

ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ & ΔΙΑΤΡΟΦΗΣ ΤΟΥ
ΑΝΘΡΩΠΟΥ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

Μελέτη της θερμικής επεξεργασίας
τροφίμων με διαφορετικές γεωμετρίες με τη
βοήθεια της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ
ΑΝΔΡΕΑ Α. ΔΗΜΟΥ

Επιβλέπων Καθηγητής: Γιαννιώτης Στ.

ΑΘΗΝΑ
2015

ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ & ΔΙΑΤΡΟΦΗΣ ΤΟΥ
ΑΝΘΡΩΠΟΥ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

Μελέτη της θερμικής επεξεργασίας
τροφίμων με διαφορετικές γεωμετρίες με τη
βοήθεια της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ
ΑΝΔΡΕΑ Α. ΔΗΜΟΥ

ΑΘΗΝΑ
2015

Copyright© 2015 Ανδρέας Α. Δήμου

Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από το Τμήμα Επιστήμης Τροφίμων & Διατροφής του Ανθρώπου του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (ν.5343/1932, αρ. 202, παρ. 2).

Η πνευματική ιδιοκτησία αποκτάται χωρίς καμία διατύπωση και χωρίς την ανάγκη ρήτρας απαγορευτικής των προσβολών της. Πάντως κατά το ν. 2121/1993, όπως μεταγενέστερα τροποποιήθηκε ιδίως με το αρ. 81, ν. 3057/2002 καθώς και με τα αρ. 1, 2 και 4, ν. 3524/2007 και τη διεθνή σύμβαση της Βέρνης (που έχει κυρωθεί με το ν. 100/1975), απαγορεύεται η αναδημοσίευση και γενικά η αναπαραγωγή του παρόντος έργου, με οποιονδήποτε τρόπο, (ηλεκτρονικό, μηχανικό, φωτοτυπικό, ηχογράφησης ή άλλο) τμηματικά ή περιληπτικά, στο πρωτότυπο ή σε μετάφραση ή άλλη διασκευή, χωρίς γραπτή άδεια του συγγραφέα.

Το μη αποκλειστικό δικαίωμα αναπαραγωγής, αντιγραφής (για λόγους ασφάλειας και συντήρησης) και διάθεσης της παρούσας διδακτορικής διατριβής υπό ηλεκτρονική μορφή, για εκπαιδευτική, ερευνητική και ιδιωτική χρήση και όχι για χρήση που αποσκοπεί σε εμπορική εκμετάλλευση, παραχωρείται στη Βιβλιοθήκη και Κέντρο Πληροφόρησης του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών.

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Μελέτη της θερμικής επεξεργασίας τροφίμων με
διαφορετικές γεωμετρίες με τη βοήθεια της
υπολογιστικής ρευστοδυναμικής

ΑΝΔΡΕΑΣ Α. ΔΗΜΟΥ

Γεωπόνος του τμήματος Επιστήμης & Τεχνολογίας Τροφίμων, M.Sc.

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Στ. Γιαννιώτης
Καθηγητής ΓΠΑ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Στ. Γιαννιώτης
Καθηγητής ΓΠΑ

Νικ. Στοφόρος
Αν. Καθηγητής ΓΠΑ

Πετρ. Τασούκης
Καθηγητής ΕΜΠ

Εξεταστική Επιτροπή

Γιαννιώτης Στ.

Καθηγητής ΓΠΑ

Στοφόρος Νικ.

Αν. Καθηγητής ΓΠΑ

Ταούκης Π.

Καθηγητής ΕΜΠ

Καραθάνος Β.

Καθηγητής ΧΠΑ

Αδαμόπουλος Κ.

Αν. Καθηγητής ΑΠΘ

Πανάγου Ευστ.

Επικ. Καθηγητής ΓΠΑ

Κουτίνας Απ.

Επικ. Καθηγητής ΓΠΑ

στους γονείς μου
και στον Κωνσταντίνο Απ. Δήμου

Ευχαριστίες

Τελειώνοντας την περίοδο, όπου ήμουν υποψήφιος διδάκτωρ του ΓΠΑ θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπων καθηγητή κ. Στ. Γιαννιώτη που ως ακαδημαϊκός πατέρας με καθοδήγησε στα μονοπάτια της Μηχανικής Τροφίμων τόσο κατά τη διάρκεια του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών, όσο και κατά τη διάρκεια της παρούσας διατριβής. Η ελευθερία κινήσεων και σκέψης, η συνεχής συμβουλές και η αμέριστη συμπαράσταση στην εκπόνηση αυτού του έργου θα αποτελούν φωτεινό παράδειγμα διδασκάλου και προ πάντων ανθρώπου. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον αναπληρωτή καθηγητή κ. Ν. Γ. Στοφόρο για την πολύτιμη βοήθειά του στο σχεδιασμό και την εκτέλεση των πειραμάτων, στην συγγραφή και μορφοποίηση των εργασιών που δημοσιεύτηκαν, στη συνεχή διδασκαλία για τα φαινόμενα που υφίσταται κατά τη διάρκεια των θερμικών επεξεργασιών, στη μετάδοση εμπειριών μιας ζωής στον ακαδημαϊκό χώρο. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή του ΕΜΠ κ. Π. Ταούκη για την πολύ καλή συνεργασία και το ενδιαφέρον του για την πορεία της διατριβής, καθώς και τα μέλη του εργαστηρίου Χημείας & Τεχνολογίας Τροφίμων, τον επίκουρο καθηγητή κ. Ε. Πανάγου για την βοήθειά του στο μέρος της διατριβής που πραγματευόταν την επεξεργασία των επιτραπέζιων ελιών, την προμήθεια ελιών και το συνεχές ενδιαφέρον του για την πορεία των μελετών, τα μέλη του εργαστηρίου Μικροβιολογίας & Βιοτεχνολογίας Τροφίμων για την πολύτιμη βοήθειά τους. Ένα μεγάλο ευχαριστώ στην κ. Ν. Προξενιά μέλος ΕΔΙΠ, τον κ. Μ. Αναγνωσταρά μέλος ΕΤΕΠ και την κ. Μ. Γεωργιάδου μέλη του εργαστηρίου Μηχανικής Τροφίμων για την καθημερινή βοήθειά τους στην εκπόνηση της διατριβής. Εκτός των άλλων, θέλω να ευχαριστήσω τους απόφοιτους πλέον φοιτητές του τμήματος κυρίως/ες Κ. Στάικου, Β. Καχριμανίδου, Σ. Μαλακάση, Σ. Γεωργακόπουλο, Λ. Κωνσταντινίδη, Α. Διολή, Η. Τσαφάρá, Δ. Κaráμπαλη και τη Ναταλία Καινούργιου για την πολύ σημαντική βοήθειά τους. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερω την PhD κ. Κ. Σάρδη για τις πολύτιμες συμβουλές, τη συνεχή βοήθειά της και τον ορθό προσανατολισμό σε κάθε δύσκολη στιγμή της εκπονήσεως, όπου χωρίς τη βοήθειά της δεν θα ήταν δυνατή η ολοκλήρωση της διατριβής.

Περίληψη

Οι θερμικές επεξεργασίες στόχο έχουν τη μικροβιακή καταστροφή ή την ενζυματική αδρανοποίηση, με όσο το δυνατό λιγότερη θερμική υποβάθμιση του τροφίμου. Η ένταση της θερμικής επεξεργασίας υπολογίζεται μέσω μεθόδων (Γενική και Formula) και εξαρτάται από τον τρόπο μεταφορά της θερμότητας, τις φυσικοχημικές και θερμοφυσικές ιδιότητες του τροφίμου και την κινητική της θερμικής καταστροφής ανεπιθύμητων και ποιοτικών παραγόντων. Η προσομοίωση μιας θερμικής επεξεργασίας μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω προγράμματος Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (CFD) και να υπολογιστεί το θερμικό αποτέλεσμα επί του τροφίμου.

Οι εγκυτωμένες επιτραπέζιες ελιές σε άλμη NaCl, καθώς και τα ροδάκινα σε σιρόπι ζάχαρης είναι σημαντικά προϊόντα για την εθνική οικονομία. Στα πλαίσια της διατριβής έγινε προσομοίωση της θερμικής επεξεργασίας με τη χρήση του προγράμματος υπολογιστικής ρευστοδυναμικής Fluent, σε ελιές καλαμών και κονσερβολιές, καθώς και σε συμπύρηνα ροδάκινα. Επίσης έγινε πειραματικός προσδιορισμός των θερμοφυσικών ιδιοτήτων τόσο των ελιών, όσο και των ροδάκινων, όπως και της θερμικής υποβάθμισης της υφής των δύο αυτών καρπών. Οι παράμετροι της θερμικής υποβάθμισης της υφής για τις ελιές και τα ροδάκινα ήταν $D_{62,4^{\circ}\text{C}}=670 \text{ min}$, $z=28,6^{\circ}\text{C}$ και $D_{93,3^{\circ}\text{C}}=18,5 \text{ min}$, $z=17,6^{\circ}\text{C}$, αντίστοιχα. Οι γεωμετρίες που σχεδιάστηκαν στηρίχτηκαν σε ρεαλιστικά δεδομένα μεγέθους και σχήματος των στερεών τροφίμων και των περιεκτών και επιλύθηκαν εισάγοντας στο πρόγραμμα απαραίτητα δεδομένα. Οι λύσεις των δύο περιπτώσεων επιβεβαιώθηκαν πειραματικά και ελέγχθηκαν ως προς την πυκνότητα του πλέγματος και το χρονικό βήμα επίλυσης.

Στην περίπτωση των ελιών σχεδιάστηκαν τρεις γεωμετρίες με ελιές καλαμών μεγάλου και μικρού μεγέθους και κονσερβολιές. Στόχος ήταν να εφαρμοστεί θερμική επεξεργασία με ελάχιστο θερμικό αποτέλεσμα $FU_{62,4^{\circ}\text{C}}^{5,25^{\circ}\text{C}} = 15 \text{ min}$, το οποίο προτείνεται από το Διεθνές Συμβούλιο Ελιάς. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, οι κονσέρβες (75x105 mm) με τις ελιές θερμάνθηκαν για 10 min στους 70°C και ψύχθηκαν για 10 min στους 20°C. Για τις τρεις περιπτώσεις βρέθηκε ότι ο ελάχιστος ισοδύναμος χρόνος ήταν 38,8 (μεγάλες καλαμών), 62,4 (μικρές καλαμών) και 20 min (κονσερβολιές). Ο ισοδύναμος χρόνος $F_{62,4^{\circ}\text{C}}^{28,6^{\circ}\text{C}}$ για την υποβάθμιση της υφής των ελιών βρέθηκε 10,4-15 min για τις μεγάλες ελιές καλαμών, 11,6-15,9 min για τις μικρές

ελιές καλαμών και 9,2-16,2 min για τις κονσερβολιές. Η μέγιστη τιμή της ταχύτητας της άλμης παρατηρήθηκε 0,5 min μετά την έναρξη της θέρμανσης και της ψύξης και είχε τιμή 2,1 cm/s, 2,6 cm/s και 3,1 cm/s αντίστοιχα για τις τρεις περιπτώσεις. Η μελέτη της επίδρασης της συγκέντρωσης της άλμης έδειξε ότι αυτή είναι σχεδόν αμελητέα, όμως το ίδιο δεν βρέθηκε για την επίδραση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μεταξύ θερμαντικού – ψυκτικού μέσου και τοιχώματος της κονσέρβας. Για τις γεωμετρίες που επιλύθηκαν και για να επιτευχθεί $PU_{62,4^{\circ}C}^{5,25^{\circ}C} = 15 \text{ min}$ πρέπει ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας να ξεπερνά τα 1.200 και 1.000 W/(m²°C) για τις περιπτώσεις ελιών καλαμών μεγάλου και μικρού μεγέθους, αντίστοιχα, και να είναι πολύ μεγάλος για την περίπτωση των κονσερβολιών. Επίσης βρέθηκε ότι οι θερμικές επεξεργασίες της βιομηχανικής πρακτικής ξεπερνούν κατά πολύ τον ελάχιστο επιθυμητό ισοδύναμο χρόνο. Τέλος, κατά την εμπορική αποστείρωση μη ζυμωμένων ελιών (121,11°C για 45 min) βρέθηκε ότι το θερμικό αποτέλεσμα είναι πολύ μεγαλύτερο από το επιθυμητό, γι' αυτό προτείνεται η θέρμανση στους 121,11°C για 25 min.

Στην περίπτωση των ροδάκινων σχεδιάστηκε κονσέρβα (95x110 mm) με 6 τεμάχια ροδάκινων σε τυχαία θέση. Η βραδύτερα θερμαινόμενη ζώνη εντοπίστηκε στο εσωτερικό του ροδάκινου, που βρισκόταν στον πυθμένα της κονσέρβας. Η μέγιστη τιμή της ταχύτητας του σιροπιού παρατηρήθηκε 0,5 min μετά την έναρξη της θέρμανσης και της ψύξης και είχε τιμή 3,1-3,2 cm/s. Ο μικροοργανισμός στόχος είναι τα σπόρια του *Clostridium butyricum* και ο επιθυμητός ελάχιστος ισοδύναμος χρόνος $F_{90^{\circ}C}^{11,5^{\circ}C}$ είναι 1,5-8 min. Η ελάχιστη τιμή $F_{90^{\circ}C}^{11,5^{\circ}C}$ που βρέθηκε ήταν 33,4 min, που υπερκαλύπτει τις ανάγκες θερμικής θανάτωσης των σπορίων. Από τον υπολογισμό της υποβάθμισης υφής βρέθηκε ότι η τιμή $F_{93,3^{\circ}C}^{17,6^{\circ}C}$ κυμαινόταν από 15,3 έως 38,5 min, κάτι το οποίο συνεπάγεται ότι η υποβάθμιση της υφής ήταν 85-99% της αρχικής. Η επίδραση της συγκέντρωσης του σιροπιού και ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ θερμαντικού-ψυκτικού μέσου και τοιχώματος ήταν σημαντική τόσο στη ροή, όσο και στο θερμικό αποτέλεσμα επί των τεμαχίων. Επίσης σχεδιάστηκε κονσέρβα (75x105 mm) με 4 τεμάχια ροδάκινα, στην οποία έγινε έλεγχος της θέσης των ροδάκινων μέσα στην κονσέρβα. Σε αυτή την περίπτωση βρέθηκε ότι τα ροδάκινα που βρίσκονται στην κονσέρβα σε οριζόντια θέση, θερμαίνονται και ψύχονται ομοιόμορφα κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας, ενώ για αυτά σε θέση προς τα πάνω ή προς τα κάτω υπήρχαν διαφορές στη ροή που επηρέαζαν σημαντικά τη

μετάδοση θερμότητας και το θερμικό αποτέλεσμα επί των σπορίων του *Clostridium butyricum* και την υποβάθμιση της υφής.

Βάσει των αποτελεσμάτων της παρούσης διατριβής φαίνεται ότι ένα εργαλείο, όπως είναι η υπολογιστική ρευστοδυναμική μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην προσομοίωση φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας κονσερβοποιημένων τροφίμων. Πέρα από όσα πραγματοποιήθηκαν, η έρευνα του συγκεκριμένου τομέα της επιστήμης τροφίμων μπορεί να συνεχιστεί σε άλλα τρόφιμα, σε διαφορετικές συνθήκες επεξεργασίας και με άλλους εμπορικούς κώδικες επίλυσης, στα πλαίσια της ανάπτυξης νέων προϊόντων και της βελτίωσης των ήδη υπαρχόντων.

Abstract

The aim of thermal processing is the microbial destruction or the enzymatic inactivation, while affecting as less as possible the quality attributes of the food items. The intensity of thermal processing is quantitatively described by mathematical methods (General and Formula) and depends on the heat transfer phenomena, the physico-chemical and the thermo-physical properties of the products and the thermal destruction kinetics of both undesirable and quality factors. The simulation of a thermal processing can be efficiently performed using a Computational Fluid Dynamics (CFD) program and the thermal impact of the process on the food can be accessed.

The canned table olives preserved in brine (NaCl solution) and the canned peaches preserved in syrup are significant products for Greek economy. During this study, a simulation of the thermal processing of two products: a) table olives of the Greek varieties Kalamon and Konservolia and b) clingstone peaches, was conducted using a CFD program. The thermophysical properties of the two mentioned products, as well as the thermal degradation of texture of the processed items were determined experimentally. The parameters of the thermal degradation of the olives and peaches were calculated as $D_{62.4^{\circ}\text{C}} = 670 \text{ min}$, $z = 28.6^{\circ}\text{C}$ and $D_{93.3^{\circ}\text{C}} = 18.5 \text{ min}$, $z = 17.6^{\circ}\text{C}$, respectively. The geometry of the system was designed based on realistic data of the size and shape of the solid products and their containers. The results, product temperature evolution, for both products were confirmed experimentally for the density of the grid and the time step employed.

In the case of the olives, three geometries were designed including small- and full-sized olives of the variety Kalamon and olives of the variety Konservolia. The aim of the study was to apply a thermal process with the minimum thermal effect, $\text{PU}_{62.4^{\circ}\text{C}}^{5.25^{\circ}\text{C}} = 15 \text{ min}$, recommended by the International Olive Council. For this purpose, the cans (75x105 mm) filled with olives and brine were heated to 70°C for 10 min and then cooled in 20°C for 10 min. In all three cases the least equivalent time was found to be 38.8 (for the full-sized Kalamon olives), 62.4 (for the small-sized Kalamon olives) and 20 min (for the Konservolia olives). The equivalent time $\text{F}_{62.4^{\circ}\text{C}}^{28.6^{\circ}\text{C}}$ referring to texture degradation of the olives was 10.4-15 min for the full-sized olives of the Kalamon variety, 11.6-15.9 min for the small-sized olives of the same variety and 9.2-16.2 min for the olives the Konservolia olives. In all cases, the maximum

velocity of the brine was observed 0.5 min after the initiation of the heating and the cooling step and it was measured to 2.1 cm/s, 2.6 cm/s and 3.3 cm/s, for the small-, the full-sized Kalamon and the Konservolia olives, respectively. Studying the effect of the concentration of the brine, it was revealed that it was almost negligible. On the contrary, the effect of the heat transfer coefficient between the heating-cooling media and the internal wall of the can was significant. According to the selected solved geometries, the heat transfer coefficient was estimated to be at least equal to 1200 and 1000 W/(m²·°C) for the small-sized and full-sized olives of the Kalamon variety, respectively, while an infinite h was necessary for the Konservolia olives, in order for a $PU_{62.4^{\circ}C}^{5.25^{\circ}C} = 15 \text{ min}$ to be achieved. In addition, it was found that the time of the thermal processing that is routinely applied in the industrial practice is much longer than the minimum desirable equivalent time. Finally, it was revealed that during the commercial sterilization of the fresh olives (121.11°C for 45 min) the thermal effect was much higher than the optimized, thus a heating in 121.11°C for 25 min is recommended.

In the case of the peaches, a can (95x110 mm) was designed containing six peach halves randomly and unordered positioned inside the can. The slowest heated zone was identified in the center of the peach half, which was positioned in the bottom of the can. The maximum velocity of the syrup was observed 0.5 min after the initiation of the heating and the cooling step and it was measured equal to 3.1-3.2 cm/s. The target microorganism of the thermal processing was the spores of *Clostridium butyricum*. The minimum $F_{90^{\circ}C}^{11.5^{\circ}C}$ value of the process (20 min at 100°C followed by 10 min at 20°C) was calculated equal to 33.4 min, which clearly indicates that the lethality is achieved for the target microorganism (target $F_{90^{\circ}C}^{11.5^{\circ}C}$ was 1.5-8 min). The value of $F_{93.3^{\circ}C}^{17.6^{\circ}C}$ as estimated from the thermal degradation of the texture was found to be in a range of 15.3-38.5 min, resulting consequently in an 85-99% degradation of the initial texture. In the case of peaches, the influence of the concentration of the syrup and the heat transfer coefficient between the heating-cooling media and internal wall was significant not only in flow parameters, but also in the thermal effect on the product.

In a next investigation, a can (75x105 mm) containing four peach halves in syrup was designed and the effect of arrangement of the peaches inside the can on heat transfer rates was investigated. In this case, it was found that peach halves in sideways position were heated and cooled faster than the other cases and evenly during the heat

treatment. In contrast, the heat flow appeared to differ in peach halves which were upwards or downwards, which affected significantly the heat transfer and the thermal effect on the spores of *Clostridium butyricum*, as well as the thermal degradation in the texture of the product. At their critical points, peach halves facing towards the top of the can heated considerably slower and cooled faster than the peaches facing towards the bottom of the can. The results of this study could be used in designing of thermal processes with optimal product quality.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	1
ABSTRACT	4
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	7
ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ.....	10
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ	14
ΕΙΚΟΝΕΣ	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ Ι. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	20
I.1 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΤΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΤΡΟΦΙΜΩΝ	20
I.2 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΤΑ ΤΡΟΦΙΜΑ	20
I.2.1 Εισαγωγικά	20
I.2.2 Ιστορική αναδρομή.....	20
I.2.3 Αντιπροσωπευτική γραμμή παραγωγής κονσερβοποιημένου τροφίμου	24
I.2.4 Ανασκόπηση θερμικών επεξεργασιών.....	25
I.2.4.1 Ζεμάτισμα.....	25
I.2.4.2 Παστερίωση	26
I.2.4.3 Αποστείρωση	27
I.3 ΜΙΚΡΟΒΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ	28
I.3.1 Κινητική της μικροβιακής καταστροφής σε σχέση με το χρόνο θέρμανσης	28
I.3.2 Επίδραση της θερμοκρασίας στην κινητική της μικροβιακής καταστροφής.....	29
I.3.3 Επίδραση της θερμοκρασίας στην κινητική της ενζυμικής αδρανοποίησης και της ποιοτικής υποβάθμισης των θερμικώς επεξεργασμένων τροφίμων	32
I.4 ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ – ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....	32
I.4.1 Μεταφορά θερμότητας με αγωγή σε σταθερή κατάσταση	33
I.4.2 Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή	34
I.4.3 Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία.....	36
I.4.4 Μεταφορά θερμότητας με αγωγή σε μη σταθερή κατάσταση	37
I.5 ΘΕΡΜΙΚΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	38
I.6 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΠΙΤΥΧΗΜΕΝΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	42
I.6.1 Υπολογισμός της τιμής F	43
I.6.1.1 Γενική μέθοδος	44
I.6.1.2 Μέθοδος Ball	45
I.6.1.3 Μέθοδος Stumbo	46
I.7 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗ (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS)	46
I.7.1 Εισαγωγικά για την υπολογιστική ρευστοδυναμική.....	46
I.7.2 Εφαρμογές της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής.....	47
I.7.3 Θεμελιώδεις αρχές της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής.....	49
I.7.4 Αριθμητικές μέθοδοι διακριτοποίησης	51
I.7.4.1 Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών.....	51
I.7.4.2 Μέθοδος πεπερασμένων όγκων	52
I.7.5 Πορεία επίλυσης ενός προβλήματος με χρήση CFD	52
I.7.5.1 Προ – επεξεργασία.....	52
I.7.5.2 Επίλυση.....	54
I.7.5.3 Μετα – επεξεργασία.....	54
I.8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ	
ΚΟΝΣΕΡΒΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΤΡΟΦΙΜΩΝ	54
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΙΙ. ΘΕΡΜΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΕΠΙΤΡΑΠΕΖΙΩΝ ΕΛΙΩΝ	65
Π.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ	65
Π.1.1 Η ελιά	65
Π.1.2 Βοτανική ταξινόμηση.....	65
Π.1.3 Ιστορικά και οικονομικά στοιχεία	66
Π.1.4 Επιτραπέζιες ελιές	67
Π.1.4.1 Ορισμός και εμπορικοί τύποι.....	67
Π.1.4.2 Φυτικοχημικά και βιοχημικά χαρακτηριστικά των επιτραπέζιων ελιών	67
Π.1.4.3 Παραγωγή επιτραπέζιων ελιών.....	69
Π.1.4.4 Τύποι εμπορίας επιτραπέζιων ελιών	70

Π.1.4.5 Θερμική επεξεργασία επιτραπέζιων ελιών	71
Π.2 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ	72
Π.2.1 Προσδιορισμός φυσικών ιδιοτήτων ελιών	72
Π.2.1.1 Πυκνότητα (ρ)	72
Π.2.1.2 Ειδική θερμότητα (C_p)	72
Π.2.1.3 Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (k)	73
Π.2.2 Προσδιορισμός φυσικών ιδιοτήτων άλλων υλικών	73
Π.2.2.1 Χάλυβας	73
Π.2.2.2 Υαλώδες Τεφλόν	74
Π.2.2.3 Άλμη ($NaCl$)	74
Π.2.2.4 Νερό	75
Π.2.3 Προσδιορισμός υγρασίας και ελαιοπεριεκτικότητας των ελιών	77
Π.2.3.1 Προσδιορισμός υγρασίας	78
Π.2.3.2 Προσδιορισμός ελαιοπεριεκτικότητας	78
Π.2.4 Προσδιορισμός θερμικής υποβάθμισης της υφής των ελιών	79
Π.2.4.1 Το φαινόμενο της θερμικής υποβάθμισης της υφής	79
Π.2.4.2 Ποσοτικοποίηση της θερμικής υποβάθμισης της υφής	79
Π.2.4.3 Πειραματική διαδικασία για τη θερμική υποβάθμιση της υφής των ελιών	81
Π.2.4.4 Υπολογισμός των παραμέτρων της θερμικής υποβάθμισης της υφής	82
Π.2.5 Σχεδιαζόμενες γεωμετρίες προς επίλυση	83
Π.2.5.1 Γεωμετρία επιβεβαίωσης	83
Π.2.5.1.1 Πειραματική θερμική επεξεργασία	84
Π.2.5.1.2 Θεωρητική γεωμετρία	86
Π.2.5.1.3 Υπολογισμός ισοδύναμου θερμικού αποτελέσματος	91
Π.2.5.1.4 Πειραματική επιβεβαίωση του θανατηφόρου αποτελέσματος επί του μικροβιακού πληθυσμού	93
Π.2.5.2 Γεωμετρίες με ελιές της ποικιλίας “Καλαμών”	94
Π.2.5.2.1 Κονσέρβα που περιείχε 48 (6x8) μεγάλες ελιές ποικιλίας “Καλαμών”	94
Π.2.5.2.2 Κονσέρβα που περιείχε 80 (8x10) μικρές ελιές ποικιλίας “Καλαμών”	98
Π.2.5.3 Γεωμετρία με “Κονσερβολιές”	101
Π.2.5.3.1 Κονσέρβα που περιείχε 48 (6x7+6) μεγάλες “Κονσερβολιές”	101
Π.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	106
Π.3.1 Προσδιορισμός υγρασίας και ελαιοπεριεκτικότητας των ελιών	106
Π.3.2 Θερμική υποβάθμιση ελιών	106
Π.3.3 Προσομοίωση θερμικών επεξεργασιών με CFD	109
Π.3.3.1 Επιβεβαίωση του θεωρητικού μοντέλου με πειραματικές μετρήσεις	109
Π.3.3.2 Ανεξαρτησία του χρονικού βήματος επίλυσης	110
Π.3.3.3 Ανεξαρτησία πλέγματος	111
Π.3.3.4 Εξέταση της υπόθεσης Boussinesq	113
Π.3.3.5 Κύρια περιγραφή της προσομοίωσης των τριών περιπτώσεων	116
Σύγκριση του μεγέθους των ελιών επί της θερμικής επεξεργασίας	137
Σύγκριση των δύο ποικιλιών επί της θερμικής επεξεργασίας	138
Π.3.3.6 Επίδραση της συγκέντρωσης της άλμης	139
Π.3.3.7 Επίδραση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στην εξωτερική επιφάνεια της κονσέρβας	143
Π.3.3.8 Προσομοίωση βιομηχανικής πρακτικής ήπιας θερμικής επεξεργασίας	155
Π.3.3.9 Προσομοίωση βιομηχανικής πρακτικής εμπορικής αποστείρωσης	162
Π.3.3.12 Επιβεβαίωση του μοντέλου ως προς το θανατηφόρο αποτέλεσμα επί των μικροοργανισμών	174
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΙΙΙ. ΘΕΡΜΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΟΝΣΕΡΒΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΡΟΔΑΚΙΝΩΝ ...	176
ΙΙΙ.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ	176
Π.1.1 Το ροδάκινο	176
Π.1.2 Βοτανική ταξινόμηση	176
Π.1.3 Ιστορικά και οικονομικά στοιχεία	176
Π.1.4 Κονσερβοποιημένα ροδάκινα	177
Π.1.4.1 Ορισμός και εμπορικοί τύποι	177
Π.1.4.2 Χαρακτηριστικά των κονσερβοποιημένων ροδάκινων	178
Π.1.4.3 Παραγωγή κονσερβοποιημένων ροδάκινων	179
ΙΙΙ.2 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ	181
Π.2.1 Προσδιορισμός των φυσικών ιδιοτήτων των ροδάκινων	181
Π.2.1.1 Πυκνότητα (ρ)	181
Π.2.1.2 Ειδική Θερμότητα (C_p)	181
Π.2.1.3 Συντελεστής Θερμικής Αγωγιμότητας (k)	182
Π.2.2 Προσδιορισμός φυσικών ιδιοτήτων άλλων υλικών	183
Π.2.2.1 Σιρόπι ζάχαρης	183
Π.2.2.2 Νερό	185
Π.2.3 Προσδιορισμός υγρασίας και διαλυτών στερεών των ροδάκινων	186
Π.2.3.1 Προσδιορισμός υγρασίας	186

III.2.3.2 Προσδιορισμός διαλυτών στερεών.....	186
III.2.4 Προσδιορισμός θερμικής υποβάθμισης της υφής των ροδάκινων	187
III.2.4.1 Η θερμική υποβάθμιση της υφής κατά τη θερμική επεξεργασία.....	187
III.2.4.2 Ποσοτικοποίηση της θερμικής υποβάθμισης της υφής	187
III.2.4.3 Πειραματική διαδικασία για τη θερμική υποβάθμιση της υφής των ροδάκινων	188
III.2.4.4 Υπολογισμός των παραμέτρων της θερμικής υποβάθμισης της υφής	189
III.2.5 Σχεδιαζόμενες γεωμετρίες προς επίλυση	190
III.2.5.1 Επιβεβαίωση μοντέλου	190
III.2.5.2 Πειραματική θερμική επεξεργασία.....	190
III.2.5.3 Θεωρητική γεωμετρία	192
III.2.5.4 Υπολογισμός ισοδύναμου θερμικού αποτελέσματος	195
III.2.6 Επιλυόμενες γεωμετρίες κονσερβοποιημένων ροδάκινων.....	197
III.2.6.1 Γεωμετρία τυχαίας κατανομής τεμαχίων ροδάκινου.....	197
III.2.6.2 Γεωμετρίες για την επίδραση της θέσης των τεμαχίων ροδάκινου.....	200
III.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	202
III.3.1 Υγρασία και διαλυτά στερεά συμπύρηνων ροδάκινων.....	202
III.3.2 Παρουσίαση των παραμέτρων της θερμικής υποβάθμισης της υφής	202
III.3.3 Παρουσίαση προσομοίωσης θερμικών επεξεργασιών με CFD κονσερβοποιημένων ροδάκινων	203
III.3.3.1 Επαλήθευση του θεωρητικού μοντέλου	203
Θερμοκρασιακό προφίλ.....	204
Προφίλ ταχύτητας του ρευστού.....	206
III.3.3.2 Προσομοίωση θερμικής επεξεργασίας 3-D μοντέλου 6 τεμαχίων ροδάκινων σε κονσέρβα ...	208
III.3.3.2.1 Ανεξαρτησία πλέγματος	208
III.3.3.2.2 Ανεξαρτησία χρονικού βήματος.....	208
III.3.3.2.3 Περιγραφή κύριας γεωμετρίας 6 τεμαχίων ροδάκινων.....	209
III.3.3.2.4 Επίδραση συγκέντρωσης σιροπιού ζάχαρης στη θερμική επεξεργασία.....	219
III.3.3.2.5 Επίδραση στη θερμική επεξεργασία του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας (h) επί της εξωτερικής επιφάνειας της κονσέρβας	226
III.3.3.3 Προσομοίωση 3-D μοντέλου 4 τεμαχίων ροδάκινων σε διαφορετικές διατάξεις.....	232
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	244
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	248
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	257

Ονοματολογία

Λατινικοί χαρακτήρες

A	επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας, m ²
a	αρχική συγκέντρωση μιας θερμικά ευαίσθητης ουσίας, π.χ., αριθμός μικροοργανισμών ανά ml, g/l, κ.α.
a _w	ενεργότητα νερού, αδιάστατος
b	τελική (μετά το πέρας της θερμικής διεργασίας) συγκέντρωση μιας θερμικά ευαίσθητης ουσίας, π.χ., αριθμός μικροοργανισμών ανά ml, g/l, κ.α.
B	χρόνος θέρμανσης, που απαιτείται για βιομηχανική αποστείρωση, min
Bi	αριθμός Biot, $Bi=(h \cdot X_o)/k$, αδιάστατος
c	συγκέντρωση του μικροβιακού φορτίου, cfu/ml
c _o	αρχική συγκέντρωση του μικροβιακού φορτίου, cfu/ml
C _p	ειδική θερμότητα του προϊόντος, J/(kg·°C)
D	διάμετρος, m
dc	η μείωση της συγκέντρωσης του μικροβιακού φορτίου σε χρόνο dt
dt	στοιχειώδης χρονική μεταβολή, s
D _T	(ή απλώς D) <i>χρόνος υποδεκαπλασιασμού</i> : χρόνος σε σταθερή θερμοκρασία, T, που απαιτείται για την καταστροφή του 90% των μικροοργανισμών (ή άλλων θερμικά ευαίσθητων ουσιών), min (εκτός αν καθορίζεται στο κείμενο διαφορετικά)
E _a	ενέργεια ενεργοποίησης, cal/mol
f _h	χρόνος που απαιτείται για να υποδεκαπλασιαστεί η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ αυτόκλειστου και προϊόντος, min
F _i	παράμετρος που ορίζεται ως $F_i = 10^{\frac{T_{ref}-T_{RT}}{z}}$, αδιάστατος
F _o	αριθμός Fourier, $F_o=(\alpha /X_o^2) \cdot t$, αδιάστατος
F _{T_{ref}} ^Z	(ή απλώς F) <i>χρόνος σε σταθερή θερμοκρασία, T_{ref}, που απαιτείται για την καταστροφή ενός δεδομένου ποσοστού μικροοργανισμών (ή άλλων θερμικά ευαίσθητων ουσιών) που χαρακτηρίζονται με την τιμή z, min ή, εισάγοντας σαφώς και την άλλη διάσταση της τιμής F, ισοδύναμος χρόνος μιας υποθετικής θερμικής διεργασίας αναφοράς, σε σταθερή θερμοκρασία, που επιφέρει το ίδιο αποτέλεσμα, όσον αφορά στην καταστροφή (υποβάθμιση) ενός θερμικά ευαίσθητου παράγοντα, με την υπό εξέταση θερμική διεργασία</i>

F_o	η τιμή F για $T_{ref} = 250^{\circ}F$ και $z = 18^{\circ}F$ ή ($T_{ref} = 121.11^{\circ}C$ και $z = 10^{\circ}C$)
g	η επιτάχυνση της βαρύτητας, ($9,81 \text{ m/s}^2$)
g	διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του αυτόκλειστου κατεργασίας και του προϊόντος –στο κρίσιμο σημείο– στο τέλος του χρόνου θέρμανσης (κλείσιμο παροχής ατμού), $^{\circ}F$
Gr	ο αριθμός Grashof, αδιάστατος
h	επιφανειακός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, $W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$
I	διαφορά μεταξύ θερμοκρασίας αυτόκλειστου και αρχικής θερμοκρασίας προϊόντος, $I = T_{RT} - T_{IT}$, $^{\circ}F$
j	παράγοντας καθυστέρησης, παράμετρος για την περιγραφή (μαζί με την τιμή f) του ευθύγραμμου τμήματος της καμπύλης θερμικής διείσδυσης που προκύπτει όταν τα θερμοκρασιακά δεδομένα του προϊόντος σχεδιάζονται ως η διαφορά θερμοκρασίας (σε λογαριθμική κλίμακα) μεταξύ αυτόκλειστου και προϊόντος συναρτήσει του χρόνου. Η παράμετρος j ορίζεται ως $j_h = \frac{T_{RT} - T_A}{T_{RT} - T_{IT}} \text{ και } j_c = \frac{T_B - T_{CW}}{T_h - T_{CW}}$ για την καμπύλη θέρμανσης και ψύξης του προϊόντος, αντίστοιχα, αδιάστατος αριθμός.
k	θερμική αγωγιμότητα του προϊόντος, $W/(m \cdot ^{\circ}C)$
k	σταθερά ταχύτητας αντίδρασης, s^{-1} για αντιδράσεις πρώτης τάξης
L	βαθμός καταστροφικότητας, ο λόγος της τιμής F της διεργασίας προς την απαιτούμενη τιμή F , αδιάστατος
m	μάζα προϊόντος, kg
$m+g$	παράμετρος που ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ θερμοκρασίας αυτόκλειστου θέρμανσης και θερμοκρασίας ψύξης, $m+g = T_{RT} - T_{CW}$, $^{\circ}F$
N	αριθμός επιζώντων μικροοργανισμών, σπορίων κ.α. (ανά περιέκτη, ανά ml κλπ) μετά από δεδομένο χρόνο θέρμανσης π.χ., αριθμός μικροοργανισμών ανά περιέκτη, ανά ml κλπ
Nu	ο αριθμός Nusselt, αδιάστατος
q	η ροή θερμότητας στη μονάδα του χρόνου, W
Q_{10}	παράμετρος που εκφράζει την επίδραση της θερμοκρασίας στην ταχύτητα δεδομένης αντίδρασης, οριζόμενη ως ο λόγος των σταθερών των ταχυτήτων αντίδρασης σε θερμοκρασίες που διαφέρουν κατά $10^{\circ}C$, δηλαδή, $Q_{10} = k_{(T+10^{\circ}C)} / k_{(T^{\circ}C)}$, αδιάστατος αριθμός
p	η πίεση του ρευστού, N/m^2
Pr	ο αριθμός Prandtl, αδιάστατος
PU	pasteurisation units (μονάδες παστερίωσης), min
R	ακτίνα (κυλινδρικού ή σφαιρικού σχήματος) προϊόντος, m
R	παγκόσμια σταθερά των αερίων, ($1,987 \text{ cal/K} \cdot \text{mol}$)
Ra	ο αριθμός Rayleigh, αδιάστατος

Re	ο αριθμός Reynolds, αδιάστατος
S	η δύναμη που ασκείται στην ελιά ή στο τεμάχιο ροδάκινου σε σχέση με το βάθος διείσδυσης (N/mm)
s	σταθερά – παράγοντας συχνότητας, min ⁻¹
T	θερμοκρασία, °F ή °C ή K
T _A	θερμοκρασία της επιφάνειας εκπομπής, K
T _A	"ψευδο"-αρχική θερμοκρασία του προϊόντος κατά την έναρξη του κύκλου θέρμανσης της διεργασίας, δηλαδή, η τομή του ευθύγραμμου τμήματος της καμπύλης θερμικής διείσδυσης (που προκύπτει όταν τα θερμοκρασιακά δεδομένα του προϊόντος σχεδιάζονται ως η διαφορά θερμοκρασίας (σε λογαριθμική κλίμακα) μεταξύ αυτόκλειστου και προϊόντος συναρτήσει του χρόνου θέρμανσης) με το άξονα των θερμοκρασιών στην αρχή του άξονα των χρόνων, °F
T _B	αντίστοιχη της T _A για την καμπύλη ψύξης του προϊόντος, δηλαδή, η τομή του ευθύγραμμου τμήματος της καμπύλης ψύξης (που προκύπτει όταν τα θερμοκρασιακά δεδομένα του προϊόντος σχεδιάζονται ως η διαφορά θερμοκρασίας (σε λογαριθμική κλίμακα) μεταξύ προϊόντος και μέσου ψύξης συναρτήσει του χρόνου ψύξης) με το άξονα των θερμοκρασιών στο χρόνο μηδέν της ψύξης, °F
T _{CW}	θερμοκρασία περιβάλλοντος (νερού) ψύξης, °F
T _g	θερμοκρασία προϊόντος –στο κρίσιμο σημείο– στο τέλος του χρόνου θέρμανσης (κλείσιμο παροχής ατμού), °F
T _h	θερμοκρασία προϊόντος στο τέλος της φάσης θέρμανσης (και αρχή του κύκλου ψύξης) μιας θερμικής διεργασίας, °F
T _{IT}	αρχική θερμοκρασία προϊόντος, °F
T _{RT}	θερμοκρασία αυτόκλειστου κατεργασίας, °F
T ₀	αρχική θερμοκρασία προϊόντος, °F ή °C
T _s	θερμοκρασία της επιφάνειας του στερεού, °C
T _∞	θερμοκρασία περιβάλλοντος, °C
TDT	χρόνος θερμικής καταστροφής (Thermal Death Time) οριζόμενος ως $TDT = F \frac{z}{T_{ref}} 10^{\frac{T_{ref}-T}{z}}, \text{ min}$
t	χρόνος, s
u	διάνυσμα της ταχύτητας, m/s
u _m	μέση ταχύτητα του ρευστού, m/s
V	όγκος, m ³
x	πάχος τοιχώματος περιέκτη, m

x	χαρακτηριστικό μήκος του σώματος που θερμαίνεται ή ψύχεται (το μισό πάχος αν αναφερόμαστε σε σώμα με γεωμετρία πλάκας (slab) ή η ακτίνα για γεωμετρίες σφαίρας και άπειρου κυλίνδρου), m
x,y,z	οι τρεις διαστάσεις (σε καρτεσιανές συντεταγμένες), m
z	διαφορά θερμοκρασίας που απαιτείται για να δεκαπλασιαστεί ή να υποδεκαπλασιαστεί η τιμή D_T , °F ή °C
2D	δισδιάστατη επίλυση ενός πεδίου ροής
3D	τριδιάστατη επίλυση ενός πεδίου ροής

Ελληνικά σύμβολα

α	θερμική διαχυτότητα του προϊόντος, $\alpha=k/(\rho \cdot C_p)$, m^2/s
β	συντελεστής θερμικής διαστολής, $1/^\circ C$
ϵ	συντελεστής ικανότητας εκπομπής, αδιάστατος
η	θέση του σημείου ($\eta=x/x_1$), αδιάστατη
μ	ιξώδες του ρευστού, Pa·s
ν	μέση ταχύτητα, m/s
ρ	πυκνότητα, kg/m^3
σ	σταθερά Stefan – Boltzmann ($5,670 \cdot 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$),
τ	τάση διάτμησης, N/m^2

Διαγράμματα

- Διάγραμμα 1. Πρώτης τάξεως κινητική μικροβιακής καταστροφής
Διάγραμμα 2. Καμπύλη χρόνου θερμικού θανάτου (TDT)
Διάγραμμα 3. Καμπύλη θέρμανσης – ψύξης για το κέντρο της κονσέρβας με στερεό τρόφιμο
Διάγραμμα 4. Καμπύλη θέρμανσης
- Διάγραμμα 5. Καμπύλη ψύξης
Διάγραμμα 6. Η μεταβολής του βαθμού θνησιμότητας κατά τη διάρκεια θερμικής επεξεργασίας για $T_{ref}=121,10C$
Διάγραμμα 7. Μεταβολής της Πυκνότητας του ρευστού σε σχέση με τη θερμοκρασία
Διάγραμμα 8. Μεταβολής της Ειδικής Θερμότητας του ρευστού σε σχέση με τη θερμοκρασία
Διάγραμμα 9. Μεταβολής της Θερμικής Αγωγιμότητας του ρευστού σε σχέση με τη θερμοκρασία
Διάγραμμα 10. Μεταβολής του Ιξώδους του ρευστού σε σχέση με τη θερμοκρασία
Διάγραμμα 11. Αντιπροσωπευτική καμπύλη αντίστασης στη συμπίεση σε σχέση με το μήκος διείσδυσης του εμβόλου
Διάγραμμα 12. Μεταβολή της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του τοιχώματος της κονσέρβας κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας
Διάγραμμα 13. Μεταβολή του αριθμού Ra της άλμης για εύρος θερμοκρασίας 10 - 90°C
Διάγραμμα 14. Μεταβολή της μέσης κλίσης σε σχέση με το χρόνο θέρμανσης για κάθε θερμοκρασία
Διάγραμμα 15. Μεταβολή της τιμής D σε σχέση με τη θερμοκρασία θέρμανσης
Διάγραμμα 16. Διαγράμματα επιβεβαίωσης των θεωρητικών με τα πειραματικά αποτελέσματα της θερμοκρασίας για Α: σημείο στην άλμη, Β: κέντρο κάτω ομοιώματος και Γ: κέντρο άνω ομοιώματος
Διάγραμμα 17. Μεταβολή θερμοκρασίας στην ΑΘΖ για τα 3 χρονικά βήματα
Διάγραμμα 18. Μεταβολή του σφάλματος θερμοκρασίας των 2 χρονικών βημάτων σε σχέση με το 0,5s
Διάγραμμα 19. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ για τα δύο διαφορετικά πλέγματα
Διάγραμμα 20. Μεταβολή του σφάλματος θερμοκρασίας των δύο διαφορετικών πλεγμάτων
Διάγραμμα 21. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ για τις δύο περιπτώσεις υπολογισμού της πυκνότητας του ρευστού (Boussinesq και πολυωνυμική $\rho=f(t)$)
Διάγραμμα 22. Μεταβολή του σφάλματος στη θερμοκρασία στην ΑΘΖ για τις δύο περιπτώσεις υπολογισμού της πυκνότητας του ρευστού (Boussinesq και πολυωνυμική $\rho=f(t)$)
Διάγραμμα 23. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ για τις δύο περιπτώσεις υπολογισμού της πυκνότητας του ρευστού (Boussinesq και πολυωνυμική $\rho=f(t)$)
Διάγραμμα 24. Μεταβολή του σφάλματος στη θερμοκρασία στην ΑΘΖ για τις δύο περιπτώσεις υπολογισμού της πυκνότητας του ρευστού (Boussinesq και πολυωνυμική $\rho=f(t)$)
Διάγραμμα 25. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ και στην ΑΨΖ.
Διάγραμμα 26. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ
Διάγραμμα 27. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ και στην ΑΨΖ
Διάγραμμα 28. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ για τις περιπτώσεις μικρών και μεγάλων ελιών της ποικιλίας “Καλαμών”
Διάγραμμα 29. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ για τις περιπτώσεις των ελιών της ποικιλίας “Καλαμών” μεγάλου μεγέθους και τις “Κονσερβολιές”
Διάγραμμα 30. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ για τις 3 συγκεντρώσεις σε NaCl της άλμης
Διάγραμμα 31. Μεταβολή του σφάλματος θερμοκρασίας για τις 3 συγκεντρώσεις σε NaCl της άλμης
- Διάγραμμα 32. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ για τις 3 συγκεντρώσεις σε NaCl της άλμης
Διάγραμμα 33. Μεταβολή του σφάλματος θερμοκρασίας για τις 3 συγκεντρώσεις σε NaCl της άλμης
Διάγραμμα 34. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ για τις 3 συγκεντρώσεις σε NaCl της άλμης
Διάγραμμα 35. Μεταβολή του σφάλματος θερμοκρασίας για τις 3 συγκεντρώσεις σε NaCl της άλμης
Διάγραμμα 36. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ για διαφορετικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας
Διάγραμμα 37. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές της θέρμανσης σε σχέση με την μεταβολή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας
Διάγραμμα 38. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές της ψύξης σε σχέση με την μεταβολή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας
Διάγραμμα 39. Μεταβολή του ελάχιστου ισοδύναμου χρόνου σε σχέση με τη μεταβολή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας
Διάγραμμα 40. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ για διαφορετικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας

- Διάγραμμα 41. Μεταβολή του ελάχιστου ισοδύναμου χρόνου σε σχέση με τη μεταβολή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας
- Διάγραμμα 42. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ για διαφορετικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας
- Διάγραμμα 43. Μεταβολή του ελάχιστου ισοδύναμου χρόνου σε σχέση με τη μεταβολή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας
- Διάγραμμα 44. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ για τις τέσσερις περιπτώσεις
- Διάγραμμα 45. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ για τις τέσσερις περιπτώσεις
- Διάγραμμα 46. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ για τις τέσσερις περιπτώσεις
- Διάγραμμα 47. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ για τις δύο θερμικές επεξεργασίες
- Διάγραμμα 48. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ για τις δύο θερμικές επεξεργασίες
- Διάγραμμα 49. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ για τις δύο θερμικές επεξεργασίες
- Διάγραμμα 50. Διάγραμμα ροής κονσερβοποιημένων ροδάκινων
- Διάγραμμα 51. Μεταβολή της Πυκνότητας του σιροπιού σε σχέση με τη θερμοκρασία
- Διάγραμμα 52. Μεταβολή της Ειδικής Θερμότητας του σιροπιού σε σχέση με τη θερμοκρασία
- Διάγραμμα 53. Μεταβολή της Θερμικής Αγωγιμότητας του σιροπιού σε σχέση με τη θερμοκρασία
- Διάγραμμα 54. Μεταβολή του Ιξώδους του σιροπιού σε σχέση με τη θερμοκρασία
- Διάγραμμα 55. Αντιπροσωπευτική καμπύλη αντίστασης στη συμπίεση σε σχέση με το μήκος διεύθυνσης του εμβόλου
- Διάγραμμα 56. Μεταβολή της εξωτερικής θερμοκρασίας, όπως αυτή καταγράφηκε στο τοίχωμα της κονσέρβας κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας
- Διάγραμμα 57. Υπολογισμός των τιμών D για την υποβάθμιση της υφής για κάθε θερμοκρασία βρασμού
- Διάγραμμα 58. Υπολογισμός της τιμής z για την υποβάθμιση της υφής
- Διάγραμμα 59. Σύγκριση θεωρητικών με πειραματικές τιμές της θερμοκρασίας για το σημείο στο κεντρικό ροδάκινο
- Διάγραμμα 60. Σύγκριση θεωρητικών με πειραματικές τιμές της θερμοκρασίας για το σημείο στο κατώτερο ροδάκινο
- Διάγραμμα 61. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ όπως υπολογίστηκε για αραιό και πυκνό πλέγμα
- Διάγραμμα 62. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ για τις 4 περιπτώσεις
- Διάγραμμα 63. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας
- Διάγραμμα 64. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ για κάθε συγκέντρωση του σιροπιού
- Διάγραμμα 65. Σύγκριση της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ για τον κύκλο θέρμανσης
- Διάγραμμα 66. Σύγκριση της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ για τον κύκλο ψύξης
- Διάγραμμα 67. Μεταβολή της τιμής $F_{90^{\circ}\text{C}}^{11.5^{\circ}\text{C}}$ στο κρίσιμο σημείο ως συνάρτηση της συγκέντρωσης του σιροπιού
- Διάγραμμα 68. Μεταβολή της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής $F_{93.3^{\circ}\text{C}}^{17.6^{\circ}\text{C}}$ σε σχέση με τη συγκέντρωση του σιροπιού
- Διάγραμμα 69. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ σε σχέση με το χρόνο θερμικής επεξεργασίας για διαφορετικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας
- Διάγραμμα 70. Ελάχιστες τιμές του ισοδύναμου χρόνου $F_{90^{\circ}\text{C}}^{11.5^{\circ}\text{C}}$ για κάθε περίπτωση μεταβολής του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας
- Διάγραμμα 71. Μέγιστη και ελάχιστη % εναπομείνασα υφή των ροδάκινων
- Διάγραμμα 72. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ για τις τρεις περιπτώσεις

Εικόνες

- Εικόνα 1. Nicholas Appert (1749-1841) (https://en.wikipedia.org/wiki/Nicholas_Appert)
- Εικόνα 2. Κονσερβοποίηση τροφίμων (Μπλούκας 2004)
- Εικόνα 3. Louis Pasteur (1822-1895) (https://en.wikipedia.org/wiki/Louis_Pasteur)
- Εικόνα 4. Charles Olin Ball (1893-1970) (https://en.wikipedia.org/wiki/C._Olin_Ball)
- Εικόνα 5. Charles Raymond Stumbo (1914-1989) (https://en.wikipedia.org/wiki/University_of_Massachusetts_Amherst_Department_of_Food_Science)
- Εικόνα 6. Τυπικά στάδια κονσερβοποίησης (Heldman 2011)
- Εικόνα 7. Μεταφορά θερμότητας με αγωγή από την μία επιφάνεια της πλάκας προς την άλλη
- Εικόνα 8. Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή από την θερμή επιφάνεια ενός στερεού προς το ψυχρό ρευστό
- Εικόνα 9. Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία από την θερμή επιφάνεια στερεού σώματος
- Εικόνα 10. Μετάδοση θερμότητας εντός του περιέκτη κατά τη θερμική επεξεργασία για στερεό (αριστερά) και υγρό (δεξιά) τρόφιμο
- Εικόνα 11. Εγκάρσια τομή σε καρπό ελιάς πλήρους ωρίμανσης (Kailis and Harris 2007)
- Εικόνα 12. Όργανο συμπίεσης των ελιών για τον προσδιορισμό της υφής
- Εικόνα 13. Γεωμετρία της πειραματικής θερμικής επεξεργασίας
- Εικόνα 14. Σχήμα και διαστάσεις ελιάς ποικιλίας “Καλαμών”
- Εικόνα 15. Γεωμετρία που επιλύθηκε στο CFD
- Εικόνα 16. Σχεδιαζόμενο ομοίωμα ελιάς από υαλώδες τεφλόν
- Εικόνα 17. Σχεδιαζόμενο πλέγμα της επιλυόμενης πειραματικής γεωμετρίας
- Εικόνα 18. “UDF” που εισήχθη στο λογισμικό για τον υπολογισμό των ισοδύναμων χρόνων
- Εικόνα 19. Γεωμετρία και τομή της κονσέρβας που περιείχε 48 ελιές “Καλαμών”
- Εικόνα 20. Σχήμα και διαστάσεις μικρού μεγέθους ελιάς “Καλαμών”
- Εικόνα 21. Γεωμετρία και τομή της κονσέρβας που περιείχε 80 ελιές “Καλαμών”
- Εικόνα 22. Σχήμα και διαστάσεις “Κονσερβολιάς”
- Εικόνα 23. Γεωμετρία και τομή της κονσέρβας που περιείχε 48 “Κονσερβολιές”
- Εικόνα 24. Προφίλ ταχύτητας σε διάφορες χρονικές στιγμές της θερμικής επεξεργασίας
- Εικόνα 25. Ταχύτητα της άλμης στην εσωτερική επιφάνεια της κονσέρβας
- Εικόνα 26. Η ΑΘΖ (Α) και η ΑΨΖ (Β) όπως εντοπίζονται στην γεωμετρία της περίπτωσης “α”
- Εικόνα 27. Κατανομή της θερμοκρασίας σε τομή της κονσέρβας για διάφορες χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας
- Εικόνα 28. Κατανομή ισοδύναμου χρόνου (α) και % εναπομεινάντων μικροοργανισμών (β) σε τομή της κονσέρβας στο τέλος της θερμικής επεξεργασίας
- Εικόνα 29. Κατανομή ισοδύναμων χρόνων υποβάθμισης υφής των ελιών Καλαμών μεγάλου μεγέθους και % εναπομείνασα υφή σε τομή της κονσέρβας
- Εικόνα 30. Προφίλ ταχύτητας σε διάφορες χρονικές στιγμές της θερμικής επεξεργασίας
- Εικόνα 31. Κατανομή της θερμοκρασίας σε τομή της κονσέρβας για διάφορες χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας
- Εικόνα 32. Σημείο εντοπισμού της αργότερα θερμαινόμενης ζώνης στη γεωμετρία “β”
- Εικόνα 33. Κατανομή ισοδύναμου χρόνου (α) και % εναπομεινάντων μικροοργανισμών (β) σε τομή της κονσέρβας στο τέλος της θερμικής επεξεργασίας
- Εικόνα 34. Κατανομή ισοδύναμου χρόνου υποβάθμισης υφής των ελιών Καλαμών μικρού μεγέθους και % εναπομείνασα υφή σε τομή της κονσέρβας
- Εικόνα 35. Προφίλ ταχύτητας σε διάφορες χρονικές στιγμές της θερμικής επεξεργασίας
- Εικόνα 36. Κατανομή της θερμοκρασίας σε τομή της κονσέρβας για διάφορες χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας
- Εικόνα 37. Η ΑΘΖ και η ΑΨΖ όπως εντοπίζονται στην γεωμετρία της περίπτωσης “γ”
- Εικόνα 38. Κατανομή ισοδύναμου χρόνου (α) και % εναπομεινάντων μικροοργανισμών (β) σε τομή της κονσέρβας στο τέλος της θερμικής επεξεργασίας
- Εικόνα 39. Κατανομή ισοδύναμου χρόνου υποβάθμισης της υφής Κονσερβολιών και % εναπομείνασα υφή σε τομή της κονσέρβας
- Εικόνα 40. Είσοδος κονσερβών σε κλίβανο για θερμική επεξεργασία
- Εικόνα 41. Κατανομή της θερμοκρασίας σε τομή της κονσέρβας για διάφορες τιμές του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μετά από 10 min από την έναρξη της θέρμανσης
- Εικόνα 42. Κατανομή της τιμής F σε τομή της κονσέρβας για διαφορετικές τιμές του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας
- Εικόνα 43. Κατανομή της θερμοκρασίας σε τομή της κονσέρβας για διάφορες τιμές του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μετά από 10 min από την έναρξη της θέρμανσης

- Εικόνα 44. Κατανομή της τιμής F σε τομή της κονσέρβας για διαφορετικές τιμές του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας
- Εικόνα 45. Κατανομή της θερμοκρασίας σε τομή της κονσέρβας για διάφορες τιμές του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μετά από 10 min από την έναρξη της θέρμανσης
- Εικόνα 46. Κατανομή της τιμής F σε τομή της κονσέρβας για διαφορετικές τιμές του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας
- Εικόνα 47. Προφίλ της ταχύτητας της άλμης μετά από ½ min από την έναρξη της θέρμανσης και της ψύξης αντίστοιχα
- Εικόνα 48. Κατανομή της θερμοκρασίας σε τομή της κονσέρβας για διάφορες χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας
- Εικόνα 49. Κατανομή της τιμής Fo σε τομή της κονσέρβας στο τέλος των δύο θερμικών επεξεργασιών
- Εικόνα 50. Προφίλ της ταχύτητας της άλμης μετά από ½ min από την έναρξη της θέρμανσης και της ψύξης αντίστοιχα
- Εικόνα 51. Κατανομή της θερμοκρασίας σε τομή της κονσέρβας για διάφορες χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας
- Εικόνα 52. Κατανομή της τιμής Fo σε τομή της κονσέρβας στο τέλος των δύο θερμικών επεξεργασιών
- Εικόνα 53. Προφίλ της ταχύτητας της άλμης μετά από 0,5 min από την έναρξη της θέρμανσης και της ψύξης αντίστοιχα
- Εικόνα 54. Κατανομή της θερμοκρασίας σε τομή της κονσέρβας για διάφορες χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας
- Εικόνα 55. Κατανομή της τιμής Fo σε τομή της κονσέρβας στο τέλος των δύο θερμικών επεξεργασιών
- Εικόνα 56. Όργανο μέτρησης ειδικής θερμότητας και θερμικής αγωγιμότητας
- Εικόνα 57. Όργανο συμπίεσης του τεμαχίου ροδάκινου για τον προσδιορισμό της υφής
- Εικόνα 58. Σχήμα και διαστάσεις τεμαχίου ροδάκινου. A=60mm, B=30mm, C=25mm και D=15mm
- Εικόνα 59. Σχεδιαζόμενη γεωμετρία που πειραματικά επεξεργάστηκε θερμικώς
- Εικόνα 60. Παρουσίαση πλέγματος στην κονσέρβα και στα περιεχόμενα τεμάχια
- Εικόνα 61. Εισαγόμενο αρχείο UDF με πληροφορίες υπολογισμού του ισοδύναμο χρόνου, όπως περιγράφεται στον πίνακα 34
- Εικόνα 62. Σχήμα και διαστάσεις σχεδιαζόμενου τεμαχίου ροδάκινου για όλες τις παραμετρικές μελέτες που θα ακολουθήσουν. A=60 mm, B=40 mm, C=30 mm και **D=15 mm**
- Εικόνα 63. Γεωμετρία 6 τεμαχίων ροδάκινων σε τυχαία θέση εντός της κονσέρβας
- Εικόνα 64. Γεωμετρίες με τα ροδάκινα σε τρεις διαφορετικές θέσεις
- Εικόνα 65. Κατανομή της θερμοκρασίας σε τομή της κονσέρβας για διάφορες χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας
- Εικόνα 66. Προφίλ ταχύτητας σε διάφορες χρονικές στιγμές της θερμικής επεξεργασίας
- Εικόνα 67. Κατανομή της θερμοκρασίας σε τομή της κονσέρβας για διάφορες χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας
- Εικόνα 68. Κατανομή της θερμοκρασίας σε τομή της κονσέρβας στο τέλος της θέρμανσης
- Εικόνα 69. Προφίλ ταχύτητας σε διάφορες χρονικές στιγμές της θερμικής επεξεργασίας
- Εικόνα 70. Κατανομή του ισοδύναμο χρόνο $F_{90^{\circ}\text{C}}^{11.5^{\circ}\text{C}}$ στο εσωτερικό και στην επιφάνεια των ροδάκινων
- Εικόνα 71. Προσδιορισμός του κρίσιμου σημείου της κονσέρβας
- Εικόνα 72. Κατανομή του ισοδύναμο χρόνο $F_{93.3^{\circ}\text{C}}^{17.6^{\circ}\text{C}}$, που αναφέρεται στην υφή των ροδάκινων στο εσωτερικό και στην επιφάνεια των ροδάκινων
- Εικόνα 73. Κατανομή του εναπομείναντος ποσοστού υφής των ροδάκινων σε τομή της κονσέρβας
- Εικόνα 74. Κατανομή της θερμοκρασίας σε τομή της κονσέρβας 10 min μετά την έναρξη της θέρμανσης συναρτήσει της συγκέντρωσης του σιροπιού ζάχαρης
- Εικόνα 75. Κατανομή της θερμοκρασίας σε τομή της κονσέρβας 10 min μετά την έναρξη της θέρμανσης συναρτήσει της συγκέντρωσης του σιροπιού ζάχαρης
- Εικόνα 76. Προφίλ ταχύτητας του ρευστού ½ min μετά την έναρξη της θέρμανσης για τις 4 διαφορετικές συγκεντρώσεις ζάχαρης στο σιρόπι
- Εικόνα 77. Κατανομή της τιμής $F_{90^{\circ}\text{C}}^{11.5^{\circ}\text{C}}$ στο εσωτερικό των ροδάκινων για τις 4 διαφορετικές συγκεντρώσεις ζάχαρης στο σιρόπι
- Εικόνα 78. Κατανομή της τιμής $F_{93.3^{\circ}\text{C}}^{17.6^{\circ}\text{C}}$ στο εσωτερικό των ροδάκινων για τις 4 διαφορετικές συγκεντρώσεις ζάχαρης στο σιρόπι
- Εικόνα 79. Αναπαράσταση θέρμανσης κονσερβών σε συνεχούς λειτουργίας κλίβανο
- Εικόνα 80. Κατανομή της θερμοκρασίας σε τομή της κονσέρβας για διάφορες τιμές του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μετά από 10 min από την έναρξη της θέρμανσης

Εικόνα 81. Ροή του σιροπιού σε τομή της κονσέρβας για διάφορες τιμές του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μετά από ½ min από την έναρξη της θέρμανσης

Εικόνα 82. Κατανομή της τιμής $F_{90^{\circ}\text{C}}^{11.5^{\circ}\text{C}}$ στο εσωτερικό των ροδάκινων σε σχέση με τη μεταβολή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας

Εικόνα 83. Κατανομή της τιμής $F_{90^{\circ}\text{C}}^{11.5^{\circ}\text{C}}$ για την υφή στο εσωτερικό των ροδάκινων σε σχέση με τη μεταβολή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας

Εικόνα 84. Κατανομή της θερμοκρασίας σε τομή της κονσέρβας με τα ροδάκινα προς τα πάνω για διάφορες χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας

Εικόνα 85. Κατανομή της θερμοκρασίας σε τομή της κονσέρβας με τα ροδάκινα προς τα κάτω για διάφορες χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας

Εικόνα 86. Κατανομή της θερμοκρασίας σε τομή της κονσέρβας με τα ροδάκινα πλάγια για διάφορες χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας

Εικόνα 87. Προφίλ ταχύτητας του σιροπιού για δύο χρονικές στιγμές της θερμικής επεξεργασίας σε τομή της κονσέρβας με τα ροδάκινα προς τα επάνω

Εικόνα 88. Προφίλ ταχύτητας του σιροπιού για δύο χρονικές στιγμές της θερμικής επεξεργασίας σε τομή της κονσέρβας με τα ροδάκινα προς τα κάτω

Εικόνα 89. Προφίλ ταχύτητας του σιροπιού για δύο χρονικές στιγμές της θερμικής επεξεργασίας σε τομή της κονσέρβας με τα ροδάκινα πλάγια

Εικόνα 90. Κατανομή του ισοδύναμου χρόνου θερμικού θανάτου των σπορίων του βακτηρίου και εντοπισμός του κρίσιμου σημείου για την περίπτωση με τα ροδάκινα προς τα επάνω

Εικόνα 91. Κατανομή του ισοδύναμου χρόνου θερμικού θανάτου των σπορίων του βακτηρίου και εντοπισμός του κρίσιμου σημείου για την περίπτωση με τα ροδάκινα προς τα κάτω

Εικόνα 92. Κατανομή του ισοδύναμου χρόνου θερμικού θανάτου των σπορίων του βακτηρίου και εντοπισμός του κρίσιμου σημείου για την περίπτωση με τα ροδάκινα πλάγια

Εικόνα 93. Κατανομή του ισοδύναμου χρόνου για την υποβάθμιση της υφής και επί τοις % εναπομείνασα υφή των ροδάκινων

Εικόνα 94. Κατανομή του ισοδύναμου χρόνου για την υποβάθμιση της υφής και επί τοις % εναπομείνασα υφή των ροδάκινων

Εικόνα 95. Κατανομή του ισοδύναμου χρόνου για την υποβάθμιση της υφής και επί τοις % εναπομείνασα υφή των ροδάκινων

Εισαγωγή

Ο τίτλος της παρούσας διατριβής είναι: “Μελέτη της θερμικής επεξεργασίας τροφίμων με διαφορετικές γεωμετρίες με τη βοήθεια της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής”. Σκοπός της διατριβής ήταν να προσομοιωθεί η θερμική επεξεργασία εγκυτιωμένων τροφίμων και ειδικότερα των ελιών σε άλμη NaCl και των ροδάκινων σε σιρόπι ζάχαρης με τη μεταβολή καθοριστικών παραμέτρων. Ένας τομέας της μηχανικής των ρευστών είναι και η υπολογιστική ρευστοδυναμική, η οποία χρησιμοποιώντας την υπολογιστική ισχύ ενός Η/Υ και κατάλληλους αλγόριθμους επιλύει διαφόρων ειδών πεδία ροής. Για την επίλυση πεδίων ροής υπάρχουν εμπορικοί και ελεύθεροι κώδικες και εισάγοντας τα κατάλληλα δεδομένα λαμβάνονται εύκολα και γρήγορα αποτελέσματα. Η υπολογιστική ρευστοδυναμική δύναται να επιλύσει και προβλήματα που σχετίζονται με την τεχνολογία τροφίμων και ειδικότερα με τις θερμικές επεξεργασίες. Η προσομοίωση στον υπολογιστή μιας θερμικής επεξεργασίας σε σχέση με την πειραματική μελέτη έχει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως η ευκολία στο σχεδιασμό και την πραγματοποίηση, η χρονική διάρκεια της επίλυσης, το χαμηλό κόστος, η δυνατότητα αλλαγής παραμέτρων και η επαναληψιμότητα. Για την πραγματοποίηση πειραματικών θερμικών επεξεργασιών απαιτούνται πολλοί πόροι, ενώ τα αποτελέσματα λαμβάνονται μετά από μεγάλο χρονικό διάστημα. Η υπολογιστική ρευστοδυναμική λειτουργώντας με τα πλεονεκτήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω είναι σε θέση να προσομοιώσει τέτοια προβλήματα και να εξάγει γρήγορα και με ακρίβεια τα επιθυμητά αποτελέσματα. Στην παρούσα διατριβή εστιάζεται η διερεύνηση της δυνατότητας χρήσης των εργαλείων της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής για τη βελτίωση των βιομηχανικών πρακτικών, για την παραγωγή σταθερών μικροβιολογικά προϊόντων, αλλά και με υψηλή διατροφική αξία.

Δύο σημαντικά για την εθνική οικονομία παραγόμενα προϊόντα, η επιτραπέζια ελιά και το ροδάκινο ερευνώνται στην παρούσα διατριβή. Η κονσερβοποίηση των δύο αυτών πρώτων υλών εμβαπτισμένων σε άλμη NaCl και σιρόπι ζάχαρης αντίστοιχα, είναι μια επεξεργασία που χρησιμοποιείται ευρέως στην παραγωγή προϊόντων που συμβάλλει θετικά στο ισοζύγιο εξαγωγών της χώρας. Κατά συνέπεια, είναι σκόπιμο να υπάρχει βελτίωση στη διαδικασία της κονσερβοποίησης. Έχοντας όλα τα πλεονεκτήματα της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής που αναφέρθηκαν παραπάνω πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση της θερμικής επεξεργασίας των δύο αυτών προϊόντων.

Κεφάλαιο I. Θεωρητικό Υπόβαθρο

I.1 Θερμικές διεργασίες στη τεχνολογία των τροφίμων

Ένα τρόφιμο από τον παραγωγό μέχρι τα χέρια του καταναλωτή υπόκειται σε μια σειρά επεμβάσεων που το καθιστούν κατάλληλο προς κατανάλωση. Οι διεργασίες που πολλές φορές εφαρμόζονται στα τρόφιμα στηρίζονται στη μεταφορά θερμότητας και μάζας από και προς το τρόφιμο αφενός ώστε να επιμηκυνθεί ο χρόνος διατήρησής του σε ασφαλή κατάσταση, αφετέρου να έχει όλα εκείνα τα ποιοτικά χαρακτηριστικά που επιθυμεί ο καταναλωτής (Heldman 2011).

I.2 Θερμικές διεργασίες στα τρόφιμα

I.2.1 Εισαγωγικά

Η θερμική επεξεργασία ενός τροφίμου είναι η διαδικασία με την οποία για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα το τρόφιμο εκτίθεται σε υψηλή θερμοκρασία και έπειτα ψύχεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ή χαμηλότερη από αυτή. Στόχος της θερμικής επεξεργασίας είναι η μείωση του μικροβιακού φορτίου και η αδρανοποίηση των ενζύμων σε τέτοιο βαθμό ώστε να μην επιβιώσουν παθογόνοι και αλλοιογόνοι μικροοργανισμοί, αλλά και να μην υποβαθμίζεται ποιοτικά το τρόφιμο. Η μικροβιακή καταστροφή σε υψηλές θερμοκρασίες (με χρήση υγρής θέρμανσης) πραγματοποιείται με έναν μηχανισμό μετουσίωσης πρωτεϊνών, σημαντικών για την ανάπτυξη και την επιβίωση του μικροβιακού κυττάρου. Η αδρανοποίηση των ενζύμων στις ίδιες συνθήκες προκαλείται από την καταστροφή της δομής τους και έχει σαν συνέπεια την μη δραστηριότητά τους επί των τροφίμων. Οι θερμικές επεξεργασίες χωρίζονται ανάλογα με την ένταση της θερμικής καταπόνησης που υπόκεινται τα τρόφιμα, σε ζεμάτισμα, παστερίωση και αποστείρωση (Μπλούκας 2004).

I.2.2 Ιστορική αναδρομή

Επί αιώνες οι άνθρωποι προσπαθούσαν να συντηρήσουν τα τρόφιμα που παρήγαγαν, λόγω της αλλοίωσης που παρατηρούσαν σε αυτά μετά το πέρας ορισμένου χρόνου. Οι τρόποι που είχαν εφεύρει για να παρατείνουν το χρόνο ζωής των τροφίμων ήταν το πάστωμα, το κάπνισμα, η ξήρανση, η τοποθέτηση τροφίμων σε λίπος ή ξύδι και η χρήση χαμηλών θερμοκρασιών (τοποθέτηση τροφίμων στο χιόνι). Εκτός από τα παραπάνω γινόταν και χρήση της θερμότητας όχι όμως ως κύρια διεργασία συντήρησης, αλλά ως βοηθητική, όπως παραδείγματος χάρη για την επίσπευση της

ξήρανσης και το μαγείρεμα των πρώτων υλών για την παρασκευή των γευμάτων. Σε καμία περίπτωση όμως η θερμική επεξεργασία δεν χρησιμοποιούνταν σαν τεχνική επιμήκυνσης του χρόνου ζωής εγκυτωμένων τροφίμων. Οι πρώτες επιτυχημένες προσπάθειες για την παρασκευή εγκυτωμένων τροφίμων έγιναν από τον Nicholas Appert (1749-1841) το 1810 (Εικόνα 1) (Heldman 2011).

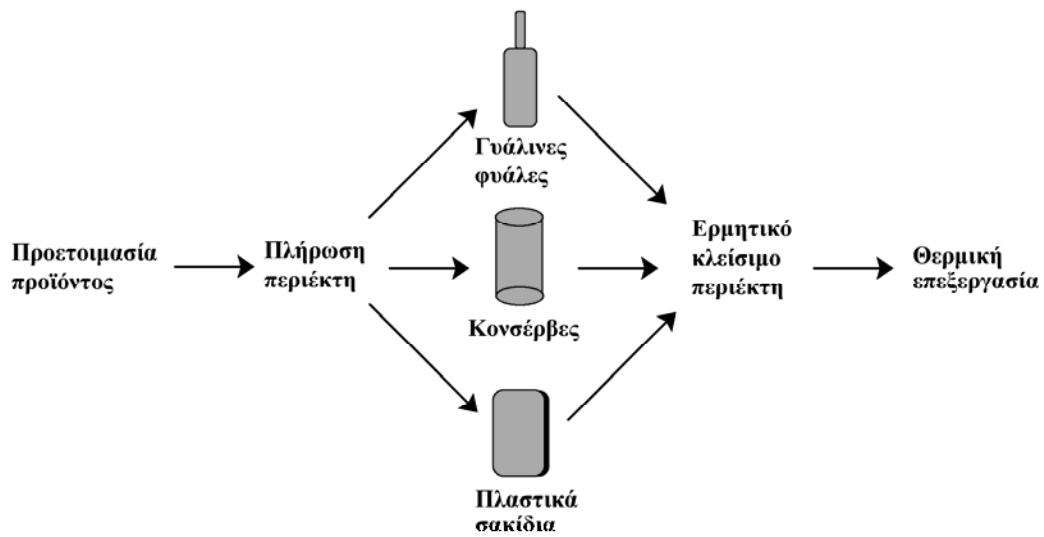


Εικόνα 1. Nicholas Appert (1749-1841) (https://en.wikipedia.org/wiki/Nicholas_Appert)

Την εποχή εκείνη οι χώρες της Ευρώπης βρίσκονταν σε συνεχή εμπόλεμη κατάσταση και ο Ναπολέων Βοναπάρτης είχε διαπιστώσει το πρόβλημα του ανεφοδιασμού των στρατευμάτων του, ειδικά όταν βρίσκονταν αρκετά μακριά από γαλλικά εδάφη. Για αυτό το λόγο πρόσφερε 12.000 φράγκα, σε όποιον κατάφερνε να επινοήσει μια μέθοδο διατήρησης τροφίμων για μεγάλο χρονικό διάστημα, έτσι ώστε να καλυφθούν οι διατροφικές ανάγκες των στρατιωτών του. Η μόνη επιτυχημένη επινοήση ήταν του Nicholas Appert, ο οποίος εγκυτίωσε σε γυάλινα βάζα τρόφιμα, έκλεισε τους περιέκτες με φελλούς και σφράγισε με βουλοκέρι και έπειτα θέρμανε τα δοχεία σε βραστό νερό. Τα βάζα δόθηκαν στον γαλλικό στρατό και τα εγκυτωμένα τρόφιμα καταναλώθηκαν μετά από αρκετό χρονικό διάστημα, χωρίς να έχουν αλλοιωθεί ή να έχουν χάσει τη φρεσκάδα τους. Ο Βοναπάρτης αντάμειψε τον Appert και ο δεύτερος με το ποσό της αμοιβής κατασκεύασε ένα εργοστάσιο υαλουργίας, το οποίο όμως καταστράφηκε στο τέλος των ναπολεόντειων πολέμων. Μέχρι και σήμερα εφαρμόζεται η ιδέα του Appert για κονσερβοποίηση των τροφίμων, κάτι το οποίο φαίνεται και στην Εικόνα 2. Για την πρωτοποριακή, αλλά και ταυτόχρονα διαχρονική ιδέα του, σήμερα ο Nicholas Appert είναι γνωστός ως “Πατέρας της Κονσερβοποιίας” (“Father of Canning”).

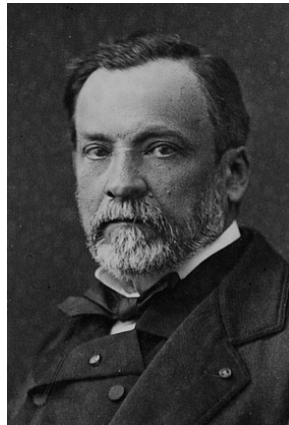
(<http://www.hyperhistory.net/apwh/bios/b2appert.htm>)

Έπειτα από περίπου 50 χρόνια ένας άλλος γάλλος και πρωτοποριακός επιστήμονας ο Louis Pasteur (1822-1895) ανακάλυψε ότι η αιτία για την αλλοίωση των τροφίμων είναι η ανάπτυξη αλλοιογόνων μικροοργανισμών.



Εικόνα 2. Κονσερβοποίηση τροφίμων (Μπλούκας 2004)

Επίσης ο Pasteur (Εικόνα 3) σε πειράματα που έκανε θερμαίνοντας γάλα απέδειξε ότι είχαν θανατωθεί όλοι οι μικροοργανισμοί και το υγρό τρόφιμο πλέον μπορούσε να διατηρηθεί για μεγάλο χρονικό διάστημα. Η διαδικασία που εφάρμοσε ο Pasteur ονομάστηκε παστερίωση και είναι μία από τις πιο συνηθισμένες θερμικές διεργασίες που εφαρμόζονται στη βιομηχανία τροφίμων.



Εικόνα 3. Louis Pasteur (1822-1895) (https://en.wikipedia.org/wiki/Louis_Pasteur)

Από την εποχή του Appert μέχρι τον Pasteur και τα τέλη του 19ου αιώνα η ερευνητική δραστηριότητα στον τομέα των θερμικών διεργασιών αναπτυσσόταν με πολύ αργούς ρυθμούς. Το 1897 οι Samuel Prescott (1872-1962) και William Underwood (1864-1929) ήταν οι πρώτοι στην έρευνα των θερμικών επεξεργασιών που ανέλυσαν μικροβιολογικά κονσερβοποιημένα τρόφιμα και πρότειναν νέες μεθόδους στην κατασκευή, σφράγιση και θέρμανση των κονσερβών. Τη δεκαετία του

1920 ο Willard Dell Bigelow (1866-1939) το 1922 και ο Charles Olin Ball (1893-1970) το 1923 έθεσαν τις βάσεις για ποσοτικοποίηση της έντασης της θερμικής επεξεργασίας των κονσερβοποιημένων τροφίμων (Bigelow 1920).



Εικόνα 4. Charles Olin Ball (1893-1970) (https://en.wikipedia.org/wiki/C._Olin_Ball)

Επίσης το 1957 οι Charles Olin Ball (Εικόνα 4) and Franklyn Carl Wester Olson (1910-) εξέδωσαν ένα βιβλίο (“Sterilization in Food Technology”) (Ball and Olson 1957) στο οποίο έκαναν εκτενή αναφορά στην ποσοτικοποίηση της εφαρμοζόμενης θερμικής επεξεργασίας, ενώ μεταξύ άλλων εισήγαγαν για πρώτη φορά την μέτρηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της κονσέρβας με θερμοζεύγος. Λίγο αργότερα το 1965 ο Charles Raymond Stumbo (1914-1989) με το βιβλίο του “Thermobacteriology in Food Processing” (Stumbo 1973) ανέφερε προτεινόμενους χρόνους θέρμανσης έτσι ώστε τα παραγόμενα εγκυτιωμένα προϊόντα να είναι μικροβιολογικώς σταθερά.



Εικόνα 5. Charles Raymond Stumbo (1914-1989)
(https://en.wikipedia.org/wiki/University_of_Massachusetts_Amherst_Department_of_Food_Science)

Από την ερευνητική δραστηριότητα των παραπάνω ερευνητών και μέχρι σήμερα δεκάδες εργασίες έχουν δημοσιευθεί, με τις οποίες γίνεται μια όσο το δυνατό εμπειριστατωμένη περιγραφή της θερμικής επεξεργασίας εγκυτιωμένων τροφίμων και

της επίδρασής της επί της μικροχλωρίδας, αλλά και των ποιοτικών χαρακτηριστικών των τροφίμων (Heldman 2011).

1.2.3 Αντιπροσωπευτική γραμμή παραγωγής κονσερβοποιημένου τροφίμου

Η θερμική επεξεργασία, όπως αναφέρθηκε παραπάνω στόχο έχει να αποτρέψει μικροβιολογικές και ενζυμικές αλλοιώσεις του τροφίμου για όσο το δυνατό μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Η κονσερβοποίηση τροφίμων εφαρμόζεται σε βιομηχανική κλίμακα με μια σειρά από βήματα, έτσι ώστε να επιτευχθεί ο παραπάνω στόχος. Τα τυπικά βήματα της κονσερβοποίησης φαίνονται στην Εικόνα 6.



Εικόνα 6. Τυπικά στάδια κονσερβοποίησης (Heldman 2011)

Αρχικά τα αγροτικά προϊόντα συγκομίζονται και μεταφέρονται στη βιομηχανική μονάδα επεξεργασίας. Εκεί η πρώτη ύλη παραλαμβάνεται και καθαρίζεται από ξένα σώματα με νερό. Έπειτα γίνεται ταξινόμηση της πρώτης ύλης σε ποιοτικές βαθμίδες ανάλογα το μέγεθος, το χρώμα, την υφή κ.α. Ακολουθεί το ζεμάτισμα του τροφίμου έτσι ώστε να διευκολυνθεί στη συνέχεια η διαδικασία της αποφλοιώσης και της εκπυρήνωσης. Έπειτα αρχίζουν τα κύρια στάδια της κονσερβοποίησης. Οι περιέκτες γεμίζονται με το επεξεργασμένο τρόφιμο και το υγρό πληρώσεως (π.χ. άλμη ή σιρόπι) και έπειτα προθερμαίνονται ώστε να αφαιρεθεί ο αέρας από τις κονσέρβες και να δημιουργηθεί κενό. Στη συνέχεια οι κονσέρβες σφραγίζονται και οδηγούνται σε

αυτόκλειστο για να θερμανθούν. Μετά το απαιτούμενο χρόνο θέρμανσης οι κονσέρβες εμβαπτίζονται σε κρύο νερό για να ψυχθούν. Μετά τη διαδικασία του κύκλου θέρμανσης – ψύξης ακολουθεί η επικόλλησης ετικετών και η αποθήκευση μέχρι να κινηθεί προς την αγορά για κατανάλωση. Η παραπάνω διαδικασία δείχνει τα βασικά βήματα επεξεργασίας ενός τροφίμου που εγκυτιώνεται και επεξεργάζεται θερμικά. Στην βιομηχανική πρακτική ορισμένα από τα παραπάνω βήματα δεν είναι απαραίτητα και παραλείπονται ή σε άλλες περιπτώσεις προστίθενται διεργασίες ώστε το τελικό προϊόν να έχει συγκεκριμένα επιθυμητά ποιοτικά χαρακτηριστικά (Heldman 2011).

1.2.4 Ανασκόπηση θερμικών επεξεργασιών

Η χρήση υψηλών θερμοκρασιών στην επεξεργασία των τροφίμων εφαρμόζεται για να διασφαλίσει τη μέγιστη μικροβιολογική και ενζυμική σταθερότητα και μερικές φορές για να προσδώσει συγκεκριμένα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά. Οι υψηλές θερμοκρασίες και ο χρόνος θέρμανσης χρησιμοποιούνται σε ένα μεγάλο εύρος τιμών, για τα διάφορα τρόφιμα. Ο χρόνος και η τιμή της θερμοκρασίας θέρμανσης καθορίζουν την ένταση της θερμικής επεξεργασίας, στην οποία υπόκεινται ένα τρόφιμο. Βάση της έντασης της θερμικής επεξεργασίας γίνεται ο διαχωρισμός των θερμικών διεργασιών σε ήπιες και έντονες. Οι ήπιες θερμικές διεργασίες είναι το ζεμάτισμα και η παστερίωση, ενώ οι έντονες θερμικές διεργασίες είναι το μαγείρεμα και η αποστείρωση. (Rahman 2007)

1.2.4.1 Ζεμάτισμα

Το ζεμάτισμα είναι μια θερμική διεργασία που εφαρμόζεται στα τρόφιμα πριν καταψυχθούν, αφυδατωθούν ή κονσερβοποιηθούν. Ο στόχος του ζεματίσματος εξαρτάται από την επεξεργασία που θα ακολουθηθεί στο τρόφιμο. Το ζεμάτισμα εφαρμόζεται κυρίως πριν την κατάψυξη φρούτων και λαχανικών για την αδρανοποίηση ενζύμων, που προκαλούν καστανώση στα κατεψυγμένα τρόφιμα. Επίσης πριν την κονσερβοποίηση φρούτων το ζεμάτισμα βοηθά στην αποφλοίωση και στο μαλάκωμα των φρούτων ώστε να είναι ευκολότεροι οι μετέπειτα χειρισμοί. Ένζυμα στόχοι κατά τη διάρκεια του ζεματίσματος είναι η υπεροξειδάση και η καταλάση. Η επίτευξη της αδρανοποίησης αυτών των ενζύμων συνεπάγεται την αδρανοποίηση και των υπολοίπων ενζύμων που προκαλούν ποιοτική υποβάθμιση στα τρόφιμα. Το ζεμάτισμα πραγματοποιείται με τη χρήση ζεστού νερού θερμοκρασίας περίπου 100 °C και ο χρόνος του ζεματίσματος κυμαίνεται από 1 min έως 3-5 min. Τα

τρόφιμα που υπόκεινται σε ζεμάτισμα εμβαπτίζονται στο ζεστό νερό για τον αντίστοιχο χρόνο και έπειτα είτε καταψύχονται αμέσως, είτε μεταφέρονται για το επόμενο στάδιο επεξεργασίας και κρυώνουν λόγω της επίδρασης της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος (Rahman 2007).

1.2.4.2 Παστερίωση

Μια από τις σημαντικότερες θερμικές διεργασίες που εφαρμόζονται στα τρόφιμα είναι η παστερίωση. Ο στόχος της παστερίωσης είναι η καταστροφή όλων των παθογόνων μικροοργανισμών και η μείωση του πληθυσμού άλλων μικροοργανισμών. Ως θερμική επεξεργασία, η παστερίωση δεν αρκεί ώστε το παραγόμενο προϊόν να αποθηκευθεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, γι' αυτό απαραίτητη είναι η χρήση επιπλέον μεθόδων επεξεργασίας και αποθήκευσης, όπως η προσθήκη συντηρητικών ουσιών ή η αποθήκευση υπό ψύξη αντίστοιχα. Για να επιτευχθεί η παστερίωση είναι απαραίτητος ο κατάλληλος συνδυασμός θερμοκρασίας – χρόνου θέρμανσης. Χαρακτηριστικοί συνδυασμοί θερμοκρασίας – χρόνου θέρμανσης που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανική πρακτική για την παστερίωση π.χ. του γάλακτος είναι: 62,8°C για 30 min και 71,7°C για 15 s. Τα παραπάνω ζεύγη θερμοκρασίας – χρόνου θέρμανσης υπολογίστηκαν με βάση τον μικροοργανισμό στόχο, ο οποίος για την παστερίωση του γάλακτος είναι ένα παθογόνο βακτήριο το *Coxiella burnetti*. Το *Coxiella burnetti* είναι ένα Gram⁻ βακτήριο και είναι υπεύθυνο για τον πυρετό Q. Επίσης η επιτυχημένη παστερίωση του γάλακτος ελέγχεται με την ύπαρξη της αλκαλικής φωσφατάσης ενός ενζύμου που βρίσκεται στο αρχικό γάλα, αλλά καταστρέφεται με την επίδραση της θέρμανσης κατά τη διάρκεια της παστερίωσης. Σε άλλα τρόφιμα για να επιτευχθεί η παστερίωση χρησιμοποιούνται διαφορετικά ζεύγη θερμοκρασίας – χρόνου θέρμανσης και αυτό εξαρτάται από το ίδιο το τρόφιμο, τον μικροοργανισμό στόχο και τις μετέπειτα συνθήκες αποθήκευσης του τροφίμου. Από τα παραπάνω γίνεται σαφές ότι η παστερίωση είναι μια ήπια θερμική επεξεργασία που δεν υποβαθμίζει ποιοτικά τα παραγόμενα προϊόντα, λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών που χρησιμοποιούνται. Τέλος, για την παστερίωση χρησιμοποιούνται μηχανήματα που ονομάζονται παστεριωτήρες και αποτελούνται από τον εναλλάκτη θερμότητας, τον σωλήνα κατακράτησης και τον εναλλάκτη ψύξης (Rahman 2007).

1.2.4.3 Αποστείρωση

Αποστειρωμένο είναι ένα τρόφιμο στο οποίο έχουν καταστραφεί όλες οι βλαστικές μορφές των μικροβιακών κυττάρων, καθώς και τα σπόριά τους. Η θερμική επεξεργασία που εξασφαλίζει αυτή τη συνθήκη είναι η αποστείρωση. Στη τεχνολογία της κονσερβοποίησης δεν είναι απαραίτητη η καταστροφή όλων των μικροοργανισμών και των σπορίων τους, κατά απόλυτη έννοια. Στην πραγματικότητα είναι δυνατή η επιβίωση σπορίων αρκεί να είναι αδύνατο να βλαστήσουν και να αναπτυχθούν στο περιβάλλον που θα αποθηκευτεί το τρόφιμο. Βάση αυτού του χαρακτηριστικού η θερμική επεξεργασία που εφαρμόζεται είναι η εμπορική αποστείρωση, που στόχο έχει τη θανάτωση όλων των βλαστικών μορφών και των σπορίων των μικροβίων που μπορούν να αναπτυχθούν και να αλλοιώσουν το τρόφιμο. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ένταση της θερμικής επεξεργασίας του τροφίμου είναι το pH, η ύπαρξη ή μη πρόσθετων υλών, η ενεργότητα του νερού (a_w), η σύσταση του τροφίμου, ο αριθμός και το είδος των μικροοργανισμών που περιέχονται στο τρόφιμο και η φάση ανάπτυξης αυτών των μικροοργανισμών. Για το σχεδιασμό της εφαρμοζόμενης θερμικής επεξεργασίας απαραίτητη είναι η γνώση όλων των παραπάνω παραγόντων. Η επίδραση του pH στη θερμική επεξεργασία είναι πολύ σημαντική και για αυτό το λόγο τα τρόφιμα χωρίζονται σε: χαμηλής οξύτητας με $pH > 4,5$, μέσης οξύτητας με $4,2 < pH \leq 4,5$, όξινα με $3,8 < pH \leq 4,2$ και υψηλής οξύτητας με $pH \leq 3,8$. Επειδή οι περισσότεροι μικροοργανισμοί, για την ανάπτυξή τους έχουν “optimum” τιμές $pH > 6$, σε αυτές τις περιπτώσεις απαιτείται η πλήρης αποστείρωση. Σε τρόφιμα χαμηλής και μέσης οξύτητας είναι δυνατόν να αναπτυχθούν στελέχη σποριογόνων βακτηρίων, συνεπώς ο σχεδιασμός της θερμικής επεξεργασίας γίνεται με μικροοργανισμό στόχο το πιο θερμοανθεκτικό σποριογόνο βακτήριο που είναι το *Clostridium sporogenes* PA 3679. Η μείωση του αριθμού των σπορίων κατά 12 λογαριθμικούς κύκλους, με την επίδραση της θερμότητας καθιστά το τρόφιμο ασφαλές και σταθερό μικροβιολογικά για μεγάλο χρονικό διάστημα. Στα όξινα τρόφιμα η ανάπτυξη των σποριογόνων βακτηρίων είναι αδύνατη με αποτέλεσμα η θερμική επεξεργασία να είναι ηπιότερη. Στις περιπτώσεις αυτές η θερμική επεξεργασία σχεδιάζεται για την καταστροφή λιγότερο θερμοανθεκτικών μικροοργανισμών. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι διάφορα είδη του γένους *Clostridium* και *Bacillus*, όπως το *C. butyricum* και το *B. coagulans*. Επίσης η εμπορική αποστείρωση σαν διεργασία συντήρησης είναι ικανή από μόνη της να επιτύχει μεγάλους χρόνους σταθερότητας χωρίς την συνέργια άλλων μορφών συντήρησης, όπως για παράδειγμα τη χρήση χαμηλών θερμοκρασιών κατά την

αποθήκευση. Αυτό οφείλεται στη θανατηφόρο δράση της θερμότητας, αλλά και το γεγονός ότι ο περιέκτης δεν έρχεται σε άμεση επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον. Η θέρμανση κατά τη διάρκεια της εμπορικής αποστείρωσης μπορεί να γίνει με κορεσμένο ατμό, νερό σε θερμοκρασία βρασμού ή φλόγα από καύση υδρογονανθράκων. Συνήθως στις θερμικές επεξεργασίες τροφίμων χαμηλής οξύτητας χρησιμοποιείται ατμός υπό πίεση. Η θέρμανση των τροφίμων πραγματοποιείται σε κλιβάνους και έπειτα οι περιέκτες μεταφέρονται και εμβαπτίζονται σε κρύο νερό για να ψυχθούν. Το θανατηφόρο αποτέλεσμα της εμπορικής αποστείρωσης επί των μικροοργανισμών θα αναλυθεί σε παρακάτω παράγραφο.

Επίσης για τη βελτίωση των παραγόμενων εμπορικά αποστειρωμένων προϊόντων επινοήθηκε η χρήση υψηλότερων θερμοκρασιών για μικρότερο χρόνο θέρμανσης (HTST) σε σχέση με την κλασική κονσερβοποίηση. Με τη χρήση της νέας αυτής μεθόδου η υποβάθμιση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του τροφίμου γίνεται σε μικρότερο βαθμό. Η μέθοδος HTST χρησιμοποιείται και στην παστερίωση με τα ίδια θετικά αποτελέσματα (Rahman 2007).

1.3 Μικροβιακή καταστροφή κατά τη θερμική επεξεργασία

1.3.1 Κινητική της μικροβιακής καταστροφής σε σχέση με το χρόνο θέρμανσης

Κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας μικροβιακά κύτταρα, σπόρια μικροοργανισμών και ένζυμα καταστρέφονται, έτσι ώστε το παραγόμενο προϊόν να είναι μικροβιολογικά και ενζυμικά σταθερό για μεγάλο χρονικό διάστημα. Επίσης ταυτόχρονα με τη θερμική καταστροφή επιβλαβών μικροβίων και ενζύμων καταστρέφονται θρεπτικά συστατικά και ευαίσθητα ποιοτικά χαρακτηριστικά του τροφίμου. Κατά κύριο λόγο, η ποσοτική μείωση όλων των παραπάνω χαρακτηριστικών ακολουθεί κινητική πρώτης τάξεως. Αυτό μαθηματικά εκφράζεται ως εξής:

$$-\frac{dc}{dt} = k \cdot c \quad \text{Εξίσωση 1}$$

όπου dc : η μείωση της συγκέντρωσης του μικροβιακού φορτίου σε χρόνο dt , c : η συγκέντρωση του μικροβιακού φορτίου και k : η σταθερά πρώτης τάξεως του ρυθμού μείωσης του μικροβιακού φορτίου.

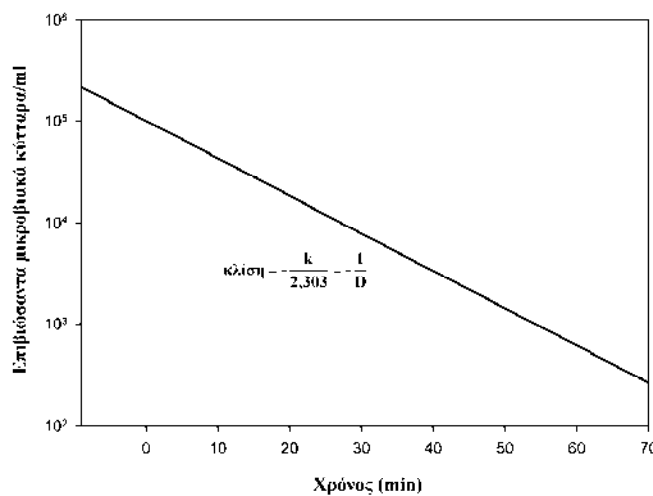
Ολοκληρώνοντας την εξίσωση 1, για c_0 σε χρόνο $t_0=0$ και c σε χρόνο t , βρίσκεται ότι:

$$-\int_{c_0}^c \frac{dc}{c} = k \int_{t_0}^t dt \Rightarrow -\ln c + \ln c_0 = k(t - t_0) \Rightarrow$$

$$\log c = \log c_0 - \frac{k \cdot t}{2.303}$$

Εξίσωση 2

Εάν θεωρηθεί ότι $c_0=10^5$ μικροβιακά κύτταρα / ml, τότε η γραφική απεικόνιση της εξίσωσης 2 για τη θερμική καταστροφή μικροοργανισμών φαίνεται στο διάγραμμα 1. Η ευθεία που σχηματίζεται στο διάγραμμα 1 δείχνει τη μείωση του ζώντων μικροβίων σε λογαριθμική κλίμακα σε σχέση με το χρόνο θέρμανσης.



Διάγραμμα 1. Πρώτης τάξεως κινητική μικροβιακής καταστροφής

Από αυτή την ευθεία και την εξίσωση 2 φαίνεται ότι ο υπο-δεκαπλασιασμός των επιβιώσαντων μικροβιακών κυττάρων πραγματοποιείται σε χρόνο $t=2,303/k$. Ο χρόνος αυτός ονομάζεται τιμή D, ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για να μειωθεί το μικροβιακό φορτίο κατά 90% και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$D = -\frac{1}{\text{κλίση της ευθείας}} = \frac{2,303}{k}$$

Εξίσωση 3

Η τιμή D μαζί με την τιμή z, που θα αναφερθεί παρακάτω είναι τα χαρακτηριστικά θερμο-ανθεκτικότητας ενός μικροοργανισμού και χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό κάθε θερμικής επεξεργασίας (Karel and Lund 2003).

1.3.2 Επίδραση της θερμοκρασίας στην κινητική της μικροβιακής καταστροφής

Για την περιγραφή της επίδρασης της θερμοκρασίας στη μικροβιακή καταστροφή αναπτύχθηκαν τρία μοντέλα: α) το μοντέλο Arrhenius, β) το μοντέλο του χρόνου

θερμικού θανάτου (TDT) και γ) το μοντέλο Q_{10} . Αυτά τα οποία χρησιμοποιούνται είναι το μοντέλο Arrhenius και το μοντέλο TDT. Επομένως ο ρυθμός μείωσης του μικροβιακού φορτίου σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση Arrhenius:

$$k = s \cdot e^{\frac{-E_a}{R \cdot T}} \quad \text{Εξίσωση 4}$$

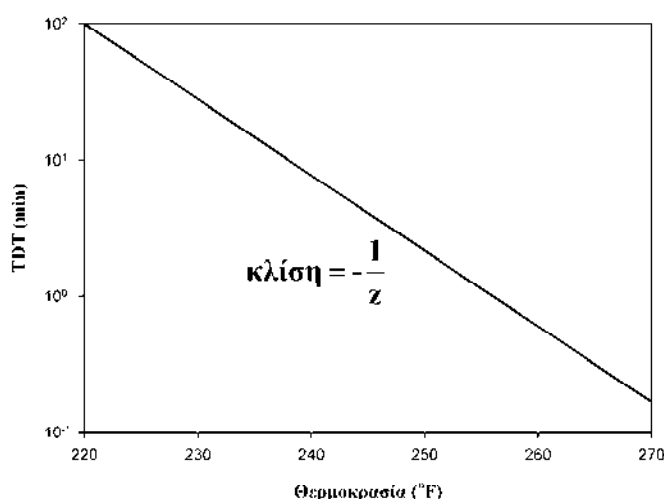
Εάν στην εξίσωση 4 θεωρηθεί ότι ο ρυθμός k_1 αντιστοιχεί σε θερμοκρασία T_1 , τότε ισχύει ότι:

$$k_1 = s \cdot e^{\frac{-E_a}{R \cdot T_1}} \quad \text{Εξίσωση 5}$$

Διαιρώντας τις εξισώσεις 4 και 5 και λογαριθμίζοντας τα δύο μέλη της εξίσωσης που παράγεται ισχύει ότι:

$$\log \frac{k}{k_1} = \frac{-E_a}{2,303 \cdot R} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_1} \right) = \frac{-E_a}{2,303 \cdot R} \cdot \left(\frac{T_1 - T}{T_1 \cdot T} \right) \quad \text{Εξίσωση 6}$$

Ο δεκαδικός λογάριθμος του χρόνου θερμικού θανάτου σε σχέση με την αύξηση της θερμοκρασίας φαίνεται να μειώνεται γραμμικά. Μια χαρακτηριστική καμπύλη του χρόνου θερμικού θανάτου σε σχέση με τη θερμοκρασία παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 2. Από την κλίση της ευθείας που σχηματίζεται υπολογίζεται η τιμή z , η οποία σχετίζεται με την σταθερά του ρυθμού μείωσης του μικροβιακού φορτίου.



Διάγραμμα 2. Καμπύλη χρόνου θερμικού θανάτου (TDT)

Επομένως μια TDT καμπύλη μπορεί να περιγραφεί από την παρακάτω εξίσωση:

$$\log\left(\frac{\mathbf{TDT}_1}{\mathbf{TDT}_2}\right) = \frac{\mathbf{T}_2 - \mathbf{T}_1}{\mathbf{z}} \quad \text{Εξίσωση 7}$$

όπου $\mathbf{TDT}_1(\text{min})$: ο χρόνος θερμικού θανάτου σε θερμοκρασία $\mathbf{T}_1(^{\circ}\text{F})$, $\mathbf{TDT}_2(\text{min})$: ο χρόνος θερμικού θανάτου σε θερμοκρασία $\mathbf{T}_2(^{\circ}\text{F})$, \mathbf{z} : η αύξηση της θερμοκρασίας ($^{\circ}\text{F}$) που απαιτείται για να μειωθεί ο χρόνος θερμικού θανάτου κατά ένα λογαριθμικό κύκλο.

Στην εξίσωση 7 εάν αντικατασταθεί ο χρόνος θερμικού θανάτου με τον δεκαδικό χρόνο μείωσης του μικροβιακού φορτίου \mathbf{D} , τότε ισχύει ότι:

$$\log\left(\frac{\mathbf{D}}{\mathbf{D}_1}\right) = \frac{\mathbf{T}_1 - \mathbf{T}}{\mathbf{z}} \quad \text{Εξίσωση 8}$$

Γνωρίζοντας ότι το \mathbf{k} σχετίζεται με το \mathbf{D} σύμφωνα με την εξίσωση 3, τότε ισχύει ότι:

$$\log\left(\frac{\mathbf{k}_1}{\mathbf{k}}\right) = \frac{\mathbf{T}_1 - \mathbf{T}}{\mathbf{z}} \Rightarrow \log\left(\frac{\mathbf{k}}{\mathbf{k}_1}\right) = \frac{1}{\mathbf{z}} \cdot (\mathbf{T} - \mathbf{T}_1) \quad \text{Εξίσωση 9}$$

Ο χρόνος θερμικού θανάτου (Thermal Death Time) ορίζεται ως $\mathbf{TDT} = \mathbf{F}_{\mathbf{T}_{\text{ref}}}^z \cdot 10^{\frac{\mathbf{T}_{\text{ref}} - \mathbf{T}}{\mathbf{z}}}$, min, όπου $\mathbf{F}_{\mathbf{T}_{\text{ref}}}^z$ είναι ο ισοδύναμος χρόνος θερμικής επεξεργασίας και ορίζεται στο κεφάλαιο I.6.

Σε αυτό το σημείο εάν γίνουν οι κατάλληλες τροποποιήσεις στην εξίσωση 9, δηλαδή να μετατραπούν οι θερμοκρασίες από ($^{\circ}\text{F}$) σε (K) και θεωρηθεί ότι για μικρά εύρη τιμών της θερμοκρασίας το μοντέλο Arrhenius μπορεί να συμπίπτει με το μοντέλο TDT, τότε οι εξισώσεις 6 και 9 μπορούν να εξισωθούν. Το αποτέλεσμα των δύο εξισώσεων θα είναι το εξής:

$$\frac{\mathbf{E}_a}{2,303 \cdot \mathbf{R}} \cdot \left(\frac{\mathbf{T}_1 - \mathbf{T}}{\mathbf{T}_1 \cdot \mathbf{T}}\right) = \left(\frac{\mathbf{T} - \mathbf{T}_1}{\mathbf{z}}\right) \cdot \left(\frac{9}{5}\right) \Rightarrow \mathbf{E}_a = \frac{2,303 \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{T} \cdot \mathbf{T}_1}{\mathbf{z}} \cdot \left(\frac{9}{5}\right) \quad \text{Εξίσωση 10}$$

όπου \mathbf{T}_1 : θερμοκρασία αναφοράς (K), \mathbf{T} : θερμοκρασία (K), \mathbf{z} : $-1/\text{κλίση}$ της ευθείας TDT ($^{\circ}\text{F}$), (9/5) συντελεστής μετατροπής από $^{\circ}\text{F}$ σε $^{\circ}\text{C}$

Τέλος ένας άλλος όρος που περιγράφει αντιδράσεις βιολογικών συστημάτων με μεταβολή της θερμοκρασίας είναι η τιμή \mathbf{Q} . Η τιμή \mathbf{Q} δείχνει την ταχύτητα απόδοσης μιας αντίδρασης σε θερμοκρασία \mathbf{T}_1 σε σχέση με μια μικρότερη θερμοκρασία \mathbf{T}_2

($Q=k_1/k_2$). Στην περίπτωση όπου η διαφορά μεταξύ των δύο θερμοκρασιών είναι 10 °C, τότε η τιμή Q ονομάζεται Q_{10} και η σχέση της με την τιμή z είναι η ακόλουθη:

$$z = \frac{10}{\log(Q_{10})} \quad \text{Εξίσωση 11}$$

όπου z : η αύξηση της θερμοκρασίας (°C) που απαιτείται για να μειωθεί ο χρόνος θερμικού θανάτου κατά ένα λογαριθμικό κύκλο (Karel and Lund 2003).

1.3.3 Επίδραση της θερμοκρασίας στην κινητική της ενζυμικής αδρανοποίησης και της ποιοτικής υποβάθμισης των θερμικώς επεξεργασμένων τροφίμων

Κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας στόχος είναι η θανάτωση των μικροβίων που είναι υπεύθυνα για την αλλοίωση των εγκυτωμένων τροφίμων. Εκτός από τους ανεπιθύμητους αλλοιογόνους μικροοργανισμούς πολλές φορές η θερμική επεξεργασία στοχεύει σε ανεπιθύμητα ένζυμα που προκαλούν ποιοτική υποβάθμιση του τροφίμου. Επίσης θρεπτικά συστατικά του τροφίμου καταστρέφονται και φυσικές ιδιότητές του μεταβάλλονται με τη χρήση υψηλών θερμοκρασιών (πχ η υφή των φρούτων υποβαθμίζεται με τη θέρμανση) και καθιστούν το τρόφιμο ποιοτικά υποβαθμισμένο και μη εμπορικό. Ο τρόπος με τον οποίο μελετάται η ενζυμική αδρανοποίηση και η υποβάθμιση θρεπτικών συστατικών ή φυσικών ιδιοτήτων του τροφίμου είναι όμοιος με αυτόν που μελετήθηκε η μικροβιακή θανάτωση. Έτσι για κάθε ένζυμο, θρεπτικό συστατικό ή οποιοδήποτε ποιοτικό χαρακτηριστικό υπολογίζονται τιμές D και z , με τις οποίες περιγράφεται η μείωση της αρχικής ποσότητας ενός χαρακτηριστικού. Ο υπολογισμός τέτοιου είδους μεγεθών, όπως D , z , E_a , σε σχέση με τη θερμοκρασία, το pH, την ενεργότητα νερού a_w δίνει τη δυνατότητα για συγκέντρωση και καταγραφή δεδομένων θερμο-ανθεκτικότητας ή θερμο-ευαισθησίας σε πίνακες. Οι πληροφορίες αυτές είναι χρήσιμες, έτσι ώστε στις σχεδιαζόμενες θερμικές επεξεργασίες να είναι δυνατός ο υπολογισμός εκτός από τους παράγοντες ασφάλειας και οι παράγοντες ποιοτικής υποβάθμισης των τροφίμων (Karel and Lund 2003).

1.4 Φαινόμενα μεταφοράς – Μεταφορά θερμότητας

Η μετάδοση θερμότητας είναι το πιο συχνό φαινόμενο μεταφοράς που συναντάται στην επεξεργασία των τροφίμων μιας και έχει εφαρμογή σε βασικές διεργασίες όπως: ψύξη, κατάψυξη, θερμική επεξεργασία, μαγείρεμα, παστερίωση, αποστείρωση, εξάτμιση και ξήρανση. Η θερμότητα μεταφέρεται από ή στο προϊόν μέσω ενός

ψυκτικού ή θερμαντικού μέσου αντίστοιχα και σκοπό έχει να επιβραδύνει ή και να ανακόψει τη μικροβιακή και ενζυματική δραστηριότητα, όπως επίσης να προσδώσει συγκεκριμένα επιθυμητά φυσικοχημικά χαρακτηριστικά στο τρόφιμο (χρώμα, άρωμα, υφή, κλπ).

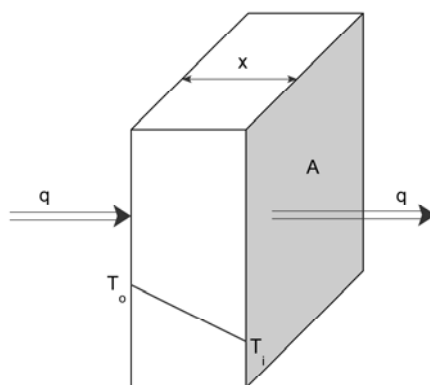
Η θερμότητα μεταδίδεται από και προς τα τρόφιμα με τρεις διαφορετικούς τρόπους, οι οποίοι είναι αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία. Εάν ο χρόνος δεν επηρεάζει το ρυθμό μεταφοράς της θερμότητας τότε ορίζεται ως σταθερή η κατάσταση (steady state), ενώ σε διαφορετική περίπτωση όπου η ροή της θερμότητας μεταβάλλεται με το πέρασμα του χρόνου ως μη σταθερή (unsteady state) (Singh and Heldman 2009).

