



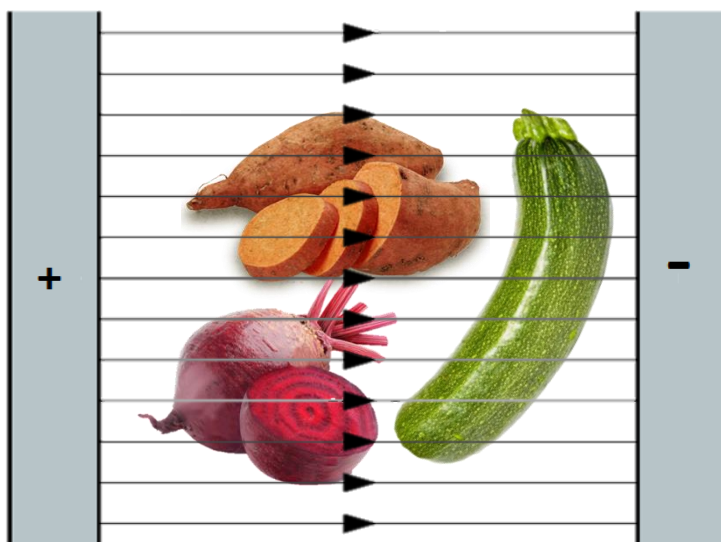
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΧΗΜΕΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

## ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΜΕ ΠΑΛΛΟΜΕΝΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΠΕΔΙΑ ΣΤΟ ΡΥΘΜΟ ΞΗΡΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΦΗΣ ΤΩΝ ΛΑΧΑΝΙΚΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΣΟΝΑΣ ΘΕΟΦΑΝΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΑΟΥΚΗΣ ΠΕΤΡΟΣ

ΑΘΗΝΑ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2016



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

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

*Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον Καθηγητή κ. Ταούκη Πέτρο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος, την καθοδήγηση και την βοήθεια που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.*

*Ευχαριστώ ακόμα τους Καθηγητές, Διδάκτορες, Υποψήφιους διδάκτορες και γενικά όλο το επιστημονικό προσωπικό του εργαστηρίου Χημείας και Τεχνολογίας Τροφίμων του ΕΜΠ, για τη συνεργασία μας και το φιλικό και ευχάριστο κλίμα καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.*

*Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα πρέπει να δοθούν στους υποψήφιους Διδάκτορες και φίλους μου Γιώργο Δημόπουλο και Βάνα Ανδρέου για την στήριξη, την πολύτιμη βοήθεια αλλά και το πραγματικό ενδιαφέρον που μου έδειξαν καθ' όλη τη διάρκεια της προσπάθειάς μου και επίσης στους συμφοιτητές μου, στο εργαστήριο Χημείας και Τεχνολογίας Τροφίμων του ΕΜΠ για τη συνεργασία μας και την βοήθειά τους κατά την διεξαγωγή της διπλωματικής μου εργασίας.*

*Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στους συνοδοιπόρους μου σε αυτό το μεγάλο ταξίδι, την οικογένειά μου και τους καλύτερους μου φίλους. Η στήριξή τους, όλα αυτά τα χρόνια σπουδών, ήταν καταλυτικής σημασίας, για την ολοκλήρωση της προσπάθειάς μου.*

*Τσόνας Θεοφάνης*

*Αθήνα, Σεπτέμβριος 2016*



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η απομάκρυνση της υγρασίας στα τρόφιμα στην βιομηχανία επιτυγχάνεται κυρίως μέσω της διεργασίας ξήρανσης. Η ξήρανση αυξάνει την διατηρησιμότητα των τροφίμων μειώνοντας την ενεργότητα του νερού, με αποτέλεσμα να αποφεύγεται η ανάπτυξη μικροβίων και αλλοιογόνων χημικών αντιδράσεων, έχει όμως υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις. Τα Παλλόμενα Ηλεκτρικά Πεδία (ΠΗΠ) μπορούν να προκαλέσουν διάρρηξη των κυτταρικών τοιχωμάτων των φυτικών ιστών ώστε η απομάκρυνση της υγρασίας από αυτούς να γίνεται με μεγαλύτερο ρυθμό. Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης της επεξεργασίας με τη μέθοδο των ΠΗΠ στα χαρακτηριστικά ξήρανσης και υφής φρούτων και λαχανικών. Με επεξεργασία στις κατάλληλες συνθήκες, στόχος είναι να μειωθεί ο χρόνος ξήρανσης και να αξιολογηθούν τα χαρακτηριστικά υφής της γλυκοπατάτας, του παντζαριού και του κολοκυθιού.

Αρχικά, δείγματα γλυκοπατάτας, παντζαριού και κολοκυθιού υπέστησαν προεπεξεργασία με ΠΗΠ με εντάσεις ηλεκτρικού πεδίου από 0.5 έως 1.5 kV/cm, 10 Hz συχνότητα, 15 μs πλάτος παλμού και διαφορετικούς χρόνους επεξεργασίας (διαφορετικός αριθμός παλμών). Στα δείγματα αυτά εκτιμήθηκε ο δείκτης κυτταρικής διάρρηξης  $Z$  μέσω της μεθόδου χαμηλής-υψηλής συχνότητας αλλά και οι μηχανικές ιδιότητες τους (ανάλυση υφής).

Πραγματοποιήθηκαν τρία διαφορετικές μετρήσεις για την ανάλυση υφής των δειγμάτων: η δοκιμή συμπίεσης, η δοκιμή χαλάρωσης τάσης και η δοκιμή δύναμης κοπής. Οι τρεις αυτές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν και για τις τρεις διαφορετικές τιμές έντασης ηλεκτρικού πεδίου 0.5 , 1.0 , 1.5 kV/cm σε διάφορους χρόνους επεξεργασίας και συγκρίθηκαν με τα ανεπέξεργαστα και τα κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε κινητική μελέτη ξήρανσης σε θερμοκρασίες 40-70°C για ανεπέξεργαστα, για προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ και για κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα γλυκοπατάτας, παντζαριού και κολοκυθιού. Η προεπεξεργασία των δειγμάτων με ΠΗΠ, τα οποία στη συνέχεια θα οδηγούνταν στους ξηραντήρες, πραγματοποιήθηκε με σταθερό ηλεκτρικό πεδίο 1.5 kV/cm, πλάτος παλμού 15 μs και συχνότητα 10Hz. Έτσι, η μοναδική μεταβαλλόμενη παράμετρος του πειράματος ήταν ο αριθμός των παλμών. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν οι εξής παλμοί για το κάθε προϊόν : για τη γλυκοπατάτα οι παλμοί 70, 150 και 620, για το παντζάρι οι παλμοί 125, 200 και 300 και για το κολοκύθι οι παλμοί 90, 150 και 9000, με στόχο να επιτευχθεί ένας δείκτης κυτταρικής διάρρηξης  $Z$  από το 0 έως το 1.

Σε όλες τις φάσεις της πειραματικής διαδικασίας εκτός από προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ δείγματα χρησιμοποιήθηκαν και ανεπέξεργαστα δείγματα, που αντιστοιχούν σε μηδενική κυτταρική διάρρηξη, αλλά και κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα, που αντιστοιχούν στην μέγιστη κυτταρική διάρρηξη. Οι αντιστοιχίες αυτές βρέθηκαν βιβλιογραφικά και επιβεβαιώθηκαν από τις μετρήσεις υπολογισμού του δείκτη κυτταρικής διάρρηξης. Στόχος ήταν η συσχέτιση του ρυθμού ξήρανσης και των χαρακτηριστικών υφής των προεπεξεργασμένων με ΠΗΠ δειγμάτων με τα δείγματα που αντιστοιχούν στις δυο ακραίες τιμές του δείκτη κυτταρικής διάρρηξης.

Από τον 2<sup>ο</sup> νόμο του Fick υπολογίστηκαν οι φαινόμενοι συντελεστές διάχυσης  $D_{eff}$  και από το εκθετικό μοντέλο 1<sup>ης</sup> τάξης υπολογίστηκαν οι ρυθμοί ξήρανσης  $k$ . Για την περιγραφή του ρυθμού ξήρανσης από την θερμοκρασία χρησιμοποιήθηκε ο νόμος του

Arrhenius και τέλος, υπολογίστηκε ο χρόνος ξήρανσης, για 20% εναπομένουσα υγρασία, για ανεπεξέργαστα, προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ (1.5kV/cm, 10Hz, 15μs πλάτος παλμού) και για κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα γλυκοπατάτας, παντζαριού και κολοκυθιού.

Οι μελέτες υπολογισμού του δείκτη κυτταρικής διάρρηξης  $Z$  της γλυκοπατάτας, του παντζαριού και του κολοκυθιού έδειξαν ότι για κάθε τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, σε μικρούς χρόνους επεξεργασίας υπάρχει σημαντική αύξηση του δείκτη κυτταρικής διάρρηξης  $Z$  ενώ σε μεγαλύτερους χρόνους εμφανίζεται μικρότερη αύξηση του  $Z$  μέχρις ότου να πάρει την τιμή 1. Επίσης όσο μεγαλώνει το ηλεκτρικό πεδίο, ο δείκτης κυτταρικής διάρρηξης  $Z$  αυξάνεται πιο γρήγορα σε σχέση με το χρόνο επεξεργασίας. Σχετικά, με τα τρία πειράματα ανάλυσης υφής που πραγματοποιήθηκαν για τα δείγματα γλυκοπατάτας, παντζαριού και κολοκυθιού παρατηρήθηκε ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των παλμών, οι δυνάμεις συμπίεσης, κοπής και ο χρόνος χαλάρωσης μειώνονται σημαντικά. Ακόμη, με την αύξηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, ο χρόνος επεξεργασίας με ΠΗΠ που απαιτείται για την επίτευξη μιας συγκεκριμένης δύναμης συμπίεσης, κοπής ή ενός συγκεκριμένου χρόνου χαλάρωσης μειώνεται σημαντικά (μείωση παλμών).

Η κινητική μελέτη ξήρανσης για τα δείγματα γλυκοπατάτας, παντζαριού και κολοκυθιού οδήγησε στο συμπέρασμα ότι στις χαμηλότερες θερμοκρασίες των 40°C, 50°C και 55°C ο ρυθμός ξήρανσης των κατεψυγμένων-αποψυγμένων δειγμάτων είναι σημαντικά μεγαλύτερος από τον ρυθμό των προεπεξεργασμένων με ΠΗΠ δειγμάτων και αυτός με τη σειρά του σημαντικά μεγαλύτερος από το ρυθμό των ανεπεξέργαστων δειγμάτων. Επιπλέον, μεταξύ των προεπεξεργασμένων με ΠΗΠ δειγμάτων είναι εμφανές ότι η εντονότερη επεξεργασία (περισσότεροι παλμοί) οδηγεί σε πιο σύντομο χρόνο ξήρανσης. Γενικά, με την αύξηση της θερμοκρασίας εμφανίζονται μικρότερες διαφορές μεταξύ των δειγμάτων. Συγκεκριμένα στους 40 και τους 50 παρατηρούνται σημαντικές διαφορές μεταξύ των διαφορετικών συνθηκών ΠΗΠ ενώ στους 60 και τους 70 δεν συμβαίνει το ίδιο.

Παρατηρήθηκε επίσης, ότι ο φαινόμενος συντελεστής διάχυσης  $D_{eff}$  και η σταθερά του ρυθμού ξήρανσης  $k$ , για την ίδια θερμοκρασία είναι μεγαλύτεροι στα επεξεργασμένα με ΠΗΠ δείγματα από ότι στα ανεπεξέργαστα. Επίσης, ακόμα μεγαλύτερες τιμές λαμβάνουν στα κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα. Όσο πιο έντονη είναι η συνθήκη ΠΗΠ τόσο μεγαλύτεροι είναι οι δύο αυτοί δείκτες. Τα παραπάνω παρατηρούνται σε όλες τις θερμοκρασίες εκτός των 70°C, όπου ο συντελεστής διάχυσης και η σταθερά του ρυθμού ξήρανσης δεν μεταβάλλονται ανεξαρτήτως επεξεργασίας των δειγμάτων. Ακόμη, για όλα τα δείγματα που έχουν υποστεί την ίδια επεξεργασία, οι δείκτες παρουσιάζουν σημαντική αύξηση με αύξηση της θερμοκρασίας ξήρανσης. Προκύπτει επίσης το συμπέρασμα ότι η ενέργεια ενεργοποίησης του φαινομένου συντελεστή διάχυσης  $D_{eff}$  και η ενέργεια ενεργοποίησης της σταθεράς του ρυθμού ξήρανσης  $k$  είναι σημαντικά μικρότερες στα επεξεργασμένα με ΠΗΠ δείγματα από ότι στα ανεπεξέργαστα και ακόμα μικρότερες στα κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα. Επίσης, μεταξύ των συνθηκών ΠΗΠ παρατηρείται ότι πιο έντονη επεξεργασία οδηγεί σε μείωση της ενέργειας ενεργοποίησης  $E_a$ . Τέλος, για κάθε θερμοκρασία ξεχωριστά ο χρόνος ξήρανσης των δειγμάτων μειώνεται με αύξηση της έντασης της επεξεργασίας των ΠΗΠ που έχουν υποστεί ενώ για την ίδια επεξεργασία δειγμάτων όσο αυξάνεται η θερμοκρασία ξήρανσης τόσο μειώνεται ο χρόνος ξήρανσης των δειγμάτων.

Συμπερασματικά, από τη μελέτη που πραγματοποιήθηκε προκύπτει η θετική επίδραση της χρήσης των ΠΗΠ ως προεπεξεργασία της ξήρανσης, αφού οδηγεί σε χαμηλότερους χρόνους ξήρανσης αλλά και υψηλής ποιότητας προϊόντα χωρίς να παρουσιάζονται αξιοσημείωτες αλλοιώσεις στα ποιοτικά τους χαρακτηριστικά.





## **EFFECT OF PULSED ELECTRIC FIELDS PROCESSING ON THE TEXTURAL PROPERTIES AND DRYING RATE OF VEGETABLES**

Moisture removal in the food industry is mostly achieved through thermal dehydration and aims at increasing the preservation of foods by reducing the water activity, but makes up a significant fraction of the energy cost. Pulsed Electric Fields (PEF) have been shown to permeabilize plant cells and thus facilitate moisture removal from plant tissues increasing drying rates. The objective of this work was to evaluate the potential benefit of Pulsed Electric Field (PEF) application on the enhancement of vegetables drying and their texture properties. By selecting appropriate treatment conditions, the aim was to reduce the drying time and to evaluate the textural properties of sweet potatoes, beetroots and zucchini.

Sweet potatoes, beetroots and zucchini were PEF pretreated at 0.5-1.8 kV/cm electric field strength, a frequency of 10 Hz, a pulse width of 15  $\mu$ s and for several treatment times (different number of pulses). The degree of cell disintegration  $Z$  was estimated for each PEF pretreatment by using the electrical conductivity low-high frequency method and their texture properties were determined.

Three different texture analysis treatments were carried out: the compression test, the stress relaxation test and the cutting force test. These three experiments were performed for three different electric field strengths 0.5, 1.0, 1.5kV/cm at different treatment times and compared with control and freeze-thawed samples.

Drying experiments for control, PEF pretreated and freeze-thawed sweet potatoes, beetroots and zucchini were carried out at drying temperatures 40–70 °C. The selected PEF conditions for drying experiments were 1.5kV/cm electric field strength, a frequency of 10 Hz and a pulse width of 15  $\mu$ s. Thus, the only variable parameter of the treatment was the number of pulses. For sweet potato, the selected pulses were: 70, 150 and 620, for beetroot, the selected pulses were 125 200 and 300 and for zucchini, the selected pulses were 90, 150 and 9000, aiming to achieve a degree of cell disintegration  $Z$  from 0 to 1.

In all phases of the experimental procedure, except PEF pretreated samples, untreated samples, amounting to no cell disruption, and freeze-thawed samples were used, corresponding to maximum cell disruption. The aim was to correlate the drying rate and the textural characteristics of PEF pretreated samples with the samples corresponding to both ends of cell disintegration  $Z$ .

The moisture effective diffusion coefficients  $D_{\text{eff}}$  (2<sup>nd</sup> Fick's law), and the drying rate constant  $k$  (1<sup>st</sup> order exponential model) of untreated, PEF pretreated and freeze-thawed samples were estimated and compared. The Arrhenius equation was used to describe the effect of temperature on drying rates and the drying time was estimated (20% residual moisture) for untreated, PEF pretreated (1.5kV / cm, 10Hz, 15 $\mu$ s pulse width) and freeze-thawed sweet potatoes, beetroots and zucchini.

The obtained results indicated a significant increase of degree of cell disintegration  $Z$  of sweet potatoes, beetroots and zucchini, for short PEF treatments times for all electric field strengths studied, while for higher treatment times led to smaller increase in  $Z$  until got a value of 1. The obtained results of texture analysis

experiments indicated that increasing the number of pulses the compression forces, the cutting forces and the stress relaxation times significantly reduced. Furthermore, when more intense PEF conditions applied, the PEF treatment time was required to achieve a given compression force, cutting force or stress relaxation is significantly reduced (reduction of number of pulses).

It was observed that for low drying temperatures (40, 50 and 55° C) the constant drying rate for PEF pretreated samples was significantly higher than untreated samples. The highest drying rates were observed for freeze-thawed samples. More intense PEF conditions (more pulses) led to lower drying times. For temperatures higher than 60 °C there were no significant differences on drying rates between treatments.

It was also observed that effective moisture diffusivity  $D_{eff}$  and constant drying rate  $k$  of PEF pretreated samples were higher than untreated samples for the same temperature. Also, the highest values of  $D_{eff}$  and  $k$  for all studied vegetables were observed for freeze-thawed samples. More intense PEF conditions led to higher values of  $D_{eff}$  and  $k$ . For temperatures higher than 70 °C there was no significant effect on the  $D_{eff}$  and  $k$  for PEF pretreated samples and untreated. Increasing drying temperature led to increase of  $D_{eff}$  and  $k$ . The activation energies of effective moisture diffusivity and of constant drying rate of PEF pretreated samples were significant lower than untreated samples and even lower for freeze-thawed samples. More intense PEF conditions led to lower activation energy.

The obtained results indicated a potential benefit of PEF as a pretreatment of drying, leading to shorter drying times without causing degradation of quality properties of vegetables.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Η ΞΗΡΑΝΣΗ ΩΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΡΟΦΙΜΩΝ.....	1
1.1 Εισαγωγή .....	1
1.2 Ο ρόλος του νερού στα τρόφιμα.....	1
1.3 Φυσικοχημικές μεταβολές κατά τη διάρκεια και μετά την ξήρανση .....	2
1.4 Μέθοδοι ξήρανσης τροφίμων.....	5
1.4.1 Μέθοδοι ξήρανσης με αέρα.....	6
1.4.1.i Ξήρανση σε σήραγγα.....	6
1.4.1.ii Ξήρανση με Μεταφορική ταινία .....	7
1.4.1.iii Ξήρανση Τυμπάνου.....	8
1.4.1.iv Ξήρανση με ψεκασμό .....	8
1.4.2 Ξήρανση σε περιβάλλον μειωμένου αέρα .....	9
1.4.2.i Ξήρανση υπό κενό .....	9
1.4.2.ii Ξήρανση με κατάψυξη .....	10
1.4.3 Ξήρανση υπό τροποποιημένη ατμόσφαιρα .....	10
1.5 Μαθηματική μοντελοποίηση της ξήρανσης.....	13
1.5.1 Καμπύλη ξήρανσης .....	14
1.5.2 Μαθηματικά Μοντέλα Ξήρανσης .....	16
1.5.2.i Εμπειρικά μοντέλα .....	16
1.5.2.ii Μοντέλα μεταφοράς θερμότητας και μάζας .....	17
1.6 Προεπεξεργασίες ξήρανσης τροφίμων .....	19
1.6.1 Θερμικές προεπεξεργασίες ξήρανσης .....	19
1.6.1.i Προεπεξεργασία με κατάψυξη .....	19
1.6.1.ii Ωμική θέρμανση .....	19
1.6.1.iii Θέρμανση με μικροκύματα .....	20
1.6.2 Μη θερμικές προεπεξεργασίες ξήρανσης.....	21
1.6.2.i Υπερυψηλή πίεση .....	21
1.6.2.ii Επεξεργασία με υπερήχους .....	22
1.6.2.iii Επεξεργασία με Παλλόμενα Ηλεκτρικά Πεδία.....	23
2. ΠΑΛΛΟΜΕΝΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΠΕΔΙΑ .....	25
2.1 Αρχή λειτουργίας.....	25
2.2 Παράμετροι επεξεργασίας .....	26
2.2.1 Ένταση ηλεκτρικού πεδίου.....	26
2.2.2 Σχήμα παλμού.....	27
2.2.3 Χρόνος επεξεργασίας και ειδική ενέργεια.....	27

2.2.4	Θερμοκρασία επεξεργασίας .....	28
2.3	Ηλεκτροδιάτρηση .....	29
2.4	Τεχνικές ποσοτικοποίησης ηλεκτροδιάτρησης .....	31
2.4.1	Οπτική μικροσκοπία .....	32
2.4.2	Ηλεκτρονική μικροσκοπία.....	33
2.4.3	Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά .....	33
2.4.3.i	Μέθοδος χαμηλής συχνότητας .....	34
2.4.3.ii	Μέθοδος χαμηλής-υψηλής συχνότητας.....	35
2.4.4	Συντελεστής διάχυσης .....	36
2.4.5	Χαρακτηριστικά υφής .....	37
2.4.6	Ακουστικές μετρήσεις .....	37
2.5	Σχεδιασμός Εξοπλισμού ΠΗΠ .....	37
2.5.1	Δημιουργία Παλλόμενων Ηλεκτρικών Πεδίων .....	38
2.5.2	Σχεδιασμός θαλάμου επεξεργασίας.....	39
2.6	Βιομηχανική εφαρμογή και εκτίμηση κόστους των ΠΗΠ .....	41
2.7	ΠΗΠ και ξήρανση σε φρούτα και λαχανικά .....	43
3.	ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	47
3.1	Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας .....	47
3.2	Σχεδιασμός Πειραμάτων.....	47
3.3	Υλικά .....	47
3.4	Πειραματική διαδικασία .....	48
3.4.1	Υπολογισμός δείκτη κυτταρικής διάρρηξης $Z$ . .....	48
3.4.2	Προεπεξεργασία με ΠΗΠ.....	48
3.4.3	Κινητική μελέτη ξήρανσης δειγμάτων γλυκοπατάτας, παντζαριού και κολοκυθιού.....	50
3.4.4	Ανάλυση υφής δειγμάτων γλυκοπατάτας, παντζαριού και κολοκυθιού.....	53
4.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ .....	59
4.1	Υπολογισμός του συντελεστή συναγωγής στον ξηραντήρα .....	59
4.2	Μελέτη της επίδρασης των Παλλόμενων Ηλεκτρικών Πεδίων στην κινητική της ξήρανσης και στις μηχανικές ιδιότητες της γλυκοπατάτας. ....	59
4.2.1	Δείκτης κυτταρικής διάρρηξης ( $Z$ ) στην γλυκοπατάτα. ....	59
4.2.2	Επίδραση των Παλλόμενων Ηλεκτρικών Πεδίων στις καμπύλες ξήρανσης της γλυκοπατάτας.....	60
4.2.3	Επίδραση των Παλλόμενων Ηλεκτρικών Πεδίων στις μηχανικές ιδιότητες της γλυκοπατάτας. ....	69
4.3	Μελέτη της επίδρασης των Παλλόμενων Ηλεκτρικών Πεδίων στην κινητική της ξήρανσης και στις μηχανικές ιδιότητες του παντζαριού. ....	75
4.3.1	Δείκτης κυτταρικής διάρρηξης ( $z$ ) στο παντζάρι. ....	75

4.3.2 Επίδραση των Παλλόμενων Ηλεκτρικών Πεδίων στις καμπύλες ξήρανσης του παντζαριού. ....	76
4.3.3 Επίδραση των Παλλόμενων Ηλεκτρικών Πεδίων στις μηχανικές ιδιότητες του παντζαριού. ....	85
4.4 Μελέτη της επίδρασης των Παλλόμενων Ηλεκτρικών Πεδίων στην κινητική της ξήρανσης και στις μηχανικές ιδιότητες του κολοκυθιού. ....	91
4.4.1 Δείκτης κυτταρικής διάρρηξης ( $Z$ ) στο κολοκύθι. ....	91
4.4.2 Επίδραση των Παλλόμενων Ηλεκτρικών Πεδίων στις καμπύλες ξήρανσης του κολοκυθιού. ....	91
4.4.3 Επίδραση των Παλλόμενων Ηλεκτρικών Πεδίων στις μηχανικές ιδιότητες του κολοκυθιού. ....	100
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	109
6. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	113
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	115



# 1. Η ΞΗΡΑΝΣΗ ΩΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

## 1.1 Εισαγωγή

Η ανάπτυξη και η δράση των μικροοργανισμών μπορεί να περιοριστεί με την μείωση του διαθέσιμου νερού. Στην ξήρανση των τροφίμων επιδιώκεται η απομάκρυνση του μεγαλύτερου μέρους του νερού που περιέχουν, ώστε να σταματούν πρακτικά οι μικροβιακές δράσεις. Εκτός από τη συντήρηση του τροφίμου η ξήρανση μπορεί να στοχεύει και στη μείωση του όγκου, διευκολύνοντας τη μεταφορά και την αποθήκευση, ή στην παρασκευή προϊόντων κατάλληλων για χρήση π.χ. μίγματα για κέικ, για σούπες κ.α.

Ο όρος ξήρανση (drying) στη βιομηχανία τροφίμων χρησιμοποιείται για τη διεργασία στην οποία η απομάκρυνση νερού από το τρόφιμο γίνεται με εξάτμιση. Η ξήρανση διαφέρει από τη συμπύκνωση (concentration) ως προς το τελικό περιεχόμενο του νερού στο τρόφιμο, το οποίο είναι χαμηλότερο στην περίπτωση της ξήρανσης. Συχνά, στη θέση του όρου ξήρανση χρησιμοποιείται ο όρος αφυδάτωση (dehydration), αν και ο όρος αυτός αποδίδει καλύτερα την πλήρη απομάκρυνση νερού από το τρόφιμο. Σύμφωνα με τον παραπάνω ορισμό, διεργασίες απομάκρυνσης νερού με κατάλληλους διαλύτες, ή μείωσης του διαθέσιμου νερού με την προσθήκη ζάχαρης ή αλατιού δεν περιλαμβάνονται στον όρο ξήρανση.

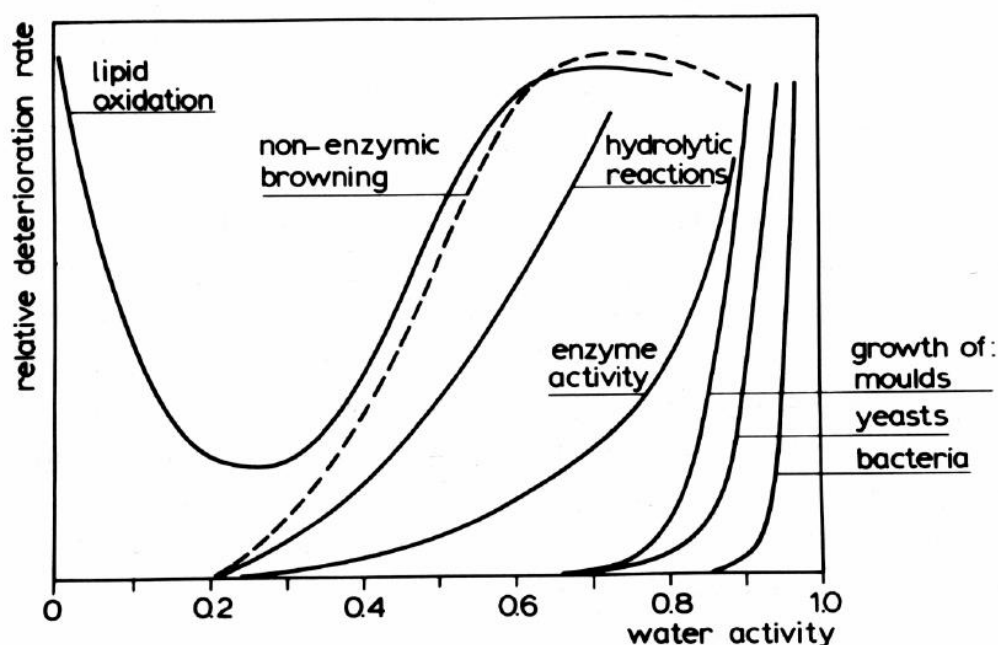
Η ξήρανση των περισσότερων τροφίμων γίνεται με θέρμανση. Πρόκειται λοιπόν για μια διεργασία στην οποία εμπλέκεται μεταφορά μάζας (νερού) από το τρόφιμο προς το περιβάλλον αλλά και μεταφορά θερμότητας από το μέσο θέρμανσης προς το τρόφιμο. Πραγματοποιείται σε διάφορων τύπων ξηραντήρες, με διαφορετικούς μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας από και προς το προϊόν. Στην ξήρανση των τροφίμων ισχύουν οι βασικές αρχές που διέπουν την ξήρανση οποιουδήποτε άλλου προϊόντος. Ο ρόλος του νερού στα τρόφιμα και η ευαισθησία των συστατικών και των ποιοτικών χαρακτηριστικών τους στις θερμικές διεργασίες καθορίζουν τις ιδιαιτερότητές τους.

## 1.2 Ο ρόλος του νερού στα τρόφιμα

Το νερό στα τρόφιμα βρίσκεται υπό μορφή ελεύθερου και δεσμευμένου νερού. Το δεσμευμένο νερό είναι εκείνο που υπάρχει στην περιοχή κοντά στα μη υδατικά συστατικά του τροφίμου και παρουσιάζει πολύ διαφορετικές ιδιότητες από αυτές του συνόλου του νερού στο τρόφιμο. Επιπλέον, δεν παγώνει σε θερμοκρασία έως  $-40^{\circ}\text{C}$  και δεν είναι διαθέσιμο ως καταλύτης προστιθέμενων ουσιών ούτε ως χημικό αντιδραστήριο. Υπάρχουν πολλοί βαθμοί δέσμευσης του νερού. Όσο ισχυρότερα είναι δεσμευμένο το νερό στα τρόφιμα τόσο πιο δύσκολη είναι και η απομάκρυνσή του από αυτά. Το πιο ισχυρά δεσμευμένο νερό αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα των μη υδατικών συστατικών, π.χ. βρίσκεται στα πολύ μικρά κενά των πρωτεϊνών. Στη συνέχεια, το γειτνιάζον νερό καταλαμβάνει τα πρώτα στρώματα σε επαφή με τα μη υδατικά συστατικά, συνδεδεμένο κυρίως με ιοντικές ομάδες αυτών των συστατικών. Ακολουθεί το πολυστρωματικό νερό που καταλαμβάνει τα αμέσως επόμενα στρώματα από το γειτνιάζον νερό και παρουσιάζει σημαντικά διαφορετικές ιδιότητες από το ελεύθερο νερό. Το μεγαλύτερό του μέρος δεν παγώνει έως τους  $-40^{\circ}\text{C}$ , ενώ

εμφανίζει μικρή ικανότητα ως διαλύτης. Το ελεύθερο νερό καταλαμβάνει τις πιο απομακρυσμένες θέσεις από τα μη υδατικά συστατικά, μπορεί να δρα ως διαλύτης, ενώ παγώνει σε θερμοκρασία κάτω των 0°C. Το νερό αυτό δεν παρουσιάζει μακροσκοπική ροή.

Η διαθεσιμότητα του νερού για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών εξαρτάται από το πόσο ισχυρά αυτό είναι δεσμευμένο. Έτσι, το νερό που αποτελεί τμήμα των μη υδατικών συστατικών των τροφίμων και το γειτνιάζον νερό δεν είναι διαθέσιμα για τις μικροβιακές δράσεις, το πολυστρωματικό νερό είναι σε ένα μικρό μέρος του διαθέσιμο, ενώ το ελεύθερο νερό είναι πλήρως διαθέσιμο. Σύμφωνα με τα παραπάνω, η ικανότητα ανάπτυξης των μικροοργανισμών και μέσω αυτής η σταθερότητα των τροφίμων σχετίζεται με την ενεργότητα του νερού στο τρόφιμο. Επομένως η αποτελεσματικότητα της ξήρανσης ως μεθόδου συντήρησης και ο σχεδιασμός της κατάλληλης διεργασίας εξαρτάται από το βαθμό επίτευξης της απομάκρυνσης του νερού από το τρόφιμο. (Ταούκης & Ωραιοπούλου, 2009)



Εικόνα 1.1 Επίδραση της ενεργότητας νερού σε διάφορες βιοχημικές αντιδράσεις (Rockland & Stewart, 2013)

### 1.3 Φυσικοχημικές μεταβολές κατά τη διάρκεια και μετά την ξήρανση

Γενικά κατά την ξήρανση οι υψηλές θερμοκρασίες που επικρατούν τείνουν να αλλοιώσουν την ποιότητα των τροφίμων. Οι μεταβολές αυτές της ποιότητας που παρατηρούνται εξαρτώνται τόσο από το χρόνο όσο και από τη θερμοκρασία. Οι δυο αυτές παράμετροι επιταχύνουν την υποβάθμιση, αλλά εξαρτώνται και από την ενεργότητα του νερού. Οι βασικότερες δράσεις που επιταχύνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας κατά την ξήρανση είναι οι αντιδράσεις αμαύρωσης Maillard, η οξειδωση λιπαρών, η απώλεια βιταμινών, η μετουσίωση θερμικά ασταθών πρωτεϊνών, οι ενζυμικές δράσεις κλπ. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι οι μεταβολές



που υφίσταται το τρόφιμο συμβαίνουν τόσο κατά τη διάρκεια της ξήρανσης στον εξοπλισμό που έχει επιλεγεί (Sivakumar et al., 2016), όσο και μετά το πέρας της διεργασίας, κατά την επακόλουθη αποθήκευσή του.

Η βιταμίνη C (ή ασκορβικό οξύ) είναι ένας σημαντικός παράγοντας που συχνά χρησιμοποιείται ως δείκτης για την ποιότητα διαφόρων διεργασιών. Μπορεί να οξειδωθεί σε δεϋδρο-ασκορβικό οξύ κάτω από αερόβιες συνθήκες, και στη συνέχεια να υδρολυθεί και να οξειδωθεί. Αυτή η υποβάθμιση εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την ενεργότητα νερού. Έχει παρατηρηθεί ότι μετά το πέρας της ξήρανσης, καταγράφεται σημαντική απώλεια της βιταμίνης C, η οποία αυξάνεται με την αύξηση του χρόνου θέρμανσης. Η ξήρανση με κατάψυξη συμβάλλει στην καλύτερη διατήρηση της βιταμίνης αυτής λόγω των χαμηλότερων θερμοκρασιών, της μικρότερης κινητικότητας των ουσιών που αντιδρούν και της μειωμένης μερικής πίεσης του O<sub>2</sub>.

Το χρώμα είναι από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των αφυδατωμένων τροφίμων καθώς αποτελεί μέρος της εμφάνισης του, οπότε συνήθως είναι το πρώτο κριτήριο που χρησιμοποιούν οι καταναλωτές. Το χρώμα αλλάζει κατά την ξήρανση λόγω χημικών και βιοχημικών δράσεων, οι ρυθμοί των οποίων εξαρτώνται από τη μέθοδο ξήρανσης αλλά και τις παραμέτρους της διεργασίας. Το χρώμα των φρούτων και των λαχανικών, των αρωματικών φυτών και των μπαχαρικών οφείλεται στην παρουσία ουσιών (καροτενοειδών, χλωροφυλλών κλπ) οι οποίες είναι επιρρεπείς στην υποβάθμιση μέσω ενζυμικών ή μη δράσεων, που επιταχύνονται από την αφυδάτωση και την επακόλουθη αποθήκευση. Έτσι, οι μεταβολές χρώματος που μπορεί να συμβούν είναι η υποβάθμιση της χλωροφύλλης, η οξείδωση διαφόρων ουσιών που ανήκουν στην οικογένεια των καροτενοειδών (β-καροτένιο, ξανθοφύλλες κ.ά) που οδηγεί στο σχηματισμό άχρωμων προϊόντων χαμηλού M.B και ουσιών με δυσάρεστη οσμή, ενώ σηματοδοτεί την απώλεια χρώματος αλλά συχνά και άλλων ευεργετικών δράσεων (π.χ. δράσης προβιταμίνης A).

Η βιολογική αξία των αφυδατωμένων πρωτεϊνών παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση ανάλογα με τη διεργασία ξήρανσης. Η παρατεταμένη έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να επηρεάσει τις λειτουργικές της ιδιότητες ή να καταστήσει την πρωτεΐνη λιγότερο χρήσιμη στο διαιτολόγιο. Διεργασίες με χαμηλές θερμοκρασίες μπορούν κατά περίπτωση να αυξήσουν και την ευπεπτότητα των πρωτεϊνών.

Στα αφυδατωμένα τρόφιμα η οξείδωση των λιπαρών είναι υπεύθυνη για την ανάπτυξη δυσάρεστων οσμών, την απώλεια λιποδιαλυτών βιταμινών ή χρωστικών ουσιών και την οξίνιση. Η περιεχόμενη υγρασία επηρεάζει σημαντικά το ρυθμό οξείδωσης. Σε κάθε περίπτωση, αποτελεσματικές λύσεις στο πρόβλημα αυτό μπορεί να αποτελέσουν η προστασία των λιπαρών με χρήση αντοξειδωτικών ουσιών (φαινολικές ενώσεις, BHA, BHT, κλπ) και δευτερευόντως η συσκευασία με κενό ή αδρανές αέριο, για την προστασία από το ατμοσφαιρικό οξυγόνο κατά την αποθήκευση των προϊόντων αυτών.

Η ενζυμική δραστηριότητα στα τρόφιμα είναι ανεπιθύμητη γιατί επηρεάζει την ποσότητα των θρεπτικών συστατικών (π.χ. υδρόλυση λεκιθίνης από τη φωσφολιπάση), ή το χρώμα των προϊόντων (π.χ. ενζυμική αμαύρωση φρούτων και λαχανικών με τη δράση της πολυφαινολοξειδάσης). Το φαινόμενο αυτό μπορεί να περιοριστεί σημαντικά με την εφαρμογή ήπιας θερμικής διεργασίας (ζεμάτισμα) πριν την ξήρανση, την προσθήκη θειώδους ουσίας ή ασκορβικού οξέος ή με την

εμβάπτιση σε πυκνό διάλυμα άλατος ή/και σακχαρόζης. Η ενζυμική δράση στα τρόφιμα αναστέλλεται για  $a_w < 0.75$ .

Μια πολύ συνηθισμένη μη ενζυμική αντίδραση στα τρόφιμα είναι η αντίδραση αμαύρωσης Maillard, μια πολύπλοκη αντίδραση με πολλά ενδιάμεσα στάδια και προϊόντα, που καταλήγουν σε ενώσεις με έντονο άρωμα και χρώμα (μελανοϊδίνες). Προϋποθέτει την αντίδραση μεταξύ ελεύθερων ομάδων αμινοξέων και καρβονυλικών ομάδων αναγόντων σακχάρων. Το ρυθμό της αντίδρασης αυτής επηρεάζει κατά κύριο λόγο η ενεργότητα νερού, με το ρυθμό αμαύρωσης να είναι μεγαλύτερος σε σχετικά χαμηλές τιμές περιεχόμενης υγρασίας, γεγονός που εξηγεί την ευκολία αμαύρωσης στα αφυδατωμένα ή συμπυκνωμένα προϊόντα.

Κατά τη διάρκεια της ξήρανσης, η συγκέντρωση της υγρασίας στα εξωτερικά στρώματα των τροφίμων είναι μικρότερη από το εσωτερικό, δεδομένου ότι τα εξωτερικά στρώματα χάνουν κατ'ανάγκη την υγρασία ταχύτερα από το εσωτερικό. Αυτή η επιφάνεια συρρίκνωσης προκαλεί ρωγμές και στρέβλωση. Αυτό το είδος της συρρίκνωσης προκαλεί την διαβάθμιση της υγρασίας και την αντίσταση στη διάχυση κοντά στην επιφάνεια. Η συρρίκνωση και η μείωση της ικανότητας διάχυσης μπορούν να δημιουργήσουν ένα φλοιό πρακτικά αδιαπέραστο από την υγρασία, ο οποίος περικλείει τον όγκο του υλικού, έτσι ώστε η εσωτερική υγρασία να μην μπορεί να αφαιρεθεί. Αυτό ονομάζεται σκλήρυνση περιβλήματος. Στην επεξεργασία τροφίμων, η επιφανειακή σκλήρυνση είναι επίσης γνωστή ως σχηματισμός κρούστας. Η έκταση του σχηματισμού κρούστας μπορεί να μειωθεί διατηρώντας την υγρασία ομοιόμορφη μέσα στο στερεό. Όσο ταχύτερη είναι ξήρανση, τόσο λεπτότερη η κρούστα (Achanta & Okos, 1996). Ο σχηματισμός κρούστας (ή κελύφους) μπορεί να είναι είτε επιθυμητός είτε ανεπιθύμητος ενώ ορισμένες φορές ενδέχεται να οφείλεται στην ζελατινοποίηση του αμύλου. Σε μικροενθυλάκωση αρωμάτων, ταχύς σχηματισμός κρούστας απαιτείται για να αποτρέψει την απώλεια γεύσης. Οι Achanta & Okos (1996) επισήμαναν ότι ο σχηματισμός κρούστας μπορεί να ανασταλεί επιτρέποντας στην ταχύτητα ξήρανσης να είναι αρκετά αργή ώστε η απώλεια υγρασίας από την επιφάνεια του προϊόντος να αναπληρώνεται από την υγρασία από το εσωτερικό.

Άλλες πολύ σημαντικές φυσικές μεταβολές που παρατηρούνται κατά την ξήρανση περιλαμβάνουν την ελάττωση της ενεργότητας νερού, την τήξη του λίπους, την εξάτμιση των πτητικών ενώσεων, την υαλώδη μετάπτωση και την κρυστάλλωση αλλά και τη μετανάστευση ή τη συγκράτηση ενώσεων, πτητικών ή μη. Ειδικά το πολύπλοκο φαινόμενο της υαλώδους μετάπτωσης και της κρυστάλλωσης που παρατηρείται συχνά στα αφυδατωμένα τρόφιμα επηρεάζει άμεσα τη ρεολογική συμπεριφορά άρα και τη γενικότερη κατάσταση και σταθερότητα των αφυδατωμένων τροφίμων (Tsotsas & Mujumdar, 2011).

Γίνεται αντιληπτό από τα παραπάνω ότι προκειμένου να ελεγχθούν και να περιοριστούν οι παραπάνω αντιδράσεις υποβάθμισης της ποιότητας των αφυδατωμένων τροφίμων, απαιτείται προσεκτικός σχεδιασμός των παραμέτρων της διεργασίας, ορθή επιλογή της μεθόδου ξήρανσης αλλά και ενδελεχής μελέτη της καταλληλότερης συσκευασίας.

## 1.4 Μέθοδοι ξήρανσης τροφίμων

Η ξήρανση (ή αφυδάτωση) είναι μία από τις σημαντικές διεργασίες στην παρασκευή των τροφίμων, με στόχο κυρίως στη διατήρησή τους, μειώνοντας την ποσότητα της υγρασίας στα τρόφιμα σε επίπεδα που θα επιβραδύνουν ή θα αναστείλουν τις μικροβιακές και ενζυματικές δράσεις και την συσχετιζόμενη υποβάθμιση της ποιότητας του προϊόντος (Bakalis, Knoerzer, & Fryer, 2015). Πρόκειται για την αφαίρεση νερού από τα τρόφιμα η οποία πραγματοποιείται μέσω διάχυσης και συναγωγής όταν το τρόφιμο εκτίθεται σε υψηλή θερμοκρασία και ρεύμα αέρα. Η ξήρανση είναι (στις περισσότερες περιπτώσεις) μια διεργασία με υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις, η οποία συνήθως οδηγεί σε έντονες μεταβολές στην ποιότητα του προϊόντος λόγω της έκθεσης σε μεγάλους χρόνους ξήρανσης και υψηλές θερμοκρασίες. Η διαδικασία της ξήρανσης τροφίμων είναι εξαιρετικά πολύπλοκη, και περιλαμβάνει συνδυασμό μηχανισμών μεταφοράς μάζας και θερμότητας καθώς και φυσικοχημικές μεταβολές (H. Sabarez, 2014).

Στην ξήρανση τροφίμων, αποτελεί πρόκληση να απομακρυνθεί το νερό από το υλικό με τον πιο αποτελεσματικό τρόπο, με την ταυτόχρονη διατήρηση της ποιότητας των προϊόντων, με τις ελάχιστες επιπτώσεις στο περιβάλλον, και με τις χαμηλότερες λειτουργικές δαπάνες. Τα προβλήματα της ξήρανσης είναι ποικίλα καθώς διάφορα υλικά τροφίμων με πολύ διαφορετικές φυσικοχημικές ιδιότητες πρέπει να ξηραίνονται σε διαφορετικά στάδια παραγωγής και με πολύ διαφορετικές προδιαγραφές ποιότητας (A. Mujumdar & Wu, 2007). Η σημερινή αύξηση του ανταγωνισμού λόγω της παγκοσμιοποίησης, μαζί με την αυξανόμενη ζήτηση των καταναλωτών για βελτιωμένη ποιότητα των προϊόντων, σε συνδυασμό με την ανάγκη για φιλικές προς το περιβάλλον και βιώσιμες διαδικασίες για τη διατήρηση της ανταγωνιστικότητας με την ελάχιστη δυνατή επίπτωση στο περιβάλλον, καθιστούν απαραίτητη την αναζήτηση καινοτομιών στη διαδικασία ξήρανσης. Αυτό θα εντείνει τις προσπάθειές για τη βελτίωση τεχνολογιών ξήρανσης και την ανάπτυξη νέων.

Σήμερα, η ξήρανση χρησιμοποιείται σε διάφορους βιομηχανικούς κλάδους (π.χ. χαρτί, ξύλο, τρόφιμα, γεωργία, διαχείριση αποβλήτων, κλπ) που χρησιμοποιούν διαφορετικές τεχνικές. Όσον αφορά τη βιομηχανία, τα τρόφιμα και η γεωργία παραμένουν οι πιο κυρίαρχοι τομείς (A. S. Mujumdar, Jangam, & Thorat, 2010). Πολλά τρόφιμα όπως φρούτα, λαχανικά, κρέατα και δημητριακά διατηρούνται με χρήση της ξήρανσης (Jangam, 2011). Υπάρχουν πολλές διαφορετικές μέθοδοι ξήρανσης τροφίμων, η καθεμία με τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα για συγκεκριμένες εφαρμογές. Ο τεράστιος αριθμός σχεδιασμού ξηραντήρων που αναφέρονται στη βιβλιογραφία οφείλεται στις διαφορές των φυσικών χαρακτηριστικών του προϊόντος, στις θερμοκρασίες και πιέσεις λειτουργίας, στις προδιαγραφές ποιότητας για το αποξηραμένο προϊόν, και ούτω καθεξής.

Οι διεργασίες ξήρανσης μπορούν γενικά να ταξινομηθούν, με βάση τη μέθοδο αφαίρεσης του νερού που εφαρμόζεται, σε (α) θερμική ξήρανση, (β) οσμωτική αφυδάτωση, και (γ) μηχανική αφυδάτωση. Στην θερμική ξήρανση, ένα αέριο ή κενό χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση του νερού από το υλικό. Έτσι, η θερμική ξήρανση μπορεί να διαιρεθεί περαιτέρω σε τρεις τύπους: (α) ξήρανση με αέρα, (β) ξήρανση σε περιβάλλον μειωμένου αέρα, και (γ) ξήρανση υπό τροποποιημένη ατμόσφαιρα. Στην οσμωτική αφυδάτωση, ένας διαλύτης ή διάλυμα χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση του νερού, ενώ στη μηχανική αφυδάτωση χρησιμοποιείται μηχανική καταπόνηση. Θα πρέπει να εξεταστούν πολλοί παράγοντες πριν από την επιλογή μιας διαδικασίας ξήρανσης. Οι παράγοντες αυτοί είναι: (α) ο τύπος του

προϊόντος που πρόκειται να ξηραθεί, (β) οι επιθυμητές ιδιότητες του τελικού προϊόντος, (γ) η επιτρεπόμενη ανοχή στη θερμοκρασία, (δ) η θερμική ευαισθησία του προϊόντος, (ε) οι προ-επεξεργασίες που απαιτούνται, (στ) το κόστος κεφαλαίου και επεξεργασίας, και (ζ) οι περιβαλλοντικοί παράγοντες. (Cohen & Yang, 1995).

Η θερμική ξήρανση είναι μια από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους ξήρανσης τροφίμων. Σε αυτή τη διαδικασία, η θερμότητα χρησιμοποιείται κυρίως για την απομάκρυνση του νερού από τα τρόφιμα. Οι μηχανισμοί της μεταφοράς υγρασίας εξαρτώνται κυρίως από τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του τροφίμου και τη διαδικασία ξήρανσης. Τα τρόφιμα μπορούν να ταξινομηθούν ως, (α) ομοιογενείς πηκτές, (β) πορώδη υλικά με αλληλοσυνδεδεμένους πόρους ή τριχοειδή αγγεία, και (γ) υλικά τα οποία έχουν ένα εξωτερικό περίβλημα που είναι το κύριο εμπόδιο στη μεταφορά της υγρασίας. Ο τύπος ή η δομή των τροφίμων παίζει πάντα σημαντικό ρόλο στη διαδικασία της ξήρανσης.

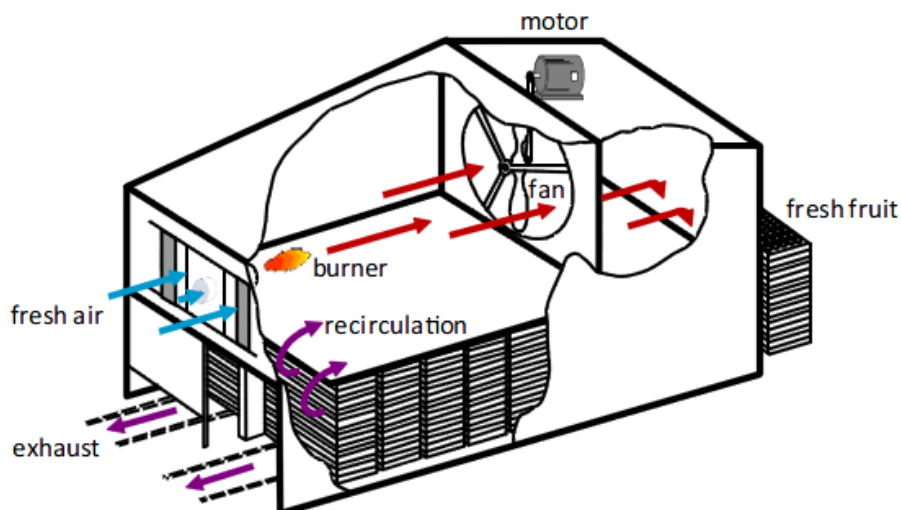
#### **1.4.1 Μέθοδοι ξήρανσης με αέρα**

Στην περίπτωση της ξήρανσης με αέρα, ο ατμοσφαιρικός αέρας χρησιμοποιείται ως το μέσο ξήρανσης και μεταφοράς θερμότητας.

##### **1.4.1.i Ξήρανση σε σήραγγα**

Η ξήρανση σε σήραγγα είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος στη βιομηχανική αφυδάτωση των φρούτων και των λαχανικών. Η σήραγγα ξήρανσης αποτελείται από μια σήραγγα, που περιέχει τους δίσκους των προϊόντων που τοποθετούνται σε κινητά καρότσια και κινούνται κατά μήκος της σήραγγας, έναν ανεμιστήρα για να κυκλοφορεί ο θερμός αέρας, και μία μονάδα θέρμανσης για την προθέρμανση του αέρα, πριν διοχετευτεί στο προϊόν (Εικόνα 1.2). Ο αέρας θερμαίνεται απευθείας από ένα καυστήρα, και ωθείται μέσα στη σήραγγα από έναν ανεμιστήρα. Στην ξήρανση σε σήραγγα, οι πρώτες ύλες φορτώνονται στα καρότσια των δίσκων και αυτά τα καρότσια συνέχεια τροφοδοτούνται μέσα στη σήραγγα ξήρανσης σε ένα άκρο σε τακτά χρονικά διαστήματα σε συνεχή βάση και το αποξηραμένο προϊόν εκφορτώνεται στο άλλο άκρο της σήραγγας. Οι ξηραντήρες λειτουργούν σε διάφορες διαμορφώσεις, όπως αντιρροής, παράλληλης ροής, και μικτής ροής. Οι συνθήκες ξήρανσης σε αυτές τις διάφορες ρυθμίσεις της σήραγγας είναι διαφορετικές. Σε μια διαμόρφωση αντίθετης ροής, ο αέρας ξήρανσης εισάγεται στο ένα άκρο της σήραγγας, ενώ τα καρότσια των υλικών τροφίμων εισέρχονται στο άλλο άκρο, και το καθένα κινείται σε αντίθετες κατευθύνσεις. Αυτή η διαμόρφωση χαρακτηρίζεται από το ότι επιτρέπει συνθήκες πιο ευνοϊκές για έντονη θέρμανση κατά το τέλος του κύκλου, όταν τα προϊόντα είναι σχεδόν ξηρά, και απαλή ή ήπια θέρμανση στα πρώτα στάδια. Η λειτουργία της σήραγγας παράλληλης ροής είναι αντίθετη με εκείνη της αντιρροής. Τα καρότσια των τροφίμων και ο αέρας ξήρανσης εισάγονται στο ίδιο άκρο της σήραγγας και κινούνται κατά μήκος της σήραγγας προς την ίδια κατεύθυνση. Αυτή η διαμόρφωση χαρακτηρίζεται από έντονη θέρμανση στα πρώτα στάδια, όπου το υλικό προς ξήρανση είναι ακόμα πολύ υγρό, που ακολουθείται από βραδεία ξήρανση καθώς το προϊόν πλησιάζει στο τέλος του ψυχρότερου άκρου της διάταξης. Στη διαμόρφωση μικτής ροής, ο αέρας κινείται προς την ίδια κατεύθυνση με το προϊόν σε ορισμένες περιοχές στον ξηραντήρα, και στη συνέχεια κινείται προς την αντίθετη κατεύθυνση με το προϊόν σε άλλες θέσεις. Αυτή η διαμόρφωση είναι βασικά ένας συνδυασμός της παράλληλης ροής και αντιρροής. Η

επιλογή των ρυθμίσεων της σήραγγας εξαρτάται από την ευαισθησία του προϊόντος σε υψηλές θερμοκρασίες σε διαφορετικά ποσοστά υγρασίας.



Εικόνα 1.2 Σχηματικό διάγραμμα μιας τυπικής σήραγγας αφυδάτωσης που χρησιμοποιείται στην εμπορική ξήρανση δαμάσκηνων (H. T. Sabarez, 2010).

#### 1.4.1.ii Ξήρανση με Μεταφορική ταινία

Οι ξηραντήρες με ιμάντα μεταφοράς χρησιμοποιούνται συχνά για τις μεγάλες βιομηχανικές εφαρμογές ξήρανσης. Αυτό το είδος της αφυδάτωσης λειτουργεί σε συνεχή βάση και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ξηράνει πολλούς τύπους τροφίμων, συμπεριλαμβανομένων κομματιών φρούτων και λαχανικών (H. Sabarez, 2007). Αποτελείται από μια μονάδα θέρμανσης, ανεμιστήρα για την κυκλοφορία του αέρα, ένα θάλαμο ξήρανσης, και έναν ιμάντα μεταφοράς. Το προϊόν τοποθετείται σε μεταφορική ταινία και κινείται συνεχώς μέσω του θαλάμου ξήρανσης με την ταχύτητα της μεταφορικής ταινίας από την είσοδο τροφοδοσίας στην έξοδο του προϊόντος του ξηραντήρα. Ο επιθυμητός χρόνος ξήρανσης επιτυγχάνεται με τη ρύθμιση της ταχύτητας της μεταφορικής ταινίας. Εάν απαιτείται μεγαλύτερος χρόνος ξήρανσης, χρησιμοποιείται ξηραντήρας με πολλαπλά στάδια μεταφορικών ταινιών που στοιβάζονται οριζόντια ή κάθετα. Η κατακόρυφη διάταξη επιτρέπει το μήκος του ξηραντήρα να είναι μάλλον βραχύτερο αλλά αυξάνει το ύψος του, καθώς προστίθενται επιπλέον μεταφορείς. Η μεταφορά-μετακίνηση μεταξύ των σταδίων των μεταφορικών ταινιών επιτρέπει τον αναπροσανατολισμό και την ανάμειξη του προϊόντος για τη βελτίωση της ομοιομορφίας ξήρανσης (Tang & Yang, 2004). Ο ξηραντήρας μπορεί να αποτελείται από διάφορα τμήματα σε σειρά για κάθε στάδιο, στο οποίο μπορεί να ελέγχεται η θερμοκρασία, η ταχύτητα και η κατεύθυνση του αέρα, και η ταχύτητα του μεταφορέα για κάθε τμήμα για να μεγιστοποιηθεί η ταχύτητα ξήρανσης και να βελτιστοποιηθεί η ενεργειακή απόδοση. Ξηραντήρες με μεταφορείς συνήθως παρέχουν υψηλότερη απόδοση και πιο σταθερή ποιότητα των προϊόντων, αλλά απαιτούν υψηλότερες επενδύσεις σε σύγκριση με τους ξηραντήρες με σήραγγα.

