

ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΒΙΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ & ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ & ΔΙΑΤΡΟΦΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΥ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ
Π.Μ.Σ. ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ & ΔΙΑΤΡΟΦΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΥ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

**Βελτιστοποίηση της «πλήρωσης εν θερμώ» διεργασίας
παραγωγής τοματοπολτού με τη χρήση της Υπολογιστικής
Ρευστοδυναμικής**



ΗΛΙΑΝΑ Θ. ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ

ΑΘΗΝΑ, 2018

Επιβλέπων καθηγητής: Νικόλαος Γ. Στοφόρος

ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΒΙΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ & ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ & ΔΙΑΤΡΟΦΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΥ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

Π.Μ.Σ. ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ & ΔΙΑΤΡΟΦΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΥ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

**Βελτιστοποίηση της «πλήρωσης εν θερμώ» διεργασίας
παραγωγής τοματοπολτού με τη χρήση της Υπολογιστικής
Ρευστοδυναμικής**

ΗΛΙΑΝΑ Θ. ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ

Επιβλέπων καθηγητής: Νικόλαος Γ. Στοφόρος

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

**Βελτιστοποίηση της «πλήρωσης εν θερμώ» διεργασίας
παραγωγής τοματοπολτού με τη χρήση της Υπολογιστικής
Ρευστοδυναμικής**

ΗΛΙΑΝΑ Θ. ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ

Επιβλέπων καθηγητής: Νικόλαος Γ. Στοφόρος

Εξεταστική Επιτροπή

Ιωάννα Μαντάλα, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια

Μαρία Γιαννακούρου, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας μελέτης ήταν η βελτιστοποίηση της «πλήρωσης εν θερμώ» διεργασίας για την παραγωγή τοματοπολτού, με τη χρήση της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής. Η βελτιστοποίηση αυτή αφορά την παραγωγή τοματοπολτού διπλής συμπύκνωσης 28°Brix με pH 4.3, ο οποίος εισέρχεται θερμός στη μεταλλική κονσέρβα, σφραγίζεται, αναποδογυρίζεται και στη συνέχεια ψύχεται στον αέρα και στο νερό. Ο τοματοπολτός θεωρήθηκε στερεό, επομένως η μεταφορά θερμότητας γίνεται με αγωγή. Ο χρόνος διατήρησης στον αέρα, θεωρείται το κρίσιμο στάδιο για την εξασφάλιση της εμπορικής αποστείρωσης του προϊόντος καθώς και της μεταλλικής κονσέρβας.

Αρχικά, προσδιορίστηκαν οι θερμοφυσικές ιδιότητες και ο συντελεστής θερμικής διαχυτότητας ($\alpha = 1,25 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$) του τοματοπολτού. Ακολούθως προσδιορίστηκαν βιβλιογραφικά οι παράμετροι θερμοανθεκτικότητας D και z του μικροοργανισμού στόχου *B. coagulans* και των ποιοτικών χαρακτηριστικών του χρώματος L και a/b , της βιταμίνης C και του Βήτα καροτένιου και η απαιτούμενη ολοκληρωμένη τιμή F_s . Στη συνέχεια ακολούθησε η ανάπτυξη του αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης σε δύο διαφορετικές περιπτώσεις: για δεδομένη μάζα προϊόντος, στη πρώτη περίπτωση θεωρήθηκε ότι αυτή καταλαμβάνει όλο τον όγκο της μεταλλικής κονσέρβας ($L = 0.112 \text{ m}$ και $D = 0.105 \text{ m}$) και στη δεύτερη περίπτωση θεωρήθηκε ότι υπάρχει κάποιος χώρος (κενός) πάνω από το προϊόν που καταλαμβάνεται από αέρα και υδρατμούς. Το ύψος του χώρου αυτού ορίστηκε ως 7 mm έτσι ώστε, για την ίδια με την πρώτη περίπτωση, μάζα προϊόντος οι διαστάσεις της μεταλλικής κονσέρβας που αναλύθηκε ήταν $L = 0.119 \text{ m}$ και $D = 0.105 \text{ m}$.

Με βάση το μοντέλο αυτό αξιολογήθηκε η «πλήρωση εν θερμώ» διεργασία για την επίτευξη της ολοκληρωμένης τιμής F_s ($F_{93,33^\circ\text{C}}^{8,89^\circ\text{C}}$), με την εξέταση της επίδρασης της θερμοκρασία γεμίσματος (88°C , 90°C , 93°C , 95°C , 98°C), του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στον αέρα h_{air} , (5 , 7 , 9 , $15 \text{ W/m}^2 \text{ K}$) και της ύπαρξης κενού στη μεταλλική κονσέρβα στην ασφάλεια και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά. Τη μεγαλύτερη επίδραση όσο αφορά την επίτευξη της τιμής F_s και της τελικής ποιότητας του προϊόντος είχε η θερμοκρασία γεμίσματος και στη συνέχεια ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στον αέρα. Με θερμοκρασίες γεμίσματος μέχρι και τους 90°C δεν επετεύχθη η ολοκληρωμένη τιμή F_s και για τις δύο περιπτώσεις με ή χωρίς κενό. Με θερμοκρασία γεμίσματος 93°C επετεύχθη η ολοκληρωμένη τιμή F_s για $h_{air}=5 \text{ W/m}^2\text{K}$ και $h_{air}=7 \text{ W/m}^2\text{K}$ στη περίπτωση

με το κενό ενώ στη περίπτωση χωρίς το κενό επιτεύχθη μόνο για $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Στη θερμοκρασία των 95°C χρειάστηκε σημαντικά λιγότερος χρόνος παραμονής στον αέρα έναντι των 93°C και η ολοκληρωμένη τιμή F_s επιτεύχθηκε για $h_{air}=5, 7$ και $9 \text{ W/m}^2\text{K}$ στη περίπτωση με το κενό ενώ στη περίπτωση χωρίς το κενό επιτεύχθη για $h_{air}=5 \text{ W/m}^2\text{K}$ και $7 \text{ W/m}^2\text{K}$. Η θερμοκρασία των 98°C πέτυχε την ολοκληρωμένη τιμή F_s για όλες τις τιμές h_{air} και για τις δύο περιπτώσεις. Επιπλέον, έγινε 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 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 Βήτα καροτενοειδή έδειξαν τη μεγαλύτερη θερμοανθεκτικότητα.

Επιστημονικό Πεδίο: Μηχανική Διεργασιών Τροφίμων, Επεξεργασία και Συντήρηση Τροφίμων

Λέξεις κλειδιά: Τοματόπαστα, Θερμική επεξεργασία, Πλήρωση εν θερμώ, Υπολογιστική ρευστοδυναμική, Κενό

ABSTRACT

The objective of the current study was the optimization of a hot fill process for the production of tomato paste using Computational Fluid Dynamics. Said optimization refers to the production of double concentrated tomato paste of 28°Brix and pH 4.3, during which, the container is filled with hot product, sealed, turned upside down and let to cool down initially from the surrounding air and then in a water bath. Tomato paste was considered as solid product and therefore heat transfer is achieved through conduction. The critical parameter for the achievement of the commercial sterilization is the holding time of the sealed container in air.

Initially, the container's dimensions were measured, $L = 0.119$ m, $D = 0.105$ m, the appropriate thermophysical properties were determined and the thermal diffusivity coefficient $\alpha = 1,25 \times 10^{-7}$ m²/s of the product. Then the D and z parameters of the target microorganism *B. coagulans* and the quality parameters for the color L and a/b , vitamin C, carotenoids and the required integrated F value (F_s). Numerical model was developed for the process of the metal can in two different cases for a given mass of the product, one being the case where the can is totally filled with product ($L = 0.112$ m και $D = 0.105$ m) and the other by letting a gap, at the top of the product, for the water vapor to exist. The gap was set at 7mm, so as the mass of the product in both cases to be the same and the dimensions of the can for the second case were set at $L = 0.119$ m and $D = 0.105$ m.

The numerical model was used to evaluate the hot fill process, as far as the quality characteristics are concerned, that is used to achieve the required F_s ($F_{93,33^\circ C}^{8,89^\circ C}$), by changing the filling temperature (88°C, 90°C, 93°C, 95°C, 98°C), the heat transfer coefficient of the surrounding air (h_{air} 5, 7, 9, 15 W/m²K) and the existence or not of the gap, as far as the safety and the quality characteristics of the product are concerned. The most factor affecting the F_s value of the process and the quality characteristics of the product was the initial temperature of the product. With filling temperatures up to 90°C the required F_s value was not obtained for all the h_{air} values (both with and without gap). For initial product temperature of 93°C the required F_s value was achieved for $h_{air}=5$ W/m²K and $h_{air}=7$ W/m²K when the can was not completely filled, but only for $h_{air}=5$ W/m²K when it was filled with the product. When the filling temperature was increased to 95°C, the time required to produce commercially sterilized product was significantly reduced, and the required F_s value was obtained for $h_{air}=5, 7$ and 9 W/m²K when the can was not filled and for $h_{air}=5$ W/m²K and 7 W/m²K for when it was filled with the product. Finally, when

the initial temperature was 98°C the required F_s value was achieved. The quality characteristics at the end of the process evaluated and the process that had the least degrading effect to the product was when 98°C used as filling temperature. The quality parameter affected most by the process was the L color value followed by the a/b value. The least affected were the carotenoids.

Scientific fields: Food Process Engineering, Processing and Preservation of Agricultural Products

Keywords: Tomatopaste, Thermal processing, Hot fill, Computational Fluid Dynamics (CFD), Head space

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	i
ABSTRACT	iii
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	3
1. ΤΟΜΑΤΑ	3
1.1 Καρπός και σύσταση της τομάτας.....	3
1.2 Προϊόντα τομάτας	5
1.3 Βιομηχανική τομάτα.....	5
1.4 Παραγωγή τοματοπολτού	6
1.4.1 Συγκομιδή.....	7
1.4.2 Παραλαβή.....	7
1.4.3 Πλύσιμο	8
1.4.4 Διαλογή.....	8
1.4.5 Πολτοποίηση – Προθέρμανση	8
1.4.6 Εκχύμωση	8
1.4.7 Συμπύκνωση	9
1.4.8 Θερμική επεξεργασία- συσκευασία.....	9
1.4.9 Αποθήκευση	10
2. ΘΕΡΜΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΡΟΦΙΜΩΝ.....	10
2.1 Αρχές θερμικής επεξεργασίας.....	11
2.1.1 Κινητικές θερμικής απενεργοποίησης	12
2.1.2 Υπολογισμός θνησιμότητας θερμικών διεργασιών	14
2.1.3 Μεταφορά θερμότητας με αγωγή σε μη σταθερή κατάσταση	15
2.1.4 Επίδραση της θερμικής επεξεργασίας στα ποιοτικά χαρακτηριστικά	21
2.1.5 «Πλήρωση εν θερμώ» διεργασία.....	21
3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗ.....	24

3.1	Εισαγωγή	24
3.2	Πλεονεκτήματα του CFD	25
3.3	Μειονεκτήματα του CFD	25
3.4	Εμπορικά πακέτα του CFD.....	26
3.5	Αρχές της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής	27
3.6	Αριθμητικές μέθοδοι διακριτοποίησης	28
3.6.1	Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών	29
3.6.2	Μέθοδος πεπερασμένων όγκων.....	29
3.6.3	Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων	29
3.7	Στάδια επίλυσης ενός προβλήματος με τη χρήση του CFD	30
3.7.1	Προ-επεξεργασία	30
3.7.2	Επίλυση	30
3.7.3	Μετά-επεξεργασία	30
3.8	Εφαρμογές Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής στη βιομηχανία τροφίμων	31
3.8.1	Ξήρανση.....	31
3.8.2	Βιομηχανική Αποστείρωση	31
4.	ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	33
4.1	Θερμοφυσικές ιδιότητες	33
4.1.1	Σταθερές θερμοφυσικές ιδιότητες.....	33
4.1.1.1	Πυκνότητα	33
4.1.1.2	Θερμική αγωγιμότητα.....	33
4.1.1.3	Ειδική θερμότητα	34
4.1.1.4	Διαλυτά στερεά	34
4.2	Μεταβλητές θερμοφυσικές ιδιότητες.....	34
4.2.1	Προσδιορισμός θερμικής διαχυτότητας (α)	35
4.3	Επίλυση αναλυτικών εξισώσεων.....	36
4.4.	Αριθμητική επίλυση με τη χρήση λογισμικού προσομοίωσης	37
4.4.1	Σχεδιασμός γεωμετρίας	37

4.4.2 Δημιουργία πλέγματος.....	38
4.5 Αξιολόγηση της θερμικής επεξεργασίας.....	40
4.6 Αξιολόγηση αριθμητικού μοντέλου – Ανεξαρτησία πλέγματος	42
4.6.1 Αξιολόγηση αναλυτικής λύσης με αριθμητική λύση	43
4.6.2 Αξιολόγηση αριθμητικής λύσης μεταξύ των πλεγμάτων.....	43
4.7 Αξιολόγηση της «πλήρωσης εν θερμώ» διεργασίας	44
4.8 Υπολογισμός της τιμής F της διεργασίας	46
4.9 Υπολογισμός της υποβάθμισης των ποιοτικών παραγόντων τοματοπολτού	47
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	49
5.1 Θερμοφυσικές ιδιότητες τοματοπολτού	49
5.2 Αξιολόγηση ποιότητας πλέγματος με βάση τις παραμέτρους Ορθογωνικότητας και Στρέβλωσης	50
5.3 Επίλυση της θερμικής επεξεργασίας	51
5.4 Σύγκριση αναλυτικής και αριθμητικής λύσης.....	54
5.5 Σύγκριση αριθμητικής λύσης μεταξύ των πλεγμάτων.....	57
5.6 Επίλυση της «πλήρωσης εν θερμώ» διεργασίας	64
5.6.1 Επίδραση της θερμοκρασίας γεμίσματος T_{IT}	64
5.6.2 Επίδραση του συντελεστή μεταφορά θερμότητας στον αέρα, h_{air}	98
5.6.3 Επίδραση του κενού στη μεταφορά θερμότητας	101
Συμπεράσματα	107
ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ.....	109
Βιβλιογραφία	113

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κυριότερο μέλημα των βιομηχανιών τροφίμων είναι η παραγωγή ποιοτικών και ασφαλών προϊόντων από την αρχή της παραγωγής τους μέχρι και την μετέπειτα αποθήκευση τους. Τα περισσότερα τρόφιμα επεξεργάζονται με διάφορες μεθόδους για την αύξηση της διάρκειας της ζωής τους. Μια μέθοδος επεξεργασίας τροφίμων είναι η «πλήρωση εν θερμώ» διεργασία, η οποία είναι μια ήπια θερμική διεργασία που εφαρμόζεται τις τελευταίες δεκαετίες σε όξινα τρόφιμα όπως πουρές φρούτων, τοματοχυμό και τοματοπολτό (Sandoval, Barreiro and Mendoza, 1993).

Με τη μέθοδο αυτή, το προϊόν που επεξεργάζεται ευρέως είναι ο τοματοπολτός ο οποίος θερμαίνεται μέχρι να φτάσει σε θερμοκρασίες πάνω από τους 90°C (Sandoval, Barreiro and Mendoza, 1993), στη συνέχεια εισάγεται θερμό μέσα στη μεταλλική κονσέρβα και ακολουθεί σφράγιση της κονσέρβας. Αφού γίνει το κλείσιμο της κονσέρβας, αυτή αναποδογυρίζεται και διατηρείται για ένα χρονικό διάστημα της τάξεως των 20 min στον αέρα και στη συνέχεια ακολουθεί ψύξη του προϊόντος σε νερό. Η μεγαλύτερη θανάτωση των μικροοργανισμών παρατηρείται κατά την παραμονή του προϊόντος στον αέρα. Κρίσιμο σημείο της μεθόδου αυτής είναι η θερμοκρασία γεμίσματος του προϊόντος, καθώς αν η θερμοκρασία μετά τη θέρμανση πέσει κάτω από την προτεινόμενη, θα επέλθει υποεπεξεργασία του προϊόντος με συνέπεια τη μείωση της διάρκειας ζωής του και την πιθανή αλλοίωση του. Για το λόγο αυτό κατά τη θέρμανση του προϊόντος, η θερμοκρασία του, είναι 5-10°C πάνω από την θερμοκρασία γεμίσματος, έτσι ώστε κατά το γέμισμα της μεταλλικής κονσέρβας το προϊόν να έχει την κατάλληλη θερμοκρασία.

Σύμφωνα με τα παραπάνω η επιστημονική προσέγγιση της διεργασίας είναι αναγκαίο να μελετηθεί περαιτέρω καθώς σε πολλές περιπτώσεις βιομηχανικής πρακτικής για να διασφαλιστεί ότι το τρόφιμο ασφαλές, αυτό υφίσταται μεγαλύτερη θερμική επεξεργασία από την ιδανική, με αποτέλεσμα να έχει κατώτερα ποιοτικά χαρακτηριστικά, όπως υποβαθμισμένο χρώμα και απώλειες σε βιταμίνες (Velioglu *et al.*, 2011). Η εξέλιξη της τεχνολογίας και των ηλεκτρονικών υπολογιστών στις μέρες μας είναι ραγδαία με αποτέλεσμα την ανάπτυξη κατάλληλων προγραμμάτων, βασισμένα στην επίλυση πολύπλοκων μαθηματικών εξισώσεων.

Η Υπολογιστική ρευστοδυναμική ή Computational fluid dynamics (CFD) είναι μια σύγχρονη αριθμητική τεχνική η οποία χρησιμοποιείται για την ανάλυση και τη προσομοίωση συστημάτων τα οποία περιλαμβάνουν ροή ρευστών, μεταφορά θερμότητας

και συσχετιζόμενων φαινομένων, όπως οι χημικές αντιδράσεις, με τη χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών (Versteeg and Malalasekera, 2007, Sun, 2007). Αποτελεί ένα δυναμικό σχεδιαστικό και ερευνητικό εργαλείο, η εφαρμογή του οποίου βοηθά στην καλύτερη κατανόηση των περίπλοκων φυσικών μηχανισμών που διέπουν τις διεργασίες μηχανικής τροφίμων (Yanniotis and Stoforos, 2014).

Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, σκοπός της παρούσας διπλωματικής επεξεργασίας ήταν η προσομοίωση της «πλήρωσης εν θερμώ» διεργασίας για τον προσδιορισμό του απαιτούμενου χρόνου βιομηχανικής αποστείρωσης για την παραγωγή τοματοπολτού με τη χρήση της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής όπου μελετήθηκε η επίδραση της θερμοκρασίας πλήρωσης και του συντελεστή μεταφορά θερμότητας κατά την παραμονή του προϊόντος στον αέρα, στην επίτευξη ή μη του απαιτούμενου στόχου ασφαλείας αλλά και της διατήρησης των ποιοτικών χαρακτηριστικών του προϊόντος.

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1. TOMATA

Η τομάτα 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. Τα περισσότερα είδη του γένους αυτού είναι θάμνοι ετήσιοι, βραχείας διάρκειας, με βιολογικό κύκλο 5 ή και λιγότερους μήνες. Όλα τα είδη είναι ενδογενή φυτά της ΝΑ Αμερικής. Η άγρια μορφή της τομάτας *L. esculentum var cerasiforme* βρέθηκε στο Μεξικό, στην Κεντρική Αμερική και άλλες περιοχές της Ν. Αμερικής. απ' όπου αρχικά μεταφέρθηκε τον 16^ο αιώνα στην Ευρώπη και στη συνέχεια διασκορπίστηκε σε αρκετές περιοχές της γης (Ολύμπιος, 2001).

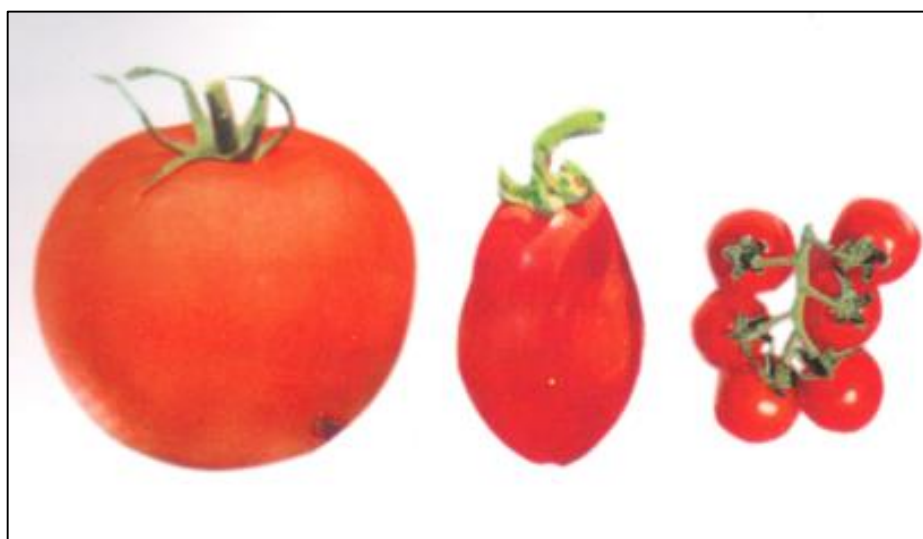
Στην Ελλάδα η εισαγωγή της έγινε αρχικά στην Αθήνα το 1818. Άμεσος πρόγονος της καλλιεργούμενης τομάτας είναι η *var. cerasiforme*. Όλα τα είδη του γένους *Lycopersicon* έχουν ίδιο αριθμό χρωμοσωμάτων και πολύ σπάνια. Το *Lycopersicon esculentum* και οι στενοί συγγενείς, είναι γενικά αυτογονιμοποιούμενα είδη. Σύμφωνα με τον Rick (Rick, 1950), σταυρογονιμοποιούνται στις περιοχές που αυτοφύονται και σε μερικές άλλες υποτροπικές περιοχές, αλλά και σε άλλα μέρη αυτογονιμοποιούνται πλήρως. Αντίθετα, τα άλλα είδη του γένους *Lycopersicon* είναι αυτόστειρα, και επομένως σταυρογονιμοποιούνται πλήρως με διάφορα είδη μελισσών (Ολύμπιος, 2001).

Είναι φυτό θερμής καλλιέργειας και απαιτεί θερμοκρασίες ημέρας 25-30°C, θερμοκρασίες νύχτας 16-20°C και εδάφη με καλή στράγγιση. Καλλιεργείται για τον καρπό της, ο οποίος καταναλώνεται ώριμος, νωπός, αποξηραμένος ή σε πολτό. Εφοδιάζει τον ανθρώπινο οργανισμό με βιταμίνες, κυρίως τη βιταμίνη C, κάλιο και αντιοξειδωτικές ουσίες, έχει ελκυστικό χρώμα και ευχάριστο άρωμα (Barrett *et. al*, 1998; Motamedzadegan and Tabarestani, 2018).

1.1 Καρπός και σύσταση της τομάτας

Ο καρπός της τομάτας είναι σαρκώδης ράγα ή, στη βοτανική ορολογία, μια διογκωμένη ωοθήκη. Το σώμα του καρπού που σχηματίστηκε από το τοίχωμα της ωοθήκης, το οποίο περιβάλλει και περικλείει τα σπέρματα και είναι γνωστό ως περικάρπιο, αποτελείται από εξωτερικά, ενδιάμεσα και εσωτερικά τοιχώματα. Η συνέχεια του περικαρπίου διακόπτεται από μικρές κοιλότητες στις οποίες υπάρχουν τα σπέρματα μέσα σ' ένα ζελατινοειδή παρεγχυματικό ιστό, ο οποίος προέρχεται από εμβρυακό ιστό (Καραουλάνης, 2007). Το σχήμα του καρπού καθορίζεται γενετικά και επηρεάζεται

ελάχιστα από καλλιεργητικές τεχνικές. Διαφέρει ανάλογα με την ποικιλία και μπορεί να είναι σφαιρικό ή επίμηκες (Σχήμα 1).



Σχήμα 1. Επιτραπέζια τομάτα (αριστερά), τύπου Cherry (δεξιά), βιομηχανική τομάτα (κέντρο) (Ολύμπιος, 2001).

Η ωρίμανση του καρπού συνοδεύεται από αλλαγές στο χρώμα, τη σταθερότητα και την ανάπτυξη χαρακτηριστικών αρωμάτων και γεύσεων. Στην τομάτα υπάρχουν έξι στάδια ωρίμανσης και βασίζονται στην εξωτερική αλλαγή του χρώματος του καρπού από πράσινο σε κόκκινο. Το χρώμα των καρπών εξαρτάται από την ποικιλία και την περιοχή που καλλιεργήθηκε. Υπάρχουν τρεις διαφορετικές φάσεις αλλαγών χρωστικής κατά την ωρίμανση. Η χλωροφύλλη είναι κυρίαρχη χρωστική ουσία κατά την ανάπτυξη μέχρι το στάδιο των ώριμων πράσινων καρπών. Καθώς ο καρπός ωριμάζει γίνεται καταστροφή της χλωροφύλλης και αύξηση των καροτενοειδών και μέχρι το στάδιο της εμφάνισης του κόκκινου χρώματος γίνεται σύνθεση του λυκοπένιου όπου η περιεκτικότητα της χλωροφύλλης είναι μηδενική (Heuvelink, 2005).

Η τομάτα σήμερα είναι το επικρατέστερο φρούτο στη προτίμηση των καταναλωτών καθ' όλη τη διάρκεια του έτους είτε νωπή είτε μεταποιημένη. Η εκατοστιαία σύσταση των καρπών της τομάτας είναι χυμός 97%, φλοιός 1% και σπέρματα 2%. Στον Πίνακα 1 αναφέρονται τα κυριότερα συστατικά των καρπών της τομάτας.

Πίνακας 1. Σύσταση της τομάτας (Gould, 1992)

ΣΥΣΤΑΤΙΚΟ	% ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ
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	0.05-0.1

1.2 Προϊόντα τομάτας

Τα προϊόντα τομάτας είναι πολύ σημαντικά για την ανθρώπινη υγεία. Δεν καταναλώνονται μόνο ως νωπός καρπός, λόγω των επιθυμητών διατροφικών και οργανοληπτικών ιδιοτήτων του, αλλά το μεγαλύτερο μέρος της παγκόσμιας καλλιέργειας χρησιμοποιείται για την παραγωγή μεγάλης ποικιλίας επεξεργασμένων προϊόντων τομάτας. Οι περισσότερες τομάτες χρησιμοποιούνται για μεταποίηση σε χυμό, πολτό, σούπα, κέτσαπ, σάλτσα και κονσέρβα τομάτας (Ouden, 1995, Motamedzadegan and Tabarestani, 2018). Στο Πίνακα 2 που ακολουθεί αναφέρονται τα κυριότερα μεταποιημένα προϊόντα τομάτας.

1.3 Βιομηχανική τομάτα

Στις ανεπτυγμένες χώρες της Ευρώπης και της Αμερικής η βιομηχανική επεξεργασία και η κονσερβοποίηση της τομάτας ξεκίνησε από το 1920 περίπου. Στην Ελλάδα η μεταποίηση της τομάτας αναπτύχθηκε κυρίως μετά το 1965 και στηρίχθηκε κυρίως στις εξαγωγές. Η μεγάλη ώθηση που δόθηκε για επέκταση της καλλιέργειας της τομάτας οδήγησε στη δημιουργία νέων ποικιλιών και υβριδίων, κατάλληλων για βιομηχανική επεξεργασία, που να ευδοκιμούν σε διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Οι ποικιλίες της βιομηχανικής τομάτας είναι πολυάριθμες και διακρίνονται μεταξύ τους ως προς το σχήμα, το μέγεθος, το χρώμα, την πρωιμότητα, την ανθεκτικότητα στις ασθένειες και στη μεταφορά και τέλος ως προς την ανάπτυξη του φυτού (Καραουλάνης, 2007).

Πίνακας 2. Κυριότερα προϊόντα τομάτας (FAO, 2016)

ΠΡΟΪΟΝ	ΟΡΙΣΜΟΣ
Φυσικός χυμός τομάτας	Μη συμπυκνωμένος χυμός των ώριμων καρπών τομάτας χωρίς φλοιούς και σπέρματα
Ελαφρώς συμπυκνωμένος χυμός τομάτας	Παρασκευάζεται από χυμό τομάτας που έχει υποστεί ελαφρά συμπύκνωση, ώστε τα στερεά συστατικά να είναι τουλάχιστον 6%
Τοματοπολτός	Παρασκευάζεται με συμπύκνωση του χυμού νωπών καρπών τομάτας. Ανάλογα με το βαθμό συμπύκνωσης διακρίνεται στους παρακάτω τύπους: <ul style="list-style-type: none"> ➤ Πελτέ τύπου Θήρας, περιέχει στερεά συστατικά τουλάχιστον 40% ➤ Τοματοπολτό τριπλής συμπύκνωσης με στερεά συστατικά τουλάχιστον 36% ➤ Τοματοπολτό διπλής συμπύκνωσης με στερεά συστατικά τουλάχιστον 28% ➤ Τοματοπολτό απλής συμπύκνωσης με στερεά συστατικά τουλάχιστον 22% ➤ Ημισυμπυκνωμένο τοματοπολτό με στερεά συστατικά τουλάχιστον 16%
Αποφλοιωμένες, κονσερβοποιημένες τομάτες ολόκληρες ή σε τεμάχια	Παρασκευάζονται από τομάτες χωρίς φλοιό
Κέτσαπ	Παρασκευάζεται με ειδική επεξεργασία είτε της ακατέργαστης σάρκας της τομάτας είτε του τοματοπολτού

Οι ποικιλίες που είναι κατάλληλες για βιομηχανοποίηση είναι αυτές που οι καρποί τους έχουν (Καραουλάνης, 2007):

- Λεία επιφάνεια χωρίς πτυχώσεις
- Υψηλή περιεκτικότητα σε σάκχαρα
- Χαμηλή οξύτητα
- Ζωηρό κόκκινο χρώμα
- Αντοχή στις μεταφορές και τις ασθένειες
- Σταθερή σάρκα και λίγα σπέρματα

1.4 Παραγωγή τοματοπολτού

Ο τοματοπολτός είναι το πιο διαδεδομένο μεταποιημένο προϊόν τομάτας το οποίο προέρχεται από τη συμπύκνωση του φυσικού χυμού νωπών καρπών της τομάτας, και

συντηρείται με θερμική επεξεργασία προς αποφυγή αλλοίωσης. Τα στάδια παραγωγής τοματοπολτού παρουσιάζονται στο Σχήμα 2 και περιγράφονται εν συντομία στη συνέχεια (Καραουλάνης, 2007):



Σχήμα 2. Διάγραμμα ροής παραγωγής τοματοπολτού.

1.4.1 Συγκομιδή

Στο στάδιο αυτό οι καρποί της τομάτας συγκομίζονται μηχανικά όταν αποκτήσουν ζωηρό κόκκινο χρώμα.

1.4.2 Παραλαβή

Τα εργοστάσια εφοδιάζονται με πρώτη ύλη η οποία είναι τοποθετημένη σε τελάρα, τα οποία ζυγίζονται και τοποθετούνται σε παλέτες. Στο στάδιο αυτό γίνεται ποιοτικός έλεγχος της πρώτης ύλης εξασφαλίζοντας τοματοπολτό καλής ποιότητας αλλά και οικονομικό όφελος στον παραγωγό. Εξετάζεται ο καρπός της τομάτας όταν φτάσει στο εργοστάσιο ως προς το χρώμα, την οξύτητα και τη περιεκτικότητα σε σάκχαρα και βάση αυτών των χαρακτηριστικών εξαρτάται η αμοιβή του εκάστοτε παραγωγού.

1.4.3 Πλύσιμο

Στο στάδιο αυτό γίνεται πλύση των παραληφθέντων τοματών, η οποία είναι απαραίτητη για την απομάκρυνση των ξένων σωμάτων και της λάσπης, μειώνοντας έτσι το μικροβιακό φορτίο που υπάρχει στο χώμα αλλά και στην επιφάνεια της τομάτας. Το πλύσιμο γίνεται με ανακυκλωμένο πόσιμο νερό.

1.4.4 Διαλογή

Αφού γίνει το πλύσιμο της πρώτης ύλης και απομακρυνθούν οι ξένες ύλες, οι καρποί περνούν πάνω σε μεταφορικές ταινίες μπροστά από διαλογείς, οι οποίοι απομακρύνουν τους ακατάλληλους καρπούς, οι οποίοι απορρίπτονται σε αγωγούς. Οι καρποί που θεωρούνται ακατάλληλοι είναι αυτοί που παρουσιάζουν σπάσιμο, μαύρα στίγματα, σάπισμα, τραύματα, μαλακή και υδαρή υφή.

1.4.5 Πολτοποίηση – Προθέρμανση

Στο στάδιο αυτό γίνεται θραύση της τομάτας με τη χρήση συστοιχίων περιστρεφόμενων οδοντωτών κυκλικών μαχαιριών ή κοπτικών αντλιών, στη συνέχεια οι σπασμένοι καρποί μεταφέρονται σε εναλλάκτες θερμότητας όπου προθερμαίνονται. Η προθέρμανση της τομάτας γίνεται με δύο τρόπους, την Ψυχρή Θραύση (Cold Break) και τη Θερμή Θραύση (Hot Break). Η Ψυχρή θραύση γίνεται σε θερμοκρασίες 40-60°C. Στη περίπτωση αυτή τα πηκτινολυτικά ένζυμα πηκτινομεθυλεστεράση και πολυγαλακτουρονάση που είναι παρόντα στο καρπό της τομάτας παραμένουν αναλλοίωτα και διατηρούν την δραστηριότητα τους προκαλώντας αποικοδόμηση των πηκτινικών ουσιών, με αποτέλεσμα τη παραγωγή προϊόντων χαμηλού ιξώδους. Τα προϊόντα στη περίπτωση αυτή παραμένουν αναλλοίωτα όσο αφορά το χρώμα, το άρωμα και τα θρεπτικά συστατικά. Σε αντίθεση, η Θερμή Θραύση γίνεται σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 90°C με σκοπό την αδρανοποίηση των πηκτινολυτικών ενζύμων και αποφυγή της αποικοδόμησης των πηκτινικών ουσιών, έτσι ώστε να λαμβάνεται προϊόν που διατηρεί το ιξώδες του. Στη περίπτωση αυτή το προϊόν είναι υποβαθμισμένο στο χρώμα, πράγμα ανεπιθύμητο (Ouden, 1995).

1.4.6 Εκχύμωση

Αφού γίνει η θραύση και η προθέρμανση της τομάτας ακολουθεί η εκχύμωση μέσω κυλινδρικών κοσκίνων διαμέτρου 0.5-5 mm τα οποία αποτελούνται από περιστρεφόμενα εσωτερικά πτερύγια, τα οποία συνθλίβουν τα τεμάχια και αποχωρίζουν το σάρκωμα της τομάτας από τους φλοιούς, τα σπέρματα και τις ίνες τα οποία είναι τα απορρίμματα. Αυτά οδηγούνται σε ειδική πρέσα για την απόρριψη του χυμού, που υπάρχει σε αυτά, και ο

οποίος μπορεί να φτάσει το 60-70% του βάρους των. Η διάμετρος οπών του κόσκινου καθώς και η ταχύτητα περιστροφής επηρεάζει σημαντικά τη ποιότητα του χυμού. Όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος της οπής και η ταχύτητα περιστροφής τόσο αυξημένο ιξώδες θα έχει ο τοματοχυμός. Ο τοματοχυμός μαζεύεται σε ανοξείδωτες δεξαμενές και στη συνέχεια μεταφέρεται στο τμήμα της συμπύκνωσης (Καραουλάνης, 2007).

1.4.7 Συμπύκνωση

Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει την εξάτμιση μεγάλης ποσότητας περιεχόμενου νερού, τη μεγάλη ταχύτητα μεταφοράς θερμότητας στο προϊόν που θα συμπυκνωθεί και τη διαφύλαξη του προϊόντος από τυχόν αλλοιώσεις λόγω υψηλών θερμοκρασιών, που αναπτύσσονται. Ο παραγόμενος χυμός μεταφέρεται με αντλίες στο σύστημα συμπύκνωσης, όπου πραγματοποιείται η εξάτμιση του περιεχόμενου νερού και λαμβάνεται ο τοματοπολτός στην επιθυμητή περιεκτικότητα σε διαλυτά στερεά. Για την ταχύτερη απομάκρυνση του περιεχόμενου νερού από τον τοματοχυμό, ώστε να μην αλλοιωθούν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά, αυτός υφίσταται μια μικρή συμπύκνωση κατά την οποία τα διαλυτά στερεά του αυξάνουν γύρω στα 11% σε 50°C, πριν ακολουθήσει η τελική συμπύκνωση. Το στάδιο αυτό καλείται προ-συμπύκνωση (Καραουλάνης, 2007).

Οι συμπυκνωτήρες που χρησιμοποιούνται είναι συνεχούς ροής και διακρίνονται σε απλής, διπλής, τριπλής και τετραπλής βαθμίδας. Ο διαχωρισμός αυτός αφορά στα στάδια στα οποία πραγματοποιείται η συμπύκνωση. Στους συμπυκνωτές απλής βαθμίδας η συμπύκνωση γίνεται σε ένα στάδιο, στους συμπυκνωτές διπλής σε δύο στάδια, στους τριπλής σε τρία στάδια και στους τετραπλής σε τέσσερα στάδια. Σε ένα συμπυκνωτή τριπλής βαθμίδας 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 κει στο τρίτο στάδιο, 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 (Μπουλέκου, 2010).

1.4.8 Θερμική επεξεργασία- συσκευασία

Μετά από τη συμπύκνωση ακολουθεί η θερμική επεξεργασία του τοματοπολτού έτσι ώστε να απαλλαγεί από οποιαδήποτε βιώσιμη μορφή παθογόνων και μη παθογόνων μικροοργανισμών οι οποίοι μπορούν να πολλαπλασιαστούν υπό συνήθεις συνθήκες αποθήκευσης και διακίνησης του προϊόντος. Λόγω του χαμηλού pH η θερμική επεξεργασία πραγματοποιείται σε σχετικά ήπιες συνθήκες. Εκτός της κλασσικής θερμικής επεξεργασίας

σε ερμητικά κλεισμένης μεταλλικής κονσέρβας, έχουμε τη «πλήρωση εν θερμώ» ή την ασηπτική επεξεργασία τοματοπολτού.

Για τη «πλήρωση εν θερμώ» χρησιμοποιούνται συνήθως εναλλάκτες θερμότητας αποξεομένης επιφάνειας ή πλακών, όπου ο τοματοπολτός θερμαίνεται σε ελάχιστη θερμοκρασία 90°C και ακολουθεί πλήρωση σε δοχεία «εν θερμώ» (Μπουλέκου, 2010). Ακολούθως σφραγίζεται χωρίς περαιτέρω θερμική επεξεργασία, αφήνεται για ένα χρονικό διάστημα της τάξεως των 20 min στον αέρα και στη συνέχεια ψύχεται σε ψύκτες με καταιονισμό νερού θερμοκρασίας 20°C από ακροφύσια μέχρις ότου η τελική θερμοκρασία του προϊόντος να είναι 35-40°C. Η ασηπτική διεργασία του τοματοπολτού συνήθως γίνεται σε θερμοκρασίες 105-110°C για 2.25 λεπτά ή στους 96°C για 3 λεπτά, ανάλογα με το είδος του προϊόντος (Motamedzadegan and Tabarestani, 2018). Η θέρμανση του προϊόντος γίνεται σε σωληνωτούς 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). Η ασηπτική διεργασία πραγματοποιείται σε τρεις φάσεις: αρχικά θερμαίνεται το προϊόν στην επιθυμητή θερμοκρασία, στη συνέχεια παραμένει στη θερμοκρασία αποστείρωσης για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και τέλος ακολουθεί η ψύξη του προϊόντος σε θερμοκρασία 35-40°C. Μετά την ψύξη ακολουθεί συσκευασία του προϊόντος σε ασηπτικούς σάκους (Μπουλέκου, 2010).

1.4.9 Αποθήκευση

Οι συνθήκες συντήρησης των προϊόντων παίζουν καθοριστικό ρόλο στη διάρκεια ζωής τους, όσο και στην ποιότητα τους. Οι μεταλλικές κονσέρβες τοποθετούνται σε παλέτες και στη συνέχεια αποθηκεύονται σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες και σε ξηρό περιβάλλον, συνθήκες οι οποίες προστατεύουν το προϊόν από αλλοίωση και ανάπτυξη παθογόνων μικροοργανισμών (Καραουλάνης, 2007).

2. ΘΕΡΜΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

Η θερμική επεξεργασία ενός τρόφιμου είναι η διαδικασία με την οποία το προϊόν θερμαίνεται, σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες για μικρούς σχετικά χρόνους. Στόχος της θερμικής επεξεργασίας είναι η μείωση του μικροβιακού φορτίου και η αδρανοποίηση των ενζύμων σε τέτοιο βαθμό ώστε να μην επιβιώσουν παθογόνοι και αλλοιογόνοι μικροοργανισμοί αλλά και να μη υποβαθμίζεται ποιοτικά το τρόφιμο. Ο εμπνευστής της μεθόδου είναι ο Nicolas Appert, ο οποίος δημοσίευσε το 1810 την εργασία με τίτλο « Το βιβλίο όλων των νοικοκυριών όπου (περιγράφεται) η τέχνη της συντήρησης όλων των

ζωικών και φυτικών ουσιών, για αρκετά χρόνια» (Le livre de tous les ménages, ou l'art de conserver, pendant plusieurs années, toutes les substances animales et végétales). Η επιστημονική βάση της διεργασίας θεμελιώθηκε αρκετά αργότερα, το 1860, από τον Luis Pasteur, ο οποίος εξήγησε ότι κατά την θερμική επεξεργασία «θανατώνονται» οι μικροοργανισμοί, υπεύθυνοι για την αλλοίωση των τροφίμων (Στοφόρος, 2005).

Από την εποχή του Appert μέχρι τον Pasteur και τα τέλη του 19^{ου} αιώνα η ερευνητική δραστηριότητα στον τομέα των θερμικών διεργασιών αναπτυσσόταν με πολύ αργούς ρυθμούς. Τη δεκαετία του 1920 ο Charles Olin Ball έθεσε τις βάσεις για ποσοτικοποίηση της έντασης της θερμικής επεξεργασίας των κονσερβοποιημένων τροφίμων (Bigelow, 1920). Επίσης το 1923 ο Charles Olin Ball εξέδωσε ένα βιβλίο με τίτλο “Sterilization in Food Technology” στο οποίο έκανε αναφορά στην ποσοτικοποίηση της εφαρμοζόμενης θερμικής επεξεργασίας. Επίσης εισήγαγε για πρώτη φορά την μέτρηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της κονσέρβας με θερμοζεύγος. Το 1965 ο Charles Raymond Stumbo με το βιβλίο “Thermobacteriology in Food Processing” ανέφερε προτεινόμενους χρόνους θέρμανσης έτσι ώστε τα παραγόμενα προϊόντα να είναι μικροβιολογικά σταθερά.

2.1 Αρχές θερμικής επεξεργασίας

Σύμφωνα με τους Jen *et al* (1971) και Lund (1975), η επιλογή της σωστής θερμικής επεξεργασίας (παστερίωση, αποστείρωση) και οι σχετικές παράμετροι της διεργασίας (χρόνος, θερμοκρασία) πρέπει να εξεταστούν με βάση μια πολύπλευρη ανάλυση, συμπεριλαμβανομένων των κινητικών εκτιμήσεων. Η θερμική επεξεργασία είναι η τεχνολογική απάντηση στην αντοχή μικροβιολογικών παραγόντων που μπορούν να επηρεάσουν την ανθρώπινη υγεία και να προκαλέσουν σημαντική υποβάθμιση των τροφίμων.

Στην πραγματικότητα, η βάση της θερμικής επεξεργασίας ονομάζεται «θερμοβακτηριολογία». Έτσι λοιπόν η θερμοανθεκτικότητα των διαφόρων μικροοργανισμών που παρουσιάζουν ενδιαφέρον από άποψη μικροβιολογικής σταθερότητας του προϊόντος, καθώς και η γνώση του μηχανισμού μεταφοράς θερμότητας στα υπό εξέταση προϊόντα, αποτελούν τις απολύτως απαραίτητες πληροφορίες για το σχεδιασμό και τον έλεγχο των θερμικών διεργασιών (Στοφόρος, 2005).

Σύμφωνα με μελέτες, η θερμική καταστροφή των μικροοργανισμών ακολουθεί λογαριθμικό ρυθμό μείωσης, ακολουθεί δηλαδή την κινητική μιας αντίδρασης πρώτης τάξης (Esty and Meyer, 1922). Διάφοροι παράγοντες που μπορούν να μειώσουν ή να

ενισχύσουν τη θερμική καταστροφή μικροοργανισμών. είναι η ενεργότητα νερού (α_w), η αλατότητα του τρόφιμου και το pH.

2.1.1 Κινητικές θερμικής απενεργοποίησης

Ο ρυθμός καταστροφής των μικροοργανισμών κατά τη διάρκεια μια θερμικής επεξεργασίας σε σταθερή θερμοκρασία T δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$N=N_0 10^{-\frac{t}{D_T}} \quad (1)$$

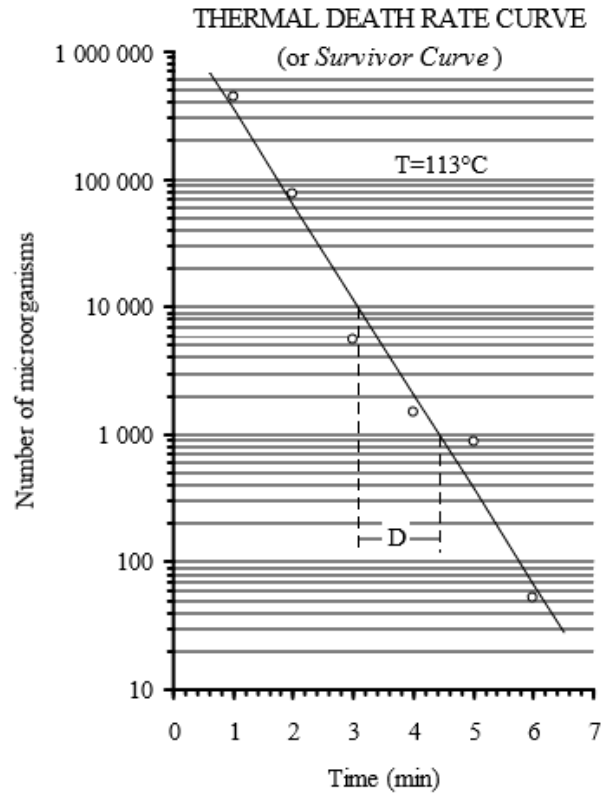
όπου N ο μικροβιακός πληθυσμός στο τέλος της θερμικής επεξεργασίας και N_0 ο αρχικός μικροβιακός πληθυσμός στο προϊόν, t είναι ο χρόνος της κατεργασίας και D_T ο «Χρόνος Υποδεκαπλασιασμού».

Η παράμετρος D_T είναι μια από τις κύριες παραμέτρους που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του ρυθμού θανάτωσης των μικροοργανισμών και ορίζεται ως ο χρόνος σε σταθερή θερμοκρασία T, που απαιτείται για την καταστροφή του 90% του αρχικού φορτίου των μικροοργανισμών. Ο κλασικός προσδιορισμός της, προϋποθέτει την κατασκευή της *Καμπύλης Ρυθμού Θερμικής Καταστροφής* (Σχήμα 3). Ο λογάριθμός του αριθμού των επιζώντων μικροοργανισμών, μετά από τη θέρμανση σε σταθερή θερμοκρασία, σχεδιάζεται συναρτήσει του χρόνου θέρμανσης. Στη συνέχεια σχεδιάζεται η ευθεία που περιγράφει καλύτερα τα πειραματικά δεδομένα και τέλος η τιμή D_T λαμβάνεται από το διάγραμμα ως ο χρόνος που απαιτείται έτσι ώστε η *Καμπύλη Ρυθμού Θερμικής Καταστροφής* να διανύσει έναν λογαριθμικό κύκλο.

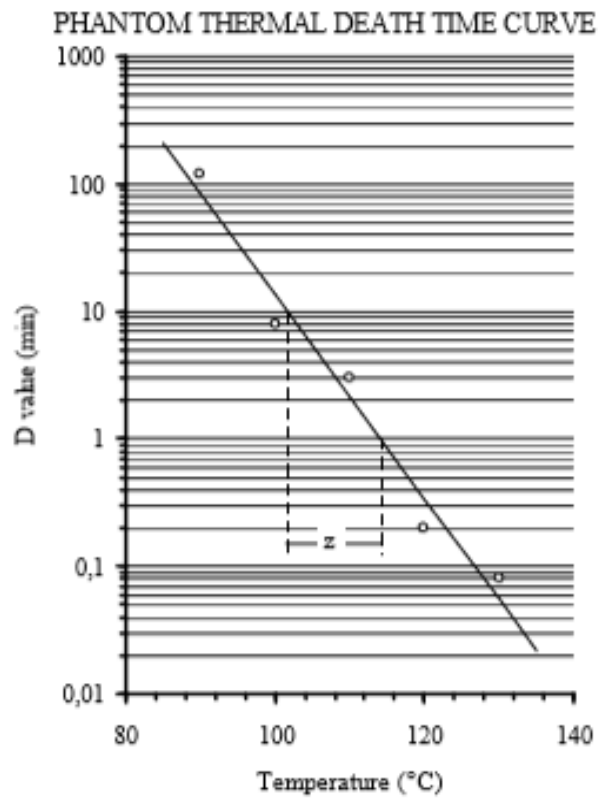
Ακόμη μια σημαντική παράμετρος που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του ρυθμού θανάτωσης είναι η τιμή z, η οποία εκφράζει την επίδραση της θερμοκρασίας στο χρόνο υποδεκαπλασιασμού. Συγκεκριμένα ορίζεται ως η διαφορά θερμοκρασίας που απαιτείται για να δεκαπλασιαστεί ή να υποδεκαπλασιαστεί η τιμή D_T . Η σχέση που περιγράφει την εξάρτηση του χρόνου υποδεκαπλασιασμού από τη θερμοκρασία με βάση τη παράμετρο z δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$D_T = D_{T_{ref}} 10^{(T_{ref}-T)/z} \quad (2)$$

Όπως και η τιμή D_T έτσι και η τιμή z προσδιορίζεται γραφικά από την *Φαινόμενη Καμπύλη Χρόνου Θερμικής Καταστροφής* (Σχήμα 4) με παρόμοιο τρόπο.



Σχήμα 3. Καμπύλη Ρυθμού Θερμικής Καταστροφής (Στοφόρος, 2005).



Σχήμα 4. Φαινόμενη Καμπύλη Χρόνου Θερμικής Καταστροφής (Στοφόρος, 2005).

Ένας άλλος τρόπος για την έκφραση της επίδρασης της θερμοκρασίας στην ειδική ταχύτητα αντίστασης είναι η κλασική εξίσωση Arrhenius, εξίσωση (3), που συσχετίζει τη σταθερά ρυθμού αντίδρασης (k) με τον αντίστροφο της απόλυτης θερμοκρασίας (T):

$$\log\left(\frac{k_{T_k}}{k_{T_{k_{ref}}}}\right) = \left(\frac{-E_a}{2.303R_g}\right) \left(\frac{T_{k_{ref}} - T_k}{T_{k_{ref}} T_k}\right) \quad (3)$$

όπου k_{T_k} και $k_{T_{k_{ref}}}$ οι σταθερές του ρυθμού αντίδρασης στις απόλυτες θερμοκρασίες T_k και $T_{k_{ref}}$ αντίστοιχα, E_a η ενέργεια ενεργοποίησης και R_g η παγκόσμια σταθερά των αερίων (Lund, 1975).

Οι παράμετροι D_T και z συνδέονται με τις παραμέτρους k_T και E_a σύμφωνα με τις Εξισώσεις (4) και (5) αντίστοιχα.

$$D_T = \frac{\ln(10)}{k_T} \quad (4)$$

$$z = \frac{\ln(10) \times R_g \times T_{k_{ref}} \times T_k}{E_a} \quad (5)$$

Και τα δύο μοντέλα έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς για την περιγραφή της επίδρασης της θερμοκρασίας στην ανάλυση των κινητικών δεδομένων. Οι δύο παράμετροι z και E_a θεωρούνται ανεξάρτητες από την θερμοκρασία αν και η Εξ. (5) υποδηλώνει το αντίθετο. Η αντίφαση μεταξύ των Εξ. (2) και (3) είναι δεδομένη (Datta, 1993), αλλά και οι δύο εξισώσεις κρίνονται ικανοποιητικές για την έκφραση της επίδρασης της θερμοκρασίας στο ρυθμό θερμικής καταστροφής (Ramaswamy, 1989). Συνήθως η κλασική θερμοβακτηριολογική (D_T και z) προσέγγιση χρησιμοποιείται για την περιγραφή της θερμικής απενεργοποίησης των μικροοργανισμών (Holdsworth, 1997), ενώ η σχέση του Arrhenius χρησιμοποιείται για την έκφραση της επίδρασης της θερμοκρασίας στην υποβάθμιση ποιοτικών παραμέτρων του προϊόντος.

2.1.2 Υπολογισμός θνησιμότητας θερμικών διεργασιών

Για την αξιολόγηση της επίδρασης του συνδυασμού χρόνου-θερμοκρασίας στη θνησιμότητα των μικροοργανισμών χρησιμοποιούνται δύο προσεγγίσεις. Η πρώτη προτείνει τον υπολογισμό μιας *σημειακής* τιμής F , Εξίσωση (6), για το σημείο του προϊόντος το οποίο δέχεται την ελάχιστη επίδραση της επεξεργασίας, όταν η θερμοκρασία του προϊόντος δεν παραμένει ομοιόμορφη σε όλη τη μάζα του προϊόντος κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας.

$$F_{T_{ref}}^z = \int_{t_a}^{t_b} 10^{(T-T_{ref})/z} dt \quad (6)$$

Η δεύτερη προσέγγιση προτείνει τον υπολογισμό μιας *ολοκληρωμένης* τιμής F, Εξίσωση (7), που προκύπτει ολοκληρώνοντας κατάλληλα τα αποτελέσματα της θερμικής διεργασίας για όλη τη μάζα του προϊόντος (Στοφόρος, 2005).

$$F_s = D_{T_{ref}} \log \left[V \int_0^V 10^{\left[\left(\frac{1}{D_{T_{ref}}} \right) \int_0^t 10^{\frac{T-T_{ref}}{z}} dt \right]} dV \right] \quad (7)$$

Για το σχεδιασμό θερμικής διεργασίας, μεγάλης σημασίας είναι ο υπολογισμός της τιμής F της διεργασίας, η οποία ορίζεται ως ο ισοδύναμος χρόνος κατεργασίας σε μια σταθερή θερμοκρασία αναφοράς μιας υποθετικής θερμικής επεξεργασίας που παράγει το ίδιο αποτέλεσμα με τη δεδομένη θερμική επεξεργασία. Η τιμή F της διεργασίας η οποία είναι γνωστό ότι παράγει εμπορικά αποστειρωμένο προϊόν καλείται *απαιτούμενη* τιμή F. Για προϊόντα χαμηλής οξύτητας, στα οποία υπάρχει δυνατότητα ανάπτυξης του *Clostridium botulinum*, ως ελάχιστη *απαιτούμενη* τιμή F θεωρείται αυτή των 3 min, η οποία αντιστοιχεί μείωση του μικροβιακού φορτίου κατά 12 λογαριθμικούς κύκλους. Μια θερμική επεξεργασία εκπληρώνει το ζητούμενο στόχο όταν ο λόγος της τιμής F της διεργασίας προς την *απαιτούμενη* τιμή F είναι τουλάχιστον ίσος με τη μονάδα (Στοφόρος, 2005).

