

ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
Π.Μ.Σ. ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΤΡΟΦΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΥ
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

*Μελέτη της “πλήρωση εν θερμώ” διεργασίας για την παραγωγή
τοματοπολτού και βελτιστοποίηση της με τη βοήθεια υπολογιστικής
ρευστοδυναμικής*

Στυλιανός Σ. Μαραγκουδάκης

Επιβλέπων καθηγητής: Νικόλαος Γ. Στοφόρος

ΑΘΗΝΑ, 2015

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

*Μελέτη της “πλήρωση εν θερμώ” διεργασίας για την παραγωγή
τοματοπολτού και βελτιστοποίηση της με τη βοήθεια υπολογιστικής
ρευστοδυναμικής*

Στυλιανός Σ. Μαραγκουδάκης

Επιβλέπων καθηγητής: Νικόλαος Γ. Στοφόρος

Εξεταστική Επιτροπή

Σταύρος Γιαννιώτης, Καθηγητής

Ιωάννα Μαντάλα, Επίκουρη καθηγήτρια

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής μελέτης ήταν η προσομοίωση της “πλήρωση εν θερμώ” διεργασίας για την παραγωγή τοματοπολτού, με τη χρήση Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής και η βελτιστοποίηση της μέσω της αξιολόγησης των σημαντικότερων ποιοτικών χαρακτηριστικών του προϊόντος. Σε αυτή τη διεργασία, το προϊόν εισάγεται θερμό στον περιέκτη, σφραγίζεται, και ακολουθεί ψύξη του στον αέρα και στο νερό όπου η μεταφορά θερμότητας γίνεται με αγωγή. Το κρίσιμο στάδιο είναι ο χρόνος διατήρησης στον αέρα, διάστημα στο οποίο εξασφαλίζεται ουσιαστικά η εμπορική αποστείρωση του προϊόντος και του περιέκτη.

Αρχικά, προσδιορίστηκαν από τη βιβλιογραφία οι θερμοφυσικές ιδιότητες του τοματοπολτού, οι παράμετροι θερμοανθεκτικότητας (τιμές D και z) του μικροοργανισμού-στόχου, *B. coagulans* και των ποιοτικών χαρακτηριστικών a/b και L του χρώματος, της βιταμίνης C και των καροτενοειδών. Ακολούθησε η ανάπτυξη του αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης σε περιέκτη με διαστάσεις $L = 0.106\text{ m}$, $R = 0.0365\text{ m}$ και όγκο $V = 443.65\text{ cm}^3$, που χρησιμοποιείται στην ελληνική βιομηχανία παραγωγής τοματοπολτού, και ακολούθησε παραμετρική μελέτη αρχικά με σταθερό α ($\alpha = 1.43 \times 10^{-7}\text{ m}^2/\text{s}$) και παραμέτρους το χρονικό βήμα (time step, 1 s, 5 s, 20 s), την ποιότητα και πυκνότητα του πλέγματος (271420 τετράεδρα κελιά, 40986 εξάεδρα κελιά, 150094 εξάεδρα κελιά, 320988 εξάεδρα κελιά) το απόλυτο κριτήριο σύγκλισης (10^{-6} , 10^{-7} , 10^{-8} , 10^{-9}) και τη διακριτοποίηση του χρόνου (πρώτης και δεύτερης τάξης). Η ακρίβεια του μοντέλου αξιολογήθηκε με βάση το χρονοθερμοκρασιακό προφίλ μιας τυπικής θερμικής διεργασίας (70 min θέρμανση, 60 min ψύξη) συγκρινόμενο με την αναλυτική λύση σε τρία σημεία εντός του περιέκτη ($A(0,0,0)$, $B(0.01825,0,0)$, $C(0,0,0.0265)$). Η αριθμητική λύση του μοντέλου με χαρακτηριστικά 150094 εξάεδρα κελιά, με χρονικό βήμα 5 s, απόλυτο κριτήριο σύγκλισης 10^{-9} και δεύτερης τάξης διακριτοποίηση του χρόνου έδωσε την πιο αποδοτική λύση (σχέση ζητούμενης ακρίβειας λύσης προς υπολογιστικό χρόνο λύσης). Στη συνέχεια με αυτό το μοντέλο αξιολογήθηκε ο μεταβλητός συντελεστής θερμικής διαχυτότητας με αρχικές τιμές $\alpha = 1 \times 10^{-7}$ έως $1.43 \times 10^{-7}\text{ m}^2/\text{s}$ σε σύγκριση με εργαστηριακά πειραματικά δεδομένα σε τοματοπολτό. Ο μεταβλητός συντελεστής α με αρχική τιμή $\alpha = 1.22 \times 10^{-7}\text{ m}^2/\text{s}$ επιλέχθηκε ως πιο ακριβής ως προς τα πειραματικά δεδομένα (μικρότερο σφάλμα σε θερμοκρασία και τιμές F).

Τέλος, αξιολογήθηκε η “πλήρωση εν θερμώ” διεργασία με την εξέταση της επίδρασης των κύριων παραμέτρων της διεργασίας στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του τοματοπολτού,

δηλαδή, της θερμοκρασίας γεμίσματος (88°C , 90°C , 93°C , 95°C , 98°C) του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στον αέρα h_{air} , (5 , 7 , 9 , 15 W/m^2 K) της απαιτούμενης ολοκληρωμένης τιμής F_s ($F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 10$ min , $F_{90^{\circ}\text{C}}^{9.5^{\circ}\text{C}} = 24.5$ min , $F_{110^{\circ}\text{C}}^{13.7^{\circ}\text{C}} = 1.6$ min) και δευτερευόντως της θερμοκρασίας του αέρα, T_{air} (35°C , 25°C) και του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στο νερό, h_{cw} (20 , 100 , 500 W/m^2 K). Τη σημαντικότερη επίδραση στην τελική ποιότητα σε φθίνουσα σειρά είχαν η θερμοκρασία γεμίσματος και η απαιτούμενη τιμή F_s και ακολούθως ο h_{air} . Με θερμοκρασίες γεμίσματος μέχρι τους 90°C δεν επιτεύχθη η ελάχιστη απαιτούμενη ολοκληρωμένη τιμή F_s , ενώ η θερμοκρασία των 93°C ήταν ικανοποιητική μόνο για $h_{air}=5$ W/m^2 K . Στη θερμοκρασία των 95°C χρειάστηκε σημαντικά λιγότερος χρόνος παραμονής στον αέρα έναντι των 93°C , ενώ η απαιτούμενη τιμή F_s επιτεύχθηκε και για $h_{air}=7$ W/m^2 K . Η θερμοκρασία των 98°C πέτυχε όχι μόνο την ελάχιστη απαιτούμενη τιμή F_s για όλες τις τιμές h_{air} , αλλά και όλες τις απαιτούμενες τιμές F_s . Επιπλέον, σε σύγκριση των παραμέτρων της διεργασίας ως προς το ποσοστό διατήρησης των ποιοτικών παραγόντων στο τέλος της διεργασίας, η βέλτιστη διατήρηση όλων των παραγόντων, επιτεύχθηκε στη θερμοκρασία γεμίσματος των 98°C . Από τις δευτερεύουσες παραμέτρους η θερμοκρασία του αέρα είχε τη μικρότερη επίδραση στη διεργασία, επίδραση που βρέθηκε να εξαρτάται άμεσα από τη θερμοκρασία γεμίσματος και τον συντελεστή h_{air} . Από την άλλη, ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στο νερό h_{cw} , έδειξε σημαντική επίδραση στη διεργασία όσον αφορά την τελική διατήρηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών, αυξάνοντας σημαντικά το χρόνο ψύξης όταν ο h_{cw} ήταν στα κατώτερα όρια (20 W/m^2 K) και την ποιοτική υποβάθμιση του προϊόντος. Η προσομοίωση έδειξε ότι η διεργασία που εφαρμόζεται στη βιομηχανία σε μεταλλικό περιέκτη έχει περιθώρια βελτίωσης, και συγκεκριμένα με τη χρήση θερμοκρασίας γεμίσματος στους 98°C , ώστε να δώσει προϊόντα καλύτερης ποιότητας. Από τους ποιοτικούς παράγοντες τη μεγαλύτερη θερμοευαισθησία έδειξε το χρώμα και ιδιαίτερα η παράμετρος L , με την παράμετρο a/b και τη βιταμίνη C να ακολουθούν. Τα καροτενοειδή έδειξαν τη μεγαλύτερη θερμοανθεκτικότητα.

Επιστημονικό πεδίο: *Μηχανική Τροφίμων*

Λέξεις-κλειδιά: *Πλήρωση “εν θερμώ” διεργασία, μεταφορά θερμότητας με αγωγή, Υπολογιστική Ρευστοδυναμική, τοματοπολτός, ολοκληρωμένη τιμή F , βελτιστοποίηση, διατήρηση ποιότητας*

Optimization of hot-fill-hold-cool thermal process for the tomato paste production using Computational Fluid Dynamics

ABSTRACT

The objective of this study was the optimization of a hot-fill thermal process for the production of tomato paste with better quality attributes, through the modelling of this process with Computational Fluid Dynamics (CFD). In the hot-fill process, the container is filled with the hot product, closed and then turned upside down, a procedure that if done right it allows the sterilization of both product and container. The critical parameter is the required holding time in the air.

Initially, a search was conducted to determine the appropriate thermophysical properties of tomato paste, the D and z values of target microorganism, *B. coagulans* and of the quality parameters (color *a/b* and *L* parameters, vitamin C, carotenoids). CFD were conducted in a metal can with dimensions $L = 0.106\text{ m}$, $R = 0.0365\text{ m}$, and of volume $V = 443.65\text{ cm}^3$ used in greek tomato paste industry. A parametric study was initially done with constant thermal diffusivity value, α ($\alpha = 1.43 \times 10^{-7}\text{ m}^2/\text{s}$) and with studied parameters the time step (1 s, 5 s, 20 s), the shape of the geometry and number of cells (271420 tet/hybrid volumes, 40986 hex/wedge volumes, 150094 hex/wedge volumes, 320988 hex/wedge volumes), the absolute convergence criteria (10^{-6} , 10^{-7} , 10^{-8} , 10^{-9}) and time discretization scheme (1st and 2nd order). The model was evaluated in terms of the time-temperature profile of a typical thermal process (70 min heating, 60 min cooling), in comparison with the analytical solution in three points inside the can ($A(0,0,0)$, $B(0.01825,0,0)$, $C(0,0,0.0265)$). The model with 150094 cells, time step 5 s, absolute convergence criteria 10^{-9} , time discretization of 2nd order was selected as it was the most efficient, giving accurate results in reasonable computational time. With the selected model, the next step was to evaluate a solution with a variable, temperature-dependent α (with initial values $a = 1 \times 10^{-7}$ to $1.43 \times 10^{-7}\text{ m}^2/\text{s}$), based on previous experimental data on tomato paste. The case with a variable α with initial value of $\alpha = 1.22 \times 10^{-7}\text{ m}^2/\text{s}$ proved to be the most accurate in terms of time-temperature profile and F values.

The final step of this study, was the simulation of hot-fill processes with carefully chosen primary parameters, the filling temperature (88°C, 90°C, 93°C, 95°C, 98°C), the heat transfer coefficient in air cooling h_{air} , (5, 7, 9, 15 W/m² K), the required integrated F_s ($F_{93.33^\circ\text{C}}^{8.89^\circ\text{C}} = 10 \text{ min}$, $F_{90^\circ\text{C}}^{9.5^\circ\text{C}} = 24.5 \text{ min}$, $F_{110^\circ\text{C}}^{13.7^\circ\text{C}} = 1.6 \text{ min}$) and secondary parameters the temperature of air, T_{air} (35°C, 25°C), and the heat transfer coefficient during water cooling, h_{cw} (20, 100, 500 W/m² K). The most important factors on product quality retention, in decreasing order, are the filling temperature and the integrated F value, followed by h_{air} . Filling temperatures of 88°C and 90°C were not adequate for all cases examined, while temperature of 93°C reached the least required integrated F value only with $h_{air}=5$ W/m² K. For filling temperature of 95°C, the required retention time was reduced significantly, while the required integrated F value was also achieved with $h_{air}=7$ W/m² K. Only the filling temperature of 98°C succeeded in reaching the least required integrated F_s , in every h_{air} value examined and for all integrated F values examined the best quality was also achieved with filling temperature of 98°C. From the secondary parameters, the temperature of air had the least effect on the process, and was found to depend on filling temperature and h_{air} . On the other hand, h_{cw} value proved important and especially smaller values (20 W/m² K) largely prolonged the water cooling process with detrimental effects on product quality. These results indicate that the hot-fill process applied in the food industry could be optimized to give better quality products. From the quality parameters examined, the color, especially L parameter, proved to be the most heat sensitive attribute, followed by the a/b ratio and vitamin C. Carotenoids showed the highest retention.

Scientific field : *Food engineering*

Keywords: *Hot-fill-hold-cool sterilization process, conduction heat transfer, CFD, tomato paste, integrated F value, optimization, quality retention*

Περιεχόμενα

Εισαγωγή	1
1. Η τομάτα και τα προϊόντα της	5
1.1. Ο καρπός της τομάτας.....	6
1.2. Η σύσταση της τομάτας	7
1.3. Προϊόντα τομάτας	10
1.4. Βιομηχανική τομάτα.....	12
1.5. Παραγωγή τοματοπολτού	12
1.5.1. Πλύση.....	13
1.5.2. Διαλογή.....	14
1.5.3. Θραύση-Προθέρμανση.....	14
1.5.4. Αποχύμωση	15
1.5.5. Συμπόκνωση.....	15
1.5.6. Θερμική επεξεργασία-συσκευασία	16
1.5.7. Αποθήκευση	18
1.6. Παραγωγή τομάτας και προϊόντων της και οικονομικά στοιχεία.....	18
2. Θερμικές διεργασίες τροφίμων και η “πλήρωση εν θερμώ”	21
2.1. Εισαγωγή	21
2.2. Αρχές της θερμικής επεξεργασίας.....	22
2.2.1. Σχεδιασμός μιας θερμικής διεργασίας	23
2.2.2. Κινητικές θερμικής απενεργοποίησης.....	24
2.2.3. Υπολογισμός θνησιμότητας θερμικών διεργασιών.....	28
2.2.4. Προγραμματισμός μιας θερμικής διεργασίας	30
2.3. Επίδραση της θερμικής διεργασίας στα ποιοτικά χαρακτηριστικά.....	31
2.4. Η αλλοίωση της κονσερβοποιημένης τομάτας και των προϊόντων της.....	33
2.4.1. Η επίπεδη οξίνιση και τα χαρακτηριστικά της	34

2.4.2.	<i>Αιτίες της επίπεδης οξίνισης και τρόποι ελέγχου της στη γραμμή παραγωγής</i>	35
2.4.3.	<i>Η θερμοανθεκτικότητα των σπόρων του <i>B. coagulans</i> και οι απαιτούμενες τιμές παστερίωσης, F</i>	38
2.5.	Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της τομάτας και των προϊόντων της	43
2.6.	Η “πλήρωση εν θερμώ” διεργασία	46
3.	Η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική στη βιομηχανία τροφίμων	49
3.1.	Εισαγωγή	49
3.2.	Βασικές αρχές της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής	50
3.2.1.	<i>Οι εξισώσεις στις οποίες βασίζονται οι αρχές λειτουργίας</i>	50
3.2.2.	<i>Αριθμητική ανάλυση</i>	52
3.3.	Βελτίωση της ακρίβειας και εξάλειψη του σφάλματος στην Υπολογιστική Ρευστοδυναμική	52
3.4.	Τα στάδια επεξεργασίας για την επίλυση ενός προβλήματος με τη χρήση Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής	55
3.5.	Εφαρμογές της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής στη βιομηχανία τροφίμων	58
4.	Θεωρητικό υπόβαθρο	61
4.1.	Μεταφορά θερμότητας με αγωγή σε μη σταθερή κατάσταση	61
4.1.1.	<i>Αναλυτική μέθοδος επίλυσης</i>	61
4.1.2.	<i>Αριθμητική μέθοδος πεπερασμένων όγκων</i>	67
5.	Υλικά και Μέθοδοι	69
5.1.	Θερμοφυσικές ιδιότητες	69
5.1.1.	<i>Σταθερές θερμοφυσικές ιδιότητες</i>	69
5.1.2.	<i>Μεταβλητές θερμοφυσικές ιδιότητες</i>	70
5.2.	Επίλυση με τη χρήση αναλυτικών εξισώσεων	71
5.3.	Η αριθμητική επίλυση με τη χρήση του λογισμικού προσομοίωσης	72
5.4.	Αξιολόγηση του αριθμητικού μοντέλου	76

5.5.	Υπολογισμός της τιμής F της διεργασίας.....	77
5.6.	Υπολογισμός της υποβάθμισης των ποιοτικών παραγόντων του τοματοπολτού	79
5.7.	Υπολογισμός του ολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, U_0	80
5.8.	Αξιολόγηση της “πλήρωση εν θερμώ” διεργασίας.....	85
6.	Αποτελέσματα και συζήτηση.....	89
6.1.	Επαλήθευση της αναλυτικής λύσης.....	89
6.2.	Αξιολόγηση του αριθμητικού μοντέλου επίλυσης (σταθερό α).....	90
6.2.1.	<i>Επίδραση του χρονικού βήματος</i>	91
6.2.2.	<i>Επίδραση του πλέγματος διακριτοποίησης</i>	94
6.2.3.	<i>Επίδραση του απόλυτου κριτηρίου σύγκλισης</i>	98
6.2.4.	<i>Επίδραση της μεθόδου διακριτοποίησης του χρόνου</i>	98
6.2.5.	<i>Επιλογή του πιο αποδοτικού αριθμητικού μοντέλου</i>	99
6.3.	Αξιολόγηση του αριθμητικού μοντέλου επίλυσης με μεταβλητό α	102
6.4.	Αξιολόγηση της “πλήρωση εν θερμώ” διεργασίας.....	106
6.4.1.	<i>Το προφίλ της διεργασίας (μεταλλική συσκευασία) στη βιομηχανική πρακτική σε διάφορα σημεία του περιέκτη</i>	106
6.4.2.	<i>Το προφίλ της διεργασίας στη βιομηχανική πρακτική (μεταλλική και γυάλινη συσκευασία) ως συνάρτηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στον αέρα</i>	111
6.4.3.	<i>Επίδραση της θερμοκρασίας γεμίσματος, T_{IT}</i>	112
6.4.4.	<i>Επίδραση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στον αέρα, h_{air}</i>	116
6.4.5.	<i>Επίδραση της ολοκληρωμένης τιμής F_s</i>	119
6.4.6.	<i>Επίδραση της θερμοκρασίας του αέρα και του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στο νερό</i>	121
6.4.7.	<i>Βελτιστοποίηση της διεργασίας</i>	124
6.4.8.	<i>Διαγράμματα ισοϋψών (contours)</i>	128
7.	Συμπεράσματα.....	143

Ονοματολογία	145
Βιβλιογραφία	149

Εισαγωγή

Η “πλήρωση εν θερμώ” (hot-fill) διεργασία είναι μια ήπια θερμική διεργασία που χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό στη βιομηχανία τροφίμων υψηλής οξύτητας ($\text{pH} < 4,6$), όπως σε χυμούς και συμπυκνώματα φρούτων και τελευταία και αναψυκτικών και αεριούχων ποτών (Sandoval *et al.*, 1994; Silva and Silva, 1997; Gould, 1992; Hariyadi, 2013). Ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο τρόφιμο υψηλής οξύτητας σε παγκόσμια κλίμακα είναι και ο τοματοπολτός. Κατά τη διαδικασία παραγωγής του με αυτή τη διεργασία, το προϊόν αυτό θερμαίνεται μέχρι να φτάσει μια ορισμένη θερμοκρασία ($< 100^\circ\text{C}$) και κατόπιν εισάγεται θερμό στον περιέκτη, ο οποίος αμέσως κλείνεται ερμητικά, αναποδογυρίζεται και αφήνεται για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, πριν ψυχθεί σε κρύο νερό (Sandoval *et al.*, 1994; Silva and Silva., 1997). Ως αποτέλεσμα το θερμό προϊόν αποστειρώνει τον περιέκτη και δίνει ένα ασφαλές προς κατανάλωση τρόφιμο που αποθηκεύεται σε θερμοκρασία δωματίου ($< 30^\circ\text{C}$). Η επιστημονική προσέγγιση της παραπάνω διεργασίας χρήζει περαιτέρω μελέτης καθώς σε πολλές περιπτώσεις βιομηχανικής πρακτικής για να διασφαλιστεί ότι το τρόφιμο είναι ασφαλές, αυτό υφίσταται μεγαλύτερη θερμική επεξεργασία από την ιδανική, με αποτέλεσμα να έχει κατώτερα ποιοτικά χαρακτηριστικά, όπως υποβαθμισμένο χρώμα και απώλειες σε βιταμίνες (Veliloglu *et al.*, 2011; Leskova *et al.*, 2006), επιπλέον υπάρχουν και αναφορές ότι η διεργασία αυτή δεν επαρκεί σε κάποιες περιπτώσεις για να εξασφαλίσει την σταθερότητα προϊόντων όπως ο τοματοχυμός, όταν ο υπεύθυνος μικροοργανισμός είναι πολύ θερμοανθεκτικός, με αποτέλεσμα την αλλοίωση τους (Gould, 1992). Ο πιο σημαντικός παράγοντας της διεργασίας φαίνεται να είναι η θερμοκρασία γεμίματος (Silva and Silva., 1997), ενώ ο σχεδιασμός της διεργασίας πρέπει να λάβει υπόψη και άλλους παράγοντες όπως ο τρόπος ψύξης (συντελεστής μεταφοράς θερμότητας), το μέγεθος, το σχήμα και ο τύπος του περιέκτη (Sandoval *et al.*, 1994), το pH και οι θερμοφυσικές ιδιότητες του τρόφιμου. Έτσι, ενώ υπάρχουν αναφορές ότι η ελάχιστη θερμοκρασία γεμίματος για πουρέ φρούτων με $\text{pH} < 4.0$ είναι 85°C , με σφράγισμα του περιέκτη, και εμφάνιση του σε ατμό θερμοκρασίας 88°C για 2 λεπτά (NCA, 1968), αυτό πολλές φορές δεν έχει πετύχει στην πράξη λόγω το μεγάλου χρόνου που μπορεί να μεσολαβήσει από τη μια διεργασία στην άλλη (Silva and Silva., 1997).

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης της ποιότητας των τροφίμων αν βελτιστοποιηθούν οι συνθήκες της θερμικής διεργασίας. Η ιδέα της βελτιστοποίησης μιας διεργασίας δεν είναι καινούρια και ειδικά τα τελευταία χρόνια έχουν

γίνει αρκετές μελέτες που αναπτύσσουν διάφορους τρόπους βελτιστοποίησης μιας θερμικής διεργασίας (Balsa-Canto *et al.*, 2002a and 2002b; Banga *et al.*, 2003; Miri *et al.*, 2008; Simpson and Abakarov, 2009; Sendin *et al.*, 2010). Η βελτιστοποίηση είναι δυνατή διότι οι κινητικές θερμικής υποβάθμισης των ποιοτικών παραγόντων όπως το χρώμα, το άρωμα, η υφή ή τα θρεπτικά συστατικά, τους καθιστούν αρκετά πιο θερμοανθεκτικούς απ' ότι οι κινητικές θερμικής καταστροφής των μικροοργανισμών ή απενεργοποίησης των ενζύμων (Teixeira *et al.*, 1969; Lund, 1977; Holdsworth, 1985). Από την άλλη, οι επιστημονικές μελέτες όσον αφορά τη πλήρωση “εν θερμώ” διεργασία είναι ελάχιστες στη βιβλιογραφία (Sandoval *et al.*, 1994; Rodrigo *et al.*, 1990; Silva and Silva., 1997) και ακόμη λιγότερες είναι αυτές που εξετάζουν τη βελτιστοποίηση της μέσω της ελαχιστοποίησης της υποβάθμισης των ποιοτικών χαρακτηριστικών του τρόφιμου (Silva and Silva., 1997).

Με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών τις τελευταίες δεκαετίες έγινε δυνατή η ανάπτυξη κατάλληλων προγραμμάτων, τα οποία βασιζόμενα στην επίλυση πολύπλοκων μαθηματικών εξισώσεων προσομοίωναν με αρκετή ακρίβεια φυσικές και χημικές διεργασίες που κατά τα άλλα θα απαιτούσαν τεράστιο χρόνο και ανθρώπινη προσπάθεια. Η εξέλιξη αυτή βοήθησε σημαντικά στην επίλυση διαφόρων προβλημάτων, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις όπου η δυνατότητα πραγματοποίησης πραγματικών πειραμάτων ήταν περιορισμένη. Οι Teixeira *et al.*, 1969 ήταν οι πρώτοι που χρησιμοποίησαν ηλεκτρονικό υπολογιστή για τη βελτιστοποίηση μιας θερμικής διεργασίας και τη μέγιστη διατήρηση θρεπτικών συστατικών σε τρόφιμα που θερμαίνονται με αγωγή. Οι Sandoval *et al.*, 1994 ανέπτυξαν ένα μαθηματικό μοντέλο σε υπολογιστικό περιβάλλον Basic με το οποίο προέβλεψαν με επιτυχία τον απαιτούμενο χρόνο διατήρησης (πριν την ψύξη τους) γυάλινων βάζων με τοματοπολτό που παράχθηκαν με τη πλήρωση “εν θερμώ” διεργασία για την επίτευξη της εμπορικής αποστείρωσής τους.

Η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (Computational Fluid Dynamics, CFD) αποτελεί ένα ισχυρό υπολογιστικό εργαλείο το οποίο χρησιμοποιείται σήμερα όλο και περισσότερο για την προσομοίωση πολλών διεργασιών στη βιομηχανία τροφίμων όπως πχ ψήσιμο, ξήρανση, αποστείρωση, ψύξη (Yanniotis and Stoforos, 2014; Norton *et al.*, 2007). Μερικά επιτυχή παραδείγματα όσον αφορά την προσομοίωση αποστείρωσης τροφίμων περιλαμβάνουν την αποστείρωση σπαραγγιών σε βάζο (Dimou *et al.*, 2011), επιτραπέζιων ελιών σε ακίνητη μεταλλική κονσέρβα (Dimou *et al.*, 2014), καρότων μαγειρεμένα με τη μέθοδο “sous vide” (Hong *et al.*, 2014) και παστερίωση γάλακτος σε κονσέρβα (Paul *et al.*, 2011).

Ο τοματοπολτός στην ελληνική βιομηχανική πρακτική, γεμίζεται στον περιέκτη σε θερμοκρασίες $>93.3^{\circ}\text{C}$, συνήθως στους 95°C σφραγίζεται, αναποδογυρίζεται για να αποστειρωθεί και το καπάκι και διατηρείται στον αέρα για 20 λεπτά, πριν ψυχθεί στο νερό. Με βάση τα παραπάνω, αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής ερευνητικής μελέτης ήταν η προσομοίωση με τη χρήση Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής και διερεύνηση της “πλήρωση εν θερμώ” διεργασίας για την παραγωγή τοματοπολτού ως προς το επίπεδο ασφάλειας της, την ποιοτική υποβάθμιση που δέχεται το προϊόν κατά τη διεργασία και τις δυνατότητες που υπάρχουν να βελτιστοποιηθεί η ποιότητα με την χρήση των πλέον κατάλληλων συνθηκών (θερμοκρασία γεμίσματος και χρόνος διατήρησης στον αέρα) της διεργασίας.

1. Η τομάτα και τα προϊόντα της

Η τομάτα βοτανολογικά ανήκει στα φρούτα αλλά καλλιεργείται κατά κανόνα ως ετήσιο λαχανικό και είναι αρκετά διαδεδομένη και δημοφιλής. Σε διεθνή κλίμακα, η καλλιέργεια της τομάτας καταλαμβάνει την τρίτη σε έκταση θέση μετά την πατάτα και γλυκοπατάτα, ενώ στην Ελλάδα η επιτραπέζια τομάτα (χωρίς να συνυπολογίζονται οι εκτάσεις της βιομηχανικής τομάτας) καταλαμβάνει τη δεύτερη θέση μετά την πατάτα. Η δημοτικότητα της τομάτας ποικίλει από χώρα σε χώρα, αλλά είναι πολύ λίγες οι περιοχές στον πλανήτη όπου η τομάτα δεν καλλιεργείται. Καλλιεργείται για τον καρπό της, ο οποίος καταναλώνεται ώριμος, νωπός, αποξηραμένος, σε άλμη, ακέραιος ή σε πολτό. Ακόμη και οι άωροι καρποί συντηρούνται σε άλμη ή ξύδι (τουρσί). Είναι γνωστοί οι φόβοι που επικρατούσαν μέχρι τον 20^ο αιώνα στις περιοχές της Μεσογείου, Β. Ευρώπης και στη Β. Αμερική, ότι οι τομάτες περιέχουν ουσίες τοξικές, γεγονός που εμπόδιζε την κατανάλωση. Οι φόβοι αυτοί οφείλονταν στην παρουσία δηλητηριωδών γλυκοαλκαλοϊδών στα φύλλα και στους καρπούς άλλων μελών της ίδιας οικογένειας. Αυτό ξεπεράστηκε στις αρχές του προηγούμενου αιώνα και έκτοτε η κατανάλωση της αυξήθηκε σημαντικά (Ολύμπιος, 2001).

Οι λόγοι που καθιστούν δημοφιλή την τομάτα είναι πολλοί. Οι σπουδαιότεροι είναι ότι εφοδιάζει τον ανθρώπινο οργανισμό με βιταμίνες, ιδίως τη βιταμίνη C, κάλιο και αντιοξειδωτικές ουσίες (κυρίως λυκοπένιο), έχει ελκυστικό χρώμα και ιδιαίτερο, ευχάριστο άρωμα, γεγονός που την καθιστά αρεστή στη διατροφή. Ποικιλίες της έχουν εγκλιματιστεί σε ένα μεγάλο εύρος τύπων εδάφους και κλίματος, αν και πρέπει να τονιστεί ότι το φυτό απαιτεί θερμό κλίμα και εδάφη με καλή στράγγιση. Σήμερα η καλλιέργεια της τομάτας εκτείνεται από τις τροπικές περιοχές μέχρι και μερικές μοίρες από τον αρκτικό κύκλο και στις μεν περιοχές όπου η διάρκεια της θερμής περιόδου το επιτρέπει, και σε περιοχές «εκτός εποχής» καλλιεργείται σε θερμοκήπια και άλλες προστατευόμενες κατασκευές. Η μορφή καλλιέργειας της τομάτας ποικίλει από την εκτατική (μεγάλες εκτάσεις σε γραμμική καλλιέργεια πλήρως μηχανοποιημένη, με εφάπαξ συγκομιδή με μηχανικά μέσα), έως την εντατική (καλλιέργεια σε θερμοκήπια, υποστήλωση, κλάδεμα, επαναλαμβανόμενη συγκομιδή με το χέρι κ.λ.π) (Ολύμπιος, 2001).

1.1. Ο καρπός της τομάτας

Η τομάτα (*L. esculentum*) είναι ένα από τα 8-10 πολύ συγγενικά είδη του γένους *Lycopersicon*, το οποίο ξεχωρίζει από το πολύ συγγενικό είδος *Solanum* από τα χαρακτηριστικά διάρρηξης των ανθών και απελευθέρωσης της γύρης. Όλα τα είδη είναι ενδογενή φυτά της Ν. Αμερικής. Ιστορικά, γίνεται δεκτό ότι η καταγωγή της καλλιεργούμενης τομάτας είναι το Μεξικό και ειδικότερα η περιοχή Vera Cruz-Puebla απ' όπου μεταφέρθηκε αρχικά τον 16^ο αιώνα στην Ευρώπη (Ολύμπιος, 2001). Το σχήμα της τομάτας καθορίζεται γενετικά, ενώ επηρεάζεται ελάχιστα από τις γενετικές και καλλιεργητικές συνθήκες. Το σχήμα του καρπού της διαφέρει ανάλογα με την ποικιλία και μπορεί να είναι σφαιρικό ή επίμηκες (Barrett *et al.*, 1998).

Ο καρπός της τομάτας είναι χυμώδης ράγα ή με όρους βοτανικής μια διογκωμένη ωοθήκη. Το σώμα του καρπού είναι γνωστό ως περικάρπιο, σχηματίζεται από το τοίχωμα της ωοθήκης, η οποία περιβάλλει και περικλείει τους σπόρους και αποτελείται από εξωτερικά, ακτινικά και εσωτερικά τοιχώματα. Η συνέχεια του περικαρπίου διακόπτονται από μικρές κοιλότητες, στις οποίες βρίσκονται εγκλεισμένοι οι σπόροι σε ένα ζελατινώδη παρεγχυματικό ιστό. Ο αριθμός των κοιλοτήτων ποικίλει από δύο και πάνω και είναι ιδιαίτερο χαρακτηριστικό κάθε ποικιλίας (Hulme, 1971).

Η ωρίμανση του καρπού της τομάτας περιλαμβάνει μια σειρά αλλαγών αναφορικά με το χρώμα, την υφή, το άρωμα, τη γεύση και τη σύσταση της. Κατά την έναρξη της ωρίμανσης παρατηρούνται οι πρώτες αλλαγές στο χρώμα στην περιοχή των κοιλοτήτων. Καθώς το φρούτο αναπνέει παρατηρείται απώλεια χλωροφύλλης, ενώ συντίθενται χρωστικές ουσίες όπως τα καροτενοειδή (Davis and Hobson, 1981). Σημαντικές αλλαγές συμβαίνουν και στα κυτταρικά τοιχώματα, τα οποία διαλυτοποιούνται κατά τη διάρκεια της ωρίμανσης, καταλήγοντας στα εύθραυστα τοιχώματα του υπερώριμου φρούτου. Επιπλέον, κατά την ωρίμανση παράγονται συστατικά αρώματος και γεύσης, με περισσότερες από 200 πτητικές ουσίες να έχουν ήδη ταυτοποιηθεί. Σημαντικό παράγοντα γεύσης αποτελούν τα σάκχαρα, κυρίως η γλυκόζη και φρουκτόζη, που παράγονται κατά την αποικοδόμηση του αμύλου καθώς και η παρουσία οργανικών οξέων (Grierson and Kader, 1986).

1.2. Η σύσταση της τομάτας

Η απόδοση και η ποιότητα των προϊόντων της τομάτας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη σύνθεση της πρώτης ύλης, δηλαδή της νωπής τομάτας. Η σύσταση της φαίνεται στον Πίνακα 1.1 που ακολουθεί:

Πίνακας 1.1. Σύσταση της τομάτας (Gould, 1992).

Συστατικό	% Περιεκτικότητα
Ολικά στερεά	7.0-8.5
Αδιάλυτα στερεά	<1.0
Διαλυτά στερεά	4.0-6.0
Σάκχαρα	2.0-3.0
Οξέα	0.3-0.5
Πρωτεΐνες και αμινοξέα	0.8-1.2
Ανόργανα άλατα	0.3-0.6
Άλατα (χλωριούχο νάτριο)	0.05-0.1

- *Στερεά*

Οι τομάτες περιέχουν συνήθως από 7.0-8.5% συνολικά στερεά συστατικά, εκ των οποίων το 1% αποτελούν οι φλοιοί και οι σπόροι. Το ποσοστό των στερεών στις τομάτες κυμαίνεται σε μεγάλα εύρη, ανάλογα με την ποικιλία της τομάτας, το χαρακτήρα του εδάφους και ιδιαίτερα την ποσότητα των βροχοπτώσεων κατά τις περιόδους της ανάπτυξης και συγκομιδής (Gould, 1992).

- *Υδατάνθρακες*

Τα ελεύθερα σάκχαρα των εμπορικών ποικιλιών είναι κατά κύριο λόγο αναγωγικά σάκχαρα. Τα αναγωγικά σάκχαρα, που συνήθως αποτελούν το 50-65% των στερεών, είναι η γλυκόζη και η φρουκτόζη, με τη δεύτερη να απαντά γενικά σε μεγαλύτερες ποσότητες (Gould, 1992).

- *Πρωτεΐνες και αμινοξέα*

Υπάρχουν 19 διαλυτά αμινοξέα στον φρέσκο τοματοχυμό. Το γλουταμινικό οξύ είναι το κυριότερο, αποτελώντας έως και το 48.45% αυτών, με δεύτερο σε συγκέντρωση το

ασπαρτικό. Η επεξεργασία του τοματοχυμού στους 220°F (104.44°C) για 20 min, έχει ως αποτέλεσμα μια σημαντική αύξηση των ελεύθερων αμινοξέων λόγω της αναδιάταξης και της μερικής υδρόλυσης της πρωτεΐνης (Gould, 1992).

- *Οργανικά οξέα*

Τα οξέα αποτελούν σημαντικό παράγοντα γεύσης της τομάτας, ενώ η ολική οξύτητα αποτελεί δείκτη ικανοποιητικής επεξεργασίας των προϊόντων της (Lambeth *et al.*, 1964). Τα οξέα στην τομάτα αποτελούνται σχεδόν εξ'ολοκλήρου από το κιτρικό οξύ (328 mg/100 g νωπού βάρους). Δεύτερο σε ποσότητα βρέθηκε ότι είναι το μαλλικό οξύ (51 mg/100g νωπού βάρους) (Belitz *et al.*, 2006). Η επεξεργασία του τοματοχυμού επιφέρει αύξηση στα οργανικά οξέα. Βρέθηκε ότι το ακετικό οξύ αυξάνεται κατά 32.1%, λόγω της οξειδωσης των αλδευδών και αλκοολών κατά την επεξεργασία (Crean, 1966).

- *Μεταλλικά στοιχεία*

Η ποσότητα των μεταλλικών στοιχείων κυμαίνεται μεταξύ 0.3-0.6%. Τα κυριότερα από αυτά είναι το κάλιο, το μαγνήσιο, ο φωσφόρος, το ασβέστιο και το νάτριο (Belitz *et al.*, 2006). Επίσης, το χλωριούχο νάτριο κυμαίνεται μεταξύ 0.05-0.1%. Τα μεταλλικά στοιχεία παίζουν δευτερεύοντα ρόλο στην ποιότητα του τελικού προϊόντος (Gould, 1992).

- *Πηκτίνες*

Η χαρακτηριστική σαρκώδης υφή της τομάτας οφείλεται στην παρουσία πηκτινών που αποτελούν φυσικό συστατικό της ώριμης τομάτας. Οι πηκτίνες είναι πολυμερή α-β-γαλακτουρονικού οξέος που συνδέονται μεταξύ τους με 1, 4 δεσμούς. Όπως συμβαίνει με τους περισσότερους πολυσακχαρίτες οι πηκτίνες διαφέρουν μεταξύ τους ως προς το μήκος της αλυσίδας και συνεπώς το μοριακό τους βάρος. Επίσης, μπορούν να εστεροποιηθούν σε διάφορους βαθμούς με ομάδες μεθυλεστέρων. Οι πηκτίνες μικρού βαθμού εστεροποίησης ονομάζονται πηκτικά οξέα, ενώ αυτές με μεγάλου βαθμού εστεροποίησης ονομάζονται πηκτινικά οξέα. Λόγω της δράσης των ενζύμων επί των πηκτινών κατά την ανάπτυξη του φρούτου της τομάτας αλλά και κατά τη συγκομιδή και επεξεργασία της, αυτές παίζουν σημαντικό ρόλο στην υφή των τελικών προϊόντων (Gould, 1992).

- *Λίπη*

Η τομάτα έχει γενικά χαμηλή περιεκτικότητα σε λίπη, αποτελώντας το 0.2% του συνολικού βάρους της τομάτας και απαντάται κυρίως στα σπόρια. Όμως, στα λίπη της τομάτας εντοπίζονται σε μεγάλες ποσότητες τα καροτενοειδή και οι τοκοφερόλες λόγω της λιπόφιλης φύσης τους (Seybold *et al.*, 2004). Ως καθημερινή πηγή καροτενοειδών, βιταμίνης C (ασκορβικού οξέος), και ενός εύρους από φαινολικές ουσίες, η τακτική κατανάλωση της τομάτας και των προϊόντων της, έχει συσχετιστεί, κυρίως λόγω του λυκοπενίου, με τη μείωση του κινδύνου ανάπτυξης καρδιαγγειακών νοσημάτων και καρκίνων, ιδιαίτερα του καρκίνου του προστάτη (Campbell *et al.*, 2004; Sesso *et al.*, 2003), ωστόσο αν και πιο πρόσφατη μελέτη καταλήγει ότι δεν υπάρχουν επαρκείς αποδείξεις για αυτό (Illic *et al.*, 2011), η θρεπτική και διατροφική αξία της τομάτας είναι δεδομένη. Το κυρίαρχο καροτενοειδές της τομάτας είναι το λυκοπένιο, το οποίο είναι υπεύθυνο για το κόκκινο χρώμα του καρπού της. Το λυκοπένιο είναι ένα συμμετρικό ακυκλικό καροτενοειδές με 13 διπλούς δεσμούς, εκ των οποίων οι 11 είναι συζευγμένοι. Λόγω της χαρακτηριστικής δομής του το λυκοπένιο είναι ένα αποτελεσματικό αντιοξειδωτικό. Το λυκοπένιο της τομάτας προκύπτει ως σύμπλεγμα καροτενοειδούς-πρωτεΐνης ή ανευρίσκεται σε ημικρυσταλλική μορφή συνδεδεμένο με μεμβράνες παραγόμενες από τα πλαστίδια. Πολλές μελέτες έχουν συστηματικά αναφέρει μεγαλύτερη βιοδιαθεσιμότητα του λυκοπενίου από επεξεργασμένα προϊόντα τομάτας σε σχέση με τη νωπή τομάτα, θεωρώντας ότι η διατάραξη της κυτταρικής δομής του λόγω της επεξεργασίας διευκολύνει την απορρόφηση του στο έντερο (Hwang *et al.*, 2012). Στον Πίνακα 1.2, δίνονται στοιχεία σχετικά με τη σύσταση της τομάτας σε καροτενοειδή και τοκοφερόλες και άλλα φαινολικά συστατικά.

Πίνακας 1.2. Περιεκτικότητα της τομάτας σε καροτενοειδή, φαινολικές ενώσεις (mg/100g ξηράς ουσίας) (Hwang *et al.*, 2012; Chanforan *et al.*, 2012).

Συστατικό	Περιεκτικότητα
E-λυκοπένιο	16.2-150.0
Z-λυκοπένιο	5.0-15.2
β-καροτένιο	2.7-4.3
Λουτεΐνη	1.1
α-τοκοφερόλη	8.0
γ-τοκοφερόλη	2.5
Καφεϊκό οξύ	23.0
p-κουμαρικό οξύ	13.2

- *Βιταμίνες*

Η τομάτα αποτελεί σημαντική διατροφική πηγή βιταμίνης C, υπό τη μορφή του ασκορβικού οξέος. Η μέση περιεκτικότητα του ασκορβικού οξέος στον καρπό της τομάτας είναι 23 mg/100g νωπού βάρους. Άλλη σημαντική βιταμίνη της τομάτας είναι η βιταμίνη A (100 IU/100g), η οποία απαντάται υπό τη μορφή καροτένιου. Άλλες βιταμίνες που απαντώνται στην τομάτα είναι κάποιες του συμπλέγματος B όπως η θειαμίνη (0.06 mg/100g), η νιασίνη και η ριβοφλαβίνη (0.04 mg/100g) (Gould, 1992).

1.3. Προϊόντα τομάτας

Από τον καρπό της τομάτας παράγονται διάφορα προϊόντα, μέσα από διεργασίες που συνήθως περιλαμβάνουν τη σύνθλιψη του καρπού και τη συμπύκνωση του. Από τη σύνθλιψη αξιοποιείται ο χυμός του για παραγωγή φρέσκου ή συμπυκνωμένου τοματοχυμού. Από διάφορα στάδια συμπύκνωσης μπορούν να παραχθούν πούλπα, τοματόσουπα, τοματοπολτός και σάλτσες για πίτσες ή ζυμαρικά, κέτσαπ, και αφυδατωμένη τομάτα. Επίσης, ο καρπός της τομάτας κονσερβοποιείται αποφλοιωμένος ολόκληρος ή και τεμαχισμένος.

Από τα προϊόντα τομάτας το πλέον διαδεδομένο στην παγκόσμια αγορά είναι ο τοματοπολτός. Σύμφωνα με τον Κώδικα Τροφίμων και Ποτών (Γενικό Χημείο του Κράτους, 2014) ως τοματοπολτός ορίζεται το προϊόν το οποίο προέρχεται από την υπό κενό συμπύκνωση του σαρκώδους χυμού των νωπών καρπών τομάτας με αποβολή μέρους του

νερού αυτών στον επιθυμητό βαθμό. Ανάλογα με το βαθμό συμπύκνωσης διακρίνονται τα εξής είδη τοματοπολτού:

- Ημισυμπυκνωμένος τοματοπολτός με περιεκτικότητα σε διαλυτά στερεά τουλάχιστον 16%.
- Τοματοπολτός απλής συμπύκνωσης με περιεκτικότητα σε διαλυτά στερεά τουλάχιστον 22%.
- Τοματοπολτός διπλής συμπύκνωσης με περιεκτικότητα σε διαλυτά στερεά τουλάχιστον 28%.
- Τοματοπολτός τριπλής συμπύκνωσης με περιεκτικότητα σε διαλυτά στερεά τουλάχιστον 36%.
- Πελτέ τύπου Θήρας, ο οποίος πρέπει να περιέχει στερεά συστατικά από χυμό τομάτας τουλάχιστον 40%.

Στον Πίνακα 1.3 φαίνεται η σύσταση του τοματοπολτού σε σχέση με τη σύσταση της νωπής τομάτας:

Πίνακας 1.3. Η σύσταση και η θερμιδική αξία της τομάτας και του τοματοπολτού σε 100g προϊόντος (Gould, 1992).

Συστατικό	Τομάτα	Τοματοπολτός
Νερό (%)	93.5	75.0
Πρωτεΐνες (g)	1.1	3.4
Λίπη (g)	0.2	0.4
Υδατάνθρακες (g)	4.7	18.6
Ίνες (g)	0.5	0.9
Τέφρα (g)	0.5	2.6
Αλάτι (mg)	3.0	38.0
Θερμιδική αξία (kcal)	22.0	82.0

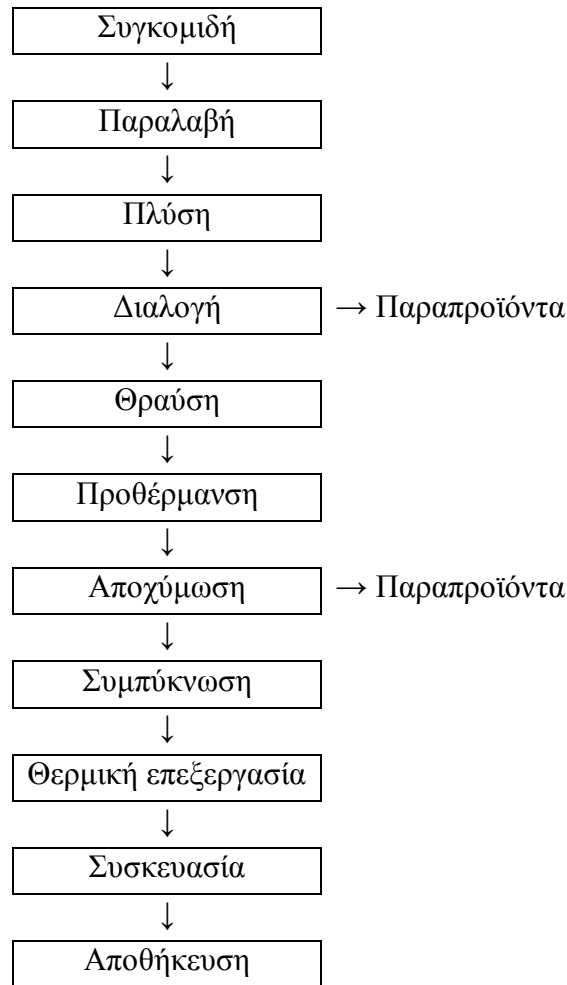
1.4. Βιομηχανική τομάτα

Στις αναπτυγμένες χώρες της Ευρώπης και στις ΗΠΑ η βιομηχανική επεξεργασία και μεταποίηση της τομάτας ξεκίνησε από το 1920. Τα επόμενα χρόνια δόθηκε μεγάλη ώθηση στην επέκταση της καλλιέργειας της τομάτας, ενώ δημιουργήθηκαν νέες ποικιλίες και υβρίδια για τη βιομηχανία. Σήμερα υπάρχει μεγάλος αριθμός ποικιλιών και υβριδίων τομάτας που ευδοκούν σε διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες και είναι κατάλληλα για βιομηχανική χρήση. Οι ποικιλίες αυτές είναι μικρόκαρπες, σφαιρικές ή ελλειψοειδείς και διακρίνονται σε πρώιμες, μεσοπρώιμες ή όψιμες ανάλογα με το βιολογικό τους κύκλο (από τη μεταφύτευση έως την ωρίμανση). Συνήθως ο βιολογικός κύκλος κυμαίνεται από 90 έως 115 μέρες, εξυπηρετώντας έτσι τη σταδιακή παράδοση τους στις βιομηχανίες μεταποίησης (Goose and Binsted, 1964).

Γενικά, μια ποικιλία τομάτας που προορίζεται για βιομηχανική χρήση πρέπει να συγκεντρώνει κάποια ποιοτικά χαρακτηριστικά, όπως υψηλή περιεκτικότητα σε ολικά στερεά και σάκχαρα, έντονο κόκκινο χρώμα, χαμηλή οξύτητα, λεία επιφάνεια χωρίς πτυχώσεις, αντοχή στη μεταφορά και τις ασθένειες και υψηλή παραγωγικότητα (Goose and Binsted, 1964). Οι απαιτήσεις αυτές καθορίζουν τις κατάλληλες για βιομηχανική χρήση ποικιλίες τομάτας, αν και η ποιότητα της πρώτης ύλης εξαρτάται και από άλλους παράγοντες, όπως τις εδαφολογικές και κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής, τον τρόπο καλλιέργειας και την εποχή της συγκομιδής. Η συγκομιδή της βιομηχανικής τομάτας πραγματοποιείται με αυτόματες μηχανές και σπανιότερα χειρωνακτικά. Για αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί ποικιλίες που αντέχουν στη μηχανική καταπόνηση. Στην Ελλάδα, η συγκομιδή της τομάτας ξεκινά από τις 20-25 Ιουλίου για τις πρώιμες ποικιλίες, ενώ τον Αύγουστο και τον Σεπτέμβριο συγκομίζεται ο κύριος όγκος της παραγωγής που προέρχεται από τις μεσοπρώιμες ποικιλίες. Ανάλογα με τις καιρικές και εδαφολογικές συνθήκες η συγκομιδή μπορεί να συνεχιστεί μέχρι τα μέσα Οκτωβρίου με τις όψιμες ποικιλίες. Τη συγκομιδή της τομάτας ακολουθεί η μεταφορά της στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις και η μεταποίηση της (Μπουλέκου, 2010).

1.5. Παραγωγή τοματοπολτού

Ο τοματοπολτός παράγεται έπειτα από μια διεργασία που περιλαμβάνει διάφορα στάδια όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1. Παρακάτω περιγράφονται αναλυτικά όλα τα στάδια:



Σχήμα 1.1. Διάγραμμα ροής παραγωγής τοματοπολτού (υιοθετημένο από την Μπουλέκου (2010)).

1.5.1. Πλύση

Ένα από τα σημαντικότερα στάδια στη μεταποίηση της τομάτας αποτελεί η σχολαστική πλύση των παραληφθέντων τοματών, η οποία είναι απαραίτητη για την απομάκρυνση του χρώματος και άλλων ξένων σωμάτων από την επιφάνειά τους. Η σωστή και αποτελεσματική πλύση της τομάτας είναι σημαντική και για τον λόγο ότι μειώνει σε μεγάλο βαθμό το μικροβιακό φορτίο που υπάρχει κυρίως στο χρώμα αλλά και γενικά στην επιφάνεια της τομάτας. Η πλύση της τομάτας ξεκινά ουσιαστικά από τη στιγμή της υδρομεταφοράς τους προς τα πλυντήρια. Τα πλυντήρια είναι δεξαμενές στον πυθμένα των οποίων διοχετεύεται αέρας υπό πίεση, με αποτέλεσμα να γίνεται έντονη ανάδευση του νερού και συνεπώς να

απομακρύνονται τα ξένα σώματα από την επιφάνεια των τοματών. Μέσα στα πλυντήρια διέρχεται το χαμηλότερο άκρο μιας κεκλιμένης μεταφορικής ταινίας, η οποία αποτελείται από περιστρεφόμενα ράουλα παραλαμβάνει και μεταφέρει τις τομάτες προς την τράπεζα διαλογής. Κατά τη μεταφορά αυτή ολοκληρώνεται η πλύση των καρπών με εκτόξευση νερού πίεσης 3-4 bar, από ακροφύσια που βρίσκονται πάνω από τη μεταφορική ταινία (Goose and Binsted, 1964). Για την πλύση των τοματών χρησιμοποιείται πόσιμο νερό, η ποιότητα του οποίου καθορίζεται από την Οδηγία 93/83/EK της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

1.5.2. Διαλογή

Μετά την πλύση τους στην κεκλιμένη μεταφορική ταινία, οι τομάτες έρχονται σε οριζόντιο μεταφορέα με περιστρεφόμενα ράουλα, που αποτελεί την τράπεζα διαλογής. Η διαλογή γίνεται χειρονακτικά και διευκολύνεται καθώς οι μεταφερόμενες τομάτες περιστρέφονται. Κατά τη διαλογή απομακρύνονται οι ακατάλληλοι καρποί και απορρίπτονται σε αγωγούς κατά μήκος της τράπεζας διαλογής. Ως ακατάλληλοι καρποί χαρακτηρίζονται οι άγουροι, οι σπασμένοι, οι φέροντες στίγματα και οι αλλοιωμένοι. Σκοπός της διαλογής είναι να παραμείνουν προς επεξεργασία καθαροί και υγιείς καρποί έτσι ώστε να παραχθεί προϊόν υψηλών προδιαγραφών (Goose and Binsted, 1964).

1.5.3. Θραύση-Προθέρμανση

Μετά τη διαλογή ακολουθεί θραύση των κατάλληλων προς επεξεργασία τοματών, κατά την οποία οι τομάτες τεμαχίζονται σε ακανόνιστο σχήμα. Για τον τεμαχισμό των τοματών χρησιμοποιούνται είτε συστοιχίες περιστρεφόμενων οδοντωτών κυκλικών μαχαιριών είτε κοπτικές αντλίες. Στη συνέχεια οι θραυσμένοι καρποί μεταφέρονται σε εναλλάκτες θερμότητας όπου προθερμαίνονται. Στη βιομηχανική πρακτική εφαρμόζονται δύο τεχνικές προθέρμανσης των τοματών, η Ψυχρή Θραύση (Cold Break) και η Θερμή Θραύση (Hot Break) (Μπουλέκου, 2010). Κατά την Ψυχρή Θραύση οι τομάτες θραύονται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και στη συνέχεια προθερμαίνονται σε θερμοκρασίες 65-75°C. Σε αυτό το εύρος θερμοκρασιών τα πηκτινολυτικά ένζυμα πηκτινομεθυλεστεράση (PME) και πολυγαλακτουρονάση (PG) που είναι παρόντα στον καρπό της τομάτας διατηρούν τη δραστηριότητα τους προκαλώντας αποικοδόμηση των πηκτινικών ουσιών, με αποτέλεσμα την παραγωγή προϊόντων χαμηλού ιξώδους και στα οποία παρατηρείται εύκολα διαχωρισμός ορού κατά την παραμονή τους (Μπουλέκου, 2010). Επιπλέον, λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών

διατηρείται το χρώμα, η γεύση και το άρωμα φρέσκιας τομάτας, ενώ παραμένουν αναλλοίωτα τα θρεπτικά της συστατικά. Αντίθετα, κατά την Θερμή Θραύση οι τομάτες προθερμαίνονται σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες (90-100°C). Σε αυτές τις συνθήκες πραγματοποιείται θερμική αδρανοποίηση των πηκτινολυτικών ενζύμων με αποτέλεσμα να αποφεύγεται η αποικοδόμηση των πηκτινικών ουσιών, οπότε λαμβάνεται προϊόν που διατηρεί μεγαλύτερο ιξώδες (Μπουλέκου, 2010). Ωστόσο, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών, προκαλείται υποβάθμιση του χρώματος, πράγμα που είναι ιδιαίτερα ανεπιθύμητο, καθώς το χρώμα αποτελεί σημαντικό κριτήριο της ποιότητας των προϊόντων τομάτας.

1.5.4. Αποχύμωση

Μετά τη θραύση και την προθέρμανση, ανεξάρτητα από τον τρόπο θραύσης, η μάζα των τοματών οδηγείται σε σύστημα εξαγωγής του χυμού, τους λεγόμενους διαχωριστήρες (ραφινέζες), όπου ολοκληρώνεται η κατάτμηση και ο διαχωρισμός της σάρκας και πραγματοποιείται η απομάκρυνση του φλοιού και των σπόρων. Οι διαχωριστήρες αποτελούνται από κυλινδρικά κόσκινα τα οποία φέρουν στο εσωτερικό τους και κατά τον άξονα τους περιστρεφόμενο σύστημα αναδευσεως και προωθήσεως της τοματομάζας (Μπουλέκου, 2010). Η διάμετρος οπών του κόσκινου κυμαίνεται από 0.5 έως 5 mm. Κατά την εξαγωγή του χυμού η ποιότητα του λαμβανόμενου προϊόντος επηρεάζεται σημαντικά από τη διάμετρο οπής του κόσκινου καθώς και από την ταχύτητα περιστροφής των αναδευτήρων του. Μεγάλη διάμετρο οπής όπως επίσης και μεγάλη ταχύτητα περιστροφής συντελούν στην παραλαβή χυμού μεγαλύτερου ιξώδους (Goose and Binsted, 1964).

Τα στερεά υπολείμματα της τομάτας (φλοιοί, σπόρια και ίνες) που συγκρατούνται από τα κόσκινα των διαχωριστήρων, αποτελούν περίπου το 3% των επεξεργαζόμενων τοματών και μπορούν με κατεργασία τους σε πιεστήρια να αποδώσουν συμπληρωματικό ποσό χυμού τομάτας ανάλογης ποιότητας με αυτό που παραλαμβάνεται κατά την κύρια επεξεργασία. Ο λαμβανόμενος από τους διαχωριστήρες χυμός, περιεκτικότητας σε διαλυτά στερεά περίπου 5% (5°Brix), συλλέγεται σε ανοξείδωτες δεξαμενές, και στη συνέχεια αποστέλλεται στο τμήμα συμπύκνωσης (Goose and Binsted, 1964).

1.5.5. Συμπύκνωση

Ο παραγόμενος χυμός τομάτας μεταφέρεται με αντλίες στο σύστημα συμπύκνωσης,

όπου πραγματοποιείται εξάτμιση του περιεχόμενου νερού και λαμβάνεται τοματοπολτός επιθυμητής περιεκτικότητας σε διαλυτά στερεά. Η συμπύκνωση πραγματοποιείται σε εξατμιστήρες αναγκαστικής κυκλοφορίας, οι οποίοι λειτουργούν υπό ελαττωμένη πίεση (κενό). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ταπείνωση του σημείου ζέσης του νερού, το οποίο πλέον εξατμίζεται σε χαμηλές θερμοκρασίες (55-85°C) με αποτέλεσμα το τελικό προϊόν να διατηρεί σε μεγάλο βαθμό το χρώμα, τη γεύση, το άρωμα και τη διατροφική αξία της νωπής τομάτας (Μπουλέκου, 2010).

Οι συμπυκνωτές που χρησιμοποιούνται είναι συνεχούς ροής και διακρίνονται σε απλής, διπλής, τριπλής και τετραπλής ενέργειας. Ο διαχωρισμός αυτός αφορά στα στάδια στα οποία πραγματοποιείται η συμπύκνωση. Έτσι, σε συμπυκνωτές απλής ενέργειας, η συμπύκνωση πραγματοποιείται σε ένα στάδιο, σε διπλής ενέργειας σε δύο στάδια, σε τριπλής ενέργειας σε τρία στάδια και σε τετραπλής ενέργειας σε τέσσερα στάδια. Σε όσο περισσότερα στάδια πραγματοποιείται η συμπύκνωση τόσο αυξάνει η παραγωγή προϊόντος ενώ ταυτόχρονα οι απαιτήσεις σε ενέργεια είναι μικρότερες (Μπουλέκου, 2010).

Σε ένα συμπυκνωτή τριπλής ενέργειας ο χυμός τομάτας αποστέλλεται στο πρώτο στάδιο συμπύκνωσης, όπου σε χαμηλή θερμοκρασία πραγματοποιείται προ-συμπύκνωση του εισερχόμενου χυμού, στη συνέχεια στο δεύτερο στάδιο, όπου συνεχίζεται η συμπύκνωση και από εκεί στο τρίτο, το οποίο τροφοδοτείται με υπέρθερμο ατμό και ολοκληρώνεται η συμπύκνωση του προϊόντος. Όλα τα στάδια λειτουργούν υπό κενό, με την πίεση να μειώνεται από το πρώτο προς το τρίτο στάδιο. Όπως προαναφέρθηκε, ατμός εισέρχεται στο τρίτο στάδιο συμπύκνωσης όπου συμπυκνώνεται το προϊόν και οι υδρατμοί που παράγονται οδηγούνται στο επόμενο στάδιο και συνεχίζουν τη συμπύκνωση. Στη συνέχεια ένα μέρος από αυτούς και όσοι παρήχθησαν στο δεύτερο στάδιο συμπύκνωσης πηγαίνουν στο πρώτο στάδιο όπου πραγματοποιείται η προ-συμπύκνωση του εισερχόμενου χυμού. Αντίστοιχα, λειτουργούν και οι συμπυκνωτές απλής, διπλής και τετραπλής ενέργειας (Μπουλέκου, 2010).

