



ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ  
AGRICULTURAL UNIVERSITY OF ATHENS

ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΤΡΟΦΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ & ΔΙΑΤΡΟΦΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΥ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ  
Π.Μ.Σ. ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ & ΔΙΑΤΡΟΦΗΣ ΤΟΥ  
ΑΝΘΡΩΠΟΥ

## **ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ**

---

**Ανάλυση της θερμικής διεργασίας παραγωγής  
κονσερβών με ντολμαδάκια γιαλατζί με χρήση  
Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής**

---

**ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Δ. ΛΑΜΠΡΟΠΟΥΛΟΣ**

**ΑΘΗΝΑ**

**2019**

Επιβλέπων καθηγητής: Νικόλαος Γ. Στοφόρος



**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ**

**Ανάλυση της θερμικής διεργασίας παραγωγής κονσερβών με ντολμαδάκια γιαλατζί με τη χρήση της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής**

**Analysis of thermal processing for the production of canned “gialatzi” dolms using Computational Fluid Dynamics**

**ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Δ. ΛΑΜΠΡΟΠΟΥΛΟΣ**

Επιβλέπων καθηγητής: Νικόλαος Γ. Στοφόρος

Εξεταστική Επιτροπή

Γεώργιος Σκεύης (Κύριος Ερευνητής, ΙΔΕΠ/ΕΚΕΤΑ)

Μαρία Γιαννακούρου (Αν. Καθηγήτρια, ΠΑΔΑ)

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος Επιστήμη και Τεχνολογία Τροφίμων & Διατροφής του Ανθρώπου, του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών. Ως την ελάχιστη δυνατή μνεία, με την παρούσα παράγραφο οφείλω να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στην εκπόνησή της και ιδιαίτερα: Τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κο Νικόλαο Γ. Στοφόρο, καθώς και τον διδακτορικό φοιτητή κο Χατζηδάκη Στυλιανό, καθώς και τον Γεωργουδη Κωσταντίνο από την εταιρεία ΖΑΝΑΕ για τις ανταλλαγές απόψεων, το ειλικρινές ενδιαφέρον τους και για τη σημαντική βοήθειά τους σε όλα τα στάδια της εργασίας.

Αθήνα, Νοέμβριος 2019

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας μελέτης ήταν η προσομοίωση της θερμικής διεργασίας, που ακολουθείται στη βιομηχανία και η σύγκριση των αποτελεσμάτων τους κατά την παραγωγή κονσέρβας ντολμαδάκια γιαλατζί, με τη χρήση της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων, σκοπός ήταν η διερεύνηση των δυνατοτήτων της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής, να παρέχει στο χρήστη αξιόπιστα αποτελέσματα όσο αναφορά τη μεταφορά θερμότητας, το επίπεδο ασφάλειας και την ποιοτική υποβάθμιση που δέχεται το προϊόν κατά τη διεργασία.

Το προϊόν που επιλέχθηκε προς μελέτη ήταν η κονσέρβα της εταιρείας ZANAE 200 gr με pH 3,8-4. Το εν λόγω προϊόν, απαρτίζεται από μεταλλικό κυλινδρικό περιέκτη και έξι ντολμαδάκια που περικλείονται από το χυμό της κονσέρβας. Η θερμική διεργασία που ακολουθείται στη βιομηχανία κατά τη παρασκευή του, έχει συνολική διάρκεια 46 λεπτών (CUT 10 min) στους 105°C και ακολουθεί ψύξη διάρκειας δέκα λεπτών. Η μεταφορά θερμότητας κατά τη διάρκεια της θερμικής διεργασίας γίνεται μέσω αγωγής και συναγωγής, αφού το προϊόν αποτελείται από στερεά (ντολμαδάκια) και υγρά (χυμός κονσέρβας) συστατικά. Η συλλογή των πειραματικών δεδομένων πραγματοποιήθηκε στο εργοστάσιο της εταιρείας ZANAE, με τη χρήση θερμοστοιχείου.

