



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΙV: ΣΥΝΘΕΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ
Εργαστήριο Χημείας και Τεχνολογίας Τροφίμων

**Εφαρμογή καινοτόμων μη θερμικών διεργασιών για την
παραγωγή προϊόντων μακράς διατηρησιμότητας με βάση τα
φυλλώδη λαχανικά**



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Μπαλαχτσής Κωνσταντίνος

Επιβλέπων καθηγητής: Ταούκης Πέτρος

Αθήνα, 2023

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Χημείας και Τεχνολογίας Τροφίμων της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Πέτρο Ταούκη για την εμπιστοσύνη του και τη διαρκή συμπαράσταση καθόλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Διδάκτορα Γεώργιο Δημόπουλο για τη συνεχή βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου, ο οποίος με συμβούλεψε διαρκώς και μου συμπαραστάθηκε σε μέγιστο βαθμό.

Οφείλω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους Υποψήφιους Διδάκτορες Αλέξανδρο Κατσιμίχα και Αθανάσιο Λημναίο, καθώς και σε όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Χημείας και Τεχνολογίας Τροφίμων, για τη σημαντική βοήθειά τους και τη φιλική ατμόσφαιρα που δημιούργησαν από την πρώτη στιγμή που βρέθηκα κοντά τους.

Είμαι σίγουρος πως οι εμπειρίες που αποκόμισα όντας μέρος της ομάδας αυτού του Εργαστηρίου θα μείνουν ανεξίτηλες στη μνήμη μου και θα με συντροφεύουν στη συνέχεια της ζωής μου.

Τέλος, ευχαριστώ ιδιαίτερα την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την υποστήριξή τους σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Μπορεί η διαδρομή μου στο Πολυτεχνείο να φτάνει στο τέλος της, ωστόσο το τελικό πρόσημο είναι αναμφίβολα θετικό.

Κωνσταντίνος Μπαλαχτσής

Αθήνα, 2023

Περίληψη

Τα φρέσκα φρούτα και λαχανικά κατέχουν ξεχωριστή θέση στη διατροφή του ανθρώπου χάρη στα θρεπτικά τους χαρακτηριστικά. Η αναζήτηση προϊόντων λαχανικών και φρούτων έτοιμων προς κατανάλωση αποτελεί νέα τάση των καταναλωτών που συνεχώς αυξάνεται. Τέτοια προϊόντα αποτελούν οι φρέσκες σαλάτες, που περιέχουν πράσινα φυλλώδη λαχανικά όπως το σπανάκι, με κύριο χαρακτηριστικό τους τη φρεσκάδα και την υψηλή διατροφική αξία.

Το σπανάκι (*Spinacia oleracea*) είναι ένα από τα πλέον καλλιεργούμενα λαχανικά παγκοσμίως με υψηλή διατροφική αξία και συγκεκριμένα ποιοτικά χαρακτηριστικά όπως είναι το πράσινο χρώμα του, η γεύση του και η έντονη φρεσκάδα του. Η προσπάθεια εισαγωγής του σπανακιού σε προϊόντα έτοιμα προς κατανάλωση, είτε μόνο του είτε σε συνδυασμό με άλλα λαχανικά, παρουσιάζει ιδιαίτερη δυσκολία λόγω του υψηλού περιεχόμενου νερού, το οποίο καθιστά ιδανικές τις συνθήκες για την ανάπτυξη αλλοιογόνων και παθογόνων μικροοργανισμών που υποβαθμίζουν την ποιότητά του σπανακιού και μειώνουν το χρόνο ζωής.

Υπάρχει πληθώρα τεχνικών αφυδάτωσης που εφαρμόζονται σε φρούτα και λαχανικά, ώστε να απομακρυνθεί η υγρασία και να παραχθούν σταθερά τελικά προϊόντα με εκτεταμένη διατηρησιμότητα. Το μειονέκτημα αυτών των τεχνικών είναι ότι δεν επικεντρώνονται στη διατήρηση της ποιότητας του τροφίμου, με αποτέλεσμα να υποβαθμίζονται σημαντικές ποιοτικές παράμετροι των τελικών προϊόντων. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος έχουν αναπτυχθεί νέες μη θερμικές μέθοδοι επεξεργασίας. Η ωσμωτική αφυδάτωση είναι μια τέτοια μέθοδος, που έχει προσφέρει σημαντικά αποτελέσματα, κατά την οποία χρησιμοποιείται ένα υπερτονικό διάλυμα σακχάρων ή αλάτων μέσα στο οποίο εμβαπτίζεται το τρόφιμο και με αυτόν το τρόπο επιτυγχάνεται απομάκρυνση της περιεχόμενης υγρασίας και πρόσληψη στερεών από το διάλυμα. Συγχρόνως, ενισχύονται τα ποιοτικά και διατροφικά χαρακτηριστικά του επεξεργαζόμενου τροφίμου.

Μέθοδοι ενίσχυσης των φαινομένων μεταφοράς μάζας χρησιμοποιούνται συχνά, ώστε να ενισχύσουν τις διεργασίες αφυδάτωσης. Μια νέα και καινοτόμα μέθοδος ενίσχυσης των φαινομένων μεταφοράς του νερού είναι τα παλμικά ηλεκτρικά πεδία. Πολλές μελέτες έχουν γίνει για τη συνδυαστική της δράση με την ωσμωτική αφυδάτωση και με άλλες διεργασίες αφυδάτωσης σε φρούτα και λαχανικά, οι οποίες έχουν καταλήξει ότι συγχρόνως με την ενίσχυση της απομάκρυνσης της υγρασίας επιτυγχάνεται η διατήρηση θρεπτικών συστατικών και η βελτίωση ποιοτικών και οργανοληπτικών χαρακτηριστικών.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της ωσμωτικής αφυδάτωσης σπανακιού σε συνδυασμό με τα παλμικά ηλεκτρικά πεδία για την παραγωγή προϊόντων σπανακιού με αυξημένη διατηρησιμότητα. Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν οι παράμετροι (συγκέντρωση ωσμωτικού διαλύματος, χρόνος επεξεργασίας) της διεργασίας της ωσμωτικής αφυδάτωσης και οι μεταβολές που προκαλεί στην υφή, το χρώμα και τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των δειγμάτων σπανακιού. Επίσης, αναζητήθηκαν οι κατάλληλες συνθήκες επεξεργασίας με παλμικά ηλεκτρικά πεδία καθώς και ο συνδυασμός των δυο μεθόδων. Τελικώς προσδιορίστηκε η διατηρησιμότητα σε διαφορετικές θερμοκρασίες αποθήκευσης σε ανεπεξέργαστα, ωσμωαφυδατωμένα και ωσμωαφυδατωμένα με προκατεργασία με ΠΗΠ δείγματα σπανακιού στις κατάλληλες συνθήκες που βρέθηκαν από τα αρχικά πειράματα.

Στο πρώτο μέρος της εργασίας έγινε μελέτη της επίδρασης της συγκέντρωσης του ωσμωτικού διαλύματος στην ωσμωτική αφυδάτωση σπανακιού. Μελετήθηκε συνδυασμός συνθηκών ωσμωτικής αφυδάτωσης (περιεκτικότητα σε γλυκερόλη 50-60%, χρόνοι επεξεργασίας 0-120 min) ως προς την απώλεια υγρασίας, την πρόσληψη στερεών, την ενεργότητα νερού και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά (αντικειμενικό χρώμα, δύναμη διάτρησης). Ως πιο κατάλληλες συνθήκες επεξεργασίας βρέθηκαν η περιεκτικότητα 60% σε γλυκερόλη και ο χρόνος επεξεργασίας 60 min, για τις οποίες επιτεύχθηκε ενεργότητα νερού 0.90 (ανεπεξέργαστο δείγμα 0.97), και δείκτες απώλειας νερού και πρόσληψης στερεών $3.4 \text{ g}_{\text{νερού}}/\text{g}_{\text{αρχικού ξηρού βάρους}}$ και $0.8 \text{ g}_{\text{στερεού}}/\text{g}_{\text{αρχικού ξηρού βάρους}}$ αντίστοιχα. Στις συνθήκες επεξεργασίας αυτές παρατηρήθηκε διατήρηση της πράσινης απόχρωσης των δειγμάτων με παράλληλη μείωση της φωτεινότητας (L) κατά 10% σε σχέση με το ανεπεξέργαστο δείγμα. Η ΩΑ δεν επέφερε σημαντική μεταβολή της δύναμης διάτρησης σε καμία από τις συνθήκες που εξετάστηκαν.

Στη συνέχεια, μελετήθηκε η επίδραση εύρους συνθηκών επεξεργασίας ΠΗΠ (0.6-2.2 kV/cm, 0-200 παλμοί, 0-50 kJ/kg ειδική ενέργεια) στα ποιοτικά χαρακτηριστικά φύλλων σπανακιού (αντικειμενικό χρώμα, δύναμη διάτρησης, οργανοληπτικά χαρακτηριστικά) με στόχο να οριοθετηθεί το εύρος της έντασης των συνθηκών επεξεργασίας που δεν προκαλεί σημαντική ποιοτική υποβάθμιση. Παρατηρήθηκε ότι το χρώμα των δειγμάτων δεν παρουσίασε ιδιαίτερες διαφορές με την αύξηση της έντασης των συνθηκών επεξεργασίας. Ωστόσο, για υψηλές τιμές ειδικής ενέργειας (>5 kJ/kg) προέκυψε ότι απαιτείται κατά 30-50% μεγαλύτερη δύναμη διάτρησης των φύλλων σπανακιού σε σχέση με την αρχική δύναμη. Οι οργανοληπτικοί δείκτες της σπαργής και της συνολικής αρέσκειας παρουσίασαν χαμηλές βαθμολογίες για ειδική ενέργεια που ξεπερνούσε τα 5 kJ/kg, επιβεβαιώνοντας τις αντικειμενικές μετρήσεις. Η τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου των 0.6 kV/cm θεωρήθηκε ως καταλληλότερη, αφού δεν επέφερε σημαντικές μεταβολές της.

Με στόχο τη διερεύνηση της επίδρασης των ΠΗΠ στα φαινόμενα μεταφοράς μάζας κατά την ΩΑ, μελετήθηκε η επεξεργασία ΠΗΠ (0.6 kV/cm, 0-200 παλμοί, 0-4 kJ/kg) σε δείγματα σπανακιού πριν από την ΩΑ σε διαλύματα περιεκτικότητας σε γλυκερόλη 50% και 60%. Η επίδραση των κατεργασιών μελετήθηκε ως προς την απώλεια νερού, την πρόσληψη στερεών, την ενεργότητα νερού και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά (αντικειμενικό χρώμα, δύναμη διάτρησης). Ο χρόνος επεξεργασίας 60 min και η εφαρμογή 20 παλμών κρίθηκαν ως καταλληλότερες συνθήκες επεξεργασίας. Σε αυτές τις συνθήκες η ενεργότητα του νερού μετρήθηκε ίση με 0.9 (σε σχέση με το ανεπεξέργαστο δείγμα με ενεργότητα νερού 0.97) και η απώλεια υγρασίας και πρόσληψης στερεών παρουσίασαν υψηλές τιμές, $2.88 \text{ g}_{\text{νερού}}/\text{g}_{\text{αρχικού ξηρού βάρους}}$ και $1.22 \text{ g}_{\text{στερεού}}/\text{g}_{\text{αρχικού ξηρού βάρους}}$ αντίστοιχα. Ο χαμηλός αριθμός παλμών (20) δεν παρουσίασε αρνητική επίδραση στις ποιοτικές παραμέτρους της υφής και του χρώματος και συγχρόνως παρατηρήθηκε αυξημένη πρόσληψη στερεών, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την ενίσχυση του ιστού του σπανακιού με διαλυμένα συστατικά του ωσμωτικού διαλύματος. Από τη μαθηματική περιγραφή των πειραματικών δεδομένων για τη μεταφορά νερού και στερεών μέσω του 2^{ου} νόμου του Fick για τη διάχυση προέκυψε ότι η επεξεργασία με ΠΗΠ οδήγησε σε σημαντική αύξηση του συντελεστή διάχυσης του νερού (από $4.23 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2/\text{s}$ (ανεπεξέργαστο δείγμα) έως $9.16 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2/\text{s}$ (200 παλμοί)) και των στερεών (από $9.94 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2/\text{s}$ (ανεπεξέργαστο δείγμα) έως $15.03 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2/\text{s}$ (200 παλμοί)).

Για τον προσδιορισμό της διατηρησιμότητας των ανεπεξέργαστων, των ωσμοαφυδατωμένων και των ωσμοαφυδατωμένων με προεπεξεργασία με ΠΗΠ δειγμάτων σπανακιού μελετήθηκε η μικροβιακή ανάπτυξη, η μεταβολή του pH, της δύναμης διάτρησης και του αντικειμενικού χρώματος, η περιεκτικότητα σε βιταμίνη C και σε χλωροφύλλες, καθώς και

πραγματοποιήθηκε οργανοληπτική αξιολόγηση των δειγμάτων. Κατά τις μικροβιολογικές αναλύσεις του ολικού μικροβιακού φορτίου, των ψευδομονάδων, των ζυμών και μυκήτων και των εντεροβακτηρίων παρατηρήθηκε ότι η ωσμωτική αφυδάτωση και η προεπεξεργασία με ΠΗΠ καθώς και η εφαρμογή χαμηλών θερμοκρασιών αποθήκευσης επιβράδυναν τη μικροβιακή ανάπτυξη. Από μαθηματική περιγραφή των πειραματικών δεδομένων για τη μικροβιακή ανάπτυξη μέσω του μοντέλου Baranyi, υπολογίστηκαν οι ρυθμοί ανάπτυξης του μικροβιακού πληθυσμού. Για το ολικό μικροβιακό φορτίο, το οποίο αποτελεί και καθοριστικό μικροβιολογικό παράγοντα για τη διατηρησιμότητα των δειγμάτων σπανακιού, βρέθηκε ότι η ΩΑ και η προκατεργασία με ΠΗΠ επέφεραν σημαντική επιβράδυνση της μικροβιακής ανάπτυξης. Ειδικότερα, για τη θερμοκρασία αποθήκευσης 4°C, ο ρυθμός ανάπτυξης μειώθηκε από 0.236 d⁻¹ για τα ανεπεξέργαστα δείγματα σε 0.091 d⁻¹ για τα ωσμωαφυδατωμένα δείγματα, ενώ για τα επεξεργασμένα δείγματα σπανακιού με ΩΑ και προκατεργασία με ΠΗΠ δεν υπήρξε μικροβιακή ανάπτυξη.

Η εξάρτηση των ρυθμών ανάπτυξης της ολικής μικροβιακής χλωρίδας από τη θερμοκρασία αποθήκευσης εκφράστηκε μέσω της εξίσωσης Arrhenius. Η ενέργεια ενεργοποίησης της ανάπτυξης της μικροβιακής χλωρίδας υπολογίστηκε ίση με 50.89 kJ/mol για τα ανεπεξέργαστα δείγματα και 33.36 kJ/mol για τα επεξεργασμένα με ΩΑ δείγματα σπανακιού αντίστοιχα.

Όσον αφορά τη μεταβολή του pH, η τάση που ακολούθησε ήρθε σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της μικροβιολογικής ανάλυσης, δηλαδή η εφαρμογή της ωσμωτικής αφυδάτωσης και των ΠΗΠ μείωσαν το ρυθμό αύξησης του pH κατά τη διάρκεια αποθήκευσης των δειγμάτων σπανακιού. Η δύναμη διάτρησης φάνηκε ότι δεν μεταβάλλεται σε σχέση με το χρόνο αποθήκευσης για καμία επεξεργασία. Η ωσμωτική αφυδάτωση και η προεπεξεργασία με ΠΗΠ είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση κατά 5-10 μονάδων των δεικτών L και C του χρώματος, ενώ ο δείκτης h δεν μεταβλήθηκε με το πέρασμα του χρόνου. Τα ωσμωαφυδατωμένα και τα ωσμωαφυδατωμένα με προκατεργασία με ΠΗΠ δείγματα σπανακιού παρουσίασαν μεγαλύτερη διατήρηση της συγκέντρωσης βιταμίνης C σε σχέση με τα ανεπεξέργαστα δείγματα. Συγκεκριμένα, στη θερμοκρασία των 10°C, η συγκέντρωση μειώθηκε κατά 80% μετά από 8 ημέρες αποθήκευσης στα ανεπεξέργαστα δείγματα, ενώ στα ωσμωαφυδατωμένα δείγματα η συγκέντρωση μειώθηκε κατά 50% μετά από 16 ημέρες και στα δείγματα με προκατεργασία με ΠΗΠ παρατηρήθηκε μείωση κατά 35% μετά από 24 ημέρες αποθήκευσης.

Στον οργανοληπτικό έλεγχο αξιολογήθηκαν η σπαργή του σπανακιού, η ένταση των δυσάρεστων οσμών, η γεύση και η συνολική αρέσκεια των δειγμάτων. Η υποβάθμιση των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών παρουσίασε γραμμική τάση, έτσι τα δεδομένα προσαρμόστηκαν σε γραμμικές εξισώσεις από τις οποίες προέκυψαν οι ρυθμοί μεταβολής των χαρακτηριστικών. Η ΩΑ συνέβαλε στην επιβράδυνση της μείωσης της συνολικής οργανοληπτικής αρέσκειας στα ωσμωαφυδατωμένα δείγματα σπανακιού, το οποίο επιβεβαιώνεται από τον υπολογισμό του ρυθμού μείωσης των ωσμωαφυδατωμένων δειγμάτων σπανακιού σε θερμοκρασία 4°C (-0.091 d⁻¹) που είναι σημαντικά μικρότερος από το ρυθμό μείωσης των ανεπεξέργαστων δειγμάτων (-0.343 d⁻¹).

Μέσω της εξίσωσης Arrhenius, υπολογίστηκαν και οι ενέργειες ενεργοποίησης για τους ρυθμούς αλλοίωσης, οι οποίες μετρήθηκαν ως 77.45 kJ/mol για τη μείωση της συνολικής αρέσκειας των ανεπεξέργαστων δειγμάτων και 88.66 kJ/mol για τα ωσμωαφυδατωμένα δείγματα σπανακιού.

Από την μαθηματική περιγραφή των πειραματικών δεδομένων προσδιορίστηκε η εξάρτηση της διατηρησιμότητας των ανεπεξέργαστων και ωσμοαφυδατωμένων δειγμάτων σπανακιού από τη θερμοκρασία αποθήκευσης, με βάση την κινητική ανάπτυξης της ολικής μικροβιακής χλωρίδας και της συνολικής οργανοληπτικής εντύπωσης. Ως όριο για την πρώτη θεωρήθηκε η τιμή των $8 \log(\text{CFU})/\text{g}$, και για την δεύτερη η τιμή 5. Στα ανεπεξέργαστα δείγματα βρέθηκε ότι καθοριστικός παράγοντας για τη διατηρησιμότητα ήταν το ολικό μικροβιακό φορτίο μέχρι τη θερμοκρασία των 19°C , ενώ για μεγαλύτερες θερμοκρασίες η συνολική αρέσκεια καθόρισε τη διατηρησιμότητα. Στα ωσμοαφυδατωμένα δείγματα, η διατηρησιμότητα καθορίστηκε από την ολική μικροβιακή χλωρίδα μέχρι τη θερμοκρασία αποθήκευσης των 18°C . Η διατηρησιμότητα ήταν 6, 4, 3 και 2 ημέρες για τα ανεπεξέργαστα δείγματα σε θερμοκρασίες 4°C , 8°C , 12°C και 20°C , ενώ για τα ωσμοαφυδατωμένα δείγματα σπανακιού ήταν 13, 10, 8 και 4 ημέρες για θερμοκρασίες 4°C , 8°C , 12°C και 20°C , αντίστοιχα.

Μέσω των αποτελεσμάτων της μελέτης προέκυψε το συμπέρασμα ότι η διεργασία της ωσμωτικής αφυδάτωσης είχε θετική επίδραση τόσο στη διατήρηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών των δειγμάτων σπανακιού όσο και στην επέκταση της διατηρησιμότητάς τους. Η ΩΑ μείωσε σημαντικά το ρυθμό ανάπτυξης του ολικού μικροβιακού φορτίου σε σχέση με τα ανεπεξέργαστα δείγματα. Επιπλέον, η συνδυαστική δράση της ΩΑ με τα παλμικά ηλεκτρικά πεδία ενίσχυσε τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας και είχε ως αποτέλεσμα την αναστολή της μικροβιακής ανάπτυξης. Η ένταξη του σπανακιού σε προϊόντα σταθερά με αυξημένη διατηρησιμότητα δεν ήταν προηγουμένως εφικτή λόγω του υψηλού μικροβιακού φορτίου του και κατ'επέκταση της χαμηλής διατηρησιμότητάς του, ωστόσο με την επίδραση της ΩΑ ενισχύεται αυτή η προοπτική. Επίσης, σε επόμενο στάδιο δύναται να μελετηθεί η επαναχρησιμοποίηση του ωσμωτικού διαλύματος μετά το τέλος της επεξεργασίας τόσο για την ωσμωτική ικανότητα του διαλύματος, το οποίο έχει αραιωθεί, όσο και για τη μικροβιακή του επιμόλυνση από το επεξεργασμένο σπανάκι. Τέλος, περαιτέρω έρευνας χρήζει η αναλογία τροφίμου προς ωσμωτικό διάλυμα, ώστε να διαπιστωθεί αν μικρότερες αναλογίες έχουν το ίδιο αποτέλεσμα στο σπανάκι, κάτι το οποίο θα αποτελούσε σημαντικό βήμα για την εφαρμογή της διεργασίας με μεγαλύτερη κλίμακα.

Application of novel nonthermal processes for the production of long shelf-life products based on leafy vegetables

Fresh fruits and vegetables have a special place in the human diet thanks to their nutritional characteristics. The search for ready-to-eat fruit and vegetable products is a new and growing trend among consumers. Such products are fresh salads containing green leafy vegetables such as spinach, whose main characteristic is their freshness and high nutritional value.

Spinach (*Spinacia oleracea*) is one of the most widely grown vegetables in the world with a high nutritional value and specific quality characteristics such as its green colour, taste and freshness. It is particularly difficult to introduce spinach into ready-to-eat products, either on its own or in combination with other vegetables, because of its high water content, which creates ideal conditions for the growth of spoilage and pathogenic micro-organisms that reduce the quality of spinach and shorten its shelf life.

There are a variety of dehydration techniques applied to fruits and vegetables to remove moisture and produce stable end products with extended shelf life. The disadvantage of these techniques is that they do not focus on preserving the quality of the food, resulting in the degradation of important quality parameters of the final products. New non-thermal processing methods have been developed to address this problem. Osmotic dehydration is one such method, in which a hypertonic solution of sugars or salts is used in which the food is immersed, thereby achieving removal of the moisture and uptake of solids from the solution. At the same time, the quality and nutritional characteristics of the processed food are enhanced.

Methods of enhancing mass transfer phenomena are often used to enhance dehydration processes. A new and innovative method of enhancing water transport phenomena is pulsed electric fields. Many studies have been carried out on its combined action with osmotic dehydration and other dehydration processes in fruits and vegetables, which have concluded that at the same time as enhancing moisture removal, nutrient retention and improvement of quality and organoleptic characteristics are achieved.

The aim of the present work is to study the osmotic dehydration of spinach in combination with pulsed electric fields for the production of spinach products with increased shelf life. In particular, the parameters (osmotic solution concentration, processing time) of the osmotic dehydration process and the changes it causes in the texture, colour and organoleptic characteristics of the spinach samples were studied. Suitable conditions for treatment with pulsed electric fields and the combination of the two methods were also sought. Finally, the shelf life at different storage temperatures was determined for untreated, osmodehydrated and osmodehydrated PEF pre-treated spinach samples under the appropriate conditions found from the initial experiments.

In the first part of the study, the effect of osmotic solution concentration on the osmotic dehydration of spinach was studied. A combination of osmotic dehydration conditions (glycerol content 50-60%, processing time 0-120 min) was studied in terms of moisture loss, solids uptake, water activity and quality characteristics (objective colour, burst strength). The most suitable processing conditions were found to be 60% glycerol content and processing time of 60 min, for which a water activity of 0.90 (unprocessed sample 0.97), and water loss and solids uptake indices of $3.4 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{initial dry weight}}$ and $0.8 \text{ g}_{\text{solids}}/\text{g}_{\text{initial dry weight}}$, respectively, were obtained. Under these treatment conditions, the green colour of the samples was

maintained while the brightness (L) was reduced by 10% compared to the untreated sample. OD did not result in a significant change in the burst strength in any of the conditions tested.

Next, the effect of the range of PEF processing conditions (0.6-2.2 kV/cm, 0-200 pulses, 0-50 kJ/kg specific energy) on the quality characteristics of spinach leaves (objective colour, burst strength, organoleptic characteristics) was studied in order to define the range of intensity of processing conditions that does not cause significant quality degradation. It was observed that the colour of the samples did not show particular differences with increasing intensity of the processing conditions. However, for high specific energy values (>5 kJ/kg), a burst strength increase of 30-50% was observed. The organoleptic indices of turgidity and overall acceptance exhibited low scores for specific energy above 5 kJ/kg, confirming the objective measurements. The electric field intensity value of 0.6 kV/cm was considered to be the most appropriate, since it did not induce significant quality alterations.

In order to investigate the effect of PEF on mass transfer phenomena during OD, the treatment of PEF (0.6 kV/cm, 0-200 pulses, 0-4 kJ/kg) on spinach samples before OD in solutions containing 50% and 60% glycerol was studied. The effect of the treatments was studied in terms of water loss, solids uptake, water activity and quality characteristics (objective colour, burst strength). A treatment time of 60 min and the application of 20 pulses were considered as the most suitable treatment conditions. Under these conditions, the water activity was measured equal to 0.90 (compared to the untreated sample with a water activity of 0.97) and the moisture loss and solids uptake showed high values, $2.88 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{initial dry weight}}$ and $1.22 \text{ g}_{\text{solids}}/\text{g}_{\text{initial dry weight}}$ respectively. The low number of pulses (20) did not have a negative effect on the quality parameters of texture and colour and at the same time increased solids uptake was observed, which results in enrichment of the spinach tissue with soluble components of the osmotic solution. From the mathematical description of the experimental data on water and solids transport by Fick's 2nd law of diffusion, it was found that PEF treatment resulted in a significant increase in the diffusion coefficient of water (from $4.23 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2/\text{s}$ (untreated sample) to $9.16 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2/\text{s}$ (200 pulses)) and solids (from $9.94 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2/\text{s}$ (untreated sample) to $15.03 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2/\text{s}$ (200 pulses)).

In order to determine the shelf life of untreated, osmodehydrated and osmodehydrated PEF pretreated spinach samples, microbial growth, changes in pH, burst strength and objective colour, vitamin C and chlorophyll content were studied and a sensory evaluation of the samples was carried out. During the microbiological analysis of total viable count, *Pseudomonas sp.*, yeasts and molds and *Enterobacteriaceae*, it was observed that osmotic dehydration and pretreatment with PEF as well as the application of low storage temperatures retarded microbial growth. From a mathematical description of the experimental data on microbial growth using the Baranyi model, the growth rates of the microbial population were calculated. For the total microbial load, which is also a decisive microbiological factor for the shelf life of spinach samples, it was found that OD and pre-treatment with PEF caused a significant deceleration of microbial growth. In particular, for the storage temperature of 4°C, the growth rate decreased from 0.236 d^{-1} for untreated samples to 0.091 d^{-1} for dehydrated samples, whereas for spinach samples treated with OD and pretreated with PEF, there was no microbial growth.

The dependence of total microbial count growth rates on storage temperature was expressed by the Arrhenius equation. The activation energy of total microflora growth was calculated equal to 50.89 kJ/mol for untreated samples and 33.36 kJ/mol for osmotic dehydrated spinach samples, respectively.

Regarding the change in pH, the trend followed was in agreement with the results of the microbiological analysis, i.e. the application of osmotic dehydration and PEF decreased the rate of pH increase during storage of the spinach samples. Burst strength did not appear to change in relation to storage time for any treatment. Osmotic dehydration and pre-treatment with PEF resulted in a 10-15% decrease in L and C indices of color, while the hue angle index did not change over time. The osmodehydrated and osmodehydrated and PEF pretreated spinach samples showed a higher retention of vitamin C concentration than the untreated samples. Specifically, at 10°C, the concentration decreased by 80% after 8 days of storage in the untreated samples, while in the dehydrated samples the concentration decreased by 50% after 16 days and in the samples pretreated with PEF a decrease of 35% was observed after 24 days of storage.

The sensory evaluation assessed the firmness of the spinach, the intensity of unpleasant odors, the taste and the overall acceptance of the samples. The deterioration of the organoleptic characteristics showed a linear trend, so the data were fitted to linear equations from which the rates of change of the characteristics were obtained. OD contributed to the slowing down of the decrease in the overall sensory acceptance in the osmodehydrated spinach samples, which is confirmed by the calculation of the rate of reduction of the osmodehydrated spinach samples at 4°C (-0.091 d^{-1}), which is significantly lower than the rate of reduction of the untreated samples (-0.343 d^{-1}).

The activation energies for the deterioration rates were also calculated via the Arrhenius equation, and were measured as 77.45 kJ/mol for the reduction of overall acceptance of untreated samples and 88.66 kJ/mol for the osmodehydrated spinach samples.

From the mathematical description of the experimental data, the dependence of the shelf life of unprocessed and osmodehydrated spinach samples on storage temperature was determined, based on the kinetics of total microbial flora growth and overall acceptance. A value of 8 log(CFU)/g was taken as the threshold for the former, and 5 for the latter. In the untreated samples, it was found that the limiting factor for shelf-life was the total microbial load up to a temperature of 19°C, while for higher temperatures the overall acceptance determined the shelf-life. In the osmodehydrated samples, shelf life was determined by the total microbial flora up to the storage temperature of 18°C. The shelf life was 6, 4, 3 and 2 days for the untreated samples at 4°C, 8°C, 12°C and 20°C, while for the osmodehydrated spinach samples it was 13, 10, 8 and 4 days for 4°C, 8°C, 12°C and 20°C, respectively.

Through the results of the study, it was concluded that the process of osmodehydration had a positive effect on both maintaining the quality characteristics of spinach samples and extending their shelf life. OD significantly reduced the growth rate of total microbial load compared to untreated samples. Furthermore, the combined action of OD with pulsed electric fields enhanced mass transfer phenomena and resulted in the inhibition of microbial growth. The integration of spinach into stable products with increased shelf life was previously not feasible due to its high microbial load and consequently low shelf life, however, the effect of OD reinforces this prospect. Also, at a later stage, the reuse of the osmotic solution after the end of the treatment can be studied both for the osmotic capacity of the diluted solution and for its microbial contamination by the treated spinach. Finally, the ratio of food to osmotic solution needs further investigation to see if lower ratios have the same effect on spinach, which would be an important step in applying the process on a larger scale.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Διεργασίες αφυδάτωσης φρούτων και λαχανικών	1
1.1 Εισαγωγή	1
1.2 Ηλιακή ξήρανση	1
1.3 Ξήρανση με θερμό αέρα	2
1.4 Ξήρανση με μικροκύματα	3
1.5 Λυοφιλίωση.....	4
1.6 Ωσμωτική αφυδάτωση.....	5
1.6.1 Μηχανισμός ωσμωτικής αφυδάτωσης.....	5
1.6.2 Παράμετροι που επηρεάζουν την ωσμωτική αφυδάτωση.....	7
1.6.2.1 Ωσμωτικό μέσο.....	7
1.6.2.2 Χαρακτηριστικά τροφίμου	7
1.6.2.3 Συνθήκες ωσμωτικής αφυδάτωσης	8
1.6.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της ωσμωτικής αφυδάτωσης	8
1.6.4 Ωσμωτική αφυδάτωση σε φυτικούς ιστούς	10
1.6.4.1 Φυλλώδη λαχανικά-Σπανάκι.....	10
Κεφάλαιο 2: Μέθοδοι ενίσχυσης φαινομένων μεταφοράς μάζας του νερού	13
2.1 Εισαγωγή	13
2.2 Χρήση κενού	13
2.3 Υπερυψηλή πίεση.....	13
2.4 Υπέρηχοι.....	14
2.5 Παλμικά Ηλεκτρικά Πεδία (ΠΗΠ)	15
2.5.1 Αρχή λειτουργίας των παλμικών ηλεκτρικών πεδίων	15
2.5.2 Παράμετροι λειτουργίας των παλμικών ηλεκτρικών πεδίων	16
2.5.3 Επίδραση της μεθόδου ΠΗΠ στη κυτταρική μεμβράνη.....	18
2.5.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των παλμικών ηλεκτρικών πεδίων.....	19
Κεφάλαιο 3: Υλικά και Μέθοδοι	21
3.1 Εισαγωγή	21
3.2 Πειραματικός Σχεδιασμός-Πειραματική Διαδικασία.....	22
3.2.1 Μελέτη της ωσμωτικής αφυδάτωσης του σπανακιού	22
3.2.2 Μελέτη της εφαρμογής των παλμικών ηλεκτρικών πεδίων στο σπανάκι.....	24
3.2.3 Μελέτη των ΠΗΠ ως προεπεξεργασία της ωσμωτικής αφυδάτωσης	25
3.2.4 Μελέτη της διατηρησιμότητας ανεπεξέργαστων, ωσμοαφυδατωμένων και ωσμοαφυδατωμένων με προεπεξεργασία με ΠΗΠ δειγμάτων σπανακιού.....	26
3.3 Αναλυτικές Μέθοδοι	28

3.3.1 Προσδιορισμός στερεού υπολείμματος και περιεχόμενης υγρασίας.....	28
3.3.2 Προσδιορισμός ενεργότητας νερού.....	28
3.3.3 Μέτρηση pH	28
3.3.4 Μέτρηση αντικειμενικού χρώματος	29
3.3.5 Προσδιορισμός δύναμης διάτρησης.....	30
3.3.6 Προσδιορισμός ασκορβικού οξέος (βιταμίνη C).....	31
3.3.7 Προσδιορισμός χλωροφυλλών	32
3.3.8 Προσδιορισμός μικροβιακού φορτίου.....	32
3.3.9 Οργανοληπτική αξιολόγηση.....	34
3.4 Επεξεργασία αποτελεσμάτων	34
3.4.1 Απώλεια νερού και πρόσληψη στερεών.....	34
3.4.2 Υπολογισμός συντελεστών διάχυσης κατά την ωσμωτική αφυδάτωση	35
3.4.3 Κινητικά μοντέλα υποβάθμισης του σπανακιού	36
Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα και Συζήτηση.....	38
4.1 Εισαγωγή	38
4.2 Μελέτη της ωσμωτικής αφυδάτωση του σπανακιού	38
4.3 Μελέτη της εφαρμογής των παλμικών ηλεκτρικών πεδίων στο σπανάκι.....	43
4.4 Μελέτη των ΠΗΠ ως προεπεξεργασία της ωσμωτικής αφυδάτωσης	49
4.5 Μελέτη της διατηρησιμότητας σε ανεπεξέργαστα, ωσμοαφυδατωμένα και ωσμοαφυδατωμένα με προεπεξεργασία με ΠΗΠ δείγματα σπανακιού	57
4.5.1 Μικροβιακή ανάπτυξη	58
4.5.1.1 Ανάπτυξη ολικού μικροβιακού φορτίου, ψευδομονάδων, ζυμών και μυκήτων και εντεροβακτηρίων σε ανεπεξέργαστα δείγματα σπανακιού.....	58
4.5.1.2 Ανάπτυξη ολικού μικροβιακού φορτίου, ψευδομονάδων, ζυμών και μυκήτων και εντεροβακτηρίων σε ωσμοαφυδατωμένα δείγματα σπανακιού	63
4.5.1.3 Ανάπτυξη ολικού μικροβιακού φορτίου, ψευδομονάδων, ζυμών και μυκήτων και εντεροβακτηρίων σε ωσμοαφυδατωμένα με προκατεργασία με ΠΗΠ δείγματα σπανακιού	66
4.5.2 Μεταβολή του pH.....	68
4.5.3 Μεταβολή της δύναμης διάτρησης	70
4.5.4 Μεταβολή του αντικειμενικού χρώματος.....	72
4.5.5 Προσδιορισμός περιεκτικότητας ασκορβικού οξέος (βιταμίνη C)	75
4.5.6 Προσδιορισμός περιεκτικότητας χλωροφυλλών	78
4.5.7 Οργανοληπτικός έλεγχος	80
4.5.7.1 Μεταβολή της σπαργής	81
4.5.7.2 Μεταβολής της έντασης δυσάρεστων οσμών	82
4.5.7.3 Μεταβολή της γεύσης.....	84

4.5.7.4 Μεταβολή της συνολικής οργανοληπτικής αρέσκειας.....	85
4.5.8 Προσδιορισμός διατηρησιμότητας.....	86
Κεφάλαιο 5: Σύνοψη αποτελεσμάτων-Συμπεράσματα-Προτάσεις για το μέλλον.....	90
Βιβλιογραφία	94

Κεφάλαιο 1: Διεργασίες αφυδάτωσης φρούτων και λαχανικών

1.1 Εισαγωγή

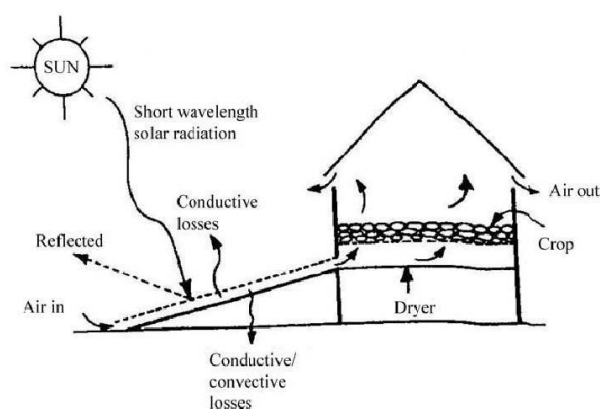
Τα φρέσκα φρούτα και λαχανικά αποτελούν αναπόσπαστο μέρος μιας ισορροπημένης διατροφής στη σύγχρονη εποχή. Ολοένα και περισσότεροι καταναλωτές αναζητούν προϊόντα φρούτων και λαχανικών, τα οποία συνδυάζουν τα φρέσκα χαρακτηριστικά τους και την υψηλή διατροφική τους αξία. Ιδανικό παράδειγμα αποτελούν τα προϊόντα φρέσκων σαλατών, οι οποίες είναι έτοιμες για κατανάλωση. Ωστόσο, η υψηλή ενεργότητα νερού σε συνδυασμό με την καταστροφή του κυτταρικού ιστού λόγω της επεξεργασίας τους, εξυπηρετούν στην ταχεία μικροβιακή ανάπτυξη και συγχρόνως στην υποβάθμιση των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών και της διατηρησιμότητάς τους. Η χρήση χαμηλών θερμοκρασιών κατά την συντήρηση των προϊόντων είναι ένας τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος, όμως απαιτεί σημαντική κατανάλωση ενέργειας και δεν είναι εύκολο να εφαρμοστεί κατάλληλα σε όλα τα στάδια της διανομής του προϊόντος. Συνεπώς, έχουν αναπτυχθεί πολλές διεργασίες αφυδάτωσης που στοχεύουν στην αφαίρεση του νερού από ένα τρόφιμο. Η μειωμένη υγρασία ενός τροφίμου έχει ως αποτέλεσμα η μικροβιακή ανάπτυξη να είναι πολύ αργή ή να μην πραγματοποιείται καθόλου. Το τρόφιμο με αυτόν τον τρόπο γίνεται σταθερότερο με μεγαλύτερο χρόνο ζωής, αλλά στις περισσότερες περιπτώσεις η υποβάθμιση των ποιοτικών του χαρακτηριστικών όπως είναι η φρεσκάδα των λαχανικών είναι αναπόφευκτη. Σε αυτό το κεφάλαιο αναφέρονται οι κυριότερες διεργασίες ξήρανσης, αλλά και γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στη διεργασία της ωσμωτικής αφυδάτωσης, η οποία αποσκοπεί στην απομάκρυνση της υγρασίας με ταυτόχρονη διατήρηση ή βελτίωση των ποιοτικών χαρακτηριστικών των φρούτων και λαχανικών.

1.2 Ηλιακή ξήρανση

Η κατεξοχήν μέθοδος ξήρανσης, που χρησιμοποιείται στις τροπικές και υποτροπικές χώρες, περιλαμβάνει την έκθεση των αγροτικών προϊόντων όπως φρούτα, λαχανικά και σιτηρά, στην ηλιακή ακτινοβολία. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως σε αγροτικές περιοχές για μικρές ποσότητες όπου η ηλεκτρική ενέργεια δεν είναι διαθέσιμη. Παρά το γεγονός ότι η μέθοδος αυτή έχει χαμηλό κόστος, η ποιότητα του τελικού προϊόντος δεν είναι η επιθυμητή. Επιπλέον, το προϊόν που βρίσκεται υπό ξήρανση είναι εκτεθειμένο στις εναλλαγές των καιρικών φαινομένων, καθώς και η ποσότητά του μπορεί να μειωθεί από πτηνά, ζώα και έντομα που θα το χρησιμοποιήσουν ως τροφή. Ο ρυθμός ξήρανσης είναι σχετικά αργός (Jain and Tiwari, 2003) και οι απώλειες εξαιτίας ενζυμικών αντιδράσεων, ανάπτυξης μικροοργανισμών και αύξησης μυκοτοξινών είναι σημαντικές, με αποτέλεσμα η παραδοσιακή ηλιακή ξήρανση να έχει αντικατασταθεί από μηχανικούς ξηραντήρες ή ξηραντήρες που χρησιμοποιούν έμμεσα την ηλιακή ακτινοβολία (Mustayen et al., 2014).

Οι ξηραντήρες, που χρησιμοποιούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως είναι ο ήλιος και όχι κάποιο είδος καυσίμου, είναι μια εναλλακτική λύση για την αντιμετώπιση των μειονεκτημάτων που έχει η παραδοσιακή μέθοδος ξήρανσης. Πολλές μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί με στόχο την ανάπτυξη ξηραντήρων που χρησιμοποιούν φωτοβολταϊκά για ξήρανση σταφυλιών (Barnwal and Tiwari, 2008) ή διαφορετικής διαμόρφωσης ξηραντήρων για ξήρανση ρυζιού (Ondier et al., 2010). Ενώ υπάρχουν ελπιδοφόρα αποτελέσματα, τα κύρια

προβλήματα αυτής της μεθόδου είναι ότι η ύπαρξη ηλιοφάνειας είναι αναγκαία και ότι καταλήγει σε χαμηλές αποδόσεις ανά ξηρή πρώτη ύλη.



Σχήμα 1.1 Μονάδα ξήρανσης που χρησιμοποιεί την ηλιακή ακτινοβολία (Mustayen et al., 2014)

1.3 Ξήρανση με θερμό αέρα

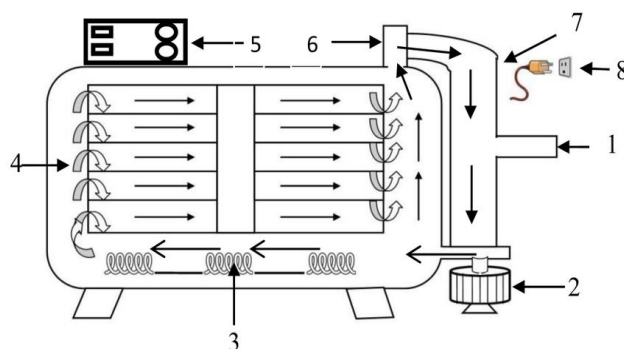
Μεταξύ όλων των διεργασιών ξήρανσης-αφυδάτωσης που θα αναφερθούν σε αυτό το κεφάλαιο, η συμβατική ξήρανση με θερμό αέρα είναι η αυτή που χρησιμοποιείται πιο συχνά για φρούτα και λαχανικά. Κατά τη διάρκεια της διεργασίας, φαινόμενα μεταφοράς μάζας και θερμότητας συμβαίνουν συγχρόνως. Από τη μια πλευρά, μεταφέρεται ενέργεια με μορφή θερμότητας από το θερμό αέρα, ώστε να εξατμιστεί η επιφανειακή υγρασία του τροφίμου. Από την άλλη, πραγματοποιείται μεταφορά της εσωτερικής υγρασίας στην επιφάνεια του στερεού ως συνέπεια της επιφανειακής εξάτμισης και της εφαρμογής θερμότητας (Liu et al., 2021; Aviara et al., 2014).

Η ξήρανση με θερμό αέρα βασίζεται σε διάφορες παραμέτρους όπως η θερμοκρασία ξήρανσης, η ταχύτητα του αέρα και το πάχος του υλικού, οι οποίοι έχουν καθοριστικό ρόλο στην κινητική της ξήρανσης καθώς και στην ποιότητα του τελικού προϊόντος. Αυξάνοντας τη θερμοκρασία ξήρανσης και τη ταχύτητα του αέρα και μειώνοντας το πάχος του υλικού επιταχύνεται ο ρυθμός ξήρανσης (Zhang et al., 2021).

Τα προϊόντα, που επεξεργάζονται με αυτή τη διεργασία, χαρακτηρίζονται από εκτεταμένη διατηρησιμότητα (shelf life), γιατί λόγω της ξήρανσης η περιεχόμενη υγρασία έχει μειωθεί σε χαμηλά επίπεδα, τα οποία δεν επιτρέπουν την ανάπτυξη μικροοργανισμών. Επίσης, το μειωμένο βάρος και όγκος των αποξηραμένων φρούτων και λαχανικών εξυπηρετεί στη μείωση του κόστους συσκευασίας, μεταφοράς και αποθήκευσης (Rojas et al., 2020).

Παρά τα πλεονεκτήματα που διαθέτει, η ξήρανση με θερμό αέρα απαιτεί υψηλές θερμοκρασίες άρα και υψηλή κατανάλωση ενέργειας και έχει ως αποτέλεσμα την υποβάθμιση της ποιότητας των τελικού προϊόντος. Μερικές ποιοτικές παράμετροι είναι το χρώμα, το σχήμα, η γεύση, η υφή, το μικροβιακό φορτίο, η ικανότητα ενυδάτωσης και η διατήρηση των θρεπτικών συστατικών (Sablani, 2006). Οι Desrosiers, Smyrl και Paquette (1985) υπολόγισαν ότι με ξήρανση στους 32-62 °C σε πράσινες πιπεριές και ροδάκινα υπήρξαν 25% και 75% απώλειες σε βιταμίνη C αντίστοιχα. Η μείωση των καροτενίων και των χλωροφυλλών είναι συχνό φαινόμενο λόγω της θερμότητας και της οξείδωσης που

συμβαίνει κατά την ξήρανση. Για την υφή παρατηρείται η σκλήρυνση της εξωτερικής επιφάνειας, ενώ το ενζυμικό μαύρισμα είναι ο κυριότερος παράγοντας που προκαλεί αλλοίωση στο χρώμα των φρούτων και λαχανικών υπό ξήρανση (Guine et al., 2015).



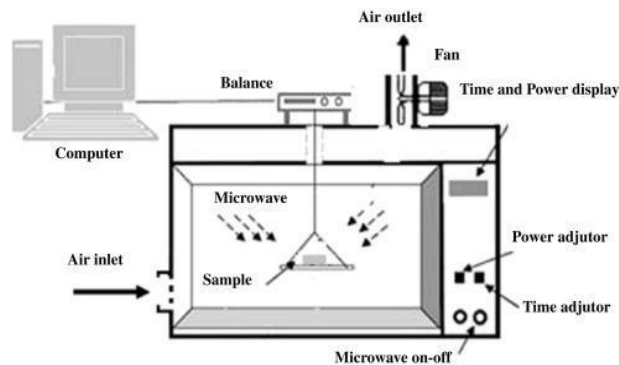
Σχήμα 1.2 Ξηραντήρας με θερμό αέρα (Kumar & Shrivastava, 2017)

1.4 Ξήρανση με μικροκύματα

Η ξήρανση με μικροκύματα χρησιμοποιείται ευρέως για την ξήρανση τροφίμων λόγω της ομοιόμορφης και υψηλού ρυθμού ξήρανσης (Nair et al., 2011). Η ξήρανση με μικροκύματα χρησιμοποιεί ηλεκτρική ενέργεια με εύρος συχνοτήτων από 300 MHz έως 300 GHz, με τη τιμή των 2450 MHz να είναι η πιο συνηθισμένη. Τα μικροκύματα παράγονται στο εσωτερικό ενός φούρνου αυξάνοντας το εναλλασσόμενο ρεύμα από οικιακές γραμμές ρεύματος με συχνότητα 60 Hz σε 2450 Hz. Έχει αποδειχθεί ότι η ξήρανση με μικροκύματα παρουσιάζει χαμηλή κατανάλωση ενέργειας (Tulasidas et al., 1995). Δεδομένου ότι τα μικροκύματα δεν μπορούν να ολοκληρώσουν μια διαδικασία ξήρανσης από μόνα τους, συνιστάται ο συνδυασμός τεχνικών, όπως είναι η εφαρμογή κενού ή ρεύματος αέρα, ώστε να βελτιωθεί η απόδοση της διεργασίας (Chou and Chua, 2001).

Όταν το τρόφιμο έρχεται σε επαφή με την ενέργεια των μικροκυμάτων, παράγεται θερμότητα στο εσωτερικό του μέσω μοριακής διέγερσης. Έπειτα, χρειάζεται να απομακρυνθεί το νερό που εξατμίζεται, κάτι το οποίο επιτυγχάνεται με ρεύμα αέρα διερχόμενο από την επιφάνεια του τροφίμου. Η θερμοκρασία του αέρα μπορεί να μεταβληθεί για να μειωθεί ο χρόνος ξήρανσης (Changrue et al., 2004). Η χρήση των μικροκυμάτων είναι περισσότερο ωφέλιμη κατά τη περίοδο του ελαττούμενου ρυθμού ξήρανσης (Soysal et al., 2006). Καθώς το υλικό απορροφά την ενέργεια των μικροκυμάτων, δημιουργείται βαθμίδα θερμοκρασίας με μεγαλύτερη τιμή αυτή στο κέντρο του τροφίμου, αναγκάζοντας την υγρασία προς το εξωτερικό του (Erle, 2005).

Γενικά, η χρήση μικροκυμάτων στην ξήρανση προσφέρει μειωμένους χρόνους ξήρανσης και συμπληρώνει τη συμβατική ξήρανση σε μεταγενέστερα στάδια, στοχεύοντας ειδικά την εσωτερική υγρασία που απομένει (Oserchuk, 2002). Στην περίπτωση της ξήρανσης μπανάνας με μικροκύματα διαπιστώθηκε ότι αποξηραμένα προϊόντα καλής ποιότητας μπορούν να επιτευχθούν μεταβάλλοντας την πυκνότητα ισχύος και τον κύκλο λειτουργίας. Αναλόγως, σε μελέτες πάνω στην ξήρανση καρότων με μικροκύματα, βρέθηκε ότι βελτιώνεται η ποιότητα του τροφίμου σε σχέση με το χρώμα, την συρρίκνωσή του και την ικανότητα ενυδάτωσης (Wang και Xi, 2005). Πέρα από τα πλεονεκτήματα που επιφέρει η χρήση μικροκυμάτων, ο λόγος που δεν χρησιμοποιείται σε μεγάλη κλίμακα στη βιομηχανία είναι το πολύ υψηλό κόστος του εξοπλισμού σε σχέση με άλλες μεθόδους ξήρανσης.



Σχήμα 1.3 Εξοπλισμός συστήματος ξήρανσης μικροκύματα (Zarein et al., 2015)

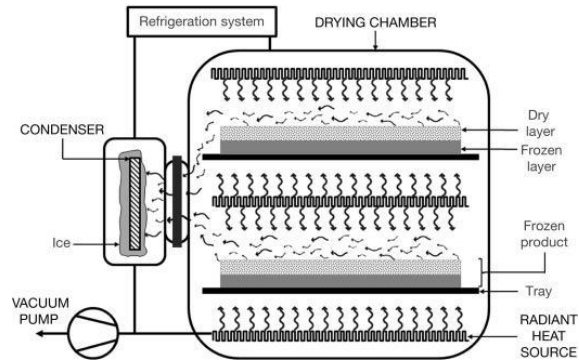
1.5 Λυοφιλίωση

Η λυοφιλίωση, ή αλλιώς λυοφιλοποίηση ή κρουοξήρανση, είναι η πιο αποτελεσματική μέθοδος απομάκρυνσης νερού και παραγωγής υψηλής ποιότητας προϊόντων σε σχέση με τις υπόλοιπες διεργασίες ξήρανσης. Η λυοφιλίωση χρησιμοποιείται στη βιομηχανία για την αφυδάτωση τροφίμων υψηλής αξίας και ιδιαίτερων αρωμάτων, καθώς και για τη συντήρηση μικροβιακών καλλιεργειών που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία τροφίμων (Ratti, 2001).