1.4.1 Μεταφορά θερμότητας με αγωγή σε σταθερή κατάσταση

Η επαφή μεταξύ δύο στερεών σωμάτων διαφορετικής θερμοκρασίας προκαλεί τη μεταφορά θερμότητας από το θερμό προς το ψυχρό σώμα και η μεταφορά αυτή της θερμικής ενέργειας καλείται αγωγή. Η μαθηματική περιγραφή της μεταφοράς θερμότητας με αγωγή περιγράφεται από το νόμο του Fourier και απεικονίζεται από την εξίσωση 12, ενώ σχηματικά από την Εκόνα 7:

$$q_x = -k \cdot A \frac{dT}{dx} \quad \text{Εξίσωση 12}$$

όπου q_x : η ροή θερμότητας κατά τη διεύθυνση x στη μονάδα του χρόνου (W), A : η κάθετη επιφάνεια στη ροής της θερμότητας (m^2), k : ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας ($W/m \cdot K$), T : η θερμοκρασία ($^{\circ}C$) και x : η απόσταση που ρέει η θερμότητα (m).



Εικόνα 7. Μεταφορά θερμότητας με αγωγή από την μία επιφάνεια της πλάκας προς την άλλη

Στην Εικόνα 7 φαίνεται η μεταφορά της θερμικής ενέργειας από το σημείο της κάθετης πλευράς του στερεού σώματος, που έχει την υψηλή θερμοκρασία T_o προς το

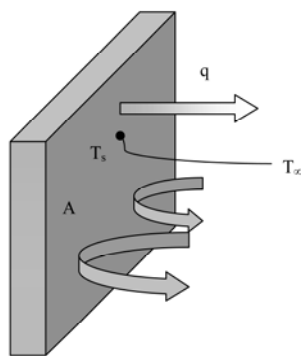
σημείο της απέναντι κάθετης πλευράς με τη χαμηλή θερμοκρασία T_i . Στη θερμοδυναμική τα σχήματα των σωμάτων που εξετάστηκαν και αποτελούν τη βάση για υπολογισμούς σε πολύπλοκα σχήματα είναι η πλάκα, ο κύλινδρος και η σφαίρα. Στον κύλινδρο και τη σφαίρα η εξίσωση 12 τροποποιείται έτσι ώστε να προσαρμοστεί στις χαρακτηριστικές διαστάσεις αυτών των σχημάτων (Singh and Heldman 2009).

1.4.2 Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή

Η ροή ενός ρευστού πάνω σε επιφάνεια στερεού διαφορετικής θερμοκρασίας προκαλεί τη μεταφορά θερμότητας από το θερμό ρευστό προς την ψυχρή επιφάνεια ή και αντίστροφα, δηλαδή από τη θερμή επιφάνεια προς το ψυχρό ρευστό. Η μαθηματική περιγραφή της ροής θερμότητας φαίνεται από την εξίσωση 13.

$$\mathbf{q} = \mathbf{h} \cdot \mathbf{A} \cdot (\mathbf{T}_s - \mathbf{T}_\infty) \quad \text{Εξίσωση 13}$$

όπου q : η ροή θερμότητας στη μονάδα του χρόνου (W), A : η επιφάνεια πάνω στην οποία ρέει το ρευστό (m^2), h : ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ($W/m^2 \cdot ^\circ C$), T_s : η θερμοκρασία του θερμού τοιχώματος ($^\circ C$) και T_∞ : η θερμοκρασία του ψυχρού ρευστού ($^\circ C$).



Εικόνα 8. Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή από την θερμή επιφάνεια ενός στερεού προς το ψυχρό ρευστό

Από την Εικόνα 8 φαίνεται ότι το ψυχρό ρευστό κινούμενο πάνω στη θερμή επιφάνεια του στερεού προσλαμβάνει θερμότητα με αποτέλεσμα να αυξάνεται η θερμοκρασία του. Η ροή του ρευστού κατά τη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή είναι ελεύθερη ή εξαναγκασμένη. Στην πρώτη περίπτωση, που ονομάζεται και φυσική κυκλοφορία η ροή είναι αποτέλεσμα της θέρμανσης του οριακού στρώματος του ρευστού με αποτέλεσμα τη μείωση της πυκνότητάς του και την κίνηση προς υψηλότερα στρώματα λόγω της άνωσης. Η κίνηση γίνεται πιο έντονη όσο

μεγαλύτερη είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της στερεής επιφάνειας και του οριακού στρώματος του ρευστού. Στην εξαναγκασμένη κίνηση το ρευστό κινείται στην επιφάνεια του στερεού λόγω της διαφοράς πίεσης μεταξύ του αρχικού και του τελικού σημείου της ροής, η οποία διαφορά πίεσης είναι αποτέλεσμα εξωτερικού παράγοντα (π.χ. χρήση αντλίας). Από την εξίσωση 13 ορίζεται το μέγεθος του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας h , μέγεθος το οποίο περιγράφει ποσοτικά την ταχύτητα με την οποία μεταφέρεται η θερμότητα από τη στερεή επιφάνεια προς το ρευστό ή το αντίστροφο. Ο υπολογισμός του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας γίνεται μέσω του αριθμού Nusselt, όπως φαίνεται στην εξίσωση 14.

$$Nu = \frac{h \cdot D}{k} \quad \text{Εξίσωση 14}$$

όπου Nu: ο αριθμός Nusselt, h : ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ($W/m^2 \cdot K$), D : η χαρακτηριστική διάσταση της ροής (m) και το k : ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του ρευστού ($W/m \cdot ^\circ C$).

Για να υπολογιστεί ο αριθμός Nu για το σύνολο των περιπτώσεων ισχύει ότι:

$$Nu = f(Re, Pr, Gr) \quad \text{Εξίσωση 15}$$

όπου Nu: ο αριθμός Nusselt, Re: ο αριθμός Reynolds, Pr: ο αριθμός Prandtl και Gr: ο αριθμός Grashof.

Στον Πίνακα 1 φαίνεται η μαθηματική διατύπωση των αριθμών Re, Pr και Gr.

Πίνακας 1. Εξισώσεις υπολογισμού αριθμών Re, Pr και Gr

Re	Pr	Gr
$Re = \frac{D \cdot u_m \cdot \rho}{\mu}$	$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{k}$	$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \rho^2 (T_s - T_\infty)}{\mu^2}$
<p>D: η χαρακτηριστική διάσταση (m) u_m: η μέση ταχύτητα του ρευστού (m/s) ρ: η πυκνότητα του ρευστού (kg/m^3) μ: το ιξώδες του ρευστού (Pa·s) C_p: η ειδική θερμότητα του ρευστού ($J/kg \cdot ^\circ C$) k: ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του ρευστού ($W/m \cdot ^\circ C$) g: η επιτάχυνση της βαρύτητας ($9,81 m/s^2$) β: ο συντελεστής θερμικής διαστολής ($1/^\circ C$) T_s: η θερμοκρασία της επιφάνειας του στερεού ($^\circ C$) T_∞: η θερμοκρασία του ρευστού ($^\circ C$)</p>		

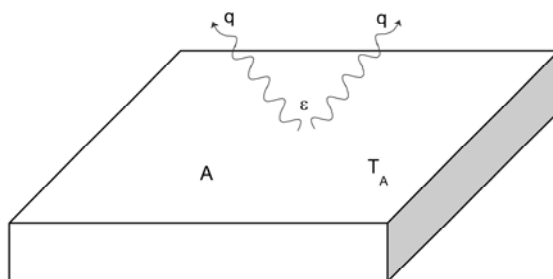
Η εξίσωση 15 ανάλογα με το σχήμα της επιφάνειας του στερεού, το είδους της ροής (ελεύθερη ή εξαναγκασμένη) και την ενδεχόμενη αλλαγή φάσης του ρευστού κατά τη διάρκεια της μεταφοράς θερμότητας (π.χ. συμπύκνωση υδρατμών) έχει διαφορετικό τύπο υπολογισμού του αριθμού Nu. Οι τύποι που χρησιμοποιούνται σε κάθε περίπτωση είναι εμπειρικοί και αναφέρονται στη βιβλιογραφία (Singh and Heldman 2009).

1.4.3 Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία

Η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία στηρίζεται στο γεγονός ότι κάθε σώμα με θερμοκρασία T_A εκπέμπει ενέργεια με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Επειδή η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μπορεί να μεταφέρεται και στο κενό, η ύπαρξη ύλης μεταξύ του εκπεμπόμενου και του απορροφούμενου σώματος δεν είναι απαραίτητη για τη μετάδοση θερμότητας, όπως είναι απαραίτητη στην αγωγή και τη συναγωγή. Στην Εικόνα 9 φαίνεται η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία από μια θερμή επιφάνεια στερεού σώματος προς το περιβάλλον. Επίσης έχει βρεθεί ότι η αύξηση της θερμοκρασίας της εκπεμπόμενης επιφάνειας αυξάνει και το ποσό της θερμότητας που μεταδίδεται μέσω της ακτινοβολίας. Η μαθηματική έκφραση για κάθε σώμα, αυτής της πρότασης γίνεται μέσω του νόμου των Stefan – Boltzmann και φαίνεται στην εξίσωση 16.

$$q = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot T_A^4 \quad \text{Εξίσωση 16}$$

όπου q : η ροή θερμότητας στη μονάδα του χρόνου (W), A : η επιφάνεια εκπομπής της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (m^2), σ : η σταθερά Stefan – Boltzmann ($5,670 \cdot 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$), ε : ο συντελεστής ικανότητας εκπομπής και T_A : η θερμοκρασία της επιφάνειας εκπομπής (K) (Singh and Heldman 2009).



Εικόνα 9. Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία από την θερμή επιφάνεια στερεού σώματος

1.4.4 Μεταφορά θερμότητας με αγωγή σε μη σταθερή κατάσταση

Σε πολλές περιπτώσεις θερμικών διεργασιών η μετάδοση θερμότητας γίνεται σε μη σταθερή κατάσταση. Η αποστείρωση μιας κονσέρβας, το ψήσιμο του ψωμιού κ.α. είναι χαρακτηριστικά παραδείγματα μετάδοσης θερμότητας σε μη σταθερή κατάσταση. Η μαθηματική αποτύπωση της μεταβολής της θερμοκρασίας σε σχέση με την απόσταση και το χρόνο φαίνεται στην εξίσωση 17.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \mathbf{a} \nabla^2 T \quad \text{Εξίσωση 17}$$

όπου \mathbf{a} : ο συντελεστής θερμικής διάχυσης ($\mathbf{a} = \frac{\mathbf{k}}{\rho \cdot C_p}$ Εξίσωση 18, m^2/s)

Η επίλυση προβλημάτων με μετάδοση θερμότητας σε μη σταθερή κατάσταση διευκολύνεται από τον αριθμό Biot (Bi), ο οποίος ορίζεται από την εξίσωση 19 και περιγράφει την αντίσταση που παρουσιάζει ένα σώμα στη ροή θερμότητας στο εσωτερικό του με αγωγή προς την αντίσταση στη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή από ένα ρευστό από την επιφάνεια του στερεού.

$$Bi = \frac{hx}{k} \quad \text{Εξίσωση 19}$$

όπου Bi : ο αριθμός Biot, h : ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$), k : ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του στερεού ($\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$) και x : η χαρακτηριστική διάσταση του στερεού (m).

Ανάλογα με την τιμή του αριθμού Biot μπορεί να θεωρηθεί εάν είναι σημαντική η εσωτερική, η εξωτερική αντίσταση ή και οι δύο. Σε όλες τις περιπτώσεις το ποσοστό της μη επιτευχθείσας μεταβολής της θερμοκρασίας σε χρόνο t , ως προς τη μέγιστη δυνατή μεταβολή της θερμοκρασίας “ θ ” εκφράζεται σαν μία συνάρτηση της θέσης του σημείου που υπολογίζεται η θερμοκρασία, της αντίστασης στη ροή θερμότητας και του χρόνου της διεργασίας. Η μαθηματική έκφραση αυτής της πρότασης φαίνεται στην εξίσωση 20.

$$\theta = \frac{T_\infty - T}{T_\infty - T_0} = f(\eta, Bi, Fo) \quad \text{Εξίσωση 20}$$

όπου T_∞ : η θερμοκρασία περιβάλλοντος ($^\circ\text{C}$), T : η θερμοκρασία στο ζητούμενο σημείο μετά από χρόνο t ($^\circ\text{C}$), T_0 : η αρχική θερμοκρασία του σώματος ($^\circ\text{C}$), η : η θέση

του σημείου ($\eta=x/x_1$), x_1 : η χαρακτηριστική διάσταση, Bi : ο αριθμός Biot και Fo : ο αριθμός Fourier που εκφράζει το χρόνο ($Fo = \frac{a \cdot t}{x_1^2}$)

Έχοντας γνωστά τη θέση του σημείου, την αντίσταση στη ροή της θερμότητας και το χρόνο t της διεργασίας είναι δυνατό μέσω εξισώσεων να υπολογιστεί η θερμοκρασία στο σημείο αυτό μετά από το χρόνο t . Όμοια μπορεί με την αντίστροφη πορεία να υπολογιστεί ο χρόνος που απαιτείται έτσι ώστε σε ένα σημείο η θερμοκρασία να γίνει ίση με T . Για να επιλυθούν προβλήματα με ροή θερμότητας σε ένα παραλληλεπίπεδο ισχύει ότι:

$$\Theta = \Theta_x \cdot \Theta_y \cdot \Theta_z = \frac{T_\infty - T_{x,y,z}}{T_\infty - T_0} \quad \text{Εξίσωση 21}$$

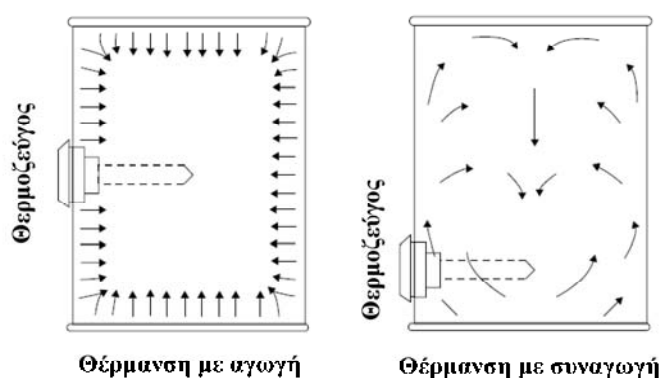
όπου $T_{x,y,z}$; η θερμοκρασία στο σημείο με συντεταγμένες (x,y,z) μετά την επίδραση της ροής της θερμότητας από τις τρεις διαστάσεις, $\Theta_x = \frac{T_\infty - T_x}{T_\infty - T_0}$, $\Theta_y = \frac{T_\infty - T_y}{T_\infty - T_0}$ και $\Theta_z = \frac{T_\infty - T_z}{T_\infty - T_0}$ (Singh and Heldman 2009, Bird et al 2007).

1.5 Θερμική διείσδυση κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας

Η θερμική επεξεργασία στα εγκυτιωμένα τρόφιμα εφαρμόζεται, όπως έχει αναφερθεί και πρωτύτερα για τη θανάτωση των μικροβίων που μπορούν να προκαλέσουν αλλοιώσεις στο προϊόν. Για τον υπολογισμό μιας επιτυχημένης θερμικής επεξεργασίας απαιτούνται τα χαρακτηριστικά θερμικής αντίστασης του μικροοργανισμού στόχου (D και z) και τα χρονο-θερμοκρασιακά δεδομένα του προϊόντος. Επειδή η θερμική επεξεργασία εγκυτιωμένων τροφίμων είναι μια διεργασία χρονικά μεταβαλλόμενη, η θερμοκρασία σε όλα τα σημεία του τροφίμου μεταβάλλεται. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η θερμοκρασία σε οποιοδήποτε σημείο του τροφίμου να είναι μια συνάρτηση (α) του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας από το θερμαντικό μέσο προς την εξωτερική πλευρά του περιέκτη, (β) των φυσικών ιδιοτήτων του τροφίμου και του περιέκτη, (γ) της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ θερμαντικού μέσου και αρχικής θερμοκρασίας του τροφίμου και (δ) του μεγέθους του περιέκτη. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι εάν το θερμαντικό μέσο είναι συμπυκνούμενοι υδρατμοί, τότε ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας είναι πολύ μεγάλος με αποτέλεσμα η εξωτερική αντίσταση του περιέκτη να θεωρείται αμελητέα

και η μόνη σημαντική αντίσταση στη μεταφορά θερμότητας να είναι η εσωτερική αντίσταση του τροφίμου.

Η θερμική διείσδυση στο τρόφιμο είναι πολύ σημαντική παράμετρος, λόγω του ότι μπορεί να υπολογιστεί το θερμικό αποτέλεσμα επί του μικροοργανισμού στόχου και να προσδιοριστεί το επίπεδο ασφάλειας του τελικού κονσερβοποιημένου προϊόντος. Για να είναι βέβαιο ότι το τελικό προϊόν είναι ασφαλές για κατανάλωση πρέπει ένα σημείο εντός του περιέκτη να έχει υποστεί το ελάχιστο θερμικό θανατηφόρο αποτέλεσμα για τον μικροοργανισμό στόχο μετά το πέρας του κύκλου θέρμανσης - ψύξης. Το σημείο ή η περιοχή που δέχεται το μικρότερο θερμικό θανατηφόρο αποτέλεσμα λέγεται κρίσιμο σημείο ή κρίσιμη ζώνη. Επίσης ένα άλλο σημείο εντός του περιέκτη θερμαίνεται, κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας, λιγότερο σε σχέση με τα υπόλοιπα σημεία. Το σημείο αυτό ονομάζεται αργότερα θερμαινόμενο σημείο ή ζώνη (slowest heating point or zone, SHP – SHZ). Όταν το τρόφιμο είναι στερεό και καλύπτει το σύνολο του περιέκτη, τότε η αργότερα θερμαινόμενη ζώνη συμπίπτει με το κρίσιμο σημείο, σε άλλες περιπτώσεις όμως που το τρόφιμο είναι υγρό ή μίγμα υγρού και στερεού, το κρίσιμο σημείο ενδέχεται να μην συμπίπτει με την αργότερα θερμαινόμενη ζώνη. Στην Εικόνα 10 φαίνεται η διάκριση μεταξύ στερεού και υγρού τροφίμου κατά τη διάρκεια του κύκλου θέρμανσης. Στο στερεό τρόφιμο η αργότερα θερμαινόμενη ζώνη είναι το κέντρο της κονσέρβας, ενώ στο υγρό τρόφιμο το σημείο αυτό εντοπίζεται περίπου στο 1/3 της απόστασης του κεντρικού άξονα από τον πυθμένα της κονσέρβας.

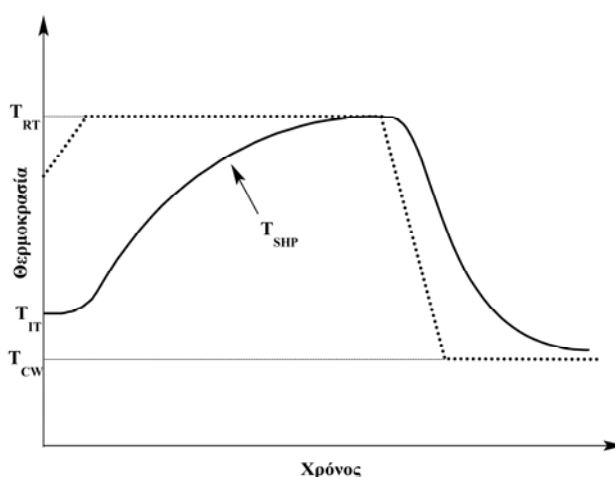


Εικόνα 10. Μετάδοση θερμότητας εντός του περιέκτη κατά τη θερμική επεξεργασία για στερεό (αριστερά) και υγρό (δεξιά) τρόφιμο

Εάν υποθεθεί ότι μια κονσέρβα που περιέχει στερεό τρόφιμο επεξεργάζεται θερμικώς σε αυτόκλειστο με θερμοκρασία T_{RT} και το προϊόν έχει αρχική θερμοκρασία $T_{Π}$, επίσης μετά τον κύκλο θέρμανσης η κονσέρβα ψυχθεί με εμβάπτιση σε κρύο νερό

θερμοκρασίας T_{CW} , τότε η θερμοκρασία στο κέντρο της κονσέρβας σε σχέση με το χρόνο θα έχει μια μορφή σαν αυτή του Διαγράμματος 3.

Εάν οι θερμοκρασίες που ελήφθησαν, κατά τη διάρκεια του κύκλου θέρμανσης από το καταγραφικό επεξεργαστούν καταλλήλως, δηλαδή να υπολογιστεί η διαφορά $T_{RT} - T$ για κάθε dt και οι διαφορές αυτές απεικονιστούν σε ημι-λογαριθμική κλίμακα θα έχουν μια μορφή σαν αυτή του διαγράμματος 4. Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται ότι τα χρονο-θερμοκρασιακά δεδομένα μετά από το πέρας ενός χρονικού διαστήματος βρίσκονται πάνω σε ευθεία.



Διάγραμμα 3. Καμπύλη θέρμανσης – ψύξης για το κέντρο της κονσέρβας με στερεό τρόφιμο

Ο χρόνος που απαιτείται για να καλύψει αυτή η ευθεία ένα λογαριθμικό κύκλο ονομάζεται f_h και ισχύει ότι:

$$f_h = \frac{-1}{\text{κλίση της ευθείας}} \quad \text{Εξίσωση 22}$$

Επίσης η προέκταση αυτής της ευθείας στο χρόνο 0 δίνει την ψευδοαρχική θερμοκρασία του προϊόντος στο κέντρο, γιατί η τομή είναι $T_{RT} - T_A$. Για να περιγραφεί πλήρως η καμπύλη θέρμανσης πρέπει να ληφθεί υπόψη και ο χρόνος προσαρμογής, δηλαδή το μη ευθύγραμμο τμήμα του λογαριθμικού διαγράμματος. Η ενσωμάτωση στην εξίσωση της καμπύλης θερμικής διεύθυνσης του χρόνου προσαρμογής γίνεται με το μέγεθος j_h , το οποίο ορίζεται από την εξίσωση 23.

$$j_h = \frac{T_{RT} - T_A}{T_{RT} - T_{IT}} \quad \text{Εξίσωση 23}$$

όπου T_A : η ψευδοαρχική θερμοκρασία στο κέντρο της κονσέρβας ($^{\circ}\text{F}$), T_{IT} : η αρχικής θερμοκρασία του τροφίμου ($^{\circ}\text{F}$) και T_{RT} : η θερμοκρασία του αυτοκλείστου ($^{\circ}\text{F}$)

Επομένως η εξίσωση που περιγράφει την καμπύλη θέρμανσης μπορεί να πάρει την εξής μορφή:

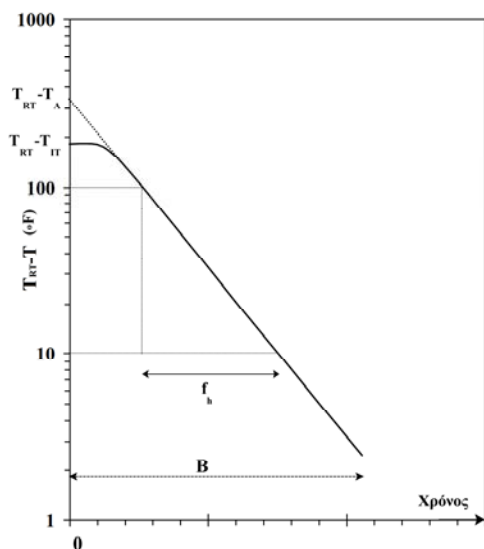
$$\log(T_{RT} - T) = -\frac{t}{f_h} + \log(j_h \cdot I) \quad \text{Εξίσωση 24}$$

όπου T_g : η θερμοκρασία στην αργότερα θερμαινόμενη ζώνη της κονσέρβας στο τέλος της θέρμανσης ($^{\circ}\text{F}$), B : ο χρόνος θέρμανσης (min), f_h : ο χρόνος για να καλύψει η ευθεία ένα λογαριθμικό κύκλο (min), j_h : το μέτρο του χρόνου της θερμικής προσαρμογής και I : η διαφορά $T_{RT}-T_{IT}$ ($^{\circ}\text{F}$).

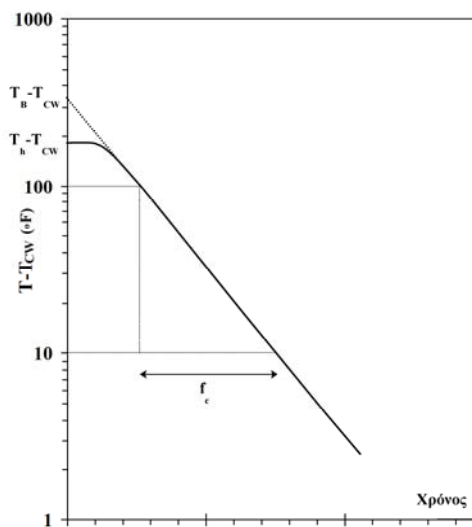
Η εξίσωση 24 μπορεί να μετασχηματιστεί στην εξίσωση 24 για διευκόλυνση των υπολογισμών.

$$B = f_h [\log(j_h \cdot I) - \log(g)] \quad \text{Εξίσωση 25}$$

όπου $\log(g)$: η διαφορά $T_{RT}-T_g$ ($^{\circ}\text{F}$), T_g είναι η θερμοκρασία που έχει το κέντρο της κονσέρβας σε χρόνο B (min), δηλαδή η θερμοκρασία στο τέλος της θέρμανσης και την αρχή της ψύξης.



Διάγραμμα 4. Καμπύλη θέρμανσης



Διάγραμμα 5. Καμπύλη ψύξης

Όμως η θερμική επεξεργασία περιλαμβάνει και τον κύκλο της ψύξης. Με αντίστοιχη επεξεργασία των χρόνο – θερμοκρασιακών δεδομένων του κύκλου της ψύξης, όπως αυτά του κύκλου της θέρμανσης δημιουργείται η καμπύλη ψύξης. Μια τέτοια

χαρακτηριστική καμπύλη ψύξης είναι αυτή του διαγράμματος 5. Όπως και στη θέρμανση παρατηρείται ότι για μια χρονική περίοδο τα θερμοκρασιακά δεδομένα $T-T_{CW}$ σχηματίζουν ευθεία. Ο χρόνος που απαιτείται για να καλύψει η ευθεία της ψύξης ένα λογαριθμικό κύκλο ονομάζεται f_c και ορίζεται ως:

$$f_c = \frac{-1}{\text{κλίση της ευθείας}} \quad \text{Εξίσωση 26}$$

Σε αντίστοιχη κατάσταση με τη θέρμανση, η προέκταση της ευθείας τέμνει τον άξονα $T-T_{CW}$ για χρόνο 0 (θεωρείται ότι για το διάγραμμα της καμπύλης ψύξης ο χρόνος είναι $t_{cw} = t - B$) στο σημείο με θερμοκρασία $T_h - T_{CW}$, όπου T_h είναι η θερμοκρασία της αργότερα θερμαινόμενης ζώνης τη στιγμή της έναρξης της ψύξης. Επίσης για την περιγραφή της καμπύλης ψύξης απαιτείται και η ενσωμάτωση του χρόνου προσαρμογής. Αυτό γίνεται με το αντίστοιχο με την θέρμανση μέγεθος j_c , το οποίο ορίζεται ως εξής:

$$j_c = \frac{T_B - T_{CW}}{T_h - T_{CW}} \quad \text{Εξίσωση 27}$$

όπου T_B : η ψευδοαρχική θερμοκρασία της αργότερα θερμαινόμενης ζώνης κατά την έναρξη της ψύξης ($^{\circ}\text{F}$), T_h : η θερμοκρασία στην αργότερα θερμαινόμενη ζώνη κατά την έναρξη της ψύξης ($^{\circ}\text{F}$) και T_{CW} : η θερμοκρασία του ψυκτικού μέσου ($^{\circ}\text{F}$).

Με τον παραπάνω τρόπο γίνεται η περιγραφή της θερμικής διείδυσης σε κονσερβοποιημένα τρόφιμα, πράγμα το οποίο είναι πολύ σημαντικό στον υπολογισμό του θερμικού φορτίου που δέχεται το επεξεργασμένο τρόφιμο (Heldman et al 2006 - Karel and Lund 2003).

1.6 Σχεδιασμός επιτυχημένης θερμικής επεξεργασίας

Η τεχνολογία της κονσερβοποίησης περιλαμβάνει την εγκυτίωση του τροφίμου σε κονσέρβα, την σφράγιση της κονσέρβας, την θέρμανση του προϊόντος σε συγκεκριμένη θερμοκρασία και χρόνο και την μεταφορά του προϊόντος προς κατανάλωση. Για χαμηλής οξύτητας τρόφιμα, όπου είναι δυνατόν να βλαστήσουν και να αναπτυχθούν τα σπόρια του βακτηρίου *Clostridium botulinum* είναι πλέον βασικό κριτήριο η μείωση του αριθμού των σπορίων κατά 12 λογαριθμικούς κύκλους ή αλλιώς 12D.

Για να γίνει εφικτή η ορθή θερμική επεξεργασία πρέπει να βρεθεί το τρόφιμο κάτω από τέτοιες θερμικές συνθήκες που θα το καταστήσουν μικροβιολογικά σταθερό και

ασφαλές. Ένα μέγεθος που δείχνει την ένταση της θερμικής επεξεργασίας είναι ο χρόνος θερμικού θανάτου ή ο ισοδύναμος χρόνος θερμικής επεξεργασίας και συμβολίζεται με $F_{T_{ref}}^z$. Ο ισοδύναμος χρόνος ορίζεται από την εξίσωση 28.

$$F_{T_{ref}}^z = D_{T_{ref}} \cdot (\log N_0 - \log N) \quad \text{Εξίσωση 28}$$

όπου $F_{T_{ref}}^z$: ο ισοδύναμος χρόνος θερμικής διεργασίας (min), $D_{T_{ref}}$: ο χρόνος υπο-δεκαπλασιασμού του μικροβιακού φορτίου (min), N_0 : ο αρχικός πληθυσμός μικροβίων (cfu/ml) και N : ο πληθυσμός των μικροβίων μετά το τέλος της θερμικής επεξεργασίας (cfu/ml).

Συνήθως η τιμή F δίνεται ως πολλαπλάσιο του χρόνου υπο-δεκαπλασιασμού του μικροβιακού φορτίου, π.χ. $F=6D$, έτσι γίνεται αντιληπτό ότι το μικροβιακό φορτίο μειώθηκε κατά 6 λογαριθμικούς κύκλους (Holdsworth and Simpson 2007).

1.6.1 Υπολογισμός της τιμής F

Ο υπολογισμός της τιμής F μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους, τη γενική μέθοδο και την υπολογιστική μέθοδο ή formula method. Για να γίνει ο υπολογισμός της τιμής F απαιτείται η χρήση θερμοκρασιακών δεδομένων και εξισώσεων που περιγράφουν τη θερμική επεξεργασία. Εξ' ορισμού για την τιμή D ισχύει ότι:

$$-\frac{d(\log N)}{dt} = \frac{1}{D} \quad \text{Εξίσωση 29}$$

Επίσης ισχύει ότι:

$$\log\left(\frac{D}{D_{T_{ref}}}\right) = \frac{T_{ref} - T}{z} \Rightarrow \frac{D}{D_{T_{ref}}} = 10^{\frac{T_{ref} - T}{z}} \quad \text{Εξίσωση 30}$$

Για τον υπολογισμό της μείωσης του μικροβιακού φορτίου εισάγεται η επίδραση της θερμοκρασίας στο χρόνο υπο-δεκαπλασιασμού, δηλαδή η ενσωμάτωση της εξίσωσης 30 στην εξίσωση 29. Ολοκληρώνοντας τα δύο μέλη της νέας εξίσωσης ισχύει ότι:

$$-\int_{C_0}^C d(\log N) = \frac{1}{D_{T_{ref}}} \int_0^t 10^{\frac{T(t) - T_{ref}}{z}} dt \quad \text{Εξίσωση 31}$$

Όμως επειδή η τιμή F ορίζεται ως $F = D (\log N_0 - \log N)$, τότε από την εξίσωση 31 μπορεί να εξαχθεί η εξίσωση:

$$F_{T_{ref}}^z = D_{T_{ref}} \cdot (\log N_0 - \log N) = \int_0^t 10^{\frac{T(t)-T_{ref}}{z}} dt \quad \text{Εξίσωση 32}$$

Με το πρώτο σκέλος της εξίσωσης 32 υπολογίζεται ο απαιτούμενος ισοδύναμος χρόνος της θερμικής επεξεργασίας για τη μείωση του μικροβιακού φορτίου από N_0 σε N . Ενώ με το δεύτερο σκέλος φαίνεται ο υπολογισμός του ισοδύναμου χρόνου στην περίπτωση θέρμανσης σε σταθερή θερμοκρασία αναφοράς και μεταβολής της θερμοκρασίας του προϊόντος κατά $T(t)$. Για κάθε προϊόν έχουν υπολογιστεί οι αντίστοιχοι ισοδύναμοι χρόνοι θερμικής διεργασίας και αναφέρονται στην παγκόσμια βιβλιογραφία. Επομένως, η παραγωγή ασφαλών κονσερβοποιημένων τροφίμων μπορεί να συμβεί εάν επιτευχθούν οι ισοδύναμοι χρόνοι της βιβλιογραφίας, εφόσον τα χρονο-θερμοκρασιακά δεδομένα είναι ορθά (Holdsworth and Simpson 2007).

1.6.1.1 Γενική μέθοδος

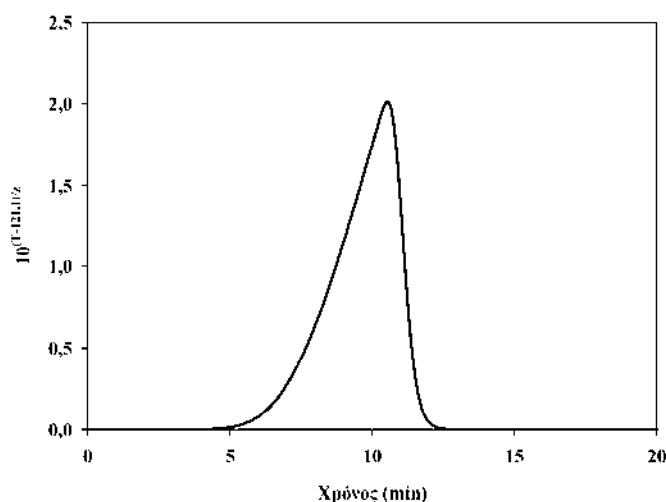
Στη γενική μέθοδο υπολογισμού του ισοδύναμου χρόνου θερμικής επεξεργασίας απαιτείται ένας αριθμός χρονο-θερμοκρασιακών δεδομένων. Τα δεδομένα αυτά έχουν καταγραφεί από καταγραφικό όργανο και μεταφερθεί σε Η/Υ. Για κάθε χρονικό βήμα (dt) που έγινε καταγραφή της θερμοκρασίας, το τρόφιμο εκτέθηκε σε ένα θερμικό φορτίο που είχε θανατηφόρο επίδραση στο μικροοργανισμό στόχο.

Επίσης από την εξίσωση 31 ισχύει ότι:

$$F_{T_{ref}}^z = \int_0^t 10^{\frac{T(t)-T_{ref}}{z}} dt \quad \text{Εξίσωση 33}$$

Ο υπολογισμός του ολοκληρώματος της εξίσωσης 32 γίνεται χρησιμοποιώντας τα χρονο-θερμοκρασιακά δεδομένα που καταγράφηκαν. Το εμβαδόν που καλύπτει το ολοκλήρωμα της εξίσωσης 33 φαίνεται στο Διάγραμμα 6. Ο προσδιορισμός του εμβαδού γίνεται μέσω του βαθμού θνησιμότητας (lethal rate ή lethality, L), που υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$L = \int_{t_a}^{t_b} 10^{\frac{T-T_{ref}}{z}} dt \quad \text{Εξίσωση 34}$$



Διάγραμμα 6. Η μεταβολής του βαθμού θνησιμότητας κατά τη διάρκεια θερμικής επεξεργασίας για $T_{ref}=121,1^{\circ}\text{C}$

Το άθροισμα όλων των εμβαδών που υπολογίζονται για μία θερμική επεξεργασία είναι ο συνολικός ισοδύναμος χρόνος $F_{T_{ref}}^z$ και ισχύει ότι (Toledo 2007):

$$F_{T_{ref}}^z = \sum L\Delta t \quad \text{Εξίσωση 35}$$

1.6.1.2 Μέθοδος Ball

Η μέθοδος του Ball για τον υπολογισμό της τιμής F είναι η πρώτη υπολογιστική μέθοδος. Ο Ball ακολουθώντας τις εξισώσεις θερμικής διείσδυσης που αναφέρονται εκτενώς στην παράγραφο 1.5 κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η τιμή F μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση 32.

$$F_{T_{ref}}^z = \frac{f_h}{f_h/U \cdot 10^{\frac{T_{ref}-T_{RT}}{z}}} \quad \text{Εξίσωση 36}$$

Επίσης κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η τιμή f_h/U μπορεί να υπολογιστεί ως μία συνάρτηση της τιμής $g = T_{RT}-T_g$. Έτσι ο Ball σχεδίασε διαγράμματα με τα οποία ήταν δυνατό να υπολογιστεί η τιμή f_h/U , αρκεί να ήταν γνωστά η τιμή $\log(g)$, το z και η τιμή $(m+g)=T_{RT}-T_{CW}$. Η τιμή $\log(g)$ μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση 25, όπου:

$$B = f_h [\log(j_h \cdot I) - \log(g)] \quad \text{Εξίσωση 37}$$

το z είναι γνωστό από τον μικροοργανισμό στόχο και η τιμή $m+g$ είναι γνωστή από τα δεδομένα της θερμικής επεξεργασίας. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατό να υπολογιστεί η τιμή F με σχετικά μεγάλη ακρίβεια έχοντας γνωστά συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της θερμικής επεξεργασίας (Toledo 2007).

I.6.1.3 Μέθοδος Stumbo

Η μέθοδος του Stumbo χρησιμοποιεί την ίδια λογική με αυτή του Ball, διαφοροποιείται όμως στον υπολογισμό της τιμής f_h/U . Ο Stumbo για τον υπολογισμό της F χρησιμοποίησε και αυτός τις εξισώσεις 25 και 33, όμως για να υπολογίσει τη τιμή f_h/U δημιούργησε πίνακες με τιμές για διάφορες τιμές του z και j αντί $m+g$. Σε αυτή την περίπτωση απαιτούνταν να είναι γνωστά η τιμή g , j_h και το z . Το πλεονέκτημα της μεθόδου Stumbo ήταν ότι υπήρχαν πίνακες για z με εύρος 8-200 °F, ώστε να μπορεί να υπολογιστεί η ποιοτική υποβάθμιση (Toledo 2007).

I.7 Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (Computational Fluid Dynamics)

I.7.1 Εισαγωγικά για την υπολογιστική ρευστοδυναμική

Η υπολογιστική ρευστοδυναμική, συνήθως χάριν συντομίας αναφέρεται ως CFD (Computational Fluid Dynamics), είναι ένας κλάδος της μηχανικής των ρευστών που χρησιμοποιεί αριθμητικές μεθόδους και αλγορίθμους για την επίλυση και την ανάλυση προβλημάτων που αφορούν ροές ρευστών. Για την εκτέλεση των υπολογισμών που απαιτούνται για την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης των ρευστών (υγρών και αερίων) με επιφάνειες που ορίζονται από οριακές συνθήκες (στερεά) χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικοί υπολογιστές.

Η υπολογιστική ρευστοδυναμική (CFD) αναπτύχθηκε αρχικά χάρη στα καινοτόμα επιτεύγματα κάποιων πρωτοπόρων ερευνητών που ασχολούνταν με το συγκεκριμένο επιστημονικό κλάδο, όπως οι Richardson (1911) και Courant, Friedrichs και Lewy (1967), οι οποίοι στην προσπάθειά τους να κατανοήσουν και να απεικονίσουν την κίνηση των ρευστών, προώθησαν την ανάπτυξη πολύ ισχυρών αριθμητικών τεχνικών μέσω των οποίων πέτυχαν την αριθμητική περιγραφή όλων των τύπων ροής υγρών. Η θεμελιώδης βάση όλων σχεδόν των προβλημάτων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής είναι οι εξισώσεις Navier - Stokes, οι οποίες προσδιορίζουν κάθε μονοφασική ή πολυφασική ροή υγρού. Αυτές οι εξισώσεις μπορούν να απλοποιηθούν με την απαλοποίηση των όρων που περιγράφουν το ιξώδες και να αποδώσουν τις εξισώσεις

Euler. Η περαιτέρω απλοποίηση των εξισώσεων αυτών, με την απαλοιφή των όρων που περιγράφουν τη στροβιλότητα αποδίδει τις εξισώσεις πλήρους δυναμικού. Τέλος, αυτές οι εξισώσεις μπορούν να γίνουν γραμμικές (διακριτοποιηθούν), ώστε να προκύψουν οι διακριτοποιημένες εξισώσεις διαφοράς δυναμικού (Patankar 1980).

Ιστορικά, πρώτα αναπτύχθηκαν οι μέθοδοι για την επίλυση των διακριτοποιημένων εξισώσεων δυναμικού. Στη δεκαετία του 1930 αναπτύχθηκαν μέθοδοι δύο διαστάσεων που έκαναν χρήση σύμμορφων μετασχηματισμών της ροής σ' ένα κύλινδρο με τη ροή σε μια αεροτομή. Η σταδιακή αύξηση των δυνατοτήτων των ηλεκτρονικών υπολογιστών της εποχής κατέστησε δυνατή την ανάπτυξη μεθόδων τριών διαστάσεων. Το πρώτο έργο που χρησιμοποιούνται υπολογιστές για τη μοντελοποίηση της ροής ενός υγρού, που διέπεται από τις εξισώσεις Navier-Stokes, πραγματοποιήθηκε στο Los Alamos National Labs, από την ομάδα T3, η οποία δημοσίευσε τον Ιούλιο του 1963 μια ερευνητική εργασία με θέμα τη μοντελοποίηση μιας περιστροφικής ροής δύο διαστάσεων γύρω από ένα στερεό αντικείμενο. Σ' αυτή την ερευνητική εργασία χρησιμοποιείται η μέθοδος για το ρεύμα στροβιλισμού, που αναπτύχθηκε από τον Jake Fromm στο LANL (Patankar 1980).

Η πρώτη δημοσίευση που αναφέρεται σε τρισδιάστατο μοντέλο πραγματοποιήθηκε από δύο επιστήμονες της εταιρίας αεροσκαφών Douglas, τον John Hess και τον A. Smith το 1967 (Hess and Smith 1967). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, η επιφάνεια της γεωμετρίας διακριτοποιείται με πάνελ, δίνοντας αφορμή για την ανάπτυξη της κατηγορίας των προγραμμάτων που ονομάζονται Panel Methods. Πρόκειται για μια αρκετά απλοποιημένη μέθοδο, δεδομένου ότι δεν περιλαμβάνει ανυψωτικές ροές και βρήκε εφαρμογή κυρίως για να προσομοιάσει κελύφη και ατράκτους αεροσκαφών.

Το κριτήριο της επιτυχίας είναι το πόσο καλά τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης συμφωνούν με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα σε περιπτώσεις όπου ένα προσεκτικό εργαστηριακό πείραμα μπορεί να πραγματοποιηθεί και το πόσο καλά οι προσομοιώσεις μπορούν να προβλέψουν ιδιαίτερα πολύπλοκα φαινόμενα που δεν μπορούν να απομονωθούν στο εργαστήριο (Sethian 1993).

1.7.2 Εφαρμογές της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής

Από τότε ως σήμερα η CFD έχει χρησιμοποιηθεί σε ένα πλήθος βιομηχανικών ή άλλων εφαρμογών, μερικές από τις οποίες είναι: στην κατασκευή πλοίων και αεροσκαφών, στην κατασκευή οχημάτων (αυτοκίνητα, μεταφορικά μέσα, στρατιωτικά οχήματα κ.α.), σε μελέτες για περιβαλλοντικούς σκοπούς (κατασκευή ανεμογεννητριών, γεωθερμία κ.α.), στην κατασκευή μεγάλων εγγειοβελτιωτικών

έργων (φράγματα, γέφυρες, κανάλια νερού κ.α.), στην βιοϊατρική (προσομοιώσεις ροής αίματος και αέρα στην καρδιά – αγγεία και τους πνεύμονες αντίστοιχα), σε μελέτες ρύπανσης του υπεδάφους, άντλησης υγρών καυσίμων και φυσικού αερίου, στη χημική βιομηχανία, σε μελέτες για βιολογικούς καθαρισμούς και σε διάφορους άλλους τομείς (Xia and Sun 2002).

Ο συνδυαστικός κρίκος μεταξύ της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής και της βιομηχανίας των τροφίμων είναι διεργασίες όπως η ανάμιξη και η ανάδευση, η ξήρανση, το μαγείρεμα, η παστερίωση και η αποστείρωση, η κατάψυξη και η συντήρηση υπό ψύξη. Όλες αυτές οι διεργασίες στόχο έχουν τη διασφάλιση της ποιότητας και της ασφάλειας των τροφίμων καθώς και την αύξηση του χρόνου ζωής τους και διέπονται από φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας ή και μάζας και συνεπώς εμπίπτουν στο πεδίο εφαρμογών της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Σήμερα η CFD βρίσκει ευρεία εφαρμογή σε θέματα σχεδιασμού και βελτιστοποίησης μηχανολογικού εξοπλισμού βιομηχανιών τροφίμων αλλά και μεθόδων επεξεργασίας των τροφίμων (Norton and Sun 2006, Sun 2007).

Οι εφαρμογές της CFD στη βιομηχανία των τροφίμων αυξάνονται τα τελευταία χρόνια με εκθετικό ρυθμό. Μερικοί μόνο από τους λόγους που συνετέλεσαν στο να έχει τόσο ευρεία εφαρμογή η CFD στη βιομηχανία των τροφίμων είναι οι ακόλουθοι (Xia and Sun 2002):

- Παρέχει μια λεπτομερή κατανόηση της κατανομής της ροής, των απωλειών βάρους, των φαινομένων μεταφοράς μάζας και θερμότητας, του διαχωρισμού σωματιδίων, κλπ. Κατά συνέπεια, όλα αυτά δίνουν στους υπεύθυνους των εργοστασίων τη δυνατότητα να έχουν μια πολύ καλύτερη εικόνα και βαθύτερη κατανόηση του τι συμβαίνει κατά την εξέλιξη μιας συγκεκριμένης διεργασίας ή κατά τη λειτουργία ενός συστήματος.
- Καθιστά δυνατή την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της μεταβολής κάποιας μεταβλητής όπως για παράδειγμα μια γεωμετρική μεταβολή με πολύ λιγότερο χρόνο και κόστος από ότι θα χρειαζόταν εάν το ίδιο θέμα εξεταζόταν μέσω εργαστηριακών δοκιμών.
- Μπορεί να απαντήσει σε πολλές ερωτήσεις – υποθέσεις του τύπου «τι θα γινόταν εάν» σε σύντομο χρονικό διάστημα.
- Παρέχει τη δυνατότητα να μειωθούν προβλήματα που προκύπτουν από τη μεταφορά σε βιομηχανική κλίμακα συμπερασμάτων που έχουν προκύψει σε εργαστηριακή κλίμακα, διότι τα μοντέλα βασίζονται σε θεμελιώδεις αρχές της φυσικής και είναι ανεξάρτητα κλίμακας.

- Είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε συνθήκες προσομοίωσης, όπου δεν είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν λεπτομερείς εργαστηριακές μετρήσεις λόγω απαγορευτικών συνθηκών που επικρατούν, όπως η υψηλή θερμοκρασία ή σε επικίνδυνο περιβάλλον ενός φούρνου.
- Δεδομένου ότι είναι ένα ενεργό εργαλείο ανάλυσης και σχεδιασμού, μπορεί να τονίσει τη βασική αιτία όχι μόνο το αποτέλεσμα, κατά την αξιολόγηση των προβλημάτων σχεδιασμού μιας διεργασίας ή ενός μηχανήματος. (Versteeg and Malalasekera, 2007)

1.7.3 Θεμελιώδεις αρχές της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής

Η εφαρμογή της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής για την περιγραφή της ροής των ρευστών βασίζεται στη θεμελιώδη θεώρηση της τμηματοποίησης ενός όγκου σε κάποιους στοιχειώδεις χώρους (όγκους ελέγχου), εντός των οποίων βρίσκονται σωματίδια του ρευστού. Οι όγκοι αυτοί πρέπει να είναι οι ελάχιστοι ικανοί να εξασφαλίσουν ότι οι ιδιότητες του ρευστού σε μακροσκοπική κλίμακα ($>1\mu\text{m}$) δεν επηρεάζονται από τη μοριακή δομή και τις κινήσεις ανεξάρτητων μορίων κι έτσι για την περιγραφή της συμπεριφοράς του ρευστού θα χρησιμοποιηθούν μόνο μακροσκοπικά μεγέθη όπως η πίεση, η θερμοκρασία, η πυκνότητα και η ταχύτητα ως συναρτήσεις του χρόνου και της θέσης κάθε όγκου ελέγχου. Με την πάροδο του χρόνου τα σωματίδια αυτά κινούνται και μεταφέρονται σε έναν αντίστοιχο διπλανό όγκο ελέγχου, ενώ στον προηγούμενο όγκο ελέγχου μεταφέρονται άλλα σωματίδια του ρευστού. Το φαινόμενο αυτό, η μεταφορά δηλαδή ορισμένου αριθμού σωματιδίων από ένα στοιχειώδη χώρο σε άλλο κάτω από ορισμένες συνθήκες, ορίζεται ως «συνέχεια». Με την παραδοχή ότι τα σωματίδια του ρευστού που βρίσκονται σε κάθε έναν από αυτούς τους στοιχειώδεις χώρους, έχουν μεταξύ τους τις ίδιες φυσικές ιδιότητες (ταχύτητα, πίεση, θερμοκρασία, πυκνότητα, κλπ), καθίσταται δυνατόν με την επίλυση συγκεκριμένων διαφορικών εξισώσεων, οι οποίες περιγράφουν τη ροή των ρευστών, να υπολογιστούν σε κάθε σημείο τα μεγέθη αυτά. Όσο καλύτερα έχει γίνει η τμηματοποίηση του συνολικού όγκου σε μικρότερους (όγκους ελέγχου), τόσο η παραπάνω παραδοχή τείνει πιο κοντά στην πραγματικότητα. Αντικείμενο λοιπόν της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής είναι η περιγραφή του υπόβαθρου, της επίλυσης και του αποτελέσματος της επίλυσης των εξισώσεων αυτών, εξηγώντας έτσι τα διάφορα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά τη ροή των ρευστών (Versteeg and Malalasekera 2007, Xia and Sun 2002, Norton and Sun 2006).

Οι εξισώσεις που διέπουν τη διατήρηση της ορμής των ρευστών είναι γνωστές ως εξισώσεις Navier – Stokes και μαζί με τις εξισώσεις της συνέχειας και της διατήρησης της ενέργειας ουσιαστικά αποτελούν την έκφραση των αρχών διατήρησης στη μηχανική των ρευστών. Οι εξισώσεις αυτές περιγράφουν πώς μια επιθυμητή ιδιότητα του ρευστού μεταβάλλεται (ρυθμός μεταβολής) εντός ενός όγκου ελέγχου εξαιτίας της επίδρασης σ' αυτό εξωτερικών δυνάμεων. Συγκεκριμένα οι αρχές αυτές είναι (Bird et al 2007):

- Αρχή διατήρησης της μάζας (Αρχή της συνέχειας).

Η αρχή διατήρησης της μάζας για μη σταθερή κατάσταση, περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση, εξίσωση της συνέχειας, η οποία για καρτεσιανές συντεταγμένες (x,y,z) μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho u_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u_z) = 0 \quad \text{Εξίσωση 38}$$

Ο πρώτος όρος της παραπάνω εξίσωσης είναι ο ρυθμός μεταβολής της πυκνότητας (μάζα ανά μονάδα όγκου). Οι υπόλοιποι τρεις όροι περιγράφουν την ροή μάζας σ' έναν όγκο ελέγχου διαμέσου των ορίων του και καλούνται όροι συναγωγής.

- Αρχή διατήρησης της ορμής (Δεύτερος νόμος του Νεύτωνα)

Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ορμής, ο ρυθμός μεταβολής της ορμής ως προς μια διεύθυνση (x,y,z) ανά μονάδα όγκου ισούται με την καθαρή εισροή ορμής μαζί με την καθαρή δύναμη ανά μονάδα όγκου. Η αντίστοιχη εξίσωση, εξίσωση της ορμής, για καρτεσιανές συντεταγμένες (x,y,z) μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\rho \left(\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} - \left(\frac{\partial}{\partial x} \tau_{xx} + \frac{\partial}{\partial y} \tau_{yx} + \frac{\partial}{\partial z} \tau_{zx} \right) + \rho g_x \quad \text{Εξίσωση 39}$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} - \left(\frac{\partial}{\partial x} \tau_{xy} + \frac{\partial}{\partial y} \tau_{yy} + \frac{\partial}{\partial z} \tau_{zy} \right) + \rho g_y \quad \text{Εξίσωση 40}$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} - \left(\frac{\partial}{\partial x} \tau_{xz} + \frac{\partial}{\partial y} \tau_{yz} + \frac{\partial}{\partial z} \tau_{zz} \right) + \rho g_z \quad \text{Εξίσωση 41}$$

- Αρχή διατήρησης της ενέργειας (Πρώτος νόμος της Θερμοδυναμικής)

Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ενέργειας, η ενέργεια δεν παράγεται ούτε καταστρέφεται αλλά μόνο αλλάζει μορφή, άρα η μεταβολή της ενέργειας ενός στοιχειώδους όγκου ρευστού ισούται με το άθροισμα της θερμότητας που προστίθεται ή απάγεται στο ρευστό και του έργου που παράγεται ή καταναλώνεται

από το ρευστό. Η αντίστοιχη εξίσωση, εξίσωση της ενέργειας, για καρτεσιανές συντεταγμένες (x,y,z) μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\rho \hat{C}_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u_x \frac{\partial T}{\partial x} + u_y \frac{\partial T}{\partial y} + u_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) - \left(\frac{\partial \ln \rho}{\partial \ln T} \right)_p \cdot \frac{Dp}{Dt} - (\boldsymbol{\tau} : \nabla \mathbf{v}) \quad \text{Εξίσωση 42}$$

όπου, ρ : η πυκνότητα του ρευστού (kg/m^3), t : ο χρόνος (min), x,y,z : οι τρεις διαστάσεις, \mathbf{u} : το διάνυσμα της ταχύτητας (m/s), v : η μέση ταχύτητα (m/s), p : η πίεση του ρευστού (N/m^2), $\boldsymbol{\tau}$: η τάση διάτμησης (N/m^2), \mathbf{g} : η επιτάχυνση της βαρύτητας ($9,81 \text{ m/s}^2$), C_p : η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση ($\text{J/kg}\cdot^\circ\text{C}$), T : η θερμοκρασία ($^\circ\text{C}$), q : η ροή θερμότητας (W).

1.7.4 Αριθμητικές μέθοδοι διακριτοποίησης

Οι εξισώσεις αυτές δεν είναι δυνατόν να επιλυθούν αναλυτικά. Για την επίλυσή τους γίνεται διακριτοποίηση. Η διακριτοποίηση αυτή μπορεί να γίνει με τέσσερις μεθόδους: μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών, μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, μέθοδος πεπερασμένων όγκων και μέθοδος οριακών στοιχείων. Περισσότερο απ' όλες τις μεθόδους χρησιμοποιούνται αυτές των πεπερασμένων διαφορών και των πεπερασμένων όγκων, με την τελευταία να έχει καθιερωθεί τα τελευταία χρόνια ως η κύρια αριθμητική μέθοδος που εφαρμόζεται στα εμπορικά πακέτα λογισμικού υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (Wang and Sun 2003).

1.7.4.1 Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών

Γεγονός είναι ότι πολλές μεταβλητές όπως η θερμοκρασία και η υγρασία, στη μοντελοποίηση εξαρτώνται από το χρόνο και τη θέση. Οι εξισώσεις μεταφοράς που περιγράφουν τον φυσικό μηχανισμό θέρμανσης - ψύξης είναι επομένως διαφορικές. Η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών είναι απλή και περιγράφει μία σειρά από διακριτές εξισώσεις μεταφοράς με διαφορικό τρόπο. Η μέθοδος αυτή μπορεί εύκολα να εφαρμοστεί σε προβλήματα πολλών διαστάσεων, σε απλές γεωμετρίες όπως σφαίρα, πλάκα και κύλινδρο. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιείται ευρέως στη λύση μοντέλων που περιγράφουν διεργασίες κατά τις οποίες λαμβάνει χώρα ταυτόχρονα μεταφορά μάζας και θερμότητας. Στις περιπτώσεις αυτές υπάγονται για παράδειγμα πολλές θερμικές διεργασίες όπως το μαγείρεμα, το τηγάνισμα, η ξήρανση και η ψύξη (Wang and Sun 2003).

1.7.4.2 Μέθοδος πεπερασμένων όγκων

Η διαδικασία των υπολογισμών στα περισσότερα εμπορικά πακέτα λογισμικού υπολογιστικής ρευστοδυναμικής βασίζεται στην αριθμητική μέθοδο των πεπερασμένων όγκων. Στην πραγματικότητα η εν λόγω μέθοδος προέκυψε από τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Στη μέθοδο πεπερασμένων όγκων, ο όγκος μελέτης διαιρείται σε διακριτούς όγκους ελέγχου. Το κλειδί της μεθόδου είναι η ενσωμάτωση εξισώσεων μεταφοράς μεταξύ των όγκων ελέγχου ώστε να προκύψουν διακριτοποιημένες εξισώσεις στα κομβικά σημεία επίλυσης. Οι γενικές εξισώσεις διατήρησης της μάζας, της ορμής και της ενέργειας διακριτοποιούνται πάνω στο πλέγμα και παίρνουν τη μορφή συστήματος αλγεβρικών εξισώσεων όπου όλες οι εξισώσεις επιλύονται για την εύρεση γενικευμένης λύσης (Versteeg and Malalasekera 2007, Wang and Sun 2003).

1.7.5 Πορεία επίλυσης ενός προβλήματος με χρήση CFD

Για να πραγματοποιηθεί μια ανάλυση CFD, αρχικά, ο αναλυτής θέτει το πρόβλημα και με τη χρήση επιστημονικής γνώσης το πρόβλημα αυτό εκφράζεται με μαθηματικούς όρους. Στη συνέχεια, το πακέτο λογισμικού CFD ενσωματώνει αυτή τη γνώση και εκφράζεται το πρόβλημα με όρους φυσικής. Ακολούθως, ο υπολογιστής εκτελεί τους υπολογισμούς που υπαγορεύονται από το λογισμικό CFD και τέλος ο αναλυτής επιθεωρεί και ερμηνεύει τα αποτελέσματά τους. Η διαδικασία αυτή μπορεί να διακριθεί σε τρία επιμέρους στάδια και να περιγραφεί αναλυτικότερα ως εξής (Versteeg and Malalasekera 2007, Xia and Sun 2002):

1.7.5.1 Προ – επεξεργασία

Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει όλες εκείνες τις ενέργειες που πραγματοποιούνται πριν την αριθμητική επίλυση του προβλήματος και μέσω των οποίων γίνεται η εισαγωγή των δεδομένων του προβλήματος στον υπολογιστή. Πιο συγκεκριμένα, οι ενέργειες που λαμβάνουν χώρα στο στάδιο της προ – επεξεργασίας είναι (Versteeg and Malalasekera 2007, Wang and Sun 2003):

- Ορισμός και σχεδιασμός της γεωμετρίας του προβλήματος.
Αυτό συνήθως γίνεται με τη χρήση ενός επικουρικού σχεδιαστικού προγράμματος (πχ Gambit) που μπορεί να δημιουργήσει αρχεία συμβατά με το λογισμικό CFD.
- Δημιουργία πλέγματος.

Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει την υποδιαίρεση του όγκου της κύριας γεωμετρίας του προβλήματος σε έναν αριθμό μικρότερων, μη επικαλυπτόμενων όγκων ελέγχου (κελιά). Οι όγκοι αυτοί είναι πολύεδρα τρισδιάστατα σχήματα όπως τετράεδρα, εξάεδρα, πρίσματα ή πυραμίδες. Η επιλογή του ενός ή του άλλου σχήματος εξαρτάται από τις ιδιαιτερότητες της γεωμετρίας του κάθε προβλήματος. Κάθε ένα από αυτά τα πολύεδρα βρίσκεται σε επαφή με τουλάχιστον ένα γειτονικό κι έτσι στο πλέγμα δημιουργούνται κόμβοι. Σε κάθε έναν τέτοιο κόμβο, θα γίνει αργότερα από το λογισμικό CFD η επεξεργασία των δεδομένων και η επίλυση των εξισώσεων. Από τα χαρακτηριστικά του πλέγματος καθορίζεται έμμεσα και η ακρίβεια των αποτελεσμάτων που τελικά θα προκύψουν από την ανάλυση. Όσο περισσότεροι και μικρότεροι κόμβοι υπάρχουν σε ένα πλέγμα (πυκνό πλέγμα) τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Όμως όσο πιο πυκνό είναι ένα πλέγμα, τόσο μεγαλύτερη είναι η υπολογιστική ισχύς και ο χρόνος που απαιτούνται για να ληφθούν τα αποτελέσματα. Βέβαια, καθώς ένα πλέγμα πυκνώνεται όλο και περισσότερο, υπάρχει ένα επίπεδο πύκνωσης, πέρα από το οποίο οποιαδήποτε επιπλέον πύκνωση δεν επιφέρει βελτίωση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων. Παρά το γεγονός ότι τα περισσότερα πακέτα λογισμικού CFD περιλαμβάνουν προγράμματα που μπορούν να δημιουργήσουν πλέγμα σε δοθείσα γεωμετρία, συνεχίζονται οι προσπάθειες για την ανάπτυξη κατάλληλου λογισμικού που θα είναι ικανό να σχεδιάσει το βέλτιστο πλέγμα. Ακόμα όμως δεν έχει επιτευχθεί η ανάπτυξη ενός τέτοιου προγράμματος και μετατίθεται στις ικανότητες του χρήστη ο σχεδιασμός του πλέγματος με τέτοιο τρόπο ώστε να βρίσκεται η χρυσή τομή μεταξύ της επιθυμητής ακρίβειας αποτελεσμάτων και της δαπάνης πόρων (υπολογιστική ισχύς και χρόνος). Αυτό στην πράξη συνήθως επιτυγχάνεται με το σχεδιασμό μη ομοιόμορφων πλεγμάτων, τα οποία είναι πυκνότερα σε σημεία όπου λαμβάνουν χώρα μεγάλες μεταβολές από το ένα σημείο στο άλλο και έχουν μικρότερο αριθμό κελιών σε περιοχές που παρατηρούνται μικρότερες μεταβολές. Αντιπροσωπευτικό της δυσκολίας αυτής είναι το στοιχείο ότι περίπου το 50% του χρόνου που απαιτείται για την εκπόνηση μιας μελέτης CFD, δαπανάται για το σχεδιασμό της γεωμετρίας του προβλήματος και τη δημιουργία του πλέγματος.

- Επιλογή των φυσικών και χημικών φαινομένων που χρειάζεται να μοντελοποιηθούν.
- Προσδιορισμός των ιδιοτήτων των υλικών
- Προσδιορισμός των αρχικών και οριακών συνθηκών

I.7.5.2 Επίλυση

Το στάδιο της επίλυσης περιλαμβάνει τη χρήση ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή για την επίλυση των μαθηματικών εξισώσεων που προαναφέρθηκαν και μπορούν να διακριθούν τρία επιμέρους στάδια:

- Ενσωμάτωση των εξισώσεων σε όλους τους πεπερασμένους όγκους ελέγχου της γεωμετρίας
- Διακριτοποίηση - μετατροπή των εξισώσεων που προκύπτουν σε ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων
- Επίλυση των αλγεβρικών εξισώσεων με μια επαναληπτική μέθοδο

Στο στάδιο αυτό επιλύονται οι εξισώσεις για κάθε ένα κελί του πλέγματος, μέχρι να επιτευχθεί ικανοποιητική ακρίβεια και να πληρούνται τα κριτήρια σύγκλισης. Η διαδικασία αυτή μπορεί να είναι αρκετά χρονοβόρα γιατί απαιτείται από τον υπολογιστή να επιλύσει ένα τεράστιο αριθμό εξισώσεων. Παρόλο που το στάδιο της επίλυσης αποτελεί τον πυρήνα μιας μελέτης CFD, ελάχιστα είναι ορατά και προσβάσιμα από το χρήστη στο στάδιο αυτό (Versteeg and Malalasekera 2007, Wang and Sun 2003).

I.7.5.3 Μετα – επεξεργασία

Το λογισμικό CFD είναι εφοδιασμένο με προγράμματα που βοηθούν το χρήστη να δει και να παρουσιάσει τα αποτελέσματα με εντυπωσιακούς τρόπους. Τα αποτελέσματα είναι δυνατόν να παρουσιαστούν αριθμητικά ή με μορφή γραφήματος. Τα γραφήματα μπορεί να είναι δισδιάστατα ή τρισδιάστατα και να περιλαμβάνουν διανύσματα ή γραμμές ή χρωματική διακύμανση ανάλογα με την τιμή μιας μεταβλητής (Versteeg and Malalasekera 2007, Wang and Sun 2003).

I.8 Βιβλιογραφική ανασκόπηση προσομοίωσης θερμικής επεξεργασίας κονσερβοποιημένων τροφίμων

Η θερμική επεξεργασία υγρών κονσερβοποιημένων τροφίμων ανέκαθεν απασχολούσε το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας, λόγω του τρόπου με τον οποίο μεταδίδεται η θερμότητα εντός του περιέκτη. Στη συνέχεια παρατίθεται μια ιστορική ανασκόπηση με τις σημαντικότερες προσπάθειες για προσομοίωση της θερμικής επεξεργασίας κονσερβοποιημένων τροφίμων.

Μια αρχική προσέγγιση για την παρατήρηση της ροής του υγρού που θερμαίνεται έγινε από τους Hiddink *et al* (1976). Κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας σιλικονούχου ρευστού, το οποίο περιείχε σωματίδια που ακτινοβολούσαν, πραγματοποιήθηκε καταγραφή της θερμοκρασίας με θερμοζεύγη και αποτύπωση εικόνων που έδειχναν την ροή του ρευστού. Επίσης έγινε προσπάθεια για την δημιουργία ενός μοντέλου προσδιορισμού του οριακού στρώματος του ρευστού με το τοίχωμα του περιέκτη καθώς και η θερμοκρασιακή στρωμάτωσή του, έτσι ώστε να υπολογίζεται με ακρίβεια η αργότερα θερμαινόμενη ζώνη.

Πολύ σημαντική ήταν η διατριβή του Datta (1985) στην οποία μελετήθηκε με τη χρήση αριθμητικού μοντέλου η μετάδοση θερμότητας σε κυλινδρικούς περιέκτες με φυσική κυκλοφορία και αγωγή. Σκοπός ήταν η προσομοίωση θερμικών επεξεργασιών σε περιέκτες που περιείχαν νερό (π.χ. μπουκάλια) και σε κονσέρβες που περιείχαν στερεό τρόφιμο. Στην πρωτοποριακή αυτή μελέτη χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών ως μέθοδος διακριτοποίησης των διαφορικών εξισώσεων της συνέχειας, της ορμής και της ενέργειας. Επίσης βρέθηκε ότι το αριθμητικό μοντέλο έδωσε αποτελέσματα πολύ κοντά στα πειραματικά, όσον αφορά στην πρόβλεψη του οριακού στρώματος του ρευστού κοντά στο τοίχωμα του περιέκτη, το οποίο ήταν 15-20% της ακτίνας του περιέκτη. Ακόμα υπολογίστηκε ότι η αργότερα θερμαινόμενη ζώνη τοποθετείται στον κεντρικό άξονα της κονσέρβας και πάνω από τον πυθμένα στο 15% του ύψους της, για την περίπτωση της μετάδοσης θερμότητας με φυσική κυκλοφορία. Ομοίως αξιόπιστα αποτελέσματα έδωσε το αριθμητικό μοντέλο και για την περίπτωση του στερεού τροφίμου, όπου η θερμότητα μεταφερόταν με αγωγή. Σε αυτή την περίπτωση το μοντέλο πρόβλεψε ότι η αργότερα θερμαινόμενη ζώνη είναι το γεωμετρικό κέντρο της κονσέρβας και ότι το μέγεθος της αποστείρωσης, ώστε το τρόφιμο να είναι ασφαλές, θα πρέπει να υπολογίζεται στο σημείο αυτό. Τέλος ο Datta (1985) ισχυρίστηκε ότι το αριθμητικό του μοντέλο μπορεί να ενσωματωθεί σε έναν ευρύτερο αλγόριθμο για τον άμεσο έλεγχο του μεγέθους της θερμικής επεξεργασίας, στην οποία υπόκεινται ένα κονσερβοποιημένο τρόφιμο, κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας. Βάση αυτού του μοντέλου, τα επόμενα χρόνια δημοσιεύθηκαν σε διεθνή περιοδικά ερευνητικές εργασίες από τον ίδιο συγγραφέα, που ανέλυε διεξοδικά τα παραπάνω αποτελέσματα (Datta *et al*, 1986, Datta & Texeira, 1987, Datta and Texeira, 1988).

Μετά το αριθμητικό μοντέλο του Datta, οι Kumar *et al* (1990) και Kumar & Bhattacharya (1991) χρησιμοποίησαν έναν από τους πρώτους εμπορικούς κώδικες επίλυσης διακριτοποιημένων διαφορικών εξισώσεων (με τη μέθοδο των

πεπερασμένων στοιχείων) που ήταν το πακέτο FIDAP. Το πακέτο αυτό χρησιμοποιούνταν για να προσομοιάσει ροές ασυμπίεστων ρευστών και είχε ήδη ελεγχθεί από προηγούμενους ερευνητές του χώρου. Οι Kumar *et al* (1990) χρησιμοποίησαν το παραπάνω πακέτο για να προσομοιάσουν την αποστείρωση παχύρευστου μη-νευτώνειου υγρού τροφίμου. Όπως ισχυρίστηκαν οι ερευνητές, η ταχύτητα που ανέπτυξε το υγρό τρόφιμο κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας ήταν τόσο μικρή που τελικά είχε συμπεριφορά νευτώνειου ρευστού. Η θέρμανση της όρθιας κονσέρβας, που μελετούσαν γινόταν μόνο από το πλάγιο τοίχωμα και όχι από την οροφή ή τον πυθμένα της κονσέρβας. Έτσι υπολόγισαν ότι η αργότερα θερμαινόμενη ζώνη εντοπιζόταν στο κέντρο του πυθμένα της κονσέρβας. Επίσης προσδιόρισαν το οριακό στρώμα μεταξύ παχύρευστου υγρού και κάθετου τοιχώματος της κονσέρβας και βρήκαν ότι κυμαινόταν στο 40% της ακτίνας του περιέκτη σε αντίθεση με το 15-20% που είχε υπολογίσει ο Datta (1985). Οι μελέτες των Kumar *et al* (1990) και Kumar & Bhattacharya (1991) παρουσιάζουν μια πρωτοπορία, διότι για πρώτη φορά γίνεται χρήση εμπορικού κώδικα στη ρευστομηχανική και ειδικότερα στη θερμική επεξεργασία κονσερβοποιημένων υγρών τροφίμων.

Την ίδια περίπου εποχή οι Stoforos & Merson (1990, 1991) υπολόγισαν τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας σε κυλινδρικούς περιέκτες που περιστρέφονταν γύρω από τον κεντρικό άξονά τους. Εντός των περιεκτών υπήρχαν σφαιρικά σωματίδια των οποίων το χρώμα μεταβαλλόταν σε σχέση με τη μεταβολή της θερμοκρασίας. Η τεχνική αυτή που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα των Stoforos & Merson (1990, 1991) και το μοντέλο για τον υπολογισμό του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας έδωσε το έναυσμα για περαιτέρω διερεύνηση των φαινομένων (ροή του υγρού και μεταφορά θερμότητας), που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας εντός των κονσερβών.

Λίγα χρόνια αργότερα και ενώ η ανάπτυξη στα χαρακτηριστικά των ηλεκτρονικών υπολογιστών βρισκόταν σε πλήρη άνθηση, οι Ghani *et al* (1999a, 1999b) κάνουν χρήση του κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής “PHOENICS” για την προσομοίωση της θερμικής επεξεργασίας διαλύματος sodium carboxy-methyl cellulose (CMC) και νερού σε κυλινδρικές κονσέρβες. Εκτός των βασικών εξισώσεων που επέλυε το πρόγραμμα, είχαν εισαχθεί και εξισώσεις (εξίσωση Arrhenius) που υπολόγιζαν την μικροβιακή καταστροφή κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας. Στις μελέτες αυτές παρατέθηκαν εικόνες από τους Ghani *et al* (1999a, 1999b) που δείχνουν τη θερμοκρασιακή μεταβολή κατά τη διάρκεια της θέρμανσης της κονσέρβας. Επίσης υπάρχουν εικόνες στις οποίες φαίνεται η κατεύθυνση και το

μέτρο της ταχύτητας του ρευστού σε διάφορες χρονικές στιγμές και τέλος υπάρχουν εικόνες που δείχνουν το μικροβιακό φορτίο και την μεταβολή του σε σχέση με το χρόνο θέρμανσης της κονσέρβας. Οι Ghani *et al* (1999a, 1999b) υπολόγισαν τη θέση της αργότερα θερμαινόμενης ζώνης για το υγρό τρόφιμο (CMC) και το νερό και βρήκαν ότι η ζώνη αυτή εντοπίζεται στον κεντρικό άξονα της κονσέρβας, όμως μετακινείται σε απόσταση 10-12% του ύψους, από τον πυθμένα. Ακόμα υπολόγισαν το οριακό στρώμα που δημιουργείται μεταξύ ρευστού και πλάγιου τοιχώματος της κονσέρβας και βρήκαν ότι ήταν 16-20 mm. Τα αποτελέσματα που βρέθηκαν έρχονται σε συμφωνία με αυτά των Hiddink *et al* (1976), Datta and Texeira (1987) και Kumar and Bhattacharya (1991).

Δύο χρόνια αργότερα, οι Ghani *et al* (2001) μελέτησαν την προσομοίωση σε 3D της θερμικής επεξεργασίας υγρού τροφίμου (χυμού καρότου – πορτοκαλιού) σε σακούλες. Στόχος ήταν ο εντοπισμός της αργότερα θερμαινόμενης ζώνης και ο υπολογισμός των μέγιστων τιμών της ταχύτητας του ρευστού, που αναπτύσσεται κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας. Το συγκεκριμένο θεωρητικό μοντέλο, όπως σχεδιάστηκε και επιλύθηκε είχε καλή σύμπτωση με τα πειραματικά αποτελέσματα. Επειδή η σακούλα με το υγρό τρόφιμο δεν είχε συμμετρικό σχήμα η αργότερα θερμαινόμενη ζώνη εντοπίστηκε από τους Ghani *et al* (2001) στο 30-40% του ύψους και στο 20-30% του μήκους της σακούλας. Επίσης λόγω του γεγονότος ότι το υγρό τρόφιμο ήταν αρκετά παχύρρεστο βρέθηκε ότι οι υψηλότερες τιμές της ταχύτητάς του δεν ξεπέρασαν τα 10^{-2} mm/s.

Την ίδια χρονιά οι Ghani *et al* (2002a, 2002b) επανήλθαν στην περίπτωση της μελέτης του 2001 (Ghani *et al* 2001) με την προσομοίωση της θερμικής επεξεργασίας δύο σακουλών που περιείχαν υγρό τρόφιμο (χυμό κρέατος – λαχανικών και χυμό καρότου - πορτοκαλιού) και αυτή τη φορά μελέτησαν τη θερμική καταστροφή των σπορίων του βακτηρίου *Bacillus stearothermophilus* και της βιταμίνης C στα δύο υγρά τρόφιμα αντίστοιχα. Σκοπός και των δύο εργασιών ήταν η επιβεβαίωση του θεωρητικού μοντέλου με πειραματικά αποτελέσματα. Τελικά οι Ghani *et al* (2002a, 2002b) ισχυρίστηκαν και στις δύο μελέτες ότι τα πειραματικά αποτελέσματα έρχονταν σε καλή συμφωνία με αυτά από το θεωρητικό μοντέλο, οπότε ο κώδικας “PHOENICS” επιλύοντας τις διακριτοποιημένες εξισώσεις συνέχειας, ορμής, ενέργειας και θερμικής καταστροφής μικροοργανισμών ή θερμο-ευαίσθητων χημικών ουσιών μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα.

Στη συνέχεια οι Ghani *et al* (2003) μελέτησαν την προσομοίωση της θερμικής επεξεργασίας οριζόντιας κυλινδρικής κονσέρβας η οποία περιείχε χυμό καρότου –

πορτοκαλιού και περιστρεφόταν κατά τη διάρκεια του κύκλου θέρμανσης – ψύξης. Ο στόχος για πιο ομοιόμορφη και γρήγορη θέρμανση ενός υγρού τροφίμου επετεύχθη μερικώς, διότι οι Ghani *et al* (2003) απέδειξαν ότι η ταχύτητα του ρευστού κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας ήταν περίπου εκατό φορές μεγαλύτερη σε σχέση με τις περιπτώσεις όπου η κονσέρβα ήταν ακίνητη. Επίσης η αργότερα θερμαινόμενη ζώνη δεν εντοπίστηκε σε σταθερή περιοχή του πεδίου ροής, κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας, αλλά μετακινούνταν σε μία απόσταση μεταξύ του κεντρικού άξονα και του μισού της ακτίνας του κυλίνδρου. Τέλος βρέθηκε ότι η θερμοκρασία του υγρού τροφίμου αυξανόταν ταχύτερα στην περίπτωση της κονσέρβας που περιστρεφόταν σε σχέση με αυτή που ήταν ακίνητη.

Ο χρόνος που απαιτείται για την αποστείρωση κονσερβοποιημένων υγρών τροφίμων (νερό, CMC, χυμός καρότου – πορτοκαλιού) μελετήθηκε από τους Farid and Ghani (2004) για να ολοκληρωθεί το έργο των παραπάνω εργασιών που είχε πραγματοποιήσει η ομάδα Ghani. Από τους Farid and Ghani (2004) θεωρήθηκε ότι το κρίσιμο σημείο (δηλαδή το σημείο που δέχεται την μικρότερη θερμική καταπόνηση) είναι η αργότερα θερμαινόμενη ζώνη. Συσχετίζοντας τα δεδομένα των προηγούμενων εργασιών της ομάδας Ghani βρήκαν ότι ο χρόνος αποστείρωσης των υγρών τροφίμων επηρεάζεται από την θέση της κονσέρβας, δηλαδή εάν είναι κάθετη ή οριζόντια τοποθετημένη, από το σχήμα του περιέκτη, δηλαδή εάν αναφέρεται σε κυλινδρική μεταλλική κονσέρβα ή συνθετική σακούλα και από τις ρεολογικές ιδιότητες του υγρού τροφίμου, δηλαδή εάν είναι παχύρευστο ή όχι και εάν είναι νευτώνειο ή μη νευτώνειο.

Οι Varma and Kannan (2005, 2006) μελέτησαν την προσομοίωση της θερμικής επεξεργασίας υγρού τροφίμου (CMC) 0,85% w/w σε κονσέρβες κυλινδρικού σχήματος και σε κονσέρβες σχήματος κανονικού κώνου και κολουρου κώνου. Επίσης πραγματοποιήθηκε διερεύνηση της επίδρασης της θερμικής επεξεργασίας όταν οι κυλινδρικές κονσέρβες ήταν τοποθετημένες οριζόντια και κάθετα και οι κώνοι βρίσκονταν σε διάφορες κλίσεις. Από την επίλυση του προβλήματος με το λογισμικό πακέτο CFXv5.6 βρέθηκε ότι στις κυλινδρικές κονσέρβες που ήταν τοποθετημένες οριζόντια απαιτήθηκε μικρότερος χρόνος για το ίδιο θερμικό αποτέλεσμα σε σχέση με τις κονσέρβες που ήταν τοποθετημένες κάθετα. Η αργότερα θερμαινόμενη ζώνη μετακινήθηκε κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας σε όλες τις περιπτώσεις. Επίσης το οριακό στρώμα δεν είχε σταθερό πάχος στις κωνικές κονσέρβες, πράγμα το οποίο επηρέασε σημαντικά το μέγεθος της ταχύτητας του ρευστού. Τέλος η

γρηγορότερη θέρμανση της αργότερα θερμαινόμενης ζώνης επετεύχθη πρώτα στον όρθιο κώνο, μετά στον κύλινδρο και έπειτα στον ανεστραμμένο κώνο.

Πολύ σημαντική ήταν και η μελέτη των Ghani and Farid (2006) στην οποία (για πρώτη φορά) μελετήθηκε η θερμική επεξεργασία κονσερβοποιημένου στερεού τροφίμου (φέτες ανανά τοποθετημένες η μία πάνω από την άλλη δημιουργώντας έναν εσωτερικό κύλινδρο) εμβαπτισμένου σε υγρό (χυμός ανανά). Αναλυτικότερα έγινε μελέτη της θερμικής επεξεργασίας θεωρώντας ότι τα τεμάχια του ανανά ήταν πορώδη ή από αδιαπέραστο υλικό και ότι ακουμπούσαν στον πυθμένα της κονσέρβας ή αιωρούνταν εντός του ρευστού. Επιλύοντας τις παραπάνω γεωμετρικές βρέθηκε ότι στα τεμάχια ανανά που θεωρήθηκαν πορώδες υλικό, δεν διαφοροποιήθηκε η συμπεριφορά τους στη ροή και στη μετάδοση θερμότητας. Στην περίπτωση όμως που τα τεμάχια ανανά άγγιζαν τον πυθμένα της κονσέρβας σε σχέση με αυτά που αιωρούνταν η θέρμανση ήταν πιο αργή και η αργότερα θερμαινόμενη ζώνη ήταν μετατοπισμένη. Σε αυτή τη μελέτη οι Ghani and Farid (2006) βρήκαν ότι η αργότερα θερμαινόμενη ζώνη εντοπιζόταν περίπου 30-35% του ύψους της κονσέρβας από τον πυθμένα και δεν βρισκόταν στον κεντρικό άξονά της, αλλά στον κεντρικό άξονα του κυλίνδρου που σχημάτιζαν τα τεμάχια του ανανά. Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι αν και στη συγκεκριμένη μελέτη δεν υπήρχαν πειραματικά αποτελέσματα για να επιβεβαιώσουν το θεωρητικό μοντέλο, εντούτοις ήταν μια σημαντική πρώτη επίλυση γεωμετρίας που περιείχε μίγμα υγρού και στερεού τροφίμου.

Το ίδιο έτος οι Siritwattanayotin *et al* (2006) ασχολήθηκαν με τη μελέτη της προσομοίωσης της θερμικής επεξεργασίας ιμβερτοσακχάρου σε κυλινδρικές κονσέρβες με τη χρήση του εμπορικού λογισμικού πακέτου CFX. Αρχικά επιβεβαίωσαν το θεωρητικό μοντέλο πραγματοποιώντας πειραματική θερμική επεξεργασία σε κονσέρβα που περιείχε σιρόπι ζάχαρης 20% (w/w). Κατά τη διάρκεια του κύκλου θέρμανσης ψύξης η θερμοκρασία καταγραφόταν σε δύο σημεία και συγκρίθηκε με αυτά του θεωρητικού μοντέλου. Έπειτα υπολογίστηκε η τιμή F_0 για τρεις θερμοκρασίες θέρμανσης 100, 110 και 120°C. Ο υπολογισμός της τιμής F_0 πραγματοποιήθηκε με δύο τρόπους, την γενική μέθοδο και από την εξίσωση $F_0 = D_{T_{ref}} (\log N_0 - \log N)$. Για τη γενική μέθοδο χρησιμοποιήθηκε η θερμοκρασία της αργότερα θερμαινόμενης ζώνης και η μέση θερμοκρασία του υγρού τροφίμου, ενώ για τον υπολογισμό της τιμής F_0 από την παραπάνω εξίσωση έγινε χρήση της εξίσωσης Arrhenius, η οποία προσαρμόστηκε ώστε να περιγράφει τη θερμική θανάτωση των σπορίων του *Clostridium botulinum*. Για θέρμανση στους 100 και

110°C βρέθηκε ότι ο υπολογισμός της τιμής F_0 με τους δύο τρόπους δεν είχε ουσιαστική διαφορά, όμως για θέρμανση στους 120°C οι δύο τρόποι υπολογισμού έδωσαν διαφορετικά αποτελέσματα.

Αργότερα, οι Rabiey *et al* (2007) πραγματοποίησαν μελέτη της προσομοίωσης της θερμικής επεξεργασίας κονσερβοποιημένου στερεού τροφίμου εμβαπτισμένου σε νερό. Συγκεκριμένα κατασκεύασαν 9 σφαίρες από μίγμα αλάτων διαλυμένων σε νερό και τις τοποθέτησαν στην κονσέρβα, ενώ έπειτα πλήρωσαν την κονσέρβα με νερό. Ακριβώς την ίδια διάταξη προσπάθησαν να κατασκευάσουν στο σχεδιαστικό πρόγραμμα. Οι Rabiey *et al* (2007) κατασκεύασαν δύο γεωμετρίες, εκ των οποίων η πρώτη είχε το υπερβολικά μεγάλο αριθμό κελιών των 1.650.000, ενώ η δεύτερη μόλις 95.000 κελιά. Για πρώτη φορά χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό “Fluent” στην επίλυση τέτοιου είδους προβλημάτων και τέλος για πρώτη φορά γίνεται η χρήση διαφορετικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στο εξωτερικό τοίχωμα της κονσέρβας, κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας αντί για τη χρήση διαφορετικών θερμοκρασιών. Πραγματοποιώντας όλα τα παραπάνω οι Rabiey *et al* (2007) βρήκαν ότι υπήρχε ανεξαρτησία πλέγματος για αυτό το εύρος της πυκνότητάς του, δηλαδή οι γεωμετρίες που επιλύθηκαν με 1.650.000 και 95.000 κελιά αντίστοιχα έδωσαν τα ίδια αποτελέσματα. Επίσης προσδιορίστηκε η αργότερα θερμαινόμενη ζώνη και εντοπίστηκε στη σφαίρα που βρισκόταν στον πυθμένα της κονσέρβας και πιο κοντά στον κεντρικό άξονά της. Ακόμα έγινε υπολογισμός της τιμής F ή αλλιώς Sterilization Value (SV) για διάφορα σημεία εντός της κονσέρβας μέσω των θεωρητικών και των πειραματικών τιμών της θερμοκρασίας. Όπως ισχυρίστηκαν οι Rabiey *et al* (2007) το θεωρητικό μοντέλο επιβεβαιώθηκε με καλή ακρίβεια από τα πειραματικά αποτελέσματα της θερμοκρασίας, όμως μπορεί να παρατηρήσει κανείς τις διαφορές στις υπολογιζόμενες τιμές SV μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών τιμών. Τέλος χρησιμοποιώντας διαφορετικούς συντελεστές μεταφοράς θερμότητας (500, 1.000 και άπειρο $W/m^2 \cdot K$) και επιλύοντας την παραπάνω γεωμετρία έδειξαν ότι η αύξηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας επιταχύνει τις μεταβολές της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της κονσέρβας.

Το επόμενο έτος οι Kannan and Sandaka (2008) μελέτησαν τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας υγρών κονσερβοποιημένων τροφίμων με τη βοήθεια της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Ως υγρό τρόφιμο χρησιμοποίησαν CMC 0.85% (w/w) και βάση αυτού επιβεβαίωσαν το θεωρητικό μοντέλο της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, το οποίο σχεδιάστηκε με βάση το λογισμικό “CFXv5.7”. Αρχικά από το λογισμικό βρήκαν τη ροή θερμότητας

(heat flux) από το θερμαντικό μέσο προς το εσωτερικό της κονσέρβας. Έπειτα υπολόγισαν τη θερμοκρασία που είχε το υγρό τρόφιμο στο οριακό στρώμα μεταξύ αυτού και του τοιχώματος της κονσέρβας. Έτσι από τον τύπο $q_w = h \cdot (T_w - T_{bulk})$ υπολόγισαν τον συντελεστή μεταφορά θερμότητας h . Επειδή όμως υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμού της ροής θερμότητας με βάση τη μάζα και τον όγκο, κρίθηκε σκόπιμο να γίνει σύγκριση των δύο περιπτώσεων. Από τη σύγκριση βρέθηκε ότι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας δεν παρουσιάζει διαφοροποιήσεις. Στη συνέχεια οι Kannan and Sandaka (2008) δημιούργησαν εξισώσεις με τις οποίες υπολογίζεται ο αριθμός Nusselt (Nu) και κατά συνέπεια ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ως συνάρτηση του αριθμού Fourier (Fo). Επίσης έκαναν σύγκριση της μεταβολής του αριθμού Nu σε σχέση με τον αριθμό Fo μεταξύ θεωρητικού μοντέλου και υπολογιστικά, μέσω της μεθόδου που περιγράφεται από τον Holman (1986) και βρήκαν καλή σύμπτωση τιμών. Τέλος, από τα παραπάνω υπολογίστηκε ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας και βρέθηκε ότι στην έναρξη της θέρμανσης κυμαινόταν κοντά στα $500 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ και στο τέλος της θέρμανσης έφτανε μόλις στα $40 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

Στη συνέχεια οι Kiziltaş *et al* (2010) μελέτησαν την προσομοίωση της θερμικής επεξεργασίας κονσερβοποιημένων μπιζελιών εμβαπτισμένα σε νερό. Επειδή το σχήμα και το μέγεθος των μπιζελιών δεν επέτρεπε σε 3D την κατασκευή πλέγματος με περιορισμένο αριθμό κελιών, ώστε να μπορεί να επιλυθεί σε ένα μέσο ηλεκτρονικό υπολογιστή οι Kiziltaş *et al* (2010) θεώρησαν ότι υπάρχει συμμετρία εντός της κονσέρβας και επέλυσαν μια κάθετη τομή της. Στην τομή αυτή ήταν σχεδιασμένο ορθογώνιο σχήμα το οποίο θεωρούσαν ως το περίγραμμα της κονσέρβας, δίσκοι σε κανονική διάταξη, τους οποίους θεωρούσαν ως τομές των σφαιρικών στερεών τροφίμων και οι χώροι μεταξύ κονσέρβας και μπιζελιών που καταλάμβανε το υγρό. Η επίλυση πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό “ANSYSv11”. Επίσης έγινε πειραματική επιβεβαίωση του θεωρητικού μοντέλου με καταγραφή της θερμοκρασίας σε σημείο (γεωμετρικό κέντρο της κονσέρβας) στο εσωτερικό του στερεού τροφίμου και σε σημείο στο ρευστό. Οι τιμές της θερμοκρασίας οι οποίες βρέθηκαν ήταν σε καλή σύμπτωση με αυτές που εξήχθησαν από το λογισμικό. Οι Kiziltaş *et al* (2010) βρήκαν ότι η αργότερα θερμαινόμενη ζώνη εντοπίστηκε ανάμεσα στο γεωμετρικό κέντρο και τον πυθμένα της κονσέρβας, συγκεκριμένα σε εικόνα που δείχνει την κατανομή της θερμοκρασίας φαίνεται ότι η αργότερα θερμαινόμενη ζώνη εστιάζεται στη δεύτερη σειρά μπιζελιών, όχι όμως στον κεντρικό άξονα της κονσέρβας, αλλά κινείται προς το πλάγιο τοίχωμα.

Το ίδιο έτος οι Augusto *et al* (2010) επιχείρησαν να προσομοιάσουν την ήπια θερμική επεξεργασία που πραγματοποιείται στους περιέκτες από αλουμίνιο, που περιέχουν μύρα με τη χρήση υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Οι Augusto *et al* (2010) χρησιμοποίησαν το λογισμικό “ANSYS CFX 11.0” για την προσομοίωση της θερμικής επεξεργασίας σε περιέκτες των 375 ml τοποθετώντας νερό αντί για μύρα στους υπολογισμούς (θεωρώντας ότι υπάρχει headspace), ενώ δεν υπήρξε επιβεβαίωση του θεωρητικού μοντέλου με πειραματικά δεδομένα. Όσον αφορά τις επιλύσεις με τη χρήση του λογισμικού της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής έγινε μελέτη στη θέση του περιέκτη (οριζόντια, κάθετη και πλάγια θέση) και υπολογίστηκε η μέση τιμή F που δέχτηκε το υγρό τρόφιμο. Μετά την επίλυση και την παραλαβή των αποτελεσμάτων οι Augusto *et al* (2010) βρήκαν ότι η αργότερα θερμαινόμενη ζώνη (ή ψυχρό σημείο), για τον κάθετο περιέκτη εντοπιζόταν στον κεντρικό άξονα και σε απόσταση από τον πυθμένα του περιέκτη περίπου 10-20% του ύψους του ρευστού, ενώ για τον οριζόντιο περιέκτη επισημάνθηκε στο μισό ύψος του και περίπου 5-10% της διαμέτρου από τη βάση. Τέλος με τον υπολογισμό της μέση τιμής F για τις τρεις περιπτώσεις (οριζόντια, κάθετη και πλάγια θέση του περιέκτη) δεν βρέθηκε αξιόλογη διαφοροποίηση στις τιμές.

Σημαντική ήταν και η μελέτη των AnandPaul *et al* (2011), η οποία αναφέρεται στη προσομοίωση της παστερίωσης γάλακτος σε κονσέρβες από αλουμίνιο χρησιμοποιώντας το λογισμικό υπολογιστικής ρευστοδυναμικής “ANSYS – Fluent”. Σε αυτή την εργασία έγινε επιβεβαίωση του θεωρητικού μοντέλου με πειραματικά δεδομένα για δύο θερμοκρασίες θέρμανσης και η μελέτη της επίδρασης της περιστροφής της κονσέρβας κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας στην μετάδοση θερμότητας και κατ’ επέκταση στο θερμικό αποτέλεσμα. Σύμφωνα με τους AnandPaul *et al* (2011) το θεωρητικό μοντέλο επιβεβαιώνεται με καλή συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα, ενώ είναι σημαντική και επίδραση των διαφορετικών θερμοκρασιών του μέσου θέρμανσης στο τελικό θερμικό αποτέλεσμα. Τέλος φαίνεται ότι η περιστροφή της κονσέρβας κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας αυξάνει το θερμικό αποτέλεσμα, όμως η περαιτέρω αύξηση από 5 rpm δεν επιφέρει σημαντικά μεγαλύτερο αποτέλεσμα.

Το ίδιο έτος οι Erdogdu and Tutar (2011) μελέτησαν την επίδραση του headspace στην μετάδοση θερμότητας και της φυσικής κυκλοφορίας ενός κονσερβοποιημένου τροφίμου κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας. Σύμφωνα με τους Erdogdu & Tutar η επίδραση στα παραπάνω φαινόμενα εξαρτάται από το ύψος του κενού (το κενό περιείχε αέρα) που δημιουργείται μεταξύ υγρού τροφίμου (νερού) και οροφής

της κονσέρβας και μπορεί να περιγραφεί με τη χρήση υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Η γεωμετρία μιας κονσέρβας με headspace σχεδιάστηκε σε 2D και το πλέγμα που δημιουργήθηκε ήταν αρκετά πυκνό στη σημαντική περιοχή γύρω από το headspace. Το θεωρητικό μοντέλο, το οποίο σχεδιάστηκε από τους Erdogdu and Tutar (2011) επιβεβαιώθηκε με πειραματικά θερμοκρασιακά δεδομένα. Επίσης, τόσο από τα θερμοκρασιακά δεδομένα που καταγράφηκαν, όσο και από τα διαγράμματα θερμοκρασιακής κατανομής εντός της κονσέρβας φαίνεται ότι η επίδραση του headspace είναι σημαντική. Το ίδιο σημαντικό είναι και η επίδραση στη ροή του υγρού τροφίμου όσο και στις τιμές Reynolds και Rayleigh.

Παράλληλα, οι Dimou and Yanniotis (2011) διερεύνησαν την προσομοίωση της θερμικής επεξεργασίας κονσερβοποιημένων σπαραγγιών εμβαπτισμένων σε άλμη NaCl με τη χρήση υπολογιστικής ρευστοδυναμικής σε 3D χρησιμοποιώντας το λογισμικό “Fluent”. Σε αυτή την εργασία έγινε μελέτη της επίδρασης των μοντέλων σύζευξης πίεσης – ταχύτητας, η επίδραση της αύξησης των σπαραγγιών στη θερμική επεξεργασία, η επίδραση του σχήματος του περιέκτη (κονσέρβα ή γυάλινο βάζο) επί της ροής της άλμης και της θερμοκρασιακής μεταβολής των σπαραγγιών και τέλος έγινε επιβεβαίωση του θεωρητικού μοντέλου με πειραματικά θερμοκρασιακά δεδομένα. Σύμφωνα με την πειραματική διαδικασία που πραγματοποιήθηκε η καταγραφόμενη θερμοκρασία στα σημεία ελέγχου είχε καλή σύμπτωση με τη θερμοκρασία που λήφθηκε από το λογισμικό. Έπειτα παρατηρήθηκε ότι η αύξηση του αριθμού των σπαραγγιών στην κονσέρβα αύξανε τη μέγιστη τιμή της ταχύτητας του ρευστού, ενώ αντίστοιχη μείωση φάνηκε στη θερμοκρασία της αργότερα θερμαινόμενης ζώνης. Η αργότερα θερμαινόμενη ζώνη εντοπίστηκε στον κεντρικό άξονα της κονσέρβας (εντός του κεντρικού σπαραγγιού) και πιο συγκεκριμένα σε απόσταση 13,5% του ύψους, από τον πυθμένα της κονσέρβας. Επίσης παρατηρήθηκε ότι η θερμοκρασία στην αργότερα θερμαινόμενη ζώνη αυξάνεται με μικρότερο ρυθμό στο βάζο που περιέχει 19 σπαραγγία σε σχέση με την κυλινδρική κονσέρβα που περιέχει τον ίδιο αριθμό σπαραγγιών. Τέλος αποδείχθηκε ότι η θέρμανση των σπαραγγιών είναι ανομοιόμορφη και το επάνω μέρος τους δέχεται την μεγαλύτερη θερμική καταπόνηση.

Σε συνέχεια της προηγούμενης εργασίας των Erdogdu and Tutar (2011), οι Tutar and Erdogdu (2012) μελέτησαν την επίδραση του headspace στη θερμική επεξεργασία υγρού τροφίμου σε κυλινδρική κονσέρβα, η οποία περιστρεφόταν κατά τον κύκλο θέρμανσης – ψύξης. Η ερευνητική αυτή ομάδα κατάφερε να επιβεβαιώσει τα θεωρητικά αποτελέσματα με πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας σε διάφορα

σημεία της κονσέρβας κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας. Σύμφωνα με το θεωρητικό μοντέλο των Tutar and Erdogdu (2012) ο όγκος του headspace αναμειγνύεται με το υγρό τρόφιμο κατά τη διάρκεια της περιστροφής της κονσέρβας. Η ανάμειξη αυτή είναι εντονότερη όταν αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής, ενώ η επίλυση γίνεται πιο ασταθής. Σημαντική είναι και η επίδραση της αδράνειας όπως φαίνεται από την κατεύθυνση του διανύσματος της ταχύτητας του ρευστού. Όσον αφορά στη μετάδοση θερμότητας, από τα διαγράμματα της μελέτης, φαίνεται ότι η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής της κονσέρβας αυξάνει το ρυθμό μετάδοσης θερμότητας και στις περιπτώσεις όπου εντός της κονσέρβας υπήρχε αέρας – νερό και στις περιπτώσεις που υπήρχε αέρας – υγρό τρόφιμο.

Τέλος, οι Augusto and Christianini (2012) πραγματοποίησαν προσομοίωση της θερμικής επεξεργασίας υγρού τροφίμου σε περιέκτη σχήματος κύβου με τη χρήση υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Οι Augusto and Christianini (2012) είναι οι πρώτοι οι οποίοι μελέτησαν με υπολογιστική ρευστοδυναμική περιέκτες σχήματος κύβου με το λογισμικό “ANSYS CFXv12”. Όπως και στην προηγούμενη δημοσίευση των Augusto *et al* (2010) έτσι και σε αυτή δεν υπάρχουν πειραματικά δεδομένα που να επιβεβαιώνουν το θεωρητικό μοντέλο της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Εντούτοις παρατίθενται σημαντικά αποτελέσματα όπως ο υπολογισμός της μέσης τιμής F για την περίπτωση του περιέκτη που περιείχε νερό, υγρό τρόφιμο με ιξώδες 10 φορές μεγαλύτερο από το νερό και στερεό τρόφιμο.

Κεφάλαιο II. Θερμική επεξεργασία επιτραπέζιων ελιών

II.1 Εισαγωγικά

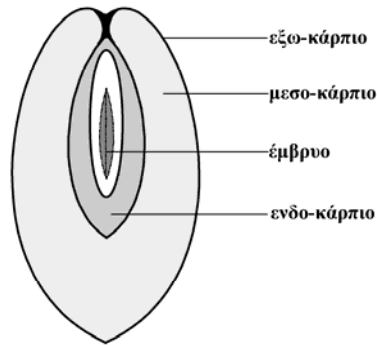
II.1.1 Η ελιά

Ένα από τα σημαντικότερα αγροτικά προϊόντα των χωρών της μεσογειακής λεκάνης είναι η ελιά. Ο χαρακτηριστικός καρπός του δένδρου της ελιάς χρησιμοποιείται για την παραγωγή του ελαιολάδου και των επιτραπέζιων ελιών. Σήμερα εκατομμύρια καταναλωτές σε όλο τον κόσμο χρησιμοποιούν τα προϊόντα της ελιάς στην καθημερινή τους διατροφή, λόγω της υψηλής προστιθέμενης αξίας των συστατικών τους. Εκτός της διατροφικής αξίας της ελιάς, πολλά προϊόντα της χρησιμοποιούνται στη φαρμακευτική και στα καλλυντικά, ενώ χαρακτηριστική είναι η χρήση της ελιάς και του ελαιολάδου στη λειτουργική διαφόρων θρησκειών και δογμάτων. Επίσης τα παραπροϊόντα της επεξεργασίας της ελιάς χρησιμοποιούνται σε μονάδες βιοτεχνολογικής αποικοδόμησης για την παραγωγή βιοκαυσίμου ή άλλων βιοτεχνολογικών προϊόντων. Κατά συνέπεια γίνεται αντιληπτό ότι η ελιά και τα προϊόντα της κατέχουν υψηλή θέση στην καθημερινή ζωή των ανθρώπων και είναι απαραίτητη η λεπτομερής διερεύνηση τόσο του τομέα καλλιέργειας και παραγωγής των ελιών, όσο και του τομέα της επεξεργασίας των καρπών για την παραγωγή ποιοτικών προϊόντων (Μπαλατσούρας 2004, Therios 2009, Del Fabro 2009, Ποντίκης 2000, Kailis and Harris 2007).

II.1.2 Βοτανική ταξινόμηση

Η ελιά είναι ένα δένδρο, που ανήκει στην οικογένεια Oleaceae και το γένος Oleae. Στο γένος αυτό ταξινομούνται περίπου 30 είδη φυτών διεσπαρμένα σε όλη τη γη. Η ελιά με επιστημονική ονομασία *Olea europaea* αποτελείται από έναν μεγάλο αριθμό υποειδών. Το δένδρο της ελιάς είναι αειθαλές, αιωνόβιο και το μέγεθός του κυμαίνεται 5-20 m ύψος. Ο καρπός της ελιάς είναι δρύπη σφαιρική ή ελλειψοειδής, αποτελούμενη από το εξωκάρπιο (φλοιός), το μεσοκάρπιο (σάρκα) και τον πυρήνα (ενδοκάρπιο και έμβρυο) – (Εικόνα 11).

Οι καρποί αρχικά έχουν χρώμα πράσινο, ενώ σταδιακά με την ωρίμανσή τους μετατρέπονται σε ερυθροϊώδες έως μαύροι. Οι ελιές σε σχέση με το μέγεθος των καρπών διακρίνονται σε μικρόκαρπες, μεσόκαρπες και αδρόκαρπες ή χονδροελιές.



Εικόνα 11. Εγκάρσια τομή σε καρπό ελιάς πλήρους ωρίμανσης (Kailis and Harris 2007)

Οι μικρόκαρπες ποικιλίες συνήθως έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε έλαιο, για αυτό το λόγο προορίζονται για την παραγωγή ελαιολάδου, ενώ οι αδρόκαρπες έχουν μικρότερη περιεκτικότητα σε έλαιο και προορίζονται για την παραγωγή επιτραπέζιων ελιών. Οι μεσόκαρπες ποικιλίες χρησιμοποιούνται και προς τις δύο κατευθύνσεις. (Μπαλατσούρας 2004, Therios 2009, Adriano Del Fabro 2009, Ποντίκης 2000, Kailis and Harris 2007)

Π.1.3 Ιστορικά και οικονομικά στοιχεία

Η ελιά, ως δένδρο καλλιεργείται από τα προϊστορικά χρόνια. Τα ευρήματα σε διάφορους αρχαιολογικούς τόπους δείχνουν ότι οι Έλληνες, αλλά και άλλοι αρχαίοι λαοί καλλιεργούσαν την ελιά για τους καρπούς της, είτε για την παραγωγή ελαιολάδου είτε για την παραγωγή επιτραπέζιων ελιών. Πολλές περιοχές του πλανήτη διεκδικούν την καταγωγή της, όμως δεν υπάρχει κάποια σαφής απόδειξη για τον αρχικό τόπο καλλιέργειας της ελιάς. Τα αρχαιολογικά ευρήματα δείχνουν ότι από τα προϊστορικά χρόνια στην Ελλαδική χερσόνησο ήταν διαδεδομένη η καλλιέργεια του ελαιοδένδρου. Στη συνέχεια από την κλασική και ελληνιστική περίοδο μέχρι τον μεσαίωνα και την τουρκοκρατία ιστορικά συγγράμματα αναφέρονται στο σημαντικό ρόλο που διαδραμάτισε η ελιά τόσο στη διατροφή των ανθρώπων όσο και στην οικονομία των εκάστοτε κρατών της μεσογειακής λεκάνης.

Σήμερα, στις χώρες γύρω από την λεκάνη της Μεσογείου καλλιεργείται το 98% των ελαιοδέντρων σε παγκόσμια κλίμακα και παράγεται το 97% της παγκόσμιας παραγωγής. Η Ιταλία, η Ισπανία, η Ελλάδα και η Τυνησία είναι οι 4 χώρες με τη μεγαλύτερη παραγωγή ελαιολάδου και επιτραπέζιων ελιών κατά φθίνουσα σειρά σε παγκόσμια κλίμακα. Στον Πίνακα 2 φαίνεται η έκταση, τα καλλιεργούμενα

ελαιόδεντρα, η παραγωγή ελαιολάδου και επιτραπέζιων ελιών των χωρών με τη μεγαλύτερη παραγωγή.

Πίνακας 2. Στατιστικά στοιχεία των σημαντικότερων χωρών που καλλιεργούν ελαιόδεντρα (Therios 2009)

Χώρα	Έκταση (x1000 ha)	Ελαιόδεντρα (x1000)	Ελαιόλαδο (x1000 tn)	Ελιές (x1000 tn)
Ιταλία	1200	160.000	566	2800
Ισπανία	2300	180.000	281	1348
Ελλάδα	420	79.000	280	1350
Τυνησία	600	37.000	140	700
Μαρόκο	140	6.700	140	700
Τουρκία	1200	59.000	107	650

Το ελαιόλαδο και οι επιτραπέζιες ελιές κατέχουν το μεγαλύτερο μέρος των ελληνικών εξαγωγών αγροτικών προϊόντων και της εγχώριας αγροτικής παραγωγής. Το ελληνικό ελαιόλαδο και οι επιτραπέζιες ελιές διακινούνται σε όλες τις χώρες του κόσμου, ενώ εξασφαλίζουν υψηλό εισόδημα στους έλληνες ελαιοπαραγωγούς (Μπαλατσούρας 2004, Therios 2009, Adriano Del Fabro 2009, Ποντίκης 2000, Kailis and Harris 2007).

Π.1.4 Επιτραπέζιες ελιές

Π.1.4.1 Ορισμός και εμπορικοί τύποι

Οι ελιές που κινούνται για την παραγωγή επιτραπέζιου προϊόντος προέρχονται από συγκεκριμένες ποικιλίες ελιών και δέχονται κατάλληλες τεχνικές επεξεργασίας. Σύμφωνα με τον Codex Alimentarius (1981) ως επιτραπέζιες ελιές ορίζεται το προϊόν που προέρχεται από υγιείς καρπούς κατάλληλων ποικιλιών του είδους *Olea europaea sativa* Hoffg, Link, οι οποίοι συγκομίζονται σε κατάλληλο στάδιο ωρίμανσης και η ποιότητα των οποίων είναι τέτοια, έτσι ώστε όταν θα επεξεργαστούν να παράγουν βρώσιμο προϊόν και με μεγάλο χρόνο συντήρησης.

Λόγω των διαφορετικών τεχνικών επεξεργασίας οι επιτραπέζιες ελιές διακρίνονται σε διαφορετικούς τύπους τελικού προϊόντος (Μπαλατσούρας 2004, Therios 2009, Codex Alimentarius 1981, Kailis and Harris 2007).

Π.1.4.2 Φυσικοχημικά και βιοχημικά χαρακτηριστικά των επιτραπέζιων ελιών

Οι ελιές που κινούνται για επιτραπέζια κατανάλωση συνήθως έχουν μήκος από 1 cm έως 3 cm και διάμετρο 1 cm έως 2 cm. Όμως ανάλογα την ποικιλία, το δέντρο και τις

καλλιεργητικές τεχνικές είναι δυνατό οι ελιές να έχουν μεγαλύτερες διαστάσεις. Το βάρος κάθε ελιάς κυμαίνεται από 0,5 g έως 15 g. Οι πυρήνες των επιτραπέζιων ελιών καταλαμβάνουν το 10 – 40% της συνολικής μάζας του καρπού και το υπόλοιπο καταλαμβάνουν η σάρκα και ο φλοιός. Το σχήμα των ελιών είναι ωσειδές συμμετρικό ή μαστοειδές, ενώ σε ορισμένες ποικιλίες παράγονται καρδιόσχημες ελιές.