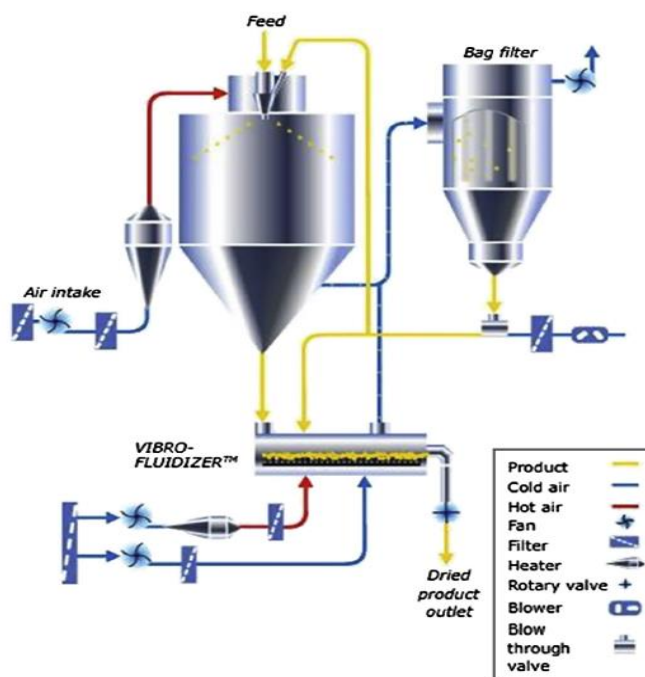
#### 1.4.1.iii Ξήρανση Τυμπάνου

Η ξήρανση τυμπάνου είναι μία ιδιαίτερα αποτελεσματική μέθοδος για την ξήρανση παχύρρευστων υλικών. Η χρήση των ξηραντήρων τυμπάνου είναι μια κοινή βιομηχανική πρακτική για την ξήρανση ποικίλων προϊόντων, συμπεριλαμβανομένων των γαλακτοκομικών προϊόντων, παιδικών τροφών, δημητριακών, πολτού φρούτων και λαχανικών, πουρέ πατάτας, κλπ (Bonauí, Dumoulin, Raoult-Wack, & Berk, 1996; Moore, 1995; Rodriguez, Vasseur, & Courtois, 1996). Οι ξηραντήρες τυμπάνου γενικά ταξινομούνται σε μονό, διπλό και δίδυμο σχεδιασμό τυμπάνου. Ένας ξηραντήρας τυμπάνου αποτελείται από έναν (για το σχεδιασμό μονού τύμπανο) ή δύο (για διπλό ή ενιαίο σχεδιασμό τυμπάνου) οριζόντια τοποθετημένων κοίλων κυλίνδρων, κατασκευασμένων από υψηλής ποιότητας χυτοσίδηρο ή ανοξείδωτο χάλυβα, ένα πλαίσιο υποστήριξης, ένα σύστημα τροφοδοσίας προϊόντος, και ένα ζέστρο. Για μια λειτουργία ξήρανσης μονού τυμπάνου, το τύμπανο περνά μέσα από μια δεξαμενή που περιέχει το υγρό υλικό προς ξήρανση. Καθώς το τύμπανο περιστρέφεται, το υγρό υλικό σχηματίζει ένα λεπτό φιλμ επικαλύπτοντας την επιφάνεια του τυμπάνου και η ξήρανση λαμβάνει χώρα λόγω της μεταφοράς θερμότητας από το εσωτερικό κυρίως με αγωγή. Η εξάτμιση της υγρασίας πραγματοποιείται μέσω του στρώματος προϊόντος στην περιβάλλουσα ατμόσφαιρα. Το αποξηραμένο προϊόν στη συνέχεια αποξέεται από το τύμπανο σε κάποιο σημείο κατά τη διάρκεια της περιστροφής του τυμπάνου (περίπου  $\frac{3}{4}$  της περιστροφής από το σημείο τροφοδοσίας) και συλλέγεται σε ένα δοχείο ή μεταφορέα για περαιτέρω επεξεργασία. Σε ένα σχέδιο διπλού τυμπάνου, το υγρό υλικό τροφοδοτείται εντός του χώρου μεταξύ των δύο τυμπάνων, τα οποία περιστρέφονται σε αντίθετες κατευθύνσεις. Το χάσμα μεταξύ των δύο τυμπάνων ελέγχει το πάχος (0,5-2 mm) του στρώματος τροφοδοσίας που εφαρμόζεται στις επιφάνειες του τυμπάνου. Η ξήρανση λαμβάνει χώρα και στα δύο τύμπανα καθώς η δεξαμενή που σχηματίζεται μεταξύ των τυμπάνων επιτρέπει ένα λεπτό φιλμ του υλικού να επικαλυφθεί στην επιφάνεια και των δύο τυμπάνων. Το αποξηραμένο προϊόν ξανά αποξέεται στο κατάλληλο σημείο και συλλέγεται για περαιτέρω επεξεργασία. Σε ξηραντήρα δίδυμο τυμπάνου, τα τύμπανα περιστρέφονται μακριά το ένα από το άλλο, και η τροφοδοσία εφαρμόζεται από τον τροφοδότη του κάθε τυμπάνου. Η διαδικασία ξήρανσης σε έναν ξηραντήρα τυμπάνου μπορεί να λαμβάνει χώρα αρκετά γρήγορα, αφού και η μεταφορά θερμότητας διαμέσου του μεταλλικού τυμπάνου και η μεταφορά μάζας του νερού έξω από το λεπτό φιλμ είναι αρκετά καλή (Heldman & Hartel, 1997). Ο χρόνος παραμονής του υλικού στο τύμπανο κυμαίνεται μεταξύ 15 και 60 s, που ρυθμίζεται από την ταχύτητα περιστροφής του τυμπάνου (Heldman & Hartel, 1997). Οι ιδιότητες των υλικών που επηρεάζουν την προσκόλληση του τυμπάνου περιλαμβάνουν το ιξώδες, την επιφανειακή τάση, και τη δύναμη διαβροχής. Θα πρέπει επίσης να δοθεί προσοχή για θερμικά ευαίσθητα υλικά, αφού τα αποξηραμένα προϊόντα εκτίθενται σε υψηλές θερμοκρασίες (άνω των 100°C). Για υλικά ευαίσθητα σε θερμικές μεταβολές, ένας ξηραντήρας τυμπάνου κενού μπορεί εναλλακτικά να χρησιμοποιηθεί για να μειώσει τη θερμοκρασία ξήρανσης. Αυτό το σύστημα είναι παρόμοιο με τους άλλους ξηραντήρες τυμπάνου εκτός του ότι τα τύμπανα περικλείονται σε ένα θάλαμο κενού. Ωστόσο, ο εξοπλισμός και η λειτουργία των ξηραντήρων τυμπάνου κενού είναι σχετικά ακριβά, γεγονός που περιορίζει αυτή την τεχνική σε προϊόντα μόνο υψηλής αξίας (Tang, Feng, & Shen, 2003).

#### 1.4.1.iv Ξήρανση με ψεκασμό

Η ξήρανση με ψεκασμό είναι μία μέθοδος όπου ένα υγρό ή πολλός ψεκάζεται σε λεπτά σταγονίδια σε ένα θερμό μέσο συναγωγής, μετατρέποντας τα σταγονίδια σε

λεπτά στερεά σωματίδια. Η διαδικασία έχει πολλές εφαρμογές στην επεξεργασία τροφίμων, ιδιαίτερα στην παραγωγή της στιγμιαίας σκόνης τροφίμων (Chegini&Ghobadian, 2005; Goula & Adamopoulos, 2008). Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται συνήθως για να ληφθούν σκόνες από το γάλα, ορό γάλακτος, μαγιά, και άλλα υψηλής αξίας προϊόντα λόγω της καλής τελικής ποιότητάς τους (Ratti, Bhandari, Bansal, & Zhang, 2013). Σε αυτή τη μέθοδο ξήρανσης, ένα υγρό ή πολτός ψεκάζεται σε ένα θάλαμο ξήρανσης χρησιμοποιώντας έναν ψεκαστήρα (π.χ., ένα ακροφύσιο), και το ζεστό αέριο ρέει με ομορροή ή κατ'αντιρροή με τα διασκορπισμένα σταγονίδια υγρού, απομακρύνοντας την υγρασία από τα σωματίδια (Εικόνα 1.3). Τα ξηρά σωματίδια σκόνης συλλέγονται στο δοχείο συλλογής. Ενώ αυτή η μέθοδος έχει αρκετά πλεονεκτήματα, μεταξύ των οποίων η ταχεία ξήρανση και η συνεχής λειτουργία, είναι μια πολύ ακριβή τεχνική για προϊόντα χαμηλής αξίας, κυρίως λόγω της χαμηλής ενεργειακής απόδοσής της (Jangam, 2011). Επιπλέον, λόγω των σχετικά υψηλών θερμοκρασιών που εμπλέκονται στις διαδικασίες ξήρανσης με ψεκασμό, αυτή η τεχνική ξήρανσης μπορεί να προκαλέσει απώλειες ορισμένων ποιοτικών και οργανοληπτικών χαρακτηριστικών ειδικά βιταμίνης C, β-καροτένιο, γεύσης, και αρώματος (Dziezak, 1988). Επίσης, η παρουσία οξυγόνου στους μεγάλους όγκους αέρα, αναμεμιγμένου με τα σταγονίδια τροφίμων κατά τη διάρκεια ξήρανσης με ψεκασμό μπορεί να έχει αρνητικό αντίκτυπο στα ευαίσθητα στη θερμότητα και ευοξειδωτά θρεπτικά συστατικά.



Εικόνα 1.3 Συμβατικός ξηραντήρας ψεκασμού

## 1.4.2 Ξήρανση σε περιβάλλον μειωμένου αέρα

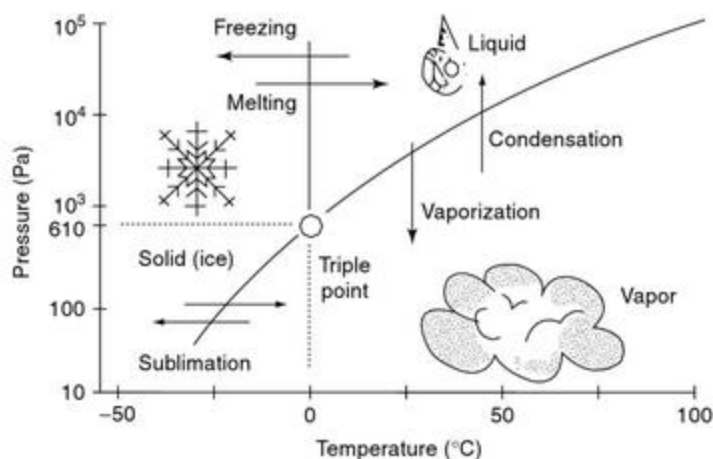
### 1.4.2.i Ξήρανση υπό κενό

Η ξήρανση υπό κενό των τροφίμων περιλαμβάνει την υποβολή του τροφίμου σε μία χαμηλή πίεση και μία πηγή θέρμανσης. Το κενό επιτρέπει στο νερό να εξατμισθεί σε χαμηλότερη θερμοκρασία από ότι σε ατμοσφαιρικές συνθήκες κι έτσι τα τρόφιμα μπορούν να ξηρανθούν χωρίς έκθεση σε υψηλή θερμοκρασία. Επιπλέον, τα χαμηλά επίπεδα του οξυγόνου στην ατμόσφαιρα μειώνει τις αντιδράσεις οξείδωσης κατά τη

διάρκεια της ξήρανσης. Σε γενικές γραμμές, το χρώμα, η υφή και η γεύση του ξηραμένου σε κενό προϊόντος βελτιώνονται σε σύγκριση με των ξηραμένων σε αέρα προϊόντα. Σε ορισμένες περιπτώσεις, το προϊόν μπορεί να συγκριθεί με την ποιότητα των τροφίμων ξηραμένων με κατάψυξη.

#### 1.4.2.ii Ξήρανση με κατάψυξη

Στην ξήρανση με κατάψυξη, κατεψυγμένο υλικό υποβάλλεται σε μία πίεση κάτω από το τριπλό σημείο του νερού (στο 0°C, πίεση: 610Pa) και θερμαίνεται για να προκαλέσει την εξαγωγή του πάγου σε ατμό. Ένα σχηματικό διάγραμμα των διαφόρων καταστάσεων του νερού με τριπλό σημείο παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.4. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται συνήθως για υψηλής ποιότητας αποξηραμένα προϊόντα, τα οποία περιέχουν θερμοευαίσθητα συστατικά, όπως βιταμίνες, αντιβιοτικά και μικροβιακές καλλιέργειες. Η απουσία αέρα και οι χαμηλές θερμοκρασίες αποτρέπουν την υποβάθμιση λόγω της οξείδωσης ή τη χημική τροποποίηση του προϊόντος. Δίνει επίσης πολύ πορώδη προϊόντα, τα οποία οδηγούν σε υψηλούς ρυθμούς ενυδάτωσης. Ωστόσο, η ξήρανση με κατάψυξη είναι μια αργή και δαπανηρή διαδικασία. Παράλληλα με το χρόνο επεξεργασίας απαιτείται πρόσθετη ενέργεια για να λειτουργεί ο συμπιεστής και οι μονάδες ψύξης, γεγονός που καθιστά τη διαδικασία πολύ ακριβή για εμπορική χρήση. Έτσι, χρησιμοποιείται κυρίως για προϊόντα υψηλής αξίας (Cohen & Yang, 1995).



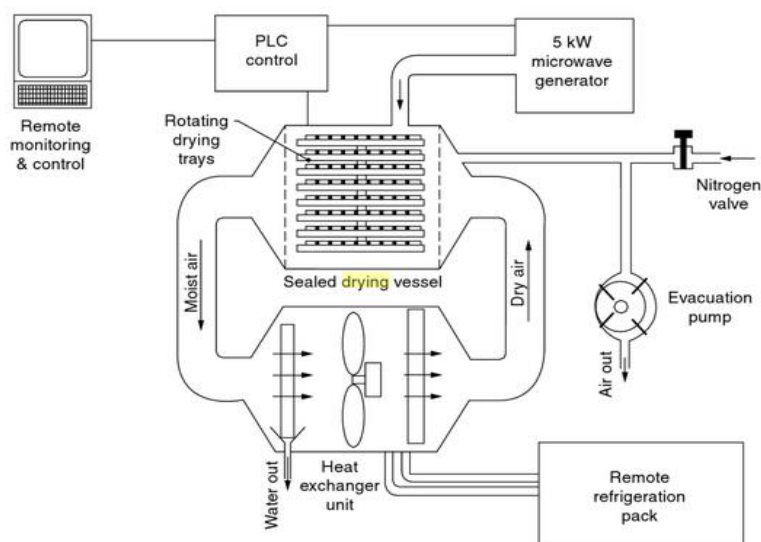
Εικόνα 1.4 Σχηματική απεικόνιση των διαφορετικών καταστάσεων στο τριπλό σημείο. (Nijhuis, HH. et al., 1996)

#### 1.4.3 Ξήρανση υπό τροποποιημένη ατμόσφαιρα

Πρόκειται για μια νέα έννοια ξήρανσης τροφίμων χρησιμοποιώντας ξηραντήρες αντλίας θερμότητας, η οποία χρησιμοποιεί τροποποιημένες ατμόσφαιρες όπως άζωτο και διοξείδιο του άνθρακα, για την καλύτερη ποιότητα και τη διατήρηση των συστατικών των τροφίμων που είναι επιρρεπή στην οξείδωση. Τεχνολογίες για τη δημιουργία της ξήρανσης υπό τροποποιημένη ατμόσφαιρα είναι τώρα σε εξέλιξη. Η ξήρανση υπό τροποποιημένη ατμόσφαιρα με αφυγραντήρα αντλίας θερμότητας (MAHPD) είναι μια σχετικά νέα εξέλιξη περιγράφεται από τον Perera (Perera, 2001) και (Hawladar, Perera, Tian, Ong, & Chng, 2004). Το γεγονός ότι η ξήρανση με αφυγραντήρα αντλίας θερμότητας (HPD) διεξάγεται σε κλειστό, μονωμένο θάλαμο οδήγησε στην ανάπτυξη του (MAHPD) συστήματος ξήρανσης. Ο αέρας στο θάλαμο



του αφυγραντήρα αντικαθίσταται με μία αδρανή ατμόσφαιρα όπως άζωτο, διοξείδιο του άνθρακα ή μίγματα αυτών. Η αντικατάσταση του αέρα στο εσωτερικό του θαλάμου διεξάγεται εύκολα με την εξάντληση του θαλάμου χρησιμοποιώντας αντλία κενού και με διακοπή του κενού χρησιμοποιώντας ένα αδρανές αέριο. Σχηματικό διάγραμμα του συστήματος ξήρανσης MAHPD εμφανίζεται στην Εικόνα 1.5. Αυτό αποτελείται από ένα σφραγισμένο δοχείο ξήρανσης συνδεδεμένο με τη μονάδα εναλλάκτη θερμότητας. Το δοχείο ξήρανσης έχει πρόβλεψη για εισαγωγή αζώτου ή για την εκκένωση μέσω μιας σύνδεσης της βαλβίδας. Το σύστημα MAHPD έχει επίσης διατάξεις για την εισαγωγή ενέργειας μικροκυμάτων για τη θέρμανση του προϊόντος, μέσω ενός κυματοδηγού με σχισμές κάτω από το θάλαμο παράλληλα προς τον άξονα του θαλάμου. Ένας πίνακας ελέγχου PLC, συνδεδεμένος σε ένα απομακρυσμένο υπολογιστή, και η οθόνη ελέγχουν το όλο σύστημα. Το προϊόν φέρεται σε πλαστικούς και διαφανείς στα μικροκύματα δίσκους που στοιβάζονται κατακόρυφα σε μια περιστρεφόμενη πλατφόρμα, η οποία είναι τοποθετημένη σε δυναμοκυψέλη, έτσι ώστε η απώλεια βάρους να μπορεί να παρακολουθείται και να καταγράφεται στον υπολογιστή. Το τρέχον πρωτότυπο είναι ουσιαστικά μια διαδικασία κατά παρτίδες, αλλά μπορεί να είναι ημιαυτόματο ανάλογα με τα προϊόντα και τις προ-επεξεργασίες που απαιτούνται για συγκεκριμένα προϊόντα. Αφού το προϊόν φορτώνεται στους δίσκους και στοιβάζεται στην πλατφόρμα, ο θάλαμος ξήρανσης εκκενώνεται σε 600-700 Pa για 30 min, μετά τα οποία, το κενό διακόπτεται με την επιλεγμένη τροποποιημένη ατμόσφαιρα και η κανονική ξήρανση HPD διεξάγεται σε αυτή την τροποποιημένη ατμόσφαιρα. Η ενέργεια μικροκυμάτων βελτιώνει την ταχύτητα ξήρανσης. Η θερμοκρασία της επιφάνειας του προϊόντος παρακολουθείται χρησιμοποιώντας έναν ανιχνευτή υπέρυθρων. Τέλος, πολυάριθμες παρατηρήσεις υποδεικνύουν ότι MAHPD είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για την ξήρανση ευαίσθητων τροφίμων και φαρμακευτικών προϊόντων.

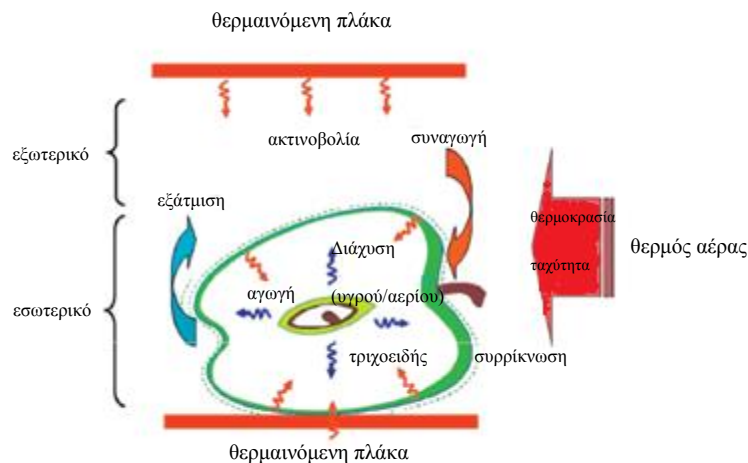


Εικόνα 1.5 Το διάγραμμα του συστήματος ξήρανσης MAHPD. (Perera, C. O., 2001)



## 1.5 Μαθηματική μοντελοποίηση της ξήρανσης

Η μαθηματική μοντελοποίηση είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για την προσομοίωση και τον έλεγχο της απόδοσης της διεργασίας ξήρανσης. Ωστόσο, τα τρόφιμα είναι εξαιρετικά πολύπλοκα στη δομή και τη σύνθεση τους, οπότε δεν υπάρχει καθολικά αποδεκτός τρόπος για να μοντελοποιηθεί η συμπεριφορά ξήρανσής τους, όπως αποδεικνύεται από τον τεράστιο όγκο βιβλιογραφίας που δημοσιεύθηκε στις διάφορες προσεγγίσεις μοντελοποίησης (Kostoglou, Chrysafis, & Andritsos, 2013). Αυτό αντανakλά επίσης την εξαιρετική ποικιλομορφία των μηχανισμών ξήρανσης σε συστήματα τροφίμων. Οι Mujumdar & Huang (2007), ανέφεραν ότι τα περισσότερα μοντέλα ισχύουν για συγκεκριμένους συνδυασμούς προϊόντων-εξοπλισμού. Η διαδικασία της ξήρανσης υλικών τροφίμων είναι εξαιρετικά πολύπλοκη, περιλαμβάνοντας συνδυασμό μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας, μάζας και ορμής καθώς και ποικίλες φυσικοχημικές μεταβολές (H. Sabarez, 2012). Στην ξήρανση τροφίμων, δύο διαφορετικοί μηχανισμοί μεταφοράς συμβαίνουν ταυτόχρονα: μεταφορά θερμότητας από το μέσο ξήρανσης (ή πηγή θερμότητας) στο τρόφιμο και μεταφορά νερού από το εσωτερικό του στερεού προϊόντος στην επιφάνειά του, από την οποία το νερό τελικά μεταφέρεται μακριά από ένα φέρον αέριο (ή με την εφαρμογή κενού για ξηραντήρες χωρίς συναγωγή). Μια εννοιολογική αναπαράσταση των φαινομένων μεταφοράς που εμφανίζονται κατά την ξήρανση του στερεού υλικού τροφίμου απεικονίζεται στην Εικόνα 1.6.



Εικόνα 1.6. Η εννοιολογική αναπαράσταση της διαδικασίας θερμικής ξήρανσης για ένα στερεό υλικό τροφίμων. (Bakalis, S. et al., 2015)

Ενέργεια απαιτείται για να δημιουργήσει αλλαγή φάσης του νερού από υγρό σε ατμό (ή στερεό σε ατμό) και να ενεργοποιήσει μοριακή κίνηση. Ο θερμός αέρας (το πιο κοινό μέσο ξήρανσης) χρησιμοποιείται τόσο για την παροχή θερμότητας (με συναγωγή) όσο και ως αέριο-φορέας για να μεταφέρει την υγρασία. Η θερμότητα μπορεί να παρέχεται επίσης με αγωγή (δηλαδή από θερμαινόμενες μεταλλικές επιφάνειες) ή ακτινοβολία, ή μπορεί να τροφοδοτείται ογκομετρικά με την τοποθέτηση του υγρού υλικού σε ηλεκτρομαγνητικό πεδίο μικροκυμάτων ή

ραδιοσυχνότητας. Η ξήρανση είναι μια λειτουργία υψηλής ενεργειακής κατανάλωσης εξαιτίας της υψηλής λανθάνουσας θερμότητας εξάτμισης του νερού και της έμφυτης ανεπάρκειας της χρήσης θερμού αέρα ως (πιο κοινό) μέσο ξήρανσης. Οι τρεις τρόποι μεταφοράς ενέργειας (συναγωγή, αγωγή και ακτινοβολία) μπορούν να χρησιμοποιηθούν ξεχωριστά ή σε συνδυασμό για την παροχή θερμότητας από την πηγή θερμότητας στα τρόφιμα. Σύμφωνα με τους Mujumdar & Devahastin (2000), πάνω από το 85% των βιομηχανικών ξηραντήρων λειτουργούν με συναγωγή, με θερμό αέρα ή καυσαέρια ως μέσο ξήρανσης. Όλοι οι τρόποι μεταφοράς θερμότητας, εκτός από εκείνοι που χρησιμοποιούν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (μικροκύματα και ραδιοσυχνότητες), παρέχουν θερμότητα στην εξωτερική επιφάνεια του προς ξήρανση υλικού η οποία κατόπιν διαχέεται μέσα στο στερεό κατά κύριο λόγο με αγωγή. Επίσης, οι διάφοροι τρόποι μεταφοράς θερμότητας μπορούν να εφαρμοστούν ταυτόχρονα ή διαδοχικά ανάλογα με την εφαρμογή, προκειμένου να επιτευχθεί βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κατά τη διαδικασία ξήρανσης.

### 1.5.1 Καμπύλη ξήρανσης

Η καμπύλη ξήρανσης υποδηλώνει τον ρυθμό ξήρανσης σε σχέση με το χρόνο ξήρανσης ή την περιεχόμενη υγρασία. Οι καμπύλες ξήρανσης παρουσιάζουν την μεταβολή με το χρόνο είτε της υγρασίας επί ξηρής βάσης είτε της αδιάστατης υγρασίας, η οποία ορίζεται από την Εξ. 1.1 ως:

$$MR = MR(t) = \frac{X(t) - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad (1.1)$$

όπου  $MR$  είναι η αδιάστατη υγρασία (Moisture ratio),  $t$  είναι ο χρόνος ξήρανσης (s),  $X(t)$  είναι η περιεκτικότητα υγρασίας προϊόντος επί ξηρής βάσης τη χρονική στιγμή  $t$ ,  $X_0$  είναι η αρχική περιεκτικότητα υγρασίας προϊόντος σε ξηρή βάση (ξ.β.) και  $X_{eq}$  είναι η υγρασία ισορροπίας σε ξηρή βάση.

Τέλος, ο ρυθμός ξήρανσης  $DR$  (*Draying Rate*) εκφράζει την ποσότητα της υγρασίας που τείνει να εξατμιστεί προς το διάστημα του χρόνου,  $dt$ , που απαιτείται για να πραγματοποιηθεί η εξάτμιση. Ο ρυθμός ξήρανσης σε  $\text{kg νερού} \cdot \text{kg}^{-1}$  ξηρού στερεού  $\cdot \text{s}^{-1}$  προσδιορίζεται από την ακόλουθη Εξ 1.2:

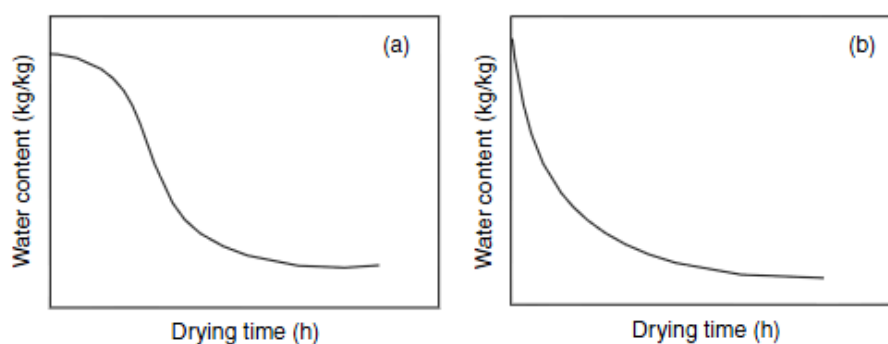
$$DR = DR(t) = - \frac{X(t+dt) - X(t)}{dt} \quad (1.2)$$

όπου  $X(t)$  είναι η περιεκτικότητα υγρασίας προϊόντος επί ξηρής βάσης τη χρονική στιγμή  $t$ ,  $X(t+dt)$  είναι η περιεκτικότητα υγρασίας προϊόντος επί ξηρής βάσης τη χρονική στιγμή  $t+dt$ .

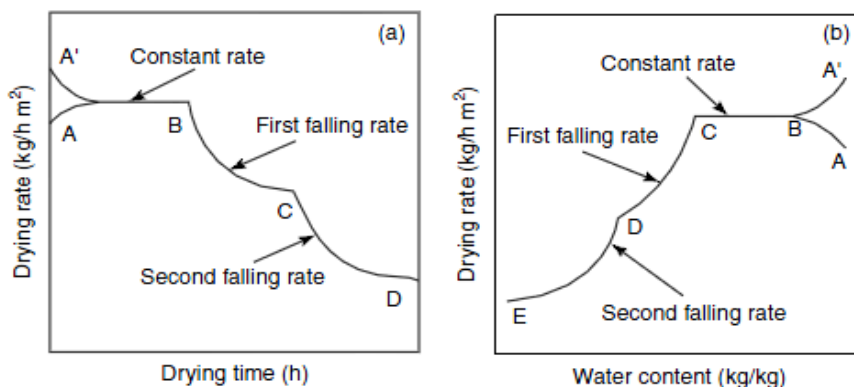
Τρία βασικά στάδια της ξήρανσης μπορεί να παρατηρηθούν στην καμπύλη ξήρανσης (Εικόνα 1.8):

1. Παροδικό πρώιμο στάδιο, κατά το οποίο το προϊόν θερμαίνεται (μεταβατική περίοδος).
2. Σταθερή ή πρώτη περίοδος, στην οποία η υγρασία είναι σχετικά εύκολο να αφαιρεθεί (περίοδος σταθερού ρυθμού).
3. Πτωτική ή δεύτερη περίοδος, κατά την οποία η υγρασία είναι δεσμευμένη ή συκρατούμενη εντός της σάρκας (περίοδος μειωνόμενου ρυθμού).

Τυπικές καμπύλες ξήρανσης φαίνονται στην Εικόνα 1.7. Η περιεκτικότητα σε υγρασία στην οποία η μεταβολή από την πρώτη στη δεύτερη περίοδο συμβαίνει είναι γνωστή ως η κρίσιμη περιεκτικότητα σε υγρασία. Τυπικά, δύο περίοδοι μειωνόμενου ρυθμού παρατηρούνται τόσο για υγροσκοπικά όσο και για μη υγροσκοπικά στερεά (Treybal Robert, 1981). Η πρώτη περίοδος πτωτικού ρυθμού εξαρτάται τόσο από εσωτερικούς όσο και από εξωτερικούς ρυθμούς μεταφοράς μάζας, ενώ η δεύτερη περίοδος, κατά την οποία η ξήρανση είναι πολύ πιο αργή, έχει τεκμηριωθεί ότι εξαρτάται εξ ολοκλήρου από την εσωτερική αντίσταση μεταφοράς μάζας. Η μικρότερη ταχύτητα μπορεί να οφείλεται στην αλληλεπίδραση στερεού- νερού ή στην υαλώδη μετάπτωση (Achanta & Okos, 1996). Οι συμπεριφορές των υλικών τροφίμων στην ξήρανση εξαρτώνται από το πορώδες, την ομοιογένεια και τις υγροσκοπικές ιδιότητες. Η άμεση είσοδος στον πτωτικό ρυθμό είναι χαρακτηριστικό των υγροσκοπικών τροφίμων.



Εικόνα 1.7 Τυπικές καμπύλες ξήρανσης (περιεκτικότητα σε νερό συναρτήσεως του χρόνου στεγνώματος): (α) με περίοδο υστέρησης, (β) χωρίς περίοδο υστέρησης. (Rahman, M., 2007)



Εικόνα 1.8 Τυπικές καμπύλες ρυθμού ξήρανσης: (α) ρυθμός ξήρανσης συναρτήσει του χρόνου ξήρανσης, (β) ρυθμός ξήρανσης συναρτήσει της περιεκτικότητας σε νερό. (Rahman, M., 2007)

### 1.5.2 Μαθηματικά Μοντέλα Ξήρανσης

Η μοντελοποίηση της διεργασίας της ξήρανσης χαρακτηρίζεται από δύο βασικές διαφορετικές προσεγγίσεις: (i) τη φυσική μοντελοποίηση και (ii) την εμπειρική μοντελοποίηση. Η φυσική μοντελοποίηση βασίζεται στην μαθηματική τυποποίηση των βασικών αρχών της φυσικής που διέπουν τη διεργασία της ξήρανσης. Παρόλα ταύτα, η εκτίμηση μερικών φυσικών ιδιοτήτων αλλά και κάποιοι περίπλοκοι μηχανισμοί που διέπουν την ξήρανση καθιστούν πολύ δύσκολη τη φυσική μοντελοποίηση με αποτέλεσμα να απαιτείται χρήση κάποιων παραδοχών. Ο Datta (2008), αναφέρει ότι η μοντελοποίηση βασισμένη στην παρατήρηση είναι μια πρώτη προσέγγιση στη μοντελοποίηση της διεργασίας της ξήρανσης, όμως επί της ουσίας παραμένει εμπειρική. Από την άλλη μεριά, μια φυσική μοντελοποίηση θα πρέπει να μπορεί να περιγράψει τα φυσικά φαινόμενα κατά τη διάρκεια της διεργασίας ακόμα και χωρίς πειραματικά δεδομένα. Τα μοντέλα προσομοίωσης της διεργασίας της ξήρανσης προϊόντων μπορούν να ταξινομηθούν σε δυο κύριες ομάδες τα εμπειρικά μοντέλα και τα μοντέλα μεταφοράς θερμότητας και μάζας.

#### 1.5.2.i Εμπειρικά μοντέλα

Τα μοντέλα αυτά βασίζονται εντελώς σε εμπειρικά δεδομένα και είναι κατάλληλα για συγκεκριμένα προϊόντα και διαδικασίες και επομένως δεν έχουν γενική εφαρμογή σε άλλα προϊόντα (Πίνακας 1.1). Η ανάπτυξη των εμπειρικών μοντέλων περιλαμβάνει παραμέτρους που μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για την εύρεση της μέσης τιμής της περιεχόμενης υγρασίας σαν συνάρτηση του χρόνου ξήρανσης. Γενικά η μοντελοποίησή τους είναι μαθηματικά και υπολογιστικά πιο εύκολη σε σχέση με άλλα μοντέλα.

Πίνακας 1.1 Μονοστρωματικά εμπειρικά μοντέλα ξήρανσης. (Akpinar, E. et al., 2002)

Model name	Model
Newton	$MR = \exp(-kt)$
Page	$MR = \exp(-kt^n)$
Modified page	$MR = \exp[-(kt)^n]$
Modified page	$MR = \exp[(-kt)^n]$
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$
Two term	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$
Two-term exponential	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat)$
Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$
Approximation of diffusion	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$
Verma et al.	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-gt)$

Ένας μεγάλος αριθμός εμπειρικών και ημ εμπειρικών μοντέλων έχουν προταθεί για διάφορα αγροτικά προϊόντα με κυριότερα εξ' αυτών τα μοντέλα του Page, του Newton του Lewis, του Wang και Sing, λογαριθμικά μοντέλα, παραβολικά μοντέλα όπως του Henderson και Rabis, εκθετικά μοντέλα δύο όρων, το τροποποιημένο μοντέλο του Page κλπ. Λεπτομέρειες των προαναφερθέντων εμπειρικών και ημ εμπειρικών μοντέλων υπάρχουν στην αναφορά (Babalís, Papanicolaou, & Kyriakis, 2006).

Μετρώντας την περιεχόμενη υγρασία  $X(t)$  με το χρόνο  $t$ , η καμπύλη ξήρανσης για κάθε πείραμα βρίσκεται σχεδιάζοντας την φθίνουσα εξέλιξη της αδιάστατης υγρασίας με το χρόνο ξήρανσης, όπου  $X_0$  είναι η αρχική υγρασία και  $k$  η σταθερά του ρυθμού ξήρανσης. Η βασική εξίσωση η οποία συνήθως χρησιμοποιείται στα εκθετικά μοντέλα για την εύρεση της αδιάστατης υγρασίας, δίνεται από την Εξ. 1.3:

$$MR = \frac{X(t) - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \exp(-k_0 t) \quad (1.3)$$

όπου  $k_0$  είναι η σταθερά ρυθμού ξήρανσης ( $s^{-1}$ ),  $MR$  είναι η αδιάστατη υγρασία (Moisture ratio),  $t$  είναι ο χρόνος ξήρανσης (s),  $X(t)$  είναι η περιεκτικότητα υγρασίας προϊόντος ξηρής βάσης τη χρονική στιγμή  $t$  ( $kg$  νερού· $kg^{-1}$  ξηρού στερεού),  $X_0$  είναι η αρχική περιεκτικότητα υγρασίας προϊόντος σε ξηρή βάση (ξ.β.) ( $kg$  νερού· $kg^{-1}$  ξηρού προϊόντος) και  $X_{eq}$  είναι η υγρασία ισορροπίας σε ξ.β. ( $kg$  νερού· $kg^{-1}$  ξηρού προϊόντος).

Η παραπάνω εκθετική εξίσωση βασίζεται στο 2<sup>ο</sup> νόμο του Fick χωρίς το φαινόμενο της συρρίκνωσης και με σταθερό συντελεστή διάχυσης σε ισοθερμικές συνθήκες.

### 1.5.2.ii Μοντέλα μεταφοράς θερμότητας και μάζας

Τα μοντέλα μεταφοράς θερμότητας και μάζας υποθέτουν ότι η θερμότητα εντός του προϊόντος μεταφέρεται με αγωγή, η μεταφορά της περιεχόμενης υγρασίας γίνεται με διάχυση και ο προσδιορισμός του φαινόμενου συντελεστή διάχυσης γίνεται με πειραματικό τρόπο. Ο όρος της εξάτμισης της υγρασίας περιλαμβάνεται στην οριακή συνθήκη της εξίσωσης μεταφοράς της θερμότητας, ενώ εσωτερικά του προϊόντος τα

εν λόγω μοντέλα θεωρούν ότι δεν υπάρχει εξάτμιση. Το προϊόν σε αυτή την προσέγγιση αντιμετωπίζεται σαν ένα ομογενοποιημένο μέσο και η υπόθεση της σωρευτικής διάχυσης της περιεχόμενης υγρασίας εντός του προϊόντος σε υγρή και αέρια μορφή (υγρός ατμός) δεν μπορεί να ισχύει για όλες τις περιπτώσεις, καθώς διάφοροι μηχανισμοί λαμβάνουν μέρος σε αυτή τη διαδικασία μεταφοράς (Halder, Dhall, & Datta, 2011).

Για αυτό το λόγο τα μοντέλα αυτά μεταφέρουν όλους τους παραπάνω μηχανισμούς μεταφοράς στον φαινόμενο συντελεστή διάχυσης της υγρασίας. Τα εν λόγω μοντέλα συσχετίζονται ικανοποιητικά με τα πειραματικά αποτελέσματα αλλά δεν μπορούν να γενικευθούν σε άλλες συνθήκες. Επίσης αυτού του είδους τα μοντέλα μπορούν να προβλέψουν την κατανομή της περιεχόμενης υγρασίας και θερμοκρασίας εντός του προϊόντος και είναι πιο ρεαλιστικά σε σχέση με τα εμπειρικά μοντέλα.

Οι Lewis και Sherwood είναι πρωτοπόροι στην ανάπτυξη τέτοιων μαθηματικών μοντέλων, χρησιμοποιώντας την εξίσωση Fourier για τη μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγής και την εξίσωση Fick για την διάχυση. Η μεταφορά της περιεχόμενης υγρασίας γίνεται με δύο αλληλοεξαρτώμενες διαδικασίες: (i) την εξάτμιση της υγρασίας στην στερεά επιφάνεια του προϊόντος από το ρεύμα του ζεστού αέρα ξήρανσης και (ii) την εσωτερική διάχυση της υγρασίας στο εσωτερικό του προϊόντος.

Σύμφωνα με την μακροσκοπική προσέγγιση των φαινομένων μεταφοράς νερού και στερεών, δεν λαμβάνονται υπόψη μηχανισμοί που παρατηρούνται σε κυτταρικό επίπεδο, δηλαδή γίνεται η παραδοχή ότι ο ιστός του τροφίμου είναι ομογενής. Οι περισσότερες ερευνητικές εργασίες που πραγματεύονται την μαθηματική περιγραφή της ξήρανσης και την ποσοτικοποίηση της επίδρασης των βασικών παραμέτρων υιοθετούν αυτή την προσέγγιση λαμβάνοντας ως βάση το δεύτερο νόμο του Fick που περιγράφει τη διάχυση σε μη μόνιμη κατάσταση με την Εξ. 1.4:

$$\frac{dM}{dt} = D \frac{d^2M}{dr^2} \quad (1.4.)$$

όπου  $M$  είναι η περιεκτικότητα σε υγρασία (kg νερού / kg ξηρών στερεών),  $r$  είναι η διαδρομή διάχυσης (m),  $t$  είναι ο χρόνος (s) και  $D$  είναι ο συντελεστής διάχυσης ( $m^2/s$ ).

Μια μαθηματική επίλυση του 2<sup>ου</sup> νόμου του Fick για τη διάχυση είναι η Εξ. 1.5:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[ \frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D t}{4L^2} \right] \quad (1.5)$$

όπου  $MR$  είναι η κλασματική αναλογία υγρασίας,  $M_0$  είναι η αρχική υγρασία, το  $M$  είναι η μέση υγρασία στο χρόνο  $t$ ,  $M_e$  είναι η υγρασία σε ισορροπία και  $L$  είναι το ήμισυ του πάχους της φέτας για την ξήρανση και από τις δύο πλευρές ή το πάχος της φέτας για ξήρανση από τη μία πλευρά.



## 1.6 Προεπεξεργασίες ξήρανσης τροφίμων

Η αφαίρεση της υγρασίας από τα τρόφιμα αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της επεξεργασίας τροφίμων. Η παραγωγή αφυδατωμένων τροφίμων στη βιομηχανία τροφίμων κυρίως επιτυγχάνεται με θερμική αφυδάτωση ή ξήρανση με θερμό αέρα. Οι συνεχείς προσπάθειες της βιομηχανίας επεξεργασίας τροφίμων για την παραγωγή αφυδατωμένων τροφίμων έχουν επικεντρωθεί γύρω από την ενίσχυση του ποσοστού ξήρανσης, τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και την ελαχιστοποίηση της θερμικής διάσπασης των συστατικών των τροφίμων. Η αύξηση του ρυθμού μεταφοράς μάζας ή / και της θερμοκρασίας ξήρανσης του μέσου θα οδηγούσαν σε ταχύτερη ξήρανση των τροφίμων, αλλά θα προκαλούσε αύξηση του κόστους ενέργειας και υποβάθμιση της ποιότητας των τροφίμων. **Οι προκατεργασίες είναι κοινές στις περισσότερες από τις διαδικασίες ξήρανσης, προκειμένου να βελτιωθεί η ποιότητα των προϊόντων, η σταθερότητα αποθήκευσης και η αποτελεσματικότητα της ξήρανσης.** Η ωμική, με μικροκύματα και η συμβατική θέρμανση ως μέθοδοι προεπεξεργασίας κατά την διάρκεια της αφυδάτωσης των λαχανικών έχουν αναφερθεί ότι μειώνουν τους χρόνους ξήρανσης, αλλά αυτό συμβαίνει σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες οι οποίες θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε θερμική αποικοδόμηση των θρεπτικών ουσιών (Wang & Sastry, 2000). Επιπλέον, η συμβατική αφυδάτωση των φρούτων και λαχανικών επηρεάζει τη φυσική και βιοχημική κατάσταση οδηγώντας σε συρρίκνωση, αλλαγή χρώματος, υφής και γεύσης. **Οι διαδικασίες που διευκολύνουν την μεταφορά μάζας των τροφίμων χωρίς να επηρεάζουν δυσμενώς την ποιότητα μπορεί να είναι καλύτερες λύσεις για την ενίσχυση των ρυθμών ξήρανσης, για την ελαχιστοποίηση της υποβάθμισης της ποιότητας και για την εξοικονόμηση ενέργειας από την προσαρμογή των παραμέτρων της διαδικασίας των συμβατικών θερμικών κατεργασιών.**

### 1.6.1 Θερμικές προεπεξεργασίες ξήρανσης

#### 1.6.1.i Προεπεξεργασία με κατάψυξη

Η επεξεργασία κατάψυξης επηρεάζει τη διαδικασία ξήρανσης. Ο ρυθμός επανενυδάτωσης των προεπεξεργασμένων με κατάψυξη και ξηραμένων υπό αέρα ή κενό φρούτων και λαχανικών, είναι συγκρίσιμος με αυτόν των ξηραμένων με κατάψυξη προϊόντων (Kompany, Allaf, Bouvier, Guigon, & Maureaux, 1991). Παρατηρείται επίσης ότι όσο μεγαλύτερη είναι η διάρκεια της κατάψυξης, τόσο καλύτερη η κινητική επανυδάτωση των αποξηραμένων προϊόντων. Αυτό οφειλόταν στο σχηματισμό μεγάλων κρυστάλλων πάγου με βραδεία κατάψυξη και στην έντονη και κυτταρική διάρρηξη. Ο ρυθμός ξήρανσης δεν εξαρτάται από την πίεση στον θάλαμο ξήρανσης (κυμαινόμενη μεταξύ 20 και 50 mmHg) και πάνω από 50 mmHg ο ρυθμός ξήρανσης μειώνεται ταχέως με την πίεση.

#### 1.6.1.ii Ωμική θέρμανση

Η ωμική θέρμανση είναι μια μέθοδος άμεσης θέρμανσης στην οποία το ίδιο το τρόφιμο είναι αγωγός του ηλεκτρισμού, που λαμβάνεται από το ηλεκτρικό δίκτυο που είναι 50Hz στην Ευρώπη και 60Hz στις ΗΠΑ. Το τρόφιμο μπορεί επίσης να βυθίζεται σε ένα αγωγίμο υγρό, π.χ. ένα ασθενές διάλυμα άλατος παρόμοιας αγωγιμότητας με

του τροφίμου. Η θέρμανση επιτυγχάνεται σύμφωνα με το νόμο του Ohm, όπου η αγωγιμότητα, ή το αντίστροφο, η ειδική αντίσταση, των τροφίμων θα καθορίσει το ρεύμα που θα ρέει μεταξύ του εδάφους και του ηλεκτροδίου. Συνήθως εφαρμόζονται υψηλές τάσεις της τάξης των 5000V. Η αγωγιμότητα των τροφίμων αυξάνει σημαντικά με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η ωμική θέρμανση έχει εξαιρετικές δυνατότητες για την ασηπτική επεξεργασία των σωματιδιακών τροφίμων. Τα περισσότερα τρόφιμα που περιέχουν ιοντικά άλατα και υψηλή υγρασία (> 30%) ενδείκνυνται για επεξεργασία με ωμική θέρμανση.

Υπάρχουν διάφορα πλεονεκτήματα με τη χρήση ωμική θέρμανσης. Δεν υπάρχουν κινούμενα μέρη στον ωμικό εναλλάκτη θερμότητας, δεν υπάρχει ανάγκη για θερμές επιφάνειες μεταφοράς θερμότητας, υπάρχει ταχεία και ακόμη και ομοιόμορφη θερμική επεξεργασία των υγρών και σωματιδιακών φάσεων που επιτυγχάνεται με ελάχιστη θερμική βλάβη. Τέλος, η ωμική θέρμανση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως προεπεξεργασία της ξήρανσης σε τρόφιμα με σκοπό την μείωση του χρόνου ξήρανσης. Οι Lebonka, N.I. et al. (2006) εξέτασαν την επιρροή της ωμικής θέρμανσης ως προεπεξεργασία της ξήρανσης δειγμάτων πατάτας. Κατέληξαν στο ότι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου της ωμικής θέρμανσης επηρεάζει σημαντικά τον ρυθμό ξήρανσης των δειγμάτων και γενικά παρατήρησαν την ενίσχυση του ρυθμού ξήρανσης από την προεπεξεργασία με ωμική θέρμανση. Επίσης οι Wang, W. & Sastry, S. (2000) παρατήρησαν την αύξηση του ρυθμού ξήρανσης δειγμάτων πατάτας, γλυκοπατάτας και καρότου όταν αυτά είχαν προεπεξεργασθεί με ωμική θέρμανση.

#### *1.6.1.iii Θέρμανση με μικροκύματα*

Τα μικροκύματα που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία τροφίμων είναι βιομηχανικών, επιστημονικών και ιατρικών (ISM) συχνοτήτων 2450 ή 900MHz, που αντιστοιχούν σε μήκος κύματος 12 ή 34 εκατοστά. Σε αυτό το φάσμα συχνοτήτων, ο διηλεκτρικός μηχανισμός θέρμανσης κυριαρχεί έως και σε μέτριες θερμοκρασίες. Η ικανότητα διείσδυσης των μικροκυμάτων σε τρόφιμα είναι περιορισμένη. Το περιορισμένο βάθος διείσδυσης των μικροκυμάτων συνεπάγεται ότι η κατανομή της ενέργειας στο εσωτερικό του τροφίμου μπορεί να ποικίλει. Ο έλεγχος της ομοιομορφίας θέρμανσης στη θέρμανση με μικροκύματα είναι δύσκολος, καθώς τα αντικείμενα που πρόκειται να θερμανθούν είναι του ίδιου μεγέθους με το μήκος κύματος στο υλικό. Ως αποτέλεσμα αυτός είναι και ο σημαντικός περιορισμός για τη βιομηχανική εφαρμογή της θέρμανσης με μικροκύματα. Ένα ακόμα μειονέκτημα της θέρμανσης με μικροκύματα, σε αντίθεση με τη συμβατική θέρμανση είναι η ανάγκη για ηλεκτρική ενέργεια, η οποία είναι ακριβή.

Η θέρμανση με μικροκύματα εφαρμόζεται στις περισσότερες από τις λειτουργίες θερμικής επεξεργασίας στην βιομηχανία τροφίμων. Για πολλά χρόνια η μεγαλύτερη εφαρμογή ήταν η απόψυξη των κατεψυγμένων τροφίμων, όπως τεμάχια κρέατος, πριν από την περαιτέρω επεξεργασία. Μια άλλη μεγάλη περιοχή εφαρμογής είναι για την παστερίωση, και τώρα, επίσης, την αποστείρωση, συσκευασμένων τροφίμων. Ο στόχος αυτών των ενεργειών είναι να παστεριωθεί το φαγητό σε θερμοκρασίες στην περιοχή από 75 έως 80°C, προκειμένου να παραταθεί η διάρκεια ζωής περίπου 3 έως 4 εβδομάδες. Η αποστείρωση χρησιμοποιώντας μικροκύματα έχει ερευνηθεί για πολλά χρόνια, αλλά η εμπορική εισαγωγή έχει έρθει μόνο τα τελευταία χρόνια στην Ευρώπη και την Ιαπωνία. Η παστερίωση και αποστείρωση με μικροκύματα υπόσχονται να δώσουν πολύ γρήγορη θερμική επεξεργασία, η οποία θα πρέπει να οδηγήσει σε μικρές μεταβολές της ποιότητας λόγω της θερμικής επεξεργασίας.

Ωστόσο, έχει αποδειχθεί ότι οι πολύ υψηλές απαιτήσεις για την ομοιομορφία θέρμανσης πρέπει να πληρούνται προκειμένου να εκπληρωθούν αυτά τα πλεονεκτήματα της ποιότητας.

Συχνά, τα μικροκύματα χρησιμοποιούνται κυρίως για τη μετακίνηση του νερού από το υγρό εσωτερικό κομματιών στερεού τροφίμου στις επιφάνειες. Περαιτέρω εφαρμογή της θέρμανσης μικροκυμάτων είναι για την ξήρανση, σε συνδυασμό με τη συμβατική ξήρανση θερμού αέρα. Συγκεκριμένα, οι Zhang, M. et al. (2006) αναφέρουν τα σημαντικά πλεονεκτήματα των μικροκυμάτων ως προεπεξεργασίας της ξήρανσης, όπως τον μειωμένο χρόνο ξήρανσης και τη βελτιωμένη ποιότητα των τελικών προϊόντων.

Σε γενικές γραμμές, η θέρμανση με μικροκύματα έχει έναν αριθμό ποσοτικών και ποιοτικών πλεονεκτημάτων έναντι των συμβατικών μεθόδων θέρμανσης, που κάνουν την εφαρμογή της μια σοβαρή επιλογή. Ένα κύριο πλεονέκτημα είναι ο τόπος όπου η θερμότητα που παράγεται, δηλαδή το ίδιο το προϊόν. Εξαιτίας αυτού, η επίδραση των μικρών αγωγιμοτήτων θερμότητας ή οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας δεν παίζουν τόσο σημαντικό ρόλο. Ως εκ τούτου, μεγαλύτερα κομμάτια μπορεί να θερμανθούν σε συντομότερο χρονικό διάστημα και με μια πιο ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας. Αυτά τα πλεονεκτήματα συχνά αποδίδουν μια αυξημένη παραγωγή.

## **1.6.2 Μη θερμικές προεπεξεργασίες ξήρανσης**

### **1.6.2.i Υπερυψηλή πίεση**

Η Υπερυψηλή Πίεση (ΥΠ) είναι μια νέα τεχνική που προέκυψε κατά την παραγωγή τροφίμων εντός της τελευταίας δεκαετίας και πιο πρόσφατα για φαρμακευτικές και ιατρικές εφαρμογές. Βασικά πλεονεκτήματα της ΥΠ, όπως η άμεση και ομοιογενής κατανομή της πίεσης στο επεξεργαζόμενο προϊόν, η δυνατότητα επεξεργασίας σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος καθώς και η δυνατότητα εφαρμογής σε συσκευασμένα τρόφιμα καθιστούν την τεχνολογία ελκυστική. Η αδρανοποίηση παθογόνων και η επέκταση της διάρκειας ζωής έτοιμων προς βρώση (ready to eat) κρεάτων είναι, προφανώς, οι εφαρμογές της ΥΠ που έχουν κάνει την τεχνολογία γνωστή και αποδεκτή στη βιομηχανία τροφίμων. Θεωρητικά η θερμοκρασία και η πίεση ως λειτουργικές συνθήκες για την επεξεργασία τροφίμων με ΥΠ μπορεί να κυμαίνονται από 300 έως 1000 MPa στους  $-20^{\circ}\text{C}$  έως  $121^{\circ}\text{C}$ , ανάλογα με τη διαδικασία και τη φύση του τροφίμου που προκύπτει στις διεργασίες όπως η αποστείρωση, η παστερίωση, ή παράταση χρόνου ζωής με προστιθέμενη αξία.

Η διεργασία της ΥΠ περιλαμβάνει αρχικά συσκευασία του τροφίμου σε έναν εύκαμπτο περιέκτη και έπειτα τοποθέτηση στο δοχείο υψηλής πίεσης. Στο δοχείο αυτό περιέχεται ένα ρευστό μεταφοράς πίεσης. Στη συνέχεια ο αέρας αποβάλλεται από το δοχείο μέσω μιας βαλβίδας εξαέρωσης με τη βοήθεια μιας αντλίας και δημιουργείται ΥΠ με άμεση ή έμμεση συμπίεση ή με θέρμανση του μέσου μεταφοράς της πίεσης. Το μέσο διαβίβασης της πίεσης είναι ένα ρευστό χαμηλής συμπιεστότητας, όπως τα ευγενή αέρια και το νερό. Η πίεση εφαρμόζεται ισοστατικά και ομοιόμορφα, όπως έχει εξηγηθεί παραπάνω, σε όλες τις πλευρές του τροφίμου κι έτσι το τρόφιμο δεν συνθλίβεται αλλά διατηρεί το σχήμα κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας.

Σχετικά με τη θερμοκρασία, στην οποία πραγματοποιείται η παραπάνω διεργασία, μπορεί είτε να γίνει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος είτε και σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Αυτό, μάλιστα, είναι σημαντικό πλεονέκτημα για τα ευπαθή στη θερμότητα τρόφιμα (Rastogi, 2013). Όπως προκύπτει, το φαινόμενο της μεταφοράς φάσης και οι χημικές αλλαγές συνοδεύονται από μείωση του όγκου. Για το λόγο αυτό το υλικό συσκευασίας θα πρέπει να είναι ανθεκτικό σε αυξομειώσεις του όγκου.

Η διεργασία χαρακτηρίζεται από τρεις παραμέτρους: τη θερμοκρασία (T), την πίεση (P) και το χρόνο επεξεργασίας (t). Λόγω του γεγονότος ότι η διεργασία της ΥΠ εξαρτάται από τρεις παραμέτρους, όταν μάλιστα οι θερμικές διεργασίες εξαρτώνται από δύο παραμέτρους (T, t), προσφέρεται το πλεονέκτημα της μεγάλης ποικιλίας σχεδιασμού για τη βελτίωση της διατηρησιμότητας του τροφίμου.

Η μέθοδος της Υπερυψηλής Πίεσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως προεπεξεργασία της ξήρανσης για την αύξηση του ρυθμού ξήρανσης των τροφίμων. Αυτό επιβεβαιώνουν οι Yucel, U. et al (2010) καθώς στη μελέτη τους τα προεπεξεργασμένα δείγματα καρότου, μήλου και πράσινων φασολιών με υπερυψηλή πίεση, μεγαλύτερη από 100MPa, εμφάνισαν μεγαλύτερη ηλεκτροδιάτρηση που οδήγησε σε μικρότερους χρόνους ξήρανσης. Στα ίδια συμπεράσματα κατέληξαν και οι Eshtiaghi, M.N. et al (1994) κατά την προεπεξεργασία δειγμάτων καρότου, πατάτας και πράσινων φασολιών.

#### 1.6.2.ii Επεξεργασία με υπερήχους

Σε αντίθεση με τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, τα οποία μπορούν να ταξιδέψουν στο κενό, τα ηχητικά κύματα χρειάζονται ένα μέσο, όπως ο αέρας ή το νερό, να ταξιδεύουν μέσω αυτού. Ο υπέρηχος αναφέρεται στα κύματα που έχουν υψηλότερες συχνότητες από τα κύματα αντιληπτά από την ανθρώπινη ακοή (16 Hz έως 18 kHz). Ανάλογα με το επίπεδο συχνότητας και ισχύος, εφαρμογή υπερήχων στην επεξεργασία των τροφίμων μπορεί να χωριστεί σε δύο:

1. Υψηλή συχνότητα (5-10MHz) και χαμηλή ενέργεια (<1 W/cm<sup>2</sup>) (HFLP)
2. Χαμηλή συχνότητα (20-100kHz) και υψηλή ενέργεια (>5 W/cm<sup>2</sup>) (LFLP)

Ο υπέρηχος HFLP (High Frequency Low Pressure) χρησιμοποιείται σε διαγνωστικές εφαρμογές όπως μέτρηση πάχους, ανίχνευση του μεγέθους και της θέσης της εξωγενούς ύλης, μέτρηση του ρυθμού ροής (αίματος στις φλέβες), ανίχνευση σύνθεσης με 0,1% ευαισθησία και τη μέτρηση του μεγέθους των σωματιδίων. Από την άλλη, ο LFLP ( Low Frequency High Pressure) υπέρηχος χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπως ο καθαρισμός, ξήρανση, εξόρυξη, μικροβιακή και ενζυμική αδρανοποίηση, απαέρωση των υγρών και επιτάχυνση της μεταφοράς θερμότητας (Mason, Riera, Vercet, & Lopez-Buesa, 2005; Feng&Yang, 2011).

Η επίδραση των υπερήχων στους μικροοργανισμούς αποδίδεται στην ενδοκυτταρική σπηλαιώση. Ωστόσο, τα αποτελέσματα που προκαλούνται από τον υπέρηχο μόνο του δεν είναι αρκετά για μία επαρκή μείωση των μικροοργανισμών, έτσι περισσότερες εφαρμογές χρησιμοποιούν συνδυασμούς με άλλες μεθόδους συντήρησης (Butz & Tauscher, 2002). Ως εκ τούτου, οι υπέρηχοι μπορούν να συνδυαστούν με θερμότητα,

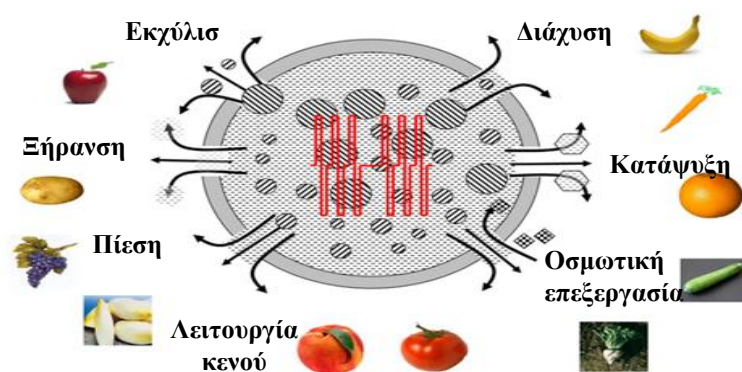
πίεση ή και τα δύο. Η ορολογία που χρησιμοποιείται για τις συνδυασμένες διεργασίες έχουν ως εξής:

- Manosonication: Συνδυασμός υπερήχου με την πίεση
- Thermosonication: Συνδυασμός υπερήχου με τη θερμότητα
- Manothermosonication: Συνδυασμός υπερήχου με τόσο πίεση και θερμότητα

Οι υπέρηχοι μπορεί να χρησιμοποιηθούν για να ενισχύσουν την μεταφορά θερμότητας και μάζας σε διάφορες διαδικασίες όπως η ξήρανση. Η ξήρανση ενισχύεται με την αύξηση του ρυθμού διάχυσης, που προκαλεί η εφαρμογή των υπερήχων μέσω των διαδοχικών συμπίεσεων και διαθλάσεων στο υλικό. Σε πρόσφατη μελέτη των Wiktor, A. et al (2012) τα προεπεξεργασμένα με υπέρηχους δείγματα μήλου εμφάνισαν κατά 31% μειωμένο χρόνο ξήρανσης σε σχέση με τα ανεπεξέργαστα δείγματα. Τέλος, οι Mothibe, K., J. et al. (2011) στην προεπεξεργασία δειγμάτων φρούτων με υπέρηχους παρατήρησαν αυξημένους ρυθμούς ξήρανσης.

### 1.6.2.iii Επεξεργασία με Παλλόμενα Ηλεκτρικά Πεδία

Μεταξύ όλων των ανερχόμενων μη θερμικών τεχνολογιών, τα Παλλόμενα Ηλεκτρικά Πεδία (ΠΗΠ) είναι μια από τις πιο ελκυστικές τεχνολογίες, λόγω των σύντομων χρόνων επεξεργασίας και των μειωμένων επιπτώσεων θέρμανσης σε σχέση με άλλες τεχνολογίες. Τα ΠΗΠ εκτιμώνται ιδιαίτερα ως μη θερμική τεχνολογία διατήρησης τροφίμων, που περιλαμβάνει την εφαρμογή των σύντομων ηλεκτρικών παλμών υψηλής τάσης στο προϊόν. Χρησιμοποιούνται επίσης ως προεπεξεργασία σε πολλές διεργασίες για φρούτα και λαχανικά, συμπεριλαμβανομένης της ξήρανσης, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.9. Η μέθοδος αυτή αλλά και ο συνδυασμός της με την ξήρανση των τροφίμων αναλύονται εκτενώς στο επόμενο κεφάλαιο.