Η διεργασία βασίζεται στην μετατροπή του νερού σε πάγο σε χαμηλή θερμοκρασία και έπειτα στην εξάχνωση του πάγου σε ατμό. Συγκεκριμένα, το προϊόν υπό ξήρανση αρχικά καταψύχεται και στη συνέχεια εκτίθεται σε θερμότητα (με αγωγή ή ακτινοβολία ή και με τους δύο τρόπους) κάτω από υψηλό κενό, έτσι το παγωμένο υγρό εξαχνώνεται και παραμένουν μόνο τα στερεά συστατικά του αρχικού προϊόντος. Η κινητήρια δύναμη της διαδικασίας της εξάχνωσης του πάγου είναι η διαφορά πίεσης μεταξύ της τάσης ατμών του πάγου και της μερικής πίεσης του νερού στο θάλαμο που γίνεται η ξήρανση (Deerak και Iqbal, 2015).

Σε σύγκριση με τις συμβατικές τεχνολογίες συντήρησης τροφίμων, τα κύρια πλεονεκτήματα της λυοφιλίωσης περιλαμβάνουν τη διατήρηση των μορφολογικών και βιοχημικών ιδιοτήτων, εκτεταμένη διατηρησιμότητα και μειωμένο βάρος για αποθήκευση και διανομή. Οι Raakkonen και Mattila (1991) παρατήρησαν/ανέφεραν ότι οι χαμηλές θερμοκρασίες που χρησιμοποιούνται στη κρουοξήρανση εξυπηρετούν στη βελτίωση των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών των αποξηραμένων φρούτων. Ακόμη, οι Ching Hui Chang et al. (2006) μελέτησαν την αντιοξειδωτική επίδραση της ξήρανσης υπό ψύξη στη ντομάτα, και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι μπορεί να αυξηθεί η περιεκτικότητα σε ολικά φλαβονοειδή, σε φαινόλες και σε λυκοπένιο στις ντομάτες.

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα, η λυοφιλίωση θεωρείται η πιο δαπανηρή μέθοδος αφυδάτωσης ενός προϊόντος εξαιτίας της υψηλής ενεργειακής κατανάλωσης και των υψηλών δαπανών τόσο στη λειτουργία όσο και στη συντήρηση. Η συγκριτική μελέτη στις ενεργειακές απαιτήσεις για μια συμβατική μέθοδο ξήρανσης και της λυοφιλίωσης έδειξαν ότι η βασική ενέργεια που απαιτείται για την αφαίρεση 1 kg νερού είναι σχεδόν διπλάσια για τη λυοφιλίωση σε σχέση με τη συμβατική ξήρανση (Flink, 1977). Επιπλέον, σε σύγκριση με την ξήρανση με θερμό αέρα, το κόστος της λυοφιλίωσης είναι 4 με 8 φορές υψηλότερο (Ratti, 2001).



Σχήμα 1.4 Λυοφιλοποιητής (Freeze drier) (García-Amezquita et al., 2016)

1.6 Ωσμωτική αφυδάτωση

Η αφυδάτωση αποτελεί μια παλιά και ευρέως διαδεδομένη τεχνική μείωσης της υγρασίας και συντήρησης των τροφίμων και ιδίως των φρούτων και λαχανικών. Οι συμβατικές τεχνικές έχουν αδιαμφισβήτητα πλεονεκτήματα ως προς την απομάκρυνση της υγρασίας και της παραγωγής σταθερών τελικών προϊόντων με υψηλούς χρόνους ζωής. Όμως, οι θερμικές αυτές διεργασίες προκαλούν υποβάθμιση των θρεπτικών και ποιοτικών χαρακτηριστικών του επεξεργαζόμενου τροφίμου.

Τα τελευταία χρόνια ερευνώνται νέες μη θερμικές μέθοδοι, οι οποίες στοχεύουν στην παραγωγή αφυδατωμένων προϊόντων με βελτιωμένα θρεπτικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά. Μέσα σε αυτές τις μεθόδους βρίσκεται και η ωσμωτική αφυδάτωση. Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε μεμονωμένα είτε σε συνδυασμό με κάποια από τις διεργασίες αφυδάτωσης που αναφέρθηκαν ανωτέρω. Η τεχνική της ωσμωτικής αφυδάτωσης καθώς και τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει έναντι των κλασικών μεθόδων μείωσης του περιεχόμενου νερού θα αναλυθούν στην ενότητα που ακολουθεί.

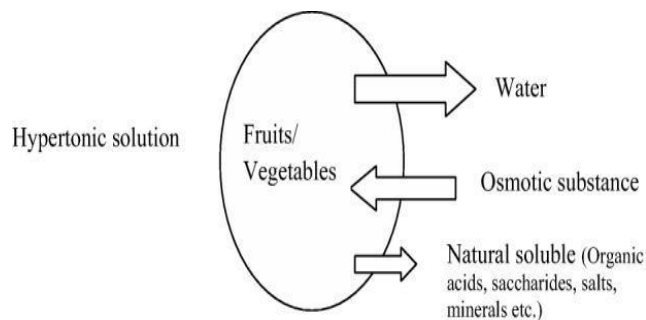
1.6.1 Μηχανισμός ωσμωτικής αφυδάτωσης

Η ωσμωτική αφυδάτωση είναι η μερική απομάκρυνση νερού από ένα τρόφιμο μέσω της άμεσης επαφής με υπερτονικό διάλυμα. Μετά την εμβάπτιση κάποιου τροφίμου με υψηλή περιεκτικότητα σε νερό σε ένα υπερτονικό διάλυμα, η κινητήρια δύναμη για την απομάκρυνση του νερού είναι η διαφορά ωσμωτικής πίεσης, η οποία δημιουργείται λόγω της διαφοράς συγκέντρωσης ανάμεσα στο διάλυμα και το τρόφιμο. Βασική προϋπόθεση κατά τη διάρκεια της ώσμωσης είναι η ενεργότητα του ωσμωτικού διαλύματος να διατηρείται σημαντικά μικρότερη από εκείνη του τροφίμου (Barbosa-Canovas και Vega-Mercado, 1996). Εάν η κυτταρική μεμβράνη είναι απόλυτα ημιπερατή, η διαλυμένη ουσία δεν μπορεί να μεταφερθεί μέσω της μεμβράνης στο εσωτερικό των κυττάρων. Όμως, οι ημιπερατές μεμβράνες στα τρόφιμα δεν είναι τέλειες λόγω της πολυπλοκότητας στην εσωτερική τους δομή ή λόγω πιθανών βλαβών κατά τη διάρκεια προηγούμενης επεξεργασίας τους.

Δύο είναι τα κύρια φαινόμενα μεταφοράς μάζας που συμβαίνουν στην ωσμωτική αφυδάτωση:

- Διαλυμένη ουσία μετακινείται από το υπερτονικό διάλυμα στο εσωτερικό των κυττάρων.
- Νερό μετακινείται από τον κυτταρικό ιστό στο διάλυμα.

Έτσι, η ωσμωτική αφυδάτωση είναι μια διαδικασία μεταφοράς πολλών συστατικών με δύο αντίρροπες ροές που συμβαίνουν ταυτόχρονα. Η ροή από το εσωτερικό του τροφίμου αποτελείται από νερό αναμειγμένο με κάποιες διαλυμένες ουσίες, όπως οργανικά οξέα, αναγωγικά σάκχαρα και κάποια αρωματικά και χρωστικές ουσίες που επηρεάζουν τα οργανοληπτικά και θρεπτικά χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος. Κάποια από τα διαλυτά στερεά του ωσμωτικού διαλύματος προσλαμβάνονται από το τρόφιμο (Shi και Le Maguer, 2002).



Σχήμα 1.5 Φαινόμενα μεταφοράς μάζας κατά την ωσμωτική αφυδάτωση (Ramya & Jain, 2017)

Πολλές μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί για την περιγραφή της κινητικής των δύο αντίθετων ροών στην ωσμωτική αφυδάτωση. Η κινητική της μεταφοράς μάζας επηρεάζεται από τη θερμοκρασία, το χρόνο επεξεργασίας και τη συγκέντρωση και τη σύνθεση του ωσμωτικού διαλύματος. Τα κύρια μεγέθη που περιγράφουν την ωσμωτική αφυδάτωση είναι η απώλεια της υγρασίας (Water Loss-WL) και η ολική πρόσληψη στερεών (Solid Gain-SG). Τα μεγέθη αυτά υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$WL = \frac{(M_o - m_o) - (M - m)}{m_o} \quad (1.1)$$

$$SG = \frac{(m - m_o)}{m_o} \quad (1.2)$$

όπου M_o το αρχικό βάρος του δείγματος πριν την ωσμωτική αφυδάτωση, M το βάρος μετά την ώσμωση, m το ξηρό βάρος του δείγματος μετά την ώσμωση και m_o το αρχικό ξηρό βάρος χωρίς την ώσμωση.

Για τη συσχέτιση των δύο αυτών μεγεθών με τις παραμέτρους της ωσμωτικής αφυδάτωσης, έχουν αναπτυχθεί διάφορα εμπειρικά ή ημι-εμπειρικά μοντέλα τα οποία προσεγγίζουν το τρόφιμο είτε μακροσκοπικά είτε και μικροσκοπικά. Ανάμεσα στην πληθώρα των μοντέλων, ορισμένα είναι πολύ εξειδικευμένα και μπορούν να εφαρμοστούν σε διάφορα ακανόνιστα σχήματα, ενώ άλλα μοντέλα λειτουργούν με κάποιες παραδοχές όπως για παράδειγμα στη γεωμετρία των δειγμάτων, τις τιμές ισορροπίας και την αντίσταση του διαλύματος (Ochoa – Martínez & Ayala – Aronte, 2007).

Το πιο ευρέως διαδεδομένο μοντέλο για τον υπολογισμό των συντελεστών διάχυσης των φαινομένων μεταφοράς μάζας μέσω αναλυτικών λύσεων, βασίζεται στο 2^ο νόμο του Fick, ο οποίος περιγράφει τη διάχυση σε μη μόνιμη κατάσταση. Η εξίσωση που περιγράφει το μηχανισμό της ώσμωσης στη μη μόνιμη κατάσταση είναι:

$$\frac{dc}{dt} = D \frac{d^2c}{dz^2} \quad (1.3)$$

όπου C είναι η συγκέντρωση της ουσίας στο τρόφιμο τη χρονική στιγμή t, D ο συντελεστής διάχυσης, z ή x η χαρακτηριστική απόσταση που διαφέρει ανάλογα με τη γεωμετρία του υλικού και t είναι ο χρόνος. Η λύση της παραπάνω εξίσωσης δίνεται στην παράγραφο 3.4.2, η οποία υπολογίζει τους συντελεστές διάχυσης του νερού και των στερεών.

1.6.2 Παράμετροι που επηρεάζουν την ωσμωτική αφυδάτωση

1.6.2.1 Ωσμωτικό μέσο

Μια βασική παράμετρος που επηρεάζει την ώσμωση είναι το είδος του ωσμωτικού μέσου. Η επιλογή του διαλύματος πρέπει να γίνει με βάση την ικανότητά του ως προς το ρυθμό απώλειας νερού και τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά που προσφέρει στο τρόφιμο. Στις επιστημονικές μελέτες συνήθως χρησιμοποιούνται ωσμωτικά διαλύματα σακχαρόζης, γλυκόζης, φρουκτόζης. Όμως, ουσίες που είναι πλήρως αναμειγμένες με το νερό και μπορούν να διαλυθούν σε αυτό γίνεται να αποτελέσουν μέρος ενός ωσμωτικού διαλύματος, όπως διάφορα άλατα (χλωριούχο νάτριο και ασβέστιο), σάκχαρα και το ασκορβικό και κιτρικό οξύ (Raoult-Wack, 1994).

Επίσης, το μοριακό βάρος του ωσμωτικού μέσου σχετίζεται με τους ρυθμούς απώλειας νερού και πρόσληψης στερεών κατά την ωσμωτική αφυδάτωση. Μόρια υψηλού μοριακού βάρους ευνοούν την απώλεια νερού, αφού δεν είναι ικανά να διαπεράσουν στο εσωτερικό των κυττάρων σε αντίθεση με τα μόρια χαμηλού μοριακού βάρους. Για αυτό το λόγο επικρατέστερο είναι τα ωσμωτικά διαλύματα να αποτελούνται από δύο ή περισσότερες διαλυμένες ουσίες (Torreggiani, 1995).

Τέλος, η συγκέντρωση του ωσμωτικού διαλύματος είναι κρίσιμης σημασίας για την ωσμωτική αφυδάτωση, γιατί η απώλεια υγρασίας αυξάνεται όσο μεγαλώνει η συγκέντρωση. Πέρα του ότι η αυξημένη συγκέντρωση μειώνει την ενεργότητα του ωσμωτικού, οδηγεί, ακόμη, στο σχηματισμό στοιβάδας στην επιφάνεια του τροφίμου που ενισχύει την απομάκρυνση νερού και εμποδίζει τη πρόσληψη στερεών (Tortoe, 2010).

1.6.2.2 Χαρακτηριστικά τροφίμου

Μεταξύ των τροφίμων επικρατούν σημαντικές διαφοροποιήσεις σε σχέση με τη χημική σύσταση (πρωτεΐνες, λίπη, υδατάνθρακες κλπ.) και τη δομή (πορώδες), οι οποίες επιδρούν στην κινητική της μεταφοράς μάζας στο τρόφιμο (Rahman, 2007). Η ενζυμική δραστηριότητα, η συνεκτικότητα του ιστού, η αρχική συγκέντρωση σε στερεά και η ενδοκυτταρική δομή επηρεάζουν την πρόσληψη στερεών και την απομάκρυνση του νερού. Η γεωμετρία ενός τροφίμου επηρεάζει και αυτή τη μεταφορά μάζας. Μελέτες έχουν δείξει ότι το μικρότερο πάχος επιταχύνει τα φαινόμενα μεταφοράς, ενώ και το σχήμα και οι διαστάσεις του δείγματος έχουν επίδραση (Tortoe, 2010).

1.6.2.3 Συνθήκες ωσμωτικής αφυδάτωσης

Σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη της αφυδάτωσης παίζουν βασικές παράμετροι της διεργασίας, όπως η θερμοκρασία του ωσμωτικού διαλύματος, η αναλογία ποσότητας τροφίμου προς διάλυμα και η εφαρμογή ανάδευσης, οι οποίες επιδρούν σημαντικά στο ρυθμό αφυδάτωσης. Συγκεκριμένα, η θερμοκρασία του διαλύματος συνδέεται άμεσα με το ρυθμό απώλειας υγρασίας. Αυξάνοντας τη θερμοκρασία επιτυγχάνεται αύξηση της απώλειας νερού, διότι ενισχύεται η διάχυση του νερού διαμέσου της κυτταρικής μεμβράνης. Σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 50°C, έχει παρατηρηθεί ότι αυξάνεται η πρόσληψη στερεών λόγω της επίδρασης της θερμοκρασίας στη διαπερατότητα της κυτταρικής μεμβράνης (Lenart και Flink, 1984).

Η αναλογία τροφίμου προς ποσότητα ωσμωτικού διαλύματος επιδρά στη πρόσληψη στερεών και στην απώλεια νερού αυξάνοντας τους αντίστοιχους ρυθμούς. Μετά από κάποια συγκεκριμένη αναλογία δεν παρατηρείται κάποια σημαντική αλλαγή στους ρυθμούς μεταφοράς (Manroudis et al., 1998). Μια συνηθισμένη αναλογία τροφίμου προς διάλυμα είναι 1:3 ή 1:5, ωστόσο δοκιμάζονται διάφορες αναλογίες, οι οποίες μετά από κάποιο σημείο κρίνονται ασύμφωρες σε βιομηχανική κλίμακα, εξαιτίας της υπερπολλαπλάσιας κατανάλωσης ωσμωτικού διαλύματος σε σχέση με το βάρος του επεξεργαζόμενου τροφίμου.

Τέλος, η ανάδευση μπορεί να ενισχύσει τη διεργασία της ωσμωτικής αφυδάτωσης, αφού περιορίζει την αντίσταση στη μεταφορά μάζας και να αυξάνεται με αυτόν τον τρόπο η απώλεια υγρασίας. Σε πρακτικό επίπεδο, εξυπηρετεί στο πρόβλημα που δημιουργείται με την επίπλευση των δειγμάτων λόγω της μεγάλης περιεκτικότητας σε σάκχαρα, βοηθώντας στην πλήρη επαφή του τροφίμου με το ωσμωτικό διάλυμα. Έχει παρατηρηθεί ότι η ανάδευση επιτυγχάνει μικρότερους χρόνους επεξεργασίας για να φτάσει το προϊόν στην επιθυμητή τιμή υγρασίας (Phisut, 2012).

1.6.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της ωσμωτικής αφυδάτωσης

Η διεργασία της ώσμωσης ως μέθοδος αφυδάτωσης μελετάται για αρκετό καιρό και η εφαρμογή της σε βιομηχανικό επίπεδο θεωρείται ελκυστική, αλλά απαιτείται περαιτέρω έρευνα για τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων της. Πολλές μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί που επιβεβαιώνουν ότι η ωσμωτική αφυδάτωση έχει σημαντικά πλεονεκτήματα στη βελτίωση της ποιότητας (χρώμα, υφή, γεύση) των αφυδατωμένων τροφίμων, στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, στη μείωση του κόστους συσκευασίας και αποθήκευσης, καθώς και στη σταθερότητα των προϊόντων και τη διατήρηση της θρεπτικής τους αξίας. Συγκεκριμένα, η εφαρμογή της ωσμωτικής αφυδάτωσης στα φρούτα και λαχανικά βελτιώνει τα ποιοτικά χαρακτηριστικά τους όπως το χρώμα, η γεύση, η υφή και το άρωμα (Rahman, 1992). Η επίδραση της θερμοκρασίας στο χρώμα και τη γεύση ελαχιστοποιούνται, γιατί η διεργασία δεν εκθέτει τα τρόφιμα σε υψηλές θερμοκρασίες. Επιπλέον, οι αρνητικές επιδράσεις στο χρώμα λόγω του ενζυμικού μαυρίσματος αποτρέπονται χάρη στη υψηλή συγκέντρωση σακχάρων που καλύπτουν το τρόφιμο, αλλά και ενίοτε στην ένταξη αντιοξειδωτικών παραγόντων στο ωσμωτικό διάλυμα. Οι Lenart & Lewicki (1988) διαπίστωσαν καλύτερη διατήρηση των συστατικών, τα οποία σχετίζονται με τη γεύση και το άρωμα, στις διεργασίες ώσμωσης σε σύγκριση με άλλες μεθόδους αφυδάτωσης.

Σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί η μειωμένη ενεργειακή κατανάλωση. Η ωσμωτική αφυδάτωση είναι λιγότερο ενεργειακά απαιτητική σε σχέση με την ξήρανση με θερμό αέρα.

Ειδικά, παρατηρήθηκε ότι η ενεργειακή κατανάλωση της ωσμωτικής αφυδάτωσης στους 40°C με ανασύσταση του ωσμωτικού με εξάτμιση ήταν δύο φορές μικρότερη από τη συμβατική ξήρανση με αέρα στους 70°C (Lenart & Lewicki, 1988).

Ως προς τις οικονομικές ωφέλειες της διεργασίας συνυπολογίζεται και το μειωμένο κόστος συσκευασίας και διανομής του προϊόντος. Η μείωση του περιεχόμενου νερού μειώνει το βάρος και το μέγεθος των τροφίμων, με αποτέλεσμα να διευκολύνονται η αποθήκευση και η συσκευασία (Rahman, 2007).

Στη συσκευασία πολλών φρούτων και λαχανικών απαιτούνται πρόσθετες χημικές ουσίες. Για παράδειγμα, λόγω της συνεχούς παραμονής του τροφίμου μέσα στο ωσμωτικό διάλυμα, ο ιστός του τροφίμου δεν έρχεται σε επαφή με το οξυγόνο με αποτέλεσμα να αποφεύγεται η χρήση διοξειδίου του θείου, μιας ουσίας που χρησιμοποιείται για την αποφυγή του οξειδωτικού και του ενζυμικού μαυρίσματος (Lazarides, 2001). Με την ωσμωτική αφυδάτωση μειώνεται η ενεργότητα του τροφίμου σε τέτοια επίπεδα που επιβραδύνονται διάφορες φυσικοχημικές και μικροβιολογικές δράσεις που αλλοιώνουν τα τρόφιμα. Τα σάκχαρα των ωσμωτικών διαλυμάτων παρεμποδίζουν το ενζυμικό μαύρισμα στα φρούτα και λαχανικά αδρανοποιώντας το ένζυμο πολυφαινολική οξειδάση και επιβραδύνουν την απομάκρυνση πτητικών ουσιών, που προσδίδουν το άρωμα στα φρούτα και τα λαχανικά (Wientjes, 1968). Η μειωμένη ενεργότητα νερού εξυπηρετεί στην αναστολή και επιβράδυνση της μικροβιακής ανάπτυξης, κάτι το οποίο συμβάλλει στην αύξηση της διατηρησιμότητας των τροφίμων κατά την αποθήκευσή τους (Rahman, 2007).

Παρά τα αδιαμφισβήτητα πλεονεκτήματα της ωσμωτικής αφυδάτωσης, η βιομηχανία τροφίμων δεν την έχει εφαρμόσει σε εκτενή κλίμακα. Αυτό αποδίδεται σε προβλήματα που σχετίζονται με το σχεδιασμό και τον έλεγχο της διαδικασίας, όπως την επιλογή του χρόνου επεξεργασίας σε μεγάλη κλίμακα, τον συνεχή έλεγχο της προόδου της ώσμωσης και την επίπλευση των υπό επεξεργασία τροφίμων στο ωσμωτικό διάλυμα, λόγω της χαμηλότερης πυκνότητας που εμφανίζουν τα τρόφιμα σε σχέση με τα πυκνά ωσμωτικά διαλύματα.

Ένα επιπρόσθετο μειονέκτημα αποτελεί η διαχείριση του ωσμωτικού διαλύματος (Rahman και Perera, 1999). Η σύσταση του ωσμωτικού διαλύματος αλλάζει κατά τη διάρκεια της ώσμωσης. Το διάλυμα αραιώνεται, αφού προσλαμβάνει νερό, και τα στερεά του συστατικά απομακρύνονται. Επίσης, υπολείμματα από το τρόφιμο παραμένουν μέσα στο ωσμωτικό διάλυμα. Η παρασκευή νέων ωσμωτικών διαλυμάτων μετά από κάθε επεξεργασία κρίνεται οικονομικά ασύμφορη. Μια εναλλακτική χρήση είναι η επαναχρησιμοποίηση του διαλύματος, ωστόσο υπάρχει το ενδεχόμενο μικροβιολογικής μόλυνσης. Σύμφωνα με τους Dermesonliouoglou και Taoukis (2008), είναι εφικτή η επαναχρησιμοποίηση του διαλύματος έως και δέκα φορές, αφού το ωσμωτικό διάλυμα που χρησιμοποιήθηκε για την αφυδάτωση ντομάτας δεν έδειξε να έχει ανεπιθύμητες μεταβολές στην ποιότητα του τελικού προϊόντος. Ορισμένες λύσεις που σχετίζονται με την επαναχρησιμοποίηση του ωσμωτικού διαλύματος είναι η συνεχής διήθηση για την απομάκρυνση των ιστών που πιθανόν απορρίπτονται στο διάλυμα, ενώ ανάλογα και με τη φύση του συστήματος μπορούν να εφαρμοστούν εξάτμιση, συμπύκνωση με μεμβράνες ή προσθήκη διαλυτών συστατικών (Raoult-Wack, 1994, Rastogi et al., 2002, Tortoe, 2010).

1.6.4 Ωσμωτική αφυδάτωση σε φυτικούς ιστούς

Τα φρούτα και τα λαχανικά περιέχουν υψηλά ποσοστά υγρασίας (80-95% σε υγρή βάση) και το pH τους κυμαίνεται σε τιμές από 7.0 έως και ελαφρά όξινες. Τα χαρακτηριστικά αυτά καθιστούν ιδανικές τις συνθήκες για την ανάπτυξη βακτηρίων, ζυμών και μυκήτων. Η μικροβιακή ανάπτυξη προκαλεί αλλοίωση και υποβάθμιση του προϊόντος, με αποτέλεσμα η διατηρησιμότητα προϊόντων φρούτων και λαχανικών να είναι μειωμένη.

Πίνακας 1.1 Αλλοιογόνοι και παθογόνοι μικροοργανισμοί και ελάχιστη τιμή ενεργότητας νερού για την ανάπτυξή τους σε φρούτα και λαχανικά

Βακτήρια	Ελάχιστη τιμή a_w	Ζύμες & Μύκητες	Ελάχιστη τιμή a_w
Pseudomonas	0.97	Mucor	0.62
E.coli	0.96	Rhizopus	0.62
Staphylococcus aureus	0.86	Botrytis	0.62
Bacillus subtilis	0.95	Aspergillus	0.85
Clostridium botulinum	0.93	Penicillium	0.95
Enterobacter aerogenes	0.94		

Για το λόγο αυτό απαραίτητη είναι η μεταποίηση των προϊόντων αυτών, ώστε να καθίσταται δυνατή η αύξηση του χρόνου ζωής τους. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως σε αυτό το κεφάλαιο, η ξήρανση-αφυδάτωση αποτελεί μια σημαντική διεργασία που στοχεύει στην επίλυση αυτού του προβλήματος. Ειδικά, για τη χρήση της ωσμωτικής αφυδάτωσης σε φρούτα και λαχανικά έχουν γίνει πολλές μελέτες με σκοπό τη δημιουργία προϊόντων όπως τα ελάχιστα επεξεργασμένα ή τα φρούτα ενδιάμεσης υγρασίας (Phisut, 2012; Chandra et al., 2014). Κατά την ωσμωτική αφυδάτωση, απομακρύνεται νερό από το τρόφιμο και ταυτόχρονα προσλαμβάνονται στερεά. Έτσι, δημιουργούνται τελικά προϊόντα με βελτιωμένες οργανοληπτικές και διατροφικές ιδιότητες. Στο πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 1.2) φαίνονται διάφορες συνθήκες ωσμωτικής αφυδάτωσης σε φυτικούς ιστούς.

1.6.4.1 Φυλλώδη λαχανικά-Σπανάκι

Τα φυλλώδη λαχανικά κατέχουν σημαντική θέση στην ανθρώπινη διατροφή λόγω της διατροφικής τους αξίας. Ιδίως τα πράσινα φυλλώδη λαχανικά χάρη στη χρώμα τους, τη γεύση τους και στα θρεπτικά οφέλη που παρέχουν στον άνθρωπο κρίνονται μεταξύ των πιο σημαντικών λαχανικών. Αποτελούν πηγή καροτενοειδών, κυρίως β-καροτένιο, βιταμίνης C, σιδήρου και φυτικών ινών (Negi και Roy, 2000).

Στην οικογένεια των φυλλωδών λαχανικών ανήκει το σπανάκι (*Spinacia oleracea*), το οποίο είναι ένα από τα πλέον καλλιεργούμενα φυλλώδη λαχανικά όλο το χρόνο σε πολλές περιοχές παγκοσμίως. Αποτελείται από νερό σε ποσοστά άνω του 90%, πρωτεΐνες (2,9%), υδατάνθρακες έως 3.6% και λίπη (0.4%). Το σπανάκι είναι σημαντική πηγή καροτενοειδών, βιταμινών (A, C, E και K) και μετάλλων (ψευδάργυρος, σίδηρο, ασβέστιο) (Lasya, 2022). Τα κυριότερα ποιοτικά χαρακτηριστικά του φρέσκου σπανακιού είναι το έντονο πράσινο χρώμα του, η σπαργή του και η χαρακτηριστική του γεύση.

Το σπανάκι περιέχει ποσοστά υγρασίας που ξεπερνά το 85-90% του βάρους του. Η υψηλή περιεκτικότητά του σε νερό οδηγεί σε ταχεία μικροβιακή ανάπτυξη, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη μικρή διατηρησιμότητα των προϊόντων σπανακιού που διατίθενται στην αγορά. Ο χρόνος ζωής του σπανακιού μετά την συγκομιδή του έχει υπολογιστεί ότι είναι λιγότερος από 14 ημέρες (Kader, 2002). Επιπλέον, κατά την αποθήκευση, η υποβάθμιση της ποιότητας μπορεί να επιταχυνθεί από καταστροφή της δομής, από απώλεια λιπιδίων της κυτταρικής μεμβράνης και αυξημένη αναπνοή των κυττάρων (Pandranghi & LaBorde, 2006). Μελετώντας το φρέσκο σπανάκι, οι Simonetti et al. (1995) υπολόγισαν ότι η περιεκτικότητα σε β-καροτένιο μειώθηκε κατά 18% μετά από 21 ημέρες αποθήκευσης στους 4-6°C.

Τα παραδείγματα υποβάθμισης και αλλοίωσης της ποιότητας του σπανακιού κατά την αποθήκευσή του έχουν γίνει η αιτία να πραγματοποιηθούν πληθώρα μελετών πάνω στη συντήρηση και την επέκταση της διατηρησιμότητάς του. Μια στρατηγική που έχει ακολουθηθεί είναι αποθήκευση του σπανακιού σε χαμηλές θερμοκρασίες υπό τροποποιημένη ατμόσφαιρα (Prince & Floros, 1993). Άλλη μέθοδος είναι η ξήρανση του σπανακιού σε μορφή αποξηραμένων νιφάδων ή σκόνης, η οποία έχει πραγματοποιηθεί με διάφορες μεθόδους αφυδάτωσης όπως ξήρανση με μικροκύματα, με ρεύμα θερμού αέρα και λυοφιλίωση (Bajgai & Hashinaga, 2001; Ghosh, 2016; Mehmood, 2018). Το αποξηραμένο σπανάκι σε μορφή νιφάδων ή σκόνης έχει χαμηλό βάρος και μπορεί να χρησιμοποιηθεί με πολλούς τρόπους. Οι Bajgai & Hashinaga (2001) κατέληξαν ότι με χρήση συμβατικής ξήρανσης σε συγκεκριμένη θερμοκρασία μπορεί να επιτευχθεί παρόμοιο αποτέλεσμα με τη κρουζήρανση του σπανακιού, η οποία είναι οικονομικά ασύμφορη. Ωστόσο, το αποξηραμένο σπανάκι, παρά την αυξημένη διατηρησιμότητα, παρουσιάζει υποβαθμισμένα ποιοτικά χαρακτηριστικά όπως το χρώμα, την υφή και τη φρεσκάδα.

Μέχρι σήμερα ελάχιστες είναι οι έρευνες που αφορούν την ωσμωτική αφυδάτωση σπανακιού. Το σπανάκι αποτελεί ένα λαχανικό με ιδιαίτερα εύθραυστη δομή, κάτι το οποίο το καθιστά δύσκολο διαχειρίσιμο ως πρώτη ύλη για οποιαδήποτε επεξεργασία. Επίσης, η απώλεια της σπαργής των φύλλων του σπανακιού μετά την επεξεργασία του είναι μια ακόμη παράμετρος που έχει συμβάλει στο χαμηλό αριθμό ερευνών. Υπάρχουν αναφορές που ασχολούνται με χρήση της ωσμωτικής αφυδάτωσης ως προ-επεξεργασία της συμβατικής ξήρανσης, οι οποίες έχουν δείξει την θετική επίδρασή της στη διατήρηση των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών του σπανακιού και μετά τη ξήρανση. Οι Kaur et al. (2008), μελετώντας το αποτέλεσμα της εμβάπτισης του σπανακιού σε ωσμωτικό διάλυμα ως προεπεξεργασία ξήρανσης με ηλιακή ακτινοβολία, τοποθέτησαν σπανάκι σε διάλυμα μεταδιθειώδους καλίου (potassium metabisulfite) για σύντομο χρονικό διάστημα (1 min) σε θερμοκρασία 95°C, με αποτέλεσμα να διατηρηθούν η χλωροφύλλη, το β-καροτένιο και να μειωθεί το ενζυμικό μαύρισμα με ελάχιστη μεταβολή του χρώματος.

Πίνακας 1.2 Εφαρμογές ωσμωτικής αφυδάτωσης σε φρούτα και λαχανικά

Φρούτο/Λαχανικό	Ωσμωτικό διάλυμα	T(°C)	Αναλογία διάλυμα:τρόφιμο	Βιβλιογραφική αναφορά
Ακτινίδιο	Γλυκερόλη,Ερυθριτόλη κ.α.	25-45	5	Dermesonlouoglou et al. (2016)
Καρότο	NaCl/Σακχαρόζη: 0-15/45- 60%	20	3	Amani et al. (2007)
Πατάτα	Μαλτοδεξτρίνη,NaCl	25-45	40	Goula et al. (2017)
Ροδάκινο	Σακχαρόζη 100-500g/L	25	4	Jian Lyu et al. (2017)
Ντομάτα	Γλυκερόλη,Ερυθριτόλη κ.α.	35	5	Dermesonlouoglou et al. (2017)

Κεφάλαιο 2: Μέθοδοι ενίσχυσης φαινομένων μεταφοράς μάζας του νερού

2.1 Εισαγωγή

Τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στις διεργασίες αφυδάτωσης, ιδίως στην περίπτωση των φρούτων και λαχανικών, τα οποία ως φυτικοί ιστοί παρουσιάζουν κάποιες ιδιαιτερότητες ως προς τη δομή τους. Τα φυτικά κύτταρα περικλείονται από μια κυτταρική μεμβράνη και ένα κυτταρικό τοίχωμα. Η κυτταρική μεμβράνη και το κυτταρικό τοίχωμα δρουν ως ένα ημιπερατό φράγμα, το οποίο ελέγχει τη μεταφορά ουσιών από το εσωτερικό του κυττάρου στο εξωτερικό χώρο και το αντίστροφο. Επομένως, ο κύριος μηχανισμός που καθορίζει τη μεταφορά μάζας στα φυτικά τρόφιμα είναι η διάχυση διαμέσου των μεμβρανών αυτών (Puertolas et al., 2012).

Σε βιομηχανική κλίμακα συχνά επιδιώκεται η ενίσχυση των φαινομένων μεταφοράς μάζας. Για αυτό το λόγο, χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι συνδυαστικά με τις διεργασίες ξήρανσης-αφυδάτωσης για να επιταχύνουν τη μεταφορά της υγρασίας από τα τρόφιμα. Συγχρόνως, οι μέθοδοι αυτές στοχεύουν στην αύξηση ή την τροποποίηση της διαπερατότητας των κυτταρικών μεμβρανών (Toerfl et al., 2006). Μερικές από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται είναι η εφαρμογή κενού, η χρήση υπερυψηλής πίεσης, οι υπέρηχοι και τα παλμικά ηλεκτρικά πεδία.

2.2 Χρήση κενού

Η χρήση κενού για την ενίσχυση της μεταφοράς μάζας χρησιμοποιείται κυρίως ως προκατεργασία άλλων μεθόδων ξήρανσης, όπως είναι η ωσμωτική αφυδάτωση. Η μεταφορά μάζας επηρεάζεται από την παρουσία αέρα ή υγρού που βρίσκεται κλεισμένο στους μεσοκυττάριους χώρους κατά την διεργασία αφυδάτωσης. Καθώς εφαρμόζεται το κενό, η μείωση της πίεσης προκαλεί τη διαφυγή του αέρα από τους μεσοκυττάριους χώρους και τους πόρους των φρούτων και λαχανικών. Έτσι, τα κενά που δημιουργούνται αυξάνουν τη διαθέσιμη επιφάνεια για την μεταφορά μάζας (Sagar et al., 2010).

Επιπλέον, η εφαρμογή κενού επιτρέπει την εισαγωγή επιθυμητών συστατικών απευθείας στα τελικά προϊόντα μέσω των πόρων με ελεγχόμενο τρόπο (Chiralt et al., 1999). Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η βελτίωση της πορώδους δομής των τροφίμων, η οποία οφείλεται στην χρήση ήπιας επεξεργασίας σε σχετικά χαμηλή θερμοκρασία, με αποτέλεσμα να ελαχιστοποιούνται οι βλάβες στους φυτικούς ιστούς (Zhao et al., 2004). Σύμφωνα με τους Zielinska και Markowski (2018) η χρήση κενού σε δείγματα cranberries αύξησε το συντελεστή διάχυσης της υγρασίας και των στερεών περίπου κατά 9 φορές σε σχέση με την απλή ωσμωτική επεξεργασία. Ένα σημαντικό μειονέκτημα είναι ότι η μέθοδος αυτή αφορά κυρίως τρόφιμα με μεγάλο πορώδες (Zhao et al., 2004).

2.3 Υπερυψηλή πίεση

Η υπερυψηλή πίεση είναι μια τεχνική προεπεξεργασίας που θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική για τη βιομηχανία τροφίμων. Η χρήση της υπερυψηλής πίεσης περιλαμβάνει την υποβολή του τροφίμου (συσκευασμένο ή μη) σε πίεση 100-900 MPa μέσα σε νερό για χρονικό διάστημα από 1 έως 20 min σε θερμοκρασία 25°C. Η μέθοδος αυτή ενισχύει την

αδρανοποίηση των ενζύμων και άλλων μικροοργανισμών που αλλοιώνουν τα θρεπτικά και οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του τροφίμου. Ακόμη, αποτελεί ένα τρόπο επέκτασης της διατηρησιμότητας του τελικού προϊόντος και διατηρεί τις θρεπτικές και φυσικοχημικές ιδιότητες του τροφίμου (Osae et al., 2020).

Η εφαρμογή τόσο υψηλής πίεσης προκαλεί μεταβολές στο κυτταρικό τοίχωμα των φυτικών ιστών και κυρίως στους μη ομοιοπολικούς δεσμούς του. Με αυτόν τον τρόπο επηρεάζεται η διαπερατότητα του τοιχώματος και ενισχύονται τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας (Nunez-Mancilla et al., 2011). Σύμφωνα με μελέτες, η εφαρμογή ΥΠ σε μάνγκο βελτίωση σημαντικά το χρόνο ζωής τους (Danalache et al., 2017). Η συνδυαστική δράση της υπερυψηλής πίεσης με την ωσμωτική αφυδάτωση έχει μελετηθεί από αρκετούς, όπως για παράδειγμα οι Dermesotliouoglou et al. (2016) σε δείγματα φράουλας, και τα αποτελέσματα ήταν ικανοποιητικά ως προς τη διατήρηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών των δειγμάτων. Ένα μειονέκτημα που έχει παρατηρηθεί στα συστήματα υπερυψηλής πίεσης είναι η μετουσίωση πρωτεϊνών, η οποία οφείλεται σε μεταβολές στον όγκο του τροφίμου και τη δομή μεγάλων μορίων (Escobedo-Avellaneda et al., 2011).

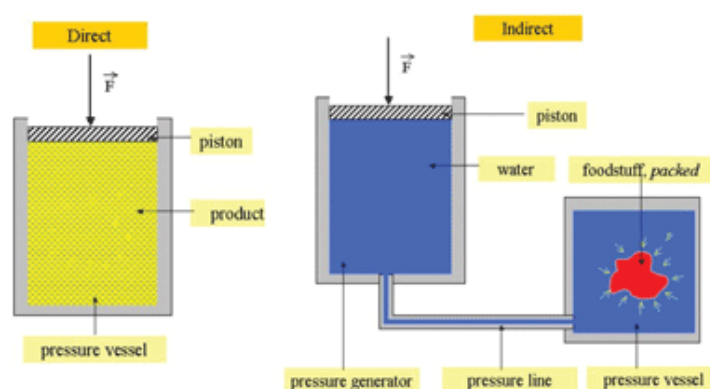


Figure 1: Principle of function of direct and indirect hydrostatic pressurisation Copyright: DIL

Σχήμα 2.1 Εφαρμογή υπερυψηλής πίεσης σε τρόφιμα (Marangoni et al., 2019)

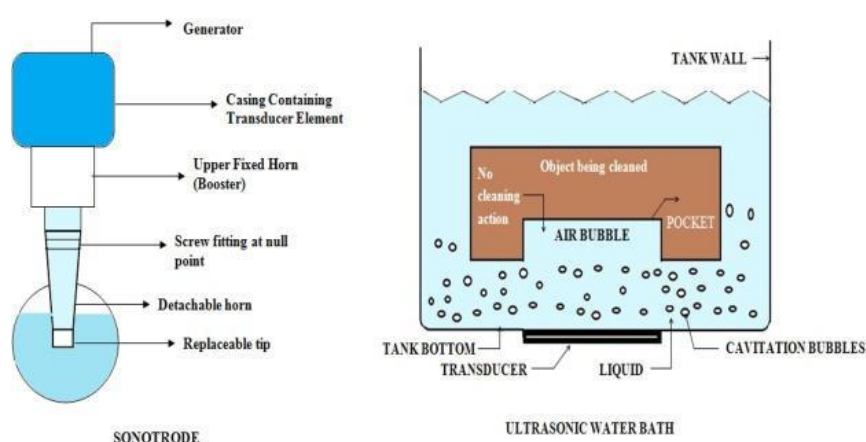
2.4 Υπέρηχοι

Οι υπέρηχοι είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιεί ηχητικά κύματα σε συχνότητες πάνω από 20 kHz, τα οποία προκαλούν ταλαντώσεις των μορίων του επεξεργαζόμενου τροφίμου. Η χρήση υπερήχων στη επεξεργασία τροφίμων παρέχει τη δυνατότητα αδρανοποίησης μικροοργανισμών χάρη σε ένα φαινόμενο που ονομάζεται ακουστική σπηλαιώση. Κατά τη διάρκεια του φαινομένου σχηματίζονται φυσαλίδες στο υγρό, οι οποίες δημιουργούν διακυμάνσεις τοπικά στη πίεση και θερμοκρασία, με αποτέλεσμα να προκαλούνται βλάβες στη δομή του κυτταρικού τοιχώματος και αύξηση της διαπερατότητας της κυτταρικής μεμβράνης (Fan et al., 2021).

Γενικά, η χρήση υπερήχων εξυπηρετεί στην ενίσχυση των φαινομένων μεταφοράς μάζας, κυρίως στους φυτικούς ιστούς, επιδρά στην ενζυμική δραστηριότητα και συνεισφέρει στη διατήρηση της ποιότητας του τελικού προϊόντος (Osae et al., 2020). Έρευνες έχουν δείξει ότι

οι υπέρηχοι προκαλέσαν μεταβολές στη δομή των κυττάρων και μείωση του χρόνου ξήρανσης σε καρότα (Juarez-Enriquez et al., 2015). Επίσης, σύμφωνα με τους Nowacka et al. (2018), παρατηρήθηκε αύξηση της απώλειας νερού σε δείγματα cranberries κατά την ωσμωτική τους αφυδάτωση, αφού πρώτα είχαν επεξεργαστεί με υπέρηχους.

Όσον αφορά τα μειονεκτήματα της μεθόδου, κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας με υπέρηχους, τα ηχητικά κύματα προκαλούν διαστολή και συστολή στην κυτταρική δομή των τροφίμων, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη μετουσίωση πρωτεϊνών και την αποσύνθεση μοριακών δομών. Συγχρόνως, αυξάνεται η ενζυμική δραστηριότητα και έτσι τα υποστρώματα είναι περισσότερο προσβάσιμα στα ένζυμα, κάτι το οποίο έχει ως αντίκτυπο την αλλοίωση του τροφίμου από ενζυμικές αντιδράσεις. Τέλος, έχει αναφερθεί ότι μειώνονται ορισμένα θρεπτικά συστατικά, όπως αντιοξειδωτικά, τα οποία απομακρύνονται στο νερό κατά την επεξεργασία (Cruz et al., 2016).



Σχήμα 2.2 Εξοπλισμοί εφαρμογής υπέρηχων (Fan et al., 2021)

2.5 Παλμικά Ηλεκτρικά Πεδία (ΠΗΠ)

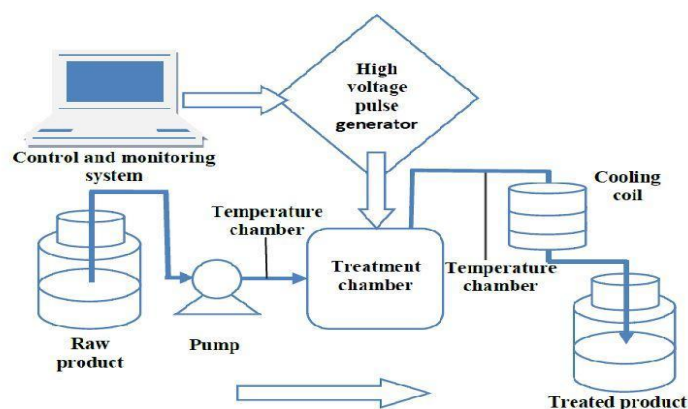
2.5.1 Αρχή λειτουργίας των παλμικών ηλεκτρικών πεδίων

Η τεχνολογία των παλμικών ηλεκτρικών πεδίων (Pulsed Electric Field – PEF) αποτελεί μια μη θερμική μέθοδο επεξεργασίας, η οποία επιτυγχάνει τη διάρρηξη των κυτταρικών μεμβρανών με χαμηλό λειτουργικό κόστος και ταυτόχρονα διατηρεί ή βελτιώνει τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του τροφίμου. Η αρχή των παλμικών ηλεκτρικών πεδίων βασίζεται στην εφαρμογή παλμών υψηλού ηλεκτρικού πεδίου και πολύ μικρής διάρκειας πάνω στο προϊόν. Οι παλμοί έχουν συνήθως ένταση από 10 έως 80 kV/cm και η διάρκεια κυμαίνεται από μς έως ms (Kempkes et al., 2017).

Τα βασικά μέρη ενός τυπικού συστήματος παλμικών ηλεκτρικών πεδίων είναι ένα ηλεκτρικό κύκλωμα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ο θάλαμος επεξεργασίας, υπολογιστής για τον έλεγχο του συστήματος, σύστημα ψύξης και μετρητές των συνθηκών (Barbosa-Canovas et al., 1999). Το σημαντικότερο κομμάτι του συστήματος είναι ο χώρος που παράγονται οι παλμοί και ο θάλαμος επεξεργασίας. Η γεννήτρια παλμών περιλαμβάνει έναν φορτιστή που μετατρέπει το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές και φορτίζει μια συσκευή αποθήκευσης ενέργειας-πυκνωτής. Η απελευθέρωση της ηλεκτρικής ενέργειας στο θάλαμο επεξεργασίας

ελέγχεται από ένα διακόπτη, ο οποίος παραμένει ανοικτός στο στάδιο της φόρτισης και κλείνεται απελευθερώνει την ενέργεια μέσω των ηλεκτροδίων σε ελάχιστο χρόνο. Αν η τάση του πυκνωτή δεν είναι αρκετά υψηλή, τότε χρησιμοποιείται ένας μετασχηματιστής παλμών για να την αυξήσει (Levieveld et al., 2007).

Ο θάλαμος επεξεργασίας αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια, τα οποία διαχωρίζονται από μονωτικό υλικό. Το ένα είναι υψηλής τάσης και το άλλο σε δυναμικό γείωσης. Σε εργαστηριακή κλίμακα χρησιμοποιούνται θάλαμοι διαλείποντος έργου, που είναι χρήσιμοι για στερεά τρόφιμα και κυρίως απαιτούνται μικροί όγκοι. Για επεξεργασία μεγάλων όγκων κυρίως υγρών, χρησιμοποιούνται θάλαμοι συνεχούς έργου. Η γεωμετρία όπως και οι διαστάσεις, ο όγκος και η απόσταση των ηλεκτροδίων, ποικίλλουν, ώστε ο κατάλληλος σχεδιασμός θαλάμου να επιλέγεται ανάλογα με την εκάστοτε διεργασία (Kempkes et al., 2017).



Σχήμα 2.3 Διάταξη εξοπλισμού παλμικών ηλεκτρικών πεδίων (Mohamed & Eissa, 2012)

2.5.2 Παράμετροι λειτουργίας των παλμικών ηλεκτρικών πεδίων

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη της διεργασίας των παλμικών ηλεκτρικών πεδίων είναι τα εξής: η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου (E), ο χρόνος επεξεργασίας (t), το σχήμα του παλμού, το εύρος του παλμού (τ), ο αριθμός των παλμών (n), η ειδική ενέργεια του παλμού (W) και η συχνότητα επανάληψης παλμών (f).

Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου

Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου αφορά στην ένταση του πεδίου στο θάλαμο επεξεργασίας. Σχετίζεται με τη τάση που εφαρμόζεται μεταξύ των ηλεκτροδίων, τη γεωμετρία του θαλάμου καθώς και τις διηλεκτρικές ιδιότητες του υλικού ανάμεσα στα ηλεκτρόδια (Raso, 2015). Για παράλληλα ηλεκτρόδια, η τιμή της έντασης υπολογίζεται από το πηλίκο της τάσης (V) στα άκρα των ηλεκτροδίων προς την απόσταση των ηλεκτροδίων (d):

$$E = \frac{V}{d} \quad (2.1)$$

Ο χρόνος επεξεργασίας

Ο χρόνος επεξεργασίας (t) εξαρτάται από τη διάρκεια του παλμού (τ) και τον αριθμό των παλμών (n) και δίνεται από την σχέση:

$$t = \tau * n \quad (2.2)$$

Το σχήμα του παλμού

Τα σχήματα των παλμών που συναντώνται συνήθως είναι ο ορθογώνιος παλμός και ο εκθετικός παλμός. Οι παλμοί εκθετικής μείωσης χαρακτηρίζονται από μια απότομη αύξηση της τάσης και στη συνέχεια έπεται η μείωση προς το μηδέν. Αυτού του είδους ο παλμός χρησιμοποιείται ευρέως λόγω της ευκολίας στη δημιουργία και στη τροποποίησή του. Οι ορθογώνιοι παλμοί έχουν χρησιμοποιηθεί σε διάφορες μελέτες, ακόμα και αν υπάρχει δυσκολία στη δημιουργία τους. Η διαφορά αυτού του παλμού είναι ότι η μέγιστη τιμή της τάσης διατηρείται σταθερή σε όλη τη διάρκεια του παλμού, με αποτέλεσμα να είναι ενεργειακά πιο αποδοτική (Leadley και William, 2006).

Το εύρος του παλμού

Για τους ορθογώνιους παλμούς το εύρος ή διάρκεια του παλμού είναι ο χρόνος για τον οποίο η τάση διατηρεί τη μέγιστη τιμή της. Για τους παλμούς εκθετικής μείωσης, το εύρος του παλμού ορίζεται ως ο χρόνος που χρειάζεται για να μειωθεί η τάση στο 37% της μέγιστης τιμής.

Η συχνότητα επανάληψης των παλμών

Η συχνότητα επανάληψης των παλμών είναι ο αριθμός των παλμών ανά μονάδα χρόνου και εκφράζεται σε Hz. Η σημασία αυτού του μεγέθους βρίσκεται στο γεγονός ότι προσδιορίζει την ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που δέχεται το τρόφιμο στη μονάδα του χρόνου, η οποία συνδέεται με την αύξηση της θερμοκρασίας στο τρόφιμο λόγω του φαινομένου Joule (Raso et al., 2016).

Η ειδική ενέργεια των παλμών

Η ειδική ενέργεια των παλμών εκφράζει την ηλεκτρική ενέργεια που δέχεται το τρόφιμο στο θάλαμο επεξεργασίας ανά παλμό και εξαρτάται από τις διηλεκτρικές ιδιότητες του τροφίμου και το σχήμα του παλμού. Η ειδική ενέργεια υπολογίζεται από την επόμενη σχέση:

$$W = \frac{1}{m} \int_0^{\infty} V(t) * I(t) dt \quad (2.3)$$

όπου m η μάζα του δείγματος, V η τάση στα άκρα του θαλάμου και I το ρεύμα που διαπερνά το θάλαμο κάθε χρονική στιγμή t.

Ένα ακόμα μέγεθος που έχει ιδιαίτερη σημασία είναι η συνολική ειδική ενέργεια W_T , που υπολογίζεται από τον πολλαπλασιασμό της ειδικής ενέργειας ανά παλμό W με τον αριθμό των παλμών n:

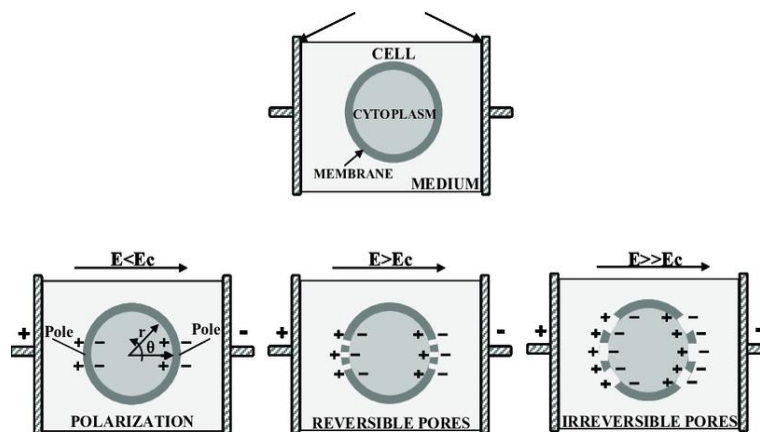
$$W_T = W * n \quad (2.4)$$

2.5.3 Επίδραση της μεθόδου ΠΗΠ στη κυτταρική μεμβράνη

Τα παλμικά ηλεκτρικά πεδία αποτελούν μια μέθοδο που χρησιμοποιείται με αποτελεσματικό τρόπο για την απενεργοποίηση μικροοργανισμών σε χαμηλές θερμοκρασίες σε σχέση με άλλες θερμικές επεξεργασίες, καθώς και εξυπηρετεί στην αύξηση της μεταφοράς μάζας. Η ενίσχυση των φαινομένων μεταφοράς λόγω της αύξησης της διαπερατότητας της κυτταρικής μεμβράνης προκαλείται από ένα φαινόμενο που ονομάζεται ηλεκτροδιάτρηση (Puertolas et al., 2012).