Η υγρασία των ελιών επιτραπέζιας χρήσης κυμαίνεται από 55 – 68%, το λίπος από 10 – 28%, ενώ η μέγιστη περιεκτικότητα σε πρωτεΐνες δεν ξεπερνά το 2% και τα σάκχαρα το 12%. Επίσης στις ελιές περιέχονται φυτικές ίνες σε ποσοστό που δεν ξεπερνά το 1% και διάφορα μέταλλα και αμέταλλα σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι στις ελιές περιέχεται ένας γλυκοζίτης με πολύ πικρή γεύση, η ελαιοευρωπαϊνή που χαρακτηρίζεται για τις αντικαρκινικές ιδιότητές της. Κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας των ελιών παρατηρείται η μείωση της υγρασίας τους, ιδίως σε αυτές που αποξηραίνονται ή αλιπαστώνονται. Οι ελιές που ζυμώνονται ή επεξεργάζονται με άλλους τρόπους (όπως αναφέρεται στην επόμενη παράγραφο) παρατηρείται μικρή μεταβολή στην υγρασία.

Το λίπος που βρίσκεται ενσωματωμένο στη σάρκα των ελιών αποτελείται κυρίως από τριγλυκερίδια, στα οποία το κύριο λιπαρό οξύ είναι το ελαϊκό σε ποσοστό 70 – 80%, το παλμιτικό σε ποσοστό 10 – 15%, το λινολεϊκό σε ποσοστό 5 – 10%, ενώ άλλα λιπαρά οξέα βρίσκονται σε μικρότερες συγκεντρώσεις, όπως το στεαρικό, το λινολενικό κ.α. Κατά βάση το λίπος των ελιών δεν μεταβάλλεται ποσοτικά και ποιοτικά κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας τους. Μικρή απώλεια ελαίου παρατηρείται κατά την πλύση των ελιών, ενώ ένα πολύ μικρό ποσοστό σαπωνοποιείται όταν γίνεται αποπίκνωση με διάλυμα NaCl στις ελιές.

Στον καρπό της ελιάς περιέχονται απλά σάκχαρα (ολιγοσακχαρίτες) και πολυσακχαρίτες. Τα απλά σάκχαρα των ελιών είναι η γλυκόζη, η φρουκτόζη, η σουκρόζη και ημανιτόλη. Η γλυκόζη και η φρουκτόζη, τα λεγόμενα και ως ανάγοντα σάκχαρα είναι αυτά που χρησιμοποιούνται ως υπόστρωμα από τα γαλακτικά βακτήρια για την παραγωγή γαλακτικού οξέως. Κατά συνέπεια μετά την επεξεργασία των ελιών με ζύμωση η περιεκτικότητα των σακχάρων αυτών μειώνεται ραγδαία. Οι πολυσακχαρίτες των ελιών είναι η κυτταρίνη, η πηκτίνη και η λιγνίνη. Η λιγνίνη εντοπίζεται στον πυρήνα των ελιών και κατά την επεξεργασία τους δεν παρατηρείται καμία αλλαγή στη σύστασή της. Η κυτταρίνη και η πηκτίνη εντοπίζονται κυρίως στα κυτταρικά τοιχώματα των ελιών και είναι υπεύθυνες για την κυτταρική δομή της σάρκας. Κατά την επεξεργασία των ελιών τυχόν βεβιασμένοι χειρισμοί είναι υπεύθυνοι για κατάρρευση της δομής και υποβάθμιση της υφής των ελιών. Επίσης

υποβάθμιση της υφής μπορεί να προκληθεί κι από δράση πηκτινολυτικών ενζύμων κατά την διάρκεια της αποθήκευσης των ελιών. Επίσης στη σάρκα των ελιών περιέχονται πολυφαινόλες, οι οποίες οξειδώνονται με τραυματισμό ή έκθεση στον αέρα λόγω της δράσης φαινολοξειδασών ενζύμων. Το φαινόμενο αυτό αποτελεί χαρακτηριστικό ποιοτικής υποβάθμισης των ελιών και αναφέρεται στις πράσινες ελιές.

Οι πρωτεΐνες και τα ανόργανα συστατικά λόγω της πολύ μικρής συγκέντρωσης στις ελιές δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερη μεταβολή κατά την επεξεργασία τους. Κατά τη συγκομιδή οι ελιές περιέχουν σημαντικές ποσότητες βιταμινών. Οι υδατοδιαλυτές βιταμίνες με τις πλύσεις και την ευρύτερη επεξεργασία μειώνονται στο ελάχιστο, ενώ οι λιποδιαλυτές βιταμίνες παρουσιάζουν σταθερότητα στη συγκέντρωσή τους, λόγω της μη μεταβολής του λίπους των ελιών.

Σημαντική παράμετρος για την επεξεργασία των ελιών είναι η μικροχλωρίδα τόσο του φλοιού, όσο και του εσωτερικού των ελιών. Το είδος και ο πληθυσμός των μικροοργανισμών εξαρτάται από την περιοχή, την εποχή της συγκομιδής και τις κλιματικές συνθήκες της εποχής της συγκομιδής. Ανάπτυξη μικροοργανισμών στο εσωτερικό της σάρκας παρατηρείται στην περίπτωση που υπάρξει τραυματισμός ή προσβολή από εντομολογικούς εχθρούς. Τέτοιοι εχθροί είναι ο δάκος της ελιάς (*Dacus oleae*) και ο πυρηνοτρήτης (*Prays oleae*). Ο δάκος είναι ένα δίπτερο που εναποθέτει τα αυγά του σε ανοίγματα που δημιουργεί στο φλοιό των ελιών. Εκεί τα αυγά εκκολάπτονται σε προνύμφες, οι οποίες δημιουργούν στοές στη σάρκα της ελιάς με αποτέλεσμα να καταστρέφουν τη δομή της σάρκας. Από την άλλη πλευρά ο πυρηνοτρήτης είναι ένα λεπιδόπτερο, το οποίο την εποχή που ο καρπός της ελιάς βρίσκεται σε νεανικό στάδιο εναποθέτει τα αυγά του κοντά στο μίσχο και αυτά εκκολαπτόμενα μετατρέπονται σε προνύμφες. Οι προνύμφες εισχωρούν στο εσωτερικό των ελιών και φτάνουν μέχρι τον μη ξυλοποιημένο πυρήνα, όπου και τον καταστρέφουν. Το κύριο πρόβλημα και των δύο προσβολών είναι η μόλυνση στις πληγές που δημιουργούν τα έντομα από μικρόβια, τα οποία στη συνέχεια αναπτυσσόμενα υποβαθμίζουν τις προς επεξεργασία ελιές (Μπαλατσούρας 2004, Therios 2009, Ποντίκης 2000, Kailis and Harris 2007).

Π.1.4.3 Παραγωγή επιτραπέζιων ελιών

Οι ελιές σαν τρόφιμο θεωρούνται από την παγκόσμια καταναλωτική αγορά ως ευγενές προϊόν και για αυτό το λόγο αντιμετωπίζεται με μεγάλη προσοχή τόσο στην παραγωγή του, όσο και στη διάθεσή του προς κατανάλωση. Σύμφωνα με τον Codex

Alimentarius από το 1981 (CODEX STAN 66-1981) έχουν θεσπιστεί διεθνή “standards” με τα οποία περιγράφονται οι εμπορικοί τύποι των επιτραπέζιων ελιών, ορίζονται οι τρόποι επεξεργασίας και καθορίζονται οι συντελεστές ποιοτικής κατανομής των εκάστοτε ελιών. Στις παρακάτω παραγράφους περιγράφονται τόσο οι εμπορικοί τύποι επιτραπέζιων ελιών, όσο και αυτοί που απαιτείται να επεξεργαστούν θερμικά, έτσι ώστε οι ελιές να παραμείνουν ασφαλείς μέχρι την κατανάλωσή τους. (Μπαλατσούρας 2004, Codex Alimentarius 1981)

II.1.4.4 Τύποι εμπορίας επιτραπέζιων ελιών

Οι κύριοι τύποι εμπορίας επιτραπέζιων ελιών σε σχέση με τον βαθμό ωριμότητά τους είναι α) οι πράσινες ελιές σε άλμη (Ισπανικού τύπου), β) οι τεχνητώς μαύρες ελιές σε άλμη και γ) οι φυσικές μαύρες ελιές σε άλμη (Ελληνικού τύπου).

Οι πράσινες ελιές σε άλμη χωρίζονται σε επεξεργασμένες και μη επεξεργασμένες ελιές. Οι πρώτες επεξεργάζονται αρχικά με άλκαλι και έπειτα υπόκεινται σε ζύμωση με τη χρήση γαλακτικών βακτηρίων. Ανάλογα το χρόνο ζύμωσης και τη διακύμανση του pH στο υγρό ζύμωσης οι ελιές αυτές επεξεργάζονται θερμικώς ή καταψύχονται ή τους προστίθενται συντηρητικές ουσίες ή συσκευάζονται σε τροποποιημένες ατμόσφαιρες. Οι φυσικές πράσινες ελιές απλώς τοποθετούνται σε δοχεία και υπόκεινται σε γαλακτική ζύμωση με άλμη.

Οι ελιές οι οποίες βρίσκονται στο στάδιο της μέσης ωρίμανσης, όπου το χρώμα τους έχει ενδιάμεση χροιά μεταξύ πράσινου και “μαύρου” επεξεργάζονται με τον ίδιο τρόπο όπως και οι πράσινες ελιές με τη διαφορά ότι “μαυρίζουν” κατά τη διάρκεια της ζύμωσης. Στην περίπτωση αυτή διακρίνονται οι επεξεργασμένες τεχνητώς μαυρισμένες ελιές με άλκαλι πριν τη ζύμωση και στις φυσικές ζυμώμενες τεχνητώς μαυρισμένες ελιές. Επίσης υπάρχει και η κατηγορία των τεχνητώς μαυρισμένων ελιών, οι οποίες δεν υπόκεινται σε ζύμωση και απ’ ευθείας οδηγούνται σε επεξεργασία, συσκευασία και αποθήκευση. Η μεταβολή του χρώματος σε αυτή την περίπτωση πραγματοποιείται με οξείδωση σε άλμη.

Οι μαύρες ελιές σε άλμη διακρίνονται βάση την επεξεργασία τους σε επεξεργασμένες με άλκαλι και φυσικές μαύρες ελιές σε άλμη. Επειδή αυτού του τύπου οι ελιές βρίσκονται σε πλήρη ωρίμανση οι χειρισμοί πρέπει να είναι ιδιαίτερος προσεκτικοί για την όσο το δυνατό μικρότερη υποβάθμιση του προϊόντος. Οι φυσικές και οι επεξεργασμένες μαύρες ελιές μετά τη γαλακτική ζύμωση που υπόκεινται, δέχονται μια σειρά από επιπλέον επεξεργασίες μέχρι την τελική διάθεση στην κατανάλωση.

Τέλος εκτός από τις εμβαπτισμένες ελιές σε άλμη NaCl υπάρχουν και άλλοι εμπορικοί τύποι ελιών, όπως οι φυσικώς “ζαρωμένες”, οι αλατισμένες (“θρούμπες”), οι “τσακιστές”, οι αποξηραμένες και άλλες. (Μπαλατσούρας 2004, Therios 2009, Codex Alimentarius 1981, Ποντίκης 2000, Kailis and Harris 2007)

Π.1.4.5 Θερμική επεξεργασία επιτραπέζιων ελιών

Από τους παραπάνω εμπορικούς τύπους ελιών είτε πριν, είτε μετά τη συσκευασία του μείγματος “ελιές – άλμη” πραγματοποιείται θερμική επεξεργασία για τη θανάτωση των αλλοιογόνων μικροοργανισμών, όπως είναι τα προπιονικά βακτήρια. Η ένταση της θερμικής επεξεργασίας που εφαρμόζεται είναι συνάρτηση των συνθηκών που επικρατούν στο εσωτερικό του περιέκτη. Έτσι σε προϊόν χαμηλής οξύτητας είναι απαραίτητο να εφαρμοστεί εμπορική αποστείρωση με στόχο τα θερμο-ανθεκτικά σποριογόνα βακτήρια, ενώ σε ελιές με υψηλή οξύτητα εφαρμόζεται θερμική επεξεργασία ήπιας έντασης. Κατά συνέπεια ο κύριος παράγοντας που καθορίζει την ένταση της θερμικής επεξεργασίας είναι το pH.

Στις ελιές που υπόκεινται σε γαλακτική ζύμωση, το μείγμα ελιές – άλμη μετά το τέλος της ζύμωσης έχει pH μικρότερο από 4, με αποτέλεσμα να είναι αδύνατη η ανάπτυξη των σπορίων του *C. botulinum*. Με βάση το γεγονός αυτό η θερμική επεξεργασία που εφαρμόζεται είναι αρκετά ήπια και έχει στόχο τα προπιονικά βακτήρια. Το Διεθνές Συμβούλιο Ελιάς στηριζόμενο στην εργασία των (González et al, 1982) όρισε ως αποδεκτό ισοδύναμο χρόνο θερμικής επεξεργασίας για τις ζυμωμένες ελιές σε άλμη την τιμή $PU_{62.4^{\circ}C}^{5.25^{\circ}C} = 15 \text{ min}$. Από την άλλη πλευρά οι ελιές που υπέστησαν τεχνητό μαύρισμα με οξείδωση έχουν υψηλό pH, με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η ανάπτυξη των σπορίων του *C. botulinum*. Σε αυτή την περίπτωση πάλι το Διεθνές Συμβούλιο Ελιάς όρισε ως κατώτερο ισοδύναμο χρόνο θερμικής επεξεργασίας την τιμή $F_0 = 15 \text{ min}$. Για το σκοπό αυτό σύμφωνα τον Lopez, 1987 η θέρμανση στους 121,11°C για 45 min σε κονσέρβες χωρητικότητας $\leq 1\text{kg}$ έχει ως αποτέλεσμα την θερμική καταστροφή των σπορίων του *C. botulinum* και την μικροβιολογική ασφάλεια του προϊόντος (Μπαλατσούρας 2004, Gonzalez et al 1982, Lopez 1987, Codex Alimentarius 1981).

II.2 Υλικά και Μέθοδοι

II.2.1 Προσδιορισμός φυσικών ιδιοτήτων ελιών

Οι φυσικές ιδιότητες των ελιών προσδιορίστηκαν πειραματικά. Οι ελιές που χρησιμοποιήθηκαν στις πειραματικές θερμικές επεξεργασίες και στο θεωρητικό μοντέλο ήταν ποικιλίας “Καλαμών” και “Κονσερβολιές” οι οποίες ήταν φρέσκιες ή είχαν υποστεί ζύμωση. Η προμήθεια των ελιών της ποικιλίας “Καλαμών” έγινε από την βιομηχανία επεξεργασίας επιτραπέζιων ελιών “Rila”, που εδρεύει στα Φιλιατρά Μεσσηνίας, ενώ των ελιών ποικιλίας “Κονσερβολιάς” από τοπικό παραγωγό της περιοχής της Φωκίδας (για αυτές που είχαν υποστεί ζύμωση) και από τον ελαιώνα του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών (για αυτές που δεν είχαν υποστεί ζύμωση και ήταν φρέσκιες). Για τις δύο ποικιλίες έγιναν πειράματα, με τα οποία υπολογίστηκαν οι φυσικές ιδιότητες των ελιών.

II.2.1.1 Πυκνότητα (ρ)

Η πυκνότητα των ελιών προσδιορίστηκε με την αρχή του Αρχιμήδη. Σε ογκομετρικό κύλινδρο τοποθετήθηκε αποσταγμένο νερό και έπειτα προστέθηκαν οι ελιές, οι οποίες πρώτα ζυγίστηκαν σε αναλυτικό ζυγό (B120S Santorius GmbH Göttingen). Το εκτόπισμα των ελιών θεωρείται ότι είναι ίσο με τον όγκο τους, επομένως από τον παρακάτω τύπο υπολογίζεται η πυκνότητα των ελιών.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Εξίσωση 43

Όπου ρ : η πυκνότητα των ελιών (kg/m^3)

m : η μάζα των ελιών (kg)

V : ο όγκος των ελιών (m^3)

Από την παραπάνω διαδικασία υπολογίστηκε η πυκνότητα των ελιών σε 10 επαναλήψεις και βρέθηκε ότι για τις δύο ποικιλίες ελιών που εξετάστηκαν και για τις δύο περιπτώσεις φρέσκων – ζυμωμένων ελιών ήταν $1.035 \pm 5 \text{ kg/m}^3$.

II.2.1.2 Ειδική θερμότητα (C_p)

Η ειδική θερμότητα προσδιορίστηκε με τη μέθοδο DSC (Differential Scanning Calorimetry) (model Q100, TA Instruments, Inc., New Castle, Del., U.S.A.). Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στη μέτρηση της διαφοράς ροής θερμότητας προς μια ουσία

– δείγμα και μια ουσία αναφοράς, συναρτήσει της θερμοκρασίας, όταν οι δύο ουσίες υπόκεινται σε ελεγχόμενο πρόγραμμα θέρμανσης ή και ψύξης. Σε αυτή τη μέθοδο χρησιμοποιήθηκαν μικρο-ποσότητες από διάφορα σημεία της σάρκας των ελιών και μετά το πέρας της διαδικασίας υπολογίστηκε η ειδική θερμότητα των ελιών, έχοντας ως υλικό αναφοράς υαλώδες σώμα γνωστής ειδικής θερμότητας (ζαφείρι). Από τον προσδιορισμό της ειδικής θερμότητας των ελιών, σε 10 επαναλήψεις βρέθηκε η τιμή **3.200±100 J/kg·°C** για τις περιπτώσεις των ελιών “Καλαμών” – “Κονσερβολιές” και φρέσκων – ζυμωμένων ελιών.

Π.2.1.3 Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (k)

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας προσδιορίστηκε με συσκευή ανάλυσης θερμικών ιδιοτήτων (model KD2, Decagon Devices Inc. Pullman, Wash., U.S.A.). Ο προσδιορισμός πραγματοποιήθηκε με την πολτοποίηση της σάρκας 10 ελιών και τη κατασκευή μιας “δοκού” από αυτό τον πολτό. Στο κέντρο της “δοκού” ενσωματώθηκε το θερμοστοιχείο του οργάνου, όπου και πραγματοποιήθηκε η μέτρηση με 10 επαναλήψεις. Η τιμή που εξάχθηκε σε όλες τις περιπτώσεις (φρέσκες – ζυμωμένες ελιές, “Καλαμών” - “Κονσερβολιές”) ήταν **0,4±0,05 W/m·°C**.

Π.2.2 Προσδιορισμός φυσικών ιδιοτήτων άλλων υλικών

Π.2.2.1 Χάλυβας

Στην επίλυση του θεωρητικού μοντέλου της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής για την ορθή προσομοίωση της θερμικής επεξεργασίας κονσερβοποιημένων τροφίμων χρησιμοποιήθηκαν μεταλλικές κονσέρβες. Οι τιμές των φυσικών ιδιοτήτων του χάλυβα, που χρησιμοποιήθηκε ως υλικό των περιεκτών λήφθηκαν από τη βάση δεδομένων του προγράμματος υπολογιστικής ρευστοδυναμικής Fluent (Fluent 6.3 User Manual 2006). Στον παρακάτω Πίνακα (3) φαίνονται οι τιμές των φυσικών ιδιοτήτων που δίνει η βάση δεδομένων του προγράμματος.

Πίνακας 3. Φυσικές ιδιότητες χάλυβα

Ιδιότητα	Τιμή
ρ (kg/m ³)	8.030
C_p (J/kg·°C)	502,48
k (W/m·°C)	16,27

Οι τιμές αυτές κατά τη διάρκεια της επίλυσης παραμένουν σταθερές και δεν μεταβάλλονται με την επίδραση της θερμοκρασίας.

Π.2.2.2 Υαλώδες Τεφλόν

Για την επιβεβαίωση της ορθής πρόβλεψης του θεωρητικού μοντέλου των κονσερβοποιημένων ελιών πραγματοποιήθηκε πειραματική θερμική επεξεργασία. Λόγω των δυσκολιών που παρουσιάστηκαν, όπως αναφέρεται στην παράγραφο Π.2.5.1.1, κρίθηκε απαραίτητο η χρήση ομοιωμάτων ελιών από υαλώδες τεφλόν στο κέντρο των οποίων θα καταγραφόταν η θερμοκρασία. Επειδή στο σχεδιαστικό πρόγραμμα (Gambit) τα ομοιώματα αυτά σχεδιάστηκαν και λήφθηκαν υπόψη ως σημαντικοί παράγοντες κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας, ήταν απαραίτητη η ενσωμάτωση των φυσικών ιδιοτήτων στο πρόγραμμα της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Οι ιδιότητες δόθηκαν από τον κατασκευαστή του υλικού αυτού.

Πίνακας 4. Φυσικές ιδιότητες υαλώδους τεφλόν

Ιδιότητα	Τιμή
ρ (kg/m ³)	2.240±2,5
C _p (J/kg·°C)	1.050±1
k (W/m·°C)	0,420±0,001

Επίσης έγινε γνωστό από τον κατασκευαστή ότι οι φυσικές ιδιότητες του υαλώδους τεφλόν δεν διαφοροποιούνται σημαντικά με τη θερμοκρασία και δεν μεταβάλλονται με τη χρήση τους σε πολλούς κύκλους θέρμανσης – ψύξης.

Π.2.2.3 Άλμη (NaCl)

Οι φυσικές ιδιότητες της άλμης NaCl είναι απαραίτητες στην ορθή επίλυση του πεδίου ροής των κονσερβών που περιέχουν στερεά τρόφιμα. Ο Irvine (1998) υπολόγισε τις φυσικές ιδιότητες για άλμη NaCl διαφόρων συγκεντρώσεων. Οι εμπορικοί τύποι προϊόντων εμβαπτισμένων σε άλμη NaCl περιέχουν άλμη συγκεντρώσεων 4-8% w/v. Οπότε κρίθηκε σκόπιμο να γίνει χρήση των ιδιοτήτων που έχει η άλμη NaCl για αυτές τις δύο συγκεντρώσεις (4 και 8% w/v). Παρακάτω παρουσιάζονται οι εξισώσεις που δίνουν τις τιμές της πυκνότητας, της ειδικής θερμότητας, του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας και του ιξώδους σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία.

$$\rho, C_p, k = \alpha \cdot T^2 + \beta \cdot T + \gamma$$

Εξίσωση 44

$$\mu = \alpha \cdot T^3 + \beta \cdot T^2 + \gamma \cdot T + \delta$$

Εξίσωση 45

όπου:

ρ : πυκνότητα (kg/m³)

C_p : ειδική θερμότητα (J/kg·°C)

k : συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (W/m·°C)

μ : ιξώδες (Pa·s)

T : θερμοκρασία (°C) για εύρος τιμών 10 – 130°C

Πίνακας 5. Φυσικές ιδιότητες άλμης NaCl 4% (w/v)

Συγκέντρωση άλμης	4% w/v				
Ιδιότητα	α	β	γ	δ	R^2
ρ	$-2,4685 \cdot 10^{-3}$	$-2,0517 \cdot 10^{-1}$	$1,0334 \cdot 10^3$	0	0,9999
C_p	$5,3846 \cdot 10^{-3}$	$7,3626 \cdot 10^{-2}$	$3,9630 \cdot 10^3$	0	0,9999
k	$-6,5734 \cdot 10^{-6}$	$1,7906 \cdot 10^{-3}$	$5,6592 \cdot 10^{-1}$	0	0,9999
μ	$-1,1334 \cdot 10^{-9}$	$3,4048 \cdot 10^{-7}$	$-3,6550 \cdot 10^{-5}$	$1,7087 \cdot 10^{-3}$	0,9981

Πίνακας 6. Φυσικές ιδιότητες άλμης NaCl 8% (w/v)

Συγκέντρωση άλμης	8% w/v				
Ιδιότητα	α	β	γ	δ	R^2
ρ	$-2,1838 \cdot 10^{-3}$	$-2,4932 \cdot 10^{-1}$	$1,0647 \cdot 10^3$	0	0,9999
C_p	$1,5834 \cdot 10^{-3}$	$6,8437 \cdot 10^{-2}$	$3,7630 \cdot 10^3$	0	0,9999
k	$-6,4835 \cdot 10^{-6}$	$1,8692 \cdot 10^{-3}$	$5,5915 \cdot 10^{-1}$	0	0,9999
μ	$-1,2013 \cdot 10^{-9}$	$3,6219 \cdot 10^{-7}$	$-3,9146 \cdot 10^{-5}$	$1,8560 \cdot 10^{-3}$	0,9981

Οι τιμές των φυσικών ιδιοτήτων που περιγράφονται από τους Πίνακες 5 & 6 μπορούν να ενσωματωθούν στο πρόγραμμα της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής είτε με την πολυωνυμική μορφή που έχουν, είτε ως τμηματικά γραμμική καμπύλη (piecewise linear) των τιμών σε συνάρτηση με την θερμοκρασία.

Η.2.2.4 Νερό

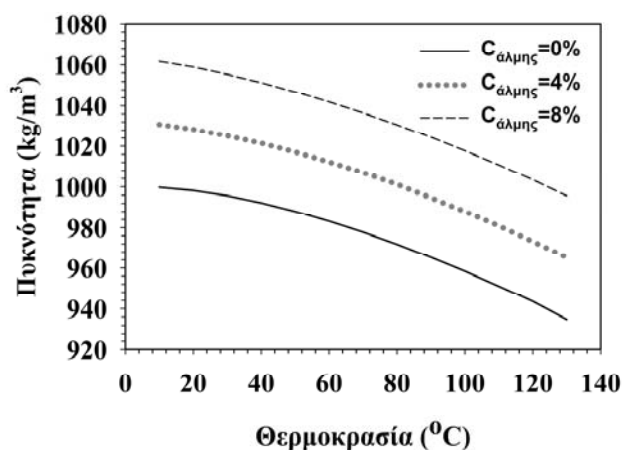
Σε ειδικές περιπτώσεις όπου οι καταναλωτές δεν επιθυμούν τα στερεά κονσερβοποιημένα τρόφιμα να είναι εμβαπτισμένα σε άλμη NaCl (π.χ. λόγω

υπέρτασης) ή σε σιρόπι ζάχαρης (π.χ. λόγω σακχαρώδους διαβήτη), τότε ως μέσω πλήρωσης των κονσερβών χρησιμοποιείται το νερό. Συνεπεία αυτού απαραίτητη ήταν η ενσωμάτωση των φυσικών ιδιοτήτων του νερού στο πρόγραμμα της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Οι τιμές των φυσικών ιδιοτήτων που χρησιμοποιήθηκαν λήφθηκαν από τη βιβλιογραφία (Heldman et al 2006). Ομοίως με τις τιμές των φυσικών ιδιοτήτων της άλμης NaCl και του σιροπιού ζάχαρης, οι τιμές ακολουθούν τις εξισώσεις 42 & 43 σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία. Οι συντελεστές των εξισώσεων αυτών φαίνονται στο παρακάτω Πίνακα 7.

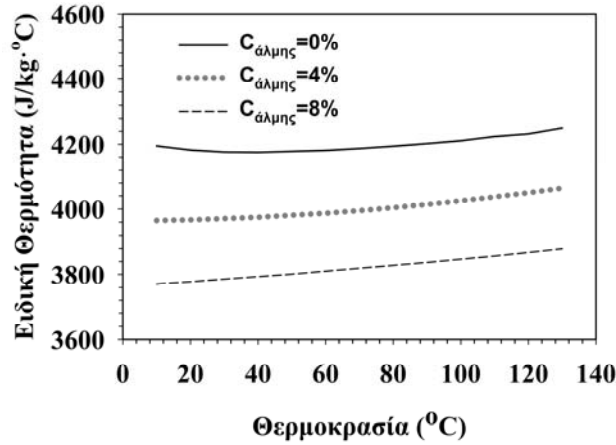
Πίνακας 7. Φυσικές ιδιότητες καθαρού νερού

Ιδιότητα	α	β	γ	δ	R^2
ρ	$-2,8976 \cdot 10^{-3}$	$-1,4384 \cdot 10^{-1}$	$1,0021 \cdot 10^3$	0	0,9996
C_p	$9,5954 \cdot 10^{-3}$	$-8,2632 \cdot 10^{-1}$	$4,1964 \cdot 10^0$	0	0,9848
k	$-9,9600 \cdot 10^{-6}$	$2,2702 \cdot 10^{-3}$	$5,5637 \cdot 10^{-1}$	0	0,9980
μ	$-1,0082 \cdot 10^{-9}$	$3,0707 \cdot 10^{-7}$	$-3,3448 \cdot 10^{-5}$	$1,5730 \cdot 10^{-3}$	0,9974

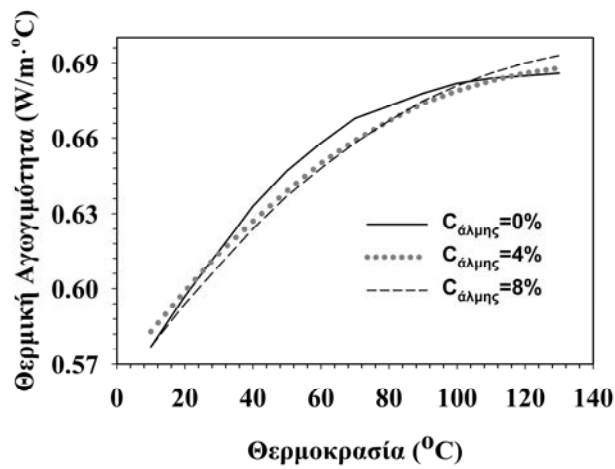
Η γραφική απεικόνιση της μεταβολής των φυσικών ιδιοτήτων σε σχέση με τη μεταβολή της θερμοκρασίας φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα (7,8,9 και 10).



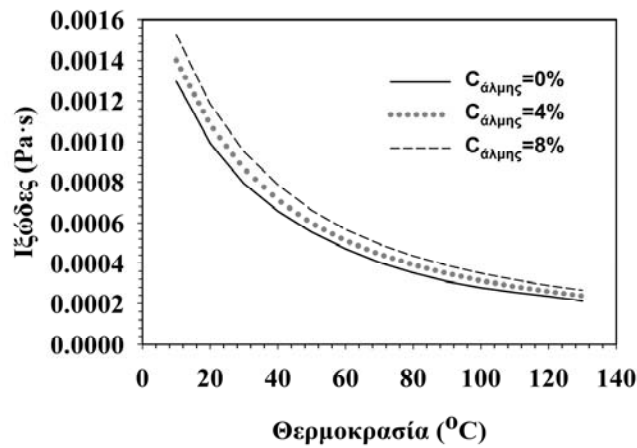
Διάγραμμα 7. Μεταβολής της Πυκνότητας του ρευστού σε σχέση με τη θερμοκρασία



Διάγραμμα 8. Μεταβολής της Ειδικής Θερμότητας του ρευστού σε σχέση με τη θερμοκρασία



Διάγραμμα 9. Μεταβολής της Θερμικής Αγωγιμότητας του ρευστού σε σχέση με τη θερμοκρασία



Διάγραμμα 10. Μεταβολής του Ιξώδους του ρευστού σε σχέση με τη θερμοκρασία

Π.2.3 Προσδιορισμός υγρασίας και ελαιοπεριεκτικότητας των ελιών

Στη βιομηχανική πρακτική τα πιο σημαντικά συστατικά των ζυμωμένων ελιών είναι η υγρασία και ελαιοπεριεκτικότητα, διότι η μεταβολή τους έχει άμεση επίδραση στα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος. Επίσης επειδή αυτά τα δύο

συστατικά βρίσκονται σε υψηλό ποσοστό καθορίζουν τη τιμή των φυσικών και θερμικών ιδιοτήτων των ελιών (πυκνότητα, ειδική θερμότητα, συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας).

Π.2.3.1 Προσδιορισμός υγρασίας

Η περιεκτικότητα των ελιών σε νερό είναι ένα σημαντικό ποιοτικό χαρακτηριστικό που διαφοροποιεί τις ελιές όσον αφορά τις φυσικοχημικές ιδιότητες, αλλά και την υφή τους. Για τον προσδιορισμό της υγρασίας χρησιμοποιήθηκαν κάψες από πορσελάνη, αναλυτικός ζυγός (B120S Santorius GMBH Göttingen) και φούρνος θερμού αέρα. Η διαδικασία για τον υπολογισμό της υγρασίας είχε ως εξής: ελιές της ποικιλίας “Καλαμών” πλένονται με απιονισμένο νερό και στεγνώνονται με χαρτί κουζίνας έτσι ώστε να υπάρχει απουσία νερού στην εξωτερική επιφάνεια τους. Οι πορσελάνινες κάψες αφού πλένονται και αυτές με απιονισμένο νερό, ξηραίνονται και ζυγίζονται στον αναλυτικό ζυγό. Έπειτα οι ελιές τεμαχίζονται σε μικρά κομμάτια εντός των καψών, ενώ απομακρύνονται οι πυρήνες. Στη συνέχεια οι κάψες με το νερό προϊόν ζυγίζονται και οδηγούνται στον φούρνο θερμού αέρα. Η ξήρανση γίνεται για 3 ώρες σε θερμό αέρα 105 °C. Οι κάψες ζυγίζονται αφού κρυώσουν σε ξηρό θάλαμο και ξανά οδηγούνται στο φούρνο. Η ξήρανση σταματά όταν το βάρος του δείγματος εντός των καψών δεν μεταβάλλεται. Ο προσδιορισμός της υγρασίας έγινε για ελιές που είχαν υποστεί ζύμωση και για φρέσκες ελιές της ποικιλίας “Καλαμών” και πραγματοποιήθηκαν τουλάχιστον πέντε επαναλήψεις για κάθε περίπτωση.

Π.2.3.2 Προσδιορισμός ελαιοπεριεκτικότητας

Το άλλο σημαντικό συστατικό των ελιών είναι οι λιπαρές ύλες τους ή αλλιώς το λάδι. Η περιεκτικότητα σε λάδι ανά ποικιλία διαφέρει σημαντικά, όμως για τις επιτραπέζιες ποικιλίες η τιμή τους είναι περίπου σταθερή και κυμαίνεται 5 – 20%. Για τον προσδιορισμό του λαδιού στις ελιές “Καλαμών” χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Soxhlet. Αναλυτικότερα έγινε χρήση της συσκευής αλληπάλληλων σιφονισμών (συσκευή Soxhlet), πετρελαϊκός αιθέρας, θερμομανδύας, συσκευή “flash evaporator” (R-114, Büchi Labortechnik AG, Flawil, CH) και αναλυτικός ζυγός (B120S Santorius GMBH Göttingen). Σύμφωνα με τη μέθοδο τεμαχισμένη και ζυγισμένη ποσότητα αποξηραμένης σάρκας ελιών τοποθετείται σε ξηρή υφασμάτινη θήκη (καρτούσα) και έπειτα στη συσκευή Soxhlet μαζί με τον πετρελαϊκό αιθέρα. Για την εκχύλιση του λαδιού από τα τεμάχια των ελιών απαιτούνται περίπου 50 σιφονισμοί. Έπειτα ο

πετρελαϊκός αιθέρας εντός του οποίου βρίσκεται εκχυλισμένο το λάδι εξατμίζεται στη συσκευή “flash evaporator” και λαμβάνεται καθαρή η λιπαρή ύλη, η οποία ζυγίζεται. Κατ’ αυτό τον τρόπο υπολογίζεται η ελαιοπεριεκτικότητα των ελιών, η οποία επαληθεύεται ζυγίζοντας το στερεό υπόλειμμα των ελιών στη καρτούσα. Ομοίως και σε αυτό τον προσδιορισμό έγιναν μετρήσεις για ελιές που είχαν υποστεί ζύμωση και αζύμωτες ελιές της ποικιλίας “Καλαμών”. Για τον προσδιορισμό της ελαιοπεριεκτικότητας έγιναν τουλάχιστον 5 επαναλήψεις για κάθε περίπτωση.

II.2.4 Προσδιορισμός θερμικής υποβάθμισης της υφής των ελιών

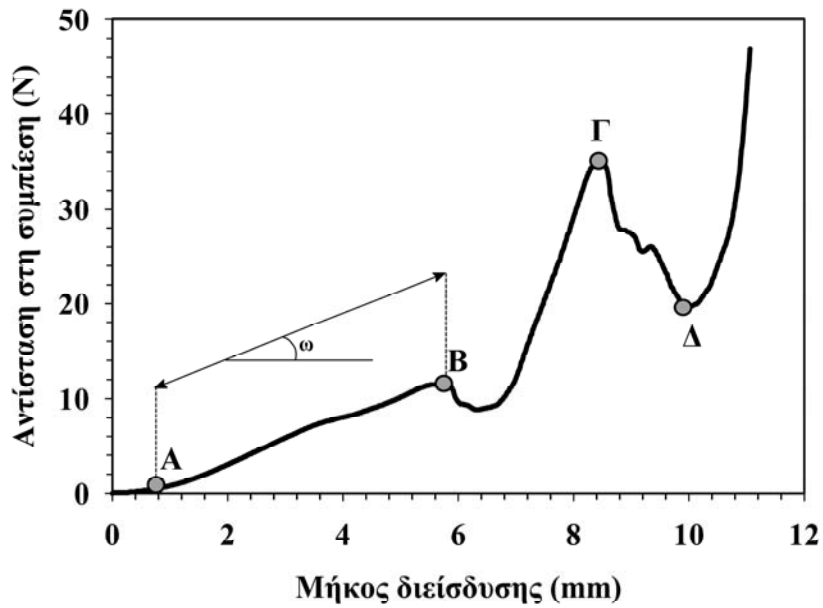
II.2.4.1 Το φαινόμενο της θερμικής υποβάθμισης της υφής

Οι επιτραπέζιες ελιές σε κονσέρβα εφόσον δέχονται θερμική επεξεργασία για την απάλειψη των παθογόνων μικροοργανισμών και την επιμήκυνση του χρόνου ζωής τους, ταυτόχρονα υποβαθμίζονται τα ποιοτικά χαρακτηριστικά τους. Τα σημαντικά ποιοτικά χαρακτηριστικά των επιτραπέζιων ελιών είναι τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά και η διατήρηση των θρεπτικών συστατικών τους. Το κύριο όμως ποιοτικό χαρακτηριστικό, του οποίου η μείωση αντιστοιχεί σε ολική υποβάθμιση του προϊόντος είναι η υφή της σάρκας των ελιών. Η υφή των ελιών έχει να κάνει με τη δομή του ιστού της σάρκας, δηλαδή τη διάταξη των κυττάρων και το ποσοστό υγρασίας που βρίσκεται ενσωματωμένο. Η σημαντικότητα της υφής οφείλεται στο γεγονός ότι οποιαδήποτε μεταβολή είναι μη αντιστρεπτή, για αυτό το λόγο στη βιομηχανική πρακτική χρησιμοποιείται CaCl_2 . Το CaCl_2 ενσωματώνεται στους ιστούς της σάρκας της ελιάς και δημιουργεί ένα πλέγμα σε αυτούς, με το οποίο ο καρπός πλέον αποκτά τραγανή υφή και γίνεται πιο επιθυμητός από τους καταναλωτές.

Για να διαπιστωθεί το μέγεθος της υποβάθμισης της υφής των ελιών γίνεται προσπάθεια σε εργαστηριακή κλίμακα της προσομοίωσης της μύσησης της ελιάς από τον άνθρωπο. Σε μια τέτοια περίπτωση μία ή περισσότερες ελιές συμπιέζονται από ένα ή περισσότερα έμβολα που μοιάζουν με την ανθρώπινη γνάθο και μετράται η δύναμη που απαιτείται ώστε η δομή της σάρκας της ελιάς να καταρρεύσει.

II.2.4.2 Ποσοτικοποίηση της θερμικής υποβάθμισης της υφής

Το όργανο που συμπιέζει τις ελιές υπολογίζει την δύναμη που απαιτείται για την κατάρρευση της δομής και την καταγράφει σε σχέση με την απόσταση της διείδυσης του εμβόλου εντός της σάρκας της ελιάς. Η αντίσταση στη συμπίεση σε σχέση με την απόσταση διείδυσης ακολουθεί μια καμπύλη, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 11.



Διάγραμμα 11. Αντιπροσωπευτική καμπύλη αντίστασης στη συμπίεση σε σχέση με το μήκος διείδυσης του εμβόλου

Στο αντιπροσωπευτικό διάγραμμα φαίνονται τρεις περιοχές που είναι πολύ σημαντικές για την έκφραση της υφής των ελιών σε σχέση με την αντίσταση στη συμπίεση και το μήκος διείδυσης. Για τη λήψη των μετρήσεων οι ελιές τοποθετούνταν πλάγια στην επιφάνεια συμπίεσης και κατά τη διείδυση του εμβόλου αρχικά κατέρρευε η μία πλευρά της ελιάς και έπειτα η άλλη, ενώ όταν όλη η σάρκα της ελιάς είχε καταστραφεί το έμβολο πίεζε τον πυρήνα μέχρι αυτός να υποστεί θραύση. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα από το σημείο Α στο σημείο Β η δύναμη συμπίεσης μεταβάλλεται γραμμικά. Αυτό συμβαίνει διότι η σάρκα της ελιάς είναι μέχρι ενός ορίου ελαστική και στη διείδυση του εμβόλου αντιλαμβάνεται γραμμικά το δυναμικό φορτίο που δέχεται. Στο σημείο Β ορίζεται η θραύση και η κατάρρευση της σάρκας της μίας πλευράς της ελιάς, ενώ στο σημείο Γ η θραύση της σάρκας και της άλλης πλευράς. Τέλος από το σημείο Δ μέχρι την ολοκλήρωση της μέτρησης παρατηρείται η αντίδραση στην πίεση που ασκείται στον πυρήνα, ο οποίος τελικά σπάει και θρυμματίζεται. Βάση των παραπάνω παρατηρήσεων στηρίχτηκε η προσπάθεια για ποσοτικοποίηση της θερμικής υποβάθμισης της υφής της ελιάς.

Αρχικά θεωρήθηκε ότι η μεταβολή της υφής των ελιών λόγω της θερμικής επεξεργασίας ήταν δυνατό να εκφραστεί ως συνάρτηση του σημείου κατάρρευσης της δομής της σάρκας της ελιάς (de Castro et al 2007). Αυτό δεν ήταν δυνατό να καταστεί εφαρμόσιμο, λόγω του γεγονότος ότι δεν υπήρχε επαναληψιμότητα στη μέθοδο. Επίσης έγινε προσπάθεια εφαρμογής της μεθόδου που πρότειναν οι Romeo *et al* (2009), δηλαδή του υπολογισμού της επιφάνειας που καλύπτεται από τα σημεία Γ,

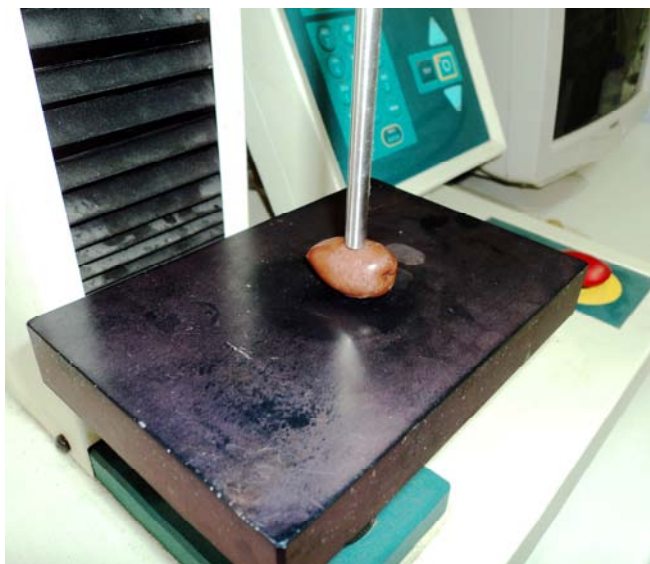
Δ και το τέλος της καμπύλης με ολοκλήρωση, όμως και αυτή η μέθοδος δεν είχε επαναληψιμότητα και έτσι απορρίφθηκε. Μετά τις παραπάνω υποθέσεις βρέθηκε ότι η θερμική υποβάθμιση της υφής προκαλεί μείωση στην κλίση της ευθείας (N/mm) που δημιουργείται από τα σημεία A και B. Δηλαδή όσο θερμαίνεται μια ελιά τόσο μειώνεται η κλίση της ευθείας AB. Με βάση αυτή τη μέθοδο σχεδιάστηκε η θερμική επεξεργασία των ελιών και ο υπολογισμός των παραμέτρων θερμικής υποβάθμισης της υφής των ελιών.

Π.2.4.3 Πειραματική διαδικασία για τη θερμική υποβάθμιση της υφής των ελιών

Για να υπολογιστούν οι παράμετροι D και z της θερμικής υποβάθμισης της υφής των ελιών χρησιμοποιήθηκαν ελιές ποικιλίας “Καλαμών”, άλμη NaCl 4% (w/v), θερμαντική εστία, δοχείο για τη θέρμανση των ελιών και υδατόλουτρο με κρύο νερό βρύσης. Αρχικά δέκα ελιές πλένονταν και στεγνώνονταν πριν την θερμική τους επεξεργασία. Στη θερμαντική εστία ποτήρι ζέσεως χωρητικότητας 1 l ήταν τοποθετημένο και υπό ανάδευση η άλμη NaCl βρισκόταν σε σταθερή θερμοκρασία (ανάλογα με τη σχεδίαση του πειράματος, όπως θα αναφερθεί παρακάτω). Έπειτα οι ελιές τοποθετούνταν στη ζεστή άλμη και παρέμεναν με ανάδευση για ορισμένο χρόνο. Ένα δεύτερο ποτήρι ζέσεως ίδιας χωρητικότητας ήταν εμβαπτισμένο σε κρύο νερό βρύσης στο υδατόλουτρο. Στο ποτήρι ζέσεως βρισκόταν υπό ανάδευση άλμη, η οποία είχε έρθει σε ισορροπία με τη θερμοκρασία του κρύου νερού. Οι ελιές μετά τον καθορισμένο χρόνο θέρμανσης μεταφέρονταν γρήγορα από το ποτήρι θέρμανσης στο ποτήρι ψύξης. Εκεί έμεναν μέχρι να αποκτήσουν τη θερμοκρασία του κρύου νερού και έπειτα οδηγούνταν στο όργανο συμπίεσης, (Model H5KS - TX0258, Hounsfield Test Equipment Ltd. Surrey, UK). Οι θερμοκρασίες και οι χρόνοι θέρμανσης φαίνονται στον Πίνακα 8.

Στο όργανο συμπίεσης, μία κάθε φορά ελιά τοποθετούνταν στην επιφάνεια συμπίεσης και το έμβολο προσαρμοζόταν, έτσι ώστε να εφάπτεται στην επάνω εξωτερική επιφάνεια της ελιάς. Έπειτα άρχιζε η καταγραφή της δύναμης με την οποία αντιστέκεται η σάρκα της ελιάς στη συμπίεση σε σχέση με το βάθος διείσδυσης, ενώ το έμβολο είχε ξεκινήσει την κάθοδό του με ταχύτητα (20 mm/min). Τα αποτελέσματα από τις δέκα ελιές μεταφέρονταν σε φύλλο “Excel” και από εκεί υπολογιζόταν η κλίση του ευθυγράμμου τμήματος A – B για κάθε ελιά.

Στην Εικόνα 12 φαίνεται το όργανο συμπίεσης και ο τρόπος με τον οποίο γινόταν η συμπίεση των ελιών για τον προσδιορισμό της υποβάθμισης της υφής.



Εικόνα 12. Όργανο συμπίεσης των ελιών για τον προσδιορισμό της υφής

II.2.4.4 Υπολογισμός των παραμέτρων της θερμικής υποβάθμισης της υφής

Για τις δέκα ελιές της κάθε περίπτωσης υπολογιζόταν η μέση τιμή των κλίσεων του ευθυγράμμου τμήματος A – B. Έπειτα για κάθε θερμοκρασία παριστάνετο γραφικά η μεταβολή των κλίσεων σε σχέση με το χρόνο θέρμανσης σε λογαριθμική κλίμακα. Η μεταβολή αυτή ήταν γραμμική και για τον υπολογισμό της τιμής D για κάθε θερμοκρασία χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση:

$$D = - \frac{1}{\text{κλίση της ευθείας}}$$

Στη συνέχεια αφού υπολογίστηκαν οι τιμές D για όλες τις θερμοκρασίες, παραστάθηκε γραφικά η μεταβολή της τιμής D σε σχέση με τη μεταβολή της θερμοκρασίας θέρμανσης. Ομοίως και αυτή η μεταβολή ήταν γραμμική και ο υπολογισμός της τιμής z έγινε με την εξίσωση:

$$z = - \frac{1}{\text{κλίση της ευθείας}}$$

Τα αποτελέσματα παρατίθενται στο κεφάλαιο II.3.2. Η τιμή z χρησιμοποιήθηκε στο θεωρητικό μοντέλο για να προβλεφθεί η θερμική υποβάθμιση της υφής των ελιών κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας των κονσερβοποιημένων προϊόντων.

Πίνακας 8. Θερμοκρασίες και χρόνοι θέρμανσης των ελιών

Θερμοκρασία θέρμανσης (°C)	Χρόνος θέρμανσης (min)
60	10
	30
	60
	90
65	15
	30
	60
	90
70	5
	10
	20
	30
75	2
	5
	15
	30
80	1
	3
	5
	10
	15

Π.2.5 Σχεδιαζόμενες γεωμετρίες προς επίλυση

Για να εξαχθούν αξιόπιστα αποτελέσματα από την προσομοίωση της θερμικής επεξεργασίας σε κονσέρβες που περιέχουν ελιές και άλμη, πρέπει αρχικά να σχεδιαστούν οι γεωμετρίες με όσο το δυνατό μεγαλύτερη ακρίβεια. Οι σχεδιαζόμενες γεωμετρίες στη συγκεκριμένη περίπτωση ήταν κυλινδρικές και ορθογώνιες μεταλλικές κονσέρβες, που περιείχαν ελιές των ποικιλιών “καλαμών” και “κονσερβολιά” σε διάφορα μεγέθη ελιών και σε διάφορες διατάξεις. Για την επιβεβαίωση του θεωρητικού μοντέλου, σχεδιάστηκε η γεωμετρία της κονσέρβας και των ελιών, που επεξεργάστηκαν θερμικά κατά την πειραματική διαδικασία, και επιλύθηκε το μοντέλο βάση της διαδικασίας που περιγράφηκε στην παράγραφο Ι.7.5. Παρακάτω περιγράφονται αναλυτικά οι σχεδιαζόμενες γεωμετρίες που επιλύθηκαν με το πρόγραμμα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής.

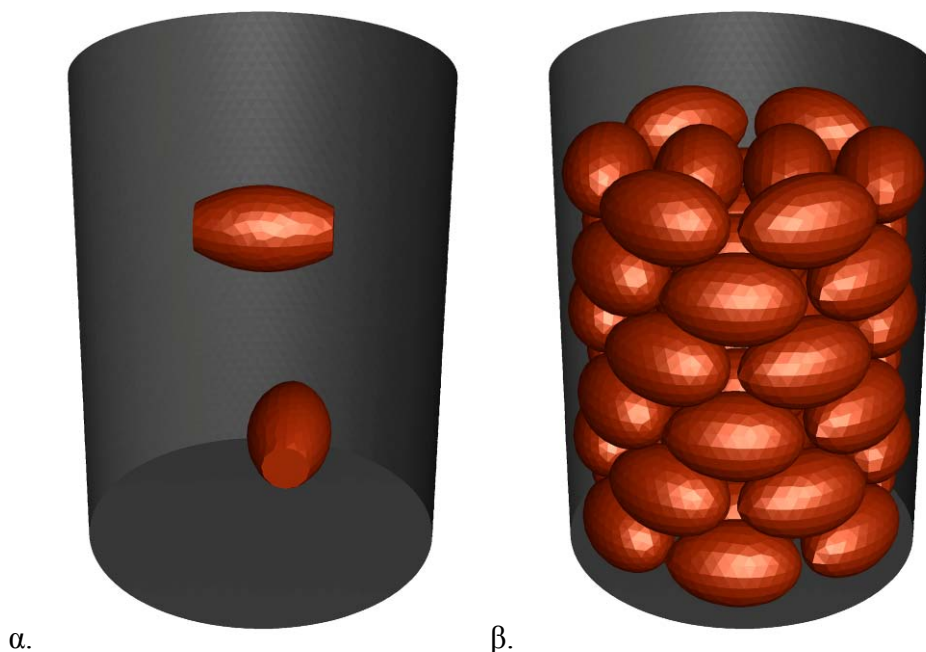
Π.2.5.1 Γεωμετρία επιβεβαίωσης

Η επιβεβαίωση του θεωρητικού μοντέλου, στις περιπτώσεις προσομοίωσης θερμικής επεξεργασίας με τη χρήση υπολογιστικής ρευστοδυναμικής πραγματοποιήθηκε με τη σύγκριση της θερμοκρασίας σε ορισμένα σημεία της πειραματικής καμπύλης θέρμανσης και της αντίστοιχης θεωρητικής, όπως υπολογίστηκε με το CFD κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας.

Π.2.5.1.1 Πειραματική θερμική επεξεργασία

Για την πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν μεταλλικές κονσέρβες διαμέτρου 75 mm και ύψους 105 mm (300x402), ελιές ποικιλίας “καλαμών” διαστάσεων 30x19 mm, άλμη NaCl 4% (w/v) και εξοπλισμός για τη θερμική επεξεργασία.

Αρχικά η μεταλλική κονσέρβα εξετάστηκε για τυχόν σφάλματα και έπειτα καθαρίστηκε ώστε να μην υπάρχουν στο εσωτερικό της ξένα σώματα. Οι κονσέρβες προμηθεύτηκαν από την κυτιοποιία “ELSA A.E.”. Έπειτα στο πλαϊνό τοίχωμα ανοίχτηκε οπή από την οποία πέρασαν 4 θερμοζεύγη τύπου “K”. Με τα θερμοζεύγη μετρήθηκε η θερμοκρασία σε 3 σημεία για την επιβεβαίωση του θεωρητικού μοντέλου, καθώς και η θερμοκρασία στο εσωτερικό της κονσέρβας. Το πρώτο θερμοζεύγος ενσωματώθηκε στο εσωτερικό τοίχωμα της κονσέρβας. Στόχος για το πρώτο θερμοζεύγος ήταν η καταγραφή της θερμοκρασίας στο εσωτερικό τοίχωμα της κονσέρβας, έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί αργότερα ως οριακή συνθήκη στο θεωρητικό μοντέλο. Μετά η οπή στεγανοποιήθηκε με θερμοάντοχη σιλικόνη και άρχισε η τοποθέτηση των ελιών στην κονσέρβα. Οι ελιές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ποικιλίας “καλαμών”, ήταν ζυμωμένες και διατηρούνταν σε φυσική άλμη μέχρι τη θερμική επεξεργασία τους, εκτός από δύο ομοιώματα ελιάς, όπως αναφέρεται παρακάτω. Η τοποθέτηση των ελιών μέσα στην κονσέρβα φαίνεται στην Εικόνα 13β. Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι η ενσωμάτωση των θερμοζευγών στο εσωτερικό των ελιών δημιουργούσε ιδιαίτερα προβλήματα, όπως η μη σταθεροποίηση της άκρης του θερμοζεύγους και η τοποθέτηση του θερμοζεύγους ακριβώς στο κέντρο. Μετά από μερικές προσπάθειες διαπιστώθηκε ότι η πειραματική θερμική επεξεργασία δεν είχε επαναληψιμότητα. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκαν δύο ομοιώματα ελιών από υαλώδες τεφλόν στα οποία τοποθετήθηκαν τα θερμοζεύγη. Στα ομοιώματα αυτά ανοίχτηκε οπή διαμέτρου 1 mm μέχρι το κέντρο τους όπου και ενσωματώθηκαν τα θερμοζεύγη. Τα θερμοζεύγη στεγανοποιήθηκαν στο εσωτερικό των ομοιωμάτων με θερμοαγώγιμη πάστα και στην έξοδο της οπής με θερμοάντοχη σιλικόνη. Έπειτα τα δύο ομοιώματα τοποθετήθηκαν το ένα στη δεύτερη στρώση των ελιών από τον πυθμένα της κονσέρβας και το δεύτερο στην πέμπτη στρώση. Η ακριβής θέση των ομοιωμάτων φαίνεται στην Εικόνα 13α.



Εικόνα 13. Γεωμετρία της πειραματικής θερμικής επεξεργασίας

Στη συνέχεια το τέταρτο θερμοζεύγος τοποθετήθηκε σε σημείο όπου κατέγραφε τη θερμοκρασία της άλμης. Οι ακριβείς συντεταγμένες των τριών θερμοζευγών φαίνονται στον Πίνακα 9. Σε όλες τις γεωμετρίες το γεωμετρικό κέντρο του κυλίνδρου θεωρήθηκε η αρχή των τριών αξόνων (x,y,z) και κατά συνέπεια είχε καρτεσιανές συντεταγμένες (0,0,0). Σε κάθε περίπτωση παρακάτω όταν δίνονται συντεταγμένες σημείων ή επιπέδων ως αρχή των αξόνων θα λαμβάνεται υπόψη το γεωμετρικό κέντρο της κονσέρβας.

Πίνακας 9. Καρτεσιανές συντεταγμένες για τα τρία σημεία καταγραφής της θερμοκρασίας

	x (mm)	y (mm)	z (mm)
Πάνω ομοίωμα	0,0	16,6	-6,0
Κάτω ομοίωμα	6,0	-29,0	0,0
Σημείο στην άλμη	18,0	-6,5	0,0

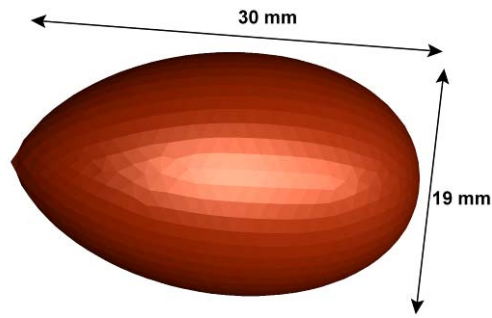
Μετά τη τοποθέτηση των ελιών και των θερμοζευγών η κονσέρβα πληρώθηκε με διάλυμα NaCl 4% (w/v) εντελώς δεν υπήρχε δηλαδή κενός χώρος μεταξύ άλμης και καπακιού (headspace). Η κονσέρβα αφού σφραγίστηκε με χειροκίνητο κλειστικό μηχάνημα με μεταλλικό καπάκι έμεινε σε ηρεμία για μισή περίπου ώρα, έτσι ώστε να αποκτήσουν τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος η άλμη και οι ελιές.

Τα θερμοζεύγη συνδέθηκαν με κατάλληλο σύστημα συλλογής και καταγραφής δεδομένων (OM-220 Portable Data Logging, OMEGA ENGINEERING, Inc.) και ξεκίνησε η καταγραφή της θερμοκρασίας στα τέσσερα σημεία. Εν τω μεταξύ σε χύτρα μεγάλων διαστάσεων (που ήταν σε θερμαντική εστία), νερό βρισκόταν σε θερμοκρασία βρασμού και ειδική κατασκευή είχε προσαρμοστεί για την σταθεροποίηση της κονσέρβας και τη διατήρησή της σε κάθετη θέση, κατά τη διάρκεια της θέρμανσης. Η κονσέρβα με τα θερμοζεύγη τοποθετήθηκε στο βραστό νερό και έμεινε εκεί για 10 min ακριβώς. Μετά το τέλος της θέρμανσης, η κονσέρβα μεταφέρθηκε σε υδατόλουτρο με κρύο νερό βρύσης υπό ανάδευση θερμοκρασίας 20 °C, για την ψύξη της. Η ψύξη της κονσέρβας διήρκησε 10 λεπτά. Έπειτα η καταγραφή της θερμοκρασίας σταμάτησε και τα δεδομένα μεταφέρθηκαν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή υπό μορφή φύλλου “excel”.

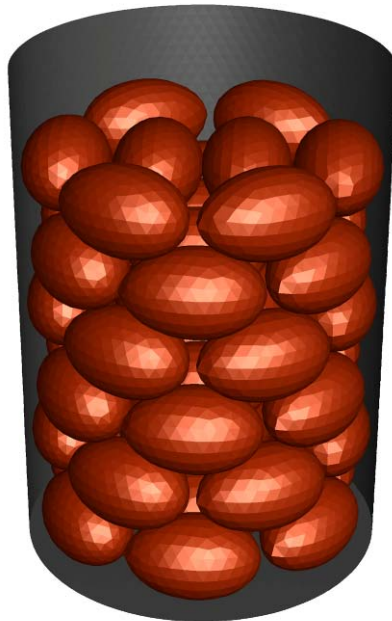
Π.2.5.1.2 Θεωρητική γεωμετρία

Για την επιβεβαίωση του θεωρητικού μοντέλου, η κονσέρβα που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία σχεδιάστηκε στο πρόγραμμα Gambit. Αρχικά σχεδιάστηκε κύλινδρος με ύψος 105 mm και διάμετρο 75 mm. Στον κύλινδρο δεν σχεδιάστηκε το κυματοειδές ανάγλυφο, που υπήρχε στην πραγματική κονσέρβα στην πλάγια πλευρά του. Ο λόγος ήταν η αδυναμία κατασκευής αξιόπιστου πλέγματος στην επιφάνεια αυτή, αλλά και το γεγονός της μικρής επίδρασης που έχει στη ροή της άλμης. Έπειτα σχεδιάστηκε ωοειδής όγκος, ο οποίος είχε το ακριβές σχήμα της ελιάς ποικιλίας “Καλαμών”. Ο όγκος αυτός είχε διαστάσεις 30 mm μήκος και 19 mm πάχος και το σχήμα του φαίνεται στην Εικόνα 14.

Έπειτα έγινε αντιγραφή πολλών τέτοιων όγκων που τοποθετήθηκαν μέσα στον κύλινδρο ακριβώς στις θέσεις που βρίσκονταν οι ελιές στην πειραματική διαδικασία. Αποτέλεσμα ήταν να δημιουργηθεί μια γεωμετρία που αποτελούνταν από ένα τέλειο κύλινδρο και 46 ωοειδής όγκους τοποθετημένους σε 6 στρώσεις. Οι 4 στρώσεις αποτελούνταν από 8 ελιές και οι 2 στρώσεις από 7 ελιές. Η θεωρητική γεωμετρία φαίνεται στην Εικόνα 15.

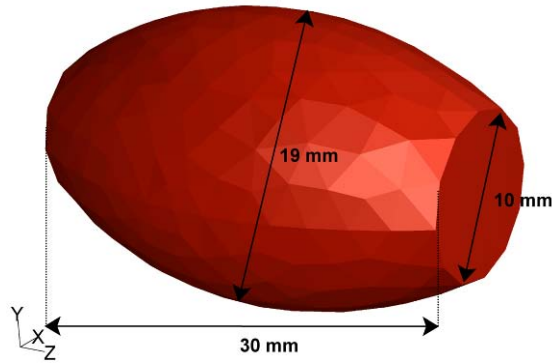


Εικόνα 14. Σχήμα και διαστάσεις ελιάς ποικιλίας “Καλαμών”



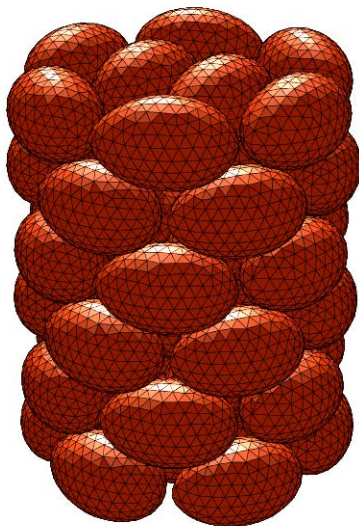
Εικόνα 15. Γεωμετρία που επιλύθηκε στο CFD

Όπως όμως αναφέρθηκε στην παράγραφο για την πειραματική διαδικασία, εντός της κονσέρβας υπήρχαν 2 ομοιώματα ελιών κατασκευασμένα από υαλώδες τεφλόν. Τα ομοιώματα αυτά που φαίνονται χαρακτηριστικά στην Εικόνα 16 σχεδιάστηκαν με ακρίβεια στο πρόγραμμα και τοποθετήθηκαν στις θέσεις όπου βρίσκονταν και στην πειραματική διαδικασία (Εικόνα 13α). Το ομοίωμα ελιάς φαίνεται κομμένο στα άκρα, λόγω της κατασκευής του από τον προμηθευτή του υαλώδους τεφλόν. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ύπαρξη των πυρήνων των ελιών αγνοήθηκε και στη θέση τους θεωρήθηκε ότι υπήρχε σάρκα ελιάς, δηλαδή θεωρήθηκε ότι οι ελιές ήταν στερεά σώματα με ομοιογενή όγκο. Το κάθε στρώμα ελιών εφάπτονταν με το επόμενο και οι ελιές στο κάτω μέρος της γεωμετρίας εφάπτονταν με το τοίχωμα της κονσέρβας.

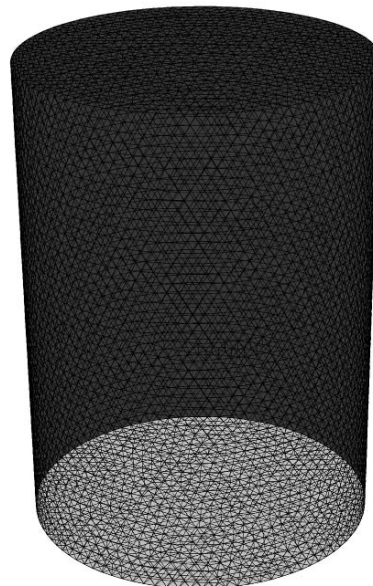


Εικόνα 16. Σχεδιαζόμενο ομοίωμα ελιάς από υαλώδες τεφλόν

Αφού η κατασκευή της γεωμετρίας ολοκληρώθηκε, χωρίστηκε σε κελιά (κατασκευή πλέγματος). Για την κατασκευή του πλέγματος, εφαρμόστηκαν τα αποτελέσματα της παραγράφου II.3.3.3, έτσι ώστε να είναι όσο το δυνατόν ακριβέστερη η λύση. Επομένως βάση των παραπάνω και των δυσκολιών που παρουσιάστηκαν λόγω της πολυπλοκότητας της γεωμετρίας το πλέγμα σχεδιάστηκε με τετράεδρα πρίσματα (“Tet/Hybrid – TGrid”) και με πυκνότητα 222,5 κελιά/cm³, το οποίο σημαίνει ότι κατασκευάστηκαν 103.226 κελιά. Το σχεδιαζόμενο πλέγμα τόσο των ελιών όσο και του χώρου που κάλυπτε η άλμη φαίνεται στις Εικόνες 17α,β.



α



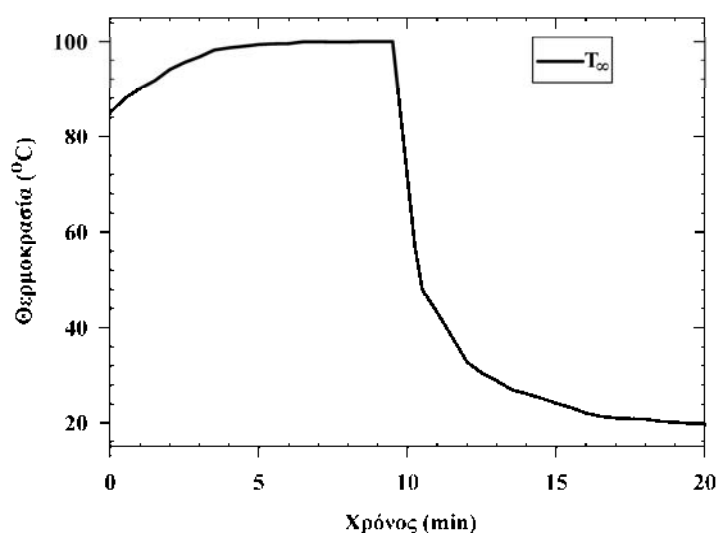
β

Εικόνα 17. Σχεδιαζόμενο πλέγμα της επιλυόμενης πειραματικής γεωμετρίας

Στη συνέχεια καθορίστηκαν οι οριακές συνθήκες και το είδος των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν. Αρχικά οι όγκοι που καταλάμβαναν οι ελιές καθορίστηκε ως “solid” δηλαδή στερεό υλικό, ενώ ο υπόλοιπος όγκος που καταλάμβανε η άλμη NaCl

καθορίστηκε ως “fluid” δηλαδή ρευστό. Το εσωτερικό τοίχωμα της κονσέρβας, όπως επίσης και το τοίχωμα των ελιών, καθορίστηκε ως “wall”. Με την επιλογή αυτή θεωρήθηκε εξ αρχής ότι μεταξύ του εξωτερικού περιβάλλοντος και του εσωτερικού της κονσέρβας, καθώς και μεταξύ του εσωτερικού των ελιών και της άλμης δεν υπάρχει μεταφορά μάζας, παρά μόνο μεταφορά θερμότητας.

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο περιγραφής της πειραματικής διαδικασίας καταγράφηκε η θερμοκρασία του τοιχώματος της κονσέρβας. Τα χρονο-θερμοκρασιακά αυτά δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν ως οριακή συνθήκη στο θεωρητικό μοντέλο για την επίλυση της πειραματικής γεωμετρίας. Στις παραμετρικές μελέτες που επιλύθηκαν η θερμοκρασία του εξωτερικού τοιχώματος ήταν σταθερή, ενώ η θερμοκρασία του εσωτερικού τοιχώματος υπολογιζόταν από το λογισμικό CFD. Στο Διάγραμμα 12 φαίνεται η θερμοκρασία του τοιχώματος κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας.



Διάγραμμα 12. Μεταβολή της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του τοιχώματος της κονσέρβας κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας

Επίσης οι αρχικές συνθήκες που εφαρμόστηκαν στο θεωρητικό μοντέλο είναι οι παρακάτω.

Τη χρονική στιγμή $t = 0$ ισχύει ότι:

$$T_w = T_b = T_o = 20 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ και } u_r = u_\theta = u_z = 0 \text{ για } 0 \leq r \leq R \text{ και } -H \leq z \leq H$$

Ενώ οι οριακές συνθήκες που ίσχυαν κατά τη διάρκεια της επίλυσης είναι οι παρακάτω.

Για $t > 0$ ισχύει ότι:

$$T_w = T_\infty \quad \text{και} \quad u_r = u_\theta = u_z = 0 \text{ για } r = R \text{ και } -H \leq z \leq H$$

$$u_r = u_\theta = u_z = 0 \text{ για } z = H \text{ και } -0 \leq r \leq R$$

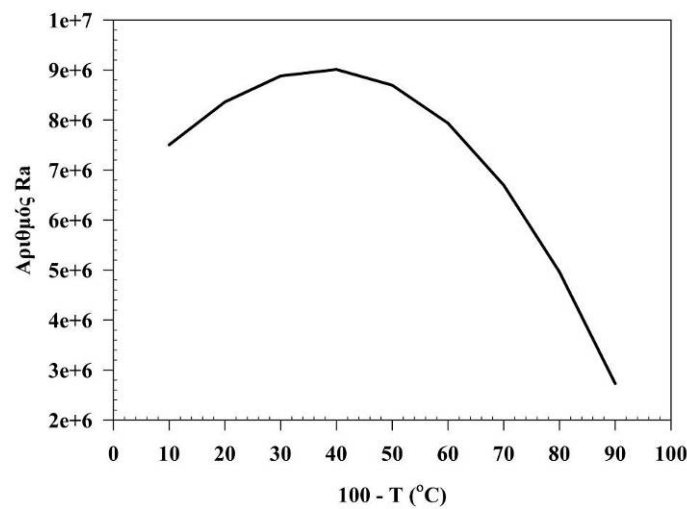
$$u_r = u_\theta = u_z = 0 \text{ για } z = -H \text{ και } -0 \leq r \leq R$$

όπου T_∞ είναι η θερμοκρασία του τοιχώματος όπως αυτή καταγράφηκε απ' την πειραματική θερμική επεξεργασία και αποτυπώνεται στο Διάγραμμα 12.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η επιλογή των κατάλληλων μοντέλων για την επίλυση των εξισώσεων που διέπουν τη ροή. Η ροή της άλμης κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας θεωρήθηκε ως γραμμική φυσική κυκλοφορία, λόγω του ότι ο αριθμός Rayleigh (Ra) ήταν μικρότερος από 10^7 .

$$Ra = \frac{\mathbf{g} \cdot \boldsymbol{\beta} \cdot \Delta T \cdot L^3}{\alpha \cdot \gamma}$$

Εξίσωση 46



Διάγραμμα 13. Μεταβολή του αριθμού Ra της άλμης για εύρος θερμοκρασίας 10 - 90°C

Αυτό επιβεβαιώθηκε από το Διάγραμμα 13 που δείχνει ότι σε όλο το εύρος των τιμών ΔT (100 – 20 °C) ο αριθμός Ra δεν ξεπέρασε την τιμή 10^7 .

Σχετικά με τα σχήματα παραγωγής, για τη διακριτοποίηση των διαφορικών εξισώσεων της ορμής χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο “PRESTO!”, ενώ για της συνέχειας και της ενέργειας χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο “First Order Upwind”. Για τη σύζευξη πίεσης – ταχύτητας ενεργοποιήθηκε το μοντέλο “Coupled”, στο οποίο ο αριθμός Courant (C) ήταν ίσος με 0,5.

$$C = \Delta t \sum_{i=1}^n \frac{\mathbf{u}_{x_i}}{\Delta \mathbf{x}_i}$$

Εξίσωση 47

Κατά την επίλυση των διακριτοποιημένων διαφορικών εξισώσεων παραμένουν υπόλοιπα, τα οποία όταν βρεθούν κάτω από ένα επίπεδο θεωρείται ότι η λύση έχει συγκλίνει και τα αποτελέσματα είναι σωστά. Για τις εξισώσεις της συνέχειας και της

ορμής, το όριο σύγκλισης ορίστηκε στο $1 \cdot 10^{-3}$ και για την εξίσωση της ενέργειας στο $1 \cdot 10^{-6}$. Η επιλογή των παραπάνω μοντέλων επίλυσης έγινε χρησιμοποιώντας τις αντίστοιχες επιλογές των Dimou and Yanniotis (2011). Η επίλυση έγινε με χρονικό βήμα (time step) 0,5 s. Η σύγκριση των θεωρητικών αποτελεσμάτων με τα πειραματικά αποτελέσματα φαίνεται στην παράγραφο II.3.3.1.

Τέλος όλη η διαδικασία του σχεδιασμού, της ενσωμάτωσης δεδομένων στο λογισμικό και της επίλυσης της γεωμετρίας πραγματοποιήθηκε σε Η/Υ του εργαστήριου Μηχανικής Τροφίμων που είχε τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Βασικό λειτουργικό σύστημα: Microsoft Windows XP Professional[®], Version 2002, Service Pack 2
- Μνήμη RAM: 2048GB
- Επεξεργαστής: Intel[®] Core TM2, CPU 660 @ 2.40GHz
- Κάρτα γραφικών: GF8400GS, 512 MB, DDR2 64B CTR DVI
- Λογισμικό CFD: FLUENT[®] Version: 3D, double precision, pressure – based, laminar flow
Release: 6.3.26, Cortex Version: 3.7.3
Graphics Version: 11.26, openg/ win
Copyright 2006[©] Fluent Inc.

II.2.5.1.3 Υπολογισμός ισοδύναμου θερμικού αποτελέσματος

Εκτός από το πεδίο της ρευστομηχανικής, στο οποίο δόθηκε έμφαση σε όλες τις περιπτώσεις επίλυσης, κρίθηκε σκόπιμο να ερευνηθεί το θανατηφόρο αποτέλεσμα που είχε η διείδυση της θερμότητας στο εσωτερικό της κονσέρβας. Για το λόγο αυτό ενσωματώθηκε στο πρόγραμμα ένας κώδικας (UDF) που γράφτηκε σε γλώσσα προγραμματισμού C, εντός του οποίου υπήρχαν εξισώσεις που ενεργοποιούνταν κατά τη διάρκεια της επίλυσης και υπολόγιζαν τον ισοδύναμο χρόνο σε κάθε σημείο για κάθε χρονικό βήμα “dt”. Στον παρακάτω Πίνακα 10 φαίνονται οι εξισώσεις που ενσωματώθηκαν και ο μικροοργανισμός στόχος ή το ποιοτικό χαρακτηριστικό του οποίου υπολόγιζαν την θερμική υποβάθμιση.

Οι εξισώσεις ενσωματώθηκαν στο πρόγραμμα μέσω ενός κώδικα γραφής λογικών ή μαθηματικών σχέσεων. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα 18.

Πίνακας 10. Παράμετροι θερμικής επεξεργασίας και μ/oi στόχοι

A/A	Εξίσωση	Μέγεθος θερμικής καταστροφής	Πηγή παραμέτρων
1	$PU_{62.4}^{5.25} = \int_0^t 10^{\frac{T-62.4}{5.25}} dt$	Θανάτωση των προπιονικών βακτηρίων T _{ref} = 62.4 °C z = 5.25 °C, D _{62.4} = 1 min	IOC (2004)
2	$F_{62.4}^{28.64} = \int_0^t 10^{\frac{T-62.4}{28.64}} dt$	Υποβάθμιση της υφής των ελιών T _{ref} = 62.4 °C z = 28.64 °C, D _{62.4} = 670 min	Πειραματικές τιμές
3	$F_o = \int_0^t 10^{\frac{T-121.11}{10}} dt$	Θανάτωση του μ/ού <i>Clostridium botulinum</i> T _{ref} = 121,11 °C z = 10 °C, D _{121.11} = 0.3 min	IOC (2004)

```
#include "udfh"
#define domain_ID 2

DEFINE_EXECUTE_AT_END(store_temp_time)
{
  Domain *domain;
  cell_t c;
  Thread *t;

  real curr_ts;
  curr_ts=RP_Get_Real("physical-time-step");

  domain=Get_Domain(1);

  thread_loop_c(t,domain) {
    begin_c_loop(c,t)
    {
      C_UDMI(c,t,0)=C_UDMI(c,t,0)+(curr_ts*pow(10,((C_T(c,t)-335.55)/5.25))); /* Θερμική καταστροφή προπιονικών βακτηρίων */

      C_UDMI(c,t,1)=C_UDMI(c,t,1)+(curr_ts*pow(10,((C_T(c,t)-394.261)/10))); /* Θερμική καταστροφή Clostridium botulinum */

      C_UDMI(c,t,2)=C_UDMI(c,t,2)+(curr_ts*pow(10,((C_T(c,t)-335.55)/28.64))); /* Θερμική υποβάθμιση υφής ελιών */
    }
    end_c_loop(c,t)
  }
}
```

Εικόνα 18. “UDF” που εισήχθη στο λογισμικό για τον υπολογισμό των ισοδύναμων χρόνων

Κατά την επίλυση της κάθε γεωμετρίας από το πρόγραμμα της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής για κάθε ένα από τα παραπάνω μεγέθη υπολογιζόταν ο συνολικός ισοδύναμος χρόνος και αποθηκευόταν στα αρχεία του συστήματος.

Π.2.5.1.4 Πειραματική επιβεβαίωση του θανατηφόρου αποτελέσματος επί του μικροβιακού πληθυσμού

Για την επιβεβαίωση της θανατηφόρου επίδρασης της θερμικής επεξεργασίας που εφαρμόστηκε πραγματοποιήθηκε μικροβιολογική ανάλυση στο Εργαστήριο Μικροβιολογίας & Βιοτεχνολογίας Τροφίμων. Στόχος της μικροβιολογικής ανάλυσης ήταν τα γαλακτικά βακτήρια, που έχουν παρόμοια θερμοανθεκτικότητα με τα προπιονικά βακτήρια (González et al 1982, Jordan and Cogan 1999) και επιπροσθέτως οι ζύμες.

Αρχικά όμοιες κονσέρβες που περιείχαν κονσερβολιές θερμάνθηκαν σε διάφορους χρόνους (0, 5, 7, 8, 9, 10 και 12 min στους 70°C) και έπειτα ψύχθηκαν σε κρύο νερό. Ο τρόπος με τον οποίο είχαν τοποθετηθεί οι ελιές εντός της κονσέρβας ήταν ίδιος με αυτόν που φαίνεται στην Εικόνα 23. Εκτός από τις ελιές η κονσέρβα πληρώθηκε με άλμη 4% (w/v), χωρίς να έχει “head space”. Για τους παραπάνω χρόνους επιλύθηκε η γεωμετρία της παραγράφου Π.2.5.3.1 και σε δύο σημεία καταγράφηκε ο ισοδύναμος χρόνος θερμικής καταστροφής των προπιονικών βακτηρίων. Στα σημεία αυτά έγινε σύγκριση των ισοδύναμων χρόνων $R_{U_{62.4}^{5.25}}^C$ με το αποτέλεσμα των μικροβιολογικών αναλύσεων (παράγραφος Π.3.3.12).

Η μικροβιολογική ανάλυση των δειγμάτων έγινε με τη μέθοδο των διαδοχικών αραιώσεων. Συγκεκριμένα, λήφθηκε από τις ελιές που βρίσκονταν στον κεντρικό άξονα πιο κοντά στο άνω και κάτω τοίχωμα της κονσέρβας. Ελήφθη ασηπτικά δείγμα για ανάλυση. Στη συνέχεια ακολουθήθηκε η διαδικασία των διαδοχικών αραιώσεων με μεταφορά 1ml δείγματος προηγούμενης αραιώσης σε 9 ml ορού Ringer. Οι κατάλληλες ανά περίπτωση δεκαδικές αραιώσεις χρησιμοποιούνταν για τον εμβολιασμό μιας τριπλής σειράς τρυβλίων για κάθε χρησιμοποιούμενο μικροβιολογικό υπόστρωμα. Οι κατηγορίες των μικροοργανισμών που προσδιορίστηκαν και ανήκουν στην αυτόχθονη μικροβιακή χλωρίδα ήταν οι ακόλουθες :

- **Γαλακτικά βακτήρια** : καταμετρήθηκαν με την τεχνική της ενσωμάτωσης στο υπόστρωμα de Man-Rogosa-Sharp (MRS, Biolife), με επώαση σε θερμοκρασία 30 °C για 3 έως 5 ημέρες. Χρησιμοποιήθηκε ποσότητα 1ml από τη σειρά των διαδοχικών αραιώσεων του ομογενοποιημένου δείγματος.
- **Ζύμες** : Ποσότητα 0,1 ml από σειρά διαδοχικών αραιώσεων του ομογενοποιημένου δείγματος εμβολιάστηκε με την τεχνική της επιφανειακής επίστρωσης στο επιλεκτικό υπόστρωμα Rose Bengal Agar (RBC, LAB M) και

την προσθήκη του αντιβιοτικού Chloramphenicol (LAB M). Ακολούθησε επώαση σε θερμοκρασία 25 °C για 2 έως 3 ημέρες.

Για τον υπολογισμό του τελικού πληθυσμού των μικροοργανισμών χρησιμοποιήθηκε ο μέσος όρος των τριών επαναλήψεων από κάθε αραιώση. Η επιλογή του κατάλληλου τρυβλίου για καταμέτρηση έγινε σύμφωνα με τον αριθμό των αποικιών που αναπτύχθηκαν σε αυτό. Τα τρυβλία που επιλέγηκαν είχαν περισσότερες από 30 και λιγότερες από 300 αποικίες (Maynell και Meynell 1970). Στην περίπτωση που δύο αραιώσεις έδιναν κατάλληλο αριθμό αποικιών, τότε επιλέγονταν αυτή με τον μεγαλύτερο αριθμό αποικιών. Για τον υπολογισμό του τελικού πληθυσμού των μικροοργανισμών ανά ml δείγματος, ο μέσος όρος του αριθμού των αποικιών πολλαπλασιάστηκε με την αραιώση που χρησιμοποιήθηκε.

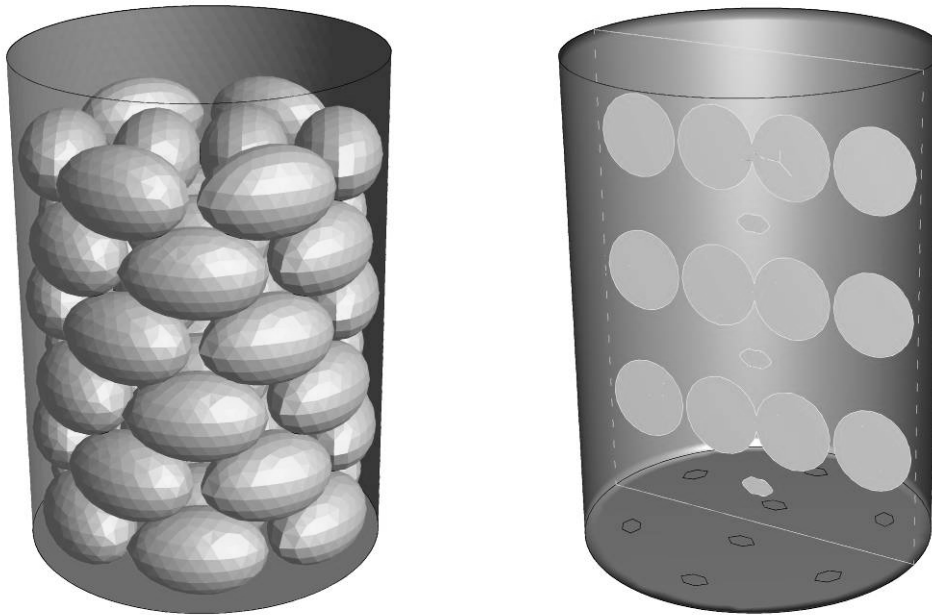
Π.2.5.2 Γεωμετρίες με ελιές της ποικιλίας “Καλαμών”

Εκτός από τη γεωμετρία που σχεδιάστηκε και επιλύθηκε για να επιβεβαιώσει το θεωρητικό μοντέλο με τα πειραματικά αποτελέσματα, πραγματοποιήθηκε σχεδιασμός και επίλυση παραμετρικών γεωμετριών, έτσι ώστε να ερευνηθούν σημαντικοί παράμετροι που αφορούν τη θερμική επεξεργασία κονσερβοποιημένων ελιών της ποικιλίας “Καλαμών”.

Π.2.5.2.1 Κονσέρβα που περιείχε 48 (6x8) μεγάλες ελιές ποικιλίας “Καλαμών”

Αρχικά σχεδιάστηκε γεωμετρία παρόμοια με αυτή της παραγράφου Π.2.5.1.2, με τη μόνη διαφορά ότι στη θέση των ομοιωμάτων των ελιών από υαλώδεις τεφλόν τοποθετήθηκαν κανονικές ελιές, ίδιες με αυτές που βρίσκονταν στην υπόλοιπη κονσέρβα.

Το πλέγμα σχεδιάστηκε να έχει 130.226 κελιά σε σχήμα τετράεδρων πρισμάτων. Για τον έλεγχο της ανεξαρτησίας του πλέγματος σχεδιάστηκε η ίδια γεωμετρία με 179.660 κελιά. Όλες οι ελιές είχαν το σχήμα και το μέγεθος της ελιάς της Εικόνας 14.



α β
Εικόνα 19. Γεωμετρία και τομή της κονσέρβας που περιείχε 48 ελιές “Καλαμών”

Ελέγχθηκε η επίδραση στη θερμική επεξεργασία, που έχει η διαφοροποίηση της συγκέντρωσης της άλμης, το χρονικό βήμα επίλυσης, η χρήση ή μη της υπόθεσης Boussinesq ο χρόνος θέρμανσης, η θερμοκρασία του θερμαντικού μέσου ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του θερμαντικού – ψυκτικού μέσου και της επιφάνειας της μεταλλικής κονσέρβας. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις οι υπόλοιπες πληροφορίες που εισάγονταν στο πρόγραμμα και είναι απαραίτητες για την επίλυση του μοντέλου παρέμεναν οι ίδιες. Στον παρακάτω Πίνακα 11 φαίνονται τα χαρακτηριστικά και οι παράμετροι που μεταβλήθηκαν στην παραπάνω γεωμετρία.

Στις περιπτώσεις 1 – 3 επιλύθηκε η γεωμετρία με μοναδική μεταβλητή τη συγκέντρωση του NaCl στη χρησιμοποιούμενη άλμη. Ο σκοπός αυτής της σειράς των παραμετρικών μελετών ήταν η επίδραση που έχει η πυκνότητα και το ιξώδες της άλμης στη θερμική επεξεργασία των ελιών, δοθέντος ότι η πυκνότητα και το ιξώδες επηρεάζουν την κίνηση με φυσική κυκλοφορία της άλμης μέσα στην κονσέρβα. Η χρήση στη βιομηχανική πρακτική διαφόρων συγκεντρώσεων αλατος στις άλμες πλήρωσης των ελιών και η επίδραση που έχουν στη διατροφή των καταναλωτών είναι πολύ σημαντικό κίνητρο για διερεύνηση.

Στα εμπορικά προϊόντα χρησιμοποιούνται άλμες NaCl με συγκεντρώσεις από 0 – 10%. Οι ελιές που κονσερβοποιούνται σε νερό προορίζονται κυρίως για καταναλωτές με καρδιαγγειακά προβλήματα, για τους οποίους είναι απαγορευτική η κατανάλωση αλατιού.

Πίνακας 11. Οριακές και αρχικές συνθήκες που εφαρμόστηκαν στην επιλύμενη γεωμετρία με 48 ελιές “Καλαμών”

A/A	Περιγραφή Παραμετρικής Μελέτης	Θερμοκρασία θερμαντικού μέσου (°C)	Θερμοκρασία ψυκτικού μέσου (°C)	Αρχική θερμοκρασία κονσερβας (°C)	Χρόνος θέρμανσης (min)	Συγκέντρωση NaCl % (w/v)	h (W/m ² K)	Χρονικό Βήμα (s)
1	Επίδραση της συγκέντρωσης της άλμης	70	20	20	10	4	∞	0,5
2		70	20	20	10	0	∞	0,5
3		70	20	20	10	8	∞	0,5
4	Επίδραση του χρονικού βήματος επί της επίλυσης	100	20	20	10	4	∞	0,1
5		100	20	20	10	4	∞	0,05
6		100	20	20	10	4	∞	0,01
7	Επίδραση της υπόθεσης Boussinesq	70	20	20	10	4	∞	0,5
8	Επίδραση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας	70	20	20	10	4	100	0,5
9		70	20	20	10	4	200	0,5
10		70	20	20	10	4	500	0,5
11		70	20	20	10	4	750	0,5
12		70	20	20	10	4	1000	0,5
13		70	20	20	10	4	1500	0,5
14		70	20	20	10	4	2000	0,5
15		70	20	20	10	4	3000	0,5
16	Επίλυση διάφορων σχημάτων ήπιας θερμικής επεξεργασίας	80	20	$T_{\text{άλμης}} = 65^{\circ}\text{C}$ $T_{\text{ελιών}} = 20^{\circ}\text{C}$		4	∞	0,5
17		62,4	20	20	25	4	∞	0,5
18		65 80 60	20	20	5 10 5	4	∞	0,5
19	Επίλυση σχημάτων εμπορικής αποστείρωσης	121,11	20	20	45	4	∞	0,5
20		121,11	20	20	25	4	∞	0,5

Έπειτα όσο περισσότερο πυκνή είναι η άλμη πλήρωσης των κονσερβών τόσο “πικάντικες” είναι οι ελιές που παράγονται και προωθούνται στην αγορά των

αλίπαστων προϊόντων. Στις συγκεκριμένες παραμετρικές μελέτες έγινε σύγκριση τριών διαφορετικών ρευστών: νερό, 4% και 8% (w/v) άλμη NaCl. Οι ιδιότητες των τριών ρευστών φαίνονται στους Πίνακες 5,6 και 7.

Έπειτα στις περιπτώσεις 4 – 6 έγινε έλεγχος για την ορθότητα της επιλογής του χρονικού βήματος στο 0,5 s. Σύμφωνα με τους Versteeg and Malasekera (2007) η ορθή επιλογή του χρονικού βήματος καθορίζεται από την πυκνότητα του πλέγματος της γεωμετρίας και επίσης από το χρόνο και την ακρίβεια επίλυσης του προβλήματος. Στη συγκεκριμένη γεωμετρία έγινε χρήση εκτός από το 0,5 s, και τα χρονικά βήματα 0,05 και 0,01 s.

Μετά τον έλεγχο του χρονικού βήματος έγινε έλεγχος στην περίπτωση 7 της εφαρμογής της υπόθεσης Boussinesq (Boussinesq 1897) στην ορθότητα των αποτελεσμάτων. Από την εξίσωση 43 φαίνεται η μεταβολή της πυκνότητας της άλμης σε σχέση με τη θερμοκρασία. Σύμφωνα με αυτή την εξίσωση ο υπολογισμός της πυκνότητας της άλμης γίνεται μέσα από μία πολυωνυμική εξίσωση με μία μόνο μεταβλητή, τη θερμοκρασία. Όμως σε πολλές αντίστοιχες περιπτώσεις όπου υπάρχει έλλειψη δεδομένων, τότε μέσω της υποθέσεως Boussinesq μπορεί να υπολογιστεί η πυκνότητα της άλμης έχοντας μόνο ως γνωστά μια τιμή της πυκνότητας σε δεδομένη θερμοκρασία, το συντελεστή θερμικής διαστολής και τη μεταβολή της θερμοκρασίας. Η εξίσωση που ορίζει την υπόθεση Boussinesq είναι:

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)] \quad \text{Εξίσωση 48}$$

Για την άλμη NaCl 4% w/v η αρχική πυκνότητα ρ_0 ήταν 1030,8 kg/m³ για θερμοκρασία αναφοράς $T_0 = 10$ °C και ο συντελεστής θερμικής διαστολής β ήταν 0,005 1/°C. Επειδή η υπόθεση Boussinesq χρησιμοποιείται συνεχώς σε παρόμοιες μελέτες, κρίθηκε σκόπιμο να γίνει έλεγχος στα αποτελέσματα που εξάγονται από μελέτες με την πυκνότητα να μεταβάλλεται με πολυωνυμική εξίσωση σε σχέση με αυτά που εξάγονται από επιλύσεις χρησιμοποιώντας την υπόθεση Boussinesq.

Στη συνέχεια στις περιπτώσεις 8 – 15 πραγματοποιήθηκε μελέτη της επίδρασης του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του εξωτερικού τοιχώματος και του ψυκτικού ή θερμαντικού μέσου αντίστοιχα. Είναι γεγονός ότι ο τρόπος με τον οποίο ρέει το νερό θέρμανσης και ψύξης γύρω από την κονσέρβα με τις ελιές επηρεάζει το ρυθμό με τον οποίο μεταφέρεται η θερμότητα από και προς την κονσέρβα. Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στην επιφάνεια στερεού σώματος, που γύρω του ρέει κρύο ή ζεστό νερό κυμαίνεται από 100 – 600 W/m²°C για φυσική κυκλοφορία

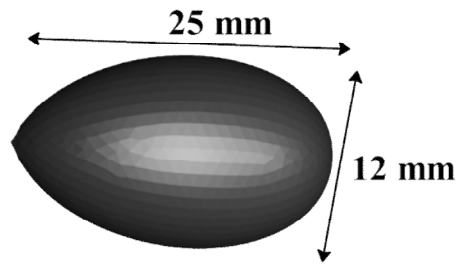
και $500 - 2.000 \text{ W/m}^2\text{°C}$ για βεβιασμένη ροή (Γιαννιώτης, 2011). Έτσι επιλέχθηκε μια σειρά από ενδεικτικές τιμές του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας και βάση αυτών επιλύθηκε η γεωμετρία της περίπτωσης 1. Στο προγράμματος Fluent ορίστηκε ότι το τοίχωμα της κονσέρβας είχε μηδενικό πάχος και ότι το ελεύθερο ρεύμα του ρευστού που χρησιμοποιούνταν ως θερμαντικό ή ψυκτικό μέσο είχε θερμοκρασία 70 °C για την περίοδο της θέρμανσης και 20 °C για την περίοδο της ψύξης σε απόσταση 1 mm από το τοίχωμα.

Πέραν όμως από τις παραμετρικές μελέτες ως συνάρτηση διαφόρων φυσικών παραμέτρων, έγινε επίλυση και διαφόρων σχημάτων ήπιας (παστερίωσης) και έντονης (εμπορική αποστείρωση) θερμικής επεξεργασίας. Η περίπτωση 16 και 18 είναι δύο θερμικές επεξεργασίες που εφαρμόζονται στην πράξη σε βιομηχανική κλίμακα. Στόχος και των δύο είναι η θερμική καταστροφή των προπιονικών βακτηρίων που προκαλούν αλλοιώσεις σε κονσερβοποιημένες επιτραπέζιες ελιές, ενώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι η εφαρμογή τους γίνεται σε ελιές διαφόρων ποικιλιών. Η περίπτωση 17 είναι μια θεωρητική ήπια θερμική επεξεργασία, που επιλύθηκε για να διαπιστωθεί ποιος πρέπει να είναι ο χρόνος θέρμανσης στη θερμοκρασία αναφοράς $T_{\text{ref}} = 62,4 \text{ °C}$ ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό θερμικό αποτέλεσμα. Οι περιπτώσεις 19 και 20 αναφέρονται σε εμπορική αποστείρωση κονσερβοποιημένων ελιών. Επειδή, όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο Π.1.4.5, υπάρχουν ελιές με υψηλό pH, όπως είναι οι φρέσκιες ελιές ή οι ελιές που δεν έχουν υποστεί ζύμωση και το pH τους βρίσκεται εντός του εύρους ανάπτυξης του *Clostridium botulinum*. Σε αυτές τις περιπτώσεις το κονσερβοποιημένο προϊόν πρέπει να επεξεργάζεται θερμικώς με κανονική εμπορική αποστείρωση. Ο Lopez (1987) προτείνει τη θέρμανση στους $121,11 \text{ °C}$ για 45 min και έπειτα την ψύξη σε κρύο νερό, για ελιές σε κονσέρβες με μέγεθος μικρότερο ή ίσο του κιλού. Στόχος στην περίπτωση αυτή είναι το κρίσιμο σημείο της κονσέρβας να δεχθεί θερμικό θανατηφόρο αποτέλεσμα ίσο με 15 min ισοδύναμου χρόνου.

Τέλος, για ευκολία στη διατύπωση των αποτελεσμάτων, η γεωμετρία που περιγράφηκε σε αυτή την παράγραφο θα χαρακτηρίζεται ως γεωμετρία “α”.

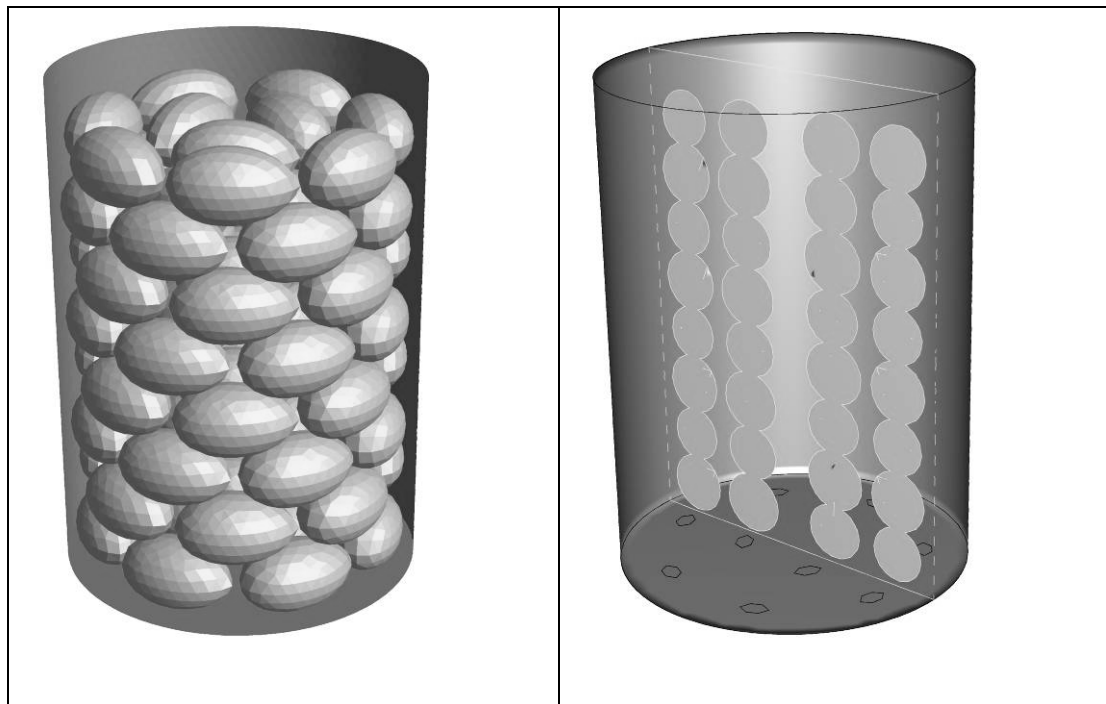
Π.2.5.2.2 Κονσέρβα που περιείχε 80 (8x10) μικρές ελιές ποικιλίας “Καλαμών”

Μετά τη σχεδίαση της γεωμετρίας με τις μεγάλες ελιές της ποικιλίας “Καλαμών”, ακολούθησε σχεδίαση γεωμετρίας με ελιές της ίδιας ποικιλίας, αλλά με μικρότερο μέγεθος σε κονσέρβα των ίδιων διαστάσεων (Εικόνα 20).



Εικόνα 20. Σχήμα και διαστάσεις μικρού μεγέθους ελιάς “Καλαμών”

Όπως ήταν αναμενόμενο, εντός της κονσέρβας τοποθετήθηκαν περισσότερες ελιές και με διαφορετική διάταξη, όμως παρέμεινε η ίδια ομοιόμορφη τοποθέτηση σε στρώματα. Για το σκοπό αυτό σχεδιάστηκαν 80 ελιές όμοιες μεταξύ τους, τόσο στο σχήμα όσο και στο μέγεθος, που τοποθετήθηκαν σε 8 στρώσεις των 10 ελιών η κάθε μία. Η κάθε ελιά είχε διαστάσεις 25x12 mm.



Εικόνα 21. Γεωμετρία και τομή της κονσέρβας που περιείχε 80 ελιές “Καλαμών”

Στην Εικόνα 21 φαίνεται ότι στην περίπτωση αυτή στον κεντρικό άξονα της κονσέρβας τοποθετήθηκαν 3 ελιές σε οριζόντια θέση για κάθε στρώση, ενώ περιμετρικά της κονσέρβας ήταν τοποθετημένες 7 ελιές και αυτές βρίσκονταν αντίστοιχα σε οριζόντια θέση. Σε κάθε στρώση οι ελιές που βρίσκονταν περιμετρικά ήταν στραμμένες σε σχέση με τις ελιές της προηγούμενης στρώσης κατά $25,7^\circ$, ενώ οι ελιές στον κεντρικό άξονα ήταν στραμμένες σε σχέση με τις ελιές της προηγούμενης στρώσης κατά 60° .

Και σε αυτή την περίπτωση αγνοήθηκε η ύπαρξη του πυρήνα των ελιών και οι ελιές του ενός στρώματος εφάπτονταν με τις ελιές του επόμενου στρώματος.

Έπειτα σχεδιάστηκε το πλέγμα, το οποίο είχε τα ίδια χαρακτηριστικά με αυτό της γεωμετρίας των μεγάλων ελιών “Καλαμών”. Στην περίπτωση των μικρών ελιών το πλέγμα σχεδιάστηκε με 180.982 κελιά, είχε σχήμα τετράεδρων πρισμάτων και η πυκνότητα του ήταν 390 κελιά/cm³.

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, μελετήθηκε αρχικά η επίδραση της μεταβολής της συγκέντρωσης της άλμης NaCl στη θερμική επεξεργασία της κονσέρβας, έπειτα η επίδραση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του θερμαντικού – ψυκτικού μέσου και της επιφάνειας της μεταλλικής κονσέρβας και τέλος επιλύθηκαν διάφορα σχήματα ήπιας θερμικής επεξεργασίας και εμπορικής αποστείρωσης. Η αναλυτική περιγραφή των συνθηκών με τις οποίες επιλύθηκε η εν λόγω γεωμετρία φαίνεται στον Πίνακα 12.

Στις περιπτώσεις 1 – 3 του Πίνακα 12 περιγράφονται οι οριακές και αρχικές συνθήκες της γεωμετρίας της εικόνας 21 για επίλυση του πεδίου ροής χρησιμοποιώντας ως ρευστό νερό και άλμη NaCl 4 και 8% (w/v). Στις περιπτώσεις 4 – 11 γίνεται επίλυση της συγκεκριμένης γεωμετρίας έχοντας μεταβάλλει το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στην εξωτερική επιφάνεια της κονσέρβας, όπως ακριβώς και στην περίπτωση της παραγράφου II.2.5.2.1. Στις περιπτώσεις 12 – 14 γίνεται επίλυση της γεωμετρίας για διάφορα σχήματα ήπιας θερμικής επεξεργασίας, είτε αυτή είναι εφαρμοσμένη στη βιομηχανική πρακτική είτε σαν προτεινόμενη θερμική επεξεργασία που θα έχει το επιθυμητό τελικό θερμικό αποτέλεσμα. Ακόμα στις περιπτώσεις 15 και 16 γίνεται επίλυση της γεωμετρίας για θερμική επεξεργασία με στόχο την εμπορική αποστείρωση του προϊόντος. Έτσι εφαρμόζεται και το χρονο-θερμοκρασιακό ζεύγος των 121,11 °C για 45 min, όπως προτείνει ο Lopez (1987).

Επειδή βρέθηκε ότι αυτός ο χρόνος θέρμανσης προκαλεί πολλαπλάσιο θερμικό αποτέλεσμα από το επιθυμητό (όπως αναφέρεται στην παράγραφο II.3.3.9 στα αποτελέσματα), έγινε επίλυση της γεωμετρίας και με χρόνο θέρμανσης 25 min. Ο χρόνος αυτός υπολογίστηκε στην αργότερα θερμαινόμενη ζώνη, έτσι ώστε η ελάχιστη τιμή Fo να είναι ελάχιστα μεγαλύτερη από την επιθυμητή.

Πίνακας 12. Οριακές και αρχικές συνθήκες που εφαρμόστηκαν στην επιλύμενη γεωμετρία με 80 ελιές “Καλαμών”

A/A	Περιγραφή Παραμετρικής Μελέτης	Θερμοκρασία θερμαντικού μέσου (°C)	Θερμοκρασία ψυκτικού μέσου (°C)	Αρχική θερμοκρασία κονσέρβας (°C)	Χρόνος θέρμανσης (min)	Συγκέντρωση NaCl % (w/v)	h (W/m ² K)	Χρονικό Βήμα (s)
1	Επίδραση της συγκέντρωσης της άλμης	70	20	20	10	4	∞	0,5
2		70	20	20	10	0	∞	0,5
3		70	20	20	10	8	∞	0,5
4	Επίδραση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας	70	20	20	10	4	100	0,5
5		70	20	20	10	4	200	0,5
6		70	20	20	10	4	500	0,5
7		70	20	20	10	4	750	0,5
8		70	20	20	10	4	1000	0,5
9		70	20	20	10	4	1500	0,5
10		70	20	20	10	4	2000	0,5
11		70	20	20	10	4	3000	0,5
12	Επίλυση διάφορων σχημάτων ήπιας θερμικής επεξεργασίας	80	20	$T_{\omega\mu\eta\varsigma} = 65^{\circ}\text{C}$		4	∞	0,5
13		62,4	20	20	25	4	∞	0,5
14		65 80 60	20	20	5 10 5	4	∞	0,5
15	Επίλυση σχημάτων εμπορικής αποστείρωσης	121,11	20	20	45	4	∞	0,5
16		121,11	20	20	25	4	∞	0,5

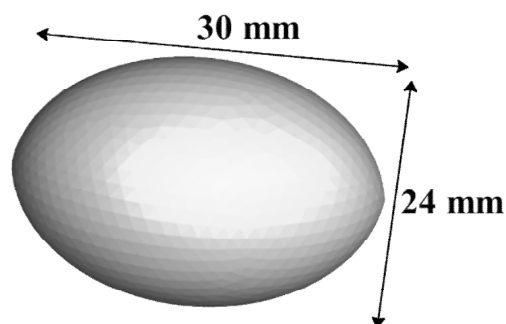
Τέλος, για χάριν ευκολίας, στις παραγράφους ανάλυσης των αποτελεσμάτων η συγκεκριμένη γεωμετρία θα χαρακτηρίζεται ως περίπτωση “β”.

Π.2.5.3 Γεωμετρία με “Κονσερβολιές”

Π.2.5.3.1 Κονσέρβα που περιείχε 48 (6x7+6) μεγάλες “Κονσερβολιές”

Μετά τη σχεδίαση των δύο γεωμετριών με κονσέρβες που περιείχαν ελιές της ποικιλίας “Καλαμών” σχεδιάστηκε κυλινδρική κονσέρβα των ίδιων διαστάσεων που περιείχε ελιές ομοιόμορφου ωοειδούς σχήματος. Στην πραγματικότητα έγινε προσπάθεια για όσο το δυνατό καλύτερη αναπαράσταση των ελιών της ποικιλίας

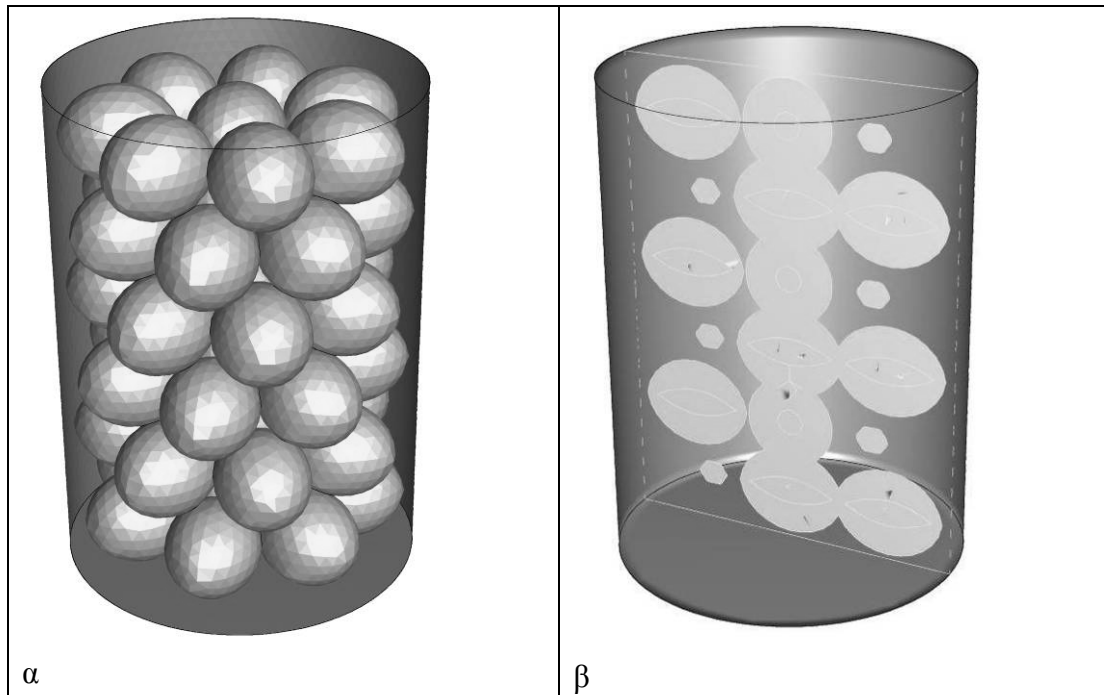
“Αμφίσσης” ή αλλιώς “κονσερβολιά”. Οι διαστάσεις των ελιών που σχεδιάστηκαν ήταν 30 mm η μεγάλη διάμετρος και 24 mm η μικρή διάμετρος. Αναλυτικότερα το σχήμα και οι διαστάσεις των ελιών φαίνονται στην Εικόνα 22.