2.1.3 Μεταφορά θερμότητας με αγωγή σε μη σταθερή κατάσταση

2.1.3.1 Αναλυτική μέθοδος επίλυσης

Σε πολλά προβλήματα θέρμανσης ή ψύξης η κατανομή της θερμοκρασίας μέσα σε ένα στερεό μεταβάλλεται με το χρόνο. Εάν δηλαδή εμβαπτιστεί μια κονσέρβα με αρχική ομοιόμορφη θερμοκρασία 40°C, σε νερό θερμοκρασίας 100°C, η θερμοκρασία στο εσωτερικό της θα αρχίσει να αυξάνεται μέχρις ότου προσεγγίσει πάλι μια ομοιόμορφη, τελική, θερμοκρασία. Αυτό απαιτεί κάποιο χρονικό διάστημα. Η μεταφορά θερμότητας από το περιβάλλον στο εσωτερικό του σώματος θεωρείται ότι γίνεται με αγωγή, εάν το προϊόν μέσα στη μεταλλική κονσέρβα είναι στερεό.

Αν οι συνθήκες θέρμανσης του υπό εξέταση προβλήματος παρουσιάζουν συμμετρία, η μεταφορά θερμότητας με αγωγή πραγματοποιείται μόνο ως προς την ακτινική, r, και την αξονική, y διεύθυνση, και το πρόβλημα απλοποιείται στις δύο διαστάσεις. Οι θερμοφυσικές ιδιότητες του προϊόντος λαμβάνονται ως σταθερές. Για τον υπολογισμό της κατανομής της θερμοκρασίας σε ένα στερεό σε μη-σταθερή κατάσταση πρέπει να λυθεί η εξίσωση της

ενέργειας. Για ένα δισδιάστατο κυλινδρικό σώμα η εξίσωση της μεταφοράς θερμότητας είναι η ακόλουθη:

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (8)$$

Όπου

α , ο συντελεστής θερμικής διάχυσης του σώματος που ισούται με $k/\rho C_p$

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

y , η αξονική διεύθυνση

t , ο χρόνος

Μια μεταλλική κονσέρβα με ύψος L και ακτίνα R θεωρείται 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 της μεταλλικής κονσέρβας. Στη περίπτωση αυτή η αδιάστατη θερμοκρασία Y για κάθε σημείο της μεταλλικής κονσέρβας θα δίνεται από το γινόμενο της αδιάστατης θερμοκρασίας του άπειρου κυλίνδρου και της αδιάστατης θερμοκρασίας της άπειρης πλάκας (Εξίσωση 9).

$$Y_{\text{can}} = \frac{T_{\infty} - T_{(x,t)}}{T_{\infty} - T_0} = Y_{\text{finite cylinder}} = Y_{\text{infinite slab}} \times Y_{\text{infinite cylinder}} \quad (9)$$

Όπου

Y_{can} , η αδιάστατη θερμοκρασία σε κάθε σημείο της μεταλλικής κονσέρβας

$Y_{\text{infinite slab}}$, η αδιάστατη θερμοκρασία άπειρης πλάκας

$Y_{\text{infinite cylinder}}$, η αδιάστατη θερμοκρασία άπειρου κυλίνδρου

T_{∞} , θερμοκρασία περιβάλλοντος

T_0 , αρχική θερμοκρασία προϊόντος

Άπειρη πλάκα

Η άπειρη πλάκα θα έχει πάχος L . Οι άλλες δύο διαστάσεις εκτείνονται στο άπειρο ή για πρακτικούς λόγους είναι κατά μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από το πάχος της πλάκας και έτσι αγνοείται οποιαδήποτε μεταφορά θερμότητας. Η πλάκα έχει σταθερή αρχική

θερμοκρασία T_0 σε όλο της τον όγκο και σε χρόνο μηδέν ($t=0$) και εκτίθεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος T_∞ . Η κατανομή της θερμοκρασίας σε κάθε σημείο της πλάκας, δηλαδή μια έκφραση για $T(x,t)$ όπου x η απόσταση από το κέντρο της πλάκας περιγράφεται από τις παρακάτω διαφορικές εξισώσεις σε καρτεσιανές συντεταγμένες:

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (10)$$

Με τις ακόλουθες αρχικές και οριακές συνθήκες:

Αρχικές συνθήκες:

$$T(x,t=0)=T_0=\text{constant} \quad (11)$$

Οριακές συνθήκες:

$$k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right| = 0 \quad (12)$$

όπου δείχνει συμμετρία στο κεντρικό άξονα και

$$T \left(x = \frac{L}{2}, t \right) = T_\infty = T_{RT} = \text{constant} \quad (13)$$

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:

$$Bi = \frac{\text{εσωτερική αντίσταση}}{\text{εξωτερική αντίσταση}} = \frac{x_1/kA}{1/hA} = \frac{hx_1}{k} \quad (14)$$

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 για άπειρο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, και με βάση τις παραπάνω αρχικές και οριακές συνθήκες δίνεται η παρακάτω εξίσωση (Carslaw and Jaeger, 1959):

$$Y_{\text{slab}} = \frac{T_{RT} - T}{T_{RT} - T_{IT}} = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2(-1)^{m+1}}{\lambda_m} \cos(\lambda_m^* x) e^{-\lambda_m^2 F_0} \quad (15)$$

όπου

$$\lambda_m = (2m-1) \frac{\pi}{2} \quad (16)$$

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

$$x^* = \frac{x}{L/2} \quad (17)$$

$$Fo = \frac{at}{(L/2)^2} \quad (18)$$

Άπειρος κύλινδρος

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

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \quad (19)$$

Με τις ακόλουθες αρχικές και οριακές συνθήκες:

Αρχικές συνθήκες:

$$T(r, t=0) = T_0 = T_{IT} = \text{constant} \quad (20)$$

Οριακές συνθήκες:

$$k \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right| = 0 \quad (21)$$

όπου δείχνει συμμετρία στο κεντρικό άξονα και

$$T(r=R, t) = T_\infty = \text{constant} \quad (22)$$

όπου δείχνει άμεση ισορροπία μεταξύ της κυλινδρικής επιφάνειας και της θερμοκρασίας του μέσου, που σημαίνει άπειρο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας.

Η αδιάστατη θερμοκρασία για άπειρο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, και με βάσει τις παραπάνω αρχικές και οριακές συνθήκες δίνεται η παρακάτω εξίσωση (Arpachi, 1966):

$$Y_{\text{infinite cylinder}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2J_0(\beta_n \frac{r}{R})}{\beta_n J_1(\beta_n)} e^{-\beta_n^2 Fo} \quad (23)$$

όπου β_n , η νιοστή θετική ρίζα της εξίσωσης:

$$J_0(\beta_n) = 0 \quad (24)$$

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 (Abramowitz and Stegun, 1974).

Ο χρόνος t δίνεται από την παρακάτω εξίσωση στην αδιάστατη του μορφή F_0 :

$$F_0 = \frac{at}{(R)^2} \quad (25)$$

1.5.1.4 Μικροβιακός στόχος θερμικής επεξεργασίας

Ο μικροοργανισμός στόχος σε μία θερμική επεξεργασία ενός τρόφιμου, είναι ο μικροοργανισμός του οποίου τα στελέχη του είναι ανθεκτικά στη θερμική επεξεργασία που γίνεται στο τρόφιμο και ο οποίος αναπτύσσεται όταν οι συνθήκες είναι ευνοϊκές για την ανάπτυξη του. Η απενεργοποίηση του μικροοργανισμού αυτού και των спорίων ή βλαστικών μορφών του στο τρόφιμο αυτόματα συνεπάγεται ότι το τρόφιμο είναι ασφαλές προς κατανάλωση.

Για να καθοριστεί ποιοι μικροοργανισμοί είναι σημαντικοί για τη θερμική επεξεργασία, πρέπει να ληφθεί υπόψιν το επεξεργασμένο τρόφιμο, το οποίο καθορίζει τόσο τους τύπους των μικροοργανισμών οι οποίοι μπορούν να αναπτυχθούν σε αυτό, όσο και η θερμική αντίσταση του μικροοργανισμού. Ο πλέον κρίσιμος παράγοντας του τρόφιμου, ο οποίος καθορίζει τους μικροοργανισμούς στόχους, οι οποίοι θα πρέπει να θανατωθούν, είναι το pH. Για το σχεδιασμό των θερμικών διεργασιών, τα τρόφιμα, ανάλογα με το pH χωρίζονται σε τρόφιμα χαμηλής οξύτητας με $pH > 4.6$, σε όξινα τρόφιμα με φυσικό pH 4.0-4.6 και μεγάλης οξύτητας με $pH < 4.0$. Σε προϊόντα χαμηλής οξύτητας ο μικροοργανισμός στόχος κατά τη θερμική επεξεργασία είναι το *Clostridium botulinum*, ένας μεσόφιλος μικροοργανισμός, υποχρεωτικά αναερόβιο, σπορογόνο βακτήριο, το οποίο κάτω από ευνοϊκές συνθήκες παράγει μια δηλητηριώδη τοξίνη, θανατηφόρα για τον άνθρωπο. Η τοξίνη όμως είναι θερμοευαίσθητη και καταστρέφεται μετά από θέρμανση 10 min στους 100°C. Επομένως, τα τρόφιμα χαμηλής οξύτητας θα πρέπει να δέχονται μια επεξεργασία ικανή για την καταστροφή των σπόρων του *Clostridium botulinum* (Λάζος, 2010).

Οι κύριες ομάδες μικροοργανισμών που εμπλέκονται στην αλλοίωση των προϊόντων τομάτας είναι τα οξυγαλακτικά και τα σπορογόνα βακτήρια. Τα οξυγαλακτικά βακτήρια καταστρέφονται με μια ήπια θερμική επεξεργασία και εμπλέκονται κυρίως σε επιμόλυνση του προϊόντος μετά την επεξεργασία του. Ο *Bacillus coagulans* θεωρείται ο πιο σημαντικός μικροοργανισμός στα προϊόντα τομάτας γιατί είναι ο πιο θερμοανθεκτικός σε σχέση με τα

άλλα σπορογόνα. Έτσι, για το σχεδιασμό μιας θερμικής επεξεργασίας για προϊόντα τομάτας ως μικροοργανισμός στόχος θεωρείται ο *Bacillus coagulans* (Mallidis *et al.*, 1990).

2.1.3.2 Μέθοδοι αξιολόγησης θερμικής επεξεργασίας

Η ανάγκη ευελιξίας και ακρίβειας κατά τον υπολογισμό του απαιτούμενου χρόνου για την επίτευξη δεδομένης θνησιμότητας μια θερμικής διεργασίας οδήγησε στην ανάπτυξη διαφόρων μεθόδων υπολογισμού. Μια από αυτές τις μεθόδους είναι η *Γενική Μέθοδος* η οποία παρουσιάστηκε το 1920 από τον Bigelow και τους συνεργάτες του, όπου ο προσδιορισμός της τιμής F δεδομένης θερμικής διεργασίας, κατά την οποία η θερμοκρασία του προϊόντος συναρτήσει του χρόνου είναι γνωστή με τη μορφή διακριτών σημείων, στηρίζεται στη γραφική ολοκλήρωση της εξίσωσης (6). Η δεύτερη μέθοδος είναι η Μαθηματική μέθοδος του Ball, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως μέχρι και σήμερα και έχει συμβάλει σε μεγάλο βαθμό για την επιτυχημένη πορεία των βιομηχανιών συντήρησης τροφίμων με θερμικές διεργασίες (Στοφόρος, 2005).

Η μέθοδος υπολογισμού του Ball προκύπτει από την καμπύλη θερμικής διεξόδου και βασίζεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$B = f_h \log \left[\frac{j_h (T_{RT} - T_{IT})}{g} \right] \quad (26)$$

όπου

B ο χρόνος θέρμανσης που απαιτείται για βιομηχανική αποστείρωση

f_h ο χρόνος που απαιτείται για να δεκαπλασιαστεί ή να υποδεκαπλασιαστεί η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ αυτοκλείστου και προϊόντος,

j_h ο παράγοντας καθυστέρησης, παράμετρος του ευθύγραμμου τμήματος της καμπύλης θερμικής διεξόδου που προκύπτει όταν τα θερμοκρασιακά δεδομένα του προϊόντος σχεδιάζονται ως η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ αυτοκλείστου και προϊόντος συναρτήσει του χρόνου. Ορίζεται ως $j_h = \frac{T_{RT} - T_A}{T_{RT} - T_{IT}}$ και $j_c = \frac{T_B - T_{CW}}{T_{HT} - T_{CW}}$ για την καμπύλη θέρμανσης και ψύξης αντίστοιχα.

g η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του αυτοκλείστου και του προϊόντος στο κρίσιμο σημείο, στο τέλος του χρόνου θέρμανσης, $g = T_{RT} - T_g$

T_A «ψευδό»-αρχική θερμοκρασία του προϊόντος κατά την έναρξη του κύκλου θέρμανσης της διεργασίας, δηλαδή, η τομή του ευθύγραμμου τμήματος της καμπύλης θερμικής διεξόδου με τον άξονα των θερμοκρασιών

2.1.4 Επίδραση της θερμικής επεξεργασίας στα ποιοτικά χαρακτηριστικά

Κατά τη θερμική επεξεργασία μαζί με την καταστροφή των μικροοργανισμών επέρχεται και υποβάθμιση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του προϊόντος. Οι παράγοντες οι οποίοι επιταχύνουν ή αναστέλλουν τη μικροβιακή καταστροφή με τη θερμότητα, επηρεάζουν επίσης και την καταστροφή των θρεπτικών συστατικών. Οι περισσότερες από τις αντιδράσεις, οι οποίες οδηγούν στην υποβάθμιση των τροφίμων κατά τη θερμική επεξεργασία, είναι πρώτης τάξεως (Λάζος, 2010).

Το εύρος των τιμών D και z των μικροοργανισμών και των ποιοτικών παραμέτρων αποτελούν τον λόγο για τον οποίο μπορούν να βελτιστοποιηθούν οι θερμικές διεργασίες. Οι τιμές z κυμαίνονται συνήθως μεταξύ 25-45°C και είναι μεγαλύτερες από αυτές των μικροοργανισμών 0-14°C (Holdsworth, 1997). Η εξίσωση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ποιοτικής υποβάθμισης που προτάθηκε από τον Mansfield το 1962 είναι η ακόλουθη, η οποία έχει την ίδια μορφή με την εξίσωση για τον προσδιορισμό της μικροβιακής απενεργοποίησης:

$$C_{T_{ref}}^z = \int_0^t 10^{\frac{(T(t)-T_{ref})}{z}} dt \quad (27)$$

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 ($\frac{C}{C_0}$) και γράφεται ως εξής:

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{V} \int_0^V 10^{-\left(\frac{1}{D_{ref}}\right) \int_0^t 10^{\frac{T-T_{ref}}{z}} dt} dV \quad (28)$$

2.1.5 «Πλήρωση εν θερμώ» διεργασία

Τα προϊόντα υψηλής οξύτητας (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 ½ κιλού (71.5 mm × 117 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 επεξεργασίας τροφίμων η οποία εφαρμόζεται τις τελευταίες δεκαετίες σε όξινα τρόφιμα όπως πουρές φρούτων, τοματοχυμό και τοματοπολτό είναι η «πλήρωση εν θερμώ» διεργασία, (Sandoval, Barreiro and Mendoza, 1993). Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται στη βιομηχανία τροφίμων για την παραγωγή προϊόντων απαλλαγμένων από μικροοργανισμούς, οι οποίοι θα αλλοιώσουν το τρόφιμο κατά την διάρκεια της αποθήκευσης του, με λιγότερη ενεργειακή κατανάλωση, καλύτερα ποιοτικά προϊόντα (Yang, 2012).

Σε μια τυπική εφαρμογή της μεθόδου αυτής, το προϊόν του τοματοπολτού θερμαίνεται μέχρι να φτάσει σε θερμοκρασίες πάνω από τους 90°C (Sandoval, Barreiro and Mendoza, 1993), στη συνέχεια εισάγεται θερμό μέσα στη μεταλλική κονσέρβα και ακολουθεί το σφράγισμα της κονσέρβας. Αφού γίνει το κλείσιμο της κονσέρβας, αυτή αναποδογυρίζεται και διατηρείται για ένα χρονικό διάστημα της τάξεως των 20 min στον αέρα και στη συνέχεια ακολουθεί η ψύξη του προϊόντος στο νερό. Το αναποδογύρισμα της κονσέρβας γίνεται για την αποστείρωση του πώματος της κονσέρβας. Η μεγαλύτερη θανάτωση των μικροοργανισμών παρατηρείται στη διατήρηση του προϊόντος στον αέρα. Κρίσιμο σημείο της μεθόδου αυτής είναι η θερμοκρασία γεμίσματος του προϊόντος, καθώς αν η θερμοκρασία μετά τη θέρμανση πέσει κάτω από την προτεινόμενη, θα επέλθει υποεπεξεργασία του προϊόντος με συνέπεια τη μείωση της διάρκειας ζωής και την πιθανή αλλοίωση του. Για το λόγο αυτό κατά τη θέρμανση του προϊόντος, η θερμοκρασία του, είναι 5-10°C πάνω από την θερμοκρασία γεμίσματος, έτσι ώστε κατά το γέμισμα της μεταλλικής κονσέρβας το προϊόν να έχει την κατάλληλη θερμοκρασία.

Για αυτή τη διεργασία και την επεξεργασία των φρούτων με $pH < 4.0$, ο NCA (1968) προτείνει θερμοκρασίες γεμίσματος μεγαλύτερες από 85°C, σφράγισμα της μεταλλικής κονσέρβας και εμβάπτιση αυτής 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 της μεταλλικής κονσέρβας 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.

3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗ

3.1 Εισαγωγή

Η υπολογιστική ρευστοδυναμική ή Computational Fluid Dynamics (CFD) είναι μια σύγχρονη αριθμητική τεχνική η οποία χρησιμοποιείται για την ανάλυση και τη προσομοίωση συστημάτων τα οποία περιλαμβάνουν ροή ρευστών, μεταφορά θερμότητας και συσχετιζόμενων φαινομένων, όπως οι χημικές αντιδράσεις, με τη χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών (Versteeg and Malalasekera, 2007, Sun, 2007). Αποτελεί ένα δυναμικό σχεδιαστικό και ερευνητικό εργαλείο, η εφαρμογή του οποίου βοηθά στην καλύτερη κατανόηση των περίπλοκων φυσικών μηχανισμών που διέπουν τις διεργασίες μηχανικής τροφίμων (Yanniotis and Stoforos, 2014). Η αυξανόμενη χρήση της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής τα τελευταία χρόνια ήταν αναπόφευκτη καθώς τα υψηλά κόστη, η κατανάλωση σε χρόνο και ενέργεια που σχετίζονται με τις πειραματικές διεργασίες, συχνά εμποδίζουν την παραγωγή ικανοποιητικών και εις βάθος αποτελεσμάτων (Norton et al., 2006).

Η υπολογιστική ρευστοδυναμική αναπτύχθηκε αρχικά από τα πρωτοποριακά επιτεύγματα ερευνητών όπως οι Richardson και Courant (1910), Friedrichs και Lewy (1928), οι οποίοι στην προσπάθειά τους να κατανοήσουν και να απεικονίσουν την κίνηση των ρευστών, προώθησαν την ανάπτυξη πολύ ισχυρών αριθμητικών τεχνικών μέσω των οποίων πέτυχαν την αριθμητική περιγραφή όλων των τύπων ροής ρευστών (Shang, 2004). Η βάση όλων σχεδόν των προβλημάτων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής είναι οι εξισώσεις Navier - Stokes οι οποίες βασίζονται στην τάση της κίνησης του ρευστού (Hyeon Park and Won Byong, 2018).

Η υπολογιστική ρευστοδυναμική εξελίσσεται σε ένα πολύ ισχυρό εργαλείο με τη κάθε λύση να περιλαμβάνει τη χρήση μαθηματικών φυσικών μοντέλων και μεθόδων καθώς και εξαιρετική απεικόνιση και παρουσίαση αποτελεσμάτων. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη περιγραφή πολύπλοκων φαινομένων ροής και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εφαρμογή της σε πληθώρα βιομηχανικών κλάδων όπως η μηχανική διεργασιών, η αεροναυπηγική, η βιοιατρική μηχανική, οι κατασκευές, οι μεταφορές, η υδρολογία και η χημική βιομηχανία και η μετεωρολογία (Versteeg and Malalasekera, 2007). Η υπολογιστική ρευστοδυναμική συνδέεται με τη βιομηχανία τροφίμων από τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας, ορμής και ενέργειας που λαμβάνουν χώρα σε πολλές διεργασίες της βιομηχανίας τροφίμων όπως η παστερίωση, η αποστείρωση, η κατάψυξη, η ψύξη, η ξήρανση κλπ. (Norton et. al, 2006).

3.2 Πλεονεκτήματα του CFD

Το CFD αναπτύχθηκε από μια μαθηματική περιέργεια για να γίνει ένα ουσιαστικό εργαλείο σχεδόν σε κάθε κλάδο της δυναμικής των ρευστών. Επιτρέπει μια βαθιά ανάλυση της μηχανικής ρευστών. Τα περισσότερα από τα αποτελέσματα του CFD δίνουν βελτιωμένη απόδοση, μεγαλύτερη αξιοπιστία, μεγαλύτερη συνοχή προϊόντος και υψηλότερη παραγωγικότητα. Ορισμένοι μηχανικοί σχεδιασμού χρησιμοποιούν το CFD για να αναλύσουν τα νέα συστήματα πριν αποφασίσουν ποιες και πόσες δοκιμές επικύρωσης πρέπει να εκτελεστούν.

Τα πλεονεκτήματα του CFD είναι (Xia and Sun, 2002):

- Παρέχει μια λεπτομερή εικόνα της κατανομής της ροής μέσα στο σύστημα, της απώλειας μάζας, της μεταφοράς θερμότητας και του διαχωρισμού των σωματιδίων κλπ. τα οποία δίνουν στους αναλυτές μια πολύ καλύτερη και βαθύτερη κατανόηση του τι συμβαίνει σε μια συγκεκριμένη διαδικασία ή σύστημα.
- Καθιστά δυνατή την αξιολόγηση των γεωμετρικών αλλαγών και των συνθηκών που πραγματοποιούνται σε μια διεργασία σε μικρότερο χρόνο και κόστος συγκριτικά με τις παραδοσιακές εργαστηριακές δοκιμές.
- Είναι σε θέση να μειώσει τα προβλήματα κλιμάκωσης, επειδή τα μοντέλα βασίζονται στη κλασική φυσική και είναι ανεξάρτητα κλίμακας.
- Είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στη προσομοίωση συνθηκών στις οποίες οι μετρήσεις με κλασσικές μεθόδους δεν είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν ή είναι επικίνδυνο.
- Δεδομένου ότι είναι ένα εργαλείο λεπτομερούς ανάλυσης και σχεδιασμού μπορεί να βρει τη βασική αιτία και όχι μόνο το αποτέλεσμα κατά την αξιολόγηση των προβλημάτων

3.3 Μειονεκτήματα του CFD

Η υπολογιστική ρευστοδυναμική έχει εδραιωθεί ως ένα πολύτιμο εργαλείο στη βιομηχανία τροφίμων αλλά υπάρχουν ορισμένα προβλήματα που εμποδίζουν τη διάδοση και τη χρήση του. Αυτά τα προβλήματα είναι (Xia and Sun, 2002):

- Τα τρόφιμα (γάλα, λαχανικά, χυμοί φρούτων, κρέας κλπ.) διαφέρουν κατά πολύ στις ρεολογικές, τις θερμοφυσικές ιδιότητες κλπ. Ωστόσο τα πακέτα του CFD που υπάρχουν στην αγορά δεν είναι σε θέση να προσομοιώσουν διεργασίες σε μίγματα με αρκετά μεγάλη ακρίβεια, όταν χρειάζεται, μεγαλύτερη κατανόηση σε επίπεδα φυσικό-χημικά, και μικροβιολογικά μιας διεργασίας.

- Επίσης η βιομηχανία τροφίμων πρέπει να προσλαμβάνει επιστήμονες εξειδικευμένους στις τεχνικές, τα μοντέλα και τις εξισώσεις του CFD καθώς και στη γενικότερη επιστήμη γύρω από τον τομέα αυτό (Xia and Sun, 2002).

3.4 Εμπορικά πακέτα του CFD

Τα τελευταία χρόνια υπήρξαν τεράστιες εξελίξεις των εμπορικών κωδικών του CFD, για την ενίσχυση της εμπιστοσύνης τους με τις εξελιγμένες απαιτήσεις μοντελοποίησης πολλών ερευνητικών πεδίων, ενισχύοντας έτσι την ευελιξία και την ελκυστικότητα τους. Τα υπάρχοντα πακέτα λογισμικού απαιτούν συνεχή βελτίωση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων, της ευκολίας της χρήσης, της ευρωστίας και της υπολογιστικής αποτελεσματικότητας. Οι κώδικες που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία τροφίμων αυτή την περίοδο είναι:

ANSYS - FLUENT

Το FLUENT είναι ένα λογισμικό πεπερασμένων όγκων και η ANSYS αποτελεί σήμερα ένα από τους κορυφαίους προμηθευτές λογισμικών CFD. Περιλαμβάνει μοντέλα μεταφοράς θερμότητας, μοντέλα διακριτής φάσης για πολυφασικές ροές, μεγάλο αριθμό μοντέλα αντιδράσεων καθώς και μοντέλα αλλαγής φάσης. Επίσης περιλαμβάνει δύο σχεδιαστικά εργαλεία τύπου CAD (Computer Aided Design), το Design Modeler και το SpaceClaim, τα οποία χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό της γεωμετρίας. Το Ansys Meshing χρησιμοποιείται για τη δημιουργία πλέγματος. Το FLUENT είναι πακέτο λογισμικού CFD το οποίο είναι κατάλληλο για την χρήση σε προβλήματα μηχανικής τροφίμων.

ANSYS – CFX

Το CFX είναι ένα εργαλείο υψηλής απόδοσης στην υπολογιστική ρευστοδυναμική το οποίο παρέχει αξιόπιστες και ακριβείς λύσεις γρήγορα και δυναμικά σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών και ανήκει στα λογισμικά πεπερασμένων όγκων. Περιλαμβάνει μεγάλο αριθμό φυσικών μοντέλων για την μελέτη της πολυφασικής ροής, του πορώδους, της μεταφοράς θερμότητας και της ακτινοβολίας.

CHAM-PHOENICS

Το PHOENICS είναι ένα λογισμικό πεπερασμένων όγκων, πολλών χρήσεων το οποίο χρησιμοποιείται για την προσομοίωση διεργασιών όπως ροή ρευστών, πολυφασικών ροών, μεταφορά μάζας και θερμότητας, χημικών αντιδράσεων κ.λπ. Διαθέτει επίσης πολλές δυνατότητες μοντελοποίησης σεναρίων που υπάρχουν στη μηχανική τροφίμων όπως μοντελοποίηση νευτώνειων και μη νευτώνειων ρευστών, ροών μέσα σε πορώδεις οι οποίες εξαρτώνται από την κατεύθυνση της αντίστασης, συζευγμένης μεταφοράς θερμότητας κ.λπ. (Xia and Sun, 2002, Sun, 2007, Ansys,2015).

COMSOL Multiphysics®

Το COMSOL Multiphysics® είναι ένα λογισμικό προσομοίωσης γενικής χρήσης για τη μοντελοποίηση σχεδίων, συσκευών και διαδικασιών σε όλους τους τομείς της μηχανικής, της κατασκευής και της επιστημονικής έρευνας. Χρησιμοποιείται επίσης για μοντελοποίηση διάφορων έργων, επιτρέπει επίσης τη μετατροπή των μοντέλων σε εφαρμογές προσομοίωσης και ψηφιακά δίδυμα για χρήση από άλλες ομάδες σχεδιασμού, τμήματα κατασκευής, εργαστήρια δοκιμών, πελάτες και πολλά άλλα. Το προϊόν πλατφόρμας μπορεί να χρησιμοποιηθεί από μόνο του ή να επεκταθεί με λειτουργικότητα από οποιοδήποτε συνδυασμό συμπληρωματικών ενοτήτων για προσομοίωση ηλεκτρομαγνητικών, δομικής μηχανικής, ακουστικής, ροής ρευστών, μεταφοράς θερμότητας και χημικής μηχανικής (Comsol, 2018).

3.5 Αρχές της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής

Οι εξισώσεις που περιγράφουν τη ροή των ρευστών είναι γνωστές ως εξισώσεις Navier – Stokes και μαζί με τις εξισώσεις της συνέχειας και διατήρησης της ενέργειας αποτελούν την έκφραση των αρχών διατήρησης στη μηχανική των ρευστών. Οι εξισώσεις αυτές όταν εφαρμόζονται σε ένα σύστημα ρευστού, συσχετίζουν το ρυθμό μεταβολής των ιδιοτήτων του ρευστού εντός ενός όγκου εξαιτίας της επίδρασης σ' αυτό εξωτερικών δυνάμεων. Οι αρχές αυτές είναι (Versteeg and Malalasekera, 2007):

- Αρχή διατήρησης της μάζας (εξίσωση συνέχειας) ορίζεται ως ο ρυθμός αύξησης της μάζας σε ένα ρευστό στοιχείο (κελί) ο οποίος ισούται με το καθαρό ρυθμό της ροής μάζας μέσα σε ένα ρευστό στοιχείο και περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση για καρτεσιανές συντεταγμένες (x,y,z):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (29)$$

Αρχή διατήρησης της ορμής (Δεύτερος Νόμος του Νεύτωνα) ορίζεται ως ο ρυθμός αύξησης της ορμής σε ένα ρευστό σωματίδιο ο οποίος ισούται με το άθροισμα των δυνάμεων που ασκούνται στο σωματίδιο αυτό. Η αντίστοιχη εξίσωση της διατήρησης της ορμής για καρτεσιανές συντεταγμένες (x,y,z) (Versteeg and Malalasekera, 2007) είναι:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p+\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (30)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial\tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial(-p+\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (31)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial\tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p+\tau_{zz})}{\partial z} + S_{Mz} \quad (32)$$

- Αρχή διατήρησης της ενέργειας (1^{ος} νόμος της θερμοδυναμικής) ορίζεται ως ο ρυθμός αύξησης της ενέργειας σε ένα στερεό σωματίδιο ο οποίος ισούται με το καθαρό ρυθμό θερμότητας που προστίθεται στο σωματίδιο αυτό και το καθαρό ρυθμό του έργου που παράγεται στο ρευστό αυτό. Η εξίσωση της διατήρησης της ενέργειας για καρτεσιανές συντεταγμένες (x,y,z) είναι:

$$\rho \frac{DE}{Dt} = -\text{div}(\rho u) + \left[\begin{array}{l} \partial \frac{(u\tau_{xx})}{\partial x} + \partial \frac{(u\tau_{yx})}{\partial y} + \partial \frac{(u\tau_{zx})}{\partial z} + \partial \frac{(v\tau_{xy})}{\partial x} \\ + \partial \frac{(v\tau_{yy})}{\partial y} + \partial \frac{(v\tau_{zy})}{\partial z} + \\ \partial \frac{(w\tau_{xz})}{\partial x} + \partial \frac{(w\tau_{yz})}{\partial y} + \partial \frac{(w\tau_{zz})}{\partial z} \end{array} \right] + \text{div}(k \text{ grad } T) + S_E \quad (33)$$

3.6 Αριθμητικές μέθοδοι διακριτοποίησης

Τα περισσότερα μοντέλα μεταφοράς θερμότητας και μάζας μπορούν να επιλυθούν αναλυτικά μόνο για απλές περιπτώσεις. Οι αριθμητικές μέθοδοι διακριτοποίησης είναι χρήσιμες για την εκτίμηση της θερμικής συμπεριφοράς των τροφίμων υπό σύνθετες αλλά ρεαλιστικές συνθήκες, όπως η μεταβολή της αρχικής θερμοκρασίας, οι μη γραμμικές και μη-ισότροπες θερμικές ιδιότητες, τα ακανόνιστα σχήματα και οι χρονικά εξαρτώμενες οριακές συνθήκες. Για την επίλυση των μοντέλων χρησιμοποιούνται ευρέως οι μέθοδοι πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων καθώς και μέθοδοι πεπερασμένων όγκων (Wang and Sun, 2003).

3.6.1 Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών

Η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών είναι η παλαιότερη αριθμητική μέθοδος. Είναι απλή στη διαμόρφωση ενός συνόλου διακριτοποιημένων εξισώσεων που προέρχονται από τις διαφορικές εξισώσεις μεταφοράς. Μπορεί εύκολα να προσαρμοστεί σε προβλήματα πολλών διαστάσεων (δισδιάστατα και τρισδιάστατα σχήματα) και σε απλές γεωμετρικές όπως σφαίρα, πλάκα και κύλινδρο. Χρησιμοποιείται στη λύση μοντέλων μεταφοράς μάζας και θερμότητας σε πολλές θερμικές επεξεργασίες όπως το ψήσιμο, ξήρανση και ψύξη. (Wang and Sun, 2003, Ferziger, 2002).

3.6.2 Μέθοδος πεπερασμένων όγκων

Η μέθοδος πεπερασμένων όγκων προέκυψε από την μέθοδο πεπερασμένων διαφορών. Σε αυτή τη μέθοδο βασίζονται τα περισσότερα λογισμικά πακέτα της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Το κλειδί της μεθόδου αυτής είναι η ολοκλήρωση εξισώσεων μεταφοράς μεταξύ των όγκων ελέγχου ώστε να προκύψουν οι διακριτοποιημένες εξισώσεις στα κομβικά σημεία επίλυσης. Οι εξισώσεις ενέργειας, μάζας και ορμής διακριτοποιούνται πάνω στο πλέγμα και παίρνουν την μορφή συστήματος αλγεβρικών εξισώσεων. Στη μέθοδο αυτή υπάρχουν δυο συστήματα διακριτοποίησης, το first order upwind το οποίο χρησιμοποιείται σε απλές περιπτώσεις γραμμικής ροής και υπολογίζει μόνο στο ένα κελί τη τιμή και το second order upwind το οποίο χρησιμοποιείται σε πολύπλοκες περιπτώσεις και υπολογίζει και στο προηγούμενο αλλά και στο επόμενο κελί τη τιμή που εξετάζεται (Versteeg and Malalasekera, 2007).

3.6.3 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι ένα αριθμητικό εργαλείο για τον καθορισμό προσεγγιστικών λύσεων σε μια μεγάλη κατηγορία προβλημάτων μηχανικής. Η μέθοδος αναπτύχθηκε αρχικά για να μελετήσει τις καταπονήσεις στις κατασκευές και αργότερα επεκτάθηκε στο γενικό πεδίο της συνεχούς ροής μηχανήματων. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων έχει λάβει σημαντική προσοχή στην τεχνική εκπαίδευση και στη βιομηχανία λόγω της ποικιλομορφίας και της ευελιξίας της ως εργαλείου ανάλυσης (Clough, 1960). Θεωρεί ότι η περιοχή λύσης περιλαμβάνει πολλές μικρές, διασυνδεδεμένες, περιοχές ή στοιχεία και δίνει μια τμηματική προσέγγιση προς τις εξισώσεις που τις διέπουν, δηλαδή οι σύνθετες μερικές διαφορικές εξισώσεις μειώνονται σε ένα σύνολο είτε γραμμικών είτε μη γραμμικών ταυτόχρονων εξισώσεων. Έτσι, η διαδικασία διακριτοποίησης πεπερασμένων στοιχείων χωρίζει τη περιοχή σε μια σειρά μικρότερων περιοχών (Bathe, 1982).

3.7 Στάδια επίλυσης ενός προβλήματος με τη χρήση του CFD

Για να εκτελεστεί μια ανάλυση CFD, ο αναλυτής θέτει το πρόβλημα και χρησιμοποιεί την επιστημονική γνώση για να το εκφράσει με μαθηματικούς όρους. Στη συνέχεια, το πακέτο λογισμικού CFD ενσωματώνει αυτή τη γνώση και εκφράζει το δηλωμένο πρόβλημα σε επιστημονικούς όρους. Τέλος, ο υπολογιστής εκτελεί τους υπολογισμούς που υπαγορεύονται από το λογισμικό CFD και ο αναλυτής επιθεωρεί και ερμηνεύει τα αποτελέσματά. Στη συνέχεια περιγράφονται τα τρία απαραίτητα στάδια για την προσομοίωση ενός προβλήματος με τη χρήση του CFD (Shaw, 1992).

3.7.1 Προ-επεξεργασία

Στο στάδιο αυτό περιλαμβάνονται όλες οι διαδικασίες που πραγματοποιούνται πριν από την διαδικασία της αριθμητικής επίλυσης. Το πρώτο βήμα στο στάδιο αυτό είναι η κατανόηση της φυσικής του προβλήματος, στη συνέχεια ακολουθεί η κατασκευή της γεωμετρίας και η δημιουργία του πλέγματος, καθώς το μέγεθος και ο τύπος των στοιχείων που χρησιμοποιούνται στο πλέγμα παίζουν καθοριστικό ρόλο στη αποτελεσματικότητα του προβλήματος. Το τελευταίο βήμα στο στάδιο αυτό είναι η επιλογή των φυσικών και χημικών φαινομένων, προσδιορίζοντας τις ιδιότητες των υλικών, τις αρχικές και οριακές συνθήκες, την επιλογή των κατάλληλων εξισώσεων που θα λύσει το πρόγραμμα καθώς και το κατάλληλο μοντέλο που θα περιγράφει κατάλληλα το πρόβλημα. (Xia and Sun, 2002, Versteeg and Malalasekera, 2007).

3.7.2 Επίλυση

Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει τη χρήση του ηλεκτρονικού υπολογιστή για την επίλυση του προβλήματος και συγκεκριμένα των μαθηματικών εξισώσεων ροής του ρευστού. Γίνεται η ολοκλήρωση των εξισώσεων που επιλέχθηκαν στο προηγούμενο στάδιο και η επίλυση των αλγεβρικών εξισώσεων σε κάθε κελί του πλέγματος με επαναληπτική μέθοδο (Xia and Sun, 2002, Versteeg and Malalasekera, 2007).

3.7.3 Μετά-επεξεργασία

Το στάδιο αυτό χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από το στάδιο της επίλυσης του προβλήματος και ακολουθεί παρουσίαση των αποτελεσμάτων με τη χρήση γραφημάτων πλέγματος, ισούψων καμπύλων, γραμμών ροής, διαγραμμάτων XY, και οπτικών μέσων όπως βίντεο (Xia and Sun, 2002, Versteeg and Malalasekera, 2007).

3.8 Εφαρμογές Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής στη βιομηχανία τροφίμων

Το CFD είναι ένα εργαλείο έρευνας το οποίο ενισχύει τη διαδικασία σχεδιασμού και κατανόησης της βασικής φυσικής της ροής των ρευστών και εφαρμόζεται σε διάφορες λειτουργίες επεξεργασίας στη βιομηχανία τροφίμων, όπως η ξήρανση, η αποστείρωση, η παστερίωση, η ψύξη, η ανάμειξη κλπ. Παρακάτω αναπτύσσονται μερικές από τις λειτουργίες επεξεργασίας στη βιομηχανία τροφίμων (Yanniotis and Stoforos, 2014).

3.8.1 Ξήρανση

Η επιτυχής ξήρανση συχνά βασίζεται στην εμπειρική γνώση και την εμπειρία του χειριστή. Η βελτίωση της ποιότητας του προϊόντος, η αύξηση της διαθεσιμότητας του ξηραντήρα και η μείωση του ενεργειακού κόστους απαιτεί ένα μαθηματικό μοντέλο βελτιστοποίησης που θα καλύπτει τις πτυχές της μεταφοράς θερμότητας και μάζας, καθώς και τη ροή του αέρα και την πτώση πίεσης. Το CFD μπορεί να εφαρμοστεί για τη μοντελοποίηση των φαινομένων αυτών και να βοηθήσει στον βέλτιστο σχεδιασμό ενός ξηραντήρα. Ωστόσο, όπως επεσήμανε ο Ray (Ray ,2010), το CFD δεν μπορεί να αντικαταστήσει εντελώς την πειραματική δοκιμή και τον εν μέρει εμπειρικό χαρακτήρα της διαδικασίας σχεδιασμού. Επιπλέον, οι προσομοιώσεις ξηραντήρα πρέπει να θεωρούνται ως ποιοτικές και όχι καθαρά ποσοτικές. Η ξήρανση με ψεκασμό είναι μία από τις σημαντικότερες μεθόδους ξήρανσης υγρών τροφίμων. Πρόσφατες αναφορές για μεθόδους ξήρανσης είναι εκείνες των Assarie et al. (2007) που χρησιμοποίησαν CFD για την προσομοίωση της ξήρανσης του σίτου σε έναν ξηραντήρα ρευστοποιημένης κλίνης και των Wang et al. (2008) που χρησιμοποίησαν επίσης το CFD σε ξηραντήρα ρευστοποιημένου στρώματος. Επίσης οι Da Silva et al. (2012) χρησιμοποίησαν το CFD για την προσομοίωση ξήρανσης αλεύρου σόγιας σε ξηραντήρα ρευστοποιημένης κλίνης που ενσωματώνει μεταφορά θερμότητας και μάζας στο μοντέλο δυναμικής ρευστών. Ακόμη, ο Marra et al., (2010) ανέλυσε, χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο CFD, τις παροδικές κατανομές της θερμοκρασίας και της υγρασίας κατά τη συνδυασμένη επεξεργασία της θέρμανσης με μικροκύματα και μεταφορά θερμότητας με συναγωγή κατά τη ξήρανση της πατάτας (Yanniotis and Stoforos, 2014).

3.8.2 Βιομηχανική Αποστείρωση

Κατά τη βιομηχανική αποστείρωση, είναι σημαντικό να εντοπιστεί το κρίσιμο σημείο, δηλαδή το σημείο που θερμαίνεται πιο αργά, και ο χρόνος επεξεργασίας να είναι αρκετός έτσι ώστε ακόμη και το κρίσιμο σημείο να λάβει την επαρκή θερμική επεξεργασία για να καταστραφούν οι μικροοργανισμοί. Ο απαιτούμενος χρόνος επεξεργασίας στην εμπορική

κονσερβοποίηση μπορεί να υπολογιστεί από την αναλυτική λύση της εξίσωσης θερμικής αγωγής για απλές περιπτώσεις στερεών τροφών όπου το βραδύτερο σημείο θέρμανσης συμπίπτει με το γεωμετρικό κέντρο του δοχείου. Οι αριθμητικές λύσεις έχουν επίσης εφαρμοστεί στο πρόβλημα της αποστείρωσης με το μεγαλύτερο μέρος να επικεντρώνεται σε στερεά τρόφιμα ή τρόφιμα με μεγάλο ιξώδες, όπως ο πουρές και τα συμπυκνώματα τα οποία θεωρείται ότι συνήθως θερμαίνονται με φυσική συναγωγή. Μία από τις πρώτες εφαρμογές των αριθμητικών μεθόδων στη θερμική επεξεργασία των τροφίμων ήταν αυτή των Teixeira et al. (1969). Οι Datta και Texeira (1988) προέβλεψαν αριθμητικά προφίλ θερμοκρασίας και ταχύτητας κατά τη διάρκεια της θέρμανσης με φυσική συναγωγή κονσερβοποιημένων υγρών τροφίμων. Οι Yang et al. (1997) χρησιμοποίησαν έναν κώδικα CFD για την προσομοίωση της θέρμανσης με φυσική συναγωγή των αιωρημάτων αμύλου σε ένα κυλινδρικό περιέκτη. Οι Abdul Ghani et al. (1999a) εφάρμοσαν CFD για τον υπολογισμό των παροδικών θερμοκρασιακών και προφίλ ταχύτητας στην αποστείρωση των κονσερβοποιημένων υγρών τροφίμων σε ένα αυτόκλειστο. Οι Quarini, Scott (1997) χρησιμοποίησαν ένα πακέτο CFD για την πρόβλεψη της θερμικής συμπεριφοράς ενός μη Νευτώνειου υγρού τρόφιμου που θερμαίνεται σε ένα κάθετο δοχείο. Άλλα παραδείγματα περιλαμβάνουν την ανάλυση της θέρμανσης με φυσική συναγωγή και της μικροβιακής καταστροφής σε κονσερβοποιημένα υγρά τρόφιμα (Ghani et al., 1999), τη μελέτη της θερμικής αποστείρωσης ενός κονσερβοποιημένου τροφίμου σε τρισδιάστατο σχήμα (Ghani et al., 2001), τον προσδιορισμό του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας κατά τη διάρκεια της θέρμανσης με φυσική συναγωγή των διαλυμάτων CMC σε κυλινδρικά δοχεία (Kannan et al., 2008), την ανάλυση της θερμικής καταστροφής της βιταμίνης C σε σακούλες τροφίμων (Chani et al., 2002), τη παστερίωση μύρας (Augusto et al., 2010). Προβλήματα που σχετίζονται με τη θερμική επεξεργασία υγρών που περιέχουν στερεά σωματίδια τροφής έχουν επίσης προσεγγιστεί με επιτυχία μέσω CFD. Σε αυτές τις εφαρμογές, το μέγεθος και το σχήμα των σωματιδίων, καθώς και ο προσανατολισμός των σωματιδίων, η διάταξη και η πυκνότητα του προϊόντος είναι σημαντικές καθώς επηρεάζουν την κίνηση του υγρού και επομένως τη μεταφορά θερμότητας από το υγρό στα σωματίδια και την ακριβή θέση του κρίσιμου σημείου στο δοχείο. Παραδείγματα τα οποία περιλαμβάνουν τη θέρμανση μεγάλων σωματιδίων τροφίμων στο νερό είναι οι φέτες ανανά σε χυμούς (Abdul Ghani, και Farid, 2006), τα σπαράγγια σε άλμη (Dimou, και Yanniotis, 2011) και τα ροδάκινα σε σιρόπι (Dimou et al, 2011).

4. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Για την επιλογή των κατάλληλων συνθηκών έτσι ώστε να έχουμε ασφαλή και υψηλής ποιότητας προϊόντα, απαιτείται η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου προσομοίωσης. Αρχικά προσδιορίστηκαν οι θερμοφυσικές ιδιότητες του τοματοπολτού, στη συνέχεια για τον προσδιορισμό της θερμικής διαχυτότητας έγινε πείραμα θερμικής επεξεργασίας του τοματοπολτού. Ακολούθως για την επαλήθευση του μοντέλου έγινε σύγκριση μεταξύ της αναλυτικής και της αριθμητικής λύσης και της αριθμητικής λύσης των πλεγμάτων μεταξύ τους και τέλος έγινε προσομοίωση της «πλήρωση εν θερμώ» διεργασίας.

4.1 Θερμοφυσικές ιδιότητες

4.1.1 Σταθερές θερμοφυσικές ιδιότητες

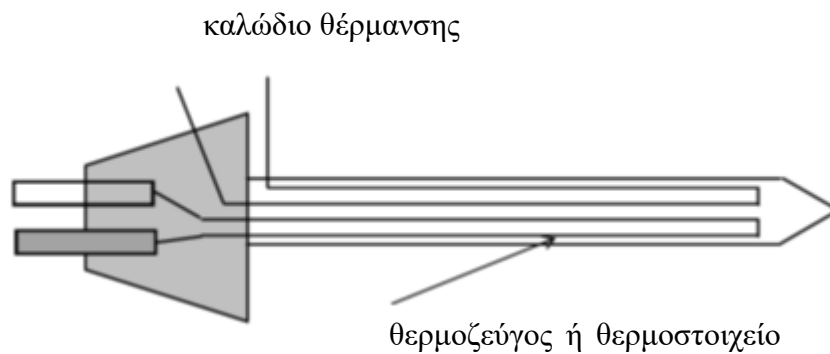
Οι θερμοφυσικές ιδιότητες που προσδιορίστηκαν στο τοματοπολτό είναι η πυκνότητα (ρ), η θερμική αγωγιμότητα (k), η ειδική θερμότητα (C_p) και τα διαλυτά στερεά ($^{\circ}\text{Brix}$).

4.1.1.1 Πυκνότητα

Η πυκνότητα (ρ) του τοματοπολτού προσδιορίστηκε πειραματικά με την ογκομετρική μέθοδο με βάση τον όγκο συγκεκριμένης μάζας.

4.1.1.2 Θερμική αγωγιμότητα

Η θερμική αγωγιμότητα (k) προσδιορίστηκε πειραματικά με τη χρήση ειδικής συσκευής η οποία βασίζεται στην εξίσωση μεταφοράς θερμότητας με αγωγή. Ο προσδιορισμός της έγινε με τη χρήση κατάλληλης συσκευής μέτρησης θερμικής αγωγιμότητας (Thermal Conductivity Probe, model KD2, Decagon Devices Inc. Pullman, Wash., U.S.A). Με τη μέθοδο αυτή, θερμότητα ρέει από ένα αγωγό το οποίο συνδέεται με το θερμοστοιχείο στο υλικό και συσσωρεύεται με την πάροδο του χρόνου, προκαλώντας αύξηση της θερμοκρασίας του τρόφιμου. Πιο συγκεκριμένα, ένα σταθερό ποσό θερμότητας μεταφέρεται από ένα λεπτό μεταλλικό στέλεχος (βελόνα), του οποίου η θέρμανση επιτυγχάνεται με τη διέλευση συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από ένα λεπτό σύρμα (καλώδιο), το οποίο συνδέεται με ένα θερμοστοιχείο για τη μέτρηση της θερμοκρασίας (Σχήμα 5). Κατά τη μέτρηση, η βελόνα τοποθετείται στο εσωτερικό του υπό εξέταση τρόφιμου και αφού επέλθει θερμοκρασιακή ισορροπία αρχίζει να θερμαίνεται με σταθερό ρυθμό για συγκεκριμένο χρόνο ενώ παράλληλα καταγράφεται η μεταβολή της θερμοκρασίας στο τρόφιμο. Η διαδικασία επαναλήφθηκε τρεις φορές και πάρθηκε ο μέσος όρος των τιμών αυτών.



Σχήμα 5. Τομή στελέχους (βελόνα) για τη μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας.

4.1.1.3 Ειδική θερμότητα

Η ειδική θερμότητα (C_p) του τοματοπολτού προσδιορίστηκε βιβλιογραφικά ίση προς 3302 J/kg K (Drucas and Saravacos, 1985).

4.1.1.4 Διαλυτά στερεά

Ο προσδιορισμός των ολικών διαλυτών στερεών συστατικών της τομάτας γίνεται με απευθείας ανάγνωση από το διαθλασίμετρο (Way 15, ABBE Refractometer, Canada) και εκτιμάται σε βαθμούς °Brix. Το διαθλασίμετρο αποτελείται από δύο πρίσματα ανάμεσα στα οποία τοποθετείται το δείγμα σε μια λεπτή στρώση. Το επάνω πρίσμα είναι σταθερά τοποθετημένο σε ένα έδρανο που επιτρέπει την περιστροφή του μέσω του πλευρικού βραχίονα. Το κάτω πρίσμα είναι αρθρωμένο στο επάνω μέρος του διαθλασίμετρου για να επιτρέπει το διαχωρισμό για εισαγωγή του δείγματος και για καθαρισμό. Το κατώτερο όριο του πρίσματος είναι τραχύ και όταν το φως αντανακλάται στο πρίσμα, η επιφάνεια αυτή γίνεται η πηγή για έναν άπειρο αριθμό ακτινών που περνούν από το δείγμα. Μετά από αυτό περνά στο σταθερό τηλεσκόπιο το οποίο είναι εφοδιασμένο με διασταυρώσεις. Για τη μέτρηση πρέπει η διεπαφή φωτός-σκότους να συμπίπτει με τη διασταύρωση. Για την μέτρηση των διαλυτών στερεών χρησιμοποιήθηκε τοματοπολτός ομογενοποιημένος με pH 4.3 και θερμοκρασία 25°C. Η μέτρηση στο διαθλασίμετρο έγινε 3 φορές και η πάρθηκε η μέση τιμή των διαλυτών στερεών του τοματοπολτού.

4.2 Μεταβλητές θερμοφυσικές ιδιότητες

Για τη καλύτερη και αποτελεσματικότερη αντιμετώπιση του προβλήματος χρησιμοποιήθηκαν εξισώσεις που δείχνουν την εξάρτηση των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του τοματοπολτού από τη θερμοκρασία. Στον Πίνακα 3 βρίσκονται οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη προσομοίωση του προβλήματος από τη βιβλιογραφία (Drucas and Saravacos, 1985, Aparicio *et al.*, 2011). Η πυκνότητα του προϊόντος (ρ) θεωρήθηκε σταθερή και χρησιμοποιήθηκε η τιμή που βρέθηκε από το πείραμα.

Πίνακας 3. Εξισώσεις για μεταβλητές θερμοφυσικές ιδιότητες τοματοπολτού

Θερμοφυσικές ιδιότητες	Μονάδες μέτρησης	Εξισώσεις
Θερμική αγωγιμότητα (k)	W/mK	$0.0025 \times T - 0.2029$
Ειδική θερμότητα (C_p)	J/kg K	$-29433 + 292.11 \times T - 0.0079543 \times T^2 + 0.00084756 \times T^3$

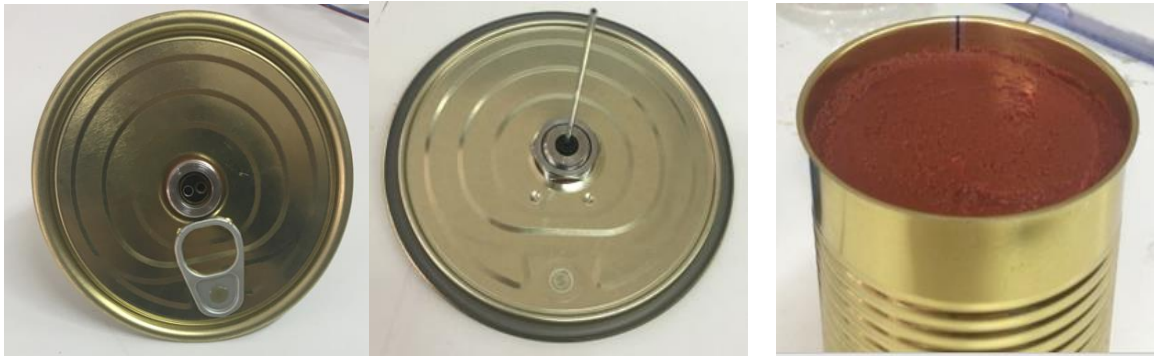
4.2.1 Προσδιορισμός θερμικής διαχυτότητας (α)

Ειδικότερα για τη πειραματική σύγκριση με την αναλυτική λύση έγινε πειραματικός προσδιορισμός της θερμικής διαχυτότητας. Αρχικά, μετρήθηκαν οι διαστάσεις της μεταλλικής κονσέρβας μεγέθους 404×415. Οι διαστάσεις αυτές είναι:

$$L=119 \text{ mm}=0.119 \text{ m}$$

$$D=105 \text{ mm}=0.105 \text{ m}$$

Στη συνέχεια έγινε πλήρωση της κονσέρβας με τοματοπολτό 95% του όγκους της. Αυτό είναι απαραίτητο γιατί εάν κατά το γέμισμα της κονσέρβας εγκλωβιστεί προϊόν στη ραφή και έρθει σε επαφή το προϊόν με το πάμα, αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα ελλατωματικό σφράγισμα καθώς και επιμόλυνση του προϊόντος αντίστοιχα (Food Processors Institute). Πριν από το σφράγισμα της κονσέρβας επάνω στο πάμα της ανοίχτηκε μια οπή (Σχήμα 6) και τοποθετήθηκε θερμοστοιχείο τύπου K, με εύρος θερμοκρασίας -270°C με 1260°C , με όρια σφάλματος $\pm 4.0^{\circ}\text{C}$ κατά τη θέρμανση και $\pm 1^{\circ}\text{C}$ κατά τη ψύξη, το οποίο ήταν συνδεδεμένο με ένα καταγραφικό θερμοκρασίας. (OM-SQ2020, OMEGA, USA.) Το μήκος του επιλεγμένου θερμοστοιχείου εξαρτάται από το είδος τρόφιμου που εξετάζεται. Ο τοματοπολτός θεωρείται στερεό τρόφιμο και η μεταφορά θερμότητας από τα τοιχώματα της μεταλλικής κονσέρβας στο εσωτερικό γίνεται με αγωγή επομένως το κρίσιμο σημείο, δηλαδή το πιο αργά θερμαινόμενο, είναι στο γεωμετρικό κέντρο της κονσέρβας. Τέλος η κονσέρβα τοποθετήθηκε σε υδατόλουτρο (Oilbath One, Memmert GmbH+ Go.KG., Germany) το οποίο χρησιμοποιήθηκε για να προσομοιάσει συνθήκες αυτοκλείστου θερμοκρασίας 100°C και σε ένα δοχείο με τρεχούμενο νερό θερμοκρασίας 20°C για το κύκλο ψύξης.