Όταν εφαρμόζεται εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο σε ένα κύτταρο πραγματοποιούνται συγκεκριμένες δράσεις. Αρχικά, αυξάνεται το διαμεμβρανικό δυναμικό της μεμβράνης λόγω του ηλεκτρικού πεδίου. Ακολουθεί η δημιουργία μικρών υδρόφιλων πόρων, οι οποίοι αυξάνονται σε μέγεθος και σε πλήθος. Η έκθεση των κυττάρων στους παλμούς υψηλής έντασης αποσταθεροποιεί τη λιπιδική διπλοστιβάδα και τις πρωτεΐνες της κυτταρικής μεμβράνης. Τέλος, υπάρχει διαρροή ενδοκυτταρικών ουσιών από το κύτταρο προς το περιβάλλον και εισχώρηση εξωκυτταρικών ουσιών στο εσωτερικό των κυττάρων. Η ηλεκτροδιάτρηση μπορεί να είναι αναστρέψιμη, όπου το κύτταρο επιστρέφει στην αρχική κατάσταση, ή μη αναστρέψιμη, η οποία είναι πολλές φορές και η επιθυμητή κατάσταση (Puertolas et al., 2012).

Η αναστρεψιμότητα ή μη του φαινομένου της ηλεκτροδιάτρησης εξαρτάται από την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, το χρόνο της επεξεργασίας και τον αριθμό των παλμών. Υπάρχει μια κρίσιμη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, η οποία για τους φυτικούς ιστούς είναι 0.05 έως 0.5kV/cm (Asavasanti et al., 2010). Για τιμές μεγαλύτερες της κρίσιμης τιμής έντασης, η κυτταρική μεμβράνη σπάει ή δημιουργούνται πόροι. Μη αντιστρεπτές μεταβολές απαιτούνται όταν ο στόχος της επεξεργασίας είναι η αδρανοποίηση μικροοργανισμών και η ενίσχυση των φαινομένων μεταφοράς. Αντιθέτως, αν η ένταση του πεδίου δεν είναι αρκετά υψηλή για να προκαλέσει μόνιμες μεταβολές, δηλαδή πάνω από την κρίσιμη τιμή, τότε η κυτταρική μεμβράνη επιστρέφει στην αρχική της κατάσταση (Saulis, 2010).



Σχήμα 2.4 Διάρρηξη κυτταρικής μεμβράνης ανάλογα με την εφαρμοζόμενη τιμή έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (Kumari et al., 2018)

Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, όπως αναφέρθηκε και ανωτέρω, είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ενίσχυση των φαινομένων μεταφοράς, ωστόσο η αύξησή της πέραν από μια τιμή δεν παρουσιάζει επιπρόσθετη βελτίωση της μεταφοράς μάζας. Υπάρχει ένα σημείο, όπου η κυτταρική μεμβράνη φτάνει στη μέγιστη δυνατή διαπερατότητά της.

Ένας άλλος παράγοντας που επιδρά στην διαπερατότητα της μεμβράνης είναι η θερμοκρασία. Έχει παρατηρηθεί ότι εφαρμόζοντας ίδια έντασης ηλεκτρικό πεδίο σε υψηλότερη θερμοκρασία απαιτείται μικρότερος χρόνος επεξεργασίας σε σχέση με χαμηλότερες θερμοκρασίες (Lebonka et al., 2005).

Όσον αφορά την επίδραση της διάρκειας των παλμών στη διαπερατότητα της κυτταρικής μεμβράνης των φυτικών ιστών, η έρευνα έχει δώσει αντικρουόμενα αποτελέσματα. Σε επεξεργασία που πραγματοποιήθηκε σε δείγματα μήλου και ζαχαρότευτλου, η διαπερατότητα των κυττάρων αυξήθηκε με την αύξηση της διάρκειας του παλμού (10-1.000 μ s) (De Vito et al., 2008). Όμως, δεν παρατηρήθηκε αύξηση στη διαπερατότητα σε ιστούς κρεμμυδιού σε αντίστοιχη αύξηση στη διάρκεια των παλμών (20-1.000 μ s) (Ersus et al., 2010).

2.5.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των παλμικών ηλεκτρικών πεδίων

Η μέθοδος των παλμικών ηλεκτρικών πεδίων παρουσιάζει κάποια σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους ενίσχυσης των φαινομένων μεταφοράς μάζας του νερού, οι οποίες αναφέρθηκαν ανωτέρω. Η αδρανοποίηση μικροοργανισμών που επιτυγχάνεται με την επεξεργασία με PEF δίνει την δυνατότητα παραγωγής προϊόντων με αυξημένο χρόνο ζωής, αφού το επεξεργασμένο τρόφιμο είναι μικροβιακά ασφαλές.

Επιπλέον, δεν απαιτούνται υψηλές θερμοκρασίες κατά την επεξεργασία των τροφίμων. Έτσι, ακόμα και τα θερμοευαίσθητα προϊόντα δεν επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό ως προς τα ποιοτικά και οργανοληπτικά τους χαρακτηριστικά. Πέρα από τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά, σημαντική είναι η επίδραση του PEF στη διατήρηση των θρεπτικών συστατικών των τροφίμων, όπως έχουν δείξει και διάφορες μελέτες. Συγκεκριμένα, οι Dermesonliouoglou et al. (2018) χρησιμοποιώντας τα παλμικά ηλεκτρικά πεδία ως προεπεξεργασία για την ξήρανση σε δείγματα goji berry παρατήρησαν μεγαλύτερη διατήρηση φαινολικών συστατικών σε σχέση με τα ανεπεξέργαστα.

Η χρήση των παλμικών ηλεκτρικών πεδίων συνήθως χρησιμοποιείται συνδυαστικά με άλλες μεθόδους όπως είναι η ξήρανση ή ωσμωτική αφυδάτωση. Η διάρρηξη των κυττάρων κατά την επεξεργασία με παλμικά ηλεκτρικά πεδία συμβάλλει στην αύξηση της απομάκρυνσης της υγρασίας κατά τη διεργασία της ξήρανσης, με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο ρυθμός ξήρανσης και να μειώνεται ο χρόνος επεξεργασίας. Άρα, δίνεται η δυνατότητα για οικονομικότερη και αποτελεσματικότερη χρήση της ενέργειας (Osae et al., 2020). Σύμφωνα με τους Donsi et al. (2010), η εφαρμογή των παλμικών ηλεκτρικών πεδίων ως προκατεργασία της ξήρανσης δειγμάτων πατάτας και πιπεριάς μείωσε το χρόνο αφυδάτωσης και αύξησε το ρυθμό ξήρανσης.

Η συνδυαστική δράση των παλμικών ηλεκτρικών πεδίων και της ωσμωτικής αφυδάτωσης περιορίζεται κυρίως σε δείγματα φρούτων και λαχανικών. Έχει αναφερθεί ότι τα παλμικά ηλεκτρικά πεδία προκάλεσαν μεγαλύτερη απώλεια υγρασίας κατά την ώσμωση και βελτίωσαν τη τελική ποιότητα των προϊόντων (Osae et al., 2020). Οι Amami et al. (2007) μελέτησαν την επίδραση παλμικών ηλεκτρικών πεδίων ως προκατεργασία της ωσμωτικής αφυδάτωσης σε καρότα. Η προεπεξεργασία στα δείγματα διευκόλυνε τη μεταφορά μάζας, με αύξηση μέχρι και 42% στην απώλεια υγρασίας σε σύγκριση με τα δείγματα αναφοράς.

Στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται διάφορες μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί για τη συνδυαστική δράση των παλμικών ηλεκτρικών πεδίων και της ωσμωτικής αφυδάτωσης σε φρούτα και λαχανικά.

Πίνακας 2.1 Μελέτες της συνδυαστικής δράσης του PEF και της ωσμωτικής αφυδάτωσης

Τρόφιμο	Συνθήκες ΠΗΠ	Συνθήκες ωσμωτικής αφυδάτωσης	Βιβλιογραφική αναφορά
Φράουλα	100,200 και 400 V/cm 100 pulses	Διάλυμα 40% σουκρόζης	Tylewicz et al., 2017
Blueberries	2 kV/cm 200 pulses/s	Σιρόπι 70% ζάχαρης με 0.025% NaCl	Yu et al., 2018
Ακτινίδιο	0.7, 1.1 και 1.8 kV/cm 250, 833 και 2250 p	Διάλυμα 30% γλυκερόλη, 20% μαλτοδεξτρίνη, 10% τρεχαλόζη, 1% NaCl	Dermesonlouoglou et al., 2016
Πατάτα	0.9 kV/cm 750 pulses	Διάλυμα 44.5% σουκρόζης	Amami et al., 2005

Κεφάλαιο 3: Υλικά και Μέθοδοι

3.1 Εισαγωγή

Τα φρέσκα φρούτα και λαχανικά, όπως αναφέρθηκε και στη βιβλιογραφική έρευνα ανωτέρω, διαδραματίζουν καίριο ρόλο στη διατροφή και υγεία του ανθρώπου χάρη στη θρεπτική τους αξία. Συγκεκριμένα, τα πράσινα φυλλώδη λαχανικά, όπως το σπανάκι, διαθέτουν σημαντικά διατροφικά οφέλη και έτσι αυξάνεται συνεχώς η τάση των καταναλωτών να αναζητούν προϊόντα τέτοιου είδους έτοιμα προς κατανάλωση, τα οποία να διατηρούν τη φρεσκάδα και τα διατροφικά τους χαρακτηριστικά.

Το σπανάκι αποτελεί ένα λαχανικό υψηλής διατροφικής αξίας που καλλιεργείται παγκοσμίως και είναι ιδιαίτερα συνηθισμένο προϊόν στη διατροφή κάθε οικογένειας. Η ένταξή του σε προϊόντα έτοιμα προς κατανάλωση, είτε μόνο του είτε σε συνδυασμό με άλλα λαχανικά, αποτελεί ένα δύσκολο εγχείρημα λόγω της υψηλής υγρασίας αυτών των προϊόντων που οδηγεί στη ταχεία ανάπτυξη μικροοργανισμών και την αλλοίωσή τους. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί κάποιες νέες μέθοδοι αφυδάτωσης, οι οποίες είναι ικανές να επεκτείνουν το χρόνο ζωής των προϊόντων αυτών και συγχρόνως να διατηρήσουν ή να βελτιώσουν τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά τους.

Η μείωση της υγρασίας του σπανακιού είναι ένας τρόπος για να μειωθεί ο ρυθμός ανάπτυξης των αλλοιογόνων και παθογόνων μικροοργανισμών. Αυτό είναι εφικτό μέσω της ωσμωτικής αφυδάτωσης, η οποία μειώνει την ενεργότητα του νερού, ενώ ταυτόχρονα ενισχύει τα ποιοτικά και διατροφικά χαρακτηριστικά του σπανακιού και αυξάνει τη διατηρησιμότητά του. Οι μελέτες πάνω στο σπανάκι αφορούν κυρίως την ξήρανσή του με συμβατικές μεθόδους, χωρίς να δίνεται έμφαση στη διατήρηση της φρεσκάδας και των οργανοληπτικών στοιχείων που χαρακτηρίζουν το φρέσκο-κομμένο σπανάκι. Έτσι, η μελέτη της ωσμωτικής αφυδάτωσης του σπανακιού τόσο ως προς τις παραμέτρους της διεργασίας όσο ως προς τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος σπανακιού χρήζει περαιτέρω έρευνας.

Τα παλμικά ηλεκτρικά πεδία είναι μια νέα και καινοτόμα μέθοδος ενίσχυσης των φαινομένων μεταφοράς του νερού, η οποία μελετάται και αναπτύσσεται συνεχώς από πολλούς ερευνητές για τη συνδυαστική της δράση με άλλες διεργασίες αφυδάτωσης. Ο συνδυασμός των παλμικών ηλεκτρικών πεδίων με την ωσμωτική αφυδάτωση έχει δείξει ελπιδοφόρα αποτελέσματα, αφού ταυτόχρονα με τη μείωση της υγρασίας με μικρές ενεργειακές απαιτήσεις επιτυγχάνεται και η διατήρηση ή βελτίωση διαφόρων χαρακτηριστικών όπως η υφή, το χρώμα, η γεύση και τα θρεπτικά συστατικά. Η εφαρμογή των παλμικών ηλεκτρικών πεδίων στον φυτικό ιστό του σπανακιού δεν έχει ερευνηθεί, ούτε η συνδυαστική δράση της ώσμωσης με τα ΠΗΠ.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της ωσμωτικής αφυδάτωσης σπανακιού σε συνδυασμό με τα παλμικά ηλεκτρικά πεδία για την παραγωγή προϊόντων σπανακιού με αυξημένη διατηρησιμότητα. Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν οι παράμετροι (συγκέντρωση ωσμωτικού διαλύματος, χρόνος επεξεργασίας) της διεργασίας της ωσμωτικής αφυδάτωσης και οι μεταβολές που προκαλεί στην υφή, το χρώμα και τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των δειγμάτων σπανακιού. Επίσης, αναζητήθηκαν οι κατάλληλες συνθήκες επεξεργασίας με παλμικά ηλεκτρικά πεδία καθώς και ο συνδυασμός των δυο μεθόδων. Τέλος, προσδιορίστηκε η διατηρησιμότητα σε διαφορετικές θερμοκρασίες αποθήκευσης σε ανεπεξέργαστα,

ωσμοαφυδατωμένα και ωσμοαφυδατωμένα με προκατεργασία με ΠΗΠ δείγματα σπανακιού στις κατάλληλες συνθήκες που βρέθηκαν από τα αρχικά πειράματα.

3.2 Πειραματικός Σχεδιασμός-Πειραματική Διαδικασία

Η πειραματική διαδικασία αυτής της διπλωματικής αποτελείται από μια σειρά πειραμάτων, τα οποία μπορούν να χωριστούν σε τέσσερα μέρη. Το πρώτο αφορά στη μελέτη της ωσμωτικής αφυδάτωσης του σπανακιού και την επιλογή των παραμέτρων της διεργασίας. Το δεύτερο μέρος αφορά στην ανεύρεση κατάλληλων συνθηκών επεξεργασίας με παλμικά ηλεκτρικά πεδία. Στο τρίτο μέρος μελετάται ο συνδυασμός της ωσμωτικής αφυδάτωσης με προκατεργασία με παλμικά ηλεκτρικά πεδία με στόχο της δημιουργία ενός αφυδατωμένου προϊόντος με βελτιωμένα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά. Στην τελευταία πειραματική ενότητα μελετήθηκε η διατηρησιμότητα των ανεπεξέργαστων, ωσμομένων και ωσμομένων με προκατεργασία με παλμικά ηλεκτρικά πεδία δειγμάτων σπανακιού σε διαφορετικές συνθήκες αποθήκευσης.

Για όλα τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε η ίδια πρώτη ύλη. Το σπανάκι προμηθεύεται την ίδια μέρα με τη διεξαγωγή του αντίστοιχου πειράματος, το οποίο αποτελεί προϊόν που διατίθεται στο εμπόριο. Σε κάθε παραλαβή νέας πρώτης ύλης πραγματοποιείται προσδιορισμός του μικροβιακού φορτίου, της ενεργότητας του νερού, του ξηρού βάρους, καθώς και ελέγχονται τα χαρακτηριστικά της υφής και του χρώματος.

3.2.1 Μελέτη της ωσμωτικής αφυδάτωσης του σπανακιού

Κατά την ωσμωτική αφυδάτωση του σπανακιού μελετήθηκαν τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας, η επίδραση της διεργασίας στην ενεργότητα του νερού, οι συνθήκες της διεργασίας (χρόνος επεξεργασίας, συγκέντρωση ωσμωτικού διαλύματος, συστατικά ωσμωτικού διαλύματος, αναλογία τροφίμου προς διάλυμα, θερμοκρασία) και οι μεταβολές στην υφή και το χρώμα των δειγμάτων.

Για την επιλογή των κατάλληλων συστατικών του ωσμωτικού διαλύματος πραγματοποιήθηκαν προκαταρκτικά πειράματα, τα οποία στόχευαν στη μείωση της ενεργότητας του νερού καθώς και στη διατήρηση των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών του σπανακιού όπως είναι η υφή, το χρώμα και η σκληρότητα. Με βάση προηγούμενες μελέτες που πραγματοποιήθηκαν, τα ωσμωτικά διαλύματα που επιλέχθηκαν περιελάμβαναν κυρίως γλυκερόλη, ξύδι, χλωριούχο νάτριο (NaCl), χλωριούχο ασβέστιο (CaCl_2), μεταδιθειώδες νάτριο ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) και νερό.

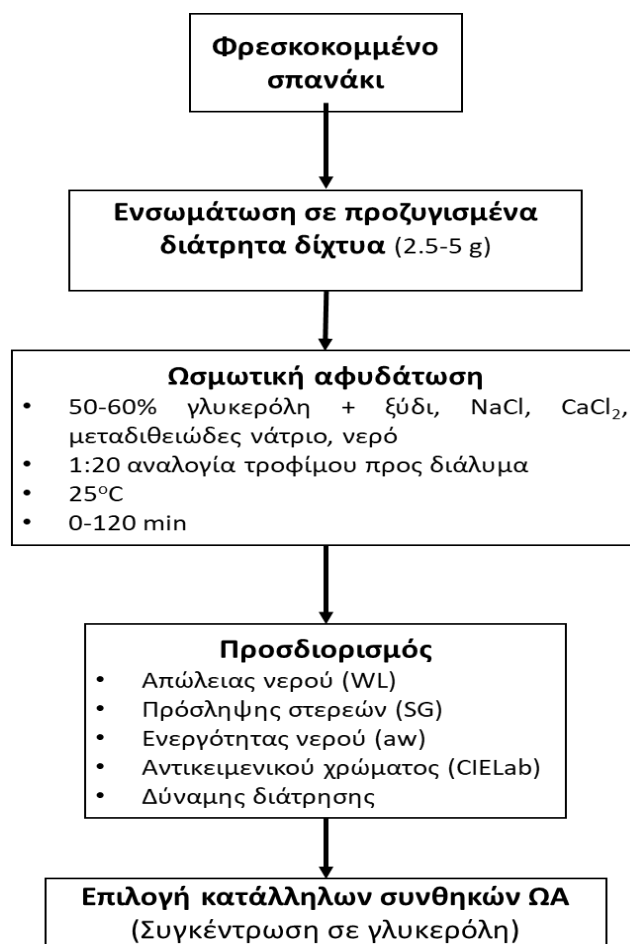
Η γλυκερόλη αποτελεί ένα συνηθισμένο συστατικό των ωσμωτικών διαλυμάτων, αφού εξυπηρετεί στη μείωση της ενεργότητας του νερού στο τρόφιμο, λόγω του σχετικά μικρού μοριακού βάρους ($\text{MW}=92.09 \text{ g/mol}$) και αποτρέπει την ανάπτυξη μικροοργανισμών κατά την αποθήκευση (Giannioti et al., 2001). Το χλωριούχο νάτριο χρησιμοποιείται για την αύξηση της απόδοσης της ώσμωσης καθώς και στην οργανοληπτική αποδοχή του τελικού προϊόντος εξισορροπώντας την γλυκύτητα που προσδίδεται από την γλυκερόλη. Το χλωριούχο ασβέστιο βοηθάει στη βελτίωση της υφής του τροφίμου και στη γεύση του φυτικού ιστού (Zaritsky 2008). Το μεταδιθειώδες νάτριο παρουσιάζει αντιοξειδωτική και αντιμικροβιακή δράση και βελτιώνει το χρόνο ζωής του προϊόντος. Το ξύδι χρησιμεύει στη συντήρηση του προϊόντος καθώς οδηγεί σε μείωση του pH και στη βελτίωση της γεύσης.

Η θερμοκρασία επεξεργασίας επιλέχθηκε η θερμοκρασία δωματίου (25°C), ενώ για την αναλογία τροφίμου προς διάλυμα επιλέχθηκε η αναλογία 1:20. Εξαιτίας της δυσκολίας της πλήρους εμβάπτισης των φύλλων του σπανακιού στο ωσμωτικό διάλυμα, ήταν απαραίτητη η υψηλή αναλογία ωσμωτικού διαλύματος προς μάζα τροφίμου. Ωστόσο, αποτελεσματική αφυδάτωση μπορεί να πραγματοποιηθεί και σε σημαντικά χαμηλότερες αναλογίες.

Οι δύο κύριες παράμετροι σχεδιασμού της ωσμωτικής αφυδάτωσης που ερευνήθηκαν ήταν η συγκέντρωση της γλυκερόλης στο διάλυμα, καθώς και ο χρόνος ώσμωσης του σπανακιού.

Για την επιλογή της συγκέντρωσης της γλυκερόλης πραγματοποιήθηκαν πειράματα ωσμωτικής αφυδάτωσης σε δύο διαφορετικές περιεκτικότητες σε γλυκερόλη. Μελετήθηκαν περιεκτικότητες γλυκερόλης 50% και 60%, ενώ τα υπόλοιπα συστατικά του ωσμωτικού διαλύματος παρέμειναν σταθερά (2.5% ξύδι, 1% χλωριούχο νάτριο, 1.5% χλωριούχο ασβέστιο, 0.05% μεταδιθειώδες νάτριο και 35% νερό).

Για τα πειράματα αυτά προζυγίστηκαν δείγματα σπανακιού βάρους 2.5-5 g, τα οποία τοποθετήθηκαν σε διάτρητα μικρά δίχτυα και έπειτα μέσα στο ωσμωτικό διάλυμα με κατάλληλη σήμανση για το διαχωρισμό τους και κατάλληλο τρόπο, ώστε να μη υπάρχει επίπλευση των δειγμάτων. Τα δείγματα λαμβάνονταν μέσα από το διάλυμα σε προεπιλεγμένα χρονικά διαστήματα από 20 έως 120 min (20, 40, 60 και 120 min) και σκουπίζονται ελαφρώς για να απομακρυνθεί η περίσσεια ποσότητα ωσμωτικού διαλύματος από την επιφάνεια. Τα δείγματα εξετάζονται ως προς την υφή και το χρώμα τους καθώς και ως προς την ενεργότητα νερού και την περιεχόμενη υγρασία. Η περιεχόμενη υγρασία των δειγμάτων προσδιορίστηκε σταθμικά, όπως περιγράφεται στην ενότητα 3.3.1. Τέλος, υπολογίζονται οι τιμές απώλειας νερού (Water loss) και πρόσληψης στερεών (Solid Gain), όπως περιγράφεται στην ενότητα 1.6.1.



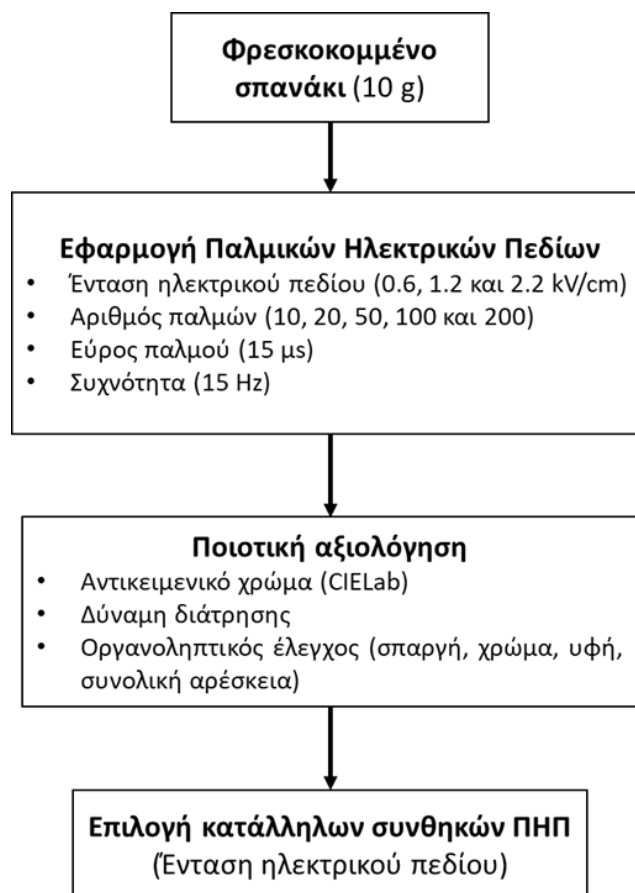
Διάγραμμα 3.1 Διάγραμμα ροής της πειραματικής διαδικασίας της μελέτης της ωσμωτικής αφυδάτωσης του σπανακιού

3.2.2 Μελέτη της εφαρμογής των παλμικών ηλεκτρικών πεδίων στο σπανάκι

Παρόλο που τα Παλμικά Ηλεκτρικά Πεδία έχουν μελετηθεί εκτενώς ως προκατεργασία της αφυδάτωσης πληθώρας φρούτων και λαχανικών, υπάρχουν περιορισμένες αναφορές στη βιβλιογραφία που να αφορούν στην επεξεργασία φυλλωδών λαχανικών. Ως πιθανός λόγος για την έλλειψη αυτή δίνεται η σχετικά ευπαθής δομή των φυλλωδών λαχανικών η οποία μπορεί να διαταραχθεί ακόμη και με μικρή καταπόνηση. Συνεπώς, είναι απαραίτητη η ανεύρεση κατάλληλων συνθηκών επεξεργασίας ΠΗΠ που να προκαλούν μεν ηλεκτροδιάτρηση αλλά διατηρώντας τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του ιστού όσο το δυνατόν πιο ανεπηρέαστα. Στην ενότητα αυτή μελετήθηκε η εφαρμογή ΠΗΠ σε σπανάκι.

Οι παράμετροι που μελετήθηκαν είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, που πρέπει να εφαρμοστεί, και ο αριθμός των παλμών. Για αυτό το λόγο, λαμβάνονται δείγματα σπανακιού, περίπου 10 g, τα οποία τοποθετούνται στο θάλαμο επεξεργασίας στη μονάδα πιλοτικής κλίμακας PEF (Elcrack-5kW, DIL, Quakenbrück, Γερμανία). Η μονάδα αποτελείται από μία γεννήτρια παλμών και ένα σύστημα χειρισμού υγρών που λειτουργεί αυτόνομα. Ο θάλαμος επεξεργασίας είναι σταθερού όγκου 400 ml και σταθερής απόσταση ηλεκτροδίων 80mm. Τα δείγματα του σπανακιού τοποθετούνται στο θάλαμο και προστίθεται νερό βρύσης μέχρι τελικό συνολικό όγκο 300 ml. Η επεξεργασία των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε σε τρεις διαφορετικές τιμές έντασης ηλεκτρικού πεδίου (0.6, 1.2 και 2.2 kV/cm). Η επιλογή της

έντασης του ηλεκτρικού πεδίου συνήθως συμβαίνει με την εξέταση του δείκτη κυτταρικής διάρρηξης, αλλά σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν τα χαρακτηριστικά υφής ως σημείο αναφοράς για να εξεταστεί αν επιτυγχάνεται ηλεκτροδιάτρηση. Επιπλέον, η επεξεργασία πραγματοποιείται σε διαφορετικό αριθμό παλμών (10, 20, 50, 100 και 200) που διέρχονται από το σπανάκι, ώστε να επιλεχθεί τελικά η κατάλληλη συνθήκη. Το εύρος του παλμού και η συχνότητα διατηρήθηκαν σταθερά και ίσα με 15 μ s και 20 Hz αντίστοιχα. Μετά την επεξεργασία με ΠΗΠ, τα δείγματα σπανακιού αναλύθηκαν ως προς τις μηχανικές τους ιδιότητες (αντοχή σε διάτρηση), το αντικειμενικό τους χρώμα (κλίμακα CIELab), αλλά και τα οργανοληπτικά τους χαρακτηριστικά, χρησιμοποιώντας τις μεθόδους που περιγράφονται αναλυτικά στις ενότητες 3.3.5, 3.3.4 και 3.3.9.



Διάγραμμα 3.2 Διάγραμμα ροής της πειραματικής διαδικασίας της μελέτης της εφαρμογής παλμικών ηλεκτρικών πεδίων στο σπανάκι

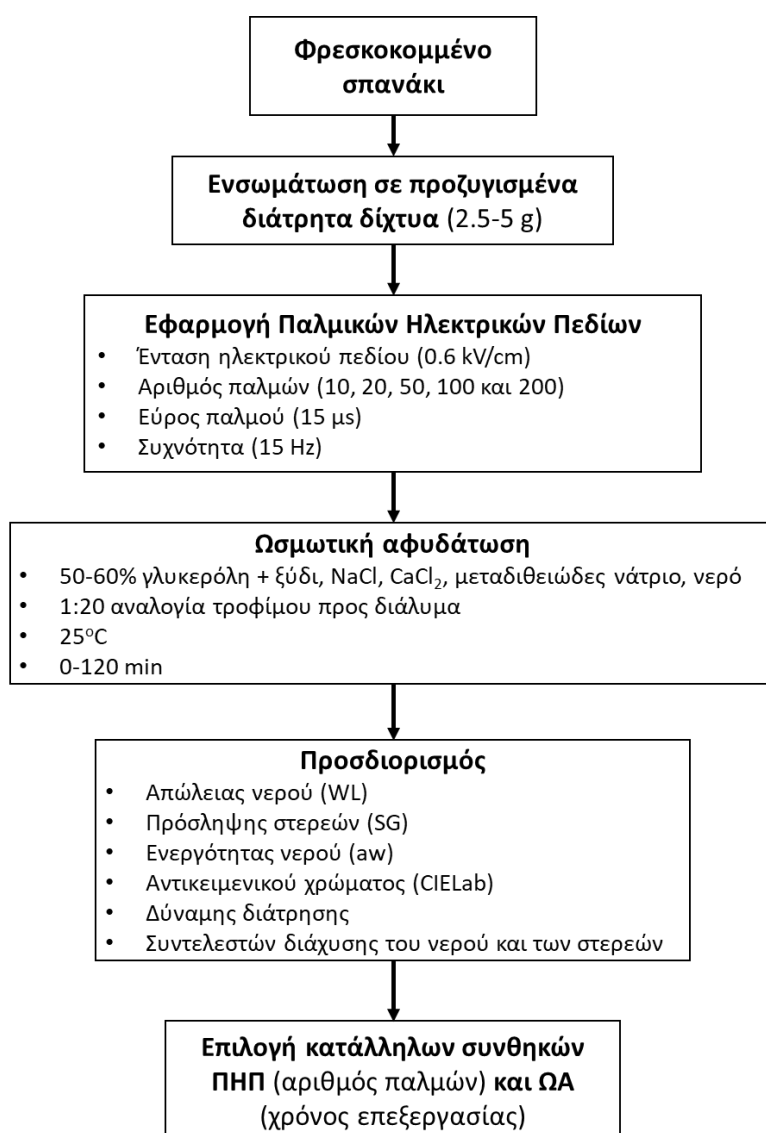
3.2.3 Μελέτη των ΠΗΠ ως προεπεξεργασία της ωσμωτικής αφυδάτωσης

Σε αυτή την πειραματική ενότητα μελετήθηκε η επίδραση των ΠΗΠ στην κινητική της ωσμωτικής αφυδάτωσης σπανακιού. Μελετήθηκε προεπεξεργασία ΠΗΠ σε ένταση ηλεκτρικού πεδίου 0.6 kV/cm και αριθμό παλμών 10-200.

Προζυγισμένα δείγματα σπανακιού 2.5-5 g τοποθετήθηκαν σε διάτρητα δίχτυα με κατάλληλη σήμανση για να διαφοροποιούνται. Αρχικά, τα δείγματα επεξεργάζονται με τη χρήση παλμικών ηλεκτρικών πεδίων στην ένταση ηλεκτρικού πεδίου που επιλέχθηκε από το προηγούμενο πείραμα (0.6 kV/cm), όπως αναφέρθηκε ανωτέρω, σε διαφορετικό αριθμό παλμών (10, 20, 50, 100 και 200 παλμούς). Έπειτα, τα επεξεργασμένα δείγματα

τοποθετούνται μέσα στα ωσμωτικά διαλύματα (50% και 60% γλυκερόλη) με κατάλληλο τρόπο και ήπια ανάδευση, ώστε να εμποδίζεται η επίπλευσή τους. Σε προεπιλεγμένα χρονικά διαστήματα (0, 20, 40, 60 και 120 min), τα δείγματα απομακρύνονται από το ωσμωτικό διάλυμα και σκουπίζονται ελαφρώς για να απομακρυνθεί το ωσμωτικό διάλυμα που έχει παραμείνει στην επιφάνειά τους.

Στη συνέχεια, τα επεξεργασμένα δείγματα αναλύονται ως προς την ενεργότητα νερού, το χρώμα, τη δύναμη διάτρησης και τη περιεχόμενη υγρασία. Η περιεχόμενη υγρασία υπολογίζεται, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, μέσω του ξηρού βάρους. Τέλος, υπολογίζονται οι τιμές της απώλειας νερού (Water Loss) και της πρόσληψης στερεών (Solid Gain).



Διάγραμμα 3.3 Διάγραμμα ροής της πειραματικής διαδικασίας της μελέτης των ΠΗΠ ως προεπεξεργασία της ωσμωτικής αφυδάτωσης σπανακιού

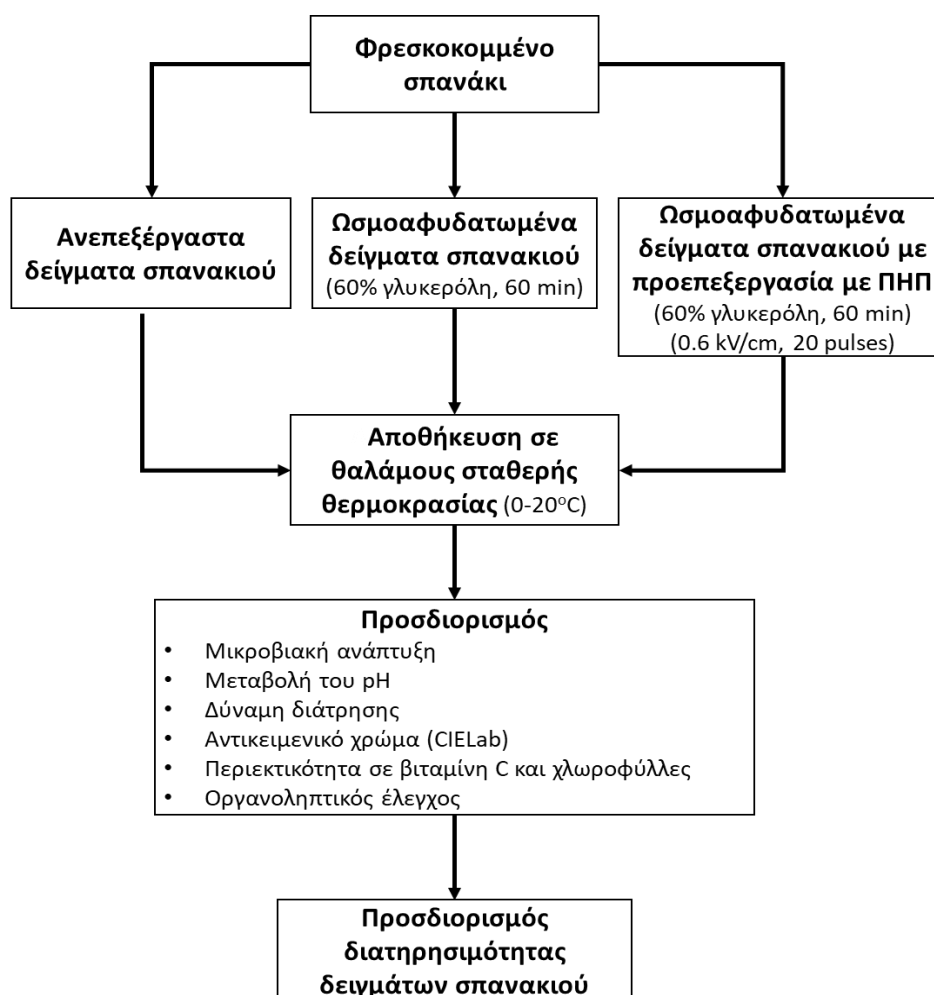
3.2.4 Μελέτη της διατηρησιμότητας ανεπεξέργαστων, ωσμοαφυδατωμένων και ωσμοαφυδατωμένων με προεπεξεργασία με ΠΗΠ δειγμάτων σπανακιού

Στην πειραματική αυτή ενότητα, μελετήθηκε η διατηρησιμότητα του ανεπεξέργαστου και του επεξεργασμένου με ώσμωση και με ΠΗΠ-ώσμωση σπανακιού σε διαφορετικές θερμοκρασίες

αποθήκευσης. Πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε δείγματα σπανακιού χωρίς επεξεργασία και ωσμοαφυδατωμένα με ή χωρίς προκατεργασία με παλμικά ηλεκτρικά πεδία στις κατάλληλες συνθήκες επεξεργασίας που επιλέχθηκαν από τα προηγούμενα πειράματα.

Μετά την επεξεργασία τους, 20 g δείγματος συσκευάστηκε σε συσκευασίες από πολυστρωματικό υλικό πολυπροπυλενίου-πολυαιθυλενίου διαστάσεων 10x15 cm. Οι συσκευασίες τοποθετήθηκαν σε θαλάμους σταθερής θερμοκρασίας (Sanyo MIR 153, Sanyo Electric, Ora-Gun, Gunna, Japan). Μελετήθηκαν 4 διαφορετικές θερμοκρασίες: 0, 4, 5, 8, 10, 12 και 20°C.

Για κάθε θερμοκρασία αποθήκευσης, λαμβάνονταν δείγματα ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Σε κάθε δείγμα προσδιορίστηκαν το μικροβιακό φορτίο (ολικό μικροβιακό φορτίο, ζύμες και μύκητες, ψευδομονάδες και εντεροβακτήρια), το pH, η αντοχή σε διάτρηση, το αντικειμενικό χρώμα, ο η περιεκτικότητα σε ασκορβικό οξύ, η περιεκτικότητα σε χλωροφύλλες και τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά, όπως η σπαργή, η ένταση δυσάρεστης οσμής (off-flavors), η γεύση, το χρώμα, η υφή και η συνολική αρέσκεια.



Διάγραμμα 3.4 Διάγραμμα ροής της πειραματικής διαδικασίας της μελέτης της διατηρησιμότητας των ανεπεξέργαστων, των ωσμοαφυδατωμένων και των ωσμοαφυδατωμένων με προεπεξεργασία με ΠΗΠ δειγμάτων σπανακιού

3.3 Αναλυτικές Μέθοδοι

3.3.1 Προσδιορισμός στερεού υπολείμματος και περιεχόμενης υγρασίας

Για τη μέτρηση του περιεχόμενου νερού και των ολικών στερεών, τα δείγματα ζυγίζονται πριν και μετά την επεξεργασία τους. Στη συνέχεια, ξηραίνονται σε κλίβανο σταθερής θερμοκρασίας 110°C (WTB BINDER 7200, Type C53, Tuttlingen, Germany) για 24 ώρες και ζυγίζονται εκ νέου.

3.3.2 Προσδιορισμός ενεργότητας νερού

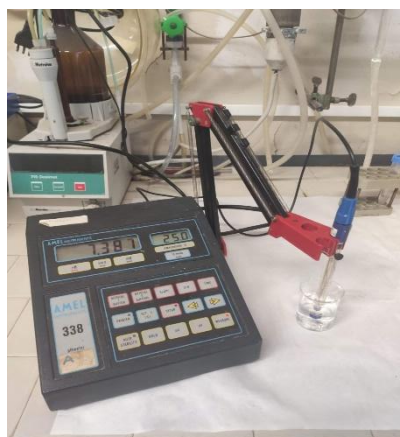
Για τον προσδιορισμό της ενεργότητας νερού στα δείγματα χρησιμοποιείται η συσκευή Lab Touch-Water Activity Meter (Novasina, Lachen, Switzerland). Για να πραγματοποιηθεί η μέτρηση, μικρή ποσότητα δείγματος τοποθετείται σε ειδικό πλαστικό κύπελλο και εισάγεται στον κατάλληλο χώρο εντός της συσκευής. Αφού η σχετική υγρασία στον θάλαμο της μέτρησης ισορροπήσει, το όργανο δίνει την τιμή της ενεργότητας νερού με ακρίβεια τριών δεκαδικών ψηφίων. Ο προσδιορισμός της ενεργότητας νερού πραγματοποιήθηκε σε σταθερή θερμοκρασία 25°C. Η συσκευή βαθμονομήθηκε πριν από κάθε σειρά μετρήσεων με τη χρήση προτύπων διαλυμάτων κορεσμένων αλάτων σταθερής ενεργότητας νερού.



Σχήμα 3.1 Συσκευή μέτρησης ενεργότητας νερού Lab Touch-Water Activity Meter

3.3.3 Μέτρηση pH

Το pH μετρήθηκε με τη χρήση ηλεκτρονικού πεχαμέτρου (pH-meter 338, AMEL Instruments, Milan, Italy). Η μέτρηση πραγματοποιείται τοποθετώντας το ηλεκτρόδιο της συσκευής μέσα στο ομογενοποιημένο με ορό Ringer δείγμα (αναλογία στερεού υγρού 1:10), ακολούθως της μικροβιολογικής ανάλυσης.



Σχήμα 3.2 Συσκευή μέτρηση pH pH-meter 338, AMEL Instruments

3.3.4 Μέτρηση αντικειμενικού χρώματος

Οι μετρήσεις του χρώματος των δειγμάτων πραγματοποιήθηκαν με ψηφιακό χρωματόμετρο Eye One (GretagMacbeth) συνδεδεμένο με ηλεκτρονικό υπολογιστή. Οι χρωματικοί δείκτες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι L, a και b, στην κλίμακα CIE Lab. Οι μετρήσεις γίνονται σε αντιπροσωπευτικό σημείο πάνω στην επιφάνεια του δείγματος και επαναλαμβάνονται τρεις ή τέσσερις φορές ανά δείγμα. Το L εκφράζει τη φωτεινότητα του δείγματος, το a την ερυθρότητα, ενώ το b είναι η παράμετρος του κίτρινου χρώματος. Η παράμετρος a όταν παίρνει αρνητικές τιμές προσδιορίζει πράσινο χρώμα, ενώ στις θετικές προσδιορίζει το κόκκινο χρώμα. Στην περίπτωση της παραμέτρου b παίρνοντας αρνητικές τιμές προσδιορίζει το μπλε χρώμα, ενώ με θετικές τιμές προσδιορίζει το κίτρινο χρώμα.

Οι δείκτες a και b χρησιμοποιούνται για να υπολογιστούν οι παράμετροι Hue angle (h), που αφορά την απόχρωση του χρώματος, και Chroma (C) που σχετίζεται με την ένταση του χρώματος. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής:

$$h_{ab} = \arctan\left(\frac{b}{a}\right) \quad (3.1)$$

και

$$C_{ab} = \sqrt{(a)^2 + (b)^2} \quad (3.2)$$



Σχήμα 3.3 Χρωματόμετρο Eye One, GretagMacbeth

3.3.5 Προσδιορισμός δύναμης διάτρησης

Για την ανάλυση υφής χρησιμοποιήθηκε ο αναλυτής υφής TA.XT2i Stable Micro Systems, ο οποίος συνδέεται με ηλεκτρονικό υπολογιστή που διαθέτει το κατάλληλο λογισμικό. Για κάθε δείγμα πραγματοποιείται μέτρηση με κατάλληλο στέλεχος σε αντιπροσωπευτικό σημείο του δείγματος σπανακιού. Για τη μέτρηση της αντοχής σε διάτρηση χρησιμοποιείται το στέλεχος Film Support Rig (HDP/FSR), το οποίο αποτελείται από δύο πλάκες που φέρουν σπή και ένα στέλεχος διακόρευσης. Για τη μέτρηση, ένα φύλλο σπανακιού στερεώθηκε ανάμεσα στις διάτρητες πλάκες και διατρήθηκε από το κατερχόμενο στέλεχος του αναλυτή. Η παράμετρος που ρυθμίστηκε ήταν η ταχύτητα καθόδου του στελέχους ίση με 1 mm/sec. Ως δύναμη διάτρησης λαμβάνεται η μέγιστη δύναμη που καταγράφεται κατά την ανάλυση.



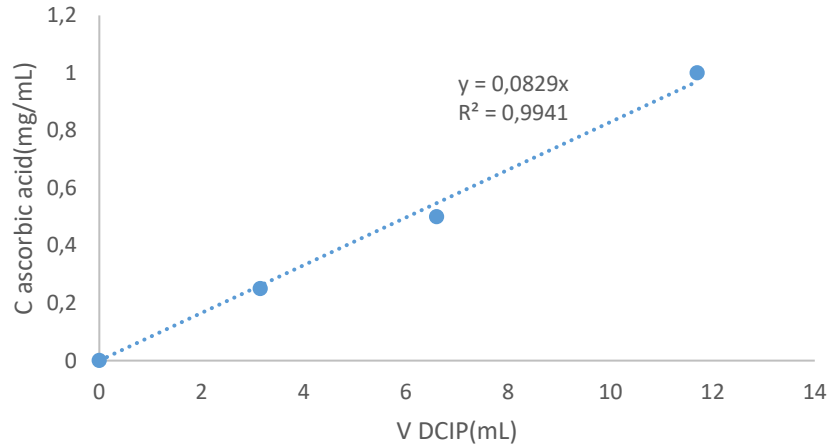
Σχήμα 3.4 Στέλεχος ανάλυσης υφής Film Support Rig (HDP/FSR)



Σχήμα 3.5 Αναλυτής υφής TA XT2i Stable Micro Systems

3.3.6 Προσδιορισμός ασκορβικού οξέος (βιταμίνη C)

Για τον προσδιορισμό του ασκορβικού οξέος Αρχικά, λαμβάνονται 3 g επεξεργασμένου δείγματος σπανακιού και μαζί με 6 g απιονισμένου νερού ομογενοποιούνται με κατάλληλο εργαλείο. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι η αναλυτική τεχνική της τιτλοδότησης. Αρχικά παρασκευάστηκε ρυθμιστικό διάλυμα, το οποίο αποτελείται από 15 g μεταφωσφορικού οξέος (HPO_3) και 40 ml οξικού οξέος ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$) διαλυμένα με απιονισμένο νερό σε τελικό όγκο 500 ml. Ο δείκτης και τιτλοδότης της τεχνικής είναι ένα διάλυμα από 100 mg DCIP (2,6-Dichlorophenolindophenol) και 84mg όξινο ανθρακικό νάτριο (NaHCO_3) και απιονισμένο νερό με τελικό συνολικό όγκο 200 ml. Η ογκομέτρηση πραγματοποιείται, χρησιμοποιώντας ως τιτλοδότη το διάλυμα DCIP, σε 2g ομογενοποιημένου μίγματος και 5 ml ρυθμιστικού διαλύματος μέχρι το χρώμα να μετατραπεί σε απόχρωση του ροζ. Για τον υπολογισμό του ασκορβικού οξέος χρησιμοποιείται η τιμή του αποτελέσματος της τιτλοδότησης σε συνδυασμό με την καμπύλη αναφοράς που φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα. Η καμπύλη αναφοράς προέκυψε από τιτλοδότηση διαλύματος ασκορβικού οξέος γνωστής συγκέντρωσης.



Διάγραμμα 3.5 Συγκέντρωση ασκορβικού οξέος (mg/ml) συναρτήσει της ποσότητας DCIP(ml)

3.3.7 Προσδιορισμός χλωροφυλλών

Για τον προσδιορισμό των χλωροφυλλών και των καροτενοειδών στα δείγματα αρχικά παρασκευάστηκε διάλυμα ακετόνης-εξανίου με αναλογία 4:6. Ποσότητα 3 g από το δείγμα μαζί με 6 g απιονισμένο νερό ομογενοποιούνται με κατάλληλο εργαλείο-ομογενοποιητή. Λαμβάνεται 1 g από το ομογενοποιημένο δείγμα και 10 ml από το διαλύτη που φτιάχτηκε στην αρχή. Το μίγμα ανακινείται με τη βοήθεια Vortex, ώστε να δημιουργηθούν δύο φάσεις. Το υπερκείμενο υγρό αποτελεί την οργανική φάση από την οποία λαμβάνεται 1 ml και μαζί με 1 ml διαλύτη τοποθετούνται σε κυψελίδα, ώστε να μετρηθεί η απορρόφηση στα εξής μήκη κύματος: 453, 505, 645 και 663nm. Χρησιμοποιώντας τις τιμές απορρόφησης σε συνδυασμό με τις παρακάτω εξισώσεις υπολογίζονται οι ποσότητες των χλωροφυλλών και των καροτενοειδών σε mg/100 ml εκχυλίσματος:

$$\text{Χλωροφύλλη A: } C_{CA} = 0.999 \cdot A_{663} - 0.0989 \cdot A_{645} \quad (3.3)$$

$$\text{Χλωροφύλλη B: } C_{CB} = -0.328 \cdot A_{663} + 1.77 \cdot A_{645} \quad (3.4)$$

$$\text{Λυκοπένιο: } C_{lyc} = -0.0458 \cdot A_{663} + 0.204 \cdot A_{645} + 0.372 \cdot A_{505} - 0.0806 \cdot A_{453} \quad (3.5)$$

$$\text{β-καροτένιο: } C_{car} = 0.216 \cdot A_{663} - 1.22 \cdot A_{645} + 0.372 \cdot A_{505} + 0.452 \cdot A_{453} \quad (3.6)$$

3.3.8 Προσδιορισμός μικροβιακού φορτίου

Για τον προσδιορισμό του μικροβιακού φορτίου, ακολουθείται η μέθοδος ανάπτυξης σε τρυβλία. Υπάρχουν διάφορα στάδια που πρέπει να αναφερθούν όπως είναι η αποστείρωση του εξοπλισμού και των υποστρωμάτων, η δειγματοληψία, η προετοιμασία των αραιώσεων, ο εμβολιασμός των τρυβλίων και η καταμέτρηση των αποικιών. Στην συγκεκριμένη περίπτωση προσδιορίζονται το ολικό μικροβιακό φορτίο με το μη επιλεκτικό υπόστρωμα Plate Count Agar (PCA), οι ψευδομονάδες με το επιλεκτικό υπόστρωμα Certimide Agar (CFC),

οι ζύμες και οι μύκητες με το επιλεκτικό υπόστρωμα (RBC) και τα εντεροβακτήρια με το επιλεκτικό υπόστρωμα Violet Red Bile Glucose Agar (VRBG). Η κάθε διαδικασία αναλύεται παρακάτω:

- Αποστείρωση εξοπλισμού και υποστρωμάτων

Για να γίνουν με το σωστό τρόπο οι μικροβιακές αναλύσεις πρέπει να αποστειρωθεί ο εξοπλισμός και ο χώρος εργασίας. Η αποστείρωση πραγματοποιείται σε αυτόκλειστο της εταιρείας Sanyo σε θερμοκρασία 121°C. Στην αποστείρωση τοποθετούνται τα υποστρώματα που πρόκειται να απλωθούν στα τρυβλία, tips δύο μεγεθών, σιφώνιο με ισοτονικό διάλυμα Ringer καθώς και γυάλινα δοχεία με ισοτονικό διάλυμα Ringer. Τα υποστρώματα αφήνονται μέχρι να μειωθεί η θερμοκρασία τους χωρίς να στερεοποιηθούν και απλώνονται στα τρυβλία.

- Δειγματοληψία

Η δειγματοληψία πραγματοποιείται με ζύγιση σε αποστειρωμένη πλαστική σακούλα 10g ή 20g δείγματος σπανακιού αναλόγως το πείραμα. Χρησιμοποιείται λαβίδα, η οποία καίγεται σε φλόγα για να αποστειρωθούν. Στη σακούλα τοποθετείται διάλυμα Ringer σε ποσότητα 9 φορές το βάρος του δείγματος για να προκύψει αναλογία 1:10. Η σακούλα αποτελεί και την πρώτη αραιώση. Στη συνέχεια, η σακούλα τοποθετείται για ομογενοποίηση για 1 min περίπου στη συσκευή Stomacher.

- Προετοιμασία διαδοχικών αραιώσεων

Διαδοχικές αραιώσεις πραγματοποιούνται για να είναι δυνατή η μέτρηση αποικιών στα τρυβλία. Λόγω της μικροβιακής ανάπτυξης, σχεδιάζεται αντίστοιχο ημερολογιακό πλάνο για τη μέρα δειγματοληψίας και τις αραιώσεις που πρέπει να γίνουν. Για την επίτευξη των αραιώσεων χρησιμοποιούνται αποστειρωμένοι δοκιμαστικοί σωλήνες, οι οποίοι γεμίζονται με 9ml διαλύματος Ringer με το αποστειρωμένο σιφώνιο που αναφέρθηκε προηγουμένως. Η πρώτη αραιώση γίνεται μέσα στη σακούλα με το ομογενοποιημένο δείγμα και το διάλυμα Ringer. Για την επόμενη διαδοχική αραιώση, λαμβάνεται 1ml από τη σακούλα και τοποθετείται σε σωλήνα, ο οποίος ανακινείται για να υπάρξει ομοιογένεια στο μίγμα. Αυτή αποτελεί τη δεύτερη αραιώση. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται με αντίστοιχο τρόπο, αλλά αυτή τη φορά λαμβάνεται 1ml από το δοκιμαστικό σωλήνα και τοποθετείται σε άλλο σωλήνα με 9ml Ringer, ώστε έτσι να προκύψει η τρίτη αραιώση. Τα βήματα αυτά επαναλαμβάνονται μέχρι να επιτευχθεί η ζητούμενη αραιώση.