Εικόνα 22. Σχήμα και διαστάσεις “Κονσερβολιάς”

Οι ελιές, αφού σχεδιάστηκαν, τοποθετήθηκαν στην κονσέρβα σε επίπεδες στρώσεις των 7 ελιών. Οι 7 ελιές της κάθε στρώσης βρίσκονταν περιμετρικά του κοίλου μέρους της κονσέρβας και σε θέση ακτινωτή σε σχέση με τον κεντρικό άξονα. Μεταξύ τους οι στρώσεις είχαν περιστραφεί κατά $25,7^\circ$ ως προς τον κεντρικό άξονα. Αυτό έγινε ώστε οι ελιές να ακουμπούν μεταξύ τους και να τοποθετηθεί όσο το δυνατό μεγαλύτερος αριθμός ελιών. Επίσης στον κεντρικό άξονα ήταν τοποθετημένες 6 ελιές (όσες και οι στρώσεις), οι οποίες ήταν ενωμένες μεταξύ τους και η κάθε μία είχε περιστραφεί κατά $25,7^\circ$ σε σχέση με την προηγούμενη. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι ενώ οι περιφερειακές ελιές ακουμπούσαν απλώς μεταξύ τους, οι ελιές του κεντρικού άξονα ήταν “βεβιασμένα” ενωμένες. Αυτό συνέβη λόγω του γεγονότος ότι ενώ η κάθε περιφερειακή ελιά ήταν τοποθετημένη ανάμεσα και πάνω από τις δύο ελιές της από κάτω στρώσης, μέρος της κάθε κεντρικής ελιάς συνέπιπτε σε τμήμα της ελιάς της από κάτω και από πάνω στρώσης, με αποτέλεσμα τα δύο τμήματα να επικαλύπτονται και να φαίνεται ότι οι ελιές του κεντρικού άξονα είναι συνεκτικά στοιβαγμένες. Ο τρόπος με τον οποίο ήταν τοποθετημένες οι ελιές εντός της κονσέρβας φαίνεται στην Εικόνα 23α, επίσης η τομή με την οποία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα (κατανομή της θερμοκρασίας, προφίλ ταχύτητας του ρευστού κ.α.) φαίνεται στην Εικόνα 23β.

Μετά τη σχεδίαση της γεωμετρίας κατασκευάστηκε το πλέγμα, στο οποίο τα κελιά ήταν ομοιόμορφα κατανεμημένα και είχαν σχήμα τετράεδρων πρισμάτων (“Tet/Hybrid – TGrid”). Τελικά σχεδιάστηκαν 158.559 κελιά και η πυκνότητα του πλέγματος ήταν $341,7$ κελιά/cm³.



Εικόνα 23. Γεωμετρία και τομή της κονσέρβας που περιείχε 48 “Κονσερβολιές”

Έπειτα καθορίστηκαν οι οριακές και οι αρχικές συνθήκες. Και σε αυτήν την περίπτωση, η επιφάνεια της κονσέρβας ορίστηκε ως τοίχωμα “wall” με ιδιότητες λευκοσιδήρου, η εξωτερική επιφάνεια των ελιών ορίστηκε και αυτή ως “wall” με ιδιότητες της ελιάς, ο χώρος που δεν κάλυπταν οι ελιές ορίστηκε ως ρευστό “fluid” και είχε ιδιότητες της άλμης και ο χώρος που κάλυπταν οι ελιές ορίστηκε ως στερεό “solid” και είχε τις ιδιότητες της ελιάς. Οι υπόλοιπες οριακές συνθήκες καθορίστηκαν, όπως φαίνεται στον παρακάτω Πίνακα 13.

Η πρώτη παράμετρος που μελετήθηκε ήταν η επίδραση της συγκέντρωσης του ρευστού. Όπως και για τις ελιές Καλαμών, έτσι και στις κονσερβολιές χρησιμοποιήθηκαν οι ιδιότητες του νερού και της άλμης NaCl 4 και 8% (w/v). Οι περιπτώσεις 1 – 3 δείχνουν αναλυτικά τις συνθήκες με τις οποίες επιλύθηκε η παραπάνω γεωμετρία για 3 διαφορετικές συγκεντρώσεις άλμης. Στην περίπτωση 4 έγινε επίλυση χρησιμοποιώντας για το ρευστό τις ιδιότητες της άλμης NaCl 4% (w/v), όχι όμως με γραμμική μεταβολή ανά 5 °C της πυκνότητας, αλλά εφαρμόζοντας την υπόθεση Boussinesq. Οι τιμές των μεγεθών που είναι απαραίτητα για τη χρήση της υπόθεσης Boussinesq ήταν ίδιες με αυτές της παραγράφου II.2.5.2.1. Στη συνέχεια, όπως και με τις δύο προηγούμενες γεωμετρίες, μελετήθηκε η επίδραση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στην εξωτερική επιφάνεια της κονσέρβας, με τις περιπτώσεις 5 – 12 να περιγράφουν αυτή την παραμετροποίηση. Στις περιπτώσεις 13 – 15 έγινε επίλυση εφαρμοζόμενων σχημάτων ήπιας θερμικής επεξεργασίας στη

βιομηχανία κονσερβοποιημένων ελιών και προτεινόμενη θερμική επεξεργασία ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό θερμικό αποτέλεσμα.

Πίνακας 13. Οριακές και αρχικές συνθήκες που εφαρμόστηκαν στην επιλύσιμη γεωμετρία με 48 “Κονσερβολιές”

A/A	Περιγραφή Παραμετρικής Μελέτης	Θερμοκρασία θερμαντικού μέσου (°C)	Θερμοκρασία ψυκτικού μέσου (°C)	Αρχική θερμοκρασία κονσερβάς (°C)	Χρόνος θέρμανσης (min)	Συγκέντρωση NaCl % (w/v)	h (W/m ² K)	Χρονικό Βήμα (s)
1	Επίδραση της συγκέντρωσης της άλμης	70	20	20	10	4	∞	0,5
2		70	20	20	10	0	∞	0,5
3		70	20	20	10	8	∞	0,5
4	Επίδραση της υπόθεσης Boussinesq	70	20	20	10	4	∞	0,5
5	Επίδραση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας	70	20	20	10	4	100	0,5
6		70	20	20	10	4	200	0,5
7		70	20	20	10	4	500	0,5
8		70	20	20	10	4	750	0,5
9		70	20	20	10	4	1000	0,5
10		70	20	20	10	4	1500	0,5
11		70	20	20	10	4	2000	0,5
12		70	20	20	10	4	3000	0,5
13	Επίλυση διάφορων σχημάτων ήπιας θερμικής επεξεργασίας	80	20	$T_{\acute{\omega}\lambda\eta\varsigma} = 65^{\circ}\text{C}$		4	∞	0,5
14		62,4	20	20	25	4	∞	0,5
15		65 80 60	20	20	5 10 5	4	∞	0,5
16	Επίλυση σχημάτων εμπορικής αποστείρωσης	121,11	20	20	45	4	∞	0,5
17		121,11	20	20	25	4	∞	0,5

Ακόμα στις περιπτώσεις 16 – 17 έγινε επίλυση έντονης θερμικής επεξεργασίας με στόχο την καταστροφή των σποριογόνων βακτηρίων, που μπορούν να αναπτυχθούν σε κονσερβοποιημένες ελιές με υψηλό pH. Ο χρόνος των 25 min θέρμανσης στους

121,11 °C χρησιμοποιήθηκε για να γίνει σύγκριση στη θερμική επεξεργασία μεταξύ των δύο ποικιλιών ελιών.

Τέλος, στην περιγραφή των αποτελεσμάτων, η συγκεκριμένη περίπτωση θα χαρακτηρίζεται ως περίπτωση “γ”.

II.3 Αποτελέσματα

II.3.1 Προσδιορισμός υγρασίας και ελαιοπεριεκτικότητας των ελιών

Μετά την πραγματοποίηση των μεθόδων που περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο βρέθηκε ότι η υγρασία των ελιών της ποικιλίας “Καλαμών” που είχαν υποστεί ζύμωση ήταν $59,2 \pm 2,0\%$ και για τις φρέσκες ελιές της ίδιας ποικιλίας η υγρασία ήταν $65,6 \pm 2,0\%$. Η υγρασία εκφράζεται ως το επί τοις % ποσοστό νερού επί του νωπού βάρους των ελιών. Σύμφωνα με τις βιβλιογραφικές αναφορές (Gandul-Rojas and Mínguez-Mosquera 2006, Kailis and Harris 2007) οι παραπάνω τιμές της υγρασίας βρίσκονται σε καλή συμφωνία με αυτές.

Επίσης η ελαιοπεριεκτικότητα των ελιών της ποικιλίας “Καλαμών” που είχαν υποστεί ζύμωση ήταν $12,9 \pm 1,0\%$ επί νωπού βάρους ελιών και $36,4 \pm 1,0\%$ επί ξηρού βάρους ελιών. Για τις δε αζύμωτες ελιές βρέθηκε ότι η ελαιοπεριεκτικότητα ήταν $11,8 \pm 1,0\%$ επί νωπού βάρους ελιών και $34,2 \pm 1,0\%$ επί ξηρού βάρους ελιών. Όμοια με την υγρασία βρέθηκε ότι υπήρχε καλή συμφωνία με τις τιμές ελαιοπεριεκτικότητας των βιβλιογραφικών αναφορών για τις ελιές (Ünal and Nergiz 2003, Gandul-Rojas and Mínguez-Mosquera 2006)

II.3.2 Θερμική υποβάθμιση ελιών

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο II.2.4, για κάθε ζεύγος θερμοκρασίας – χρόνου υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές των κλίσεων των ευθυγράμμων τμημάτων A – B (Διάγραμμα 11). Οι μέσες τιμές αυτές για κάθε θερμοκρασία και χρόνο θέρμανσης φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 14.

Για τον υπολογισμό των παραμέτρων θερμικής υποβάθμισης της υφής κατασκευάζονται διαγράμματα μέσης κλίσης – χρόνου θέρμανσης για κάθε θερμοκρασία. Στο Διάγραμμα 14 φαίνεται η μέση κλίση που είναι τοποθετημένη σε λογαριθμική κλίμακα σε σχέση με το χρόνο θέρμανσης για κάθε θερμοκρασία αναφοράς. Η μεταβολή της υφής σε σχέση με το χρόνο θέρμανσης είναι γραμμική. Από το κάθε διάγραμμα υπολογίζεται η τιμή D από τον τύπο:

$$D = - \frac{1}{\text{κλίση της ευθείας}}$$

Πίνακας 14. Αποτελέσματα μέσης κλίσης για την ευθεία A-B του διαγράμματος 7.

Θερμοκρασία θέρμανσης (°C)	Χρόνος θέρμανσης (min)	Μέση κλίση (N/mm)
60	10	2,29524
	30	2,00072
	60	1,82882
	90	1,73960
65	15	2,10187
	30	2,04482
	60	1,71154
	90	1,65374
70	5	2,11673
	10	2,03582
	20	1,94578
	30	1,86400
75	2	2,04442
	5	2,00107
	15	1,86228
	30	1,61356
80	1	2,09212
	3	1,93822
	5	1,85360
	10	1,75532
	15	1,63737

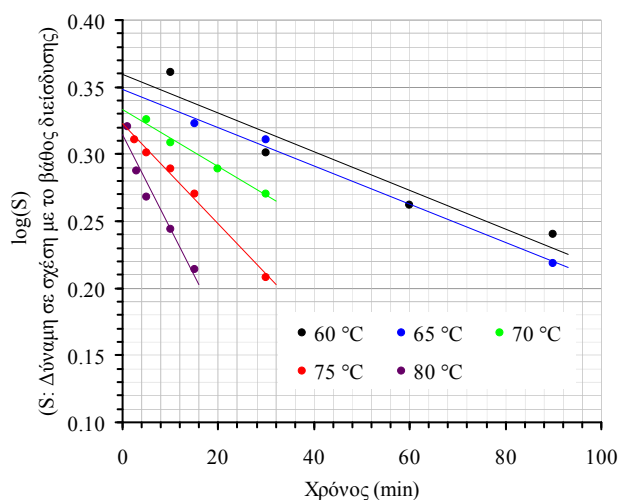
Υπολογίζοντας με τον ίδιο τρόπο τη τιμή D για κάθε θερμοκρασία εξάγεται ο Πίνακας 15.

Πίνακας 15. Τιμές D για κάθε θερμοκρασία θέρμανσης

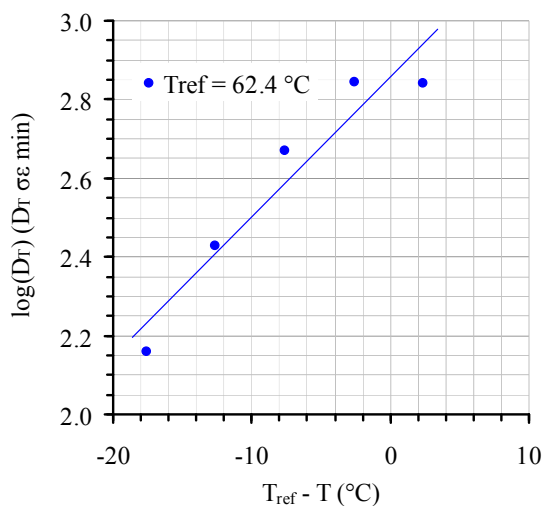
Θερμοκρασία Θέρμανσης (°C)	D value (min)
60	693 ± 30
65	654 ± 10
70	466 ± 5
75	273 ± 3
80	144 ± 1

Έχοντας πλέον υπολογίσει τις τιμές D για κάθε θερμοκρασία θέρμανσης κατασκευάζεται διάγραμμα θερμοκρασίας και τιμών D για τον υπολογισμό της τιμής z. Όπως και πριν οι τιμές D είναι τοποθετημένες σε λογαριθμική κλίμακα. Βρίσκοντας την κλίση της ευθείας που δημιουργείται στο Διάγραμμα 15 υπολογίζεται η τιμή z βάση του παρακάτω τύπου.

$$z = - \frac{1}{\text{κλίση της ευθείας}}$$



Διάγραμμα 14. Μεταβολή της μέσης κλίσης σε σχέση με το χρόνο θέρμανσης για κάθε θερμοκρασία



Διάγραμμα 15. Μεταβολή της τιμής D σε σχέση με τη θερμοκρασία θέρμανσης

Η τιμή z κατά συνέπεια είναι $28,64 \pm 0,50$ °C. Όπως έχει αναφερθεί στην παράγραφο II.2.5.1.3 η τιμή z χρησιμοποιήθηκε ως εισαγόμενο δεδομένο κατά την επίλυση των παραπάνω θεωρητικών περιπτώσεων, έτσι ώστε να υπολογιστεί η θερμική υποβάθμιση της υφής των ελιών της ποικιλίας “Καλαμών”. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι χρησιμοποιήθηκε και για τις ελιές της ποικιλίας “Κονσερβολιά” η ίδια τιμή z θεωρώντας ότι η θερμική υποβάθμιση της υφής των ελιών “Κονσερβολιά” είναι περίπου η ίδια.

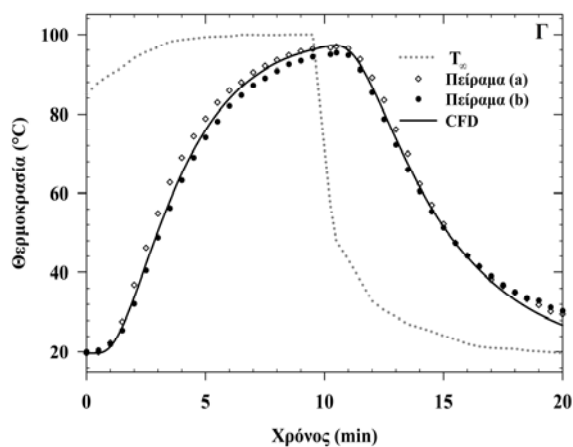
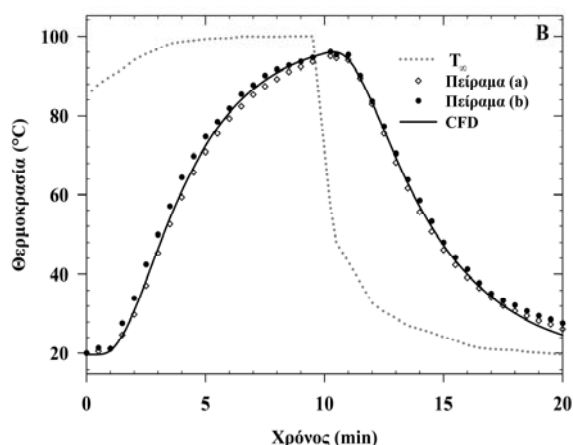
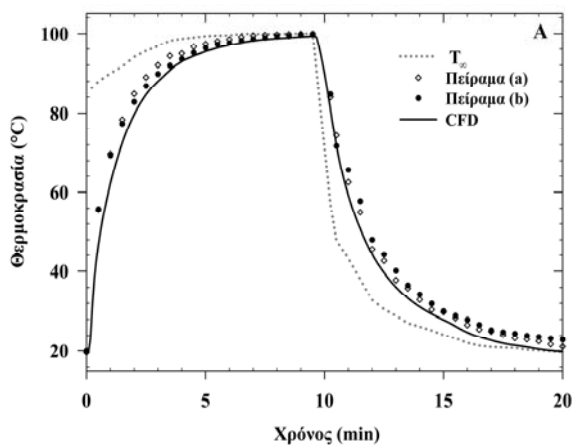
Π.3.3 Προσομοίωση θερμικών επεξεργασιών με CFD

Π.3.3.1 Επιβεβαίωση του θεωρητικού μοντέλου με πειραματικές μετρήσεις

Έχοντας σχεδιάσει την πειραματική γεωμετρία με όσο το δυνατό μεγαλύτερη

ακρίβεια και επιλύοντας στο πρόγραμμα Fluent αυτή τη γεωμετρία, λαμβάνονται τα θεωρητικά αποτελέσματα για τα τρία σημεία καταγραφής.

Από το Διάγραμμα 16 φαίνεται ότι υπάρχει σύμπτωση στις πειραματικές τιμές της θερμοκρασίας και τις θεωρητικές τιμές που εξάγονται από το πρόγραμμα της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Το σφάλμα μεταξύ των θεωρητικών και των πειραματικών τιμών υπολογίζεται ότι δεν ξεπερνά το 10% για τα σημεία εντός των ομοιωμάτων των ελιών από τεφλόν και το 13% για το σημείο στην άλμη. Με δεδομένο ότι τα επίπεδα σφάλματος μεταξύ των δύο τιμών βρίσκονται σε αποδεκτά όρια εξάγεται το συμπέρασμα ότι η πειραματικές τιμές επιβεβαιώνουν το θεωρητικό μοντέλο. Η επιβεβαίωση αυτή δίνει τη δυνατότητα για τον ισχυρισμό ότι παρόμοιες θεωρητικές παραμετρικές μελέτες δίνουν ορθά αποτελέσματα. Στη συνέχεια γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων από τις



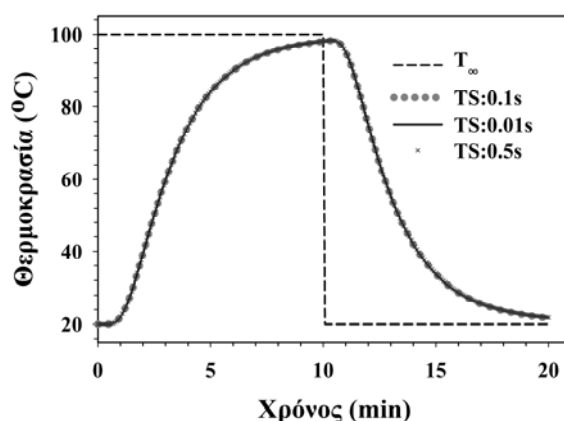
Διάγραμμα 16. Διαγράμματα επιβεβαίωσης των θεωρητικών με τα πειραματικά αποτελέσματα της θερμοκρασίας για A: σημείο στην άλμη, B: κέντρο κάτω ομοιώματος και Γ: κέντρο άνω ομοιώματος

παραμετρικές μελέτες, οι οποίες αναλύθηκαν λεπτομερώς στις παραπάνω

παραγράφους και περιγράφουν τις συνέπειες της θερμικής επεξεργασίας σε κονσερβοποιημένες ελιές των ποικιλιών “Καλαμών” και “Κονσερβολιά”.

Π.3.3.2 Ανεξαρτησία του χρονικού βήματος επίλυσης

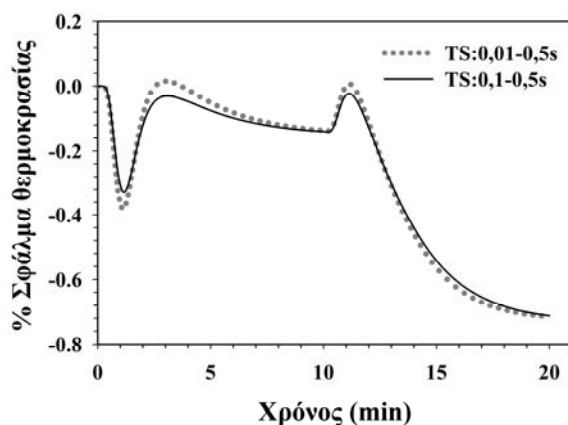
Η ορθή επίλυση πεδίων ροής ρευστών με τη χρήση της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής είναι γενικά αποδεκτό ότι πρέπει να πραγματοποιείται με μικρά χρονικά βήματα. Γενική αρχή είναι ότι ένα σωματίδιο του ρευστού για τη διάρκεια ενός χρονικού βήματος δεν πρέπει να διανύσει μεγαλύτερη απόσταση από το μήκος δύο κελιών. Στην προκειμένη περίπτωση ερευνήθηκε η γεωμετρία “α” για θέρμανση στους 100°C για 10 min και έπειτα ψύξη στους 20°C για 10 min με σταθερά χρονικά βήματα 0.5, 0.1 και 0.01 s. Όπως φαίνεται και από το Διάγραμμα 17 η διαφορά θερμοκρασίας στην Αργότερα Θερμαινόμενη Ζώνη (ΑΘΖ) είναι πολύ μικρή. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι από το διάγραμμα δεν είναι δυνατό να αντιληφθεί κανείς τη διαφορά μεταξύ των καμπυλών των τριών χρονικών βημάτων.



Διάγραμμα 17. Μεταβολή θερμοκρασίας στην ΑΘΖ για τα 3 χρονικά βήματα

Για αυτό το λόγο υπολογίστηκε το σφάλμα που υπήρχε μεταξύ των περιπτώσεων των τριών χρονικών βημάτων. Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 18 που περιγράφει την ποσοστιαία μεταβολή του σφάλματος μεταξύ των τριών παραμετρικών, το σφάλμα δεν ξεπερνά το 1%. Επομένως οι λύσεις που λαμβάνονται για χρονικά βήματα μεταξύ του 0,01 και 0,5 s δεν διαφέρουν ουσιαστικά, δηλαδή η λύση είναι ανεξάρτητη για το συγκεκριμένο εύρος τιμών του χρονικού βήματος. Επειδή δε για την επίλυση με μικρότερο χρονικό βήμα απαιτείται πολλαπλάσιος χρόνος σε σχέση με το μεγαλύτερο, για αυτό επιλέγεται το μεγαλύτερο. Έτσι στις επόμενες παραμετρικές μελέτες έγινε η χρήση του μεγαλύτερου χρονικού βήματος, το οποίο σημαίνει ότι χρησιμοποιήθηκε το χρονικό βήμα 0,5 s. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο χρόνος επίλυσης

για χρονικό βήμα 0,5 s ήταν 2 ημέρες, για το χρονικό βήμα 0,1 s ήταν 1 εβδομάδα και για το χρονικό βήμα 0,01 s ήταν 1,5 μήνας.

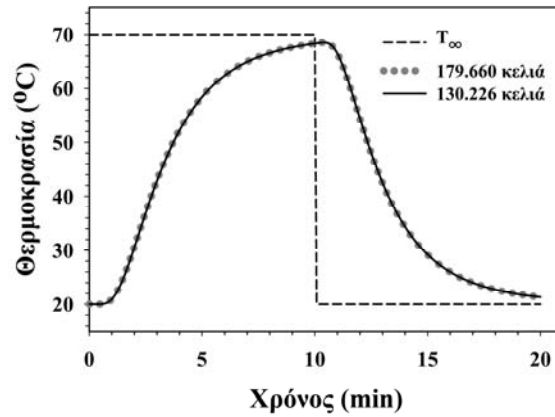


Διάγραμμα 18. Μεταβολή του σφάλματος θερμοκρασίας των 2 χρονικών βημάτων σε σχέση με το 0,5s

Είναι φανερό ότι για ένα σωστό αποτέλεσμα, εντός ενός εύλογου χρονικού διαστήματος επίλυσης το χρονικό βήμα των 0,01 s βρίσκεται εκτός μιας βιώσιμης προσέγγισης του εν λόγω προβλήματος.

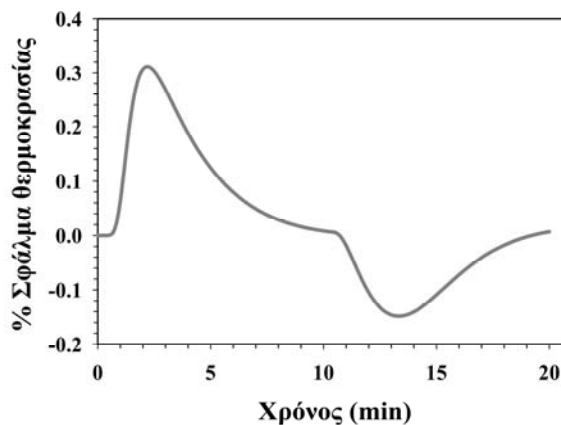
II.3.3.3 Ανεξαρτησία πλέγματος

Σε αντιστοιχία με το χρονικό βήμα έγινε επίλυση της ίδιας γεωμετρίας με αυτή της παραγράφου II.3.3.2 για θέρμανση στους 70°C για 10 min και ψύξη στους 20°C για 10 min. Όπως έχει αναφερθεί και στην παράγραφο II.2.5.2.1 το πλέγμα σχεδιάστηκε να έχει 130.226 κελιά και πυκνώθηκε μέχρι τα 179.660 κελιά. Για να είναι αποδεκτή η λύση θα πρέπει τα αποτελέσματα των δύο πλεγμάτων να μην έχουν διαφορά μεταξύ τους. Σε αυτήν την περίπτωση επιλέγεται το αραιότερο πλέγμα, λόγω του μικρότερου χρόνου επίλυσης. Στην περίπτωση αυτή η επίλυση με χρονικό 0,5 s ολοκληρώθηκε εντός 3 περίπου ημερών. Η καταγραφή της θερμοκρασίας έγινε και εδώ στην αργότερα θερμαινόμενη ζώνη και οι διαφορές μεταξύ αραιού και πυκνού πλέγματος φαίνονται στο παρακάτω Διάγραμμα 19.



Διάγραμμα 19. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ για τα δύο διαφορετικά πλέγματα

Συγκρίνοντας τις δύο καμπύλες φαίνεται ότι η διαφορά της θερμοκρασίας στην αργότερα θερμαινόμενη ζώνη για τις δύο περιπτώσεις είναι πολύ μικρή. Από το Διάγραμμα 20 επίσης φαίνεται η ποσοστιαία μεταβολή μεταξύ των δύο καμπυλών θέρμανσης – ψύξης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα η ποσοστιαία μεταβολή δεν ξεπερνά το 0,3% καθ' όλη τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας.



Διάγραμμα 20. Μεταβολή του σφάλματος θερμοκρασίας των δύο διαφορετικών πλεγμάτων

Αυτό το αποτέλεσμα δίνει το δικαίωμα για ισχυρισμό ότι μεταξύ 130.226 κελιών και 179.660 κελιών η λύση που λαμβάνεται είναι ανεξάρτητη της πυκνότητας του πλέγματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε μελέτες προσομοίωσης ροών με προγράμματα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής προτιμώνται τα κελιά να έχουν σχήμα ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου. Όμως στην προκειμένη περίπτωση η κατασκευή ενός τέτοιου πλέγματος ήταν αδύνατη, λόγω της πολυπλοκότητας της γεωμετρίας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην είναι δυνατός ο έλεγχος του σχήματος των κελιών και να θεωρηθεί ότι το πλέγμα με τα τετράεδρα πρίσματα δίνει ορθές λύσεις. Όπως και με την περίπτωση του χρονικού βήματος έτσι και εδώ θεωρήθηκε ότι και στις υπόλοιπες

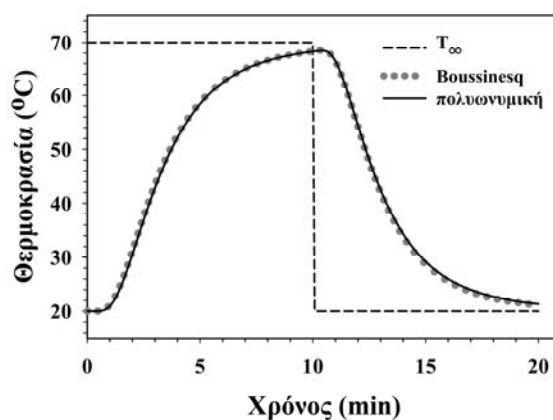
περιπτώσεις υπήρχε ανεξαρτησία της πυκνότητας του πλέγματος για αριθμό κελιών μεταξύ 100.000 και 200.000. Κάτι τέτοιο άλλωστε φαίνεται ορθό λόγω του γεγονότος ότι με το χρονικό βήμα 0,5 s ένα φανταστικό σωματίδιο, που μπορεί να βρεθεί στο ρευστό δεν μπορεί να διανύσει μεγαλύτερη απόσταση από το μήκος δύο κελιών στη μέση ταχύτητα που αναπτύσσεται στο πεδίο ροής.

II.3.3.4 Εξέταση της υπόθεσης Boussinesq

Όπως έχει αναφερθεί στην παράγραφο II.2.5.2 έγινε έλεγχος για την ορθότητα των αποτελεσμάτων που εξάγονται από το πρόγραμμα Fluent είτε χρησιμοποιώντας για την μεταβολή της πυκνότητας του ρευστού την υπόθεση Boussinesq είτε χρησιμοποιώντας την πολυωνυμική εξίσωση $\rho(T)$. Η συγκεκριμένη μελέτη έγινε για δυο από τις τρεις περιπτώσεις. Ο λόγος ήταν ότι δεν είναι αναμενόμενο να παρατηρηθούν μεταβολές στο εσωτερικό των ελιών διαφορετικού μεγέθους ή διαφορετικής ποικιλίας. Η δε δεύτερη περίπτωση επιλύθηκε απλώς για να επιβεβαιώσει την ορθότητα των αποτελεσμάτων της πρώτης περίπτωσης. Έτσι αρχικά εφαρμόστηκε για την περίπτωση (α) και έπειτα για την περίπτωση (γ).

α) Περίπτωση α (μεγάλες ελιές καλαμών)

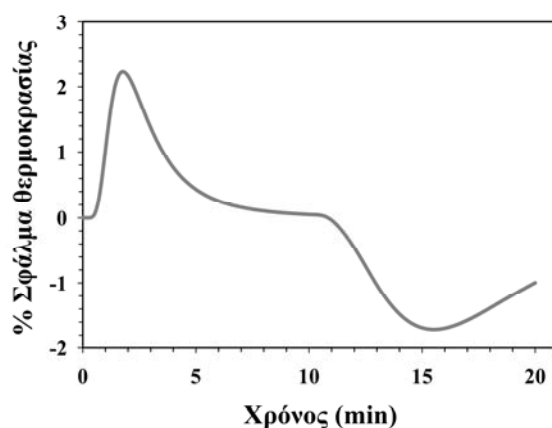
Για την περίπτωση (α) φαίνεται στο Διάγραμμα 21 η διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων χρησιμοποιώντας την υπόθεση Boussinesq και την πολυωνυμική μεταβολή της πυκνότητας της άλμης. Μετά την επίλυση των δύο παραμετρικών φαίνεται ότι η διαφορά της θερμοκρασίας στην αργότερα θερμαινόμενη ζώνη είναι πολύ μικρή, όχι όμως αμελητέα.



Διάγραμμα 21. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ για τις δύο περιπτώσεις υπολογισμού της πυκνότητας του ρευστού (Boussinesq και πολυωνυμική $\rho=f(t)$)

Αν και στο μεγαλύτερο μέρος της θερμικής επεξεργασίας η διαφορά θερμοκρασίας είναι μικρότερη από $0,5^{\circ}\text{C}$ εντούτοις η χρήση της υπόθεσης Boussinesq φαίνεται να διαφοροποιεί τα αποτελέσματα, έστω και σε μικρό ποσοστό.

Δηλαδή, ενώ στις δύο προηγούμενες παραγράφους το ποσοστό του σφάλματος δεν ξεπερνούσε το 0,8%, η διαφοροποίηση στον υπολογισμό και χρήση της τιμής της πυκνότητας της άλμης φαίνεται να έχει επίδραση ακόμα και 2% στη θερμοκρασία της ΑΘΖ. Στο Διάγραμμα 22 η γραφική αναπαράσταση του σφάλματος δείχνει ότι αν και στο μεγαλύτερο μέρος υπάρχει διαφορά στη θερμοκρασία χρησιμοποιώντας την υπόθεση Boussinesq, εντούτοις στο κρίσιμο χρονικό διάστημα της θερμικής επεξεργασίας η διαφορά ήταν πολύ μικρή. Το κρίσιμο χρονικό διάστημα θεωρείται ο χρόνος πριν και μετά την έναρξη της ψύξης, εκεί δηλαδή που υφίσταται η μεγαλύτερη μικροβιοκτόνος δράση της θερμότητας.

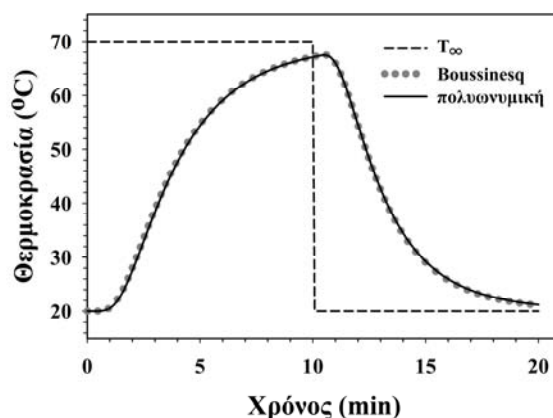


Διάγραμμα 22. Μεταβολή του σφάλματος στη θερμοκρασία στην ΑΘΖ για τις δύο περιπτώσεις υπολογισμού της πυκνότητας του ρευστού (Boussinesq και πολυωνυμική $\rho=f(t)$)

Έτσι στις περιπτώσεις που δεν υπάρχουν εξισώσεις περιγραφής της μεταβολής της πυκνότητας του ρευστού σε σχέση με τη μεταβολή της θερμοκρασίας, η χρήση της υπόθεσης Boussinesq μπορεί να δώσει αποτελέσματα με πολύ μικρή διαφοροποίηση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα χρήσης της υπόθεσης Boussinesq, όπως έχει αναφερθεί στην παράγραφο 1.8, είναι η έρευνα της θερμικής επεξεργασίας κονσερβοποιημένων υγρών τροφίμων με υπολογιστική ρευστοδυναμική από τους Kumar, Datta, Ghani και άλλους. Κατά συνέπεια ο υπολογισμός της πυκνότητας ενός ρευστού με τη συγκεκριμένη υπόθεση είναι αποδεκτή μέθοδος και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ελλείψει πειραματικών δεδομένων ή κατάλληλων εξισώσεων.

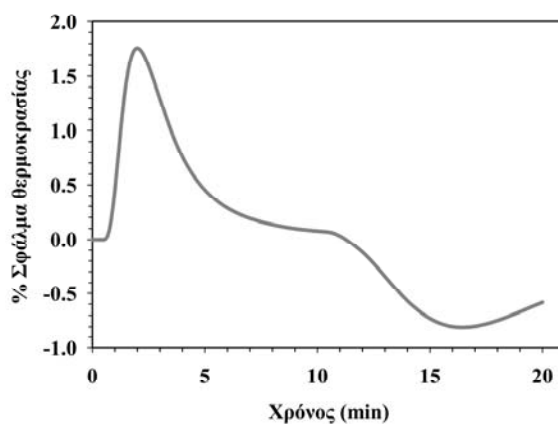
β) Περίπτωση γ (κονσερβολιές)

Έχοντας αναλύσει την περίπτωση (α) γίνεται σύγκριση της υπόθεσης Boussinesq και στην περίπτωση (γ). Και σε αυτή την περίπτωση φαίνεται ότι η διαφορά της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ είναι πολύ μικρή. Στο Διάγραμμα 23 φαίνονται οι καμπύλες θέρμανσης – ψύξης για την παράμετρο της μεταβολής της πυκνότητας της άλμης σε σχέση με τη θερμοκρασία.



Διάγραμμα 23. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ για τις δύο περιπτώσεις υπολογισμού της πυκνότητας του ρευστού (Boussinesq και πολυωνυμική $\rho=f(t)$)

Επίσης στο Διάγραμμα 24 φαίνεται το ποσοστό σφάλματος μεταξύ των δύο περιπτώσεων για όλο το χρόνο της θερμικής επεξεργασίας. Στην περίπτωση (γ) οι διαφορές της θερμοκρασίας φαίνεται ότι είναι μικρότερη σε σχέση με την περίπτωση (α). Στο μεγαλύτερο μέρος της θερμικής επεξεργασίας η διαφορά της θερμοκρασίας δεν ξεπέρασε τους 0,3°C ή 0,2%, ενώ η μέγιστη διαφορά παρουσιάστηκε μεταξύ 3^{ου} και 4^{ου} λεπτού της θέρμανσης με τιμή 0,5°C ή 1,8%.



Διάγραμμα 24. Μεταβολή του σφάλματος στη θερμοκρασία στην ΑΘΖ για τις δύο περιπτώσεις υπολογισμού της πυκνότητας του ρευστού (Boussinesq και πολυωνυμική $\rho=f(t)$)

Επιβεβαιώνοντας την επίλυση της προηγούμενης παραγράφου είναι φανερό ότι η χρήση της υπόθεσης Boussinesq δίνει αποτελέσματα με πολύ μικρή διαφοροποίηση σε σχέση με αυτά που εξάγονται από τη χρήση πολυωνυμικών εξισώσεων για να περιγράψουν τη μεταβολή της πυκνότητας της άλμης σε σχέση με τη μεταβολή της θερμοκρασίας. Παράλληλα γίνεται αποδεκτό για ακόμα μια φορά ότι η χρήση είτε της μίας είτε της άλλης παραμέτρου εξαρτάται κυρίως από τη διαθεσιμότητα ή έλλειψη δεδομένων παρά με την ορθότητα του τελικού αποτελέσματος.

Π.3.3.5 Κύρια περιγραφή της προσομοίωσης των τριών περιπτώσεων

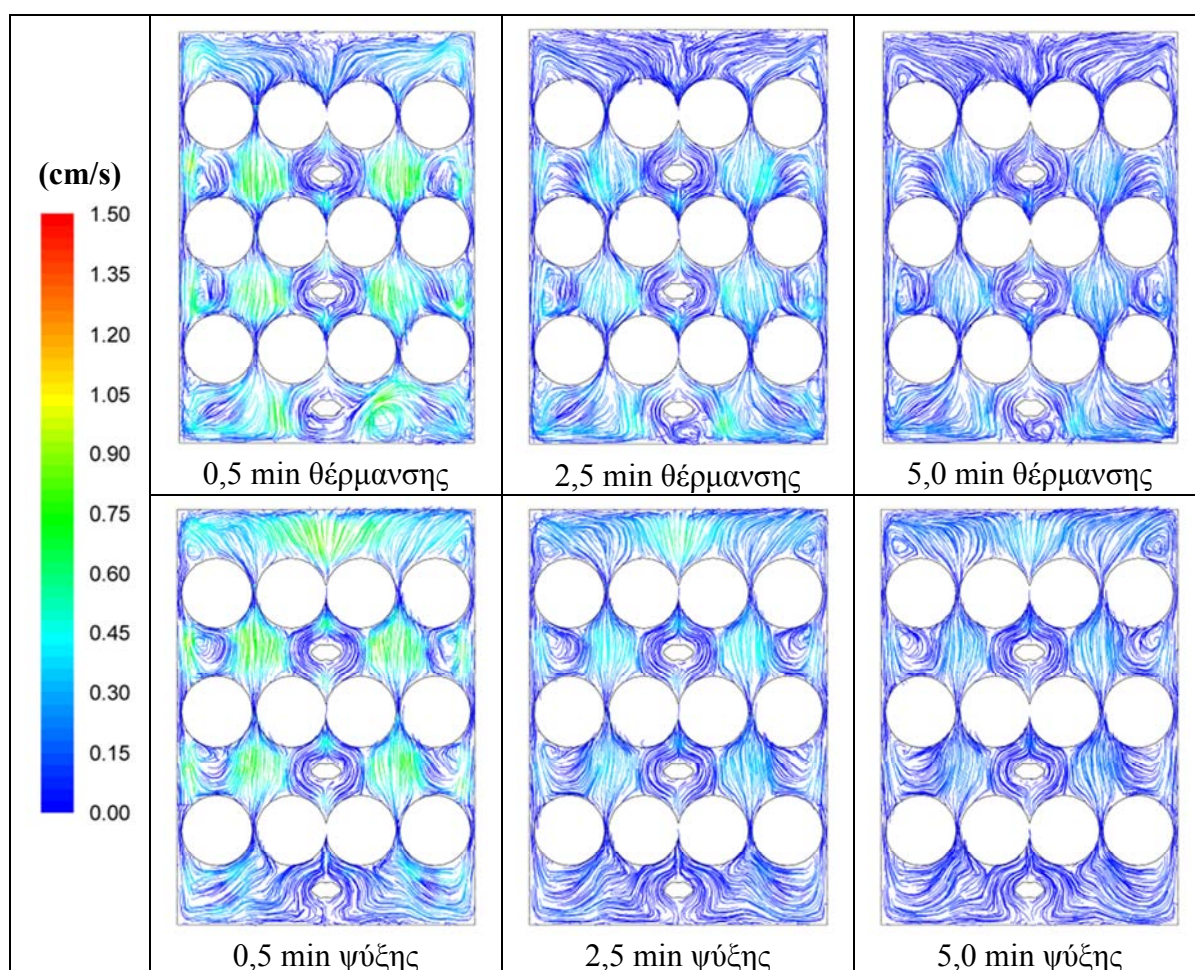
Η επίλυση των τριών κύριων γεωμετριών που επιλύθηκαν ολοκληρώθηκε χρησιμοποιώντας μια σειρά από μοντέλα και παραμέτρους που περιγράφηκαν αναλυτικά στην παράγραφο Π.2.5.2. Μετά τον έλεγχο των παραμέτρων που επηρεάζουν την ορθότητα των αποτελεσμάτων, επιλέχθηκαν εκείνες που δίνουν τις ορθότερες και γρηγορότερες λύσεις. Με βάση τα αποτελέσματα των παραπάνω παραγράφων έγινε χρήση του χρονικού βήματος 0,5 s, του αραιότερου δυνατού πλέγματος, του μοντέλου σύζευξης πίεσης – ταχύτητας “COUPLED” με αριθμό Courant 0,5, του μοντέλου διακριτοποίησης “PRESTO!” (για την πίεση) και “First Order Upwind” (για την συνέχεια και την ενέργεια). Και οι τρεις γεωμετρίες επιλύθηκαν για θέρμανση στους 70°C για 10 min και ψύξη στους 20°C για 10 min, τη στιγμή που ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του θερμαντικού – ψυκτικού μέσου και της εξωτερικής επιφάνειας του περιέκτη θεωρήθηκε άπειρος. Για τις τρεις αυτές περιπτώσεις γίνεται μια λεπτομερής ανάλυση των φαινομένων μεταφοράς, καθώς και του θερμικού αποτελέσματος που επιτυγχάνεται επί της καταστροφής των αλλοιογόνων μικροοργανισμών και της υποβάθμισης της υφής των ελιών καθ’ όλη τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας.

α) Περίπτωση α (μεγάλες ελιές καλαμών)

Η περίπτωση (α) (γεωμετρία με τις ελιές “Καλαμών” μεγάλου μεγέθους επιλύθηκε για θέρμανση στους 70°C για 10 min με σκοπό τη θερμική καταστροφή των αλλοιογόνων μικροοργανισμών που βρίσκονται στις ζυμωμένες ελιές. Υπολογίστηκαν η κατανομή της θερμοκρασίας εντός του περιέκτη, η ταχύτητα της άλμης στο πεδίο ροής, το θερμικό αποτέλεσμα στη θανάτωση των προπιονικών βακτηρίων καθώς και η ποιοτική υποβάθμιση της υφής του προϊόντος.

Ταχύτητα και ροή της άλμης

Το φαινόμενο της μετάδοσης θερμότητας με φυσική κυκλοφορία είναι ο τρόπος με τον οποίο μεταφέρεται η θερμότητα από το θερμό εσωτερικό τοίχωμα της κονσέρβας προς την κρύα άλμη. Κατά τη θέρμανση η άλμη στο οριακό στρώμα στο εσωτερικό τοίχωμα της κονσέρβας θερμαίνεται με αποτέλεσμα να γίνεται πιο ελαφριά (δηλαδή να έχει ελαττωμένη πυκνότητα) και λόγω της άνωσης τείνει να κινηθεί προς την οροφή της κονσέρβας.

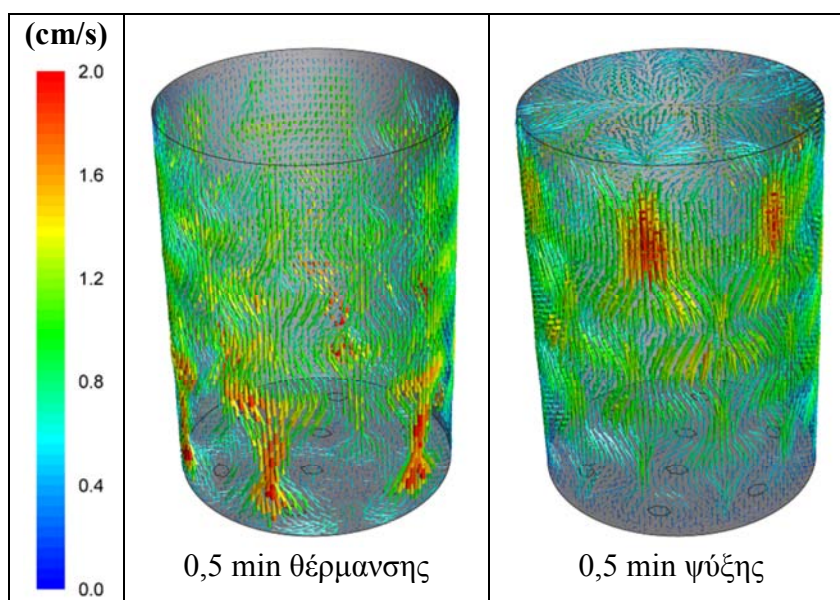


Εικόνα 24. Προφίλ ταχύτητας σε διάφορες χρονικές στιγμές της θερμικής επεξεργασίας

Η κίνηση αυτή διακόπτεται από το επίπεδο της οροφής με αποτέλεσμα την αντιστροφή της ροής προς τον πυθμένα της κονσέρβας στην περιοχή του κεντρικού άξονα του κυλίνδρου. Η ροή αυτή είναι συνεχής για όσο διαρκεί η περίοδος της θέρμανσης, ενώ αντιστρέφεται με την έναρξη της ψύξης. Στην περίπτωση αυτή δημιουργείται ένα αντίστοιχο με τη θέρμανση οριακό στρώμα στο εσωτερικό τοίχωμα της κονσέρβας. Ο όγκος της άλμης που βρίσκεται στο οριακό στρώμα ψύχεται με συνέπεια να γίνεται βαρύτερη (δηλαδή να αυξάνεται η πυκνότητά της). Η μεταβολή αυτή οδηγεί τη βαρύτερη άλμη να κινείται καθοδικά στο κοίλο μέρος της κονσέρβας

μέχρι να βρει αντίσταση από το τοίχωμα του πυθμένα και να αλλάξει κατεύθυνση στον κεντρικό άξονα της κονσέρβας. Στον κεντρικό άξονα η ψυχόμενη άλμη πιεζόμενη από τα συνεχώς καθοδικά ρεύματα του εσωτερικού τοιχώματος αναγκάζεται να κινηθεί ανοδικά.

Η ροή αυτή συνεχίζεται μέχρι το τέλος της ψύξης που είναι και το τέλος της θερμικής επεξεργασίας. Επειδή στη φυσική κυκλοφορία η κινητήριος δύναμη για την ανάπτυξη της ροής είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του εσωτερικού τοιχώματος και της άλμης, το μέγεθος της ταχύτητας εξαρτάται από αυτή τη διαφορά θερμοκρασίας. Κατά συνέπεια η μέγιστη τιμή της ταχύτητας της άλμης εντοπίζεται κοντά στο πλάγιο τοίχωμα της κονσέρβας και χρονικά στην έναρξη της θέρμανσης και στην έναρξη της ψύξης.



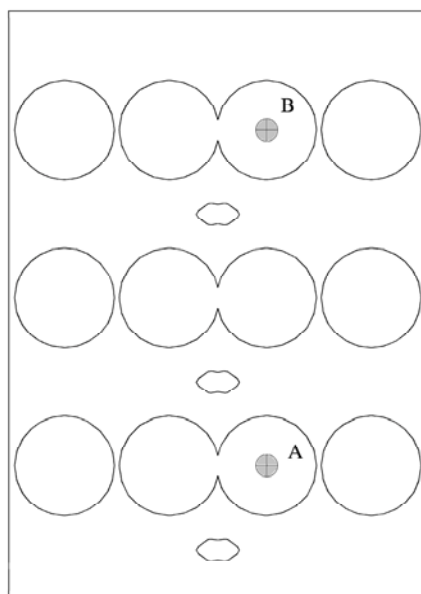
Εικόνα 25. Ταχύτητα της άλμης στην εσωτερική επιφάνεια της κονσέρβας

Αυτό άλλωστε φαίνεται από τις Εικόνες (24 και 25), που δείχνουν τη διαφορά στο μέγεθος της ταχύτητας στο χώρο μεταξύ των ελιών και στο εσωτερικό τοίχωμα της κονσέρβας, στο πρώτο μισό λεπτό της θέρμανσης και της ψύξης αντίστοιχα. Κατά συνέπεια ενώ η μέγιστη ταχύτητα στο εσωτερικό των ελιών δεν ξεπερνά τα 1,5 cm/s, στο εσωτερικό τοίχωμα η ταχύτητα αγγίζει τα 2 cm/s. Με το πέρας του χρόνου είτε στον κύκλο θέρμανσης, είτε στον κύκλο ψύξης η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ τοιχώματος της κονσέρβας και της άλμης συνεχώς μειώνεται με αποτέλεσμα την ανάλογη μείωση της ταχύτητας της άλμης στην περιοχή αυτή. Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο είναι ότι οι μέγιστες τιμές της ταχύτητας εντοπίζονται στα σημεία που οι ελιές ακουμπούν μεταξύ τους ή ακουμπούν στο τοίχωμα της κονσέρβας. Στα σημεία αυτά το ρευστό αναγκάζεται να διέλθει από πιο στενές διόδους, δηλαδή τα ανοίγματα

που αφήνουν οι ελιές μεταξύ τους και έτσι παρατηρείται αύξηση της ταχύτητας της άλμης.

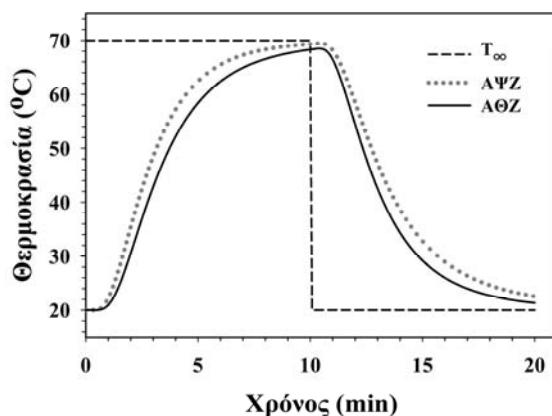
Θερμοκρασιακό προφίλ και εντοπισμός της αργότερα θερμαινόμενης & ψυχόμενης ζώνης

Με την έναρξη της θέρμανσης όλα τα σημεία της γεωμετρίας έχουν θερμοκρασία 20°C, ενώ το τοίχωμα της κονσέρβας αποκτά αμέσως θερμοκρασία 70°C. Στη συνέχεια η θερμοκρασία του τοιχώματος παραμένει για 10 min στους 70°C και έπειτα ξαφνικά μειώνεται στους 20°C, όπου παραμένει εκεί για άλλα 10 min. Σημαντικό στοιχείο στην ανάλυση των αποτελεσμάτων είναι ο καθορισμός της αργότερα θερμαινόμενης ζώνης (ΑΘΖ). Ο προσδιορισμός της αργότερα θερμαινόμενης ζώνης έγινε μετά από συνεχείς δοκιμές και διαδοχικούς υπολογισμούς (runs). Μετά τον καθορισμό της αργότερα θερμαινόμενης ζώνης, η οποία εντοπίστηκε στο σημείο με συντεταγμένες (8.7,-28.8,0) πραγματοποιήθηκε τελική επίλυση με καταγραφή της θερμοκρασίας στο σημείο αυτό. Ο εντοπισμός των σημείων της ΑΘΖ (Α) και της ΑΨΖ (Β) φαίνονται στην παρακάτω Εικόνα 26.



Εικόνα 26. Η ΑΘΖ (Α) και η ΑΨΖ (Β) όπως εντοπίζονται στην γεωμετρία της περίπτωσης “α”

Από την καταγραφή της θερμοκρασίας εξάγεται το παρακάτω Διάγραμμα 25. Στο διάγραμμα φαίνεται η καμπύλη της θερμοκρασίας στην αργότερα θερμαινόμενη ζώνη και στην αργότερα ψυχόμενη ζώνη της κονσέρβας κατά τη διάρκεια του κύκλου θέρμανσης – ψύξης.

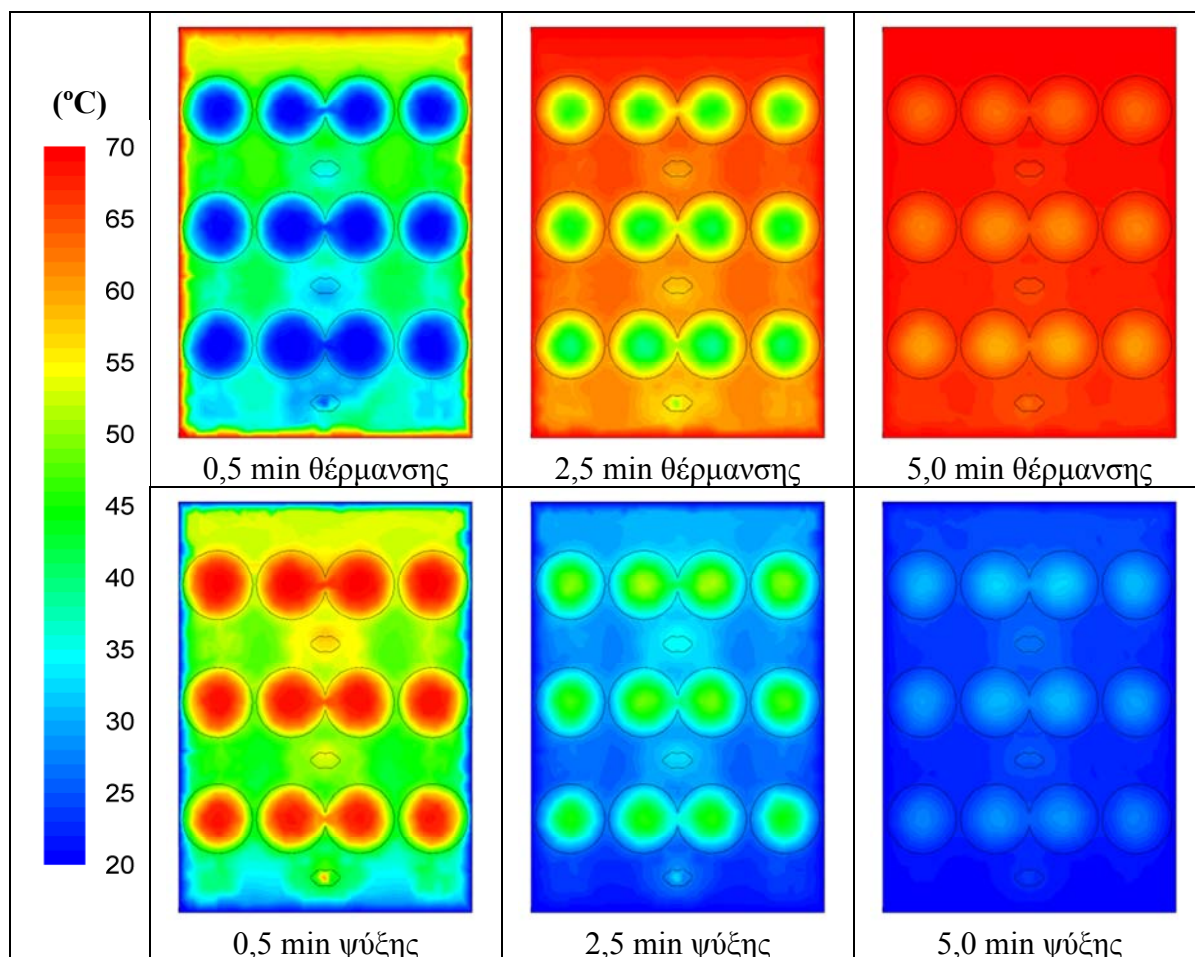


Διάγραμμα 25. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ και στην ΑΨΖ.

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί μέχρι, το πρώτο λεπτό της θέρμανσης η θερμοκρασία παραμένει σταθερή και ίση με την αρχική θερμοκρασία της κονσέρβας. Έπειτα παρατηρείται απότομη αύξηση της θερμοκρασίας, η οποία όσο τείνει να προσεγγίσει τη θερμοκρασία του θερμαντικού μέσου τόσο επιβραδύνεται η αύξηση. Στο τέλος της θέρμανσης φαίνεται ότι η αργότερα θερμαινόμενη ζώνη δεν φτάνει τους 70°C. Χαρακτηριστική είναι η συνέχιση της αύξησης της θερμοκρασίας ακόμα και όταν η κονσέρβα έχει εισέλθει στην περίοδο της ψύξης. Σε λιγότερο από 1 min μετά την έναρξη της ψύξης η θερμοκρασία της αργότερα θερμαινόμενης ζώνης φτάνει στη μέγιστη τιμή της και έπειτα αρχίζει η πτώση της, η οποία αρχικά είναι απότομη, ενώ μετά το πέμπτο λεπτό της περιόδου της ψύξης, η πτώση της θερμοκρασίας επιβραδύνεται.

Στην Εικόνα 27 φαίνεται η κατανομή της θερμοκρασίας σε κάθετη τομή της κονσέρβας για συγκεκριμένους χρόνους του κύκλου θέρμανσης – ψύξης. Στο πρώτο μισό λεπτό της θέρμανσης είναι χαρακτηριστική η ταχύτητα με την οποία θερμαίνεται η άλμη, ενώ οι ελιές παραμένουν ακόμα σε χαμηλή θερμοκρασία. Επίσης φαίνεται ότι η θερμή άλμη συσσωρεύεται στην οροφή της κονσέρβας, ενώ στα χαμηλότερα στρώματα η άλμη είναι πιο κρύα. Επιπλέον φαίνεται το οριακό στρώμα που δημιουργείται μεταξύ του τοιχώματος της κονσέρβας και του ρευστού. Το οριακό αυτό στρώμα αποκτά πολύ γρήγορα τη θερμοκρασία του τοιχώματος και η ποσότητα της άλμης που βρίσκεται σε αυτά τα σημεία κινείται ανοδικά, ενώ αναμειγνύεται με την ποσότητα του υπόλοιπου ρευστού και έτσι παρατηρείται μια ταχεία θέρμανση του ρευστού. Η ταχεία θέρμανση της άλμης φαίνεται επίσης και από τις εικόνες κατανομής της θερμοκρασίας στα 2,5 και 5 min, τη στιγμή που τα στερεά σώματα (ελιές) θερμαίνονται αργότερα. Αυτή η ανομοιομορφία μεταξύ στερεού και ρευστού

στο γεγονός ότι οι θερμές μάζες της άλμης στο οριακό στρώμα αναμειγνύονται με τις ψυχρότερες της υπόλοιπης κονσέρβας με τη ροή που δημιουργείται, ενώ η μάζα κάθε ελιάς θερμαίνεται με αγωγή.



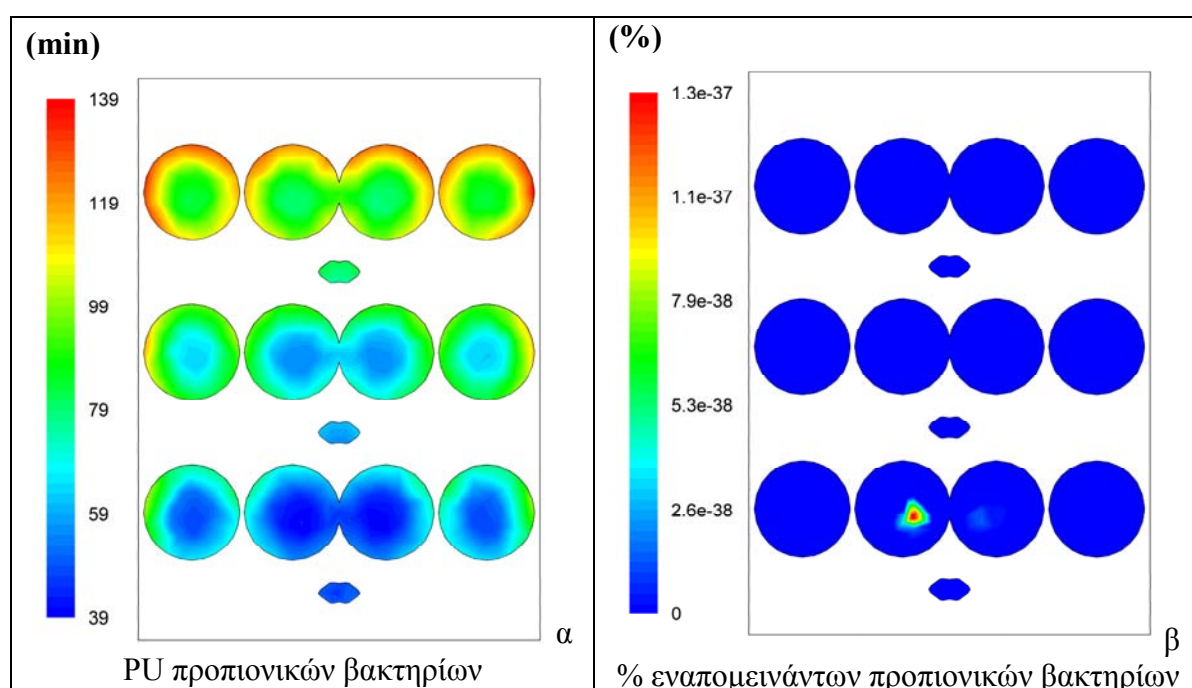
Εικόνα 27. Κατανομή της θερμοκρασίας σε τομή της κονσέρβας για διάφορες χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας

Πολύ σημαντικό στοιχείο από τις εικόνες της θερμοκρασιακής κατανομής αποτελεί ο εντοπισμός της αργότερα θερμαινόμενης ζώνης. Στη συγκεκριμένη γεωμετρία, έχοντας δηλαδή τοποθετήσει τις ελιές με συγκεκριμένη διάταξη και θέση παρατηρήθηκε ότι δύο σημεία αποκτούν σε μια δεδομένη χρονική στιγμή, τη χαμηλότερη θερμοκρασία σε σχέση με τα υπόλοιπα σημεία της γεωμετρίας. Τα σημεία αυτά είναι συμμετρικά μεταξύ τους, ως προς τον κεντρικό άξονα της κονσέρβας και εντοπίζονται στο κέντρο των ελιών, που βρίσκονται στο κέντρο της δεύτερης στρώσης ελιών από τον πυθμένα. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω το ένα σημείο από τα δύο έχει συντεταγμένες (8.7,-28.8,0) και το άλλο λόγω του ότι είναι συμμετρικό ως προς τον κεντρικό άξονα έχει συντεταγμένες (-8.7,-28.8,0). Ακόμα, σημαντικό είναι το γεγονός ότι η θέση της αργότερα θερμαινόμενης ζώνης δεν μετακινείται κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας.

Τέλος θα πρέπει να επισημανθεί ότι λόγω της συσσώρευσης της θερμής άλμης στην οροφή της κονσέρβας, οι ελιές που βρίσκονται στην περιοχή αυτή δέχονται μεγαλύτερο θερμικό φορτίο σε σχέση με τις ελιές των υπολοίπων στρωμάτων.

Θερμική καταστροφή μικροοργανισμών και εντοπισμός κρίσιμου σημείου

Έχοντας εισαγάγει στο σύστημα την εξίσωση για τον υπολογισμό του ισοδύναμου χρόνου για μικροοργανισμό στόχο τα προπιονικά βακτήρια με $z = 5,25^{\circ}\text{C}$ και $D_{62,4} = 1 \text{ min}$ (Gonzalez et al, 1982) εξάγονται οι παρακάτω εικόνες στις οποίες φαίνεται η κατανομή του ισοδύναμου χρόνου για $T_{\text{ref}} = 62,4^{\circ}\text{C}$, καθώς και το κρίσιμο σημείο.

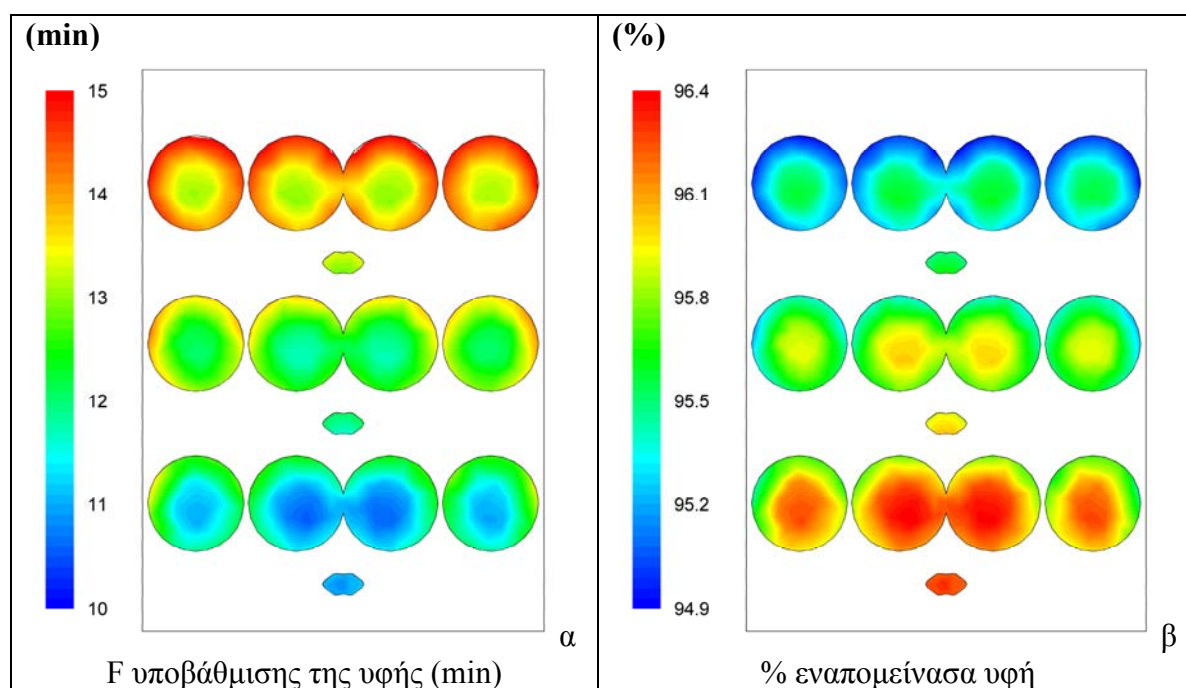


Εικόνα 28. Κατανομή ισοδύναμου χρόνου (α) και % εναπομεινάντων μικροοργανισμών (β) σε τομή της κονσέρβας στο τέλος της θερμικής επεξεργασίας

Με βάση τους υπολογισμούς του προγράμματος Fluent για τις παραπάνω παραμέτρους βρέθηκε ότι η ελάχιστη τιμή του ισοδύναμου χρόνου για τα προπιονικά βακτήρια ήταν 38,8 min, τιμή κατά πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με την απαιτούμενη από το Διεθνές Συμβούλιο Ελιάς (IOC, 2004) που δίνει $PU_{62,4^{\circ}\text{C}}^{5,25^{\circ}\text{C}} = 15 \text{ min}$ στο κρίσιμο σημείο. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα τη μείωση του μικροβιακού φορτίου κατά 38,8 λογαριθμικούς κύκλους (λόγω του ότι η τιμή $D_{62,4} = 1 \text{ min}$). Υπολογίζοντας τον επί τοις % αριθμό εναπομεινάντων κυττάρων, φαίνεται η περιοχή στην οποία εντοπίζεται το κρίσιμο σημείο (Εικόνα 28β). Η περιοχή αυτή βρίσκεται στη δεύτερη στρώση ελιών από τον πυθμένα της κονσέρβας και κοντά στον κεντρικό άξονά της.

Θερμική υποβάθμιση ποιοτικών χαρακτηριστικών των ελιών

Κατά τη θερμική επεξεργασία εκτός από το επιθυμητό θερμικό αποτέλεσμα επί των αλλοιογόνων μικροοργανισμών παρατηρείται και υποβάθμιση ορισμένων ποιοτικών χαρακτηριστικών του κονσερβοποιημένου τροφίμου. Στην παρούσα μελέτη, όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως, υπολογίστηκαν πειραματικά τα χαρακτηριστικά της θερμικής υποβάθμισης της υφής των ελιών (μαλάκωμα), (παράγραφος II.3.2 – $z=28,64\pm 0.50$ °C) και τα χαρακτηριστικά αυτά ενσωματώθηκαν στον κώδικα υπολογισμών του προγράμματος υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Επιλύοντας τη γεωμετρία “α” λαμβάνονται αποτελέσματα για την θερμική υποβάθμιση της υφής των ελιών. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 29α η κατανομή του ισοδύναμου χρόνου για την ποιοτική υποβάθμιση της υφής των ελιών $F_{62.4}^{28.64}$ μετά την ολοκλήρωση του κύκλου θέρμανσης – ψύξης (10 min θέρμανση στους 70°C και 10 min ψύξη στους 20°C) κυμαίνεται μεταξύ 10,4 – 15 min.



Εικόνα 29. Κατανομή ισοδύναμων χρόνων υποβάθμισης υφής των ελιών Καλαμών μεγάλου μεγέθους και % εναπομείνασα υφή σε τομή της κονσέρβας

Επίσης από την εξίσωση:

$$F_{62.4}^{28.64} = D_{62.4} \cdot (\log 100 - \log C_b) \quad \text{Εξίσωση 49}$$

υπολογίζεται η επί τοις % εναπομείνασα υφή των ελιών C_b . Στην Εικόνα 29β φαίνεται η κατανομή του μεγέθους $(C_b/C_a) \cdot 100\%$. Είναι χαρακτηριστικό ότι το θερμικό φορτίο στο οποίο εκτέθηκαν οι ελιές υποβάθμισε μόνο κατά 5,1% την υφή των ελιών κατά μέγιστο και κατά ελάχιστο κατά 3,6% της αρχικής υφής.

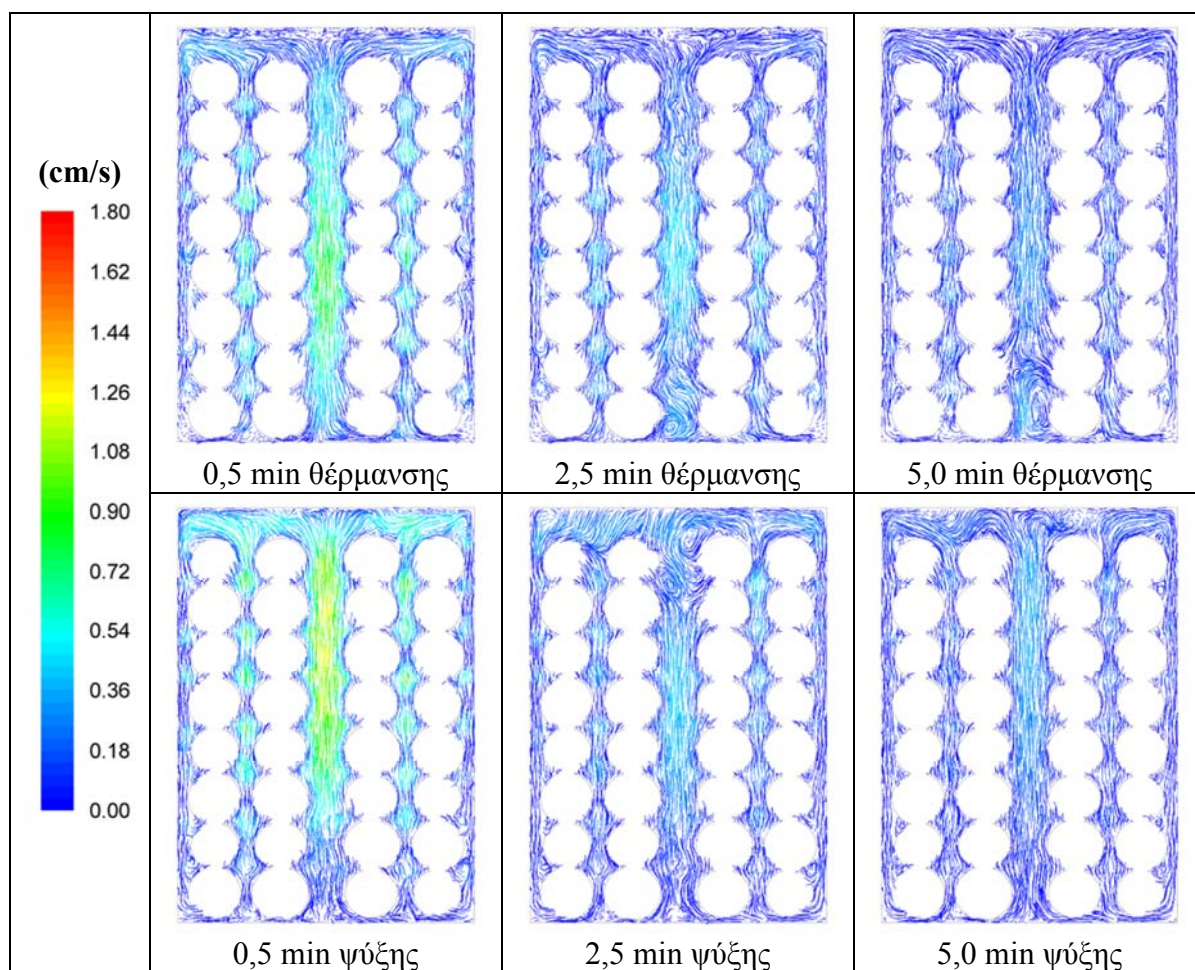
Παρατηρώντας την κατανομή του ισοδύναμου χρόνου στις ελιές φαίνεται ότι τα ανώτερα στρώματα ελιών στην κονσέρβα δέχονται μεγαλύτερο θερμικό φορτίο σε σχέση με τα στρώματα ελιών που βρίσκονται κοντά στον πυθμένα της κονσέρβας. Από τον ισοδύναμο χρόνο που βρέθηκε παρατηρείται μεγαλύτερη υποβάθμιση στην επιφάνεια των ελιών της ανώτερης στρώσης, ενώ η μικρότερη υποβάθμιση παρατηρείται στις δύο ελιές που βρίσκονται στον κεντρικό άξονα της δεύτερης στρώσης ελιών από τον πυθμένα.

β) Περίπτωση β (μικρές ελιές καλαμών)

Σε συνέχεια της περίπτωσης “α” με τις ελιές της ποικιλίας “καλαμών” μεγάλου μεγέθους πραγματοποιήθηκε προσομοίωση της θερμικής επεξεργασίας σε κονσέρβα του ίδιου μεγέθους που περιείχε ελιές “καλαμών” σε μικρότερο μέγεθος. Ο κύκλος θέρμανσης – ψύξης ήταν ο ίδιος με την περίπτωση “α”, δηλαδή θέρμανση στους 70°C για 10 min και ψύξη στους 20°C για άλλα 10 min. Η θερμική επεξεργασία αυτή είχε στόχο την θερμική θανάτωση των προπιονικών βακτηρίων σε επίπεδα τέτοια, έτσι ώστε να επιτευχθεί ισοδύναμος χρόνος $PU_{62.4^{\circ}C}^{5.25^{\circ}C} = 15 \text{ min}$. Στη συνέχεια γίνεται ανάλυση της ροής της άλμης NaCl, της κατανομής της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της κονσέρβας, της καταστροφής των μικροοργανισμών που είναι υπεύθυνοι για την αλλοίωση των ελιών και της θερμικής υποβάθμισης των βασικών ποιοτικών χαρακτηριστικών των περιεχόμενων ελιών στην κονσέρβα.

Ταχύτητα και ροή της άλμης

Στη συγκεκριμένη περίπτωση οι αρχικές και οριακές συνθήκες ήταν ίδιες με αυτές της περίπτωσης “α” και η μόνη διαφορά ήταν το μέγεθος των ελιών και η τοποθέτησή τους στην κονσέρβα. Η κίνηση της άλμης ήταν όμοια με αυτή της περίπτωσης “α” τόσο κατά τον κύκλο θέρμανσης, όσο και κατά τον κύκλο ψύξης. Στο σύμπλεγμα εικόνων 30 φαίνεται η ροή της άλμης σε κάθετη τομή για τρεις χρονικές στιγμές κατά τον κύκλο θέρμανσης και άλλες τρεις κατά τον κύκλο ψύξης.

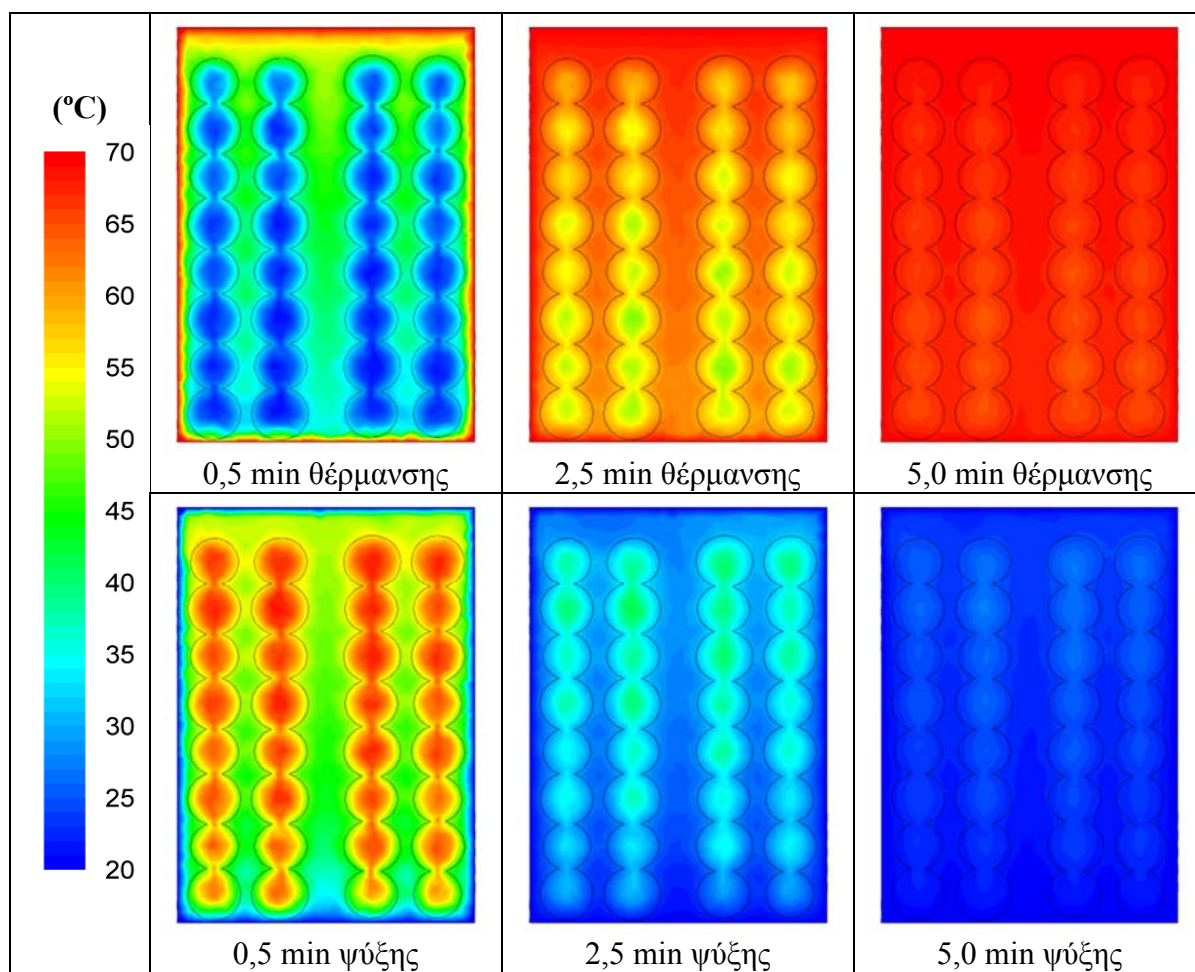


Εικόνα 30. Προφίλ ταχύτητας σε διάφορες χρονικές στιγμές της θερμικής επεξεργασίας

Από το πρόγραμμα επίλυσης του πεδίου ροής βρέθηκε ότι η μέγιστη ταχύτητα κατά τη διάρκεια της θέρμανσης έφτασε τα 2,627 cm/s, ενώ για την ψύξη η μέγιστη ταχύτητα της άλμης έφτασε τα 2,558 cm/s. οι μέγιστες τιμές της ταχύτητας της άλμης εντοπίστηκαν στην εσωτερική επιφάνεια της κονσέρβας.

Θερμοκρασιακό προφίλ και εντοπισμός της αργότερα θερμαινόμενης & ψυχόμενης ζώνης

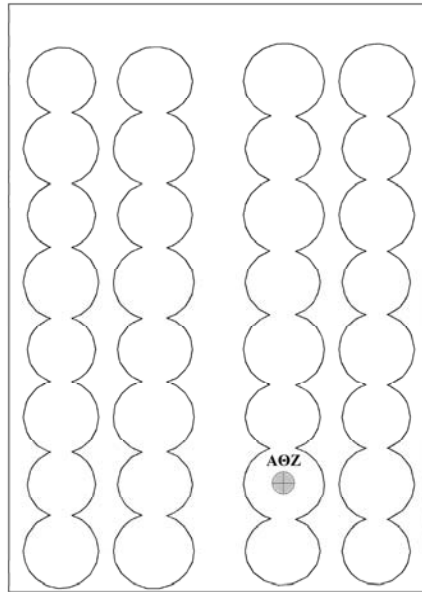
Σε συνέχεια της ανάλυσης της προηγούμενης παραγράφου παρουσιάζεται το θερμοκρασιακό προφίλ του εσωτερικού της κονσέρβας κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας. Εφόσον ο τρόπος μεταφοράς της θερμότητας από την κονσέρβα προς την άλμη και κατ' επέκταση προς τις ελιές, ήταν ο ίδιος με την περίπτωση των μεγάλων ελιών, παρατηρήθηκε αντιστοιχία και στο θερμοκρασιακό προφίλ.



Εικόνα 31. Κατανομή της θερμοκρασίας σε τομή της κονσέρβας για διάφορες χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας

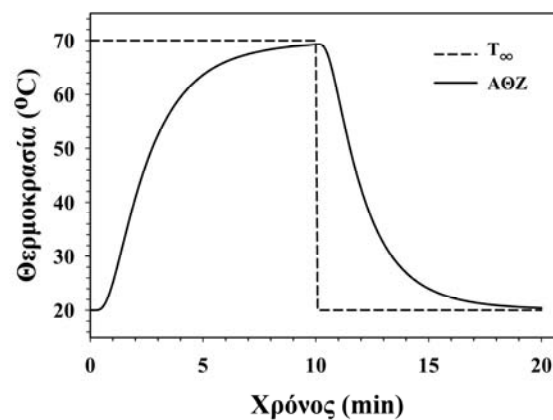
Στις τρεις πρώτες εικόνες του συμπλέγματος εικόνων 31 φαίνεται η θερμοκρασιακή μεταβολή της άλμης και των ελιών σε μια χαρακτηριστική τομή για τρεις χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια του κύκλου θέρμανσης. Πολύ σημαντική πληροφορία είναι ο εντοπισμός της αργότερα θερμαινόμενης ζώνης. Από τα δεδομένα που υπολογίστηκαν με το πρόγραμμα Fluent βρέθηκε ότι η αργότερα θερμαινόμενη ζώνη εντοπίζεται στο εσωτερικό των ελιών που βρίσκονται γύρω από τον κεντρικό άξονα και στη δεύτερη σειρά ελιών από τον πυθμένα. Ο εντοπισμός της αργότερα θερμαινόμενης ζώνης φαίνεται στην Εικόνα 32.

Στην περίπτωση “β” η αργότερα ψυχόμενη ζώνη εντοπίστηκε στο εσωτερικό των ελιών που βρίσκονται γύρω από τον κεντρικό άξονα και στην πρώτη σειρά από την οροφή της κονσέρβας. Οι συντεταγμένες της αργότερα θερμαινόμενης ζώνης ήταν (11.5,-33,0), ενώ οι αντίστοιχες συντεταγμένες για τις συμμετρικές ελιές στο ίδιο επίπεδο ήταν (-8.5,-33,-6.7) και (0.9,-33,10.8). Η αργότερα ψυχόμενη ζώνη είχε συντεταγμένες (11.5,39,0) και αντίστοιχα οι συμμετρικές ελιές είχαν συντεταγμένες (-10,39,-6) και (-2,39,12.5).



Εικόνα 32. Σημείο εντοπισμού της αργότερα θερμαινόμενης ζώνης στη γεωμετρία “β”

Η μεταβολή της θερμοκρασίας στην αργότερα θερμαινόμενη ζώνη κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας φαίνεται στο Διάγραμμα 26.



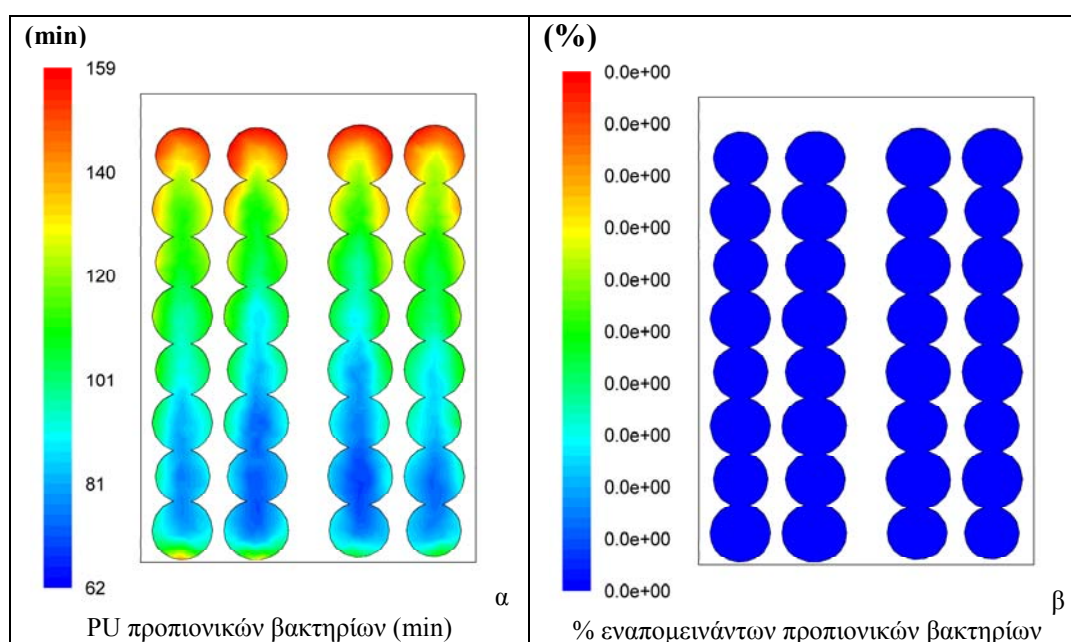
Διάγραμμα 26. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ

Θερμικός θάνατος μικροοργανισμών και εντοπισμός κρίσιμου σημείου

Η θερμική επεξεργασία της κονσέρβας με ελιές “καλαμών” μικρότερου μεγέθους σε σχέση με αυτή της περίπτωσης “α” εφαρμόζεται για να μελετηθεί εάν επιτυγχάνει το ίδιο θερμικό αποτέλεσμα στον μικροοργανισμό στόχο. Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω ο μικροοργανισμός στόχος για τις ζυμωμένες ελιές εμβαπτισμένες σε άλμη είναι τα προπιονικά βακτήρια και ο ισοδύναμος χρόνος που πρέπει να επιτευχθεί είναι

$PU_{62.4^{\circ}C}^{5.25^{\circ}C} = 15\text{min}$. Ο ισοδύναμος χρόνος στο τέλος της θερμικής επεξεργασίας, όπως υπολογίστηκε με τη βοήθεια των σχέσεων που αναφέρθηκαν πριν (Εικόνα 18),

φαίνεται στην Εικόνα 33. Πρώτον φαίνεται ότι το θερμικό αποτέλεσμα στις ελιές που βρίσκονται κοντά στην οροφή της κονσέρβας είναι πολύ μεγαλύτερο σε σχέση με αυτό των ελιών που βρίσκονται στον πυθμένα της κονσέρβας. Δεύτερον οι τιμές του ισοδύναμου χρόνου είναι πολύ μεγαλύτερες σε σχέση με αυτές που βρέθηκαν για την περίπτωση “α”. Συγκεκριμένα οι μεγάλες ελιές “καλαμών” για τις ίδιες συνθήκες θερμικής επεξεργασίας βρέθηκε ότι είχαν ένα εύρος ισοδύναμου χρόνου 38,8 – 139 min, ενώ οι μικρού μεγέθους ελιές έχουν ένα εύρος ισοδύναμου χρόνου 62,4 – 159 min.



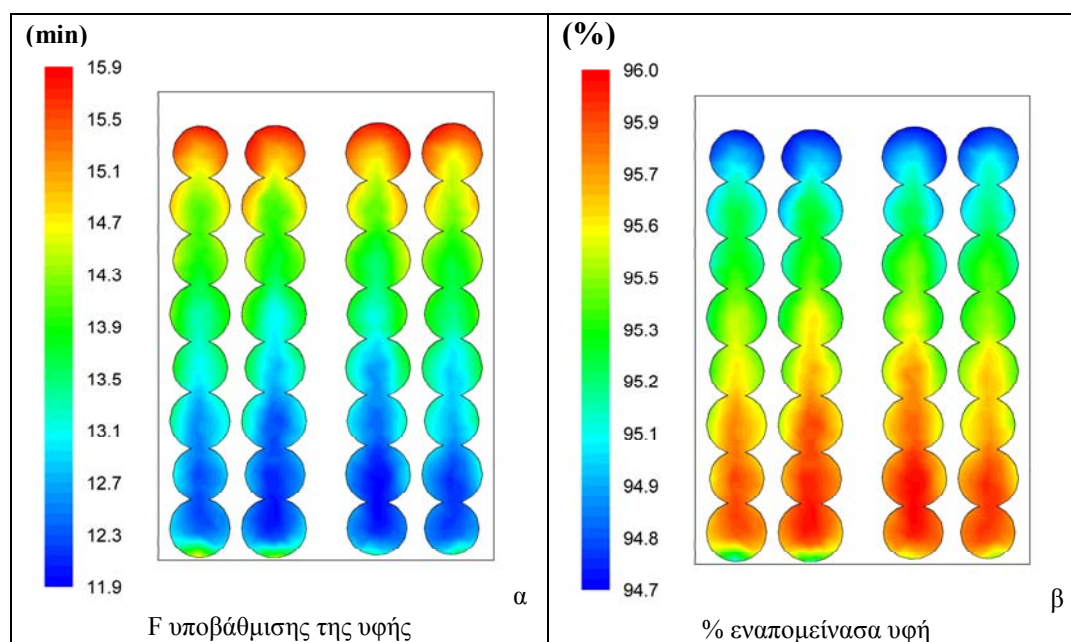
Εικόνα 33. Κατανομή ισοδύναμου χρόνου (α) και % εναπομεινάντων μικροοργανισμών (β) σε τομή της κονσέρβας στο τέλος της θερμικής επεξεργασίας

Η μεγάλη αυτή διαφορά εξηγείται από την κατανομή της θερμοκρασίας στο εσωτερικό των ελιών. Οι μεγάλες ελιές λόγω του μεγαλύτερου πάχους που είχαν απαιτούσαν περισσότερο χρόνο για να αποκτήσουν τη θερμοκρασία του θερμαντικού μέσου, πράγμα το οποίο ήταν πιο εύκολο να επιτευχθεί στις ελιές μικρότερου μεγέθους. Έτσι οι ελιές μικρότερου μεγέθους παρέμεναν εκτεθειμένες σε υψηλή θερμοκρασία για περισσότερο χρόνο σε σχέση με αυτές μεγαλύτερου μεγέθους. Από τα εξαγόμενα αποτελέσματα φαίνεται ότι η θερμική επεξεργασία για μικρού μεγέθους ελιές “καλαμών” είναι υπέρ – επαρκής μιας και ξεπερνά κατά πολύ τα 15 min ισοδύναμου χρόνου, που έχει ορίσει ως όριο το Διεθνές Συμβούλιο Ελιάς (IOC 2004).

Θερμική υποβάθμιση ποιοτικών χαρακτηριστικών των ελιών

Σε αντιστοιχία με την περίπτωση “α” πραγματοποιήθηκε υπολογισμός του ισοδύναμου χρόνου για την υποβάθμιση των ποιοτικών χαρακτηριστικών των ελιών της ποικιλίας “καλαμών” μικρού μεγέθους. Τα εισαγόμενα δεδομένα στο λογισμικό Fluent για τη θερμική υποβάθμιση της υφής των ελιών υπολογίστηκαν πειραματικά, όπως περιγράφηκαν στην παράγραφο II.2.4.

Στην περίπτωση “β” ο υπολογιζόμενος ισοδύναμος χρόνος $F_{62.4^{\circ}C}^{28.64^{\circ}C}$ για την υφή, μετά το τέλος της προσομοίωσης της θερμικής επεξεργασίας κυμάνθηκε από 11,6 έως 15,9 min. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι και σε αυτή την περίπτωση οι ελιές που βρίσκονται κοντά στην οροφή της κονσέρβας εκτίθενται σε μεγαλύτερη θερμική καταπόνηση σε σχέση με αυτές που βρίσκονται προς τον πυθμένα της κονσέρβας. Επίσης οι ελιές κοντά στον κεντρικό άξονα έχουν υποστεί μικρότερη θερμική υποβάθμιση σε σχέση με τις περιφερειακές ελιές. Η παρατήρηση όμως της επί τοις % εναπομείνουσας υφής σε σχέση με την αρχική δείχνει ότι οι ελιές με την παραπάνω θερμική επεξεργασία υποβαθμίστηκαν μόλις κατά 4 – 5%. Η μεγαλύτερη υποβάθμιση παρατηρείται στην εξωτερική επιφάνεια των ανώτερων ελιών, ενώ στην μικρότερη θερμική υποβάθμιση υπόκεινται οι ελιές που τοποθετούνται στη δεύτερη από τον πυθμένα της κονσέρβας σειρά.



Εικόνα 34. Κατανομή ισοδύναμου χρόνου υποβάθμισης υφής των ελιών Καλαμών μικρού μεγέθους και % εναπομείνουσα υφή σε τομή της κονσέρβας

Τέλος συγκρίνοντας τις τιμές που υπολογίστηκαν σε αυτή τη γεωμετρία σε σχέση με αυτές της περίπτωσης “α” φαίνεται πως το θερμικό αποτέλεσμα στην περίπτωση “β” είναι εντονότερο. Όμως παραμένουν πιο ευαίσθητες περιοχές στη θερμική

καταπόνηση οι ελιές των ανωτέρων στρωμάτων, οι επιφάνειες των ελιών και οι ελιές που βρίσκονται κοντά στο τοίχωμα της κονσέρβας.

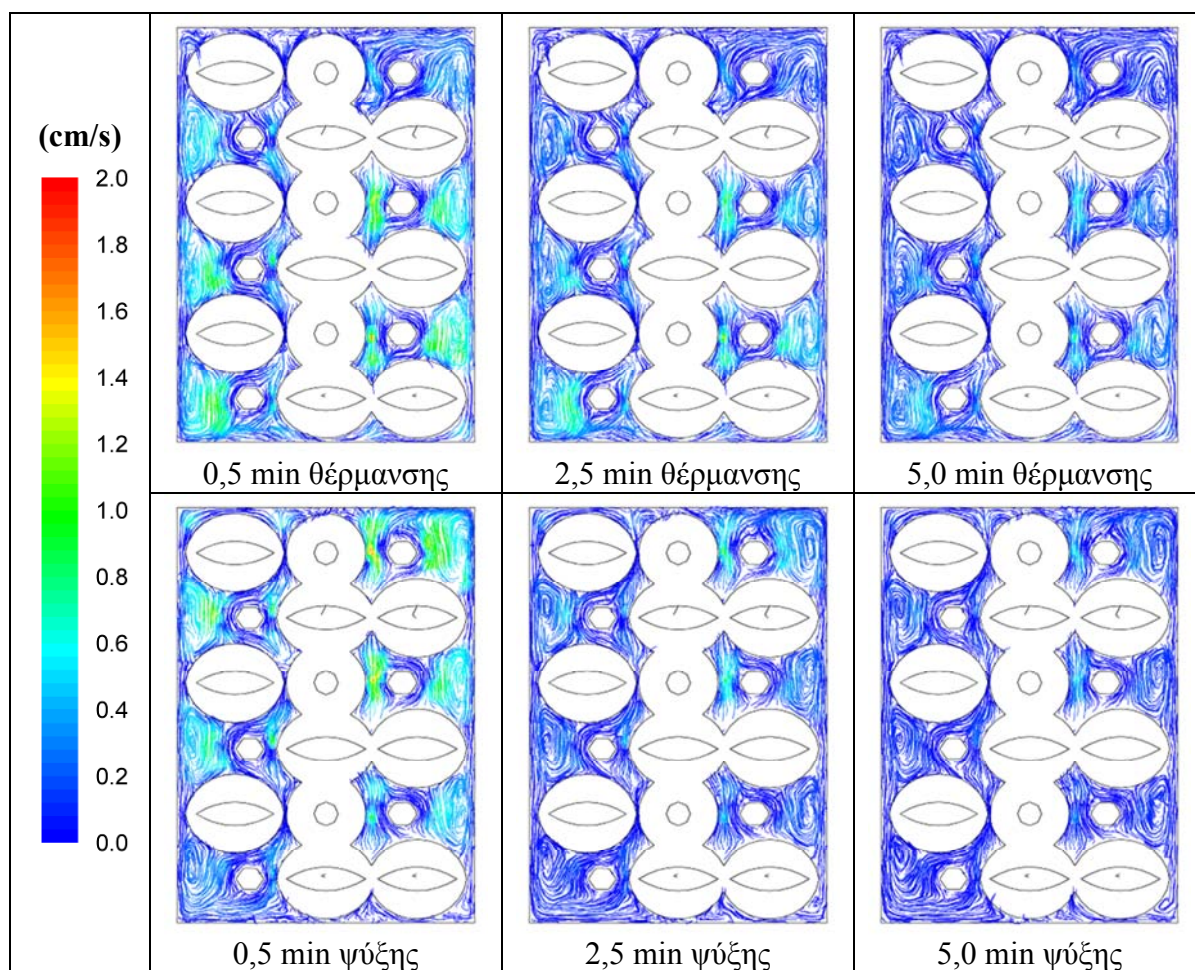
γ) Περίπτωση γ (κονσερβολιές)

Εκτός από τις ελιές της ποικιλίας “καλαμών” πραγματοποιήθηκε προσομοίωση στη θερμική επεξεργασία ελιών της ποικιλίας “κονσερβολιά”. Οι συνθήκες της θερμικής επεξεργασίας ήταν ακριβώς οι ίδιες, όπως και στις δύο προηγούμενες περιπτώσεις. Ο στόχος και σε αυτή την περίπτωση ήταν η θανάτωση των προπιονικών βακτηρίων ή αλλιώς η επίτευξη 15 min ισοδύναμου χρόνου $PU_{62.4^{\circ}C}^{5.25^{\circ}C}$. Όπως έχει περιγραφεί στην παράγραφο II.2.5.3 οι κονσερβολιές έχουν σχήμα ωοειδές το οποίο είναι διαφορετικό σε σχέση με τις ελιές “καλαμών” που έχουν σχήμα μαστοειδές. Επίσης οι κονσερβολιές ενώ έχουν την ίδια μεγάλη διάμετρο με τις ελιές “καλαμών”, η μικρή διάμετρος είναι πολύ μεγαλύτερη και έτσι καταλαμβάνουν μεγαλύτερο όγκο στην κονσέρβα. Σύμφωνα με τον τρόπο με τον οποίο οι ελιές σχεδιάστηκαν στη γεωμετρία, εντός της κονσέρβας τοποθετήθηκαν 48 ελιές σε 6 στρώσεις των 7 ελιών περιφερειακά και 6 ελιές η μία επάνω στην άλλη στον κεντρικό άξονα. Μετά το πέρας των υπολογισμών έγινε επεξεργασία των αποτελεσμάτων, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω.

Ταχύτητα και ροή της άλμης

Σε αντιστοιχία με τις δύο προηγούμενες γεωμετρίες η άλμη είχε όμοια ροή για τον κύκλο θέρμανσης και ψύξης. Σε αυτή την περίπτωση η ροή της άλμης δεν πραγματοποιούνταν στον κεντρικό άξονα λόγω της ύπαρξης των ελιών. Οι θερμοί όγκοι άλμης που εγκλωβίζονταν στην οροφή της κονσέρβας κινούνταν καθοδικά περιμετρικά των ελιών του κεντρικού άξονα. Στις τρεις πρώτες εικόνες του συμπλέγματος εικόνων 35 φαίνεται η ροή της άλμης σε κάθετη τομή της κονσέρβας για τρεις χρονικές στιγμές του κύκλου θέρμανσης.

Εκτός από τις εικόνες που δείχνουν την ροή της άλμης για τρεις χρονικές στιγμές της θέρμανσης παρουσιάζονται και τρεις εικόνες για τους αντίστοιχους χρόνους κατά τη διάρκεια του κύκλου ψύξης.



Εικόνα 35. Προφίλ ταχύτητας σε διάφορες χρονικές στιγμές της θερμικής επεξεργασίας

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι η μέγιστη τιμή στη ταχύτητα της άλμης παρατηρείται στις περιόδους έναρξης της θέρμανσης και της ψύξης. Αναλυτικότερα η μέγιστη τιμή της ταχύτητας κατά τη διάρκεια του κύκλου θέρμανσης ήταν 3,065 cm/s και κατά τη διάρκεια του κύκλου ψύξης 3,017 cm/s.

Συνολικά οι μέγιστες τιμές της ταχύτητας της άλμης, για τις τρεις περιπτώσεις, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα για τον κύκλο της θέρμανσης και της ψύξης.

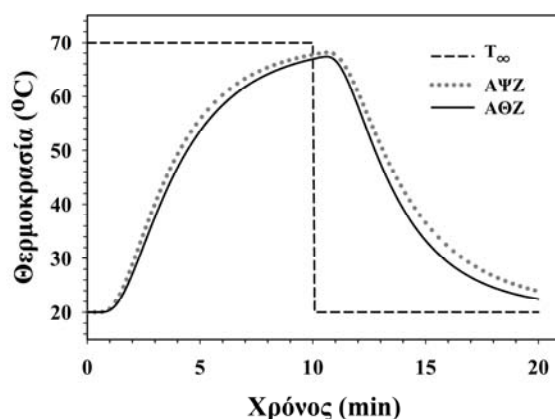
Πίνακας 16. Μέγιστες τιμές της ταχύτητας της άλμης για τις τρεις περιπτώσεις

Α/Α	Γεωμετρία	Vmax (cm/s)	
		Κύκλος Θέρμανσης	Κύκλος Ψύξης
1.	Καλαμών μεγάλου μεγέθους	2,619	2,113
2.	Καλαμών μικρού μεγέθους	2,627	2,558
3.	Κονσερβολιές	3,065	3,017

Θερμοκρασιακό προφίλ και εντοπισμός της αργότερα θερμαινόμενης & ψυχόμενης ζώνης

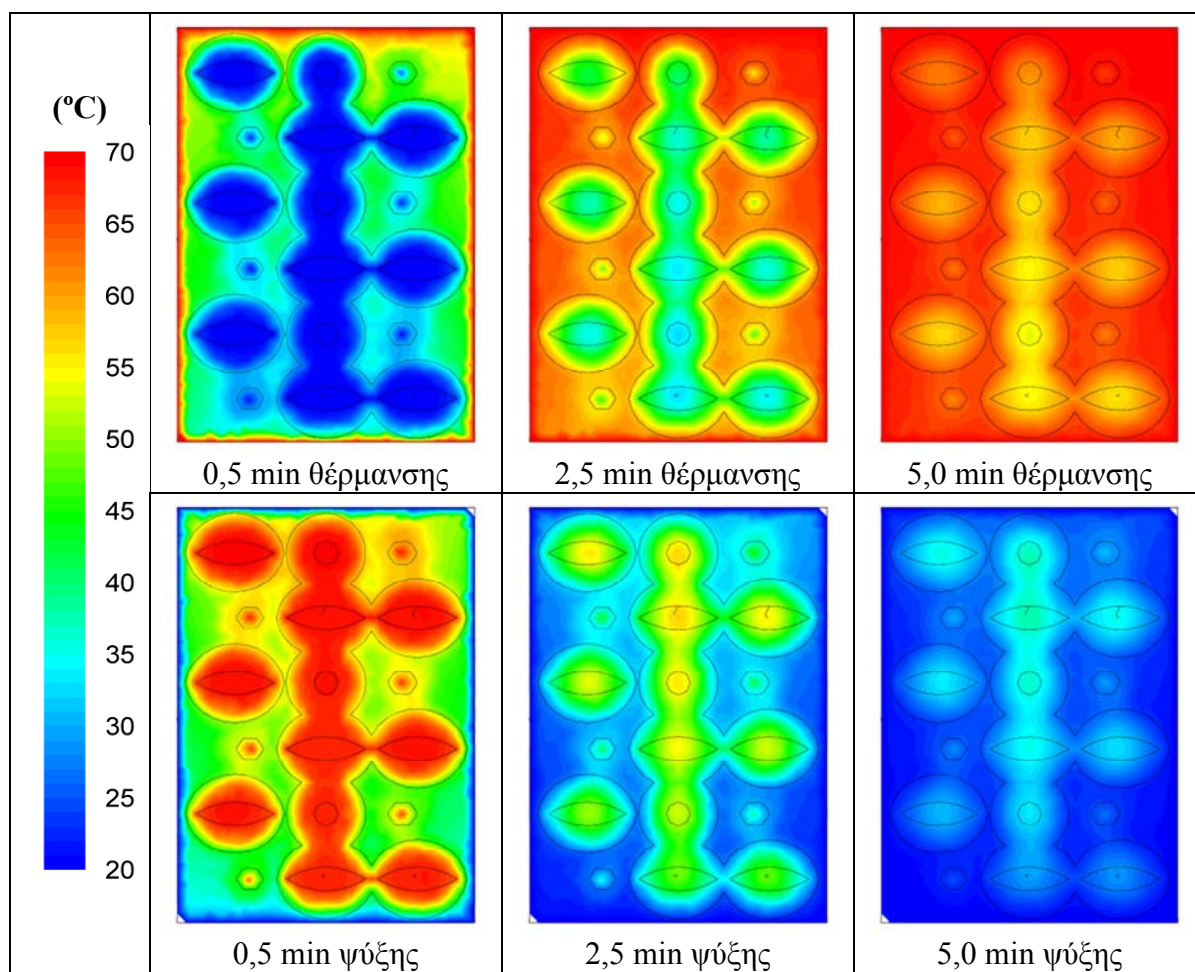
Όμοια με τις περιπτώσεις των ελιών “Καλαμών” η θερμότητα μεταφέρεται με τον ίδιο τρόπο. Η μόνη διαφορά που παρατηρείται είναι στις ελιές στον κεντρικό άξονα. Σε αυτή την περίπτωση, οι ελιές στον κεντρικό άξονα “αγγίζουν” η μία την άλλη με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα συσσωμάτωμα ελιών. Αυτό το συμπαγές σώμα θερμαίνεται αργότερα κατά τη διάρκεια της θέρμανσης και ψύχεται αργότερα κατά τη διάρκεια της ψύξης. Όπως είναι φυσικό η αργότερα θερμαινόμενη ζώνη βρίσκεται σε αυτή τη στήλη και προς τον πυθμένα της κονσέρβας. Μετά από επαναλαμβανόμενες επιλύσεις βρέθηκε ότι η αργότερα θερμαινόμενη ζώνη βρίσκεται στο σημείο με συντεταγμένες (0,-24.5,0), ενώ η αργότερα ψυχόμενη ζώνη εντοπίζεται στο σημείο με συντεταγμένες (0,25.5,0).

Η μεταβολή της θερμοκρασίας τόσο στην αργότερα θερμαινόμενη ζώνη, όσο και στην αργότερα ψυχόμενη ζώνη φαίνεται στο Διάγραμμα 27.

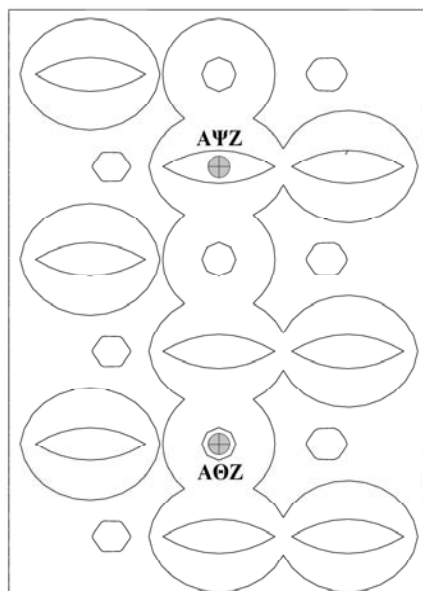


Διάγραμμα 27. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ και στην ΑΨΖ

Στην Εικόνα 36 φαίνεται η κατανομή της θερμοκρασίας σε μια κάθετη τομή της κονσέρβας για έξι διαφορετικές χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας. Στις εικόνες φαίνεται η διαφορά στη μεταφορά θερμότητας τόσο στην άλμη όσο και στο εσωτερικό των ελιών. Από την κατανομή της θερμοκρασίας φαίνεται ότι η αργότερα θερμαινόμενη ζώνη μετά το πέρας 5 min θέρμανσης στους 70°C κατάφερε να ξεπεράσει τους 55°C, τη στιγμή που τα ανώτερα στρώματα ελιών είχαν θερμοκρασία πολύ κοντά σε αυτή του θερμαντικού μέσου.