Για την πραγμάτωση της εργασίας δημιουργήθηκαν τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις (γεωμετρίες)

1. Όλη η κονσέρβα αποτελείται από το προϊόν ομογενοποιημένο.
2. Η κονσέρβα αποτελείται από το προϊόν ομογενοποιημένο με ένα στρώμα αέρα (κενό) 0.1 cm στο πάνω μέρος του μεταλλικού περιέκτη.
3. Η κονσέρβα αποτελείται από το χυμό, ένα ντολμαδάκι στο κέντρο και ένα στρώμα αέρα (κενό) 0.1 cm στο πάνω μέρος του μεταλλικού περιέκτη.
4. Η κονσέρβα αποτελείται από το χυμό, έξι ντολμαδάκια και ένα στρώμα αέρα (κενό) 0.1 cm στο πάνω μέρος του μεταλλικού περιέκτη.

Αρχικά, προσδιορίστηκαν βιβλιογραφικά οι θερμοφυσικές ιδιότητες του προϊόντος, και ακολούθησε η ανάπτυξη του αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης για κάθε μια από τις τέσσερις περιπτώσεις, σε μεταλλικό περιέκτη με διάμετρο 9,66 cm και ύψος 3cm. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε επίλυση των μοντέλων, και ακολούθησε αξιολόγηση και σύγκριση των αποτελεσμάτων των τεσσάρων περιπτώσεων, ως προς το

χρονοθερμοκρασιακό προφίλ, την τιμή της  $F$  διεργασίας, της ύπαρξης κενού η μη στη μεταλλική κονσέρβα καθώς και των ποιοτικών χαρακτηριστικών τους. Παρατηρήθηκε μεγάλη διαφορά στα αποτελέσματα, καθώς και μετατόπιση του κρίσιμου σημείου σε κάθε περίπτωση.

Η τέταρτη περίπτωση που αποδείχθηκε να προσομοιάζει καλύτερα τα πειραματικά δεδομένα, επιλύθηκε βάση της θερμικής επεξεργασίας που ακολουθείται στη βιομηχανία. Η σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα, πραγματοποιήθηκε βάση της θερμοκρασιακής μεταβολής και της τιμής της διεργασίας  $F$  που συντελείται, κατά τη διάρκεια της θερμικής διεργασίας. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης απέδειξαν την δυνατότητα προσομοίωσης μιας θερμικής επεξεργασίας μέσω της υπολογιστικής θερμοδυναμικής.

Λέξεις Κλειδιά: Υπολογιστική Ρευστοδυναμική, ντολμαδάκια γιαλατζί, θερμική επεξεργασία, προσομοίωση

## ABSTRACT

The purpose of this study was to simulate and compare the results of the heat treatment process used in industry for the production of canned “gialantzi” dolms, using computational fluid dynamics. By comparing the results, the aim was to investigate the capabilities of Computational Fluid Dynamics, to provide the user with reliable results as far as heat transfer, safety level and quality degradation that the product receives during the process.

The product selected for the study was the small can (metal container with a diameter of 9.66 cm and a height of 3 cm) of Zanae 200 gr at pH 3.8-4, the product in question consists of the metal cylindrical container and six dolms enclosed in the juice of the can. The heat treatment process used in the industry during its manufacture has a total of forty-six minutes (CUT 10 min) at 105 ° C followed by a cooling period of ten minutes. Heat transfer during the heat processing is achieved by means of conduction and convection, since the product consists of solid (dolms) and liquid (canned juice) ingredients. Experimental data were collected by ZANAE factory using thermocouples.

Four different cases (geometries) of different product composition were created to explore the problem space:

1. The entire can consists of homogenized product
2. The can consists of homogenized product with a thin layer of air (vacuum) 0.1 cm on the top part of the metal container.
3. The can consist of juice, a dolm in the center of the can and a thin layer of air (vacuum) 0.1 cm on the top part of the metal container.
4. The can consist of juice, six dolms and a thin layer of air (vacuum) 0.1 cm on the top part of the metal container.

Initially, the thermophysical properties of the product were determined bibliographically, followed by the development of a numerical simulation model, for each of the four cases. Subsequent evaluation and comparison of the results between the four cases was conducted, based on the time-temperature profile, the F value of the process, the existence of vacuum, the quality degradation, as well as the comparison of the time-temperature profiles of the cases. Significant difference among the results of all the four cases, as well as the displacement of the critical point were observed in each case.

The fourth case, which proved to best simulate the experimental data, was solved on the basis of the heat treatment used in the industry a process of a total heat treatment of 46 minutes (CUT 10 min) at 105 ° C followed by cooling for 10 minutes. The comparison with the experimental data was made on the basis of temperature change and the F value of the process that occurred during the heat treatment. The results of this comparison demonstrated the reliability of simulating a heat treatment with the use of Computational Fluid Dynamics.

