

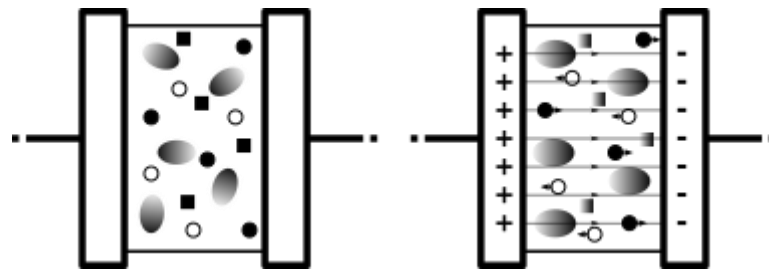


Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής  
Σχολή Επιστημών Τροφίμων  
Τμήμα Επιστήμης και Τεχνολογίας Τροφίμων

## ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Επεξεργασία Υγρών Τροφίμων με Παλμικά Ηλεκτρικά Πεδία**

**Pulsed Electric Field Treatment of Liquid Foods**



ΌΝΟΜΑ ΦΟΙΤΗΤΗ  
Χρηστάκης Άγγελος  
Christakis Aggelos

ΌΝΟΜΑ ΕΙΣΗΓΗΤΗ  
Μπάρτζης Βασίλειος  
Bartzis Vasileios

ΑΙΓΑΛΕΩ / AIGALEO 2023

Έγινε δεκτή

Οι υπογράφωντες δηλώνουμε ότι έχουμε εξετάσει τη πτυχιακή εργασία με τίτλο «Επεξεργασία Υγρών Τροφίμων με Παλμικά Ηλεκτρικά Πεδία» που παρουσιάστηκε από τον Χρηστάκη Άγγελο και βεβαιώνουμε ότι γίνεται δεκτή.

Ημερομηνία

21/06/2023

Όνομα επιβλέποντος

ΜΠΑΡΤΖΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

Επίκουρος Καθηγητής

Ημερομηνία

21/06/2023

Όνομα μέλους επιτροπής

ΣΤΡΑΤΗ ΕΙΡΗΝΗ

Επίκουρη Καθηγήτρια

Ημερομηνία

21/06/2023

Όνομα μέλους επιτροπής

ΚΡΙΤΣΗ ΕΥΤΥΧΙΑ

Επίκουρη Καθηγήτρια

## **Δήλωση περί λογοκλοπής / Copyright**

Έχοντας πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικής ιδιοκτησίας, δηλώνω ότι είμαι αποκλειστική συγγραφέας της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Δηλώνω, επίσης, ότι αναλαμβάνω όλες τις συνέπειες, όπως αυτές νομίμως ορίζονται, στην περίπτωση που διαπιστωθεί διαχρονικά ότι η εργασία μου αυτή ή τμήμα αυτής αποτελεί προϊόν λογοκλοπής.

Χρηστάκης Άγγελος

## **Ευχαριστίες**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Βασίλειο Μπάρτζη (PhD in Quantum Optics), Επίκουρος Καθηγητής του ΠΑΔΑ, για την καθοδήγηση που προσέφερε αλλά και για τον χρόνο που διέθεσε δίνοντας συμβουλές επάνω σε επιστημονικές απορίες, βοηθώντας έτσι στην υλοποίηση της παρούσας εργασίας. Μεγάλη τιμή θα ήθελα να αποδώσω στους καθηγητές δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης Χριστίνα Τζίνη Δημητρίου (MSc in Energy), Αναστασία Ζερβού (MSc in Food Chemistry) και Γιάννη Γεωργουλέτη (BSc in Physics), που όχι μόνο με ενέπνευσαν, αλλά και με ενθάρρυναν με τον τρόπο τους να ασχοληθώ με διάφορους επιστημονικούς κλάδους από μικρή ηλικία.

## Περίληψη

Στην παρούσα εργασία γίνεται πρωτίστως ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας με σκοπό να οριστούν τα βασικότερα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά την επεξεργασία υγρών τροφίμων με παλμικά ηλεκτρικά πεδία (PEF). Μια τέτοια επεξεργασία μπορεί να βρει εφαρμογή στη βιομηχανία τροφίμων, καθώς αποτελεί μια μη-θερμική μέθοδο μείωσης του μικροβιακού φορτίου ενός τροφίμου, αυξάνοντας τη σταθερότητά του και διατηρώντας παράλληλα τα θερμοευαίσθητα συστατικά του. Ωστόσο, λόγω της πολυπλοκότητας της μεθόδου αυτής, είναι απαραίτητο τα φαινόμενα αυτά να αναλυθούν και να εκφραστούν με μαθηματικά πρότυπα, επιτρέποντας έτσι την ευκολότερη εύρεση και υπολογισμό των κρίσιμων παραμέτρων της επεξεργασίας (χρόνος επεξεργασίας, ένταση ηλεκτρικού πεδίου, κατάλληλη κυματομορφή κ.α.). Για να εντοπιστούν αρχικά τα φαινόμενα που αφορούν τους μικροοργανισμούς-στόχους, λαμβάνονται στοιχεία από τη διεθνή βιβλιογραφία, συνθέτοντας έτσι μια σειρά από μαθηματικά πρότυπα που αναλύουν τις αλληλεπιδράσεις των κυτταρικών μεμβρανών με το ηλεκτρικό πεδίο. Εν συνεχεία, το δεύτερο σκέλος της ανάλυσης αφορά την αλληλεπίδραση του ηλεκτρικού πεδίου με την ύλη – δηλαδή με τα ιόντα και τα μόρια του υγρού τροφίμου. Για τη μαθηματική προτυποποίηση αυτή, κατασκευάζεται μια σειρά εξισώσεων στη γενική τους μορφή, που περιγράφουν τη ροή των ιόντων και των μορίων σε έναν θεωρητικό χώρο επεξεργασίας (τριών διαστάσεων). Έπειτα, γίνεται επίλυση του συστήματος Poisson Nernst – Planck (PNP) για ένα ζεύγος ιόντων που βρίσκονται σε διάλυμα εντός ενός θαλάμου επεξεργασίας παράλληλων πλακών και αποδεικνύεται ότι οι συγκεντρώσεις τους μεταβάλλονται ανάλογα με τη θέση τους στον χώρο. Κλείνοντας, γίνεται αναφορά σε μερικούς τομείς της επεξεργασίας με παλμικά ηλεκτρικά πεδία που απαιτούν περεταίρω έρευνα, καθώς παράλληλα αναφέρονται κάποια πρώτα βήματα για την ενσωμάτωση μιας τέτοιας διεργασίας στη βιομηχανία τροφίμων.

### Λέξεις – Κλειδιά:

Παλμικά ηλεκτρικά πεδία, Υγρά τρόφιμα, Ροές μορίων, Ηλεκτροδιάτρηση, Ηλεκτροπερατότητα, Κατάρρευση κυτταρικής μεμβράνης

## **Abstract**

In this paper, the international literature is primarily reviewed in order to define the main phenomena that take place during the treatment of liquid foods with pulsed electric fields (PEF). Such treatment can find application in the food industry, as it is a non-thermal method of reducing the microbial load of a food, increasing its stability while preserving its thermosensitive components. However, due to the complexity of this method, it is necessary to analyse and express these phenomena in mathematical models, thus allowing easier calculation of the critical processing parameters (processing time, electric field intensity, appropriate waveform, etc.). To initially identify the phenomena related to the target microorganisms, data from the international literature are taken, thus synthesising a set of mathematical models analysing the interactions of cell membranes with the electric field. Then, the second part of the analysis concerns the interaction of the electric field with matter - i.e., with the ions and molecules of the liquid food. For this mathematical standardisation, a series of equations are constructed in their general form, describing the flow of ions and molecules in a theoretical three-dimensional processing space. Then, the Poisson Nernst - Planck (PNP) system is solved for a pair of ions in a solution that flows within a parallel-plate processing chamber and it is shown that their concentrations vary with their position in space. Concluding, some areas of pulsed electric field processing that require further research are mentioned, as well as some first steps towards the integration of such a process in the food industry.

## **Keywords:**

Pulsed electric fields, Liquid foods, Ionic flow, Electroporation, Electropermeabilization, Cell membrane breakdown

## Περιεχόμενα

Δήλωση περί λογοκλοπής / Copyright .....	2
Ευχαριστίες .....	3
Περίληψη .....	4
Abstract .....	5
Περιεχόμενα .....	6
Κατάλογος Πινάκων .....	8
Κατάλογος Σχημάτων / Εικόνων .....	9
Ονοματολογία Συμβόλων .....	10
Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή .....	13
Κεφάλαιο 2. Θεωρητικό υπόβαθρο .....	15
2.1. Βασική δομή κυτταρικών μεμβρανών .....	15
2.2. Το φαινόμενο της ηλεκτροδιάτρησης .....	17
2.3. Τάση κατάρρευσης κυτταροπλασματικής μεμβράνης .....	19
2.4. Κινητική μικροβιακής αδρανοποίησης .....	21
2.4.1. Μοντέλο Hülshager .....	23
2.4.2. Μοντέλο Fermi .....	24
2.5. Κυματομορφές ηλεκτρικού πεδίου .....	26
2.6. Επιλογή κατάλληλης κυματομορφής .....	27
2.6.1. Μονοπολικότητα – διπολικότητα .....	28
2.6.2. Σχήμα .....	29
2.7. Γεννήτριες παραγωγής παλμών .....	30
2.7.1. Εκθετικοί παλμοί .....	30
2.7.2. Τετραγωνικοί παλμοί .....	31
2.8. Ανεπιθύμητα φαινόμενα .....	34
2.8.1. Διάσπαση .....	34
2.8.2. Ηλεκτροχημικές αντιδράσεις – διάβρωση ηλεκτροδίων .....	34

2.8.3. Ωμική θέρμανση.....	36
2.9. Θάλαμοι επεξεργασίας .....	37
Κεφάλαιο 3. Σκοπός της εργασίας.....	38
Κεφάλαιο 4. Επεξεργασία δεδομένων .....	39
4.1. Μικροβιακά φαινόμενα .....	39
4.1.1. Κατάρρευση κυτταροπλασματικής μεμβράνης .....	39
4.1.2. Χρόνος φόρτισης μεμβράνης.....	42
4.1.3. Ηλεκτροδιάτρηση πυρήνα.....	43
4.2. Μοριακά φαινόμενα.....	45
4.2.1. Ροή λόγω ηλεκτρομεταφοράς .....	45
4.2.2. Ροή λόγω βαθμίδας συγκέντρωσης - διάχυση.....	47
4.2.3. Εξαναγκασμένη ροή.....	48
4.2.4. Εξίσωση Nernst – Planck.....	48
4.2.5. Ροές μορίων .....	49
4.3. Ροή ιόντων σε θάλαμο παράλληλων πλακών .....	50
Κεφάλαιο 5. Αποτελέσματα και συζήτηση .....	56
5.1. Αποτελέσματα ηλεκτροδιάτρησης μεμβρανών.....	56
5.2. Αποτελέσματα κίνησης ιόντων.....	57
Κεφάλαιο 6. Συμπεράσματα και υποδείξεις για περαιτέρω έρευνα .....	59
Βιβλιογραφία .....	61
Πηγές εικόνων .....	67
Παράρτημα .....	68



## **Κατάλογος Πινάκων**

Πίνακας 0.1: Πίνακας συμβόλων.....	10
Πίνακας 0.2: Πίνακας δεικτών.....	11
Πίνακας 0.3: Πίνακας σταθερών.....	12
Πίνακας 5.1.1: Ενδεικτική χρονική διάρκεια διεργασιών ηλεκτροδιάτρησης.....	56

## Κατάλογος Σχημάτων / Εικόνων

Εικόνα 1.0.1: Διάταξη επεξεργασίας τροφίμων με παλμικά ηλεκτρικά πεδία. ....	14
Εικόνα 2.1.1: Δομή κυτταροπλασματικής μεμβράνης – διπλοστοιβάδα φωσφολιπιδίων. ....	15
Εικόνα 2.1.2: Δομή φωσφολιπιδίου. ....	16
Εικόνα 2.2.1: Διάγραμμα μοριακών μηχανισμών ηλεκτροδιάτρησης α) Δημιουργία υδάτινων πόρων β) Χημικές μεταβολές στα φωσφολιπίδια της μεμβράνης γ) Καταστροφή πρωτεϊνικών καναλιών. ....	18
Εικόνα 2.3.1: Φόρτιση μεμβράνης λόγω επίδρασης εξωτερικού πεδίου. ....	20
Εικόνα 2.4.1: Είδη καμπυλών αδρανοποίησης μικροοργανισμών. Α: γραμμική, Β: κυρτή προς τα άνω, C και D: κυρτές προς τα κάτω, E και F: σιγμοειδείς. ....	22
Εικόνα 2.5.1: Διάφορα είδη κυματομορφών του δυναμικού. 1-4: μονοπολικά κύματα, 5-8: διπολικά συνεχή κύματα, 9-12: διπολικά ασυνεχή κύματα. ....	27
Εικόνα 2.6.1: Παράμετροι κυματομορφής. ....	28
Εικόνα 2.7.1.1: Γεννήτρια Marx. Απάνω: Φόρτιση τράπεζας πυκνωτών, Κάτω: Αποφόρτιση κυκλώματος. ....	31
Εικόνα 2.7.2.1: Μετάβαση από γραμμή μεταφοράς σε PFN. ....	32
Εικόνα 2.9.1: Βασικές γεωμετρίες θαλάμων επεξεργασίας. α) Παράλληλων πλακών, β) Ομοαξονική, γ) Ομοπεδιακή ή συγγραμμική. ....	37
Εικόνα 4.1.1.1: Αναπαράσταση κυττάρου εντός ηλεκτρικού πεδίου. ....	40
Εικόνα 4.3.1: Ορισμός ορθοκανονικού συστήματος αξόνων σε θάλαμο παράλληλων πλακών. ....	51

## Ονοματολογία Συμβόλων

Πίνακας 0.1: Πίνακας συμβόλων

Σύμβολο	Ερμηνεία	Μονάδες μέτρησης
<b>Λατινικά σύμβολα</b>		
$\vec{a}$	Επιτάχυνση	$ms^{-2}$
$A$	Πλάτος κύματος δυναμικού	$V$
$B$	Συντελεστής παλινδρόμησης	-
$c$	Ειδική θερμότητα (Κεφάλαιο 2.8.3)	$J kg^{-1}K^{-1}$
$c$	Ειδική χωρητικότητα (Κεφάλαιο 4.1.2)	$Fm^{-2}$
$c, C$	Συγκέντρωση (Κεφάλαια 4.2 και 5.2)	$mol m^{-3}$
$C$	Χωρητικότητα (Κεφάλαια 2.7 και 4.1.2)	$F$
$d$	Διάμετρος	$m$
$D$	Συντελεστής διάχυσης	$m^2s^{-1}$
$E, \vec{E}$	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου	$Vm^{-1}$
$\vec{F}$	Δύναμη	$kg m s^{-2}$
$g$	Σταθερά Stokes	$kg s^{-1}$
$G$	Αγωγιμότητα ανά επιφάνεια	$Sm^{-2}$
$\vec{j}$	Ροή	$mol m^{-2}s^{-1}$
$l$	Μήκος γραμμής μεταφοράς	$m$
$L$	Συντελεστής αυτεπαγωγής	$H$
$m$	Μάζα	$kg$
$n$	Φυσικός αριθμός	-
$Q$	Πυκνότητα ενέργειας ανά μονάδα όγκου	$Jm^{-3}$
$r, R$	Ακτίνα	$m$
$R$	Αντίσταση	$\Omega$
$S$	Κλάσμα επιβιώνοντων κυττάρων	-
$t$	Χρόνος	$s$

$T$	Θερμοκρασία	$K$
$\bar{u}$	Ηλεκτροχημική ευκινησία	$C s kg^{-1}$
$u$	Ευκινησία	$mol s kg^{-1}$
$\vec{v}$	Ταχύτητα	$ms^{-1}$
$V$	Διαφορά δυναμικού	$V$
$W_C$	Ενέργεια	$J$
$z$	Αριθμός φορτίου	-
<b>Ελληνικά σύμβολα</b>		
$\epsilon$	Ηλεκτρική διαπερατότητα	$F m^{-1}$ ή $C^2 J^{-1} m^{-1}$
$\eta$	Δυναμικό ιξώδες διαλύματος	$kg m^{-1} s^{-1}$
$\theta$	Γωνία	$rad$
$\lambda_s$	Πάχος	$\text{\AA}$ ( $1 \text{\AA} = 1 \times 10^{-10} m$ )
$\mu$	Χημικό δυναμικό	$J mol^{-1}$
$\rho$	Ειδική αντίσταση (Κεφάλαιο 4.1)	$\Omega m$
$\rho$	Πυκνότητα υγρού (Κεφάλαιο 2.8.3)	$kg m^{-3}$
$\rho$	Πυκνότητα φορτίου (Κεφάλαιο 4.3)	$C m^{-3}$
$\tau$	Χρονική σταθερά	$s$
$\varphi$	Βαθμωτό ηλεκτρικό δυναμικό	$V$

Πίνακας 0.2: Πίνακας δεικτών

Δείκτης	Ερμηνεία
$c$	Κρίσιμη (critical)
$con$	Συναγωγή (convection)
$dif$	Διάχυση (diffusion)
$e$	Εξωκυττάριος χώρος (exterior)
$el$	Ηλεκτρική / Ηλεκτρομεταφοράς
$f$	Λόγω ηλεκτρικού πεδίου (field)

$f$	Τροφίμου (food)
$f$	Τριβής (friction)
$i$	Εσωκοιτάριος χώρος (interior)
$k$	Χημικό είδος $k$
$m$	Μεμβράνης (membrane)
$n$	Πυρήνα (nucleus)
$PFN$	Δίκτυο παραγωγής παλμών (Pulse Forming Network)
$tm$	Διαμεμβρανική (transmembrane)
$+, -$	Κατιόντα, ανιόντα

Πίνακας 0.3: Πίνακας σταθερών

Σταθερά	Τιμή	Ερμηνεία
$c$	$299792458 \text{ m s}^{-1}$	Ταχύτητα φωτός
$e_0$	$1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$	Στοιχειώδες φορτίο
$\mathcal{F}$	$9,648533 \times 10^4 \text{ C mol}^{-1}$	Σταθερά Faraday
$R$	$8,314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$	Παγκόσμια σταθερά αερίων
$\epsilon_0$	$8,854 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$	Διηλεκτρική σταθερά

## Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

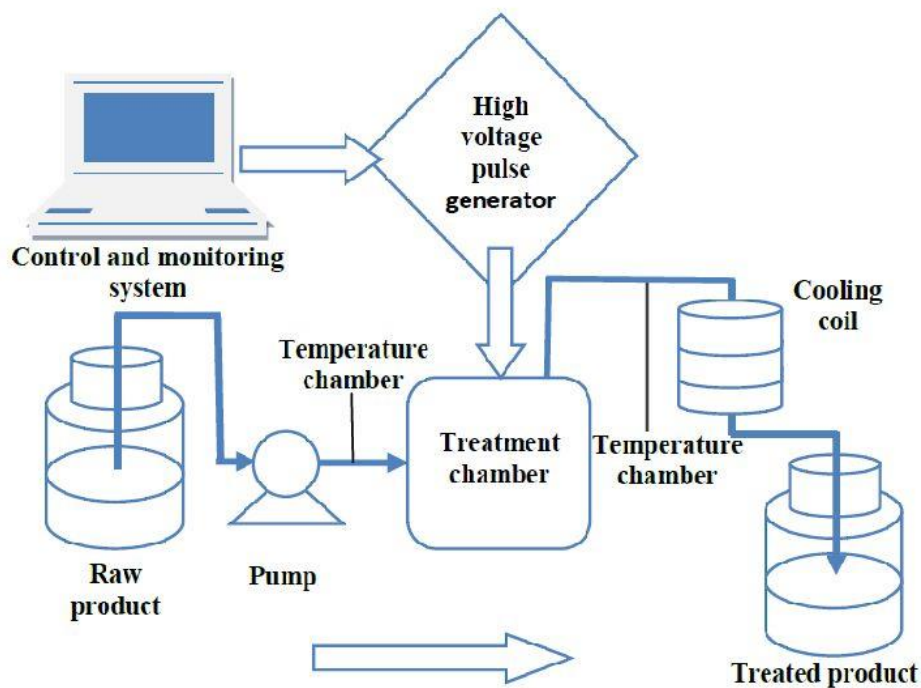
Τα τελευταία χρόνια οι καταναλωτές ενδιαφέρονται ολοένα και περισσότερο για την υγεία τους, πράγμα που έχει ως αποτέλεσμα την ανάγκη παραγωγής προϊόντων υψηλής θρεπτικής αξίας. Κατά την παραδοσιακή θερμική επεξεργασία, πολλά από τα θερμοευαίσθητα συστατικά των τροφίμων καταστρέφονται, οδηγώντας έτσι σε ένα κατώτερης ποιότητας προϊόν. Για τον λόγο αυτό, είναι σημαντικό να βρεθούν νέοι μέθοδοι παράτασης του χρόνου ζωής των τροφίμων οι οποίες επιτρέπουν τη διατήρηση των θρεπτικών συστατικών, μειώνοντας την ανάγκη για περεταίρω εμπλουτισμό τους. Μια τέτοια αναδυόμενη μη-θερμική μέθοδος επεξεργασίας είναι η επεξεργασία με παλμικά ηλεκτρικά πεδία ή PEF (Pulsed Electric Fields). Η αρχή λειτουργίας της τεχνολογίας αυτής είναι η τοποθέτηση του τροφίμου μεταξύ δύο ηλεκτροδίων εντός ενός θαλάμου, στον οποίο έπειτα διαβιβάζονται ηλεκτρικά πεδία με τη μορφή παλμών. Αυτό φέρει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του μικροβιακού φορτίου του τροφίμου λόγω λύσης των κυτταρικών μεμβρανών, φαινόμενο που καλείται ηλεκτροδιάτρηση και θα αναλυθεί πλήρως στην ενότητα (2.2). Η επεξεργασία γίνεται σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος, επιτρέποντας επίσης και τη διατήρηση των φυσικών και οργανοληπτικών ιδιοτήτων του τροφίμου.

Μια διάταξη επεξεργασίας υγρών τροφίμων με παλμικά ηλεκτρικά πεδία αποτελείται συνολικά από πέντε απαραίτητα διαφορετικά μέρη: μία δεξαμενή η οποία περιέχει το υπό επεξεργασία τρόφιμο, μία που περιέχει το τελικό προϊόν, τον θάλαμο επεξεργασίας, μια γεννήτρια παλμικών ηλεκτρικών πεδίων και έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή καταγραφής. Πέρα από αυτά τα μέρη – και ανάλογα με τη παραγωγική διαδικασία – είναι δυνατό να προστεθούν και άλλα εξαρτήματα στη γραμμή παραγωγής, όπως μια αντλία, ένα συστήματα ελέγχου της θερμοκρασίας του τροφίμου στην είσοδο και στην έξοδο του θαλάμου και μια σερπαντίνα ψύξης στην έξοδο (Εικόνα 1.0.1).

Ο σχεδιασμός μιας τέτοιας διεργασίας είναι πολύπλοκη, καθώς απαιτούνται γνώσεις από πολλούς επιστημονικούς τομείς για την πλήρη κατανόηση του φαινομένου. Ο κύριος στόχος της εργασίας αυτής είναι η ανάλυση των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα όταν σε ένα υγρό τρόφιμο επέμβουν παλμικά ηλεκτρικά πεδία. Αρχικά, θα εξεταστούν κάποια βασικά πράγματα που αφορούν τη δομή των κυτταρικών μεμβρανών και θα διατυπωθούν οι κύριες θεωρίες που εξηγούν το φαινόμενο της ηλεκτροδιάτρησης. Έπειτα, θα γίνει μια σύντομη αναφορά σε μαθηματικά μοντέλα που αφορούν την κινητική μικροβιακής αδρανοποίησης κατά την επεξεργασία με παλμικά ηλεκτρικά πεδία. Συνεχίζοντας, αναλύονται πλήρως οι προδιαγραφές που πρέπει να έχει ένα ηλεκτρικό πεδίο για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια

τέτοια επεξεργασία, ενώ εξετάζονται και οι τρόποι παραγωγής των πεδίων αυτών. Στο τέλος του δεύτερου κεφαλαίου, θα γίνει αναφορά στα ανεπιθύμητα φαινόμενα που μπορούν να παρουσιαστούν κατά την επεξεργασία τροφίμων με παλμικά ηλεκτρικά πεδία και θα παρουσιαστούν οι κυριότερες γεωμετρικές διατάξεις των θαλάμων επεξεργασίας.