- Επίστρωση υποστρωμάτων και εμβολιασμός δειγμάτων

Για την επίστρωση υποστρωμάτων υπάρχουν κάποιες διαφοροποιήσεις στη διαδικασία ανάλογα με τις καλλιέργειες που αναπτύσσονται σε αερόβιες και αναερόβιες συνθήκες. Για τις αερόβιες καλλιέργειες, απλώνεται σε τρυβλία το αποστειρωμένο υπόστρωμα, περίπου 10-15ml ανά τρυβλίο, και αφήνεται να στερεοποιηθεί. Τα τρυβλία με τα υποστρώματα μπορούν να αποθηκευτούν για κάποιο χρονικό διάστημα σε ψυγείο. Στη συνέχεια, σημειώνεται πάνω στα τρυβλία τα χαρακτηριστικά του δείγματος για να είναι εφικτός ο διαχωρισμός τους. Σε κάθε τρυβλίο τοποθετείται ποσότητα 100μl από το δείγμα και απλώνεται σε όλη την επιφάνεια με τη χρήση κατάλληλης αποστειρωμένης ράβδου.

Για τις αναερόβιες καλλιέργειες, όπως είναι τα εντεροβακτήρια, η διαδικασία διαφοροποιείται, αφού σε άδειο αποστειρωμένο τρυβλίο εισάγεται ποσότητα 1ml δείγματος και έπειτα προστίθεται το υπόστρωμα. Το VRBG υπόστρωμα κατασκευάζεται την ίδια στιγμή

με τη δειγματοληψία και αφήνεται να ψυχθεί κάτω από τους 45°C για να μην θανατωθούν οι μικροοργανισμοί, αλλά όχι πολύ πιο χαμηλά γιατί μπορεί να στερεοποιηθεί στην κωνική φιάλη. Στο τρυβλίο με το δείγμα προστίθεται ορισμένη ποσότητα από το υπόστρωμα VRBG, ανακινείται ελαφρώς και αφήνεται να στερεοποιηθεί. Έπειτα, ακολουθεί και δεύτερη επίστρωση και αφήνεται πάλι να στερεοποιηθεί. Η δεύτερη επίστρωση πραγματοποιείται για να επικρατήσουν αναερόβιες συνθήκες για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών.

- Επώαση και καταμέτρηση αποικιών

Αφού γίνει η επίστρωση των τρυβλίων, πραγματοποιείται η επώαση τους στους 30°C για όλα τα υποστρώματα, εκτός από το υπόστρωμα VRBG που γίνεται στου 37.5°C. Το ολικό μικροβιακό φορτίο επώαζεται για 3 ημέρες, οι ψευδομονάδες για 2 ημέρες, τα εντεροβακτήρια για 1 ημέρα και οι ζύμες και μύκητες για 3-5 ημέρες. Όταν ολοκληρωθεί η επώαση, καταμετρώνται οι αποικίες που έχουν αναπτυχθεί. Τέλος, ο αριθμός των αποικιών ανάγεται στην αραίωση 0, ώστε να προσδιοριστεί το μικροβιακό φορτίο ανά g δείγματος.

3.3.9 Οργανοληπτική αξιολόγηση

Η οργανοληπτική αξιολόγηση των τελικών και ενδιάμεσων προϊόντων σπανακιού πραγματοποιήθηκε από 3 έως 5 δοκιμαστές με βαθμολογία σε κλίμακα αρέσκειας από 1 έως 9, με 9 να θεωρείται το άριστο. Κάθε δοκιμαστής έλαβε ένα έντυπο οργανοληπτικού ελέγχου με τα χαρακτηριστικά που πρέπει να αξιολογηθούν. Τα χαρακτηριστικά στα οποία εξετάστηκαν τα δείγματα σπανακιού ήταν η ένταση του πράσινου χρώματος, η ένταση φωτεινότητας (σκούρο 1/ ανοιχτό 9), η σπαργή, η ελαστικότητα στο σχίσιμο, η αντοχή στο σχίσιμο, η ένταση της ανεπιθύμητης οσμής, η γεύση και η συνολική αρέσκεια. Το όριο αποδοχής του προϊόντος κυμαίνεται από 4 έως 5 αναλόγως το χαρακτηριστικό που εξετάζεται.

3.4 Επεξεργασία αποτελεσμάτων

3.4.1 Απώλεια νερού και πρόσληψη στερεών

Κατά την ωσμωτική αφυδάτωση προσδιορίζονται η απώλεια νερού (Water Loss, WL), που δείχνει την ποσότητα νερού που απομακρύνεται από το τρόφιμο προς το ωσμωτικό διάλυμα, και η πρόσληψη στερεών (Solid Gain, SG), η οποία αποτυπώνει τη ποσότητα στερεών που εισέρχονται στο τρόφιμο από το διάλυμα. Οι δείκτες WL και SG υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$WL = \frac{(M_o - m_o) - (M - m)}{m_o} \quad (3.7)$$

$$SG = \frac{(m - m_o)}{m_o} \quad (3.8)$$

όπου M_o το αρχικό βάρος του δείγματος πριν την ωσμωτική αφυδάτωση, M το βάρος μετά την ώσμωση, m το ξηρό βάρος του δείγματος μετά την ώσμωση και m_o το αρχικό ξηρό βάρος χωρίς την ώσμωση.

3.4.2 Υπολογισμός συντελεστών διάχυσης κατά την ωσμωτική αφυδάτωση

Για να περιγραφεί μαθηματικά η ωσμωτική αφυδάτωση, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τους δείκτες απώλειας νερού και πρόσληψης στερεών προσαρμόζονται στον 2^ο νόμο του Fick, ο οποίος αφορά τη διάχυση στη μη μόνιμη κατάσταση. Η λύση της εξίσωσης εξαρτάται από τη γεωμετρία του τροφίμου. Η δομή του σπανακιού μπορεί να προσεγγιστεί ως άπειρη πλάκα της οποίας το πάχος είναι σημαντικά μικρότερο από την επιφάνεια, με τη μεταφορά νερού να πραγματοποιείται από τις δύο κύριες πλευρές. Για τη γεωμετρία της άπειρης πλάκας γίνονται οι εξής παραδοχές: α) ομοιόμορφη κατανομή αρχικής υγρασίας, β) αμελητέα εξωτερική αντίσταση σε μεταφορά μάζας, γ) μη συρρίκνωση κατά τη διάρκεια της ωσμωτικής αφυδάτωσης. Στην περίπτωση της γεωμετρίας πλάκας η διάχυση περιγράφεται από την εξής εξίσωση:

$$\frac{dc}{dt} = D \frac{d^2c}{dz^2} \quad (3.9)$$

όπου C η συγκέντρωση, D ο συντελεστής διάχυσης, z η χαρακτηριστική απόσταση διάχυσης και t ο χρόνος.

Επίσης, λαμβάνονται υπόψιν οι εξής αρχικές οριακές συνθήκες:

για t=0 τότε C=C₀, -1<x<1

για t>0 τότε C=C₁, x=1

όπου C η συγκέντρωση των συστατικών θεωρώντας ένα καλά αναμειγμένο ωσμωτικό διάλυμα.

Με αυτές τις οριακές συνθήκες οι παράμετροι της απώλειας υγρασίας και της πρόσληψης στερεών αναλύονται ως εξής:

$$M = \frac{w_t - w_\infty}{w_0 - w_\infty} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[- \left(n + \frac{1}{2} \right)^2 * \pi^2 * F_{ow} \right] \quad (3.10)$$

και

$$S = \frac{s_t - s_\infty}{s_0 - s_\infty} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[- \left(n + \frac{1}{2} \right)^2 * \pi^2 * F_{os} \right] \quad (3.11)$$

όπου w και s η περιεχόμενη υγρασία και τα περιεχόμενα στερεά συστατικά αντίστοιχα, οι δείκτες 0, t και ∞ αντιπροσωπεύουν τις συγκεντρώσεις αρχικά, σε τυχαία χρονική στιγμή και στην ισορροπία αντίστοιχα, F_{ow} και F_{os} είναι οι αριθμοί Fourier για τη διάχυση της υγρασίας και των στερεών αντίστοιχα. Οι αριθμοί Fourier δίνονται από τις εξισώσεις:

$$F_{ow} = \frac{D_{ew}}{l^2} t \quad (3.12)$$

και

$$F_{os} = \frac{D_{es}}{l^2} t \quad (3.13)$$

όπου D_{ew} και D_{es} είναι οι δραστηριοί συντελεστές διάχυσης της υγρασίας και των στερεών αντίστοιχα, t ο χρόνος εμφάνισης του σπανακιού στο ωσμωτικό διάλυμα και l το μισό του πάχους του τροφίμου.

Οι τιμές F_{ow} και F_{os} υπολογίζονται ως συνάρτηση των τιμών M και S και παριστάνονται γραφικά ως προς τις αντίστοιχες τιμές t , λαμβάνοντας υπόψιν μέχρι τον πέμπτο όρο. Οι συντελεστές D_{ew} και D_{es} υπολογίζονται με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.

3.4.3 Κινητικά μοντέλα υποβάθμισης του σπανακιού

Για τον κάθε ποιοτικό δείκτη αναζητείται η κατάλληλη τάξη της αντίδρασης που περιγράφει την ποιοτική αλλοίωση. Έπειτα, προσδιορίζονται οι τιμές της σταθεράς του ρυθμού ποιοτικής αλλοίωσης σε όλες τις θερμοκρασίες. Για να συνδεθεί η σταθερά του ρυθμού με τη θερμοκρασία χρησιμοποιείται η σχέση Arrhenius:

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (3.14)$$

η οποία γράφεται και με αναφορά σε κάποια θερμοκρασία ως εξής:

$$k = k_{ref} \left[-\frac{E_a}{RT} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \quad (3.15)$$

Όπου k_0 ο προεκθετικός παράγοντας, k_{ref} η σταθερά του ρυθμού στη θερμοκρασία αναφοράς T_{ref} , E_a η ενέργεια ενεργοποίησης (kJ/mol) και R η παγκόσμια σταθερά των αερίων ίση με 8.314 J/mol/K.

Επιπλέον, χρησιμοποιείται και η λογαριθμημένη μορφή της εξίσωσης 3.9:

$$\ln \ln(k) = \ln \ln(k_{ref}) - \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \quad (3.16)$$

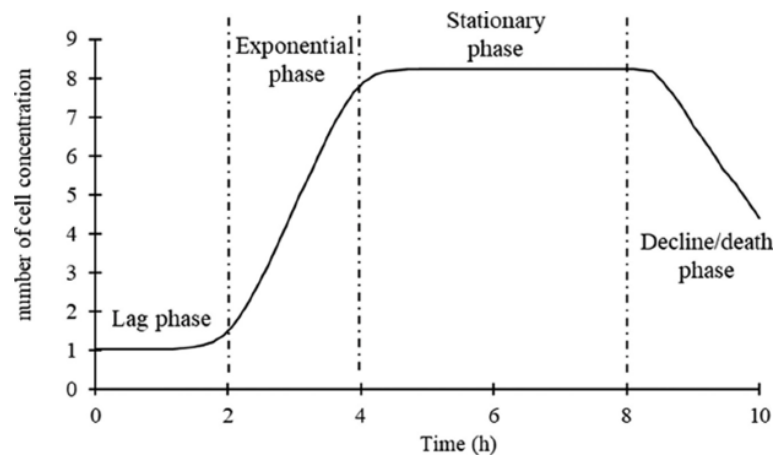
Όσον αφορά την μικροβιολογική ανάλυση ακολουθείται το μοντέλο των Baranyi και Roberts για τη μικροβιακή ανάπτυξη για το οποίο δίνεται μια τυπική καμπύλη ανάπτυξης μικροβίων παρακάτω. Η προσαρμογή των μετρήσεων γίνονται με τη χρήση του προγράμματος DMfit software (IFR, Institute of Food Research, Reading, UK), το οποίο προσδιορίζει τις καμπύλες ανάπτυξης των μικροοργανισμών και τις σταθερές k του ρυθμού ανάπτυξης. Παρακάτω δίνεται η εξίσωση Baranyi για σταθερές θερμοκρασιακές συνθήκες:

$$\ln(N(t)) = \ln(N_0) + \mu_{max} * A(t) - \ln\left[1 + \frac{\exp(\mu_{max} * A(t)) - 1}{\exp(\ln(N_{max}) - \ln(N_0))}\right] \quad (3.17)$$

όπου

$$A(t) = t + \frac{1}{\mu_{max}} * \ln[\exp(-\mu_{max} * t) + \exp(-\mu_{max} * \lambda) - \exp(-\mu_{max} * (t + \lambda))] \quad (3.18)$$

όπου $N(t)$ ο πληθυσμός των μικροοργανισμών τη χρονική στιγμή t σε (CFU)/ml, N_0 ο πληθυσμός των μικροοργανισμών στο χρόνο μηδέν σε (CFU)/ml, μ_{max} ο μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης σε log(CFU/ml)/h και λ η χρονική διάρκεια της φάσης υστέρησης σε h.



Διάγραμμα 3.6 Τυπική καμπύλη μικροβιακής ανάπτυξης

Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα και Συζήτηση

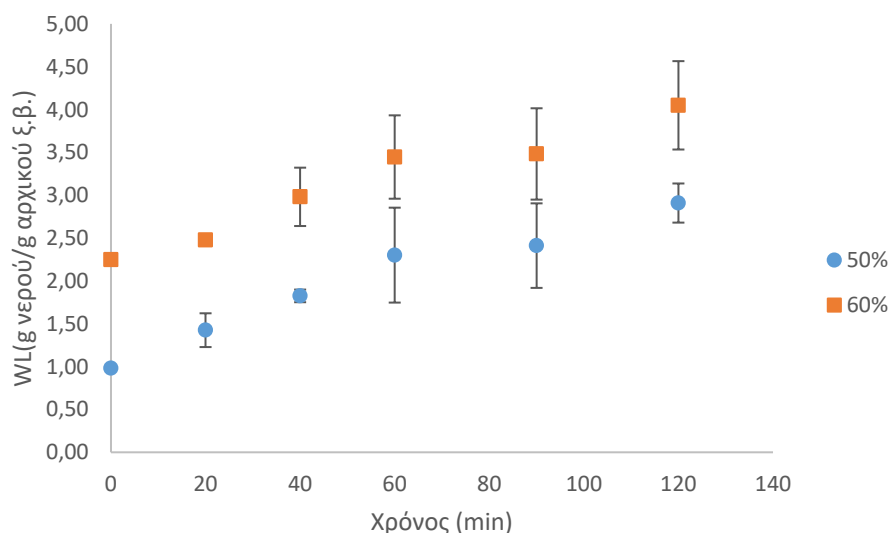
4.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης των θεματικών ενοτήτων που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 3 της εργασίας. Επιδιώκεται να εξαχθούν συμπεράσματα για τις καταλληλότερες συνθήκες επεξεργασίας των δειγμάτων σπανακιού με ωσμωτική αφυδάτωση και εφαρμογή παλμικών ηλεκτρικών πεδίων. Η αξιολόγηση των συνθηκών επεξεργασίας γίνεται βάσει των δεικτών απώλειας υγρασίας και πρόσληψης στερεών καθώς και της ενεργότητας νερού, ενώ συνηθίζονται και οι ποιοτικοί δείκτες του αντικειμενικού χρώματος, της δύναμης διάτρησης και των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών. Τελικώς, πραγματοποιήθηκαν συνεχείς αναλύσεις ως προς το μικροβιακό φορτίο, τη μεταβολή του pH, το αντικειμενικό χρώμα, τη δύναμη διάτρησης, τη συγκέντρωση της βιταμίνη C και των χλωροφυλλών καθώς και οργανοληπτικός έλεγχος για τον προσδιορισμό της διατηρησιμότητας ανεπεξέργαστων, ωσμοαφυδατωμένων και ωσμοαφυδατωμένων με προεπεξεργασία με ΠΗΠ δειγμάτων σπανακιού σε διαφορετικές θερμοκρασίες αποθήκευσης.

4.2 Μελέτη της ωσμωτικής αφυδάτωσης του σπανακιού

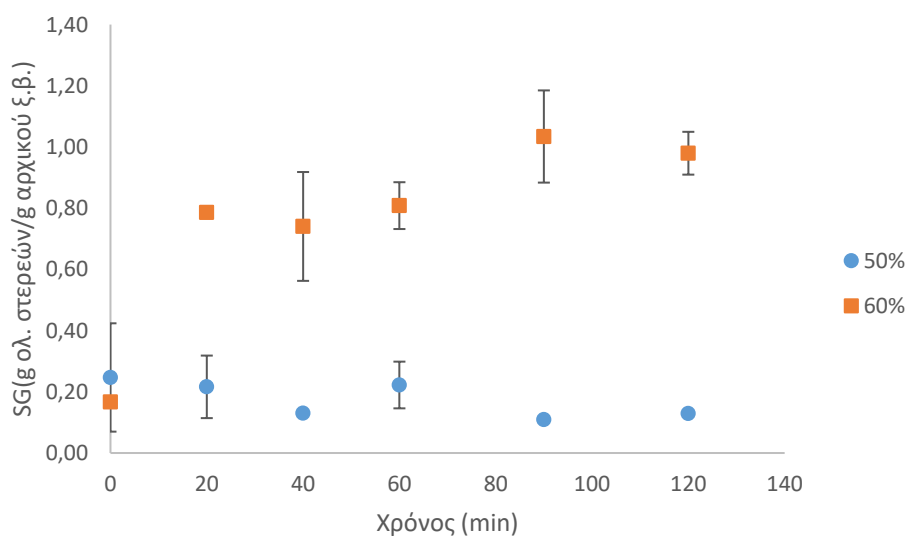
Για τη μελέτη της ωσμωτικής αφυδάτωσης του σπανακιού έγιναν πειράματα με ωσμωτικά διαλύματα διαφορετικής συγκέντρωσης και διαφορετικούς χρόνους επεξεργασίας. Χρησιμοποιήθηκαν διαλύματα 50% και 60% περιεκτικότητας σε γλυκερόλη και ελήφθησαν δείγματα σε χρόνους 0, 20, 40, 60 και 120 min.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων από τα πειράματα που αναφέρθηκαν γίνεται με τη χρήση των δεικτών της απώλειας νερού (Water Loss, WL), της πρόσληψης στερεών (Solid Gain, SG), της ενεργότητας νερού (a_w), της μεταβολής της υφής και του χρώματος των δειγμάτων.



Διάγραμμα 4.1 Μεταβολή της απώλειας νερού ($g_{\text{νερού}}/g_{\text{αρχικού ξηρού βάρους}}$) σε συνάρτηση του χρόνου ωσμωτικής επεξεργασίας

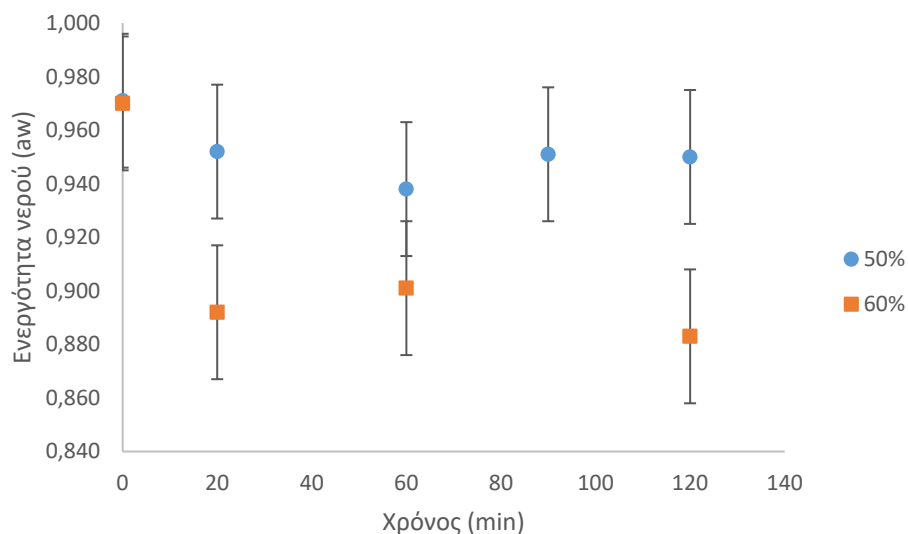
Στο διάγραμμα 4.1 παρουσιάζεται η μεταβολή της απώλειας νερού σε συνάρτηση με το χρόνο επεξεργασίας για διαφορετικές συγκεντρώσεις ωσμωτικού διαλύματος. Φαίνεται ότι με την πάροδο του χρόνου επεξεργασίας η απώλεια υγρασίας αυξάνεται συνεχώς. Αυτό κρίνεται λογικό, καθώς όσο τα δείγματα βρίσκονται μέσα στο ωσμωτικό διάλυμα η μεταφορά νερού από το εσωτερικό τους στο ωσμωτικό διάλυμα συνεχίζεται μέχρι να φτάσει σε ισορροπία το σύστημα. Παρατηρείται ότι υπάρχει μια τάση εξισορρόπησης της απώλειας νερού μετά τα 60 min επεξεργασίας. Επίσης σε χρόνο $t=0$ min, δηλαδή στο χρόνο που έγινε απλή εμβάπτιση του δείγματος μέσα στο ωσμωτικό διάλυμα, υπάρχει σχεδόν ακαριαία απώλεια νερού, γιατί πιθανώς η μεταφορά μάζας του νερού ξεκινάει αμέσως μόλις έρθει σε επαφή το τρόφιμο με το ωσμωτικό διάλυμα. Επίσης, είναι εμφανής η διαφορά στην απώλεια υγρασίας μεταξύ των ωσμωτικών διαλυμάτων με διαφορετική συγκέντρωση. Η απώλεια νερού στο διάλυμα συγκέντρωσης 60% σε γλυκερόλη είναι σχεδόν διπλάσια από αυτή του ωσμωτικού 50% σε γλυκερόλη σε όλη τη διάρκεια της επεξεργασίας. Η μέγιστη τιμή απώλειας νερού για το διάλυμα 60% είναι $4.049 \text{ g}_{\text{νερού}}/\text{g}_{\text{αρχικού ξηρού βάρους}}$, ενώ για το διάλυμα 50% είναι $2.909 \text{ g}_{\text{νερού}}/\text{g}_{\text{αρχικού ξηρού βάρους}}$, με τις δύο τιμές να υπολογίζονται σε χρόνο 120 min, δηλαδή στο τέλος της επεξεργασίας. Η γλυκερόλη αποτελεί το κύριο συστατικό του ωσμωτικού διαλύματος, συνεπώς με την αύξηση της συγκέντρωσής της αυξάνεται και η ικανότητα απομάκρυνσης του νερού από το εσωτερικό του κυττάρου.



Διάγραμμα 4.2 Μεταβολή της πρόσληψης ολικών στερεών ($\text{g}_{\text{στερεού}}/\text{g}_{\text{αρχικού ξηρού βάρους}}$) με το χρόνο ωσμωτικής επεξεργασίας

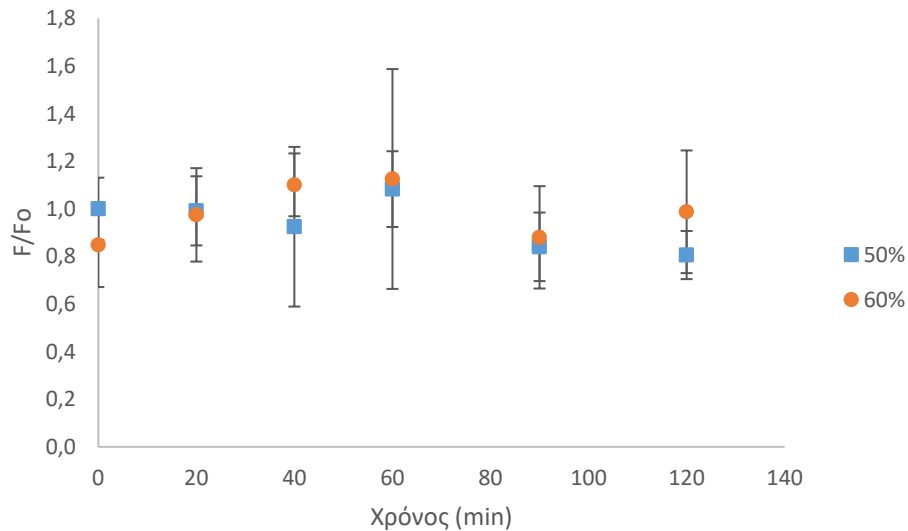
Όσον αφορά την πρόσληψη των στερεών, αυτή οφείλεται στη μεταφορά της γλυκερόλης και των αλάτων του ωσμωτικού διαλύματος στο εσωτερικό των κυττάρων του σπανακιού κατά τη διάρκεια της ώσμωσης, αλλά και στην κατακράτηση συστατικών στην επιφάνεια του φυτικού ιστού κατά την εμβάπτιση. Από το διάγραμμα 4.2, όπου φαίνεται η μεταβολή της πρόσληψης στερεών σε σχέση με το χρόνο ωσμωτικής επεξεργασίας, παρατηρείται ότι για το ωσμωτικό διάλυμα συγκέντρωσης 50% η πρόσληψη των στερεών παρουσιάζει πτωτική πορεία με την πάροδο του χρόνου επεξεργασίας και οι τιμές του δείκτη κυμαίνονται από 0.089 έως $0.247 \text{ g}_{\text{στερεού}}/\text{g}_{\text{αρχικού ξηρού βάρους}}$. Για το διάλυμα 60%, η πρόσληψη στερεών μένει σταθερή για τα πρώτα 60 min επεξεργασίας και έπειτα παρουσιάζει αύξηση 25% (από 0.808 σε $1.034 \text{ g}_{\text{στερεού}}/\text{g}_{\text{αρχικού ξηρού βάρους}}$). Συγκρίνοντας τα δύο ωσμωτικά διαλύματα, φαίνεται ότι η

επεξεργασία με διάλυμα 60% περιεκτικότητα σε γλυκερόλη επιτυγχάνει υψηλότερη πρόσληψη στερεών σε σχέση με το διάλυμα 50% σε όλη τη διάρκεια της επεξεργασίας.



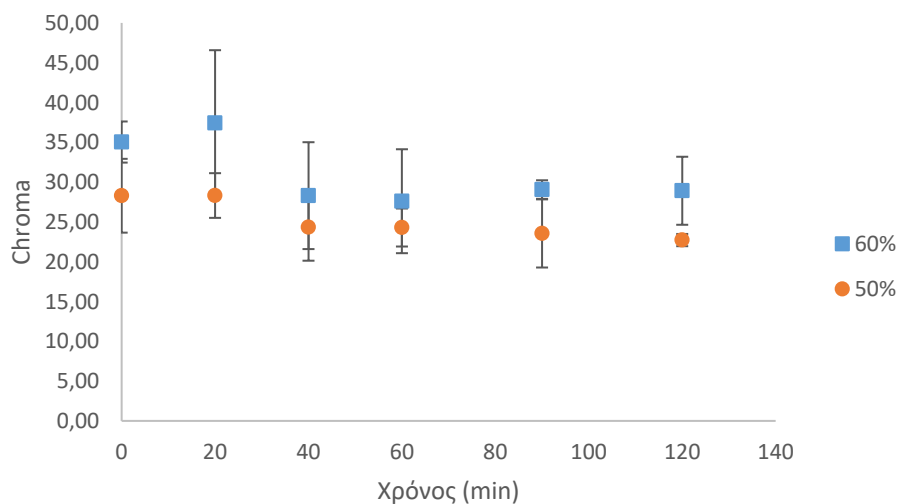
Διάγραμμα 4.3 Μεταβολή της ενεργότητας του νερού σε συνάρτηση με το χρόνο ωσμωτικής επεξεργασίας

Στο διάγραμμα 4.3 απεικονίζεται η μεταβολή της ενεργότητας νερού σε συνάρτηση με το χρόνο ωσμωτικής αφυδάτωσης για διαφορετικές συγκεντρώσεις ωσμωτικού διαλύματος. Προκύπτει ότι η ενεργότητα του νερού έχει απότομη μείωση στα πρώτα 20-30 min της επεξεργασίας, αλλά στη συνέχεια σταθεροποιείται με την πάροδο του χρόνου. Η χρήση του ωσμωτικού διαλύματος συγκέντρωσης 50% προκάλεσε μικρότερη μεταβολή στην ενεργότητα του νερού. Η χαμηλότερη τιμή ενεργότητας που έφτασαν τα δείγματα, τα οποία επεξεργάστηκαν με το διάλυμα συγκέντρωσης 50%, είναι 0.938 σε χρόνο 60 min, ενώ για το διάλυμα συγκέντρωσης 60% η χαμηλότερη τιμή ενεργότητας αντιστοιχεί σε 0.883 σε χρόνο 120 min. Την ίδια χρονική στιγμή που η ενεργότητα του νερού για το ωσμωτικό διάλυμα συγκέντρωσης 50% είχε την μικρότερη τιμή (0.938), η ενεργότητα των δειγμάτων που επεξεργάστηκαν με το διάλυμα 60% ήταν 0.901.



Διάγραμμα 4.4 Μεταβολή του λόγου της μετρούμενης δύναμης διάτρησης προς την αρχική δύναμη διάτρησης συναρτήσει του χρόνου για τα ωσμωτικά διαλύματα διαφορετικής συγκέντρωσης

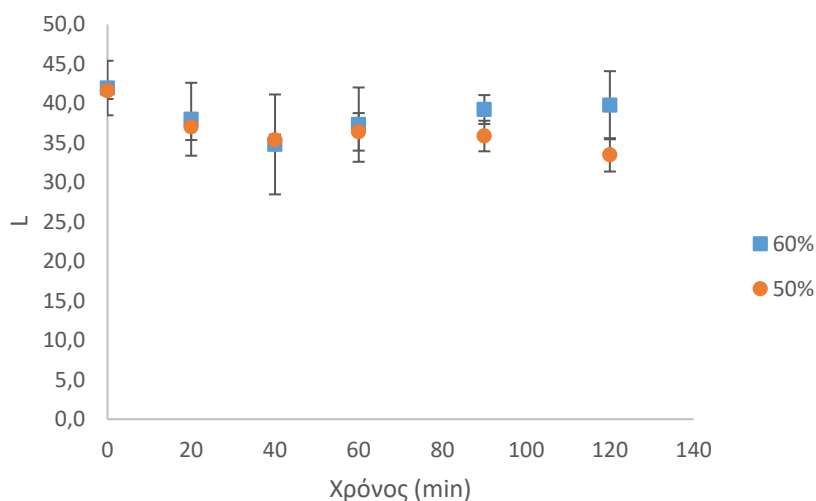
Από το διάγραμμα 4.4 της μεταβολής του λόγου της δύναμης διάτρησης προς την αρχική δύναμη σε σχέση με το χρόνο προκύπτει το συμπέρασμα ότι η δύναμη διάτρησης των δειγμάτων που επεξεργάστηκαν με το διάλυμα 50% έχει πτωτική τάση, ενώ για εκείνα που βρίσκονταν στο διάλυμα 60% φαίνεται ότι μεταβάλλονται με την πάροδο του χρόνου.



Διάγραμμα 4.5 Μεταβολή δείκτη χρώματος C σε συνάρτηση με το χρόνο ωσμωτικής αφυδάτωσης

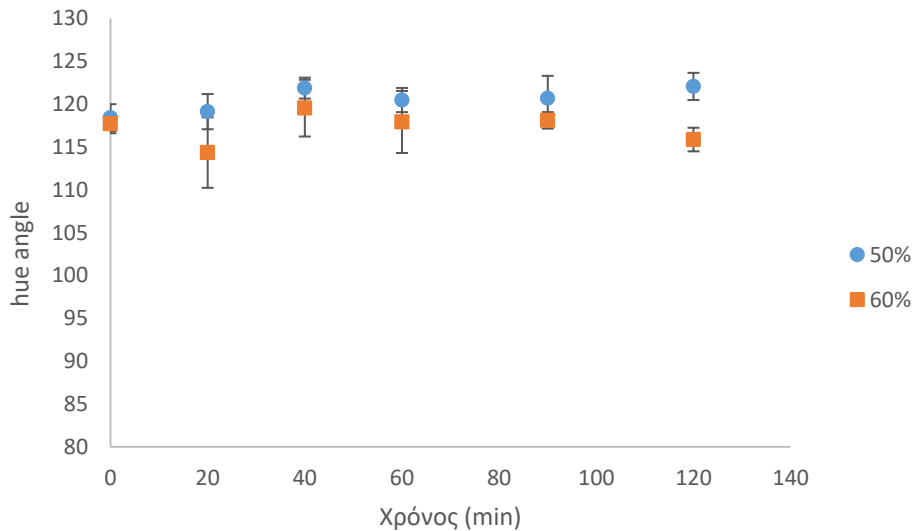
Όσον αφορά τη μεταβολή του χρώματος, η μια παράμετρος που εξετάζεται είναι ο δείκτης C (Chroma) που δείχνει την ένταση του χρώματος των φύλλων του σπανακιού. Από το διάγραμμα 4.5, όπου φαίνεται η μεταβολή του δείκτη χρώματος C σε συνάρτηση του χρόνου ωσμωτικής αφυδάτωσης, παρατηρείται ότι και για τις δύο συγκεντρώσεις υπάρχει απότομη μείωση της έντασης του χρώματος στο χρονικό διάστημα 20-40 min, ενώ στη συνέχεια υπάρχει σταθεροποίηση της τιμής του δείκτη C μέχρι το πέρας της διεργασίας. Όπως

αναφέρθηκε και ανωτέρω, μετά τα πρώτα 20 min επεξεργασίας αυξάνεται η απώλεια υγρασίας και μειώνεται αρκετά η ενεργότητα του νερού. Αυτό πιθανώς έχει ως αποτέλεσμα τη συμπύκνωση των χρωστικών στα κύτταρα του σπανακιού, γεγονός που εξηγεί την παρατηρούμενη μείωση της παραμέτρου.



Διάγραμμα 4.6 Μεταβολή δείκτη L σε σχέση με το χρόνο ωσμωτικής αφυδάτωσης

Η φωτεινότητα των δειγμάτων περιγράφεται από την παράμετρο L, η οποία παρουσιάζεται στο διάγραμμα 4.6 σε σχέση με το χρόνο ωσμωτικής αφυδάτωσης. Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι οι τιμές της φωτεινότητας των δειγμάτων είναι παρόμοιες ανεξάρτητα από τη συγκέντρωση του ωσμωτικού διαλύματος. Και στις δύο περιπτώσεις η φωτεινότητα παρουσιάζει πτώση της τάξης του 10% της αρχικής τιμής για τα πρώτα 60 min της επεξεργασίας και σταθεροποιείται για το υπόλοιπο χρονικό διάστημα. Η μείωση της φωτεινότητας στα αρχικά στάδια επεξεργασίας και μετέπειτα σταθεροποίησή της έχει παρατηρηθεί και σε μελέτες φυτικών ιστών, κυρίως φρούτων, όπως το πεπόνι (Pereira et al., 2006). Όπως ισχύει και για την παράμετρο C, η συμπύκνωση των χρωστικών των κυττάρων λόγω της απομάκρυνσης του νερού δικαιολογεί τη μεταβολή του δείκτη φωτεινότητας L.



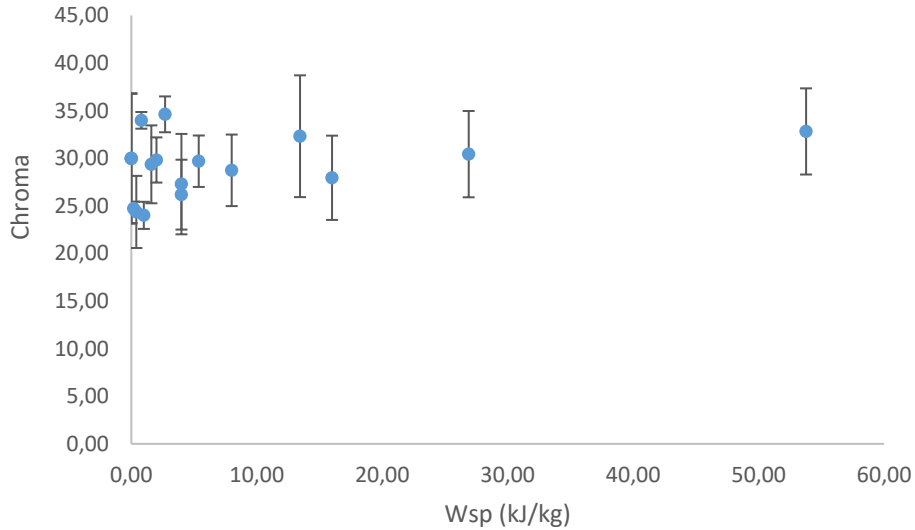
Διάγραμμα 4.7 Μεταβολή του δείκτη h σε σχέση με το χρόνο για τα ωσμωτικά διαλύματα διαφορετικής συγκέντρωσης

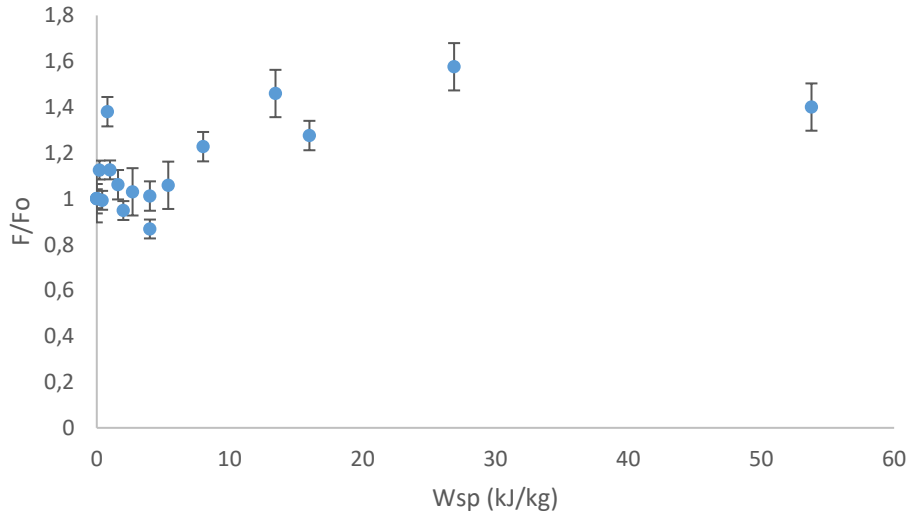
Το διάγραμμα 4.7 παρουσιάζει τη μεταβολή του δείκτη της απόχρωσης του χρώματος των δειγμάτων h σε συνάρτηση του χρόνου ωσμωτικής αφυδάτωσης σε ωσμωτικά διαλύματα διαφορετικής συγκέντρωσης. Ο δείκτης h δεν μεταβάλλεται με το πέρασμα του χρόνου, αλλά έχει σταθερή τιμή. Επιπλέον, δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ των διαφορετικών συγκεντρώσεων των ωσμωτικών διαλυμάτων. Το γεγονός ότι ο δείκτης h παραμένει σταθερός με το χρόνο επεξεργασίας δηλώνει ότι τα δείγματα σπανακιού δεν χάνουν το χαρακτηριστικό πράσινό τους χρώμα κατά τη διάρκεια της ωσμωτικής αφυδάτωσης, συνεπώς διατηρείται το χαρακτηριστικό χρώμα του σπανακιού.

Η εξέταση των συνθηκών της ωσμωτικής αφυδάτωσης, που σχολιάστηκαν ανωτέρω, έχουν ως στόχο την επιλογή των κατάλληλων συνθηκών επεξεργασίας ως προς τη συγκέντρωση του ωσμωτικού διαλύματος και του χρόνου επεξεργασίας. Αυτό που επιδιώκεται είναι να υπάρχει επίδραση στις τιμές απώλειας νερού, πρόσληψης στερεών αλλά και ενεργότητας νερού, ενώ συγχρόνως να μην μεταβάλλονται σημαντικά τα ποιοτικά χαρακτηριστικά. Επιπλέον, σημαντική είναι και η επιλογή του χρόνου επεξεργασίας, γιατί ένας πολύ μεγάλος χρόνος καθιστά τη διεργασία ασύμφορη και αντίστοιχα ένας αρκετά χαμηλός δεν παρουσιάζει επιθυμητές τιμές στις παραμέτρους της ωσμωτικής κατεργασίας. Έτσι, ως κατάλληλες συνθήκες επεξεργασίας επιλέγονται η συγκέντρωση 60% σε γλυκερόλη και ο χρόνος 60 min, με τις οποίες επιτυγχάνεται σημαντική μείωση της ενεργότητας νερού, από 0.97 αρχική τιμή σε 0.90 και υψηλές τιμές των δεικτών της απώλειας νερού και πρόσληψης στερεών. Η αντίστοιχη μείωση για το ωσμωτικό διάλυμα συγκέντρωσης 50% είναι από 0.97 σε 0.94. Ωστόσο, η επιλογή των συνθηκών θα εξεταστεί ξανά στη συνέχεια, όταν θα μελετηθεί η συνδυαστική επίδραση της ωσμωτικής αφυδάτωσης με τα παλμικά ηλεκτρικά πεδία, τα οποία ενισχύουν τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας.

4.3 Μελέτη της εφαρμογής των παλμικών ηλεκτρικών πεδίων στο σπανάκι

Για τη μελέτη της επίδρασης των παλμικών ηλεκτρικών πεδίων σε δείγματα σπανακιού έγιναν πειράματα εφαρμογής των ΠΗΠ σε διάφορες συνθήκες επεξεργασίας. Οι παράμετροι

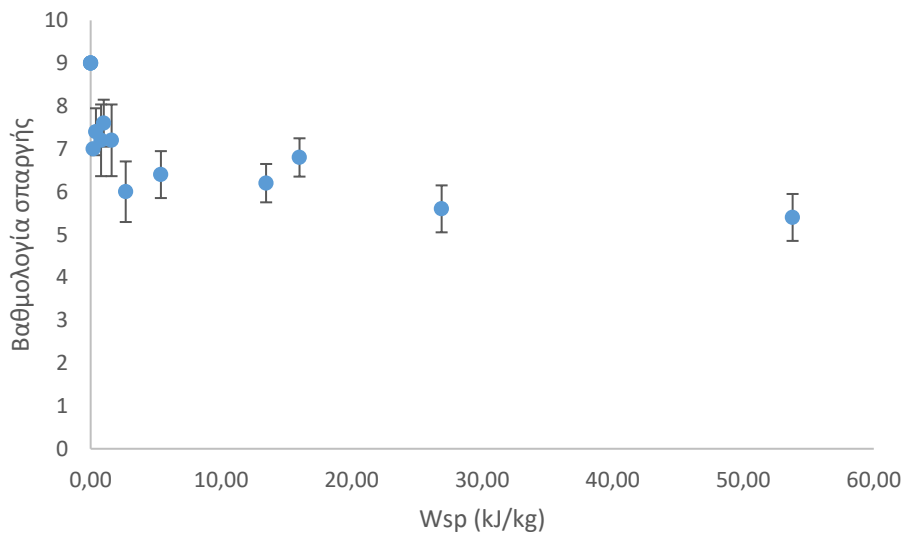




Διάγραμμα 4.11 Μεταβολή του λόγου της μετρούμενης δύναμης διάτρησης προς την αρχική δύναμη διάτρησης συναρτήσει της ειδικής ενέργειας

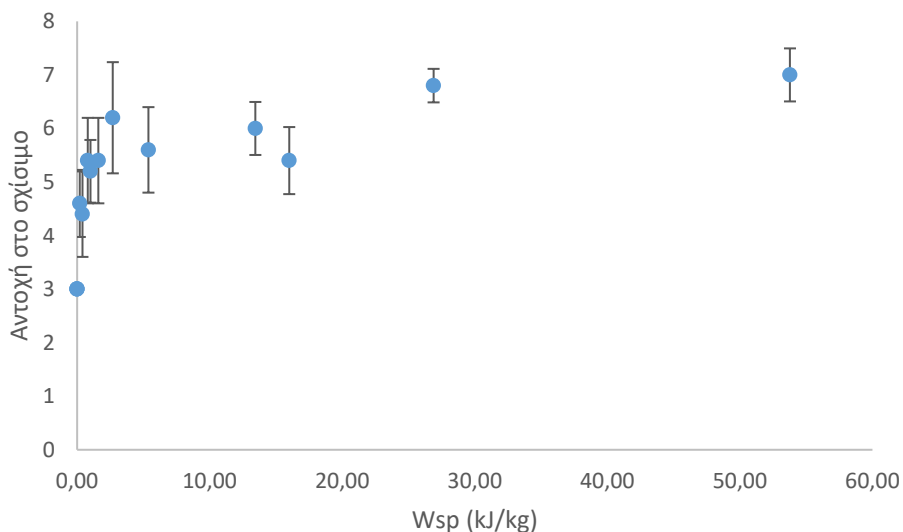
Η δύναμη διάτρησης σε σχέση με την αύξηση της ειδικής ενέργειας φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα 4.1. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η αύξηση της ενέργειας προκαλεί και αύξηση του λόγου της δύναμης διάτρησης προς την αρχική δύναμη. Ειδικά, για τιμές ειδικής ενέργειας μεγαλύτερες των 10 kJ/kg, παρατηρείται απότομη αύξηση της δύναμης που απαιτείται για τη διάτρηση των δειγμάτων σπανακιού. Αυτό οφείλεται πιθανώς στο γεγονός ότι η επεξεργασία με ΠΗΠ προκαλεί δομικές μεταβολές στον ιστό του σπανακιού που οδηγούν στην απαίτηση μεγαλύτερης δύναμης για να διαπεραστεί το φύλλο του σπανακιού.

Πέρα από τους τρόπους που αναφέρθηκαν ανωτέρω για την καταγραφή των μεταβολών στην ποιότητα και στα χαρακτηριστικά του σπανακιού, πραγματοποιείται και οργανοληπτική αξιολόγηση των δειγμάτων.



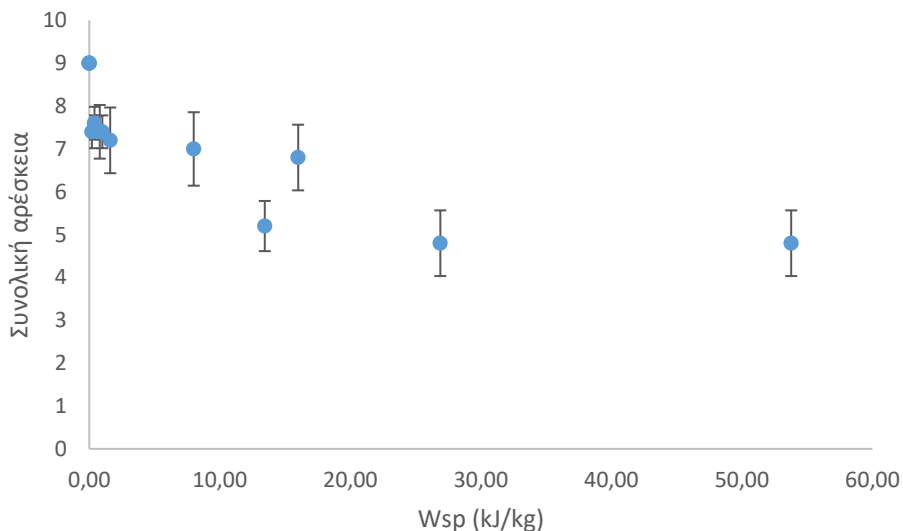
Διάγραμμα 4.12 Μεταβολή της σπαργής σε συνάρτηση με την ειδική ενέργεια

Από το διάγραμμα 4.12 όπου φαίνεται η μεταβολή του οργανοληπτικού χαρακτηριστικού της σπαργής συναρτήσει της ειδικής ενέργειας της επεξεργασίας παρατηρείται ότι η σπαργή των δειγμάτων μειώνεται με την αύξηση της ειδικής ενέργειας. Μετά την τιμή των 10 kJ/kg υπάρχει τάση σταθεροποίησης της μεταβολής. Το αποτέλεσμα αυτό θεωρείται αναμενόμενο και αναπόφευκτο, καθώς η εύθραυστη δομή του σπανακιού επηρεάζεται εύκολα από την επεξεργασία του με οποιαδήποτε μέθοδο. Ειδικά μία επεξεργασία όπως τα ΠΗΠ που οδηγεί σε απώλεια ενδοκυτταρικού νερού επηρεάζει τη σπαργή των φυτικών ιστών.



Διάγραμμα 4.13 Μεταβολή της αντοχής στο σχίσσιμο σε συνάρτηση της ειδικής ενέργειας

Το διάγραμμα 4.13 δείχνει τη μεταβολή του χαρακτηριστικού της αντοχής στο σχίσσιμο σε σχέση με την ειδική ενέργεια. Η αντοχή στο σχίσσιμο των φύλλων σπανακιού παρουσιάζει αύξηση για μεγαλύτερες τιμές της ειδικής ενέργειας. Το αποτέλεσμα αυτό έρχεται σε συμφωνία με την αύξηση της δύναμης διάτρησης που σχολιάστηκε ανωτέρω. Επομένως, για τιμές ειδικής ενέργειας μεγαλύτερες από 5 kJ/kg η εφαρμογή των ΠΗΠ επιδρά αρνητικά στο συγκεκριμένο χαρακτηριστικό της υφής των δειγμάτων σπανακιού.



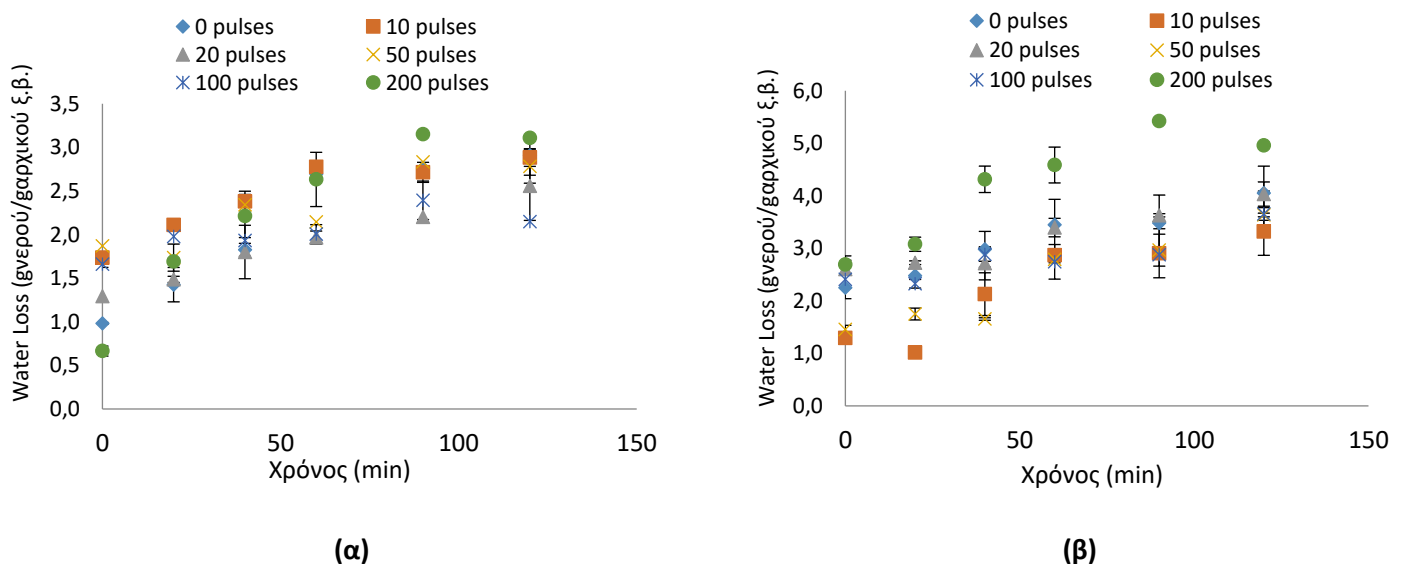
Διάγραμμα 4.14 Μεταβολή της συνολικής αρέσκειας σε σχέση με την ειδική ενέργεια

Μέσω του διαγράμματος προκύπτει ότι η συνολική αρέσκεια των δειγμάτων σπανακιού παρουσιάζει μείωση σε συνάρτηση της αύξησης της ειδικής ενέργειας. Επομένως, η επεξεργασία με εφαρμογή παλμικών ηλεκτρικών πεδίων σε υψηλές τιμές ειδικής ενέργειας λειτουργεί αρνητικά στην ποιότητα των δειγμάτων σπανακιού.

