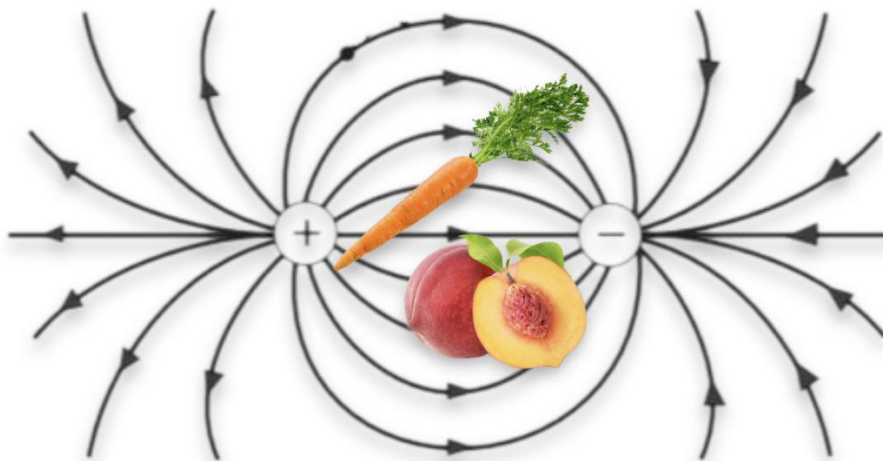




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΧΗΜΕΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

## «ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΑΛΜΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΠΡΟΙΟΝΤΩΝ ΦΡΟΥΤΩΝ ΚΑΙ ΛΑΧΑΝΙΚΩΝ»



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΣΤΟΥΚΟΓΙΩΡΓΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΑΟΥΚΗΣ ΠΕΤΡΟΣ

ΑΘΗΝΑ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2023

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Χημείας και Τεχνολογίας Τροφίμων της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Πέτρο Ταούκη για την ανάθεση του θέματος καθώς και για την υποστήριξη και την καθοδήγηση του κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον μεταδιδάκτορα Γεώργιο Δημόπουλο για την καθοδήγηση και τις γνώσεις που μου παρείχε καθώς και την άψογη συνεργασία καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας. Επιπλέον, οφείλω να ευχαριστήσω όλα τα μέλη του εργαστηρίου Χημείας και Τεχνολογίας Τροφίμων για το φιλικό κλίμα και τη βοήθεια κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων της διπλωματικής μου εργασίας καθώς και τους συμφοιτητές και φίλους μου από την πρώτη ημέρα Ελευθέριο Πίττα, Αχιλλέα Νταφούλη και Ιωάννη Σταυρακάκη για την από κοινού πορεία μας στο Τμήμα Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ το οφείλω στην οικογένεια μου, τους γονείς και τα αδέρφια μου καθώς και στους κοντινούς μου ανθρώπους που με στήριξαν όλα αυτά τα χρόνια ώστε να ολοκληρώσω την προσπάθειά μου.

Γεώργιος Στουκογιώργος  
Αθήνα, Σεπτέμβριος 2023

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα φρούτα και τα λαχανικά αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της βιομηχανίας τροφίμων λόγω της υψηλής θρεπτικής αξίας που τα χαρακτηρίζουν καθώς και της ποικιλίας στα προϊόντα τους. Μια σημαντική διεργασία για την αξιοποίηση των φρέσκων φρούτων και λαχανικών είναι η χυμοποίηση για παραγωγή χυμού. Πριν τη διεργασία της χυμοποίησης πραγματοποιείται θερμική επεξεργασία των φρούτων και λαχανικών με στόχο να μεταβληθούν οι μηχανικές τους ιδιότητες και να διευκολυνθεί η εξαγωγή του χυμού καθώς συχνό πρόβλημα για τη βιομηχανία αποτελούν οι σκληροί φυτικοί ιστοί που δυσκολεύουν τη χυμοποίηση και φθείρουν τον εξοπλισμό. Η θερμική επεξεργασία έχει αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις και υποβαθμίζει τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του χυμού, στρέφοντας τη βιομηχανία τροφίμων σε νέες μη θερμικές τεχνολογίες επεξεργασίας. Η τεχνολογία των Παλμικών Ηλεκτρικών Πεδίων (ΠΗΠ) είναι μια νέα, μη θερμική μέθοδος επεξεργασίας που προκαλεί ηλεκτροδιάτρηση της κυτταρικής μεμβράνης των κυττάρων του τροφίμου. Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μελέτη της επίδρασης της επεξεργασίας με τη μέθοδο των Παλμικών Ηλεκτρικών Πεδίων στην απόδοση της χυμοποίησης, στα χαρακτηριστικά υφής δειγμάτων ροδάκινου και καρότου, στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των χυμών τους καθώς και ο προσδιορισμός των ενεργειακών απαιτήσεων της επεξεργασίας με ΠΗΠ.

Αρχικά, προσδιορίστηκε ο δείκτης κυτταρικής διάρρηξης ( $Z$ ) σε δείγματα ροδάκινου, αλεσμένου και ολόκληρου καρότου με τη μέθοδο της υψηλής-χαμηλής συχνότητας μετά την επεξεργασία με ΠΗΠ. Οι εντάσεις του ηλεκτρικού πεδίου που εφαρμόστηκαν κατά την επεξεργασία με ΠΗΠ στο δείγμα ροδάκινου ήταν 0,6-2,1 kV/cm, στο δείγμα αλεσμένου καρότου 0,25-1 kV/cm ενώ στο δείγμα ολόκληρου καρότου 0,5-2 kV/cm. Ο δείκτης κυτταρικής διάρρηξης στο δείγμα ροδάκινου έφτασε το 0,37, στο δείγμα αλεσμένου καρότου το 0,42 ενώ στο ολόκληρο καρότο έφτασε το 0,65. Από τα αποτελέσματα του προσδιορισμού του δείκτη κυτταρικής διάρρηξης επιλέχθηκαν οι κατάλληλες συνθήκες επεξεργασίας ΠΗΠ που οδηγούν σε αποτελεσματική κυτταρική διάρρηξη των φυτικών ιστών.

Στη συνέχεια, με στόχο να αξιολογηθεί η επίδραση των ΠΗΠ στις μηχανικές ιδιότητες των φυτικών ιστών πραγματοποιήθηκε ανάλυση υφής των ανεπεξέργαστων και επεξεργασμένων φυτικών ιστών. Συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν δοκιμή συμπίεσης σε δείγματα ροδάκινου, δοκιμή συμπίεσης και κοπής σε δείγματα καρότου. Τα επεξεργασμένα με ΠΗΠ δείγματα ροδάκινου ( $W_{sp}=2,73$  kJ/kg) έδειξαν μείωση 23% στη δύναμη συμπίεσης σε σύγκριση με το ανεπεξέργαστο δείγμα, παρόμοια με το θερμικά επεξεργασμένο δείγμα (90°C, 5 λεπτά,  $W_{sp}=241,85$  kJ/kg), γεγονός που μαρτυρά το σημαντικό μαλάκωμα του ιστού. Η μείωση στη δύναμη συμπίεσης του κατεψυγμένου-αποψυγμένου δείγματος ροδάκινου ( $W_{sp}=870$  kJ/kg) ήταν 67% σε σύγκριση με ανεπεξέργαστο δείγμα και οφείλεται στη μέγιστη κυτταρική διάρρηξη που υπέστη λόγω της διεργασίας. Επιπλέον, έγινε εκτίμηση της συχνότητας αντικατάστασης μαχαιριών σε κοπτική μηχανή πραγματικής γραμμής παραγωγής κατά τη μελέτη της περιόδου αντικατάστασης των μαχαιριών στη βιομηχανία λόγω φθοράς από την κοπή φρούτων με διαφορετικά επίπεδα σκληρότητας. Βρέθηκε ότι

η προ επεξεργασία με ΠΗΠ σε ηλεκτρικό πεδίο 2,1 kV/cm παρέτεινε το χρονικό διάστημα για αντικατάσταση από 33 ώρες σε 7 ημέρες κάνοντας σκληρά ροδάκινα να έχουν παρόμοια υφή με ώριμα.

Στα επεξεργασμένα με ΠΗΠ δείγματα καρότου, η δύναμη συμπίεσης μειώθηκε κατά 60% μετά την εφαρμογή 3000 παλμών σε ηλεκτρικό πεδίο 0,5 kV/cm ( $W_{sp}=5,73$  kJ/kg), κατά 70% μετά την εφαρμογή 800 παλμών σε ηλεκτρικό πεδίο 1 kV/cm ( $W_{sp}=3,05$  kJ/kg) και κατά 90% μετά την εφαρμογή 400 παλμών σε ηλεκτρικό πεδίο 1,7 kV/cm ( $W_{sp}=2,60$  kJ/kg) σε σύγκριση με το ανεπεξέργαστο δείγμα. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ότι η επεξεργασία με ΠΗΠ μπορεί να συνεισφέρει σημαντικά στη μείωση των ενεργειακών αναγκών κατά την επεξεργασία του καρότου.

Ακολούθησε χυμοποίηση των δειγμάτων και παρατηρήθηκε αύξηση της απόδοσης τους σε χυμό μετά την επεξεργασία με ΠΗΠ σε ηλεκτρικό πεδίο 2,1 kV/cm από 65,6% στο ανεπεξέργαστο δείγμα ροδάκινου σε 79,4% μετά την εφαρμογή 1000 παλμών ( $W_{sp}=2,73$  kJ/kg). Η απόδοση του θερμικά επεξεργασμένου δείγματος ροδάκινου έφτασε το 77,8% ( $W_{sp}=241,85$  kJ/kg) ενώ το δείγμα που υπέστη κατάψυξη-απόψυξη είχε απόδοση 77,7% ( $W_{sp}=870,09$  kJ/kg). Στο αλεσμένο καρότο η απόδοση χυμού του ανεπεξέργαστου δείγματος ήταν 33% ενώ το επεξεργασμένο με ΠΗΠ δείγμα σε ηλεκτρικό πεδίο 1 kV/cm μετά την εφαρμογή 700 παλμών ( $W_{sp}=19,83$  kJ/kg) σημείωσε απόδοση 43%. Στο δείγμα ολόκληρου καρότου η απόδοση σε χυμό στο ανεπεξέργαστο δείγμα ήταν 23,8% ενώ στο επεξεργασμένο με ΠΗΠ δείγμα σε ηλεκτρικό πεδίο 1,6 kV/cm μετά την εφαρμογή 400 παλμών ( $W_{sp}=2,73$  kJ/kg) η απόδοση ήταν 41%. Για τα θερμικά επεξεργασμένα δείγματα ολόκληρου καρότου, η απόδοση τους έφτασε το 45,7% μετά από επεξεργασία στους 60°C για 15 λεπτά ( $W_{sp}=134,6$  kJ/kg), το 41,8% μετά από επεξεργασία στους 70°C για 10 λεπτά ( $W_{sp}=173,10$  kJ/kg), το 39,5% μετά από επεξεργασία στους 80°C για 3 λεπτά ( $W_{sp}=211,50$  kJ/kg) και το 40,1% μετά από επεξεργασία στους 90°C για 1 λεπτό ( $W_{sp}=250,00$  kJ/kg). Το δείγμα καρότου που υπέστη κατάψυξη-απόψυξη ( $W_{sp}=882,00$  kJ/kg) είχε 45% απόδοση σε χυμό.

Στη μελέτη που έγινε στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του χυμού ροδάκινου που προέκυψε με χρήση των προ επεξεργασιών, παρατηρήθηκε ότι οι συνθήκες επεξεργασίας δεν επηρεάζουν τη συγκέντρωση των ολικών διαλυτών στερεών αλλά ούτε και το pH. Η συνεκτικότητα κατά Bostwick του χυμού ροδάκινου αυξάνεται από 6,30 σε 8,75 cm/30 δευτερόλεπτα όταν έχει προηγηθεί επεξεργασία του φρούτου με ΠΗΠ (2,1 kV/cm) ή κατάψυξη-απόψυξη σε σύγκριση με το ανεπεξέργαστο δείγμα λόγω της αυξημένης κυτταρικής διάρρηξης των δειγμάτων. Επίσης, παρατηρήθηκε μικρή μεταβολή του χρώματος ( $\Delta E=2$ ) του χυμού μετά την επεξεργασία του ροδάκινου με ΠΗΠ σε ηλεκτρικό πεδίο 2,1 kV/cm ειδικότερα μετά την εφαρμογή 500 και 1000 παλμών. Η θερμική επεξεργασία του φρούτου στους 90°C για 5 λεπτά είχε παρόμοια αποτελέσματα στη μεταβολή του χρώματος με την επεξεργασία με ΠΗΠ ενώ μετά τη διεργασία της κατάψυξης-απόψυξης παρατηρήθηκε η μεγαλύτερη μεταβολή στο χρώμα ( $\Delta E=4,35$ ) εφόσον ο χυμός ήταν αρκετά σκουρόχρωμος. Επομένως, η επεξεργασία των δειγμάτων ροδάκινου με ΠΗΠ επηρεάζει σε μικρότερο βαθμό τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του χυμού.

Κατά τη μελέτη των ποιοτικών χαρακτηριστικών στο χυμό καρότου, παρατηρήθηκε έως και 11% αύξηση της συγκέντρωσης των ολικών διαλυτών στερεών μετά την επεξεργασία του λαχανικού με ΠΗΠ (1 kV/cm και 1,6 kV/cm) καθώς και μετά τη διεργασία της κατάψυξης-απόψυξης, ενώ μετά τη θερμική επεξεργασία στους 60-90°C ο χυμός είχε έως και 25% μειωμένη συγκέντρωση ολικών διαλυτών στερεών σε σύγκριση με το ανεπεξέργαστο δείγμα. Επιπλέον, η θερμική επεξεργασία επηρεάζει το pH του χυμού μειώνοντας το έως και 6,2% ενώ, η επεξεργασία με ΠΗΠ και η κατάψυξη-απόψυξη δεν επηρεάζει την τιμή του pH. Η οξύτητα (% κιτρικό οξύ) στο χυμό καρότου παρουσιάζει μείωση έως και 44% μετά τη θερμική επεξεργασία, παρόμοια με τη μείωση μετά από κατάψυξη και απόψυξη του καρότου, ενώ η επεξεργασία με ΠΗΠ φαίνεται να αυξάνει σε μικρό βαθμό την οξύτητα του χυμού όταν η επεξεργασία με ΠΗΠ πραγματοποιείται σε αλεσμένο καρότο και να μειώνει την οξύτητα όταν η επεξεργασία πραγματοποιείται σε ολόκληρο καρότο. Η διαφορετική περίοδος συγκομιδής των δειγμάτων καρότου ίσως οφείλεται για τη διαφορετική τάση στην οξύτητα του χυμού μετά την επεξεργασία με ΠΗΠ. Έπειτα, η συγκέντρωση των καροτενοειδών στο χυμό μειώνεται έως και 43% μετά από κάθε συνθήκη επεξεργασίας του καρότου σε σύγκριση με το ανεπεξέργαστο δείγμα. Τέλος, η μεταβολή του χρώματος του χυμού είναι αισθητή κυρίως μετά τη θερμική επεξεργασία ( $\Delta E > 4$ ) καθώς και μετά την κατάψυξη-απόψυξη ( $\Delta E = 10$ ) του λαχανικού όπου έχει αρκετά σκούρο χρώμα, ενώ μετά την επεξεργασία με ΠΗΠ η μεταβολή του χρώματος είναι μικρή ( $\Delta E \sim 2$ ) και αυξάνεται όσο η επεξεργασία γίνεται εντονότερη.

Συμπερασματικά, από τη μελέτη που πραγματοποιήθηκε προκύπτει η θετική επίδραση της τεχνολογίας των Παλμικών Ηλεκτρικών Πεδίων ως προ επεξεργασία της χυμοποίησης και του τεμαχισμού φρούτων και λαχανικών, αφού μεταβάλλει τα χαρακτηριστικά υφής, αυξάνει την απόδοση της χυμοποίησης χωρίς να έχει μεγάλες ενεργειακές απαιτήσεις και διατηρεί τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του χυμού σχεδόν αναλλοίωτα. Καθώς η διεργασία μπορεί να πραγματοποιηθεί σε συνεχές έργο, η ένταξή της σε πραγματικές γραμμές παραγωγής φρούτων και λαχανικών έχει σχετικά χαμηλές απαιτήσεις σε τροποποίηση των γραμμών και μπορεί να επιφέρει σημαντικά οφέλη στην αύξηση της παραγωγικότητας και την μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων της επεξεργασίας.

## **APPLICATION OF PULSED ELECTRIC FIELDS FOR IMPROVED PRODUCTION OF FRUIT AND VEGETABLE PRODUCTS**

Fruits and vegetables are an integral part of the food industry because of their high nutritional value and variety in their products. An important process for the utilization of fresh fruits and vegetables is juicing for juice production. Thermal treatment of fruits and vegetables takes place prior to the process of juicing in order to transform its mechanical property as well as facilitate the extraction of juice, a frequent problem for the industry is the hard plant tissues that make it difficult to extract the juice and wear out the equipment. Thermal processing methods have increased energy requirements and degrades the quality characteristics of the juice, turning the food industry towards new non-thermal processing technologies. Pulsed Electric Fields (PEF) technology is a new, non-thermal processing method that causes electrodeposition of the cell membrane of food cells. The objective of this thesis is to study the effect of Pulsed Electric Fields processing on the juicing performance, textural characteristics of peach and carrot samples, quality characteristics of their juices and to determine the energy requirements of the PEF processing.

Initially, the cell disintegration index (Z) was determined in peach, milled and whole carrot samples by the high-low frequency method after the PEF treatment. The electric field intensities applied during the PEF treatment in the peach sample were 0.6-2.1 kV/cm, in the milled carrot sample 0.25-1 kV/cm and in the whole carrot sample 0.5-2 kV/cm. The cell disintegration index in the peach sample reached 0.37, in the milled carrot sample 0.42 and in the whole carrot sample 0.65. From the results of the cell disintegration index determination, suitable PEF treatment conditions leading to effective cell disintegration of plant tissues were selected.

Subsequently, to evaluate the effect of PEF on the mechanical properties of plant tissues, a texture analysis of unprocessed and processed plant tissues was carried out. Compression test on peach samples, compression and cutting test on carrot samples were performed. PEF-treated peach samples ( $W_{sp}=2.73$  kJ/kg) showed a 23% reduction in compression force compared to the untreated sample, like the heat-treated sample (90°C, 5 min,  $W_{sp}=171.45$  kJ/kg), indicating significant tissue softening. The reduction in compression force of the freeze-thawed peach sample ( $W_{sp}=870$  kJ/kg) was 67% compared to untreated sample and was due to the maximum cellular disintegration suffered due to the process. In addition, an estimation of the knife replacement frequency in a real production line cutter was made when studying the knife replacement period in the industry due to wear and tear from cutting fruit with different hardness levels. Results showed that pre-treatment with PEF in an electric field of 2.1 kV/cm extended the time for replacement from 33 hours to 7 days making hard peaches have a similar texture to ripe peaches.

In PEF-treated carrot samples, the compression force decreased by 60% after application of 3000 pulses in an electric field of 0.5 kV/cm ( $W_{sp}=5.73$  kJ/kg), by 70%

after application of 800 at an electric field of 1 kV/cm ( $W_{sp}=3.05$  kJ/kg) and by 90% after the application of 400 pulses at an electric field of 1.7 kV/cm ( $W_{sp}=2.60$  kJ/kg) compared to the untreated sample. These results show that the treatment with PEF can contribute significantly to the reduction of energy requirements during carrot processing.

Juicing of the samples was followed and an increase in juice yield was observed after treatment with PEF in an electric field of 2.1 kV/cm from 65.6% in the unprocessed peach sample to 79.4% after application of 1000 pulses ( $W_{sp}=2.73$  kJ/kg). The yield of the heat-treated peach sample reached 77.8% ( $W_{sp}=171.45$  kJ/kg) while the freeze-thawed sample had a yield of 77.7% ( $W_{sp}=870.09$  kJ/kg). In the milled carrot, the juice yield of the unprocessed sample was 33% while the PEF-treated sample in 1 kV/cm electric field after application of 700 pulses ( $W_{sp}=19.83$  kJ/kg) had a yield of 43%. In the whole carrot sample, the juice yield in the untreated sample was 23.8% while in the PEF treated sample in 1.6 kV/cm electric field after application of 400 pulses ( $W_{sp}=2.73$  kJ/kg) the yield was 41%. For the heat-treated whole carrot samples, the yield reached 45.7% after treatment at 60°C for 15 min ( $W_{sp}=134.6$  kJ/kg), 41.8% after treatment at 70°C for 10 min ( $W_{sp}=173.10$  kJ/kg), 39.5% after treatment at 80°C for 3 min ( $W_{sp}=211.50$  kJ/kg) and 40.1% after treatment at 90°C for 1 min ( $W_{sp}=250.00$  kJ/kg). The carrot sample subjected to freeze-thawing ( $W_{sp}=882.00$  kJ/kg) had 45% juice yield.

In the study carried out on the quality characteristics of the peach juice obtained using the pre-treatments, it was observed that the processing conditions did not affect the concentration of total soluble solids nor the pH. The Bostwick cohesiveness of the peach juice increased from 6.30 to 8.75 cm/30 seconds when the fruit was pre-processed with PEF (2.1 kV/cm) or freeze-thawing prior to the untreated sample due to increased cellular breakthrough of the samples. Also, little change in the colour ( $DE=2$ ) of the juice was observed after the peach was treated with PEF in a 2.1 kV/cm electric field especially after the application of 500 and 1000 pulses. The heat treatment of the fruit at 90°C for 5 min had similar effects on the colour change with the PEF treatment while after the freeze-thaw process the highest change in colour ( $\Delta E=4.35$ ) was observed since the juice was quite dark. Therefore, the treatment of peach samples with PEF has a minor effect on the quality characteristics of the juice.

In the study of quality characteristics in carrot juice, up to 11% increase in total soluble solids concentration was observed after the vegetable was treated with PEF (1 kV/cm and 1.6 kV/cm) and after the freeze-thaw process, while after heat treatment at 60-90°C the juice had up to 25% reduced total soluble solids, concentration compared to the untreated sample. Furthermore, thermal processing affected the pH of the juice by reducing it by up to 6.2%, while the pH value was not affected by the thermal processing and freeze-thaw treatment. The acidity (% citric acid) in carrot juice shows a decrease of up to 44 % after thermal processing, like the decrease after freezing and thawing of carrots, while the PEF treatment seems to slightly increase the acidity of

the juice when it's carried out on milled carrots and decrease the acidity when it's carried out on whole carrots. The different harvesting period of the carrot samples may be responsible for the different trend in juice acidity after PEF treatment. Then, the concentration of carotenoids in the juice decreases up to 43% after each treatment condition of carrot compared to the untreated sample. Finally, the change in the colour of the juice is mainly noticeable after thermal processing ( $\Delta E > 4$ ) and after freezing thawing ( $\Delta E = 10$ ) of the vegetable where it is quite dark in colour, while after the PEF treatment the color change is small ( $\Delta E \sim 2$ ) and increases as the treatment becomes more intense.

In conclusion, the study carried out shows the positive effect of the pulsed electric field technology as a pre-processing method for fruit and vegetable juicing and slicing, since it changes the texture characteristics, increases the juicing efficiency without having high energy requirements and keeps the quality characteristics of the juice almost unchanged. As the process can be carried out in a continuous project, its integration into actual fruit and vegetable production lines has relatively low requirements for line modification and can bring significant benefits in increasing productivity and reducing the energy requirements of processing.



## Περιεχόμενα

<b>1 Το ροδάκινο</b> .....	1
<b>1.1.1 Βοτανική Ταξινόμηση</b> .....	1
<b>1.1.2 Είδη και Ποικιλίες</b> .....	1
<b>1.1.3 Εχθροί και Ασθένειες</b> .....	2
<b>1.1.4 Θρεπτικά Στοιχεία ροδάκινου</b> .....	2
<b>1.1.5 Κλίμα και Έδαφος</b> .....	3
<b>1.1.6 Παραγωγή ροδακίνου</b> .....	4
<b>1.2 Κονσερβοποίηση ροδάκινου: διαδικασία παραγωγής στη βιομηχανία</b> .....	4
<b>2 Το καρότο</b> .....	6
<b>2.1.1 Καταγωγή-Ιστορία</b> .....	6
<b>2.1.2 Χρήσεις του καρότου</b> .....	7
<b>2.1.3 Θρεπτικά στοιχεία καρότου</b> .....	7
<b>2.1.4 Βοτανικά χαρακτηριστικά καρότου</b> .....	8
<b>2.1.5 Ποικιλίες καρότου</b> .....	9
<b>2.1.6 Κλιματικές και εδαφικές απαιτήσεις για την καλλιέργεια καρότου</b> .....	9
<b>2.1.7 Εχθροί και ασθένειες στην καλλιέργεια καρότου</b> .....	9
<b>2.2 Χυμοποίηση καρότου: διαδικασία παραγωγής στη βιομηχανία</b> .....	10
<b>3 Θερμικές και μη θερμικές μέθοδοι επεξεργασίας φρούτων και λαχανικών</b> .....	12
<b>3.1 Θερμικές μέθοδοι επεξεργασίας</b> .....	12
<b>3.1.1 Παστερίωση</b> .....	12
<b>3.1.2 Αποστείρωση</b> .....	13
<b>3.1.3 Ζεμάτισμα ως μέθοδος προ επεξεργασίας</b> .....	14
<b>3.1.3.1 Βασικές αρχές του ζεματίσματος και εξοπλισμός</b> .....	15
<b>3.1.3.2 Ζεμάτισμα σε νερό</b> .....	16
<b>3.1.3.3 Ζεμάτισμα με ατμό</b> .....	16
<b>3.1.3.4 Ζεμάτισμα με μικροκύματα</b> .....	16
<b>3.1.3.5 Ενεργειακές απαιτήσεις και απόβλητα</b> .....	17
<b>3.1.3.6 Επίδραση του ζεματίσματος στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των φρούτων και λαχανικών</b> .....	18
<b>3.1.4 Συμπεράσματα</b> .....	18
<b>3.2 Μη θερμικές μέθοδοι επεξεργασίας</b> .....	20
<b>3.2.1 Υπέρηχοι</b> .....	20
<b>3.2.2 Υπερυψηλή πίεση</b> .....	21

3.2.3 Παλμικά Ηλεκτρικά Πεδία.....	22
3.2.3.1 Ορισμός των Παλμικών Ηλεκτρικών Πεδίων .....	22
3.2.3.2 Αρχή λειτουργείας Παλμικών Ηλεκτρικών Πεδίων .....	22
3.2.3.3 Ηλεκτροδιάτρηση .....	24
3.2.3.4 Εξαρτήματα συστήματος Παλμικών Ηλεκτρικών Πεδίων .....	25
3.2.3.5 Παράμετροι λειτουργείας Παλμικών Ηλεκτρικών Πεδίων .....	27
3.2.3.6 Χαρακτηριστικά υφής .....	30
3.2.3.7 Δείκτης κυτταρικής διάρρηξης, Z.....	31
3.2.3.8 Πλεονεκτήματα Παλμικών Ηλεκτρικών Πεδίων .....	32
3.2.3.9 Εφαρμογή των Παλμικών Ηλεκτρικών Πεδίων σε φυτικούς ιστούς .....	33
3.2.3.10 Εφαρμογή των Παλμικών Ηλεκτρικών Πεδίων για χυμοποίηση φρούτων και λαχανικών.....	33
3.2.3.11 Βιομηχανική εφαρμογή και εκτίμηση κόστους Παλμικών Ηλεκτρικών Πεδίων .....	34
<b>4 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ .....</b>	<b>36</b>
4.1 Εισαγωγή .....	36
4.2 Σκοπός .....	36
4.3 Σχεδιασμός Πειραμάτων .....	36
4.4 Πρώτες Ύλες.....	37
4.5 Πειραματική Διαδικασία .....	38
4.5.1 Υπολογισμός δείκτη κυτταρικής διάρρηξης, Z .....	38
4.5.2 Εξοπλισμός Παλμικών Ηλεκτρικών Πεδίων .....	39
4.6 Μελέτη χυμοποίησης δείγματος ροδάκινου .....	41
4.6.1 Διαδικασία χυμοποίησης ροδάκινου .....	41
4.7 Μελέτη χυμοποίησης δείγματος καρότου .....	43
4.7.1 Διαδικασία χυμοποίησης καρότου .....	45
4.8 Αναλυτικές μέθοδοι για τον προσδιορισμό των ποιοτικών χαρακτηριστικών .....	47
4.8.1 Μέτρηση ολικών διαλυτών στερεών (°Bx).....	47
4.8.2 Προσδιορισμός pH .....	47
4.8.3 Προσδιορισμός της συνεκτικότητας κατά Bostwick σε χυμό ροδάκινου ...	48
4.8.4 Προσδιορισμός χρώματος .....	48
4.8.5 Ανάλυση υφής.....	49
4.8.6 Προσδιορισμός καρτενοειδών στο χυμό καρότου .....	52
4.8.7 Προσδιορισμός οξύτητας (% κιτρικό οξύ) .....	53

<b>5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ</b> .....	54
<b>5.1 Μελέτη της επίδρασης των Παλμικών Ηλεκτρικών Πεδίων στην χυμοποίηση ροδάκινου και στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του χυμού του</b> .....	54
<b>5.1.1.1.1 Δείκτης κυτταρικής διάρρηξης (Z) στο ροδάκινο</b> .....	54
<b>5.1.1.1.2 Δείκτης κυτταρικής διάρρηξης και ενεργειακές απαιτήσεις για το ροδάκινο</b> .....	56
<b>5.1.1.2 Μελέτη της απόδοσης χυμοποίησης ροδάκινου σε διάφορες συνθήκες επεξεργασίας</b> .....	57
<b>5.1.1.3 Μελέτη της προσφερόμενης ενέργειας ανά συνθήκη επεξεργασίας και απόδοση χυμοποίησης</b> .....	58
<b>5.1.2.1 Ολικά διαλυτά στερεά στο χυμό ροδάκινου (°Bx)</b> .....	60
<b>5.1.2.2 Μέτρηση pH στο χυμό ροδάκινου</b> .....	61
<b>5.1.2.3 Συνεκτικότητα του χυμού ροδάκινου</b> .....	61
<b>5.1.2.4 Χρώμα στο χυμό ροδάκινου</b> .....	62
<b>5.1.3.1 Μηχανικές ιδιότητες ροδάκινου σε διάφορες συνθήκες επεξεργασίας</b> .....	66
<b>5.1.3.2 Μελέτη της συχνότητας αντικατάστασης μαχαιριών κατά την κοπή ροδάκινου στη βιομηχανία</b> .....	67
<b>5.2 Μελέτη της επίδρασης των Παλμικών Ηλεκτρικών Πεδίων στην χυμοποίηση καρότου και στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του χυμού του</b> .....	70
<b>5.2.1.1.1 Δείκτης κυτταρικής διάρρηξης (Z) στο αλεσμένο καρότο</b> .....	70
<b>5.2.1.1.2 Δείκτης κυτταρικής διάρρηξης και ενεργειακές απαιτήσεις για το αλεσμένο καρότο</b> .....	72
<b>5.2.1.2.1 Μελέτη της απόδοσης χυμοποίησης καρότου σε διάφορες συνθήκες επεξεργασίας</b> .....	73
<b>5.2.1.2.2 Μελέτη της προσφερόμενης ενέργειας ανά ηλεκτρικό πεδίο και απόδοση χυμοποίησης</b> .....	74
<b>5.2.3 Ποιοτικά χαρακτηριστικά για το χυμό καρότου</b> .....	75
<b>5.2.3.1 Προσδιορισμός ολικών διαλυτών στερεών στο χυμό καρότου</b> .....	76
<b>5.2.3.2 Μέτρηση pH στο χυμό καρότου</b> .....	76
<b>5.2.3.3 Οξύτητα στο χυμό καρότου</b> .....	77
<b>5.2.3.4 Προσδιορισμός καροτενοειδών στο χυμό καρότου</b> .....	78
<b>5.2.3.5 Χρώμα στο χυμό καρότου</b> .....	79
<b>5.3.1.1.1 Δείκτης κυτταρικής διάρρηξης (Z) σε καρότο σε ροδέλες</b> .....	82
<b>5.3.1.1.2 Δείκτης κυτταρικής διάρρηξης και ενεργειακές απαιτήσεις για το καρότο σε ροδέλες</b> .....	85
<b>5.3.2.1 Μελέτη της απόδοσης χυμοποίησης καρότου σε διάφορες συνθήκες επεξεργασίας</b> .....	86

5.3.2.2 Μελέτη της προσφερόμενης ενέργειας ανά συνθήκη επεξεργασίας και απόδοση χυμοποίησης .....	88
5.3.3 Ποιοτικά χαρακτηριστικά για το χυμό καρότου .....	90
5.3.3.1 Προσδιορισμός ολικών διαλυτών στερεών στο χυμό καρότου .....	90
5.3.3.2 Μέτρηση pH στο χυμό καρότου .....	92
5.3.3.3 Οξύτητα στο χυμό καρότου .....	93
5.3.3.4 Καροτενοειδή στο χυμό καρότου .....	94
5.3.3.5 Χρώμα στο χυμό καρότου .....	96
5.3.4 Μηχανικές ιδιότητες καρότου .....	102
5.3.4.1 Σκληρότητα καρότου .....	102
5.3.4.2 Ενέργεια άλεσης καρότου .....	105
6 Συμπεράσματα .....	107

## **1 Το ροδάκινο**

### **1.1.1 Βοτανική Ταξινόμηση**

Η ροδακινιά είναι ένα φυλλοβόλο, πυρηνόκαρπο σπωροφόρο δέντρο της οικογένειας Rosaceae του γένους *Prunus* και σύμφωνα με τη Συστηματική Βοτανική, ονομάζεται *Prunus persica*. Είναι δέντρο μετρίου μεγέθους, ύψους 4-5 m με μέσο όρο ζωής στις εμπορικές καλλιέργειες τα 15-20 έτη. Τα φύλλα της είναι κατ' εναλλαγή, επιμήκη, λογχοειδή, οδοντωτά και συνήθως αδενοφόρα. Αποτελείται από 3 οφθαλμούς βλαστοφόρους και απλούς ανθοφόρους με τον κεντρικό να είναι πάντοτε βλαστοφόρος. Οι ανθοφόροι οφθαλμοί έχουν σχήμα κυλινδρικό και καλύπτονται με χνούδι, ενώ οι βλαστοφόροι έχουν σχήμα οξύ επίμηκες. Τα άνθη είναι λευκά ή ροζ-ερυθρού χρώματος και αποτελούνται από 5 σέπαλα, 5 πέταλα, δίχωρο ωοθήκη και πολλούς στήμονες. Ο καρπός της ροδακινιάς είναι δρύπη, σχήματος σφαιρικού και έχει μια χαρακτηριστική κοιλιακή ραφή. Αποτελείται από το εδώδιμο τμήμα και το σκληρό ενδοκάρπιο που περικλείει το σπέρμα. Η σάρκα του είναι χυμώδης με γλυκιά υπόξινη γεύση (Byrne et al., 2012).



Σχήμα 1.1 : Ροδάκινο, λουλούδι, καρπός, σπόρος και φύλλα (Otto Wilhelm Thome 1885).

### **1.1.2 Είδη και Ποικιλίες**

Όλες οι καλλιεργούμενες και εμπορικές ποικιλίες ροδακινιάς ανήκουν στο είδος *Prunus persica*, ενώ για την δημιουργία μερικών ποικιλιών της ροδακινιάς έχει συμβάλει και το είδος *P. davidiana*. Η ποικιλία και τα χαρακτηριστικά του ροδάκινου

διαφέρουν αναλόγως με το σχήμα τους, την ύπαρξη ή μη χνουδιού, το μέγεθος και το χρόνο ωρίμανσης του καρπού, το χρώμα της σάρκας, την ευκολία αποχωρισμού του πυρήνα από τη σάρκα και το αν προορίζονται για επιτραπέζιο ή βιομηχανική χρήση. Το σχήμα των ροδάκινων είναι συνήθως στρογγυλό, παρόλα αυτά τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί έντονο ενδιαφέρον γύρω από τα πλακέ ροδάκινα τα οποία καλλιεργήθηκαν συστηματικά στις ΗΠΑ. Το χρώμα της σάρκας είναι σημαντικό χαρακτηριστικό και κριτήριο ποιότητας και διακρίνονται σε λευκόσαρκα και κιτρινόσαρκα τα οποία αποτελούν και την πλειοψηφία των καλλιεργειών (Byrne et al., 2012). Ο αποχωρισμός του πυρήνα από την σάρκα δεν έχει μεγάλη σημασία για τα επιτραπέζια ροδάκινα σε αντίθεση με τα ροδάκινα που προορίζονται για κονσερβοποίηση που είναι κατάλληλα αυτά που δεν αποκολλάται (συμπύρηνα). Γενικώς, η ποιότητα των καρπών διαφέρει από ποικιλία σε ποικιλία, με τις όψιμες ποικιλίες να παράγουν καλύτερης ποιότητας καρπούς από τις πρώιμες ποικιλίες. Ωστόσο, η ποιότητα των ροδάκινων καθορίζεται από το μέγεθος και διαχωρίζεται σε κατηγορίες ανάλογα με το βάρος ή τον όγκο. Υπάρχουν πολυάριθμες ποικιλίες ροδακινιάς ανά των κόσμο, όμως ανάλογα με τις εδαφοκλιματικές συνθήκες που επικρατούν καλλιεργούνται και οι κατάλληλες ποικιλίες. Στην Ελλάδα οι κυριότερες ποικιλίες εκπύρηνων (επιτραπέζια) ροδάκινων που επικρατούν είναι οι ποικιλίες *June Gold*, *Red Haven*, *Fayette*, *Spring Belle* κ.α. ενώ συμπύρηνα (βιομηχανικά) ροδάκινα καλλιεργούνται οι ποικιλίες *Catherina*, *Andross*, *Loadel*, *A-37* και η ποικιλία *Everts* (Robertson et al., 1990)

### **1.1.3 Εχθροί και Ασθένειες**

Το δέντρο της ροδακινιάς προσβάλλεται από πολλές ασθένειες, έτσι πρέπει να εφαρμόζονται συστηματική ψεκασμοί ώστε να έχουμε πολλούς και εμπορεύσιμους καρπούς. Παραδείγματος χάριν υπάρχουν οι ασθένειες ριζών και ξύλου (καρκίνος ριζών, καρκίνος ροδακινιάς κ.α.), μυκητολογικές ασθένειες (εξωασκός, κορύνεο, ωίδιο κ.α.), έντομα (νάρκη, αφίδα της ροδακινιάς, καρπόκαψα της ροδακινιάς κ.α.), κοκκοειδή (βαμβακάδα, ψευδοτετράνυχος κ.α.) και ιώσεις (Ιωση Σάρκα) (Luo et al., 2022).

### **1.1.4 Θρεπτικά Στοιχεία ροδάκινου**

Τα ροδάκινα έχουν σημαντική θρεπτική αξία λόγω της μεγάλης ποσότητας σε σάκχαρα, χαμηλή ποσότητα σε λίπη και πρωτεΐνες και ικανοποιητική ποσότητα αλάτων. Η κατανάλωση ενός ροδάκινου 100g αποδίδει περίπου 39 kcal ενέργειας, θερμιδική αξία σχεδόν διπλάσια από τα μήλα και τα αχλάδια λόγω των πολλών σακχάρων που περιέχει. Επιπλέον αποτελεί πηγή άφθονων βιταμινών Α και C. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται αναλυτικά η περιεκτικότητα του ροδάκινου σε θρεπτικά συστατικά, βιταμίνες, ανόργανα στοιχεία, φυτοχημικές ουσίες και ηλεκτρολύτες.

Πίνακας 1.1: Θρεπτική αξία ανά 100g ροδάκινου (USDA).

<b>Θρεπτικά Συστατικά</b>	<b>Θρεπτική Αξία/100g</b>
Υδατάνθρακες	9540mg
Πρωτεΐνες	910mg
Λιπαρά	250mg
Διατροφικές Ίνες	1500mg
<b>Βιταμίνες</b>	
Φυλλικό Οξύ	0.004mg
Νιασίνη	0.80mg
Παντοθενικό Οξύ	0.15mg
Πυριδοξίνη	0.02mg
Ριβοφλαβίνη	0.03mg
Θειαμίνη	0.02mg
Βιταμίνη Α	293.40mg
Βιταμίνη C	6.60mg
Βιταμίνη E	0.73mg
Βιταμίνη K	0.0026mg
<b>Ανόργανα Στοιχεία</b>	
Ασβέστιο	6.00mg
Χαλκός	0.07mg
Σίδηρος	0.25mg
Μαγνήσιο	9.00mg
Μαγγάνιο	0.061mg
Φώσφορος	20.00mg
Ψευδάργυρος	0.17mg
<b>Φυτοχημικές Ουσίες</b>	
β-καροτένιο	0.00162μg
β-κρυπτοξανθίνη	0.0067μg
Ζεαξανθίνη	0.0091μg
<b>Ηλεκτρολύτες</b>	
Κάλιο	190mg

Πηγή : <https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/169928/nutrients>

### **1.1.5 Κλίμα και Έδαφος**

Η ροδακινιά είναι ιθαγενές είδος των θερμών περιοχών της Κίνας, επομένως απαιτεί ξηρό και ζεστό καλοκαίρι για την παραγωγή καλής ποιότητας καρπών. Πρέπει να αποφεύγονται υγρές περιοχές καθώς είναι δύσκολο να καταπολεμηθούν μυκοτολογικές ασθένειες όπως η μονίλα και το κορύνεο. Για να παραχθούν καρποί άριστης ποιότητας η θερμοκρασία δεν πρέπει να υπερβαίνει τους 35°C, διαφορετικά θα έχουμε μικρούς καρπούς και την επόμενη χρονιά παρατηρούνται πολλοί δίδυμοι καρποί. Η ροδακινιά μπορεί να αντέξει σε θερμοκρασίες μέχρι -25°C αλλά στους -21°C οι ανθοφόροι οφθαλμοί καταστρέφονται. Οι οφθαλμοί για να διακόψουν τον λήθαργό τους απαιτούν τουλάχιστον εξακόσιες ώρες με θερμοκρασία κάτω των 7°C. Παρόλα αυτά υπάρχουν ποικιλίες που έχουν μικρές χρονικές απαιτήσεις σε χαμηλές

θερμοκρασίες και μπορούν να αξιοποιηθούν σε θερμότερες περιοχές. Επιπλέον η ροδακινιά έχει υψηλές απαιτήσεις σε νερό καθ' όλη τη διάρκεια του καλοκαιριού. Όσον αφορά τα εδάφη, η ροδακινιά προτιμά αμμοπηλώδη ελαφρά εδάφη και δεν αναπτύσσεται σωστά σε εδάφη που δεν στραγγίζουν και δεν αερίζονται. Έτσι, σε βαριά εδάφη λόγω της υπερβολικής υγρασίας και του κακού αερισμού που δεν επιτρέπουν την κανονική αναπνοή του ριζικού συστήματος, παρατηρείται μια γενική χλώρωση στα φύλλα του δέντρου. Επομένως στα συγκεκριμένα εδάφη χρησιμοποιούνται υποκείμενα ή υβρίδια δαμασκηνιάς.

#### **1.1.6 Παραγωγή ροδακίνου**

Σύμφωνα με τον FAOSTAT των Ηνωμένων Εθνών για το 2021, η παγκόσμια παραγωγή σε ροδάκινα ανήλθε σε 24.9 εκατομμύρια τόνους με την Κίνα να βρίσκεται στην πρώτη θέση με 16 εκατ. τόνους και έπειτα να ακολουθεί η Ισπανία με μόλις 1.20 εκατ. τόνους. Η Ελλάδα βρίσκεται στην 5<sup>η</sup> θέση με μέση ετήσια παραγωγή 0.6 εκατ. τόνους (FAO, 2021).

#### **1.2 Κονσερβοποίηση ροδάκινου: διαδικασία παραγωγής στη βιομηχανία**

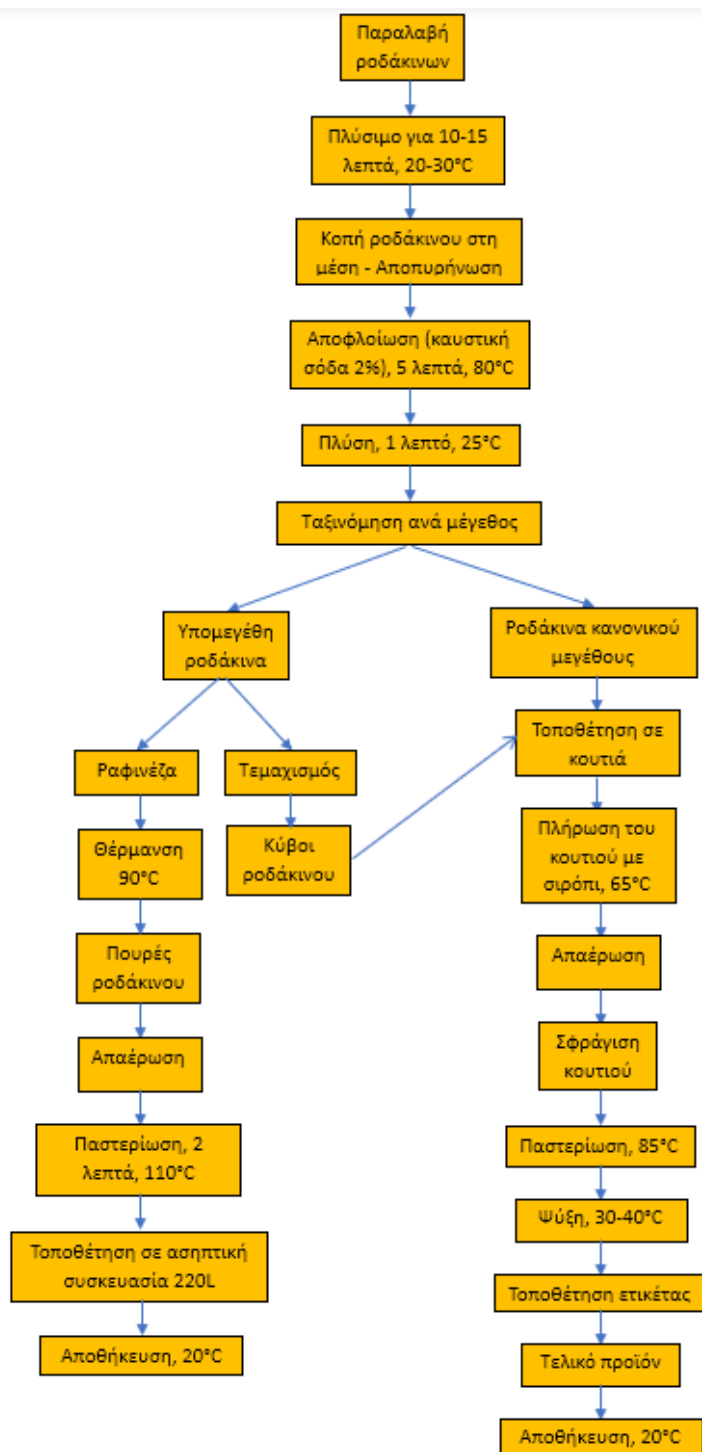
Η παραγωγή κονσερβοποιημένων ροδάκινων περιλαμβάνει τις ακόλουθες διαδικασίες: παραλαβή στο εργοστάσιο, πλύσιμο, κοπή στη μέση και αφαίρεση των πυρήνων, αποφλοιώση (αφαίρεση των υπολειμμάτων χημικών ουσιών), πλύσιμο, γέμισμα κουτίου με φρούτα, προσθήκη σιροπιού, απαέρωση, κλείσιμο, παστερίωση, ψύξη, τοποθέτηση ετικέτας.

Μόλις τα ροδάκινα εισέλθουν στις γραμμές παραγωγής, βυθίζονται σε υψηλής χωρητικότητας χώρους συγκράτησης, δεξαμενές γεμάτες με ζεστό νερό (20-30 °C) για 10-15 λεπτά. Αυτό το στάδιο επεξεργασίας αποσκοπεί στην απομάκρυνση των ξένων υλών, όπως φύλλα, έντομα, υπολείμματα κ.λπ. Στη συνέχεια, οι πλυμένοι καρποί κόβονται στη μέση με τη χρήση μηχανήματος κοπής ενώ ταυτόχρονα αφαιρούνται οι πυρήνες. Η πιο συνηθισμένη μέθοδος για το ξεφλούδισμα είναι η εμβάπτιση των καρπών σε αλκαλικό διάλυμα (καυστική σόδα 2%) στους 80 °C για 5 λεπτά. Ακολουθεί οπτικός έλεγχος, ώστε να διασφαλιστεί ότι τυχόν εναπομείναντα φλούδα από τον καρπό, θα αφαιρεθούν. Μετά το ξεφλούδισμα, οι καρποί πλένονται, ώστε να απομακρυνθούν τυχόν υπολείμματα χημικών ουσιών από τη σάρκα. Συνήθως, η διαδικασία πλύσης πραγματοποιείται στους 25 °C για 1 λεπτό. Οι πλυμένοι καρποί ταξινομούνται στη συνέχεια ανάλογα με το μέγεθος. Οι καρποί που είναι υπομεγέθους ή κατεστραμμένοι απορρίπτονται και προορίζονται για άλλους τύπους προϊόντων, όπως ο πουρές ροδάκινου. Στη συνέχεια, τα κουτιά γεμίζονται με τα αποφλοιωμένα μισά ροδάκινα με μια μηχανή πλήρωσης. Το σιρόπι παρασκευάζεται διαλύοντας τη ζάχαρη σε νερό και διατηρώντας τη θερμοκρασία του διαλύματος που προκύπτει στους 65 °C πριν από την πλήρωση. Η συγκέντρωση του διαλύματος, ωστόσο, εξαρτάται από την ποικιλία που χρησιμοποιείται για την κονσερβοποίηση ροδάκινων. Συνήθως, οι ποικιλίες με υψηλά διαλυτά και ολικά στερεά απαιτούν λιγότερη ποσότητα ζάχαρης για να επιτύχει το προϊόν το επιθυμητό επίπεδο. Οι καρποί καλύπτονται με σιρόπι χρησιμοποιώντας μηχανή σιροπιού υπό κενό και το μείγμα (μισά ροδάκινα και σιρόπι) υποβάλλεται σε απαέρωση για την απομάκρυνση του αέρα, η οποία αποσκοπεί στη μείωση της μικροβιακής ανάπτυξης και, ως εκ



τούτου, στην παράταση της διάρκειας ζωής του τελικού προϊόντος. Τα γεμισμένα κουτιά κλείνουν στη συνέχεια με την τοποθέτηση ενός καπακιού στην κορυφή κάθε κουτιού και τη σφράγισή του. Στη συνέχεια, το προϊόν παστεριώνεται έως ότου η θερμοκρασία στο κέντρο φτάσει τους 85 °C και ψύχεται μέχρι η θερμοκρασία στο κέντρο του αυτόκλειστου να φτάσει τους 30-40 °C. Στο τελικό προϊόν τοποθετείται ετικέτα και αποθηκεύεται (Nanaki & Koroneos, 2018).

Η παραπάνω παραγωγική διεργασία συνοψίζεται στο εξής διάγραμμα ροής:



Σχήμα 1.2: Διάγραμμα ροής κονσερβοποίησης ροδάκινου στη βιομηχανία

## **2 Το καρότο**

### **2.1.1 Καταγωγή-Ιστορία**

Το καρότο (*Daucus carota*) είναι το πιο δημοφιλές καλλιεργούμενο μέλος της οικογένειας των Σκιαδανθών (*Ariaceae*). Σε αυτή την οικογένεια φυτών ανήκουν και άλλα λαχανικά όπως ο μαϊντανός, το σέλινο, ο μάραθος, το παστινάκι και πολλά βότανα και μπαχαρικά (Rubatzky et al., 1999). Το γένος *Daucus*, όπου ανήκει το καρότο, περιλαμβάνει περίπου 20 είδη που καλλιεργούνται παγκοσμίως, όμως τα περισσότερα εμφανίζονται γύρω από την Μεσόγειο (Saenz Lain, 1981). Σε αντίθεση με άλλα μέλη του γένους, το *Daucus carota* προέρχεται από την κεντρική Ασία. Το καρότο υπολογίζεται ότι καλλιεργείται ως ρίζα τα τελευταία 1.100 χρόνια και η καλλιέργεια του ξεκίνησε στο Αφγανιστάν. Η εξάπλωση της καλλιέργειας του καρότου πραγματοποιήθηκε κατά τον 9<sup>ο</sup> αιώνα στην Περσία, το 10<sup>ο</sup> σε Βόρεια Αφρική και Μέση Ανατολή, ενώ στην Ισπανία και τη Βόρεια Ευρώπη τον 11<sup>ο</sup> και 13<sup>ο</sup> αιώνα αντίστοιχα (Brandenburg, 1981).

Το είδος *Daucus carota*, περιλαμβανομένων τόσο των άγριων όσο και των καλλιεργημένων μορφών, εκτυλίσσεται με εντυπωσιακή φαινοτυπική και μοριακή ποικιλομορφία, (Small, 1978; Vivek & Simon, 1998). Εν προκειμένω, η πρώιμη επιλογή φαίνεται να επικεντρώνεται σε μεγέθη ριζοσφαιρικών αποθηκευτικών οργάνων που είναι μεγάλα και ομοιόμορφα, με στόχο τη μείωση της τάσης πρόωρης ανθοφορίας. Η ευρεία διακύμανση που παρατηρείται στα εξημερωμένα καρότα υποδεικνύει πιθανή επίδραση εκτεταμένης ενσωμάτωσης βλαστικού πλάσματος από άγριες μορφές καρότου προς τις καλλιεργημένες ποικιλίες. Ο τύπος καρότου που καλλιεργείται στις δυτικές χώρες θεωρείται ότι προέρχεται από προγενέστερες μορφές του φυτού που περιέχουν ανθοκυανίνη και βρέθηκαν στο Αφγανιστάν. Αφού «εξημερώθηκαν» και διαδόθηκαν σε όλη την Ευρασία, το χρώμα της ρίζας του καρότου άλλαξε από κίτρινο και μωβ σε πορτοκαλί στα αρχές του 17<sup>ου</sup> αιώνα. Η καλλιέργεια του πορτοκαλί πλέον καρότου προτιμήθηκε από την ανατολή και τη δύση (Rubatzky et al., 1999). Η αιτία αλλαγής του χρώματος είναι ακόμα άγνωστη εφόσον οι ρίζες του άγριου καρότου έχουν ρίζα λευκή ή ωχροκίτρινη.



Σχήμα 2.1: Φαινοτυπική ποικιλομορφία σε γογγυλόριζες

Στις μέρες μας, η Κίνα είναι η κυρίαρχη χώρα παραγωγής καρότου, έχοντας παραγωγή για το 2019 21,4 εκατομμύρια τόνους. Ακολουθούν το Ουζμπεκιστάν, η Ρωσία, οι ΗΠΑ με τεράστια διαφορά στην παραγωγή. Η παραγωγή καρότου στην Ελλάδα για το 2019 έφτασε τους 22,3 χιλιάδες τόνους (FAO, 2021). Ψυχρά και εύκρατα κλίματα ευνοούν τη συγκεκριμένη καλλιέργεια.

### **2.1.2 Χρήσεις του καρότου**

Το καρότο καλλιεργείται κυρίως για την γογγυλόριζά του. Αυτή καταναλώνεται νωπή, μαγειρεμένη ή χρησιμοποιείται για την παραγωγή κανσερβοποιημένων, αφυδατωμένων ή κατεψυγμένων προϊόντων καθώς και για χυμό. Το φύλλωμα μπορεί να αξιοποιηθεί προσθέτοντάς το σε ζωτροφές.

### **2.1.3 Θρεπτικά στοιχεία καρότου**

Το καρότο είναι μια σημαντική πηγή φυτοθρεπτικών συστατικών συμπεριλαμβανομένων των φαιολικών (Babic et al., 1993), πολυακετυλενίων (Hansen et al., 2003; Kidmose et al., 2006) και καροτενοειδών (Block, 1994). Είναι πλούσιο σε β-καροτένιο, ασκορβικό οξύ και τοκοφερόλη και ταξινομείται ως βιταμινούχος τροφή.