Εικόνα 36. Κατανομή της θερμοκρασίας σε τομή της κονσέρβας για διάφορες χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας



Εικόνα 37. Η ΑΘΖ και η ΑΨΖ όπως εντοπίζονται στην γεωμετρία της περίπτωσης “γ”

Όπως και στις δύο προηγούμενες περιπτώσεις σημαντικό στοιχείο είναι και ο εντοπισμός της αργότερα ψυχόμενης ζώνης. Έτσι ενώ για την ασφάλεια του

προϊόντος αξιοσημείωτη είναι η αργότερα θερμαινόμενη ζώνη, ως η περιοχή της κονσέρβας που δέχεται το μικρότερο θερμικό φορτίο, για τη θερμική υποβάθμιση των ποιοτικών χαρακτηριστικών είναι η αργότερα ψυχόμενη ζώνη, ως η περιοχή που δέχεται το μεγαλύτερο θερμικό φορτίο.

Μετά τον εντοπισμό των σημαντικών περιοχών της γεωμετρίας τίθενται σε ανάλυση τόσο τα φαινόμενα θερμικής καταστροφής των αλλοιογόνων μικροοργανισμών, όσο και η θερμική υποβάθμιση της υφής, της εμφάνισης και της γεύσης των ελιών. Ο εντοπισμός της ΑΘΖ και της ΑΨΖ για τις τρεις περιπτώσεις παρουσιάζεται στον Πίνακα 17, όπου φαίνονται οι συντεταγμένες των σημείων.

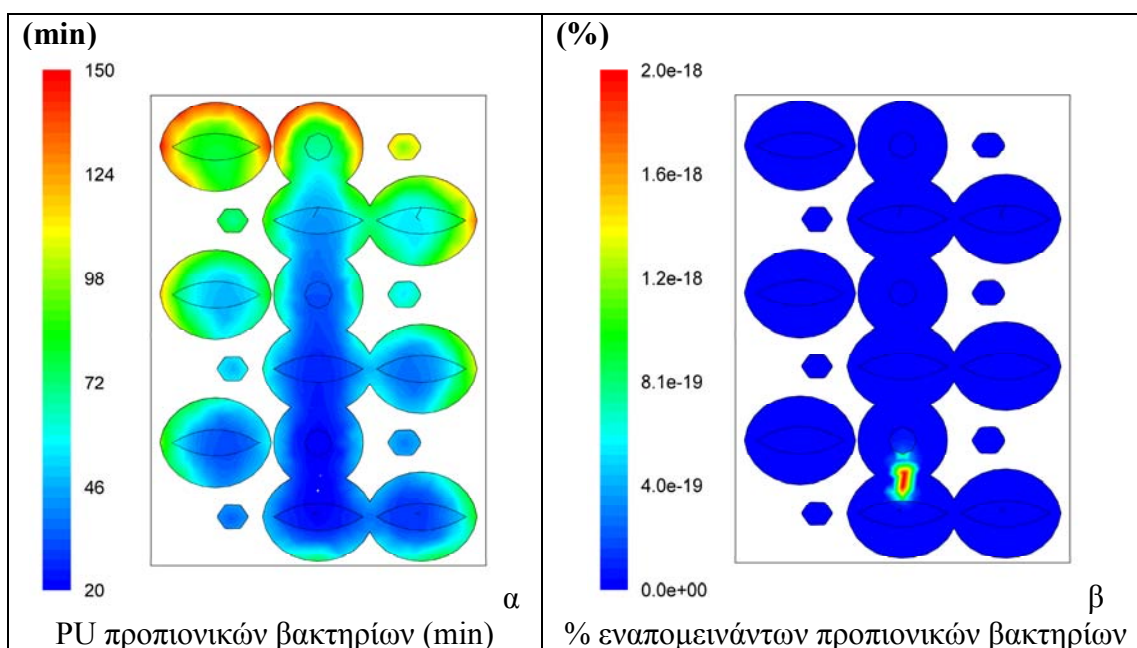
Πίνακας 17. Συντεταγμένες της ΑΘΖ και της ΑΨΖ για τις τρεις περιπτώσεις

Α/Α	Γεωμετρία	Συντεταγμένες (mm)	
		ΑΘΖ	ΑΨΖ
1.	Καλαμών μεγάλου μεγέθους	(9.0,-29.0,0.0) (-9.0,-29.0,0.0)	(8.0,30.5,0.0) (-8.0,30.5,0.0)
2.	Καλαμών μικρού μεγέθους	(11.5,-33.0,0.0) (-8.5,-33.0,-6.7) (0.9,-33.0,10.8)	(11.5,39.0,0.0) (-10.0,39.0,-6.0) (-2.0,39.0,12.5)
3.	Κονσερβολιές	(0.0,-24.5,0.0)	(0.0,25.5,0.0)

Θερμική καταστροφή μικροοργανισμών και εντοπισμός κρίσιμου σημείου

Σε συνέχεια της παραπάνω ανάλυσης θεωρήθηκε απαραίτητο να γίνει αντίστοιχη περιγραφή του θερμικού θανατηφόρου αποτελέσματος για τις ίδιες συνθήκες θερμικής επεξεργασίας για τις κονσερβολιές. Όμοια με τις προηγούμενες περιπτώσεις μικροοργανισμός στόχος ήταν τα προπιονικά βακτήρια, όπως ορίζει το Διεθνές Συμβούλιο Ελιάς (IOC 2004) και ο προς επίτευξη ισοδύναμος χρόνος είναι $PU_{62.4^{\circ}C}^{5.25^{\circ}C} = 15 \text{ min}$. Για την παρούσα περίπτωση διάταξης ελιών στην κονσέρβα, τις ιδιότητες των ελιών, όπως ορίστηκαν στην παράγραφο II.2.5.3 και των συνθηκών θερμικής επεξεργασίας βρέθηκε ότι ο ελάχιστος ισοδύναμος χρόνος $PU_{62.4^{\circ}C}^{5.25^{\circ}C}$ ήταν 20 min, τιμή η οποία ήταν σαφώς μεγαλύτερη από την επιθυμητή. Κατά συνέπεια το προϊόν βάση της θερμικής επεξεργασίας στην οποία υπέστη μπορεί να θεωρηθεί μικροβιολογικά ασφαλές. Στις εικόνες (37α,β) φαίνεται η κατανομή της τιμής $PU_{62.4^{\circ}C}^{5.25^{\circ}C}$ σε κάθετη τομή της κονσέρβας και η επί τοις % εναπομένουσα συγκέντρωση προπιονικών βακτηρίων στην ίδια τομή αντίστοιχα. Από τις δύο αυτές εικόνες είναι φανερό ότι το κρίσιμο σημείο, δηλαδή το σημείο στο οποίο τα κύτταρα του μικροοργανισμού στόχου δέχονται το μικρότερο θερμικό φορτίο βρίσκεται

ανάμεσα στις κεντρικές ελιές της πρώτης και δεύτερης στρώσης ελιών από τον πυθμένα. Αυτό συμβαίνει διότι οι ελιές που τοποθετήθηκαν επί του κεντρικού άξονα είναι στοιβαγμένες μεταξύ τους, οπότε δεν υπάρχει κενός χώρος μεταξύ των εξωτερικών τοιχωμάτων τους και δεν μπορεί να διέλθει από αυτή την περιοχή θερμική άλμη. Επίσης με την έναρξη της ψύξης οι όγκοι άλμης που ψύχθηκαν και λόγω μικρότερης άνωσης κινήθηκαν προς τον πυθμένα της κονσέρβας προκαλώντας γρήγορη ψύξη στις ελιές των κάτω στρωμάτων, με αποτέλεσμα οι κονσερβολιές που εντοπίζονται στα κάτω στρώματα και επί του κεντρικού άξονα της κονσέρβας να δέχονται μικρότερη έκθεση στη θερμότητα. Πιο συγκεκριμένα το σημείο με τον μικρότερο ισοδύναμο χρόνο θερμικής επεξεργασίας $PU_{62.4^{\circ}C}^{5.25^{\circ}C}$ έχει συντεταγμένες (0.29,-33.2,0.18) και διαφέρει κατά πολύ από την αργότερα θερμαινόμενη ζώνη, που εντοπίζεται στο κέντρο της κεντρικής ελιάς της δεύτερης στρώσης ελιών από τον πυθμένα της κονσέρβας και έχει συντεταγμένες (0,-24.5,0).



Εικόνα 38. Κατανομή ισοδύναμου χρόνου (α) και % εναπομεινάντων μικροοργανισμών (β) σε τομή της κονσέρβας στο τέλος της θερμικής επεξεργασίας

Πίνακας 18. Εύρος ισοδύναμου χρόνου $PU_{62.4^{\circ}C}^{5.25^{\circ}C}$ για τις τρεις περιπτώσεις

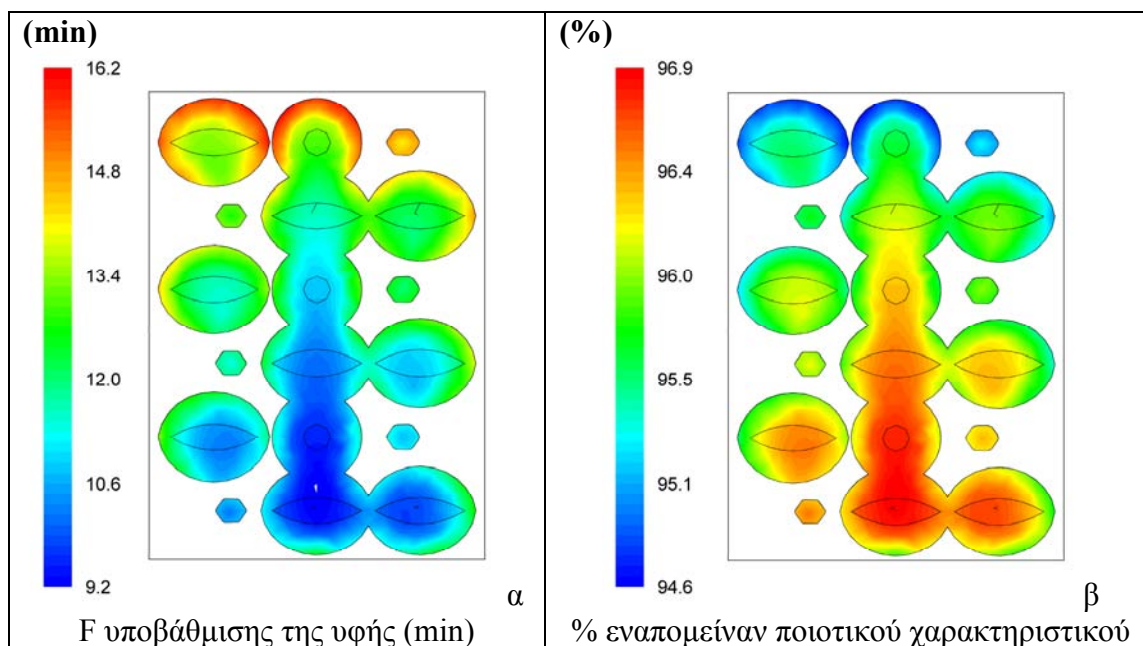
A/A	Γεωμετρία	$PU_{62.4^{\circ}C}^{5.25^{\circ}C}$ (min)
1.	Καλαμών μεγάλου μεγέθους	38,8 – 139
2.	Καλαμών μικρού μεγέθους	62,4 – 159
3.	Κονσερβολιές	20 – 150

Το εύρος του θερμικού αποτελέσματος επί του μικροοργανισμού στόχου για τις τρεις περιπτώσεις παρουσιάζεται στον Πίνακα 18, όπου φαίνονται οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές $PU_{62.4^{\circ}C}^{5.25^{\circ}C}$.

Θερμική υποβάθμιση ποιοτικών χαρακτηριστικών των ελιών

Μετά την περιγραφή του θανατηφόρου αποτελέσματος της θερμικής επεξεργασίας επί των αλλοιογόνων μικροοργανισμών έγινε υπολογισμός της θερμικής υποβάθμισης τόσο της υφής, όσο της εμφάνισης και της γεύσης των κονσερβολιών. Για την υποβάθμιση της υφής (μαλάκωμα) των ελιών υπολογίστηκε ο ισοδύναμος χρόνος $F_{62.4^{\circ}C}^{28.64^{\circ}C}$ με χαρακτηριστικά D, z που υπολογίστηκαν πειραματικά για τις ελιές “καλαμών”, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο Π.2.4.4.

Μετά το τέλος της θερμικής επεξεργασίας του μεταλλικού περιέκτη με τις κονσερβολιές βρέθηκε ότι το εύρος του ισοδύναμου χρόνου για την υποβάθμιση της υφής ήταν 9,2 – 16,2 min και βάση του χρόνου υπο-δεκαπλασιασμού αυτού του ποιοτικού χαρακτηριστικού $D_{62.4^{\circ}C} = 670$ min βρέθηκε ότι η υποβάθμιση της υφής των ελιών κυμάνθηκε από 3,1% έως 5,4%. Η κατανομή τόσο του ισοδύναμου χρόνου, όσο και της επί τοις % εναπομείνουσας υφής των κονσερβολιών φαίνεται στις εικόνες (39α,β) αντίστοιχα. Σε σύγκριση με τις περιπτώσεις “α” και “β” φαίνεται και εδώ πως οι ελιές που βρίσκονται στα ανώτερα στρώματα υπόκεινται σε μεγαλύτερη θερμική καταπόνηση από αυτές που βρίσκονται στα κατώτερα στρώματα. Η επιφάνεια των ελιών είναι και εδώ η κύρια ζώνη θερμικής υποβάθμισης, ενώ το εσωτερικό, δεχόμενο μικρότερα ποσά θερμότητας, διατήρησε το ποιοτικό χαρακτηριστικό σε μεγαλύτερο βαθμό. Επίσης σε σύγκριση για τον εντοπισμό του κρίσιμου σημείου με στόχο τον αλλοιογόνο παράγοντα και του σημείου με την μικρότερη θερμική υποβάθμιση φαίνεται ότι τα σημεία αυτά συμπίπτουν. Επομένως η περιοχή στην οποία παρατηρείται η μικρότερη θερμική θανάτωση των αλλοιογόνων μικροοργανισμών είναι η ίδια περιοχή η οποία δέχεται την μικρότερη θερμική καταπόνηση. Σε αντιστοιχία με τις προηγούμενες παρατηρήσεις οι ζώνες υψηλής ποιοτικής υποβάθμισης εντοπίζονται στις ελιές των στρωμάτων, που βρίσκονται κοντά στην οροφή της κονσέρβας και κυρίως στην εξωτερική επιφάνεια των ελιών, ενώ και εδώ η ζώνη με την μικρότερη θερμική υποβάθμιση εντοπίζεται ανάμεσα στις κεντρικές ελιές τις πρώτης και δεύτερης στρώσης ελιών από τον πυθμένα της κονσέρβας.



Εικόνα 39. Κατανομή ισοδύναμου χρόνου υποβάθμισης της υφής Κονσερβολιών και % εναπομείναν ποιοτικού χαρακτηριστικού υφή σε τομή της κονσερβάς

Το εύρος του ισοδύναμου χρόνου για την υποβάθμιση της υφής των ελιών, για τις τρεις περιπτώσεις παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα, όπου φαίνονται οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές $F_{62.4}^{28.64}$.

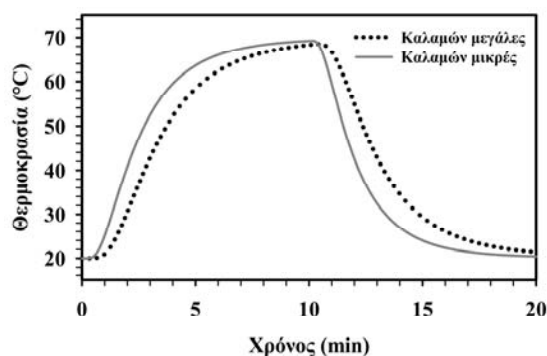
Πίνακας 19. Εύρος ισοδύναμου χρόνου $F_{62.4}^{28.64}$ για τις τρεις περιπτώσεις

A/A	Γεωμετρία	$F_{62.4}^{28.64}$ (min)
1.	Καλαμών μεγάλου μεγέθους	10,4 – 15,0
2.	Καλαμών μικρού μεγέθους	11,6 – 15,9
3.	Κονσερβολιές	9,2 – 16,2

Σύγκριση του μεγέθους των ελιών επί της θερμικής επεξεργασίας

Έχοντας υπόψη τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν για την ήπια θερμική επεξεργασία στις ελιές “καλαμών” μικρού και μεγάλου μεγέθους είναι δυνατό να γίνει μια συνοπτική ανάλυση επί των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας. Οι ελιές “καλαμών” μικρού μεγέθους έχουν μικρότερο μήκος και πάχος με αποτέλεσμα να αντιλαμβάνονται ταχύτερα τις θερμοκρασιακές μεταβολές του μέσου θέρμανσης και ψύξης. Στο παρακάτω

Διάγραμμα 28 φαίνεται η θερμοκρασιακή μεταβολή στην αργότερα θερμαινόμενη ζώνη για τις ελιές “καλαμών” μικρού και μεγάλου μεγέθους.



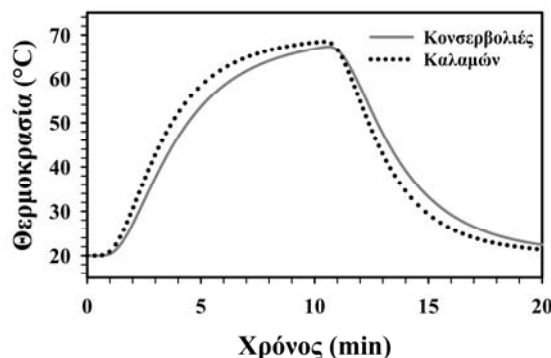
Διάγραμμα 28. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ για τις περιπτώσεις μικρών και μεγάλων ελιών της ποικιλίας ‘Καλαμών’

Η θερμοκρασιακή μεταβολή δεικνύει την παραπάνω σημείωση, δηλαδή ότι κατά τη θέρμανση η μικρότερου μεγέθους ελιές θερμαίνονται πιο γρήγορα ανεξάρτητα από το πώς είναι κατανομημένες στην κονσέρβα και ψύχονται πιο γρήγορα κατά την ψύξη. Επομένως κατά τη θερμική επεξεργασία ελιών “καλαμών” μικρού μεγέθους θα πρέπει να εφαρμόζονται ηπιότερες συνθήκες θέρμανσης, έτσι ώστε να μην καταπονείται το προϊόν θερμικά και υποβαθμίζεται ποιοτικά. Ειδικά σε βιομηχανίες όπου είναι δυνατή η διαλογή των ελιών σε σχέση με το μέγεθός τους μια τέτοια πρόταση θα πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη.

Σύγκριση των δύο ποικιλιών επί της θερμικής επεξεργασίας

Οι ποικιλίες που μελετήθηκαν παραπάνω είναι οι δύο πιο συχνά καλλιεργούμενες ποικιλίες επιτραπέζιων ελιών στην Ελλάδα. Η τυπική διαφορά μεταξύ τους είναι το σχήμα και το πάχος τους. Με μια προσεκτική ματιά στο σχήμα των ελιών (εικόνες 14 και 22) όμως είναι δυνατόν να ισχυριστεί κανείς ότι οι δύο ποικιλίες ελιών διαφέρουν ουσιαστικά στο πάχος τους. Έχοντας παρατηρήσει την επίδραση του μεγέθους των ελιών από την προηγούμενη παράγραφο θα διαπιστώσει κανείς πως υπάρχουν ομοιότητες. Δηλαδή οι ελιές “καλαμών” σαν πιο λεπτές από τις “κονσερβολιές” θερμαίνονται και ψύχονται γρηγορότερα. Βάση όμως του σχήματός τους οι ελιές των δύο ποικιλιών τοποθετούνται με διαφορετικό τρόπο στην κονσέρβα. Κάτι τέτοιο έχει μεγάλη επίδραση επί της θερμικής διείδυσης, μιας και στην πρώτη περίπτωση ο κεντρικός άξονας της κονσέρβας καταλαμβάνεται από δύο ελιές, ενώ στη δεύτερη περίπτωση από μία ελιά σε κάθε στρώση γεγονός που δημιουργεί διαφορές στη ροή της άλμης. Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η μεταβολή της

θερμοκρασίας στην αργότερα θερμαινόμενη ζώνη κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας για τις δύο ποικιλίες ελιών.



Διάγραμμα 29. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ για τις περιπτώσεις των ελιών της ποικιλίας “Καλαμών” μεγάλου μεγέθους και τις “Κονσερβολιές”

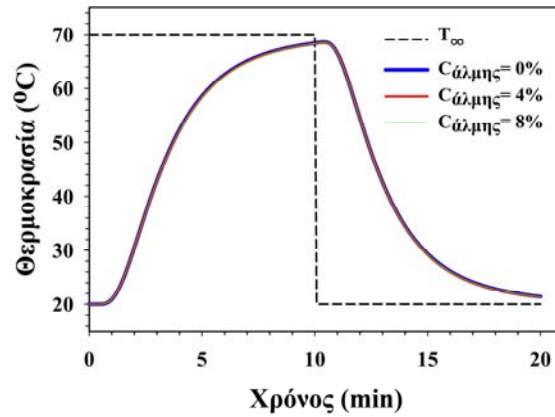
Από το Διάγραμμα 29 λοιπόν φαίνεται ότι οι ελιές “καλαμών” θερμαίνονται και ψύχονται ταχύτερα από τις “κονσερβολιές”. Η διαφοροποίηση αυτή οφείλεται τόσο στη διαφορά πάχους των ελιών, όσο και στην τοποθέτησή τους στην κονσέρβα.

Π.3.3.6 Επίδραση της συγκέντρωσης της άλμης

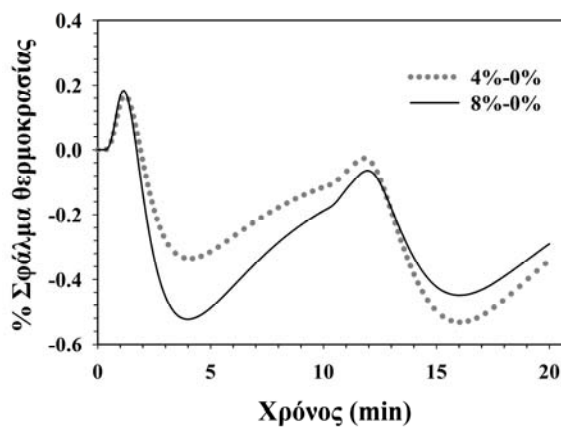
Κατά τη βιομηχανική πρακτική γίνεται χρήση άλμης, ως μέσου πλήρωσης των ελιών διαφόρων περιεκτικοτήτων σε NaCl (0-10%). Η διαφορά αυτή έχει να κάνει με τα γευστικά χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος, την ποικιλία των ελιών, καθώς και με τις διεργασίες που έχουν λάβει χώρα πριν τη θερμική επεξεργασία. Οι τρεις γεωμετρίες που εξετάστηκαν εκτενώς στην προηγούμενη παράγραφο επιλύθηκαν με μέσο πλήρωσης άλμη NaCl 4, 8% (w/v) και νερό.

α) Περίπτωση α (μεγάλες ελιές καλαμών)

Για τις ελιές καλαμών με διάταξη εντός της κονσέρβας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 19 επιλύθηκε το πεδίο ροής τρεις φορές με τις ιδιότητες του ρευστού να μεταβάλλονται σύμφωνα με τις εξισώσεις που υπολογίστηκαν στην παράγραφο Π.2.2.3. Κατά την επίλυση, η θερμοκρασία καταγράφηκε στην αργότερα θερμαινόμενη ζώνη, καθώς και σε άλλα σημεία. Η μεταβολή της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης του κύκλου θέρμανσης – ψύξης φαίνεται στο Διάγραμμα 30. Από τις καμπύλες της θερμοκρασίας στην αργότερα θερμαινόμενη ζώνη είναι ολοφάνερο ότι οι διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ των τριών συγκεντρώσεων του ρευστού είναι ελάχιστες.



Διάγραμμα 30. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ για τις 3 συγκεντρώσεις σε NaCl της άλμης



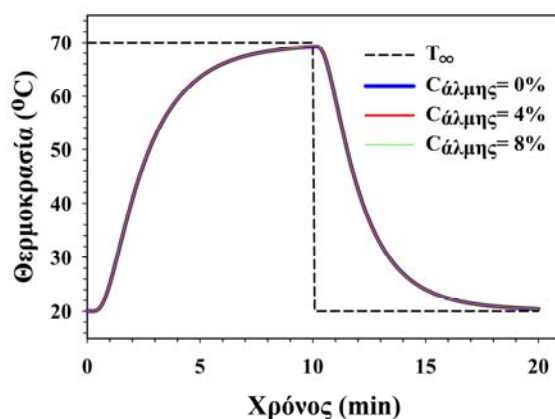
Διάγραμμα 31. Μεταβολή του σφάλματος θερμοκρασίας για τις 3 συγκεντρώσεις σε NaCl της άλμης

Αυτό γίνεται ακόμα πιο ξεκάθαρο υπολογίζοντας το σφάλμα μεταξύ των δύο συγκεντρώσεων της άλμης σε σχέση με το νερό. Εφόσον το σφάλμα της καταγεγραμμένης θερμοκρασίας για τις τρεις περιπτώσεις δεν ξεπερνά το 0,5% καθ' όλη τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας είναι εμφανές ότι δεν υπάρχει επίδραση της συγκέντρωσης της άλμης στα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας για συγκεντρώσεις από 0 – 8% σε NaCl. Η μελέτη για μεγαλύτερη συγκέντρωση άλατος δεν έχει πρακτικό ενδιαφέρον μιας και η άλμη με συγκέντρωση NaCl μεγαλύτερη από 8% (w/v) έχει πολύ αλμυρή γεύση και προκαλεί υποβαθμισμένο ποιοτικά και μη εμπορικό προϊόν.

β) Περίπτωση β (μικρές ελιές καλαμών)

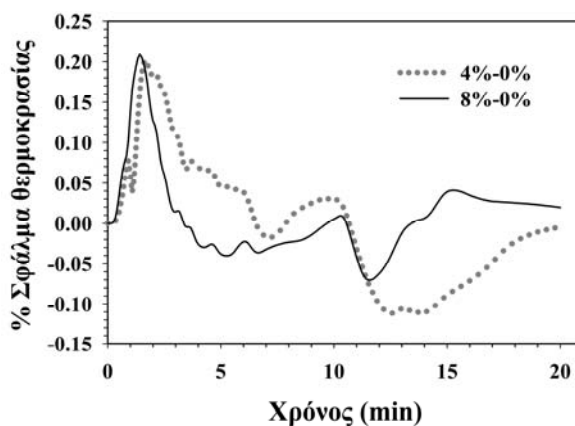
Σε αντιστοιχία με την προηγούμενη περίπτωση “α” πραγματοποιήθηκαν επιλύσεις για την γεωμετρία “β” με τις ίδιες αρχικές και οριακές συνθήκες και για συγκέντρωση NaCl 0, 4 και 8% (w/v). Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης της θερμικής επεξεργασίας η θερμοκρασία της αργότερα θερμαινόμενης ζώνης καταγράφηκε και

για τις τρεις συγκεντρώσεις και έγινε σύγκριση των τιμών. Στην περίπτωση αυτή η διαφορά της θερμοκρασίας στην αργότερα θερμαινόμενη ζώνη ήταν ακόμα μικρότερη σε σχέση με αυτή της προηγούμενης παραγράφου. Ενώ στις ελιές “Καλαμών” μεγάλου μεγέθους το μέγιστο σφάλμα μεταξύ της συγκέντρωσης της άλμης έφτανε στο 0,5% στις ελιές μικρότερου μεγέθους το σφάλμα δεν ξεπέρασε το 0,2%.



Διάγραμμα 32. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ για τις 3 συγκεντρώσεις σε NaCl της άλμης

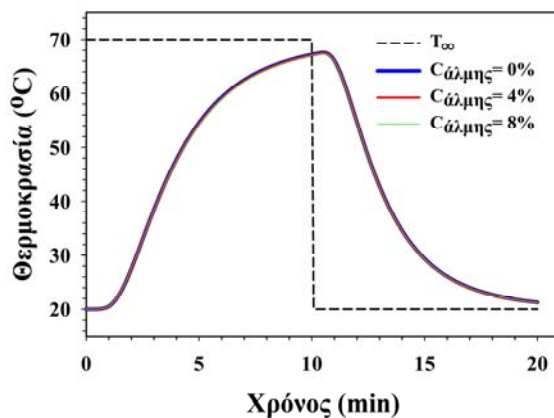
Από το Διάγραμμα 32 φαίνεται ότι η επίδραση της συγκέντρωσης του NaCl στην μεταβολή της θερμοκρασίας της αργότερα θερμαινόμενης ζώνης είναι ελάχιστη και φτάνει στα επίπεδα του πειραματικού σφάλματος. Από το Διάγραμμα 33 το υπολογιζόμενο σφάλμα μεταξύ των συγκεντρώσεων φαίνεται ότι είναι τόσο μικρό που η επίδραση της συγκέντρωσης της άλμης είναι αμελητέα. Η ίδια συμπεριφορά στην μεταβολή της θερμοκρασίας παρατηρήθηκε και στα υπόλοιπα σημεία της γεωμετρίας.



Διάγραμμα 33. Μεταβολή του σφάλματος θερμοκρασίας για τις 3 συγκεντρώσεις σε NaCl της άλμης

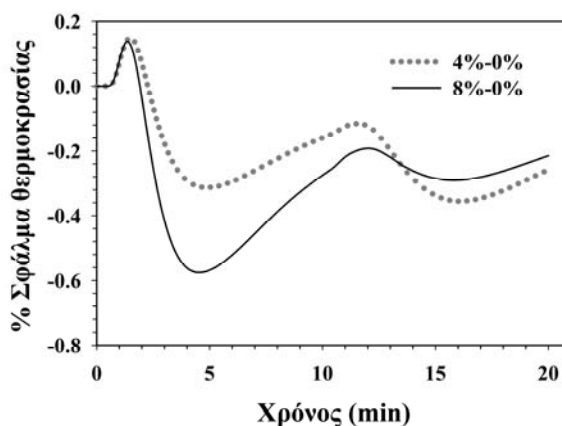
γ) Περίπτωση γ (κονσερβολιές)

Τέλος έγινε επίλυση της γεωμετρίας που περιείχε κονσερβολιές με ρευστό πλήρωσης, όπως και στις δύο προηγούμενες περιπτώσεις νερό και άλμη NaCl 4% και 8% (w/v). Κατά τη διάρκεια επίλυσης της γεωμετρίας καταγράφηκε η θερμοκρασία στην αργότερα θερμαινόμενη ζώνη για τα τρία ρευστά και υπολογίστηκε το σφάλμα μεταξύ της άλμης 4% και 8% σε σχέση με το νερό, ως μέσο πλήρωσης. Όμοια με τις δύο προηγούμενες περιπτώσεις και σε αυτή τη γεωμετρία η διαφορά της θερμοκρασίας μεταξύ των τριών ρευστών στην αργότερα θερμαινόμενη ζώνη ήταν ελάχιστη. Το σφάλμα όπως και στις μεγάλου μεγέθους ελιές ποικιλίας “καλαμών” δεν ξεπέρασε το 0,6%.



Διάγραμμα 34. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ για τις 3 συγκεντρώσεις σε NaCl της άλμης

Στο Διάγραμμα 34 φαίνεται η μεταβολή της θερμοκρασίας στην αργότερα θερμαινόμενη ζώνη, ενώ η μεταβολή του σφάλματος στο Διάγραμμα 35.



Διάγραμμα 35. Μεταβολή του σφάλματος θερμοκρασίας για τις 3 συγκεντρώσεις σε NaCl της άλμης

Χαρακτηριστικό είναι ότι η μέγιστη διαφορά παρατηρείται από το 2^ο λεπτό μετά την έναρξη της θέρμανσης μέχρι το 5^ο λεπτό, όπου και μειώνεται σταδιακά μέχρι να σταθεροποιηθεί περίπου στο 0,25%.

Τέλος, αποδεικνύεται ότι και στις τρεις περιπτώσεις η μεταβολή στη συγκέντρωση της άλμης μέχρι το επίπεδο του 8% (w/v) δεν επιδρά στη μεταβολή της θερμοκρασίας σε οποιοδήποτε σημείο της γεωμετρίας. Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να είναι δυνατή η χρήση άλμης οποιασδήποτε συγκέντρωσης NaCl σε κονσέρβες με ελιές “καλαμών” ή κονσερβολιές, διαφόρων μεγεθών, χωρίς να μεταβληθεί το θερμικό αποτέλεσμα στο οποίο εκτίθενται οι ελιές κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 20.

Πίνακας 20. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα των τριών περιπτώσεων για κάθε συγκέντρωση άλμης

Γεωμετρία	Vmax (cm/s)			PU ^{5.25° C} _{62.4° C} (min)			F ^{28.64} _{62.4} (min)		
	0%	4%	8%	0%	4%	8%	0%	4%	8%
Καλαμών μεγάλου μεγέθους	2,683 (Θ) 2,080 (Ψ)	2,619 (Θ) 2,113 (Ψ)	2,558 (Θ) 2,118 (Ψ)	39,3	38,8	38,6	10,5	10,4	10,3
Καλαμών μικρού μεγέθους	2,626 (Θ) 2,555 (Ψ)	2,627 (Θ) 2,558 (Ψ)	2,618 (Θ) 2,619 (Ψ)	62,1	62,4	61,2	11,6	11,6	11,5
Κονσερβολιές	3,032 (Θ) 3,018 (Ψ)	3,065 (Θ) 3,020 (Ψ)	3,101 (Θ) 3,028 (Ψ)	20,5	20,0	19,7	9,3	9,2	9,1

Όπου “Θ”: ο κύκλος θέρμανσης και “Ψ”: ο κύκλος ψύξης.

II.3.3.7 Επίδραση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στην εξωτερική επιφάνεια της κονσέρβας

Η θερμική επεξεργασία που εφαρμόζεται στη βιομηχανία για τις ζυμωμένες ελιές εμβαπτισμένες σε άλμη NaCl είναι ήπια και όπως έχει αναφερθεί παραπάνω το επιθυμητό θερμικό αποτέλεσμα προκαλεί μικρή θερμική καταπόνηση στις ελιές. Λόγω της ήπιας θερμικής επεξεργασίας οι εφαρμοζόμενες θερμοκρασίες του θερμαντικού μέσου είναι σχετικά χαμηλές. Στην προσομοίωση της ήπιας θερμικής επεξεργασίας, όπως αναλύθηκε παραπάνω εφαρμόστηκε θέρμανση στους 70°C για 10 min και έπειτα ψύξη στους 20°C για άλλα 10 min, στην οποία όμως ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας θεωρήθηκε άπειρος. Κατά συνέπεια κρίθηκε σκόπιμο να μελετηθεί η επίδραση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας τόσο στα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας, όσο και στο θερμικό αποτέλεσμα επί των ελιών.

Το βιομηχανικό ενδιαφέρον για τη μεταβολή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας εντοπίζεται καθαρά στο τεχνολογικό τμήμα της θερμικής επεξεργασίας.

Χαρακτηριστικός είναι ο τρόπος με τον οποίο οι κονσέρβες, τα γυάλινα βάζα και οι πλαστικές σακούλες με το μείγμα ελιές – άλμη οδηγούνται στους παστεριωτήρες συνεχούς λειτουργίας. Συνήθως μεταφορικές ταινίες 5 – 30 θέσεων οδηγούν ανάλογο αριθμό κονσερβών σε τούνελ με ατμό ή θερμό νερό.

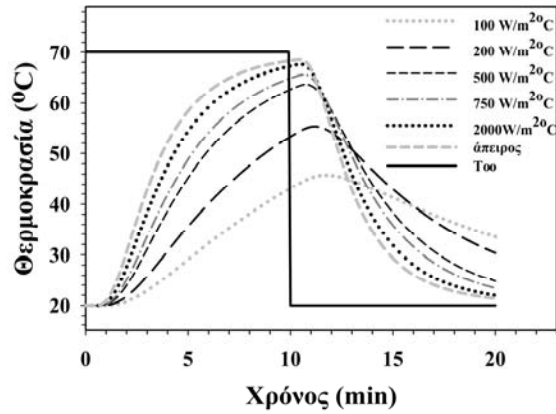


Εικόνα 40. Είσοδος κονσερβών σε κλίβανο για θερμική επεξεργασία

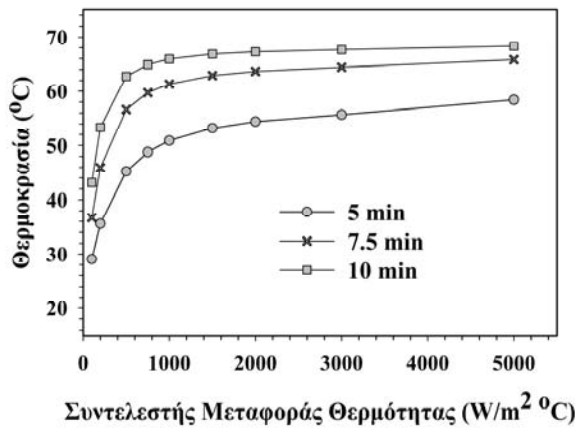
Ο ατμός συμπυκνώνεται στο εξωτερικό τοίχωμα των κονσερβών αποδίδοντας τη λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης. Από την άλλη πλευρά το θερμό νερό αποδίδει στις κονσέρβες την αισθητή θερμότητα και μειώνεται η θερμοκρασία του. Κατά τη διάρκεια της ψύξης των κονσερβών το κρύο νερό παραλαμβάνει την αισθητή θερμότητα από τις κονσέρβες και θερμαίνεται σταδιακά. Σε βεβαιωμένη κυκλοφορία ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας για το νερό είναι $500 - 2.000 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, για νερό σε βρασμό $2.000 - 20.000 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ και για συμπυκνούμενους υδρατμούς $6.000 - 28.000 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. Σε φυσική κυκλοφορία ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας για το νερό είναι $100 - 600 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. Το εύρος της τιμής του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας που επιλέχθηκε βρισκόταν στα παραπάνω επίπεδα για μεταφορά της θερμότητας από νερό προς στερεή επιφάνεια για φυσική και βεβαιωμένη κυκλοφορία (Γιαννιώτης, 2011). Στις παρακάτω παραγράφους αναλύεται η επίδραση της μεταβολής του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στη ροή, το θερμοκρασιακό προφίλ και το θερμικό αποτέλεσμα που προκαλείται για τις τρεις γεωμετρίες “α”, “β” και “γ”.

α) Περίπτωση α (μεγάλες ελιές καλαμών)

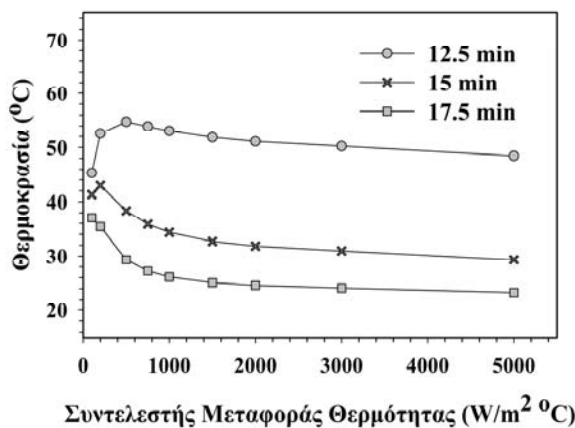
Για τις ελιές της ποικιλίας “καλαμών” μεγάλου μεγέθους εφαρμόστηκε θερμική επεξεργασία ίδια με αυτήν που περιγράφεται στην παράγραφο II.3.3.5, με μεταβολή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας από $100 - 3.000 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ και άπειρο. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας αναφέρεται στη μεταφορά θερμότητας μεταξύ θερμαντικού μέσου και τοιχώματος της κονσέρβας. Λόγω του ότι το νερό σε θερμοκρασία 70°C και ατμοσφαιρική πίεση δεν βρίσκεται σε βρασμό συνεπάγεται ότι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του νερού και στερεού τοιχώματος δεν μπορεί να ξεπεράσει την τιμή $2.000 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ (Γιαννιώτης, 2011). Για την περίπτωση “α” πραγματοποιήθηκαν επιλύσεις με παράμετρο την μεταβολή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας. Η επίδραση τόσο στο θερμοκρασιακό προφίλ, όσο και στο θερμικό αποτέλεσμα φαίνεται στις παρακάτω εικόνες. Χαρακτηριστική είναι η μεταβολή της θερμοκρασίας στην αργότερα θερμαινόμενη ζώνη. Αναλυτικότερα, με την ολοκλήρωση της θέρμανσης και την έναρξη της ψύξης στην κονσέρβα με $h = 100 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ η αργότερα θερμαινόμενη ζώνη έχει θερμοκρασία $43,2^\circ\text{C}$, ενώ η κονσέρβα με άπειρο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στο ίδιο σημείο για την ίδια χρονική στιγμή έχει $68,3^\circ\text{C}$. Για τις ενδιάμεσες τιμές του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας οι τιμές τις θερμοκρασίας κυμαίνονται μεταξύ των δύο παραπάνω τιμών. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι όταν ο συντελεστής έχει τιμές μεγαλύτερες από $1.000 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ η κατανομή της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της κονσέρβας δεν διαφέρει σημαντικά μεταξύ των επιλυόμενων περιπτώσεων. Αριθμητικά η διαφορά μεταξύ του άπειρου και του συντελεστή $100 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ είναι $36,8\%$, ενώ μεταξύ του άπειρου και του συντελεστή $1.000 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ η διαφορά είναι μόλις $3,5\%$ και για μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας η διαφορά είναι 1% και τείνει να μηδενιστεί. Επί πλέον στα παρακάτω Διαγράμματα 37 και 38 παρουσιάζεται η θερμοκρασιακή μεταβολή της αργότερα θερμαινόμενης ζώνης σε σχέση με τη μεταβολή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας για τη θέρμανση και την ψύξη αντίστοιχα. Χαρακτηριστική είναι η υστέρηση που παρατηρείται σε όλες τις χρονικές στιγμές για τις τιμές του συντελεστή μικρότερη των $1.000 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. Σημειωτέον ότι για την ορθή παρουσίαση των διαγραμμάτων θεωρήθηκε ότι ο άπειρος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ισοδυναμεί με τιμή $5.000 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.



Διάγραμμα 36. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ για διαφορετικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας



Διάγραμμα 37. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές της θέρμανσης σε σχέση με την μεταβολή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας



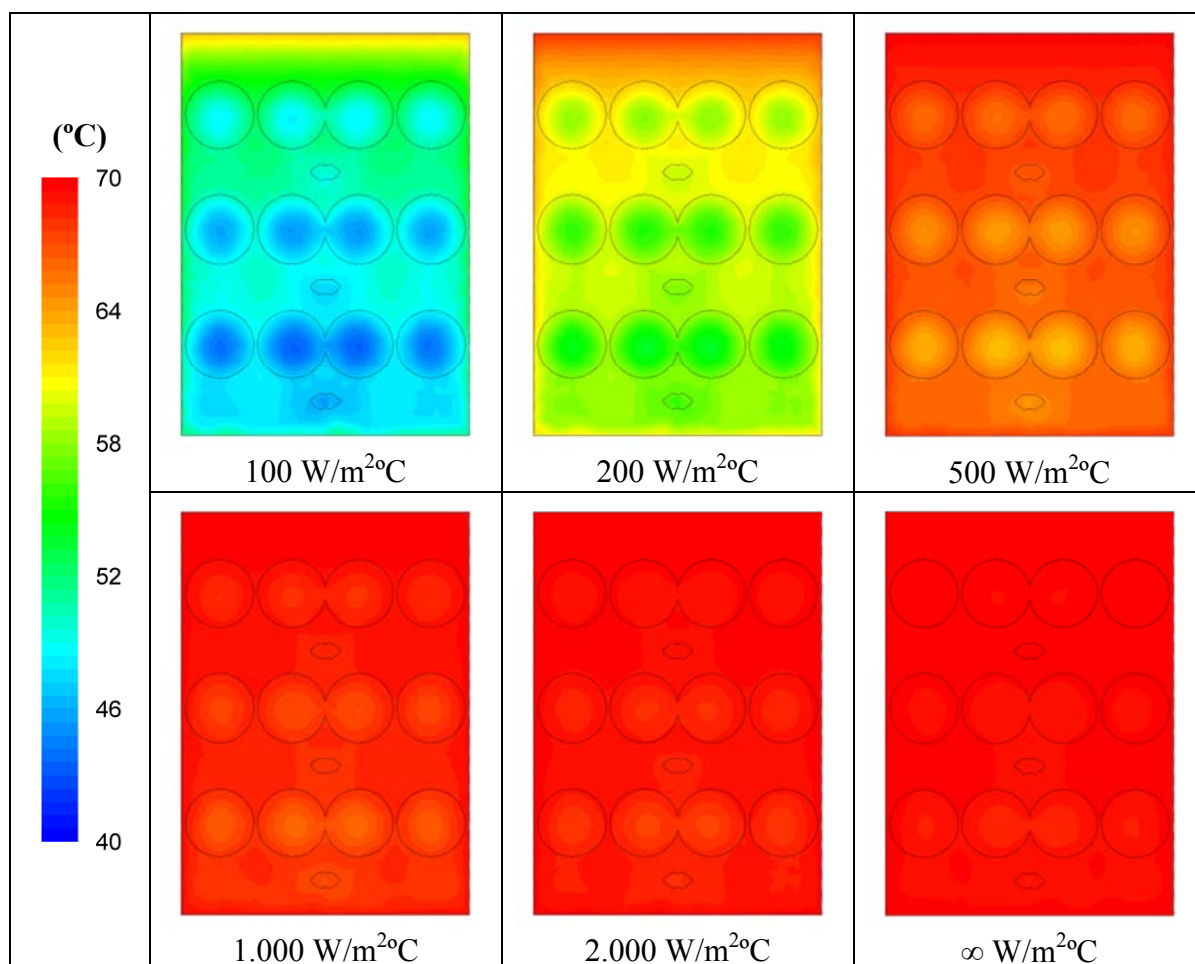
Διάγραμμα 38. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές της ψύξης σε σχέση με την μεταβολή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας

Σε αντιστοιχία με τη θέρμανση η ίδια υστέρηση στην επίδραση της θερμοκρασιακής παρατηρείται και κατά τον κύκλο της ψύξης. Στις διάφορες χρονικές στιγμές κατά τη

διάρκεια της ψύξης παρατηρείται γρήγορη απόκριση στην μεταβολή της θερμοκρασίας από την αργότερα θερμαινόμενη ζώνη όταν ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ξεπερνά την τιμή των $1.000 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

Επίσης στις παρακάτω εικόνες 41 παρουσιάζεται η κατανομή της θερμοκρασίας σε κάθετη τομή της κονσέρβας τη χρονική στιγμή του $10^{\text{ου}}$ min από την έναρξη της θερμικής επεξεργασίας, δηλαδή κατά την έναρξη του κύκλου ψύξης

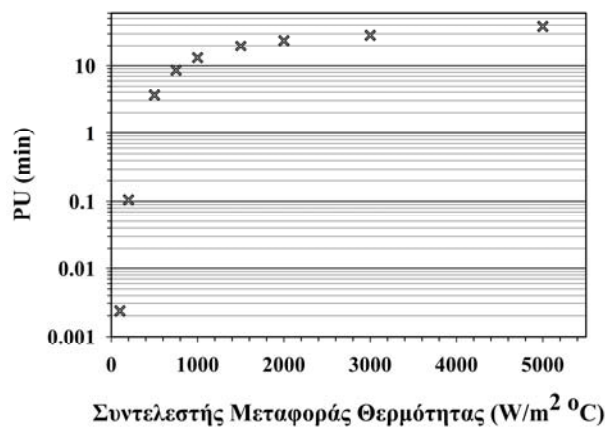
Από το σύμπλεγμα εικόνων 41 είναι φανερό ότι η θέση της αργότερα θερμαινόμενης ζώνης δεν μεταβάλλεται και εντοπίζεται στο ίδιο σημείο για όλες τις περιπτώσεις που επιλύθηκαν. Όμως είναι εμφανής η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των περιπτώσεων.



Εικόνα 41. Κατανομή της θερμοκρασίας σε τομή της κονσέρβας για διάφορες τιμές του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μετά από 10 min από την έναρξη της θέρμανσης

Εκτός από την θερμοκρασιακή κατανομή εντός της κονσέρβας πολύ σημαντική είναι και η κατανομή του ισοδύναμου χρόνου της θερμικής επεξεργασίας για τις επιλύμενες περιπτώσεις. Στο παρακάτω Διάγραμμα 39 φαίνεται η μεταβολή του ισοδύναμου χρόνου για το κρίσιμο σημείο στο τέλος της θερμικής επεξεργασίας.

Έχοντας ως στόχο την επίτευξη 15 min ισοδύναμου χρόνου $PU_{62.4^{\circ}C}^{5.25^{\circ}C}$ παρατηρείται ότι για τιμές του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας $1.000 \text{ W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ και κάτω ο επιθυμητός ισοδύναμος χρόνος δεν επιτυγχάνεται. Ακολουθώντας την μεταβολή του ισοδύναμου χρόνου σε σχέση με τη μεταβολή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας υπολογίζεται με σφάλμα μικρότερο του 0,05% ότι η ελάχιστη επιθυμητή τιμή $PU_{62.4^{\circ}C}^{5.25^{\circ}C} = 15 \text{ min}$ αντιστοιχεί σε συντελεστή ίσο με $1.200 \text{ W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$.

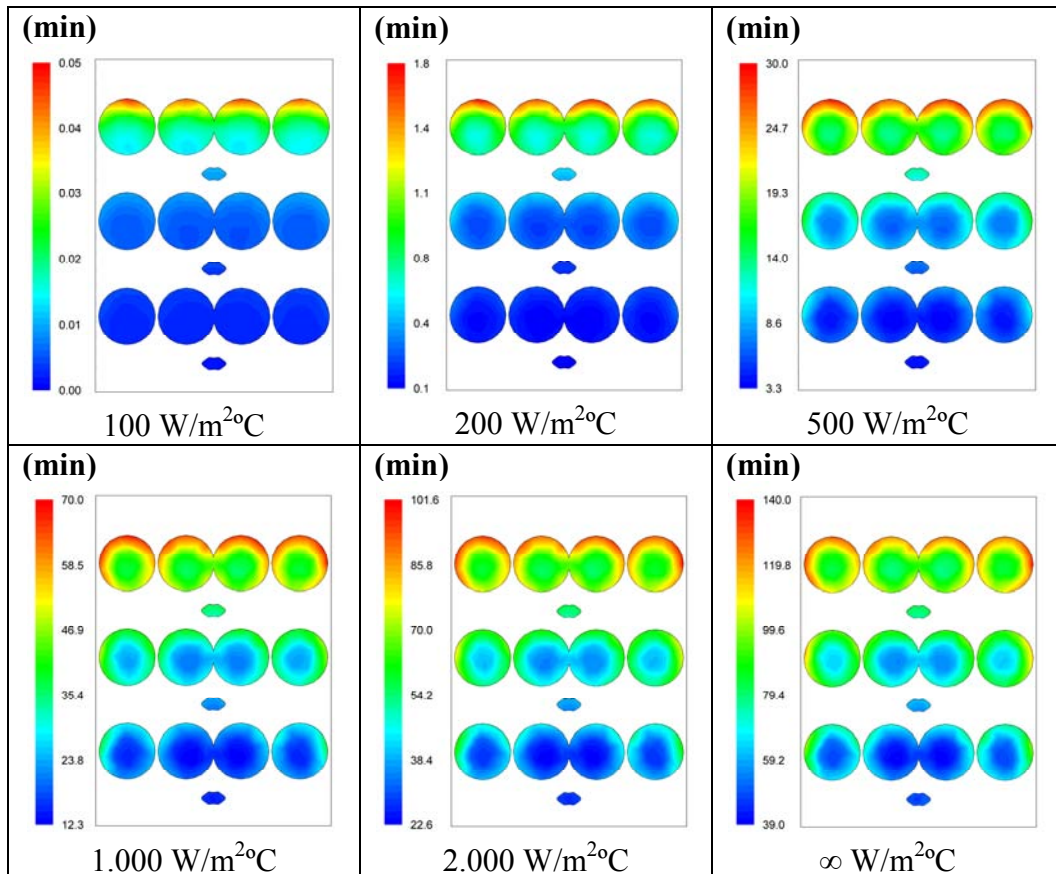


Διάγραμμα 39. Μεταβολή του ελάχιστου ισοδύναμου χρόνου σε σχέση με τη μεταβολή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας

Πέραν αυτή της τιμής ο ισοδύναμος χρόνος είναι μεγαλύτερος και φθάνει την τιμή 28,5 min που αντιστοιχεί σε θερμική επεξεργασία με άπειρο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας.

Επίσης στις παρακάτω εικόνες 42 φαίνεται η κατανομή του ισοδύναμου χρόνου $PU_{62.4^{\circ}C}^{5.25^{\circ}C}$ για κάθετη τομή της κονσέρβας στο τέλος της θερμικής επεξεργασίας. Όμοια και στην περίπτωση κατανομής της θερμοκρασίας βρέθηκε και εδώ ότι δεν υπάρχει μεταβολή στις συντεταγμένες του κρίσιμου σημείου και η μόνη μεταβολή που παρατηρείται είναι στο μέγεθος του ισοδύναμου χρόνου στο σημείο αυτό, αλλά και στην υπόλοιπη γεωμετρία.

Τέλος, σημαντική παρατήρηση είναι το διαφορετικό εύρος στην τιμή F για κάθε τιμή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας που επιλύθηκε. Από τις εικόνες φαίνεται ότι για μικρές τιμές του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, το εύρος είναι πολύ μικρό (0 – 0,05min), ενώ για μεγαλύτερες τιμές π.χ. $2.000 \text{ W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ το εύρος κυμάνθηκε από 22,6 – 101,6 min.

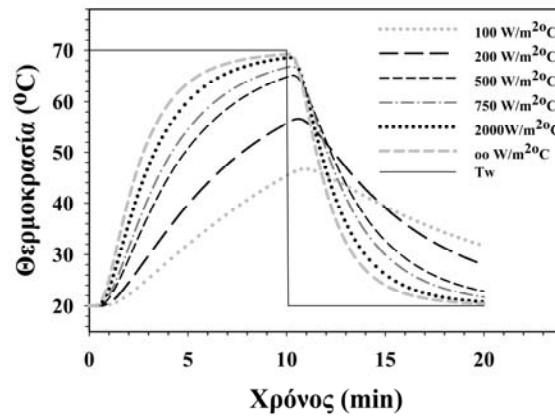


Εικόνα 42. Κατανομή της τιμής F σε τομή της κονσέρβας για διαφορετικές τιμές του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας

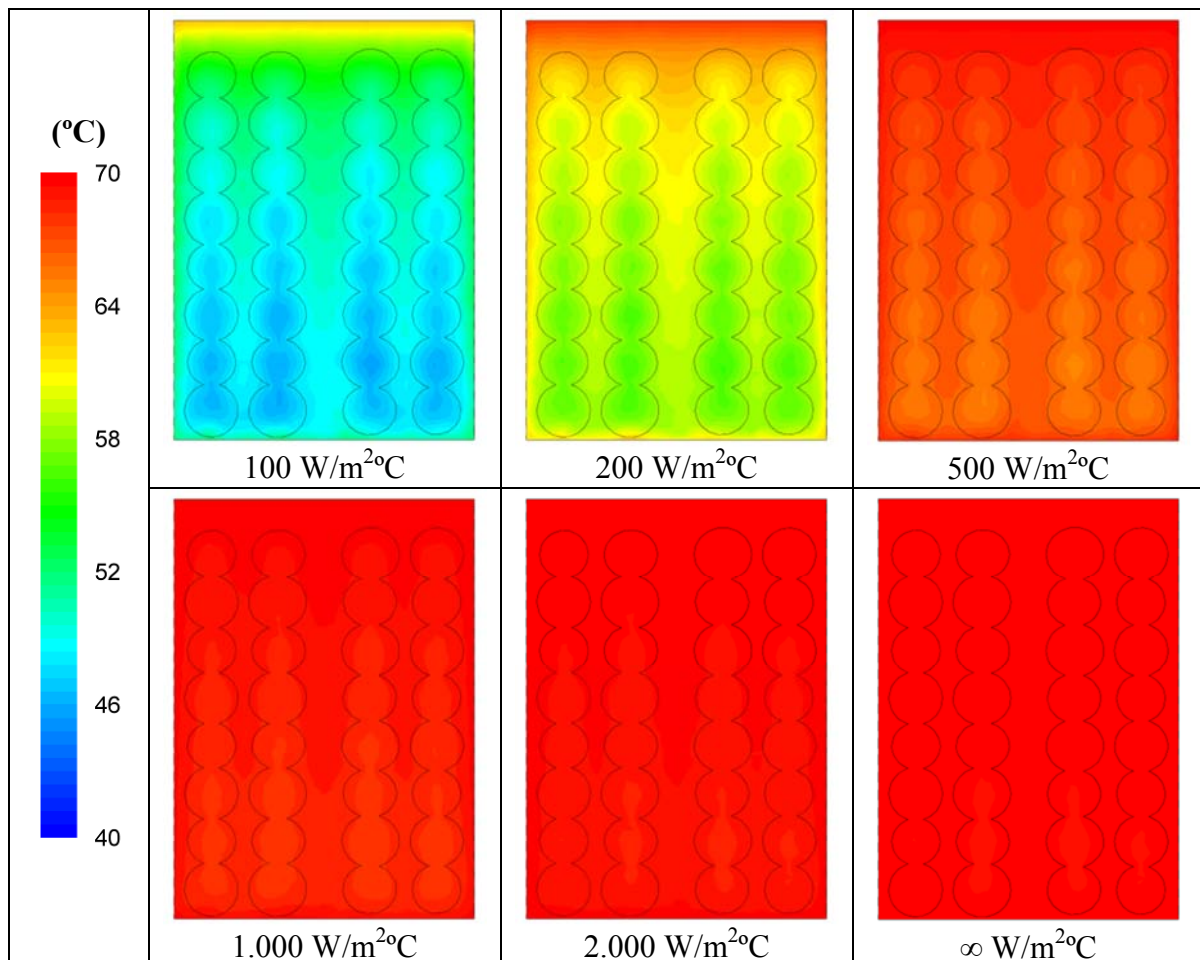
β) Περίπτωση β (μικρές ελιές καλαμών)

Σε αντίστοιχη κατάσταση επιλύθηκε η γεωμετρία “β” με τις ίδιες αρχικές και οριακές συνθήκες. Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ θερμαντικού μέσου και τοιχώματος της κονσέρβας μεταβλήθηκε από $100 - 3.000 W/m^2 \cdot ^\circ C$ και άπειρο. Η θερμική επεξεργασία που εφαρμόστηκε αφορούσε θέρμανση για 10 min στους $70^\circ C$ και ψύξη στους $20^\circ C$ για τον ίδιο χρόνο. Η μεταβολή της θερμοκρασίας στην αργότερα θερμαινόμενη ζώνη σε σχέση με το χρόνο θερμικής επεξεργασίας παρουσιάζεται στο επόμενο Διάγραμμα 40.

Όπως με την περίπτωση “α” φαίνεται και στην περίπτωση “β” ότι η επίδραση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στη μεταβολή της θερμοκρασίας των ελιών είναι σημαντική. Χαρακτηριστικές είναι οι καμπύλες θέρμανσης – ψύξης για τις περιπτώσεις με συντελεστή μεταφοράς θερμότητας από $100 - 1.000 W/m^2 \cdot ^\circ C$ όπου για τον ίδιο χρόνο θέρμανσης η διαφορά θερμοκρασίας αγγίζει τους $20^\circ C$. Όμως όταν ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας αυξάνεται πάνω από $1.500 W/m^2 \cdot ^\circ C$ δεν μεταβάλλεται αισθητά η θερμοκρασία στην αργότερα θερμαινόμενη ζώνη.



Διάγραμμα 40. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ για διαφορετικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας

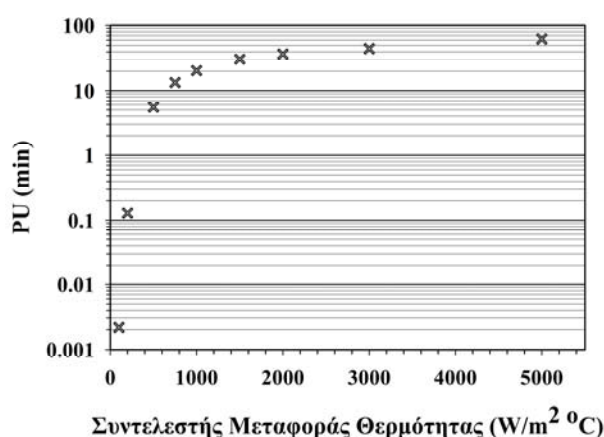


Εικόνα 43. Κατανομή της θερμοκρασίας σε τομή της κονσέρβας για διάφορες τιμές του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μετά από 10 min από την έναρξη της θέρμανσης

Αυτό το αποτέλεσμα φαίνεται και στην εικόνα 43 που απεικονίζεται η θερμοκρασιακή κατανομή στην κάθετη τομή, στο τέλος της θέρμανσης, δηλαδή στο 10^ο min της θερμικής επεξεργασίας. Όπως φαίνεται μετά την τιμή των 1.000 W/m²·°C δεν υπάρχει αισθητή χρωματική αλλαγή που να υποδηλώνει ότι η

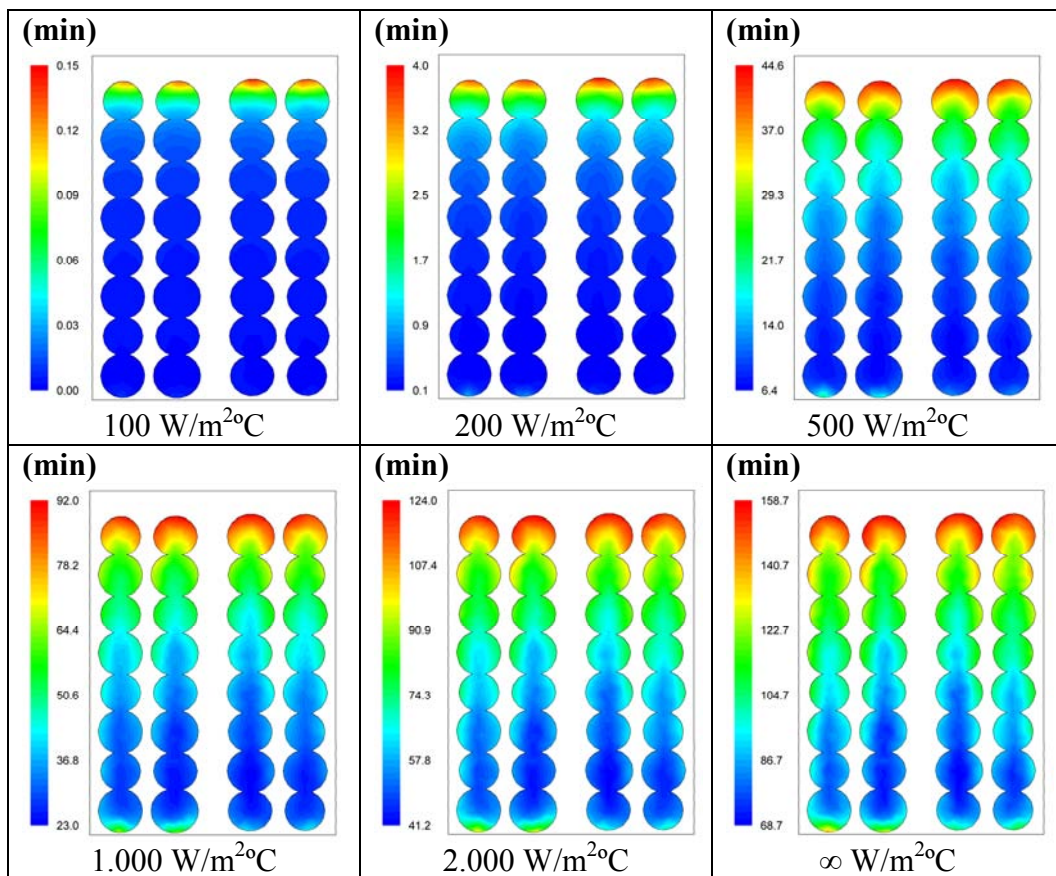
θερμοκρασιακή κατανομή είναι διαφορετική. Σε αναλυτικότερη παρατήρηση των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν από το Fluent σε διαφορετική κλίμακα φαίνεται ότι η αργότερα θερμαινόμενη ζώνη δεν μεταβάλλεται και παραμένει στις κεντρικές ελιές της δεύτερης στρώσης από τον πυθμένα της κονσέρβας.

Εκτός όμως από τη θερμοκρασιακή κατανομή μεγάλο ενδιαφέρον έχει η κατανομή του ισοδύναμου χρόνου θερμικής επεξεργασίας για την καταστροφή των προπιονικών βακτηρίων. Οι ελάχιστες τιμές του ισοδύναμου χρόνου φαίνονται στο Διάγραμμα 41. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι για τη συγκεκριμένη γεωμετρία και τις παραπάνω οριακές και αρχικές συνθήκες η επιλυόμενη γεωμετρία που έδωσε πάνω από τον επιθυμητό ισοδύναμο χρόνο $PU_{62.4^{\circ}C}^{5.25^{\circ}C} = 15 \text{ min}$ ήταν αυτή με συντελεστή μεταφοράς θερμότητας $1.000 \text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Όμως η ελάχιστη τιμή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας για την οποία η περίπτωση “β” υπόκειται σε θερμική επεξεργασία με το επιθυμητό θερμικό αποτέλεσμα είναι $835 \text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Διάγραμμα 41. Μεταβολή του ελάχιστου ισοδύναμου χρόνου σε σχέση με τη μεταβολή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας

Η τιμή αυτή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας είναι μια οριακή τιμή και κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας θα πρέπει πάντοτε να ξεπερνιέται ούτως ώστε το τελικό προϊόν να είναι μικροβιολογικά ασφαλές. Εκτός όμως από το κρίσιμο σημείο της κονσέρβας σημαντική είναι και η κατανομή του ισοδύναμου χρόνου σε όλη την κονσέρβα. Στις εικόνες 44 παρουσιάζεται η κατανομή του ισοδύναμου χρόνου για κάθετη τομή της κονσέρβας σε διάφορες τιμές του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στο τέλος της θερμικής επεξεργασίας. Από την κλίμακα της κάθε εικόνας φαίνεται το εύρος του ισοδύναμου χρόνου, ενώ από τις εικόνες είναι εμφανείς οι κρίσιμες περιοχές της γεωμετρίας.

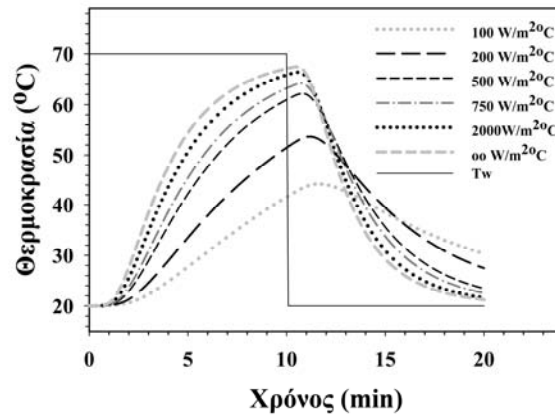


Εικόνα 44. Κατανομή της τιμής F σε τομή της κονσέρβας για διαφορετικές τιμές του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας

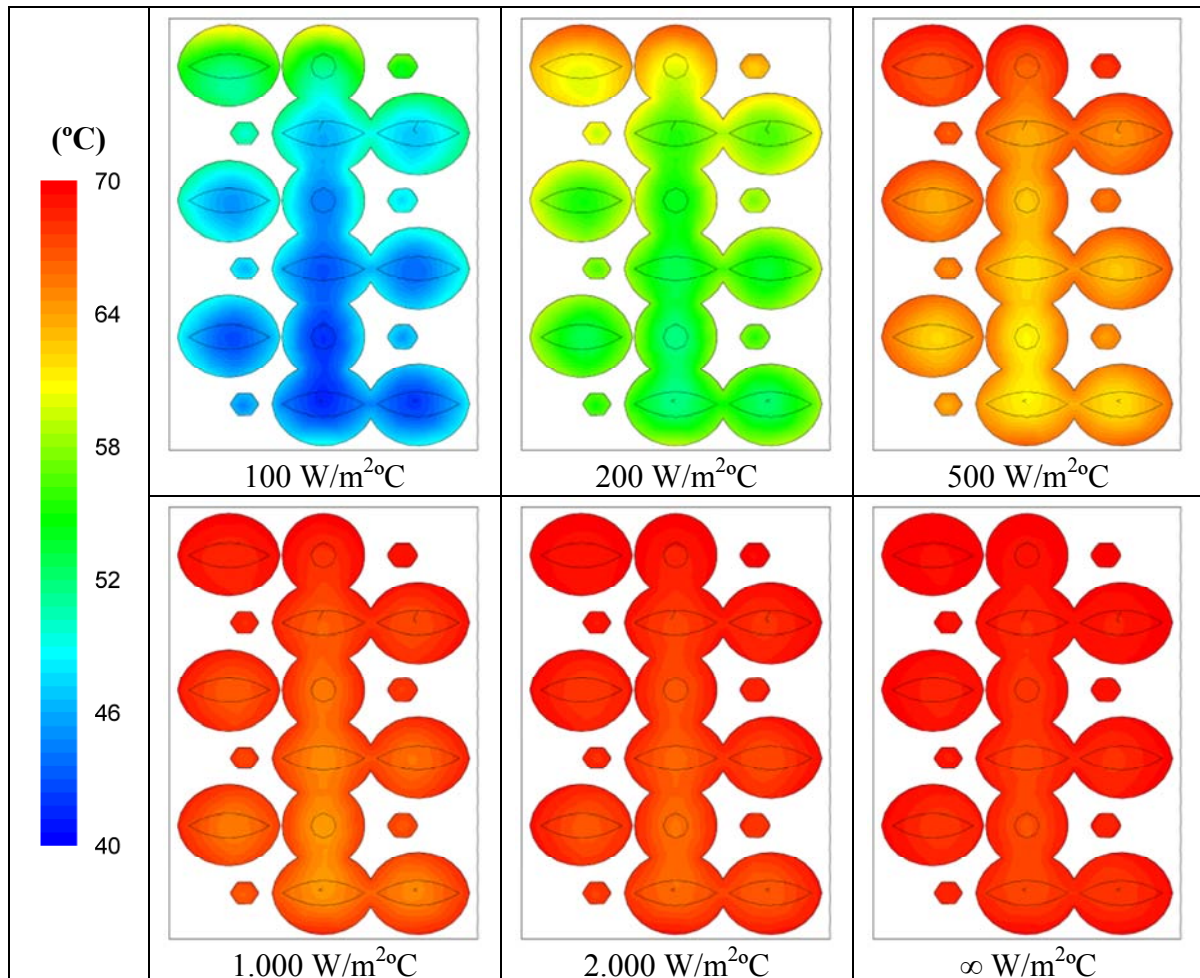
γ) Περίπτωση γ (κονσερβολιές)

Στην περίπτωση “γ” πραγματοποιήθηκε η ίδια επίλυση, όπως και με τις δύο προηγούμενες περιπτώσεις. Στόχος και σε αυτή την περίπτωση ήταν να διαπιστωθεί η επίδραση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μεταξύ θερμαντικού μέσου και τοιχώματος της κονσέρβας επί της θερμικής επεξεργασίας. Το εύρος του συντελεστή και σε αυτή την περίπτωση ήταν το ίδιο, δηλαδή από $100 - 3.000 \text{ W/m}^2\text{°C}$ και άπειρος. Η μεταβολή της θερμοκρασίας στην αργότερα θερμαινόμενη ζώνη καταγράφηκε κατά τη διάρκεια της επίλυσης της γεωμετρίας και παρουσιάζεται στο παρακάτω Διάγραμμα 42. Σε σχέση με τις προηγούμενες γεωμετρίες, σε αυτή την περίπτωση η τιμή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, όπου μετά την αύξησή του επιδρά ελάχιστα επί της μεταβολής της θερμοκρασίας των ελιών, είναι τα $750 \text{ W/m}^2\text{°C}$. Πέρα από αυτή τη τιμή του συντελεστή η διαφορά θερμοκρασίας στην

αργότερα θερμαινόμενη ζώνη δεν ξεπερνά τους 5 – 6 °C για κάθε χρονική στιγμή της θερμικής επεξεργασίας.



Διάγραμμα 42. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ για διαφορετικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας



Εικόνα 45. Κατανομή της θερμοκρασίας σε τομή της κονσέρβας για διάφορες τιμές του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μετά από 10 min από την έναρξη της θέρμανσης

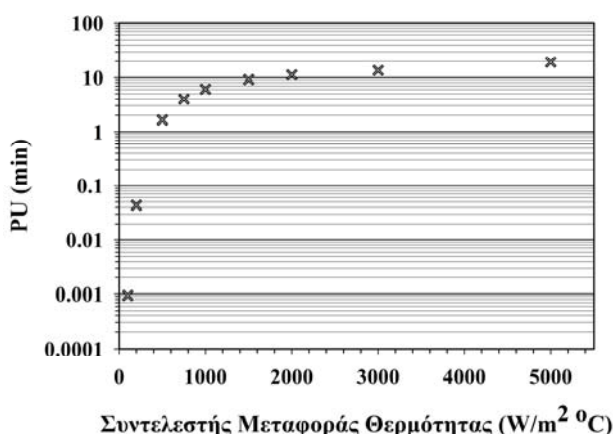
Επίσης χαρακτηριστική και σε αυτή την περίπτωση είναι η αργή αύξηση της θερμοκρασίας κατά την περίοδο της θέρμανσης για συντελεστή μεταφοράς

θερμότητας $100 \text{ W/m}^2\text{C}$ και ταυτόχρονα η αργή μείωση της θερμοκρασίας του ίδιου σημείου στην περίοδο της ψύξης. Με το τέλος της περιόδου θέρμανσης και της έναρξης της ψύξης, η θερμοκρασιακή κατανομή παρουσιάζεται στην Εικόνα 45.

Στην εικόνα αυτή είναι εμφανής χαρακτηριστική η χρωματική ομοιότητα στην κάθετη τομή για τιμές του συντελεστή $1.000 - \infty \text{ W/m}^2\text{C}$, πράγμα το οποίο μαζί με την θερμοκρασιακή κατανομή της αργότερα θερμαινόμενης ζώνης δείχνει ότι το θερμικό αποτέλεσμα αναμένεται να είναι περίπου το ίδιο.

Επιπροσθέτως και σε αυτή την περίπτωση στόχος της θερμικής επεξεργασίας ήταν η θερμική καταστροφή των προπιονικών βακτηρίων στην κονσέρβα. Η μελέτη της επίδρασης του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας για δεδομένες συνθήκες θερμικής επεξεργασίας αποδεικνύει ότι για τη θέρμανση και ψύξη της γεωμετρίας “γ” μόνο όταν ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας είναι άπειρος επιτυγχάνεται $PU_{62.4^{\circ}\text{C}}^{5.25^{\circ}\text{C}}$ μεγαλύτερο από το επιθυμητό ($PU_{62.4^{\circ}\text{C}}^{5.25^{\circ}\text{C}} = 15 \text{ min}$). Αυτό είναι ένα σημαντικό αποτέλεσμα, λόγω του ότι οποιαδήποτε μείωση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μπορεί να έχει αρνητική επίδραση επί της ασφάλειας του τελικού προϊόντος.

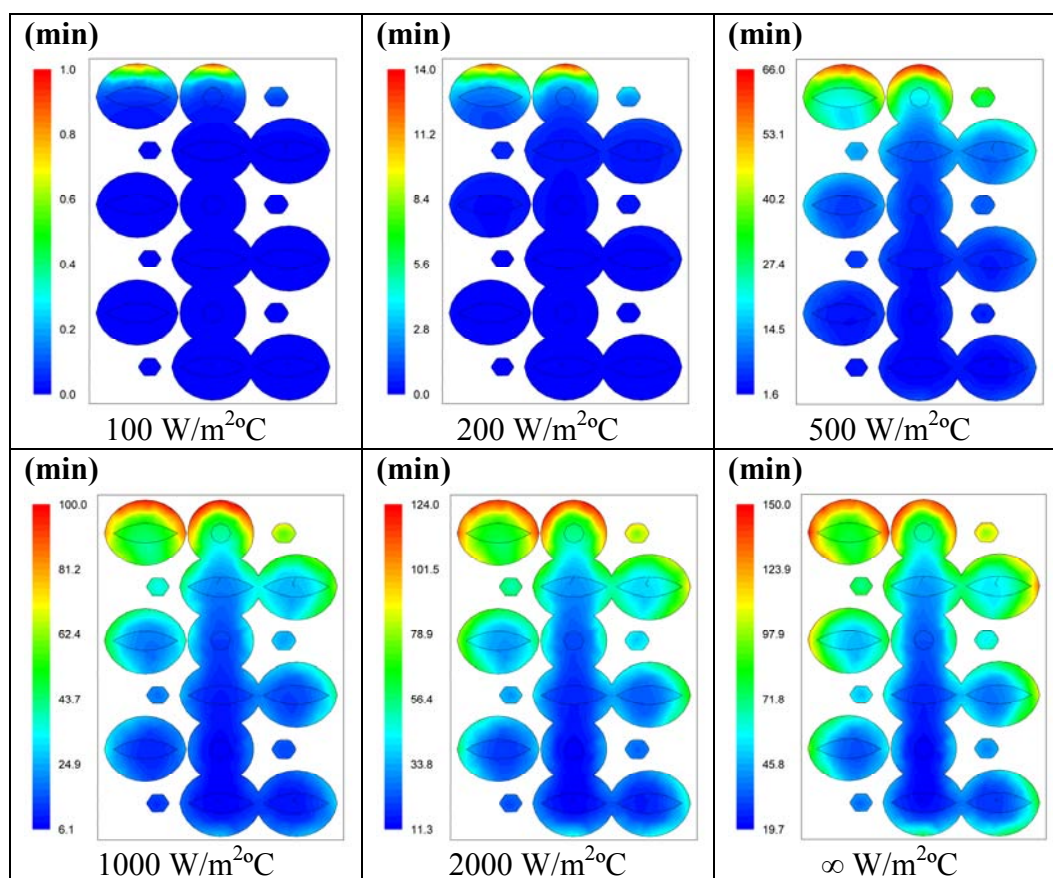
Βάση της παραπάνω παρατήρησης ενδέχεται κατά τη βιομηχανική πρακτική η θέρμανση με νερό 70°C για 10 min και ψύξη με νερό 20°C να μην είναι αρκετή, ώστε να μειωθεί ο αρχικός πληθυσμός των προπιονικών βακτηρίων στα επιθυμητά επίπεδα.



Διάγραμμα 43. Μεταβολή του ελάχιστου ισοδύναμου χρόνου σε σχέση με τη μεταβολή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας

Το γεγονός ότι οποιαδήποτε άλλη τιμή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, πλην του άπειρου, είναι μη αποδεκτή γιατί αποδίδει προϊόν μικροβιολογικά μη ασφαλές φαίνεται στην Εικόνα 46, στην οποία παρουσιάζεται η κατανομή του ισοδύναμου χρόνου της θερμικής επεξεργασίας στην κάθετη τομή της κονσέρβας. Στη μόνη περίπτωση, όπου ο ισοδύναμος χρόνος ξεπερνά την οριακή τιμή των

$PU_{62.4^{\circ}C}^{5.25^{\circ}C} = 15 \text{ min}$ είναι όταν ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ θερμαντικού μέσου και τοιχώματος της κονσέρβας είναι άπειρος.



Εικόνα 46. Κατανομή της τιμής F σε τομή της κονσέρβας για διαφορετικές τιμές του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας

Συνοψίζοντας τα παραπάνω αποτελέσματα κρίνεται απαραίτητο να σημειωθεί ότι για τις “κονσερβολιές” η παραπάνω θερμική επεξεργασία, ήτοι 10 min στους 70°C και 10 min στους 20°C , είναι ανεπαρκής. Για αυτό το λόγο θα πρέπει να αυξηθεί ο χρόνος θέρμανσης ή να αυξηθεί η θερμοκρασία του θερμαντικού μέσου. Με τις ενέργειες αυτές περισσότερο θερμικό φορτίο θα εισχωρήσει στις ελιές και θα προκαλέσει αυξημένη θερμική καταστροφή στον μικροοργανισμό στόχο. Κατά συνέπεια είναι υποχρεωτικός ο επανασχεδιασμός του προτεινόμενου σχήματος, έτσι ώστε να παράγεται ένα προϊόν μικροβιολογικά ασφαλές.

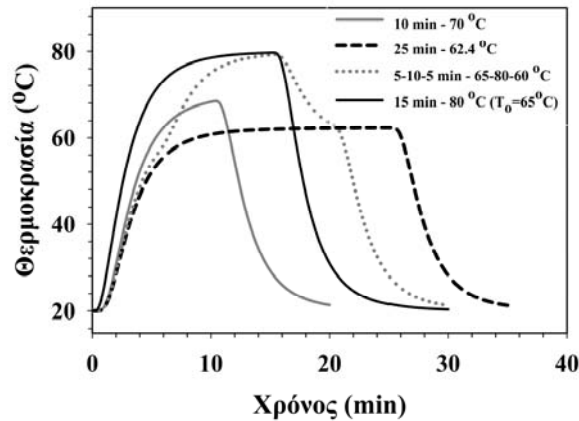
Π.3.3.8 Προσομοίωση βιομηχανικής πρακτικής ήπιας θερμικής επεξεργασίας

Για την επίτευξη του ισοδύναμου χρόνου $15 \text{ min } PU_{62.4^{\circ}C}^{5.25^{\circ}C}$ εφαρμόζονται μια σειρά από διαφορετικές θερμικές επεξεργασίες στη βιομηχανική πρακτική. Ο σχεδιασμός μια τέτοιας θερμικής επεξεργασίας, εκτός από το αρχικό μικροβιακό φορτίο, τον

βιομηχανικό εξοπλισμό, το μέγεθος και το είδος του περιέκτη, εξαρτάται και από διάφορες λεπτομέρειες καθ' όλη τη διάρκεια της επεξεργασίας του προϊόντος. Για την ασφάλεια του τελικού προϊόντος στη βιομηχανική πρακτική συνήθως εφαρμόζονται σχήματα θερμικής επεξεργασίας, που έχουν ως αποτέλεσμα τη θερμική καταπόνηση του προϊόντος σε μεγάλο βαθμό. Με αυτά τα σχήματα δεν επιβιώνουν αλλοιογόνοι μικροοργανισμοί, αλλά οι ελιές υποβαθμίζονται ποιοτικά σε μεγάλο βαθμό. Παρακάτω αναλύονται σχήματα θερμικής επεξεργασίας που εφαρμόζονται στη βιομηχανική πρακτική και συγκρίνονται με την θερμική επεξεργασία που εφαρμόστηκε και αναλύθηκε στην παράγραφο II.3.3.5 και με μια θερμική επεξεργασία, όπου η θερμοκρασία του θερμαντικού μέσου ήταν ίδια με τη θερμοκρασία αναφοράς και επιλύθηκε για 25 min θέρμανσης. Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ θερμαντικού μέσου και τοιχώματος της κονσέρβας θεωρήθηκε σε όλες τις περιπτώσεις άπειρος.

α) Περίπτωση α (μεγάλες ελιές καλαμών)

Για τις ελιές “καλαμών” μεγάλου μεγέθους εφαρμόστηκαν τα σχήματα θερμικής επεξεργασίας, που περιγράφονται στον Πίνακα 11 (περιπτώσεις 1,16,17 και 18). Η μεταβολή της θερμοκρασίας σε σχέση με το χρόνο στην αργότερα θερμαινόμενη ζώνη παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 39. Σε σύγκριση με το σχήμα θερμικής επεξεργασίας 70°C για 10 min οι δύο βιομηχανικές πρακτικές, ήτοι η 62,4°C για 25 min και η 65 – 80 – 60°C για 5 – 10 – 5 min αντίστοιχα, είναι περισσότερο έντονες και καταπονούν θερμικά τις ελιές περισσότερο. Στην περίπτωση της αρχικής θερμοκρασίας της άλμης $T_{br} = 65^{\circ}\text{C}$ και θέρμανση στους 80°C για 15 min, φαίνεται ότι το εσωτερικό των ελιών θερμαίνεται γρηγορότερα. Στη δε περίπτωση της θερμικής επεξεργασίας με εναλλαγές στη θερμοκρασία του θερμαντικού μέσου (65 – 80 – 60°C για 5 – 10 – 5 min αντίστοιχα) φαίνεται ότι το εσωτερικό των ελιών αποκρίνεται στην μεταβολή της θερμοκρασίας με σχετική καθυστέρηση, πράγμα το οποίο δικαιολογείται από την απόσταση που πρέπει να διανύσει η θερμότητα για να διεισδύσει μέχρι το κέντρο των ελιών. Στην περίπτωση της θερμικής επεξεργασίας με θερμοκρασία θερμαντικού μέσου τους 62,4°C, όση δηλαδή και η θερμοκρασία αναφοράς στον υπολογισμό του ισοδύναμου χρόνου το θερμοκρασιακό προφίλ της αργότερα θερμαινόμενης ζώνης είναι σαφώς ηπιότερο.



Διάγραμμα 44. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ για τις τέσσερις περιπτώσεις

Ο στόχος σε κάθε περίπτωση όμως παραμένει η επίτευξη των 15 min ισοδύναμου χρόνου και κατά συνέπεια τη θερμική καταστροφή των προπιονικών βακτηρίων. Εν συνεχεία, μετά την επίλυση της γεωμετρίας “α” με το πρόγραμμα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής βρέθηκε ότι στο κρίσιμο σημείο ο ισοδύναμος χρόνος $PU_{62.4^{\circ}C}^{5.25^{\circ}C}$ έχει μεγάλο εύρος τιμών για τα παραπάνω σχήματα θερμικής επεξεργασίας. Στον Πίνακα 21 παρουσιάζονται οι τιμές αυτές για το κρίσιμο σημείο σε κάθε περίπτωση.

Πίνακας 21. Αποτελέσματα ισοδύναμου χρόνου για τις τέσσερις περιπτώσεις

Σχήμα θερμικής επεξεργασίας	$PU_{62.4^{\circ}C}^{5.25^{\circ}C}$ (min)
I. 10 min - 70°C	38,8
II. 25 min - 62.4°C	14,4
III. 5-10-5 min - 65-80-60°C	6.638,6
IV. 15 min - 80°C ($T_{br}=65^{\circ}C$)	11.977,2

Από το εύρος των τιμών $PU_{62.4^{\circ}C}^{5.25^{\circ}C}$ φαίνεται ότι κατά τη βιομηχανική πρακτική και για το συγκεκριμένο μέγεθος κονσερβών, οι ελιές δέχονται πολύ μεγαλύτερο θερμικό φορτίο απ’ ότι πραγματικά απαιτείται. Τις περισσότερες φορές αυτό συμβαίνει για να διασφαλιστεί ότι στο προϊόν δεν επιζούν αλλοιογόνοι μικροοργανισμοί.

Επίσης εκτός από το θανατηφόρο αποτέλεσμα στα αλλοιογόνα μικρόβια υπολογίστηκε και η επίδραση της θερμότητας στην υποβάθμιση της υφής των ελιών. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται ο ελάχιστος ισοδύναμος χρόνος για την θερμική υποβάθμιση της υφής και το μέγιστο επί τοις % εναπομείναν ποιοτικό χαρακτηριστικό.

Πίνακας 22. Αποτελέσματα ισοδύναμου χρόνου της υποβάθμισης της υφής των ελιών και της επί τοις % εναπομείνουσας υφής

Σχήμα θερμικής επεξεργασίας	$F_{62,4^{\circ}C}^{28,64^{\circ}C}$ (min)	Cb%
I. 10 min - 70°C	10,4	94,1
II. 25 min - 62,4°C	20,8	91,8
III. 5-10-5 min - 65-80-60°C	38,1	84,2
IV. 15 min - 80°C (T _{br} =65°C)	42,9	81,5

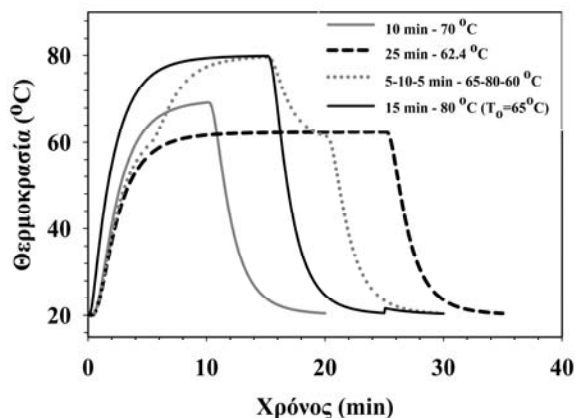
Βάση των παραπάνω αποτελεσμάτων φαίνεται ότι το προτεινόμενο σχήμα των 70°C για 10 min είναι αυτό που καλύπτει τις απαιτήσεις μικροβιολογικής ασφάλειας και έχει την μικρότερη θερμική υποβάθμιση της υφής. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι, ενώ το σχήμα των 62,4°C για 25 min δεν καλύπτει οριακά τον επιθυμητό ισοδύναμο χρόνο για τη θανάτωση των προπιονικών βακτηρίων, εν τούτοις προκαλεί μεγαλύτερη θερμική καταπόνηση στην υφή των ελιών σε σχέση με το προηγούμενο σχήμα θερμικής επεξεργασίας. Τέλος οι θερμικές επεξεργασίες που εφαρμόζονται στη βιομηχανική πρακτική προκαλούν μεγαλύτερη θερμική υποβάθμιση της υφής, σε σχέση με τα προηγούμενα θεωρητικά σχήματα, όμως ποσοτικά αυτή η ποιοτική υποβάθμιση δεν ξεπερνά το 20%.

β) Περίπτωση β (μικρές ελιές καλαμών)

Σε αντιστοιχία με την περίπτωση “α” επιλύθηκε η γεωμετρία με τις ελιές “καλαμών” μικρότερο μεγέθους με τα ίδια ακριβώς σχήματα θερμικής επεξεργασίας. Στο Διάγραμμα 45 φαίνεται το θερμοκρασιακό προφίλ της αργότερα θερμαινόμενης ζώνης σε σχέση με το χρόνο. Ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλεται η θερμοκρασία τους κρίσιμους χρόνους, δηλαδή τις χρονικές στιγμές όπου μεταβάλλεται η θερμοκρασία του θερμαντικού ή ψυκτικού μέσου, είναι ο ίδιος με αυτόν της περίπτωσης “α”.

Αρχικά φαίνονται οι καμπύλες των σχημάτων θερμικής επεξεργασίας για 10 min στους 70°C και 25 min στους 62,4°C. Τα θεωρητικά αυτά σχήματα θερμικής επεξεργασίας στόχο έχουν την επίτευξη του επιθυμητού ισοδύναμου χρόνου έχοντας την ελάχιστη θερμική καταπόνηση των ελιών. Οι ελιές “καλαμών” μικρού μεγέθους θερμαίνονται και ψύχονται γρηγορότερα ως συνέπεια της μικρότερης απόστασης διείσδυσης της θερμότητας στο εσωτερικό τους. Αυτό είναι ένα χαρακτηριστικό το οποίο μπορεί να βοηθήσει τη βιομηχανική πρακτική σε μεγάλο βαθμό. Η γρήγορη θέρμανση και ψύξη των ελιών οδηγεί σε ασφαλές προϊόν με την μικρότερη θερμική υποβάθμιση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του. Όμως όπως παρουσιάζεται στο

παρακάτω διάγραμμα οι θερμικές επεξεργασίες που εφαρμόζονται σε βιομηχανική κλίμακα είναι πιο έντονες.



Διάγραμμα 45. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ για τις τέσσερις περιπτώσεις

Χαρακτηριστικά σημεία των καμπυλών του διαγράμματος 45 είναι 1) η ταχύτερη αύξηση της θερμοκρασίας στο σχήμα με αρχική θερμοκρασία της άλμης 65°C σε σχέση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις, 2) στο σχήμα με τις συνεχείς μεταβολές της θερμοκρασίας του θερμαντικού μέσου η αργότερα θερμαινόμενη ζώνη αντιλαμβάνεται αυτές τις μεταβολές μετά από ένα μικρό χρονικό διάστημα και 3) λόγω μεγέθους των ελιών, η πτώση της θερμοκρασίας με την έναρξη του κύκλου ψύξης δεν καθυστερεί αρκετά και γίνεται σχεδόν ταυτόχρονα.

Για τη θανάτωση του μικροοργανισμού στόχου υπολογίστηκε ο ισοδύναμος χρόνος για τα 4 διαφορετικά σχήματα θερμικής επεξεργασίας και παρουσιάζεται στον παρακάτω Πίνακα 23. Σύμφωνα με τις υπολογιζόμενες τιμές του ισοδύναμου χρόνου φαίνεται ότι η καταστροφή των προπιονικών βακτηρίων είναι σαφώς μεγαλύτερη σε σχέση με την περίπτωση “α”. Επίσης ακόμα και στην περίπτωση της θέρμανσης στους 62,4°C για 25 min ο ισοδύναμος χρόνος στο κρίσιμο σημείο ξεπέρασε το όριο των 15 min που ορίζει ως όριο ασφάλεια το Διεθνές Συμβούλιο Ελιάς.

Πίνακας 23. Αποτελέσματα ισοδύναμου χρόνου για τις τέσσερις περιπτώσεις

Σχήμα θερμικής επεξεργασίας	$PU_{62.4^{\circ}C}^{5.25^{\circ}C}$ (min)
I. 10 min - 70°C	62.4
II. 25 min - 62.4°C	16.3
III. 5-10-5 min - 65-80-60°C	8.956.7
IV. 15 min - 80°C ($T_{br}=65^{\circ}C$)	15.506.3

Από τις τιμές του ισοδύναμου χρόνου, που παρουσιάζονται για τα σχήματα θερμικής επεξεργασίας της βιομηχανικής πρακτικής φαίνεται ότι το τελικό θερμικό αποτέλεσμα είναι σαφώς μεγαλύτερο από το απαραίτητο έχει όμως ως συνέπεια τη

θερμική καταπόνηση των ελιών. Το γεγονός αυτό φαίνεται ξεκάθαρα στον Πίνακα 24, όπου η θερμική υποβάθμιση των ελιών από τα θεωρητικά σχήματα θερμικής επεξεργασίας είναι μικρή έως αμελητέα, ενώ στα σχήματα της βιομηχανικής πρακτικής το ποσοστό υποβάθμισης της υφής τείνει να αγγίξει το 20% επί της αρχικής τιμής.

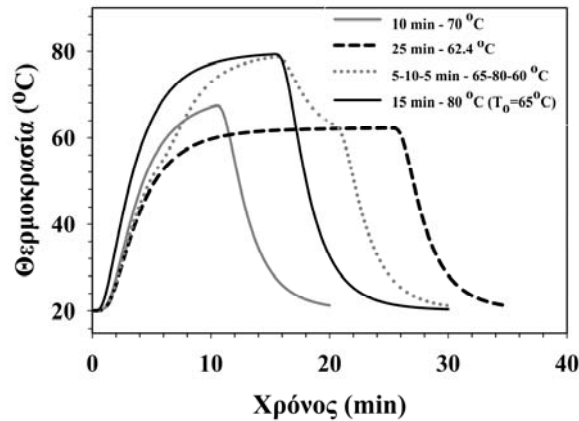
Πίνακας 24. Αποτελέσματα ισοδύναμου χρόνου της υποβάθμισης της υφής των ελιών και της επί τοις % εναπομείνουσας υφής

Σχήμα θερμικής επεξεργασίας	$F_{62.4^{\circ}C}^{28.64^{\circ}C}$ (min)	Cb%
I. 10 min - 70°C	11,6	94,6
II. 25 min - 62.4°C	21,5	91,8
III. 5-10-5 min - 65-80-60°C	40,5	84,1
IV. 15 min - 80°C ($T_{br}=65^{\circ}C$)	46,5	81,4

Επίσης χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι η θερμική επεξεργασία με θέρμανση στους 62,4°C για 25 min προκαλεί μεγαλύτερη θερμική καταπόνηση επί της υφής των ελιών σε σχέση με τη θερμική επεξεργασία στους 70°C για 10 min. Η παρατήρηση αυτή γίνεται πιο ενδιαφέρουσα όταν συνδέεται με τις τιμές του Πίνακα 23, όπου φαίνεται ότι η πρώτη θερμική επεξεργασία έχει $PU_{62.4^{\circ}C}^{5.25^{\circ}C} = 16,3 \text{ min}$, ενώ η θέρμανση στους 70°C για 10 min έχει $PU_{62.4^{\circ}C}^{5.25^{\circ}C} = 62,4 \text{ min}$.

γ) Περίπτωση γ (κονσερβολιές)

Τέλος έγινε επίλυση και για την περίπτωση “γ” στα τέσσερα διαφορετικά σχήματα ήπιας θερμικής επεξεργασίας. Όμοια με τις δύο προηγούμενες περιπτώσεις κατά τη διάρκεια των επιλύσεων η θερμοκρασία στην αργότερα θερμαινόμενη ζώνη καταγράφηκε και παρουσιάζεται στο παρακάτω Διάγραμμα 46. Σύμφωνα με τη μεταβολή της θερμοκρασίας στην αργότερα θερμαινόμενη ζώνη φαίνεται ότι οι θερμικές επεξεργασίες που εφαρμόζονται στη βιομηχανική πρακτική είναι σαφώς εντονότερες σε σχέση με τις θεωρητικές. Επίσης, σε σχέση με τις προηγούμενες γεωμετρίες, φαίνεται ότι οι “κονσερβολιές” αντιδρούν πιο αργά, έτσι ώστε να παρατηρείται μια πιο ομαλή μεταβολή στη θερμοκρασία της αργότερα θερμαινόμενης ζώνης στη θερμική επεξεργασία με διαφορετικές θερμοκρασίες θέρμανσης.



Διάγραμμα 46. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ για τις τέσσερις περιπτώσεις

Ο βασικός στόχος όμως των επιλύσεων είναι να διαπιστωθούν τα επίπεδα του θερμικού φορτίου στα οποία υπόκεινται οι ελιές και το αποτέλεσμα αυτών επί των αλλοιογόνων βακτηρίων. Στον παρακάτω Πίνακα 25 φαίνονται οι ελάχιστες τιμές του ισοδύναμου χρόνου θερμικής επεξεργασίας για τα προπιονικά βακτήρια και για τα τέσσερα σχήματα θερμικής επεξεργασίας που μελετήθηκαν. Το αρχικό σχήμα των 10 min στους 70°C ξεπέρασε οριακά τον επιθυμητό ισοδύναμο χρόνο, ενώ το δεύτερο θεωρητικό σχήμα δεν κατάφερε να καλύψει τις ανάγκες του ελάχιστου θερμικού φορτίου με αποτέλεσμα να είναι αναγκαίος ο επιπλέον χρόνος θέρμανσης σε αυτή τη θερμοκρασία. Τέλος, τα σχήματα που εφαρμόζονται στη βιομηχανική πρακτική υπερκαλύπτουν τις ανάγκες θέρμανσης σε θανατηφόρο δράση, όμως γίνεται αντιληπτό ότι θα υπάρχει αντίστοιχη θερμική υποβάθμιση των ποιοτικών χαρακτηριστικών των ελιών.

Πίνακας 25. Αποτελέσματα ισοδύναμου χρόνου για τις τέσσερις περιπτώσεις

Σχήμα θερμικής επεξεργασίας	$PU^{5.25^{\circ}C}_{62.4^{\circ}C}$ (min)
I. 10 min - 70°C	20,0
II. 25 min - 62,4°C	12,6
III. 5-10-5 min - 65-80-60°C	4.522,2
IV. 15 min - 80°C ($T_{br}=65^{\circ}C$)	8.262,4

Πίνακας 26. Αποτελέσματα ισοδύναμου χρόνου της υποβάθμισης της υφής των ελιών και της επί τοις % εναπομείνουσας υφής

Σχήμα θερμικής επεξεργασίας	$F^{28.64^{\circ}C}_{62.4^{\circ}C}$ (min)	Cb%
I. 10 min - 70°C	9,2	94,6
II. 25 min - 62,4°C	19,9	92,0
III. 5-10-5 min - 65-80-60°C	35,7	84,0
IV. 15 min - 80°C ($T_{br}=65^{\circ}C$)	38,9	82,3

Αυτή ακριβώς η αντίστοιχη θερμική υποβάθμιση της υφής των ελιών φαίνεται στον Πίνακα 26, όπου παρουσιάζονται τόσο οι ισοδύναμοι χρόνοι, όσο και η επί τοις % εναπομείνασα από την αρχική υφή των ελιών.

Αξιοσημείωτη είναι η σαφώς μεγαλύτερη θερμική υποβάθμιση της υφής στην οποία υπόκεινται οι ελιές με την δεύτερη θερμική επεξεργασία, σε σχέση με το προτεινόμενο σχήμα, τη στιγμή που δεν κατάφερε να καλύψει τον ελάχιστο ισοδύναμο χρόνο για τον μικροοργανισμό στόχο. Ωστόσο αν και η θερμική υποβάθμιση της υφής για τις βιομηχανικές θερμικές επεξεργασίες είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τις θεωρητικές, η υφή των ελιών δεν μειώνεται σε τέτοια επίπεδα που να προκαλείται πλήρης καταστροφή του ποιοτικού χαρακτηριστικού.

Συνολικά, είναι δυνατόν να σημειωθεί ότι στη βιομηχανική πρακτική ενδέχεται να γίνεται χρήση CaCl_2 με αποτέλεσμα η υφή των ελιών να μην υποβαθμίζεται σε τέτοιο βαθμό, ενώ η θερμική καταστροφή των αλλοιογόνων μικροοργανισμών να είναι διασφαλισμένη, ακόμη και για μεγαλύτερου μεγέθους κονσέρβες, οι οποίες όμως δεν ήταν δυνατό να αναλυθούν στην παρούσα μελέτη λόγω του υπερβολικού χρόνου υπολογισμού στο Fluent, που θα απαιτείτο.

II.3.3.9 Προσομοίωση βιομηχανικής πρακτικής εμπορικής αποστείρωσης

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο II.1.4.4, οι ελιές όλων των τύπων που υπόκεινται σε τεχνητό μαύρισμα με οξείδωση οδηγούνται για συσκευασία χωρίς να ζυμωθούν με γαλακτικά βακτήρια. Η πρακτική αυτή έχει ως συνέπεια το μείγμα ελιών – άλμης να έχει υψηλό pH και να επιτρέπει την ανάπτυξη σποριογόνων βακτηρίων, κατά τη διάρκεια της εναποθήκευσής του στους περιέκτες. Αυτός ο εμπορικός τύπος ελιών, λόγω της χαμηλής οξύτητας, προκαλεί την ανάπτυξη των θερμο-ανθεκτικών σπορίων του βακτηρίου *C. botulinum* και κατά συνέπεια επιβάλλεται η εμπορική αποστείρωσή του. Σύμφωνα με το Διεθνές Συμβούλιο Ελιάς (IOC 2004), ο ελάχιστος ισοδύναμος χρόνος θερμικής επεξεργασίας για τέτοιου τύπου προϊόν είναι $F_0 = 15 \text{ min}$. Εφόσον δεν καθορίζεται το σημείο στο οποίο θα επιτευχθεί ο ισοδύναμος αυτός χρόνος, θεωρήθηκε ότι θα πρέπει να επιτευχθεί στο κρίσιμο σημείο της κονσέρβας. Τέλος επειδή ο παραπάνω εμπορικός τύπος επιτραπέζιων ελιών αναφέρεται σε διάφορες ποικιλίες και μεγέθη ελιών, έγινε προσομοίωση για τις ελιές “καλαμών” μικρού και μεγάλου μεγέθους και για τις “κονσερβολιές”.

Για την επίτευξη της εμπορικής αποστείρωσης στις κονσερβοποιημένες ελιές, εφαρμόστηκε θέρμανση στους $121,11^\circ\text{C}$ για συγκεκριμένες χρονικές περιόδους. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι η θέρμανση στους $121,11^\circ\text{C}$ δεν μπορεί να γίνει σε

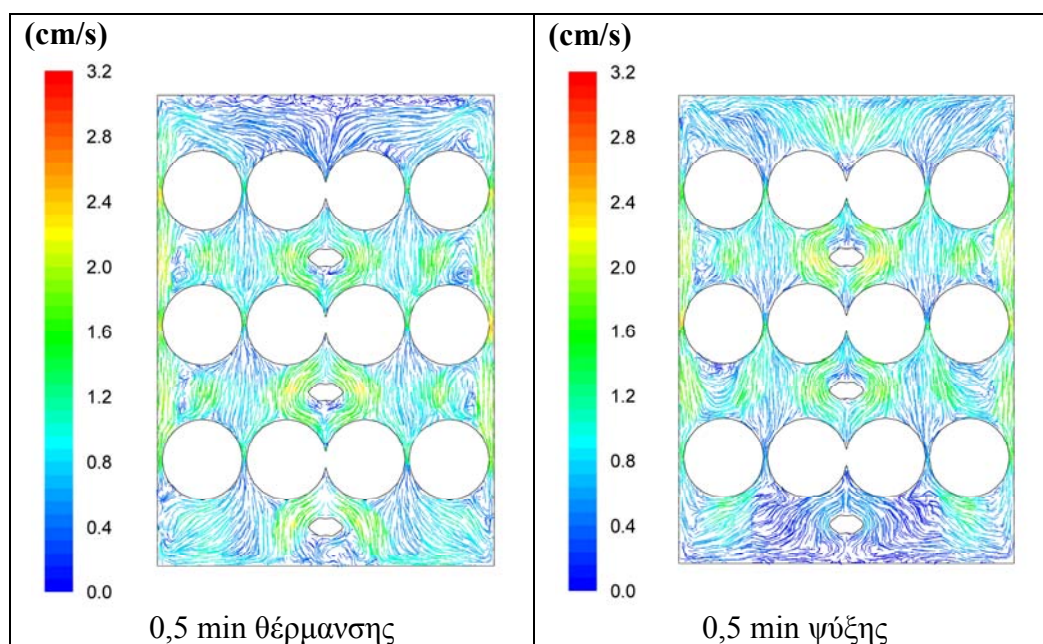
ατμοσφαιρική πίεση με θερμό νερό (το σημείο βρασμού του νερού σε ατμοσφαιρική πίεση είναι 100°C), με συνέπεια η θέρμανση να πραγματοποιείται με κορεσμένους υδρατμούς υπό πίεση. Η χρήση ατμού για τη θέρμανση κονσερβών πραγματοποιείται σε κλιβάνους ελεγχόμενης πίεσης. Στην περίπτωση συμπίκνωσης υδρατμών ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ ατμού και εξωτερικού τοιχώματος των κονσερβών αποκτά πολύ υψηλές τιμές της τάξεως των 5.000 W/m²·°C (Γιαννιώτης, 2011). Αυτό έχει σαν συνέπεια να μην απαιτείται η μελέτη της επίδρασης του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας επί της θερμικής επεξεργασίας, γιατί όπως παρατηρήθηκε στην παράγραφο II.3.3.7 για τιμές του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας πάνω από 1.500 W/m²·°C η επίδραση είναι ελάχιστη. Μετά από αυτή την παρατήρηση όλες οι παρακάτω προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με άπειρο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας.

α) Περίπτωση α (μεγάλες ελιές καλαμών)

Οι ελιές της ποικιλίας “καλαμών” μεγάλου μεγέθους χρησιμοποιήθηκαν στην περίπτωση “α” και η γεωμετρία επιλύθηκε με τις ίδιες οριακές συνθήκες με την παράγραφο II.2.5.2.1 με τη μόνη διαφορά ότι η θέρμανση πραγματοποιήθηκε στους 121,11°C για 45 min και η ψύξη στους 20°C για 15 min. Η περίπτωση “α” μετά τη θερμική επεξεργασία με θέρμανση για 45 min στους 121,11°C, όπως προτείνει ο Lopez (1987) βρέθηκε ότι έχει πολύ μεγαλύτερο θερμικό αποτέλεσμα επί των αλλοιογόνων μικροοργανισμών. Έχοντας ως δεδομένη τη θερμική διείδυση στην αργότερα θερμαινόμενη ζώνη, μέσω της “Formula method” βρέθηκε ότι ο επιθυμητός ισοδύναμος χρόνος για τις συγκεκριμένες διαστάσεις κονσερβας, μπορεί να επιτευχθεί με θέρμανση στην ίδια θερμοκρασία για 25 min και έπειτα με ψύξη στους 20°C.

Τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας από το θερμαντικό μέσο προς την κονσερβία και το περιεχόμενό της είναι ίδια με αυτά που περιγράφηκαν στην παράγραφο II.3.3.5, η μόνη διαφορά παρατηρείται στην διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ θερμαντικού μέσου και εσωτερικού της κονσερβας. Η αύξηση αυτής της διαφοράς θερμοκρασίας είναι υπεύθυνη για την αύξηση στη ταχύτητα του ρευστού τόσο κατά τη διάρκεια του κύκλου θέρμανσης, όσο και κατά τη διάρκεια του κύκλου ψύξης. Όμοια όμως με τις προηγούμενες θερμικές επεξεργασίες που εφαρμόστηκαν παρατηρήθηκε ότι όσο αυτή η διαφορά θερμοκρασίας μειώνεται με το πέρας του χρόνου τόσο μειώνεται και η ταχύτητα του ρευστού στο πεδίο ροής.

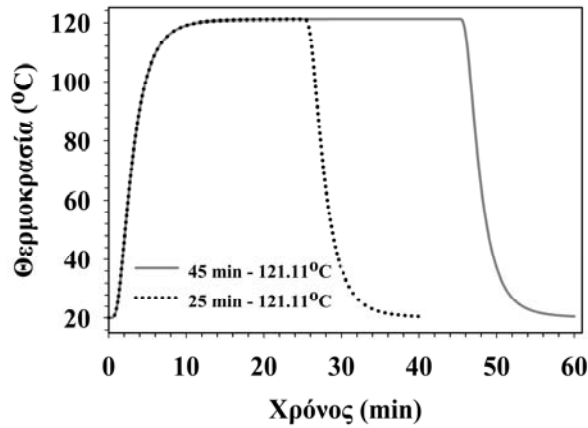
Η ροή της άλμης κατά τη διάρκεια του κύκλου θέρμανσης και ψύξης ακολουθεί την ίδια πορεία με τις περιπτώσεις της ήπιας θερμικής επεξεργασίας. Απλή αναφορά θα γίνει στο γεγονός ότι οι μέγιστες τιμές της ταχύτητας παρατηρούνται στην έναρξη της θέρμανσης και της ψύξης, ενώ εντοπίζονται σε περιοχές που έχουν μικρό άνοιγμα (χώροι ανάμεσα σε ελιές ή μεταξύ ελιών και κονσέρβας), με αποτέλεσμα το υγρό να συμπιέζεται για να κινηθεί και έτσι να έχει αυξημένη ταχύτητα σε σχέση με τα υπόλοιπα σημεία της γεωμετρίας.