Η αξιολόγηση διαφόρων δεικτών της μεταβολής των χαρακτηριστικών των δειγμάτων σπανακιού γίνεται για να επιλεγθούν οι κατάλληλες συνθήκες επεξεργασίας με παλμικά ηλεκτρικά πεδία. Η ποιοτική υποβάθμιση του σπανακιού είναι ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας, ο οποίος καθορίζει και την αποδοχή ή όχι του τελικού προϊόντος. Παρατηρήθηκε ότι το χρώμα δεν παρουσίασε ιδιαίτερες διαφορές με την αύξηση της ειδικής ενέργειας επεξεργασίας. Ωστόσο, για υψηλές τιμές ειδικής ενέργειας, μεγαλύτερες δηλαδή από 5 kJ/kg, προκύπτει ότι χαρακτηριστικά της υφής όπως η δύναμη διάτρησης και τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά της αντοχής στο σχίσιμο, της σπαργής και της συνολικής αρέσκειας επηρεάζονται αρνητικά. Οι υψηλές τιμές ειδικής ενέργειας αντιστοιχούν σε υψηλή ένταση ηλεκτρικού πεδίου και μεγάλο αριθμό παλμών. Αυτές οι συνθήκες παρουσιάζουν αρνητική επίδραση, και για αυτό το λόγο δεν επιλέχθηκαν για περαιτέρω μελέτη. Επομένως, η τιμή 2.2 kV/cm της έντασης ηλεκτρικού πεδίου δεν θεωρείται κατάλληλη. Με τις τιμές 0.6 και 1.2 kV/cm είναι δυνατή η επίτευξη χαμηλών τιμών ειδικής ενέργειας. Η τιμή που τελικά επιλέγεται είναι τα 0.6 kV/cm, γιατί επιφέρει χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας, κάτι το οποίο έχει θετική επίδραση στη μείωση του κόστους της επεξεργασίας με παλμικά ηλεκτρικά πεδία. Η τελική επιλογή του κατάλληλου αριθμού παλμών γίνεται στην επόμενη ενότητα, όπου εξετάστηκε η συνδυαστική δράση της ωσμωτικής αφυδάτωσης και των παλμικών ηλεκτρικών πεδίων.

4.4 Μελέτη των ΠΗΠ ως προεπεξεργασία της ωσμωτικής αφυδάτωσης

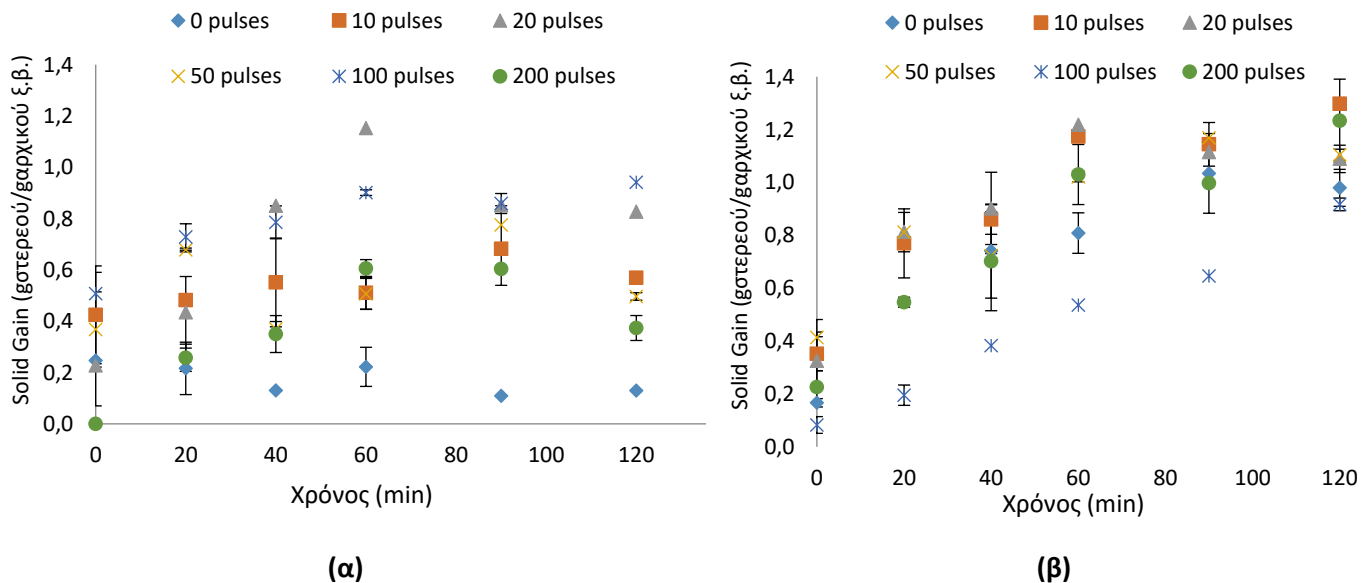
Για τη μελέτη της εφαρμογής παλμικών ηλεκτρικών πεδίων ως προκατεργασία της ωσμωτικής αφυδάτωσης πραγματοποιήθηκαν δύο πειράματα σε διαφορετικές συγκεντρώσεις ωσμωτικού διαλύματος (50% και 60% περιεκτικότητα σε γλυκερόλη) με λήψη δειγμάτων ανά χρονικά διαστήματα (0, 20, 40, 60, 90 και 120 min) με προεπεξεργασία των δειγμάτων σπανακιού με ΠΗΠ σε διαφορετικό αριθμό παλμών (10, 20, 50, 100 και 200 παλμοί), σε σταθερή ένταση ηλεκτρικού πεδίου 0.6 kV/cm. Προηγουμένως η συγκέντρωση του ωσμωτικού διαλύματος 60% σε γλυκερόλη χαρακτηρίστηκε ως καταλληλότερη, ωστόσο μελετάται εκ νέου για να ελεγχθούν πιθανές διαφορές στην περίπτωση που το σπανάκι έχει πρώτα επεξεργαστεί με ΠΗΠ, τα οποία εξυπηρετούν στην ενίσχυση των φαινομένων μεταφοράς μάζας. Η αξιολόγηση των συνθηκών γίνεται με βάση τους δείκτες της απώλειας νερού, της πρόσληψης στερεών, της ενεργότητας του νερού, της μεταβολής στην υφή και του χρώματος των δειγμάτων κατά την επεξεργασία.



Διάγραμμα 4.15 Μεταβολή της απώλειας υγρασίας ($g_{\text{νερού}}/g_{\text{αρχικού ξηρού θάρους}}$) σε συνάρτηση με τον αριθμό παλμών της επεξεργασίας με ΠΗΠ και του χρόνου ωσμωτικής αφυδάτωσης, (α) σε ωσμωτικό διάλυμα συγκέντρωσης 50% σε γλυκερόλη, (β) σε ωσμωτικό διάλυμα συγκέντρωσης 60% σε γλυκερόλη

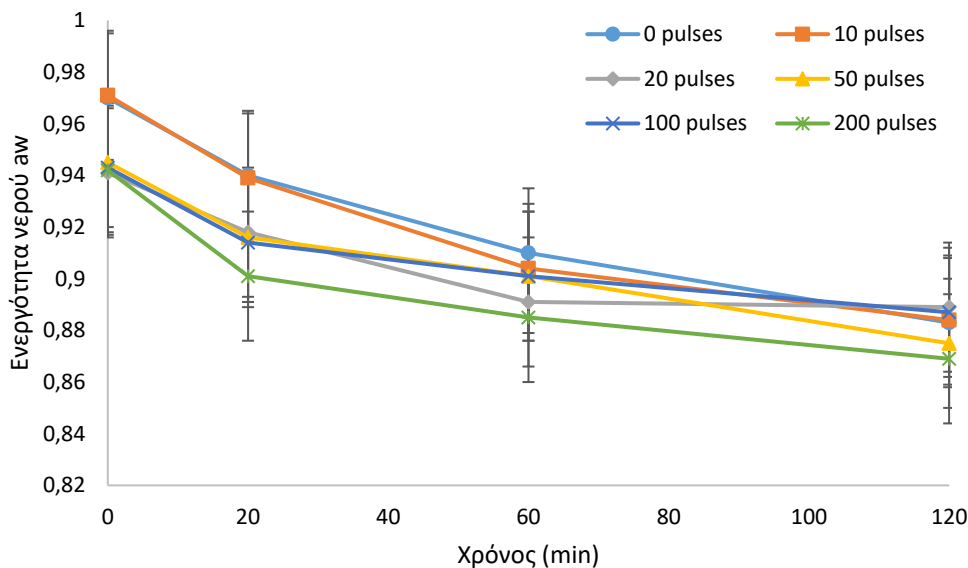
Από το διάγραμμα 4.15 όπου παρουσιάζεται η μεταβολή της απώλειας υγρασίας σε συνάρτηση με τον αριθμό παλμών της επεξεργασίας με ΠΗΠ και του χρόνου ωσμωτικής αφυδάτωσης, παρατηρείται ότι και με την εφαρμογή των παλμικών ηλεκτρικών πεδίων η απώλεια υγρασίας κατά την διάρκεια της ωσμωτικής αφυδάτωσης αυξάνεται με το χρόνο, ωστόσο τείνει να σταθεροποιηθεί μετά τα 60 πρώτα λεπτά της επεξεργασίας. Η επεξεργασία με 200 παλμούς επιτυγχάνει υψηλότερες απώλειες υγρασίας και για τα δύο ωσμωτικά διαλύματα, ιδίως για το διάλυμα περιεκτικότητας 60%, στο οποίο από την αρχή της ωσμωτικής αφυδάτωσης η απώλεια της υγρασίας είναι μεγαλύτερη από την απώλεια που υπολογίζεται τόσο για το ανεπεξεργαστο με ΠΗΠ δείγμα όσο και για τα υπόλοιπα δείγματα που επεξεργάστηκαν με διάφορους αριθμούς παλμών. Πιο συγκεκριμένα, η εφαρμογή 200 παλμών για 40 και περισσότερα min ωσμωτικής επεξεργασίας προκάλεσε αύξηση κατά 1-2

γενερού/βαρικού ξηρού βάρους στην τιμή της απώλειας υγρασίας στη περίπτωση του ωσμωτικού διαλύματος συγκέντρωσης 60% σε γλυκερόλη. Το αποτέλεσμα αυτό κρίνεται λογικό, γιατί πιθανώς η επεξεργασία με αριθμό παλμών ίσο με 200 να είναι αρκετή για την επίτευξη μη αναστρέψιμης ηλεκτροδιάτρησης των κυττάρων του σπανακιού. Επίσης, προκύπτει ότι η προεπεξεργασία με 10 παλμούς για το ωσμωτικό διάλυμα συγκέντρωσης 60% δεν επιφέρει αύξηση ή διατήρηση της απώλειας υγρασίας σε σχέση με τις τιμές των ανεπεξεργαστων με ΠΗΠ δειγμάτων.

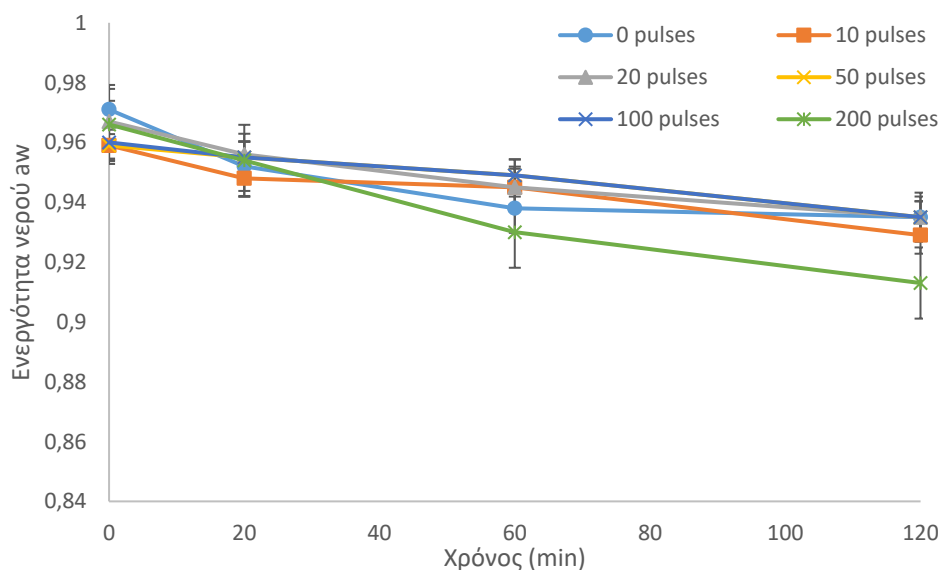


Διάγραμμα 4.16 Μεταβολή της πρόσληψης στερεών σε συνάρτηση με τον αριθμό παλμών και του χρόνου ωσμωτικής αφυδάτωσης, **(α)** σε ωσμωτικό διάλυμα συγκέντρωσης 50% και **(β)** σε ωσμωτικό διάλυμα συγκέντρωσης 60% σε γλυκερόλη

Συγκρίνοντας τα διαγράμματα 4.16, τα οποία παρουσιάζουν τη μεταβολή της πρόσληψης στερεών σε σχέση με το χρόνο ωσμωτικής αφυδάτωσης και τον αριθμό παλμών, προκύπτει ότι η εφαρμογή των παλμικών ηλεκτρικών πεδίων για κάθε αριθμό παλμών οδήγησε στην αύξηση της πρόσληψης στερεών στο ωσμωτικό διάλυμα συγκέντρωσης 50% σε γλυκερόλη, στο οποίο προηγουμένως παρατηρήθηκε αρκετά χαμηλότερη πρόσληψη στερεών. Στο ωσμωτικό διάλυμα 60%, η πρόσληψη στερεών στα επεξεργασμένα δείγματα με ΠΗΠ αυξήθηκε κυρίως σε χρόνους ωσμωτικής αφυδάτωσης που ξεπερνούσαν τα 60 λεπτά. Η αύξηση στη πρόσληψη των στερεών δείχνει ότι τα συστατικά του ωσμωτικού διαλύματος όπως το χλωριούχο ασβέστιο, το μεταδιθειώδες νάτριο κ.ά. εισέρχονται τελικώς στον ιστό του σπανακιού. Με αυτόν τον τρόπο βελτιώνονται διάφορα χαρακτηριστικά του σπανακιού όπως η υφή και το χρώμα καθώς και η αντιμικροβιακή και αντιοξειδωτική δράση.



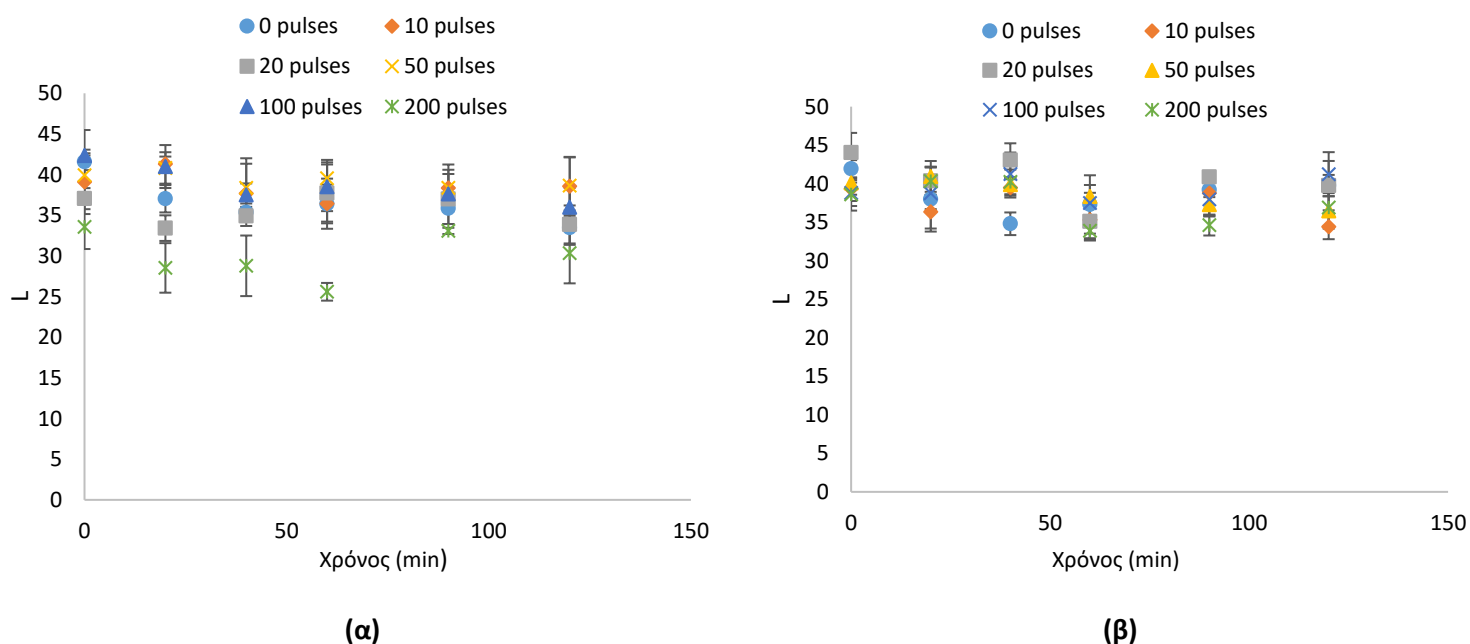
Διάγραμμα 4.17 Μεταβολή της ενεργότητας του νερού σε σχέση με τον αριθμό παλμών και το χρόνο ωσμωτικής αφυδάτωσης σε ωσμωτικό διάλυμα συγκέντρωσης 60%



Διάγραμμα 4.18 Μεταβολή της ενεργότητας του νερού σε σχέση με τον αριθμό παλμών και του χρόνου ωσμωτικής αφυδάτωσης σε ωσμωτικό διάλυμα 50% συγκέντρωσης σε γλυκερόλη

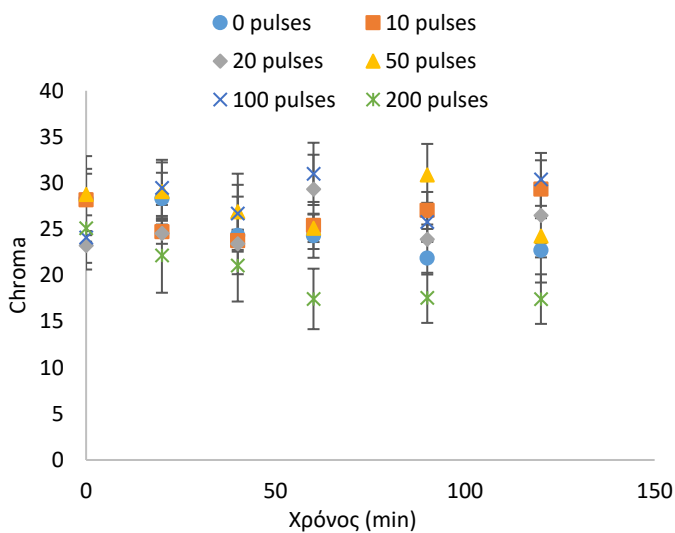
Η ενεργότητα του νερού στην επεξεργασία με το ωσμωτικό διάλυμα συγκέντρωσης 50%, που φαίνεται στο διάγραμμα 4.18, δεν μειώνεται κάτω από τη τιμή 0.93 και μόνο για τους 200 παλμούς στο τέλος της ωσμωτικής επεξεργασίας (120 min) φαίνεται ότι πλησιάζει σε τιμές ενεργότητας κοντά στο 0.9. Για το ωσμωτικό διάλυμα 60%, που παρουσιάζεται στο διάγραμμα 4.17, προκύπτει ότι για τα επεξεργασμένα δείγματα με αριθμό παλμών 10, 20, 50 και 100 η ενεργότητα παρουσίασε χαμηλότερες τιμές σε σύγκριση με τα ανεπεξεργαστα δείγματα και τα ωσμωαφυδατωμένα με διάλυμα συγκέντρωσης 50% σε γλυκερόλη. Η τιμή της ενεργότητας του ανεπεξεργαστου δείγματος σε χρόνο 60 min είναι 0.91, ενώ η εφαρμογή ΠΗΠ οδήγησε σε τιμές μικρότερες από 0.9. Όσο αυξάνεται ο αριθμός παλμών, η ενεργότητα

παρουσιάζει χαμηλότερες τιμές. Η μείωση της ενεργότητας πραγματοποιείται στα πρώτα 20 με 60 min και στη συνέχεια σταθεροποιείται σε τιμή ενεργότητας 0.90 ± 0.01 . Εξαιρέση αποτελεί η επεξεργασία με αριθμό παλμών ίσο με 200, κατά την οποία στο τέλος της ωσμωτικής αφυδάτωσης υπολογίζονται τιμές ενεργότητας περίπου 0.8. Όπως παρουσιάστηκε και προηγουμένως, για το ωσμωτικό διάλυμα συγκέντρωσης 60% η απώλεια υγρασίας ήταν η μεγαλύτερη για σε σχέση με τις υπόλοιπες συνθήκες επεξεργασίας, κάτι το οποίο συμβαδίζει με το γεγονός του υπολογισμού ενεργότητας κοντά στην τιμή 0.8. Η επίτευξη τιμών ενεργότητας κοντά στη τιμή 0.9 κρίνεται ικανοποιητική γιατί σύμφωνα με τους Neumeayer et al. (1997), σε επίπεδο κάτω του 0,95 αναστέλλεται σημαντικά η ανάπτυξη των μικροοργανισμών του γένους *Pseudomonas spp.* και σύμφωνα με τον Οργανισμό Ελέγχου Φαρμάκων και Τροφίμων (FDA) των παθογόνων μικροοργανισμών *Vibrio spp.* (FDA, 2011). Επίσης, σε τιμές ενεργότητας νερού χαμηλότερες από 0,92 δεν αναπτύσσεται η *Listeria spp.* σύμφωνα με τον FDA (2011). Οι παθογόνοι μικροοργανισμοί, που αναφέρθηκαν, δεν αναπτύσσονται στον ιστό του σπανακιού, αλλά πιθανώς προέρχονται από επιμόλυνση των δειγμάτων σπανακιού κατά το πλύσιμό τους πριν τη συσκευασία τους.

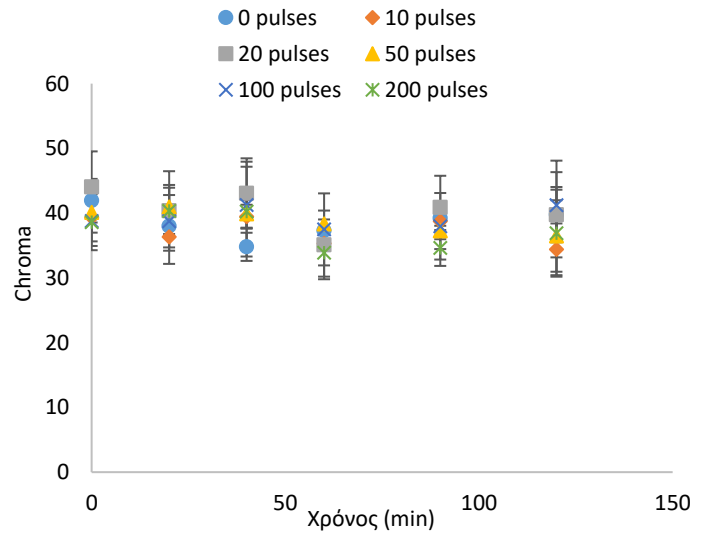


Διάγραμμα 4.19 Μεταβολή του δείκτη φωτεινότητας L σε συνάρτηση με τον αριθμό παλμών και το χρόνο ωσμωτικής αφυδάτωσης, **(α)** σε ωσμωτικό διάλυμα 50% και **(β)** σε ωσμωτικό διάλυμα 60% συγκέντρωσης σε γλυκερόλη

Από τα διαγράμματα 4.19 του δείκτη L, που αντιστοιχεί στη φωτεινότητα των δειγμάτων, σε συνάρτηση με το χρόνο ωσμωτικής αφυδάτωσης και τον αριθμό παλμών που χρησιμοποιήθηκε προκύπτει ότι υπάρχει μικρή μείωση στη φωτεινότητα στα πρώτα 20 min της επεξεργασίας και στη συνέχεια σταθεροποιείται η τιμή του δείκτη. Στο ωσμωτικό διάλυμα συγκέντρωσης 50% παρατηρείται ότι η επεξεργασία με 200 παλμούς οδήγησε σε σημαντική μείωση του L στα 60 min της επεξεργασίας.



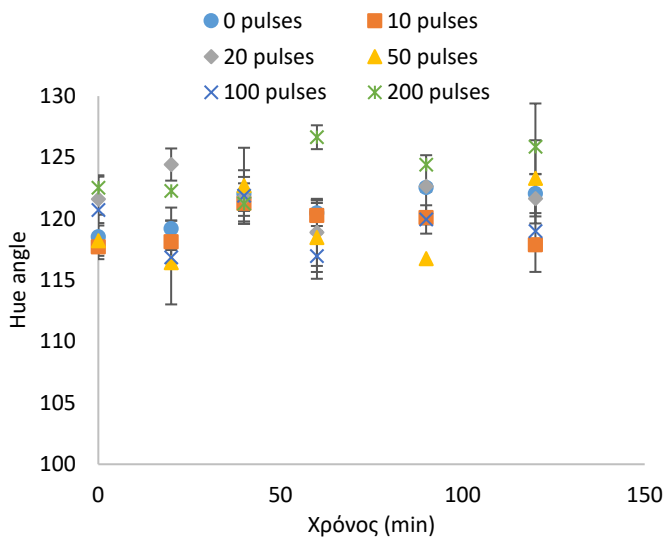
(α)



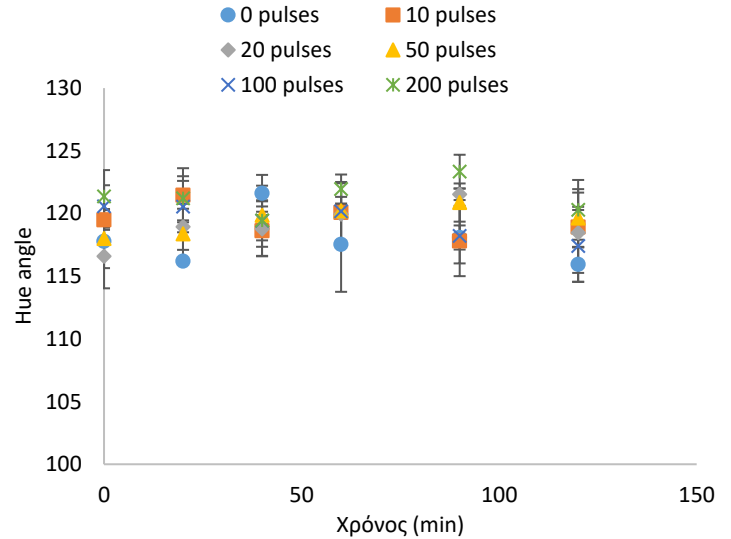
(β)

Διάγραμμα 4.20 Μεταβολή του δείκτη έντασης του χρώματος C σε σχέση με τον αριθμό παλμών και το χρόνο ωσμωτικής αφυδάτωσης, **(α)** σε ωσμωτικό διάλυμα 50% και **(β)** σε ωσμωτικό διάλυμα 60% συγκέντρωσης σε γλυκερόλη

Στα διαγράμματα 4.20 παρουσιάζεται η μεταβολή του δείκτη έντασης του χρώματος C σε σχέση με το χρόνο ωσμωτικής αφυδάτωσης και τον αριθμό των παλμών. Για το ωσμωτικό διάλυμα 50% φαίνεται ότι ο δείκτης C παραμένει σταθερός με το πέρασμα του χρόνου ανεξαρτήτως τον αριθμό παλμών εκτός από τους 200 παλμούς. Η επεξεργασία με 200 παλμούς είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση της έντασης του χρώματος (δείκτης C) των δειγμάτων σπανακιού για τα πρώτα 60 min της ωσμωτικής αφυδάτωσης. Στην περίπτωση της επεξεργασίας με ωσμωτικό διάλυμα 60% παρατηρείται ότι δεν υπάρχει μεταβολή στη ένταση του χρώματος των δειγμάτων για κάθε αριθμό παλμών. Συγκρίνοντας τα δύο διαγράμματα συνολικά προκύπτει ότι στο διάλυμα συγκέντρωσης 50% κανένα δείγμα δεν έχει ένταση μεγαλύτερη από 30 μονάδες του δείκτη C, ενώ από την άλλη στην επεξεργασία με διάλυμα 60% συγκέντρωση σε γλυκερόλη τα δείγματα για κάθε αριθμό παλμών ξεπερνούν την τιμή 30 της φωτεινότητας. Συνεπώς, φαίνεται ότι η ωσμωτική αφυδάτωση με διάλυμα 60% συγκέντρωση σε γλυκερόλη με συνδυαστική εφαρμογή παλμικών ηλεκτρικών πεδίων επιδρά θετικά στη φωτεινότητα των δειγμάτων.



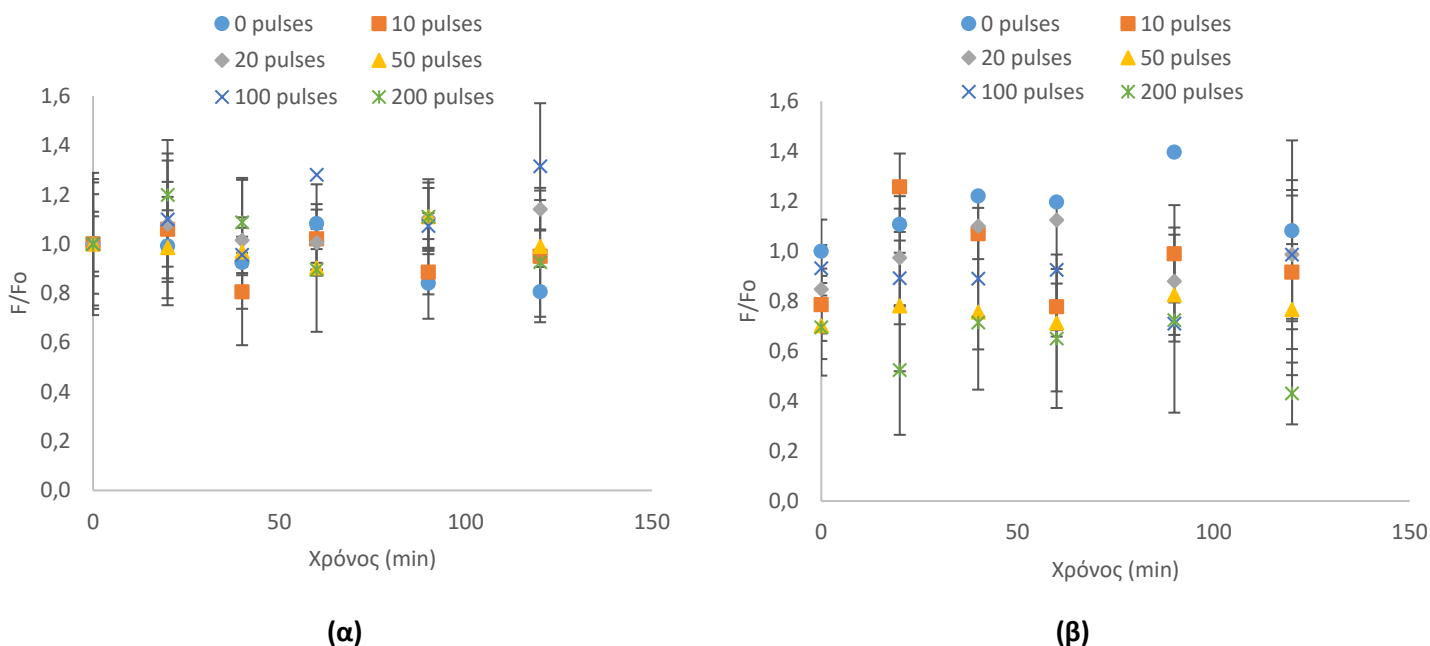
(α)



(β)

Διάγραμμα 4.21 Μεταβολή του δείκτη της απόχρωσης του χρώματος h σε σχέση με τον αριθμό παλμών και το χρόνο ωσμωτικής αφυδάτωσης, **(α)** σε ωσμωτικό διάλυμα 50% και **(β)** σε ωσμωτικό διάλυμα συγκέντρωσης 60% σε γλυκερόλη

Από τα διαγράμματα 4.21 του δείκτη h (Hue angle) σε συνάρτηση του χρόνου ωσμωτικής αφυδάτωσης για κάθε αριθμό παλμών και για συγκεντρώσεις ωσμωτικού διαλύματος 50% και 60% παρατηρείται ότι η απόχρωση του πράσινου χρώματος των δειγμάτων σπανακιού δεν μεταβάλλεται σε μεγάλο βαθμό. Υπάρχει μια σταθερή τάση για όλες τις συνθήκες επεξεργασίας. Συνεπώς, προκύπτει ότι η εφαρμογή των ΠΗΠ συνδυαστικά με την ωσμωτική αφυδάτωση δεν επηρεάζει αρνητικά την απόχρωση του πράσινου χρώματος του σπανακιού, το οποίο είναι ένα επιθυμητό αποτέλεσμα αφού στόχος της επεξεργασίας είναι και η διατήρηση ή βελτίωση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του σπανακιού.



Διάγραμμα 4.22 Μεταβολή της δύναμης διάτρησης σε σχέση με τον αριθμό παλμών και το χρόνο ωσμωτικής αφυδάτωσης, **(α)** σε ωσμωτικό διάλυμα 50% και **(β)** σε ωσμωτικό διάλυμα συγκέντρωσης 60% σε γλυκερόλη

Στα παραπάνω διαγράμματα 4.22 παρουσιάζεται η μεταβολή του λόγου της δύναμης διάτρησης προς την αρχική δύναμη σε σχέση με το χρόνο επεξεργασίας και τον αριθμό παλμών. Για την επεξεργασία με ωσμωτικό διάλυμα 50% περιεκτικότητας σε γλυκερόλη προκύπτει ότι η δύναμη διάτρησης για τα δείγματα σπανακιού δεν μεταβάλλεται σημαντικά σε σχέση με την δύναμη που απαιτείται για το αρχικό δείγμα. Από την άλλη πλευρά, για την ωσμωτική αφυδάτωση με διάλυμα συγκέντρωσης 60% παρατηρείται ότι η δύναμη διάτρησης μειώνεται για μεγάλο αριθμό παλμών (50, 100 και 200). Η μείωση είναι της τάξης του 10% σε σχέση με τα ανεπεξεργαστα με ΠΗΠ δείγματα.

Υπολογισμός συντελεστών διάχυσης του νερού και των στερεών

Χρησιμοποιώντας τις τιμές της απώλειας υγρασίας και της πρόσληψης στερεών από τα δείγματα σπανακιού, εφαρμόστηκε ο 2^{ος} νόμος του Fick μέσω των εξισώσεων 3.10, 3.11, 3.12 και 3.13 για να προσδιοριστούν οι συντελεστές διάχυσης του νερού και των στερεών. Οι τιμές των συντελεστών υπολογίστηκαν για τα δείγματα σπανακιού που έχουν επεξεργαστεί με το ωσμωτικό διάλυμα συγκέντρωσης 60% σε γλυκερόλη και με προκατεργασία με ΠΗΠ.

Πίνακας 5.1 Συντελεστές διάχυσης της απώλειας νερού D_{ew} και της πρόσληψης στερεών D_{es} για το ωσμωτικό διάλυμα συγκέντρωσης 60% σε γλυκερόλη και προκατεργασία με ΠΗΠ

Αριθμός παλμών	Συντελεστής διάχυσης της απώλειας νερού D_{ew} (m^2/s)	Συντελεστής διάχυσης της πρόσληψης στερεών D_{es} (m^2/s)
0	$4.23 \cdot 10^{-15}$	$9.94 \cdot 10^{-15}$
10	$5.58 \cdot 10^{-15}$	$9.64 \cdot 10^{-15}$
20	$8.32 \cdot 10^{-15}$	$13.12 \cdot 10^{-15}$
50	$7.94 \cdot 10^{-15}$	$13.6 \cdot 10^{-15}$
100	$8.69 \cdot 10^{-15}$	$14.2 \cdot 10^{-15}$
200	$9.16 \cdot 10^{-15}$	$15.03 \cdot 10^{-15}$

Στο πίνακα 5.1 παρουσιάζονται οι συντελεστές διάχυσης της απώλειας νερού και της πρόσληψης στερεών για τα δείγματα σπανακιού που επεξεργάστηκαν σε ωσμωτικό διάλυμα συγκέντρωσης 60% σε γλυκερόλη και εφαρμόστηκαν ως προκατεργασία παλμικά ηλεκτρικά πεδία. Από τα αποτελέσματα του πίνακα προκύπτει ότι η αύξηση των παλμών οδήγησε σε αύξηση των συντελεστών διάχυσης, το οποίο επιβεβαιώνεται και από τα διαγράμματα της απώλειας υγρασίας και της πρόσληψης στερεών που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Επίσης, παρατηρείται ότι οι συντελεστές διάχυσης της πρόσληψης στερεών είναι μεγαλύτεροι από τους αντίστοιχους της απώλειας νερού, το οποίο πιθανώς να οφείλεται στο γεγονός ότι η πρόσληψη στερεών είναι εντονότερη από την απώλεια νερού λόγω της ιδιαιτερότητας των φύλλων του σπανακιού. Τα φύλλα του σπανακιού έχουν μεγάλη ειδική επιφάνεια, δηλαδή η επιφάνεια της είναι σημαντικά μεγαλύτερη από το βάρος τους, με αποτέλεσμα να ευνοείται η πρόσληψη στερεών στην επιφάνειά τους.

Σε αυτήν την ενότητα πραγματοποιήθηκε σύγκριση του αποτελέσματος της ωσμωτικής αφυδάτωσης των δειγμάτων σπανακιού με ωσμωτικά διαλύματα συγκέντρωσης 50% και 60% σε γλυκερόλη και προκατεργασία με παλμικά ηλεκτρικά πεδία σε διαφορετικό αριθμό παλμών (10, 20, 50, 100 και 200). Σκοπός ήταν η επιλογή του κατάλληλου χρόνου ωσμωτικής αφυδάτωσης, καθώς και η εύρεση του κατάλληλου αριθμού παλμών για την εφαρμογή των παλμικών ηλεκτρικών πεδίων. Όσον αφορά το δείκτη απώλειας υγρασίας, η εφαρμογή των παλμικών ηλεκτρικών πεδίων παρουσίασε μικρή αύξηση της απώλειας νερού μόνο στην περίπτωση του ωσμωτικού διαλύματος συγκέντρωσης 60% με εφαρμογή 200 παλμών και αυτή για χρόνους ώσμωσης μεγαλύτερους από 60 min. Η εφαρμογή 200 παλμών για χρόνους μεγαλύτερους των 40 min ωσμωτικής επεξεργασίας προκάλεσε αύξηση κατά 1-2 $\frac{\text{g}_{\text{νερού}}}{\text{g}_{\text{αρχικού ξηρού βάρους}}}$ στην τιμή της απώλειας υγρασίας στη περίπτωση του ωσμωτικού διαλύματος συγκέντρωσης 60% σε γλυκερόλη. Η πρόσληψη στερεών στο ωσμωτικό διάλυμα συγκέντρωσης 50% αυξήθηκε για κάθε αριθμό παλμών σε σύγκριση με τα ανεπεξέργαστα δείγματα. Για χρόνους μεγαλύτερους των 40 min ωσμωτικής επεξεργασίας στο διάλυμα συγκέντρωσης 60%, η πρόσληψη των στερεών αυξήθηκε για τα δείγματα που επεξεργάστηκαν με ΠΗΠ.

Στην περίπτωση του ωσμωτικού διαλύματος συγκέντρωσης 50% σε γλυκερόλη η εφαρμογή των ΠΗΠ οδηγεί σε ενεργότητες μέχρι 0.93, εκτός από τους 200 παλμούς που στο τέλος της ωσμωτικής επεξεργασίας η ενεργότητα είναι ίση με 0.91. Για το διάλυμα συγκέντρωσης 60% παρατηρήθηκε ότι η ενεργότητα των δειγμάτων έφτασε σε τιμές κοντά στο 0.9 σε αντίθεση με το διάλυμα 50%. Συγκεκριμένα, η εφαρμογή 200 παλμών οδήγησε σε τιμή ενεργότητας 0.9 μετά από 20 min επεξεργασίας, ενώ η εφαρμογή 20 παλμών στην ίδια τιμή ενεργότητας σε χρόνο επεξεργασίας 60 min. Σε σχέση με την αρχική τιμή ενεργότητας για τα ανεπεξέργαστα δείγματα (0.97) επιτεύχθηκε για τους 200 παλμούς μετά το τέλος της επεξεργασίας μείωση κατά 10% και για τους 20 παλμούς 7%. Στους υπόλοιπους αριθμούς παλμών η ενεργότητα παρουσίασε τιμή μικρότερη ή ίση με 0.9 για χρόνο επεξεργασίας μεγαλύτερο από 60 min.

Επιπλέον, η αντικειμενική μέτρηση της μεταβολής του χρώματος των δειγμάτων με τους δείκτες L, C και h δεν παρουσίασε μεταβολές στο χρώμα των δειγμάτων για την επεξεργασία με ωσμωτικό διάλυμα 60% και προκατεργασία με ΠΗΠ. Ωστόσο, στην περίπτωση του ωσμωτικού διαλύματος 50% ο δείκτης L παρουσίασε μείωση 25% σε σχέση με την αρχική

τιμή όταν στα δείγματα σπανακιού εφαρμόστηκαν 200 παλμοί. Για τη μεταβολή της υψής τα συμπεράσματα δεν ήταν σαφή λόγω της μεγάλης διακύμανσης των τιμών που μετρήθηκαν. Αυτό που προκύπτει είναι ότι η επεξεργασία με υψηλό αριθμό παλμών οδήγησε σε μείωση της δύναμης διάτρησης των δειγμάτων στην ωσμωτική αφυδάτωση με διάλυμα 60% σε γλυκερόλη.

Οι συνθήκες που επιλέχθηκαν ως κατάλληλες είναι τα 60 min ως χρόνος ωσμωτικής αφυδάτωσης και οι 20 παλμοί ως προκατεργασία με παλμικά ηλεκτρικά πεδία. Βασικό κριτήριο για την επιλογή αυτών των συνθηκών είναι η ενεργότητα του νερού. Όπως αναφέρθηκε και ανωτέρω, η ενεργότητα του νερού έφτασε σε τιμές κοντά του 0.9 σε χρόνο 60 min και παρουσίασε παραπλήσιες τιμές για μεγαλύτερους χρόνους. Μεταξύ των διαφορετικών αριθμών παλμών, προκύπτει ότι ενεργότητες της τάξης του 0.9 επιτυγχάνονται σε μικρότερο χρόνο (60 min) με εφαρμογή 20 ή 200 παλμών σε αντίθεση με τους υπόλοιπους παλμούς που απαιτούνται περισσότερο από 90 min επεξεργασία για να μειωθεί η ενεργότητα του νερού σε αντίστοιχη τιμή. Οι ενεργότητες στα επίπεδα 0.9 εξυπηρετούν στη μείωση του ρυθμού μικροβιακής ανάπτυξης, καθώς εμποδίζεται η ανάπτυξη αλλοιογόνων μικροοργανισμών. Επιπλέον, σε χρόνο 60 min η απώλεια υγρασίας και η πρόσληψη στερεών παρουσίασαν υψηλές τιμές, για τους 20 παλμούς 3.4 $\frac{\text{g}_{\text{νερού}}}{\text{g}_{\text{αρχικού ξηρού βάρους}}}$ και 1.22 $\frac{\text{g}_{\text{στερεού}}}{\text{g}_{\text{αρχικού ξηρού βάρους}}}$ και για τους 200 παλμούς 4.13 $\frac{\text{g}_{\text{νερού}}}{\text{g}_{\text{αρχικού ξηρού βάρους}}}$ και 1.03 $\frac{\text{g}_{\text{στερεού}}}{\text{g}_{\text{αρχικού ξηρού βάρους}}}$ αντίστοιχα. Η εφαρμογή υψηλών παλμών είχε αρνητική επίδραση στο χρώμα των δειγμάτων, καθώς και προκάλεσε μείωση στη δύναμη διάτρησης των φύλλων σπανακιού. Επίσης, η επιλογή χαμηλού αριθμού παλμών πλεονεκτεί στο τομέα της χαμηλότερης κατανάλωσης ενέργειας, αφού η ειδική ενέργεια που απαιτείται για τους 200 παλμούς είναι 10 φορές μεγαλύτερη από αυτή που χρειάζονται οι 20 παλμοί. Τέλος, η πρόσληψη των στερεών, η οποία εξυπηρετεί την ενίσχυση του ιστού του σπανακιού με συστατικά του ωσμωτικού διαλύματος, παρουσίασε σημαντική αύξηση σε χρόνο ωσμωτικής επεξεργασίας 60 min με προκατεργασία με 20 παλμούς σε σχέση με τα ανεπεξέργαστα με ΠΗΠ δείγματα.

4.5 Μελέτη της διατηρησιμότητας σε ανεπεξέργαστα, ωσμοαφυδατωμένα και ωσμοαφυδατωμένα με προεπεξεργασία με ΠΗΠ δείγματα σπανακιού

Στις προηγούμενες ενότητες μελετήθηκαν η ωσμωτική αφυδάτωση των δειγμάτων σπανακιού σε διαφορετικές συγκεντρώσεις ωσμωτικού διαλύματος και χρόνους επεξεργασίας. Επίσης, εξετάστηκε η εφαρμογή των παλμικών ηλεκτρικών πεδίων σε διαφορετικές εντάσεις ηλεκτρικού πεδίου και αριθμό παλμών. Στόχος ήταν η επιλογή των κατάλληλων συνθηκών επεξεργασίας για κάθε μέθοδο, ώστε να επιτυγχάνονται υψηλές απώλειες υγρασίας και πρόσληψης στερεών και μείωση της ενεργότητας του νερού, ενώ συγχρόνως να παραμένουν αναλλοίωτα ή να βελτιώνονται ποιοτικά χαρακτηριστικά του σπανακιού όπως η υφή και το χρώμα.

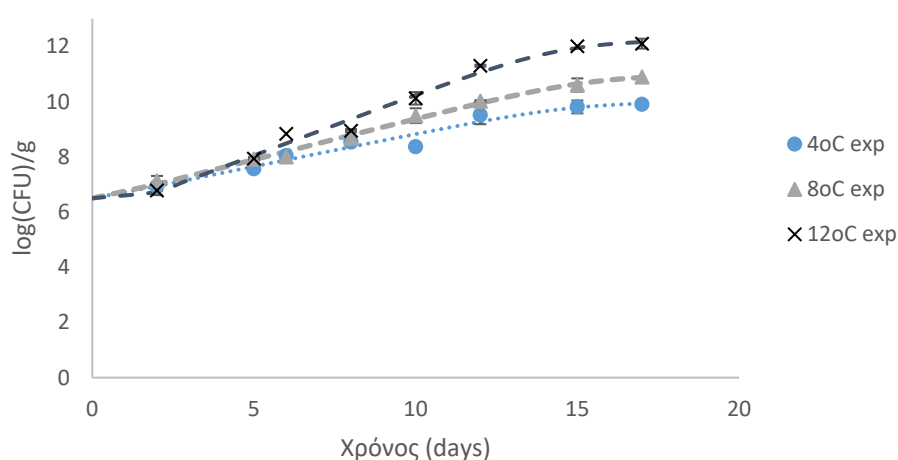
Σε αυτήν την ενότητα εξετάζεται η διατηρησιμότητα δειγμάτων σπανακιού μέσω της χρονικής μεταβολής φαινομένων ποιοτικής και μικροβιολογικής υποβάθμισης του τροφίμου σε διαφορετικές θερμοκρασίας αποθήκευσης. Όλα τα πειράματα έγιναν σε δείγματα χωρίς επεξεργασία (Control), σε ωσμοαφυδατωμένα δείγματα (Osmo) και σε ωσμοαφυδατωμένα με προεπεξεργασία με ΠΗΠ δείγματα σπανακιού (Pef-osmo).

4.5.1 Μικροβιακή ανάπτυξη

Σε αυτό το σημείο μελετάται η ανάπτυξη διαφόρων αλλοιογόνων μικροοργανισμών και συγκεκριμένα το ολικό μικροβιακό φορτίο (total viable count), οι ψευδομονάδες, οι ζύμες και μύκητες και τα εντεροβακτήρια. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για κάθε επεξεργασία ή μη ξεχωριστά. Η προσαρμογή των πειραματικών δεδομένων έγινε με την εφαρμογή του μοντέλου Baranyi και υπολογίστηκαν οι ρυθμοί ανάπτυξης σε κάθε θερμοκρασία.

4.5.1.1 Ανάπτυξη ολικού μικροβιακού φορτίου, ψευδομονάδων, ζυμών και μυκήτων και εντεροβακτηρίων σε ανεπεξέργαστα δείγματα σπανακιού

Ολικό μικροβιακό φορτίο σε ανεπεξέργαστα δείγματα



Διάγραμμα 4.23 Μεταβολή του ολικού μικροβιακού φορτίου σε ανεπεξέργαστα δείγματα (Control) σε σχέση με το χρόνο σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες (4°C, 8°C και 12°C)

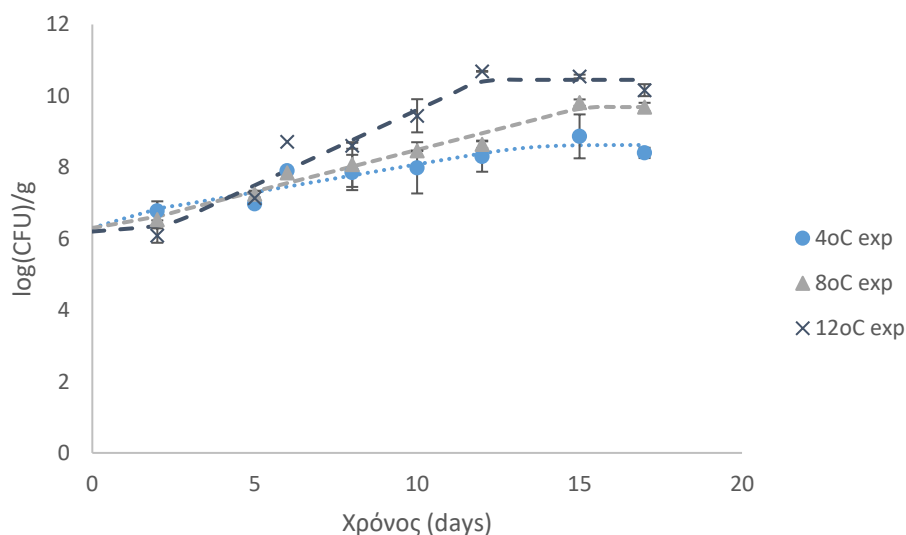
Το διάγραμμα 4.32 παρουσιάζει τη μεταβολή του ολικού μικροβιακού φορτίου σε σχέση με το χρόνο αποθήκευσης σε διαφορετικές θερμοκρασίες για τα ανεπεξέργαστα δείγματα σπανακιού. Παρατηρείται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε αύξηση του ρυθμού ανάπτυξης της ολικής μικροβιακής χλωρίδας. Η φάση στασιμότητας της ανάπτυξης παρατηρείται και για τις τρεις θερμοκρασίες να συμβαίνει μετά τις 15 μέρες αποθήκευσης. Η τελική τιμή του φορτίου για τους 4°C είναι 9.9 log(CFU)/g, για τους 8°C είναι 10.9 log(CFU)/g, ενώ για τους 12°C 12 log(CFU)/g. Η αρχική τιμή του φορτίου είναι 6.5 log(CFU)/g. Προκύπτει ότι η ανάπτυξη της ολικής μικροβιακής χλωρίδας εισέρχεται στη φάση στασιμότητας στις 15 ημέρες για τους 12°C και στις 17 περίπου για τις θερμοκρασίες των 4°C και 8°C.

Πίνακας 5.2 Οι τιμές των ρυθμών ανάπτυξης k (d^{-1}) για το ολικό μικροβιακό φορτίο σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για τα ανεπεξέργαστα δείγματα σπανακιού (Control), όπως προέκυψαν από την προσαρμογή του μοντέλου Baranyi στα πειραματικά δεδομένα

Θερμοκρασία T ($^{\circ}C$)	Ρυθμός ανάπτυξης k (d^{-1})	R^2
4	0.236	0.943
8	0.296	0.991
12	0.440	0.980
E_a (kJ/mol)	50.89	0.97

Στον πίνακα 5.2 φαίνονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μοντέλου Baranyi, μέσω του οποίου προσδιορίζονται οι ρυθμοί ανάπτυξης. Παρατηρείται ότι ο ρυθμός ανάπτυξης αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, καθώς και η προσαρμογή των δεδομένων είναι αρκετά καλή, αφού οι συντελεστές συσχέτισης είναι μεγαλύτεροι από 0.95. Επιπλέον, οι ρυθμοί ανάπτυξης χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή της γραμμικοποιημένης εξίσωσης Arrhenius, για την οποία χρησιμοποιείται ως θερμοκρασία αναφοράς οι $5^{\circ}C$. Η τιμή της ενέργειας ενεργοποίησης για την κινητική ανάπτυξης της ολικής μικροβιακής χλωρίδας είναι ίση με $E_a=50.89$ kJ/mol και ο ρυθμός ανάπτυξης στη θερμοκρασία αναφοράς είναι ίσος με $k_{ref}=0.249$ d^{-1} .