Σχήμα 6. Τοποθέτηση θερμοστοιχείου στο πόμα της μεταλλικής κονσέρβας.

Με βάση τις σταθερές θερμοφυσικές ιδιότητες του τοματοπολτού και τα πειραματικά δεδομένα που συλλέχθηκαν από το θερμοστοιχείο υπολογίστηκε η παράμετρος f_h από την εξίσωση $-\ln(10)/\text{κλίση της ευθείας}$ και βρέθηκε ίση με 106.6 min. Η κλίση της ευθείας υπολογίστηκε από την καμπύλη θέρμανσης, δηλαδή της διαφοράς της θερμοκρασίας του υδατόλουτρου με το προϊόν συναρτήσεως της θερμοκρασίας, η οποία προέκυψε από τα δεδομένα του πειράματος. Στη συνέχεια υπολογίστηκε ο συντελεστής θερμικής διαχυτότητας, (α) χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση η οποία συσχετίζει τις θερμοφυσικές ιδιότητες ενός προϊόντος με τις διαστάσεις της μεταλλικής κονσέρβας (Merson et al., 1978):

$$\alpha = \frac{2,303}{\left(\frac{2,4048^2}{R^2} + \frac{\pi^2}{L^2}\right) \times f_h} \quad (34)$$

Τα δεδομένα που πάρθηκαν από το πείραμα της θερμικής διεργασίας του τοματοπολτού που έγινε στο εργαστήριο και χρησιμοποιήθηκαν για την σύγκριση μεταξύ αναλυτικής και αριθμητικής λύσης.

4.3 Επίλυση αναλυτικών εξισώσεων

Για την επαλήθευση του αριθμητικού μοντέλου έγινε επίλυση των αναλυτικών εξισώσεων, αποτελούμενη από ένα κύκλο θέρμανσης 135 min έτσι ώστε η θερμοκρασία του γεωμετρικού κέντρου της κονσέρβας να είναι μεγαλύτερη από 90°C ($T_{\text{centre}} > 90^\circ\text{C}$), και από ένα κύκλο ψύξης 103 min έτσι ώστε η θερμοκρασία του γεωμετρικού κέντρου να είναι ίση με 35°C ($T_{\text{center}} \approx 35^\circ\text{C}$)

Ο τοματοπολτός θεωρήθηκε στερεό σώμα επομένως η μεταφορά θερμότητας από τα τοιχώματα της μεταλλικής κονσέρβας προς το εσωτερικό της κονσέρβας και συγκεκριμένα στο τοματοπολτό γίνεται με αγωγή, με τις αρχικές και οριακές συνθήκες για άπειρη πλάκα και άπειρο κύλινδρο που αναφέρονται στο κεφάλαιο (2.5.1.3) με τις παρακάτω παραδοχές:

- Η αρχική θερμοκρασία T_{IT} του προϊόντος στη μεταλλική κονσέρβα είναι ομοιόμορφη σε όλη τη μάζα του.
- Η θερμοκρασία του μέσου θέρμανσης T_{RT} παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της θερμικής διεργασίας.
- Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας h θεωρείται άπειρος αφού τα τοιχώματα της μεταλλικής κονσέρβας λαμβάνουν άμεσα τη θερμοκρασία του μέσου θέρμανσης T_{RT} .

Για την επίλυση των εξισώσεων της αναλυτικής λύσης χρησιμοποιήθηκε μεταλλική κονσέρβα χωρίς κενό. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν οι σταθερές θερμοφυσικές ιδιότητες του τοματοπολτού καθώς και η θερμική διαχυτότητα α που υπολογίστηκε από το πείραμα. Οι αρχικές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν είναι αρχική θερμοκρασία του προϊόντος $T_{IT}=20^{\circ}\text{C}$, θερμοκρασία του μέσου θέρμανσης $T_{RT}=100^{\circ}\text{C}$ για το κύκλο θέρμανσης και θερμοκρασία ψύξης $T_{CW}=20^{\circ}\text{C}$ για το κύκλο ψύξης με νερό. Οι εξισώσεις της αναλυτικής λύσης που επιλύθηκαν για τη σύγκριση με την αριθμητική λύση είναι (15) και (23) για τον υπολογισμό της αδιάστατης θερμοκρασίας Y για άπειρη πλάκα και για άπειρο κύλινδρο αντίστοιχα και ακολούθως υπολογίστηκε το γινόμενο αυτών όπου έδωσε την αδιάστατη θερμοκρασία Y για το προϊόν σε μεταλλική κονσέρβα.

4.4. Αριθμητική επίλυση με τη χρήση λογισμικού προσομοίωσης

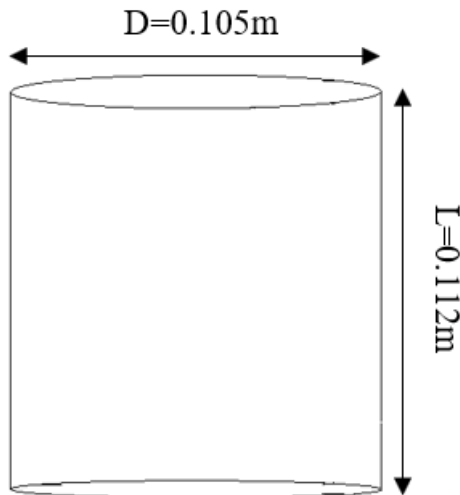
Για την προσομοίωση του προβλήματος χρησιμοποιήθηκε ένα εμπορικό πακέτο Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής. Το πακέτο αυτό είναι το Workbench (Ansys®) το οποίο περιλαμβάνει το πρόγραμμα CAD (*Design Modeller*) για το σχεδιασμό της γεωμετρίας, το *Meshing* για τη δημιουργία του πλέγματος και το Fluent για την αριθμητική λύση.

4.4.1 Σχεδιασμός γεωμετρίας

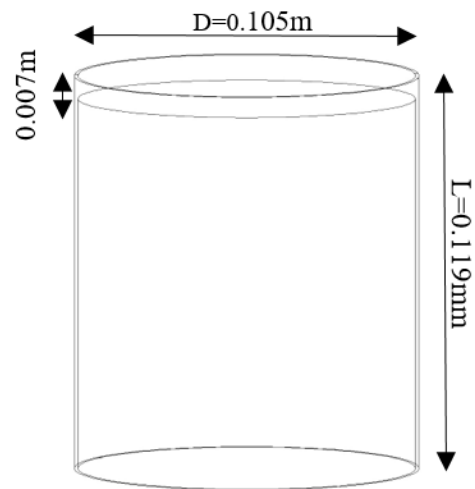
Αφού έγινε κατανόηση του προβλήματος, σχεδιάστηκε η τρισδιάστατη γεωμετρία της κονσέρβας. Μελετήθηκαν δύο διαφορετικές περιπτώσεις.

1. μεταλλική κονσέρβα μεγέθους 404×411 με διαστάσεις $L=112\text{mm}=0.112\text{m}$ και $D=105\text{mm}=0.105\text{m}$ (Σχήμα 7)

2. μεταλλική κονσέρβα μεγέθους 404×415 με διαστάσεις $L=119\text{mm}=0.119\text{m}$ και $D=105\text{mm}=0.105\text{m}$ με κενό 7mm (Σχήμα 8)



Σχήμα 7. Γεωμετρία της κονσέρβας χωρίς κενό.



Σχήμα 8. Γεωμετρία της κονσέρβας με κενό.

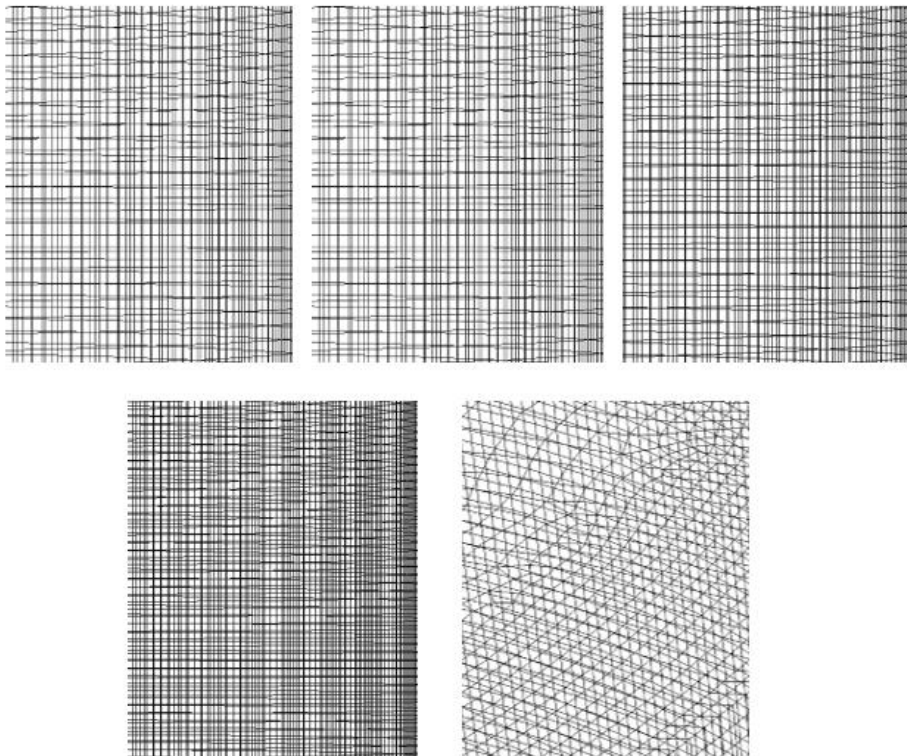
Για δεδομένη μάζα προϊόντος, στη πρώτη περίπτωση θεωρήθηκε ότι αυτή καταλαμβάνει όλο τον όγκο μιας μεταλλικής κονσέρβας ($L = 0.112\text{ m}$ και $D = 0.105\text{ m}$). Η περίπτωση αυτή θα αναφέρεται στο εξής ως περίπτωση «χωρίς κενό». Στη δεύτερη περίπτωση θεωρήθηκε ότι υπάρχει κάποιος χώρος (κενός) πάνω από το προϊόν που καταλαμβάνεται από αέρα και υδρατμούς. Το ύψος του χώρου αυτού ορίστηκε ως 7 mm έτσι ώστε, για την ίδια με την πρώτη περίπτωση, μάζα προϊόντος οι διαστάσεις της μεταλλικής κονσέρβας που αναλύθηκε ήταν $L = 0.119\text{ m}$ και $D = 0.105\text{ m}$. Η περίπτωση αυτή θα αναφέρεται στο εξής ως η περίπτωση «με κενό».

4.4.2 Δημιουργία πλέγματος

Αφού έγινε ο σχεδιασμός της γεωμετρίας, με τη βοήθεια του Meshing σχεδιάστηκαν πέντε διαφορετικά πλέγματα και για τις δύο περιπτώσεις με διαφορετική πυκνότητα (Πίνακας 4). Στις τέσσερις περιπτώσεις η πυκνότητα του πλέγματος ήταν ομοιόμορφη και στη πέμπτη περίπτωση η πυκνότητα του πλέγματος ήταν ανομοιόμορφη. Στο Σχήμα 9 που ακολουθεί απεικονίζονται τα πλέγματα και για τις δύο διαφορετικές περιπτώσεις γεωμετρίας που σχεδιάστηκαν:

Πίνακας 4. Περιπτώσεις πλεγμάτων που σχεδιάστηκαν στο Meshing

Κονσέρβα χωρίς κενό		
Περιπτώσεις	Ποιότητα	Αριθμός κελιών
Case A	Hex/wedge	385388
Case B	Hex/wedge	1312464
Case C	Hex/wedge	1942250
Case D	Hex/wedge	2705845
Case E	Hex/wedge	984126
Κονσέρβα με κενό		
Περιπτώσεις	Ποιότητα	Αριθμός κελιών
Case A	Hex/wedge	390375
Case B	Hex/wedge	1366953
Case C	Hex/wedge	1974917
Case D	Hex/wedge	2721150
Case E	Hex/wedge	1530170



Σχήμα 9. Περιπτώσεις πλεγμάτων που σχεδιάστηκαν στο Meshing.

Για να επιλεγεί το κατάλληλο πλέγμα πρέπει να μελετηθεί η ποιότητα των πλεγμάτων που δημιουργήθηκαν. Στη ποιότητα του πλέγματος, εξετάζουμε δυο παραμέτρους. Η πρώτη παράμετρος είναι το πόσο ορθογωνικά (orthogonal quality) είναι τα κελιά από τα οποία αποτελείται το πλέγμα, όπου η τιμή πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 0.1 (Πίνακας 5), (Ansys, 2015) και η δεύτερη παράμετρος είναι η στρέβλωση (skewness) του πλέγματος. Υπάρχουν δύο μέθοδοι προσδιορισμού της στρέβλωσης. Η πρώτη μέθοδος είναι η απόκλιση όγκου, η οποία ισχύει μόνο για τριγωνικά και τετράεδρα σχήματα, και περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\text{Στρέβλωση} = \frac{\text{βέλτιστο μέγεθος κελιού} - \text{μέγεθος κελιού}}{\text{βέλτιστο μέγεθος κελιού}} \quad (35)$$

Η δεύτερη μέθοδος είναι η κανονικοποιημένη απόκλιση γωνίας η οποία ισχύει για σχήματα κελιών όλων των ειδών και χρησιμοποιείται σε εξάεδρα, πρίσματα και πυραμίδες. Περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\text{Στρέβλωση} = \max \left[\frac{\theta_{\max} - \theta_e}{180 - \theta_e}, \frac{\theta_e - \theta_{\min}}{\theta_e} \right] \quad (36)$$

Όπου θ_e η ισοδύναμη γωνιά όψης/κελί (60° για τετράεδρα και τρίγωνα και 90° για εξάεδρα και τετράγωνα). Με βάση τα παραπάνω η τιμή της στρέβλωσης του πλέγματος πρέπει να είναι μικρότερη από 0.95 (Πίνακας 6) (Ansys, 2015).

Παρακάτω ακολουθούν οι κλίμακες για τα δύο αυτά κριτήρια:

Πίνακας 5. Τιμές ορθογωνικής ποιότητας πλέγματος

Ορθογωνική ποιότητα πλέγματος					
Μη αποδεκτή	Κακή	Αποδεκτή	Καλή	Πολύ καλή	Άριστη
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00

Πίνακας 6. Τιμές στρέβλωσης πλέγματος

Στρέβλωση πλέγματος					
Άριστη	Πολύ καλή	Καλή	Αποδεκτή	Κακή	Μη αποδεκτή
0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.94	0.95-0.97	0.98-1.00

4.5 Αξιολόγηση της θερμικής επεξεργασίας

Εξετάστηκε η θερμική επεξεργασία για 135 min κύκλο θέρμανσης έτσι ώστε η θερμοκρασία του γεωμετρικού κέντρου της κονσέρβας να είναι μεγαλύτερη από 90°C

($T_{\text{centre}} > 90^{\circ}\text{C}$), και 103 min κύκλο ψύξης έτσι ώστε η θερμοκρασία του γεωμετρικού κέντρου να είναι ίση με 35°C ($T_{\text{center}} \approx 35^{\circ}\text{C}$). Υπολογίστηκε το θερμοκρασιακό προφίλ συναρτήσει του χρόνου της διεργασίας για τις περιπτώσεις με και χωρίς κενό σε κάθε σημείο του πλέγματος που αναφέρθηκαν παραπάνω.

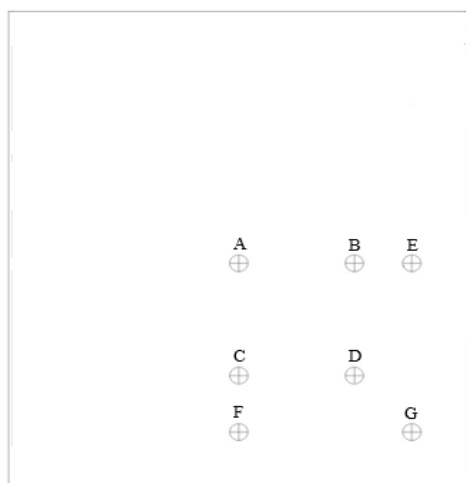
Οι συνθήκες που εισάχθηκαν στο Fluent είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_{\text{RT}}=100^{\circ}\text{C}$ για το κύκλο θέρμανσης, η αρχική θερμοκρασία του προϊόντος $T_{\text{IT}}=20^{\circ}\text{C}$, η θερμοκρασία του νερού $T_{\text{CW}}=20^{\circ}\text{C}$ και ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας $h=\infty$ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$. Το υλικό το οποίο αποτελείται η μεταλλική κονσέρβα είναι το αλουμίνιο με θερμοφυσικές ιδιότητες θερμική αγωγιμότητα $k=202.4$ W/mK , πυκνότητα $\rho=2719$ kg/m^3 και ειδική θερμότητα $C_p=871$ $\text{J}/\text{kg K}$. Στη περίπτωση όπου η μεταλλική κονσέρβα εξετάστηκε ως προς την επίδραση του κενού κατά τη προσομοίωση του προβλήματος στο χώρο όπου θεωρήθηκε κενό, δηλαδή χωρίς προϊόν εισάχθηκαν υδρατμοί και χρησιμοποιήθηκαν οι θερμοφυσικές ιδιότητες που ήταν στο πρόγραμμα του Fluent (Πίνακας 7). Επίσης για την επίλυση του προβλήματος επιλέχθηκε ως χρονικό βήμα τα 5s, απόλυτο κριτήριο σύγκλισης 10^{-9} , συσχέτιση πίεσης-ταχύτητας, SIMPLE, για τη χωρική διακριτοποίηση επιλέχθηκε το Gradiend: Green-Gauss cell based, Pressure: Standard, Momentum: 2nd order upwind, Energy: 2nd order upwind.

Πίνακας 7. Θερμοφυσικές ιδιότητες των υδρατμών από το Fluent

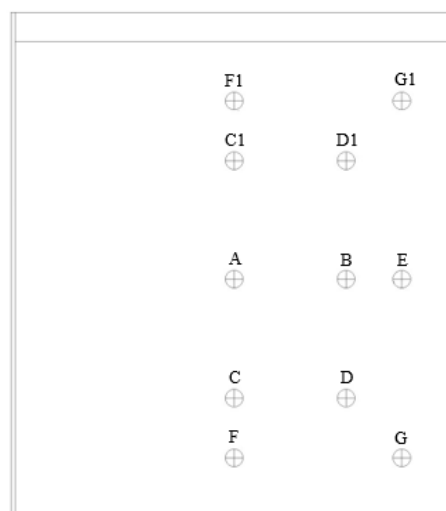
Θερμοφυσικές ιδιότητες	Μονάδες μέτρησης	Εξισώσεις
Θερμική αγωγιμότητα (k)	W/mK	0.0261
Πυκνότητα (ρ)	kg/m ³	0.5542
Ιξώδες (μ)	kg/ms	$1.34e^{-05}$
Ειδική θερμότητα (C_p)	J/kg K	$1563.077 + 1.603755 \times T - 0.002932784 \times T^2 + 3.216101 \times 10^{-6} \times T^3 - 1.156827 \times 10^{-9} \times T^4$

4.6 Αξιολόγηση αριθμητικού μοντέλου – Ανεξαρτησία πλέγματος

Αφού έγινε η δημιουργία του πλέγματος ακολούθησε η επιλογή του καλύτερου πλέγματος. Για την επιλογή του καλύτερου πλέγματος πρέπει να εξεταστεί εάν η λύση είναι ανεξάρτητη του πλέγματος. Υπάρχουν κάποιοι πρακτικοί κανόνες για τον έλεγχο της ανεξαρτησίας του πλέγματος. Οι κανόνες αυτοί είναι επιλογή αυστηρού κριτηρίου σύγκλισης έτσι ώστε να γίνει έλεγχος για το πως επηρεάζονται τα αποτελέσματα και εάν είναι ανεξάρτητα σε σχέση με το κριτήριο σύγκλισης, έλεγχος εάν το διάγραμμα σύγκλισης ακολουθεί μονοτονική συμπεριφορά σε όλες τις εξισώσεις και έλεγχος σύγκλισης επιλεγμένων μεταβλητών σε επιλεγμένα σημεία (Σάρδη, 2012). Σύμφωνα με τα παραπάνω εξετάστηκε η ανεξαρτησία των πλεγμάτων και για τις δύο περιπτώσεις. Για την επιλογή καλύτερου πλέγματος στη μεταλλική κονσέρβα χωρίς κενό επιλέχθηκαν 7 διαφορετικά σημεία A (0,0,0.56), B (0,0.02625,0.056), C (0,0,0.28), D (0,0.02625,0.028), E (0,0.039375,0.056) F (0,0,0.14) και G (0,0.039375,0.014) (Σχήμα 10) ενώ στη μεταλλική κονσέρβα με κενό επιλέχθηκαν 11 διαφορετικά σημεία A (0,0,0.56), B (0,0.02625,0.056), C (0,0,0.28), C1 (0,0,0.84), D (0,0.02625,0.028), D1 (0,0.02625,0.084), E (0,0.039375,0.056), F (0,0,0.14) F1 (0,0,0.098), G (0,0.039375,0.014) και G1 (0,0.039375,0.098) (Σχήμα 11) γιατί λόγω ύπαρξης του κενού στο επάνω μέρος της κονσέρβας το οποίο περιέχει υδρατμούς δεν παρουσιάζεται συμμετρία στη μεταφορά θερμότητας με αποτέλεσμα την ανάγκη περαιτέρω εξέτασης του φαινομένου αυτού.



Σχήμα 10. Σημεία που εξετάστηκαν στη μεταλλική κονσέρβα χωρίς κενό.

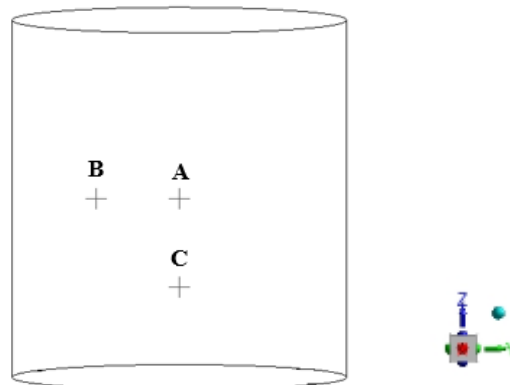


Σχήμα 11. Σημεία που εξετάστηκαν στη μεταλλική κονσέρβα με κενό.

4.6.1 Αξιολόγηση αναλυτικής λύσης με αριθμητική λύση

Στη γεωμετρία της μεταλλικής κονσέρβας χωρίς κενό έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων υπολογίζοντας την τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγώνου του σφάλματος (Root Mean Square Error, RMSE), δηλ. η μέση διαφορά των θερμοκρασιακών δεδομένων μεταξύ αριθμητικής και αναλυτικής λύσης για κάθε λεπτό της επεξεργασίας (Εξίσωση 37). Στη δεύτερη γεωμετρία λόγω ύπαρξης του διαφορετικού μέσου από το οποίο μεταδίδεται η θερμότητα μόνο από την μία πλευρά, πράγμα που δεν την κάνει συμμετρική δεν έγινε σύγκριση της αριθμητικής με την αναλυτική. Η σύγκριση έγινε σε τρία διαφορετικά σημεία της κονσέρβας, τα οποία είναι: *A* (0,0,0.56) το γεωμετρικό κέντρο της κονσέρβας το οποίο θερμαίνεται πιο αργά σε τρόφιμα που θερμαίνονται με αγωγή, *B* (0,0.02625,0.056), και *C* (0,0,0.28) (Σχήμα 12). Η περίπτωση με τη μικρότερη τιμή RMSE θεωρήθηκε η πιο ακριβής ως προς τη λύση.

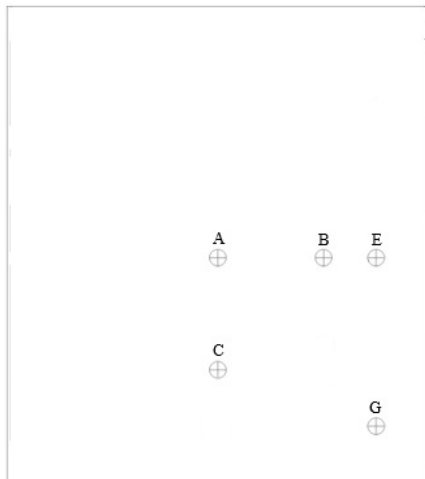
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{\text{analytical}} - T_{\text{numerical}})^2} \quad (37)$$



Σχήμα 12 Τα τρία σημεία που έγινε σύγκριση αριθμητικής με αναλυτική λύση

4.6.2 Αξιολόγηση αριθμητικής λύσης μεταξύ των πλεγμάτων

Για την επιλογή του καλύτερου πλέγματος έγινε επίσης η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των πλεγμάτων και για τις δύο περιπτώσεις ξεχωριστά. Υπολογίστηκε η διαφορά των θερμοκρασιακών δεδομένων (ΔT) συναρτήσει του χρόνου διαδοχικά, όσον αφορά στον αριθμό των κελιών σε πέντε διαφορετικά σημεία της κονσέρβας *A* (0,0,0.56), *B* (0,0.02625,0.056), *C* (0,0,0.28), *E* (0,0.039375,0.056) και *G* (0,0.039375,0.014) (Σχήμα 13 και 14). Η περίπτωση με τη μικρότερη τιμή θεωρείται η πιο ακριβής λύση.



Σχήμα 13. Σημεία που επιλέχθηκαν για τη σύγκριση μεταξύ των πλεγμάτων στη κονσέρβα χωρίς κενό.



Σχήμα 14. Σημεία που επιλέχθηκαν για τη σύγκριση μεταξύ των πλεγμάτων στη κονσέρβα με κενό

4.7 Αξιολόγηση της «πλήρωσης εν θερμώ» διεργασίας

Αφού σχεδιάστηκε η γεωμετρία και έγινε η επιλογή του καλύτερου πλέγματος έγινε η αξιολόγηση της «πλήρωσης εν θερμώ» διεργασίας. Εξετάστηκε η «πλήρωση εν θερμώ» διεργασία υπολογίζοντας το θερμοκρασιακό προφίλ συναρτήσει του χρόνου, τη τιμή F της διεργασίας σε κάθε σημείο του πλέγματος που αναφέρθηκαν παραπάνω χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις που αναφέρονται στο Κεφάλαιο (1.5.1.2) για τον υπολογισμό της ολοκληρωμένης απαιτούμενης τιμής F_s και την ποιοτική υποβάθμιση του προϊόντος χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις που αναφέρονται στο Κεφάλαιο (1.5.2) και στις δύο γεωμετρίες.

Η «πλήρωση εν θερμώ διεργασία» εξετάστηκε ως προς δύο παραμέτρους. Τη θερμοκρασία γεμίματος, T_{IT} , σε ένα εύρος 10 μονάδων, 88-98°C, και το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στον αέρα, h_{air} , σε ένα εύρος 5-15 W/m² K. Ο χρόνος παραμονής στον αέρα προσδιορίστηκε με δοκιμή και σφάλμα αυξάνοντας και μειώνοντας κατάλληλα το χρόνο διατήρησης στον αέρα όπου αυτό ήταν απαραίτητο. Οι συνθήκες επίσης που εισάχθηκαν στο Fluent είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_{air}=25^{\circ}\text{C}$ και ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στο νερό $h_{cw}=100\text{ W/m}^2\text{K}$. Για την εξέταση της επίδρασης της θερμοκρασίας του αέρα χρησιμοποιήθηκε η περίπτωση με $T_{IT}=95^{\circ}\text{C}$ και $h_{air}=5\text{ W/m}^2\text{K}$ (Πίνακας 8). Όπως και στη προσομοίωση της θερμικής επεξεργασίας στη περίπτωση όπου

η μεταλλική κονσέρβα εξετάστηκε η επίδραση του κενού, στο χώρο όπου θεωρήθηκε κενό, δηλαδή χωρίς προϊόν εισάχθηκαν υδρατμοί και χρησιμοποιήθηκαν οι θερμοφυσικές ιδιότητες που αναφέρονται στο Πίνακα (7) και το υλικό που αποτελείται η μεταλλική κονσέρβα ορίστηκε το αλουμίνιο με τις θερμοφυσικές ιδιότητες που αναφέρονται παραπάνω. Επίσης για την επίλυση του προβλήματος επιλέχθηκε ως χρονικό βήμα τα 5s, απόλυτο κριτήριο σύγκλισης 10^{-9} , συσχέτιση πίεσης-ταχύτητας, SIMPLE, για τη χωρική διακριτοποίηση επιλέχθηκε το Gradiend: Green-Gauss cell based, Pressure: Standard, Momentum: 2nd order upwind, Energy: 2nd order upwind. Η προσομοίωση του προβλήματος έγινε με τη χρήση δύο ηλεκτρονικών υπολογιστών. Ο ένας υπολογιστής χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση του προβλήματος για τη περίπτωση με τη κονσέρβα χωρίς κενό με χαρακτηριστικά 8 Gb Ram, και επεξεργαστή Intel Core 2 Quad. Ο δεύτερος υπολογιστής χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση του προβλήματος για τη περίπτωση με τη κονσέρβα με κενό με χαρακτηριστικά 16 Gb Ram, και επεξεργαστή Core i7 3370k.

Πίνακας 8. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση του προβλήματος στο Fluent

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ
Θερμοκρασία Προϊόντος, T_{IT}	88°C, 90°C, 93°C, 95°C, 98°C
Θερμοκρασία περιβάλλοντος αέρας ψύξης, T_{air}	25°C
Θερμοκρασία περιβάλλοντος υγρής ψύξης, T_{cw}	20°C
Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας του αέρα, h_{air}	5 W/m ² K, 7 W/m ² K, 9 W/m ² K, 15 W/m ² K
Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας του νερού, h_{cw}	100 W/m ² K
Ολοκληρωμένη τιμή, F_s	$F_{93,33}^{8,89°C} = 12,6 \text{ min}$
Τιμή z^*	8.89°C
Χρόνος υποδεκαπλασιασμού, D	$D_{93,33} = 6.77 \text{ min}$
Ποιοτική παράμετρος χρώματος, a/b	$D_{90}=364.84, z=85.56°C$
Ποιοτική παράμετρος χρώματος, L	$D_{90}=197.59, z=51.04°C$
Καροτενοειδή	$D_{90}=1303.84, z=35.24°C$
Ασκορβικό οξύ	$D_{90}=414.01, z=76.60°C$
Θερμοκρασία αναφοράς, T_{ref}	90°C

4.8 Υπολογισμός της τιμής F της διεργασίας

Για τον υπολογισμό της τιμής F της διεργασίας έγινε εισαγωγή στο Fluent ενός κώδικα από τον χρήστη (User Defined Function, UDF) ο οποίος βασίζεται στην κλασική θερμοβακτηριολογική προσέγγιση μέσω της Εξίσωσης (6) των Ball and Olson, 1957. Η εξίσωση αυτή βασίζεται σε κινητική μικροβιακής απενεργοποίησης πρώτης τάξης και την γραμμική εξάρτηση του λογαρίθμου του χρόνου δεκαδικής μείωσης (D) από τη θερμοκρασία.

Με τη χρήση της Εξίσωσης (6) υπολογίστηκε η τιμή F της διεργασίας και στις δύο περιπτώσεις για κάθε χρονική στιγμή της επεξεργασίας. Στη «πλήρωση εν θερμώ» διεργασία το κρίσιμο σημείο στο προϊόν, δηλαδή το σημείο που ψύχεται πιο γρήγορα, βρίσκεται στην επιφάνεια της κονσέρβας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στην αρχή της διεργασίας το προϊόν έχει μια ομοιόμορφη θερμοκρασία και όταν αρχίζει να ψύχεται στον αέρα και στη συνέχεια στο νερό, τα σημεία που ψύχονται ταχύτερα θα είναι αυτά στην επιφάνεια της κονσέρβας, ενώ αυτά που ψύχονται πιο αργά βρίσκονται στο εσωτερικό της κονσέρβας. Λόγω της αβεβαιότητας και της μεταβλητότητας στην τιμή F σε τέτοιες θέσεις για τη διεργασία της «πλήρωσης εν θερμώ», η πλέον κατάλληλη για τον υπολογισμό της απαιτούμενης τιμής της παστερίωσης θεωρείται η Εξίσωση (7) που δίνει την ολοκληρωμένη τιμή F_s . Έτσι η Εξίσωση (7) εφαρμόστηκε σε δύο μέρη: πρώτα υπολογίστηκε η τιμή $\% N(t)/N_0$ στο Fluent με τη βοήθεια της εντολής Custom Field Function για κάθε σημείο του τρόφιμου με τη χρήση της παρακάτω εξίσωσης:

$$\% \frac{N(t)}{N_0} = \frac{N(t)}{N_0} \times 100 = 10^{-\frac{F^Z T_{ref}}{D T_{ref}}} \times 100 \quad (38)$$

όπου, $N(t)$: μικροβιακός πληθυσμός σε κάθε όγκο ελέγχου για κάθε χρονική στιγμή

N_0 : ο αρχικός μικροβιακός πληθυσμός σε κάθε όγκο ελέγχου και

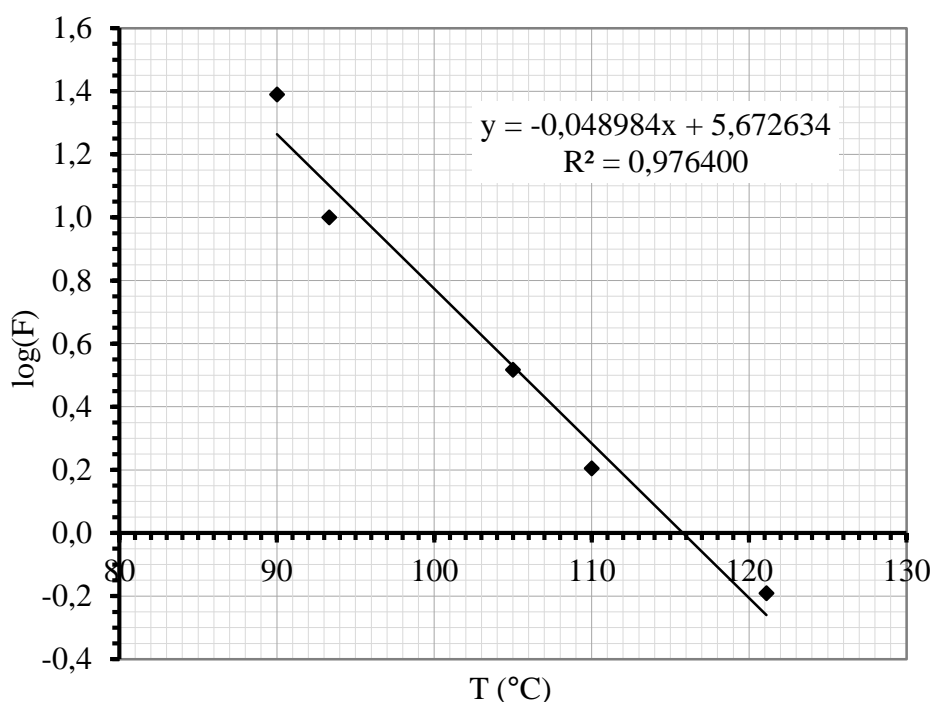
$F^Z T_{ref}$: η τιμή F σε κάθε όγκο ελέγχου για κάθε χρονική στιγμή

Αφού υπολογίστηκε η τιμή $\% N(t)/N_0$, υπολογίστηκε η ολοκληρωμένη τιμή F_s με τη χρήση της παρακάτω εξίσωσης μέσω του Custom Field Function του Fluent:

$$F_s = D_{T_{ref}} \times \log\left(\frac{N_0}{N(t)}\right) \quad (39)$$

Η απαιτούμενη ολοκληρωμένη τιμή F_s που χρησιμοποιήθηκε από τη βιβλιογραφία σύμφωνα με παλαιότερες έρευνες για τη αξιολόγηση της προσομοιωμένης διεργασίας ήταν $F_{93.33^\circ C}^{8.89^\circ C} = 12,6 \text{ min}$. Η τιμή αυτή προέκυψε από το Σχήμα 15 $\log(F)$ - T το οποίο

κατασκευάστηκε από διάφορες απαιτούμενες τιμές F για προϊόντα τομάτας που βρέθηκαν βιβλιογραφικά.



Σχήμα 15. Ο λογάριθμος της τιμής, F σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για το *B. Coagulans* (Μαραγκουδάκης, 2015).

4.9 Υπολογισμός της υποβάθμισης των ποιοτικών παραγόντων τοματοπολτού

Για τον υπολογισμό της επίδρασης της διεργασίας στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του τοματοπολτού σε κάθε σημείο της κονσέρβας εισάχθηκε στο Fluent η παρακάτω εξίσωση μέσω του UDF:

$$C_{T_{ref}}^z = \int_0^t 10^{\frac{(T(t)-T_{ref})}{z}} dt \quad (40)$$

Για την καλύτερη απεικόνιση της υποβάθμισης του ποιοτικού παράγοντα υπολογίστηκε η μέση τιμή διατήρησης ποιοτικού παράγοντα, με τρόπο αντίστοιχο του υπολογισμού της ολοκληρωμένης τιμής F_s .

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, τη βιταμίνη C και το Βήτα καροτένιο οι οποίοι είναι πολύ σημαντικοί παράγοντες για την ποιότητα του

τοματοπολτού. Οι τιμές D_{Tref} και z που χρησιμοποιήθηκαν για τις τέσσερις ποιοτικές παραμέτρους αναφέρονται στο Πίνακα 9.

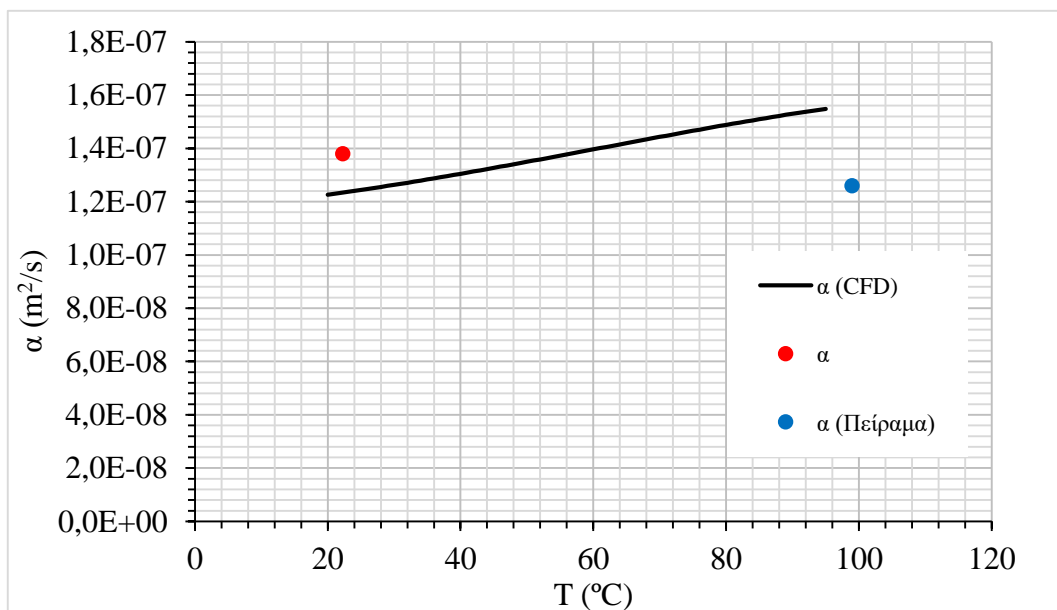
Πίνακας 9. Κινητικές παράμετροι των ποιοτικών παραγόντων που χρησιμοποιήθηκαν στη προσομοίωση (Μαραγκουδάκης, 2015)

Ποιοτική παράμετρος	D_{90} (min)	z (°C)
L	197.59	51.04
a/b	364.84	85.56
Καροτενοειδή	1303.84	35.24
Βιταμίνη C	414.01	76.60

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

5.1 Θερμοφυσικές ιδιότητες τοματοπολτού

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα έγινε προσδιορισμός των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του τοματοπολτού πειραματικά. Οι θερμοφυσικές ιδιότητες που μετρήθηκαν είναι η πυκνότητα (ρ) ίση με 1126.4 kg/m^3 , η θερμική αγωγιμότητα (k) ίση με 0.51 W/mK στους 22.3°C και τα διαλυτά στερεά ίσα με 29°Brix . Η ειδική θερμότητα (C_p) του τοματοπολτού βρέθηκε βιβλιογραφικά ίση με 3302 J/kg K . Με βάση τις παραπάνω τιμές των θερμοφυσικών ιδιοτήτων υπολογίστηκε ο συντελεστής θερμικής διαχυτότητας (α) του τοματοπολτού και βρέθηκε ίσος με $1.38 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Η τιμή αυτή βρέθηκε με τη χρήση της εξίσωσης $\alpha = k/\rho \times C_p$ με τη τιμή της ειδικής θερμότητας που βρέθηκε βιβλιογραφικά λόγω της μη δυνατότητας μέτρησης της στο εργαστήριο. Έτσι για λόγους σύγκρισης έγινε προσδιορισμός του συντελεστή θερμικής διαχυτότητας πειραματικά με τη χρήση της εξίσωσης $\alpha = \frac{2,303}{\left(\frac{2,4048^2}{R^2} + \frac{\pi^2}{L^2}\right) \times fh}$ και βρέθηκε ίσος με $1.26 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Με βάση τις δύο τιμές του συντελεστή θερμικής διαχυτότητας που αναφέρθηκαν παραπάνω, οι οποίες διαφέρουν μεταξύ τους, για τις ανάγκες της προσομοίωσης επιλέχθηκαν εξισώσεις που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο για μεταβλητή ειδική θερμότητα και θερμική αγωγιμότητα. Στο Σχήμα 16 που ακολουθεί απεικονίζονται οι τιμές της θερμικής διαχυτότητας και για τους τρεις μεθόδους μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν συναρτήσει της θερμοκρασίας.



Σχήμα 16. Οι τιμές της θερμικής διαχυτότητας α (m^2/s) συναρτήσει της θερμοκρασίας.

5.2 Αξιολόγηση ποιότητας πλέγματος με βάση τις παραμέτρους Ορθογωνικότητας και Στρέβλωσης

Αφού έγινε η σχεδίαση της γεωμετρίας της μεταλλικής κονσέρβας και για τις δύο περιπτώσεις με και χωρίς κενό και η δημιουργία των πλεγμάτων μελετήθηκε η ποιότητα των πλεγμάτων με βάση τις παραμέτρους ορθογωνικότητας και στρέβλωσης. Με βάση τους Πίνακες 10 και 11 όπου παρουσιάζονται οι τιμές ορθογωνικότητας και στρέβλωσης και για τα πέντε πλέγματα που δημιουργήθηκαν και για τις δύο περιπτώσεις που εξετάστηκαν, (μεταλλική κονσέρβα με και χωρίς κενό) παρατηρείται είναι ότι για το Case C και για τις δύο περιπτώσεις, ο μεγαλύτερος αριθμός κελιών έχει άριστη τιμή ορθογωνικότητας και άριστη τιμή στρέβλωσης.

Πίνακας 10. Κατανομή του αριθμού κελιών με βάση τις τιμές ορθογωνικότητας και για τα πέντε πλέγματα για τις μεταλλικές κονσέρβες με και χωρίς κενό

ΤΙΜΕΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΟΤΗΤΑΣ						
Περιπτώσεις	Κονσέρβα με κενό			Κονσέρβα χωρίς κενό		
Τιμές	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00
Αριθμός κελιών						
CASE A	2265	19550	368560	568	8032	376788
CASE B	1071	81617	1284265	555	53950	1259069
CASE C	1412	58130	1915375	1375	52155	1940875
CASE D	2100	113280	2605770	3725	136694	2565526
CASE E	11050	140300	1378820	0	79464	904662

Πίνακας 11. Κατανομή του αριθμού κελιών με βάση τις τιμές στρέβλωσης και για τα πέντε πλέγματα για τις μεταλλικές κονσέρβες με και χωρίς κενό

ΤΙΜΕΣ ΣΤΡΕΒΛΩΣΗΣ						
Περιπτώσεις	Κονσέρβα με κενό			Κονσέρβα χωρίς κενό		
Τιμές	0.50-0.80	0.25-0.50	0-0.25	0.50-0.80	0.25-0.50	0-0.25
Αριθμός κελιών						
CASE A	1580	10350	378445	213	15474	369701
CASE B	119	153050	1213784	2999	57671	1251794
CASE C	798	80556	1893563	500	57550	1884220
CASE D	450	132500	2588200	725	152191	117668
CASE E	680	190180	1339310	10046	166888	957392

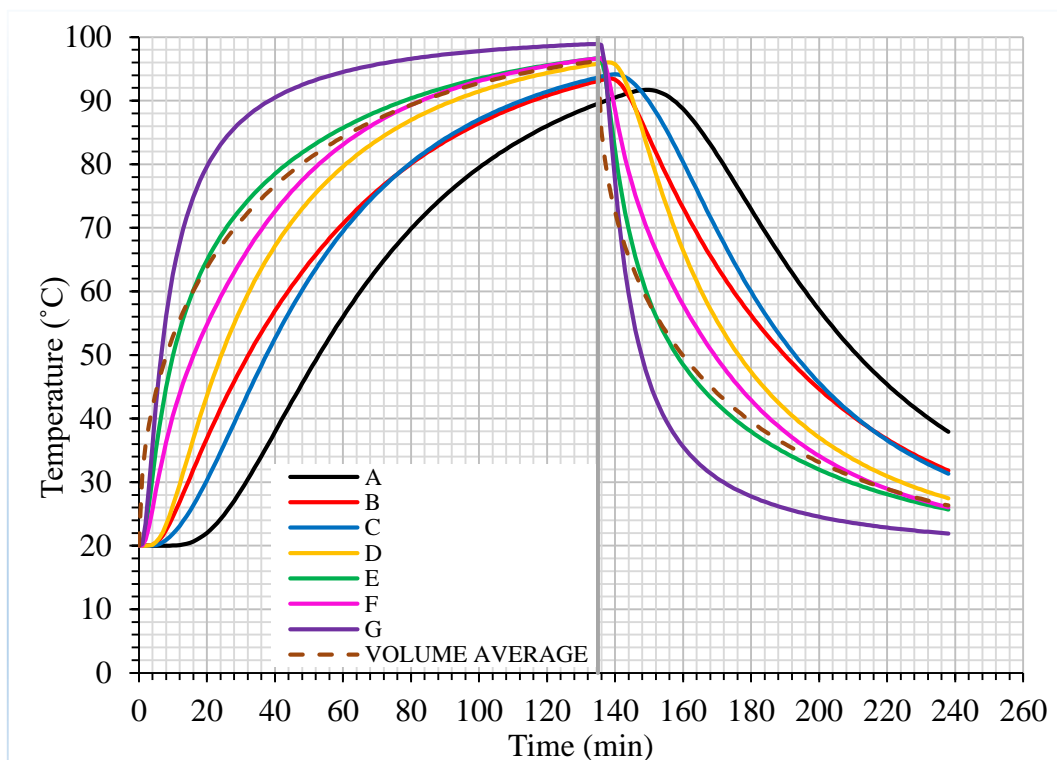
5.3 Επίλυση της θερμικής επεξεργασίας

Αφού έγινε ο σχεδιασμός της γεωμετρίας και η δημιουργία των πλεγμάτων, επιλέχθηκαν οι αρχικές και οριακές συνθήκες του προβλήματος και έγινε η επίλυση της θερμικής επεξεργασίας μέσω CFD για τις ανάγκες σύγκρισης με την αναλυτική λύση. Στα Σχήματα 17 και 18 παρουσιάζονται η εξέλιξη της θερμοκρασίας στα διάφορα σημεία που εξετάστηκαν καθώς και η μέση θερμοκρασία του προϊόντος κατά τη θερμική επεξεργασία για τη μεταλλική κονσέρβα με κενό και χωρίς κενό. Η γραμμή χρώματος γκρι που υπάρχει στο γράφημα δείχνει το τέλος της θέρμανσης. Το ίδιο δείχνει σε όλα τα ακόλουθα σχήματα. Σύμφωνα με τα Σχήματα αυτά παρατηρείται ότι η θερμοκρασία στο τέλος του κύκλου θέρμανσης (135 min), στο γεωμετρικό κέντρο (A) της μεταλλικής κονσέρβας στη περίπτωση με το κενό είναι 90°C ενώ στη περίπτωση χωρίς κενό η θερμοκρασία είναι 92°C. Το ίδιο παρατηρείται και στο τέλος του κύκλου ψύξης (103 min) όπου η θερμοκρασία στο κέντρο στη περίπτωση με το κενό είναι 38°C ενώ στη περίπτωση χωρίς κενό είναι 36°C. Και στο κύκλο θέρμανσης και στο κύκλο ψύξης ανάμεσα στις δύο περιπτώσεις στο γεωμετρικό κέντρο καθώς και στη μέση θερμοκρασία του προϊόντος της μεταλλικής κονσέρβας υπάρχει μια διαφορά θερμοκρασίας 2°C, θερμοκρασίας μεγαλύτερη στη περίπτωση με το κενό.

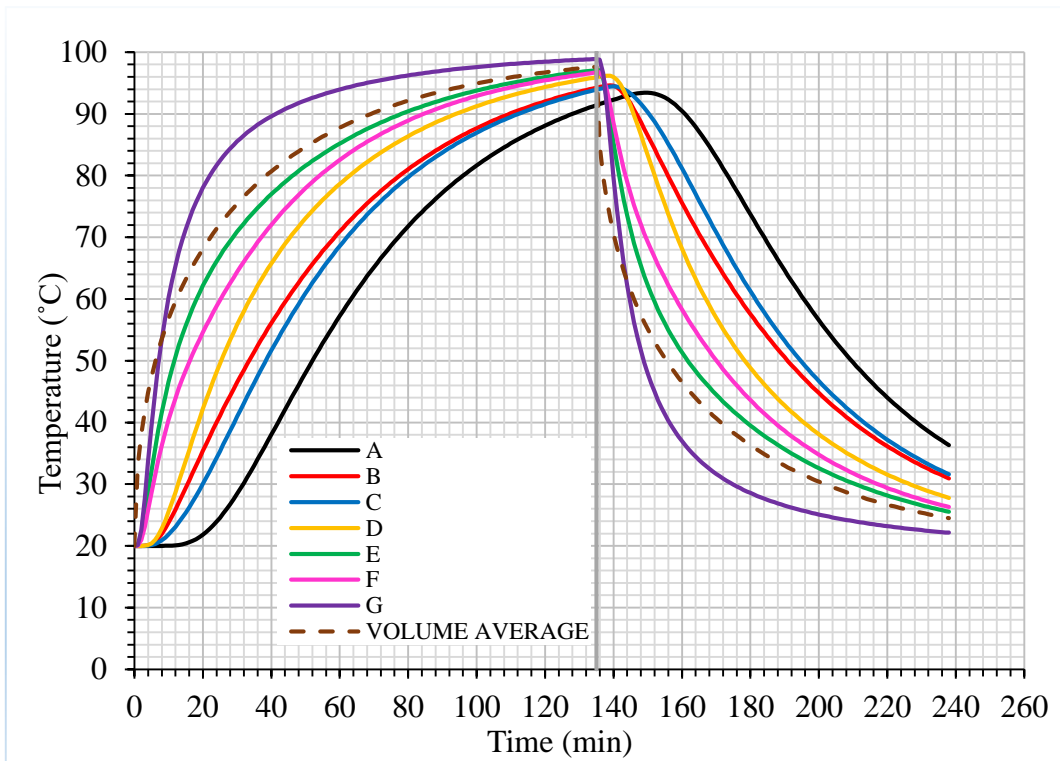
Αυτό οφείλεται στους υδρατμούς που υπάρχουν οι οποίοι λόγω χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας λειτουργούν ως μονωτικό υλικό με αποτέλεσμα την παρεμπόδιση της μεταφοράς θερμότητας. Διαφορά θερμοκρασίας ίση με 1°C στη κονσέρβα με κενό παρατηρείται και στα σημεία B, C και F σε σχέση με τη περίπτωση χωρίς κενό, ενώ καμία διαφορά θερμοκρασίας δεν παρατηρείται στα υπόλοιπα σημεία.