1.5.6. Θερμική επεξεργασία-συσκευασία

Μετά τη συμπύκνωση ακολουθεί θερμική επεξεργασία του προϊόντος, η οποία διακρίνεται σε εμπορική αποστείρωση με πλήρωση των περιεκτών “εν θερμό” και στην ασηπτική διεργασία. Για την εμπορική αποστείρωση του τοματοπολτού χρησιμοποιούνται κυρίως παστεριωτές αποξεόμενης επιφάνειας ή πλακοειδείς παστεριωτές, όπου ο τοματοπολτός θερμαίνεται σε θερμοκρασία 95°C και ακολουθεί πλήρωση των περιεκτών “εν

θερμό” μια διεργασία η οποία θα αναλυθεί εκτενώς σε επόμενο κεφάλαιο. Η ελάχιστη απαιτούμενη θερμοκρασία του τοματοπολτού κατά την πλήρωση των περιεκτών είναι 90°C τόσο για το μεταλλικό (Goose and Binsted, 1964) όσο και για το γυάλινο περιέκτη (Sandoval *et al.*, 1994), αν και η θερμοκρασία αυτή μπορεί να κυμαίνεται καθώς βρίσκεται σε άμεση συνάρτηση με τον όγκο του περιέκτη (Sandoval *et al.*, 1994; Silva and Silva, 1997). Με τον τρόπο αυτό θεωρείται ότι παρεμποδίζεται η επιβίωση κάθε μικροοργανισμού ικανού να προκαλέσει επακόλουθη αλλοίωση του προϊόντος. Στη συνέχεια οι περιέκτες σφραγίζονται ερμητικά χωρίς να δεχτούν περαιτέρω θέρμανση. Κατά συνέπεια, η “πλήρωση εν θερμώ” και η άμεση σφράγιση του περιέκτη αποτελούν κρίσιμα σημεία του σταδίου της συσκευασίας. Η συνήθης πρακτική που ακολουθείται στην ελληνική βιομηχανία μεταποίησης τομάτας μετά το σφράγισμα του περιέκτη είναι να αφήνεται για ένα χρονικό διάστημα 10 και 20 min στον αέρα (αέρια ψύξη) για τη γυάλινη και τη μεταλλική συσκευασία αντίστοιχα και στη συνέχεια να ψύχεται σε ψύκτες, όπου με καταιονισμό κρύου νερού (20°C) από ακροφύσια, πραγματοποιείται το ταχύτερο στάδιο της ψύξης του προϊόντος, στάδιο απαραίτητο για την καλύτερη διατήρηση της ποιότητας του (μέση θερμοκρασία στο τέλος της ψύξης 35-40°C). Η ψύξη σταματά σε αυτή τη θερμοκρασία για τη διευκόλυνση του στεγνώματος του περιέκτη και την αποφυγή της οξείδωσης του.

Η ασηπτική διεργασία πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες 105-110°C, ανάλογα με το είδος του προϊόντος, και χρησιμοποιείται στην περίπτωση ασηπτικής συσκευασίας σε μεγάλους περιέκτες (200-1000 kg) (Μπουλέκου, 2010). Σύμφωνα με την εταιρεία Fenco S.P.A (Fenco, 2014), για την παραγωγή τοματοπολτού ο συνδυασμός θερμοκρασίας αποστείρωσης-χρόνου θέρμανσης θα κυμαίνεται ανάλογα με το pH του προϊόντος. Για pH<4.2 προτείνεται η θερμοκρασία των 115°C για τουλάχιστον 60-90 sec, ενώ αν το pH>4.2 προτείνεται η οξίνιση του προϊόντος ώστε το pH να σταθεροποιηθεί στο 4.1, βελτιώνοντας έτσι τη γεύση και τη συνολική ποιότητα του. Για τη θέρμανση του προϊόντος χρησιμοποιούνται σωληνωτοί εναλλάκτες θερμότητας με θερμαντικό μέσο υπέρθερμο νερό. Η κυκλοφορία του τοματοπολτού στους εναλλάκτες είναι βεβιασμένη και ταχεία, ώστε να επιτυγχάνονται μικροί χρόνοι και να διατηρούνται αναλλοίωτα τα οργανοληπτικά του χαρακτηριστικά (Goose and Binsted, 1964). Οι εναλλάκτες αποτελούνται από τρεις ομόκεντρους σωλήνες, στον εσωτερικό και εξωτερικό σωλήνα κυκλοφορεί το θερμαντικό μέσο, ενώ ενδιάμεσα και σε δακτύλιο κυκλοφορεί το προϊόν. Οι σωλήνες φέρουν στατικούς αναμείκτες για την ανάμιξη του προϊόντος κατά την κυκλοφορία του σε αυτούς. Η ασηπτική διεργασία πραγματοποιείται σε

τρεις φάσεις: αρχικά το προϊόν θερμαίνεται στην επιθυμητή θερμοκρασία, στη συνέχεια παραμένει στη θερμοκρασία αποστείρωσης για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και τέλος ακολουθεί ψύξη του προϊόντος σε θερμοκρασία 35-40°C. Μετά την ψύξη ακολουθεί συσκευασία του προϊόντος σε ασηπτικούς σάκους υπό συνθήκες στείρου περιβάλλοντος (Μπουλέκου, 2010).

1.5.7. Αποθήκευση

Οι περιέκτες τοποθετούνται σε παλέτες και στη συνέχεια αποθηκεύονται στις αποθήκες μέχρι τη διανομή τους και την τελική τους χρήση. Η θερμοκρασία αποθήκευσης τόσο στην αποθήκη όσο και στο ράφι του καταναλωτή παίζει σημαντικό ρόλο καθώς αν το τελικό προϊόν αποθηκευτεί σε θερμοκρασίες <30°C, κάτω από τη βέλτιστη θερμοκρασία ανάπτυξης του μικροοργανισμού στόχου, μειώνεται η πιθανότητα ανάπτυξης των σπόρων του μικροοργανισμού-στόχου (Stumbo, 1973; Pflug, 1987; York *et al.*, 1975). Με αυτόν τον τρόπο, η διάρκεια ζωής του προϊόντος φτάνει τα δύο χρόνια σύμφωνα με την μέθοδο παραγωγής της ελληνικής βιομηχανίας τοματοπολτού. Με την παραγωγή με τη μέθοδο της ασηπτικής συσκευασίας, το προϊόν διατηρείται για 24 μήνες και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, ενώ για περαιτέρω αποθήκευση προτείνεται η αποθήκευση του υπό ψύξη, περισσότερο για τον περιορισμό της οξειδωσης που μπορεί να προκαλέσει αλλαγή του χρώματος του προϊόντος (Fenco, 2014).

1.6. Παραγωγή τομάτας και προϊόντων της και οικονομικά στοιχεία

Ο κλάδος της τομάτας είναι πολύ σημαντικός για την ελληνική οικονομία και τον πρωτογενή τομέα της καθώς η χώρα παραμένει από τους μεγαλύτερους παραγωγούς σε παγκόσμιο επίπεδο με μεγάλο μέρος της παραγωγής να κατευθύνεται σε εξαγωγές σε άλλες χώρες.

Σύμφωνα με στοιχεία της Eurostat για τα τελευταία 5 χρόνια (Πίνακας 1.4), η Ελλάδα παραμένει στις κυριότερες χώρες παραγωγής τομάτας, μαζί με την Ιταλία, την Ισπανία και την Πορτογαλία με την τελευταία καταγραφή να αναφέρει παραγωγή 1110700 τόνων για το 2013.

Πίνακας 1.4. Οι κυριότερες χώρες παραγωγής τομάτας στην Ευρωπαϊκή Ένωση (χιλιάδες τόνοι) (Eurostat, 2015).

Χώρα/Έτος *	2010	2011	2012	2013	2014
Ισπανία	4312.7	3864.1	4046.4	3776.8	4888.9
Ιταλία	6024.8	5961.5	5132	5207.9	5624
Ελλάδα	1406.2	1169.9	979.6	1110.7	-
Πορτογαλία	1406	1245.4	1392.7	1186.8	1186.8
E.E.	16108.3	15961.1	15015.6	14966.9	-

* Τα στοιχεία αφορούν το σύνολο νωπής και βιομηχανικής παραγωγής τομάτας.

Από αυτή την ποσότητα περίπου το 1/3 κατευθύνθηκε στη μεταποιητική βιομηχανία της τομάτας το 2013, αποδίδοντας συνολική ποσότητα παραχθέντων τελικών προϊόντων, εκφρασμένη σε τοματοπολτό 28-30 ° Brix, 70000 τόνων (Πίνακας 1.5). Για το ίδιο έτος, η τιμή παραγωγού κυμάνθηκε από 70-103 €/τόνο ανάλογα με την ποιοτική κατάταξη της πρώτης ύλης (° Brix), την περιοχή παραγωγής και άλλους παραμέτρους που καθορίζουν οι αγοραστές. Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 1.5 η παραγωγή μειώθηκε σημαντικά το 2011, ενώ στη συνέχεια παρουσίασε μια μικρή ετήσια αύξηση χωρίς να φτάνει όμως τα επίπεδα του 2010. Συνακόλουθα, για την ίδια περίοδο μειώθηκαν και οι καλλιεργούμενες εκτάσεις, ενώ οι στρεμματικές αποδόσεις αυξήθηκαν. Σύμφωνα με το Υπουργείο Παραγωγικής Ανασυγκρότησης (ΥΠΑΠΕΝ, 2015), διάφοροι παράγοντες οδήγησαν σε μείωση της καλλιέργειας βιομηχανικής τομάτας ειδικά το έτος 2011:

- Η αναθεώρηση της Κοινής Αγροτικής Παραγωγής (ΚΑΠ) και της Κοινής Οργάνωσης Αγοράς (ΚΟΑ) οπωροκηπευτικών το 2007 και η εθνική επιλογή διατήρησης της συνδεδεμένης ενίσχυσης σε ποσοστό 30% για 3 χρόνια δημιούργησε συγκριτικό μειονέκτημα με αποτέλεσμα της εγκατάλειψη της καλλιέργειας από τους παραδοσιακούς της καλλιεργητές.
- Ο έντονος ανταγωνισμός από την Κίνα, η οποία αύξησε υπέρμετρα την παραγωγή πρώτης ύλης καθώς και τις εξαγωγές της σε τελικά προϊόντα, καθώς και ο ανταγωνισμός από την Καλιφόρνια των ΗΠΑ λόγω της πλήρους αποδέσμευσης της ενίσχυσης το 2011.

- Τα διαρθρωτικά προβλήματα της γεωργίας στη χώρα μας (μικρός κλήρος, μεγάλης ηλικίας αγρότες, χαμηλές στρεμματικές αποδόσεις ιδιαίτερα σε ορισμένες περιοχές της Μακεδονίας).
- Το γεγονός ότι η βιομηχανική τομάτα λειτουργεί υπό το καθεστώς της συμβολαιακής γεωργίας, σε αντίθεση με άλλα ανταγωνιστικά προϊόντα όπως πχ το βαμβάκι, το καλαμπόκι και το σιτάρι.

Πίνακας 1.5. Στοιχεία για την καλλιέργεια της βιομηχανικής τομάτας στην Ελλάδα (ΥΠΑΠΕΝ, 2015).

Εμπορική περίοδος (σοδειά)	Μεταποιηθείσα πρώτη ύλη (τόνοι)	Παραγωγή τελικών προϊόντων (τόνοι)	Καλλιεργ. έκταση (στρ.)	Μ.ο. απόδοση kg/στρ.
2010	661914.7	135466	90800	7289.8
2011	330000.0	83844	40000	8250.0
2012	390000.0	65000	45000	8666.6
2013	410000.0	70000	45000	9150.0
2014	463961.8	-	49923	-

2. Θερμικές διεργασίες τροφίμων και η “πλήρωση εν θερμώ”

2.1. Εισαγωγή

Η έννοια της θερμικής διεργασίας που πρωτίστως περιλαμβάνει την εμπορική αποστείρωση του τρόφιμου εντός της κονσέρβας έχει εξελιχθεί από τότε που αναπτύχθηκε η πρώτη επιστημονική μέθοδος για τη μέτρηση της ελάχιστης ασφαλούς διεργασίας αποστείρωσης από τους Ball και Bigelow το 1920 (Bigelow *et al.*, 1920). Σε όλες τις μορφές με τις οποίες έχει εφαρμοστεί η θερμική διεργασία παραμένει η πιο ευρέως χρησιμοποιημένη μέθοδος για τη συντήρηση και την επέκταση της διάρκειας ζωής των τροφίμων. Η έννοια της εμπορικής αποστείρωσης σε κονσέρβα (κονσερβοποίηση) περιλαμβάνει την εφαρμογή μιας υψηλής θερμοκρασίας θερμική διεργασία για ένα αρκετό και ικανό χρονικό διάστημα για την καταστροφή των μικροοργανισμών που αποτελούν κίνδυνο για τη δημόσια υγεία (παθογόνοι), καθώς και αυτών που ευθύνονται για την αλλοίωση των τροφίμων. Το ερμητικό σφράγισμα του περιέκτη εμποδίζει την επαναμόλυνση του προϊόντος (Awuah *et al.*, 2007).

Σήμερα, η ζήτηση για επεξεργασμένα τρόφιμα δε σταματά στις στοιχειώδεις αρχές της ασφάλειας και της σταθερότητας κατά την αποθήκευση, αλλά δίνεται μεγαλύτερη έμφαση και στην σωστή επισήμανση, την υψηλή ποιότητα των τροφίμων καθώς και σε αυτά με ιδιαίτερη προστιθέμενη αξία. Βελτιώσεις στην ποιότητα και ασφάλεια των επεξεργασμένων τροφίμων έχουν επιτευχθεί μέσω επιβολής ρυθμιστικών κανονισμών στη βιομηχανία τροφίμων καθώς και εθνικής και διεθνούς νομοθεσίας που προτείνει ή/και επιβάλλει συγκεκριμένα επίπεδα ποιότητας ή μεθόδους για την επίτευξη ασφάλειας και εξασφάλισης της ποιότητας.

Η συμβατική κονσερβοποίηση έχει το μειονέκτημα ότι επιφέρει μόνιμες αλλαγές στα θρεπτικά και οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των τροφίμων. Γι’ αυτό οι εξελίξεις στην επεξεργασία των τροφίμων στοχεύουν στην ανάπτυξη τεχνολογιών που έχουν τη δυνατότητα να μειώσουν την υποβάθμιση στις ωφέλιμες θρεπτικές ουσίες και στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των τροφίμων, όπως το χρώμα, με τρόπους που θα μειώνουν το συνολικό χρόνο θέρμανσης και θα βελτιστοποιούν τις θερμοκρασίες επεξεργασίας.

Πριν από 4 δεκαετίες, το λεπτό προφίλ και τα αυτόκλειστα ανάδευσης (agitating retorts) αναπτύχθηκαν για να προωθήσουν την ταχεία θέρμανση για την ελαχιστοποίηση των συνεπειών της θέρμανσης στα ποιοτικά χαρακτηριστικά. Τότε εμφανίστηκε ο σάκος (pouch) ως εναλλακτική συσκευασία τόσο για τα συμβατικά όσο και για τα τρόφιμα ασηπτικής

επεξεργασίας. Η ασηπτική επεξεργασία και συσκευασία αναπτύχθηκε για να ελαχιστοποιήσει περαιτέρω το αντίκτυπο της θερμότητας μέσω της ταχείας θέρμανσης και ψύξης του τρόφιμου πριν τη συσκευασία υπό ασηπτικές συνθήκες. Τα τελευταία χρόνια, έχουν εμφανιστεί εναλλακτικές ή καινοτόμες μέθοδοι επεξεργασίας τροφίμων (τόσο θερμικές όσο και μη θερμικές), για την παραγωγή ασφαλών αλλά και καλύτερης ποιότητας τροφίμων. Αυτές οι εναλλακτικές τεχνολογίες που περιλαμβάνουν αλλά δεν περιορίζονται σε: επεξεργασία υψηλών πιέσεων, παλμικών ηλεκτρικών πεδίων, παλμικές ακτινοβολίες ή υπεριώδες φως, ωμική θέρμανση, ραδιοκύματα, μικροκύματα, παλμικό φως, ταλαντευόμενα μαγνητικά πεδία, μπορούν στο μέλλον να αντικαταστήσουν τις συμβατικές θερμικές διεργασίες για κάποια τρόφιμα. Κάθε μια από αυτές τις τεχνολογίες πρέπει να μελετηθεί σε βάθος με όρους ικανότητας μικροβιακής απενεργοποίησης, ασφάλειας, αποτελεσματικότητας, κόστους και συνολικής ποιότητας για να γίνουν μια τεχνολογία που να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μαζική κλίμακα (Awuah *et al.*, 2007).

2.2. Αρχές της θερμικής επεξεργασίας

Η θερμική καταστροφή των μικροοργανισμών, στις περισσότερες περιπτώσεις ακολουθεί ένα λογαριθμικό ρυθμό μείωσης, ακολουθώντας δηλαδή κινητική αντίδρασης πρώτης τάξης. Συνεπώς, θεωρητικά, δεν μπορεί να παραχθεί ένα πλήρως αποστειρωμένο προϊόν, ανεξάρτητα από το χρόνο που θα αυτό θα θερμανθεί. Στοχεύοντας σε ένα προϊόν το οποίο θα είναι τελείως αποστειρωμένο, θα καθιστούσε αυτό άχρηστο από θρεπτική ή οργανοληπτική σκοπιά ή γενικά εμφανώς κατώτερης ποιότητας. Σε βιομηχανικό επίπεδο, οι θερμικές διεργασίες σχεδιάζονται για να παρέχουν εμπορικά αποστειρωμένα ή σταθερά κατά την αποθήκευση τρόφιμα. Η εμπορική αποστείρωση όπως ορίζεται από την Αρχή Τροφίμων και Φαρμάκων των ΗΠΑ (FDA, 2010) ή σταθερότητα κατά την αποθήκευση αναφέρεται σε συνθήκες που επιτυγχάνονται σε ένα προϊόν μέσω της εφαρμογής θερμότητας για να καταστεί το τρόφιμο ελεύθερο από μικροοργανισμούς που είναι ικανοί να αναπαράγονται σε ένα τρόφιμο που αποθηκεύεται και διανέμεται κάτω από συνήθεις περιβαλλοντικές συνθήκες. Για το σωστό σχεδιασμό μιας θερμικής διεργασίας απαιτείται εκτεταμένη κατανόηση των μεθόδων επεξεργασίας, της συμπεριφοράς του τρόφιμου κατά την θέρμανση, και της επίδρασης που αυτή θα έχει στο μικροοργανισμό στόχο. Κατά συνέπεια, η αυστηρότητα μιας οποιαδήποτε διεργασίας πρέπει να είναι γνωστή και εξαρτάται από παράγοντες όπως: 1) Τα φυσικά χαρακτηριστικά του τρόφιμου συμπεριλαμβανομένων των θερμοφυσικών ιδιοτήτων,

το μέγεθος και το σχήμα του περιέκτη, 2) τον τύπο και τη θερμοανθεκτικότητα των μικροοργανισμών στόχων που μπορεί να υπάρχουν στο τρόφιμο, 3) το pH, την ενεργότητα νερού (a_w) και την αλατότητα του τροφίμου.

Αλλαγές στις εσωτερικές ιδιότητες του τροφίμου, κυρίως περιεκτικότητα σε αλάτι, ενεργότητα νερού και pH είναι γνωστό ότι επηρεάζουν την ικανότητα των μικροοργανισμών να επιβιώνουν κατά τις θερμικές διεργασίες, ως αποτέλεσμα και του γενότυπου τους. Λόγω ανησυχιών που σχετίζονται με την υγεία όσον αφορά τη χρήση του αλατιού στα τρόφιμα, υπάρχει αυξανόμενη ζήτηση για μείωση της ποσότητας του σε αυτά. Η Αρχή Τροφίμων και Φαρμάκων των ΗΠΑ έχει κατηγοριοποιήσει τα τρόφιμα σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με την οξύτητα τους (FDA, 2010): 1) όξινα τρόφιμα, 2) οξιτισμένα τρόφιμα και 3) χαμηλής οξύτητας τρόφιμα. Όξινα τρόφιμα είναι εκείνα με φυσικό $pH < 4.6$. Οξιτισμένα τρόφιμα (αρακάς, αγγούρια, λάχανο, πιπεριές, τροπικά φρούτα, ψάρια) είναι χαμηλής οξύτητας τρόφιμα στα οποία προστίθενται ένα ή περισσότερα όξινα τρόφιμα ή συστατικά που δίνουν ένα προϊόν με τελικό $pH < 4.6$ και ενεργότητα νερού, $a_w > 0.85$. Τρόφιμα χαμηλής οξύτητας ορίζονται τα τρόφιμα με $pH > 4.6$ και ενεργότητα νερού > 0.85 . Επιστημονικές έρευνες έδειξαν ότι οι σπόροι του *Clostridium botulinum* δεν αναπτύσσονται σε $pH < 4.8$ (Gavin and Weddig, 1995). Παρέχοντας ένα περιθώριο ασφάλειας, έχει γίνει αποδεκτό ως όριο το pH 4.6 κάτω από το οποίο ο *Clostridium botulinum* δε θα αναπτυχθεί για να παράγει τοξίνη. Οπότε αυτό το pH αποτελεί τη διαχωριστική γραμμή μεταξύ όξινων και μη όξινων τροφίμων. Κατά τη θερμική διεργασία τροφίμων χαμηλής οξύτητας το *Clostridium botulinum* αποτελεί το μικροοργανισμό στόχο, ένας εξαιρετικά θερμοανθεκτικός, παθογόνος, σπορογόνος μικροοργανισμός που αναπτύσσεται κάτω από αναερόβιες συνθήκες και παράγει μια εξαιρετικά θανατηφόρα τοξίνη. Υπάρχουν και άλλοι θερμοανθεκτικοί μικροοργανισμοί (θερμόφιλοι) όπως ο *Clostridium thermosaccharolyticum*, ο *Bacillus stearothermophilus* και ο *Bacillus coagulans* οι οποίοι προκαλούν αλλοίωση των τροφίμων και συνακόλουθη οικονομική ζημιά όταν αποθηκεύονται σε ακατάλληλες συνθήκες ($> 30^\circ\text{C}$).

2.2.1. Σχεδιασμός μιας θερμικής διεργασίας

Ο σχεδιασμός των θερμικών διεργασιών βασίζεται σε δύο υποθέσεις: 1) τη θερμοανθεκτικότητα των μικροοργανισμών για κάθε σύνθεση και σχηματισμό τροφίμου ξεχωριστά και 2) το ρυθμό θέρμανσης του συγκεκριμένου τροφίμου. Οι διαδικασίες που εφαρμόζονται για την πειραματική αξιολόγηση των κινητικών θερμικής αντίστασης των

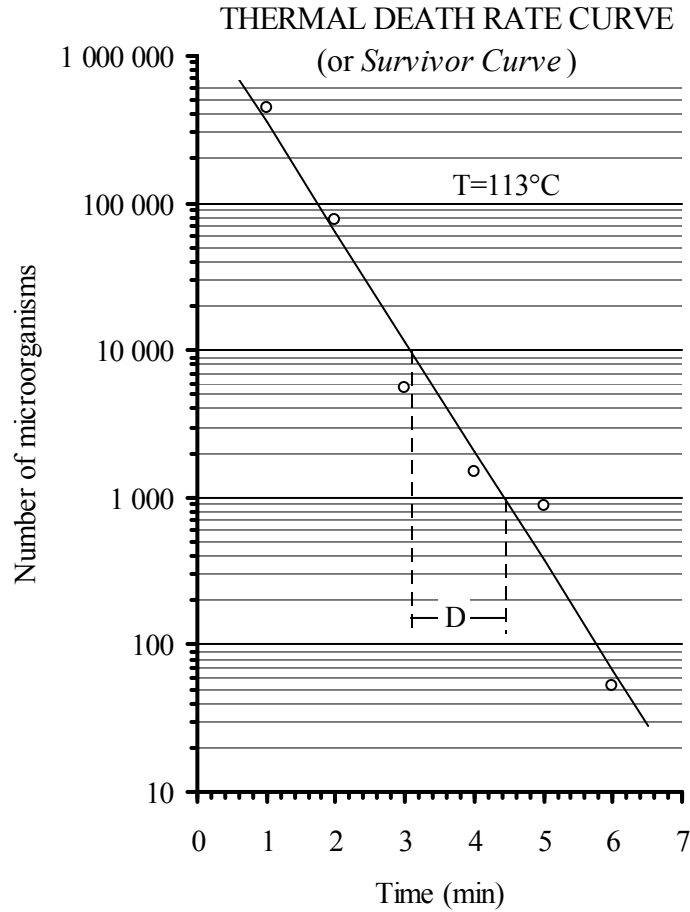
μικροοργανισμών αναφέρονται μεταξύ άλλων από τον Stumbo (1973). Ο προσδιορισμός του ρυθμού θέρμανσης ενός προϊόντος επιτυγχάνεται με μια λεπτομερή ανάλυση των παραμέτρων (τόσο του προϊόντος όσο και του συστήματος) που έχουν τη δυνατότητα να επηρεάσουν τη θερμική συμπεριφορά του προϊόντος.

2.2.2. *Κινητικές θερμικής απενεργοποίησης*

Οι κινητικές θερμικής απενεργοποίησης των μικροοργανισμών λαμβάνονται πρώτα με την δημιουργία μιας καμπύλης επιβίωσης, η οποία είναι ένα ημι-λογαριθμικό διάγραμμα του αριθμού των μικροοργανισμών που επιβιώνουν μιας δεδομένης θερμικής διεργασίας, σε συγκεκριμένη θερμοκρασία, έναντι του χρόνου θέρμανσης. Αυτό προϋποθέτει ότι η μικροβιακή καταστροφή γενικά ακολουθεί κινητική αντίδραση πρώτης τάξης. Οι δύο κύριες παράμετροι (τιμές D και z) ακολούθως προσδιορίζονται από τις καμπύλες επιβίωσης και θερμικής αντίστασης αντίστοιχα. Η τιμή D αναπαριστά το χρόνο θέρμανσης που απαιτείται για την καταστροφή του 90% του μικροβιακού πληθυσμού του μικροοργανισμού στόχου που υπάρχει σε ένα τρόφιμο, ή να το μειώσει κατά ένα λογαριθμικό κύκλο σε σχέση με την αρχική του τιμή. Αυτή η τιμή εκφράζεται μαθηματικά ως:

$$D = \frac{t_2 - t_1}{\log(A) - \log(B)} \quad (1)$$

Όπου A και B είναι οι μικροβιακοί πληθυσμοί τις χρονικές στιγμές t_1 και t_2 αντίστοιχα. Μία τυπική καμπύλη ρυθμού θερμικής καταστροφής παρουσιάζεται παρακάτω στο Σχήμα 2.1.

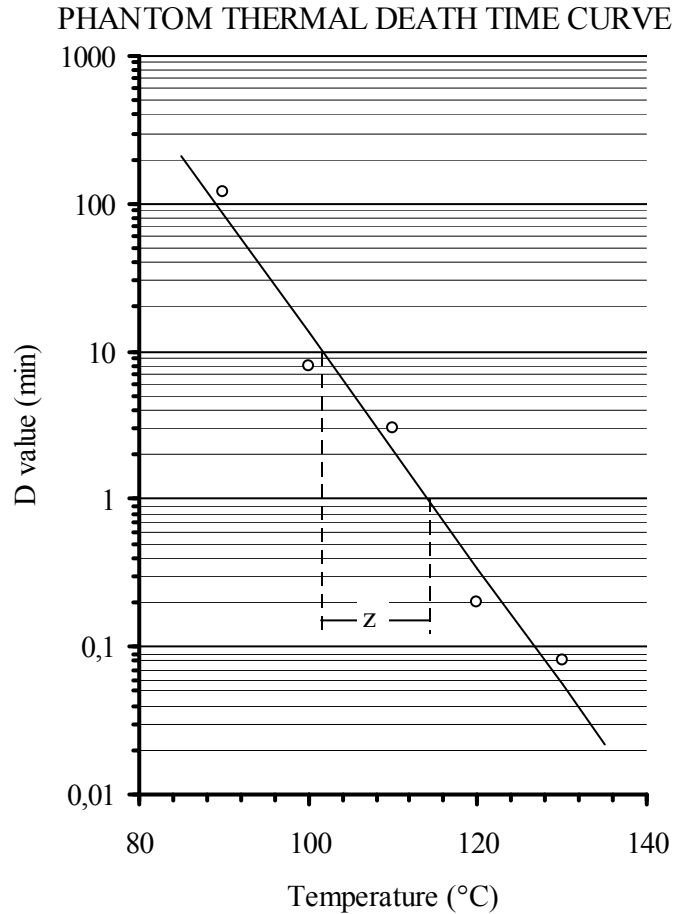


Σχήμα 2.1. Καμπύλη ρυθμού θερμικής καταστροφής (Stoforos and Taoukis, 2004).

Η θερμική ευαισθησία (τιμή z) που αναπαριστά τη μεταβολή της θερμοκρασίας που επιφέρει δεκαπλάσια μεταβολή της τιμής D , εκφράζεται μαθηματικά ως:

$$z = \frac{T_2 - T_1}{\log(D_1) - \log(D_2)} \quad (2)$$

όπου D_1 και D_2 οι τιμές D στις αντίστοιχες θερμοκρασίες T_1 και T_2 . Αυτή η σχέση αποδίδεται διαγραμματικά σε λογαριθμική κλίμακα όπως στο Σχήμα 2.2 παρακάτω:



Σχήμα 2.2. Φαινομενική καμπύλη χρόνου θερμικής καταστροφής (Stoforos and Taoukis, 2004).

Μια εναλλακτική μέθοδος του μοντέλου D - z για την περιγραφή της εξάρτησης από τη θερμοκρασία είναι η κλασική εξίσωση Arrhenius (αναφέρεται ως το μοντέλο k - E_a), που συσχετίζει τη σταθερά του ρυθμού αντίδρασης (k) με τον αντίστροφο της απόλυτης θερμοκρασίας (T):

$$\log\left(\frac{k_1}{k_2}\right) = \left(\frac{-E_a}{2.303R}\right)\left(\frac{T_2 - T_1}{T_2 T_1}\right) \quad (3)$$

Όπου k_1, k_2 , οι σταθερές του ρυθμού αντίδρασης στις θερμοκρασίες T_1, T_2 αντίστοιχα, E_a είναι η ενέργεια ενεργοποίησης και R , η παγκόσμια σταθερά των αερίων. Και τα δύο μοντέλα

έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς για να περιγράψουν την επίδραση της θερμοκρασίας στην ανάλυση των κινητικών δεδομένων. Πρέπει όμως να τονιστεί ότι οι δύο έννοιες βρίσκονται σε ασυμφωνία καθώς όπως φαίνεται από τις (2) και (3) η παράμετρος z σχετίζεται άμεσα με τη θερμοκρασία ενώ η παράμετρος E_a σχετίζεται με το αντίστροφο της θερμοκρασίας. Έχει αποδειχτεί ότι οι μετατροπές από τη μια παράμετρο στην άλλη (E_a και z) όταν συμβαίνουν έξω από τα θερμοκρασιακά όρια από τα οποία πάρθηκαν τα πειραματικά δεδομένα μπορεί να οδηγήσει σε υπολογιστικά σφάλματα (David and Merson, 1990). Καλές μετατροπές βιβλιογραφικών δεδομένων με ελάχιστο σφάλμα λαμβάνονται μέσω της παρακάτω εξίσωσης (Ramaswamy *et al.*, 1989):

$$z = \frac{\ln(10) \times R_g \times T_{kref} \times T_k}{E_a} \quad (4)$$

Το μοντέλο $D - z$ προβλέπει μεγαλύτερες τιμές μικροβιακής θνησιμότητας από το μοντέλο $k - E_a$ για θερμοκρασίες κάτω από $T_{ref}=121.1^\circ\text{C}$ και αντίστροφα. Παρόλα αυτά, κάποιοι ειδικοί προτείνουν τη χρήση του μοντέλου $D - z$ για την παρακολούθηση και αξιολόγηση των διεργασιών αποστείρωσης (Holdsworth, 1997).

Αποκλίσεις από την κινητική αντίδραση πρώτης τάξης (κοινώς αναφερόμενη ως η μηχανιστική προσέγγιση) έχουν αναφερθεί εκτενώς στη βιβλιογραφία, κάτι που δείχνει ότι οι ημι-λογαριθμικές καμπύλες επιβίωσης παρουσιάζουν κάποια καμπύλωση προς τα πάνω ή προς τα κάτω. Με άλλα λόγια μπορεί να παρουσιάζουν ένα «ώμο» ή μια «ουρά». Η «ουρά» μπορεί να αποδοθεί σε 1) ένα μικρό αριθμό από μεγάλες μάζες κυττάρων στον πληθυσμό, 2) διαφορές στη θερμοανθεκτικότητα των διαφόρων κυττάρων και 3) διακυμάνσεις στον κύκλο ζωής ή πιθανή προσαρμογή στη θερμότητα (Davidson *et al.*, 2003). Η παρουσία «ώμων» έχει αποδοθεί σε μικροβιακούς πληθυσμούς που αποτελούνται από αρκετούς υποπληθυσμούς (με τον καθένα να έχει τη δική του κινητική αντίδραση απενεργοποίησης), συσσωματώματα κυττάρων και ανεπαρκής μεταφορά θερμότητας ή πολλαπλούς στόχους σε ένα κύτταρο. Έχουν αναπτυχθεί διάφορες προσεγγίσεις που να εξηγούν το φαινόμενο της απόκλισης από το γραμμικό μοντέλο, όπως η βιταλιστική (vitalistic) και η πιθανολογική (probabilistic) προσέγγιση, παρουσιάζοντας όμως κάθε μια από αυτές τη δική της αδυναμία.

Αν και η μηχανιστική προσέγγιση παρουσιάζει κάποια όρια ως προς τη χρήση της, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι αυτή έχει μέχρι σήμερα εντυπωσιακή επιτυχία στη

βιομηχανία τροφίμων που δικαιολογεί τη χρήση της. Από την άλλη, αυτοί που στέκονται κριτικά απέναντι στη χρήση της μπορούν να αντιτάξουν ότι είναι τα επιπλέον μέτρα ασφάλειας που λαμβάνονται στη βιομηχανική πρακτική είναι αυτά που έχουν συνεισφέρει σε αυτή την επιτυχία.

2.2.3. Υπολογισμός θνησιμότητας θερμικών διεργασιών

Παραδοσιακά, τα εκτιμώμενα δεδομένα κινητικής απενεργοποίησης (χρησιμοποιώντας την κλασσική εξίσωση πρώτης τάξης) συνδέονται με το χρονοθερμοκρασιακό προφίλ σε ένα προκαθορισμένο σημείο (κρίσιμο σημείο) μέσα στο προϊόν για την αξιολόγηση της αποστείρωσης της διεργασίας ή αλλιώς τη θνησιμότητα της διεργασίας (τιμή F), κάτι που αποτελεί τη βάση μιας αξιόπιστης θερμικής διεργασίας (Ball and Olson, 1957):

$$F_{T_{ref}}^z = \int_0^t 10^{\frac{(T(t)-T_{ref})}{z}} dt \quad (5)$$

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο προσεγγίσεις για την αξιολόγηση της επίδρασης του συνδυασμού χρόνου-θερμοκρασίας θέρμανσης στη θνησιμότητα της διεργασίας: α) η σημειακή τιμή F, όπου υπολογίζεται η τιμή F στο σημείο στο προϊόν που δέχεται τη μικρότερη επίδραση θερμότητας κατά τη διάρκεια της διεργασίας (κρίσιμο σημείο) όπως ορίζεται από την εξίσωση (5) και β) η ολοκληρωμένη τιμή F (F_s) που αντιπροσωπεύει τη μέση τιμή της μικροβιακής επιβίωσης για όλο τον όγκο του προϊόντος (Stumbo, 1973). Η τιμή F_s ορίζεται στην ολοκληρωμένη της μορφή από την παρακάτω εξίσωση:

$$F_s = D_{T_{ref}} \log \left[V \int_0^V 10^{\left[\left(\frac{1}{D_{T_{ref}}} \right) \int_0^t 10^{\frac{T-T_{ref}}{z}} dt \right]} dV \right] \quad (6)$$

Στον σχεδιασμό των θερμικών διεργασιών, είναι θεμελιώδους σημασίας ο υπολογισμός της τιμής F μιας δεδομένης διεργασίας. Η τιμή F δεδομένης θερμικής επεξεργασίας ορίζεται ως ο ισοδύναμος χρόνος κατεργασίας σε μια σταθερή θερμοκρασία αναφοράς μιας υποθετικής θερμικής επεξεργασίας που παράγει το ίδιο αποτέλεσμα (όσον

αφορά στην καταστροφή των ίδιων παραγόντων αλλοίωσης ή ποιοτικών χαρακτηριστικών) με τη δεδομένη θερμική επεξεργασία (Στοφόρος, 2005). Η τιμή F μιας θερμικής διεργασίας η οποία είναι γνωστό ότι παράγει εμπορικά αποστειρωμένο προϊόν ορίζει την απαιτούμενη τιμή F (F required).

Ο τελικός στόχος για να επιτευχθεί εμπορική αποστείρωση είναι να εξασφαλιστεί ότι ο λόγος της τιμής F της διεργασίας προς την απαιτούμενη τιμή F να είναι τουλάχιστον ίσος με τη μονάδα ($\frac{F(\text{process})}{F(\text{required})} \geq 1$). Τα τρόφιμα χαμηλής οξύτητας πρέπει να δεχτούν θερμική επεξεργασία που θα δώσει τουλάχιστον $F_{121.1}^{10^\circ\text{C}} = F_0 = 3 \text{ min}$ που αποτελεί μια μείωση του πληθυσμού του *C. botulinum* κατά 12 λογαριθμικούς κύκλους ($12D$). Παρόλα αυτά, οι διεργασίες σχεδιάζονται έτσι ώστε να λαμβάνουν υπόψη τους εκτός από τη δημόσια υγεία και τους μικροοργανισμούς που είναι υπεύθυνοι για την αλλοίωση των τροφίμων, διότι αυτοί προκαλούν οικονομικές απώλειες. Διάφορες αρχές και οργανισμοί έχουν εκδώσει κατά καιρούς κανονισμούς και κατευθυντήριες οδηγίες για τη βιομηχανία τροφίμων όσον αφορά την κατάλληλη θερμική διεργασία για τα όξινα, τα οξιμισμένα και χαμηλής οξύτητας τρόφιμα, όπου αναφέρονται απαιτούμενες τιμές F με βάση το μικροοργανισμό στόχο για κάθε τρόφιμο (FDA, 2010; NCA, 1968).

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικοί συνδυασμοί χρόνου-θερμοκρασίας θέρμανσης και διαφορετικές μέθοδοι επεξεργασίας, συστήματα και τεχνικές για να επιτευχθεί η απαιτούμενη τιμή F . Κάθε σύστημα θα επηρέαζε σε διαφορετικό βαθμό την ποιότητα του τελικού προϊόντος. Γι' αυτό, οι ελάχιστες αλλαγές στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των τροφίμων βρίσκονται μέσω ρουτίνων βελτιστοποίησης της διεργασίας για την αξιολόγηση της καταλληλότητας του κάθε συστήματος, χρησιμοποιώντας δεδομένα κινητικής υποβάθμισης για τον πιο θερμοευαίσθητο παράγοντα. Το χρονοθερμοκρασιακό προφίλ ενός προϊόντος το οποίο δέχεται θερμική διεργασία θα εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες που περιλαμβάνουν αλλά δεν περιορίζονται στους: 1) σύστημα επεξεργασίας, όπως συμβατικό (στατικά ή περιστρεφόμενα αυτόκλειστα) ή ασηπτικό, 2) το μέσο θέρμανσης ή ψύξης (ατμός, εμβάπτιση σε νερό, καταιονισμός νερού, ή μίξη ατμού/αέρα), 3) τα χαρακτηριστικά του προϊόντος όπως σύσταση, λόγος στερεού/υγρού, και θερμοφυσικές ιδιότητες, 4) η αρχική θερμοκρασία του προϊόντος και του μέσου θέρμανσης/ψύξης και 5) ο τύπος, το σχήμα και το μέγεθος του περιέκτη. Χρησιμοποιώντας δεδομένα συλλεγμένα από μελέτες θερμικής διεπίδωσης,

προσδιορίζονται δεδομένα ρυθμού θέρμανσης και κατόπιν χρησιμοποιούνται στο σχεδιασμό ενός προγράμματος θερμικής επεξεργασίας.

2.2.4. Προγραμματισμός μιας θερμικής διεργασίας

Ένα πρόγραμμα θερμικής διεργασίας γίνεται με τη χρήση δεδομένων θερμικής διείσδυσης και δεδομένων κινητικής απενεργοποίησης του μικροοργανισμού στόχου (τιμές F_{required} και z) είτε μέσω της γενικής μεθόδου είτε με βελτιωμένων εκδοχών αυτής (εξίσωση (5)). Η ανάγκη ευελιξίας και ακρίβειας κατά τον υπολογισμό του απαιτούμενου χρόνου για την επίτευξη δεδομένης θνησιμότητας μιας θερμικής διεργασίας, οδήγησε στην ανάπτυξη διάφορων μεθόδων υπολογισμού (Gillespy, 1951; Ball and Olson, 1957; Stumbo and Longley, 1966; Hayakawa, 1970; Pham, 1987), ενώ η μέθοδος που ανέπτυξε ο Ball παραμένει η πιο ευρέως χρησιμοποιημένη στη βιομηχανία τροφίμων. Η μέθοδος υπολογισμού του Ball προκύπτει από την καμπύλη θερμικής διείσδυσης και βασίζεται στην παρακάτω εξίσωση (Στοφόρος, 2005):

$$B = f_h \log \left[\frac{j_h(T_{RT} - T_{IT})}{g} \right] \quad (7)$$

όπου

B χρόνος θέρμανσης που απαιτείται για βιομηχανική αποστείρωση, min.

f_h χρόνος που απαιτείται για να δεκαπλασιαστεί (ή να υποδεκαπλασιαστεί) η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ αυτοκλείστου και προϊόντος, min.

g διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του αυτοκλείστου κατεργασίας και του προϊόντος –στο κρίσιμο σημείο– στο τέλος του χρόνου θέρμανσης (κλείσιμο παροχής ατμού). Σημειώστε ότι ο Ball (1923) όρισε το g με βάση τη μέγιστη θερμοκρασία του κρίσιμου σημείου του προϊόντος κατά τη διάρκεια της θερμικής διεργασίας, °F.

j_h 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 αυτοκλείστου και προϊόντος συναρτήσει του χρόνου. Η παράμετρος j ορίζεται ως $j_h = \frac{T_{RT} - T_A}{T_{RT} - T_{IT}}$.

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 αυτοκλείστου και προϊόντος συναρτήσει του χρόνου θέρμανσης) με τον άξονα των θερμοκρασιών, °F.

T_{RT} αρχική θερμοκρασία προϊόντος, °F (εκτός αν καθορίζεται στο κείμενο διαφορετικά).

T_{IT} θερμοκρασία αυτοκλείστου κατεργασίας, °F (εκτός αν καθορίζεται στο κείμενο διαφορετικά).

Αν και η μεθοδολογία του Ball, χρησιμοποιείται ακόμη, η μέθοδος που αναπτύχθηκε από τον Stumbo (Stumbo, 1973) μείωσε τις περισσότερες από τις υποθέσεις που γίνονται στη μέθοδο του Ball και φέρνει καλύτερα αποτελέσματα για τις εκτιμώμενες θνησιμότητες στα τρόφιμα που θερμαίνονται με αγωγή (Smith *et al.*, 1982). Οι διάφορες μέθοδοι υπολογισμού που αναπτύχθηκαν έπαιξαν ένα χρήσιμο ρόλο στον προσδιορισμό του χρόνου της διεργασίας ή της συνολικής θνησιμότητας και αντίστροφα. Παρόλα αυτά, η χρησιμότητα τους περιορίζεται όταν χρειάζεται να γίνει βελτιστοποίηση των παραμέτρων του συστήματος, ή σε αυτοματοποιημένα συστήματα καθώς δε μπορούν να περιγράψουν δυναμικές λειτουργίες καθ’ όλη τη διάρκεια της διεργασίας (Chen *et al.*, 2002).

2.3. Επίδραση της θερμικής διεργασίας στα ποιοτικά χαρακτηριστικά

Οι διαφορές στις τιμές D και z των μικροοργανισμών και των θρεπτικών συστατικών αποτελούν τον λόγο για τον οποίο μπορούν να βελτιστοποιηθούν οι θερμικές διεργασίες. Οι τιμές z που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την υποβάθμιση των θρεπτικών συστατικών κυμαίνονται συνήθως μεταξύ 25-45°C και είναι γενικά μεγαλύτερες από αυτές των μικροοργανισμών που κυμαίνονται μεταξύ 7-12°C. Για κάθε 10°C αύξηση της θερμοκρασίας, ο ρυθμός υποβάθμισης των θρεπτικών συστατικών διπλασιάζεται, ενώ ο ρυθμός αποστείρωσης των μικροοργανισμών δεκαπλασιάζεται (Holdsworth, 1997). Ως ένα γενικό

συμπέρασμα μπορεί να ειπωθεί ότι η διατήρηση ενός θρεπτικού συστατικού με μικρή τιμή z (π.χ. 18°F ή 10°C) ευνοείται από μια διεργασία με συνδυασμό χαμηλής θερμοκρασίας-μεγάλου χρόνου θέρμανσης, ενώ για ένα ποιοτικό παράγοντα με μεγάλη τιμή z (>25°C), η καλύτερη διατήρηση του θα επιτυγχάνεται με συνδυασμούς υψηλής θερμοκρασίας-μικρού χρόνου θέρμανσης (Teixeira *et al.*, 1969).

Μια κοινή εξίσωση για την εκτίμηση της ποιοτικής υποβάθμισης είναι η τιμή C (Cook value) που αρχικά προτάθηκε από τον Mansfield για την ασηπτική επεξεργασία των χαμηλής οξύτητας τροφίμων (Mansfield, 1962) και έχει την ίδια μορφή με την εξίσωση για τον προσδιορισμό της μικροβιακής απενεργοποίησης, δηλαδή την τιμή F:

$$C_{T_{ref}}^z = \int_0^t 10^{\frac{(T(t)-T_{ref})}{z}} dt \quad (8)$$

Σε όρους ποιοτικής αξιολόγησης η εξίσωση (8) έχει μικρή αξία αφού επικεντρώνεται σε ένα μόνο σημείο. Αντίθετα, η ολοκλήρωση της εξίσωσης (8) για ολόκληρο τον όγκο του περιέκτη για να δώσει τη μέση τιμή όγκου (volume average) ποιοτικής υποβάθμισης, τιμή C, είναι πιο κατάλληλη για το χαρακτηρισμό της επίδρασης των διαφόρων συνδυασμών χρόνου θέρμανσης-θερμοκρασίας στα θερμοευαίσθητα θρεπτικά συστατικά. Η εξίσωση που δίνει τη μέση τιμή όγκου (volume average) ποιοτικής υποβάθμισης γράφεται ως:

$$C_{avg} = \frac{1}{V} \int_0^t \int_0^V 10^{\frac{T-T_{ref}}{z}} dt dV \quad (9)$$

Η παραπάνω εξίσωση δείχνει ότι η μέση τιμή ποιοτικής υποβάθμισης όγκου είναι ανεξάρτητη από τη $D_{T_{ref}}$. Στην πράξη όμως η παραπάνω εξίσωση αποδείχτηκε λανθασμένη διότι μπορεί να υποτιμήσει σε σημαντικό βαθμό τη βέλτιστη θερμοκρασία της διεργασίας για τη διατήρηση της ποιότητας, ιδιαίτερα για χαμηλές τιμές $D_{T_{ref}}$ (Holdsworth, 1997; Silva *et al.*, 1992). οπότε η αξιολόγηση της ποιοτικής υποβάθμισης μπορεί να εκφραστεί καλύτερα ως μεγιστοποίηση της διατήρησης ενός ποιοτικού παράγοντα, μέσω της έκφρασης που δίνει τη μέση διατήρηση ποιοτικού παράγοντα όγκου (C/C_0) και γράφεται ως:

$$\frac{C}{C_o} = \frac{1}{V} \int_0^V 10^{-\left(\frac{1}{D_{ref}}\right) \int_0^t 10^{\frac{T-T_{ref}}{z}} dt} dV \quad (10)$$

2.4. Η αλλοίωση της κονσερβοποιημένης τομάτας και των προϊόντων της

Περιστασιακά μπορεί να επέλθει αλλοίωση στα κονσερβοποιημένα τρόφιμα είτε αυτά γίνονται με “πλήρωση εν θερμώ”, είτε δέχονται επεξεργασία μετά το κλείσιμο του περιέκτη (Gould, 1992). Αυτό μπορεί να συμβεί με δύο τρόπους:

- Όταν η θερμική διεργασία που εφαρμόζεται στο προϊόν δεν καταφέρνει να καταστρέψει όλα τα βακτήρια που θα μπορούσαν να αναπτυχθούν σε κανονικές συνθήκες.
- Όταν το προϊόν επιμολύνεται αφότου έχει δεχτεί μια επαρκή κατά τα άλλα επεξεργασία

Η πρώτη περίπτωση αναφέρεται ως υποεπεξεργασία, ενώ η δεύτερη ως επιμόλυνση. Οι κονσερβοποιημένες τομάτες δεν αποτελούν εξαίρεση σε αυτές τις γενικές παρατηρήσεις.

Όπως έχει ειπωθεί, τα κονσερβοποιημένα τρόφιμα χωρίζονται σε δύο ευρείς κατηγορίες με βάση το pH, που αποτελεί δείκτη της οξύτητας, και η διαχωριστική γραμμή είναι η τιμή pH 4.6. Για τα τρόφιμα χαμηλής οξύτητας απαιτούνται θερμικές διεργασίες μεγάλης έντασης (>100°C), για το λόγο αυτό η θερμοκρασία αναφοράς κατά τον υπολογισμό της τιμής F για αυτά τα τρόφιμα είναι 121.11°C (250°F). Για τα όξινα τρόφιμα είναι επαρκείς πιο ήπιες διεργασίες, καθώς το χαμηλό pH δημιουργεί ένα εχθρικό περιβάλλον για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών. Συγκεκριμένα για τις τομάτες η Αρχή Τροφίμων και Φαρμάκων των ΗΠΑ (FDA, 2010) αναφέρει ότι το pH στις τομάτες κυμαίνεται από 4.0-4.7, ανάλογα με την ποικιλία της τομάτας και την ωρίμανση. Όπως γίνεται κατανοητό, οι τομάτες με 4.6<pH<4.7 δεν πληρούν τον ορισμό του όξινου τροφίμου όπως έχει οριστεί παραπάνω. Όμως επειδή ο *C.botulinum* δεν αναπτύσσεται σε προϊόντα τομάτας σε pH<4.9 και με ένα περιθώριο ασφαλείας 0.2 ο FDA, εξαιρεί τα προϊόντα τομάτας εκείνα με 4.6<pH<4.7 εντάσσοντας τα στην κατηγορία των όξινων τροφίμων.

Από σχήμα κατανομής συχνοτήτων pH από έρευνες σε τομάτες (Gould, 1992), φαίνεται ότι για αυτό το τρόφιμο ακολουθεί κανονική κατανομή με ένα μέσο pH 4.3, ενώ οι ακραίες τιμές είναι 3.9 (6 αναφορές) και 5 (1 αναφορά). Εκτός από την ποικιλία και την

ωριμότητα, άλλοι παράγοντες που φαίνεται να παίζουν κάποιο ρόλο στη διαμόρφωση του pH είναι οι εποχικές διακυμάνσεις λόγω των συνθηκών ανάπτυξης, η γεωγραφική περιοχή, οι πρακτικές χειρισμού πριν την επεξεργασία, οι μεταβλητές της επεξεργασίας και η αλατότητα (Gould, 1992). Από τα παραπάνω γίνεται κατανοητό ότι η βιομηχανία που μεταποιεί την πρώτη ύλη πρέπει να είναι σε θέση να γνωρίζει την ποικιλία και την ωριμότητα της τομάτας που επεξεργάζεται καθώς αυτές οι παράμετροι επηρεάζουν σημαντικά το pH, ενώ πρέπει να ελέγχει το pH τακτικά και να το ρυθμίζει με οργανικά οξέα που επιτρέπονται από τη νομοθεσία, ώστε να μην υπερβαίνει το όριο του 4.6 (Gould, 1992). Τέλος, το pH παίζει αποφασιστικό ρόλο και στην αυστηρότητα της θερμικής επεξεργασίας, καθώς ίσως χρειαστεί να αλλάξει το χρόνο και τη θερμοκρασία της επεξεργασίας αν το pH διαφέρει σε σημαντικό βαθμό.

Οι κύριες ομάδες μικροοργανισμών που εμπλέκονται στην αλλοίωση των προϊόντων τομάτας είναι τα οξυγαλακτικά και τα σπορογόνα βακτήρια. Τα οξυγαλακτικά βακτήρια καταστρέφονται γρήγορα με μια ήπια θερμική διεργασία και εμπλέκονται κυρίως σε επιμόλυνση του προϊόντος μετά την επεξεργασία του. Από τα σπορογόνα βακτήρια, τα αναερόβια που παράγουν βουτυρικό οξύ οι *Clostridium pasteurianum* και *C. butyricum* και ο *Bacillus coagulans* που προκαλεί τη λεγόμενη επίπεδη οξίνιση (flat sour), εμπλέκονται στην αλλοίωση των προϊόντων τομάτας. Ο *Bacillus coagulans* θεωρείται ο πιο σημαντικός από τους παραπάνω όχι μόνο επειδή απαντάται πιο συχνά, αλλά και επειδή είναι και ο πιο θερμοανθεκτικός σε σχέση με τα άλλα σπορογόνα βακτήρια που εμπλέκονται στην αλλοίωση των προϊόντων τομάτας (Mallidis *et al.*, 1990). Κατά συνέπεια, μια θερμική διεργασία επαρκώς ισχυρή για την καταστροφή των σπόρων του *Bacillus coagulans* θα εμποδίζει και την αλλοίωση που προκαλείται από τους υπόλοιπους μικροοργανισμούς, γι’ αυτό ο μικροοργανισμός αυτός χρησιμοποιείται φυσιολογικά ως μικροοργανισμός-στόχος στη σχεδίαση των θερμικών διεργασιών για την αποστείρωση των προϊόντων τομάτας (NCA, 1968; York *et al.*, 1975; Rodrigo *et al.*, 1990).

2.4.1. Η επίπεδη οξίνιση και τα χαρακτηριστικά της

Η επίπεδη οξίνιση (flat sour) σε εμπορικά κονσερβοποιημένο τοματοχυμό παρατηρήθηκε για πρώτη φορά το 1931. Από τότε, τέτοια φαινόμενα αλλοίωσης παρατηρούνταν σε ετήσια βάση, ενώ σε πολλές περιπτώσεις φτάνοντας σημαντικά ποσοστά, προκαλούσαν σημαντικές οικονομικές ζημιές στη βιομηχανία. Ο αλλοιωμένος τοματοχυμός

έχει χαρακτηριστική οσμή και γεύση. Η γεύση έχει χαρακτηριστεί ως φαρμακευτική, ελαφρά όξινη, ξινισμένη και πολύ δυσάρεστη ανάλογα με το στάδιο της αλλοίωσης (Gould, 1992).

Ο Berry (1933) ερευνήσε την πρώτη αναφορά αλλοίωσης, σε τοματοχυμό. Ανακάλυψε ότι υπεύθυνος ήταν ένας σπορογόνος μικροοργανισμός του εδάφους, ο οποίος λόγω της θερμοφιλής φύσης του, της αντίστασης στη θερμότητα και της ικανότητας του να αναπτύσσεται σε όξινο περιβάλλον, ονομάστηκε από τον ίδιο *Bacillus thermoacidurans*. Στην πορεία άλλοι ερευνητές ταυτοποίησαν ότι ο *Bacillus coagulans* που είχε ανακαλυφθεί από άλλους ήταν ο ίδιος μικροοργανισμός και τελικά επικράτησε η τελευταία ονομασία.

Όπως υποδεικνύει ο ορισμός της, αυτού του τύπου η αλλοίωση δεν προκαλεί διαστολή των περιεκτών, οπότε δεν υπάρχει η δυνατότητα να ανιχνευτεί η αλλοίωση μέχρι το άνοιγμα του περιέκτη. Στις περισσότερες των περιπτώσεων η ανάπτυξης δυσάρεστης οσμής είναι η πρώτη ένδειξη αλλοίωσης, ακολουθούμενη από την ανάπτυξη της οξύτητας στη γεύση. Όσο συνεχίζει η ανάπτυξη του μικροοργανισμού το pH στον τοματοχυμό πέφτει από το 4.5 στο 3.5 σύμφωνα με τον Gould (1992).

2.4.2. Αιτίες της επίπεδης οξίνισης και τρόποι ελέγχου της στη γραμμή παραγωγής

Ενώ οι οργανισμοί αυτοί είναι εδαφικής προέλευσης και συνήθως εισέρχονται στη μονάδα παραγωγής με το νωπό προϊόν, σε φυσιολογικές συνθήκες δεν συγκεντρώνονται σε αρκετούς αριθμούς για να αποτελέσουν πραγματικό κίνδυνο εμφάνισης αλλοίωσης, εκτός αν τους δοθεί η ευκαιρία να πολλαπλασιαστούν σε αυτή τη μονάδα παραγωγής. Οι παράγοντες που μπορεί να προκαλέσουν την επίπεδη οξίνιση είναι:

- Η χρήση πρώτης ύλης φτωχής ποιότητας
- Ο κακός χειρισμός της πρώτης ύλης κατά τη μεταφορά του στη μονάδα παραγωγής και πριν και κατά την διάρκεια του σταδίου του πλυσίματος
- Το ανεπαρκές πλύσιμο της πρώτης ύλης
- Το υψηλό pH του νωπού προϊόντος
- Το υψηλό αρχικό μικροβιακό φορτίο
- Η ανεπαρκή θερμική διεργασία
- Η επιμόλυνση του εξοπλισμού της μονάδας
- Η φτωχή απολύμανση των χώρων της μονάδας παραγωγής

Ποιότητα της πρώτης ύλης

Μόνο οι τομάτες υψηλών προδιαγραφών και άριστης ποιότητας πρέπει να χρησιμοποιούνται για την παραγωγή του τελικού προϊόντος. Η χρήση μια ζώνης όπου γίνεται ο στεγνός διαχωρισμός (dry sorting) των τοματών πριν εισέλθουν στην παραγωγή είναι ένα αποτελεσματικό μέσο για τη απόρριψη των μωλωπισμένων, υπερώριμων ή μουχλιασμένων τοματών, οι οποίες μπορεί να μεταδώσουν τους μικροοργανισμούς και στις καλής ποιότητας τομάτες. Ο Bash (1964) βρήκε μεγαλύτερο μικροβιακό φορτίο στις πιο μαλακές τομάτες.

Ο χειρισμός της τομάτας

Ο χειρισμός της τομάτας πρέπει να είναι γρήγορος μετά τη συγκομιδή και τη μεταφορά στη μονάδα. Τα κουτιά μεταφοράς δεν πρέπει να γεμίζονται υπερβολικά έτσι ώστε να αποφεύγεται το σπάσιμο των τοματών που βρίσκονται στον πάτο, από το υπερβολικό βάρος. Μετά από κάθε χρήση τους τα κουτιά μεταφοράς πρέπει να πλένονται πριν επαναχρησιμοποιηθούν σε νέα μεταφορά. Προσοχή πρέπει να δοθεί επίσης κατά τη συγκέντρωση των καρπών στις δεξαμενές, να μη χτυπηθούν γιατί μετά ο καθαρισμός γίνεται δύσκολος ακόμη και κατά τις διαδικασίες πλυσίματος.

Διαδικασίες πλυσίματος του καρπού

Η αποτυχία σωστού καθαρισμού των καρπών είναι ένας από τους κύριους παράγοντες που συνεισφέρουν στην ανάπτυξη της επίπεδης οξίνισης. Οι Denny and Bohrer (1964) έδειξαν ότι η επιμόλυνση από τον *Bacillus coagulans* σε άπλυτες τομάτες κυμαίνεται από 65 έως 1100 σπόρους/g τομάτας, ενώ για τις πλυμένες και αποφλοιωμένες τομάτες οι York *et al.* (1975) αναφέρουν ένα μέσο μικροβιακό φορτίο της τάξης των 55 σπόρων/mL. Η ποσότητα του χώματος που μπορεί να εισέλθει στη μονάδα μαζί με τις τομάτες μπορεί να είναι αρκετά μεγάλη, ειδικά όταν το έδαφος κατά τη συγκομιδή είναι βαρύ και υγρό, οπότε μεγάλη ποσότητα χώματος προσκολλάται στον καρπό. Μια από τις πιο δύσκολες απαιτήσεις κατά τη διαδικασία πλυσίματος είναι η παρεμπόδιση της συσσώρευσης του χώματος στις δεξαμενές διαβροχής, ειδικά όταν το νερό από αυτές επανακυκλοφορεί. Όσο μεγαλύτερη είναι η συγκέντρωση του χώματος στη δεξαμενή διαβροχής τόσο μεγαλύτερη είναι και η συγκέντρωση των σπόρων σε αυτή (Gould, 1992). Μια λύση σε αυτό το πρόβλημα αποτελεί η χρήση χλωριωμένου νερού κατά το τελικό ξέπλυμα. Συνιστώνται συγκεντρώσεις χλωρίνης της τάξης των 15-20 ppm (mg/L).

Το pH του τοματοχυμού

Το pH είναι ένας απόλυτος παράγοντας επίδρασης στη θερμοανθεκτικότητα των βακτηρίων και της ικανότητας τους να βλαστάνουν και να αναπτύσσονται. Όσο υψηλότερο το pH, τόσο μειώνεται η θερμοανθεκτικότητα τους. Η αλλοίωση του χυμού είναι συχνότερη όταν το pH στον τοματοχυμό είναι μεγαλύτερο του 4.35 (Gould, 1992). Τέλος, οι Rodrigo *et al.*, 1990 αναφέρουν ανάπτυξη του *B. coagulans* σε ελάχιστο pH 3.91 σε πολτοποιημένες τομάτες, όταν όμως είχαν υψηλό αρχικό μικροβιακό φορτίο (8.6×10^5 σπόροι/mL).

Αρχικό μικροβιακό φορτίο

Διάφοροι ερευνητές έχουν μελετήσει την επίδραση της αρχικής μικροβιακής συγκέντρωσης του *B.coagulans* στο ελάχιστο pH στο οποίο μπορεί αυτός ο μικροοργανισμός να αναπτυχθεί (Gould, 1992; York *et al.*, 1975; Rodrigo *et al.*, 1990). Τα αποτελέσματα για διάφορα στελέχη του μικροοργανισμού φαίνονται στον Πίνακα 2.1. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ότι όταν υπάρχει υψηλό μικροβιακό φορτίο απαιτείται ένα σημαντικά χαμηλότερο pH για να παρεμποδίσει την ανάπτυξη τους, και αντίστροφα, αν υπάρχει χαμηλό αρχικό μικροβιακό φορτίο αλλά το pH του καρπού είναι υψηλό, υπάρχει επίσης πιθανότητα αλλοίωσης του τελικού προϊόντος.

Πίνακας 2.1. Σχέση μεταξύ του αρχικού μικροβιακού φορτίου και του ελάχιστου pH στο οποίο παρατηρείται ανάπτυξη σε τοματοχυμό (στελέχη 710, 43P) και πολτοποιημένη τομάτα (ATCC 8038) (Gould, 1992; Rodrigo *et al.*, 1990).