Συνεχίζοντας, αφού παρουσιαστεί ο σκοπός της εργασίας, θα γίνει ανάλυση των αλληλεπιδράσεων των κυττάρων με τα ηλεκτρικά πεδία, χρησιμοποιώντας και κάποια μαθηματικά μοντέλα από τη διεθνή βιβλιογραφία. Έπειτα, σχεδιάζεται μια μεθοδολογία εύρεσης των μοριακών αλληλεπιδράσεων εντός του ηλεκτρικού πεδίου και δίνεται μια αναλυτική λύση των εξισώσεων που κατασκευάστηκαν, η οποία αφορά ένα θεωρητικό υγρό τρόφιμο το οποίο ρέει σε έναν θάλαμο επεξεργασίας παλμικών ηλεκτρικών πεδίων. Στο παράρτημα δίνονται οι λύσεις κάποιων μαθηματικών εξισώσεων που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των παραπάνω μοντέλων. Στο τέλος, αφού παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των παραπάνω αναλύσεων, θα ληφθούν τα κατάλληλα συμπεράσματα και θα γίνει αναφορά στους τομείς που απαιτείται περαιτέρω έρευνα.



Εικόνα 1.0.1: Διάταξη επεξεργασίας τροφίμων με παλμικά ηλεκτρικά πεδία.

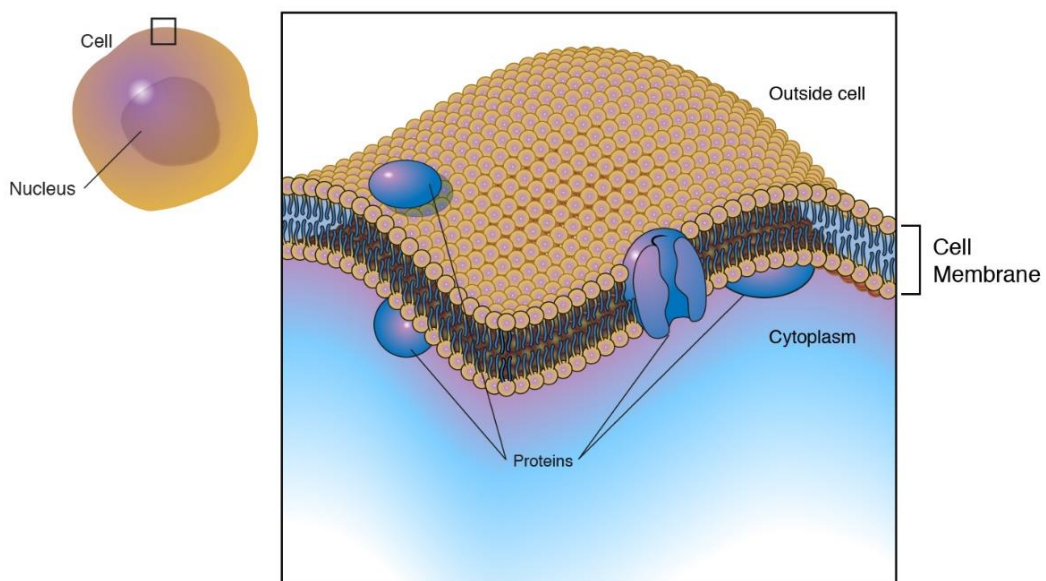
## Κεφάλαιο 2. Θεωρητικό υπόβαθρο

### 2.1. Βασική δομή κυτταρικών μεμβρανών

Η κυτταροπλασματική μεμβράνη έχει ως ρόλο τον διαχωρισμό του εσωκυττάριου χώρου από το εξωτερικό περιβάλλον, επιτρέποντας παράλληλα τη μεταφορά συγκεκριμένων ουσιών από και προς το εσωτερικό του κυττάρου. Η μεμβράνη αυτή (Εικόνα 2.1.1) συντάσσεται στο μεγαλύτερο μέρος της από μια διπλή στοιβάδα φωσφολιπιδίων, τα οποία αποτελούνται από μια αρνητικά φορτισμένη φωσφορική ομάδα «κεφαλή» και δύο μη-πολικά λιπαρά οξέα «ουρές» (Εικόνα 2.1.2). Ενσωματωμένες στην κυτταροπλασματική μεμβράνη βρίσκονται επίσης πρωτεΐνες οι οποίες δρουν ως δίοδοι (ή αντλίες) ιόντων.

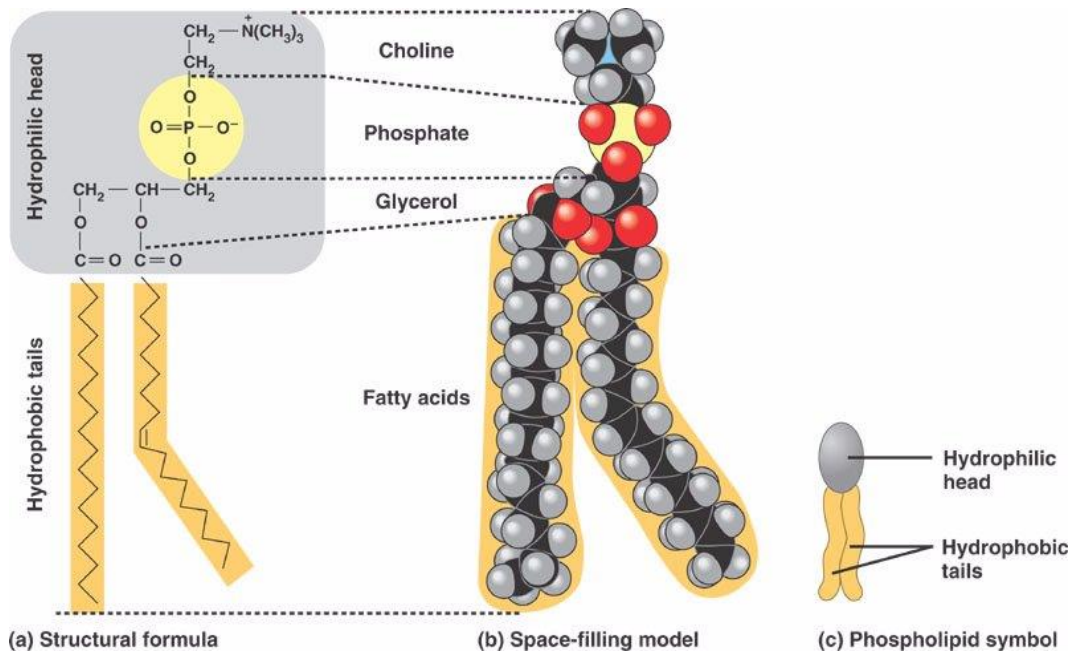
Ειδικότερα, μία πρωτεΐνη-μεταφορέας είναι υπεύθυνη για τη μετακίνηση ενός ιόντος ή μορίου στη φορά της βαθμίδας συγκέντρωσής του και με κατεύθυνση από την πλευρά της μεμβράνης με την υψηλότερη συγκέντρωση προς την πλευρά με τη χαμηλότερη.

Ο πυρηνικός φάκελος περικλείει τον πυρήνα ενός ευκαρυωτικού κυττάρου και τον διαχωρίζει από το κυτταρόπλασμα με μια διπλή μεμβράνη. Η μεμβράνη αυτή έχει παρόμοια μορφή με αυτή της κυτταροπλασματικής μεμβράνης, καθώς και αυτή αποτελείται από πρωτεΐνες-διόδους και δύο στιβάδες φωσφολιπιδίων. Η σημαντικότερη διαφορά τους είναι ότι ο πυρηνικός φάκελος είναι εφοδιασμένος με μόνιμους πόρους, μεγαλύτερου μεγέθους ώστε να μπορούν να διέλθουν τα μόρια του RNA (Simon, Dickey, Hogan, & Reece, 2019). Πολλές φορές συνεχίζοντας (στο κεφάλαιο 4.1.3) θα γίνεται αναφορά στον όρο «πυρηνική μεμβράνη», όπου θα εννοείται η διπλή φωσφολιπιδιακή διπλοστοιβάδα του πυρήνα.



Εικόνα 2.1.1: Δομή κυτταροπλασματικής μεμβράνης - διπλοστοιβάδα φωσφολιπιδίων.





Εικόνα 2.1.2: Δομή φωσφολιπιδίου.

## 2.2. Το φαινόμενο της ηλεκτροδιάτρησης

Έχει παρατηρηθεί ότι ένα παλμικό ηλεκτρικό πεδίο μπορεί να έχει μεγάλη επίδραση στη λειτουργία ενός βιολογικού κυττάρου, καθώς είναι ικανό να μεταβάλλει τη διαπερατότητα της κυτταροπλασματικής του μεμβράνης. Το φαινόμενο αυτό καλείται **ηλεκτροδιάτρηση (electroporation)** ή **ηλεκτροπερατότητα (electroporabilization)**. Μερικοί ερευνητές διακρίνουν τις δύο αυτές έννοιες, ορίζοντας για κάποια από τις δύο έναν συγκεκριμένο μηχανισμό δημιουργίας πόρων. Επειδή όμως δεν υπάρχει ταυτοφωνία στη διεθνή βιβλιογραφία, συνεχίζοντας, οι έννοιες θα χρησιμοποιούνται αλληλένδετα και θα σημαίνουν γενικότερα τη δημιουργία πόρων σε μια κυτταρική μεμβράνη λόγω επίδρασης ενός παλμικού ηλεκτρικού πεδίου.

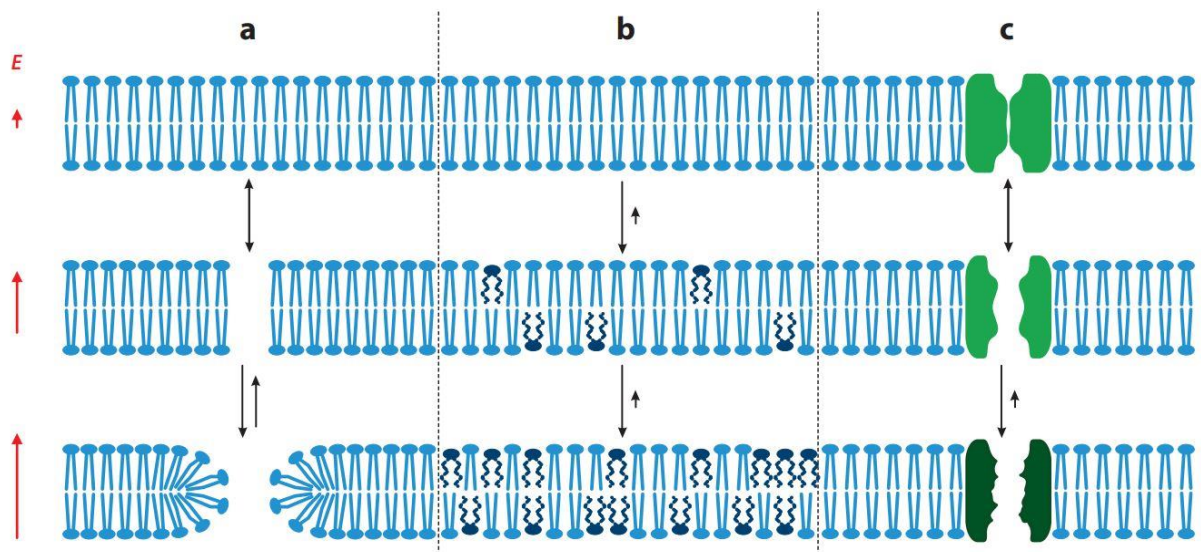
Η κύρια θεωρία που εξηγεί το φαινόμενο αυτό βασίζεται στην ικανότητα ενός PEF να φορτίσει επαγωγικά τις κυτταρικές μεμβράνες, μεταβάλλοντας τη διάταξη των φωσφολιπιδίων τους και δημιουργώντας υδάτινους πόρους στην επιφάνειά τους (Εικόνα 2.2.1, “a”) (Neumann, Schaefer-Ridder, Wang, & Hofschneider, 1982) (Weaver, J, 1993) (Weaver, J; Chizmadzhev, YA, 1996). Ένας ακόμη μηχανισμός δημιουργίας πόρων στην κυτταρική μεμβράνη είναι η υπεροξειδωση των φωσφολιπιδίων λόγω χημικών μεταβολών, οι οποίες είναι αποτέλεσμα της επίδρασης ενός εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου. Κατά τη διαδικασία αυτή παραμορφώνονται οι υδρόφοβες «ουρές» των φωσφολιπιδίων, αυξάνοντας έτσι τη διαπερατότητα της μεμβράνης στο νερό, στα ιόντα και σε άλλα μόρια (Εικόνα 2.2.1, “b”) (Kotnik, Rems, Tarek, & Miklavčič, 2019). Τέλος, μία ακόμη θεωρία που εξηγεί το φαινόμενο της ηλεκτροδιάτρησης εκφράζει τη δημιουργία πόρων στην κυτταρική μεμβράνη λόγω καταστροφής των πρωτεϊνικών αντλιών ιόντων που βρίσκονται πεπλεγμένες σε αυτή (Εικόνα 2.2.1, “c”) (Schoenbach, Katsuki, Stark, Buescher, & Beebe, 2002) (Kotnik, Rems, Tarek, & Miklavčič, 2019).

Μία πολύ σημαντική ιδιότητα των κυτταρικών μεμβρανών που δεν γίνεται να αγνοηθεί κατά την εξέταση του φαινομένου είναι ότι κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, μπορούν σε σύντομο χρονικό διάστημα να κλείσουν τους πόρους που μόλις δημιουργήθηκαν. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι μεμβράνες αυτές δεν έχουν συμπαγή στερεά μορφή, αλλά αντίθετα είναι ρευστές, πράγμα που επιτρέπει στα μόριά τους να αναδιαταχθούν αυθαίρετα (Simon, Dickey, Hogan, & Reece, 2019). Συνεπώς, εάν η χρονική απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών παλμών του ηλεκτρικού πεδίου είναι μεγαλύτερη από τον χρόνο που απαιτείται για να επανέλθει η μεμβράνη στην αρχική της κατάσταση, δεν είναι δυνατή η θανάτωση του κυττάρου και η ηλεκτροδιάτρηση καλείται αντιστρεπτή.

Όταν εφαρμόζεται ένα ηλεκτρικό πεδίο σε ένα κύτταρο, υπάρχουν τρία πιθανά αποτελέσματα που εξαρτώνται από την τοπική ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, τη διάρκεια έκθεσης του κυττάρου στο πεδίο και τον ρυθμό ανάκτησης της κυτταρικής μεμβράνης: (Rols & Teissie, 1990)

- i. Εάν η ένταση του πεδίου ή και ο χρόνος έκθεσης δεν επαρκούν, τότε η ηλεκτροδιάτρηση δεν είναι δυνατή και η διαπερατότητα της μεμβράνης δεν μεταβάλλεται.
- ii. Εάν η ένταση του πεδίου ξεπεράσει το όριο που απαιτείται για την αντιστρεπτή ηλεκτροδιάτρηση και η έκθεση του κυττάρου σε αυτό είναι επαρκής, τότε θα δημιουργηθούν αρχικά πόροι στη μεμβράνη και έπειτα από μία χρονική περίοδο θα ξανακλείσουν.
- iii. Εάν η ένταση του πεδίου ή/και ο χρόνος έκθεσης είναι αρκετά υψηλός, τότε συμβαίνει μη αντιστρεπτή ηλεκτροδιάτρηση της μεμβράνης και το κύτταρο θανατώνεται.

Για τη μείωση του μικροβιακού πληθυσμού στα υγρά τρόφιμα είναι επιθυμητή κατά κύριο λόγο η τρίτη (iii) περίπτωση, επομένως αρκεί να βρεθούν οι παράμετροι για τις οποίες επιτυγχάνεται η μη αντιστρεπτή ηλεκτροδιάτρηση της κυτταροπλασματικής μεμβράνης.



Εικόνα 2.2.1: Διάγραμμα μοριακών μηχανισμών ηλεκτροδιάτρησης a) Δημιουργία υδάτινων πόρων b) Χημικές μεταβολές στα φωσφολιπίδια της μεμβράνης c) Καταστροφή πρωτεϊνικών καναλιών.

### 2.3. Τάση κατάρρευσης κυτταροπλασματικής μεμβράνης

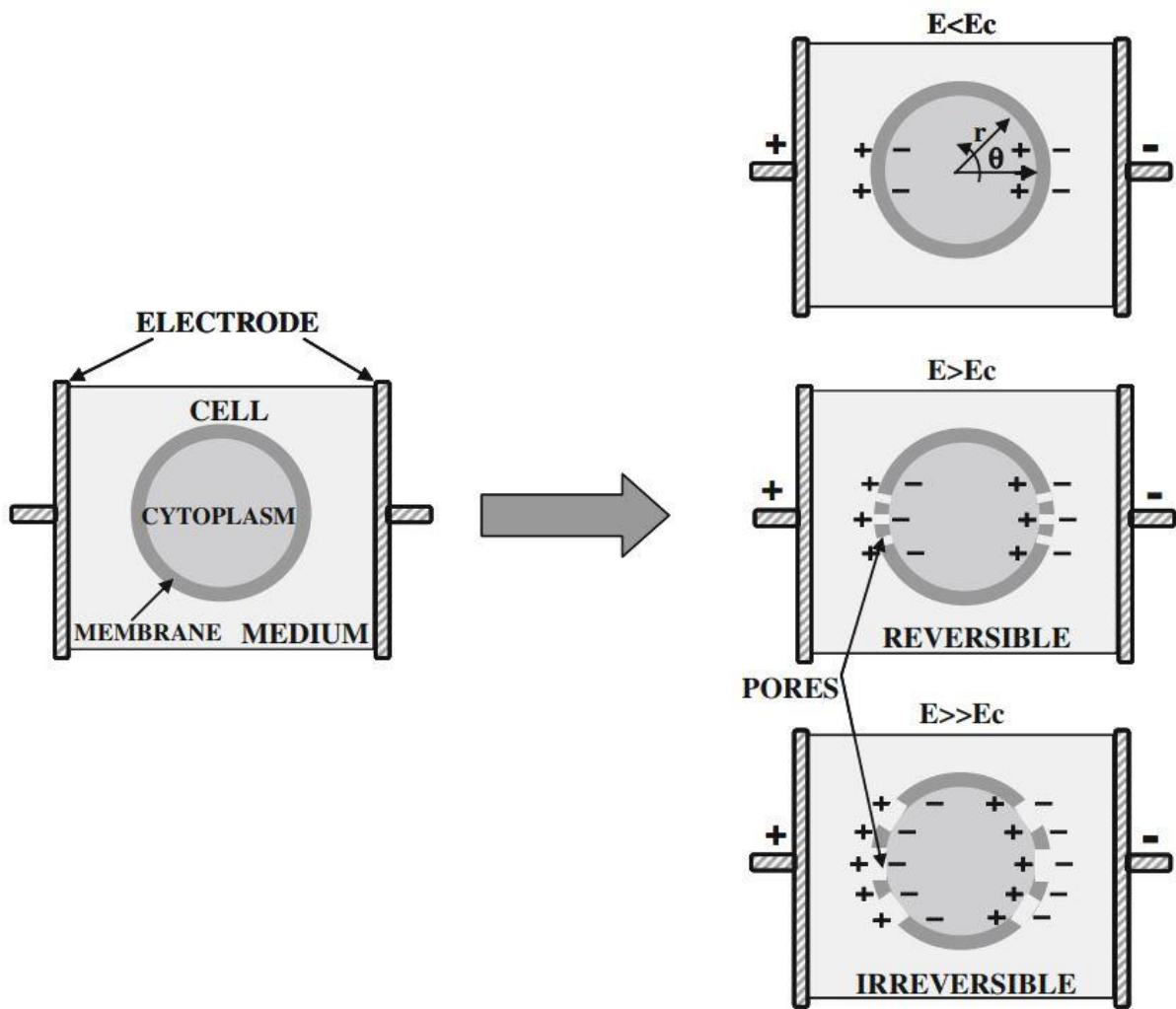
Για να είναι δυνατή η ανάλυση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ κυττάρων και ηλεκτρικού πεδίου, πρέπει αρχικά να προσδιοριστούν οι ηλεκτρικές ιδιότητες ενός μικροοργανισμού και του υποστρώματος στο οποίο βρίσκεται. Έπειτα από πειραματικά δεδομένα αλλά και από μαθηματικά μοντέλα, προσδιορίζονται οι τιμές των παραμέτρων (χρονική σταθερά, ένταση ηλεκτρικού πεδίου, τάση κατάρρευσης κ.α.) που απαιτούνται για να επιτευχθεί ο επιθυμητός βαθμός ηλεκτροδιάτρησης. Στη συνέχεια με τις πληροφορίες αυτές προσδιορίζονται και οι προδιαγραφές του παλμικού ηλεκτρικού πεδίου (πλάτος κύματος, εύρος, συχνότητα, κυματομορφή κ.α.).

Εφόσον εξετάζεται η επεξεργασία υγρών τροφίμων, θα θεωρηθεί πως τόσο οι παθογόνοι αλλά και οι αλλοιογόνοι μικροοργανισμοί βρίσκονται σε μορφή εναιωρήματος, ρέουν ελεύθερα εντός αυτού και δεν είναι προσκολλημένοι σε κάποιο στερεό υπόστρωμα.

Κάθε κυτταρική μεμβράνη θα αντιμετωπιστεί σαν ένα λεπτό φύλλο μονωτικού υλικού, πάνω στο οποίο όταν εφαρμοστεί επαρκής τάση, θα καταρρεύσει, δηλαδή θα σχηματιστούν στη μεμβράνη αμετάκλητοι πόροι. Η τάση αυτή καλείται τάση κατάρρευσης  $V_c$ .

Σε όλα σχεδόν τα κύτταρα παρατηρείται μια διαφορά δυναμικού μεταξύ της εξωτερικής και εσωτερικής πλευράς της κυτταροπλασματικής μεμβράνης η οποία οφείλεται στο σύστημα αντλιών ιόντων. Η τάση αυτή καλείται διαμεμβρανική τάση ή διαμεμβρανικό δυναμικό  $V_{tm}$  (transmembrane voltage) και στα ευκαρυωτικά κύτταρα κυμαίνεται από -40 έως -70 mV (το αρνητικό πρόσημο συμβολίζει ότι το εξωτερικό δυναμικό είναι υψηλότερο από το εσωτερικό) (Kotnik, Rems, Tarek, & Miklavčič, 2019).

Η κυτταρική μεμβράνη είναι δυνατό να φορτιστεί και να δράσει ως πυκνωτής όταν το κύτταρο βρεθεί εντός κάποιου εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου, πράγμα που έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας διαφοράς δυναμικού  $V_f$  μεταξύ των δύο πλευρών της μεμβράνης. Αυτή η τάση έπειτα προστίθεται στη διαμεμβρανική τάση  $V_{tm}$  λόγω της αρχής της υπέρθεσης. Επομένως, η μη αντιστρεπτή ηλεκτροδιάτρηση είναι επιτυχής όταν το άθροισμα των τάσεων αυτών ισούται ή είναι μεγαλύτερο από την οριακή τάση κατάρρευσης της μεμβράνης, δηλαδή όταν  $V_c \leq V_f + V_{tm}$ . Από μελέτες έχει βρεθεί πως η οριακή τάση κατάρρευσης  $V_c$  της κυτταροπλασματικής μεμβράνης των ευκαρυωτικών κυττάρων είναι της τάξεως του 1V (συγκεκριμένα με εύρος 0,5 – 1,5 V) σε θερμοκρασία δωματίου και είναι ανεξάρτητη από την μέθοδο που χρησιμοποιείται (Zimmermann & Neil, 1996).