*Πίνακας 2.1: Διατροφική αξία ανά 100 g καρότου*

<b>Θρεπτικά Συστατικά</b>	<b>Θρεπτική Αξία/100g</b>
Υδατάνθρακες	9580mg
Πρωτεΐνες	930mg
Λιπαρά	240mg
Διατροφικές Ίνες	2800mg
<b>Βιταμίνες</b>	
Φυλλικό Οξύ	0.018mg
Νιασίνη	0.983mg
Παντοθενικό Οξύ	0.273mg
Πυριδοξίνη	0.138mg
Ριβοφλαβίνη	0.058mg
Θειαμίνη	0.066mg
Βιταμίνη Α	16700 IU
Βιταμίνη C	5.90mg
Βιταμίνη E	0.66mg
Βιταμίνη K	0.0132mg
<b>Ανόργανα Στοιχεία</b>	
Ασβέστιο	33.00mg
Χαλκός	0.045mg
Σίδηρος	0.30mg
Μαγνήσιο	12.40mg
Μαγγάνιο	0.143mg
Φώσφορος	35.00mg
Ψευδάργυρος	0.24mg

Φυτοχημικές Ουσίες	
α-καροτένιο	3427μg
β-καροτένιο	8285μg
β-κρυπτοξανθίνη	0.0μg
Ζεαξανθίνη	256μg
Ηλεκτρολύτες	
Νάτριο	69mg
Κάλιο	320mg

Πηγή : <https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/2258586/nutrients>

#### **2.1.4 Βοτανικά χαρακτηριστικά καρότου**

Το φυτό του καρότου είναι δικοτυλήδονο, ποώδες και καλλιεργείται κυρίως για τη διογκωμένη κεντρική του ρίζα (γογγυλόριζα). Ο άγριος τύπος του καρότου πρόκειται για μονοετές φυτό ενώ ο καλλιεργούμενος για διατέες. Στον πρώτο χρόνο καλλιέργειας του καρότο αναπτύσσεται βλαστικά, αναπτύσσει δηλαδή το φύλλωμα και τη γογγυλόριζα. Σε μερικές περιπτώσεις, κατά τον πρώτο χρόνο καλλιέργειας, το καρότο μπορεί να βγάλει ανθικά στελέχη, γεγονός ανεπιθύμητο στα καρότα που καλλιεργούνται για αξιοποίηση της ρίζας τους αφού την καθιστά ξυλώδη και ακατάλληλη προς κατανάλωση. Τα φύλλα αναπτύσσονται υπό μορφή ροζέτας, διαθέτουν μακρύ μίσχο και έλασμα πτεροσχιδές. Κατά τον πρώτο χρόνο η γογγυλόριζα που σχηματίζεται είναι σαρκώδης και βρώσιμη με αρκετά γλυκιά γεύση. Το μήκος, το σχήμα και το χρώμα της ποικίλουν (Rubatzky et al., 1999).



Σχήμα 2.2: Τα φύλλα και η γογγυλόριζα του καρότου

Πηγή: <https://gardenerspath.com/wp-content/uploads/2020/02/Carrot-Growing-in-Soil-X-Ray.jpg>

### **2.1.5 Ποικιλίες καρότου**

Οι πιο ευρέως καλλιεργήσιμες ποικιλίες καρότου για νωπή κατανάλωση είναι οι *Baby Carrots, Danvers, Chantenay, Amsterdam forcing, Nantes* ενώ για βιομηχανική χρήση χρησιμοποιούνται οι ποικιλίες *Kronos, Garo* και *Nantes 2*. Στην Ελλάδα οι ποικιλίες που προτιμώνται είναι η *Nantaise Ameliore VILM, Forto Rs* και *Kronos*.

### **2.1.6 Κλιματικές και εδαφικές απαιτήσεις για την καλλιέργεια καρότου**

Η καλλιέργεια του καρότου είναι ψυχρής εποχής με βέλτιστη ανάπτυξη σε μέσες θερμοκρασίες 16 - 18 °C. Όταν η θερμοκρασία πέφτει κάτω από 16 °C παρατηρείται φτωχότερο χρώμα στη γογγυλόριζα. Τα φύλλα του ριζώματος επηρεάζονται σε θερμοκρασίες άνω των 28°C ή σε θερμοκρασίας 4 – 10 °C καθώς περιορίζεται η ανάπτυξή τους. Στην περίπτωση που τα καρότα προορίζονται για εμπορική παραγωγή, σπέρνονται απευθείας στον αγρό ως ετήσια καλλιέργεια. Σε βέλτιστες θερμοκρασίες, 15 – 20 °C, η βλάστηση ολοκληρώνεται σε 7 έως 12 ημέρες. Ο σπόρος του καρότου, σπέρνεται σε βάθος 3 – 10 mm. Η πυκνότητα σποράς είναι 50.000 έως 300.000 σπόροι ανά στρέμμα. Η ρίζα του καρότου επιτυγχάνει εμπορεύσιμο μέγεθος σε 70 έως 120 ημέρες, όμως κατά τη διάρκεια της ψυχρής περιόδου ορισμένες ποικιλίες χρειάζονται περισσότερες από 150 ημέρες ανάπτυξης (Rubatzky et al., 1999).

### **2.1.7 Εχθροί και ασθένειες στην καλλιέργεια καρότου**

Η καλλιέργεια καρότου (*Daucus carota*) μπορεί να επηρεαστεί από ένα ευρύ φάσμα εχθρών και παθογόνων. Πιο συγκεκριμένα 36 ασθένειες προκαλούνται από παθογόνα μυκήτων και οωμυκήτων, τουλάχιστον 5 από βακτηριακά παθογόνα, 13 από ιούς και δύο από φυτοπλάσματα. Επίσης, δύο γένη παρασιτικών φυτών και επτά γένη νηματωδών βλάπτουν την καλλιέργεια του καρότου (du Toit et al., 2019).

Οι σημαντικότεροι εχθροί και ασθένειες που προσβάλλουν το καρότο είναι:

- Εντομολογικές προσβολές και εχθροί του καρότου:
  - Μύγα του καρότου
  - Κρεμμυδοφάγος
  - Σιδηροσκώληκες
  - Κομβωνηματώδεις
  - Πράσινο σκουλήκι
  
- Σημαντικότερες ασθένειες του καρότου:
  - Κερκοσπορίωση των φύλλων του καρότου
  - Αλτερναρίωση των φύλλων του καρότου
  - Βακτηριακή κηλίδωση του καρότου
  - Σήψη του καρότου
  - Ζημιές από συνεκτικό έδαφος
  - Ωίδιο

## **2.2 Χυμοποίηση καρότου: διαδικασία παραγωγής στη βιομηχανία**

Η παραγωγή χυμού καρότου στη βιομηχανία περιλαμβάνει τις εξής διαδικασίες: παραλαβή καρώτων, πλύσιμο, ζεμάτισμα, τεμαχισμό και άλεση, εκχύλιση χυμού με συμπίεση, τοποθέτηση του χυμού σε φιάλες, αποστείρωση, ψύξη, τοποθέτηση ετικέτας και αποθήκευση.

Μόλις τα καρότα εισέρθουν στις γραμμές παραγωγής βυθίζονται σε δεξαμενές με νερό ώστε να απομακρυνθούν ξένες ύλες όπως χώμα, έντομα κ.λπ. Έπειτα, ζεματίζονται σε θερμοκρασία 80°C για 10 σε λουτρό νερού ώστε να μαλακώσουν και να διευκολυνθεί η άλεση και η χυμοποίηση τους καθώς και να απενεργοποιηθούν συγκεκριμένα ένζυμα που προκαλούν μεταβολές στο χρώμα του χυμού. Στη συνέχεια, ψύχονται στους 32°C για 5 λεπτά, τεμαχίζονται και αλέθονται. Ακολουθεί χυμοποίηση του αλεσμένου καρότου με χρήση πρέσας συμπίεσης, παραλαβή του χυμού καρότου και τοποθέτηση του σε φιάλες οι οποίες σφραγίζονται. Ο χυμός που περιέχεται στις φιάλες αποστειρώνεται στους 121°C έως ότου η θερμοκρασία στο κέντρο της φιάλης να φτάσει τους 121°C (περίπου 2-3 λεπτά), με στόχο τη θανάτωση του μικροοργανισμού *Clostridium botulinum*. Ακολουθεί ψύξη του χυμού στους 22° για 3 λεπτά, τοποθέτηση ετικέτας και αποθήκευση στους 4°C (Reiter et al., 2003).

Η παραπάνω παραγωγική διεργασία συνοψίζεται στο εξής διάγραμμα ροής:



Σχήμα 2.3: Διάγραμμα ροής χυμοποίησης καρότου στη βιομηχανία

## **3 Θερμικές και μη θερμικές μέθοδοι επεξεργασίας φρούτων και λαχανικών**

### **3.1 Θερμικές μέθοδοι επεξεργασίας**

Στη βιομηχανία τροφίμων οι θερμικές μέθοδοι επεξεργασίας εφαρμόζονται κυρίως για τη μικροβιακή απενεργοποίηση για τη συντήρηση των προϊόντων καθώς και για μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων φρούτων και λαχανικών διευκολύνοντας μετέπειτα διεργασίες. Οι σημαντικότερες μέθοδοι θερμικής επεξεργασίας είναι η παστερίωση, η αποστείρωση και το ζεμάτισμα.

#### **3.1.1 Παστερίωση**

Η θερμική παστερίωση είναι μια ήπια μορφή θερμικής επεξεργασίας που χρησιμοποιείται από τη βιομηχανία για την αδρανοποίηση σχετικά ευαίσθητων στη θερμότητα μικροοργανισμών όπως βλαστικά βακτήρια, ζυμομύκητες και μούχλες οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την αλλοίωση των τροφίμων ή την τροφική δηλητηρίαση (Lewis & Herpell, 2000). Εκτός από τη μικροβιακή απενεργοποίηση, η θερμική παστερίωση χρησιμοποιείται για την αδρανοποίηση ενζύμων σε χυμούς φρούτων και λαχανικών, όπως η πολυφαινολοξειδάση (PPO), η λιποξυγενάση (LOX), η υπεροξειδάση (POD) και η πικτηνεστεράση (PME) τα οποία είναι υπεύθυνα για την ποιοτική υποβάθμιση του προϊόντος. Η διάρκεια ζωής των θερμικά παστεριωμένων τροφίμων παρατείνεται για ορισμένο χρονικό διάστημα που εξαρτάται από τη φύση του τροφίμου και τις συνθήκες της παστερίωσης.

Σύμφωνα με την ένταση της θερμικής επεξεργασίας υπάρχουν τέσσερις μέθοδοι που εφαρμόζονται στη βιομηχανία. Οι μέθοδοι αυτοί εξαρτώνται από τη θερμοκρασία και το χρόνο επεξεργασίας, διαχωρίζονται σε υψηλή θερμοκρασία και μικρό και μεγάλο χρονικό διάστημα επεξεργασίας και σε χαμηλή θερμοκρασία και μικρό και μεγάλο χρονικό διάστημα επεξεργασίας. Στην περίπτωση της υψηλής θερμοκρασίας για μικρό χρονικό διάστημα η θερμική επεξεργασία πραγματοποιείται στους 80°C-100°C για χρονικό διάστημα 30 δευτερολέπτων και χρησιμοποιείται συνήθως για παστερίωση σε χυμούς φρούτων και λαχανικών. Χυμοί χαμηλής οξύτητας με pH μεγαλύτερο του 4,5 χρειάζονται ισχυρότερες επεξεργασίες για να προφυλάσσεται η ποιότητά τους. Αυτός ο τύπος επεξεργασίας θα μπορούσε να επηρεάσει θετικά ορισμένες βιοδραστικές ενώσεις (φαινολικές ενώσεις, φλαβονοειδή και ανθοκυανίνες) και μπορεί να μειώσει τη δραστηριότητα ορισμένων ενζύμων ενώ άλλες βιοδραστικές ενώσεις με οφέλη για την υγεία επηρεάζονται αρνητικά. Η παστερίωση για μικρό χρονικό διάστημα σε υψηλή θερμοκρασία χρησιμοποιείται για την εξασφάλιση υψηλής ποιότητας προϊόντων. Η θερμική επεξεργασία σε θερμοκρασία μεγαλύτερη των 80°C για χρονική διάρκεια μικρότερη των 30 δευτερολέπτων θα μπορούσε να απενεργοποιήσει την δράση των ενζύμων PME, PPO και POD σε ορισμένους χυμούς. Η θερμική παστερίωση σε θερμοκρασία μικρότερη των 80°C για χρονική διάρκεια μεγαλύτερη των 30 δευτερολέπτων χρησιμοποιείται σε ελάχιστα επεξεργασμένα τρόφιμα με μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Η θερμική επεξεργασία σε θερμοκρασίες κάτω των 80°C για χρονική διάρκεια



μικρότερη των 30 δευτερολέπτων μπορεί να επηρεάσει τις φυσικοχημικές και οργανοληπτικές ιδιότητες των χυμών (Petruzzi et al., 2017). Οι (Mena et al., 2013) ανέφεραν ότι μετά από διεργασίες παστερίωσης ήπιας θερμοκρασίας-μικρού χρονικού διαστήματος επεξεργασίας, διαπιστώθηκε σημαντική αδρανοποίηση (περίπου 4,5-log), αλλά μόνο οι επεξεργασίες παστερίωσης υψηλής θερμοκρασίας είχαν ως αποτέλεσμα την πλήρη εξάλειψη των μικροοργανισμών στο χυμό ροδιού. Συγκρίνοντας τις παστερώσεις χαμηλής θερμοκρασίας (65°C για 30 ή 60 δευτερόλεπτα), η μεγαλύτερης διάρκειας παστερίωση (60 δευτερόλεπτα) μείωσε τους μικροοργανισμούς που βρίσκονται φυσικά στο χυμό ροδιού σε μεγαλύτερο βαθμό. Οι σημαντικότεροι μικροοργανισμοί στόχοι για τη θερμική παστερίωση σε φρούτα και λαχανικά είναι η *Salmonella*, η *Escherichia coli* (*E. coli*) και η *Listeria monocytogenes* (Mazzotta, 2001).



Σχήμα 3.1: Μηχάνημα παστερίωσης χυμού

Πηγή: <https://www.foodmachinesale.com/fruit-processing-machine/pasteurization-equipment.html>

### **3.1.2 Αποστείρωση**

Η θερμική αποστείρωση περιλαμβάνει τη θέρμανση του τροφίμου σε θερμοκρασία μεγαλύτερη των 100°C, διατηρώντας το σε αυτή τη θερμοκρασία για συγκεκριμένη χρονική διάρκεια, με στόχο την αδρανοποίηση των βακτηριακών σπορίων, αυξάνοντας τη διάρκεια ζωής του τροφίμου και προστατεύοντας τη δημόσια υγεία. Η αντοχή στη θερμική επεξεργασία των θερμοάντοχων βακτηριακών σπορίων καθορίζει την ένταση της επεξεργασίας αποστείρωσης. Παρατεταμένη θερμική έκθεση κατά τη θέρμανση και ψύξη μπορεί να προκαλέσει υποβάθμιση στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά και τη θρεπτική αξία του προϊόντος. Ως εμπορική αποστείρωση επεξεργασμένων τροφίμων ορίζεται η κατάσταση που επιτυγχάνεται μετά τη θερμική επεξεργασία του τροφίμου, καθιστώντας το τρόφιμο απαλλαγμένο από μικροοργανισμούς ικανούς να αναπαραχθούν στο τρόφιμο υπό κανονική μη ψυχρή αποθήκευση και διανομή καθώς και από ζώντες μικροοργανισμούς ή σπόρια που πιθανότατα να υπάρχουν και να απειλούν τη δημόσια υγεία. Κατά συνέπεια,

εμπορικά αποστειρωμένα τρόφιμα μπορεί να περιέχουν μικρό αριθμό μικροοργανισμών όπως μη παθογόνα μικροβιακά σπόρια τα οποία δεν είναι αδρανή. Στη βιομηχανία η αποστείρωση σε θερμοκρασία 121°C για μερικά δευτερόλεπτα πραγματοποιείται για να μειωθεί σημαντικά (έως και 12-log) η συγκέντρωση του *Clostridium botulinum*, σε κονσερβοποιημένα τρόφιμα χαμηλής οξύτητας (pH≥4,6). Πολλά κονσερβοποιημένα τρόφιμα έχουν διάρκεια ζωής δύο ή περισσότερα έτη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (Park et al., 2014).



Σχήμα 3.2: Μηχάνημα που χρησιμοποιείται για αποστείρωση στη βιομηχανία για κονσερβοποιημένα προϊόντα  
Πηγή: <https://www.amisyfoodmachine.com/food-machinery/steam-sterilizer.html>

### **3.1.3 Ζεμάτισμα ως μέθοδος προ επεξεργασίας**

Το ζεμάτισμα ή μπλανσάρισμα είναι μία ήπια τεχνική θερμικής επεξεργασίας τροφίμων που χρησιμοποιείται και εφαρμόζεται κατά κύριο λόγο σε φρούτα και λαχανικά πριν από την κατάψυξη, την κονσερβοποίηση, την αποξήρανση και τη χυμοποίηση. Κατά τη διεργασία του ζεματίσματος, το τρόφιμο θερμαίνεται με στόχο την απενεργοποίηση ενζύμων, τη τροποποίηση της υφής, τη διατήρηση του χρώματος, της γεύσης και της θρεπτικής αξίας καθώς και την απομάκρυνση του παγιδευμένου αέρα. Το ζεστό νερό και ο ατμός είναι οι περισσότερο διαδεδομένες μέθοδοι ζεματίσματος στη βιομηχανία. Τα μικροκύματα ως μέθοδος ζεματίσματος έχει επίσης μελετηθεί (Ramesh et al., 2002). Έχουν κατασκευαστεί διάφορα μηχανήματα ζεστού νερού και ατμού για το ζεμάτισμα των φρούτων και των λαχανικών με στόχο την διασφάλιση της ποιότητας, την αύξηση της απόδοσης σε χυμό με διαφορετικές θερμικές ιδιότητες και γεωμετρίες. Πιο πρόσφατα, η εξοικονόμηση της ενέργειας και η μείωση των αποβλήτων έχουν οδηγήσει σε περαιτέρω βελτίωση του σχεδιασμού του εξοπλισμού.

Οι συνθήκες του ζεματίσματος προσαρμόζονται κατάλληλα ώστε να απενεργοποιούνται συγκεκριμένα ένζυμα χωρίς όμως να υποβαθμίζονται τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του τροφίμου όπως το χρώμα και η υφή. Για ένα δεδομένο

προϊόν, η ροή μάζας είναι σταθερή, θερμοκρασία μετράται τακτικά, και ρυθμίζεται ο ρυθμός ροής του θερμαντικού μέσου ώστε η θερμοκρασία να διατηρείται σταθερή σε καθορισμένο σημείο.

### **3.1.3.1 Βασικές αρχές του ζεματίσματος και εξοπλισμός**

Ο σχεδιασμός της διεργασίας του ζεματίσματος εξαρτάται από το προϊόν, την διαδικασία που ακολουθεί μετά το ζεμάτισμα και τη χρήση του τελικού προϊόντος. Τα περισσότερα λαχανικά ζεματίζονται πριν την κατάψυξη για να αδρανοποιηθούν ένζυμα που επηρεάζουν το χρώμα και τη οσμή. Εξαιρέση αποτελούν τα κρεμμύδια, τα πράσα και οι πιπεριές που χάνουν το χρώμα του μετά το ζεμάτισμα. Το ζεμάτισμα, απομακρύνει τον παγιδευμένο αέρα και τα μεταβολικά αέρια που περιέχονται μέσα στα κύτταρα των φρούτων και των λαχανικών και τα αντικαθιστά με νερό, σχηματίζοντας μία ημισυνεχή φάση νερού που ευνοεί μια πιο ομοιόμορφη ανάπτυξη κρυστάλλων κατά την κατάψυξη. Η απομάκρυνση αερίων είναι σημαντικότερη πριν την διεργασία της κονσερβοποίησης διότι επιτρέπει ευκολότερη πλήρωση της κονσερβας, μειώνει την καταπόνηση της κατά την παστερίωση της και τέλος μειώνει και τη διάβρωσή της (Downing et al., 1996). Επιπλέον, το ζεμάτισμα διευκολύνει τις διαδικασίες του ξεφλουδίσματος και της κοπής πέρα από τη μείωση του μικροβιακού φορτίου. Το ζεμάτισμα στα φρούτα γίνεται πιο σπάνια και σε ηπιότερες συνθήκες (χαμηλότερες θερμοκρασίες) διότι προκαλεί ανεπιθύμητες μεταβολές στην υφή (Rahman et al., 1999). Μετά το ζεμάτισμα, τα λαχανικά ψύχονται είτε με ψεκασμό νερού είτε εισέρχονται σε σωλήνα που περιέχει νερό και τα μεταφέρει στην επόμενη διεργασία. Τέλος, το ζεμάτισμα αναστέλλει τη λειτουργία των ενζύμων οξειδάση πολυφαινόλης (PPO) και υπεροξειδάσης (POD) που ευθύνονται για το ενζυμικό μαύρισμα (Liu et al., 2019).



Σχήμα 3.3: (Α): Εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για ζεμάτισμα με ατμό (Β): Εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για ζεμάτισμα με εμβάπτιση σε νερό

Πηγή: <https://www.rxpelletmachine.com/food-processing-machines/potato-chips-blanching-machine.html>

### **3.1.3.2 Ζεμάτισμα σε νερό**

Το ζεμάτισμα σε νερό γίνεται συνήθως σε θερμοκρασίες από 70°C έως 100°C. Ωστόσο, έχει μελετηθεί το ζεμάτισμα σε χαμηλές θερμοκρασίες για μεγάλο χρονικό διάστημα και σε υψηλές θερμοκρασίες για μικρό χρονικό διάστημα (Rahman et al., 1999; Lin & Schyvens, 1995; Stanley et al., 1995). Υπάρχουν μηχανήματα για ζεμάτισμα τα οποία χρησιμοποιούν έναν κοχλία ή ταινία μεταφοράς για να μεταφερθεί το προϊόν στο εσωτερικό της δεξαμενής, όπου προστίθεται ζεστό νερό. Άλλοι χρησιμοποιούν ένα περιστρεφόμενο τύμπανο για να βυθίζουν και να μεταφέρουν το προϊόν. Το νερό ζεσταίνεται με ατμό έμμεσα σε έναν εναλλάκτη θερμότητας. Το ζεμάτισμα σε νερό απαιτεί μεγάλους χρόνους επεξεργασίας, οδηγεί σε έκπλυση μετάλλων και θρεπτικών συστατικών όπως οι βιταμίνες και παράγει υγρά απόβλητα με μεγάλες απαιτήσεις σε BOD (βιοχημικές απαιτήσεις σε οξυγόνο).

### **3.1.3.3 Ζεμάτισμα με ατμό**

Το ζεμάτισμα με ατμό πραγματοποιείται μέσω ταινιών μέσα σε έναν θάλαμο όπου διοχετεύεται στο τρόφιμο κατάλληλος για τη συγκεκριμένη διεργασία ατμός σε θερμοκρασία περίπου 100°C. Η θερμοκρασία του ατμού μετράται πολύ συχνά και η ροή του ελέγχεται. Το ζεμάτισμα με ατμό χρησιμοποιείται συνήθως για κομμένα και μικρά προϊόντα και απαιτεί λιγότερο χρόνο από το ζεμάτισμα με νερό, επειδή ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας του συμπυκνωμένου ατμού είναι μεγαλύτερος από αυτόν του ζεστού νερού. Ωστόσο, λόγω των θερμοκρασιακών διαβαθμίσεων μεταξύ της επιφάνειας και του κέντρου του τρόφιμου, μεγαλύτερα κομμάτια μπορεί να ζεματιστούν περισσότερο από το επιθυμητό στην επιφάνειά τους και λιγότερο στο κέντρο τους. Η τεχνολογία που έχει αναπτυχθεί είναι η είσοδος του τρόφιμου μέσω ταινίας στον θάλαμο ατμού. Το τρόφιμο είναι απλωμένο πάνω στην ταινία με τρόπο ώστε να υπάρχει μία μόνο στρώση τρόφιμου και να έρχεται σε επαφή απευθείας με το ρεύμα ατμού. Αυτή η μέθοδος μειώνει αρκετά το χρόνο ζεματίσματος. Το ζεμάτισμα με ατμό έχει χαμηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις σε σχέση με το ζεμάτισμα με το νερό και τα απόβλητά του δεν έχουν τόσο μεγάλες απαιτήσεις σε BOD. Τέλος, δεν γίνεται τόσο μεγάλη έκπλυση μετάλλων και βιταμινών όσο στο ζεμάτισμα με νερό.

### **3.1.3.4 Ζεμάτισμα με μικροκύματα**

Μελέτες για ζεμάτισμα με μικροκύματα σε τρόφιμα έχουν γίνει από το 1940 [1]. Τα σημαντικότερα ευρήματα ήταν η διατήρηση της βιταμίνης C και των καροτένιων, όπως και ο πολύ μικρός χρόνος επεξεργασίας σε σύγκριση με το ζεμάτισμα με ατμό και νερό. Στα πρώτα βήματα χρησιμοποιήθηκαν φούρνοι μικροκυμάτων (θάλαμοι) οι οποίοι έκαναν το στάδιο της ψύξης αρκετά δύσκολο. Έπειτα, αναπτύχθηκαν φούρνοι συνεχούς ροής και ξεπέρασαν το πρόβλημα αυτό. Η τεχνολογία των μικροκυμάτων μπορεί να συνδυαστεί με το ζεμάτισμα σε νερό ώστε να μειωθεί ο χρόνος επεξεργασίας (Ramesh et al., 2002). Ωστόσο, παρά τα οφέλη στην ποιότητα του τρόφιμου και την ελαχιστοποίηση των αποβλήτων, η τεχνολογία των μικροκυμάτων δεν είναι διαδεδομένη στην βιομηχανία για τους εξής λόγους:

- Στη βιομηχανία χρησιμοποιείται κυρίως για προϊόντα υψηλής αξίας
- Δεν έχει αποδειχθεί ότι οι μικρότεροι χρόνοι επεξεργασίας των φούρνων μικροκυμάτων έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση του λειτουργικού κόστους

παράγοντας προϊόντα υψηλότερης αξίας και η αντιστάθμιση αυτών με το κόστος του εξοπλισμού.



Σχήμα 3.4: Εξοπλισμός ζεματίσματος με μικροκύματα

Πηγή: [https://www.alibaba.com/product-detail/turmeric-finger-microwave-blanching-drying-machine\\_60515255821.html](https://www.alibaba.com/product-detail/turmeric-finger-microwave-blanching-drying-machine_60515255821.html)

### **3.1.3.5 Ενεργειακές απαιτήσεις και απόβλητα**

Στη βιομηχανία κατεψυγμένων τροφίμων, το ζεμάτισμα είναι η δεύτερη διεργασία με την μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας μετά την κατάψυξη. Η κατανάλωση ενέργειας για το ζεμάτισμα τρόφιμου με ατμού μπορεί να περιγραφεί από το παρακάτω ισοζύγιο:

$$Q_H = W_p(W_p\Delta T) + Q_L \quad (3.1)$$

$$W_s = \frac{Q_H}{\lambda} \quad (3.2)$$

Όπου  $Q_H$  είναι η θερμότητα που περιέχεται στο θάλαμο που γίνεται το ζεμάτισμα,  $W_p$  είναι ο ρυθμός τροφοδοσίας μάζας του προϊόντος,  $C_p$  η θερμοχωρητικότητα του τρόφιμου,  $\Delta T$  είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του ωμού λαχανικού και της θερμοκρασίας ζεματίσματος,  $Q_L$  είναι οι απώλειες ενέργειας,  $W_s$  ο ρυθμός ροής μάζας ατμού και  $\lambda$  είναι η θερμότητα εξατμίσεως του ατμού. Σε έναν ιδανικό ζεματιστήρα, οι απώλειες ενέργειας είναι μηδενικές  $Q_L=0$ , υποθέτοντας ότι  $C_p=4,18 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$  και  $\lambda=2330 \text{ kJ kg}^{-1}$ , οι απαιτήσεις σε ατμό θα ήταν  $134 \text{ kg ton}^{-1}$  λαχανικού δηλαδή,  $56,15 \text{ kJ/kg}$ .

Οι απώλειες θερμότητας κατά το ζεμάτισμα με ατμό είναι αρκετά μεγάλες. Ο χρόνος επεξεργασίας καθορίζεται από την τροφοδοσία του προϊόντος και τη μεταφορά θερμότητας από το μέσο στο προϊόν. Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας εξαρτάται από την θερμική αγωγιμότητα του προϊόντος, το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας και τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του μέσου και του τρόφιμου.

Το ζεμάτισμα παράγει περίπου το 40% των λυμάτων που περιέχουν BOD σε μια βιομηχανία επεξεργασίας λαχανικών. Κάθε τρόφιμο παράγει διαφορετικές ποσότητες λυμάτων. Για να μειωθούν τα λύματα πλούσια σε BOD το ζεμάτισμα γίνεται με ατμό παρά με νερό.

Το ζεμάτισμα σε μικροκύματα μπορεί να παίζει σημαντικό ρόλο στην περαιτέρω μείωση του φορτίου BOD, αλλά όπως αναφέρθηκε η τεχνολογία αυτή δεν έχει βιομηχανικές εφαρμογές.

### **3.1.3.6 Επίδραση του ζεμάτισματος στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των φρούτων και λαχανικών**

Η γεύση, η υφή και το χρώμα είναι παράμετροι ποιότητας που συχνά αξιολογούνται για νωπά προϊόντα μετά το ζεμάτισμα τους.

#### **Γεύση**

Το ζεμάτισμα επηρεάζει έμμεσα και άμεσα τη γεύση των τροφίμων εφόσον αδρανοποιεί ένζυμα που είναι υπεύθυνα για τη δυσάρεστη γεύση, το πιο σύνηθες είναι η λιποξυγενάση (LOX) σε διάφορα λαχανικά.

#### **Υφή**

Το ζεμάτισμα έχει ως αποτέλεσμα το μαλάκωμα του ιστού του λαχανικού ή του φρούτου (Seow & Lee, 1997). Σε μερικές περιπτώσεις αυτό είναι επιθυμητό και σε άλλες όχι. Το ανεπιθύμητο μαλάκωμα μπορεί να αποφευχθεί με προσθήκη ασβεστίου (Stanley et al., 1995)

#### **Χρώμα**

Το ζεμάτισμα επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το χρώμα του τρόφιμου, καθώς η θερμότητα καταστρέφει τις χρωστικές ουσίες όπως τη χλωροφύλλη. Επίσης, με εντατική θέρμανση είναι πιθανό να πραγματοποιηθεί στο τρόφιμο η αντίδραση Maillard, δίνοντάς του χαρακτηριστικό σκούρο χρώμα (Raul et al., 1984). Η αξιολόγηση του χρώματος στη βιομηχανία γίνεται σε σύγκριση με το ανεπεξέργαστο δείγμα.

#### **Διατροφική αξία**

Σε γενικές γραμμές το ζεμάτισμα προκαλεί υποβάθμιση της θρεπτικής αξίας των τροφίμων. Τα θρεπτικά συστατικά απομακρύνονται από τα φρούτα και τα λαχανικά ιδίως κατά το ζεμάτισμα με νερό. Επιπλέον, οι βιταμίνες αποικοδομούνται από τη θερμότητα. Η βιταμίνη C είναι πολύ ευαίσθητη στη θερμότητα και έχει υψηλή διαλυτότητα, έτσι καθίσταται δείκτης διατήρησης θρεπτικών συστατικών. Οι βιταμίνες B1, B2 και τα καροτένια έχουν επίσης δοκιμαστεί ως δείκτες.

### **3.1.4 Συμπεράσματα**

Το ζεμάτισμα είναι μια παλιά και καθιερωμένη πρακτική στην βιομηχανία τροφίμων. Οι πρώτες τεχνολογίες επικεντρώθηκαν στην βελτίωση της ποιότητας του προϊόντος. Έπειτα, σημαντικοί παράγοντες στην εξέλιξη της τεχνολογίας του

ζεματίσματος ήταν η αποδοτικότητα του προϊόντος, οι ενεργειακές απαιτήσεις και η μείωση των αποβλήτων. Υπάρχει χώρος για περαιτέρω μελέτη της διεργασίας του ζεματίσματος καθώς και για εναλλακτικές τεχνολογίες που επιτυγχάνουν τα ίδια ή και καλύτερα αποτελέσματα. Μια νέα τεχνολογία που εστιάζει στην κυτταρική διάρρηξη και το μαλάκωμα του ιστού του τρόφιμου είναι τα Παλμικά Ηλεκτρικά Πεδία, που μελετήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία. Πρόκειται για μια τεχνολογία ενεργειακά συμφέρουσα που διατηρεί τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του φρούτου ή του λαχανικού.

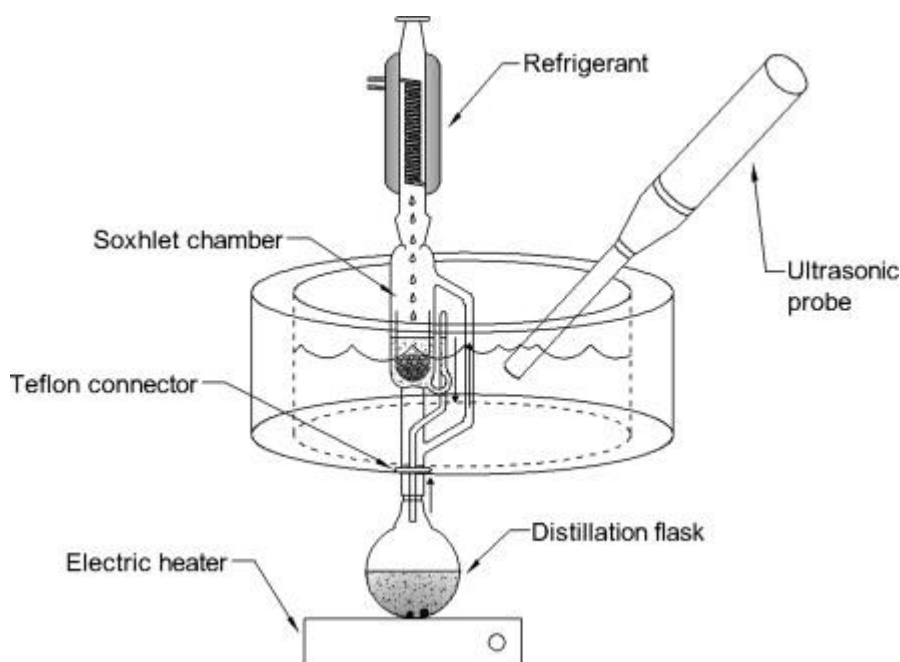
## 3.2 Μη θερμικές μέθοδοι επεξεργασίας

### 3.2.1 Υπέρηχοι

Υπέρηχοι θεωρούνται τα ηχητικά κύματα τα οποία εκπέμπουν σε συχνότητες υψηλότερες από το όριο της ανθρώπινης ακοής, μεγαλύτερες των 16 kHz. Χαρακτηριστικά μεγέθη για τους υπέρηχους αποτελούν η συχνότητα και το μήκος κύματός τους, παράμετροι που συσχετίζονται με την ταχύτητα διάδοσης του κύματος μέσα σε ένα μέσο. Απαραίτητο είναι ένα ελαστικό μέσο για να διαδοθούν τα κύματα αυτά καθώς πρόκειται για μηχανικά κύματα.

Η τεχνολογία των υπερήχων χρησιμοποιείται από τη βιομηχανία τροφίμων τα τελευταία χρόνια και ήδη έχει επιφέρει σημαντικές προόδους σε διάφορες εφαρμογές. Ο χρόνος επεξεργασίας αποτελεί ένα από τα πλεονεκτήματα της νέας αυτής τεχνολογίας καθώς κυμαίνεται από μερικά δευτερόλεπτα έως λίγα λεπτά. Η εκχύλιση με υποβοήθηση υπερήχων παρέχει τη δυνατότητα στη βιομηχανία για παραγωγή προϊόντων υψηλής διατροφικής αξίας. Επίσης, η τεχνολογία των υπερήχων διευκολύνει την ενυδάτωση και τη διόγκωση του φυτικού ιστού του συστατικού που επιλέχθηκε να εξαχθεί καθώς αυτή η διεργασία διογκώνει τους πόρους, προκαλεί μικρορωγμές στα κυτταρικά τοιχώματα διευκολύνοντας την μεταφορά μάζας (Roselló-Soto et al., 2015)

Η επίδραση της τεχνολογίας των υπερήχων κατά τη διεργασία της εκχύλισης έχει μελετηθεί από τους Carrera et al. (2015) για εκχύλιση αμινοξέων σε δείγματα σταφυλιού, από τους Albu et al. (2004) σε δείγματα αρώνιας για παραλαβή ανθοκυανινών καθώς και από τους Li et al. (2013) για εκχύλιση καρροτενοειδών από δείγματα καρότου η οποία πραγματοποιήθηκε σε 20 λεπτά.



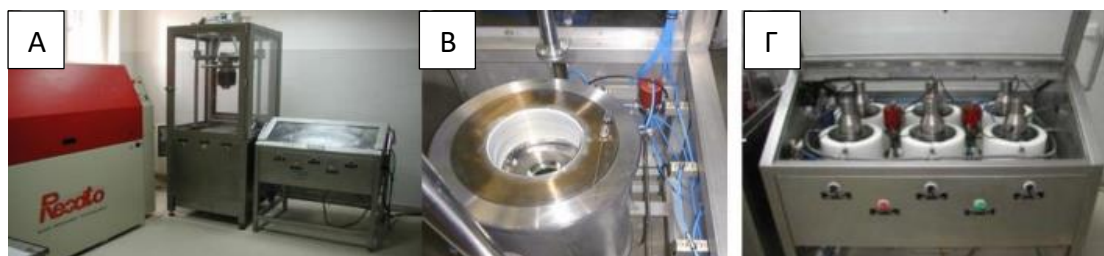
Σχήμα 3.5: Πειραματική διάταξη για εκχύλιση υποβοηθούμενη από υπερήχους

Πηγή: <https://www.sciencedirect.com/topics/immunology-and-microbiology/ultrasound-assisted-extraction>



### **3.2.2 Υπερυψηλή πίεση**

Η τεχνολογία της υπερυψηλής πίεσης στοχεύει στην απενεργοποίηση μικροοργανισμών και ενζύμων που προκαλούν φυσικοχημικές μεταβολές στα τρόφιμα έχοντας ως στόχο την ασφάλεια και την ελαχιστοποίηση της υποβάθμισης του τελικού προϊόντος. Με τη χρήση ήπιων θερμοκρασιών επεξεργασίας, η υπερυψηλή πίεση διατηρεί τη θρεπτική αξία των τροφίμων και τα οργανοληπτικά τους χαρακτηριστικά, καθιστώντας τα παρόμοια με φρέσκα προϊόντα. Η βασική αρχή λειτουργίας της υπερυψηλής πίεσης βασίζεται στην εφαρμογή υψηλής υδροστατικής πίεσης (100-1000 MPa) στα εξωτερικά τοιχώματα των κυττάρων, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη διάρρηξή τους (Αλεξανδράκης Ζ., 2015). Με την αύξηση της πίεσης, η διπλοστοιβάδα των λιπιδίων της κυτταρικής μεμβράνης υφίσταται αλλαγή φάσης, μετουσιώνονται οι συνδεδεμένες στη μεμβράνη πρωτεΐνες προκαλώντας λειτουργικές διαταραχές στο κύτταρο, διευκολύνοντας τη μεταφορά μάζας (San Martín et al., 2002). Η τεχνολογία αυτή βρίσκει εφαρμογή σε υγρά ή στερεά, συσκευασμένα και μη συσκευασμένα τρόφιμα. Οι βασικότεροι παράμετροι της διεργασίας είναι η εφαρμοζόμενη πίεση (100-1000 MPa), η θερμοκρασία (αύξηση θερμοκρασίας 3°C ανά 100 MPa) και ο χρόνος επεξεργασίας (3-20 λεπτά). Στη μελέτη του οι Rodrigo et al. (2006) παρατήρησαν πλήρης απενεργοποίηση του ενζύμου πηκτινομεθυλεστεράση (PME) μετά την χρήση υπερυψηλής πίεσης σε δείγματα τομάτας ενώ οι Crelie et al. (2001) παρατήρησαν πλήρης απενεργοποίηση του ενζύμου πολυγαλακτουρονάση (PG). Σε άλλη μελέτη οι Velázquez et al. (2012) σε χυμό πορτοκαλιού που υπέστη επεξεργασία στα 200 MPa για 30 δευτερόλεπτα στους 20°C, παρατήρησαν παρόμοια μικροβιακή απενεργοποίηση με αυτή της θερμικής επεξεργασίας.



Σχήμα 3.6: Εξοπλισμός Υπερυψηλής Πίεσης : Α) γενική όψη εξοπλισμού Β) θάλαμος επεξεργασίας Γ) συστοιχία θαλάμων επεξεργασίας

### **3.2.3 Παλμικά Ηλεκτρικά Πεδία**

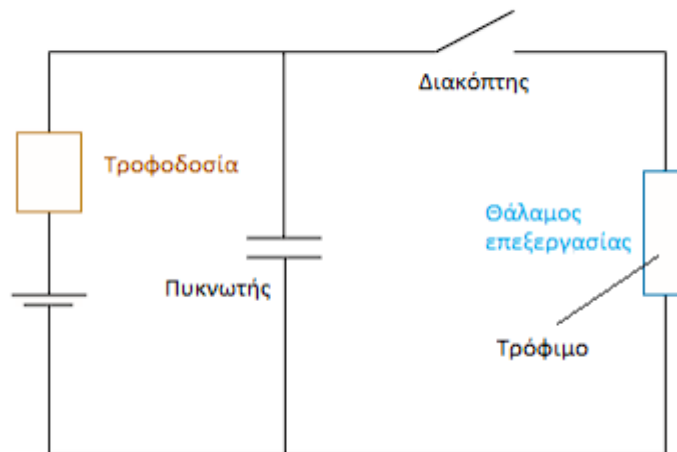
#### **3.2.3.1 Ορισμός των Παλμικών Ηλεκτρικών Πεδίων**

Τα Παλμικά Ηλεκτρικά Πεδία (Pulsed Electric Fields) είναι μία από τις ανερχόμενες μη θερμικές μεθόδους επεξεργασίας των τροφίμων, που χρησιμοποιεί παλμούς υψηλής ηλεκτρικής έντασης και ελάχιστης διάρκειας (από  $\mu\text{sec}$  έως  $\text{msec}$ ) με στόχο τη διάτρηση των κυττάρων του τροφίμου (Maged & Ayman, 2012; Jäger, 2012; Soliva-Fortuny et al., 2009). Ο όρος “Παλμικά Ηλεκτρικά Πεδία” οφείλεται στην αυξομείωση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου με τη μορφή παλμού, σύμφωνα με τις αρχές του ηλεκτρομαγνητισμού. Η έννοια του παλμού αφορά την ακαριαία αύξηση και μείωση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε πολύ μικρό χρόνο.

Οι μη θερμικές τεχνολογίες επεξεργασίας των τροφίμων σχεδιάστηκαν για να περιορίσουν όσο το δυνατόν περισσότερο τη χρήση υψηλών θερμοκρασιών κατά τη παραγωγική διαδικασία στη βιομηχανία λόγω της αρνητικής επίδρασης της υψηλής θερμοκρασίας στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά (π.χ. γεύση, εμφάνιση) και τη θρεπτική αξία των τροφίμων (Maged & Ayman, 2012; Toerfl et al., 2014). Επομένως, η τεχνολογία των Παλμικών Ηλεκτρικών Πεδίων (ΠΗΠ) κρίνεται ανώτερη των παραδοσιακών θερμικών μεθόδων επεξεργασίας. Επιπλέον, επειδή η επεξεργασία γίνεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ή λίγο υψηλότερη, οι ενεργειακές ανάγκες της διεργασίας είναι σχετικά χαμηλές (Αλεξανδράκης Ζ., 2015). Άρα, εφόσον δεν αυξάνεται σημαντικά η θερμοκρασία του τροφίμου κατά την επεξεργασία το κόστος λειτουργίας είναι χαμηλότερο (Abenoza et al., 2013).

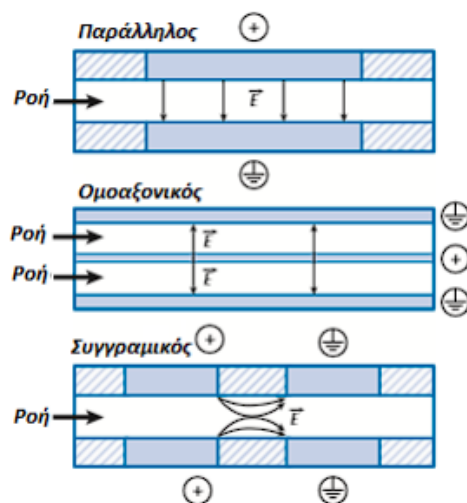
#### **3.2.3.2 Αρχή λειτουργίας Παλμικών Ηλεκτρικών Πεδίων**

Ηλεκτρική ενέργεια χαμηλής ισχύος συλλέγεται για παρατεταμένη χρονική περίοδο και αποθηκεύεται σε έναν πυκνωτή. Στη συνέχεια ο πυκνωτής αποφορτίζεται ακαριαία και η ενέργεια που μεταφέρεται είναι υψηλής ισχύος. Μία διάταξη παραγωγής ΠΗΠ (σχήμα) πρέπει να διαθέτει μια γεννήτρια παλμών και έναν θάλαμο επεξεργασίας στον οποίο εισέρχεται το τρόφιμο (Puértolas et al., 2012). Η γεννήτρια παλμών περιλαμβάνει έναν φορτιστή που μετατρέπει το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές και φορτίζει μια συσκευή αποθήκευσης ενέργειας (π.χ. πυκνωτή). Η εκκένωση της ηλεκτρικής ενέργειας στον θάλαμο επεξεργασίας ελέγχεται από έναν διακόπτη, ο οποίος σε βιομηχανικό επίπεδο έχει κρίσιμο ρόλο, καθώς πρέπει να ενεργοποιεί και να απενεργοποιεί ένα κύκλωμα με ισχυρό ρεύμα και υψηλή τάση σε κλάσματα του δευτερολέπτου (Vega-Mercado et al., 2007). Εάν η τάση του πυκνωτή δεν είναι αρκετά υψηλή τότε χρησιμοποιείται ένας μετασχηματιστής παλμών για να την αυξήσει (Deeth et al., 2007).



Σχήμα 3.7: Διάταξη συσκευής Παλμικών Ηλεκτρικών Πεδίων

Όταν το τρόφιμο εισέλθει στον θάλαμο επεξεργασίας εφαρμόζονται για πολύ μικρό χρονικό διάστημα ( $\mu\text{sec} - \text{msec}$ ) ηλεκτρικοί παλμοί υψηλής έντασης ( $0,1-30 \text{ kV/cm}$ ) (Picart et al., 2002; Qin et al., 1995). Ο χρόνος επεξεργασίας υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας τον αριθμό των παλμών με το χρόνο που διαρκεί ο κάθε παλμός (Maged & Ayman, 2012). Ο θάλαμος επεξεργασίας αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια που ανάμεσα τους βρίσκεται μονωτικό υλικό. Τις περισσότερες φορές στις μελέτες που διεξάγονται για να γίνει κατανοητή η συμβολή του PEF στη διάρρηξη της κυτταρικής μεμβράνης χρησιμοποιούνται στατικοί θάλαμοι που περιέχουν παράλληλα ηλεκτρόδια. Ωστόσο, πρόσφατα έχει σημειωθεί σημαντική ανάπτυξη θαλάμων επεξεργασίας συνεχούς ροής οι οποίοι είναι απαραίτητη στην περίπτωση της βιομηχανικής εφαρμογής (Huang & Wang, 2009). Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί διάφοροι σχεδιασμοί θαλάμων επεξεργασίας, παρόλα αυτά οι σημαντικότεροι που είναι και κατάλληλοι για εμπορική χρήση είναι οι θάλαμοι με παράλληλα ηλεκτρόδια, οι ομοαξονικοί σχηματισμοί και οι συγγραμικοί (σχήμα) (Puértolas et al., 2012).



Σχήμα 3.8: Θάλαμοι επεξεργασίας για εφαρμογή ΠΗΠ

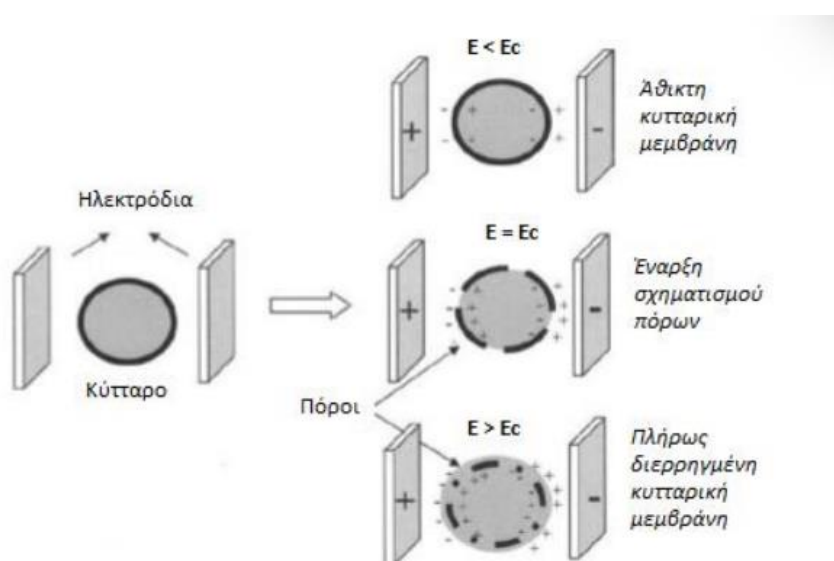
Κατά την εφαρμογή των Παλμικών Ηλεκτρικών Πεδίων στα τρόφιμα λαμβάνουν χώρα πολλά βιολογικά και φυσικοχημικά φαινόμενα όπως αδρανοποίηση μικροοργανισμών και ενζύμων, διάρρηξη της κυτταρικής μεμβράνης, ηλεκτροδιάτρηση των κυττάρων, ηλεκτρόλυση κ.α. (Deeth et al., 2007). Στην παρούσα διπλωματική εργασία δόθηκε βάση κυρίως στα φαινόμενα μεταφοράς μάζας και στη διάρρηξη της κυτταρικής μεμβράνης.

### **3.2.3.3 Ηλεκτροδιάτρηση**

Η τεχνολογία Παλμικών Ηλεκτρικών Πεδίων βασίζεται στην εφαρμογή παλμών υψηλής έντασης ηλεκτρικού πεδίου σε μικροβιακά, ζωικά και φυτικά κύτταρα με στόχο την αύξηση της διαπερατότητας της κυτταρικής τους μεμβράνης. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ηλεκτροδιάτρηση (Tsong, 1991). Κατά την ηλεκτροδιάτρηση προκαλούνται τοπικές αλλαγές στην κυτταρική μεμβράνη και προάγεται ο σχηματισμός πόρων, χάνεται η ημιπερατότητά της, είτε προσωρινά είτε μόνιμα (Weaver & Chizmadzhev, 1996). Η διεργασία αυτή χρησιμοποιείται για τη βελτίωση των φαινομένων μεταφοράς μάζας και τη μη θερμική παστερίωση (Teissie et al., 2005).

Τα φαινόμενα που συμβαίνουν κατά την έκθεση του κυττάρου σε εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο είναι:

- (α) αύξηση του διαμεμβρανικού δυναμικού της κυτταροπλασματικής μεμβράνης
- (β) εκκίνηση σχηματισμού πόρων στην μεμβράνη
- (γ) συνεχώς αυξάνεται ο αριθμός των πόρων και μεταβάλλεται το μέγεθός τους
- (δ) μετά το πέρας της επεξεργασίας με ΠΗΠ, η ηλεκτροδιάτρηση μπορεί να είναι είτε αναστρέψιμη είτε μη αναστρέψιμη. Στην περίπτωση που δεν έχει καταστραφεί εξ ολοκλήρου η κυτταρική μεμβράνη, τότε η βιωσιμότητα των διαπερατών κυττάρων μπορεί να διατηρηθεί με την ανάκτηση της ακεραιότητας της μεμβράνης. Πλήρως κατεστραμμένη κυτταρική μεμβράνη οδηγεί στην διαρροή ενδοκυτταρικών υγρών και τέλος στη θανάτωση του κυττάρου (Puértolas et al., 2012).

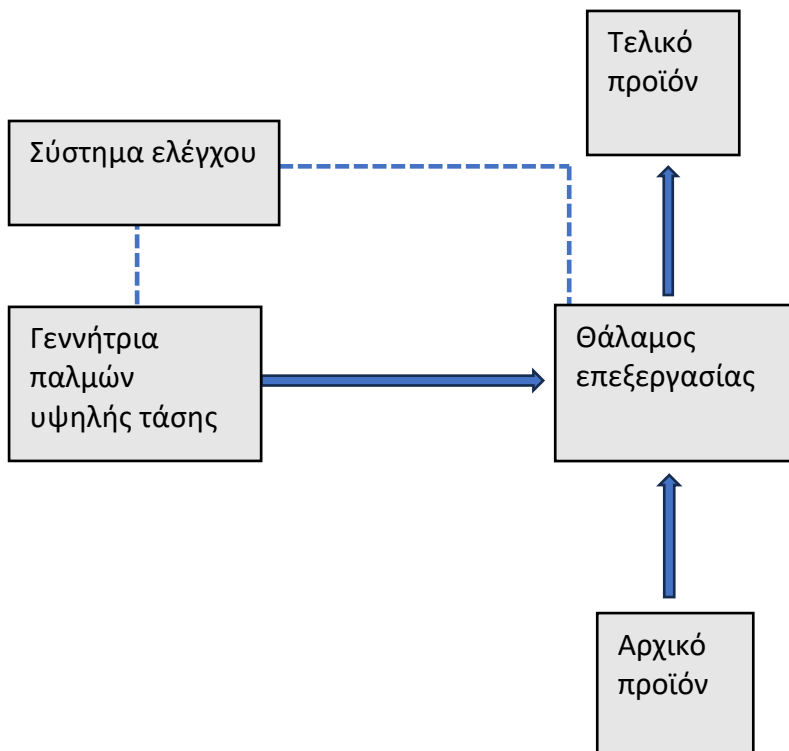


Σχήμα 3.9: Απεικόνιση κυττάρου που έχει υποστεί ηλεκτροδιάτρηση μετά από επεξεργασία με ΠΗΠ. E: ένταση ηλεκτρικού πεδίου,  $E_c$ : κρίσιμη ένταση ηλεκτρικού πεδίου (Raso & Heinz, 2010).

Κατά την εφαρμογή εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου, πραγματοποιείται αύξηση του δυναμικού στην επιφάνεια της μεμβράνης λόγω των αυξημένων ηλεκτρικών φορτίων στο εσωτερικό του κυττάρου με αποτέλεσμα τη συσσώρευση ελεύθερων φορτίων στις δύο πλευρές της μεμβράνης. Η μεμβράνη συμπιέζεται καθώς τα φορτία στο εσωτερικό και εξωτερικό του κυττάρου έχουν αντίθετο πρόσημο και έλκονται, μειώνοντας έτσι το πάχος της μεμβράνης και σχηματίζοντας πόρους. Η ρήξη της κυτταρικής μεμβράνης επέρχεται όταν της ασκείται ηλεκτρική δύναμη μεγαλύτερη της ελάχιστης δύναμης αποκατάστασης (Zimmermann, 1986). Το διαμεμβρανικό δυναμικό (0,2-1,0 V) που θα επικρατήσει κατά την εφαρμογή του ηλεκτρικού πεδίου είναι υπεύθυνο για το σχηματισμό αναστρέψιμων ή μη πόρων και εξαρτάται από την κρίσιμη ένταση ηλεκτρικού πεδίου. Η επεξεργασία με Παλμικά Ηλεκτρικά Πεδία στη βιομηχανία για μικροβιακή αδρανοποίηση και βελτίωση μεταφοράς μάζας, απαιτεί μη αναστρέψιμη ηλεκτροδιάτρηση. Όταν οι τιμές του εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου είναι κοντά στην κρίσιμη τιμή ηλεκτρικού πεδίου τότε η ηλεκτροδιάτρηση είναι αναστρέψιμη, δίνοντας τη δυνατότητα στην κυτταρική μεμβράνη να ανακτήσει τη λειτουργικότητα και τη δομή της. Στην περίπτωση που είναι επιθυμητή μη αναστρέψιμη ηλεκτροδιάτρηση, δηλαδή πλήρης κατάρρευση της μεμβράνης και θανάτωση του κυττάρου, πρέπει να εφαρμοστούν εντάσεις πεδίου μεγαλύτερες της κρίσιμης έντασης (Donsi et al., 2010). Είναι αρκετά σημαντική η κατανόηση αυτών των φαινομένων ώστε να γίνει προσδιορισμός των κρίσιμων παραμέτρων που απαιτούνται για την επεξεργασία με Παλμικά Ηλεκτρικά Πεδία στη βιομηχανία τροφίμων για βελτίωση της μεταφοράς μάζας.

#### **3.2.3.4 Εξαρτήματα συστήματος Παλμικών Ηλεκτρικών Πεδίων**

Ένα σύστημα επεξεργασίας παλμικών ηλεκτρικών πεδίων απαρτίζεται από μια συστοιχία πυκνωτών αποθήκευσης ενέργειας, μία πηγή υψηλής τάσης, μια αντίσταση για περιορισμό του ρεύματος φόρτισης, έναν διακόπτη για την ενεργειακή εκφόρτιση των πυκνωτών και έναν θάλαμο επεξεργασίας. Η παρατήρηση των παλμών γίνεται με χρήση παλμογράφου. Τα τρία βασικότερα στοιχεία για ένα σύστημα ΠΗΠ για επεξεργασία τροφίμων είναι μια γεννήτρια παλμών υψηλής τάσης, ένας θάλαμος επεξεργασίας και το σύστημα ελέγχου για παρακολούθηση των παραμέτρων της διεργασίας.