Στέλεχος	Σπόροι/mL	Ελάχιστο pH ανάπτυξης
710	65000000	4.24
	650000	4.31
	6500	4.37
	650	4.41
43P	22000000	4.19
	22000	4.24
	220	4.31
	22	4.37
ATCC 8038	860000	3.91
	86000	3.86
	8600	4.03
	860	4.20
	86	4.19
	8	-

Ενεργότητα νερού

Ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών είναι και η ενεργότητα νερού (a_w). Η ανάπτυξη των περισσότερων βακτηρίων στην τομάτα παρεμποδίζεται όταν $a_w < 0.91$, αλλά κάποιες ζύμες και μύκητες μπορούν να αναπτυχθούν σε επίπεδα με $a_w = 0.60$ (Gould, 1992).

Ανεπαρκής θερμική διεργασία

Είναι πολύ σημαντικό η εφαρμοζόμενη θερμική διεργασία να μπορεί να εξουδετερώσει όχι μόνο τους μικροοργανισμούς χαμηλής θερμοανθεκτικότητας όπως τα οξυγαλακτικά βακτήρια αλλά και τους πιο θερμοανθεκτικούς όπως ο *B. coagulans*. Όταν αφορά τη θέρμανση και την “πλήρωση εν θερμώ” του τοματοχυμού σε θερμοκρασίες 93.33-96.11°C (200-205°F), και η προτεινόμενη διατήρηση του περιέκτη ανεστραμμένου στον αέρα για 3 min, δεν επαρκεί για την καταστροφή του πιο θερμοανθεκτικών μικροοργανισμών (Gould, 1992).

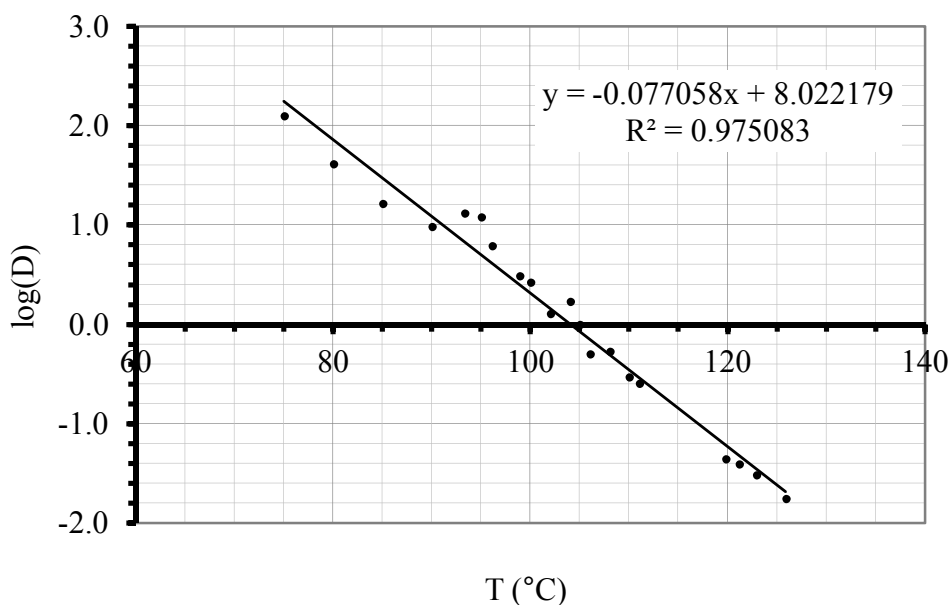
Ανεπαρκής καθαρισμός του μηχανολογικού εξοπλισμού

Οι μικροοργανισμοί που ευθύνονται για την αλλοίωση της τομάτας δε βρίσκονται φυσιολογικά σε μεγάλους πληθυσμούς για να αποτελούν πραγματικό κίνδυνο. Παρόλα αυτά αν έχει προηγηθεί πλημμελής καθαρισμός των καρπών κατά το στάδιο του πλυσίματος, αυτός θα εισέλθει στις εγκαταστάσεις της βιομηχανίας και είναι πιθανό να επιμολύνει συγκεκριμένο εξοπλισμό όπως σε διάφορα σημεία σωληνώσεων όπου ο χυμός παραμένει στατικός για μεγάλο χρονικό διάστημα. Ο σωστός σχεδιασμός των εγκαταστάσεων ώστε να υπάρχει ευκολία κατά τον καθαρισμό τους είναι κεφαλαιώδους σημασίας (Gould, 1992).

2.4.3. Η θερμοανθεκτικότητα των σπόρων του B. coagulans και οι απαιτούμενες τιμές παστερίωσης, F

Τα βακτήρια που προκαλούν αυτού του τύπου αλλοιώσεις είναι προαιρετικά αναερόβια εδαφικής προέλευσης. Στον τοματοχυμό, αναπτύσσονται ιδανικά σε θερμοκρασίες 54-60°C. Η θερμοανθεκτικότητά τους κυμαίνεται σε μεγάλο βαθμό, και εξαρτάται από ένα αριθμό παραγόντων όπως το στέλεχος του βακτηρίου, η θερμοκρασία επώασης, το μέσο επώασης και ανάκτησης, το αρχικό μικροβιακό φορτίο, το τρόφιμο/μέσο και το pH (Πίνακας 2.1). Από τον Πίνακα 2.2 φαίνονται οι τιμές z που αναφέρονται στη βιβλιογραφία για τον *B. coagulans* κυρίως σε προϊόντα τομάτας. Οι τιμές αυτές κυμαίνονται σε ένα μεγάλο εύρος (6.7-

16.1°C), ενώ για τον τοματοπολτό υπάρχουν δύο αναφορές με τις τιμές για το z να κυμαίνονται στους 9-9.5°C. Για την απενεργοποίηση του *B. coagulans* στον τοματοπολτό το μοντέλο κινητικής απενεργοποίησης πρώτης τάξης παρουσιάζει ικανοποιητική ακρίβεια (Mallidis *et al.*, 1990; Sandoval *et al.*, 1992). Επίσης, χρησιμοποιώντας δεδομένα χρόνου δεκαδικής μείωσης, D, και θερμοκρασίας από τη βιβλιογραφία (οι ερευνητές από τους οποίους συγκεντρώθηκαν τα δεδομένα φαίνονται στον Πίνακα 2.2) για τον *B. coagulans* σε όλα τα προϊόντα τομάτας κατασκευάσαμε το παρακάτω διάγραμμα log(D)- T το οποίο δείχνει ότι η εξάρτηση του λογαρίθμου της τιμής D από τη θερμοκρασία είναι ισχυρά γραμμική ($R^2=0.98$) (Σχήμα 2.3). Από τα δεδομένα αυτά υπολογίζεται μια μέση τιμή z για τον *B. coagulans* ίση προς 12.98°C.



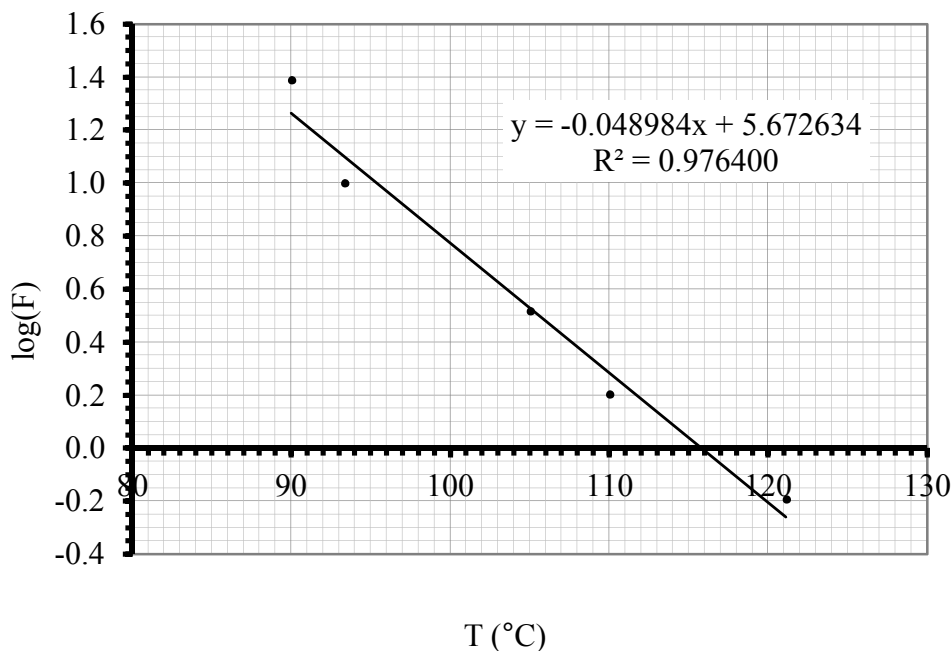
Σχήμα 2.3. Ο λογάριθμος του δεκαδικού χρόνου μείωσης μικροβιακής απενεργοποίησης, D σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για τον *B. coagulans*, με βάση βιβλιογραφικά δεδομένα του Πίνακα 2.2.

Θερμικές διεργασίες τροφίμων και η “πλήρωση εν θερμώ”

Πίνακας 2.2. Δεδομένα κινητικής απενεργοποίησης (τιμές z) του *B. coagulans* σε προϊόντα τομάτας και ρυθμιστικά διαλύματα.

z (°C)	Μέσο/τρόφιμο	Στέλεχος	T επώασης (°C)	Μέσο ανάκτησης	Μέσο επώασης	pH	Αρχικό φορτίο	Εύρος T (°C)	Αναφορά
10.2	Τοματοχυμός, 6% στερεά	185A	-	-	-	4.3	-	95-115	Daryaei <i>et al.</i> , 2013
8.3	Τοματοχυμός	ATCC 8038	-	-	-	4.3	-	95-115	Daryaei <i>et al.</i> , 2013
8.9			-	-	-	-	-	-	FDA, 2010
10.0	Τοματοχυμός		-	-	-	-	4 × 10 ⁵ cfu/mL	-	Gould, 1992
16.1	Τοματοχυμός		-	-	-	-	-	93-106	Knock <i>et al.</i> , 1959
15.0	Τοματοχυμός	ATCC 8038	37	-	-	4.2	-	-	Leonard <i>et al.</i> , 1975
9.2	Ορός τομάτας	ATCC 8038, NCA 43A	55	YPTD agar	SMS+L-alanine	4.5	1.2 × 10 ⁶ cfu/g	95-110	Mallidis <i>et al.</i> , 1990
12.0	Phosphate buffer	ATCC 8038	55	YPTD agar	SMS+L-alanine	7	1.2 × 10 ⁶ cfu/g	95-110	Mallidis <i>et al.</i> , 1990
8.0	Τοματοχυμός	ATCC 8038	-	-	-	4.1	-	-	Milly <i>et al.</i> , 2007
6.7	-	-	-	-	-	-	-	104-117	Okazaki & Suzuki 2007
12.7	Τεμαχισμένες τομάτες	Spanish type 4522	52	-	Nutrient agar	4	-	-	Palop <i>et al.</i> , 1999
10.5/ 8.9	Mcllvaine buffer	Spanish type 4522	52	-	Nutrient agar	4	-	-	Palop <i>et al.</i> , 1999
13.9	Λιωμένες τομάτες	ATCC 8038	45	Dextrose tryptone agar	Tomato juice agar	4.3	2.5 × 10 ⁵ cfu/mL	85-108	Rodrigo <i>et al.</i> , 1990
13.7	Λιωμένες τομάτες	ATCC 8038	45	Dextrose tryptone agar	Tomato juice agar	4.5	2.5 × 10 ⁵ cfu/mL	85-108	Rodrigo <i>et al.</i> , 1990
9.5	Τοματοπολτός 30.3 °Brix	-	45	GTY agar	Tomato juice agar	4	1.3 × 10 ⁴ cfu/mL	75-90	Sandoval <i>et al.</i> , 1992
8.7	Τοματοχυμός	ATCC 8038	50	-	Nutrient agar	4.4	10 ⁷ cfu/mL	95-110	Somavat <i>et al.</i> , 2013
8.9	-	ATCC 8038	-	-	-	-	-	-	Stumbo, 1973
9.4/ 12.2	Αποφλοιωμένες τομάτες	ATCC 8038	-	-	-	4.3	1-25 spores/mL	-	York <i>et al.</i> , 1975
15.6	Τοματοχυμός	ATCC 8038	-	-	-	4.2	10 ⁴ cfu/mL	100	York <i>et al.</i> , 1975
8.2		ATCC 8038	-	-	-	-	-	104, 110	Youland and Stumbo, 1953

Ο Berry (1933) μελετώντας την θερμοανθεκτικότητα του *B. coagulans*, χρησιμοποιώντας μια αρχική συγκέντρωση 10^7 σπόρους/mL σε τοματοχυμό με pH 4.5 υπολόγισε μια απαιτούμενη τιμή $F_{121.1^{\circ}\text{C}}^{10^{\circ}\text{C}}$ ίση προς 0.33 min. Οι Sognefest and Jackson (1947) έδειξαν ότι πρακτικά όλα τα στελέχη του μικροοργανισμού καταστράφηκαν με μια θερμική διεργασία ισοδύναμη με $F_{121.1^{\circ}\text{C}}^{10^{\circ}\text{C}} = 0.7 \text{ min}$. Οι Mallidis *et al.* (1990) υπολογίζουν μια απαιτούμενη ολοκληρωμένη τιμή $F_{105^{\circ}\text{C}}^{8.9^{\circ}\text{C}} = 3.29 \text{ min}$ με βάση τον *B. coagulans* για την θερμική διεργασία κονσερβοποιημένου τοματοπολτού. Ο NCA (1968) προτείνει για όξινα προϊόντα με μικροοργανισμό στόχο τον *B. coagulans* και για εξαγωγή σε τροπικές χώρες $F_{121.11^{\circ}\text{C}}^{10^{\circ}\text{C}} = 0.9 \text{ min}$. Επίσης για όξινα και οξινισμένα προϊόντα με $4.3 < \text{pH} < 4.4$ προτείνει μια τιμή $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 10 \text{ min}$. Οι York *et al.* (1975) για αποφλοιωμένες τομάτες δίνουν ολοκληρωμένη τιμή αποστείρωσης (Integrated Sterilizing value, IS), $F_{100^{\circ}\text{C}}^{15^{\circ}\text{C}} = 1.55 \text{ min}$, ενώ οι Rodrigo *et al.* (1990) για πολτοποιημένες τομάτες επεξεργασμένες με τη μέθοδο της “πλήρωσης εν θερμώ” δίνουν ολοκληρωμένη τιμή $F_{110^{\circ}\text{C}}^{13.7^{\circ}\text{C}} = 1.6 \text{ min}$. Τέλος, οι Sandoval *et al.* (1994) υπολογίζουν για τοματοπολτό συσκευασμένο σε γυάλινα βάζα διαφόρων διαστάσεων, ολοκληρωμένη τιμή $F_{90^{\circ}\text{C}}^{9.5^{\circ}\text{C}} = 24.5 \text{ min}$. Με τις προαναφερθείσες απαιτούμενες τιμές F για τα προϊόντα τομάτας κατασκευάσαμε διάγραμμα $\log(F)$ -T (Σχήμα 2.4). Οι τιμές F παρουσιάζουν καλή συσχέτιση ($R^2=0.98$), με την εξαίρεση της τιμής F που δίνουν οι York *et al.* (1975) η οποία παρουσιάζει μεγάλη απόκλιση σε σχέση με τις υπόλοιπες κάτι που μπορεί να εξηγηθεί από διάφορους παράγοντες, όπως η διαφορετική τιμή z, με εύρος 8.9-15°C, οι διαφορές στο pH του προϊόντος, στον τρόπο υπολογισμού κ.α.



Σχήμα 2.4. Ο λογάριθμος της τιμής, F σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για τον *B. coagulans*.

Ο κίνδυνος που υπάρχει για τα προϊόντα υψηλής οξύτητας που υπόκεινται σε μια θερμική διεργασία είναι να επιβιώσει ένας μικροοργανισμός ανθεκτικός σε όξινο περιβάλλον ο οποίος ενώ ο ίδιος δεν είναι επικίνδυνος, έχει την ικανότητα να μεταβάλλει τις μη ευνοϊκές συνθήκες για την ανάπτυξη ενός άλλου παθογόνου μικροοργανισμού όπως πχ. ο *C. botulinum* δημιουργώντας συνεπώς το κατάλληλο περιβάλλον για αυτόν ώστε να αναπτυχθεί. Τέτοιο φαινόμενο αναφέρεται ως μεταβιοτικό και έχει αναφερθεί από διάφορους μελετητές και σε προϊόντα τομάτας (Montville, 1982; Huhtanen *et al.*, 1976; Odlaug and Pflug, 1979; Fields *et al.*, 1977). Οι Fields *et al.* (1977) έκαναν μικροβιακή ανάλυση σε οικιακά κονσερβοποιημένες τομάτες και βρήκαν ότι οι μικροοργανισμοί που επιβίωσαν της θερμικής επεξεργασίας ήταν κυρίως οι *Bacillus licheniformis* και *Bacillus subtilis*, ενώ σε τρία προϊόντα το pH ήταν >4.8 γεγονός που τα καθιστούσε ευνοϊκά περιβάλλοντα για την ανάπτυξη του *C. botulinum*. Η επιβίωση αυτών των μικροοργανισμών αποδόθηκε σε ανεπαρκείς συνθήκες επεξεργασίας και στη χρήση ακατάλληλων περιεκτών. Οι μικροοργανισμοί αυτοί αύξησαν το pH σε ορό τομάτας από αρχική τιμή 4.2, σε έως και 5.2 μετά από 5 μέρες επώασης στους 35°C. Ο

Montville (1982) μελέτησε το μεταβιοτικό φαινόμενο του *B. licheniformis* επί του *C. botulinum* αρχικά σε ένα μοντελοποιημένο σύστημα με αρχικό pH 4.4 στο οποίο ο *C. botulinum* αναπτύχθηκε και παρήγαγε τοξίνη. Αυτό επιτεύχθηκε με την παρουσία και των δύο μικροοργανισμών σε επίπεδα έως και 10 σπόροι/ mL. Αντίθετα, όταν εμβολιάστηκαν βάζα που περιείχαν τομάτα και επεξεργάστηκαν θερμικά σύμφωνα με την προτεινόμενη διεργασία του USDA (35 min σε βραστό νερό) ενώ παρατηρήθηκε ανάπτυξη του *B. licheniformis* μόνο στα βάζα με διαρρηγμένο πώμα δεν παρατηρήθηκε παραγωγή τοξίνης. Ο ερευνητής συμπεραίνει ότι η προτεινόμενη από το USDA θερμική διεργασία είναι ανεπαρκής επιτρέποντας την επιβίωση του *B. licheniformis* ο οποίος στη συνέχεια μπορεί να δημιουργήσει τις κατάλληλες συνθήκες για την παραγωγή τοξίνης από τον *C. botulinum*. Ο ερευνητής αναφέρει ότι ενώ ο *B. coagulans* είναι πιο θερμοανθεκτικός από τον *B. licheniformis* ($D_{95}=13.7$ min έναντι 5.1 min αντίστοιχα) αυτός δεν αποτελεί κίνδυνο διότι δεν αυξάνει το pH του περιβάλλοντος του όπως ο *B. licheniformis* (Frazier, 1958). Σε αυτό το σημείο τα αποτελέσματα των διαφόρων ερευνητών αντικρούουν το ένα το άλλο. Οι Fields *et al.* (1977) αναφέρουν τον *B. coagulans* να αυξάνει το pH σε ορό τομάτας από 4.2 σε 4.75 μετά από 5 μέρες επώασης στους 35°C, ενώ και ο Anderson (1984) αποδίδει την αύξηση στο pH στην παρουσία του *B. coagulans*. Αντίθετα, οι Rodrigo *et al.* (1990) μελετώντας την ανάπτυξη του *B. coagulans* ATCC 8038 σε πολτοποιημένες τομάτες δεν ανέφεραν σημαντικές αλλαγές στο pH μετά από επώαση 6 ημερών στους 37°C, ενώ επισημαίνουν ότι τα διάφορα στελέχη του *B. coagulans* χαρακτηρίζονται από σημαντική διακύμανση όχι μόνο στην αντίδραση τους σε εξωτερικούς παράγοντες αλλά και στα φυσιολογικά τους χαρακτηριστικά, σημειώνοντας ότι το pH από μόνο του δεν αποτελεί αξιόπιστο δείκτη αλλοίωσης από αυτόν τον μικροοργανισμό.

Τέλος, όπως επισημαίνεται και από τον FDA (2010), έχοντας γνώση της παραπάνω βιβλιογραφίας, δεν υφίσταται κίνδυνος από τον *C. botulinum* σε προϊόντα τομάτας με pH <4.9.

2.5. Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της τομάτας και των προϊόντων της

Στον τοματοπολτό σημαντικοί παράγοντες ποιότητας θεωρούνται το χρώμα και θρεπτικά συστατικά όπως η βιταμίνη C (ασκορβικό οξύ) και τα καροτενοειδή. Το χρώμα είναι ένας πολύ σημαντικός ποιοτικός παράγοντας στα επεξεργασμένα προϊόντα τομάτας, ιδιαίτερος στα συμπυκνωμένα, αφού επηρεάζει την αποδοχή τους από τον καταναλωτή.

Υπάρχουν πολλές χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά τη θερμική επεξεργασία που επηρεάζουν το χρώμα. Ανάμεσα σε αυτές, οι πιο κοινές είναι η υποβάθμιση των καροτενοειδών (λυκοπένιο, ξανθοφύλλες) και της χλωροφύλλης και οι αντιδράσεις καστανώσης όπως η αντίδραση Maillard και η οξειδωση του ασκορβικού οξέος. Στα προϊόντα τομάτας, μια σημαντική αντίδραση είναι η υποβάθμιση του λυκοπενίου, αρχικά στην trans μορφή του, το οποίο στη συνέχεια ισομεριώνεται στη cis μορφή του κατά την θέρμανση, προκαλώντας αλλαγές του χρώματος. Επιπλέον, η παρουσία υπολειπόμενης χλωροφύλλης η οποία μπορεί να υπάρχει στο χυμό ως αποτέλεσμα ανάμιξης ανώριμων τοματών στην παραγωγή, μετατρέπεται σε φαιοφυτίνη, πράσινου χρώματος όμοιου με αυτό του ελαιόλαδου. Η υποβάθμιση του χρώματος κατά την θέρμανση των προϊόντων τομάτας στην πραγματικότητα περιλαμβάνει μια σειρά από πολύπλοκες αντιδράσεις των οποίων οι μηχανισμοί και οι μορφές έκφρασης, δεν έχουν κατανοηθεί πλήρως μέχρι σήμερα (Barreiro *et al.*, 1997). Ανεπιθύμητες αλλαγές που παρατηρούνται συνήθως λόγω της θερμικής διεργασίας περιλαμβάνουν σκοτεινότερο χρώμα ή μαύρες κηλίδες στο τελικό προϊόν (Veliloglu *et al.*, 2011).

Η Επιτροπή Codex Alimentarius και η Αμερικάνικη Αρχή για τη βαθμονόμηση του κονσερβοποιημένου τοματοπολτού ορίζει ως ποιοτικό κριτήριο το χρώμα του τοματοπολτού (Anonymous, 1994; 2004). Υπάρχουν διάφορες κλίμακες για την μέτρηση του χρώματος, εκ των οποίων η κλίμακα L , a , b του Hunter θεωρείται ότι δείχνει καλύτερη διάκριση μεταξύ μικρών χρωματικών διαφορών στην σκοτεινότερη περιοχή του χρωματικού φάσματος, παρέχοντας έτσι καλή διάκριση στα κορεσμένα χρώματα, όπως στην περίπτωση των προϊόντων τομάτας (Barreiro *et al.*, 1997).

Η τιμή L αντιπροσωπεύει μια μη γραμμική μαθηματική προσέγγιση της ανταπόκρισης του ματιού στο λευκό-μαύρο, με βαθμό 100 για τέλεια λευκότητα έως 0 για τέλειο μαύρο χρώμα, δηλαδή, ουσιαστικά μετράει τη φωτεινότητα του δείγματος. Μια θετική τιμή του a υποδεικνύει ερυθρή χροιά και μια αρνητική τιμή, πράσινη χροιά. Μια θετική τιμή του b υποδεικνύει κίτρινη χροιά και μια αρνητική τιμή μπλε χροιά. Άλλες παράμετροι που απορρέουν από την κλίμακα του Hunter είναι: η συνολική χρωματική διαφορά (ΔE), ο δείκτης κορεσμού (SI), ο λόγος a/b και η γωνία Hue. Ο λόγος a/b έχει χρησιμοποιηθεί ως δείκτης ποιότητας για τα προϊόντα τομάτας. Τιμές μεγαλύτερες του 2 είναι ενδεικτικές ενός εξαιρετικού χρώματος στον τοματοπολτό ενώ τιμές μικρότερες του 1.8 θεωρούνται μη

αποδεκτές (Barreiro *et al.*, 1997). Οι περισσότεροι ποιοτικοί παράγοντες, συμπεριλαμβανομένου του χρώματος, περιγράφονται με μια κινητική υποβάθμισης μηδενικής ή πρώτης τάξης αντίδραση, με την επίδραση της θερμοκρασίας στη σταθερά της ταχύτητας να εκφράζεται ικανοποιητικά μέσω της εξίσωσης Arrhenius. Συγκεκριμένα, για τον τοματοπολτό οι Barreiro *et al.* (1997) υπολόγισαν πειραματικά τις κινητικές υποβάθμισης όλων των παραμέτρων του χρώματος που προαναφέρθηκαν, δείχνοντας ότι ακολουθούν κινητική αντίδρασης υποβάθμισης πρώτης τάξης εκτός από την παράμετρο ΔE η οποία ακολουθεί κινητική μηδενικής τάξης. Η παράμετρος L περιγράφεται με δύο φάσεις (διαφορετικές κλίσεις στο διάγραμμα $\ln(L) - \text{time}$), με την πρώτη να περιγράφει τα πρώτα 20 min της θέρμανσης (Barreiro *et al.*, 1997) (Πίνακας 2.3). Οι Rodrigo *et al.* (2006) συγκρίνοντας τις παραμέτρους ΔE , και τους συνδυασμούς $L \times a \times b$ και $L \times a/b$, βρήκαν ότι αυτή που περιγράφει καλύτερα την θερμική υποβάθμιση του χρώματος σε πουρέ τομάτας, ήταν ο συνδυασμός $L \times a/b$.

Ο Heldman (2011) αναφέρει τα καροτενοειδή ως παράμετρο που συσχετίζεται με το χρώμα και για τα οποία στον τοματοχυμό δίνει τιμές k και E_a όπως αναφέρονται στον Πίνακα 2.3. Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (4) καθώς και την παρακάτω για τη μετατροπή της τιμής k σε D (Στοφόρος, 2005):

$$D_T = \frac{\ln(10)}{k_T} \quad (11)$$

βρέθηκαν οι αντίστοιχες τιμές D και z για όλες τις παραμέτρους που αναφέρονται στον Πίνακα 2.3.

Μια άλλη σημαντική παράμετρος της ποιοτικής υποβάθμισης των προϊόντων τομάτας αποτελούν και οι βιταμίνες. Συγκεκριμένα, για το α -καροτένιο αναφέρονται απώλειες 56-78% στα καρότα με διάφορες μεθόδους επεξεργασίας. Τα λαχανικά έχουν 7-11% απώλειες με το ζεμάτισμα, 43% με το βράσιμο, στο ατμό χάνουν έως και 15%, ενώ κατά την κονσερβοποίηση του χυμού καρότου αναφέρεται διατήρηση του 77% της βιταμίνης (Leskova *et al.*, 2006). Για τη βιταμίνη C (ασκορβικό οξύ), αναφέρονται απώλειες 89.12% για τις μαγειρεμένες τομάτες και 97.7% για τις αποφλοιωμένες και μαγειρεμένες τομάτες (Leskova *et al.*, 2006).

Πίνακας 2.3. Δεδομένα κινητικής ποιοτικής υποβάθμισης παραγόντων σε προϊόντα τομάτας.

Ποιοτική παράμετρος	Μέσο	k_{Tref} (min^{-1})	D_{Tref} (min)	E_a (kJ/mole)	z ($^{\circ}\text{C}$)	T_{ref} ($^{\circ}\text{C}$)	Εύρος T ($^{\circ}\text{C}$)	Αναφορά
L (1 st phase)	Τοματοπολτός	0.0093	247.59	48.12	51.04	85	70-100	Barreiro <i>et al.</i> , 1997
a/b	Τοματοπολτός	0.005517	417.40	28.70	85.56	85	70-100	Barreiro <i>et al.</i> , 1997
Καροτενοειδή	Τοματοχυμός	0.024105	95.52	88.30	35.24	130	130	Heldman, 2011
Ασκορβικό οξύ	-	0.006661	345.68	34.06	76.60	96	96	Heldman, 2011
$L \times a/b$	Πουρές τομάτας	0.189	12.18	126.06	23.47	120	100-140	Rodrigo <i>et al.</i> , 2006

2.6. Η “πλήρωση εν θερμώ” διεργασία

Όπως έχει ειπωθεί τα προϊόντα υψηλής οξύτητας ($\text{pH} < 4.6$) δέχονται ηπιότερες θερμικές επεξεργασίες από τα τρόφιμα χαμηλής οξύτητας. Επομένως, θερμοκρασίες έως 100°C , για κατάλληλο χρόνο θέρμανσης, όπως αυτός καθορίζεται επακριβώς από τους αρμόδιους φορείς, θεωρούνται επαρκείς. Μια συμβατική θερμική διεργασία για τα τρόφιμα υψηλής οξύτητας είναι η θέρμανση σε στατικά αυτόκλειστα με βραστό νερό (100°C) για ορισμένο χρονικό διάστημα. Για παράδειγμα, οι πολτοποιημένες τομάτες θερμαίνονται αφού κονσερβοποιηθούν για χρόνους που κυμαίνονται από 20-30 min για κονσέρβες $\frac{1}{2}$ κιλού ($71.5 \text{ mm} \times 117 \text{ mm}$), σε ακίνητο αυτόκλειστο σε θερμοκρασία 100°C (Rodrigo *et al.*, 1990). Το πρόβλημα με αυτή τη διεργασία είναι ότι καταναλώνει σημαντικά ποσά ενέργειας λόγω της μεγάλης ποσότητας του απαιτούμενου ατμού, και επιφέρει μειωμένη παραγωγή. Επιπλέον, τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του προϊόντος, είναι αρκετά υποβαθμισμένα.

Μια εναλλακτική μέθοδος είναι η “πλήρωση εν θερμώ” διεργασία (Hot-Fill-Hold-Cool), η οποία εφαρμόζεται τις τελευταίες δεκαετίες με επιτυχία σε όξινα τρόφιμα όπως πουρές φρούτων, τοματοχυμό, πουρέ και πολτό τομάτας (Sandoval *et al.*, 1994; Rodrigo *et al.*, 1990), ενώ τα τελευταία χρόνια εφαρμόζεται σε μεγάλο βαθμό και στη βιομηχανία των αναψυκτικών (χυμοί φρούτων και λαχανικών, ελαφρά αναψυκτικά, ανθρακούχο ενισχυμένα νερά, και τσάι) (Hariyadi, 2013). Αυτή η μέθοδος επεξεργασίας υπόσχεται καλύτερη ποιότητα προϊόντος με λιγότερα ενεργειακά κόστη, ενώ και η διαδικασία παραγωγής είναι απλή.

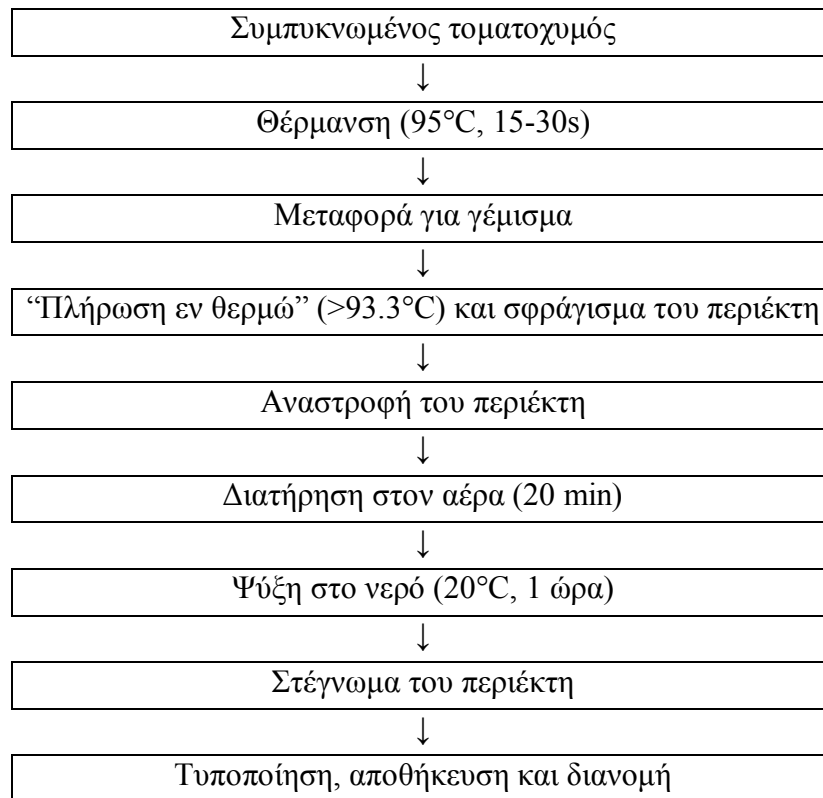
Συνοπτικά, με τη μέθοδο αυτή το τρόφιμο θερμαίνεται μέχρι μια ορισμένη θερμοκρασία και στη συνέχεια εισάγεται θερμό στον περιέκτη, με θερμοκρασίες μεγαλύτερες

από 85°C και ιδανικά μεταξύ 90-95°C, ακολουθεί το άμεσο σφράγισμα του περιέκτη, αναποδογύρισμα του περιέκτη και διατήρηση για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα που κυμαίνεται από 2-3 min στη βιομηχανία των αναψυκτικών (Hariyadi, 2013), ή έως και 20 min στην παραγωγή τοματοπολτού, ενώ ακολουθεί η ψύξη του περιέκτη σε κρύο νερό. Μετά το κλείσιμο του περιέκτη, η ψύξη του προϊόντος δημιουργεί κενό μέσα στον περιέκτη παρέχοντας αναερόβιο περιβάλλον και εμποδίζοντας με αυτόν τον τρόπο την αερόβια μικροβιακή ανάπτυξη, αλλά ταυτόχρονα και σε συνδυασμό με τη μεταλλική, τη γυάλινη και τελευταία την PET συσκευασία, που αποτελούν καλούς παρεμποδιστές του οξυγόνου, εμποδίζει την οξείδωση της βιταμίνης C (Hariyadi, 2013). Στο Σχήμα 2.5 παρουσιάζονται αναλυτικά τα στάδια της “πλήρωση εν θερμώ” διεργασίας.

Στην “πλήρωση εν θερμώ” διεργασία η θερμοκρασία γεμίσματος (T_{IT}) αποτελεί το πιο κρίσιμο σημείο της διεργασίας καθώς αν η θερμοκρασία μετά τη θέρμανση πέσει κάτω από την προτεινόμενη, θα επέλθει υποεπεξεργασία του προϊόντος και κατ’ επέκταση μείωση της διάρκειας ζωής του, ενώ ενέχονται και πιθανοί κίνδυνοι ασφάλειας. Για αυτό το λόγο η θερμοκρασία κατά το προηγούμενο στάδιο πριν το γέμισμα πρέπει να ανέβει τουλάχιστον 5-10°C πάνω από τη θερμοκρασία γεμίσματος για να προλάβει να εισαχθεί το προϊόν στον περιέκτη στη σωστή θερμοκρασία. Για παράδειγμα, στην παραγωγή αναψυκτικών με αυτή τη μέθοδο, η θερμοκρασία του προϊόντος ανεβαίνει στους 90-95°C, θερμοκρασία όπου κρατείται για 15-30s, και κατόπιν εισάγεται θερμό στη συσκευασία σε θερμοκρασίες 82-85°C (Hariyadi 2013). Για αυτή τη διεργασία και την επεξεργασία των φρούτων με $pH < 4.0$, ο NCA (1968) προτείνει θερμοκρασίες γεμίσματος μεγαλύτερες από 85°C, σφράγισμα του περιέκτη και εμφύσηση αυτού σε νερό ή ατμό θερμοκρασίας 88°C, πριν την ψύξη. Όμως αυτή η μέθοδος δεν πέτυχε όταν χρησιμοποιήθηκε σε μικρά κονσερβοποιία στην Ινδία, γιατί μεσολαβούσε ένα διάστημα 10-30 min από το σφράγισμα του περιέκτη μέχρι την επεξεργασία στον ατμό (Silva and Silva., 1997). Στην παραγωγή τοματοχυμού, ο χυμός θερμαίνεται στους 93.33-96.11°C (200-205°F), το γέμισμα γίνεται σε θερμοκρασίες 91-93°C, με αναστροφή της κονσέρβας, διατήρηση για 3 min, και ψύξη σε νερό. Όμως σύμφωνα με τον Gould (1992), αυτή η μέθοδος δεν επαρκεί για να εμποδίσει την αλλοίωση του τοματοχυμού ειδικά όταν το $pH > 4.35$ και δεν προτείνεται. Οι Sandoval *et al.* (1994) εξετάζοντας τη μέθοδο αυτή για παραγωγή τοματοπολτού σε γυάλινα βάζα διαστάσεων 200, 500, 4000 cm³, και θερμοκρασίες γεμίσματος 85, 90, 92, 94, 95°C με διατήρηση στον αέρα μετά την πλήρωση και το σφράγισμα, πρότειναν

ελάχιστες θερμοκρασίες γεμίσματος για να επιτευχθεί η απαιτούμενη τιμή F, τους 94, 92 και 90°C για τα βάζα των 200, 500 και 4000 cm³ αντίστοιχα.

Από τα παραπάνω γίνονται φανερές κάποιες πρακτικές δυσκολίες που παρουσιάζονται κατά την εφαρμογή της διεργασίας, καθώς για τη σωστή εφαρμογή αυτής είναι απαραίτητο να λαμβάνει κανείς υπόψη του, κατά κύριο λόγο το pH του προϊόντος και το μέγεθος του περιέκτη αλλά και το αρχικό μικροβιακό φορτίο και το συνολικό συντελεστή μεταφορά θερμότητας, U_o (γυάλινο βάζο ή μεταλλικός περιέκτης). Όλοι αυτοί οι παράγοντες καθορίζουν την κατάλληλη θερμοκρασία γεμίσματος και τον χρόνο διατήρησης της κονσέρβας στον αέρα πριν την ψύξη στο νερό.



Σχήμα 2.5. Τα στάδια της “πλήρωση εν θερμώ” διεργασίας για παραγωγή τοματοπολτού.

3. Η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική στη βιομηχανία τροφίμων

3.1. Εισαγωγή

Στη σημερινή εποχή, οι μηχανικοί χρησιμοποιούν όλο και περισσότερο την υπολογιστική δύναμη εργαλείων όπως η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (Computational Fluid Dynamics, CFD), για τη μοντελοποίηση βιομηχανικών διεργασιών, τη διεξαγωγή αναλύσεων σε βάθος και το σχεδιασμό πιο αποδοτικών συστημάτων. Η αυξανόμενη χρήση της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής τα τελευταία χρόνια ήταν αναπόφευκτη καθώς τα υψηλά κόστη και η κατανάλωση σε χρόνο και ενέργεια που σχετίζονται με τις πειραματικές διεργασίες, συχνά εμποδίζουν την παραγωγή ικανών και εις βάθος αποτελεσμάτων (Norton *et al.*, 2007). Επιπλέον, οι σχετικές θεωρητικές υποθέσεις, οι γενικεύσεις και οι προσεγγίσεις αποτέλεσαν περιοριστικούς παράγοντες για τα μοντέλα που χρησιμοποιούν αναλυτικές μεθόδους, για την παραγωγή επακριβών λύσεων σε προβλήματα ροής. Προσθέτοντας σε αυτούς τους περιορισμούς και την πρόοδο στη χρήση αριθμητικών λύσεων για τις εξισώσεις Navier-Stokes και την ενίσχυση της απόδοσης και δύναμης των ηλεκτρονικών υπολογιστών, γίνεται εύκολα κατανοητό γιατί η εφαρμογή της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής έχει εξελιχθεί σε μια βιώσιμη εναλλακτική λύση στη βιομηχανία τροφίμων και όχι μόνο.

Η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική εξελίσσεται σε ένα πολύ ισχυρό εργαλείο με την κάθε λύση να περιλαμβάνει τη χρήση πληθώρα μαθηματικών φυσικών μοντέλων και μεθόδων καθώς και εξαιρετική απεικόνιση και παρουσίαση αποτελεσμάτων. Σήμερα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί με μεγάλη επιτυχία για την περιγραφή πολύπλοκων φαινομένων ροής και ως αποτέλεσμα βρίσκει εφαρμογή σε πληθώρα βιομηχανικών κλάδων όπως η μηχανική διεργασιών, η αεροναυπηγική, η υδρολογία, η βιοιατρική μηχανική, οι κατασκευές, οι μεταφορές και η χημική βιομηχανία περιγράφοντας φαινόμενα και διεργασίες όπως η μεταφορά θερμότητας και μάζας, η αλληλεπίδραση στερεού-υγρού, οι χημικές αντιδράσεις, η αλλαγή φάσεων και η ακτινοβολία (Norton *et al.*, 2007).

Η διασύνδεση που υπάρχει μεταξύ Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής και τη βιομηχανία τροφίμων και ποτών είναι βαθιά, και γίνεται μέσα από διεργασίες όπως η ανάμιξη, η ξήρανση, η παστερίωση, η αποστείρωση, η ψύξη, και η κατάψυξη. Τέτοιες διεργασίες χρησιμοποιούνται σταθερά στη βιομηχανία τροφίμων για την ενίσχυση της ποιότητας, της ασφάλειας και της διάρκειας ζωής των τροφίμων και εξελίσσονται για να γίνουν πιο αποτελεσματικές. Η

εφαρμογή της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής από τους μηχανικούς τροφίμων ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του 90, κυρίως λόγω της μεγάλης βελτίωσης των υπολογιστικών συστημάτων και των λογισμικών προγραμμάτων Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής. Αυτή η διαρκής εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών και λογισμικού συστήματος οδήγησε σε μια εκθετική, μέχρι σήμερα, αύξηση στη δημοσίευση άρθρων και μελετών που σχετίζονται με εφαρμογές της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής στη βιομηχανία τροφίμων (Norton *et al.*, 2007).

3.2. Βασικές αρχές της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής

Οι κωδικοί της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής αναπτύσσονται γύρω από αριθμητικούς αλγόριθμους που επιλύουν της μη γραμμικές μερικές διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν κάθε κίνηση των ρευστών, τη μεταφορά θερμότητας και άλλα σχετικά φαινόμενα. Αν χρησιμοποιηθεί σωστά, η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική επιτρέπει την κατανόηση σε λεπτομέρεια της φυσικής που περιγράφει ένα φαινόμενο ροής. Όμως, για να επιτευχθούν ακριβείς λύσεις μέσω του λογισμικού απαιτείται καλή γνώση του προβλήματος που πρέπει να λυθεί, και την κατάλληλη ενσωμάτωση τόσο των φυσικών μοντέλων όσο και των αριθμητικών σχημάτων, είτε μέσω ενσωματωμένων κωδικών του συστήματος είτε με εισαγόμενους κώδικες από το χρήστη στο σύστημα (User Defined Functions, UDF).

3.2.1. Οι εξισώσεις στις οποίες βασίζονται οι αρχές λειτουργίας

Οι εξισώσεις που περιγράφουν τη ροή των ρευστών και τη μεταφορά θερμότητας είναι μαθηματικές εξισώσεις των νόμων διατήρησης της μηχανικής των ρευστών. Αυτοί οι νόμοι διατήρησης, όταν εφαρμόζονται σε ένα σύστημα ρευστού, συσχετίζουν το ρυθμό μεταβολής των ιδιοτήτων των ρευστών με εξωτερικές δυνάμεις και μπορούν να γραφτούν ως:

- 1) Η αρχή διατήρησης της μάζας (εξίσωση συνέχειας) που αναφέρει ότι η μάζα που εισέρχεται σε ένα ρευστό πρέπει να ισοδυναμεί με αυτή που εξέρχεται.
- 2) Η αρχή διατήρησης της ορμής (δευτερός νόμος κίνησης του Νεύτωνα) που αναφέρει ότι το άθροισμα των εξωτερικών δυνάμεων που επιδρούν σε ένα σωματίδιο ρευστού είναι ίσο με το ρυθμό μεταβολής της γραμμικής ορμής:

- 3) Η αρχή διατήρησης της ενέργειας (πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής) που αναφέρει ότι ο ρυθμός μεταβολής της ενέργειας ενός σωματιδίου ρευστού είναι ίσος με την προσθήκη θερμότητας και το παραγόμενο έργο πάνω σε αυτό το σωματίδιο.

Ενσωματώνοντας αυτούς τους νόμους συντήρησης σε διακριτές χωρικές περιοχές στην περιοχή ροής, είναι πιθανό να επιτευχθεί μια συστηματική καταγραφή των αλλαγών που συμβαίνουν στη μάζα, την ενέργεια και την ορμή καθώς το ρευστό διέρχεται τα όρια της περιοχής. Οι εξισώσεις της κίνησης του ρευστού αναφέρονται ως εξισώσεις των Navier-Stokes και γράφονται ως

Εξίσωση διατήρησης της μάζας:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_j) = 0 \quad (12)$$

Εξίσωση διατήρησης της ορμής:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-p \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) + \rho g_i \quad (13)$$

Εξίσωση διατήρησης της ενέργειας:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho C_a T) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j C_a T) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = s_T \quad (14)$$

Από μόνες τους, οι εξισώσεις Navier-Stokes έχουν περιορισμένη εφαρμογή σε πολλές περιοχές της μηχανικής τροφίμων. Αυτό σημαίνει ότι, πρέπει να ληφθούν υπόψη στην προσομοίωση και οι επιπρόσθετες διεργασίες που παίζουν κυρίαρχο ρόλο στη δυναμική ενός συστήματος. Σε αυτές τις περιπτώσεις οι κυρίαρχες εξισώσεις ίσως χρειαστεί να ενισχυθούν

με επιπρόσθετες προσεγγίσεις και φυσικά μοντέλα για την πλήρη περιγραφή του συστήματος. Σημαντικά φυσικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται συχνά σε εφαρμογές της μηχανικής τροφίμων περιλαμβάνουν τα μοντέλα τύρβης, τα πορώδη μέσα, τα πολυφασικά μοντέλα, και τα μοντέλα μη Νευτώνιων ρευστών (Norton *et al.*, 2007).

3.2.2. Αριθμητική ανάλυση

Μετά την επιλογή του κατάλληλου μαθηματικού μοντέλου, πρέπει να γίνει και η σωστή επιλογή της μεθόδου διακριτοποίησης, δηλαδή μιας μεθόδου για την προσέγγιση των διαφορικών εξισώσεων μέσω ενός συστήματος αλγεβρικών εξισώσεων για τις εξεταζόμενες μεταβλητές, σε συγκεκριμένες διακριτές περιοχές στο χώρο και στο χρόνο. Από τις πολλές τεχνικές που υπάρχουν, τρεις είναι οι πιο σημαντικές και περιλαμβάνουν α) τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, β) τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και γ) τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων. Αν και οι τρεις τεχνικές παράγουν το ίδιο αποτέλεσμα σε υψηλής ανάλυσης πλέγματα, το εύρος των κατάλληλων προβλημάτων που λύνονται με την κάθε τεχνική είναι διαφορετικό (Norton *et al.*, 2007).

Η τεχνική των πεπερασμένων διαφορών έχει περιορισμένη χρήση σε πολλά προβλήματα ροής λόγω των δυσκολιών τους στη διαχείριση πολύπλοκων γεωμετριών. Τα πεπερασμένα στοιχεία λειτουργούν καλά σε κάποιες εξισώσεις, αλλά είναι περιορισμένη η ανάπτυξη προγραμμάτων που να βασίζονται σε αυτήν την τεχνική πιθανότητα λόγω της πολυπλοκότητας τους. Η πολυπλοκότητα των πεπερασμένων στοιχείων εξαλείφεται με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων όγκων. Η ευκολία, στην κατανόηση, τον προγραμματισμό, και την ευελιξία των πεπερασμένων όγκων την καθιστά την κυρίαρχη μέθοδο που χρησιμοποιείται στην Υπολογιστική Ρευστοδυναμική. Άλλες προσεγγίσεις που έχουν αναπτυχθεί και αποκτούν αυξημένο ενδιαφέρον τελευταία (Sardi and Yanniotis, 2007) περιλαμβάνουν τα οριακά στοιχεία (boundary elements) (Puri and Anantheswaran, 1993), τη μέθοδο lattice-gas cellular automata και τη lattice Boltzman (Wolf-Gladrow, 2000).

3.3. Βελτίωση της ακρίβειας και εξάλειψη του σφάλματος στην Υπολογιστική Ρευστοδυναμική

Συχνά, οι λεπτομέρειες των εξισώσεων Navier-Stokes εισέρχονται με γενικές υποθέσεις και φτωχές τεχνικές μοντελοποίησης που μπορούν να καταστρέψουν την ποιότητα

της προσομοίωσης. Όσο η χρήση και αποδοχή της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής αυξανόταν, τόσο μεγαλύτερη έμφαση δινόταν στην βελτίωση της ακρίβειας. Σήμερα, οι κωδικοί Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής προσφέρουν πληθώρα εργαλείων που ανταποκρίνονται καλύτερα στις ανάγκες της βιομηχανίας τροφίμων προσφέροντας μεγαλύτερη ακρίβεια. Τέτοια μοντέλα περιλαμβάνουν μεγάλο εύρος σχημάτων διακριτοποίησης, τυρβωδών μοντέλων, και λειτουργίες που αφορούν το σχηματισμό του πλέγματος όπως αδόμητο πλέγμα (unstructured mesh) και ολισθηρό πλέγμα (sliding mesh) (Norton *et al.*, 2007).

Μια τυπική ανάλυση Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής αποτελείται από τη δημιουργία της γεωμετρίας, διαιρώντας τη σε μικρά στοιχεία (πλέγμα) για το σχηματισμό της υπολογιστικής γεωμετρίας, διακριτοποιώντας τις εξισώσεις και λύνοντας με τα κατάλληλα αριθμητικά σχήματα (Boz *et al.*, 2014). Μια μεταβλητή που προσδιορίζεται όπως η θερμοκρασία, σε ένα συγκεκριμένο σημείο στην περιοχή υπολογισμού, προβλέπεται με τη χρήση επαναληπτικών διαδικασιών μέχρι η λύση να φτάσει ένα προηγουμένως ορισμένο κριτήριο σύγκλισης και μέσα από το μέγεθος του χρονικού βήματος, Δt (από το t στο $t+\Delta t$). Συνεπώς, όλοι οι παράμετροι μοντελοποίησης (μέγεθος πλέγματος, χρονικό βήμα, κριτήριο σύγκλισης) συνεισφέρουν στην επιτυχία μιας λύσης με χρήση Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής. Η ακρίβεια μιας λύσης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής γενικά βελτιώνεται με την αύξηση του αριθμού των στοιχείων του πλέγματος (Boz *et al.*, 2014). Ως γενικός κανόνας δηλαδή, η αύξηση του αριθμού των στοιχείων στη γεωμετρία υπολογισμού πραγματοποιείται μέχρι να επιτευχθεί μια λύση με ανεξαρτησία πλέγματος. Αυτή η αύξηση στο τέλος θα παρέχει θεωρητικά ελάχιστες διαφορές μεταξύ των λύσεων (Boz *et al.*, 2014). Παρόλα αυτά, αυτή η διαδικασία μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση του χρόνου υπολογισμού (Norton *et al.*, 2007). Λόγω των περιορισμών της υπολογιστικής δύναμης, μπορεί η αύξηση του αριθμού των στοιχείων του πλέγματος στην υπολογιστική γεωμετρία να μην είναι εφικτή και η χρήση αραιότερων πλεγμάτων να δίνει επίσης ακριβές αποτέλεσμα (Boz *et al.*, 2014).

Λάθη και αβεβαιότητες

Μια σειρά από λάθη και αβεβαιότητες συνδέεται με τη χρήση της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής. Λάθος σε μια μελέτη Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής ονομάζεται μια αναγνωρισμένη έλλειψη που δεν οφείλεται σε έλλειψη γνώσης. Τέτοια είναι:

- i) Αριθμητικό (στρογγυλοποίηση, σύγκλιση, διακριτοποίηση)
- ii) Προγραμματιστικό (bugs)
- iii) Ανθρώπινο (μη σωστή χρήση του προγράμματος)

Αβεβαιότητα είναι μια πιθανή έλλειψη σε μια μελέτη που οφείλεται σε έλλειψη γνώσης:

- i) Αβεβαιότητα στις παραμέτρους εισόδου εξαιτίας έλλειψης επαρκούς πληροφόρησης ή παραδοχών ως προς τη γεωμετρία, τις αρχικές/οριακές συνθήκες, τις διάφορες ιδιότητες των υλικών κτλ.
- ii) Αβεβαιότητα στο φυσικό μοντέλο λόγω ελλείψεων στη μοντελοποίηση των διάφορων φυσικών ή χημικών διαδικασιών και λανθασμένες παραδοχές για απλούστευση του προβλήματος

Τα παραπάνω λάθη και αβεβαιότητες σε μελέτες Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής παρουσιάζουν μια κατάταξη ως προς τη σημασία τους κατά τη λύση ενός προβλήματος (Versteeg and Malalasekera, 2007). Η κατάταξη τους κατά φθίνουσα σειρά ως προς τη σημαντικότητα έχει ως εξής:

Μοντελοποίηση > διακριτοποίηση > σύγκλιση > στρογγυλοποίηση

- Λάθη στρογγυλοποίησης εντοπίζονται σε πλέγματα με μεγάλους λόγους πλευρών και όταν εκτελούνται πράξεις με μεγάλους αριθμούς ίδιας τάξης μεγέθους. Αυτά διορθώνονται με έλεγχο του πλέγματος και αποφυγή τέτοιων αριθμητικών πράξεων.
- Όταν γίνεται αναφορά για σύγκλιση εννοείται ο αριθμός των επαναλήψεων που θεωρείται ανεκτός για να προσεγγίσει μια τελική λύση. Όταν μια λύση συγκλίνει η τιμή κάθε επανάληψης θα μειώνει την διαφορά της από την τιμή της προηγούμενης λύσης. Η σύγκλιση βασίζεται σε διάφορα κριτήρια που αναφέρονται ως υπόλοιπα (scaled residuals). Αυτά αποτελούνται από την συνέχεια (continuity), τις ταχύτητες στις διευθύνσεις x, y, z και την ενέργεια. Όταν πρέπει να ελεγχθεί αν υπάρχει σύγκλιση α) ελέγχεται αν αυτά τα στοιχεία παρουσιάζουν μονοτονική συμπεριφορά (πτωτική πορεία) ως προς τον αριθμό των επαναλήψεων, β) πρέπει να υπάρχει πτώση κατά τουλάχιστον 3 τάξεις μεγέθους από την αρχική λύση στην πρώτη επανάληψη γ) γίνεται έλεγχος για σύγκλιση σε συνολικά ισοζύγια δ) γίνεται πιο αυστηρό κατά 1 τάξη μεγέθους το κριτήριο σύγκλισης και ελέγχεται αν υπάρχουν διαφορές στα αποτελέσματα (Versteeg and Malalasekera, 2007).

- Τα λάθη διακριτοποίησης οφείλονται στην παράβλεψη της συνεισφοράς των όρων υψηλότερης τάξης λόγω της αποκοπής όρων (truncation) στις εξισώσεις των σειρών Taylor. Θεωρητικά, αυτό το σφάλμα μπορεί να ελεγχθεί με προσεκτικό σχεδιασμό του πλέγματος, και ελαχιστοποιείται με τη χρήση προοδευτικά μικρότερου χρονικού βήματος και μεγέθους πλέγματος (Versteeg and Malalasekera, 2007).

Επαλήθευση (verification) και πιστοποίηση (validation)

Είναι γενικά παραδεκτό ότι τα σφάλματα και οι αβεβαιότητες είναι αναπόφευκτα κομμάτι της αριθμητικής επεξεργασίας με χρήση Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής. Γι' αυτό είναι αναγκαίο να αναπτυχθούν αυστηρές μέθοδοι για την ποσοτικοποίηση του επιπέδου εμπιστοσύνης στα αποτελέσματα. Οι όροι που έχουν εδραιωθεί και περιγράφουν καλύτερα την πρακτική που ακολουθείται είναι:

- 1) Η επαλήθευση (verification): Μέσω αυτής της διαδικασίας ποσοτικοποιείται το σφάλμα που οφείλεται σε λάθη στρογγυλοποίησης, σύγκλισης και διακριτοποίησης. Δηλαδή ελέγχεται αν λύνονται σωστά οι εξισώσεις.
- 2) Η πιστοποίηση (validation): Με τη διαδικασία αυτή ελέγχεται κατά πόσο το μοντέλο που χρησιμοποιείται ανταποκρίνεται στο μοντέλο που περιγράφει την πραγματική φύση του προβλήματος. Η διαδικασία ποσοτικοποιεί την αβεβαιότητα και ελέγχει αν λύνονται οι σωστές εξισώσεις (Versteeg and Malalasekera, 2007).

3.4. Τα στάδια επεξεργασίας για την επίλυση ενός προβλήματος με τη χρήση Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής

Η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική περιλαμβάνει 3 στάδια: α) Την προεπεξεργασία β) την μοντελοποίηση και επίλυση και γ) τη μετεπεξεργασία. Η προεπεξεργασία περιλαμβάνει την κατασκευή της γεωμετρίας του συστήματος (σχήμα, μέγεθος, δισδιάστατη ή τρισδιάστατη απεικόνιση ανάλογα με την περίπτωση για απλοποίηση ενός προβλήματος με χρήση συμμετρίας) που μελετάται και την κατασκευή του πλέγματος (στοιχεία πλέγματος που συνθέτουν τον όγκο της γεωμετρίας, π.χ., τετράεδρα, εξάεδρα, πυραμίδες, πρίσματα). Ο αριθμός και ο τύπος των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν είναι καθοριστικής σημασίας για την ακριβή και ορθή λύση του προβλήματος. Κατά τη μοντελοποίηση και επίλυση πρέπει να

επιλεγούν τα μεγέθη που πρόκειται να υπολογιστούν (θερμοκρασία, ταχύτητα, πίεση, συγκέντρωση), να οριστούν οι φυσικές ιδιότητες των υλικών (πυκνότητα, ιξώδες, αγωγιμότητα, θερμική διαχυτότητα κλπ), οι εξισώσεις μεταφοράς, οι αρχικές και οριακές συνθήκες καθώς και επιπρόσθετα μοντέλα ανάλογα με τη φύση του προβλήματος. Τέλος, στη μετεπεξεργασία αφού γίνει επίλυση του προβλήματος γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων με τη χρήση γραφημάτων πλέγματος, ισοϋψών και ανυσμάτων, γραμμών ροής, διαγραμμάτων XY, και οπτικών μέσων όπως βίντεο (Norton *et al.*, 2007) (Σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1. Τα στάδια ανάλυσης ενός προβλήματος Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής.

3.5. Εφαρμογές της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής στη βιομηχανία τροφίμων

Γενικά, οι εφαρμογές της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής στην βιομηχανία τροφίμων μπορεί να χωριστεί σε δύο κατηγορίες: α) οι εφαρμογές σε πεδία ροής και β) οι εφαρμογές με συνδυασμό πεδίου ροής και μεταφοράς θερμότητας ή/και μάζας (Norton *et al.*, 2007).

Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τις απλούστερες εφαρμογές καθώς η προσομοίωση των πεδίων ροής δεν απαιτεί την επίλυση εξισώσεων που αφορούν τη μεταφορά θερμότητας και μάζας. Αναφορικά, τέτοιες εφαρμογές περιλαμβάνουν τη μοντελοποίηση συστημάτων εξαερισμού στις βιομηχανίες τροφίμων για τον περιορισμό του κινδύνου από αερόβιους μικροοργανισμούς, τη μοντελοποίηση του πεδίου ροής σε περιστρεφόμενες δεξαμενές και σε ακίνητους αναμίκτης (Norton *et al.*, 2007).

Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει την προσομοίωση πιο πολύπλοκων διεργασιών όπως το ψήσιμο, αποξήρανση, εμπορική αποστείρωση, παστερίωση, εναλλάκτες θερμότητας, ψύξη και κατάψυξη. Από αυτές ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον, τα τελευταία χρόνια παρουσιάζουν οι τρεις πρώτες (Yanniotis and Stoforos, 2014).

Το ψήσιμο τροφίμων όπως π.χ., το ψωμί είναι μια πολύπλοκη διεργασία όπου η θερμότητα μεταφέρεται από τα μεταλλικά τοιχώματα του ταψιού στην επιφάνεια του τρόφιμου με αγωγή, μέσω του θερμού αέρα με συναγωγή και με ακτινοβολία από τα μεταλλικά θερμαντικά μέσα. Η θερμότητα μεταφέρεται στο εσωτερικό του ψωμιού με αγωγή, ενώ ακολουθεί ένας κύκλος εξάτμισης-συμπύκνωσης του νερού. Πέρα από αυτά, άλλα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά το ψήσιμο είναι και η ζελατινοποίηση αμύλου, η αποσταθεροποίηση πρωτεϊνών, αντιδράσεις καστανώσης και σχηματισμός κρούστας. Αν ο μηχανισμός της εξάτμισης-συμπύκνωσης αν δεν συμπεριληφθεί στο μοντέλο προσομοίωσης οι θερμοκρασίες που προβλέπονται από την προσομοίωση είναι πολύ μεγαλύτερες ($>100^{\circ}\text{C}$) σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί κατάλληλα αριθμητικά μοντέλα που προβλέπουν τη μεταφορά υγρασίας και τη διαστολή του όγκου και κατά συνέπεια καλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα (Yanniotis and Stoforos, 2014).