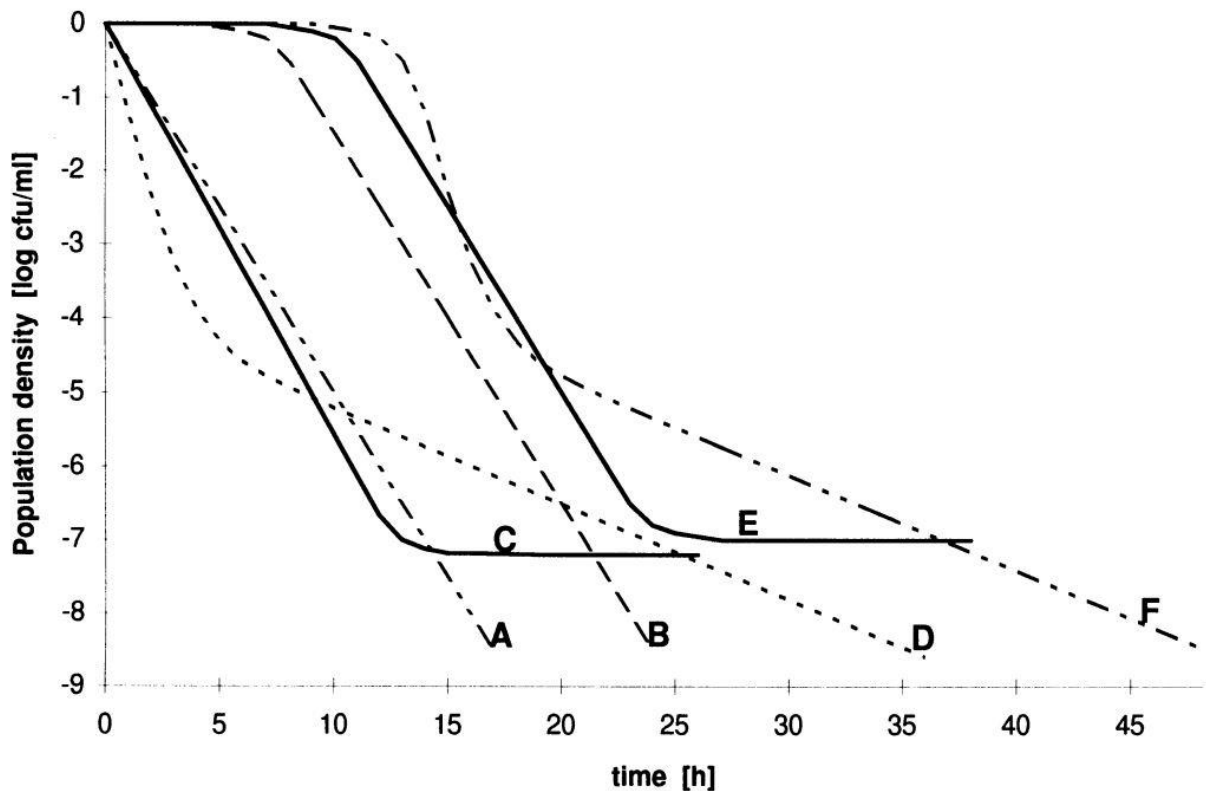
Εικόνα 2.3.1: Φόρτιση μεμβράνης λόγω επίδρασης εξωτερικού πεδίου.

## 2.4. Κινητική μικροβιακής αδρανοποίησης

Για να είναι δυνατό να εφαρμοστεί σε βιομηχανική κλίμακα οποιαδήποτε διεργασία επεξεργασίας τροφίμων, θα πρέπει να εκτελεί το στόχο της αποδοτικά. Κατά την επεξεργασία με παλμικά ηλεκτρικά πεδία, η κυριότερη παράμετρος που πρέπει να εξετασθεί για να βρεθεί η αποδοτικότητα της διεργασίας είναι η επιβίωση των μικροοργανισμών. Χρησιμοποιώντας κλασικές μικροβιολογικές μεθόδους (Ολική Μεσόφιλη Χλωρίδα κ.α.) μπορούν να βρεθούν οι αρχικοί πληθυσμοί των μικροοργανισμών που βρίσκονται στο ανεπεξέργαστο τρόφιμο. Έπειτα, σε διάφορα στάδια της επεξεργασίας μπορούν να ληφθούν δείγματα και να εξεταστούν πάλι μικροβιολογικά. Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα αυτά, είναι δυνατό να σχεδιαστούν οι καμπύλες μικροβιακής επιβίωσης κατά την επεξεργασία του τροφίμου. Οι καμπύλες αυτές και τα μαθηματικά μοντέλα που τις εκφράζουν μπορούν να δώσουν χρήσιμες πληροφορίες όχι μόνο για την πρόβλεψη του τελικού μικροβιακού φορτίου του τροφίμου, αλλά και για την καλύτερη σχεδίαση της διεργασίας.

Γενικά, τέσσερεις τύποι γραφικών παραστάσεων επιβίωσης των μικροοργανισμών μπορούν να παρουσιαστούν κατά την αδρανοποίηση βακτηρίων χρησιμοποιώντας θερμικές ή μη θερμικές μεθόδους. Αυτές είναι (Εικόνα 2.4.1) (Xiong, Xie, Edmondson, & Sheard, 1999):

- i. Γραμμική, όπου ο λογάριθμος των επιβιώνοντων κυττάρων αυξάνεται με την αύξηση του παράγοντα θανάτωσης.
- ii. Κυρτή προς τα άνω (παρουσία «ώμου» στην καμπύλη)
- iii. Κυρτή προς τα κάτω (παρουσία «ουράς» στην καμπύλη) και
- iv. Σιγμοειδής καμπύλη



Εικόνα 2.4.1: Είδη καμπυλών αδρανοποίησης μικροοργανισμών. A: γραμμική, B: κυρτή προς τα άνω, C και D: κυρτές προς τα κάτω, E και F: σιγμοειδείς.

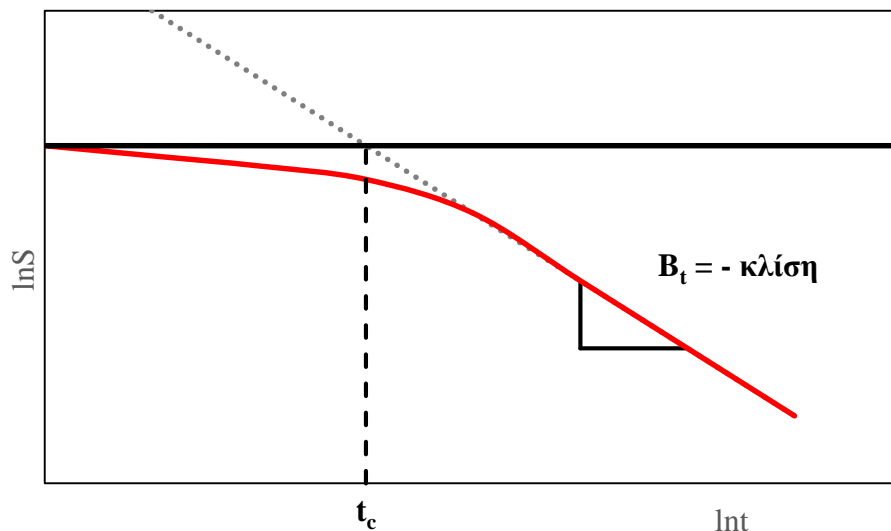
Κατά την επεξεργασία με παλμικά ηλεκτρικά πεδία και για μικροβιακή αδρανοποίηση της τάξεως των 2 – 4 λογαριθμικών κύκλων, πολλές έρευνες έχουν υποστηρίξει το γραμμικό μοντέλο (Grahl & Märkl, 1996) (Heinz, Phillips, Zenker, & Knorr, 1999) (Hülsheger, Potel, & Niemann, Killing of bacteria with electric pulses of high field strength, 1981) (Martín-Belloso, et al., 1997) (Mizuno & Hori, 1988) (Pothakamury & Vega, 1996) (Qin, et al., 1995) (Reina, Jin, Zhang, & Yousef, 1998) (Sensoy, Zhang, & Sastry, 1997) ενώ επεκτείνοντας τον χρόνο επεξεργασίας για περισσότερους λογαριθμικούς κύκλους, αυτές οι καμπύλες παίρνουν κυρτή προς τα άνω μορφή (Álvarez, Mañas, Condón, & Raso, 2003) (Álvarez, Pagán, Condón, & Raso, 2003) (Álvarez, Virto, Raso, & Condón, 2003) (Jayaram, Castle, & Margaritis, 1992) (Raso, Alvarez, Condón, & Trepát, 2000) (Rodrigo & Ruiz, 2003). Έχουν υπάρξει πολλά μαθηματικά μοντέλα που εκφράζουν τις παραπάνω καμπύλες επιβίωσης μικροοργανισμών όπως η απλή κινητική πρώτης τάξης, το μοντέλο της διασποράς Weibull, το λογαριθμικό-λογιστικό μοντέλο (log-logistic) και άλλα. Παρακάτω αναλύονται δύο από τα βασικότερα μοντέλα που χρησιμοποιούνται κατά την επεξεργασία με παλμικά ηλεκτρικά πεδία, καθώς λαμβάνουν υπόψη και την επίδραση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου.

### 2.4.1. Μοντέλο Hülsheger

Ο Hülsheger το 1980 (Hülsheger & Niemann, 1980) για πρώτη φορά πρότεινε ένα μαθηματικό μοντέλο, βασιζόμενο σε κυρτές προς τα άνω καμπύλες, που περιγράφει την αδρανοποίηση μικροοργανισμών κατά την επεξεργασία με παλμικά ηλεκτρικά πεδία. Αρχικά, ο χρόνος επεξεργασίας και το κλάσμα επιβιώνοντων κυττάρων ( $S = \frac{N}{N_0}$  όπου  $N$  και  $N_0$  το μικροβιακό φορτίο μετά και πριν την επεξεργασία αντίστοιχα) συνδέονται από τη σχέση:

$$\ln(S) = -B_t(\ln t - \ln t_c) \quad (2.4.1.1)$$

όπου  $t$  ο ολικός χρόνος επεξεργασίας,  $t_c$  ο κρίσιμος χρόνος και  $B_t$  ο συντελεστής παλινδρόμησης που εξαρτάται από τα  $t$  και  $t_c$ . Αξίζει να σημειωθεί πως αν  $t_r$  είναι το εύρος ενός παλμού του ηλεκτρικού πεδίου και  $n$  ο συνολικός αριθμός των παλμών που παράγονται κατά την επεξεργασία, τότε θα ισχύει  $t = nt_r$ . Επίσης, ο κρίσιμος χρόνος  $t_c$  μπορεί να βρεθεί γραφικά από την τετμημένη του σημείου τομής της προέκτασης της καμπύλης θανάτου με την ευθεία  $y = 0$  που αντιστοιχεί σε επιβίωση 100% (Σχήμα 2.4.1.1).



Σχήμα 2.4.1.1: Κλάσμα επιβιώνοντων μικροοργανισμών συναρτήσει του χρόνου (κόκκινη γραμμή).

Έπειτα, το 1981 ο Hülsheger (Hülsheger, Potel, & Niemann, 1981) συσχέτισε μαθηματικά την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου με το κλάσμα επιβιώνοντων κυττάρων:

$$\ln(S) = -B_E(E - E_c) \quad (2.4.1.2)$$

όπου  $B_E$  ο συντελεστής παλινδρόμησης του ηλεκτρικού πεδίου,  $E$  η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και  $E_c$  η κρίσιμη ένταση του ηλεκτρικού πεδίου. Το  $E_c$  μπορεί να υπολογιστεί γραφικά



με όμοια μεθοδολογία όπως το  $t_c$ , όμως επειδή εξαρτάται από τις διαστάσεις των κυττάρων, μπορεί να υπολογιστεί και από τη σχέση:

$$E_c = \frac{V_c}{1,5r} \quad (2.4.1.3)$$

όπου  $V_c$  η κρίσιμη τάση κατάρρευσης της κυτταρικής μεμβράνης και  $r$  η ακτίνα του κυττάρου. Οι συντελεστές παλινδρόμησης  $B_t$  και  $B_E$  ταυτίζονται με τις κλίσεις των καμπυλών επιβίωσης στη γραμμική τους περιοχή και δείχνουν την φύση της καμπύλης (Σχήμα 2.4.1.1).

Συσχετίζοντας τώρα τις εξισώσεις ( 2.4.1.2 ) και ( 2.4.1.3 ) λαμβάνεται μια συνολική σχέση που συνδέει το κλάσμα επιβίωσης με τον χρόνο επεξεργασίας και την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου:

$$S = \left( \frac{t}{t_c} \right)^{\frac{(E-E_c)}{k_c}} \quad (2.4.1.4)$$

με  $k_c$  μια σταθερά.

## 2.4.2. Μοντέλο Fermi

Έχει βρεθεί πως οι καμπύλες επιβίωσης μερικών μικροοργανισμών δεν μπορούν να θεωρηθούν γραμμικές καθώς ακολουθούν μια σιγμοειδής μορφή. Για τον λόγο αυτό, ο Peleg σχεδίασε ένα μοντέλο για τη μικροβιακή αδρανοποίηση, γνωστό και ως Μοντέλο Fermi (Fermi Model) (Peleg & Cole, Reinterpretation of microbial survival curves, 1998) (Peleg, 1995). Το μοντέλο αυτό είναι εξειδικευμένο για επεξεργασίες με παλμικά ηλεκτρικά πεδία και συσχετίζει το κλάσμα επιβιώνοντων κυττάρων με την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και τον αριθμό των παλμών:

$$S = \frac{100}{1 + e^{\frac{E-E_c}{a}}} \quad (2.4.2.1)$$

με  $a$  να είναι η παράμετρος που δείχνει το πόσο απότομη είναι η κλίση της καμπύλης στην περιοχή κοντά στο  $E_c$ .

Ισχύει επίσης ότι το  $a$  εξαρτάται από τον αριθμό των παλμών  $n$  του ηλεκτρικού πεδίου, σύμφωνα με τη σχέση  $a = a_0 e^{-\frac{K}{n}}$  με  $K$  μια αδιάστατη σταθερά. Χρησιμοποιώντας το

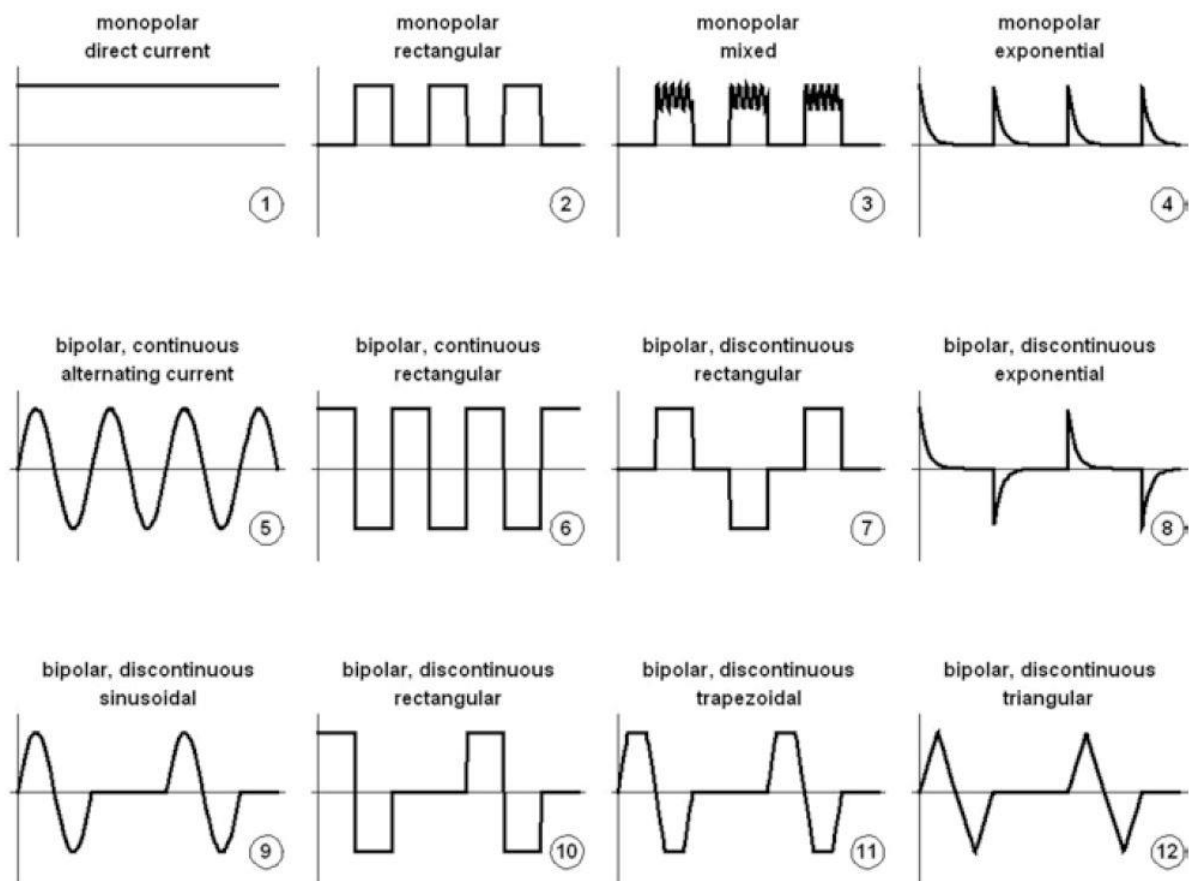
μοντέλο αυτό, έχει βρεθεί πως τα πειραματικά αποτελέσματα που αφορούν την επεξεργασία με PEF της *Listeria innocua* ATCC 51742 παρουσιάζουν  $R^2 \approx 1$  (Martin, et al., 2007).

## 2.5. Κυματομορφές ηλεκτρικού πεδίου

Στην ενότητα αυτή θα εξεταστεί τόσο η παραγωγή των παλμικών ηλεκτρικών πεδίων, όσο και οι διαφορετικές κυματομορφές του παλμού που μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά την επεξεργασία υγρών τροφίμων με PEF. Αρχικά, ως τεχνολογίες παλμικής ισχύς ορίζονται οι ηλεκτρικές συσκευές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επεξεργασία οργανικών και ανόργανων υλικών με ηλεκτρικά πεδία  $>10$  kV/cm (Löffler, 2022).

Για να επιτευχθούν οι επιθυμητές υψηλές εντάσεις του ηλεκτρικού πεδίου εντός του θαλάμου, γίνεται αρχικά φόρτιση μιας αλληλουχίας πυκνωτών (τράπεζα πυκνωτών) οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους παράλληλα. Έπειτα, αφού τελειώσει η διαδικασία της φόρτισης, η ηλεκτρική ενέργεια που έχει αποθηκευτεί στην τράπεζα πυκνωτών εκκενώνεται ακαριαία μέσω ενός διακόπτη στον θάλαμο επεξεργασίας, δημιουργώντας έτσι έναν παλμό (Barbosa - Cánovas & Altunakar, 2006). Για να εξεταστεί τώρα η μορφή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται εντός του θαλάμου επεξεργασίας, αρκεί να βρεθεί η χρονική μεταβολή του δυναμικού που δημιουργείται κατά την εκκένωση αυτή. Μεταβάλλοντας το κύκλωμα της γεννήτριας παλμών, παρατηρείται και αλλαγή της κυματομορφής του δυναμικού κατά την αποφόρτιση.

Οι κυματομορφές του δυναμικού που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή παλμικών ηλεκτρικών πεδίων είναι είτε μονοπολικές είτε διπολικές. Ο όρος μονοπολικός παλμός περιγράφει την κατεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων, η οποία δεν αλλάζει η φορά του καθ' όλη την διάρκεια του παλμού. Αντιθέτως, στους διπολικούς παλμούς, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου αντιστρέφεται μία φορά σε κάθε παλμό. Οι μονοπολικές κυματομορφές μπορούν να ακολουθούν ένα σχήμα σταθερής, τετραγωνικής, εκθετικής ή και ανάμικτης μορφής ενώ οι διπολικές είναι ημιτονοειδείς, τριγωνικές, τραπεζοειδείς, συνεχείς ή ασυνεχείς ορθογώνιες ή ασυνεχείς εκθετικές (Lazarenko, Fursov, Scheglov, Bordiyan, & Chebanu, 1977) (US Patent No. 4787303, 1988) (US Patent No. 4723483, 1988) (McLellan, Kime, & Lind, 1991) (Zhang, Barbosa - Cánovas, & Swanson, 1995) (Barbosa - Cánovas, Pierson, Zhang, & Schaffner, 2000) (Bazhal, 2001) (Kotnik, Miklavčič, & Mir, 2001) (Jemai & Vorobiev, 2002) (Kotnik, Pucihar, Reberšek, Miklavčič, & Mir, 2003).



Εικόνα 2.5.1: Διάφορα είδη κυματομορφών του δυναμικού. 1-4: μονοπολικά κύματα, 5-8: διπολικά συνεχή κύματα, 9-12: διπολικά ασυνεχή κύματα.

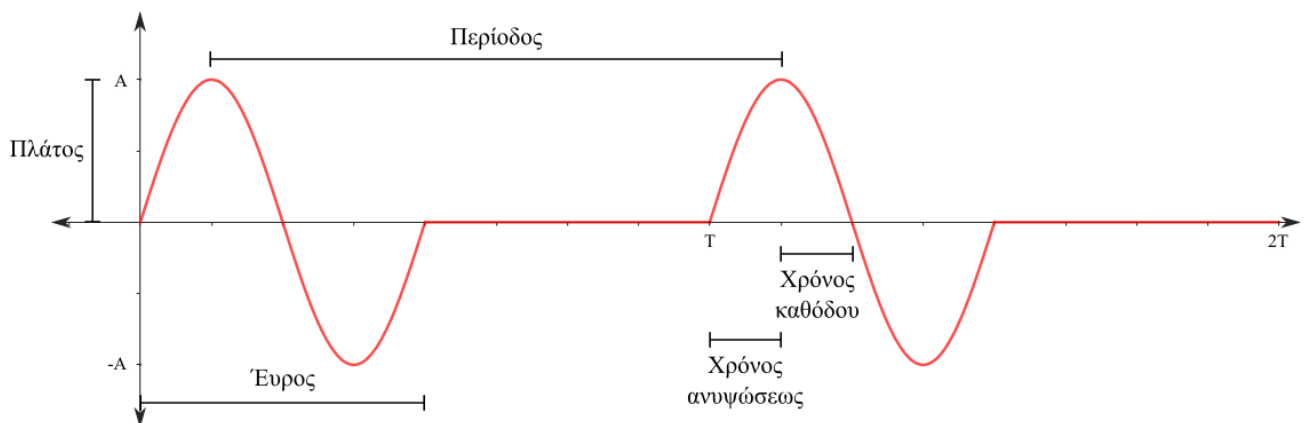
## 2.6. Επιλογή κατάλληλης κυματομορφής

Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιαστούν οι κύριες διαφορές των πιο ευρέως χρησιμοποιούμενων κυματομορφών του δυναμικού κατά την παραγωγή παλμικών ηλεκτρικών πεδίων. Αξίζει να σημειωθεί πως τόσο σε ερευνητικό επίπεδο αλλά και σε μικρής κλίμακας εφαρμογές, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε κυματομορφή, μονοπολική ή διπολική, φέροντας συνεπώς και διαφορετικά αποτελέσματα όσον αφορά τον βαθμό της ηλεκτροδιάτρησης. Σε βιομηχανικό επίπεδο όμως κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό, καθώς οι αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις των συστημάτων παραγωγής παλμικών ηλεκτρικών πεδίων αποκλείουν πολλές από αυτές.

Πριν αναλυθούν οι κυματομορφές, είναι σημαντικό να οριστούν κάποιες έννοιες που χρησιμεύουν κατά την περιγραφή τους (Εικόνα 2.6.1).

- i. Η περίοδος του παλμού ορίζεται ως η χρονική απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών μεγίστων του δυναμικού.

- ii. Ως εύρος χαρακτηρίζεται η χρονική διάρκεια που εφαρμόζεται ένας παλμός, μέχρι το δυναμικό να μηδενιστεί. Στην περίπτωση των διπολικών παλμών είναι η χρονική διάρκεια μέχρι να μηδενιστεί το δυναμικό για δεύτερη φορά.
- iii. Ως χρόνος ανυψώσεως ορίζεται ο χρόνος που απαιτείται για να παρουσιαστεί η μέγιστη τιμή του δυναμικού, από τη στιγμή που έγινε η εκκένωση.
- iv. Ο χρόνος καθόδου είναι το χρονικό διάστημα που απαιτείται για να μηδενιστεί το δυναμικό, από τη στιγμή που αρχίζει να μειώνεται από τη μέγιστή του τιμή.
- v. Πλάτος του παλμού είναι η μέγιστη τιμή του δυναμικού που παρατηρείται κατά την αποφόρτιση του κυκλώματος.