Εικόνα 1.9 Διεργασίες σε φρούτα και λαχανικά, στις οποίες χρησιμοποιούνται ως προεπεξεργασία τα ΠΗΠ. (Lebovka, N. & Vorobiev, E. 2016)



## 2. ΠΑΛΛΟΜΕΝΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΠΕΔΙΑ

### 2.1 Αρχή λειτουργίας

Η ολοένα αυξανόμενη τάση προς τρόφιμα υψηλής διατροφικής αξίας οδήγησε την τεχνολογία τροφίμων να στραφεί σε εναλλακτικές μεθόδους συντήρησης, αντί των συμβατικών θερμικών επεξεργασιών. Η θερμική επεξεργασία είναι μια σημαντική τεχνολογία που έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στη βιομηχανία τροφίμων για την αύξηση της διάρκειας ζωής και τη διατήρηση της ασφάλειας των τροφίμων με χαμηλό κόστος επεξεργασίας (Knoir, Geulen, Grahl, & Sitzmann, 1994). Επιπλέον, η θερμική επεξεργασία παραδοσιακά επιτυγχάνεται με την υποβολή του τροφίμου σε μια περιοχή θερμοκρασιών από 60 έως πάνω από 100 ° C για λίγα sec έως min, μεταφέροντας ένα μεγάλο ποσό ενέργειας στην τροφή (Jay, 2000). Αν και ο στόχος της ενέργειας είναι να καταστρέψει τους μικροοργανισμούς για τη συντήρηση των τροφίμων, πολλές ανεπιθύμητες αντιδράσεις ενισχύονται και οδηγούν σε ανεπιθύμητες αλλαγές, συμπεριλαμβανομένης της απώλειας της θρεπτικής και οργανοληπτικής ποιότητας των τροφίμων (Alwazeer, Delbeau, Divies, & Cachon, 2003). Εναλλακτικές τεχνολογίες για την αδρανοποίηση των μικροοργανισμών, χωρίς εξάρτηση από τη θερμότητα δεν είναι νέες έννοιες, αλλά η ανάπτυξή τους για χρήση ως επεξεργασίες συντήρησης των τροφίμων έχει λάβει σημαντική ώθηση μόλις τα τελευταία χρόνια. Μη θερμικές τεχνολογίες επεξεργασίας τροφίμων, με τη χρήση θερμοκρασιών περιβάλλοντος ή σχεδόν θερμοκρασιών περιβάλλοντος, μπορούν να παρέχουν μια εναλλακτική λύση για τις θερμικές τεχνολογίες μέσω της βελτίωσης της ασφάλειας, διατηρώντας παράλληλα την ποιότητα των προϊόντων και την οικονομική σκοπιμότητα.

Αρκετές τεχνολογίες μη θερμικής επεξεργασίας διατηρούν τα τρόφιμα κάτω από θερμοκρασίες που χρησιμοποιούνται συνήθως σε θερμική επεξεργασία. Αυτό διατηρεί τη διατροφική τους ποιότητα, συμπεριλαμβανομένων των βιταμινών, μετάλλων, και βασικών γεύσεων, ενώ καταναλώνεται λιγότερη ενέργεια από τη θερμική επεξεργασία. Η υπερυψηλή πίεση, τα παλλόμενα μαγνητικά πεδία, οι έντονοι παλμοί φωτός, η ακτινοβολία, και τα ΠΗΠ έχουν αναγνωρισθεί ως ανερχόμενες μη θερμικές τεχνολογίες τα τελευταία χρόνια (Barbosa-Canovas & Pothakamury, 1999). Κάθε μια από τις μη θερμικές τεχνολογίες έχει συγκεκριμένες εφαρμογές σε σχέση με τα είδη τροφίμων που μπορούν να υποβληθούν σε επεξεργασία. Μεταξύ αυτών, τα παλλόμενα ηλεκτρικά πεδία (ΠΗΠ) είναι μια από τις πιο πολλά υποσχόμενες μεθόδους μη θερμικής επεξεργασίας για την αδρανοποίηση των μικροοργανισμών, με τη δυνατότητα να είναι μια εναλλακτική λύση για παστερίωση υγρών τροφίμων.

Με τα ΠΗΠ είναι δυνατή η μη θερμική παστερίωση υγρών τροφίμων μέσω της έκθεσής τους σε σύντομους παλμούς υψηλής τάσης που διατηρούνται σε θερμοκρασίες κάτω των 30-40°C. Η τεχνολογία των ΠΗΠ στηρίζεται στη χρήση υψηλής έντασης παλλόμενων ηλεκτρικών πεδίων (10-80 kV/cm), τα οποία προκαλούν ηλεκτροδιάτρηση στις μικροβιακές μεμβράνες, μια διεργασία που χρησιμοποιείται στη βιοτεχνολογία για την εισαγωγή DNA μέσα στα κύτταρα. Η ηλεκτροδιάτρηση στηρίζεται στην ηλεκτρική πόλωση της κυτταρικής μεμβράνης. Η πόλωση αυτή δημιουργεί δυνάμεις που οδηγούν στο σχηματισμό πόρων και τελικά σε κυτταρικό θάνατο (Zimmermann, 1986). Η τεχνολογία των ΠΗΠ βασίζεται σε μια

παλλόμενη τάση που εφαρμόζεται μεταξύ δυο ηλεκτροδίων και μεταφέρεται στο προϊόν το οποίο είναι τοποθετημένο στο θάλαμο επεξεργασίας. Ο εξοπλισμός αποτελείται από μια γεννήτρια παλμών υψηλής τάσης και ένα θάλαμο επεξεργασίας με ένα κατάλληλο σύστημα χειρισμού υγρών και τις αναγκαίες συσκευές παρακολούθησης και ελέγχου. Το προϊόν τοποθετείται στο θάλαμο επεξεργασίας, είτε σε στατικό ή συνεχή σχεδιασμό, όπου τα δύο ηλεκτρόδια συνδέονται μεταξύ τους με ένα μη αγώγιμο υλικό για την αποφυγή ηλεκτρικής ροής από το ένα στο άλλο. Οι παραγόμενοι υψηλής τάσης ηλεκτρικοί παλμοί εφαρμόζονται στα ηλεκτρόδια, και μεταφέρονται προς το προϊόν που είναι τοποθετημένο μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων. Το προϊόν δέχεται μια δύναμη ανά μονάδα φορτίου, το λεγόμενο ηλεκτρικό πεδίο, το οποίο είναι υπεύθυνο για την αναστρέψιμη ή μη αναστρέψιμη διάσπαση της κυτταρικής μεμβράνης στους μικροοργανισμούς (Zimmermann & Benz, 1980). Η αδρανοποίηση των μικροοργανισμών που εκτίθενται σε υψηλής τάσης ΠΗΠ σχετίζεται με την προκαλούμενη ηλεκτροδιάτρηση, η οποία εξαρτάται από την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, τον αριθμό των παλμών, το χρόνο επεξεργασίας και άλλες παραμέτρους που αναλύονται στη συνέχεια.

## **2.2 Παράμετροι επεξεργασίας**

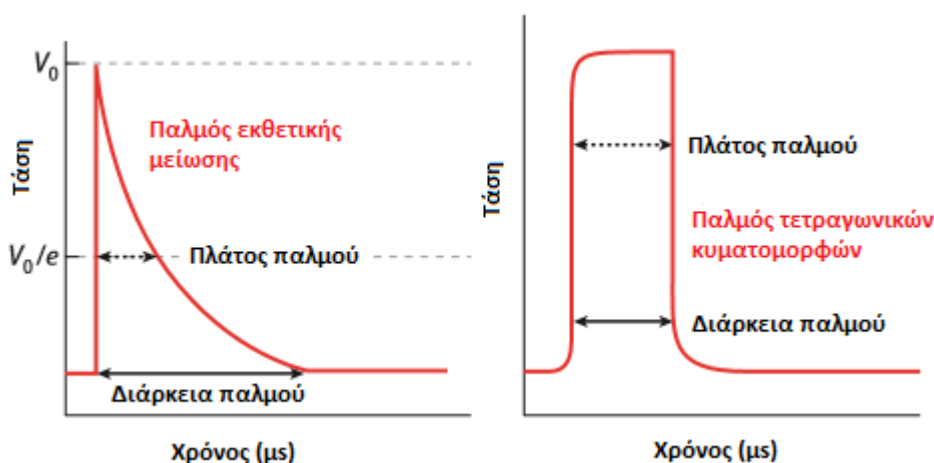
### **2.2.1 Ένταση ηλεκτρικού πεδίου**

Εφαρμόζοντας ένα εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο σε ένα ηλεκτρικά αγώγιμο κυτταρικό αιώρημα, οι κυτταρικές μεμβράνες φορτίζονται. Ο σχηματισμός πόρων θα παρατηρηθεί όταν μια ορισμένη οριακή τιμή του διαμεμβρανικού δυναμικού υπερβαίνεται, η οποία έχει βρεθεί να είναι στην περιοχή του 1V (Zimmermann, 1996). Η κρίσιμη ένταση του πεδίου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος των κυττάρων, καθώς και τον προσανατολισμό των κυττάρων στο πεδίο (Heinz, Alvarez, Angersbach, & Knorr, 2001). Με τη μείωση του μεγέθους των κυττάρων η απαιτούμενη ένταση που απαιτείται για ηλεκτροδιάτρηση αυξάνει απότομα, και παραλλαγές στο σχήμα του κύτταρου μπορούν να προκαλέσουν σημαντική αύξηση της έντασης του πεδίου. Η αύξηση της έντασης ηλεκτρικού πεδίου οδηγεί σε αύξηση της αποδοτικότητας της επεξεργασίας (Hülshager, Potel, & Niemann, 1983; Boyko, Tur, Evdoshenko, Zarochentsev, & Ivanov, 1998; Heinz, Phillips, Zenker, & Knorr, 1999; Heinz & Knorr, 2000; McDonald, Lloyd, & Vitale, 2000; Alvarez, Pagán, Condón, & Raso, 2003; Heinz, Toepfl, & Knorr, 2003), αλλά περιορίζεται από την διηλεκτρική αντοχή του τροφίμου (Ho & Mittal, 2000) η οποία κυμαίνεται συνήθως σε τιμές από 60 έως 80kV/cm. Εάν το ηλεκτρικό πεδίο υπερβεί την διηλεκτρική αντοχή, δημιουργείται ηλεκτρική εκκένωση. Το σχηματιζόμενο ηλεκτρικό τόξο αυξάνει τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος και ενισχύει ανεπιθύμητες ηλεκτροχημικές αντιδράσεις, σχηματισμό φυσαλίδων και διάβρωση του ηλεκτροδίου. Εκκένωση μπορεί επίσης να παρατηρηθεί εάν στο τρόφιμο υπάρχουν φυσαλίδες αέρα, καθώς η διηλεκτρική αντοχή του αέρα είναι μόλις 30kV/cm.



## 2.2.2 Σχήμα παλμού

Τα σχήματα παλμού που χρησιμοποιούνται στις επεξεργασίες ΠΗΠ είναι συνήθως ο εκθετικός και ο τετραγωνικός παλμός (Jeyamkondan & Jayas, 1999) (Εικόνα 2.1). Ο χρόνος επεξεργασίας υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας τον αριθμό των παλμών με τη διάρκεια του παλμού. Ο τετραγωνικός έχει προσδιορισθεί ότι είναι το ιδανικό σχήμα παλμού για επεξεργασία ΠΗΠ, διότι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου παραμένει σταθερή για όλη τη διάρκεια του παλμού. Η διάρκεια του παλμού για ένα τετραγωνικό παλμό είναι ο χρόνος που η τάση διατηρείται στη μέγιστη τιμή. Στην περίπτωση του εκθετικού παλμού, η διάρκεια παλμού ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για να μειωθεί η τάση στο 37% της μέγιστης τιμής της (Zhang & Barbosa-Cánovas, 1995).



Εικόνα 2.1 Σχήματα παλμού: Εκθετικός παλμός (αριστερά), Τετραγωνικός παλμός (δεξιά). (Puertolas, E. et al. 2012)

Η πλειοψηφία των μελετών έχουν χρησιμοποιήσει εκθετικούς παλμούς, κατά τη μελέτη μικροβιακής αδρανοποίησης από ΠΗΠ. Ο υπολογισμός του χρόνου επεξεργασίας σε μια δεδομένη ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι πιο δύσκολος με αυτό το είδος του παλμού, επειδή η τάση μειώνεται εκθετικά από τη μέγιστη τιμή και η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου αλλάζει μόνιμα κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας. Καθώς η κορυφή του παλμού και το σχήμα παλμού εξαρτώνται από την ηλεκτρική αγωγιμότητα, οι τετραγωνικοί παλμοί είναι πιο ακριβείς για τον υπολογισμό του χρόνου επεξεργασίας σε μια δεδομένη ένταση ηλεκτρικού πεδίου. Τέλος, οι τετραγωνικοί παλμοί είναι πιο αποτελεσματικοί, από πλευρά εξοικονόμηση ενέργειας και μικροβιακής καταστροφής, από τους εκθετικούς (Qin, Zhang, & Barbosa-Canovas, 1994).

## 2.2.3 Χρόνος επεξεργασίας και ειδική ενέργεια

Εκτός από την ένταση ηλεκτρικού πεδίου το πλάτος παλμού και ο μέσος αριθμός των παλμών που εφαρμόζονται έχει συχνά χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της έντασης της επεξεργασίας. Η αύξηση του χρόνου επεξεργασίας έχει ως αποτέλεσμα την υψηλότερη μικροβιακή αδρανοποίηση (Sale & Hamilton, 1967). Το πλάτος παλμού ορίζεται ως ο χρόνος όπου η μέγιστη ένταση ηλεκτρικού πεδίου διατηρείται για τετραγωνικούς παλμούς ή ο χρόνος μέχρι την επίτευξη 37% της μέγιστης έντασης

πεδίου για εκθετικούς παλμούς. Η αύξηση του χρόνου επεξεργασίας οδηγεί σε αυξημένη μικροβιακή καταστροφή. Η ειδική ενέργεια προτάθηκε ως παράμετρος έντασης και μπορεί να εκτιμηθεί από την αύξηση της θερμοκρασίας του προϊόντος και την ειδική θερμοχωρητικότητα του τροφίμου εκλαμβάνοντας αδιαβατικό σύστημα όπου η ενέργεια που προσδίδεται στο σύστημα μετατρέπεται εντελώς σε θερμότητα. Ακριβέστερα, μπορεί να υπολογιστεί για όλες τις κυματομορφές βασισμένη σε σήματα τάσης και ρεύματος που προσδιορίζονται κοντά στα ηλεκτρόδια από την Εξ.2.1:

$$W_{pulse} = \int U(t)I(t)dt \quad (2.1)$$

Για εκθετικό σχήμα παλμών η ειδική ενέργεια μπορεί επίσης να εκτιμηθεί από την ενέργεια που αποθηκεύεται στους πυκνωτές (Εξ.2.2), όπου  $U$  η τάση φόρτισης και  $C$  η χωρητικότητα του πυκνωτή:

$$W_{specific} = \frac{U^2C}{2} \cdot f \cdot \dot{m} \quad (2.2)$$

Με βάση την αγωγιμότητα του μέσου και την μετρούμενη ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, η ειδική ενέργεια μπορεί επίσης να υπολογιστεί από την Εξ. 2.3 ως:

$$W_{specific} = f \cdot \frac{1}{m} \cdot \int_0^\infty \kappa(T) \cdot E(t)^2 dt \quad (2.3)$$

όπου  $E$ ,  $\kappa(T)$ ,  $f$  και  $m$  υποδηλώνουν την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, την αγωγιμότητα του μέσου, τη συχνότητα και το ρυθμό ροής της μάζας, αντίστοιχα. Η αύξηση της θερμοκρασίας λόγω διάχυσης της ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της διαδικασίας συγκρίνοντας την θερμοκρασία εισόδου με θερμοκρασία εξόδου του προϊόντος μετά την επεξεργασία. Η ειδική ενέργεια που απαιτείται για την επίτευξη ενός δεδομένου μικροβιακού ρυθμού απενεργοποίησης ή για την διάρρηξη κυττάρων είναι κατάλληλη για να χρησιμοποιηθεί ως παράμετρος έντασης επεξεργασίας, καθώς μπορεί να προσδιοριστεί από αυτήν και το κόστος λειτουργίας. Ωστόσο, ούτε ο χρόνος επεξεργασίας ούτε η ειδική ενέργεια είναι επαρκείς για να περιγράψουν τις παραμέτρους επεξεργασίας καθώς δεν παρέχονται πληροφορίες σχετικά με την ενέργεια που παραδίδεται ανά παλμό ή με τον αριθμό των παλμών.

#### 2.2.4 Θερμοκρασία επεξεργασίας

Η θερμοκρασία επεξεργασίας εμφανίζει συνεργιστική δράση στην αποτελεσματικότητα της επεξεργασίας, καθώς έχει σημαντική επίδραση στην ρευστότητα και τη σταθερότητα της κυτταρικής μεμβράνης. Ενώ σε χαμηλές θερμοκρασίες τα φωσφολιπίδια είναι συμπαγή σε μια δομή που μοιάζει με πήγμα, η ρευστότητά τους αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η εξαρτώμενη από τη

θερμοκρασία μετατόπιση φάσης από ρευστή σε υγρή κρυσταλλική δομή επηρεάζει τη σταθερότητα της μεμβράνης των κυττάρων (D. Stanley & Parkin, 1991). Οι Dunn&Pearlman(1987), παρατήρησαν μια αύξηση της αδρανοποίησης του S. dublin στο γάλα από 1 έως 4 λογαρίθμους όταν αυξάνεται θερμοκρασία επεξεργασίας από 40 έως 50 ° C. Οι Jayarametal.(1993), ανέφεραν μια βελτιωμένη αδρανοποίηση του L.brevis με την αύξηση της θερμοκρασίας επεξεργασίας από 24 έως 60 ° C. Η επίδραση της αύξησης της αποτελεσματικότητας της εφαρμογής των ΠΗΠ σε αυξημένες θερμοκρασίες επεξεργασίας έχει αναφερθεί σε αρκετές μελέτες (Evrendilek & Zhang, 2003; Heinzetal., 2003; Li, Zhang, Jin, Turek, & Lau, 2005). Η επίδραση της θερμοκρασίας στις ιδιότητες υψής του μήλου έχει ερευνηθεί από τον Οι Lebonka et al. (2004), δείχνοντας ότι η προθέρμανση στους 50 ° C οδήγησε σε πιο αποτελεσματική καταστροφή του ιστού από επεξεργασία μόνο με ΠΗΠ και σε καλύτερη εξαγωγή χυμού με πίεση.

### 2.3 Ηλεκτροδιάτρηση

Όταν εφαρμόζονται εξωτερικοί παλμοί ηλεκτρικού πεδίου πολύ μικρής διάρκειας, παρατηρείται αύξηση στην διαπερατότητα μιας κυτταρικής μεμβράνης (Tsong, 1991). Το φαινόμενο αυτό, ονομάζεται ηλεκτροδιάτρηση. Η ηλεκτροδιάτρηση χρησιμοποιείται για μη θερμική παστερίωση και για τη βελτίωση της μεταφοράς μάζας (Teissie, Golzio, & Rols, 2005). Οι μοριακοί μηχανισμοί που υποβοηθούν την επαγωγή της διαπερατότητας στις μεμβράνες δεν είναι πλήρως κατανοητοί.

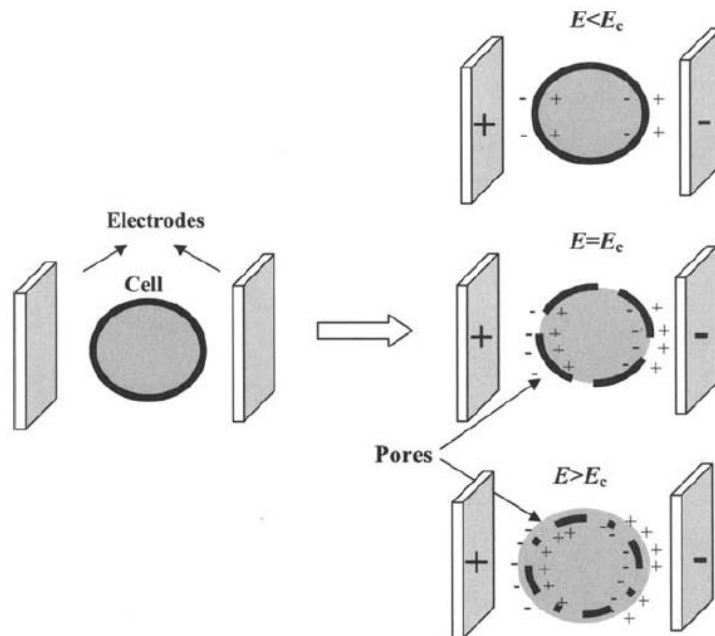
Οι επιδράσεις σε ένα κύτταρο όταν εκτίθεται σε ένα εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο μπορούν να περιγραφούν σε τέσσερα στάδια: (α) αύξηση του διαμεμβρανικού δυναμικού της κυτταροπλασματικής μεμβράνης, (β) έναρξη του σχηματισμού πόρων, (γ) μεταβολές στον αριθμό ή / και το μέγεθος των πόρων που δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας ΠΗΠ, και (δ) μετά την ολοκλήρωση της επεξεργασίας ΠΗΠ, η ηλεκτροδιάτρηση μπορεί να είναι αναστρέψιμη ή μη αναστρέψιμη. Κατά την αναστρέψιμη ηλεκτροδιάτρηση η βιωσιμότητα του κυττάρου που έχει υποστεί ηλεκτροδιάτρηση μπορεί να διατηρηθεί με την ανάκτηση της ακεραιότητας της κυτταρικής μεμβράνης, ενώ κατά την μη αναστρέψιμη, υπάρχει διαρροή των ενδοκυτταρικών ενώσεων ή είσοδο εξωκυτταρικών ουσιών.

Αρκετές θεωρίες έχουν προταθεί για να εξηγήσουν τους μηχανισμούς για την έναρξη της ηλεκτροδιάτρησης των κυττάρων (Teissie et al., 2005; Tsong, 1991; Weaver & Chizmadzhev, 1996). Ηλεκτρομηχανολογικές θεωρίες που προσπαθούν να εξηγήσουν την ηλεκτροδιάτρηση των βιολογικών μεμβρανών υποθέτουν ότι το εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο που εφαρμόζεται προκαλεί συμπίεση της μεμβράνης που οδηγεί σε ρήξη της, όταν η ηλεκτρική δύναμη ξεπερνά την ελαστική δύναμη επαναφοράς. Όταν το κύτταρο εκτίθεται σε εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο, εμφανίζεται διαμεμβρανικό δυναμικό κατά μήκος της μεμβράνης λόγω συσσώρευσης ιόντων στα δύο άκρα της. Η συσσώρευση αυτή εξαρτάται από το χρόνο έκθεσης, το ηλεκτρικό πεδίο, τον προσανατολισμό του κυττάρου στο πεδίο και τις ηλεκτρικές ιδιότητες του κυτταροπλάσματος (Teissie et al., 2005). Η έλξη μεταξύ αυτών των ιόντων προκαλεί ελάττωση του πάχους μεμβράνης και σχηματισμό πόρων. Από μια ηλεκτρική άποψη, λόγω της χαμηλής ηλεκτρικής αγωγιμότητας μιας μεμβράνης σε σχέση με το περιβάλλον υγρό, ένα κύτταρο μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα σφαιρικός πυκνωτής. Το διαμεμβρανικό δυναμικό ( $U_m$ ) που παράγεται από ένα εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο για ένα σφαιρικό κύτταρο, μπορεί να υπολογιστεί από την Εξ. 2.4 ως:

$$U_m = 1.5 \cdot r \cdot E \cdot \cos\theta(2.4)$$

όπου  $r$  είναι η ακτίνα του κυττάρου,  $E$  είναι το εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο που εφαρμόζεται,  $\theta$  είναι η γωνία μεταξύ της καθέτου προς τη μεμβράνη και της κατεύθυνσης του ηλεκτρικού πεδίου. Καθώς το διαμεμβρανικό δυναμικό εξαρτάται από μια γωνιακή παράμετρο, το εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο προκαλεί μια διαφορά δυναμικού εξαρτώμενη από τη θέση που σχετίζεται γραμμικά με την ένταση του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου.

Ο σχηματισμός αναστρέψιμων ή μη πόρων στη μεμβράνη επιτυγχάνεται από ένα διαμεμβρανικό δυναμικό (0,2-1,0 V) το οποίο προκαλείται από μια κρίσιμη τιμή του εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου. Αν και στις βιοτεχνολογικές εφαρμογές των ΠΗΠ απαιτείται αναστρέψιμη ηλεκτροδιάτρηση που διατηρεί τη βιωσιμότητα του κυττάρου, η μικροβιακή αδρανοποίηση και η βελτίωση της μεταφοράς μάζας από ΠΗΠ στη βιομηχανία τροφίμων απαιτούν μη αναστρέψιμη ηλεκτροδιάτρηση. Όταν το εφαρμοζόμενο εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο είναι κοντά στην κρίσιμη τιμή, συμβαίνει αναστρέψιμη ηλεκτροδιάτρηση, επιτρέποντας στην κυτταρική μεμβράνη να ανακτήσει τη δομή και τη λειτουργικότητά της. Μη αναστρέψιμη ηλεκτροδιάτρηση, με αποτέλεσμα τη ρήξη μεμβράνης και απώλεια της βιωσιμότητας των κυττάρων, συμβαίνει όταν εφαρμοστούν ηλεκτρικές εντάσεις πεδίου μεγαλύτερες από την κρίσιμη τιμή (Εικόνα 2.2).



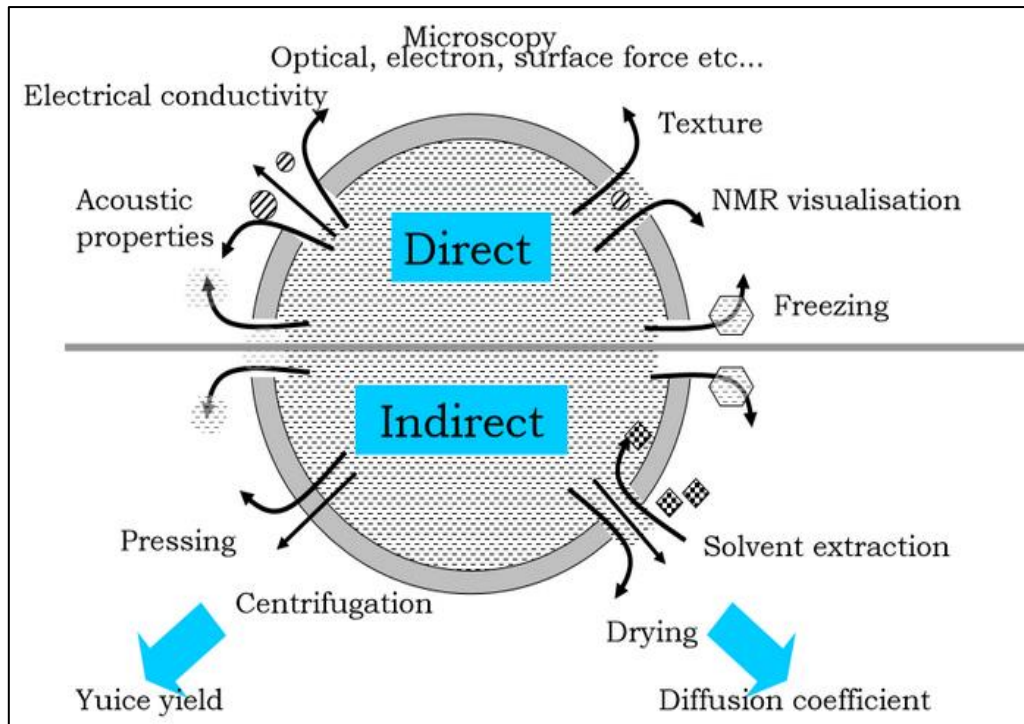
Εικόνα 2.2 Ηλεκτροδιάτρηση της κυτταρικής μεμβράνης όταν εκτίθεται σε επεξεργασία ΠΗΠ.  $E$ : ένταση ηλεκτρικού πεδίου,  $E_c$ : κρίσιμη ένταση ηλεκτρικού πεδίου. (Raso, J. & Heinz, V. 2010)

Σύμφωνα με την Εξ. 2.4, όσο μεγαλύτερο το κυττάρο, τόσο μεγαλύτερο είναι το διαμεμβρανικό δυναμικό που δημιουργείται σε όλη την κυτταροπλασματική μεμβράνη του. Επειδή το μέγεθος των ευκαρυωτικών κυττάρων είναι περίπου 10 έως 100 φορές υψηλότερο από ότι το μέγεθος των μικροοργανισμών, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που απαιτείται για την ηλεκτροδιάτρηση φυτικών ή ζωικών κυττάρων ( $0,1-5 \text{ kVcm}^{-1}$ ) είναι μικρότερη από την απαιτούμενη για μικροβιακή αδρανοποίηση ( $10-35 \text{ kVcm}^{-1}$ ) (Donsì, Ferrari, & Pataro, 2010).

Οι προτεινόμενες θεωρίες για να εξηγήσουν την ηλεκτροδιάτρηση βασίζονται σε πειράματα σε πρότυπα συστήματα, όπως λιποσώματα, ή σε μεμονωμένα ευκαρυωτικά κύτταρα. Ωστόσο, σε τρόφιμα τα κύτταρα είναι μέρος των ιστών που έχουν μια περίπλοκη δομή, είναι πολύ ανομοιογενή και έχουν ιδιότητες που είναι χωρικά εξαρτώμενες. Στην περίπτωση αυτή, η κατανομή του τοπικού ηλεκτρικού πεδίου είναι μια πολύπλοκη συνάρτηση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των συστατικών του υλικού, του πορώδους, και της δομής, και αλλάζει κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας με ΠΗΠ (Vorobiev & Lebonka, 2006). Ως αποτέλεσμα, περιορισμένες πληροφορίες είναι διαθέσιμες σχετικά με τη διαπερατότητα μεμβράνης σε πραγματικά συστήματα τροφίμων ως συνέπεια της εφαρμογής των ΠΗΠ. Μια βασική κατανόηση των φαινομένων αυτών είναι απαραίτητη για τον καθορισμό των κρίσιμων παραμέτρων διεργασίας που απαιτούνται για τη χρήση επεξεργασίας ΠΗΠ για τη βελτίωση της μεταφοράς μάζας στη βιομηχανία τροφίμων.

## 2.4 Τεχνικές ποσοτικοποίησης ηλεκτροδιάτρησης

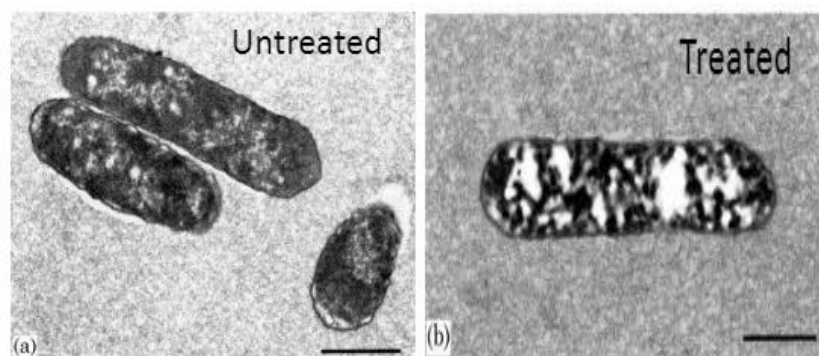
Διαφορετικές μέθοδοι έχουν χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση της διαπερατότητας της κυτταρικής μεμβράνης ή/και για την ακεραιότητά της σε πολυκύτταρους ιστούς. Ο στόχος μερικών από αυτές τις μεθόδους είναι η ποσοτικοποίηση του βαθμού διαπερατότητας που έχει οριστεί ως ο λόγος των κυττάρων που έχουν υποστεί ηλεκτροδιάτρηση προς τον συνολικό αριθμό των κυττάρων (Lebonka, Bazhal, & Vorobiev, 2002). Μια μέθοδος που παρέχει μια ακριβή και ταχεία μέτρηση του βαθμού διαπερατότητας σε σύντομο χρονικό διάστημα και της οποίας οι μετρήσεις συσχετίζονται με τη βελτίωση της μεταφοράς μάζας σε διαφορετικές λειτουργίες της βιομηχανίας τροφίμων θα ήταν ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για την επιλογή των βέλτιστων συνθηκών επεξεργασίας ΠΗΠ για μια δεδομένη εφαρμογή και την παρακολούθηση της επεξεργασίας ΠΗΠ κατά τη διάρκεια βιομηχανικών εφαρμογών (Εικόνα 2.3).



Εικόνα 2.3 Άμεσες και έμμεσες μέθοδοι ποσοτικοποίησης ηλεκτροδιάτρησης. (Lebonka, N. & Vorobiev, E. 2016)

#### 2.4.1 Οπτική μικροσκοπία

Η οπτική μικροσκοπία είναι η πιο άμεση τεχνική για την απεικόνιση της επίδρασης των ΠΗΠ στη διάρθρωση των ηλεκτροδιατρημένων μεμονωμένων κυττάρων, των κυττάρων σε εναιωρήματα και των ιστών των τροφίμων (Εικόνα 2.4).



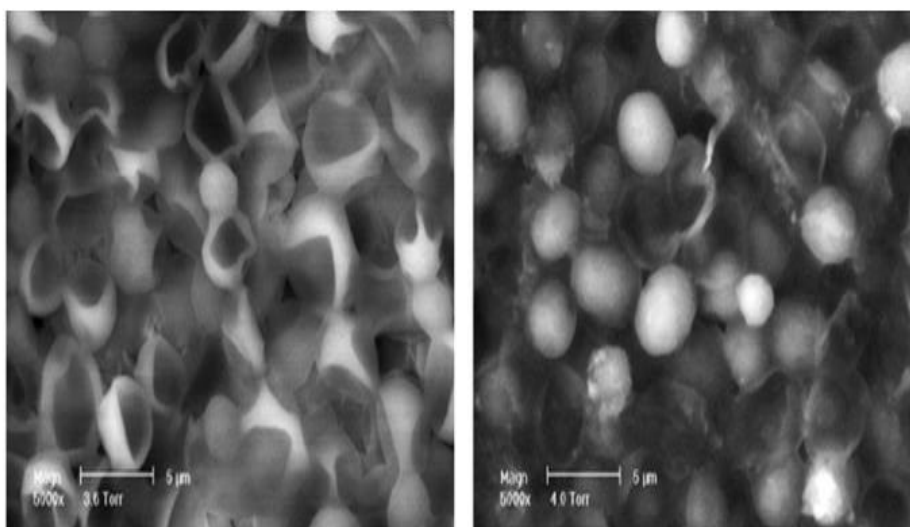
Εικόνα 2.4 Απεικόνιση SEM: Ανεπεξέργαστα (αριστερά) και επεξεργασμένα (δεξιά) κύτταρα E.coli. (Aronsson et al.,2001)

Η άμεση απεικόνιση των αποτελεσμάτων ηλεκτροδιάτρησης είναι πολύ ελκυστική. Ωστόσο, ο προσδιορισμός του κλάσματος των κατεστραμμένων κυττάρων απαιτεί οπτική κλασμάτωσή τους και αυτή δεν είναι εύκολο να γίνει με τη χρήση του υπολογιστή καταμετρώντας τα κύτταρα. Επιπλέον, η προετοιμασία των δειγμάτων, η και η βαφή με χρωστικές απαιτεί ειδικές τεχνικές, προσαρμογή του pH και της

αγωγιμότητας των χρησιμοποιημένων διαλυμάτων. Στην πραγματικότητα, αυτή η τεχνική μπορεί να αναφέρεται ως καταστροφική και είναι επιθυμητό να χρησιμοποιείται για το χαρακτηρισμό της ηλεκτροδιάτρησης σαν συμπληρωματικό εργαλείο σε συνδυασμούς με άλλες τεχνικές.

#### 2.4.2 Ηλεκτρονική μικροσκοπία

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) και διέλευσης (TEM) εφαρμόστηκαν ευρέως στην έρευνα για τη μελέτη των επιπτώσεων των ΠΗΠ σε υλικά διαφορετικής βιολογικής προέλευσης (Εικόνα 2.5).



Εικόνα 2.5 Ανεπεξέργαστα (δεξιά) και προεπεξεργασμένα (αριστερά) με ΠΗΠ κύτταρα μαγιάς, σε απεικόνιση του SEM. (Zakhem, H. et al. 2006)

Τα SEM και TEM είναι πολύ ισχυρές τεχνικές για την ποσοτικοποίηση των μορφολογικών ιδιοτήτων των μεμβρανών και των κυτταρικών τοιχωμάτων (Condello, Caraglia, & Castellano, 2013). Ωστόσο, αυτές οι τεχνικές απαιτούν την εφαρμογή σύνθετων μεθόδων παρασκευής δείγματος (χρώση, στερέωση, αφυδάτωση, υπέρλεπτη τομή κλπ) που ποικίλλουν ανάλογα από τον τύπο των κυττάρων ή των ιστών.

#### 2.4.3 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά

Ένας αριθμός χρήσιμων μεθόδων για το χαρακτηρισμό της ηλεκτροδιάτρησης σε τρόφιμα βασίζονται σε μετρήσεις των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών τους (Pliquett, 2010). Τα κύρια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα  $\sigma$  και η διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon$ .

Το απλούστερο ηλεκτρικό μοντέλο μεμονωμένων κυττάρων συνεπάγεται ότι περιβάλλεται από μια μονωτική μεμβράνη με χωρητικότητα, ενώ το εξωκυτταρικό μέσο και το κυτταρόπλασμα είναι αγωγά ηλεκτρολύτες. Η σχετική διηλεκτρική σταθερά,  $\epsilon^*$ , ορίζεται από την Εξ. 2.5 ως:

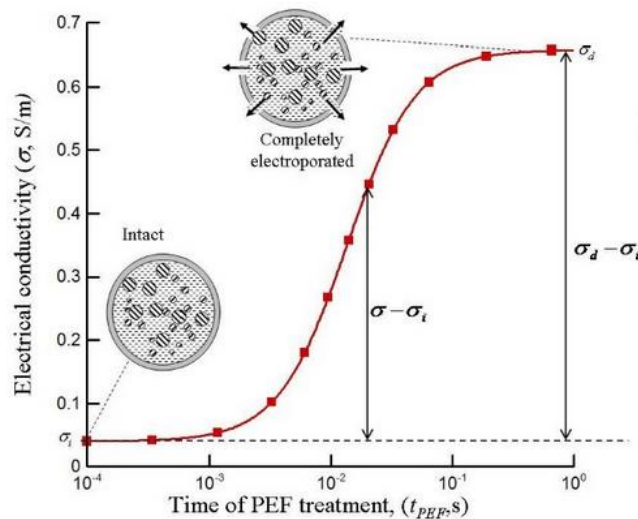
$$\varepsilon^* = \varepsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega\varepsilon_0} \quad (2.5)$$

όπου  $\varepsilon_r$  είναι η σχετική που αντανακλά την χωρητικότητα του υλικού μεταξύ των ηλεκτροδίων,  $\omega$  είναι η γωνιακή συχνότητα ( $\omega = 2\pi f$ ) και  $\varepsilon_0$  είναι η διηλεκτρική σταθερά του ελεύθερου χώρου.

Ο λόγος  $\sigma/(\omega\varepsilon_0)$  ονομάζεται ο συντελεστής απώλειας και η χρήσιμη ποσότητα είναι επίσης η μετατόπιση φάσης (Grimnes & Martinsen, n.d.).

#### 2.4.3.i Μέθοδος χαμηλής συχνότητας

Η μέθοδος βασίζεται στις μετρήσεις της ηλεκτρικής αγωγιμότητας  $\sigma$  σε χαμηλές συχνότητες 1-10 kHz. Η Εικόνα 2.6 παρουσιάζει την τυπική συμπεριφορά της ηλεκτρικής αγωγιμότητας  $\sigma$  κατά τη διάρκεια της ηλεκτροδιάτρησης.



Εικόνα 2.6 Εφαρμογή της μεθόδου χαμηλής συχνότητας: Τυπική εξάρτηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας  $\sigma$  (στο  $f = 1-10$  kHz) συναρτήσεως του χρόνου επεξεργασίας ΠΗΠ  $t_{PEF}$ . (Lebovka, N. & Vorobiev, E. 2016)

Ο δείκτης κυτταρικής διάρρηξης με βάση την αγωγιμότητα  $Z_c$  ορίζεται από την Εξ. 2.6 ως (M Bazhal, Lebovka, & Vorobiev, 2003; Lebovka et al., 2002):

$$Z_c = \frac{(\sigma - \sigma_i)}{(\sigma_d - \sigma_i)} \quad (2.6)$$

όπου  $\sigma$  είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα μετρούμενη σε χαμηλή συχνότητα (=1-10 kHz) και οι δείκτες "i" και "d" αναφέρονται στις αγωγιμότητες των ανέπαφων και εντελώς κατεστραμμένων κυττάρων, αντίστοιχα.

Αυτή η μέθοδος απαιτεί τη γνώση της  $\sigma_d$  η οποία μπορεί να εκτιμηθεί από τα δεδομένα που λαμβάνονται στο όριο για μεγάλο χρόνο επεξεργασίας ( $t_{PEF} = 0.1-1s$ )

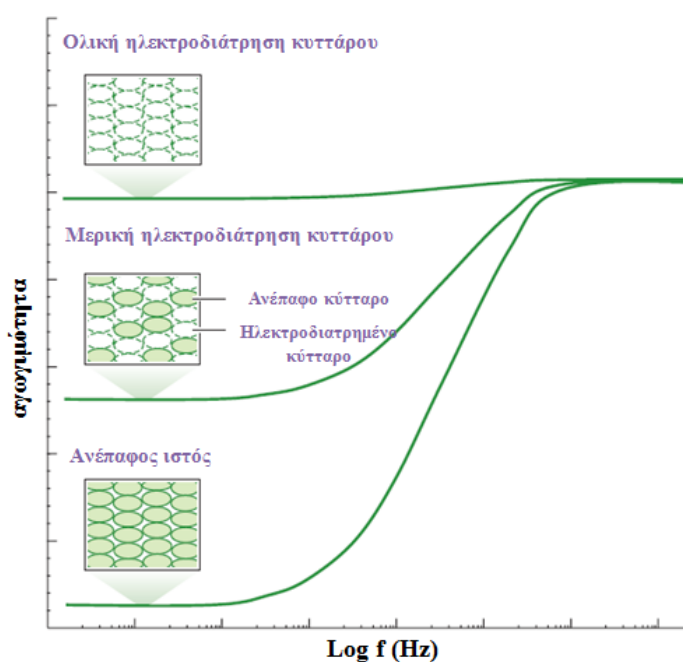


και για υψηλή ένταση ηλεκτρικού πεδίου ( $E > 1.000 \text{ V/cm}$  ή από τη μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του κατεψυγμένου-αποψυγμένου υλικού, στο οποίο θεωρείται ότι παρατηρείται η μέγιστη κυτταρική διάρρηξη).

#### 2.4.3.ii Μέθοδος χαμηλής-υψηλής συχνότητας

Αυτή η μέθοδος βασίζεται σε μετρήσεις της ηλεκτρικής αγωγιμότητας  $\sigma$ , άθικτων και ηλεκτροδιάτρητων υλικών σε χαμηλές ( $=1-10 \text{ kHz}$ ) και υψηλές ( $50 \text{ MHz}$ ) συχνότητες (Angersbach, Heinz, & Knorr, 1999; Angersbach, Heinz, & Knorr, 2002). Σε χαμηλή συχνότητα οι μεμβράνες έχουν πολύ υψηλή αντίσταση και η ηλεκτροδιάτρησή τους μπορεί να οδηγήσει σε αξιοσημείωτες αλλαγές στην ηλεκτρική αγωγιμότητά τους. Ωστόσο, σε υψηλές συχνότητες η επίδραση των άθικτων μεμβρανών στην αγωγιμότητα είναι αμελητέα. Αυτός είναι ο λόγος που η ηλεκτροδιάτρηση του υλικού οδηγεί σε ελάττωση της εξάρτησης της αγωγιμότητας  $\sigma$  από τη συχνότητα.

Η Εικόνα 2.7 παρουσιάζει χαρακτηριστικές εξαρτήσεις στη συχνότητα της ηλεκτρικής αγωγιμότητας  $\sigma$  για ανέπαφα και εν μέρει ηλεκτροδιατρημένα υλικά. Για το εντελώς ηλεκτροδιατρημένο υλικό οι ηλεκτρικές αγωγιμότητες μετρημένες σε εύρος χαμηλών συχνοτήτων  $\sigma$  και σε εύρος υψηλών συχνοτήτων  $\sigma_{\infty}$  θα πρέπει να συμπίπτουν και να είναι ίσες με εκείνες για το ανέπαφο υλικό ( $\sigma_{i\infty}$ ).



Εικόνα 2.7 Τυπικό διάγραμμα συχνότητας-αγωγιμότητας του φυτικού ιστού με άθικτα, μερικώς ηλεκτροδιατρημένα και εντελώς ηλεκτροδιατρημένα κύτταρα στην περιοχή συχνοτήτων από  $1 \text{ kHz}$  έως  $50 \text{ MHz}$  (Knorr & Angersbach, 1998).

Η εξάρτηση της αγωγιμότητας από τη συχνότητα  $\sigma_m(f)$  συνήθως απαιτεί διορθώσεις για τις μεταβολές της θερμοκρασίας, του πορώδους ιστού και της συγκέντρωσης ηλεκτρολύτη (Angersbach et al., 2002). Αυτή η διόρθωση μπορεί να γίνει εύκολα με τη χρήση διορθωτικού συντελεστή  $\alpha = \sigma_{i\infty} / \sigma_{m\infty}$  που αντιπροσωπεύει τη διαφορά μεταξύ  $\sigma_{i\infty}$  και τη μετρούμενη τιμή του  $\sigma_{m\infty}$ . Ο δείκτης αποσύνθεσης ηλεκτρικής

αγωγιμότητας  $Z_c$  για τη μέθοδο αυτή ορίστηκε από την Εξ. 2.7 ως (M Bazhal et al., 2003; Lebovka et al., 2002):

$$Z_c = \frac{(\alpha \sigma_m - \sigma_i)}{(\sigma_i^\infty - \sigma_i)} \quad (2.7)$$

όπου  $\alpha$  ο συντελεστής διόρθωσης ( $\alpha = \sigma_i^\infty / \sigma_{m^\infty}$ ),  $\sigma_i$  η αγωγιμότητα του ανέπαφου ιστού μετρούμενη σε χαμηλή συχνότητα,  $\sigma_i^\infty$  η αγωγιμότητα του ανέπαφου ιστού μετρούμενη σε υψηλή συχνότητα και  $\sigma_m$  η εξάρτηση της αγωγιμότητας από τη συχνότητα.

Έτσι ο προσδιορισμός του  $Z_c$  απαιτεί μετρήσεις της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των ανέπαφων και ηλεκτροδιατρητών υλικών σε μικρές ( $\sigma_i$ ,  $\sigma_m$ ) και υψηλές ( $\sigma_i^\infty$ ,  $\sigma_{m^\infty}$ ) αγωγιμότητες. Για τις δύο προηγούμενες εξισώσεις η παράμετρος  $Z_c$  κυμαίνεται από 0 (ανέπαφο υλικό) έως 1 (εντελώς ηλεκτροδιάτρητο υλικό).

Εν κατακλείδι, οι μέθοδοι που βασίζονται στην ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι απλές και μπορούν να γίνουν χρήσιμες για γρήγορη εκτίμηση της έκτασης της ηλεκτροδιάτρησης. Οι διαδικασίες είναι απλές, δεν απαιτούν ακριβό εξοπλισμό και μπορούν να εφαρμοστούν εύκολα για συνεχή παρακολούθηση της ηλεκτροδιάτρησης κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας ΠΗΠ.

Ωστόσο, αυτές οι μέθοδοι μπορούν να εφαρμοστούν μόνο με κάποια προφύλαξη. Στην πραγματικότητα, η σχέση μεταξύ  $Z$  και ηλεκτρικής αγωγιμότητας  $\sigma$  είναι ισχυρά μη γραμμική (Pliquett, 2010). Επιπλέον, η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι ευαίσθητη στη χωρική δομή του ιστού και τα στοιχεία των κατανομών της περιεκτικότητας αέρα και υγρασίας στο εσωτερικό του. Οι αλλαγές σε αυτές τις κατανομές κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας ΠΗΠ και μετά το τέλος της μπορούν να επηρεάσουν την τιμή του  $\sigma$  και δεν σχετίζονται πάντα άμεσα με την ηλεκτροδιάτρηση (Lebovka, Bazhal, & Vorobiev, 2001). Επιπλέον, η τιμή του  $\sigma_d$  στη μέθοδο χαμηλής συχνότητας δεν είναι καλά καθορισμένη. Η ισχυρή επεξεργασία ΠΗΠ της διαδικασίας κατάψυξης-απόψυξης μπορεί να επηρεάσει τη δομή των κυτταρικών τοιχωμάτων. Οι μετρήσεις της υφής των επεξεργασμένων με ΠΗΠ και των κατεψυγμένων-αποψυγμένων ιστών πατάτας απέδειξε το διαφορετικό μαλάκωμα αυτών των ιστών (Lebovka, Praporscic, & Ghnimi, 2005).

#### 2.4.4 Συντελεστής διάχυσης

Το επίπεδο της ηλεκτροδιάτρησης που προκαλείται με επεξεργασία ΠΗΠ μπορεί επίσης να εκτιμηθεί από μελέτες της επιταχυνόμενης εκχύλισης διαλυτών ουσιών ή με ξήρανση συναγωγής σε κυτταρικούς ιστούς (Lebovka, Shynkaryk, & Vorobiev, 2007a; Loginova, Shynkaryk, & Lebovka, 2010). Ο δείκτης κυτταρικής διάρρηξης με βάση το συντελεστή διάχυσης,  $Z_D$  ορίζεται από την Εξ. 2.8 ως (Vorobiev, Jemai, & Bouzrara, 2005):

$$Z_D = \frac{(D - D_i)}{(D_d - D_i)} \quad (2.8)$$

όπου  $D$  είναι ο συντελεστής διάχυσης και οι δείκτες «i» και «d» αναφέρονται στις τιμές του ανέπαφου και πλήρως ηλεκτροδιατρητού ιστού, αντίστοιχα.

Η μέθοδος είναι χρήσιμη για την εκτίμηση της επίδρασης των ΠΗΠ στο συντελεστή διάχυσης σε πειράματα εκχύλισης και ξήρανσης. Δυστυχώς, οι τεχνικές διάχυσης είναι έμμεσες και επεμβατικές για βιολογικά αντικείμενα και μπορούν να παραβιάσουν τη δομή των ιστών (Lebonka, Shynkaryk, & Vorobiev, 2006).

#### **2.4.5 Χαρακτηριστικά υφής**

Μετρήσεις υφής χρησιμοποιούνται συχνά για το χαρακτηρισμό της επεξεργασίας με ΠΗΠ ιστών. Συνήθως, εφαρμόζονται οι δοκιμές συμπίεσης και χαλάρωσης για ανέπαφους και επεξεργασμένους με ΠΗΠ ιστούς (Grimi, 2009; Grimi, Lebonka, & Vorobiev, 2009).

Τα πειράματα υφής είναι χρήσιμα για τον ποιοτικό χαρακτηρισμό των αλλαγών που προκαλούνται από τα ΠΗΠ. Οι παράμετροι υφής αντικατοπτρίζουν τις αλλαγές που προκαλούνται από τα ΠΗΠ με ένα έμμεσο τρόπο. Τα αποτελέσματα των δοκιμών υφής μπορεί να εξαρτώνται από το πείραμα υφής (π.χ., είναι διαφορετικά για μονοαξονικές (1D) και τριών διαστάσεων (3D) δοκιμές) (Lebonka et al., 2004; Chalermchat & Dejmek, 2005). Επιπλέον, οι οριστικές σχέσεις μεταξύ αυτών των παραμέτρων και το κλάσμα των κατεστραμμένων κυττάρων  $Z$  δεν έχουν ακόμη καθοριστεί.

#### **2.4.6 Ακουστικές μετρήσεις**

Η ακουστική τεχνική χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό της ποιότητας των διαφόρων γεωργικών προϊόντων (García-Ramos, Valero, & Homer, 2005). Η τεχνική αυτή επιτρέπει την μέτρηση του δείκτη σταθερότητας  $F$  (ή συντελεστής ακαμψίας) που δίνει καλές συσχετίσεις με την ποιότητα και την ωριμότητα των φρούτων και λαχανικών.

Η ακουστική τεχνική είναι μη καταστρεπτική και επιτρέπει εκτιμήσεις της ποιότητας των ολόκληρων μη αποφλοιωμένων δειγμάτων. Μπορεί να είναι σημαντική όταν τα φρούτα και τα λαχανικά επεξεργάζονται ως ολόκληρα μη αποφλοιωμένα δείγματα στις υπάρχουσες βιομηχανικές εφαρμογές ΠΗΠ, π.χ., τα ζαχαρότευτλα (Sack, Schultheiss, & Bluhm, 2005) ή η πατάτα (H. Jaeger, Balasa, & Knorr, 2009). Η ακουστική τεχνική μπορεί να είναι επίσης ελκυστική για επεξεργασία των μαλακών ή χωρικά ετερογενών φρούτων και λαχανικών.

### **2.5 Σχεδιασμός Εξοπλισμού ΠΗΠ**

Τα κύρια μέρη που απαιτούνται για μια εφαρμογή παλλόμενων ηλεκτρικών πεδίων είναι ένα σύστημα παραγωγής παλμών και ένας θάλαμος επεξεργασίας. Μια βασική προϋπόθεση για την οικονομική και αποδοτική παραγωγή είναι μια συνεχής λειτουργία με ικανότητα υψηλού ρυθμού ροής, η οποία οδηγεί στην ανάπτυξη των θαλάμων συνεχούς επεξεργασίας, στους οποίους το τρόφιμο αντλείται ενώ παράλληλα εκτίθεται σε ηλεκτρικό πεδίο σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ή υπό ψύξη ή σε αυξημένες θερμοκρασίες. Πριν την επεξεργασία εναλλάκτες θερμότητας βοηθούν την προθέρμανση του μέσου. Η ηλεκτρική επεξεργασία οδηγεί σε παραγωγή θερμότητας, η οποία θα πρέπει να αφαιρεθεί πριν την ασηπτική συσκευασία. Μια ασηπτική συσκευασία απαιτείται για να αποφεύγεται οποιαδήποτε νέα μόλυνση. Ένα

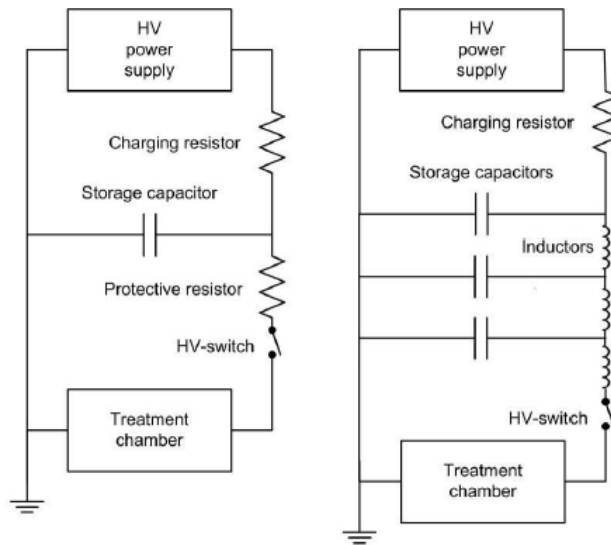
από τα κύρια πλεονεκτήματα της επεξεργασίας με ΠΗΠ είναι η συνεχής λειτουργικότητά της με πολύ σύντομους χρόνους επεξεργασίας. Ως εκ τούτου, ένα σύστημα μπορεί εύκολα να εφαρμοστεί σε υπάρχουσες γραμμές.

### **2.5.1 Δημιουργία Παλλόμενων Ηλεκτρικών Πεδίων**

Το σύστημα διαμόρφωσης παλμού μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια από μια χαμηλή τάση σε παλλόμενα ηλεκτρικά πεδία υψηλής έντασης. Τα απλουστευμένα κυκλώματα για την παραγωγή εκθετικών και τετραγωνικών παλμών φαίνονται στο Εικόνα 2.8, που αποτελούνται από ένα κύκλωμα φόρτισης και ένα κύκλωμα εκφόρτισης. Στην πρώτη, μια διάταξη αποταμίευσης ενέργειας φορτίζεται σε ένα αντιστάτη φόρτισης από μία παροχή ισχύος υψηλής συνεχούς τάσης. Η παραγωγή των παλλόμενων ηλεκτρικών πεδίων απαιτεί αργή φόρτιση και μια γρήγορη εκφόρτιση της ενέργειας, αφού το πλάτος παλμού είναι μικρό σε σύγκριση με το χρόνο μεταξύ των παλμών. Η τάση φόρτισης  $U$  που απαιτείται για την παραγωγή παλμών επαρκούς έντασης ηλεκτρικού πεδίου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την απόσταση των ηλεκτροδίων. Για δύο παράλληλα ηλεκτρόδια σε σχήμα πλάκας η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου  $E$  δίνεται από την Εξ. 2.9:

$$E = \frac{U}{d} (2.9)$$

όπου  $U$  είναι η τάση (kV) και  $d$  (m) το κενό μεταξύ των ηλεκτροδίων. Τάσεις στην κλίμακα από 10-60 kV συνήθως χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία των τροφίμων. Η αύξηση της απόστασης των ηλεκτροδίων  $d$  για να αποκτηθεί υψηλή ογκομετρική παροχή επιβάλλει την αύξηση της τάσης φόρτισης και ως εκ τούτου, το φορτίο του συστήματος μεταγωγής. Η ηλεκτρική ισχύς πιο συχνά αποθηκεύεται σε πυκνωτές που συνδέονται σε σειρά ή παράλληλα και εκφορτίζονται στο θάλαμο επεξεργασίας μέσω ενός διακόπτη υψηλής τάσης και προστατευτικών αντιστάσεων εντός μς.



Εικόνα 2.8 Απλοποιημένα ηλεκτρικά κυκλώματα για παραγωγή εκθετικών (αριστερά) και τετραγωνικών (δεξιά) παλμών.

Σε ένα χωρητικό σύστημα αποθήκευσης, όταν ο διακόπτης υψηλής τάσης κλείνει με ένα σήμα ενεργοποίησης ή αφού η τάση διάσπασής του έχει επιτευχθεί, η ενέργεια που αποθηκεύεται εκκενώνεται στο έδαφος σε όλο το κύκλωμα εκφόρτισης με μια προστατευτική αντίσταση και τον θάλαμο επεξεργασίας με το τρόφιμο. Με βάση τον τύπο του διακόπτη και τη διαμόρφωση του κυκλώματος εκφόρτισης πολλές μορφές παλμού είναι δυνατές, αλλά κυρίως δύο έχουν χρησιμοποιηθεί: οι εκθετικοί και οι τετραγωνικοί παλμοί.