Στα Σχήματα 19 και 20 παρουσιάζονται οι τιμές $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}}$ της διεργασίας και στα εφτά σημεία που εξετάστηκαν. Αυτό που παρατηρείται στα Σχήματα αυτά είναι ότι η τιμή $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}}$ στο τέλος του κύκλου θέρμανσης (135 min), στο γεωμετρικό κέντρο (A) της μεταλλικής κονσέρβας στη περίπτωση με το κενό είναι μικρότερη ενώ στη περίπτωση χωρίς κενό είναι μεγαλύτερη. Το ίδιο παρατηρείται και στο τέλος του κύκλου ψύξης (103 min) όπου η τιμή $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}}$ στο κέντρο στη περίπτωση με το κενό εξακολουθεί να είναι μικρότερη ενώ στη περίπτωση χωρίς κενό μεγαλύτερη. Στο κύκλο θέρμανσης στο γεωμετρικό κέντρο της μεταλλικής κονσέρβας με το κενό υπάρχει μια διαφορά στη τιμή $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}}$ της διεργασίας ίση προς 3 min καθώς και στη μέση τιμή $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}}$ του προϊόντος 63 min σε σχέση με τη μεταλλική κονσέρβα χωρίς το κενό. Το ίδιο παρατηρείται και στο κύκλο ψύξης όπου υπάρχει μια διαφορά στη τιμή $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}}$ της διεργασίας ίση προς 13 min

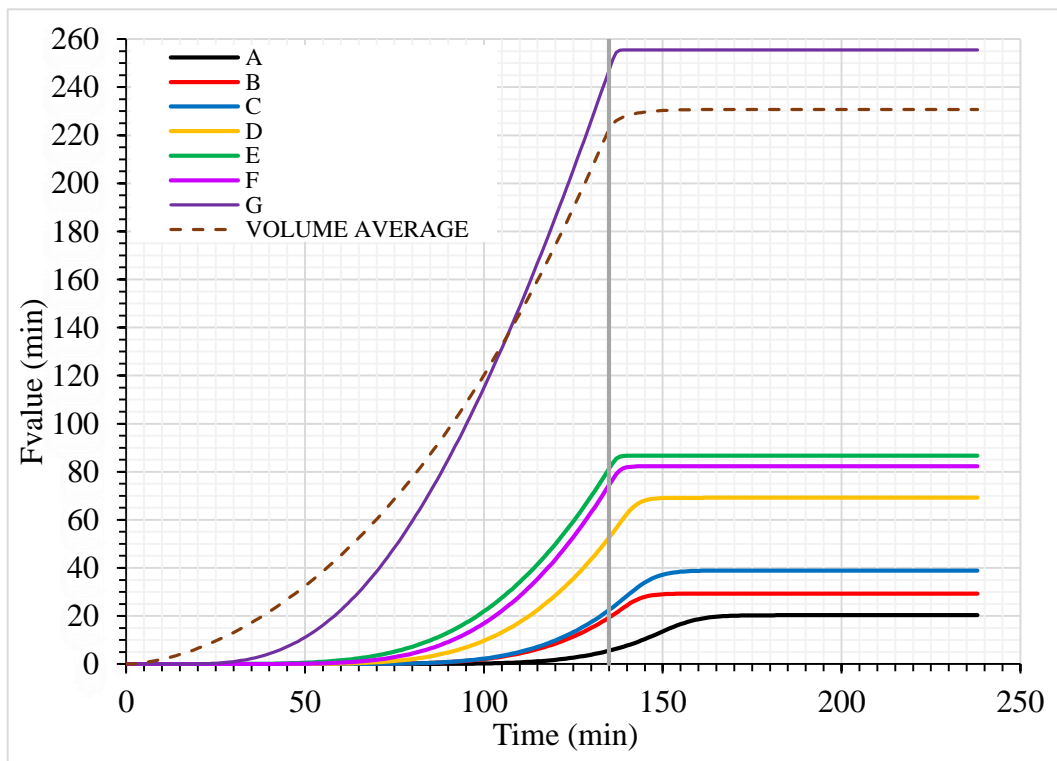
και στη μέση τιμή $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}}$ του προϊόντος 63 min μεταξύ των περιπτώσεων με κενό και χωρίς κενό με τις μεγαλύτερες τιμές να παρουσιάζονται στη περίπτωση της μεταλλικής κονσέρβας με το κενό. Αυτό οφείλεται όπως αναφέρθηκε και παραπάνω στους υδρατμούς που υπάρχουν στη περίπτωση με το κενό, οι οποίοι λόγω χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας λειτουργούν ως μονωτικό υλικό με αποτέλεσμα την παρεμπόδιση της μεταφοράς θερμότητας και της διατήρησης της θερμοκρασίας του προϊόντος υψηλή με αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη θανάτωση των μικροοργανισμών



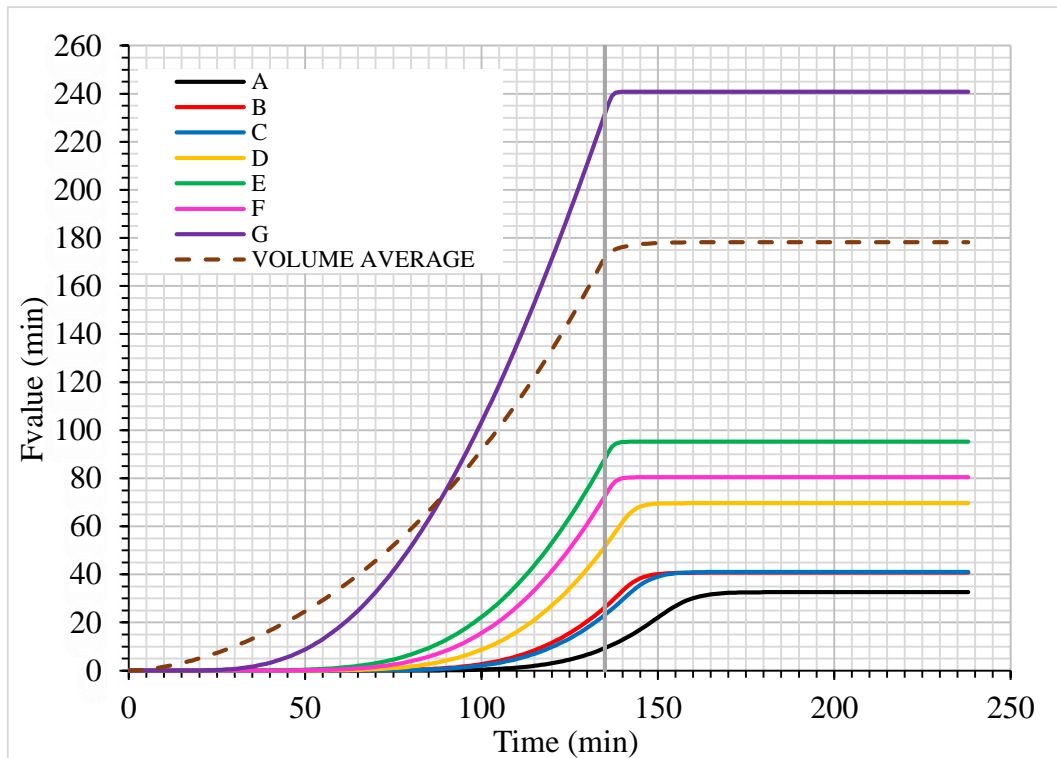
Σχήμα 17. Εξέλιξη της θερμοκρασίας στα 7 σημεία κατά τη θερμική επεξεργασία στη μεταλλική κονσέρβα με κενό.



Σχήμα 18. Εξέλιξη της θερμοκρασίας στα 7 σημεία κατά τη θερμική επεξεργασία στη μεταλλική κονσέρβα χωρίς κενό.



Σχήμα 19. Κατανομή της τιμής $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}}$ της διεργασίας στα επτά σημεία για τη μεταλλική κονσέρβα με κενό.



Σχήμα 20. Κατανομή της τιμής $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}}$ της διεργασίας στα επτά σημεία για τη μεταλλική κονσέρβα χωρίς κενό.

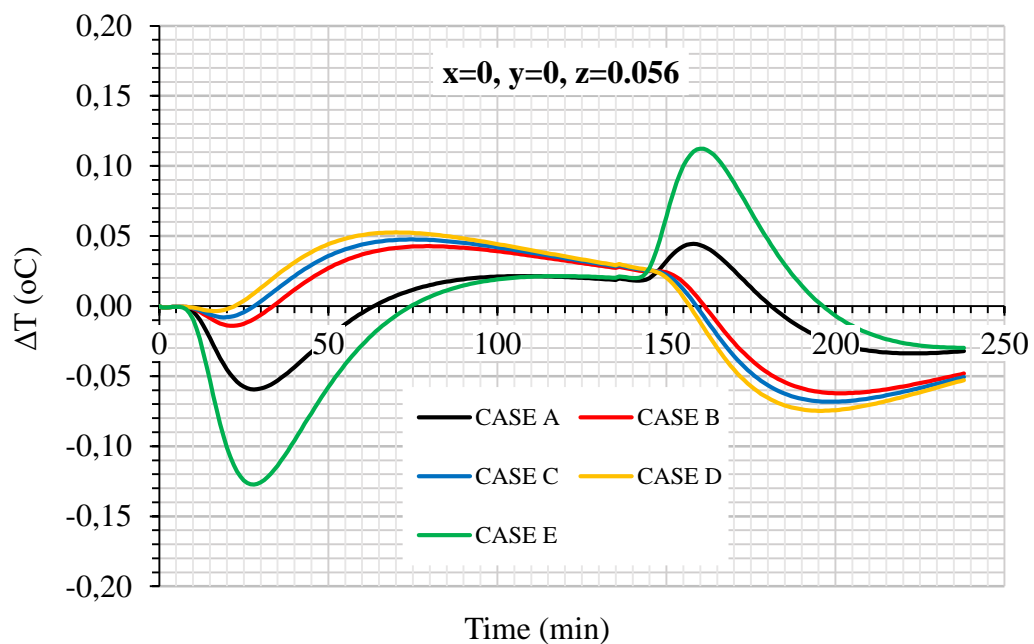
5.4 Σύγκριση αναλυτικής και αριθμητικής λύσης

Για τη σύγκριση της αναλυτικής λύσης με την αριθμητική υπολογίστηκε η μέση τιμή τετραγωνικής ρίζας του σφάλματος (RMSE) σε τρία διαφορετικά σημεία. Στον Πίνακα 12 παρουσιάζονται οι τιμές του RMSE μεταξύ αναλυτικής και αριθμητικής λύσης καθώς και ο πραγματικός υπολογιστικός χρόνος, όπου παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η πυκνότητα του πλέγματος αυξάνεται η ακρίβεια της αριθμητικής λύσης. Στη περίπτωση D παρατηρείται η μεγαλύτερη ακρίβεια της αριθμητικής λύσης και στα τρία σημεία ενώ στη περίπτωση E παρατηρείται η μικρότερη ακρίβεια της αριθμητικής λύσης. Επίσης όσο αυξάνεται η πυκνότητα των κελιών αυξάνεται και ο πραγματικός υπολογιστικός χρόνος.

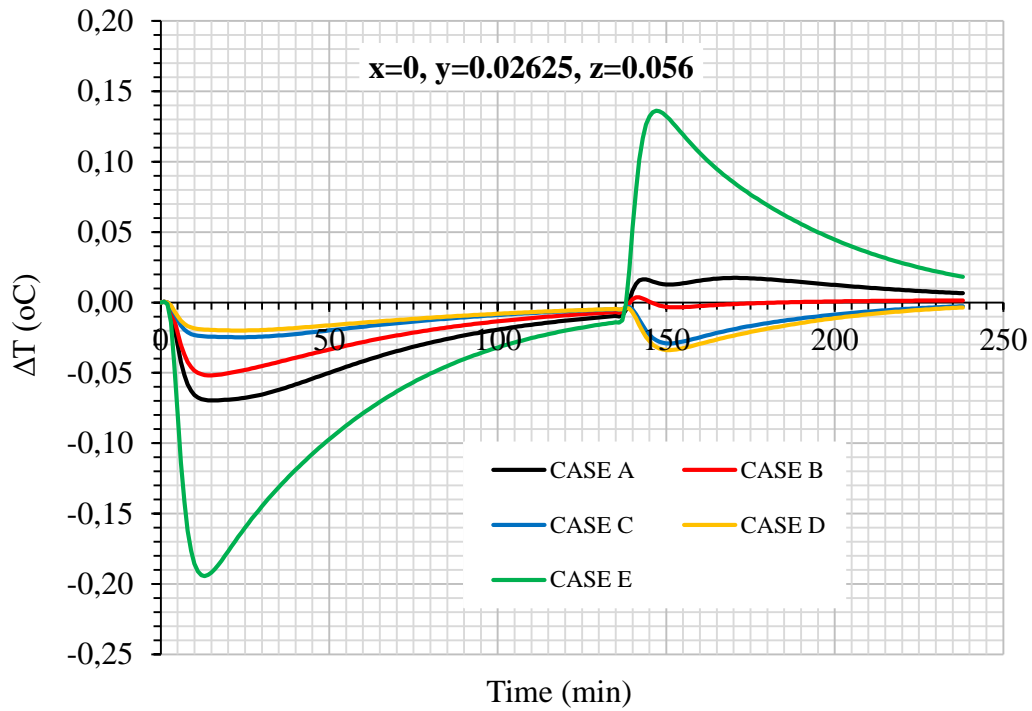
Πίνακας 12. Επίδραση του πλέγματος στο RMSE διαφόρων σημείων (A,B,C) και του υπολογιστικού χρόνου CPU μεταξύ αναλυτικής και αριθμητικής λύσης με διακριτοποίηση χρόνου 2nd order implicit, χρονικό βήμα 5s και απόλυτο κριτήριο σύγκλισης 10⁻⁹

Είδος πλέγμα	Αριθμός κελιών	Σημεία			CPU (min)
		A	B	C	
Case A	385388	0.028	0.033	0.041	34.08
Case B	1312464	0.038	0.022	0.019	121.47
Case C	1942250	0.042	0.016	0.016	187.32
Case E	2705845	0.046	0.016	0.016	265.57
Case G	984126	0.055	0.086	0.063	89.71

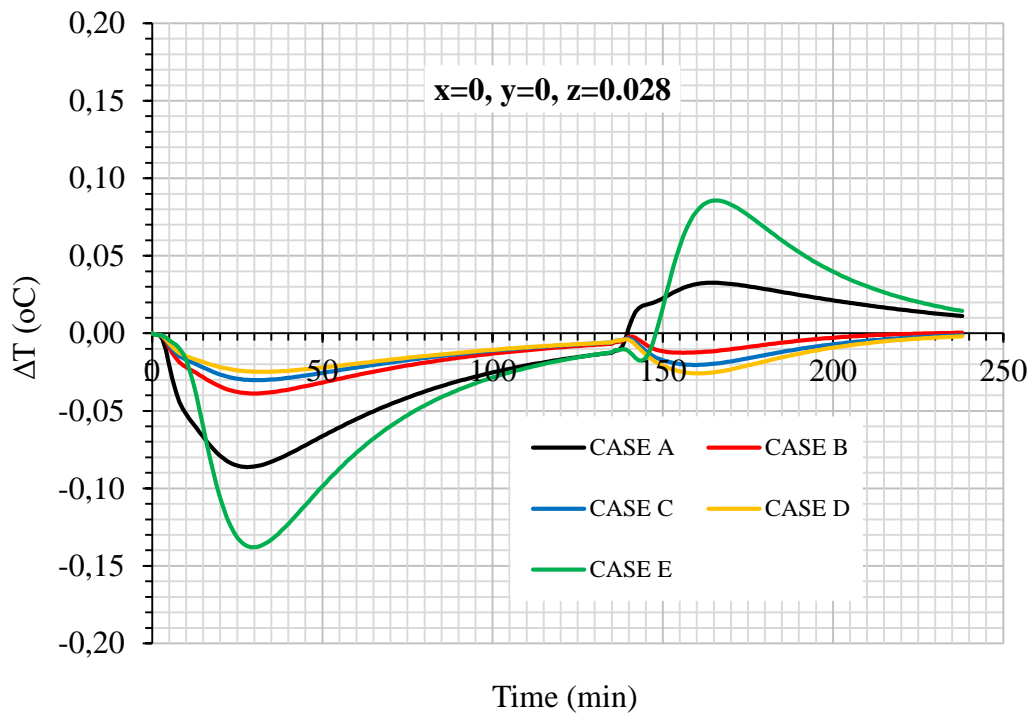
Στα Σχήματα 21, 22 και 23 παρουσιάζεται η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ αναλυτικής και αριθμητικής λύσης στα τρία σημεία που εξετάστηκαν και για τα πέντε πλέγματα. Στο σημείο A παρατηρείται ότι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ αναλυτικής και αριθμητικής λύσης είναι μικρότερη στα Case B και D, ενώ στα σημεία B και C η διαφορά θερμοκρασίας είναι μικρότερη στα Case C και D. Επίσης στα Σχήματα αυτά παρατηρείται ότι στα πρώτα λεπτά της θέρμανσης και της ψύξης εμφανίζεται μια κορυφή η οποία θεωρήθηκε πρόβλημα της λύσης του προγράμματος.



Σχήμα 21. Διαφορά θερμοκρασίας αναλυτικής-αριθμητικής στο σημείο A και για τα πέντε πλέγματα.



Σχήμα 22. Διαφορά θερμοκρασίας αναλυτικής-αριθμητικής στο σημείο B και για τα πέντε πλέγματα.



Σχήμα 23. Διαφορά θερμοκρασίας αναλυτικής-αριθμητικής στο σημείο C και για τα πέντε πλέγματα.

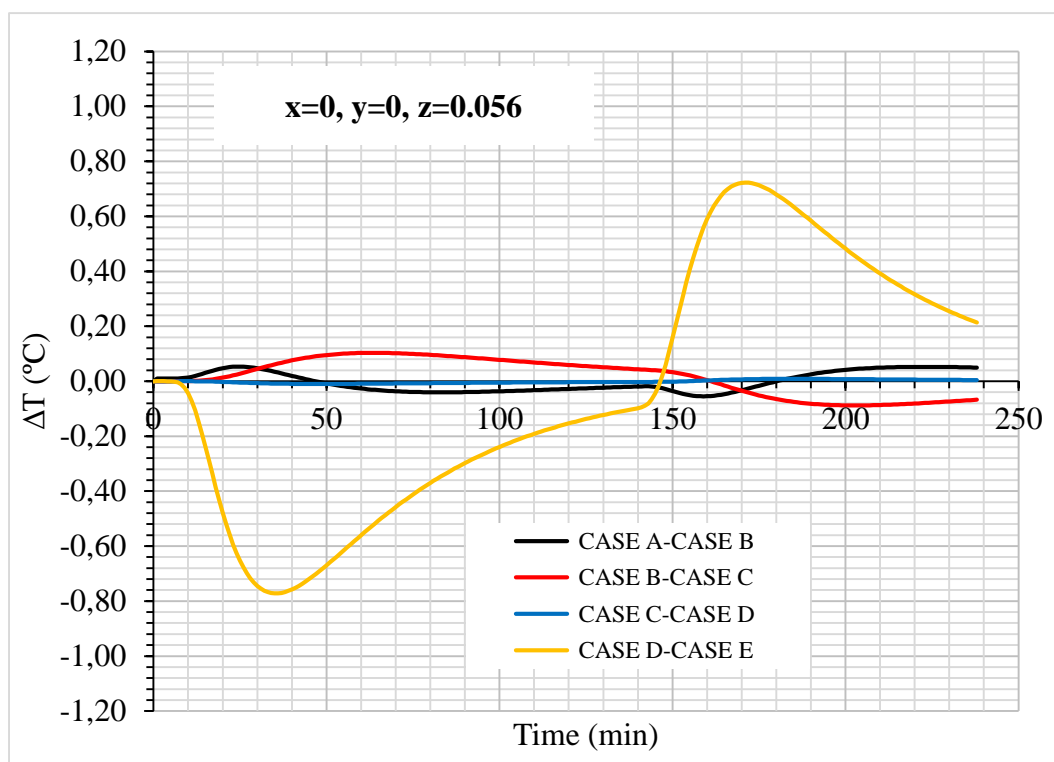
5.5 Σύγκριση αριθμητικής λύσης μεταξύ των πλεγμάτων

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω για τη σύγκριση της αριθμητικής λύσης μεταξύ των πλεγμάτων υπολογίστηκε η διαφορά θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου διαδοχικά όσον αφορά τον αριθμό των κελιών σε πέντε διαφορετικά σημεία και για τις δύο περιπτώσεις. Στο Πίνακα 13 παρουσιάζονται οι τιμές της μέσης τιμής της τετραγωνικής ρίζας του σφάλματος (RMSE) για όλους τους συνδυασμούς που έγιναν. Από το Πίνακα 13 βλέπουμε ότι όσο αυξάνεται η πυκνότητα του πλέγματος αυξάνεται η ακρίβεια της αριθμητικής λύσης. Και για τις δύο περιπτώσεις με και χωρίς κενό όταν γίνεται σύγκριση της περίπτωσης C είτε με τη περίπτωση B είτε με τη περίπτωση D, παρατηρείται η μικρότερη τιμή RMSE, ενώ όταν γίνεται σύγκριση με τη περίπτωση E όπου το πλέγμα είναι μεταβλητό, δηλαδή αραιό προς τα μέσα και πυκνότερο προς τα έξω παρατηρείται η μεγαλύτερη τιμή RMSE. Όσο αυξανόταν η πυκνότητα του πλέγματος ο απαιτούμενος υπολογιστικός χρόνος ήταν μεγαλύτερος και πιο χρονοβόρος. Με βάση τα παραπάνω το πλέγμα που επιλέχτηκε για την επίλυση του προβλήματος κατά την προσομοίωση του στο CFD είναι το Case C με αριθμό κελιών 1942250 στη περίπτωση χωρίς κενό και 1974917 στη περίπτωση με κενό.

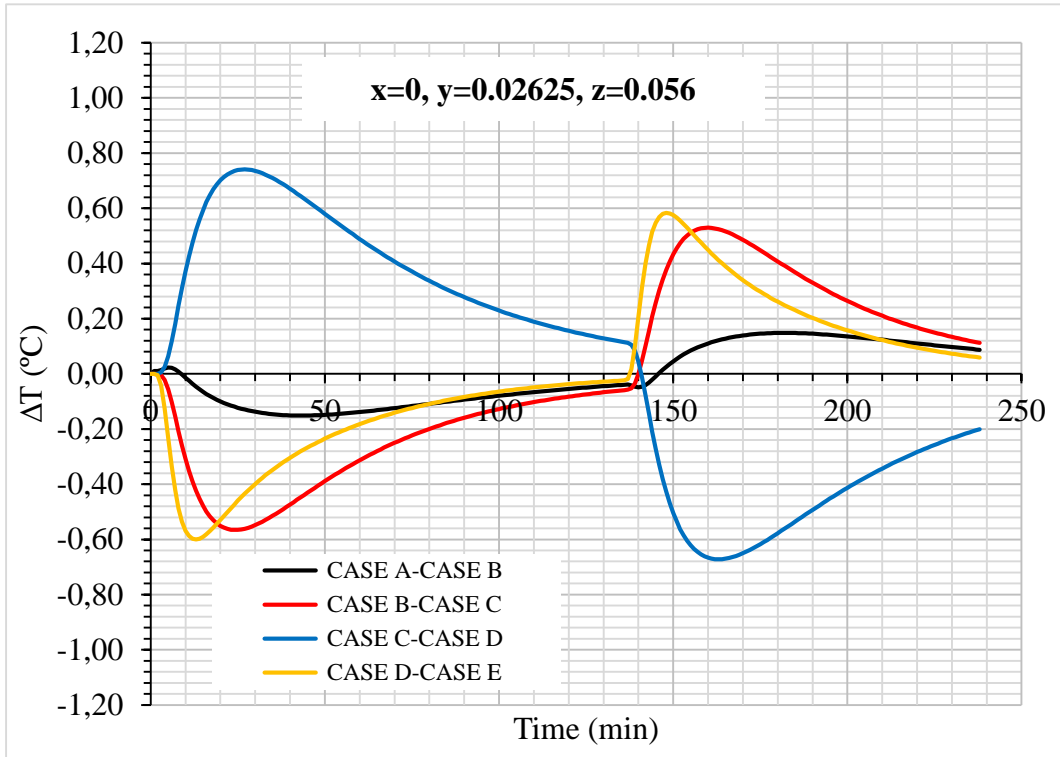
Πίνακας 13. Επίδραση του πλέγματος στο RMSE διαφόρων σημείων (A,B,C,E,G) μεταξύ των αριθμητικών λύσεων με διακριτοποίηση χρόνου 2nd order implicit, χρονικό βήμα 5s και απόλυτο κριτήριο σύγκλισης 10⁻⁹

Σημεία	A	B	C	E	G
Διαστάσεις	Με κενό				
Case A- CASE B	0.033	0.013	0.028	0.013	0.022
Case B- CASE C	0.006	0.014	0.005	0.015	0.009
Case C- CASE D	0.006	0.003	0.003	0.001	0.003
Case D-CASE E	0.075	0.086	0.059	0.073	0.053
Διαστάσεις	Χωρίς κενό				
Case A- CASE B	0.071	0.485	0.079	0.097	0.186
Case B- CASE C	0.070	0.322	0.508	0.024	0.284
Case C- CASE D	0.002	0.641	0.019	0.512	0.297
Case D- CASE E	0.459	0.459	0.486	0.312	0.242

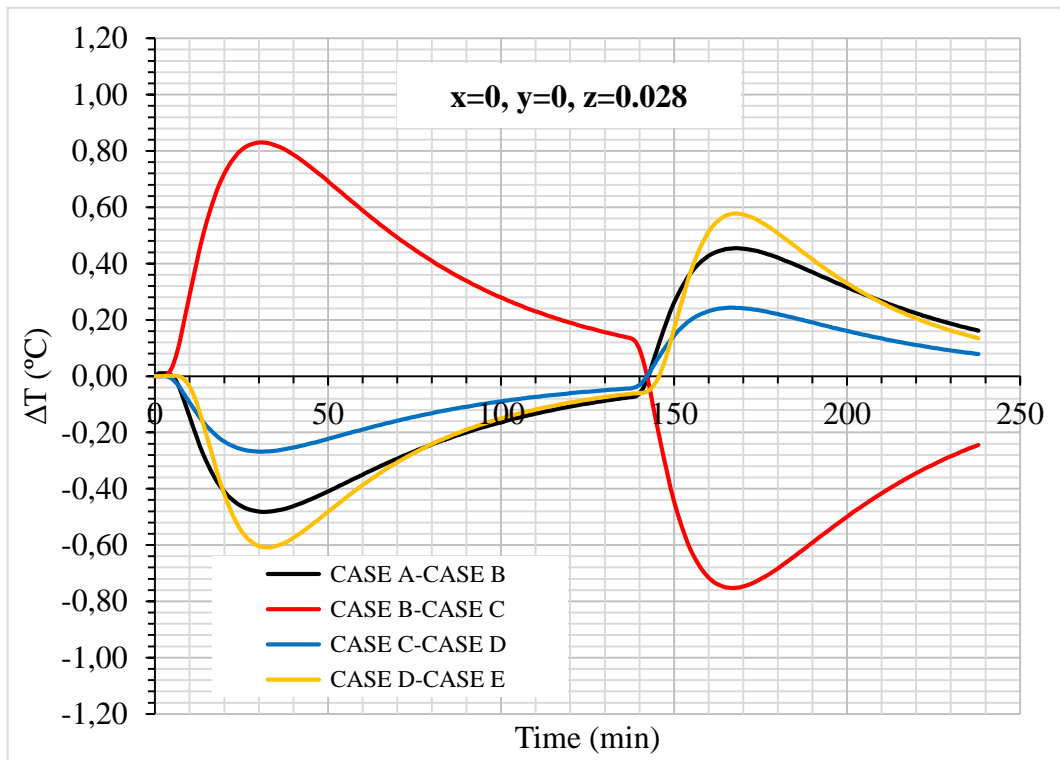
Στα Σχήματα 24-28 που ακολουθούν φαίνεται η επίδραση της μεταβολής της πυκνότητας του πλέγματος στα πέντε σημεία της μεταλλικής κονσέρβας με κενό A, B, C, E και G. Για τα σημεία A, E, και G (Σχήματα 24, 27, 28) το σφάλμα μειώνεται όταν το πλέγμα αυξάνει. Την αντίθετη εικόνα δίνουν τα υπόλοιπα σημεία B, C όπου καλύτερη ακρίβεια δείχνει να έχει η περίπτωση με το αραιότερο πλέγμα (Σχήματα 25, 26). Αυτό μπορεί να οφείλεται σε τοπικά κακής ποιότητας πλέγματα. Στα Σχήματα 29-33 φαίνεται η επίδραση της μεταβολής της πυκνότητας του πλέγματος στα πέντε σημεία της μεταλλικής κονσέρβας χωρίς κενό στα αντίστοιχα σημεία A, B, C, E και G. Και για τα πέντε σημεία το σφάλμα μειώνεται όταν το πλέγμα αυξάνει. Σε όλα τα σημεία η περίπτωση με το μεταβλητό πλέγμα (Case E) το σφάλμα είναι μεγαλύτερο από τις άλλες περιπτώσεις και αυτό μπορεί να οφείλεται στο ότι εσωτερικά το πλέγμα είναι πιο αραιό με αποτέλεσμα τη δημιουργία κακής ποιότητας κελιών.



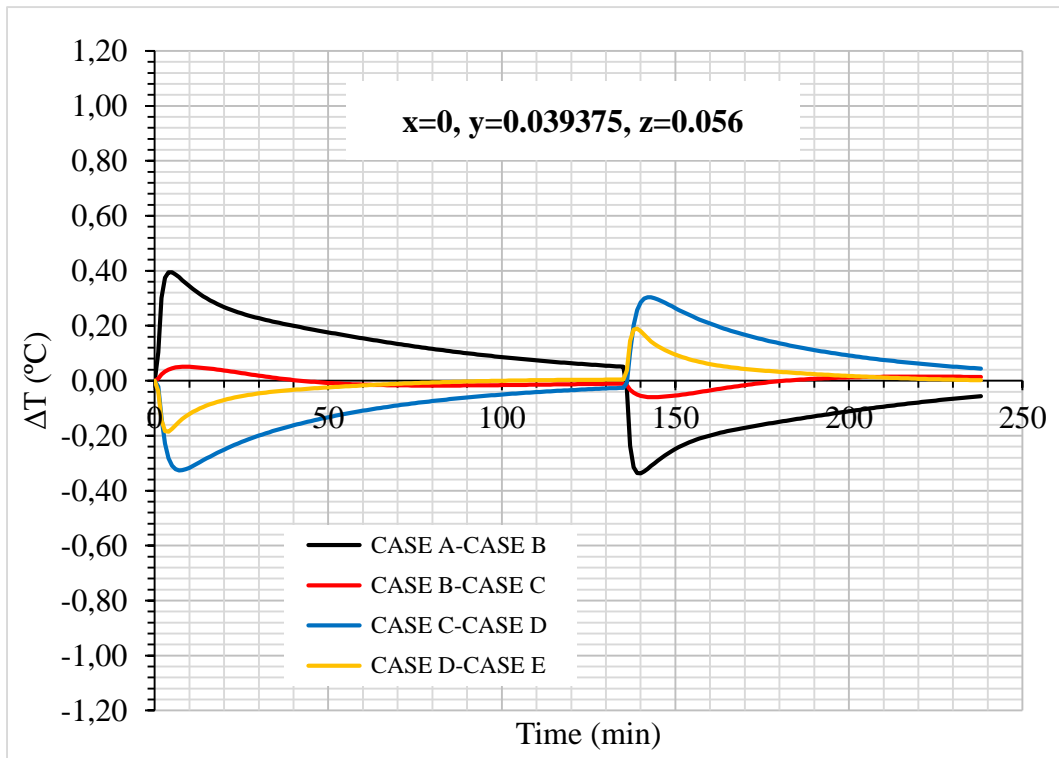
Σχήμα 24. Διαφορά θερμοκρασίας στο σημείο A και για τα πέντε πλέγματα της μεταλλικής κονσέρβας με κενό με χρονικό βήμα 5s και κριτήριο σύγκλισης 10^{-9} .



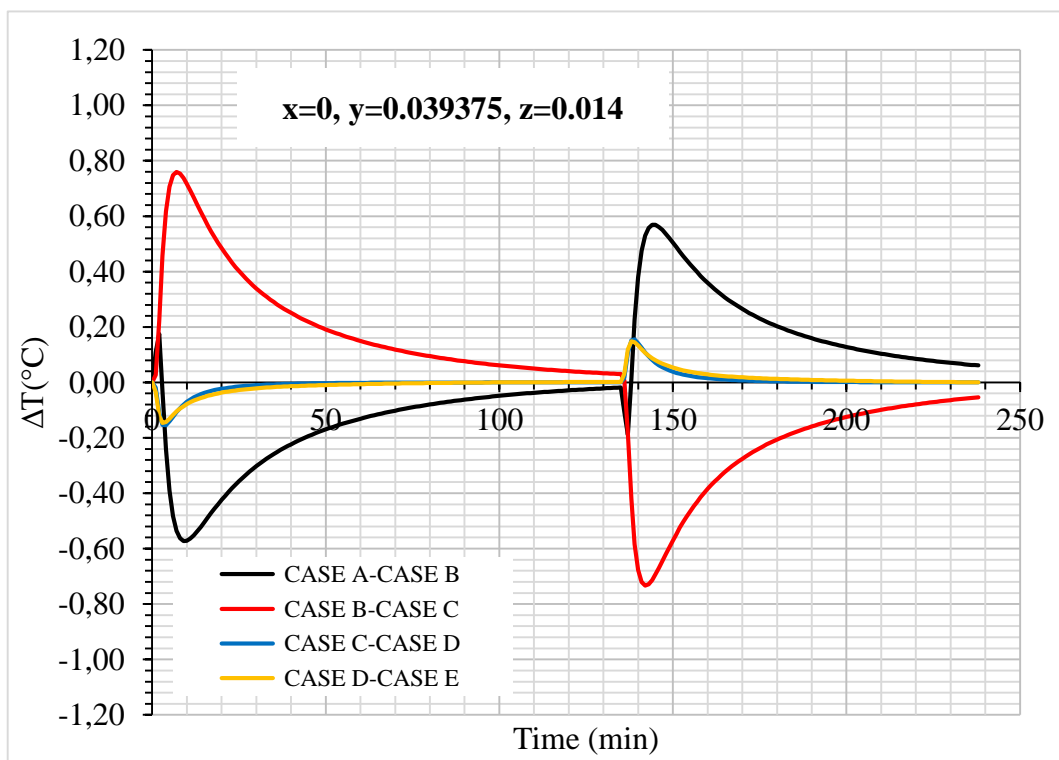
Σχήμα 25. Διαφορά θερμοκρασίας στο σημείο B και για τα πέντε πλέγματα της μεταλλικής κονσέρβας με κενό με χρονικό βήμα 5s και κριτήριο σύγκλισης 10^{-9} .



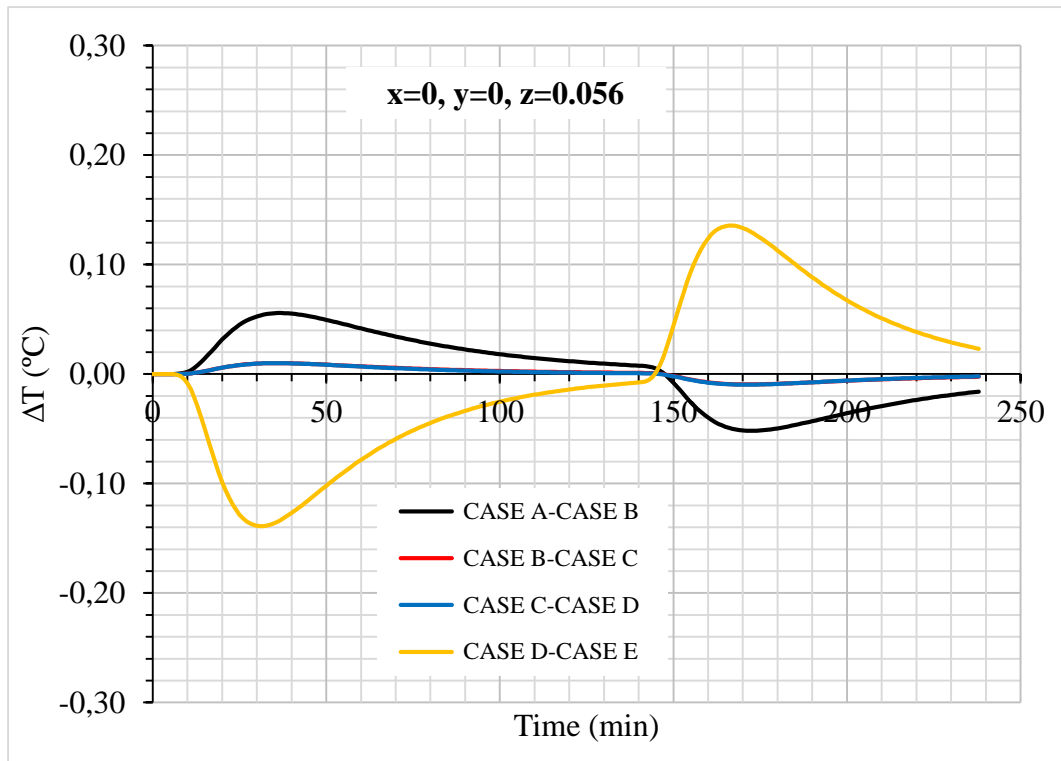
Σχήμα 26. Διαφορά θερμοκρασία στο σημείο C και για τα πέντε πλέγματα της μεταλλικής κονσέρβας με κενό με χρονικό βήμα 5s και κριτήριο σύγκλισης 10^{-9} .



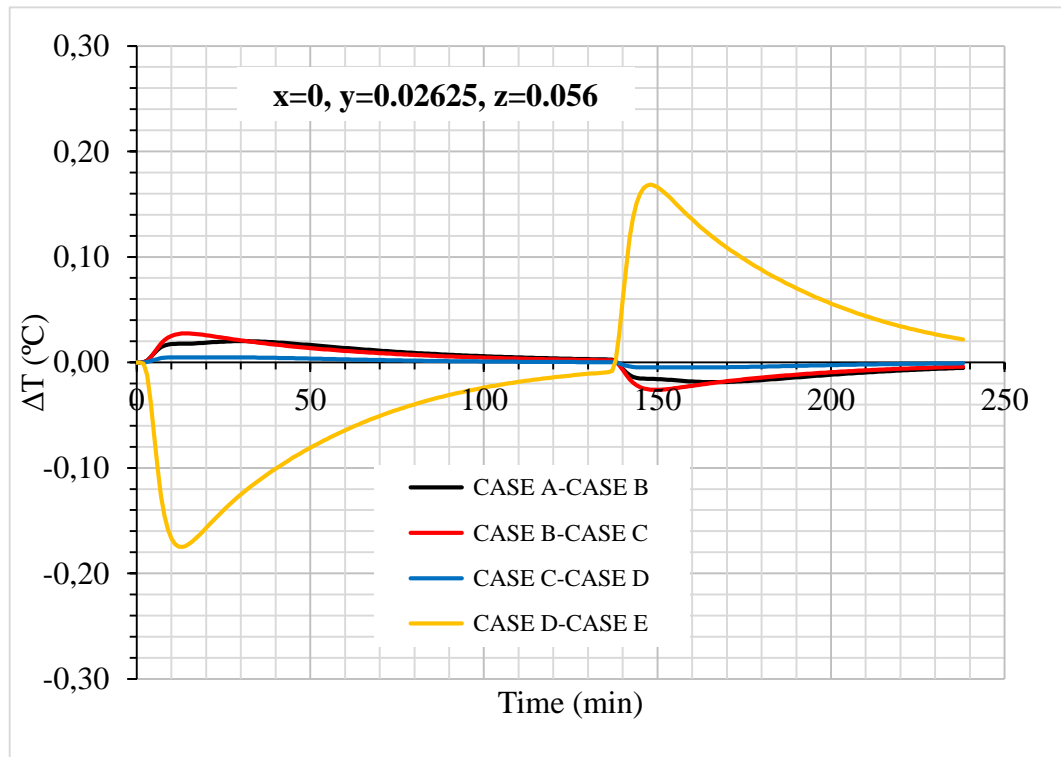
Σχήμα 27. Διαφορά θερμοκρασία στο σημείο E και για τα πέντε πλέγματα της μεταλλικής κονσέρβας με κενό με χρονικό βήμα 5s και κριτήριο σύγκλισης 10^{-9} .



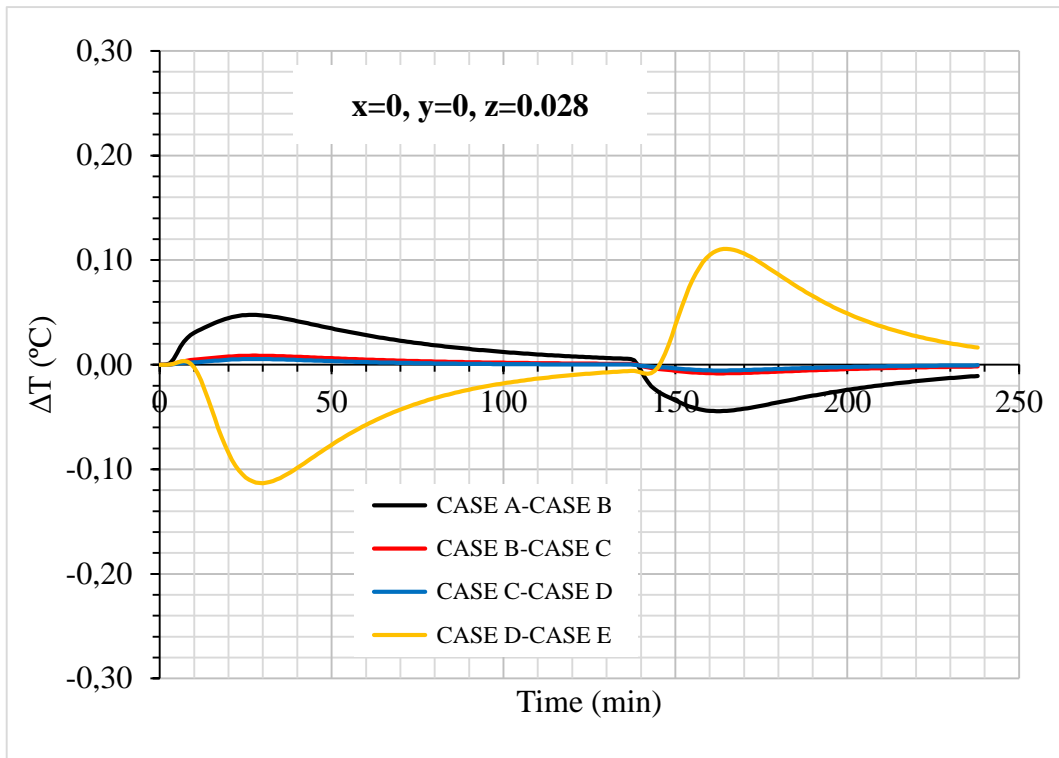
Σχήμα 28. Διαφορά θερμοκρασία στο σημείο G και για τα πέντε πλέγματα της μεταλλικής κονσέρβας με κενό με χρονικό βήμα 5s και κριτήριο σύγκλισης 10^{-9} .



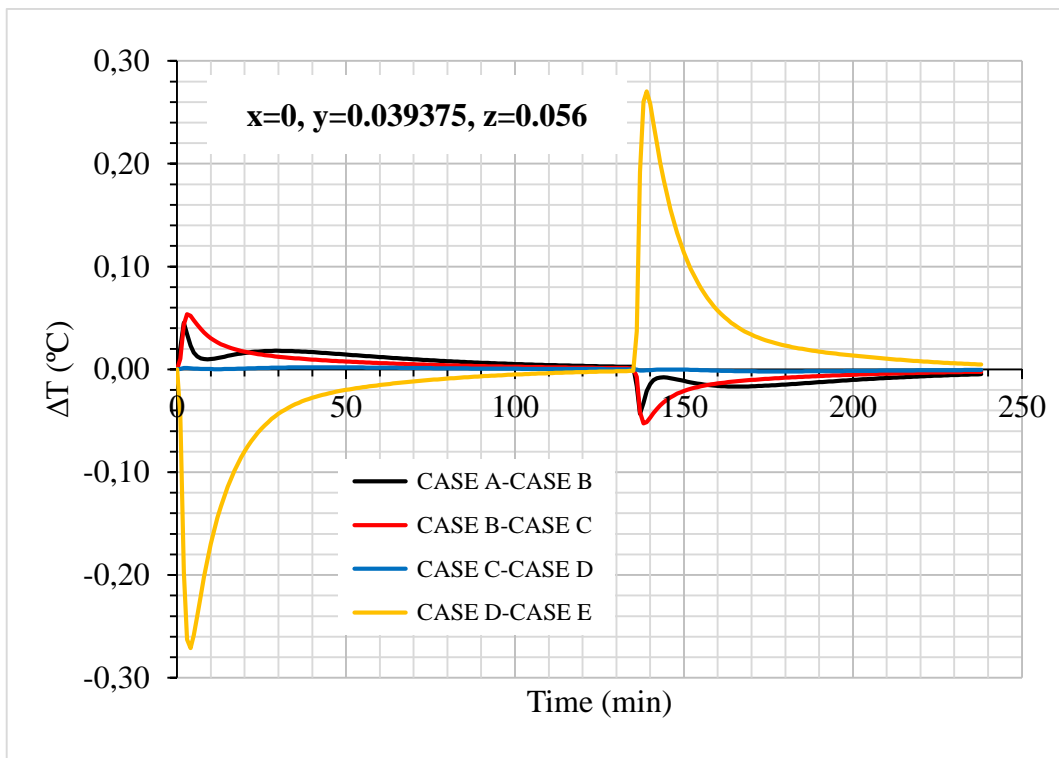
Σχήμα 29. Διαφορά θερμοκρασία στο σημείο A και για τα πέντε πλέγματα της μεταλλικής κονσέρβας χωρίς κενό με χρονικό βήμα 5s και κριτήριο σύγκλισης 10^{-9} .



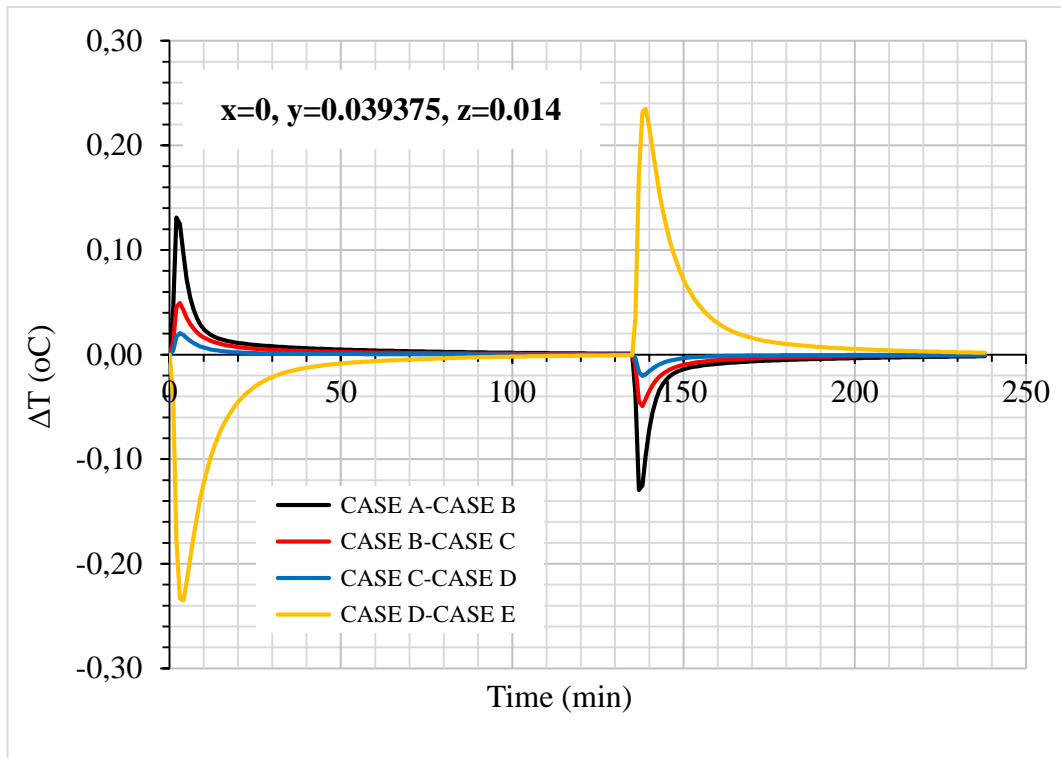
Σχήμα 30. Διαφορά θερμοκρασία στο σημείο B και για τα πέντε πλέγματα της μεταλλικής κονσέρβας χωρίς κενό με χρονικό βήμα 5s και κριτήριο σύγκλισης 10^{-9} .



Σχήμα 31. Διαφορά θερμοκρασία στο σημείο C και για τα πέντε πλέγματα της μεταλλικής κονσέρβας χωρίς κενό με χρονικό βήμα 5s και κριτήριο σύγκλισης 10^{-9} .



Σχήμα 32. Διαφορά θερμοκρασία στο σημείο E και για τα πέντε πλέγματα της μεταλλικής κονσέρβας χωρίς κενό με χρονικό βήμα 5s και κριτήριο σύγκλισης 10^{-9} .



Σχήμα 33. Διαφορά θερμοκρασία στο σημείο G και για τα πέντε πλέγματα της μεταλλικής κονσέρβας χωρίς κενό με χρονικό βήμα 5s και κριτήριο σύγκλισης 10^{-9} .

Με βάση τη σύγκριση της αναλυτικής με την αριθμητική λύση για την κονσέρβα χωρίς κενό και του απαιτούμενου CPU χρόνου (Πίνακας 12) και τη σύγκριση των διαφόρων πλεγμάτων για τις κονσέρβες με και χωρίς κενό, για την προσομοίωση τόσο της θερμικής επεξεργασίας όσο και της «πλήρωσης εν θερμώ» διεργασίας το πλέγμα που επιλέχτηκε είναι η περίπτωση C η οποία αποτελείται από 1974917 κελιά στην κονσέρβα με κενό και 1942250 κελιά στη κονσέρβα χωρίς κενό.

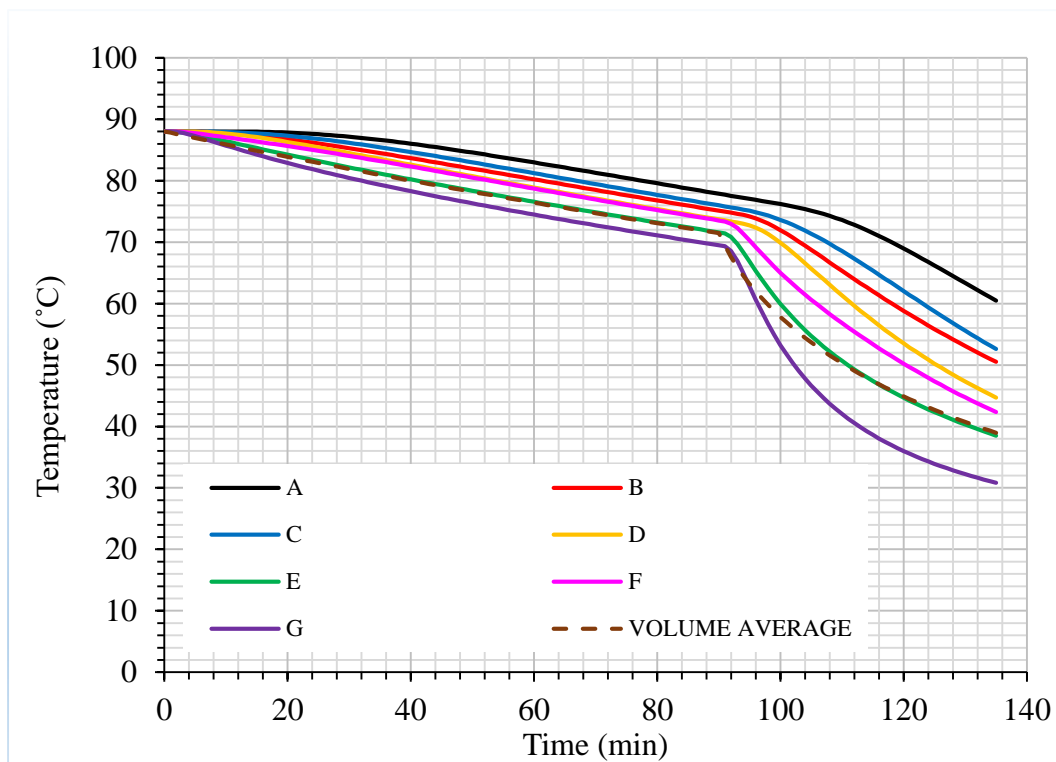
5.6 Επίλυση της «πλήρωσης εν θερμώ» διεργασίας

Αφού έγινε ο σχεδιασμός της γεωμετρίας, η επιλογή του πλέγματος και των αρχικών και οριακών συνθηκών έγινε η επίλυση του προβλήματος και αξιολογήθηκε η «πλήρωση εν θερμώ» διεργασία. Για την αξιολόγηση της διεργασίας στο τοματοπολτό εξετάστηκε η επίδραση της θερμοκρασίας γεμίσματος T_{IT} του προϊόντος, η επίδραση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας του αέρα και η επίδραση του κενού στη μεταφορά θερμότητας.

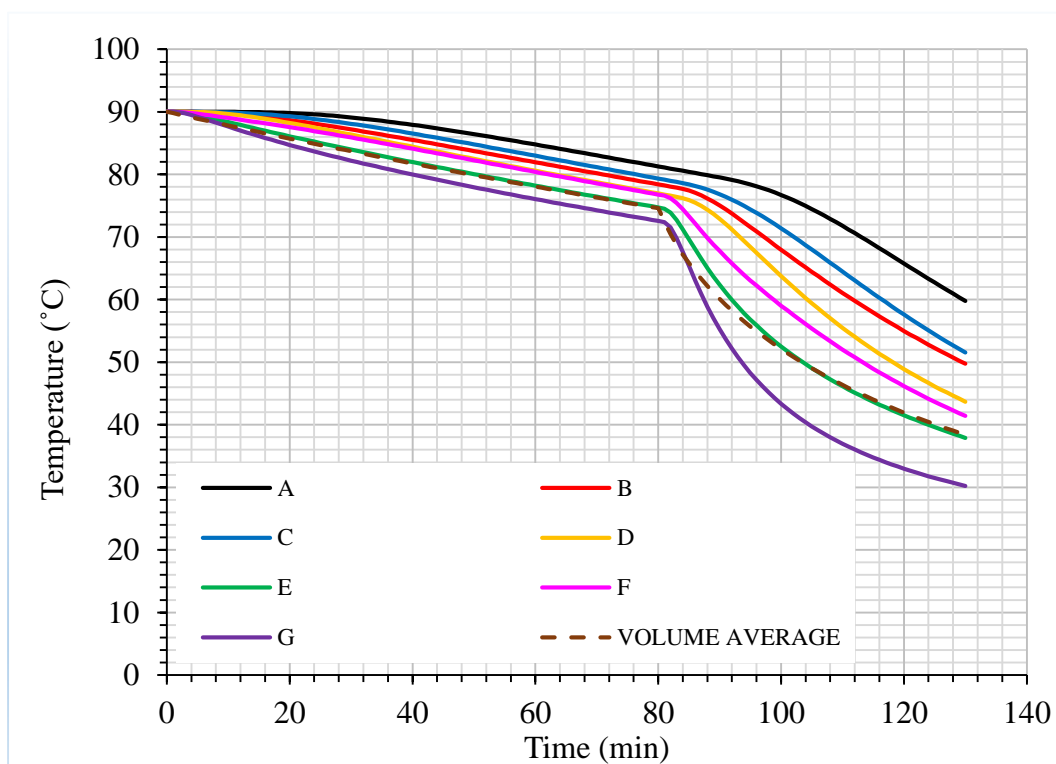
5.6.1 Επίδραση της θερμοκρασίας γεμίσματος T_{IT}

Εξετάστηκε η επίδραση της θερμοκρασίας γεμίσματος σε ένα εύρος θερμοκρασιών 10 μονάδων, 88-98°C και υπολογίστηκε για τη κάθε θερμοκρασία η κατανομή της θερμοκρασίας και η μέση θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου, η κατανομή των τιμών F και η ολοκληρωμένη τιμή F_s της διεργασίας, η κατανομή του % επιβίωσης του *B. coagulans*, N/N_0 και η % διατήρηση του χρώματος L και a/b , του ασκορβικού οξέος καθώς και των καροτενοειδών και για τις δύο περιπτώσεις με και χωρίς κενό μεταλλικές κονσέρβες.