Στην εμπορική αποστείρωση, αυτό που έχει σημασία είναι ο εντοπισμός του κρίσιμου σημείου, το σημείο στην κονσέρβα το οποίο δέχεται τη λιγότερη θερμότητα, και να εξασφαλιστεί ότι το ο χρόνος θέρμανσης για αυτό το σημείο θα είναι αρκετός για να επιφέρει την απαιτούμενη καταστροφή των μικροοργανισμών. Για απλές περιπτώσεις στερεών

τροφίμων όπου το τρόφιμο θερμαίνεται με αγωγή και το κρίσιμο σημείο ταυτίζεται ή είναι πολύ κοντά στο γεωμετρικό κέντρο του περιέκτη, ο απαιτούμενος χρόνος θέρμανσης για να επιτευχθεί εμπορική κονσερβοποίηση μπορεί να προσεγγιστεί με αναλυτικές μεθόδους. Έχει γίνει και χρήση αριθμητικών μεθόδων για τέτοιες περιπτώσεις, με τις περισσότερες να προσανατολίζονται σε στερεά ή υψηλού ιξώδους τρόφιμα όπως πουρές και συμπυκνώματα για τα οποία συνήθως γίνεται η υπόθεση ότι η μεταφορά θερμότητας γίνεται με αγωγή. Μια από τις πρώτες εφαρμογές αριθμητικών μεθόδων στη θερμική διεργασία των τροφίμων ήταν και αυτή των Teixeira *et al.* (1969), οι οποίοι χρησιμοποίησαν την αριθμητική μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Άλλα παραδείγματα που σχετίζονται άμεσα και με την παρούσα ερευνητική εργασία είναι η μελέτη των Sandoval *et al.* (1994), οι οποίοι δημιουργούν ένα πρόγραμμα γραμμένο στην υπολογιστική γλώσσα Pascal και υπολογίζουν το χρονοθερμοκρασιακό προφίλ και την ολοκληρωμένη τιμή αποστείρωσης, F_s , για μια διεργασία “πλήρωσης εν θερμώ” τοματοπολτού σε γυάλινα βάζα. Σε άλλο παράδειγμα οι Silva and Silva. (1997) αναπτύσσουν ένα πρόγραμμα σε γλώσσα Pascal και με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών προσομοιώνουν την “πλήρωση εν θερμώ” διεργασία για παραγωγή πουρέ φρούτων, υπολογίζοντας επίσης την ολοκληρωμένη τιμή αποστείρωσης, F_s . Ένα πιο πρόσφατο παράδειγμα επιτυχούς προσομοίωσης θερμικής διεργασίας είναι και η μέθοδος παστερίωσης sous-vide καρότων για εστιατόρια (Hong *et al.*, 2014).

Η προσομοίωση εμπορικής αποστείρωσης υγρών τροφίμων συνιστά ένα πιο δύσκολο πρόβλημα καθώς η θερμότητα μεταφέρεται στην κονσέρβα με φυσική συναγωγή. Η κίνηση του ρευστού οφείλεται στις δυνάμεις άνωσης (buoyancy forces), οπότε η ταχύτητα στις εξισώσεις ορμής πρέπει να ληφθεί υπόψη και να λυθεί ταυτόχρονα με τη θερμοκρασία στην εξίσωση ενέργειας, για τον υπολογισμό του χρονοθερμοκρασιακού προφίλ, του προφίλ της ταχύτητας και του ψυχρότερου σημείου. Επιτυχείς προσομοιώσεις σε προβλήματα τέτοιας φύσης, υπάρχουν αρκετές στη βιβλιογραφία. Οι Yang *et al.* (1997) προσομοίωσαν τη θέρμανση με φυσική συναγωγή διαλυμάτων αμύλου σε κυλινδρικούς στατικούς περιέκτες. Οι Ghani *et al.* (1999a,b) προέβλεψαν τόσο το θερμοκρασιακό προφίλ, το προφίλ ταχύτητας όσο και τη μικροβιακή καταστροφή σε κονσερβοποιημένα υγρά τρόφιμα. Σε άλλες μελέτες οι Ghani *et al.* (2002) ανέλυσαν τη θερμική καταστροφή της βιταμίνης C σε ασκούς τροφίμων, τον υπολογισμό του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας σε διαλύματα καρβόξυλ-μέθυλ-σελουλόζης (CMC) σε κυλινδρικούς περιέκτες (Kannan *et al.*, 2008), την παστερίωση μπύρας

(Augusto *et al.*, 2010) ή γάλακτος (Paul *et al.*, 2011). Οι Varna and Kannan (2005) αναφέρουν ότι κυλινδρικές γεωμετρίες θερμαίνονταν ταχύτερα όταν αποστειρώνονταν σε οριζόντια θέση.

Άλλες περιπτώσεις εμπορικής αποστείρωσης που έχουν προσομοιωθεί με επιτυχία με τη χρήση Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής είναι υγρά τρόφιμα που περιέχουν στερεά σωματίδια. Σε αυτές τις εφαρμογές, το μέγεθος και το σχήμα των σωματιδίων όπως και ο προσανατολισμός, η διάταξη και η πυκνότητα τους μέσα στο ρευστό είναι σημαντικοί παράμετροι καθώς επηρεάζουν την κίνηση του ρευστού και άρα τη μεταφορά θερμότητας από το ρευστό στα σωματίδια, με αποτέλεσμα τη μετακίνηση του κρίσιμου σημείου του προϊόντος, η θέση του οποίου σε αυτές τις περιπτώσεις μπορεί να κυμανθεί από 10-15% του ύψους του περιέκτη από το κάτω μέρος, για προϊόντα όπως σπαράγγια σε άλμη (Dimou and Yanniotis, 2011) και ροδάκινα σε σιρόπι (Dimou *et al.*, 2011), ελιές σε άλμη (Dimou *et al.*, 2013) ενώ μπορεί να φτάσει στο 30-35% του ύψους του περιέκτη από το κάτω μέρος για ανανά σε φέτες (Ghani and Farid, 2006).

4. Θεωρητικό υπόβαθρο

4.1. Μεταφορά θερμότητας με αγωγή σε μη σταθερή κατάσταση

4.1.1. Αναλυτική μέθοδος επίλυσης

Όταν ένα στερεό σώμα όπως είναι μια κονσέρβα που περιέχει τοματοπολτό, εμβαπτίζεται σε βραστό νερό τότε η κατανομή της θερμοκρασίας μέσα στο στερεό αρχίζει να μεταβάλλεται με το χρόνο, και άρα έχουμε μια μη σταθερή κατάσταση. Η μεταφορά θερμότητας από το περιβάλλον στο εσωτερικό του σώματος θεωρείται ότι γίνεται μόνο με αγωγή, καθώς ο τοματοπολτός διπλής ή τριπλής συμπύκνωσης μπορεί να θεωρηθεί στερεό ή πολύ υψηλού ιξώδους τρόφιμο, ενώ η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή θεωρείται αμελητέα.

Οι συνθήκες θέρμανσης του υπό εξέταση προβλήματος παρουσιάζουν συμμετρία, δηλαδή ο κύλινδρος θεωρείται αρχικά ότι έχει ομοιόμορφη θερμοκρασία σε όλο του τον όγκο. Συνεπώς, η μεταφορά θερμότητας με αγωγή πραγματοποιείται μόνο ως προς την ακτινική διεύθυνση r και την αξονική διεύθυνση x , και το πρόβλημα απλοποιείται στις δύο διαστάσεις. Επίσης, δεν υπάρχει κάποια πρόσθετη πηγή θέρμανσης στο εσωτερικό του σώματος, και οι θερμοφυσικές ιδιότητες του σώματος, η θερμική αγωγιμότητα, η ειδική θερμότητα και η πυκνότητα λαμβάνονται ως σταθερές. Με αυτές τις παραδοχές, το πρόβλημα απλοποιείται και για να υπολογιστεί η κατανομή της θερμοκρασίας σε κάθε σημείο του πεπερασμένου κυλίνδρου σε μη σταθερή κατάσταση πρέπει να επιλυθεί η εξίσωση της ενέργειας για αυτό το σώμα. Εφαρμόζοντας την αρχή διατήρησης της ενέργειας για ένα δισδιάστατο κυλινδρικό σώμα γράφεται η ακόλουθη εξίσωση (Carslaw and Jaeger, 1959):

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (15)$$

όπου

$$a = \frac{k}{\rho c_p} \quad (16)$$

και

- a , ο συντελεστής θερμικής διαχυτότητας του σώματος
- k , ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του σώματος
- ρ , η πυκνότητα του σώματος
- C_p , η ειδική θερμότητα του σώματος
- T η θερμοκρασία του σώματος
- r η ακτινική διεύθυνση
- x η αξονική διεύθυνση
- t ο χρόνος

Ένας μεταλλικός περιέκτης με ύψος L και ακτίνα R θεωρείται ένας πεπερασμένος κύλινδρος ο οποίος δημιουργείται από την τομή ενός άπειρου κυλίνδρου με ακτίνα R και μιας άπειρης πλάκας με πάχος ίσο με το ύψος L του περιέκτη. Στην περίπτωση αυτή η αδιάστατη θερμοκρασία Y για κάθε σημείο μέσα στην κονσέρβα θα δίνεται από το γινόμενο των αντίστοιχων αδιάστατων θερμοκρασιών Y των άπειρων σωμάτων η τομή των οποίων συνθέτει το πεπερασμένο σώμα σύμφωνα με τον κανόνα του Newman για τις πεπερασμένες γεωμετρίες (Newman, 1931):

$$Y_{can} = \frac{T_{\infty} - T(x,t)}{T_{\infty} - T_0} = Y_{finite\ cylinder} = Y_{infinite\ slab} \times Y_{infinite\ cylinder} \quad (17)$$

Παρακάτω, η αναλυτική λύση του προβλήματος δισδιάστατης μεταφοράς θερμότητας με αγωγή σε μη σταθερή κατάσταση, αναλύεται στη λύση για την άπειρη πλάκα και για τον άπειρο κύλινδρο.

Άπειρη πλάκα

Μια άπειρη πλάκα θα έχει πάχος L και οι άλλες 2 διαστάσεις θα εκτείνονται στο άπειρο έτσι ώστε η μεταφορά θερμότητας από αυτές τις πλευρές να μπορεί να αγνοηθεί. Η πλάκα θα έχει σταθερή αρχική θερμοκρασία T_0 σε όλο της τον όγκο και σε χρόνο μηδέν ($t=0$) εκτίθεται σε μια θερμοκρασία περιβάλλοντος T_{∞} . Η κατανομή της θερμοκρασίας σε κάθε σημείο της

πλάκας δηλαδή μια έκφραση για $T(x, t)$ όπου x είναι η απόσταση από το κέντρο της πλάκας θα περιγράφεται από τις παρακάτω διαφορικές εξισώσεις σε καρτεσιανές συντεταγμένες:

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (18)$$

Με τις ακόλουθες αρχικές και οριακές συνθήκες:

Αρχικές συνθήκες:

$$T(x, t = 0) = T_0 = T_{IT} = \text{constant} \quad (19)$$

Δηλαδή, η αρχική κατανομή της θερμοκρασίας στην πλάκα είναι ομοιόμορφη, οπότε όλα τα εσωτερικά σημεία κατά την έναρξη της θέρμανσης θα έχουν αρχική θερμοκρασία ίση με T_0 ή T_{IT} .

Οριακές συνθήκες:

$$k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0 \quad (20)$$

όπου δείχνει συμμετρία στο κεντρικό άξονα και

$$T\left(x = \frac{L}{2}, t\right) = T_\infty = T_{RT} = \text{constant} \quad (21)$$

όπου δείχνει άμεση ισορροπία μεταξύ της επιφάνειας του σώματος και της θερμοκρασίας του μέσου (που σημαίνει άπειρο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, h , μεταξύ του μέσου θέρμανσης ή ψύξης και της στερεής επιφάνειας).

Μια άλλη έκφραση της παραπάνω πρότασης είναι μέσω του αριθμού Biot, Bi , όπου:

$$Bi = \frac{\text{εσωτερική αντίσταση}}{\text{εξωτερική αντίσταση}} = \frac{x_1/kA}{1/hA} = \frac{hx_1}{k} \quad (22)$$

Όταν $Bi > 40$ μόνο η εσωτερική αντίσταση θεωρείται σημαντική ενώ η εξωτερική είναι αμελητέα και η θερμοκρασία της επιφάνειας του στερεού είναι ίση με την αρχική θερμοκρασία του μέσου θέρμανσης ή ψύξης.

Η αδιάστατη θερμοκρασία Y για άπειρο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, h , και για τις παραπάνω αρχικές και οριακές συνθήκες θα δίνεται από την παρακάτω εξίσωση (Carslaw and Jaeger, 1959):

$$Y_{slab} = \frac{T_{\infty} - T(x,t)}{T_{\infty} - T_0} = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2(-1)^{m+1}}{\lambda_m} \cos(\lambda_m x^*) e^{-\lambda_m^2 F_0} \quad (23)$$

όπου

$$\lambda_m = (2m - 1) \frac{\pi}{2} \quad (24)$$

Η απόσταση από το κέντρο της πλάκας, x και ο χρόνος, t παρουσιάζονται στην παραπάνω εξίσωση στην αδιάστατη τους μορφή x^* και F_0 αντίστοιχα:

$$x^* = \frac{x}{L/2} \quad (25)$$

$$F_0 = \frac{at}{(L/2)^2} \quad (26)$$

Άπειρος κύλινδρος

Με τον ίδιο τρόπο η θερμοκρασιακή κατανομή σε ένα άπειρο κύλινδρο ακτίνας R και άπειρου ύψους θα δίνεται από τις κατάλληλες μερικές διαφορικές εξισώσεις σε κυλινδρικές συντεταγμένες:

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \quad (27)$$

Με τις παρακάτω αρχικές και οριακές συνθήκες:

Αρχικές συνθήκες:

$$T(r, t = 0) = T_0 = T_{IT} = constant \quad (28)$$

Οριακές συνθήκες:

$$k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0 \quad (29)$$

που δείχνει συμμετρία στον κεντρικό άξονα και

$$T(r = R, t) = T_\infty = constant \quad (30)$$

που δείχνει άμεση ισορροπία μεταξύ της κυλινδρικής επιφάνειας και της θερμοκρασίας του μέσου (άπειρος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας).

Η εξίσωση για τις παραπάνω αρχικές και οριακές συνθήκες και για άπειρο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας είναι:

$$Y_{infinite\ cylinder} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2J_0(\beta_n \frac{r}{R})}{\beta_n J_1(\beta_n)} e^{-\beta_n^2 F_0} \quad (31)$$

όπου β_n , η νιοστή θετική ρίζα της εξίσωσης:

$$J_0(\beta_n) = 0 \quad (32)$$

και

J_0 η περιοδική συνάρτηση Bessel πρώτου είδους μηδενικής τάξης

J_1 η περιοδική συνάρτηση Bessel πρώτου είδους πρώτης τάξης.

Τιμές των συναρτήσεων Bessel λαμβάνονται από πίνακες της βιβλιογραφίας (π.χ., Abramowitz and Stegun, 1974).

Ο χρόνος δίνεται επίσης στην αδιαστατη μορφή του, F_o :

$$F_o = \frac{at}{(R)^2} \quad (33)$$

Μεταβλητή θερμοκρασία μέσου

Κατά τη θερμική επεξεργασία των τροφίμων ο κύκλος της θέρμανσης ακολουθείται πάντα από ένα κύκλο ψύξης. Η μικροβιακή καταστροφή που συμβαίνει στα πρώιμα στάδια της ψύξης μπορεί να θεωρηθεί σημαντική και πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά το σχεδιασμό της θερμικής διεργασίας. Το θεώρημα του Duhamel μπορεί να εφαρμοστεί για να υπολογιστεί η κατανομή της θερμοκρασίας σε κονσέρβα με στερεό τρόφιμο αρχικά σε ομοιόμορφη θερμοκρασία, T_{IT} όπου σε τυπική θερμική διεργασία αποτελούμενη από α) θέρμανση σε σταθερή θερμοκρασία μέσου, T_{RT} για χρόνο t_h και β) ψύξη σε σταθερή θερμοκρασία μέσου, T_{CW} . Έτσι, η θερμοκρασία της κονσέρβας ως συνάρτηση του χρόνου και της θέσης δίνεται αναλυτικά ως (Flambert and Deltour, 1972):

Κύκλος θέρμανσης ($t \leq t_h$)

$$T(r, x, t)_{can} = T_{RT} + (T_{RT} - T_{IT})Y_{can}(t) \quad (34)$$

Κύκλος ψύξης ($t > t_h$)

$$T(r, x, t)_{can} = T_{CW} - (T_{RT} - T_{IT})Y_{can}(t) + (T_{RT} - T_{CW})Y_{can}(t - t_h) \quad (35)$$

4.1.2. Αριθμητική μέθοδος πεπερασμένων όγκων

Η αριθμητική λύση των πεπερασμένων όγκων για χρονικά μεταβαλλόμενες ροές βασίζεται στις εξισώσεις μεταφοράς που έχουν τη γενική μορφή (Patankar, 1980):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varphi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u\varphi) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma \frac{\partial\varphi}{\partial x}\right) + S_{\varphi} \quad (36)$$

όπου

- ρ η πυκνότητα του ρευστού
- u η ταχύτητα του ρευστού
- φ η εξαρτημένη μεταβλητή
- Γ ο συντελεστής διάχυσης
- S_{φ} ο όρος πηγής

Ο πρώτος όρος της εξίσωσης αναπαριστά το ρυθμό μεταβολής και είναι μηδέν για χρονικά σταθερές ροές. Για να επιλυθούν τα προβλήματα με χρονική μεταβολή πρέπει να διατηρηθεί αυτός ο όρος στη διαδικασία διακριτοποίησης. Η ολοκλήρωση της παραπάνω εξίσωσης για τον πεπερασμένο όγκο, γίνεται πάνω σε ένα όγκο ελέγχου (CV) και ξεκινά από την περαιτέρω ολοκλήρωση σε ένα πεπερασμένο χρονικό βήμα, Δt (Versteeg and Malalasekera, 2007).

Για χρονικά μεταβαλλόμενη τρισδιάστατη μεταφορά θερμότητας με αγωγή η εξίσωση (36) παίρνει τη μορφή της εξίσωσης (15) με επιπλέον τον όρο για τη μεταβολή της θερμοκρασίας κατά την ακτινική διάσταση x . Στην απλοποιημένη μονοδιάστατη αγωγή σε μη σταθερή κατάσταση, η εξίσωση της ενέργειας γράφεται ως:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(k \frac{\partial T}{\partial x}\right) + S \quad (37)$$

Με ολοκλήρωση της εξίσωσης (37) ως προς το χρόνο ($t, t+\Delta t$) και τον όγκο ελέγχου (CV):

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{CV} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dV dt = \int_t^{t+\Delta t} \int_{CV} \frac{\partial}{\partial x} \left[k \frac{\partial T}{\partial x} \right] dV dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_{CV} S dV dt \quad (38)$$

Η ολοκλήρωση δίνει με βάση μια ζυγισμένη παράμετρο θ τρία σχήματα διακριτοποίησης του χρόνου: Την άμεση (explicit) για τιμή 0 της παραμέτρου θ , και την έμμεση για $0 < \theta \leq 1$ που περιλαμβάνει την Crank-Nicolson ($\theta=1/2$) και την πλήρως έμμεση (fully implicit) για $\theta=1$. Η λύση που περιλαμβάνει τα άμεσα σχήματα θέτει σοβαρούς περιορισμούς στο χρονικό βήμα (Δt) που θα χρησιμοποιηθεί, εξαρτώμενο από το χωρικό διάστημα, Δx . Για να υπάρχει ικανοποιητική ακρίβεια στα αποτελέσματα πρέπει: $\Delta t < \rho c \frac{\Delta x^2}{2k}$, οπότε δε συνίσταται η χρήση της για γενικά προβλήματα με μεταβλητό χρόνο, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για απλά προβλήματα μεταφοράς θερμότητας με αγωγή με την προϋπόθεση της χρήσης κατάλληλα μικρού χρονικού βήματος. Για τη μέθοδο Crank-Nicolson ($\theta=1/2$) ο περιορισμός του χρονικού βήματος είναι ελαφρά λιγότερο περιοριστικός από αυτόν για την άμεση διακριτοποίηση του χρόνου ($\Delta t < \rho c \frac{\Delta x^2}{k}$), βασίζεται στην κεντρική διαφοροποίηση και άρα έχει ακρίβεια δεύτερης τάξης σε σχέση με το χρόνο. Αν και τα έμμεσα σχήματα δεν έχουν περιορισμούς ως προς το χρονικό βήμα, είναι σταθερά δηλαδή για κάθε μέγεθος χρονικού βήματος, η ακρίβεια τους είναι πρώτης τάξης σε σχέση με το χρόνο οπότε απαιτούνται σε κάθε περίπτωση μικρά χρονικά βήματα για να επιτευχθεί ακρίβεια στα αποτελέσματα (Versteeg and Malalasekera, 2007).

5. Υλικά και Μέθοδοι

Αρχικά, υπολογίστηκαν οι διαστάσεις του μεταλλικού περιέκτη που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία παραγωγής τοματοπολτού. Επίσης, πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική ανασκόπηση για τον προσδιορισμό των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του τοματοπολτού διπλής συμπύκνωσης. Για τον προσδιορισμό των διαστάσεων χρησιμοποιήθηκαν δύο πηγές: α) Οι διαστάσεις αναφοράς που δίνει η βιβλιογραφία και β) ο μεταλλικός περιέκτης που χρησιμοποιείται από τη ελληνική βιομηχανία παραγωγής τοματοπολτού και συγκεκριμένα από την εταιρεία Δ. Νομικός Α.Ε. Τα στοιχεία που πάρθηκαν από τον Gould (1992) συγκρινόμενα με μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε μεταλλικό περιέκτη από την εταιρεία Δ. Νομικός Α.Ε. παραπέμπουν σε μεταλλικό περιέκτη διαστάσεων 300×407 που όμως δεν ταυτίζονται. Συγκεκριμένα οι διαστάσεις του μεταλλικού περιέκτη που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση είναι:

$$L=106 \text{ mm}=0.106 \text{ m}$$

$$D=73 \text{ mm}=0.073 \text{ m}$$

5.1. Θερμοφυσικές ιδιότητες

5.1.1. Σταθερές θερμοφυσικές ιδιότητες

Οι θερμοφυσικές ιδιότητες αναφέρονται στην θερμική αγωγιμότητα k , την ειδική θερμότητα C_p , την πυκνότητα, ρ και το συντελεστή θερμικής διαχυτότητας, α , όπως ορίζεται από την εξίσωση (16), ως συνάρτηση των παραπάνω ιδιοτήτων. Οι Sandoval *et al.* (1994) υπολόγισαν τη θερμική διαχυτότητα, ίση προς $\alpha=1.59 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ αναφερόμενοι σε τοματοπολτό διπλής συμπύκνωσης (28-36% στερεά), 30.3 °Brix και pH 4. Οι Drucas and Saravacos (1985) μέτρησαν τη θερμική διαχυτότητα ίση προς $\alpha=1.42 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ με τη χρήση μιας απλοποιημένης δυναμικής (transient) μεθόδου σε τοματοπολτό 35 °Brix. Επίσης υπολόγισαν την θερμική αγωγιμότητα k , με τη μέθοδο hot plate ως $k=0.525 \text{ W/mK}$ στους 30°C και 36 °Brix ενώ έδειξαν ότι αυτή αυξάνεται με τη θερμοκρασία (0.557 W/mK στους 50°C) και την περιεκτικότητα σε νερό και μειώνεται με την περιεκτικότητα σε σάκχαρα (0.460-0.490 W/mK στους 44 °Brix). Επιπλέον, υπολόγισαν την ειδική θερμότητα, $C_p=3302 \text{ J/Kg K}$ και την πυκνότητα $\rho=1163 \text{ kg/m}^3$. Οι Aparicio *et al.* (2011) και οι Denys *et al.* (2000) δίνουν τιμές για την ειδική θερμότητα C_p στους 20°C 3800 J/Kg K και 3100 J/Kg K αντίστοιχα.

Χρησιμοποιήθηκαν επίσης πειραματικά δεδομένα από θερμική διεργασία σε κονσερβοποιημένο τοματοπολτό στο εργαστήριο της Μηχανικής Τροφίμων του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών για λόγους σύγκρισης. Χρησιμοποιήθηκαν δύο σειρές χρονοθερμοκρασιακών δεδομένων από θερμοστοιχεία που τοποθετήθηκαν στο κέντρο των περιεκτών (therm1 και therm4). Με χρήση της εξίσωσης (7) υπολογίστηκε η παράμετρος f_h και για τις 2 σειρές δεδομένων με τιμή 54.9 min και 48.2 min για τα therm1 και therm4 αντίστοιχα. Ο μέσος όρος αυτών ήταν 51.6 min. Για τον υπολογισμό του συντελεστή θερμικής διαχυτότητας, α χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω εξίσωση που συσχετίζει τις θερμοφυσικές ιδιότητες ενός προϊόντος με τις διαστάσεις του περιέκτη (Merson *et al.*, 1978):

$$\alpha = \frac{2.303}{\left(\frac{2.4048^2}{R^2} + \frac{\pi^2}{L^2}\right)f_h} \quad (39)$$

και για $R=0.0365$ m, $L=0.106$ m υπολογίστηκε $\alpha=1.42669 \times 10^{-7}$ m²/s τιμή πολύ κοντά σε αυτή που δίνουν οι Drucas and Saravacos (1985), και παραπλήσια με αυτή που δίνεται γενικά στη βιβλιογραφία (Πίνακας 5.1).

Πίνακας 5.1. Οι θερμοφυσικές ιδιότητες του τοματοπολτού

k (W/mK)	ρ (kg/m ³)	C_p (J/Kg K)	α (mm ² /s)	Αναφορά
0.546	1163	3302	0.142	Drucas and Saravacos, 1985
-	1136-1580	-	-	Gould, 1992
-	-	-	0.159	Sandoval <i>et al.</i> , 1994
-	-	3900	-	Aparicio <i>et al.</i> , 2011
-	-	3200	-	Denys <i>et al.</i> , 2000
-	-	-	0.142-0.154	Betta <i>et al.</i> , 2009
-	-	-	0.149	Choi and Okos, 1986
-	-	-	0.155	Ball, 1923
-	-	-	0.149-0.158	Falcone <i>et al.</i> , 1999; Rinaldi 2005

5.1.2. Μεταβλητές θερμοφυσικές ιδιότητες

Στον Πίνακα 5.2 αναφέρονται οι εξισώσεις που δείχνουν την εξάρτηση των θερμοφυσικών ιδιοτήτων στον τοματοπολτό από τη θερμοκρασία. Για την προσομοίωση

με την Υπολογιστική Ρευστοδυναμική με χρήση μεταβλητών θερμοφυσικών ιδιοτήτων ήταν απαραίτητος ο ορισμός του τοματοπολτού ως ρευστό σώμα, ενώ για το ιξώδες εισάχθηκε μια σταθερή μέση τιμή βάσει της βιβλιογραφίας (Πίνακας 5.2). Οι τιμές αυτές κυμαίνονται από 10-195 Pa s, ανάλογα με το ρυθμό διάτμησης γ (1-100). Για τις ανάγκες της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε μια μέση τιμή $\mu=125$ Pa s.

Πίνακας 5.2. Οι θερμοφυσικές ιδιότητες του τοματοπολτού μεταβαλλόμενες σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία

k (W/mK)	ρ (kg/m ³)	C_p (J/Kg K)	μ (Pa s)	Αναφορά
$0.0025 \times T - 0.2079$	-	-	-	Drusas and Saravacos, 1985
-	$860.79 + 2.7695 \times T - 0.0079543 \times T^2 + 5.7775 \times 10^{-6} \times T^3$	$-29433 + 292.11 \times T - 0.85818 \times T^2 + 0.00084756 \times T^3$	-	Aparicio <i>et al.</i> , 2011
-	-	-	10-100	Toki Sangyo Co., 2008
-	-	-	195	Depco, 2009
-	-	-	18.7-118	Γιαννιώτης, 2000

* Η θερμοκρασία T στις εξισώσεις είναι σε μονάδες K.

5.2. Επίλυση με τη χρήση αναλυτικών εξισώσεων

Η αξιολόγηση της αριθμητικής λύσης με τη χρήση της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής, έγινε με βάση την αναλυτική λύση. Για το σκοπό αυτό, επιλύθηκε με τη χρήση αναλυτικών εξισώσεων μια τυπική θερμική διεργασία, αποτελούμενη από ένα κύκλο θέρμανσης 70 min ($T_{\text{centre}} > 90^\circ\text{C}$), και ένα κύκλο ψύξης 60 min ($T_{\text{centre}} \approx 30^\circ\text{C}$). Αρχικά, για λόγους σύγκρισης και επαλήθευσης της ορθής επίλυσης των αναλυτικών εξισώσεων οι εξισώσεις λύθηκαν για 192 min θέρμανσης και 73 min ψύξης προσαρμοζόμενα στα διαθέσιμα εργαστηριακά πειραματικά δεδομένα για τον τοματοπολτό.

Ο τοματοπολτός θεωρήθηκε στερεό σώμα οπότε η μεταφορά θερμότητας από τα τοιχώματα του περιέκτη προς το εσωτερικό του τοματοπολτού γίνεται μόνο με αγωγή. με

τις αρχικές και οριακές συνθήκες που αναφέρονται στην ενότητα 4.1.1 (εξισώσεις (19), (20), (21), (28), (29), (30)) για άπειρη πλάκα και άπειρο κύλινδρο δηλαδή με τις παρακάτω παραδοχές:

- 1) Τα τοιχώματα του περιέκτη λαμβάνουν άμεσα τη θερμοκρασία του μέσου θέρμανσης, υπάρχει δηλαδή άπειρος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας h .
- 2) Ο περιέκτης έχει αρχική ομοιόμορφη θερμοκρασία T_{IT} σε όλη τη μάζα του.
- 3) Η ειδική θερμότητα, C_p , η θερμική αγωγιμότητα, k , η πυκνότητα και εξ' ορισμού η θερμική διαχυτότητα, α , θεωρούνται σταθερές ή η επίδραση της θερμοκρασίας και άλλων παραγόντων θεωρείται αρκετά μικρή ώστε να μπορεί να αγνοηθεί.
- 4) Ο συμπυκνωμένος ατμός διατηρεί μια σταθερή θερμοκρασία στην εξωτερική επιφάνεια του περιέκτη. Δηλαδή η θερμοκρασία του μέσου θεωρείται σταθερή κατά τη διάρκεια της διεργασίας.

Χρησιμοποιήθηκαν οι παραπάνω ορισμένες διαστάσεις του περιέκτη, η τιμή $\alpha = 1.42669 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ για το συντελεστή θερμικής διαχυτότητας, η αρχική θερμοκρασία ήταν $T_{IT} = 20^\circ\text{C}$, η θερμοκρασία του μέσου θέρμανσης $T_{RT} = 100^\circ\text{C}$ και η αντίστοιχη της ψύξης $T_{CW} = 20^\circ\text{C}$. Για την αναλυτική λύση επιλύθηκαν οι εξισώσεις (23), (31) που δίνουν την αδιάστατη θερμοκρασία Y για άπειρη πλάκα και άπειρο κύλινδρο αντίστοιχα και στη συνέχεια το γινόμενο αυτών έδωσε την αδιάστατη θερμοκρασία, Y , για τον περιέκτη (εξίσωση (17)). Η εξίσωση για την άπειρη πλάκα λύθηκε για 50 ρίζες λ_m ($m=1-50$, εξίσωση (24)) και 40 ρίζες β_n (εξίσωση (32)) για τον άπειρο κύλινδρο. Υπολογίστηκε το χρονοθερμοκρασιακό προφίλ σε τρία σημεία εντός της κονσέρβας, το γεωμετρικό κέντρο A ($x=0, y=0, z=0$) (θεωρούμενο ως το ψυχρότερο σημείο σε τρόφιμα που θερμαίνονται μόνο με αγωγή), ένα δεύτερο σημείο στο ήμισυ της ακτίνας R , B ($x=0.01825, y=0, z=0$), και ένα τρίτο σημείο στα $\frac{3}{4}$ του ύψους L , C ($x=0, y=0, z=0.0265$).

5.3. Η αριθμητική επίλυση με τη χρήση του λογισμικού προσομοίωσης

Για τις ανάγκες της προσομοίωσης της διεργασίας χρησιμοποιήθηκε ένα από τα εμπορικά λογισμικά προγράμματα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής που περιλαμβάνει:

1. Το σχεδιαστικό πακέτο *Gambit 2.3.16*.

2. Το λογισμικό προσομοίωσης *Fluent 6.3.26, 14.5* της εταιρείας *Ansys Inc., Canonsburg, Pa., U.S.A.*

Η προσομοίωση της τυπικής διεργασίας (70 min θέρμανση, 60 min ψύξη) για την επιλογή του κατάλληλου μοντέλου αριθμητικής επίλυσης, καθώς και η προσομοίωση της “πλήρωση εν θερμώ” διεργασίας έγινε σε ηλεκτρονικό υπολογιστή με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Λειτουργικό Σύστημα: Windows 7 Home Premium 64-bit 2009 service pack 1
- Επεξεργαστής AMD FX 8320 8-core, 3.50 GHz, 8 GB RAM

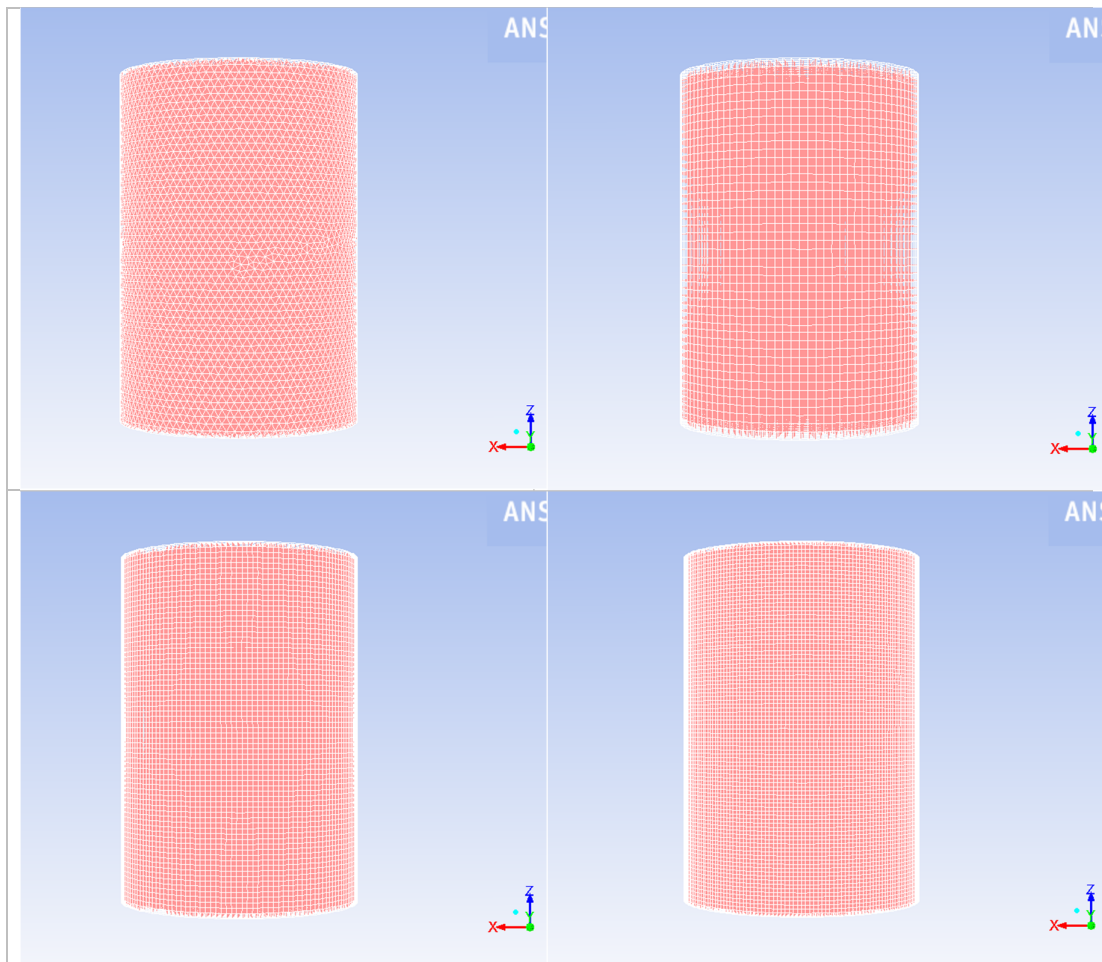
Η προσπάθεια απλοποίησης του προβλήματος σε δισδιάστατο (2D) περιβάλλον λόγω της υπόθεσης της συμμετρίας δεν απέδωσε τα αναμενόμενα, καθώς παρουσιάστηκαν σφάλματα απόκλισης των εξισώσεων ενέργειας και ροής κατά την επίλυση στο περιβάλλον του *Fluent*.

Με το *Gambit 2.3.16* σχεδιάστηκαν τέσσερις περιπτώσεις τρισδιάστατου (3D) κυλινδρικού περιέκτη με διαστάσεις $L=0.106$ m (άξονας z), ακτίνα $R=0.0365$ m (άξονες x και y), με διαφορετικά χαρακτηριστικά ποιότητας (Case A) και πυκνότητας πλέγματος (Case B-D) (Πίνακας 5.3). Το πλέγμα για τις τέσσερις περιπτώσεις απεικονίζεται στα παρακάτω Σχήματα 5.1, 5.2.

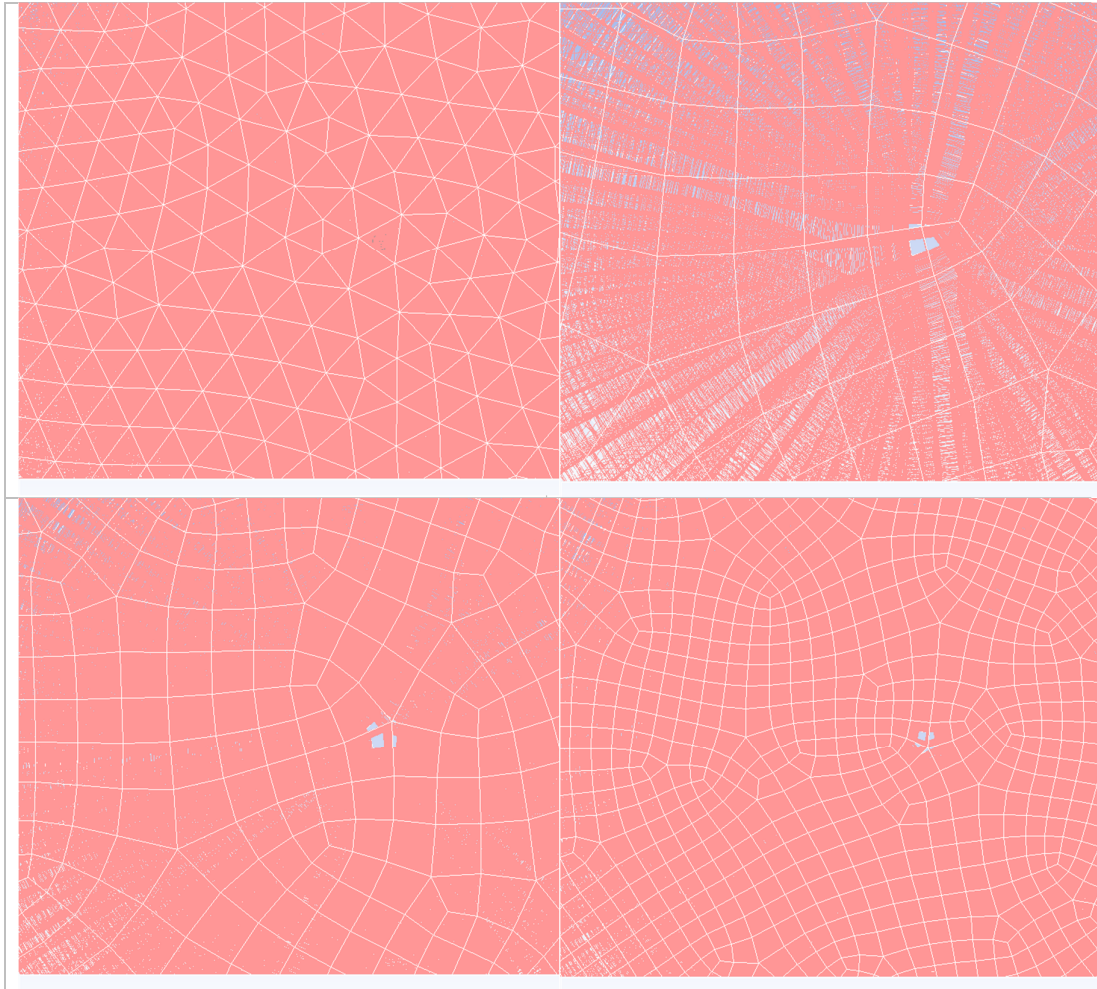
Πίνακας 5.3. Οι περιπτώσεις που σχεδιάστηκαν με το *Gambit*.

	Quality	Cells/ volumes	Interval size, (m) Δx	Shortest edge (%)	Time step (s), Δt^*
Case A	Tet/hybrid	271420	0.002293363	1.00	<36.87
Case B	Hex/wedge	40986	0.002293363	1.00	<36.87
Case C	Hex/wedge	150094	0.001490686	0.65	<15.58
Case D	Hex/wedge	320988	0.001146681	0.50	<9.22

* Περιορισμός μεγέθους χρονικού βήματος με βάση το κριτήριο διακριτοποίησης χρόνου δεύτερης τάξης (2nd order implicit method- Crank-Nicolson scheme, $\Delta t < \frac{\Delta x^2}{a}$) (Versteeg and Malalasekera, 2007).



Σχήμα 5.1. Οι τέσσερις περιπτώσεις (Case A-πάνω αριστερά, Case B-πάνω δεξιά, Case C-κάτω αριστερά, Case D-κάτω δεξιά) που σχεδιάστηκαν όπως απεικονίζονται στο πρόγραμμα Fluent.



Σχήμα 5.2. Οι τέσσερις περιπτώσεις (Case A-πάνω αριστερά, Case B-πάνω δεξιά, Case C-κάτω αριστερά, Case D-κάτω δεξιά) που σχεδιάστηκαν όπως απεικονίζονται στο πρόγραμμα Fluent από κοντινή οπτική γωνία.

Η προσομοίωση στο Fluent έγινε με τις επιλεγμένες συνθήκες: τρισδιάστατου (3D) περιβάλλοντος, διπλής ακρίβειας (double precision), γραμμικής ροής (laminar), μεταβλητού χρόνου (time unsteady), pressured-based. Ενεργοποιήθηκε η εξίσωση της ενέργειας για τον υπολογισμό της μεταβολής της θερμοκρασίας κατά τη μεταφορά θερμότητας. Ο τοματοπολτός στο εσωτερικό της γεωμετρίας ορίστηκε ως στερεό με σταθερές θερμοφυσικές ιδιότητες $k = 0.54788 \frac{W}{m \times K}$, $C_p = 3302 \frac{J}{kg \times K}$, $\rho = 1163 \text{ kg}/m^3$. Οι παραπάνω τιμές δίνουν μια τιμή $\alpha = 1.42669 \times 10^{-7} m/s^2$. Οι οριακές συνθήκες στη θέρμανση ήταν $T = 373.16 \text{ K} = 100^\circ\text{C}$ για όλα τα τοιχώματα του περιέκτη ενώ για την ψύξη $T = 293.16 \text{ K} = 20^\circ\text{C}$, με αρχική θερμοκρασία $T = 293.16 \text{ K} = 20^\circ\text{C}$ για τον

τοματοπολτό. Η επιλογή του λύτη για τη συσχέτιση πίεσης-ταχύτητας, ήταν η SIMPLE, οι επιλογές για τη χωρική διακριτοποίηση ήταν Gradiend: Green-Gauss cell based, Pressure: Standard, Momentum: 1st order upwind, Energy: 1st order upwind.

5.4. Αξιολόγηση του αριθμητικού μοντέλου

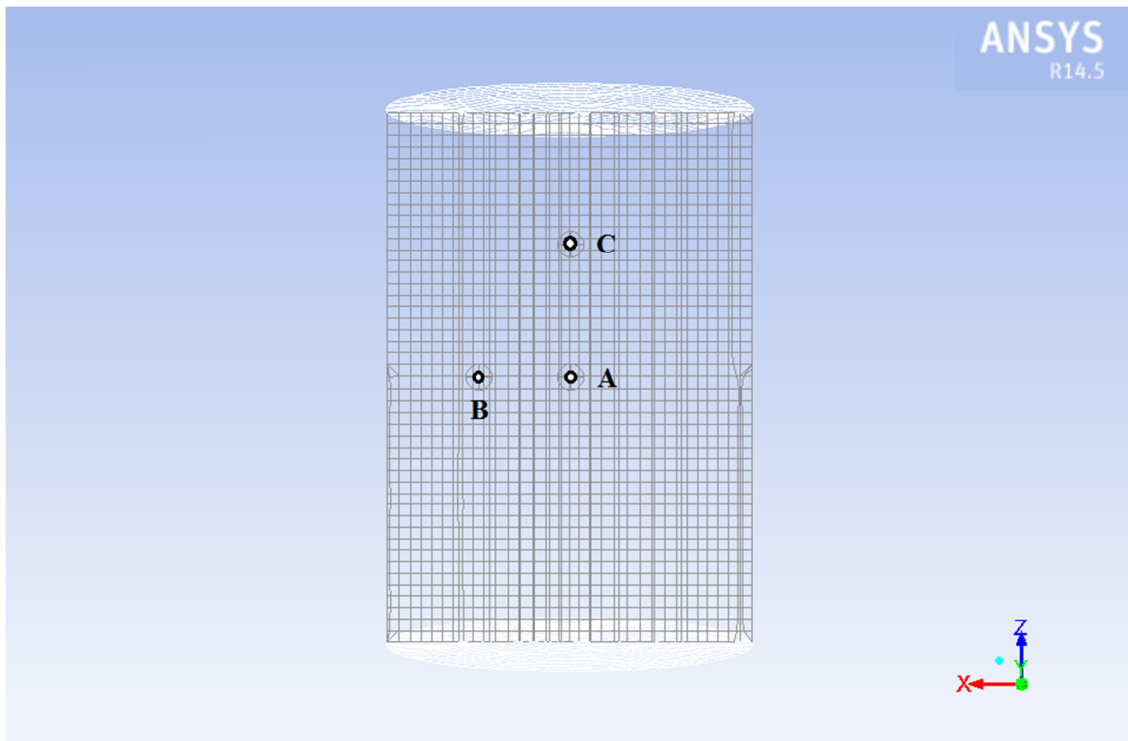
Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων υπολογίστηκαν για κάθε περίπτωση η τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγώνου του σφάλματος (Root Mean Square Error, RMSE), δηλαδή η μέση διαφορά των θερμοκρασιακών δεδομένων μεταξύ αριθμητικής και αναλυτικής λύσης για κάθε λεπτό της επεξεργασίας. Οι περιπτώσεις με τη μικρότερη τιμή RMSE ήταν οι πιο ακριβείς ως προς τη λύση.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{analytical} - T_{numerical})^2} \quad (40)$$

Για την αξιολόγηση του αριθμητικού μοντέλου με μεταβλητές θερμοφυσικές ιδιότητες χρησιμοποιήθηκε με τον ίδιο τρόπο ο όρος της τετραγωνικής ρίζας του μέσου τετραγώνου του σφάλματος για τη σύγκριση των χρονοθερμοκρασιακών προφίλ μεταξύ αριθμητικής λύσης και πειραματικών δεδομένων.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{experimental} - T_{numerical})^2} \quad (41)$$

Όπως αναφέρθηκε και πρωτύτερα η σύγκριση έγινε πέρα από το κέντρο $A (0, 0, 0)$, για το σημείο στο ήμισυ της ακτίνας R , $B (0.01825, 0, 0)$, και ένα τρίτο σημείο στα $\frac{3}{4}$ του ύψους L , $C (0, 0, 0.0265)$ (Σχήμα 5.3).



Σχήμα 5.3. Τα σημεία του περιέκτη, $A (0,0,0)$, $B (0.01825,0,0)$, $C (0,0,0.0265)$ στα οποία καταγράφηκε το χρονοθερμοκρασιακό προφίλ κατά την αριθμητική λύση.

5.5. Υπολογισμός της τιμής F της διεργασίας

Για τον υπολογισμό της τιμής F της διεργασίας γράφτηκε και εισάχθηκε στο περιβάλλον του Fluent μια Λειτουργία Ορισμένη από τον Χρήστη (User Defined Function, UDF) βασισμένη στην κλασική θερμοβακτηριολογική προσέγγιση μέσω της εξίσωσης των Ball and Olson, 1957, εξίσωση (5) της ενότητας 2. Η εξίσωση αυτή βασίζεται σε κινητική μικροβιακής απενεργοποίησης πρώτης τάξης και γραμμική εξάρτηση του λογαρίθμου του χρόνου δεκαδικής μείωσης (D) από τη θερμοκρασία.

Με βάση την παραπάνω εξίσωση μπορεί να υπολογιστεί η τιμή F της διεργασίας σε κάθε σημείο του περιέκτη για κάθε χρονική στιγμή της επεξεργασίας. Στην “πλήρωση εν θερμώ” διεργασία το ψυχρότερο ή κρίσιμο σημείο στο προϊόν υπολογίζεται ότι θα είναι σε μια ζώνη στην επιφάνεια του περιέκτη διότι το προϊόν στην αρχή της διεργασίας έχει μια ομοιόμορφη υψηλή αρχική θερμοκρασία και αρχίζει και ψύχεται στον αέρα και στη συνέχεια στο νερό, οπότε τα σημεία που θα ψύχονται ταχύτερα θα είναι αυτά στην επιφάνεια του περιέκτη, ενώ το κέντρο θα ψύχεται πιο αργά από όλα τα υπόλοιπα σημεία.

Συνεπώς, τα κρίσιμα σημεία της διεργασίας θα εντοπίζονται σε αυτήν την περιοχή. Όμως επειδή η ακριβή θέση αυτών των σημείων δεν είναι γνωστή, για μια τέτοια διεργασία η εξίσωση (6) που δίνει την ολοκληρωμένη τιμή F_s είναι η πλέον κατάλληλη για τον υπολογισμό της απαιτούμενης τιμής παστερίωσης. Ένας επιπλέον λόγος για την επιλογή της ολοκληρωμένης τιμής F είναι και το γεγονός ότι αν επιλεγθεί ένα σημείο στην επιφάνεια ως το κρίσιμο τότε το εξεταζόμενο προϊόν θα υποστεί υπερβολική θερμική επεξεργασία.

Με τη χρήση αυτής της εξίσωσης μέσα από το πρόγραμμα του Fluent υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμού της ολοκληρωμένης τιμής F_s , με ολοκλήρωση της τιμής F για όλο τον όγκο του προϊόντος μέσω της εξίσωσης (6). Για τον υπολογισμό της ολοκληρωμένης τιμής F , χρειάστηκε η εξίσωση να “σπάσει” σε δύο μέρη: Πρώτα έγινε ο υπολογισμός της τιμής $\% N(t)/N_0$ για κάθε σημείο του τρόφιμου, μέσω της παρακάτω εξίσωσης:

$$\% \frac{N(t)}{N_0} = \frac{N(t)}{N_0} \times 100 = 10^{-\frac{Fz}{D_{T_{ref}}}} \times 100 \quad (42)$$

όπου $N(t)$, ο μικροβιακός πληθυσμός σε κάθε όγκο ελέγχου ή κελί (CV) για κάθε χρονική στιγμή της διεργασίας, και N_0 ο αρχικός μικροβιακός πληθυσμός σε κάθε όγκο ελέγχου. Ζητώντας από το πρόγραμμα να υπολογίσει την παραπάνω τιμή για όλο τον όγκο της κονσέρβας και να δώσει τη μέση τιμή του όγκου (volume average), υπολογίζει ουσιαστικά το παρακάτω ολοκλήρωμα (εξίσωση (43)), που αποτελεί τη μέση $\%$ επιβίωση του μικροοργανισμού στόχου σε κάθε χρονική στιγμή της διεργασίας και για όλο τον όγκο της κονσέρβας:

$$\text{Μέση τιμή όγκου } \% \frac{N(t)}{N_0} = \frac{1}{V} \int_0^V 10^{-\frac{1}{D_{T_{ref}}} \int_0^t 10^{\frac{(T(t)-T_{ref})}{z}} dt} dV \times 100 \quad (43)$$

Ουσιαστικά το πρόγραμμα αθροίζει την N/N_0 σε κάθε κελί και την διαιρεί με τον συνολικό όγκο της κονσέρβας για να δώσει μια μέση τιμή. Η δεύτερη μαθηματική πράξη για τον υπολογισμό της ολοκληρωμένης τιμής F_s γίνεται στο Excel μέσω της παρακάτω εξίσωσης (εξίσωση (6)) που ξαναγράφεται ως:

$$F_s = D_{T_{ref}} \times \log\left(\frac{N_0}{N(t)}\right) \quad (44)$$

όπου η υπολογισμένη μέση τιμή όγκου % $N(t)/N_0$ διαιρείται με το 100 (απομάκρυνση του ποσοστού) και αντιστρέφεται ο όρος για να προκύψει η τιμή $N_0/N(t)$.

Οι απαιτούμενες ολοκληρωμένες τιμές F_s που χρησιμοποιήθηκαν από τη βιβλιογραφία για την αξιολόγηση της προσομοιωμένης διεργασίας ήταν τρεις: $F_{93.33^\circ\text{C}}^{8.89^\circ\text{C}} = 10 \text{ min}$ (NCA 1968), $F_{90^\circ\text{C}}^{9.5^\circ\text{C}} = 24.5 \text{ min}$ (Sandoval et al. 1994) και $F_{110^\circ\text{C}}^{13.7^\circ\text{C}} = 1.6 \text{ min}$ (Rodrigo et al. 1990). Με αυτόν τον τρόπο εξετάστηκε ως παράμετρος και η τιμή z του μικροοργανισμού στόχου. Δηλαδή στο αρχείο UDF ορίστηκαν στην εξίσωση (5) τρεις διαφορετικές τιμές z (8.89, 9.5, 13.7°C), στη θερμοκρασία αναφοράς $T_{ref} = 90^\circ\text{C}$. Η θερμοκρασία αναφοράς είναι ενδεικτική της ήπιας θερμικής διεργασίας που δέχεται το προϊόν. Στη συνέχεια μέσα από το πρόγραμμα και μέσω της παρακάτω εξίσωσης μετατρέπονταν οι υπολογισμοί της τιμής F στη αντίστοιχη θερμοκρασία αναφοράς για κάθε ζητούμενη ολοκληρωμένη τιμή F_s (Στοφόρος, 2005):

$$F_T = F_{T_{ref}} 10^{\frac{T_{ref}-T}{z}} \quad (45)$$

Το ζητούμενο σε κάθε περίπτωση ήταν, η απαιτούμενη τιμή F_s να έχει επιτευχθεί στο τέλος της διατήρησης του προϊόντος στον αέρα.

5.6. Υπολογισμός της υποβάθμισης των ποιοτικών παραγόντων του τοματοπολτού

Για τον υπολογισμό της επίδρασης της διεργασίας στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του τοματοπολτού σε κάθε σημείο του περιέκτη εισάχθηκε στο Fluent παρόμοια εξίσωση (UDF) με αυτήν που υπολογίζει την τιμή F της διεργασίας, όπου για την μετρούμενη ποιοτική παράμετρο, χρησιμοποιείται το σύμβολο C (cooking value):

$$C_{T_{ref}}^z = \int_0^t 10^{\frac{(T(t)-T_{ref})}{z}} dt \quad (46)$$

Για την καλύτερη απεικόνιση της υποβάθμισης του ποιοτικού παράγοντα χρησιμοποιείται η μέσου όγκου διατήρηση ποιοτικού παράγοντα (εξίσωση (10)). Οπότε, μέσα από την

επιλογή custom field functions του Fluent η παραπάνω εξίσωση γράφεται στην παρακάτω μορφή:

$$\% \text{ διατήρηση} = \frac{C_t}{C_0} \times 100 = 10 \frac{C_{T_{ref}}^z}{D_{T_{ref}}} \times 100 \quad (47)$$

Για τον υπολογισμό της % διατήρησης ποιοτικού παράγοντα χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις παράμετροι, δύο που χαρακτηρίζουν την υποβάθμιση του χρώματος, ο λόγος a/b και η παράμετρος L , και άλλες δύο που αναφέρονται στα θρεπτικά συστατικά, η βιταμίνη C (ασκορβικό οξύ) και τα καροτενοειδή. Οι τιμές $D_{T_{ref}}$ και z που χρησιμοποιήθηκαν για τις τέσσερις παραμέτρους αναφέρονται στον παρακάτω Πίνακα 5.4 και προέρχονται από τον Πίνακα 2.3, με μετατροπή των τιμών D στην αντίστοιχη θερμοκρασία αναφοράς $T_{ref}=90^{\circ}\text{C}$ (194°F), για αυτή τη διεργασία, μέσω της εξίσωσης (Στοφόρος, 2005):

$$D_T = D_{T_{ref}} 10^{\frac{T_{ref}-T}{z}} \quad (48)$$

Πίνακας 5.4. Οι ποιοτικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση.

Ποιοτική παράμετρος	D_{90} (min)	z ($^{\circ}\text{C}$)
L (1 st phase)	197.59	51.04
a/b	364.84	85.56
Καροτενοειδή	1303.84	35.24
Ασκορβικό οξύ	414.01	76.60

5.7. Υπολογισμός του ολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, U_o

Για τον υπολογισμό του συνολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας κατά τη ψύξη στον αέρα και στο νερό, γίνεται χρήση κατάλληλων εμπειρικών εξισώσεων από τη βιβλιογραφία. Το εύρος που κυμαίνονται αυτές οι τιμές δίνεται στον παρακάτω Πίνακα 5.5. Οι Rabiey *et al.* (2007) δίνουν για τον συντελεστή μεταφορά θερμότητας σε ένα ακίνητο στρώμα αέρα μια τιμή της τάξης των $6 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

Πίνακας 5.5. Οι τιμές που κυμαίνεται ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, U_o , κατά την ψύξη στον αέρα και στο νερό, σε ελεύθερη και βεβιασμένη κυκλοφορία.

	Αερόψυξη (W/m ² K)	Υδροψυξη (W/m ² K)	Αναφορά
Ελεύθερη κυκλοφορία	3-50	20-600	Heldman, 2011; Γιαννιώτης, 2000; Hui, 2006
Βεβιασμένη κυκλοφορία	10-500	50-15000	Heldman, 2011; Γιαννιώτης, 2000, Hui, 2006

1. Οι Sandoval *et al.* (1994) για τον υπολογισμό του ολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, U_o στον αέρα, κατά την προσομοίωση της “πλήρωση εν θερμώ” διεργασίας για την παραγωγή τοματοπολτού σε γυάλινα βάζα, χρησιμοποιούν τον παρακάτω τύπο (McAdams, 1954; Kreith, 1973):

$$U_o = \frac{1}{\frac{1}{H_c + H_r} + \frac{X_v}{K_v}} \quad (49)$$

όπου

H_c ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στον αέρα σε φυσική συναγωγή σε κάθετες κυλινδρικές επιφάνειες.

$\frac{X_v}{K_v}$, συμβολίζει την αντίσταση των τοιχωμάτων του περιέκτη, το πάχος του τοιχώματος προς τη θερμική αγωγιμότητα του υλικού του περιέκτη.

H_r η ακτινοβολία αντίσταση που οφείλεται στην εκπεμπιμότητα του υλικού του περιέκτη.

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στον αέρα σε φυσική συναγωγή σε κάθετες κυλινδρικές επιφάνειες υπολογίζεται από τον τύπο:

$$H_c = C \frac{(T_s - T_a)^n}{2l^{(1-3n)}} \quad (50)$$

όπου

$C=0.19$ και $n=1/3$ για $10^9 < Ra < 10^{12}$

$C=0.29$ και $n=1/4$ για $10^4 < Ra < 10^9$

Το μισό ύψος του περιέκτη, $l=0.053$ m=0.0161544 ft

Η θερμοκρασία της επιφάνειας, $T_s=95^\circ\text{C}=203^\circ\text{F}$

Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος, $T_a=35^\circ\text{C}=95^\circ\text{F}$

Επειδή ο τύπος απαιτεί η θερμοκρασία να είναι σε $^\circ\text{F}$ και το μήκος σε ft για την μετατροπή των μονάδων έτσι ώστε ο H_c να εκφράζεται ως $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$, η τιμή που υπολογίζεται πολλαπλασιάζεται με 5.677.

Η ακτινοβολός αντίσταση, H_r υπολογίζεται αντίστοιχα από τον παρακάτω τύπο:

$$H_r = \varepsilon \sigma \frac{(T_s+273)^4 - (T_a+273)^4}{T_s - T_a} \quad (51)$$

γνωρίζοντας ότι:

Ο συντελεστής εκπεμπιμότητας, ε , σε μεταλλικό περιέκτη (Mikron Inc, 2015): $\varepsilon=0.075$

Η σταθερά του Boltzmann, $\sigma=5.73 \times 10^{-8}$ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$

Η θερμοκρασία της επιφάνειας, $T_s=95^\circ\text{C}$

Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος, $T_a=35^\circ\text{C}$

Υπολογίζεται η ακτινοβολός αντίσταση $H_r=0.67$ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$.

Η θερμική αγωγιμότητα του μεταλλικού περιέκτη είναι $K_v=50.2$ W/mK

Το μέσο πάχος του μεταλλικού περιέκτη είναι $X_v=0.00023$ m (Ardagh Group, 2015)

Υπολογίζεται $X_v/K_v=0.00023/50.2=4.58 \times 10^{-6}$ $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$.

Για να υπολογιστεί ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στον αέρα, H_c πρέπει να υπολογιστεί ο αριθμός Rayleigh, Ra που αποτελεί κριτήριο για το είδος της ροής του

ρευστού (φυσική ή βεβιασμένη κυκλοφορία). Ο Ra είναι παράγωγο των αριθμών Prandtl και Grashof:

$$Ra = Gr \times Pr \quad (52)$$

με τον αριθμό Prandtl να υπολογίζεται ως:

$$Gr = \frac{L^3 \times g \times \rho^2 \times \beta \times (T_w - T_\infty)}{\mu^2} \quad (53)$$

όπου

L (m)	το χαρακτηριστικό μήκος
g (m/s ²)	η επιτάχυνση της βαρύτητας
ρ (Kg/m ³)	η πυκνότητα του ρευστού
β (1/K)	ο συντελεστής θερμικής διαστολής
μ (Kg/m s)	το δυναμικό ιξώδες
T_w (K)	η θερμοκρασία στην επιφάνεια του στερεού σώματος
T_∞ (K)	η θερμοκρασία του ρευστού

Οι ιδιότητες του αέρα είναι γνωστές από τη βιβλιογραφία, το χαρακτηριστικό μήκος είναι το ύψος του περιέκτη $L=0.106$ m, ενώ οι θερμοκρασίες της επιφάνειας του σώματος, T_w και του ρευστού T_∞ είναι 368.16 K (95°C) και 308.16 K (35°C) αντίστοιχα. Με βάση τα παραπάνω υπολογίζεται $Gr=1.13 \times 10^{-7}$. Αντίστοιχα, ο αριθμός Pr υπολογίζεται ως :

$$Pr = \frac{c_p \times \mu}{k} \quad (54)$$

όπου

c_p (J/Kg K)	η ειδική θερμότητα του ρευστού
k (W/m K)	η θερμική αγωγιμότητα του ρευστού

Υπολογίζεται ο αριθμός $Pr=0.74$.