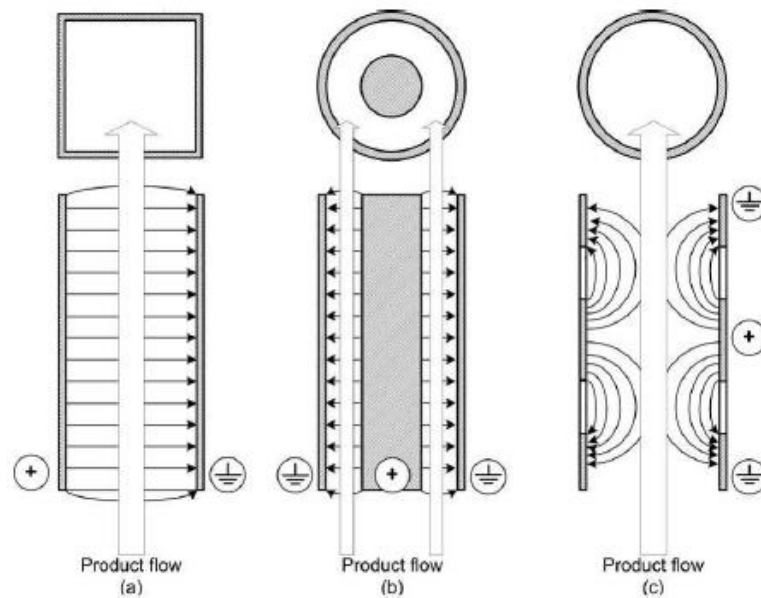
Οι τετραγωνικοί παλμοί διατηρούν ένα σταθερό επίπεδο υψηλής τάσης για το συνολικό πλάτος του παλμού, ενώ οι εκθετικοί παλμοί έχουν χαμηλό ηλεκτρικό πεδίο. Μελέτες σύγκρισης της αποτελεσματικότητας των διαφόρων μορφών παλμού για μικροβιακή αδρανοποίηση με ΠΗΠ που έχουν διεξαχθεί (Haan&Willcock, 2002; Góngora-Nieto, Sepúlveda, & Pedrow, 2002; Kotnik, Pucihar, Reberšek, & Miklavčič, 2003) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι και οι δύο μορφές είναι αποτελεσματικές για μικροβιακή αδρανοποίηση, αλλά οι τετραγωνικοί παλμοί θα εξοικονομούσαν ενέργεια και θα απαιτούσαν λιγότερη προσπάθεια ψύξης.

Για μια βιομηχανική εφαρμογή με υψηλούς ρυθμούς ροής, υψηλοί ρυθμοί επανάληψης παλμών μέχρι αρκετά kHz απαιτούνται σε υψηλή τάση (40-100 kV) και επίπεδα ρεύματος (> 100 A), οι οποίες είναι συνθήκες λειτουργίας δύσκολες για χειρισμό, ιδίως εάν η διάρκεια ζωής του συστήματος παραγωγής παλμών λαμβάνεται υπόψη. Η αξιοπιστία σε περίπτωση δυσλειτουργίας, βλάβης αντλίας, σχηματισμού τόξου και προστασίας από βραχυκύκλωμα θα είναι μια κρίσιμη παράμετρος για την εφαρμογή ενός διακόπτη και την συνολική ρύθμιση του διαμορφωτή παλμών.

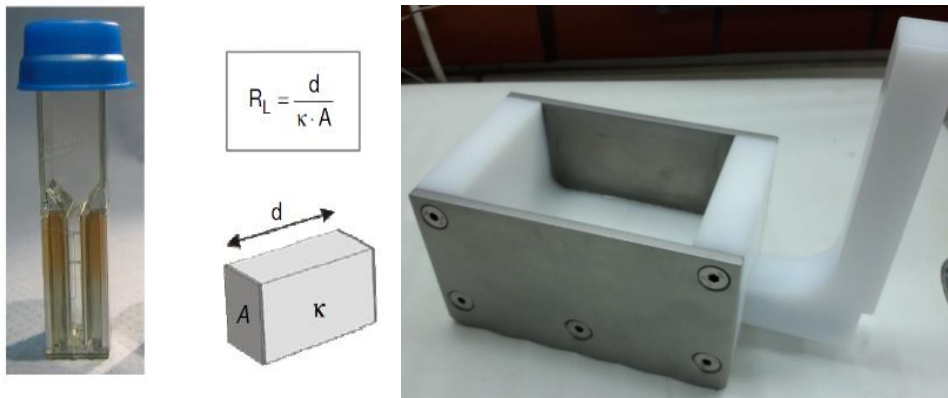
### 2.5.2 Σχεδιασμός θαλάμου επεξεργασίας

Ο θάλαμος επεξεργασίας, όπου το τρόφιμο εκτίθεται σε παλμούς ηλεκτρικού πεδίου αποτελείται από τουλάχιστον δύο ηλεκτρόδια, ένα σε υψηλή τάση και το άλλο σε δυναμικό γείωσης, που χωρίζονται από μονωτικό υλικό σε διάφορες γεωμετρικές διατάξεις. Παράλληλες πλάκες, ομοαξονικοί ή συγγραμμικοί κύλινδροι είναι μεταξύ

των πιο συχνά χρησιμοποιούμενων θαλάμων επεξεργασίας. Ένας μεγάλος αριθμός μελετών έχουν διεξαχθεί με παράλληλα συστήματα πλάκας σε σύστημα διαλείποντος έργου και αργότερα σε συστήματα συνεχούς ροής. Οι θάλαμοι διαλείποντος έργου παρέχουν πολλά πλεονεκτήματα για εργαστηριακή χρήση καθώς απαιτούνται μικροί όγκοι μέσω επεξεργασίας ενώ η θερμοκρασία επεξεργασίας είναι εύκολο να διατηρηθεί με ψύξη των ηλεκτροδίων και με επεξεργασία σε χαμηλή συχνότητα παλμών. (Εικόνα 2.9) Οι θάλαμοι συνεχούς έργου έχουν τη δυνατότητα επεξεργασίας μεγάλων όγκων υγρών τροφίμων και επιτρέπουν την εύκολη ενσωμάτωση σε ήδη υπάρχουσες γραμμές επεξεργασίας τροφίμων.



Εικόνα 2.9 Διαμορφώσεις θαλάμων επεξεργασίας για συνεχή λειτουργία ΠΗΠ : (a) παράλληλη πλάκα, (b) ομοαξονική, (c) συγγραμική διαμόρφωση. (Toerfl, S. 2006)



Εικόνα 2.10 Διαμορφώσεις των θαλάμων επεξεργασίας για τα ΠΗΠ διαλείποντος έργου: (αριστερά) κυψελίδα ηλεκτροδιάτρησης (Frey, W. 2016), (δεξιά) θάλαμος επεξεργασίας διαλείποντος έργου 400ml

Μεταξύ των διαφόρων διαμορφώσεων ηλεκτροδίων που παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.9, οι παράλληλες πλάκες παρέχουν ομογενές ηλεκτρικό πεδίο σε μια μεγάλη ωφέλιμη επιφάνεια μεταξύ των πλακών. Για την επίτευξη ογκομετρικής παροχής, όπως απαιτείται για βιομηχανικές εφαρμογές, οι παλμοί θα πρέπει να εφαρμόζονται με υψηλό ρυθμό επανάληψης, που οδηγεί σε μια γρήγορη αύξηση της θερμοκρασίας του μέσου. Η διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας μπορεί να έχει υψηλές απαιτήσεις ψύξης, εφαρμογή καναλιών ψύξης στο υλικό του ηλεκτροδίου ή ενδιάμεση ψύξη ανάμεσα σε πολλαπλές ζώνες επεξεργασίας.

Το ηλεκτρόδιο και το μονωτικό υλικό πρέπει να είναι κατάλληλο για τρόφιμα και να επιδέχεται αποστείρωση και επιπλέον οι ηλεκτροχημικές ιδιότητές του πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Ο Bushnell (Bushnell, Clark, Dunn, & Lloyd, 1996) πρότεινε χρυσό, λευκόχρυσο, οξειδία του άνθρακα και μετάλλου για χρήση ως εναλλακτική λύση στα ηλεκτρόδια από ανοξείδωτο χάλυβα. Η διάβρωση των ηλεκτροδίων και η απελευθέρωση των μεταλλικών σωματιδίων στο τρόφιμο έχουν αναφερθεί πρόσφατα (Morren, Roodenburg, & Haan, 2003). Για να αποφευχθεί η έκθεση του προϊόντος στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου οι Lubicki και Jayaram (Lubicki & Jayaram, 1997) ανέπτυξαν ένα σύστημα που αποτελείται από μια γυάλινη σπείρα που περιβάλλει την άνοδο και επιβεβαίωσε ότι η μικροβιακή αδρανοποίηση μπορεί να επιτευχθεί ακόμη και χωρίς άμεση επαφή. Η επεξεργασία με ΠΗΠ των συσκευασμένων τροφίμων χωρίς άμεση επαφή με τα ηλεκτρόδια έχει συζητηθεί τα τελευταία χρόνια και ερωτήματα όπως πόσο αποδοτικό θα είναι ένα επαρκές (και ομοιογενές) ηλεκτρικό πεδίο ή εάν η απαιτούμενη ενέργεια παλμού μπορεί να μεταφερθεί στο προϊόν, θα πρέπει να αντιμετωπιστούν.

Ένας συγγραμμικός θάλαμος αποτελείται από ένα σύνολο κοίλων, κυλινδρικών ηλεκτροδίων που χωρίζονται από μονωτικά υλικά, τα οποία διαπερνά το προϊόν και η ροή δεν διαταράσσεται από τυχόν εμπόδια (Εικόνα 2.9c).

## 2.6 Βιομηχανική εφαρμογή και εκτίμηση κόστους των ΠΗΠ

Αν και πολλή έρευνα έχει διεξαχθεί για χρόνια σχετικά με τις πιθανές εφαρμογές των ΠΗΠ για μεταφορά μάζας, η βιομηχανική εφαρμογή εξακολουθεί να παραμένει αναξιόπιστη. Μία από τις μεγαλύτερες ανησυχίες για την εμπορευματοποίηση της τεχνολογίας ΠΗΠ ήταν η παραγωγή παλμών υψηλής τάσης με επαρκή μέγιστη ισχύ για να ικανοποιήσει τις βιομηχανικές απαιτήσεις (Puértolas, López, Condón, & Álvarez, 2010). Τα τελευταία χρόνια, διαφορετικός εξοπλισμός πιλοτικής κλίμακας και βιομηχανικά πρωτότυπα έχει αναπτυχθεί ειδικά για την εξαγωγή της σακχαρόζης από τεύτλα, την επεξεργασία χυμού μήλου, και την οινοποίηση (Sack, Sigler, Frenzel, Eing, & Arnold, 2010).

Με βάση τα ελπιδοφόρα αποτελέσματα που επιτεύχθηκαν σε πειράματα εργαστηριακής κλίμακας, το πρώτο βιομηχανικό πρωτότυπο σχεδιασμένο για την εξαγωγή σακχαρόζης από ζαχαρότευτλα αναπτύχθηκε στο Τεχνολογικό Ινστιτούτο της Καρλσρούης χρησιμοποιώντας γεννήτριες Marx (Sack, Sigler, Frenzel, et al., 2010). Σε ένα εργοστάσιο ζάχαρης, επεξεργάζονται 10-50 τόνοι ζαχαρότευτλων ανά ώρα. Αυτό το σύστημα επέτρεψε την εφαρμογή επεξεργασιών ΠΗΠ ( $3-5 \text{ kVcm}^{-1}$ ) σε ολόκληρα ζαχαρότευτλα με διακίνηση περίπου 10 τόνοι ανά ώρα.

Το 2006, επίσης με βάση τις γεννήτριες Μαρξ, αναπτύχθηκε ένα σύστημα ΠΗΠ για ενισχυμένη επεξεργασία χυμού μήλου (Sack, Sigler, Frenzel, et al., 2010). Παρ' όλα αυτά, από ότι γνωρίζουμε δεν υπάρχουν ακόμα διαθέσιμοι στο εμπόριο χυμοί μήλων που παράγονται από την τεχνολογία ΠΗΠ.

Σχετικά με την εφαρμογή των ΠΗΠ για τη βελτίωση της εκχύλισης φαινολικών σε οινοποίηση (κόκκινο κρασί), οι πρώτες ελπιδοφόρες δοκιμές σε οινοποιεία με χρήση βιομηχανικών πρωτοτύπων έγιναν από ερευνητές στο Τεχνολογικό Ινστιτούτο της Καρλσρούης χρησιμοποιώντας ένταση ηλεκτρικού πεδίου μεγαλύτερη από  $30 \text{ kVcm}^{-1}$  και ένα ρυθμό ροής των  $900 \text{ kgh}^{-1}$  (Sack, Sigler, Eing, & Stukenbrock, 2010) και από ερευνητές στο Πανεπιστήμιο της Σαραγόσα σε χαμηλότερες εντάσεις ηλεκτρικού πεδίου ( $<5 \text{ kVcm}^{-1}$ ) και υψηλότερη ογκομετρική παροχή ( $2.000 \text{ kgh}^{-1}$ ).

Η πιο ολοκληρωμένη προσέγγιση για το οικονομικό κόστος της επεξεργασίας ΠΗΠ, σχετικά με τη βελτίωση της μεταφοράς μάζας για να μαλακώσει τους ιστούς έχει γίνει από τον (Klonowski, Heinz, Toepfl, & Gunnarsson, 2006). Σε αυτή τη μελέτη, το κόστος των ΠΗΠ στην εξαγωγή του χυμού μελετήθηκε με λεπτομέρεια. Με την παραδοχή μιας τρέχουσας τιμής των  $0,1 \text{ € / kWh}$  ως βάση, οι συγγραφείς κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι, για την εφαρμογή της επεξεργασίας ΠΗΠ των  $10 \text{ kJkg}^{-1}$  σε  $1-2 \text{ kVcm}^{-1}$  και χρησιμοποιώντας δυναμικότητα  $10 \text{ τόνων h}^{-1}$  ( $3 \text{ kWh ton}^{-1}$ ), το κόστος της επεξεργασίας μπορεί να εκτιμηθεί σε  $0,33 \text{ € ton}^{-1}$ . Για μια συμβατική ενζυμική διεργασία, το κόστος της επεξεργασίας μπορεί να εκτιμηθεί σε  $7,50 \text{ € ton}^{-1}$ ,  $22,7$  φορές το κόστος της επεξεργασίας ΠΗΠ. Χρησιμοποιώντας τις ίδιες εκτιμήσεις και με βάση τα στοιχεία που δημοσιεύθηκαν, έχει υπολογιστεί ότι το κόστος της επεξεργασίας ΠΗΠ ( $2-7 \text{ kVcm}^{-1}$ ,  $0,56$  έως  $6,76 \text{ kJkg}^{-1}$ ) για να βελτιωθεί η φαινολική εκχύλιση στην οινοποίηση θα μπορούσε να είναι περίπου  $0,01-0,2 \text{ € ton}^{-1}$  (Puértolas et al., 2010). Όσον αφορά τη χρήση των ΠΗΠ για την εξαγωγή σακχαρόζης, οι (Frenzel, Michelberger, Bluhm, Sack, & Kern, 2005) ανέφεραν ότι η ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για την ηλεκτροδιάτρηση είναι μόνο  $1-1,5 \text{ kWh ton}^{-1}$  των ζαχαρότευτλων, το οποίο είναι μόνο το  $3\%$  της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας ενός εργοστασίου ζάχαρης.

Λόγω του χαμηλού κόστους της επεξεργασίας, οι μεγάλες ανησυχίες για την εφαρμογή της τεχνολογίας ΠΗΠ στη βιομηχανία τροφίμων είναι το κόστος των επενδύσεων και η ανάπτυξη του βιομηχανικού εξοπλισμού (σε εξέλιξη). Λαμβάνοντας υπόψη τις γενικές παραμέτρους επεξεργασίας που αναφέρθηκαν για τη μεταφορά μάζας ( $1-7 \text{ kVcm}^{-1}$ ,  $2-50 \text{ kJkg}^{-1}$ ), μια γεννήτρια, με μέγιστη ισχύ φορτίου και τάσης  $30 \text{ kW}$  και  $30 \text{ kV}$ , αντίστοιχα, είναι απαραίτητη. Το εκτιμώμενο κόστος του εξοπλισμού αυτού είναι  $100-200 \text{ k €}$ . Αναμένεται ότι το χαμηλό κόστος ανά τόνο από τις επεξεργασίες θα μπορούσε να αποσβέσει την επένδυση σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα. Για παράδειγμα, οι Sack et al., (2010) καθόρισαν ότι για την επεξεργασία χυμού μήλου, η αύξηση  $6\%$  του αφιльтράριστου χυμού που λαμβάνεται θα αντισταθμίσει το κόστος της επένδυσης μετά από μόλις  $1,5$  χρόνια. Επιπλέον, αναμένεται ότι όταν η τεχνολογία εμπορευματοποιηθεί, το κόστος του εξοπλισμού θα αποσυντεθεί έντονα.

Η ικανότητα των ΠΗΠ ως μια αποτελεσματική επεξεργασία για τη βελτίωση της μεταφοράς μάζας σε διάφορες διεργασίες της βιομηχανίας τροφίμων αποδεικνύεται παραπάνω. Η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και οι σύντομοι χρόνοι επεξεργασίας που απαιτούνται για την διαπερατότητα των ευκαρυωτικών κυττάρων αποτελούν βασικά πλεονεκτήματα για την άμεση εφαρμογή της τεχνολογίας ΠΗΠ σε βιομηχανικό επίπεδο.



## 2.7 ΠΗΠ και ξήρανση σε φρούτα και λαχανικά

Οι εφαρμογές των ΠΗΠ βασίζονται στην ικανότητά τους να προκαλούν ηλεκτροδιάτρηση ή ηλεκτροπλάσμούση στις κυτταρικές μεμβράνες (Barbosa-Canovas & Pothakamury, 1999). Η τεχνική έχει ήδη επεκταθεί στους τομείς της ιατρικής και της βιολογίας, αλλά μελετάται και σε συστήματα τροφίμων (Angersbach, Heinz, & Knorr, 2000; Bouzrara, Vorobiev, & others, 2000; Lebonka, Bazhal, & Vorobiev, 2000).

Ελπιδοφόρα αποτελέσματα που αναφέρονται στην βιβλιογραφία έχουν προτείνει πιθανή εφαρμογή των ΠΗΠ ως μία προεπεξεργασία σε διεργασίες αφυδάτωσης. Η τεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ενίσχυση των ρυθμών ξήρανσης και για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Οι Angersbach και Knorr(1997), ήταν από τους πρώτους που ανέφεραν την εφαρμογή των ΠΗΠ για την επιτάχυνση των διαδικασιών ξήρανσης στις πατάτες. Ο Rastogi et al.(1999), ανέφεραν επίσης υψηλότερους συντελεστές μεταφοράς μάζας με την εφαρμογή των ΠΗΠ στις φέτες καρότου. Ο Ade-Omowaye et al. (2000), αξιολόγησαν την επιρροή των ΠΗΠ στην ηλεκτροδιάτρηση ιστών και στην ξήρανση καρύδας. Σε μια άλλη μελέτη οι Ade-Omowaye et al.(2001) εκτίμησαν την επίδραση των ΠΗΠ στην αφυδάτωση κόκκινης πάπρικας. Οι Taiwo et al.(2001), διερεύνησαν την επίδραση των ΠΗΠ στην κινητική διάχυσης σε οσμωτικά αφυδατωμένες φέτες μήλου. Πιο πρόσφατα, οι Eshtiaghi & Knorr(2002), ερεύνησαν την εφαρμογή του PEF για την ενίσχυση της εκχύλισης κατά την επεξεργασία ζαχαρότευτλων.

Είναι επίσης κατανοητό ότι οι επεξεργασίες ΠΗΠ υποβαθμίζουν την ακεραιότητα των κυττάρων των ιστών σε κυτταρικό επίπεδο (Harrison & Barbosa-Cánovas, 1997). Σε μεγάλο βαθμό, οι αλλαγές στην υφή φυτικών ιστών μπορούν να εξηγηθούν από αλλαγές σε συγκεκριμένα κυτταρικά συστατικά. Ως εκ τούτου, υποβάλλοντας φυτικούς ιστούς σε ΠΗΠ μπορούν να αλλοιωθούν οι ιδιότητες υφής του ιστού, αλλάζοντας έτσι την ποιότητα και την εμπορευσιμότητα του τελικού προϊόντος. Διαφορετικοί συγγραφείς έχουν επανειλημμένα καταδείξει τη σημασία της υφής ενός προϊόντος για την αποδοχή του από τους καταναλωτές (Daillant-Spinnler, MacFie, & Beyts, 1996; S. Jaeger, Andani, & Wakeling, 1998). Ωστόσο, υπάρχουν περιορισμένες διαθέσιμες πληροφορίες σχετικά με την επίδραση των ΠΗΠ στην υφή των φρούτων και των λαχανικών.

Ως εκ τούτου, τα ΠΗΠ ως αναδυόμενη τεχνική απαιτούν περαιτέρω μελέτη. Αυτή η διπλωματική εργασία σχεδιάστηκε για να αξιολογήσει τον αντίκτυπο των ΠΗΠ στην υφή και τους ρυθμούς ξήρανσης σε δισκία παντζαριού, κολοκυθίου και γλυκοπατάτας.

Παρακάτω ακολουθεί ένας πίνακας που συνοψίζει τις σημαντικότερες μελέτες που έχουν γίνει σχετικά με την προεπεξεργασία φρούτων και λαχανικών με τη μέθοδο των ΠΗΠ αλλά και την επίδραση αυτής στην ξήρανση των συγκεκριμένων προϊόντων.

Πίνακας 2.1 Μελέτες σχετικά με την επίδραση της προεπεξεργασίας με ΠΗΠ φρούτων και λαχανικών στο ρυθμό ξήρανσής τους.

Προϊόν	Συνθήκες	Αποτελέσματα	Βιβλιογραφία
<u>Μήλο</u>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ένταση ηλεκτρικού πεδίου <math>E = 5-10 \text{ kV/cm}</math></li> <li>10-50 παλμοί</li> <li>ταχύτητα αέρα <math>2 \text{ m/s}</math></li> </ul>	μείωση του χρόνου ξήρανσης έως και 12% όταν εφαρμόστηκαν $10 \text{ kV/cm}$ και 50 παλμοί	(Wiktor, Iwaniuk, Śledź, & Nowacka, 2013)
<u>Πατάτα</u>	θερμοκρασίες ξήρανσης $30-70^\circ\text{C}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ο <math>D_{\text{eff}}</math> είναι συνάρτηση του δείκτη κυτταρικής διάρρηξης <math>Z</math>.</li> <li>Η θερμική προεπεξεργασία στους <math>50^\circ\text{C}</math> και η προεπεξεργασία ΠΗΠ αυξάνουν τον συντελεστή διάχυσης υγρασίας <math>D_{\text{eff}}</math></li> </ul>	(Lebovka, Shynkaryk, & Vorobiev, 2007b)
<u>Καρότο</u>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ένταση ηλεκτρικού πεδίου <math>1 \text{ kVcm}^{-1}</math> ή <math>1,5 \text{ kVcm}^{-1}</math></li> <li>ζεμάτισμα (<math>100^\circ\text{C}</math>, 3min)</li> <li>θερμοκρασία ξήρανσης <math>70^\circ\text{C}</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Το ποσοστό επανυδάτωσης των προεπεξεργασμένων με ΠΗΠ καρότων είναι χαμηλότερο από εκείνο των ζεματισμένων καρότων</li> <li>Η προεπεξεργασία με ΠΗΠ μείωσε την δραστηριότητα της υπεροξειδάσης κατά 30-50%, ενώ το ζεμάτισμα αδρανοποίησε εντελώς το ένζυμο (&gt; 95%).</li> <li>Τα ΠΗΠ θα μπορούσαν να είναι μια αποτελεσματική προεπεξεργασία κατά την ξήρανση και επανυδάτωση των καρότων.</li> </ul>	(Gachovska, Simpson, & Ngadi, 2009)
<u>Παντζάρι</u>	θερμοκρασίες ξήρανσης $30-100^\circ\text{C}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>Η προεπεξεργασία με ΠΗΠ επέτρεψε μείωση της θερμοκρασίας ξήρανσης με <math>20-25^\circ\text{C}</math>.</li> <li>Η προεπεξεργασία με ΠΗΠ οδηγεί σε μεγαλύτερο βαθμό συρρίκνωσης του ιστού και επομένως σε αύξηση του χρόνου ενυδάτωσης.</li> <li>Οι ιδιότητες υφής των επανυδατωμένων δειγμάτων με και χωρίς επεξεργασία ΠΗΠ φαίνεται να είναι παρόμοια.</li> </ul>	(Shynkaryk, Lebovka, & Vorobiev, 2008)

<u>Φυτικές τροφές</u>	Βέλτιστες συνθήκες: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ένταση ηλεκτρικού πεδίου 1,5-3,0 kV/cm</li> <li>• 15-30 παλμοί</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Τα ΠΗΠ οδήγησαν σε μη αναστρέψιμη ηλεκτροδιάτρηση της μεμβράνης σε φυτικά τρόφιμα.</li> <li>• Η χρήση ΠΗΠ ως προεπεξεργασία έχει αποδειχθεί ότι διευκολύνει την ενισχυμένη απώλεια νερού κατά τη διάρκεια της οσμωτικής αφυδάτωσης.</li> <li>• Τα ΠΗΠ οδήγησαν σε μείωση του χρόνου ξήρανσης μεγαλύτερη από 20%.</li> </ul>	(Ade-Omowaye, Angersbach, & Taiwo, 2001)
<u>Καρότο</u>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ένταση ηλεκτρικού πεδίου 0.5, 1, 1.5 kV/cm</li> <li>• χωρητικότητα 0.5 και 1 IF</li> <li>• 10, 30, και 50 παλμοί</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Οι ρυθμοί ξήρανσης επηρεάστηκαν σημαντικά (<math>P &lt; 0,05</math>) από την κατεργασία ΠΗΠ.</li> <li>• Η διακύμανση σε συνεχή ξήρανση επηρεάστηκε σημαντικά από την ενέργεια ανά παλμό.</li> </ul>	(Gachovska, Adedeji, & Ngadi, 2008)
<u>Πατάτα, μήλο</u>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Εντάσεις παλμικού ηλεκτρικού πεδίου από 0,75 έως 1,5 kV/cm.</li> <li>• διάρκεια παλμού από 100 έως 300</li> <li>• αριθμός παλμών μέχρι 120</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Η αντοχή σε θλίψη των μήλων μειώθηκε μεταξύ 21 και 47%.</li> <li>• Η επεξεργασία ΠΗΠ αύξησε το πορώδες και την πυκνότητα των σωματιδίων.</li> <li>• Η επεξεργασία ΠΗΠ αύξησε τους ρυθμούς ξήρανσης των δειγμάτων πατάτας, των οποίων οι συντελεστές διάχυσης αυξήθηκαν έως και 40%.</li> </ul>	(Arevalo, Ngadi, & Bazhal, 2004)
<u>Μήλο</u>	Μελέτη επίδρασης της επαγόμενης από ΠΗΠ ηλεκτροδιάτρησης στις μηχανικές και δομικές ιδιότητες του ιστού μήλου.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Η επεξεργασία με ΠΗΠ μείωσε την συρρίκνωση όγκου και αύξησε το πορώδες του ιστού μήλου ξηραμένου με αέρα.</li> <li>• Το συνολικό μέσο μέγεθος των επαγόμενων με ΠΗΠ πόρων ήταν 5,86 <math>\mu\text{m}</math>, μικρότερο από το 7,81 <math>\mu\text{m}</math> των μη επεξεργασμένων δειγμάτων.</li> </ul>	(MI Bazhal, Ngadi, & Raghavan, 2003)
<u>Καρότο, Πατάτα, Μήλο</u>	Ανάλυση υφής: δοκιμές αντοχής-παραμόρφωσης και δοκιμές χαλάρωσης	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Αποδείχθηκε ότι η ήπια θερμική κατεργασία επιτρέπει να αυξηθεί η αποτελεσματικότητα της επεξεργασίας ΠΗΠ.</li> <li>• Η συνδυασμένη εφαρμογή των ήπιων θερμικών επεξεργασιών και των ΠΗΠ έχει ως αποτέλεσμα την</li> </ul>	(Lebovka et al., 2004)

		επιπλέον μαλακτική δράση για τα καρότα, τις πατάτες και τα μήλα.	
--	--	--	--

### 3. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

#### 3.1 Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη της επίδρασης της επεξεργασίας με τη μέθοδο των Παλλόμενων Ηλεκτρικών Πεδίων στα χαρακτηριστικά ξήρανσης και υφής φρούτων και λαχανικών. Με επεξεργασία στις κατάλληλες συνθήκες, στόχος ήταν να μειωθεί ο χρόνος ξήρανσης και να αξιολογηθούν τα χαρακτηριστικά υφής της γλυκοπατάτας, του παντζαριού και του κολοκυθιού.

#### 3.2 Σχεδιασμός Πειραμάτων

Η πειραματική διαδικασία αυτής της διπλωματικής εργασίας είχε δύο φάσεις:

Η πρώτη θεματική ενότητα περιλαμβάνει τις μελέτες υπολογισμού του δείκτη κυτταρικής διάρρηξης  $Z$  της γλυκοπατάτας, του παντζαριού και του κολοκυθιού μέσω της μεθόδου χαμηλής-υψηλής συχνότητας. Σε επόμενο στάδιο, επιλέχθηκαν οι συνθήκες προεπεξεργασίας ΠΗΠ σε διαφορετικές τιμές  $Z$ , ώστε να διερευνηθεί η επίδραση του δείκτη κυτταρικής διάρρηξης στο ρυθμό ξήρανσης και τα χαρακτηριστικά υφής των συγκεκριμένων φρούτων και λαχανικών.

Στη δεύτερη θεματική ενότητα πραγματοποιήθηκε κινητικό πείραμα ξήρανσης για ανεπεξέργαστα, για προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ σε μια επιλεγείσα συνθήκη σταθερής έντασης ηλεκτρικού πεδίου (1.5kV/cm) και διαφόρων χρόνων επεξεργασίας (διαφορετικοί δείκτες κυτταρικής διάρρηξης) και για κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα γλυκοπατάτας, παντζαριού και κολοκυθιού.

Στις δύο αυτές φάσεις της πειραματικής διαδικασίας εκτός από προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ δείγματα χρησιμοποιήθηκαν και ανεπεξέργαστα δείγματα, που αντιστοιχούν σε μηδενική κυτταρική διάρρηξη, αλλά και κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα, που αντιστοιχούν στην μέγιστη κυτταρική διάρρηξη. Οι αντιστοιχίες αυτές βρέθηκαν βιβλιογραφικά και επιβεβαιώθηκαν από τις μετρήσεις υπολογισμού του δείκτη κυτταρικής διάρρηξης. Στόχος ήταν η συσχέτιση του ρυθμού ξήρανσης και των χαρακτηριστικών υφής των προεπεξεργασμένων με ΠΗΠ δειγμάτων με τα δείγματα που αντιστοιχούν στις δυο ακραίες τιμές του δείκτη κυτταρικής διάρρηξης.

#### 3.3 Υλικά

Για την εκτέλεση των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν γλυκοπατάτες (*Ipomoeabatatas*), παντζάρια (*Betavulgaris*) και κολοκύθια (*Cucurbitapepo*). Τα προϊόντα αυτά μεταφέρθηκαν στο Εργαστήριο Χημείας και Τεχνολογίας Τροφίμων της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. όπου και αποθηκεύτηκαν σε θερμοκρασία 5°C για τα δείγματα κολοκυθιού και παντζαριού και σε θερμοκρασία περιβάλλοντος για τα δείγματα γλυκοπατάτας, μέχρι την επεξεργασία τους.

### 3.4 Πειραματική διαδικασία

#### 3.4.1 Υπολογισμός δείκτη κυτταρικής διάρρηξης Z.

Για τον υπολογισμό του δείκτη κυτταρικής διάρρηξης Z χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της χαμηλής-υψηλής συχνότητας. (βλ. Ενότητα 2.4.3.ii)



Εικόνα 3.1Η γεννήτρια συχνοτήτων Newtronics 200LTPC (αριστερά) και ο παλμογράφος TektronixTDS1012 (δεξιά)

Στην πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν η γεννήτρια συχνοτήτων Newtronics 200LTPC και ο παλμογράφος Tektronix TDS1012 (Oregon, U.S.A). Η συγκεκριμένη διάταξη απεικονίζεται στην Εικόνα 3.1. Ως χαμηλή συχνότητα ορίστηκε το 1 kHz και ως υψηλή το 1 MHz. Στον θάλαμο επεξεργασίας της διάταξης ΠΗΠ, χωρητικότητας 400 ml, εισήχθησαν τα δείγματα συγκεκριμένων διαστάσεων μαζί με νερό, ώστε να καταλαμβάνουν συνολικό όγκο 300 ml. Τα δείγματα γλυκοπατάτας που εισάγονταν στον θάλαμο επεξεργασίας για κάθε μέτρηση ήταν τρεις κύβοι ακμής 4 cm, τα δείγματα κολοκυθιού ήταν δύο κύλινδροι μήκους 6 cm και διαμέτρου 2 cm, και τα δείγματα παντζαριού αποτελούνταν από ένα παντζάρι διαμέτρου 6cm. Τα δείγματα αυτά, υπέστησαν επεξεργασία με τη διάταξη των ΠΗΠ σε ηλεκτρικά πεδία με τιμές 0.5, 1.0 και 1.5 kV/cm, πλάτος παλμού 15  $\mu$ s και συχνότητα 10Hz.

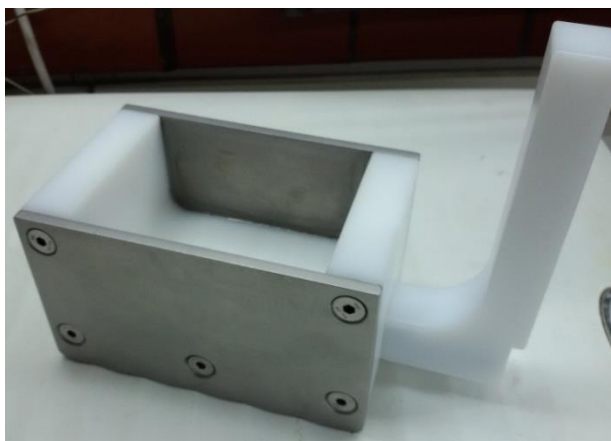
#### 3.4.2 Προεπεξεργασία με ΠΗΠ

Τα πειράματα των παλλόμενων ηλεκτρικών πεδίων διεξήχθησαν σε μία πιλοτικής κλίμακας μονάδα (Elcrack-5kW, DIL, Quakenbrück, Γερμανία) (Εικόνα 3.2). Αποτελείται από μία γεννήτρια παλμών και ένα σύστημα χειρισμού υγρών που λειτουργεί αυτόνομα.



Εικόνα 3.2 Μονάδα παλλόμενων ηλεκτρικών πεδίων Elcrack-5kW, DIL

Τα δείγματα γλυκοπατάτας, παντζαριού και κολοκυθιού, όπως και στην διαδικασία υπολογισμού του Z, εισήχθησαν μέσα στο θάλαμο επεξεργασίας σταθερού όγκου 400 ml και σταθερής απόστασης ηλεκτροδίων 80 mm (Εικόνα 3.3), ώστε μαζί με το νερό να καταλαμβάνουν συνολικό όγκο 300 ml.



Εικόνα 3.3 Θάλαμος επεξεργασίας σταθερού όγκου 400ml

Όμοια, τα δείγματα γλυκοπατάτας που εισάγονταν στον θάλαμο επεξεργασίας για κάθε μέτρηση ήταν τρεις κύβοι ακμής 4 cm, τα δείγματα κολοκυθιού ήταν δύο κύλινδροι μήκους 6 cm και διαμέτρου 2 cm, και τα δείγματα παντζαριού αποτελούνταν από ένα παντζάρι διαμέτρου 6 cm. Η προεπεξεργασία των δειγμάτων με ΠΗΠ, τα οποία στη συνέχεια θα οδηγούνταν στους ξηραντήρες, πραγματοποιήθηκε με σταθερό ηλεκτρικό πεδίο 1.5 kV/cm, πλάτος παλμού 15  $\mu$ s και συχνότητα 10 Hz. Συμπερασματικά, η μοναδική μεταβαλλόμενη παράμετρος του πειράματος ήταν ο αριθμός των παλμών. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν οι εξής παλμοί για το κάθε προϊόν : για τη γλυκοπατάτα οι παλμοί 70, 150 και 620, για το παντζάρι οι παλμοί 125, 200 και 300 και για το κολοκύθι οι παλμοί 90, 150 και 9000, με στόχο να επιτευχθεί ένας δείκτης κυτταρικής διάρρηξης Z από το 0 έως το 1. Στον πίνακα

6.1 απεικονίζεται η ο αριθμός των παλμών σε αντιστοιχία με τον δείκτη κυτταρικής διάρρηξης που προκαλεί σε καθένα από τα τρία προϊόντα.

Πίνακας 3.1 Σχέση αριθμού παλμών με δείκτη Z για τα δείγματα γλυκοπατάτας, παντζαριού και κολοκυθιού.

<i>Γλυκοπατάτα</i>			
<i>παλμοί</i>	70	150	620
<i>Δείκτης Z</i>	0.37	0.48	0.64
<i>Παντζάρι</i>			
<i>παλμοί</i>	125	200	300
<i>Δείκτης Z</i>	0.2	0.43	0.8
<i>Κολοκύθι</i>			
<i>παλμοί</i>	90	150	9000
<i>Δείκτης Z</i>	0.2	0.46	0.77

### 3.4.3 Κινητική μελέτη ξήρανσης δειγμάτων γλυκοπατάτας, παντζαριού και κολοκυθιού.

Στο στάδιο αυτό της πειραματικής διαδικασίας πραγματοποιήθηκε κινητικό πείραμα ξήρανσης για ανεπεξέργαστα , για προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ (σε μια επιλεγείσα συνθήκη σταθερής έντασης ηλεκτρικού πεδίου (1.5 kV/cm) και σε διάφορους χρόνους επεξεργασίας) και για κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα γλυκοπατάτας, παντζαριού και κολοκυθιού. Η κατάψυξη έγινε στους -30°C για 24 h και η απόψυξη σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος για 4 h. Πραγματοποιήθηκε ξήρανση σε ρεύμα αέρα με ξηραντήρα Biosec (Εικόνα 3.4), με συντελεστή συναγωγής  $h=11.3\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ , ο οποίος περιείχε 6 θέσεις για ράφια στο εσωτερικό του.





Εικόνα 3.4 Ξηραντήρας Biosec (συντελεστής συναγωγής  $h=11.3\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ ).

Όλα τα δείγματα, μετά το καθάρισμα και το κόψιμο, είχαν τη μορφή μικρού κυκλικού δίσκου με διάμετρο 2 cm και πάχος 0.4 cm. Στη συνέχεια όλα τα κομμένα δισκία των προϊόντων τοποθετούνταν στα ράφια του ξηραντήρα, τα οποία προζυγίζονταν και στη συνέχεια ζυγίζονταν ανά 10 min κατά τη διάρκεια της ξήρανσης. Χρησιμοποιήθηκαν, 3 ράφια στο εσωτερικό του ξηραντήρα. Το αρχικό μίκτο βάρος του κάθε ραφιού ήταν διαφορετικό για κάθε προϊόν. Οι θερμοκρασίες στις οποίες πραγματοποιήθηκε η ξήρανση ήταν οι 40°C, 50°C, 60°C και 70°C για την γλυκοπατάτα και οι 40°C, 55°C και 70°C για το παντζάρι και το κολοκύθι.

Για τους υπολογισμούς προσαρμόστηκαν δύο μαθηματικά μοντέλα : ο 2<sup>ος</sup> νόμος του Fick και το εκθετικό μοντέλο 1<sup>ης</sup> τάξης. Ο 2<sup>ος</sup> νόμος του Fick περιγράφεται από την Εξ. 3.1:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[ \frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D t}{4L^2} \right] \quad (3.1)$$

όπου MR είναι η αδιάστατη υγρασία,  $M_0$  είναι η αρχική υγρασία, το M είναι η μέση υγρασία στο χρόνο t, το  $M_e$  είναι η υγρασία σε ισορροπία και L είναι το ήμισυ του πάχους της φέτας για την ξήρανση και από τις δύο πλευρές ή το πάχος της φέτας για ξήρανση από τη μία πλευρά.

Το εκθετικό μοντέλο πρώτης τάξης δίνεται από την Εξ. 3.2:

$$\omega = e^{-kt} \quad (3.2)$$

όπου  $\omega$  είναι η αδιάστατη υγρασία στο χρόνο t και k η σταθερά του ρυθμού ξήρανσης.

Για την περιγραφή του ρυθμού ξήρανσης από την θερμοκρασία χρησιμοποιήθηκε ο νόμος του Arrhenius (Εξ. 3.3) που εκφράζει την εξάρτηση του ρυθμού ξήρανσης ή του συντελεστή διάχυσης από τη θερμοκρασία:

$$D_{eff} = D_{\infty} \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (3.3)$$

όπου  $D_{\infty}$  είναι μια σταθερά ανεξάρτητη από τη θερμοκρασία,  $E_a$  η ενέργεια ενεργοποίησης,  $R$  η σταθερά των αερίων και  $T$  η θερμοκρασία σε βαθμούς K.

Για τον υπολογισμό του συντελεστή συναγωγής  $h$ , ένα θερμοστοιχείο τοποθετήθηκε στο κέντρο πλάκας αλουμινίου. Αρχικά η πλάκα αλουμινίου βρισκόταν στο θάλαμο ψύξης και στη συνέχεια τοποθετήθηκε στον ξηραντήρα και καταγράφηκε η θερμοκρασία της με τη βοήθεια ειδικού λογισμικού (PC208W Datalogger, Campbell Scientific, UK).



Εικόνα 3.5 Εισαγωγή πλάκας με θερμοστοιχείο στον ξηραντήρα

Για τον υπολογισμό του συντελεστή συναγωγής μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες εμπειρικές εξισώσεις. (Singh and Heldman, 1981). Ένας άλλος τρόπος υπολογισμού του ξεκινά από τη θεώρηση ότι πραγματοποιείται θέρμανση με τρόπο ώστε η αντίσταση από την επιφάνεια να είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την εσωτερική αντίσταση (ομοιόμορφη θερμοκρασία στο αντικείμενο). Το ισοζύγιο ενέργειας που θα ισχύει τότε (θέρμανση σε μη μόνιμη κατάσταση) θα είναι:

$$c_p \cdot \rho \cdot V \cdot dT = h \cdot A_s \cdot (T - T_M) \cdot dt \quad (3.4)$$

Η παραπάνω εξίσωση μετασχηματίζεται στην ακόλουθη μορφή:

$$\ln \left( \frac{T - T_M}{T_0 - T_M} \right) = - \frac{hA_s}{c_p m} \cdot t \quad (3.5)$$

Όπου  $h$  ο συντελεστής συναγωγής ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ )

$T$  η θερμοκρασία της πλάκας στο χρόνο  $t$  (K)

$T_M$  η θερμοκρασία του ξηραντήρα (K)

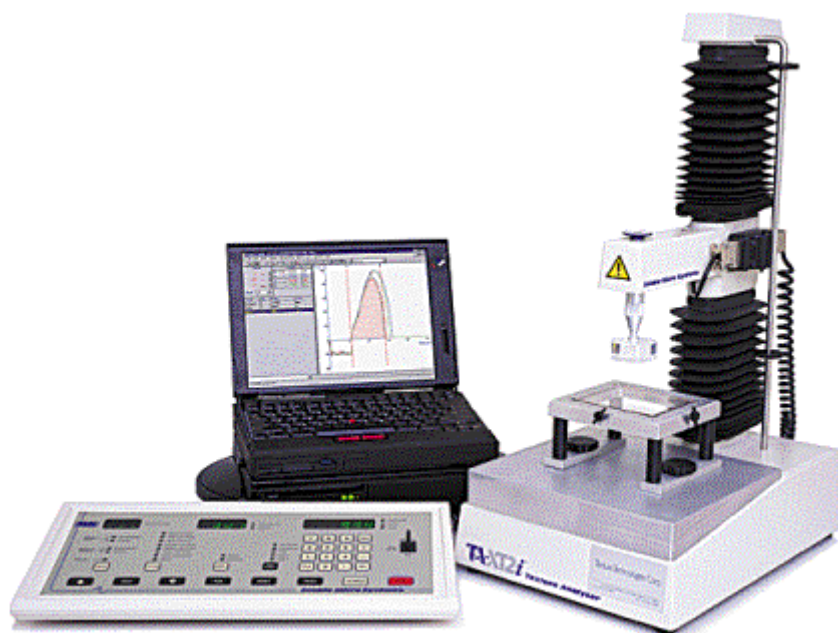
$T_0$  η αρχική θερμοκρασία της πλάκας (K)  
 $t$  ο χρόνος θέρμανσης της πλάκας (s)  
 $\rho$  η πυκνότητα της πλάκας αλουμινίου ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $V$  ο όγκος της πλάκας αλουμινίου ( $\text{m}^3$ )  
 $A_s$  η επιφάνεια της πλάκας αλουμινίου ίση με  $0,044 \text{ m}^2$   
 $c_p$  η ειδική θερμότητα του υλικού ίση με  $897 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$   
 $m$  η μάζα της πλάκας αλουμινίου ίση με  $0,795 \text{ kg}$

#### **3.4.4 Ανάλυση υφής δειγμάτων γλυκοπατάτας, παντζαριού και κολοκυθιού.**

Με τον όρο υφή εννοείται το άθροισμα των ιδιοτήτων οι οποίες προκύπτουν από τα δομικά στοιχεία και τον τρόπο με τον οποίο αυτά επιδρούν στα αισθητήρια όργανα. Γίνεται προσπάθεια να συνδεθεί η υφή με τα αισθητήρια όργανα και με την δομή του προϊόντος. Για την αντίληψη της υφής ο άνθρωπος χρησιμοποιεί ειδικά αισθητήρια όργανα, που βρίσκονται βασικά στο δέρμα, τους μύες και τις αρθρώσεις κυρίως στα δάχτυλα και τη στοματική κοιλότητα. Τα αισθήματα που αντανακλούν στον άνθρωπο τις ιδιότητες της υφής είναι δερμικά (επαφής και πίεσης) και κινητικά (μυϊκά). Η υφή είναι σημαντική παράμετρος αποδοχής από τον καταναλωτή, καθώς είναι ευδιάκριτο χαρακτηριστικό και για ορισμένα τρόφιμα παίζει σπουδαιότερο ρόλο από την οσμή και τη γεύση. Τα επιθυμητά χαρακτηριστικά της υφής είναι συνήθως η τρυφερότητα, η μαλακότητα, το χυμώδες, η συνεκτικότητα, η τραγανότητα και το εύθραυστο, το οποίο είναι σημαντικός δείκτης, επιθυμητός από τους καταναλωτές επειδή έχει ειδική επίδραση στο αίσθημα της όρεξης.

Η υφή είναι δύσκολο να μελετηθεί και να βρεθεί τρόπος να περιγραφεί η αντίδραση του καταναλωτή για την αποδοχή των προϊόντων. Έχει αναπτυχθεί μια νέα τεχνική «όψη υφής για τον καταναλωτή» (consumer texture profile), που βασίζεται σε οργανοληπτική εξέταση από εκπαιδευμένες ομάδες δοκιμαστών, η οποία επιτρέπει την περιγραφή της υφής του προϊόντος και εκφράζεται με ψυχοφυσικές παραμέτρους.

Η λειτουργία των οργάνων μέτρησης βασίζεται στην αντίσταση του προϊόντος σε κάποια δύναμη, η οποία εφαρμόζεται για συμπίεση, για διάτμηση, κοπή ή εφελκυσμό, ή συνδυασμό συμπίεσης και διάτμησης. Για την ανάλυση της υφής χρησιμοποιήθηκε ο αναλυτής υφής TA-XT2i Stable Microsystems που εικονίζεται παρακάτω (Εικόνα 3.6).



Εικόνα 3.6 Αναλυτής υφής TA-XT2i Stable Microsystems

Τα δείγματα υπέστησαν επεξεργασία με στελέχη συγκεκριμένου σχήματος, το οποία κινούνταν με προκαθορισμένη ταχύτητα και βυθιζόταν σε συγκεκριμένο βάθος που καθορίστηκε σε σχέση με το μέγεθος των δειγμάτων. Τα στελέχη που χρησιμοποιήθηκαν για τα συγκεκριμένα πειράματα φαίνονται παρακάτω (Εικόνα 3.7) και πρόκειται για μια λεπίδα και ένα κυκλικό δίσκο διαμέτρου 75 mm.



Εικόνα 3.7 Στελέχη που χρησιμοποιήθηκαν στον αναλυτή υφής για τα πειράματα. (αριστερά: κυκλικός δίσκος διαμέτρου 75 mm, δεξιά: λεπίδα)

Στα πλαίσια των πειραμάτων ανάλυσης υφής πραγματοποιήθηκαν τρία διαφορετικά πειράματα: η δοκιμή συμπίεσης, η δοκιμή χαλάρωσης τάσης και η δοκιμή δύναμης κοπής.

**Δοκιμή συμπίεσης:** Κατά τη δοκιμή συμπίεσης μετράται η δύναμη που απαιτείται για την συμπίεση του δείγματος σε συγκεκριμένη παραμόρφωση. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με τη χρήση δίσκου διαμέτρου 7.5 cm. Η ταχύτητα καθόδου του εμβόλου ορίστηκε στα 0.05 mm/s και η καταγραφή της δύναμης πραγματοποιήθηκε μέχρι την παραμόρφωση 10%. Η δύναμη συμπίεσης εμφανίζεται ως μία κορυφή στο διάγραμμα δύναμης/χρόνου (Εικόνα 3.8).

**Δοκιμή δύναμης κοπής:** Κατά τη δοκιμή δύναμης κοπής μετράται η δύναμη που απαιτείται για την κοπή του δείγματος με τη χρήση στελέχους λεπίδας μήκους 6cm. Η ταχύτητα του εμβόλου ορίστηκε ως 1 cm/s. Η δύναμη κοπής λαμβάνεται ως η πρώτη μέγιστη κορυφή στο διάγραμμα δύναμης-χρόνου (Εικόνα 3.9).

**Δοκιμή χαλάρωσης τάσης:** Κατά τη δοκιμή χαλάρωσης τάσης μετρώνται τα ιξωδοελαστικά χαρακτηριστικά του δείγματος. Το δείγμα συμπιέζεται σε σταθερή παραμόρφωση 10% με τη χρήση στελέχους δίσκου διαμέτρου 7.5 cm. Η συμπίεση διατηρείται για 60 s και καταγράφεται η χαλάρωση της δύναμης με το χρόνο (Εικόνα 3.10). Στην καμπύλη προσαρμόζεται το μοντέλο Maxwell με δύο παράλληλα στοιχεία, το οποίο περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση 3.6:

$$F = F_0 + F_1 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + F_2 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \quad (3.6)$$

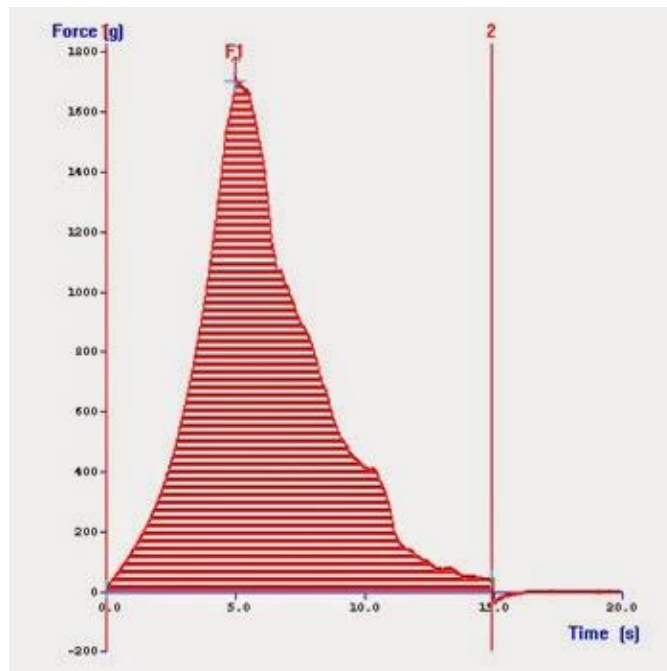
Όπου  $\tau_1$  και  $\tau_2$  οι χρόνοι χαλάρωσης (s),  $F_0$  η δύναμη μετά την χαλάρωση και  $F_1$  και  $F_2$  οι δυνάμεις μετά τη χαλάρωση για το πρώτο και δεύτερο στοιχείο Maxwell αντίστοιχα.

Στον παρακάτω πίνακα απεικονίζονται όλα τα χαρακτηριστικά του κάθε πειράματος και συγκεκριμένα το στέλεχος που χρησιμοποιήθηκε, η ταχύτητα κατά τη διάρκεια της μέτρησης, οι διαστάσεις του δείγματος και η τελική παραμόρφωση ή το βάθος καθόδου του στελέχους μέσα στο δείγμα (Πίνακας 6.2).

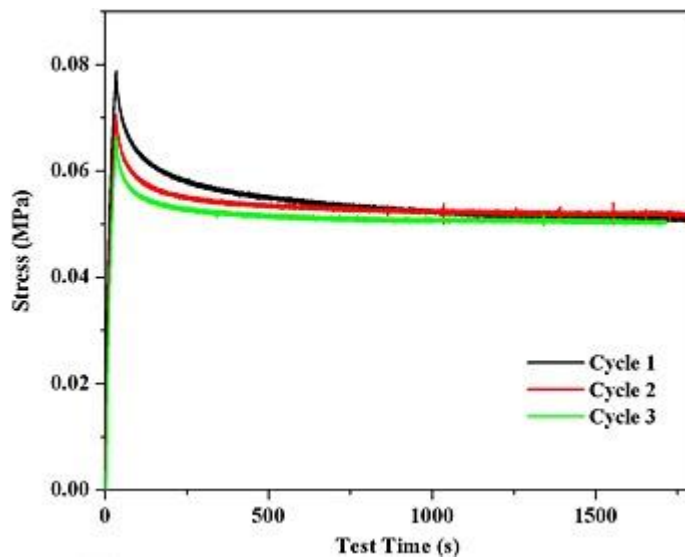
Πίνακας 3.2 Χαρακτηριστικά στοιχεία για τα τρία πειράματα ανάλυσης υφής.

Δοκιμές	Στέλεχος	Ταχύτητα Μέτρησης	Διαστάσεις δείγματος	Παραμόρφωση δείγματος-Βάθος καθόδου του στελέχους στο δείγμα
Δοκιμή Συμπίεσης	κυκλικός δίσκος	0.05 mm/sec	δίσκος διαμέτρου 2cm, πάχους 0.7 cm	παραμόρφωση 10%
Δοκιμή Χαλάρωσης Τάσης	κυκλικός δίσκος	0.5 mm/sec	δίσκος διαμέτρου 2cm, πάχους 0.7 cm	παραμόρφωση 10%
Δοκιμή Δύναμης Κοπής	λεπίδα	1 mm/sec	κύβος ακμής 1 cm	Βάθος καθόδου του στελέχους στο δείγμα 5 mm

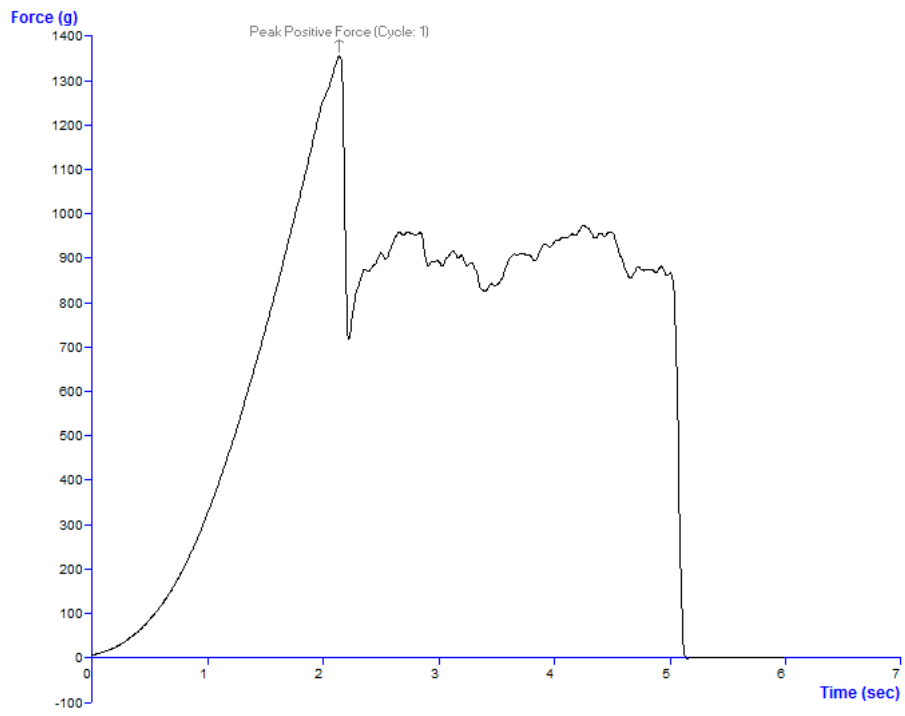
Παρακάτω απεικονίζονται τα χαρακτηριστικά διαγράμματα για το κάθε πείραμα (Εικόνες 3.8-3.10).



Εικόνα 3.8 Χαρακτηριστικό διάγραμμα δοκιμής της δύναμης συμπίεσης.



Εικόνα 3.9 Χαρακτηριστικό διάγραμμα δοκιμής της δύναμης χαλάρωσης τάσης.



Εικόνα 3.10 Χαρακτηριστικό διάγραμμα δοκιμής της δύναμης κοπής.

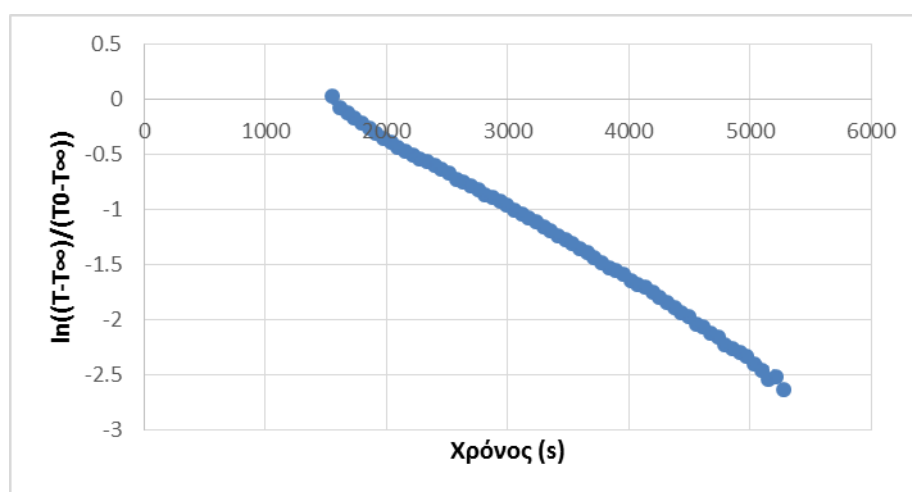




## 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

### 4.1 Υπολογισμός του συντελεστή συναγωγής στον ξηραντήρα

Στα δεδομένα αύξησης της θερμοκρασίας της πλάκας αλουμινίου στον ξηραντήρα, έγινε γραμμική προσαρμογή στην εξίσωση 3.5. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η μορφή της εξίσωσης αυτής, όπως προκύπτει από την καταγραφή των δεδομένων θερμοκρασίας. Από την κλίση του διαγράμματος καθώς και από τις γνωστές φυσικές και γεωμετρικές ιδιότητες της πλάκας, ο συντελεστής συναγωγής υπολογίστηκε ίσος με  $h=11.3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

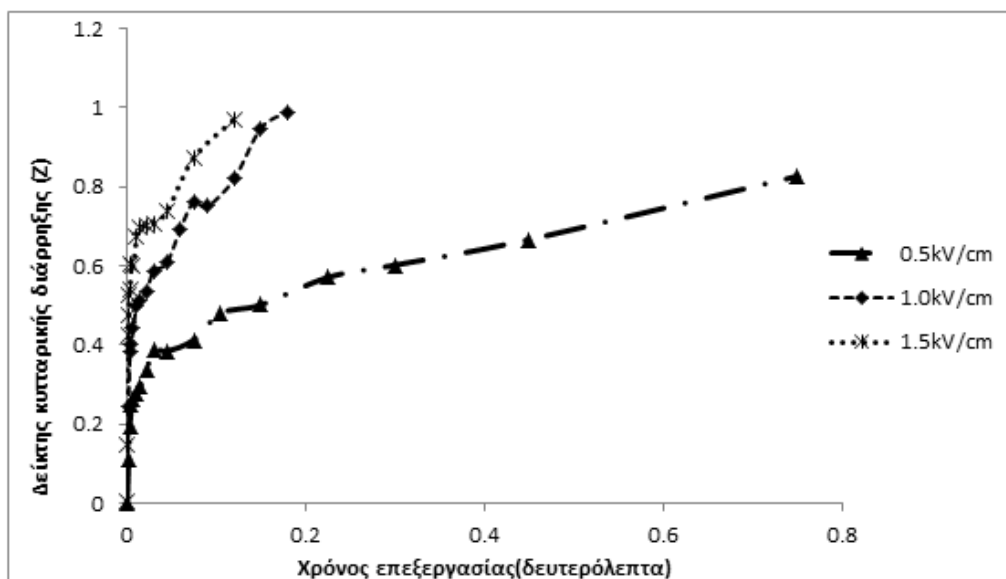


Διάγραμμα 4.1.α Μεταβολή του λογαρίθμου της αδιάστατης θερμοκρασίας της πλάκας αλουμινίου με το χρόνο σε σταθερή θερμοκρασία ξηραντήρα 55°C.