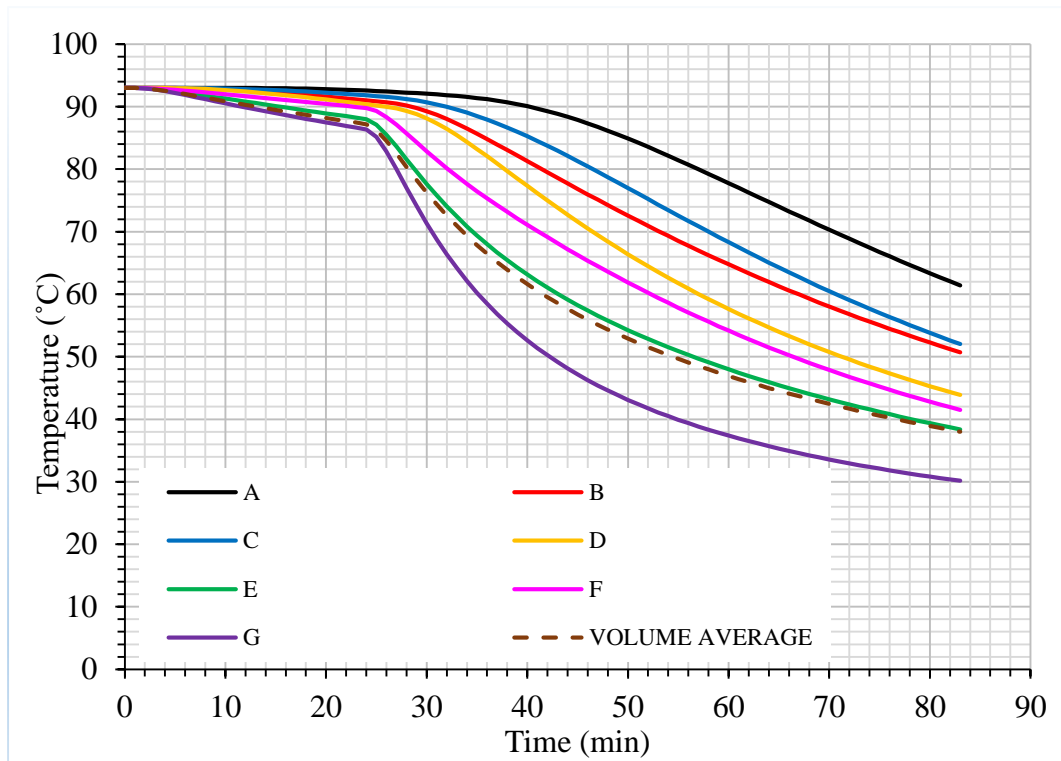
Στα Σχήματα 34-43 παρουσιάζονται η εξέλιξη της θερμοκρασίας στα διάφορα σημεία για όλες τις θερμοκρασίες που εξετάστηκαν για την περίπτωση της μεταλλικής κονσέρβας με κενό και χωρίς κενό αντίστοιχα. Αυτό που εμφανίζεται και στα δέκα αυτά σχήματα είναι ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία γεμίσματος του προϊόντος, μειώνεται ο χρόνος παραμονής τους προϊόντος στον αέρα ο οποίος υπολογίστηκε για τη κάθε θερμοκρασία γεμίσματος με βάση την επίτευξη της ολοκληρωμένης τιμής F_s . Επίσης παρουσιάζεται ποσοτικά ότι τα σημεία που είναι εσωτερικά και συγκεκριμένα κοντά στο γεωμετρικό κέντρο της κονσέρβας έχουν μεγαλύτερες θερμοκρασίες σε σχέση με τα σημεία τα οποία είναι επιφανειακά στην κονσέρβα.



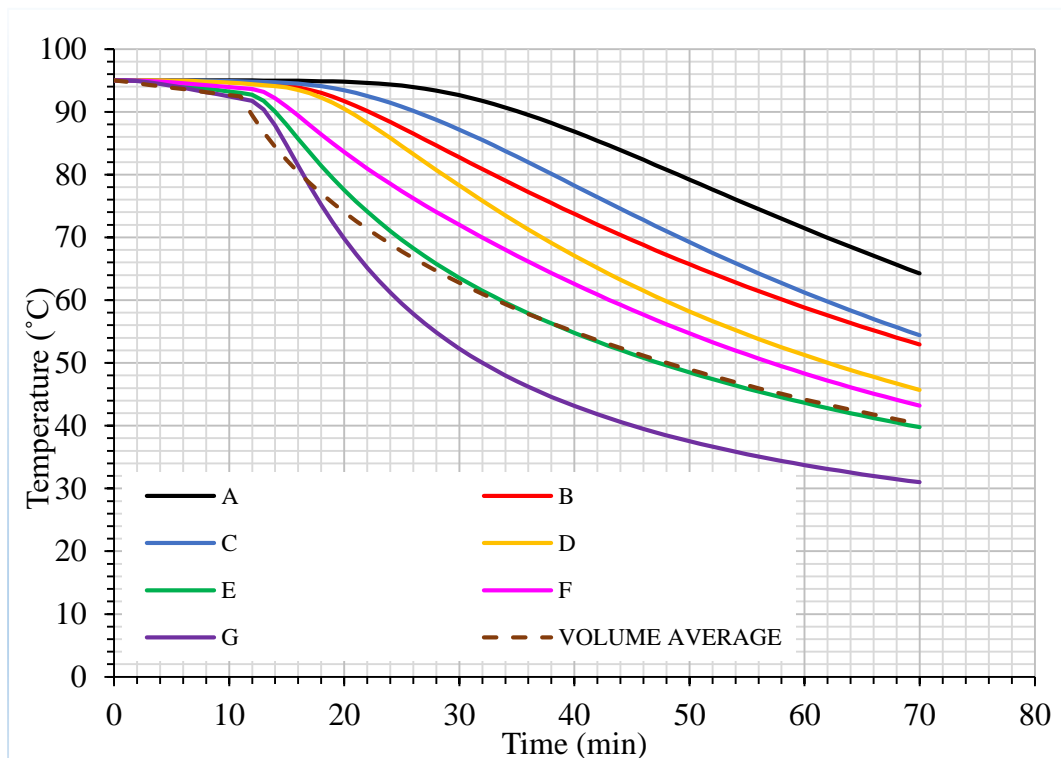
Σχήμα 34. Εξέλιξη της μέσης θερμοκρασίας και της θερμοκρασίας στα διάφορα σημεία του προϊόντος για $T_{IT}=88^{\circ}\text{C}$ για $h_{air}=5\text{ W/m}^2\text{K}$, $h_{cw}=100\text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{cw}=20^{\circ}\text{C}$ και $T_{air}=25^{\circ}\text{C}$ για τη μεταλλική κονσέρβα με κενό.



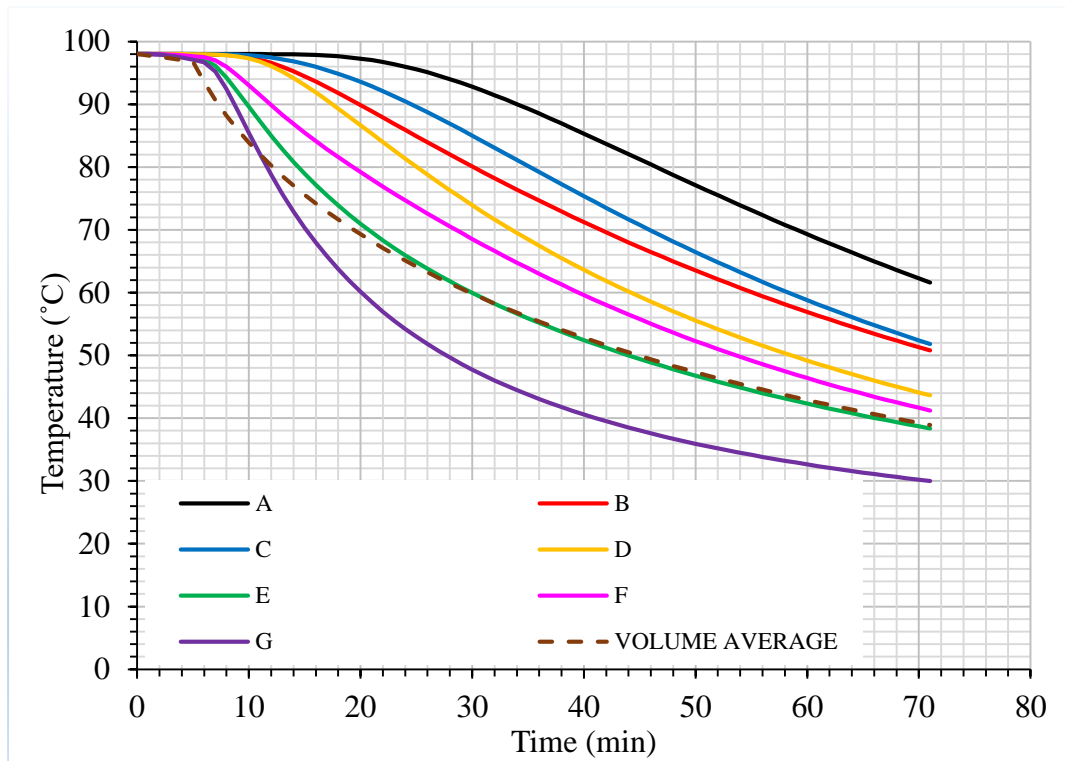
Σχήμα 35. Εξέλιξη της μέσης θερμοκρασίας και της θερμοκρασίας στα διάφορα σημεία του προϊόντος για $T_{IT}=90^{\circ}\text{C}$ για $h_{air}=5\text{ W/m}^2\text{K}$, $h_{cw}=100\text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{cw}=20^{\circ}\text{C}$ και $T_{air}=25^{\circ}\text{C}$ για τη μεταλλική κονσέρβα με κενό.



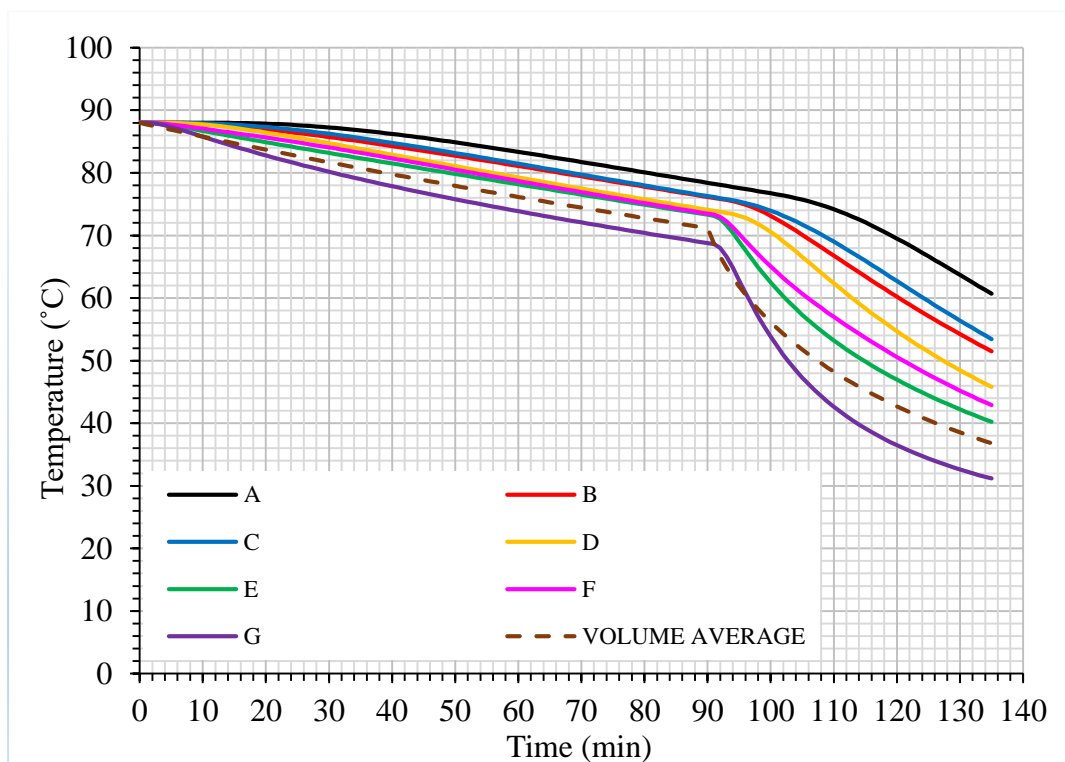
Σχήμα 36. Εξέλιξη της μέσης θερμοκρασίας και της θερμοκρασίας στα διάφορα σημεία του προϊόντος για $T_{IT}=93^{\circ}\text{C}$ για $h_{air}=5\text{ W/m}^2\text{K}$, $h_{CW}=100\text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{CW}=20^{\circ}\text{C}$ και $T_{air}=25^{\circ}\text{C}$ για τη μεταλλική κονσέρβα με κενό.



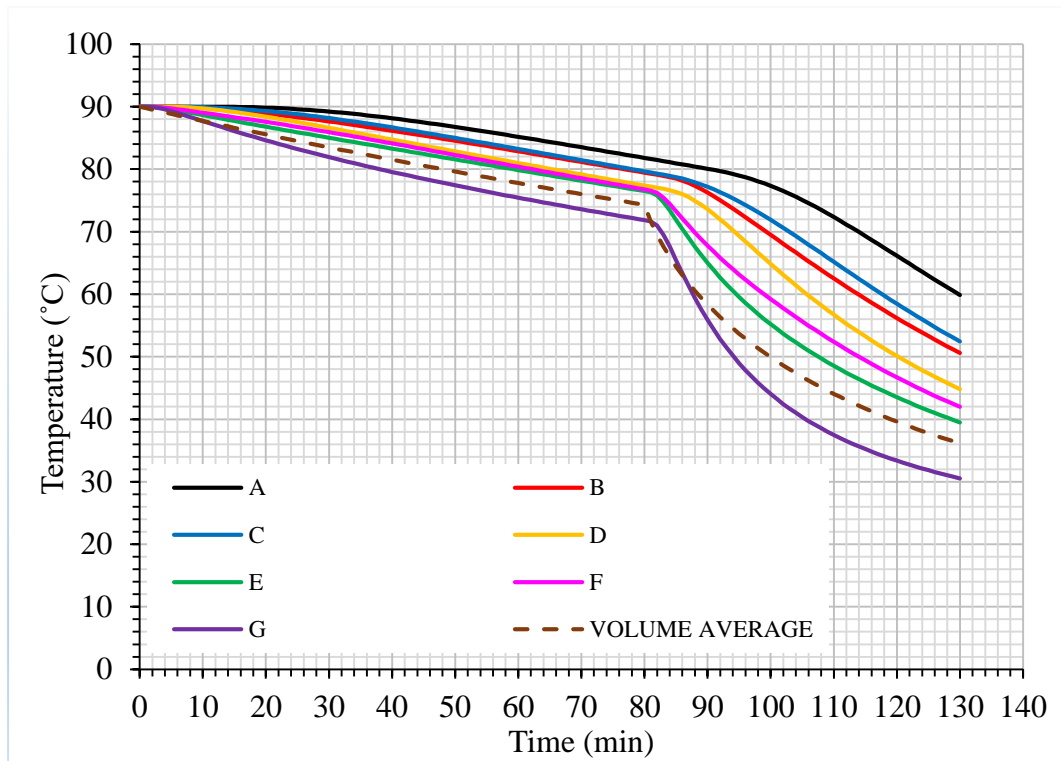
Σχήμα 37. Εξέλιξη της μέσης θερμοκρασίας και της θερμοκρασίας στα διάφορα σημεία του προϊόντος για $T_{IT}=95^{\circ}\text{C}$ για $h_{air}=5\text{ W/m}^2\text{K}$, $h_{CW}=100\text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{CW}=20^{\circ}\text{C}$ και $T_{air}=25^{\circ}\text{C}$ για τη μεταλλική κονσέρβα με κενό.



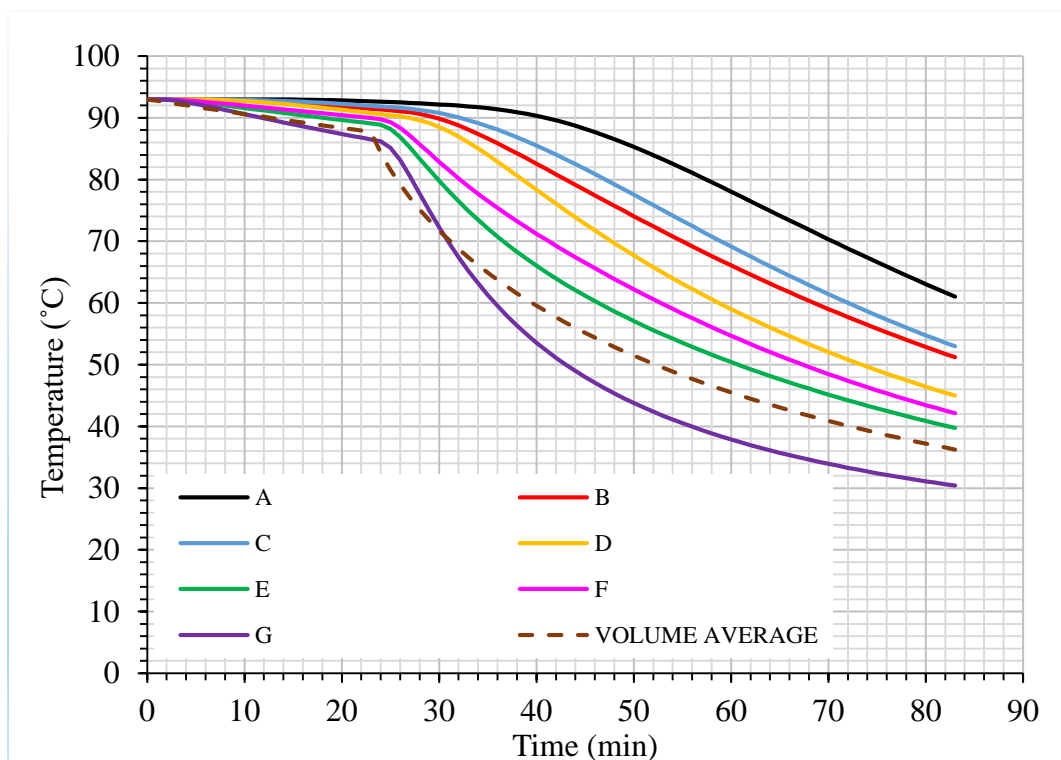
Σχήμα 38. Εξέλιξη της μέσης θερμοκρασίας και της θερμοκρασίας στα διάφορα σημεία του προϊόντος για $T_{IT}=98^{\circ}\text{C}$ για $h_{air}=5\text{ W/m}^2\text{K}$, $h_{CW}=100\text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{CW}=20^{\circ}\text{C}$ και $T_{air}=25^{\circ}\text{C}$ για τη μεταλλική κονσέρβα με κενό.



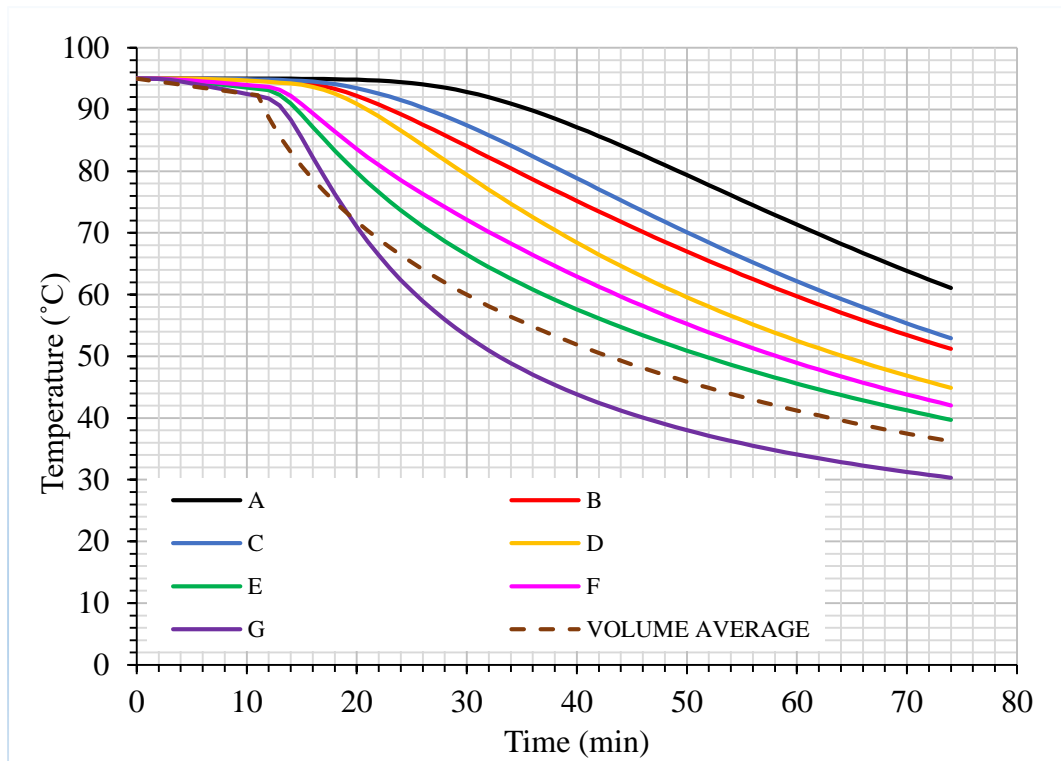
Σχήμα 39. Εξέλιξη της μέσης θερμοκρασίας και της θερμοκρασίας στα διάφορα σημεία του προϊόντος για $T_{IT}=88^{\circ}\text{C}$ για $h_{air}=5\text{ W/m}^2\text{K}$, $h_{CW}=100\text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{CW}=20^{\circ}\text{C}$ και $T_{air}=25^{\circ}\text{C}$ για τη μεταλλική κονσέρβα χωρίς κενό.



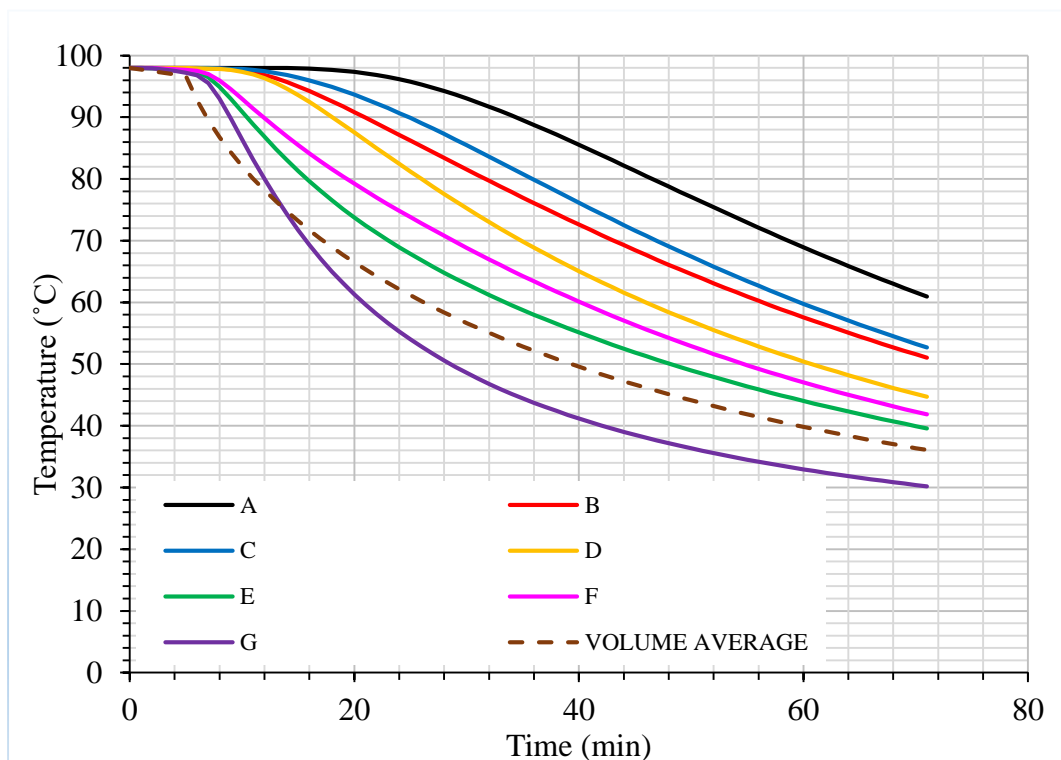
Σχήμα 40. Εξέλιξη της μέσης θερμοκρασίας και της θερμοκρασίας στα διάφορα σημεία του προϊόντος για $T_{IT}=90^{\circ}\text{C}$ για $h_{air}=5\text{ W/m}^2\text{K}$, $h_{CW}=100\text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{CW}=20^{\circ}\text{C}$ και $T_{air}=25^{\circ}\text{C}$ για τη μεταλλική κονσέρβα χωρίς κενό.



Σχήμα 41. Εξέλιξη της μέσης θερμοκρασίας και της θερμοκρασίας στα διάφορα σημεία του προϊόντος για $T_{IT}=93^{\circ}\text{C}$ για $h_{air}=5\text{ W/m}^2\text{K}$, $h_{CW}=100\text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{CW}=20^{\circ}\text{C}$ και $T_{air}=25^{\circ}\text{C}$ για τη μεταλλική κονσέρβα χωρίς κενό.

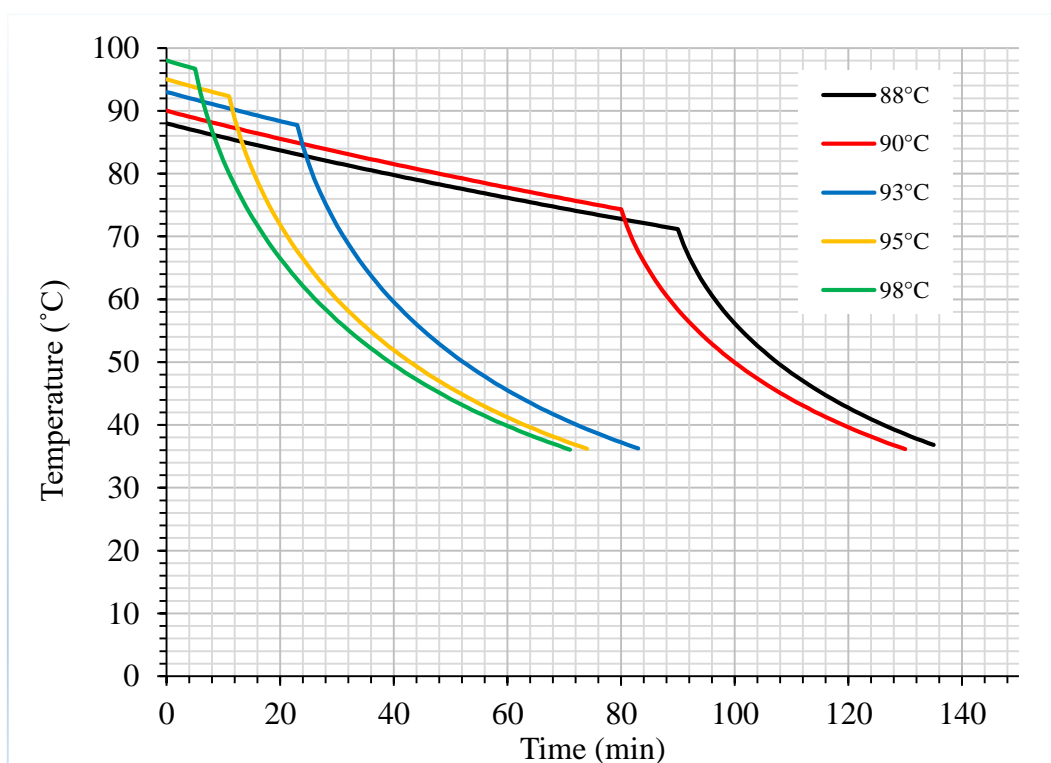


Σχήμα 42. Εξέλιξη της μέσης θερμοκρασίας και της θερμοκρασίας στα διάφορα σημεία του προϊόντος για $T_{IT}=95^{\circ}\text{C}$ για $h_{air}=5\text{ W/m}^2\text{K}$, $h_{CW}=100\text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{CW}=20^{\circ}\text{C}$ και $T_{air}=25^{\circ}\text{C}$ για τη μεταλλική κονσέρβα χωρίς κενό.

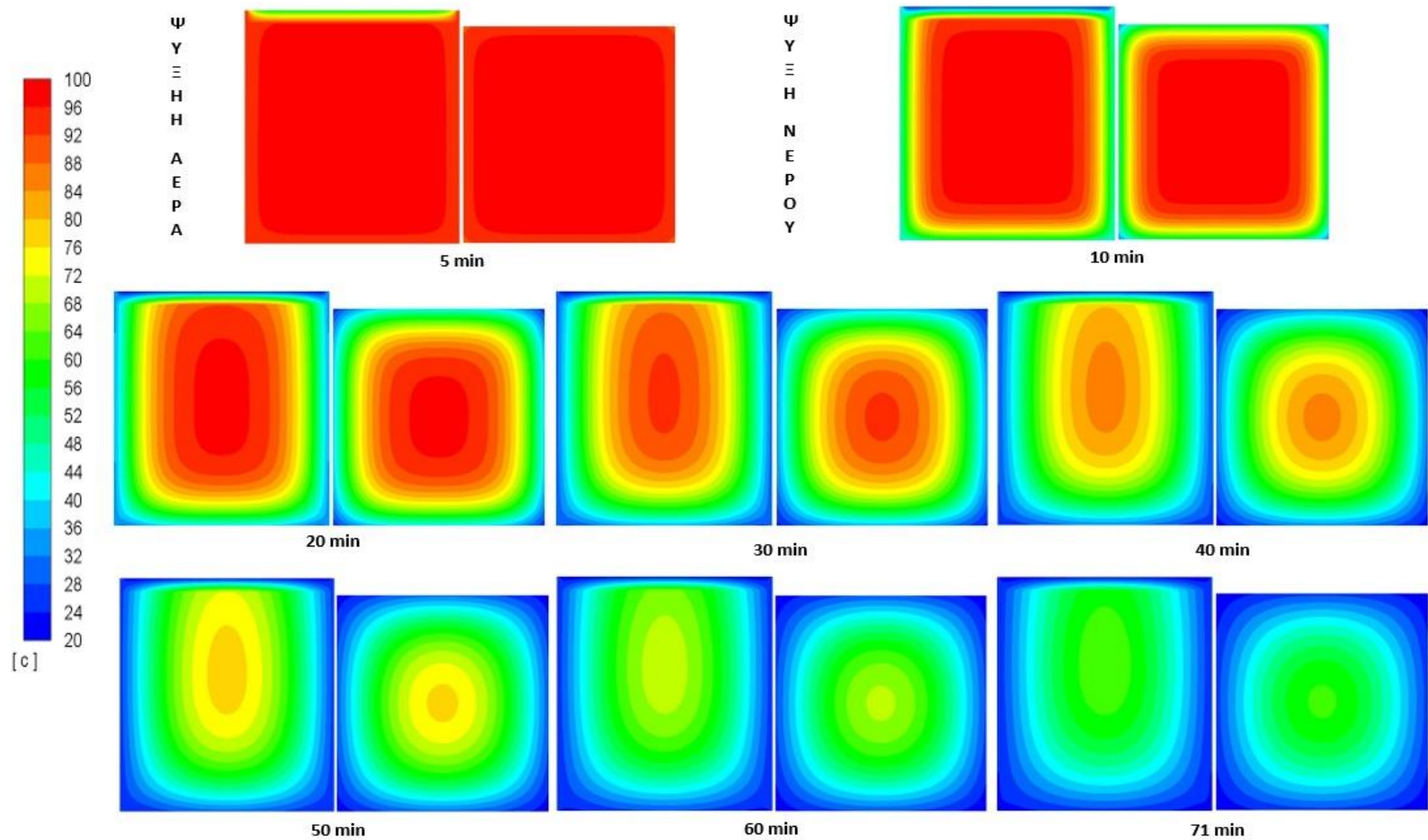


Σχήμα 43. Εξέλιξη της μέσης θερμοκρασίας και της θερμοκρασίας στα διάφορα σημεία του προϊόντος για $T_{IT}=98^{\circ}\text{C}$ για $h_{air}=5\text{ W/m}^2\text{K}$, $h_{CW}=100\text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{CW}=20^{\circ}\text{C}$ και $T_{air}=25^{\circ}\text{C}$ για τη μεταλλική κονσέρβα χωρίς κενό.

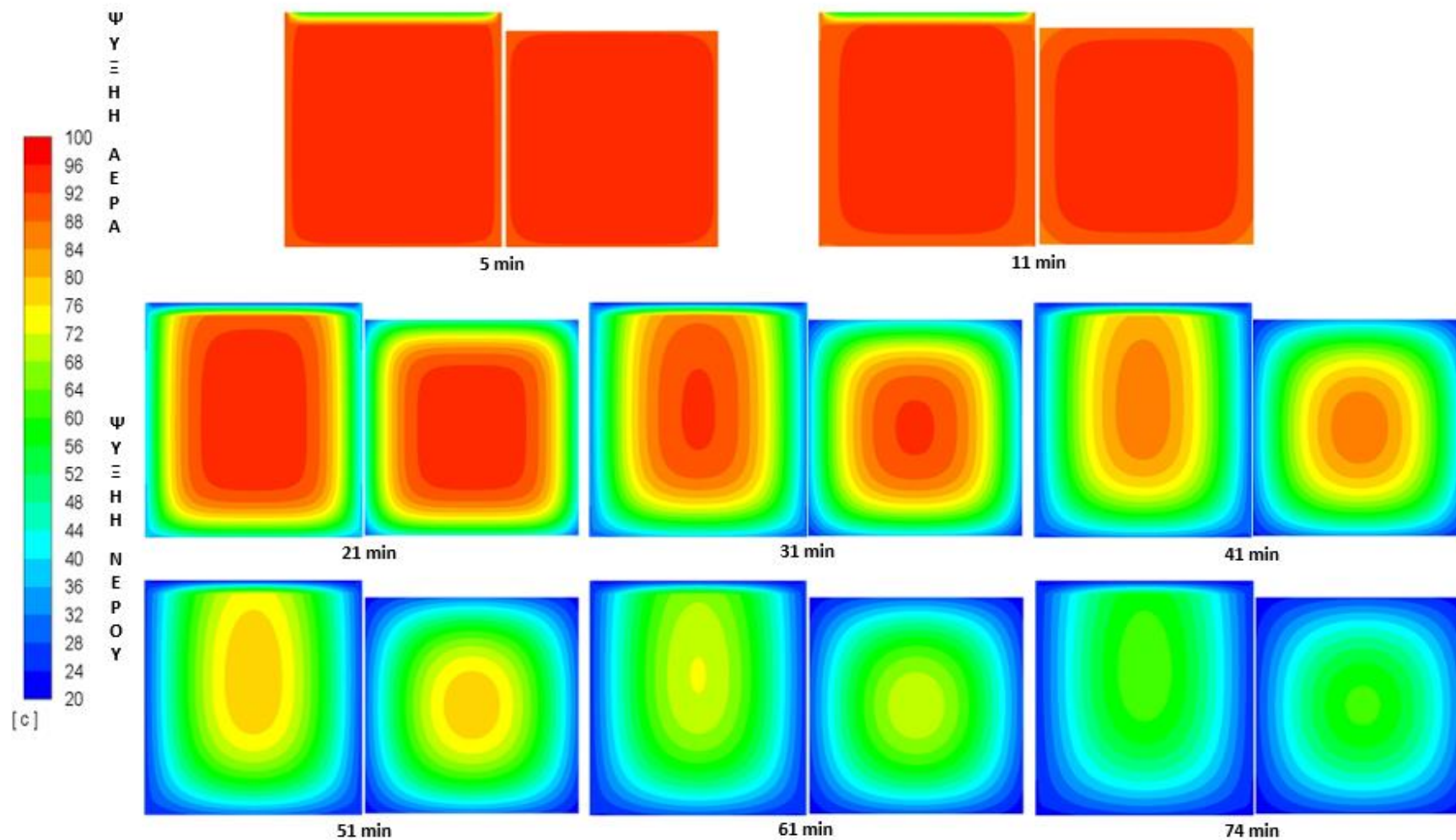
Στο Σχήμα 44 παρουσιάζεται η εξέλιξη της μέσης θερμοκρασίας του προϊόντος για όλες τις θερμοκρασίες γεμίσματος στην περίπτωση της μεταλλικής κονσέρβας με κενό συναρτήσει του χρόνου και αυτό που συμπεραίνεται είναι ότι όσο πιο υψηλή είναι η θερμοκρασία γεμίσματος τόσο πιο μικρός είναι ο χρόνος παραμονής στον αέρα που απαιτείται για την επίτευξη της ολοκληρωμένης τιμής F_s . Στα Σχήματα, 45, 46, 47 και 48 για τις θερμοκρασίες 98°C, 95°C και 93°C, 90°C και 88°C. Η χρωματική κατανομή εσωτερικά περιγράφει τις υψηλές θερμοκρασίες του προϊόντος (κόκκινο χρώμα) και όσο πάμε προς τα έξω τις χαμηλές θερμοκρασίες του προϊόντος (μπλε χρώμα). Το ίδιο ισχύει και για τα ακόλουθα σχήματα. Αυτό που εμφανίζεται είναι ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία γεμίσματος κατά τη διάρκεια της ψύξης με αέρα ο χρόνος που απαιτείται είναι πολύ μικρός έτσι ώστε να επιτευχθεί η τιμή $F_{93,33}^{8,89^\circ\text{C}}$. Επίσης στη κονσέρβα με κενό παρατηρούμε ότι η μεταφορά θερμότητας δεν είναι συμμετρική λόγω της ύπαρξης υδρατμών οι οποίοι εμποδίζουν την μεταφορά θερμότητας. Το ίδιο παρατηρείται και στις άλλες θερμοκρασίες γεμίσματος. Τα Σχήματα 48 και 49 είναι διαφορετικής μορφής για τους 90°C και 88°C γιατί όσο και να το ψύχω στον αέρα το προϊόν σε αυτές τις θερμοκρασίες δεν επιτυγχάνεται η τιμή παστερίωσης.



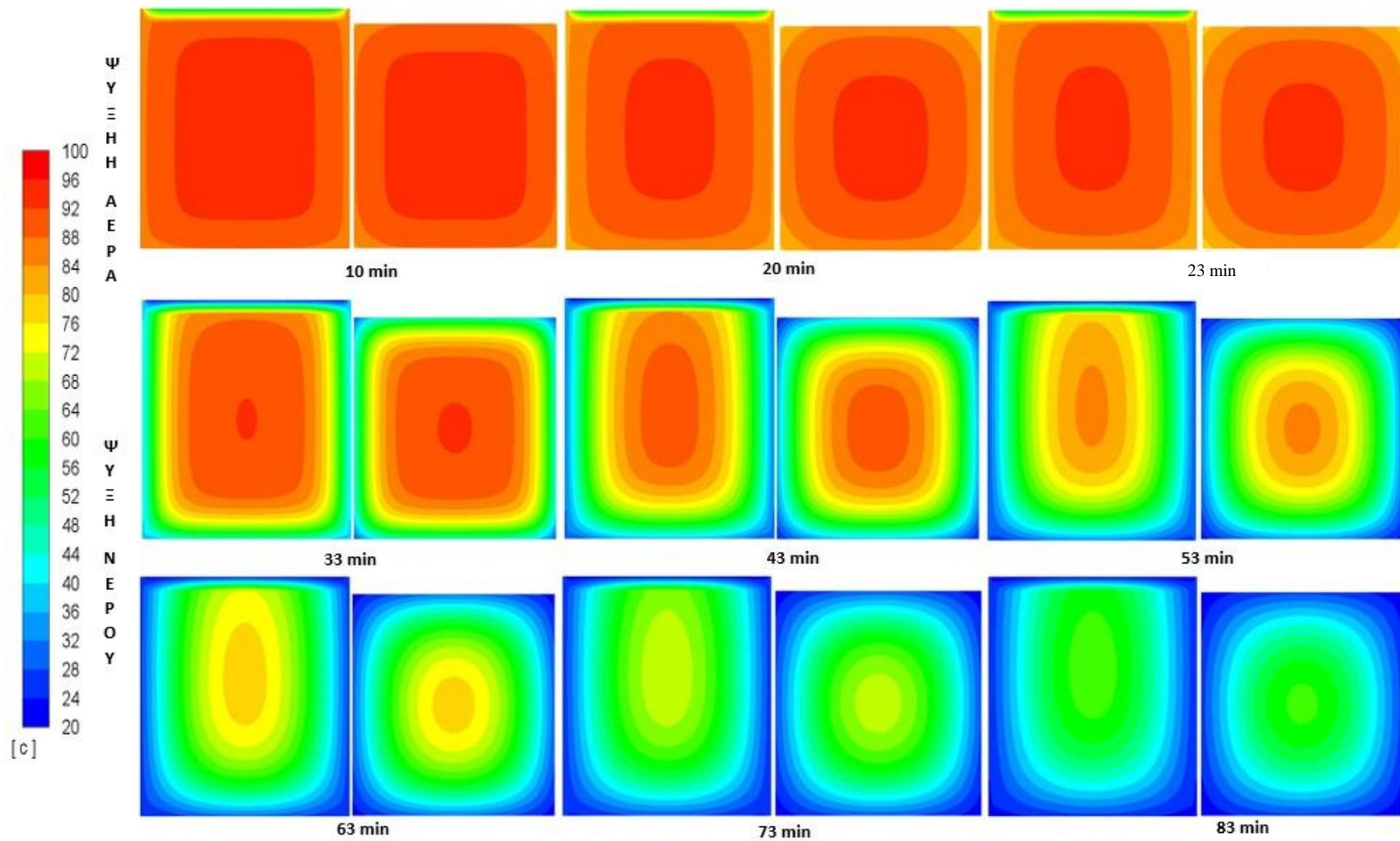
Σχήμα 44. Εξέλιξη της μέσης θερμοκρασίας για όλες τις θερμοκρασίες γεμίσματος για $h_{air}=5 \text{ W/m}^2\text{K}$, $h_{cw}=100 \text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{cw}=20^\circ\text{C}$ και $T_{air}=25^\circ\text{C}$ στην μεταλλική κονσέρβα με κενό.



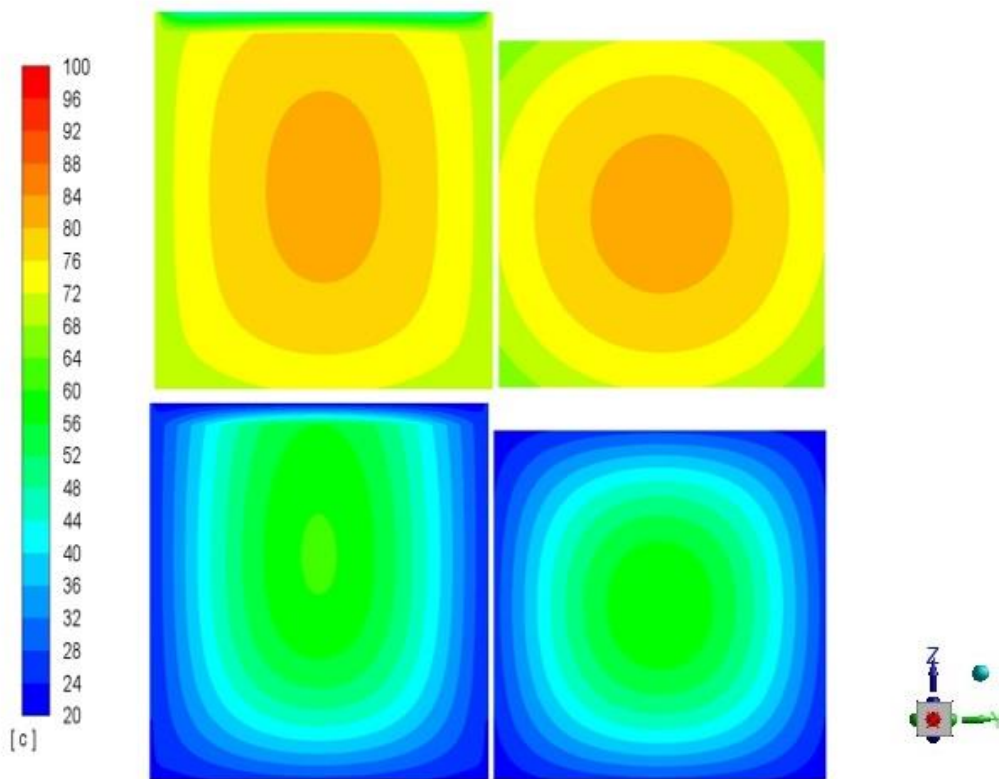
Σχήμα 45. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας για $T_{IT}= 98^{\circ}\text{C}$ στις κονσέρβες ανα ζεύγος (αριστερά κενό-δεξιά χωρίς κενό) στα 5 min τέλος ψύξης με αέρα και στα 10 min αρχή ψύξης με νερό για $h_{air}=5 \text{ W/m}^2\text{K}$, $h_{cw}=100 \text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{cw}=20^{\circ}\text{C}$ και $T_{air}=25^{\circ}\text{C}$.



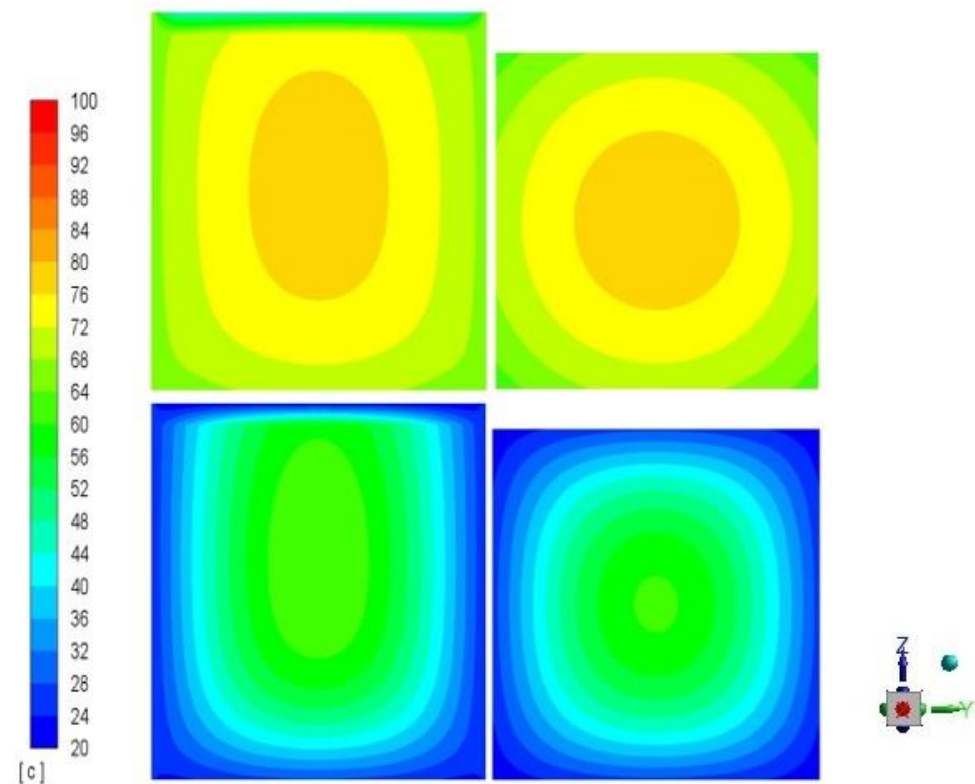
Σχήμα 46 Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας για $T_{\Gamma\Gamma} = 95^{\circ}\text{C}$ στις κονσέρβες ανα ζεύγος (αριστερά κενό-δεξιά χωρίς κενό) στα 11 min τέλος ψύξης με αέρα και στα 21 min αρχή ψύξης με νερό για $h_{\text{air}} = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$, $h_{\text{cw}} = 100 \text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{\text{cw}} = 20^{\circ}\text{C}$ και $T_{\text{air}} = 25^{\circ}\text{C}$



Σχήμα 47. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας για $T_{IT}=93^{\circ}\text{C}$ στις κονσέρβες ανα ζεύγος (αριστερά κενό-δεξιά χωρίς κενό) στα 13 min τέλος ψύξης με αέρα και στα 23 min αρχή ψύξης με νερό για $h_{air}=5\text{ W/m}^2\text{K}$, $h_{cw}=100\text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{cw}=20^{\circ}\text{C}$ και $T_{air}=25^{\circ}\text{C}$



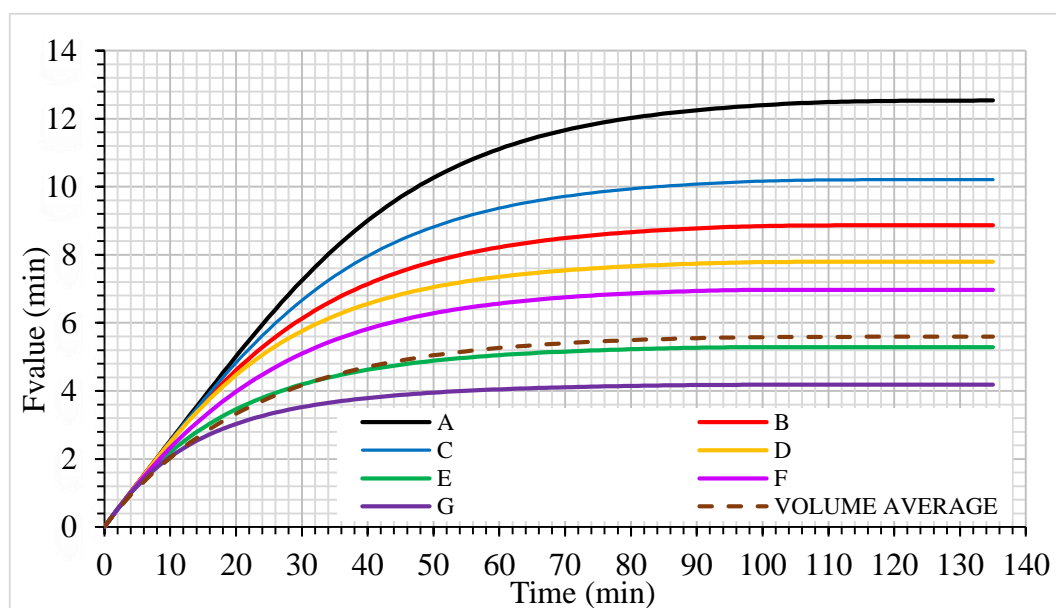
Σχήμα 48. Κατανομή της θερμοκρασίας στο τέλος της ψύξης με αέρα (πάνω) και στο τέλος της ψύξης με νερό (κάτω) για θερμοκρασία γεμίματος 90°C σε κονσέρβα με κενό (αριστερά) και χωρίς κενό (δεξιά) για $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, $h_{cw}=100 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, $T_{cw}=20^{\circ}\text{C}$ και $T_{air}=25^{\circ}\text{C}$.



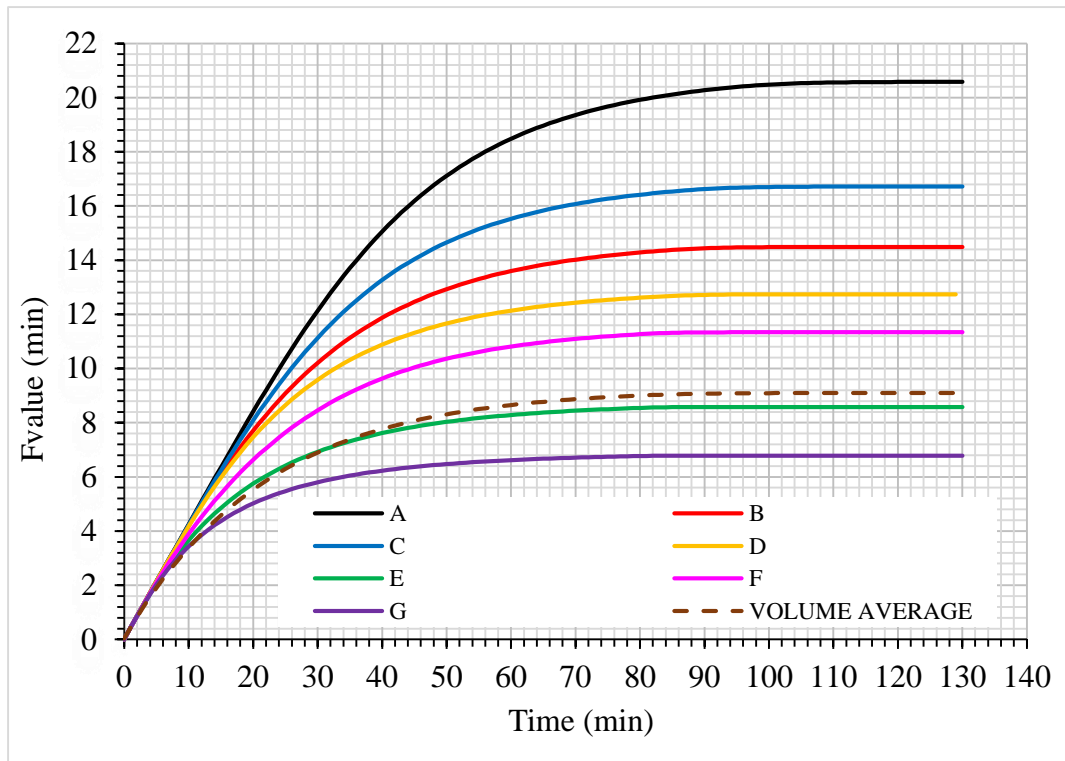
Σχήμα 49. Κατανομή της θερμοκρασίας στο τέλος της ψύξης με αέρα (πάνω) και στο τέλος της ψύξης με νερό (κάτω) για θερμοκρασία γεμίματος 88°C σε κονσέρβα με κενό (αριστερά) και χωρίς κενό (δεξιά) για $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, $h_{cw}=100 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, $T_{cw}=20^{\circ}\text{C}$ και $T_{air}=25^{\circ}\text{C}$.

Στα Σχήματα 50 έως 59 παρουσιάζεται η κατανομή των τιμών F στα διάφορα σημεία για όλες τις θερμοκρασίες που εξετάστηκαν για την περίπτωση της μεταλλικής κονσέρβας με κενό και χωρίς κενό αντίστοιχα. Μέσω των υπολογισμών αυτό που φαίνεται είναι ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία γεμίσματος του προϊόντος, μειώνεται ο χρόνος παραμονής του προϊόντος στη ψύξη με αέρα γιατί επιτυγχάνεται η τιμή $F_{93,33^{\circ}\text{C}}^{8,89^{\circ}\text{C}}$ της διεργασίας. Τα σημεία που είναι εσωτερικά κοντά στο γεωμετρικό κέντρο της κονσέρβας έχουν μεγαλύτερες τιμές F σε σχέση με τα σημεία τα οποία είναι επιφανειακά στη κονσέρβα. Στα Σχήματα 60 και 61 παρουσιάζεται η ολοκληρωμένη τιμή F_s της διεργασίας και για τις περιπτώσεις με κενό και χωρίς κενό που εξετάστηκαν, όπου παρατηρείται στην περίπτωση που η θερμοκρασία γεμίσματος είναι 88°C η μέση τιμή $F_{93,33^{\circ}\text{C}}^{8,89^{\circ}\text{C}}$ της διεργασίας υπολογίστηκε ίση προς 5,5 min και στους 90°C ίση προς 9 min στο τέλος της ψύξης με νερό, επομένως δεν επιτυγχάνεται η τιμή $F_{93,33^{\circ}\text{C}}^{8,89^{\circ}\text{C}}$ των 12,6 min παρόλο που η ψύξη με αέρα έγινε για μεγαλύτερους χρόνους.