Ανάπτυξη ψευδομονάδων στα ανεπεξέργαστα δείγματα σπανακιού



Διάγραμμα 4.24 Μεταβολή των ψευδομονάδων σε ανεπεξέργαστα δείγματα (Control) σε σχέση με το χρόνο σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες ($4^{\circ}C$, $8^{\circ}C$ και $12^{\circ}C$)

Στο διάγραμμα 4.24 φαίνεται η μεταβολή των ψευδομονάδων σε ανεπεξέργαστα δείγματα σπανακιού σε σχέση με το χρόνο σε διαφορετικές θερμοκρασίες αποθήκευσης. Παρατηρείται ότι ο ρυθμός ανάπτυξης των ψευδομονάδων αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Ο τελικός πληθυσμός διαφέρει για κάθε θερμοκρασία, για τους $4^{\circ}C$ είναι 8.9 log(CFU)/g, για τους $8^{\circ}C$ 9.8 log(CFU)/g και για τους $12^{\circ}C$ 10.7 log(CFU)/g. Επίσης, προκύπτει ότι η υψηλότερη τιμή του φορτίου των ψευδομονάδων επιτυγχάνεται σε 12 μέρες στη

θερμοκρασία των 12°C, ενώ στις υπόλοιπες θερμοκρασίες αποθήκευσης η μεγαλύτερη τιμή απαντάται περίπου στις 15 μέρες αποθήκευσης.

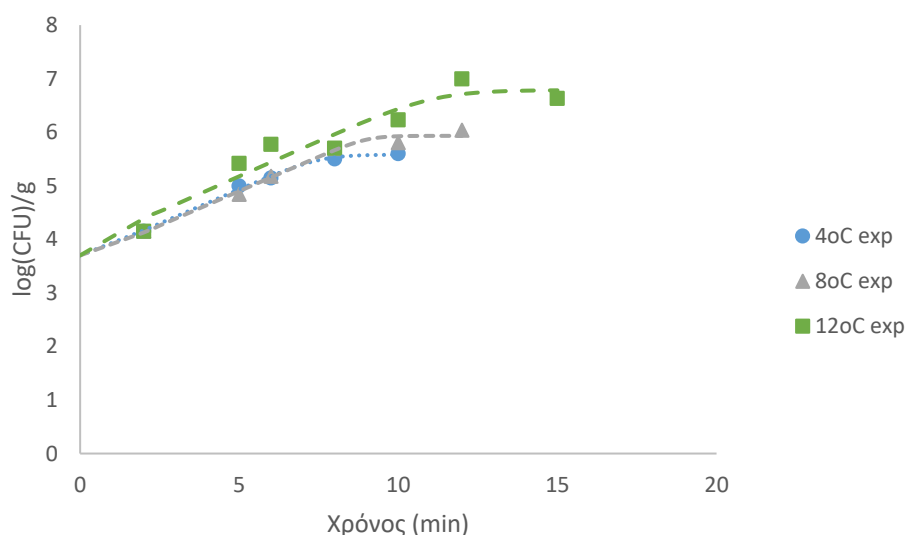
Πίνακας 5.3 Οι τιμές των ρυθμών ανάπτυξης k (d^{-1}) για τις ψευδομονάδες σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για τα ανεπεξέργαστα δείγματα σπανακιού (Control), όπως προέκυψαν από την προσαρμογή του μοντέλου Baranyi στα πειραματικά δεδομένα.

Θερμοκρασία T (°C)	Ρυθμός ανάπτυξης k (d^{-1})	R ²
4	0.157	0.821
8	0.233	0.965
12	0.422	0.927
E_a (kJ/mol)	81.25	0.99

Από τους ρυθμούς ανάπτυξης των ψευδομονάδων που δίνονται στον πίνακα 5.3, επιβεβαιώνεται η αύξηση του ρυθμού με την αύξηση της θερμοκρασίας. Στους 12°C ο ρυθμός είναι σχεδόν διπλάσιος από αυτόν στους 8°C. Οι συντελεστές συσχέτισης είναι ικανοποιητικοί για τους 8 και 12 °C.

Από την εφαρμογή της γραμμικοποιημένης εξίσωσης Arrhenius στις τιμές των ρυθμών ανάπτυξης προκύπτει ότι η ενέργεια ενεργοποίησης της κινητικής ανάπτυξης των ψευδομονάδων είναι $E_a=81.25$ kJ/mol και ο ρυθμός στην θερμοκρασία αναφοράς $k_{ref}=0.172$ d^{-1} .

Ανάπτυξη ζυμών και μυκήτων στα ανεπεξέργαστα δείγματα σπανακιού



Διάγραμμα 4.25 Μεταβολή των ζυμών και μυκήτων σε ανεπεξέργαστα δείγματα (Control) σε σχέση με το χρόνο σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες (4°C, 8°C και 12°C)

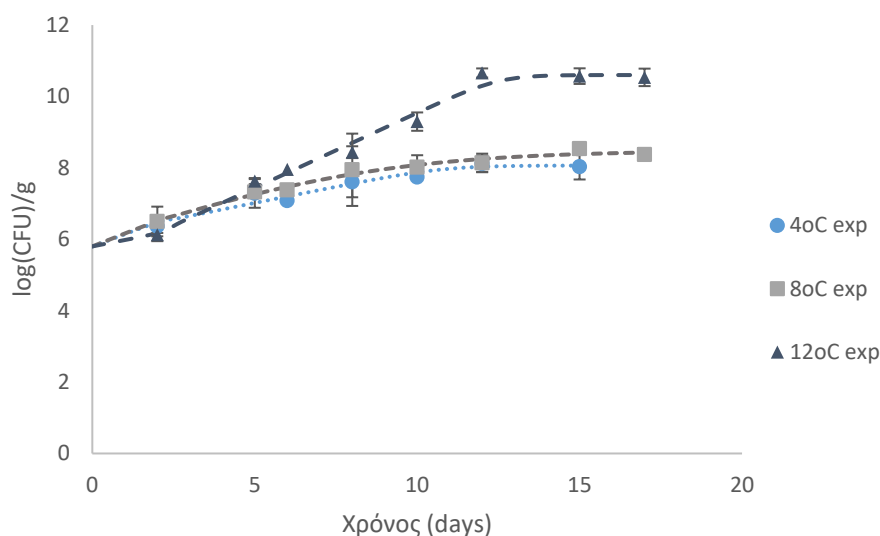
Το διάγραμμα 4.25 αναπαριστά τη μεταβολή των ζυμών και μυκήτων στα ανεπεξέργαστα δείγματα σπανακιού σε σχέση με το χρόνο σε διαφορετικές θερμοκρασίες αποθήκευσης. Παρατηρείται ότι και σε αυτήν την περίπτωση η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε αύξηση του ρυθμού ανάπτυξης και σε μεγαλύτερες τιμές τελικών πληθυσμών. Για την αποθήκευση στους 12°C η μεγαλύτερη τιμή του φορτίου των ζυμών και μυκήτων είναι 7 log(CFU)/g στις 10 ημέρες, για τους 8°C η μεγαλύτερη τιμή που επιτυγχάνεται είναι 6 log(CFU)/g και αντίστοιχα στους 4°C είναι 5.6 log(CFU)/g. Το αρχικό φορτίο είναι 4.5 log(CFU)/g. Η φάση στασιμότητας για τις θερμοκρασίες αποθήκευσης ξεκινάει στις 8 ημέρες για τους 4°C, στις 10 ημέρες για τους 8°C και στις 12 ημέρες για τους 12°C.

Πίνακας 5.4 Οι τιμές των ρυθμών ανάπτυξης k (d^{-1}) για τις ζύμες και μύκητες σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για τα ανεπεξέργαστα δείγματα σπανακιού (Control), όπως προέκυψαν από την προσαρμογή του μοντέλου Baranyi στα πειραματικά δεδομένα.

Θερμοκρασία T (°C)	Ρυθμός ανάπτυξης k (d^{-1})	R ²
4	0.255	0.990
8	0.257	0.980
12	0.264	0.873
E_a (kJ/mol)	2.70	0.90

Από την γραμμικοποιημένη εξίσωση Arrhenius προκύπτουν οι τιμές ανάπτυξης των ζυμών και των μυκήτων στον πίνακα 5.4. Η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί αύξηση και στους ρυθμούς ανάπτυξης, ωστόσο στην περίπτωση των ζυμών και μυκήτων φαίνεται ότι οι ρυθμοί έχουν κοντινές τιμές. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τη χαμηλή τιμή της ενέργειας ενεργοποίησης ($E_a=2.70$ kJ/mol) που δηλώνει ότι δεν υπάρχει σημαντική εξάρτηση της ανάπτυξης των ζυμών και μυκήτων από τη θερμοκρασία. Ο ρυθμός ανάπτυξης στη θερμοκρασία αναφοράς υπολογίστηκε ως $k_{ref}=0.256d^{-1}$.

Ανάπτυξη εντεροβακτηρίων στα ανεπεξέργαστα δείγματα σπανακιού



Διάγραμμα 4.26 Μεταβολή των εντεροβακτηρίων σε ανεπεξέργαστα δείγματα (Control) σε σχέση με το χρόνο σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες (4°C, 8°C και 12°C)

Από το διάγραμμα 4.26 όπου φαίνεται η μεταβολή του φορτίου των εντεροβακτηρίων σε σχέση με το χρόνο αποθήκευσης για ανεπεξέργαστα δείγματα, προκύπτει και σε αυτήν την περίπτωση ότι ο ρυθμός ανάπτυξης είναι μεγαλύτερος για μεγαλύτερη τιμή θερμοκρασίας. Ο μέγιστος πληθυσμός στους 12°C είναι 10.6 log(CFU)/g, στους 8°C είναι 8.5 log(CFU)/g και για τους 4°C 8.2 log(CFU)/g. Το αρχικό φορτίο είναι 5.8 log(CFU)/g. Στους 4 και 8°C η φάση στασιμότητας ξεκινάει στις 12 ημέρες, ενώ για τη θερμοκρασία των 12°C στις 15 περίπου ημέρες.

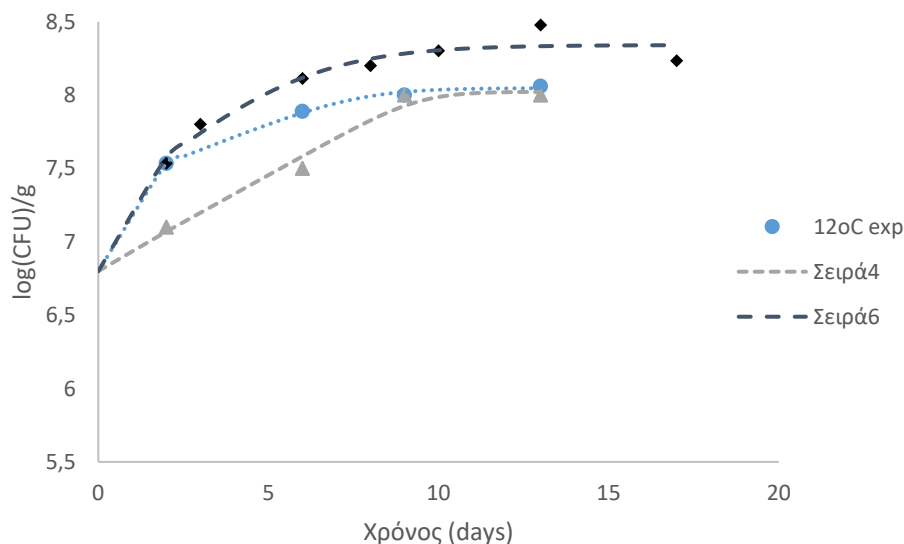
Πίνακας 5.5 Οι τιμές των ρυθμών ανάπτυξης k (d^{-1}) για τα εντεροβακτήρια σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για τα ανεπεξέργαστα δείγματα σπανακιού (Control), όπως προέκυψαν από την προσαρμογή του μοντέλου Baranyi στα πειραματικά δεδομένα.

Θερμοκρασία T (°C)	Ρυθμός ανάπτυξης k (d^{-1})	R ²
4	0.182	0.915
8	0.313	0.969
12	0.421	0.977
E_a (kJ/mol)	68.84	0.975

Στον ανωτέρω πίνακα 5.5 φαίνονται οι ρυθμοί ανάπτυξης των εντεροβακτηρίων σε σχέση με τη θερμοκρασία. Και σε αυτήν την περίπτωση η αύξηση της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ρυθμού ανάπτυξης. Οι συντελεστές συσχέτισης είναι μεγαλύτεροι από 0.9, επομένως προκύπτει μια ικανοποιητική προσαρμογή. Από την εφαρμογή της γραμμικοποιημένης εξίσωσης Arrhenius προκύπτει ότι η ενέργεια ενεργοποίησης της ανάπτυξης των εντεροβακτηρίων ισούται με $E_a=68.84$ kJ/mol και ο ρυθμός στη θερμοκρασία αναφοράς είναι $k_{ref}=0.211$ d^{-1} .

4.5.1.2 Ανάπτυξη ολικού μικροβιακού φορτίου, ψευδομονάδων, ζυμών και μυκήτων και εντεροβακτηρίων σε ωσμοαφυδατωμένα δείγματα σπανακιού

Ολικό μικροβιακό φορτίο σε ωσμοαφυδατωμένα δείγματα



Διάγραμμα 4.27 Μεταβολή του ολικού μικροβιακού φορτίου σε ωσμοαφυδατωμένα δείγματα (*Osmo*) σε ωσμωτικό διάλυμα συγκέντρωσης 60% σε γλυκερόλη για χρόνο 60 min σε σχέση με το χρόνο σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες (4°C, 12°C και 20°C)

Το διάγραμμα 4.27 παρουσιάζει τη μεταβολή της ολικής μικροβιακής χλωρίδας σε ωσμοαφυδατωμένα δείγματα σε σχέση με το χρόνο αποθήκευσης σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Από το διάγραμμα αυτό προκύπτει ότι ο ρυθμός ανάπτυξης αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Σε αντίθεση με τα ανεπεξέργαστα δείγματα, το εύρος του φορτίου στα ωσμοαφυδατωμένα δείγματα είναι πολύ μικρότερο. Η μέγιστη τιμή του μικροβιακού φορτίου είναι 8.5 log(CFU)/g στους 20°C. Συγκριτικά με τα ανεπεξέργαστα δείγματα για τις θερμοκρασίες 4 και 12 °C, ο πληθυσμός φτάνει την τιμή 8 log(CFU)/g περίπου στις 10 ημέρες ενώ στα ανεπεξέργαστα περίπου στις 6 ημέρες. Το αρχικό φορτίο ισούται με 6.9 log(CFU)/g. Η τιμή του αρχικού φορτίου διαφέρει σε σχέση με την περίπτωση του ανεπεξέργαστου δείγματος λόγω της διαφορετικού μικροβιακού φορτίου που υπάρχει στην πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται για κάθε πείραμα.

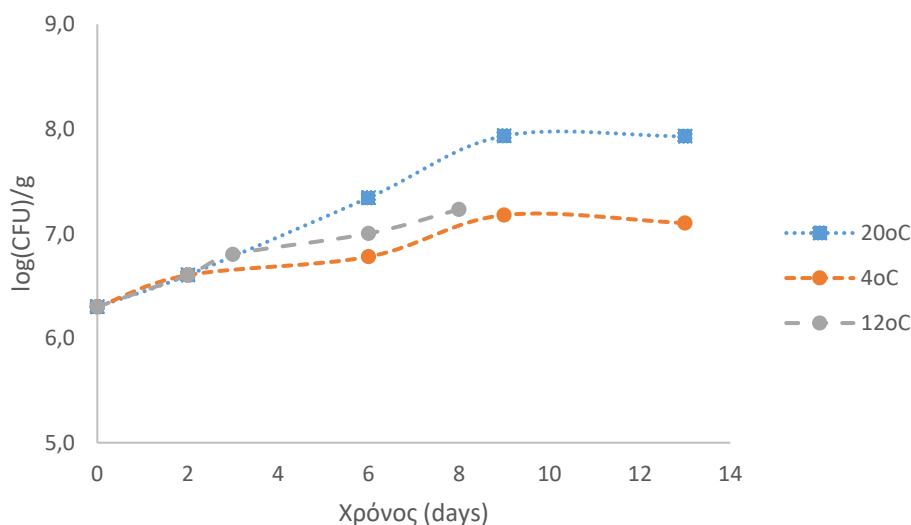
Πίνακας 5.6 Οι τιμές των ρυθμών ανάπτυξης k (d^{-1}) για το ολικό μικροβιακό φορτίο σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για τα ωσμοαφυδατωμένα δείγματα σπανακιού (*Osmo*), όπως προέκυψαν από την προσαρμογή του μοντέλου Baranyi στα πειραματικά δεδομένα.

Θερμοκρασία T (°C)	Ρυθμός ανάπτυξης k (d^{-1})	R ²
4	0.091	0.987
12	0.129	0.928
20	0.201	0.905
E_a (kJ/mol)	33.36	0.993

Οι τιμές των ρυθμών ανάπτυξης, που φαίνονται στον ανωτέρω πίνακα 5.6, αυξάνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Οι συντελεστές συσχέτισης έχουν τιμές μεγαλύτερες του 0.9, που αντικατοπτρίζουν μια καλή προσαρμογή του μαθηματικού μοντέλου στα πειραματικά δεδομένα. Οι τιμές των ρυθμών ανάπτυξης είναι μικρότερες σε σχέση με τα ανεπεξέργαστα δείγματα. Η τιμή του ρυθμού ανάπτυξης της ολικής μικροβιακής χλωρίδας στους 4°C για τα ανεπεξέργαστα δείγματα είναι ίση με 0.236 d⁻¹, ενώ στους 20°C ο ρυθμός ανάπτυξης είναι 0.201 d⁻¹. Αυτό δείχνει ότι η ωσμωτική επεξεργασία επιτυγχάνει πιο αργή μικροβιακή ανάπτυξη, κάτι το οποίο δικαιολογείται αφού η ωσμωτική αφυδάτωση μειώνει την ενεργότητα νερού στο σπανάκι, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνονται τιμές ενεργότητας νερού για τις οποίες είτε δεν μπορεί να υπάρξει μικροβιακή ανάπτυξη είτε επιβραδύνεται σημαντικά.

Μέσω της γραμμικοποιημένης εξίσωσης Arrhenius προκύπτει ότι η ενέργεια ενεργοποίησης για το ολικό μικροβιακό φορτίο για τα ωσμοαφυδατωμένα δείγματα ισούται με E_a=33.36 kJ/mol και ο ρυθμός στη θερμοκρασία αναφοράς είναι k_{ref}=0.094 d⁻¹.

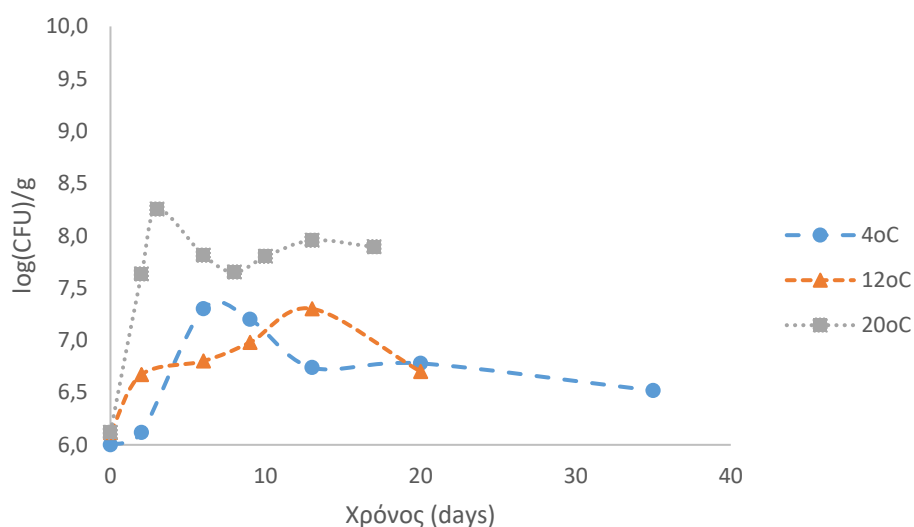
Ψευδομονάδες σε ωσμοαφυδατωμένα δείγματα



Διάγραμμα 4.28 Μεταβολή των ψευδομονάδων σε ωσμοαφυδατωμένα δείγματα (Osmo) σε ωσμωτικό διάλυμα συγκέντρωσης 60% σε γλυκερόλη για χρόνο 60 min σε σχέση με το χρόνο σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες (4°C, 12°C και 20°C)

Στο διάγραμμα 4.28 παρουσιάζεται η μεταβολή των ψευδομονάδων στα ωσμοαφυδατωμένα δείγματα σπανακιού σε σχέση με το χρόνο αποθήκευσης σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Παρατηρείται ότι στα ωσμοαφυδατωμένα δείγματα οι ψευδομονάδες αναπτύσσονται με μικρότερο ρυθμό σε σύγκριση με τα ανεπεξέργαστα δείγματα. Επιπλέον, φαίνεται ότι στις θερμοκρασίες 4 και 12 °C, το φορτίο δεν ξεπερνά τη τιμή 7.2 log(CFU)/g σε καμία χρονική στιγμή σε αντίθεση με τα ανεπεξέργαστα δείγματα όπου σε εκείνη την περίπτωση η τιμή 7.2 υπολογίστηκε περίπου την 5^η ημέρα αποθήκευσης

Εντεροβακτήρια σε ωσμοαφυδατωμένα δείγματα

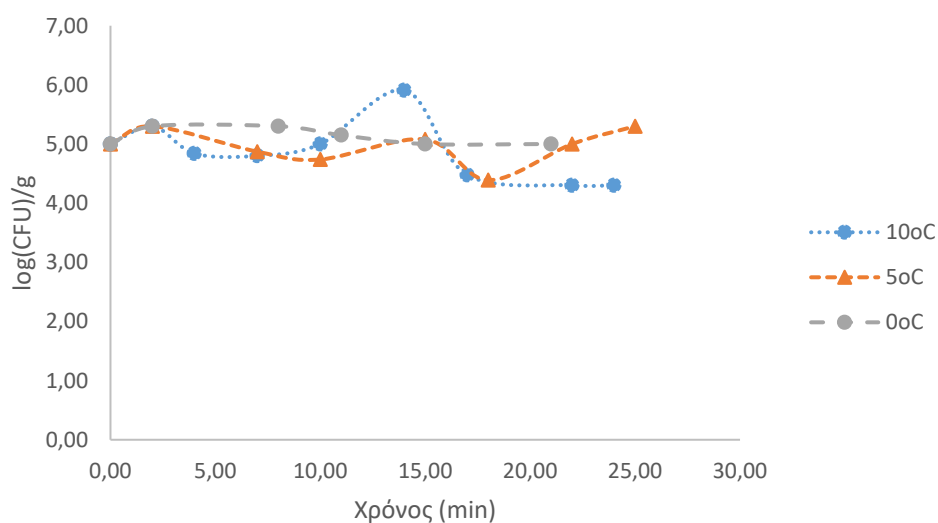


Διάγραμμα 4.29 Μεταβολή των εντεροβακτηρίων σε ωσμοαφυδατωμένα δείγματα (*Osmo*) σε ωσμωτικό διάλυμα συγκέντρωσης 60% σε γλυκερόλη για χρόνο 60 min σε σχέση με το χρόνο σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες (4°C, 12°C και 20°C)

Στο διάγραμμα 4.29 φαίνεται η μεταβολή των εντεροβακτηρίων σε ωσμοαφυδατωμένα δείγματα σπανακιού συναρτήσει του χρόνου αποθήκευσης σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Παρατηρείται ότι στις θερμοκρασίες 4 και 12°C το μικροβιακό φορτίο έφτασε στη μέγιστη τιμή του 7.3 log(CFU)/g σε 6 και 13 ημέρες αντίστοιχα. Στην περίπτωση της θερμοκρασίας των 20°C η αύξηση του φορτίου είναι μεγαλύτερη, αφού η μέγιστη τιμή του φορτίου είναι 8.3 log(CFU)/g μετά από 3 ημέρες αποθήκευσης.

4.5.1.3 Ανάπτυξη ολικού μικροβιακού φορτίου, ψευδομονάδων, ζυμών και μυκήτων και εντεροβακτηρίων σε ωσμοαφυδατωμένα με προκατεργασία με ΠΗΠ δείγματα σπανακιού

Ολικό μικροβιακό φορτίο σε ωσμοαφυδατωμένα δείγματα με προκατεργασία με ΠΗΠ



Διάγραμμα 4.30 Μεταβολή του ολικού μικροβιακού φορτίου σε ωσμοαφυδατωμένα δείγματα με προκατεργασία με ΠΗΠ σε 20 παλμούς (*ref-osmo*) σε ωσμωτικό διάλυμα συγκέντρωσης 60% σε γλυκερόλη για χρόνο 60 min σε σχέση με το χρόνο σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες (0°C, 5°C και 10°C)

Στο διάγραμμα 4.30 παρουσιάζεται η μεταβολή του ολικού μικροβιακού φορτίου στα ωσμοαφυδατωμένα δείγματα σπανακιού με προεπεξεργασία με ΠΗΠ σε συνάρτηση με το χρόνο σε διαφορετικές θερμοκρασίες αποθήκευσης. Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι τα επεξεργασμένα δείγματα σπανακιού με ωσμωτική αφυδάτωση και εφαρμογή παλμικών ηλεκτρικών πεδίων ως προκατεργασία εξυπηρετεί στην καθυστέρηση της ανάπτυξης των μικροοργανισμών. Συνεπώς, δεν παρατηρείται αύξηση του μικροβιακού φορτίου για τις 25 ημέρες διεξαγωγής δειγματοληψιών σε καμία από τις τρεις θερμοκρασίες (0°C, 5°C και 10°C). Η μέγιστη τιμή του φορτίου είναι 5.9 log(CFU)/g στη θερμοκρασία αποθήκευσης 10°C. Αντίστοιχα, το φορτίο στους 5°C δεν ξεπερνά τη τιμή 5.3 log(CFU)/g, όπως και στη περίπτωση της θερμοκρασίας των 0°C.

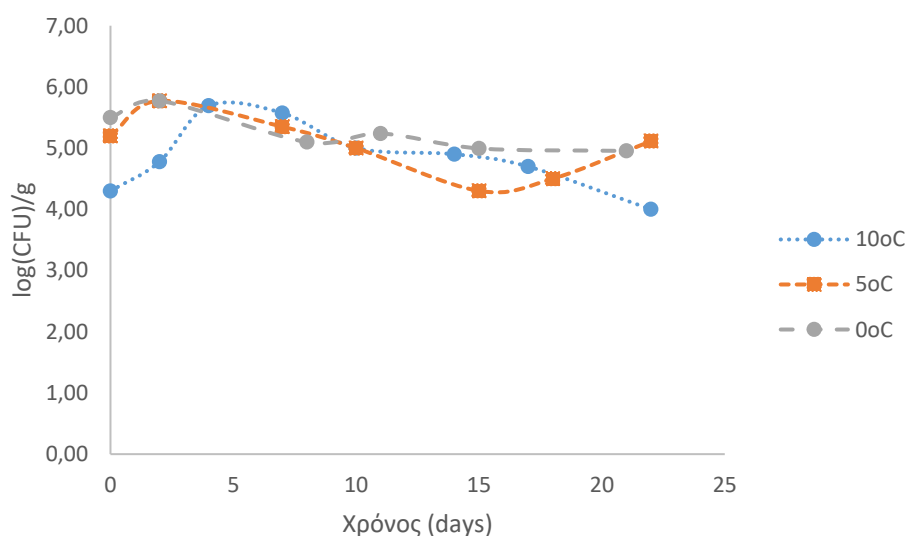
Ψευδομονάδες σε ωσμοαφυδατωμένα δείγματα με προκατεργασία με ΠΗΠ

Κατά την χρονική περίοδο διεξαγωγής πειραμάτων (25-30 ημέρες) δεν παρουσιάστηκε ανάπτυξη ψευδομονάδων στα ωσμοαφυδατωμένα δείγματα σπανακιού με προκατεργασία με ΠΗΠ.

Ζύμες και μύκητες σε ωσμοαφυδατωμένα δείγματα με προκατεργασία με ΠΗΠ

Κατά την χρονική περίοδο διεξαγωγής πειραμάτων (25-30 ημέρες) δεν παρουσιάστηκε ανάπτυξη ζυμών και μυκήτων στα ωσμοαφυδατωμένα δείγματα σπανακιού με προκατεργασία με ΠΗΠ.

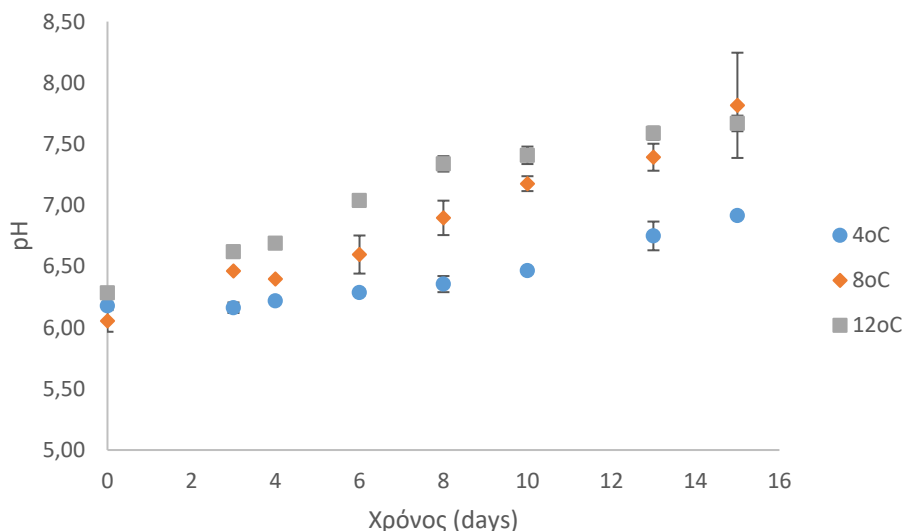
Εντεροβακτήρια σε ωσμοαφυδατωμένα δείγματα με προκατεργασία με ΠΗΠ



Διάγραμμα 4.31 Μεταβολή των εντεροβακτηρίων σε ωσμοαφυδατωμένα δείγματα με προκατεργασία με ΠΗΠ σε 20 παλμούς (*ref-osmo*) σε ωσμωτικό διάλυμα συγκέντρωσης 60% σε γλυκερόλη για χρόνο 60 min σε σχέση με το χρόνο σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες (0°C, 5°C και 10°C)

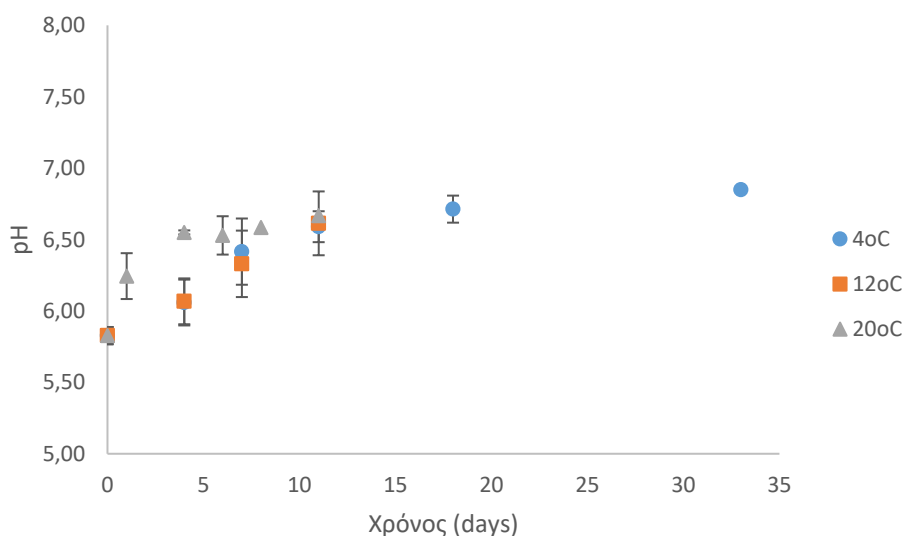
Το παραπάνω διάγραμμα 4.31 απεικονίζει τη μεταβολή των εντεροβακτηρίων σε ωσμοαφυδατωμένα δείγματα σπανακιού με προκατεργασία με ΠΗΠ σε σχέση με το χρόνο σε διαφορετικές θερμοκρασίες αποθήκευσης. Προκύπτει ότι υπάρχει μικρή ανάπτυξη εντεροβακτηρίων τις πρώτες 5-6 ημέρες της αποθήκευσης για τις θερμοκρασίες των 5 και 10°C και στη συνέχεια παρατηρείται ότι η ανάπτυξη πιθανώς περνάει στη φάση στασιμότητας. Το φορτίο παραμένει σε τιμές κάτω από τη τιμή 6 log(CFU)/g κατά τη συνολική διάρκεια διεξαγωγής των δειγματοληψιών. Στους 0°C το μικροβιακό φορτίο παραμένει σταθερό κατά την περίοδο των δειγματοληψιών, κάτι που δείχνει ότι δεν παρουσιάζεται ανάπτυξη εντεροβακτηρίων. Συγκριτικά με τα ανεπεξέργαστα και τα ωσμοαφυδατωμένα δείγματα, επιτυγχάνονται σημαντικά μικρότερες τιμές φορτίου, το οποίο συμβαίνει λόγω της προεπεξεργασίας με ΠΗΠ που μειώνει το ρυθμό ανάπτυξης.

4.5.2 Μεταβολή του pH



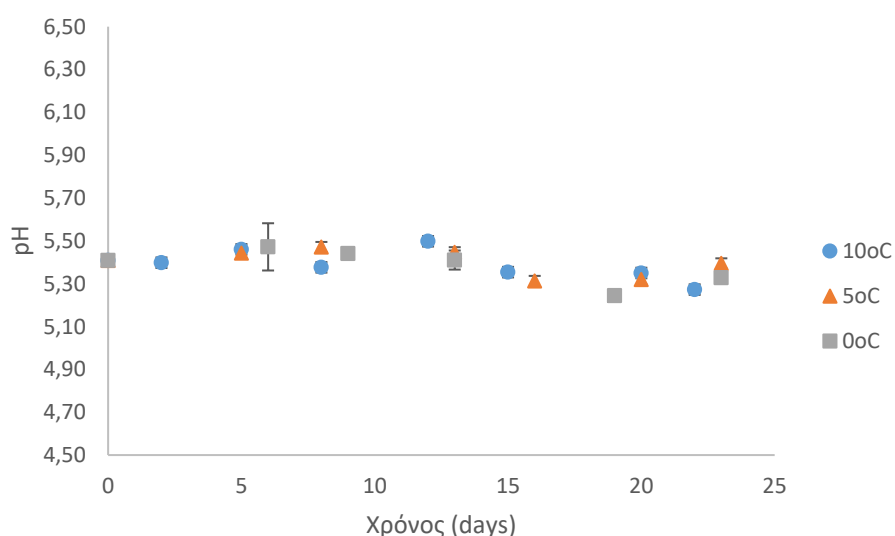
Διάγραμμα 4.32 Μεταβολή του pH στα ανεπεξέργαστα δείγματα (Control) σε σχέση με το χρόνο σε διαφορετικές θερμοκρασίες αποθήκευσης (4°C, 8°C και 12°C)

Στο παραπάνω διάγραμμα 4.32 φαίνεται η μεταβολή του pH στα ανεπεξέργαστα δείγματα σπανακιού σε σχέση με το χρόνο για διαφορετικές θερμοκρασίες αποθήκευσης. Το pH εξαρτάται από την ανάπτυξη των μικροοργανισμών, αφού ορισμένοι μικροοργανισμοί όπως οι ψευδομονάδες παράγουν μεταβολικές ενώσεις οι οποίες αυξάνουν το pH (Gram και Huss, 1996). Από το διάγραμμα 4.32, προκύπτει ότι το pH μεταβάλλεται με αυξητική τάση, η οποία είναι μεγαλύτερη όσο αυξάνεται και η θερμοκρασία αποθήκευσης. Η μέγιστη τιμή pH που μετρήεται είναι 7,8 μετά από 15 ημέρες σε θερμοκρασίες αποθήκευσης δειγμάτων ίσες με 8°C και 12°C.



Διάγραμμα 4.33 Μεταβολή του pH στα ωσμωαφυδατωμένα δείγματα (Osmo) σε σχέση με το χρόνο σε διαφορετικές θερμοκρασίες αποθήκευσης (4°C, 12°C και 20°C)

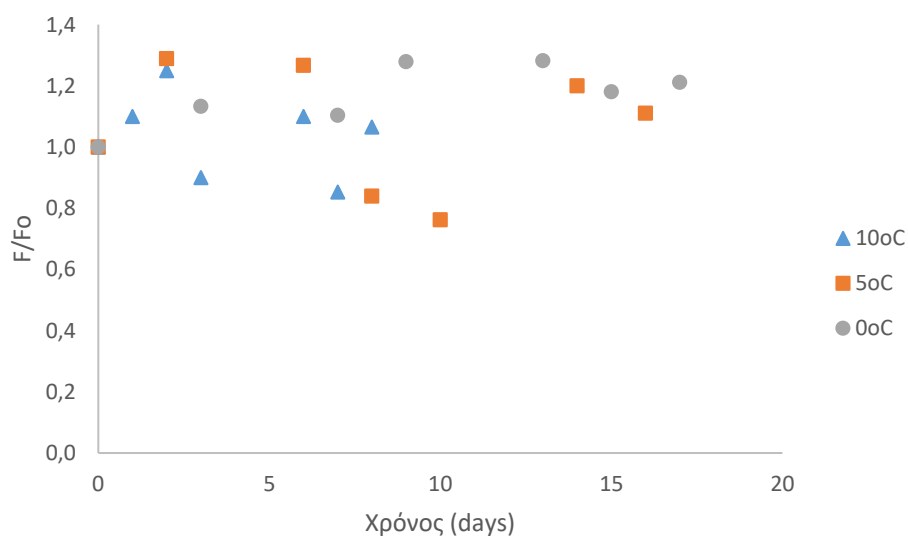
Το διάγραμμα 4.33 απεικονίζει τη μεταβολή του pH στα ωσμοαφυδατωμένα δείγματα σπανακιού σε συνάρτηση με το χρόνο σε διαφορετικές θερμοκρασίες αποθήκευσης. Όπως και στην περίπτωση των ανεπεξεργαστων δειγμάτων, η μεταβολή του pH ακολουθεί την πορεία της μικροβιακής ανάπτυξης. Συγκεκριμένα παρατηρείται μικρή αύξηση του pH τις πρώτες ημέρες και στη συνέχεια υπάρχει σταθεροποίηση της τιμής. Η μέγιστη τιμή του pH συναντάται στη θερμοκρασία αποθήκευσης των 4°C και είναι ίση με 6.8 στις 33 ημέρες αποθήκευσης, σε αντίθεση με τα ανεπεξεργαστα δείγματα όπου η μέγιστη τιμή μετρήθηκε στο 7.5. Και σε αυτήν την περίπτωση η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε αύξηση του pH, κάτι το οποίο σχετίζεται με τους ρυθμούς της μικροβιακής ανάπτυξης, οι οποίοι παρουσιάζουν αύξηση όταν αυξάνεται η θερμοκρασία.



Διάγραμμα 4.34 Μεταβολή του pH στα ωσμοαφυδατωμένα δείγματα με προεπεξεργασία με ΠΗΠ (ref-osmo) σε σχέση με το χρόνο σε διαφορετικές θερμοκρασίες αποθήκευσης (5°C και 10°C)

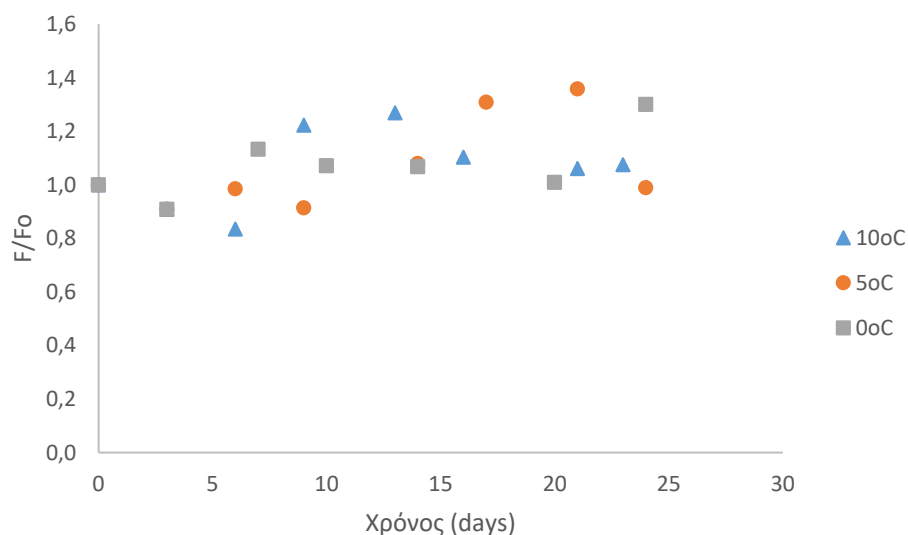
Από το διάγραμμα 4.34, όπου φαίνεται η μεταβολή του pH στα ωσμοαφυδατωμένα δείγματα με προεπεξεργασία με ΠΗΠ σε σχέση με το χρόνο σε διαφορετικές θερμοκρασίες αποθήκευσης, προκύπτει ότι το pH δεν παρουσιάζει μεταβολή σε σχέση με το χρόνο στα ωσμοαφυδατωμένα δείγματα σπανακιού με προκατεργασία με ΠΗΠ. Το εύρος των τιμών κυμαίνεται από 5.3 έως 5.5 της κλίμακας του pH. Προηγουμένως αναφέρθηκε ότι η μικροβιακή ανάπτυξη στα ωσμοαφυδατωμένα δείγματα με προεπεξεργασία με ΠΗΠ είναι περιορισμένη ή μη ανιχνεύσιμη ανάλογα με το υπόστρωμα που μετριέται, κάτι το οποίο έρχεται σε συμφωνία με τις μετρήσεις του pH. Επιπλέον, ένα από τα συστατικά του ωσμωτικού διαλύματος είναι το ξύδι, το οποίο είναι όξινο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η επεξεργασία με ώσμωση να μειώνει το pH, όπως και προκύπτει στις περιπτώσεις των ωσμοαφυδατωμένων δειγμάτων σπανακιού με προκατεργασία ή μη με ΠΗΠ.

4.5.3 Μεταβολή της δύναμης διάτρησης



Διάγραμμα 4.35 Μεταβολή της δύναμης διάτρησης προς την αρχική δύναμη σε ανεπεξέργαστα δείγματα σπανακιού (*control*) σε σχέση με το χρόνο σε θερμοκρασίες αποθήκευσης (0°C, 5°C και 10°C)

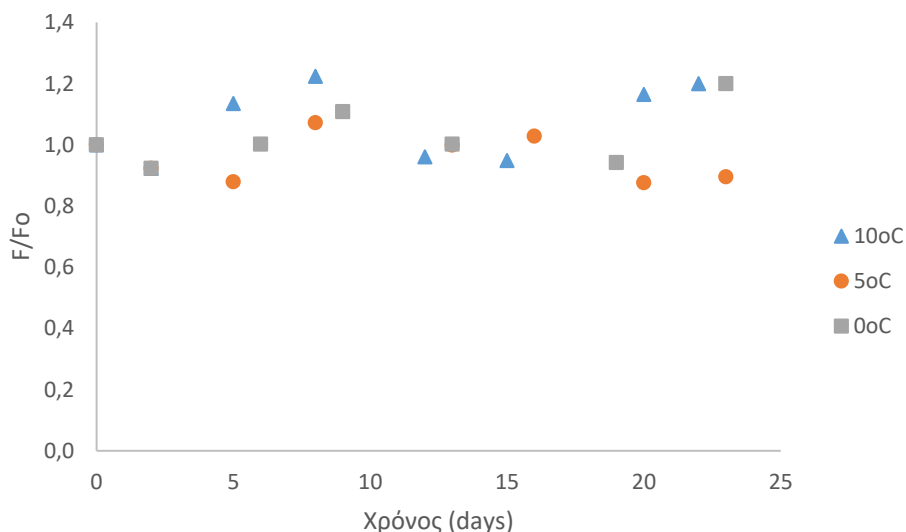
Στο διάγραμμα 4.35 αναπαρίσταται η μεταβολή της δύναμης διάτρησης στα ανεπεξέργαστα δείγματα σπανακιού σε διαφορετικές θερμοκρασίες αποθήκευσης. Παρατηρείται ότι δεν υπάρχει μεταβολή της δύναμης σε σχέση με τη θερμοκρασία αποθήκευσης. Σε όλες τις θερμοκρασίες οι τιμές παρουσιάζουν κοντινές τιμές.



Διάγραμμα 4.36 Μεταβολή της δύναμης διάτρησης προς την αρχική δύναμη σε ωσμοαφυδατωμένα δείγματα σπανακιού (*osmo*) σε σχέση με το χρόνο σε θερμοκρασίες αποθήκευσης (0°C, 5°C και 10°C)

Το διάγραμμα 4.36 παρουσιάζει τη μεταβολή της δύναμης διάτρησης των ωσμοαφυδατωμένων δειγμάτων σπανακιού σε σχέση με το χρόνο σε διαφορετικές

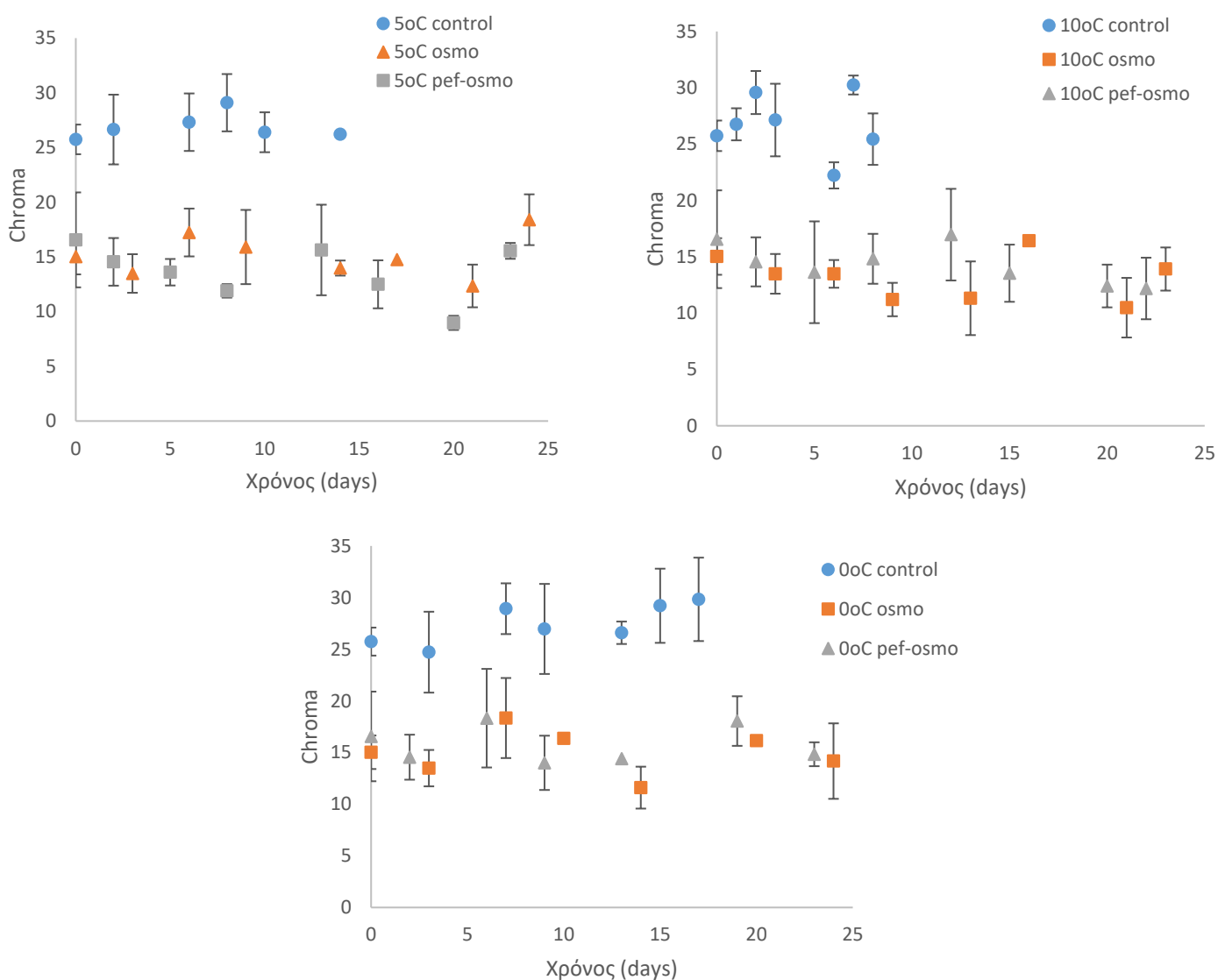
θερμοκρασίες αποθήκευσης. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η δύναμη που απαιτείται για τη διάτρηση των φύλλων του σπανακιού δεν μεταβάλλεται σε σχέση με το χρόνο. Επίσης, συγκριτικά για τις τρεις θερμοκρασίες αποθήκευσης δεν παρατηρείται κάποια διαφορά μεταξύ τους.



Διάγραμμα 4.37 Μεταβολή της δύναμης διάτρησης προς την αρχική δύναμη σε ωσμοαφυδατωμένα δείγματα σπανακιού με προκατεργασία με ΠΗΠ (ref-osmo) σε σχέση με το σε θερμοκρασίες αποθήκευσης (0°C, 5°C και 10°C)

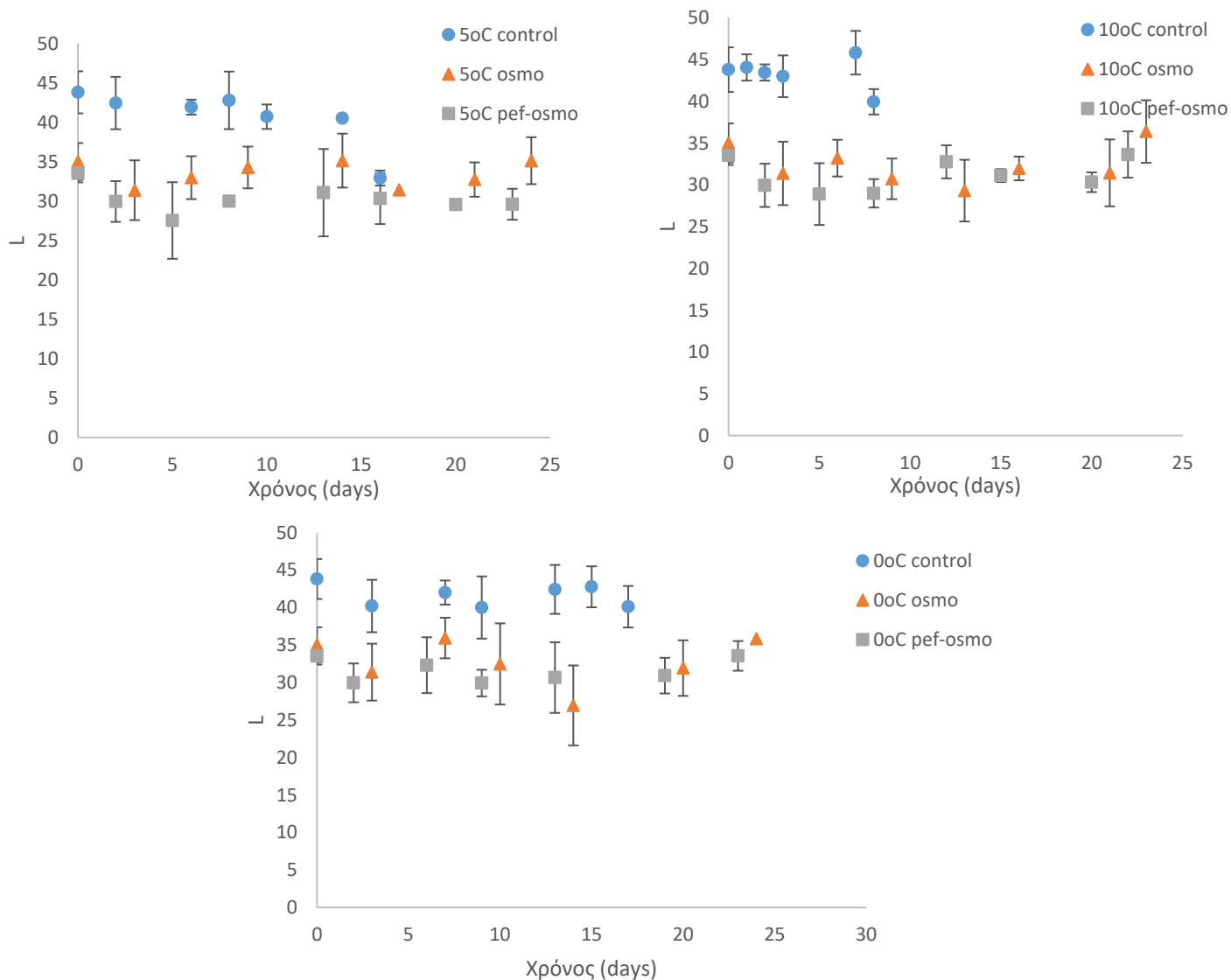
Στο διάγραμμα 4.37 παρουσιάζεται η μεταβολή τα δύναμης διάτρησης των ωσμοαφυδατωμένων δειγμάτων σπανακιού με προεπεξεργασία με ΠΗΠ σε σχέση με το χρόνο σε διαφορετικές θερμοκρασίες αποθήκευσης. Η ωσμωτική αφυδάτωση και η εφαρμογή ΠΗΠ δεν φαίνεται να επιδρά αρνητικά στην υφή των δειγμάτων, αφού η δύναμη διάτρησης δεν μεταβάλλεται σε σχέση με το χρόνο και σε σχέση με τη θερμοκρασία αποθήκευσης.