### 4.2 Μελέτη της επίδρασης των Παλλόμενων Ηλεκτρικών Πεδίων στην κινητική της ξήρανσης και στις μηχανικές ιδιότητες της γλυκοπατάτας.

#### 4.2.1 Δείκτης κυτταρικής διάρρηξης (Z) στην γλυκοπατάτα.

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα του δείκτη κυτταρικής διάρρηξης (Z) σε δείγματα γλυκοπατάτας σε διαφορετικά έντασης ηλεκτρικά πεδία (Διάγραμμα 4.1.β).



Διάγραμμα 4.1.β Δείκτης κυτταρικής διάρρηξης (Z) για διάφορους χρόνους επεξεργασίας των δειγμάτων γλυκοπατάτας σε τρεις διαφορετικές εντάσεις ηλεκτρικού πεδίου (0.5kV/cm, 1.0kV/cm, 1.5 kV/cm).

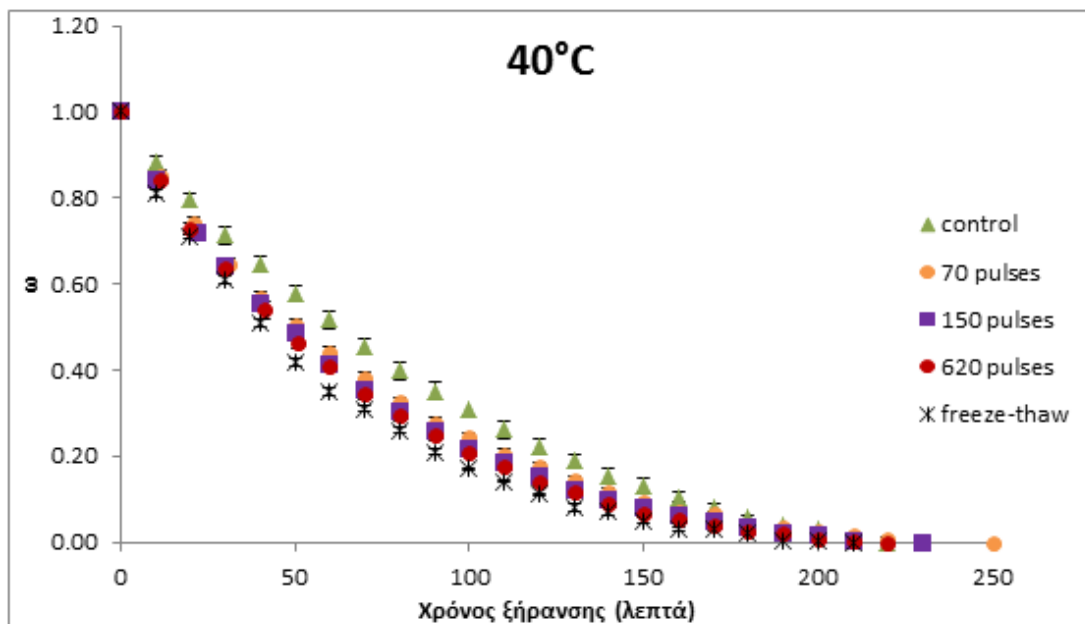
Παρατηρείται ότι, για κάθε τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, σε μικρούς χρόνους επεξεργασίας υπάρχει σημαντική αύξηση του δείκτη κυτταρικής διάρρηξης Z ενώ σε μεγαλύτερους χρόνους εμφανίζεται μικρότερη αύξηση του Z μέχρι να πάρει την τιμή 1.

Επίσης όσο μεγαλώνει η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, ο δείκτης κυτταρικής διάρρηξης αυξάνεται πιο γρήγορα σε σχέση με το χρόνο επεξεργασίας.

Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων της κινητικής ξήρανσης επιλέχθηκε η συνθήκη έντασης ηλεκτρικού πεδίου 1.5 kV/cm και οι κατάλληλοι παλμοί ώστε να καλύπτεται όλο το εύρος των τιμών του δείκτη κυτταρικής διάρρηξης Z από το 0 έως το 1.

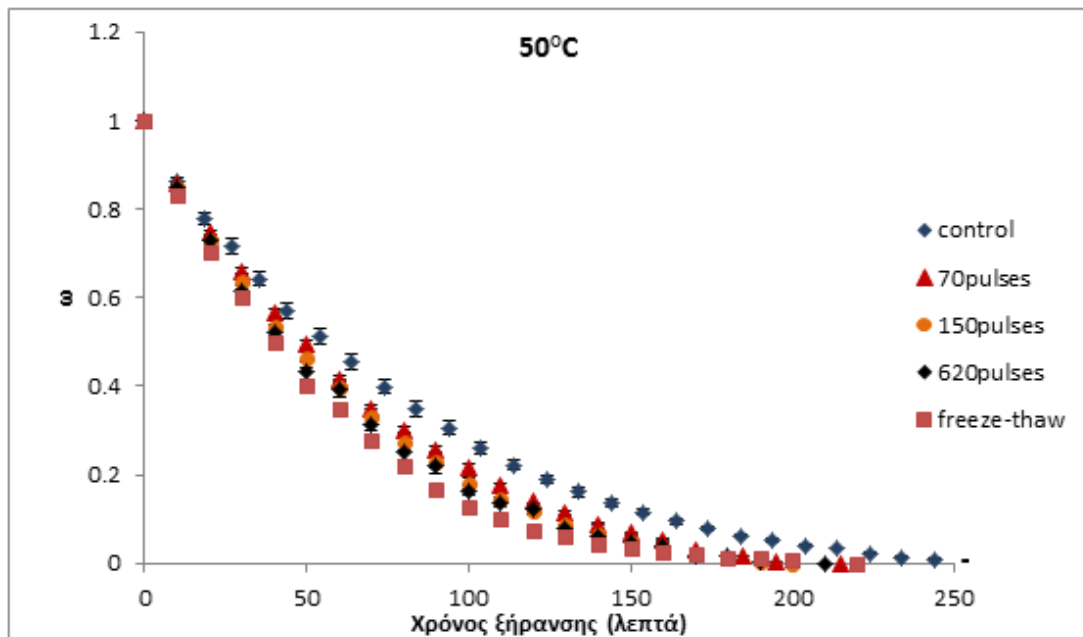
#### 4.2.2 Επίδραση των Παλλόμενων Ηλεκτρικών Πεδίων στις καμπύλες ξήρανσης της γλυκοπατάτας.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι καμπύλες ξήρανσης γλυκοπατάτας σε θερμοκρασίες από 40 έως 70°C για ανεπεξέργαστα, προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ (1.5kV/cm, 10Hz, 15μs πλάτος παλμού, 70-620 παλμοί) και αποψυγμένα δείγματα. (Διαγράμματα 4.2-4.5)



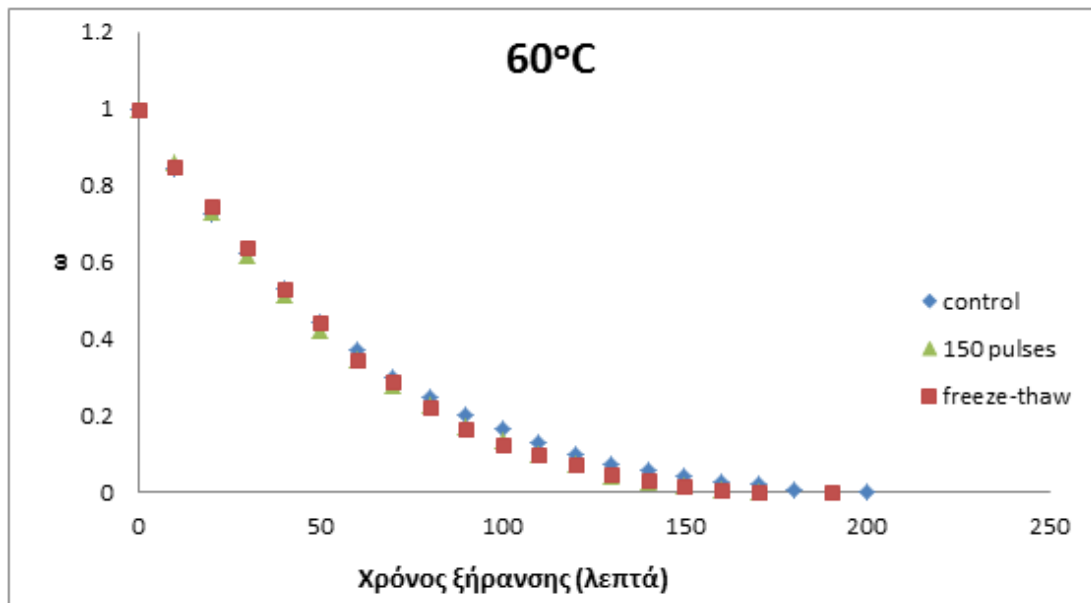
Διάγραμμα 4.2 Καμπύλες ξήρανσης στους 40°C για ανεπεξεργαστα, προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ (1.5 kV/cm, 10 Hz, 15 μs πλάτος παλμού, 70-620 παλμοί) και για αποψυγμένα δείγματα γλυκοπατάτας.

Παρατηρείται ότι στην θερμοκρασία των 40°C, ο ρυθμός ξήρανσης των κατεψυγμένων-αποψυγμένων δειγμάτων είναι μεγαλύτερος από τον ρυθμό των προεπεξεργασμένων με ΠΗΠ δειγμάτων και αυτός με τη σειρά του μεγαλύτερος από το ρυθμό των ανεπεξεργαστων δειγμάτων. Επιπλέον, μεταξύ των προεπεξεργασμένων με ΠΗΠ δειγμάτων, η εντονότερη επεξεργασία (περισσότεροι παλμοί) οδηγεί σε σημαντικά μεγαλύτερο ρυθμό ξήρανσης. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι εντονότερη επεξεργασία ΠΗΠ οδηγεί σε εντονότερη ηλεκτροδιάτρηση, με αποτέλεσμα να ενισχύεται ο ρυθμός μεταφοράς μάζας από και προς τα δείγματα γλυκοπατάτας. Ακόμη, ο χρόνος ξήρανσης της πιο έντονης συνθήκης ΠΗΠ είναι περίπου ίσος με τον χρόνο ξήρανσης των κατεψυγμένων-αποψυγμένων δειγμάτων.



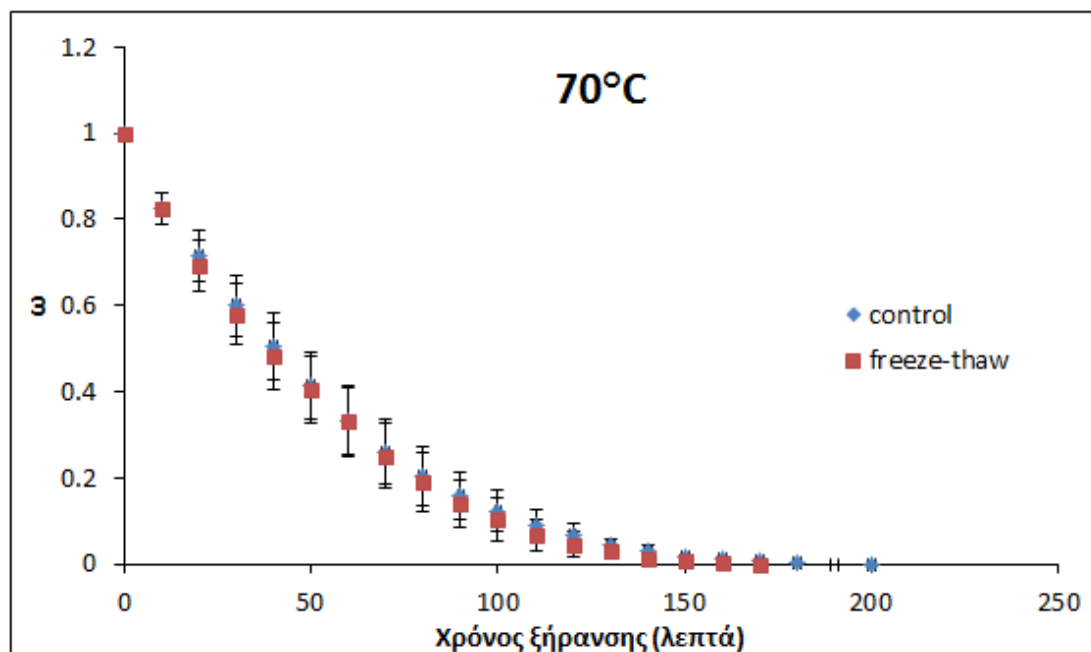
Διάγραμμα 4.3 Καμπύλες ξήρανσης στους 50°C για ανεπεξεργαστα, προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ (1.5 kV/cm, 10 Hz, 15  $\mu$ s πλάτος παλμού, 70-620 παλμοί) και για αποψυγμένα δείγματα γλυκοπατάτας.

Παρατηρείται ότι και στην θερμοκρασία των 50°C, ο ρυθμός ξήρανσης των κατεψυγμένων-αποψυγμένων δειγμάτων είναι σημαντικά μεγαλύτερος από τον ρυθμό των προεπεξεργασμένων με ΠΗΠ δειγμάτων και αυτός με τη σειρά του σημαντικά μεγαλύτερος από το ρυθμό των ανεπεξεργαστων δειγμάτων. Επιπλέον, μεταξύ των προεπεξεργασμένων με ΠΗΠ δειγμάτων είναι εμφανές ότι η εντονότερη επεξεργασία (περισσότεροι παλμοί) οδηγεί σε γρηγορότερη ξήρανση. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι εντονότερη επεξεργασία ΠΗΠ οδηγεί σε εντονότερη ηλεκτροδιάτρηση, με αποτέλεσμα να ενισχύεται ο ρυθμός μεταφοράς μάζας από και προς το τρόφιμο. Ωστόσο, συγκριτικά με την θερμοκρασία των 40°C, οι διαφορές μεταξύ των ρυθμών ξήρανσης των επεξεργασμένων με ΠΗΠ είναι μικρότερες.



Διάγραμμα 4.4 Καμπύλες ξήρανσης στους 60°C για ανεπεξέργαστα, προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ (1.5 kV/cm, 10 Hz, 15 μs πλάτος παλμού, 150 παλμοί) και για αποψυγμένα δείγματα γλυκοπατάτας.

Στην θερμοκρασία των 60°C παρατηρείται μια μικρή αύξηση του ρυθμού ξήρανσης από τα ανεπεξέργαστα στα κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα γλυκοπατάτας. Παρ'όλα αυτά, δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές μεταξύ των προεπεξεργασμένων με ΠΗΠ και των ανεπεξέργαστων δειγμάτων ως προς το ρυθμό ξήρανσης.



Διάγραμμα 4.5 Καμπύλες ξήρανσης στους 70°C για ανεπεξέργαστα και για αποψυγμένα δείγματα γλυκοπατάτας.

Στην θερμοκρασία των 70°C δεν παρατηρούνται διαφορές μεταξύ των ανεπεξέργαστων και των κατεψυγμένων-αποψυγμένων δειγμάτων.

Γενικά, με την αύξηση της θερμοκρασίας εμφανίζονται μικρότερες διαφορές μεταξύ των ρυθμών ξήρανσης των δειγμάτων. Συγκεκριμένα στους 40 °C και τους 50°C παρατηρούνται σημαντικές διαφορές μεταξύ των διαφορετικών συνθηκών ΠΗΠ ενώ στους 60°C και τους 70°C δεν συμβαίνει το ίδιο.

Συμπερασματικά, οι ρυθμοί ξήρανσης επηρεάστηκαν σημαντικά από την κατεργασία με ΠΗΠ, γεγονός που συμφωνεί με τα αποτελέσματα της μελέτης των Gachovska et al. (2008), στην οποία κατά την ξήρανση καρότου οι ρυθμοί ξήρανσης των δειγμάτων επηρεάστηκαν επίσης σημαντικά από τα ΠΗΠ.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι φαινόμενοι συντελεστές διάχυσης  $D_{eff}$  από τον 2ο νόμο του Fick (Πίνακας 4.1) και οι ενέργειες ενεργοποίησης  $E_a$  (Πίνακας 4.2) από τον νόμο του Arrhenius για τα ανεπεξέργαστα, προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ (1.5 kV/cm, 10 Hz, 15 μs πλάτος παλμού, 70-620 παλμοί) και για τα αποψυγμένα δείγματα γλυκοπατάτας για όλες τις θερμοκρασίες ξήρανσης (40-70°C).

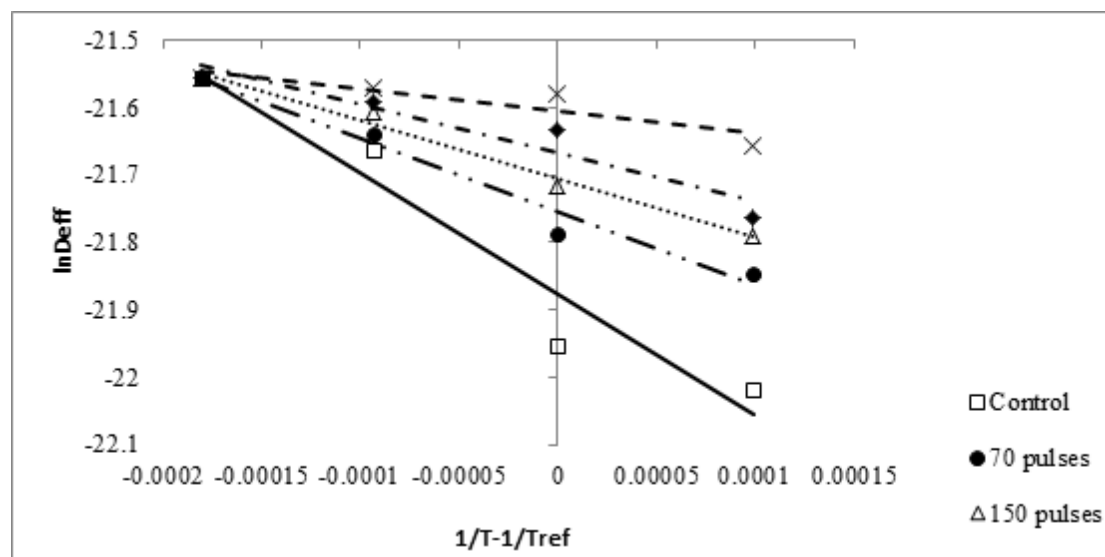
Πίνακας 4.1 Φαινόμενοι συντελεστές διάχυσης  $D_{eff}$  και οι ενέργειες ενεργοποίησης  $E_a$  για τα ανεπεξέργαστα, προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ (1.5 kV/cm, 10 Hz, 15 μs πλάτος παλμού, 70-620 παλμοί) και για τα αποψυγμένα δείγματα γλυκοπατάτας για όλες τις θερμοκρασίες ξήρανσης (40-70°C).

Δείγματα	$D_{eff}(m^2/s)$ . Θερμοκρασία ξήρανσης (°C)			
	40°C	50°C	60°C	70°C
<b>Ανεπεξέργαστο</b>	$2.74 \cdot 10^{-10} \pm 2.37 \cdot 10^{-11}$	$2.92 \cdot 10^{-10} \pm 1.82 \cdot 10^{-11}$	$3.91 \cdot 10^{-10} \pm 3.00 \cdot 10^{-11}$	$4.35 \cdot 10^{-10} \pm 3.51 \cdot 10^{-11}$
<b>70 παλμοί</b>	$3.25 \cdot 10^{-10} \pm 1.89 \cdot 10^{-11}$	$3.45 \cdot 10^{-10} \pm 2.64 \cdot 10^{-11}$	$4.00 \cdot 10^{-10} \pm 3.55 \cdot 10^{-11}$	$4.35 \cdot 10^{-10} \pm 3.61 \cdot 10^{-11}$
<b>150 παλμοί</b>	$3.44 \cdot 10^{-10} \pm 2.17 \cdot 10^{-11}$	$3.71 \cdot 10^{-10} \pm 2.82 \cdot 10^{-11}$	$4.14 \cdot 10^{-10} \pm 4.02 \cdot 10^{-11}$	$4.35 \cdot 10^{-10} \pm 3.40 \cdot 10^{-11}$
<b>620 παλμοί</b>	$3.53 \cdot 10^{-10} \pm 2.34 \cdot 10^{-11}$	$4.03 \cdot 10^{-10} \pm 2.80 \cdot 10^{-11}$	$4.20 \cdot 10^{-10} \pm 3.95 \cdot 10^{-11}$	$4.35 \cdot 10^{-10} \pm 3.33 \cdot 10^{-11}$
<b>Κατεψυγμένο-αποψυγμένο</b>	$3.94 \cdot 10^{-10} \pm 2.40 \cdot 10^{-11}$	$4.25 \cdot 10^{-10} \pm 2.94 \cdot 10^{-11}$	$4.29 \cdot 10^{-10} \pm 3.89 \cdot 10^{-11}$	$4.35 \cdot 10^{-10} \pm 3.51 \cdot 10^{-11}$

Παρατηρείται ότι ο φαινόμενος συντελεστής διάχυσης  $D_{eff}$  της γλυκοπατάτας για την ίδια θερμοκρασία είναι μεγαλύτερος στα επεξεργασμένα με ΠΗΠ δείγματα από ότι στα ανεπεξέργαστα. Επίσης, ακόμα μεγαλύτερες τιμές λαμβάνει στα κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα. Όσο πιο έντονη είναι η συνθήκη ΠΗΠ τόσο μεγαλύτερος είναι και ο συντελεστής διάχυσης. Τα παραπάνω παρατηρούνται σε όλες τις θερμοκρασίες εκτός των 70°C, όπου ο συντελεστής διάχυσης δεν μεταβάλλεται ανεξαρτήτως επεξεργασίας των δειγμάτων. Τα αποτελέσματα των φαινομένων συντελεστών διάχυσης συμβαδίζουν με την μελέτη των Lebonka et al. (2007a) όπου, κατά την ξήρανση πατάτας σε θερμοκρασίες 30-70°C, επισημάνθηκε ότι ο  $D_{eff}$  είναι συνάρτηση του δείκτη κυτταρικής διάρρηξης. Επίσης, αντίστοιχα αποτελέσματα,

βρέθηκαν και στην μελέτη των Arevalo et al. (2004), όπου οι συντελεστές διάχυσης των προεπεξεργασμένων με ΠΗΠ δειγμάτων πατάτας, αυξήθηκαν έως και 40%.

Για όλα τα δείγματα που έχουν υποστεί την ίδια επεξεργασία, ο φαινόμενος συντελεστής διάχυσης παρουσιάζει σημαντική αύξηση με αύξηση της θερμοκρασίας ξήρανσης.



Διάγραμμα 4.6 Διάγραμμα Arrhenius για ανεπεξεργαστα, προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ (1.5 kV/cm, 10 Hz, 15 μs πλάτος παλμού, 70-620 παλμοί) και για αποψυγμένα δείγματα γλυκοπατάτας.

Πίνακας 4.2 Ενέργεια ενεργοποίησης E<sub>a</sub> του φαινομένου συντελεστή διάχυσης D<sub>eff</sub> και συντελεστή συσχέτισης για ανεπεξεργαστα, προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ (1.5 kV/cm, 10 Hz, 15 μs πλάτος παλμού, 70-620 παλμοί) και για αποψυγμένα δείγματα γλυκοπατάτας.

Δείγματα	E <sub>a</sub> (kJ/mol)	R <sup>2</sup>
<b>Ανεπεξέργαστο</b>	14.94	0.9381
<b>70 παλμοί</b>	9.06	0.9717
<b>150 παλμοί</b>	7.25	0.9841
<b>620 παλμοί</b>	5.98	0.9031
<b>Κατεψυγμένο-αποψυγμένο</b>	2.75	0.8123

Μελετώντας τον παραπάνω πίνακα, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η ενέργεια ενεργοποίησης του φαινομένου συντελεστή διάχυσης D<sub>eff</sub> είναι σημαντικά μικρότερη στα επεξεργασμένα με ΠΗΠ δείγματα από ότι στα ανεπεξεργαστα και ακόμα μικρότερη στα κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα. Επίσης, μεταξύ των συνθηκών ΠΗΠ παρατηρείται ότι πιο έντονη επεξεργασία οδηγεί σε μείωση της ενέργειας ενεργοποίησης E<sub>a</sub>. Η μείωση αυτή της τιμής της E<sub>a</sub> υποδεικνύει ότι η εξάρτηση του ρυθμού ξήρανσης από τη θερμοκρασία γίνεται λιγότερο έντονη όσο πιο έντονες είναι

οι συνθήκες ΠΗΠ. Πιο συγκεκριμένα, σε μια προεπεξεργασία με ΠΗΠ όπου ο δείκτης κυτταρικής διάρρηξης είναι μεγαλύτερος από τα ανεπεξέργαστα δείγματα, ο ίδιος χρόνος ξήρανσης μπορεί να επιτευχθεί σε χαμηλότερη θερμοκρασία.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι σταθερές ρυθμού ξήρανσης από το εκθετικό μοντέλο 1<sup>ης</sup> τάξης (Πίνακας 4.3) και οι ενέργειες ενεργοποίησης  $E_a$  (Πίνακας 4.4) από τον νόμο του Arrhenius για τα ανεπεξέργαστα, προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ (1.5 kV/cm, 10 Hz, 15  $\mu$ s πλάτος παλμού, 70-620 παλμοί) και για τα αποψυγμένα δείγματα γλυκοπατάτας για όλες τις θερμοκρασίες ξήρανσης (40-70°C).

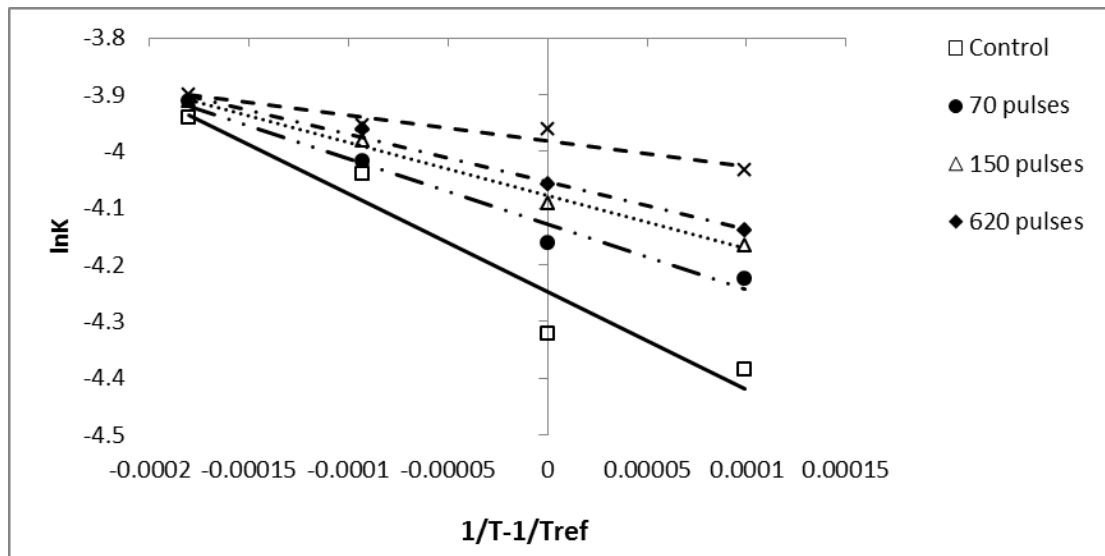
Πίνακας 4.3 Σταθερές ρυθμού ξήρανσης Arrhenius για τα ανεπεξέργαστα, προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ (1.5 kV/cm, 10 Hz, 15  $\mu$ s πλάτος παλμού, 70-620 παλμοί) και για τα αποψυγμένα δείγματα γλυκοπατάτας για όλες τις θερμοκρασίες ξήρανσης (40-70°C).

	<b>k (min<sup>-1</sup>).Θερμοκρασία ξήρανσης (°C)</b>			
<b>Δείγματα</b>	<b>40°C</b>	<b>50°C</b>	<b>60°C</b>	<b>70°C</b>
<b>Ανεπεξέργαστο</b>	0.0125±0.0004	0.0133±0.0003	0.0176±0.0005	0.0194±0.0007
<b>70 παλμοί</b>	0.0146±0.0003	0.0156±0.0005	0.0180±0.0007	0.0200±0.0006
<b>150 παλμοί</b>	0.0155±0.0003	0.0167±0.0005	0.0186±0.0008	0.0200±0.0007
<b>620 παλμοί</b>	0.0159±0.0004	0.0173±0.0005	0.0190±0.0006	0.0200±0.0008
<b>Κατεψυγμένο-αποψυγμένο</b>	0.0177±0.0004	0.0190±0.0005	0.0192±0.0008	0.0203±0.0008

Παρατηρείται ότι η σταθερά του ρυθμού ξήρανσης  $k$  παρουσιάζει τις αντίστοιχες μεταβολές με τον συντελεστή διάχυσης  $D_{eff}$  της γλυκοπατάτας. Επομένως, η σταθερά του ρυθμού ξήρανσης  $k$  της γλυκοπατάτας για την ίδια θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη στα επεξεργασμένα με ΠΗΠ δείγματα από ότι στα ανεπεξέργαστα. Επίσης, ακόμα μεγαλύτερες τιμές λαμβάνει στα κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα. Όσο πιο έντονη είναι η συνθήκη ΠΗΠ τόσο μεγαλύτερη είναι και η σταθερά του ρυθμού ξήρανσης. Τα παραπάνω παρατηρούνται σε όλες τις θερμοκρασίες εκτός των 70°C, όπου ο συντελεστής διάχυσης δεν μεταβάλλεται σημαντικά, ανεξαρτήτως επεξεργασίας των δειγμάτων.

Για όλα τα δείγματα που έχουν υποστεί την ίδια επεξεργασία, η σταθερά του ρυθμού ξήρανσης παρουσιάζει σημαντική αύξηση με αύξηση της θερμοκρασίας ξήρανσης.





Διάγραμμα 4.7 Διάγραμμα Arrhenius για ανεπεξέργαστα, προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ (1.5 kV/cm, 10 Hz, 15  $\mu$ s πλάτος παλμού, 70-620 παλμοί) και για αποψυγμένα δείγματα γλυκοπατάτας.

Πίνακας 4.4 Ενέργεια ενεργοποίησης  $E_a$  της σταθεράς ρυθμού ξήρανσης  $k$  και συντελεστής συσχέτισης για ανεπεξέργαστα, προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ (1.5 kV/cm, 10 Hz, 15  $\mu$ s πλάτος παλμού, 70-620 παλμοί) και για αποψυγμένα δείγματα γλυκοπατάτας.

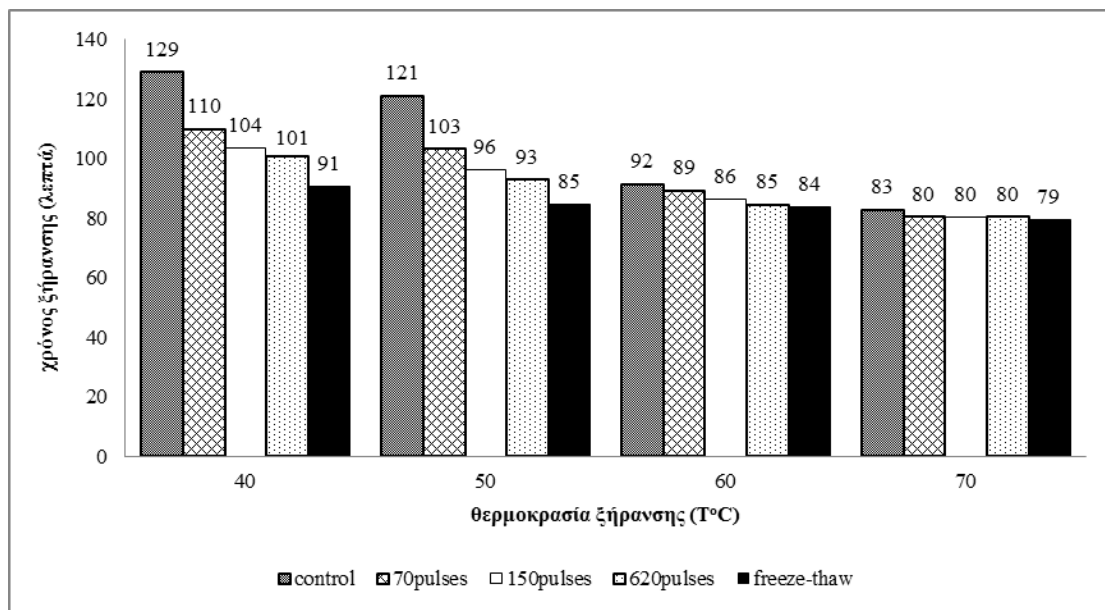
Δείγματα	$E_a$ (kJ/mol)	$R^2$
<b>Ανεπεξέργαστο</b>	14.37	0.9371
<b>70 παλμοί</b>	9.62	0.9754
<b>150 παλμοί</b>	7.78	0.9925
<b>620 παλμοί</b>	6.96	0.9895
<b>Κατεψυγμένο-αποψυγμένο</b>	3.70	0.9302

Μελετώντας τον παραπάνω πίνακα, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η ενέργεια ενεργοποίησης της σταθεράς ρυθμού ξήρανσης  $k$  είναι μικρότερη στα επεξεργασμένα με ΠΗΠ δείγματα από ότι στα ανεπεξέργαστα και ακόμα μικρότερη στα κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα. Επίσης, μεταξύ των συνθηκών ΠΗΠ παρατηρείται ότι πιο έντονη επεξεργασία οδηγεί σε μείωση της ενέργειας ενεργοποίησης  $E_a$ . Η μείωση αυτή της τιμής της  $E_a$  υποδεικνύει ότι η εξάρτηση του ρυθμού ξήρανσης από τη θερμοκρασία γίνεται λιγότερο έντονη. Πιο συγκεκριμένα, σε μια προεπεξεργασία με ΠΗΠ όπου ο δείκτης κυτταρικής διάρρηξης είναι μεγαλύτερος από τα ανεπεξέργαστα δείγματα, ο ίδιος χρόνος ξήρανσης μπορεί να επιτευχθεί σε χαμηλότερη θερμοκρασία.

Στη συνέχεια υπολογίστηκε ο χρόνος ξήρανσης, (Διάγραμμα 4.8) για 20% εναπομένονσα υγρασία, για ανεπεξέργαστα, προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ (1.5 kV/cm, 10 Hz, 15  $\mu$ s πλάτος παλμού, 70-620 παλμοί) και για κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα γλυκοπατάτας. Ο χρόνος ξήρανσης υπολογίστηκε από την εξίσωση 4.1:

$$t_d = -\frac{\ln(\omega)}{k} \quad (4.1)$$

όπου  $k$  είναι η σταθερά του ρυθμού ξήρανσης και  $\omega$  η αδιάστατη υγρασία, η οποία στους υπολογισμούς ήταν σταθερή και ίση με 0.2.



Διάγραμμα 4.8 Χρόνοι ξήρανσης για ανεπεξέργαστα (20% εναπομένονσα υγρασία), προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ (1.5 kV/cm, 10 Hz, 15  $\mu$ s πλάτος παλμού, 70-620 παλμοί) και για κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα γλυκοπατάτας.

Παρατηρώντας το διάγραμμα του χρόνου ξήρανσης δειγμάτων γλυκοπατάτας συναρτήσει της θερμοκρασίας ξήρανσης αρχικά συμπεραίνεται ότι για κάθε θερμοκρασία ξεχωριστά ο χρόνος ξήρανσης των δειγμάτων είναι μειώνεται με αύξηση της έντασης της επεξεργασίας των ΠΗΠ που έχουν υποστεί. Συγκεκριμένα, τα κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα, τα οποία έχουν υποστεί την εντονότερη επεξεργασία (δείκτης κυτταρικής διάρρηξης  $Z=1$ ), εμφανίζουν τους μικρότερους

χρόνους ξήρανσης. Στη συνέχεια, μεταξύ των επεξεργασμένων με ΠΗΠ δειγμάτων, η αύξηση των παλμών (άρα και της έντασης της επεξεργασίας) οδηγεί σε μείωση των χρόνων ξήρανσης. Επιπρόσθετα, τα ανεπεξέργαστα δείγματα εμφανίζουν τους μεγαλύτερους χρόνους ξήρανσης. Για την ίδια επεξεργασία δειγμάτων όσο αυξάνεται η θερμοκρασία ξήρανσης τόσο μειώνεται ο χρόνος ξήρανσης των δειγμάτων γλυκοπατάτας. Τέλος, βρέθηκε ότι τόσο η θερμοκρασία ξήρανσης όσο και η ένταση της προεπεξεργασίας επηρεάζουν σημαντικά το χρόνο ξήρανσης των δειγμάτων γλυκοπατάτας. ( $P < 0.05$ )

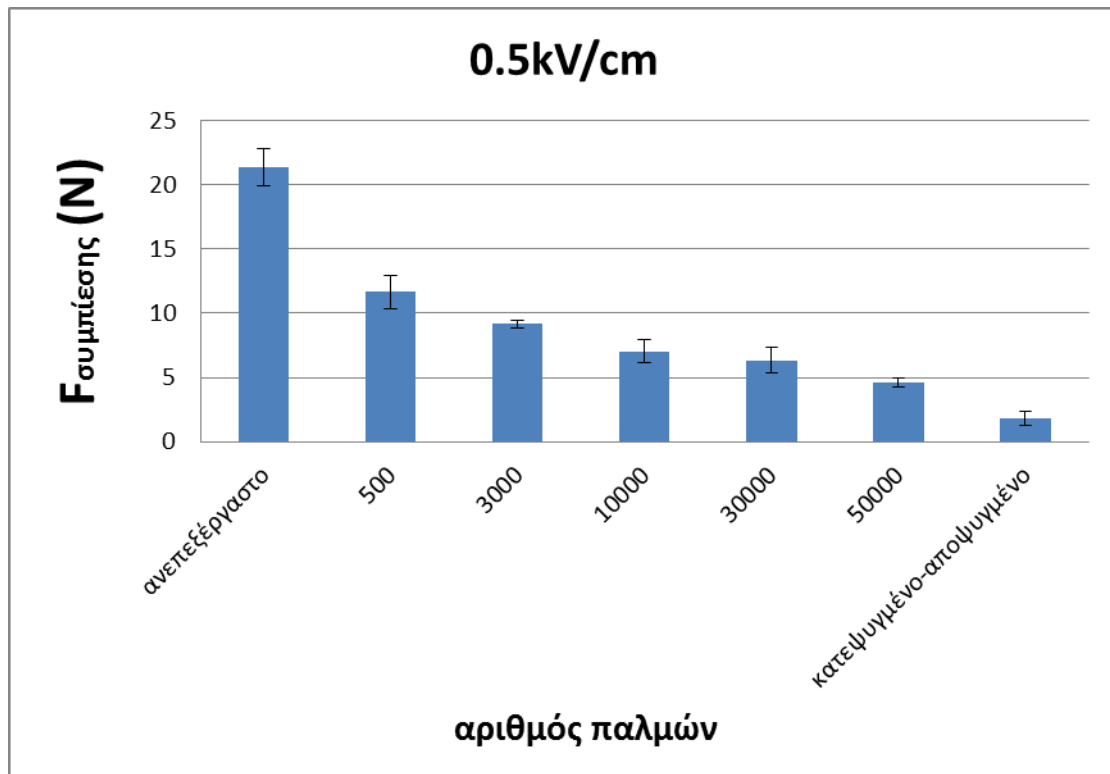
Τα παραπάνω στοιχεία συμφωνούν με αντίστοιχη μελέτη των Ade-Omowaye, Angersbach et al. (2001) για την ξήρανση φυτικών τροφών, στην οποία τα ΠΗΠ οδήγησαν στη μείωση του χρόνου ξήρανσης μεγαλύτερη από 20%.

Όλες οι παραπάνω μετρήσεις και τα αποτελέσματα από την προεπεξεργασία της γλυκοπατάτας με τη μέθοδο των Παλλόμενων Ηλεκτρικών Πεδίων παρουσιάστηκαν στο συνέδριο IUFOST, Δουβλίνο Ιρλανδία, Αύγουστος 21-25, 2016.

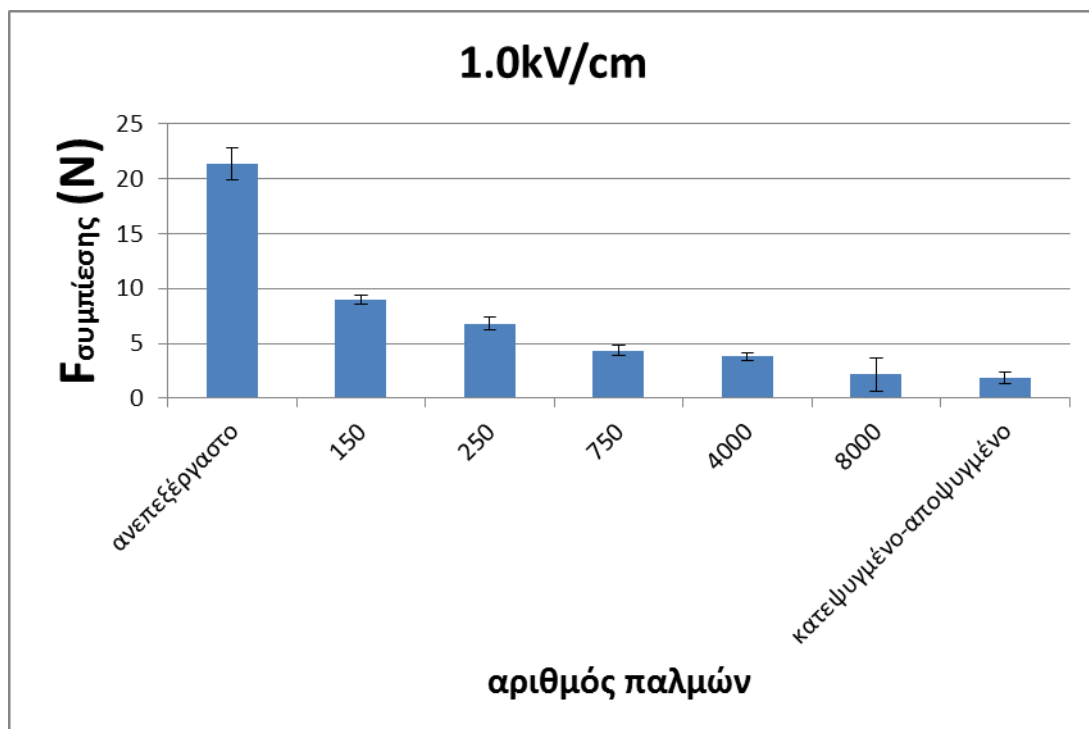
#### ***4.2.3 Επίδραση των Παλλόμενων Ηλεκτρικών Πεδίων στις μηχανικές ιδιότητες της γλυκοπατάτας.***

Για την μελέτη της επίδρασης των ΠΗΠ στις μηχανικές ιδιότητες της γλυκοπατάτας χρησιμοποιήθηκε ο αναλυτής υφής TA-XT2i Stable Microsystems και πραγματοποιήθηκαν τρία τεστ: η δοκιμή συμπίεσης, η δοκιμή δύναμης κοπής και η δοκιμή χαλάρωσης τάσης. Τα τρία αυτά πειράματα πραγματοποιήθηκαν και για τις τρεις διαφορετικές τιμές έντασης ηλεκτρικού πεδίου 0.5 , 1.0 , 1.5 kV/cm σε διάφορους χρόνους επεξεργασίας και συγκρίθηκαν με τα ανεπεξέργαστα και τα κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα.

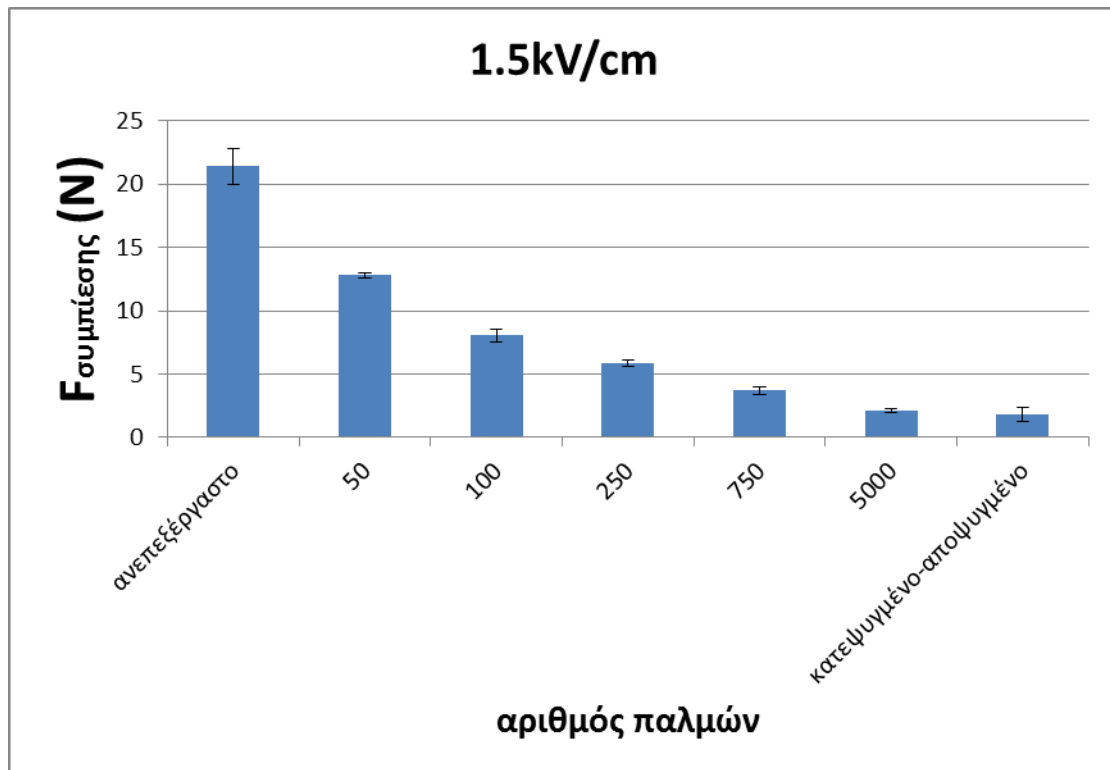
Παρακάτω απεικονίζονται τα τρία διαγράμματα της δοκιμής συμπίεσης, για κάθε τιμή της έντασης ηλεκτρικού πεδίου, που δείχνουν τη σχέση του αριθμού των παλμών με τη δύναμη συμπίεσης F (Διαγράμματα 4.9-4.11).



Διάγραμμα 4.9 Δύναμη συμπίεσης συναρτήσει του αριθμού παλμών για ανεπεξεργαστα, επεξεργασμένα με ΠΗΠ με ένταση ηλεκτρικού πεδίου 0.5 kV/cm σε διαφορετικούς παλμούς (500-50000) και για κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα γλυκοπατάτας.



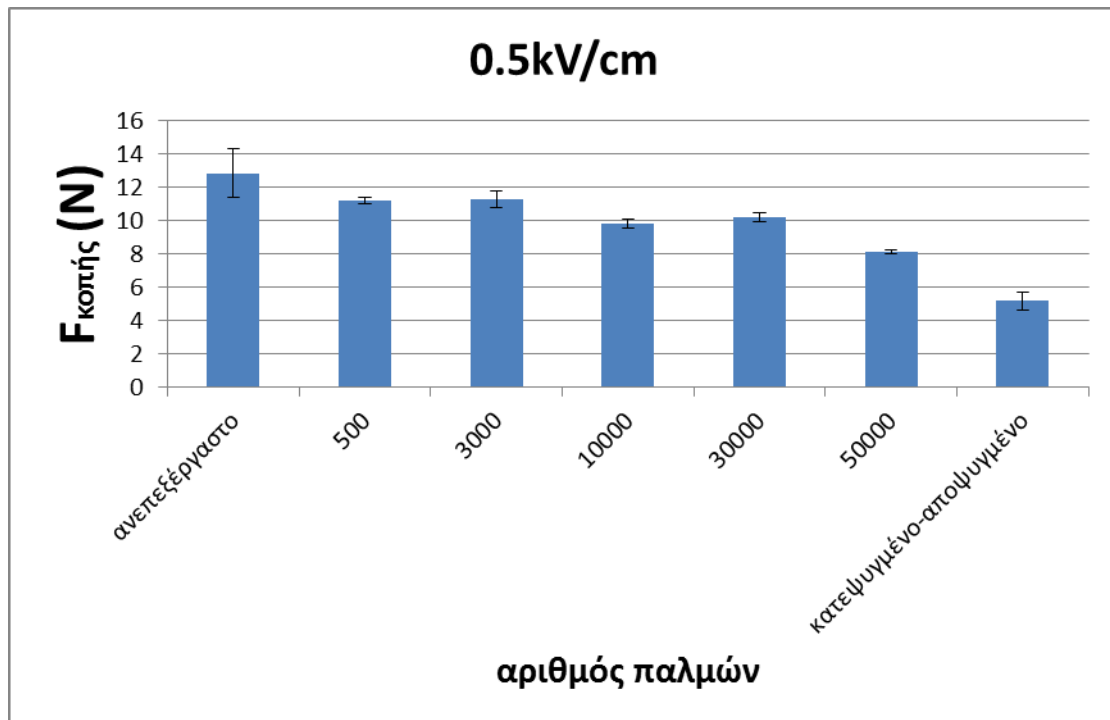
Διάγραμμα 4.10 Δύναμη συμπίεσης συναρτήσει του αριθμού παλμών για ανεπεξεργαστα, επεξεργασμένα με ΠΗΠ με ένταση ηλεκτρικού πεδίου 1.0 kV/cm σε διαφορετικούς παλμούς (150-8000) και για κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα γλυκοπατάτας.



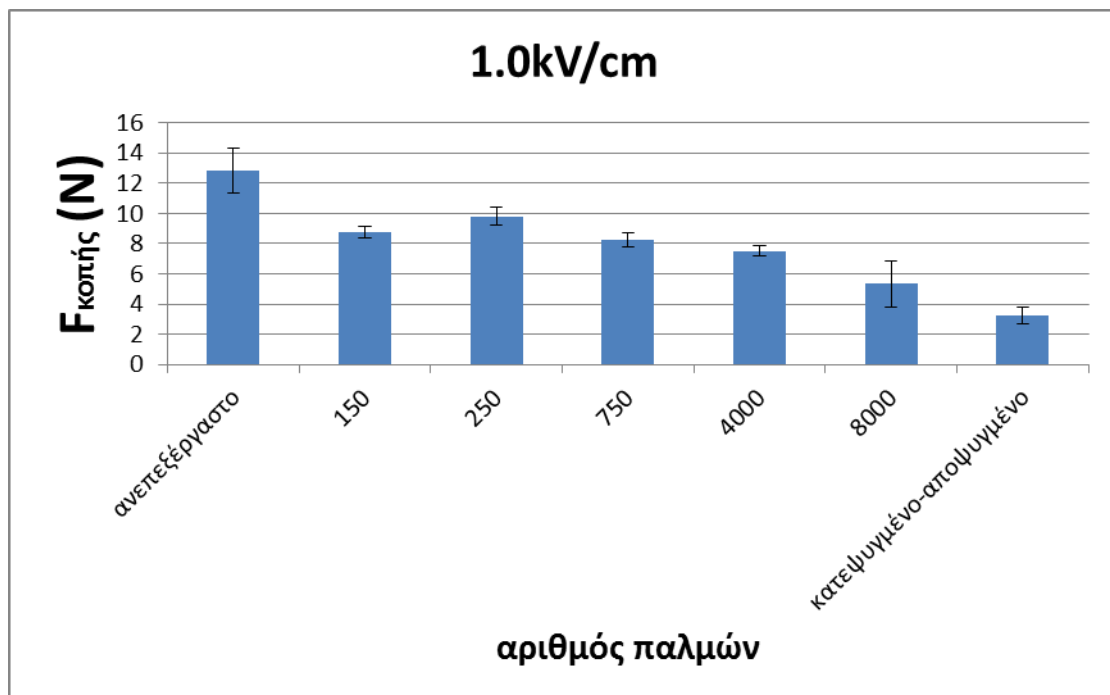
Διάγραμμα 4.11 Δύναμη συμπίεσης συναρτήσει του αριθμού παλμών για ανεπεξεργαστα, επεξεργασμένα με ΠΗΠ με ένταση ηλεκτρικού πεδίου 1.5 kV/cm σε διαφορετικούς παλμούς (50-5000) και για κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα γλυκοπατάτας.

Μελετώντας και τα τρία διαγράμματα, παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των παλμών, η δύναμη συμπίεσης μειώνεται σημαντικά. Με άλλα λόγια, όσο εντείνεται η επεξεργασία των δειγμάτων γλυκοπατάτας, τόσο αυτά μαλακώνουν και έτσι η εφαρμοζόμενη δύναμη συμπίεσης μειώνεται. Αυτό δικαιολογείται από την αύξηση της κυτταρικής διάρρηξης (αύξηση  $Z$ ) που επιφέρει η αύξηση της έντασης της επεξεργασίας των δειγμάτων. Ακόμη, με την αύξηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, ο χρόνος επεξεργασίας με ΠΗΠ που απαιτείται για την επίτευξη μιας συγκεκριμένης δύναμης  $F$  μειώνεται σημαντικά (μείωση παλμών).

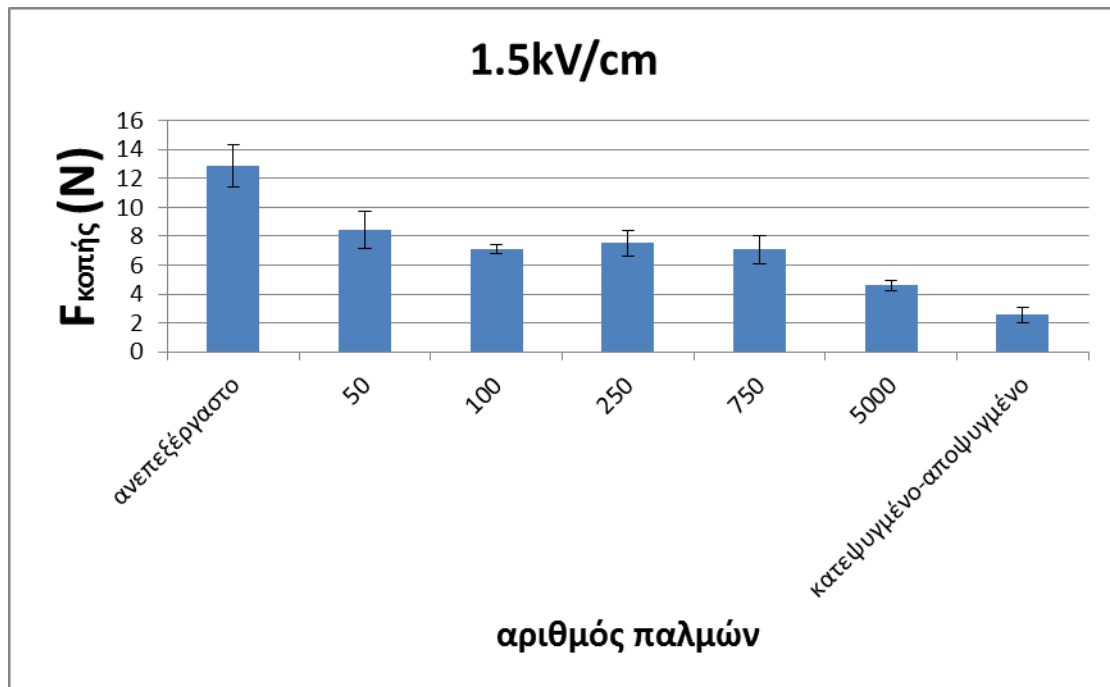
Παρακάτω απεικονίζονται τα τρία διαγράμματα της δοκιμής δύναμης κοπής, για κάθε τιμή της έντασης ηλεκτρικού πεδίου, που δείχνουν τη σχέση του αριθμού παλμών με τη δύναμη συμπίεσης  $F$  (Διαγράμματα 4.12-4.14).



Διάγραμμα 4.12 Δύναμη κοπής συναρτήσει του αριθμού παλμών για ανεπεξέργαστα, επεξεργασμένα με ΠΗΠ με ένταση ηλεκτρικού πεδίου 0.5 kV/cm σε διαφορετικούς παλμούς (500-50000) και για κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα γλυκοπατάτας.



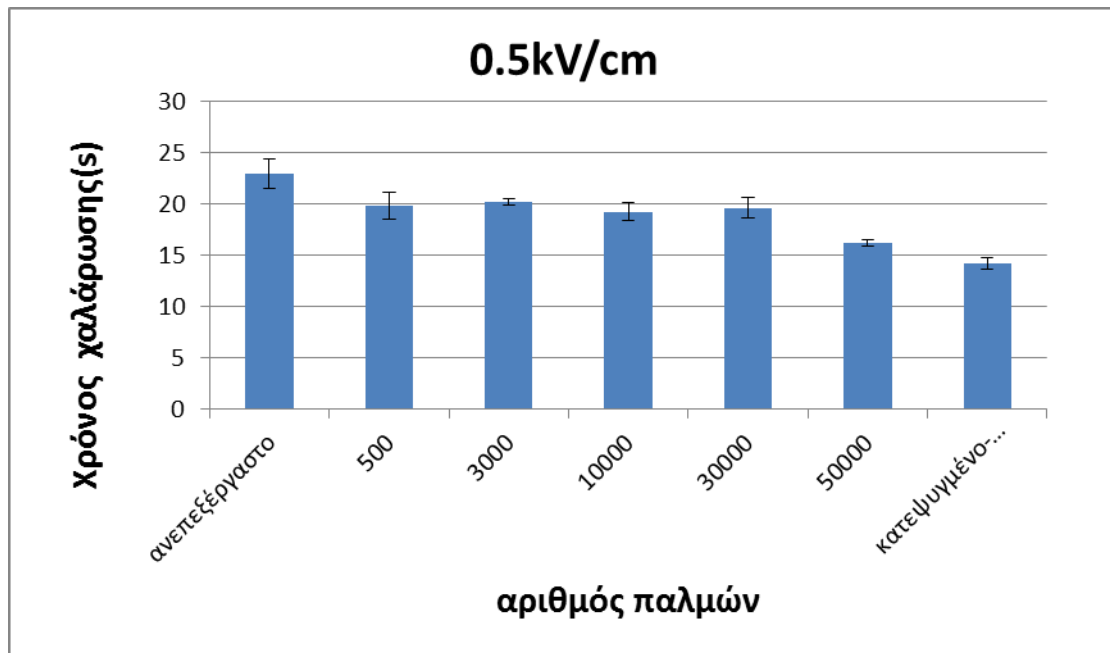
Διάγραμμα 4.13 Δύναμη κοπής συναρτήσει του αριθμού παλμών για ανεπεξέργαστα, επεξεργασμένα με ΠΗΠ με ένταση ηλεκτρικού πεδίου 1.0 kV/cm σε διαφορετικούς παλμούς (150-8000) και για κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα γλυκοπατάτας.