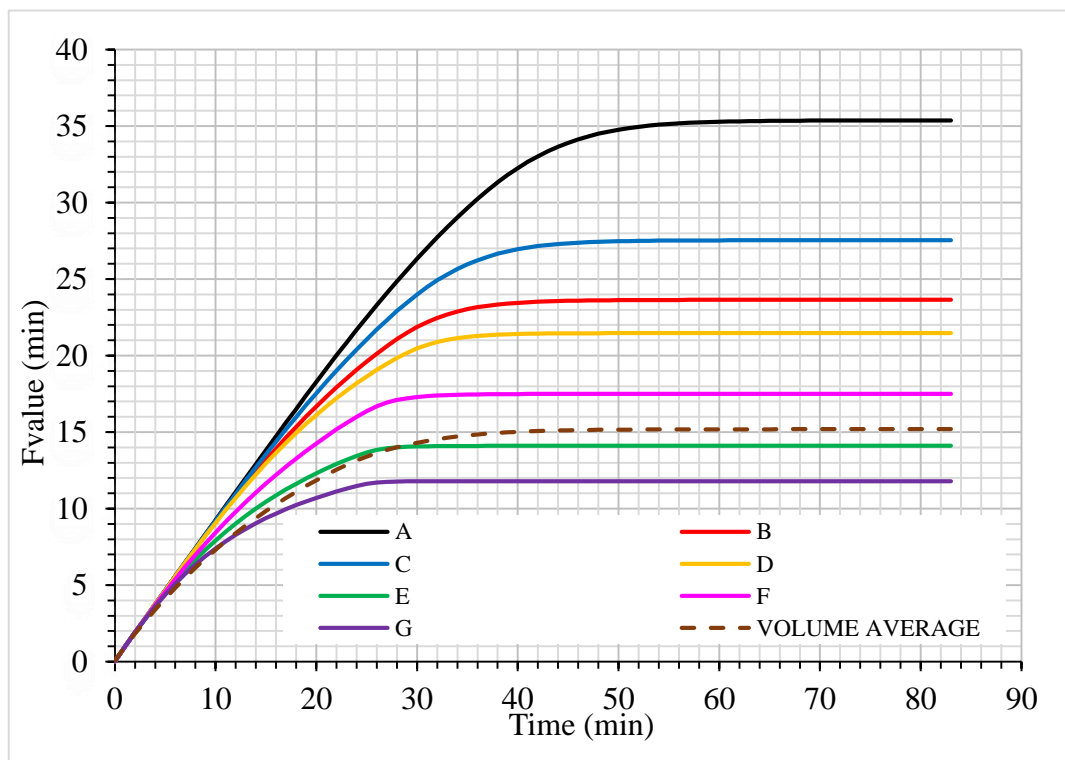
Αντίθετα όταν η θερμοκρασία γεμίσματος είναι 93°C η τιμή $F_{93,33^{\circ}\text{C}}^{8,89^{\circ}\text{C}}$ της διεργασίας υπολογίστηκε ίση προς 12,85 min, στους 95°C ίση προς 13,93 min και στους 98°C ίση προς 14,96 min στο τέλος της ψύξης με αέρα, επομένως επιτυγχάνεται η τιμή $F_{93,33^{\circ}\text{C}}^{8,89^{\circ}\text{C}}$ των 12,6 min σε μικρότερους χρόνους ψύξης με αέρα. Ακολούθησε η ψύξη με νερό αφού επιτεύχθηκε η τιμή F , έτσι ώστε το προϊόν να φτάσει τους 35°C . Κατά τη διάρκεια της ψύξης με νερό η τιμή της παστερίωσης αυξανόταν. Όσο μεγαλύτερη ήταν η θερμοκρασία γεμίσματος τόσο πιο μεγάλη ήταν η θανάτωση στο τέλος της ψύξης με νερό.



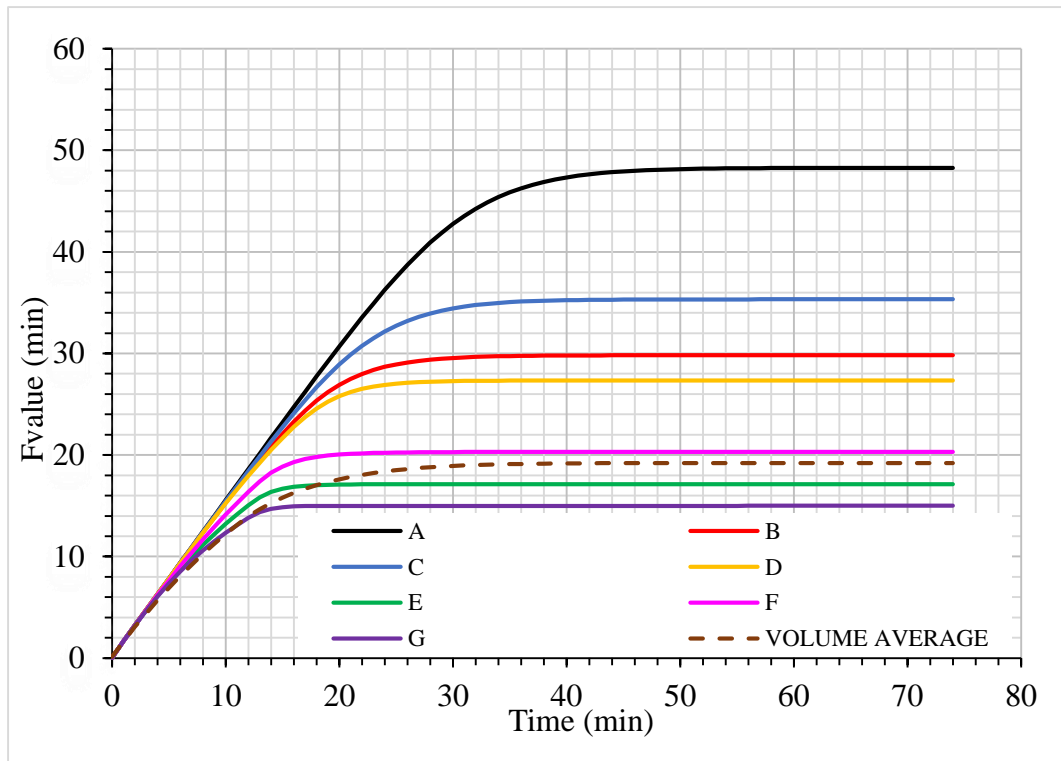
Σχήμα 50. Η μέση τιμή $F_{93,33^{\circ}\text{C}}^{8,89^{\circ}\text{C}}$ της διεργασίας και η αντίστοιχη τιμή F στα διάφορα σημεία για $T_{IT} = 88^{\circ}\text{C}$ για $h_{\text{air}} = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$, $h_{\text{cw}} = 100 \text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{\text{cw}} = 20^{\circ}\text{C}$ και $T_{\text{air}} = 25^{\circ}\text{C}$ για τη μεταλλική κονσέρβα με κενό.



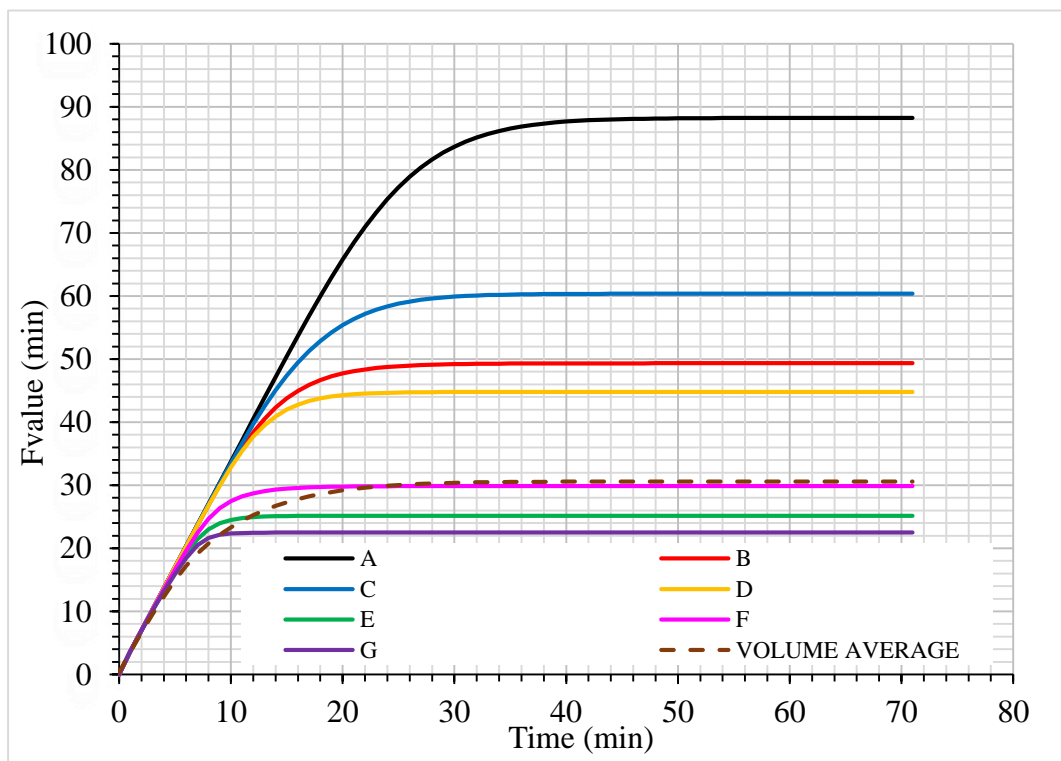
Σχήμα 51. Η μέση τιμή $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}}$ της διεργασίας και η αντίστοιχη τιμή F στα διάφορα σημεία για $T_{IT}=90^{\circ}\text{C}$ για $h_{\text{air}}=5\text{ W/m}^2\text{K}$, $h_{\text{CW}}=100\text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{\text{CW}}=20^{\circ}\text{C}$ και $T_{\text{air}}=25^{\circ}\text{C}$ για τη μεταλλική κονσέρβα με κενό.



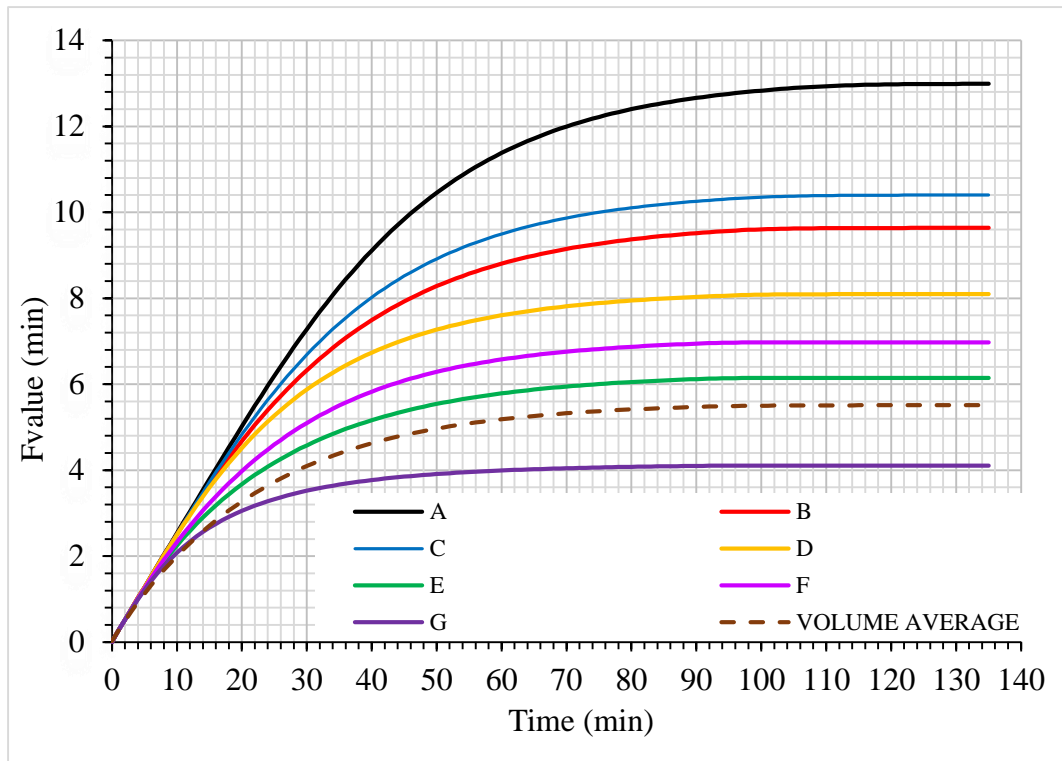
Σχήμα 52. Η μέση τιμή $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}}$ της διεργασίας και η αντίστοιχη τιμή F στα διάφορα σημεία για $T_{IT}=93^{\circ}\text{C}$ για $h_{\text{air}}=5\text{ W/m}^2\text{K}$, $h_{\text{CW}}=100\text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{\text{CW}}=20^{\circ}\text{C}$ και $T_{\text{air}}=25^{\circ}\text{C}$ για τη μεταλλική κονσέρβα με κενό.



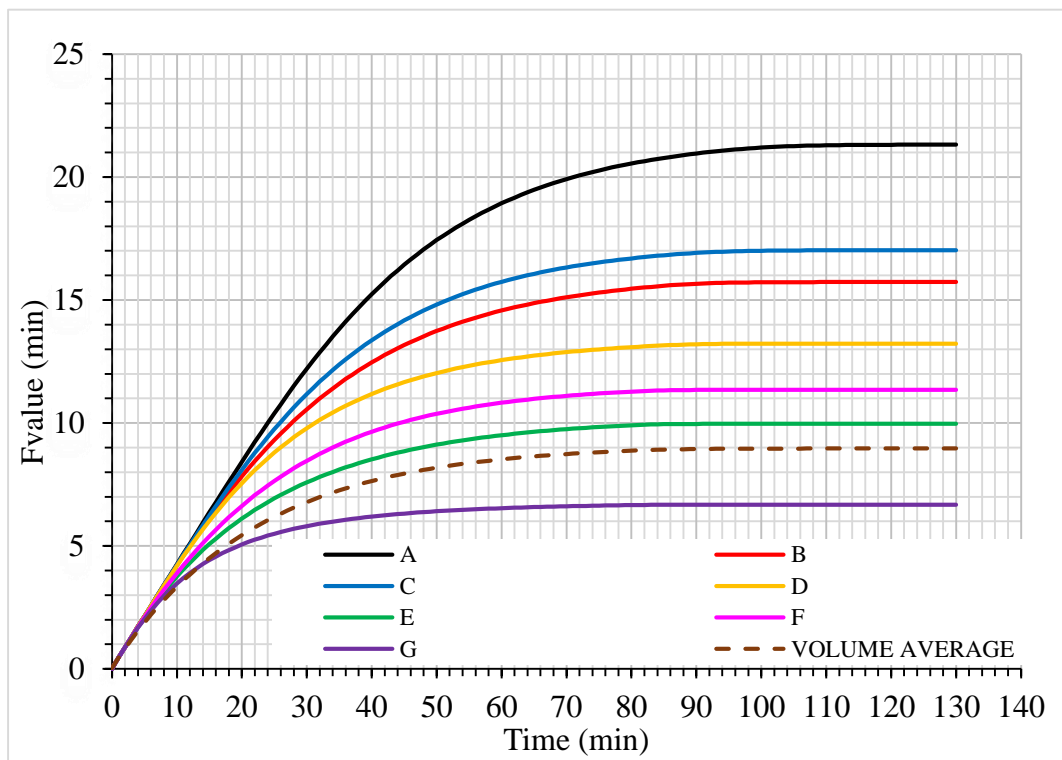
Σχήμα 53. Η μέση τιμή $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}}$ της διεργασίας και η αντίστοιχη τιμή F στα διάφορα σημεία για $T_{IT}=95^{\circ}\text{C}$ για $h_{\text{air}}=5\text{ W/m}^2\text{K}$, $h_{\text{cw}}=100\text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{\text{cw}}=20^{\circ}\text{C}$ και $T_{\text{air}}=25^{\circ}\text{C}$ για τη μεταλλική κονσέρβα με κενό.



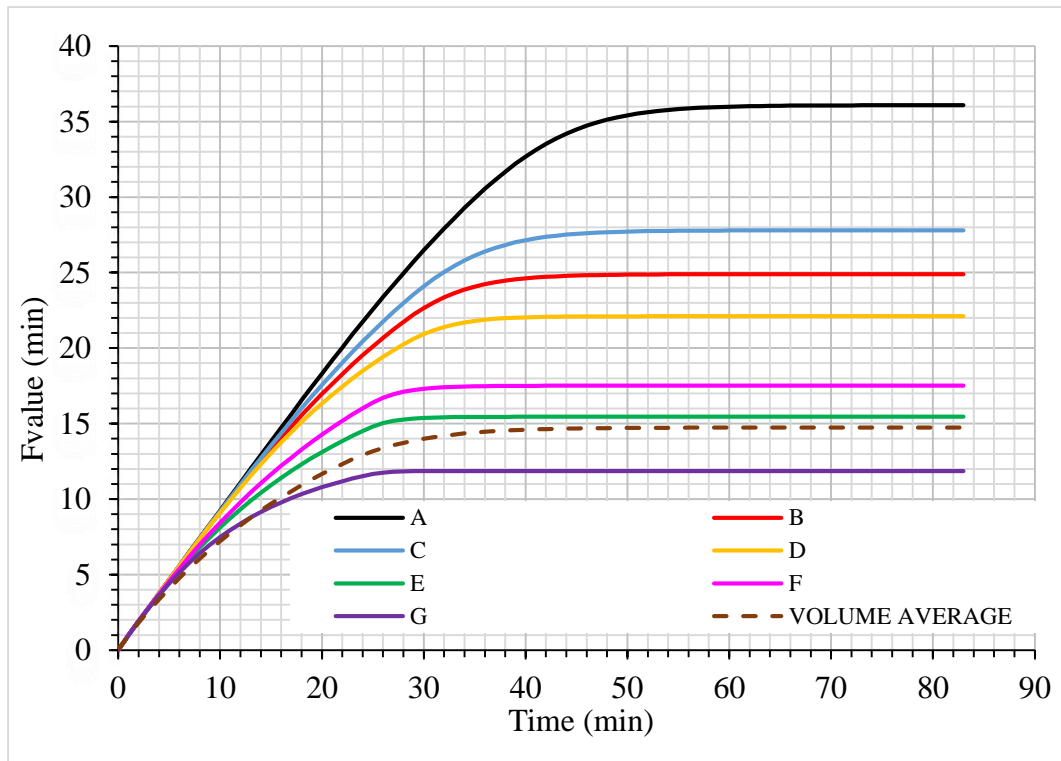
Σχήμα 54. Η μέση τιμή $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}}$ της διεργασίας και η αντίστοιχη τιμή F στα διάφορα σημεία για $T_{IT}=98^{\circ}\text{C}$ για $h_{\text{air}}=5\text{ W/m}^2\text{K}$, $h_{\text{cw}}=100\text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{\text{cw}}=20^{\circ}\text{C}$ και $T_{\text{air}}=25^{\circ}\text{C}$ για τη μεταλλική κονσέρβα με κενό.



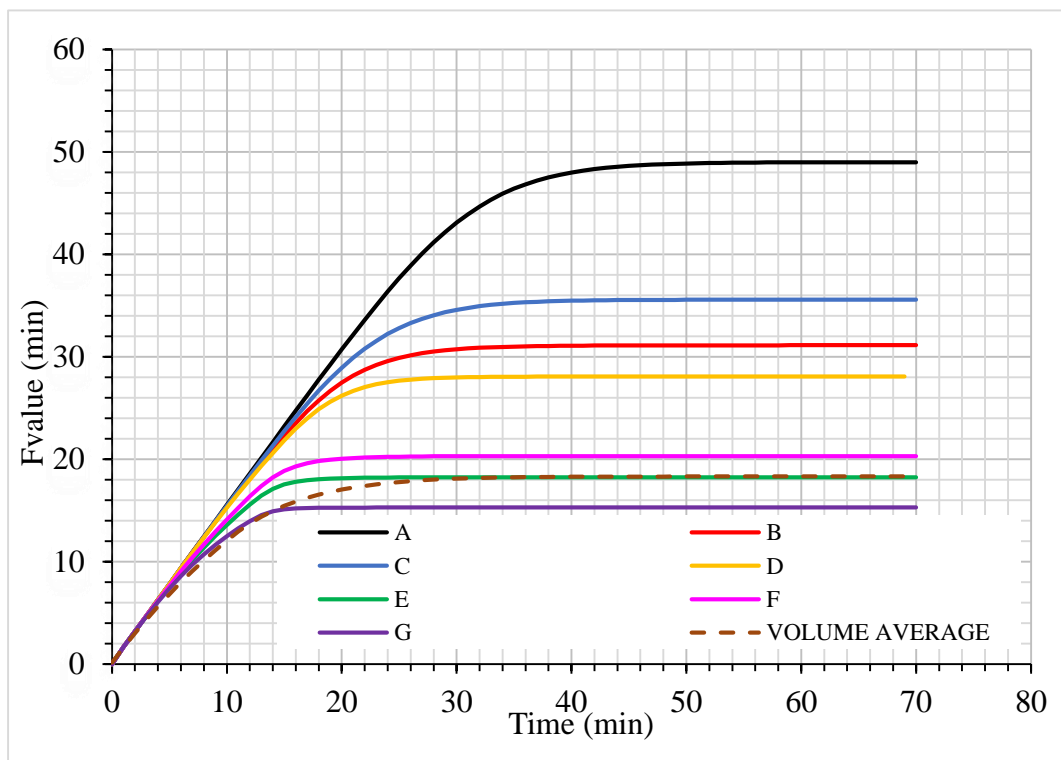
Σχήμα 55. Η μέση τιμή $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}}$ της διεργασίας και η αντίστοιχη τιμή F στα διάφορα σημεία για $T_{IT}= 88^{\circ}\text{C}$ για $h_{\text{air}}=5 \text{ W/m}^2\text{K}$, $h_{\text{cw}}=100 \text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{\text{cw}}=20^{\circ}\text{C}$ και $T_{\text{air}}=25^{\circ}\text{C}$ για τη μεταλλική κονσέρβα χωρίς κενό.



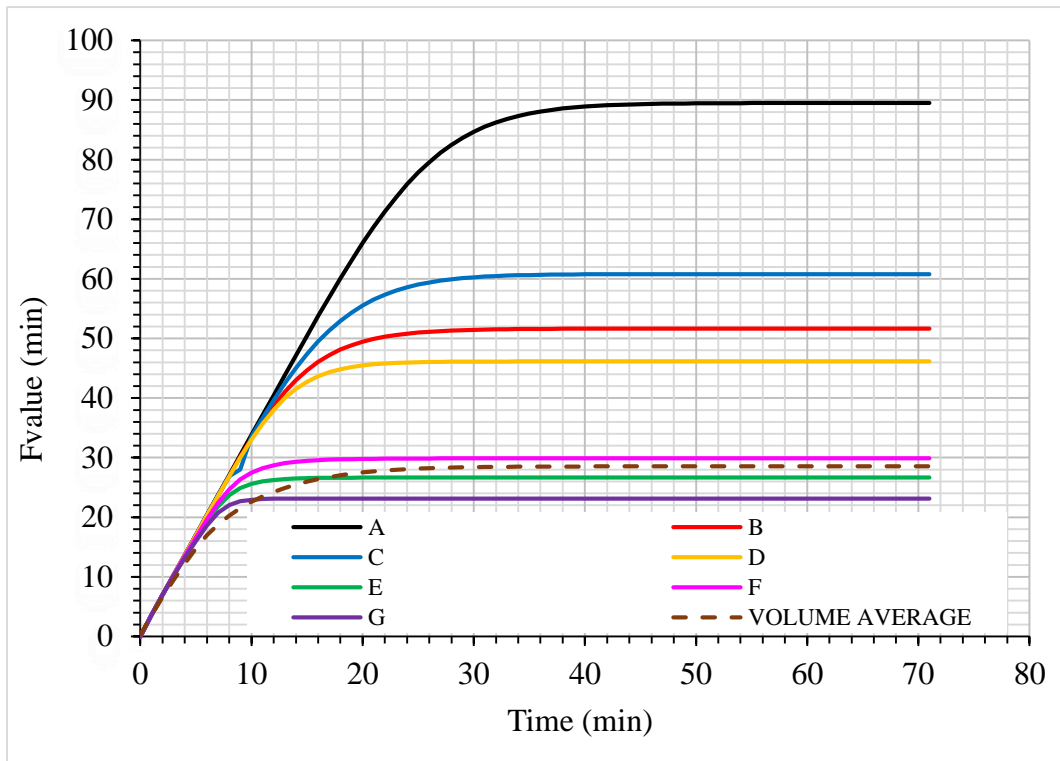
Σχήμα 56 Η μέση τιμή $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}}$ της διεργασίας και η αντίστοιχη τιμή F στα διάφορα σημεία για $T_{IT}= 90^{\circ}\text{C}$ για $h_{\text{air}}=5 \text{ W/m}^2\text{K}$, $h_{\text{cw}}=100 \text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{\text{cw}}=20^{\circ}\text{C}$ και $T_{\text{air}}=25^{\circ}\text{C}$ για τη μεταλλική κονσέρβα χωρίς κενό



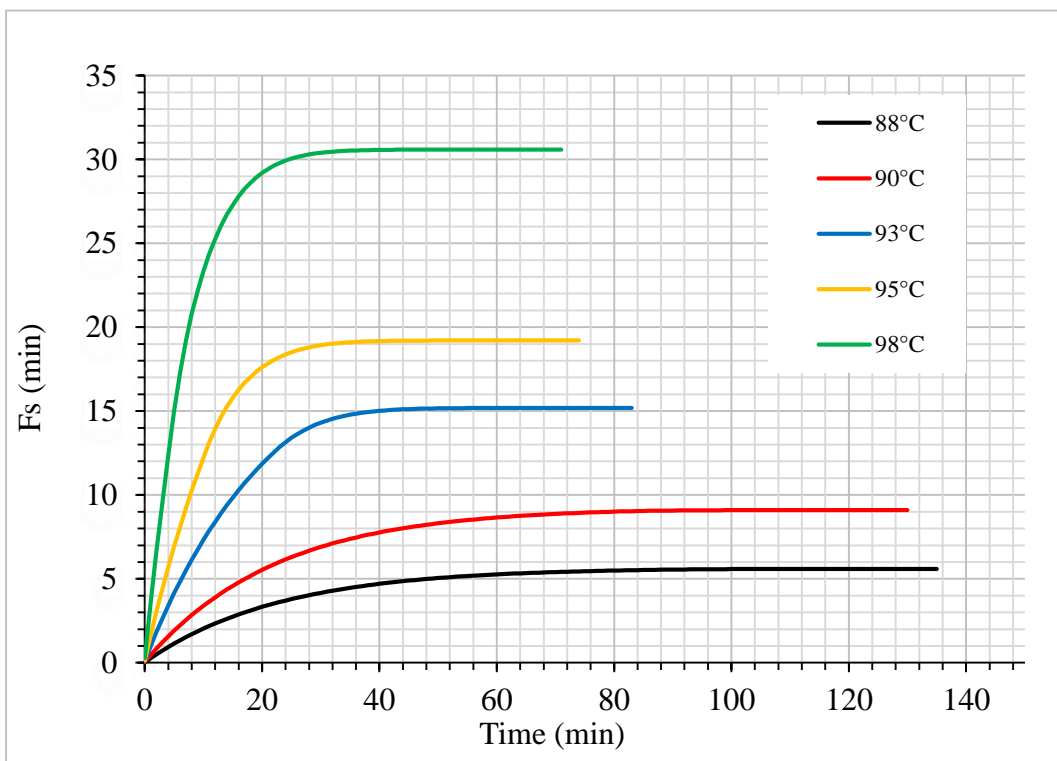
Σχήμα 57. Η μέση τιμή $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}}$ της διεργασίας και η αντίστοιχη τιμή F στα διάφορα σημεία για $T_{IT}=93^{\circ}\text{C}$ για $h_{air}=5\text{ W/m}^2\text{K}$, $h_{cw}=100\text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{cw}=20^{\circ}\text{C}$ και $T_{air}=25^{\circ}\text{C}$ για τη μεταλλική κονσέρβα χωρίς κενό



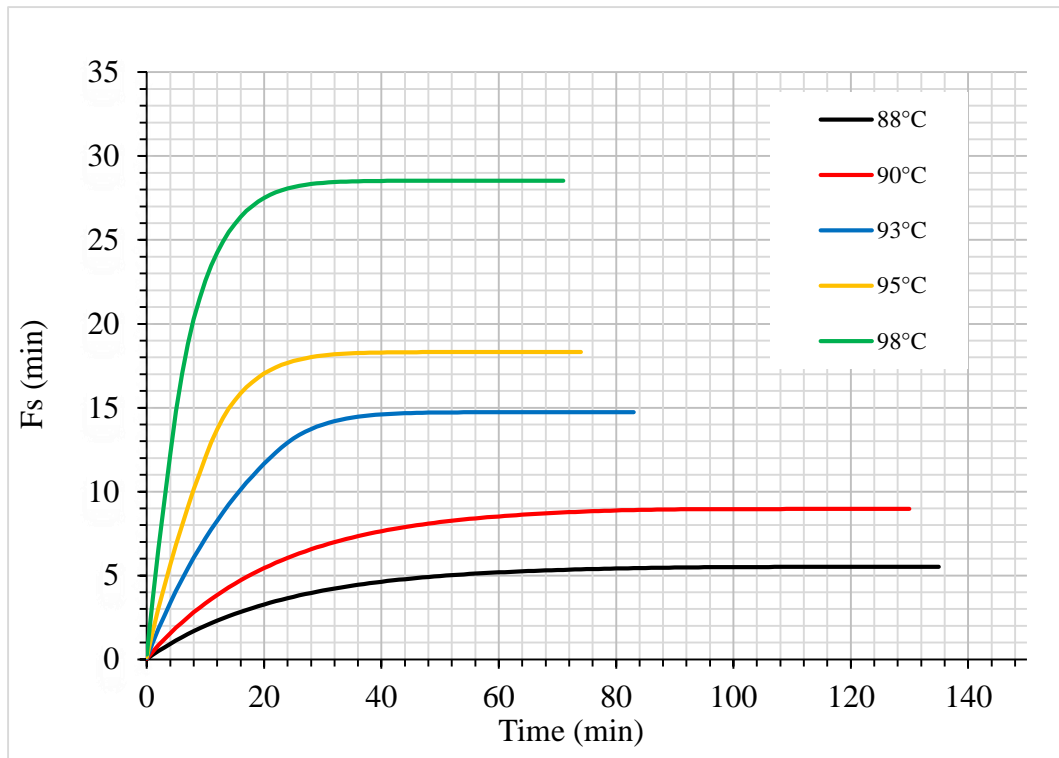
Σχήμα 58 Η μέση τιμή $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}}$ της διεργασίας και η αντίστοιχη τιμή F στα διάφορα σημεία για $T_{IT}=95^{\circ}\text{C}$ για $h_{air}=5\text{ W/m}^2\text{K}$, $h_{cw}=100\text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{cw}=20^{\circ}\text{C}$ και $T_{air}=25^{\circ}\text{C}$ για τη μεταλλική κονσέρβα χωρίς κενό



Σχήμα 59. Η μέση τιμή $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}}$ της διεργασίας και η αντίστοιχη τιμή F στα διάφορα σημεία για $T_{IT}=98^{\circ}\text{C}$ για $h_{\text{air}}=5\text{ W/m}^2\text{K}$, $h_{\text{CW}}=100\text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{\text{CW}}=20^{\circ}\text{C}$ και $T_{\text{air}}=25^{\circ}\text{C}$ για τη μεταλλική κονσέρβα χωρίς κενό

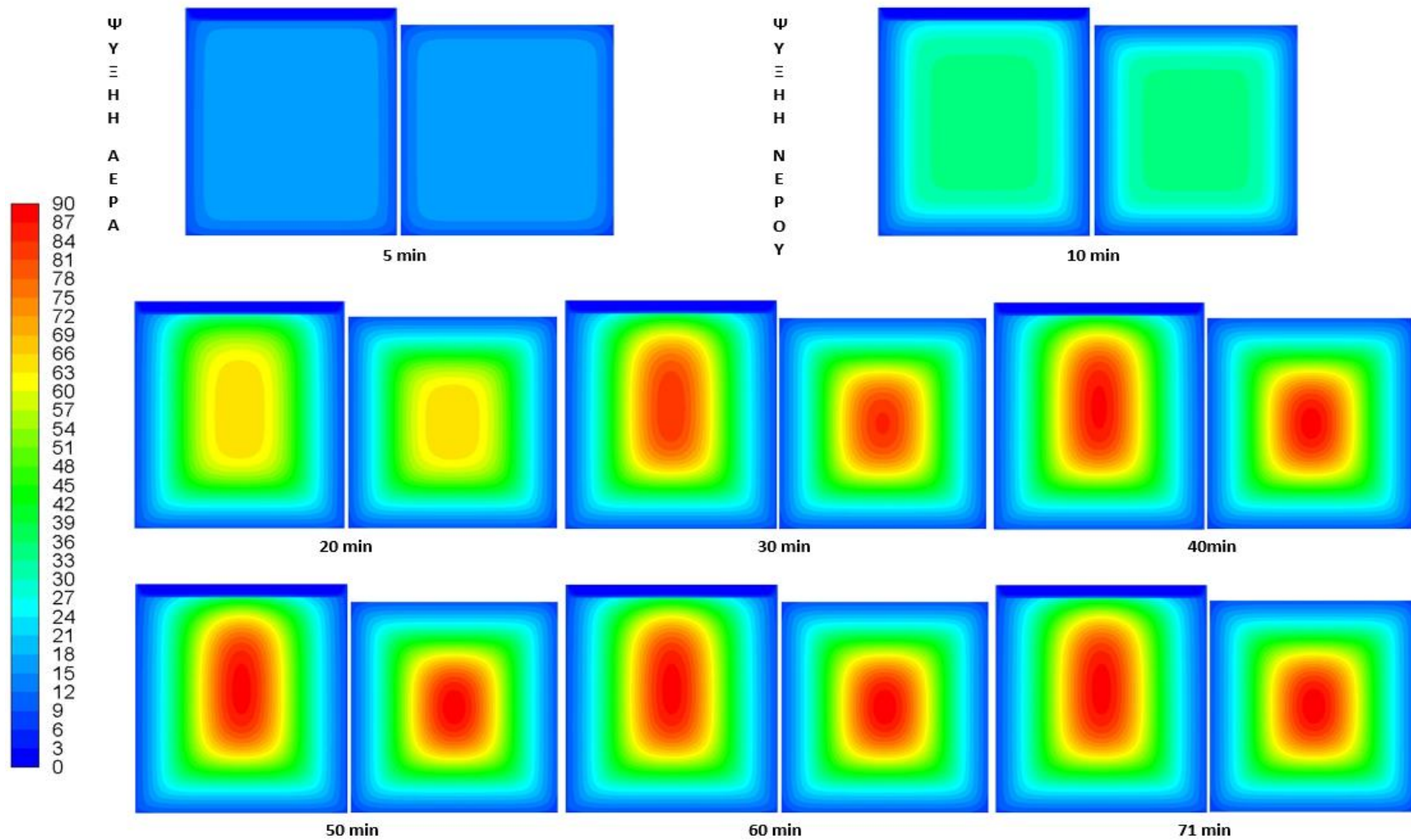


Σχήμα 60. Ολοκληρωμένη τιμή F_s για όλες τις θερμοκρασίες γεμίσματος για $h_{\text{air}}=5\text{ W/m}^2\text{K}$, $h_{\text{CW}}=100\text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{\text{CW}}=20^{\circ}\text{C}$ και $T_{\text{air}}=25^{\circ}\text{C}$ για τη μεταλλική κονσέρβα με κενό.

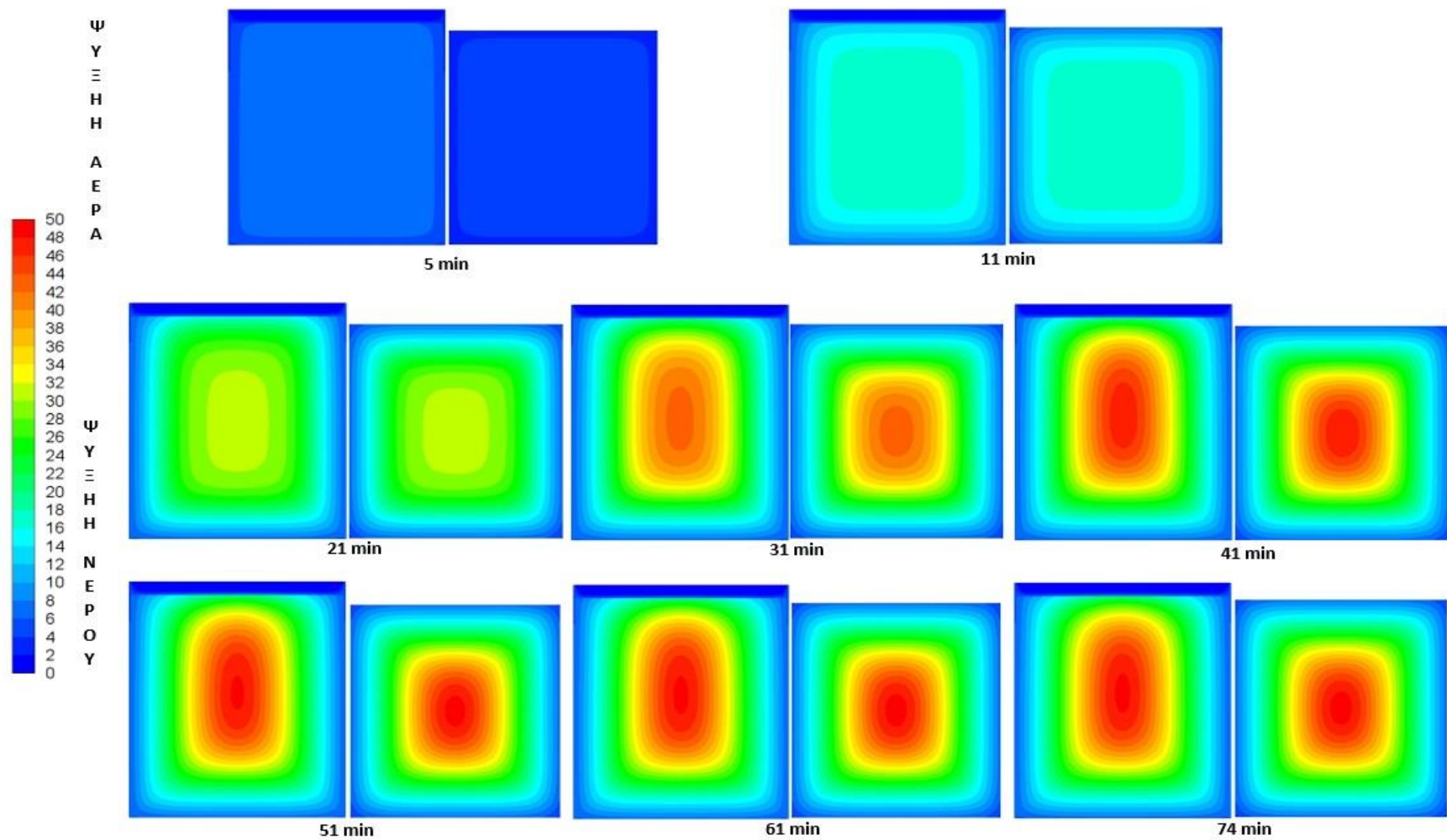


Σχήμα 61. Ολοκληρωμένη τιμή F_s για όλες τις θερμοκρασίες γεμίσματος για $h_{air}=5$ W/m^2K , $h_{cw}=100$ W/m^2K , $T_{cw}=20^\circ C$ και $T_{air}=25^\circ C$ για τη μεταλλική κονσέρβα χωρίς κενό.

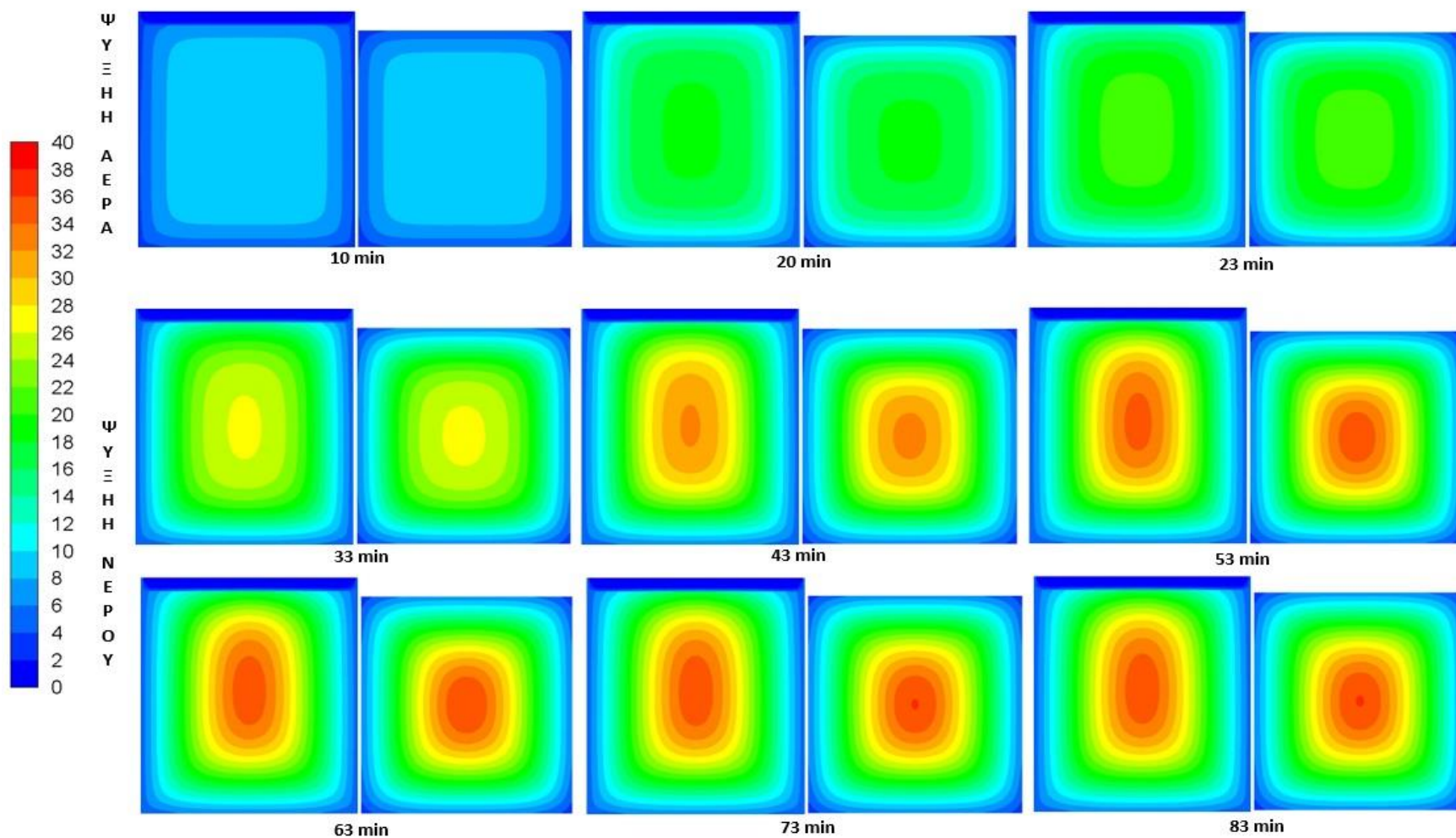
Στα Σχήματα 62-66 απεικονίζεται η κατανομή της τιμής $F_{93.33}^{8.89^\circ C}$ συναρτήσει του χρόνου για τις θερμοκρασίες $98^\circ C$, $95^\circ C$, $93^\circ C$, $90^\circ C$ και $88^\circ C$. Αυτό που εμφανίζεται είναι ότι όταν η θερμοκρασία γεμίσματος είναι $98^\circ C$ ο χρόνος που απαιτείται για την ψύξη με αέρα έτσι ώστε να επιτευχθεί η τιμή $F_{93.33}^{8.89^\circ C}$ ίση προς 12,6 είναι μικρός, δηλαδή όσο αυξάνεται η θερμοκρασία γεμίσματος μειώνεται ο χρόνος ψύξης με αέρα και τόσο μεγαλύτερη θανάτωση παρουσιάζεται στα εσωτερικά σημεία της μεταλλικής κονσέρβας και μικρότερα στα εξωτερικά σημεία της κονσέρβας και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την ψύξη τα εσωτερικά σημεία έχουν μεγαλύτερες θερμοκρασίες για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα με αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη θανάτωση. Το αντίθετο συμβαίνει στα εξωτερικά σημεία τα οποία ψύχονται πιο νωρίς επομένως έχουμε μικρότερη θανάτωση. Στις θερμοκρασίες $88^\circ C$ και $90^\circ C$ η τιμή F δεν επιτυγχάνεται. Επίσης στη κονσέρβα με κενό παρατηρούμε ότι η τιμή F δεν είναι συμμετρική λόγω της ύπαρξης υδρατμών οι οποίοι εμποδίζουν την μεταφορά θερμότητας με αποτέλεσμα την εμφάνιση μεγαλύτερων τιμών F της διεργασίας σε σύγκριση με τη περίπτωση χωρίς κενό.



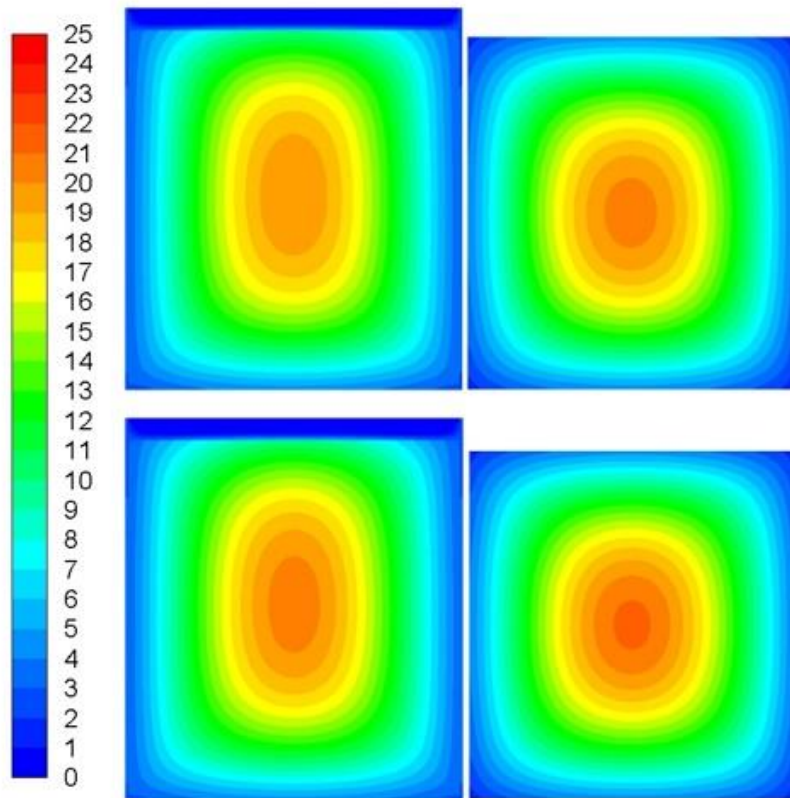
Σχήμα 62. Εξέλιξη της κατανομής της τιμής F για $T_{IT}=98^{\circ}\text{C}$ στις κονσέρβες ανα ζεύγος (αριστερά κενό-δεξιά χωρίς κενό) στα 5 min τέλος ψύξης με αέρα και στα 10 min αρχή ψύξης με νερό για $h_{air}=5\text{ W/m}^2\text{K}$, $h_{cw}=100\text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{cw}=20^{\circ}\text{C}$ και $T_{air}=25^{\circ}\text{C}$.



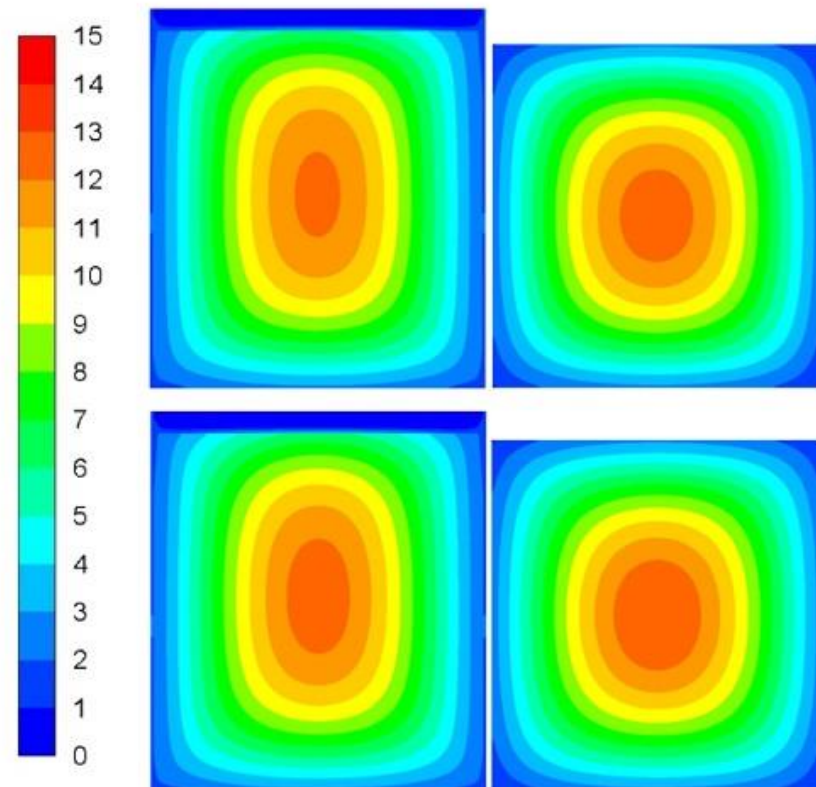
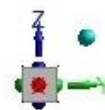
Σχήμα 63. Εξέλιξη της κατανομής της τιμής F για $T_{IT}=95^{\circ}\text{C}$ στις κονσέρβες ανα ζεύγος (αριστερά κενό-δεξιά χωρίς κενό) στα 11 min τέλος ψύξης με αέρα και στα 21 min αρχή ψύξης με νερό για $h_{\text{air}}=5 \text{ W/m}^2\text{K}$, $h_{\text{cw}}=100 \text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{\text{cw}}=20^{\circ}\text{C}$ και $T_{\text{air}}=25^{\circ}\text{C}$.



Σχήμα 64. Εξέλιξη της κατανομής της τιμής F για $T_{IT} = 93^{\circ}\text{C}$ στις κονσέρβες ανα ζεύγος (αριστερά κενό-δεξιά χωρίς κενό) στα 23 min τέλος ψύξης με αέρα και στα 23 min αρχή ψύξης με νερό για $h_{\text{air}} = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$, $h_{\text{cw}} = 100 \text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{\text{cw}} = 20^{\circ}\text{C}$ και $T_{\text{air}} = 25^{\circ}\text{C}$.



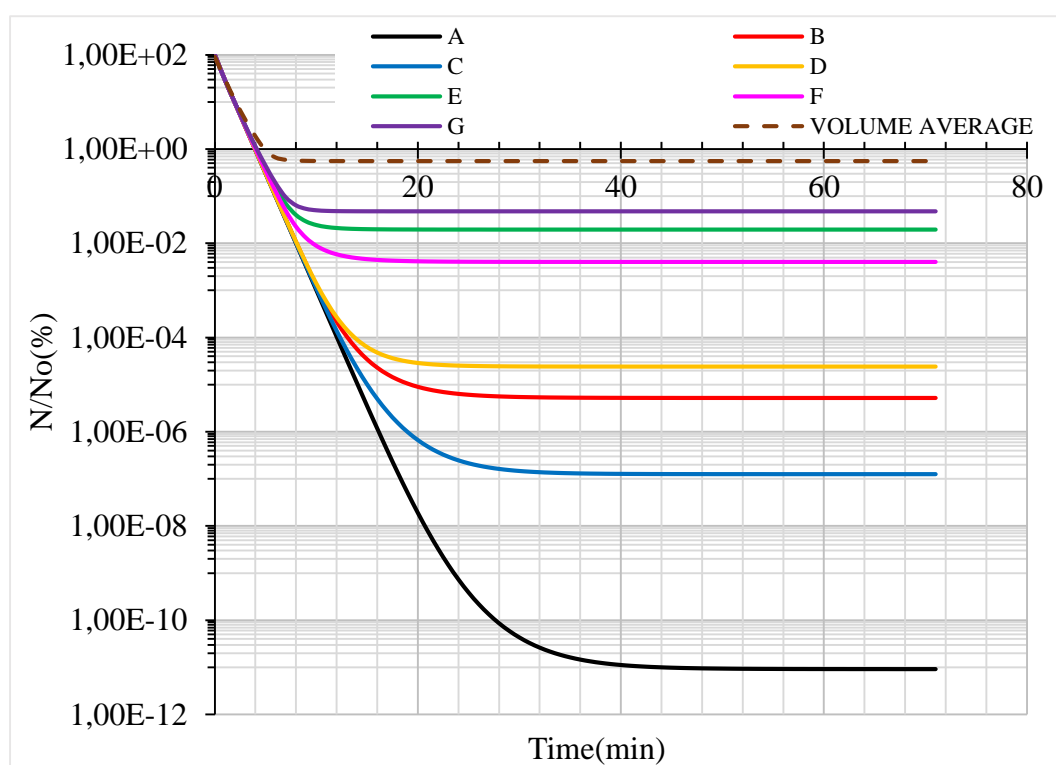
Σχήμα 65. Κατανομή της τιμής $F_{93.33^{\circ}C}^{8.89^{\circ}C} = 12.6$ στο τέλος της ψύξης με αέρα (πάνω) και στο τέλος της ψύξης με νερό (κάτω) για θερμοκρασία γεμίσματος $90^{\circ}C$ σε κονσέρβα με κενό (αριστερά) και χωρίς κενό (δεξιά) για $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, $h_{cw}=100 \text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{cw}=20^{\circ}C$ και $T_{air} =25^{\circ}C$.