Εικόνα 47. Προφίλ της ταχύτητας της άλμης μετά από ½ min από την έναρξη της θέρμανσης και της ψύξης αντίστοιχα

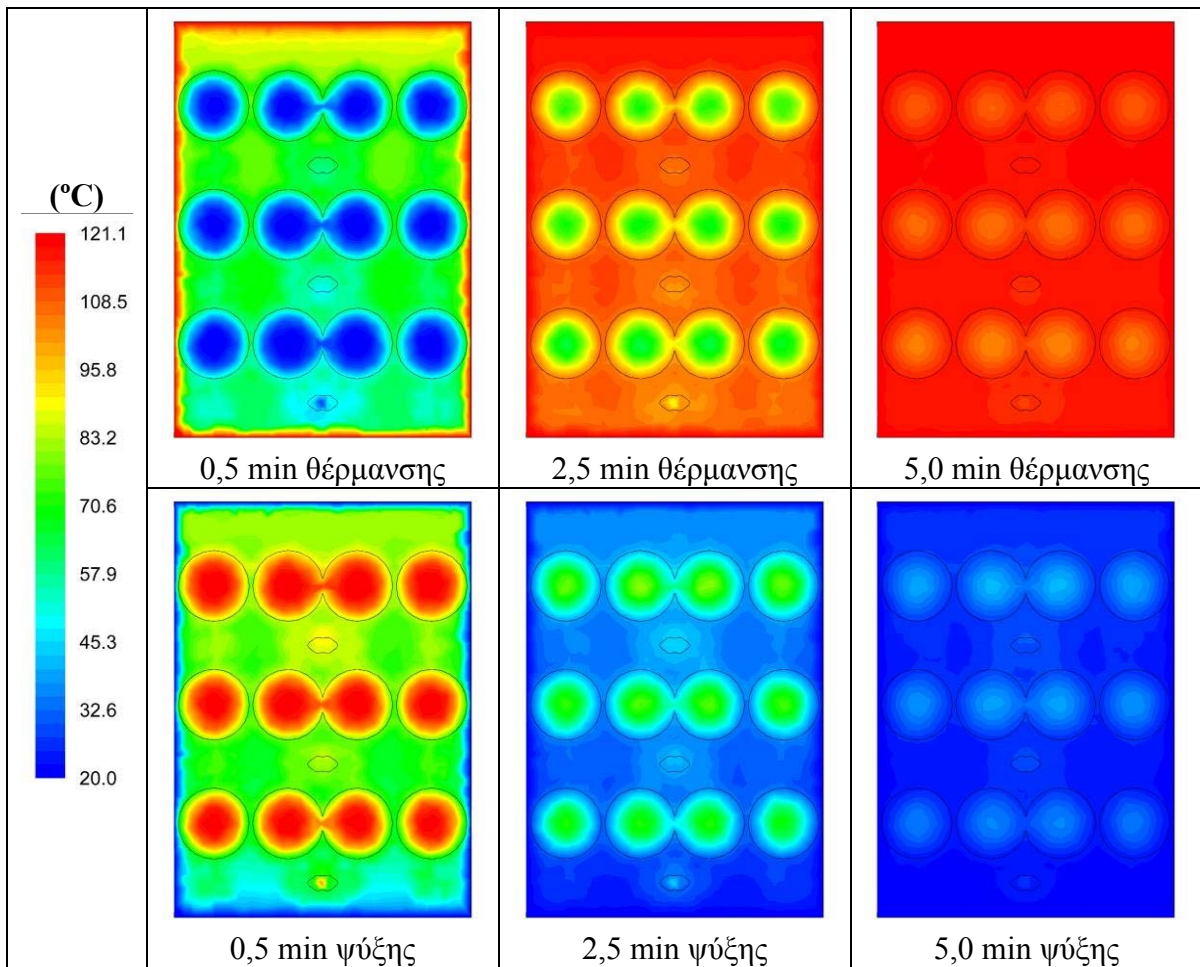
Οι μέγιστες τιμές της ταχύτητας, που επιτυγχάνεται 0,5 min μετά την έναρξη της θέρμανσης είναι 4,597 cm/s και 3,206 cm/s 0,5 min μετά την έναρξη της ψύξης. Τέτοιου είδους περιοχές με αυξημένη την ταχύτητα του ρευστού φαίνονται στις εικόνες κατανομής της ταχύτητας (Εικόνα 47).

Στο Διάγραμμα 47 παρουσιάζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας στο αργότερα θερμαινόμενο σημείο της γεωμετρίας κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης της θερμικής επεξεργασίας. Εμφανής είναι η διαφορά στο χρόνο της θέρμανσης μεταξύ των δύο σχημάτων εμπορικής αποστείρωσης ήτοι 121,11°C για 45 min και στην ίδια θερμοκρασία για 25 min.



Διάγραμμα 47. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ για τις δύο θερμικές επεξεργασίες

Επίσης σημαντικό είναι το γεγονός ότι μετά το 15^ο min της θερμικής επεξεργασίας η αργότερα θερμαινόμενη ζώνη αποκτά τη θερμοκρασία του θερμαντικού μέσου, ενώ με την έναρξη της ψύξης η αργότερα θερμαινόμενη ζώνη αντιλαμβάνεται πολύ γρήγορα την θερμοκρασιακή μεταβολή και μετά το πέρας μερικών δευτερολέπτων αρχίζει η πτωτική πορεία της θερμοκρασίας.



Εικόνα 48. Κατανομή της θερμοκρασίας σε τομή της κονσέρβας για διάφορες χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας

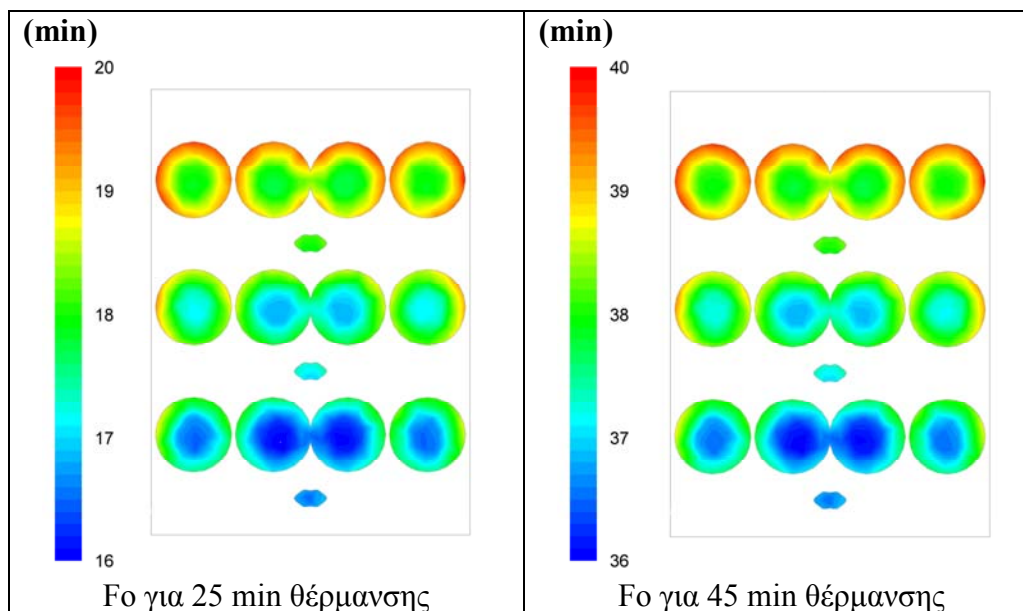
Εκτός από τη θερμοκρασιακή μεταβολή στην αργότερα θερμαινόμενη ζώνη, στην Εικόνα 48 παρουσιάζεται και η θερμοκρασιακή κατανομή σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές του κύκλου θέρμανσης – ψύξης στην κάθετη τομή της κονσέρβας. Από τις παρακάτω εικόνες φαίνεται η ταχύτητα της θερμικής διείσδυσης, όπου για παράδειγμα μετά το 5^ο min της θέρμανσης δεν μπορεί να διακριθεί η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ άλμης και εσωτερικού των ελιών. Χαρακτηριστική είναι η σχετική θερμοκρασιακή ομοιομορφία στο εσωτερικό των ελιών, πράγμα το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα και την ομοιομορφία στο θερμικό αποτέλεσμα επί του μικροβιακού αλλοιογόνου φορτίου.

Κατά τη διάρκεια του κύκλου ψύξης παρατηρείται η θερμή άλμη να συσσωρεύεται κοντά στην οροφή της κονσέρβας, ενώ όπως και στη θέρμανση η πτώση της θερμοκρασίας της άλμης και των ελιών είναι αρκετά γρήγορη. Από τις εικόνες μπορεί να παρατηρηθεί ότι μετά το 5^ο min της ψύξης η υψηλότερη θερμοκρασία εντός της κονσέρβας δεν ξεπερνά τους 50°C. Η αργότερα θερμαινόμενη ζώνη παραμένει στο ίδιο σημείο με την ήπια θερμική επεξεργασία, ενώ μετά το 15^ο min της θέρμανσης δεν υφίσταται ουσιαστικά αργότερα θερμαινόμενη ζώνη, μιας και όλη η κονσέρβα έχει αποκτήσει τη θερμοκρασία του θερμαντικού μέσου.

Στη συνέχεια υπολογίστηκε ο ισοδύναμος χρόνος F_0 για τη θερμική επεξεργασία των 45 min θέρμανσης. Η κατανομή σε κάθετη τομή του ισοδύναμου χρόνου F_0 φαίνεται στην Εικόνα 49. Υπολογίζοντας ότι κατά τη θέρμανση 45 min ο ελάχιστος ισοδύναμος χρόνος ήταν 36 min γίνεται αντιληπτό ότι η θερμική επεξεργασία που προτείνει ο Lopez (1987) είναι υπεραρκετή και πιθανόν να προκαλεί καταστροφή στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των ελιών. Για αυτό το λόγο έγινε προσομοίωση σε θέρμανση στους 121,11°C για 25 min, χρόνος ο οποίος υπολογίστηκε ότι θα προκαλέσει το ελάχιστο επιθυμητό θερμικό αποτέλεσμα. Πραγματικά μετά την επίλυση βρέθηκε ότι ο ελάχιστος ισοδύναμος χρόνος ήταν 16 min. Για την δεδομένη θερμική επεξεργασία το ζεύγος θερμοκρασίας – χρόνου προκάλεσε ένα σχεδόν ομοιόμορφο θερμικό αποτέλεσμα επί των αλλοιογόνων μικροοργανισμών. Επίσης ομοιόμορφο αποτέλεσμα του ισοδύναμου χρόνου F_0 παρατηρείται και κατά τη θέρμανση για 45 min στους 121,11°C.

Η κατανομή αυτή του ισοδύναμου χρόνου δεικνύει ότι θα υπάρχει και ανάλογη ομοιομορφία επί της υποβάθμισης των ποιοτικών χαρακτηριστικών των ελιών. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να επισημανθεί το γεγονός ότι για τις ελιές που έχουν υποστεί γαλακτική ζύμωση και είναι υψηλής οξύτητας προϊόν αρκεί μια πολύ ήπια θερμική επεξεργασία, ενώ για τις μη ζυμωμένες ελιές, που απαιτείται μια έντονη

θερμική επεξεργασία όπως η παραπάνω, η θερμική υποβάθμιση των ποιοτικών χαρακτηριστικών τους είναι πολύ μεγαλύτερη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το τελικό προϊόν ενώ διαφημίζεται ως θρεπτικό, να έχει δεχτεί ένα πολύ μεγάλο θερμικό φορτίο και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά να έχουν καταστραφεί.

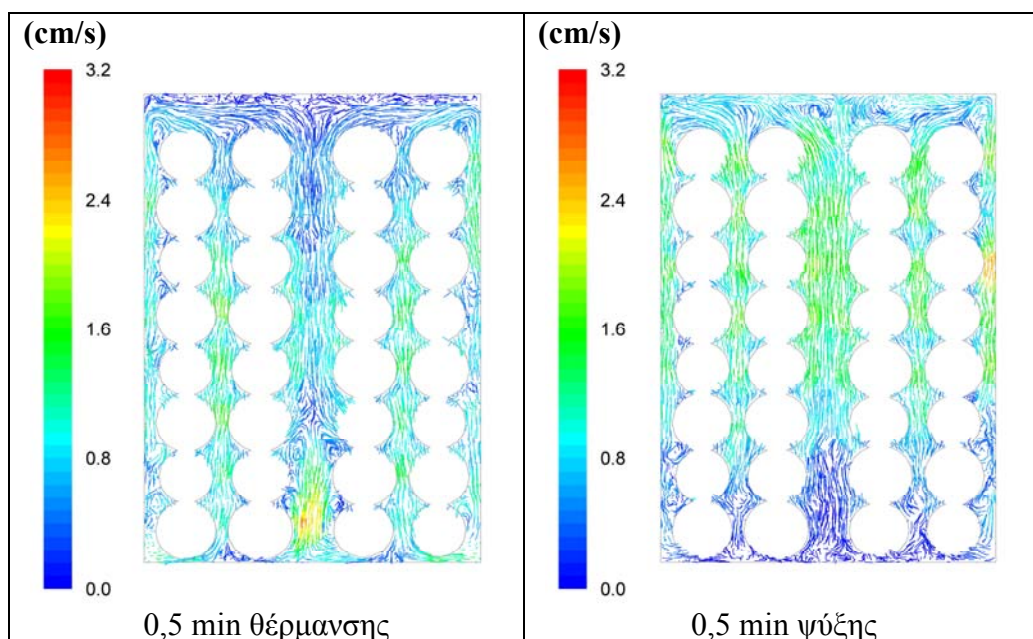


Εικόνα 49. Κατανομή της τιμής Fo σε τομή της κονσέρβας στο τέλος των δύο θερμικών επεξεργασιών

β) Περίπτωση β (μικρές ελιές καλαμών)

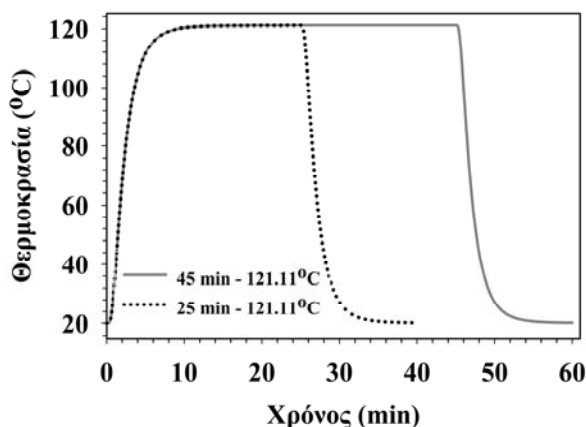
Ομοίως με την περίπτωση “α” έγινε προσομοίωση της θερμικής επεξεργασίας και στη γεωμετρία με τις ελιές “καλαμών” μικρού μεγέθους. Αρχικά επιλύθηκε με θερμοκρασία θέρμανσης 121,11°C για 45 min και έπειτα επιλύθηκε για τον χρόνο που βρέθηκε στην προηγούμενη περίπτωση, δηλαδή για χρόνο θέρμανσης 25 min. Κατά τη διάρκεια της επίλυσης οι μέγιστες τιμές της ταχύτητας του ρευστού κυμάνθηκαν στα ίδια επίπεδα με αυτά της περίπτωσης “α”.

Η κύρια διαφορά ήταν ότι οι μέγιστες τιμές της ταχύτητας της άλμης εντοπίστηκαν στον κεντρικό άξονα της κονσέρβας κατά τη θέρμανση και ανάμεσα στις ελιές και το τοίχωμα της κονσέρβας κατά την ψύξη. Επίσης, διαφορά παρατηρήθηκε στο μέγεθος της ταχύτητας σε σχέση με την ήπια θέρμανση, που όπως ήταν φυσικό υπήρχε μια μικρή αύξηση λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας μεταξύ θερμαντικού μέσου και εσωτερικού της κονσέρβας. Οι παραπάνω παρατηρήσεις φαίνονται στην εικόνα κάθετης τομής της Εικόνας 50, όπου παρουσιάζεται η διεύθυνση και το μέγεθος της ταχύτητας της άλμης 0,5 min μετά την έναρξη της θέρμανσης και της ψύξης αντίστοιχα.



Εικόνα 50. Προφίλ της ταχύτητας της άλμης μετά από ½ min από την έναρξη της θέρμανσης και της ψύξης αντίστοιχα

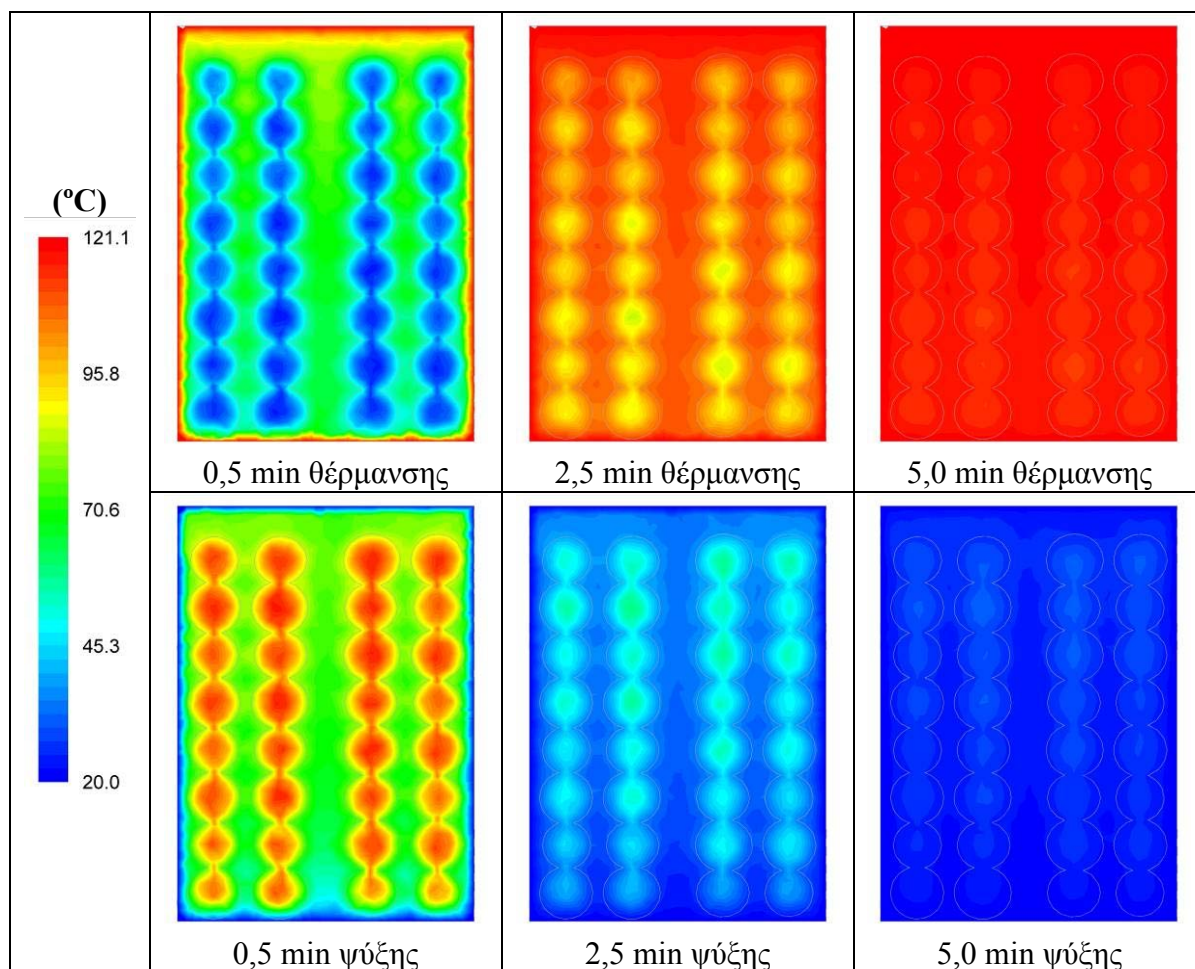
Η μέγιστη τιμή της ταχύτητας της άλμης μετά από 0,5 min θέρμανσης ήταν 4,155 cm/s, ενώ μετά από 0,5 min ψύξης ήταν 4,109 cm/s.



Διάγραμμα 48. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ για τις δύο θερμικές επεξεργασίες

Επίσης λόγω του μικρότερου μεγέθους των ελιών ήταν ευκολότερη η θερμική διείσδυση. Αυτό φαίνεται στο Διάγραμμα 48 θερμοκρασιακής μεταβολής της αργότερα θερμαινόμενης ζώνης για τις δύο μεγάλης έντασης θερμικές επεξεργασίες. Σε σύγκριση με τις ελιές “καλαμών” μεγάλου μεγέθους (Διάγραμμα 47) φαίνεται ότι τόσο η θέρμανση, όσο και η ψύξη των ελιών μικρού μεγέθους γίνεται ταχύτερα. Κάτι τέτοιο μπορεί να παρατηρήσει κανείς και από τις εικόνες θερμοκρασιακής κατανομής σε κάθετη τομή της κονσέρβας για τη γεωμετρία “β”, που παρουσιάζονται παρακάτω (Εικόνα 51).

Από την πρώτη κιόλας εικόνα (για 0,5 min μετά την έναρξη της θέρμανσης) φαίνεται ότι οι μικρές ελιές θερμαίνονται γρηγορότερα σε σχέση με τις ελιές μεγάλου μεγέθους (Εικόνα 48). Επίσης και σε αυτή την περίπτωση η αργότερα θερμαινόμενη ζώνη εντοπίζεται στο ίδιο σημείο με αυτή που εντοπίστηκε στην ήπια θερμική επεξεργασία. Μια σημαντική διαφορά με την αντίστοιχη θερμική επεξεργασία της περίπτωσης “α” είναι η λιγότερο ομοιόμορφη θέρμανση των ελιών.

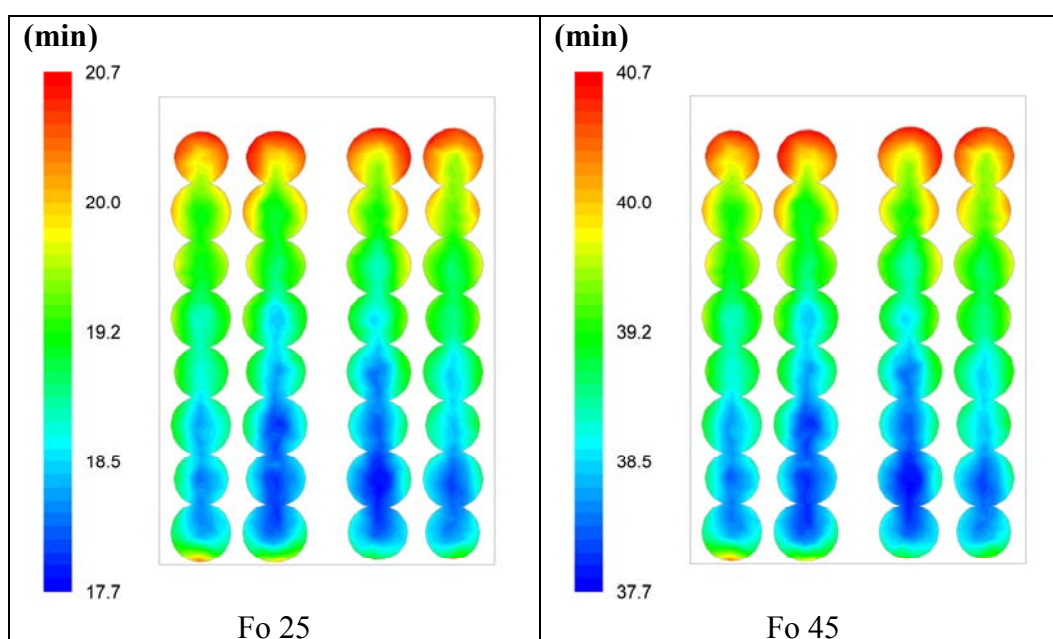


Εικόνα 51. Κατανομή της θερμοκρασίας σε τομή της κονσέρβας για διάφορες χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας

Από τις εικόνες της θερμοκρασιακής κατανομής φαίνεται ότι οι ελιές στην οροφή της κονσέρβας είναι ελαφρώς πιο θερμές σε σχέση με αυτές των στρωμάτων κοντά στον πυθμένα για την περίοδο της θέρμανσης. Για την περίοδο της ψύξης η θερμοκρασιακή κατανομή είναι αντίστροφη. Οι ελιές των στρωμάτων κοντά στην οροφή της κονσέρβας παραμένουν πιο θερμές σε σχέση με αυτές των κατωτέρων στρωμάτων. Αυτό θα περίμενε κανείς να έχει αποτέλεσμα επί του ισοδύναμου χρόνου F_0 , που υπολογίστηκε για τις δύο επιλυόμενες θερμικές επεξεργασίες. Η διαφορά στον υπολογιζόμενο ισοδύναμο χρόνο φαίνεται στην Εικόνα 52, που δείχνει ότι οι

ελιές κοντά στην οροφή έχουν δεχτεί υψηλότερο θερμικό φορτίο σε σχέση με τις ελιές της δεύτερης στρώσης από τον πυθμένα.

Τέλος φαίνεται ότι και σε αυτή την περίπτωση η θερμική επεξεργασία των 25 min στους 121,11°C είναι αρκετή, έτσι ώστε ο ισοδύναμος χρόνος F_0 να ξεπεράσει τον στόχο που θέτει το Διεθνές Συμβούλιο Ελιάς. Έχοντας υπόψη την κατανομή του ισοδύναμου χρόνου F_0 γίνεται κατανοητό ότι θα υπάρχει μια αντίστοιχη κατανομή στη θερμική υποβάθμιση της υφής και των υπολοίπων ποιοτικών χαρακτηριστικών των ελιών.



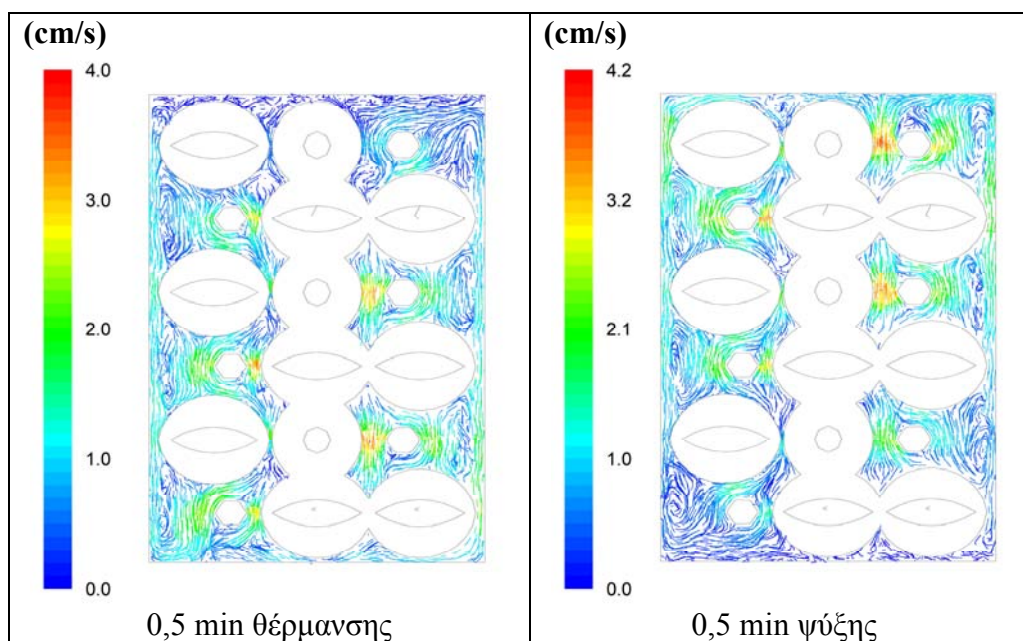
Εικόνα 52. Κατανομή της τιμής F_0 σε τομή της κονσέρβας στο τέλος των δύο θερμικών επεξεργασιών

γ) Περίπτωση γ (κονσερβολιές)

Στην περίπτωση στην οποία ο περιέκτης γεμίστηκε με ελιές της ποικιλίας “κονσερβολιά” επιλύθηκαν οι ίδιες θερμικές επεξεργασίες με στόχο τη θανάτωση των спорίων του βακτηρίου *C. botulinum*. Η γεωμετρία και όλες οι οριακές συνθήκες ήταν ίδιες με αυτές της ήπιας θερμικής επεξεργασίας με τη μόνη διαφορά ότι η θέρμανση πραγματοποιήθηκε σε θερμοκρασία 121,11°C για 45 και 25 min. Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις “α” και “β”, έγινε ανάλυση της ταχύτητας της άλμης, της θερμοκρασιακής κατανομής εντός της κονσέρβας και του ισοδύναμου χρόνου F_0 της θερμικής επεξεργασίας.

Κατά τη διάρκεια του κύκλου θέρμανσης – ψύξης παρατηρήθηκαν μεγαλύτερες ταχύτητες στην άλμη τόσο σε σχέση με τις αντίστοιχες εμπορικές αποστειρώσεις των άλλων γεωμετριών, όσο και με την ίδια περίπτωση, αλλά σε προσομοίωση ήπιας

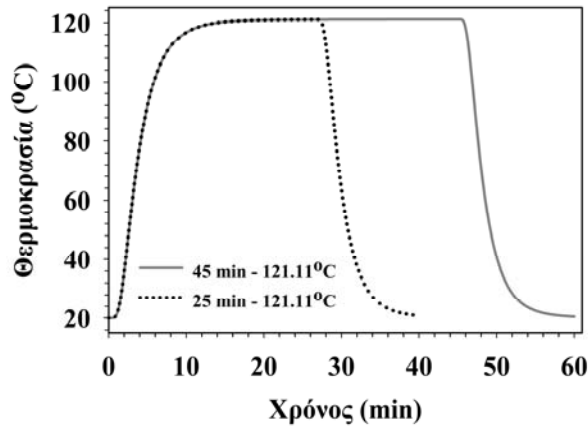
θερμικής επεξεργασίας. Στην παρακάτω Εικόνα 53 φαίνεται η διεύθυνση και το μέγεθος της ταχύτητας του ρευστού σε κάθετη τομή του πεδίου ροής. Χαρακτηριστικές είναι οι περιοχές που παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές της ταχύτητας της άλμης. Η μέγιστη τιμή της ταχύτητας της άλμης μετά από 0,5 min θέρμανσης ήταν 4,271 cm/s, ενώ μετά από 0,5 min ψύξης ήταν 4,237 cm/s.



Εικόνα 53. Προφίλ της ταχύτητας της άλμης μετά από 0,5 min από την έναρξη της θέρμανσης και της ψύξης αντίστοιχα

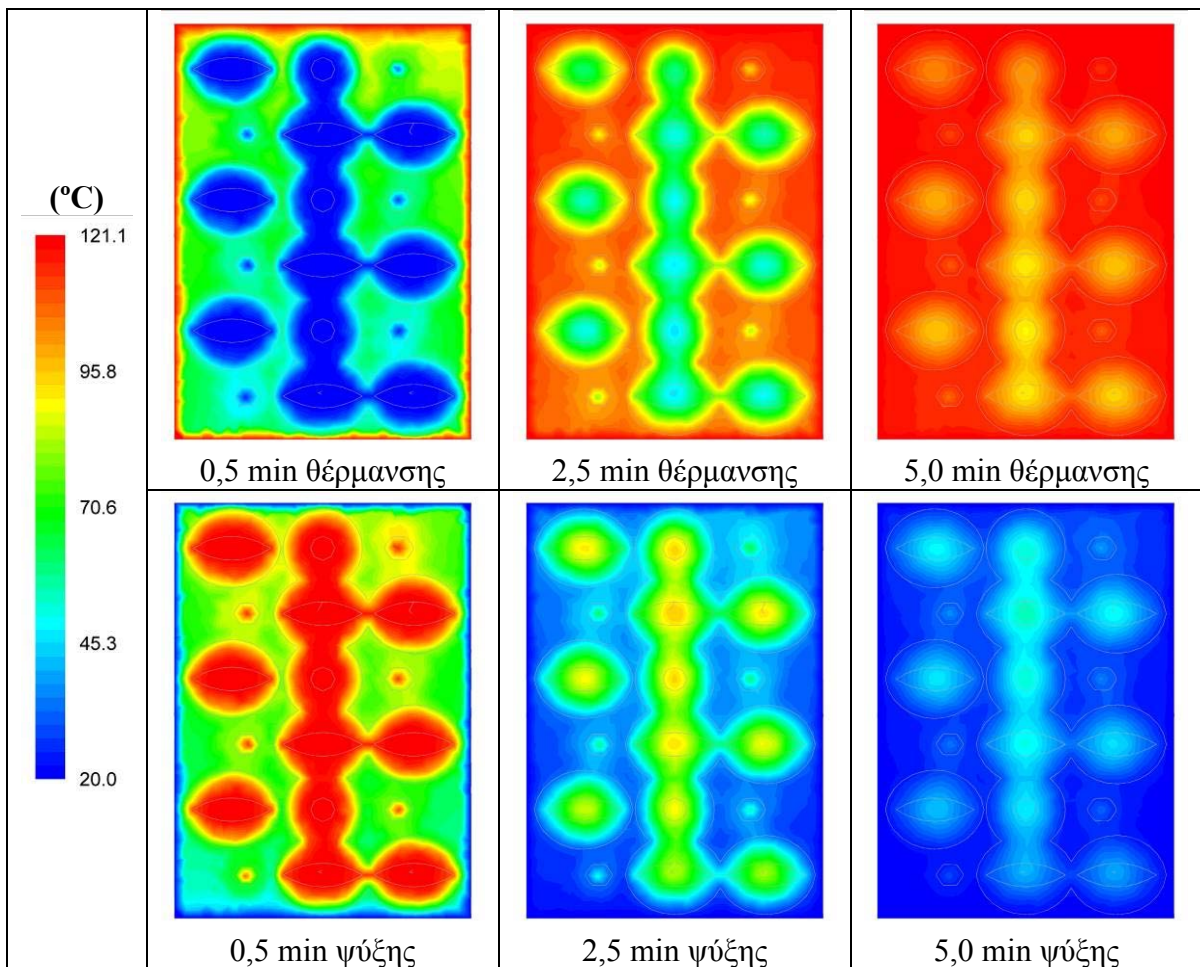
Επίσης μετά από 0,5 min από την έναρξη της ψύξης φαίνεται ότι η ταχύτητα είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την έναρξη της θέρμανσης. Επί προσθέτως η κίνηση της άλμης κατά τη διάρκεια της θέρμανσης και της ψύξης ακολουθεί την ίδια πορεία με αυτή που αναλύθηκε στην ανάλυση της ήπιας θερμικής επεξεργασίας για την ίδια γεωμετρία.

Στο Διάγραμμα 49 παρουσιάζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας στην αργότερα θερμαινόμενη ζώνη σε σχέση με το χρόνο της θερμικής επεξεργασίας. Συγκρίνοντας τη μεταβολή αυτή με τα αντίστοιχα διαγράμματα 47 και 48 φαίνεται ότι η αργότερα θερμαινόμενη ζώνη θερμαίνεται και ψύχεται με μια μικρή υστέρηση σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις. Όμως είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι μετά το 15^ο min της θέρμανσης η θερμοκρασία της αργότερα θερμαινόμενης ζώνης και κατ' επέκταση ολόκληρης της κονσέρβας γίνεται ίση με την θερμοκρασία του θερμαντικού μέσου.



Διάγραμμα 49. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ για τις δύο θερμικές επεξεργασίες

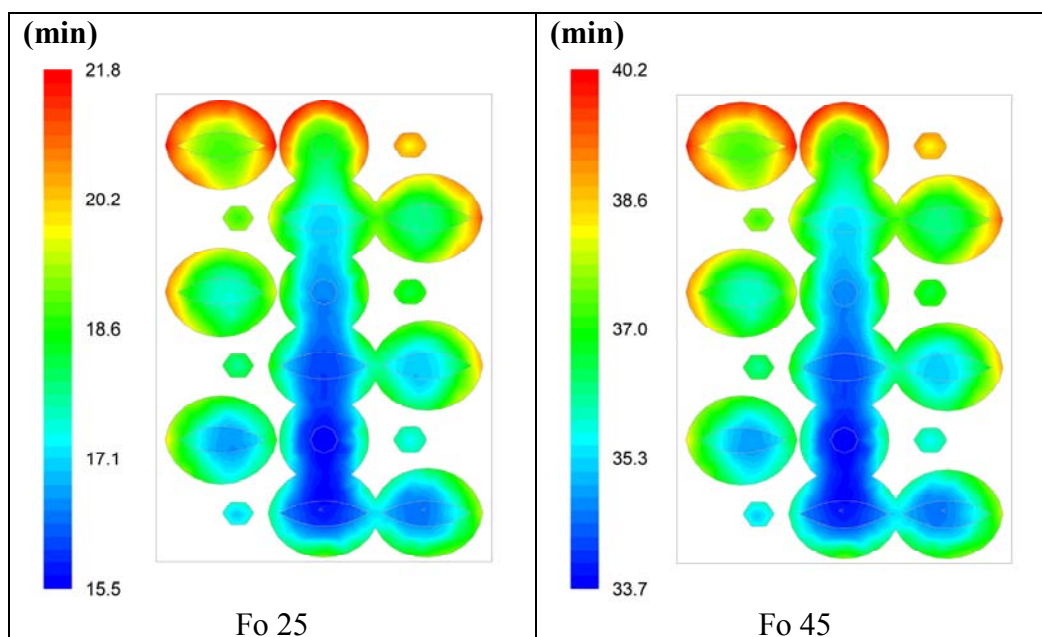
Όπως και στη θέρμανση το ίδιο και στην ψύξη η πτώση της θερμοκρασίας υστερεί τόσο για τη θερμική επεξεργασία των 45 min, όσο και για αυτή των 25 min σε σχέση με τις περιπτώσεις “α” και “β”. Το γεγονός αυτό φαίνεται ακόμα καλύτερα από τις εικόνες κατανομής της θερμοκρασίας σε κάθετη τομή της κονσέρβας, για συγκεκριμένους χρόνους του κύκλου θέρμανσης – ψύξης (Εικόνα 54).



Εικόνα 54. Κατανομή της θερμοκρασίας σε τομή της κονσέρβας για διάφορες χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας

Όμως εκτός από την υστέρηση στη θέρμανση των ελιών, αξιοσημείωτη είναι και η θερμοκρασιακή ομοιομορφία στο εσωτερικό των ελιών. Έτσι για κάθε χρονική στιγμή φαίνεται ότι δεν υπάρχει μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος στις ελιές. Αντιθέτως στην άλμη παρατηρείται ότι πρέπει να ξεπεραστούν τα 5 min θέρμανσης, έτσι ώστε να αποκτήσει το ρευστό τη θερμοκρασία του θερμαντικού μέσου. Αντίστοιχα και στην ψύξη παρατηρούνται τα ίδια φαινόμενα. Δηλαδή στις θερμές ελιές αργεί να μειωθεί η θερμοκρασία σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις και ακόμα μετά από 5 min ψύξης η άλμη δεν έχει αποκτήσει τη θερμοκρασία του ψυκτικού μέσου. Αναλύοντας περαιτέρω τα δεδομένα που παρελήφθησαν από το Fluent βρέθηκε ότι η αργότερα θερμαινόμενη ζώνη δεν μετατοπίστηκε σε σχέση με τη θέση που είχε στην περίπτωση της ήπιας θερμικής επεξεργασίας και ήταν ίδια τόσο στη θέρμανση των 45 min, όσο και στη θέρμανση των 25 min.

Εκτός όμως από την θερμοκρασιακή κατανομή στο εσωτερικό της κονσέρβας μελετήθηκε και ο ισοδύναμος χρόνος F_0 που επετεύχθη. Ήδη από την περίπτωση της ήπιας θερμικής επεξεργασίας και της μελέτης του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας βρέθηκε ότι η γεωμετρία “γ” έχει μεγαλύτερες ανάγκες σε θερμικό φορτίο για να επιτύχει το ίδιο θερμικό αποτέλεσμα επί του εκάστοτε μικροοργανισμού στόχου. Κατά συνέπεια ήταν αναμενόμενο ότι ο ισοδύναμος χρόνος θα ήταν μικρότερος για δεδομένη θερμοκρασία και χρόνο της θερμικής επεξεργασίας. Κάτι τέτοιο επαληθεύτηκε από την Εικόνα 55 της κατανομής του ισοδύναμου χρόνου F_0 . Από τις δύο θερμικές επεξεργασίες (25 και 45 min) φαίνεται ξεκάθαρα ότι το θερμικό αποτέλεσμα επί των σπορίων του βακτηρίου *C. botulinum* είναι μικρότερο σε σχέση με τις δύο προηγούμενες περιπτώσεις. Επίσης φαίνεται μεγαλύτερο εύρος στον ισοδύναμο χρόνο σε σχέση με τη θέση των ελιών. Οι ελιές στα ανώτερα στρώματα δέχτηκαν θερμικό φορτίο με ισοδύναμο χρόνο 19 – 22 min τη στιγμή, που τα στρώματα ελιών στον πυθμένα της κονσέρβας δέχτηκαν 15,5 – 17,5 min. Ομοίως και για την περίπτωση των 45 min θέρμανσης παρατηρήθηκε η ίδια κατανομή με αντίστοιχο όμως εύρος τιμών. Ακόμα κατά τη σύγκριση του κρίσιμου σημείου της εν λόγω θερμικής επεξεργασίας σε σχέση με αυτή της ήπιας βρέθηκε ότι δεν υπήρχε μεταβολή ως προς τη θέση του. Τέλος είναι φανερό ότι η ανομοιομορφία, που παρατηρείται στον ισοδύναμο χρόνο F_0 αντιστοιχεί και σε ανάλογη ανομοιομορφία στην θερμική υποβάθμιση της υφής και των υπολοίπων ποιοτικών χαρακτηριστικών των ελιών.



Εικόνα 55. Κατανομή της τιμής Fo σε τομή της κονσέρβας στο τέλος των δύο θερμικών επεξεργασιών

Π.3.3.12 Επιβεβαίωση του μοντέλου ως προς το θανατηφόρο αποτέλεσμα επί των μικροοργανισμών

Η γεωμετρία με τις κονσερβολιές επιλύθηκε θεωρητικά για διάφορους χρόνους θέρμανσης και για 2 ελιές εντός της κονσέρβας υπολογίστηκε ο μέσος ισοδύναμος χρόνος $PU_{62.4^{\circ}C}^{5.25^{\circ}C}$.

Πίνακας 27. Παρουσίαση υπολογιζόμενου ισοδύναμου χρόνου και μικροβιολογικών αναλύσεων

Χρόνος θέρμανσης (min)	$PU_{62.4^{\circ}C}^{5.25^{\circ}C}$ (min)		CFU _{γαλακτικών} (log/g)		CFU _{ζυμών} (log/g)	
	Πάνω ελιά	Κάτω ελιά	Πάνω ελιά	Κάτω ελιά	Πάνω ελιά	Κάτω ελιά
0	0	0	5,4-6,1	5,4-6,1	4,7-4,9	4,7-4,9
5	2,41	0,36	4,4-4,9	4,5-5,0	2,6-3,4	3,7-3,9
7	14,27	3,53	limit-2,3	3,0-4,3	limit-1,0	2,0-2,3
8	25,80	7,89	limit	2,7-4,1	limit	limit-3,5
9	41,01	14,97	limit	limit-2,0	limit	limit
10	59,34	25,03	limit	limit	limit	limit
12	102,79	53,61	limit	limit	limit	limit

όπου “limit”: το αποτέλεσμα ήταν κάτω από το όριο ανίχνευσης

Οι περιοχές που υπολογίστηκε ο ισοδύναμος χρόνος ήταν δύο ελιές που βρίσκονταν στον κεντρικό άξονα της κονσέρβας, όμως η μία ήταν στον πυθμένα και η άλλη στην οροφή της κονσέρβας. Στον Πίνακα 27 παρουσιάζονται οι χρόνοι θέρμανσης στους

70°C και οι αντίστοιχες τιμές $PU_{62.4^{\circ}C}^{5.25^{\circ}C}$. Στον ίδιο Πίνακα 27 φαίνονται και οι τιμές CFU γαλακτικών βακτηρίων και ζυμών για τις δύο αυτές ελιές, όπως προσδιορίστηκαν πειραματικά για τους αντίστοιχους χρόνους θέρμανσης της κονσέρβας με κονσερβολιές με διαστάσεις και διάταξη ίδια με τη θεωρητική περίπτωση “γ”.

Βάση των παραπάνω αποτελεσμάτων φαίνεται ότι σε τιμές $PU_{62.4^{\circ}C}^{5.25^{\circ}C}$ κοντά στα 15min ο μικροοργανισμός στόχος (εν προκειμένω τα γαλακτικά βακτήρια) θανατώνεται και έτσι επιβεβαιώνεται ο ορισμός των 15 min από το Διεθνές Συμβούλιο Ελιάς (IOC 2004) ως ο αποδεκτός ισοδύναμος χρόνος θερμικής επεξεργασίας για τις ζυμωμένες ελιές σε άλμη.

Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο που εξάγεται από τα αποτελέσματα είναι ότι στην ανώτερη ελιά οι μικροοργανισμοί θανατώνονται γρηγορότερα σε σχέση με αυτή που βρίσκεται κοντά στον πυθμένα της κονσέρβας, όπως φαίνεται από τα πειραματικά αποτελέσματα. Σε όλα τα αποτελέσματα του θεωρητικού μοντέλου, που περιγράφηκαν μέχρι τώρα ήταν χαρακτηριστικό ότι η θερμή άλμη συσσωρεύεται στην οροφή της κονσέρβας και έτσι προκαλεί μεγαλύτερη θερμική θανάτωση στους μικροοργανισμούς, που βρίσκονται στην ανώτερη στρώση ελιών. Η θερμοκρασιακή κατανομή αποδείκνυε το γεγονός αυτό, ενώ και η μικροβιολογική ανάλυση έρχεται να επιβεβαιώσει το συγκεκριμένο ισχυρισμό.

Στην βιομηχανική πρακτική είναι δεδομένο ότι δεν επιβιώνει κανένα κύτταρο βακτηρίου ή ζύμης, μιας και οι ισοδύναμοι χρόνοι είναι πολύ μεγαλύτεροι, όπως φαίνεται στην παράγραφο II.3.3.8 (Πίνακας 25).

Κεφάλαιο III. Θερμική επεξεργασία κονσερβοποιημένων ροδάκινων

III.1 Εισαγωγικά

III.1.1 Το ροδάκινο

Το ροδάκινο είναι ένα φρούτο που προέρχεται από ένα οπωροφόρο δένδρο, τη ροδακινιά με μεγάλη εξάπλωση στις περιοχές της εύκρατης ζώνης. Στην Ελλάδα οι ροδακινιές είναι ιδιαίτερα παραγωγικά δένδρα και παράγουν υψηλής ποιότητας καρπούς. Σαν καρπός το ροδάκινο είναι πλούσιο σε θρεπτικές ουσίες. Τα ροδάκινα συγκομίζονται κατά τους μήνες Ιούλιο, Αύγουστο και Σεπτέμβριο και καταναλώνονται νωπά ή επεξεργασμένα (κομπόστα, μαρμελάδα ή χυμός) (Layne 2008, Ποντίκης 1996).

III.1.2 Βοτανική ταξινόμηση

Η ροδακινιά είναι ένα φυλλοβόλο δένδρο της οικογένειας Rosaceae και συγκεκριμένα σύμφωνα με τη Συστηματική Βοτανική, ονομάζεται *Prunus persica*. Ο καρπός της ροδακινιάς είναι δρύπη, σχήματος σφαιρικού και έχει μια χαρακτηριστική κοιλιακή ραφή. Οι διάφορες ποικιλίες της ροδακινιάς διαφέρουν στο χρώμα του καρπού (λευκόσαρκα ή κιτρινόσαρκα), στην ύπαρξη ή μη χνουδιού στο φλοιό (νεκταρίνια) στη συνεκτικότητα της σάρκας και τέλος στην ευκολία ή μη της αποκόλλησης του πυρήνα από τη σάρκα (εκπύρηνα ή συμπύρηνα). Τα σημαντικότερα εξ' αυτών είναι τα συμπύρηνα ροδάκινα. Στην Ελλάδα καλλιεργούνται οι ποικιλίες: Catherina, Loadel, A-37, Andross και Everts (Layne 2008, Ποντίκης 1996).

III.1.3 Ιστορικά και οικονομικά στοιχεία

Η καταγωγή του δένδρου εντοπίζεται ιστορικά στην Κίνα, όμως από την Κλασική Εποχή (4ος αιώνας π.Χ.) η καλλιέργειά της ξεκίνησε στον Ελλαδικό χώρο και έπειτα στην υπόλοιπη Ευρώπη. Η εντατικοποίηση της καλλιέργειας στην Ελλάδα με σκοπό τη βιομηχανική παραγωγή κομπόστας ροδάκινου ξεκίνησε τη δεκαετία του 60. Ο νομός Ημαθίας έγινε ο πρώτος νομός εγκατάστασης μεγάλων οπωρώνων ροδακινιάς και κατασκευής των πρώτων βιομηχανικών μονάδων μεταποίησης και επεξεργασίας των ροδάκινων. Στη συνέχεια η καλλιέργεια καθώς και η επεξεργασία αναπτύχθηκε και στους γειτονικούς νομούς. Σήμερα τα ροδάκινα αποτελούν σημαντικό τμήμα της

ελληνικής οικονομίας είτε για νωπή κατανάλωση, είτε για κονσερβοποίηση, είτε για παραγωγή χυμού και είναι εκ των σημαντικότερων εξαγωγίμων προϊόντων. Από τις ποικιλίες, που καλλιεργούνται τις μεγαλύτερες εκτάσεις καταλαμβάνουν τα συμπύρηνα ροδάκινα και σε αυτές τις εκτάσεις απασχολούνται 12.000 νοικοκυριά. Το τελικό προϊόν εξάγεται κυρίως σε χώρες της ΕΕ (το 80% της παραγωγής), ενώ μόλις το 2% κινείται προς την εσωτερική κατανάλωση. Το εισερχόμενο συνάλλαγμα από τις εξαγωγές κονσερβοποιημένου ροδάκινου ανέρχονται στα 250-300 εκ. € ετησίως. Κατά μέσο όρο η ετήσια ελληνική παραγωγή εγκυτιωμένων συμπύρηνων ροδάκινων ανέρχεται στις 245,000 tn και καθιστά τη χώρα πρώτη σε παραγωγή στην ΕΕ και δεύτερη στον κόσμο μετά τις ΗΠΑ (στοιχεία 2008). Τα τελευταία χρόνια η παραγωγή εγκυτιωμένων ροδάκινων έχει ραγδαία αύξηση στην Κίνα και μαζί με την αύξηση του κόστους παραγωγής στους έλληνες ροδακινοπαραγωγούς, αναμένεται η μείωση των εξαγωγών. Ανεξάρτητα όμως από τις δυσκολίες που έχουν εμφανιστεί η παραγωγή ροδάκινων παραμένει σημαντικό κεφάλαιο για την εθνική οικονομία (Ποντίκης 1996, www.minagric.gr).

III.1.4 Κονσερβοποιημένα ροδάκινα

III.1.4.1 Ορισμός και εμπορικοί τύποι

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα ροδάκινα ανάλογα με την υφή τους διακρίνονται σε εκπύρηνα και συμπύρηνα. Τα εκπύρηνα ροδάκινα χρησιμοποιούνται για νωπή κατανάλωση ή χυμοποίηση (πούλπα), ενώ τα συμπύρηνα για παραγωγή κομπόστας και χυμοποίηση (πούλπα). Μόνο τα συμπύρηνα ροδάκινα εγκυτιώνονται, γιατί είναι περισσότερο συνεκτικά και διατηρούν το σχήμα και την υφή τους μετά την θερμική επεξεργασία, στην οποία υπόκεινται. Η κομπόστα ροδάκινο είναι το προϊόν που αποτελείται από τεμάχια ροδάκινου εμβαπτισμένα σε σιρόπι ζάχαρης ή άλλο γλυκαντικό υγρό και έχει υποστεί θερμική επεξεργασία. Επειδή τα συμπύρηνα ροδάκινα έχουν συνεκτική υφή η θέρμανση δεν αποσκοπεί μόνο στην καταστροφή των αλλοιογόνων μικροοργανισμών, αλλά και στο μαλάκωμα της σάρκας του ροδάκινου.

Η κομπόστα ροδάκινο μπορεί να συσκευαστεί σε μεταλλικούς περιέκτες, γυάλινα βάζα ή πλαστικά δοχεία. Ανάλογα με το υλικό συσκευασίας εφαρμόζεται και διαφορετική τεχνική στη θερμική επεξεργασία. Το μεγαλύτερο ποσοστό των επεξεργασμένων εγκυτιωμένων ροδάκινων συσκευάζεται σε κονσέρβες. Οι εμπορικοί τύποι τέτοιων εγκυτιωμένων ροδάκινων διακρίνονται από το μέγεθος της κονσέρβας

(½kg ή 1kg), το υγρό πληρώσεως της κονσέρβας (νερό, σιρόπι ζάχαρης ελαφρύ, μέτριο ή βαρύ, χυμός ροδάκινου ή άλλου φρούτου, πχ μήλου ή αχλαδιού) και το σχήμα του τεμαχίου ροδάκινου (μισό ροδάκινο, φέτα ή κύβος). Επίσης τεμάχια ροδάκινων (κύβοι) συμμετέχουν και σε ένα άλλο κονσερβοποιημένο προϊόν, τη φρουτοσαλάτα, που είναι τεμάχια από διάφορα φρούτα εμβαπτισμένα σε σιρόπι. (<http://www.alexander-canning.com>, www.minagric.gr)

III.1.4.2 Χαρακτηριστικά των κονσερβοποιημένων ροδάκινων

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω το ροδάκινο είναι ένα φρούτο υψηλής διατροφικής αξίας. Είναι πηγή υδατανθράκων, φυτικών ινών και ιχνοστοιχείων. Κατά την κονσερβοποίηση η περιεκτικότητα σε σάκχαρα αυξάνει, όταν χρησιμοποιείται βαρύ σιρόπι ως υγρό πληρώσεως. Η χημική σύσταση των νωπών, καθώς και των εγκυτιωμένων ροδάκινων παρουσιάζεται στον Πίνακα 28.

Πίνακας 28. Χημική σύσταση νωπών και επεξεργασμένων ροδάκινων

	Υγρασία (%)	Πρωτεΐνες (%)	Λίπος (%)	Σάκχαρα (%)	Φυτικές ίνες – Τέφρα (%)
Νωπό ροδάκινο	87,50	0,80	0,10	9,90	1,70
Ροδάκινα σε νερό	93,09	0,44	0,06	6,11	1,30
Ροδάκινα σε χυμό φρούτων	86,49	0,63	0,03	11,55	1,30
Ροδάκινα σε Extra light σιρόπι	87,40	0,40	0,10	11,10	1,00
Ροδάκινα σε Light σιρόπι	83,72	0,45	0,03	14,50	1,30
Ροδάκινα σε Heavy σιρόπι	78,28	0,45	0,10	19,87	1,30
Ροδάκινα σε Extra heavy σιρόπι	72,49	0,47	0,03	26,01	1,00

Τα υγρά πληρώσεως των κονσερβών ποικίλουν ανάλογα με τις καταναλωτικές απαιτήσεις. Έτσι υπάρχουν τα ροδάκινα που εγκυτιώνονται με νερό και αυτά που έχουν χυμό φρούτων ή σιρόπι ζάχαρης. Ο χυμός φρούτων συνήθως έχει περιεκτικότητα σε σάκχαρα 10-12%, ενώ το σιρόπι διακρίνεται σε διάφορους τύπους, ανάλογα με την περιεκτικότητα σε ζάχαρη. Στον Πίνακα 29 παρουσιάζονται οι τύποι των σιροπιών και οι περιεκτικότητες σε ζάχαρη.

Πίνακας 29. Συγκεντρώσεις ζάχαρης για κάθε τύπο σιροπιού

Σιρόπι	Συγκέντρωση ζάχαρης (%)
Extra light (πολύ ελαφρύ)	10-14
Light (ελαφρύ)	14-18
Heavy (βαρύ)	18-22
Extra heavy (πολύ βαρύ)	22-35

Για τις κονσέρβες ροδάκινο, η κοινοτική νομοθεσία έχει θεσπίσει κατώτερα όρια του βάρους του περιεχομένου και του εστραγγισμένου βάρους των ροδάκινων. Για τις κονσέρβες του ½ kg τα ελάχιστα όρια είναι 410 g και 240 g αντίστοιχα, ενώ για τις κονσέρβες του 1 kg τα ελάχιστα όρια είναι 820 g και 470 g αντίστοιχα. Επίσης το pH των ροδάκινων πρέπει να είναι μεταξύ 3,6 -3,9 και η οξύτητα 0,4% (σε κιτρικό οξύ). Το χρώμα των ροδάκινων πρέπει να είναι χρυσοκίτρινο έως ερυθροκίτρινο και τα ροδάκινα συνεκτικά και χωρίς τραύματα ή μώλωπες (τεχνική οδηγία Frulantis).

III.1.4.3 Παραγωγή κονσερβοποιημένων ροδάκινων

Η διαδικασία παραγωγής κονσερβοποιημένων ροδάκινων είναι ουσιαστικά κοινή για όλους τους εμπορικούς τύπους με μικρές μόνο παραλλαγές. Οι διαφορές εντοπίζονται κυρίως στον τεμαχισμό των ροδάκινων, ενώ στην υπόλοιπη γραμμή παραγωγής οι διαφοροποιήσεις επί του υγρού πληρώσεως ή το χρόνο θερμικής επεξεργασίας δεν επιβάλλουν επιπρόσθετα μηχανήματα. Το διάγραμμα ροής της παραγωγής κονσερβοποιημένων ροδάκινων φαίνεται στο παρακάτω Διάγραμμα 50.



Διάγραμμα 50. Διάγραμμα ροής κονσερβοποιημένων ροδάκινων

Αρχικά, όταν τα φρούτα φτάσουν στο επιθυμητό επίπεδο ωρίμανσης γίνεται η συγκομιδή τους. Η συγκομιδή πραγματοποιείται χειρονακτικά και τα ροδάκινα τοποθετούνται σε κιβώτια των 20 kg περίπου. Έπειτα μεταφέρονται στο χώρο μεταποίησης. Εκεί γίνεται έλεγχος για το βαθμό ωριμότητας, τους τυχόν

τραυματισμούς και την εν γένει ποιότητα των εισερχομένων ροδάκινων. Έπειτα οι καρποί παραλαμβάνονται, πλένονται με νερό και γίνεται η διαλογή τους από τυχόν προβληματικά ροδάκινα. Μετά, τα ροδάκινα κόβονται στα δύο και ταυτόχρονα αφαιρείται ο πυρήνας. Στη συνέχεια πραγματοποιείται η αποφλοιώση, η οποία μπορεί να γίνει με έγχυση ατμού ή με τη χρήση διαλύματος NaOH. Η επεξεργασία συνεχίζεται με την ταξινόμηση κατά μέγεθος και το γέμισμα των κονσερβών. Μέχρι αυτό το στάδιο κάθε διεργασία απαιτεί μεγάλες ποσότητες νερού, τόσο για το ξέπλυμα από τα υπολείμματα που ξεμένουν στην κάθε διεργασία, όσο και για τη διευκόλυνση στη μεταφορά των τεμαχίων. Εφόσον οι κονσέρβες γεμιστούν με ροδάκινα, τότε ακολουθεί η πλήρωση με το γλυκαντικό υγρό. Έπειτα οι κονσέρβες απαερώνονται, σφραγίζονται και οδηγούνται για θερμική επεξεργασία. Οι χρόνοι και οι θερμοκρασίες θέρμανσης καθορίζονται από το μέγεθος, το είδος της κονσέρβας και το υγρό πλήρωσεως. Τέλος, αφού οι κονσέρβες ψυχθούν στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, αποθηκεύονται για ένα χρονικό διάστημα 20 – 25 ημερών για να διαπιστωθεί η μικροβιολογική σταθερότητά τους.

Επίσης οι τεχνικές οδηγίες κονσερβοποίησης συμπύρηνων ροδάκινων που εξέδωσε η ιδιωτική εταιρία Frulantis συστήνουν οι θερμοκρασίες κατά την αποφλοιώση να κυμαίνονται μεταξύ 75 - 82°C για 8 – 12 min και κατά την παστερίωση μεταξύ 96 – 99°C για 20 – 30 min. Η θερμοκρασία ψύξης πρέπει να είναι μεταξύ 37 – 42°C και το υγρό πλήρωσεως όταν προστίθεται πρέπει να έχει θερμοκρασία 70 – 75°C, έτσι ώστε να επέλθει γρηγορότερα η θέρμανση των ροδάκινων (τεχνική οδηγία Frulantis, Layne 2008).

III.2 Υλικά και μέθοδοι

III.2.1 Προσδιορισμός των φυσικών ιδιοτήτων των ροδάκινων

Για τη μελέτη της θερμικής επεξεργασίας και τη μέτρηση των φυσικών ιδιοτήτων των ροδάκινων χρησιμοποιήθηκαν ροδάκινα από την περιοχή του νομού Ημαθίας. Τα ροδάκινα που μελετήθηκαν ήταν ποικιλίας “LOADEL” και η συγκομιδή τους πραγματοποιήθηκε στο μέσο της χρονικής περιόδου ωριμάνσεως (05 Αυγ.), ενώ την επόμενη ημέρα ξεκίνησε η μελέτη τους. Σκοπός των πειραμάτων που έγιναν ήταν ο προσδιορισμός των φυσικών ιδιοτήτων τους και ο προσδιορισμός της υποβάθμισης της υφής, ως επακόλουθο της θερμικής επεξεργασίας. Οι Phomkong *et al* (2006) υπολόγισαν τις φυσικές ιδιότητες συμπύρηνων ροδάκινων και βρήκαν ότι για υγρασία 86% η πυκνότητα τους ήταν $1.022\pm 3 \text{ kg/m}^3$, η ειδική θερμότητα ήταν $3.992\pm 7 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C}$ και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας ήταν $0,58\pm 0.089 \text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$.

III.2.1.1 Πυκνότητα (ρ)

Η πυκνότητα των ροδάκινων προσδιορίστηκε με την αρχή του Αρχιμήδη. Αρχικά μετρήθηκε το βάρος τεμαχίων ροδάκινων με αναλυτικό ζυγό (B120S Sartorius GMBH Göttingen) και έπειτα τα τεμάχια τοποθετήθηκαν σε ογκομετρικό κύλινδρο που περιείχε γνωστό όγκο απεσταγμένου νερού. Το εκτόπισμα των τεμαχίων θεωρείται ότι είναι ίσο με τον όγκο τους και επομένως από τον παρακάτω τύπο υπολογίζεται η πυκνότητα των ροδάκινων.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{Εξίσωση 50}$$

Όπου ρ : η πυκνότητα των ροδάκινων (kg/m^3)

m : η μάζα των ροδάκινων (kg)

V : ο όγκος των ροδάκινων (m^3)

Μετά από 20 επαναλήψεις και χρησιμοποιώντας την τιμή της μάζας των τεμαχίων, το εκτόπισμά τους και την εξίσωση (49) βρέθηκε ότι η πυκνότητα των ροδάκινων ήταν $1.020\pm 5 \text{ kg/m}^3$. Η τιμή αυτή έρχεται σε συμφωνία με τη τιμή που υπολόγισαν οι Phomkong *et al* (2006).

III.2.1.2 Ειδική Θερμότητα (C_p)

Για τον προσδιορισμό της ειδικής θερμότητας των ροδάκινων χρησιμοποιήθηκε το όργανο KD2 Pro, Thermal Properties Analyzer (Decagon Devices, Inc. Pullman,

WA), με το οποίο πραγματοποιήθηκαν 5 μετρήσεις σε κάθε ροδάκινο σε πλήθος 20 ροδάκινων. Από τα τρία είδη αισθητήρων χρησιμοποιήθηκε αυτό με τους δύο ακροδέκτες (όπως φαίνεται στην Εικόνα 56) και όπως καθόριζαν οι οδηγίες χρήσης του κατασκευαστή.



Εικόνα 56. Όργανο μέτρησης ειδικής θερμότητας και θερμικής αγωγιμότητας

Ο αισθητήρας εισερχόταν στη σάρκα του εκάστοτε ροδάκινου, σε διαφορετικό σημείο για κάθε μέτρηση, τόσο σε βάθος όσο και σε απόσταση από το μίσχο. Ο μέσος όρος της ειδικής θερμότητας που υπολογίστηκε με τον παραπάνω τρόπο βρέθηκε ότι ήταν $3.990 \pm 100 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$. Ομοίως με την πυκνότητα, η τιμή της ειδικής θερμότητας που βρέθηκε ήταν πολύ κοντά στην τιμή που προσδιόρισαν οι Phomkong et al (2006).

III.2.1.3 Συντελεστής Θερμικής Αγωγιμότητας (k)

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας μετρήθηκε με το ίδιο όργανο με το οποίο μετρήθηκε και η ειδική θερμότητα των ροδάκινων KD2 Pro, Thermal Properties Analyzer (Decagon Devices, Inc. Pullman, WA). Αξίζει να σημειωθεί ότι για κάθε μέτρηση της ειδικής θερμότητας το όργανο απέδιδε και την τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας. Κατά συνέπεια μετά τον υπολογισμό της μέσης τιμής του συντελεστή βρέθηκε ότι ήταν $0,58 \pm 0,1 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$. Τέλος και σε αυτή την περίπτωση η υπολογιζόμενη τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας ήταν σύμφωνη με την προσδιοριζόμενη τιμή των Phomkong et al (2006).

III.2.2 Προσδιορισμός φυσικών ιδιοτήτων άλλων υλικών

III.2.2.1 Σιρόπι ζάχαρης

Τα ροδάκινα που εγκυτώνονται είναι εμβαπτισμένα σε σιρόπι ζάχαρης (βαρύ, ελαφρύ, πολύ ελαφρύ), νερό ή ελαφρύ χυμό ροδάκινου. Για την ορθή προσομοίωση της θερμικής επεξεργασίας των κονσερβοποιημένων ροδάκινων είναι απαραίτητη η εισαγωγή στο πρόγραμμα της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής των ιδιοτήτων του σιροπιού ή του νερού αντίστοιχα. Οι Bubnik *et al* (1995) υπολόγισαν τις φυσικές ιδιότητες του σιροπιού ζάχαρης για διάφορες συγκεντρώσεις. Βάση αυτών των τιμών και των συγκεντρώσεων σιροπιού που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία κομπόστας ροδάκινου προσδιορίστηκαν εμπειρικές εξισώσεις για τον υπολογισμό της πυκνότητας, της ειδικής θερμότητας, του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας και του ιξώδους σε σχέση με τη θερμοκρασία. Η μεταβολή των παραπάνω φυσικών ιδιοτήτων σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία ακολουθεί τις εξισώσεις (50,51).

$$\rho, C_p, k = \alpha \cdot T^2 + \beta \cdot T + \gamma \quad \text{Εξίσωση 51}$$

$$\mu = \alpha \cdot T^3 + \beta \cdot T^2 + \gamma \cdot T + \delta \quad \text{Εξίσωση 52}$$

όπου:

ρ : πυκνότητα (kg/m^3)

C_p : ειδική θερμότητα ($\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$)

k : συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας ($\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$)

μ : ιξώδες ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)

T : θερμοκρασία ($^\circ\text{C}$) για εύρος τιμών $10 - 130^\circ \text{C}$

Οι συντελεστές αυτών των εξισώσεων παρατίθενται στους παρακάτω πίνακες (30,31 και 32)

Πίνακας 30. Φυσικές ιδιότητες σιροπιού 10% (w/v)

	α	β	γ	δ	R^2
ρ	$-2,7013 \cdot 10^{-3}$	$-1,8852 \cdot 10^{-1}$	$1,0429 \cdot 10^3$	0	0,9980
C_p	$-5,9940 \cdot 10^{-4}$	$8,4216 \cdot 10^{-1}$	$3,9333 \cdot 10^3$	0	0,9907
k	$-6,0714 \cdot 10^{-6}$	$1,7750 \cdot 10^{-3}$	$5,3300 \cdot 10^{-1}$	0	0,9999
μ	$-1,6926 \cdot 10^{-9}$	$4,9366 \cdot 10^{-7}$	$-5,0201 \cdot 10^{-5}$	$2,1828 \cdot 10^{-3}$	0,9964

Πίνακας 31. Φυσικές ιδιότητες σιροπιού 20% (w/v)

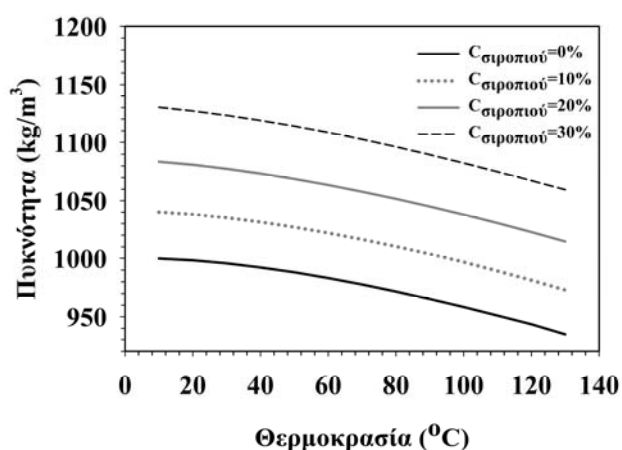
	α	β	γ	δ	R^2
ρ	$-2,4201 \cdot 10^{-3}$	$-2,4377 \cdot 10^{-1}$	$1,0868 \cdot 10^3$	0	0,9985
C_p	$3,4965 \cdot 10^{-4}$	$1,4510 \cdot 10^0$	$3,6839 \cdot 10^3$	0	0,9980
k	$-5,0000 \cdot 10^{-6}$	$1,5929 \cdot 10^{-3}$	$5,0486 \cdot 10^{-1}$	0	0,9999
μ	$-2,8823 \cdot 10^{-9}$	$8,3164 \cdot 10^{-7}$	$-8,2745 \cdot 10^{-5}$	$3,3817 \cdot 10^{-3}$	0,9955

Πίνακας 32. Φυσικές ιδιότητες σιροπιού 30% (w/v)

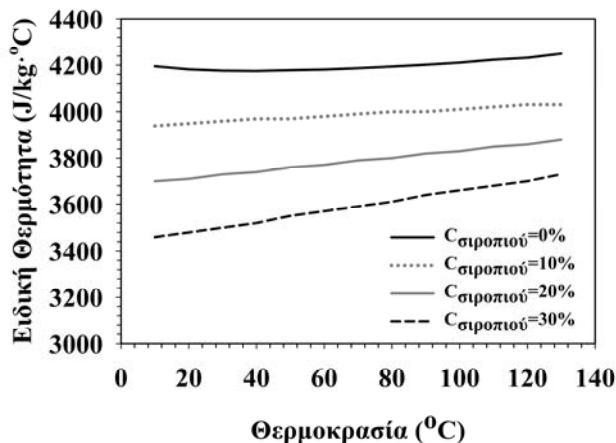
	α	β	γ	δ	R^2
ρ	$-2,1364 \cdot 10^{-3}$	$-2,9745 \cdot 10^{-1}$	$1,1338 \cdot 10^3$	0	0,9987
C_p	$5,9940 \cdot 10^{-4}$	$2,1578 \cdot 10^0$	$3,4367 \cdot 10^3$	0	0,9989
k	$-5,1190 \cdot 10^{-6}$	$1,5440 \cdot 10^{-3}$	$4,7221 \cdot 10^{-1}$	0	0,9999
μ	$-5,7354 \cdot 10^{-9}$	$1,6303 \cdot 10^{-6}$	$-1,5753 \cdot 10^{-4}$	$5,9553 \cdot 10^{-3}$	0,9938

Είναι δυνατή η ενσωμάτωση στο πρόγραμμα της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής των ιδιοτήτων του σιροπιού είτε με τη μορφή πολυωνυμικής εξίσωσης, είτε με τη μορφή τμηματικά γραμμικής καμπύλης (piecewise linear) των τιμών των φυσικών ιδιοτήτων σε συνάρτηση με την θερμοκρασία.

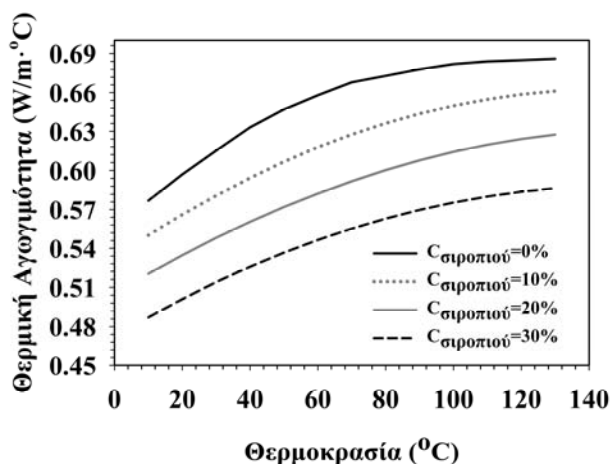
Οι τιμές των φυσικών ιδιοτήτων που περιγράφονται στους πίνακες (30,31 και 32) αποτυπώνονται γραφικά στα παρακάτω διαγράμματα (51,52,53 και 54).



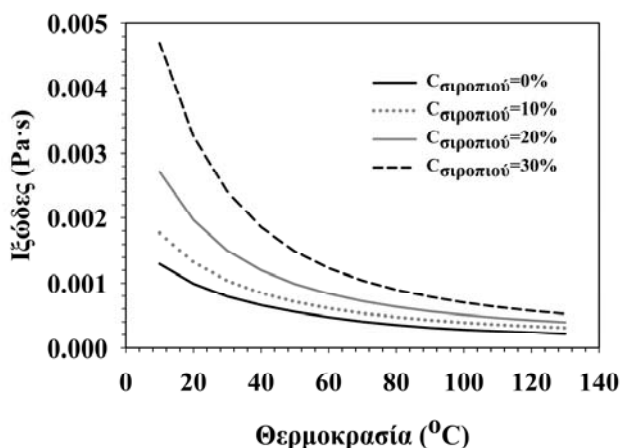
Διάγραμμα 51. Μεταβολή της Πυκνότητας του σιροπιού σε σχέση με τη θερμοκρασία



Διάγραμμα 52. Μεταβολή της Ειδικής Θερμότητας του σιροπιού σε σχέση με τη θερμοκρασία



Διάγραμμα 53. Μεταβολή της Θερμικής Αγωγιμότητας του σιροπιού σε σχέση με τη θερμοκρασία



Διάγραμμα 54. Μεταβολή του Ιξώδους του σιροπιού σε σχέση με τη θερμοκρασία

ΠΙ.2.2.2 Νερό

Σε ειδικές περιπτώσεις όπου οι καταναλωτές δεν επιθυμούν τα στερεά κονσερβοποιημένα τρόφιμα να είναι εμβαπτισμένα σε σιρόπι ζάχαρης (π.χ. λόγω

σακχαρώδους διαβήτη), τότε ως μέσω πλήρωσης των κονσερβών χρησιμοποιείται το νερό. Συνεπεία αυτού απαραίτητη ήταν η ενσωμάτωση των φυσικών ιδιοτήτων του νερού στο πρόγραμμα της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Οι τιμές των φυσικών ιδιοτήτων που χρησιμοποιήθηκαν λήφθηκαν από τη βιβλιογραφία (Heldman et al 2006) και έχουν παρουσιαστεί στην παράγραφο II.2.2.4.

III.2.3 Προσδιορισμός υγρασίας και διαλυτών στερεών των ροδάκινων

Εκτός από την εμφάνιση (σχήμα, μέγεθος και χρώμα των ροδάκινων) υπάρχουν δύο χαρακτηριστικοί παράγοντες που καθορίζουν την καταλληλότητα του καρπού για περαιτέρω επεξεργασία. Οι δύο αυτοί παράγοντες είναι η υγρασία των ροδάκινων και η περιεκτικότητά τους σε διαλυτά στερεά. Όμως οι δύο αυτοί παράγοντες επηρεάζουν σημαντικά τόσο την υφή του ροδάκινου όσο και τη βιομηχανική πρακτική, έτσι ώστε να επιτευχθεί ομοιόμορφο τελικό προϊόν (Layne 2008).

III.2.3.1 Προσδιορισμός υγρασίας

Η διαδικασία για τον προσδιορισμό της υγρασίας των ροδάκινων πριν τη θερμική επεξεργασία τους πραγματοποιήθηκε με τον ίδιο τρόπο που έγινε και για τις ελιές. Αναλυτικότερα, πέντε ροδάκινα επιλέχθηκαν δειγματοληπτικά και αφού κόπηκαν στη μέση αποπυρηνώθηκαν. Έπειτα αφαιρέθηκε ο φλοιός μηχανικά (δηλαδή με τη χρήση μαχαιριού) και μικρά τμήματα των ημισφαιρίων αφαιρέθηκαν και τοποθετήθηκαν σε κάψες ξήρανσης. Τα μικρά τμήματα των ροδάκινων ήταν λεπτές φέτες τετράγωνου σχήματος με πλευρά 2 cm και πάχους 1-2 mm περίπου. Η υπόλοιπη διαδικασία είναι ίδια με αυτή των ελιών και περιγράφεται αναλυτικά στην παράγραφο II.2.3.1.

III.2.3.2 Προσδιορισμός διαλυτών στερεών

Τα κονσερβοποιημένα ροδάκινα μετά τη θερμική επεξεργασία αποθηκεύονται για ένα σχετικά μικρό χρονικό διάστημα κατά το οποίο επέρχεται ισορροπία στα σάκχαρα μεταξύ του υγρού εμβλαπίσεως και των φρούτων. Η τελική συγκέντρωση σε σάκχαρα του προϊόντος καθορίζεται τόσο από την αρχική συγκέντρωση του σιροπιού, όσο και από την αρχική συγκέντρωση των ροδάκινων.

Για τον προσδιορισμό των σακχάρων χρησιμοποιήθηκαν τα τεμάχια ροδάκινων που απέμειναν από τη διαδικασία προσδιορισμού της υγρασίας και διαθλασίμετρο (Abbe Refractometer, WAY-1S, HuiXia Supply Co., Ltd, Fujian, China). Τα τεμάχια αυτά πολτοποιήθηκαν σε οικιακό “blender” και από την πούλπα που δημιουργήθηκε μια

μικρή ποσότητα της τάξης του 0,1 ml μεταφέρθηκε στο διαθλασίμετρο, όπου και πραγματοποιήθηκε η μέτρηση σε °Brix.

III.2.4 Προσδιορισμός θερμικής υποβάθμισης της υφής των ροδάκινων

III.2.4.1 Η θερμική υποβάθμιση της υφής κατά τη θερμική επεξεργασία

Στα ροδάκινα, όπως σε όλους τους φυτικούς ιστούς, η θερμότητα προκαλεί την υποβάθμιση της υφής. Η υποβάθμιση της υφής είναι η κατάρρευση του πλέγματος που δημιουργείται από τα κύτταρα και τις ίνες της σάρκας του ροδάκινου. Η κατάρρευση αυτή μπορεί να προκληθεί είτε από τραυματισμούς της σάρκας (έντονη πίεση), είτε από ακτινοβολία (ηλιακά εγκαύματα), είτε από υπερωρίμανση (λόγω καθυστερημένης συγκομιδής), είτε από την επίδραση χαμηλών (ψύξη – κατάψυξη) ή υψηλών θερμοκρασιών.

Από τη συγκομιδή των καρπών στο χωράφι αρχίζει μια συνεχής καταπόνηση των ροδάκινων. Χτυπήματα, απρόσεκτη μετακίνηση και μεταφορά των ροδάκινων, καθυστέρηση στην έναρξη της κονσερβοποίησης και χρήση υψηλών θερμοκρασιών τόσο κατά την αποφλοιώση, όσο και κατά τη θερμική επεξεργασία είναι τα κύρια προβλήματα που εντοπίζονται στη βιομηχανική πρακτική και προκαλούν την υποβάθμιση της υφής των κονσερβοποιημένων ροδάκινων (Layne 2008).

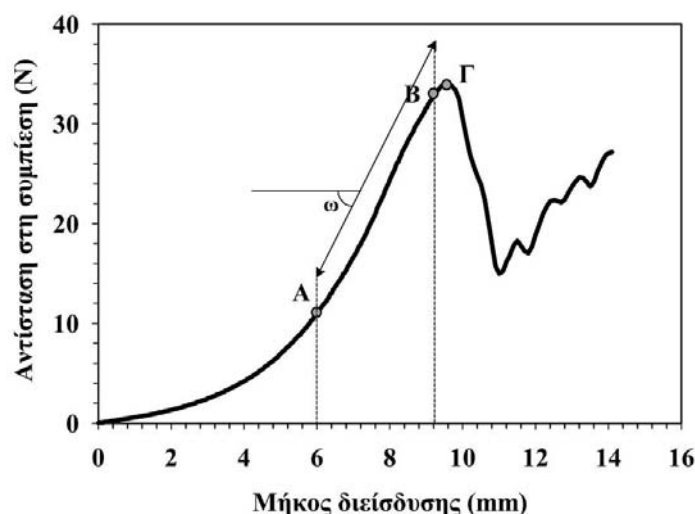
Θεωρώντας ότι η υποβάθμιση λόγω βιομηχανικών χειρισμών είναι σταθερή, πραγματοποιήθηκε μια σειρά πειραμάτων με τα οποία προσδιορίστηκε η υποβάθμιση της υφής λόγω επίδρασης της θερμότητας. Σαν υποβάθμιση της υφής θεωρείται η ελάττωση της συνεκτικότητας του φρούτου. Κατά συνέπεια ο προσδιορισμός της μεταβολής της συνεκτικότητας με την επίδραση των υψηλών θερμοκρασιών πραγματοποιήθηκε, μετά από τη θερμική επεξεργασία τεμαχίων ροδάκινου σε σιρόπι ζάχαρης, σε συγκεκριμένα ζεύγη τιμών θερμοκρασίας – χρόνου.

III.2.4.2 Ποσοτικοποίηση της θερμικής υποβάθμισης της υφής

Το όργανο που συμπιέζει τα τεμάχια των ροδάκινων υπολογίζει τη δύναμη που απαιτείται για την κατάρρευση της δομής και την καταγράφει σε σχέση με την απόσταση της διείσδυσης του εμβόλου εντός του τεμαχίου του ροδάκινου. Η αντίσταση στη συμπίεση σε σχέση με την απόσταση διείσδυσης ακολουθεί μια καμπύλη, όπως φαίνεται στο παρακάτω Διάγραμμα 55.

Παρατηρώντας το πρότυπο διάγραμμα φαίνονται δύο σημαντικές περιοχές. Η πρώτη περιοχή εντοπίζεται μεταξύ των σημείων Α και Β. Κατά τη διάρκεια διείσδυσης του

εμβόλου μεταξύ του 6^{ου} και 9^{ου} mm φαίνεται ότι η αντίσταση ακολουθεί μια γραμμική πορεία.



Διάγραμμα 55. Αντιπροσωπευτική καμπύλη αντίστασης στη συμπίεση σε σχέση με το μήκος διείσδυσης του εμβόλου

Όπως και στην περίπτωση των ελιών η κλίση του ευθυγράμμου τμήματος είναι αυτή που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των παραμέτρων D και z της θερμικής υποβάθμισης των ροδάκινων. Στην επόμενη παράγραφο περιγράφεται η πειραματική διαδικασία και ο υπολογισμός των παραμέτρων.

ΠΙ.2.4.3 Πειραματική διαδικασία για τη θερμική υποβάθμιση της υφής των ροδάκινων

Μετά την προμήθεια των ροδάκινων από το εργοστάσιο επεξεργασίας τους, έγινε η μεταφορά των φρούτων στο χώρο του εργαστηρίου και η αποθήκευσή τους υπό ψύξη. Αμέσως άρχισε ο προσδιορισμός των φυσικών ιδιοτήτων των ροδάκινων και ο προσδιορισμός της θερμικής υποβάθμισης της υφής τους. Το πρωτόκολλο της πειραματικής διαδικασίας περιελάμβανε την αφαίρεση κυλινδρικών τεμαχίων από τα ροδάκινα, τα οποία θα είχαν ομόκεντρη κατεύθυνση, ίδιο ύψος και διάμετρο, τη θέρμανση και ψύξη αυτών των κυλίνδρων εντός σιροπιού ζάχαρης 20% v/w και τη συμπίεση των τεμαχίων στο κατάλληλο όργανο.

Αναλυτικά, η διαδικασία είχε ως εξής: με κυλινδρικό σωλήνα εσωτερικής διαμέτρου 10mm αφαιρούνταν τμήματα από όλη τη σάρκα του ροδάκινου πάντοτε με ομόκεντρη κατεύθυνση. Από τα τεμάχια αυτά αφαιρούνταν τα άκρα, έτσι ώστε να απομείνει κύλινδρος 20 mm ύψους. Για την προσομοίωση της θερμικής επεξεργασίας υπήρχαν δύο υδατόλουτρα στα οποία βρίσκονταν εμβαπτισμένα δοχεία με περίπου 1 lt

σιροπιού ζάχαρης 20% (v/w). Στο πρώτο υδατόλουτρο η θερμοκρασία είχε καθοριστεί σε σταθερά υψηλή θερμοκρασία (70 – 100° C), ενώ στο δεύτερο πραγματοποιούνταν η ψύξη των τεμαχίων και η θερμοκρασία ήταν σταθερά στους 20° C. Σε κάθε περίπτωση 10 κύλινδροι τοποθετούνταν στο θερμό σιρόπι για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και έπειτα μεταφέρονταν στο ψυχρό σιρόπι. Στη συνέχεια οι θερμικώς επεξεργασμένοι κύλινδροι ροδάκινου μεταφέρονταν στο όργανο συμπίεσης (Model H5KS - TX0258, Hounsfield Test Equipment Ltd. Surrey, UK) και εκεί ακολουθούσε η μέτρηση αντίστασης στη διείσδυση του εμβόλου ανά τεμάχιο. Το έμβολο που χρησιμοποιήθηκε είχε διάμετρο 8mm και η ταχύτητα καθόδου του ήταν 20 mm/min. Μετά τη συμπίεση των δέκα δειγμάτων ακολουθούσε η εξαγωγή των καμπυλών αντίστασης προς βάθος διείσδυσης και υπολογιζόταν σε λογιστικό φύλλο η κλίση του ευθυγράμμου τμήματος της καμπύλης και της μέγιστης τιμής της αντίστασης.



Εικόνα 57. Όργανο συμπίεσης του τεμαχίου ροδάκινου για τον προσδιορισμό της υφής

ΠΙ.2.4.4 Υπολογισμός των παραμέτρων της θερμικής υποβάθμισης της υφής

Για τα δέκα τεμάχια ροδάκινου της κάθε περίπτωσης υπολογιζόταν η μέση τιμή των κλίσεων του ευθυγράμμου τμήματος A – B. Έπειτα για κάθε θερμοκρασία παράστατο γραφικά η μεταβολή των λογαρίθμων των κλίσεων σε σχέση με το χρόνο θέρμανσης. Η μεταβολή αυτή ήταν γραμμική και για τον υπολογισμό της τιμής D για κάθε θερμοκρασία χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση:

$$D = -\frac{1}{\text{κλίση της ευθείας}}$$

Στη συνέχεια αφού υπολογίστηκαν οι τιμές D για όλες τις θερμοκρασίες, παραστάθηκε γραφικά η μεταβολή της λογαριθμημένης τιμής D σε σχέση με τη μεταβολή της θερμοκρασίας θέρμανσης. Ομοίως και αυτή η μεταβολή ήταν γραμμική και ο υπολογισμός της τιμής z έγινε με την εξίσωση:

$$z = -\frac{1}{\text{κλίση της ευθείας}}$$

Τα αποτελέσματα παρατίθενται στην παράγραφο III.3.2. Επίσης η τιμή z χρησιμοποιήθηκε στο θεωρητικό μοντέλο για να προβλεφθεί η θερμική υποβάθμιση της υφής των ροδάκινων κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας.

III.2.5 Σχεδιαζόμενες γεωμετρίες προς επίλυση

Μετά από τα εισαγωγικά πειράματα για τον προσδιορισμό μεγεθών που θα βοηθήσουν στην κατανόηση των φαινομένων της μεταφοράς θερμότητας και της επίδρασης της θερμότητας στο προϊόν σχεδιάστηκαν οι θεωρητικές γεωμετρίες στον υπολογιστή, έτσι ώστε να επιλυθούν με το πρόγραμμα της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής.

III.2.5.1 Επιβεβαίωση μοντέλου

Σε κάθε μελέτη προσομοίωσης, με τη χρήση θεωρητικών μαθηματικών μοντέλων είναι απαραίτητη η επιβεβαίωση των θεωρητικών αποτελεσμάτων με πειραματικές μετρήσεις. Στις παρακάτω παραγράφους περιγράφεται ο σχεδιασμός του πειραματικού μέρους μιας θερμικής επεξεργασίας κονσερβοποιημένων ροδάκινων και της θεωρητικής προσομοίωσης στον υπολογιστή με τη χρήση προγράμματος υπολογιστικής ρευστοδυναμικής.

III.2.5.2 Πειραματική θερμική επεξεργασία

Στην παρακάτω σχεδιαζόμενη θερμική επεξεργασία η επαλήθευση έγινε με καταγραφή της θερμοκρασίας σε δύο σημεία εντός των ροδάκινων. Η σχεδιαζόμενη πειραματική γεωμετρία αποτελείται από κυλινδρική μεταλλική κονσέρβα διαστάσεων 75mm διαμέτρου και 105mm ύψους και από 3 ημίσεια τεμάχια ροδάκινων. Τα φρούτα είχαν σχήμα σφαιρικό και μετά την διχοτόμησή τους και την αφαίρεση του πυρήνα έμειναν ημισφαίρια με άνοιγμα στο εσωτερικό τους. Η διάμετρος των ροδάκινων ήταν 60 mm και μετά την αφαίρεση του πυρήνα το πάχος της σάρκας ήταν

15 - 25 mm. Από την αφαίρεση του πυρήνα δημιουργήθηκε ένα άνοιγμα με μεγάλη διάμετρο 30 mm και μικρή διάμετρο 5 mm (Εικόνα 58).

Ξεκινώντας την πειραματική διαδικασία παρελήφθησαν κυλινδρικές μεταλλικές κονσέρβες διαστάσεων 75x105 mm (300x402) από την κυτιοποιία “ELSA A.E.” και οι οποίες ελέγχθησαν ως προς το σχήμα, τυχόν ελαττώματα και καθαρίστηκαν ώστε να μην περιέχουν ξένες ύλες. Έπειτα τοποθετήθηκαν θερμοζεύγη τύπου “K” ώστε να καταγραφεί η θερμοκρασία σε δύο σημεία εντός της κονσέρβας και σε άλλα δύο σημεία στο εξωτερικό τοίχωμα. Τα θερμοζεύγη που τοποθετήθηκαν στη εξωτερική επιφάνεια του περιέκτη είχαν σκοπό να καταγράφουν τη θερμοκρασία του θερμαντικού – ψυκτικού μέσου. Τα δύο θερμοζεύγη που τοποθετήθηκαν στο εσωτερικό της κονσέρβας βρίσκονταν το ένα στο εσωτερικό του ροδάκινου που ήταν στον πυθμένα της κονσέρβας και το άλλο θερμοζεύγος στο αμέσως επόμενο τεμάχιο ροδάκινου. Οι συντεταγμένες των σημείων που κατέγραφαν τα θερμοζεύγη φαίνονται στον Πίνακα 33.

Πίνακας 33. Συντεταγμένες σημείων καταγραφής της θερμοκρασίας

	x (mm)	y (mm)	z (mm)
Σημείο στο κάτω ροδάκινο	0,0	-27,0	0,0
Σημείο στο μεσαίο ροδάκινο	0,0	0,0	0,0

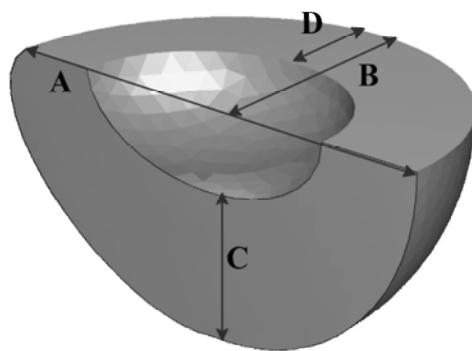
Σε αυτό το σημείο πρέπει να επισημανθεί ότι υπήρχε δυσκολία στη σταθεροποίηση της θέσης των τεμαχίων ροδάκινων. Τα θερμοζεύγη τύπου “K” που χρησιμοποιήθηκαν κατέληγαν σε μεταλλικές ακίδες, οι οποίες ήταν στηριγμένες και στεγανοποιημένες στο κοίλο τοίχωμα της κονσέρβας. Λόγω της στήριξης αυτής τα τεμάχια που βρίσκονταν κοντά στο πυθμένα και στη μέση της κονσέρβας ήταν σταθεροποιημένα αντίστοιχα. Επίσης, περιμετρικά στην εσωτερική επιφάνεια της κονσέρβας είχαν κολληθεί ακίδες (πινέζες) με θερμοάντοχη σιλικόνη, οι οποίες σταθεροποιούσαν επιπλέον τα τεμάχια ροδάκινου.

Έπειτα η κονσέρβα πληρώθηκε με σιρόπι ζάχαρης 20% (w/v) και σφραγίστηκε. Το “headspace” της κονσέρβας ήταν πολύ μικρό (1-2 mm). Σε εκείνο το σημείο η κονσέρβα ελέγχθηκε για τυχόν διαρροές σιροπιού και μετά συνδέθηκαν τα θερμοστοιχεία με το καταγραφικό. Σε υδατόλουτρο χωρητικότητας περίπου 20 lt θερμού νερού θερμοκρασίας 100°C, τοποθετήθηκε η κονσέρβα σε κάθετη θέση και η θέρμανση διήρκησε 20 min. Έπειτα σε υδατόλουτρο με κρύο νερό βρύσης που

ανανεωνόταν συνεχώς μεταφέρθηκε η κονσέρβα για τον κύκλο της ψύξης. Η διάρκεια της ψύξης ήταν 20 min και καθ' όλη τη διάρκεια της θέρμανσης – ψύξης γινόταν η καταγραφή θερμοκρασιών από το καταγραφικό όργανο. Τα χρονο-θερμοκρασιακά δεδομένα μεταφέρθηκαν από το καταγραφικό στον υπολογιστή για ανάλυση και η κονσέρβα ανοίχτηκε για να διαπιστωθεί ότι τα τεμάχια δεν είχαν αλλάξει θέση.

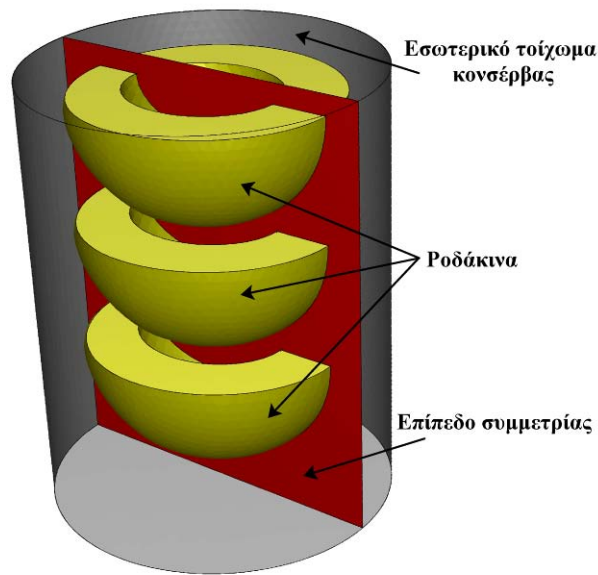
III.2.5.3 Θεωρητική γεωμετρία

Έπειτα από την πειραματική θερμική επεξεργασία που πραγματοποιήθηκε ακολούθησε η επίλυση της θεωρητικής γεωμετρίας με τα ίδια χαρακτηριστικά. Αρχικά σχεδιάστηκε η κονσέρβα με τις διαστάσεις της περίπτωσης των επιτραπέζιων ελιών. Έπειτα σχεδιάστηκαν τα τεμάχια των ροδάκινων έτσι ώστε να επιτευχθεί το ίδιο σχήμα και μέγεθος. Για την ορθή αποτύπωση των τεμαχίων των ροδάκινων έγινε πρώτα ο σχεδιασμός ενός ολόκληρου ροδάκινου με παραβολοειδές σχήμα, ενώ στη συνέχεια σχεδιάστηκε ο πυρήνας του ροδάκινου με ατρακτοειδές σχήμα. Αφαιρώντας το ήμισυ του ροδάκινου και ολόκληρο τον πυρήνα απέμεινε το τεμάχιο, το οποίο προσομοιάζει όσο το δυνατό περισσότερο στην πραγματικότητα. Οι διαστάσεις των τεμαχίων των ροδάκινων φαίνονται στην παρακάτω Εικόνα 58.



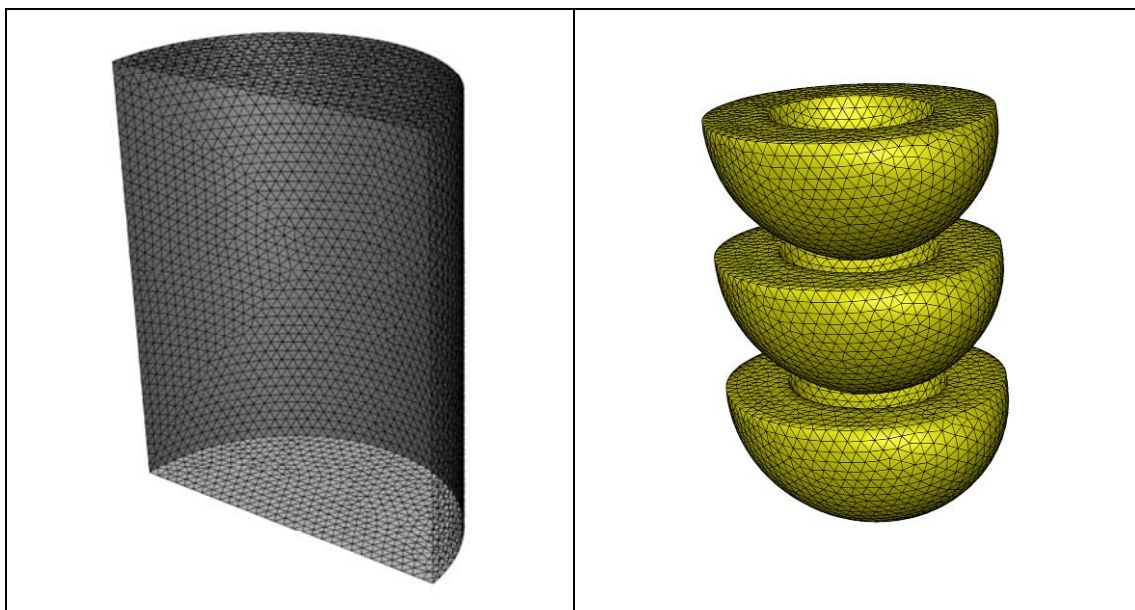
Εικόνα 58. Σχήμα και διαστάσεις τεμαχίου ροδάκινου. A=60mm, B=30mm, C=25mm και D=15mm

Για την ολοκλήρωση της σχεδιαζόμενης γεωμετρίας έγινε αντιγραφή του αρχικού τεμαχίου ροδάκινου σε άλλα δύο αντίγραφα και όλα τοποθετήθηκαν στην ίδια θέση με αυτή που βρίσκονταν στην πειραματική γεωμετρία.



Εικόνα 59. Σχεδιαζόμενη γεωμετρία που πειραματικά επεξεργάστηκε θερμικώς

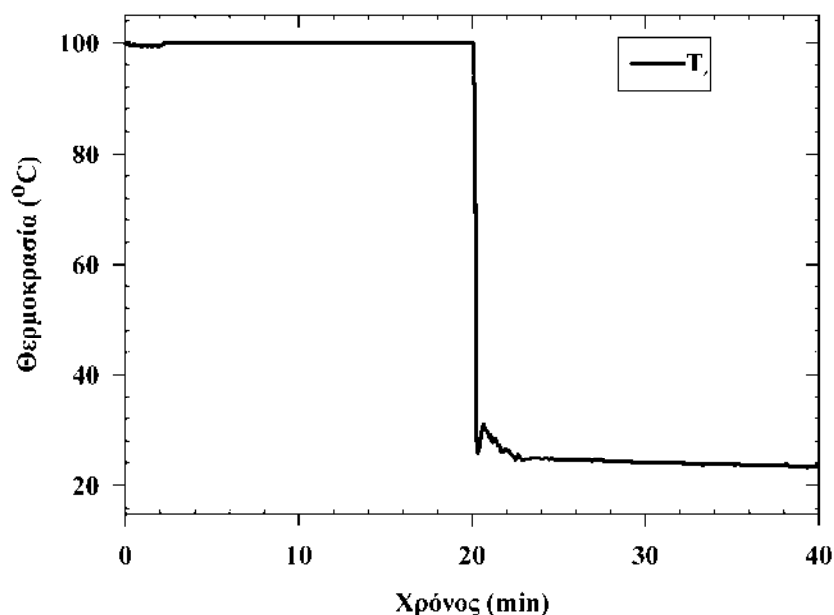
Μετά τη σχεδίαση της πειραματικής γεωμετρίας στο πρόγραμμα Gambit ακολούθησε η δημιουργία του πλέγματος. Στην παραπάνω γεωμετρία δημιουργήθηκαν 85.132 κελιά με πυκνότητα 183,5 κελιά/cm³. Τα κελιά αυτά είχαν σχήμα τετράεδρου πρίσματος, λόγω της εντολής “Tet/Hybrid – TGrid” που επιλέχθηκε. Τόσο το πλέγμα στην κονσέρβα, όσο και στα ροδάκινα φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα 60.



Εικόνα 60. Παρουσίαση πλέγματος στην κονσέρβα και στα περιεχόμενα τεμάχια

Με την ολοκλήρωση της κατασκευής του πλέγματος καθορίστηκαν οι οριακές συνθήκες, καθώς και η φύση των υλικών που αποτελούσαν τη γεωμετρία. Ο όγκος που καταλάμβαναν τα τεμάχια των ροδάκινων ορίστηκαν ως “solid”, ενώ ο όγκος που

καταλάμβανε το μέσο πληρώσεως της κονσέρβας (σιρόπι ζάχαρης) ορίστηκε ως “fluid”. Ως ιδιότητες του υγρού χρησιμοποιήθηκαν οι ιδιότητες σιροπιού περιεκτικότητας 20% (w/v), όμοιο δηλαδή με αυτό που χρησιμοποιήθηκε στο πειραματικό μέρος. Επίσης το τοίχωμα της κονσέρβας και η εξωτερική επιφάνεια των τεμαχίων ορίστηκαν ως “wall”. Εδώ θα πρέπει να επισημανθεί ότι θεωρήθηκε πως δεν υπάρχει μεταφορά μάζας μεταξύ ροδάκινου και σιροπιού κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας, καθώς και μεταξύ σιροπιού και τοιχώματος της κονσέρβας. Από την πειραματική θερμική επεξεργασία είχε καταγραφεί η θερμοκρασία στην επιφάνεια της κονσέρβας. Τα χρονοθερμοκρασιακά αυτά δεδομένα εισήχθησαν ως οριακή συνθήκη στο προς επίλυση πεδίο ροής. Η μεταβολή της θερμοκρασίας τόσο κατά τη διάρκεια του κύκλου θέρμανσης, όσο και κατά τη διάρκεια του κύκλου ψύξης φαίνεται στο παρακάτω Διάγραμμα 56.



Διάγραμμα 56. Μεταβολή της εξωτερικής θερμοκρασίας, όπως αυτή καταγράφηκε στο τοίχωμα της κονσέρβας κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας

Οι αρχικές και οριακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν στο θεωρητικό μοντέλο είναι:

Για $t = 0$:

$$T_w = T_{\text{syryp}} = T_o = 20 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ και } u_r = u_\theta = u_z = 0 \text{ για } 0 \leq r \leq R \text{ και } -H \leq z \leq H$$

Για $t > 0$:

$$T_w = T_\infty \quad \text{και} \quad u_r = u_\theta = u_z = 0 \text{ για } r = R \text{ και } -H \leq z \leq H$$

$$u_r = u_\theta = u_z = 0 \text{ για } z = H \text{ και } -0 \leq r \leq R$$

$$u_r = u_\theta = u_z = 0 \text{ για } z = -H \text{ και } -0 \leq r \leq R$$

όπου T_{∞} είναι η θερμοκρασία του τοιχώματος όπως αυτή καταγράφηκε απ' την πειραματική θερμική επεξεργασία και αποτυπώνεται στο Διάγραμμα 56.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η επιλογή των κατάλληλων μοντέλων για την επίλυση των εξισώσεων που διέπουν τη ροή. Η ροή του ρευστού κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας θεωρήθηκε ως γραμμική φυσική κυκλοφορία, λόγω του ότι ο αριθμός Rayleigh (Ra) ήταν μικρότερος από 10^7 . Όπως και στην περίπτωση των ελιών, ο αριθμός Ra υπολογίστηκε από την εξίσωση 45 και βρέθηκε ότι για το εύρος των θερμοκρασιών που εφαρμόστηκαν στην παραπάνω θερμική επεξεργασία δεν ξεπερνούσε το 10^7 .

Έπειτα ενεργοποιήθηκε η εντολή για την χρήση της επιτάχυνσης της βαρύτητας (g) με τιμή $-9,81 \text{ m/s}^2$. Το μείον στη τιμή της επιτάχυνσης της βαρύτητας έχει την έννοια της κατεύθυνσης του διανύσματος από τον πυθμένα προς την οροφή της κονσέρβας. Επίσης επειδή η θερμική επεξεργασία είναι μια χρονικά μεταβαλλόμενη διαδικασία ενεργοποιήθηκε η εντολή “unsteady”.

Όπως θα αναφερθεί στο παράρτημα, σχετικά με τα σχήματα παραγωγίσης, για τη διακριτοποίηση των διαφορικών εξισώσεων της ορμής χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο “PRESTO!” και για τη συνέχεια και την ενέργεια χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο “First Order Upwind”. Για τη σύζευξη πίεσης – ταχύτητας ενεργοποιήθηκε το μοντέλο “Coupled”, στο οποίο ο αριθμός Courant (C) ήταν ίσος με 0,5.

Ακόμα κατά την επίλυση των διακριτοποιημένων διαφορικών εξισώσεων παραμένουν υπόλοιπα, τα οποία όταν βρεθούν κάτω από ένα επίπεδο θεωρείται ότι η λύση έχει συγκλίνει και τα αποτελέσματα είναι σωστά. Για τις εξισώσεις τις συνέχειας και της ορμής το όριο σύγκλισης ορίστηκε στο $1 \cdot 10^{-3}$ και για την εξίσωση της ενέργειας στο $1 \cdot 10^{-6}$. Τέλος η επίλυση έγινε με χρονικό βήμα (time step) 0,5 s και η σύγκριση της θεωρητικής γεωμετρίας με τα πειραματικά αποτελέσματα φαίνονται στην παράγραφο III.3.3.1.

III.2.5.4 Υπολογισμός ισοδύναμου θερμικού αποτελέσματος

Κατά τη διάρκεια των υπολογισμών για την προσομοίωση της θερμικής επεξεργασίας και όλων των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα επιλύθηκαν και εξισώσεις που αποδίδουν το θανατηφόρο θερμικό αποτέλεσμα επί των αλλοιογόνων μικροοργανισμών στόχων, καθώς και της υποβάθμισης της υφής των ροδάκινων. Για τις περιπτώσεις υπολογισμού του θανατηφόρου θερμικού αποτελέσματος, τα δεδομένα ελήφθησαν από τη βιβλιογραφία (Silva & Gibbs 2004), ενώ για την περίπτωση της υποβάθμισης της υφής των ροδάκινων χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα

που βρέθηκαν από την αντίστοιχη μελέτη, όπως περιγράφεται στην παράγραφο III.2.4.

Πίνακας 34. Παράμετροι μ/ου στόχου και υποβάθμισης της υφής των ροδάκινων

A/A	Εξίσωση	Μέγεθος θερμικής καταστροφής
1	$PU_{90}^{11.5} = \int_0^t 10^{\frac{T-90}{11.5}} dt$	Θανάτωση των σπορίων του βακτηρίου <i>Clostridium butyricum</i> T _{ref} = 90 °C, z = 11,5 °C, D ₉₀ = 1,1 min
2	$F_{93.3}^{17.6} = \int_0^t 10^{\frac{T-93.3}{17.6}} dt$	Υποβάθμιση της υφής των ροδάκινων T _{ref} = 93,3 °C, z = 17,6 °C, D _{93,3} = 18,5 min

Οι παραπάνω τιμές D και z για την εκάστοτε T_{ref} εντάχθηκαν στο λογισμικό μέσω ενός αρχείου (UDF), βάσει του οποίου γίνονταν οι υπολογισμοί των αντίστοιχων ισοδύναμων χρόνων θερμικής καταστροφής και υποβάθμισης. Το αρχείο που εισήχθη στο λογισμικό φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα 61.

```
#include "udf.h"
#define domain_ID 2

DEFINE_EXECUTE_AT_END(store_temp_time)
{
    Domain *domain;
    cell_t c;
    Thread *t;

    real curr_ts;
    curr_ts = RP_Get_Real("physical-time-step");

    domain = Get_Domain(1);

    thread_loop_c(t, domain) {
        begin_c_loop(c, t)
        {
            C_UDMI(c, t) = C_UDMI(c, t) + (curr_ts * pow(10, ((C_T(c, t) - 363.15) / 11.5))); /*Θερμική καταστροφή Cl. butyricum*/

            C_UDMI(c, t) = C_UDMI(c, t) + (curr_ts * pow(10, ((C_T(c, t) - 366.48) / 17.58))); /*Θερμική υποβάθμιση της υφής των
ροδάκινων*/

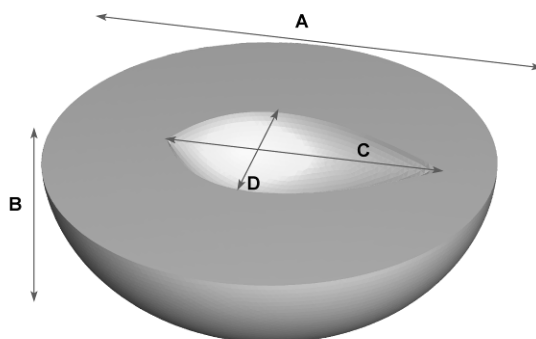
        }
        end_c_loop(c, t)
    }
}
```

Εικόνα 61. Εισαγόμενο αρχείο UDF με πληροφορίες υπολογισμού του ισοδύναμο χρόνου, όπως περιγράφεται στον πίνακα 34

Κατά τη διάρκεια της επίλυσης το λογισμικό έχοντας τις παραπάνω πληροφορίες κατέγραφε τους ισοδύναμους χρόνους. Έτσι σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή της θερμικής επεξεργασίας ήταν δυνατό να εντοπιστεί τόσο το κρίσιμο σημείο της κονσέρβας, όσο και οι περιοχές με τη χαμηλότερη ή υψηλότερη θερμική υποβάθμιση της υφής των ροδάκινων.