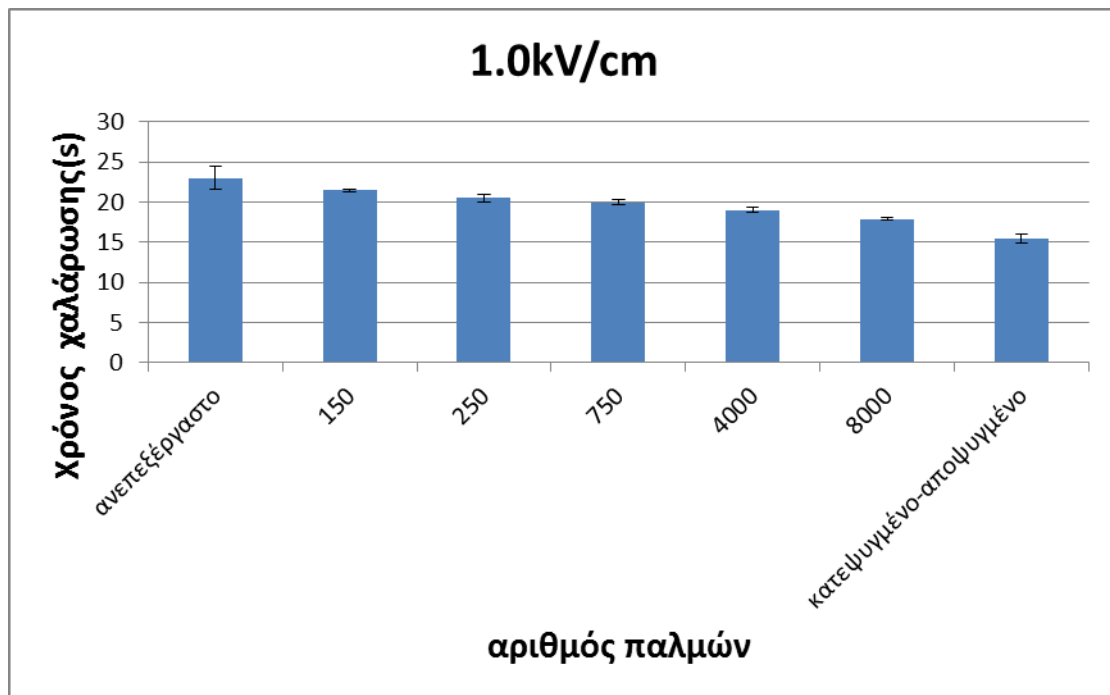
Διάγραμμα 4.14 Δύναμη κοπής συναρτήσει του αριθμού παλμών για ανεπεξεργαστα, επεξεργασμένα με ΠΗΠ με ένταση ηλεκτρικού πεδίου 1.5 kV/cm σε διαφορετικούς παλμούς (50-5000) και για κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα γλυκοπατάτας.

Μελετώντας και τα τρία διαγράμματα, παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των παλμών, η δύναμη κοπής μειώνεται σημαντικά. Με άλλα λόγια, όσο εντείνεται η επεξεργασία των δειγμάτων γλυκοπατάτας, τόσο αυτά μαλακώνουν και έτσι η εφαρμοζόμενη δύναμη κοπής μειώνεται. Αυτό δικαιολογείται από την αύξηση της κυτταρικής διάρρηξης (αύξηση  $Z$ ) που επιφέρει η αύξηση της έντασης της επεξεργασίας των δειγμάτων. Ακόμη, με την αύξηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, ο χρόνος επεξεργασίας με ΠΗΠ που απαιτείται για την επίτευξη μιας συγκεκριμένης δύναμης κοπής  $F$  μειώνεται σημαντικά (μείωση παλμών).

Παρακάτω απεικονίζονται τα τρία διαγράμματα της δοκιμής χαλάρωσης τάσης, για κάθε τιμή της έντασης ηλεκτρικού πεδίου, που δείχνουν τη σχέση του αριθμού παλμών με το χρόνο χαλάρωσης (Διαγράμματα 4.15-4.17). Από το μοντέλο Maxwell παρουσιάζεται μόνο ο πρώτος χρόνος χαλάρωσης  $\tau_1$  καθώς ο δεύτερος  $\tau_2$  δεν συνεισφέρει σημαντικά στο μοντέλο.

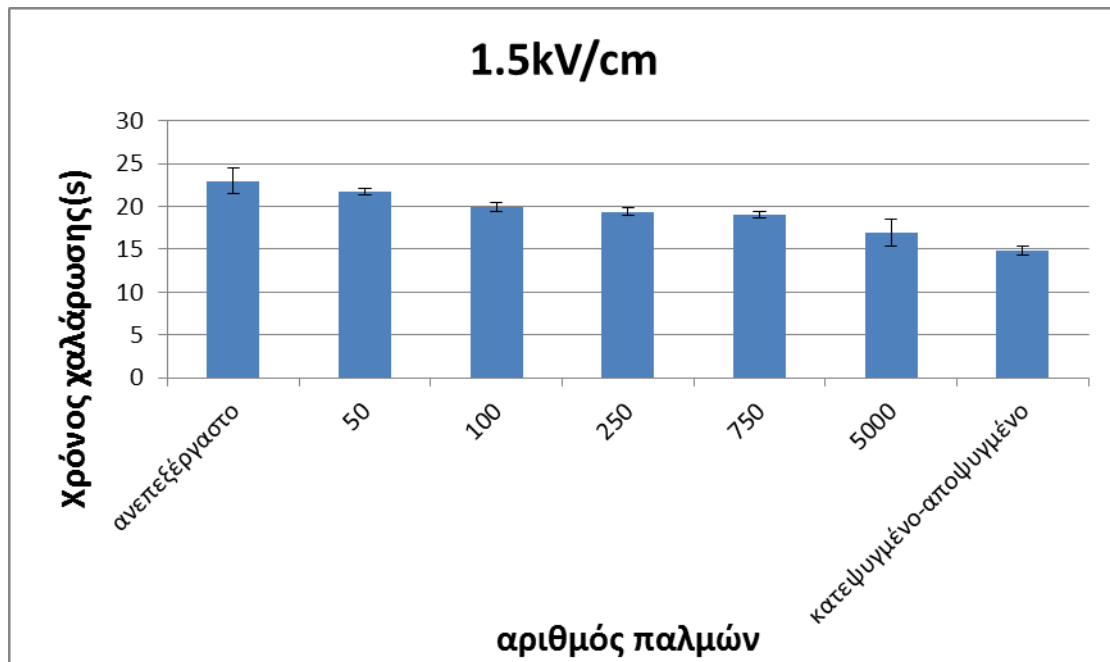


Διάγραμμα 4.15 Χρόνος χαλάρωσης συναρτήσει του αριθμού παλμών για ανεπεξέργαστα, επεξεργασμένα με ΠΗΠ με ένταση ηλεκτρικού πεδίου 0.5 kV/cm σε διαφορετικούς παλμούς (500-50000) και για κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα γλυκοπατάτας.



Διάγραμμα 4.16 Χρόνος χαλάρωσης συναρτήσει του αριθμού παλμών για ανεπεξέργαστα, επεξεργασμένα με ΠΗΠ με ένταση ηλεκτρικού πεδίου 1.0 kV/cm σε διαφορετικούς παλμούς (150-8000) και για κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα γλυκοπατάτας.





Διάγραμμα 4.17 Χρόνος χαλάρωσης συναρτήσει του αριθμού παλμών για ανεπεξεργαστα, επεξεργασμένα με ΠΗΠ με ένταση ηλεκτρικού πεδίου 1.5 kV/cm σε διαφορετικούς παλμούς (50-5000) και για κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα γλυκοπατάτας.

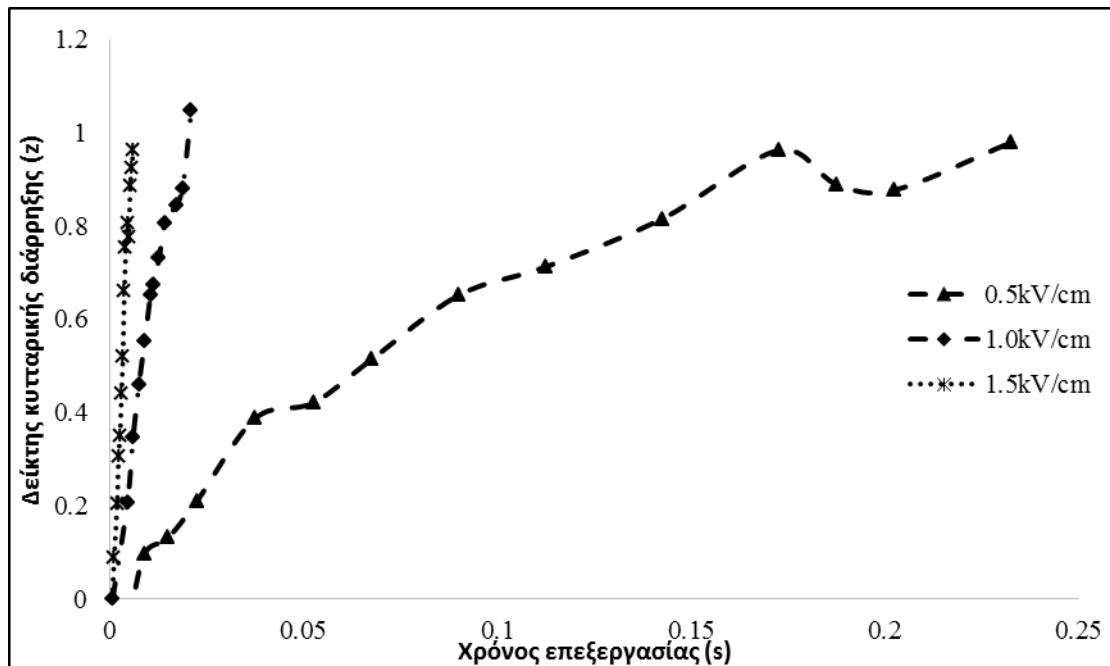
Μελετώντας και τα τρία διαγράμματα, παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των παλμών, ο χρόνος χαλάρωσης μειώνεται σημαντικά. Με άλλα λόγια, όσο εντείνεται η επεξεργασία των δειγμάτων γλυκοπατάτας, τόσο αυτά μαλακώνουν και έτσι η εφαρμοζόμενη τάση χαλαρώνει σε μικρότερο χρόνο. Αυτό δικαιολογείται από την αύξηση της κυτταρικής διάρρηξης (αύξηση  $Z$ ) που επιφέρει η αύξηση της έντασης της επεξεργασίας των δειγμάτων.

Τέλος, βρέθηκε ότι υπάρχει μεγάλη συσχέτιση της δύναμης συμπίεσης, της δύναμης κοπής και του χρόνου χαλάρωσης με το δείκτη κυτταρικής διάρρηξης  $Z$  και για τις τρεις τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, στα δείγματα γλυκοπατάτας. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι όσο αυξάνεται ο  $Z$  τόσο αλλοιώνονται οι ιδιότητες αυτές, καθώς οι δυνάμεις συμπίεσης και κοπής και ο χρόνος χαλάρωσης μειώνονται σημαντικά. Ενδεικτικά για την τιμή της έντασης των 1.5 kV/cm οι συντελεστές συσχέτισης μεταξύ της δύναμης συμπίεσης και του  $Z$ , της δύναμης κοπής και του  $Z$ , του χρόνου χαλάρωσης και του  $Z$  βρέθηκαν ίσοι με -0.95, -0.83, -0.99 αντίστοιχα.

### 4.3 Μελέτη της επίδρασης των Παλλόμενων Ηλεκτρικών Πεδίων στην κινητική της ξήρανσης και στις μηχανικές ιδιότητες του παντζαριού.

#### 4.3.1 Δείκτης κυτταρικής διάρρηξης ( $z$ ) στο παντζάρι.

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα του δείκτη κυτταρικής διάρρηξης ( $Z$ ) σε δείγματα πατζαριού σε διαφορετικά έντασης ηλεκτρικά πεδία (Διάγραμμα 4.18).



Διάγραμμα 4.18 Δείκτης κυτταρικής διάρρηξης (z) για διάφορους χρόνους επεξεργασίας των δειγμάτων παντζαριού σε τρεις διαφορετικές εντάσεις ηλεκτρικού πεδίου (0.5 kV/cm, 1.0 kV/cm, 1.5 kV/cm).

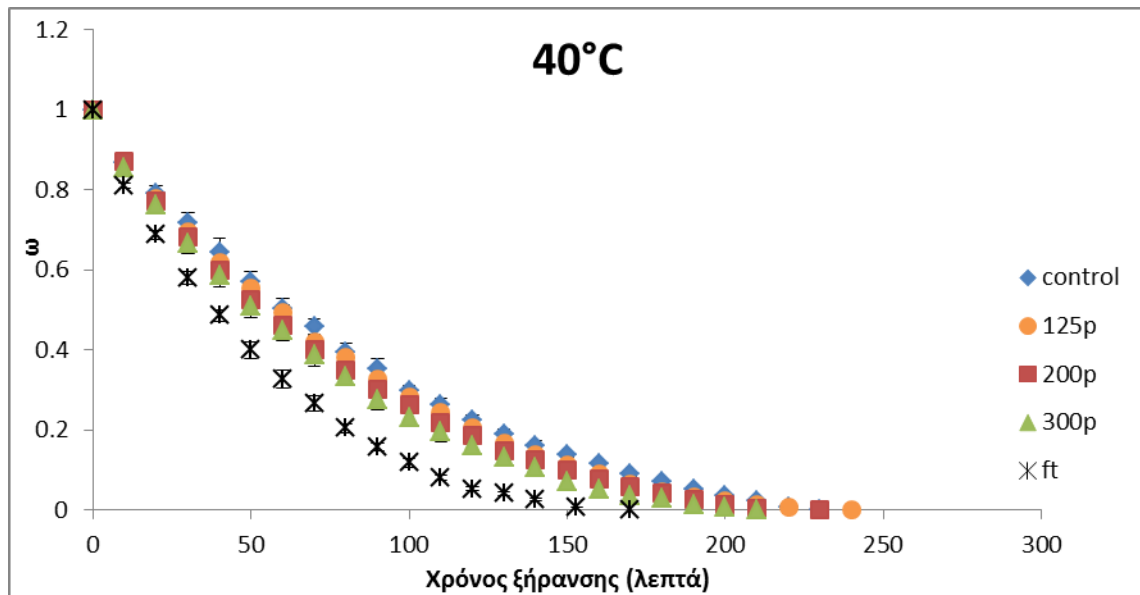
Παρατηρείται ότι, για κάθε τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, σε μικρούς χρόνους επεξεργασίας υπάρχει σημαντική αύξηση του δείκτη κυτταρικής διάρρηξης Z ενώ σε μεγαλύτερους χρόνους εμφανίζεται μικρότερη αύξηση του Z μέχρις ότου να πάρει την τιμή 1.

Γίνεται εύκολα αντιληπτό επίσης ότι όσο μεγαλώνει το ηλεκτρικό πεδίο, ο δείκτης κυτταρικής διάρρηξης αυξάνεται πιο γρήγορα σε σχέση με το χρόνο επεξεργασίας.

Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων του υπολογισμού της κινητικής ξήρανσης επιλέχθηκε η συνθήκη έντασης ηλεκτρικού πεδίου 1.5 kV/cm και οι κατάλληλοι παλμοί ώστε να καλύπτεται όλο το εύρος των τιμών του δείκτη κυτταρικής διάρρηξης Z από το 0 έως το 1.

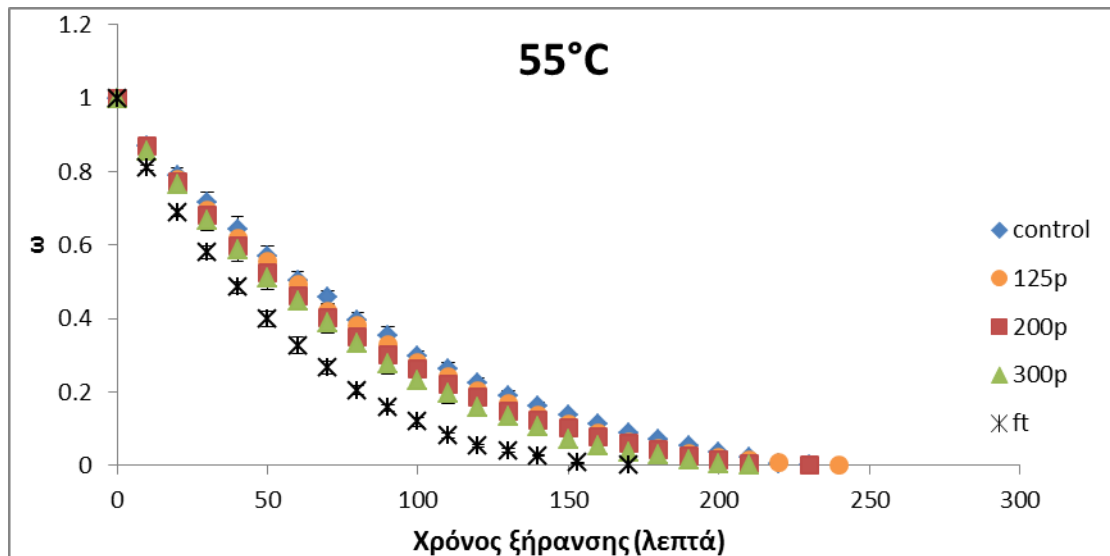
#### 4.3.2 Επίδραση των Παλλόμενων Ηλεκτρικών Πεδίων στις καμπύλες ξήρανσης του παντζαριού.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι καμπύλες ξήρανσης παντζαριού σε θερμοκρασίες από 40 έως 70°C για ανεπεξέργαστα, προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ (1.5 kV/cm, 10 Hz, 15 μs πλάτος παλμού, 125-300 παλμοί) και αποψυγμένα δείγματα. (Διαγράμματα 4.19-4.21).



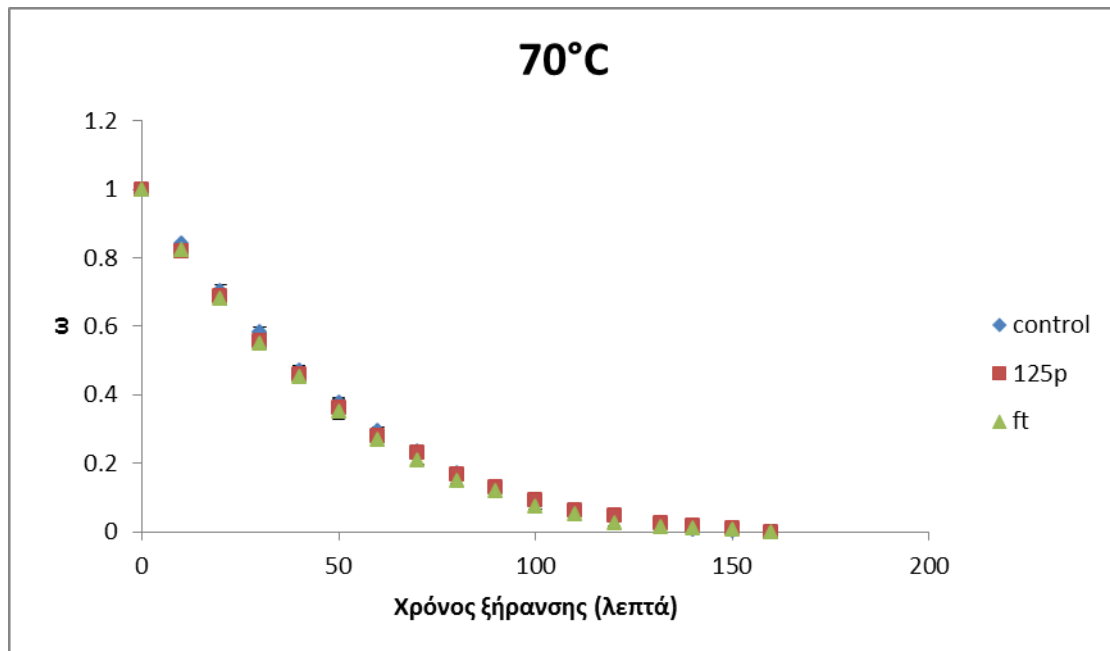
Διάγραμμα 4.19 Καμπύλες ξήρανσης στους 40°C για ανεπεξεργαστα, προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ (1.5 kV/cm, 10 Hz, 15 μs πλάτος παλμού, 125-300 παλμοί) και για αποψυγμένα δείγματα παντζαριού.

Παρατηρείται ότι στην θερμοκρασία των 40°C, ο ρυθμός ξήρανσης των κατεψυγμένων-αποψυγμένων δειγμάτων είναι σημαντικά μεγαλύτερος από τον ρυθμό των προεπεξεργασμένων με ΠΗΠ δειγμάτων και αυτός με τη σειρά του μεγαλύτερος από το ρυθμό των ανεπεξεργαστων δειγμάτων. Επιπλέον, μεταξύ των προεπεξεργασμένων με ΠΗΠ δειγμάτων, η εντονότερη επεξεργασία (περισσότεροι παλμοί) οδηγεί σε σημαντικά μεγαλύτερο ρυθμό ξήρανσης. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι εντονότερη επεξεργασία ΠΗΠ οδηγεί σε εντονότερη ηλεκτροδιάτρηση, με αποτέλεσμα να ενισχύεται ο ρυθμός μεταφοράς μάζας από και προς τα δείγματα παντζαριού.



Διάγραμμα 4.20 Καμπύλες ξήρανσης στους 55°C για ανεπεξεργαστα, προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ (1.5 kV/cm, 10 Hz, 15 μs πλάτος παλμού, 125-300 παλμοί) και για αποψυγμένα δείγματα παντζαριού.

Παρατηρείται ότι και στην θερμοκρασία των 55°C, ο ρυθμός ξήρανσης των κατεψυγμένων-αποψυγμένων δειγμάτων είναι σημαντικά μεγαλύτερος από τον ρυθμό των προεπεξεργασμένων με ΠΗΠ δειγμάτων και αυτός με τη σειρά του σημαντικά μεγαλύτερος από το ρυθμό των ανεπεξεργαστων δειγμάτων. Επιπλέον, μεταξύ των προεπεξεργασμένων με ΠΗΠ δειγμάτων είναι εμφανές ότι η εντονότερη επεξεργασία (περισσότεροι παλμοί) οδηγεί σε γρηγορότερη ξήρανση. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι εντονότερη επεξεργασία ΠΗΠ σημαίνει μεγαλύτερο δείκτη Z, με αποτέλεσμα να ενισχύεται ο ρυθμός μεταφοράς μάζας από και προς τα δείγματα παντζαριού.



Διάγραμμα 4.21 Καμπύλες ξήρανσης στους 70°C για ανεπεξεργαστα, προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ (1.5 kV/cm, 10 Hz, 15 μs πλάτος παλμού, 125 παλμοί) και για αποψυγμένα δείγματα παντζαριού.

Στην θερμοκρασία των 70°C δεν παρατηρούνται διαφορές μεταξύ των ανεπεξεργαστων, των προεπεξεργασμένων με ΠΗΠ (1.5 kV/cm, 10 Hz, 15 μs πλάτος παλμού, 125 παλμοί) και των κατεψυγμένων-αποψυγμένων δειγμάτων.

Συμπερασματικά, οι ρυθμοί ξήρανσης επηρεάστηκαν σημαντικά από την κατεργασία με ΠΗΠ, γεγονός που συμφωνεί με τα αποτελέσματα της μελέτης των Gachovska et al. (2008), στην οποία κατά την ξήρανση καρότου οι ρυθμοί ξήρανσης των δειγμάτων επηρεάστηκαν επίσης σημαντικά από τα ΠΗΠ.

Παρατηρείται ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας εμφανίζονται μικρότερες διαφορές μεταξύ των δειγμάτων. Συγκεκριμένα στους 40°C και τους 55°C παρατηρούνται σημαντικές διαφορές μεταξύ των διαφορετικών συνθηκών ΠΗΠ ενώ στους 70°C δεν συμβαίνει το ίδιο.

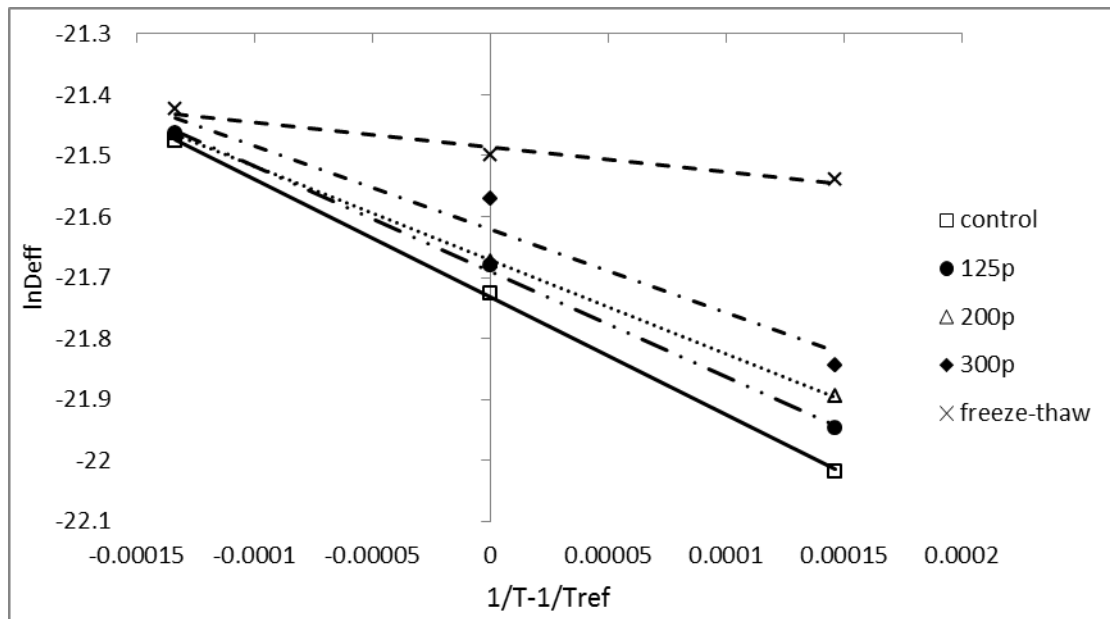
Παρακάτω παρουσιάζονται οι φαινόμενοι συντελεστές διάχυσης  $D_{eff}$  από τον 2ο νόμο του Fick (Πίνακας 4.5) και οι ενέργειες ενεργοποίησης  $E_a$  (Πίνακας 4.6) από τον νόμο του Arrhenius για τα ανεπεξεργαστα, προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ (1.5 kV/cm, 10 Hz, 15 μs πλάτος παλμού, 125-300 παλμοί) και για τα αποψυγμένα δείγματα παντζαριού για όλες τις θερμοκρασίες ξήρανσης (40-70°C).

Πίνακας 4.5 Φαινόμενοι συντελεστές διάχυσης  $D_{\text{eff}}$  και οι ενέργειες ενεργοποίησης  $E_a$  για τα ανεπεξέργαστα, προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ (1.5 kV/cm, 10Hz, 15 μs πλάτος παλμού, 125-300 παλμοί) και για τα αποψυγμένα δείγματα παντζαριού για όλες τις θερμοκρασίες ξήρανσης (40-70°C).

$D_{\text{eff}}(\text{m}^2/\text{s})$ .Θερμοκρασία Ξήρανσης (°C)			
Δείγματα	40°C	55°C	70°C
<b>Ανεπεξέργαστο</b>	$2.74 \cdot 10^{-10} \pm 2.15 \cdot 10^{-11}$	$3.67 \cdot 10^{-10} \pm 2.96 \cdot 10^{-11}$	$4.71 \cdot 10^{-10} \pm 4.78 \cdot 10^{-11}$
<b>125 παλμοί</b>	$2.94 \cdot 10^{-10} \pm 2.27 \cdot 10^{-11}$	$3.84 \cdot 10^{-10} \pm 3.25 \cdot 10^{-11}$	$4.77 \cdot 10^{-10} \pm 4.13 \cdot 10^{-11}$
<b>200 παλμοί</b>	$3.10 \cdot 10^{-10} \pm 2.33 \cdot 10^{-11}$	$3.86 \cdot 10^{-10} \pm 3.14 \cdot 10^{-11}$	$4.77 \cdot 10^{-10} \pm 4.63 \cdot 10^{-11}$
<b>300 παλμοί</b>	$3.26 \cdot 10^{-10} \pm 2.59 \cdot 10^{-11}$	$4.28 \cdot 10^{-10} \pm 4.01 \cdot 10^{-11}$	$4.77 \cdot 10^{-10} \pm 4.82 \cdot 10^{-11}$
<b>Κατεψυγμένο-αποψυγμένο</b>	$4.43 \cdot 10^{-10} \pm 3.60 \cdot 10^{-11}$	$4.60 \cdot 10^{-10} \pm 2.88 \cdot 10^{-11}$	$4.96 \cdot 10^{-10} \pm 4.56 \cdot 10^{-11}$

Παρατηρείται ότι ο φαινόμενος συντελεστής διάχυσης  $D_{\text{eff}}$  του παντζαριού για την ίδια θερμοκρασία είναι μεγαλύτερος στα επεξεργασμένα με ΠΗΠ δείγματα από ότι στα ανεπεξέργαστα. Επίσης, ακόμα μεγαλύτερες τιμές λαμβάνει στα κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα. Όσο πιο έντονη είναι η συνθήκη ΠΗΠ τόσο μεγαλύτερος είναι και ο συντελεστής διάχυσης. Τα παραπάνω παρατηρούνται σε όλες τις θερμοκρασίες εκτός των 70°C, όπου ο συντελεστής διάχυσης δεν μεταβάλλεται ανεξαρτήτως επεξεργασίας των δειγμάτων.

Για όλα τα δείγματα που έχουν υποστεί την ίδια επεξεργασία, ο φαινόμενος συντελεστής διάχυσης παρουσιάζει σημαντική αύξηση με αύξηση της θερμοκρασίας ξήρανσης.



Διάγραμμα 4.22 Διάγραμμα Arrhenius για ανεπεξέργαστα, προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ (1.5 kV/cm, 10 Hz, 15  $\mu$ s πλάτος παλμού, 125-300 παλμοί) και για αποψυγμένα δείγματα παντζαριού.

Πίνακας 4.6 Ενέργεια ενεργοποίησης  $E_a$  του φαινομένου συντελεστή διάχυσης  $D_{eff}$  και συντελεστής συσχέτισης για ανεπεξέργαστα, προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ (1.5 kV/cm, 10 Hz, 15  $\mu$ s πλάτος παλμού, 125-300 παλμοί) και για αποψυγμένα δείγματα παντζαριού.

Δείγματα	$E_a$ (kJ/mol)	$R^2$
<b>Ανεπεξέργαστο</b>	16.10	0.9997
<b>125 παλμοί</b>	14.38	0.9989
<b>200 παλμοί</b>	12.84	0.9999
<b>300 παλμοί</b>	11.37	0.9533
<b>Κατεψυγμένο-αποψυγμένο</b>	3.39	0.9589

Μελετώντας τον παραπάνω πίνακα, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η ενέργεια ενεργοποίησης του φαινομένου συντελεστή διάχυσης  $D_{eff}$  είναι σημαντικά μικρότερη στα επεξεργασμένα με ΠΗΠ δείγματα από ότι στα ανεπεξέργαστα και ακόμα μικρότερη στα κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα. Επίσης, μεταξύ των συνθηκών ΠΗΠ παρατηρείται ότι πιο έντονη επεξεργασία οδηγεί σε μείωση της ενέργειας ενεργοποίησης  $E_a$ . Η μείωση αυτή της τιμής της  $E_a$  υποδεικνύει ότι η εξάρτηση του ρυθμού ξήρανσης από τη θερμοκρασία γίνεται λιγότερο έντονη όσο αυξάνεται η ένταση της επεξεργασίας με ΠΗΠ. Πιο συγκεκριμένα, σε μια προεπεξεργασία με ΠΗΠ όπου ο δείκτης κυτταρικής διάρρηξης είναι μεγαλύτερος από τα ανεπεξέργαστα δείγματα, ο ίδιος χρόνος ξήρανσης μπορεί να επιτευχθεί σε χαμηλότερη θερμοκρασία. Για παράδειγμα, οι Shynkaryk et al. (2008), στην ξήρανση παντζαριού

στις θερμοκρασίες 30-100°C, ανέφεραν ότι η προεπεξεργασία με ΠΗΠ επέτρεψε τη μείωση της θερμοκρασίας ξήρανσης κατά 20-25°C.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι σταθερές ρυθμού ξήρανσης από το εκθετικό μοντέλο 1<sup>ης</sup> τάξης (Πίνακας 4.7) και οι ενέργειες ενεργοποίησης  $E_a$  (Πίνακας 4.8) από τον νόμο του Arrhenius για τα ανεπεξέργαστα, προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ (1.5 kV/cm, 10 Hz, 15 μs πλάτος παλμού, 125-300 παλμοί) και για τα αποψυγμένα δείγματα παντζαριού για όλες τις θερμοκρασίες ξήρανσης (40-70°C).

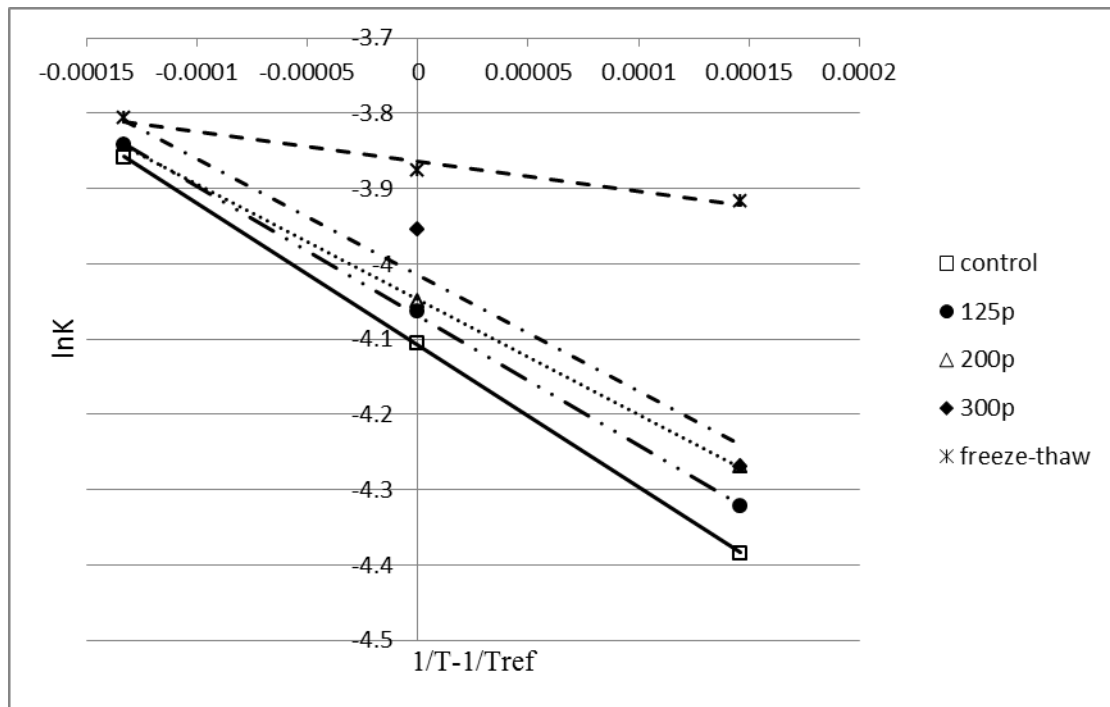
Πίνακας 4.7 Σταθερές ρυθμού ξήρανσης για τα ανεπεξέργαστα, προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ (1.5kV/cm, 10Hz, 15μs πλάτος παλμού, 125-300 παλμοί) και για τα αποψυγμένα δείγματα παντζαριού για όλες τις θερμοκρασίες ξήρανσης (40-70°C).

<b>k (min<sup>-1</sup>). Θερμοκρασία ξήρανσης (°C)</b>			
<b>Δείγματα</b>	<b>40°C</b>	<b>55°C</b>	<b>70°C</b>
<b>Ανεπεξέργαστο</b>	0.0125±0.0004	0.0165±0.0005	0.0211±0.0009
<b>125 παλμοί</b>	0.0133±0.0005	0.0172±0.0006	0.0214±0.0007
<b>200 παλμοί</b>	0.0140±0.0004	0.0174±0.0005	0.0214±0.0007
<b>300 παλμοί</b>	0.0140±0.0005	0.0192±0.0008	0.0214±0.0008
<b>Κατεψυγμένο-αποψυγμένο</b>	0.0199±0.0007	0.0207±0.0007	0.0222±0.0008

Παρατηρείται ότι η σταθερά του ρυθμού ξήρανσης  $k$  παρουσιάζει τις αντίστοιχες μεταβολές με τον συντελεστή διάχυσης  $D_{eff}$  του παντζαριού. Επομένως, η σταθερά του ρυθμού ξήρανσης  $k$  του παντζαριού για την ίδια θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη στα επεξεργασμένα με ΠΗΠ δείγματα από ότι στα ανεπεξέργαστα. Επίσης, ακόμα μεγαλύτερες τιμές λαμβάνει στα κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα. Όσο πιο έντονη είναι η συνθήκη ΠΗΠ τόσο μεγαλύτερη είναι και η σταθερά του ρυθμού ξήρανσης. Τα παραπάνω παρατηρούνται σε όλες τις θερμοκρασίες εκτός των 70°C, όπου ο συντελεστής διάχυσης δεν μεταβάλλεται σημαντικά, ανεξαρτήτως επεξεργασίας των δειγμάτων.

Για όλα τα δείγματα που έχουν υποστεί την ίδια επεξεργασία, η σταθερά του ρυθμού ξήρανσης παρουσιάζει σημαντική αύξηση με αύξηση της θερμοκρασίας ξήρανσης.





Διάγραμμα 4.23 Διάγραμμα Arrhenius για ανεπεξεργαστα, προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ (1.5 kV/cm, 10 Hz, 15 μs πλάτος παλμού, 125-300 παλμοί) και για αποψυγμένα δείγματα παντζαριού.

Πίνακας 4.8 Ενέργεια ενεργοποίησης  $E_a$  της σταθεράς ρυθμού ξήρανσης  $k$  και συντελεστής συσχέτισης για ανεπεξεργαστα, προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ (1.5 kV/cm, 10 Hz, 15 μs πλάτος παλμού, 125-300 παλμοί) και για αποψυγμένα δείγματα παντζαριού.

Δείγματα	$E_a$ (kJ/mol)	$R^2$
<b>Ανεπεξεργαστο</b>	15.66	0.9999
<b>125 παλμοί</b>	14.28	0.9996
<b>200 παλμοί</b>	12.69	0.9999
<b>300 παλμοί</b>	12.79	0.9421
<b>Κατεψυγμένο-αποψυγμένο</b>	3.28	0.9675

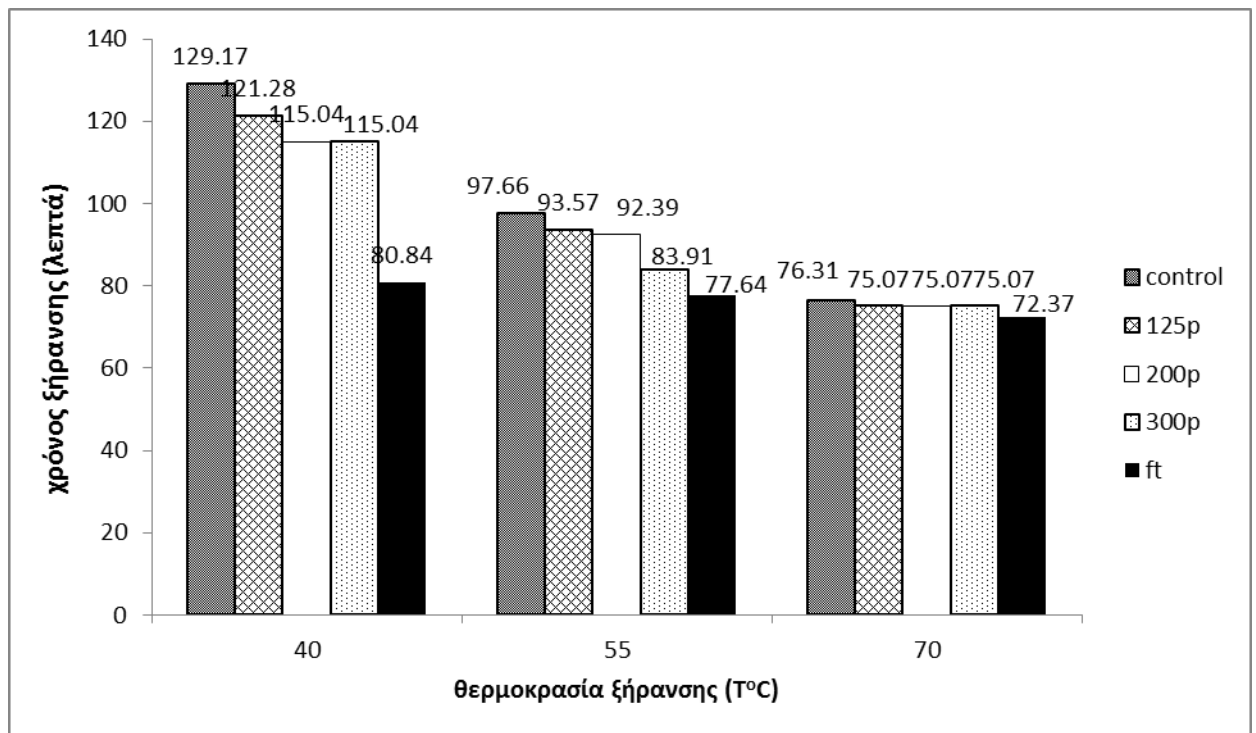
Μελετώντας τον παραπάνω πίνακα, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η ενέργεια ενεργοποίησης της σταθεράς ρυθμού ξήρανσης  $k$  είναι μικρότερη στα επεξεργασμένα με ΠΗΠ δείγματα από ότι στα ανεπεξεργαστα και ακόμα μικρότερη στα κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα. Επίσης, μεταξύ των συνθηκών ΠΗΠ παρατηρείται ότι πιο έντονη επεξεργασία οδηγεί σε μείωση της ενέργειας ενεργοποίησης  $E_a$ . Η μείωση αυτή της τιμής της  $E_a$  υποδεικνύει ότι η εξάρτηση του ρυθμού ξήρανσης από τη θερμοκρασία γίνεται λιγότερο έντονη. Πιο συγκεκριμένα, σε μια προεπεξεργασία με ΠΗΠ όπου ο δείκτης κυτταρικής διάρρηξης είναι

μεγαλύτερος από τα ανεπεξέργαστα δείγματα, ο ίδιος χρόνος ξήρανσης μπορεί να επιτευχθεί σε χαμηλότερη θερμοκρασία.

Στη συνέχεια υπολογίστηκε ο χρόνος ξήρανσης (Διάγραμμα 4.24), για 20% εναπομένουσα υγρασία, για ανεπεξέργαστα, προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ (1.5 kV/cm, 10 Hz, 15 μs πλάτος παλμού, 125-300 παλμοί) και για κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα παντζαριού. Ο χρόνος ξήρανσης υπολογίστηκε από την εξίσωση 4.2 :

$$t_d = -\frac{\ln(\omega)}{k} \quad (4.2)$$

όπου k είναι η σταθερά του ρυθμού ξήρανσης και ω η αδιάστατη υγρασία, η οποία στους υπολογισμούς ήταν σταθερή και ίση με 0.2.



Διάγραμμα 4.24 Χρόνοι ξήρανσης για ανεπεξέργαστα (20% εναπομένουσα υγρασία), προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ (1.5 kV/cm, 10 Hz, 15 μs πλάτος παλμού, 70-620 παλμοί) και για αποψυγμένα δείγματα παντζαριού.

Παρατηρώντας το διάγραμμα του χρόνου ξήρανσης δειγμάτων παντζαριού συναρτήσει της θερμοκρασίας ξήρανσης αρχικά συμπεραίνεται ότι για κάθε θερμοκρασία ξεχωριστά ο χρόνος ξήρανσης των δειγμάτων μειώνεται με αύξηση της έντασης της επεξεργασίας των ΠΗΠ που έχουν υποστεί. Συγκεκριμένα, τα κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα, τα οποία έχουν υποστεί την εντονότερη επεξεργασία (δείκτης κυτταρικής διάρρηξης Z=1), εμφανίζουν τους μικρότερους χρόνους ξήρανσης. Στη συνέχεια, μεταξύ των επεξεργασμένων με ΠΗΠ δειγμάτων, η αύξηση των παλμών (άρα και της έντασης της επεξεργασίας) οδηγεί σε μείωση των χρόνων ξήρανσης. Επιπρόσθετα, τα ανεπεξέργαστα δείγματα εμφανίζουν τους μεγαλύτερους χρόνους ξήρανσης. Για την ίδια επεξεργασία δειγμάτων όσο αυξάνεται η θερμοκρασία ξήρανσης τόσο μειώνεται ο χρόνος ξήρανσης των δειγμάτων

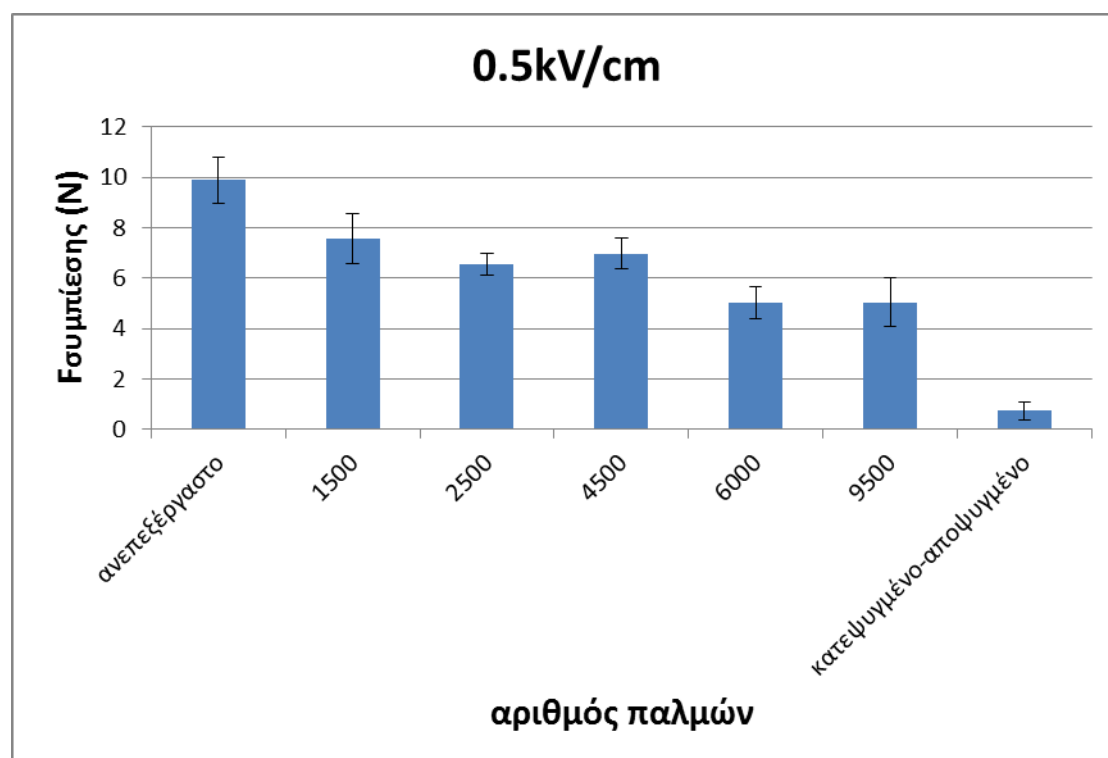
γλυκοπατάτας. Τέλος, βρέθηκε ότι τόσο η θερμοκρασία ξήρανσης όσο και η ένταση της προεπεξεργασίας επηρεάζουν σημαντικά το χρόνο ξήρανσης των δειγμάτων παντζαριού. ( $P < 0.05$ )

Όλα τα παραπάνω στοιχεία συμφωνούν με αντίστοιχη μελέτη των Ade-Omowaye, Angersbach et al. (2001) για την ξήρανση φυτικών τροφών, στην οποία τα ΠΗΠ οδήγησαν στη μείωση του χρόνου ξήρανσης μεγαλύτερη από 20%.

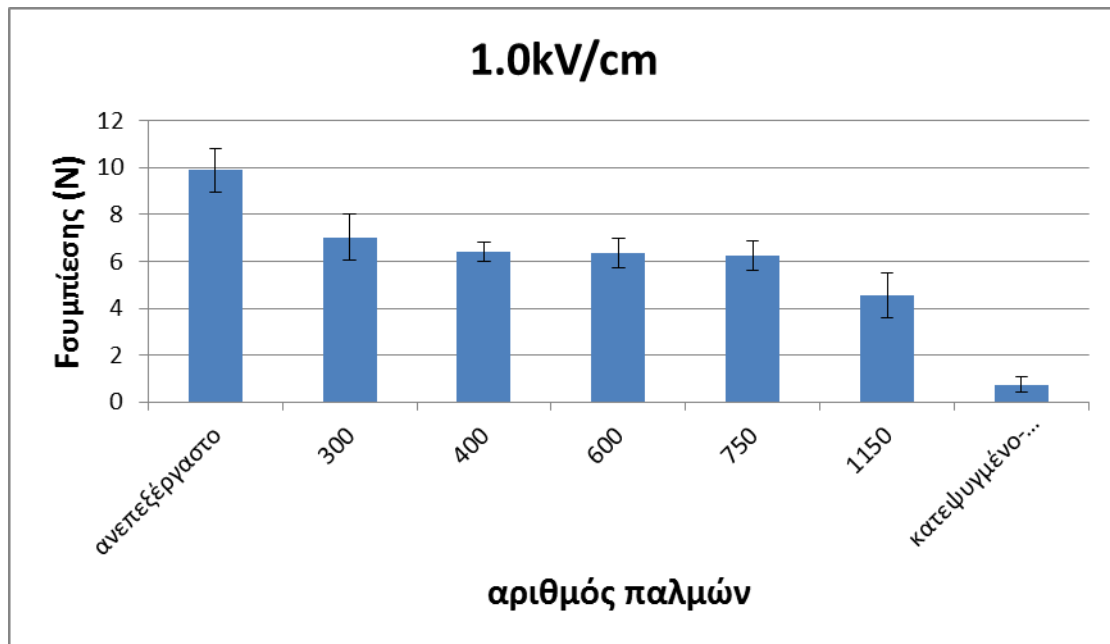
#### 4.3.3 Επίδραση των Παλλόμενων Ηλεκτρικών Πεδίων στις μηχανικές ιδιότητες του παντζαριού.

Για την μελέτη της επίδρασης των ΠΗΠ στις μηχανικές ιδιότητες του παντζαριού χρησιμοποιήθηκε ο αναλυτής υφής TA-XT2i Stable Microsystems και πραγματοποιήθηκαν τρία τεστ: η δοκιμή συμπίεσης, η δοκιμή δύναμης κοπής και η δοκιμή χαλάρωσης τάσης. Τα τρία αυτά πειράματα πραγματοποιήθηκαν και για τις τρεις διαφορετικές τιμές έντασης ηλεκτρικού πεδίου 0.5 , 1 , 1.5 kV/cm σε διάφορους χρόνους επεξεργασίας και συγκρίθηκαν με τα ανεπεξέργαστα και τα κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα.

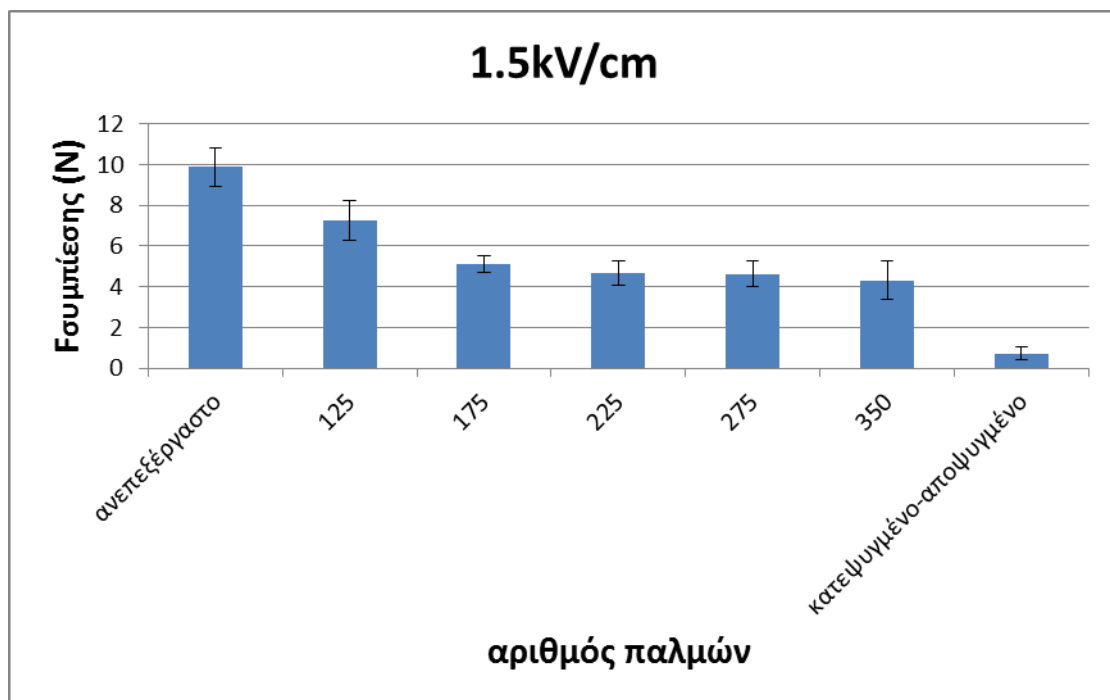
Παρακάτω απεικονίζονται τα τρία διαγράμματα της δοκιμής συμπίεσης, για κάθε τιμή της έντασης ηλεκτρικού πεδίου, που δείχνουν τη σχέση του αριθμού των παλμών με τη δύναμη συμπίεσης F (Διαγράμματα 4.25-4.27)



Διάγραμμα 4.25 Δύναμη συμπίεσης συναρτήσει του αριθμού παλμών για ανεπεξέργαστα, επεξεργασμένα με ΠΗΠ με ένταση ηλεκτρικού πεδίου 0.5 kV/cm σε διαφορετικούς παλμούς (1500-9500) και για κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα παντζαριού.



Διάγραμμα 4.26 Δύναμη συμπίεσης συναρτήσει του αριθμού παλμών για ανεπεξεργαστα, επεξεργασμένα με ΠΗΠ με ένταση ηλεκτρικού πεδίου 1.0 kV/cm σε διαφορετικούς παλμούς (300-1150) και για κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα παντζαριού.

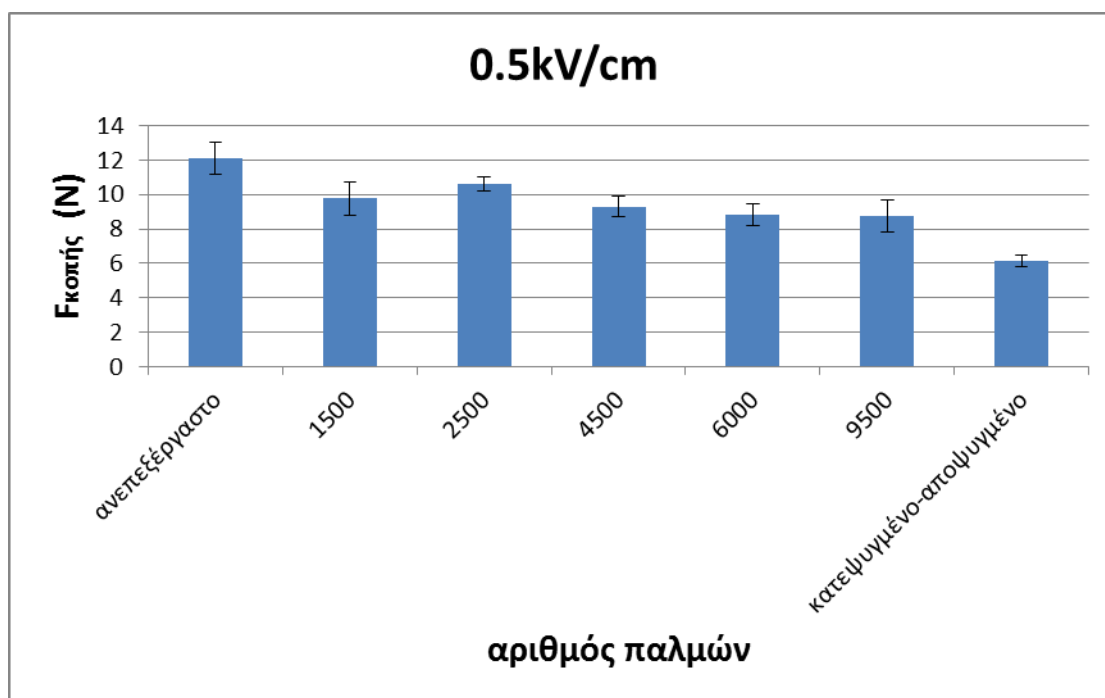


Διάγραμμα 4.27 Δύναμη συμπίεσης συναρτήσει του αριθμού παλμών για ανεπεξεργαστα, επεξεργασμένα με ΠΗΠ με ένταση ηλεκτρικού πεδίου 1.5 kV/cm σε διαφορετικούς παλμούς (125-350) και για κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα παντζαριού.

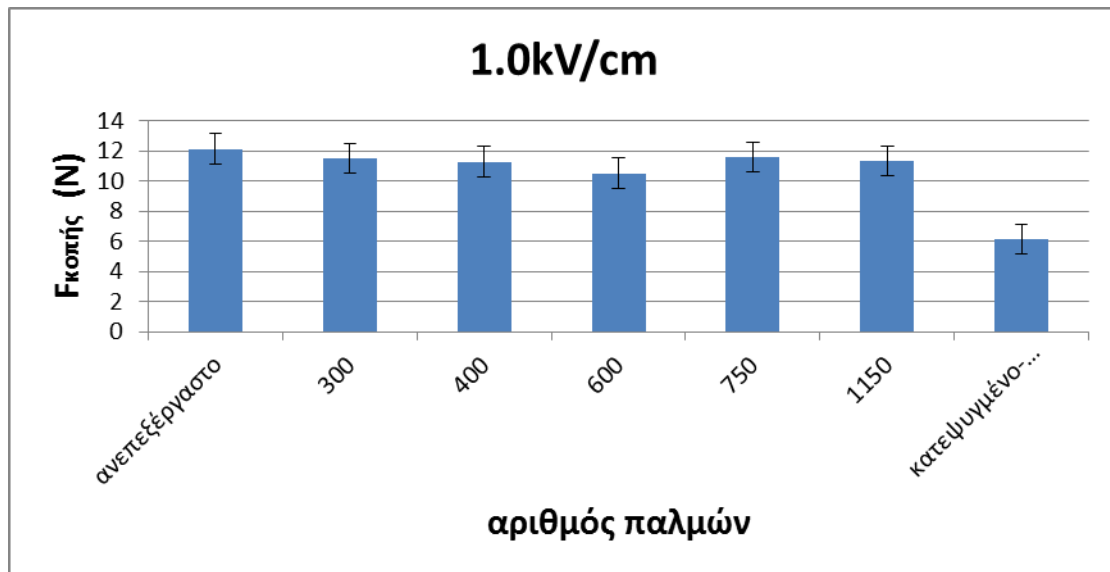
Μελετώντας και τα τρία διαγράμματα, παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των παλμών, η δύναμη συμπίεσης μειώνεται σημαντικά. Με άλλα λόγια, όσο εντείνεται η επεξεργασία των δειγμάτων παντζαριού, τόσο αυτά μαλακώνουν και έτσι η εφαρμοζόμενη δύναμη συμπίεσης μειώνεται. Αυτό δικαιολογείται από την αύξηση

της κυτταρικής διάρρηξης (αύξηση  $Z$ ) που επιφέρει η αύξηση της έντασης της επεξεργασίας των δειγμάτων. Ακόμη, με την αύξηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, ο χρόνος επεξεργασίας με ΠΗΠ που απαιτείται για την επίτευξη μιας συγκεκριμένης δύναμης  $F$  μειώνεται σημαντικά (μείωση παλμών).