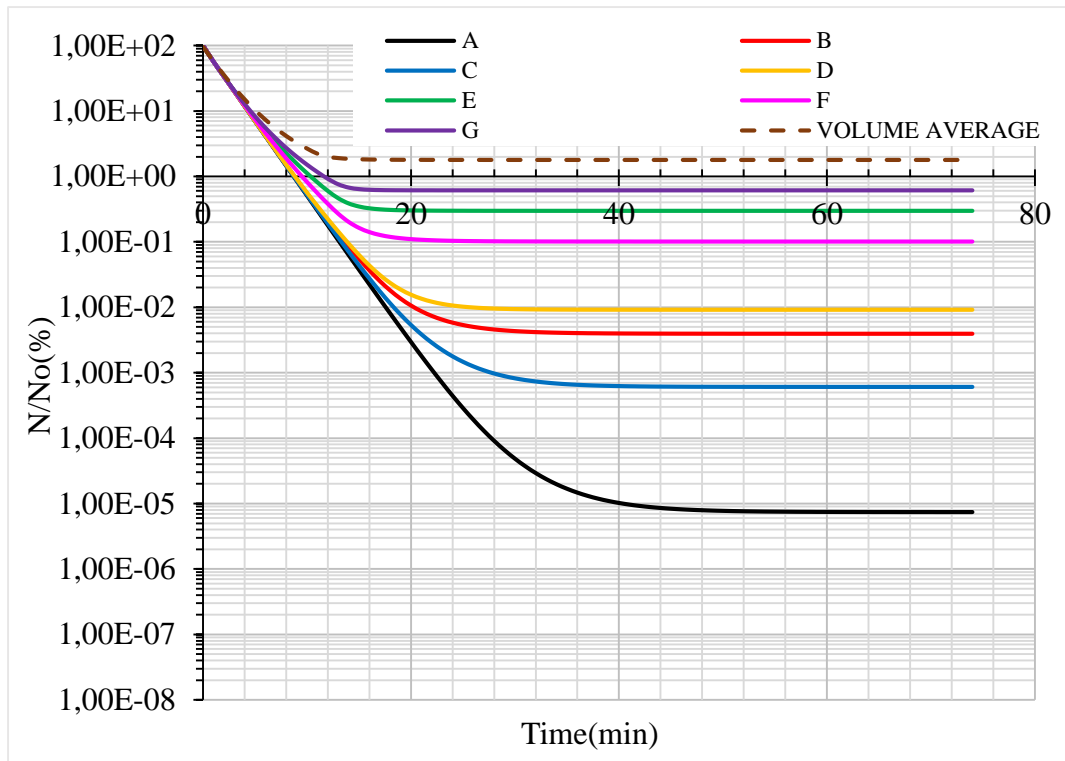
Σχήμα 66. Κατανομή της τιμής $F_{93.33^{\circ}C}^{8.89^{\circ}C} = 12.6$ στο τέλος της ψύξης με αέρα (πάνω) και στο τέλος της ψύξης με νερό (κάτω) για θερμοκρασία γεμίσματος $88^{\circ}C$ σε κονσέρβα με κενό (αριστερά) και χωρίς κενό (δεξιά) για $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, $h_{cw}=100 \text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{cw}=20^{\circ}C$ και $T_{air} =25^{\circ}C$



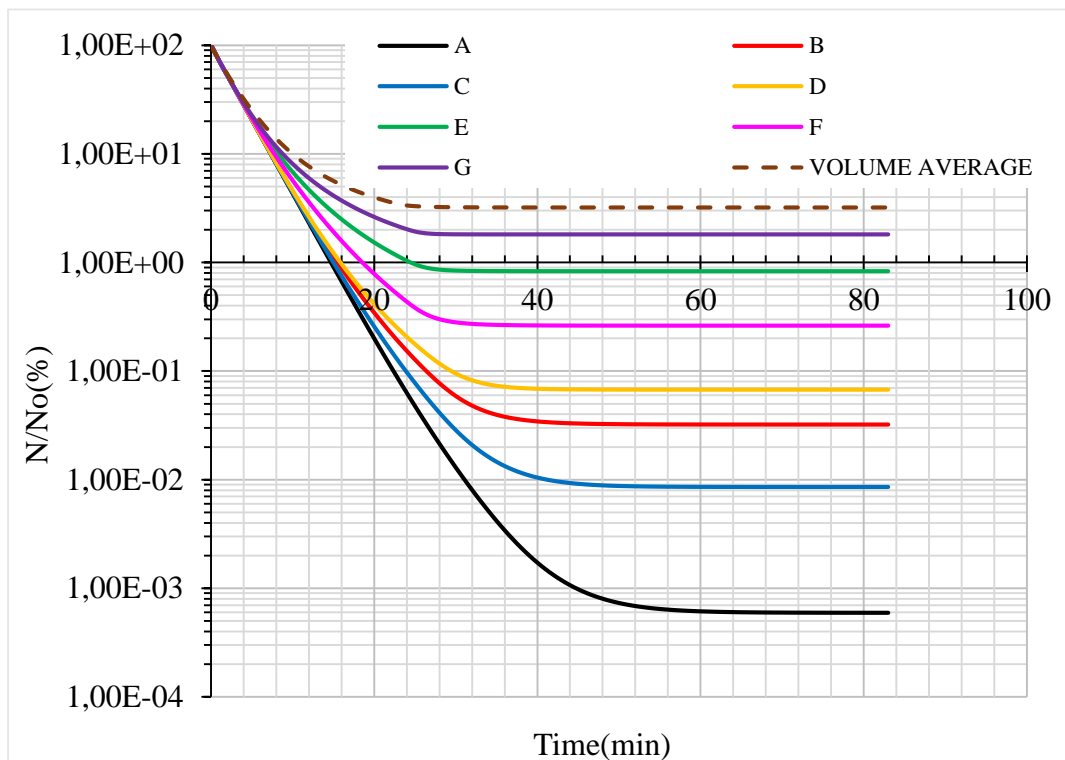
Όσον αφορά την επίδραση της θερμοκρασίας γεμίσματος εξετάστηκε και η κατανομή του % επιβίωσης του *B. coagulans*, N/N_0 και η % διατήρηση του χρώματος L και a/b, του ασκορβικού οξέος (Βιταμίνη C) καθώς και του Βήτα καροτένιου και για τις δύο περιπτώσεις με και χωρίς κενό μεταλλική κονσέρβα στις θερμοκρασίες γεμίσματος 98°C, 95°C και 93°C. Στα Σχήματα 67- 72 παρουσιάζεται το % ποσοστό επιβίωσης του *B. coagulans*, N/N_0 για τη θερμοκρασία γεμίσματος 98°C, 95°C και 93°C στα διάφορα σημεία και για τις δύο περιπτώσεις. Αυτό που φαίνεται είναι ότι η μεγαλύτερη θανάτωση των μικροοργανισμών εμφανίζεται στη θερμοκρασία γεμίσματος 98°C και συγκεκριμένα στο θερμότερο σημείο της κονσέρβας (A) της τάξης των 11 λογαριθμικών κύκλων. Η ίδια συμπεριφορά παρατηρείται και στις άλλες δύο θερμοκρασίες γεμίσματος.



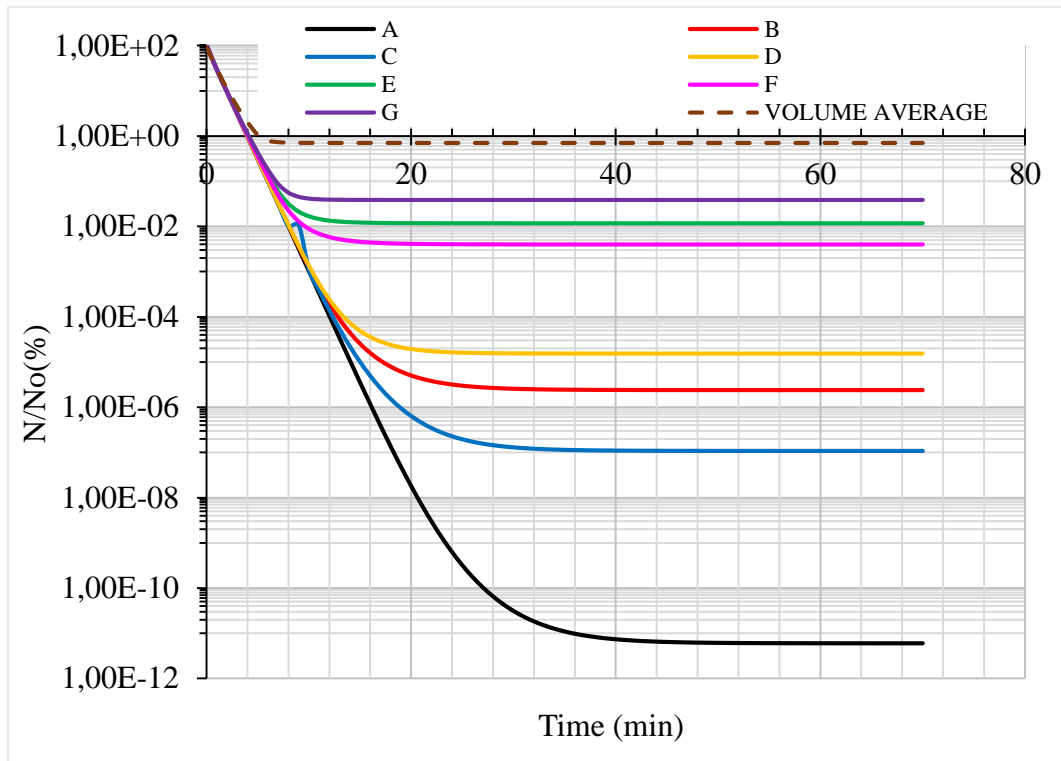
Σχήμα 67. Ποσοστό επιβίωσης του *B. coagulans*, N/N_0 στα διάφορα σημεία και μέση τιμή του για $T_{IT}=98^{\circ}\text{C}$, $h_{air}=5\text{ W/m}^2\text{K}$, $h_{CW}=100\text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{CW}=20^{\circ}\text{C}$ και $T_{air}=25^{\circ}\text{C}$ για τη μεταλλική κονσέρβα με κενό.



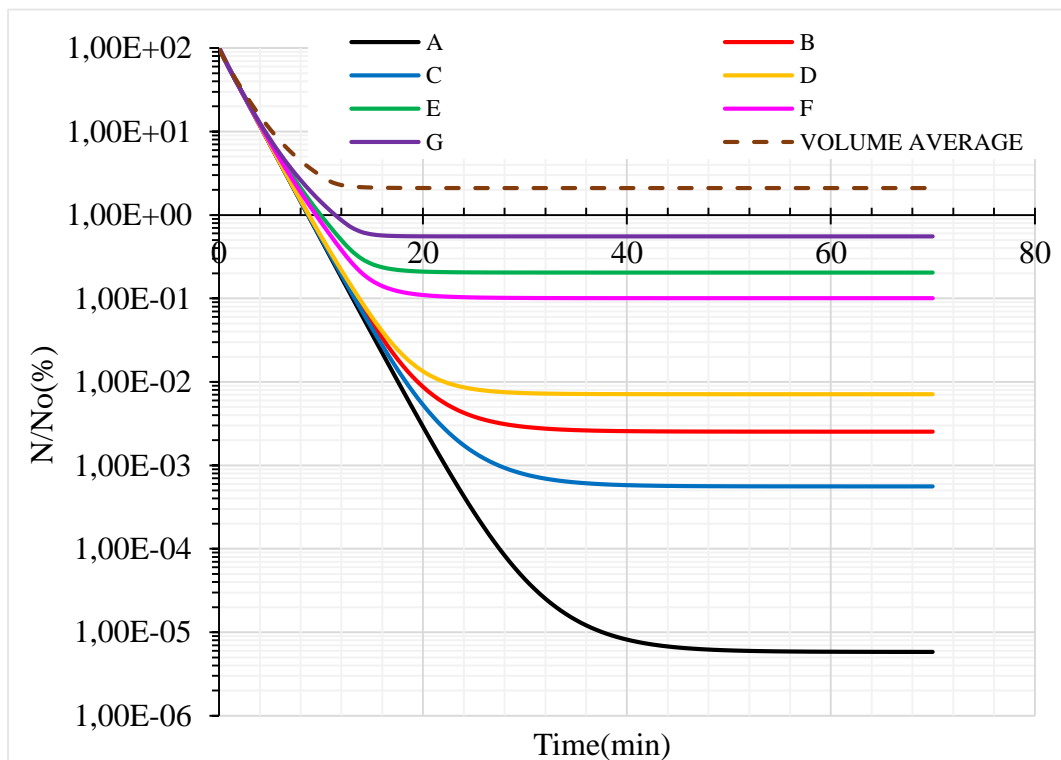
Σχήμα 68. Ποσοστό επιβίωσης του *B. coagulans*, N/N_0 στα διάφορα σημεία και μέση τιμή του για $T_{IT}=95^{\circ}\text{C}$, $h_{air}=5\text{ W/m}^2\text{K}$, $h_{cw}=100\text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{cw}=20^{\circ}\text{C}$ και $T_{air}=25^{\circ}\text{C}$ για τη μεταλλική κονσέρβα με κενό.



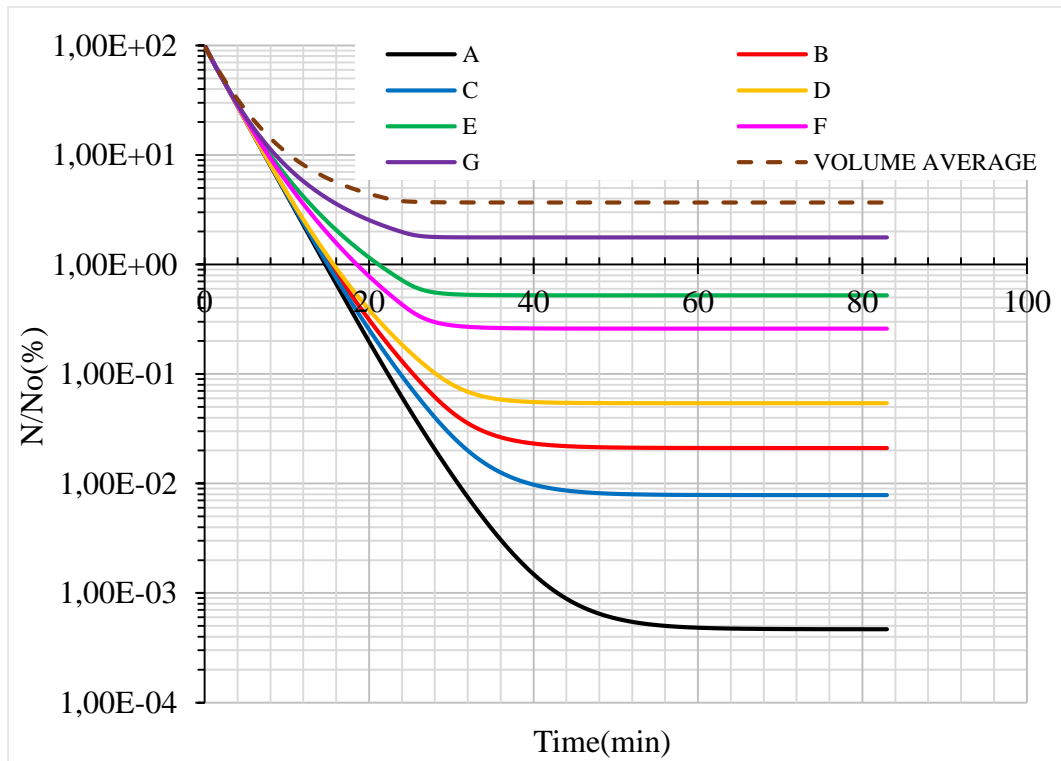
Σχήμα 69. Ποσοστό επιβίωσης του *B. coagulans*, N/N_0 στα διάφορα σημεία και μέση τιμή του για $T_{IT}=93^{\circ}\text{C}$, $h_{air}=5\text{ W/m}^2\text{K}$, $h_{cw}=100\text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{cw}=20^{\circ}\text{C}$ και $T_{air}=25^{\circ}\text{C}$ για τη μεταλλική κονσέρβα με κενό.



Σχήμα 70. Ποσοστό επιβίωσης του *B. coagulans*, N/N_0 στα διάφορα σημεία και μέση τιμή του για $T_{IT}=98^{\circ}\text{C}$, $h_{air}=5\text{ W/m}^2\text{K}$, $h_{cw}=100\text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{cw}=20^{\circ}\text{C}$ και $T_{air}=25^{\circ}\text{C}$ για τη μεταλλική κονσέρβα χωρίς κενό.

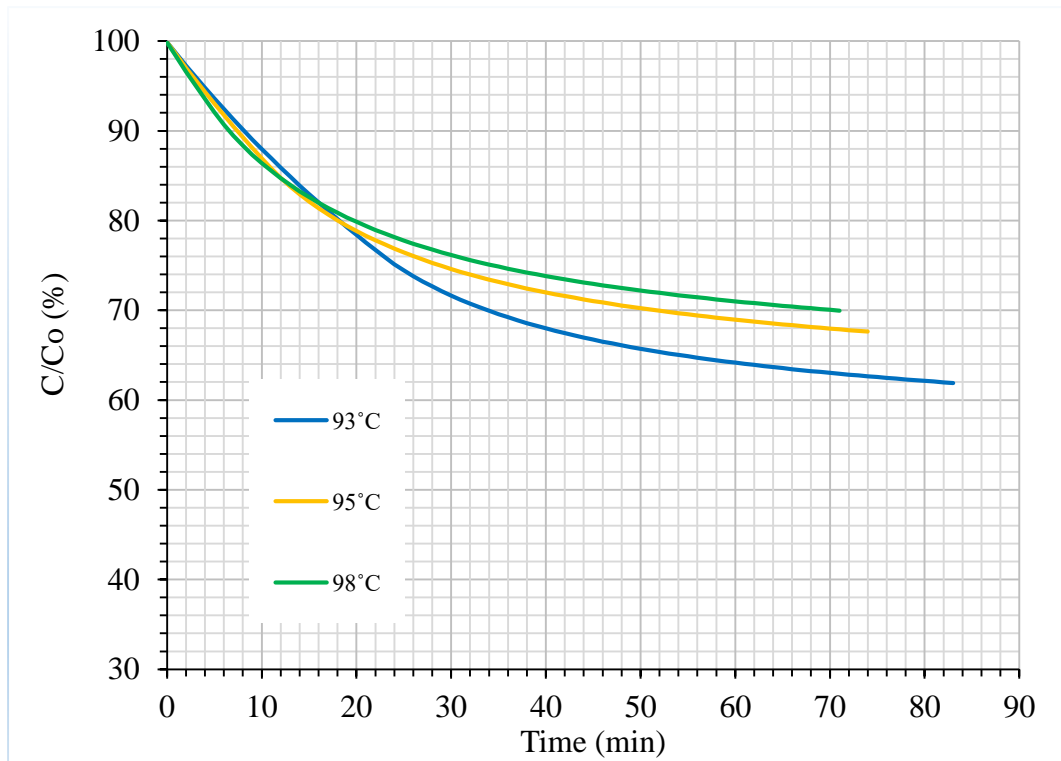


Σχήμα 71. Ποσοστό επιβίωσης του *B. coagulans*, N/N_0 στα διάφορα σημεία και μέση τιμή του για $T_{IT}=95^{\circ}\text{C}$, $h_{air}=5\text{ W/m}^2\text{K}$, $h_{cw}=100\text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{cw}=20^{\circ}\text{C}$ και $T_{air}=25^{\circ}\text{C}$ για τη μεταλλική κονσέρβα χωρίς κενό.

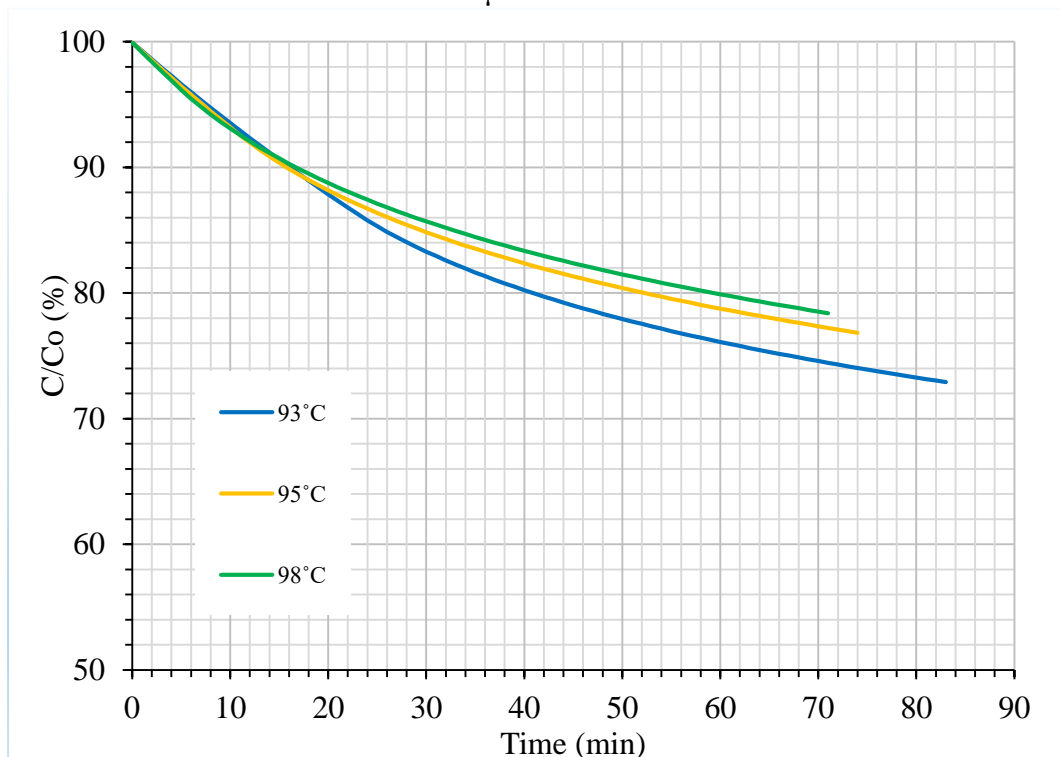


Σχήμα 72. Ποσοστό επιβίωσης του *B. coagulans*, N/N_0 στα διάφορα σημεία και μέση τιμή του για $T_{IT}=93^{\circ}\text{C}$, $h_{air}=5\text{ W/m}^2\text{K}$, $h_{CW}=100\text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{CW}=20^{\circ}\text{C}$ και $T_{air}=25^{\circ}\text{C}$ για τη μεταλλική κονσέρβα χωρίς κενό.

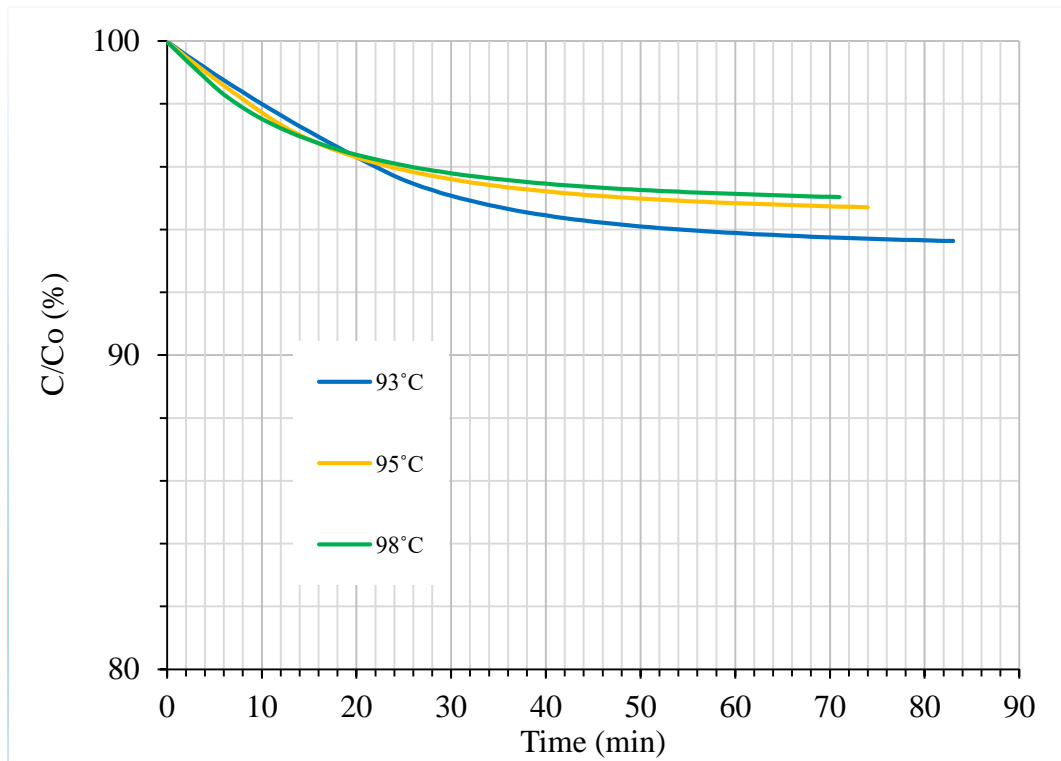
Στα Σχήματα 73-80 παρουσιάζεται η μέση τιμή του ποσοστού διατήρησης των παραμέτρων χρώματος L και a/b , του ποσοστό % διατήρηση του ασκορβικού οξέος (Βιταμίνης C) και του Βήτα καροτένιου για τις θερμοκρασίες γεμίσματος 98°C , 95°C και 93°C και για τις δύο περιπτώσεις με και χωρίς κενό. Παρατηρείται ότι η μεγαλύτερη διατήρηση όλων των ποιοτικών παραμέτρων αντιστοιχεί στη θερμοκρασία γεμίσματος 98°C και συγκεκριμένα στα εξωτερικά σημεία της μεταλλικής κονσέρβας και τη μεγαλύτερη υποβάθμιση των ποιοτικών χαρακτηριστικών στα εσωτερικά σημεία της μεταλλικής κονσέρβας. Μικρή διαφορά έχουν οι άλλες δύο θερμοκρασίες γεμίσματος. Επίσης παρατηρείται ότι ο πιο θερμοανθεκτικός ποιοτικός παράγοντας είναι το Βήτα καροτένιο και ο πιο θερμοευαίσθητος παράγοντας είναι ο L του χρώματος. Στα Σχήματα 81-84 παρουσιάζεται η κατανομή των ποιοτικών παραμέτρων και για τις δύο περιπτώσεις που εξετάστηκαν για τη θερμοκρασία γεμίσματος 98°C όπου παρατηρείται η μεγαλύτερη διατήρηση των ποιοτικών παραγόντων.



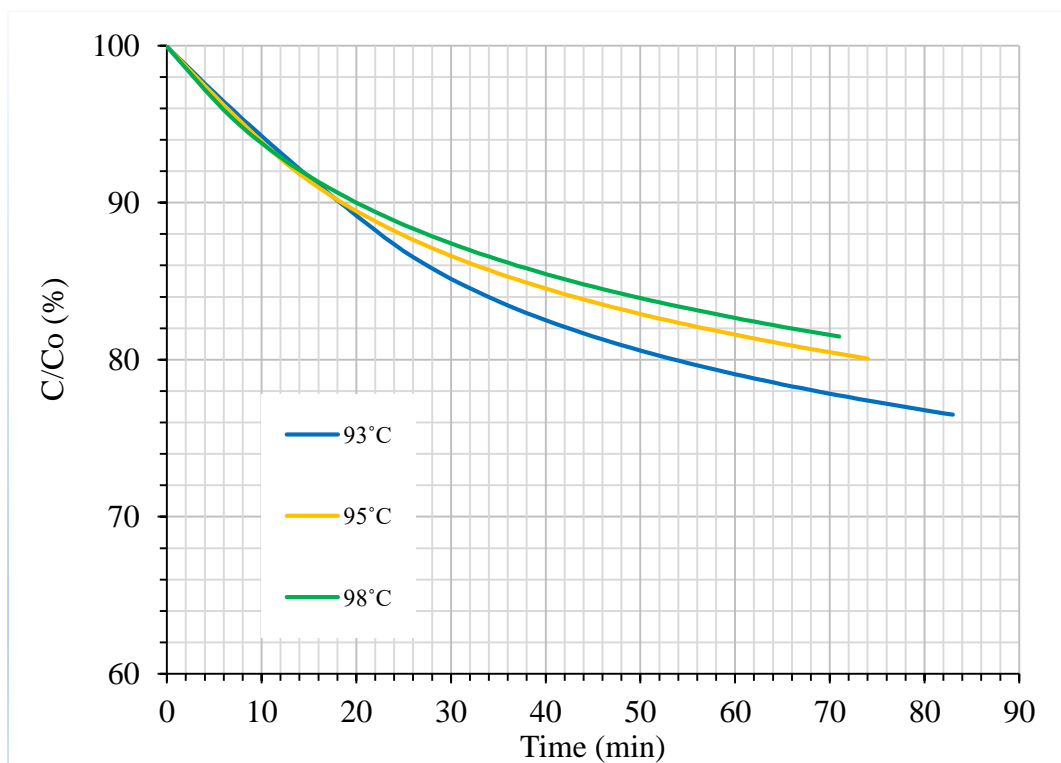
Σχήμα 73. Η % διατήρηση του χρώματος (L) για όλες τις θερμοκρασίες γεμίσματος για $h_{air}=5 \text{ W/m}^2\text{K}$, $h_{cw}=100 \text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{cw}=20^\circ\text{C}$ και $T_{air}=25^\circ\text{C}$ για τη μεταλλική κονσέρβα με κενό.



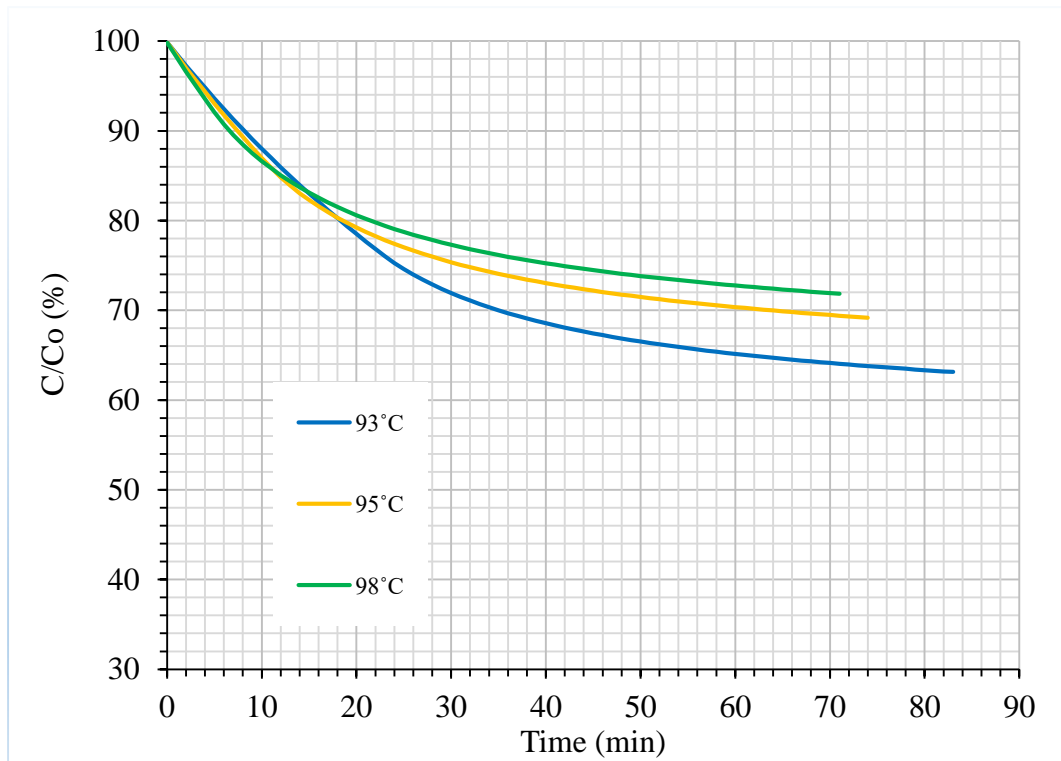
Σχήμα 74. Η % διατήρηση του χρώματος (a/b) για όλες τις θερμοκρασίες γεμίσματος για $h_{air}=5 \text{ W/m}^2\text{K}$, $h_{cw}=100 \text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{cw}=20^\circ\text{C}$ και $T_{air}=25^\circ\text{C}$ για τη μεταλλική κονσέρβα με κενό.



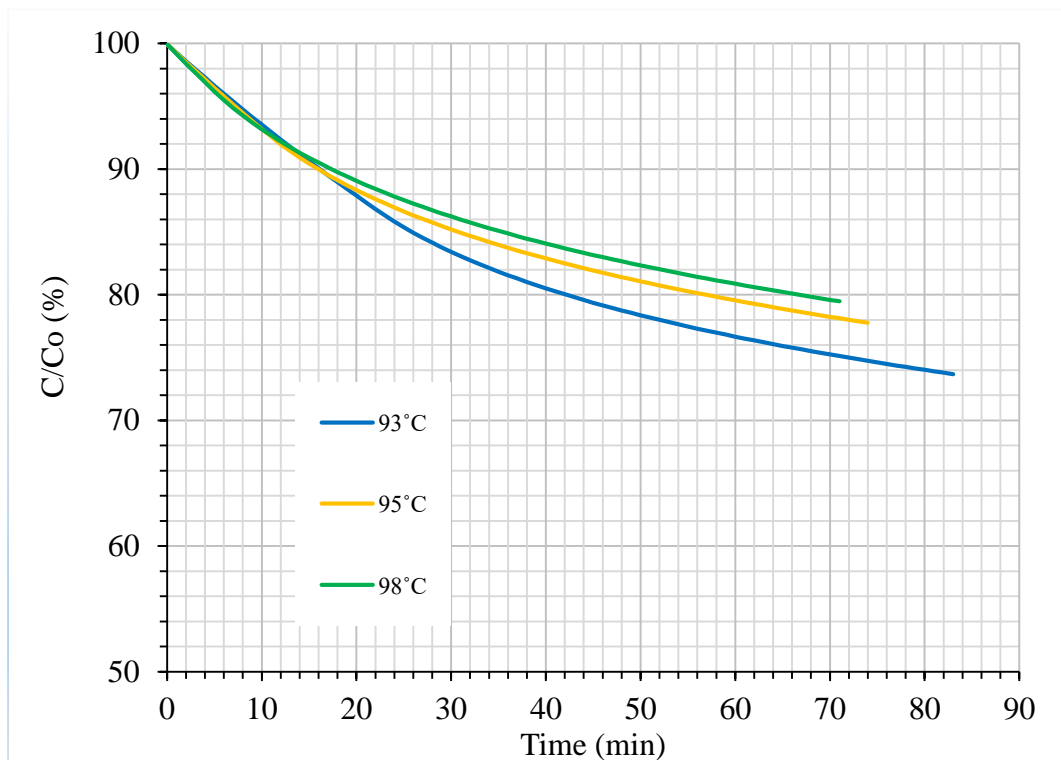
Σχήμα 75. Η % διατήρηση του Βήτα καροτένιου για όλες τις θερμοκρασίες γεμίσματος για $h_{air}=5 \text{ W/m}^2\text{K}$, $h_{cw}=100 \text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{cw}=20^\circ\text{C}$ και $T_{air}=25^\circ\text{C}$ για τη μεταλλική κονσέρβα με κενό.



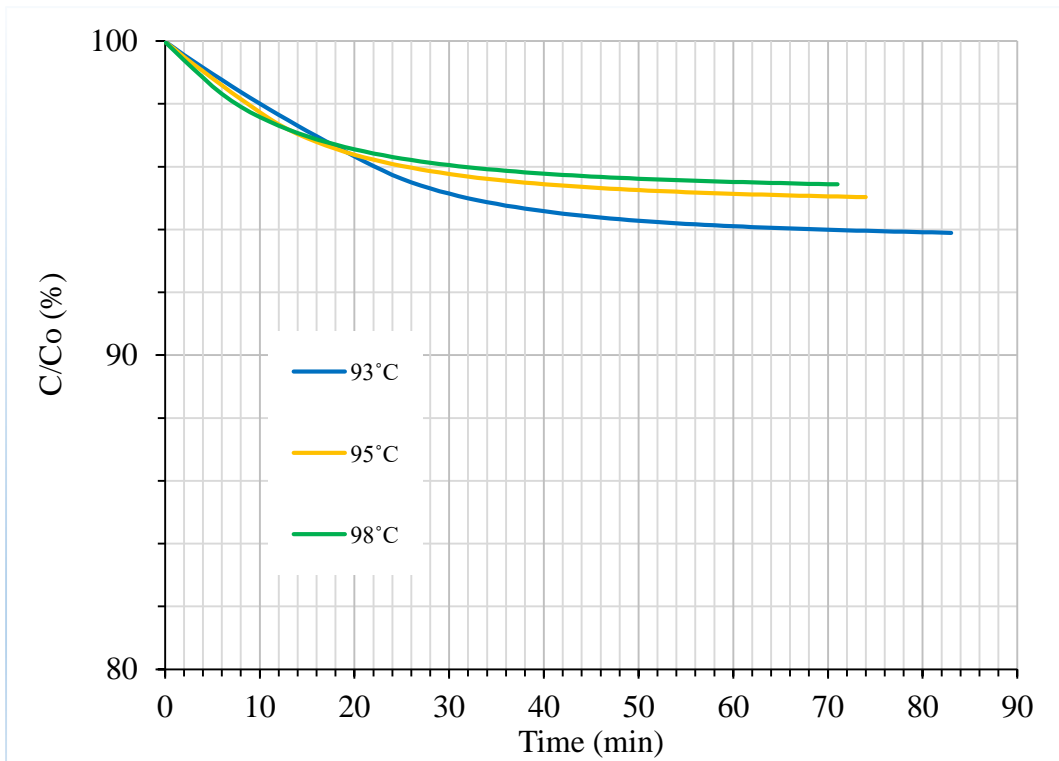
Σχήμα 76. Η % διατήρηση του ασκορβικού για όλες τις θερμοκρασίες γεμίσματος για $h_{air}=5 \text{ W/m}^2\text{K}$, $h_{cw}=100 \text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{cw}=20^\circ\text{C}$ και $T_{air}=25^\circ\text{C}$ για τη μεταλλική κονσέρβα με κενό.



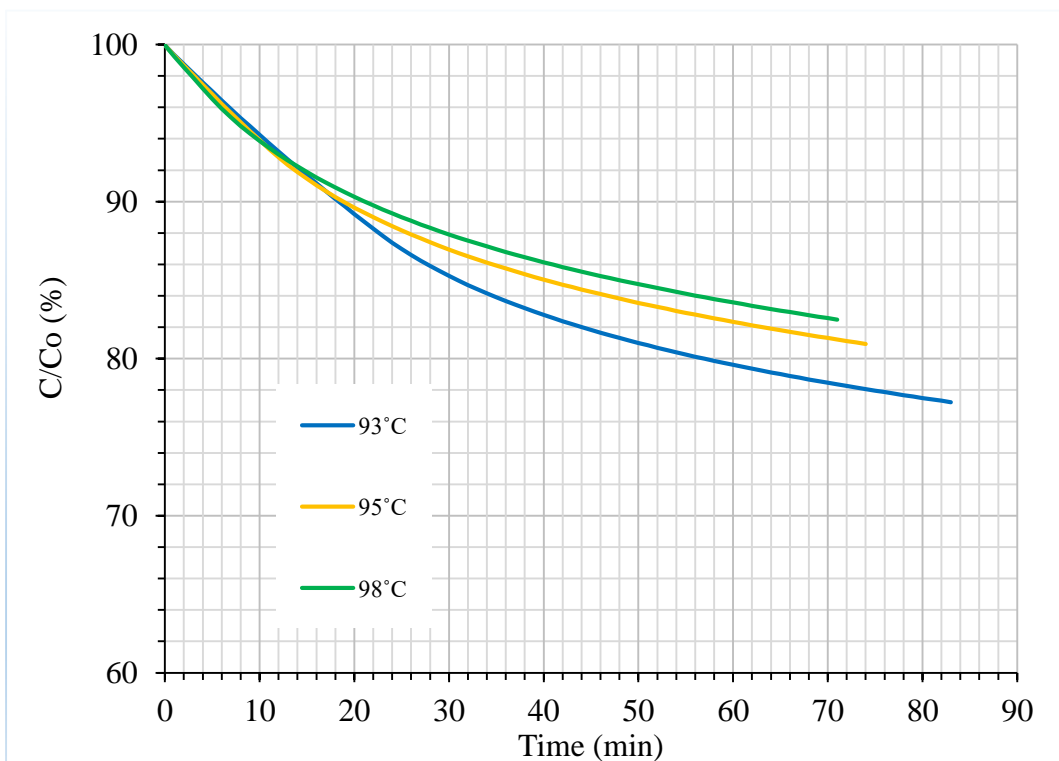
Σχήμα 77. Η % διατήρηση του χρώματος (L) για όλες τις θερμοκρασίες γεμίσματος για $h_{air}=5 \text{ W/m}^2\text{K}$, $h_{cw}=100 \text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{cw}=20^\circ\text{C}$ και $T_{air}=25^\circ\text{C}$ για τη μεταλλική κονσέρβα χωρίς κενό.



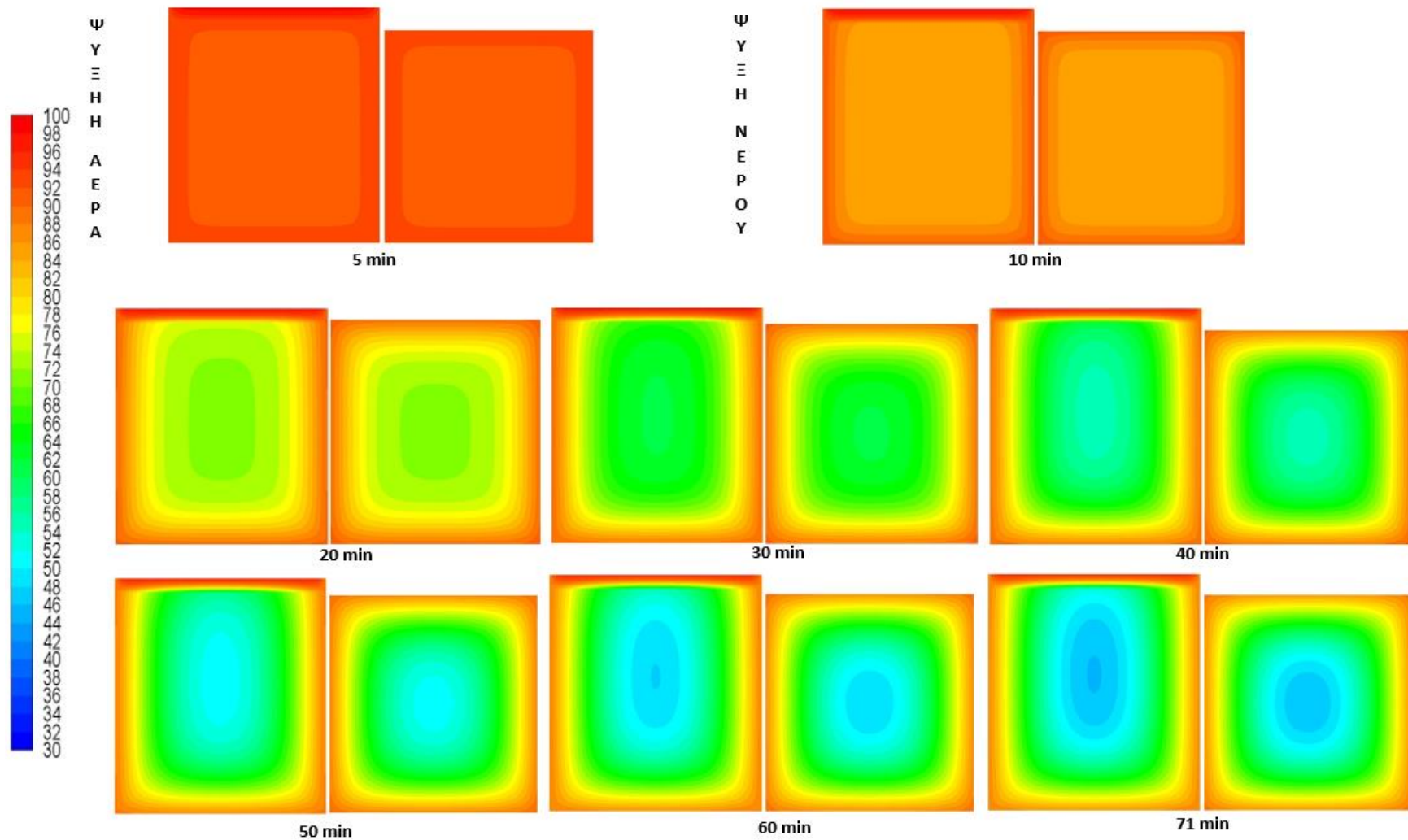
Σχήμα 78. Η % διατήρηση του χρώματος (a/b) για όλες τις θερμοκρασίες γεμίσματος για $h_{air}=5 \text{ W/m}^2\text{K}$, $h_{cw}=100 \text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{cw}=20^\circ\text{C}$ και $T_{air}=25^\circ\text{C}$ για τη μεταλλική κονσέρβα χωρίς κενό



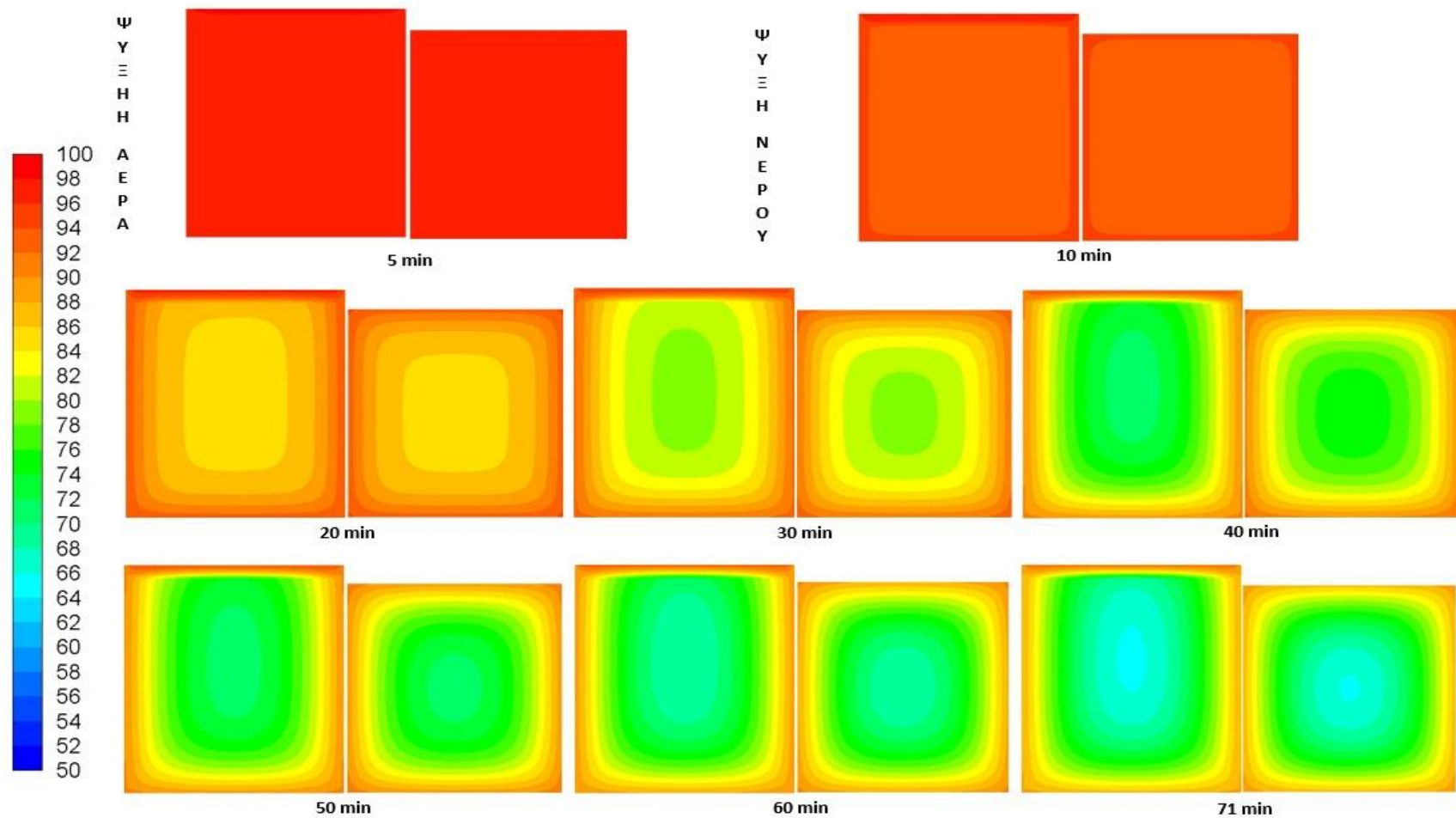
Σχήμα 79. Η % διατήρηση του Βήτα καροτένιου για όλες τις θερμοκρασίες γεμίσματος για $h_{air}=5 \text{ W/m}^2\text{K}$, $h_{cw}=100 \text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{cw}=20^\circ\text{C}$ και $T_{air}=25^\circ\text{C}$ για τη μεταλλική κονσέρβα χωρίς κενό



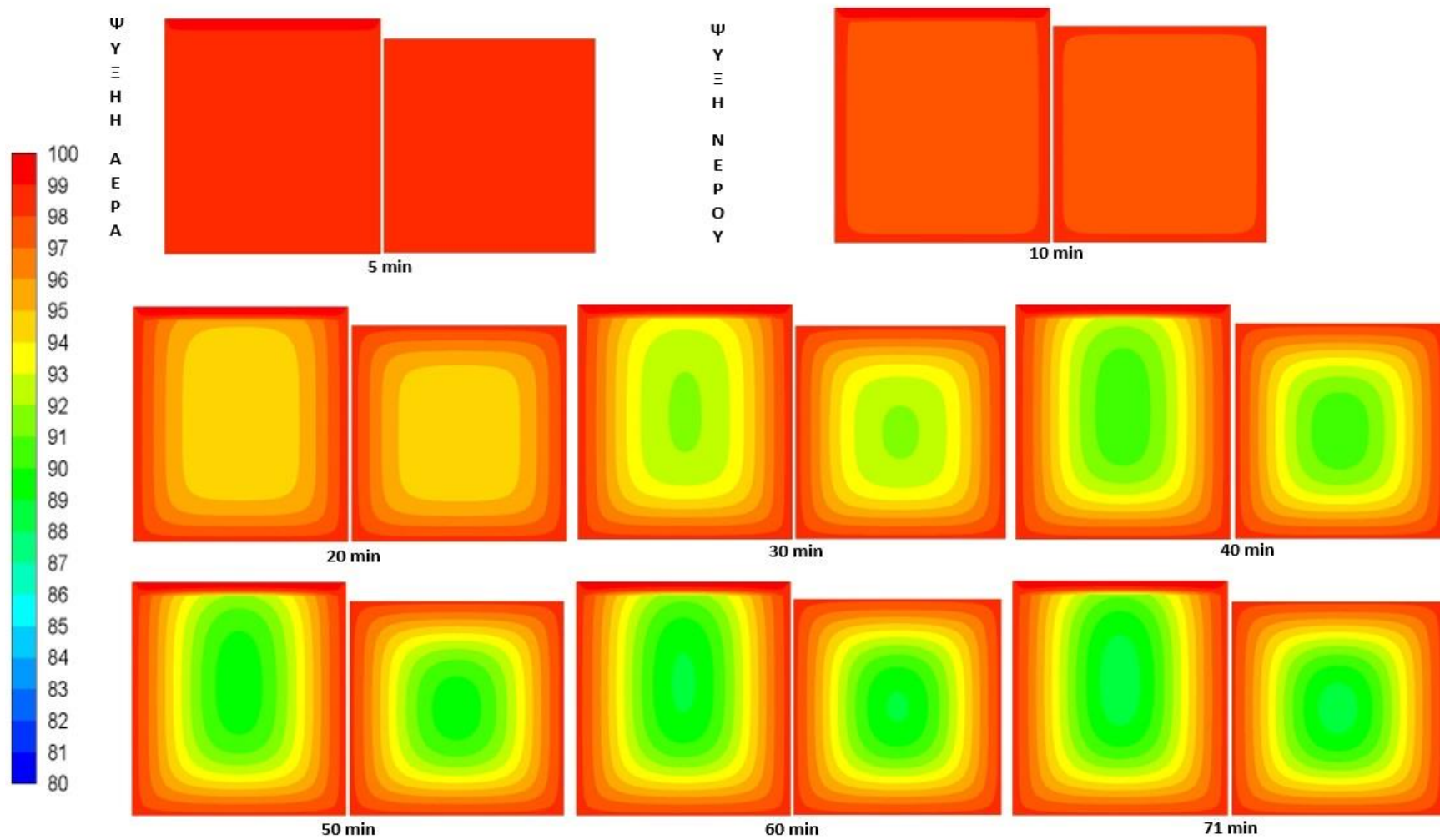
Σχήμα 80. Η % διατήρηση του ασκορβικού για όλες τις θερμοκρασίες γεμίσματος για $h_{air}=5 \text{ W/m}^2\text{K}$, $h_{cw}=100 \text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{cw}=20^\circ\text{C}$ και $T_{air}=25^\circ\text{C}$ για τη μεταλλική κονσέρβα χωρίς κενό



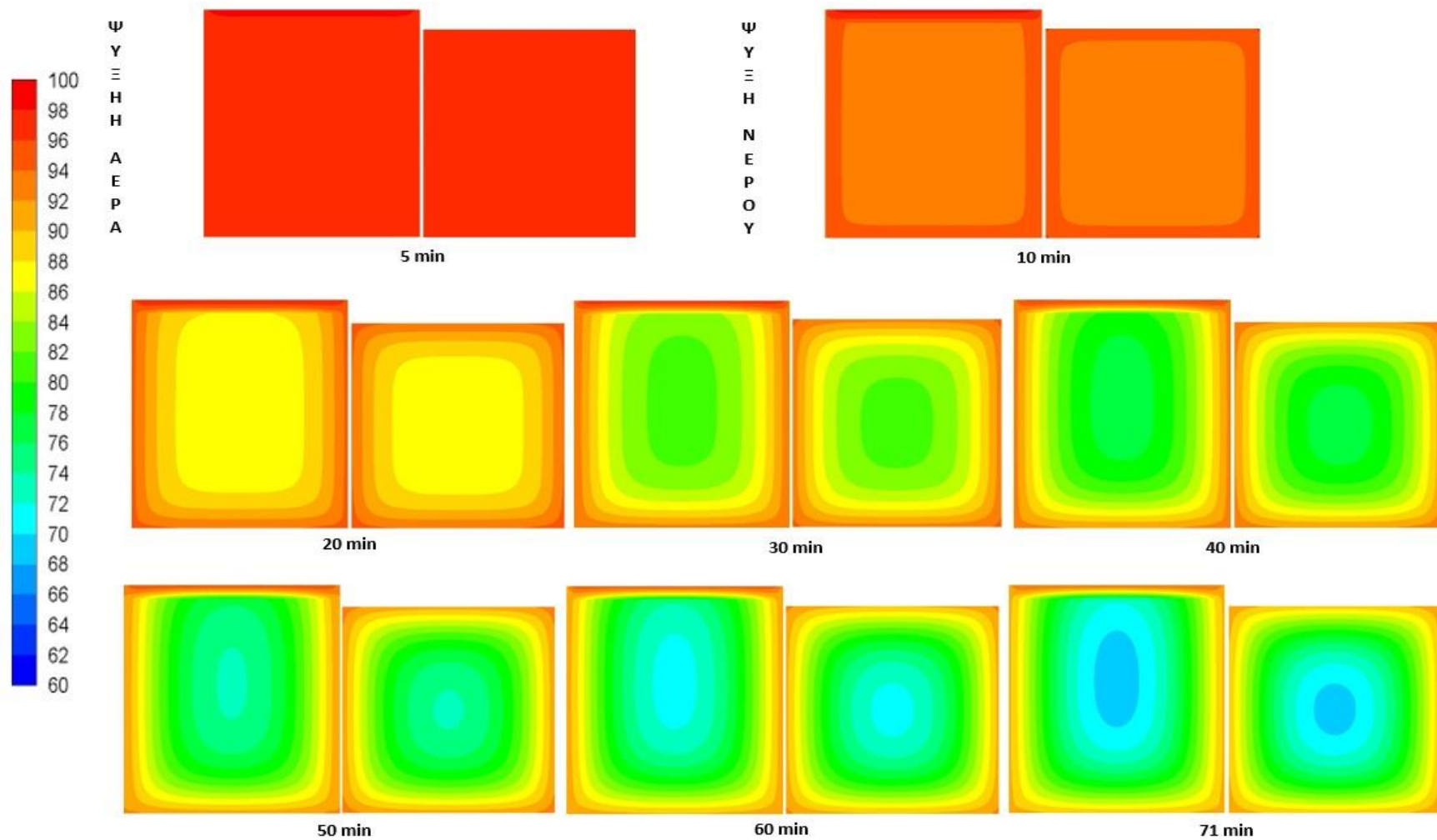
Σχήμα 81. Εξέλιξη της κατανομής του % διατήρησης του χρώματος (L) για $T_{IT}=95^{\circ}\text{C}$ στις κονσέρβες ανα ζεύγος (αριστερά κενό-δεξιά χωρίς κενό) στα 5 min τέλος ψύξης με αέρα και στα 10 min αρχή ψύξης με νερό για $h_{air}=5 \text{ W/m}^2\text{K}$, $h_{CW}=100 \text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{CW}=20^{\circ}\text{C}$ και $T_{air}=25^{\circ}\text{C}$.