Εικόνα 2.6.1: Παράμετροι κυματομορφής.

### 2.6.1. Μονοπολικότητα – διπολικότητα

Για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, κύματα δυναμικού συνεχούς δράσης – δηλαδή κύματα των οποίων η περίοδος τους ισούται με το εύρος τους – δεν είναι ωφέλιμο να χρησιμοποιηθούν, καθώς καταναλώνουν μεγάλα ποσά ενέργειας. Συγκριτικά με τις μονοπολικές κυματομορφές, οι διπολικές δεν έχουν μεγάλη επίδραση στην ηλεκτροδιάτρηση των κυτταρικών μεμβρανών όταν εφαρμόζονται σε μέτριας τάξης δυναμικά, όμως για δυναμικά άνω των κρίσιμων τιμών, ο βαθμός μη αντιστρεπτής διάτρησης αυξάνεται αρκετά. Παρόλα αυτά, εφαρμόζοντας διπολικούς παλμούς μειώνεται σημαντικά η διάβρωση των ηλεκτροδίων εντός του θαλάμου επεξεργασίας, επομένως περιορίζεται έτσι και το φαινόμενο της μετανάστευσης μετάλλων στο υγρό τρόφιμο (Kotnik, Miklavčič, & Mir, 2001) (Johnstone & Bodger, 1997). Το φαινόμενο αυτό θα αναλυθεί και στη συνέχεια, στην παράγραφο 2.8.2.

### 2.6.2. Σχήμα

Γενικά, για παλμούς ίδιου εύρους οι τραπεζοειδείς, τριγωνικές και ανάμικτες κυματομορφές δυναμικού, όταν εφαρμόζονται με υψηλότερα πλάτη, φέρουν τα ίδια αποτελέσματα με αυτές τετραγωνικής μορφής (Kotnik, Pucihar, Reberšek, Miklavčič, & Mir, 2003).

Για τους τετραγωνικούς παλμούς δεν έχει βρεθεί κάποια σημαντική επίδραση στην απόδοση της ηλεκτροδιάτρησης λόγω της κλίσης που παρουσιάζει το δυναμικό κατά τον χρόνο ανύψωσης – όταν αυτός εννοείται είναι μικρότερος από το εύρος του παλμού (Kotnik, Pucihar, Reberšek, Miklavčič, & Mir, 2003). Ένα επίσης σημαντικό πλεονέκτημα των τετραγωνικών κυματομορφών είναι ότι θεωρητικά, όταν μειώνεται σημαντικά ο χρόνος ανύψωσης, το δυναμικό παραμένει σταθερό στην επιθυμητή περιοχή για την ηλεκτροδιάτρηση των κυτταρικών μεμβρανών καθ' όλη τη διάρκεια του παλμού.

Οι κυματομορφές δυναμικού εκθετικής μορφής δεν είναι αρκετά αποδοτικές, καθώς διαθέτουν μια μεγάλη χρονική περιοχή (ουρά) κατά την οποία το δυναμικό βρίσκεται χαμηλότερα από την κρίσιμη τιμή του για τη μη αντιστρεπτή ηλεκτροδιάτρηση. Κατά τη χρονική αυτή διάρκεια επιτυγχάνεται μόνο περεταίρω θέρμανση του υγρού τροφίμου, χωρίς κάποια σημαντική μείωση του μικροβιακού φορτίου, πράγμα που είναι ανεπιθύμητο (San, Barbosa - Cánovas, & Swanson, 2003).

## 2.7. Γεννήτριες παραγωγής παλμών

Σύμφωνα με τα παραπάνω, οι κυματομορφές που ενδείκνυνται για βιομηχανική χρήση είναι οι τετραγωνικοί – μονοπολικοί και διπολικοί. Όμως, οι φθίνουσες εκθετικές και οι ημιτονοειδείς κυματομορφές πρέπει πάντα να λαμβάνονται υπόψη κατά τον σχεδιασμό μιας τέτοιας διαδικασίας επεξεργασίας, καθώς είναι οι πιο εύκολες για την παραγωγή τους και συνεπώς έχουν σχετικά το μικρότερο κόστος.

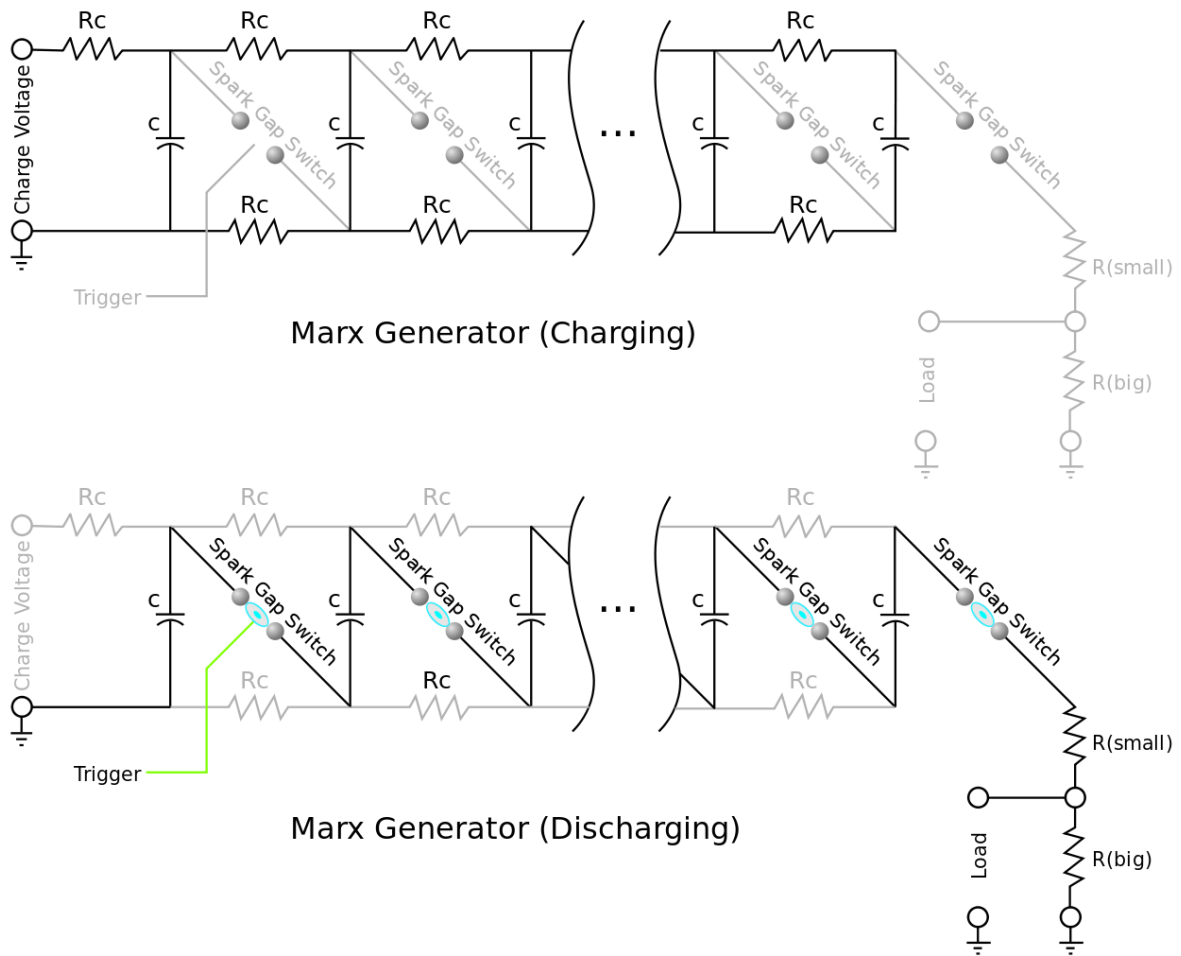
### 2.7.1. Εκθετικοί παλμοί

Η συνηθέστερη μέθοδος παραγωγής παλμών φθίνουσας εκθετικής κυματομορφής είναι χρησιμοποιώντας ένα κύκλωμα αντιστάσεων – πυκνωτών RC (Resistor – Capacitor). Αρχικά η τράπεζα πυκνωτών χωρητικότητας  $C_b$  φορτίζεται σε μια συγκεκριμένη τάση  $V_0$ , η οποία θα ορίζει και το πλάτος του παλμού  $A_{max}$ . Έπειτα, αφού δοθεί σήμα, το φορτίο που είναι αποθηκευμένο στην τράπεζα ρέει μέσω του υγρού τροφίμου εντός του θαλάμου επεξεργασίας και η χρονική σταθερά του παλμού δίνεται από τη σχέση

$$\tau = C_b R_f \quad (2.7.1.1)$$

όπου  $R_f$  η αντίσταση του υγρού τροφίμου. Έχει παρατηρηθεί όμως πως κατά την επεξεργασία του τροφίμου με PEF η ειδική του αντίσταση μειώνεται με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται και η χρονική σταθερά του συστήματος, πράγμα που κάνει την καταγραφή του παλμού δυσκολότερη.

Ο καλύτερος τρόπος για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα σε συστήματα βιομηχανικού επιπέδου είναι η χρήση μιας γεννήτριας Marx για την παραγωγή των φθινόντων εκθετικών παλμών. Η γεννήτρια αυτή αποτελείται από μια ακολουθία πυκνωτών οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι παράλληλα και ενδιάμεσά τους είναι συνδεδεμένες αντιστάσεις. Έπειτα γίνεται σύνδεση των πυκνωτών και κατά σειρά χρησιμοποιώντας όμως διακόπτες – σπινθηριστές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη φόρτιση των πυκνωτών σε παραλληλία, ενώ η αποφόρτισή τους μέσω του τροφίμου γίνεται σε σειρά, ενεργοποιώντας ακαριαία τους σπινθηριστές (Sack, 2017).



Εικόνα 2.7.1.1: Γεννήτρια Marx. Απάνω: Φόρτιση τράπεζας πυκνωτών, Κάτω: Αποφόρτιση κυκλώματος.

## 2.7.2. Τετραγωνικοί παλμοί

Συνηθέστερα, για την παραγωγή τετραγωνικών παλμών χρησιμοποιείται ένα δίκτυο παραγωγής παλμών PFN (Pulse Forming Network) το οποίο βασίζεται στην αρχή λειτουργίας των γραμμών μεταφοράς (Transmission Lines). Μία ιδανική γραμμή μεταφοράς δίχως απώλειες ορίζεται από έναν αγωγό μήκους  $l$ , αυτεπαγωγής  $L = L'l$  και χωρητικότητας  $C = C'l$ . Φορτίζοντας τη γραμμή μεταφοράς σε δυναμικό  $V_0$  ενέργειας

$$W_C = C \frac{V_0^2}{2}$$

( 2.7.2.1 )

και αποφορτίζοντάς τη μέσω ενός διακόπτη S στον θάλαμο τροφοίμου, αντιστάσεως

$$R_f = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$$

( 2.7.2.2 )



παράγεται ένας τετραγωνικός παλμός πλάτους  $V_0/2$  και διάρκειας

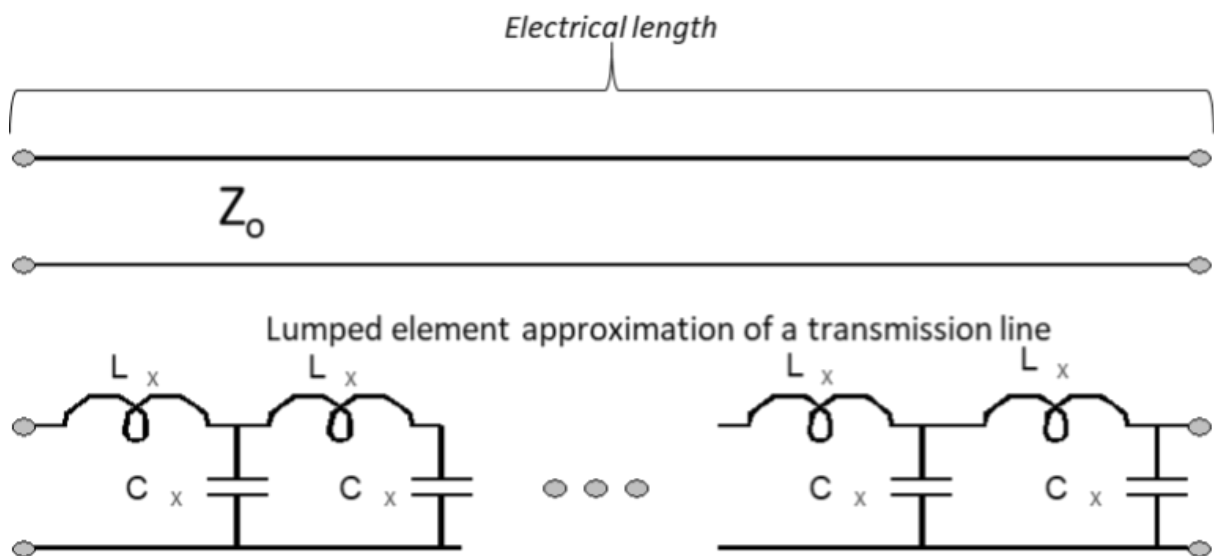
$$\tau = 2\sqrt{LC} = \frac{2l\sqrt{\epsilon_r}}{c}$$

( 2.7.2.3 )

όπου  $\epsilon_r$  η ειδική επιτρεπτότητα του μονωτή της γραμμής και  $c$  η ταχύτητα του φωτός (Löffler, 2022). Όπως φαίνεται, η χωρητικότητα και η αυτεπαγωγή του κυκλώματος είναι προκαθορισμένες και εξαρτώνται από τη γεωμετρία του αγωγού, πράγμα που δεν επιτρέπει την εύκολη ρύθμιση των προδιαγραφών του παλμού. Έτσι, σε γεννήτριες τετραγωνικών παλμών χρησιμοποιούνται κυκλώματα με πηνία και πυκνωτές LC (Inductor Capacitor) πράγμα που επιτρέπει την ελεύθερη επιλογή των τιμών τους. Ένα τέτοιο κύκλωμα καλείται δίκτυο παραγωγής παλμών και έπειτα θα αναλυθεί η κατασκευή του.

Αρχικά, θεωρείται μια γραμμή μεταφοράς η οποία χωρίζεται σε μικρότερα τμήματα συνδεδεμένα το ένα με το άλλο σε σειρά – σαν αλυσίδα. Κάθε ένα από αυτά τα τμήματα έχει τη δική του χωρητικότητα και συντελεστή αυτεπαγωγής. Ως αρχή λειτουργίας, το διάγραμμα της γραμμής μεταφοράς έχει μετασχηματιστεί ως μια ακολουθία πανομοιότυπων κυκλωμάτων με τέσσερα τερματικά και το καθένα να διαθέτει τον ίδιο συνδυασμό πηνίων και πυκνωτών. Θεωρητικά, μια γραμμή μεταφοράς αποτελείται από μια άπειρη σειρά τέτοιων κυκλωμάτων με απείρως μικρές επιμέρους χωρητικότητες και αυτεπαγωγές. Ορίζοντας όμως έναν πεπερασμένο αριθμό από τέτοιες επαναλήψεις, δημιουργείται το κύκλωμα του δικτύου παραγωγής παλμών.

### Simple parallel plate transmission line



Εικόνα 2.7.2.1: Μετάβαση από γραμμή μεταφοράς σε PFN.

Έστω  $n$  ο αριθμός των επιμέρους κυκλωμάτων, τότε η ολική χωρητικότητα του δικτύου είναι  $C_{PFN} = nC$  και ο ολικός συντελεστής αυτεπαγωγής είναι  $L_{PFN} = nL$ . Αποφορτίζοντας το κύκλωμα μέσω του τροφοίμου στον θάλαμο επεξεργασίας – και λόγω ομοιότητας της γραμμής μεταφοράς με το PFN, είναι:

$$(3.1) \Rightarrow W_C = C_{PFN} \frac{V_0^2}{2} = nC \frac{V_0^2}{2}$$

$$(3.2) \Rightarrow R_f = \sqrt{\frac{L_{PFN}}{C_{PFN}}} = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

$$(3.3) \Rightarrow \tau = 2\sqrt{L_{PFN}C_{PFN}} = 2n\sqrt{LC}$$

Λόγω των παραπάνω, τα  $L$ ,  $C$  και  $\tau$  μπορούν να υπολογιστούν από τις εξισώσεις:

$$C = 2 \frac{W_C}{nV_0^2}$$

$$L = 2R_f^2 \frac{W_C}{nV_0^2}$$

$$\tau = 4 \frac{R_f W_C}{V_0^2}$$

Δηλαδή η διάρκεια του παλμού  $\tau$  εξαρτάται και μπορεί να ρυθμιστεί από τις τιμές των  $R_f$ ,  $V_0$  και  $W_C$ .

## **2.8. Ανεπιθύμητα φαινόμενα**

### **2.8.1. Διάσπαση**

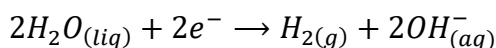
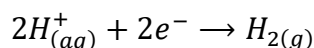
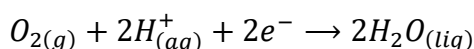
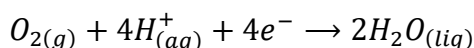
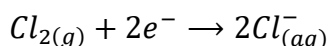
Ο θάλαμος επεξεργασίας των τροφίμων με PEF διαθέτει δύο ηλεκτρόδια με έναν κενό χώρο ανάμεσα τους στον οποίο κατά τη λειτουργία, διέρχεται το υγρό τρόφιμο. Από ηλεκτρολογικής απόψεως ο θάλαμος αυτός μπορεί να θεωρηθεί ως μια αντίσταση νερού, όπου όταν διέλθει το ηλεκτρικό ρεύμα από αυτή μπορούν να συμβούν δύο πράγματα. Η πρώτη περίπτωση είναι το ρεύμα να διέλθει από όλη τη διατομή του υγρού, πράγμα που συνεπάγεται τα φαινόμενα που έχουν εξεταστεί μέχρι τώρα (ηλεκτροδιάτρηση, κίνηση ιόντων, πόλωση μορίων κ.α.). Όμως, λόγω του υψηλού δυναμικού και της μικρής απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων, μπορεί να παρουσιαστεί το φαινόμενο της ηλεκτρικής διάσπασης (ή διηλεκτρικής διάσπασης), δημιουργώντας μια εκκένωση ρεύματος υψηλής έντασης (Löffler, 2022). Το φαινόμενο της διηλεκτρικής διασπάσεως παρατηρείται όταν ένα ηλεκτρικά μονωτικό υλικό υποβάλλεται σε αρκετά υψηλή τάση, καθιστώντας το ακαριαία αγωγίμο και επιτρέποντας έτσι τη διαρροή του από ρεύμα (Subir, 2013). Το φαινόμενο αυτό είναι ανεπιθύμητο και πρέπει να ληφθεί υπόψιν κατά τον σχεδιασμό των επεξεργασιών με παλμικά ηλεκτρικά πεδία, καθώς μπορεί να προκαλέσει βλάβη στον εξοπλισμό αλλά και ανεπιθύμητες μεταβολές στο υπό επεξεργασία τρόφιμο.

### **2.8.2. Ηλεκτροχημικές αντιδράσεις – διάβρωση ηλεκτροδίων**

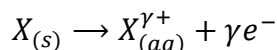
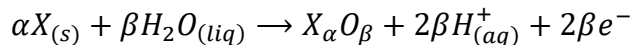
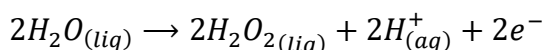
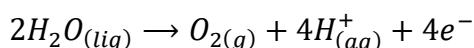
Ένα ακόμα αρνητικό φαινόμενο που παρατηρείται κατά τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος στον θάλαμο επεξεργασίας είναι η διεξαγωγή ηλεκτροχημικών αντιδράσεων. Τέτοιες αντιδράσεις πραγματοποιούνται επειδή ένα υγρό τρόφιμο δρα ως ηλεκτρολυτικό διάλυμα το οποίο βρίσκεται μεταξύ δύο ηλεκτροδίων, δηλαδή ο θάλαμος επεξεργασίας είναι ένα ηλεκτρολυτικό κελί (Καραντώνης, 2015). Ο μηχανισμός λειτουργίας των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων χαρακτηρίζεται από μεταφορά μάζας ενός ηλεκτροενεργού χημικού είδους προς το ηλεκτρόδιο. Έπειτα γίνεται μεταφορά ηλεκτρονίων στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου και μεταφορά μάζας των προϊόντων της αντίδρασης πίσω στο διάλυμα. Η μεταφορά μάζας και φορτίου είναι δύο διαδοχικές διαδικασίες των οποίων ο ρυθμός εξαρτάται από το εφαρμοζόμενο δυναμικό, το υλικό κατασκευής των ηλεκτροδίων, τον ηλεκτρολύτη, τη συχνότητα επανάληψης των παλμών, την πολικότητα του παλμού, τη θερμοκρασία, το pH κ.α. (Gileadi, 1993) (Morren, Roodenburg, & de Haan, 2003) (Pataro, Barca, Donsi, & Ferrari, 2015).

Κατά την επεξεργασία τροφίμων με PEF μπορούν να συμβούν ταυτόχρονα πολλές ηλεκτροχημικές αντιδράσεις καθώς ένα υγρό τρόφιμο έχει πολύπλοκη δομή και δεν αποτελείται από μονάχα ένα χημικό είδος. Για τον λόγο αυτό η πρόβλεψη όλων των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων που πρόκειται να λάβουν χώρα κατά την επεξεργασία είναι μια πολύ δύσκολη διαδικασία. Παρακάτω παρουσιάζονται μερικά παραδείγματα πιθανών ανοδικών και καθοδικών ημιαντιδράσεων που σχετίζονται με τη διάβρωση των ηλεκτροδίων και την ηλεκτρόλυση του νερού (Barba, Parniakov, & Wiktor, 2020) (Gad & Jayaram, 2014).

Καθοδικές ημιαντιδράσεις:



Ανοδικές ημιαντιδράσεις:



όπου  $X = Fe, Ni, Cr, Mn, Ti, Pt, \dots$

Όπως δείχνουν και οι παραπάνω αντιδράσεις υπάρχει περίπτωση να διαβρωθούν τα ηλεκτρόδια του θαλάμου με αποτέλεσμα τη μετανάστευση των μετάλλων από τα οποία είναι φτιαγμένα στο τρόφιμο. Για να περιοριστεί το φαινόμενο αυτό είναι σημαντικό να γίνει επιλογή αδρανέστερων μετάλλων για την κατασκευή των ηλεκτροδίων ενώ παράλληλα πρέπει αυτά να ελέγχονται συστηματικά και να αντικαθίστανται.. Ένας ακόμα τρόπος για να μειωθεί το φαινόμενο αυτό είναι η χρήση διπολικών παλμών κατά την επεξεργασία του τροφίμου – στις περιπτώσεις που είναι εφικτό. Επίσης, πολλές από αυτές τις αντιδράσεις έχουν ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό φυσαλίδων αερίων που άμα συσσωρευθούν εντός του θαλάμου μπορεί να προκαλέσει βλάβες στον εξοπλισμό, αλλά και να οδηγήσει στον τραυματισμό του χειριστή του.

### 2.8.3. Ωμική θέρμανση

Κατά τη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από το υγρό τρόφιμο παρατηρείται μια αντίσταση στη ροή του ηλεκτρισμού κατά την οποία εκλύεται θερμότητα. Αυτή η αντίσταση είναι υπεύθυνη για το φαινόμενο της ωμικής θέρμανσης (ή αλλιώς θέρμανσης Τζάουλ) (Ramaswamy, 2014) (Varghese, Pandey, Radhakrishna, & Bawa, 2014) (Fellows, 2017). Έχουν σχεδιαστεί πολλές μέθοδοι επεξεργασίας που εκμεταλλεύονται αυτό το φαινόμενο για την παστερίωση υγρών τροφίμων καθώς η τεχνολογία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για ασηπτικές διεργασίες. Όμως κατά την επεξεργασία τροφίμων με PEF το φαινόμενο της ωμικής θέρμανσης είναι ανεπιθύμητο καθώς ένας από τους κύριους στόχους της τεχνολογίας αυτής είναι η θανάτωση των μικροοργανισμών δίχως αύξηση της θερμοκρασίας, διατηρώντας έτσι και τα θερμοευαίσθητα συστατικά του τροφίμου. Η μέγιστη θερμοκρασιακή αύξηση δίνεται από τον τύπο (Lindgren, Aronsson, Galt, & Ohlsson, 2002):

$$\Delta T = \frac{Q}{\rho c}$$

όπου  $Q$  η πυκνότητα ενέργειας ανά μονάδα όγκου που αποδίδεται στο τρόφιμο κατά την επεξεργασία,  $\rho$  η πυκνότητα του τροφίμου και  $C$  η ειδική του θερμότητα.