Σχήμα 3.10: Σχεδιάγραμμα του συστήματος ΠΗΠ για την επεξεργασία τροφίμων (Raso & Heinz, 2010)

### Γεννήτρια παλμών υψηλής τάσης

Η γεννήτρια παλμών υψηλής τάσης τροφοδοτεί το σύστημα με ηλεκτρικούς παλμούς στην τάση που έχει ρυθμιστεί από τον χειριστή καθώς και του επιθυμητού σχήματος και διάρκειας. Χρησιμοποιεί ένα δίκτυο σχηματισμού παλμών (PFN). Πιο συγκεκριμένα, το PFN είναι ένα ηλεκτρικό κύκλωμα που αποτελείται από διάφορα εξαρτήματα όπως, αντιστάσεις φόρτισης, τροφοδοτικά συνεχούς ρεύματος, συστοιχία πυκνωτών σε παράλληλη σύνδεση, διακόπτες, επαγωγείς και αντιστάσεις (Zhang & Barbosa-Cánovas, et al., 1995) .

### Σύστημα ελέγχου

Από το σύστημα ελέγχου ο χειριστής μπορεί να ρυθμίσει τις παραμέτρους του ηλεκτρικού κυκλώματος καθώς και να παρακολουθήσει τις τιμές τους. Πιο συγκεκριμένα, επιλέγεται το επιθυμητό ηλεκτρικό πεδίο του συστήματος και ρυθμίζεται από την ισχύ (1-100%) της γεννήτριας παλμών υψηλής τάσης. Έπειτα, ρυθμίζεται ο αριθμός των παλμών για την επεξεργασία του τροφίμου. Παρατηρώντας το χρονικό διάστημα που διαρκεί ο ένας παλμός σαν ένδειξη στο σύστημα ελέγχου, υπολογίζεται ο συνολικός χρόνος επεξεργασίας πολλαπλασιάζοντας τον αριθμό των παλμών με τη χρονική διάρκεια του ενός παλμού (Heinz & Toerpfel, 2022).

### Θάλαμος επεξεργασίας

Ο θάλαμος επεξεργασίας είναι ένα απαραίτητο και ιδιαίτερα σημαντικό κομμάτι της επεξεργασίας. Σκοπός του θαλάμου είναι η διατήρηση του τροφίμου στο εσωτερικό του κατά τη διάρκεια της εφαρμογής των παλμών πράγμα που τον καθιστά υπεύθυνο για την ομοιομορφία της επεξεργασίας αναλόγως το σχεδιασμό του. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι ο θάλαμος επεξεργασίας στον οποίο τοποθετείται το τρόφιμο να περιέχει δύο ηλεκτρόδια όπου το ένα να έχει υψηλή τάση ενώ το άλλο να έχει γείωση. Τα δύο ηλεκτρόδια διαχωρίζονται από μονωτικό υλικό. Συνηθέστεροι είναι οι θάλαμοι επεξεργασίας με δύο παράλληλες πλάκες ώστε το ηλεκτρικό πεδίο εντός τους να είναι ομοιογενές. Οι θάλαμοι επεξεργασία κατατάσσονται σε συνεχούς και διαλείποντος έργου. Οι θάλαμοι διαλείποντος έργου προτιμώνται κυρίως για εργαστηριακή χρήση διότι επιτρέπουν τον έλεγχο των παραμέτρων όπως την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, τον αριθμό των παλμών, την ειδική ενέργεια και τον χρόνο επεξεργασίας (Toerfl et al., 2014; Sun, 2015). Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων καθορίζεται από το μέγεθος των προς επεξεργασία τροφίμων και από την επιθυμητή ένταση του ηλεκτρικού πεδίου. Ένας θάλαμος με μικρό κενό μεταξύ των πλακών με παράλληλα ηλεκτρόδια παρέχει ένα ομοιόμορφο ηλεκτρικό πεδίο και είναι κατάλληλος για εργαστηριακή χρήση (De Vito et al., 2008). Οι θάλαμοι επεξεργασίας συνεχούς έργου βρίσκουν εφαρμογή κυρίως στη βιομηχανία για επεξεργασία υγρών τροφίμων (Toerfl et al., 2014).

### **3.2.3.5 Παράμετροι λειτουργίας Παλμικών Ηλεκτρικών Πεδίων**

Οι παράμετροι επεξεργασίας των Παλμικών Ηλεκτρικών Πεδίων είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, ο χρόνος επεξεργασίας, το σχήμα των παλμών, η ειδική ενέργεια, η συχνότητα των παλμών και η θερμοκρασία της διεργασίας. Οι παράγοντες αυτοί είναι ιδιαίτερα σημαντικοί για την αποτελεσματική ηλεκτροδιάτρηση των κυτταρικών μεμβρανών (Álvarez et al., 2006).

### Ένταση ηλεκτρικού πεδίου

Η ηλεκτροδιάτρηση των κυτταρικών μεμβρανών σε φυτικά και ζωικά κύτταρα επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου (kV/cm) καθώς αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες της επεξεργασίας με ΠΗΠ. Απαραίτητη προϋπόθεση για να επιτευχθεί ηλεκτροδιάτρηση είναι η εφαρμογή μιας ελάχιστης έντασης ηλεκτρικού πεδίου που ονομάζεται κρίσιμη ένταση ηλεκτρικού πεδίου  $E_c$  (Asavasanti et al., 2010). Ο προσδιορισμός της κρίσιμης έντασης ηλεκτρικού πεδίου αποτελεί σημαντικό κομμάτι για το βέλτιστο σχεδιασμό της διεργασίας και τη μελέτη των μηχανισμών διαπερατότητας. Η τιμή αυτή εξαρτάται από το είδος του κυτταρικού ιστού καθώς και από το μέγεθος του κυττάρου, μείωση του μεγέθους του κυττάρου απαιτεί αύξηση στην απαιτούμενη ένταση ηλεκτρικού πεδίου για την αποτελεσματική ηλεκτροδιάτρηση του (Toerfl et al., 2006). Ανάλογα με τον τύπο του ιστού, η κρίσιμη τιμή απαιτούμενης έντασης ηλεκτρικού πεδίου κυμαίνεται από 0.05-0.5 kV/cm όταν η διάρκεια επεξεργασίας με ΠΗΠ ήταν 100-10.000  $\mu$ s σε αυτές τις μικρές έως μέτριες εντάσεις ηλεκτρικού πεδίου (Asavasanti et al., 2010; Vorobiev & Lebonka, 2006). Στην περίπτωση που η ηλεκτροδιάτρηση της κυτταρικής μεμβράνης

διαρκεί λιγότερο από 100  $\mu\text{s}$ , χρειάζεται εφαρμογή ισχυρών ηλεκτρικών πεδίων, υψηλότερων από 0,5 kV/cm (López et al., 2009; Schilling et al., 2007).

Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ορίζεται ως εξής:

$$E = \frac{V}{d} \quad (3.3)$$

όπου  $E$  είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου,  $V$  η εφαρμοζόμενη τάση και  $d$  η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων στο θάλαμο επεξεργασίας.

Η ένταση πρέπει να κατανέμεται ομοιογενώς στο ηλεκτρικό πεδίο μέσα στον θάλαμο επεξεργασίας ώστε να είναι γνωστό το πραγματικό πεδίο εφαρμογής. Στην περίπτωση ανομοιογενούς κατανομής του πεδίου είναι πιθανή η ύπαρξη περιοχών με κύτταρα που επηρεάζονται λιγότερο κατά την ηλεκτροδιάτρηση από κάποια άλλα. Τα χαρακτηριστικά του θαλάμου επεξεργασίας που επηρεάζουν την κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου είναι κυρίως το σχήμα των ηλεκτροδίων και η απόσταση μεταξύ τους (Fiala et al., 2001; Góngora-Nieto et al., 2003; Qin et al., 1998; Qin et al., 1995).

#### Χρόνος επεξεργασίας

Ο χρόνος επεξεργασίας ( $\mu\text{s}$ -ms) ορίζεται ως το γινόμενο της διάρκειας ενός παλμού και του αριθμού των παλμών που εφαρμόζονται στο τρόφιμο:

$$t = n * \tau \quad (3.4)$$

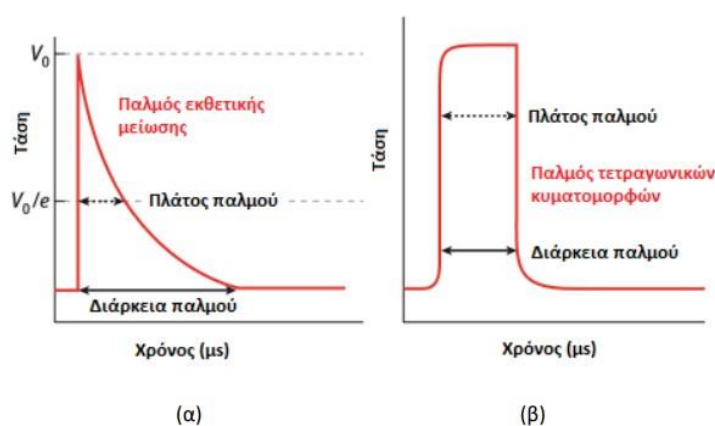
όπου  $t$  ο χρόνος επεξεργασίας,  $n$  ο αριθμός των παλμών και  $\tau$  η διάρκεια του κάθε παλμού.

Ο χρόνος επεξεργασίας αυξάνεται με αύξηση είτε της διάρκειας είτε του αριθμού των παλμών. Η αύξηση της διάρκειας του κάθε παλμού θα επιφέρει αύξηση στην θερμοκρασία εντός του θαλάμου επεξεργασίας του τρόφιμου ενώ, με αύξηση του αριθμού των παλμών θα αυξηθεί η καταναλισκόμενη ενέργεια. Με την αύξηση του χρόνου επεξεργασίας αυξάνεται ο ρυθμός διάρρηξης των κυτταρικών μεμβρανών (De Vito, 2006), αυτό συμβαίνει μέχρι μια τιμή πάνω από την οποία περαιτέρω αυξήσεις στον χρόνο επεξεργασίας ή στην ένταση του ηλεκτρικού πεδίου δεν συνεπάγεται βελτίωση στα φαινόμενα μεταφοράς μάζας, δείχνοντας ότι το κύτταρο έχει υποστεί τη μέγιστη διάρρηξη (Knorr & Angersbach, 1998a; Praporscic et al., 2004). Η μέγιστη διάρρηξη του κυτταρικού ιστού γίνεται αλλιώς με διαφορετικούς συνδυασμούς στις τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και του αριθμού των παλμών έχοντας ως στόχο την ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας.



### Το σχήμα του παλμού

Οι συνηθέστερες μορφές εφαρμοζόμενων παλμών στα Παλμικά Ηλεκτρικά Πεδία είναι η εκθετική φθίνουσα μορφή και η τετραγωνική. Οι τετραγωνικοί παλμοί χρησιμοποιούνται συχνότερα διότι έχουν καλύτερη ενεργειακή απόδοση και βελτιώνουν τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας (Zhang et al., 1994). Επιπλέον, στον τετραγωνικό παλμό η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου παραμένει σταθερή σε όλη τη διάρκεια του παλμού. Η διάρκεια σε έναν τετραγωνικό παλμό είναι ο χρόνος που ο παλμός έχει τη μέγιστη τιμή τάσης ενώ σε έναν εκθετικό παλμό η διάρκεια του ορίζεται ως ο χρόνος που χρειάζεται για να μειωθεί η τάση στο 37% της μέγιστης τιμής της (Zhang & Qin, et al., 1995).



Σχήμα 3.11: Σχήματα παλμού: (α) Εκθετικός παλμός, (β) Τετραγωνικός παλμός (Ruértolas et al., 2012).

### Ειδική ενέργεια

Η ειδική ενέργεια είναι μια παράμετρος που δείχνει την ένταση και μπορεί να εκτιμηθεί από την αύξηση της θερμοκρασίας και την ειδική θερμοχωρητικότητα του τροφίμου. Το σύστημα εκλαμβάνεται ως αδιαβατικό όπου η ενέργεια που προσδίδεται στο σύστημα μετατρέπεται εξ ολοκλήρου σε θερμότητα (Ruértolas et al., 2012). Πρόκειται για μία ολοκληρωμένη παράμετρο που εμπεριέχει επιπλέον την αντίσταση του θαλάμου επεξεργασίας, η οποία επηρεάζεται από τις διαστάσεις και την αγωγιμότητα του μέσου, το χρόνο επεξεργασίας και την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου. Η ειδική ενέργεια που απαιτείται για την κυτταρική διάρρηξη θεωρείται ενδεικτική παράμετρος έντασης επεξεργασίας, εφόσον μπορεί να προσδιοριστεί από αυτή και το λειτουργικό κόστος της διεργασίας. Η ειδική ενέργεια που απαιτείται για ηλεκτροδιάτρηση σε μικροβιακά κύτταρα είναι 100-150 kJ/kg ενώ για φυτικά κύτταρα 1-10 kJ/kg. Επομένως, μέσω τις ειδικής ενέργειας μπορεί να γίνει σύγκριση των Παλμικών Ηλεκτρικών Πεδίων με άλλες διεργασίες αν είναι γνωστή και η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου.

Η ειδική ενέργεια περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$$W_{sp} = \frac{\sigma * E^2 * n_p * \tau}{\rho} = \frac{I * V * n_p * \tau}{m} \quad (3.5)$$

Όπου:

$W_{sp}$ : ειδική ενέργεια (J/kg)

$\sigma$ : ειδική αγωγιμότητα (S/m)

$E$ : ένταση ηλεκτρικού πεδίου ( $V \cdot m^{-1}$ )

$n_p$ : αριθμός παλμών

$t$ : πλάτος παλμού (s)

$\rho$ : πυκνότητα τροφίμου ( $kg/m^3$ )

$I$ : ένταση ηλεκτρικού ρεύματος (A)

$V$ : ηλεκτρική τάση (V)

$m$ : μάζα του τροφίμου (kg)

### Συχνότητα

Ο χρόνος επεξεργασίας με Παλμικά Ηλεκτρικά Πεδία ρυθμίζεται μέσω της συχνότητας  $f$  (Hz) που αντιστοιχεί σε αριθμό παλμών ανά δευτερόλεπτο. Η συχνότητα κατά την επεξεργασία με ΠΗΠ κυμαίνεται από 1 έως 500 Hz και δεν επηρεάζει το ποσοστό ηλεκτροδιάτρησης του κυτταρικού ιστού. Το ποσοστό ηλεκτροδιάτρησης του κυττάρου εξαρτάται από τον αριθμό των παλμών που εφαρμόζονται σε αυτό (Álvarez et al., 2003; Hulsheger et al., 1981; Raso et al., 2006). Ο συνολικός χρόνος επεξεργασίας μειώνεται με αύξηση της συχνότητας των παλμών όμως προκαλείται αύξηση της θερμοκρασίας στον θάλαμο επεξεργασίας. Η αύξηση της θερμοκρασίας του τροφίμου δημιουργεί μεταβολές στις ιδιότητές του (Raso et al., 2006).

### Θερμοκρασία της διεργασίας

Η θερμοκρασία κατά την οποία γίνεται η διεργασία επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη διαπερατότητα της κυτταρικής μεμβράνης και τη ρευστότητα του τροφίμου. Η αύξηση της θερμοκρασίας οφείλεται στην συνεχή ύπαρξη ηλεκτρικού πεδίου. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, αυξάνεται και η διάρρηξη της κυτταρικής μεμβράνης. Μετά το πέρας της επεξεργασίας συνιστάται επαρκής ψύξη του τροφίμου ώστε να αποφευχθούν θερμοκρασίες που πλησιάζουν την θερμική παστερίωση και υποβαθμίζουν τις ιδιότητές του (Toerfl et al., 2014).

### **3.2.3.6 Χαρακτηριστικά υφής**

Το κυτταρικό τοίχωμα αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα για την ακαμψία και την ανθεκτικότητα των φυτικών ιστών. Όταν οι κυτταρικές μεμβράνες διαρρηγνύονται εξαιτίας της επεξεργασίας με Παλμικά Ηλεκτρικά Πεδία μεταβάλλονται οι ιζωδοελαστικές ιδιότητες των ιστών αυτών. Συχνά, για το χαρακτηρισμό της επεξεργασίας με Παλμικά Ηλεκτρικά Πεδία στους ιστούς, χρησιμοποιούνται μετρήσεις υφής.

Τα πειράματα υφής χρησιμεύουν στην οπτική απεικόνιση και τον ποιοτικό προσδιορισμό των αλλαγών που προκαλεί η επεξεργασία με ΠΗΠ. Στις δοκιμές υφής συνήθως, εφαρμόζονται δοκιμές σε επεξεργασμένα και μη δείγματα με ΠΗΠ. Οι παράμετροι υφής δείχνουν με έμμεσο τρόπο τις αλλαγές που προκαλούν τα Παλμικά

Ηλεκτρικά Πεδία στον κυτταρικό ιστό (Grimi et al., 2009). Ο δείκτης κυτταρικής διάρρηξης βασισμένος σε μετρήσεις υφής ορίζεται ως :

$$Z_F = \frac{F-F_i}{F_d-F_i} \quad (3.6)$$

Όπου: F η δύναμη που μετρήθηκε από τον αναλυτή υφής σε N για έναν ιστό που έχει επεξεργαστεί με ΠΗΠ, ο δείκτης i αναφέρεται σε ανέπαφο ιστό ενώ ο δείκτης d σε πλήρως ηλεκτροδιατηρημένο. Για τον υπολογισμό του  $F_d$  χρησιμοποιείται η μέτρηση από δείγμα που έχει υποστεί κατάψυξη-απόψυξη. Οι περισσότερο ηλεκτροδιατηρημένοι ιστοί παρουσιάζουν μικρότερη αντίσταση (πιο μαλακοί) ενώ οι ανεπεξέργαστοι μεγαλύτερη αντίσταση (πιο σκληροί).

### **3.2.3.7 Δείκτης κυτταρικής διάρρηξης, Z**

Μία εκτίμηση για τον βαθμό διάρρηξης της κυτταρικής μεμβράνης κατά την εφαρμογή Παλμικών Ηλεκτρικών Πεδίων μπορεί να γίνει με μέτρηση της μεταβολής της αγωγιμότητας του κυτταρικού ιστού (Angersbach et al., 1999). Η σχέση μεταξύ της συχνότητας και της αγωγιμότητας των κυττάρων είναι η βάση αυτής της μεθόδου. Η αγωγιμότητα του ιστού αυξάνεται σε χαμηλές συχνότητες (1 - 5 kHz) εξαιτίας της αναντίστροπης ηλεκτροδιάτρησης της κυτταρικής μεμβράνης ενώ, σε μεγάλες συχνότητες (1 – 50 MHz) η μεταβολή της αγωγιμότητας είναι ίδια για την άθικτη κυτταρική μεμβράνη καθώς και για την πλήρως διαπερατή. Στην περίπτωση των υψηλών συχνοτήτων, η μεμβράνη δεν παρουσιάζει αντίσταση στο ηλεκτρικό ρεύμα και έτσι η διαπερατότητα παραμένει ίδια (Lebonka et al., 2001; Vorobiev & Lebonka, 2010).

Η διαδικασία προσδιορισμού του δείκτη κυτταρικής διάρρηξης (Z) που αναφέρθηκε ονομάζεται μέθοδος χαμηλής-υψηλής συχνότητας και ορίζεται ως εξής:

$$Z = 1 - \left( \frac{K_b}{K'_b} \right) * \left( \frac{K'_b - K'_i}{K_b - K_i} \right) \quad (3.7)$$

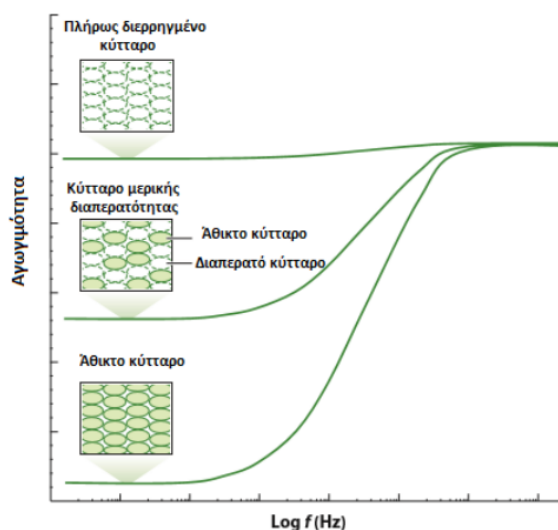
Όπου:

$K_b$ : ηλεκτρική αγωγιμότητα για το ανεπεξέργαστο δείγμα σε υψηλή συχνότητα (1 – 50 MHz)

$K'_b$ : ηλεκτρική αγωγιμότητα για το επεξεργασμένο με ΠΗΠ δείγμα σε υψηλή συχνότητα (1 – 50 MHz)

$K_i$ : ηλεκτρική αγωγιμότητα για το ανεπεξέργαστο δείγμα σε χαμηλή συχνότητα (1 – 5 kHz)

$K'_i$ : ηλεκτρική αγωγιμότητα για το επεξεργασμένο με ΠΗΠ δείγμα σε χαμηλή συχνότητα (1 – 5 kHz) (Parniakov et al., 2016).



Σχήμα 3.12: Συσχέτιση συχνότητας και αγωγιμότητας φυτικού ιστού για άθικτα, μερικώς και πλήρως ηλεκτροδιατρημένα κύτταρα για εφαρμογή συχνοτήτων από 1 kHz έως 50 MHz (Knorr & Angersbach, 1998).

Ο δείκτης κυτταρικής διάρρηξης εκφράζει το ποσοστό διαπερατότητας της κυτταρικής μεμβράνης και παίρνει τιμές από 0 έως 1. Το 0 αντιστοιχεί σε άθικτο κυτταρικό ιστό ενώ, το 1 σε πλήρως διαπερατό. Αυξάνοντας είτε την παρεχόμενη ενέργεια είτε την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, αυξάνεται ο δείκτης κυτταρικής διάρρηξης (Guderjan et al., 2007). Όμως, για κάθε ένταση ηλεκτρικού πεδίου, όσο παρέχεται ενέργεια, ο δείκτης Z παρουσιάζει μια απότομη αύξηση, ενώ μετά με περαιτέρω αύξηση της ενέργειας οι μεταβολές είναι οριακές. Το ίδιο συμβαίνει και με την αύξηση του ηλεκτρικού πεδίου καθώς και με τον αριθμό των παλμών. Ο δείκτης Z φαίνεται πως από ένα σημείο και μετά δεν επηρεάζεται από τις μεταβολές τις ενέργειας, του ηλεκτρικού πεδίου και του αριθμού των παλμών. Ωστόσο, πρέπει να αναφερθεί ότι η επιρροή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στη διάρρηξη των κυττάρων είναι μεγαλύτερη από αυτή του αριθμού των παλμών (De Vito, 2006).

Είναι ιδιαίτερα σημαντικός ο προσδιορισμός του δείκτη κυτταρικής διάρρηξης ώστε να καθοριστούν οι κρίσιμες συνθήκες επεξεργασίας τροφίμων. Η βέλτιστη τιμή του, υποβοηθά τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας σε διεργασίες όπως η χυμοποίηση (Ade-Omowaye et al., 2001)

### **3.2.3.8 Πλεονεκτήματα Παλμικών Ηλεκτρικών Πεδίων**

Η τεχνολογία των Παλμικών Ηλεκτρικών Πεδίων είναι ανερχόμενη και βρίσκει όλο και μεγαλύτερη χρήση στη βιομηχανία τροφίμων καθώς διαθέτει αρκετά θετικά χαρακτηριστικά. Πιο συγκεκριμένα, η εφαρμογή του ηλεκτρικού πεδίου γίνεται ομοιόμορφα σε όλο το τρόφιμο και η θερμοκρασία επεξεργασίας παραμένει σε χαμηλά επίπεδα σε όλη τη διάρκεια της διεργασίας ώστε να μην αλλοιώνει τα ποιοτικά του χαρακτηριστικά. Επίσης, έχει χαμηλό λειτουργικό κόστος καθώς δεν χρειάζεται να αναπτυχθούν υψηλές θερμοκρασίες όπως στην συμβατική θερμική επεξεργασία και ο χρόνος επεξεργασίας είναι πολύ μικρός. Τέλος, τα Παλμικά Ηλεκτρικά Πεδία βρίσκουν εφαρμογή τόσο σε διεργασίες διαλείποντος έργου,

κυρίως σε εργαστηριακή κλίμακα, όσο και σε διεργασίες συνεχούς ροής στη βιομηχανία.

### **3.2.3.9 Εφαρμογή των Παλμικών Ηλεκτρικών Πεδίων σε φυτικούς ιστούς**

Η τεχνολογία των ΠΗΠ χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο στην βιομηχανία τηγανιτής πατάτας από το 2010 που πρωτοεμφανίστηκε. Η ηλεκτροδιάτρηση που επιτυγχάνεται στην κυτταρική μεμβράνη των κυττάρων της πατάτας μετά την επεξεργασία με ΠΗΠ έχει ως αποτέλεσμα το μαλάκωμα του φρέσκου λαχανικού διευκολύνοντας τον τεμαχισμό του. Η επιφάνεια της πατάτας γίνεται ομαλότερη με αποτέλεσμα η απορρόφηση λαδιού κατά τη διεργασία του τηγανίσματος να μειώνεται. Η τεχνολογία των ΠΗΠ έχει βρει εφαρμογή στη συγκεκριμένη βιομηχανία λόγω της κατά 90% χαμηλότερης κατανάλωσης ενέργειας σε σχέση με τον προθερμαντήρα που χρησιμοποιούνταν συνήθως. Η κατανάλωση ενέργειας υπολογίζεται στη 1kWh/τόνο νωπής πατάτας ενώ η απαίτηση σε νερό είναι περίπου 30 L/ton. Επίσης, οι αυξημένοι ρυθμοί διάχυσης που επιτυγχάνονται με την ηλεκτροδιάτρηση, επιτρέπουν την μείωση του χρόνου τηγανίσματος καθώς και της θερμοκρασίας της διεργασίας αφού το νερό που περιέχεται στην πατάτα απομακρύνεται ευκολότερα. Επιπλέον, η πατάτα μετά την επεξεργασία με ΠΗΠ και τηγάνισμα, έχει λαμπερότερο χρώμα και μειωμένη περιεκτικότητα σε ακρυλαμίδιο σε σύγκριση με ανεπεξέργαστη τηγανισμένη πατάτα. Ακόμα, λόγω της ομοιόμορφης κατανομής και ζελατινοποίησης του αμύλου, επιτυγχάνεται βελτιωμένη υφή στο τελικό προϊόν. Στη βιομηχανία τηγανιτής πατάτας σήμερα χρησιμοποιούνται πάνω από 100 μηχανήματα Παλμικών Ηλεκτρικών Πεδίων παγκοσμίως (Hill et al., 2022)

Τα Παλμικά Ηλεκτρικά Πεδία βρίσκουν εφαρμογή επίσης, ως προ επεξεργασία σε διεργασίες αφυδάτωσης φρούτων και λαχανικών. Οι Ade-Omowaye et al. (2000) ασχολήθηκαν με την επιρροή των ΠΗΠ στην διαδικασία ξήρανσης καρύδας και την αφυδάτωση κόκκινης πιπεριάς (Ade-Omowaye et al., 2001). Άλλες μελέτες έδειξαν μείωση του χρόνου ξήρανσης κατά 12% σε δείγμα μήλου όταν εφαρμόστηκε σε αυτό ηλεκτρικό πεδίο 10 kV/cm και 50 παλμοί (Wiktor et al., 2013). Επίσης, από πειράματα που πραγματοποιήθηκαν σε καρότα, παρατηρήθηκε ότι το ποσοστό επανυδάτωσης των προ επεξεργασμένων με ΠΗΠ καρότων (1,5 kV/cm) είναι χαμηλότερο από εκείνο των ζεματισμένων καρότων (100°C για 3 λεπτά) καθώς και η δραστικότητα της υπεροξειδάσης μειώθηκε κατά 30-50% ενώ το ζεμάτισμα μείωσε τη δραστικότητα κατά 95% (Gachowska et al., 2009). Τέλος, μετά την προ επεξεργασία με ΠΗΠ σε δείγματα παντζαριού, η θερμοκρασία ξήρανσης τους μειώθηκε κατά 20-25°C ενώ η αρχική θερμοκρασία ήταν 100°C (Shynkaryk et al., 2008).

### **3.2.3.10 Εφαρμογή των Παλμικών Ηλεκτρικών Πεδίων για χυμοποίηση φρούτων και λαχανικών**

Ο χυμός είναι το υγρό που περιέχεται φυσιολογικά σε κύτταρα φρούτων και λαχανικών. Για την παραλαβή του χυμού, εφαρμόζεται στο τρόφιμο μηχανική πίεση, η οποία προκαλεί τη διάσπαση των κυτταρικών μεμβρανών που συνεπάγεται την απελευθέρωση της υγρής φάσης του εσωτερικού των κυττάρων (Bouzraga & Vorobiev, 2003). Η αύξηση απόδοσης σε χυμό και η ταυτόχρονη διατήρηση των

ποιοτικών, οργανοληπτικών και θρεπτικών χαρακτηριστικών των τροφίμων είναι μερικές από τις σημαντικότερες προτεραιότητες της βιομηχανίας τριφύμων. Η εφαρμογή Παλμικών Ηλεκτρικών Πεδίων για προ επεξεργασία φρούτων και λαχανικών βελτίωσε την απόδοση τους σε χυμό λόγω της ενίσχυσης των φαινομένων μεταφοράς μάζας υγρού από το εσωτερικό του κυττάρου προς τα έξω. Σε διάφορες μελέτες έχει γίνει έρευνα για τη χρήση των ΠΗΠ ως μέθοδος προ επεξεργασίας ώστε να υποβοηθηθεί η εκχύλιση του χυμού από φυτικούς ιστούς, όπως τα καρότα, οι πατάτες, τα μήλα και τα ζαχαρότευτλα (Bazhal & Vorobiev, 2000; Eshtiaghi & Knorr, 2002; Grimi et al., 2011; Schilling et al., 2007). Μελέτες έχουν δείξει ότι η προ επεξεργασία με ΠΗΠ (1-5 kV/cm, 1,1-27 kJ/kg) αύξησε την απόδοση της χυμοποίησης σε δείγμα μήλου κατά 7,7% σε σχέση με το ανεπεξέργαστο δείγμα. Η ενζυματική προ επεξεργασία του πολτού βελτίωσε την απόδοση κατά 4,2% (Schilling et al., 2007). Σε μία μελέτη τους οι Grimi et al. (2011) κατέληξαν σε ακόμη μεγαλύτερη αύξηση της απόδοσης σε χυμό μήλου αν η προ επεξεργασία γίνει σε φέτες μήλου (64% απόδοση) σε σχέση με ολόκληρα μήλα (58% απόδοση). Οι δύο εκδοχές που αναφέρθηκαν δίνουν μεγαλύτερη απόδοση σε σχέση με το ανεπεξέργαστο δείγμα είτε αυτό είναι σε φέτες (64% απόδοση) είτε πρόκειται για ολόκληρο μήλο (44% απόδοση). Η διαφορά που παρατηρείται στην απόδοση της χυμοποίησης του μήλου, οφείλεται στην ηλεκτροδιάτρηση που υπέστησαν οι κυτταρικές μεμβράνες των κυττάρων του φρούτου. Η ηλεκτροδιάτρηση προκάλεσε κυτταρική διάρρηξη η οποία είναι υπεύθυνη για την αύξηση της απόδοσης σε χυμό. Στην περίπτωση της χυμοποίησης επεξεργασμένων με ΠΗΠ φετών μήλου, η αύξηση στην απόδοση οφείλεται στην ήδη μεγαλύτερη κυτταρική διάρρηξη λόγω του τεμαχισμού.

### **3.2.3.11 Βιομηχανική εφαρμογή και εκτίμηση κόστους Παλμικών Ηλεκτρικών**

#### **Πεδίων**

Η μελέτη των Παλμικών ηλεκτρικών πεδίων γίνεται εδώ και αρκετά χρόνια σε εργαστηριακό επίπεδο. Τα τελευταία χρόνια γίνονται προσπάθειες να εισέρθουν στην βιομηχανία τροφίμων. Ο λόγος που δεν είχαν βρει εφαρμογή μέχρι τώρα είναι διότι μια νέα τεχνολογία δεν αρκεί μόνο να βελτιώσει ένα τρόφιμο αλλά να μπορεί να εφαρμοστεί και σε βιομηχανική κλίμακα. Επιπλέον, η νέα τεχνολογία θα πρέπει να εξασφαλίζει οικονομικά οφέλη για τη βιομηχανία, εκτός από την βελτίωση στην ποιότητα του προϊόντος, ώστε να είναι εφικτή η χρήση της και να είναι αποτελεσματική για μεγάλη ποικιλία προϊόντων (Fellows P., 2000).

Η τεχνολογία των Παλμικών Ηλεκτρικών Πεδίων εξασφαλίζει στη βιομηχανία χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και μικρούς χρόνους επεξεργασίας κατά τη χρήση τους. Αυτοί οι δύο παράγοντες κάνουν τη μέθοδο ιδιαίτερα ελκυστική καθώς η εξοικονόμηση ενέργειας και η ελαχιστοποίηση του χρόνου επεξεργασίας αποτελούν επιβολές για τη βιομηχανία. Η νέα τεχνολογία έχει στόχο να ενισχύσει τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας καθώς και να διευκολύνει το ξεφλούδισμα και τον τεμαχισμό φρούτων και λαχανικών. Όμως, το κόστος επένδυσης και εξοπλισμού είναι κάτι που καθυστερεί την μαζική είσοδο των Παλμικών Ηλεκτρικών Πεδίων για επεξεργασίες μεγάλης κλίμακας (Puértolas et al., 2012)

Οι Toepfl et al., (2006) έκαναν την πιο εμπειριστατωμένη προσέγγιση για το λειτουργικό κόστος της επεξεργασίας με ΠΗΠ με στόχο την βελτίωση της μεταφοράς μάζας για να μαλακώσουν οι φυτικοί ιστοί. Πιο συγκεκριμένα, με την παραδοχή της τιμής των 0,1 €/kWh ως βάση, οι συγγραφείς κατέληξαν ότι για επεξεργασία χυμού με ΠΗΠ των 10 kJ/kg σε πεδίο 1-2 kV/cm και έχοντας δυναμικότητα 10 t/h (3 kWh/t), το λειτουργικό κόστος εκτιμάται στα 0,33 €/t. Στην περίπτωση μιας συμβατικής ενζυμικής διεργασίας, το κόστος της επεξεργασίας μπορεί να εκτιμηθεί στα 7,50 €/t, περίπου 22 φορές μεγαλύτερο από το κόστος επεξεργασίας με Παλμικά Ηλεκτρικά Πεδία (Puértolas et al., 2012).

Εξαιτίας του χαμηλού λειτουργικού κόστους, οι περισσότερες ανησυχίες, για την εφαρμογή της τεχνολογίας των Παλμικών Ηλεκτρικών Πεδίων στην βιομηχανία τροφίμων, είναι το αρχικό κόστος επένδυσης και η ανάπτυξη του βιομηχανικού εξοπλισμού. Μία γεννήτρια με μέγιστη ισχύ φορτίου 30 kW και μέγιστη τάση 30 kV είναι απαραίτητη αν λάβουμε υπόψη τις γενικές παραμέτρους επεξεργασίας με ΠΗΠ για τη μεταφορά μάζας. Έτσι, το κόστος του εξοπλισμού αυτού ανέρχεται στις 100.000-200.000 €. Σημαντικό είναι να το όφελος του χαμηλού λειτουργικού κόστους που θα μπορούσε να αποσβέσει την επένδυση με σύντομο χρονικό διάστημα. Οι (Sack et al., 2010), στη μελέτη τους για επεξεργασία με ΠΗΠ σε χυμό μήλου, κατέληξαν ότι η αύξηση της απόδοσης κατά 6% σε αφιλτράριστο χυμό θα αντισταθμίσει το κόστος της επένδυσης σε διάστημα 2 χρόνων περίπου.

Συμπερασματικά, η βιομηχανία τροφίμων έχει ανάγκη από νέες τεχνολογίες ενεργειακά συμφέρουσες, με πολύ σύντομους χρόνους επεξεργασίας για τη διαπερατότητα των κυτταρικών ιστών. Έτσι τα Παλμικά Ηλεκτρικά Πεδία έχουν τη δυνατότητα να εισέρθουν στη βιομηχανία προσφέροντας ποιοτικά προϊόντα με αρκετά χαμηλό κόστος.

## **4 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ**

### **4.1 Εισαγωγή**

Τα φρούτα και τα λαχανικά είναι ένα αναπόσπαστο κομμάτι της βιομηχανίας τροφίμων στη χώρα μας και σε ολόκληρο τον κόσμο λόγω της εκτεταμένης καλλιέργειάς τους. Το ροδάκινο είτε σε μορφή κομπόστας είτε σαν χυμός αξιοποιείται εδώ και αρκετά χρόνια από τη βιομηχανία. Ωστόσο, το καρότο αξιοποιήθηκε τα τελευταία χρόνια και πλέον συναντάται σε όλο και περισσότερους χυμούς λόγω της ιδιαίτερης γεύσης του και των θρεπτικών συστατικών του. Η κύρια μέθοδος προ επεξεργασίας στη βιομηχανία πριν την χυμοποίηση ή τον τεμαχισμό των φρούτων και των λαχανικών είναι η θέρμανση. Η θερμική επεξεργασία είναι γνωστό ότι προκαλεί υποβάθμιση στα ποιοτικά και οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων φρουτολαχανικών και είναι ιδιαίτερα κοστοβόρα διότι απαιτεί αρκετά μεγάλα ποσά ενέργειας για την αύξηση της θερμοκρασίας και έπειτα για την ψύξη. Η χρήση νέων τεχνολογιών, μη θερμικών μεθόδων επεξεργασίας, αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη λύση.

Τα Παλμικά Ηλεκτρικά Πεδία είναι μια αποτελεσματική μη θερμική μέθοδος επεξεργασίας τροφίμων, που εξασφαλίζει παρόμοια ή και καλύτερα αποτελέσματα κατά τη χυμοποίηση και μείωση στη δύναμη κοπής των φρούτων και των λαχανικών. Τα χαρακτηριστικά των τροφίμων δεν επηρεάζονται ενώ οι ενεργειακές απαιτήσεις της νέας αυτής τεχνολογίας είναι ιδιαίτερα χαμηλές εφόσον δεν χρειάζεται αύξηση της θερμοκρασίας και επομένως και ψύξη. Συνεπώς, τα Παλμικά Ηλεκτρικά Πεδία είναι φιλικά προς το περιβάλλον διατηρώντας και την ποιότητα των προϊόντων σε υψηλά επίπεδα.

### **4.2 Σκοπός**

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η επίδραση της τεχνολογίας των Παλμικών Ηλεκτρικών Πεδίων στην διάρρηξη του κυτταρικού ιστού σε δείγματα ροδάκινου και καρότου. Σκοπός ήταν η αύξηση της απόδοσης σε χυμό καθώς και η μεταβολή της υφής τους με στόχο τη μείωση της δύναμης κοπής διατηρώντας τα ποιοτικά και οργανοληπτικά χαρακτηριστικά. Επίσης, στόχος αποτέλεσε ο προσδιορισμός των ενεργειακών απαιτήσεων της επεξεργασίας με Παλμικά Ηλεκτρικά Πεδία και η σύγκριση με τη θερμική επεξεργασία και την κατάψυξη-απόψυξη.

### **4.3 Σχεδιασμός Πειραμάτων**

Τα πειράματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας χωρίζονται σε δύο θεματικές ενότητες που είναι ίδιες για το ροδάκινο και για το καρότο:

Στην πρώτη θεματική ενότητα μελετάται ο προσδιορισμός του δείκτη κυτταρικής διάρρηξης Z του ροδάκινου και του καρότου. Ο προσδιορισμός του δείκτη γίνεται μετά την επεξεργασία με ΠΗΠ με τη μέθοδο υψηλής-χαμηλής συχνότητας σε διαφορετικές εντάσεις πεδίων. Έπειτα, για κάθε πεδίο επιλέγονται οι βέλτιστες



συνθήκες προ επεξεργασίας με βάση την τιμή του συντελεστή κυτταρικής διάρρηξης, ώστε να διερευνηθεί η συσχέτιση του δείκτη με το ποσοστό χυμοποίησης καθώς και η επίδραση του στη σκληρότητα.

Στη δεύτερη θεματική ενότητα πραγματοποιήθηκε κινητικό πείραμα χυμοποίησης και προσδιορισμός σκληρότητας για ανεπεξέργαστα, προ επεξεργασμένα με ΠΗΠ σε διάφορες συνθήκες, προ επεξεργασμένα θερμικά σε διάφορες θερμοκρασίες και χρόνους και κατεψυγμένα-αποψυγμένα (Freeze-Thaw) δείγματα ροδάκινου και καρότου. Η διεργασία των ΠΗΠ πραγματοποιείται στα καρότα μετά την άλεση ή τον τεμαχισμό τους, πριν την χυμοποίηση τους, ενώ στα ροδάκινα η διεργασία των ΠΗΠ γίνεται σε ολόκληρο το φρούτο πριν την αποπυρήνωσή του. Στη συνέχεια, στους χυμούς που προέκυψαν μετρήθηκαν διάφοροι ποιοτικοί δείκτες όπως pH, ολικά διαλυτά στερεά ( $^{\circ}\text{Bx}$ ), συνεκτικότητα κατά Bostwick, αντικειμενικό χρώμα (κλίμακα CIE Lab), τιτλοδοτούμενη οξύτητα (% κιτρικό οξύ) και περιεκτικότητα σε ολικά καροτενοειδή.

Στις δύο θεματικές ενότητες, στην περίπτωση του ανεπεξέργαστου δείγματος ο δείκτης κυτταρικής διάρρηξης θεωρείται μηδενικός ενώ μετά την κατάψυξη-απόψυξη έχει μέγιστη τιμή. Ο κυτταρικός ιστός του δείγματος μετά από κατάψυξη-απόψυξη θεωρείται κατεστραμμένος, επομένως επιτρέπει την σύγκριση με μερικώς διαρρηγμένους ιστούς. Η θερμική επεξεργασία που πραγματοποιείται κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων, προσομοιάζει τη συμβατική θερμική επεξεργασία που γίνεται στη βιομηχανία. Σκοπός των πειραμάτων ήταν η συσχέτιση της απόδοσης και των χαρακτηριστικών υφής των προ επεξεργασμένων με ΠΗΠ δειγμάτων με ανεπεξέργαστα, θερμικά προ επεξεργασμένα και κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα. Στα καρότα μελετήθηκε η προ επεξεργασία με ΠΗΠ σε τριμμένο και σε ολόκληρο καρότο.

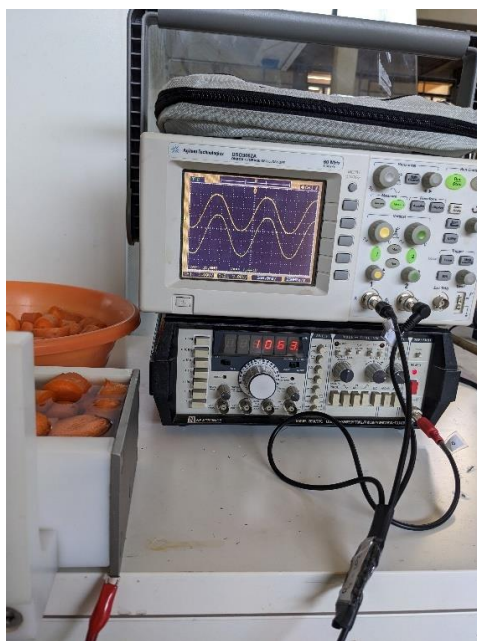
#### **4.4 Πρώτες Ύλες**

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν ροδάκινα (*Prunus Persica*) (ποικιλία *Everts*) και καρότα (*Daucus Carota*) τα οποία μεταφέρθηκαν και αποθηκεύτηκαν στο εργαστήριο Χημείας και Τεχνολογίας Τροφίμων στους 5°C.

## 4.5 Πειραματική Διαδικασία

### 4.5.1 Υπολογισμός δείκτη κυτταρικής διάρρηξης, Z

Ο υπολογισμός του δείκτη κυτταρικής διάρρηξης πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο χαμηλής-υψηλής συχνότητας όπως αυτή περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3.2.3.7. Οι συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία είναι η γεννήτρια συχνοτήτων Newtronics, Model 200LTPC και ο παλμογράφος Tektronix TDS1012 (Oregon, USA) στη συγκεκριμένη διάταξη όπως απεικονίζονται παρακάτω:



Σχήμα 4.1: Ο παλμογράφος Tektronix TDS1012 (πάνω) και η γεννήτρια συχνοτήτων Newtronics, Model 200LTPC (κάτω)

Ως χαμηλή συχνότητα επιλέχθηκε το 1kHz ενώ ως υψηλή το 1MHz. Ο θάλαμος επεξεργασίας έχει χωρητικότητα 400 ml και μέσα τοποθετούνται δείγματα συγκεκριμένων διαστάσεων μαζί με νερό.

Τα δείγματα ροδάκινου ήταν ένα ολόκληρο ροδάκινο διαμέτρου 6 cm, βάρους 100 g μαζί με 268 ml νερό. Επεξεργάστηκαν σε ηλεκτρικά πεδία 0,6-2,1 kV/cm και εφαρμόστηκαν έως και 2100 παλμοί σε πεδίο 1,1 kV/cm.

Τα δείγματα αλεσμένου καρότου κάλυπταν όλο τον όγκο του θαλάμου και ζύγισαν 300g. Επεξεργάστηκε σε ηλεκτρικά πεδία 0,25-1,0 kV/cm και εφαρμόστηκαν έως και 2000 παλμοί σε πεδίο 0,25 kV/cm.

Τα δείγματα καρότου σε ροδέλες ήταν διαμέτρου 1,5-2,5 cm πάχους 1 cm, συνολικής μάζας δείγματος 230 g μαζί με 70 ml νερού. Επεξεργάστηκαν σε ηλεκτρικά πεδία 0,5-2,0 kV/cm ενώ εφαρμόστηκαν έως και 1500 παλμοί σε πεδίο 0,5 kV/cm.

Το εύρος παλμού σε όλα τα πειράματα ήταν 15  $\mu$ s και η συχνότητα παλμού 20 Hz. Σε κάθε διαφορετικό ηλεκτρικό πεδίο γινόταν ανανέωση του νερού του θαλάμου με νερό στους 25°C λόγω τις μικρής αύξησης της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του θαλάμου.

Η εξάρτηση του δείκτη κυτταρικής διάρρηξης από τον χρόνο επεξεργασίας με ΠΗΠ περιγράφηκε μαθηματικά με προσαρμογή των πειραματικών δεδομένων στην παρακάτω εξίσωση:

$$Z = Z_{max} * (1 - 2^{-\frac{t_{pref}}{\tau}}) \quad (4.1)$$

όπου, το  $Z_{max}$  είναι η μέγιστη κυτταρική διάρρηξη που μπορεί να υποστεί ο κυτταρικός ιστός,  $t_{pref}$  ο χρόνος επεξεργασίας και  $\tau$  είναι ο χρόνος που χρειάζεται ώστε η τιμή του  $Z$  να φτάσει το 50% του  $Z_{max}$  (χαρακτηριστικός χρόνος καταστροφής).

Η εξάρτηση του χαρακτηριστικού χρόνου καταστροφής από την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά από την παρακάτω εξίσωση:

$$\tau = \tau_{\infty} * e^{\frac{A}{E}} \quad (4.2)$$

όπου,  $\tau$  (μs) είναι ο χαρακτηριστικός χρόνος καταστροφής,  $\tau_{\infty}$  είναι ο χαρακτηριστικός χρόνος καταστροφής για θεωρητικά άπειρη ένταση ηλεκτρικού πεδίου,  $E$  είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και  $A$  είναι μια παράμετρος που φανερώνει την εξάρτηση του  $\tau$  από την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου.

#### **4.5.2 Εξοπλισμός Παλμικών Ηλεκτρικών Πεδίων**

Τα πειράματα των Παλμικών Ηλεκτρικών Πεδίων πραγματοποιήθηκαν με τον εξοπλισμό πιλοτικής κλίμακας Elcrack-5kW, DIL, Quakenbrück, Germany. Απαρτίζεται από μια γεννήτρια παραγωγής παλμών και έναν θάλαμο διαλείποντος έργου. Ο θάλαμος είναι κατασκευασμένος από ανοξείδωτο χάλυβα, έχει χωρητικότητα 400 ml και διαστάσεις 80 x 100 x 50 mm (κενό μεταξύ των πλακών x μήκος x πλάτος).



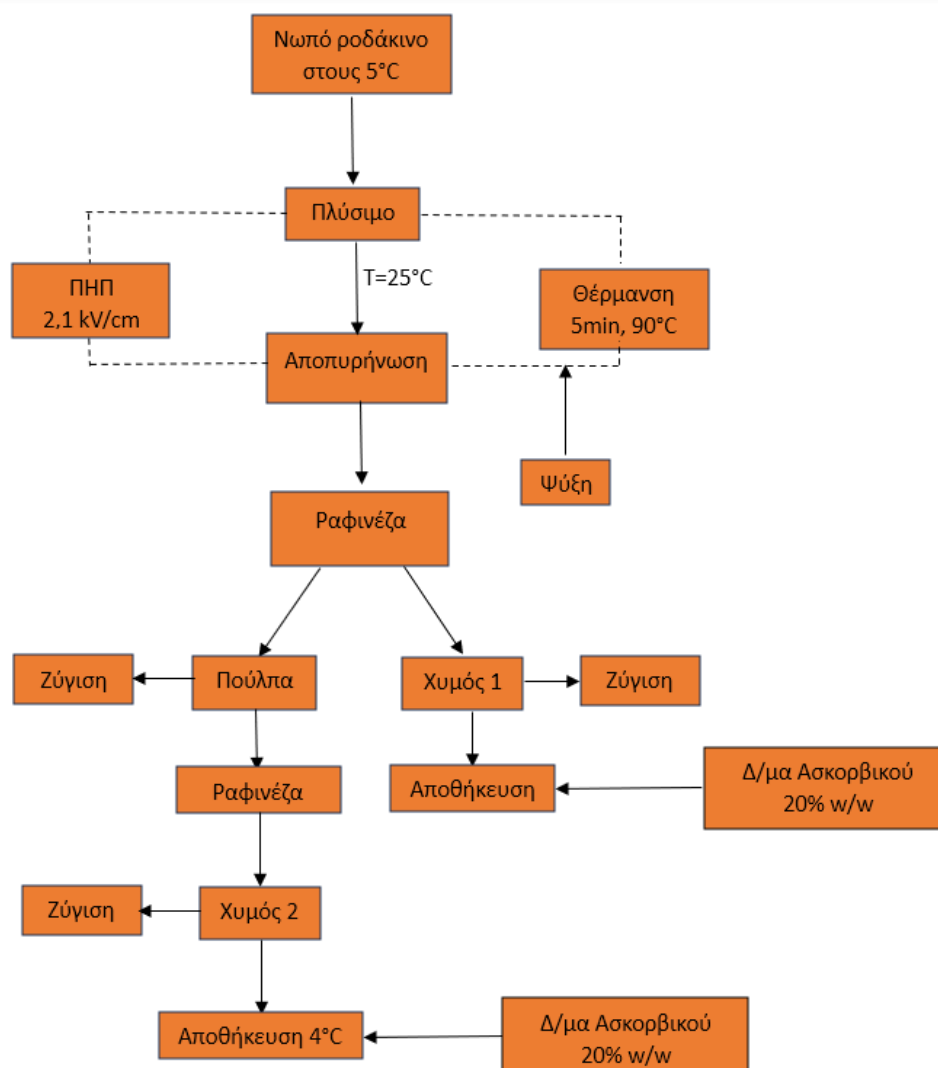
Σχήμα 4.2: Μονάδα παραγωγής Παλμικών Ηλεκτρικών Πεδίων και δίπλα ο θάλαμος επεξεργασίας

Η προεπεξεργασία των διαφορετικών δειγμάτων με ΠΗΠ είχε ως στόχο την κυτταρική διάρρηξη των φυτικών ιστών, δίνοντας στο  $Z$  τιμές από 0 έως 1. Τα δείγματα τοποθετήθηκαν στον θάλαμο επεξεργασίας με τον ίδιο τρόπο που αναφέρθηκε για τον προσδιορισμό του δείκτη  $Z$ . Το πλάτος του παλμού και η συχνότητα του ήταν 15 μs και 20 Hz αντίστοιχα. Στα δείγματα ροδάκινου εφαρμόστηκαν 50-1000 παλμοί σε

ηλεκτρικό πεδίο 2,1 kV/cm. Στα δείγματα τριμμένου καρότου εφαρμόστηκαν 20-400 παλμοί σε πεδίο 0,7 kV/cm και 20-700 παλμοί σε πεδίο 1 kV/cm. Στα δείγματα του καρότου σε ροδέλες εφαρμόστηκαν 50-800 παλμοί σε πεδίο 1 kV/cm και 40-400 παλμοί σε πεδίο 1,6 kV/cm.

#### 4.6 Μελέτη χυμοποίησης δείγματος ροδάκινου

Σε όλα τα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν φρέσκα ροδάκινα ποικιλίας Everts που διατηρήθηκαν στους 5°C. Η ποικιλία αυτή χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο από τη βιομηχανία για παραγωγή κονσερβοποιημένων προϊόντων ροδάκινου και χυμού. Κατά την παραλαβή των φρούτων έγινε διαλογή ανάμεσα σε ώριμα και άγουρα ροδάκινα. Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η πειραματική διαδικασία της μελέτης της επίδρασης των ΠΗΠ στη χυμοποίηση του ροδάκινου:



Σχήμα 4.3: Διάγραμμα ροής για τη χυμοποίηση δείγματος ροδάκινου

##### 4.6.1 Διαδικασία χυμοποίησης ροδάκινου

Τα ροδάκινα έχουν θερμοκρασία περιβάλλοντος (25°C). Ακολούθησε προ επεξεργασία με Παλμικά Ηλεκτρικά Πεδία (Elcrack-5kW, DIL, Quakenbrück, Germany) όπου ολόκληρα ροδάκινα τοποθετούνταν στον θάλαμο επεξεργασίας μαζί με νερό (100 g ροδάκινο με 268g νερό περίπου) κάθε φορά σε ηλεκτρικό πεδίο 2,1 kV/cm. Ο αριθμός των παλμών που εφαρμόστηκε ήταν : 20P, 50P, 120P, 500P και 1000P. Το εύρος του παλμού ρυθμίστηκε στα 15 μs ενώ η συχνότητα στα 20 Hz. Έπειτα,

ακολουθεί αποπυρήνωσή τους, κόβοντας το ροδάκινο στη μέση. Για την χυμοποίηση χρησιμοποιείται ειδική ραφινέζα εργαστηριακής κλίμακας (SpremiTO, Tre Spade, Torino, Ιταλία) στην οποία τοποθετούνται προ ζυγισμένα ροδάκινα και διαχωρίζεται ο χυμός από την πούλπα του φρούτου. Στο χυμό προστίθεται 1 ml διαλύματος ασκορβικού οξέος περιεκτικότητας 20% w/w για την αποφυγή του ενζυμικού μαυρίσματος του χυμού, ζυγίζεται και αποθηκεύεται. Η πούλπα ζυγίζεται και επανατοποθετείται στη ραφινέζα για δεύτερη χυμοποίηση. Η δεύτερη χυμοποίηση, αυτή της πούλπας πραγματοποιείται διότι έχει παραμείνει υγρασία σε αυτή. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται και η απόδοση της χυμοποίησης. Στο χυμό προστίθεται και πάλι 1 ml διαλύματος ασκορβικού οξέος 20% w/w, ζυγίζεται και αποθηκεύεται.

Στην περίπτωση της θερμικής προ επεξεργασίας, η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι παρόμοια με την παραπάνω. Ολόκληρα ροδάκινα τοποθετούνται σε νερό 90°C για 5 min, ακολουθεί ψύξη μέχρι τους 25°C, αποπυρήνωση, χυμοποίηση στη ραφινέζα, διαχωρισμός χυμού και πούλπας και ζύγισή τους, προσθήκη 1 ml ασκορβικού οξέος 20% w/w στο χυμό και αποθήκευση. Ακολουθεί χυμοποίηση της πούλπας του ροδάκινου ζύγιση του χυμού, προσθήκη ασκορβικού και αποθήκευση. Κατά την κατάψυξη-απόψυξη, νωπά ροδάκινα ψύχονται στους -20°C για μία μέρα και έπειτα αποψύχονται σε θερμοκρασία 25°C. Η διαδικασία χυμοποίησης τους είναι ίδια με τις παραπάνω. Η διεργασία της κατάψυξης-απόψυξης καταστρέφει ολοκληρωτικά τον κυτταρικό ιστό του φρούτου, έτσι μπορεί να γίνει σύγκριση με την επεξεργασία με ΠΗΠ και τη θερμική που καταστρέφουν μερικώς τον ιστό καθώς και με το ανεπεξέργαστο δείγμα που ο κυτταρικός του ιστός είναι ανέπαφος. Η αποθήκευση του χυμού γίνεται στους 5°C.