Συνεπώς, υπολογίζεται με βάση την εξίσωση (52) ο αριθμός $Ra=8.39 \times 10^{-6}$, τιμή για την οποία ισχύει $10^4 < Ra < 10^9$ και άρα $C=0.29$ και $n=1/4$. Δηλαδή, $H_c=12.52 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Τέλος, ο ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με βάση τις εξισώσεις (49), (50), (51) $U_o=13.19 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

2. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται και άλλες εμπειρικές εξισώσεις για τον υπολογισμό του U_o . Οι Silva and Silva. (1997) χρησιμοποιούν επίσης τον τύπο των McAdams (1954) και Kreith (1973) για τον υπολογισμό του ολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, αλλά για τον υπολογισμό του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας σε φυσική συναγωγή σε κάθετα κυλινδρικά τοιχώματα, H_c , χρησιμοποιούν την παρακάτω εμπειρική εξίσωση (Holman, 1990):

$$H_c = 1.42 \times \left(\frac{T_s - T_\infty}{y} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (55)$$

όπου

y η χαρακτηριστική διάσταση του σώματος (ύψος ή διάμετρος), m

Χρησιμοποιώντας τον παραπάνω τύπο με χαρακτηριστική διάσταση το ύψος υπολογίζεται $H_c=6.93 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Προσθέτοντας σε αυτόν και τα προϋπολογισμένα μεγέθη, ακτινοβόλο αντίσταση, H_r και X_w/K_v , υπολογίζεται ο ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ως $U_o=7.6 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

3. Για τους περισσότερους υπολογισμούς στη μηχανική, ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας λαμβάνεται από μια σχέση της μορφής:

$$Nu = \frac{h \times L}{k} = C \times Ra^n \quad (56)$$

Για γραμμική ροή σε κάθετα τοιχώματα οι τιμές για τις παραμέτρους $C=0.59$ και $n=0.25$, ενώ για τον υπολογισμό του αριθμού Ra όλες οι ιδιότητες του αέρα πρέπει να υπολογιστούν στη θερμοκρασία του φιλμ, T_f δηλαδή τη μέση θερμοκρασία μεταξύ της θερμοκρασίας του τοιχώματος, T_w και της θερμοκρασίας του αέρα, T_∞ (Mikrocontroller, 2015):

$$T_f = \frac{T_w + T_\infty}{2} = \frac{T_{IT} + T_{air}}{2} = \frac{95^\circ\text{C} + 35^\circ\text{C}}{2} = 65^\circ\text{C}$$

Με βάση τα παραπάνω υπολογίστηκε ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στους 20°C ως $h=7.25 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, και στους 127°C ως $h=6.83 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ με γραμμική παρεμβολή για τη θερμοκρασία $T_f=65^\circ\text{C}$, $h=7.07 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Αν ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι με τη χρήση αυτών των εμπειρικών εξισώσεων, υπάρχουν διακυμάνσεις στις τιμές του h της τάξης του 25% ή και παραπάνω τότε το θεωρητικό εύρος τιμών με βάση την παραπάνω υπολογισθείσα τιμή είναι $h=5.30-8.84 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

Από τους τρεις παραπάνω τρόπους υπολογισμού με βάση διαφορετικές εμπειρικές εξισώσεις που δίνονται στη βιβλιογραφία, παρατηρείται μια διακύμανση στον συνολικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας U_o ($5-13 \text{ W/m}^2 \text{ K}$). Η κατώτερη τιμή από τον τρίτο τρόπο υπολογισμού είναι το κάτω όριο του $U_o=7.07 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ που υπολογίστηκε παραπάνω, δηλαδή μια τιμή $U_o=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Ως ακραία ανώτερη τιμή υπολογίστηκε με τον πρώτο τρόπο $U_o=13.19 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ και παίρνοντας ένα περιθώριο ασφαλείας 2 μονάδων μπορεί να ληφθεί ως ανώτερη τιμή $U_o=15 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Λαμβάνοντας ως ενδιάμεσες τιμές τις 7 και 9 $\text{W/m}^2 \text{ K}$, μπορεί να εξεταστεί η επίδραση του συνολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας U_o στην αποτελεσματικότητα της διεργασίας που μελετάται.

5.8. Αξιολόγηση της “πλήρωση εν θερμώ” διεργασίας

Η “πλήρωση εν θερμώ” διεργασία εξετάστηκε ως προς δύο κύριες παραμέτρους. Την θερμοκρασία γεμίσματος, T_{IT} , η οποία αποτελεί το πιο κρίσιμο στάδιο της διεργασίας και το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στον αέρα, h_{air} . Η θερμοκρασία γεμίσματος εξετάστηκε σε ένα εύρος 10 μονάδων, $88-98^\circ\text{C}$, το οποίο μπορεί να συναντήσει κανείς σε τέτοιου τύπου διεργασίες (βλέπε Κεφάλαιο 2.6). Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας εξετάστηκε σε ένα εύρος $5-15 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Οι τιμές αυτές υπολογίστηκαν με εμπειρικές εξισώσεις όπως αναφέρεται σε προηγούμενη ενότητα, και εξετάστηκαν σε συνδυασμό με την θερμοκρασία γεμίσματος, καθώς δεν κατέστη δυνατός ο πειραματικός προσδιορισμός του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στον αέρα, οπότε επιλέχθηκε ως μεταβλητή παράμετρος. Επίσης, εξετάστηκαν διαφορετικές ολοκληρωμένες τιμές F_s που αναφέρονται σε διαφορετική τιμή z για το μικροοργανισμό στόχο, καθώς και σε διαφορετική τιμή D . Το πρόγραμμα υπολόγιζε ταυτόχρονα όλες τις τιμές F_s για κάθε συνδυασμό θερμοκρασίας γεμίσματος και συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στον αέρα. Ζητούμενο σε κάθε περίπτωση ήταν η επίτευξη τουλάχιστον μια τιμής F_s στο τέλος του χρόνου διατήρησης

του προϊόντος στον αέρα. Ο χρόνος διατήρησης στον αέρα προσδιορίστηκε με δοκιμή και σφάλμα (trial and error) αυξάνοντας ή μειώνοντας κατάλληλα το χρόνο διατήρησης στον αέρα όπου αυτό ήταν απαραίτητο. Οι υπόλοιπες δευτερεύουσες παράμετροι, θερμοκρασία περιβάλλοντος T_{air} και συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στο νερό κρατήθηκαν σταθερές κατά την εξέταση των κύριων παραμέτρων, και είχαν τις τιμές $T_{air}=35^{\circ}\text{C}$, $U_o(\text{υδρόψυξη})=100 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Για την εξέταση της επίδρασης της θερμοκρασίας του αέρα χρησιμοποιήθηκε η περίπτωση με $T_{IT}=95^{\circ}\text{C}$ και $h=5 \text{ W/ m}^2 \text{ K}$, ενώ για την εξέταση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στο νερό χρησιμοποιήθηκε η περίπτωση με τον καλύτερο συνδυασμό T_{IT} και U_o , αυτόν που δίνει τη μεγαλύτερη διατήρηση των ποιοτικών παραγόντων. Συνοπτικά, οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση της διεργασίας αναφέρονται στον Πίνακα 5.6.

Τέλος, αξιολογήθηκε η διεργασία όπως εφαρμόζεται στη βιομηχανική πρακτική για την παραγωγή τοματοπολτού με μεταλλική ($T_{IT}=95^{\circ}\text{C}$, 20 min) και γυάλινη συσκευασία ($T_{IT}=95^{\circ}\text{C}$, 10 min). Για την προσομοίωση της γυάλινης συσκευασίας, τα πλευρικά και τα κάτω τοιχώματα θεωρήθηκαν γυαλί με πάχος 0.0031 m, ενώ το πάνω τοίχωμα (καπάκι) ως μέταλλο (ατσάλι) με πάχος 0.00023 m.

Ο υπολογιστικός χρόνος για μια συνολική διεργασία ψύξης στον αέρα και στο νερό 50-70 min ανάλογα με την περίπτωση, κυμάνθηκε από 2-4 h.

Πίνακας 5.6. Οι παράμετροι που εισάχθηκαν στο Fluent για την προσομοίωση της διεργασίας (κατά την εξέταση της επίδρασης των κύριων παραμέτρων οι δευτερεύουσες παράμετροι κρατήθηκαν σταθεροί, και οι τιμές τους ήταν $T_{αέρα}=35^{\circ}\text{C}$, h (υδρόψυξη)=100 $\text{W/m}^2 \text{K}$).

Κύριες παράμετροι	Περιπτώσεις
Θερμοκρασία γεμίσματος, T_{IT}	88°C, 90°C, 93°C, 95°C, 98°C
Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (αέρα), h_{air} (U_0)	5 $\text{W/m}^2 \text{K}$, 7 $\text{W/m}^2 \text{K}$, 9 $\text{W/m}^2 \text{K}$, 15 $\text{W/m}^2 \text{K}$
Ολοκληρωμένη τιμή F_s	$F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 10 \text{ min}$, $F_{90^{\circ}\text{C}}^{9.5^{\circ}\text{C}} = 24.5 \text{ min}$, $F_{110^{\circ}\text{C}}^{13.7^{\circ}\text{C}} = 1.6 \text{ min}$
Τιμή z^*	8.89°C, 9.5°C, 13.7°C
Χρόνος δεκαδικής απενεργοποίησης, D^*	$D_{93.33}=6.77 \text{ min}^{**}$, $D_{90}=3.5 \text{ min}$, $D_{110}=0.42 \text{ min}$
Δευτερεύουσες παράμετροι	
Θερμοκρασία περιβάλλοντος αέριας ψύξης, T_{air}	35°C, 25°C
Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (υδρόψυξη), h_{cw}	20 $\text{W/m}^2 \text{K}$, 100 $\text{W/m}^2 \text{K}$, 500 $\text{W/m}^2 \text{K}$
Σταθερές παράμετροι	
Ποιοτική παράμετρος χρώματος, a/b	$D_{90}=364.84 \text{ min}$, $z=85.56^{\circ}\text{C}$
Ποιοτική παράμετρος χρώματος, L	$D_{90}=197.59 \text{ min}$, $z=51.04^{\circ}\text{C}$
Καροτενοειδή	$D_{90}=1303.84 \text{ min}$, $z=35.24^{\circ}\text{C}$
Βιταμίνη C (ασκορβικό οξύ)	$D_{90}=414.01 \text{ min}$, $z=76.60^{\circ}\text{C}$
Θερμοκρασία περιβάλλοντος υδρόψυξης, T_{cw}	20°C
Θερμική διαχυτότητα τοματοπολτού, α	Σταθερή ή εξαρτώμενη από T (ενότητα 6.3)
Μέγεθος περιέκτη	$L=0.106 \text{ m}$, $R=0.0365 \text{ m}$
Θερμοκρασία αναφοράς, T_{ref}	90°C

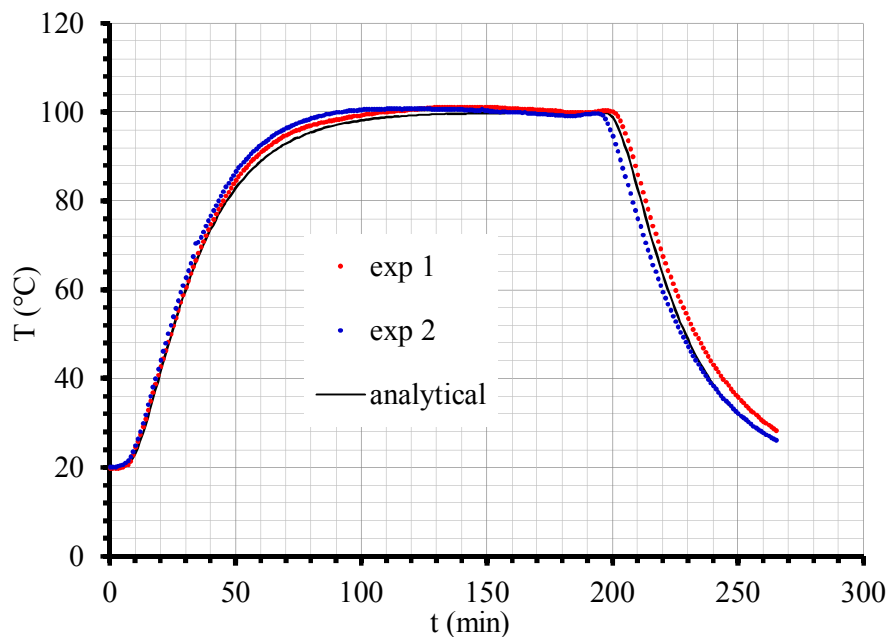
*Η επίδραση των D και z εξετάστηκε μέσα από την αντίστοιχη υπολογιζόμενη τιμή F_s της διεργασίας και όχι ανεξάρτητα από αυτήν.

**Αυτή η τιμή D για την αντίστοιχη τιμή F , $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 10 \text{ min}$ υπολογίστηκε μέσα από την εξίσωση που δίνεται στο Σχήμα 2.3.

6. Αποτελέσματα και συζήτηση

6.1. Επαλήθευση της αναλυτικής λύσης

Όπως προαναφέρθηκε η αναλυτική λύση προσαρμόστηκε στα πειραματικά δεδομένα με τη χρήση του συντελεστή θερμικής διαχυτότητας $\alpha=1.43 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ και των αντίστοιχων διαστάσεων του περιέκτη που προαναφέρθηκαν. Το Σχήμα 6.1 δείχνει το χρονοθερμοκρασιακό προφίλ για την αναλυτική λύση σε σύγκριση με τις δύο σειρές πειραματικών δεδομένων για το γεωμετρικό κέντρο του περιέκτη. Η καμπύλη αυτή είναι μια τυπική καμπύλη θερμικής διεργασίας που περιλαμβάνει τον κύκλο θέρμανσης (0-192 min) και τον κύκλο ψύξης (192-265 min). Η προσαρμογή αυτή στα πειραματικά δεδομένα μέσω της χρήσης της σταθερής τιμής $\alpha=1.43 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ φαίνεται στο Σχήμα 6.1 όπου δείχνει ότι η αναλυτική λύση βρίσκεται μεταξύ των δύο σειρών πειραματικών μετρήσεων με μια μικρή απόκλιση να παρατηρείται στο διάστημα 50-100 min κάτι που μπορεί ίσως να εξηγηθεί με ένα μεταβλητό συντελεστή θερμικής διαχυτότητας σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία.



Σχήμα 6.1. Το χρονοθερμοκρασιακό προφίλ για τα πειραματικά δεδομένα και την αναλυτική λύση για το κέντρο του περιέκτη.

Πίνακας 6.1. Το μέσο τετράγωνο του σφάλματος μεταξύ αναλυτικής λύσης και πειραματικών δεδομένων.

	Experimental data 1	Experimental data 2
RMSE	2.21	2.70

6.2. Αξιολόγηση του αριθμητικού μοντέλου επίλυσης (σταθερό α)

Μελετήθηκαν όλοι οι συνδυασμοί επίλυσης της αριθμητικής λύσης σε διαφορετικά χρονικά βήματα (time step, 20 s, 5 s, 1 s), διαφορετικά πλέγματα διακριτοποίησης (Case A, Case B, Case C, Case D), διαφορετικό απόλυτο κριτήριο σύγκλισης για την επίλυση των εξισώσεων της ενέργειας (10^{-6} , 10^{-7} , 10^{-8} , 10^{-9}) και διαφορετική μέθοδο διακριτοποίησης του χρόνου (πρώτης και δεύτερης τάξης).

Στον Πίνακα 6.2 φαίνεται η μέση τετραγωνική ρίζα του σφάλματος (RMSE) μεταξύ αριθμητικής και αναλυτικής λύσης και ο πραγματικός υπολογιστικός χρόνος για την επίλυση κάθε συνδυασμού. Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 6.2 η ακρίβεια της αριθμητικής λύσης αυξάνεται σημαντικά όσο μικραίνει το χρονικό βήμα, ενώ μικρότερη επίδραση έχει το απόλυτο κριτήριο σύγκλισης για την ενέργεια. Επίσης, σημαντική επίδραση φαίνεται να έχει και η ποιότητα του πλέγματος καθώς η περίπτωση A με τετράεδρα, παρουσιάζει μεγάλο σφάλμα σε σχέση με τις άλλες περιπτώσεις που χρησιμοποιούν εξάεδρα. Όσον αφορά την πυκνότητα του πλέγματος, η επίδραση της δε φαίνεται να είναι σημαντική, όταν αυτή συνδυάζεται με μεγάλο χρονικό βήμα, ενώ όσο αυτό μικραίνει η επίδραση της πυκνότητας του πλέγματος γίνεται πιο σημαντική.

Εκτός από την ακρίβεια, αυτό που ζητείται από την επίλυση ενός προβλήματος είναι ένας ικανοποιητικός υπολογιστικός χρόνος, μια όσο το δυνατόν πιο ταχεία λύση που θα επιτρέπει την εξοικονόμηση χρόνου και ενέργειας. Μια γενική παρατήρηση που εξάγεται από τα αποτελέσματα είναι ότι όσο αυξάνεται η ακρίβεια της λύσης τόσο αυξάνουν οι απαιτήσεις σε υπολογιστικό χρόνο. Ο χρόνος λύσης από το αραιότερο στο πυκνότερο πλέγμα αυξάνεται κατά 70-240%. Αντίστοιχα, ο υπολογιστικός χρόνος όταν μικραίνει το χρονικό βήμα αυξάνεται κατά 170-390%. Τη μικρότερη διαφορά έχει το απόλυτο κριτήριο σύγκλισης με τις διαφορές να κυμαίνονται από 6-25% από λύση με μικρότερο κριτήριο (10^{-6}) σε λύση με μεγαλύτερο κριτήριο (10^{-9}). Τέλος, η λύση με διαφορετική διακριτοποίηση χρόνου (πρώτης τάξης έναντι δεύτερης τάξης), δεν παρουσιάζει διαφορά ως προς τον υπολογιστικό χρόνο, ενώ η χρήση της δεύτερης τάξης

βελτιώνει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων γι' αυτό και επιλέχθηκε η χρήση της στη επίλυση του προβλήματος που εξετάζεται.

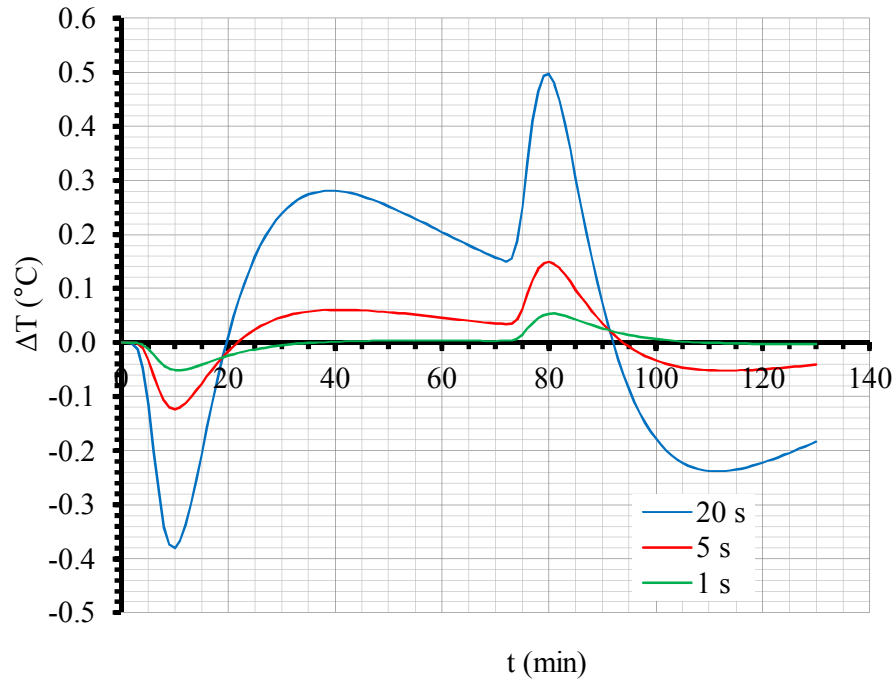
Πίνακας 6.2. Η τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγώνου του σφάλματος (RMSE) για όλους τους συνδυασμούς χρονικού βήματος, διακριτοποίησης χρόνου, σχήματος, και απόλυτου κριτηρίου σύγκλισης (παραλείπονται οι περιπτώσεις 10^{-7} , 10^{-8}) για το κέντρο του περιέκτη. Σε παρένθεση δίνεται ο πραγματικός υπολογιστικός χρόνος (CPU time, min).

Διακριτοποίηση χρόνου	1 st order implicit						2 nd order implicit		
	20		5		1		5	1	
Χρονικό βήμα (s)	10^{-6}	10^{-9}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-9}
Απόλυτο κριτήριο σύγκλισης									
Case A	1.667 (10.5)	1.685 (23.5)	1.773 (25.7)	1.810 (59.4)	1.830 (98.6)	1.845 (190)	-	-	-
Case B	0.247 (1.8)	0.246 (2.6)	0.101 (6.0)	0.101 (8.4)	0.084 (29.3)	0.084 (38.6)	0.065 (6.0)	-	-
Case C	0.250 (5.0)	0.238 (8.4)	0.078 (16.5)	0.067 (28.3)	0.031 (63.8)	0.031 (87.4)	0.029 (16.5)	0.029 (28.3)	0.024 (87.4)
Case D	0.249 (10.2)	0.236 (18.1)	0.069 (28.5)	0.061 (49.6)	0.021 (112.5)	0.021 (169.9)	0.043 (28.5)	0.029 (49.6)	0.014 (169.9)

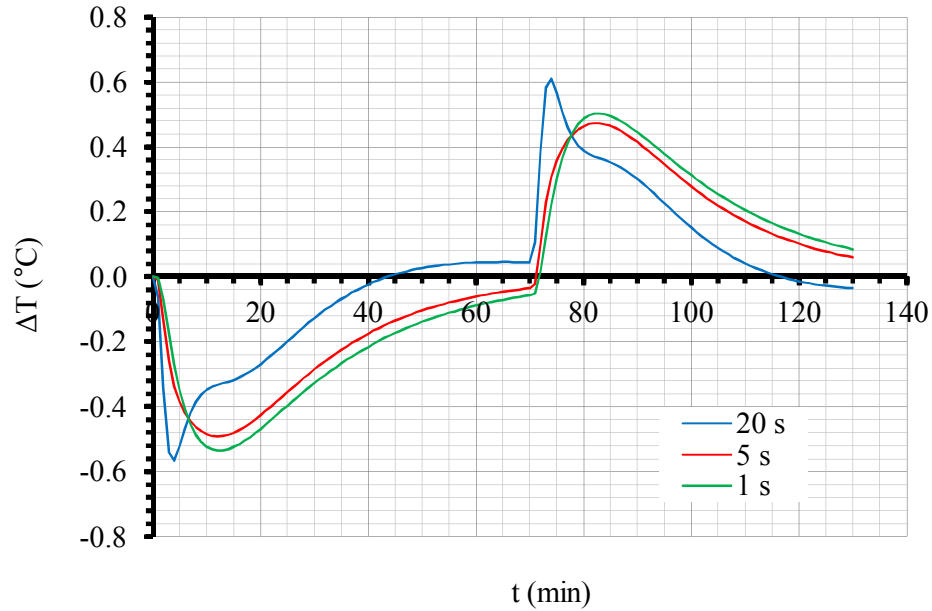
6.2.1. Επίδραση του χρονικού βήματος

Τα Σχήματα 6.2-6.4 παρουσιάζουν την επίδραση του χρονικού βήματος στην ακρίβεια της λύσης. Παρατηρείται για το κέντρο (σημείο A, Σχήμα 6.2) ότι στο χρονικό βήμα 20 s το σφάλμα είναι της τάξης των 0.5°C , και μειώνεται στους 0.15°C και 0.05°C για τα χρονικά βήματα 5 s και 1 s αντίστοιχα. Αντίστοιχες διαφορές παρατηρούνται και στο σημείο C (Σχήμα 6.4). Αντίθετα, για το σημείο B (Σχήμα 6.3) τα αποτελέσματα παρουσιάζονται διαφορούμενα με το σφάλμα για το χρονικό βήμα 20 s να παρουσιάζει αρχικά μεγαλύτερη μέγιστη τιμή από τα άλλα χρονικά βήματα αλλά στη συνέχεια να μειώνεται ταχύτερα και να έχει συνολικά μικρότερο μέσο σφάλμα. Επιπλέον, το χρονικό βήμα του 1 s παρουσιάζεται ελαφρά χειρότερο σε σχέση με αυτό των 5 s. Αυτή η ασυνέπεια μπορεί να συμβεί ορισμένες φορές, όταν το μέγεθος του χρονικού βήματος γίνει αρκετά μικρό, είναι πιθανό η προβλεπόμενη αλλαγή σε ένα κελί σε συγκεκριμένο χρονικό βήμα να γίνει μικρότερη από το κριτήριο σύγκλισης οδηγώντας τελικά σε μεγαλύτερο συνολικό σφάλμα (Boz *et al.*, 2014). Μπορεί επίσης να οφείλεται στο ότι η περιοχή στο σημείο B να

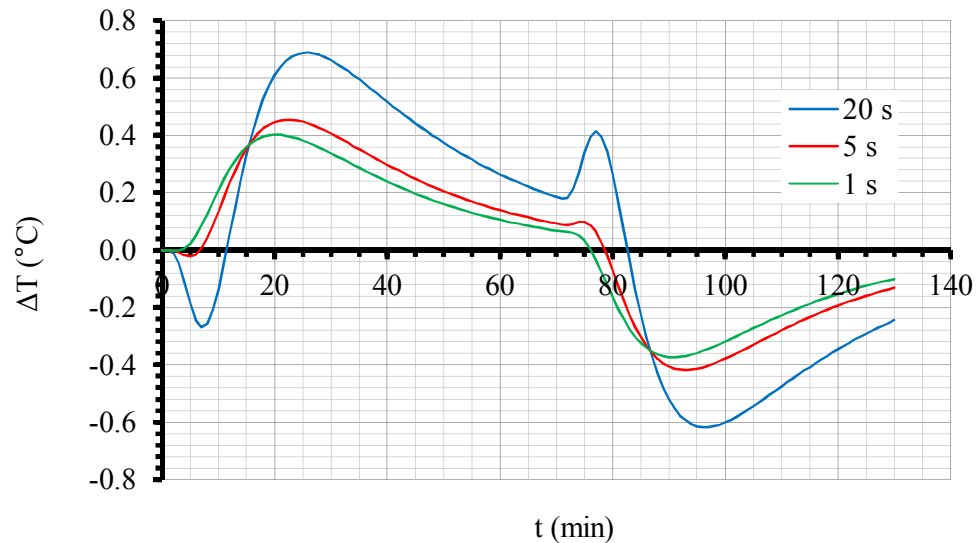
παρουσιάζει κακής ποιότητας πλέγμα, κάτι που αυξάνει το σφάλμα όταν επιδιώκεται μεγαλύτερη ακρίβεια μέσω της μείωσης του χρονικού βήματος.



Σχήμα 6.2. Η διαφορά θερμοκρασίας αναλυτικής-αριθμητικής λύσης για τα τρία χρονικά βήματα που εξετάστηκαν, στο κέντρο και για την περίπτωση Case D με απόλυτο κριτήριο σύγκλισης 10^{-9} .



Σχήμα 6.3. Η διαφορά θερμοκρασίας αναλυτικής-αριθμητικής λύσης για τα τρία χρονικά βήματα που εξετάστηκαν, στο σημείο B και για την περίπτωση Case D, με απόλυτο κριτήριο σύγκλισης 10^{-9} .

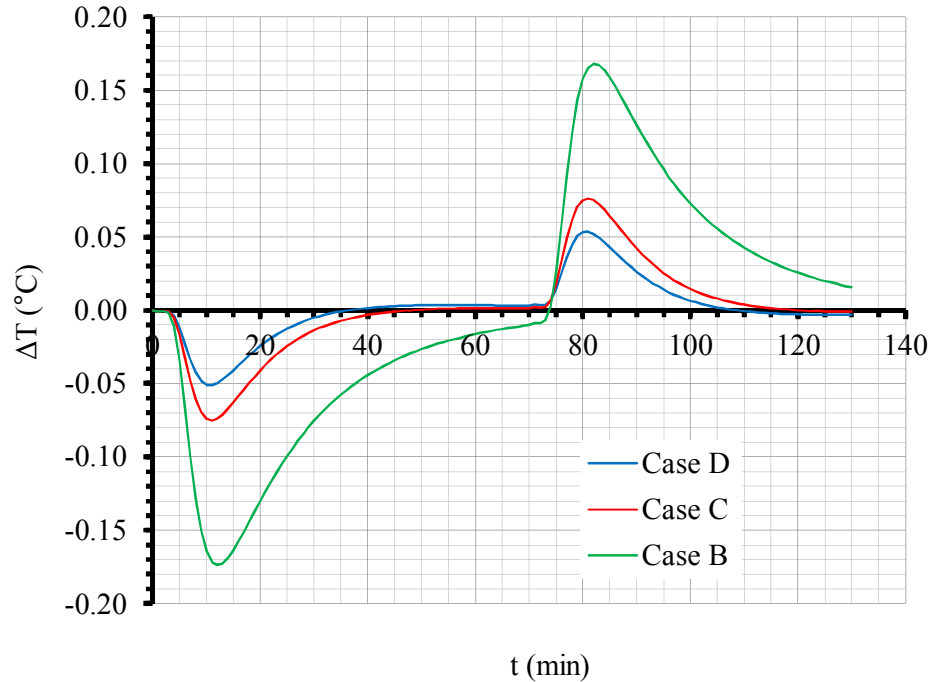


Σχήμα 6.4. Η διαφορά θερμοκρασίας αναλυτικής-αριθμητικής λύσης για τα τρία χρονικά βήματα που εξετάστηκαν, στο σημείο C, για την περίπτωση Case D με απόλυτο κριτήριο σύγκλισης 10^{-9} .

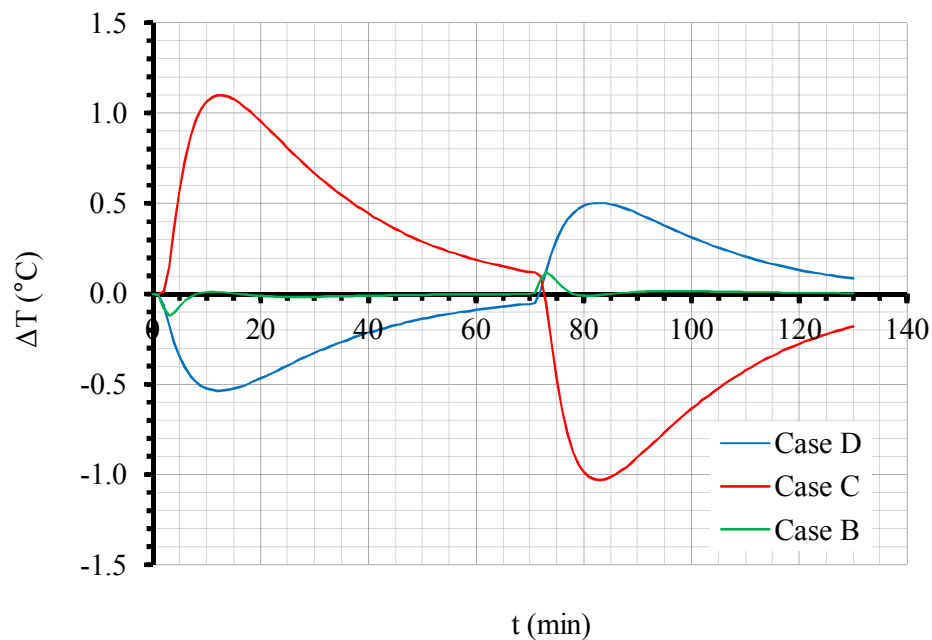
6.2.2. Επίδραση του πλέγματος διακριτοποίησης

Η πυκνότητα του πλέγματος διακριτοποίησης παίζει επίσης σημαντικό ρόλο στην ακρίβεια της λύσης όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα. Αυτή η επίδραση γίνεται πιο έντονη όταν συνδυάζεται με ένα μικρότερο χρονικό βήμα (Πίνακας 6.2). Στα Σχήματα 6.5-6.7 που ακολουθούν φαίνεται η επίδραση της μεταβολής της πυκνότητας του πλέγματος (εξάεδρα, hex/wedge) στα τρία σημεία του περιέκτη A, B και C. Για το κέντρο (σημείο A, Σχήμα 6.5) το σφάλμα μειώνεται (0.17°C , 0.08°C , 0.05°C αντίστοιχα) όταν το πλέγμα από τα 40986 κελιά (Case B), αυξάνει διαδοχικά στα 150094 κελιά (Case C) και στα 320988 κελιά (Case D). Την αντίθετη εικόνα δίνουν τα υπόλοιπα σημεία B, C όπου καλύτερη ακρίβεια δείχνει να έχει η περίπτωση με το αραιότερο πλέγμα (Σχήματα 6.6-6.7). Μια εξήγηση για αυτή τη διαφωνία αναφέρουν οι Boz *et al.* (2014) οι οποίοι αναφέρονται στη χρήση της άμεσης προσέγγισης φιλτραρίσματος (explicit filtering approach). Τέτοια προσέγγιση επειδή δε βρίσκει εφαρμογή σε προβλήματα χρονικά μεταβαλλόμενης γραμμικής ροής, δεν είναι δυνατός ο διαχωρισμός των φυσικών και αριθμητικών επιδράσεων και τα λάθη μοντελοποίησης και διακριτοποίησης μπορεί να ακυρώνουν το ένα το άλλο αποτελεσματικότερα σε ένα αραιότερο πλέγμα απ' ότι σε ένα πυκνότερο. Μπορεί να οφείλεται όμως και σε τοπικά κακής ποιότητας πλέγμα όπως αναφέρθηκε και παραπάνω για τις διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται και για το χρονικό βήμα.

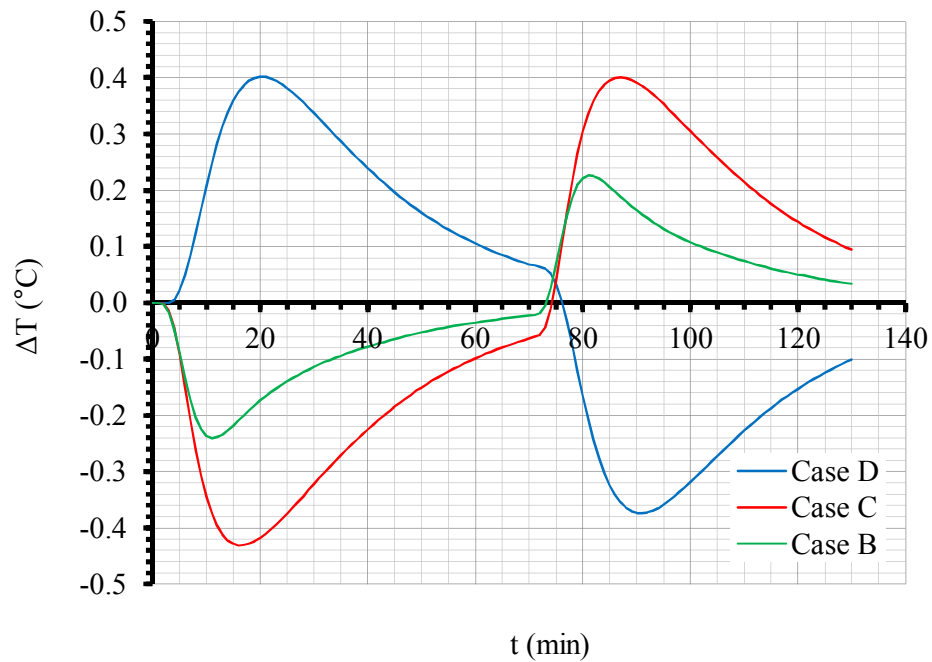
Στα Σχήμα 6.8-6.10 φαίνεται το χρονοθερμοκρασιακό προφίλ στα τρία σημεία για όλες τις περιπτώσεις με διαφορετικό πλέγμα που εξετάστηκαν. Σε αυτά συμπεριλαμβάνεται και η περίπτωση A (Case A) όπου το πλέγμα κατασκευάστηκε με τη χρήση τετράεδρων. Όπως φαίνεται και από τα τρία σχήματα η περίπτωση A παρουσιάζει μεγάλο σφάλμα σε σχέση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις, ενώ όπως δείχνει ο Πίνακας 6.2 ο υπολογιστικός χρόνος είναι επίσης εξαιρετικά μεγάλος, συγκρίσιμος με την περίπτωση με τα περισσότερα εξάεδρα κελιά (Case D).



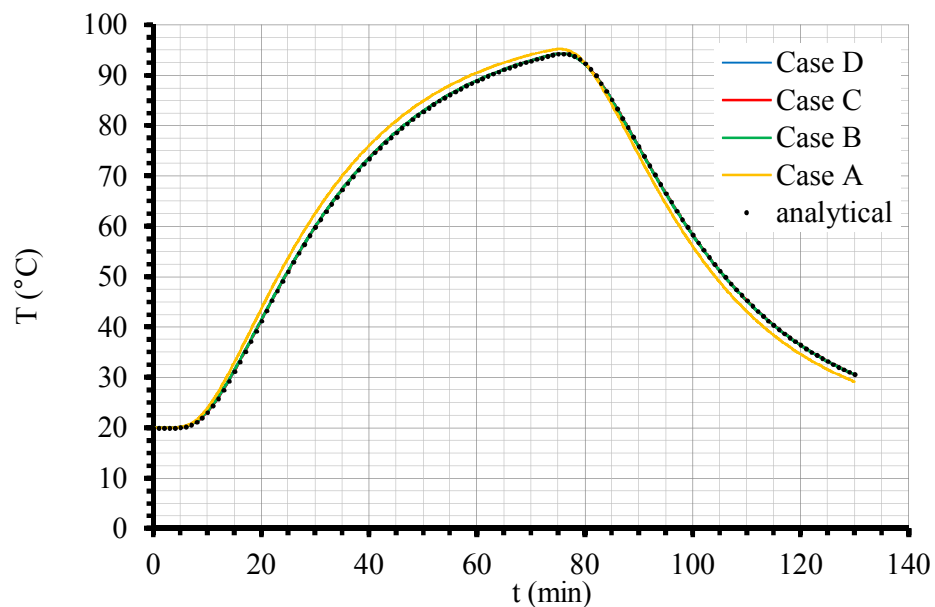
Σχήμα 6.5. Το σφάλμα (διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ αναλυτικής και αριθμητικής λύσης) για τις τρεις περιπτώσεις με την ίδια ποιότητα πλέγματος (hex/wedge), αλλά διαφορετικής πυκνότητας (Case B-D), για το κέντρο, σε χρονικό βήμα 1 s, απόλυτο κριτήριο σύγκλισης 10^{-9} .



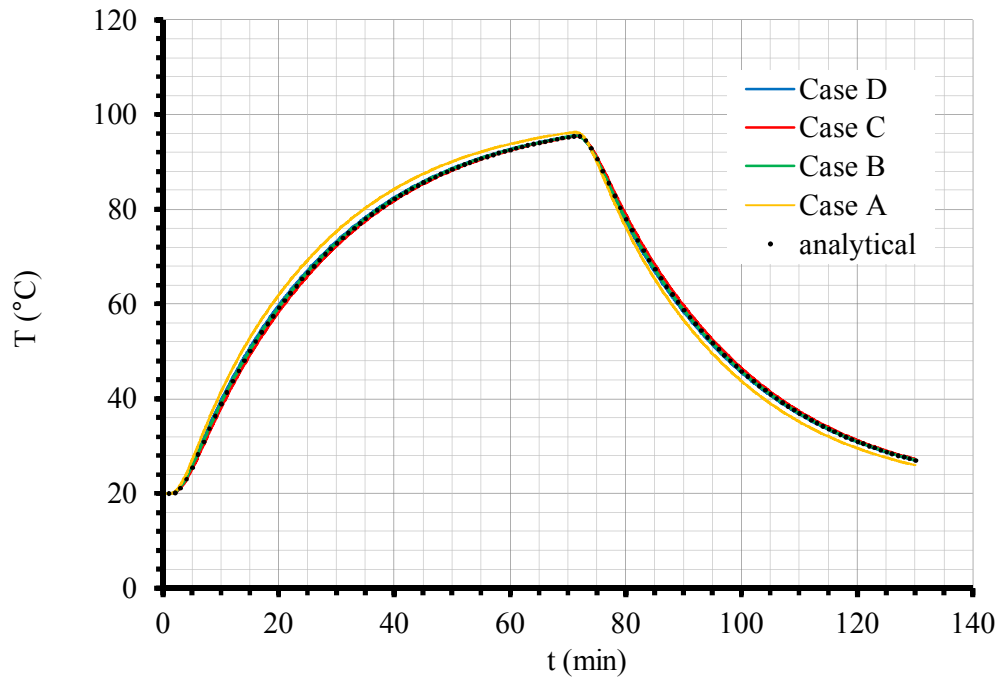
Σχήμα 6.6. Το σφάλμα (διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ αναλυτικής και αριθμητικής λύσης) για τις τρεις περιπτώσεις με την ίδια ποιότητα πλέγματος (hex/wedge), αλλά διαφορετικής πυκνότητας (Case B-D), για το σημείο B, σε χρονικό βήμα 1 s, απόλυτο κριτήριο σύγκλισης 10^{-9} .



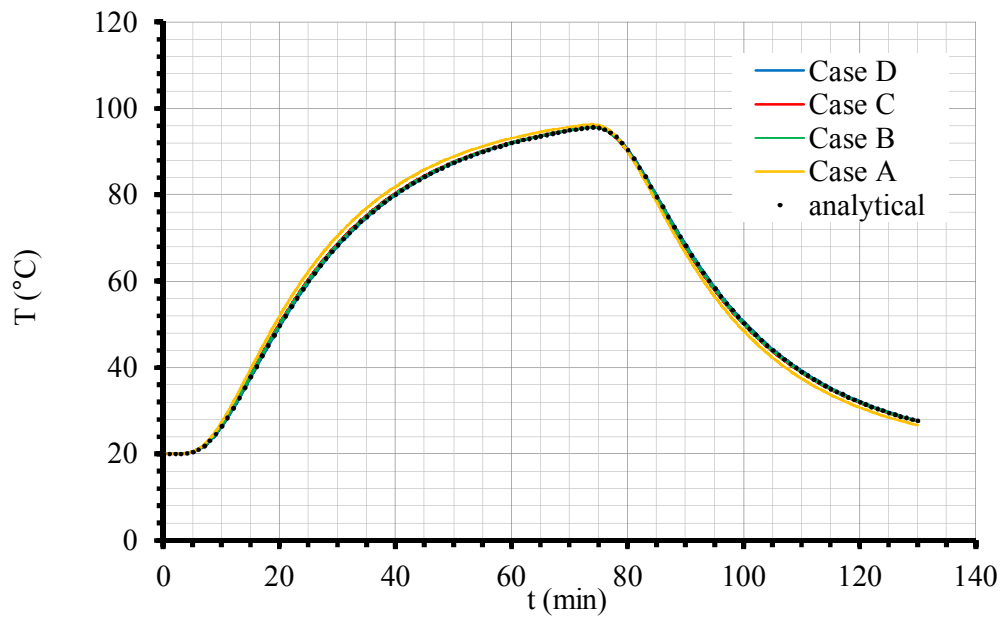
Σχήμα 6.7. Το σφάλμα (διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ αναλυτικής και αριθμητικής λύσης) για τις τρεις περιπτώσεις με την ίδια ποιότητα πλέγματος (hex/wedge), αλλά διαφορετικής πυκνότητας (Case B-D), για το σημείο C, σε χρονικό βήμα 1 s, απόλυτο κριτήριο σύγκλισης 10^{-9} .



Σχήμα 6.8. Το σφάλμα (διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ αναλυτικής και αριθμητικής λύσης) για όλες τις περιπτώσεις, για το κέντρο, σε χρονικό βήμα 1 s, απόλυτο κριτήριο σύγκλισης 10^{-9} .



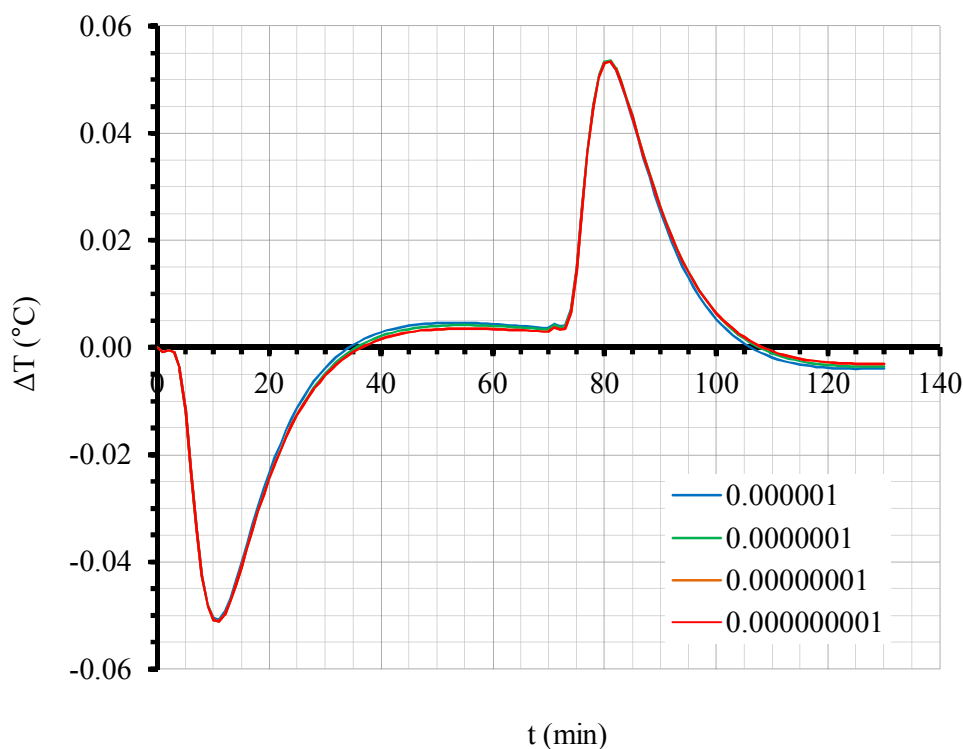
Σχήμα 6.9. Το σφάλμα (διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ αναλυτικής και αριθμητικής λύσης) για όλες τις περιπτώσεις, για το σημείο B, σε χρονικό βήμα 1 s, απόλυτο κριτήριο σύγκλισης 10^{-9} .



Σχήμα 6.10. Το σφάλμα (διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ αναλυτικής και αριθμητικής λύσης) για όλες τις περιπτώσεις, για το σημείο C, σε χρονικό βήμα 1 s, απόλυτο κριτήριο σύγκλισης 10^{-9} .

6.2.3. Επίδραση του απόλυτου κριτηρίου σύγκλισης

Το απόλυτο κριτήριο σύγκλισης φαίνεται να έχει μικρή επίδραση στην ακρίβεια της λύσης (Πίνακας 6.2, Σχήμα 6.11). Στις περισσότερες περιπτώσεις οι διαφορές εντοπίζονται μετά το δεύτερο δεκαδικό ψηφίο. Σε κάθε περίπτωση και αυτό το σφάλμα έχει ένα βαθμό συνεισφοράς στο συνολικό σφάλμα και λαμβάνεται υπόψη στην επιλογή του καλύτερου μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί στην τελική λύση του προβλήματος.

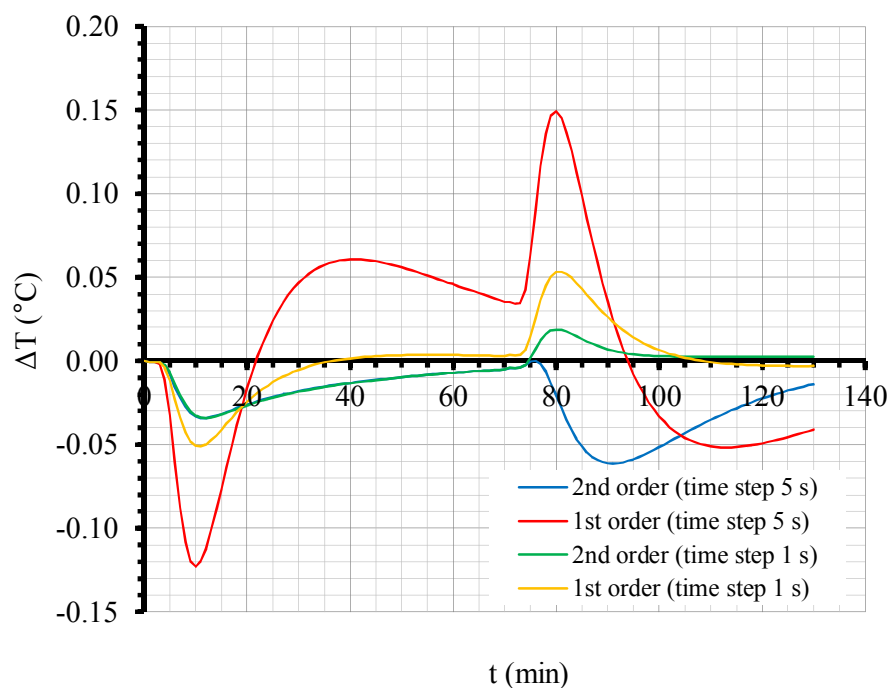


Σχήμα 6.11. Το σφάλμα (διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ αναλυτικής και αριθμητικής λύσης) για διαφορετικό απόλυτο κριτήριο σύγκλισης, για το κέντρο, την περίπτωση Case D και χρονικό βήμα 1 s.

6.2.4. Επίδραση της μεθόδου διακριτοποίησης του χρόνου

Από το Σχήμα 6.12 γίνεται φανερό ότι η διακριτοποίηση του χρόνου με χρήση της δεύτερης τάξης, μειώνει το μέγιστο σφάλμα τόσο στο χρονικό βήμα 5 s (0.15 έναντι 0.06°C) όσο και στο χρονικό βήμα 1 s (0.05 έναντι 0.02°C), ενώ ο υπολογιστικός χρόνος παραμένει ο ίδιος.

Συνεπώς, η επιλογή της δεύτερης τάξης διακριτοποίησης του χρόνου κρίνεται επιβεβλημένη.

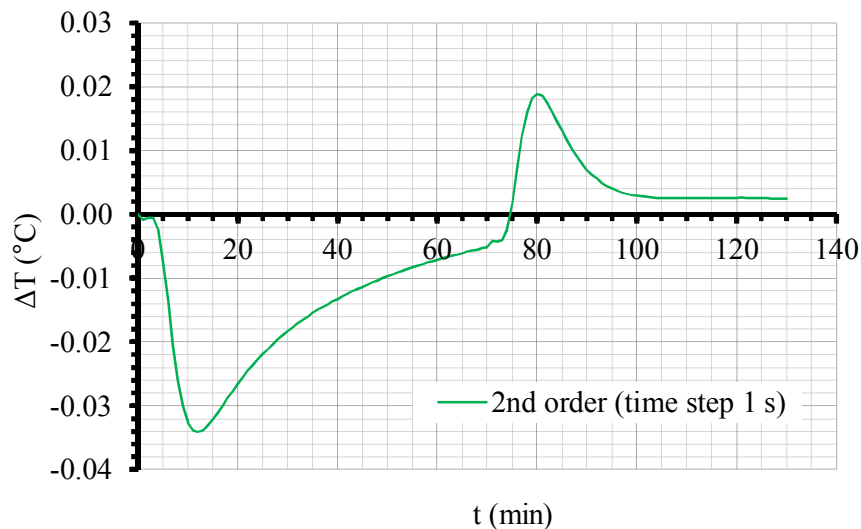


Σχήμα 6.12. Το σφάλμα (διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ αναλυτικής και αριθμητικής λύσης) για διαφορετική μέθοδο διακριτοποίησης του χρόνου, για το κέντρο, την περίπτωση Case D, και απόλυτο κριτήριο σύγκλισης 10^{-9} .

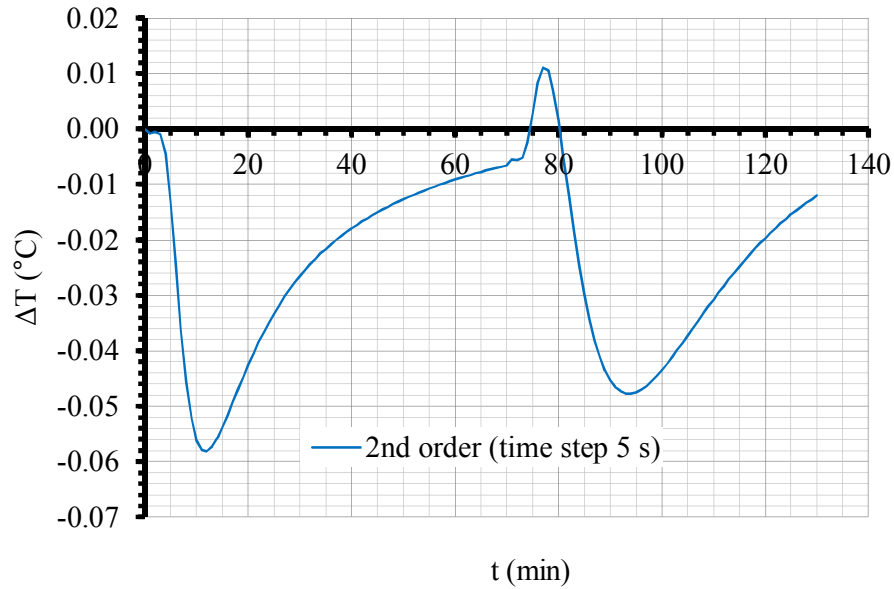
6.2.5. Επιλογή του πιο αποδοτικού αριθμητικού μοντέλου

Από τα όσα έχουν αναφερθεί μέχρι τώρα, και λαμβάνοντας υπόψη το συγκεντρωτικό πίνακα 6.2, το ιδανικό μοντέλο επίλυσης πρέπει να συγκεντρώνει ικανοποιητικό επίπεδο ακρίβειας ($<0.10^{\circ}\text{C}$) σε συνδυασμό με ένα χρόνο υπολογισμού που να μην είναι υπερβολικός. Στην προκειμένη περίπτωση τα παραπάνω χαρακτηριστικά φαίνεται να έχει το μοντέλο με τα εξής χαρακτηριστικά: α) Πλέγμα μέσης πυκνότητας, ποιότητας εξαέδρων κελιών (Case C), β) με χρονικό βήμα 5s, γ) απόλυτο κριτήριο σύγκλισης 10^{-9} και δ) χρονική διακριτοποίηση δεύτερης τάξης. Με χρήση αυτού του μοντέλου το επίπεδο ακρίβειας είναι ικανοποιητικά μικρό ($\text{RMSE}=0.029^{\circ}\text{C}$), ενώ για την επίλυση μιας τυπικής θερμικής διεργασίας που περιλαμβάνει θέρμανση και ψύξη (130 min), ο υπολογιστικός χρόνος δεν ξεπερνά τα 30 min (Πίνακας 6.2).

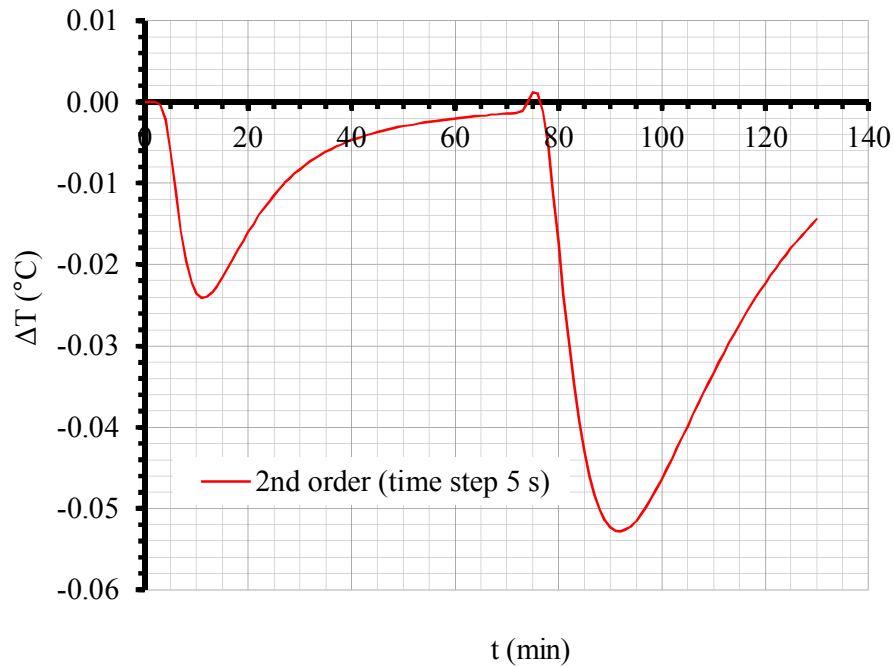
Στο Σχήμα 6.13 παρουσιάζεται το σφάλμα για την καλύτερη αριθμητική λύση (Case D, 10^{-9} , χρονικό βήμα 1 s, διακριτοποίηση δεύτερης τάξης). Η μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας σε σχέση με την αναλυτική λύση δεν ξεπερνά τους 0.034°C , τιμή διπλάσια από τη μέση (RMSE= 0.014°C , Πίνακας 6.2). Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζεται το σφάλμα για το επιλεγμένο μοντέλο λύσης πρώτα σε σύγκριση με την αναλυτική λύση (Σχήμα 6.13) και στη συνέχεια σε σύγκριση με την καλύτερη αριθμητική λύση (Σχήμα 6.14). Η μέγιστη τιμή του σφάλματος με την αναλυτική λύση προσεγγίζει τους 0.06°C για τη θέρμανση και τους 0.05°C για την ψύξη, ενώ στη σύγκριση με την καλύτερη αριθμητική λύση τους 0.024°C για τη θέρμανση και τους 0.053°C για την ψύξη.



Σχήμα 6.13. Το σφάλμα (διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ αναλυτικής και αριθμητικής λύσης) σε σχέση με την αναλυτική λύση, για το κέντρο για την καλύτερη περίπτωση αριθμητικής λύσης (Case D, 10^{-9} , χρονικό βήμα 1s, διακριτοποίηση δεύτερης τάξης).



Σχήμα 6.14. Το σφάλμα (διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ αναλυτικής και αριθμητικής λύσης) σε σχέση με την αναλυτική λύση για το κέντρο για την επιλεγμένη περίπτωση αριθμητικής λύσης (Case C, 10^{-9} , χρονικό βήμα 5s, χρονική διακριτοποίηση δεύτερης τάξης).



Σχήμα 6.15. Το σφάλμα (διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ αναλυτικής και αριθμητικής λύσης) για το κέντρο για την επιλεγμένη περίπτωση αριθμητικής λύσης (Case C, 10^{-9} , χρονικό βήμα 5s, χρονική διακριτοποίηση δεύτερης τάξης) σε σχέση με την καλύτερη αριθμητική λύση (Case D, 10^{-9} , χρονικό βήμα 1s, χρονική διακριτοποίηση δεύτερης τάξης).

6.3. Αξιολόγηση του αριθμητικού μοντέλου επίλυσης με μεταβλητό α

Μετά την επιλογή του πιο αποτελεσματικού μοντέλου, έγινε αξιολόγηση του μοντέλου επίλυσης με μεταβλητό συντελεστής θερμικής διαχυτότητας, α , για να διαπιστωθεί αν περιγράφει με μεγαλύτερη ακρίβεια τη θερμική διεργασία. Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 6.1, η παραδοχή σταθερού συντελεστής θερμικής διαχυτότητας, μπορεί να δικαιολογεί το σφάλμα που παρατηρείται στη σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα στο χρονικό διάστημα 60-150 min του κύκλου θέρμανσης. Συνεπώς, έγινε προσομοίωση της θερμικής διεργασίας με συντελεστή θερμικής διαχυτότητας που μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία (εξισώσεις Πίνακα 5.2 της ενότητας 5.1.2) και με διαφορετική αρχική τιμή ($\alpha=10^{-7}$ έως 1.43×10^{-7} m²/s) (Σχήμα 6.17). Για περαιτέρω σύγκριση των αποτελεσμάτων, υπολογίστηκε η τιμή F της διεργασίας με χρήση τιμών για την τιμή $z=10^\circ\text{C}$ και θερμοκρασία αναφοράς $T_{ref}=121.11^\circ\text{C}$.