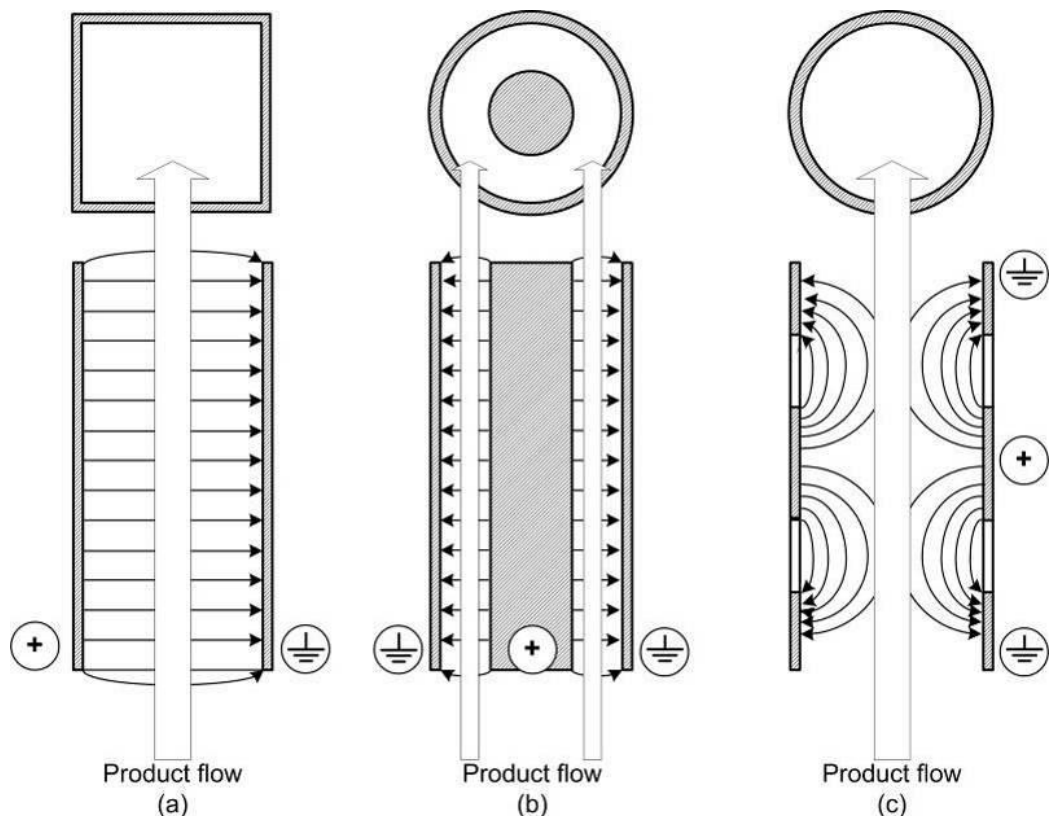
Δεν είναι δυνατή η πλήρης καταστολή του φαινομένου αυτού, όμως μπορούν να ληφθούν συγκεκριμένα μέτρα για τον περιορισμό του. Το κυριότερο είναι η μείωση και ο έλεγχος της θερμοκρασίας του τροφίμου πριν και αφού εισέλθει αυτό στον θάλαμο επεξεργασίας. Συνηθέστερα τοποθετούνται σερπαντίνες ψύξεως και συσκευές καταγραφής στην είσοδο και έξοδο του θαλάμου στέλνοντας τα δεδομένα στον ηλεκτρονικό υπολογιστή ελέγχου. Ένας ακόμα τρόπος για να μειωθεί η θέρμανση είναι η επιλογή κατάλληλης κυματομορφής του δυναμικού και ρύθμιση του πλάτους και του εύρους της. Αξίζει να σημειωθεί όμως ότι αν και το φαινόμενο αυτό είναι ανεπιθύμητο κατά την επεξεργασία με PEF, η παρουσία του δεν προκαλεί κίνδυνο για τον χειριστή αλλά ούτε επιμολύνει με κάποιον τρόπο το τρόφιμο.

## 2.9. Θάλαμοι επεξεργασίας

Συνεχίζοντας, θα γίνει αναφορά σε διάφορες βασικές έννοιες που αφορούν τους θαλάμους επεξεργασίας των τροφίμων, επομένως είναι σημαντικό να διευκρινιστούν αυτές κατάλληλα.

Για τους θαλάμους επεξεργασίας μπορούν να γίνουν δύο διαφορετικές διακρίσεις. Η πρώτη διάκριση αφορά τον τρόπο λειτουργίας των θαλάμων, οι οποίοι διαχωρίζονται σε στατικής ή συνεχής λειτουργίας. Στους θαλάμους στατικής λειτουργίας το τρόφιμο τοποθετείται μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων, έπειτα δίχως αυτό να είναι εν κινήσει διαβιβάζονται οι παλμοί και όταν τελειώσει η επεξεργασία, αυτό αφαιρείται από τον θάλαμο. Αντιθέτως, οι θάλαμοι συνεχής λειτουργίας επιτρέπουν τη συνεχή ροή του τροφίμου εντός του θαλάμου, διαβιβάζοντας παράλληλα τους παλμούς των ηλεκτρικών πεδίων.

Η δεύτερη διάκριση που μπορεί να γίνει αφορά την εσωτερική γεωμετρία των θαλάμων, των ηλεκτροδίων και του ενδιάμεσου από αυτά χώρου. Οι περισσότερες διατάξεις που έχουν κατασκευαστεί για τους θαλάμους στατικής λειτουργίας μπορούν να απλοποιηθούν στον τύπο παράλληλων πλακών. Άλλες συνήθεις γεωμετρίες είναι οι ομοαξονικές – όπου τα δύο ηλεκτρόδια έχουν ομοαξονική κυλινδρική συμμετρία – και οι ομοπεδιακές ή συγγραμμικές – όπου το τρόφιμο ρέει στην ίδια διεύθυνση με αυτή του ηλεκτρικού πεδίου (Εικόνα 2.9.1) (Toerfl, 2006).



Εικόνα 2.9.1: Βασικές γεωμετρίες θαλάμων επεξεργασίας. a) Παράλληλων πλακών, b) Ομοαξονική, c) Ομοπεδιακή ή συγγραμμική.

### Κεφάλαιο 3. Σκοπός της εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανάλυση των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα όταν ένα τρόφιμο τοποθετηθεί εντός ενός εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου. Ο συλλογισμός που θα χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση αυτή είναι απλός. Αρχικά, θεωρείται ένα τυχαίο υγρό τρόφιμο που αποτελείται κατά κύριο λόγο από νερό, όπως ένας χυμός φρούτων, ένα αναψυκτικό, μια άλμη ή ακόμα και ένα σιρόπι. Στη συνέχεια, αποδομείται στα βασικά μέρη που θα εξεταστούν, τα οποία είναι το μικροβιακό του φορτίο, τα μόρια και τα ιόντα από τα οποία αποτελείται. Συνεχίζοντας, κάθε ένα από αυτά τα μέρη θα αναλυθούν ξεχωριστά και θα βρεθούν οι μεταβολές που συμβαίνουν όταν αυτά βρεθούν εντός ενός ηλεκτρικού πεδίου, ξεκινώντας με τις επιπτώσεις του πεδίου στους μικροοργανισμούς και έπειτα στα ιόντα και στα μόρια.

Είναι πολύ σημαντικό να διατυπωθούν σωστά όλες οι υποθέσεις που λαμβάνονται κατά την εξέταση των φαινομένων και την κατασκευή των μαθηματικών μοντέλων που τις εκφράζουν. Στην εργασία αυτή, πριν κατασκευαστεί οποιαδήποτε σχέση, θα αναφέρονται όλες αυτές οι υποθέσεις και οι απλοποιήσεις που χρησιμοποιήθηκαν. Με τον τρόπο αυτό θα μειωθεί η πιθανότητα εξαγωγής λανθασμένων και αντεπιστημονικών συμπερασμάτων. Η διαφάνεια αυτή επιτρέπει επίσης και τη ξεκάθαρη ανάδειξη των τομέων του θέματος που απαιτούν περαιτέρω έρευνα.

## Κεφάλαιο 4. Επεξεργασία δεδομένων

### 4.1. Μικροβιακά φαινόμενα

Στο υποκεφάλαιο αυτό θα αναλυθεί η επίδραση που έχει ένα ηλεκτρικό πεδίο στις κυτταροπλασματικές μεμβράνες των μικροοργανισμών. Έχοντας ως στόχο πάντα τη μη-αντιστρεπτή ηλεκτροδιάτρηση των μεμβρανών, θα παρουσιαστούν κάποια μαθηματικά μοντέλα που υποδεικνύουν τις απαιτούμενες οριακές τιμές του δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου. Επίσης, μεγάλο κριτήριο για την επιτυχία της ηλεκτροδιάτρησης – και ένα ακόμα θέμα που θα εξεταστεί – είναι ο χρόνος έκθεσης της κυτταρικής μεμβράνης στο ηλεκτρικό πεδίο.

#### 4.1.1. Κατάρρευση κυτταροπλασματικής μεμβράνης

Για την περαιτέρω εξέταση και κατασκευή μαθηματικών μοντέλων που συσχετίζουν τις τάσεις  $V_{tm}$ ,  $V_c$  και  $V_f$ , είναι απαραίτητο να γίνουν οι ακόλουθες υποθέσεις:

- i. Ισχύει η αρχή της υπέρθεσης για τα  $V_f$  και  $V_{tm}$  και αυτά συσχετίζονται μεταξύ τους γραμμικά.
- ii. Το  $V_{tm}$  δεν μεταβάλλεται όταν εφαρμόζεται εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο.
- iii. Το ηλεκτρικό πεδίο που επιβάλλεται είναι ομογενές.
- iv. Το κύτταρο θεωρείται ως μια σφαίρα η οποία στο εσωτερικό της είναι αγωγίμη και περικλείεται από την κυτταρική μεμβράνη.

Εάν η κυτταροπλασματική μεμβράνη θεωρηθεί ως τέλειος μονωτής, τότε η διαφορά δυναμικού που προκαλείται από τους παλμούς ενός εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου δίνεται από την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης Laplace σε σφαιρικές συντεταγμένες (Schwan, 1957):

$$V_c = 1,5E_c r \cos\theta \pm V_{tm}$$

(4.1.1.1)

όπου  $E_c$  η κρίσιμη ένταση του ηλεκτρικού πεδίου,  $V_c$  η κρίσιμη τάση κατάρρευσης της κυτταρικής μεμβράνης,  $V_{tm}$  η διαμεμβρανική τάση,  $r$  η ακτίνα του κυττάρου και  $\theta$  η γωνία που σχηματίζει η επιβατική ακτίνα της θέσης της κυτταρικής μεμβράνης, όπου μετρείται το  $V_c$  με το διάνυσμα του  $E_c$ .

Προφανώς, η μέγιστη διαφορά δυναμικού παρατηρείται στους δύο πόλους του κυττάρου, όπου  $\theta = 0$  και  $\theta = \pi$ , και η ελάχιστη μετριέται στα σημεία τα οποία είναι κάθετα στο διάνυσμα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου ( $\theta = \pm \pi/2$ ). Από την παραπάνω εξίσωση μπορεί

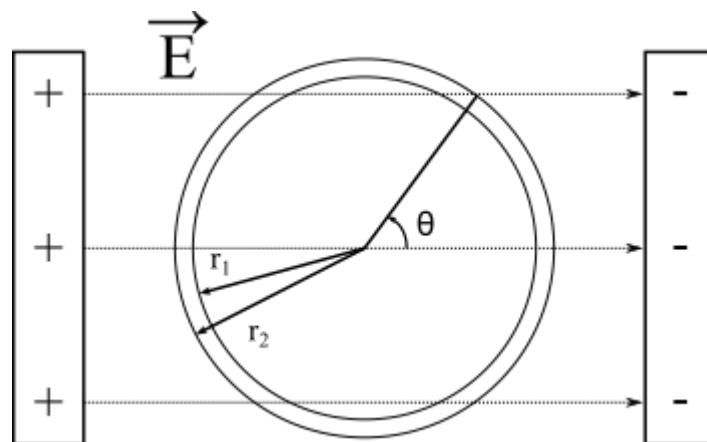


επίσης να υπολογιστεί εύκολα η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που απαιτείται για την κατάρρευση της μεμβράνης θεωρώντας ότι  $V_c = 1V$  σε θερμοκρασία δωματίου. Επίσης συμπεραίνεται ότι μικροοργανισμοί μικρότερου μεγέθους (δηλαδή με μικρότερη ακτίνα  $r$ ) απαιτούν ισχυρότερη ένταση ηλεκτρικού πεδίου για να γίνει επιτυχής ηλεκτροδιάτρηση. Δεδομένα από έρευνες έχουν δείξει ότι κύτταρα μεγέθους 1–10  $\mu m$  απαιτούν για την ηλεκτροδιάτρησή τους ένταση μεγαλύτερη των 10 kV/cm ενώ για ευκαρυωτικά φυτικά κύτταρα μεγέθους 40–200  $\mu m$  αρκεί ένταση μικρότερη των 5 kV/cm (Donsi, Ferrari, & Pataro, 2010).

Στο προηγούμενο μοντέλο θεωρήθηκε πως η κυτταρική μεμβράνη έχει τις ιδιότητες ενός τέλει μονωτή, όμως έχει βρεθεί ότι η μεμβράνη των περισσότερων κυττάρων διαθέτει μια αγωγιμότητα ανά μονάδα επιφάνειας  $G_m$  της τάξεως των  $10^{-3} - 10^{-4} S cm^{-2}$ . Στη περίπτωση αυτή δεν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα και η εξίσωση 3.1 παίρνει τη μορφή (Zimmermann & Neil, 1996):

$$V_c = \frac{\frac{3}{2 + \rho_e/\rho_m} E_c \left[ r_1 - r_2 + \frac{1 - \rho_m/\rho_i}{2 + \rho_m/\rho_i} r_1^3 \left( \frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_2^2} \right) \right] \cos\theta}{1 + 2 \left( \frac{1 - \rho_e/\rho_m}{2 + \rho_e/\rho_m} \right) \left( \frac{1 - \rho_m/\rho_i}{2 + \rho_m/\rho_i} \right) \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^3} \pm V_{tm} \quad (4.1.1.2)$$

όπου  $r_1$  η εσωτερική ακτίνα και  $r_2$  η εξωτερική ακτίνα του κυττάρου,  $\rho_i$  η ειδική αντίσταση στο εσωτερικό του κυττάρου (κυτταρόπλασμα),  $\rho_e$  η ειδική αντίσταση του διαλύματος που αιωρείται το κύτταρο και  $\rho_m$  η ειδική αντίσταση της κυτταρικής μεμβράνης.



Εικόνα 4.1.1.1: Αναπαράσταση κυττάρου εντός ηλεκτρικού πεδίου.

Αν θεωρηθεί ότι η ακτίνα του κυττάρου είναι πολύ μεγαλύτερη από το πάχος της μεμβράνης  $r \gg r_2 - r_1$  τότε η (4.1.1.2) απλοποιείται:

$$V_c = \frac{1,5E_c r \cos\theta}{1 + \lambda} \pm V_{tm}$$

(4.1.1.3)

Όπου  $\lambda = G_m r (0,5\rho_e + \rho_i)$

#### 4.1.2. Χρόνος φόρτισης μεμβράνης

Η κυτταρική μεμβράνη όπως έχει αναφερθεί, υπό την επήρεια εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου, δρα ως πυκνωτής, επομένως απαιτείται ένας χρόνος  $\tau$  για να φορτιστεί ώστε να φτάσει την κρίσιμη διαφορά δυναμικού. Από πειραματικά δεδομένα έχει βρεθεί ότι επιπλέον αυτή η διαφορά δυναμικού πρέπει να διατηρηθεί για περεταίρω χρόνο  $\approx 10$  ns έτσι ώστε να είναι επιτυχής η μη αντιστρεπτή ηλεκτροδιάτρηση (Donsì, Ferrari, & Pataro, 2010).

Ο χρόνος που απαιτείται για να φορτιστεί η επιφάνεια της κυτταρικής μεμβράνης εξαρτάται από τις ηλεκτρικές παραμέτρους και του κυττάρου, αλλά και του υγρού υποστρώματος στο οποίο αιωρείται αυτό. Έστω η ειδική αντίσταση και ειδική χωρητικότητα της μεμβράνης  $R_m = 1/G_m$  και  $c_m$  αντίστοιχα. Υποθέτοντας ότι το κύτταρο έχει σφαιρικό σχήμα με ακτίνα  $r$ , όταν το εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο επέμβει στη μεμβράνη, εκείνη δεν φορτίζεται ακαριαία αλλά η χρονική σταθερά φόρτισής της δίνεται από τη σχέση (Zimmermann & Neil, 1996):

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{R_m c_m} + \frac{1}{r c_m (\rho_i + 0,5\rho_e)}$$

( 4.1.2.1 )

όταν η αγωγιμότητα του υγρού υποστρώματος δεν είναι πολύ μικρή, ο όρος  $R_m c_m$  απλοποιείται και η εξίσωση ( 4.1.2.1 ) γίνεται (Zimmermann & Neil, 1996) (Cole, 1937):

$$\tau = r c_m (\rho_i + 0,5\rho_e)$$

( 4.1.2.2 )

Για παράδειγμα, ένα κύτταρο διαμέτρου 10  $\mu\text{m}$  (ακτίνας 5  $\mu\text{m}$ ) με ειδική αντίσταση κυτταροπλάσματος και υγρού υποστρώματος 100  $\Omega \text{ cm}$  και χωρητικότητα μεμβράνης 1  $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ , έχει χρονική σταθερά ίση με 75 ns.

Επειδή η ειδική χωρητικότητα της μεμβράνης αλλά και η ειδική αντίσταση του κυτταροπλάσματος παραμένουν σταθερά για δεδομένο κύτταρο, τότε ο χρόνος φόρτισης της κυτταρικής μεμβράνης λόγω ύπαρξης εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου εξαρτάται μόνο από την ακτίνα  $r$  του κυττάρου και την ειδική αντίσταση  $\rho_e$  του υγρού υποστρώματος στο οποίο βρίσκεται αυτό.

Τώρα είναι δυνατό να εκφραστεί η διαφορά δυναμικού της μεμβράνης συναρτήσει και του χρόνου φόρτισής της (Schwan, Herman P., 1989) (Krassowska, Stone, & Neu, 2002) (Kinosita & Tsong, 1977):

$$V(t, \theta) = 1,5E_c r \cos\theta \left(1 - e^{-t/\tau}\right) \pm V_{tm}$$

( 4.1.2.3 )

### 4.1.3. Ηλεκτροδιάτρηση πυρήνα

Μέχρι τώρα έχει εξεταστεί η τάση κατάρρευσης και η χρονική σταθερά φόρτισης της κυτταροπλασματικής μεμβράνης, χωρίς να γίνει αναφορά στην πυρηνική μεμβράνη των ευκαρυωτικών κυττάρων. Σίγουρα, η μη αντιστρεπτή ηλεκτροδιάτρηση της κυτταροπλασματικής μεμβράνης επαρκεί για τη θανάτωση των παθογόνων και αλλοιογόνων μικροοργανισμών, μειώνοντας έτσι το μικροβιακό φορτίο του τροφίμου. Όμως η εξέταση της συμπεριφοράς του κυτταρικού πυρήνα όταν αυτός εκτεθεί σε ένα παλμικό ηλεκτρικό πεδίο μπορεί να έχει μεγάλο ενδιαφέρον για βιοτεχνολογικές, μοριακές, αλλά και ιατρικές εφαρμογές.

Αρχικά όπως έχει γίνει μέχρι τώρα, θα χρησιμοποιηθεί το σφαιρικό κυτταρικό μοντέλο, θεωρώντας πως ο πυρήνας έχει και αυτός σφαιρική δομή και βρίσκεται στο γεωμετρικό κέντρο του κυττάρου. Επίσης, για να εκφραστεί η επίδραση των ηλεκτρικών παλμών στον εσωκυττάριο χώρο, θεωρείται πως η μεμβράνη που επικαλύπτει τον πυρήνα και το κύτταρο είναι μη αγωγίμη. Εφαρμόζοντας τώρα ένα ηλεκτρικό πεδίο στο εναιώρημα του κυττάρου φέρει ως αποτέλεσμα ένα επαγωγικό ρεύμα στο υγρό υπόστρωμα και στο κυτταρόπλασμα αλλά και ένα ρεύμα μετατόπισης στη μεμβράνη. Για έναν τετραγωνικό παλμό του ηλεκτρικού πεδίου, το ρεύμα αυτό φθίνει εκθετικά με τη χρονική σταθερά φόρτισης της κυτταροπλασματικής μεμβράνης (Schoenbach, Beebe, & Buescher, 2001).

Έστω  $d_n$  και  $d_{cell}$  η διάμετρος του πυρήνα και του κυττάρου αντίστοιχα. Αν  $d_n \ll d_{cell}$ , τότε η διαφορά δυναμικού της πυρηνικής μεμβράνης που έχει δημιουργηθεί από έναν τετραγωνικό παλμό του ηλεκτρικού πεδίου δίνεται από τον τύπο (Schoenbach, Beebe, & Buescher, 2001):

$$V_n = d_n E(t) e^{-\frac{t}{\tau_c}} \quad (4.1.3.1)$$

όπου  $\tau_c$  η χρονική σταθερά φόρτισης της κυτταροπλασματικής μεμβράνης και  $E(t)$  η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου.

Το δυναμικό τώρα στη πυρηνική μεμβράνη εξαρτάται χρονικά από την ανάπτυξη της παραπάνω διαφοράς δυναμικού, αλλά και από τον χρόνο φόρτισης της εσωτερικής μεμβράνης. Για τετραγωνικό παλμό, θεωρώντας πως η ειδική αντίσταση του πυρήνα ισούται με αυτή του κυτταροπλάσματος, η διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο πόλων της πυρηνικής μεμβράνης είναι (Schoenbach, Beebe, & Buescher, 2001):

$$V_{n,membrane} = d_n E(t) e^{-\frac{t}{\tau_c}} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_n}} \right)$$

( 4.1.3.2 )

όπου  $\tau_n$  η χρονική σταθερά φόρτισης της πυρηνικής μεμβράνης, η οποία είναι ανάλογη της  $\tau_c$ .

Το δυναμικό του πυρήνα και συνεπώς της πυρηνικής μεμβράνης εξαρτάται από τον χρόνο φόρτισης και αποφόρτισης της κυτταροπλασματικής μεμβράνης. Επίσης το ρεύμα που διαρρέει έναν πυκνωτή (μεμβράνη) ορίζεται από τη χρονική παράγωγο της διαφοράς δυναμικού που εφαρμόζεται ( $i = C \frac{dv}{dt}$ ). Έτσι, η εφαρμογή ενός τετραγωνικού παλμού του ηλεκτρικού πεδίου διάρκειας  $T$  συνεπάγεται το διπολικό παλμό δυναμικού σε κάθε πλευρά της πυρηνικής μεμβράνης. Τα ακρότατα του παλμού αυτού παρουσιάζονται στις χρονικές στιγμές:

$$t_1 = \tau_n \ln \left( 1 + \frac{\tau_c}{\tau_n} \right) \quad \text{και} \quad t_2 = T + \tau_n \ln \left( 1 + \frac{\tau_c}{\tau_n} \right)$$

( 4.1.3.3 )

## 4.2. Μοριακά φαινόμενα

Στο υποκεφάλαιο αυτό θα αναλυθούν οι κινήσεις που εκτελούν τα μόρια και τα ιόντα του υγρού τροφίμου, καθώς αυτά βρίσκονται στον θάλαμο επεξεργασίας. Επίσης θα εξεταστεί η συνεισφορά του ηλεκτρικού πεδίου στις κινήσεις αυτές, αλλά και οι μεταβολές που επιβάλλει στις συγκεντρώσεις τους ανάλογα με τη θέση τους στον χώρο. Για να είναι ευκολότερη η ανάλυση αυτή, θα πρέπει να ληφθούν κάποιες αρχικές υποθέσεις και έπειτα, ανάλογα με την περίπτωση που εξετάζεται κάθε φορά, θα προστίθενται νέες σε αυτές. Οι υποθέσεις αυτές είναι:

- i. Τα μόρια και τα ιόντα έχουν σφαιρικό σχήμα.
- ii. Εντός του θαλάμου επεξεργασίας το υγρό τρόφιμο κινείται με στρωτή ροή.
- iii. Το τρόφιμο είναι ομογενές μίγμα με υψηλό ιξώδες.
- iv. Τα σωματίδια δεν αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους.