Η τελική απόδοση υπολογίστηκε προσθέτοντας τους χυμούς και από τις δύο χυμοποιήσεις και διαιρώντας με το αρχικό βάρος των φρούτων, ως εξής:

$$yield\% = \frac{J_1+J_2}{M_{ολ}} * 100\% \quad (4.3)$$

όπου  $J_1, J_2$  το βάρος του χυμού από την πρώτη και τη δεύτερη χυμοποίηση αντίστοιχα και  $M_{ολ}$  το συνολικό βάρος των φρούτων πριν την χυμοποίηση.

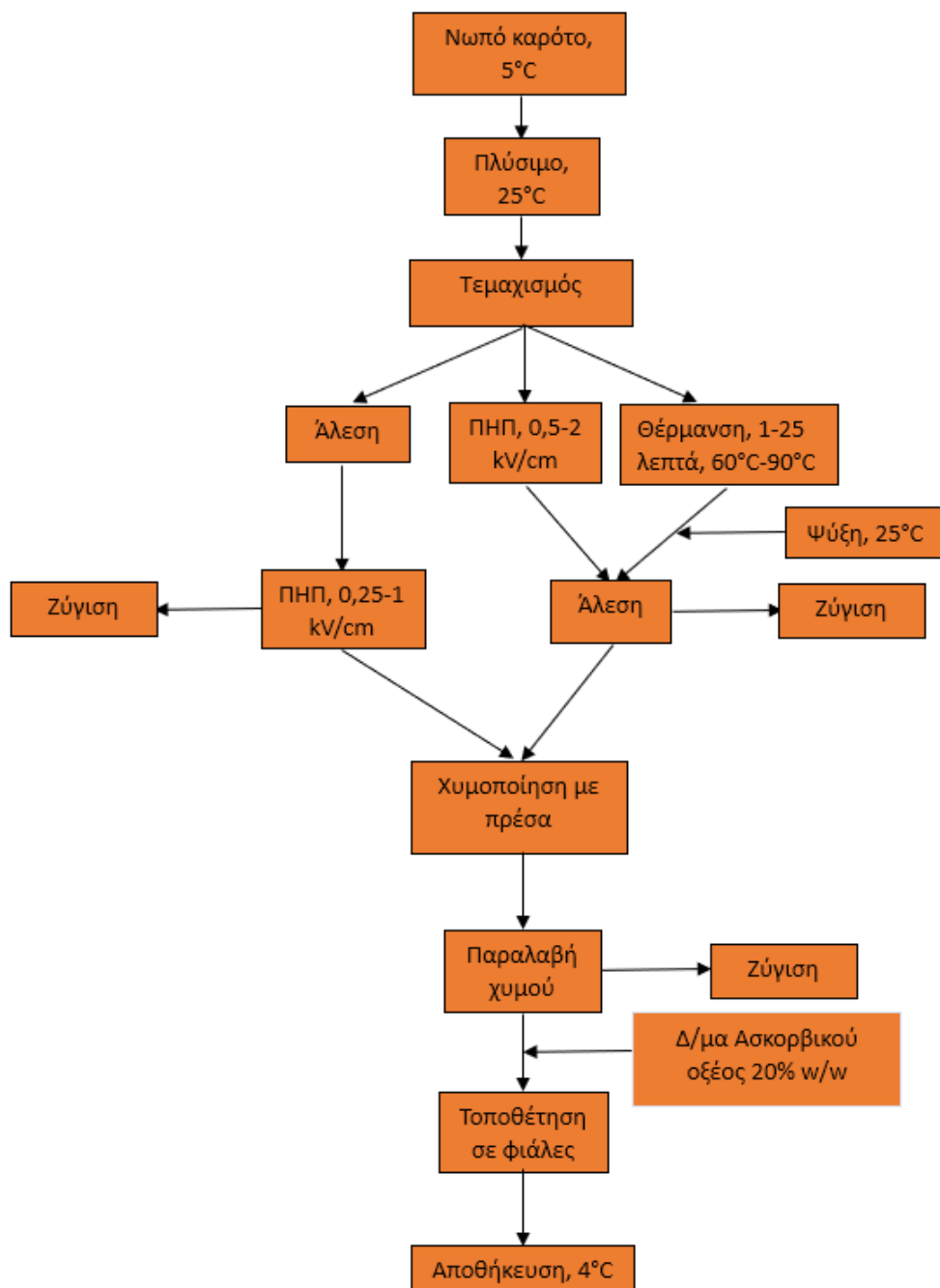


Σχήμα 4.4: Ραφινέζα (SpremiTO, Tre Spade, Torino, Ιταλία) που χρησιμοποιήθηκε για τη χυμοποίηση ροδάκινου

#### **4.7 Μελέτη χυμοποίησης δείγματος καρότου**

Σε όλα τα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν φρέσκα καρότα που διατηρήθηκαν στους 5°C. Η συγκεκριμένη ποικιλία καρότου έχει βιομηχανική χρήση και προορίζεται κυρίως για χυμοποίηση. Κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων έγιναν δύο παραλαβές φρέσκου καρότου, στα μέσα Φεβρουαρίου και στις αρχές Μαΐου, με τα καρότα του Μαΐου να παρουσιάζουν μεγαλύτερη σκληρότητα. Στην πρώτη παραλαβή η επεξεργασία με Παλμικά Ηλεκτρικά Πεδία έγινε σε αλεσμένο καρότο ενώ στην δεύτερη σε ροδέλες καρότου. Επιλέχθηκε να γίνει επεξεργασία με ΠΗΠ σε αλεσμένο και ολόκληρο καρότο ώστε να διερευνηθεί το πως επηρεάζει η μορφή του καρότου την κυτταρική διάρρηξη και κατά συνέπεια την απόδοση της χυμοποίησης και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του χυμού. Επιπλέον, σε βιομηχανικό επίπεδο το αλεσμένο με το ολόκληρο καρότο ακολουθούν διαφορετική παραγωγική διαδικασία και απαιτούν διαφορετικό εξοπλισμό για τη χυμοποίηση τους.

Η πειραματική διαδικασία συνοψίζεται στο παρακάτω διάγραμμα ροής:



Σχήμα 4.5: Διάγραμμα ροής χυμοποίησης καρότου που ακολουθήθηκε κατά την πειραματική διαδικασία



#### **4.7.1 Διαδικασία χυμοποίησης καρότου**

Φρέσκα καρότα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος τεμαχίζονται. Έπειτα, είτε έγινε άλεση του καρότου και προ επεξεργασία με Παλμικά Ηλεκτρικά Πεδία (Elcrack-5kW, DIL, Quakenbrück, Germany), είτε εφαρμογή ΠΗΠ σε ροδέλες καρότου και στη συνέχεια άλεση. Ο θάλαμος επεξεργασίας των ΠΗΠ είτε πληρώθηκε με 300 g αλεσμένου καρότου είτε, με 230 g καρότο σε ροδέλες και 70 ml νερό. Οι συνθήκες που εφαρμόστηκαν ήταν:

- στο αλεσμένο καρότο ηλεκτρικά πεδία 0,7 και 1 kV/cm και σε αριθμό παλμών 20-400 και 20-700 παλμοί αντίστοιχα.
- στις ροδέλες καρότου ηλεκτρικά πεδία 1 και 1,6 kV/cm σε αριθμό παλμών 50-800 και 40-400 παλμοί αντίστοιχα

Οι συνθήκες της επεξεργασίας με ΠΗΠ επιλέχθηκαν με βάση τον προσδιορισμό της κυτταρικής διάρρηξης.

Το πλάτος του παλμού ρυθμίστηκε στα 15 μs ενώ η συχνότητα στα 20 Hz. Κάθε συνθήκη επαναλήφθηκε δύο φορές για περιορισμό των σφαλμάτων.

Ακολουθεί ζύγιση του αλεσμένου καρότου και τοποθέτησή του σε πρέσα προς χυμοποίηση υπό συμπίεση. Ο χυμός συλλέγεται, προστίθεται 1 ml διαλύματος ασκορβικού οξέος 20% w/w για αποφυγή ενζυμικού μαυρίσματος, ζυγίζεται και αποθηκεύεται.

Στην περίπτωση της θερμικής προ επεξεργασίας η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι παρόμοια με την παραπάνω. Πιο συγκεκριμένα, καρότα σε ροδέλες εμβαπτίζονται σε νερό σε θερμοκρασία:

- 60°C για 7-25 min
- 70°C για 5-15 min
- 80°C για 3-12 min
- 90°C για 1- 5 min

Έπειτα γίνεται ψύξη, άλεση και ζύγιση. Το αλεσμένο καρότο τοποθετείται στην πρέσα και χυμοποιείται υπό πίεση. Ο χυμός συλλέγεται, προστίθεται 1 ml διαλύματος ασκορβικού οξέος 20% w/w, ζυγίζεται και αποθηκεύεται.

Κατά την κατάψυξη-απόψυξη, φρέσκα καρότα ψύχονται στους -20°C για μία μέρα και έπειτα αποψύχονται σε θερμοκρασία 25°C. Η διαδικασία χυμοποίησης τους είναι ίδια με τις παραπάνω.

Η τελική απόδοση υπολογίστηκε ως εξής:

$$yield\% = \frac{J}{M} * 100\% \quad (4.4)$$

όπου J η μάζα του χυμού καρότου και M η μάζα του αλεσμένου καρότου που πρόκειται να χυμοποιηθεί.



Σχήμα 4.6: (Α): Χυμοποίηση καρότου με πρέσα (Β):Θερμική προ επεξεργασία καρότου



Σχήμα 4.7: (Α): Προ επεξεργασία αλεσμένου καρότου με ΠΗΠ (Β): Προ επεξεργασία καρότου σε ροδέλες με ΠΗΠ

## **4.8 Αναλυτικές μέθοδοι για τον προσδιορισμό των ποιοτικών χαρακτηριστικών**

### **4.8.1 Μέτρηση ολικών διαλυτών στερεών (°Bx)**

Τα ολικά διαλυτά στερεά (°Bx) εκφράζουν την περιεκτικότητα των σακχάρων σε γραμμάρια σακχαρόζης ανά 100 γραμμάρια διαλύματος. Για την μέτρηση τους τοποθετήθηκε 0,5 ml χυμού σε διαθλασίμετρο Abbe με χρήση πιπέτας. Το όργανο ρυθμίστηκε κατάλληλα ώστε η μέτρηση του βαθμού των Brix να είναι όσο το δυνατόν πιο ακριβής.



Σχήμα 4.8: Διαθλασίμετρο με το οποίο μετρήθηκαν τα ολικά διαλυτά στερεών (°Bx) των χυμών

### **4.8.2 Προσδιορισμός pH**

Το pH του χυμού προσδιορίζεται με ηλεκτρονικό pH-μετρο (pHmeter 338, Amel instruments, Milan, Italy). Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε δείγματα ομοιογενούς χυμού.



Σχήμα 4.9: Ηλεκτρονικό pH-μετρο (pHmeter 338, Amel instruments, Milan, Italy)

#### **4.8.3 Προσδιορισμός της συνεκτικότητας κατά Bostwick σε χυμό ροδάκινου**

Η συνεκτικότητα του χυμού ροδάκινου μετρήθηκε με τη μέθοδο Bostwick σε θερμοκρασία 25°C. Η συνεκτικότητα κατά Bostwick ορίζεται ως η απόσταση που διανύει ένα ρευστό σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (30 sec στο πείραμα) μόνο υπό την επίδραση του βάρους του. Η ροή πραγματοποιείται σε πλήρως ευθυγραμμισμένη και βαθμονομημένη επιφάνεια (0,5 cm) μετά την στιγμιαία ανύψωση ελάσματος. Η μέτρηση λαμβάνεται παρατηρώντας την απόσταση που διένυσε το ρευστό σε 30 δευτερόλεπτα. Ρευστά που διανύουν μικρή απόσταση σε 30 δευτερόλεπτα θεωρούνται παχύρευστα, ενώ άλλα που διανύουν μεγάλη απόσταση σε 30 δευτερόλεπτα θεωρούνται λεπτόρευστα. Επομένως, η απόσταση που θα διανύσει ένα ρευστό φανερώνει τη σύστασή του.



Σχήμα 4.10: Όργανο μέτρησης της συνεκτικότητας κατά Bostwick (Bostwick Consistometer, Extended Length, 30 cm)

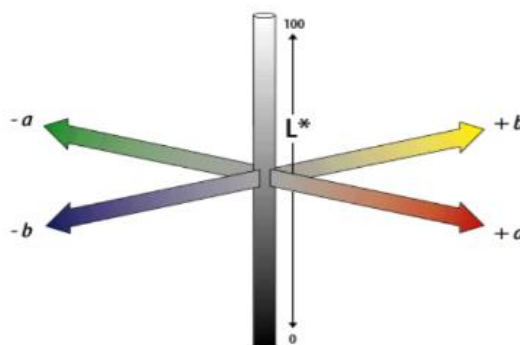
#### **4.8.4 Προσδιορισμός χρώματος**

Οι μετρήσεις του χρώματος για το χυμό έγιναν με χρήση του χρωματομέτρου Eye One (GretagMacbeth) και εκφράστηκαν στην κλίμακα CIE Lab (L, a, b). Πριν γίνει μέτρηση στο χρώμα του χυμού, πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση του οργάνου με τη βοήθεια λευκής πλάκας (Calibration plate). Οι μετρήσεις έγιναν σε ομοιογενές δείγμα χυμού, που περιεχόταν σε ειδική για τη μέτρηση γυάλινη κυψελίδα για το χυμό ροδάκινου και σε δοκιμαστικό σωλήνα για το χυμό καρότου, επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία τρεις φορές ώστε να περιοριστεί το σφάλμα.

Στην κλίμακα CIE Lab, το L εκφράζει τη φωτεινότητα του δείγματος και έχει τιμές από 0 έως 100 όπου αυξανόμενου του L αυξάνεται και η φωτεινότητα, το a παίρνει τιμές από -60 έως +60 όπου αρνητικές τιμές του a που πλησιάζουν το -60 δηλώνουν ότι το δείγμα που μετρήθηκε πλησιάζει το πράσινο χρώμα ενώ θετικές τιμές του a κοντά στο +60 το κόκκινο. Το b παίρνει τιμές από το -60 έως το +60 όπως το a όμως οι αρνητικές τιμές του προσεγγίζουν το μπλε χρώμα ενώ οι θετικές του κοντά στο +60 το κίτρινο. Από τις παραμέτρους αυτές μπορεί να προσδιοριστεί η συνολική μεταβολή του χρώματος  $\Delta E$ , η οποία υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\Delta E = \sqrt{(L - L_0)^2 + (a - a_0)^2 + (b - b_0)^2} \quad (4.5)$$

όπου  $L_0$ ,  $a_0$ ,  $b_0$  είναι οι αρχικές παράμετροι του δείγματος που γίνεται η σύγκριση.



Σχήμα 4.11: Παράμετροι χρωματικής κλίμακας CIE Lab



Σχήμα 4.12: Χρωματόμετρο Eye One (GretagMacbeth)

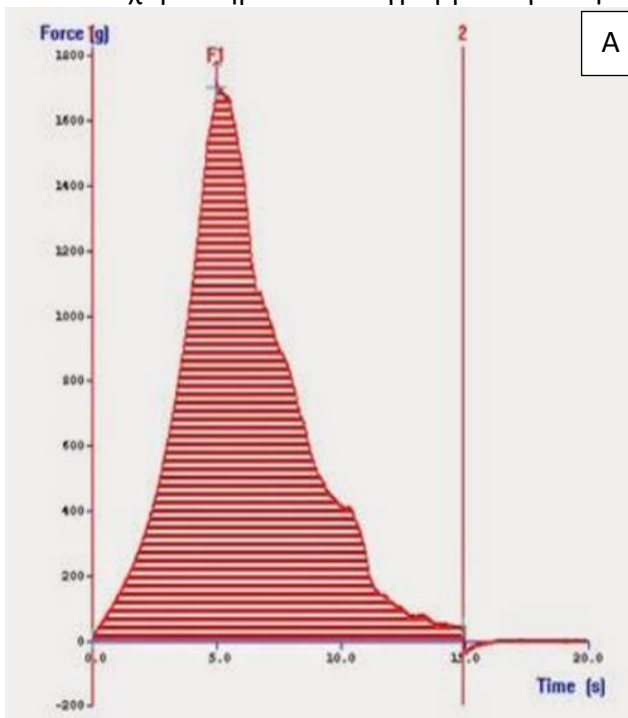
#### **4.8.5 Ανάλυση υφής**

Ο προσδιορισμός της υφής για τα δείγματα καρότου και ροδάκινου έγινε με τη βοήθεια του αναλυτή υφής TA-XT2i Plus Texture Analyzer (Stable Micro Systems, UK) και η ανάλυση τους πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα Texture Exponent 32. Τα δείγματα υπέστησαν συμπίεση και προσομοίωση κοπής με χρήση των στελεχών κυλίνδρου και κοπιδιού (μέγεθος λεπίδας 6 cm). Η προσομοίωση κοπής έγινε μόνο στα δείγματα καρότου και επαναλήφθηκε δύο φορές για κάθε δείγμα. Τα δείγματα είχαν προετοιμαστεί ώστε να είναι ομοιόμορφα στις επιφάνειες τους, πιο συγκεκριμένα το ροδάκινο μετρήθηκε στον αναλυτή υφής στη μορφή κύβου διαστάσεων 1x1x1 cm (μήκος x πλάτος x ύψος) ενώ το καρότο στη μορφή κυλίνδρου διαμέτρου 2-2,5 cm και πάχους 0,5 cm. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν μετά την εφαρμογή συγκεκριμένων παραμέτρων όπως παρουσιάζονται παρακάτω:

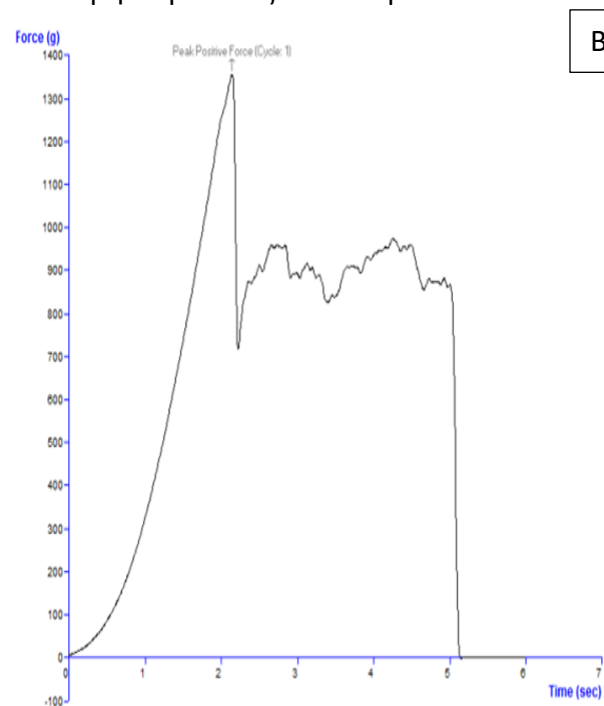
Πίνακας 4.1: Παράμετροι για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών υφής

Δοκιμές	Στέλεχος	Ταχύτητα Μέτρησης	Διαστάσεις δειγματος	Βάθος καθόδου του στελέχους – Παραμόρφωση δειγματος
Δοκιμή συμπίεσης σε δείγμα ροδάκινου	κύλινδρος επιφάνειας 0,28 cm <sup>2</sup>	2 mm/sec	Κύβος ακμής 1 cm	Βάθος καθόδου 15 mm
Δοκιμή συμπίεσης σε δείγμα καρότου	κύλινδρος επιφάνειας 0,28 cm <sup>2</sup>	0.1 mm/sec	Κύλινδρος διαμέτρου 2-2,5 cm, πάχους 0,5 cm	Παραμόρφωση 10%
Δοκιμή δύναμης κοπής σε δείγμα καρότου	λεπίδα 6 cm	1 mm/sec	Κύλινδρος διαμέτρου 2-2,5 cm, πάχους 0,5 cm	Βάθος καθόδου 5 mm

Τα χαρακτηριστικά διαγράμματα για την κάθε δοκιμή παρουσιάζονται παρακάτω:

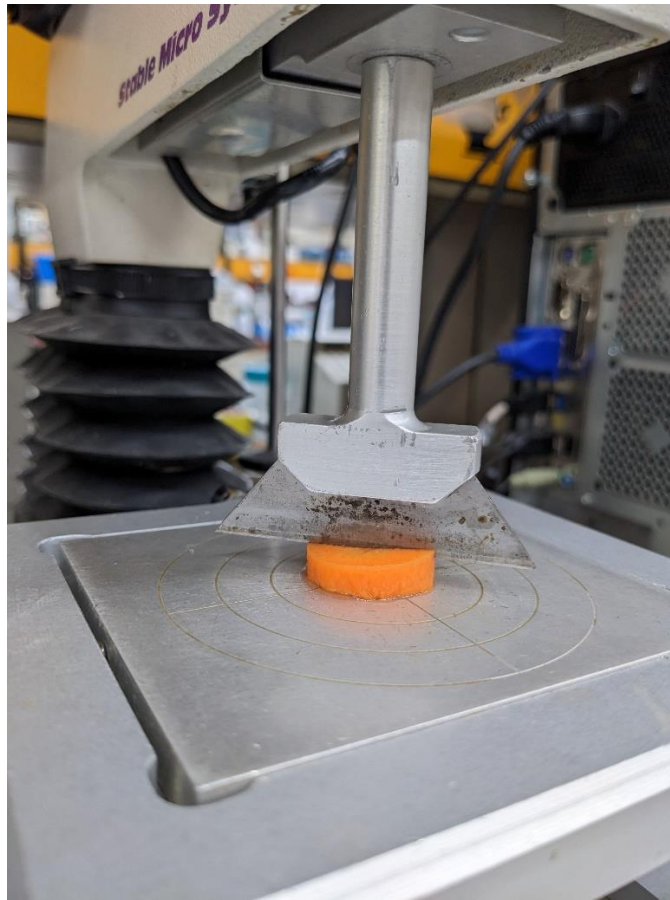


A



B

Σχήμα 4.13: Α) Χαρακτηριστικό διάγραμμα της δύναμης συμπίεσης Β) Χαρακτηριστικό διάγραμμα της δύναμης κοπής



Σχήμα 4.14: Προσομοίωση κοπής σε δείγμα καρότου με τον αναλυτή υφής TA-XT2i Plus Texture Analyzer (Stable Micro Systems, UK)

#### 4.8.6 Προσδιορισμός καρτενοειδών στο χυμό καρότου

Για τον προσδιορισμό των καρτενοειδών αρχικά παρασκευάστηκε ένα διάλυμα ακετόνης – n-εξανίου σε αναλογία 4:6 κατ' όγκο. Σε δοχεία falcon προτέθηκαν 10 ml του διαλύματος ακετόνης – n-εξανίου και 1 ml χυμού καρότου. Έπειτα τα δείγματα αναδεύονταν για 30 min στα 30 rpm ώστε να διαχωριστούν οι “στρώσεις”. Έπειτα οι μετρήσεις έγιναν στο φασματοφωτόμετρο Hitachi U-2900 Spectrophotometer τοποθετώντας σε γυάλινη κυψελίδα 1 ml από την πάνω, οργανική, στρώση του διαλύματος και 2 ml από το διάλυμα ακετόνης – n-εξανίου (αραίωση 1:2). Το φασματοφωτόμετρο προγραμματίζεται να κάνει μετρήσεις στα 453, 505, 645 και 663 nm. Αρχικά, μετρήθηκε το διάλυμα ακετόνης – n-εξανίου σαν ‘τυφλό’. Οι μετρήσεις στα 645 και 663 nm είναι αρκετά χαμηλές διότι αυτό το φάσμα είναι κατάλληλο για χλωροφύλλες οι οποίες δεν υπάρχουν σε μεγάλη περιεκτικότητα στο χυμό καρότου. Ο υπολογισμός των καρτενοειδών έγινε με την παρακάτω εξίσωση:

$$C_{car} = (0.372 * A_{505} + 0.452 * A_{453} + 0.216 * A_{663} - 1.22 * A_{645}) * 2 \quad (4.6)$$

όπου  $C_{car}$  η συγκέντρωση των καρτενοειδών σε mg καρτενοειδών/100 ml εκχυλίσματος,  $A_{505}$ ,  $A_{453}$ ,  $A_{663}$ ,  $A_{645}$  οι απορροφήσεις στα αντίστοιχα μήκη κύματος (Kaur et al., 2011; Nagata & Yamashita, 1992)



Σχήμα 4.15: Φασματοφωτόμετρο Hitachi U-2900 το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό των καρτενοειδών σε χυμό καρότου



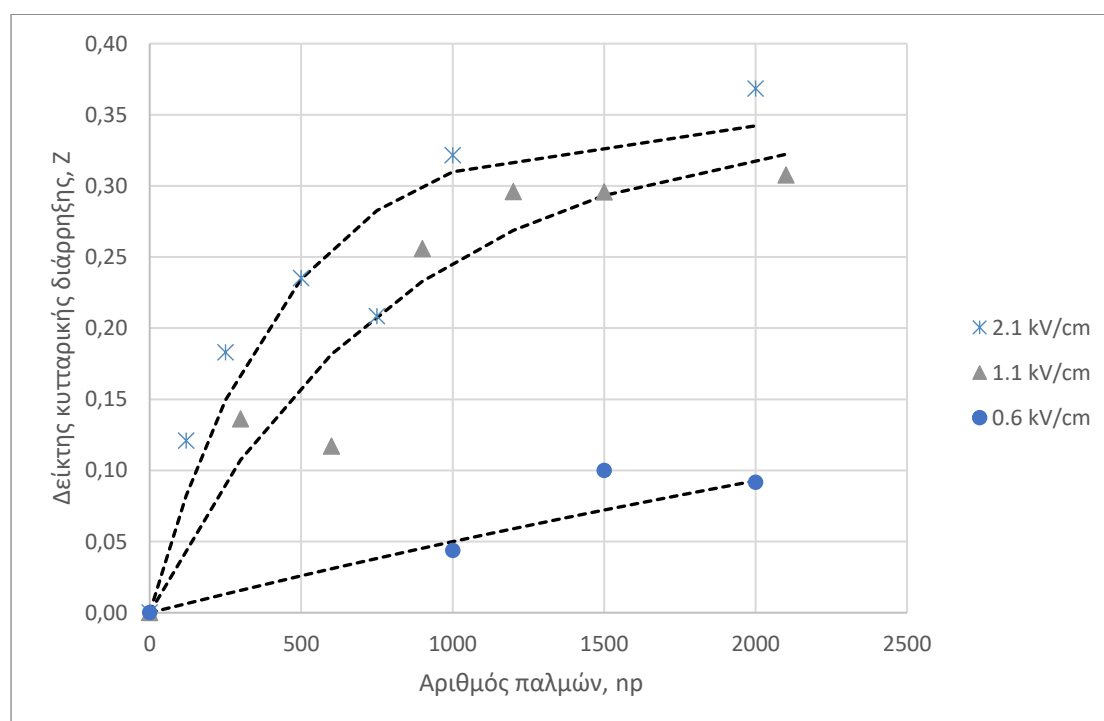


## 5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

### 5.1 Μελέτη της επίδρασης των Παλμικών Ηλεκτρικών Πεδίων στην χυμοποίηση ροδάκινου και στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του χυμού του

#### 5.1.1.1.1 Δείκτης κυτταρικής διάρρηξης (Z) στο ροδάκινο

Ο προσδιορισμός του δείκτη κυτταρικής διάρρηξης πραγματοποιείται για την εύρεση των βέλτιστων συνθηκών επεξεργασίας. Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα του δείκτη κυτταρικής διάρρηξης (Z) σε τρία ηλεκτρικά πεδία διαφορετικής έντασης.



Διάγραμμα 5.1: Εξάρτηση του δείκτη κυτταρικής διάρρηξης συναρτήσει του αριθμού των παλμών που εφαρμόστηκαν για κάθε ένταση ηλεκτρικού πεδίου που μελετήθηκε. Οι διακεκομμένες γραμμές αντιστοιχούν στην προσαρμογή της εξίσωσης 4.1 στα πειραματικά δεδομένα

Παρατηρείται ότι σε μικρό αριθμό παλμών η τιμή του δείκτη κυτταρικής διάρρηξης έχει μεγάλη αύξηση και στα τρία ηλεκτρικά πεδία που μελετήθηκαν ενώ, σε μεγαλύτερο αριθμό παλμών η τιμή του Z έχει μικρότερη αύξηση μέχρι να φτάσει στη μέγιστη δυνατή τιμή του. Στο ηλεκτρικό πεδίο των 0,6 kV/cm ο δείκτης Z έφτασε το 0,12 μετά τη εφαρμογή 1500 παλμών, στο ηλεκτρικό πεδίο των 1,1 kV/cm ο δείκτης Z έφτασε το 0,31 μετά την εφαρμογή 2100 παλμών ενώ στο ηλεκτρικό πεδίο των 2,1 kV/cm ο δείκτης Z έφτασε το 0,37 μετά την εφαρμογή 2000 παλμών, επομένως η κυτταρική διάρρηξη αυξάνεται όσο αυξάνεται και ο αριθμός των παλμών μέχρι να φτάσει στη μέγιστη τιμή της. Τα υψηλότερα ηλεκτρικά πεδία φτάνουν σε μεγαλύτερα ποσοστά κυτταρικής διάρρηξης σε σύγκριση με τα χαμηλότερα. Η κυτταρική

διάρρηξη που υφίσταται ο κυτταρικός ιστός του ροδάκινου οφείλεται στην ηλεκτροδιάτρηση που υπέστη από την επεξεργασία με Παλμικά Ηλεκτρικά Πεδία. Η ηλεκτροδιάτρηση γίνεται εντονότερη όσο αυξάνεται η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και ο αριθμός των παλμών που εφαρμόζεται, δηλαδή όσο αυξάνεται η προσφερόμενη ενέργεια. Για το λόγο αυτό η επεξεργασία σε υψηλότερα ηλεκτρικά πεδία με εφαρμογή μεγάλου αριθμού παλμών επιτυγχάνει μεγαλύτερες τιμές του δείκτη Z.

Η εξάρτηση του δείκτη κυτταρικής διάρρηξης από τον χρόνο επεξεργασίας με ΠΗΠ περιγράφηκε μαθηματικά με προσαρμογή των πειραματικών δεδομένων από την Εξίσωση 4.1.

Οι τιμές των παραμέτρων  $Z_{max}$  και  $\tau$  προσδιορίστηκαν με μη γραμμική παλινδρόμηση και παρουσιάζονται παρακάτω:

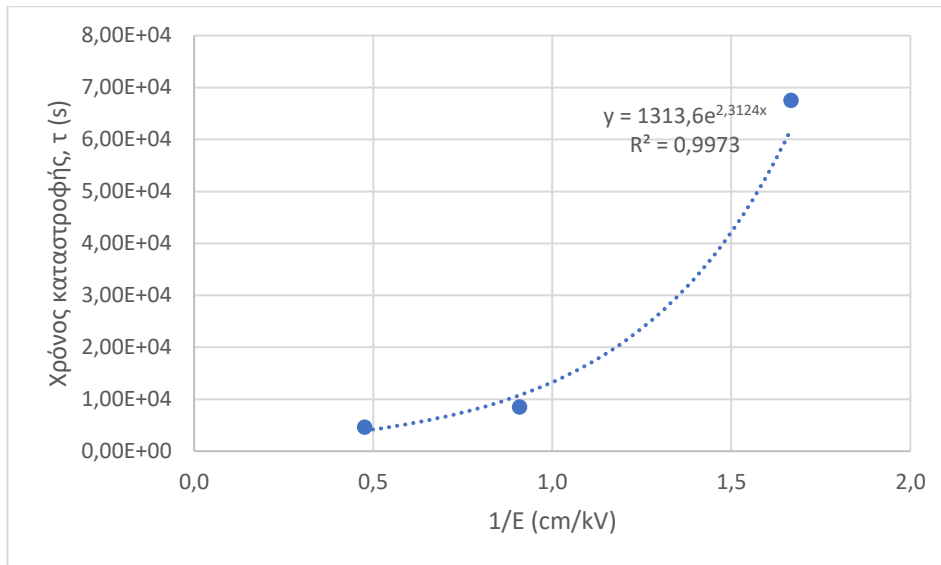
Πίνακας 5.1: Τιμές των παραμέτρων  $Z_{max}$ ,  $\tau$ , A και  $\tau_{\infty}$

E (kV/cm)	$Z_{max}$	$\tau$ ( $\mu$ s)	$R^2$
0,6	0,35	67540,85	0,973
1,1	0,35	8485,523	0,997
2,1	0,35	4592,47	0,979
<b>A (kV/cm)</b>	2,3124		
<b><math>\tau_{\infty}</math> (<math>\mu</math>s)</b>	1313,6		0,997

Από τους συντελεστές συσχέτισης των προσαρμογών, στα πειραματικά δεδομένα ( $R^2 > 0,9$ ) παρατηρήθηκε ότι οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν περιγράφουν πολύ ικανοποιητικά τα πειραματικά δεδομένα. Η τιμή του  $\tau$  μειώνεται με την αύξηση του ηλεκτρικού πεδίου, αυτό συμβαίνει διότι σε υψηλότερα ηλεκτρικά πεδία ο χρόνος που απαιτείται για να φτάσει η τιμή του Z το 50% της τιμής του  $Z_{max}$  είναι μικρότερος. Δηλαδή επιτυγχάνεται γρηγορότερα η καταστροφή του κυτταρικού ιστού.

Η εξάρτηση του χαρακτηριστικού χρόνου καταστροφής από την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά από την Εξίσωση 4.2.

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα του χρόνου καταστροφής  $\tau$  συναρτήσει του ηλεκτρικού πεδίου.



Διάγραμμα 5.2: Συσχέτιση του ηλεκτρικού πεδίου που εφαρμόζεται κατά την επεξεργασία με ΠΗΠ και του χρόνου ημικαταστροφής

Παρατηρείται ότι σε υψηλό ηλεκτρικό πεδίο το  $\tau$  είναι μικρότερο, δηλαδή σε υψηλότερα πεδία ο χρόνος για επίτευξη κυτταρικής διάρρηξης 50% είναι μικρότερος. Ο χαρακτηριστικός χρόνος καταστροφής  $\tau$  στο ηλεκτρικό πεδίο των 1,1 kV/cm είναι διπλάσιος σχεδόν από αυτόν του πεδίου 2,1 kV/cm ενώ, του ηλεκτρικού πεδίου 0,6 kV/cm είναι έως και 15 φορές μεγαλύτερος. Το  $A$  είναι της τάξης των μερικών kV/cm, χαρακτηριστικό των φυτικών κυττάρων λόγω του μεγέθους τους, δηλαδή σε μεγαλύτερα κύτταρα η ηλεκτροδιάτρηση είναι ευκολότερη. Αντίθετα, μικροβιακά κύτταρα όπως της ζύμης *S. cerevisiae* εμφανίζουν  $A$  της τάξης των 20 cm/kV (El Zakhem et al., 2006). Το  $\tau_{\infty}$  μας δείχνει τον ελάχιστο χαρακτηριστικό χρόνο καταστροφής που μπορεί να επιτευχθεί σε μέγιστη ένταση ηλεκτρικού πεδίου και είναι της τάξης των  $\mu$ s.

#### **5.1.1.1.2 Δείκτης κυτταρικής διάρρηξης και ενεργειακές απαιτήσεις για το ροδάκινο**

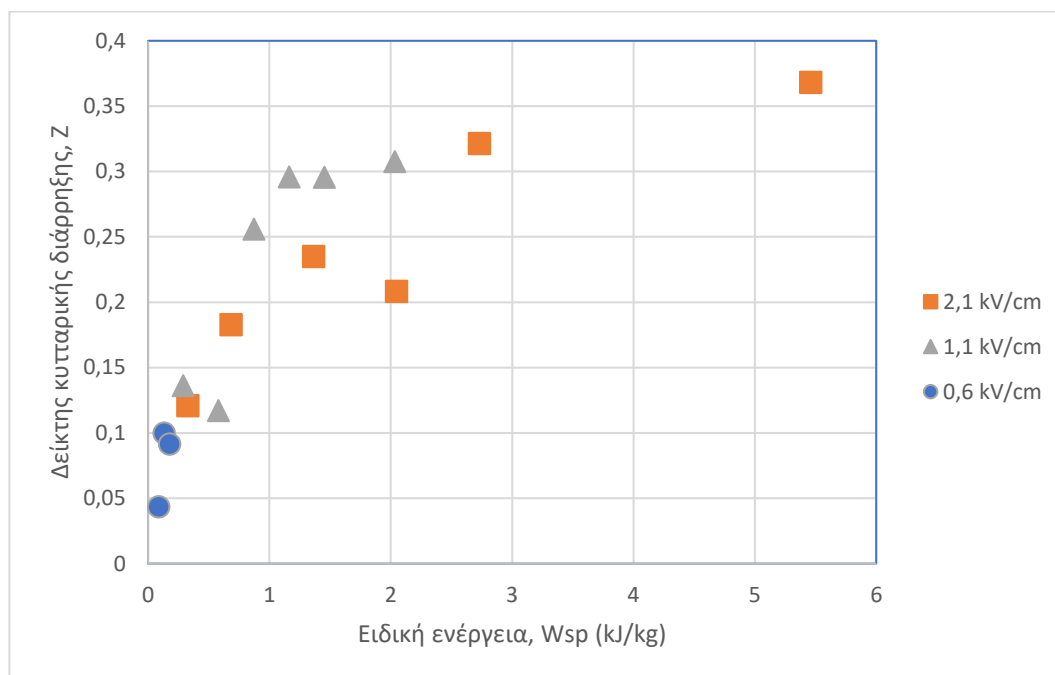
Η ειδική ενέργεια που απαιτείται για την κυτταρική διάρρηξη στο δείγμα ροδάκινου υπολογίζεται ως εξής:

$$W_{sp} = \frac{E_p * 0,3 * 0,27 * n_p}{0,368 * 1000} \quad (5.1)$$

όπου, μονάδα μέτρησης της ειδικής ενέργειας: kJ/kg

Το  $E_p$  είναι η ένδειξη της ειδικής ενέργειας ανά παλμό όπως αυτή εμφανίζεται από το όργανο, το 0,3 είναι συντελεστής διόρθωσης, το 0,27 οφείλεται στην περιεκτικότητα σε ροδάκινο μέσα στο θάλαμο καθώς περιέχει 100 g ροδάκινου και 268 g νερού ( $\frac{100}{368} = 0,27$ ),  $n_p$  είναι ο αριθμός των παλμών που εφαρμόζονται στο δείγμα, το 0,368 οφείλεται στην συνολική μάζα ροδάκινου και νερού που περιέχεται στον θάλαμο επεξεργασίας ενώ η διαίρεση με το 1000 είναι για αναγωγή των μονάδων σε kJ/kg.

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα απαιτήσεων ενέργειας για την κυτταρική διάρρηξη σε κάθε ηλεκτρικό πεδίο.



Διάγραμμα 5.3: Ειδική ενέργεια (kJ/kg) που απαιτείται για την κυτταρική διάρρηξη σε δείγμα ροδάκινου σε ηλεκτρικά πεδία 0,6 kV/cm, 1,1 kV/cm, 2,1 kV/cm

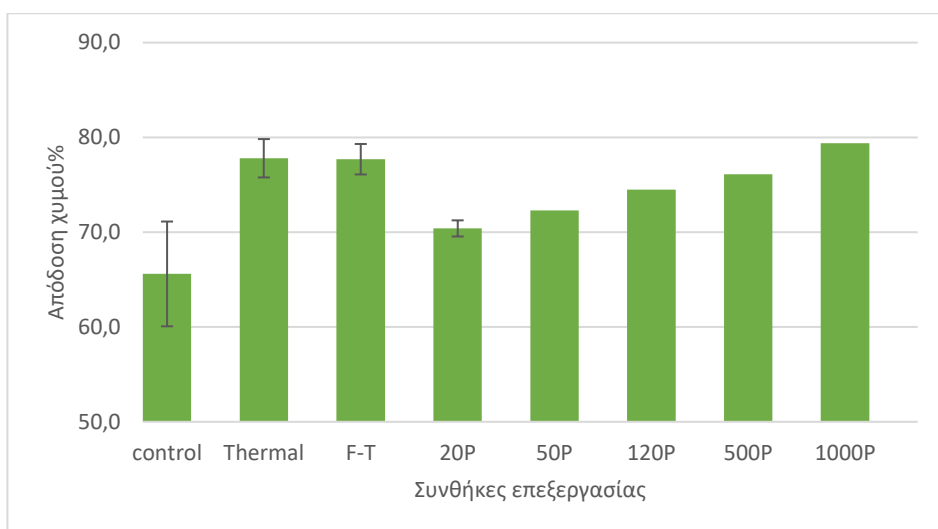
Παρατηρείται ότι με αύξηση της προσφερόμενης ενέργειας ο δείκτης κυτταρικής διάρρηξης αυξάνεται έως ότου φτάσει τη μέγιστη τιμή του η οποία είναι 0,37.

Επιπλέον, παρατηρείται από το διάγραμμα ότι ο δείκτης κυτταρικής διάρρηξης εξαρτάται μονοτονικά από την προσφερόμενη ειδική ενέργεια.

Στο χαμηλότερο ηλεκτρικό πεδίο οι ενεργειακές απαιτήσεις είναι αρκετά χαμηλές όπως και ο δείκτης κυτταρικής διάρρηξης. Μέχρι τα 2,7 kJ/kg η περισσότερη κυτταρική διάρρηξη έχει επιτευχθεί.

#### **5.1.1.2 Μελέτη της απόδοσης χυμοποίησης ροδάκινου σε διάφορες συνθήκες επεξεργασίας**

Για την μελέτη της απόδοσης σε χυμό χρησιμοποιήθηκαν ανεπεξέργαστα δείγματα, επεξεργασμένα με ΠΗΠ δείγματα σε ηλεκτρικό πεδίο 2,1 kV/cm και αριθμό παλμών από 20-1000 παλμούς, θερμικά επεξεργασμένα δείγματα στους 90°C για 5 λεπτά και κατεψυγμένα αποψυγμένα δείγματα ροδάκινου σε θερμοκρασία κατάψυξης -20°C και θερμοκρασία απόψυξης 25°C. Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα για απόδοση χυμού:



Διάγραμμα 5.4: Απόδοση χυμού ανά συνθήκη επεξεργασίας

Παρατηρείται ότι η απόδοση σε χυμό αυξάνεται κατά πολύ μετά την επεξεργασία με ΠΗΠ σε σχέση με το ανεπεξέργαστο δείγμα. Επίσης, η προ κατεργασία με ΠΗΠ έχει παρόμοιες ή και καλύτερες αποδόσεις από τη θερμική προ κατεργασία και την κατάψυξη-απόψυξη. Η απόδοση μετά την επεξεργασία με ΠΗΠ έφτασε το 79%.

### **5.1.1.3 Μελέτη της προσφερόμενης ενέργειας ανά συνθήκη επεξεργασίας και απόδοση χυμοποίησης**

Η απαιτούμενη ενέργεια για την επεξεργασία με Παλμικά Ηλεκτρικά Πεδία μελετήθηκε στο Κεφάλαιο 3.2.3.5. Στην περίπτωση της θερμικής επεξεργασίας και στην κατάψυξη-απόψυξη χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση :

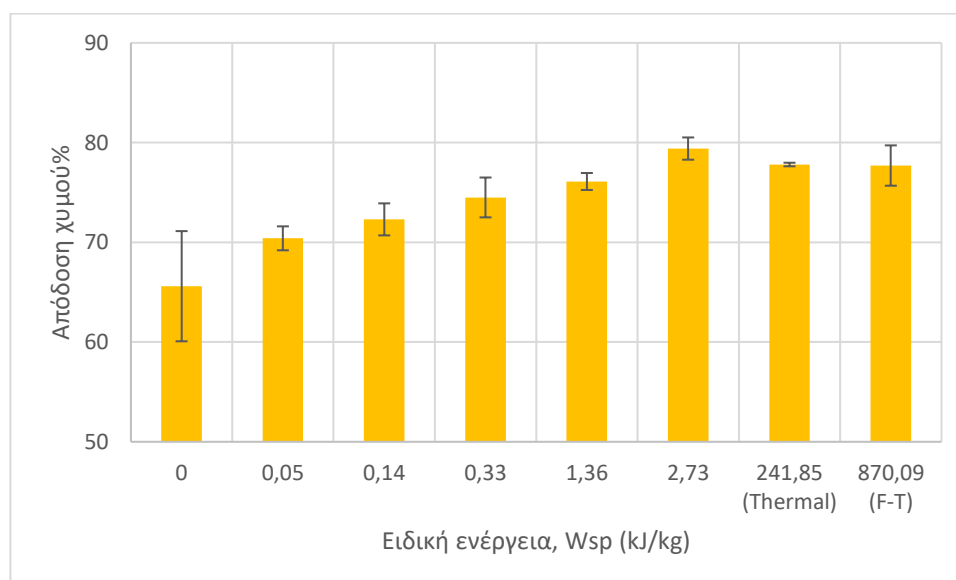
$$W = m * C_p * \Delta T \quad (5.2)$$

όπου, m η μάζα του ροδάκινου,  $C_p$  η θερμοχωρητικότητα και  $\Delta T$  η διαφορά θερμοκρασίας. Είναι απαραίτητο για τη θερμοχωρητικότητα ο προσδιορισμός της σύστασης του ροδάκινου διότι το  $C_p$  είναι διαφορετικό για το φρούτο και διαφορετικό για το νερό καθώς και για τον πάγο. Το ροδάκινο περιέχει 89% υγρασία σε υγρή βάση. Στην περίπτωση της κατάψυξης-απόψυξης χρησιμοποιείται η θερμοχωρητικότητα του νερού από τους 25°C έως τους 0°C και η θερμοχωρητικότητα του πάγου από 0°C έως -20°C. Στον υπολογισμό η ταπείνωση του σημείου πήξης του νερού καθώς και τυχόν επίδραση των συστατικών του τρόφιμου στην ενθαλπία πήξης θεωρούνται αμελητέες. Οι τιμές της θερμοχωρητικότητας σε κάθε περίπτωση ανευρίσκονται βιβλιογραφικά και φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5.2: Σύσταση και θερμοχωρητικότητες ροδάκινου και νερού

Ροδάκινο	
Περιεκτικότητα σε νερό	89,00%
Θερμοχωρητικότητα νερού (kJ/kg)	4,18
Θερμοχωρητικότητα πάγου (kJ/kg)	2,093
Θερμοχωρητικότητα ροδάκινου (kJ/kg)	3,72
Ενθαλπία πήξης νερού (kJ/kg)	333

Με χρήση αυτών των δεδομένων διαμορφώθηκε το διάγραμμα 5.4:



Διάγραμμα 5.4: Απόδοση χυμού και ενεργειακές απαιτήσεις για ανεπεξέργαστα, επεξεργασμένα με ΠΗΠ, επεξεργασμένα θερμικά και κατεψυγμένα-αποψυγμένα ροδάκινα.

Παρατηρείται ότι οι απαιτήσεις σε ενέργεια κατά την θερμική επεξεργασία και κατά την κατάψυξη απόψυξη είναι σημαντικά μεγαλύτερες σε σχέση με την απαιτούμενη ενέργεια για επεξεργασία με Παλμικά Ηλεκτρικά Πεδία. Πιο συγκεκριμένα, κατά την επεξεργασία με ΠΗΠ για 20 έως 1000 παλμούς σε ηλεκτρικό πεδίο 2,1 kV/cm η ειδική ενέργεια που απαιτείται κυμαίνεται από 0,05-2,73 kJ/kg. Η ενέργεια που απαιτείται για τη θερμική επεξεργασία στους 90°C για δείγμα ροδάκινου είναι 241,85 kJ/kg, ποσό πολύ μεγαλύτερο από αυτό της επεξεργασίας με ΠΗΠ. Επιπλέον, αρκετά μεγάλο ποσό ενέργειας απαιτεί και η διεργασία της κατάψυξης-απόψυξης όπου η θερμοκρασία του ροδάκινου πρέπει να μεταβληθεί από τους 25°C στους -20°C και έπειτα από τους -20°C στους 25°C. Η διαδικασία αυτή χρειάζεται 870,09 kJ/kg ενέργειας, ποσό σημαντικά υψηλότερο σε σύγκριση με τις ενεργειακές απαιτήσεις των ΠΗΠ.

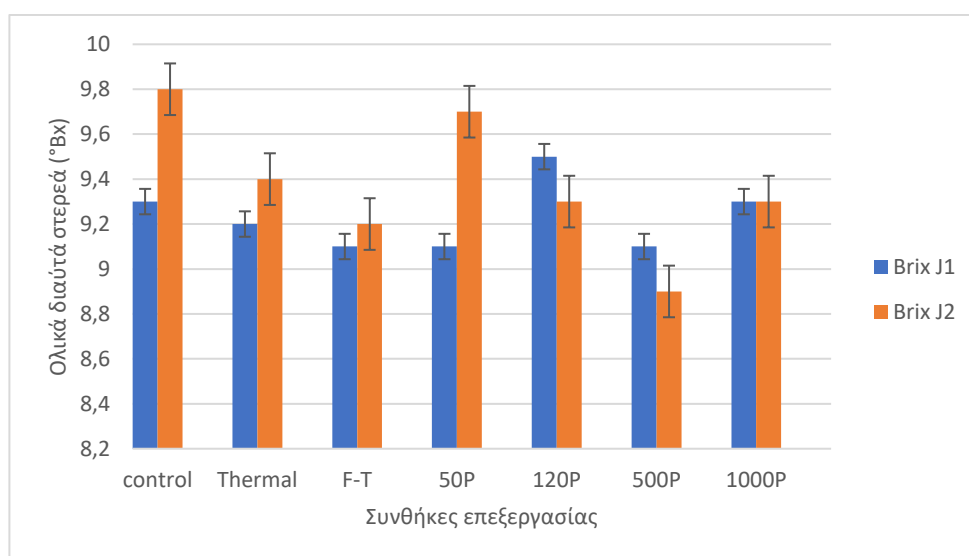
Οι αποδόσεις σε χυμό των επεξεργασμένων δειγμάτων είναι μεγαλύτερες σε σχέση με το ανεπεξέργαστο (απόδοση 65,6%). Οι αποδόσεις των επεξεργασμένων με ΠΗΠ

δειγμάτων (αποδόσεις 70,4-79,4%) είναι παρόμοιες ή και μεγαλύτερες από το θερμικά επεξεργασμένο δείγμα (απόδοση 77,8%) και από το κατεψυγμένο-αποψυγμένο δείγμα (απόδοση 77,7%). Η απόδοση στα επεξεργασμένα δείγματα είναι εμφανώς μεγαλύτερη από αυτή του ανεπεξέργαστου δείγματος λόγω της προσφοράς ενέργειας (αύξηση στην απόδοση έως και 13,8%). Όμως, μεγάλη προσφορά ενέργειας, όπως στην περίπτωση της κατάψυξης-απόψυξης και της θερμικής επεξεργασίας, δεν συνεπάγεται μεγαλύτερη απόδοση σε χυμό. Επομένως, η θερμική επεξεργασία και η κατάψυξη-απόψυξη δεν δικαιολογεί την κατά πολύ μεγαλύτερη προσφορά ενέργειας.

## **5.1.2 Ποιοτικά χαρακτηριστικά του χυμού ροδάκινου**

### **5.1.2.1 Ολικά διαλυτά στερεά στο χυμό ροδάκινου (°Bx).**

Κατά τη διαδικασία χυμοποίησης του ροδάκινου λήφθηκε χυμός κατά την πρώτη χυμοποίηση καθώς και κατά τη δεύτερη (χυμοποίηση της πούλπας) για κάθε δείγμα. Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα των ολικών διαλυτών στερεών σε βαθμούς Brix° και για τις δύο χυμοποιήσεις σε κάθε συνθήκη επεξεργασίας:



Διάγραμμα 5.5: Ολικά διαλυτά στερεά (°Bx) για τις δύο χυμοποιήσεις για ανεπεξέργαστο, επεξεργασμένο με ΠΗΠ 2,1 kV/cm, θερμικά επεξεργασμένο και κατεψυγμένο-αποψυγμένο δείγμα ροδάκινου

Παρατηρείται ότι στα δείγματα χυμού ροδάκινου η συγκέντρωση ολικών διαλυτών στερεών δεν παρουσιάζει συσχέτιση με την συνθήκη επεξεργασίας, πράγμα που συμφωνεί με τη βιβλιογραφία (Yeom et al., 2000).

Στο ανεπεξέργαστο δείγμα και στο επεξεργασμένο με ΠΗΠ δείγμα που εφαρμόστηκαν 50 παλμοί σε ηλεκτρικό πεδίο 2,1 kV/cm η συγκέντρωση των ολικών διαλυτών στερεών κατά τη δεύτερη χυμοποίηση, χυμοποίηση της πούλπας, φαίνεται να εμφανίζουν αύξηση ενώ στις υπόλοιπες συνθήκες επεξεργασίας παραμένουν ίδιοι με την πρώτη χυμοποίηση.

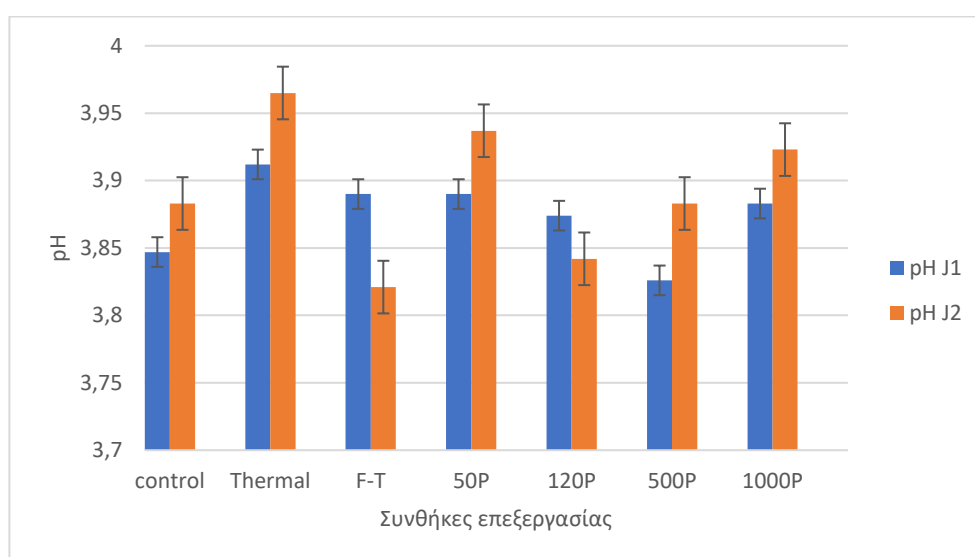
Ο χυμός ροδάκινου έχει συγκέντρωση ολικών διαλυτών στερεών από 8,9 έως 9,8 °Bx. Ο χυμός ροδάκινου έχει μελετηθεί από τους Garza et al. (1999) και έχει διαπιστωθεί



ότι η περιεκτικότητα του σε ολικά διαλυτά στερεά είναι 11° Bx, τιμή αρκετά κοντά με τις πειραματικές μετρήσεις. Η χαμηλότερη συγκέντρωση σε ολικά διαλυτά στερεά του χυμού ροδάκινου του πειράματος οφείλονται στην ποικιλία του φρούτου καθώς και στην περίοδο συγκομιδής του. Πιο ώριμα φρούτα έχουν υψηλότερη περιεκτικότητα σε ολικά διαλυτά στερεά (Karabulut et al., 2018).

### **5.1.2.2 Μέτρηση pH στο χυμό ροδάκινου**

Οι μετρήσεις για το pH πραγματοποιήθηκαν σε θερμοκρασία 25°C σε ανεπεξέργαστο, θερμικά επεξεργασμένο, επεξεργασμένο με ΠΗΠ και κατεψυγμένο-αποψυγμένο δείγμα χυμού ροδάκινου. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται οι τιμές του pH για την κάθε συνθήκη επεξεργασίας και για τις δύο χυμοποιήσεις:



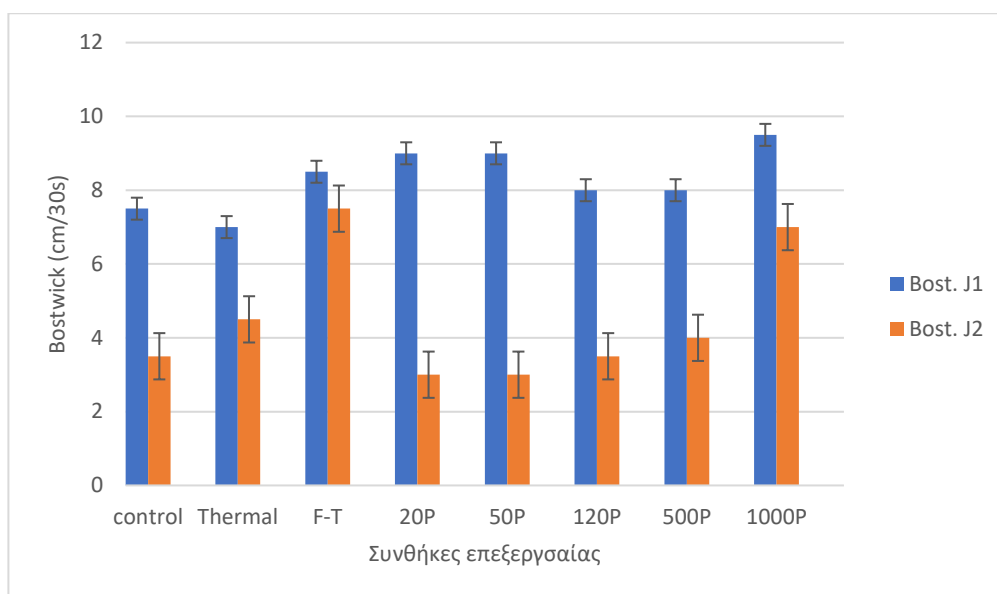
Διάγραμμα 5.6: pH για ανεπεξέργαστο, θερμικά επεξεργασμένο, επεξεργασμένο με ΠΗΠ και κατεψυγμένο-αποψυγμένο δείγμα χυμού ροδάκινου και για τις δύο χυμοποιήσεις

Παρατηρείται ότι υπάρχει μια αρκετά μικρή αύξηση στην τιμή του pH μετά από κάθε επεξεργασία ενώ είναι εμφανής μία μικρή αύξηση του pH κατά τη δεύτερη χυμοποίηση, δηλαδή κατά τη χυμοποίηση της πούλπας. Παρόλα αυτά, η μεταβολή του pH είναι αμελητέα επομένως, δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ του pH και της συνθήκης προ επεξεργασίας του ροδάκινου, συμφωνώντας με τη μελέτη των Yeom et al. (2000).