4.5.4 Μεταβολή του αντικειμενικού χρώματος



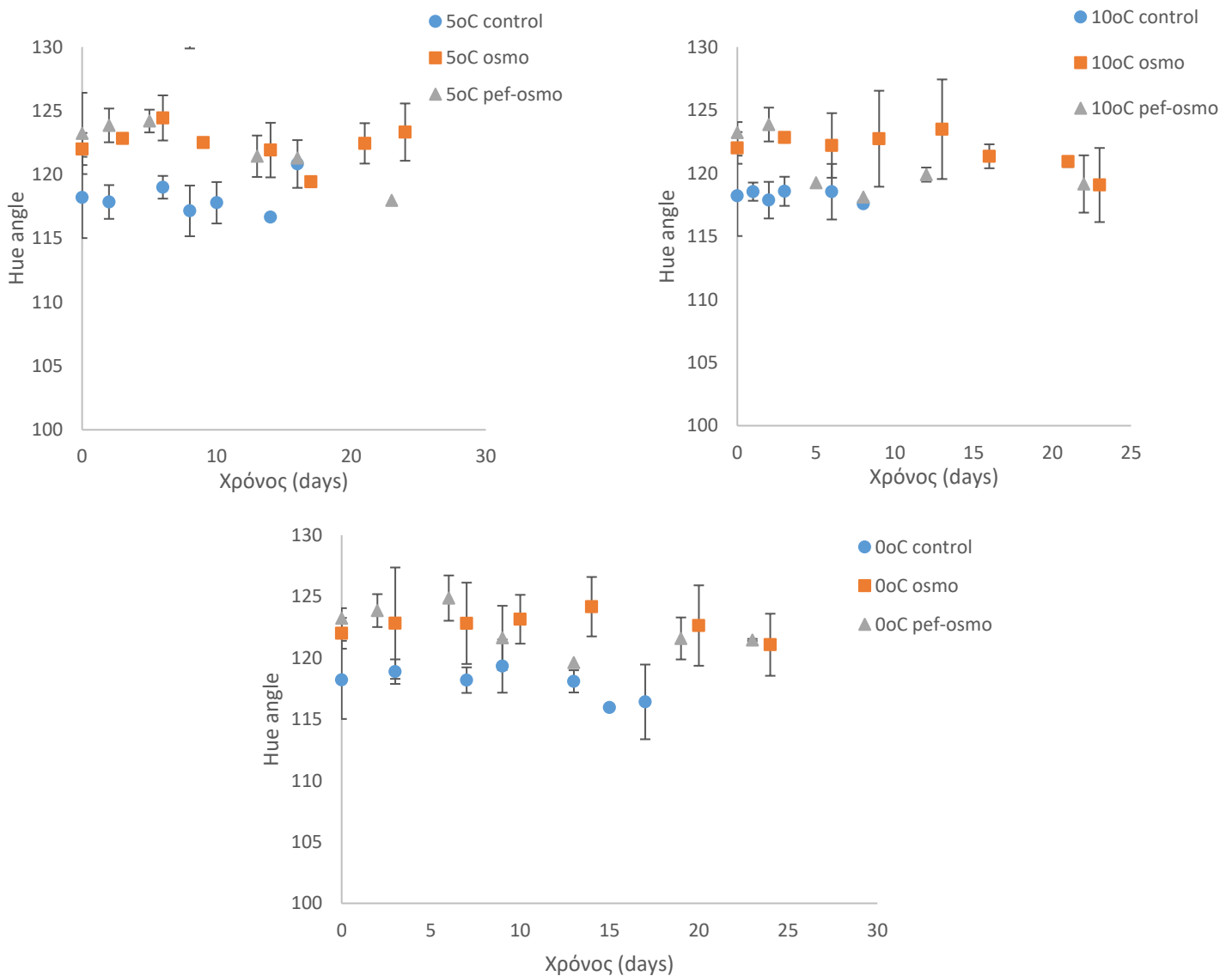
Διάγραμμα 4.38 Μεταβολή του δείκτη C της έντασης του χρώματος για ανεπεξέργαστα, ωσμοαφυδατωμένα και ωσμοαφυδατωμένα με προκατεργασία με ΠΗΠ δείγματα σε θερμοκρασία αποθήκευσης 0°C (κάτω), 5°C (πάνω αριστερά) και 10°C (πάνω δεξιά)

Τα διαγράμματα 4.38 παρουσιάζουν τη μεταβολή του δείκτη C για τα ανεπεξέργαστα, τα ωσμοαφυδατωμένα και τα ωσμοαφυδατωμένα δείγματα με προκατεργασία με ΠΗΠ δείγματα σπανακιού, ο οποίος περιγράφει την ένταση του χρώματος των δειγμάτων. Και για τις τρεις θερμοκρασίες υπάρχει η ίδια τάση. Οι τιμές του δείκτη C στα ωσμοαφυδατωμένα και τα ωσμοαφυδατωμένα με προκατεργασία με ΠΗΠ δείγματα σπανακιού παρουσιάζουν πτώση 10 μονάδων αμέσως μετά από κάθε επεξεργασία και στη συνέχεια η τιμή δεν μεταβάλλεται κατά τη χρονική διάρκεια των δειγματοληψιών. Μεταξύ των δύο διαφορετικών επεξεργασιών δεν προκύπτει κάποια σαφής διαφορά.



Διάγραμμα 4.39 Μεταβολή του δείκτη L της φωτεινότητας για ανεπεξέργαστα, ωσμοαφυδατωμένα και ωσμοαφυδατωμένα με προκατεργασία με ΠΗΠ δείγματα σε θερμοκρασία αποθήκευσης 0°C (κάτω), 5°C (πάνω αριστερά) και 10°C (πάνω δεξιά)

Στο διάγραμμα 4.39 απεικονίζεται η μεταβολή του δείκτη L στα ανεπεξέργαστα, ωσμοαφυδατωμένα και ωσμοαφυδατωμένα με προκατεργασία με ΠΗΠ δείγματα σπανακιού. Και σε αυτήν την περίπτωση προκύπτει ότι ο δείκτης φωτεινότητας των δειγμάτων L παρουσιάζει την ίδια τάση με τον δείκτη C. Η τιμή του δείκτη και για τις τρεις θερμοκρασίες και στις δύο επεξεργασίες μειώνεται αμέσως μετά την κάθε επεξεργασία σε χρόνο 0 κατά 5 έως 10 μονάδες. Στη συνέχεια, δεν υπάρχει μεταβολή της τιμής με το χρόνο ούτε για τα ανεπεξέργαστα ούτε για τα επεξεργασμένα δείγματα. Μεταξύ των διαφορετικών θερμοκρασιών και επεξεργασιών δεν υπάρχει κάποια μεταβολή του δείκτη φωτεινότητας των δειγμάτων.



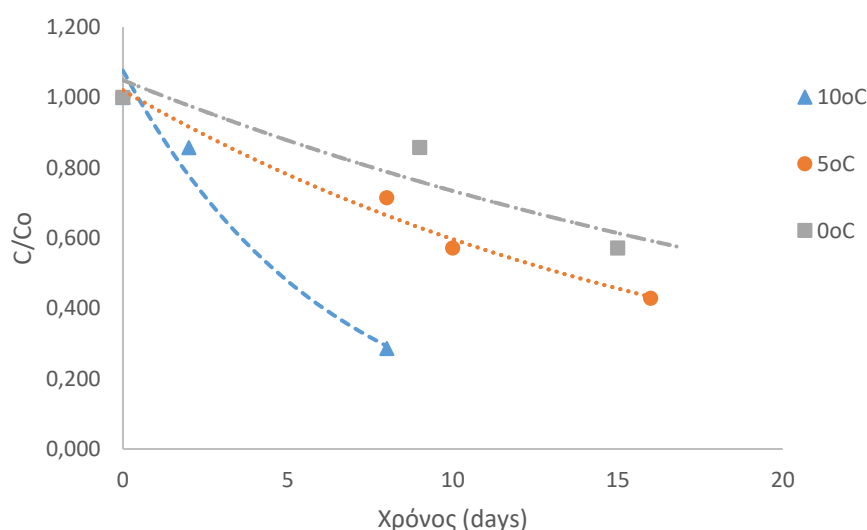
Διάγραμμα 4.40 Μεταβολή του δείκτη Hue angle της απόχρωσης του χρώματος για ανεπεξέργαστα, ωσμοαφυδατωμένα και ωσμοαφυδατωμένα με προκατεργασία με ΠΗΠ δείγματα σε θερμοκρασία αποθήκευσης 0°C (κάτω), 5°C (πάνω αριστερά) και 10°C (πάνω δεξιά)

Το διάγραμμα 4.40 περιγράφει τη μεταβολή του δείκτη h στα ανεπεξέργαστα, στα ωσμοαφυδατωμένα και στα ωσμοαφυδατωμένα με προκατεργασία με ΠΗΠ δείγματα σπανακιού. Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι τα ωσμοαφυδατωμένα και ωσμοαφυδατωμένα με προεπεξεργασία με ΠΗΠ δείγματα σπανακιού και στις τρεις θερμοκρασίες (0°C, 5°C και 10°C) παρουσιάζουν αύξηση περίπου 5 έως 10 μονάδων του δείκτη h σε χρόνο 0 σε σχέση με τα ανεπεξέργαστα δείγματα. Κατά τη διάρκεια του πειράματος διατηρησιμότητα όλα τα δείγματα διατηρούν σχεδόν σταθερή την απόχρωση του πράσινου χρώματος του σπανακιού ανεξαρτήτως το είδος της επεξεργασίας, το οποίο κρίνεται ως επιθυμητό αποτέλεσμα γιατί δεν φαίνεται η ωσμωτική αφυδάτωση και τα ΠΗΠ να επιδρούν αρνητικά στην απόχρωση του χαρακτηριστικού πράσινου χρώματος των δειγμάτων σπανακιού.

4.5.5 Προσδιορισμός περιεκτικότητας ασκορβικού οξέος (βιταμίνη C)

Η συγκέντρωση της βιταμίνης C μειώνεται λόγω της οξείδωσης του L-ασκορβικού οξέος των φυτικών προϊόντων κατά τη συντήρησή τους. Μέσω των μετρήσεων, κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης των ανεπεξέργαστων, των ωσμοαφυδατωμένων και των ωσμοαφυδατωμένων με προκατεργασία με ΠΗΠ δειγμάτων σπανακιού, υπολογίζεται ο ρυθμός απώλειας για κάθε θερμοκρασία αποθήκευσης. Η απώλεια της βιταμίνης φαίνεται ότι ακολουθεί κινητική αντίδρασης πρώτης τάξης:

$$\frac{C}{C_0} = A * e^{-kt} \text{ (Εξίσωση 4.1)}$$



Διάγραμμα 4.41 Μεταβολή του λόγου της συγκέντρωσης βιταμίνης C προς την αρχική συγκέντρωση στα ανεπεξέργαστα δείγματα (Control) για θερμοκρασίες αποθήκευσης 0°C, 5°C και 10°C

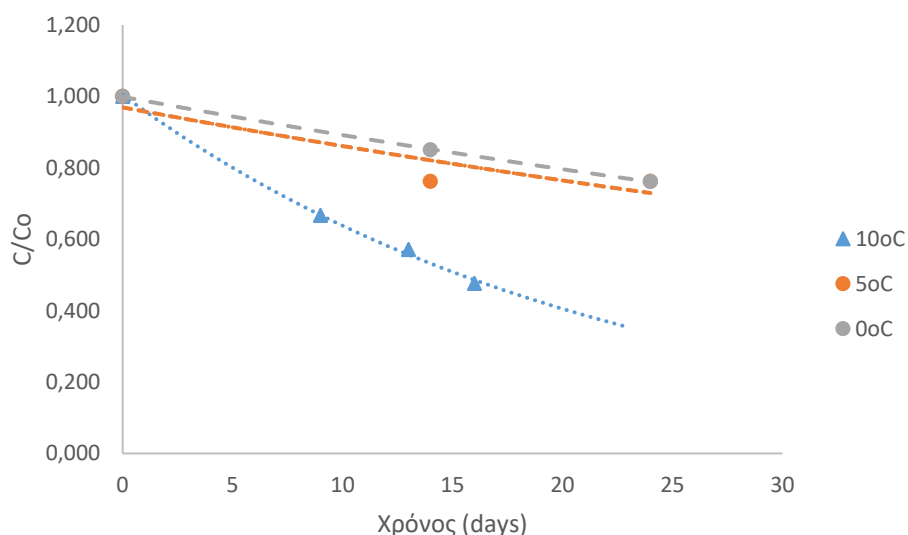
Το διάγραμμα 4.41 δείχνει τη μεταβολή της περιεκτικότητας σε βιταμίνη C στα ανεπεξέργαστα δείγματα σπανακιού σε σχέση με το χρόνο αποθήκευσης σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Προκύπτει ότι η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε μεγαλύτερη μείωση της βιταμίνης C. Στην θερμοκρασία των 10°C παρατηρείται μείωση κατά 80% στην περιεκτικότητα της βιταμίνης C μετά από 8 ημέρες, ενώ στις θερμοκρασίες 0 και 5°C η μείωση είναι περίπου της τάξης του 50% μετά από 15 ημέρες αποθήκευσης.

Πίνακας 5.7 Σταθερές ρυθμού μείωσης βιταμίνης C k_{vitaminC} και συντελεστές συσχέτισης R^2 για θερμοκρασίες 0°C, 5°C και 10°C σε ανεπεξέργαστα δείγματα σπανακιού (Control)

Θερμοκρασία T(°C)	k_{vitaminC} (d ⁻¹)	R^2
0	-0.036	0.870
5	-0.054	0.980
10	-0.163	0.983
E_a (kJ/mol)	96.73	0.928

Στον πίνακα 5.7 φαίνονται οι ρυθμοί μείωσης της βιταμίνης C σε σχέση με τη θερμοκρασία αποθήκευσης. Αυτό που αναμενόταν ήταν η αύξηση της θερμοκρασίας να οδηγεί και σε

αύξηση του ρυθμού απωλειών. Οι συντελεστές συσχέτισης παρουσιάζουν υψηλές τιμές εκτός από τη θερμοκρασία των 0°C. Από την εφαρμογή της γραμμικοποιημένης εξίσωσης Arrhenius προκύπτει ότι η ενέργεια ενεργοποίησης του ρυθμού μείωσης της βιταμίνης C είναι $E_a=96.73 \text{ kJ/mol}$ και ο ρυθμός μείωσης στη θερμοκρασία αναφοράς ($T_{ref}=4^\circ\text{C}$) είναι ίσος με $k_{ref}=0.059\text{d}^{-1}$.



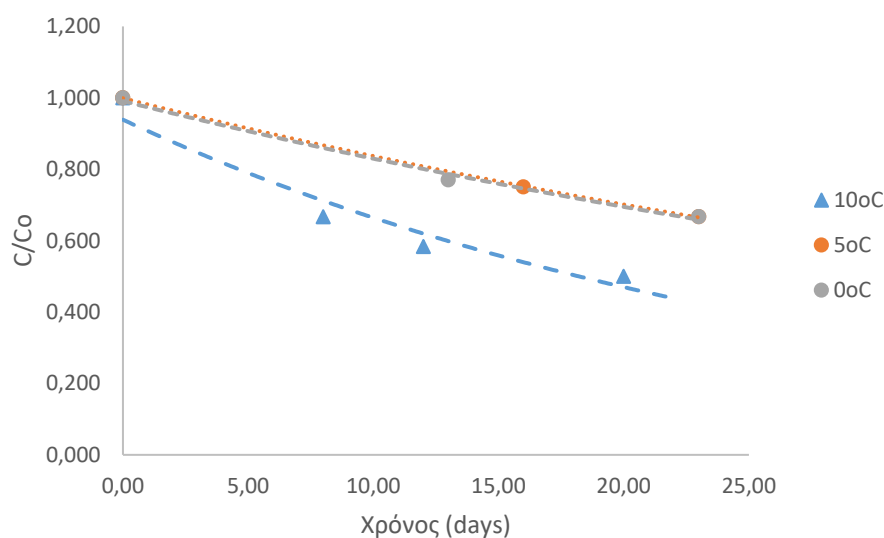
Διάγραμμα 4.42 Μεταβολή του λόγου της συγκέντρωσης βιταμίνης C προς την αρχική συγκέντρωση στα ωσμοαφυδατωμένα δείγματα (Osmo) για θερμοκρασίες αποθήκευσης 0°C, 5°C και 10°C

Στο διάγραμμα 4.42 παρουσιάζεται η μεταβολή της συγκέντρωσης βιταμίνης C στα ωσμοαφυδατωμένα δείγματα σπανακιού σε σχέση με το χρόνο για διαφορετικές θερμοκρασίες αποθήκευσης. Στην περίπτωση των ωσμοαφυδατωμένων δειγμάτων παρατηρείται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα και την αύξηση του ρυθμού μείωσης. Οι τιμές για τις θερμοκρασίες 0 και 5°C είναι πολύ κοντινές. Στη θερμοκρασία των 10°C η συγκέντρωση μειώνεται κατά 50% μετά από 16 ημέρες, ενώ για τις άλλες θερμοκρασίες η μείωση της συγκέντρωσης είναι της τάξης του 25% μετά από 24 ημέρες. Φαίνεται ότι η ωσμωτική αφυδάτωση εξυπηρετεί στην επιβράδυνση της μείωσης της βιταμίνης C, κάτι το οποίο επιβεβαιώνεται και από τους ρυθμούς μείωσης παρακάτω.

Πίνακας 5.8 Σταθερές ρυθμού μείωσης βιταμίνης C k_{vitaminC} και συντελεστές συσχέτισης R^2 για θερμοκρασίες 0°C, 5°C και 10°C σε ωσμοαφυδατωμένα δείγματα σπανακιού (Osmo)

Θερμοκρασία T(°C)	k_{vitaminC} (d^{-1})	R^2
0	-0.011	0.999
5	-0.012	0.828
10	-0.045	0.996
E_a (kJ/mol)	90.01	0.788

Από τον πίνακα 5.8 των ρυθμών μείωσης της βιταμίνης C επιβεβαιώνεται η εξάρτηση του ρυθμού από τη θερμοκρασία, αφού η αύξηση της οδηγεί σε αυξημένες τιμές του ρυθμού μείωσης. Από την εφαρμογή της εξίσωσης Arrhenius, προκύπτει η ενέργεια ενεργοποίησης ίση με $E_a=90.01\text{kJ/mol}$ και ο ρυθμός μείωσης στη θερμοκρασία αναφοράς $k_{ref}=0.016\text{d}^{-1}$.



Διάγραμμα 4.43 Μεταβολή του λόγου της συγκέντρωσης βιταμίνης C προς την αρχική συγκέντρωση στα ωσμοαφυδατωμένα δείγματα με προκατεργασία με ΠΗΠ (*ref-osmo*) για θερμοκρασίες αποθήκευσης 0°C, 5°C και 10°C

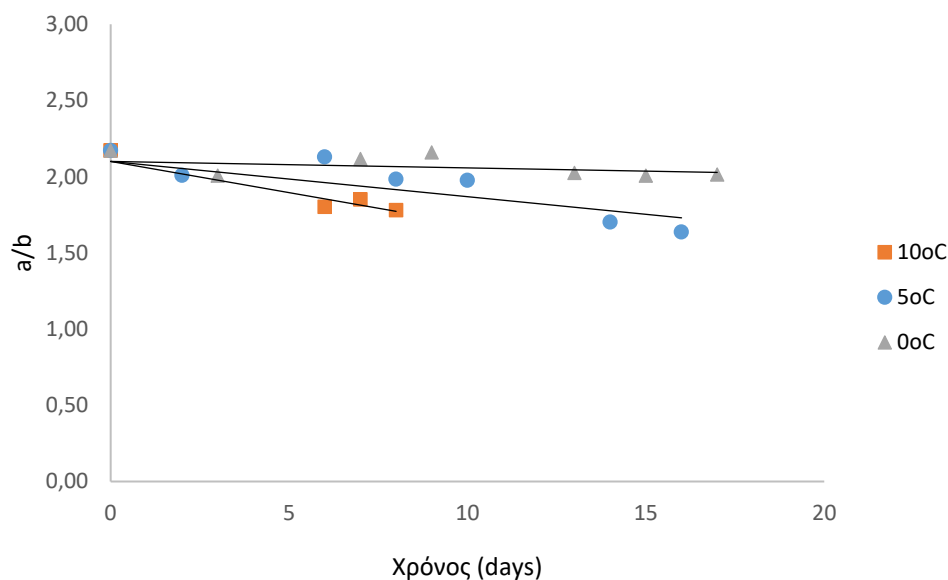
Στο διάγραμμα 4.43 φαίνεται η μεταβολή της συγκέντρωσης της βιταμίνης C στα ωσμοαφυδατωμένα δείγματα σπανακιού με προκατεργασία με ΠΗΠ σε σχέση με το χρόνο σε διαφορετικές θερμοκρασίες αποθήκευσης. Στην περίπτωση της προκατεργασίας με ΠΗΠ στα ωσμοαφυδατωμένα δείγματα σπανακιού επιβεβαιώνεται ότι η αύξηση της θερμοκρασία οδηγεί σε αύξηση του ρυθμού μείωσης της βιταμίνης C. Στη θερμοκρασία των 10°C παρατηρείται μείωση της συγκέντρωσης της βιταμίνης κατά 35% μετά από 24 ημέρες. Συγκριτικά με τα ανεπεξέργαστα δείγματα και τα ωσμοαφυδατωμένα δείγματα, στους 10°C η εφαρμογή ΠΗΠ οδήγησε με μικρότερη μείωση της βιταμίνης C μετά από 24 ημέρες αποθήκευσης.

Πίνακας 5.9 Σταθερές ρυθμού μείωσης βιταμίνης C k_{vitaminC} και συντελεστές συσχέτισης R^2 για θερμοκρασίες 0°C, 5°C και 10°C σε ωσμοαφυδατωμένα με προκατεργασία με ΠΗΠ δείγματα σπανακιού (*Osmo*)

Θερμοκρασία T(°C)	k_{vitaminC} (d ⁻¹)	R ²
0	-0.018	0.992
5	-0.018	0.999
10	-0.035	0.940
E_a (kJ/mol)	42.45	0.741

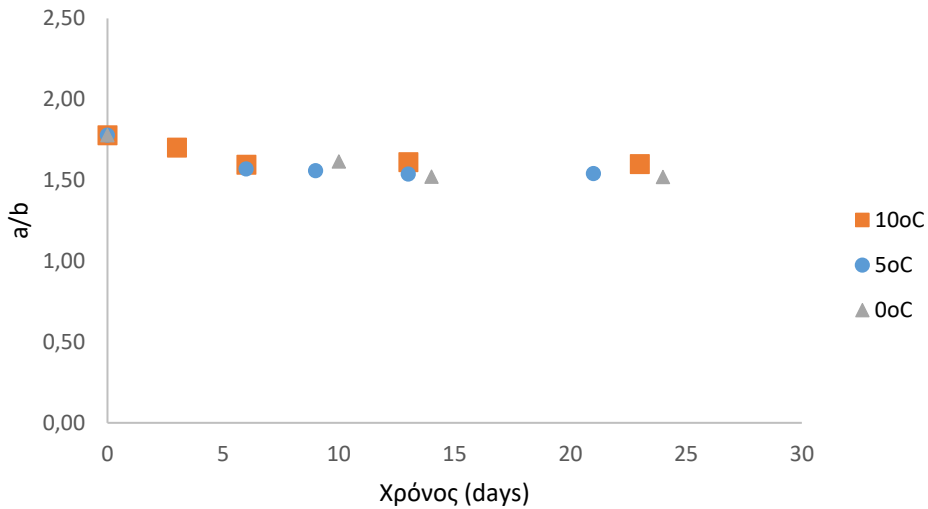
Όσον αφορά τους ρυθμούς μείωσης της βιταμίνης C, οι οποίοι φαίνονται στον πίνακα 5.9, επιβεβαιώνεται και σε αυτήν την περίπτωση την εξάρτηση του ρυθμού από τη θερμοκρασία. Οι συντελεστές συσχέτισης έχουν υψηλές τιμές, μεγαλύτερες από 0.94. Με την εφαρμογή της εξίσωσης Arrhenius στους ρυθμούς μείωσης της βιταμίνης C προσδιορίστηκε η ενέργεια ενεργοποίησης $E_a=42.45$ kJ/mol και ο ρυθμός μείωσης στη θερμοκρασία αναφοράς $k_{\text{ref}}=0.021\text{d}^{-1}$.

4.5.6 Προσδιορισμός περιεκτικότητας χλωροφυλλών



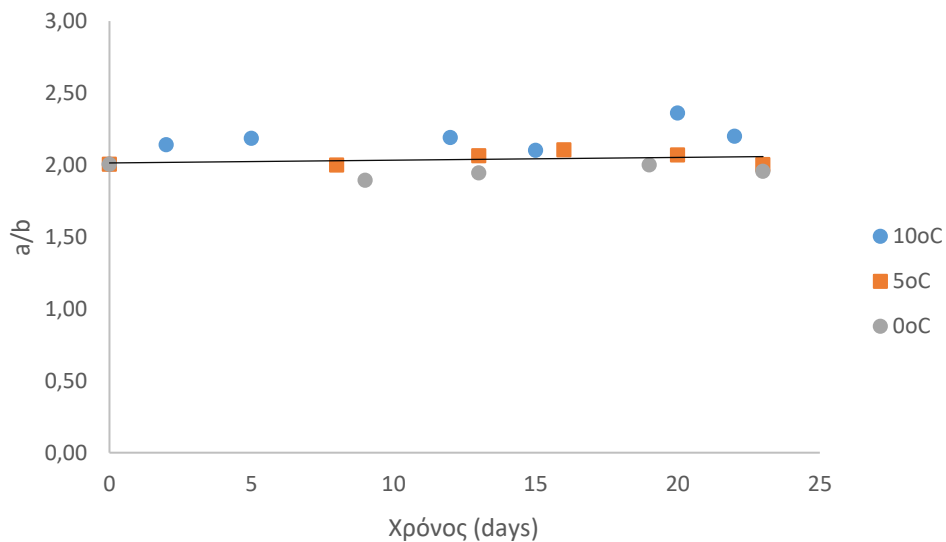
Διάγραμμα 4.44 Μεταβολή του λόγου των συγκεντρώσεων χλωροφύλλης *a* προς *b* σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία αποθήκευσης (0°C, 5°C και 10°C) και το χρόνο σε ανεπεξέργαστα δείγματα σπανακιού

Στο διάγραμμα 4.44 παρουσιάζεται η μεταβολή του λόγου της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης *a* προς την χλωροφύλλη *b* σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία και το χρόνο αποθήκευσης στα ανεπεξέργαστα δείγματα σπανακιού. Παρατηρείται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε ταχύτερη μείωση του λόγου, δηλαδή στη μείωση κυρίως της χλωροφύλλης *a*. Στη θερμοκρασία των 0°C, ο λόγος *a/b* παραμένει σταθερός με το χρόνο, δηλαδή δεν ευνοείται η αντίδραση υποβάθμισης της χλωροφύλλης σε τόσο χαμηλή θερμοκρασία. Σύμφωνα με τους Yamauchi & Watada (1991), η μείωση της συγκέντρωσης των χλωροφυλλών οφείλεται σε ενζυμική δραστηριότητα, η οποία καταλύει τις αντιδράσεις υποβάθμισης της χλωροφύλλης. Συνεπώς, η αύξηση της θερμοκρασίας ευνοεί την ενζυμική δραστηριότητα, με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο ρυθμός μείωσης των χλωροφυλλών *a* και *b*.



Διάγραμμα 4.45 Μεταβολή του λόγου των συγκεντρώσεων χλωροφύλλης *a* προς *b* σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία αποθήκευσης (0°C, 5°C και 10°C) και το χρόνο σε ωσμοαφυδατωμένα δείγματα σπανακιού

Στο διάγραμμα 4.45 φαίνεται η μεταβολή του λόγου των συγκεντρώσεων χλωροφύλλης *a* προς *b* σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία και το χρόνο αποθήκευσης σε ωσμοαφυδατωμένα δείγματα σπανακιού. Στα δείγματα σπανακιού που έχουν επεξεργαστεί με ΩΑ ο λόγος *a/b* παρατηρείται μείωση του λόγου κατά 0.20-0.25 τις πρώτες 8 ημέρες, ωστόσο στη συνέχεια η συγκέντρωση των χλωροφυλλών *a* και *b* παραμένει σταθερή. Για όλες τις θερμοκρασίες υπάρχει η ίδια τάση, ανεξαρτήτως από το γεγονός ότι η αύξηση της θερμοκρασίας ευνοεί την αντίδραση υποβάθμισης των χλωροφυλλών.



Διάγραμμα 4.46 Μεταβολή του λόγου των συγκεντρώσεων χλωροφύλλης *a* προς *b* σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία αποθήκευσης (0°C, 5°C και 10°C) και το χρόνο σε ωσμοαφυδατωμένα με προεπεξεργασία με ΠΗΠ δείγματα σπανακιού

Στο διάγραμμα 4.46 παρουσιάζεται η μεταβολή του λόγου των συγκεντρώσεων της χλωροφύλλης a προς τη χλωροφύλλη b σε σχέση με τη θερμοκρασία και το χρόνο αποθήκευσης στα ωσμοαφυδατωμένα με προεπεξεργασία με ΠΗΠ δείγματα σπανακιού. Ο λόγος a/b δεν μεταβάλλεται σημαντικά με το πέρασμα του χρόνου. Με την αύξηση της θερμοκρασίας δεν παρατηρείται μεταβολή στη συγκέντρωση των χλωροφυλλών. Επομένως, ο συνδυασμός της ΩΑ με την εφαρμογή ΠΗΠ συνείσφερε στη διατήρηση της συγκέντρωσης των χλωροφυλλών στα αρχικά επίπεδα των ανεπεξέργαστων δειγμάτων. Αυτό οφείλεται πιθανώς στην ενίσχυση του φυτικού ιστού του σπανακιού από την πρόσληψη στερεών από το ωσμωτικό διάλυμα όπως το μεταδιθειώδες νάτριο που χρησιμοποιείται για την αντιοξειδωτική δράση του, καθώς και το ξύδι που διατηρεί το pH σε χαμηλά επίπεδα με αποτέλεσμα να μην ευνοείται η ενζυμική δράση.

4.5.7 Οργανοληπτικός έλεγχος

Ο οργανοληπτικός έλεγχος αποτελεί δείκτη που λαμβάνεται υπόψη για την εύρεση της διατηρησιμότητας. Παρά το γεγονός ότι χαρακτηρίζεται από υποκειμενικότητα, ο οργανοληπτικός έλεγχος είναι μια πρώτη ένδειξη για την εναπομένουσα διάρκεια ζωής του τελικού προϊόντος αλλά και για την αποδοχή του από τον καταναλωτή.

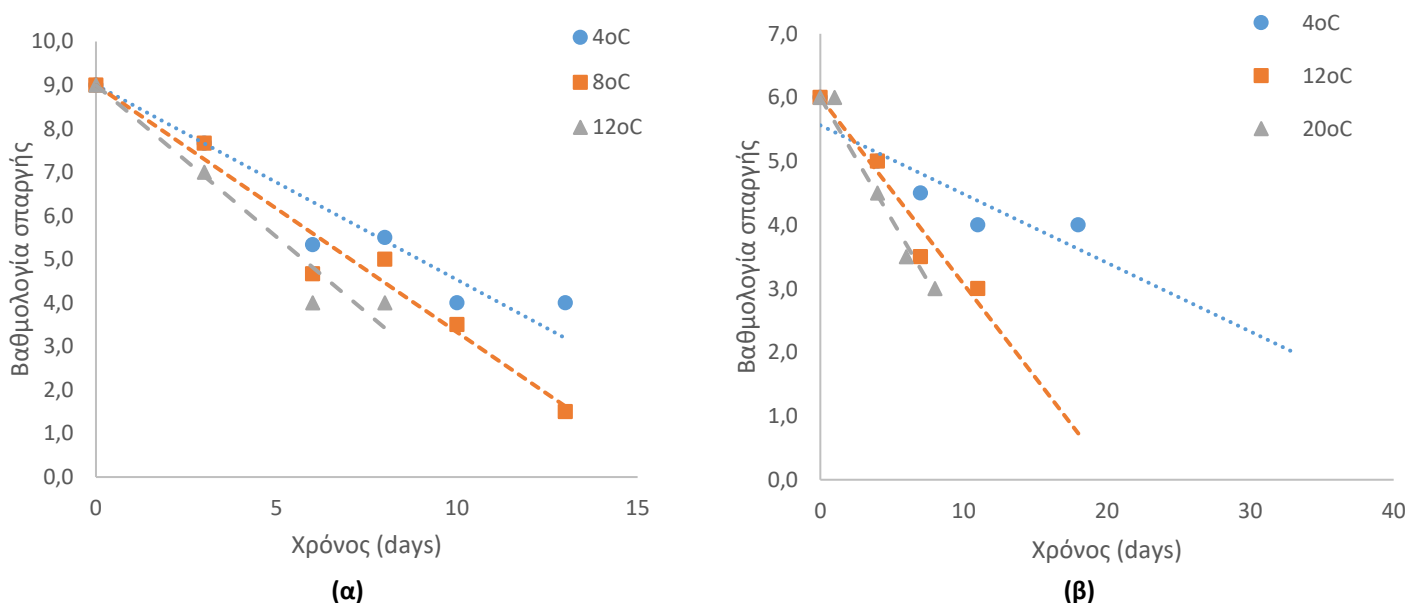
Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων διατηρησιμότητας, πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία, με σκοπό την αξιολόγηση των δειγμάτων σπανακιού ως προς τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά τους όπως η σπαργή, η ένταση των δυσάρεστων οσμών (off-flavors), η γεύση και η συνολική αρέσκεια. Με το πέρασμα των ημερών, τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά αλλοιώνονται, όπως αναμενόταν, κάτι το οποίο είναι φανερό και από τα παρακάτω αποτελέσματα.

Παρατηρώντας τα δεδομένα για κάθε συνθήκη, φαίνεται ότι υπάρχει κάποια γραμμικότητα, δηλαδή η αλλοίωση των χαρακτηριστικών ακολουθεί κινητική 0ης τάξης. Η εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε για την περιγραφή των δεδομένων είναι της εξής μορφής:

$$s = s_0 - kt \text{ (Εξίσωση 4.2)}$$

όπου s η βαθμολογία του οργανοληπτικού χαρακτηριστικού που εξετάζεται, s_0 η αρχική βαθμολογία του χαρακτηριστικού, k η σταθερά μείωσης του χαρακτηριστικού και t η χρονική στιγμή.

4.5.7.1 Μεταβολή της σπαργής



Διάγραμμα 4.47 Μεταβολή της σπαργής του σπανακιού σε σχέση με το χρόνο αποθήκευσης σε θερμοκρασίες 4°C, 8°C, 12°C και 20°C σε (α) ανεπεξέργαστα δείγματα και σε (β) ωσμοαφυδατωμένα δείγματα

Τα διαγράμματα 4.47 παρουσιάζουν τη μεταβολή της σπαργής του σπανακιού σε σχέση με το χρόνο και τη θερμοκρασία αποθήκευσης στα ανεπεξέργαστα και τα ωσμοαφυδατωμένα δείγματα σπανακιού. Από τα παραπάνω διαγράμματα, φαίνεται ότι με το πέρασμα του χρόνου μειώνεται η σπαργή των δειγμάτων αλλά με διαφορετικό ρυθμό για κάθε θερμοκρασία. Παρατηρείται ότι και στα ανεπεξέργαστα και στα ωσμοαφυδατωμένα δείγματα η μεγαλύτερη θερμοκρασία συντήρησης έχει ως αποτέλεσμα το μεγαλύτερο ρυθμό ελάττωσης του χαρακτηριστικού. Παρακάτω παρουσιάζονται οι υπολογισμένες τιμές του ρυθμού αλλοίωσης για κάθε δείγμα και θερμοκρασία.

Πίνακας 5.10 Ρυθμοί μείωσης σπαργής στα ανεπεξέργαστα δείγματα σπανακιού σε διαφορετικές θερμοκρασίες (4°C, 8°C και 12°C)

Θερμοκρασία T (°C)	Ρυθμός μείωσης σπαργής k (d ⁻¹)	R ²
4	-0.447	0.906
8	-0.568	0.964
12	-0.697	0.944
E_a (kJ/mol)	36.46	0.999

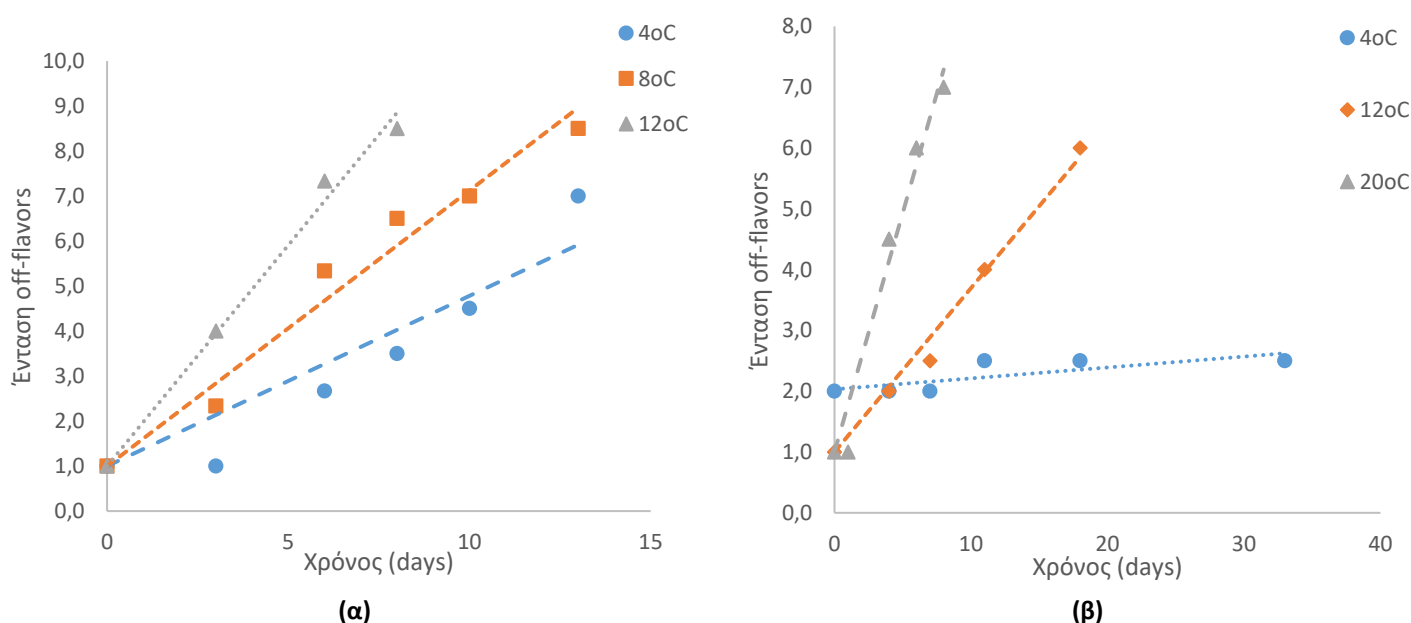
Πίνακας 5.11 Ρυθμοί μείωσης σπαργής στα ωσμοαφυδατωμένα δείγματα σπανακιού σε διαφορετικές θερμοκρασίες (4°C, 12°C και 20°C)

Θερμοκρασία T (°C)	Ρυθμός μείωσης σπαργής k (d ⁻¹)	R ²
4	-0.108	0.790
12	-0.293	0.951
20	-0.385	0.981
E_a (kJ/mol)	53.88	0.911

Από τις τιμές των ρυθμών μείωσης των πινάκων 5.10 και 5.11, επιβεβαιώνεται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας συνεπάγεται με αύξηση του ρυθμού. Επίσης, οι ρυθμοί μείωσης της σπαργής των ωσμοαφυδατωμένων δειγμάτων είναι αρκετά μικρότεροι από τους αντίστοιχους στα ανεπεξέργαστα δείγματα στην ίδια θερμοκρασία. Αυτό δείχνει ότι η ωσμωτική αφυδάτωση προκαλεί πιο αργή αλλοίωση του χαρακτηριστικού της σπαργής. Ωστόσο, οι αρχικές τιμές της σπαργής του σπανακιού αμέσως μετά την επεξεργασία με το ωσμωτικό διάλυμα είναι μικρότερες από τα ανεπεξέργαστα δείγματα, κάτι το οποίο είναι αναπόφευκτο λόγω της ευαισθησίας του ιστού του σπανακιού στην κατεργασία.

Από την εφαρμογή της γραμμικοποιημένης εξίσωσης Arrhenius, προκύπτει ότι για τα ανεπεξέργαστα δείγματα η ενέργεια ενεργοποίησης ισούται με $E_a=36.46 \text{ kJ/mol}$ και ο ρυθμός για τη θερμοκρασία αναφοράς ($T_{ref}=5^\circ\text{C}$) είναι $k_{ref}=-0.475\text{d}^{-1}$. Αντίστοιχα, για τα ωσμοαφυδατωμένα δείγματα υπολογίζεται ότι $E_a=53.88 \text{ kJ/mol}$ και $k_{ref}=-0.131\text{d}^{-1}$.

4.5.7.2 Μεταβολής της έντασης δυσάρεστων οσμών



Διάγραμμα 4.48 Μεταβολή της έντασης των δυσάρεστων οσμών του σπανακιού σε σχέση με το χρόνο αποθήκευσης σε θερμοκρασίες 4°C, 8°C, 12°C και 20°C σε (α) ανεπεξέργαστα δείγματα και σε (β) ωσμοαφυδατωμένα δείγματα

Στο διάγραμμα 4.48 περιγράφεται η μεταβολή της έντασης των δυσάρεστων οσμών σε σχέση με το χρόνο και τη θερμοκρασία αποθήκευσης στα ανεπεξέργαστα και τα ωσμοαφυδατωμένα δείγματα σπανακιού. Στην περίπτωση της έντασης της δυσάρεστης οσμής, επιβεβαιώνεται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε αυξημένους ρυθμούς. Συγκρίνοντας τα ανεπεξέργαστα με τα ωσμοαφυδατωμένα δείγματα προκύπτει ότι στους 4°C και 12°C η ένταση off-flavors παραμένει σε χαμηλές τιμές για μεγαλύτερο χρόνο αποθήκευσης στα επεξεργασμένα δείγματα. Για τη θερμοκρασία των 20°C, η ωσμωτική αφυδάτωση δεν φαίνεται να έχει ελαττώσει το ρυθμό αύξησης, αφού η βαθμολογία της

έντασης των δυσάρεστων οσμών παίρνει τιμές πάνω από το όριο αποδοχής σε 6 ημέρες, ενώ για τη θερμοκρασία αποθήκευσης των 12°C η αντίστοιχη τιμή μετριέται στις 16 ημέρες και για τους 4°C δεν ξεπερνάει το όριο κατά τη χρονική διάρκεια των δειγματοληψιών (33 ημέρες).

Πίνακας 5.12 Ρυθμοί αύξησης της έντασης off-flavors στα ανεπεξέργαστα δείγματα σπανακιού σε διαφορετικές θερμοκρασίες (4°C, 8°C και 12°C)

Θερμοκρασία T (°C)	Ρυθμός αύξησης έντασης off-flavors k (d ⁻¹)	R ²
4	0.378	0.878
8	0.612	0.969
12	0.982	0.991
E_a (kJ/mol)	78.24	0.999

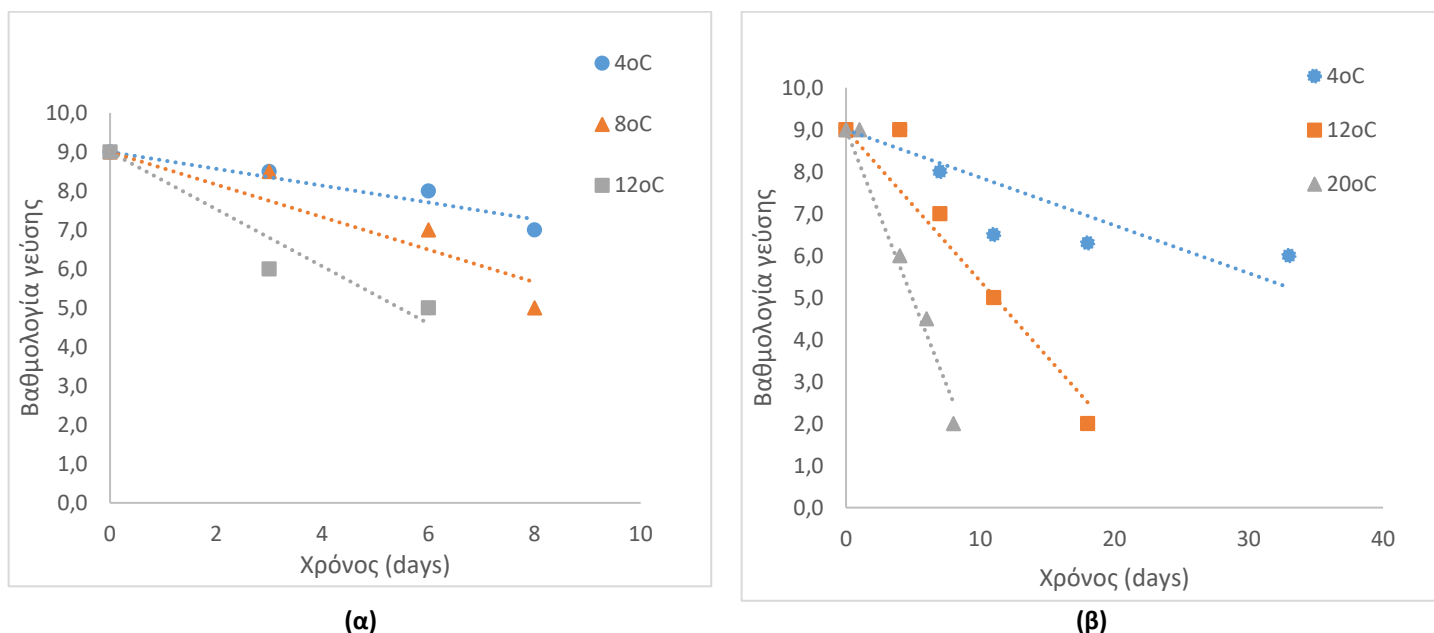
Πίνακας 5.13 Ρυθμοί αύξησης της έντασης off-flavors στα ωσμοαφυδατωμένα δείγματα σπανακιού σε διαφορετικές θερμοκρασίες (4°C, 12°C και 20°C)

Θερμοκρασία T (°C)	Ρυθμός αύξησης έντασης off-flavors k (d ⁻¹)	R ²
4	0.018	0.610
12	0.270	0.923
20	0.786	0.974
E_a (kJ/mol)	160.1	0.948

Από τους πίνακες 5.12 και 5.13, επιβεβαιώνεται ότι οι ρυθμοί αύξησης των δυσάρεστων οσμών αυξάνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Όπως παρατηρήθηκε και στα διαγράμματα, οι ρυθμοί αύξησης στους 4°C και 12°C για ωσμοαφυδατωμένα είναι αρκετά μικρότεροι από τους ρυθμούς στα ανεπεξέργαστα δείγματα. Οι συντελεστές συσχέτισης είναι ικανοποιητικοί εκτός από την περίπτωση του ρυθμού στους 4°C στα ωσμοαφυδατωμένα δείγματα.

Με την εφαρμογή της γραμμικοποιημένης εξίσωσης Arrhenius, προκύπτουν για τα ανεπεξέργαστα δείγματα η ενέργεια ενεργοποίησης ίση με E_a=78.24 kJ/mol και ο ρυθμός για τη θερμοκρασία αναφοράς k_{ref}=0.427 d⁻¹. Για τα ωσμοαφυδατωμένα δείγματα, υπολογίζονται E_a=160.1 kJ/mol και k_{ref}=0.029 d⁻¹. Οι έντονες διαφορές μεταξύ των τιμών της ενέργειας ενεργοποίησης δείχνουν την σημαντική εξάρτηση από τη θερμοκρασία για τα ωσμοαφυδατωμένα δείγματα. Η διαφορά στις σταθερές του ρυθμού επιβεβαιώνει ότι η ώσμωση επιβραδύνει την αύξηση του χαρακτηριστικού των δυσάρεστων οσμών.

4.5.7.3 Μεταβολή της γεύσης



Διάγραμμα 4.49 Μεταβολή της γεύσης του σπανακιού σε σχέση με το χρόνο αποθήκευσης σε θερμοκρασίες 4°C, 8°C, 12°C και 20°C σε (α) ανεπεξέργαστα δείγματα και σε (β) ωσμοαφυδατωμένα δείγματα

Στο διάγραμμα 4.49 περιγράφεται η μεταβολή της γεύσης των ανεπεξέργαστων και των ωσμοαφυδατωμένων δειγμάτων σπανακιού σε σχέση με το χρόνο και τη θερμοκρασία αποθήκευσης. Η γεύση είναι ένα από τα πιο σημαντικά οργανοληπτικά χαρακτηριστικά στον έλεγχο της ποιότητας των τροφίμων. Ο οργανοληπτικός έλεγχος πραγματοποιήθηκε τις ημέρες για τις οποίες η ολική μικροβιακή χλωρίδα είχε χαμηλότερο φορτίο από το μέγιστο επιτρεπτό ($8 \log(\text{CFU})/\text{g}$). Από τα διαγράμματα παρατηρείται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε ταχύτερη αλλοίωση της γεύσης των δειγμάτων. Στην περίπτωση των ωσμοαφυδατωμένων δειγμάτων, η θερμοκρασία αποθήκευσης των 4°C φαίνεται ότι παρουσιάζει το καλύτερο αποτέλεσμα, αφού κατά τη διάρκεια των δειγματοληψιών η βαθμολογία της γεύσης πλησιάζει στο όριο αποδοχής μετά από 20 ημέρες αποθήκευσης.

Πίνακας 5.14 Ρυθμοί αλλοίωσης της γεύσης στα ανεπεξέργαστα δείγματα σπανακιού σε διαφορετικές θερμοκρασίες (4°C, 8°C και 12°C)

Θερμοκρασία T (°C)	Ρυθμός αλλοίωσης της γεύσης k (d ⁻¹)	R ²
4	-0.216	0.916
8	-0.417	0.870
12	-0.733	0.910
E _a (kJ/mol)	100.43	0.999

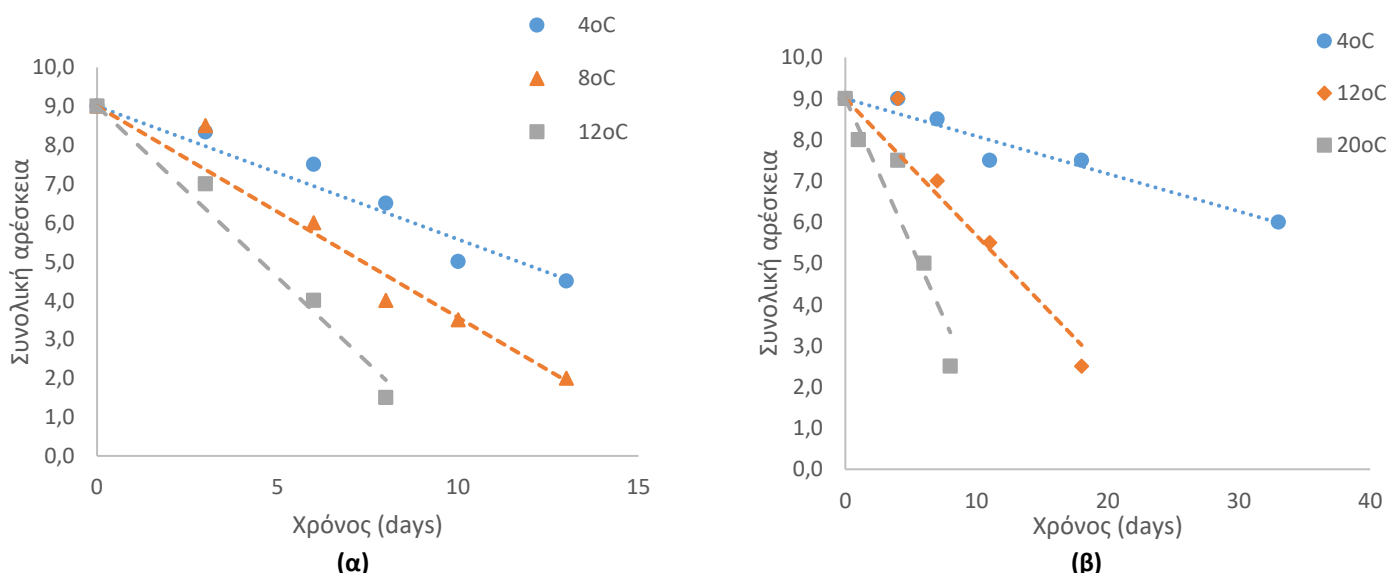
Πίνακας 5.15 Ρυθμοί αλλοίωσης της γεύσης στα ωσμοαφυδατωμένα δείγματα σπανακιού σε διαφορετικές θερμοκρασίες (4°C, 12°C και 20°C)

Θερμοκρασία T (°C)	Ρυθμός αλλοίωσης της γεύσης k (d ⁻¹)	R ²
4	-0.114	0.703
12	-0.361	0.926
20	-0.812	0.969
E_a (kJ/mol)	82.95	0.993

Από τους πίνακες 5.14 και 5.15 των ρυθμών αλλοίωσης της γεύσης προκύπτει ότι η ωσμωτική αφυδάτωση οδηγεί σε μικρότερους αριθμούς αλλοίωσης. Οι συντελεστές συσχέτισης παρουσιάζουν υψηλές τιμές εκτός από την περίπτωση του ρυθμού αλλοίωσης των ωσμοαφυδατωμένων δειγμάτων στη θερμοκρασία 4°C.