### 4.2.1. Ροή λόγω ηλεκτρομεταφοράς

Αρχικά, η ένταση  $\vec{E}$  του ηλεκτρικού πεδίου εντός του θαλάμου δίνεται από τη σχέση (Τσιμπούκης, 2016):

$$\vec{E} = -\nabla\varphi \quad (4.2.1.1)$$

όπου  $\varphi$  είναι το βαθμωτό ηλεκτρικό δυναμικό.

Η ηλεκτρική δύναμη  $\vec{F}_{el}$  που ασκείται σε κάθε ιόν είναι:

$$\begin{aligned} \vec{F}_{el} &= z_k e_0 \vec{E} \stackrel{(1.1)}{\implies} \\ \vec{F}_{el} &= -z_k e_0 \nabla\varphi \end{aligned} \quad (4.2.1.2)$$

με  $z_k \in \mathbb{Z} \setminus \{0\}$  ο αριθμός φορτίου ενός ιόντος τύπου  $k$ . Τα κατιόντα έχουν  $z_k > 0$  ενώ τα ανιόντα  $z_k < 0$ . Για παράδειγμα:

$$Fe^{3+} : z_k = +3 \text{ ενώ } O^{2-} : z_k = -2$$

Εφόσον τα ιόντα κινούνται σε ένα ηλεκτρολυτικό διάλυμα, θα τους ασκείται μια δύναμη τριβής  $\vec{F}_f$ . Έχοντας υποθέσει ότι κάθε ιόν έχει τη μορφή σφαίρας, θα ισχύει ο νόμος Stokes:

$$\vec{F}_f = -g_k \vec{v}_k \quad (4.2.1.3)$$

Όπου  $g_k = 6\pi\eta r_k$  η σταθερά Stokes,  $\sigma$  το δυναμικό ιζώδες,  $r_k$  η ακτίνα του ιόντος και  $\vec{v}_k$  η ταχύτητα που κινούνται τα ιόντα τύπου k.

Το διάνυσμα της δύναμης τριβής θα έχει αντίθετη φορά από την ηλεκτρική, επομένως η συνισταμένη των δυνάμεων που ασκούνται σε ένα ιόν τύπου k λόγω ηλεκτρικού πεδίου και τριβής είναι το αλγεβρικό άθροισμα:

$$\begin{aligned}\sum \vec{F} &= \vec{F}_{el} + \vec{F}_f \Leftrightarrow \\ \sum \vec{F} &= -z_k e_0 \nabla \varphi - g_k \vec{v}_{k,el}\end{aligned}\tag{4.2.1.4}$$

Αφού  $\sum \vec{F} \neq 0$ , από τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα συμπεραίνεται ότι ένα ιόν τύπου k θα εκτελεί επιταχυνόμενη κίνηση με επιτάχυνση  $\vec{a}_k$ :

$$\vec{a}_k = \frac{d\vec{v}_{k,el}}{dt}\tag{4.2.1.5}$$

και πολλαπλασιάζοντας τη (4.2.1.5) με τη μάζα του ιόντος  $m_k$  είναι:

$$\begin{aligned}m_k \frac{d\vec{v}_{k,el}}{dt} &= m_k \vec{a}_k = \sum \vec{F} \xrightarrow{(4.2.1.4)} \\ m_k \frac{d\vec{v}_{k,el}}{dt} &= -z_k e_0 \nabla \varphi - g_k \vec{v}_{k,el}\end{aligned}\tag{4.2.1.6}$$

Η (4.2.1.6) είναι μια συνήθης μη ομογενής διαφορική εξίσωση πρώτης τάξεως (ως προς  $\vec{v}_{k,el}(t)$ ) η οποία λύνεται με τη μέθοδο του πολλαπλασιαστικού παράγοντα και έχει λύση (η αναλυτική λύση βρίσκεται στο **Παράρτημα**):

$$\vec{v}_{k,el} = -\frac{z_k e_0}{g_k} \nabla \varphi \left(1 - e^{-\frac{g_k t}{m_k}}\right) \approx -\frac{z_k e_0}{g_k} \nabla \varphi\tag{4.2.1.7}$$

Διότι το πηλίκο  $\frac{g_k}{m_k} \gg 1$ , άρα για  $t > 0$  το  $e^{-\frac{g_k t}{m_k}} \rightarrow 0$ .

Η ηλεκτροχημική ευκινησία  $\bar{u}_k$  ενός ιόντος k ορίζεται ως το μέτρο της οριακής ταχύτητας που μπορεί να αποκτήσει το ιόν υπό την επίδραση της ηλεκτρικής δύναμης  $\vec{F}_{el}$  και της δύναμης τριβής  $\vec{F}_f$  κινούμενο σε ένα ηλεκτρολυτικό διάλυμα:

$$\bar{u}_k = \frac{z_k e_0}{g_k}\tag{4.2.1.8}$$

Όπου  $e_0 = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$  το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο. Έπειτα η ευκινησία του ιόντος  $k$  είναι:

$$u_k = \frac{\bar{u}_k}{z_k \mathcal{F}} \quad (4.2.1.9)$$

Όπου  $\mathcal{F} = e_0 N_A \approx 9.648533 \times 10^4 \text{ C mol}^{-1}$  η σταθερά Faraday. Από τα παραπάνω, η εξίσωση (4.2.1.7) γίνεται:

$$\vec{v}_{k,el} = -z_k \mathcal{F} u_k \nabla \varphi \quad (4.2.1.10)$$

Πολλαπλασιάζοντας με την συγκέντρωση των ιόντων τύπου  $k$   $c_k$  προκύπτει η ροή των ιόντων  $k$  λόγω ηλεκτρομεταφοράς  $\vec{j}_{k,el} = c_k \vec{v}_{k,el}$ . Δηλαδή:

$$\vec{j}_{k,el} = -z_k \mathcal{F} u_k c_k \nabla \varphi \quad (4.2.1.11)$$

## 4.2.2. Ροή λόγω βαθμίδας συγκέντρωσης - διάχυση

Όπως δείχθηκε παραπάνω, εντός του θαλάμου παρουσιάζεται μια ροή ιόντων λόγω της παρουσίας του εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου. Επιπλέον και τα ιόντα αλλά και τα μόρια του υγρού τροφίμου κινούνται και λόγω του φαινομένου της διάχυσης. Το χημικό δυναμικό  $\mu_k$  ενός είδους  $k$  στο σημείο  $(x, y, z)$  ενός καρτεσιανού συστήματος αξόνων είναι:

$$\mu_k(x, y, z) = \mu_k^0 + RT \ln c_k(x, y, z) \quad (4.2.2.1)$$

Η βαθμίδα του χημικού δυναμικού (ως προς τη θέση) είναι:

$$\begin{aligned} \nabla \mu_k &= \nabla [\mu_k^0 + RT \ln c_k] \Rightarrow \\ \nabla \mu_k &= \nabla \mu_k^0 + \nabla RT \ln c_k \Rightarrow \\ \nabla \mu_k &= RT \nabla \ln c_k \Rightarrow \\ \nabla \mu_k &= \frac{RT}{c_k} \nabla c_k \end{aligned} \quad (4.2.2.2)$$

και έχει μονάδες μέτρησης:

$$\begin{aligned} [\nabla \mu_k] &= \frac{(\text{J K}^{-1} \text{mol}^{-1}) \text{K}}{\text{mol}} \cdot \frac{\text{mol}}{\text{m}} = \text{J m}^{-1} \text{mol}^{-1} \\ [\nabla \mu_k] &= \text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{m}^{-1} \text{mol}^{-1} = \text{kg ms}^{-2} \text{mol}^{-1} \\ [\nabla \mu_k] &= \text{Nm mol}^{-1} \end{aligned}$$



όπου  $R \approx 8,314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$  η παγκόσμια σταθερά αερίων και  $T$  η θερμοκρασία.

Επομένως, από τον ορισμό της ευκινησίας των ιόντων, η οριακή ταχύτητα που αποκτά ένα χημικό είδος λόγω βαθμίδας συγκέντρωσης είναι:

$$\vec{v}_{k,dif} = -u_k \nabla \mu_k = -u_k \frac{RT}{c_k} \nabla c_k \quad (4.2.2.3)$$

και πολλαπλασιάζοντας με την συγκέντρωση  $c_k$  ορίζεται η ροή σωματιδίων  $k$  λόγω διάχυσης:

$$\vec{J}_{k,dif} = -u_k RT \nabla c_k \quad (4.2.2.4)$$

Εάν οριστεί ο συντελεστής διάχυσης του Einstein  $D_k = u_k RT$  (σταθερός για κάθε είδος  $k$ ), τότε προκύπτει η σχέση:

$$\vec{J}_{k,dif} = -D_k \nabla c_k \quad (4.2.2.5)$$

### 4.2.3. Εξαναγκασμένη ροή

Για να επεξεργαστεί ένα υγρό τρόφιμο σε έναν θάλαμο συνεχούς λειτουργείας απαιτείται η εξαναγκασμένη κίνησή του εντός του θαλάμου η οποία επιτυγχάνεται συνήθως με την χρήση μιας αντλίας. Έστω ότι ένας στοιχειώδης όγκος ρευστού κινείται με ταχύτητα  $\vec{v}$ , τότε θεωρείται πως και κάθε χημικό είδος του όγκου αυτού κινείται με την ίδια ταχύτητα ( $\vec{v}_{k,con} = \vec{v}$ ). Επομένως η εξαναγκασμένη ροή ενός είδους  $k$  θα δίνεται από τη σχέση:

$$\vec{J}_{k,con} = c_k \vec{v}_{k,con} \quad (4.2.3.1)$$

Όταν το υπό επεξεργασία τρόφιμο τοποθετείται σε θάλαμο στατικής λειτουργίας, η ροή λόγω συναγωγής είναι ίση με μηδέν.

### 4.2.4. Εξίσωση Nernst – Planck

Όλα τα παραπάνω τώρα μπορούν να συνδυαστούν και να εκφράσουν την αρχή διατήρησης μάζας μέσω της εξίσωσης Nernst – Planck, η οποία δίνεται από τον τύπο:

$$\frac{\partial c_k}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{J}_k = 0 \quad (4.2.4.1)$$

όπου  $\vec{J}_k$  η συνολική ροή ενός χημικού είδους k.

$$\begin{aligned}\vec{J}_k &= \vec{J}_{k,el} + \vec{J}_{k,dif} + \vec{J}_{k,con} \Rightarrow \\ \vec{J}_k &= -z_k \mathcal{F} u_k c_k \nabla \varphi - D_k \nabla c_k + c_k \vec{v}_{k,con}\end{aligned}\quad (4.2.4.2)$$

Στην περίπτωση που το ηλεκτρολυτικό διάλυμα (υγρό τρόφιμο) βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας θα ισχύει  $\frac{\partial c}{\partial t} = 0$ . Επομένως είναι:

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0 \Rightarrow \nabla \cdot (-z_k \mathcal{F} u_k c_k \nabla \varphi - D_k \nabla c_k + c_k \vec{v}_{k,con}) = 0 \quad (4.2.4.3)$$

#### 4.2.5. Ροές μορίων

Έως τώρα, οι εξισώσεις που έχουν κατασκευαστεί αφορούν κυρίως ιόντα. Όμως, είναι δυνατό να προσαρμοστούν κατάλληλα, έτσι ώστε να εκφράσουν τις ροές που εκτελούν και τα μόρια ενός υγρού τροφίμου όταν αυτό ρέει στον θάλαμο επεξεργασίας.

Ως γνωστόν, τα μόρια ενός διαλύματος είναι ηλεκτρικά ουδέτερα, επομένως θεωρώντας το φορτίο  $z = 0$ , οι σχέσεις ( 4.2.1.11 ), ( 4.2.2.5 ) και ( 4.2.3.1 ) γίνονται:

$$(4.2.1.11) \Rightarrow \vec{J}_{k,el} = -z_k \mathcal{F} u_k c_k \nabla \varphi = 0 \quad (4.2.5.1)$$

$$(4.2.2.5) \Rightarrow \vec{J}_{k,dif} = -D_k \nabla c_k \quad (4.2.5.2)$$

$$(4.2.3.1) \Rightarrow \vec{J}_{k,con} = c_k \vec{v}_{k,con} \quad (4.2.5.3)$$

Επομένως, η συνολική ροή των μορίων k είναι:

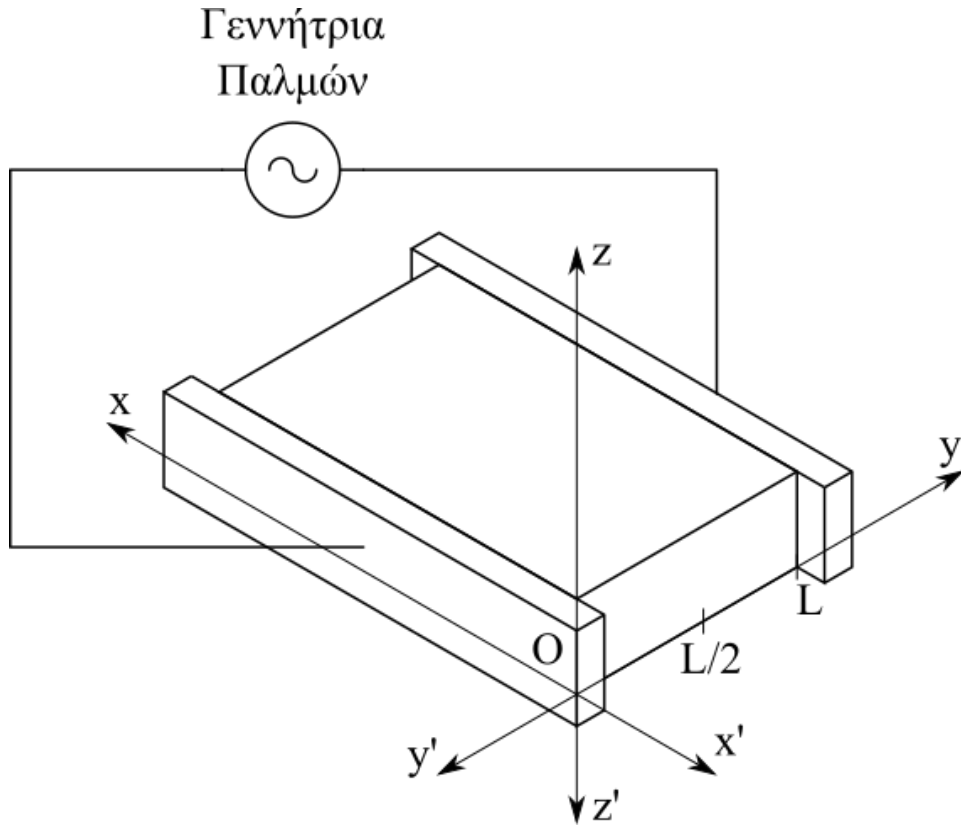
$$\begin{aligned}\vec{J}_k &= \vec{J}_{k,el} + \vec{J}_{k,dif} + \vec{J}_{k,con} \Rightarrow \\ \vec{J}_k &= -D_k \nabla c_k + c_k \vec{v}_{k,con}\end{aligned}\quad (4.2.5.4)$$

Όπως παρατηρείται από τη σχέση ( 4.2.5.1 ), η ροή των μορίων λόγω ηλεκτρομεταφοράς ισούται με μηδέν. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς, όπως αναφέρθηκε πριν, τα μόρια είναι ηλεκτρικά ουδέτερα, επομένως δεν τους ασκείται ηλεκτρική δύναμη όταν αυτά βρίσκονται εντός του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργούν τα ηλεκτρόδια του θαλάμου. Αντιθέτως όμως, τα πολικά μόρια πολώνονται όταν βρίσκονται εντός ηλεκτρικού πεδίου και προσανατολίζονται σύμφωνα με τη φορά της έντασής του (Ebbing & Gammon, 2011).

### 4.3. Ροή ιόντων σε θάλαμο παράλληλων πλακών

Οι παραπάνω σχέσεις περιγράφουν την συνολική ροή των σωματιδίων δίχως κανέναν περιορισμό ως προς τις διευθύνσεις που παρατηρούνται οι επιμέρους ροές. Για τον λόγο αυτό είναι πολύ δύσκολο να βρεθεί μια αναλυτική λύση των εξισώσεων αυτών. Στην παράγραφο αυτή θα εξεταστεί η λύση θεωρώντας τα εξής:

- 
- i. Το τρώφιμο ρέει σε έναν θάλαμο επεξεργασίας παράλληλων πλακών και ορίζεται το ορθοκανονικό σύστημα αξόνων ως εξής (Εικόνα 4.3.1):
    - a) Ο άξονας  $x'x$  ορίζεται από τη διεύθυνση φοράς της εξαναγκασμένης ροής του τροφίμου.
    - b) Ο άξονας  $y'y$  είναι κάθετος στον  $x'x$  και τέμνει κάθετα τις εκτεθειμένες επιφάνειες των ηλεκτροδίων του θαλάμου.
    - c) Ο άξονας  $z'z$  είναι κάθετος στους προηγούμενους δύο, δηλαδή είναι κάθετος ως προς τη διεύθυνση ροής του τροφίμου και είναι παράλληλος στις εκτεθειμένες επιφάνειες των ηλεκτροδίων.
  - ii. Ισχύει η αρχή της επαλληλίας των ροών.
  - iii. Η ροή λόγω ηλεκτρομεταφοράς ορίζεται μονοδιάστατα και η διεύθυνσή της είναι παράλληλη με τον άξονα  $y'y$ .
  - iv. Η ροή λόγω διάχυσης ορίζεται μονοδιάστατα και η διεύθυνσή της ταυτίζεται με αυτή της ροής λόγω ηλεκτρομεταφοράς.
  - v. Η ροή λόγω συναγωγής ορίζεται μονοδιάστατα και η διεύθυνσή της είναι παράλληλη με τον άξονα  $x'x$ .
  - vi. Ένα μόνο είδος άλατος είναι διαλυμένο στην υδατική φάση του υγρού τροφίμου και τα ανιόντα και κατιόντα του έχουν ίσες συγκεντρώσεις. Δηλαδή αν  $C_+$  και  $C_-$  οι συγκεντρώσεις των κατιόντων και ανιόντων αντίστοιχα, θα ισχύει  $C_+ = C_-$  και  $z_{\text{κατιόντος}} = -z_{\text{ανιόντος}} \Leftrightarrow |z_{\text{κατιόντος}}| = |z_{\text{ανιόντος}}| = z$ .
  - vii. Από τα παραπάνω συνεπάγεται επίσης πως η ευκινησία των κατιόντων θα είναι ίση με αυτή των ανιόντων, επομένως το ίδιο θα ισχύει και για τους συντελεστές διάχυσής τους  $D_+ = D_- = D$ .
  - viii. Τέλος, η εξέταση της ηλεκτροχημικής διεπιφάνειας γίνεται με βάση τη θεωρία Debye – Hückel.
-



Εικόνα 4.3.1: Ορισμός ορθοκανονικού συστήματος αξόνων σε θάλαμο παράλληλων πλακών.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η ( 4.2.4.2 ) στον άξονα  $y'y$  γίνεται:

$$\vec{J}_{\pm} = \vec{J}_{\pm,el} + \vec{J}_{\pm,dif} + \vec{J}_{\pm,con} \Rightarrow$$

$$\vec{J}_{\pm} = \mp z \mathcal{F} u C_{\pm} \frac{\partial \varphi}{\partial y} - D \frac{\partial C_{\pm}}{\partial y}$$

( 4.3.1 )

Επομένως και η ( 4.2.4.1 ) είναι:

$$\frac{\partial C_{\pm}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} (\vec{J}_{\pm}) = 0 \Rightarrow$$

$$\frac{\partial C_{\pm}}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial y} (\vec{J}_{\pm}) = - \frac{\partial}{\partial y} \left( \mp z \mathcal{F} u C_{\pm} \frac{\partial \varphi}{\partial y} - D \frac{\partial C_{\pm}}{\partial y} \right) \Rightarrow$$

$$\frac{\partial C_{\pm}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \pm z \mathcal{F} u C_{\pm} \frac{\partial \varphi}{\partial y} + D \frac{\partial C_{\pm}}{\partial y} \right)$$

( 4.3.2 )

Τώρα, η πυκνότητα φορτίου λόγω της παραπάνω συγκέντρωσης ιόντων είναι (Καραντώνης, 2015):

$$\begin{aligned}\rho &= \sum C_{\pm} z \mathcal{F} = C_{+} z \mathcal{F} - C_{-} z \mathcal{F} \Rightarrow \\ \rho &= z \mathcal{F} (C_{+} - C_{-})\end{aligned}\tag{4.3.3}$$

και η μονοδιάστατη εξίσωση Poisson δίνεται από τη σχέση (Brett & Brett, 1993) (Καραντώνης, 2015):

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} &= -\frac{\rho}{\varepsilon} \xrightarrow{(5.3)} \\ \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} &= -\frac{z \mathcal{F} (C_{+} - C_{-})}{\varepsilon}\end{aligned}\tag{4.3.4}$$

όπου  $\varepsilon$  είναι η διηλεκτρική σταθερά (ή ηλεκτρική διαπερατότητα) του υγρού τροφίμου.

Το σύστημα εξισώσεων (4.3.2) και (4.3.4) είναι γνωστό και ως σύστημα Poisson – Nernst – Planck (PNP).

$$(PNP) \begin{cases} \frac{\partial C_{\pm}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \pm z \mathcal{F} u C_{\pm} \frac{\partial \varphi}{\partial y} + D \frac{\partial C_{\pm}}{\partial y} \right) \\ \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = -\frac{z \mathcal{F} (C_{+} - C_{-})}{\varepsilon} \end{cases}\tag{4.3.5}$$

Για την επίλυση του παραπάνω συστήματος διαφορικών εξισώσεων απαιτείται να οριστούν οι κατάλληλες συνοριακές συνθήκες. Έστω  $L$  η απόσταση μεταξύ των δύο πλακών του θαλάμου επεξεργασίας, τότε το δυναμικό στο κέντρο του ( $y = L/2$ ) θα είναι  $\varphi(y = L/2) = 0$  και επίσης  $\varphi(y = 0) = -\varphi(y = L)$ . Θεωρώντας μια γραμμική εξάρτηση της απόστασης από το βαθμωτό ηλεκτρικό δυναμικό στο συμπαγές τμήμα της διεπιφάνειας εκατέρωθεν από τα ηλεκτρόδια, είναι:

$$\varphi = \pm \varphi(0) \pm \lambda_s \frac{\partial \varphi}{\partial y} \quad \text{για } y = 0, L\tag{4.3.6}$$

όπου  $\lambda_s$  το φαινόμενο πάχος του συμπαγούς μέρους (compact part) της ηλεκτροχημικής διεπιφάνειας.

Επίσης, οι συνολικές ιοντικές ροές στη διεπιφάνεια πρέπει να είναι ίσες με το μηδέν καθώς δεν υπάρχει ανταλλαγή φορτίου στα ηλεκτρόδια. Δηλαδή:

$$J_{\pm} = \mp z\mathcal{F}uC_{\pm} \frac{\partial\varphi}{\partial y} - D \frac{\partial C_{\pm}}{\partial y} = 0 \text{ για } y = 0, L$$

( 4.3.7 )

Τέλος, θεωρούνται ως αρχικές συνθήκες ότι η ομοιόμορφη κατανομή των ιόντων γίνεται σε χρόνο  $t < 0$  ταυτόχρονα με μηδενικό δυναμικό.