Η τιμές pH 3,85-3,96 για το χυμό ροδάκινου είναι αποδεκτές από την βιομηχανία και επαληθεύονται από τη βιβλιογραφία (Hashemi et al., 2021).

### **5.1.2.3 Συνεκτικότητα του χυμού ροδάκινου**

Η συνεκτικότητα του χυμού ροδάκινου προσδιορίστηκε με τη μέθοδο Bostwick σε θερμοκρασία χυμού 25°C. Ο θάλαμος του οργάνου πληρώθηκε με 100 ml χυμού ροδάκινου και έπειτα από 30 δευτερόλεπτα λήφθηκε μέτρηση για την απόσταση που έχει διανύσει. Μετρήσεις για τη συνεκτικότητα του χυμού έγιναν για τους χυμούς και των δύο χυμοποιήσεων για κάθε δείγμα σε κάθε συνθήκη προ επεξεργασίας όπως φαίνεται παρακάτω :



Διάγραμμα 5.7: Μετρήσεις για τη συνεκτικότητα του χυμού ροδάκινου με τη μέθοδο Bostwick (cm/30sec) για ανεπεξέργαστο, θερμικά επεξεργασμένο, επεξεργασμένο με ΠΗΠ και κατεψυγμένο-αποψυγμένο δείγμα και για τις δύο χυμοποιήσεις

Παρατηρείται ότι μετά την προ επεξεργασία με ΠΗΠ και μετά από κατάψυξη απόψυξη ο χυμός ροδάκινου είναι πιο λεπτόρρευστος σε σύγκριση με το ανεπεξέργαστο και το θερμικά επεξεργασμένο δείγμα. Επιπλέον, μετά τη δεύτερη χυμοποίηση, δηλαδή τη χυμοποίηση της πούλπας, ο χυμός είναι αρκετά παχύρρευστος, πράγμα που οφείλεται σε μικρά κομμάτια φλούδας και σάρκας που συσσωρεύονται σε αυτόν. Στο δείγμα που το ροδάκινο έχει υποστεί κατάψυξη και μετά απόψυξη, όπως και στο δείγμα που έχουν εφαρμοστεί 1000 παλμοί σε ηλεκτρικό πεδίο 2,1 kV/cm ο χυμός κατά τη δεύτερη χυμοποίηση παρουσιάζει μεγαλύτερη ρευστότητα σε σχέση με τις υπόλοιπες συνθήκες προ επεξεργασίας, πράγμα που οφείλεται στο αυξημένο μαλάκωμα της σάρκας και της φλούδας. Οι τιμές της συνεκτικότητας κατά Bostwick που παίρνει ο χυμός ροδάκινου είναι 7-9,5 cm/30sec για την πρώτη χυμοποίηση και 3-7,5 cm/30sec για τη δεύτερη χυμοποίηση. Το 70% του συνολικού χυμού προέρχεται από την πρώτη χυμοποίηση και το 30% από την δεύτερη. Επομένως, οι τιμές της συνεκτικότητας κατά Bostwick κυμαίνονται από 6,30 cm/30sec για το ανεπεξέργαστο δείγμα έως και 8,75 cm/30sec για το δείγμα που έχει επεξεργαστεί με ΠΗΠ και του έχουν εφαρμοστεί 1000 παλμοί. Οι πειραματικές τιμές της συνεκτικότητας του χυμού ροδάκινου είναι εντός των αποδεκτών ορίων, δηλαδή μικρότερες από 9 cm/30sec.

Οι αποδεκτές τιμές από τη βιομηχανία για τη συνεκτικότητα του χυμού ροδάκινου με τη μέθοδο Bostwick είναι 9-11 cm/30sec μετά την παστερίωση του (Massa et al., 2010). Η διαδικασία της παστερίωσης θα αυξήσει τη συνεκτικότητα του χυμού λόγω της θέρμανσής του.

#### **5.1.2.4 Χρώμα στο χυμό ροδάκινου**

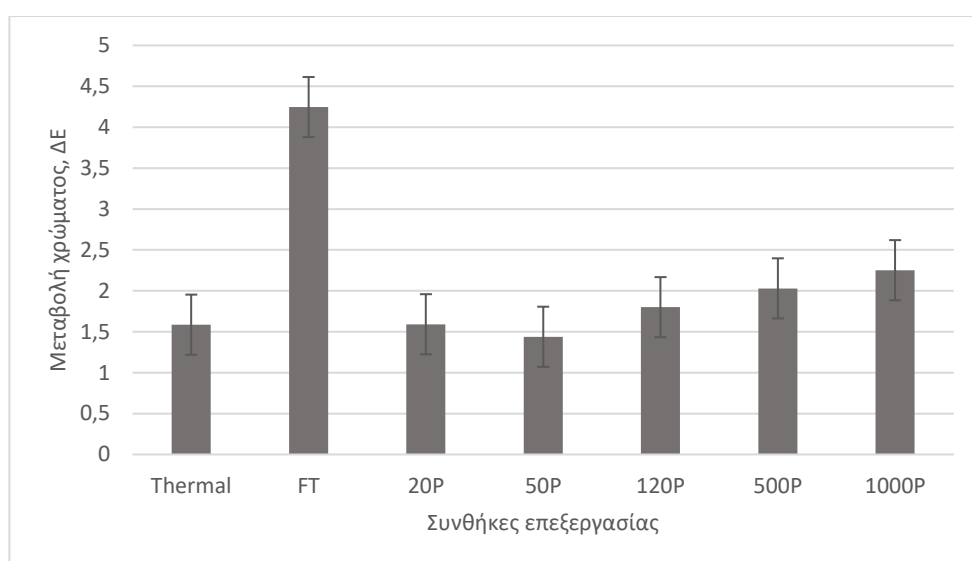
Ο χυμός ροδάκινου έχει έντονο πορτοκαλί χρώμα το οποίο χρησιμοποιείται και ως δείκτης ποιότητας του χυμού. Η φωτεινότητα του χυμού είναι ένας σημαντικός παράγοντας στην βιομηχανία διότι χαρακτηρίζει το τελικό προϊόν. Οι μετρήσεις του

χρώματος με βάση τη κλίμακα CIE Lab για το ανεπεξεργαστο δείγμα χυμού παρουσιάζονται παρακάτω:

Πίνακας 5.3: Τιμές παραμέτρων L, a, b για ανεπεξεργαστο χυμό ροδάκινου

	L	a	b
Control	27,8 ± 1,3	0,45 ± 0,04	22,4 ± 1,8

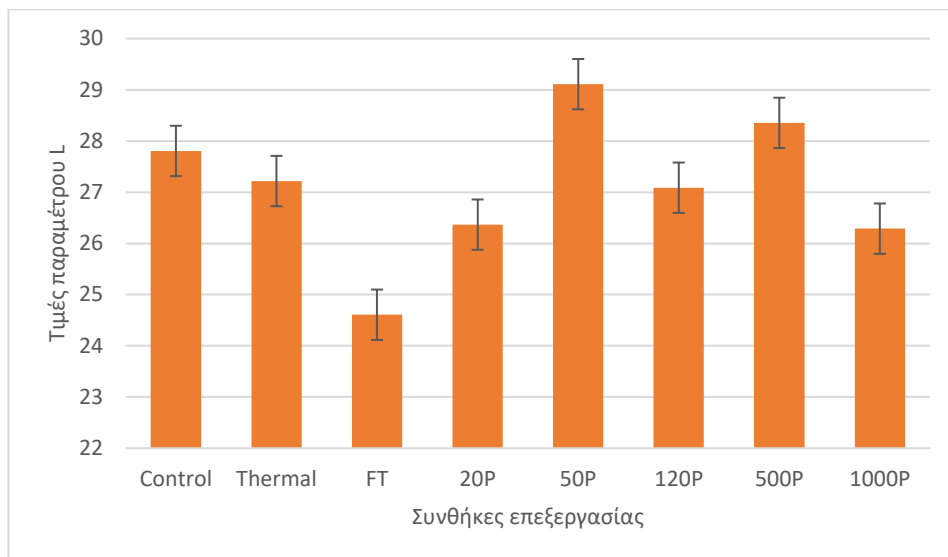
Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η συνολική μεταβολή ( $\Delta E$ ) του χρώματος για κάθε συνθήκη δηλαδή, η μεταβολή του χρώματος μετά από κάθε επεξεργασία σε σχέση με το ανεπεξεργαστο δείγμα χυμού ( $\Delta E=0$ ).



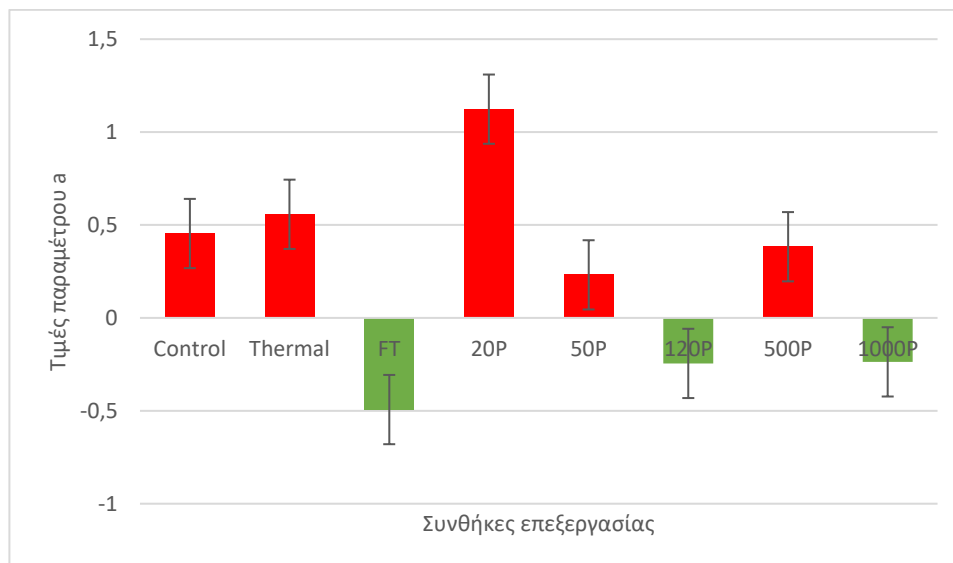
Διάγραμμα 5.8: Συνολική μεταβολή του χρώματος ( $\Delta E$ ) για θερμικά επεξεργασμένα, επεξεργασμένα με ΠΗΠ και κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα χυμού ροδάκινου σε σχέση με το ανεπεξεργαστο δείγμα

Η μεγαλύτερη μεταβολή στο χρώμα του χυμού ροδάκινου παρατηρείται μετά από κατάψυξη και απόψυξη του φρούτου. Επίσης, παρατηρείται ότι με εντονότερη επεξεργασία με ΠΗΠ, εφαρμογή υψηλότερου αριθμού παλμών, το χρώμα του χυμού μεταβάλλεται περισσότερο. Η μεταβολή του χρώματος είναι εμφανής για τιμές του  $\Delta E$  μεγαλύτερες του 2,5.

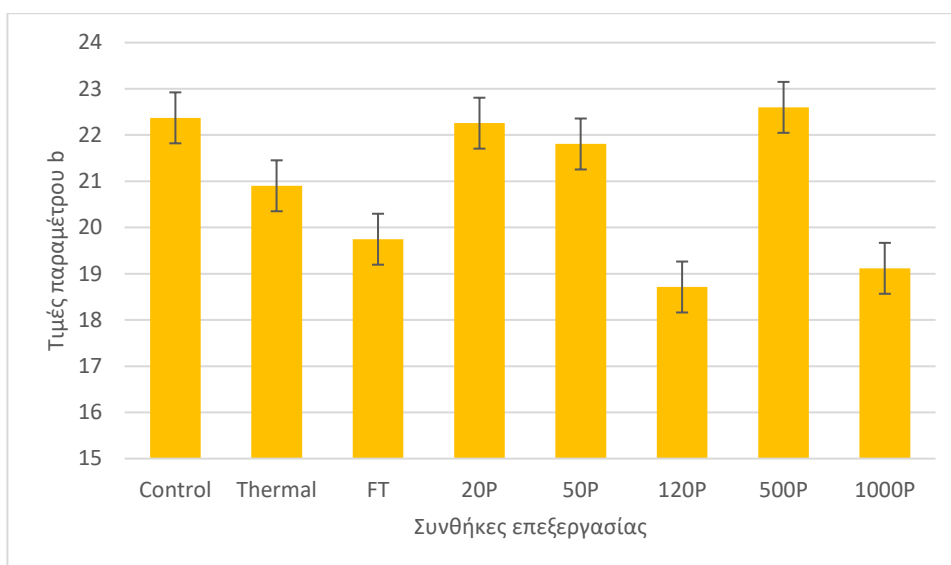
Η τιμή του  $\Delta E$  επηρεάζεται και από τις τρεις παραμέτρους L, a, b. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα για τις παραμέτρους L, a, b για κάθε συνθήκη επεξεργασίας ώστε να γίνει κατανοητό ποια παράμετρος επηρεάζει τη μεταβολή του χρώματος ανά συνθήκη.



Διάγραμμα 5.9: Παράμετρος L της κλίμακας CIELab που εκφράζει τη φωτεινότητα για χυμό ροδάκινο σε κάθε συνθήκη επεξεργασίας



Διάγραμμα 5.10: Παράμετρος a της κλίμακας CIELab που εκφράζει το κόκκινο (θετικές τιμές) ή το πράσινο χρώμα (αρνητικές τιμές) για χυμό ροδάκινο σε κάθε συνθήκη επεξεργασίας



Διάγραμμα 5.11: Παράμετρος b της κλίμακας CIELab που εκφράζει το κίτρινο χρώμα για χυμό ροδάκινο σε κάθε συνθήκη επεξεργασίας

Παρατηρείται ότι σε κάθε συνθήκη προ επεξεργασίας των φρούτων η φωτεινότητα του χυμού μειώνεται σε σύγκριση με το ανεπεξέργαστο δείγμα. Στο δείγμα χυμού μετά από κατάψυξη και απόψυξη του ροδάκινου παρατηρείται μεγάλη μείωση στη φωτεινότητα του, πράγμα που δικαιολογεί και την μεγάλη μεταβολή στο χρώμα ( $\Delta E$ ) καθώς και το σκούρο χρώμα του χυμού. Επίσης, στο ίδιο δείγμα ο δείκτης a είναι αρνητικός δηλαδή, το χρώμα του χυμού τείνει και προς το πράσινο. Αρνητικός είναι ο δείκτης a και στα δείγματα των 120 και 1000 παλμών. Αντιθέτως, μετά την εφαρμογή 20 παλμών σε δείγμα ροδάκινου, ο χυμός του εμφανίζει δείκτη a θετικό και μεγαλύτερο από το ανεπεξέργαστο δείγμα, υποδηλώνοντας χρώμα χυμού που τείνει στο κόκκινο. Οι τιμές του a είναι αρκετά μικρές και δεν επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τη μεταβολή του χρώματος ( $\Delta E$ ). Ο δείκτης b που εκφράζει το κίτρινο χρώμα φαίνεται να μην επηρεάζεται από τις συνθήκες προ επεξεργασίας.

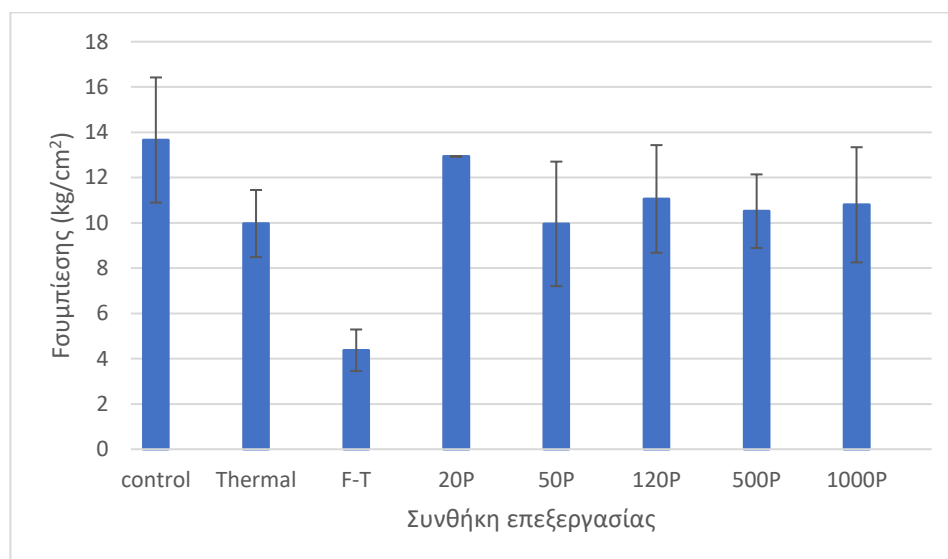
Συμπερασματικά, για τον χυμό ροδάκινο οι δείκτες της φωτεινότητας (L) και του κίτρινου χρώματος (b) επιδρούν περισσότερο στη μεταβολή του χρώματος ( $\Delta E$ ). Η κατάψυξη-απόψυξη και η εφαρμογή μεγάλου αριθμού παλμών στο φρούτο μεταβάλλουν το χρώμα του κάνοντας το χυμό να δείχνει πιο σκουρόχρωμος. Το μη ενζυμικό μαύρισμα ευνοείται από την αύξηση της θερμοκρασία κατά την θερμική επεξεργασία (Garza et al., 1999). Ενώ, κατά την εντονότερη επεξεργασία με ΠΗΠ απελευθερώνεται κυτταρικό υγρό λόγω της ηλεκτροδιάτρησης, το οποίο ευνοεί το ενζυμικό μαύρισμα (Wiktor et al., 2015). Το σκούρο χρώμα του χυμού μετά τη διεργασία της κατάψυξης-απόψυξης οφείλεται σε μηχανικές βλάβες (κρύσταλλοι πάγου και διαστολή όγκου) στον ιστό του φρούτου. Επίσης, η διεργασία αυτή μπορεί να διαλύσει τις εύθραυστες μεμβράνες της χλωροφύλλης και των καροτενοειδών, διευκολύνοντας έτσι την οξειδωτική ή ενζυματική αποικοδόμησή τους (Gallego-Castillo & Ayala-Aponte, 2018).

### 5.1.3.1 Μηχανικές ιδιότητες ροδάκινου σε διάφορες συνθήκες επεξεργασίας

Για τη μελέτη της επίδρασης των ΠΗΠ καθώς και της θερμικής επεξεργασίας και της κατάψυξης-απόψυξης σε δείγματα ροδάκινου χρησιμοποιήθηκε ο αναλυτής υφής TA-XT2i Plus Texture Analyzer (Stable Micro Systems, UK) και πραγματοποιήθηκε δοκιμή συμπίεσης του φρούτου με απόσταση συμπίεσης 15 mm. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου κατά την επεξεργασία με ΠΗΠ ήταν 2,1 kV/cm ενώ οι παλμοί που εφαρμόστηκαν ήταν 20 έως 1000 παλμοί. Για την θερμική επεξεργασία, το ροδάκινο θερμάνθηκε στους 90°C για 5 λεπτά ενώ, για την κατάψυξη-απόψυξη, καταψύχθηκε στους -20°C και αποψύχθηκε στους 25°C. Επίσης, πραγματοποιήθηκε δοκιμή συμπίεσης σε ανεπεξέργαστο δείγμα ώστε να γίνει σύγκριση των μετρήσεων.

Η μέτρηση του οργάνου δόθηκε σε kg και έγινε αναγωγή της σε kg/cm<sup>2</sup> διαιρώντας με την επιφάνεια επαφής τους στελέχους (0,28 cm<sup>2</sup>) του αναλυτή υφής.

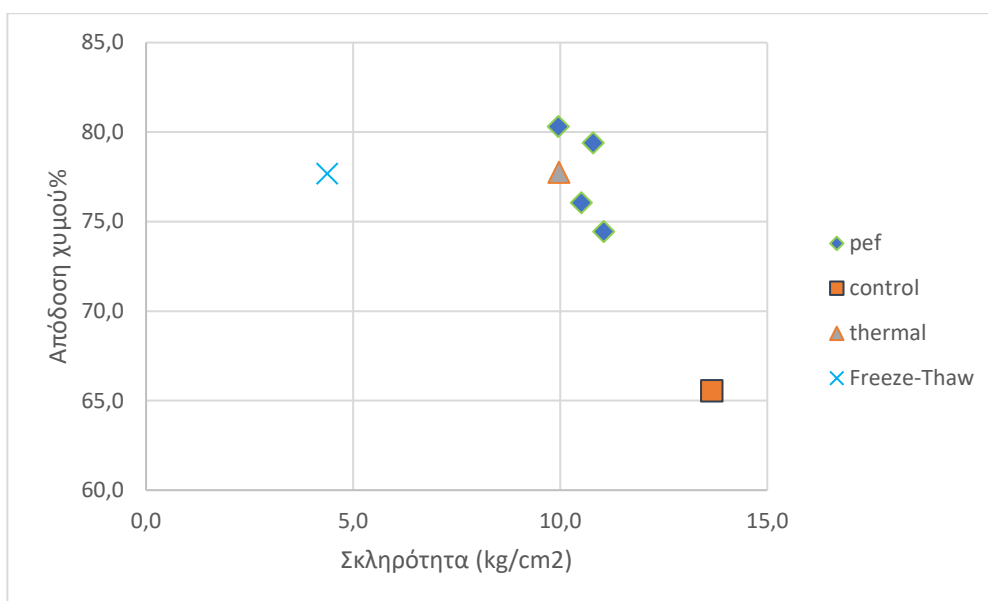
Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα της δύναμης συμπίεσης (kg/cm<sup>2</sup>) για κάθε συνθήκη επεξεργασίας σε δείγμα ροδάκινου:



Διάγραμμα 5.12: Δύναμη συμπίεσης σε kg/cm<sup>2</sup> για ανεπεξέργαστο, θερμικά επεξεργασμένο (90°C για 5 λεπτά), κατεψυγμένο-αποψυγμένο και επεξεργασμένο με ΠΗΠ δείγμα σε ένταση ηλεκτρικού πεδίου 2,1 kV/cm από 20 έως 1000 παλμούς

Στο διάγραμμα 5.12, παρατηρείται ότι μετά από κάθε επεξεργασία η δύναμη συμπίεσης μειώνεται, δηλαδή τα δείγματα μαλακώνουν, με το δείγμα μετά από κατάψυξη-απόψυξη να βλέπει την μεγαλύτερη μείωση. Έπειτα η θερμική επεξεργασία και η επεξεργασία με ΠΗΠ έχουν παρόμοιες τιμές δύναμης συμπίεσης. Το μαλάκωμα στα επεξεργασμένα φρούτα οφείλεται στην κυτταρική διάρρηξη που έχουν υποστεί από την εκάστοτε επεξεργασία. Η διεργασία της κατάψυξης απόψυξης επιτυγχάνει την μεγαλύτερη δυνατή κυτταρική διάρρηξη στον ιστό του φρούτου, έτσι έχει τη μικρότερη δύναμη συμπίεσης σε σχέση με τις άλλες επεξεργασίες που δεν καταστρέφουν ολοκληρωτικά τον φυτικό ιστό.

Το διάγραμμα που ακολουθεί, δείχνει τη συσχέτιση της σκληρότητας και της απόδοσης σε χυμό ροδάκινου:



Διάγραμμα 5.13: Απόδοση ροδάκινου σε χυμό συναρτήσει την δύναμης συμπίεσης για κάθε συνθήκη επεξεργασίας

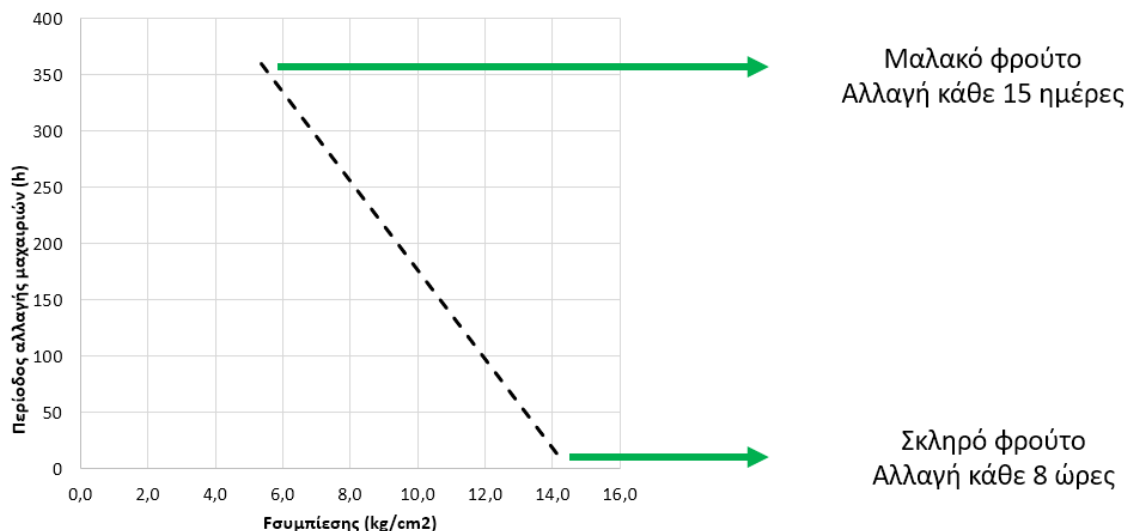
Παρατηρείται ότι η αύξηση του δείκτη κυτταρικής διάρρηξης επιφέρει μείωση στη σκληρότητα καθώς και αύξηση στην απόδοση της χυμοποίησης. Στην περίπτωση της κατάψυξης-απόψυξης ο δείκτης κυτταρικής διάρρηξης έχει τιμή 0,69 πράγμα που δικαιολογεί την χαμηλή σκληρότητα και την υψηλή απόδοση σε χυμό. Τα δείγματα που επεξεργάστηκαν με ΠΗΠ έχουν επίσης υψηλότερη απόδοση σε χυμό καθώς και μικρότερη σκληρότητα σε σύγκριση με το ανεπεξεργαστο δείγμα εξαιτίας της κυτταρικής διάρρηξης που παίρνει τιμές από 0,10 έως 0,39. Το διάγραμμα αυτό συσχετίζει τη σκληρότητα του φρούτου με την απόδοση του σε χυμό. Σε βιομηχανικό περιβάλλον, με ένα φορητό όργανο μέτρησης της σκληρότητας και χρησιμοποιώντας το παραπάνω διάγραμμα, είναι εύκολο να υπολογιστεί η αναμενόμενη απόδοση του φρούτου σε χυμό.

### **5.1.3.2 Μελέτη της συχνότητας αντικατάστασης μαχαιριών κατά την κοπή ροδάκινου στη βιομηχανία**

Συχνό πρόβλημα στην βιομηχανία αποτελεί η τακτική αντικατάσταση των μαχαιριών εξαιτίας της σκληρότητας του ροδάκινου. Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκε μελέτη η οποία συσχετίζει τη δύναμη συμπίεσης που εφαρμόζεται στο φρούτο και του χρονικού διαστήματος για αντικατάσταση των μαχαιριών.

Αρχικά, λήφθηκαν δεδομένα από μεγάλη ελληνική βιομηχανία επεξεργασίας φρούτων για την περίοδο αλλαγής των μαχαιριών. Πιο συγκεκριμένα, για μαλακά ροδάκινα πραγματοποιείται αλλαγή μαχαιριών λόγω φθοράς κάθε 15 ημέρες ενώ για σκληρά κάθε 8 ώρες κατά τη διεργασία της αποπυρήνωσης και του τεμαχισμού. Η αποπυρήνωση πραγματοποιείται στην αρχή της παραγωγικής διαδικασίας σε όλα τα προϊόντα ροδάκινου, πρόκειται για μία διαδικασία κατά την οποία το ροδάκινο κόβεται στη μέση και αφαιρείται ο πυρήνας του. Ο τεμαχισμός γίνεται κυρίως στα ροδάκινα που πρόκειται να κονσερβοποιηθούν, τεμαχίζονται είτε σε φέτες είτε σε κύβους αναλόγως τη μετέπειτα χρήση τους.

Με αυτά τα δεδομένα δημιουργήθηκε το παρακάτω διάγραμμα που συσχετίζει τη δύναμη συμπίεσης σε  $\text{kg}/\text{cm}^2$  και την περίοδο αντικατάστασης των μαχαιριών σε ώρες:



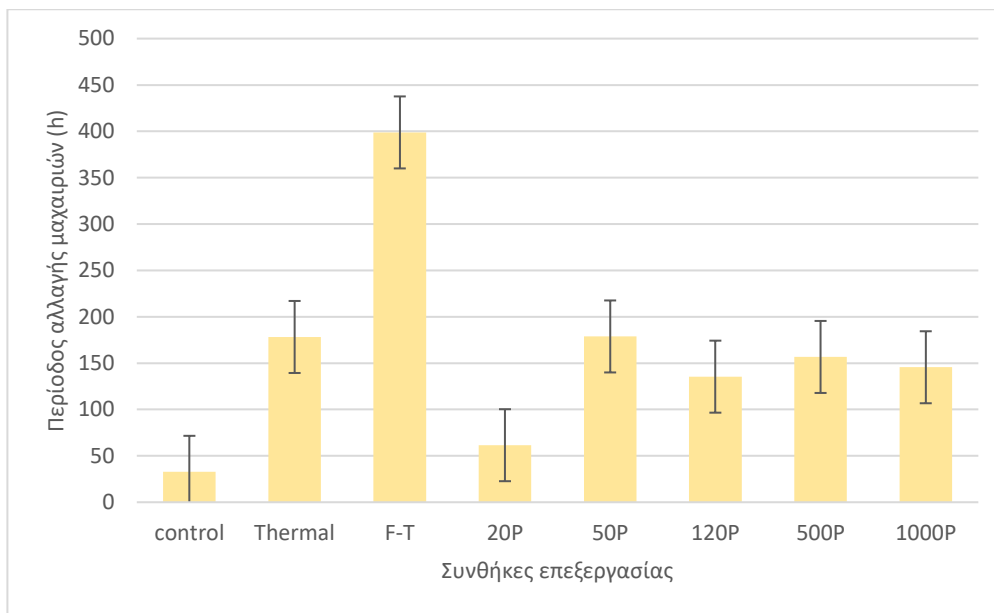
Διάγραμμα 5.14: Συσχέτιση δύναμης συμπίεσης που εφαρμόζεται σε σκληρό και μαλακό ροδάκινο και της χρονικής περιόδου για αντικατάσταση των μαχαιριών

Παρατηρείται ότι με αύξηση της δύναμης που απαιτείται για συμπίεση του ροδάκινου, μειώνεται ο χρόνος αλλαγής των μαχαιριών στη βιομηχανία. Ο ρυθμός μείωσης της χρονικής περιόδου συναρτήσεως της δύναμης συμπίεσης είναι αρκετά μεγάλος δηλαδή, η σκληρότητα του φρούτου επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το πόσο συχνά αλλάζονται τα μαχαίρια στη βιομηχανία λόγω της φθοράς τους. Η εξίσωση της γραμμής που εκφράζεται στο παραπάνω διάγραμμα είναι η εξής:

$$\text{Περίοδος αλλαγής μαχαιριών} = -33,667 * F_{\text{συμπίεσης}} + 528,67 \quad (5.3)$$

Γνωρίζοντας τη συσχέτιση της δύναμης συμπίεσης με την χρονική περίοδο αλλαγής των μαχαιριών στη βιομηχανία και τη δύναμη συμπίεσης που εφαρμόστηκε στα δείγματα μετά από κάθε επεξεργασία, προσδιορίστηκαν χρησιμοποιώντας την Εξίσωση 5.3, οι περίοδοι για αλλαγή μαχαιριών μετά από κάθε συνθήκη. Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα των περιόδων αντικατάστασης των μαχαιριών για το ανεπεξέργαστο, το θερμικά επεξεργασμένο δείγμα σε  $90^\circ\text{C}$  για 5 λεπτά, το επεξεργασμένο με ΠΗΠ δείγμα σε ηλεκτρικό πεδίο  $2,1 \text{ kV}/\text{cm}$  με εφαρμογή 20 έως 1000 παλμών και το κατεψυγμένο-αποψυγμένο δείγμα:





Διάγραμμα 5.15: Περίοδοι αλλαγής μαχαιριών στη βιομηχανία για δείγματα ροδάκινου μετά από κάθε επεξεργασία καθώς και για ανεπεξέργαστο δείγμα

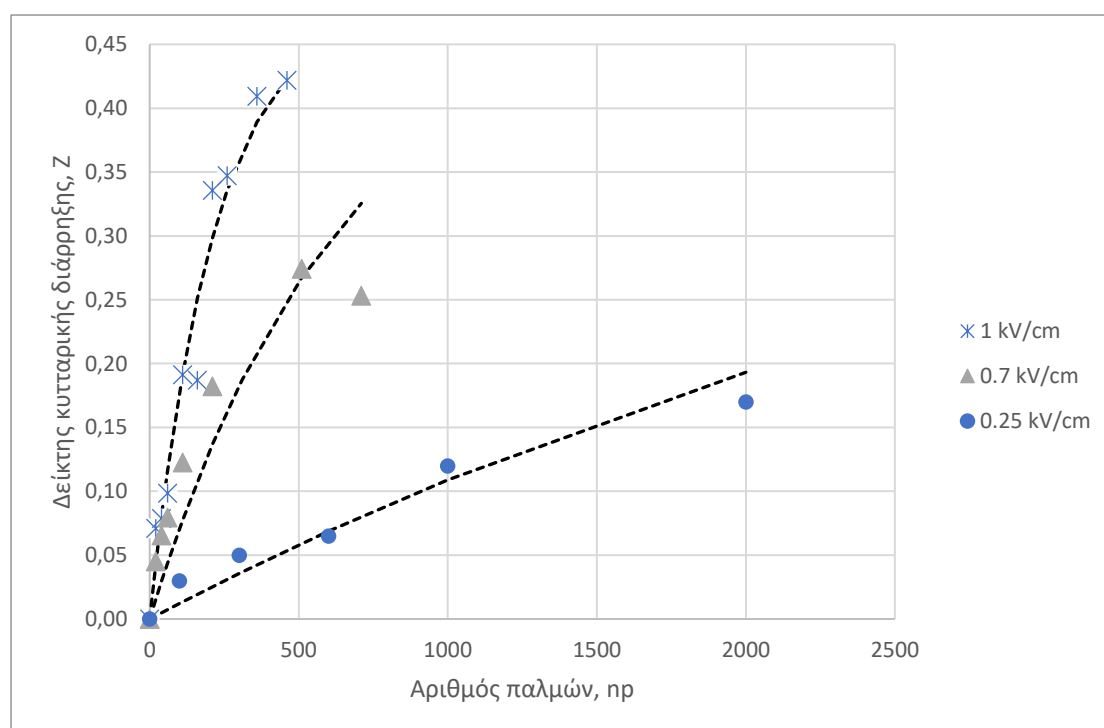
Μελετώντας το διάγραμμα παρατηρείται ότι μετά από κάθε επεξεργασία η περίοδος αλλαγής των μαχαιριών αυξάνεται, πράγμα που υποδηλώνει ότι μειώνεται η φθορά στα μαχαίρια. Πιο συγκεκριμένα, μετά την επεξεργασία με ΠΗΠ αυξάνεται κατά πολύ η περίοδος αλλαγής μαχαιριών σε σύγκριση με το ανεπεξέργαστο δείγμα, δηλαδή από 33 ώρες σε 7 ημέρες. Πιο σπάνια αλλαγή στα μαχαίρια γίνεται μετά από κατάψυξη και απόψυξη του ροδάκινου διότι το φρούτο είναι αρκετά μαλακό. Ωστόσο η διεργασία της κατάψυξης-απόψυξης είναι ενεργειακά μη συμφέρουσα και για αυτό δεν χρησιμοποιείται από τη βιομηχανία.

Συμπερασματικά, η επεξεργασία με Παλμικά Ηλεκτρικά Πεδία μειώνει τη δύναμη συμπίεσης και ταυτόχρονα αυξάνει την περίοδο αλλαγής μαχαιριών στη βιομηχανία, που αποτελεί μια χρονοβόρα και δαπανηρή διεργασία. Επίσης, η απόδοση σε χυμό αυξάνεται μετά την επεξεργασία του ροδάκινου με ΠΗΠ διότι, επιτυγχάνεται κυτταρική διάρρηξη στους ιστούς του φρούτου. Η κυτταρική διάρρηξη είναι υπεύθυνη για το μαλάκωμα που είναι επιθυμητό κατά τις διεργασίες της κοπής και της χυμοποίησης του ροδάκινου στη βιομηχανία. Επιπλέον, η επεξεργασία με ΠΗΠ στο ροδάκινο δεν έχει αρνητικές επιπτώσεις στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του χυμού του, καθώς από τις πειραματικές μετρήσεις παρατηρήθηκε, και επιβεβαιώθηκε από τη βιβλιογραφία, ότι δεν επηρεάζονται τα ολικά διαλυτά στερεά, το pH, η συνεκτικότητα και το χρώμα. Επομένως, η διεργασία των Παλμικών Ηλεκτρικών Πεδίων αποτελεί μια διεργασία που επηρεάζει άμεσα τις μηχανικές ιδιότητες του ροδάκινου χωρίς να υποβαθμίζει τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του χυμού του και μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε βιομηχανικό επίπεδο.

## 5.2 Μελέτη της επίδρασης των Παλμικών Ηλεκτρικών Πεδίων στην χυμοποίηση καρότου και στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του χυμού του

### 5.2.1.1.1 Δείκτης κυτταρικής διάρρηξης (Z) στο αλεσμένο καρότο

Ο προσδιορισμός του δείκτη κυτταρικής διάρρηξης πραγματοποιείται για την εύρεση των βέλτιστων συνθηκών επεξεργασίας. Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα του δείκτη κυτταρικής διάρρηξης (Z) σε τρία ηλεκτρικά πεδία διαφορετικής έντασης.



Διάγραμμα 5.16: Εξάρτηση του δείκτη κυτταρικής διάρρηξης συναρτήσει του αριθμού των παλμών που εφαρμόστηκαν για κάθε ένταση ηλεκτρικού πεδίου που μελετήθηκε. Οι διακεκομμένες γραμμές αντιστοιχούν στην προσαρμογή της εξίσωσης 4.1 στα πειραματικά δεδομένα

Παρατηρείται ότι σε μικρό αριθμό παλμών η τιμή του δείκτη κυτταρικής διάρρηξης έχει μεγάλη αύξηση και στα τρία ηλεκτρικά πεδία που μελετήθηκαν ενώ, σε μεγαλύτερο αριθμό παλμών η τιμή του Z έχει μικρότερη αύξηση μέχρι να φτάσει στη μέγιστη δυνατή τιμή του. Στο ηλεκτρικό πεδίο των 0,25 kV/cm ο δείκτης Z έφτασε το 0,17 μετά τη εφαρμογή 2000 παλμών, στο ηλεκτρικό πεδίο των 0,7 kV/cm ο δείκτης Z έφτασε το 0,25 μετά την εφαρμογή 710 παλμών ενώ στο ηλεκτρικό πεδίο του 1 kV/cm ο δείκτης Z έφτασε το 0,42 μετά την εφαρμογή 460 παλμών, επομένως η κυτταρική διάρρηξη αυξάνεται όσο αυξάνεται και ο αριθμός των παλμών μέχρι να φτάσει στη μέγιστη τιμή της. Τα υψηλότερα ηλεκτρικά πεδία φτάνουν σε μεγαλύτερα ποσοστά κυτταρικής διάρρηξης σε σύγκριση με τα χαμηλότερα. Η κυτταρική διάρρηξη που υφίσταται ο κυτταρικός ιστός του αλεσμένου καρότου οφείλεται στην ηλεκτροδιάτρηση που υπέστη από την επεξεργασία με Παλμικά Ηλεκτρικά Πεδία. Η ηλεκτροδιάτρηση γίνεται εντονότερη όσο αυξάνεται η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και ο αριθμός των παλμών που εφαρμόζεται, δηλαδή όσο αυξάνεται η

προσφερόμενη ενέργεια. Για το λόγο αυτό η επεξεργασία σε υψηλότερα ηλεκτρικά πεδία με εφαρμογή μεγάλου αριθμού παλμών επιτυγχάνει μεγαλύτερες τιμές του δείκτη Z.

Η εξάρτηση του δείκτη κυτταρικής διάρρηξης από τον χρόνο επεξεργασίας με ΠΗΠ περιγράφηκε μαθηματικά με προσαρμογή των πειραματικών δεδομένων από την Εξίσωση 4.1.

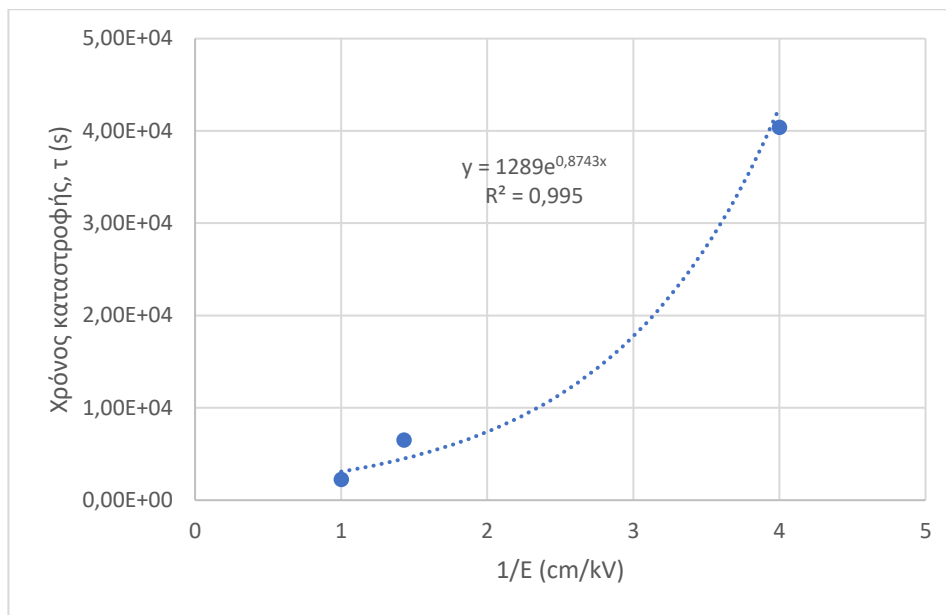
Οι τιμές των παραμέτρων  $Z_{max}$  και  $\tau$  προσδιορίστηκαν με μη γραμμική παλινδρόμηση και παρουσιάζονται παρακάτω:

Πίνακας 5.4: Τιμές των παραμέτρων  $Z_{max}$  και  $\tau$

E (kV/cm)	$Z_{max}$	$\tau$ ( $\mu$ s)	$R^2$
0,25	0,48	40377,9	0,943
0,7	0,48	6512,2	0,912
1	0,48	2248,9	0,972
<b>A(kV/cm)</b>	0,8743		
<b><math>\tau_{\infty}</math> (<math>\mu</math>s)</b>	1289		0,995

Από τους συντελεστές συσχέτισης των προσαρμογών, στα πειραματικά δεδομένα ( $R^2 > 0,9$ ) παρατηρήθηκε ότι οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν περιγράφουν πολύ ικανοποιητικά τα πειραματικά δεδομένα. Η τιμή του  $\tau$  μειώνεται με την αύξηση του ηλεκτρικού πεδίου, αυτό συμβαίνει διότι σε υψηλότερα ηλεκτρικά πεδία ο χρόνος που απαιτείται για να φτάσει η τιμή του Z το 50% της τιμής του  $Z_{max}$  είναι μικρότερος. Δηλαδή επιτυγχάνεται γρηγορότερα η καταστροφή του κυτταρικού ιστού.

Η εξάρτηση του χαρακτηριστικού χρόνου καταστροφής από την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά από την Εξίσωση 4.2. Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα του χρόνου καταστροφής  $\tau$  συναρτήσει του ηλεκτρικού πεδίου.



Διάγραμμα 5.17: Συσχέτιση του ηλεκτρικού πεδίου που εφαρμόζεται κατά την επεξεργασία με ΠΗΠ και του χρόνου ημικαταστροφής

Παρατηρείται ότι σε υψηλό ηλεκτρικό πεδίο το  $\tau$  είναι μικρότερο, δηλαδή σε υψηλότερα πεδία ο χρόνος για επίτευξη κυτταρικής διάρρηξης 50% είναι μικρότερος. Ο χαρακτηριστικός χρόνος καταστροφής  $\tau$  στο ηλεκτρικό πεδίο των 0,7 kV/cm είναι περίπου 3 φορές μεγαλύτερος από αυτόν του πεδίου 1 kV/cm ενώ, του ηλεκτρικού πεδίου 0,25 kV/cm είναι 18 φορές μεγαλύτερος. Το A είναι της τάξης των μερικών kV/cm, χαρακτηριστικό των φυτικών κυττάρων λόγω του μεγέθους τους, δηλαδή σε μεγαλύτερα κύτταρα η ηλεκτροδιάτρηση είναι ευκολότερη (El Zakhem et al., 2006). Το  $\tau_{\infty}$  μας δείχνει τον ελάχιστο χαρακτηριστικό χρόνο καταστροφής που μπορεί να επιτευχθεί σε μέγιστη ένταση ηλεκτρικού πεδίου και είναι της τάξης των μs.

#### **5.2.1.1.2 Δείκτης κυτταρικής διάρρηξης και ενεργειακές απαιτήσεις για το αλεσμένο καρότο**

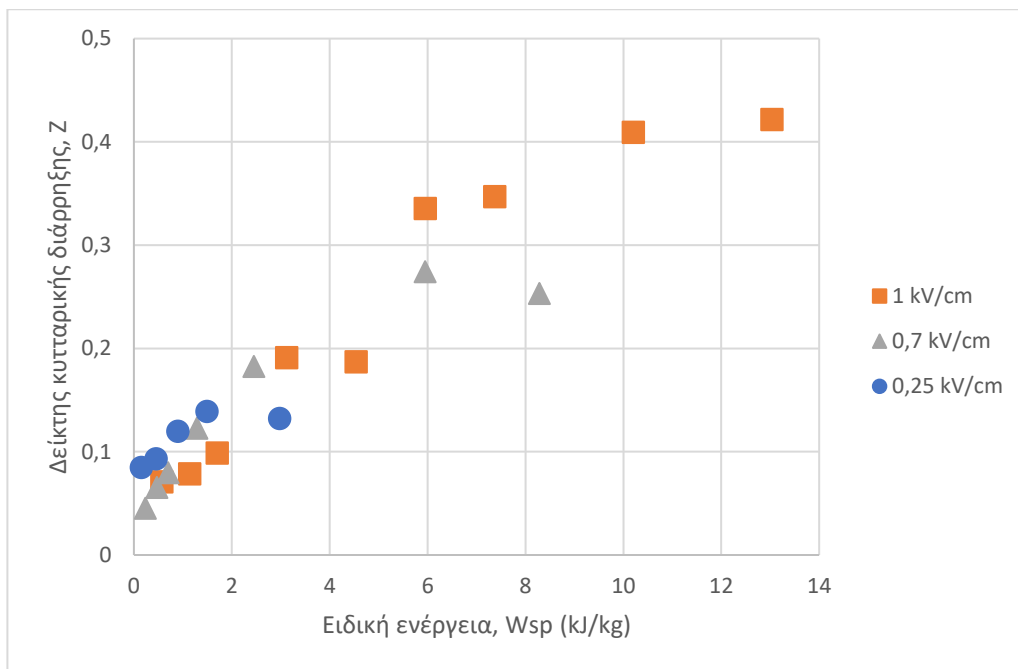
Η ειδική ενέργεια που απαιτείται για την κυτταρική διάρρηξη υπολογίζεται ως εξής:

$$W_{sp} = \frac{E_p * n_p}{0,300 * 1000} \quad (5.4)$$

όπου, μονάδα μέτρησης της ειδικής ενέργειας: kJ/kg

Το  $E_p$  είναι η ένδειξη της ειδικής ενέργειας ανά παλμό όπως αυτή εμφανίζεται από το όργανο για κάθε ηλεκτρικό πεδίο,  $n_p$  είναι ο αριθμός των παλμών που εφαρμόζονται στο δείγμα, το 0,300 οφείλεται στην συνολική μάζα του αλεσμένου καρότου που περιέχεται στον θάλαμο επεξεργασίας ενώ η διαίρεση με το 1000 είναι για αναγωγή των μονάδων σε kJ/kg.

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα απαιτήσεων ενέργειας για την κυτταρική διάρρηξη σε κάθε ηλεκτρικό πεδίο.



Διάγραμμα 5.18: Ειδική ενέργεια (kJ/kg) που απαιτείται για την κυτταρική διάρρηξη σε δείγμα αλεσμένου καρότου σε ηλεκτρικά πεδία 0,25 kV/cm, 0,7 kV/cm και 1 kV/cm

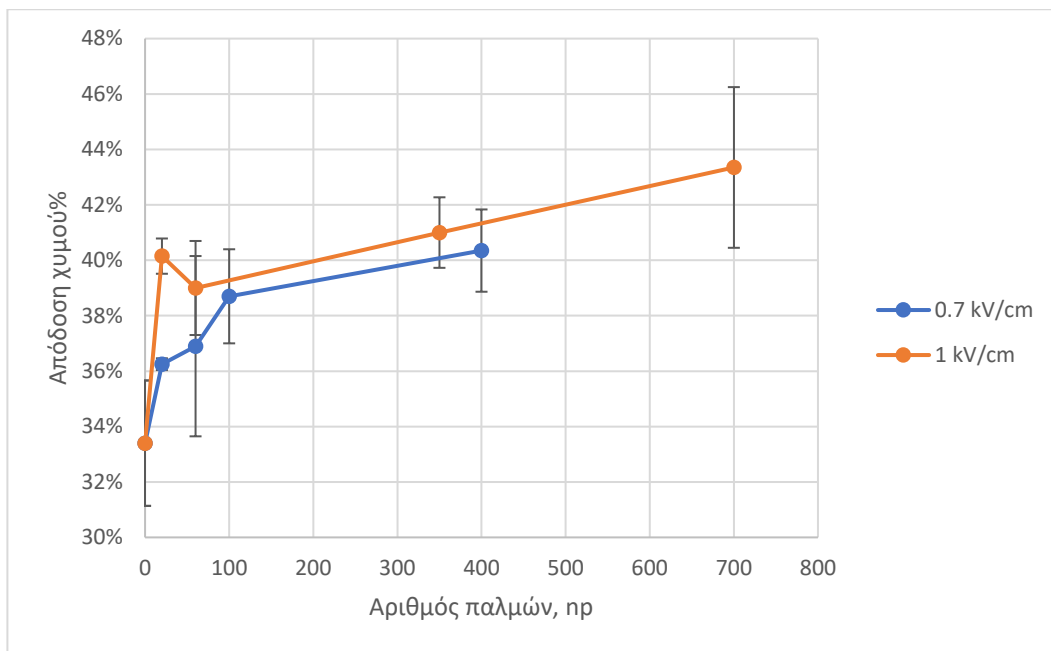
Παρατηρείται ότι με αύξηση της προσφερόμενης ενέργειας ο δείκτης κυτταρικής διάρρηξης αυξάνεται έως ότου φτάσει τη μέγιστη τιμή του.

Στα υψηλότερα ηλεκτρικά πεδία οι ενεργειακές απαιτήσεις είναι μεγαλύτερες, όμως ο δείκτης κυτταρικής διάρρηξης Z μπορεί να φτάσει σε μεγαλύτερες τιμές ( $Z=0,42$ ).

Μέχρι τα 10 kJ/kg το μεγαλύτερο ποσοστό κυτταρικής διάρρηξης έχει επιτευχθεί ( $Z=0,41$ ).

#### **5.2.1.2.1 Μελέτη της απόδοσης χυμοποίησης καρότου σε διάφορες συνθήκες επεξεργασίας**

Για την μελέτη της απόδοσης σε χυμό χρησιμοποιήθηκαν ανεπεξέργαστα, επεξεργασμένα με ΠΗΠ καρότα σε ηλεκτρικά πεδία 0,7 kV/cm και 1 kV/cm, εύρος παλμού 15  $\mu$ s και συχνότητα 20 Hz αφού αλέστηκαν. Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα για απόδοση χυμού:

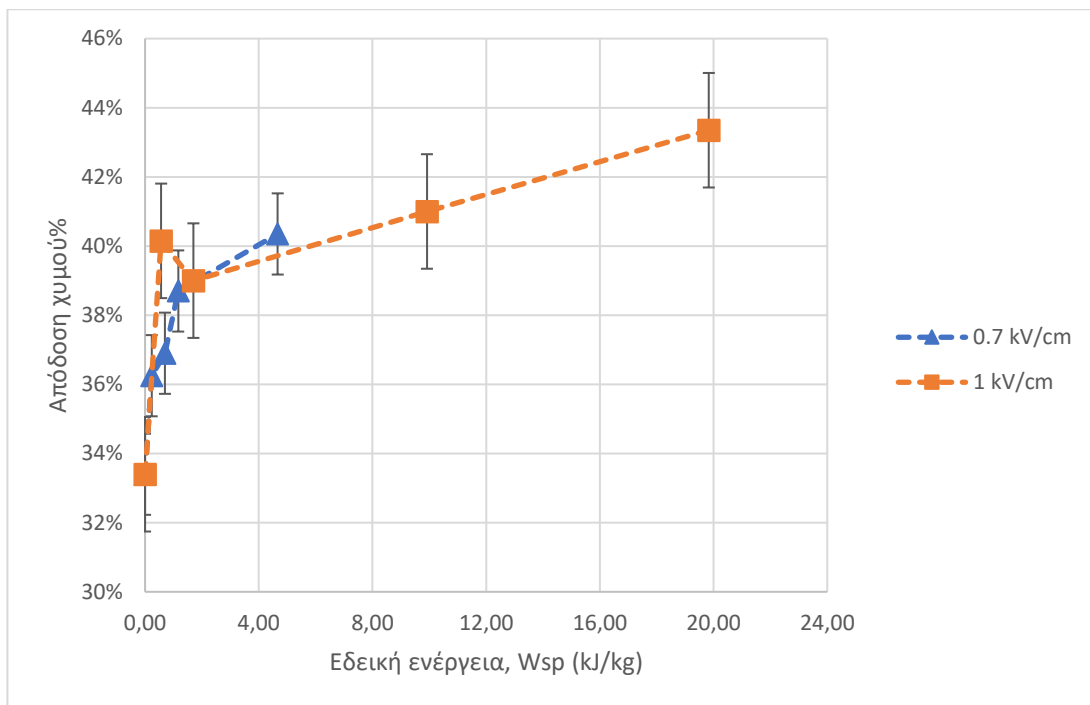


Διάγραμμα 5.19: Απόδοση σε χυμό καρότο συναρτήσει του αριθμού των παλμών για ηλεκτρικά πεδία 0,7 kV/cm και 1 kV/cm

Παρατηρείται σημαντική αύξηση της απόδοσης σε χυμό καρότου με την αύξηση του αριθμού των παλμών που εφαρμόστηκαν στα δείγματα που επεξεργάστηκαν με ΠΗΠ (έως 43% απόδοση) σε σύγκριση με το ανεπεξέργαστο δείγμα (33% απόδοση). Η πιο εντατική επεξεργασία σε ηλεκτρικό πεδίο 1 kV/cm επιφέρει υψηλότερα ποσοστά απόδοσης σε χυμό στον ίδιο αριθμό παλμών σε σύγκριση με το πεδίο των 0,7 kV/cm. Αυτό οφείλεται στο μεγαλύτερο ποσοστό κυτταρικής διάρρηξης που επιτυγχάνει το ηλεκτρικό πεδίο του 1 kV/cm σε σχέση με το πεδίο των 0,7 kV/cm. Όσο περισσότερο διαρρηγμένος είναι ο κυτταρικός ιστός, τόσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα του χυμού που παραλαμβάνεται, σύμφωνα και με τη μελέτη των Schilling et al. (2007) για επεξεργασία με ΠΗΠ σε πολτό μήλου. Η απόδοση σταματάει να αυξάνεται με περαιτέρω επεξεργασία εφόσον και η κυτταρική διάρρηξη του φυτικού ιστού σταματάει όταν φτάσει στη μέγιστη τιμή της. Βιομηχανικά η απόδοση του χυμού καρότου φτάνει έως και 80% (Di Giacomo & Taglieri, 2009).