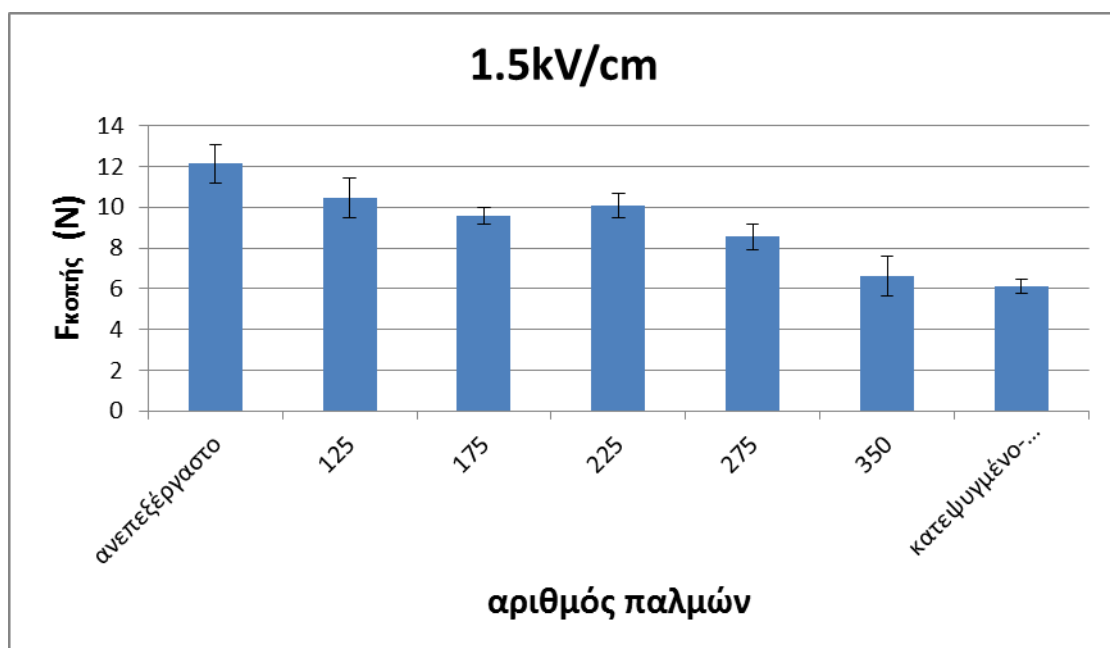
Παρακάτω απεικονίζονται τα τρία διαγράμματα της δοκιμής δύναμης κοπής, για κάθε τιμή της έντασης ηλεκτρικού πεδίου, που δείχνουν τη σχέση του αριθμού παλμών με τη δύναμη συμπίεσης  $F$  (Διαγράμματα 4.28-4.30).



Διάγραμμα 4.28 Δύναμη κοπής συναρτήσει του αριθμού παλμών για ανεπεξέργαστα, επεξεργασμένα με ΠΗΠ με ένταση ηλεκτρικού πεδίου 0.5 kV/cm σε διαφορετικούς παλμούς (1500-9500) και για κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα παντζαριού.



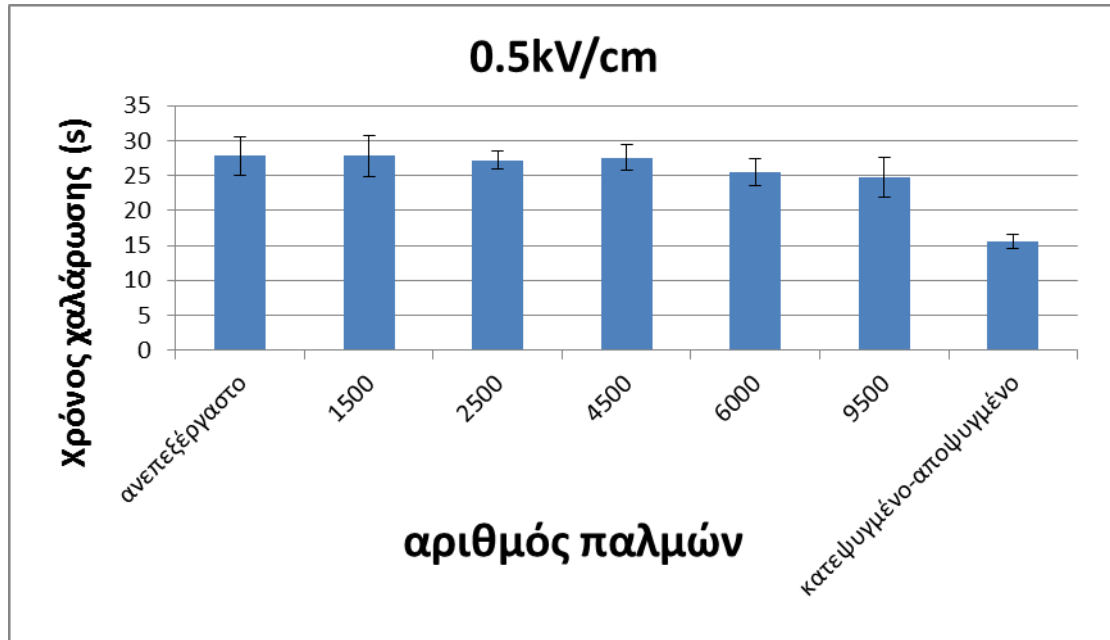
Διάγραμμα 4.29 Δύναμη κοπής συναρτήσει του αριθμού παλμών για ανεπεξεργαστα, επεξεργασμένα με ΠΗΠ με ένταση ηλεκτρικού πεδίου 1.0 kV/cm σε διαφορετικούς παλμούς (300-1150) και για κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα παντζαριού.



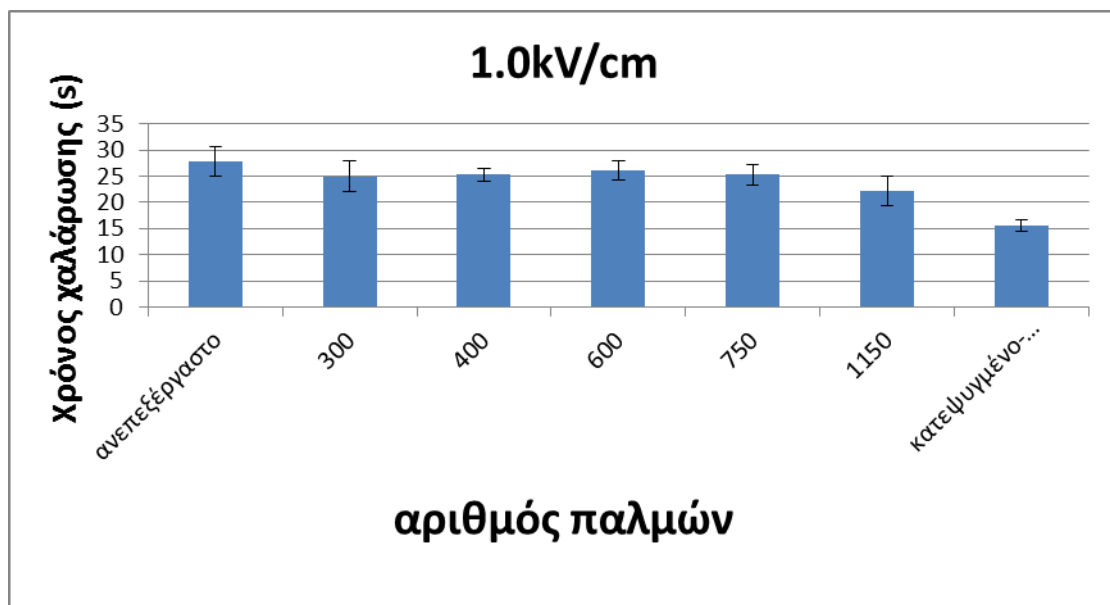
Διάγραμμα 4.30 Δύναμη κοπής συναρτήσει του αριθμού παλμών για ανεπεξεργαστα, επεξεργασμένα με ΠΗΠ με ένταση ηλεκτρικού πεδίου 1.5 kV/cm σε διαφορετικούς παλμούς (125-350) και για κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα παντζαριού.

Μελετώντας και τα τρία διαγράμματα, παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των παλμών, η δύναμη κοπής μειώνεται. Με άλλα λόγια, όσο εντείνεται η επεξεργασία των δειγμάτων παντζαριού, τόσο αυτά μαλακώνουν και έτσι η εφαρμοζόμενη δύναμη κοπής μειώνεται. Αυτό δικαιολογείται από την αύξηση της κυτταρικής διάρρηξης (αύξηση  $Z$ ) που επιφέρει η αύξηση της έντασης της επεξεργασίας των δειγμάτων. Ακόμη, με την αύξηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, ο χρόνος επεξεργασίας με ΠΗΠ που απαιτείται για την επίτευξη μιας συγκεκριμένης δύναμης κοπής  $F$  μειώνεται σημαντικά (μείωση παλμών).

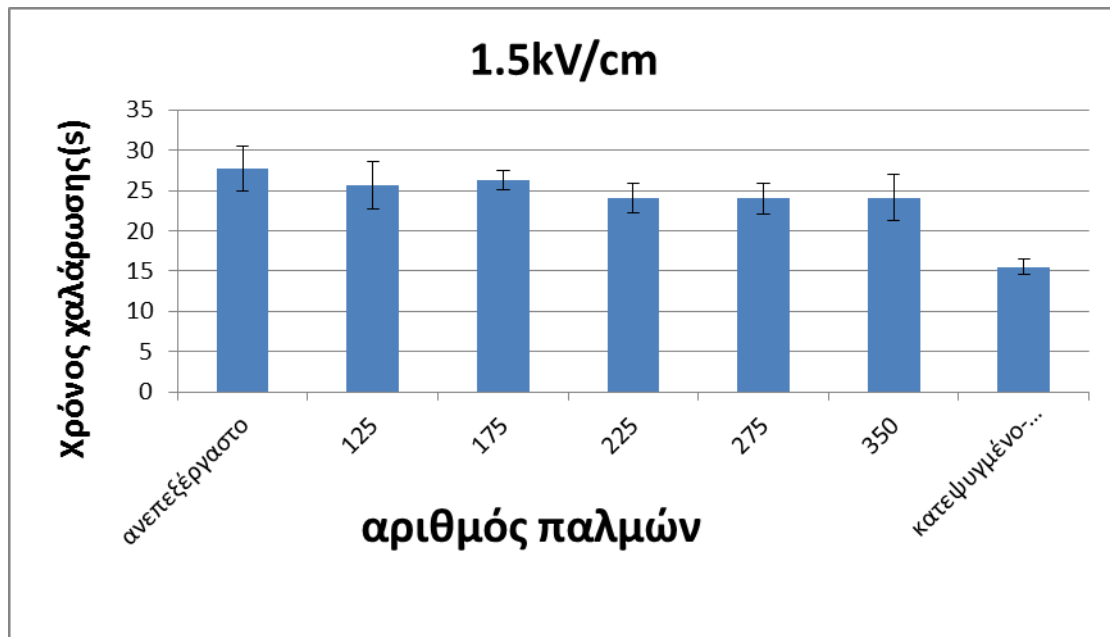
Παρακάτω απεικονίζονται τα τρία διαγράμματα της δοκιμής χαλάρωσης τάσης, για κάθε τιμή της έντασης ηλεκτρικού πεδίου, που δείχνουν τη σχέση του αριθμού παλμών με το χρόνο χαλάρωσης (Διαγράμματα 4.31-4.33). Από το μοντέλο Maxwell παρουσιάζεται μόνο ο πρώτος χρόνος χαλάρωσης  $\tau_1$  καθώς ο δεύτερος  $\tau_2$  δεν συνεισφέρει σημαντικά στο μοντέλο.



Διάγραμμα 4.31 Χρόνος χαλάρωσης συναρτήσει του αριθμού παλμών για ανεπεξέργαστα, επεξεργασμένα με ΠΗΠ με ένταση ηλεκτρικού πεδίου 0.5 kV/cm σε διαφορετικούς παλμούς (1500-9500) και για κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα παντζαριού.



Διάγραμμα 4.32 Χρόνος χαλάρωσης συναρτήσει του αριθμού παλμών για ανεπεξέργαστα, επεξεργασμένα με ΠΗΠ με ένταση ηλεκτρικού πεδίου 1.0 kV/cm σε διαφορετικούς παλμούς (300-1150) και για κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα παντζαριού.



Διάγραμμα 4.33 Χρόνος χαλάρωσης συναρτήσει του αριθμού παλμών για ανεπεξεργαστα, επεξεργασμένα με ΠΗΠ με ένταση ηλεκτρικού πεδίου 1.5 kV/cm σε διαφορετικούς παλμούς (125-350) και για κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα παντζαριού.

Μελετώντας και τα τρία διαγράμματα, παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των παλμών, ο χρόνος χαλάρωσης μειώνεται σημαντικά. Με άλλα λόγια, όσο εντείνεται η επεξεργασία των δειγμάτων παντζαριού, τόσο αυτά μαλακώνουν και έτσι η εφαρμοζόμενη τάση χαλαρώνει σε μικρότερο χρόνο. Αυτό δικαιολογείται από την αύξηση της κυτταρικής διάρρηξης (αύξηση  $Z$ ) που επιφέρει η αύξηση της έντασης της επεξεργασίας των δειγμάτων.

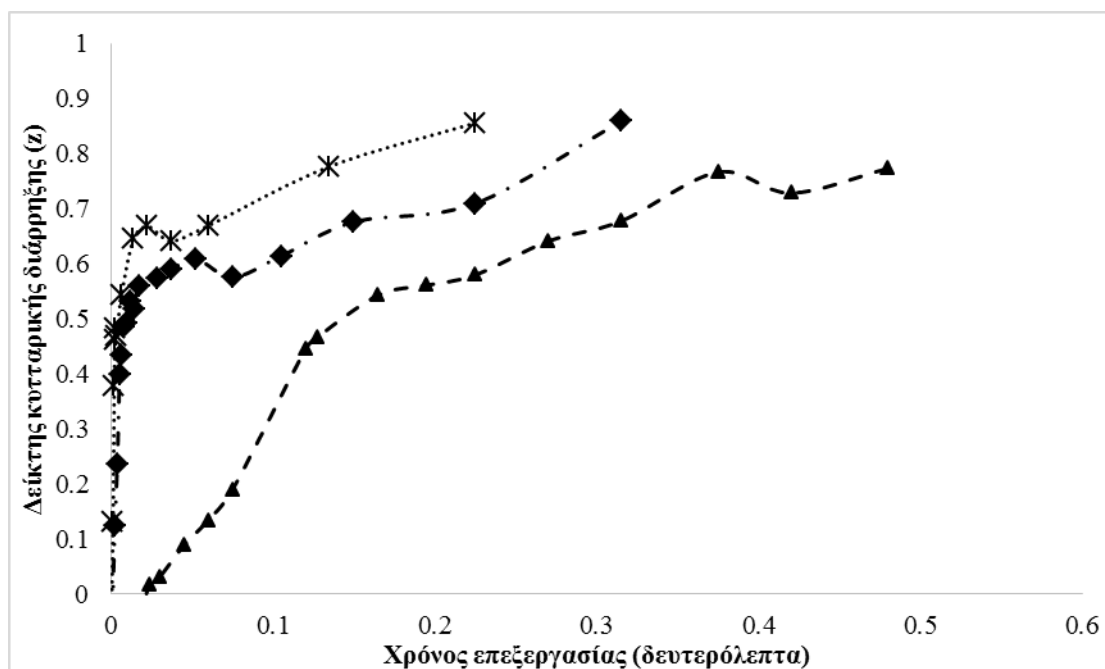
Τέλος, βρέθηκε ότι υπάρχει μεγάλη συσχέτιση της δύναμης συμπίεσης, της δύναμης κοπής και του χρόνου χαλάρωσης με το δείκτη κυτταρικής διάρρηξης  $Z$  και για τις τρεις τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, στα δείγματα παντζαριού. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι όσο αυξάνεται ο  $Z$  τόσο αλλοιώνονται οι ιδιότητες αυτές, καθώς οι δυνάμεις συμπίεσης και κοπής και ο χρόνος χαλάρωσης μειώνονται σημαντικά. Ενδεικτικά για την τιμή της έντασης των 1.5 kV/cm οι συντελεστές συσχέτισης μεταξύ της δύναμης συμπίεσης και του  $Z$ , της δύναμης κοπής και του  $Z$ , του χρόνου χαλάρωσης και του  $Z$  βρέθηκαν ίσοι με -0.86, -0.92, -0.91 αντίστοιχα.



#### 4.4 Μελέτη της επίδρασης των Παλλόμενων Ηλεκτρικών Πεδίων στην κινητική της ξήρανσης και στις μηχανικές ιδιότητες του κολοκυθιού.

##### 4.4.1 Δείκτης κυτταρικής διάρρηξης (Z) στο κολοκύθι.

Παρακάτω παρουσιάζεται τα διάγραμμα του δείκτη κυτταρικής διάρρηξης (Z) σε δείγματα κολοκυθιού σε διαφορετικά έντασης ηλεκτρικά πεδία (Διάγραμμα 4.34).



Διάγραμμα 4.34 Δείκτης κυτταρικής διάρρηξης (z) για διάφορους χρόνους επεξεργασίας των δειγμάτων κολοκυθιού σε τρεις διαφορετικές εντάσεις ηλεκτρικού πεδίου (0.5 kV/cm, 1 kV/cm, 1.5 kV/cm).

Παρατηρείται ότι, για κάθε τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, σε μικρούς χρόνους επεξεργασίας υπάρχει σημαντική αύξηση του δείκτη κυτταρικής διάρρηξης Z ενώ σε μεγαλύτερους χρόνους εμφανίζεται μικρότερη αύξηση του Z μέχρις ότου να πάρει την τιμή 1.

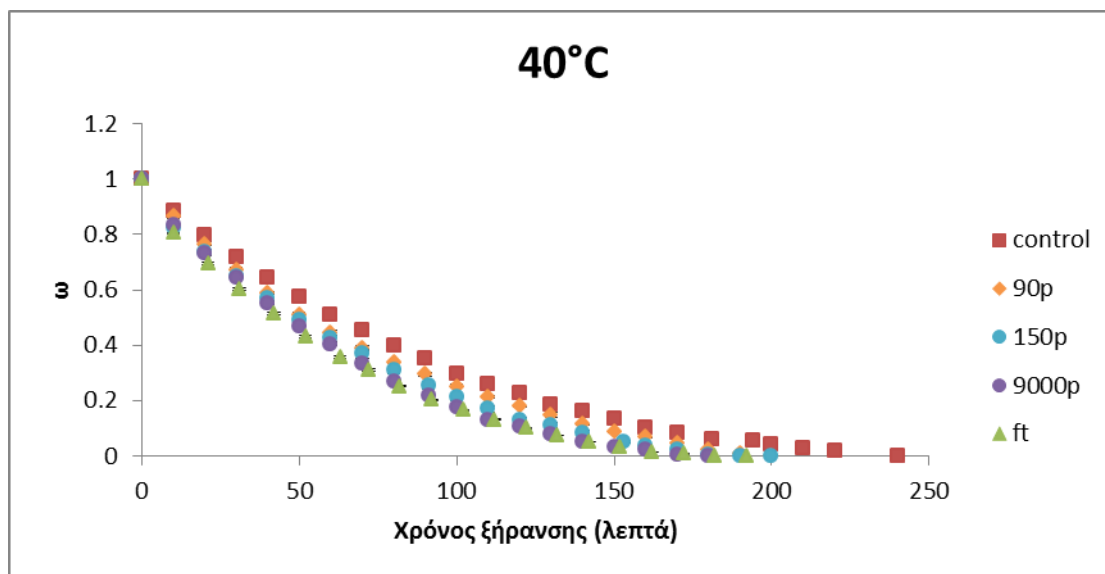
Γίνεται εύκολα αντιληπτό επίσης ότι όσο μεγαλώνει το ηλεκτρικό πεδίο, ο δείκτης κυτταρικής διάρρηξης αυξάνεται πιο γρήγορα σε σχέση με το χρόνο επεξεργασίας.

Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων του υπολογισμού της κινητικής ξήρανσης επιλέχθηκε η συνθήκη έντασης ηλεκτρικού πεδίου 1.5 kV/cm και οι κατάλληλοι παλμοί ώστε να καλύπτεται όλο το εύρος των τιμών του δείκτη κυτταρικής διάρρηξης Z από το 0 έως το 1.

##### 4.4.2 Επίδραση των Παλλόμενων Ηλεκτρικών Πεδίων στις καμπύλες ξήρανσης του κολοκυθιού.

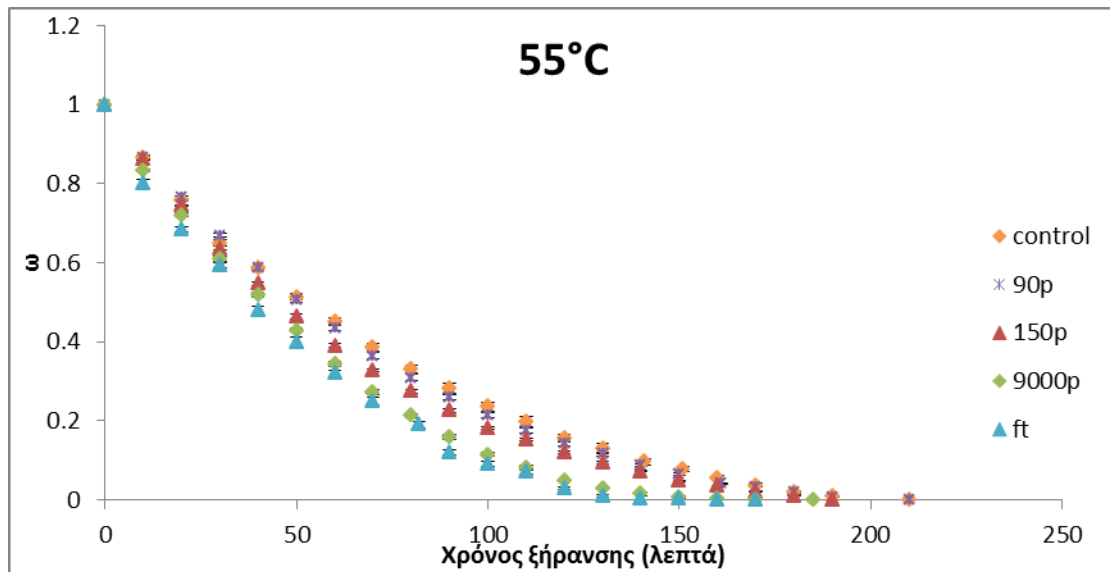
Παρακάτω παρουσιάζονται οι καμπύλες ξήρανσης κολοκυθιού σε θερμοκρασίες από 40 έως 70°C για ανεπεξεργαστα, προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ (1,5 kV/cm, 10 Hz, 15

μs πλάτος παλμού, 90-9000 παλμοί) και αποψυγμένα δείγματα (Διαγράμματα 4.35-4.37).



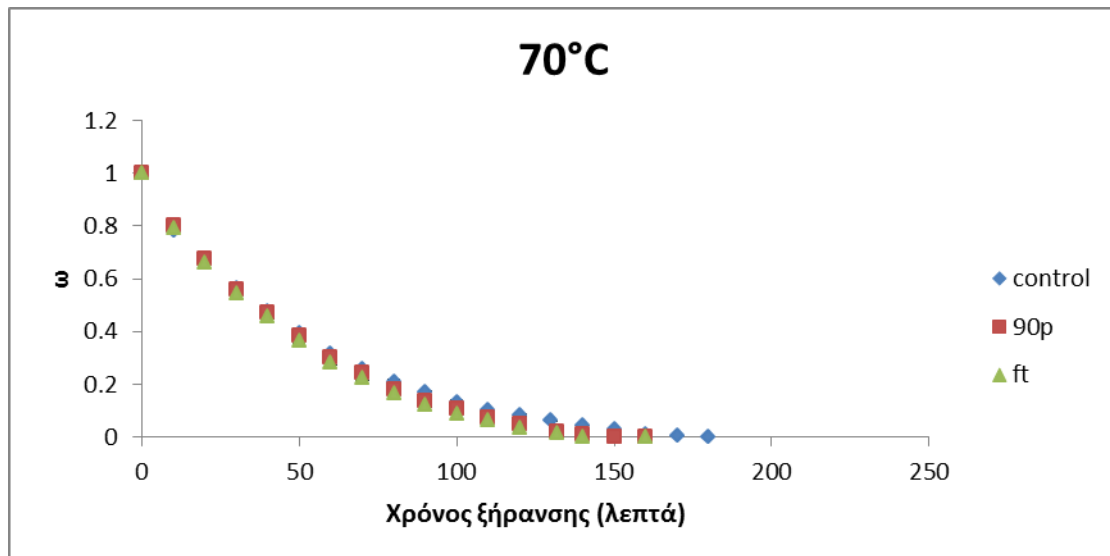
Διάγραμμα 4.35 Καμπύλες ξήρανσης στους 40°C για ανεπεξέργαστα, προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ (1,5 kV/cm, 10 Hz, 15 μs πλάτος παλμού, 90-9000 παλμοί) και αποψυγμένα δείγματα κολοκυθιού.

Παρατηρείται ότι στην θερμοκρασία των 40°C, ο ρυθμός ξήρανσης των κατεψυγμένων-αποψυγμένων δειγμάτων είναι μεγαλύτερος από τον ρυθμό των προεπεξεργασμένων με ΠΗΠ δειγμάτων και αυτός με τη σειρά του μεγαλύτερος από το ρυθμό των ανεπεξέργαστων δειγμάτων. Επιπλέον, μεταξύ των προεπεξεργασμένων με ΠΗΠ δειγμάτων, η εντονότερη επεξεργασία (περισσότεροι παλμοί) οδηγεί σε σημαντικά μεγαλύτερο ρυθμό ξήρανσης. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι εντονότερη επεξεργασία ΠΗΠ οδηγεί σε εντονότερη ηλεκτροδιάτρηση, με αποτέλεσμα να ενισχύεται ο ρυθμός μεταφοράς μάζας από και προς τα δείγματα κολοκυθιού. Ακόμη, ο ρυθμός ξήρανσης της πιο έντονης συνθήκης ΠΗΠ είναι ίσος με τον ρυθμό ξήρανσης των κατεψυγμένων-αποψυγμένων δειγμάτων στο μεγαλύτερο κομμάτι της ξήρανσης.



Διάγραμμα 4.36 Καμπύλες ξήρασης στους 55°C για ανεπεξεργαστα, προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ (1,5kV/cm, 10Hz, 15μs πλάτος παλμού, 90-9000 παλμοί) και αποψυγμένα δείγματα κολοκυθιού

Παρατηρείται ότι και στην θερμοκρασία των 55°C, ο ρυθμός ξήρασης των κατεψυγμένων-αποψυγμένων δειγμάτων είναι σημαντικά μεγαλύτερος από τον ρυθμό των προεπεξεργασμένων με ΠΗΠ δειγμάτων και αυτός με τη σειρά του σημαντικά μεγαλύτερος από το ρυθμό των ανεπεξεργαστων δειγμάτων. Επιπλέον, μεταξύ των προεπεξεργασμένων με ΠΗΠ δειγμάτων είναι εμφανές ότι η εντονότερη επεξεργασία (περισσότεροι παλμοί) οδηγεί σε γρηγορότερη ξήρανση. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι εντονότερη επεξεργασία ΠΗΠ σημαίνει μεγαλύτερο δείκτη Z, με αποτέλεσμα να ενισχύεται ο ρυθμός μεταφοράς μάζας από και προς τα δείγματα κολοκυθιού. Παρατηρείται επίσης ότι, οι ρυθμοί ξήρασης των κατεψυγμένων-αποψυγμένων δειγμάτων και των δειγμάτων που έχουν υποστεί την εντονότερη επεξεργασία ΠΗΠ (9000 παλμοί), είναι παραπλήσιοι αλλά και πολύ μεγαλύτεροι από τους αντίστοιχους ρυθμούς των ανεπεξεργαστων και των επεξεργασμένων με πιο ήπιες συνθήκες δειγμάτων.



Διάγραμμα 4.37 Καμπύλες ξήρανσης στους 70°C για ανεπεξέργαστα, προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ (1,5 kV/cm, 10 Hz, 15 μs πλάτος παλμού, 90-9000 παλμοί) και αποψυγμένα δείγματα κολοκυθιού.

Στην θερμοκρασία των 70°C δεν παρατηρούνται διαφορές μεταξύ των ανεπεξέργαστων, των προεπεξεργασμένων με ΠΗΠ (1,5 kV/cm, 10 Hz, 15 μs πλάτος παλμού, 90 παλμοί) και των κατεψυγμένων-αποψυγμένων δειγμάτων.

Παρατηρείται ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας εμφανίζονται μικρότερες διαφορές μεταξύ των δειγμάτων. Συγκεκριμένα στους 40 και τους 55 παρατηρούνται σημαντικές διαφορές μεταξύ των διαφορετικών συνθηκών ΠΗΠ ενώ στους 70 δεν συμβαίνει το ίδιο.

Συμπερασματικά, οι ρυθμοί ξήρανσης επηρεάστηκαν σημαντικά από την κατεργασία με ΠΗΠ, γεγονός που συμφωνεί με τα αποτελέσματα της μελέτης των Gachovska et al. (2008), στην οποία κατά την ξήρανση καρότου οι ρυθμοί ξήρανσης των δειγμάτων επηρεάστηκαν επίσης σημαντικά από τα ΠΗΠ.

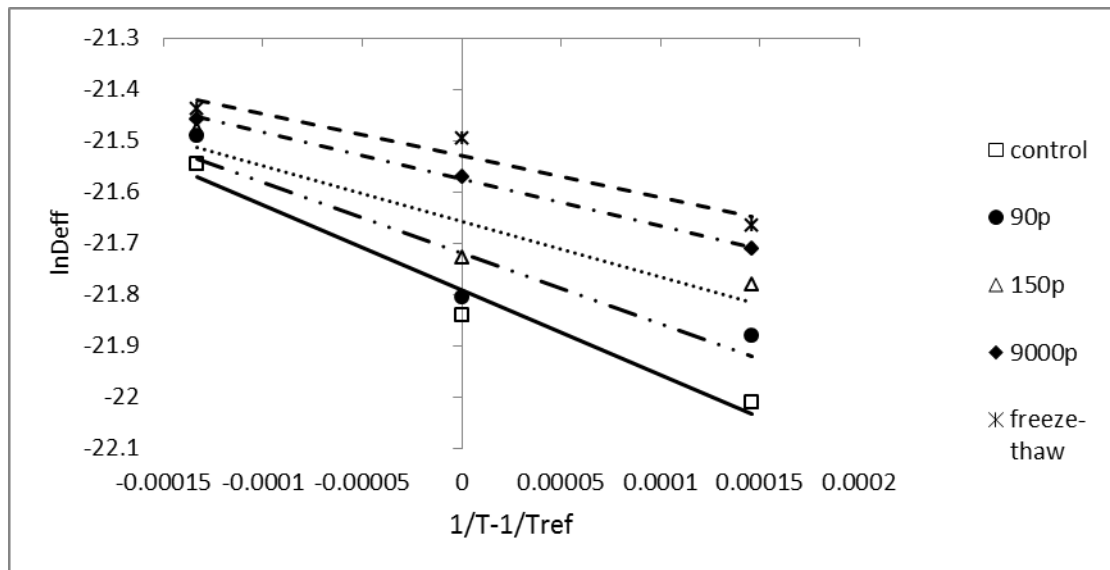
Παρακάτω παρουσιάζονται οι φαινόμενοι συντελεστές διάχυσης  $D_{eff}$  από τον 2ο νόμο του Fick (Πίνακας 4.9) και οι ενέργειες ενεργοποίησης  $E_a$  (Πίνακας 4.10) από τον νόμο του Arrhenius για τα ανεπεξέργαστα, προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ (1,5 kV/cm, 10 Hz, 15 μs πλάτος παλμού, 90-9000 παλμοί) και για τα αποψυγμένα δείγματα κολοκυθιού για όλες τις θερμοκρασίες ξήρανσης (40-70°C).

Πίνακας 4.9 Φαινόμενοι συντελεστές διάχυσης  $D_{\text{eff}}$  και οι ενέργειες ενεργοποίησης  $E_a$  για τα ανεπεξέργαστα, προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ (1.5 kV/cm, 10 Hz, 15μs πλάτος παλμού, 125-300 παλμοί) και για τα αποψυγμένα δείγματα κολοκυθιού για όλες τις θερμοκρασίες ξήρανσης (40-70°C).

$D_{\text{eff}}$	Θερμοκρασία Ξήρανσης (°C)		
	40°C	55°C	70°C
<b>Δείγματα</b>			
<b>Ανεπεξέργαστο</b>	$2.76 \cdot 10^{-10} \pm 2.24 \cdot 10^{-11}$	$3.27 \cdot 10^{-10} \pm 2.62 \cdot 10^{-11}$	$4.40 \cdot 10^{-10} \pm 2.71 \cdot 10^{-11}$
<b>90 παλμοί</b>	$3.15 \cdot 10^{-10} \pm 2.51 \cdot 10^{-11}$	$3.39 \cdot 10^{-10} \pm 2.85 \cdot 10^{-11}$	$4.64 \cdot 10^{-10} \pm 3.82 \cdot 10^{-11}$
<b>150 παλμοί</b>	$3.47 \cdot 10^{-10} \pm 2.75 \cdot 10^{-11}$	$3.66 \cdot 10^{-10} \pm 2.98 \cdot 10^{-11}$	$4.70 \cdot 10^{-10} \pm 2.98 \cdot 10^{-11}$
<b>9000 παλμοί</b>	$3.72 \cdot 10^{-10} \pm 3.28 \cdot 10^{-11}$	$4.29 \cdot 10^{-10} \pm 4.14 \cdot 10^{-11}$	$4.80 \cdot 10^{-10} \pm 3.38 \cdot 10^{-11}$
<b>Κατεψυγμένο-αποψυγμένο</b>	$3.90 \cdot 10^{-10} \pm 2.77 \cdot 10^{-11}$	$4.62 \cdot 10^{-10} \pm 4.25 \cdot 10^{-11}$	$4.89 \cdot 10^{-10} \pm 3.98 \cdot 10^{-11}$

Παρατηρείται ότι ο φαινόμενος συντελεστής διάχυσης  $D_{\text{eff}}$  του κολοκυθιού για την ίδια θερμοκρασία είναι μεγαλύτερος στα επεξεργασμένα με ΠΗΠ δείγματα από ότι στα ανεπεξέργαστα. Επίσης, ακόμα μεγαλύτερες τιμές λαμβάνει στα κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα. Όσο πιο έντονη είναι η συνθήκη ΠΗΠ τόσο μεγαλύτερος είναι και ο συντελεστής διάχυσης. Τα παραπάνω παρατηρούνται σε όλες τις θερμοκρασίες εκτός των 70°C, όπου ο συντελεστής διάχυσης δεν μεταβάλλεται σημαντικά, ανεξαρτήτως επεξεργασίας των δειγμάτων.

Για όλα τα δείγματα που έχουν υποστεί την ίδια επεξεργασία, ο φαινόμενος συντελεστής διάχυσης παρουσιάζει σημαντική αύξηση με αύξηση της θερμοκρασίας ξήρανσης.



Διάγραμμα 4.38 Διάγραμμα Arrhenius για ανεπεξέργαστα, προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ (1,5 kV/cm, 10 Hz, 15 μs πλάτος παλμού 90-9000 παλμοί) και για αποψυγμένα δείγματα κολοκυθιού.

Πίνακας 4.10 Ενέργεια ενεργοποίησης  $E_a$  του φαινομένου συντελεστή διάχυσης  $D_{eff}$  και συντελεστή συσχέτισης για ανεπεξέργαστα, προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ (1,5 kV/cm, 10 Hz, 15 μs πλάτος παλμού, 90-9000 παλμοί) και για αποψυγμένα δείγματα κολοκυθιού.

Δείγματα	$E_a$ (kJ/mol)	$R^2$
Ανεπεξέργαστο	13.78	0.967
90 παλμοί	11.44	0.8691
150 παλμοί	8.94	0.8616
9000 παλμοί	7.59	0.9983
Κατεψυγμένο-αποψυγμένο	6.78	0.9356

Μελετώντας τον παραπάνω πίνακα, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η ενέργεια ενεργοποίησης του φαινομένου συντελεστή διάχυσης  $D_{eff}$  είναι σημαντικά μικρότερη στα επεξεργασμένα με ΠΗΠ δείγματα από ότι στα ανεπεξέργαστα και ακόμα μικρότερη στα κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα. Επίσης, μεταξύ των συνθηκών ΠΗΠ παρατηρείται ότι πιο έντονη επεξεργασία οδηγεί σε μείωση της ενέργειας ενεργοποίησης  $E_a$ . Η μείωση αυτή της τιμής της  $E_a$  υποδεικνύει ότι η εξάρτηση του ρυθμού ξήρανσης από τη θερμοκρασία γίνεται λιγότερο έντονη. Πιο συγκεκριμένα, σε μια προεπεξεργασία με ΠΗΠ όπου ο δείκτης κυτταρικής διάρρηξης είναι μεγαλύτερος από τα ανεπεξέργαστα δείγματα, ο ίδιος χρόνος ξήρανσης μπορεί να επιτευχθεί σε χαμηλότερη θερμοκρασία.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι σταθερές ρυθμού ξήρανσης από το εκθετικό μοντέλο 1<sup>ης</sup> τάξης (Πίνακας 4.11) και οι ενέργειες ενεργοποίησης  $E_a$  (Πίνακας 4.12) από τον νόμο του Arrhenius για τα ανεπεξέργαστα, προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ (1.5 kV/cm,

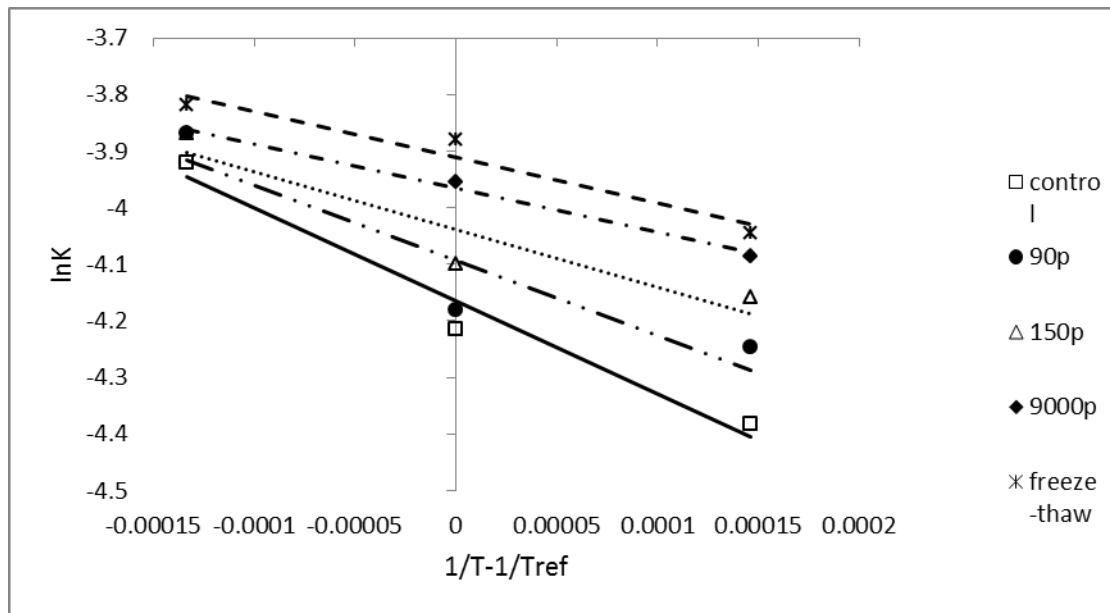
10 Hz, 15  $\mu$ s πλάτος παλμού, 90-9000 παλμοί) και για τα αποψυγμένα δείγματα κολοκυθίου για όλες τις θερμοκρασίες ξήρανσης (40-70°C).

Πίνακας 4.11 Σταθερές ρυθμού ξήρανσης για τα ανεπεξέργαστα, προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ (1.5 kV/cm, 10 Hz, 15  $\mu$ s πλάτος παλμού, 90-9000 παλμοί) και για τα αποψυγμένα δείγματα κολοκυθίου για όλες τις θερμοκρασίες ξήρανσης (40-70°C).

<b>k (min<sup>-1</sup>), Θερμοκρασία ξήρανσης (°C)</b>			
<b>Δείγματα</b>	<b>40°C</b>	<b>55°C</b>	<b>70°C</b>
<b>ανεπεξέργαστο</b>	0.0125±0.0004	0.0148±0.0005	0.0198±0.0005
<b>90 παλμοί</b>	0.0143±0.0005	0.0153±0.0005	0.0209±0.0007
<b>150 παλμοί</b>	0.0157±0.0006	0.0166±0.0005	0.0209±0.0007
<b>9000 παλμοί</b>	0.0168±0.0007	0.0192±0.0009	0.0209±0.0008
<b>Κατεψυγμένο-αποψυγμένο</b>	0.0175±0.0006	0.0210±0.0010	0.0219±0.0005

Παρατηρείται ότι η σταθερά του ρυθμού ξήρανσης  $k$  παρουσιάζει τις αντίστοιχες μεταβολές με τον συντελεστή διάχυσης  $D_{\text{eff}}$  του κολοκυθίου. Επομένως, η σταθερά του ρυθμού ξήρανσης  $k$  του κολοκυθίου για την ίδια θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη στα επεξεργασμένα με ΠΗΠ δείγματα από ότι στα ανεπεξέργαστα. Επίσης, ακόμα μεγαλύτερες τιμές λαμβάνει στα κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα. Όσο πιο έντονη είναι η συνθήκη ΠΗΠ τόσο μεγαλύτερη είναι και η σταθερά του ρυθμού ξήρανσης. Τα παραπάνω παρατηρούνται σε όλες τις θερμοκρασίες εκτός των 70°C, όπου ο συντελεστής διάχυσης δεν μεταβάλλεται σημαντικά, ανεξαρτήτως επεξεργασίας των δειγμάτων.

Για όλα τα δείγματα που έχουν υποστεί την ίδια επεξεργασία, η σταθερά του ρυθμού ξήρανσης παρουσιάζει σημαντική αύξηση με αύξηση της θερμοκρασίας ξήρανσης.



Διάγραμμα 4.39 Διάγραμμα Arrhenius για ανεπεξέργαστα, προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ (1,5 kV/cm, 10 Hz, 15 μs πλάτος παλμού, 90-9000 παλμοί) και για αποψυγμένα δείγματα κολοκυθιού.

Πίνακας 4.12 Ενέργεια ενεργοποίησης  $E_a$  της σταθεράς ρυθμού ξήρανσης και συντελεστής συσχέτισης για ανεπεξέργαστα, προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ (1,5 kV/cm, 10 Hz, 15 μs πλάτος παλμού, 90-9000 παλμοί) και για αποψυγμένα δείγματα κολοκυθιού.

Δείγματα	$E_a$ (kJ/mol)	$R^2$
ανεπεξέργαστο	13.68	0.9666
90 παλμοί	11.18	0.8554
150 παλμοί	8.49	0.8747
9000 παλμοί	6.46	0.9899
Κατεψυγμένο-αποψυγμένο	6.75	0.946

Μελετώντας τον παραπάνω πίνακα, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η ενέργεια ενεργοποίησης της σταθεράς ρυθμού ξήρανσης  $k$  είναι μικρότερη στα επεξεργασμένα με ΠΗΠ δείγματα από ότι στα ανεπεξέργαστα και ακόμα μικρότερη στα κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα κολοκυθιού. Επίσης, μεταξύ των συνθηκών ΠΗΠ παρατηρείται ότι πιο έντονη επεξεργασία οδηγεί σε μείωση της ενέργειας ενεργοποίησης  $E_a$ . Η μείωση αυτή της τιμής της  $E_a$  υποδεικνύει ότι η εξάρτηση του ρυθμού ξήρανσης από τη θερμοκρασία γίνεται λιγότερο έντονη. Πιο συγκεκριμένα, σε μια προεπεξεργασία με ΠΗΠ όπου ο δείκτης κυτταρικής διάρρηξης είναι μεγαλύτερος από τα ανεπεξέργαστα δείγματα, ο ίδιος χρόνος ξήρανσης μπορεί να επιτευχθεί σε χαμηλότερη θερμοκρασία.

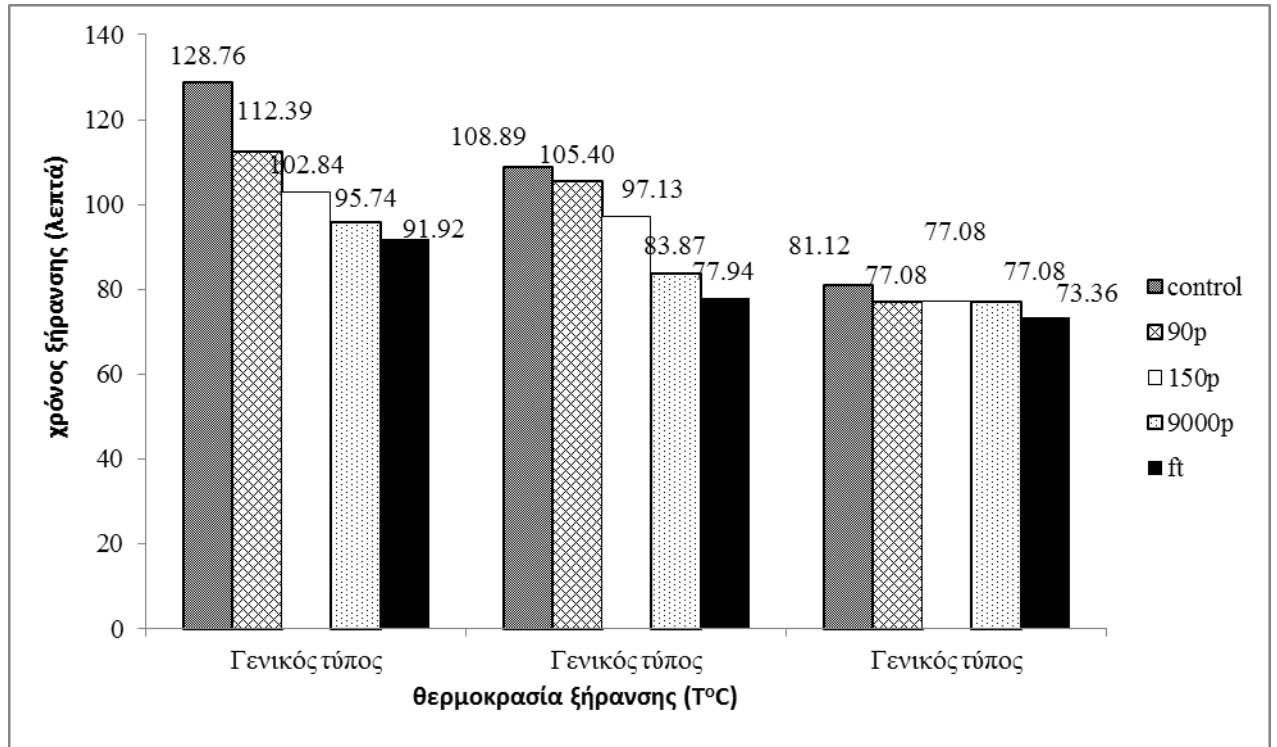
Στη συνέχεια υπολογίστηκε ο χρόνος ξήρανσης (Διάγραμμα 4.40), για 20% εναπομένονσα υγρασία, για ανεπεξέργαστα, προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ (1.5 kV/cm,



10 Hz, 15 μs πλάτος παλμού, 90-9000 παλμοί) και για κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα κολοκυθιού. Ο χρόνος ξήρανσης υπολογίστηκε από την εξίσωση 4.3:

$$t_d = -\frac{\ln(\omega)}{k} \quad (4.3)$$

όπου k είναι η σταθερά του ρυθμού ξήρανσης και ω η αδιάστατη υγρασία, η οποία στους υπολογισμούς ήταν σταθερή και ίση με 0.2.



Διάγραμμα 4.40 Χρόνοι ξήρανσης για ανεπεξεργαστα (20% εναπομένουσα υγρασία). προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ (1.5 kV/cm, 10Hz, 15 μs πλάτος παλμού, 70-620 παλμοί) και για αποψυγμένα δείγματα κολοκυθιού.

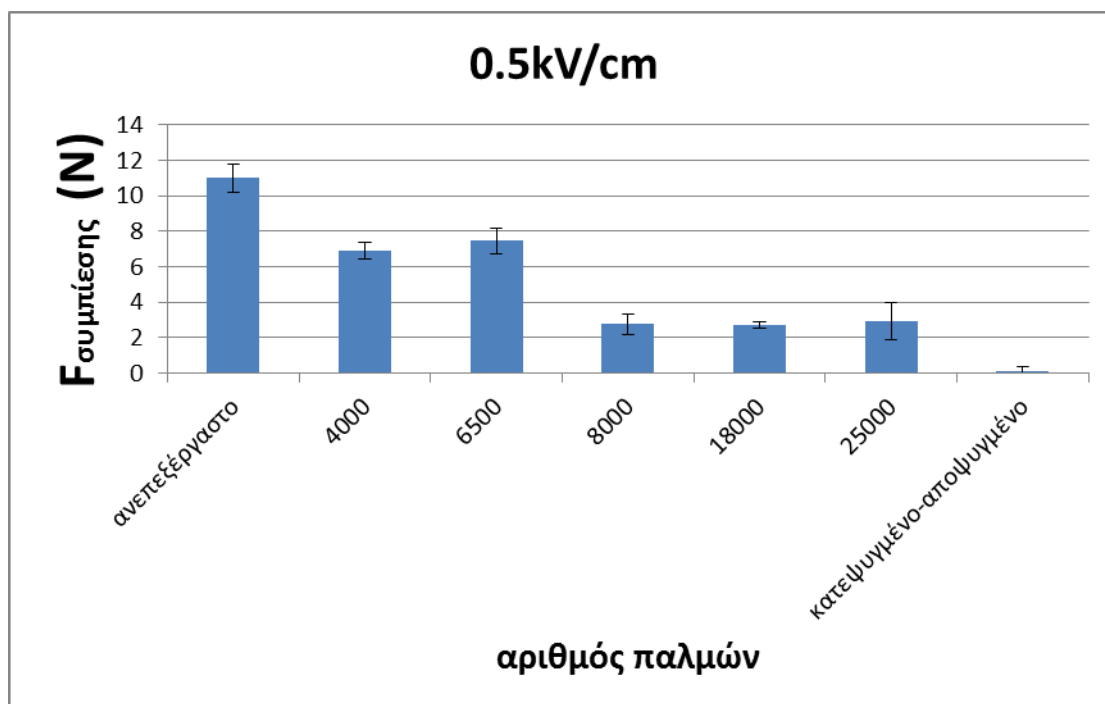
Παρατηρώντας το διάγραμμα του χρόνου ξήρανσης δειγμάτων κολοκυθιού συναρτήσει της θερμοκρασίας ξήρανσης αρχικά συμπεραίνεται ότι για κάθε θερμοκρασία ξεχωριστά ο χρόνος ξήρανσης των δειγμάτων μειώνεται με αύξηση της έντασης της επεξεργασίας των ΠΗΠ που έχουν υποστεί. Συγκεκριμένα, τα κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα, τα οποία έχουν υποστεί την εντονότερη επεξεργασία (δείκτης κυτταρικής διάρρηξης Z=1), εμφανίζουν τους μικρότερους χρόνους ξήρανσης. Στη συνέχεια, μεταξύ των επεξεργασμένων με ΠΗΠ δειγμάτων, η αύξηση των παλμών (άρα και της έντασης της επεξεργασίας) οδηγεί σε μείωση των χρόνων ξήρανσης. Επιπρόσθετα, τα ανεπεξεργαστα δείγματα εμφανίζουν τους μεγαλύτερους χρόνους ξήρανσης. Για την ίδια επεξεργασία δειγμάτων όσο αυξάνεται η θερμοκρασία ξήρανσης τόσο μειώνεται ο χρόνος ξήρανσης των δειγμάτων κολοκυθιού. Τέλος, βρέθηκε ότι τόσο η θερμοκρασία ξήρανσης όσο και η ένταση της προεπεξεργασίας επηρεάζουν σημαντικά το χρόνο ξήρανσης των δειγμάτων κολοκυθιού. (P<0.05)

Όλα τα παραπάνω στοιχεία συμφωνούν με αντίστοιχη μελέτη των Ade-Omowaye, Angersbach et al. (2001) για την ξήρανση φυτικών τροφών, στην οποία τα ΠΗΠ οδήγησαν στη μείωση του χρόνου ξήρανσης μεγαλύτερη από 20%.

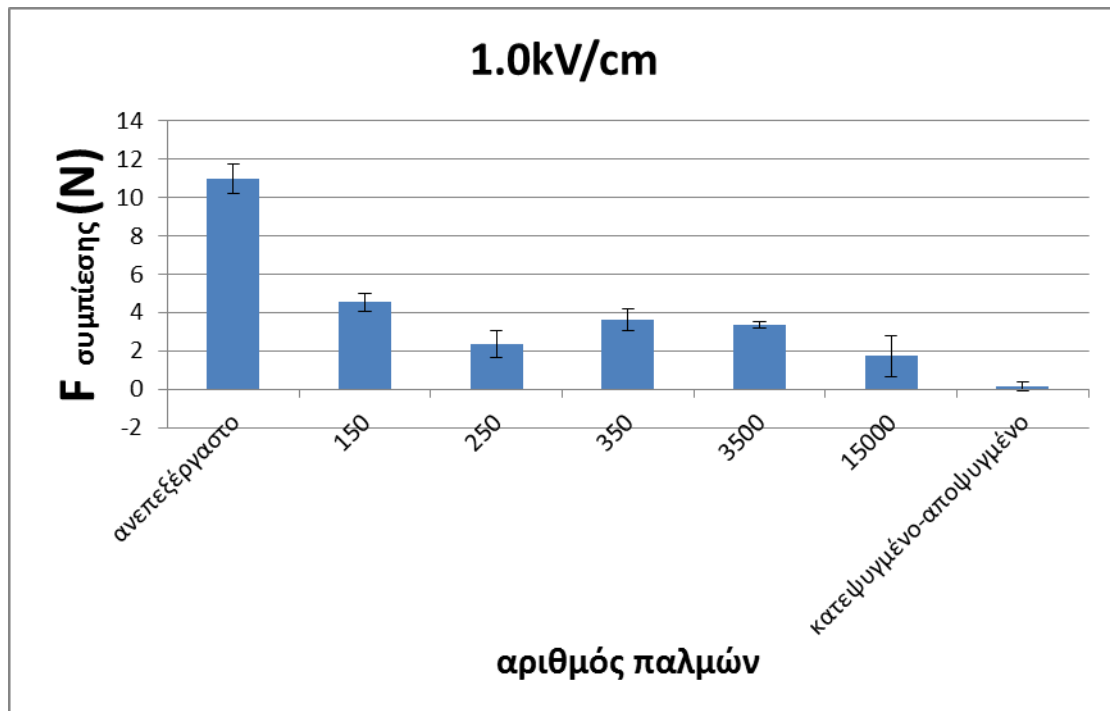
#### 4.4.3 Επίδραση των Παλλόμενων Ηλεκτρικών Πεδίων στις μηχανικές ιδιότητες του κολοκυθιού.

Για την μελέτη της επίδρασης των ΠΗΠ στις μηχανικές ιδιότητες του κολοκυθιού χρησιμοποιήθηκε ο αναλυτής υφής TA-XT2i Stable Microsystems και πραγματοποιήθηκαν τρία τεστ: η δοκιμή συμπίεσης, η δοκιμή δύναμης κοπής και η δοκιμή χαλάρωσης τάσης. Τα τρία αυτά πειράματα πραγματοποιήθηκαν και για τις τρεις διαφορετικές τιμές έντασης ηλεκτρικού πεδίου 0.5 , 1 , 1.5 kV/cm σε διάφορους χρόνους επεξεργασίας και συγκρίθηκαν με τα ανεπέξεργαστα και τα κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα.

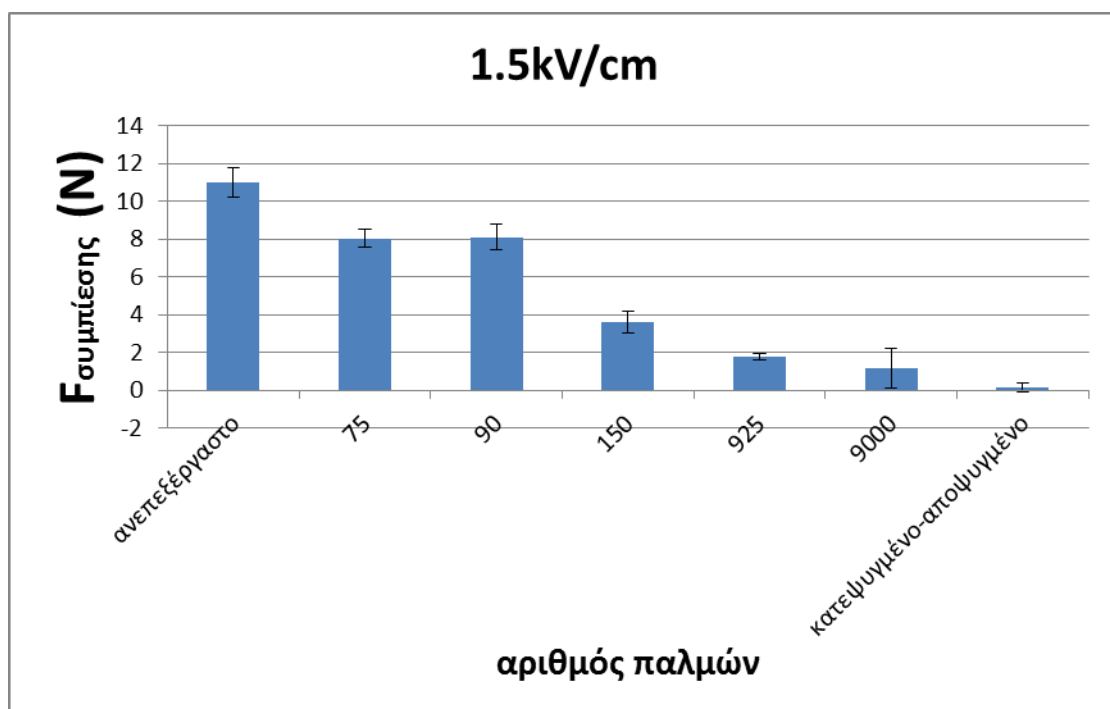
Παρακάτω απεικονίζονται τα τρία διαγράμματα της δοκιμής συμπίεσης, για κάθε τιμή της έντασης ηλεκτρικού πεδίου, που δείχνουν τη σχέση του αριθμού των παλμών με τη δύναμη συμπίεσης F (Διαγράμματα 4.41-4.43).



Διάγραμμα 4.41 Δύναμη συμπίεσης συναρτήσει του αριθμού παλμών για ανεπεξεργαστα, επεξεργασμένα με ΠΗΠ με ένταση ηλεκτρικού πεδίου 0.5 kV/cm σε διαφορετικούς παλμούς (4000-25000) και για κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα κολοκυθιού.



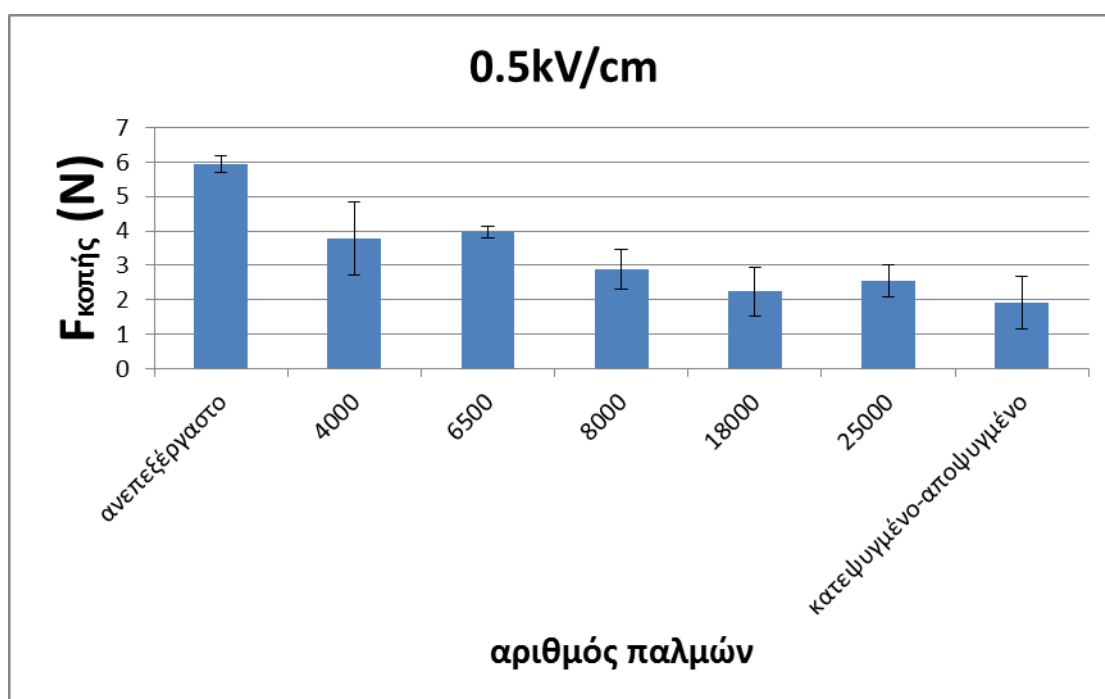
Διάγραμμα 4.42 Δύναμη συμπίεσης συναρτήσει του αριθμού παλμών για ανεπεξέργαστα, επεξεργασμένα με ΠΗΠ με ένταση ηλεκτρικού πεδίου 1.0 kV/cm σε διαφορετικούς παλμούς (150-15000) και για κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα κολοκυθιού.