Θεωρείται ότι στον μεγαλύτερο όγκο του υγρού τροφίμου η συγκέντρωση των ιόντων μεταβάλλεται γραμμικά στη διεύθυνση του άξονα  $y'y$  και ειδικότερα στην περιοχή από 0 έως L. Επειδή η συγκέντρωση των ιόντων αυξάνεται και μειώνεται από την μία πλάκα προς την άλλη, η ολική συγκέντρωση παραμένει σταθερή, δηλαδή η πυκνότητα φορτίου είναι μικρότερη από τη συγκέντρωση του κάθε ιόντος. Άρα ο μεγαλύτερος όγκος του ρευστού που βρίσκεται εντός του θαλάμου επεξεργασίας είναι πρακτικά ουδέτερος εκτός της ηλεκτροχημικής διεπιφάνειας. Η ( 4.3.2 ) δίνει:

$$\frac{\partial C_{\pm}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \pm z\mathcal{F}uC_{\pm} \frac{\partial\varphi}{\partial y} + D \frac{\partial C_{\pm}}{\partial y} \right) \Rightarrow \begin{cases} \frac{\partial C_{+}}{\partial t} = +z\mathcal{F}uC_{+} \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} + D \frac{\partial^2 C_{+}}{\partial y^2} \\ \frac{\partial C_{-}}{\partial t} = -z\mathcal{F}uC_{-} \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} + D \frac{\partial^2 C_{-}}{\partial y^2} \end{cases}$$

( 4.3.8 )

Επίσης ισχύει ότι  $C_{+} + C_{-} = 2C_M$  όπου  $C_M$  είναι η συγκέντρωση του κάθε ιόντος σε απόσταση  $y = L/2$ . Αφαιρώντας κατά μέλη τις παραπάνω δύο εξισώσεις είναι:

$$\frac{\partial C_{+}}{\partial t} - \frac{\partial C_{-}}{\partial t} = +z\mathcal{F}uC_{+} \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} + z\mathcal{F}uC_{-} \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} + D \frac{\partial^2 C_{+}}{\partial y^2} - D \frac{\partial^2 C_{-}}{\partial y^2} \Rightarrow \dots \Rightarrow$$

$$\frac{1}{D} \frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial^2 \rho}{\partial y^2} - \kappa^2 \rho$$

( 4.3.9 )

όπου

$$\kappa = \sqrt{\frac{2z^2 C_M \mathcal{F}^2}{\varepsilon RT}}$$

( 4.3.10 )

Το  $\kappa^{-1}$  είναι γνωστό και ως μήκος Debye και ορίζει την απόσταση μεταξύ των πλακών ενός θεωρητικού πυκνωτή, εάν αυτός αναπαριστά την ηλεκτροχημική διεπιφάνεια σύμφωνα με το υπόδειγμα Gouy – Chapman (Καραντώνης, 2015).

Η αναλυτική επίλυση της εξίσωσης ( 4.3.9 ) δίνει τα ακόλουθα αποτελέσματα (Bartzis & Sarris, 2021):

$$\rho = \alpha \sinh \left[ \kappa \left( y - \frac{L}{2} \right) \right] \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

(4.3.11)

$$\frac{\partial \varphi}{\partial y} = -\frac{\alpha}{\varepsilon \kappa} \cosh \left[ \kappa \left( y - \frac{L}{2} \right) \right] \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) - a \frac{1}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} \frac{\cosh \left( \kappa \frac{L}{2} \right)}{\varepsilon D \kappa^3}$$

(4.3.12)

$$\varphi = -\alpha \frac{\sinh \left[ \kappa \left( y - \frac{L}{2} \right) \right]}{\varepsilon \kappa^2} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) - a \frac{1}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} \left( \frac{y - \frac{L}{2}}{\varepsilon D \kappa^3} \right) \cosh \left( \kappa \frac{L}{2} \right)$$

(4.3.13)

όπου

$$\alpha = \frac{\varphi(0) \varepsilon \kappa^2}{\cosh \left( \kappa \frac{L}{2} \right) \left[ \lambda_s \kappa + \tanh \left( \kappa \frac{L}{2} \right) \right]}$$

(4.3.14)

και

$$\tau = \frac{L \left( 1 + \frac{2\lambda_s}{L} \right)}{2D\kappa \left[ \lambda_s \kappa + \tanh \left( \kappa \frac{L}{2} \right) \right]}$$

(4.3.15)

Επομένως σύμφωνα με τα παραπάνω βρίσκεται ότι οι συγκεντρώσεις των κατιόντων και των ανιόντων μεταβάλλονται ως εξής:

$$C_+ = C_M + \frac{\alpha \sinh \left[ \kappa \left( y - \frac{L}{2} \right) \right]}{2z\mathcal{F}} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

(4.3.16)

και

$$C_- = C_M - \frac{\alpha \sinh \left[ \kappa \left( y - \frac{L}{2} \right) \right]}{2z\mathcal{F}} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

(4.3.17)

Αν το κανάλι ενός θαλάμου επεξεργασίας παράλληλων πλακών έχει πλάτος  $L > 10^{-3} \text{ m}$  και επειδή  $\lambda_s \approx 1 - 10 \text{ \AA}$ , τότε το πηλίκο  $\frac{\lambda_s}{L} \leq 10^{-6}$  επομένως μπορεί να θεωρηθεί αμελητέο ( $\frac{\lambda_s}{L} = 0$ ). Επίσης για τέτοια  $L$ , το  $\kappa$  παίρνει τιμές της τάξεως του  $10^8 \text{ m}^{-1}$  επομένως

μπορεί να γίνει η απλοποίηση  $\tanh\left(\kappa\frac{L}{2}\right) = 1$  (αφού  $\lim_{x\rightarrow\infty} \tanh x = 1$ ). Άρα οι όροι  $\alpha$  και  $\tau$  γίνονται:

$$\alpha = \frac{\varphi(0)\varepsilon\kappa^2}{\cosh\left(\kappa\frac{L}{2}\right)(\lambda_s\kappa + 1)}$$

και

$$\tau = \frac{L}{2D\kappa(\lambda_s\kappa + 1)}$$



## Κεφάλαιο 5. Αποτελέσματα και συζήτηση

### 5.1. Αποτελέσματα ηλεκτροδιάτρησης μεμβρανών

Παρουσιάστηκαν κάποιες σημαντικές εξισώσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εύρεση των κρίσιμων τιμών του δυναμικού της κυτταρικής μεμβράνης και της έντασης ηλεκτρικού πεδίου εντός του θαλάμου. Από την οριακή ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που απαιτείται για τη μη-αντιστρεπτή ηλεκτροδιάτρηση των κυτταρικών μεμβρανών, μπορεί να βρεθεί η αντίστοιχη διαφορά δυναμικού στα δύο ηλεκτρόδια του θαλάμου. Το δυναμικό αυτό υποδεικνύει το ελάχιστο πλάτος που μπορεί να έχει ένας παλμός του ηλεκτρικού πεδίου, έτσι ώστε να είναι επιτυχής η θανάτωση των μικροοργανισμών. Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2.6, οι τετραγωνικοί παλμοί μπορούν να διατηρήσουν το δυναμικό αυτό για μεγάλη χρονική διάρκεια. Αντιθέτως, εάν επιλεγεί η χρήση κάποιας άλλης κυματομορφής (όπως εκθετική), πρέπει να ελεγχθεί πως είναι ικανή να διατηρήσει τουλάχιστον το κρίσιμο αυτό δυναμικό για αρκετό διάστημα. Αυτό μπορεί να γίνει είτε με παράταση του εύρους του παλμού, είτε με επιλογή πλάτους, υψηλότερο του κρίσιμου.

Αξίζει επίσης να σημειωθεί πως ο χρόνος που απαιτείται για να φορτιστούν οι κυτταροπλασματικές μεμβράνες δεν γίνεται να αγνοηθεί κατά τη σχεδίαση των διεργασιών ηλεκτροδιάτρησης. Αντιθέτως, ο χρόνος αυτός πρέπει να συνυπολογίζεται κατά την επιλογή των προδιαγραφών της κυματομορφής, έτσι ώστε ο ολικός χρόνος έκθεσης των μικροοργανισμών στο ηλεκτρικό πεδίο, να τον συμπεριλαμβάνει.

Οι φάσεις που συντελούν τη διαδικασία της ηλεκτροδιάτρησης και η χρονική διάρκεια που κατά κύριο λόγο παρατηρούνται είναι συγκεντρωμένες στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5.1.1) (Kandušer & Miklavčič, 2008) (Vorobiev & Lebovka, 2008):

*Πίνακας 5.1.1: Ενδεικτική χρονική διάρκεια διεργασιών ηλεκτροδιάτρησης.*

Διεργασία	Χρόνος
Φόρτιση και πόλωση των μεμβρανών	1 $\mu$ s
Αποσταθεροποίηση μεμβράνης και δημιουργία πόρων	10 ns
Διαστολή και συνένωση των πόρων	100 $\mu$ s έως μερικά ns
Απελευθέρωση πόρων	Δευτερόλεπτα έως ώρες

## 5.2. Αποτελέσματα κίνησης ιόντων

Έπειτα από τη μαθηματική ανάλυση που έγινε στο κεφάλαιο 4.2, είναι πλέον εφικτό να παρουσιαστούν γραφικά οι μεταβολές των συγκεντρώσεων των ιόντων του υγρού τροφίμου όταν αυτό βρίσκεται σε θάλαμο παράλληλων πλακών και εφαρμόζεται ένα εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο.

Αρχικά, θέτοντας στις εξισώσεις ( 4.3.16 ) και ( 4.3.17 )  $t = 0$ , είναι:

$$C_+ = C_M + \frac{\alpha \sinh \left[ \kappa \left( y - \frac{L}{2} \right) \right]}{2z\mathcal{F}} \left( 1 - e^{-\frac{0}{\tau}} \right) \Rightarrow$$

$$C_+ = C_M + \frac{\alpha \sinh \left[ \kappa \left( y - \frac{L}{2} \right) \right]}{2z\mathcal{F}} (1 - 1) \Rightarrow C_+ = C_M$$

και όμοια για τη συγκέντρωση των ανιόντων είναι  $C_- = C_M$ , επομένως συνολικά σε χρόνο  $t = 0$  είναι:

$$C_+ = C_- = C_M, \quad t = 0$$

( 5.2.1 )

Δηλαδή, πριν εφαρμοστεί το ηλεκτρικό πεδίο, οι συγκεντρώσεις των ιόντων παραμένουν σταθερές σε όλο τον όγκο του υγρού τροφίμου.

Για να βρεθεί τώρα η συμπεριφορά των συγκεντρώσεων των ιόντων όταν  $t \rightarrow \infty$ , αρκεί να επιλυθούν τα παρακάτω όρια:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} C_+ = \lim_{t \rightarrow \infty} \left\{ C_M + \frac{\alpha \sinh \left[ \kappa \left( y - \frac{L}{2} \right) \right]}{2z\mathcal{F}} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \right\} = C_M + \frac{\alpha}{2z\mathcal{F}} \cdot \sinh \left[ \kappa \left( y - \frac{L}{2} \right) \right]$$

( 5.2.2 )

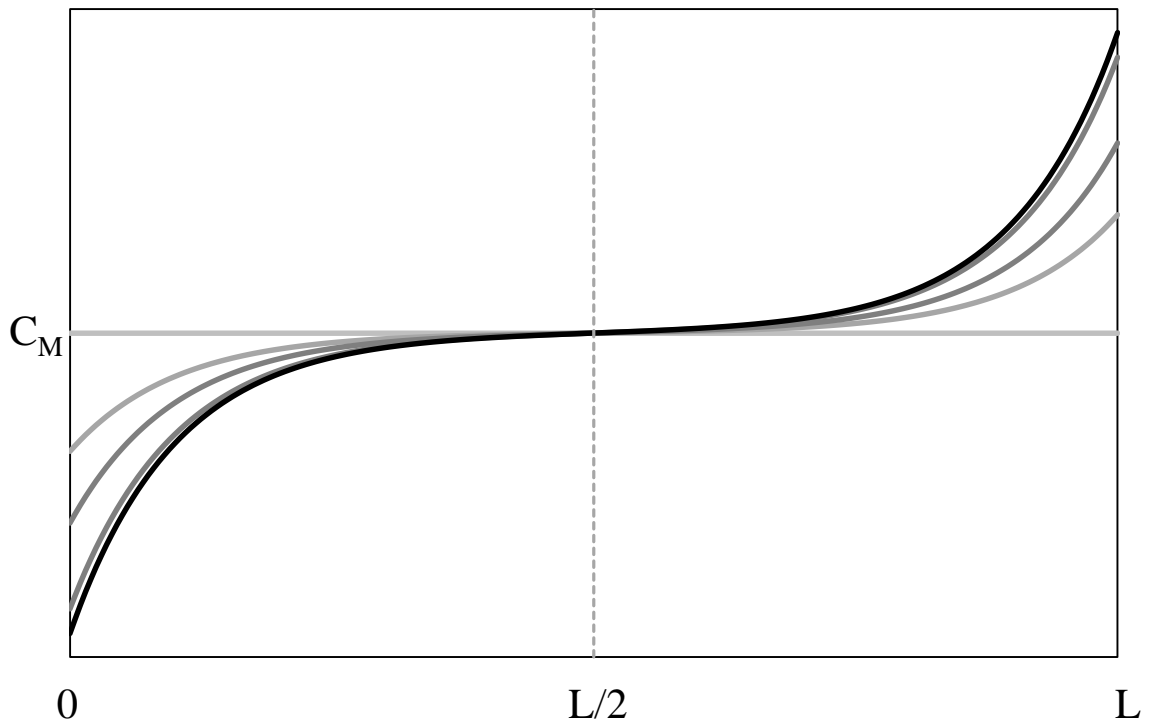
και όμοια για τα ανιόντα:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} C_- = \lim_{t \rightarrow \infty} \left\{ C_M - \frac{\alpha \sinh \left[ \kappa \left( y - \frac{L}{2} \right) \right]}{2z\mathcal{F}} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \right\} = C_M - \frac{\alpha}{2z\mathcal{F}} \cdot \sinh \left[ \kappa \left( y - \frac{L}{2} \right) \right]$$

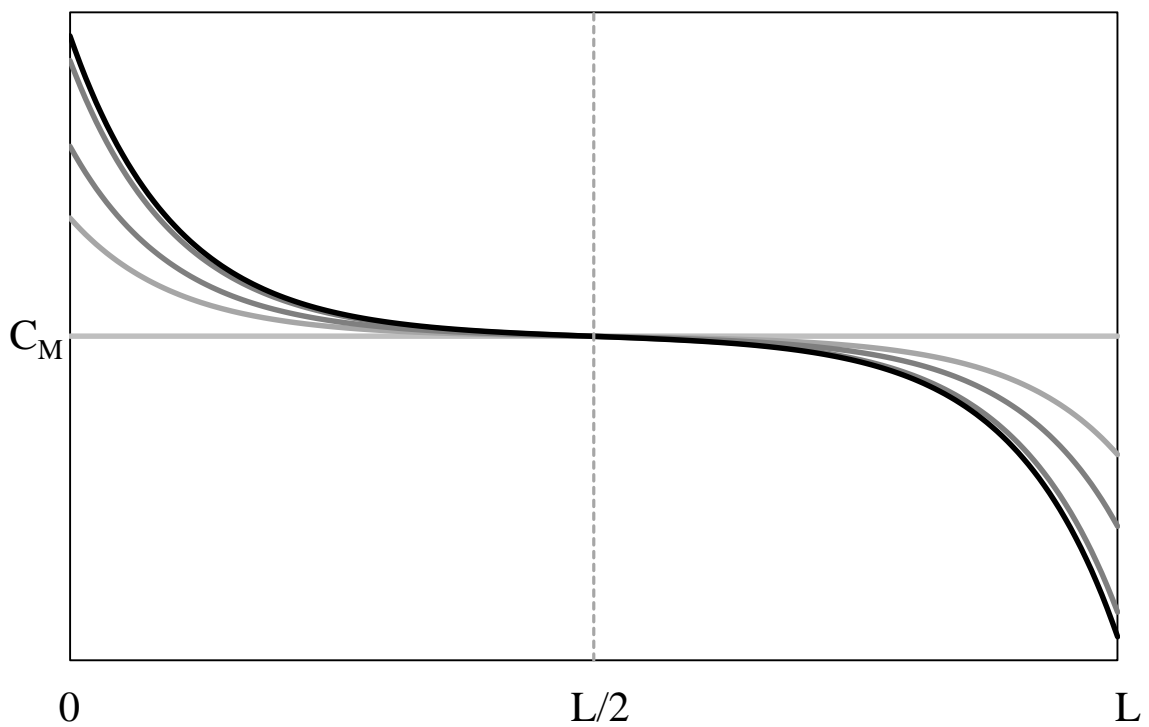
( 5.2.3 )

Αυτό δείχνει πως οι συγκεντρώσεις των ιόντων συναρτήσει της απόστασης από τα ηλεκτρόδια του θαλάμου και σε άπειρο χρόνο από την εφαρμογή του ηλεκτρικού πεδίου, παίρνουν γραφικά μια μορφή ανάλογη της γραφικής παράστασης του υπερβολικού ημιτόνου. Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται ποιοτικά η φύση των καμπυλών αυτών. Η ανοιχτή οριζόντια γραμμή αντιπροσωπεύει τη συγκέντρωση των ιόντων για  $t = 0$ , ενώ οι υπόλοιπες διαβαθμίσεις του γκρι δείχνουν τη μεταβολή των συγκεντρώσεων μέχρι  $t \rightarrow \infty$  (μαύρη καμπύλη). Θεωρείται

επίσης πως στη θέση  $y = 0$  βρίσκεται το θετικό ηλεκτρόδιο, ενώ στη θέση  $y = L$ , είναι το αρνητικό. Το Σχήμα 5.2.1 αντιπροσωπεύει τα κατιόντα ενώ το Σχήμα 5.2.2 τα ανιόντα.



Σχήμα 5.2.1: Ποιοτικό σχήμα που δείχνει τη μεταβολή των συγκεντρώσεων των κατιόντων με την πάροδο του χρόνου.



Σχήμα 5.2.2: Ποιοτικό σχήμα που δείχνει τη μεταβολή των συγκεντρώσεων των ανιόντων με την πάροδο του χρόνου.

## Κεφάλαιο 6. Συμπεράσματα και υποδείξεις για περαιτέρω έρευνα

Συνοψίζοντας τώρα τα παραπάνω αποτελέσματα, είναι φανερό πως για να σχεδιαστεί μια διεργασία επεξεργασίας υγρών τροφίμων με παλμικά ηλεκτρικά πεδία, είναι απαραίτητη η πλήρη κατανόηση των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα. Ειδικότερα, δείχθηκε πως κατά τον σχεδιασμό της μιας επεξεργασίας με παλμικά ηλεκτρικά πεδία με στόχο τη μη-αντιστρεπτή ηλεκτροδιάτρηση των κυτταρικών μεμβρανών, είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη το μέγεθος του μικροοργανισμού-στόχου, οι ηλεκτρικές του ιδιότητες, αλλά και ο χρόνος που απαιτείται για να γίνει φόρτιση της κυτταροπλασματικής μεμβράνης. Επίσης, αποδείχθηκε αναλυτικά ότι κατά την επεξεργασία ενός τροφίμου με παλμικά ηλεκτρικά πεδία, παρουσιάζεται μια χωρική διακύμανση των συγκεντρώσεων των ιόντων του τροφίμου στον θάλαμο επεξεργασίας, η οποία εξαρτάται από τη γεωμετρία του θαλάμου, τον χρόνο επεξεργασίας αλλά και από την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου.

Όπως παρουσιάστηκε από τα αποτελέσματα πειραματικών ερευνών, αλλά και όπως αποδείχθηκε από τη μαθηματική ανάλυση των σχέσεων που περιγράφουν τα φαινόμενα αυτά, οι σχέσεις που παρουσιάζονται σε μια τέτοια επεξεργασία είναι πολύ συγκεκριμένες και εξαρτώνται από τον μικροοργανισμό-στόχο. Για τον λόγο αυτό, είναι απαραίτητη η προσεκτική ρύθμιση των παραμέτρων που αφορούν το παλμικό ηλεκτρικό πεδίο (ένταση, εύρος, πλάτος κ.α.) αλλά και τον θάλαμο επεξεργασίας (διάταξη, απόσταση μεταξύ ηλεκτροδίων κ.α.). Η διαδικασία αυτή μπορεί να διευκολυνθεί πολύ από την δημιουργία ενός λογισμικού, το οποίο συσχετίζει όλα τα μεγέθη μεταξύ τους και αφού γίνει επιλογή των επιθυμητών σταθερών παραμέτρων (διάταξη θαλάμου επεξεργασίας, μέγιστη επιτρεπόμενη κατανάλωση ενέργειας, μικροοργανισμός-στόχος, κυματομορφή), εκείνο υπολογίζει τις βέλτιστες τιμές των υπόλοιπων μεγεθών. Θεωρητικά, η ανάπτυξη ενός τέτοιου λογισμικού δεν είναι δύσκολη, καθώς πλέον έχουν κατασκευαστεί αρκετά μαθηματικά πρότυπα τα οποία εκφράζουν τη διαδικασία της ηλεκτροδιάτρησης. Όμως, για να διασφαλιστεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων που θα εξάγονται από το λογισμικό, απαιτείται η χρήση μιας μεγάλης βάσης δεδομένων που αφορούν τις ηλεκτρικές και γεωμετρικές ιδιότητες των μικροοργανισμών, αλλά και τις ηλεκτρικές ιδιότητες των υγρών τροφίμων. Ενώ η ηλεκτροδιάτρηση έχει εξεταστεί εκτενώς σε πρότυπα διαλύματα και εναιωρήματα ενός μόνο είδους μικροοργανισμού, δυστυχώς, μέχρι τη στιγμή της συγγραφής αυτής της εργασίας, η διεθνή βιβλιογραφία υστερεί στη διερεύνηση του φαινομένου αυτού στα τρόφιμα αλλά και σε διαλύματα τα οποία περιέχουν μεγάλη ποικιλία μικροοργανισμών.

Ένας ακόμα τομέας που χρειάζεται περαιτέρω εξέταση είναι η αλληλεπίδραση του ηλεκτρικού πεδίου με μόρια μεγαλύτερου μοριακού βάρους, όπως τα ένζυμα. Στην παράγραφο 4.2.5 έγινε αναφορά στην ιδιότητα των πολικών μορίων να πολώνονται όταν αυτά βρίσκονται εντός ηλεκτρικού πεδίου. Η αρχή αυτή μπορεί να αποτελέσει βάση για περαιτέρω έρευνα της επίδρασης των παλμικών ηλεκτρικών πεδίων στη χωρική διαμόρφωση των μορίων, καθώς μία πρόσφατη έρευνα έδειξε ότι η επεξεργασία του ενζύμου αλκαλάση με παλμικά ηλεκτρικά πεδία, επέφερε αλλαγές στη δευτεροταγή και τριτοταγή δομή του μορίου. Ειδικότερα, παρουσιάστηκε αύξηση της ενζυμικής δραστηριότητας, η οποία οφείλεται στις μεταβολές των δεσμών υδρογόνου του ενεργού κέντρου του ενζύμου που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διαβίβαση των παλμικών ηλεκτρικών πεδίων (Li, Zhang, Bao, Sun, & Lin, 2022).

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.2, μία θεωρία που περιγράφει το φαινόμενο της ηλεκτροδιάτρησης είναι η υπεροξείδωση των φωσφολιπιδίων της κυτταροπλασματικής μεμβράνης. Η διεθνής βιβλιογραφία όμως, δεν βρίσκεται σε ταυτοφωνία για τις χημικές μεταβολές που επιβάλλει το ηλεκτρικό πεδίο στις λιπαρές ύλες γενικά. Για παράδειγμα, κατά την επεξεργασία κρέατος με παλμικά ηλεκτρικά πεδία, τα επίπεδα δευτεροταγών προϊόντων οξείδωσης των λιπιδίων δεν παρουσίασαν μεταβολή (Mungure, et al., 2023). Αντιθέτως, όμοια επεξεργασία σε λαβράκι είχε ως αποτέλεσμα μεγάλη αύξηση των πρωτογενών και δευτερογενών προϊόντων οξείδωσης (Cropotona, et al., 2021).

Κλείνοντας, αξίζει να σημειωθεί ότι η επεξεργασία υγρών – και όχι μόνο – τροφίμων με παλμικά ηλεκτρικά πεδία, μπορεί να συμβάλλει σε ένα πιο βιώσιμο μέλλον στον κλάδο της επεξεργασίας τροφίμων. Ως πρώτο βήμα για την ενσωμάτωση μιας τέτοιας διεργασίας σε βιομηχανικό επίπεδο, είναι αρχικά η περαιτέρω έρευνα ειδικά πάνω στα τρόφιμα και όχι μόνο σε πρότυπα διαλύματα.