#### **5.2.1.2.2 Μελέτη της προσφερόμενης ενέργειας ανά ηλεκτρικό πεδίο και απόδοση χυμοποίησης**

Η απαιτούμενη ενέργεια για την επεξεργασία αλεσμένου καρότου με Παλμικά Ηλεκτρικά Πεδία μελετήθηκε στο Κεφάλαιο 3.2.3.5. Χρησιμοποιήθηκε η Εξίσωση 5.4 για τον προσδιορισμό της ειδικής ενέργειας για κάθε ηλεκτρικό πεδίο. Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα της ειδικής ενέργειας και της απόδοσης σε χυμό για τα δύο ηλεκτρικά πεδία.



Διάγραμμα 5.20: Απόδοση χυμοποίησης καρότου συναρτήσει της ειδικής ενέργειας για ηλεκτρικά πεδία 0,7 kV/cm και 1 kV/cm

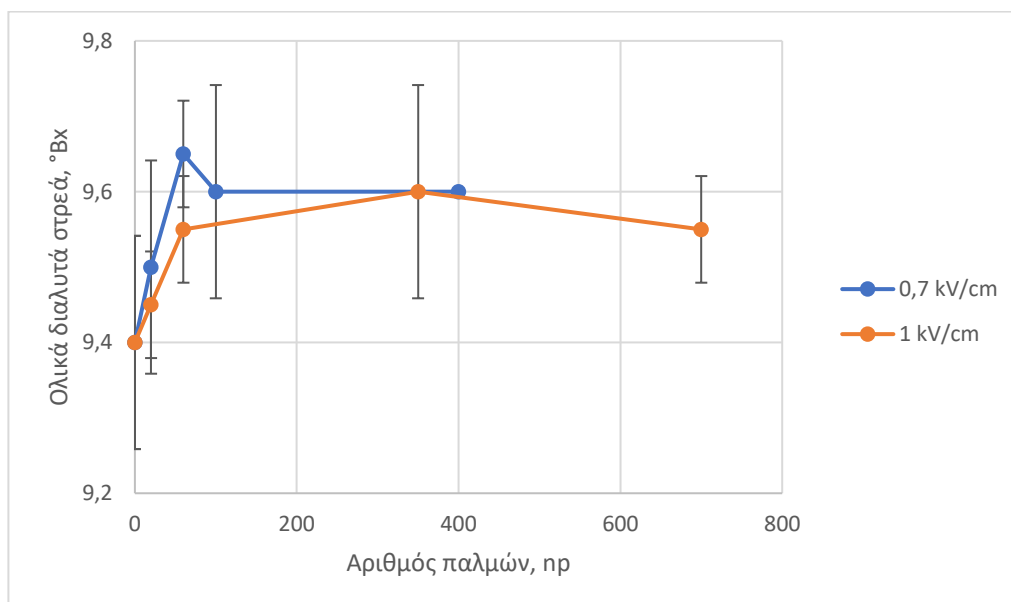
Μελετώντας το διάγραμμα, παρατηρείται αύξηση της απόδοσης σε χυμό με την αύξηση της προσφερόμενης ενέργειας λόγω της κυτταρικής διάρρηξης που υφίσταται ο ιστός του φρούτου. Πιο συγκεκριμένα, η απόδοση στο ανεπεξέργαστο δείγμα είναι 33% ενώ σε ηλεκτρικό πεδίο 1 kV/cm μετά την εφαρμογή 700 παλμών, η ενέργεια που προσφέρθηκε ήταν 20 kJ/kg και η απόδοση έφτασε το 43%. Στο ηλεκτρικό πεδίο των 0,7 kV/cm η ειδική ενέργεια που προσφέρθηκε ήταν από 1 kJ/kg έως 5 kJ/kg και η απόδοση έφτασε το 40%. Μετά τα 5 kJ/kg χρειάζεται μεγάλη προσφορά ενέργειας για μικρή αύξηση της απόδοσης σε χυμό, δηλαδή χρειάζονται επιπλέον 15 kJ/kg για 3% αύξηση της απόδοσης. Συμπερασματικά, όπως φαίνεται και από το διάγραμμα με προσφορά ενέργειας της τάξης των 1-2 kJ/kg υπάρχει σημαντική αύξηση στην απόδοση σε χυμό καρότου καθώς δεν χρειάζονται μεγάλα ποσά ενέργειας για να πραγματοποιηθεί η κυτταρική διάρρηξη του φυτικού ιστού. Αντιθέτως, η συμβατική θερμική επεξεργασία του καρότου στους 80°C που εφαρμόζεται από τη βιομηχανία απαιτεί 211,5 kJ/kg ενέργειας, ποσό σημαντικά υψηλότερο.

### **5.2.3 Ποιοτικά χαρακτηριστικά για το χυμό καρότου**

Μετρήθηκαν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά για το χυμό ανεπεξέργαστου καρότου καθώς και χυμό επεξεργασμένου με ΠΗΠ καρότου αφού είχε αλεστεί πριν την επεξεργασία του. Η επεξεργασία με Παλμικά Ηλεκτρικά Πεδία πραγματοποιήθηκε σε ηλεκτρικά πεδία 0,7 kV/cm και 1 kV/cm στα οποία εφαρμόστηκαν 20-400 και 20-700 παλμοί αντίστοιχα.

### **5.2.3.1 Προσδιορισμός ολικών διαλυτών στερεών στο χυμό καρότου**

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα των ολικών διαλυτών στερεών σε °Bx για το χυμό καρότου στα δύο ηλεκτρικά πεδία που εφαρμόστηκαν:



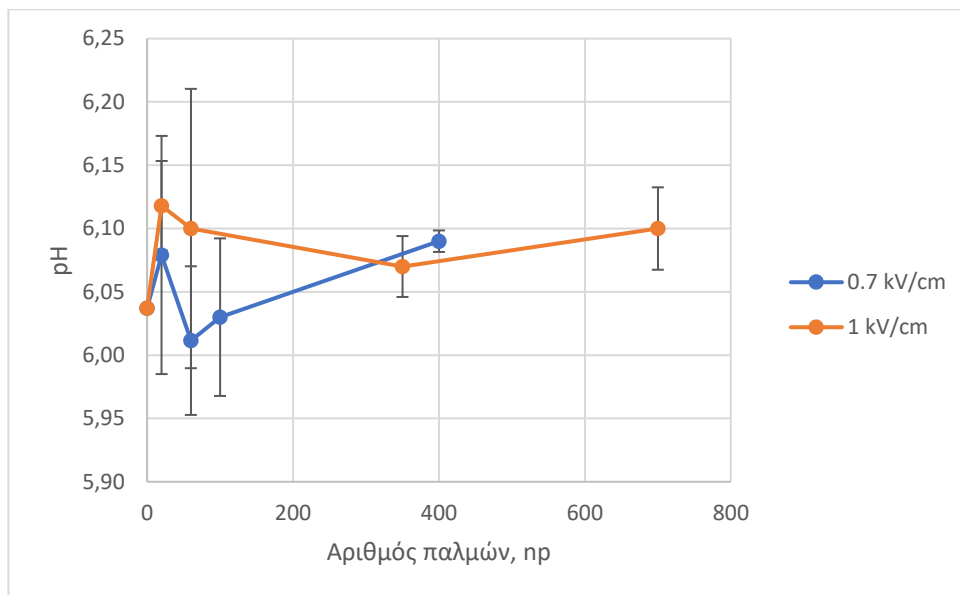
Διάγραμμα 5.21: Ολικά διαλυτά στερεά (°Bx) για χυμό καρότου συναρτήσει του αριθμού των παλμών που εφαρμόστηκαν για ανεπεξέργαστο και επεξεργασμένο με ΠΗΠ δείγμα σε ηλεκτρικά πεδία 0,7 kV/cm και 1 kV/cm

Παρατηρείται ότι τα ολικά διαλυτά στερεά (°Bx) στο χυμό αυξάνονται σε μικρό βαθμό (αύξηση 2,5%) σε σύγκριση με το ανεπεξέργαστο δείγμα. Η μικρή αύξηση στα ολικά διαλυτά στερεά του χυμού μετά την επεξεργασία των καρότων με ΠΗΠ πιθανώς να οφείλεται στην εκχύλιση υδατοδιαλυτών ουσιών όπως τα σάκχαρα. Στα δύο ηλεκτρικά πεδία 0,7 kV/cm και 1 kV/cm δεν παρατηρείται σημαντική διαφορά στα ολικά διαλυτά στερεά. Επίσης, ο αριθμός των παλμών που εφαρμόστηκαν φαίνεται να αυξάνει σε μικρό βαθμό τα ολικά διαλυτά στερεά του χυμού μετά την εφαρμογή μικρού αριθμού παλμών (20-100 παλμοί) ενώ έπειτα με περαιτέρω εφαρμογή παλμών η συγκέντρωση των ολικών διαλυτών στερεών δεν μεταβάλλεται. Τα ολικά διαλυτά στερεά (°Bx) για το χυμό καρότου κυμαίνονται από 9,40 έως 9,65. Κατά τη μελέτη τους σε χυμό καρότου οι Akin & Evrendilek (2009) κατέληξαν σε παρόμοιες τιμές για τη συγκέντρωση των ολικών διαλυτών στερεών.

### **5.2.3.2 Μέτρηση pH στο χυμό καρότου**

Οι μετρήσεις pH για το χυμό καρότου πραγματοποιήθηκαν στους 25°C σε ανεπεξέργαστο και σε επεξεργασμένα με ΠΗΠ δείγματα σε ηλεκτρικά πεδία 0,7 kV/cm και 1 kV/cm. Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα του pH για τα δείγματα χυμού καρότου:





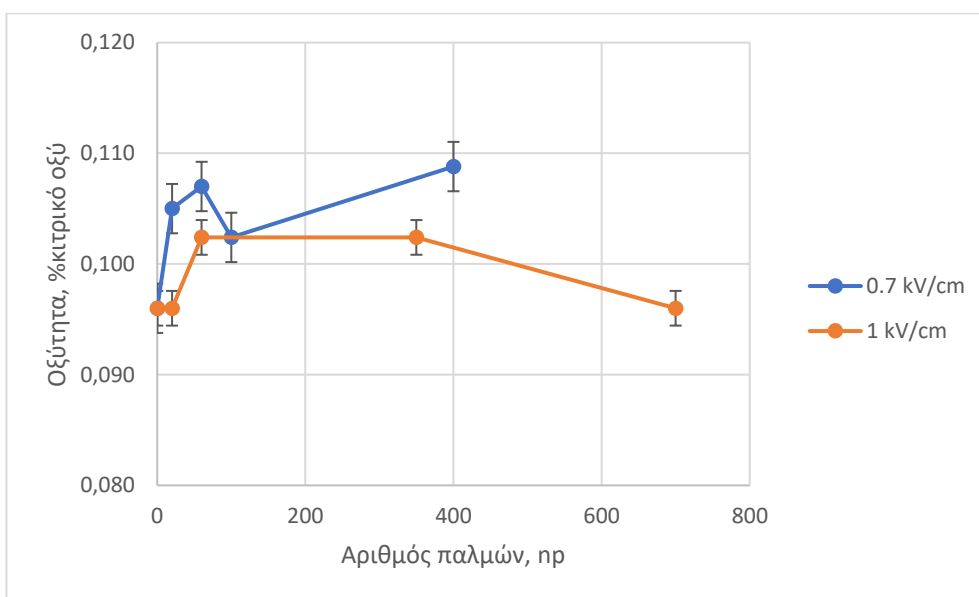
Διάγραμμα 5.22: pH για χυμό καρότου συναρτήσει του αριθμού των παλμών που εφαρμόστηκαν για ανεπεξέργαστο και επεξεργασμένο με ΠΗΠ δείγμα σε ηλεκτρικά πεδία 0,7 kV/cm και 1 kV/cm

Μελετώντας το διάγραμμα, παρατηρείται ότι δεν υπάρχει συσχέτιση του pH μεταξύ του ανεπεξέργαστου και του επεξεργασμένου με ΠΗΠ δείγματος. Επίσης, δεν υπάρχει συσχέτιση του pH και του ηλεκτρικού πεδίου που πραγματοποιήθηκε η επεξεργασία των ΠΗΠ όπως και του αριθμού των παλμών που εφαρμόστηκαν. Συμπεραίνουμε, ότι η επεξεργασία με ΠΗΠ σε οποιαδήποτε συνθήκη δεν επηρεάζει το pH στο χυμό καρότου, πράγμα που επιβεβαιώνεται και από τη βιβλιογραφία (Akin & Evrendilek, 2009). Το pH στο χυμό καρότου κυμαίνεται από 6,01 έως 6,12.

### **5.2.3.3 Οξύτητα στο χυμό καρότου**

Πραγματοποιήθηκε προσδιορισμός οξύτητας σε ανεπεξέργαστο και επεξεργασμένα με ΠΗΠ δείγματα χυμού καρότου σε ηλεκτρικά πεδία 0,7 kV/cm και 1 kV/cm.

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα της οξύτητας του χυμού καρότου συναρτήσει του αριθμού των παλμών που εφαρμόστηκαν για τα δύο ηλεκτρικά πεδία καθώς και για ανεπεξέργαστο δείγμα:



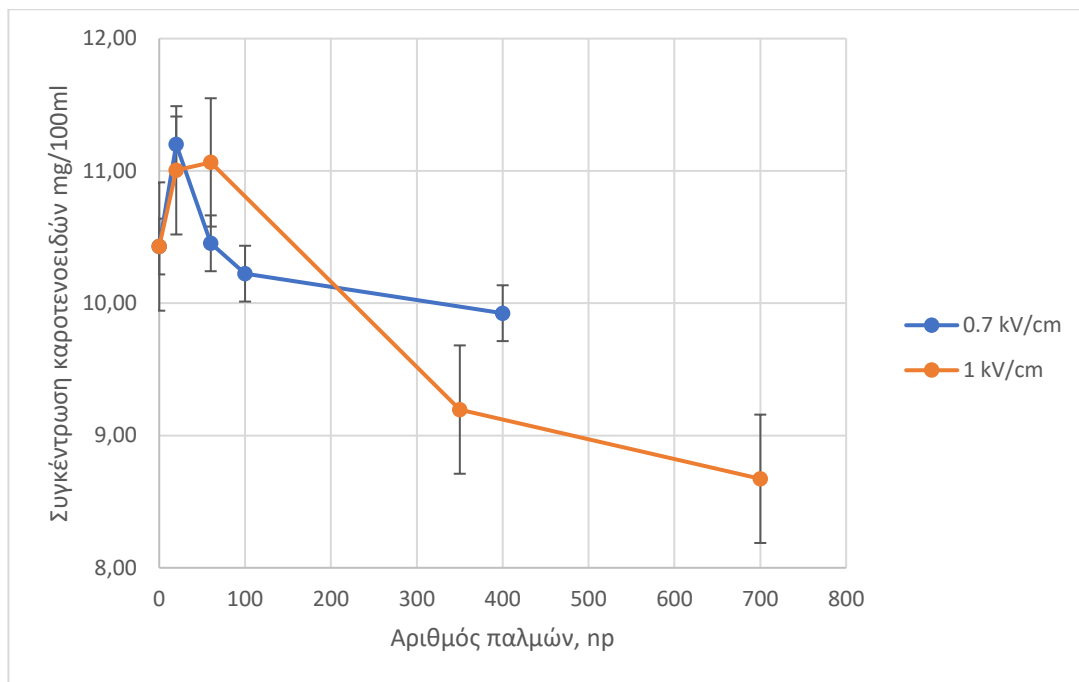
Διάγραμμα 5.23: Ποσοστό τιτλοδοτούμενης οξύτητας (%κίτρικό οξύ) σε χυμό καρότου συναρτήσει του αριθμού των παλμών για επεξεργασμένο με ΠΗΠ δείγμα σε ηλεκτρικά πεδία 0,7 kV/cm και 1 kV/cm και για ανεπεξέργαστο δείγμα

Παρατηρείται ότι υπάρχει μικρή αύξηση (έως και 13%) της οξύτητας στο χυμό από επεξεργασμένα με ΠΗΠ καρότα σε σύγκριση με το χυμό από ανεπεξέργαστα. Πιθανότατα η αύξηση αυτή να οφείλεται στην κυτταρική διάρρηξη που υφίσταται ο κυτταρικός ιστός, προκαλώντας απελευθέρωση ενδοκυτταρικών υγρών. Επίσης, δεν υπάρχει συσχέτιση της οξύτητας και του ηλεκτρικού πεδίου που πραγματοποιήθηκε η επεξεργασία των ΠΗΠ όπως και του αριθμού των παλμών που εφαρμόστηκαν. Η οξύτητα για χυμό καρότου κυμαίνεται από 0,096% έως 0,109%. Στη μελέτη τους σε χυμό καρότου οι Akin & Evrendilek (2009) παρατήρησαν παρόμοιες τιμές οξύτητας.

#### **5.2.3.4 Προσδιορισμός καρτενοειδών στο χυμό καρότου**

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας σε καρτενοειδή στο χυμό καρότου σε ανεπεξέργαστα και επεξεργασμένα με ΠΗΠ δείγματα σε ηλεκτρικά πεδία 0,7 kV/cm και 1 kV/cm.

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα συγκέντρωσης καρτενοειδών συναρτήσει του αριθμού των παλμών για ανεπεξέργαστο και επεξεργασμένο με ΠΗΠ δείγμα χυμού καρότου:



Διάγραμμα 5.24: Συγκέντρωση καροτενοειδών (mg/100 ml) σε χυμό καρότου συναρτήσει του αριθμού των παλμών για επεξεργασμένο με ΠΗΠ δείγμα σε ηλεκτρικά πεδία 0,7 kV/cm και 1 kV/cm και για ανεπεξέργαστο δείγμα

Στο διάγραμμα παρατηρείται μείωση της συγκέντρωσης σε καροτενοειδή μετά την επεξεργασία με ΠΗΠ σε σύγκριση με το ανεπεξέργαστο δείγμα. Πιθανότατα η μείωση οφείλεται σε οξείδωση λόγω της ηλεκτροδιάτρησης. Κατά την επεξεργασία με ΠΗΠ ένζυμα όπως η λιποξυγενάση είναι πιθανό να καταλύουν την οξειδωτική απεικονοδότηση των καροτενοειδών (Roohinejad et al., 2014). Επιπλέον η επεξεργασία ΠΗΠ σε υψηλότερο ηλεκτρικό πεδίο επιφέρει μεγαλύτερη μείωση της συγκέντρωσης καροτενοειδών σε σχέση με το χαμηλότερο ηλεκτρικό πεδίο. Επίσης, η αύξηση του αριθμού των παλμών που εφαρμόζονται έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της συγκέντρωσης των καροτενοειδών στο χυμό καρότου. Κατά τη διάρκεια της χυμοποίησης παρατηρήθηκε ότι ο χυμός με την πάροδο του χρόνου προκρίπτει πιο διαυγής. Αυτό συμβαίνει καθώς τα ΠΗΠ προκαλούν κυτταρική διάρρηξη η οποία οδηγεί στην εξαγωγή υδατοδιαλυτών μορίων, καθώς τα καροτενοειδή είναι μη πολικά μόρια, πιθανώς δεν συμπαρασύρονται κατά τη χυμοποίηση του δείγματος. Η συγκέντρωση σε καροτενοειδή στο χυμό καρότου κυμαίνεται από 8,67 mg/100 ml χυμού έως 11,20 mg/100 ml χυμού. Η μείωση της συγκέντρωσης των καροτενοειδών μετά την επεξεργασία με ΠΗΠ ήταν έως και 15%, τιμές που επιβεβαιώνονται και βιβλιογραφικά (Xiang et al., 2014).

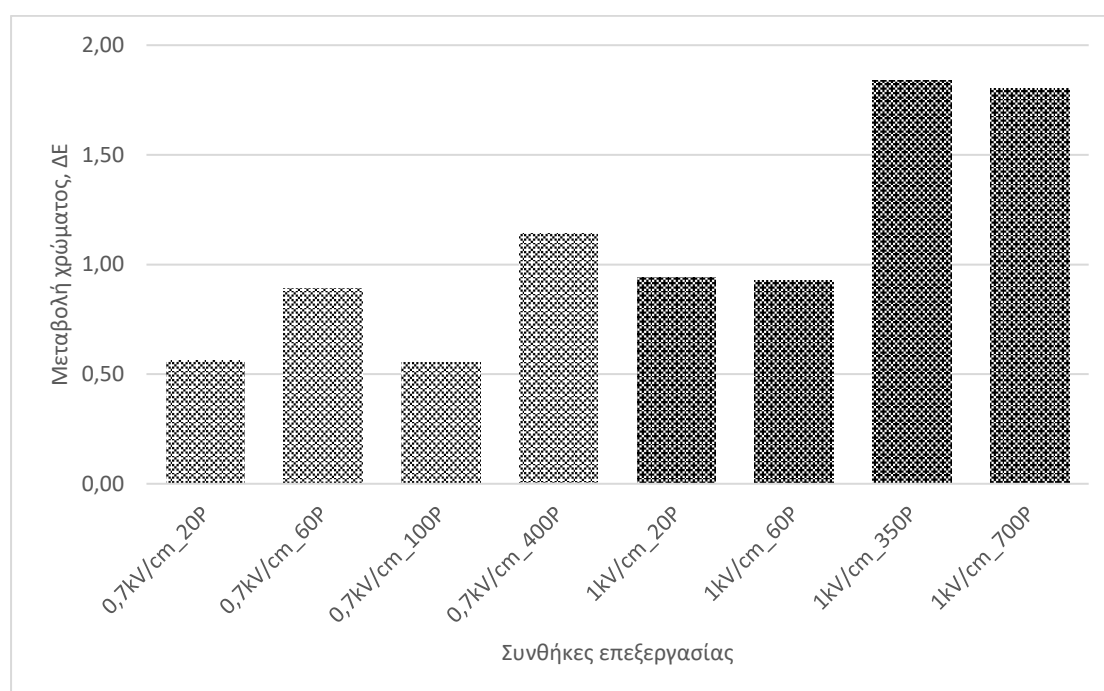
#### **5.2.3.5 Χρώμα στο χυμό καρότου**

Ο χυμός καρότου έχει έντονο πορτοκαλί χρώμα το οποίο χρησιμοποιείται και ως δείκτης ποιότητας του χυμού. Η φωτεινότητα του χυμού είναι ένας σημαντικός παράγοντας στην βιομηχανία διότι χαρακτηρίζει το τελικό προϊόν. Οι μετρήσεις του χρώματος με βάση τη κλίμακα CIE Lab για το ανεπεξέργαστο δείγμα χυμού παρουσιάζονται παρακάτω:

Πίνακας 5.5: Τιμές παραμέτρων L, a, b για ανεπεξέργαστο χυμό καρότου

	L	a	b
Control	27,6 ± 0,48	10,5 ± 0,20	22,9 ± 0,47

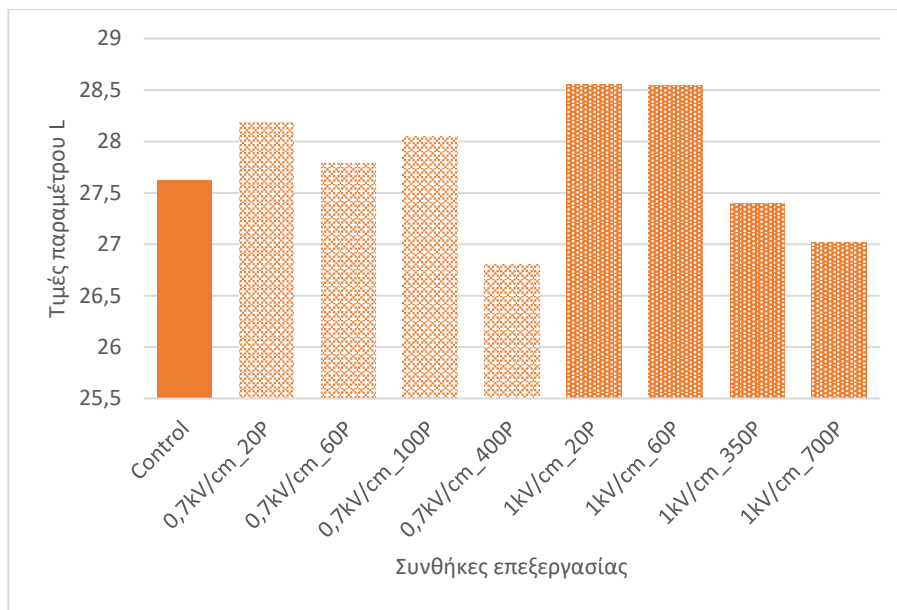
Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η συνολική μεταβολή ( $\Delta E$ ) του χρώματος για κάθε συνθήκη δηλαδή, η μεταβολή του χρώματος μετά από κάθε επεξεργασία σε σχέση με το ανεπεξέργαστο δείγμα χυμού ( $\Delta E=0$ ).



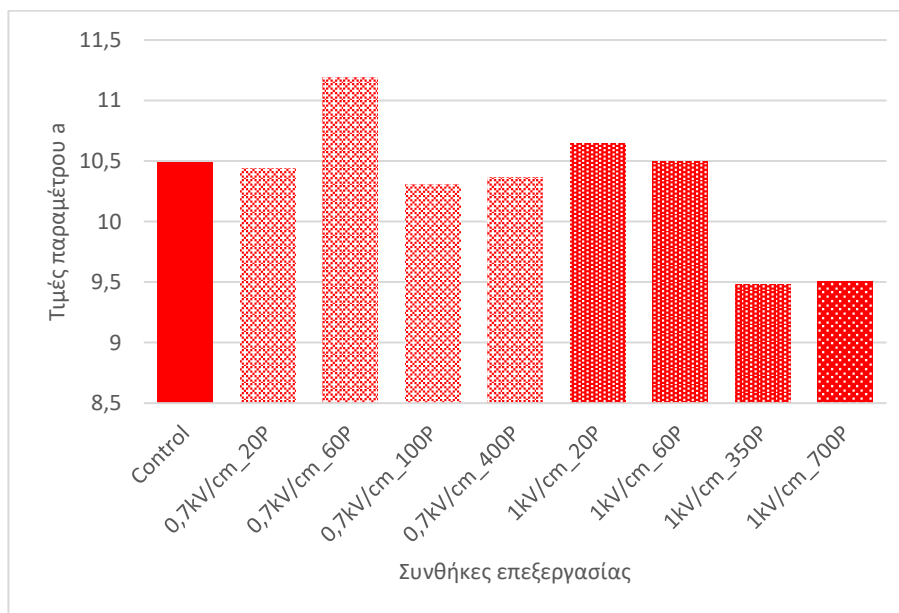
Διάγραμμα 5.25: Συνολική μεταβολή του χρώματος του χυμού καρότου μετά την επεξεργασία με ΠΗΠ σε ηλεκτρικά πεδία 0,7 kV/cm και 1 kV/cm

Παρατηρείται ότι η επεξεργασία με ΠΗΠ επιφέρει μεταβολή στο χρώμα του χυμού καρότου σε σύγκριση με το ανεπεξέργαστο δείγμα. Πιο συγκεκριμένα, η εντονότερη επεξεργασία στο υψηλότερο ηλεκτρικό πεδίο (1 kV/cm) σε μεγάλο αριθμό παλμών (350 και 700 παλμοί) έχει τη μεγαλύτερη διαφορά στο χρώμα με  $\Delta E=1,8$ . Παρόλα αυτά η μεταβολή του χρώματος σε όλες τις συνθήκες επεξεργασίας είναι αρκετά μικρή ( $\Delta E < 2,5$ ).

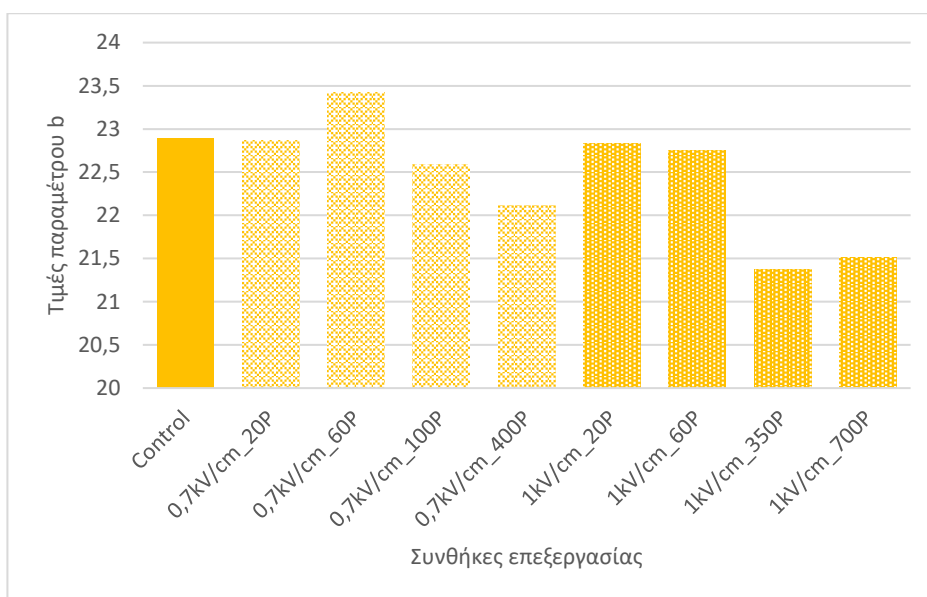
Η τιμή του  $\Delta E$  επηρεάζεται και από τις τρεις παραμέτρους L, a, b. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα για τις παραμέτρους L, a, b για κάθε συνθήκη επεξεργασίας ώστε να γίνει κατανοητό ποια παράμετρος επηρεάζει τη μεταβολή του χρώματος ανά συνθήκη.



Διάγραμμα 5.26: Παράμετρος L της κλίμακας CIE Lab που εκφράζει τη φωτεινότητα για χυμό καρότου σε κάθε συνθήκη επεξεργασίας



Διάγραμμα 5.27: Παράμετρος a της κλίμακας CIE Lab που εκφράζει το κόκκινο χρώμα για χυμό καρότου σε κάθε συνθήκη επεξεργασίας

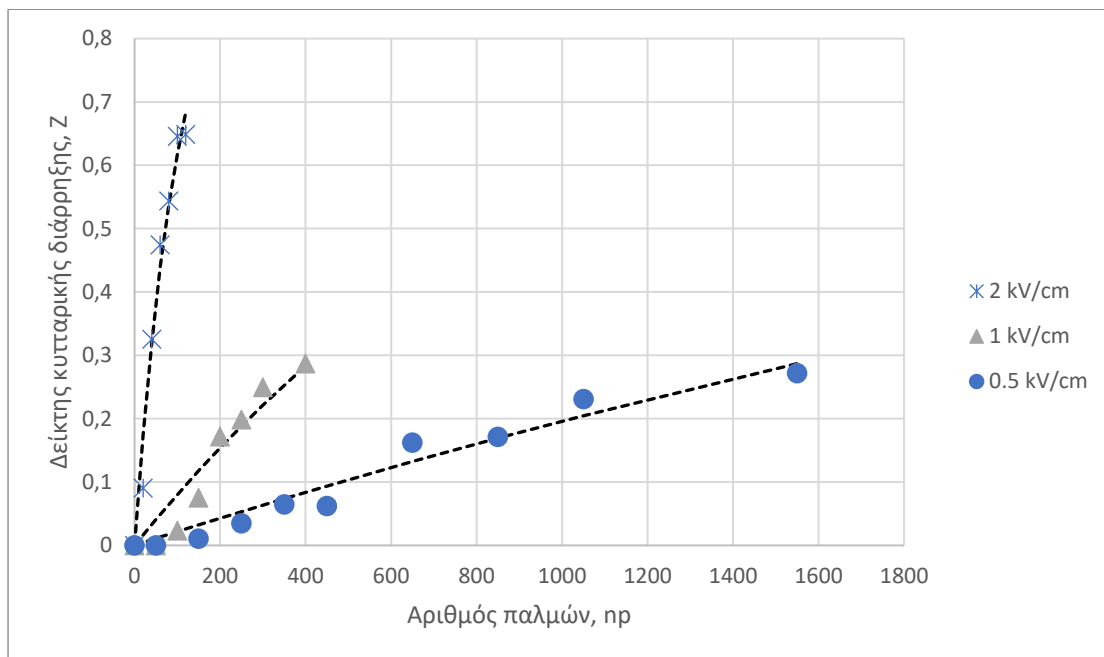


Διάγραμμα 5.28: Παράμετρος b της κλίμακας CIE Lab που εκφράζει το κίτρινο χρώμα για χυμό καρότου σε κάθε συνθήκη επεξεργασίας

Μελετώντας τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται ότι και οι τρεις παράμετροι, της φωτεινότητας (L), του κόκκινου (a) και του κίτρινου (b) χρώματος, μειώνονται μετά την εφαρμογή μεγάλου αριθμού παλμών και στα δύο ηλεκτρικά πεδία, 0,7 kV/cm και 1 kV/cm σε σύγκριση με το χυμό από ανεπεξέργαστο δείγμα καρότου. Οι χυμοί στους οποίους έχουν εφαρμοστεί 350 και 700 παλμοί στο πεδίο του 1 kV/cm έχουν πιο σκούρο χρώμα που οφείλεται στην ταυτόχρονη μείωση της παραμέτρου a και b που ευθύνονται για το πορτοκαλί χρώμα. Στις συνθήκες εφαρμογής μικρότερου αριθμού παλμών και στα δύο ηλεκτρικά πεδία οι τιμές των L, a, b είναι παρόμοιες με αυτές του ανεπεξέργαστου δείγματος. Κατά την εντονότερη επεξεργασία με ΠΗΠ απελευθερώνεται κυτταρικό υγρό λόγω της ηλεκτροδιάτρησης, το οποίο ευνοεί το ενζυμικό μαύρισμα (Wiktor et al., 2015).

#### **5.3.1.1.1 Δείκτης κυτταρικής διάρρηξης (Z) σε καρότο σε ροδέλες**

Ο προσδιορισμός του δείκτη κυτταρικής διάρρηξης πραγματοποιείται για την εύρεση των βέλτιστων συνθηκών επεξεργασίας. Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα του δείκτη κυτταρικής διάρρηξης (Z) σε τρία ηλεκτρικά πεδία διαφορετικής έντασης.



Διάγραμμα 5.29: Εξάρτηση του δείκτη κυτταρικής διάρρηξης συναρτήσει του αριθμού των παλμών που εφαρμόστηκαν για κάθε ένταση ηλεκτρικού πεδίου που μελετήθηκε. Οι διακεκομμένες γραμμές αντιστοιχούν στην προσαρμογή της εξίσωσης (APIΘ ΕΞ) στα πειραματικά δεδομένα

Παρατηρείται ότι σε μικρό αριθμό παλμών η τιμή του δείκτη κυτταρικής διάρρηξης έχει μεγάλη αύξηση και στα τρία ηλεκτρικά πεδία που μελετήθηκαν ενώ, σε μεγαλύτερο αριθμό παλμών η τιμή του Z έχει μικρότερη αύξηση μέχρι να φτάσει στη μέγιστη δυνατή τιμή του. Στο ηλεκτρικό πεδίο των 0,5 kV/cm ο δείκτης Z έφτασε το 0,27 μετά τη εφαρμογή 1550 παλμών, στο ηλεκτρικό πεδίο του 1 kV/cm ο δείκτης Z έφτασε το 0,29 μετά την εφαρμογή 400 παλμών ενώ στο ηλεκτρικό πεδίο των 2 kV/cm ο δείκτης Z έφτασε το 0,65 μετά την εφαρμογή 120 παλμών, επομένως η κυτταρική διάρρηξη αυξάνεται όσο αυξάνεται και ο αριθμός των παλμών μέχρι να φτάσει στη μέγιστη τιμή της. Τα υψηλότερα ηλεκτρικά πεδία φτάνουν σε μεγαλύτερα ποσοστά κυτταρικής διάρρηξης σε σύγκριση με τα χαμηλότερα. Η κυτταρική διάρρηξη που υφίσταται ο κυτταρικός ιστός του καρότου οφείλεται στην ηλεκτροδιάτρηση που υπέστη από την επεξεργασία με Παλμικά Ηλεκτρικά Πεδία. Η ηλεκτροδιάτρηση γίνεται εντονότερη όσο αυξάνεται η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και ο αριθμός των παλμών που εφαρμόζεται, δηλαδή όσο αυξάνεται η προσφερόμενη ενέργεια. Για το λόγο αυτό η επεξεργασία σε υψηλότερα ηλεκτρικά πεδία με εφαρμογή μεγάλου αριθμού παλμών επιτυγχάνει μεγαλύτερες τιμές του δείκτη Z.

Η εξάρτηση του δείκτη κυτταρικής διάρρηξης από τον χρόνο επεξεργασίας με ΠΗΠ περιγράφηκε μαθηματικά με προσαρμογή των πειραματικών δεδομένων από την Εξίσωση 4.1.

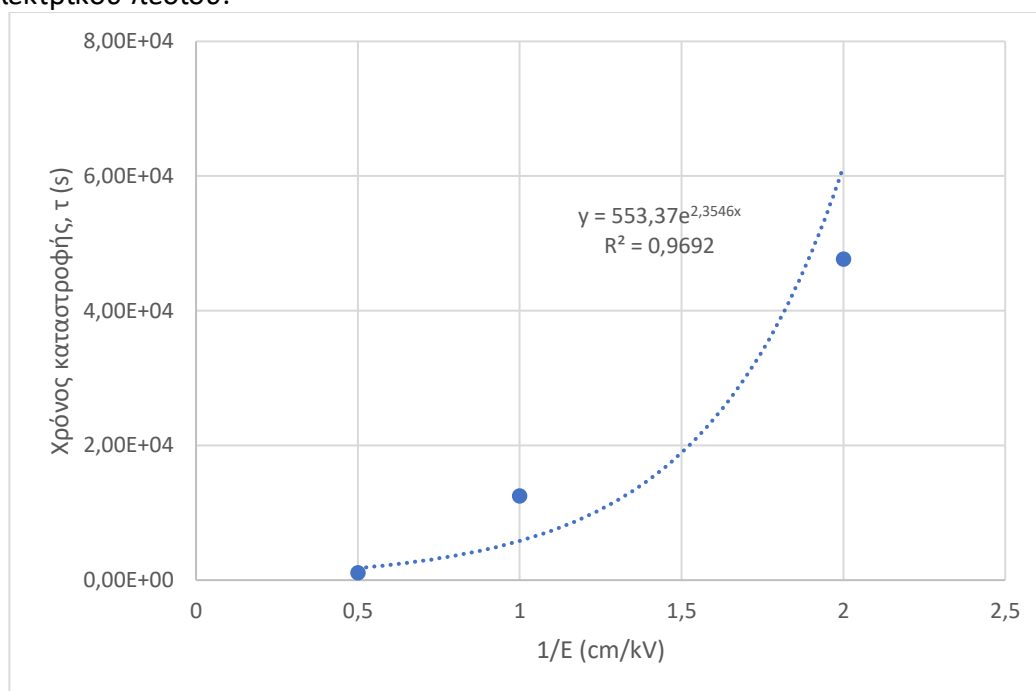
Οι τιμές των παραμέτρων  $Z_{max}$  και  $\tau$  προσδιορίστηκαν με μη γραμμική παλινδρόμηση και παρουσιάζονται παρακάτω:

Πίνακας 5.6: Τιμές των παραμέτρων  $Z_{max}$  και  $\tau$

E (kV/cm)	$Z_{max}$	$\tau$ ( $\mu$ s)	$R^2$
0,5	1	47649,4	0,8305
1	1	12476,4	0,932
2	1	1081,4	0,985
<b>A (kV/cm)</b>		2,3546	
<b><math>\tau_{\infty}</math> (<math>\mu</math>s)</b>		553,37	0,996

Από τους συντελεστές συσχέτισης των προσαρμογών, στα πειραματικά δεδομένα ( $R^2 > 0,9$ ) παρατηρήθηκε ότι οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν περιγράφουν πολύ ικανοποιητικά τα πειραματικά δεδομένα. Η τιμή του  $\tau$  μειώνεται με την αύξηση του ηλεκτρικού πεδίου, αυτό συμβαίνει διότι σε υψηλότερα ηλεκτρικά πεδία ο χρόνος που απαιτείται για να φτάσει η τιμή του  $Z$  το 50% της τιμής του  $Z_{max}$  είναι μικρότερος. Δηλαδή επιτυγχάνεται γρηγορότερα η καταστροφή του κυτταρικού ιστού.

Η εξάρτηση του χαρακτηριστικού χρόνου καταστροφής από την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά από την Εξίσωση 4.2. Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα του χρόνου καταστροφής  $\tau$  συναρτήσει του ηλεκτρικού πεδίου.



Διάγραμμα 5.30: Συσχέτιση του ηλεκτρικού πεδίου που εφαρμόζεται κατά την επεξεργασία με ΠΗΠ και του χρόνου ημικαταστροφής

Παρατηρείται ότι σε υψηλό ηλεκτρικό πεδίο το  $\tau$  είναι μικρότερο, δηλαδή σε υψηλότερα πεδία ο χρόνος για επίτευξη κυτταρικής διάρρηξης 50% είναι μικρότερος. Ο χαρακτηριστικός χρόνος καταστροφής  $\tau$  στο ηλεκτρικό πεδίο των 1 kV/cm είναι 11 φορές μεγαλύτερος από αυτόν του πεδίου 2 kV/cm ενώ, του ηλεκτρικού πεδίου 0,5



kV/cm είναι 44 φορές μεγαλύτερος. Η τιμή του A είναι ανάλογη των φυτικών κυττάρων, χαμηλές τιμές του A υποδηλώνουν μεγάλα σε μέγεθος κύτταρα όπου η ηλεκτροδιάτρηση είναι ευκολότερη (El Zakhem et al., 2006). Το  $\tau_{\infty}$  μας δείχνει τον ελάχιστο χαρακτηριστικό χρόνο καταστροφής που μπορεί να επιτευχθεί σε μέγιστη ένταση ηλεκτρικού πεδίου και είναι της τάξης των μς.

### 5.3.1.1.2 Δείκτης κυτταρικής διάρρηξης και ενεργειακές απαιτήσεις για το καρότο σε ροδέλες

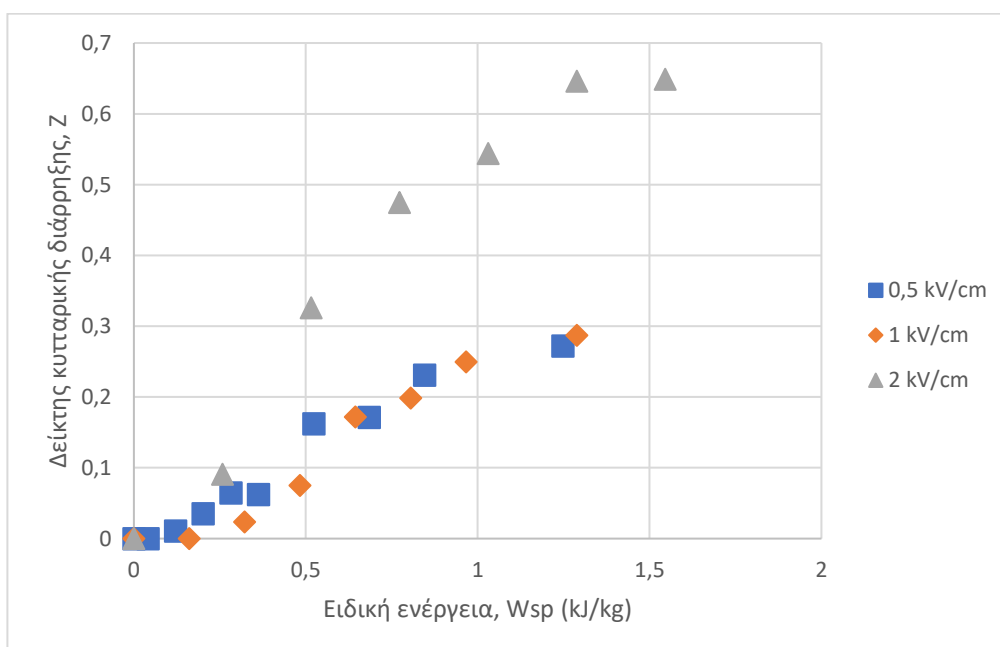
Η ειδική ενέργεια που απαιτείται για την κυτταρική διάρρηξη υπολογίζεται ως εξής:

$$W_{sp} = \frac{E_p * 0,3 * 0,77 * n_p}{0,300 * 1000} \quad (5.5)$$

όπου, μονάδα μέτρησης της ειδικής ενέργειας: kJ/kg

Το  $E_p$  είναι η ένδειξη της ειδικής ενέργειας ανά παλμό όπως αυτή εμφανίζεται από το όργανο, το 0,3 είναι συντελεστής διόρθωσης, το 0,069 οφείλεται στην περιεκτικότητα σε καρότο μέσα στο θάλαμο καθώς περιέχει 230 g καρότου και 70 g νερού ( $\frac{230 \text{ g}}{300 \text{ g}} = 0,77$ ),  $n_p$  είναι ο αριθμός των παλμών που εφαρμόζονται στο δείγμα, το 0,300 οφείλεται στην συνολική μάζα καρότου και νερού που περιέχεται στον θάλαμο επεξεργασίας ενώ η διαίρεση με το 1000 είναι για αναγωγή των μονάδων σε kJ/kg.

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα απαιτήσεων ενέργειας για την κυτταρική διάρρηξη σε κάθε ηλεκτρικό πεδίο.



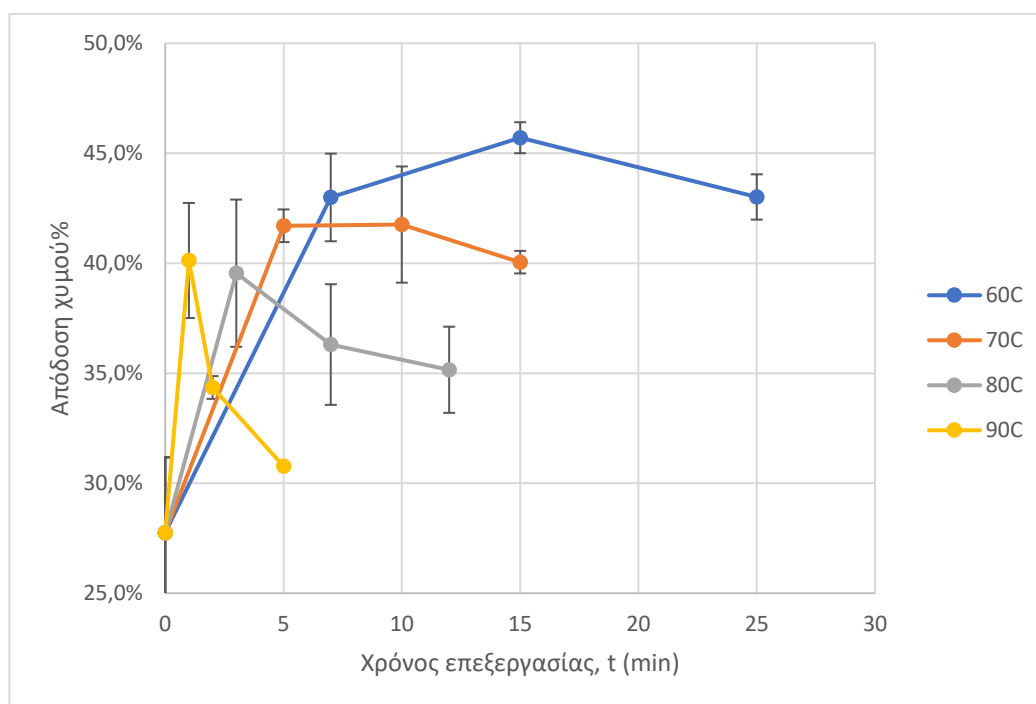
Διάγραμμα 5.31: Ειδική ενέργεια (kJ/kg) που απαιτείται για την κυτταρική διάρρηξη σε δείγμα καρότου σε ροδέλες σε ηλεκτρικά πεδία 0,5 kV/cm, 1 kV/cm και 2 kV/cm

Παρατηρείται ότι με αύξηση της προσφερόμενης ενέργειας ο δείκτης κυτταρικής διάρρηξης αυξάνεται έως ότου φτάσει τη μέγιστη τιμή του. Και στα τρία ηλεκτρικά πεδία οι ενεργειακές απαιτήσεις είναι αρκετά χαμηλές (0,04-1,55 kJ/kg). Επομένως,

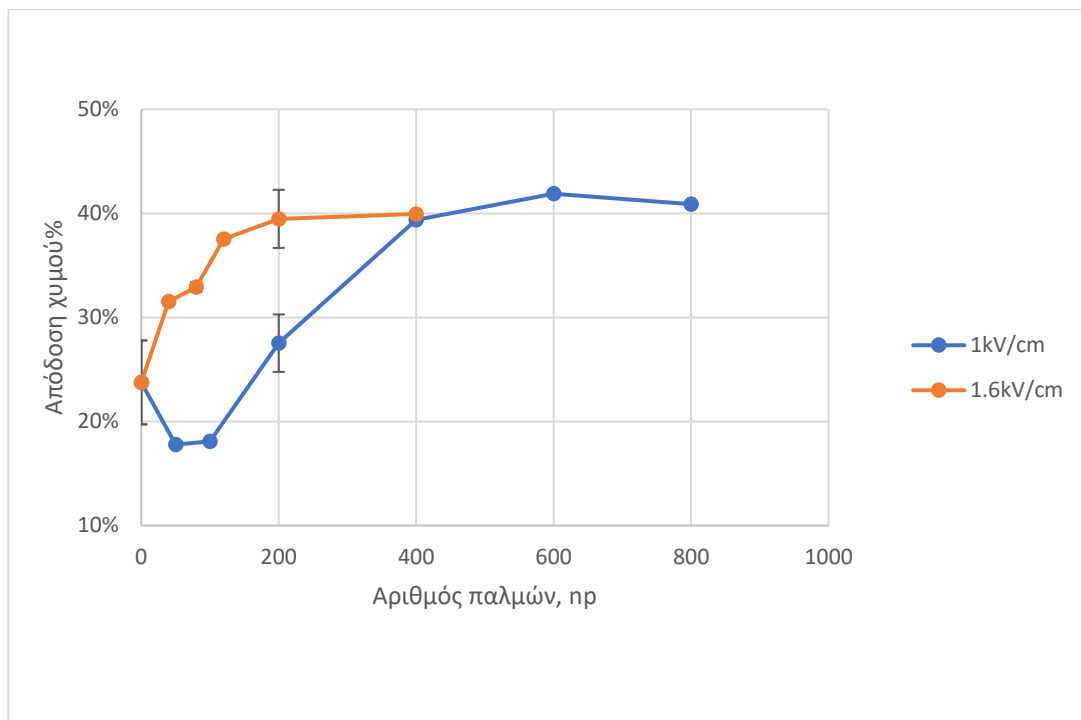
για το δείγμα καρότου σε ροδέλες δεν είναι απαραίτητη υψηλή κατανάλωση ενέργειας για μεγάλη κυτταρική διάρρηξη. Μέχρι τα 1,3 kJ/kg το μεγαλύτερο ποσοστό κυτταρικής διάρρηξης έχει επιτευχθεί ( $Z=0,64$ ).

### **5.3.2.1 Μελέτη της απόδοσης χυμοποίησης καρότου σε διάφορες συνθήκες επεξεργασίας**

Για την μελέτη της απόδοσης σε χυμό χρησιμοποιήθηκαν ανεπεξέργαστα, επεξεργασμένα με ΠΗΠ, θερμικά επεξεργασμένα και κατεψυγμένα αποψυγμένα καρότα. Η προ επεξεργασία με ΠΗΠ έγινε σε ηλεκτρικά πεδία 1 kV/cm και 1,6 kV/cm και αριθμό παλμών 50-800 και 40-400 αντίστοιχα. Η θερμική προ επεξεργασία πραγματοποιήθηκε στους 60°C για 7-25 λεπτά, στους 70°C για 5-15 λεπτά, στους 80°C για 3-12 λεπτά και στους 90°C για 1-5 λεπτά. Το δείγμα που υπέστη κατάψυξη απόψυξη, καταψύχθηκε στους -20°C και αποψύχθηκε στους 25°C. Παρακάτω παρουσιάζεται τα διαγράμματα για αποδόσεις χυμού:



Διάγραμμα 5.32: Απόδοση χυμού μετά τη θερμική επεξεργασία καρότου συναρτήσει του χρόνου που παρέμειναν σε θερμοκρασίες 60°C, 70°C, 80°C και 90°C



Διάγραμμα 5.33: Απόδοση χυμοποίησης μετά την επεξεργασία με ΠΗΠ σε ηλεκτρικά πεδία 1 kV/cm και 1,6 kV/cm συναρτήσει του αριθμού των παλμών

Μελετώντας τα δύο διαγράμματα παρατηρείται αύξηση της απόδοσης σε χυμό μετά τη θερμική επεξεργασία όπως και μετά την επεξεργασία με Παλμικά Ηλεκτρικά Πεδία σε σύγκριση με τα ανεπεξεργαστα δείγματα καρότου. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη θερμική επεξεργασία η απόδοση αυξάνεται σημαντικά στο μικρότερο χρονικό διάστημα που επιλέχθηκε για κάθε θερμοκρασία ενώ σε μεγαλύτερους χρόνους παρατηρείται μείωση της απόδοσης. Αυτό συμβαίνει διότι κατά την έντονη θερμική επεξεργασία το καρότο γίνεται αρκετά μαλακό δυσκολεύοντας την παραλαβή του χυμού του όταν η χυμοποίηση πραγματοποιείται με πρέσα (Bao & Chang, 1994). Η θερμοκρασία των 60°C για χρονικό διάστημα 15 λεπτών έδωσε την καλύτερη απόδοση σε χυμό (απόδοση 46%). Με την αύξηση της θερμοκρασίας πάνω απ' τους 60°C η απόδοση μειώνεται σταδιακά. Κατά τη θερμική επεξεργασία όπως και κατά την επεξεργασία με ΠΗΠ, πραγματοποιείται κυτταρική διάρρηξη στον ιστό του καρότου, η οποία συσχετίζεται με την αύξηση της απόδοσης σε χυμό (Abdullah & Chin, 2014; Linhares et al., 2020).

Στην περίπτωση της προ επεξεργασίας με ΠΗΠ η απόδοση σημειώνει σημαντική αύξηση όσο αυξάνεται και ο αριθμός των παλμών που εφαρμόζονται και στα δύο ηλεκτρικά πεδία που μελετήθηκαν έως ότου φτάσει στη μέγιστη τιμή της. Φαίνεται ότι στον ίδιο αριθμό παλμών το ηλεκτρικό πεδίο των 1,6 kV/cm να επιτυγχάνει μεγαλύτερη απόδοση από αυτό του 1 kV/cm όμως η τελική μέγιστη απόδοση και για τα δύο πεδία είναι η ίδια (απόδοση 42%). Οι τιμές της απόδοσης για τα δύο ηλεκτρικά πεδία συγκλίνουν διότι έχει επιτευχθεί μέγιστη κυτταρική διάρρηξη (Schilling et al., 2007).

### **5.3.2.2 Μελέτη της προσφερόμενης ενέργειας ανά συνθήκη επεξεργασίας και απόδοση χυμοποίησης**

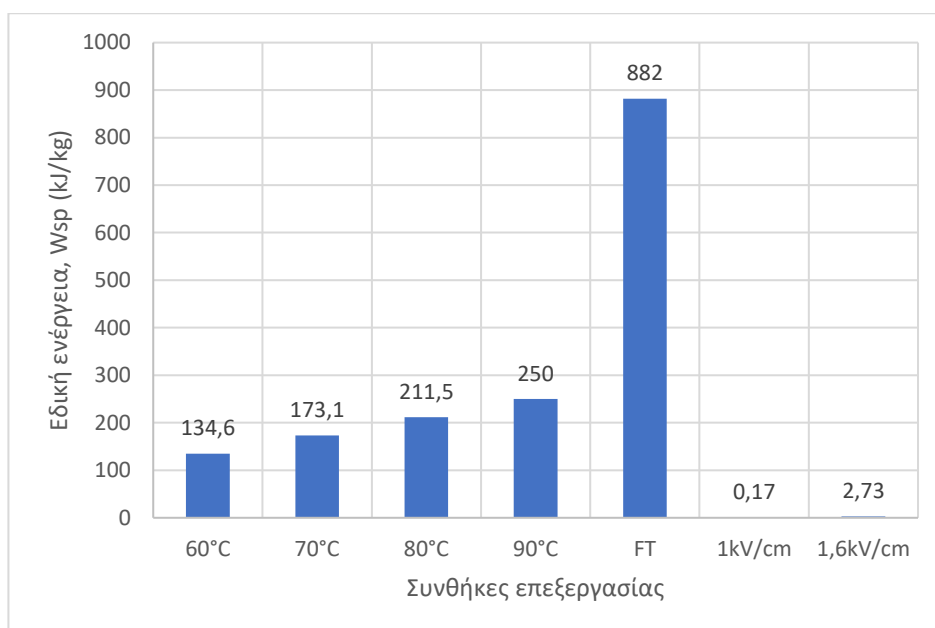
Η απαιτούμενη ενέργεια για την επεξεργασία με Παλμικά Ηλεκτρικά Πεδία μελετήθηκε στο Κεφάλαιο 3.2.3.5. Στην περίπτωση της θερμικής επεξεργασίας και στην κατάψυξη-απόψυξη χρησιμοποιήθηκε η Εξίσωση 5.2.