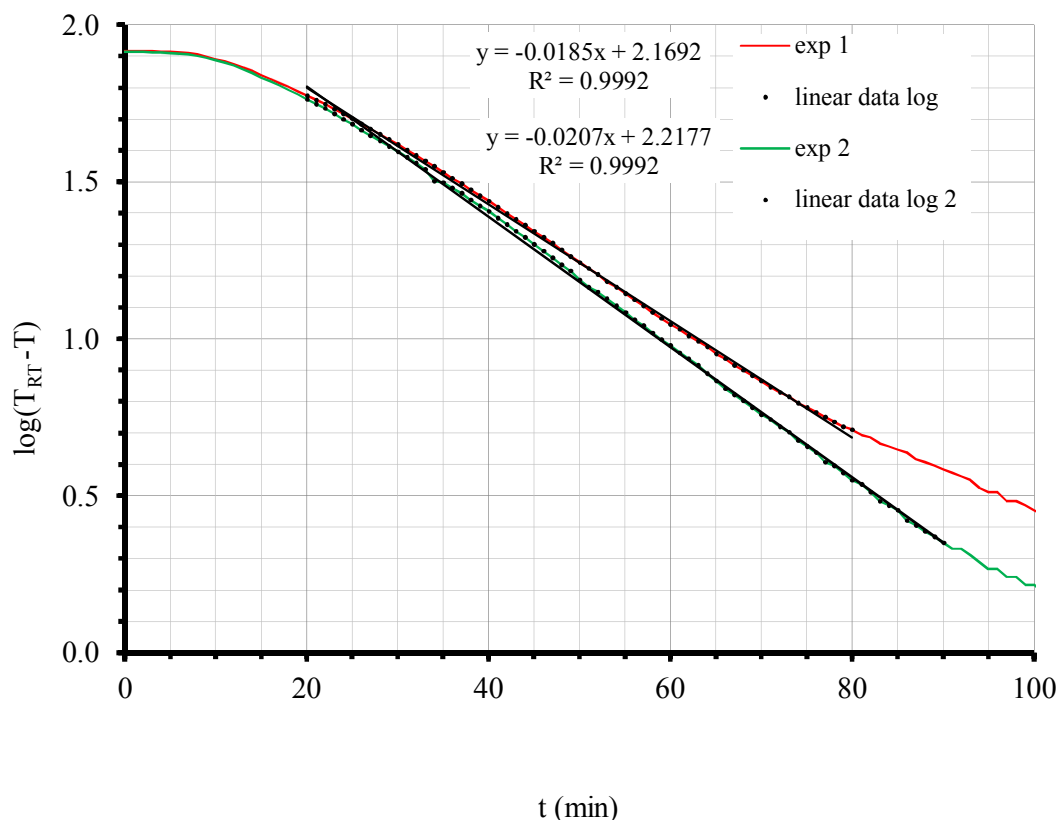
Για τον υπολογισμό της τιμής F για τα πειραματικά δεδομένα (Exp1, Exp2) ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία:

1. Προσδιορίστηκαν οι παράμετροι f_h και j_h από τις καμπύλες θερμικής διείσδυσης (Σχήμα 6.16). Οι τιμές f_h και j_h για την πρώτη σειρά, exp 1, υπολογίστηκαν 54.89 min και 1.77 αντίστοιχα, ενώ για τη δεύτερη σειρά, exp 2, 48.21 min και 2.06.
2. Υπολογίστηκαν οι τιμές $\log(g)$ από την εξίσωση (7) γνωρίζοντας ότι $B = 192 \text{ min}$, $T_{RT}=100^\circ\text{C}$, $T_{IT}=20^\circ\text{C}$ ως $\log(g) = -1.35$ και $\log(g) = -1.77$ για τα exp 1 και exp 2, αντίστοιχα.
3. Για τιμές $z = 18^\circ\text{F}$ και $m + g = T_{RT} - T_{IT} = 80^\circ\text{C} = 176^\circ\text{F}$ από τα διαγράμματα του Ball (Ball, 1923; Ball and Olson, 1957; NCA, 1968) υπολογίστηκε για τις παραπάνω τιμές $\log(g)$ η τιμή $\frac{f_h}{U} = 0.49$ και $\frac{f_h}{U} = 0.40$ για τα exp 1 και exp 2, αντίστοιχα.
4. Τέλος, υπολογίστηκαν οι τιμές F με βάση τις τιμές $\frac{f_h}{U}$ από την εξίσωση:

$$F_{T_{ref}}^z = \frac{f_h}{\frac{f_h}{U} F_i} \quad (55)$$

και

$$F_i = 10^{\frac{T_{ref}-T_{RT}}{z}} = 10^{\frac{121.11-100}{10}} = 129.12$$

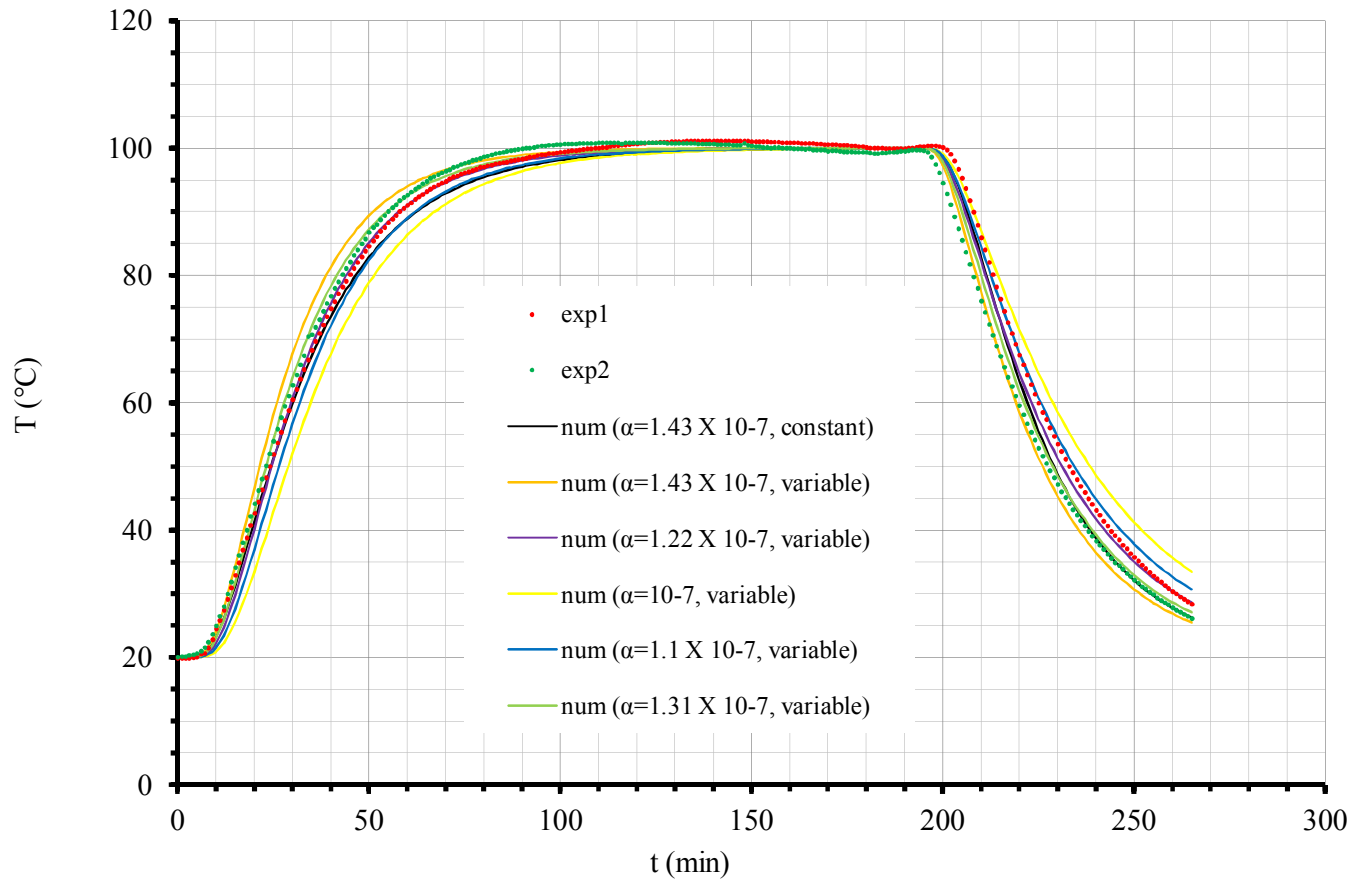


Σχήμα 6.16. Καμπύλες θερμικής διείσδυσης για τα θερμοκρασιακά δεδομένα του Σχήμα τος 6.1.

Οι περιπτώσεις που ελαχιστοποιούν το σφάλμα στο χρονικό διάστημα 60-150 min είναι αυτές με $\alpha=1.22 \times 10^{-7}$ και $\alpha=1.31 \times 10^{-7}$ m²/s, ενώ συνολικά η πρώτη περίπτωση έχει ελάχιστο σφάλμα σε σχέση με την 1^η σειρά πειραματικών δεδομένων (RMSE=1.47°C), ενώ η δεύτερη περίπτωση με με την 2^η σειρά πειραματικών δεδομένων (RMSE=1.46°C). Οι τιμές F για τις δύο περιπτώσεις αντίστοιχα είναι 0.90 και 0.93 min, με την 1^η περίπτωση με $\alpha=1.22 \times 10^{-7}$ m²/s να είναι μεταξύ της τιμής F και των δύο σειρών πειραματικών δεδομένων (0.87-0.93). Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε να εισαχθεί στο μοντέλο επίλυσης της “πλήρωση εν θερμώ” διεργασίας η θερμοκρασιακή εξάρτηση του συντελεστή θερμικής διαχυτότητας με αρχική τιμή την $\alpha=1.22 \times 10^{-7}$ m²/s (Πίνακας 6.3).

Πίνακας 6.3. Σύγκριση των πειραματικών δεδομένων (Exp. 1 και Exp. 2) με τις περιπτώσεις με μεταβλητό και σταθερό συντελεστή θερμικής διαχυτότητας, α .

	Exp 1	Exp 2	Μεταβλητό α (m ² /s)				Σταθερό α (m ² /s)
	Ball, 1923		$1 \cdot 10^{-7}$	$1.1 \cdot 10^{-7}$	$1.22 \cdot 10^{-7}$	$1.31 \cdot 10^{-7}$	$1.43 \cdot 10^{-7}$
F (min)	0.87	0.93	0.81	0.86	0.90	0.93	0.97
RMSE (°C) (Exp1)			4.14	2.05	1.47	2.52	4.19
RMSE (°C) (Exp2)			6.68	4.40	2.59	1.46	1.77

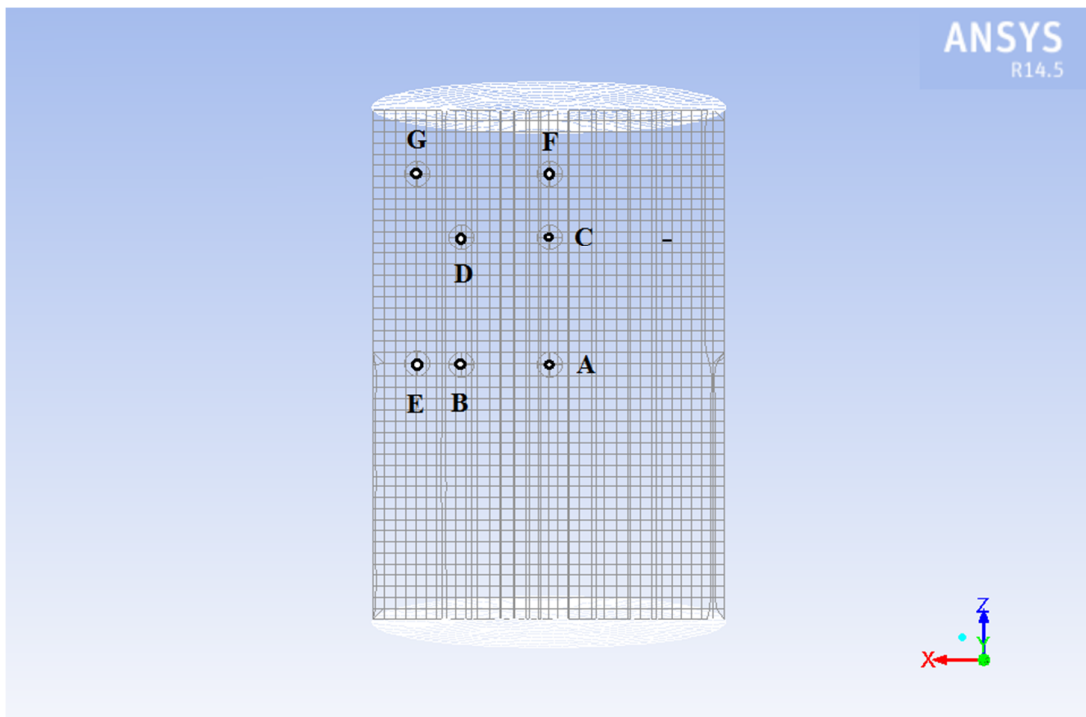


Σχήμα 6.17. Το χρονοθερμοκρασιακό προφίλ για το κέντρο για τις περιπτώσεις με διαφορετικό συντελεστή θερμικής διαχυτότητας (σταθερό και εξαρτώμενο από τη θερμοκρασία) σε σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα.

6.4. Αξιολόγηση της “πλήρωση εν θερμώ” διεργασίας

6.4.1. Το προφίλ της διεργασίας (μεταλλική συσκευασία) στη βιομηχανική πρακτική σε διάφορα σημεία του περιέκτη

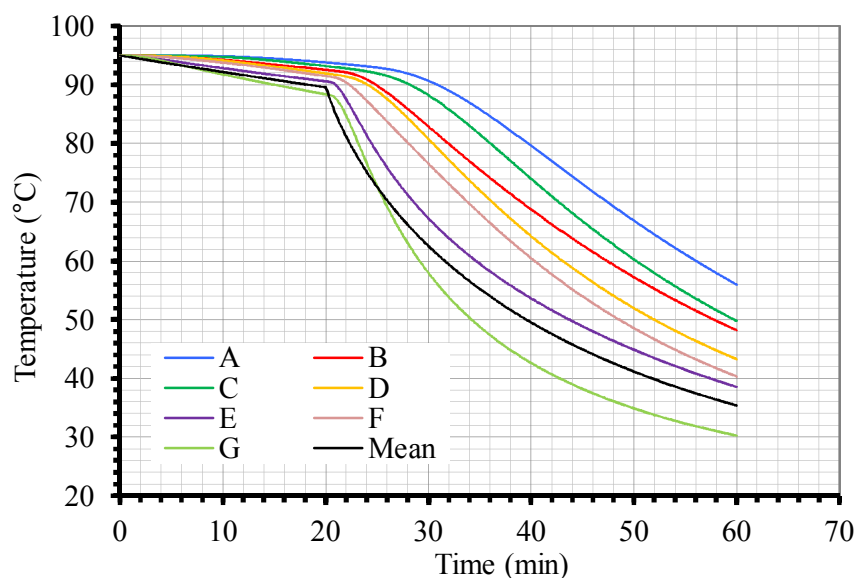
Στην ελληνική βιομηχανία τομάτας όπως έγινε αναφορά στη θεωρία, το προϊόν εισάγεται θερμό στον περιέκτη σε θερμοκρασία 95°C και διατηρείται στον αέρα για 20 min, πριν ψυχθεί στο νερό, μέχρι η μέση θερμοκρασία του να φτάσει τους 35-40°C. Η διεργασία αυτή προσομοιώθηκε στο Fluent με τις προαναφερθείσες συνθήκες και εξετάστηκαν όλες οι παράμετροι του προϊόντος σε 7 σημεία του περιέκτη (Σχήμα 6.18).



Σχήμα 6.18. Τα 7 σημεία στα οποία έγινε καταγραφή όλων των μετρούμενων ιδιοτήτων, $A (0,0,0)$, $B (0.01825,0,0)$, $C (0,0,0.0265)$, $D (0.01825,0,0.0265)$, $E (0.027375,0,0)$, $F (0,0,0.03975)$, $G (0.027375,0,0.03975)$.

Το προφίλ της θερμοκρασίας του προϊόντος στα 7 σημεία κατά τη διεργασία φαίνεται στο Σχήμα 6.19. Η θερμοκρασιακή μεταβολή δεν είναι μεγάλη στα πρώτα 20 λεπτά της διεργασίας όπου το προϊόν ψύχεται στον αέρα, ενώ κατά την ψύξη στο νερό οι

θερμοκρασιακές διαφορές μεγαλώνουν μεταξύ των σημείων, με το κέντρο (σημείο A) να έχει την υψηλότερη θερμοκρασία στο τέλος της διεργασίας, ενώ τα πιο απομακρυσμένα από το κέντρο σημεία (E, F, G) έχουν τη χαμηλότερη θερμοκρασία.

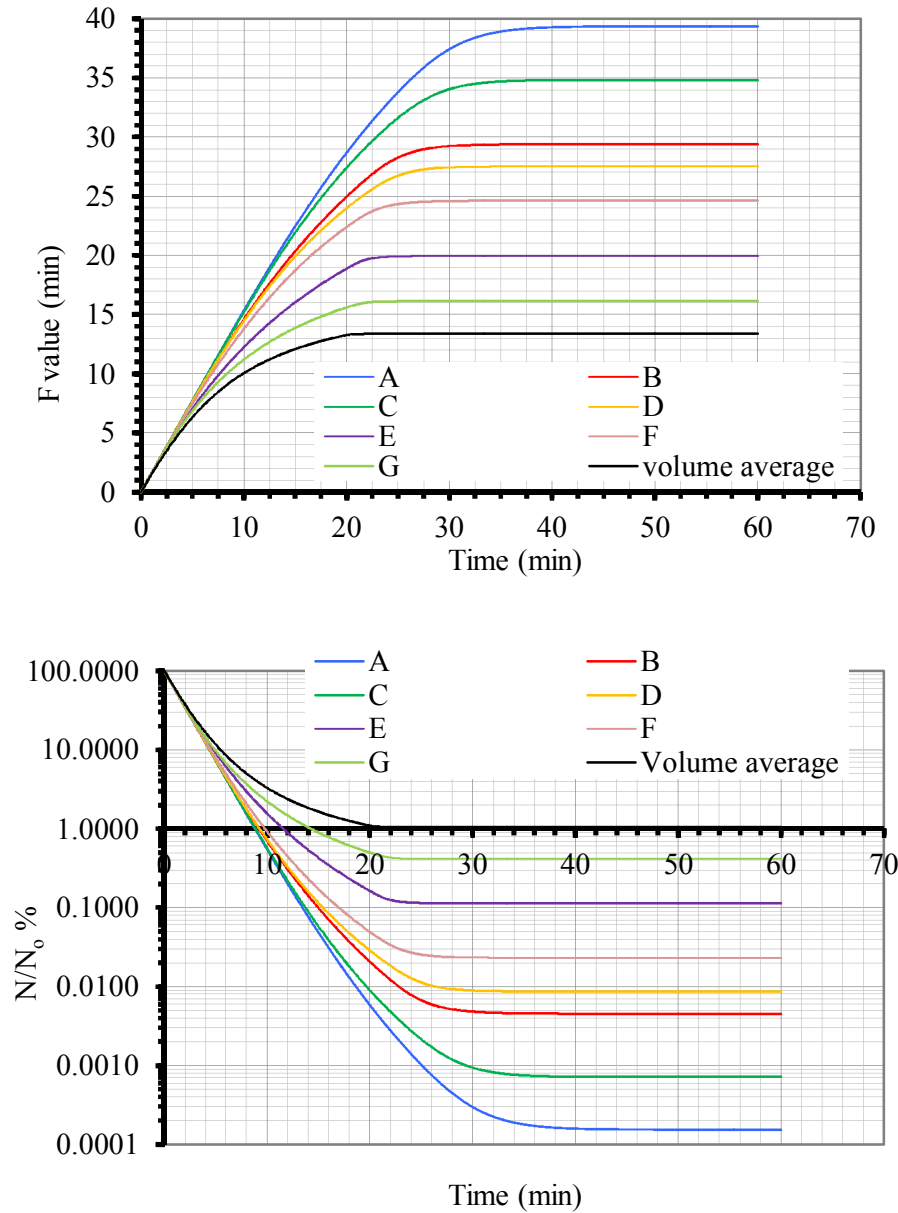


Σχήμα 6.19. Το χρονοθερμοκρασιακό προφίλ για 7 σημεία στον περιέκτη και η μέση θερμοκρασία, για την περίπτωση με $T_{\text{IT}}=95^{\circ}\text{C}$, $h_{\text{air}}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ για 20 min ψύξη στον αέρα, ακολουθούμενη από ψύξη στο νερό.

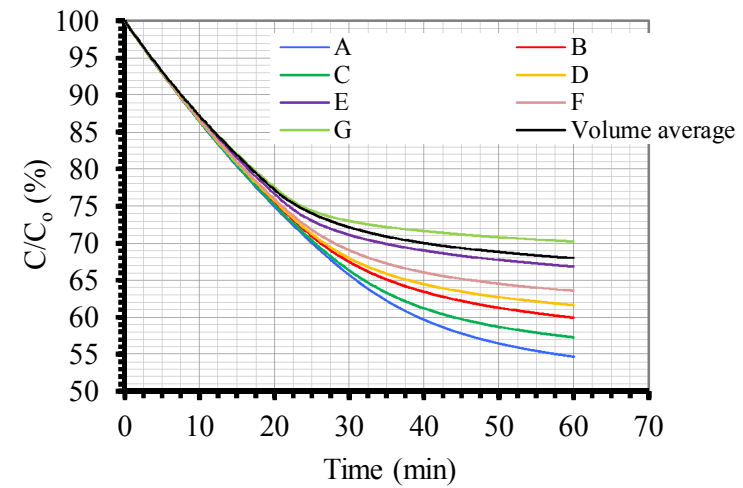
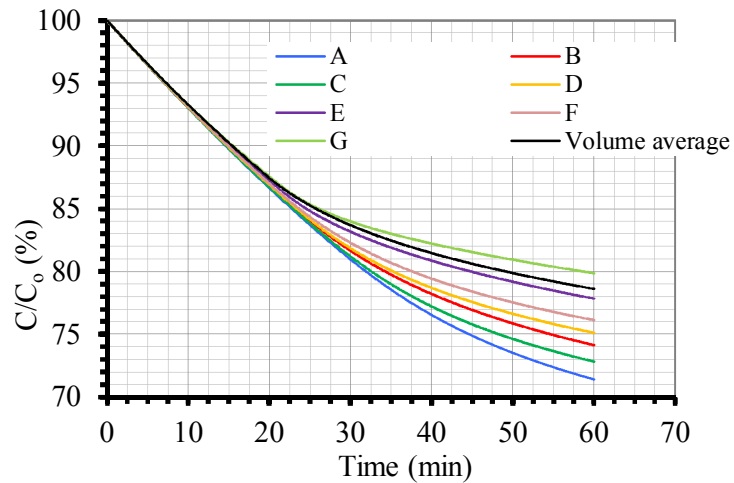
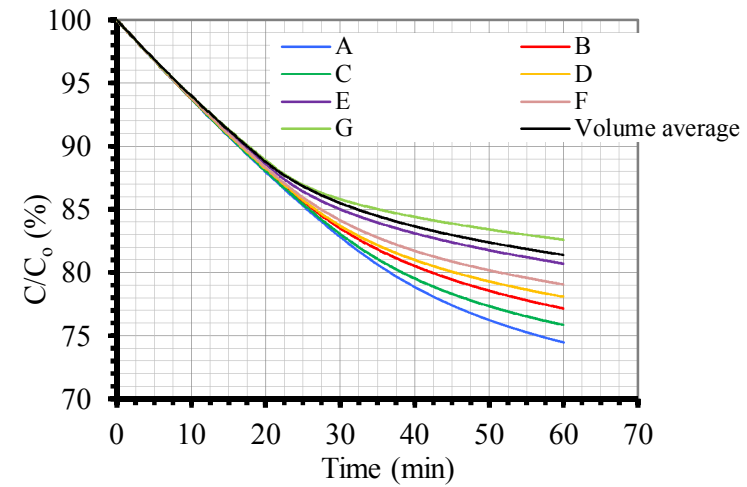
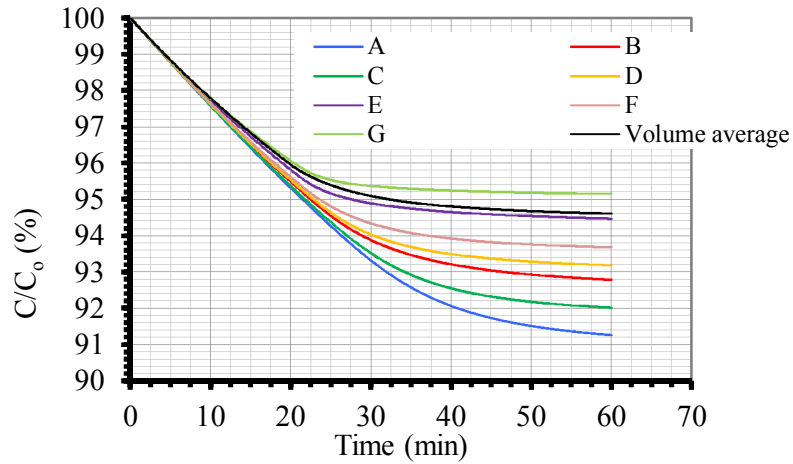
Στην ίδια λογική, τα σημεία κοντύτερα στο κέντρο στα οποία καταγράφηκαν υψηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με τα πιο απομακρυσμένα, είχαν αντίστοιχα τις υψηλότερες τιμές F και τη μεγαλύτερη λογαριθμική καταστροφή του μικροοργανισμού (Σχήμα 6.20). Η τιμή αποστείρωσης για το κέντρο ήταν $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} \approx 40 \text{ min}$ ενώ για το σημείο G, $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} \approx 16 \text{ min}$ (Σχήμα 6.20). Η μείωση του πληθυσμού του *B. coagulans* N/N_0 στο κέντρο ήταν σχεδόν 6 λογαριθμικοί κύκλοι, ενώ στο σημείο G, 2.5 λογαριθμικοί κύκλοι (Σχήμα 6.20). Φαίνεται ότι η τιμή F και η % επιβίωση του μικροοργανισμού για το συνολικό όγκο του προϊόντος είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες τιμές για πιο απομακρυσμένο σημείο, G στο οποίο έγινε καταγραφή. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί αν υπολογιστεί ο όγκος ο οποίος περιλαμβάνει τα σημεία καταγραφής. Σύμφωνα με τις

συντεταγμένες του σημείου G αυτός μπορεί να υπολογιστεί ως: $Dx \times Dy \times Dz = (0.027375 \times 2) \times (0.027375 \times 2) \times (0.03975 \times 2) = 2.3831 \times 10^{-4} m^3$. Ο συνολικός όγκος του περιέκτη υπολογίζεται ως: $\pi \times R^2 \times L = 3.14 \times (0.0365)^2 \times 0.106 = 4.4365 \times 10^{-4} m^3$. Ο λόγος των δύο παραπάνω όγκων δείχνει ότι το 52% του όγκου της κονσέρβας περιέχει τα σημεία στα οποία έγιναν οι καταγραφές. Δηλαδή, ο μισός όγκος της κονσέρβας είναι έξω από τα όρια καταγραφής και άρα είναι τα σημεία σε αυτές τις περιοχές θα έχουν τιμές F_s κοντά και κάτω από τη μέση τιμή του όγκου τις κονσέρβας για τις υπολογιζόμενες μεταβλητές.

Όσον αφορά τις διαφορές που παρατηρούνται για τα ποιοτικά χαρακτηριστικά που υπολογίστηκαν τη μεγαλύτερη διατήρηση έχουν τα ψυχρότερα σημεία (E, F, G) για όλα τα ποιοτικά χαρακτηριστικά (χρώμα, βιταμίνη C, καροτενοειδή) ενώ η μέση διατήρηση ποιοτικού παράγοντα του όγκου είναι κοντά στη σημειακή τιμή διατήρησης του σημείο E (Σχήμα 6.21). Τη μεγαλύτερη διατήρηση από τους ποιοτικούς παράγοντες έχουν τα καροτενοειδή, (94.6%), γεγονός που δικαιολογείται από τη εξαιρετικά μεγάλη τιμή $D_{90^\circ C}$ που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση. Η βιταμίνη C και ο λόγος a/b του χρώματος ακολουθούν εμφανίζοντας παραπλήσια θερμοανθεκτικότητα, με το λόγο a/b να είναι λίγο πιο θερμοευαίσθητος (78.6% έναντι 81.41% αντίστοιχα). Ο πιο θερμοευαίσθητος παράγοντας φαίνεται να είναι η παράμετρος L του χρώματος (68%).



Σχήμα 6.20. Η τιμή παστερίωσης F ($F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}}$) (πάνω) και η % επιβίωση του *B.coagulans* N/N_0 (κάτω) σε 7 σημεία και σε όλο τον όγκο περιέκτη, για την περίπτωση με $T_{IT}=95^{\circ}\text{C}$, $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ για 20 min ψύξη στον αέρα, ακολουθούμενη από ψύξη στο νερό.

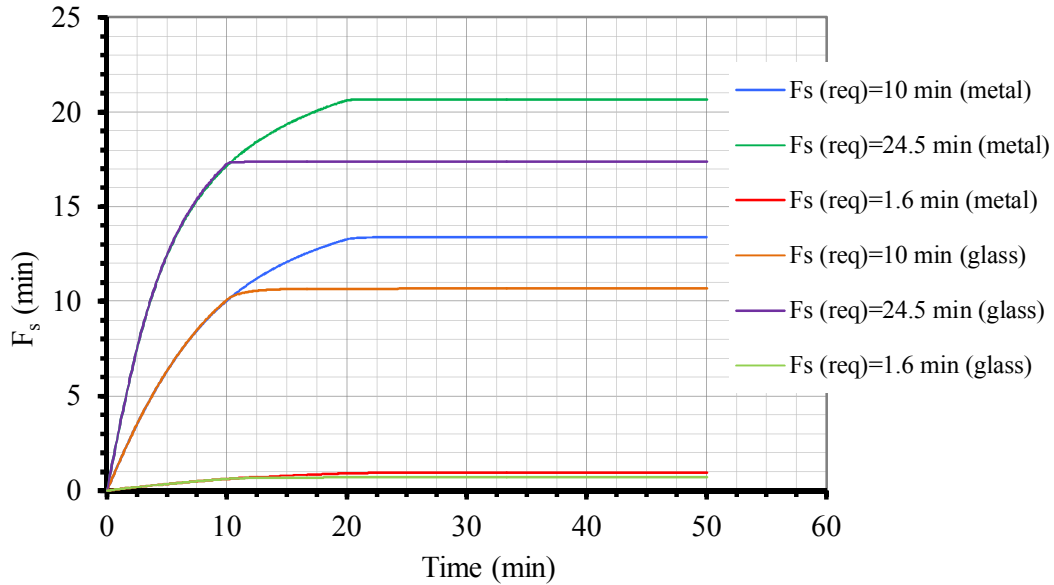


Σχήμα 6.21. Η % διατήρηση των καροτενοειδών (πάνω αριστερά), της βιταμίνης C (πάνω δεξιά), του χρώματος (λόγος a/b , κάτω αριστερά, L , κάτω δεξιά), σε 7 σημεία και σε όλο τον όγκο περιέκτη, για την περίπτωση με $T_{IT}=95^{\circ}C$, $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ για 20 min ψύξη στον αέρα, ακολουθούμενη από ψύξη στο νερό.

6.4.2. Το προφίλ της διεργασίας στη βιομηχανική πρακτική (μεταλλική και γυάλινη συσκευασία) ως συνάρτηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στον αέρα

Η αξιολόγηση της διεργασίας με βάση την ολοκληρωμένη τιμή F_s φαίνεται στο Σχήμα 6.22, όπου απεικονίζεται η ολοκληρωμένη τιμή F_s για τις περιπτώσεις με $T_{IT}=95^{\circ}\text{C}$, $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ για 20 min ψύξη στον αέρα σε μεταλλική κονσέρβα και 10 min ψύξη στον αέρα σε γυάλινο βάζο, ακολουθούμενα από ψύξη στο νερό.

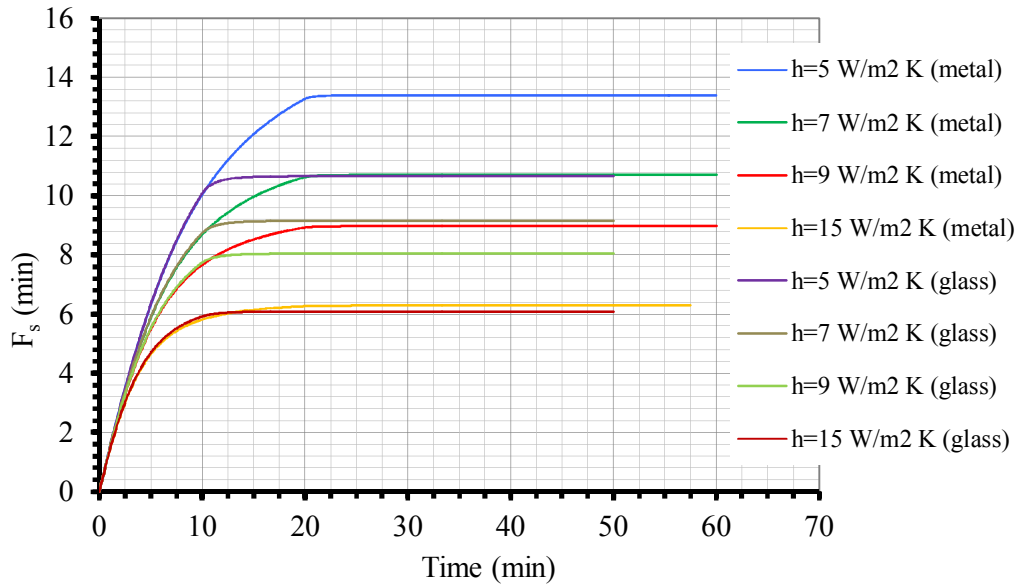
Από τις τρεις απαιτούμενες τιμές F_s , η διεργασία επιτυγχάνει μόνο την $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 10 \text{ min}$, ενώ έρχεται αρκετά κοντά στην δεύτερη τιμή $F_{90^{\circ}\text{C}}^{9.5^{\circ}\text{C}} = 24.5 \text{ min}$ στην περίπτωση με την μεταλλική συσκευασία.



Σχήμα 6.22. Η “πλήρωση εν θερμώ” διεργασία σε συνάρτηση με την απαιτούμενη ολοκληρωμένη τιμή F_s για τις περιπτώσεις με $T_{IT}=95^{\circ}\text{C}$, $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ για 20 min ψύξη στον αέρα σε μεταλλική κονσέρβα και 10 min ψύξη στον αέρα σε γυάλινο βάζο, ακολουθούμενα από ψύξη στο νερό.

Η “πλήρωση εν θερμώ” διεργασία στη βιομηχανική πρακτική εξετάστηκε και με βάση το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στον αέρα, στο εύρος $h_{air}=5-15 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ (Σχήμα 6.23). Από το διάγραμμα φαίνεται ότι όταν ο $h_{air}=5-7 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, στο μεταλλικό περιέκτη και $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ στο γυάλινο περιέκτη, επιτυγχάνεται η ολοκληρωμένη τιμή

$F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 10 \text{ min}$, ενώ αυτό δε συμβαίνει στις περιπτώσεις με μεγαλύτερο h_{air} . Η διαφορετική συσκευασία από μόνη της δε φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά την τιμή F_s της διεργασίας, με την προϋπόθεση ίδιου συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στον αέρα για τις δύο συσκευασίες.

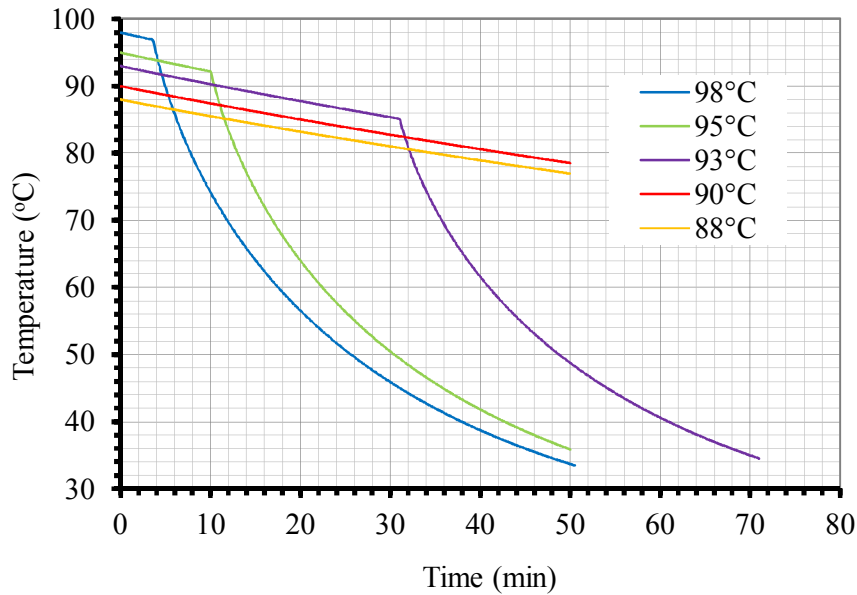


Σχήμα 6.23. Η ολοκληρωμένη τιμή $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}}$ σε συνάρτηση με το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στον αέρα για την περίπτωση με $T_{IT}=95^{\circ}\text{C}$, $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ για 20 min ψύξη στον αέρα σε μεταλλική κονσέρβα και 10 min στον αέρα σε γυάλινο βάζο, ακολουθούμενα από ψύξη στο νερό.

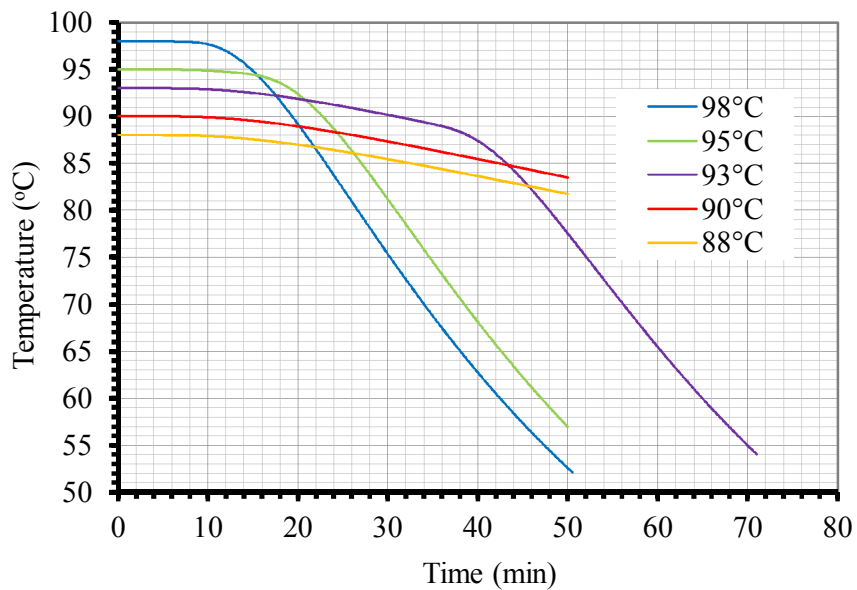
6.4.3. Επίδραση της θερμοκρασίας γεμίσματος, T_{IT}

Η επίδραση της θερμοκρασίας γεμίσματος στο βαθμό αποστείρωσης και στα ποιοτικά χαρακτηριστικά παρουσιάζεται στα διαγράμματα που ακολουθούν. Αρχικά, στο Σχήμα 6.24 φαίνεται η μέση θερμοκρασία του περιέκτη κατά τη διάρκεια της διεργασίας και στο Σχήμα 6.25 η θερμοκρασία στο κέντρο. Στις θερμοκρασίες γεμίσματος 98°C , 95°C , 93°C το προφίλ της μέσης θερμοκρασίας παρουσιάζει 2 φάσεις, η πρώτη φάση με την ψύξη στον αέρα είναι μια ευθεία, ενώ στη δεύτερη φάση όπου ο περιέκτης μεταφέρεται στο νερό η μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας είναι πιο απότομη και παρουσιάζει μια καμπύλη. Οι

θερμοκρασίες γεμίσματος 88°C, 90°C δεν πετυχαίνουν την απαιτούμενη τιμή $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 10 \text{ min}$ οπότε η διεργασία δεν ολοκληρώνεται ποτέ.

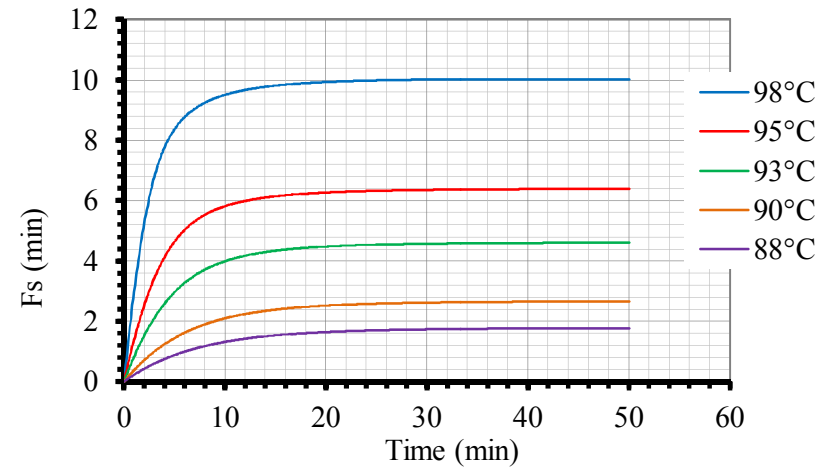
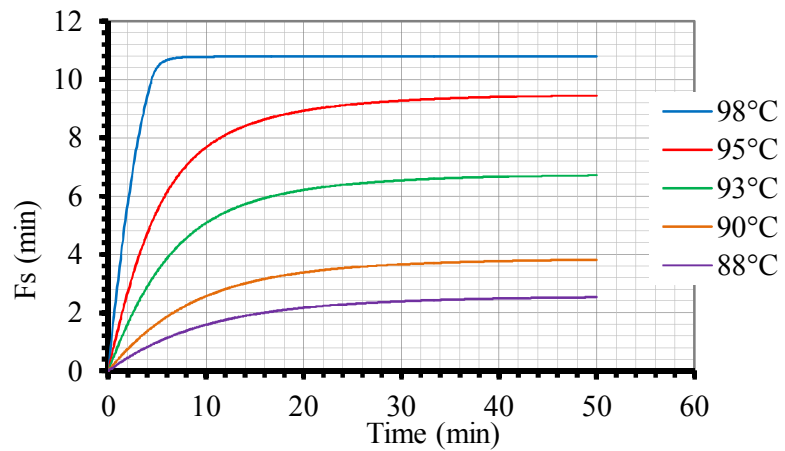
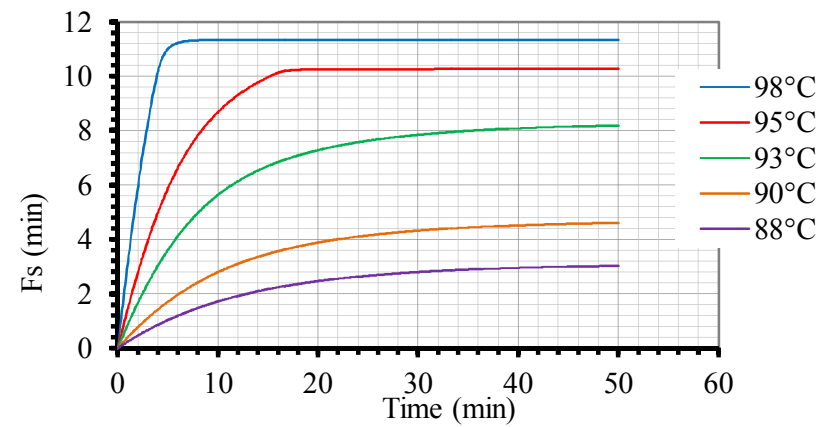
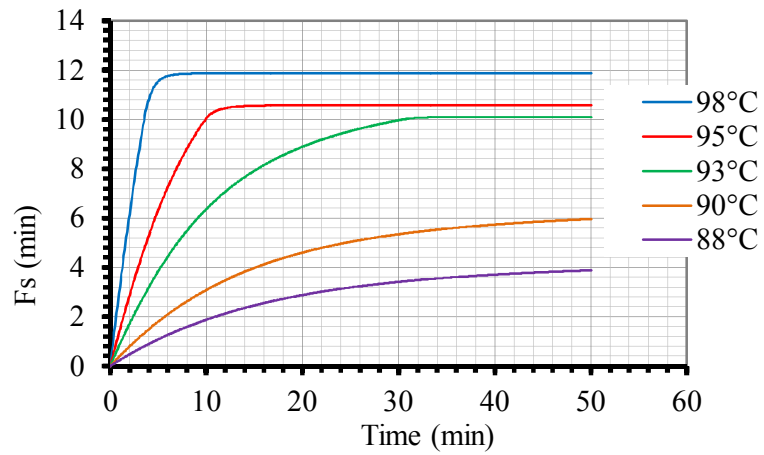


Σχήμα 6.24. Η μέση θερμοκρασία του περιέκτη κατά την “πλήρωση εν θερμώ” διεργασία σε όλες τις θερμοκρασίες γεμίσματος ($h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$).



Σχήμα 6.25. Η θερμοκρασία στο κέντρο του περιέκτη κατά την “πλήρωση εν θερμώ” διεργασία σε όλες τις θερμοκρασίες γεμίσματος ($h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$).

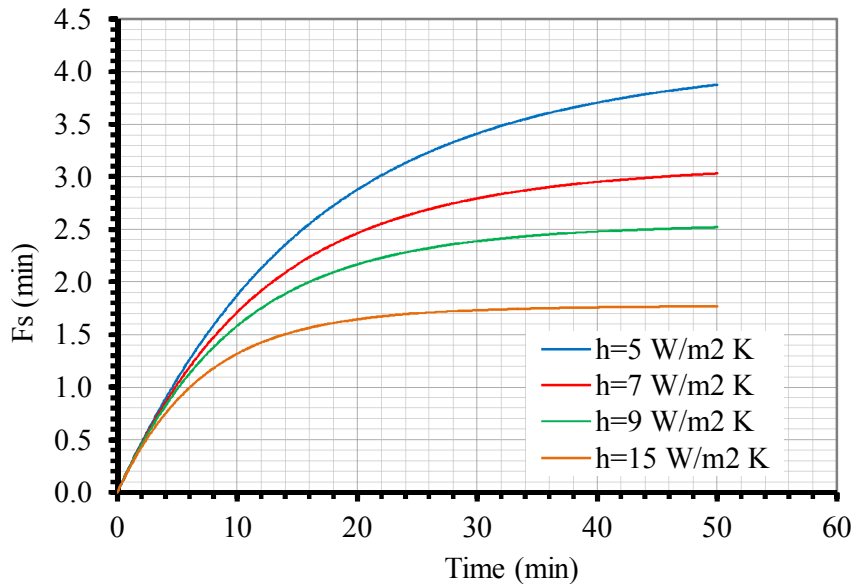
Εξετάζοντας την επίδραση της θερμοκρασίας γεμίσματος, T_{IT} στην επίτευξη της απαιτούμενης τιμής F_s , μεταβάλλοντας παράλληλα το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στον αέρα, παρατηρείται αρχικά ότι και στην ευνοϊκότερη περίπτωση για $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, τρεις θερμοκρασίες γεμίσματος 98°C , 95°C , 93°C , πετυχαίνουν την ελάχιστη απαιτούμενη τιμή $F_{93.33^\circ\text{C}}^{8.89^\circ\text{C}} = 10 \text{ min}$, ενώ οι 88°C , 90°C αποδεικνύονται ανεπαρκείς (Σχήμα 6.26). Όταν ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας αυξάνεται στη τιμή $h_{air}=7 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, οι θερμοκρασίες γεμίσματος που επιτυγχάνουν την απαιτούμενη τιμή F , είναι οι 98°C , 95°C (Σχήμα 6.26), ενώ στη τιμή $h_{air}=9 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ μόνο η θερμοκρασία των 98°C είναι επαρκής (Σχήμα 6.26). Ακόμη και στην ακραία περίπτωση που ο $h_{air}=15 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ η θερμοκρασία γεμίσματος των 98°C χαρακτηρίζεται επαρκής έστω και οριακά (Σχήμα 6.26). Οι Sandoval *et al.* (1994) μελέτησαν την “πλήρωση εν θερμώ” διεργασία τοματοπολτού σε γυάλινα βάζα, για θερμοκρασίες γεμίσματος 85°C , 90°C , 92°C , 94°C , 95°C , αλλά με παραμέτρους το αρχικό μικροβιακό φορτίο και το μέγεθος του περιέκτη, επίσης αναφέρουν ανεπάρκεια των θερμοκρασιών έως 90°C (με εξαίρεση το αρχικό μικροβιακό φορτίο των 10^2 σπόρων/βάζο), για βάζα έως 500 cm^3 .



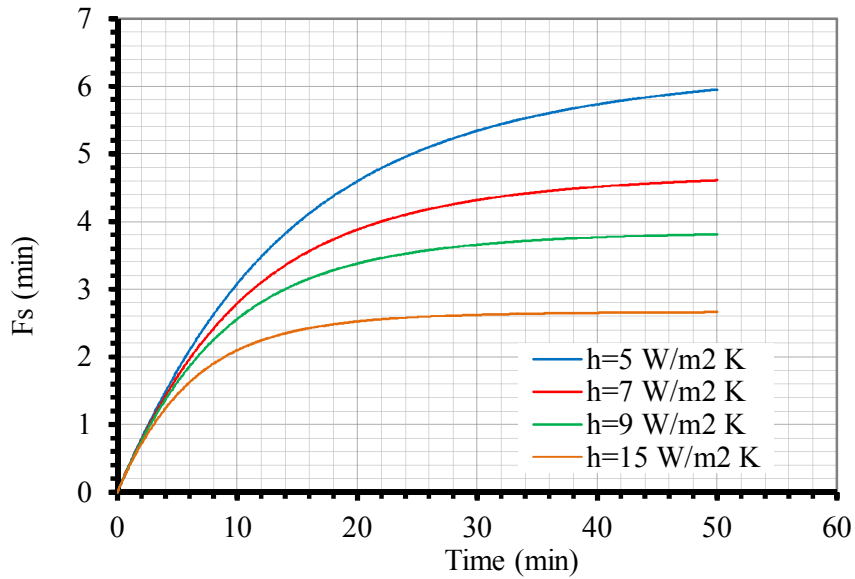
Σχήμα 6.26. Η ολοκληρωμένη τιμή F_s ($F_{93.33^\circ\text{C}}^{8.89^\circ\text{C}}$) σε όλες τις θερμοκρασίες γεμίσματος της διεργασίας για $h=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ (πάνω αριστερά), $h=7 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ (πάνω δεξιά), $h_{air}=9 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ (κάτω αριστερά), $h_{air}=15 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ (κάτω δεξιά).

6.4.4. Επίδραση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στον αέρα, h_{air}

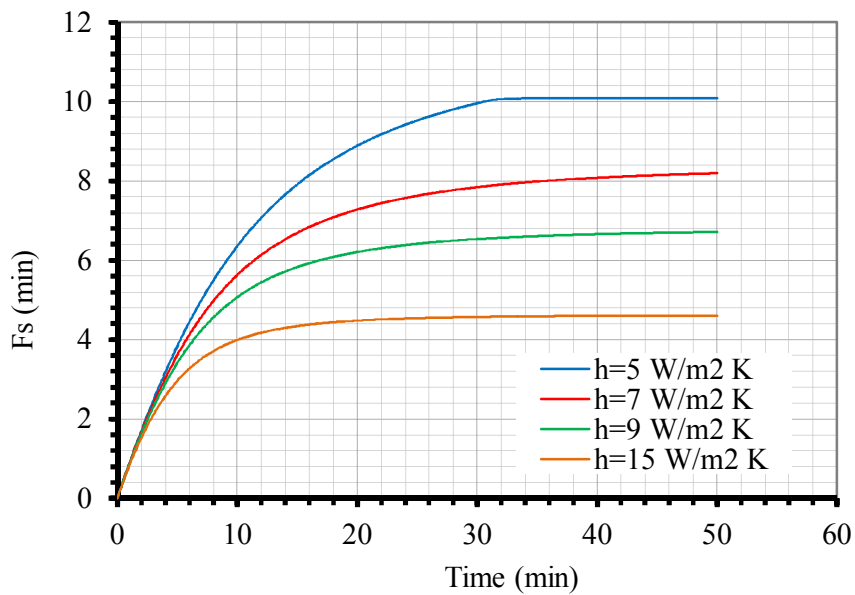
Στα σχήματα που ακολουθούν εξετάζεται η επίδραση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στον αέρα, σε συνδυασμό με τη θερμοκρασία γεμίσματος (Σχήματα 6.27-6.31). Σε κάθε περίπτωση παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας τόσο μειώνεται η τιμή F_s . Οι θερμοκρασίες γεμίσματος 88°C , 90°C ανεξάρτητα του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας είναι ανεπαρκείς όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα (Σχήματα 6.27, 6.28). Στη θερμοκρασία γεμίσματος των 93°C , η απαιτούμενη τιμή $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 10 \text{ min}$ επιτυγχάνεται μόνο όταν $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ (Σχήμα 6.29). Στη θερμοκρασία γεμίσματος των 95°C η απαιτούμενη τιμή F επιτυγχάνεται στις περιπτώσεις με $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ και $h_{air}=7 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ (Σχήμα 6.30), ενώ στην υψηλότερη θερμοκρασία γεμίσματος των 98°C η απαιτούμενη τιμή F επιτυγχάνεται σε όλες τις μεταβολές του h_{air} , αλλά για την ακραία τιμή $h_{air}=15 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ο απαιτούμενος χρόνος κράτησης στον αέρα είναι πολύ μεγαλύτερος σε σχέση με τις άλλες περιπτώσεις για τις οποίες ο χρόνος κράτησης είναι μικρός (Σχήμα 6.31).



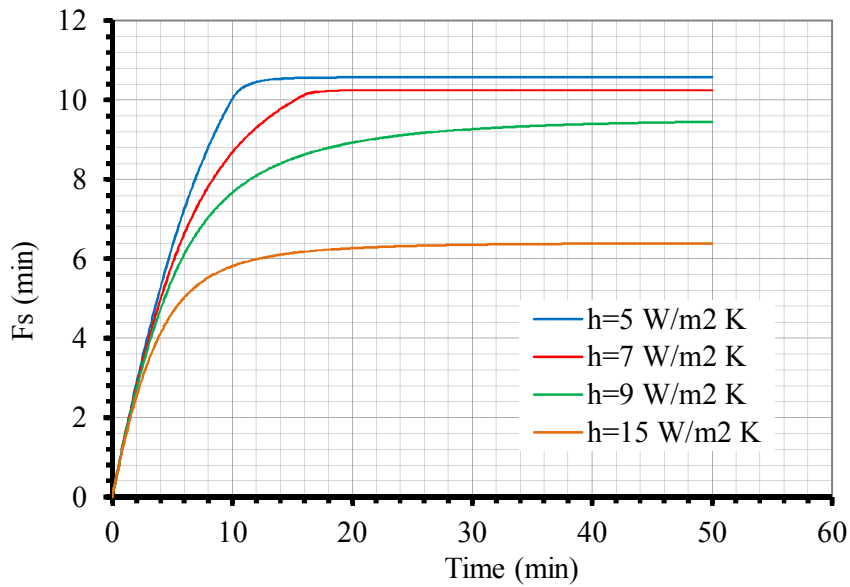
Σχήμα 6.27. Η ολοκληρωμένη τιμή F_s ($F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}}$) για όλους τους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας που εξετάστηκαν ($T_{IT}=88^{\circ}\text{C}$).



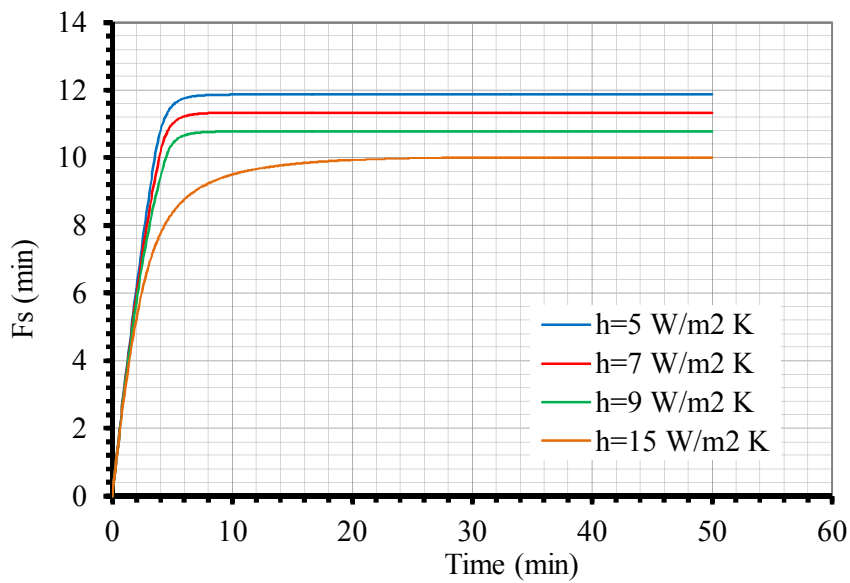
Σχήμα 6.28. Η ολοκληρωμένη τιμή F_s ($F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}}$) για όλους τους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας που εξετάστηκαν ($T_{IT}=90^{\circ}\text{C}$).



Σχήμα 6.29. Η ολοκληρωμένη τιμή F_s ($F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}}$) για όλους τους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας που εξετάστηκαν ($T_{IT}=93^{\circ}\text{C}$).



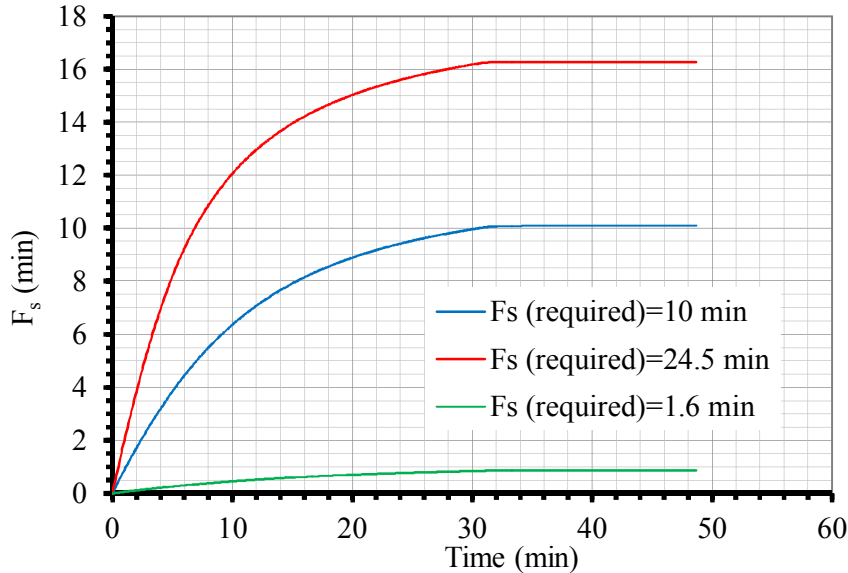
Σχήμα 6.30. Η ολοκληρωμένη τιμή F_s ($F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}}$) για όλους τους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας που εξετάστηκαν ($T_{IT}=95^{\circ}\text{C}$).



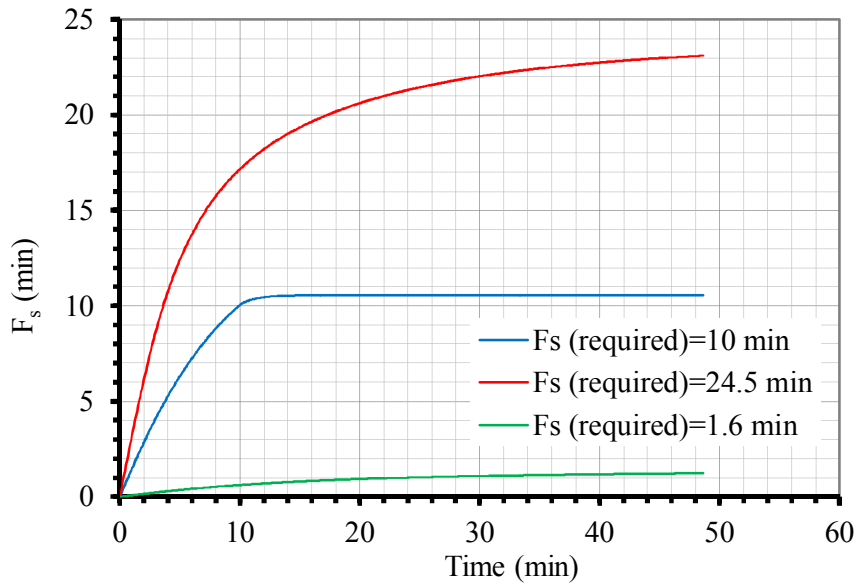
Σχήμα 6.31. Η ολοκληρωμένη τιμή F_s ($F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}}$) για όλους τους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας που εξετάστηκαν ($T_{IT}=98^{\circ}\text{C}$).

6.4.5. Επίδραση της ολοκληρωμένης τιμής F_s

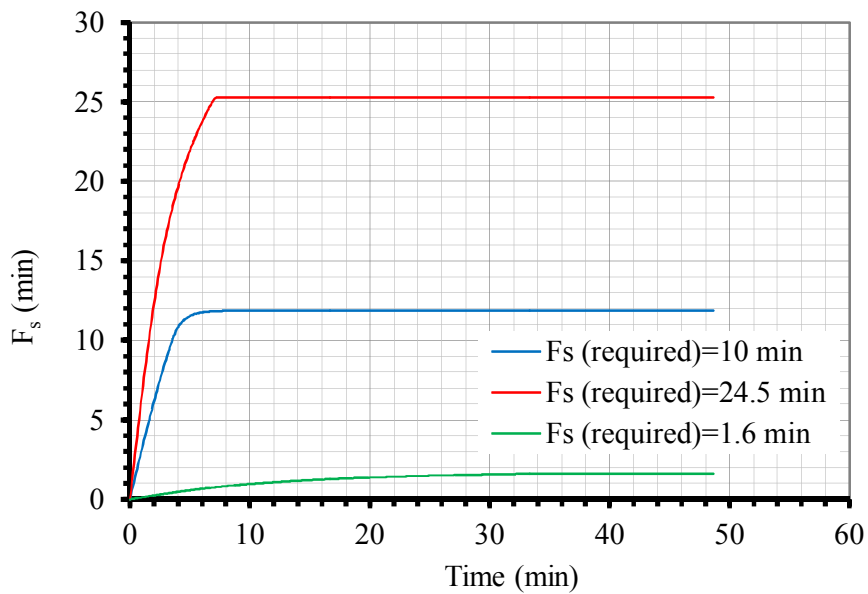
Αγνοώντας τις θερμοκρασίες γεμίματος 88°C , 90°C αφού δεν πέτυχαν την ελάχιστη απαιτούμενη τιμή F , εξετάζονται οι υπόλοιπες ως προς την επίδραση της απαιτούμενης τιμής F . Για την περίπτωση με $T_{IT}=93^{\circ}\text{C}$, 95°C $h=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ δεν ήταν δυνατή η επίτευξη των άλλων απαιτούμενων τιμών $F_{90^{\circ}\text{C}}^{9.5^{\circ}\text{C}} = 24.5 \text{ min}$ και $F_{110^{\circ}\text{C}}^{13.7^{\circ}\text{C}} = 1.6 \text{ min}$ για όσο διάστημα και να έμεναν οι περιέκτες σε αέρια ψύξη (Σχήματα 6.32-6.33). Μόνο η θερμοκρασία γεμίματος των 98°C ήταν ικανή να επιτύχει και τις τρεις απαιτούμενες τιμές F_s αυξάνοντας ανάλογα τον χρόνο διατήρησης στον αέρα (Σχήμα 6.34).



Σχήμα 6.32. Η επίδραση της ολοκληρωμένης τιμής F_s για $T_{IT}=93^{\circ}\text{C}$, $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.



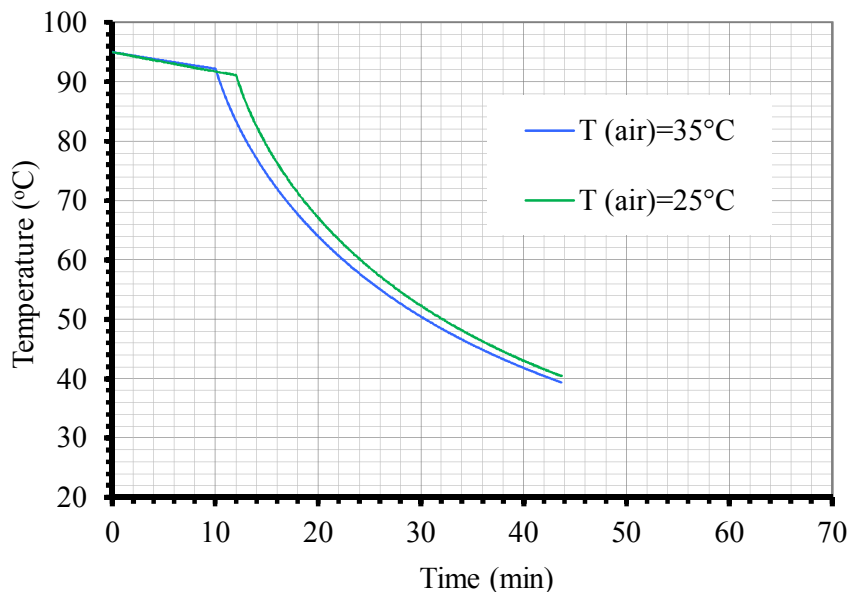
Σχήμα 6.33. Η επίδραση της ολοκληρωμένης τιμής F_s για $T_{IT}=95^{\circ}\text{C}$, $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.