III.2.6 Επιλυόμενες γεωμετρίες κονσερβοποιημένων ροδάκινων

Μετά την πειραματική επιβεβαίωση του θεωρητικού μοντέλου της θερμικής επεξεργασίας των κονσερβοποιημένων ροδάκινων ακολούθησε η επίλυση δύο σημαντικών ομάδων γεωμετριών. Στην πρώτη ομάδα γεωμετριών εξετάστηκε η επίδραση της θέσης των τεμαχίων ροδάκινου σε κονσέρβα μικρών διαστάσεων (75x105mm) και στη δεύτερη ομάδα εξετάστηκε η επίδραση διαφόρων παραγόντων επί της θερμικής επεξεργασίας σε κονσέρβα μεγάλων διαστάσεων (95x110mm) και με τυχαία κατανομή των τεμαχίων ροδάκινων εντός του περιέκτη. Και στις δύο ομάδες γεωμετριών τα ροδάκινα σχεδιάστηκαν σύμφωνα με το μέγεθος και το σχήμα που έχουν τα συμπύρηνια ροδάκινα, έτσι ώστε να είναι πιο κοντά στην πραγματικότητα η προσομοίωση της θερμικής επεξεργασίας. Επίσης με την ίδια λεπτομέρεια σχεδιάστηκε και το άνοιγμα που αφήνει η αφαίρεση του πυρήνα του ροδάκινου κατά την επεξεργασία του στις βιομηχανίες κομποστοποίησης. Οι διαστάσεις, καθώς και το σχήμα του τεμαχίου που σχεδιάστηκε και χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις παρακάτω παραμετρικές μελέτες φαίνεται στην Εικόνα 62.

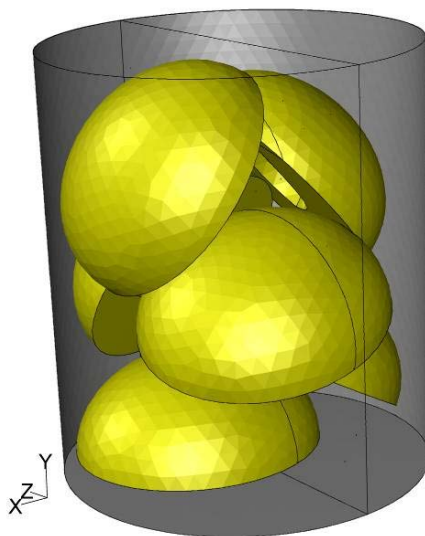


Εικόνα 62. Σχήμα και διαστάσεις σχεδιαζόμενου τεμαχίου ροδάκινου για όλες τις παραμετρικές μελέτες που θα ακολουθήσουν. A=60 mm, B=40 mm, C=30 mm και D=15 mm

III.2.6.1 Γεωμετρία τυχαίας κατανομής τεμαχίων ροδάκινου

Σε αυτή την περίπτωση κρίθηκε αναγκαία η επίλυση μιας ρεαλιστικής περίπτωσης, δηλαδή μιας γεωμετρίας με κατανομή των τεμαχίων, όπως θα μπορούσε να είναι στην πραγματικότητα στη βιομηχανική πρακτική. Αυτό σημαίνει ότι τα τεμάχια τοποθετήθηκαν σε τυχαία θέση, χωρίς κάποια συγκεκριμένη σκοπιμότητα. Επίσης τα τεμάχια ακουμπούσαν μεταξύ τους, χωρίς όμως να μπορεί να θεωρηθεί ότι δημιουργούσαν ένα συσσωμάτωμα. Στη συγκεκριμένη γεωμετρία, η κονσέρβα είχε

χωρητικότητα $778,9 \text{ cm}^3$ εκ των οποίων το 63,9% του όγκου καταλάμβανε το σιρόπι και το 36,1% τα τεμάχια των ροδάκινων.



Εικόνα 63. Γεωμετρία 6 τεμαχίων ροδάκινων σε τυχαία θέση εντός της κονσέρβας

Έπειτα από το σχεδιασμό της γεωμετρίας κατασκευάστηκε το πλέγμα. Ο αριθμός των κελιών για αυτή την περίπτωση ήταν 62.580 και η πυκνότητα του πλέγματος ήταν $80,34 \text{ κελιά/cm}^3$. Όπως και στη γεωμετρία επιβεβαίωσης, τα κελιά είχαν σχήμα τετράεδρου πρίσματος, λόγω της επιλογής που δόθηκε “Tet/Hybrid – TGrid”, ενώ είχαν ομοιόμορφη κατανομή λόγω της επιλογής “Shortest edge” 18%. Βάση των προηγούμενων περιπτώσεων φαίνεται ότι ο αριθμός των κελιών είναι μικρός, όμως μετά τη σχετική μελέτη θα διαπιστωθεί ότι υπάρχει ανεξαρτησία πλέγματος και η λύση είναι αποδεκτή. Ακόμα ορίστηκε το τοίχωμα της κονσέρβας και η επιφάνεια των τεμαχίων ως “wall”, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι η μεταφορά μάζας θεωρήθηκε αμελητέα κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας. Επίσης ο χώρος που καταλάμβαναν τα τεμάχια ορίστηκε ως “solid” και ο υπόλοιπος χώρος της κονσέρβας που καταλάμβανε το σιρόπι ως “fluid”. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η επίλυση του πεδίου ροής.

Μετά την επίλυση της γεωμετρίας με τις βασικές συνθήκες της θερμικής επεξεργασίας πραγματοποιήθηκε επίλυση με μεταβολή της συγκέντρωσης του σιροπιού, του χρόνου θέρμανσης, του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας από το θερμαντικό – ψυκτικό μέσο στην επιφάνεια της κονσέρβας, καθώς επίσης και για την ανεξαρτησία τόσο της πυκνότητας του πλέγματος όσο και του χρονικού βήματος. Σαν βασικές συνθήκες θερμικής επεξεργασίας χρησιμοποιήθηκαν τα ζεύγη θερμοκρασίας – χρόνου θέρμανσης 100°C για 20 min και ψύξης 20°C για 10 min. Επιπλέον

λεπτομέρειες (οριακές, αρχικές συνθήκες, λοιπές πληροφορίες) για τις παραμετρικές μελέτες που επιλύθηκαν παρατίθενται στον Πίνακα 35.

Για να επιβεβαιωθεί ότι το μοντέλο λειτουργεί ανεξάρτητα από την πυκνότητα του πλέγματος και του χρονικού βήματος, έγινε αρχικά η επίλυση της ίδιας γεωμετρίας με πυκνωμένο το πλέγμα κατά 143,84% (152.600 κελιά) και το χρονικό βήμα μεταβλήθηκε από 0,5 σε 0,1, 0,05 και 0,01 s.

Πίνακας 35. Αρχικές και οριακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν στην επιλυόμενη γεωμετρία με τα 6 τεμάχια σε τυχαία θέση

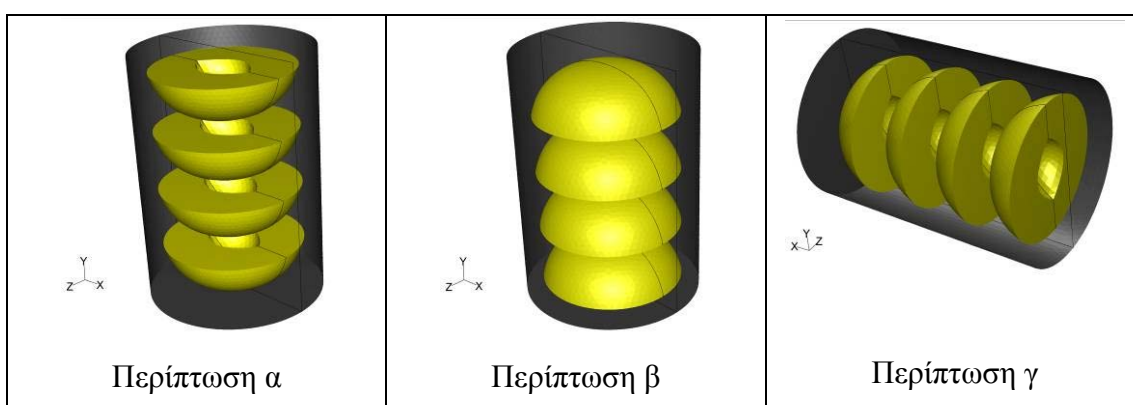
A/A	Περιγραφή Παραμετρικής Μελέτης	Θερμοκρασία θερμαντικού μέσου (°C)	Θερμοκρασία ψυκτικού μέσου (°C)	Αρχική θερμοκρασία κοκσέρβας (°C)	Χρόνος θέρμανσης (min)	Συγκέντρωση ζάχαρης % (w/v)	h (W/m ² ·°C)	Χρονικό Βήμα (s)
1.	Επίδραση της συγκέντρωσης του σιροπιού	100	20	20	20	0	∞	0,5
2.		100	20	20	20	10	∞	0,5
3.		100	20	20	20	20	∞	0,5
4.		100	20	20	20	30	∞	0,5
5.	Ανεξαρτησία πλέγματος (152600 κελιά)	100	20	20	20	20	∞	0,5
6.	Επίδραση του χρονικού βήματος επί της επίλυσης	100	20	20	20	20	∞	0,01
7.		100	20	20	20	20	∞	0,05
8.		100	20	20	20	20	∞	0,1
9.	Επίδραση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας	100	20	20	20	20	100	0,5
10.		100	20	20	20	20	200	0,5
11.		100	20	20	20	20	500	0,5
12.		100	20	20	20	20	1000	0,5
13.		100	20	20	20	20	2000	0,5

Οι υπόλοιπες πληροφορίες που εισάγονται στο λογισμικό για την ορθή επίλυση του πεδίου ροής, όπως τα μοντέλα σύζευξης πίεσης – ταχύτητας και διακριτοποίησης των διαφορικών εξισώσεων είναι ίδιες με αυτές που εισήχθησαν στη γεωμετρία επιβεβαίωσης.

III.2.6.2 Γεωμετρίες για την επίδραση της θέσης των τεμαχίων ροδάκινου

Για να μελετηθεί η επίδραση της θέσης με την οποία είναι τοποθετημένα τα τεμάχια ροδάκινου εντός της κονσέρβας σχεδιάστηκαν τρεις διαφορετικές γεωμετρίες. Οι τρεις γεωμετρίες μεταξύ τους ήταν ίδιες με τη διαφορά ότι οι δύο είχαν περιστραφεί κατά τον άξονα zz' σε σχέση με την πρώτη. Στην πρώτη γεωμετρία το άνοιγμα που αφήνει ο πυρήνας εντός των τεμαχίων "κοιτούσε" αντίθετα προς την κατεύθυνση του διανύσματος της επιτάχυνσης της βαρύτητας. Η δεύτερη γεωμετρία είχε περιστραφεί γύρω από τον άξονα zz' κατά 180° με αποτέλεσμα το άνοιγμα που αφήνει ο πυρήνας να "κοιτάει" στην ίδια κατεύθυνση με το διάνυσμα της επιτάχυνσης της βαρύτητας. Τέλος η τρίτη γεωμετρία είχε περιστραφεί κατά 90° λιγότερο από τη δεύτερη, έτσι το άνοιγμα των πυρήνων "κοιτούσε" κάθετα στο διάνυσμα της επιτάχυνσης της βαρύτητας. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ενώ στην παρακάτω εικόνα που φαίνεται η διάταξη των τεμαχίων εντός των κονσερβών παραθέτονται ολόκληρες οι κονσέρβες στην πραγματικότητα για οικονομία χρόνου επίλυσης και χώρου αποθήκευσης δεδομένων του λογισμικού επιλύθηκαν μόνο οι μισές γεωμετρίες. Η τομή των γεωμετριών έγινε στο επίπεδο συμμετρίας όπως αυτό φαίνεται στις παρακάτω εικόνες. Επίσης για ευκολία οι τρεις παραμετρικές μελέτες ονομάστηκαν περίπτωση α, β και γ σύμφωνα με την αντιστοιχία των παρακάτω εικόνων.

Μετά το σχεδιασμό και τις τροποποιήσεις που επακολούθησαν έγινε η κατασκευή του πλέγματος. Για την πρώτη περίπτωση ο αριθμός των κελιών ήταν 74.770, για τη δεύτερη 73.364 και για τη τρίτη 73.590. Η γεωμετρία χωρίστηκε σε κελιά που είχαν σχήμα τετράεδρων πρισμάτων βάση της εντολής που δόθηκε "Tet/Hybrid – TGrid".



Εικόνα 64. Γεωμετρίες με τα ροδάκινα σε τρεις διαφορετικές θέσεις

Πίνακας 36. Αρχικές και οριακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν στην επιλυόμενη γεωμετρία με τα 4 τεμάχια σε συγκεκριμένη θέση

A/A	Περιγραφή Παραμετρ. Μελέτης	Θέση	Θερμοκρασία θερμαντικού μέσου (°C)	Θερμοκρασία ψυκτικού μέσου (°C)	Αρχική θερμοκρασία κονσέρβας (°C)	Χρόνος θέρμανσης (min)	Συγκέντρωση ζάχαρης % (w/v)	h (W/m ² ·°C)	Χρονικό Βήμα (s)
1.	Επίδραση της θέσης των ροδάκινων στη κονσέρβα	Προς τα πάνω	100	20	20	20	20	∞	0,5
2.		Προς τα κάτω	100	20	20	20	20	∞	0,5
3.		Πλάγια	100	20	20	20	20	∞	0,5

Όπως και στη γεωμετρία επιβεβαίωσης του μοντέλου, ορίστηκε ότι τα τεμάχια των ροδάκινων είναι στερεά (“solid”) και το υγρό πλήρωσης (σιρόπι ζάχαρης) “fluid”. Επίσης ορίστηκε ως “wall” η επιφάνεια της κονσέρβας, όπως επίσης και η επιφάνεια των τεμαχίων. Βάση αυτού έγινε η παραδοχή ότι μεταξύ τεμαχίων ροδάκινων και σιροπιού δεν υπήρχε μεταφορά μάζας καθ’ όλη τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας. Οι αρχικές και οι οριακές συνθήκες, καθώς και επιπλέον σημαντικές πληροφορίες για την επίλυση του πεδίου ροής φαίνονται στον Πίνακα 36.

Οι υπόλοιπες πληροφορίες που εισάγονται στο λογισμικό ήταν ίδιες με αυτές της γεωμετρίας επιβεβαίωσης του μοντέλου.

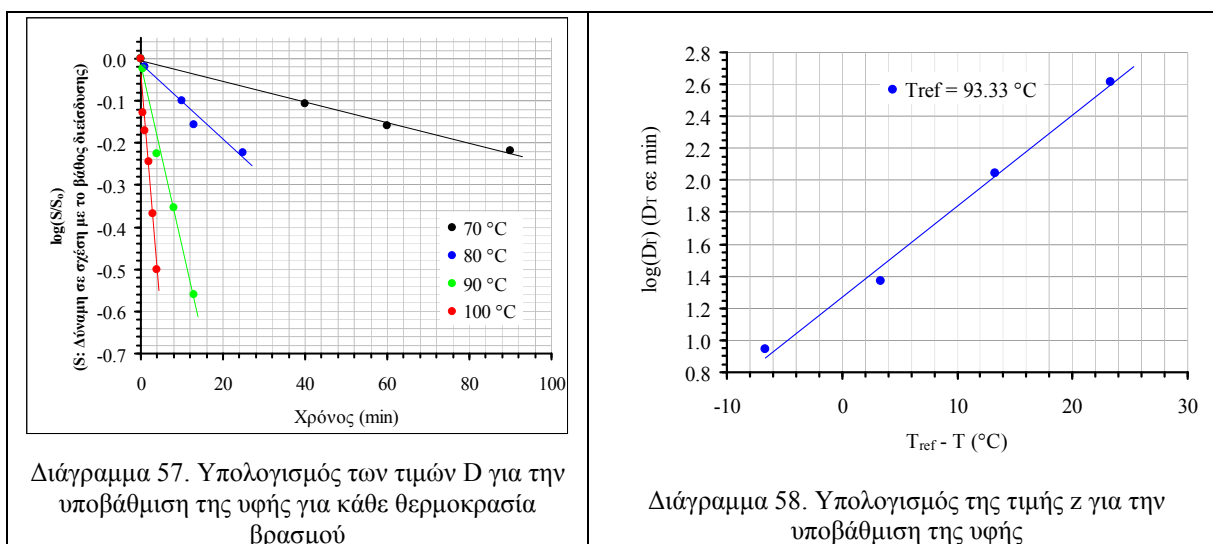
III.3 Αποτελέσματα

III.3.1 Υγρασία και διαλυτά στερεά συμπύρηνων ροδάκινων

Μετά τη μεταφορά των ροδάκινων από το χώρο παραγωγής (Βέροια) στο εργαστήριο πραγματοποιήθηκε ο προσδιορισμός της υγρασίας τους και η συγκέντρωση σε διαλυτά στερεά. Από τις 5 επαναλήψεις που έγιναν βρέθηκε ότι τα νωπά ροδάκινα είχαν υγρασία $85,9\% \pm 2,0\%$ και συγκέντρωση διαλυτών στερεών $11,1 \pm 0,2^\circ \text{Brix}$.

III.3.2 Παρουσίαση των παραμέτρων της θερμικής υποβάθμισης της υφής

Στην παράγραφο III.2.4 είχαν αναφερθεί οι παράμετροι D και z με τους οποίους περιγράφεται η υποβάθμιση της υφής. Από τα πειραματικά αποτελέσματα και μετά τη στατιστική επεξεργασία τους υπολογίστηκαν οι δύο αυτοί παράμετροι για τα ροδάκινα. Στα διαγράμματα 57 και 58 φαίνεται η μείωση του χαρακτηριστικού μεγέθους που αντιπροσώπευε την υφή σε διάφορες θερμοκρασίες και η μεταβολή του D σε σχέση με την αύξηση της θερμοκρασίας. Στο παράρτημα Α παρουσιάζονται οι καμπύλες μεταβολής της δύναμης σε σχέση με το βάθος διεύθυνσης για κάθε θερμοκρασία και χρόνο θέρμανσης.



Όπως είχε περιγραφεί στην παράγραφο III.2.4, πειράματα για την υποβάθμιση της υφής έγιναν σε τέσσερις διαφορετικές θερμοκρασίες (70, 80, 90 και 100°C). Για αυτές τις θερμοκρασίες βρέθηκαν οι αντίστοιχες τιμές D και έπειτα βάση των τιμών

αυτών υπολογίστηκε η τιμή z. Τόσο οι τιμές D, όσο και η τιμή z παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 37.

Πίνακας 37. Τιμές D και z για την θερμική υποβάθμιση της υφής

T (°C)	D (min)	z = 17,6±0,5 °C
70	408,7±10	
80	111,2±5	
90	23,4±1	
100	8,7±0,4	

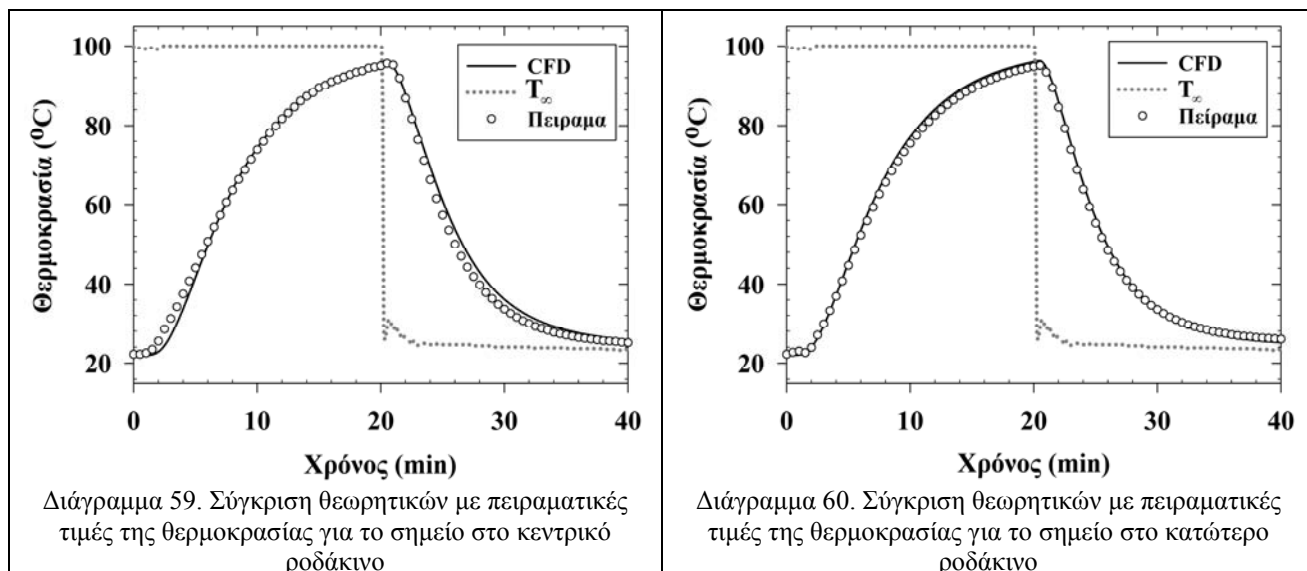
Επίσης για τον υπολογισμό της επί τοις % υποβάθμισης της υφής των ροδάκινων χρησιμοποιήθηκε η θερμοκρασία αναφοράς $T_{ref} = 93,3 \text{ } ^\circ\text{C}$. Σε αυτή τη θερμοκρασία η τιμή D υπολογίστηκε ίση με 18,5 min. Στις παρακάτω επιλύσεις των γεωμετριών θα αναφερθεί και θα παρουσιασθεί το ποσοστό υποβάθμισης της υφής βάση των παραπάνω παραμέτρων.

III.3.3 Παρουσίαση προσομοίωσης θερμικών επεξεργασιών με CFD

κονσερβοποιημένων ροδάκινων

III.3.3.1 Επαλήθευση του θεωρητικού μοντέλου

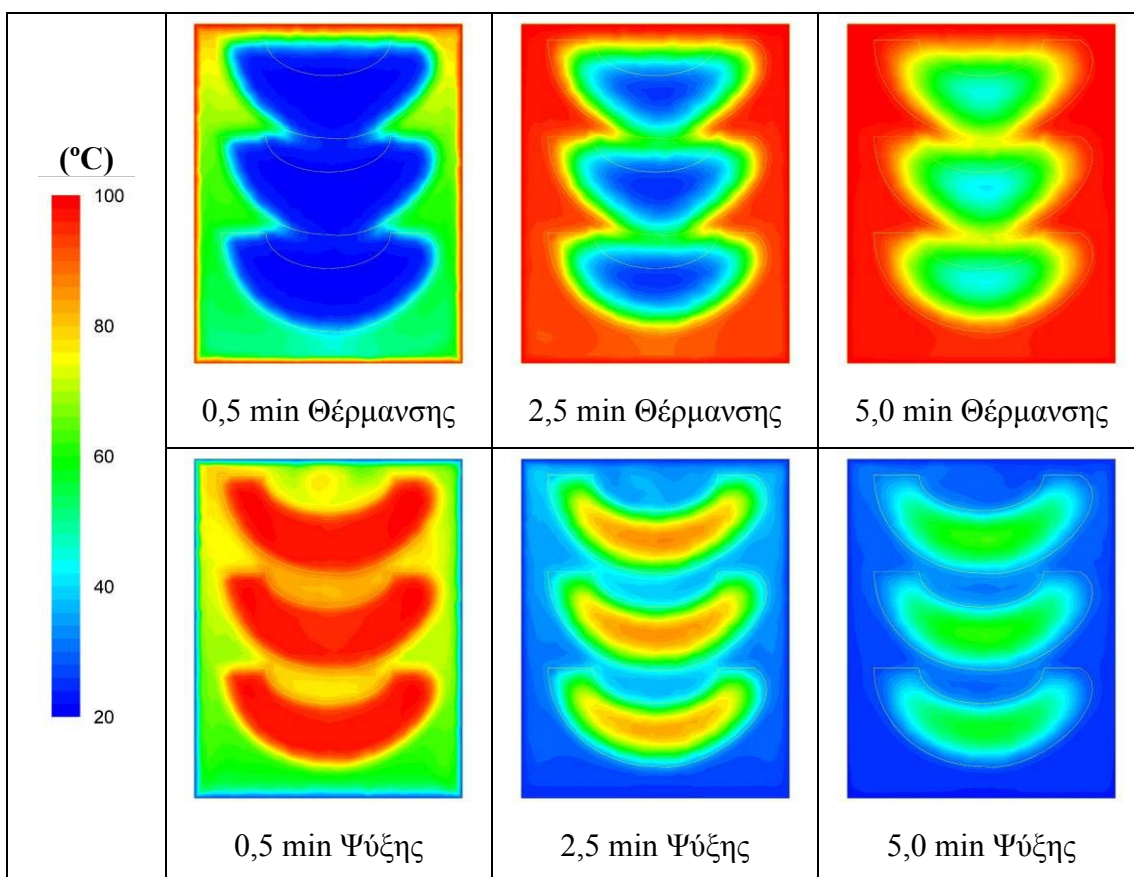
Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενες παραγράφους, η επιβεβαίωση του θεωρητικού μοντέλου με πειραματικές τιμές είναι απαραίτητη για να αποδειχθεί ότι το μοντέλο έχει εφαρμογή σε τέτοιου είδους γεωμετρίες και φαινόμενα μεταφοράς. Έχοντας υπόψη τις συνθήκες τόσο του θεωρητικού μοντέλου, όσο και της πειραματικής θερμικής επεξεργασίας που επικράτησαν, παραθέτονται τα διαγράμματα 59 και 60, που δείχνουν τη θερμοκρασιακή μεταβολή σε συνάρτηση με το χρόνο της θερμικής επεξεργασίας στα δύο σημεία μέτρησης, που βρίσκονται στο κάτω και στο μεσαίο ροδάκινο, όπως αναλυτικά αναφέρεται στην παράγραφο III.2.5.2. Στις εικόνες αυτές φαίνονται η πειραματική θερμοκρασία του θερμαντικού – ψυκτικού μέσου, καθώς και η πειραματική θερμοκρασία και η θερμοκρασία από το θεωρητικό μοντέλο στα δύο σημεία μέτρησης. Είναι χαρακτηριστικό ότι οι πειραματικές και οι θεωρητικές τιμές της θερμοκρασίας βρίσκονται σε πολύ καλή σύμπτωση, τόσο στο κέντρο του κάτω, όσο και του κεντρικού τεμαχίου. Επομένως το θεωρητικό μοντέλο επαληθεύεται και άρα είναι δυνατή η περαιτέρω επίλυση παραμετρικών μελετών.



Θερμοκρασιακό προφίλ

Η γενικότερη εικόνα της κατανομής της θερμοκρασίας όπως υπολογίστηκε από το CFD κατά τη διάρκεια της πειραματικής επαλήθευσης του θεωρητικού μοντέλου, φαίνεται στην Εικόνα 65.

Όπως φαίνεται αρχικά τα τεμάχια των ροδάκινων κρατούν την αρχική θερμοκρασία τους, ενώ το σιρόπι θερμαίνεται πολύ γρηγορότερα. Έτσι πριν ακόμα ολοκληρωθεί 1 min θέρμανσης το σιρόπι στο πάνω μέρος της κονσέρβας έχει μια θερμοκρασία της τάξης των 75 – 85 °C, ενώ προς τον πυθμένα η θερμοκρασία του ρευστού δεν ξεπερνά τους 50 °C. Αξίζει να σημειωθεί ότι στο κενό που αφήνουν οι πυρήνες των ροδάκινων εγκλωβίζεται κρύο σιρόπι, το οποίο δεν μπορεί να αναμειχθεί με το υπόλοιπο ρευστό και δημιουργεί μια ψυχρή περιοχή κοντά στα τεμάχια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα τεμάχια να θερμαίνονται μέσω της περιφερειακής τους επιφάνειας και όχι από την άνω ή κάτω επιφάνειά τους, εκτός από το κάτω ροδάκινο που θερμαίνεται και από την κάτω επιφάνειά του. Το φαινόμενο αυτό γίνεται περισσότερο εμφανές στα 5 min μετά την έναρξη της θέρμανσης, όπου η περιφερειακή επιφάνεια έχει θερμοκρασία πάνω από 90 °C και κοντά στους 100 °C, ενώ τόσο το εσωτερικό των ροδάκινων, όσο και η άνω και κάτω επιφάνειές τους βρίσκονται ακόμα σε θερμοκρασίες της τάξης των 40 – 50 °C. Συνέπεια αυτού του φαινομένου είναι να δέχεται μεγαλύτερο θερμικό φορτίο η περιφερειακή επιφάνεια των τεμαχίων ενώ το εσωτερικό να υπόκειται σε σαφώς μικρότερη θερμική επεξεργασία.



Εικόνα 65. Κατανομή της θερμοκρασίας σε τομή της κονσέρβας για διάφορες χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας

Όπως φαίνεται από την Εικόνα 65, μετά τη περίοδο 0,5 min από την έναρξη της ψύξης, το σιρόπι έχει θερμοκρασία που κυμαίνεται από 60 – 80°C, τη στιγμή που τα ροδάκινα έχουν θερμοκρασία που βρίσκεται κοντά στους 100°C. Με το πέρας 2,5 min ψύξης, το σιρόπι φαίνεται ότι βρίσκεται σχεδόν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, ενώ τα ροδάκινα παραμένουν ακόμα αρκετά θερμά. Εδώ θα πρέπει να επισημανθεί ότι κατά τη διάρκεια της ψύξης το σιρόπι ρέει σε όλο τον όγκο που καταλαμβάνει στην κονσέρβα και δεν υπάρχουν περιοχές που εγκλωβίζονται θερμοί όγκοι σιροπιού. Αυτό έχει ως συνέπεια την περισσότερο ομοιόμορφη ψύξη των ροδάκινων, αλλά και του ίδιου του σιροπιού.

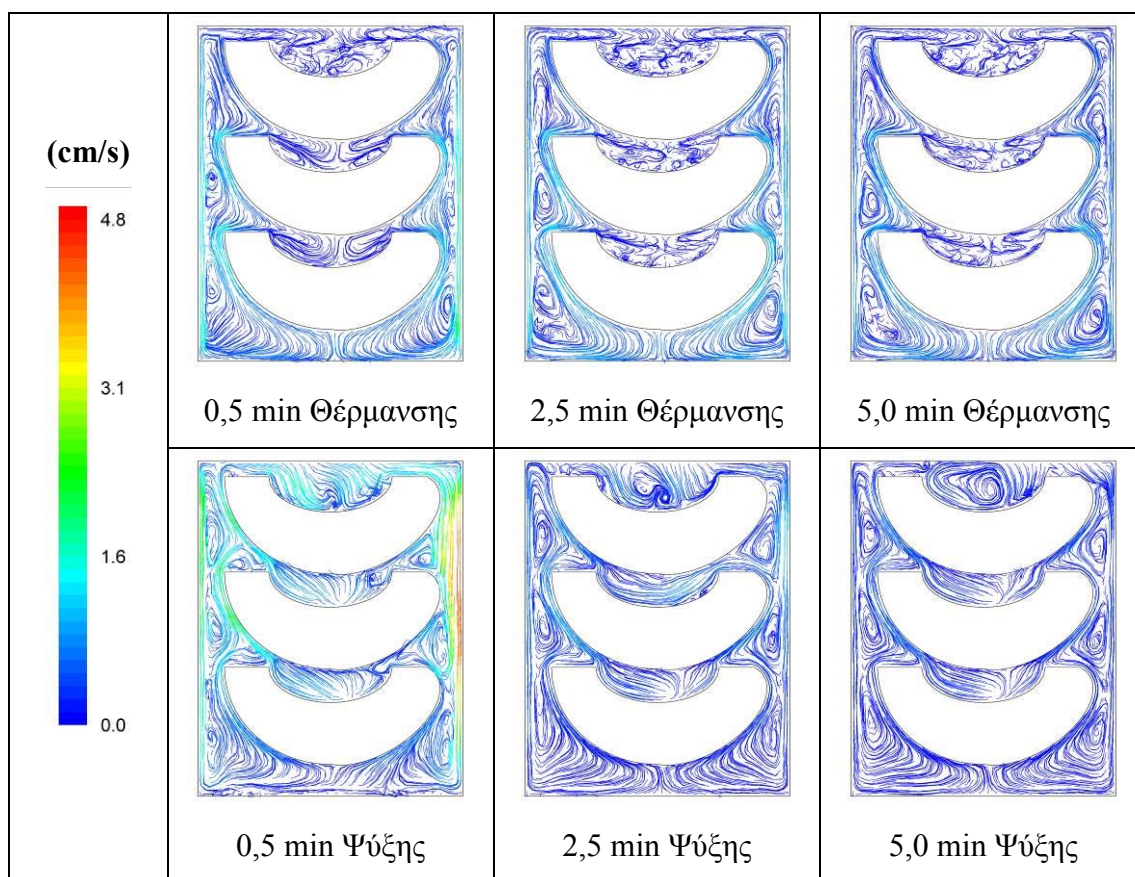
Συγκρίνοντας τις εικόνες της θέρμανσης με αυτές της ψύξης μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι ψυχρές περιοχές της κονσέρβας στη θέρμανση δημιουργούν τρεις τριγωνικές επιφάνειες στην τομή, ενώ στην ψύξη οι αντίστοιχες θερμές περιοχές σχηματίζουν τρεις επιφάνειες σχήματος μισοφέγγαρου. Επιπροσθέτως οι διαφορές αυτές στη θέρμανση και την ψύξη της κονσέρβας οφείλονται και στο γεγονός ότι τα τεμάχια ήταν στην πραγματικότητα ακίνητα και το κενό που άφησαν οι πυρήνες των ροδάκινων κοιτούσε προς την οροφή της κονσέρβας. Σε περίπτωση που τα τεμάχια είχαν άλλη θέση ή άλλαζαν συνεχώς θέση κατά τη διάρκεια της θερμικής

επεξεργασίας, τότε θα ήταν διαφορετική η συμπεριφορά του ρευστού, όπως θα παρατηρηθεί στην επόμενη παράγραφο.

Προφίλ ταχύτητας του ρευστού

Αρχικά όλος ο όγκος του σιροπιού έχει θερμοκρασία 20°C όση έχουν και τα τεμάχια των ροδάκινων. Με την έναρξη της θέρμανσης η θερμότητα μεταφέρεται μέσω του μεταλλικού τοιχώματος της κονσέρβας στο ρευστό. Στην εσωτερική επιφάνεια της κονσέρβας δημιουργείται ένα οριακό στρώμα το οποίο θερμαίνεται και λόγω της μειώσεως της πυκνότητάς του γίνεται πιο ελαφρύ και κινείται προς τον ανώτερο χώρο της κονσέρβας. Η κίνηση αυτή στα πρώτα δευτερόλεπτα της θέρμανσης είναι ραγδαία και οφείλεται στη μεγάλη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ σιροπιού και θερμαντικού μέσου. Η διαφορά θερμοκρασίας στην αρχή ήταν 80°C και με το πέρασμα του χρόνου η διαφορά αυτή μειωνόταν. Αποτέλεσμα αυτής της μείωσης ήταν η μέγιστη ταχύτητα, που παρουσιάστηκε στην αρχή και είχε μέγεθος 2,2 cm/s να μειωθεί σταδιακά και στο τέλος του κύκλου της θέρμανσης να μην ξεπερνά το 0,1 cm/s. Το οριακό στρώμα κατευθυνόμενο προς την οροφή της κονσέρβας συναντούσε αντίσταση και αναγκαστικά με αναστροφή της κίνησης το στρώμα αυτό κινούνταν προς τον πυθμένα της κονσέρβας. Έτσι από τις εικόνες που δείχνουν τη ροή του σιροπιού σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές φαίνεται ότι περιφερειακά της κονσέρβας υπάρχουν δύο στρώματα κίνησης. Το ένα στρώμα που εφάπτεται στο τοίχωμα της κονσέρβας κινείται ανοδικά, ενώ αυτό το οποίο είναι ακριβώς από μέσα έχει καθοδική κίνηση. Επίσης ανάμεσα σε αυτά τα δύο στρώματα παρουσιάζεται ανακυκλοφορία του ρευστού και όπως φαίνεται από την Εικόνα 66 δημιουργούνται δίνες ανάμεσα στα τεμάχια. Στο εσωτερικό της κονσέρβας και κυρίως γύρω από τον κεντρικό άξονα η ταχύτητα του σιροπιού ήταν πολύ μικρή. Αυτό, όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, οφείλεται στον εγκλωβισμό μικρού όγκου σιροπιού στο άνοιγμα, που αφήνουν οι αφαιρούμενοι πυρήνες και προκαλεί τη δυσκολία στη μετάδοση θερμότητας από το σιρόπι προς τα τεμάχια.

Κατά την έναρξη του κύκλου της ψύξης η ταχύτητα του ρευστού αυξάνει σημαντικά σε τιμή και αλλάζει σε κατεύθυνση. Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ ψυκτικού μέσου και θερμού σιροπιού είναι η κύρια αιτία αύξησης της τιμής της ταχύτητας. Η διαφορά αυτή κυμαίνεται αρχικά σε επίπεδα της τάξης των 80°C και σταδιακά μειώνεται μέχρι το τέλος της ψύξης, οπότε ουσιαστικά μηδενίζεται. Οι μέγιστες τιμές της ταχύτητας του ρευστού παρατηρούνται με την έναρξη της ψύξης και εντοπίζονται στο πλάγιο τοίχωμα της κονσέρβας.



Εικόνα 66. Προφίλ ταχύτητας σε διάφορες χρονικές στιγμές της θερμικής επεξεργασίας

Η μέγιστη τιμή που παρατηρήθηκε ήταν 4,8 cm/s. Λόγω του γεγονότος ότι η θερμοκρασία του σιροπιού μειώθηκε απότομα στα πρώτα λεπτά της ψύξης παρατηρήθηκε και απότομη πτώση της ταχύτητας. Έτσι από την Εικόνα 66 φαίνεται ότι μετά από 2,5 min από την έναρξη της ψύξης η μέγιστη τιμή της ταχύτητας δεν ξεπερνά το 1,5 cm/s. Επίσης κατά τη διάρκεια της ψύξης δεν εγκλωβίζεται θερμό σιρόπι στα ανοίγματα των πυρήνων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια πιο ομοιόμορφη ροή σε όλο το χώρο και τη μεταφορά της θερμότητας πιο γρήγορα προς το ψυκτικό μέσο. Εκτός όμως από τη μεταβολή του μεγέθους της ταχύτητας παρατηρήθηκε και μεταβολή στην κατεύθυνση της ροής σε σχέση με τον κύκλο θέρμανσης. Με την έναρξη της ψύξης το οριακό στρώμα μεταξύ πλάγιου τοιχώματος και του υπόλοιπου όγκου του σιροπιού άρχισε να ψύχεται. Η ψύξη αυτή συνεπάγεται την αύξηση της πυκνότητας του σιροπιού τοπικά και την κίνησή του προς τα κατώτερα επίπεδα της κονσέρβας. Φτάνοντας στον πυθμένα της κονσέρβας ο όγκος σιροπιού αναγκάζεται να αναστρέψει την πορεία του και να κινηθεί ανοδικά περνώντας από την περιφερειακή επιφάνεια των τεμαχίων. Με την ανοδική αυτή κίνηση μέρος του σιροπιού κινείται προς τον κεντρικό άξονα της κονσέρβας και δέχεται φορτία θερμότητας από την άνω και κάτω επιφάνεια των τεμαχίων. Όταν ο όγκος του

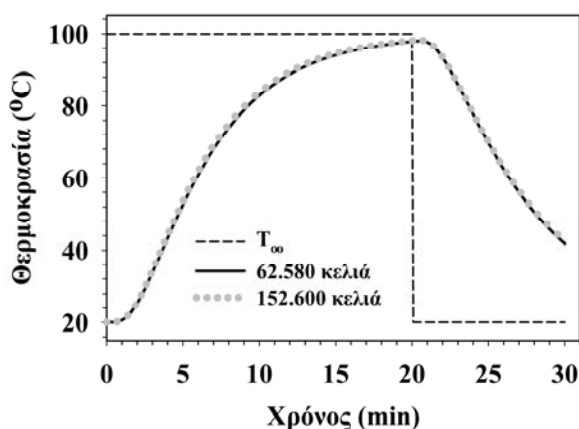
σιροπιού φτάσει στην οροφή της κονσέρβας έχει θερμανθεί και ακολουθεί ξανά την καθοδική πορεία του, αποδίδοντας το θερμικό φορτίο στην επιφάνεια της κονσέρβας. Όπως φαίνεται από την Εικόνα 66 η κίνηση αυτή είναι περίπου σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της ψύξης με τη διαφορά ότι μειώνεται η έντασή της.

ΠΙ.3.3.2 Προσομοίωση θερμικής επεξεργασίας 3-D μοντέλου 6 τεμαχίων ροδάκινων σε κονσέρβα

Στην παράγραφο αυτή γίνεται περιγραφή της προσομοίωσης κονσέρβας με τυχαία κατανομή των 6 τεμαχίων ροδάκινων εντός του περιέκτη. Τα 6 τεμάχια ροδάκινων εμβαπτισμένα σε σιρόπι ζάχαρης υπέστησαν θερμική επεξεργασία σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του Πίνακα 30.

ΠΙ.3.3.2.1 Ανεξαρτησία πλέγματος

Στην περίπτωση της γεωμετρίας με τα 6 τεμάχια ροδάκινων επιλύθηκαν δύο περιπτώσεις, με αραιό (62.580 κελιά) και πυκνό (152.600 κελιά) πλέγμα.



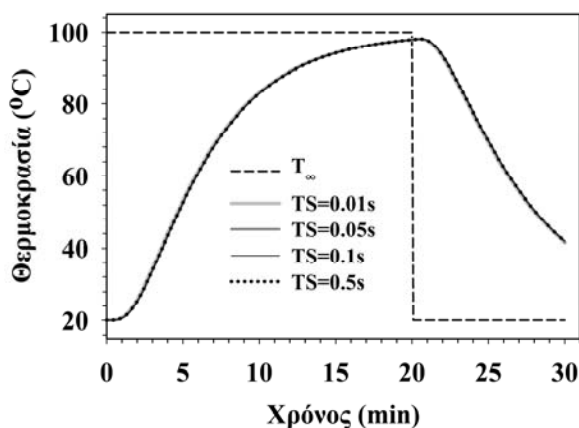
Διάγραμμα 61. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ όπως υπολογίστηκε για αραιό και πυκνό πλέγμα

Είναι χαρακτηριστικό ότι η διαφορά στη θερμοκρασία των δύο περιπτώσεων δεν υπερβαίνει τους 0,2°C. Κατά συνέπεια για οικονομία χρόνου επίλυσης επιλέχθηκε το αραιότερο πλέγμα και σε όλες τις υπόλοιπες παραμετρικές μελέτες χρησιμοποιήθηκε μόνο αυτό το πλέγμα.

ΠΙ.3.3.2.2 Ανεξαρτησία χρονικού βήματος

Ομοίως με την ανεξαρτησία της πυκνότητας του πλέγματος πρέπει για μια επιλύσιμη γεωμετρία να υφίσταται και ανεξαρτησία του χρονικού βήματος (time

step). Αυτό ισχύει στην περίπτωση που η ροή είναι χρονικά μεταβαλλόμενη. Στην γεωμετρία με τα 6 τεμάχια ροδάκινων χρησιμοποιήθηκε το χρονικό βήμα των 0,5 s. Όμως επιλύθηκε η ίδια γεωμετρία και με χρονικά βήματα 0,1, 0,05 και 0,01 s. Ομοίως με την προηγούμενη παράγραφο έγινε σύγκριση της θερμοκρασίας στην αργότερα θερμαινόμενη ζώνη της κονσέρβας για τις τέσσερις περιπτώσεις.



Διάγραμμα 62. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ για τις 4 περιπτώσεις

Τόσο στον κύκλο της θέρμανσης, όσο και στον κύκλο της ψύξης είναι εμφανές ότι δεν υπάρχει κάποια σημαντική διαφορά μεταξύ των τεσσάρων περιπτώσεων. Αυτό συνεπάγεται ότι υπάρχει ανεξαρτησία χρονικού βήματος μεταξύ 0,5 – 0,01 s. Έχοντας υπόψη αυτό το αποτέλεσμα ακολούθησε η επίλυση όλων των υπολοίπων παραμετρικών μελετών με χρονικό βήμα ίσο με 0,5 s.

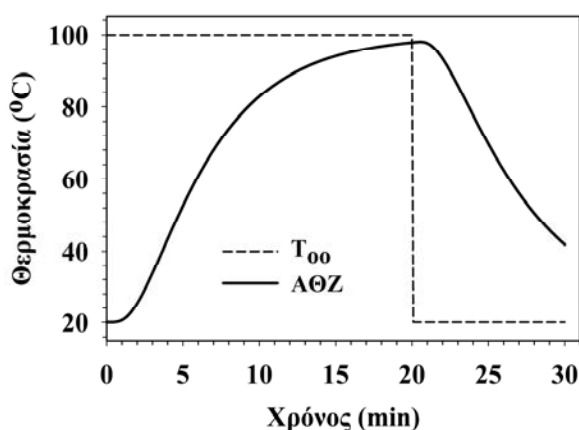
ΠΙ.3.3.2.3 Περιγραφή κύριας γεωμετρίας 6 τεμαχίων ροδάκινων

Η κονσέρβα που περιείχε 6 τεμάχια ροδάκινων όπως φαίνεται στην Εικόνα 63, επιλύθηκε σύμφωνα με τις παραμέτρους και τα χαρακτηριστικά που περιγράφονται στον Πίνακα 35. Στην πραγματικότητα η επιλογή του χρόνου και της θερμοκρασίας θέρμανσης επιλέχθηκε σύμφωνα με τη βιομηχανική πρακτική του εργοστασίου από το οποίο έγινε η προμήθεια των ροδάκινων. Αναλυτικότερα, οι κονσέρβες αφού γεμίζονται με ροδάκινα και σιρόπι θερμοκρασίας 20°C, απαερώνονται και σφραγίζονται. Στη συνέχεια οι κονσέρβες κινούνται σε μεταφορική ταινία, η οποία είναι εμβαπτισμένη σε νερό 100°C περίπου όπου και παραμένουν για 20 min. Μετά το πέρας των 20 min θέρμανσης, στις κονσέρβες γίνεται καταιονισμός κρύου νερού για 10 min. Βάση λοιπόν, της παραπάνω βιομηχανικής πρακτικής επιλύθηκε η γεωμετρία, με θέρμανση για 20 min στους 100°C και ψύξη για 10 min στους 20°C. Μετά την επίλυση παρελήφθησαν τα δεδομένα, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω, ως διαγράμματα θερμοκρασίας – χρόνου και εικόνες του θερμοκρασιακού προφίλ και

της ταχύτητας του ρευστού. Επίσης παρουσιάζονται εικόνες με την απεικόνιση του θερμικού αποτελέσματος επί του μικροοργανισμού στόχου και της υποβάθμισης της υφής.

Θερμοκρασιακό προφίλ

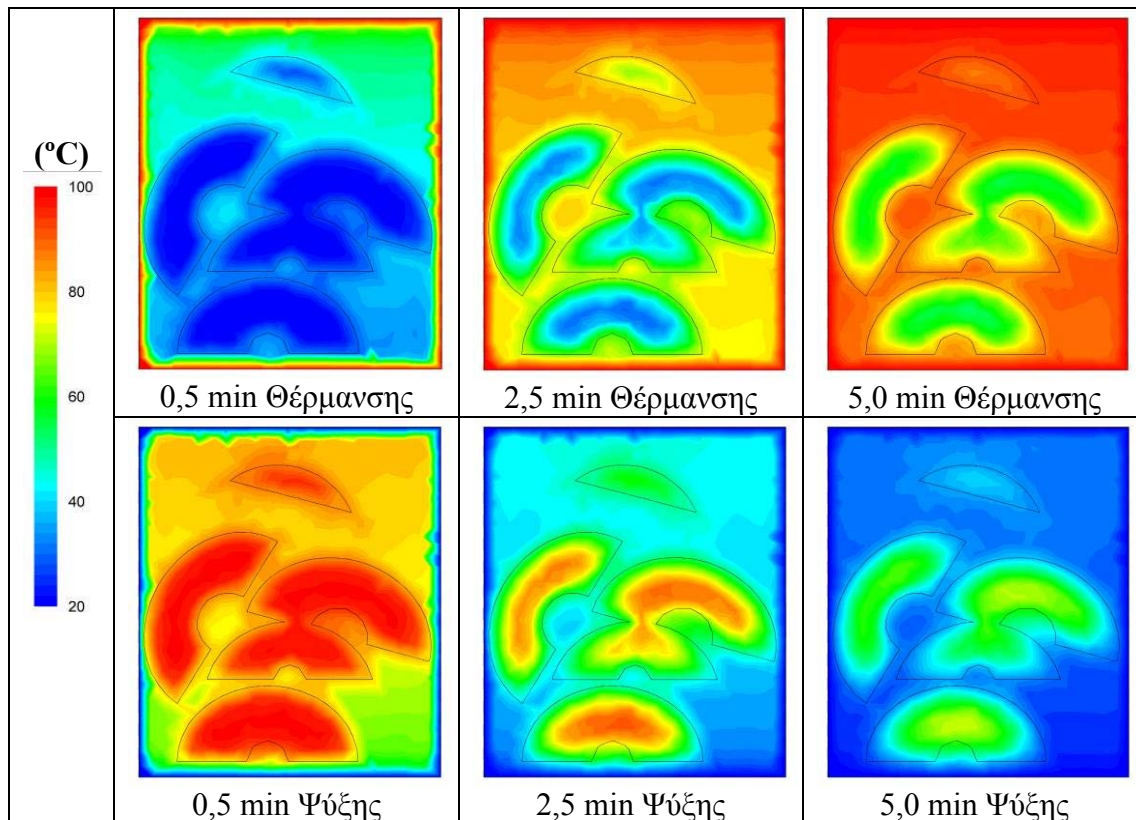
Κατά την επίλυση της γεωμετρίας καταγραφόταν η θερμοκρασία στην αργότερα θερμαινόμενη ζώνη. Η μεταβολή της θερμοκρασίας στο σημείο αυτό φαίνεται από το Διάγραμμα 63. Αρχικά υπάρχει μια περίοδος 1 min όπου η ΑΘΖ δεν αντιλαμβάνεται την εισροή θερμότητας στο σύστημα, ενώ στη συνέχεια η θερμοκρασία αυξάνεται απότομα. Στα 20 min θέρμανσης γίνεται αντιληπτό από το διάγραμμα ότι η ΑΘΖ δεν φτάνει τη θερμοκρασία του θερμαντικού μέσου. Επίσης για 1 min μετά την έναρξη της ψύξης, η θερμοκρασία στην ΑΘΖ παραμένει σε ανοδική πορεία και έπειτα αρχίζει να μειώνεται σταδιακά.



Διάγραμμα 63. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας

Εάν ήταν απαραίτητο η θερμοκρασία της ΑΘΖ να φτάσει τη θερμοκρασία του ψυκτικού μέσου, τότε θα έπρεπε να συνεχιστεί η ψύξη για ακόμα 10 min. Το γεγονός ότι στη βιομηχανική πρακτική είναι επιθυμητό οι κονσέρβες να ψύχονται μέχρι τους 30-40°C έχει να κάνει με το στέγνωμα εξωτερικά των κονσερβών, έτσι ώστε να μην χρειαστεί επιπλέον χρόνος και ενέργεια για αυτή τη διαδικασία.

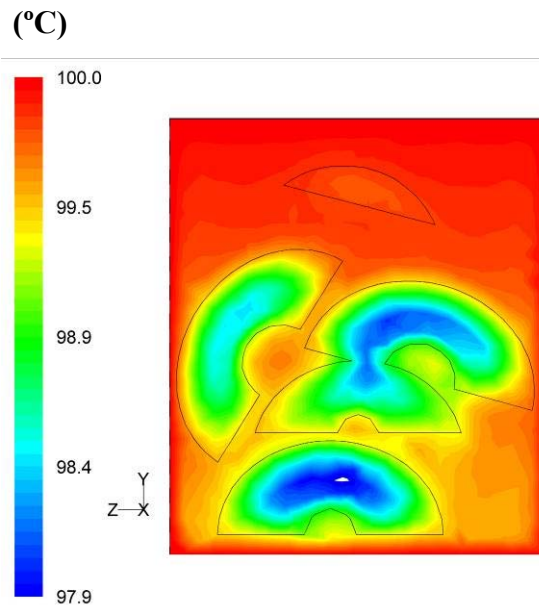
Εκτός από την καταγραφή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ εξήχθησαν και εικόνες θερμοκρασιακού προφίλ σε διάφορες χρονικές στιγμές (Εικόνα 67). Αρχικά φαίνεται το οριακό στρώμα που δημιουργείται μεταξύ του τοιχώματος της κονσέρβας και του σιροπιού. Ενώ το σιρόπι αρχίζει να θερμαίνεται, τα τεμάχια ροδάκινων είναι ακόμα στην αρχική θερμοκρασίας τους.



Εικόνα 67. Κατανομή της θερμοκρασίας σε τομή της κονσέρβας για διάφορες χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας

Όμως μετά το πέρασμα 2,5 min από την έναρξη της θέρμανσης το σιρόπι βρίσκεται σε θερμοκρασία 80°C περίπου (και με συνεχόμενη αύξηση της θερμοκρασίας), ενώ τα τεμάχια έχουν θερμοκρασία περιμετρικά 60°C και στο εσωτερικό τους 40°C περίπου. Έπειτα από 5 min από την έναρξη της θέρμανσης το σιρόπι δείχνει να βρίσκεται κοντά στη θερμοκρασία θέρμανσης, ενώ τα τεμάχια βρίσκονται σε θερμοκρασία των 60-70°C.

Στη συνέχεια της θέρμανσης συνεχίζεται η αύξηση της θερμοκρασίας των τεμαχίων, ενώ η θερμοκρασία του σιροπιού παραμένει ουσιαστικά σταθερή, μιας και ήδη βρισκόταν κοντά στους 100°C μετά το 5^ο min θέρμανσης. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι κατά το τέλος της θέρμανσης η θερμοκρασία στην ΑΘΖ δεν αγγίζει τους 100°C. Άλλωστε αυτό φαίνεται και από το Διάγραμμα 63, όπου ενώ η θερμοκρασία της ΑΘΖ και μετά το τέλος της θέρμανσης συνεχίζει να αυξάνεται, τελικά δεν φθάνει τη θερμοκρασία θέρμανσης. Από την Εικόνα 68, που δείχνει το θερμοκρασιακό προφίλ στην τομή της κονσέρβας, εντοπίζεται η ΑΘΖ.



Εικόνα 68. Κατανομή της θερμοκρασίας σε τομή της κονσέρβας στο τέλος της θέρμανσης

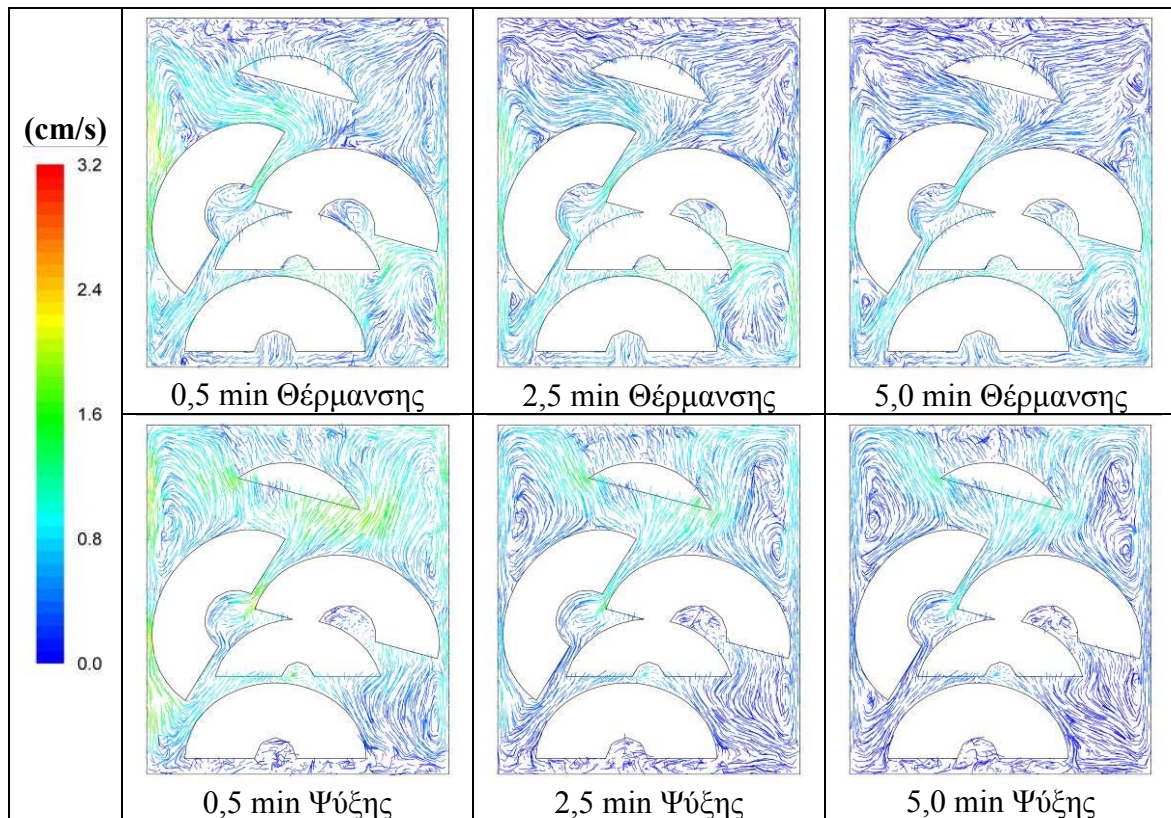
Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι το συγκεκριμένο σημείο έχει συντεταγμένες (0,-36.3,2.5) και βάση αυτής της επίλυσης καταγράφηκε η θερμοκρασία στο ίδιο σημείο για τις υπόλοιπες παραμετρικές μελέτες. Η επιλογή αυτή ελέγχθηκε και επιβεβαιώθηκε ότι το συγκεκριμένο σημείο είναι η ΑΘΖ για όλες τις περιπτώσεις.

Με την έναρξη του κύκλου ψύξης δημιουργήθηκε πάλι ένα ψυχρό οριακό στρώμα μεταξύ τοιχώματος και σιροπιού. 0,5 min μετά την έναρξη της ψύξης η θερμοκρασία του σιροπιού είναι ακόμα υψηλή, ενώ στο εσωτερικό των τεμαχίων η θερμοκρασία συνεχίζει να αυξάνεται. Μετά τα 2,5 min από την έναρξη της ψύξης η θερμοκρασία του σιροπιού έχει μειωθεί αισθητά, όμως τα ροδάκινα παραμένουν σε υψηλή θερμοκρασία, δηλαδή 85°C περίπου στο εσωτερικό τους και κοντά στους 60°C περιμετρικά. Προς το τέλος της ψύξης η θερμοκρασία του ρευστού βρίσκεται στους 30°C και στα τεμάχια ροδάκινων στους 55 – 65°C. Όπως είχε αναφερθεί προηγουμένως, η ψύξη με κρύο νερό διακόπτεται νωρίτερα για να στεγνώσουν οι κονσέρβες από το νερό ψύξης, που βρίσκεται στην εξωτερική επιφάνειά τους. Όμως από την εικόνα του θερμοκρασιακού προφίλ στα 5 min μετά την έναρξη της ψύξης φαίνεται το σιρόπι να έχει ψυχθεί αρκετά και αναμένεται ακόμα περισσότερο στα 10 min. Στην πραγματικότητα το σιρόπι ψύχεται αρκετά, εντούτοις τα τεμάχια βρίσκονται σε θερμοκρασία της τάξης των 40°C, με αποτέλεσμα μετά τη θερμική εξισορρόπηση η κονσέρβα σαν σύνολο να βρίσκεται σε υψηλότερη θερμοκρασία από αυτή του περιβάλλοντος.

Προφίλ ταχύτητας του ρευστού

Όπως σε όλες τις παραμετρικές μελέτες, έτσι και σε αυτή την περίπτωση το σιρόπι βρισκόταν σε ηρεμία πριν την έναρξη της θέρμανσης. Όταν ξεκίνησε η επίλυση του πεδίου ροής, τότε αυτομάτως το τοίχωμα της κονσέρβας θεωρήθηκε ότι αποκτά θερμοκρασία 100°C και αρχίζει η ροή θερμότητας από το τοίχωμα προς το εσωτερικό της κονσέρβας. Εκείνη τη στιγμή δημιουργείται ένα οριακό στρώμα σιροπιού το οποίο θερμαίνεται γρηγορότερα από τον υπόλοιπο όγκο του ρευστού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το σιρόπι που θερμαίνεται γρηγορότερα να γίνεται πιο ελαφρύ και με την επίδραση των βαρυτικών δυνάμεων να έχει την τάση να κινηθεί προς την οροφή της κονσέρβας, όπως αναπτύχθηκε στην παράγραφο III.3.3.1. Μετά από 0,5 min από την έναρξη της θέρμανσης, η ταχύτητα του ρευστού κυμαίνεται στο οριακό στρώμα από 3,0 - 3,2 cm/s. Επίσης σταδιακά φαίνεται η μείωση στην ταχύτητα του οριακού στρώματος, συνέπεια της μείωσης της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ τοιχώματος και ρευστού.

Μια άλλη σημαντική πληροφορία, που εξάγεται από τις παρακάτω εικόνες είναι η αυξημένη τιμή της ταχύτητας στο εσωτερικό της κονσέρβας. Όπως φαίνεται από την εικόνα σχεδίασης της γεωμετρίας, τα τεμάχια των ροδάκινων είναι άτακτα τοποθετημένα εντός της κονσέρβας και θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν και ως “στριμωγμένα”. Το σιρόπι κατά τη διάρκεια της θέρμανσης εκτελεί μια κυκλική κίνηση, η οποία αρχίζει ανοδικά από το πλάγιο τοίχωμα της κονσέρβας, φτάνει στην οροφή της και εκεί αναγκάζεται να κινηθεί καθοδικά πιεζόμενο από το όλο και ελαφρύτερο οριακό στρώμα ρευστού. Η καθοδική αυτή κίνηση γίνεται κατά μήκος του κεντρικού άξονα της κονσέρβας και περιφερειακά αυτού. Όμως εμποδίζεται από την άτακτη τοποθέτηση των τεμαχίων ροδάκινων και αναγκάζεται να κινηθεί από τους χώρους που αυτά αφήνουν μεταξύ τους. Η μικρή διατομή των διάκενων αυτών είναι ο κύριος λόγος αύξησης της ταχύτητας του καθοδικού ρεύματος σε τοπικό επίπεδο. Ένας άλλος λόγος αύξησης της ταχύτητας του σιροπιού στην κάθοδο είναι τα λιγότερο θερμά τεμάχια ροδάκινων σε σχέση με τον όγκο του σιροπιού. Έτσι, κινούμενο το σιρόπι καθοδικά κοντά στον κεντρικό άξονα, ψύχεται από τα κρύα ροδάκινα, γίνεται πιο βαρύ και κινείται με μεγαλύτερη ταχύτητα μέχρι να συναντήσει τον πυθμένα της κονσέρβας. Εκεί αναγκάζεται να αλλάξει κατεύθυνση και να κινηθεί προς το πλάγιο τοίχωμα της κονσέρβας. Έπειτα επαναλαμβάνεται η κίνηση που περιγράφηκε παραπάνω.

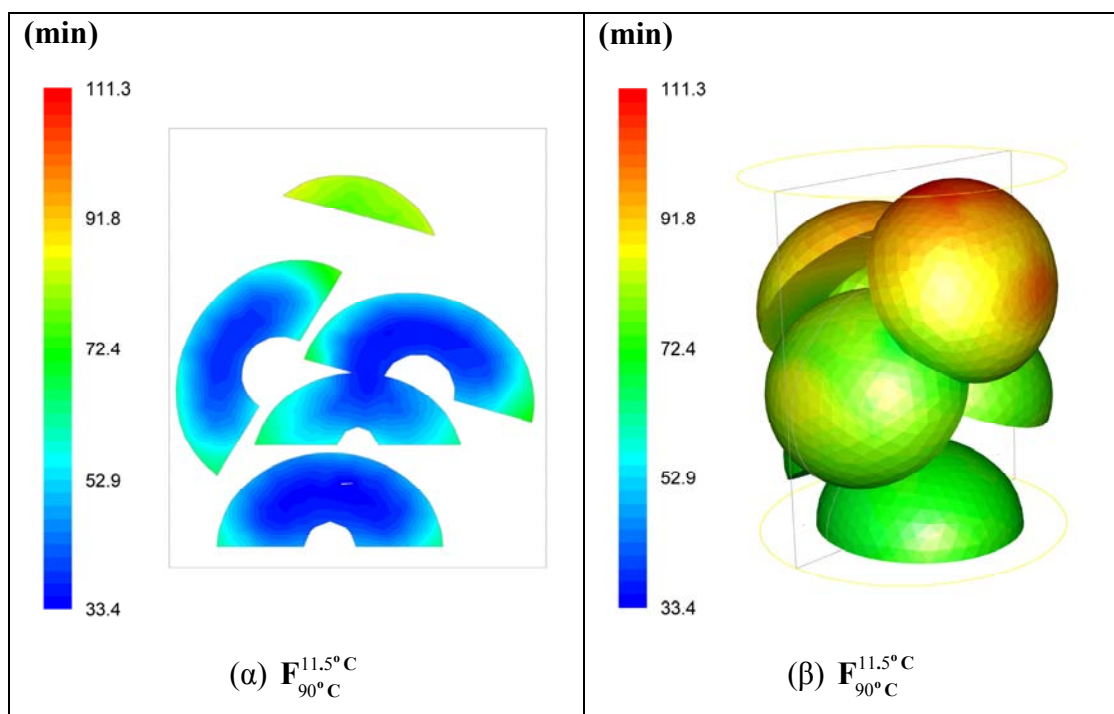


Εικόνα 69. Προφίλ ταχύτητας σε διάφορες χρονικές στιγμές της θερμικής επεξεργασίας

Εφόσον ολοκληρώθηκε ο κύκλος θέρμανσης ακολούθησε ο κύκλος ψύξης. Σε αυτή την περίπτωση η κίνηση αντιστράφηκε. Πλέον το οριακό στρώμα ψυχόταν από το ψυκτικό μέσο και γινόταν πιο βαρύ. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να έχει καθοδική κατεύθυνση κοντά στο πλάγιο τοίχωμα της κονσέρβας, ενώ ανοδική κατεύθυνση κοντά στον κεντρικό άξονα. Η κινητήριος δύναμη για την καθοδική κίνηση του σιροπιού ήταν η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ ρευστού και πλάγιου τοιχώματος της κονσέρβας. Με την έναρξη της ψύξης αυτή η διαφορά θερμοκρασίας έχει τη μέγιστη τιμή της (80°C περίπου), ενώ στη συνέχεια αρχίζει να μειώνεται με αποτέλεσμα τη μείωση της ταχύτητας του ρευστού. Η έντονη ροή στο εσωτερικό της κονσέρβας είναι εμφανής και κατά τη διάρκεια της ψύξης, για τους ίδιους λόγους που αναφέρθηκαν στον κύκλο της θέρμανσης. Η μέγιστη τιμή της ταχύτητας παρατηρείται αμέσως μετά την έναρξη της ψύξης και έχει μέγεθος 3,1 – 3,2 cm/s, τιμή η οποία μειώνεται σταδιακά. Τόσο στο τέλος της θέρμανσης, όσο και στο τέλος της ψύξης η μέγιστη τιμή της ταχύτητας του ρευστού δεν ξεπερνούσε τα 0,2 και 0,4 cm/s αντίστοιχα. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο διαφορετικό χρόνο θέρμανσης και ψύξης.

Θερμική καταστροφή και εντοπισμός κρίσιμου σημείου στα ροδάκινα

Όπως έχει αναφερθεί στην παράγραφο III.2.5.4, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία και τη βιομηχανική πρακτική η θερμική επεξεργασία σχεδιάζεται για την καταστροφή των σπορίων του βακτηρίου *C. butyricum*. Με την επίλυση γίνονται υπολογισμοί του ισοδύναμου χρόνου θερμικής επεξεργασίας σε όλα τα σημεία των ροδάκινων για την επιβίωση των σπορίων του βακτηρίου.

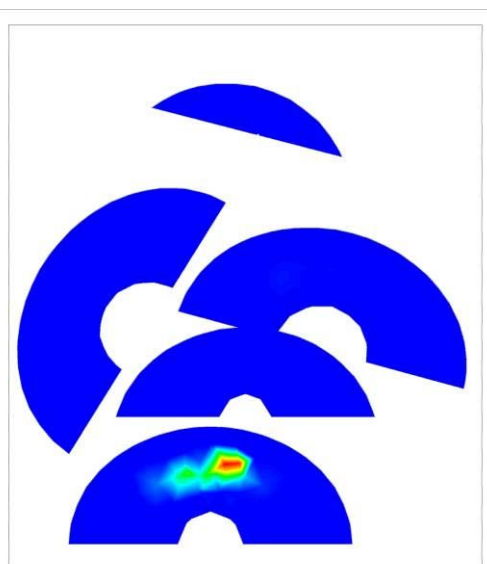


Εικόνα 70. Κατανομή του ισοδύναμου χρόνου $F_{90^{\circ}\text{C}}^{11.5^{\circ}\text{C}}$ στο εσωτερικό και στην επιφάνεια των ροδάκινων

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Silva & Gibbs 2004) για μια επαρκή θερμική επεξεργασία ο απαιτούμενος ισοδύναμος χρόνος είναι $F_{90^{\circ}\text{C}}^{11.5^{\circ}\text{C}} = 1,5 - 8 \text{ min}$ ή απαιτείται η θερμοκρασία στην ΑΘΖ να φτάσει στους 91°C . Όπως θα παρατηρηθεί παρακάτω με την εφαρμοζόμενη θερμική επεξεργασία υπερκαλύπτονται οι παραπάνω συνθήκες, για τις διαστάσεις της κονσέρβας που χρησιμοποιήσαμε. Τα αποτελέσματα της επίλυσης φαίνονται στις εικόνες 70 α και β. Σε αυτές τις εικόνες παρουσιάζεται η κατανομή των τιμών $F_{90^{\circ}\text{C}}^{11.5^{\circ}\text{C}}$ σε τομή της κονσέρβας, αλλά και στην επιφάνεια των ροδάκινων.

Η αρχική παρατήρηση των δύο εικόνων δείχνει ότι υπάρχει μεγάλη διαφορά στο επιφανειακό θερμικό αποτέλεσμα σε σχέση με αυτό στο εσωτερικό των τεμαχίων. Χαρακτηριστικό είναι ότι η μέγιστη τιμή παρατηρείται στην επιφάνεια των τεμαχίων

που βρίσκονται κοντά στην οροφή της κονσέρβας. Ενώ στην επιφάνεια των κατωτέρων τεμαχίων ο ισοδύναμος χρόνος είναι πολύ μικρότερος. Για την ακρίβεια η μέγιστη τιμή του ισοδύναμου χρόνου είναι 111,3 min, ενώ η ελάχιστη 33,4 min. Είναι δε χαρακτηριστικό ότι όλα τα σημεία των τεμαχίων έχουν πολλαπλάσια τιμή F σε σχέση με αυτή που η βιβλιογραφία αναφέρει, ως επαρκή για ένα μικροβιολογικά σταθερό προϊόν.



Εικόνα 71. Προσδιορισμός του κρίσιμου σημείου της κονσέρβας

Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο που απαιτεί διερεύνηση είναι το κρίσιμο σημείο (CP). Έχοντας ως δεδομένα τις θερμικές παραμέτρους των σπορίων του βακτηρίου και τον υπολογιζόμενο ισοδύναμο χρόνο σε όλο τον όγκο των ροδάκινων εντοπίστηκε το κρίσιμο σημείο.

$$F_{T_{ref}}^z = \int_0^t 10^{\frac{T-T_{ref}}{z}} dt = D_{T_{ref}} \cdot (\log(a) - \log(b)) \quad \text{Εξίσωση 53}$$

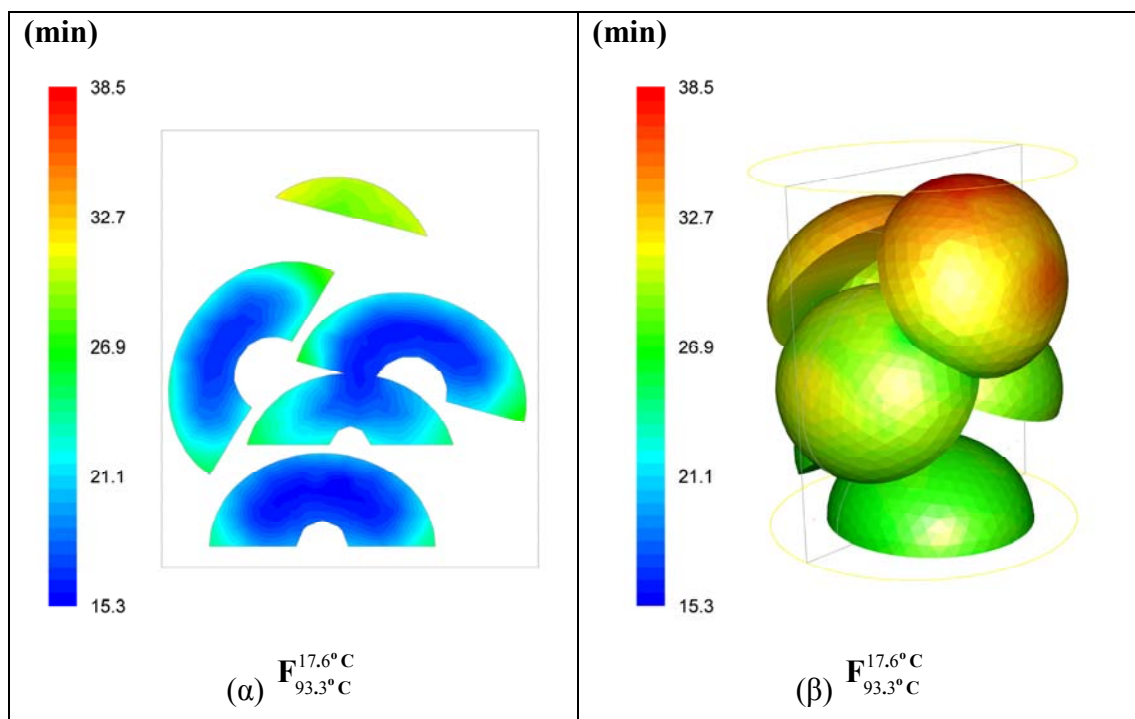
Όπου **a**: το αρχικό μικροβιακό φορτίο και **b**: το μικροβιακό μετά τη θερμική επεξεργασία

Από την εξίσωση (52) γνωρίζοντας την τιμή $F_{90^{\circ}C}^{11.5^{\circ}C}$ από την επίλυση της γεωμετρίας, το $D_{T_{ref}}$ από την βιβλιογραφία και θέτοντας ότι το αρχικό μικροβιακό φορτίο είναι 100 υπολογίζεται το εναπομείναν μικροβιακό φορτίο. Η τιμή “b” υπολογίστηκε για κάθε σημείο και παρουσιάζεται στην Εικόνα 71, η οποία δείχνει την τομή της κονσέρβας. Όπως φαίνεται το κρίσιμο σημείο (CP), εντοπίζεται στο τεμάχιο ροδάκινου που βρίσκεται κοντά στον πυθμένα της κονσέρβας και έχει συντεταγμένες (0,-34.0,4.6).

Επίσης θα πρέπει να σημειωθεί ότι για τις δεδομένες συνθήκες επεξεργασίας το ποσοστό επιβίωσης είναι στην ουσία μηδενικό και η πιθανότητα με τη συγκεκριμένη θερμική επεξεργασία να αλλοιωθεί μία κονσέρβα των συγκεκριμένων διαστάσεων κυμαίνεται στις 1 ανά $2,3 \cdot 10^{28}$ κονσέρβες.

Επίδραση της θερμικής επεξεργασίας στην υφή των ροδάκινων

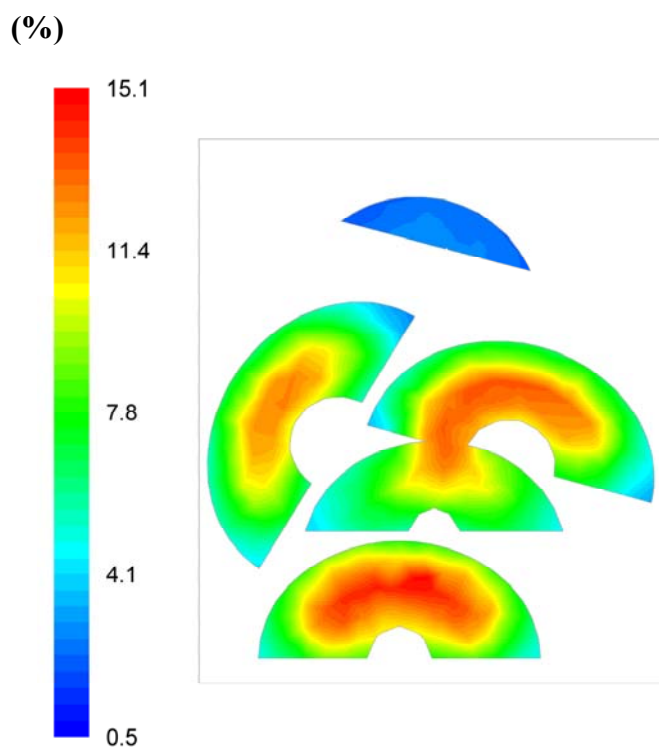
Μα ανάλογο τρόπο υπολογίστηκε η θερμική υποβάθμιση της υφής των τεμαχίων των ροδάκινων. Ο υπολογισμός για τον ισοδύναμο χρόνο θερμικής υποβάθμισης $F_{93,3^{\circ}\text{C}}^{17,6^{\circ}\text{C}}$, έγινε με θερμικές παραμέτρους ίσες με αυτές που βρέθηκαν πειραματικά και περιγράφονται στην παράγραφο III.3.2. Ομοίως και σε αυτή την περίπτωση εξήχθησαν δύο εικόνες (72 α και β) που περιγράφουν την κατανομή της τιμής F τόσο για την επιφάνεια των ροδάκινων, όσο και για το εσωτερικό τους. Η Εικόνα 72α με την τομή της κονσέρβας δείχνει χαρακτηριστικά, τη θερμική υποβάθμιση στο εσωτερικό των τεμαχίων.



Εικόνα 72. Κατανομή του ισοδύναμου χρόνου $F_{93,3^{\circ}\text{C}}^{17,6^{\circ}\text{C}}$, που αναφέρεται στην υφή των ροδάκινων στο εσωτερικό και στην επιφάνεια των ροδάκινων

Το εύρος της τιμής $F_{93,3^{\circ}\text{C}}^{17,6^{\circ}\text{C}}$ είναι από 15,3 έως 38,5 min για την εφαρμοζόμενη θερμική επεξεργασία. Η μεγαλύτερη θερμική υποβάθμιση της υφής εντοπίζεται στο επιφανειακό στρώμα των τεμαχίων και κυρίως στα τεμάχια που βρίσκονται κοντά

στην οροφή της κονσέρβας. Από την άλλη πλευρά, στο εσωτερικό των τεμαχίων η υφή υποβαθμίζεται θερμικά λιγότερο σε σχέση με την επιφάνεια. Έχοντας υπόψη την εξίσωση 52 και τις παραμέτρους θερμικής υποβάθμισης της υφής βρέθηκε ότι η επί τοις % υποβάθμιση είναι πολύ σημαντική. Στην Εικόνα 73 φαίνεται το εναπομείναν ποσοστό της υφής αν η αρχική τιμή ήταν 100%.



Εικόνα 73. Κατανομή του εναπομείναντος ποσοστού υφής των ροδάκινων σε τομή της κονσέρβας

Όπως φαίνεται από την Εικόνα 73 μετά το τέλος της θερμικής επεξεργασίας στο εξωτερικό στρώμα των τεμαχίων η θερμική υποβάθμιση είναι κοντά στο 99%, ενώ στο εσωτερικό φτάνει το 85%. Αυτά τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι η θερμική επεξεργασία που πραγματοποιήθηκε ήταν εξόχως έντονη σε σχέση με την κατάλληλη. Σε αυτό το σημείο όμως τίθεται το ερώτημα, γιατί στη βιομηχανική πρακτική εφαρμόζεται μια τόσο έντονη θερμική επεξεργασία χωρίς να εμφανίζονται τα δυσμενή αποτελέσματα στο προϊόν. Στο ερώτημα αυτό δίνονται οι εξής απαντήσεις:

- A) τα ροδάκινα επεξεργάζονται όταν βρίσκονται σε πολύ αρχικό στάδιο ωρίμανσης.
- B) ενδέχεται να γίνεται χρήση CaCl_2 για να μείνουν τα ροδάκινα συνεκτικά.
- Γ) οι διαστάσεις της κονσέρβας είναι συνήθως μεγαλύτερες.

Δ) η θερμοκρασία του θερμαντικού μέσου κατά το χρόνο θέρμανσης δεν είναι στους 100°C, δηλαδή υπάρχει μια φυσιολογική αυξομείωση λόγω περιβαλλοντικών συνθηκών.

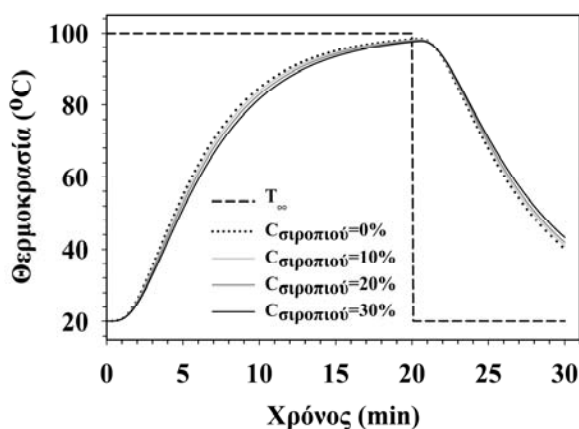
Ε) ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ενδέχεται να είναι μικρότερος λόγω έλλειψης βρασμού.

III.3.3.2.4 Επίδραση συγκέντρωσης σιροπιού ζάχαρης στη θερμική επεξεργασία

Στη βιομηχανία παραγωγής κονσερβοποιημένων ροδάκινων πλέον παράγονται διάφοροι τύποι προϊόντων. Οι νέες τάσεις της αγοράς απαιτούν την μείωση των σακχάρων στα τρόφιμα, θεωρώντας τα υπεύθυνα για προβλήματα υγείας, ενώ υπάρχουν περιοχές της γης, όπου η μέση θερμοκρασία κυμαίνεται σε υψηλά επίπεδα καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου. Εκτός των παραπάνω υπάρχουν συγκεκριμένες εθνικές ομάδες καταναλωτών που επιθυμούν τα εγκυτιωμένα ροδάκινα να έχουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Έχοντας υπόψη όλους αυτούς τους παράγοντες και τις βιομηχανικές πρακτικές επιλύθηκαν παραμετρικές μελέτες με μόνη διαφορά το υγρό πληρώσεως της κονσέρβας. Αυτό επιτεύχθηκε με την αλλαγή των ιδιοτήτων του ρευστού. Έτσι χρησιμοποιήθηκαν οι ιδιότητες του σιροπιού ζάχαρης για συγκέντρωση 10%, 20% και 30% (w/v) και οι ιδιότητες του νερού.

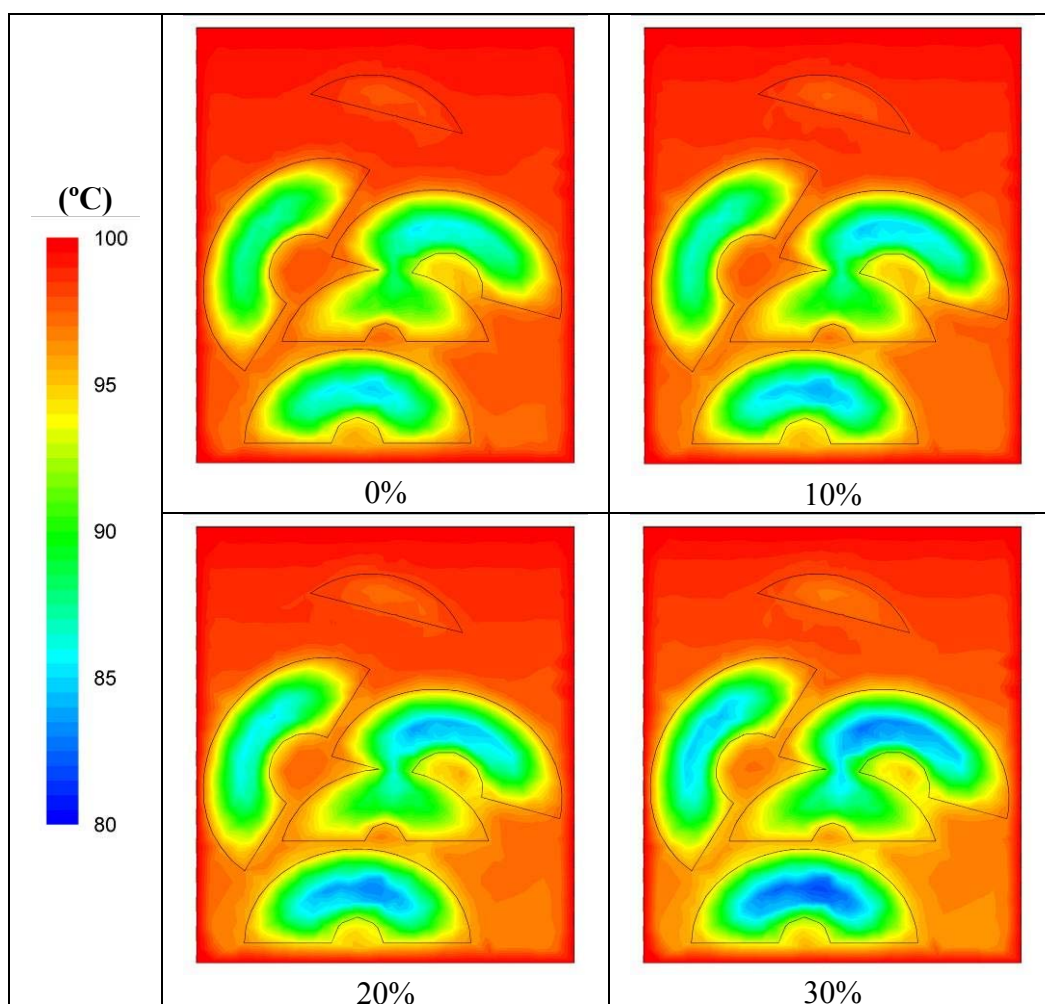
Θερμοκρασιακό προφίλ

Έχοντας επιλύσει την παραπάνω γεωμετρία με τις παραμέτρους που προαναφέρθηκαν καταγράφηκε η θερμοκρασία στην αργότερα θερμαινόμενη ζώνη για τις τέσσερις περιπτώσεις.



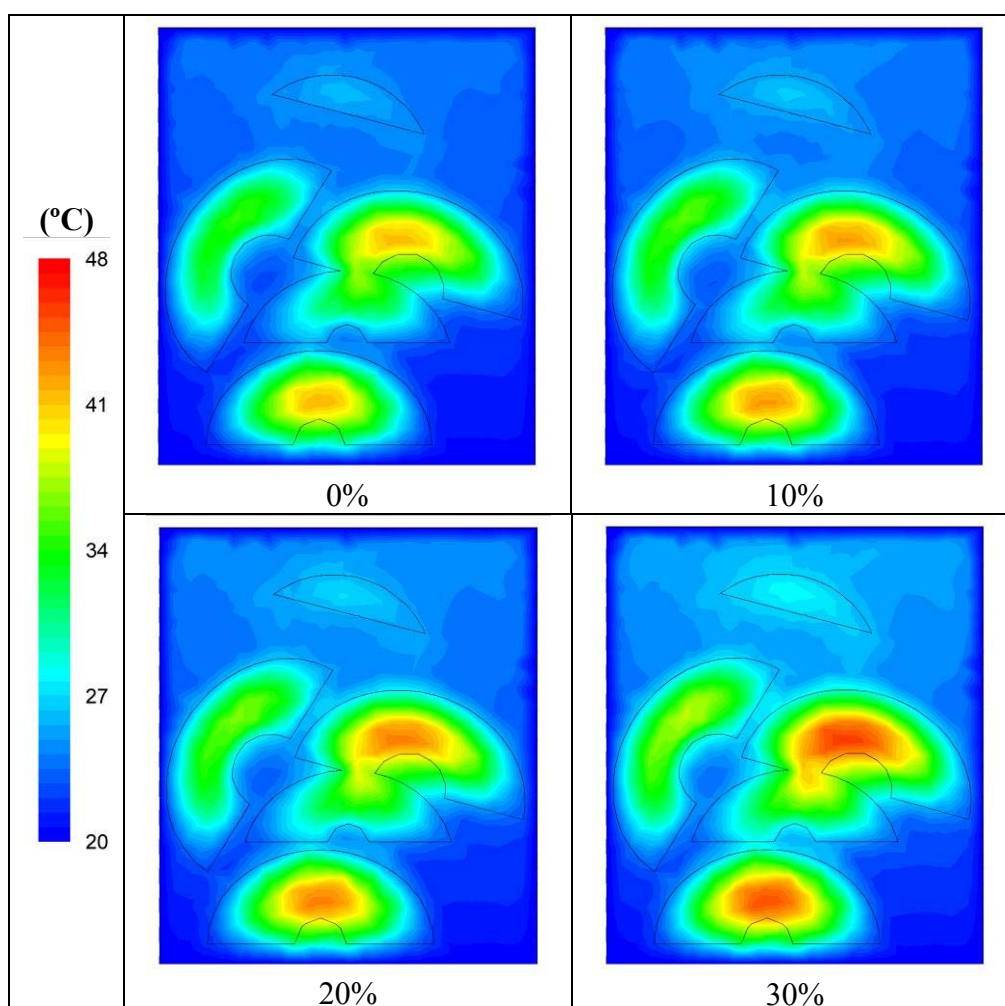
Διάγραμμα 64. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ για κάθε συγκέντρωση του σιροπιού

Η διαφορά θερμοκρασίας $\log(T_{Tr}-T)$ για τον κύκλο της θέρμανσης και $\log(T-T_{Cw})$ για την ψύξη φαίνονται στα παρακάτω δύο διαγράμματα αντίστοιχα.



Από το Διάγραμμα 64 και 65 φαίνεται ότι η θερμοκρασία στο αργότερα θερμαινόμενο σημείο είναι μεγαλύτερη για την περίπτωση όπου το ρευστό ήταν το

νερό, ενώ μικρότερη στην περίπτωση με το σιρόπι συγκέντρωσης 30%. Αυτή η διαφορά εξηγείται από τις ιδιότητες των ρευστών. Το νερό είναι λιγότερο πυκνό και έχει μικρότερο ιξώδες από το σιρόπι ζάχαρης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να είναι μειωμένη η ροή του υγρού (σιροπιού) και κατά συνέπεια να μεταφέρεται με μικρότερο ρυθμό η θερμότητα από το θερμαντικό μέσο προς τα τεμάχια των ροδάκινων. Το αντίστοιχο φαινόμενο φαίνεται να συμβαίνει και κατά τη διάρκεια της ψύξης (Διάγραμμα 64 και 66). Δηλαδή η ψύξη, όταν το υγρό πλήρωσης είναι το νερό είναι ταχύτερη από την περίπτωση με το πυκνό σιρόπι. Επομένως η θερμοκρασία στην αργότερα θερμαινόμενη ζώνη επηρεάζεται από τη συγκέντρωση της ζάχαρης στο υγρό πλήρωσης.



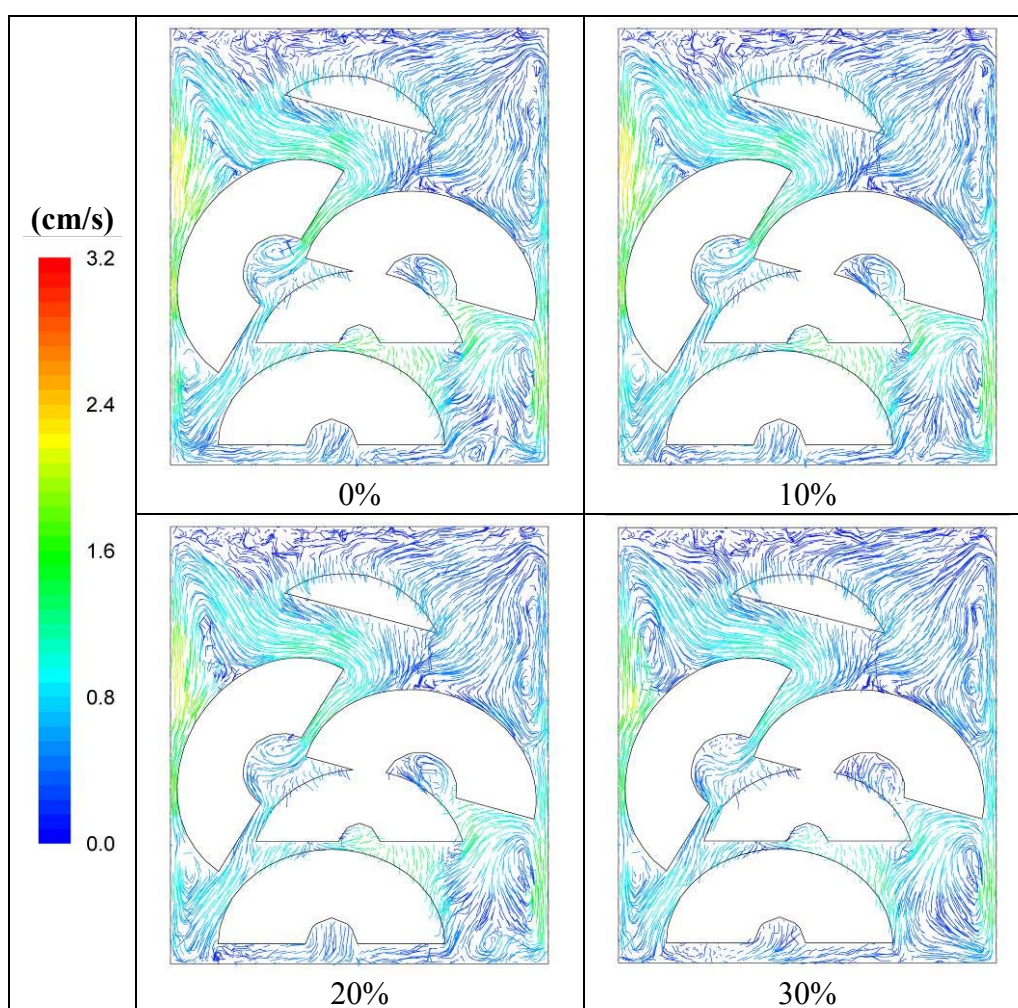
Εικόνα 75. Κατανομή της θερμοκρασίας σε τομή της κονσέρβας 10 min μετά την έναρξη της θέρμανσης συναρτήσει της συγκέντρωσης του σιροπιού ζάχαρης

Το γεγονός ότι η θερμότητα μεταφέρεται γρηγορότερα στην περίπτωση που το ρευστό είναι καθαρό νερό επαληθεύεται και από την θερμοκρασιακή κατανομή της τομής της κονσέρβας, για τις τέσσερις περιπτώσεις. Οι εικόνες 74 και 75 δείχνουν την θερμοκρασία σε κάθετη τομή της κονσέρβας για χρόνο 10 min μετά την έναρξη της

θέρμανσης και της ψύξης, αντίστοιχα. Παρατηρώντας τις εικόνες 74 και 75 τόσο στη θέρμανση, όσο και στην ψύξη είναι εμφανές ότι η αύξηση της συγκέντρωσης του σιροπιού επιδρά σημαντικά στη μεταφορά θερμότητας. Η θερμοκρασιακή μεταβολή στις τέσσερις περιπτώσεις δεν υφίσταται μόνο για τα τεμάχια ροδάκινων, αλλά και για το ίδιο το ρευστό.

Προφίλ ταχύτητας του ρευστού

Στην Εικόνα 76 φαίνεται η επίδραση της συγκέντρωσης του σιροπιού στην ταχύτητα του ρευστού σε κάθετη τομή της κονσέρβας 0,5 min μετά την έναρξη της θέρμανσης.



Εικόνα 76. Προφίλ ταχύτητας του ρευστού ½ min μετά την έναρξη της θέρμανσης για τις 4 διαφορετικές συγκεντρώσεις ζάχαρης στο σιρόπι

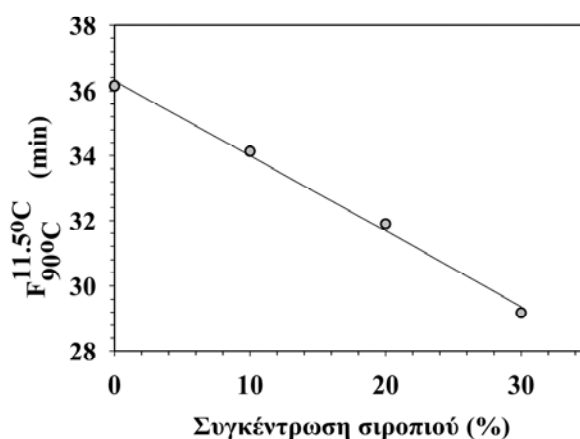
Η μέγιστη τιμή της ταχύτητας εντοπίζεται κοντά στο πλάγιο τοίχωμα και έχει τιμές 3,01 cm/s, 2,97 cm/s, 2,84 cm/s και 2,58 cm/s, για συγκέντρωση 0%, 10%, 20% και 30% αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές δείχνουν ότι η αύξηση της συγκέντρωσης του σιροπιού έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ταχύτητάς του κατά τη διάρκεια της θέρμανσης.

Οι χαμηλές ταχύτητες επηρεάζουν το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας και επομένως το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας, με συνέπεια η περίπτωση της συγκέντρωσης του 30% ζάχαρης να θερμαίνεται με αργότερο ρυθμό σε σχέση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις. Με την έναρξη της ψύξης η ροή του ρευστού αντιστράφηκε. Μετά το πέρασμα 0,5 min από την έναρξη της ψύξης παρατηρήθηκε η μέγιστη τιμή στη ταχύτητα για όλη τη θερμική επεξεργασία. Η μέγιστη τιμή εντοπίστηκε κοντά στο πλάγιο τοίχωμα μεταξύ του ανωτέρου τεμαχίου και του τοιχώματος της κονσέρβας. Οι μέγιστες τιμές της ταχύτητας του ρευστού ήταν 4,88 cm/s, 4,01 cm/s, 3,78 cm/s και 3,42 cm/s, για συγκέντρωση 0%, 10%, 20% και 30% αντίστοιχα. Επομένως η συγκέντρωση του σιροπιού επηρεάζει την ταχύτητα του σιροπιού τόσο κατά τη θέρμανση όσο και κατά την ψύξη.

Θερμική καταστροφή και εντοπισμός κρίσιμου σημείου στα ροδάκινα

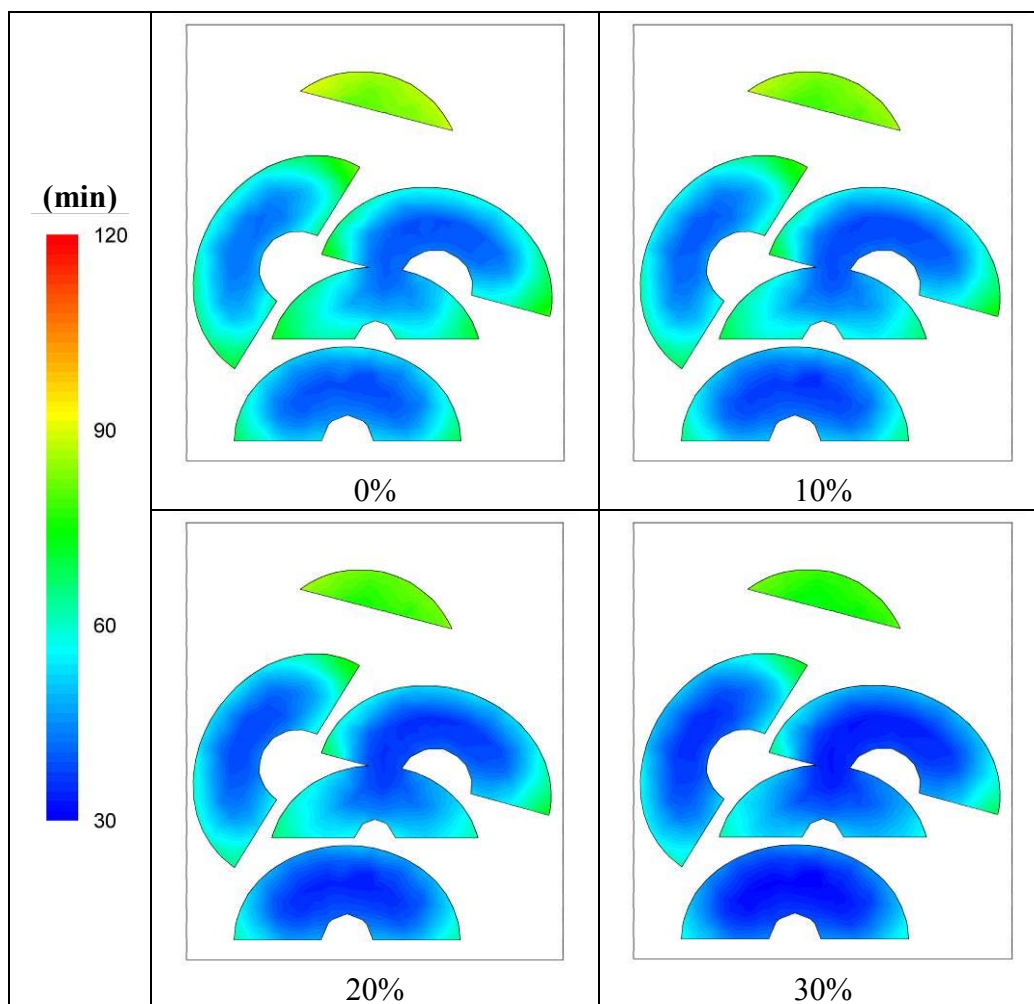
Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ο μικροοργανισμός στόχος της θερμικής επεξεργασίας ήταν τα σπόρια του βακτηρίου *C. butyricum*. Εφόσον αποδείχθηκε ότι η συγκέντρωση του σιροπιού επιδρά στη θερμοκρασιακή κατανομή ολόκληρης της κονσέρβας, κρίθηκε σκόπιμο να βρεθεί ο ισοδύναμος χρόνος θερμικής επεξεργασίας για κάθε περίπτωση.

Οι ελάχιστες τιμές του ισοδύναμου χρόνου $F_{90^{\circ}\text{C}}^{11.5^{\circ}\text{C}}$ για την κονσέρβα ήταν 36,15 min, 34,13 min, 31,90 min και 29,18 min, με ρευστό συγκέντρωσης 0%, 10%, 20% και 30% σε ζάχαρη, αντίστοιχα.



Διάγραμμα 67. Μεταβολή της τιμής $F_{90^{\circ}\text{C}}^{11.5^{\circ}\text{C}}$ στο κρίσιμο σημείο ως συνάρτηση της συγκέντρωσης του σιροπιού

Η μεταβολή του ισοδύναμου χρόνου στο κρίσιμο σημείο σε σχέση με τη συγκέντρωση του σιροπιού σε ζάχαρη ακολουθεί ευθεία γραμμή. Στο Διάγραμμα 67 φαίνεται η γραμμικότητα στη μεταβολή αυτή. Επίσης το κρίσιμο σημείο για όλες τις περιπτώσεις ήταν το ίδιο και δεν παρουσιάστηκε μεταβολή στις συντεταγμένες.

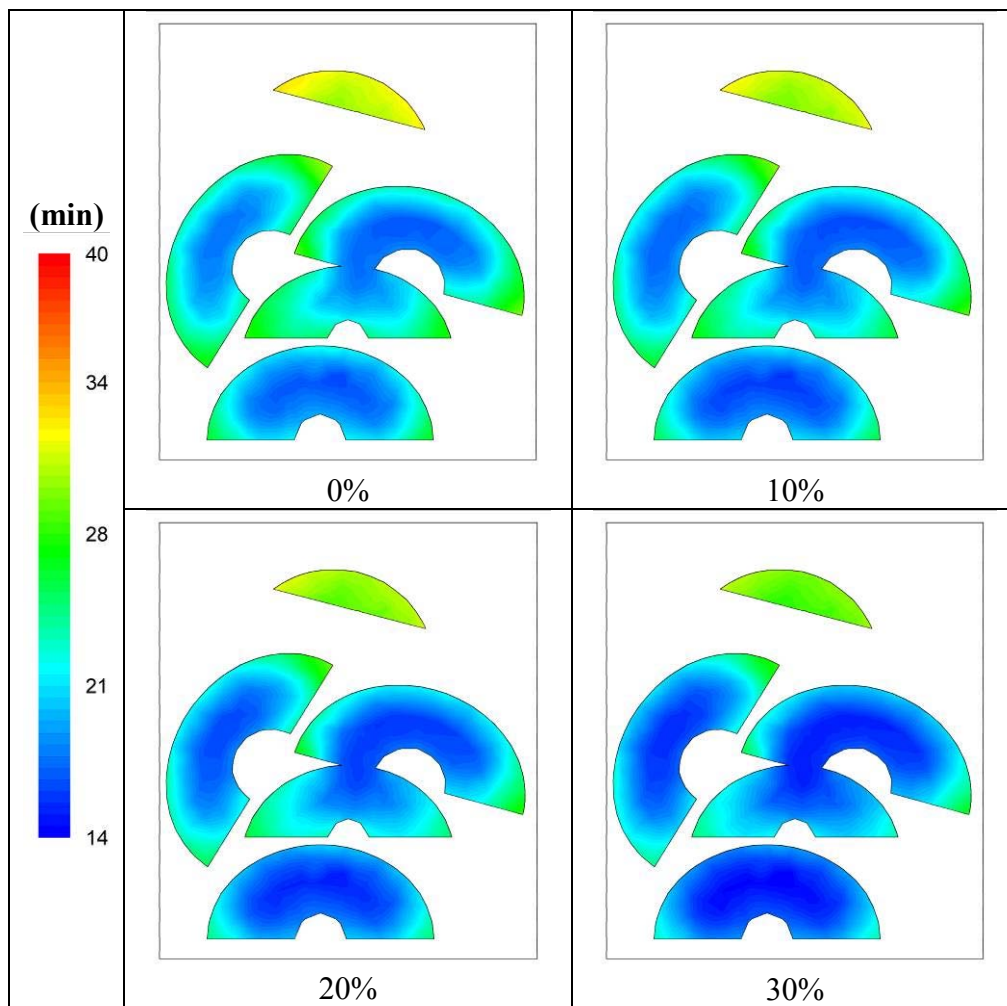


Εικόνα 77. Κατανομή της τιμής $F_{90^{\circ}\text{C}}^{11.5^{\circ}\text{C}}$ στο εσωτερικό των ροδάκινων για τις 4 διαφορετικές συγκεντρώσεις ζάχαρης στο σιρόπι

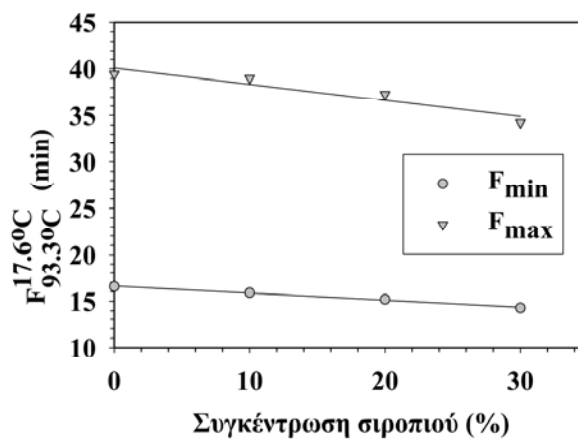
Επίδραση της θερμικής επεξεργασίας στην υφή των ροδάκινων

Εκτός από τη μικροβιοκτόνο δράση της θερμικής επεξεργασίας προσδιορίστηκε η υποβάθμιση της υφής των τεμαχίων για τις τέσσερις περιπτώσεις. Ο ισοδύναμος χρόνος $F_{93.3^{\circ}\text{C}}^{17.6^{\circ}\text{C}}$ υπολογίστηκε για το σύνολο του όγκου των τεμαχίων. Στην περίπτωση που το ρευστό είχε συγκέντρωση σε ζάχαρη 0% βρέθηκε ότι το εύρος του ισοδύναμου χρόνου ήταν 16,55 – 39,44min. Για την περίπτωση με σιρόπι συγκέντρωσης 10% το εύρος της τιμής F ήταν 15,90 – 39,01min. Για την περίπτωση με σιρόπι συγκέντρωσης 20% το εύρος ήταν 15,30 – 35,51min και τέλος στη

γεωμετρία που επιλύθηκε με σιρόπι συγκέντρωσης 30% σε ζάχαρη το εύρος του ισοδύναμου χρόνου ήταν 14,30 – 34,23min.



Εικόνα 78. Κατανομή της τιμής $F_{93.3^{\circ}C}^{17.6^{\circ}C}$ στο εσωτερικό των ροδάκινων για τις 4 διαφορετικές συγκεντρώσεις ζάχαρης στο σιρόπι



Διάγραμμα 68. Μεταβολή της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής $F_{93.3^{\circ}C}^{17.6^{\circ}C}$ σε σχέση με τη συγκέντρωση του σιροπιού

Επομένως η αύξηση της συγκέντρωσης του σιροπιού προκάλεσε τη σταδιακή μείωση του ισοδύναμου χρόνου της υποβάθμισης της υφής.

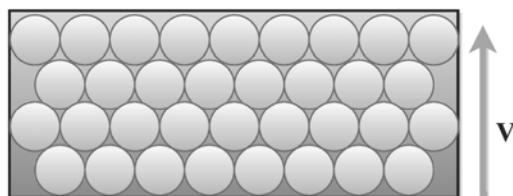
Επίσης η μεταβολή της ελάχιστης και της μέγιστης τιμής του ισοδύναμου χρόνου υποβάθμισης της υφής ακολουθεί ευθεία γραμμή όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 68. Οι δύο ευθείες δεν είναι παράλληλες, με αποτέλεσμα η προέκτασή τους να έχει σημείο τομής. Όμως επειδή το σημείο τομής βρίσκεται πέρα από το σημείο υπέρκορου διαλύματος ζάχαρης δεν υπάρχει περίπτωση σύμπτωσης.