Είναι απαραίτητο για τη θερμοχωρητικότητα ο προσδιορισμός της σύστασης του καρότου διότι το Cr είναι διαφορετικό για το λαχανικό και διαφορετικό για το νερό καθώς και για τον πάγο. Το καρότο περιέχει 92% υγρασία σε υγρή βάση. Στην περίπτωση της κατάψυξης-απόψυξης χρησιμοποιείται η θερμοχωρητικότητα του νερού από τους 25°C έως τους 0°C και η θερμοχωρητικότητα του πάγου από 0°C έως -20°C. Στον υπολογισμό η ταπείνωση του σημείου πήξης του νερού καθώς και τυχόν επίδραση των συστατικών του τροφίμου στην ενθαλπία πήξης θεωρούνται αμελητέες. Οι τιμές της θερμοχωρητικότητας σε κάθε περίπτωση ανευρίσκονται βιβλιογραφικά και φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

*Πίνακας 5.7: Σύσταση και θερμοχωρητικότητες καρότου και νερού*

<b>Καρότο</b>	
<b>Περιεκτικότητα σε νερό</b>	92,00%
<b>Θερμοχωρητικότητα νερού (kJ/kg)</b>	4,18
<b>Θερμοχωρητικότητα πάγου (kJ/kg)</b>	2,093
<b>Θερμοχωρητικότητα καρότου (kJ/kg)</b>	3,85
<b>Ενθαλπία πήξης νερού (kJ/kg)</b>	333

Με χρήση αυτών των δεδομένων διαμορφώθηκε το διάγραμμα 5.34 :



Διάγραμμα 5.34: Ενεργειακές απαιτήσεις για επεξεργασμένα με ΠΗΠ, επεξεργασμένα θερμικά και κατεψυγμένα-αποψυγμένα καρότα

Παρατηρείται ότι οι απαιτήσεις σε ενέργεια κατά την θερμική επεξεργασία και κατά την κατάψυξη-απόψυξη είναι σημαντικά μεγαλύτερες σε σχέση με την απαιτούμενη ενέργεια για επεξεργασία με Παλμικά Ηλεκτρικά Πεδία. Πιο συγκεκριμένα, κατά την επεξεργασία με ΠΗΠ για 50 έως 800 παλμούς σε ηλεκτρικό πεδίο 1 kV/cm η ειδική ενέργεια που απαιτείται κυμαίνεται από 0,01 kJ/kg έως 0,17 kJ/kg ενώ, για ηλεκτρικό πεδίο 1,6 kV/cm η ειδική ενέργεια που απαιτείται για εφαρμογή 40 έως 400 παλμών κυμαίνεται από 0,27 kJ/kg έως 2,73 kJ/kg. Η ενέργεια που απαιτείται για τη θερμική επεξεργασία από 60°C έως 90°C για δείγμα καρότου κυμαίνεται από 135 kJ/kg έως 250 kJ/kg, ποσά πολύ μεγαλύτερα από αυτά της επεξεργασίας με ΠΗΠ. Επιπλέον, αρκετά μεγάλο ποσό ενέργειας απαιτεί και η διεργασία της κατάψυξης-απόψυξης όπου η θερμοκρασία του καρότου πρέπει να μεταβληθεί από τους 25°C στους -20°C και έπειτα από τους -20°C στους 25°C. Η διαδικασία αυτή χρειάζεται 882 kJ/kg ενέργειας, ποσό τάξης μεγέθους μεγαλύτερο σε σύγκριση με τις ενεργειακές απαιτήσεις των ΠΗΠ.

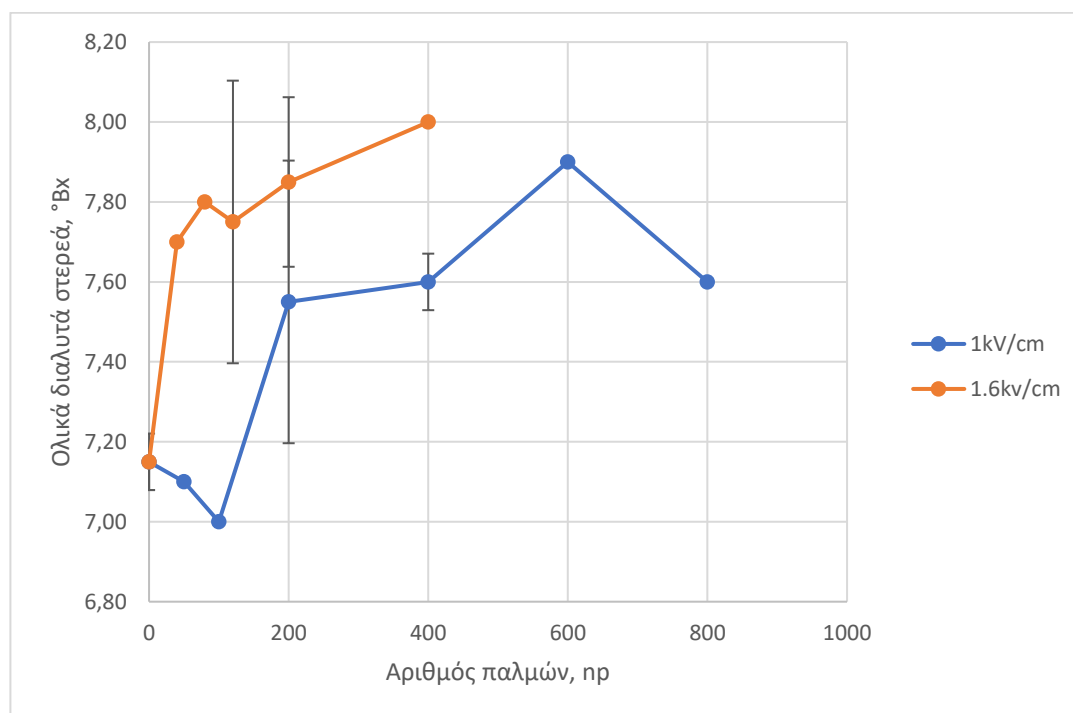
Οι αποδόσεις σε χυμό των επεξεργασμένων δειγμάτων είναι μεγαλύτερες σε σχέση με το ανεπεξέργαστο (απόδοση 27,8%). Οι αποδόσεις των επεξεργασμένων με ΠΗΠ καρότων (40%-42%) είναι παρόμοιες με τις αποδόσεις των θερμικά επεξεργασμένων καρότων (40%-41,8%), με εξαίρεση το δείγμα των 60°C για 15 λεπτά θέρμανσης που η απόδοση του φτάνει το 45,7%. Το δείγμα που υπέστη κατάψυξη-απόψυξη είχε απόδοση σε χυμό 45%. Επομένως, η θερμική επεξεργασία και η κατάψυξη-απόψυξη δεν δικαιολογεί την κατά πολύ μεγαλύτερη προσφορά ενέργειας εφόσον δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά στην απόδοση της χυμοποίησης. Η διεργασία της κατάψυξης-απόψυξης μπορεί να πραγματοποιηθεί στην περίπτωση που είναι επιθυμητή πλήρης κυτταρική διάρρηξη στο φυτικό ιστό.

### **5.3.3 Ποιοτικά χαρακτηριστικά για το χυμό καρότου**

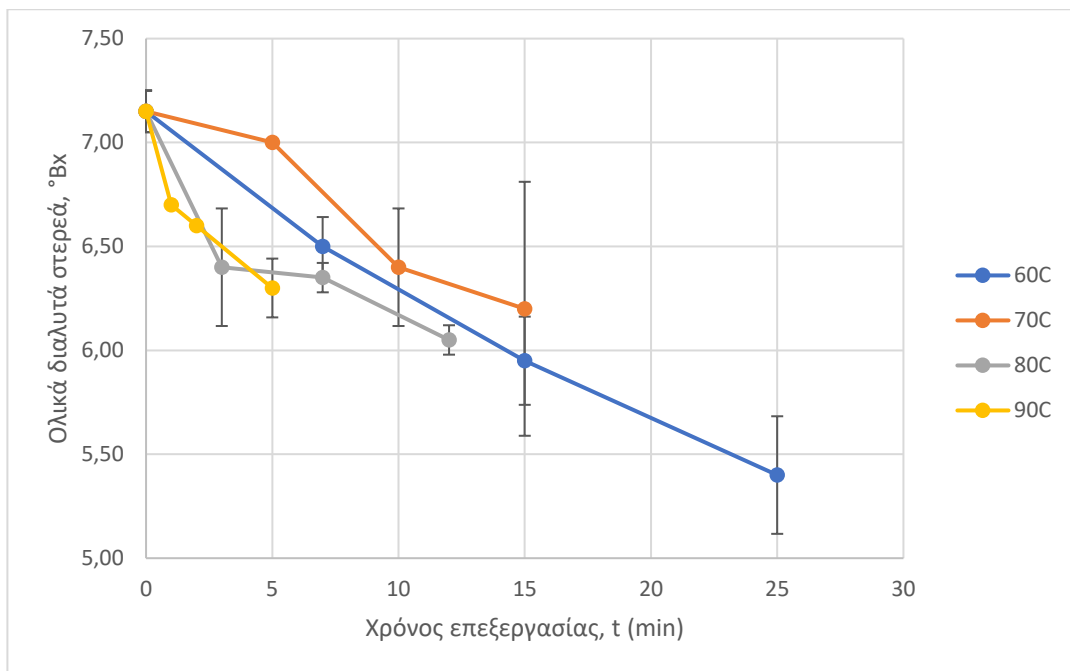
Μετρήθηκαν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά για το χυμό ανεπεξέργαστου καρότου καθώς και χυμό επεξεργασμένου με ΠΗΠ καρότου σε ροδέλες, θερμικά επεξεργασμένου καρότου σε θερμοκρασίες 60°C, 70°C, 80°C, 90°C. Η επεξεργασία με Παλμικά Ηλεκτρικά Πεδία πραγματοποιήθηκε σε ηλεκτρικά πεδία 1 kV/cm και 1,6 kV/cm στα οποία εφαρμόστηκαν 50-800 και 40-400 παλμοί αντίστοιχα, εύρος παλμού 15 μs και συχνότητα 20 Hz. Κατά τη θερμική επεξεργασία τα χρονικά διαστήματα που τα δείγματα καρότου παρέμειναν στις συγκεκριμένες θερμοκρασίες ήταν στους 60°C για 7-25 λεπτά, στους 70°C για 5-15 λεπτά, στους 80°C για 3-12 λεπτά και στους 90°C για 1-5 λεπτά.

#### **5.3.3.1 Προσδιορισμός ολικών διαλυτών στερεών στο χυμό καρότου**

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα των ολικών διαλυτών στερεών σε °Bx για το χυμό καρότου στα δύο ηλεκτρικά πεδία που εφαρμόστηκαν καθώς και σε κάθε συνθήκη θερμικής επεξεργασίας:



Διάγραμμα 5.35: Βαθμοί Brix συναρτήσει του αριθμού των παλμών για δείγματα χυμού καρότου μετά από επεξεργασία με ΠΗΠ σε πεδία 1 kV/cm και 1,6 kV/cm



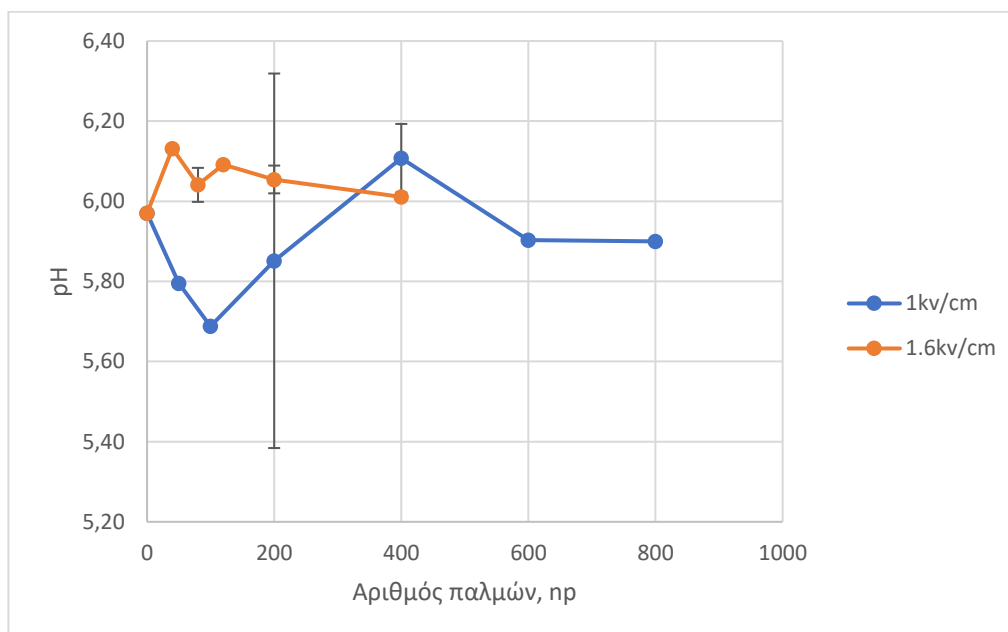
Διάγραμμα 5.36: Βαθμοί Brix συναρτήσει του χρόνου επεξεργασίας για δείγματα χυμού καρότου μετά από θερμική επεξεργασία σε θερμοκρασίες 60°C, 70°C, 80°C και 90°C

Μελετώντας τα παραπάνω διαγράμματα, παρατηρείται αύξηση της συγκέντρωσης (έως και 12%) σε ολικά διαλυτά στερεά μετά την επεξεργασία με ΠΗΠ ενώ μετά τη θερμική επεξεργασία παρατηρείται μείωση της συγκέντρωσης (έως και 24%) σε σύγκριση με το ανεπεξέργαστο δείγμα. Πιο συγκεκριμένα, η συγκέντρωση των ολικών διαλυτών στερεών αυξάνεται από 7,15 στο ανεπεξέργαστο δείγμα σε 8 °Bx στο επεξεργασμένο με ΠΗΠ δείγμα στο ηλεκτρικό πεδίο των 1,6 kV/cm μετά την εφαρμογή 400 παλμών. Η αύξηση της συγκέντρωσης σε ολικά διαλυτά στερεά είναι μεγαλύτερη στο υψηλότερο ηλεκτρικό πεδίο αφού παρατηρούνται υψηλότερες τιμές ολικών διαλυτών στερεών στον ίδιο αριθμό παλμών στο πεδίο των 1,6 kV/cm σε σύγκριση με το πεδίο του 1 kV/cm. Η αύξηση της συγκέντρωσης των ολικών διαλυτών στερεών του χυμού μετά την επεξεργασία των καρότων με ΠΗΠ οφείλεται στην εκχύλιση υδατοδιαλυτών ουσιών όπως τα σάκχαρα. Στην περίπτωση της θερμικής επεξεργασίας, παρατηρείται μείωση της συγκέντρωσης ολικών διαλυτών στερεών με εντονότερη επεξεργασία, δηλαδή σε υψηλότερη θερμοκρασία και για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα επεξεργασίας. Η συγκέντρωση ολικών διαλυτών στερεών στο ανεπεξέργαστο δείγμα ήταν 7,15 °Bx ενώ δείγμα χυμού από καρότα που επεξεργάστηκαν θερμικά στους 60°C για 25 λεπτά ήταν 5,40 °Bx. Η μείωση των ολικών διαλυτών στερεών είναι μεγαλύτερη όσο αυξάνεται η θερμοκρασία και ο χρόνος επεξεργασίας σε δείγματα καρότου πράγμα που επιβεβαιώνεται και από τη μελέτη των Salama & Ibrahim (2007) σε χυμό καρότου.

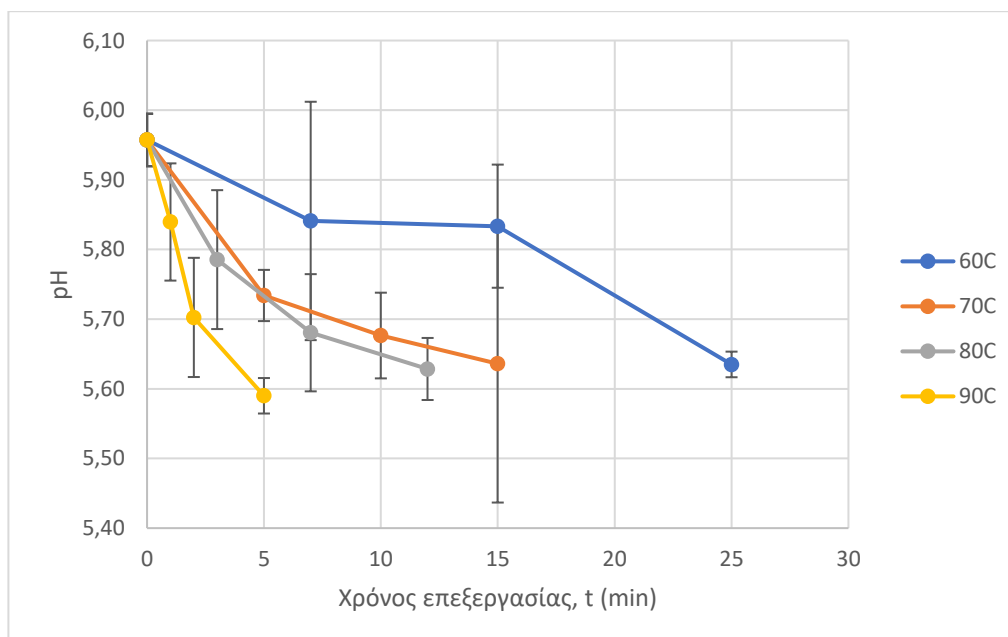
Κατά την επεξεργασία με ΠΗΠ η περιεκτικότητα σε ολικά διαλυτά στερεά για χυμό καρότου κυμαίνεται από 7,00 έως 8,00 °Bx ενώ μετά τη θερμική επεξεργασία από 5,40 έως 7,15 °Bx. Η συγκέντρωση των ολικών διαλυτών στερεών για το κατεψυγμένο-αποψυγμένο δείγμα ήταν 8,40 και οφείλεται στην εκχύλιση υδατοδιαλυτών στερεών.

### 5.3.3.2 Μέτρηση pH στο χυμό καρότου

Οι μετρήσεις pH για το χυμό καρότου πραγματοποιήθηκαν στους 25°C σε ανεπεξεργαστο, σε επεξεργασμένα με ΠΗΠ δείγματα, σε θερμικά επεξεργασμένα δείγματα και σε δείγματα μετά από κατάψυξη-απόψυξη. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα του pH για τα δείγματα χυμού καρότου:



Διάγραμμα 5.37: pH συναρτήσει του αριθμού των παλμών για δείγματα χυμού καρότου μετά από επεξεργασία με ΠΗΠ σε πεδία 1 kV/cm και 1,6 kV/cm



Διάγραμμα 5.38: pH συναρτήσει του χρόνου επεξεργασίας για δείγματα χυμού καρότου μετά από θερμική επεξεργασία σε θερμοκρασίες 60°C, 70°C, 80°C και 90°C

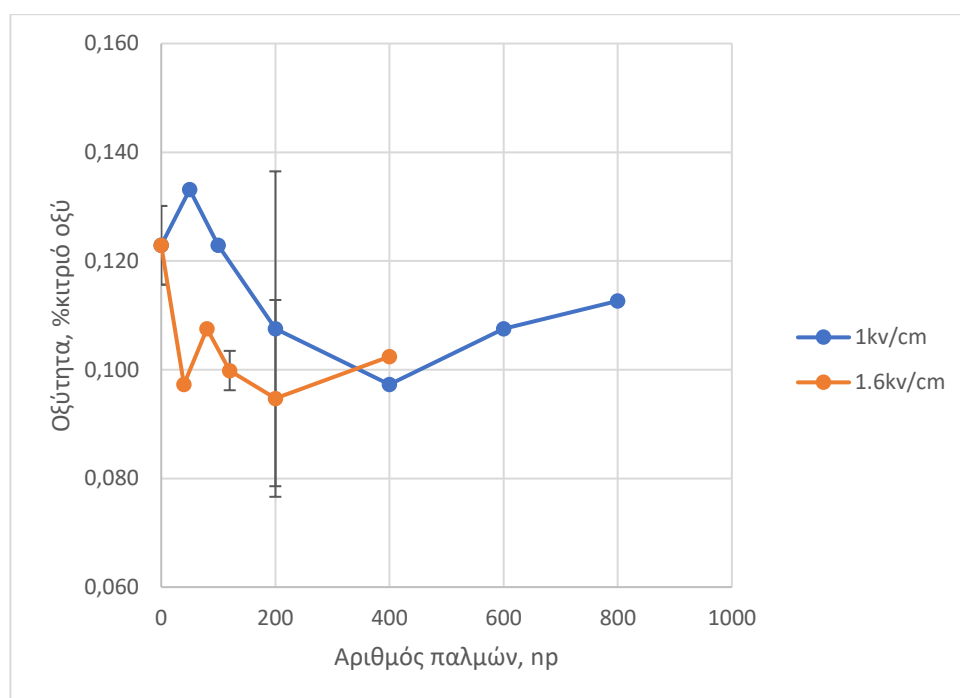
Μελετώντας τα διαγράμματα παρατηρείται ότι δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ του pH και του ηλεκτρικού πεδίου εφαρμογής κατά την επεξεργασία με ΠΗΠ, ενώ



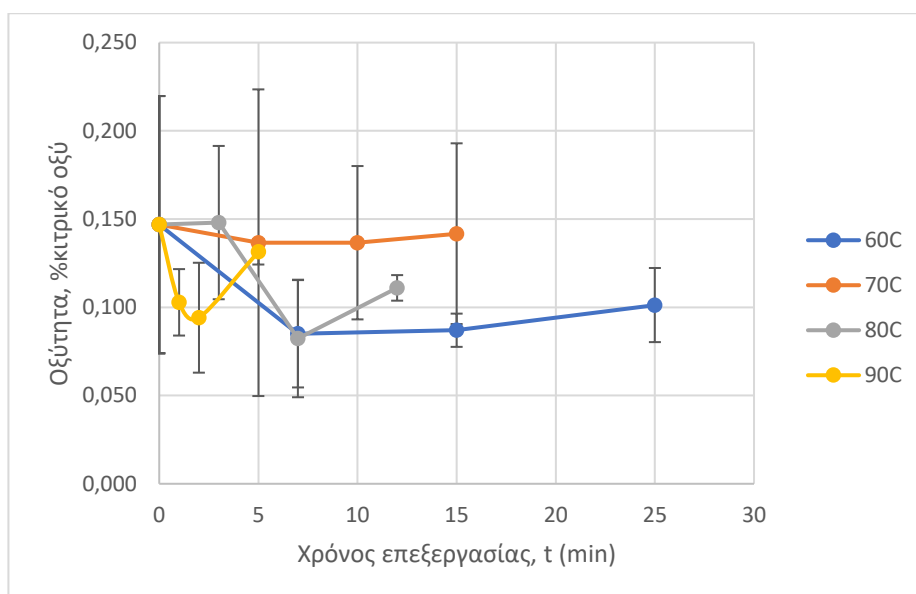
υπάρχει μείωση του pH μετά τη θερμική επεξεργασία του καρότου σε σύγκριση με το ανεπεξέργαστο δείγμα. Πιο συγκεκριμένα, ο αριθμός των παλμών που εφαρμόζονται στο δείγμα καρότου κατά την επεξεργασία με ΠΗΠ δεν επηρεάζει το pH ενώ η εντονότερη θερμική επεξεργασία το ελαττώνει σε κάποιο βαθμό (Akin & Evrendilek, 2009). Η μείωση του pH κατά τη θερμική επεξεργασία του καρότου είναι μεγαλύτερη στις υψηλότερες θερμοκρασίες δηλαδή, στον ίδιο χρόνο επεξεργασίας το pH είναι χαμηλότερο για υψηλότερη θερμοκρασία. Χημικές αντιδράσεις που επιτυγχάνονται με αύξηση της θερμοκρασίας οδηγούν πιθανότατα σε διάσπαση ή παραγωγή συστατικών κατά την επεξεργασία και κατ' επέκταση στην παρατηρούμενη μεταβολή του pH. Η τιμή του pH για το χυμό από επεξεργασμένα με ΠΗΠ καρότα κυμαίνεται από 5,69 έως 6,11 ενώ για χυμό από καρότα που υπέστησαν θερμικές επεξεργασίες από 5,59 έως 5,97. Το pH για το κατεψυγμένο-αποψυγμένο δείγμα ήταν 6,03. Οι τιμές αυτές επιβεβαιώνονται και από τη βιβλιογραφία (Bao & Chang, 1994).

### **5.3.3.3 Οξύτητα στο χυμό καρότου**

Πραγματοποιήθηκε προσδιορισμός οξύτητας (%κιτρικό οξύ) σε ανεπεξέργαστο και επεξεργασμένα με ΠΗΠ δείγματα χυμού καρότου, θερμικά επεξεργασμένα και κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα της οξύτητας για χυμό καρότου:



Διάγραμμα 5.39: Οξύτητα συναρτήσει του αριθμού των παλμών για δείγματα χυμού καρότου μετά από επεξεργασία με ΠΗΠ σε πεδία 1 kV/cm και 1,6 kV/cm



Διάγραμμα 5.40: Οξύτητα συναρτήσει του χρόνου επεξεργασίας για δείγματα χυμού καρότου μετά από θερμική επεξεργασία σε θερμοκρασίες 60°C, 70°C, 80°C και 90°C

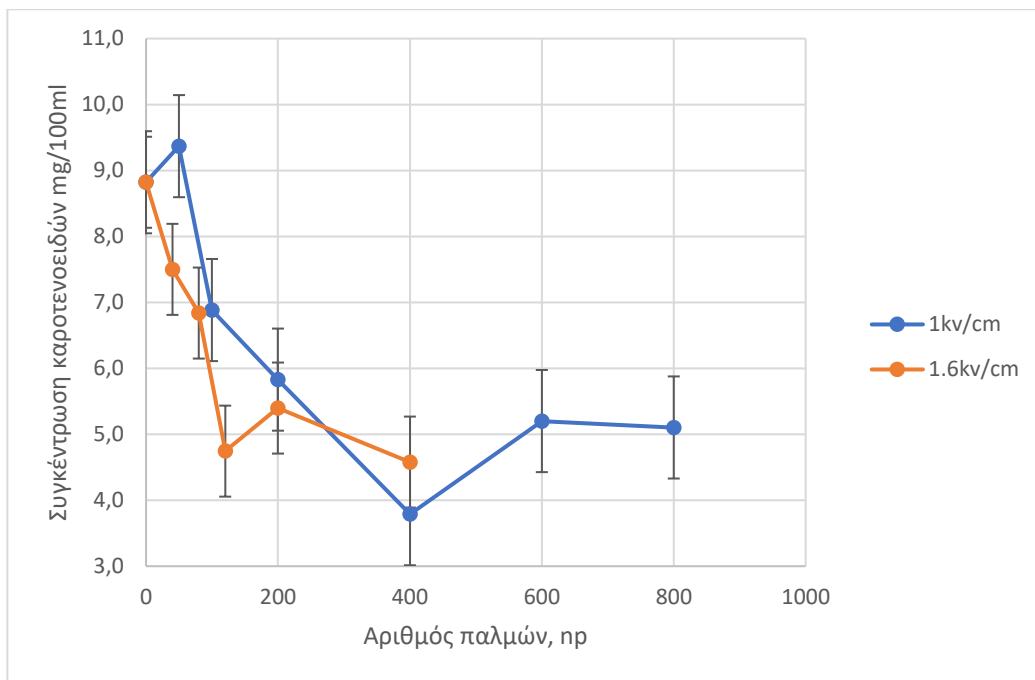
Μελετώντας τα διαγράμματα της οξύτητας για χυμό από επεξεργασμένα με ΠΗΠ καρότα και θερμικά επεξεργασμένα καρότα, παρατηρείται ότι μετά την επεξεργασία με ΠΗΠ και στα δύο ηλεκτρικά πεδία η οξύτητα του χυμού μειώνεται με την αύξηση του αριθμού των παλμών που εφαρμόζονται σε σύγκριση με το ανεπεξέργαστο δείγμα (έως και 21% μείωση). Το ίδιο συμβαίνει και για το χυμό από θερμικά επεξεργασμένα καρότα, χωρίς όμως να υπάρχει κάποια συσχέτιση της θερμοκρασίας ή του χρόνου επεξεργασίας με την οξύτητα του χυμού (Vandresen et al., 2009).

Για τον επεξεργασμένο με ΠΗΠ χυμό οι τιμές της οξύτητας κυμαίνονται από 0,095% έως 0,133% ενώ για την θερμική επεξεργασία από 0,082% έως 0,148%. Βιβλιογραφικά η μείωση της οξύτητας δεν είναι σημαντική μετά από θερμική επεξεργασία και επεξεργασία με ΠΗΠ (Garde-Cerdán et al., 2007). Για το δείγμα που υπέστη κατάψυξη-απόψυξη η τιμή της οξύτητας ήταν 0,133%. Πιθανότατα η μείωση της οξύτητας του χυμού από επεξεργασμένα καρότα να οφείλεται στην κυτταρική διάρρηξη που έχουν υποστεί έχοντας ως αποτέλεσμα την εκχύλιση ενδοκυτταρικών υγρών. Οι πειραματικές τιμές για την οξύτητα (%κιτρικό οξύ) σε χυμό καρότου επιβεβαιώνονται και από τη βιβλιογραφία (Quitão-Teixeira et al., 2008).

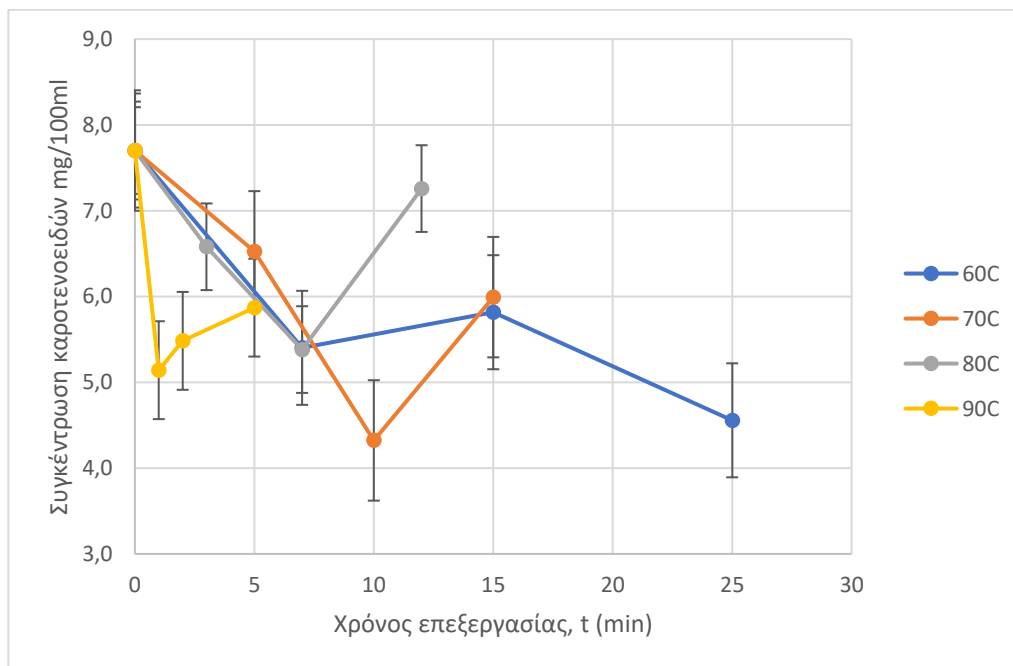
#### **5.3.3.4 Καροτενοειδή στο χυμό καρότου**

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας σε καροτενοειδή στο χυμό καρότου σε ανεπεξέργαστα, επεξεργασμένα με ΠΗΠ δείγματα σε ηλεκτρικά πεδία 1 kV/cm και 1,6 kV/cm, θερμικά επεξεργασμένα και κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα καρότου.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα της συγκέντρωσης καροτενοειδών για χυμό καρότου:



Διάγραμμα 5.41: Συγκέντρωση καροτενοειδών συναρτήσει του αριθμού των παλμών σε χυμό καρότου σε ανεπεξεργαστο δείγμα και σε επεξεργασμένα με ΠΗΠ δείγματα σε ηλεκτρικά πεδία 1 kV/cm και 1,6 kV/cm



Διάγραμμα 5.42: Συγκέντρωση καροτενοειδών συναρτήσει του χρόνου επεξεργασίας σε χυμό καρότου σε ανεπεξεργαστο δείγμα και σε θερμικά επεξεργασμένα δείγματα σε θερμοκρασίες 60°C, 70°C, 80°C, 90°C

Μελετώντας τα διαγράμματα, παρατηρείται μείωση της συγκέντρωσης σε καροτενοειδή στο χυμό καρότου μετά την επεξεργασία με ΠΗΠ στο καρότο όπως και μετά τη θερμική επεξεργασία σε σύγκριση με το ανεπεξεργαστο δείγμα. Πιο συγκεκριμένα, κατά την επεξεργασία με ΠΗΠ δεν παρατηρείται συσχέτιση του ηλεκτρικού πεδίου στη μείωση της συγκέντρωσης των καροτενοειδών ενώ, αρχικά με εφαρμογή μικρού αριθμού παλμών παρατηρείται μείωση της συγκέντρωσης σε

μεγαλύτερες τιμές παλμών η συγκέντρωση καροτενοειδών φαίνεται να σταθεροποιείται (Xiang et al., 2014). Η κυτταρική διάρρηξη που προκαλεί η επεξεργασία με ΠΗΠ οδηγεί στην εξαγωγή υδατοδιαλυτών μορίων, τα καροτενοειδή είναι μη πολικά μόρια και πιθανώς δεν συμπαρασύρονται κατά τη χυμοποίηση του καρότου. Επίσης, κατά τη θερμική επεξεργασία παρατηρείται μείωση της συγκέντρωσης χωρίς όμως να υπάρχει συσχέτιση της θερμοκρασίας επεξεργασίας σε αυτή, όπως και του χρόνου επεξεργασίας. Η αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να αλλοιώσει ή να καταστρέψει τα μόρια των καροτενοειδών με αποτέλεσμα τη μείωση της συγκέντρωσής τους (Bao & Chang, 1994).

Για την επεξεργασία με ΠΗΠ οι τιμές της συγκέντρωσης σε καροτενοειδή κυμαίνονται από 3,79 έως 9,37 mg καροτενοειδών/100 ml χυμού καρότου. Για τη θερμική επεξεργασία οι τιμές της συγκέντρωσης σε καροτενοειδή κυμαίνονται από 4,32 έως 7,26 mg καροτενοειδών/100 ml χυμού καρότου. Για την διεργασία την κατάψυξης-απόψυξης η τιμή της συγκέντρωσης ήταν 4,33 mg καροτενοειδών/100 ml χυμού καρότου (Bao & Chang, 1994).

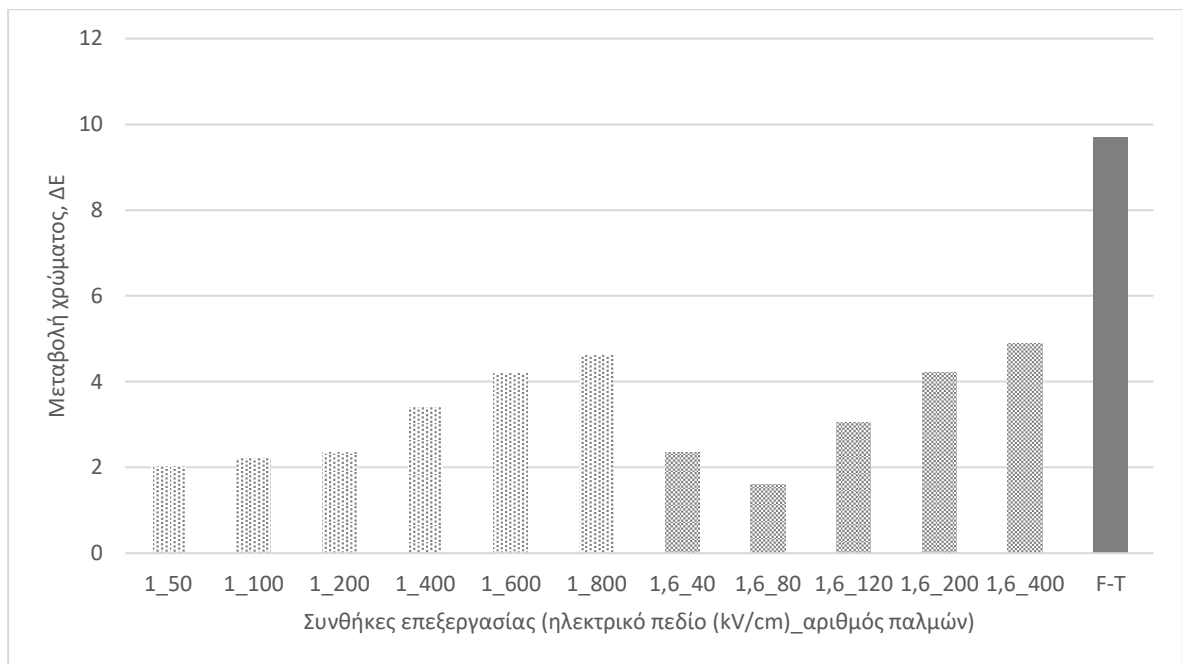
#### **5.3.3.5 Χρώμα στο χυμό καρότου**

Οι μετρήσεις του χρώματος με βάση τη κλίμακα CIE Lab για το ανεπεξέργαστο δείγμα χυμού παρουσιάζονται παρακάτω:

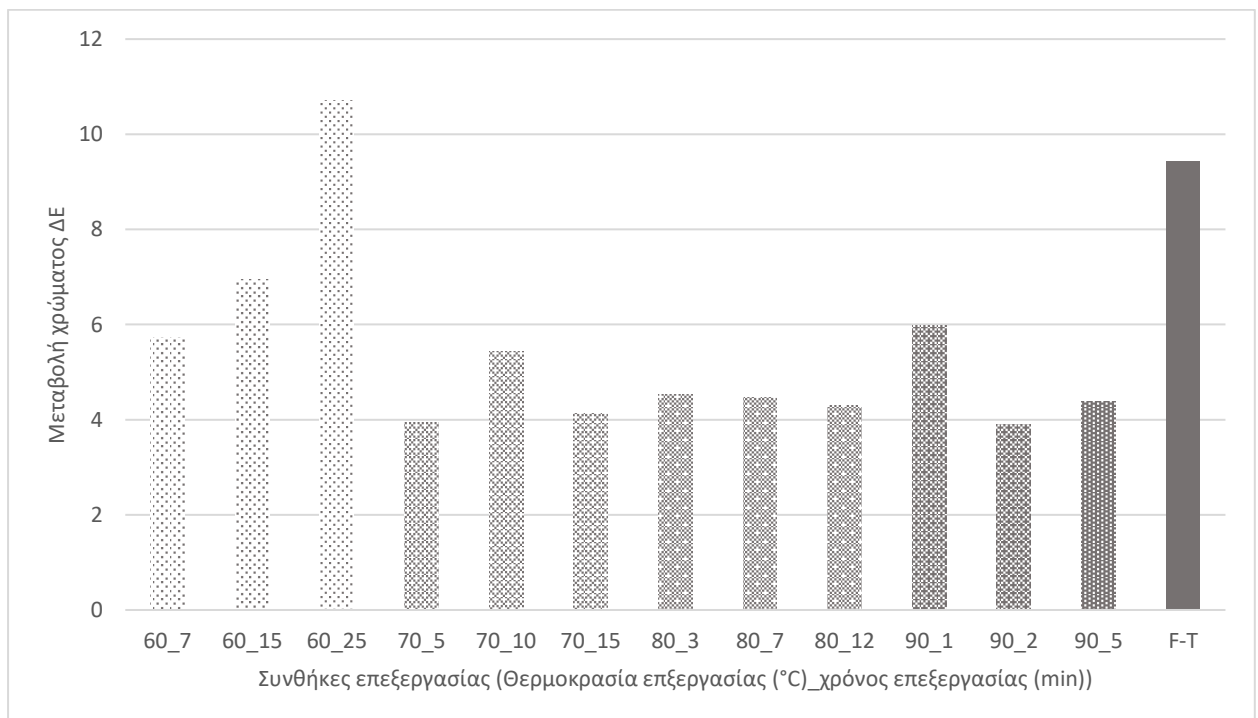
*Πίνακας 5.8: Τιμές παραμέτρων L, a, b για ανεπεξέργαστο χυμό καρότου*

	L	a	b
Control	30,3 ± 0,60	7,7 ± 0,58	18,4 ± 0,73

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι συνολικές μεταβολές ( $\Delta E$ ) του χρώματος για κάθε συνθήκη δηλαδή, η μεταβολή του χρώματος μετά από κάθε επεξεργασία σε σχέση με το ανεπεξέργαστο δείγμα χυμού ( $\Delta E=0$ ).



Διάγραμμα 5.43: Συνολική μεταβολή του χρώματος του χυμού καρότου μετά την επεξεργασία με ΠΗΠ σε ηλεκτρικά πεδία 1 kV/cm και 1,6 kV/cm και σε δείγμα μετά από κατάψυξη-απόψυξη



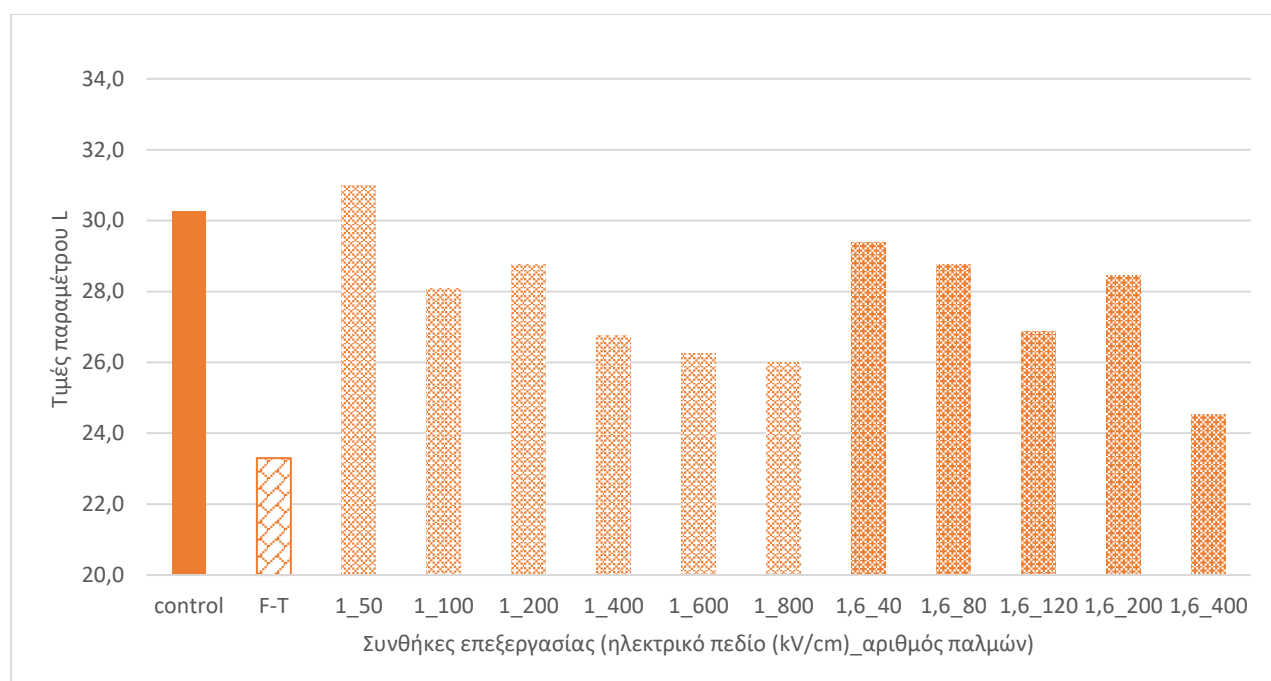
Διάγραμμα 5.44: Συνολική μεταβολή του χρώματος του χυμού καρότου μετά την θερμική επεξεργασία σε θερμοκρασίες 60°C, 70°C, 80°C, 90°C για διάφορους χρόνους επεξεργασίας και σε δείγμα μετά από κατάψυξη-απόψυξη

Παρατηρείται ότι η επεξεργασία με ΠΗΠ επιφέρει μεταβολή στο χρώμα του χυμού καρότου σε σύγκριση με το ανεπεξεργαστο δείγμα όπως και η θερμική επεξεργασία. Η μεταβολή του χρώματος του χυμού μετά την επεξεργασία του καρότου με ΠΗΠ αυξάνεται όσο η επεξεργασία γίνεται εντονότερη, δηλαδή με αύξηση του ηλεκτρικού

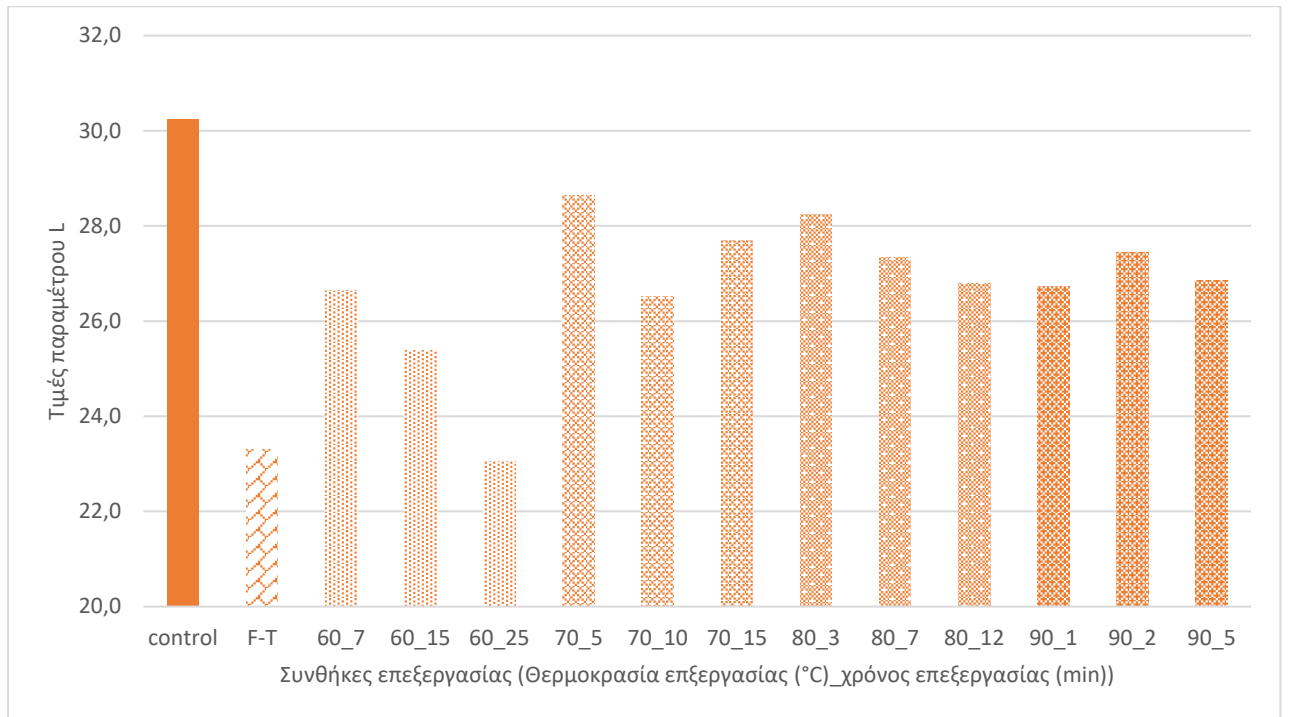
πεδίου και με αύξηση του αριθμού των παλμών που εφαρμόζονται. Μετά τη θερμική επεξεργασία του καρότου η μεταβολή του χρώματος είναι αρκετά μεγάλη ( $\Delta E > 2,5$ ) σε όλες τις θερμοκρασίες και χρόνους επεξεργασίας.

Ακόμα, ο χυμός του καρότου μετά την κατάψυξη-απόψυξη του καρότου παρουσιάζει πολύ μεγάλη μεταβολή του χρώματός του.

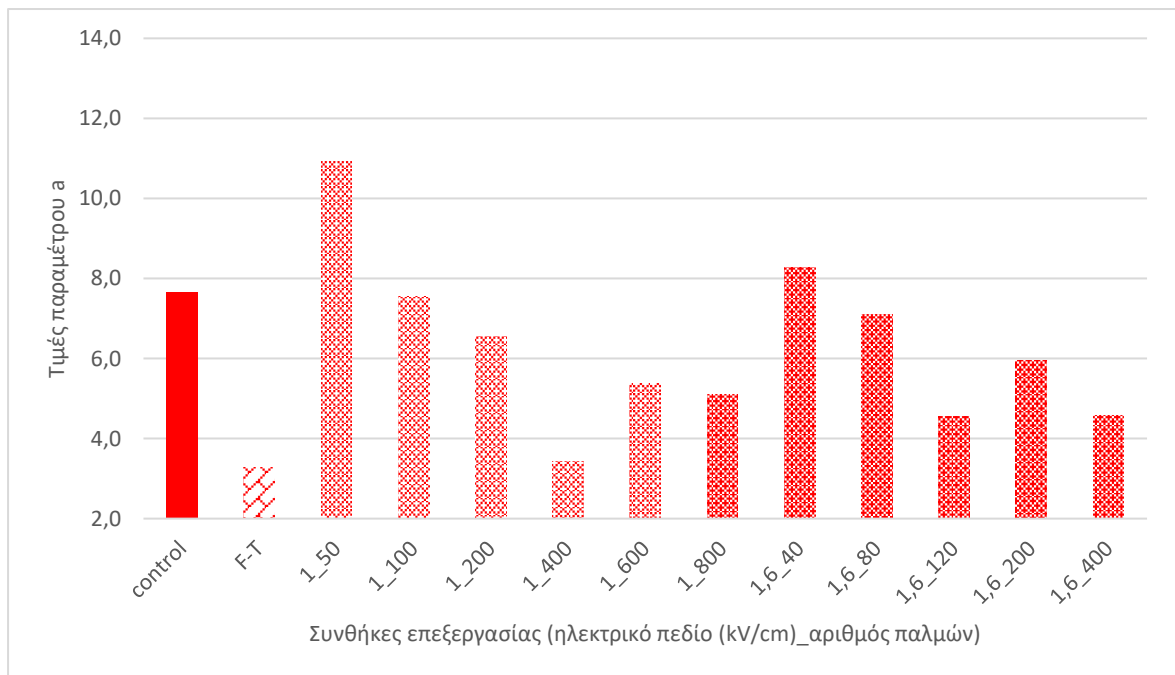
Η τιμή του  $\Delta E$  επηρεάζεται και από τις τρεις παραμέτρους L, a, b. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα για τις παραμέτρους L, a, b για κάθε συνθήκη επεξεργασίας ώστε να γίνει κατανοητό ποια παράμετρος επηρεάζει τη μεταβολή του χρώματος ανά συνθήκη.



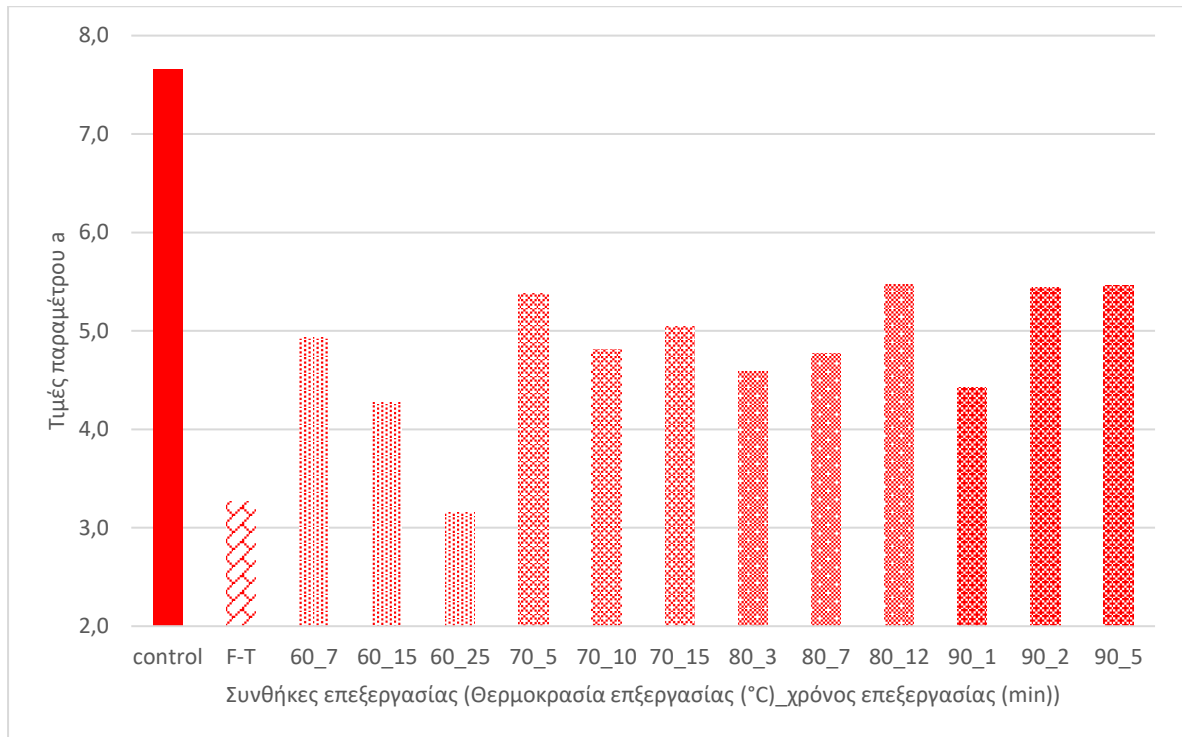
Διάγραμμα 5.45: Παράμετρος L της κλίμακας CIELab που εκφράζει τη φωτεινότητα για χυμό καρότου για ανεπεξεργαστο, επεξεργασμένο με ΠΗΠ και κατεψυγμένο-αποψυγμένο δείγμα



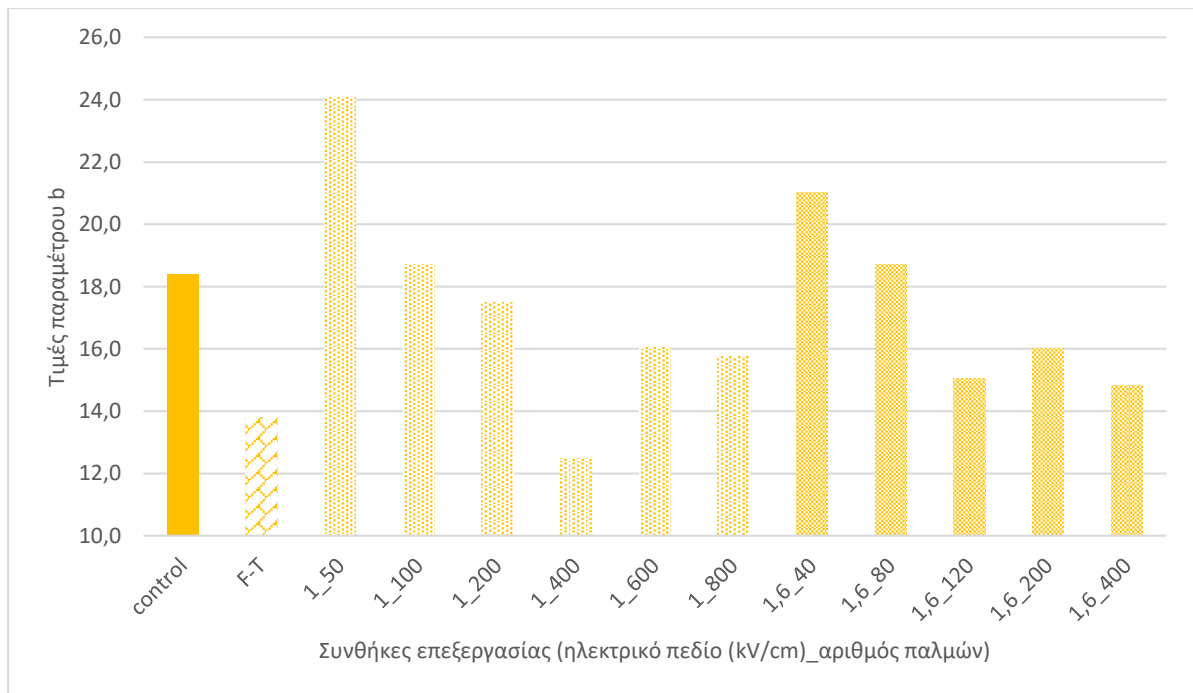
Διάγραμμα 5.46: Παράμετρος L της κλίμακας CIE Lab που εκφράζει τη φωτεινότητα για χυμό καρότου για ανεπεξεργαστο, θερμικά επεξεργασμένο και κατεψυγμένο-αποψυγμένο δείγμα



Διάγραμμα 5.47: Παράμετρος a της κλίμακας CIE Lab που εκφράζει το κόκκινο χρώμα για χυμό καρότου για ανεπεξεργαστο, επεξεργασμένο με ΠΗΠ και κατεψυγμένο-αποψυγμένο δείγμα

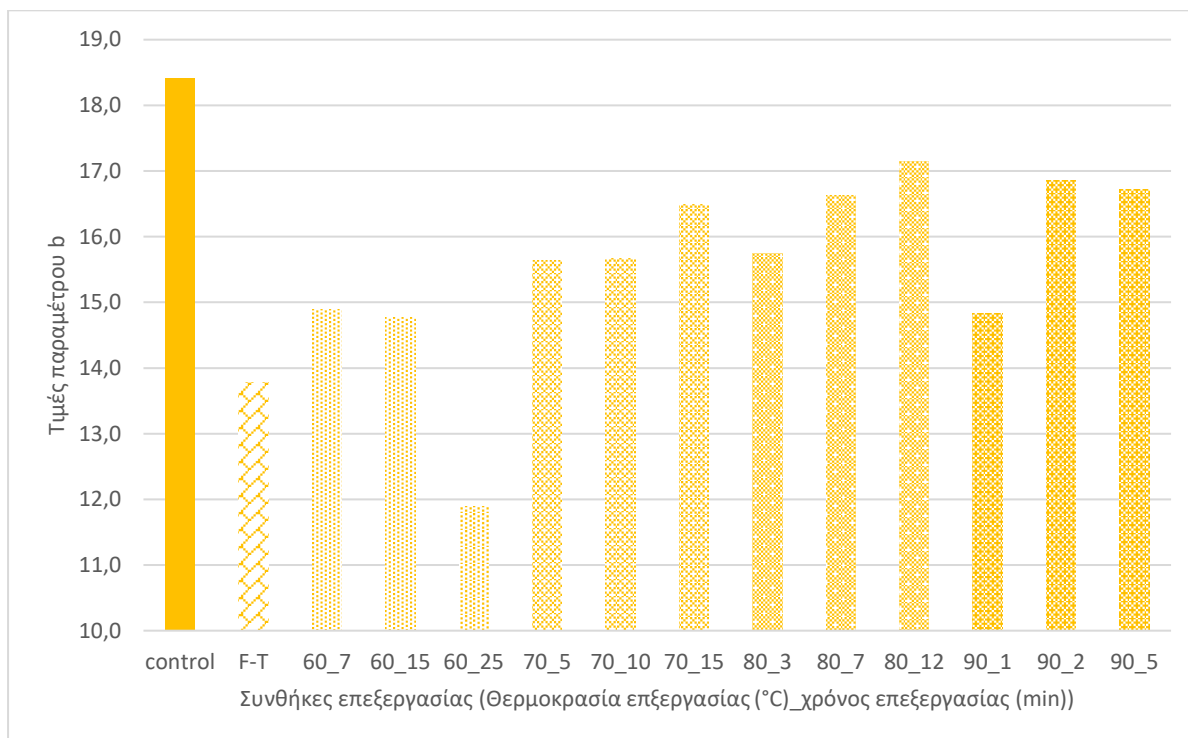


Διάγραμμα 5.48: Παράμετρος a της κλίμακας CIELab που εκφράζει το κόκκινο χρώμα για χυμό καρότου για ανεπεξέργαστο, θερμικά επεξεργασμένο και κατεψυγμένο-αποψυγμένο δείγμα



Διάγραμμα 5.49: Παράμετρος b της κλίμακας CIELab που εκφράζει το κίτρινο χρώμα για χυμό καρότου για ανεπεξέργαστο, επεξεργασμένο με ΠΗΠ και κατεψυγμένο-αποψυγμένο δείγμα





Διάγραμμα 5.50: Παράμετρος b της κλίμακας CIE Lab που εκφράζει το κίτρινο χρώμα για χυμό καρότου για ανεπεξέργαστο, θερμικά επεξεργασμένο και κατεψυγμένο-αποψυγμένο δείγμα

Μελετώντας τα παραπάνω διαγράμματα των παραμέτρων της κλίμακας CIE Lab, παρατηρείται ότι οι τρεις παράμετροι L, a, b μειώνονται περισσότερο στο χυμό από καρότα που έχουν υποστεί θερμική επεξεργασία παρά σε χυμό από καρότα που έχουν επεξεργαστεί με ΠΗΠ. Όμως και στις δύο μεθόδους προ επεξεργασίας οι τιμές των δεικτών είναι χαμηλότερες από αυτές του ανεπεξέργαστου δείγματος. Πιο αναλυτικά, ο δείκτης L που εκφράζει την φωτεινότητα στο χυμό μειώνεται με εντατικότερη επεξεργασία του λαχανικού. Κατά την επεξεργασία με ΠΗΠ το ηλεκτρικό πεδίο των 1,6 kV/cm έχει μικρότερες τιμές του δείκτη σε σύγκριση με το πεδίο του 1 kV/cm, όπως επίσης και η αύξηση του αριθμού των παλμών έχει ως αποτέλεσμα την μειωμένη φωτεινότητα στο χυμό καρότου. Στην περίπτωση της θερμικής επεξεργασίας, ο χρόνος επεξεργασίας φαίνεται να επηρεάζει αρκετά το δείκτη L καθώς τα δείγματα τα οποία έχουν επεξεργαστεί για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα παρουσιάζουν μειωμένη φωτεινότητα. Η θερμοκρασία επεξεργασίας παρατηρείται ότι δεν συσχετίζεται με το δείκτη L. Το δείγμα που έχει υποστεί κατάψυξη-απόψυξη έχει χαμηλή τιμή L που υποδηλώνει ότι είναι αρκετά σκουρόχρωμος ο χυμός.