Σχήμα 6.34. Η επίδραση της ολοκληρωμένης τιμής F_s για $T_{IT}=98^{\circ}\text{C}$, $h=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

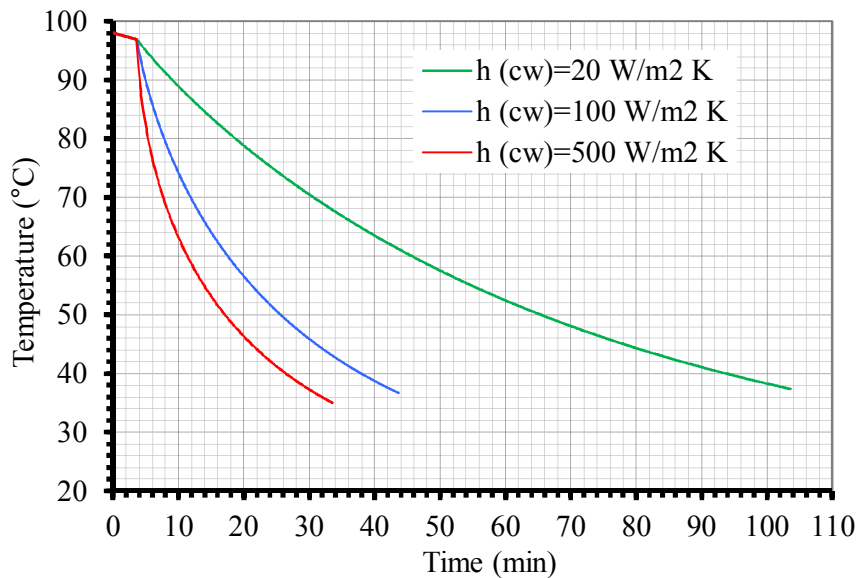
6.4.6. Επίδραση της θερμοκρασίας του αέρα και του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στο νερό

Η θερμοκρασία του αέρα κατά την “πλήρωση εν θερμώ” διεργασία προσομοιώθηκε σε δύο θερμοκρασίες $T_{air}=25^{\circ}\text{C}$, 35°C . Η θερμοκρασία του αέρα εξαρτάται από την περίοδο συγκομιδής και μεταποίησης της τομάτας. Η μεγαλύτερη συγκομιδή της βιομηχανικής τομάτας στην ελληνική επικράτεια γίνεται κατά το τέλος της καλοκαιρινής περιόδου, εποχή με σχετικά υψηλές θερμοκρασίες αέρα ($>35^{\circ}\text{C}$). Οι Sandoval *et al.* (1994) αναφέρουν μικρότερες θερμοκρασίες για την παραγωγή τοματοπολτού στη Βενεζουέλα (28°C). Η παράμετρος αυτή φαίνεται να έχει τη μικρότερη επίδραση καθώς από την προσομοίωση για την περίπτωση με $T_{IT}=95^{\circ}\text{C}$, $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ φαίνεται ότι ο χρόνος κράτησης στον αέρα που απαιτείται για την επίτευξη της απαιτούμενης τιμής F , αυξάνεται μόνο κατά 2 min στην περίπτωση με $T_{air}=25^{\circ}\text{C}$, σε σχέση με την περίπτωση με $T_{air}=35^{\circ}\text{C}$ (Σχήμα 6.35). Επίσης, η επίδραση της εξαρτάται άμεσα από τις κύριες παραμέτρους, T_{IT} και h_{air} , καθώς στην περίπτωση με $T_{IT}=98^{\circ}\text{C}$, $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ όπου ο χρόνος κράτησης στον αέρα είναι μόνο 3.58 min δεν υπάρχει ουσιαστική διαφορά (1 χρονικό βήμα) στον απαιτούμενο χρόνο κράτησης στον αέρα (δεδομένα δεν φαίνονται).

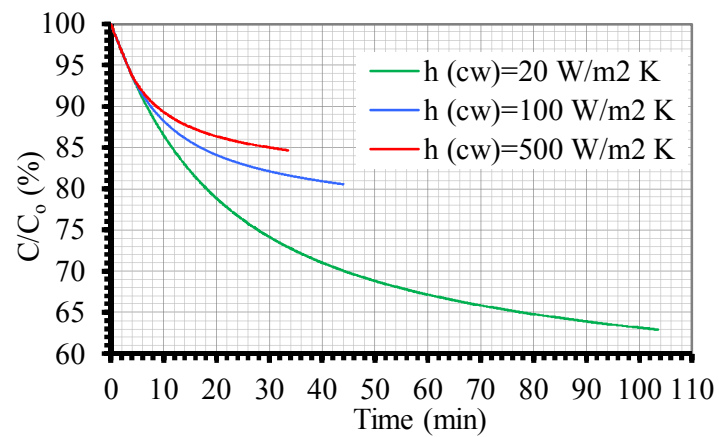
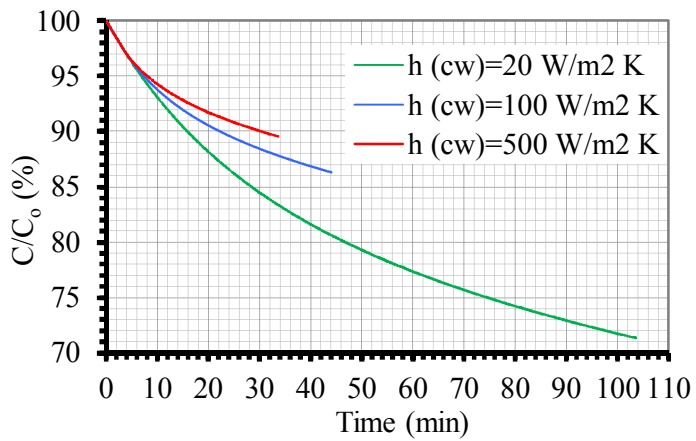
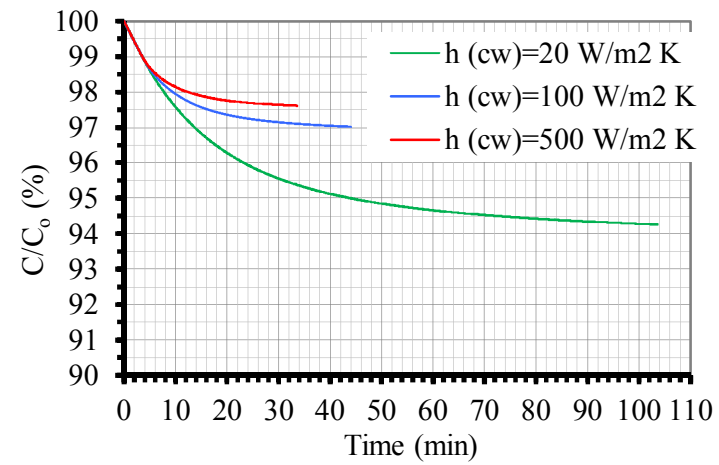
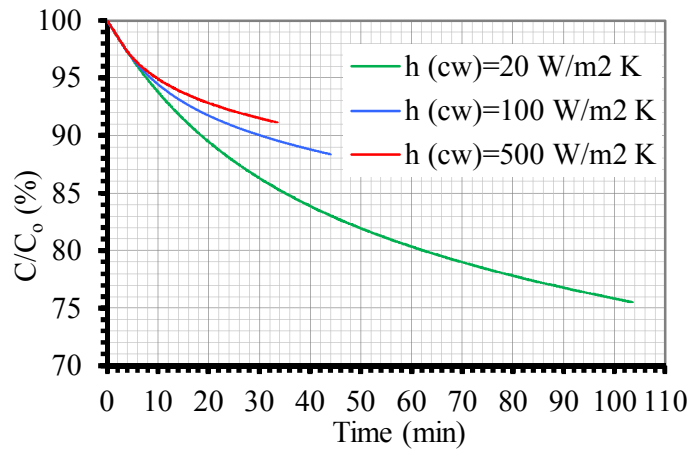


Σχήμα 6.35. Η μέση θερμοκρασία του περιέκτη για τις περιπτώσεις με διαφορετική θερμοκρασία αέρα στην περίπτωση με $T_{IT}=95^{\circ}\text{C}$, $h=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

Όσον αφορά το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στον νερό, εξεταζόμενος στις ακραίες του τιμές σύμφωνα με τη βιβλιογραφία ($20 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, $500 \text{ W/m}^2 \text{ K}$) έδειξε σημαντικές διαφορές ως προς τον απαιτούμενο χρόνο ψύξης μέχρι η μέση θερμοκρασία του προϊόντος να γίνει $35\text{-}40^\circ\text{C}$ (Σχήμα 6.36). Όπως ήταν αναμενόμενο όταν $h_{cw}=20 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, γίνεται δηλαδή 5 φορές μικρότερος από την ενδιάμεση τιμή που χρησιμοποιήθηκε στην εξέταση των κύριων παραμέτρων ($h_{cw}=100 \text{ W/m}^2 \text{ K}$), ο απαιτούμενος χρόνος ψύξης γίνεται υπερδιπλάσιος (104 min έναντι 44 min, αντίστοιχα) (Σχήμα 6.35). Από την άλλη, όταν η τιμή του h_{cw} αυξήθηκε κατά 5 φορές από τη ενδιάμεση τιμή ($h_{cw}=500 \text{ W/m}^2 \text{ K}$), ο χρόνος ψύξης στο νερό μειώθηκε μόνο κατά 12 min (32 min έναντι 44 min, αντίστοιχα). Κατά συνέπεια, οι χαμηλότερες τιμές του h_{cw} επιδρούν περισσότερο στο θερμοκρασιακό προφίλ του περιέκτη κατά τον κύκλο ψύξης στο νερό. Αυτή η διαφορά στο χρόνο ψύξης έχει άμεση επίδραση στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του τοματοπολτού, τα οποία παρουσιάζουν ανάλογες διαφορές στο τελικό ποσοστό διατήρησης, με τις διαφορές μεταξύ των χαμηλότερων τιμών h_{cw} 20 και $100 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ να κυμαίνονται από 3% για τα καροτενοειδή (94% έναντι 97%) έως και 17% για την παράμετρο L του χρώματος (63% έναντι 80%) (Σχήμα 6.37).



Σχήμα 6.36. Η μέση θερμοκρασία του περιέκτη για τις περιπτώσεις με διαφορετικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στο νερό ($T_{cw}=20^\circ\text{C}$) για την περίπτωση με $T_{\Pi}=98^\circ\text{C}$, $h=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.



Σχήμα 6.37. Η % διατήρηση βιταμίνης C (πάνω αριστερά), καροτενοειδών (πάνω δεξιά), χρώματος (λόγος a/b, κάτω αριστερά, L, κάτω δεξιά) για τις περιπτώσεις με διαφορετικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στο νερό ($T_{\text{IT}}=98^{\circ}\text{C}$, $h=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$).

6.4.7. Βελτιστοποίηση της διεργασίας

Στον Πίνακα 6.4. φαίνονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της διεργασίας όσον αφορά το χρόνο διατήρησης του προϊόντος στον αέρα για την επίτευξη των τριών απαιτούμενων τιμών F_s , όπου εξετάστηκαν όλοι οι συνδυασμοί των κύριων παραμέτρων, θερμοκρασία γεμίσματος, T_{IT} , και h_{air} . Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα, οι θερμοκρασίες γεμίσματος των 88°C και 90°C αποδείχθηκαν ανεπαρκείς για την επίτευξη έστω και της ελάχιστης τιμής $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 10 \text{ min}$, σε οποιαδήποτε τιμή h_{air} . Ακόμη, η θερμοκρασία γεμίσματος 93°C πέτυχε μόνο αυτή την ελάχιστη τιμή F , για την περίπτωση με το χαμηλότερο $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ και μετά από μεγάλο χρόνο κράτησης στον αέρα (31 min). Η θερμοκρασία γεμίσματος των 95°C, ενώ μείωσε τον απαιτούμενο χρόνο κράτησης στον αέρα στο 1/3 για $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, δεν κατάφερε να επιτύχει κάποια άλλη τιμή F , ενώ όσον αφορά τη μεταβολή του h_{air} για την ίδια τιμή F , αυτή ήταν δυνατή και για $h_{air}=7 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Μόνο η θερμοκρασία γεμίσματος των 98°C πέτυχε όλες τις απαιτούμενες τιμές F_s αυξάνοντας τον απαιτούμενο χρόνο από 3.58 min για $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 10 \text{ min}$, σε 7 min για $F_{90^{\circ}\text{C}}^{9.5^{\circ}\text{C}} = 24.5 \text{ min}$ και 33 min για $F_{110^{\circ}\text{C}}^{13.7^{\circ}\text{C}} = 1.6 \text{ min}$, όταν $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Η επίτευξη της $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 10 \text{ min}$ ήταν δυνατή σε κάθε τιμή h_{air} που εξετάστηκε, της $F_{90^{\circ}\text{C}}^{9.5^{\circ}\text{C}} = 24.5 \text{ min}$ για τις δύο μικρότερες τιμές $h_{air}=5$ και $7 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, ενώ για την αυστηρότερη τιμή $F_{110^{\circ}\text{C}}^{13.7^{\circ}\text{C}} = 1.6 \text{ min}$ μόνο όταν $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

Πίνακας 6.4. Ο χρόνος διατήρησης του περιέκτη στον αέρα για την επίτευξη της απαιτούμενης τιμής F_s .

F_s	$h_{air} \text{ (W/m}^2 \text{ K)}$	Χρόνος διατήρησης στον αέρα (min)				
		88°C	90°C	93°C	95°C	98°C
$F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 10 \text{ min}$	5	-	-	31	10	3.58
	7	-	-	-	16	4
	9	-	-	-	-	4.5
	15	-	-	-	-	29
$F_{90^{\circ}\text{C}}^{9.5^{\circ}\text{C}} = 24.5 \text{ min}$	5	-	-	-	-	7
	7	-	-	-	-	23
	9	-	-	-	-	-
	15	-	-	-	-	-
$F_{110^{\circ}\text{C}}^{13.7^{\circ}\text{C}} = 1.6 \text{ min}$	5	-	-	-	-	33
	7	-	-	-	-	-
	9	-	-	-	-	-
	15	-	-	-	-	-

Για τους συνδυασμούς T_{IT} , και h_{air} που κατάφεραν να πετύχουν την τιμή $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 10 \text{ min}$, ακολούθησε ψύξη στο νερό μέχρι τελική μέση θερμοκρασία του περιέκτη 35-40°C. Για τις περιπτώσεις αυτές αναφέρεται στους παρακάτω Πίνακες 6.5-6.8 η % διατήρηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών, βιταμίνης C, χρώμα (παράμετροι a/b και L) και καροτενοειδών. Από τους πίνακες εξάγεται το συμπέρασμα ότι όσο αυξάνεται η T_{IT} , για ίδια τιμή h_{air} τόσο καλύτερα διατηρούνται τα ποιοτικά χαρακτηριστικά. Επίσης, όσο αυξάνεται ο h_{air} τόσο μειώνεται η διατήρηση των ποιοτικών παραγόντων, με τις διαφορές να είναι μικρότερες για $h_{air}=5-9 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ όταν ζητούμενο είναι η τιμή $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 10 \text{ min}$ και μεγαλύτερες όταν ζητούμενο είναι η τιμή $F_{90^{\circ}\text{C}}^{9.5^{\circ}\text{C}} = 24.5 \text{ min}$. Τέλος, για την ίδια τιμή T_{IT} , και h_{air} , το ποσοστό διατήρησης μειώνεται όταν ζητούμενο είναι η επίτευξη μιας αυστηρότερης τιμής F , διότι αυξάνεται ο αντίστοιχος χρόνος κράτησης στον αέρα (Πίνακες 6.5-6.8).

Από την ελάχιστη βιβλιογραφία όσον αφορά την “πλήρωση εν θερμώ” διεργασία, μόνο μία βρέθηκε που να αφορά τη βελτιστοποίηση προϊόντων που παράγονται με αυτή τη μέθοδο (Silva and Silva., 1997). Οι ερευνητές αξιολόγησαν στατιστικά (modified factorial design) την επίδραση τεσσάρων παραμέτρων της διεργασίας (θερμοκρασία γεμίσματος, τιμή παστερίωσης, συντελεστή μεταφορά θερμότητας, σχήμα περιέκτη) στην μέσου όγκου τελική διατήρηση ποιοτικού παράγοντα. Οι πιο σημαντικοί παράγοντες σε φθίνουσα σειρά ήταν η θερμοκρασία γεμίσματος, T_{IT} , η τιμή παστερίωσης P , ακολουθούμενη από το συντελεστή μεταφορά θερμότητας, U_0 . Η επίδραση των T_{IT} και P στη διατήρηση της ποιότητας δεν βρέθηκε να είναι γραμμική καθώς σημαντική επίδραση είχαν επίσης οι τιμές T^2 και P^2 . Σημαντική βρέθηκε επίσης η αλληλεπίδραση $T \times P$ αλλά όχι η αλληλεπίδραση $T \times U_0$ και $P \times U_0$. Με βάση τα παραπάνω φτάνουν στο συμπέρασμα ότι η τελική ποιότητα βελτιώνεται σημαντικά με τη χρήση υψηλότερων θερμοκρασιών γεμίσματος, T_{IT} , θέτοντας όμως κάποια πάνω όρια για αυτήν που βρίσκονται σε άμεση συνάρτηση με το μέγεθος του περιέκτη (Silva and Silva., 1997). Στην παρούσα μελέτη δεν ήταν δυνατή μια στατιστική μελέτη λόγω έλλειψης δεδομένων για όλες τις παραμέτρους, αλλά από την εικόνα που δίνουν οι Πίνακες 6.5-6.8 φαίνεται ότι οι σημαντικότερες παράμετροι είναι η θερμοκρασία γεμίσματος, T_{IT} και η τιμή αποστείρωσης F_s , ενώ ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στον αέρα, h_{air} δε φαίνεται να ασκεί την ίδια σημαντική επίδραση σε κάποιες εκ των περιπτώσεων που εξετάστηκαν, όταν δηλαδή ζητούμενο ήταν η ελάχιστη τιμή F_s και για τιμές $h_{air}=5-9 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

Πίνακας 6.5. Η % διατήρηση της βιταμίνης C στο τέλος της ψύξης στο νερό για κάθε περίπτωση που εξετάστηκε

F_s	h_{air} (W/m ² K)	% Διατήρηση βιταμίνης C				
		88°C	90°C	93°C	95°C	98°C
$F_{93.33^\circ\text{C}}^{8.89^\circ\text{C}} = 10 \text{ min}$	5	-	-	79.17	86.79	89.17
	7	-	-	-	84.47	89.04
	9	-	-	-	-	88.90
	15	-	-	-	-	81.10
$F_{90^\circ\text{C}}^{9.5^\circ\text{C}} = 24.5 \text{ min}$	5	-	-	-	-	87.27
	7	-	-	-	-	80.43
	9	-	-	-	-	-
	15	-	-	-	-	-
$F_{110^\circ\text{C}}^{13.7^\circ\text{C}} = 1.6 \text{ min}$	5	-	-	-	-	75.78
	7	-	-	-	-	-
	9	-	-	-	-	-
	15	-	-	-	-	-

Πίνακας 6.6. Η % διατήρηση του χρώματος (λόγος a/b) στο τέλος της ψύξης στο νερό για κάθε περίπτωση που εξετάστηκε

F_s	h_{air} (W/m ² K)	% Διατήρηση χρώματος (λόγος a/b)				
		88°C	90°C	93°C	95°C	98°C
$F_{93.33^\circ\text{C}}^{8.89^\circ\text{C}} = 10 \text{ min}$	5	-	-	76.22	84.70	87.34
	7	-	-	-	82.13	87.21
	9	-	-	-	-	87.06
	15	-	-	-	-	78.35
$F_{90^\circ\text{C}}^{9.5^\circ\text{C}} = 24.5 \text{ min}$	5	-	-	-	-	85.27
	7	-	-	-	-	77.78
	9	-	-	-	-	-
	15	-	-	-	-	-
$F_{110^\circ\text{C}}^{13.7^\circ\text{C}} = 1.6 \text{ min}$	5	-	-	-	-	72.75
	7	-	-	-	-	-
	9	-	-	-	-	-
	15	-	-	-	-	-

Πίνακας 6.7. Η % διατήρηση του χρώματος (L) στο τέλος της ψύξης στο νερό για κάθε περίπτωση που εξετάστηκε

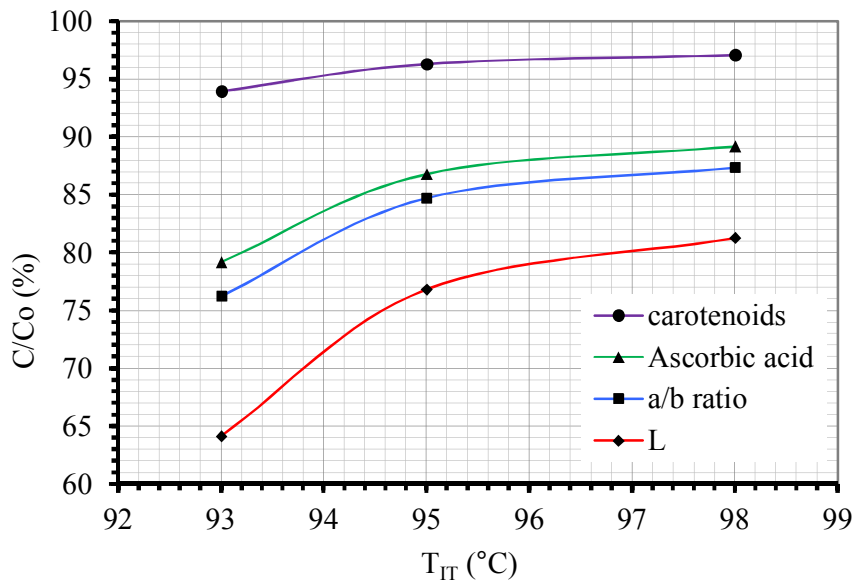
F_s	h_{air} (W/m ² K)	% Διατήρηση χρώματος (L)				
		88°C	90°C	93°C	95°C	98°C
$F_{93.33^\circ\text{C}}^{8.89^\circ\text{C}} = 10 \text{ min}$	5	-	-	64.13	76.81	81.26
	7	-	-	-	72.69	80.98
	9	-	-	-	-	80.66
	15	-	-	-	-	67.36
$F_{90^\circ\text{C}}^{9.5^\circ\text{C}} = 24.5 \text{ min}$	5	-	-	-	-	77.35
	7	-	-	-	-	64.90
	9	-	-	-	-	-
	15	-	-	-	-	-
$F_{110^\circ\text{C}}^{13.7^\circ\text{C}} = 1.6 \text{ min}$	5	-	-	-	-	56.93
	7	-	-	-	-	-
	9	-	-	-	-	-
	15	-	-	-	-	-

Πίνακας 6.8. Η % διατήρηση των καροτενοειδών στο τέλος της ψύξης στο νερό για κάθε περίπτωση που εξετάστηκε

F_s	h_{air} (W/m ² K)	% Διατήρηση καροτενοειδών				
		88°C	90°C	93°C	95°C	98°C
$F_{93.33^\circ\text{C}}^{8.89^\circ\text{C}} = 10 \text{ min}$	5	-	-	93.94	96.30	97.07
	7	-	-	-	95.52	97.02
	9	-	-	-	-	96.95
	15	-	-	-	-	94.50
$F_{90^\circ\text{C}}^{9.5^\circ\text{C}} = 24.5 \text{ min}$	5	-	-	-	-	96.26
	7	-	-	-	-	93.62
	9	-	-	-	-	-
	15	-	-	-	-	-
$F_{110^\circ\text{C}}^{13.7^\circ\text{C}} = 1.6 \text{ min}$	5	-	-	-	-	91.65
	7	-	-	-	-	-
	9	-	-	-	-	-
	15	-	-	-	-	-

Λαμβάνοντας υπόψη μόνο την ηπιότερη τιμή F_s , $F_{93.33^\circ\text{C}}^{8.89^\circ\text{C}} = 10 \text{ min}$ και για $h_{air}=5$ W/m² K μπορεί να αποτυπωθεί καλύτερα η εικόνα των παραπάνω Πινάκων 6.5-6.8, για τη βελτιστοποίηση της διεργασίας με βάση την T_{IT} . Τέτοια σχέση δίνεται στο Σχήμα 6.38

όπου φαίνεται η διατήρηση όλων των ποιοτικών χαρακτηριστικών στο τέλος της διεργασίας σε συνάρτηση με την θερμοκρασία γεμίσματος, T_{IT} . Από το Σχήμα 6.38 φαίνεται ότι η καλύτερη διατήρηση των ποιοτικών παραγόντων επιτυγχάνεται με τη θερμοκρασία γεμίσματος των 98°C , με μέγιστο όφελος για το χρώμα, το οποίο φαίνεται να είναι ο πιο θερμοευαίσθητος ποιοτικός παράγοντας σε αυτή τη μελέτη. Μετά το χρώμα, πιο θερμοευαίσθητη αποδείχτηκε η βιταμίνη C, ενώ η πιο θερμοανθεκτική ποιοτική παράμετρος ήταν τα καροτενοειδή.

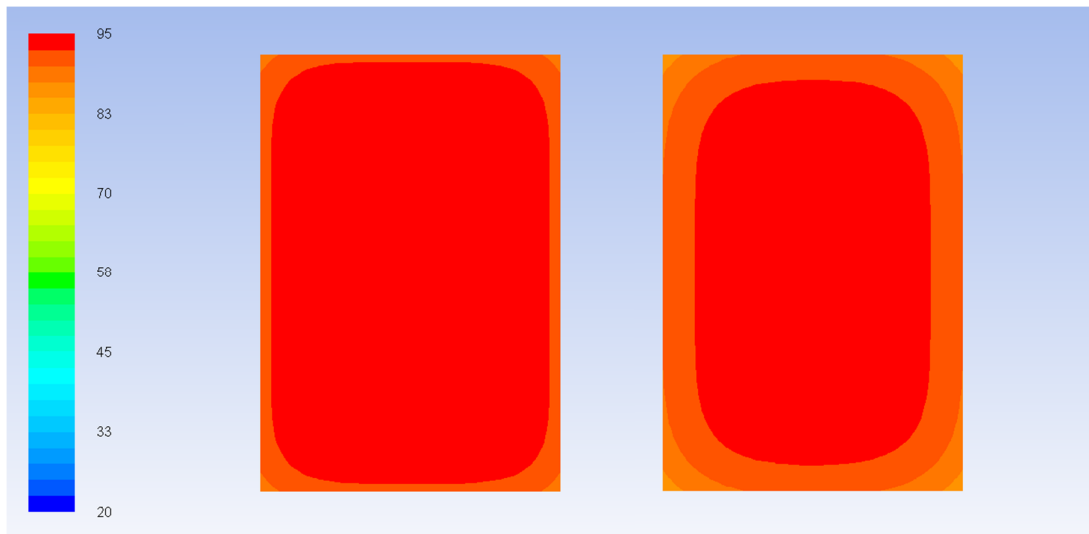


Σχήμα 6.38. Βελτιστοποίηση της “πλήρωση εν θερμώ” διεργασίας με βάση τη μέγιστη διατήρηση της συγκέντρωσης όλων των ποιοτικών χαρακτηριστικών που εξετάστηκαν στον τοματοπολτό, για διαφορετικές θερμοκρασίες γεμίσματος, για $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 10 \text{ min}$ για $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

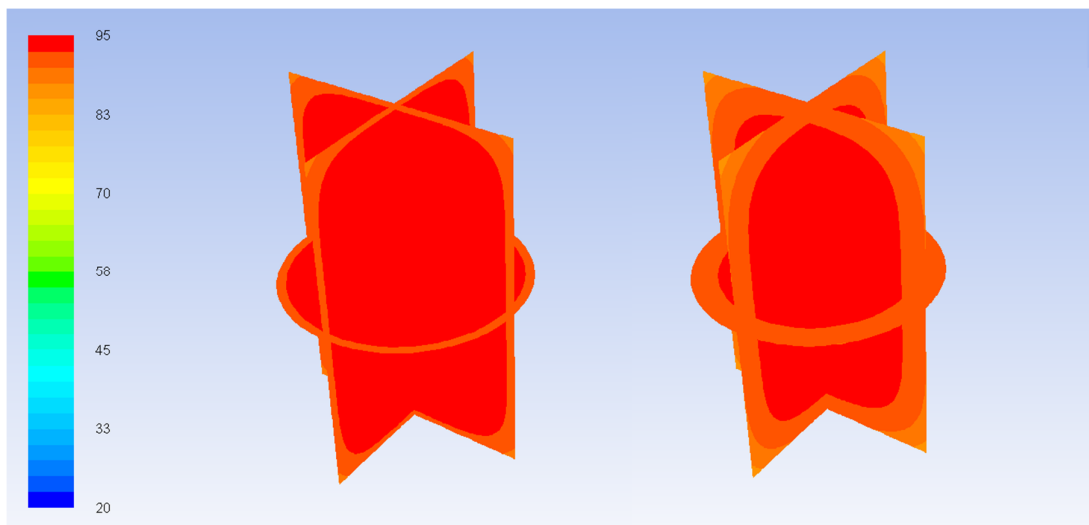
6.4.8. Διαγράμματα ισοψών (contours)

Η χρήση της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής δίνει τη δυνατότητα απεικόνισης των μετρούμενων ιδιοτήτων υπό μορφή διαγραμμάτων ισοψών τα οποία παρουσιάζουν κάθε μεταβλητή σε μια χρωματική κλίμακα για όλο το φάσμα της γεωμετρίας. Η συγκεκριμένη απεικόνιση είναι ιδιαίτερος χρήσιμη και σε πολλές περιπτώσεις επιτρέπει την καλύτερη κατανόηση των φαινομένων που εξετάζονται σε ένα πρόβλημα.

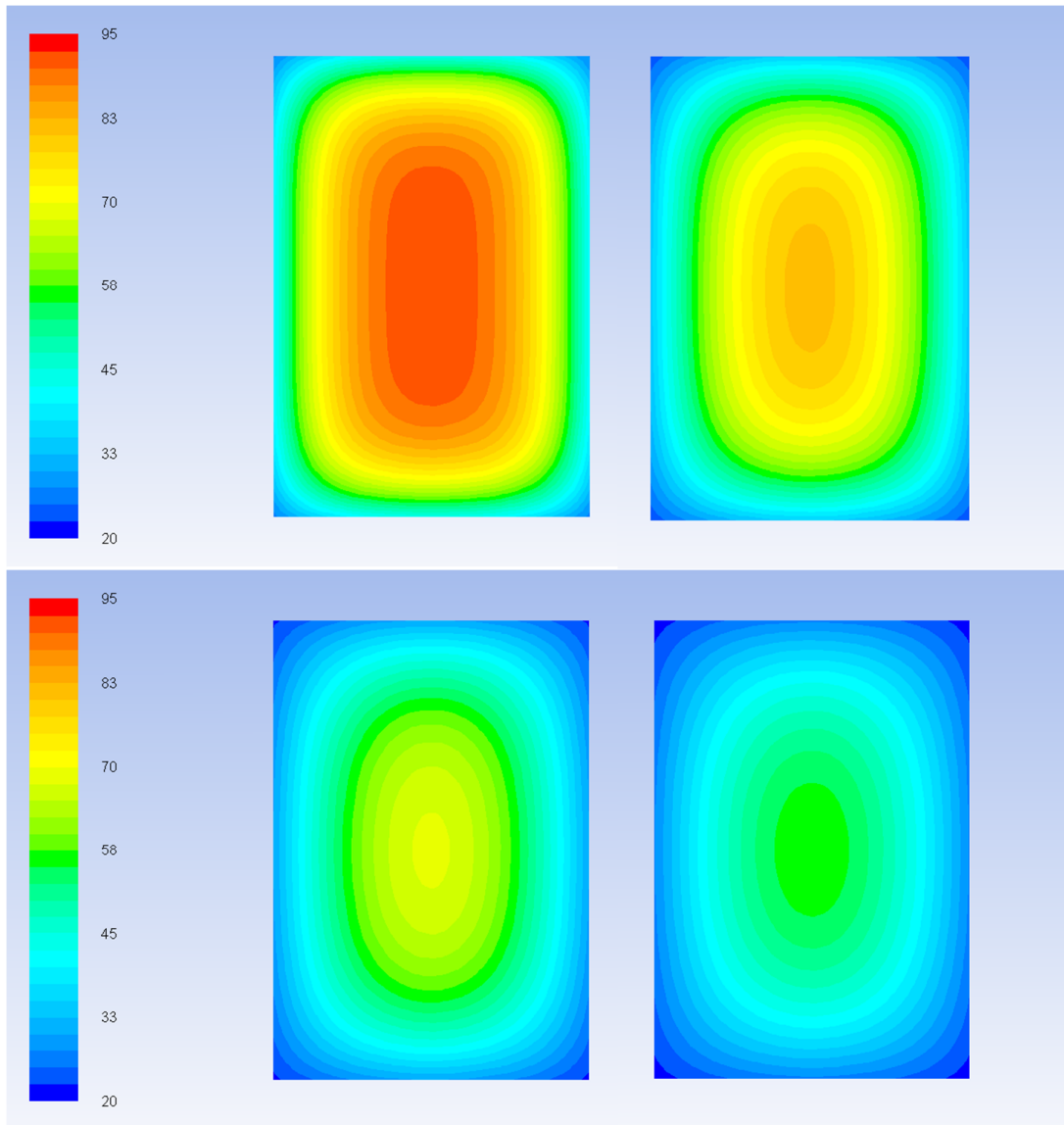
Στα Σχήματα 6.39 και 6.40 παρουσιάζονται οι ισοϋψείς του χρονοθερμοκρασιακού προφίλ σε διαφορετική απεικόνιση κατά την διατήρηση στον αέρα στις χρονικές στιγμές των 5 και 10 min για την περίπτωση με $T_{IT}=95^{\circ}\text{C}$, $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Στα σχήματα αυτά φαίνονται οι μικρές θερμοκρασιακές μεταβολές που συμβαίνουν κατά τη διατήρηση στον αέρα και οφείλονται στο χαμηλή τιμή του h_{air} . Αντίθετα, πιο έντονες είναι οι θερμοκρασιακές μεταβολές κατά την ψύξη στο νερό όπου ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας γίνεται πολύ μεγαλύτερος ($h_{cw}=100 \text{ W/m}^2 \text{ K}$) (Σχήματα 6.41 και 6.42).



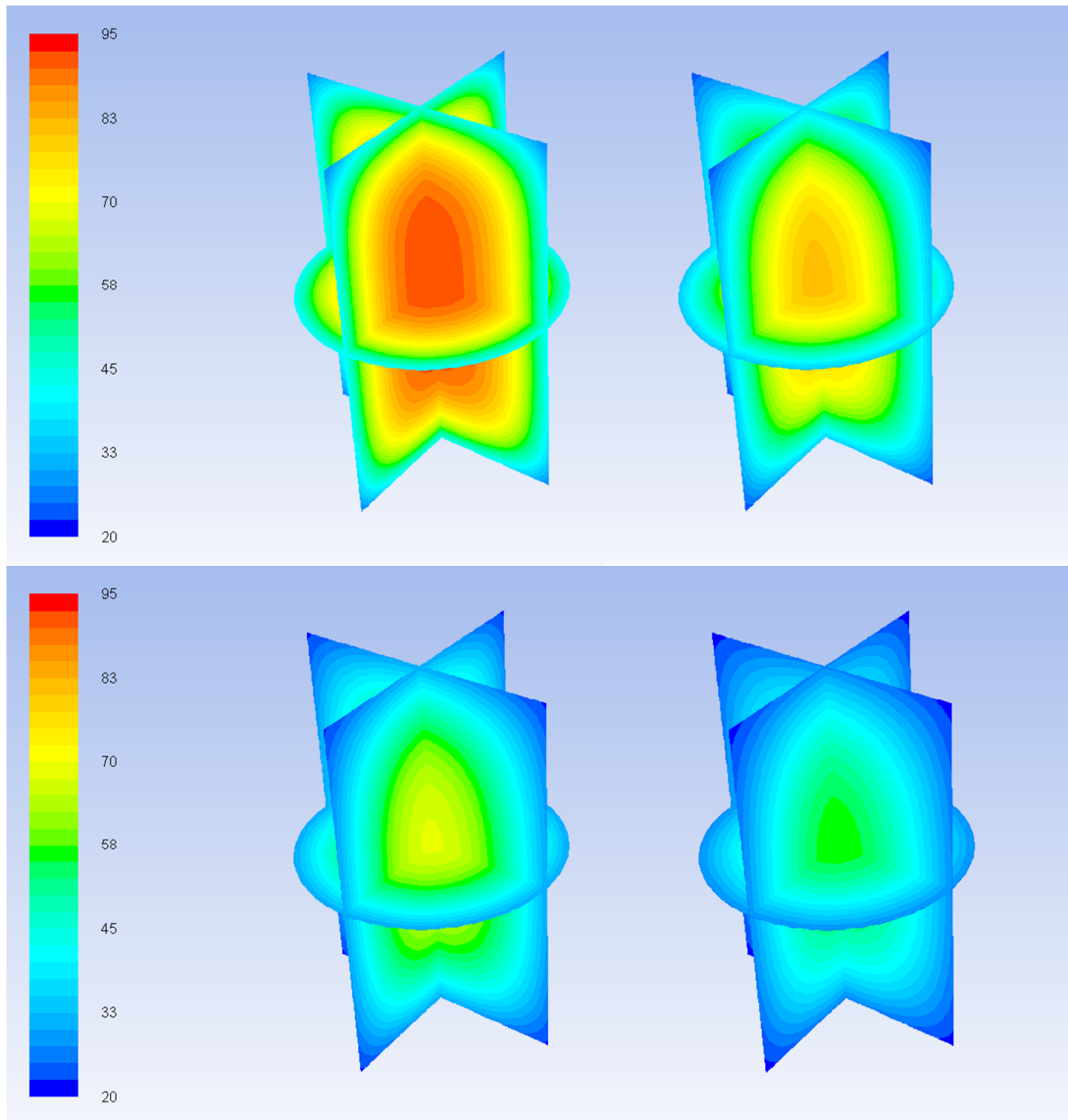
Σχήμα 6.39. Διαγράμματα ισοϋψών θερμοκρασίας στην αέρια ψύξη στα 5 min (αριστερά) και στα 10 min (δεξιά) ($T_{IT}=95^{\circ}\text{C}$, $h=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$).



Σχήμα 6.40. Διαγράμματα ισοϋψών θερμοκρασίας σε τρισδιάστατη απεικόνιση στην αέρια ψύξη στα 5 min (αριστερά) και στα 10 min (δεξιά) ($T_{IT}=95^{\circ}\text{C}$, $h=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$).



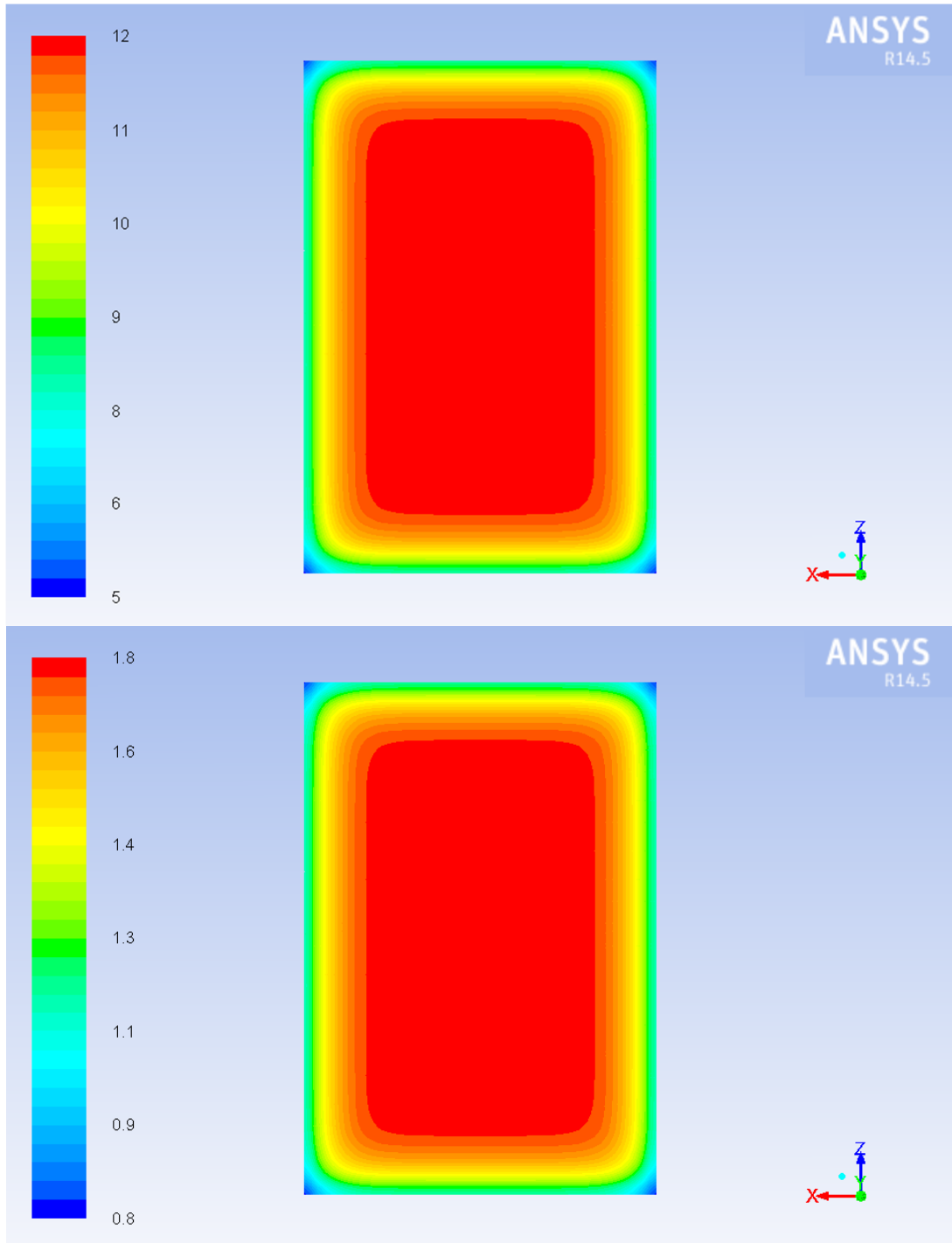
Σχήμα 6.41. Διαγράμματα ισοϋψών θερμοκρασίας μετά από 10 min υδρόψυξη, πάνω αριστερά, 20 min υδρόψυξη, πάνω δεξιά, 30 min υδρόψυξη, κάτω αριστερά και 40 min υδρόψυξη, κάτω δεξιά ($T_{\Gamma}=95^{\circ}\text{C}$, $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$).



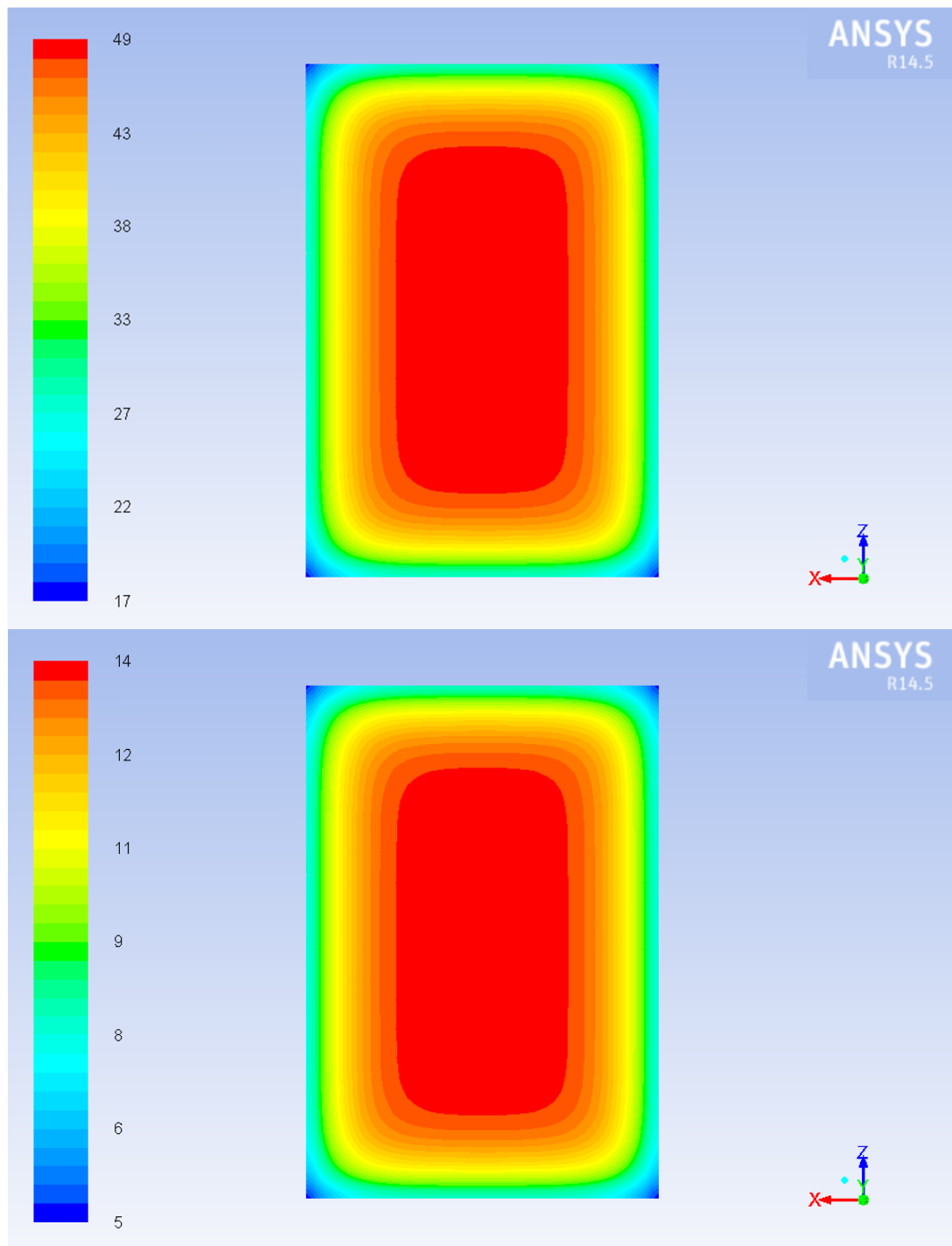
Σχήμα 6.42. Διαγράμματα ισοϋψών θερμοκρασίας σε τρισδιάστατη απεικόνιση στα 20 min (υδρόψυξη, πάνω αριστερά), στα 30 min (υδρόψυξη, πάνω δεξιά), στα 40 min (υδρόψυξη, κάτω αριστερά) και στα 50 min (υδρόψυξη, κάτω δεξιά) ($T_{IT}=95^{\circ}\text{C}$, $h=5\text{ W/m}^2\text{ K}$).

Στα Σχήματα 6.43-6.45 παρουσιάζονται η τιμή F και η αντίστοιχη λογαριθμική καταστροφή του *B. coagulans* για την περίπτωση με $T_{IT}=98^{\circ}\text{C}$, $h_{air}=5\text{ W/m}^2\text{ K}$, η οποία ήταν η μόνη περίπτωση στην οποία επιτεύχθηκε κάθε απαιτούμενη ολοκληρωμένη τιμή F_s . Και στις τρεις περιπτώσεις η μεγαλύτερη τιμή F και αντίστοιχα η μεγαλύτερη λογαριθμική καταστροφή επιτυγχάνεται στο κέντρο του προϊόντος όπου έχει τη μέγιστη θερμοκρασία σε όλη τη διάρκεια της διεργασίας, ενώ τη μικρότερη τιμή F και λογαριθμική καταστροφή

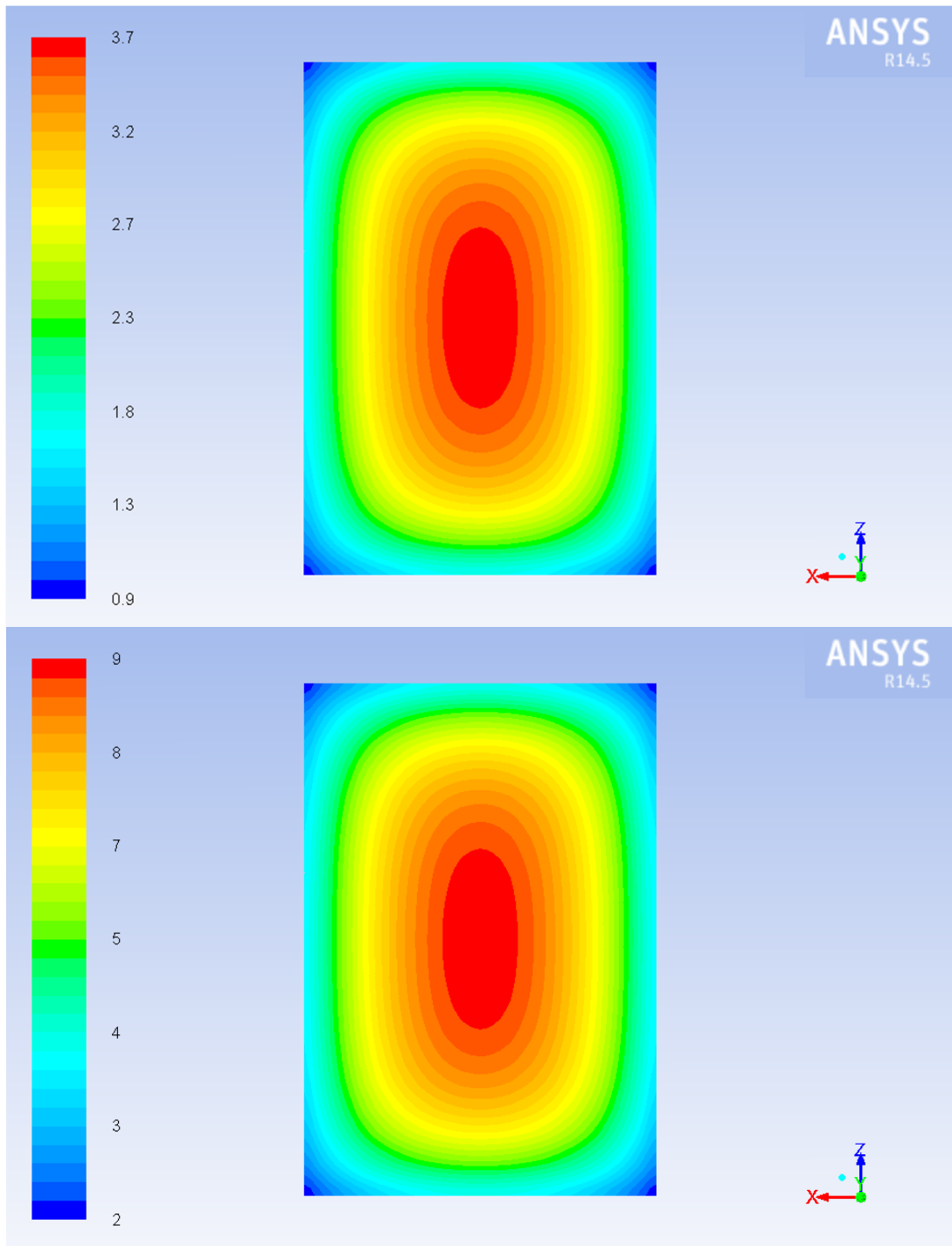
υφίστανται τα σημεία κοντά στις γωνίες του πάνω και κάτω τοιχώματος του περιέκτη, τα σημεία που ψύχονται δηλαδή ταχύτερα κατά τη διατήρηση του προϊόντος στον αέρα.



Σχήμα 6.43. Διαγράμματα ισοϋψών της τιμής F για $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 10 \text{ min}$ (πάνω) και της αντίστοιχης λογαριθμικής καταστροφής του $B. coagulans$ (κάτω) στο τέλος της ψύξης στον αέρα (χρόνος κράτησης 3.58 min) για $T_{\text{IT}}=98^{\circ}\text{C}$, $h_{\text{air}}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.



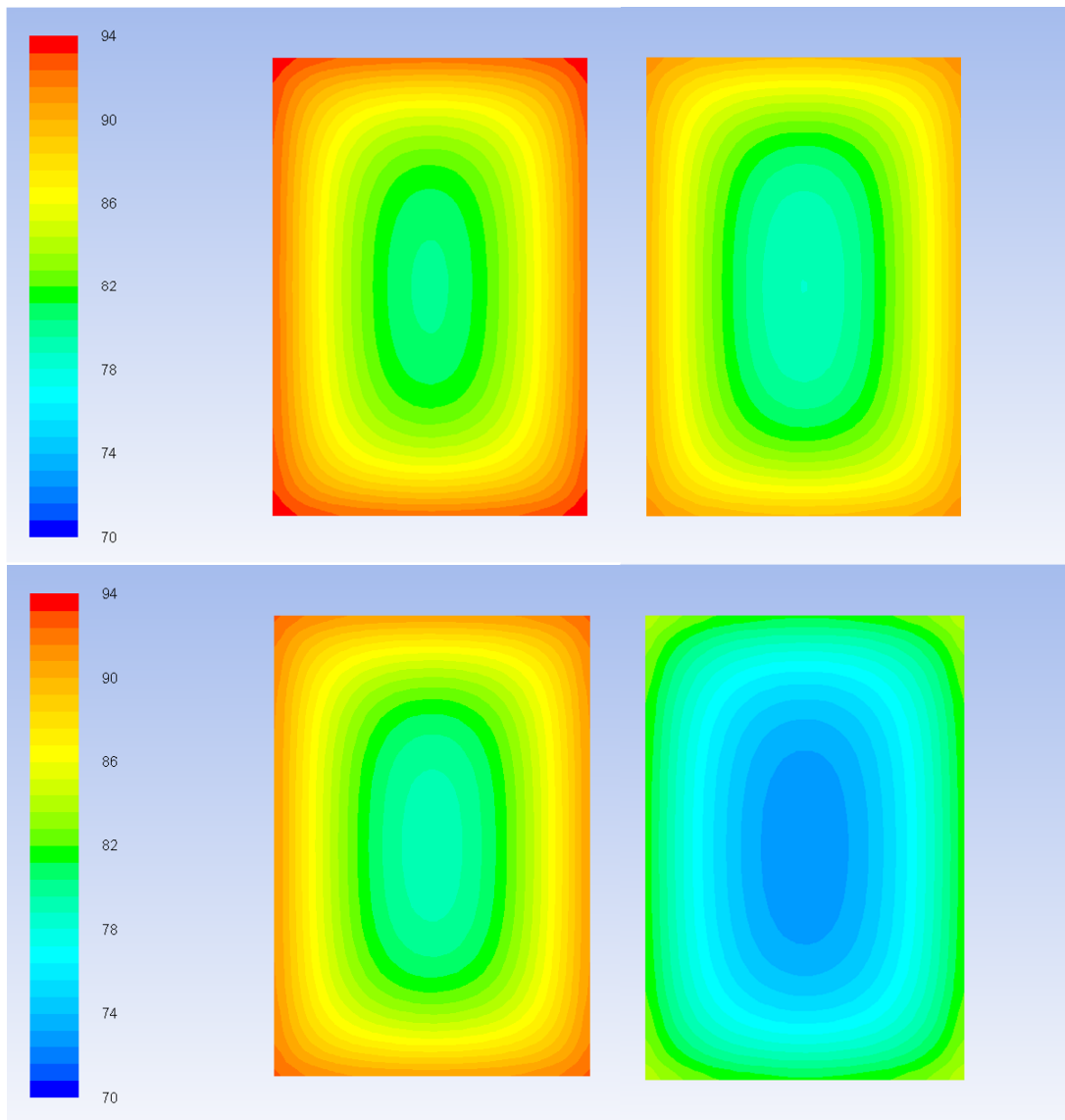
Σχήμα 6.44. Διαγράμματα ισοϋψών της τιμής F για $F_{90^{5^{\circ}\text{C}}} = 24.5 \text{ min}$ (πάνω) και της αντίστοιχης λογαριθμικής καταστροφής του *B. coagulans* (κάτω) στο τέλος της ψύξης στον αέρα (χρόνος κράτησης 7 min) για $T_{IT}=98^{\circ}\text{C}$, $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.



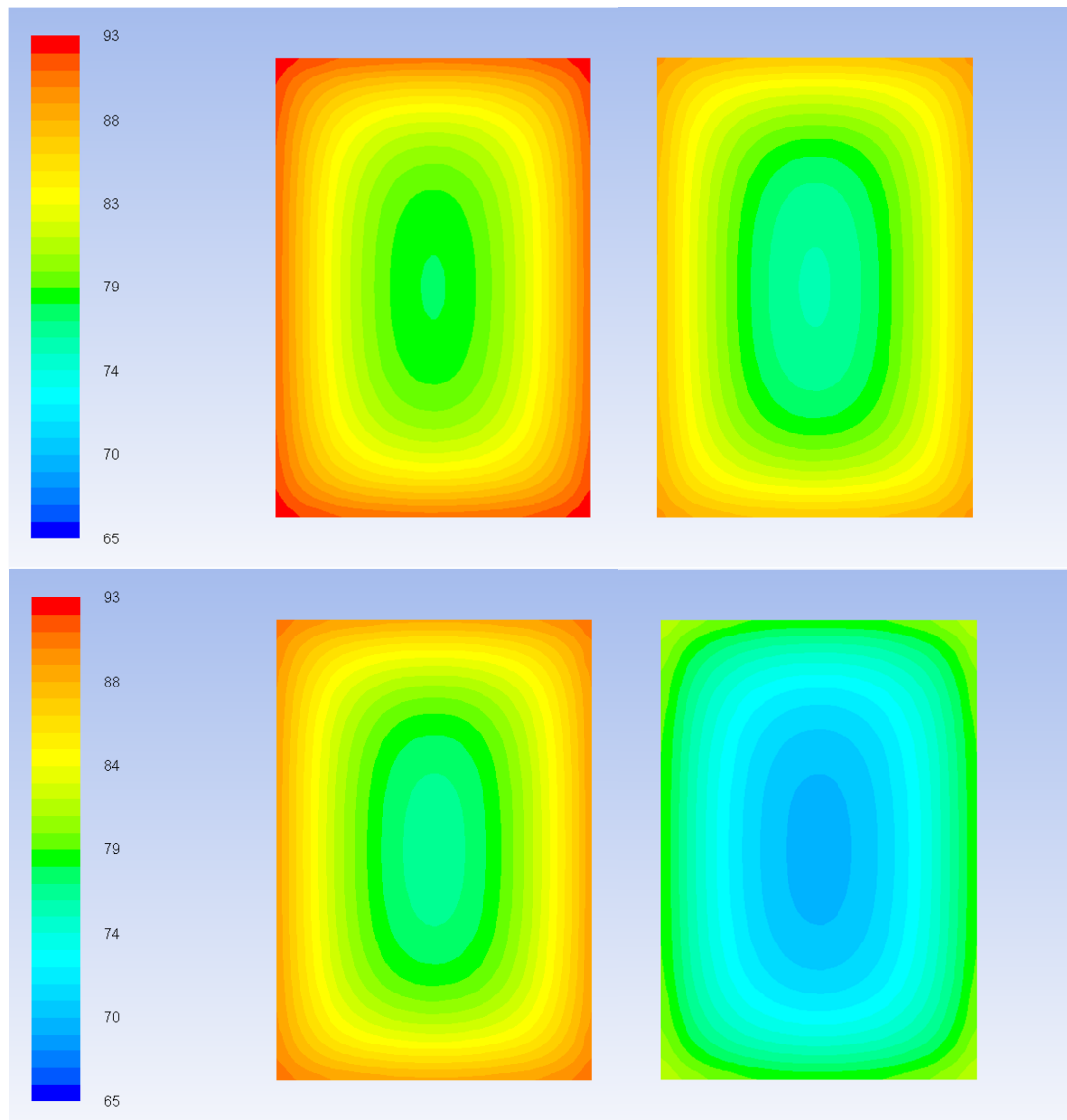
Σχήμα 6.45. Διαγράμματα ισοϋψών της τιμής F για $F_{110^{\circ}\text{C}}^{13.7^{\circ}\text{C}} = 1.6 \text{ min}$ (πάνω) και της αντίστοιχης λογαριθμικής καταστροφής του *B. coagulans* (κάτω) στο τέλος της ψύξης στον αέρα (χρόνος κράτησης 33 min) για $T_{IT}=98^{\circ}\text{C}$, $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

Στα Σχήματα 6.46-6.50 που ακολουθούν αξιολογούνται τα ποιοτικά χαρακτηριστικά, βιταμίνη C, καροτενοειδή και χρώμα (παράμετροι a/b , L , χρωματικός δείκτης ποιότητας) για τις περιπτώσεις με διαφορετική θερμοκρασία γεμίσματος $T_{IT}=93, 95, 98^{\circ}\text{C}$, $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ για την ελάχιστη απαιτούμενη τιμή F_s και η περίπτωση με 98°C $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ που επιτυγχάνεται και η δεύτερη σε σειρά αυστηρότητας απαιτούμενη τιμή F_s . Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι σε όλα τα ποιοτικά χαρακτηριστικά διατηρούνται καλύτερα στη θερμοκρασία των 98°C , με τις θερμοκρασίες 95°C και 93°C να ακολουθούν. Μάλιστα, η δεύτερη περίπτωση στους 98°C που παρέχει μεγαλύτερη κάλυψη από μικροβιολογική σκοπιά έχει συγκρίσιμη διατήρηση ποιότητας με την περίπτωση με θερμοκρασία γεμίσματος των 95°C . Αυτή η παρατήρηση, επιτρέπει να γίνει μια πρόταση όσον αφορά την εφαρμογή της διεργασίας στο μέλλον. Με την προϋπόθεση ότι ο $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, αν η βιομηχανία επιλέξει να παρέχει επιπλέον προστασία στο προϊόν από ενδεχόμενες αλλοιώσεις, μπορεί να επιλέξει μια διεργασία με συνθήκες $T_{IT}=98^{\circ}\text{C}$, χρόνο διατήρησης 7 min, με μια μικρή έκπτωση στο επίπεδο της ποιότητας. Αν η ελάχιστη απαιτούμενη τιμή F θεωρείται αρκετή, κάτι που χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση, τότε η διεργασία με τις συνθήκες $T_{IT}=98^{\circ}\text{C}$, χρόνο κράτησης 3.6 min είναι αυτή που παρέχει την καλύτερη ποιότητα στο τελικό προϊόν.