III.3.3.2.5 Επίδραση στη θερμική επεξεργασία του συντελεστή μεταφοράς

Θερμότητας (h) επί της εξωτερικής επιφάνειας της κονσέρβας

Μία άλλη παράμετρος που έχει ιδιαίτερη αξία να μελετηθεί είναι η επίδραση επί της θερμικής επεξεργασίας του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μεταξύ θερμαντικού μέσου και κονσέρβας. Είναι χαρακτηριστικό το γεγονός ότι για τη θέρμανση των κονσερβών χρησιμοποιείται θερμό νερό ή ατμός. Η επιλογή του είδους του θερμαντικού μέσου έχει να κάνει με την κατασκευή του κλιβάνου και το σχεδιασμό της γραμμής παραγωγής. Στη βιομηχανική πρακτική εισάγονται στον κλίβανο πολλές κονσέρβες πάνω σε μεταφορική ταινία.

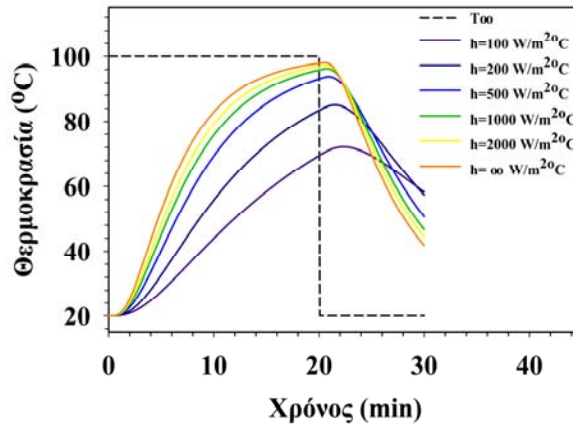
Στην Εικόνα 79 φαίνεται μια αναπαράσταση της κίνησης των κονσερβών εντός του κλιβάνου



Εικόνα 79. Αναπαράσταση θέρμανσης κονσερβών σε συνεχούς λειτουργίας κλίβανο

Με βάση ότι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στις συνθήκες αυτές μπορεί να κυμαίνεται από $100 - 2.000 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ επιλύθηκε η γεωμετρία των 6 τεμαχίων ροδάκινων.

Κατά την επίλυση καταγράφηκε η θερμοκρασία στην ΑΘΖ. Όπως φαίνεται στα διαγράμματα θέρμανσης και ψύξης, η θερμοκρασία μεταβάλλεται σημαντικά ανάλογα με το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας.



Διάγραμμα 69. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ σε σχέση με το χρόνο θερμικής επεξεργασίας για διαφορετικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας

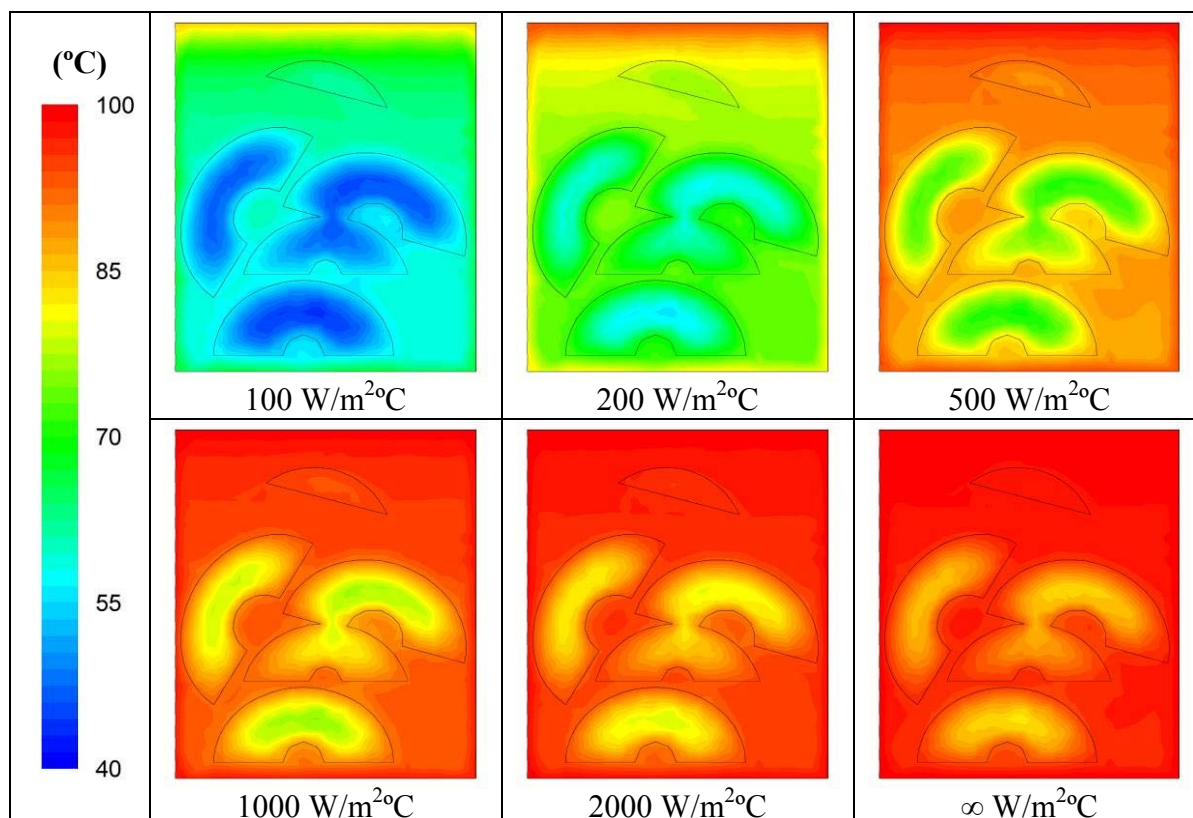
Χαρακτηριστική είναι η μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ για την περίπτωση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας $100 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, όπου παρατηρείται η αργή θέρμανση και έπειτα η αργή ψύξη. Στην περίπτωση των $2.000 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ η θέρμανση και η ψύξη επιτυγχάνεται γρηγορότερα, όχι όμως με την ίδια ταχύτητα που επιτυγχάνεται όταν ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας είναι άπειρος. Στις επόμενες παραγράφους γίνεται περιγραφή της θερμοκρασιακής μεταβολής και της μεταβολής του προφίλ ταχύτητας του ρευστού πληρώσεως καθώς και υπολογισμός του ισοδύναμου χρόνου μικροβιακής καταστροφής και υποβάθμισης της υφής σε σχέση με τη μεταβολή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, σε τομή της κονσέρβας.

Θερμοκρασιακό προφίλ

Για να διαπιστωθεί το μέγεθος της επιρροής του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στη θερμοκρασιακή μεταβολή του εσωτερικού της κονσέρβας, αρκεί η παρατήρηση της εικόνας 80, που αναπαριστά την κατανομή της θερμοκρασίας μετά από 10 min από την έναρξη της θέρμανσης για την τομή της κονσέρβας, όταν ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταβάλλεται. Οι μεγαλύτερες διαφορές φαίνονται μεταξύ $100 - 500 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, ενώ όταν ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας γίνεται μεγαλύτερος από $1.000 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ οι διαφορές στο προφίλ της θερμοκρασίας ελαχιστοποιούνται.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό είναι ότι η ΑΘΖ εντοπίζεται στην ίδια περιοχή για όλες τις περιπτώσεις μεταβολής του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας. Αυτό συνεπάγεται ότι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας δεν επιδρά στη θέση της ΑΘΖ, αλλά μόνο στην ταχύτητα της ροής της θερμότητας από το θερμαντικό μέσο προς το εσωτερικό

της κονσέρβας. Αντίστοιχα, κατά τη διάρκεια του κύκλου ψύξης παρατηρούνται ανάλογα φαινόμενα. Δηλαδή στην περίπτωση που ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας είναι μικρός η ψύξη της κονσέρβας γίνεται αργότερα, ενώ καθώς αυξάνεται το υγρό πληρώσεως και τα ροδάκινα ψύχονται ταχύτερα.



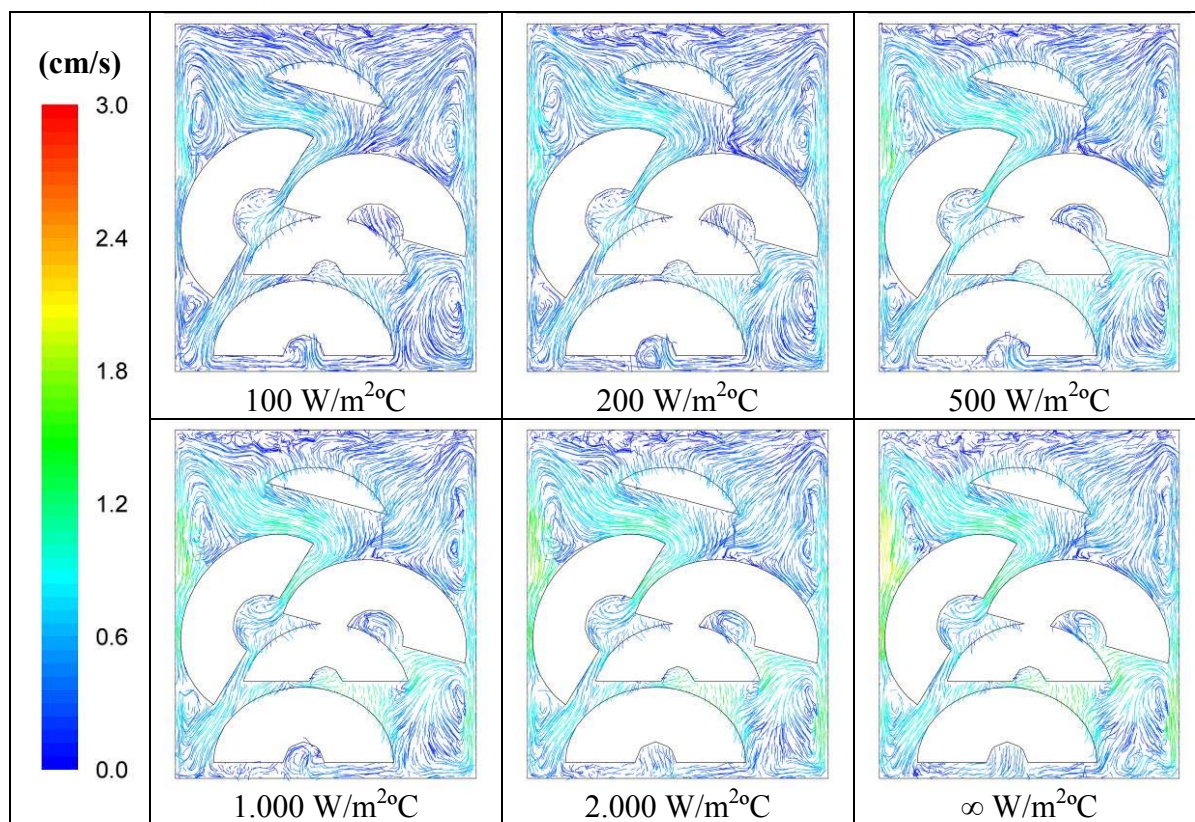
Εικόνα 80. Κατανομή της θερμοκρασίας σε τομή της κονσέρβας για διάφορες τιμές του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μετά από 10 min από την έναρξη της θέρμανσης

Προφίλ ταχύτητας του ρευστού

Εκτός από την κατανομή της θερμοκρασίας η μεταβολή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας επηρεάζει και τη ροή του σιροπιού. Αυτό άλλωστε είναι αναμενόμενο, διότι η ροή του υγρού προκαλείται από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ τοιχώματος της κονσέρβας και οριακού στρώματος του υγρού. Επομένως ο μειωμένος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας είναι υπεύθυνος για τη μειωμένη ροή θερμότητας και κατά συνέπεια τη μικρότερη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ τοιχώματος και υγρού. Στην Εικόνα 81 φαίνεται η επίδραση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας επί της ροής του σιροπιού.

Οι μέγιστες τιμές της ταχύτητας για τη θέρμανση και την ψύξη φαίνονται στον Πίνακα 38. Για 0,5 min μετά την έναρξη της θέρμανσης η μέγιστη ταχύτητα του υγρού παρατηρήθηκε στην περίπτωση που ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας

ήταν άπειρος με τιμή 2,84 cm/s, ενώ η ελάχιστη τιμή της ταχύτητας παρατηρήθηκε για συντελεστή $100 \text{ W/m}^2\text{C}$ με τιμή 1,49 cm/s.



Εικόνα 81. Ροή του σιροπιού σε τομή της κονσέρβας για διάφορες τιμές του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μετά από ½ min από την έναρξη της θέρμανσης

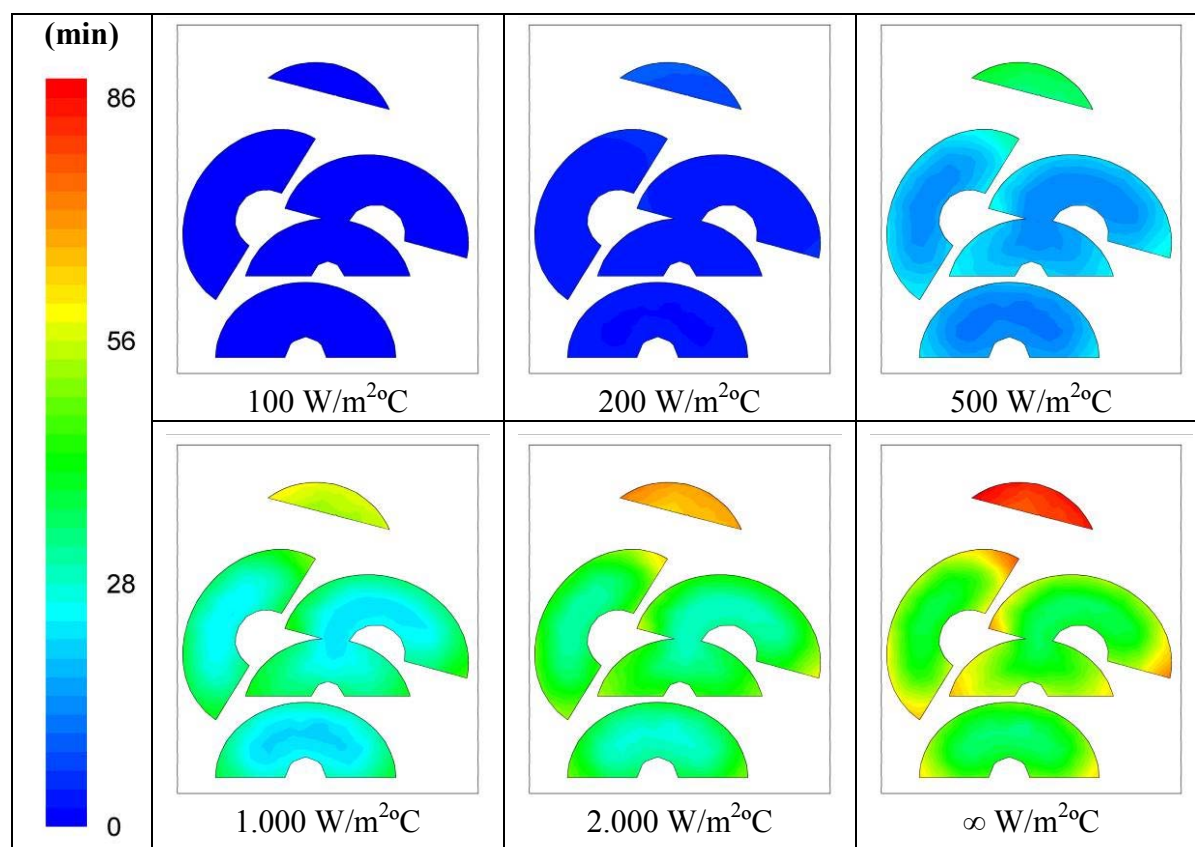
Οι τιμές της ταχύτητας μετά από 0,5 min από την έναρξη της ψύξης ήταν σαφώς μεγαλύτερες σε σχέση με τον αντίστοιχο χρόνο από την έναρξη της θέρμανσης. Παρατηρώντας τις μέγιστες τιμές της ταχύτητας του ρευστού φαίνεται ότι όταν ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ξεπερνά τα $1.000 \text{ W/m}^2\text{C}$ μειώνεται η επίδραση της μεταβολής του επί της ροής του σιροπιού.

Πίνακας 38. Μέγιστη ταχύτητα ρευστού σε δύο χρονικές στιγμές της θερμικής επεξεργασίας

h (W/m ² C)	Vmax(cm/s)	
	½ min θέρμανσης	½ min ψύξης
100	1,49	1,10
200	1,79	2,19
500	2,30	3,31
1.000	2,40	3,58
2.000	2,54	3,83
∞	2,84	3,88

Θερμική καταστροφή και εντοπισμός κρίσιμου σημείου στα ροδάκινα

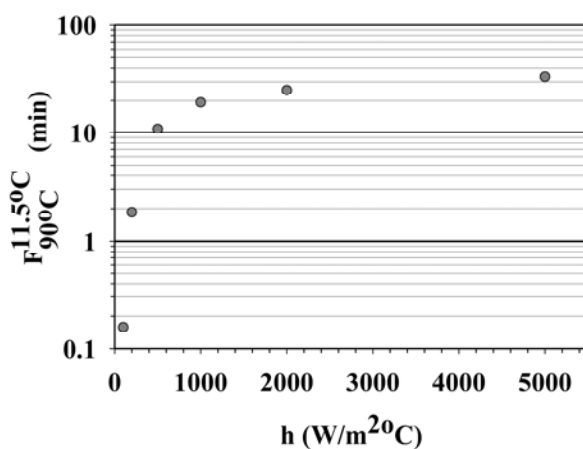
Η μεταβολή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας αποκτά ιδιαίτερο ενδιαφέρον, όταν αυτή επηρεάζει εκτός των άλλων και το θανατηφόρο αποτέλεσμα της θερμικής επεξεργασίας. Στην Εικόνα 82 παρουσιάζεται η κατανομή του ισοδύναμου χρόνου $F_{90^{\circ}\text{C}}^{11.5^{\circ}\text{C}}$ στο εσωτερικό των ροδάκινων. Έχοντας υπόψη ότι ο ελάχιστος ισοδύναμος χρόνος $F_{90^{\circ}\text{C}}^{11.5^{\circ}\text{C}}$ πρέπει να είναι μεγαλύτερος από 1,5 – 8 min για να είναι μικροβιολογικά ασφαλές το προϊόν, τότε όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 70 μόνο για τιμές του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μεγαλύτερες από $200 \text{ W/m}^2\text{C}$, μπορεί να εξασφαλιστεί κάτι τέτοιο.



Εικόνα 82. Κατανομή της τιμής $F_{90^{\circ}\text{C}}^{11.5^{\circ}\text{C}}$ στο εσωτερικό των ροδάκινων σε σχέση με τη μεταβολή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας

Επίσης, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 70 για τιμές του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μεγαλύτερες από $1.000 \text{ W/m}^2\text{C}$, η επίδραση στον ισοδύναμο χρόνο θερμικής καταστροφής των σπορίων του βακτηρίου *Cl. butyricum* γίνεται όλο και μικρότερη. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι στο Διάγραμμα 74 ο ισοδύναμος χρόνος που αναφέρεται στην τιμή $5.000 \text{ W/m}^2\text{C}$ υπολογίστηκε για άπειρο συντελεστή

μεταφοράς θερμότητας, όμως για λόγους παρουσίασης των αποτελεσμάτων θεωρήθηκε στο διάγραμμα ως 5.000 W/m²°C.

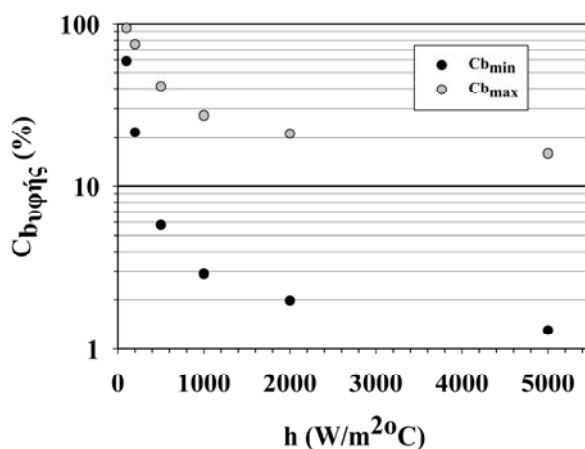


Διάγραμμα 70. Ελάχιστες τιμές του ισοδύναμου χρόνου $F_{90^{\circ}\text{C}}^{11.5^{\circ}\text{C}}$ για κάθε περίπτωση μεταβολής του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας

Επίδραση της θερμικής επεξεργασίας στην υφή των ροδάκινων

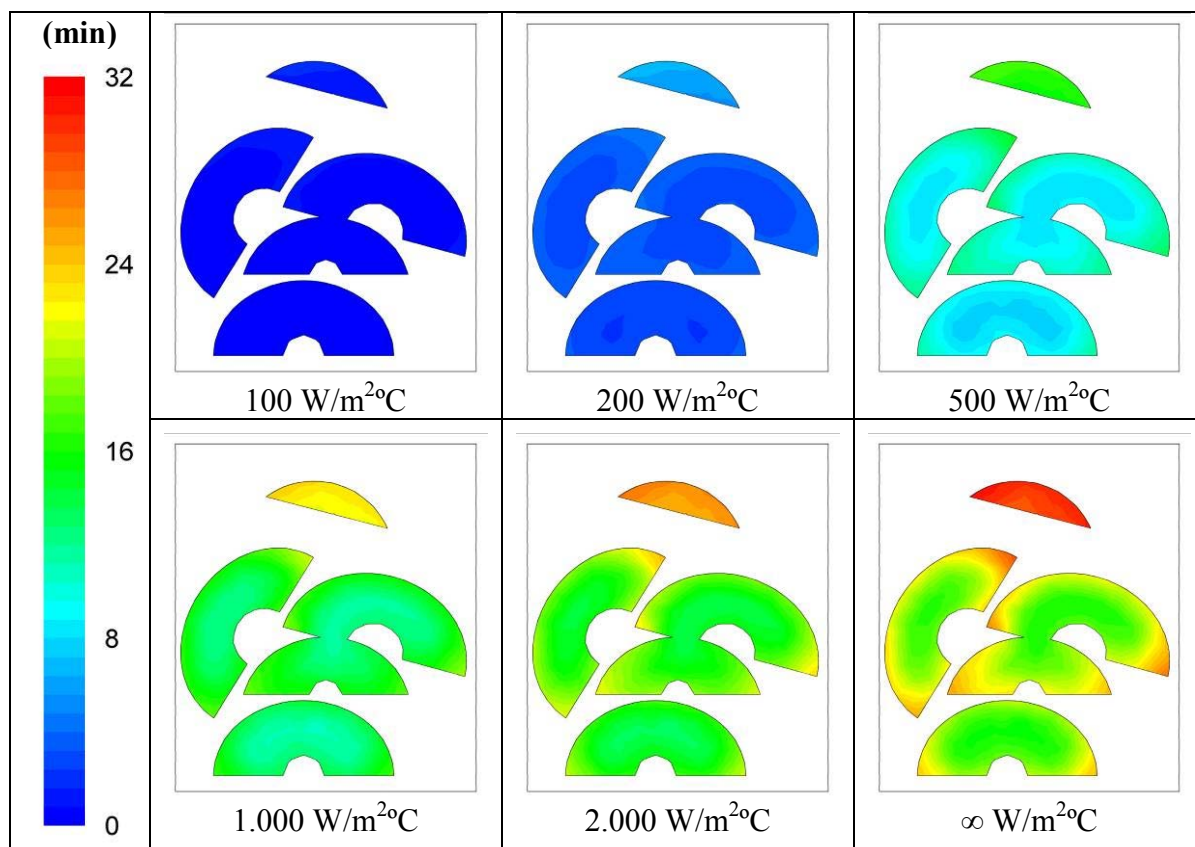
Όμοια με τη θερμική καταστροφή των σπορίων του βακτηρίου *Cl. butyricum* παρουσιάζεται η επίδραση του h στον ισοδύναμο χρόνο υποβάθμισης της υφής των ροδάκινων.

Γίνεται και εδώ αντιληπτό ότι η μεταβολή του h επηρεάζει σημαντικά της υφή των ροδάκινων. Στην Εικόνα 83 παρουσιάζεται για τις έξι περιπτώσεις μεταβολής του h η κατανομή του ισοδύναμου χρόνου $F_{93.3^{\circ}\text{C}}^{17.6^{\circ}\text{C}}$. Από την εξίσωση 52 μπορεί να βρεθεί η επί τοις % εναπομείνασα υφή των ροδάκινων, αφού είναι γνωστή η τιμή $D_{93.3^{\circ}\text{C}}$.



Διάγραμμα 71. Μέγιστη και ελάχιστη % εναπομείνασα υφή των ροδάκινων

Με αυτό τον τρόπο υπολογίστηκε το ποσοστό της υφής που απέμεινε μετά το τέλος της θερμικής επεξεργασίας για διάφορες τιμές του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας και το ποσοστό αυτό παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 71.



Εικόνα 83. Κατανομή της τιμής $F_{90^{\circ}\text{C}}^{11.5^{\circ}\text{C}}$ για την υφή στο εσωτερικό των ροδάκινων σε σχέση με τη μεταβολή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας

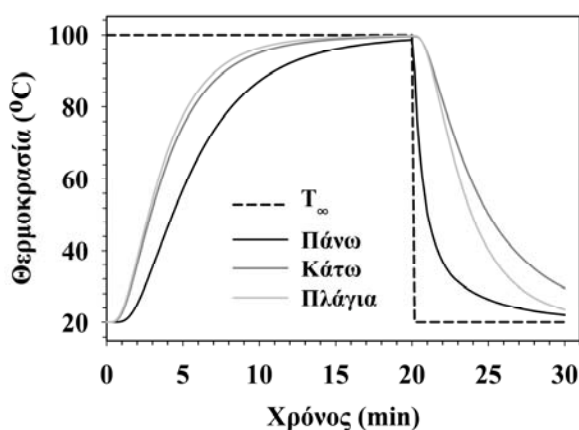
III.3.3.3 Προσομοίωση 3-D μοντέλου 4 τεμαχίων ροδάκινων σε διαφορετικές διατάξεις

Έχοντας υπόψη ότι μπορεί να εγκλωβίζεται σιρόπι στο κενό που αφήναν οι πυρήνες των ροδάκινων πραγματοποιήθηκε μελέτη της επίδρασης της θέσης των τεμαχίων στη θερμική επεξεργασία. Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο III.2.6.2 σχεδιάστηκαν τρεις γεωμετρίες με τεμάχια ροδάκινων να έχουν όψη προς την οροφή της κονσέρβας, τον πυθμένα της κονσέρβας και πλάγια. Για την οικονομία της μελέτης η περίπτωση με τα τεμάχια να κοιτούν προς την οροφή της κονσέρβας θα αναφέρεται ως περίπτωση “α”, με τα τεμάχια να κοιτούν προς τον πυθμένα της κονσέρβας περίπτωση “β” και με τα τεμάχια πλάγια ως περίπτωση “γ”.

Θερμοκρασιακό προφίλ

Αρχικά καταγράφηκε η θερμοκρασία στην ΑΘΖ, η οποία και παρουσιάζεται στο παρακάτω Διάγραμμα 72. Όπως φαίνεται, η θέση που τοποθετήθηκαν τα τεμάχια έχει επίδραση στη θερμοκρασία στην ΑΘΖ. Τα τεμάχια που κοιτούν προς την οροφή της κονσέρβας φαίνεται ότι θερμαίνονται πιο αργά σε σχέση με τις άλλες δύο περιπτώσεις, όμως ψύχονται γρηγορότερα. Αντίθετα τα τεμάχια που κοιτούν προς τον πυθμένα της κονσέρβας θερμαίνονται πιο γρήγορα, αλλά ψύχονται αργότερα. Τέλος, στην κονσέρβα που κατά τον κύκλο θέρμανσης – ψύξης βρίσκεται πλάγια η θέρμανση είναι γρηγορότερη από τις άλλες δύο περιπτώσεις, ενώ κατά την ψύξη η θερμοκρασία μεταβάλλεται ενδιάμεσα σε σχέση με τις άλλες δύο περιπτώσεις.

Εκτός από την καταγεγραμμένη θερμοκρασία στην ΑΘΖ, εξήχθησαν και εικόνες κατανομής της θερμοκρασίας στις τομές των κονσερβών και για τις τρεις περιπτώσεις, όπως φαίνονται από τις εικόνες (84, 85 και 86). Όπως αρχικά αναφέρθηκε, η θέρμανση των τεμαχίων στην περίπτωση “α” έχει υστέρηση σε σχέση με τις δύο άλλες περιπτώσεις. Το αποτέλεσμα αυτό συνδέεται με τη ροή του σιροπιού στην κονσέρβα.



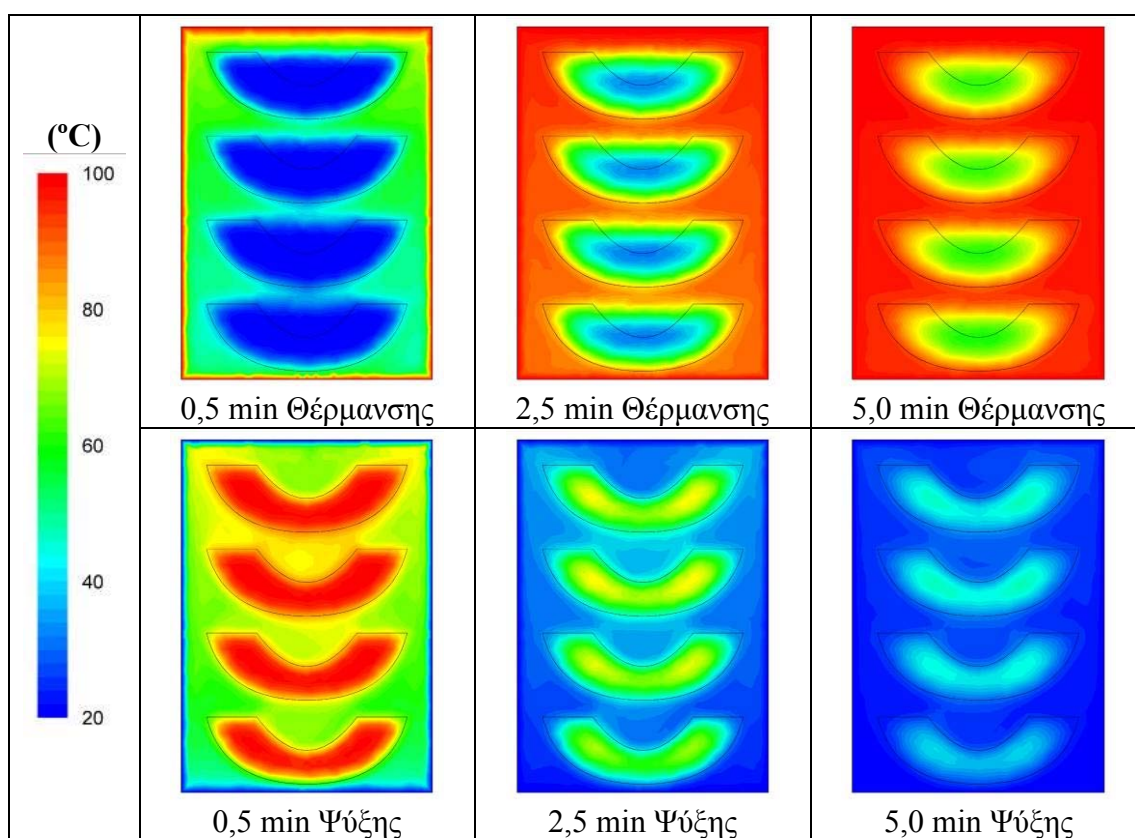
Διάγραμμα 72. Μεταβολή της θερμοκρασίας στην ΑΘΖ για τις τρεις περιπτώσεις

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 84 και αναφέρθηκε και στην παράγραφο III.3.3.1 ένα μέρος του ρευστού εγκλωβίζεται στο κενό που αφήνουν οι αφαιρούμενοι πυρήνες. Εκεί δεν έχει τη δυνατότητα να μετακινηθεί με αποτέλεσμα να θερμαίνεται αργότερα από τον υπόλοιπο όγκο του ρευστού. Ο εγκλωβισμός του σιροπιού είναι αποτέλεσμα της μη δυνατότητας καθοδικής κίνησης του σιροπιού στον κεντρικό άξονα. Το σιρόπι θερμαίνεται από τον όγκο σιροπιού που βρίσκεται στην οροφή της κονσέρβας, όμως ψύχεται από το τεμάχιο του ροδάκινου. Η τοπική αυτή ψύξη τείνει να οδηγήσει τον εγκλωβισμένο όγκο να κινηθεί καθοδικά, όμως το τεμάχιο αποτρέπει την κίνηση

αυτή. Έτσι το σιρόπι αυτό παραμένει στο χώρο του αφαιρούμενου πυρήνα μέχρι την έναρξη της ψύξης και θερμαίνεται με τον ίδιο τρόπο που θερμαίνεται και το τεμάχιο του ροδάκινου, σαν να ήταν μέρος αυτού.

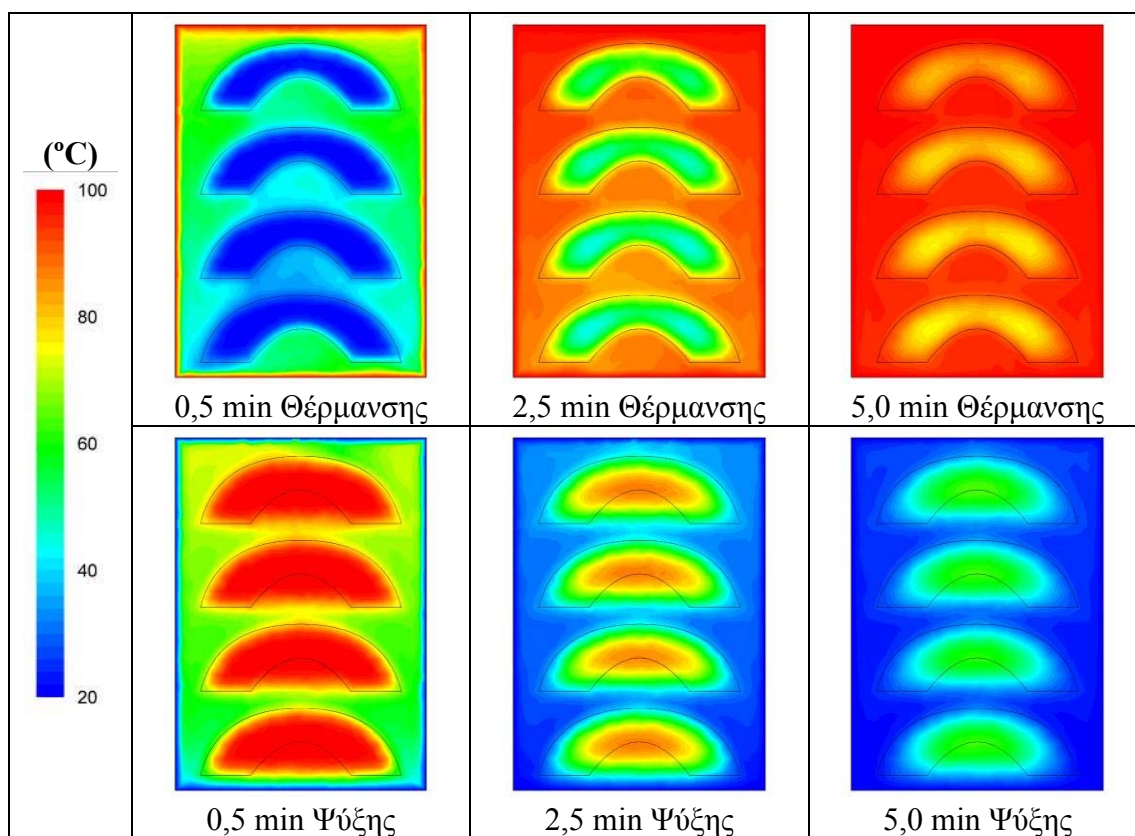
Η ΑΘΖ εντοπίζεται στο πρώτο τεμάχιο ροδάκινου από τον πυθμένα της κονσέρβας (Εικόνα 84) με συντεταγμένες $(0,-40.0,0)$. Επιπροσθέτως το σημείο αυτό ήταν ταυτόχρονα και το κρίσιμο σημείο για αυτή την περίπτωση. Ομοίως με τη γεωμετρία επιβεβαίωσης και τη γεωμετρία με τα 6 τεμάχια ροδάκινων, τα τεμάχια θερμαίνονται γρηγορότερα περιφερειακά, ενώ το εσωτερικό τους μέρος έχει μια διαφορά θερμοκρασίας ακόμα και 40°C για τα πρώτα λεπτά της θέρμανσης.

Με την έναρξη της ψύξης το φαινόμενο του εγκλωβισμένου σιροπιού δεν εμφανίζεται. Πλέον το ρευστό ψύχεται στο εσωτερικό τοίχωμα της κονσέρβας και η μείωση της θερμοκρασίας είναι ραγδαία. Τα τεμάχια των ροδάκινων ψύχονται γρηγορότερα στο κεντρικό μέρος αφήνοντας δύο περιοχές στα άκρα με υψηλότερη θερμοκρασία. Εδώ είναι χαρακτηριστική η διαφορά του κύκλου θέρμανσης και ψύξης όταν κατά τη θέρμανση ο χώρος με μικρότερη θερμοκρασία έχει σχήμα ημισφαιρίου, ενώ κατά την ψύξη ο χώρος με υψηλότερη θερμοκρασία έχει σχήμα ημισελήνου.



Εικόνα 84. Κατανομή της θερμοκρασίας σε τομή της κονσέρβας με τα ροδάκινα προς τα πάνω για διάφορες χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας

Στην περίπτωση με τα κοίλα προς τα κάτω “β” επικρατεί μια αντίστροφη πορεία της θερμοκρασιακής μεταβολής της περίπτωσης “α”. Με την έναρξη της θέρμανσης το σιρόπι θερμαίνεται στην εσωτερική επιφάνεια της κονσέρβας και έπειτα με την ροή που διαγράφει θερμαίνει τον υπόλοιπο όγκο τόσο του σιροπιού, όσο και των τεμαχίων των ροδάκινων. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 85 εντός των τεμαχίων δημιουργούνται δύο περιοχές χαμηλότερης θερμοκρασίας σε σχέση με τον υπόλοιπο όγκο των τεμαχίων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μετακινηθεί η ΑΘΖ σε σχέση με την περίπτωση “α”. Εντοπίζοντας την ΑΘΖ (Εικόνα 85), βρέθηκε ότι έχει συντεταγμένες (-7.6,-35.8,-7.9) και βρίσκεται στο πρώτο τεμάχιο από τον πυθμένα της κονσέρβας. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ΑΘΖ δεν συμπίπτει με το κρίσιμο σημείο. Η διαφοροποίηση αυτή οφείλεται στην ιδιαιτερότητα της ροής και στη μεταβολή της θερμοκρασίας κατά την ψύξη.

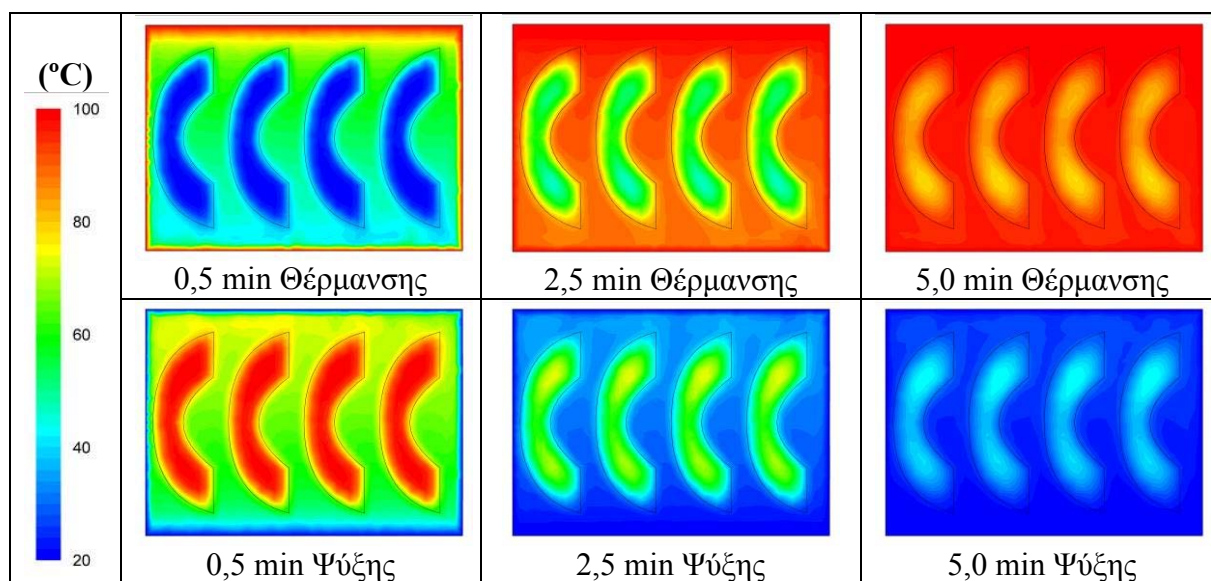


Εικόνα 85. Κατανομή της θερμοκρασίας σε τομή της κονσέρβας με τα ροδάκινα προς τα κάτω για διάφορες χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας

Όπως φαίνεται από την Εικόνα 85 κατά την ψύξη παρατηρείται ο αντίστοιχος εγκλωβισμός σιροπιού στο χώρο του αφαιρούμενο πυρήνα των ροδάκινων, όπως στη θέρμανση της περίπτωσης “α”. Σε αυτή την περίπτωση η κίνηση του σιροπιού τείνει να γίνει ανοδική στον κεντρικό άξονα, λόγω της ψύξης στο πλάγιο τοίχωμα της κονσέρβας και της πίεσης που ασκεί ο ψυχόμενος αυτός όγκος στο υπόλοιπο ρευστό.

Η παρουσία όμως των τεμαχίων εμποδίζει την ανοδική κίνηση στον κεντρικό άξονα, με αποτέλεσμα τον εγκλωβισμό ενός όγκου σιροπιού στο χώρο που αφήνουν οι αφαιρούμενοι πυρήνες των ροδάκινων. Το γεγονός ότι η ψύξη γίνεται με αργότερο ρυθμό στην περίπτωση “β” φαίνεται από τη σύγκριση των δύο εικόνων 84 και 85.

Στην περίπτωση “γ”, η οποία είναι η μοναδική περίπτωση όλης της μελέτης που η κονσέρβα επιλύθηκε κάθετα σε σχέση με τον κεντρικό άξονά της, η θέρμανση και η ψύξη δεν είχε κάποια ιδιαιτερότητα. Λόγω του γεγονότος ότι τα τεμάχια των ροδάκινων ήταν σχεδιασμένα να κοιτούν πλάγια ήταν δυνατό να υπάρχει κανονική ροή του σιροπιού τόσο κατά τη θέρμανση, όσο και κατά την ψύξη, χωρίς να εγκλωβίζεται. Η διευκόλυνση της ροής του σιροπιού επέτρεπε την ομαλή μεταφορά θερμότητας από το σιρόπι προς τα τεμάχια. Η ΑΘΖ της κονσέρβας εντοπίστηκε στο δεύτερο από αριστερά τεμάχιο (Εικόνα 86) και είχε συντεταγμένες (-35.57,-13.46,0). Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ΑΘΖ και των τεσσάρων τεμαχίων κατά τη διάρκεια της θέρμανσης είχε περίπου την ίδια θερμοκρασία. Η διαφοροποίηση μεταξύ των τεμαχίων οφειλόταν στο γεγονός ότι το άνοιγμα του αφαιρούμενου πυρήνα είχε όψη προς τα δεξιά. Αυτός ο σχεδιασμός των τεμαχίων επιδρούσε στη ροή του σιροπιού με αποτέλεσμα τη μικρή διαφορά στη θερμοκρασία των αργότερα θερμαινόμενων ζωνών του κάθε τεμαχίου. Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο είναι ότι το ανώτερο μέρος των τεμαχίων θερμάνθηκε γρηγορότερα σε σχέση με το κατώτερο. Αυτή η διαφοροποίηση οφείλεται στο ότι το θερμότερο σιρόπι κατά τη διάρκεια της θέρμανσης είναι ελαφρύτερο και παραμένει στο ανώτερο μέρος της κονσέρβας. Έτσι θερμαίνει γρηγορότερα το ανώτερο μέρος των τεμαχίων.

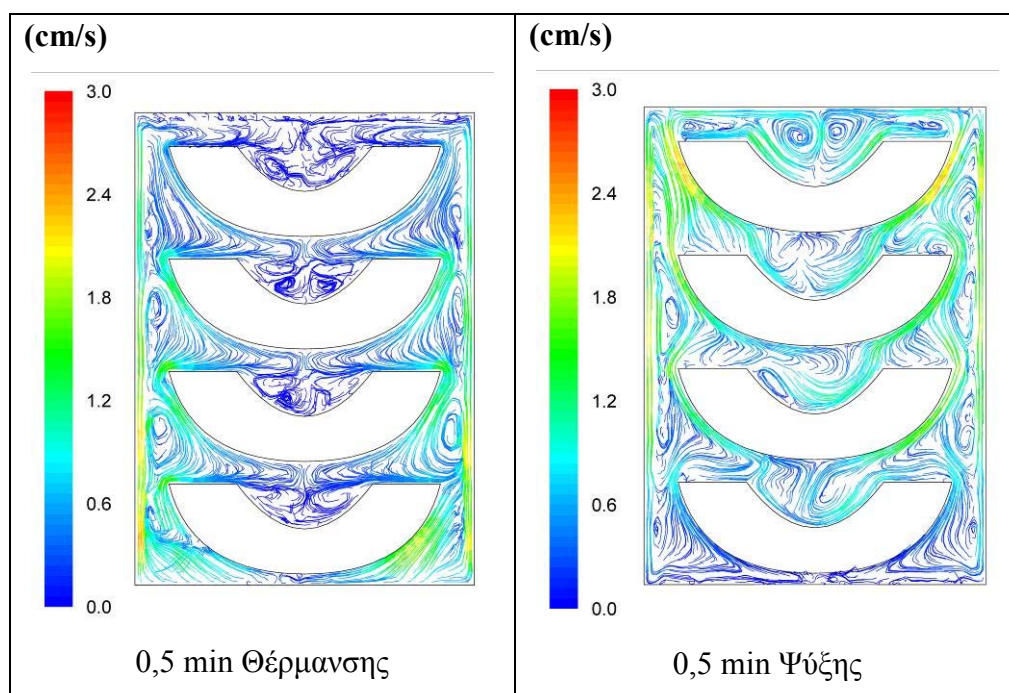


Εικόνα 86. Κατανομή της θερμοκρασίας σε τομή της κονσέρβας με τα ροδάκινα πλάγια για διάφορες χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας

Αντίθετα, κατά τη διάρκεια της ψύξης το κρύο σιρόπι γίνεται πιο βαρύ και κινείται προς το κατώτερο μέρος της κονσέρβας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το κατώτερο μέρος των τεμαχίων να ψύχεται γρηγορότερα από το ανώτερο μέρος. Όμοια με τη θέρμανση και κατά τη διάρκεια της ψύξης το ρευστό πλήρωσης μπορούσε να κινηθεί ελεύθερα ανάμεσα στα τεμάχια με αποτέλεσμα την ομοιόμορφη ψύξη των τεμαχίων.

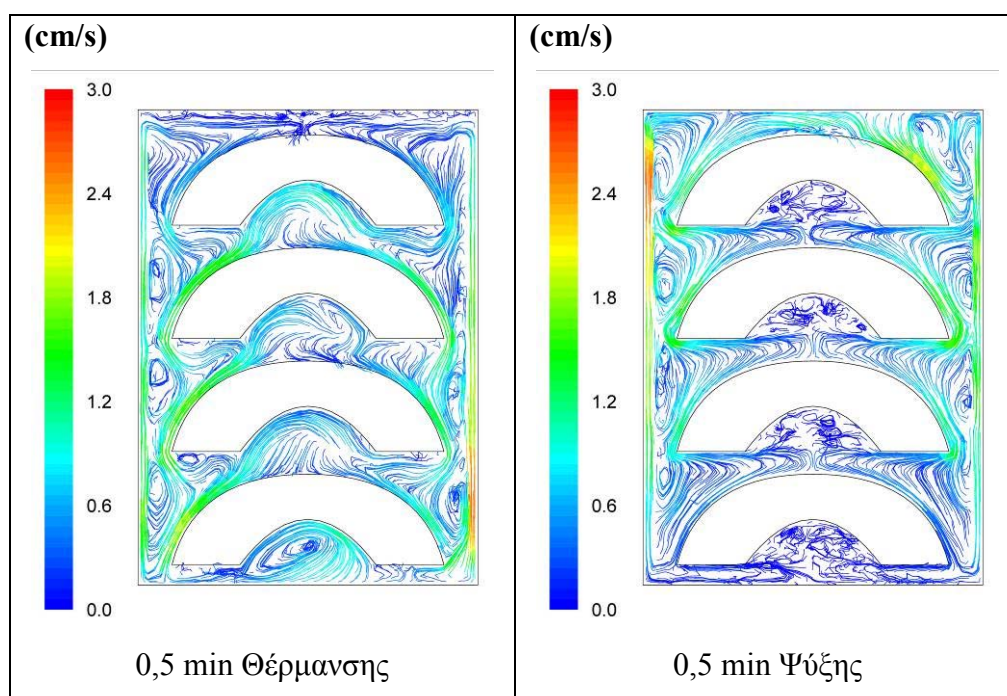
Προφίλ ταχύτητας του ρευστού

Με την έναρξη της θέρμανσης το τοίχωμα της κονσέρβας θεωρήθηκε ότι αποκτά θερμοκρασία ίση με 100°C . Σε μία τομή, όπως αυτή φαίνεται στην Εικόνα 87 κοντά στο πλάγιο τοίχωμα της κονσέρβας υπάρχουν δύο αντίρροπα ρεύματα. Το ανοδικό ρεύμα και το καθοδικό ρεύμα που δημιουργούν ανακυκλοφορίες του ρευστού. Χαρακτηριστικό είναι το μικρό μέγεθος της ταχύτητας ανάμεσα στα τεμάχια. Όμως η μέγιστη ταχύτητα του σιροπιού κατά τον κύκλο θέρμανσης, που καταγράφηκε και για τις τρεις περιπτώσεις ήταν στο 0,5 min μετά την έναρξη της θέρμανσης. Οι μέγιστες τιμές ήταν 2,568 cm/s, 2,760 cm/s και 2,147 cm/s για τις περιπτώσεις “α”, “β” και “γ” αντίστοιχα. Για τις δύο όρθιες κονσέρβες η μέγιστη ταχύτητα εντοπίστηκε στο πλάγιο τοίχωμα της κονσέρβας και από το 1° έως το 4° cm από τον πυθμένα της. Ενώ στην οριζόντια η μέγιστη ταχύτητα εντοπίστηκε στα δύο άκρα (καπάκια) και ειδικότερα 0,5 – 2 cm από τον πυθμένα της κονσέρβας.



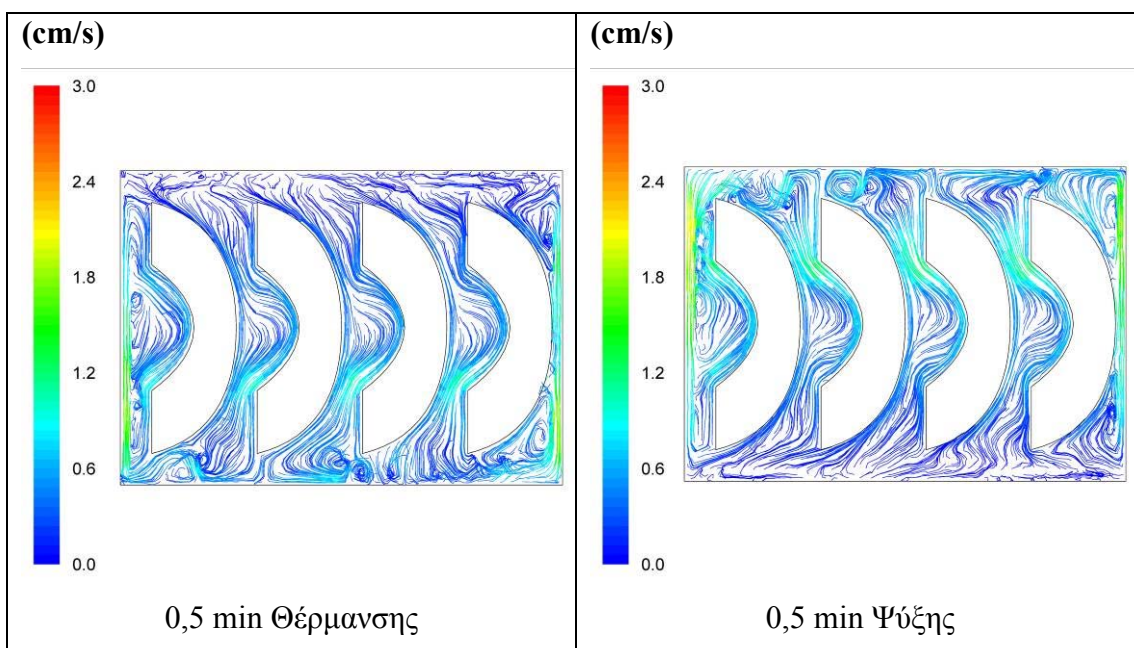
Εικόνα 87. Προφίλ ταχύτητας του σιροπιού για δύο χρονικές στιγμές της θερμικής επεξεργασίας σε τομή της κονσέρβας με τα ροδάκια προς τα επάνω

Το φαινόμενο με το εγκλωβισμένο σιρόπι στο άνοιγμα που αφήνει ο αφαιρούμενος πυρήνας για τις περιπτώσεις “α” στον κύκλο θέρμανσης και “β” για τον κύκλο της ψύξης φαίνεται καθαρά στις εικόνες 87 και 88. Το γεγονός ότι το σιρόπι σε αυτές τις δύο περιπτώσεις εγκλωβίζεται, φαίνεται τόσο από το μέγεθος της ταχύτητας του ρευστού, όσο και από γραμμές ροής στις περιοχές αυτές.



Εικόνα 88. Προφίλ ταχύτητας του σιροπιού για δύο χρονικές στιγμές της θερμικής επεξεργασίας σε τομή της κονσέρβας με τα ροδάκινα προς τα κάτω

Η μέγιστη ταχύτητα του ρευστού μετά την έναρξη της ψύξης ήταν μεγαλύτερη στην περίπτωση “α”, έπειτα στην περίπτωση “β” και τέλος στην πλάγια κονσέρβα. Ειδικότερα η μέγιστη ταχύτητα είχε μέγεθος 2,838 cm/s, 2,709 cm/s και 2,301 cm/s για τις τρεις περιπτώσεις αντίστοιχα. Για την περίπτωση “α” η μέγιστη ταχύτητα του σιροπιού εντοπίστηκε στα άκρα του ανώτερου τεμαχίου, για την περίπτωση “β” στο πλάγιο τοίχωμα 1 – 2 cm κάτω από την οροφή της κονσέρβας και για την περίπτωση “γ” στα άκρα της κονσέρβας και 0,5 – 1,5 cm από την οροφή της κονσέρβας.



Εικόνα 89. Προφίλ ταχύτητας του σιροπιού για δύο χρονικές στιγμές της θερμικής επεξεργασίας σε τομή της κονσέρβας με τα ροδάκινα πλάγια

Θερμική καταστροφή και εντοπισμός κρίσιμου σημείου στα ροδάκινα

Για τις τρεις περιπτώσεις α, β και γ υπολογίστηκαν οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές του ισοδύναμου χρόνου $F_{90^{\circ}\text{C}}^{11.5^{\circ}\text{C}}$ (καταστροφή των σπορίων του βακτηρίου *Cl. butyricum*), ενώ εξήχθησαν εικόνες κατανομής του ισοδύναμου αυτού χρόνου.

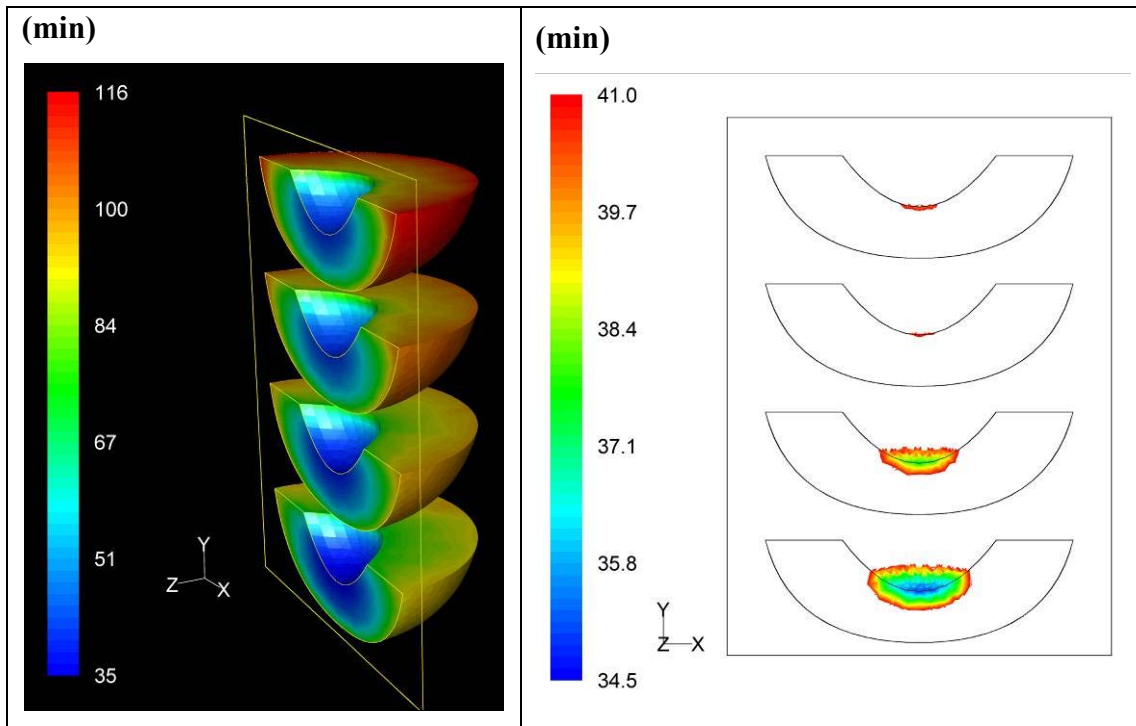
Στις εικόνες 90, 91 και 92 φαίνεται τόσο η κατανομή της τιμής $F_{90^{\circ}\text{C}}^{11.5^{\circ}\text{C}}$ για όλο τον όγκο των ροδάκινων, όσο και οι περιοχές που εντοπίζεται το κρίσιμο σημείο σε κάθε περίπτωση.

Στην περίπτωση “α” η ελάχιστη τιμή $F_{90^{\circ}\text{C}}^{11.5^{\circ}\text{C}}$ ήταν 34,9 min ενώ η μέγιστη τιμή 116,4 min. Το σημείο που παρατηρήθηκε η ελάχιστη τιμή F ήταν το ίδιο με την ΑΘΖ. Αυτό δείχνει ότι το σημείο που άργησε να θερμανθεί σε σχέση με την υπόλοιπη κονσέρβα ήταν αυτό που δέχτηκε και το μικρότερο θερμικό φορτίο.

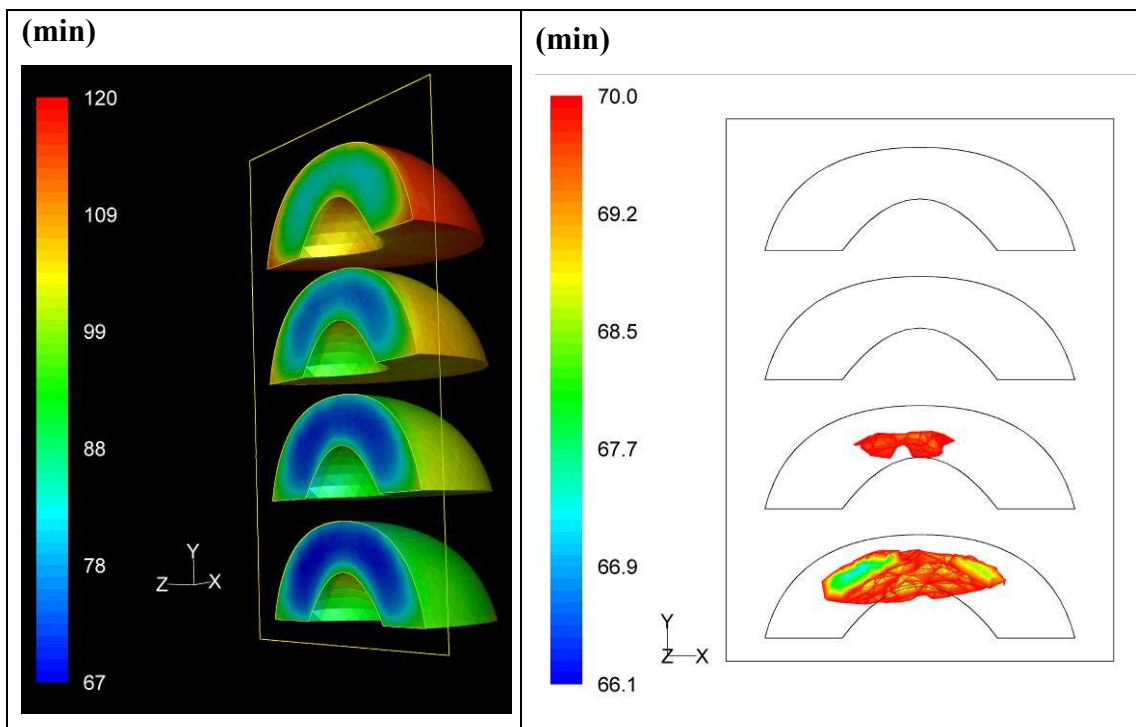
Στην περίπτωση “β” το εύρος του ισοδύναμου χρόνου κυμάνθηκε μεταξύ 66,1 min και 119,9 min. Σε αυτή την περίπτωση το κρίσιμο σημείο δεν εντοπίστηκε στο ίδιο σημείο με την ΑΘΖ. Οι συντεταγμένες του κρίσιμου σημείου ήταν (-10.2,-35.9,-9.1) και εντοπίστηκε στο πρώτο τεμάχιο από τον πυθμένα της κονσέρβας.

Ο ισοδύναμος χρόνος $F_{90^{\circ}\text{C}}^{11.5^{\circ}\text{C}}$ για την περίπτωση “γ” κυμάνθηκε μεταξύ 73,9 min και 128,1 min. Το κρίσιμο σημείο είχε τις ίδιες συντεταγμένες με την ΑΘΖ. Ειδικότερα το κρίσιμο σημείο προσδιορίστηκε, όπως φαίνεται στην Εικόνα 92, στο αριστερό

τεμάχιο. Επίσης παρατηρείται ότι σε κάθε τεμάχιο της περίπτωσης “γ” το σημείο που έχει δεχθεί τη μικρότερη θερμική κατεργασία έχει περίπου την ίδια τιμή F.



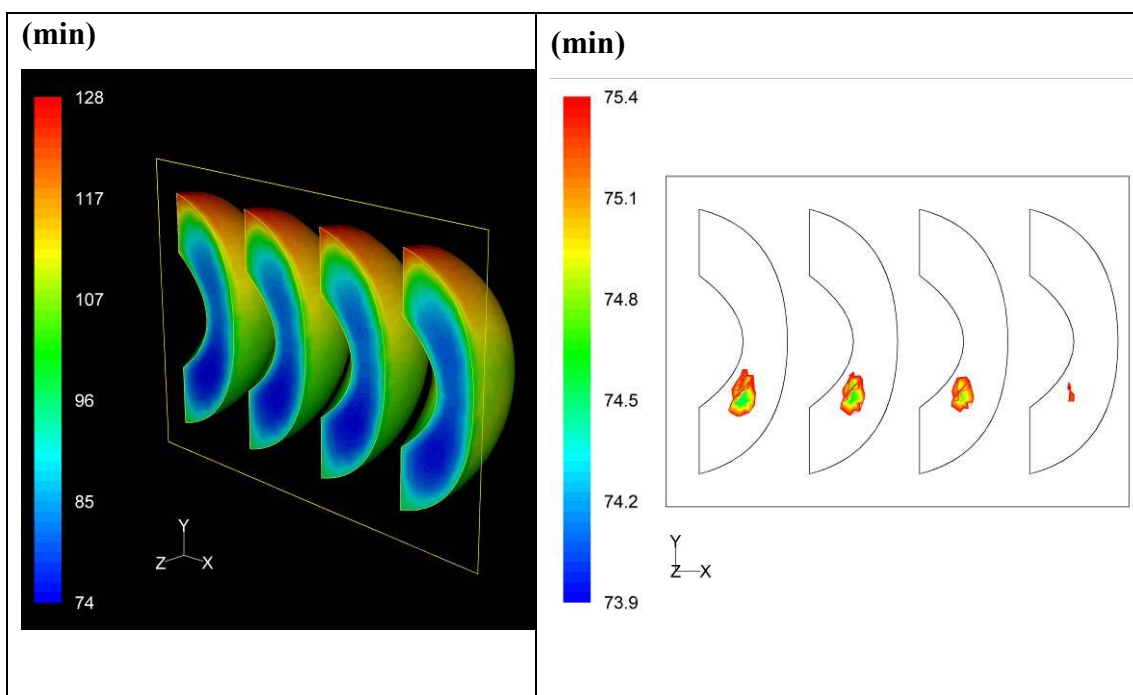
Εικόνα 90. Κατανομή του ισοδύναμου χρόνου θερμικού θανάτου των σπορίων του βακτηρίου και εντοπισμός του κρίσιμο σημείου για την περίπτωση με τα ροδάκινα προς τα επάνω



Εικόνα 91. Κατανομή του ισοδύναμου χρόνου θερμικού θανάτου των σπορίων του βακτηρίου και εντοπισμός του κρίσιμο σημείου για την περίπτωση με τα ροδάκινα προς τα κάτω

Αυτό συμβαίνει λόγω της διευκόλυνσης της ροής κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας και δεύτερο λόγω του ότι τα τεμάχια ήταν τοποθετημένα στο ίδιο ύψος. Υπολογίζοντας τους ελάχιστους ισοδύναμους χρόνους για κάθε τεμάχιο της περίπτωσης “γ” βρέθηκε ότι από αριστερά προς τα δεξιά οι τιμές ήταν 73,9 min, 74,6 min, 74,8 min και 75,2 min αντίστοιχα.

Εδώ θα πρέπει να επισημανθεί ότι οι μέγιστες τιμές του ισοδύναμου χρόνου εντοπίζονται στην επιφάνεια των τεμαχίων. Ειδικότερα στις δύο πρώτες περιπτώσεις “α” και “β” η μέγιστη τιμή F εντοπίζεται στο ανώτερο τεμάχιο ροδάκινου, εκεί δηλαδή που έμεινε για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα το θερμό σιρόπι. Στην περίπτωση “γ” η μέγιστη τιμή F εντοπίστηκε στην ανώτερη επιφάνεια όλων των τεμαχίων, ενώ στην επιφάνεια των τεμαχίων προς τον πυθμένα της κονσέρβας φαίνεται η μείωση του ισοδύναμου χρόνου.

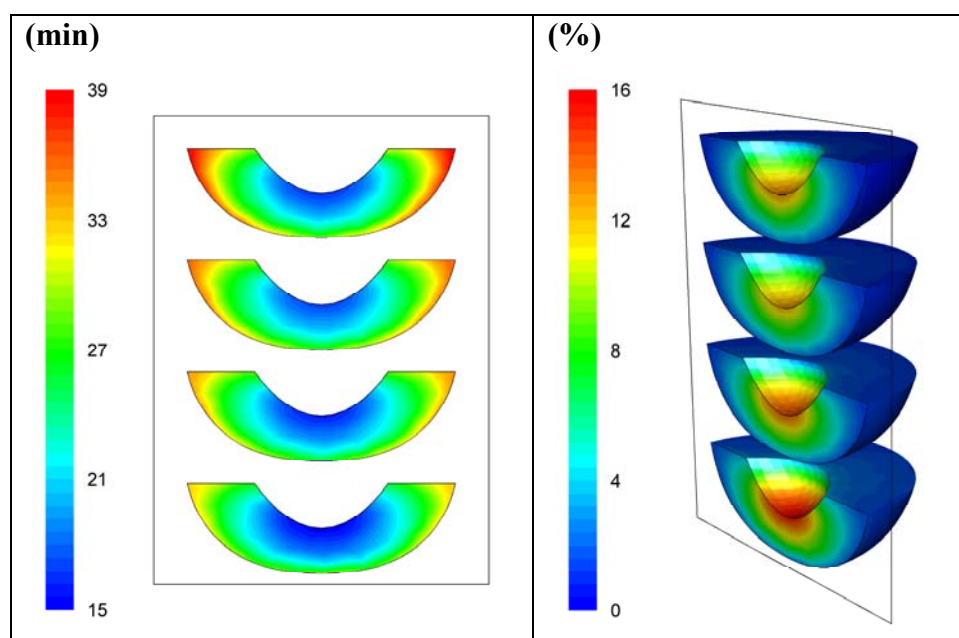


Εικόνα 92. Κατανομή του ισοδύναμου χρόνου θερμικού θανάτου των σπορίων του βακτηρίου και εντοπισμός του κρίσιμο σημείου για την περίπτωση με τα ροδάκινα πλάγια

Ο στόχος για μικροβιολογικά ασφαλές προϊόν ήταν $F_{90^{\circ}\text{C}}^{11.5^{\circ}\text{C}} = 1,5 - 8 \text{ min}$. Με τις υπολογιζόμενες τιμές του ισοδύναμου χρόνου, η θερμική επεξεργασία κρίνεται ότι υπερκαλύπτει τις ανάγκες θερμικής καταστροφής των σπορίων του βακτηρίου *Cl. butyricum*.

Επίδραση της θερμικής επεξεργασίας στην υφή των ροδάκινων

Στην περίπτωση “α” ο ισοδύναμος χρόνος $F_{93,3^{\circ}\text{C}}^{17,6^{\circ}\text{C}}$ για την υποβάθμιση της υφής των ροδάκινων βρέθηκε να έχει εύρος 15 – 39 min. Η ελάχιστη τιμή του ισοδύναμου χρόνου εντοπίστηκε στο κρίσιμο σημείο, δηλαδή στο εσωτερικό του πρώτου τεμαχίου από τον πυθμένα της κονσέρβας. Το εναπομείναν ποσοστό της υφής των τεμαχίων για την περίπτωση “α” υπολογίστηκε και βρέθηκε ότι κυμαινόταν από 0,5% στην επιφάνεια των τεμαχίων έως 16% στο κρίσιμο σημείο. Αυτό σημαίνει ότι η υποβάθμιση ήταν μεγάλη και κυμάνθηκε πάνω από το 85%, με αποτέλεσμα τα τεμάχια να μην διατηρούν την αρχική συνεκτικότητά τους.



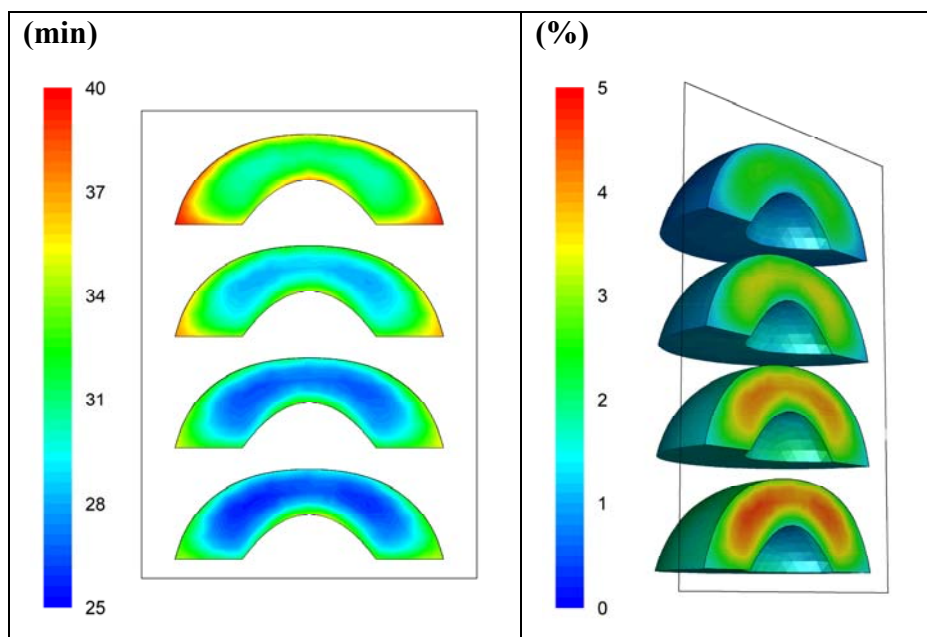
Εικόνα 93. Κατανομή του ισοδύναμου χρόνου για την υποβάθμιση της υφής και επί τοις % εναπομείνασα υφή των ροδάκινων

Στην περίπτωση “β” ο ισοδύναμος χρόνος υποβάθμισης της υφής $F_{93,3^{\circ}\text{C}}^{17,6^{\circ}\text{C}}$ κυμάνθηκε από 25 – 40 min. Σαφέστατα η θερμική υποβάθμιση είναι μεγαλύτερη σε αυτή την περίπτωση σε σχέση με την προηγούμενη. Όπως και με την επίδραση επί των σπορίων του κλωστριδίου έτσι και για την υποβάθμιση της υφής ο ισοδύναμος χρόνος παρουσίαζε αυξημένο εύρος, το οποίο φαίνεται χαρακτηριστικά στην Εικόνα 94.

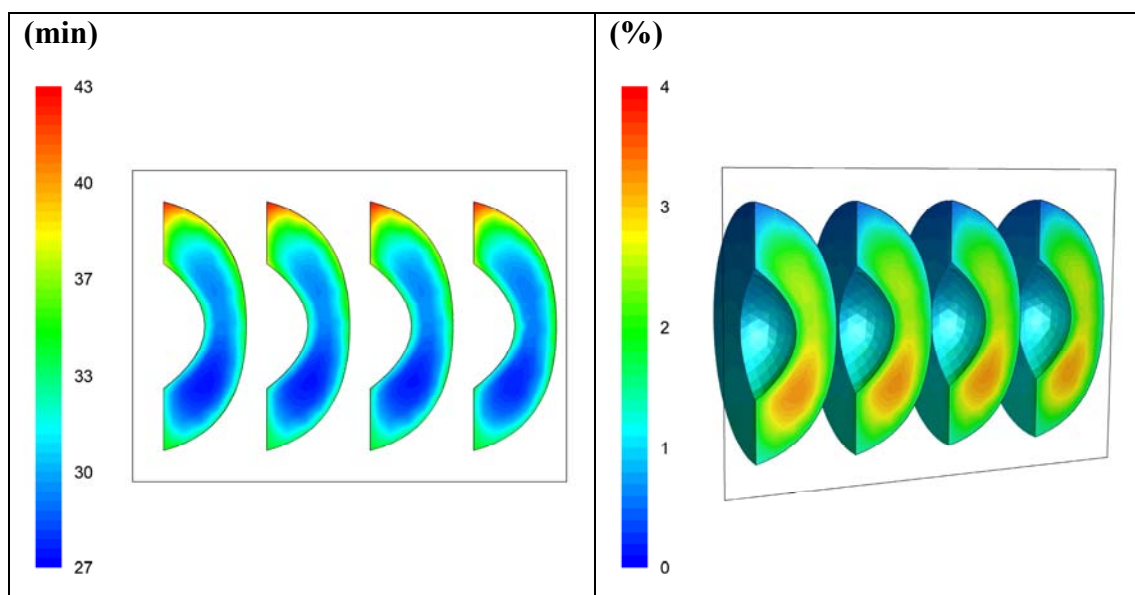
Σε αυτή την εικόνα φαίνεται ότι η εναπομείνασα υφή των τεμαχίων δεν ξεπερνά το 5%. Αποτέλεσμα που δείχνει ότι η υποβάθμιση της υφής ξεπέρασε το 95%.

Ακόμα μεγαλύτερη φαίνεται να είναι η υποβάθμιση στην περίπτωση των πλάγιων τεμαχίων. Το εύρος του ισοδύναμου χρόνου $F_{93,3^{\circ}\text{C}}^{17,6^{\circ}\text{C}}$ σε αυτή την περίπτωση

κυμάνθηκε από 27 – 43 min, με αποτέλεσμα η εναπομείνασα υφή να μην ξεπεράσει το 4% της αρχικής.



Εικόνα 94. Κατανομή του ισοδύναμου χρόνου για την υποβάθμιση της υφής και επί τοις % εναπομείνασα υφή των ροδάκινων



Εικόνα 95. Κατανομή του ισοδύναμου χρόνου για την υποβάθμιση της υφής και επί τοις % εναπομείνασα υφή των ροδάκινων

Η υποβάθμιση της υφής σε μεγαλύτερες τιμές από 96% της αρχικής καθιστά τη θερμική επεξεργασία ιδιαίτερα "σκληρή" τόσο απέναντι στα σπόρια του βακτηρίου, όσο και απέναντι στην υφή των ροδάκινων.

Συμπεράσματα

Η εκπόνηση της διατριβής είχε σκοπό την προσομοίωση της θερμικής επεξεργασίας κονσερβοποιημένων ελιών και ροδάκινων, τα οποία ήταν εμβαπτισμένα σε υγρό. Οι ουσιαστικές διαφορές των δύο αυτών τροφίμων ήταν από τη μία πλευρά το σχήμα και το μέγεθός τους και από την άλλη το υγρό πληρώσεως των κονσερβών. Δηλαδή οι ελιές είχαν σχήμα σφαιρικό (ελλειψοειδές), ενώ τα ροδάκινα ημισφαιρίου και είχαν πολλαπλάσιο όγκο (μέγεθος) από τις ελιές. Επίσης οι ελιές ήταν εμβαπτισμένες στην κονσέρβα σε άλμη NaCl, ενώ τα ροδάκινα σε σιρόπι ζάχαρης. Έχοντας υπόψη τις παραμέτρους που τέθηκαν και τα αποτελέσματα που ελήφθησαν από τη μεταβολή αυτών, εξάγονται μια σειρά από χρήσιμα συμπεράσματα.

- 1) Η θέρμανση των ελιών και των ροδάκινων προκαλεί υποβάθμιση στην υφή τους. Οι παράμετροι θερμικής υποβάθμισης μετρήθηκαν και βρέθηκαν για τις ελιές: $D_{93,3^{\circ}\text{C}} = 55,7 \text{ min}$ και $z = 28,6^{\circ}\text{C}$ ενώ για τα ροδάκινα: $D_{93,3^{\circ}\text{C}} = 18,5 \text{ min}$ και $z = 17,6^{\circ}\text{C}$.
- 2) Η υπολογιστική ρευστοδυναμική με τον κώδικα του λογισμικού Fluent είναι σε θέση να προσομοιώσει θερμικές επεξεργασίες εγκυτωμένων και εμβαπτισμένων σε υγρό, στερεών τροφίμων.
- 3) Οι λύσεις στο πεδίο ροής που πραγματοποιήθηκαν ήταν ανεξάρτητες της πυκνότητας του πλέγματος και του χρονικού βήματος για τα εύρη που μελετήθηκαν. Η πυκνότητα των πλεγμάτων που ελέγχθηκε για τις ελιές ήταν $222,5 \text{ κελιά/cm}^3$ έως $387,3 \text{ κελιά/cm}^3$ και για τα ροδάκινα ήταν $80,3 \text{ κελιά/cm}^3$ έως $195,7 \text{ κελιά/cm}^3$. Η πολύ μικρή διαφοροποίηση στα αποτελέσματα των πυκνότερων πλεγμάτων που επιλύθηκαν οδήγησε στην υιοθέτηση των αραιότερων πλεγμάτων για τη μελέτη. Το χρονικό βήμα όσο μεγαλύτερο είναι τόσο μικρότερος είναι ο χρόνος επίλυσης. Ο έλεγχος της μεταβολής των χρονικών βημάτων απέδειξε ότι το χρονικό βήμα της τάξης του $0,5 \text{ s}$ δίνει τα ίδια αποτελέσματα με λύσεις που έγιναν με πολύ μικρότερης τάξης χρονικά βήματα.
- 4) Όπως αποδείχθηκε με πειραματική επιβεβαίωση υπήρξε καλή σύμπτωση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας σε συγκεκριμένα σημεία των γεωμετριών.
- 5) Από το θεωρητικό υπολογισμό του ισοδύναμου χρόνου θερμικής θανάτωσης του μικροοργανισμού στόχου με τη βοήθεια του λογισμικού και των μικροβιολογικών αναλύσεων που έγιναν, βρέθηκε ότι το μοντέλο CFD προέβλεπε σωστά τη μείωση του μικροβιακού φορτίου.

6) Οι λύσεις της προσομοίωσης είναι πιο ακριβείς όσο πιο ακριβείς είναι και οι τιμές των θερμοφυσικών ιδιοτήτων. Πολλές φορές υπάρχουν λίγες τιμές των ιδιοτήτων των υλικών που λαμβάνουν μέρος και κατά συνέπεια πρέπει να βρεθούν τρόποι προσπέρασης αυτών των εμποδίων. Λόγω έλλειψης μεγάλου εύρους τιμών της πυκνότητας των ρευστών σε σχέση με τη θερμοκρασία, γίνεται χρήση της υπόθεσης Boussinesq. Ο έλεγχος της υπόθεσης Boussinesq σε σχέση με τη χρήση πολυωνυμικών εξισώσεων που περιγράφουν τη μεταβολή της πυκνότητας της άλμης με τη θερμοκρασία απέδειξε ότι υπάρχει πολύ μικρή διαφοροποίηση μεταξύ των δύο (η μέγιστη περίπου 2%). Κατά συνέπεια είναι εφικτή η χρήση της υπόθεσης Boussinesq σε φυσική κυκλοφορία άλμης και σιροπιού σε θέρμανση σε κονσέρβα.

7) Εξετάζοντας τα αποτελέσματα των κύριων γεωμετριών, αλλά και των παραμετρικών μελετών φαίνεται ότι το μοντέλο της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής περιγράφει ορθά τη φυσική κυκλοφορία του ρευστού στην κονσέρβα κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας. Οι ταχύτητες του ρευστού που αναπτύσσονται δεν ξεπερνούν τα 5 cm/s στην αρχή του κύκλου θέρμανσης ή ψύξης, ενώ με τη μείωση της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού της κονσέρβας η ταχύτητα μειώνεται σημαντικά.

8) Η επίδραση της συγκέντρωσης NaCl στη θερμική επεξεργασία των ελιών είναι αμελητέα. Η θερμοκρασιακή κατανομή έδειξε ότι η μεταβολή της συγκέντρωσης NaCl στο εύρος που επιτάσσουν οι καταναλωτικές συνήθειες δεν επηρεάζει τη θερμοκρασία σημαντικά (διαφοροποίηση 0,5%) και κατά συνέπεια δεν υπάρχει ουσιαστική μεταβολή στο θερμικό θανατηφόρο αποτέλεσμα του μικροοργανισμού στόχου.

Αντίθετα στην περίπτωση των ροδάκινων η επίδραση της συγκέντρωσης της ζάχαρης στη θερμική επεξεργασία ήταν μεγαλύτερη. Το σιρόπι με συγκέντρωση 30% σε ζάχαρη παρουσίαζε μικρότερη ταχύτητα του ρευστού και κατά συνέπεια μικρότερο ρυθμό στη μεταφορά της θερμότητας προς και από το εσωτερικό της κονσέρβας από και προς το θερμαντικό – ψυκτικό μέσο. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα το μικρότερο θερμικό αποτέλεσμα στο μικροοργανισμό στόχο σε σχέση με την περίπτωση που το υγρό πληρώσεως ήταν το νερό (ισοδύναμος χρόνος 29,2 min για σιρόπι 30% και 36,2 min για το νερό). Για αυτή τη σημαντική διαφορά, αιτία είναι οι διαφορετικές θερμοφυσικές ιδιότητες του σιροπιού και του νερού.

9) Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ θερμαντικού – ψυκτικού μέσου και τοιχώματος της κονσέρβας (h) έχει σημαντική επίδραση στη θερμική επεξεργασία. Ο μικρός ΣΜΘ προκαλούσε αργή θέρμανση, αλλά και αργή ψύξη, ενώ το αντίθετο

συνέβαινε στην περίπτωση που ο ΣΜΘ ήταν μεγάλος (1.000-2.000 W/m²·°C). Αυτό είχε ως συνέπεια την επίδραση στη ροή του υγρού και στον ισοδύναμο χρόνο θερμικής επεξεργασίας για το μικροοργανισμό στόχο. Ειδικότερα στην περίπτωση των κονσερβοβολιών για το εφαρμοζόμενο σχήμα θερμικής επεξεργασίας μόνο όταν ο ΣΜΘ ήταν άπειρος επιτυγχανόταν το επιθυμητό θερμικό αποτέλεσμα. Ενώ στις υπόλοιπες περιπτώσεις ελιών και ροδάκινων υπήρχε κρίσιμη τιμή του ΣΜΘ, όπου μείωση κάτω από αυτή, προκαλούσε παραγωγή προϊόντος μικροβιολογικά μη ασφαλούς.

10) Για την περίπτωση των ελιών και αφού επιλύθηκαν σχήματα θερμικής επεξεργασίας βιομηχανικής πρακτικής για άπειρο ΣΜΘ βρέθηκε ότι το θερμικό αποτέλεσμα ήταν πολύ μεγαλύτερο από το επιθυμητό. Αντίθετα η θερμική υποβάθμιση της υφής για αυτά τα σχήματα κυμαινόταν σε φυσιολογικά επίπεδα και δεν ξεπερνούσε το 20% της αρχικής υφής. Η χρήση τέτοιων σχημάτων με έντονα θερμικά αποτελέσματα επί των μικροοργανισμών στόχων πραγματοποιείται για τη βεβαιότητα της μικροβιολογικής σταθερότητας του προϊόντος.

Για τις ελιές που δεν έχουν υποστεί ζύμωση εφαρμόζεται εμπορική αποστείρωση. Το ζεύγος χρόνου-θερμοκρασίας που προτείνεται από τη βιβλιογραφία έχει εντονότερα αποτελέσματα επί του μικροοργανισμού στόχου από τα απαραίτητα. Προτείνεται η θέρμανση στους 121,11°C για 25 min αντί για 45 min υπό την αίρεση άπειρου ΣΜΘ.

11) Σημαντικό στοιχείο είναι και η σύγκριση μεταξύ μεγέθους ελιών, καθώς και ποικιλιών (ουσιαστικά διαφοροποίηση στο σχήμα). Οι μικρές ελιές θερμαίνονται και ψύχονται ταχύτερα από αυτές μεγαλύτερου μεγέθους, με αποτέλεσμα την σαφώς μεγαλύτερη θερμική θανάτωση μικροοργανισμών, αλλά και την μεγαλύτερη ποιοτική υποβάθμιση. Στη σύγκριση μεταξύ ποικιλιών οι ελιές “Καλαμών” φαίνεται να υπόκεινται σε μεγαλύτερη θερμική καταπόνηση σε σχέση με τις κονσερβολιές για το ίδιο σχήμα θερμικής επεξεργασίας.

12) Για την περίπτωση των ροδάκινων, σημαντική είναι η θέση που έχουν τα τεμάχια εντός της κονσέρβας κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας. Για τον κύκλο της θέρμανσης, τα τεμάχια με τα κοίλα προς την οροφή της κονσέρβας εγκλώβιζαν σιρόπι στο χώρο που άφηνε η αφαίρεση του πυρήνα, με αποτέλεσμα την αργή θέρμανση στο χώρο αυτό. Αντίστοιχο φαινόμενο παρουσιαζόταν κατά τον κύκλο ψύξης στα τεμάχια που κοιτούσαν στον πυθμένα της κονσέρβας. Ενώ στην περίπτωση με τα πλάγια τεμάχια, δεν παρατηρήθηκε κανένα τέτοιο φαινόμενο και η θέρμανση, όπως και η ψύξη ήταν ιδιαίτερα ομοιόμορφη στη σάρκα των τεμαχίων. Οι ιδιαιτερότητες του

σιροπιού είχαν σημαντική επίδραση στη ροή και στο θερμικό αποτέλεσμα της μικροβιακής θανάτωσης, αλλά και υποβάθμισης της υφής των ροδάκινων.

Τέλος, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι για την επίλυση όλων των πεδίων ροής έγιναν κάποιες παραδοχές, χωρίς τις οποίες δεν ήταν δυνατή η επίλυση ή θα απαιτούσε πολλούς πόρους σε χρόνο και υπολογιστική ισχύ. Οι δυνατότητες ενός προγράμματος υπολογιστικής ρευστοδυναμικής δεν είναι απεριόριστες και κάθε παραδοχή γίνεται για διευκόλυνση στην επίλυση, όμως μπορεί να εισάγει σφάλματα στα εξερχόμενα αποτελέσματα. Η κατάλληλη ισορροπία μεταξύ πόρων και παραδοχών είναι αυτή που τελικά δίνει το καλύτερο αποτέλεσμα.

Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 1.7 η υπολογιστική ρευστοδυναμική άρχισε να αναπτύσσεται στις αρχές του 20^{ου} αιώνα και πλέον είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για την επίλυση προβλημάτων με ροές. Στον τομέα της επιστήμης των τροφίμων φαίνεται ότι υπάρχει χώρος για χρήση του εργαλείου αυτού και μάλιστα σε πολλές εφαρμογές. Η εφαρμογή του στις θερμικές επεξεργασίες και συγκεκριμένα στην κονσερβοποιία αποδείχθηκε τόσο από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, όσο και από την συγκεκριμένη διατριβή, ότι μπορεί να αποδώσει σημαντικά αποτελέσματα. Επιπροσθέτως, οι εμπορικοί κώδικες που κυκλοφορούν συνεχώς εξελίσσονται και βελτιώνονται για να καλύψουν όλο και μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών. Η δυναμική αυτή δίνει τη δυνατότητα για περαιτέρω έρευνα στον κλάδο της κονσερβοποιίας. Επίσης στα πλαίσια της ανάπτυξης νέων προϊόντων και της βελτίωσης των ήδη υπάρχοντων είναι δυνατή η προσομοίωση αρχικά της θερμικής επεξεργασίας από ένα λογισμικό υπολογιστικής ρευστοδυναμικής και έπειτα η εφαρμογή του σε βιομηχανική κλίμακα. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι οι κονσερβοποιημένες τομάτες πληρωμένες με χυμό τομάτας, τα κονσερβοποιημένα λουκάνικα σε άλμη και η προσομοίωση της θερμικής τους επεξεργασίας τους σε συνθήκες συνεχούς λειτουργίας. Ακόμη, εφόσον οι H/Y συνεχώς εξελίσσονται θα είναι δυνατό στο μέλλον η προσομοίωση της θερμικής επεξεργασίας κονσερβών εντός κλιβάνου με επίλυση τόσο του πεδίου ροής της γεωμετρίας της κονσέρβας, όσο και του εσωτερικού του κλιβάνου. Σε μια τέτοια περίπτωση μπορεί να υπολογιστεί ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ θερμαντικού μέσου και τοιχώματος της κονσέρβας, πράγμα που θα βελτιώσει τους χρόνους θέρμανσης και της ποιοτικής υποβάθμισης των προϊόντων.

Βιβλιογραφία

Διεθνής βιβλιογραφία

AnandPaul, D., Anishaparvin, A., & Anandharamakrishnan, C. (2011). Computational fluid dynamics studies on pasteurisation of canned milk. *International Journal of Dairy Technology*, 64(2), 305-313.

Augusto, P. E. D., Pinheiro, T. F., & Cristianini, M. (2010). Using Computational Fluid-Dynamics (CFD) for the evaluation of beer pasteurization: effect of orientation of cans. *Food Science and Technology (Campinas)*, 30(4), 980-986.

Augusto, P. E. D., & Cristianini, M. (2011). Evaluation of boundary conditions for CFD simulation of liquid food thermal process in glass bottles. *International Journal of Food Engineering*, 7(6).

Ball, C.O. and Olson, F.C.W. (1957). *Sterilization in Food Technology*. New York, NY, USA: McGraw-Hill.

Bigelow W. D., Bohart G. S., Richardson A. C., and Ball C. O., (1920). *Heat Penetration in Processing Canned Foods*, Bulletin No 16-L, Washington, USA: Laboratory National Canners Associated.

Bird, R. B., Stewart, W. E., & Lightfoot, E. N. (2007). *Transport phenomena*. New York, USA: John Wiley & Sons.

Boussinesq, M. J. (1897). *Théorie de l'écoulement tourbillonnant et tumultueux des liquides*. Gauthier-Villars.

Bubník, Z., Kadlec, P., Urban, D., & Bruhns, M. (1995). Sugar technologists manual: Chemical and physical data for sugar manufacturers and users. *Zuckerindustrie*, 120(6), 574-575.

Codex Alimentarius. (1987). Codex Standard for Table Olives, Codex Stan 66, *Codex Alimentarius, International Food Standards*. Available from: http://www.codexalimentarius.org/standards/list-of-standards/en/?no_cache=1. (πρόσβαση 14 Οκτωβρίου 2012)

Courant, R., Friedrichs, K., and Lewy, H. (1967). On the Partial Difference Equations of Mathematical Physics. *IBM Journal* **11**, 215-234, .

Datta, A. K. (1985). *Numerical modelling of natural convection and conduction heat transfer in canned foods with application to on-line process control*. PhD Thesis, Department of Agricultural Engineering, University of Florida.

Datta, A. K., Teixeira, A. A., & Manson, J. E. (1986). Computer - based retort control logic for on - line correction of process deviations. *Journal of Food Science*, *51*(2), 480-483.

Datta, A. K., & Teixeira, A. A. (1987). Numerical modeling of natural convection heating in canned liquid foods. *Transactions of the ASAE-American Society of Agricultural Engineers (USA)*. *30*(5), 1542–1551.

Datta, A. K., & Teixeira, A. A. (1988). Numerically predicted transient temperature and velocity profiles during natural convection heating of canned liquid foods. *Journal of Food Science*, *53*(1), 191-195.

de Castro, A., García, P., Romero, C., Brenes, M., & Garrido, A. (2007). Industrial implementation of black ripe olive storage under acid conditions. *Journal of Food Engineering*, *80*(4), 1206-1212.

Dimou, A., & Yanniotis, S. (2011). 3D numerical simulation of asparagus sterilization in a still can using computational fluid dynamics. *Journal of Food Engineering*, *104*(3), 394-403.

Erdogdu, F., & Tutar, M. (2011). Velocity and temperature field characteristics of water and air during natural convection heating in cans. *Journal of Food Science*, *76*(1), E119-E129.

Farid, M., & Ghani, A. A. (2004). A new computational technique for the estimation of sterilization time in canned food. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 43(4), 523-531.

Fluent, I. N. C. (2006). Fluent 6.3 Users Guide. *Fluent documentation*.

Gandul-Rojas, B., & Mínguez-Mosquera, M. I. (2006). *Handbook of fruits and fruit processing*. Olive processing. In: Hui Y.H. editor. Ames, IA, USA: Blackwell Publishing, 26, 491-517.

Ghani, A. A., Farid, M. M., Chen, X. D., & Richards, P. (1999a). Numerical simulation of natural convection heating of canned food by computational fluid dynamics. *Journal of Food Engineering*, 41(1), 55-64.

Ghani, A. A., Farid, M. M., Chen, X. D., & Richards, P. (1999b). An investigation of deactivation of bacteria in a canned liquid food during sterilization using computational fluid dynamics (CFD). *Journal of Food Engineering*, 42(4), 207-214.

Ghani, A. A., Farid, M. M., Chen, X. D., & Richards, P. (2001). Thermal sterilization of canned food in a 3-D pouch using computational fluid dynamics. *Journal of Food Engineering*, 48(2), 147-156.

Ghani, A. A., Farid, M. M., & Chen, X. D. (2002a). Numerical simulation of transient temperature and velocity profiles in a horizontal can during sterilization using computational fluid dynamics. *Journal of Food Engineering*, 51(1), 77-83.

Ghani, A. A., Farid, M. M., & Chen, X. D. (2002b). Theoretical and experimental investigation of the thermal inactivation of *Bacillus stearothermophilus* in food pouches. *Journal of Food Engineering*, 51(3), 221-228.

Ghani, A. A., Farid, M. M., & Zarrouk, S. J. (2003). The effect of can rotation on sterilization of liquid food using computational fluid dynamics. *Journal of Food Engineering*, 57(1), 9-16.

- Ghani, A. A., & Farid, M. M. (2006). Using the computational fluid dynamics to analyze the thermal sterilization of solid–liquid food mixture in cans. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 7(1), 55-61.
- González, F., Rejano, L., & González, F. (1982). La pasterización de aceitunas estilo sevillano, I. *Grasas y Aceites*, 33, 201-207.
- Heldman, D. R. (2013). Food preservation process design. In *Advances in Food Process Engineering Research and Applications* (pp. 489-497), In Taylor S. L. editor. Mason, OH, USA: Springer US.
- Heldman, D. R., Lund, D. B., & Sabliov, C. (2006). *Handbook of food engineering*. (2nd Ed.). Boca Raton, FL, USA: CRC press.
- Hess, J. L., & Smith, A. M. O. (1967). Calculation of potential flow about arbitrary bodies. *Progress in Aerospace Sciences*, 8, 1-138.
- Hiddink, J., Schenk, J., & Bruin, S. (1976). Natural convection heating of liquids in closed containers. *Applied Scientific Research*, 32(3), 217-237.
- Holman, J. (1986). *Heat transfer*. (6th Ed.). New York, NY, USA: McGraw-Hill.
- Holdsworth, S. D., & Simpson, R. (2007). *Thermal processing of packaged foods*. (2nd Ed.). New York, NY, USA: Springer Science & Business Media.
- IOC (International Olive Council). (2004). *Trade Standard Applying to Table Olives*, Resolution Nr RES-2/91-IV/04, COI/OT/NC nr 1. Available from: <http://www.internationaloliveoil.org>. (πρόσβαση στις 14 Οκτωβρίου 2012)
- Irvine, J. (1998). Thermophysical properties. In: Rohsenow WM, Hartnett JR, Cho YI, editors. *Handbook of heat transfer*. (3th ed). New York, NY, USA: The McGraw-Hill Co., Inc. p 2.1 – 2.74.
- Jordan, K. N., & Cogan, T. M. (1999). Heat resistance of *Lactobacillus* spp. isolated from Cheddar cheese. *Letters in Applied Microbiology*, 29(2), 136-140.

Kailis, S., & Harris, D. J. (2007). *Producing table olives*. Collingwood, Australia: Landlinks press.

Kannan, A., & Sandaka, P. C. G. (2008). Heat transfer analysis of canned food sterilization in a still retort. *Journal of Food Engineering*, 88(2), 213-228.

Karel, M., & Lund, D. B. (2003). *Physical principles of food preservation*. (Vol. 129). (2nd Ed.). New York, NY, USA: CRC Press.

Kızıldaş, S., Erdoğan, F., & Palazoğlu, T. K. (2010). Simulation of heat transfer for solid–liquid food mixtures in cans and model validation under pasteurization conditions. *Journal of Food Engineering*, 97(4), 449-456.

Kumar, A., Bhattacharya, M., & Blaylock, J. (1990). Numerical simulation of natural convection heating of canned thick viscous liquid food products. *Journal of Food Science*, 55(5), 1403-1411.

Kumar, A., & Bhattacharya, M. (1991). Transient temperature and velocity profiles in a canned non-Newtonian liquid food during sterilization in a still-cook retort. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 34(4), 1083-1096.

Layne, D. R., & Bassi, D. (Eds.). (2008). *The peach: botany, production and uses*. Wallingford, Oxfordshire, UK: CABI.

Lopez, A. (1987). *A Complete course in canning and related processes*. (12th ed.). Baltimore, MD, USA: The Canning Trade.

Meynell, G. G., & Meynell, E. (1970). *Theory and practice in experimental bacteriology*. CUP Archive.

Norton, T., & Sun, D. W. (2006). Computational fluid dynamics (CFD)—an effective and efficient design and analysis tool for the food industry: a review. *Trends in Food Science & Technology*, 17(11), 600-620.

Patankar, S., V. (1980). *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. New York, NY, USA: Hemisphere Publishing Corporation.

Phomkong, W., Srzednicki, G., & Driscoll, R. H. (2006). Thermophysical properties of stone fruit. *Drying Technology*, 24(2), 195-200.

Rabiey, L., Flick, D., & Duquenoy, A. (2007). 3D simulations of heat transfer and liquid flow during sterilisation of large particles in a cylindrical vertical can. *Journal of Food Engineering*, 82(4), 409-417.

Rahman, M. S. (2007). *Handbook of food preservation*. (2nd Ed.). Boca Raton, FL, USA: CRC press.

Richardson, L. F. (1911). The approximate arithmetical solution by finite differences of physical problems involving differential equations, with an application to the stresses in a masonry dam. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A*, 307-357.

Sethian J.A. (1993). *Computational fluid dynamics. In: From Desktop to Teraflop: Exploiting the US Lead in High Performance Computing*. Washington, DC, USA: National Science Foundation Publications.

Silva, F. V., & Gibbs, P. (2004). Target selection in designing pasteurization processes for shelf-stable high-acid fruit products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 44(5), 353-360.

Singh, R. Paul, Heldman, Dennis R. (2009). *Introduction to food engineering*. (4th Ed.). Amsterdam, Holland: Elsevier/Academic Press,

Siriwattanayotin, S., Yoovidhya, T., Meepadung, T., & Ruenglerpanyakul, W. (2006). Simulation of sterilization of canned liquid food using sucrose degradation as an indicator. *Journal of Food Engineering*, 73(4), 307-312.

Stoforos, N.G. and Merson, R.L., 1990. Estimating heat transfer coefficients in liquid/particulate canned foods using only liquid temperature data. *Journal of Food Science*, 55(2): 478-483, 521.

Stoforos, N.G. and Merson, R.L., 1991. Measurement of heat transfer coefficients in rotating liquid/particulate systems. *Biotechnology Progress*, 7(3): 267-271.

Stumbo, C.R. (1973). *Thermobacteriology in Food Processing*. (2nd Ed.). New York, NY, USA: Academic Press.

Sun, D. W. (Ed.). (2007). *Computational fluid dynamics in food processing*. Boca Raton, FL, USA: CRC press.

Therios, I. N. (2009). *Olives* (Vol. 18). Wallingford, Oxfordshire, UK: CABI.

Toledo, R. T. (2007). *Fundamentals of food process engineering*. (3rd Ed.). New York, NY, USA: Springer Science & Business Media.

Tutar, M., & Erdogan, F. (2012). Numerical simulation for heat transfer and velocity field characteristics of two-phase flow systems in axially rotating horizontal cans. *Journal of Food Engineering*, 111(2), 366-385.

Ünal, K., & Nergiz, C. (2003). The effect of table olive preparing methods and storage on the composition and nutritive value of olives. *Grasas y Aceites*, 54(1), 71-76.

Varma, M. N., & Kannan, A. (2005). Enhanced food sterilization through inclination of the container walls and geometry modifications. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(18), 3753-3762.

Varma, M. N., & Kannan, A. (2006). CFD studies on natural convective heating of canned food in conical and cylindrical containers. *Journal of Food Engineering*, 77(4), 1024-1036.

Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. (2nd Ed.). Harlow, Essex, UK, Pearson Education.

Wang, L., & Sun, D. W. (2003). Recent developments in numerical modelling of heating and cooling processes in the food industry—a review. *Trends in Food Science & Technology*, 14(10), 408-423.

Xia, B., & Sun, D. W. (2002). Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the food industry: a review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 34(1), 5-24.

Ελληνική βιβλιογραφία

Del Fabro, A. (2009). *Η ελιά : Ποικιλίες, καλλιέργεια, προϊόντα*. Μετάφραση Βασίλης Περάκης - Αθήνα : Εκδόσεις Ψύχαλος

Γιαννιώτης Σ. (2011). *Μηχανική Τροφίμων: Μέρος 1^ο, Φαινόμενα μεταφοράς στη μηχανική τροφίμων*. Πανεπιστημιακές Σημειώσεις. ΓΠΑ

Μπαλατσούρας Γ. (2004). *Συγχρονη Ελαιοκομία: Η επιτραπέζια ελιά*. Αθήνα: Ιδιωτική Έκδοση

Μπλούκας Ι. (2004). *Επεξεργασία και συντήρηση Τροφίμων*. Αθήνα: Εκδόσεις Σταμούλης Α.Ε.

Ποντίκης Κ. (2000). *Ειδική Δενδροκομία III – Ελαιοκομία*. Αθήνα: Εκδόσεις Σταμούλης Α.Ε.

Ποντίκης Κ. (1996). *Ειδική Δενδροκομία II – Ακρόδρυα, Πυρηνόκαρπα*. Αθήνα: Εκδόσεις Σταμούλης Α.Ε.

Ιστοσελίδες

(https://en.wikipedia.org/wiki/Nicolas_Appert) (πρόσβαση 1 Οκτωβρίου 2012)

(https://en.wikipedia.org/wiki/Louis_Pasteur) (πρόσβαση 1 Οκτωβρίου 2012)

(https://en.wikipedia.org/wiki/C._Olin_Ball) (πρόσβαση 1 Οκτωβρίου 2012)

(https://en.wikipedia.org/wiki/University_of_Massachusetts_Amherst_Department_of_Food_Science) (πρόσβαση 1 Οκτωβρίου 2012)

(<http://www.alexander-canning.com>) (πρόσβαση 1 Οκτωβρίου 2012)

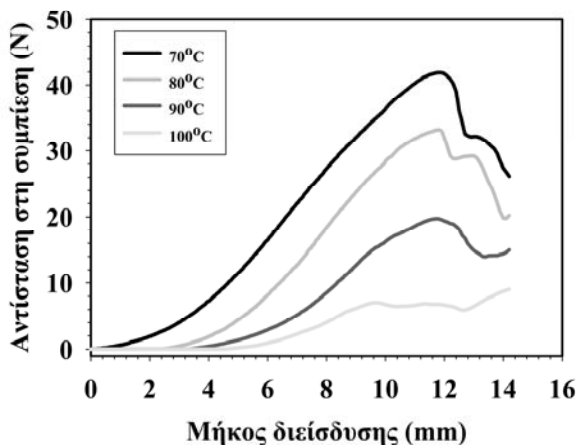
(<http://www.hyperhistory.net/apwh/bios/b2appert.htm>) (πρόσβαση 1 Οκτωβρίου 2012)

(www.minagric.gr) (πρόσβαση 15 Οκτωβρίου 2012)

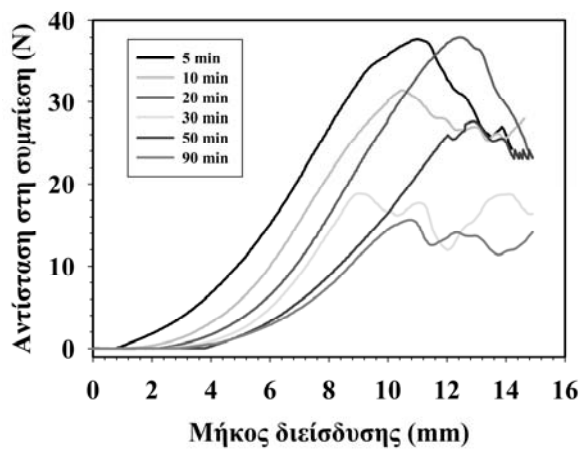
(<http://frulantis.com>) (πρόσβαση 15 Οκτωβρίου 2012)

Παράρτημα Α

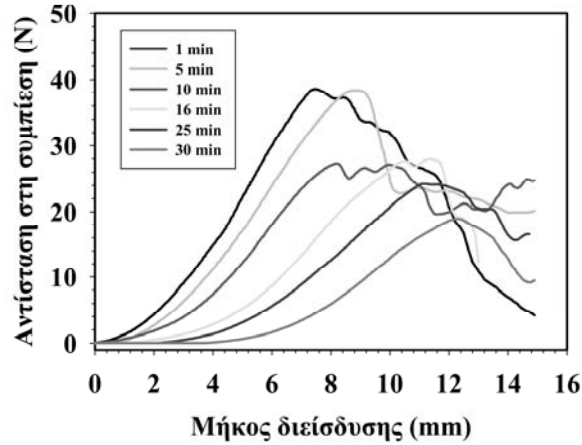
Διαγράμματα παρουσίασης της μεταβολής της αντίστασης στη συμπίεση του εμβόλου επί του τεμαχίου ροδάκινου για θέρμανση 5 min σε διάφορες θερμοκρασίες και για κάθε θερμοκρασία σε διάφορους χρόνους



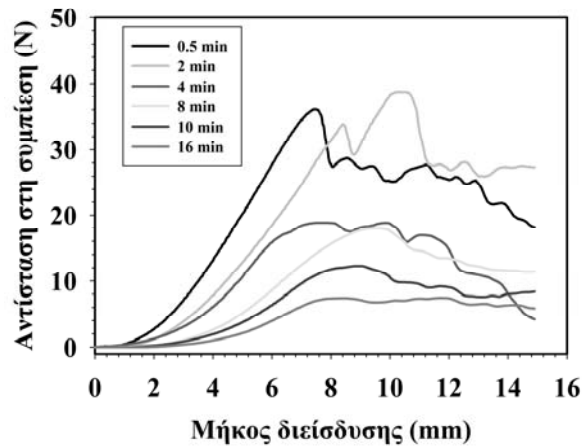
Διάγραμμα 73. Μεταβολή της αντίστασης στη συμπίεση σε σχέση με το μήκος διείσδυσης του εμβόλου για θέρμανση 5 min σε 70, 80, 90 και 100°C



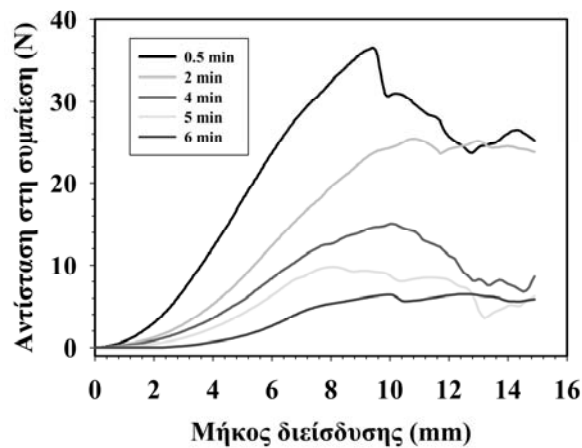
Διάγραμμα 74. Μεταβολή της αντίστασης στη συμπίεση σε σχέση με το μήκος διείσδυσης του εμβόλου για θέρμανση στους 70°C σε διάφορους χρόνους



Διάγραμμα 75. Μεταβολή της αντίστασης στη συμπίεση σε σχέση με το μήκος διείσδυσης του εμβόλου για θέρμανση στους 80°C σε διάφορους χρόνους



Διάγραμμα 76. Μεταβολή της αντίστασης στη συμπίεση σε σχέση με το μήκος διείσδυσης του εμβόλου για θέρμανση στους 90°C σε διάφορους χρόνους



Διάγραμμα 77. Μεταβολή της αντίστασης στη συμπίεση σε σχέση με το μήκος διείσδυσης του εμβόλου για θέρμανση στους 100°C σε διάφορους χρόνους



Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών
2015