## Βιβλιογραφία

- Álvarez, I., Mañas, P., Condón, S., & Raso, J. (2003). Resistance variation of *Salmonella enterica* serovars to pulsed electric fields treatments. *J. Food Sci.* 68, σσ. 2316-2320. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2003.tb05765.x>
- Álvarez, I., Pagán, R., Condón, S., & Raso, J. (2003). The influence of process parameters for the inactivation of *Listeria monocytogenes* by pulsed electric fields. *Int. J. Food Microbiol.* 87, σσ. 87-95. doi:[https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(03\)00056-4](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(03)00056-4)
- Álvarez, I., Virto, R., Raso, J., & Condón, S. (2003). Comparing predicting models for the *Escherichia coli* inactivation by pulsed electric fields. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 4, σσ. 195-202. doi:[https://doi.org/10.1016/S1466-8564\(03\)00004-3](https://doi.org/10.1016/S1466-8564(03)00004-3)
- Barba, F., Parniakov, O., & Wiktor, A. (2020). *Pulsed Electric Fields to Obtain Healthier and Sustainable Food for Tomorrow*. London: Academic Press.
- Barbosa - Cánovas, G., & Altunakar, B. (2006). *Pulsed Electric Fields Processing of Foods: An Overview*. (J. Raso, & V. Heinz, Επιμ.) Boston: Springer.
- Barbosa - Cánovas, G., Pierson, M., Zhang, Q., & Schaffner, D. (2000). Pulsed electric fields. *J Food Sci* 65, σσ. 65-80. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2000.tb00619.x>
- Bartzis, V., & Sarris, I. (2021). Time Evolution Study of the Electric Field Distribution and Charge Density Due to Ion Movement in Salty Water. *Water* 13. doi:<https://doi.org/10.3390/w13162185>
- Bazhal, M. (2001). Etude du mécanisme d'électroperméabilisation des tissus végétux. Application à l'extraction du jus des pommes. Thèse de Doctorat. Université de Technologie de Compiègne.
- Brett, C., & Brett, A. (1993). *Electrochemistry Principles, Methods and Applications*. New York: Oxford University Press.
- Cole, K. (1937). Electric Impedance of Marine Egg Membranes. *Trans Faraday Soc* 23, σσ. 966-972. doi:<https://doi.org/10.1039/TF9373300966>
- Cropotova, J., Tappi, S., Genovese, J., Rocculi, P., Rosa, M., & Rustad, T. (2021, January). The combined effect of pulsed electric field treatment and brine salting on changes in the oxidative stability of lipids and proteins and color characteristics of sea bass (*Dicentrarchus labrax*). *Heliyon* 7. doi:<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e05947>
- Donsì, F., Ferrari, G., & Pataro, G. (2010). Applications of Pulsed Electric Field Treatments for the Enhancement of Mass Transfer from Vegetable Tissue. *Food Engineering Reviews* 2, σσ. 109-130. doi:<https://doi.org/10.1007/s12393-010-9015-3>

- Ebbing, D., & Gammon, S. (2011). *Γενική Χημεία*. (Ν. Κλούρας, Μεταφρ.) Αθήνα: ΤΡΑΥΛΟΣ.
- Fellows, P. (2017). *Food processing technology*. Woodhead Publishing.
- Gad, A., & Jayaram, S. (2014). Effect of Electric Pulse Parameters on Releasing Metallic Particles From Stainless Steel Electrodes During PEF Processing of Milk. *IEEE Trans Ind Appl* 50(2), σσ. 1402–1409. doi:10.1109/TIA.2013.2278424.
- Gileadi, E. (1993). *Electrode Kinetics for Chemists, Chemical Engineers and Materials Scientists*. New York: Wiley-VCH.
- Grahl, T., & Märkl, H. (1996). Killing of microorganisms by pulsed electric fields. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 45, σσ. 148-157. doi:https://doi.org/10.1007/s002530050663
- 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 Biotechnol.* 13, σσ. 155-168. doi:https://doi.org/10.1080/08905439909549968
- Hülshager, H., & Niemann, E. (1980). Lethal effects of high-voltage pulses on *E. coli* K12. *Radiat. Environ. Biophys.* 18, σσ. 281-288. doi:https://doi.org/10.1007/BF01324271
- Hülshager, H., Potel, J., & Niemann, E. (1981). Killing of bacteria with electric pulses of high field strength. *Radiat. Environ. Biophys.* 20, σσ. 53-65.
- Hülshager, H., Potel, J., & Niemann, E. (1981). Killing of bacteria with electric pulses of high field strength. *Radiat. Environ. Biophys.*, σσ. 53-65. doi:10.1007/BF01323926
- Jayaram, S., Castle, G., & Margaritis, A. (1992). Kinetics of sterilization of *Lactobacillus brevis* cells by the application of high voltage pulses. *Biotechnology and Bioengineering* 40, σσ. 1412-1420. doi:https://doi.org/10.1002/bit.260401116
- Jemai, A., & Vorobiev, W. (2002). Effect of moderate electric field pulse (MFEP) on the diffusion coefficient of soluble substances from apple slices. *Int J Food Sci Technol* 37, σσ. 73-86.
- Johnstone, P., & Bodger, P. (1997). High voltage disinfection of liquids. *IPENZ Trans* 24, σσ. 30-35. doi:10.1046/j.1472-765x.2002.01139.x
- Kandušer, M., & Miklavčič, D. (2008). *Electroporation in biological cell and tissue: an overview*. New York: Springer. doi:https://doi.org/10.1007/978-0-387-79374-0\_1
- Kinosita, K., & Tsong, T. (1977). Voltage-induced pore formation and hemolysis of human erythrocytes. *Biochim. Biophys. Acta* 471, σσ. 227-242. doi:10.1016/0005-2736(77)90252-8
- Kotnik, T., Miklavčič, D., & Mir, L. (2001). Cell membrane electropermeabilization by symmetrical bipolar rectangular pulses; Part II. Reduced electrolytic contamination. *Bioelectrochemistry* 54, σσ. 91-95. doi:10.1016/s1567-5394(01)00115-3

- Kotnik, T., Pucihar, G., Reberšek, M., Miklavčič, D., & Mir, L. (2003). Role of pulse shape in cell membrane electroporation. *Biochem Biophys Acta* 1614, σσ. 193-200. doi:[https://doi.org/10.1016/S0005-2736\(03\)00173-1](https://doi.org/10.1016/S0005-2736(03)00173-1)
- Kotnik, T., Rems, L., Tarek, M., & Miklavčič, D. (2019). Membrane Electroporation and Electroporation: Mechanisms and Models. *Annual Review of Biophysics*, σσ. 63-91. doi:10.1146/annurev-biophys-052118-115451
- Krassowska, W., Stone, B., & Neu, J. (2002). *Electrical stimulation of cardiac cells*. New York: Marcel Dekker.
- Lazarenko, B., Fursov, S., Scheglov, Y., Bordiyan, V., & Chebanu, V. (1977). *Electroplasmolysis*. Kishinev: Karta Moldovenaske.
- Li, Y., Zhang, S., Bao, Z., Sun, N., & Lin, S. (2022, January). Exploring the activation mechanism of alkalase activity with pulsed electric field treatment: Effects on enzyme activity, spatial conformation, molecular dynamics simulation and molecular docking parameters. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 76. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.102918>
- Lindgren, M., Aronsson, K., Galt, S., & Ohlsson, T. (2002). Simulation of the temperature increase in pulsed electric field (PEF) continuous flow treatment chambers. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 3, σσ. 233-245. doi:[https://doi.org/10.1016/S1466-8564\(02\)00044-9](https://doi.org/10.1016/S1466-8564(02)00044-9)
- Löffler, M. J. (2022). Generation and Application of High Intensity Pulsed Electric Fields. Στο J. Raso, V. Heinz, I. Alvarez, & S. Toepfl, *Pulsed Electric Fields Technology for the Food Industry Fundamentals and Applications* (σσ. 27-72). doi:[https://doi.org/10.1007/978-0-387-31122-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-0-387-31122-7_2)
- Martin, M., Sepulveda, D., Altunakar, B., Góngora-Nieto, M., Swanson, B., & Barbosa-Cánovas, G. (2007). Evaluation of selected mathematical models to predict the inactivation of *Listeria innocua* by pulsed electric fields. *LWT-Food Sci* 40, σσ. 1271-1279. doi:<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2006.08.011>
- Martín-Belloso, O., Vega-Mercado, H., Qin, B., Chang, F., Barbosa-Cánovas, G., & Swanson, B. (1997). Inactivation of *Escherichia coli* suspended in liquid egg using pulsed electric fields. *J. Food Process. Preserv.* 21, σσ. 193-208. doi:10.1111/j.1745-4549.1997.tb00776.x
- McLellan, M., Kime, R., & Lind, L. (1991). Electroporation and other treatments to improve apple juice yield. *J Sci Food Agr* 57, σσ. 303-306. doi:<https://doi.org/10.1002/jsfa.2740570214>



- Mizuno, A., & Hori, Y. (1988). Destruction of living cells by pulsed high-voltage application. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 24, σσ. 387-394. doi:10.1109/28.2886.
- Morren, J., Roodenburg, B., & de Haan, S. (2003). Electrochemical reactions and electrode corrosion in pulsed electric field (PEF) treatment chambers. *Innov Food Sci Emerg Technol* 4, σσ. 285–295. doi:https://doi.org/10.1016/S1466-8564(03)00041-9
- Mungure, T., Faruk, M., Carne, A., Staincliffe, M., Stewart, I., Jowett, T., . . . Bekhit, A.-D. (2023, January). Understanding the influence of PEF treatment on minerals and lipid oxidation of wet- and dry-aged venison M. longissimus dorsi muscle. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 83. doi:https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103238
- Neumann, E., Schaefer-Ridder, M., Wang, Y., & Hofschneider, P. (1982). Gene transfer into mouse lyoma cells by electroporation in high electric fields. *EMBO J.* doi:10.1002/j.1460-2075.1982.tb01257.x
- Papchenko, A., Bologa, M., & Berzoi, S. (1988). *US Ευρεσιτεχνία Ap.* 4787303.
- Papchenko, A., Bologa, M., Berzoi, S., Paukov, J., Rudkovskaya, G., & Chebanu, V. (1988). *US Ευρεσιτεχνία Ap.* 4723483.
- Pataro, G., Barca, G., Donsì, G., & Ferrari, G. (2015). On the modeling of electrochemical phenomena at the electrode solution interface in a PEF treatment chamber: methodological approach to describe the phenomenon of metal release. *J Food Eng* 165, σσ. 34-44. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.05.009
- Peleg, M. (1995). A model of microbial survival after exposure to pulsed electric fields. *J. Sci. Food Agric.* 67, σσ. 93-99. doi:https://doi.org/10.1002/jsfa.2740670115
- Peleg, M., & Cole, M. (1998). Reinterpretation of microbial survival curves. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 38, σσ. 353-80. doi:10.1080/10408699891274246
- Pothakamury, U., & Vega, H. (1996). Effect of growth stage and processing temperature on the inactivation of E. coli by pulsed electric fields. *J. Food Prot.* 11, σσ. 1153-1247. doi:10.4315/0362-028X-59.11.1167
- Qin, B., Pothakamury, U., Vega, H., Martin, O., Barbosa-Canovas, G., Swanson, G., & Mermelstein, N. (1995). Food pasteurization using high-intensity pulsed electric fields. *Food Technol.* 49, σσ. 55-60.
- Ramaswamy, H. (2014). *Ohmic Heating in Food Processing*. CRC Press.
- Raso, J., Alvarez, I., Condón, S., & Trepat, F. (2000). Predicting inactivation of Salmonella senftenberg by pulsed electric fields. *Innov. Food Sci.* 1, σσ. 21-29. doi:https://doi.org/10.1016/S1466-8564(99)00005-3

- Reina, L., Jin, Z., Zhang, Q., & Yousef, A. (1998). Inactivation of *Listeria monocytogenes* in Milk by Pulsed Electric Field. *J. Food Prot.* 9, σσ. 1093-1259. doi:10.4315/0362-028X-61.9.1203
- Rodrigo, D., & Ruiz, P. (2003). Kinetic model for the inactivation of *Lactobacillus plantarum* by pulsed electric fields. *Int. J. Food Microbiol.* 81, σσ. 223-229. doi:https://doi.org/10.1016/S0168-1605(02)00247-7
- Rols, M.-P., & Teissie, J. (1990, Νοέμβριος). Electroporation of mammalian cells. *Biophysical Journal Volume* 58. doi:10.1016/S0006-3495(90)82451-6
- Sack, M. (2017). Marx - Generator Design and Development for Biomass Electroporation. *Handbook of Electroporation*, σσ. 793-812. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-319-32886-7\_203
- San, M. M., Barbosa - Cánovas, G., & Swanson, B. (2003, March). Innovations in food processing. *CEP*.
- Schoenbach, K., Beebe, S., & Buescher, E. (2001). Intracellular Effect of Ultrashort Electrical Pulses. *Bioelectromagnetics* 22:440-448. doi:10.1002/bem.71
- Schoenbach, K., Katsuki, S., Stark, R., Buescher, S., & Beebe, S. (2002, Φεβρουάριος). Bioelectrics - New Applications for Pulsed Power Technology. *IEEE Transactions on Plasma Science*, σσ. 293-300. doi:10.1109/TPS.2002.1003873.
- Schwan, H. (1957). Electrical properties of tissue and cell suspensions. *Adv. Biol. Med. Phys.* 5, σσ. 147-209. doi:https://doi.org/10.1016/B978-1-4832-3111-2.50008-0
- Schwan, Herman P. (1989). Dielectrophoresis and rotation of cells. *Electroporation and Electrofusion in Cell Biology*. New York: Plenum Press.
- Sensoy, I., Zhang, Q., & Sastry, S. (1997). Inactivation kinetics of *Salmonella dublin* by pulsed electric field. *J. Food Process Eng.* 20, σσ. 367-381. doi:https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.1997.tb00428.x
- Simon, E., Dickey, J., Hogan, K., & Reece, J. (2019). *Campbell's Βασικές Αρχές Βιολογίας*. Nicosia, Cyprus: Broken Hill Publishers Ltd.
- Subir, R. (2013). *An introduction to high voltage engineering*. New Delhi: PHI Learning Pvt. Ltd.
- Toepfl, S. (2006). *Pulsed Electric Fields (PEF) for Permeabilization of Cell Membranes in Food-and Bioprocessing: Applications, Process and Equipment Design and Cost Analysis*. Berlin. doi:10.14279/depositonce-1441

- Varghese, K., Pandey, M., Radhakrishna, K., & Bawa, A. (2014). Technology, applications and modelling of ohmic heating: a review. *Journal of Food Science and Technology* 51 (10), σσ. 2304-2317. doi:<https://doi.org/10.1007/s13197-012-0710-3>
- Vorobiev, E., & Lebovka, N. (2008). *Pulsed-electric-fields-induced effects in plant tissues: fundamental aspects and perspectives of applications*. New York: Springer.
- Weaver, J. (1993). Electroporation: a general phenomenon for manipulating cells and tissues. *J Cell Biochem*, σσ. 426-435. doi:10.1002/jcb.2400510407
- Weaver, J; Chizmadzhev, YA. (1996). Theory of electroporation: a review. *Bioelectrochem Bioenerg*, σσ. 135-160. doi:[https://doi.org/10.1016/S0302-4598\(96\)05062-3](https://doi.org/10.1016/S0302-4598(96)05062-3)
- Xiong, R., Xie, G., Edmondson, A., & Sheard, M. (1999). A mathematical model for bacterial inactivation. *Int. J. Food Microbiol.* 46, σσ. 45-55. doi:[https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(98\)00172-X](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(98)00172-X)
- Zhang, Q., Barbosa - Cánovas, G., & Swanson, B. (1995). Engineering aspects of pulsed electric field pasteurization. *J Food Eng* 25, σσ. 261-281. doi:[https://doi.org/10.1016/0260-8774\(94\)00030-D](https://doi.org/10.1016/0260-8774(94)00030-D)
- Zimmermann, U., & Neil, G. (1996). *Electromanipulation of Cells*. CRC Press.
- Καραντώνης, Α. (2015). *Βασικές Αρχές Ηλεκτροχημείας*. Αθήνα: ΣΕΑΒ.
- Τσιμπούκης, Θ. (2016). *Ηλεκτρομαγνητικό Πεδίο Βασική Θεωρία και Εφαρμογές*. Ηράκλειο Κρήτης: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.

## Πηγές εικόνων

Εικόνα 1.0.1	Προσωπικό αρχείο
Εικόνα 2.1.1	<a href="https://www.genome.gov/genetics-glossary/Cell-Membrane">https://www.genome.gov/genetics-glossary/Cell-Membrane</a>
Εικόνα 2.1.2	<a href="http://www.biology.lsu.edu">www.biology.lsu.edu</a>
Εικόνα 2.2.1	(Kotnik, Rems, Tarek, & Miklavčič, 2019)
Εικόνα 2.3.1	(Donsì, Ferrari, & Pataro, 2010)
Εικόνα 2.4.1	(Xiong, Xie, Edmondson, & Sheard, 1999)
Εικόνα 2.5.1	Προσωπικό αρχείο
Εικόνα 2.6.1	Προσωπικό αρχείο
Εικόνα 2.7.1.1	<a href="http://www.wikipedia.com">www.wikipedia.com</a>
Εικόνα 2.7.2.1	<a href="https://apelc.com/description-and-application-of-pulse-forming-networks-pfns/">https://apelc.com/description-and-application-of-pulse-forming-networks-pfns/</a>
Εικόνα 2.9.1	(Toepfl, 2006)
Εικόνα 4.1.1.1	Προσωπικό αρχείο
Εικόνα 4.3.1	Προσωπικό αρχείο

## Παράρτημα

Παρακάτω δίνεται η λύση της διαφορικής εξίσωσης ( 4.2.1.6 ).

$$( 4.2.1.6 ): m_k \frac{d\vec{v}_{k,el}}{dt} = -z_k e_0 \nabla \varphi - g_k \vec{v}_{k,el} \Rightarrow$$

$$\frac{d}{dt} \vec{v}_{k,el}(t) + P(t) \vec{v}_{k,el}(t) = Q(t)$$

( 0.1 )

όπου

$$P(t) = \frac{g_k}{m_k} \text{ και } Q(t) = -\frac{z_k e_0}{m_k} \nabla \varphi$$

( 0.2 )

Αφού  $Q(t) \neq 0$ , η ( 0.1 ) είναι μη ομογενής και ειδικότερα είναι γραμμική διαφορική εξίσωση 1<sup>ης</sup> τάξεως.

Έστω τώρα η συνάρτηση του πολλαπλασιαστικού παράγοντα ή πολλαπλασιαστή Euler,  $\mu(t)$ . Πολλαπλασιάζοντας τώρα τη ( 0.1 ) με τη  $\mu(t)$ , είναι:

$$\mu(t) \frac{d}{dt} \vec{v}_{k,el}(t) + \mu(t) P(t) \vec{v}_{k,el}(t) = \mu(t) Q(t)$$

( 0.3 )

Θα πρέπει να γίνει κατάλληλη επιλογή της συνάρτησης  $\mu(t)$  έτσι ώστε το αριστερό μέλος της ( 0.3 ) να γράφεται ως  $\frac{d}{dt} [\mu(t) \vec{v}_{k,el}(t)] = \frac{d}{dt} \mu(t) \vec{v}_{k,el}(t) + \mu(t) \frac{d}{dt} \vec{v}_{k,el}(t)$ . Δηλαδή πρέπει:

$$\mu(t) \frac{d}{dt} \vec{v}_{k,el}(t) + \mu(t) P(t) \vec{v}_{k,el}(t) = \frac{d}{dt} \mu(t) \vec{v}_{k,el}(t) + \mu(t) \frac{d}{dt} \vec{v}_{k,el}(t) \Rightarrow$$

$$\frac{d}{dt} \mu(t) \vec{v}_{k,el}(t) = \mu(t) P(t) \vec{v}_{k,el}(t)$$

( 0.4 )

προφανώς, η ταχύτητα  $\vec{v}_{k,el}(t) \neq 0$  και για  $\mu(t) \neq 0$  είναι:

$$\frac{\frac{d}{dt} \mu(t)}{\mu(t)} = P(t) \Rightarrow$$

$$\int \frac{\frac{d}{dt} \mu(t)}{\mu(t)} dt = \int P(t) dt + c_1 \Rightarrow$$

$$\ln|\mu(t)| = \int P(t) dt + c_1 \Rightarrow$$

$$\mu(t) = \pm e^{c_1} e^{\int P(t) dt}$$

και επειδη αρκει η ευρεση μονο μιας συναρτησης  $\mu(t)$  – και για λογους ευκολιας, οριζεται  $\pm e^{c_1} = 1$ . Άρα

$$\mu(t) = e^{\int P(t)dt}$$

Επομένως η ( 0.4 ) γίνεται:

$$( 0.4 ) \Rightarrow \frac{d}{dt}[\mu(t)\vec{v}_{k,el}(t)] = \mu(t)Q(t) \Rightarrow$$

$$\mu(t)\vec{v}_{k,el}(t) = \int \mu(t)Q(t)dt + c \Rightarrow$$

$$\vec{v}_{k,el}(t) = \mu(t)^{-1} \left[ \int \mu(t)Q(t)dt + c \right]$$

( 0.5 )

Τώρα υπολογίζονται τα παρακάτω ολοκληρώματα, χωρίς όμως να γράφονται οι σταθερές ολοκλήρωσης, καθώς αυτές είναι συνυπολογισμένες στη σταθερά  $c$  της εξίσωσης ( 0.5 ):

$$\int P(t)dt = \int \frac{g_k}{m_k} dt = \frac{g_k}{m_k} \int dt = \frac{g_k}{m_k} t$$

άρα

$$\mu(t) = e^{\int P(t)dt} = e^{\frac{g_k t}{m_k}}$$

και

$$\begin{aligned} \int \mu(t)Q(t)dt &= \int e^{\frac{g_k t}{m_k}} \left( -\frac{z_k e_0}{m_k} \nabla \varphi \right) dt \\ &= -\frac{z_k e_0}{m_k} \nabla \varphi \int e^{\frac{g_k t}{m_k}} dt \\ &= -\frac{z_k e_0}{m_k} \nabla \varphi \frac{m_k}{g_k} e^{\frac{g_k t}{m_k}} \\ &= -\frac{z_k e_0}{g_k} \nabla \varphi e^{\frac{g_k t}{m_k}} \end{aligned}$$

επομένως η διαφορική εξίσωση ( 0.5 ) γίνεται:

$$\vec{v}_{k,el}(t) = \mu(t)^{-1} \left[ \int \mu(t)Q(t)dt + c \right] \Rightarrow$$

$$\vec{v}_{k,el}(t) = e^{-\frac{g_k t}{m_k}} \left[ -\frac{z_k e_0}{g_k} \nabla \varphi e^{\frac{g_k t}{m_k}} + c \right] \Rightarrow$$

$$\vec{v}_{k,el}(t) = -\frac{z_k e_0}{g_k} \nabla \varphi + c e^{-\frac{g_k t}{m_k}}$$

( 0.6 )

Θεωρώντας πως σε χρόνο  $t = 0$ , η ταχύτητα του ιόντος είναι ίση με μηδέν  $\vec{v}_{k,el}(0) = 0$ , βρίσκεται:

$$\vec{v}_{k,el}(0) = -\frac{z_k e_0}{g_k} \nabla \varphi + c e^{-\frac{g_k t}{m_k}} \Rightarrow$$

$$c = \frac{z_k e_0}{g_k} \nabla \varphi$$

άρα η λύση της διαφορικής εξίσωσης ( 0.6 ) και συνεπώς της ( 4.2.1.6 ) είναι:

$$\vec{v}_{k,el}(t) = -\frac{z_k e_0}{g_k} \nabla \varphi + \frac{z_k e_0}{g_k} \nabla \varphi e^{-\frac{g_k t}{m_k}} \Rightarrow$$

$$\vec{v}_{k,el}(t) = -\frac{z_k e_0}{g_k} \nabla \varphi \left( 1 - e^{-\frac{g_k t}{m_k}} \right)$$

■