Σχήμα 82. Εξέλιξη της κατανομής του % διατήρηση του χρώματος (a/b) για $T_{IT}=95^{\circ}\text{C}$ στις κονσέρβες ανα ζεύγος (αριστερά κενό-δεξιά χωρίς κενό) στα 5 min τέλος ψύξης με αέρα και στα 10 min αρχή ψύξης με νερό για $h_{air}=5\text{ W/m}^2\text{K}$, $h_{cw}=100\text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{cw}=20^{\circ}\text{C}$ και $T_{air}=25^{\circ}\text{C}$.



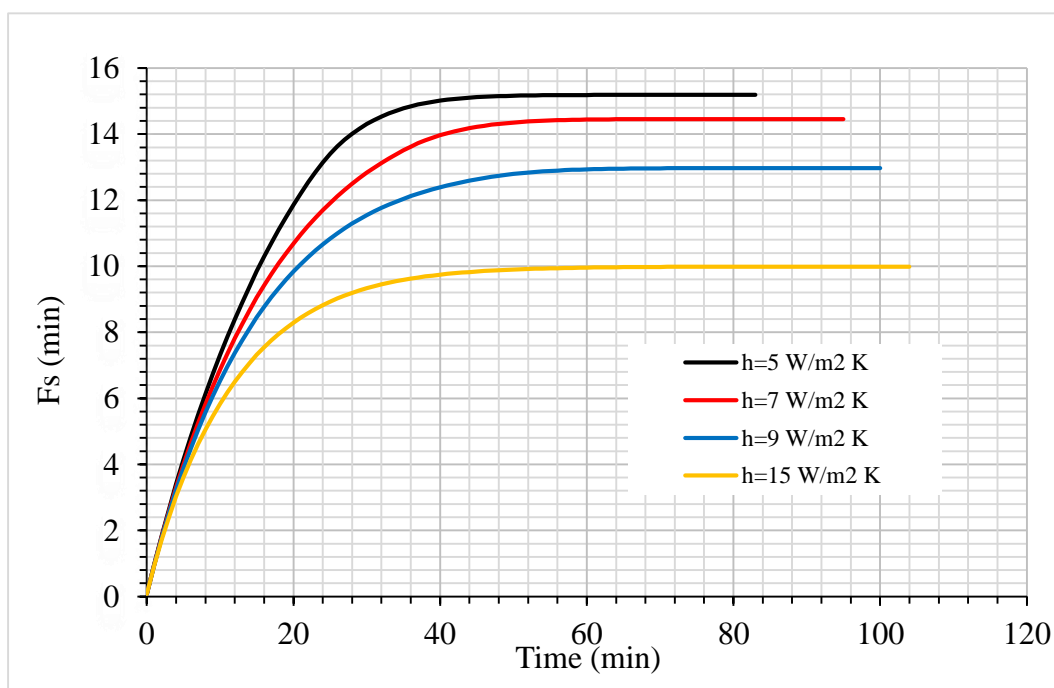
Σχήμα 83. Εξέλιξη της κατανομής του % διατήρησης του Βήτα καροτενίου για $T_{IT}=95^{\circ}\text{C}$ στις κονσέρβες ανα ζεύγος (αριστερά κενό-δεξιά χωρίς κενό) στα 5 min τέλος ψύξης με αέρα και στα 10 min αρχή ψύξης με νερό για $h_{air}=5\text{ W/m}^2\text{K}$, $h_{CW}=100\text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{CW}=20^{\circ}\text{C}$ και $T_{air}=25^{\circ}\text{C}$.



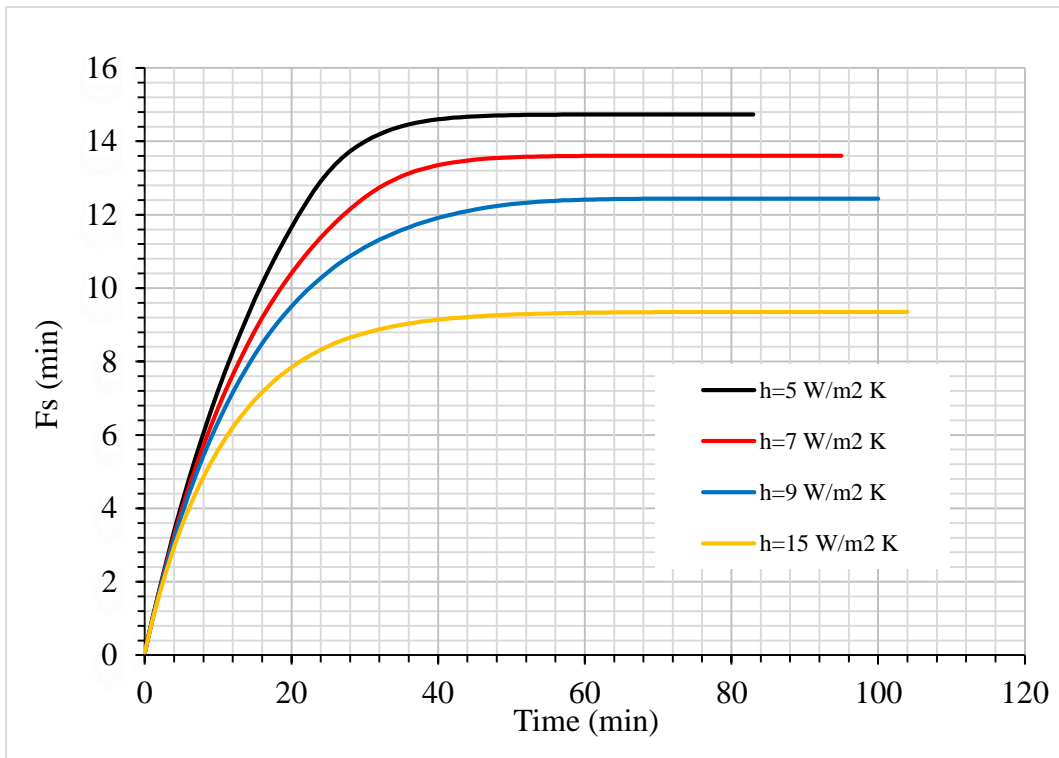
Σχήμα 84. Εξέλιξη της κατανομής του % διατήρηση του ασκορβικού για $T_{IT}=95^{\circ}\text{C}$ στις κονσέρβες ανα ζεύγος (αριστερά κενό-δεξιά χωρίς κενό) στα 5 min τέλος ψύξης με αέρα και στα 10 min αρχή ψύξης με νερό για $h_{air}=5\text{ W/m}^2\text{K}$, $h_{CW}=100\text{ W/m}^2\text{K}$, $T_{CW}=20^{\circ}\text{C}$ και $T_{air}=25^{\circ}\text{C}$.

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

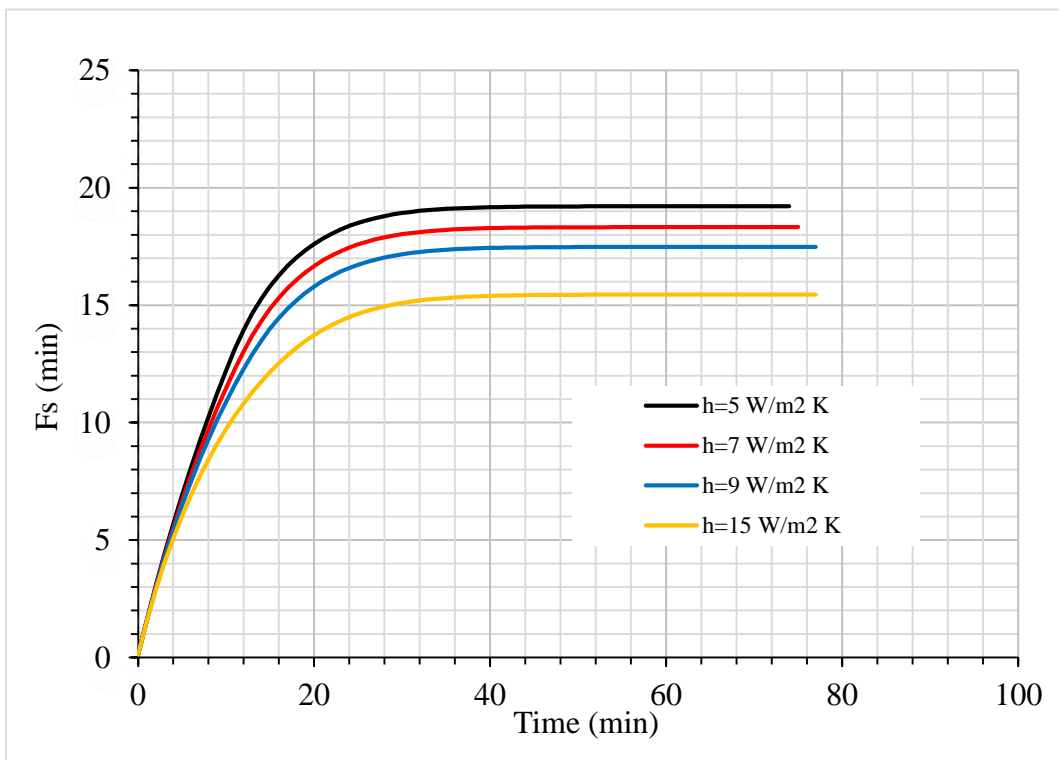
Στα Σχήματα 85-90 που ακολουθούν εξετάζεται η επίδραση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στον αέρα, σε συνδυασμό με τη θερμοκρασία γεμίσματος και για τις δύο περιπτώσεις. Σε κάθε περίπτωση παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας τόσο μειώνεται η τιμή F_s και αυτό συμβαίνει γιατί όταν ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας είναι μεγάλος η θερμότητα μεταφέρεται πιο γρήγορα με αποτέλεσμα την πιο γρήγορη ψύξη του προϊόντος στα διάφορα σημεία που εξετάστηκαν με αποτέλεσμα την μικρότερη μικροβιακή θανάτωση. Οι θερμοκρασίες γεμίσματος 88°C , 90°C εξετάστηκαν μόνο ως προς τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ και παρατηρήθηκε ότι είναι ανεπαρκείς. Στη θερμοκρασία γεμίσματος των 93°C , η απαιτούμενη τιμή $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}}$ επιτυγχάνεται όταν $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ και $7 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ στη περίπτωση της κονσέρβας με κενό και μόνο όταν $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ στη περίπτωση της κονσέρβας χωρίς κενό στους ίδιου χρόνου επεξεργασίας. Στη θερμοκρασία γεμίσματος των 95°C η απαιτούμενη τιμή $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}}$ επιτυγχάνεται σε όλους τους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας στη περίπτωση της κονσέρβας με κενό ενώ στη περίπτωση της κονσέρβας χωρίς κενό επιτυγχάνεται μόνο όταν $h_{air}=5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ και $7 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Στην υψηλότερη θερμοκρασία γεμίσματος των 98°C η απαιτούμενη τιμή F επιτυγχάνεται σε όλες τις μεταβολές του h_{air} και για τις δύο περιπτώσεις.



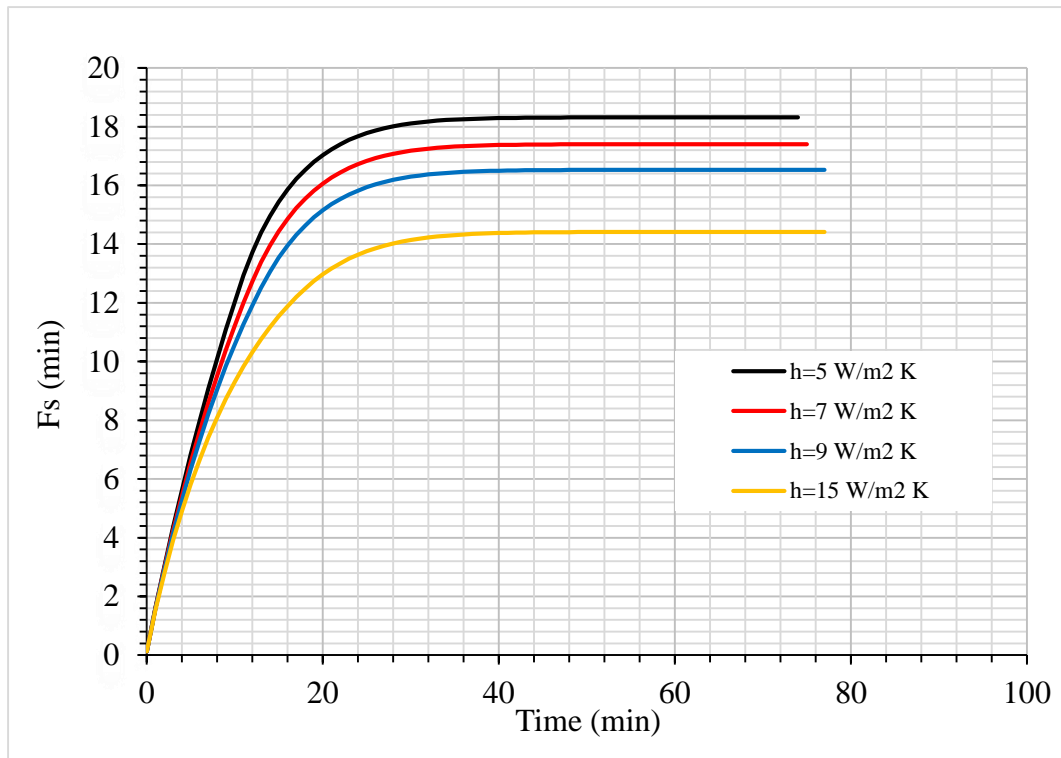
Σχήμα 85. Η ολοκληρωμένη τιμή F_s για όλους τους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας h_{air} που εξετάστηκαν για τη θερμοκρασία γεμίσματος $T_{IT}=93^{\circ}\text{C}$ στη μεταλλική κονσέρβα με κενό.



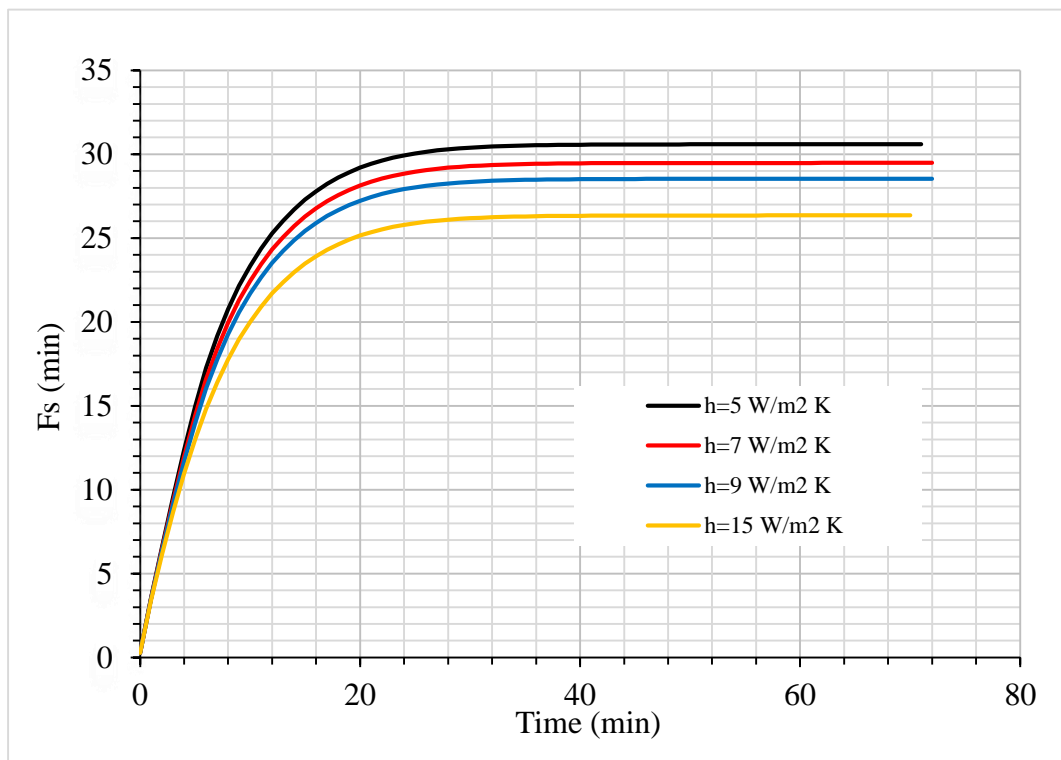
Σχήμα 86. Η ολοκληρωμένη τιμή F_s για όλους τους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας h_{air} που εξετάστηκαν για τη θερμοκρασία γεμίσματος $T_{\Pi}=93^{\circ}\text{C}$ στη μεταλλική κονσέρβα χωρίς κενό.



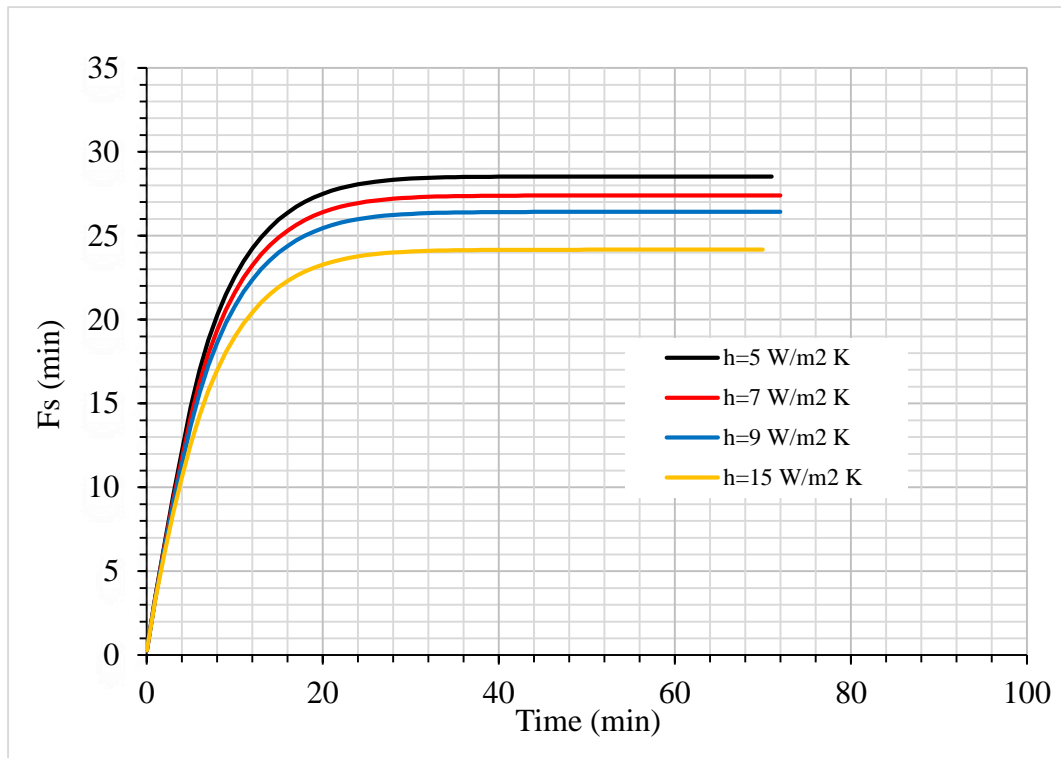
Σχήμα 87. Η ολοκληρωμένη τιμή F_s για όλους τους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας h_{air} που εξετάστηκαν για τη θερμοκρασία γεμίσματος $T_{\Pi}=95^{\circ}\text{C}$ στη μεταλλική κονσέρβα με κενό.



Σχήμα 88. Η ολοκληρωμένη τιμή F_s για όλους τους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας h_{air} που εξετάστηκαν για τη θερμοκρασία γεμίσματος $T_{IT}=95^{\circ}\text{C}$ στη μεταλλική κονσέρβα χωρίς κενό.



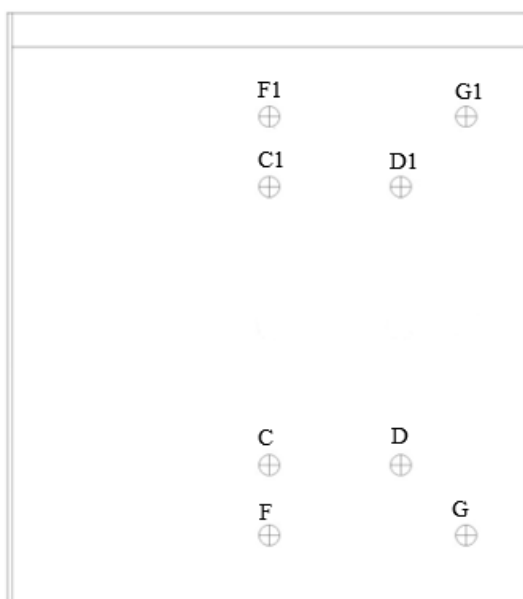
Σχήμα 89. Η ολοκληρωμένη τιμή F_s για όλους τους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας h_{air} που εξετάστηκαν για τη θερμοκρασία γεμίσματος $T_{IT}=98^{\circ}\text{C}$ στη μεταλλική κονσέρβα με κενό.



Σχήμα 90. Η ολοκληρωμένη τιμή F_s για όλους τους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας h_{air} που εξετάστηκαν για τη θερμοκρασία γεμίσματος $T_{\text{IT}}=93^{\circ}\text{C}$ στη μεταλλική κονσέρβα χωρίς κενό.

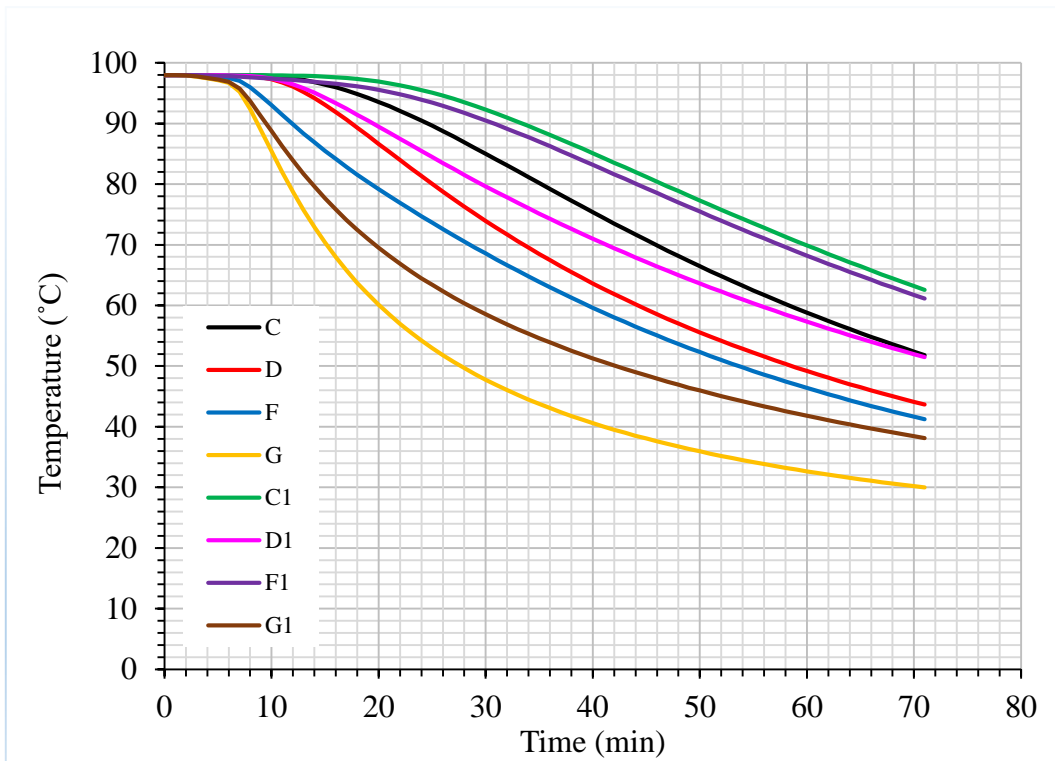
5.6.3 Επίδραση του κενού στη μεταφορά θερμότητας

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω ο τοματοπολτός θεωρείται στερεό προϊόν, οπότε η μεταφορά θερμότητας γίνεται με αγωγή. Από τα Σχήματα 45-47 στην περίπτωση της μεταλλικής κονσέρβας χωρίς κενό παρατηρείται ότι η μεταφορά θερμότητας είναι ομοιόμορφη και συμμετρική σε αντίθεση με τη περίπτωση της κονσέρβας με κενό η οποία φαίνεται μη συμμετρική λόγω ύπαρξης υδρατμών στο κενό. Για την περαιτέρω εξέταση του προβλήματος αυτών πάρθηκαν ακόμη τέσσερα σημεία C1 (0,0,0.84), D1 (0,0.02625,0.084), F1 (0,0,0.098), και G1 (0,0.039375,0.098) στο επάνω μέρος της μεταλλικής κονσέρβας.(Σχήμα 91).

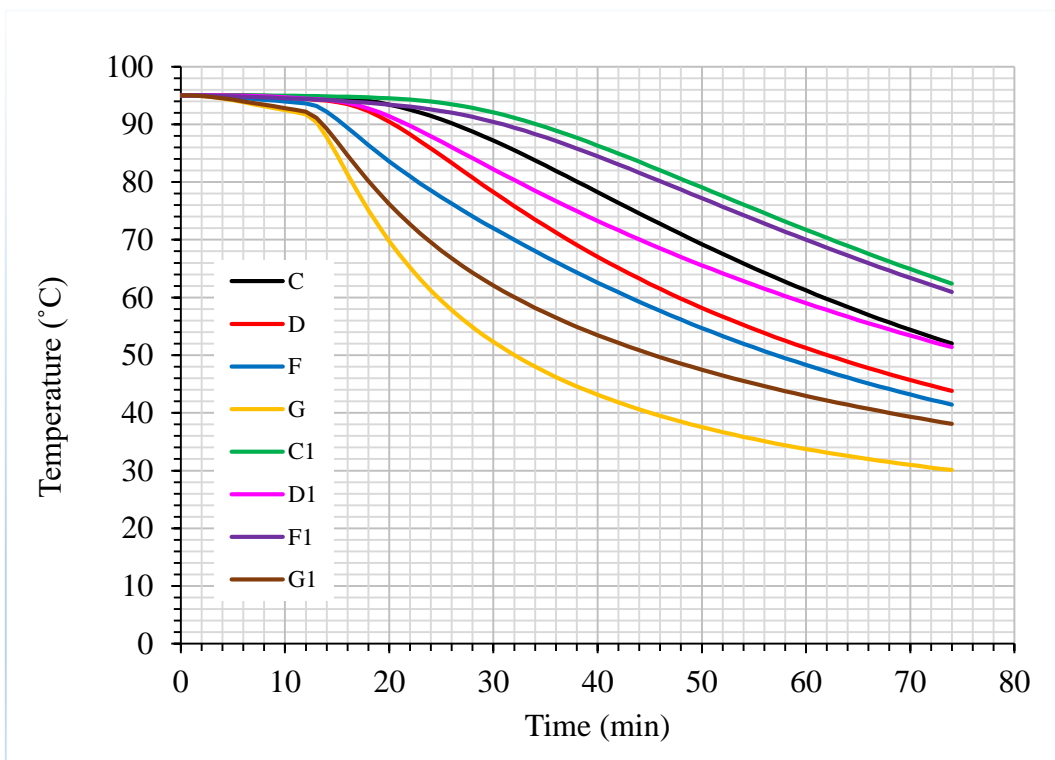


Σχήμα 91. Τα οχτώ σημεία που εξετάστηκαν στη μεταλλική κονσέρβα με κενό

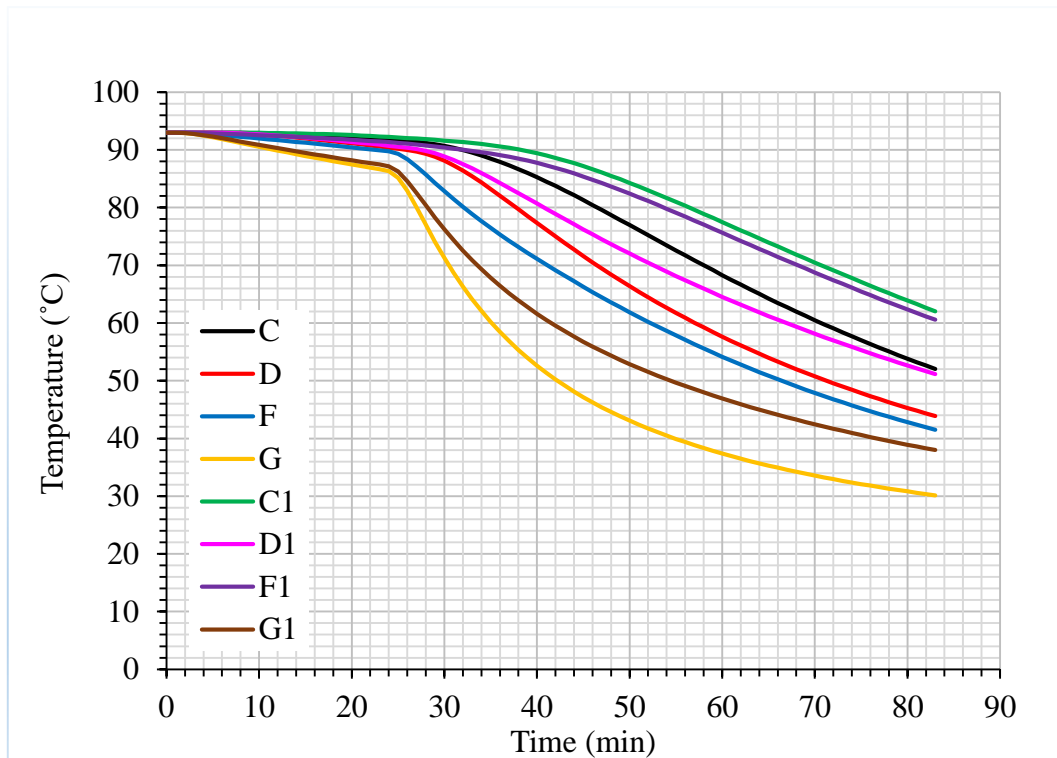
Στα Σχήματα 92, 93 και 94 παρουσιάζεται η εξέλιξη της θερμοκρασίας για τα οχτώ σημεία στη θερμοκρασία γεμίσματος 98°C , 95°C και 93°C . Αυτό που παρατηρείται είναι ότι τα σημεία F1 και C1 τα οποία είναι κοντά στο κέντρο και στην επάνω πλευρά της κονσέρβας, δηλαδή κοντά στο κενό με τους υδρατμούς έχουν μεγαλύτερες θερμοκρασίες από τα αντίστοιχα σημεία F και C τα οποία βρίσκονται στο κέντρο αλλά στη κάτω πλευρά της μεταλλικής κονσέρβας με αποτέλεσμα την αργή ψύξη τους σε σχέση με τα αντίστοιχα σημεία τα οποία ψύχονται πιο γρήγορα. Η διαφορά μεταξύ των σημείων αυτών είναι περίπου 10°C . Στα σημεία που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια της μεταλλικής κονσέρβας δεν έχουμε μεγάλη επίδραση στη θερμοκρασία γιατί οι υδρατμοί βρίσκονται προς τα πάνω με αποτέλεσμα να μην επηρεάζουν τη μεταφορά θερμότητας. Το ίδιο παρατηρείται σε όλες τις θερμοκρασίες γεμίσματος.



Σχήμα 92. Επίδραση του κενού στη θερμοκρασία στα οχτώ σημεία για τη θερμοκρασία γεμίσματος $T_{IT}=98^{\circ}\text{C}$ στη μεταλλική κονσέρβα με κενό.



Σχήμα 93. Επίδραση του κενού στη θερμοκρασία στα οχτώ σημεία για τη θερμοκρασία γεμίσματος $T_{IT}=95^{\circ}\text{C}$ στη μεταλλική κονσέρβα με κενό.



Σχήμα 94. Επίδραση του κενού στη θερμοκρασία στα οχτώ σημεία για τη θερμοκρασία γεμίσματος $T_{IT}=93^{\circ}\text{C}$ στη μεταλλική κονσέρβα με κενό.

Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω ακολουθεί ο Πίνακας 14 και 15 οι οποίοι παρουσιάζουν συνοπτικά όλους τους συνδυασμούς που εξετάστηκαν. Συγκεκριμένα αυτό που συμπεραίνεται και στις δύο περιπτώσεις με και χωρίς κενό είναι ότι όταν η θερμοκρασία γεμίσματος είναι 88°C και 90°C η απαιτούμενη ολοκληρωμένη τιμή F_s δεν επιτυγχάνεται στο μικρότερο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας $h_{\text{air}} = 5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ επομένως δεν μελετήθηκε για τους άλλους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας. Όταν η θερμοκρασία γεμίσματος είναι 93°C η ολοκληρωμένη τιμή F_s στη περίπτωση με το κενό επιτυγχάνεται στους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας 5, 7 και $9 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ενώ στη περίπτωση χωρίς το κενό επιτυγχάνεται μόνο στο $h_{\text{air}} = 5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ στο τέλος της ψύξης με αέρα. Όταν η θερμοκρασία γεμίσματος είναι 95°C η ολοκληρωμένη τιμή F_s στη περίπτωση με το κενό επιτυγχάνεται στους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας 5, 7 και $9 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ενώ στη περίπτωση χωρίς το κενό επιτυγχάνεται στους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας 5 και $7 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ στο τέλος της ψύξης με αέρα και όταν η θερμοκρασία γεμίσματος είναι 98°C η ολοκληρωμένη τιμή F_s και για τις δύο περιπτώσεις με και χωρίς κενό επιτυγχάνεται σε όλους τους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας 5, 7, 9 και $15 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ στο τέλος της ψύξης με αέρα. Επίσης βλέπουμε ότι όσο αυξάνεται ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας κατά

τη ψύξη με αέρα αυξάνεται ο χρόνος παραμονής του προϊόντος στον αέρα έτσι ώστε να γίνει η επίτευξη της ολοκληρωμένης τιμής F_s . Αυτό δεν παρατηρείται όταν η θερμοκρασία γεμίσματος είναι 98°C , δηλαδή η ολοκληρωμένη τιμή F_s επιτυγχάνεται στα 5 min ψύξη με αέρα και στους τέσσερις συντελεστές μεταφοράς θερμότητας και για τις δύο περιπτώσεις.

Τέλος όσο αφορά τα ποιοτικά χαρακτηριστικά αυτό που παρατηρείται είναι ότι ο πιο θερμανθεκτικός ποιοτικός παράγοντας είναι το Βήτα καροτένιο και ο πιο θερμοευαίσθητος ο παράγοντας του χρώματος L και για τις δύο περιπτώσεις που εξετάστηκαν.

Πίνακας 14. Συγκεντρωτικός πίνακας όλων των παραμέτρων που εξετάστηκαν στη περίπτωση μεταλλικής κονσέρβας με κενό

$F_{93,33^{\circ}\text{C}}^{8,89^{\circ}\text{C}}=12,6 \text{ min}$									
T ($^{\circ}\text{C}$)	h_{air} ($\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$)	t_{air} (min)	t (min)	F_{air} (min)	F_s (min)	% L	% a/b	% BC	% vit. C
88	5	90	135	5.55	5.59	-	-	-	-
	7	-	-	-	-	-	-	-	-
	9	-	-	-	-	-	-	-	-
	15	-	-	-	-	-	-	-	-
90	5	80	130	9	9.09	-	-	-	-
	7	-	-	-	-	-	-	-	-
	9	-	-	-	-	-	-	-	-
	15	-	-	-	-	-	-	-	-
93	5	23	83	12.85	15.18	44	62	88	66
	7	30	95	12.66	14.45	41	60	88	64
	9	45	100	12.63	12.92	39	58	87	62
	15	60	104	9.96	9.99	-	-	-	-
95	5	11	74	13.13	19.21	47	66	89	69
	7	12	75	13.03	18.32	46	65	89	69
	9	13	77	12.68	17.48	46	64	89	68
	15	17	77	12.28	15.45	-	-	-	-
98	5	5	71	14.96	30.60	46	65	88	69
	7	5	72	14.42	29.48	46	65	88	69
	9	5	72	13.97	28.53	46	65	88	69
	15	5	70	12.99	26.35	46	66	88	69

T: θερμοκρασία, h_{air}: συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στον αέρα, t_{air}: χρόνος παραμονής στον αέρα, t: ολικός χρόνος κατεργασίας, F_{air}: τιμή F της διεργασίας στον αέρα, F_s: ολοκληρωμένη τιμή της διεργασίας στο τέλος της ψύξης με νερό, % L στο τέλος της διεργασίας, % a/b: μέση τιμή διατήρησης χρώματος, % BC: ποσοστό διατήρησης καροτενοειδών (Beta Carotene), % vit. C: ποσοστό διατήρησης Βιταμίνης C στο τέλος της διεργασίας

Πίνακας 15. Συγκεντρωτικός πίνακας όλων των παραμέτρων που εξετάστηκαν στη περίπτωση μεταλλικής κονσέρβας χωρίς κενό

$F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}}=12,6 \text{ min}$									
T (°C)	h_{air} (W/m ² K)	t_{air} (min)	t (min)	F_{air} (min)	F_s (min)	% L	% a/b	% BC	% vit. C
88	5	90	135	5.47	5.51	-	-	-	-
	7	-	-	-	-	-	-	-	-
	9	-	-	-	-	-	-	-	-
	15	-	-	-	-	-	-	-	-
90	5	80	130	8.87	8.96	-	-	-	-
	7	-	-	-	-	-	-	-	-
	9	-	-	-	-	-	-	-	-
	15	-	-	-	-	-	-	-	-
93	5	23	83	12.63	14.73	44	62	88	66
	7	30	95	12.47	13.61	-	-	-	-
	9	45	100	12.14	12.44	-	-	-	-
	15	60	104	9.33	9.35	-	-	-	-
95	5	11	74	12.93	18.3	47	66	89	69
	7	12	75	12.73	17.4	46	65	89	69
	9	13	77	12.52	16.52	-	-	-	-
	15	17	77	12.20	14.41	-	-	-	-
98	5	5	71	14.79	28.53	46	65	88	69
	7	5	72	14.18	27.39	46	65	88	69
	9	5	72	13.67	26.42	46	65	88	69
	15	5	70	12.67	24.16	46	66	88	69

T: θερμοκρασία, h_{air} : συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στον αέρα, t_{air} : χρόνος παραμονής στον αέρα, t: ολικός χρόνος κατεργασίας, F_{air} : τιμή F της διεργασίας στον αέρα, F_s : ολοκληρωμένη τιμή της διεργασίας στο τέλος της ψύξης με νερό, % L στο τέλος της διεργασίας, % a/b: μέση τιμή διατήρησης χρώματος, % BC: ποσοστό διατήρησης καροτενοειδών (Beta Carotene), % vit. C: ποσοστό διατήρησης Βιταμίνης C στο τέλος της διεργασίας

Συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας μελέτης ήταν η προσομοίωση της «πλήρωσης εν θερμώ» διεργασίας για τον προσδιορισμό του απαιτούμενου χρόνου παραμονής για την επίτευξη βιομηχανικής αποστείρωσης κατά την παραγωγή τοματοπολτού με τη χρήση της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκε το υπολογιστικό μοντέλο και ακολούθησε η παραμετρική μελέτη, εξετάζοντας την επίδραση των κυριότερων παραγόντων της διεργασίας σε διάφορους συνδυασμούς για τον υπολογισμό του απαιτούμενου χρόνου βιομηχανικής αποστείρωσης σε δύο διαφορετικές περιπτώσεις μεταλλικής κονσέρβας, μιας με κενό και μια χωρίς κενό. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν ήταν η θερμοκρασία γεμίσματος (88°C , 90°C , 93°C , 95°C και 98°C), ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στον αέρα, h_{air} ($5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, $7 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, $9 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ και $15 \text{ W/m}^2 \text{ K}$) και η επίδραση της ύπαρξης κενού σε μεταλλική κονσέρβα παραγωγής τοματοπολτού στη μεταφορά θερμότητας.

Όταν η θερμοκρασία γεμίσματος ήταν 88°C και 90°C δεν επετεύχθη η απαιτούμενη ολοκληρωμένη τιμή F_s ίση προς $12,61\text{min}$ σε κανένα από τους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας που εξετάστηκαν και για καμία από τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Στη θερμοκρασία γεμίσματος 93°C η ολοκληρωμένη τιμή επετεύχθη στη περίπτωση με το κενό όταν ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ήταν $5 \text{ W/m}^2\text{K}$ και $7 \text{ W/m}^2\text{K}$, σε αντίθεση με τη περίπτωση της κονσέρβας με κενό όπου επετεύχθη μόνο όταν ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ήταν $5 \text{ W/m}^2\text{K}$. Επίσης όταν η θερμοκρασία γεμίσματος ήταν 95°C η ολοκληρωμένη τιμή F_s επετεύχθη στη περίπτωση με το κενό στους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας 5 , 7 και $9 \text{ W/m}^2\text{K}$ ενώ στη περίπτωση χωρίς το κενό επετεύχθη μόνο για τους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας 5 και $7 \text{ W/m}^2\text{K}$. Όταν η θερμοκρασία γεμίσματος ήταν 98°C η ολοκληρωμένη τιμή F_s επετεύχθη σε όλους τους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας και στις δύο περιπτώσεις. Τέλος όσον αφορά τις θερμοκρασίες γεμίσματος προσδιορίστηκε επίσης ο χρόνος παραμονής στον αέρα που απαιτείται για κάθε συνδυασμό για να επιτευχθεί η ολοκληρωμένη τιμή F_s . Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία γεμίσματος μειώνεται ο χρόνος ενώ όσο αυξάνεται ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας του αέρα αυξάνεται ο χρόνος.

Επιπλέον όσον αφορά την επίδραση της διεργασίας σε διάφορους ποιοτικούς παραγόντες που εξετάστηκαν στο τέλος της διεργασίας, η βέλτιστη διατήρηση επιτεύχθηκε

όταν η θερμοκρασία γεμίσματος ήταν 98°C ακολουθεί η θερμοκρασία γεμίσματος 95°C και 93°C κατά φθίνουσα σειρά. Από τους ποιοτικούς παράγοντες που εξετάστηκαν ο πιο θερμοευαίσθητος παράγοντας ήταν του χρώματος L, ακολουθεί ο παράγοντας a/b και το ασκορβικό οξύ. Ο πιο θερμοανθεκτικός ποιοτικός παράγοντας ήταν το Βήτα καροτένιο.

Τέλος όσον αφορά την επίδραση της ύπαρξης κενού ή όχι παρατηρήθηκε ότι η ύπαρξη κενού δεν επιδρά μειονεκτικά στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του προϊόντος και βοηθά στην επίτευξη της ολοκληρωμένης τιμής F_s λόγω της καθυστέρησης της ψύξης του προϊόντος.

Προτείνεται για μελλοντική έρευνα η εξέταση της επίδρασης της μεταφοράς θερμότητας με ανάδευση της μεταλλικής κονσέρβας με τοματοπολτό. Επίσης προτείνεται η εξέταση της επίδρασης του ποσοστού του κενού στη μεταλλική κονσέρβα και τέλος η εξέταση του απαιτούμενου χρόνου, για βιομηχανική αποστείρωση παραγωγής τοματοπολτού σε γυάλινο δοχείο.

ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ

Λατινικοί χαρακτήρες

B	χρόνος θέρμανσης (από άνοιγμα μέχρι κλείσιμο της παροχής ατμού) που απαιτείται για βιομηχανική αποστείρωση, min
B_i	ο αριθμός Biot, λόγος της αντίστασης που παρουσιάζει ένα σώμα στην ροή της θερμότητας στο εσωτερικό του με αγωγή προς την αντίσταση μεταφορά θερμότητας με συναγωγή από ένα ρευστό προς την επιφάνεια του ρευστού, αδιάστατος αριθμός
C_o	αρχική συγκέντρωση μιας θερμικά ευαίσθητης ουσίας, π.χ. αριθμός μικροοργανισμών ανά mL, g/L, κ.α.
C	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	διάμετρος μεταλλικής κονσέρβας, m
D_T	(ή απλώς D) χρόνος υποδεκαπλασιασμού 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 ή που απαιτείται για την καταστροφή δεδομένου ποσοστού θερμοευαίσθητου παράγοντα
F_o	αριθμός Fourier, αδιάστατος αριθμός
F_s	η ολοκληρωμένη τιμή F που αναφέρεται στη τιμή F του μέσου συνολικού όγκου της μεταλλικής κονσέρβας όπως υπολογίζεται από την εξίσωση $F_s = D_{T_{ref}} \times \log\left(\frac{N_o}{N(t)}\right)$ min
g	η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ αυτοκλείστου και προϊόντος στο κρίσιμο σημείο, στο τέλος του χρόνου θέρμανσης, $g = T_{RT} - T_g$, °F

h	ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας $W/(m^2 K)$
h_{air}	ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στον αέρα ($W/m^2 K$)
h_{cw}	ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στο νερό $W/(m^2 K)$
$J_0(x)$	συνάρτηση Bessel πρώτου είδους και μηδενικής τάξης
$J_1(x)$	συνάρτηση Bessel πρώτου είδους και πρώτης τάξης
j	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 $j_c = \frac{T_B-T_{CW}}{T_{hT}-T_{CW}}$ για την καμπύλη θέρμανσης και ψύξης του προϊόντος, αντίστοιχα, αδιάστατος αριθμός
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, $W/(m \cdot K)$
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, $m+g=T_{RT}-T_{CW}$, $^{\circ}F$
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_o	το ποσοστό επιβίωσης του μικροοργανισμού-στόχου στη μεταλλική κονσέρβα στο τέλος μιας δεδομένης θερμικής διεργασίας
p	πίεση του ρευστού, N/m^2
R	ακτίνα (κυλινδρικού σχήματος) προϊόντος, m
R_g	παγκόσμια σταθερά αερίων, 8314.34 J/kmol K
SE	
T	θερμοκρασία (προϊόντος στο κρίσιμο σημείο), °C (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, °C
T_{air}	η θερμοκρασία περιβάλλοντος σε αέρια ψύξη °C
T_{CW}	θερμοκρασία περιβάλλοντος (νερού) ψύξης, °C
T_g	θερμοκρασία προϊόντος –στο κρίσιμο σημείο– στο τέλος του χρόνου θέρμανσης (κλείσιμο παροχής ατμού), °C (εκτός αν καθορίζεται στο κείμενο διαφορετικά)
T_h	θερμοκρασία προϊόντος στο τέλος της φάσης θέρμανσης (και αρχή του κύκλου ψύξης) μιας θερμικής διεργασίας, °C (εκτός αν καθορίζεται στο κείμενο διαφορετικά)
T_{IT}	αρχική θερμοκρασία προϊόντος ή θερμοκρασία γεμίσματος στην κονσέρβα «πλήρωση εν θερμώ» διεργασία °C (εκτός αν καθορίζεται στο κείμενο διαφορετικά)
T_{RT}	θερμοκρασία αυτοκλείστου κατεργασίας, °C (εκτός αν καθορίζεται στο κείμενο διαφορετικά)
t	χρόνος, s (εκτός αν καθορίζεται στο κείμενο διαφορετικά).
Y	αδιάστατη, κανονικοποιημένη θερμοκρασία, οριζόμενη ως $Y_{can} = \frac{T_{RT}-T}{T_{RT}-T_{IT}}$
u	το διάνυσμα της ταχύτητας ως προς τον άξονα x, m^2/s

v το διάνυσμα της ταχύτητας ως προς τον άξονα y , m^2/s

Ελληνικά σύμβολα

z διαφορά θερμοκρασίας που απαιτείται για να δεκαπλασιαστεί ή να υποδεκαπλασιαστεί η τιμή D_T , $^{\circ}F$ (εκτός αν καθορίζεται στο κείμενο διαφορετικά)

α θερμική διαχυτότητα του προϊόντος, $\alpha=k/(\rho C_p)$, m^2/s

β_n νιοστή ρίζα της εξίσωσης $J_0(\beta_n) = 0$, αδιάστατος αριθμός

τ η τάση διάτμησης, N/m^2

Δείκτες πυκνότητα του προϊόντος, kg/m^3

c αναφερόμενος στη φάση της ψύξης

h αναφερόμενος στη φάση της θέρμανσης

required αναφερόμενος στην απαιτούμενη τιμή F

process αναφερόμενος στην τιμή F που επιτυγχάνεται κατά τη διάρκεια μιας θερμικής διεργασίας

Βιβλιογραφία

Διεθνής

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: 980-986pp.

Arpachi, V.S. 1966. *Conduction Heat Transfer*, Addison-Wersley: Ontario, 550 pp.

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, 76pp.

Barrett, D.M., Garcia, E. and Wayne, J.E. 1998. Textural modification of processing tomatoes. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 38 (3): 173-258pp.

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.

Courant, R. Friedrichs. K., and Lewy. H. 1967. On the Partial Difference Equations of Mathematical Physics. *IBM Journal* 11. 215-234pp.

Datta, A.K., Teixeira, A.A., 1987. Numerical modelling of natural convection heating in canned liquid foods. *Transactions of the ASAE* 30 (5), 1542–1551.

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.

Ferziger, J. and Peric, M. 2002. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. 3rd Edition. Springer Science.

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. A. Farid. M. M. Chen. X. D. & Richards. P. (2001). Thermal sterilization of canned food in a 3-D pouch using computational fluid dynamics. *Journal of Food Engineering* 48(2) 147-156.
- Ghani, A.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.
- Carslaw, H.S. and Jaeger, J.C. 1959. *Conduction of Heat in Solids*, 2nd Ed. Clarendon Press: Oxford, Great Britain, 510 pp.
- Gould, W.A.1992. *Tomato Production, Processing and Technology*. Baltimore, Maryland: CTI Publications Inc. Third Edition.535 pp.
- Goose, P.G. and Binsted, R. 1964. *Tomato paste, puree, juice and powder*, 1st ed. Great Britain: Food Trade Press Ltd.
- Hayakawa, K.I. 1974, Response charts for estimating temperatures in cylindrical cans of solid food subjected to time variable processing temperatures, Food science Dept. Cook College, Box 231, 10pp.
- 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): 89pp.
- Heuveling, EP. 2005, *Tomatoes*, Netherlands.
- Holdsworth, S.D. 1997. *Thermal processing of packaged foods*. New York: Blackie Academic & Professional. 283 pp.
- Jen, Y., Mnson, J.E., Stumbo, C.R., and Zahradnik, J.W. 1971. A procedure for estimating sterilization of and quality factor degradation in thermally processed foods. *Journal of Food Science*, 36:692-698.
- 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.
- Lund, D.B. 1975. Heat processing. In: Karel, M., Fennema, O.R., and Lund D.B. (eds.), *Principles of Food Science. Part II. Physical Principles of Food Preservation*. Marcel Dekker, Inc., New York, pp. 31-92.

- 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.
- 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.
- Motamedzadegan, and Tabarestani, 2018, *Tomato Production, Processing and Nutrition, Hndbook of Vegetables Processing*, Vol.2, Part.2, 23pp.
- NCA 1968. *Laboratory Manual for Food Canners and Processors*, Vol. I. National Canners Association, The AVI Publ. Co., Westport CT.
- Norton, T., & Sun, D. W. (2006). Computational fluid dynamics (CFD)-an effective and efficient design and analysis tool for the food industry: a review. *Trends in Food Science & Technology* 17(11). 600-620.
- 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.
- Ouden, 1995. *Physico-chemical stability of tomato products*, Land bouw univerite it Wageningern, 128pp.
- Richardson, L. F. 1911. The approximate arithmetical solution by finite differences of physical problems involving differential equations, with an application to the stresses in a masonry dam. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. Series, 307-357pp.
- Rodrigo M., Martinez A., Sanchis J., Trama J. and Giner V. 1990. Determination of Hotfill-hold-cool process specifications for crushed tomatoes. *Journal of Food Science* 55(4): 1029-1038.
- 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: 3350.
- 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.

- 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.
- Sun. Da-Wen. 2007. *Computational Fluid Dynamics in Food Processing*. CRC Press. Taylor and Francis Group.
- 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.
- Wang, ZL. and Sun, SH. 2003. *Handbook of Food Safety Engineering*. Edited by Da-Wen Sun.
- Wolf-Gladrow, D.A. 2000. *Lattice-gas cellular automata and lattice Boltzman methods. An introduction*. New York: Springer-Verlag, 1st Ed.
- 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.
- 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.
- Xia. B, & Sun. D. W. 2002. Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the food industry: a review. *Computers and Electronics in Agriculture*. 34(1). 5-24.

Ελληνική

- Καραουλάνης, ΓΔ. 2007. *Τεχνολογία επεξεργασίας οπωροκηπευτικών*, Αθήνα, Εκδόσεις Σταμούλη.
- Λάζος, ΣΕ. 2010. *Επεξεργασία Τροφίμων*, Αθήνα, Εκδόσεις Interbooks.

Μαραγκουδάκης, Σ. 2015, Μελέτη της “πλήρωση εν θερμώ” διεργασίας για την παραγωγή τοματοπολτού και βελτιστοποίηση της με τη βοήθεια υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, Μεταπτυχιακή διατριβή, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 170 σελίδες.

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, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 234 σελίδες.

Ολύμπιος, Μ. 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.: Γεωργάκης Σπ. Α. Θεσσαλονίκη Εκδόσεις Σύγχρονη Παιδεία.

Ιστοσελίδες

ANSYS, 2015. Engineering Simulation & 3D Design Software. <https://www.ansys.com>. Πρόσβαση στις 31/10/2018.

Comsol, 2018. Comsol Multiphysics® Modeling Software. <https://www.comsol.com/products>. Πρόσβαση στις 17/12/2018.