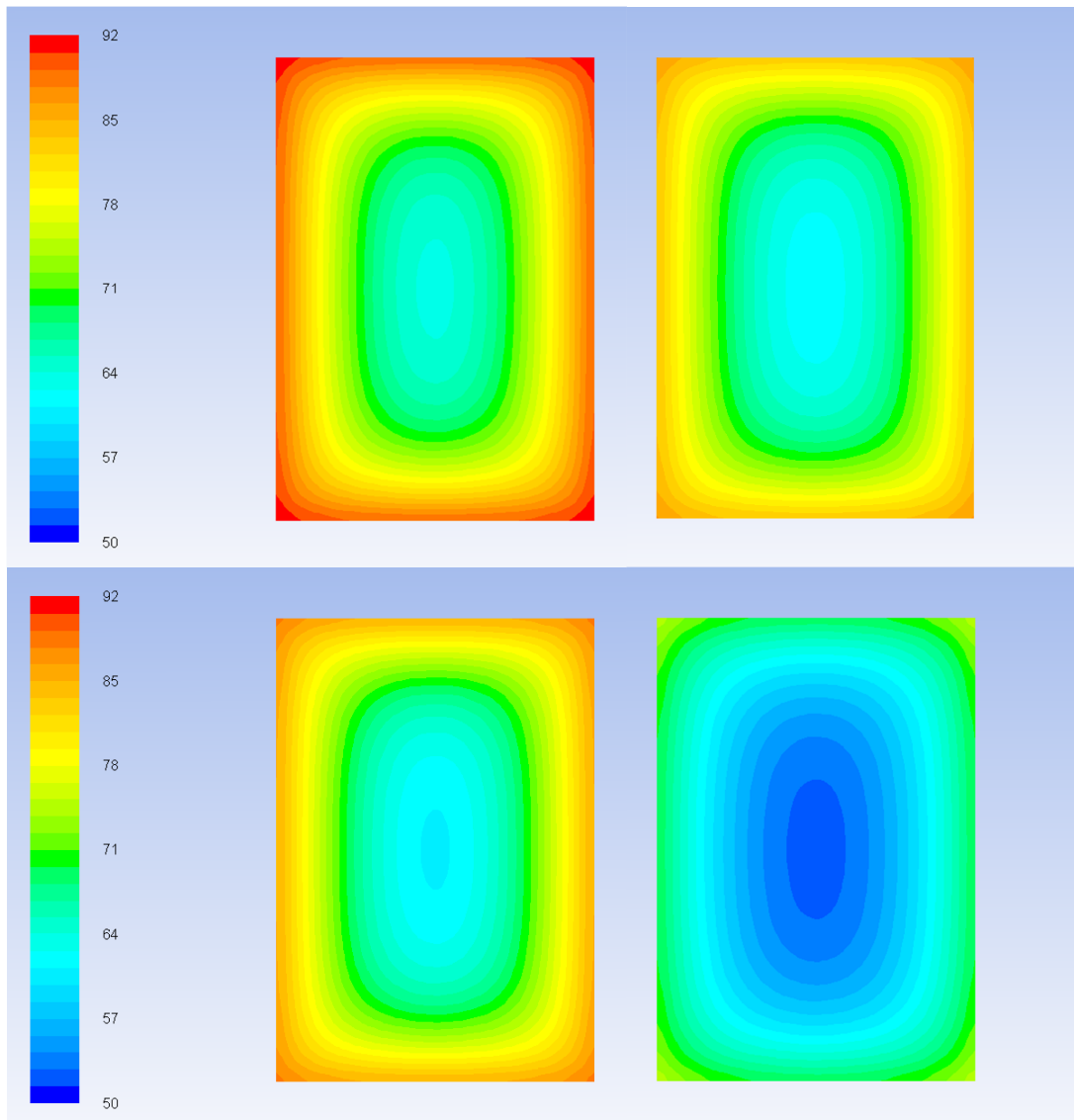
Όσον αφορά το χρωματικό δείκτη ποιότητας με βάση την τιμή του λόγου a/b αυτός δείχνει ότι στο εσωτερικό του προϊόντος υπάρχει μη αποδεκτή υποβάθμιση του χρώματος (<1.80) (Gould, 1992; Barreiro, 1997) ακόμα και για την καλύτερη περίπτωση, ενώ στην επιφάνεια η ποιότητα του χρώματος διατηρείται για τις περιπτώσεις με $T_{IT}=95, 98^{\circ}\text{C}$. Στη βιβλιογραφία οι Velioğlu *et al.* (2011) αναφέρουν τιμές χρωματικού δείκτη από πειραματική αξιολόγηση της οπτικής ποιότητας του τοματοπολτού, κυμαινόμενες στο εύρος 1.3-2.0 με τις τιμές μεταξύ 1.3-1.6 να παρατηρούνται συχνότερα.



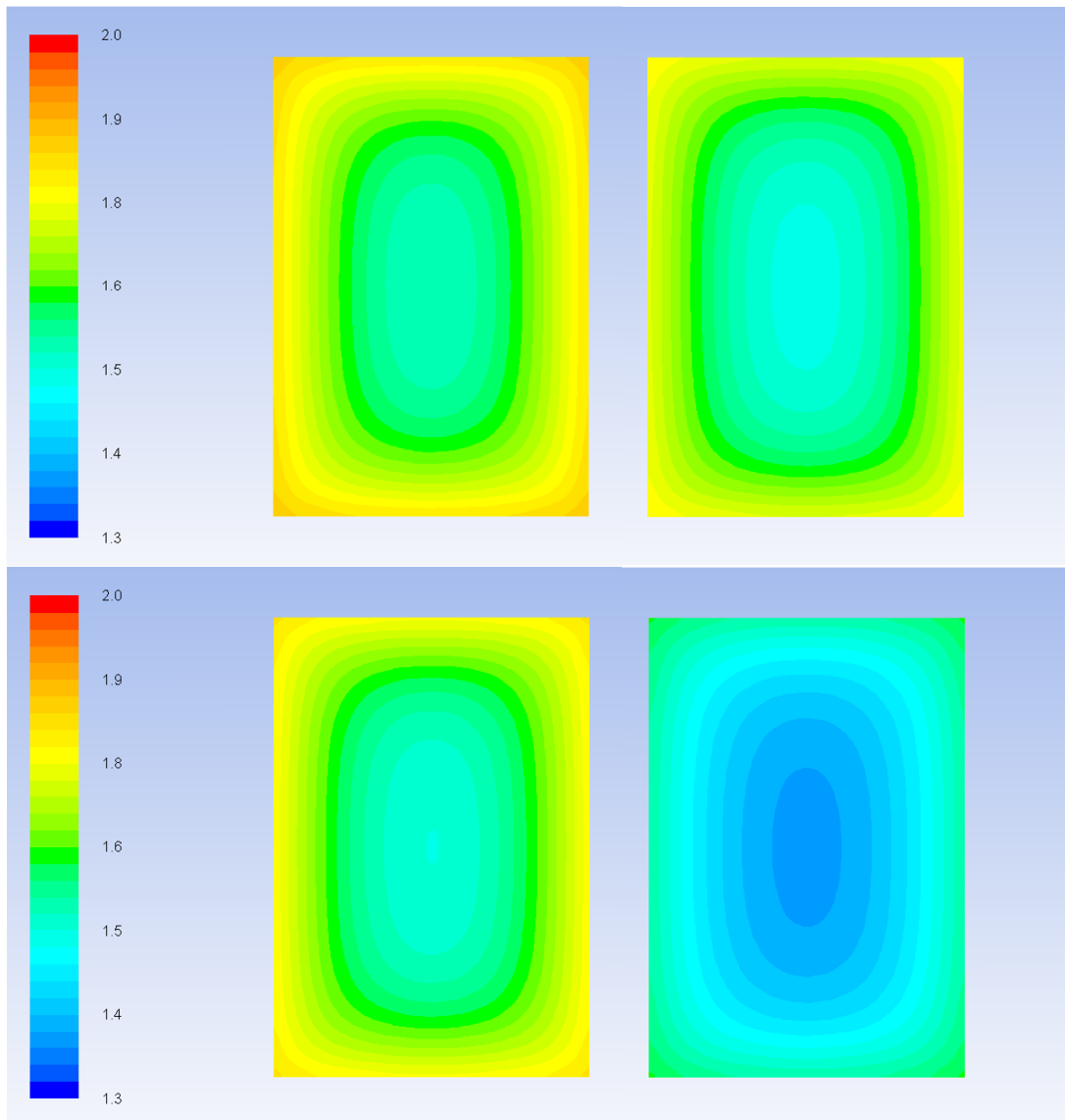
Σχήμα 6.46. Διαγράμματα ισοϋψών της % διατήρησης της βιταμίνης C στο τέλος της ψύξης στο νερό για τέσσερις χαρακτηριστικές περιπτώσεις: α) $T_{\Pi}=98^{\circ}\text{C}$, $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, ($F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 10 \text{ min}$) (πάνω αριστερά), β) $T_{\Pi}=95^{\circ}\text{C}$, $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, ($F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 10 \text{ min}$) (πάνω δεξιά), γ) $T_{\Pi}=98^{\circ}\text{C}$, $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, ($F_{90^{\circ}\text{C}}^{9.5^{\circ}\text{C}} = 24.5 \text{ min}$) (κάτω αριστερά), δ) $T_{\Pi}=93^{\circ}\text{C}$, $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, ($F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 10 \text{ min}$) (κάτω δεξιά).



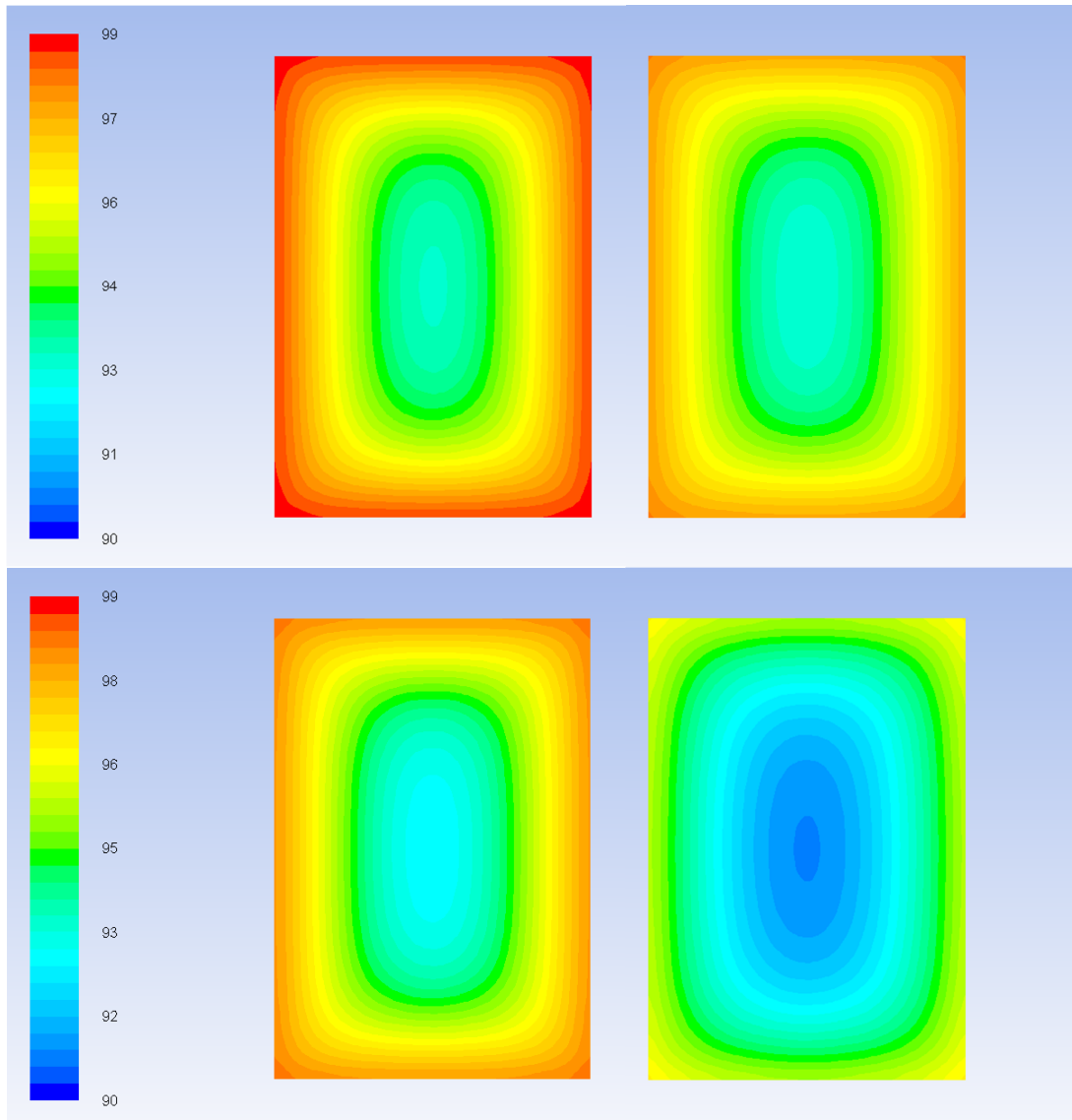
Σχήμα 6.47. Διαγράμματα ισοϋψών της % διατήρησης του χρώματος με βάση την παράμετρο a/b στο τέλος της ψύξης στο νερό για τέσσερις χαρακτηριστικές περιπτώσεις: α) $T_{IT}=98^{\circ}\text{C}$, $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, ($F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 10 \text{ min}$) (πάνω αριστερά), β) $T_{IT}=95^{\circ}\text{C}$, $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, ($F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 10 \text{ min}$) (πάνω δεξιά), γ) $T_{IT}=98^{\circ}\text{C}$, $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, ($F_{90^{\circ}\text{C}}^{9.5^{\circ}\text{C}} = 24.5 \text{ min}$) (κάτω αριστερά), δ) $T_{IT}=93^{\circ}\text{C}$, $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, ($F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 10 \text{ min}$) (κάτω δεξιά).



Σχήμα 6.48. Διαγράμματα ισοϋψών της % διατήρησης του χρώματος με βάση την παράμετρο L στο τέλος της ψύξης στο νερό για τέσσερις χαρακτηριστικές περιπτώσεις: α) $T_{\text{IT}}=98^{\circ}\text{C}$, $h=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, ($F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 10 \text{ min}$) (πάνω αριστερά), β) $T_{\text{IT}}=95^{\circ}\text{C}$, $h_{\text{air}}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, ($F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 10 \text{ min}$) (πάνω δεξιά), γ) $T_{\text{IT}}=98^{\circ}\text{C}$, $h_{\text{air}}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, ($F_{90^{\circ}\text{C}}^{9.5^{\circ}\text{C}} = 24.5 \text{ min}$) (κάτω αριστερά), δ) $T_{\text{IT}}=93^{\circ}\text{C}$, $h_{\text{air}}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, ($F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 10 \text{ min}$) (κάτω δεξιά).

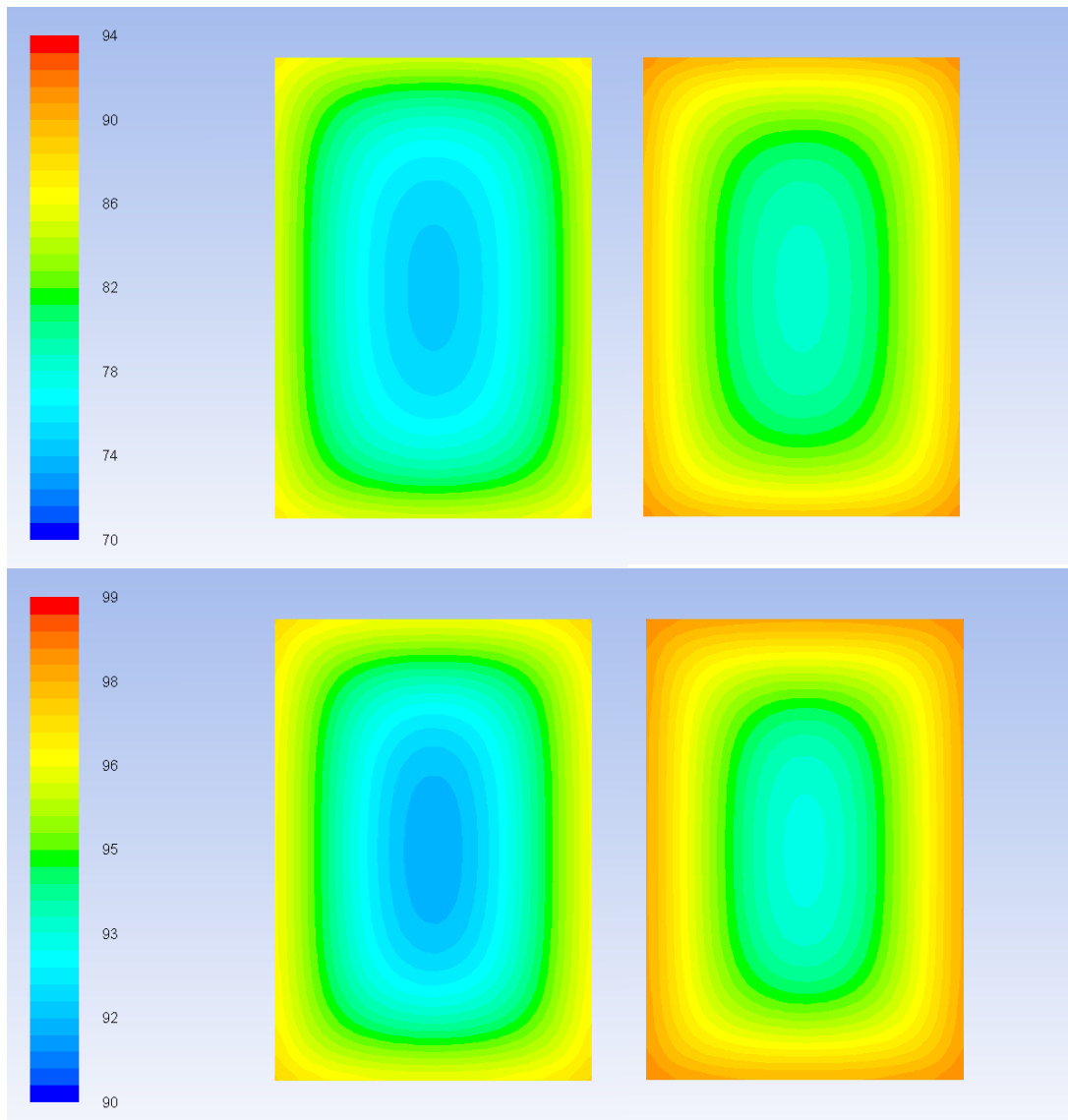


Σχήμα 6.49. Διαγράμματα ισοϋψών της % διατήρησης του χρώματος με βάση το δείκτη $2 \times a/b$ ratio (>1.8 = ικανοποιητικό χρώμα, <1.8 = μη αποδεκτό χρώμα) στο τέλος της ψύξης στο νερό για τέσσερις χαρακτηριστικές περιπτώσεις: α) $T_{\Pi}=98^{\circ}\text{C}$, $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, ($F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 10 \text{ min}$) (πάνω αριστερά), β) $T_{\Pi}=95^{\circ}\text{C}$, $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, ($F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 10 \text{ min}$) (πάνω δεξιά), γ) $T_{\Pi}=98^{\circ}\text{C}$, $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, ($F_{90^{\circ}\text{C}}^{9.5^{\circ}\text{C}} = 24.5 \text{ min}$) (κάτω αριστερά), δ) $T_{\Pi}=93^{\circ}\text{C}$, $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, ($F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 10 \text{ min}$) (κάτω δεξιά).

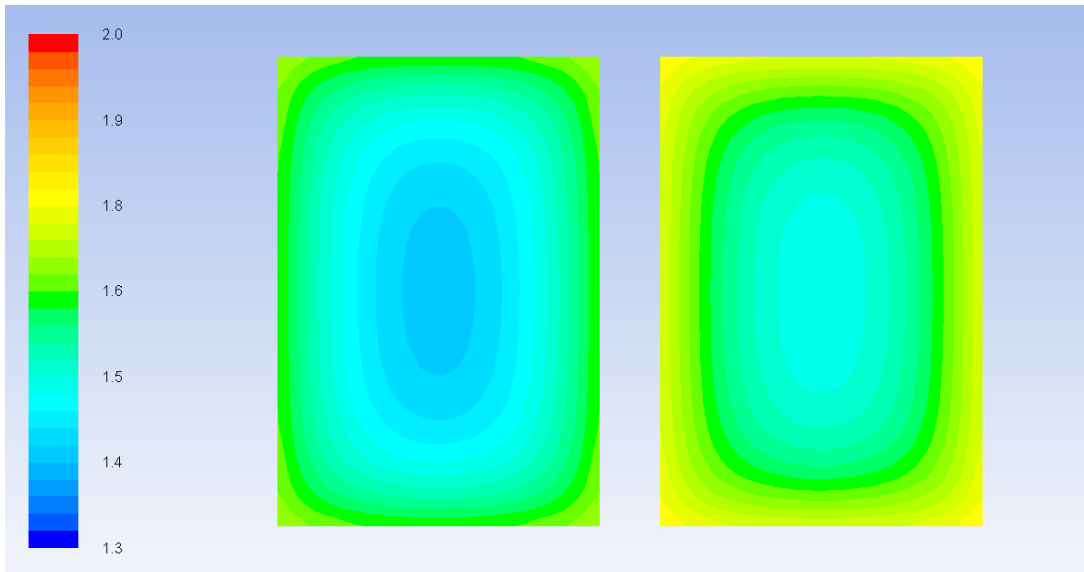


Σχήμα 6.50. Διαγράμματα ισοϋψών της % διατήρησης των καροτενοειδών στο τέλος της ψύξης στο νερό για τέσσερις χαρακτηριστικές περιπτώσεις: α) $T_{\Pi}=98^{\circ}\text{C}$, $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, ($F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 10 \text{ min}$) (πάνω αριστερά), β) $T_{\Pi}=95^{\circ}\text{C}$, $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, ($F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 10 \text{ min}$) (πάνω δεξιά), γ) $T_{\Pi}=98^{\circ}\text{C}$, $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, ($F_{90^{\circ}\text{C}}^{9.5^{\circ}\text{C}} = 24.5 \text{ min}$) (κάτω αριστερά), δ) $T_{\Pi}=93^{\circ}\text{C}$, $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, ($F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 10 \text{ min}$) (κάτω δεξιά).

Στη βιομηχανική πρακτική η ποιότητα του προϊόντος υποβαθμίζεται περισσότερο στο μεταλλικό περιέκτη σε σχέση με το γυάλινο (Σχήματα 6.51-6.52). Αυτό είναι λογικό επακόλουθο του μικρότερου χρόνου διατήρησης του προϊόντος στον αέρα στην περίπτωση του γυάλινου περιέκτη.



Σχήμα 6.51. Διαγράμματα ισοϋψών της % διατήρησης της βιταμίνης C (πάνω) και των καροτενοειδών (κάτω) στο τέλος της ψύξης στο νερό για τη βιομηχανική διεργασία α) με μεταλλικό περιέκτη $T_{\text{IT}}=95^{\circ}\text{C}$, $h_{\text{air}}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, ($F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 10 \text{ min}$) (πάνω και κάτω αριστερά), β) με γυάλινο περιέκτη $T_{\text{IT}}=95^{\circ}\text{C}$, $h_{\text{air}}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, ($F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 10 \text{ min}$) (πάνω και κάτω δεξιά).



Σχήμα 6.52. Διαγράμματα ισοϋψών της % διατήρησης του χρώματος με βάση το δείκτη $2 \times a/b$ ratio (>1.8 = ικανοποιητικό χρώμα, <1.8 =μη αποδεκτό χρώμα) στο τέλος της ψύξης στο νερό για τη βιομηχανική διεργασία α) με μεταλλικό περιέκτη $T_{IT}=95^{\circ}\text{C}$, $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, ($F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 10 \text{ min}$) (αριστερά), β) με γυάλινο περιέκτη $T_{IT}=95^{\circ}\text{C}$, $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, ($F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 10 \text{ min}$) (δεξιά).

7. Συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας μελέτης ήταν η βελτιστοποίηση της “πλήρωση εν θερμώ” διεργασίας για την παραγωγή τοματοπολτού, μέσα από τον κατάλληλη προσομοίωση της με τη χρήση της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής. Για το σκοπό αυτό, αφού αρχικά αναπτύχθηκε το ακριβές υπολογιστικό μοντέλο, ακολούθησε παραμετρική μελέτη, εξετάζοντας την επίδραση των κύριων παραμέτρων της διεργασίας στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του τοματοπολτού, δηλαδή, της θερμοκρασίας γεμίσματος, T_{IT} , (88°C, 90°C, 93°C, 95°C, 98°C) του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στον αέρα h_{air} , (5, 7, 9, 15 W/m² K) της απαιτούμενης ολοκληρωμένης τιμής F_s ($F_{93.33^\circ C}^{8.89^\circ C} = 10 \text{ min}$, $F_{90^\circ C}^{9.5^\circ C} = 24.5 \text{ min}$, $F_{110^\circ C}^{13.7^\circ C} = 1.6 \text{ min}$) και δευτερευόντως της θερμοκρασίας του αέρα, T_{air} (35°C, 25°C) και του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στο νερό, h_{cw} (20, 100, 500 W/m² K). Τη σημαντικότερη επίδραση σε φθίνουσα σειρά είχαν η θερμοκρασία γεμίσματος και η απαιτούμενη τιμή F_s και ακολούθως ο h_{air} . Οι θερμοκρασίες γεμίσματος μέχρι τους 90°C δεν πέτυχαν την ελάχιστη απαιτούμενη ολοκληρωμένη τιμή F_s , ενώ η θερμοκρασία των 93°C το πέτυχε μόνο για $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Στη θερμοκρασία των 95°C χρειάστηκε σημαντικά λιγότερος χρόνος κράτησης στον αέρα από του 93°C (10 min έναντι 31 min αντίστοιχα), ενώ η απαιτούμενη τιμή F_s επιτεύχθηκε και για την περίπτωση με $h_{air}=7 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Η θερμοκρασία των 98°C πέτυχε όχι μόνο την ελάχιστη απαιτούμενη τιμή F_s για όλες τις τιμές h_{air} , αλλά και όλες τις απαιτούμενες τιμές F_s . Επιπλέον, με σύγκριση των παραμέτρων της διεργασίας ως προς το ποσοστό διατήρησης των ποιοτικών παραγόντων στο τέλος της διεργασίας, η βέλτιστη διατήρηση όλων των παραγόντων, επιτεύχθηκε στη θερμοκρασία γεμίσματος των 98°C. Από τις δευτερεύουσες παραμέτρους η θερμοκρασία του αέρα είχε τη μικρότερη επίδραση στη διεργασία και βρέθηκε να εξαρτάται άμεσα από τη θερμοκρασία γεμίσματος και τον h_{air} . Από την άλλη ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στο νερό h_{cw} , έδειξε σημαντική επίδραση στη διεργασία και κατ’ επέκταση στην τελική διατήρηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών υπερδιπλασιάζοντας το χρόνο ψύξης σε σχέση με την τιμή $h_{cw}=100 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ (104 min έναντι 44 min αντίστοιχα), όταν ο h_{cw} ήταν στα κατώτερα όρια ($h_{cw}=20 \text{ W/m}^2 \text{ K}$), ενώ στα ανώτερα όρια ($h_{cw}=500 \text{ W/m}^2 \text{ K}$) ο χρόνος ψύξης μειώθηκε (32 min έναντι 44 min αντίστοιχα). Όσον αφορά τη διεργασία που εφαρμόζεται στη βιομηχανία παραγωγής τοματοπολτού σε μεταλλικό ($T_{IT}=95^\circ C$, χρόνος διατήρησης 20 min) και γυάλινο ($T_{IT}=95^\circ C$, χρόνος διατήρησης 10 min) περιέκτη αυτή ενώ επιτυγχάνει την ελάχιστη απαιτούμενη τιμή F_s , φαίνεται ότι το τελικό προϊόν υστερεί ποιοτικά σε σχέση με κάποιες από τις συνθήκες που εξετάστηκαν και συγκεκριμένα σε σχέση με την θερμοκρασία γεμίσματος στους 98°C.

Από τους ποιοτικούς παράγοντες που εξετάστηκαν στον τοματοπολτό τη μεγαλύτερη θερμοευαισθησία έδειξε το χρώμα και ιδιαίτερα η παράμετρος L αυτού, με την παράμετρο a/b και τη βιταμίνη C να ακολουθούν. Τέλος, τα καροτενοειδή έδειξαν τη μεγαλύτερη θερμοανθεκτικότητα.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή ερευνητική μελέτη προσομοιώθηκε επιτυχώς με τη χρήση Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής η “πλήρωση εν θερμώ” διεργασία για την παραγωγή τοματοπολτού. Τα αποτελέσματα όσον αφορά την επίδραση των εξεταζόμενων παραμέτρων και τα συμπεράσματα από τη βελτιστοποίηση της διεργασίας αν και επιβεβαιώνονται εν μέρει από τη βιβλιογραφία, απαιτούν τη διεξαγωγή ανάλογων εργαστηριακών πειραμάτων για την επικύρωση και επαλήθευση τους. Αν τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιωθούν και πειραματικά τότε υπάρχουν σαφή περιθώρια βελτίωσης των συνθηκών της διεργασίας για την παραγωγή τοματοπολτού μέσω της αύξησης της θερμοκρασίας γεμίσματος στους 98°C , από τους 95°C που εφαρμόζεται αυτή τη στιγμή στη βιομηχανία, αλλαγή που θα βελτιώσει σημαντικά τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος και ιδιαιτέρως το χρώμα του, το οποίο αποτελεί την σημαντικότερη παράμετρο για την αποδοχή του προϊόντος από τον καταναλωτή.

Ονοματολογία

Λατινικοί χαρακτήρες

B	χρόνος θέρμανσης (από άνοιγμα μέχρι κλείσιμο της παροχής ατμού) που απαιτείται για βιομηχανική αποστείρωση, min.
α_w	Ενεργότητα νερού, οριζόμενη ως η τάση των ατμών ενός διαλύματος προς την τάση των ατμών του καθαρού νερού.
C_a	αρχική συγκέντρωση μιας θερμικά ευαίσθητης ουσίας, π.χ. αριθμός μικροοργανισμών ανά mL, g/L, κ.α.
C_b	τελική (μετά το πέρας της θερμικής διεργασίας) συγκέντρωση μιας θερμικά ευαίσθητης ουσίας, π.χ., αριθμός μικροοργανισμών ανά mL, g/L, κ.α.
C_p	ειδική θερμότητα του προϊόντος, J/(kg·K).
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.
E_a	ενέργεια ενεργοποίησης, J/mol.
$F_{T_{ref}}^Z$	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.
F_o	η τιμή F για $T_{ref}=250^\circ\text{F}$ και $z = 18^\circ\text{F}$.
F_i	παράμετρος που ορίζεται ως $F_i = 10^{\frac{T_{ref} - T_{RT}}{z}}$, αδιάστατος αριθμός
F_s	Η ολοκληρωμένη τιμή F που αναφέρεται στη τιμή F του μέσου συνολικού όγκου του περιέκτη όπως υπολογίζεται από την εξίσωση $F_{T_{ref}}^Z = D \times \log\left(\frac{N_o}{N}\right)$.
f_h	χρόνος που απαιτείται για να δεκαπλασιαστεί (ή να υποδεκαπλασιαστεί) η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ αυτοκλείστου και προϊόντος, min.
g ή g_c	διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του αυτοκλείστου κατεργασίας και του προϊόντος –στο κρίσιμο σημείο – στο τέλος του χρόνου θέρμανσης (κλείσιμο παροχής ατμού), °F.
h_{air}	Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στον αέρα.
h_{cw}	Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στο νερό.

I	διαφορά μεταξύ θερμοκρασίας αυτόκλειστου και αρχικής θερμοκρασίας προϊόντος, $I = T_{RT} - T_{IT}$, °F.
ID	εσωτερική διάμετρος περιέκτη, m.
IL	εσωτερικό μήκος περιέκτη, m.
$J_0(x)$	συνάρτηση Bessel πρώτου είδους και μηδενικής τάξης.
$J_1(x)$	συνάρτηση Bessel πρώτου είδους και πρώτης τάξης.
j	<i>παράγοντας καθυστέρησης, παράμετρος για την περιγραφή (μαζί με την τιμή f) του ευθύγραμμου τμήματος της καμπύλης θερμικής διεύθυνσης 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 $j_h = \frac{T_{RT} - T_A}{T_{RT} - T_{IT}}$ και $j_c = \frac{T_B - T_{CW}}{T_h - T_{CW}}$ για την καμπύλη θέρμανσης και ψύξης του προϊόντος, αντίστοιχα. Σημειώστε ότι ο δείκτης h συνήθως παραλείπεται από το σύμβολο j για την καμπύλη θέρμανσης. Αδιάστατος αριθμός.</i>
j_c	η τιμή j στο γεωμετρικό κέντρο προϊόντος που θερμαίνεται με αγωγή, ή η τιμή j κατά το κύκλο ψύξης του προϊόντος. Αδιάστατος αριθμός.
k	θερμική αγωγιμότητα του προϊόντος, W/(m·K).
k_T	σταθερά ταχύτητας αντίδρασης, s^{-1} για αντιδράσεις πρώτης τάξης.
L	μήκος ή ύψος (κυλινδρικού σχήματος) προϊόντος, m.
lethality	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 αυτοκλείστου θέρμανσης και θερμοκρασίας ψύξης, $m+g = T_{RT} - T_{CW}$, °F.
N	αριθμός επιζώντων μικροοργανισμών, σπορίων κ.α. (ανά περιέκτη, ανά mL κ.λ.π.) μετά από δεδομένο χρόνο θέρμανσης π.χ., αριθμός μικροοργανισμών ανά περιέκτη, ανά mL κ.λ.π.
N_0	Ο αρχικός μικροβιακός πληθυσμός, αριθμός σπορίων κ.α. (ανά περιέκτη, ανά mL κ.λ.π.).
N/N_0	Το ποσοστό επιβίωσης του μικροοργανισμού-στόχου στον περιέκτη στο τέλος μιας δεδομένης θερμικής διεργασίας.
OD	εξωτερική διάμετρος περιέκτη, m.

OL	εξωτερικό μήκος περιέκτη, m.
R	ακτίνα (κυλινδρικού σχήματος) προϊόντος, m.
T	θερμοκρασία (προϊόντος στο κρίσιμο σημείο), °F (εκτός αν καθορίζεται στο κείμενο διαφορετικά).
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 αυτοκλείστου και προϊόντος συναρτήσει του χρόνου θέρμανσης) με τον άξονα των θερμοκρασιών, °F.
T _{air}	Η θερμοκρασία περιβάλλοντος σε αέρια ψύξη.
T _{CW}	θερμοκρασία περιβάλλοντος (νερού) ψύξης, °F.
T _g	θερμοκρασία προϊόντος –στο κρίσιμο σημείο– στο τέλος του χρόνου θέρμανσης (κλείσιμο παροχής ατμού), °F (εκτός αν καθορίζεται στο κείμενο διαφορετικά).
T _h	θερμοκρασία προϊόντος στο τέλος της φάσης θέρμανσης (και αρχή του κύκλου ψύξης) μιας θερμικής διεργασίας, °F (εκτός αν καθορίζεται στο κείμενο διαφορετικά).
T _{IT}	αρχική θερμοκρασία προϊόντος ή θερμοκρασία γεμίσματος του περιέκτη στην “πλήρωση εν θερμώ” διεργασία °F (εκτός αν καθορίζεται στο κείμενο διαφορετικά).
T _{RT}	θερμοκρασία αυτοκλείστου κατεργασίας, °F (εκτός αν καθορίζεται στο κείμενο διαφορετικά).
TDT	χρόνος θερμικής καταστροφής (Thermal Death Time) οριζόμενος ως $TDT = F_{T_{ref}}^z 10^{\frac{T_{ref}-T}{z}}$, min (εκτός αν καθορίζεται στο κείμενο διαφορετικά).
t	χρόνος, s (εκτός αν καθορίζεται στο κείμενο διαφορετικά).
U	παράμετρος για το σχεδιασμό θερμικών διεργασιών οριζόμενη ως $U=FF_i$, min (εκτός αν καθορίζεται στο κείμενο διαφορετικά).
U _o	ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του προϊόντος και του περιβάλλοντος θέρμανσης ή ψύξης, W/(m ² K).
Y	αδιάστατη, κανονικοποιημένη θερμοκρασία, οριζόμενη ως $Y = \frac{T_{RT} - T}{T_{RT} - T_{IT}}$.

z	διαφορά θερμοκρασίας που απαιτείται για να δεκαπλασιαστεί ή να υποδεκαπλασιαστεί η τιμή D_T , °F (εκτός αν καθορίζεται στο κείμενο διαφορετικά).
a	θερμική διαχυτότητα του προϊόντος, $a=k/(\rho C_p)$, m^2/s .
β_n	νιοστή ρίζα της εξίσωσης $J_0(\beta_n) = 0$, αδιάστατος αριθμός.
ρ	πυκνότητα του προϊόντος, kg/m^3 .

Δείκτες

a	αρχική συνθήκη.
b	τελική συνθήκη.
o	αρχική, οριακή, συνθήκη.
c	αναφερόμενος στη φάση της ψύξης.
h	αναφερόμενος στη φάση της θέρμανσης.
process	αναφερόμενος στην τιμή F που επιτυγχάνεται κατά τη διάρκεια μιας θερμικής διεργασίας.
required	αναφερόμενος στην απαιτούμενη τιμή F.
ref	συνθήκη αναφοράς.
vavg	μέση τιμή όγκου.

Βιβλιογραφία

- Abramowitz M. and Stegun I.A. 1974. Handbook of Mathematical Functions, New York, Dover Publications, Inc.
- Anderson R.E. 1984. Growth and corresponding elevation of tomato juice pH by *Bacillus coagulans*. Journal of Food Science 49: 647-649.
- Anonymous 1994. United States Standards for grades of tomato sauce. (59 FR 52624). Department of Agriculture, United States.
- Anonymous 2004. Proposed draft revised codex standard for processed tomato concentrates. Codex Alimentarius, joint FAO/WHO Food Standards Programme Codex Committee on processed fruits and vegetables. 22nd session. Washington, DC Metro area, USA.
- Aparicio C., Guignon B., Otero L. and Sanz P.D. 2011. Thermal expansion coefficient and specific heat capacity from sound velocity measurements in tomato paste from 0.1 up to 350 MPa and as a function of temperature. Journal of Food Engineering 104: 341-347.
- Ardagh Group 2015. Steel can manufacture. Available from: <http://cannedfood.org/files/library/pdfs/Manufacture-can.pdf>. Accessed March 7, 2015
- Augusto PED, Pinheiro T.F. and Christianini M. 2010. Using computational fluid dynamics for the evaluation of beer pasteurization: effect of orientation of cans. Ciencia e Tecnologia de Alimentos (Campinas) 30: 980-986.
- Awuah G.B., Ramaswamy H.S. and Economides A. 2007. Thermal processing and quality: Principles and overview. Chemical Engineering and Processing 46: 584-602.
- Ball C.O. 1923. Thermal Process Time for Canned Food, Bulletin of the National Research Council No. 37, Vol. 7, Part 1: National Research Council. Washington, DC, 76 p.
- Ball C.O. and Olson F.C.W. 1957. Sterilization in food technology. Theory, practice and calculations. New York: McGraw-Hill Book Co. 654 p.
- Balsa-Canto E., Alonso A.A. and Banga J.R. 2002a. A novel, efficient and reliable method for thermal process design and optimization. Part I: theory. Journal of Food Engineering 52: 227-234.
- Balsa-Canto E., Alonso A.A. and Banga J.R. 2002b. A novel, efficient and reliable method for thermal process design and optimization. Part II: applications. Journal of Food Engineering 52: 235-247.
- Banga J.R., Balsa-Canto E., Moles C.G. and Alonso A.A. 2003. Improving food processing using modern optimization methods. Trends in Food Science and Technology 14: 131-144.

- Barreiro J.A., Milano M. and Sandoval A.J. 1997. Kinetics of colour change of double concentrated tomato paste during thermal treatment. *Journal of Food Engineering* 33: 359-371.
- Barrett D.M., Garcia E. and Wayne J.E. 1998. Textural modification of processing tomatoes. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 38 (3): 173-258.
- Bash W.D. 1964. Effects of handling and holding practices on the aerobic heat resistant bacterial spore population of mechanically harvested tomatoes. Ph.D. Dissertation. Ohio State University, Columbus, USA.
- Belitz H-D., Grosch W. and Schieberle P. 2006. *Χημεία Τροφίμων*. 3^η Έκδοση, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα. Σελ. 1237-1287.
- Berry R.N. 1933. Some new heat-resistant acid-tolerant organisms causing spoilage in tomato juice. *Journal of Bacteriology* 25: 72.
- Betta G., Rinaldi M., Barbanti D. and Massini R. 2009. A quick method for thermal diffusivity estimation: Application to several foods. *Journal of Food Engineering* 91: 34-41.
- Bigelow W.D., Bohart G.S., Richardson A.C. and Ball C.O. 1920. Heat penetration in processing canned foods. Bulletin No. 16-L, Research Laboratory, National Canners Association, Washington D.C. 128 pp.
- Boz Z., Erdogan F. and Tutar M. 2014. Effects of mesh refinement, time step size and numerical scheme on the computational modeling of temperature evolution during natural-convection heating. *Journal of Food Engineering* 123: 8-16.
- Campbell J.K., Canene-Adams K., Lindshield B.L., Boileau T.W.M., Clinton S.K. and Erdman J.W. Jr. 2004. Tomato phytochemicals and prostate cancer risk. *The Journal of Nutrition* 134: 3486S-3492S.
- Carslaw, H.S. and Jaeger, J.C. 1959. *Conduction of Heat in Solids*, 2nd Ed. Clarendon Press: Oxford, Great Britain, 510 pp.
- Chanforan C., Loonis M., Mora N., Caris-Veyrat C. and Dufour C. 2012. The impact of industrial processing on health-beneficial tomato micro constituents. *Food Chemistry* 134: 1786-1795.
- Chen C.R., Ramaswamy H.S. and Prasher S.O. 2002. Dynamic modelling of retort processing using neural networks. *Journal of Food Processing Preservation* 26: 91-111.
- Choi Y. and Okos M.R., 1986. *Thermal Properties of Liquids Foods Review*. M.R. ASAE, St. Joseph, Michigan.
- Crean D.E. 1966. Acid components of fruits and vegetables: production of acids by thermal processing. *Journal of Food Technology* 1: 55.

- Daryaei H. and Balasubramaniam V.M. 2013. Kinetics of *Bacillus coagulans* spore inactivation in tomato juice by combined pressure-heat treatment. *Food Control* 30: 168-175.
- Davidson P.M. and Weiss J. 2003. Decimal reduction times. In: Heldman D.R. (Ed.), *Encyclopedia of Agriculture, Food and Biological Engineering*. Marcel Dekker Inc. New York, NY, 2003, pp. 165.
- Davis J.N. and Hobson G.E. 1981. The constituents of tomato fruit-The influence of environment, nutrition and genotype. *CRC Critical Reviews of Fruit Science and Nutrition* 15 (3): 205-280.
- David J.R.D. and Merson R.L. 1990. Kinetic parameters for inactivation of *Bacillus stearothermophilus* at high temperatures. *Journal of Food Science* 55(2): 488-493, 515.
- Denny C.B. and Bohrer C.W. 1964. Bacteriological determination on handling of mechanically harvested tomatoes. Research Report No.2-64. National Canners Association. Westport CT.
- Ramaswamy H.S., Van De Voort F.R. and Ghazala S. 1989. An analysis of TDT and Arrhenius Methods for handling process and kinetic data. *Journal of Food Science* 54(5): 1322-1326.
- Denys S., Van Loey, A.N. and Hendrickx E. 2000. A modelling approach for evaluating process uniformity during batch high hydrostatic pressure processing: combination of numerical heat transfer model and enzyme inactivation kinetics. *Innovative Food Sciences and Emerging Technologies* 1: 5-19.
- Depco Pump Company. 2009. Approximate Viscosities of Common Liquids. Clearwater, United States: Depco Pump Company. Available from: <http://www.depcopump.com>. Accessed March 7, 2015.
- Dimou A., Panagou E., Stoforos N.G. and Yanniotis S. 2013. Analysis of thermal processing of table olives using computational fluid dynamics. *Journal of Food Science* 78(11): E1695-E1703.
- Dimou A., Stoforos N.G. and Yanniotis S. 2011. CFD simulations in still cans filled with solid food items in liquid. *Procedia Food Science* 1: 1216-1222.
- Dimou A. and Yanniotis S. 2011. 3D numerical simulation of asparagus sterilization in a still can using computational fluid dynamics. *Journal of Food Engineering* 104: 394-403.
- Drusas A.E. and Saravacos G.D. 1985. Thermal conductivity of tomato paste. *Journal of Food Engineering* 4: 157-168.
- Eurostat 2015. Tomatoes production (1000 t). Ec.Europa.eu. Available from: <http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&init=1&language=en&pcode=tag00035&plugin=1>. Accessed May 2015.

Falcone, P., Anese, M., Severini, C. and Massini, R., 1999. Estrapolazione di simulazioni di laboratorio alle condizioni di sterilizzazione termica per prodotti alimentari confezionati. *Industrie Alimentari* 38: 129–135.

FDA 2010. Guidance for Industry: Acidified Foods. Draft guidance. Rockville M.D. USA. FDA. Center for Food Safety and Applied Nutrition. Phone num.: 301-436-2411. 36p. Available from:
<http://www.fda.gov/Food/GuidanceRegulation/GuidanceDocumentsRegulatoryInformation/default.htm>. Accessed March 7, 2015.

Fenco S.P.A., 2014. Equipment for tomato paste production. Parma, Italy. Available from:
<http://www.fenco.it/tomato-processing-lines/equipment-for-tomato-paste-production/>. Accessed March 7, 2015.

Fields M.L., Zamora A.F. and Bradsher M. 1977. Microbiological analysis of home-canned tomatoes and green beans. *Journal of Food Science* 42(4): 931-934.

Flambert, F. and Deltour, J. 1972. Exact lethality calculation for sterilizing process. I. Principles of the method. *Lebensmittel-Wissenschaft und –Technologie* 5(2):72-73.

Frazier W.C. 1958. *Food Microbiology*, 2nd ed. New York: McGraw-Hill Book Co. 360-361 p.

Gavin A. and Weddig L.M. 1995. *Canned Foods: Principles of Thermal Process Control, Acidification and Container Closure Evaluation*, 6th ed., The Food Processors Institute, Washington D.C.

Ghani A.G.A. and Farid M.M. 2006. Using the computational fluid dynamics to analyze the thermal sterilization of solid-liquid food mixture in cans. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 7: 55-61.

Ghani A.G.A., Farid M.M. and Chena X.D. 2002. Theoretical and experimental investigation of the thermal destruction of vitamin C in food pouches. *Computers and Electronics in Agriculture* 34: 129-143.

Ghani A.G.A., Farid M.M., Chena X.D. and Richards P. 1999a. Numerical simulation of natural convection heating of canned food by computational fluid dynamics. *Journal of Food Engineering* 41: 55-64.

Ghani A.G.A., Farid M.M., Chena 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 Science* 42: 207-214.

Gillespy T.G. 1951 Estimation of sterilizing values of processes as applied to canned foods. I. Packs heating by conduction. *Journal of Food Science and Agriculture* 2: 107-125.

Goose P.G. and Binsted R. 1964. *Tomato paste, puree, juice and powder*, 1st ed. Great Britain: Food Trade Press Ltd.

- Gould W.A. 1992. Tomato Production, Processing and Technology. Baltimore, Maryland: CTI Publications Inc. Third Edition. 535 p.
- Grierson D. and Kader A. 1986. Fruit ripening and quality. In: Atherton J.G. and Rudich J., editors. The tomato crop: a scientific basement for improvement. 1st ed. London: Chapman and Hall, p. 241-280.
- Hariyadi B. 2013. Hot-fill processing of beverages. Food Review International 1(1): 46-50.
- Hayakawa K.I. 1970. Experimental formulas for accurate estimation of transient temperature of food and their application to thermal process evaluation. Food Technology 24(12): 89-.
- Heldman D.R. 2011. Food preservation process design. Mason, Ohio: Elsevier Inc. 357 p.
- Holdsworth S.D. 1985. Optimization of thermal processing: a review. Journal of Food Engineering 4: 89-116.
- Holdsworth S.D. 1997. Thermal processing of packaged foods. New York: Blackie Academic & Professional. 283 p.
- Holman J.P. 1990. Heat transfer 7th edition. New York: McGraw Hill.
- Hong Y., Uhm J. and Yoon W.B. 2014. Using numerical analysis to develop and evaluate the method of high temperature sous-vide to soften carrot texture in different-sized packages. Journal of Food Science 79(4): E546-E561.
- Huhtanen C.N., Naghski J., Custer C.S. and Russell R.W. 1976. Growth and toxin production by *Clostridium botulinum* in moldy tomato juice. Applied and Environmental Microbiology 32: 711-715.
- Hui W.H. 2006. Handbook of Food Science, Technology and Engineering Volume I. Boca Rayton, Florida: CRC Press Taylor and Francis Group. 1516 p.
- Hulme A.C. 1971. The Biochemistry of Foods and their Products. Vol 2. London and New York: Academic Press.
- Hwang Eun-Sun, Stacewitz-Sapuntzakis M. and Bowen P.E. 2012. Effects of heat treatment on the carotenoid and tocopherol composition of tomato. Journal of Food Science 77 (10): C1109-1114.
- Illic D, Forbes M. Kristian and Hassed C. 2011. Lycopene for the prevention of prostate cancer. Cochrane Database of Systematic Reviews. Issue 11.
- Kannan A. and Sandaka G.P.C. 2008. Heat transfer analysis of canned food sterilization in a still retort. Journal of Food Engineering 88: 213-228.

- Knock G., Lambrechts M., Hunter R. and Riley F.R. 1959. In: Hersom A.C. and Hulland E.D. 1964. Canned Foods, an introduction to their microbiology. New York: (Baumgartner), 5th edition. Chem. Pub. Co. Inc.
- Kreith F. 1973. Principles of Heat Transfer. New York: Intext Educational Publishers, 3rd edition.
- Lambeth V.N., Fields M.L. and Huecker D.G. 1964. The sugar-acid ratio of selected tomato varieties. University of Missouri Agric Exp Sta Res Bul. 850 p.
- Leonard S., Merson R.L., Marsh G.L., York G.K., Heil T.R. and Wolcott T. 1975. Flame sterilization of canned foods. An overview. Journal of Food Science 40: 246-249.
- Leskova E., Kubikova J., Kovacikova E., Kosicka M., Porubská J. and Holcikova K. 2006. Vitamin losses: Retention during heat treatment and continual changes expressed by mathematical models. Journal of Food Composition and Analysis 19: 252-276.
- Lund D.B. 1977. Design of thermal processes for maximizing nutrient retention. Food Technology 2: 71-78.
- Mallidis C.G., Frantzeskakis P., Balatsouras G. and Katsaboxakis C. 1990. Thermal treatment of aseptically processed tomato paste. International Journal of Food Science and Technology 25: 442-448.
- Mansfield T. 1962. High temperature short time sterilization. In: Proc. 1st International Congress in Food Science and Technology. Vol 4, Gordon and Breach, London, 311 p.
- McAdams W.H. 1954. Heat transmission (3rd edition). New York: McGraw Hill
- Merson R.L., Singh R.P., and Carroad P.A. 1978. An evaluation of Ball's formula method of thermal process calculations. Food Technology 32(3): 66-72, 75.
- Mikrocontroller 2015. A guide to calculate convection coefficients for thermal problems: Application note. Mikrocontroller.net. Available from: http://www.mikrocontroller.net/attachment/2415/convection_coeff.pdf. Accessed March 7, 2015.
- Mikron Instrument Company Inc 2015. Table of emissivity of various surfaces for infrared thermometry. Available from: http://www-eng.lbl.gov/~dw/projects/DW4229_LHC_detector_analysis/calculations/emissivity2.pdf. Accessed March 7, 2015
- Milly P.J., Toledo R.T., Harrison M.A. and Armstead D. 2007. Inactivation of food spoilage microorganisms by hydrodynamic cavitation to achieve pasteurization and sterilization of fluid foods. Journal of Food Science 72: M414-M422.
- Miri T., Tsoukalas A., Bakalis S., Pistikopoulos E.N., Rustem B. and Fryer P.J. 2008. Global optimization of process conditions in batch thermal sterilization of food. Journal of Food Engineering 87: 485-494.

Montville T.J. 1982. Metabiotic effect of *Bacillus licheniformis* on *Clostridium botulinum*: Implications for home-canned tomatoes. Applied and Environmental Microbiology 44(2): 334-338.

NCA 1968. Laboratory Manual for Food Canners and Processors, Vol. I. National Canners Association, The AVI Publ. Co., Westport CT.

Newman, A.B. 1931. The drying of porous solids: Diffusion calculations. Transactions of the American Institute of Chemical Engineers 27: 310-333.

Norton T. and Sun D. 2007. An overview of CFD applications in the food industry. In: Da-Wen Sun, editor. Computational Fluid Dynamics in Food Processing. New York CRC Press p 1-41.

Odlaug T.E., and Pflug I.J. 1979. Clostridium botulinum growth and toxin production in tomato juice containing *Aspergillus gracilis*. Applied and Environmental Microbiology 37: 496-504.

Okazaki T. and Suzuki K. 2007. Pressure-assisted thermal processing. In D.-W. Sun (Ed.), Thermal Food Processing: New technologies and quality issues. Boca Raton, Florida: CRC Press. pp. 527-566.

Palop A., Raso J., Pagan R., Condon S. and Sala F.J. 1999. Influence of pH on heat resistance of spore of *Bacillus coagulans* in buffer and homogenized foods. International Journal of Food Microbiology 46: 243-249.

Patankar S.V., 1980. Numerical heat transfer and fluid flow. Washington: Hemisphere Publishing Corp. 2nd Ed.

Paul D.A., Anishaparvin A. and Anandharamakrishnan C. 2011. Computational fluid dynamics studies on pasteurization of canned milk. International Journal of Dairy Technology 64: 1-9.

Pflug I. 1987. Calculating F_T -values for heat preservation of shelf stable, low acid canned foods using the straight line semi-logarithmic model. Journal of Food Protection 50: 608-15, 620.

Pham Q.T. 1987. Calculation of thermal process lethality for conduction-heated canned foods. Journal of Food Science 52(4): 967-974.

Puri V.M. and Anantheswaran R.C. 1993. The finite element method in food processing: a review. Journal of Food Engineering 19: 247-274.

Rabiey L., Flick D. and Duckenoy A. 2007. 3D simulations of heat transfer and liquid flow during sterilization of large particles in a cylindrical vertical can. Journal of Food Engineering 82: 409-417.

Rinaldi, M., 2005. Thermal Diffusivity in Foods: Experimental Estimation and its Use in Conductive Heat Exchange Simulation. Ph.D. Thesis, Università degli Studi di Parma.

- Rodrigo D., Loey A.V. and Hendrickx M. 2006. Combined thermal and high pressure color degradation of tomato puree and strawberry juice. *Journal of Food Engineering* Article in Press.
- Rodrigo M., Martinez A., Sanchis J., Trama J. and Giner V. 1990. Determination of Hot-fill-hold-cool process specifications for crushed tomatoes. *Journal of Food Science* 55(4): 1029-1038.
- Sandoval A. J. , Barreiro J.A., Mendoza S., 1992. Thermal Resistance of *Bacillus coagulans* in Double Concentrated Tomato Paste. *Journal of Food Engineering* 57(6), 1369-1370.
- Sandoval A. J. , Barreiro J.A., Mendoza S., 1994. Prediction of hot-fill-air-cool sterilization processes for tomato paste in glass jars. *Journal of Food Engineering* 23: 33-50.
- Sandoval, A. J. 1991. Estudio del Proceso de Esterilizacion por Llenado en Caliente de Pasta de Tomate Envasada en Vidrio. Tesis de Magister en Ciencia de los Alimentos, Universidad Simon Bolivar, Caracas, Venezuela. Cited in Sandoval A. J., Barreiro J.A. and Mendoza S. 1994. Prediction of hot-fill-air-cool sterilization processes for tomato paste in glass jars. *Journal of Food Engineering* 23: 33-50.
- Sardi K. and Yanniotis S. 2007. Numerical modelling of heat transfer in the food industry-recent developments and applications. In: Yanniotis S., Sunden B. editors. *Heat transfer in food processing*. Southampton: WIT Press. pp. 7-35.
- Sendin J.O.H., Alonso A.A. and Banga J.R. 2010. Efficient and robust multi-objective optimization of food processing: A novel approach with application to thermal sterilization. *Journal of Food Engineering* 98: 317-324.
- Sesso H.D., Liu S.M., Gaziano J.M., and Buring J.E. 2003. Dietary lycopene, tomato-based food products and cardiovascular disease in women. *Journal of Nutrition*. 133: 2336-2341.
- Seybold C., Frochlich K., Bitsch R., Otto K. and Bohm V. 2004. Changes in contents of carotenoids and vitamin E during tomato processing. *Journal of Agriculture and Food Chemistry* 52: 7005-10.
- Silva C., Hendricks M., Oliveira F. and Tobback P. 1992. Critical evaluation of commonly used objective functions to optimize overall quality and nutrient retention of heat preserved-foods. *Journal of Food Engineering* 17: 241-258.
- Silva F.V.M. and Silva C.L.M. 1997. Quality optimization of hot filled pasteurized fruit purees: Container characteristics and filling temperatures. *Journal of Food Engineering* 32: 351-364.
- Simpson R. and Abakarov A. 2009. Optimal scheduling of canned food plants including simultaneous sterilization. *Journal of Food Engineering* 90: 53-59.

- Smith T. and Tung M.A. Comparison of formula methods for calculating thermal process lethality. *Journal of Food Science* 47: 626-630.
- Sognefest R. and Jackson J.M. 1947. Pre-sterilization of canned tomato juice. *Food Technology* 1: 78.
- Somavat R., Mohamed H.M.H. and Sastry S.K. 2013. Inactivation kinetics of *Bacillus coagulans* spores under ohmic and conventional heating. *Food Science and Technology* 54: 194-198.
- Stoforos N.G. and Taoukis P.S. 2004, Temperature-time combinations. In *Handbook of Food Technology and Food Engineering*, Y.H. Hui (Ed.), New York: Marcel Dekker, Inc.
- Stumbo C.R. 1973. *Thermobacteriology in Food Processing*. New York: Academic Press. pp. 112-117.
- Stumbo C.R. and Longley R.E. 1966. New parameters for process calculation. *Food Technology* 20(3): 341.
- Teixeira A.A., Dixon J.R., Zahradnik J.W. and Zinsmeister G.E. 1969. Computer optimization of nutrient retention in the thermal processing of conduction-heated foods. *Food Technology* 23: 845-850.
- Thomas Norton and Da-Wen Sun. 2006. Computational Fluid Dynamics-(CFD)-an effective and efficient design and analysis tool for the food industry: a review. *Trends in Food Science and Technology* 17: 600-620.
- Toki Sangyo Co., LTD. 2008. *Food Products Viscosity Data Chart*. Minato-Ku, Tokio: Toki Sangyo Co., LTD. Available from: <http://www.tokisangyo.com/pdf/paper/syokuhin-data.pdf>. Accessed March 7, 2015.
- Varma M.N. and Kannan A. 2005. Enhanced food sterilization through inclination of the container walls and geometry modifications. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48: 3752-3762.
- Velioglu H.M., Boyaci I.H. and Kurultay S. 2011. Determination of visual quality of tomato paste using computerized inspection system and artificial neural networks. *Computers and Electronics in Agriculture* 77: 147-154.
- Versteeg H.K. and Malalasekera W. 2007. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Essex, England: Pearson Prentice Hall, Second Edition.
- Wolf-Gladrow D.A. 2000. *Lattice-gas cellular automata and lattice Boltzman methods. An introduction*. New York: Springer-Verlag, 1st Ed.
- Yang B.B., Datta A.K., and Rao M.A. 1997. Rheological and calorimetric behavior of starch gelatinization in simulation of heat transfer. In: Jovvit R. (ed): *Proceedings 7th International Conference on Engineering and Food*. Vol 2. Sheffield Academic Press, Sheffield, K1-K4.

Yanniotis S. and Stoforos N.G. 2014. Modelling food processing operations with computational fluid dynamics: a review. *Scientia Agriculturae Bohemica* 45(1): 1-10.

York G.K., Heil J.R., Marsh G.L., Merson A.R., Wolcott T. and Leonard S. 1975. Thermobacteriology of canned whole peeled tomatoes. *Journal of Food Science* 40: 764-769.

Youland G. and Stumbo C. 1953. Resistance values reflecting the order of death of spores of *Bacillus coagulans* subjected to moist heat. *Food Technology* 7: 286.

Γενικό Χημείο του Κράτους, 2014, Μάρτιος. Κώδικας Τροφίμων και Ποτών. Άρθρο 124, Έκδοση 3: Μεταποιημένα προϊόντα τομάτας. Αθήνα: Γενικό Χημείο του Κράτους. Σελ 3. Διαθέσιμο διαδικτυακά από: <http://www.gcsl.gr/media/trofima/124-iss3.pdf>.

Γιαννιώτης Σ. 2000. Μηχανική Τροφίμων. Αθήνα: Εκδόσεις Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών.

Μπουλέκου Σ., 2010. Μελέτη της επίδρασης των παραμέτρων της διεργασίας υπερυψηλής υδροστατικής πίεσης στα ένζυμα της τομάτας και εφαρμογή για την παραγωγή προϊόντων με επιθυμητά χαρακτηριστικά. Διδακτορική διατριβή. Θεσσαλονίκη. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης. 234 σελίδες.

Ολύμπιος Μ. Χρίστος. 2001. Η τεχνική της καλλιέργειας των κηπευτικών στα θερμοκήπια. Αθήνα: Εκδόσεις Αθ. Σταμούλης. 772 σελίδες.

Στοφόρος Ν.Γ. 2005. Αρχές θερμικής επεξεργασίας του κρέατος και των προϊόντων του. Κεφάλαιο 18. Στο: Το κρέας και τα προϊόντα του: Παραγωγή, εμπορία, τεχνολογία, υγιεινή. Θεσσαλονίκη: Γεωργάκης Σπ. Α. Εκδόσεις Σύγχρονη Παιδεία.

(ΥΠΑΠΕΝ) Υπουργείο Παραγωγικής Ανασυγκρότησης, Περιβάλλοντος και Ενέργειας 2015. Στοιχεία μεταποίησης βιομηχανική τομάτας. Αθήνα: Διαθέσιμος σύνδεσμος: <http://www.minagric.gr/index.php/el/for-farmer-2/crop-production/oporokipeytika/876-tomata>. Έγινε πρόσβαση το Μάιο του 2015.