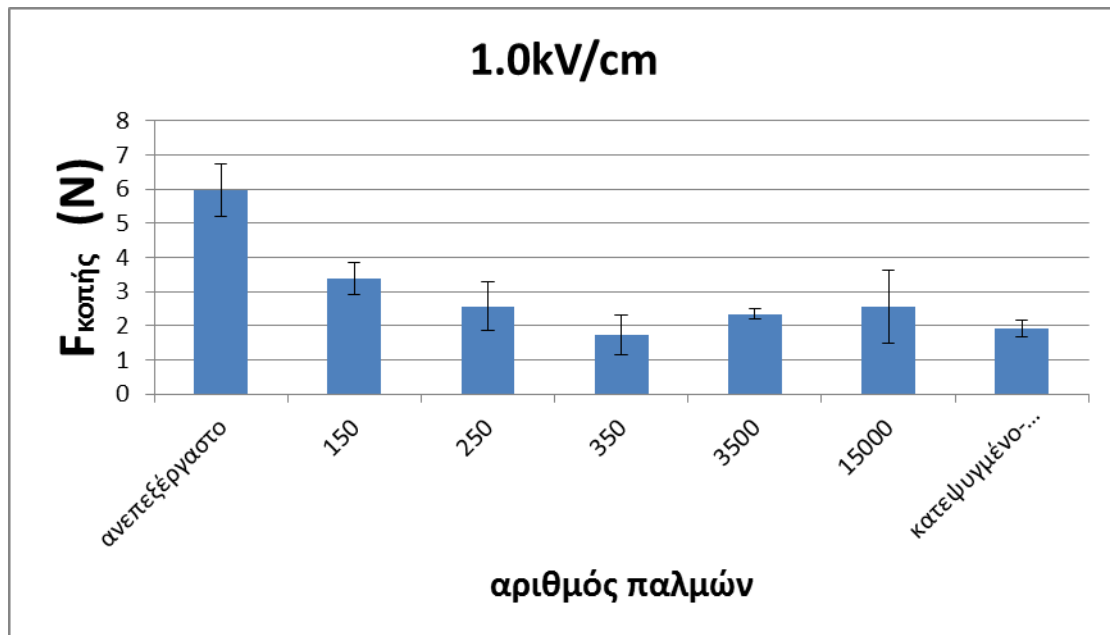
Διάγραμμα 4.43 Δύναμη συμπίεσης συναρτήσει του αριθμού παλμών για ανεπεξέργαστα, επεξεργασμένα με ΠΗΠ με ένταση ηλεκτρικού πεδίου 1.5 kV/cm σε διαφορετικούς παλμούς (75-9000) και για κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα κολοκυθιού.

Μελετώντας και τα τρία διαγράμματα, παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των παλμών, η δύναμη συμπίεσης μειώνεται σημαντικά. Με άλλα λόγια, όσο εντείνεται η επεξεργασία των δειγμάτων κολοκυθίου, τόσο αυτά μαλακώνουν και έτσι η εφαρμοζόμενη δύναμη συμπίεσης μειώνεται. Αυτό δικαιολογείται από την αύξηση της κυτταρικής διάρρηξης (αύξηση  $Z$ ) που επιφέρει η αύξηση της έντασης της επεξεργασίας των δειγμάτων. Ακόμη, με την αύξηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, ο χρόνος επεξεργασίας με ΠΗΠ που απαιτείται για την επίτευξη μιας συγκεκριμένης δύναμης  $F$  μειώνεται σημαντικά (μείωση παλμών).

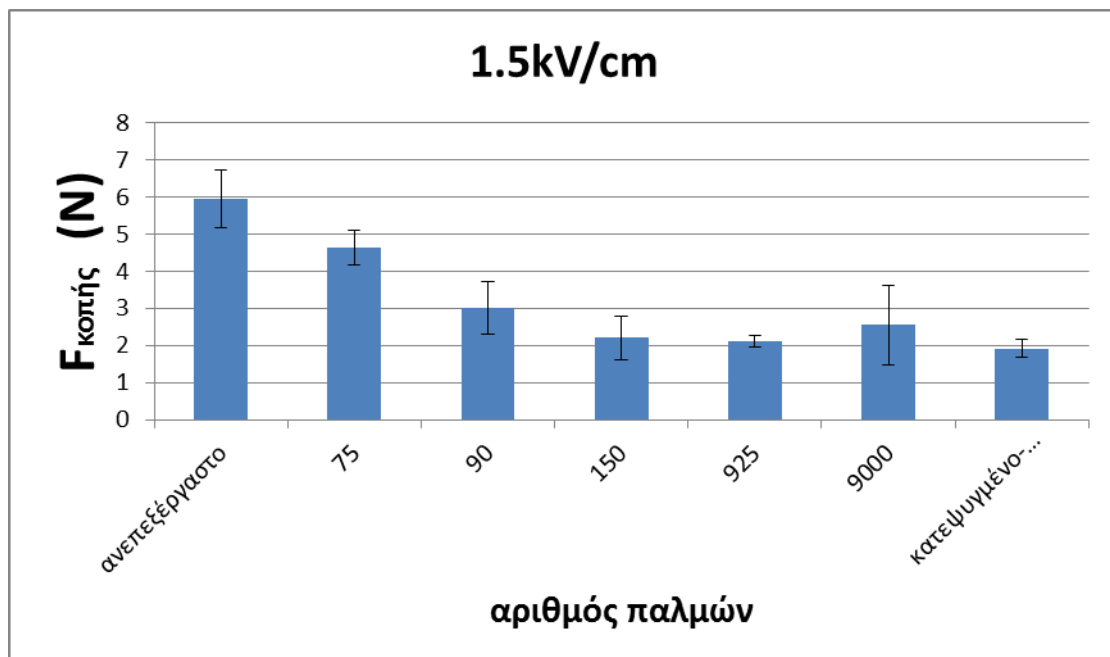
Παρακάτω απεικονίζονται τα τρία διαγράμματα της δοκιμής δύναμης κοπής, για κάθε τιμή της έντασης ηλεκτρικού πεδίου, που δείχνουν τη σχέση του αριθμού παλμών με τη δύναμη συμπίεσης  $F$  (Διαγράμματα 4.44-4.46).



Διάγραμμα 4.44 Δύναμη κοπής συναρτήσει του αριθμού παλμών για ανεπεξεργαστα, επεξεργασμένα με ΠΗΠ με ένταση ηλεκτρικού πεδίου 0.5 kV/cm σε διαφορετικούς παλμούς (4000-25000) και για κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα κολοκυθίου.



Διάγραμμα 4.45 Δύναμη κοπής συναρτήσει του αριθμού παλμών για ανεπεξέργαστα, επεξεργασμένα με ΠΗΠ με ένταση ηλεκτρικού πεδίου 1.0 kV/cm σε διαφορετικούς παλμούς (150-15000) και για κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα κολοκυθιού.

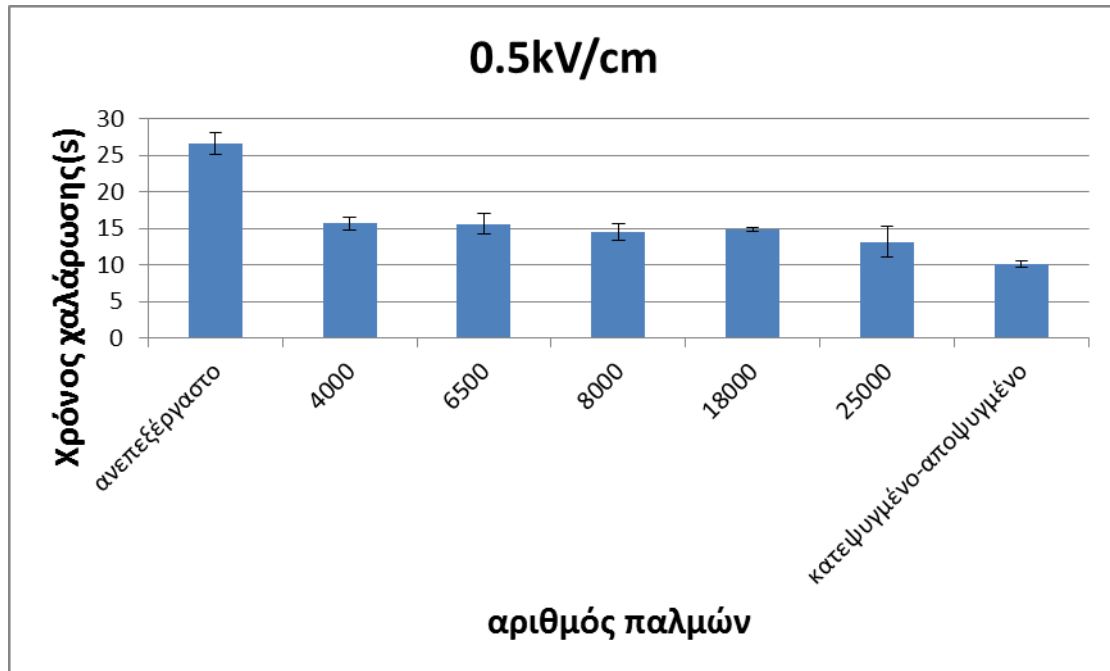


Διάγραμμα 4.46 Δύναμη κοπής συναρτήσει του αριθμού παλμών για ανεπεξέργαστα, επεξεργασμένα με ΠΗΠ με ένταση ηλεκτρικού πεδίου 1.5 kV/cm σε διαφορετικούς παλμούς (75-9000) και για κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα κολοκυθιού.

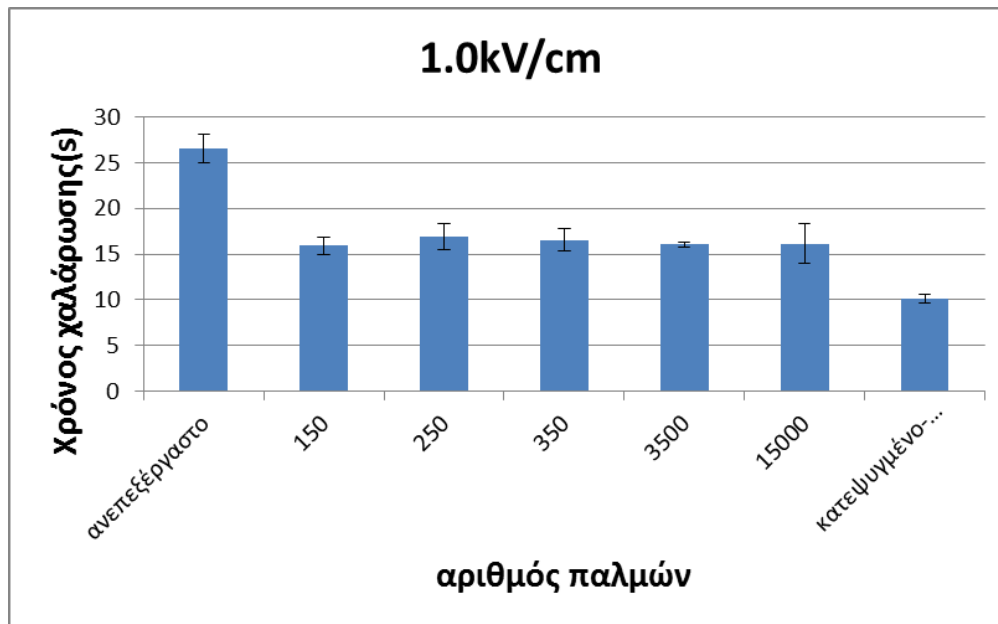
Μελετώντας και τα τρία διαγράμματα, παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των παλμών, η δύναμη κοπής μειώνεται σημαντικά. Με άλλα λόγια, όσο εντείνεται η επεξεργασία των δειγμάτων κολοκυθιού, τόσο αυτά μαλακώνουν και έτσι η εφαρμοζόμενη δύναμη κοπής μειώνεται. Αυτό δικαιολογείται από την αύξηση της

κυτταρικής διάρρηξης (αύξηση  $Z$ ) που επιφέρει η αύξηση της έντασης της επεξεργασίας των δειγμάτων. Ακόμη, με την αύξηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, ο χρόνος επεξεργασίας με ΠΗΠ που απαιτείται για την επίτευξη μιας συγκεκριμένης δύναμης κοπής  $F$  μειώνεται σημαντικά (μείωση παλμών).

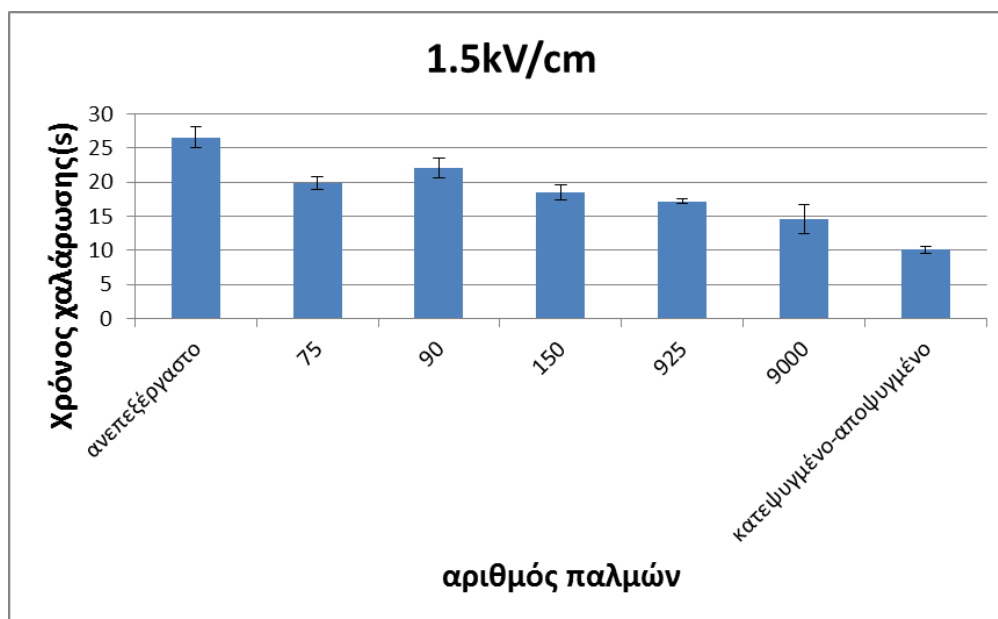
Παρακάτω απεικονίζονται τα τρία διαγράμματα της δοκιμής χαλάρωσης τάσης, για κάθε τιμή της έντασης ηλεκτρικού πεδίου, που δείχνουν τη σχέση του αριθμού παλμών με το χρόνο χαλάρωσης (Διαγράμματα 4.47-4.49). Από το μοντέλο Maxwell παρουσιάζεται μόνο ο πρώτος χρόνος χαλάρωσης  $\tau_1$  καθώς ο δεύτερος  $\tau_2$  δεν συνεισφέρει σημαντικά στο μοντέλο.



Διάγραμμα 4.47 Χρόνος χαλάρωσης συναρτήσει του αριθμού παλμών για ανεπεξέργαστα, επεξεργασμένα με ΠΗΠ με ένταση ηλεκτρικού πεδίου 0.5 kV/cm σε διαφορετικούς παλμούς (4000-25000) και για κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα κολοκυθίου.



Διάγραμμα 4.48 Χρόνος χαλάρωσης συναρτήσει του αριθμού παλμών για ανεπεξεργαστα, επεξεργασμένα με ΠΗΠ με ένταση ηλεκτρικού πεδίου 1.0 kV/cm σε διαφορετικούς παλμούς (150-15000) και για κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα κολοκυθιού.



Διάγραμμα 4.49 Χρόνος χαλάρωσης συναρτήσει του αριθμού παλμών για ανεπεξεργαστα, επεξεργασμένα με ΠΗΠ με ένταση ηλεκτρικού πεδίου 1.5 kV/cm σε διαφορετικούς παλμούς (75-9000) και για κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα κολοκυθιού.

Μελετώντας και τα τρία διαγράμματα, παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των παλμών, ο χρόνος χαλάρωσης μειώνεται σημαντικά. Με άλλα λόγια, όσο εντείνεται η επεξεργασία των δειγμάτων κολοκυθιού, τόσο αυτά μαλακώνουν και έτσι η εφαρμοζόμενη τάση χαλαρώνει σε μικρότερο χρόνο. Αυτό δικαιολογείται από την αύξηση της κυτταρικής διάρρηξης (αύξηση  $Z$ ) που επιφέρει η αύξηση της έντασης της επεξεργασίας των δειγμάτων.





Τέλος, βρέθηκε ότι υπάρχει μεγάλη συσχέτιση της δύναμης συμπίεσης, της δύναμης κοπής και του χρόνου χαλάρωσης με το δείκτη κυτταρικής διάρρηξης  $Z$  και για τις τρεις τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, στα δείγματα κολοκυθιού. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι όσο αυξάνεται ο  $Z$  τόσο αλλοιώνονται οι ιδιότητες αυτές, καθώς οι δυνάμεις συμπίεσης και κοπής και ο χρόνος χαλάρωσης μειώνονται σημαντικά. Ενδεικτικά για την τιμή της έντασης των 1.5 kV/cm οι συντελεστές συσχέτισης μεταξύ της δύναμης συμπίεσης και του  $Z$ , της δύναμης κοπής και του  $Z$ , του χρόνου χαλάρωσης και του  $Z$  βρέθηκαν ίσοι με -0.79, -0.87, -0.91 αντίστοιχα.



## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ξήρανση είναι μία από τις σημαντικές διεργασίες στην παρασκευή των τροφίμων, με στόχο κυρίως στη διατήρησή τους, μειώνοντας την ποσότητα της υγρασίας στα τρόφιμα σε επίπεδα που θα επιβραδύνουν ή θα αναστείλουν τις μικροβιακές και ενζυματικές δράσεις και την συσχετιζόμενη επιδείνωση της ποιότητας του προϊόντος. Στις περισσότερες περιπτώσεις είναι μια διεργασία με υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις, η οποία συνήθως οδηγεί σε μεταβολές στην ποιότητα του προϊόντος λόγω της έκθεσης σε μεγάλους χρόνους ξήρανσης και υψηλές θερμοκρασίες. Στην ξήρανση τροφίμων, αποτελεί μείζονα πρόκληση να απομακρυνθεί το νερό από το τρόφιμο με τον πιο αποτελεσματικό τρόπο, με την ταυτόχρονη διατήρηση της ποιότητας των προϊόντων, με τις ελάχιστες επιπτώσεις στο περιβάλλον, και με τις χαμηλότερες λειτουργικές δαπάνες. Η ανάγκη αυτή για βελτιστοποίηση της διεργασίας οδήγησε στην ανάπτυξη των μη θερμικών τεχνολογιών προεπεξεργασίας τροφίμων, που μπορούν να παρέχουν μια εναλλακτική λύση για τις θερμικές τεχνολογίες μέσω της βελτίωσης της ασφάλειας, διατηρώντας παράλληλα την ποιότητα των προϊόντων και βελτιώνοντας την οικονομική απόδοση της διεργασίας της ξήρανσης. Η τεχνολογία των Παλλόμενων Ηλεκτρικών Πεδίων (ΠΗΠ) στηρίζεται στη χρήση υψηλής έντασης παλλόμενων ηλεκτρικών πεδίων, τα οποία μπορούν να προκαλέσουν διάρρηξη των κυτταρικών τοιχωμάτων των φυτικών ιστών ώστε η μεταφορά μάζας από και προς το τρόφιμο να είναι εντονότερη, με πιθανό όφελος και στην διεργασία της ξήρανσης. Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης της επεξεργασίας με τη μέθοδο των Παλλόμενων Ηλεκτρικών Πεδίων στα χαρακτηριστικά ξήρανσης και υφής των λαχανικών. Με επεξεργασία σε επιλεγμένες συνθήκες, στόχος ήταν να μειωθεί ο χρόνος ξήρανσης και να αξιολογηθούν τα χαρακτηριστικά υφής των φρούτων και λαχανικών, και συγκεκριμένα της γλυκοπατάτας, του παντζαριού και του κολοκυθιού.

Αρχικά, εκτιμήθηκε ο δείκτης κυτταρικής διάρρηξης  $Z$  για κάθε συνθήκη ΠΗΠ (0.5-1.5kV/cm, 15  $\mu$ s πλάτος παλμού, 10 Hz συχνότητα) σε δείγματα γλυκοπατάτας, παντζαριού και κολοκυθιού και συγκρίθηκαν οι μηχανικές ιδιότητες τους, με ανεπεξέργαστα και κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα. Τα αποτελέσματα από τον υπολογισμό του δείκτη κυτταρικής διάρρηξης  $Z$  της γλυκοπατάτας, του παντζαριού και του κολοκυθιού έδειξαν ότι για κάθε τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, σε μικρούς χρόνους επεξεργασίας υπάρχει σημαντική αύξηση του δείκτη κυτταρικής διάρρηξης  $Z$  ενώ σε μεγαλύτερους χρόνους εμφανίζεται μικρότερη αύξηση του  $Z$  μέχρις ότου να πάρει την τιμή 1. Όσο μεγαλώνει η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, ο δείκτης κυτταρικής διάρρηξης  $Z$  αυξάνεται πιο γρήγορα όσο αυξάνεται ο χρόνος επεξεργασίας. Ενδεικτικά, για τα δείγματα γλυκοπατάτας, ο χρόνος επεξεργασίας για να επιτευχθεί  $Z=1$  στο ηλεκτρικό πεδίο 1.5 kV/cm ήταν κατά 85% μειωμένος σε σχέση με τον αντίστοιχο χρόνο για 0.5 kV/cm. Αντίστοιχα στο παντζάρι ήταν κατά 97% και για το κολοκύθι κατά 53 % μειωμένος χρόνος επεξεργασίας. Σχετικά, με τα τρία πειράματα ανάλυσης υφής που πραγματοποιήθηκαν για τα δείγματα γλυκοπατάτας, παντζαριού και κολοκυθιού παρατηρήθηκε ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των παλμών, οι δυνάμεις συμπίεσης και κοπής και ο χρόνος χαλάρωσης μειώνονται σημαντικά. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι τα δείγματα παντζαριού που είχαν υποστεί διαφορετική επεξεργασία εμφάνισαν μικρότερες διαφορές μεταξύ τους,

από ότι τα αντίστοιχα δείγματα γλυκοπατάτας και κολοκυθιού. Ενδεικτικά, στην δοκιμή συμπίεσης των δειγμάτων κολοκυθιού, προεπεξεργασμένων με ηλεκτρικό πεδίο 1.5kV/cm, η μετρούμενη δύναμη συμπίεσης ήταν κατά 78% μειωμένη στην εντονότερη προεπεξεργασία ΠΗΠ (9000 παλμοί) σε σχέση με την ηπιότερη επεξεργασία (75 παλμοί). Ακόμη, με την αύξηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, ο χρόνος επεξεργασίας με ΠΗΠ που απαιτείται για την επίτευξη, μιας συγκεκριμένης δύναμης συμπίεσης ή κοπής ή ενός συγκεκριμένου χρόνου χαλάρωσης, μειώνεται σημαντικά (μείωση παλμών) σε όλα τα μελετώμενα λαχανικά.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε κινητική μελέτη ξήρανσης σε θερμοκρασίες 40°C έως 70°C για ανεπεξέργαστα, για προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ και για κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα γλυκοπατάτας, παντζαριού και κολοκυθιού. Παρατηρήθηκε ότι στις χαμηλότερες θερμοκρασίες των 40°C, 50°C και 55°C ο ρυθμός ξήρανσης των κατεψυγμένων-αποψυγμένων δειγμάτων είναι σημαντικά μεγαλύτερος από τον ρυθμό των προεπεξεργασμένων με ΠΗΠ δειγμάτων και αυτός με τη σειρά του σημαντικά μεγαλύτερος από το ρυθμό των ανεπεξέργαστων δειγμάτων. Επιπλέον, μεταξύ των προεπεξεργασμένων με ΠΗΠ δειγμάτων παρατηρήθηκε ότι η εντονότερη επεξεργασία (περισσότεροι παλμοί) οδηγεί σε γρηγορότερη ξήρανση. Συγκεκριμένα, ο χρόνος ξήρανσης των προεπεξεργασμένων με την εντονότερη συνθήκη ΠΗΠ (300 παλμοί) δειγμάτων παντζαριού στους 40°C αλλά και τους 55°C ήταν κατά 30 min ταχύτερος από τον αντίστοιχο χρόνο των ήπια προεπεξεργασμένων με ΠΗΠ (125 παλμοί) δειγμάτων. Η ίδια μείωση χρόνου επιτεύχθηκε στην ξήρανση των δειγμάτων γλυκοπατάτας στους 50°C, ανάμεσα στα έντονα προεπεξεργασμένα δείγματα και στα ανεπεξέργαστα. Επιπλέον, ακόμα μεγαλύτερη μείωση, περίπου 50 min, εμφανίστηκε στα έντονα επεξεργασμένα δείγματα κολοκυθιού σε σύγκριση με τα ανεπεξέργαστα, στη θερμοκρασία ξήρανσης των 40°C. Σε γενικές γραμμές τα κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα και των τριών λαχανικών ήταν αυτά που εμφάνιζαν τους μικρότερους χρόνους ξήρανσης με χαρακτηριστικό παράδειγμα τη μείωση του χρόνου ξήρανσης των κατεψυγμένων-αποψυγμένων δειγμάτων παντζαριού κατά 40 min, συγκριτικά με τα ανεπεξέργαστα δείγματα, στις θερμοκρασίες ξήρανσης 40°C και 55°C. Ωστόσο, η προεπεξεργασία της κατάψυξης-απόψυξης δεν προτιμάται γιατί αλλοιώνει σε πολύ μεγάλο βαθμό τα ποιοτικά και τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των τροφίμων. Με την αύξηση της θερμοκρασίας εμφανίζονται μικρότερες διαφορές μεταξύ των δειγμάτων ως προς το ρυθμό ξήρανσης. Συγκεκριμένα στους 40°C, τους 50°C και τους 55°C παρατηρούνται σημαντικές διαφορές μεταξύ των διαφορετικών συνθηκών ΠΗΠ ενώ στους 60°C και τους 70°C δεν συμβαίνει το ίδιο.

Για τη μαθηματική περιγραφή της ξήρανσης χρησιμοποιήθηκαν δύο μαθηματικά μοντέλα: ο 2<sup>ος</sup> νόμος του Fick για τη διάχυση και ένα εκθετικό μοντέλο πρώτης τάξης. Παρατηρήθηκε ότι ο φαινόμενος συντελεστής διάχυσης  $D_{eff}$  από τον 2<sup>ο</sup> νόμο του Fick και η σταθερά του ρυθμού ξήρανσης  $k$  από το εκθετικό μοντέλο πρώτης τάξης, και για τα τρία λαχανικά, για την ίδια θερμοκρασία είναι μεγαλύτεροι στα προεπεξεργασμένα με ΠΗΠ δείγματα από ότι στα ανεπεξέργαστα. Οι μεγαλύτεροι ρυθμοί ξήρανσης και συντελεστές διάχυσης βρέθηκαν στα κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα. Όσο πιο έντονη είναι η συνθήκη ΠΗΠ τόσο μεγαλύτεροι είναι οι δύο αυτοί δείκτες. Τα παραπάνω παρατηρούνται σε όλες τις θερμοκρασίες εκτός των 70°C, όπου ο συντελεστής διάχυσης και η σταθερά του ρυθμού ξήρανσης δεν μεταβάλλονται ανεξαρτήτως προεπεξεργασίας των δειγμάτων. Για τα ανεπεξέργαστα δείγματα γλυκοπατάτας στους 40°C υπολογίστηκε ο φαινόμενος συντελεστής διάχυσης ίσος με  $2.74 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ , σημαντικά μικρότερος σε σχέση με το φαινόμενο συντελεστή διάχυσης των κατεψυγμένων-αποψυγμένων δειγμάτων που ήταν  $3.94 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ .

$10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s. Ακόμη, για όλα τα δείγματα που έχουν υποστεί την ίδια επεξεργασία, οι δείκτες παρουσιάζουν σημαντική αύξηση με αύξηση της θερμοκρασίας ξήρανσης. Για παράδειγμα, τα προεπεξεργασμένα στους 90 παλμούς δείγματα κολοκυθιού εμφανίζουν στους 70°C ρυθμό ξήρανσης 0.0209 min<sup>-1</sup> ενώ στους 40°C ρυθμό ξήρανσης 0.0143min<sup>-1</sup>.

Η εξάρτηση του ρυθμού ξήρανσης και του φαινομένου συντελεστή διάχυσης από τη θερμοκρασία περιγράφηκε από την εξίσωση Arrhenius. Συμπεραίνεται ότι η ενέργεια ενεργοποίησης του φαινομένου συντελεστή διάχυσης  $D_{eff}$  και η ενέργεια ενεργοποίησης της σταθεράς του ρυθμού ξήρανσης  $k$  είναι σημαντικά μικρότερες στα επεξεργασμένα με ΠΗΠ δείγματα από ότι στα ανεπεξέργαστα και ακόμα μικρότερες στα κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα. Επίσης, μεταξύ των συνθηκών ΠΗΠ παρατηρείται ότι πιο έντονη επεξεργασία οδηγεί σε μείωση της ενέργειας ενεργοποίησης  $E_a$ . Αυτό σημαίνει ότι όσο αυξάνεται η ένταση των συνθηκών ΠΗΠ (και κατ'επέκταση η έκταση της κυτταρικής διάρρηξης) ο ρυθμός ξήρανσης εξαρτάται λιγότερο έντονα από τη θερμοκρασία. Παρατηρήθηκε συγκεκριμένα ότι στα δείγματα κολοκυθιού η μείωση της ενέργειας ενεργοποίησης του φαινομένου συντελεστή διάχυσης και της σταθεράς του ρυθμού ξήρανσης, από τα ανεπεξέργαστα στα κατεψυγμένα-αποψυγμένα δείγματα ήταν της τάξης του 50%. Η αντίστοιχη μείωση στα δείγματα γλυκοπατάτας και παντζαριού ήταν αρκετά μεγαλύτερη, της τάξης του 75-80%.

Τέλος, για σταθερή θερμοκρασία ο χρόνος ξήρανσης των δειγμάτων μειώνεται με αύξηση της έντασης της επεξεργασίας των ΠΗΠ που έχουν υποστεί ενώ για τις ίδιες συνθήκες επεξεργασίας αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε χαμηλότερο χρόνο ξήρανσης. Για παράδειγμα, στην ήπια προεπεξεργασία δειγμάτων παντζαριού ο χρόνος ξήρανσης στους 70°C ήταν 160 min και ο χρόνος ξήρανσης στους 40°C ήταν 240 min. Συνεπώς, ο ίδιος χρόνος ξήρανσης μπορεί να επιτευχθεί σε χαμηλότερη θερμοκρασία αν γίνει προεπεξεργασία του δείγματος με ΠΗΠ. Για παράδειγμα ο χρόνος ξήρανσης 180 min επιτεύχθηκε για την ξήρανση των έντονα επεξεργασμένων δειγμάτων κολοκυθιού στους 55°C αλλά και των ανεπεξέργαστων δειγμάτων στους 70°C, δηλαδή για την επίτευξη του ίδιου χρόνου ξήρανσης, η θερμοκρασία ξήρανσης μειώθηκε κατά 15°C. Αντίστοιχα αποτελέσματα παρατηρήθηκαν και για την ξήρανση της γλυκοπατάτας και του πατζαριού.

Με βάση τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, προκύπτει η θετική επίδραση της χρήσης των ΠΗΠ ως προεπεξεργασία της ξήρανσης, αφού οδηγεί σε χαμηλότερους χρόνους ξήρανσης αλλά και υψηλής ποιότητας προϊόντα χωρίς να παρουσιάζονται αξιοσημείωτες αλλοιώσεις στα ποιοτικά τους χαρακτηριστικά. Ταυτόχρονα εμφανίζονται και αξιοσημείωτες αλλαγές στην υφή των προϊόντων καθώς παρατηρήθηκε μαλάκωμα των ιστών γλυκοπατάτας, παντζαριού και κολοκυθιού που ερμηνεύεται από τις μικρότερες εφαρμοζόμενες δυνάμεις του αναλυτή υφής όσο η επεξεργασία των δειγμάτων γινόταν εντονότερη. Όλα τα παραπάνω, σε μια βιομηχανία θα οδηγούσαν στην εξοικονόμηση ενέργειας, κόστους και χρόνου κατά την ξήρανση, την κοπή ή τη μορφοποίηση των λαχανικών.



## 6. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Βιβλιογραφικές αναφορές έχουν αποδείξει ότι η μελέτη της επίδρασης της επεξεργασίας με Παλλόμενα Ηλεκτρικά Πεδία στο ρυθμό ξήρανσης και τα χαρακτηριστικά υφής των λαχανικών μπορεί να εφαρμοστεί και σε περισσότερα λαχανικά (αλλά και φρούτα), εκτός της γλυκοπατάτας, του παντζαριού και του κολοκυθιού. Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί ένα κομμάτι μιας ευρύτερης και πιο ολοκληρωμένης έρευνας όσον αφορά την επίδραση των ΠΗΠ ως προεπεξεργασία της ξήρανσης των τριών αυτών λαχανικών. Για αυτό το λόγο, για τη συνέχιση της παρούσας έρευνας μπορούν να γίνουν οι ακόλουθες προτάσεις:

- Η συσχέτιση των μηχανικών ιδιοτήτων με τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των ανεπεξέργαστων και επεξεργασμένων με ΠΗΠ δειγμάτων.
- Η αξιολόγηση ποιοτικών δεικτών στα τελικά αποξηραμένα προϊόντα των ανεπεξέργαστων και επεξεργασμένων με ΠΗΠ δειγμάτων.
- Ο προσδιορισμός των χρόνων επανενυδάτωσης των ανεπεξέργαστων και επεξεργασμένων με ΠΗΠ δειγμάτων και η σύγκριση των ποιοτικών δεικτών τους στα τελικά προϊόντα.





## 7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Abdelhaq, E., & Labuza, T. (1987). Air drying characteristics of apricots. *Journal of Food Science*, 342–360.
2. Achanta, S., & Okos, M. (1996). Predicting the quality of dehydrated foods and biopolymers—research needs and opportunities. *Drying Technology*, 1329–1368.
3. Ade-Omowaye, B., & Angersbach, A. (2000). Impact of high intensity electric field pulses on cell permeabilisation and as pre-processing step in coconut processing. *Innovative Food Science*, 203–209.
4. Ade-Omowaye, B., Angersbach, A., & Taiwo, K. (2001). Use of pulsed electric field pre-treatment to improve dehydration characteristics of plant based foods. *Trends in Food Science*.
5. Ade-Omowaye, B., Rastogi, N., & Angersbach, A. (2001). Effects of high hydrostatic pressure or high intensity electrical field pulse pre-treatment on dehydration characteristics of red paprika. *Innovative Food Science*, 2,1-7.
6. Akpinar, E., Midilli, A., Bicer Y. (2002). Single layer drying behaviour of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modelling. *Energy Conversion and Management*, 1689-1705
7. Alvarez, I., Pagán, R., Condón, S., & Raso, J. (2003). The influence of process parameters for the inactivation of *Listeria monocytogenes* by pulsed electric fields. *International Journal of Food Microbiology*, 87–95.
8. Alwazeer, D., Delbeau, C., Divies, C., & Cachon, R. (2003). Use of redox potential modification by gas improves microbial quality, color retention, and ascorbic acid stability of pasteurized orange juice. *International Journal of Food Microbiology*, 21–29.
9. Alzamora, S., & Hough, G. (1985). Mathematical prediction of leaching losses of water soluble vitamins during blanching of peas. *Journal of Food Technology*, 251–262.
10. Angersbach, A., Heinz, V., & Knorr, D. (1999). Electrophysiological model of intact and processed plant tissues: cell disintegration criteria. *Biotechnology Progress*, 753–762.
11. Angersbach, A., Heinz, V., & Knorr, D. (2000). Effects of pulsed electric fields on cell membranes in real food systems. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 135–149.
12. Angersbach, A., Heinz, V., & Knorr, D. (2002). Evaluation of Process-Induced Dimensional Changes in the Membrane Structure of Biological Cells Using Impedance Measurement. *Biotechnology Progress*, 597–603.
13. Angersbach, A., & Knorr, D. (1997). High intensity electric field pulses as pretreatment for effecting dehydration characteristics and rehydration properties of potato cubes. *Nahrung (Germany)*, 194–200.
14. Arevalo, P., Ngadi, M., & Bazhal, M. (2004). Impact of pulsed electric fields on the dehydration and physical properties of apple and potato slices. *Drying Technology*.
15. Aronsson, K. & Ronner, U., (2001). Influence of pH, water activity and temperature on the inactivation of *Escherichia coli* and *Saccharomyces cerevisiae* by pulsed electric fields. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 2, 105-112

16. Babalis, S., Papanicolaou, E., & Kyriakis, N. (2006). Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of figs (*Ficus carica*). *Journal of Food Engineering*, 205–214.
17. Bakalis, S., Knoerzer, K., & Fryer, P. (2015). Modeling Food Processing Operations. *Woodhead Publishing*, 95–123.
18. Barbosa-Canovas, G., & Pothakamury, U. (1999). Preservation of foods with pulsed electric fields. *Academic Press*, 1-9-107, 108–155.
19. Bazhal, M., Lebovka, N., & Vorobiev, E. (2003). Optimisation of pulsed electric field strength for electroporation of vegetable tissues. *Biosystems Engineering*, 339–345.
20. Bazhal, M., Ngadi, M., & Raghavan, G. (2003). Textural changes in apple tissue during pulsed electric field treatment. *Journal of Food*.
21. Beveridge, T., & Weintraub, S. (1995). Effect of blanching pretreatment on color and texture of apple slices at various water activities. *Food Research International*, 83–86.
22. Biekman, E., & Kroese-Hoedeman, H. (1996). Loss of solutes during blanching of mushrooms (*Agaricus bisporus*) as a result of shrinkage and extraction. *Journal of Food Engineering*, 139–152.
23. Bonau, C., Dumoulin, E., Raoult-Wack, A., & Berk, Z. (1996). Food drying and dewatering. *Drying*, 2135–2170.
24. Bouzrara, H., Vorobiev, E., & others. (2000). Beet juice extraction by pressing and pulsed electric fields. *International Sugar Journal*, 102(1216), 194–200.
25. Boyko, N. I., Tur, A. N., Evdoshenko, L. S., Zarochentsev, A. I., & Ivanov, V. M. (1998). A high-voltage pulse generator with mean power up to 50 kW for the treatment of foodstuffs. *Instruments and Experimental Techniques*, 41(2), 111–117.
26. Bushnell, A., Clark, R., Dunn, J., & Lloyd, S. (1996). Process for reducing levels of microorganisms in pumpable food products using a high pulsed voltage system. *US Patent 5,514,391*, 5,514,391.
27. Butz, P., & Tauscher, B. (2002). Emerging technologies: chemical aspects. *Food Research International*, 279–284.
28. Chalermchat, Y., & Dejmek, P. (2005). Effect of pulsed electric field pretreatment on solid–liquid expression from potato tissue. *Journal of Food Engineering*, 164–169.
29. Chegini, G., & Ghobadian, B. (2005). Effect of spray-drying conditions on physical properties of orange juice powder. *Drying Technology*, 657–668.
30. Cohen, J., & Yang, T. (1995). Progress in food dehydration. *Trends in Food Science & Technology*, 20–25.
31. Condello, M., Caraglia, M., & Castellano, M. (2013). Structural and functional alterations of cellular components as revealed by electron microscopy. *Microscopy Research*, 1057–1069.
32. Daillant-Spinnler, B., MacFie, H., & Beyts, P. (1996). Relationships between perceived sensory properties and major preference directions of 12 varieties of apples from the southern hemisphere. *Food Quality and Preference*, 113–126.
33. Datta, A. (2008). Status of Physics-Based Models in the Design of Food Products, Processes, and Equipment. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 121–129.
34. Dimopoulos, G., Tsonas, T., Andreou, V., Katsaros, G. & Taoukis P. (2016). Effect of Pulsed Electric Fields on the drying process of sweet potato. *IUFoST: 18<sup>th</sup> World Congress of Food Science and Technology*.

35. 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*.
36. Dunn, J., & Pearlman, J. (1987). Methods and apparatus for extending the shelf life of fluid food products. *US Patent 4,695,472*.
37. Dziezak, J. D. (1988). Microencapsulation and encapsulated ingredients. *Food Technology*, 42(4), 136–151.
38. Eshtiaghi, M., Stute, R., Knorr, D. (1994). High Pressure and freezing pretreatment effects on drying, rehydration, texture and color of green beans, carrots and potatoes. *Journal of Food Science*, 1168-1170
39. Eshtiaghi, M., & Knorr, D. (2002). High electric field pulse pretreatment: potential for sugar beet processing. *Journal of Food Engineering*, 265–272.
40. Evrendilek, G., & Zhang, Q. (2003). Effects of pH, temperature, and pre-pulsed electric field treatment on pulsed electric field and heat inactivation of *Escherichia coli* O157: H7. *Journal of Food Protection*®, 755–759.
41. Feng, H., & Yang, W. (2011). Ultrasonic processing. *Nonthermal Processing Technologies for Food*. Wiley-Blackwell, 135–154.
42. Fox, B. A., & Cameron, A. G., (1982). *Food science, a chemical approach*. Hodder and Stoughton Ltd.
43. Frenzel, S., Michelberger, T., Bluhm, H., Sack, M., & Kern, M. (2005). Entwicklung und Bau einer Elektroimpuls-Pilotanlage. *Final Report, FKZ, 330434*. article.
44. Frey, W. (2016). Basic Concepts on High Voltage Pulse Generation. *Institute of Pulsed Power and Microwave Technology (IHM)*., 28
45. Gachovska, T., Adedeji, A., & Ngadi, M. (2008). Drying characteristics of pulsed electric field-treated carrot. *Drying*.
46. Gachovska, T., Simpson, M., & Ngadi, M. (2009). Pulsed electric field treatment of carrots before drying and rehydration. *Journal of the Science of Food and Agriculture*.
47. Gaillard, S., Leguérinel, I., & Mafart, P. (1998). Modelling combined effects of temperature and pH on the heat resistance of spores of *Bacillus cereus*. *Food Microbiology*, 625–630.
48. García-Ramos, F., Valero, C., & Homer, I. (2005). Non-destructive fruit firmness sensors: a review. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 61–73.
49. Góngora-Nieto, M., Sepúlveda, D., & Pedrow, P. (2002). Food processing by pulsed electric fields: treatment delivery, inactivation level, and regulatory aspects. *LWT-Food Science and Technology*, 375–388.
50. Goula, A., & Adamopoulos, K. (2008). Effect of maltodextrin addition during spray drying of tomato pulp in dehumidified air: I. Drying kinetics and product recovery. *Drying Technology*, 714–725.
51. Grimi, N. (2009). Vers l'intensification du pressage industriel des agroressources par champs électriques pulsés: étude multi-échelles.
52. Grimi, N., Lebovka, N., & Vorobiev, E. (2009). Compressing behavior and texture evaluation for potatoes pretreated by pulsed electric field. *Journal of Texture*, 208–224.
53. Grimnes, S., & Martinsen, O. G. (n.d.). *Bioimpedance and bioelectricity basics*. 2000. misc, Academic press.
54. Haan, S. De, & Willcock, P. (2002). Comparison of the energy performance of pulse generation circuits for PEF. *Innovative Food Science & Emerging*, 349–356.

55. Haas, G., Prescott, H., & Cante, C. (1974). On rehydration and respiration of dry and partially dried vegetables. *Journal of Food Science*, 681–684.
56. Halder, A., Dhall, A., & Datta, A. (2011). Modeling transport in porous media with phase change: applications to food processing. *Journal of Heat Transfer*.
57. Harrison, S., & Barbosa-Cánovas, G. (1997). Saccharomyces cerevisiae Structural Changes Induced by Pulsed Electric Field Treatment. *LWT-Food Science and Technology*, 236–240.
58. Hawlader, M., Perera, C., Tian, M., Ong, B., & Chng, K. (2004). Heat pump drying under inert atmosphere. *IDS*, 309–316.
59. Heinz, V., Alvarez, I., Angersbach, A., & Knorr, D. (2001). Preservation of liquid foods by high intensity pulsed electric fields - basic concepts for process design. *Trends in Food Science & Technology*, 103–111.
60. Heinz, V., & Knorr, D. (2000). Effect of pH, ethanol addition and high hydrostatic pressure on the inactivation of Bacillus subtilis by pulsed electric fields. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 151–159.
61. Heinz, V., Phillips, S., Zenker, M., & Knorr, D. (1999). Inactivation of Bacillus subtilis by high intensity pulsed electric fields under close to isothermal conditions. *Food Biotechnology*, 155–168.
62. Heinz, V., Toepfl, S., & Knorr, D. (2003). Impact of temperature on lethality and energy efficiency of apple juice pasteurization by pulsed electric fields treatment. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 167–175.
63. Heldman, D., & Hartel, R. (1997). Principles of food processing. *Aspen Publication*.
64. Hülshager, H., Potel, J., & Niemann, E. (1983). Electric field effects on bacteria and yeast cells. *Radiation and Environmental Biophysics*, 149–162.
65. Jackson, J., & Bourne, M. (1996). Optimization of blanching for crispness of banana chips using response surface methodology. *Journal of Food Science*, 165–166.
66. Jaeger, H., Balasa, A., & Knorr, D. (2009). Food industry applications for pulsed electric fields. *Electrotechnologies for Extraction from Food Plants and Biomaterials*, 181–217.
67. Jaeger, S., Andani, Z., & Wakeling, I. (1998). Consumer preferences for fresh and aged apples: a cross-cultural comparison. *Food Quality and Preference*, 355–366.
68. Jangam, S. (2011). An overview of recent developments and some R&D challenges related to drying of foods. *Drying Technology*, 1343–1357.
69. Jay, J. (2000). High-temperature food preservation and characteristics of thermophilic microorganisms. *Modern Food Microbiology*, 335.
70. Jayaram, S., Castle, G., & Margaritis, A. (1993). The effects of high field DC pulse and liquid medium conductivity on survivability of Lactobacillus brevis. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 117–122.
71. Jeyamkondan, S., & Jayas, D. (1999). Pulsed electric field processing of foods: a review. *Journal of Food Protection*, 62, 1088–1096.
72. Juneja, V., & Marmer, B. (1998). Thermal inactivation of Clostridium perfringens vegetative cells in ground beef and turkey as affected by sodium pyrophosphate. *Food Microbiology*, 281–287.
73. Klonowski, I., Heinz, V., Toepfl, S., & Gunnarsson, G. (2006). Applications of pulsed electric field technology for the food industry. *Reykjavik, Iceland.*, 197–221.

74. Knorr, D., & Angersbach, A. (1998). Impact of high-intensity electric field pulses on plant membrane permeabilization. *Trends in Food Science & Technology*.
75. Knorr, D., Geulen, M., Grahl, T., & Sitzmann, W. (1994). Food application of high electric field pulses. *Trends in Food Science & Technology*, 71–75.
76. Kompany, E., Allaf, K., Bouvier, J. M., Guigon, P., & Maureaux, A. (1991). New drying method of fruits and vegetables. Quality improvement of the final product. *Elsevier Publishers*, 499–506.
77. Kostoglou, M., Chrysafis, N., & Andritsos, N. (2013). Modelling tomato dehydration in a tunnel dryer using geothermal energy. *Drying Technology*, 5–15.
78. Kotnik, T., Pucihar, G., Reberšek, M., & Miklavčič, D. (2003). Role of pulse shape in cell membrane electropermeabilization. *Biochimica et Biophysica*, 193–200.
79. Lebovka, N., Bazhal, M., & Vorobiev, E. (2000). Simulation and experimental investigation of food material breakage using pulsed electric field treatment. *Journal of Food Engineering*, 213–223.
80. Lebovka, N., Bazhal, M., & Vorobiev, E. (2001). Pulsed electric field breakage of cellular tissues: visualisation of percolative properties. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 113–125.
81. Lebovka, N., Bazhal, M., & Vorobiev, E. (2002). Estimation of characteristic damage time of food materials in pulsed-electric fields. *Journal of Food Engineering*, 337–346.
82. Lebovka, N., Praporscic, I., & Vorobiev, E. (2004). Effect of moderate thermal and pulsed electric field treatments on textural properties of carrots, potatoes and apples. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 9–16.
83. Lebovka, N., Shynkaryk, M., & Vorobiev, E. (2006). Drying of potato tissue pretreated by ohmic heating. *Drying Technology*, 601–608.
84. Lebovka, N., Shynkaryk, N., & Vorobiev, E. (2007a). Pulsed electric field enhanced drying of potato tissue. *Journal of Food Engineering*, 606–613.
85. Lebovka, N., Shynkaryk, N., & Vorobiev, E. (2007b). Pulsed electric field enhanced drying of potato tissue. *Journal of Food Engineering*.
86. Lebovka, N. & Vorobiev, E. (2016). Techniques to detect electroporation in food tissues. *3<sup>rd</sup> School of Pulsed Electric Field Processing of Food*, 23-35
87. Li, S., Zhang, H., Jin, T., Turek, E., & Lau, M. (2005). Elimination of *Lactobacillus plantarum* and achievement of shelf stable model salad dressing by pilot scale pulsed electric fields combined with mild heat. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 125–133.
88. Loginova, K., Shynkaryk, M., & Lebovka, N. (2010). Acceleration of soluble matter extraction from chicory with pulsed electric fields. *Journal of Food Engineering*, 374–379.
89. Lubicki, P., & Jayaram, S. (1997). High voltage pulse application for the destruction of the Gram-negative bacterium *Yersinia enterocolitica*. *Bioelectrochemistry and Bioenergetics*, 135–141.
90. Maharaj, V., & Sankat, C. (1996). Quality changes in dehydrated dasheen leaves: effects of blanching pre-treatments and drying conditions. *Food Research International*, 563.
91. Mason, T. J., Riera, E., Vercet, A., & Lopez-Buesa, P. (2005). Application of ultrasound. *Emerging Technologies for Food Processing*, 32, 323–351.

92. McDonald, C., Lloyd, S., & Vitale, M. (2000). Effects of pulsed electric fields on microorganisms in orange juice using electric field strengths of 30 and 50 kV/cm. *Journal of Food Science*, 984–989.
93. Moore, J. G. (1995). Drum dryers. *Handbook of Industrial Drying, 1*, 249–262.
94. Morren, J., Roodenburg, B., & Haan, S. de. (2003). Electrochemical reactions and electrode corrosion in pulsed electric field (PEF) treatment chambers. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 285–295.
95. Mothibe, K. J., Zhang, M., Nsor-atindana, J. & Wang, Y. (2011). Use of ultrasound pretreatment in drying of fruits: Drying rates, Quality attributes, and shelf life extension. *Journal of Drying Technology*, 1611-1621
96. Mujumdar, A., & Devahastin, S. (2000). Fundamental principles of drying. *Exergex, Brossard, Canada*, 1–21.
97. Mujumdar, A., & Huang, L. (2007). Global R&D needs in drying. *Drying Technology*, 647–658.
98. Mujumdar, A. S., Jangam, S. V, & Thorat, B. N. (2010). R&D Needs Challenges and Opportunities for Innovation in Drying Technologies. *Jangam, SV*.
99. Mujumdar, A., & Wu, Z. (2007). Thermal drying technologies: new developments and future R&D potential.
100. Nijhuis, H., Toringa, E., Luyten, H., & Rene, F. (1996). Research needs and opportunities in the dry conservation of fruits and vegetables. *Drying Technology*, 1429–1457.
101. Perera, C. O. (2001). Modified atmosphere heat pump drying of food products. In *Proceedings of the 2nd Asia--Oceania Drying Conference* (pp. 469–476).
102. Puértolas, E., López, N., Condón, S., & Álvarez, I. (2010). Potential applications of PEF to improve red wine quality. *Trends in Food Science & Technology*, 247–255.
103. 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.
104. Qin, B., Zhang, Q., & Barbosa-Canovas, G. (1994). Inactivation of microorganisms by pulsed electric fields of different voltage waveforms. *Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1047–1057.
105. Quintero-Ramos, A., & Bourne, M. (1992). Texture and rehydration of dehydrated carrots as affected by low temperature blanching. *Journal of Food Science*, 1127.
106. Rahman, M. (2007). *Handbook of food preservation*, 173–216.
107. Raso, J., & Heinz, V. (2010). *Pulsed Electric Fields Technology for the Food Industry: Fundamentals and Applications*, Springer, 87
108. Rastogi, N. (2013). High-Pressure Processing of Dairy Products. *Recent Developments in High Pressure Processing of Foods*, 51–66.
109. Rastogi, N., Eshtiaghi, M., & Knorr, D. (1999). Accelerated mass transfer during osmotic dehydration of high intensity electrical field pulse pretreated carrots. *Journal of Food Science*, 1020–1023.
110. Ratti, C., Bhandari, B., Bansal, N., & Zhang, M. (2013). Freeze drying for food powder production. *Handbook of Food Powders: Processes and Properties*, 57–84.

111. Rockland, L., & Stewart, G. (2013). Water activity: influences on food quality: a treatise on the influence of bound and free water on the quality and stability of foods and other natural products.
112. Rodriguez, G., Vasseur, J., & Courtois, F. (1996). Design and control of drum dryers for the food industry. Part 1. Set-up of a moisture sensor and an inductive heater. *Journal of Food Engineering*, 271–282.
113. Sabarez, H. (2007). Tomato dehydration. *Food Drying Science and Technology*., 603–628.
114. Sabarez, H. (2012). Computational modelling of the transport phenomena occurring during convective drying of prunes. *Journal of Food Engineering*, 279–288.
115. Sabarez, H. (2014). Mathematical Modeling of the Coupled Transport Phenomena and Color Development: Finish Drying of Trellis-Dried Sultanas. *Drying Technology*, 578–589.
116. Sabarez, H. T. (2010). Improving prune dehydration cost efficiency. Unpublished Report Prepared by CSIRO Food and Nutritional Sciences for Horticulture Australia Limited (HAL), Australia.
117. Sack, M., Schultheiss, C., & Bluhm, H. (2005). Triggered Marx generators for the industrial-scale electroporation of sugar beets. *IEEE Transactions on Industry*, 707–714.
118. Sack, M., Sigler, J., Eing, C., & Stukenbrock, L. (2010). Operation of an electroporation device for grape mash. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1928–1934.
119. Sack, M., Sigler, J., Frenzel, S., Eing, C., & Arnold, J. (2010). Research on industrial-scale electroporation devices fostering the extraction of substances from biological tissue. *Food Engineering*, 147–156.
120. Sale, A., & Hamilton, W. (1967). Effects of high electric fields on microorganisms: I. Killing of bacteria and yeasts. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General*, 781–800.
121. Schaffner, D., & Labuza, T. (1997). Predictive microbiology: where are we, and where are we going? *Food Technology (USA)*, 95–99.
122. Shamaila, M., & Durance, T. (1996). Water blanching effects on headspace volatiles and sensory attributes of carrots. *Journal of Food Science*, 1191–1195.
123. Shynkaryk, M., Lebovka, N., & Vorobiev, E. (2008). Pulsed electric fields and temperature effects on drying and rehydration of red beetroots. *Drying Technology*.
124. Singh, R.P & Heldman, D.R (1981), Food Process Engineering, AVI publishing company, Inc, Westport, Connecticut
125. Sivakumar, Saravanan,R., Elaya Perumal,A.,Iniyan, S. (2016). Fluidized bed drying of some agro products – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 61: 280-301.
126. Stanley, D., & Parkin, K. (1991). Biological membrane deterioration and associated quality losses in food tissues. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition*.
127. Taiwo, K., & Angersbach, A. (2001). Effects of pretreatments on the diffusion kinetics and some quality parameters of osmotically dehydrated apple slices. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2804–2811.
128. Tang, J., Feng, H., & Shen, G. (2003). Drum drying. *Encyclopedia of Agricultural, Food, and Biological Engineering* 211–214.

129. Tang, J., & Yang, T. (2004). Dehydrated vegetables: principles and systems. *Marcel Dekker, Inc. New York, Basel*
130. Teissie, J., Golzio, M., & Rols, M. (2005). Mechanisms of cell membrane electroporation: a minireview of our present (lack of?) knowledge. *Et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects*, 270–280.
131. Toepfl, S. (2006). Pulsed Electric Fields (PEF) for Permeabilization of Cell Membranes in Food - and Bioprocessing – Applications, Process and Equipment Design and Cost Analysis. , 43
132. Treybal Robert, E. (1981). Mass-transfer operations. *McGraw-Hill Book Company*.
133. Tsong, T. (1991). Electroporation of cell membranes. *Biophysical Journal*, 297–306.
134. Tsotsas, E., & Mujumdar, A.S. (2011). Modern Drying Technology-Vol 3, *Product quality and formulation*. Wiley-VCH, Weinheim, Germany
135. Vorobiev, E., Jemai, A., & Bouzrara, H. (2005). Pulsed electric field assisted extraction of juice from food plants. *Novel Food Processing Technologies*. *CRC Press*, 105–130.
136. Vorobiev, E., & Lebovka, N. (2006). Extraction of intercellular components by pulsed electric fields. *Pulsed Electric Fields Technology for the Food Industry*.
137. Wang, W., & Sastry, S. (2000). Effects of thermal and electrothermal pretreatments on hot air drying rate of vegetable tissue. *Journal of Food Process Engineering*, 299–319.
138. Weaver, J., & Chizmadzhev, Y. (1996). Theory of electroporation: a review. *Bioelectrochemistry and Bioenergetics*, 111–126.
139. Wiktor, A., Iwaniuk, M., Śledź, M., & Nowacka, M. (2013). Drying kinetics of apple tissue treated by pulsed electric field. *Drying Technology*.
140. Wiktor, A., Sledz, M., Jurek, N., & Witrowa-Rajchert, D. (2012). Drying of ultrasound pretreated apple and its selected physical properties. *Journal of Food Engineering*, 427-433
141. Yucel, U., Alpas, H., Bayindirli, A. (2010). Evaluation of high pressure pretreatment for enhancing the drying rates of carrot, apple and green bean. *Journal of Food Engineering*, 266-272
142. Zakhem , H., Lanoiselle, J. L., Lebovka, N., Nonus, M. & Vorobiev, E. (2006). The early stages of *Saccharomyces cerevisiae* yeast suspensions damage in moderate pulsed electric fields. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 189-197
143. Zhang, M., Tang, J., Mujumdar, A.S., Wang, S. (2006). Trends in food Science & Technology. *Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables*, 524-534
144. Zhang, Q., & Barbosa-Cánovas, G. (1995). Engineering aspects of pulsed electric field pasteurization. *Journal Of Food Engineering*, 25,261–281.
145. Zimmermann, U. (1986). Electrical breakdown, electroporation and electrofusion. *Reviews of Physiology, Biochemistry and Pharmacology*, 176–257.
146. Zimmermann, U. (1996). The effect of high intensity electric field pulses on eukaryotic cell membranes: fundamentals and applications. *Electromanipulation of Cells*, 1–106.



147. Zimmermann, U., & Benz, R. (1980). Dependence of the electrical breakdown voltage on the charging time in *Valonia utricularis*. *The Journal of Membrane Biology*, 33–43.
148. Ταούκης, Π., Ωραιοπούλου, Β., (2009). *Επιστήμη και Μηχανική Τροφίμων*, 293-295.