Με την εφαρμογή της εξίσωσης Arrhenius, υπολογίζονται οι ενέργειες ενεργοποίησης για τους ρυθμούς αλλοίωσης των ανεπεξέργαστων και των ωσμοαφυδατωμένων δειγμάτων σπανακιού. Για τα ανεπεξέργαστα δείγματα η ενέργεια ενεργοποίησης είναι ίση με E_a=100.43 kJ/mol και ο ρυθμός αλλοίωσης της γεύσης στη θερμοκρασία αναφοράς ισούται με k_{ref}=-0.256d⁻¹. Για τα ωσμοαφυδατωμένα δείγματα προκύπτει ότι E_a=82.95 kJ/mol και k_{ref}=-0.136d⁻¹.

4.5.7.4 Μεταβολή της συνολικής οργανοληπτικής αρέσκειας



Διάγραμμα 4.50 Μεταβολή της συνολικής αρέσκειας σε σχέση με το χρόνο αποθήκευσης σε θερμοκρασίες 4°C, 8°C, 12°C και 20°C σε (α) ανεπεξέργαστα δείγματα και σε (β) ωσμοαφυδατωμένα δείγματα

Το διάγραμμα 4.50 απεικονίζει τη μεταβολή της συνολικής αρέσκειας των ανεπεξέργαστων και των ωσμοαφυδατωμένων δειγμάτων σπανακιού σε σχέση με το χρόνο και τη θερμοκρασία αποθήκευσης. Από τα παραπάνω αποτελέσματα είναι εμφανής η επίδραση της θερμοκρασία αποθήκευσης στη μεταβολή της συνολικής οργανοληπτικής αρέσκειας. Όπως

σχολιάστηκε και στα προηγούμενα χαρακτηριστικά, η αύξηση της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ρυθμού ελάττωσης του χαρακτηριστικού που εξετάζεται. Τα δεδομένα και σε αυτό το χαρακτηριστικό φαίνεται ότι ακολουθούν κινητική αλλοίωσης μηδενικής τάξης, για την οποία τα αποτελέσματα φαίνονται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 5.16 Ρυθμοί μείωσης της συνολικής αρέσκειας στα ανεπεξέργαστα δείγματα σπανακιού σε διαφορετικές θερμοκρασίες (4°C, 8°C και 12°C)

Θερμοκρασία T (°C)	Ρυθμός μείωσης συνολικής αρέσκειας k (d ⁻¹)	R ²
4	-0.343	0.949
8	-0.544	0.956
12	-0.881	0.979
E_a (kJ/mol)	77.45	0.998

Πίνακας 5.17 Ρυθμοί μείωσης της συνολικής αρέσκειας στα ωσμοαφυδατωμένα δείγματα σπανακιού σε διαφορετικές θερμοκρασίες (4°C, 12°C και 20°C)

Θερμοκρασία T (°C)	Ρυθμός μείωσης συνολικής αρέσκειας k (d ⁻¹)	R ²
4	-0.091	0.939
12	-0.332	0.957
20	-0.709	0.851
E_a (kJ/mol)	88.66	0.982

Στους πίνακες 5.16 και 5.17 φαίνονται οι ρυθμοί μείωσης της συνολικής αρέσκειας των ανεπεξέργαστων και των ωσμοαφυδατωμένων δειγμάτων σπανακιού σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Οι ρυθμοί μείωσης της συνολικής αρέσκειας επιβεβαιώνουν ότι αυξάνοντας τη θερμοκρασία αυξάνεται και ο ρυθμός. Οι συντελεστές συσχέτισης παρουσιάζουν υψηλές τιμές, μεγαλύτερες από 0.94, εκτός από το ρυθμό στη θερμοκρασία των 20°C στα ωσμοαφυδατωμένα δείγματα. Η επεξεργασία με ωσμωτική αφυδάτωση των δειγμάτων σπανακιού μειώνει σημαντικά τους ρυθμούς για κάθε θερμοκρασία.

Επιπλέον, γίνεται η προσαρμογή των ρυθμών μείωσης με την εφαρμογή της εξίσωσης Arrhenius. Η ενέργεια ενεργοποίησης για τα ανεπεξέργαστα δείγματα υπολογίζεται ίση με E_a=77.45 kJ/mol και ο ρυθμός στη θερμοκρασία αναφοράς ίσος με k_{ref}=-0.385 d⁻¹. Για τα ωσμοαφυδατωμένα δείγματα προκύπτει ότι E_a=86.66 kJ/mol και k_{ref}=-0.113d⁻¹. Η διαφορά στις σταθερές ρυθμού είναι έντονη σε αντίθεση με την ενέργεια ενεργοποίησης.

4.5.8 Προσδιορισμός διατηρησιμότητας

Αξιοποιώντας τα αποτελέσματα που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες ενότητες, προσδιορίζεται η διατηρησιμότητα των ανεπεξέργαστων και των ωσμοαφυδατωμένων δειγμάτων σπανακιού. Η διατηρησιμότητα υπολογίστηκε με βάση ένα μικροβιολογικό και ένα οργανοληπτικό δείκτη. Ο μικροβιολογικός δείκτης που χρησιμοποιήθηκε είναι το ολικό μικροβιακό φορτίο σύμφωνα και με τη διεθνής επιτροπή για τις μικροβιολογικές προδιαγραφές στα τρόφιμα (International Commission on Microbiological Specifications for Foods – ICMSF) (ICMSF, 1986). Ο οργανοληπτικός δείκτης που επιλέχθηκε είναι η συνολική

αρέσκεια των δειγμάτων σπανακιού, ως ο πιο καθοριστικός παράγοντας στην αποδοχή ή μη του τελικού προϊόντος. Το όριο αποδοχής για τον οργανοληπτικό δείκτη είναι η βαθμολογία ίση με 5. Για την ολική μικροβιακή χλωρίδα ως όριο τίθεται το φορτίο 8 log(CFU)/g.

Για τη διατηρησιμότητα με βάση την συνολική οργανοληπτική αρέσκεια χρησιμοποιήθηκαν συνδυαστικά η γραμμική εξίσωση 4.2, η οποία περιγράφει τα δεδομένα του οργανοληπτικού ελέγχου, με τις υπολογισμένες τιμές, μέσω της εφαρμογής της γραμμικοποιημένης εξίσωσης Arrhenius, της ενέργειας ενεργοποίησης και του ρυθμού αλλοίωσης στη θερμοκρασία αναφοράς για κάθε επεξεργασία. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής:

$$s = s_o - kt \rightarrow t = \frac{s-s_o}{k} \quad (\text{Εξίσωση 4.3})$$

$$k(T) = k_{ref} * e^{\left[-\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right]} \quad (\text{Εξίσωση 4.4})$$

Από τις εξισώσεις 4.3 και 4.4 προκύπτει η σχέση που συνδέει το χρόνο ζωής με τη θερμοκρασία αποθήκευσης.

$$t(T) = \frac{s_t - s_o}{k_{ref} * e^{\left[-\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right]}} \quad (\text{Εξίσωση 4.5})$$

όπου s_t η βαθμολογία του ορίου της συνολικής αρέσκειας, s_o η βαθμολογία της συνολικής αρέσκειας σε χρόνο 0, k_{ref} ο ρυθμός αλλοίωσης στη θερμοκρασία αναφοράς, E_a η ενέργεια ενεργοποίησης του ρυθμού αλλοίωσης, R η παγκόσμια σταθερά των αερίων ίση με 8.314 J/mol/K και T_{ref} η θερμοκρασία αναφοράς σε Kelvin.

Αντίστοιχα, για το μικροβιολογικό χρόνο ζωής χρησιμοποιήθηκαν οι υπολογισμένες τιμές της ενέργειας ενεργοποίησης και του ρυθμού ανάπτυξης της ολικής μικροβιακής χλωρίδας μέσω της εξίσωσης Arrhenius και η παρακάτω εξίσωση:

$$t = \frac{\log(N_t) - \log(N_o)}{k} + L \quad (\text{Εξίσωση 4.6})$$

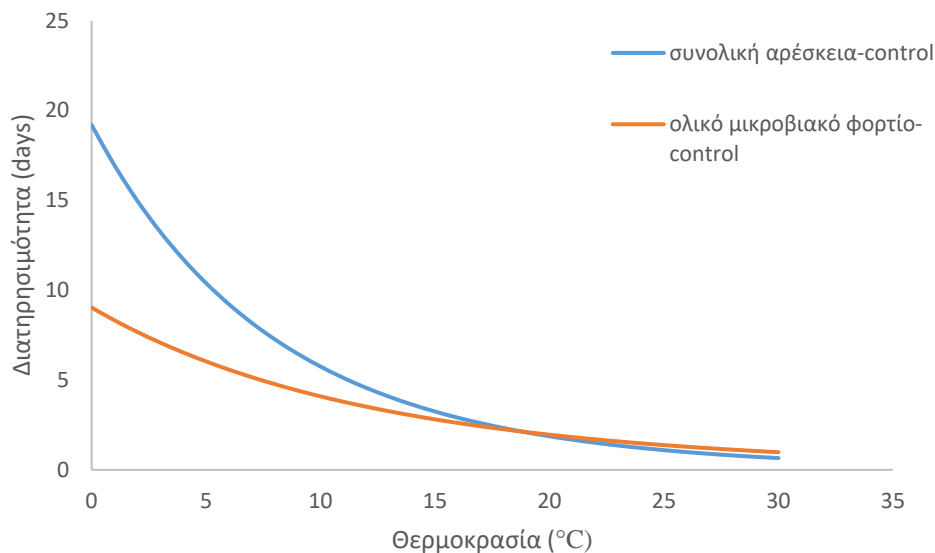
Η εξίσωση 4.6 σε συνδυασμό με την εξίσωση 4.4:

$$t(T) = \frac{\log(N_t) - \log(N_o)}{k_{ref} * e^{\left[-\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right]}} + L \quad (\text{Εξίσωση 4.7})$$

όπου $\log(N_t)$ το όριο του φορτίου όπου έχει τεθεί ως αποδεκτό (8 log(CFU)/g), $\log(N_o)$ η αρχική τιμή του φορτίου, L ο χρόνος υστέρησης της ανάπτυξης ίσος με 0 στην περίπτωση αυτή.

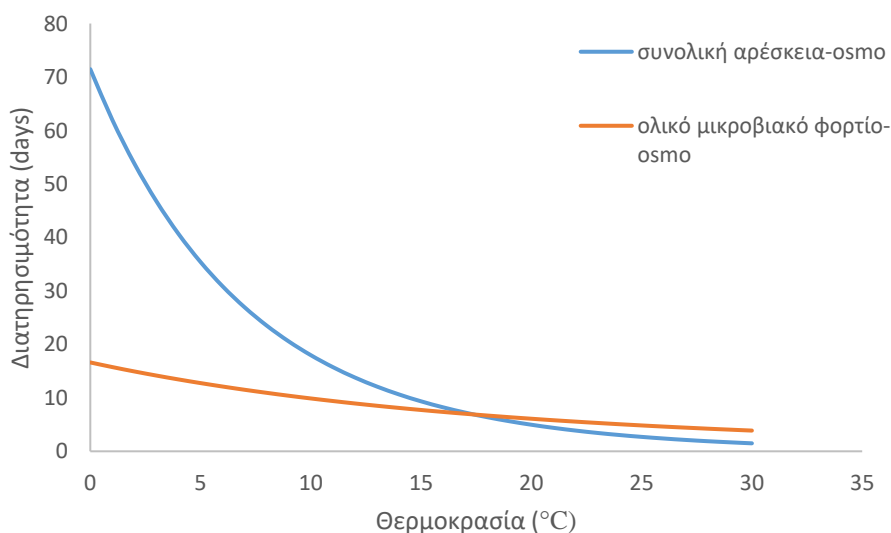
Το αρχικό φορτίο της ολικής μικροβιακής χλωρίδας για τα ανεπεξέργαστα δείγματα σπανακιού είναι ίσο με 6.5 log(CFU)/g και το αρχικό φορτίο για τα ωσμοαφυδατωμένα δείγματα είναι 6.8 log(CFU)/g.

Παρακάτω δίνονται τα διαγράμματα για τα ανεπεξέργαστα και τα ωσμοαφυδατωμένα δείγματα όπου παρουσιάζεται η διατηρησιμότητα σε σχέση με τη θερμοκρασία για τον οργανοληπτικό δείκτη και το μικροβιολογικό δείκτη του χρόνου ζωής.



Διάγραμμα 4.51 Μεταβολή της διατηρησιμότητας για τα ανεπεξέργαστα δείγματα σπανακιού σε σχέση με τη θερμοκρασία για τη συνολική αρέσκεια και το ολικό μικροβιακό φορτίο

Το διάγραμμα 4.51 παριστάνει τη μεταβολή της διατηρησιμότητας των ανεπεξέργαστων δειγμάτων σπανακιού σε σχέση με τη θερμοκρασία για τους δείκτες της συνολικής αρέσκειας και του ολικού μικροβιακού φορτίου. Παρατηρείται ότι ο καθοριστικός παράγοντας για τη διατηρησιμότητα μέχρι περίπου τη θερμοκρασία των 20°C είναι το ολικό μικροβιακό φορτίο. Σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες φαίνεται ότι ο οργανοληπτικός δείκτης της συνολικής αρέσκειας καθορίζει τη τιμή της διατηρησιμότητας των ανεπεξέργαστων δειγμάτων. Συγκεκριμένα, από τη θερμοκρασία των 19°C η συνολική αρέσκεια καθορίζει τη διατηρησιμότητα.



Διάγραμμα 4.52 Μεταβολή της διατηρησιμότητας για τα ωσμοαφυδατωμένα δείγματα σε σχέση με τη θερμοκρασία για τη συνολική αρέσκεια και το ολικό μικροβιακό φορτίο

Το διάγραμμα 4.52 αναπαριστά τη μεταβολή της διατηρησιμότητας των ωσμοαφυδατωμένων δειγμάτων σε σχέση με τη θερμοκρασία για τους δείκτες της συνολικής

αρέσκειας και του ολικού μικροβιακού φορτίου. Προκύπτει ότι στα ωσμοαφυδατωμένα δείγματα το ολικό μικροβιακό φορτίο είναι ο καθοριστικός παράγοντας που ορίζει τη διατηρησιμότητα μέχρι τη θερμοκρασία των 15-20°C. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες, δηλαδή από 18°C, ο οργανοληπτικός δείκτης της συνολικής αρέσκειας ορίζει τη διατηρησιμότητα των δειγμάτων σπανακιού.

Πίνακας 5.18 Προσδιορισμός διατηρησιμότητας για ανεπεξέργαστα και ωσμοαφυδατωμένα δείγματα σπανακιού σε διαφορετικές θερμοκρασίες

Θερμοκρασία (°C) (Καθοριστικός παράγοντας)	Διατηρησιμότητα (days)	
	Ανεπεξέργαστο δείγμα (Control)	Ωσμοαφυδατωμένο δείγμα (Osmo)
4°C (ολικό μικροβιακό φορτίο)	6	13
8°C (ολικό μικροβιακό φορτίο)	4	10
12°C (ολικό μικροβιακό φορτίο)	3	8
20°C (συνολική αρέσκεια)	2	4

Από τον πίνακα 5.18, παρατηρείται ότι η διατηρησιμότητα των ωσμοαφυδατωμένων δειγμάτων είναι μεγαλύτερη τουλάχιστον κατά 50% σε σχέση με αυτή των ανεπεξέργαστων δειγμάτων. Κρίνεται λογικό ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία να μειώνεται η διατηρησιμότητα, γιατί αυξάνεται η μικροβιακή ανάπτυξη οπότε αλλοιώνονται και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του σπανακιού. Επιπλέον, σε υψηλές θερμοκρασίες επιταχύνονται και αλλοιώσεις που οφείλονται στην ενζυμική δραστηριότητα, οι οποίες δεν μελετώνται στα πλαίσια αυτής της εργασίας.

Κεφάλαιο 5: Σύνοψη αποτελεσμάτων-Συμπεράσματα-Προτάσεις για το μέλλον

Σε αυτήν την ενότητα πραγματοποιείται η σύνοψη των συμπερασμάτων αυτής της εργασίας, με στόχο να δημιουργηθεί μια συνολική εικόνα για το αποτέλεσμα της έρευνας καθώς και να αναφερθούν τα σημεία που χρήζουν περαιτέρω έρευνας. Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η μελέτη των παραμέτρων της διεργασίας της ωσμωτικής αφυδάτωσης του σπανακιού και η συνδυαστική της δράση με τα παλμικά ηλεκτρικά πεδία για την παραγωγή προϊόντων σπανακιού με αυξημένη διατηρησιμότητα. Ειδικότερα, δόθηκε έμφαση στην αναζήτηση των κατάλληλων συνθηκών επεξεργασίας για την ωσμωτική αφυδάτωση (συγκέντρωση ωσμωτικού διαλύματος, χρόνος επεξεργασίας) και την εφαρμογή παλμικών ηλεκτρικών πεδίων (ένταση ηλεκτρικού πεδίου, αριθμός παλμών). Συγχρόνως, εξετάστηκαν οι μεταβολές στην υφή, το χρώμα και τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των δειγμάτων σπανακιού για να ελεγχθεί η επίδραση των επεξεργασιών στον ιστό του σπανακιού. Σε τελικό στάδιο, προσδιορίστηκε η διατηρησιμότητα σε διαφορετικές θερμοκρασίες αποθήκευσης των ανεπεξέργαστων, των ωσμοαφυδατωμένων και των ωσμοαφυδατωμένων με προεπεξεργασία με ΠΗΠ δειγμάτων σπανακιού.

Η επιλογή του σπανακιού ως πρώτη ύλη, πέρα από την υψηλή διατροφική του αξία, έρχεται σε συμφωνία με τις καταναλωτικές ανάγκες της εποχής για προϊόντα λαχανικών υψηλής σταθερότητας και μεγάλης διατηρησιμότητας με βελτιωμένα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά. Η ανεπάρκεια τέτοιων προϊόντων στην αγορά οφείλεται στο υψηλό μικροβιακό φορτίο και τη μεγάλη περιεκτικότητα σε νερό του φρέσκου σπανακιού, με αποτέλεσμα το μικρό χρόνο ζωής των προϊόντων του, καθώς και στην ελλιπή επιστημονική έρευνα πάνω σε καινοτόμες μη θερμικές μεθόδους όπως η ωσμωτική αφυδάτωση που στοχεύουν στην αφυδάτωση του σπανακιού με ταυτόχρονη διατήρηση ή και ενίσχυση των ποιοτικών και διατροφικών του χαρακτηριστικών. Επίσης, η επιμήκυνση της διατηρησιμότητας του σπανακιού και γενικότερα των λαχανικών σχετίζεται άμεσα με την αντιμετώπιση του προβλήματος της σπατάλης τροφίμων που διαρκώς αυξάνεται τη σύγχρονη εποχή.

Στο πρώτο μέρος της εργασίας, μελετήθηκε η επίδραση της ΩΑ στο σπανάκι σε διαφορετικές συνθήκες επεξεργασίας (περιεκτικότητα σε γλυκερόλη 50-60%, χρόνοι επεξεργασίας 0-120 min) ως προς την απώλεια υγρασίας, την πρόσληψη στερεών, την ενεργότητα νερού καθώς και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της δύναμης διάτρησης και του αντικειμενικού χρώματος. Συνολικά, το ωσμωτικό διάλυμα συγκέντρωσης σε γλυκερόλη 60% είχε σημαντικότερη επίδραση σε σχέση με το διάλυμα συγκέντρωσης 50% στην απώλεια υγρασίας, στην πρόσληψη στερεών και στην ενεργότητα νερού. Η αύξηση της συγκέντρωσης της γλυκερόλης οδήγησε σε μείωση κατά 7% της ενεργότητας του νερού σε χρόνο 60 min (από 0.97 του ανεπεξέργαστου σε 0.90 του ωσμοαφυδατωμένου δείγματος), ενώ με το διάλυμα συγκέντρωσης 50% δεν παρατηρήθηκε μείωση μεγαλύτερη του 3% σε οποιοδήποτε χρόνο επεξεργασίας. Επιπλέον, η επεξεργασία με ωσμωτικό διάλυμα συγκέντρωσης 60% σε γλυκερόλη σε χρόνο 60 min παρουσίασε μεγαλύτερη απώλεια σε υγρασία κατά 1.1 g_{νερού}/g αρχικού ξηρού βάρους και σε πρόσληψη στερεών κατά 0.6 g_{στερεού}/g αρχικού ξηρού βάρους αντίστοιχα. Η γλυκερόλη, ως κύριο συστατικό του ωσμωτικού διαλύματος, φαίνεται ότι καθορίζει την ικανότητα του διαλύματος στην απομάκρυνση της υγρασίας από τον ιστό του σπανακιού καθώς και την πρόσληψη των στερεών και τη μείωση της ενεργότητας του νερού. Όσον αφορά τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του σπανακιού δεν παρατηρήθηκε μεταβολή στη δύναμη

διάτρησης, στην απόχρωση του πράσινου χρώματος (δείκτης h) και στην ένταση του χρώματος (δείκτης C), ενώ η φωτεινότητα (L) των δειγμάτων μειώθηκε κατά 10% σε σχέση με το ανεπεξέργαστο δείγμα. Η αποτελεσματικότητα της διεργασίας της ωσμωτικής αφυδάτωσης ως προς τη μεταφορά μάζας νερού και στερεών προέκυψε ότι επηρεάστηκε σημαντικά και από τη συγκέντρωση του ωσμωτικού διαλύματος και το χρόνο επεξεργασίας. Οι συνθήκες που επιλέχθηκαν ως πιο κατάλληλες ήταν η περιεκτικότητα 60% σε γλυκερόλη και ο χρόνος επεξεργασίας 60 min.

Κατά τη δεύτερη θεματική ενότητα, μελετήθηκαν οι συνθήκες επεξεργασίας ΠΗΠ (ένταση ηλεκτρικού πεδίου, αριθμός παλμών, ειδική ενέργεια) για τις οποίες δεν παρατηρείται σημαντική ποιοτική υποβάθμιση του σπανακιού. Η τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου 0.6 kV/cm θεωρήθηκε ως η καταλληλότερη. Σε αυτήν την συνθήκη δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές μεταβολές στο αντικειμενικό χρώμα, τη δύναμη διάτρησης και τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά της σπαργής και της συνολικής αρέσκειας. Η εφαρμογή των ΠΗΠ σε υψηλές τιμές ειδικής ενέργειας (>5 kJ/kg) παρουσίασε υποβάθμιση της ποιότητας του σπανακιού. Η απαιτούμενη δύναμη διάτρησης αυξήθηκε κατά 30-50% σε υψηλές τιμές ειδικής ενέργειας, και οι υποκειμενικοί δείκτες της σπαργής και της συνολικής αρέσκειας επιβεβαίωσαν την αλλοίωση της ποιότητας των δειγμάτων σπανακιού. Το χρώμα των δειγμάτων δεν διαφοροποιήθηκε σημαντικά σε σχέση με την αύξηση της ειδικής ενέργειας της επεξεργασίας.

Στη συνέχεια, μελετήθηκε η εφαρμογή των ΠΗΠ ως προκατεργασία της ΩΑ με στόχο την ενίσχυση των φαινομένων μεταφοράς μάζας. Η επεξεργασία ΠΗΠ (0.6 kV/cm, 0-200 παλμοί) πραγματοποιήθηκε πριν την ΩΑ σε διαλύματα περιεκτικότητας σε γλυκερόλη 50% και 60%. Ανεξαρτήτως της συγκέντρωσης του ωσμωτικού διαλύματος η εφαρμογή των ΠΗΠ παρουσίασε μεγαλύτερες τιμές απώλειας υγρασίας και πρόσληψης στερεών σε σχέση με τα ανεπεξέργαστα με ΠΗΠ δείγματα. Η ενεργότητα του νερού στα δείγματα σπανακιού που επεξεργάστηκαν με ωσμωτικό διάλυμα 60% σε γλυκερόλη μειώθηκε σε τιμές χαμηλότερες του 0.90. Ως καταλληλότερες συνθήκες επιλέχθηκαν ο χρόνος επεξεργασίας 60 min και η εφαρμογή 20 παλμών. Στις συνθήκες αυτές οι ποιοτικοί παράμετροι της δύναμης διάτρησης και του αντικειμενικού χρώματος δεν παρουσίασαν αρνητικές μεταβολές και η πρόσληψη των στερεών ήταν κατά 0.4 g_{στερεού}/g_{αρχικού ξηρού βάρους} μεγαλύτερη από τη τιμή των υπόλοιπων δειγμάτων. Η αυξημένη πρόσληψη στερεών έχει ως αποτέλεσμα την ενίσχυση του φυτικού ιστού του σπανακιού, αφού το ωσμωτικό διάλυμα περιέχει συστατικά όπως το χλωριούχο ασβέστιο και το μεταδιθειώδες νάτριο, τα οποία βελτιώνουν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος. Από τη μαθηματική περιγραφή των πειραματικών δεδομένων για τη μεταφορά νερού και στερεών μέσω του 2^{ου} νόμου του Fick για τη διάχυση προέκυψε ότι η επεξεργασία με ΠΗΠ οδήγησε σε σημαντική αύξηση του συντελεστή διάχυσης του νερού (από 4.23*10⁻¹⁵ m²/s (ανεπεξέργαστο δείγμα) έως 9.16*10⁻¹⁵ m²/s (200 παλμοί)) και των στερεών (από 9.94*10⁻¹⁵ m²/s (ανεπεξέργαστο δείγμα) έως 15.03*10⁻¹⁵ m²/s (200 παλμοί)). Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνουν την επίδραση των ΠΗΠ στην ενίσχυση των φαινομένων μεταφοράς μάζας και στερεών κατά την ΩΑ.

Έχοντας επιλέξει τις κατάλληλες συνθήκες επεξεργασίας με ΩΑ και ΠΗΠ, πραγματοποιήθηκε μελέτη της διατηρησιμότητας ανεπεξέργαστων, ωσμοαφυδατωμένων και ωσμοαφυδατωμένων με προκατεργασία με ΠΗΠ δειγμάτων σπανακιού σε διαφορετικές θερμοκρασίες αποθήκευσης. Οι παράμετροι που ελέγχθηκαν ήταν η μικροβιακή ανάπτυξη, η μεταβολή του pH, της δύναμης διάτρησης και του αντικειμενικού χρώματος, η περιεκτικότητα σε βιταμίνη C και χλωροφύλλες, καθώς και η οργανοληπτική αξιολόγηση

των δειγμάτων. Η ΩΑ και η προκατεργασία με ΠΗΠ επιβράδυναν σημαντικά την ανάπτυξη της ολικής μικροβιακής χλωρίδας, των ψευδομονάδων, των ζυμών και μυκήτων και των εντεροβακτηρίων. Αυτό επιβεβαιώνεται και από το ρυθμό ανάπτυξης του ολικού μικροβιακού φορτίου, που υπολογίστηκε από τη μαθηματική περιγραφή των δεδομένων μέσω του μοντέλου Baranyi, ο οποίος στους 4°C για τα ανεπεξέργαστα δείγματα ήταν ίσος με 0.236 d⁻¹, ενώ στα ωσμοαφυδατωμένα 0.091 d⁻¹ αντίστοιχα. Ακόμη, μέσω της εξίσωσης Arrhenius, προσδιορίστηκε η εξάρτηση των ρυθμών ανάπτυξης της ολικής μικροβιακής χλωρίδας από τη θερμοκρασία αποθήκευσης. Η ενέργεια ενεργοποίησης της ανάπτυξης της μικροβιακής χλωρίδας υπολογίστηκε ίση με 50.89 kJ/mol για τα ανεπεξέργαστα δείγματα και 33.36 kJ/mol για τα επεξεργασμένα με ΩΑ δείγματα σπανακιού αντίστοιχα. Η μεταβολή του pH, ακολούθησε τη τάση της μικροβιακής ανάπτυξης, δηλαδή η εφαρμογή της ΩΑ και των ΠΗΠ μείωσαν το ρυθμό αύξησης του pH κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης των δειγμάτων. Στα ανεπεξέργαστα και στα ωσμοαφυδατωμένα δείγματα το pH αυξήθηκε λόγω της παραγωγής βασικών μεταβολιτών από τους αλλοιογόνους μικροοργανισμούς που αναπτύσσονται και κυρίως από τις ψευδομονάδες. Στα ωσμοαφυδατωμένα δείγματα με προκατεργασία με ΠΗΠ, το pH παρέμεινε σταθερό, όπως και το μικροβιακό φορτίο των δειγμάτων αυτών. Οι δείκτες της φωτεινότητας (L) και της έντασης του χρώματος παρουσίασαν μείωση κατά 5-10 μονάδες, ενώ ο δείκτης της απόχρωσης του χρώματος (h) δεν μεταβλήθηκε με το πέρασμα του χρόνου. Ακόμη, η ΩΑ και η προεπεξεργασία με ΠΗΠ είχαν ως αποτέλεσμα τη σημαντική διατήρηση της συγκέντρωσης της βιταμίνης C στα δείγματα σπανακιού στη θερμοκρασία των 10°C σε σχέση με τα ανεπεξέργαστα δείγματα.

Κατά τον οργανοληπτικό έλεγχο των δειγμάτων προέκυψε το συμπέρασμα ότι η ΩΑ μείωσε σημαντικά το ρυθμό αλλοίωσης των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών όπως είναι η σπαργή, η ένταση των δυσάρεστων οσμών, η γεύση και η συνολική αρέσκεια των δειγμάτων σπανακιού. Μέσω της γραμμικής προσαρμογής των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών υπολογίστηκαν οι ρυθμοί μεταβολής. Συγκεκριμένα, για τη συνολική οργανοληπτική αρέσκεια σε θερμοκρασία 4°C ο ρυθμός μείωσης στα ανεπεξέργαστα δείγματα ίσος με -0.343 d⁻¹ μειώθηκε σε -0.091 d⁻¹ στα ωσμοαφυδατωμένα δείγματα. Και σε αυτήν την περίπτωση, μέσω της εξίσωσης Arrhenius, υπολογίστηκαν οι ενέργειες ενεργοποίησης ως 77.45 kJ/mol για τη μείωση της συνολικής αρέσκειας των ανεπεξέργαστων δειγμάτων και 88.66 kJ/mol για τα ωσμοαφυδατωμένα δείγματα σπανακιού.

Το τελευταίο στάδιο της παρούσας εργασίας ήταν ο προσδιορισμός της διατηρησιμότητας των ανεπεξέργαστων και των ωσμοαφυδατωμένων δειγμάτων σπανακιού σε συνάρτηση της θερμοκρασίας αποθήκευσης. Καθοριστικοί παράγοντες της διατηρησιμότητας αποτέλεσαν η κινητική ανάπτυξη της ολικής μικροβιακής χλωρίδας και της συνολικής οργανοληπτικής εντύπωσης. Η διατηρησιμότητα των δειγμάτων ορίστηκε ως συνάρτηση της θερμοκρασίας αποθήκευσης και με εφαρμογή της εξίσωσης Arrhenius υπολογίστηκε ότι στα ανεπεξέργαστα δείγματα για θερμοκρασίες 4°C, 8°C, 12°C και 20°C η διατηρησιμότητα ήταν 6, 4, 3 και 2 ημέρες, ενώ στα ωσμοαφυδατωμένα δείγματα σπανακιού ήταν 13, 10, 8 και 4 ημέρες για θερμοκρασίες 4°C, 8°C, 12°C και 20°C, αντίστοιχα. Συνεπώς, η ΩΑ πέτυχε την επιμήκυνση της διατηρησιμότητας του σπανακιού για σημαντικό χρονικό διάστημα.

Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι η ωσμωτική αφυδάτωση του σπανακιού αποτελεί λύση στο πρόβλημα της γρήγορης αλλοίωσης του σπανακιού, αφού όχι μόνο επιτάχυνε τη μείωση της περιεχόμενης υγρασίας με συνέπεια την επιβράδυνση της μικροβιακής ανάπτυξης, αλλά συγχρόνως διατήρησε τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της φρεσκάδας, του χρώματος και της γεύσης του σπανακιού. Η συνδυαστική εφαρμογή της ΩΑ με τα παλμικά

ηλεκτρικά πεδία ενίσχυσε τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας του νερού και κυρίως των στερεών και παρουσίασε αναστολή της μικροβιακής ανάπτυξης στα δείγματα σπανακιού.

Ολοκληρώνοντας την παρούσα διπλωματική εργασία, θα παρουσίαζε ενδιαφέρον η προσπάθεια ενσωμάτωσης του ωσμωτικά επεξεργασμένου σπανακιού σε προϊόντα έτοιμα προς κατανάλωση μαζί με άλλα ωσμοαφυδατωμένα λαχανικά και η μελέτη της διατηρησιμότητάς τους και της ποιοτικής μεταβολής των χαρακτηριστικών τους συνολικά. Επίσης, περαιτέρω έρευνας χρήζει η επαναχρησιμοποίηση του ωσμωτικού διαλύματος μετά το τέλος της επεξεργασίας, με σκοπό την εξοικονόμηση υλικών. Σε αυτό το στάδιο θα μπορούσε να εξεταστεί η προσθήκη συστατικών στο αραιωμένο ωσμωτικό διάλυμα για την ενίσχυση της ωσμωτικής ικανότητάς του, καθώς και να γίνει προσδιορισμός του μικροβιακού φορτίου του διαλύματος λόγω επιμόλυνσης από το επεξεργαζόμενο σπανάκι. Τέλος, στα πλαίσια εφαρμογής της διεργασίας σε μεγαλύτερη κλίμακα, θα μπορούσαν να μελετηθούν μικρότερες αναλογίες τροφίμου προς ωσμωτικού διαλύματος, ώστε να μειωνόταν το κόστος της διεργασίας.

Βιβλιογραφία

- Amami, E., Vorobiev, E., & Kechaou, N. (2005). Effect of pulsed electric field on the osmotic dehydration and mass transfer kinetics of apple tissue. *Drying technology*, 23(3), 581-595
- Asavasanti S, Ersus S, Ristenpart W, Strove P, Barret DM. «Critical field strength of onions tissues treated by pulsed electric fields», *J. Food Sci.* 75:433–4, 2010
- Aviara, N. A., Onuoha, L. N., Falola, O. E., Igbeka J. C. Energy and Exergy Analyses of Native Cassava Starch Drying in a Tray Dryer. *Energy* 2014, 73, 809–817
- Bajgai, T. R., & Hashinaga, F. (2001). Drying of spinach with a high electric field. *Drying Technology*, 19(9), 2331–2341.
- Barbosa-Cánovas G., Gongora-Nieto M. M., Pothakamury U. R., Swanson B. G. 1999. Preservation of foods with pulsed electric fields. Academic Press. San Diego, USA. Pages 1-45
- Barbosa-Canovas G.V., Vega-Mercado H. «Osmotic Dehydration. In: Dehydration of Foods», *Dehydration of Foods*. Springer, Boston, MA, 1996
- Chandra, S., & Kumari, D. (2014). *Recent Development in Osmotic Dehydration of Fruit and Vegetables: A Review*. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55(4), 552–561
- Chang, C. H., H. Y. Lin, C. Y. Chang, and Y. C. Liu. 2006. Comparisons on the antioxidant properties of fresh, freeze-dried and hot-air-dried tomatoes. *Journal of Food Engineering* 77 (3): 478–485
- Changrue V, Sunjka PS, Garipey Y, Raghavan GSV, Wang N (2004) Realtime control of microwave drying process. Proc 14th Int Drying Symp Sao Paulo, Brazil 22–25 August, p 1532–1542
- Changrue, V., Raghavan, V. G., Orsat, V., & Vijaya Raghavan, G. (2006). Microwave drying of fruits and vegetables. *Stewart Postharvest Review*, 2(6), 1-7
- Chou SK and Chua KJ. New hybrid drying technologies for heat sensitive foodstuffs. *Trends in Food Science & Technology* 2001:12:359–369
- Cruz L, Clemente G, Mulet A, Ahmad-Qasem M, Barraón-Catalán E and García-Pérez J, Airborne ultrasonic application in the drying of grape skin: kinetic and quality considerations. *J Food Eng* 168:251–258 (2016)
- D. Jain, G.N. Tiwari, Thermal aspects of open sun drying of various crops, *Energy*, Volume 28, Issue 1, 2003, Pages 37-54
- Danalache F, Carvalho CY, Brito L, Mata P, Moldão-Martins M and Alves VD, Effect of thermal and high hydrostatic pressure treatments on mango bars shelf-life under refrigeration. *J Food Eng* 212: 113–120 (2017)
- De Vito F, Ferrari G, Lebovka NI, Shynkaryk NV, Vorobiev E. 2008. Pulse duration and efficiency of soft cellular tissue disintegration by pulsed electric fields. *Food Bioprocess Technol.* 1:307–313
- Deepak, B., & Iqbal, Z. (2015). Lyophilization—Process and Optimization for Pharmaceuticals. *IJDRA*, 3(1), 30-40

Dermesonlouoglou E, Chalkia A, Dimopoulos G and Taoukis P, Combined effect of pulsed electric field and osmotic dehydration pretreatments on mass transfer and quality of air dried goji berry. *Innovative Food Sci Emerg Technol* 49:106–115 (2018)

Dermesonlouoglou E.K., Taoukis P.. 2008b. Characterisation of reused osmotic solution during tomato osmotic dehydration. IFT Annual Meeting, 28 June – 1 July, New Orleans-Louisiana, U.S.A.. Book of Abstracts. Pages 29

Desrosiers, T.; Smyrl, T.G.; Paquette, G. Retention of ascorbic acid in home dehydrated green peppers and peaches. *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal* 1985, 18, 58–62

Donsì F, Ferrari G and Pataro G, Applications of pulsed electric field treatments for the enhancement of mass transfer from vegetable tissue. *Food Eng Rev* 2:109–130 (2010)

Ersus S, Oztop MH, McCarthy MJ, Barret DM. 2010. Disintegration efficiency of pulsed electric field induced effects on onion (*Allium cepa* L.) tissues as a function of pulsed protocol and determination of cell integrity by ¹H-NMR relaxometry. *J. Food Sci.* 7:444–52

Escobedo-Avellaneda Z, Moure MP, Chotyakul N, Torres JA, WeltiChanes J and Lamela CP, Benefits and limitations of food processing by high-pressure technologies: effects on functional compounds and abiotic contaminants (Beneficios y limitaciones del procesamiento de alimentos por tecnologías de alta presión: efectos en componentes funcionales y contaminantes abióticos). *CyTA J Food* 9:351–364 (2011)

Fan, K., Wu, J., & Chen, L. (2021). Ultrasound and its combined application in the improvement of microbial and physicochemical quality of fruits and vegetables: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 80

Flink J.M., Energy analysis in dehydration processes. *Food Technol.*, 1977, 31, 76–83

Ghosh, A., & Ghosh, U. (2016). Effect of processing on nutritional quality of spinach (*Spinacia oleracea*). *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology*, 7, 247–253

Giannioti A., Sacchetti G., Guerzoni M.F. & Dala Rosa M. «Microbial aspects on short-time osmotic treatment of kiwifruit» *J. Food Eng.*, 2001

Hasan, M. U., Malik, A. U., Ali, S., Imtiaz, A., Munir, A., Amjad, W., & Anwar, R. (2019). *Modern drying techniques in fruits and vegetables to overcome postharvest losses: A review. Journal of Food Processing and Preservation*

Hasan, M. U., Malik, A. U., Ali, S., Imtiaz, A., Munir, A., Amjad, W., & Anwar, R. (2019). Modern drying techniques in fruits and vegetables to overcome postharvest losses: A review. *Journal of Food Processing and Preservation*, 43(12)

Juarez-Enriquez E, Salmeron-Ochoa I, Gutierrez-Mendez N, Ramaswamy H and Ortega-Rivas E, Shelf life studies on apple juice pasteurised by ultrahigh hydrostatic pressure. *LWT Food Sci Technol* 62:915–919 (2015)

Kader AA. 2002. Postharvest biology and technology: and overview. In: Kader AA, editor. *Postharvest technology of horticultural crops*. Oakland, Calif.: Univ. of California Div. of Agriculture and Natural Resources, Spec. Publ. 3311. p 39–48

- Kaur, A., Kaur, D., Oberoi, D. P. S., Gill, B. S., & Sogi, D. S. (2008). *Effect of Dehydration on Physicochemical Properties of Mustard, Mint AND Spinach*. *Journal of Food Processing and Preservation*, 32(1), 103–116
- Kempkes, M., & Munderville, M. (2017). *Pulsed Electric Fields (PEF) processing of fruit and vegetables*. *2017 IEEE 21st International Conference on Pulsed Power (PPC)*
- Kumar, V., & Shrivastava, S. L. (2017). Vacuum-assisted microwave drying characteristics of green bell pepper. *International Journal of Food Studies*, 6(1)
- Kumari, B., Tiwari, B. K., Hossain, M. B., Brunton, N. P., & Rai, D. K. (2018). Recent advances on application of ultrasound and pulsed electric field technologies in the extraction of bioactives from agro-industrial by-products. *Food and bioprocess technology*, 11(2), 223-241
- L.E. Garcia-Amezquita, J. Welti-Chanes, F.T. Vergara-Balderas, D. Bermúdez-Aguirre, *Freeze drying: The Basic Process*, Editor(s): Benjamin Caballero, Paul M. Finglas, Fidel Toldrá, *Encyclopedia of Food and Health*, Academic Press, 2016, Pages 104-109
- Lasya, C. S. (2022). Spinach and its health benefits: A review.
- Leadley C., William A.. 2006. Pulsed Electric Field Processing, Power Ultrasound and Other Emerging Technologies. In: Brennan J. (Ed.). *Food Processing Handbook*. 2nd edition. WILEY – VCH. Chapter 7. Pages 201-231
- Lebovka, N. I., Praporscic, I., Ghnimi, S., & VAngersbach A., Heinz V. & Knorr D. Vorobiev, E., «Temperature enhanced electroporation under the pulsed electric field treatment of food tissue», *Journal of food engineering*, 69(2), 177-184, 2005
- Lelieveld, H. L., Notermans, S., & De Haan, S. W. H. (Eds.). *Food preservation by pulsed electric fields: from research to application*. Elsevier, 2007
- Lenart A.& Flink J.M., «Osmotic concentration of potato. I. Criteria for the end-point of the osmosis process», *J. Food Technol.* 19:45, 1984
- Lewicki, P. P., & Lenart, A. (2020). Osmotic dehydration of fruits and vegetables. In *Handbook of industrial drying* (pp. 691-713). CRC press
- Liu, Z. L.; Zielinska, M.; Yang, X. H.; Yu, X. L.; Chen, C.; Wang, H.; Wang, J.; Pan, Z.; Xiao, H. W. Moisturizing Strategy for Enhanced Convective Drying of Mushroom Slices. *Renew. Energy*2021, 172, 728–739
- Luís Marangoni Júnior, Marcelo Cristianini, Marisa Padula, Carlos Alberto Rodrigues Anjos, *Effect of high-pressure processing on characteristics of flexible packaging for foods and beverages*, *Food Research International*, Volume 119, 2019, Pages 920-930
- Mavroudis N.E., Gekas V., Sjöholm I. «Osmotic dehydration of apples-Effects of agitation and raw material characteristics» *J. of Food Eng.*, 1998
- Mohamed, M. E., & Eissa, A. H. A. (2012). Pulsed electric fields for food processing technology. *Structure and function of food engineering*, 11, 275-306
- Mustayen, A. G. M. B., Mekhilef, S., & Saidur, R. (2014). Performance study of different solar dryers: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 463–47

- Nowacka M., Tylewicz U., Tappi S., Siroli L, Lanciotti R., Romani S., WitrowaRajchert D.. 2018. Ultrasound assisted osmotic dehydration of organic cranberries (*Vaccinium oxycoccus*): Study on quality parameters evolution during storage. *Food Control*. Volume 93. Pages 40-47.
- Nuñez-Mancilla Y., Perez-Won P., Vega-Gálvez A., Arias V., Tabilo-Munizaga G., Briones-Labarca V., Lemus-Mondaca R., Di Scala K.. 2011. Modeling mass transfer during osmotic dehydration of strawberries under high hydrostatic pressure conditions. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. Volume 12. Pages 338-343
- Ochoa – Martínez C.I., Ayala – Aponte A.A.. 2007. Prediction of mass transfer kinetics during osmotic dehydration of apples using neural networks. *LWT - Food Science and Technology*. Volume 40. Pages 638 – 645
- Ondier GO, Siebenmorgen TJ, Mauromoustakos A. Low-temperature, low relative humidity drying of rough rice. *J Food Eng* 2010; 100:545–50
- Onwude, D. I., Hashim, N., & Chen, G. (2016). Recent advances of novel thermal combined hot air drying of agricultural crops. *Trends in Food Science & Technology*, 57, 132–145
- Osaе, R., Essilfie, G., Alolga, R. N., Akaba, S., Song, X., Owusu-Ansah, P., & Zhou, C. (2020). *Application of non-thermal pretreatment techniques on agricultural products prior to drying: a review. Journal of the Science of Food and Agriculture*
- Osepchuk JM (2002) Microwave power applications. *IEEE Trans Microwave Theory Technol* 50:975–98
- P. Barnwal, G.N. Tiwari, Grape drying by using hybrid photovoltaic-thermal (PV/T) greenhouse dryer: An experimental study, *mSolar Energy*, Volume 82, Issue 12, 2008, Pages 1131-1144
- Pandurangi, S., & LaBorde, L. F. (2006). Retention of Folate, Carotenoids, and Other Quality Characteristics in Commercially Packaged Fresh Spinach. *Journal of Food Science*, 69(9), C702–C707
- Pandurangi, S., & LaBorde, L. F. (2006). Retention of Folate, Carotenoids, and Other Quality Characteristics in Commercially Packaged Fresh Spinach. *Journal of Food Science*, 69(9), C702–C707
- Pereira, L. M., Ferrari, C. C., Mastrantonio, S. D. S., Rodrigues, A. C. C., & Hubinger, M. D. (2006). Kinetic Aspects, Texture, and Color Evaluation of Some Tropical Fruits during Osmotic Dehydration. *Drying Technology*, 24(4), 475–484
- Phisut, N., «Factors affecting mass transfer during osmotic dehydration of fruits», *International Food Research Journal*, 19 (1), pp. 7-18, 2012
- Price JL, Floros JD. 1993. Quality decline in minimally processed fruits and vegetables. *Dev Food Sci* 32:405–27
- Puertolas E., Luengo E., Ivarez I.A., Raso J., « Improving Mass Transfer to Soften Tissues by Pulsed Electric Fields: Fundamentals and Application», *Annu. Rev. Food Sci. Technol.*, 3:263–82, 2012
- Puértolas, E., Luengo, E., Álvarez, I., & Raso, J. (2012). *Improving Mass Transfer to Soften Tissues by Pulsed Electric Fields: Fundamentals and Applications. Annual Review of Food Science and Technology*, 3(1), 263–282

- R. P. F. Guiné, *Food Drying and Dehydration: Technology and Effect on Food Properties*, Germany: LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co, 2015
- Rahman MS, Lamb J (1990). Osmotic dehydration of pineapple. *J. Food Sci. Technol.* 27: 150-152
- Rahman MS, Perera CO (1999). Drying and food preservation. In: *Handbook of food preservation*. Rahman, MS (Ed). Marcel Dekker, New York, USA. pp. 173-216
- Ramya, V., & Jain, N. K. (2017). A review on osmotic dehydration of fruits and vegetables: An integrated approach. *Journal of Food Process Engineering*, 40(3), e12440
- Raoult-Wack A.L.. 1994. Recent advances in the osmotic dehydration of foods. *Trends in Food Science & Technology*. Volume 5. Pages 255-260
- Raso J., Heinz V. 2006. *Pulsed Electric Fields Technology for the Food Industry Fundamentals and Applications*. Springer Science + Business Media, LLC. USA
- Rastogi N.K., Raghavarao K.S.M.S., Niranjana K., Knorr D. 2002. Recent developments in osmotic dehydration: methods to enhance mass transfer. *Trends in Food Science & Technology*. Volume 13. Pages 48-59
- Ratti C., Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review. *J. Food Eng.*, 2001, 49, 311–319
- Ratti, C. (2001). *Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review*. *Journal of Food Engineering*, 49(4), 311–319
- Rojas, M. L.; Silveira, I.; Augusto, P. E. D. Ultrasound and Ethanol Pre-Treatments to Improve Convective Drying: Drying, Rehydration and Carotenoid Content of Pumpkin. *Food Bioprod. Process.* 2020, 119, 20–30
- Sablani, S. S. (2006). Drying of Fruits and Vegetables: Retention of Nutritional/Functional Quality. *Drying Technology*, 24(2), 123–135
- Sablani, S. S. (2006). *Drying of Fruits and Vegetables: Retention of Nutritional/Functional Quality*. *Drying Technology*, 24(2), 123–135
- Sagar, V. R., & Suresh Kumar, P. (2010). Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review. *Journal of food science and technology*, 47(1), 15-26
- Sagar, V.R., Suresh Kumar, P. Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review. *J Food Sci Technol* 47, 15–26 (2010)
- Santos, P. H. S., & Silva, M. A. (2008). Retention of Vitamin C in Drying Processes of Fruits and Vegetables—A Review. *Drying Technology*, 26(12), 1421–1437
- Saulis, G., «Electroporation of cell membranes: The fundamental effects of pulsed electric fields in food processing», *Food Engineering Reviews*, 2(2), 52–73, 2010
- Shi, J., & Le Maguer, M. (2002). *OSMOTIC DEHYDRATION OF FOODS: MASS TRANSFER AND MODELING ASPECTS*. *Food Reviews International*, 18(4), 305–335
- Soysal Y, Oztekin S and Eren O. Microwave drying of parsley modeling, kinetics and energy aspects. *Biosystems Engineering* 2006: 93(4):403– 413

- Toepfel S., Heinz V. & Knorr D., «Potential of high hydrostatic pressure and pulsed electric fields for energy efficient and environmentally friendly food processing» *Food Rev. Int.*, 2006
- Toepfl S., «Current industrial applications of Pulsed Electric Fields», 3rd School on Pulsed Electric Field Processing of Food. Dublin: School Proceedings, 2016. 129-131
- Torreggiani D. 1995. Technological aspects of osmotic dehydration in foods. In: Barbosa-Cánovas G, Welti-Chanes J.(Ed.). *Food preservation by moisture controls: fundamentals and applications*. Technomic Publishing Co. USA. Pages 281–304
- Tortoe C.. 2010. A review of osmodehydration for food industry. *African Journal of Food Science*. Volume 4. Pages 303-324
- Tulasidas TN, Raghavan GSV and Mujumdar AS. Microwave drying of grapes in a single mode cavity at 2450 MHz. I. Drying kinetics. *Drying Technology* 1995: 13(8/9):1949–1971
- Tylewicz, U., Tappi, S., Mannozi, C., Romani, S., Dellarosa, N., Laghi, L., ... & Dalla Rosa, M. (2017). Effect of pulsed electric field (PEF) pre-treatment coupled with osmotic dehydration on physico-chemical characteristics of organic strawberries. *Journal of Food Engineering*, 213, 2-9
- Wang J, Xi YS (2005) Drying characteristics and drying quality of carrot using a two-stage microwave process. *J Food Eng* 68: 505–511
- Wientjes AG (1968). The influence of sugar concentrations on the vapour pressure of food odour volatiles in aqueous solutions. *J. Food Sci.* 33: 1-2
- Yamauchi, N., & Watada, A. E. (1991). Regulated chlorophyll degradation in spinach leaves during storage. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 116(1), 58-62
- Yao Z, Le Maguer M (1996). Mathematical modelling and simulation of mass transfer in osmotic dehydration processes. Part I: conceptual and mathematical model. *J. Food Eng.* 29: 349-360
- Zhang, W.-P., Yang, X.-H., Mujumdar, A. S., Ju, H.-Y., & Xiao, H.-W. (2021). The influence mechanism and control strategy of relative humidity on hot air drying of fruits and vegetables: a review. *Drying Technology*, 1–18
- Zhao, Y., & Xie, J. (2004). *Practical applications of vacuum impregnation in fruit and vegetable processing*. *Trends in Food Science & Technology*, 15(9), 434–451
- Zielinska M., Markowski M.. 2018. Effect of microwave-vacuum, ultrasonication, and freezing on mass transfer kinetics and diffusivity during osmotic dehydration of cranberries. *Drying Technology*. Volume 36. Pages 1158-1169