Ο δείκτης a που εκφράζει το κόκκινο χρώμα φαίνεται να μην επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την επεξεργασία με ΠΗΠ καθώς οι τιμές των επεξεργασμένων δειγμάτων είναι παρόμοιες με του ανεπεξέργαστου. Η θερμική επεξεργασία του καρότου παρατηρείται ότι ελαττώνει την τιμή του δείκτη a στο χυμό του χωρίς όμως να υπάρχει συσχέτιση της θερμοκρασίας ή του χρόνου επεξεργασίας. Το δείγμα που έχει υποστεί κατάψυξη-απόψυξη έχει μικρή τιμή a.

Ο δείκτης  $b$  που εκφράζει το κίτρινο χρώμα φαίνεται να είναι περισσότερο μειωμένος μετά την επεξεργασία του καρότου με ΠΗΠ στο πεδίο των 1,6 kV/cm σε σχέση με το πεδίο του 1 kV/cm. Επιπλέον, με αύξηση του αριθμού των παλμών που εφαρμόζονται στο καρότο, μειώνεται και ο δείκτης του κίτρινου χρώματος. Παρόλα αυτά, οι τιμές του δείκτη  $b$  μετά την επεξεργασία με ΠΗΠ είναι παρόμοιες με αυτές του ανεπεξέργαστου δείγματος. Στην περίπτωση της θερμικής επεξεργασίας του καρότου, ο χυμός παρουσιάζει χαμηλότερες τιμές του δείκτη  $b$  σε σύγκριση με το ανεπεξέργαστο δείγμα χωρίς όμως να παρατηρείται συσχέτιση μεταξύ δείκτη και θερμοκρασίας ή χρόνου επεξεργασίας. Το δείγμα που έχει υποστεί κατάψυξη-απόψυξη έχει μικρότερη τιμή  $b$  σύγκριση με το ανεπεξέργαστο δείγμα.

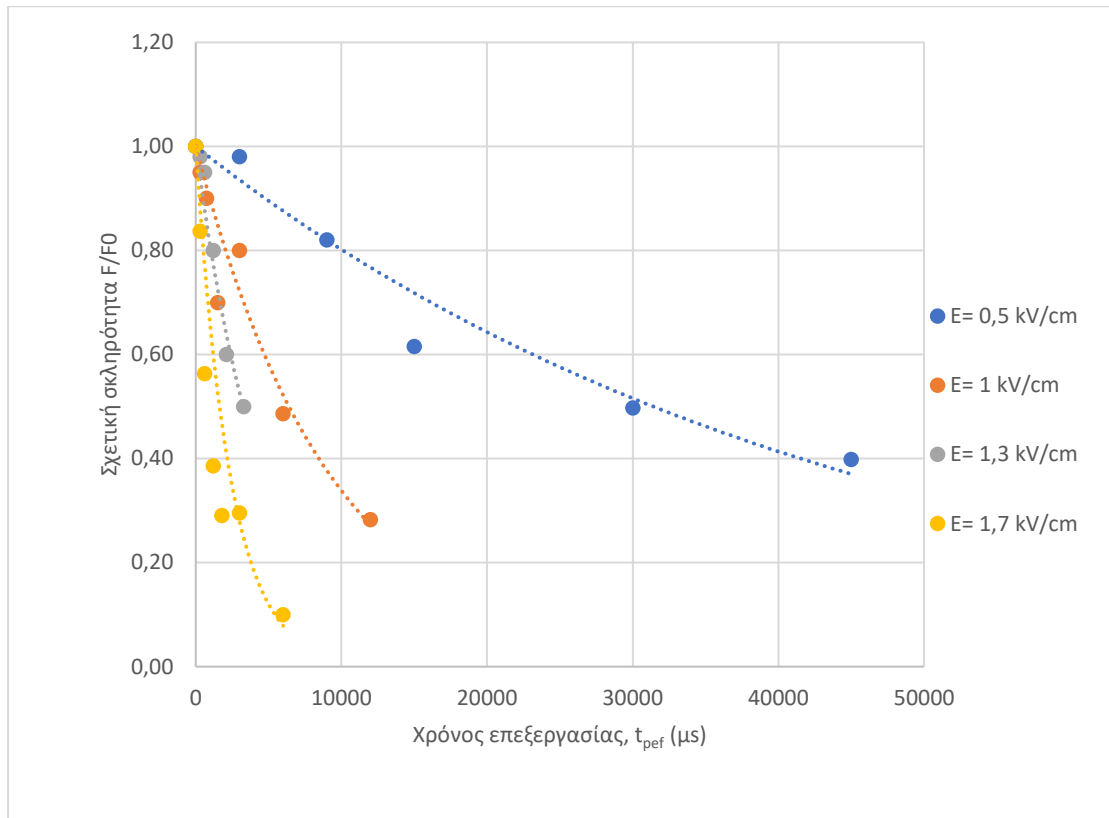
Στο πείραμα τους σε χυμό καρότου οι Chen et al. (1995) παρατήρησαν συσχέτιση της μεταβολής του χρώματος του χυμού με τη μείωση της συγκέντρωσης των καροτενοειδών μετά τη θερμική επεξεργασία του λαχανικού. Κατά την επεξεργασία του καρότου με ΠΗΠ, εκλύεται ενδοκυτταρικό υγρό λόγω της ηλεκτροδιάτρησης που υφίσταται ο φυτικός ιστός, το οποίο διευκολύνει το ενζυμικό μαύρισμα του χυμού (Mannozi et al., 2019; Wiktor et al., 2015). Μετά τη διεργασία της κατάψυξης-απόψυξης ο χυμός είναι αρκετά σκουρόχρωμος πράγμα που οφείλεται σε μηχανικές βλάβες στον ιστό του φρούτου, διαλύονται οι εύθραυστες μεμβράνες των καροτενοειδών προκαλώντας ενζυμικό μαύρισμα στο χυμό (Gallego-Castillo & Ayala-Aronte, 2018).

Συνοψίζοντας, η παράμετρος της φωτεινότητας ( $L$ ) και η παράμετρος του κίτρινου χρώματος ( $b$ ) επιδρούν περισσότερο στη μεταβολή του χρώματος ( $\Delta E$ ). Η επεξεργασία με Παλμικά Ηλεκτρικά Πεδία όπως και η θερμική επηρεάζουν το χρώμα του χυμού καρότου όμως, η διαφορά χρώματος μετά τη θερμική επεξεργασία είναι περισσότερο εμφανής (πιο σκουρόχρωμος χυμός). Στο χυμό από καρότα που έχουν υποστεί κατάψυξη-απόψυξη παρατηρείται η μεγαλύτερη υποβάθμιση στο χρώμα του.

### **5.3.4 Μηχανικές ιδιότητες καρότου**

#### **5.3.4.1 Σκληρότητα καρότου**

Για τη μελέτη της επίδρασης των ΠΗΠ σε δείγματα καρότου χρησιμοποιήθηκε ο αναλυτής υφής TA-XT2i Plus Texture Analyzer (Stable Micro Systems, UK) και πραγματοποιήθηκε δοκιμή συμπίεσης (10% παραμόρφωση) καθώς και δοκιμή κοπής (απόσταση κοπής 5 mm) σε επεξεργασμένα με ΠΗΠ και ανεπεξέργαστα δείγματα. Οι εντάσεις των ηλεκτρικών πεδίων ήταν 0,5, 1, 1,3, 1,7 kV/cm ενώ οι παλμοί που εφαρμόστηκαν ήταν 20-3000, 20-800, 20-200 και 20-400 αντίστοιχα. Οι μετρήσεις για τις δοκιμές κοπής και συμπίεσης δόθηκαν από το όργανο σε N. Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα της σχετικής σκληρότητας του καρότου:



Διάγραμμα 5.51: Σχετική σκληρότητα δείγματος καρότου συναρτήσει του χρόνου επεξεργασίας για ηλεκτρικά πεδία 0,5 kV/cm, 1 kV/cm, 1,3 kV/cm και 1,7 kV/cm. F: σκληρότητα επεξεργασμένου δείγματος,  $F_0$ : αρχική σκληρότητα ανεπεξεργαστού δείγματος

Μελετώντας το διάγραμμα 5.51 παρατηρείται ότι με αύξηση του χρόνου επεξεργασίας με ΠΗΠ η σκληρότητα του καρότου μειώνεται, πράγμα που επιβεβαιώνεται και από τους Shayanfar et al. (2014) στη μελέτη τους για την σκληρότητα μετά την επεξεργασία με ΠΗΠ σε δίσκους καρότου. Επίσης, τα υψηλότερα ηλεκτρικά πεδία επιτυγχάνουν μεγαλύτερη μείωση στη σκληρότητα και μάλιστα σε μικρότερους χρόνους επεξεργασίας. Δηλαδή, για τον ίδιο χρόνο επεξεργασίας, η σκληρότητα είναι μικρότερη στα υψηλότερα ηλεκτρικά πεδία. Στο ηλεκτρικό πεδίο των 1,7 kV/cm παρατηρείται μείωση της σκληρότητας σε σύγκριση με την αρχική έως και 90%. Οι πειραματικές μετρήσεις περιγράφονται από την παρακάτω εκθετική εξίσωση:

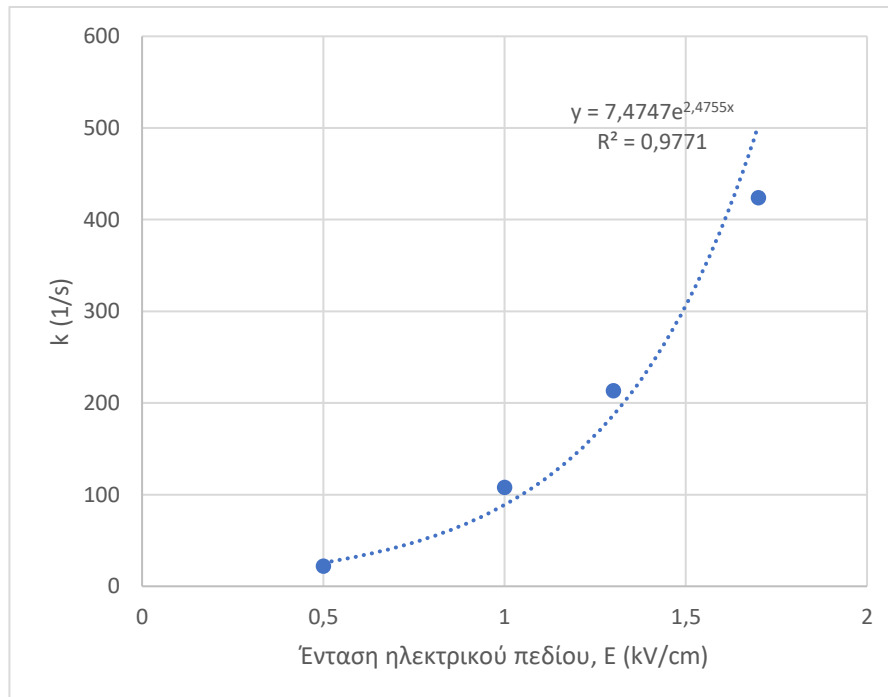
$$\frac{F}{F_0} = e^{-(k \cdot t_{perf})} \quad (5.6)$$

όπου, F η σκληρότητα του επεξεργασμένου δείγματος (N),  $F_0$  η αρχική σκληρότητα του ανεπεξεργαστού δείγματος (N),  $t_{perf}$  ο χρόνος επεξεργασίας με ΠΗΠ (μs) και k η σταθερά της εξίσωσης.

Στον παρακάτω πίνακα και στο διάγραμμα 5.52 παρουσιάζονται οι τιμές τις παραμέτρου k και η συνάρτηση της με την ένταση κάθε ηλεκτρικού πεδίου που μελετήθηκε.

Πίνακας 5.9: Τιμές σταθεράς  $k$  για κάθε ένταση ηλεκτρικού πεδίου

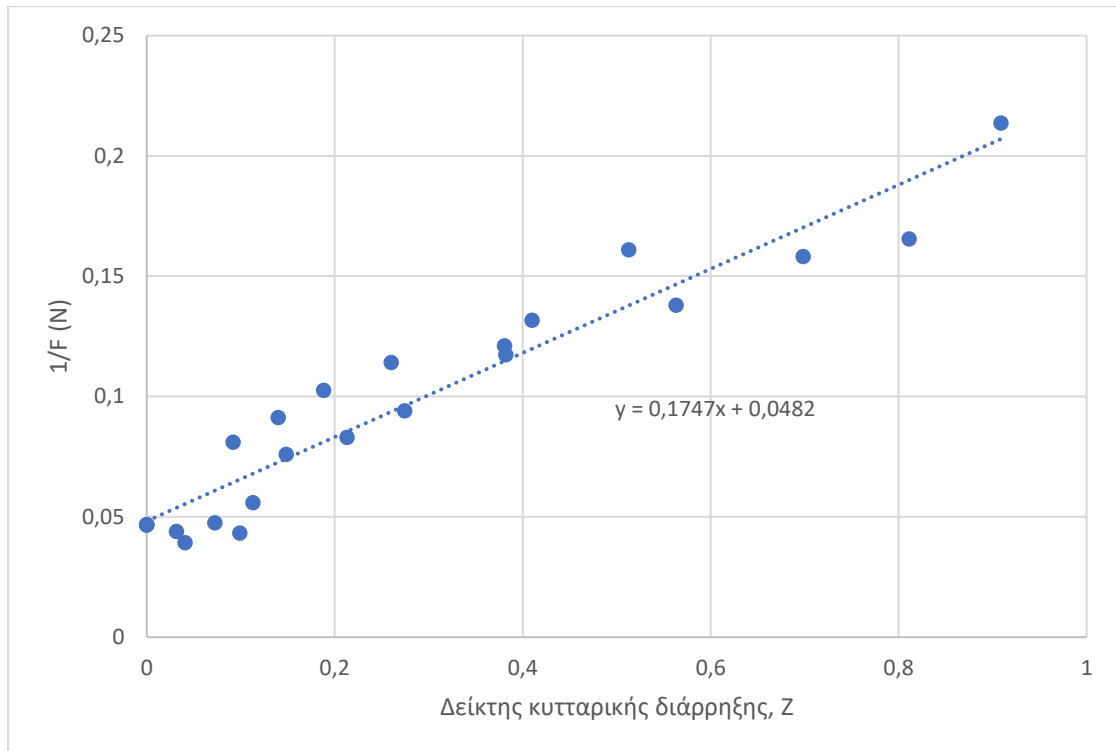
E (kV/cm)	k(1/s)
0,5	22
1	108
1,3	213
1,7	424



Διάγραμμα 5.52: Εξάρτηση της σταθεράς  $k$  από την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι με αύξηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου η σταθερά  $k$  αυξάνεται δηλαδή, φανερώνεται η εντονότερη επίδραση του χρόνου επεξεργασίας στη μείωση της σκληρότητας στα δείγματα καρότου.

Η μείωση της σκληρότητας του καρότου οφείλεται στην κυτταρική διάρρηξη του φυτικού ιστού λόγω της ηλεκτροδιάτρησης που υφίσταται κατά την επεξεργασία με ΠΗΠ. Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα συσχέτισης της σκληρότητας με τον δείκτη κυτταρικής διάρρηξης  $Z$ :



Διάγραμμα 5.53: Συσχέτιση της σκληρότητας με το δείκτη κυτταρικής διάρρηξης σε δείγμα καρότου

Μελετώντας το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται μείωση της σκληρότητας του καρότου με αύξηση του δείκτη κυτταρικής διάρρηξης. Πιο συγκεκριμένα, η μέτρηση του Z με τη μέθοδο υψηλής-χαμηλής συχνότητας συσχετίζεται απόλυτα με τη σκληρότητα του δείγματος. Η μαθηματική εξίσωση που εκφράζεται από το παραπάνω διάγραμμα είναι η εξής:

$$\frac{1}{\text{Φσυμπίεσης (N)}} = 0,1747 * \text{ποσοστό κυτταρικής διάρρηξης} + 0,0482 \quad (5.7)$$

Το αποτέλεσμα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί από την βιομηχανία αφού με μία απλή μέτρηση της σκληρότητας του λαχανικού με φορητό όργανο μέτρησης σκληρότητας, μπορεί να υπολογίσει την κυτταρική διάρρηξη που έχει υποστεί.

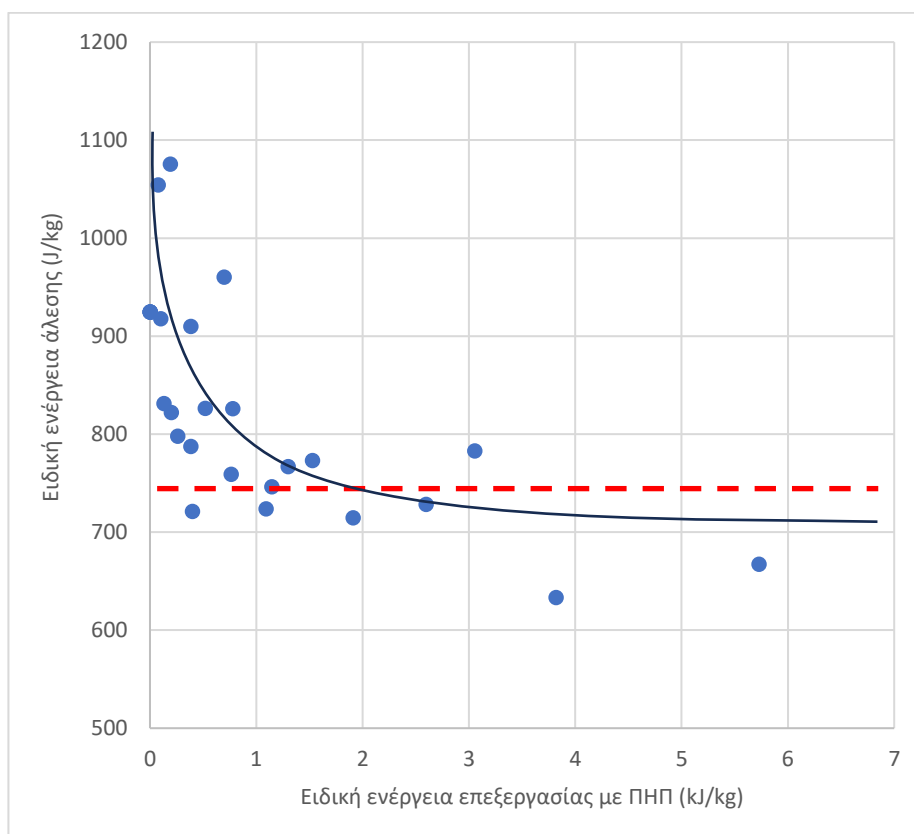
#### **5.3.4.2 Ενέργεια άλεσης καρότου**

Για τον προσδιορισμό της δύναμης κοπής σε επεξεργασμένα με ΠΗΠ δείγματα καρότου πραγματοποιήθηκαν δοκιμές κοπής στον αναλυτή υφής TA-XT2i Plus Texture Analyzer (Stable Micro Systems, UK) (απόσταση κοπής 5 mm). Χρησιμοποιώντας τις τιμές για τη δύναμη κοπής, προσδιορίστηκε η σταθερά K της εξίσωσης Rittinger η οποία συνδέει την απαιτούμενη ειδική ενέργεια άλεσης με τη μείωση του μεγέθους των σωματιδίων:

$$W = K * \left( \frac{1}{x} - \frac{1}{x_0} \right) \quad (5.8)$$

όπου K η σταθερά της εξίσωσης, x και x<sub>0</sub> το μήκος των σωματιδίων μετά και πριν την άλεση αντίστοιχα.

Προσδιορίστηκε η απαιτούμενη ενέργεια για άλεση του καρότου από χαρακτηριστικό μήκος 10 cm (ολόκληρο καρότο) σε 2 mm (αλεσμένο καρότο), διαστάσεις που είναι κατάλληλες για τη χυμοποίηση του καρότου με πρέσα. Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα συσχέτισης της προσφερόμενης ενέργειας  $W_s$  (kJ/kg) κατά την επεξεργασία του καρότου με ΠΗΠ και της ειδικής ενέργειας άλεσης του.



Διάγραμμα 5.54: Συσχέτιση προσφερόμενης ενέργειας κατά την επεξεργασία με ΠΗΠ και ενέργειας άλεσης καρότου

Μελετώντας το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται μείωση της απαιτούμενης ενέργειας για άλεση όσο αυξάνεται η προσφερόμενη ενέργεια κατά την επεξεργασία με ΠΗΠ. Η κόκκινη γραμμή συμβολίζει την απαιτούμενη ενέργεια για άλεση η οποία είναι 740 J/kg μετά από θερμική επεξεργασία του καρότου στους 90°C για 5 λεπτά. Η ενέργεια που προσφέρεται κατά τη θερμική επεξεργασία είναι 250 kJ/kg για να επιτευχθεί ενέργεια άλεσης 740 J/kg ενώ για την επεξεργασία με ΠΗΠ 2 kJ/kg.

## **6 Συμπεράσματα**

Τα φρούτα και τα λαχανικά αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της βιομηχανίας τροφίμων λόγω της υψηλής θρεπτικής αξίας που τα χαρακτηρίζουν καθώς και της ποικιλίας στα προϊόντα τους. Μια σημαντική διεργασία για την αξιοποίηση των φρέσκων φρούτων και λαχανικών είναι η χυμοποίηση για παραγωγή χυμού. Ωστόσο, συχνό πρόβλημα για τη βιομηχανία αποτελούν οι σκληροί φυτικοί ιστοί που δυσχεραίνουν την εξαγωγή του χυμού και φθείρουν τον εξοπλισμό. Στις μέρες μας η ευρέως χρησιμοποιούμενη διεργασία από τη βιομηχανία για τη μεταβολή της υφής των φρούτων και των λαχανικών είναι η θερμική επεξεργασία ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερη απόδοση κατά τη χυμοποίηση καθώς και μείωση στη δύναμη κοπής. Η θερμική επεξεργασία έχει υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις καθώς και αυξημένους χρόνους επεξεργασίας ενώ ταυτόχρονα αλλοιώνει τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των παραγόμενων προϊόντων. Η έρευνα και εφαρμογή καινοτόμων διεργασιών που δύναται να χρησιμοποιηθούν από τη βιομηχανία για τη μεταβολή της υφής σε φρούτα και λαχανικά κρίνεται αναγκαία.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η μη θερμική διεργασία των Παλμικών Ηλεκτρικών Πεδίων (ΠΗΠ). Η διεργασία αυτή ενισχύει την κυτταρική διαπερατότητα μέσω της ηλεκτροδιάτρησης που υφίσταται ο κυτταρικός ιστός, μεταβάλλοντας τα χαρακτηριστικά υφής των φρούτων και λαχανικών και βελτιώνοντας τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας σε σύντομους χρόνους επεξεργασίας. Η επεξεργασία με ΠΗΠ οδήγησε στην διάρρηξη των κυτταρικών τοιχωμάτων σε δείγματα ροδάκινου και καρότου. Η ηλεκτροδιάτρηση του φυτικού ιστού κατέστησε τα δείγματα πιο μαλακά σε σύγκριση με το ανεπεξέργαστο δείγμα, πράγμα που επιβεβαιώθηκε και από δοκιμές συμπίεσης και κοπής από τον αναλυτή υφής. Ακόμα, τα επεξεργασμένα με ΠΗΠ δείγματα εμφάνισαν υψηλότερες αποδόσεις κατά τη χυμοποίηση τους σε σύγκριση με το ανεπεξέργαστο δείγμα, παρόμοιες με τις αποδόσεις δειγμάτων που έχουν υποστεί θερμική επεξεργασία ή κατάψυξη-απόψυξη. Η εξοικονόμηση ενέργειας για την επεξεργασία είναι επίσης σημαντική, με την επεξεργασία με ΠΗΠ να απαιτεί έως και 100 φορές χαμηλότερη προσφορά ενέργειας για την επίτευξη του ίδιου αποτελέσματος με τη θερμική διεργασία.

Επίσης, τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των παραγόμενων χυμών παραμένουν σχεδόν αναλλοίωτα από την επεξεργασία με ΠΗΠ σε σύγκριση με το ανεπεξέργαστο δείγμα. Αντιθέτως, θερμικές διεργασίες όπως το ζεμάτισμα και η κατάψυξη-απόψυξη φαίνεται να υποβαθμίζουν σημαντικά ποιοτικά χαρακτηριστικά του χυμού όπως είναι το χρώμα.

Τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας καταδεικνύουν την καταλληλότητα της τεχνολογίας των Παλμικών Ηλεκτρικών Πεδίων ως μέθοδο προ επεξεργασίας φρούτων και λαχανικών στη βιομηχανία αφού επιτυγχάνουν μεταβολές στην υφή, βελτίωση των φαινομένων μεταφοράς μάζας σε σύντομο χρονικό διάστημα επεξεργασίας διατηρώντας τα ποιοτικά χαρακτηριστικά και παρέχοντας προϊόντα υψηλής ποιότητας. Για το λόγο αυτό, προτείνεται η περαιτέρω μελέτη της τεχνολογίας των Παλμικών Ηλεκτρικών Πεδίων ως μέθοδος προ επεξεργασίας και σε άλλα φρούτα και λαχανικά. Ως συνέχεια της παρούσας

διπλωματικής εργασίας προτείνεται να πραγματοποιηθούν αναλυτική οικονομοτεχνική μελέτη της εφαρμογής ΠΗΠ σε βιομηχανικό επίπεδο, μεταφορά των αποτελεσμάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας σε βιομηχανικό επίπεδο και δοκιμή της διεργασίας και σε άλλα φρούτα με χαμηλές αποδόσεις χυμοποίησης όπως το ακτινίδιο.



## **Βιβλιογραφία**

- Abdullah, N., & Chin, N. L. (2014). Application of Thermosonication Treatment in Processing and Production of High Quality and Safe-to-Drink Fruit Juices. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 2, 320–327.
- Abenoza, M., Benito, M., Saldaña, G., Álvarez, I., Raso, J., & Sánchez-Gimeno, A. C. (2013). Effects of Pulsed Electric Field on Yield Extraction and Quality of Olive Oil. *Food and Bioprocess Technology*, 6(6), 1367–1373.
- Ade-Omowaye, B. I. O., Rastogi, N. K., Angersbach, A., & Knorr, D. (2001). Effects of high hydrostatic pressure or high intensity electrical field pulse pre-treatment on dehydration characteristics of red paprika. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2(1), 1–7.
- Akın, E., & Evrendilek, G. A. (2009). Effect of Pulsed Electric Fields on Physical, Chemical, and Microbiological Properties of Formulated Carrot Juice. *Food Science and Technology International*, 15(3), 275–282.
- Albu, S., Joyce, E., Paniwnyk, L., Lorimer, J. P., & Mason, T. J. (2004). Potential for the use of ultrasound in the extraction of antioxidants from *Rosmarinus officinalis* for the food and pharmaceutical industry. *Ultrasonics Sonochemistry*, 11(3–4), 261–265.
- Álvarez, I., Condón, S., & Raso, J. (2006). *Microbial Inactivation by Pulsed Electric Fields* (pp. 97–129).
- Álvarez, I., Raso, J., Sala, F. J., & Condón, S. (2003). Inactivation of *Yersinia enterocolitica* by pulsed electric fields. *Food Microbiology*, 20(6), 691–700.
- Angersbach, A., Heinz, V., & Knorr, D. (1999). Electrophysiological Model of Intact and Processed Plant Tissues: Cell Disintegration Criteria. *Biotechnology Progress*, 15(4), 753–762.
- Asavasanti, S., Ersus, S., Ristenpart, W., Stroeve, P., & Barrett, D. M. (2010). Critical Electric Field Strengths of Onion Tissues Treated by Pulsed Electric Fields. *Journal of Food Science*, 75(7), E433–E443.
- Babic, I., Amiot, M. J., Nguyen, C., & Aubert, S. (1993). Changes in Phenolic Content in Fresh Ready-to-use Shredded Carrots during Storage. *Journal of Food Science*, 58(2), 351–356.
- Bao, B., & Chang, K. C. (1994). Carrot Juice Color, Carotenoids, and Nonstarchy Polysaccharides as Affected by Processing Conditions. *Journal of Food Science*, 59(6), 1155–1158.

- Bazhal, M., & Vorobiev, E. (2000). Electrical treatment of apple cossettes for intensifying juice pressing. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *80*(11), 1668–1674.
- Block, G. (1994). Nutrient Sources of Provitamin A Carotenoids in the American Diet. *American Journal of Epidemiology*, *139*(3), 290–293.
- Bouzzara, H., & Vorobiev, E. (2003). Solid–liquid expression of cellular materials enhanced by pulsed electric field. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, *42*(4), 249–257.
- Brandenburg, W. A. (1981). Possible relationships between wild and cultivated carrots (*Daucus carota* L.) in the Netherlands. *Die Kulturpflanze*, *29*(1), 369–375.
- Byrne, D. H., Raseira, M. B., Bassi, D., Piagnani, M. C., Gasic, K., Reighard, G. L., Moreno, M. A., & Pérez, S. (2012). Peach. In *Fruit Breeding* (pp. 505–569). Springer US.
- Carrera, C., Ruiz-Rodríguez, A., Palma, M., & Barroso, C. G. (2015). Ultrasound-assisted extraction of amino acids from grapes. *Ultrasonics Sonochemistry*, *22*, 499–505.
- Chen, B. H., Peng, H. Y., & Chen, H. E. (1995). Changes of Carotenoids, Color, and Vitamin A Contents during Processing of Carrot Juice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *43*(7), 1912–1918.
- Crelier, S., Robert, M.-C., Claude, J., & Juillerat, M.-A. (2001). Tomato (*Lycopersicon esculentum*) Pectin Methyltransferase and Polygalacturonase Behaviors Regarding Heat- and Pressure-Induced Inactivation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *49*(11), 5566–5575.
- De Vito. (2006). *Application of Pulsed Electric Field (PEF): Techniques in Food Processing*.
- De Vito, F., Ferrari, G., I. Lebovka, N., V. Shynkaryk, N., & Vorobiev, E. (2008). Pulse Duration and Efficiency of Soft Cellular Tissue Disintegration by Pulsed Electric Fields. *Food and Bioprocess Technology*, *1*(4), 307–313.
- Deeth, H. C., Datta, N., Ross, A. I. V., & Dam, X. T. (2007). Pulsed Electric Field Technology: Effect on Milk and Fruit Juices. In *Advances in Thermal and Non-Thermal Food Preservation* (pp. 241–269). Blackwell Publishing.
- Di Giacomo, G., & Taglieri, L. (2009). A New High-Yield Process for the Industrial Production of Carrot Juice. *Food and Bioprocess Technology*, *2*(4), 441–446.

- Donsì, F., Ferrari, G., & Pataro, G. (2010). Applications of Pulsed Electric Field Treatments for the Enhancement of Mass Transfer from Vegetable Tissue. *Food Engineering Reviews*, 2(2), 109–130.
- Downing, D.L. Canning Operations. In *A Complete Course in Canning and Related Processes: Book 1. Fundamental Information on Canning*, 13th Ed.; CTI Publications, Inc.: MD, 1996; 269–272.
- du Toit, L. J., Le Clerc, V., & Briard, M. (2019). *Genetics and Genomics of Carrot Biotic Stress* (pp. 317–362).
- El Zakhem, H., Lanoisellé, J.-L., Lebovka, N. I., Nonus, M., & Vorobiev, E. (2006). Behavior of yeast cells in aqueous suspension affected by pulsed electric field. *Journal of Colloid and Interface Science*, 300(2), 553–563.
- Eshtiaghi, M. N., & Knorr, D. (2002). High electric field pulse pretreatment: potential for sugar beet processing. *Journal of Food Engineering*, 52(3), 265–272.
- Fiala, A., Wouters, P. C., van den Bosch, E., & Creyghton, Y. L. M. (2001). Coupled electrical-fluid model of pulsed electric field treatment in a model food system. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2(4), 229–238.
- Gachovska, T. K., Simpson, M. V, Ngadi, M. O., & Raghavan, G. (2009). Pulsed electric field treatment of carrots before drying and rehydration. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 89(14), 2372–2376.
- Gallego-Castillo, S., & Ayala-Aponte, A. A. (2018). Changes in physical properties of sweet potato due to effects of thermal pre-treatments for puree production. *DYNA*, 85(207), 135–142.
- Garde-Cerdán, T., Arias-Gil, M., Marsellés-Fontanet, A. R., Ancín-Azpilicueta, C., & Martín-Belloso, O. (2007). Effects of thermal and non-thermal processing treatments on fatty acids and free amino acids of grape juice. *Food Control*, 18(5), 473–479.
- Garza, S., Ibarz, A., Pagán, J., & Giner, J. (1999). Non-enzymatic browning in peach puree during heating. *Food Research International*, 32(5), 335–343.
- Góngora-Nieto, M. M., Pedrow, P. D., Swanson, B. G., & Barbosa-Cánovas, G. V. (2003). Energy analysis of liquid whole egg pasteurized by pulsed electric fields. *Journal of Food Engineering*, 57(3), 209–216.
- Grimi, N., Lebovka, N., Vorobiev, E., & Vaxelaire, J. (2009). Compressing behavior and texture evaluation for potatoes pretreated by pulsed electric field. *Journal of Texture Studies*, 40(2), 208–224.

- Grimi, N., Mamouni, F., Lebovka, N., Vorobiev, E., & Vaxelaire, J. (2011). Impact of apple processing modes on extracted juice quality: Pressing assisted by pulsed electric fields. *Journal of Food Engineering*, *103*(1), 52–61.
- Guderjan, M., Elez-Martínez, P., & Knorr, D. (2007). Application of pulsed electric fields at oil yield and content of functional food ingredients at the production of rapeseed oil. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *8*(1), 55–62.
- Hansen, S. L., Purup, S., & Christensen, L. P. (2003). Bioactivity of falcarinol and the influence of processing and storage on its content in carrots (*Daucus carota* L). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *83*(10), 1010–1017.
- Hashemi, S. M. B., Jafarpour, D., & Jouki, M. (2021). Improving bioactive properties of peach juice using *Lactobacillus* strains fermentation: Antagonistic and anti-adhesion effects, anti-inflammatory and antioxidant properties, and Maillard reaction inhibition. *Food Chemistry*, *365*, 130501.
- Heinz, V., & Toepfl, S. (2022). *Pulsed Electric Fields Industrial Equipment Design* (pp. 489–504).
- Hill, K., Ostermeier, R., Töpfl, S., & Heinz, V. (2022). *Pulsed Electric Fields in the Potato Industry* (pp. 325–335).
- Huang, K., & Wang, J. (2009). Designs of pulsed electric fields treatment chambers for liquid foods pasteurization process: A review. *Journal of Food Engineering*, *95*(2), 227–239.
- Halsheger, H., Potel, J., & Niemann, E.-G. (1981). Killing of bacteria with electric pulses of high field strength. *Radiation and Environmental Biophysics*, *20*(1), 53–65.
- Jäger, H. (2012). *Process performance analysis of pulsed electric field (PEF) food applications vorgelegt von Diplom-Ingenieur*.
- Karabulut, I., Gokbulut, I., Bilenler, T., Sislioglu, K., Ozdemir, I. S., Bahar, B., Çelik, B., & Seyhan, F. (2018). Effect of fruit maturity level on quality, sensory properties and volatile composition of two common apricot (*Prunus armeniaca* L.) varieties. *Journal of Food Science and Technology*, *55*(7), 2671–2678.
- Kaur, P., Rai, D. R., & Paul, S. (2011). Quality changes in fresh-cut spinach (*spinacia oleracea*) under modified atmospheres with perforations. *Journal of Food Quality*, *34*(1), 10–18.
- Kidmose, U., Hansen, S. L., Christensen, L. P., Edelenbos, M., Larsen, E., & Nørbaek, R. (2006). Effects of Genotype, Root Size, Storage, and Processing on Bioactive

- Compounds in Organically Grown Carrots (*Daucus carota* L.). *Journal of Food Science*, 69(9), S388–S394.
- Knorr, D., & Angersbach, A. (1998). Impact of high-intensity electric field pulses on plant membrane permeabilization. *Trends in Food Science & Technology*, 9(5), 185–191.
- Lebovka, N. I., Bazhal, M. I., & Vorobiev, E. (2001). Pulsed electric field breakage of cellular tissues: visualisation of percolative properties. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2(2), 113–125.
- Lewis M., & Heppell N. (2000). *Continuous Thermal Processing of Foods: Pasteurization and UHT Sterilization*.
- Li, Y., Fabiano-Tixier, A. S., Tomao, V., Cravotto, G., & Chemat, F. (2013). Green ultrasound-assisted extraction of carotenoids based on the bio-refinery concept using sunflower oil as an alternative solvent. *Ultrasonics Sonochemistry*, 20(1), 12–18.
- Lin, Z., & Schyvens, E. (1995). Influence of blanching treatments on the texture and color of some preprocessed vegetables and fruits. *Journal of Food Processing and Preservation*, 19(6), 451–465.
- Linhares, M. de F. D., Alves Filho, E. G., Silva, L. M. A., Fonteles, T. V., Wurlitzer, N. J., de Brito, E. S., Fernandes, F. A. N., & Rodrigues, S. (2020). Thermal and non-thermal processing effect on açai juice composition. *Food Research International*, 136, 109506.
- Liu, J., Wang, R., Wang, X., Yang, L., Zhang, Q., Shan, Y., & Ding, S. (2019). Effect of blanching and drying temperatures on the browning-related enzymes and physicochemical properties of lily bulb flours. *Journal of Food Processing and Preservation*, 43(12).
- López, N., Puértolas, E., Condón, S., Raso, J., & Ignacio Álvarez. (2009). Enhancement of the solid-liquid extraction of sucrose from sugar beet (*Beta vulgaris*) by pulsed electric fields. *LWT - Food Science and Technology*, 42(10), 1674–1680.
- Luo, C.-X., Schnabel, G., Hu, M., & De Cal, A. (2022). Global distribution and management of peach diseases. *Phytopathology Research*, 4(1), 30.
- Maged M., & Ayman E. (2012). Pulsed Electric Fields for Food Processing Technology. In *Structure and Function of Food Engineering*. InTech.
- Mannozi, C., Rompoonpol, K., Fauster, T., Tylewicz, U., Romani, S., Dalla Rosa, M., & Jaeger, H. (2019). Influence of Pulsed Electric Field and Ohmic Heating

- Pretreatments on Enzyme and Antioxidant Activity of Fruit and Vegetable Juices. *Foods*, 8(7), 247.
- Massa, A., Gonzalez, C., Maestro, A., Labanda, J., & Ibarz, A. (2010). Rheological characterization of peach purees. *Journal of Texture Studies*, 41(4), 532–548.
- Mazzotta, A. S. (2001). Thermal Inactivation of Stationary-Phase and Acid-Adapted *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella*, and *Listeria monocytogenes* in Fruit Juices. *Journal of Food Protection*, 64(3), 315–320.
- Mena, P., Vegara, S., Martí, N., García-Viguera, C., Saura, D., & Valero, M. (2013). Changes on indigenous microbiota, color, bioactive compounds and antioxidant activity of pasteurised pomegranate juice. *Food Chemistry*, 141(3), 2122–2129.
- Nagata, M., & Yamashita, I. (1992). Simple Method for Simultaneous Determination of Chlorophyll and Carotenoids in Tomato Fruit. *Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi*, 39(10), 925–928.
- Nanaki, E., & Koroneos, C. (2018). Sustainable Peach Compote Production: A Life Cycle Thinking Approach. *Sustainability*, 10(11), 4229.
- Fellows P. (2000). *Processing using electric fields, high hydrostatic pressure, light or ultrasound*.
- Park, S. H., Lamsal, B. P., & Balasubramaniam, V. M. (2014). Principles of Food Processing. In *Food Processing* (pp. 1–15). Wiley.
- Parniakov, O., Bals, O., Lebovka, N., & Vorobiev, E. (2016). Effects of pulsed electric fields assisted osmotic dehydration on freezing-thawing and texture of apple tissue. *Journal of Food Engineering*, 183, 32–38.
- Petruzzi, L., Campaniello, D., Speranza, B., Corbo, M. R., Sinigaglia, M., & Bevilacqua, A. (2017). Thermal Treatments for Fruit and Vegetable Juices and Beverages: A Literature Overview. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 16(4), 668–691.
- Picart, L., Dumay, E., & Cheftel, J. C. (2002). Inactivation of *Listeria innocua* in dairy fluids by pulsed electric fields: influence of electric parameters and food composition. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 3(4), 357–369.
- Praporscic, I., Muravetchi, V., & Vorobiev, E. (2004). Constant Rate Expressing of Juice from Biological Tissue Enhanced by Pulsed Electric Field. *Drying Technology*, 22(10), 2395–2408.

- 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.
- Qin B, Barbosa-Canovas, G. V., Swanson, B. G., Pedrow, P. D., & Olsen, R. G. (1998). Inactivating microorganisms using a pulsed electric field continuous treatment system. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 34(1), 43–50.
- Qin, B.-L., Chang, F.-J., Barbosa-Cánovas, G. V., & Swanson, B. G. (1995). Nonthermal inactivation of *Saccharomyces cerevisiae* in apple juice using pulsed electric fields. *LWT - Food Science and Technology*, 28(6), 564–568.
- Qin B., Zhang Q., Barbosa-Cánovas G. V., Swanson B. G., & Pedrow P. D. (1995). Pulsed Electric Field Treatment Chamber Design for Liquid Food Pasteurization Using a Finite Element Method. *Transactions of the ASAE*, 38(2), 557–565.
- Quitão-Teixeira, L. J., Aguiló-Aguayo, I., Ramos, A. M., & Martín-Belloso, O. (2008). Inactivation of Oxidative Enzymes by High-Intensity Pulsed Electric Field for Retention of Color in Carrot Juice. *Food and Bioprocess Technology*, 1(4), 364–373.
- Rahman, M.S.; Perera, C. Drying and Food Preservation. In Handbook of Food Preservation; Rahman, M.S., Ed.; Marcel Dekker, Inc.: NY, 1999; 192–194.
- Ramesh, M. N., Wolf, W., Tevini, D., & Bognar, A. (2002). Microwave Blanching of Vegetables. *Journal of Food Science*, 67(1), 390–398.
- Raso, J., Calderón, M. L., Góngora, M., Barbosa-Cánovas, G. V., & Swanson, B. G. (2006). Inactivation of *Zygosaccharomyces Bailii* in Fruit Juices by Heat, High Hydrostatic Pressure and Pulsed Electric Fields. *Journal of Food Science*, 63(6), 1042–1044.
- Raso, J., & Heinz, V. (2010). *Pulsed electric field technology for the food industry. Fundamentals and applications.*
- Raul, L. G., Ricardo, A. B., & Enrique, R. S. (1984). Effect of Soaking-Blanching Conditions on Glucose Losses in Potato Slices. *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal*, 17(2), 111–113.
- Reiter, M., Stuparić, M., Neidhart, S., & Carle, R. (2003). The role of process technology in carrot juice cloud stability. *LWT - Food Science and Technology*, 36(2), 165–172.
- Robertson, J. A., Horvat, R. J., Lyon, B. G., Meredith, F. I., Senter, S. D., & Okle, W. R. (1990). Comparison of Quality Characteristics of Selected Yellow-and White-fleshed Peach Cultivars. *Journal of Food Science*, 55(5), 1308–1311.

- Rodrigo, D., Cortés, C., Clynen, E., Schoofs, L., Loey, A. Van, & Hendrickx, M. (2006). Thermal and high-pressure stability of purified polygalacturonase and pectinmethylesterase from four different tomato processing varieties. *Food Research International*, 39(4), 440–448.
- Roohinejad, S., Everett, D. W., & Oey, I. (2014). Effect of pulsed electric field processing on carotenoid extractability of carrot purée. *International Journal of Food Science & Technology*, 49(9), 2120–2127.
- Roselló-Soto, E., Barba, F. J., Parniakov, O., Galanakis, C. M., Lebovka, N., Grimi, N., & Vorobiev, E. (2015). High Voltage Electrical Discharges, Pulsed Electric Field, and Ultrasound Assisted Extraction of Protein and Phenolic Compounds from Olive Kernel. *Food and Bioprocess Technology*, 8(4), 885–894.
- Rubatzky, V. E., Quiros, C. F., & Simon, P.W. (1999). Carrots and Related Vegetable Umbelliferae. New York (NY), USA: CABI Publishing.
- Sack, M., Sigler, J., Eing, C., Stukenbrock, L., Stangle, R., Wolf, A., & Muller, G. (2010). Operation of an Electroporation Device for Grape Mash. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 38(8), 1928–1934.
- Saenz Lain, C. 1981. Research on *Daucus L.* (Umbelliferae). *Anales del Instituto Botanico A.J. Cavanilles*, 37, 481-534.
- Salama, & Ibrahim. (2007). Carrot and Carrot Juice Quality as Affected by Cutting Shapes and Heat Treatment. *Journal of the Saudi Society for Food & Nutrition*, 29–45.
- San Martín, M. F., Barbosa-Cánovas, G. V., & Swanson, B. G. (2002). Food Processing by High Hydrostatic Pressure. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 42(6), 627–645.
- Schilling, S., Alber, T., Toepfl, S., Neidhart, S., Knorr, D., Schieber, A., & Carle, R. (2007). Effects of pulsed electric field treatment of apple mash on juice yield and quality attributes of apple juices. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 8(1), 127–134.
- Seow, C. C., & Lee, S. K. (1997). Firmness and Color Retention in blanched green beans and green bell pepper. *Journal of Food Quality*, 20(4), 329–336.
- Shayanfar, S., Chauhan, O., Toepfl, S., & Heinz, V. (2014). Pulsed electric field treatment prior to freezing carrot discs significantly maintains their initial quality parameters after thawing. *International Journal of Food Science & Technology*, 49(4), 1224–1230.



- Shynkaryk, M. V., Lebovka, N. I., & Vorobiev, E. (2008). Pulsed Electric Fields and Temperature Effects on Drying and Rehydration of Red Beetroots. *Drying Technology*, 26(6), 695–704.
- Small, E. (1978). A numerical taxonomic analysis of the *Daucus carota* complex. *Canadian Journal of Botany*, 56(3), 248–276.
- Soliva-Fortuny, R., Balasa, A., Knorr, D., & Martín-Belloso, O. (2009). Effects of pulsed electric fields on bioactive compounds in foods: a review. *Trends in Food Science & Technology*, 20(11–12), 544–556.
- Stanley, D. W., Bourne, M. C., Stone, A. P., & Wismer, W. V. (1995). Low Temperature Blanching Effects on Chemistry, Firmness and Structure of Canned Green Beans and Carrots. *Journal of Food Science*, 60(2), 327–333.
- Sun, D. W. (2015). *Emerging Technologies for Food Processing*. Elsevier.
- Teissie, J., Golzio, M., & Rols, M. P. (2005). Mechanisms of cell membrane electropermeabilization: A minireview of our present (lack of ?) knowledge. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects*, 1724(3), 270–280.
- Toepfl, S., Heinz, V., & Knorr, D. (2006). *Applications of Pulsed Electric Fields Technology for the Food Industry* (pp. 197–221).
- Toepfl, S., Siemer, C., Saldaña-Navarro, G., & Heinz, V. (2014). Overview of Pulsed Electric Fields Processing for Food. In *Emerging Technologies for Food Processing* (pp. 93–114). Elsevier.
- Tsong, T. (1991). Electroporation of cell membranes. *Biophysical Journal*, 297–306.
- United Nations. (2021) Food and Agricultural Organization, Statistics Division (FAOSTAT). [online]. Διαθέσιμο στο: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL> [ανάκτηση: 11/8/2023]
- U.S. Department of Agriculture. (2019). National Nutrient Database (Peaches, yellow, raw). [online]. Διαθέσιμο στο: <https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/169928/nutrients> [ανάκτηση: 11/8/2023]
- Vandresen, S., Quadri, M. G. N., Souza, J. A. R. de, & Hotza, D. (2009). Temperature effect on the rheological behavior of carrot juices. *Journal of Food Engineering*, 92(3), 269–274.
- Vega-Mercado, H., Gongora-Nieto, M. M., Barbosa-Canovas, G. V., & Swanson, B. G. (2007). *33 Pulsed Electric Fields in Food Preservation*.

- Velázquez-Estrada, R. M., Hernández-Herrero, M. M., Guamis-López, B., & Roig-Sagués, A. X. (2012). Impact of ultra high pressure homogenization on pectin methylesterase activity and microbial characteristics of orange juice: A comparative study against conventional heat pasteurization. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *13*, 100–106.
- Vivek, B. S., & Simon, P. W. (1998). Genetic Relationships and Diversity in Carrot and other *Daucus* Taxa Based on Nuclear Restriction Fragment Length Polymorphisms. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, *123*(6), 1053–1057.
- Vorobiev, E., & Lebovka, N. (2010). Enhanced Extraction from Solid Foods and Biosuspensions by Pulsed Electrical Energy. *Food Engineering Reviews*, *2*(2), 95–108.
- Vorobiev, E., & Lebovka, N. I. (2006). *Extraction of Intercellular Components by Pulsed Electric Fields* (pp. 153–193).
- Weaver, J. C., & Chizmadzhev, Yu. A. (1996). Theory of electroporation: A review. *Bioelectrochemistry and Bioenergetics*, *41*(2), 135–160.
- Wiktor, A., Iwaniuk, M., Śledź, M., Nowacka, M., Chudoba, T., & Witrowa-Rajchert, D. (2013). Drying Kinetics of Apple Tissue Treated by Pulsed Electric Field. *Drying Technology*, *31*(1), 112–119.
- Wiktor, A., Sledz, M., Nowacka, M., Rybak, K., Chudoba, T., Lojkowski, W., & Witrowa-Rajchert, D. (2015). The impact of pulsed electric field treatment on selected bioactive compound content and color of plant tissue. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *30*, 69–78.
- Xiang, B., Sundararajan, S., Mis Solval, K., Espinoza-Rodezno, L., Aryana, K., & Sathivel, S. (2014). Effects of Pulsed Electric Fields on Physicochemical Properties and Microbial Inactivation of Carrot Juice. *Journal of Food Processing and Preservation*, *38*(4).
- Yeom, H. W., Streaker, C. B., Zhang, Q. H., & Min, D. B. (2000). Effects of Pulsed Electric Fields on the Quality of Orange Juice and Comparison with Heat Pasteurization. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *48*(10), 4597–4605.
- Zhang, Q., Barbosa-Cánovas, G. V., & Swanson, B. G. (1995). Engineering aspects of pulsed electric field pasteurization. *Journal of Food Engineering*, *25*(2), 261–281.
- Zhang, Q., Monsalve-Gonzalea, A., Qin, B.-L., Barbosa-Canovas, G. V., & Swanson, B. G. (1994). Inactivation of *saccharomyces cerevisiae* in apple juice by square-wave and exponential-decay pulsed electric field. *Journal of Food Process Engineering*, *17*(4), 469–478.

Zhang, Q., Qin, B.-L., Barbosa-Canovas, G. V., & Swanson, B. G. (1995). Inactivation of *E. Coli* for food pasteurization by high-strength pulsed electric fields. *Journal of Food Processing and Preservation*, 19(2), 103–118.

Zimmermann, U. (1986). Electrical breakdown, electropermeabilization and electrofusion. In *Reviews of Physiology, Biochemistry and Pharmacology, Volume 105* (pp. 175–256). Springer-Verlag.

Αλεξανδράκης Ζ. (2015). *Μελέτη βιοχημικών, καταλυτικών και δομικών μεταβολών φυτικών ενζύμων σε συνθήκες υπερυψηλής πίεσης* [Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ), Σχολή Χημικών Μηχανικών, Τομέας Σύνθεσης και Ανάπτυξης Βιομηχανικών Διαδικασιών, Εργαστήριο Χημείας και Τεχνολογίας Τροφίμων].