Key words: Computational Fluid Dynamics, “gialantzi” dolms, heat treatment, simulation

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Σελίδα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	iv
ABSTRACT.....	vi
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....	viii
Εικόνες.....	x
Πίνακες .....	xii
Σχήματα .....	xiii
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ .....	3
2.1 Θερμική επεξεργασία στα τρόφιμα.....	3
2.1.1 Η ανάγκη συντήρησης των τροφίμων.....	3
2.2 Η κονσερβοποίηση.....	4
2.2.1 Ο σχεδιασμός της θερμικής διεργασίας.....	4
2.2.2 Κινητικές θερμικής απενεργοποίησης .....	5
2.2.3 Υπολογισμός θνησιμότητας θερμικών διεργασιών .....	8
2.2.4. Προγραμματισμός μιας θερμικής διεργασίας.....	8
2.2.5 Επίδραση της θερμικής επεξεργασίας στα ποιοτικά χαρακτηριστικά.....	9
2.3 Μεταφορά θερμότητας.....	11
2.3.1 Αγωγή .....	11
2.3.2 Συναγωγή.....	13
2.4 Ντολμαδάκια γιαλατζί - Το υπό μελέτη τρόφιμο .....	14
2.4.1 Προέλευση.....	14
2.4.2 Σύσταση.....	15
2.4.3 Διαδικασία κονσερβοποίησης.....	16
2.5 Υπολογιστική Ρευστοδυναμική .....	20
2.5.1 Εμπορικά Πακέτα CFD.....	22
2.5.2 Αρχές της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής.....	23
2.5.3 Μεθοδολογία επίλυσης προβλημάτων CFD.....	24
2.5.4 Εφαρμογές Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής στη βιομηχανία τροφίμων .....	25
3. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	27



3.1	Θερμοφυσικές ιδιότητες.....	27
3.1.1	Πειραματική μέτρηση θερμοφυσικών ιδιοτήτων . .....	30
3.2	Συλλογή πειραματικών δεδομένων .....	32
3.3	Αριθμητική επίλυση με τη χρήση λογισμικού προσομοίωσης .....	33
3.4	Μεθοδολογία CFD .....	33
3.5	Σχεδιασμός γεωμετρίας.....	34
3.6	Δημιουργία πλέγματος .....	38
3.7	Ανεξαρτησία πλέγματος.....	40
3.8	Θερμοκρασία αυτόκλειστου.....	41
3.9	Υπολογισμός της τιμής F της διεργασίας.....	45
3.10	Υπολογισμός της υποβάθμισης των ποιοτικών παραγόντων του προϊόντος. ....	46
3.11	Αξιολόγηση της θερμικής διεργασίας μέσω του λογισμικού προσομοίωσης....	47
3.12	Σημεία μέτρησης τιμών και εντοπισμού κρίσιμου σημείου .....	49
4.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ .....	54
4.1	Θερμοφυσικές ιδιότητες.....	54
4.2	Σύγκριση αριθμητικής λύσης μεταξύ των πλεγμάτων .....	55
4.3	Επίλυση της θερμικής επεξεργασίας.....	59
4.3.1	Θερμοκρασιακό προφίλ .....	59
4.3.2	Αποτελέσματα υπολογισμού της τιμής F της διεργασίας.....	85
4.3.3	Ποιοτική υποβάθμιση προϊόντος .....	105
4.4	Σύγκριση αποτελεσμάτων .....	124
4.4.1	Σύγκριση αποτελεσμάτων αριθμητικής επίλυσης στο κρίσιμο σημείο .....	124
4.4.2	Σύγκριση αποτελεσμάτων αριθμητικής επίλυσης με πειραματικά δεδομένα.	128
	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ.....	133
	ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ.....	135
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	138

## ΕΙΚΟΝΕΣ

Σελίδα

Εικόνα 1. Καμπύλη Ρυθμού Θερμικής Καταστροφής (Στοφόρος, 2005). .....	7
Εικόνα 2. Φαινόμενη Καμπύλη Χρόνου Θερμικής Καταστροφής (Στοφόρος, 2005). .....	7
Εικόνα 3. Καμπύλες θέρμανσης και ψύξης κονσερβοποιημένου τροφίμου. ....	9
Εικόνα 4. Θερμοφυσικές ιδιότητες νερού από βάση δεδομένων υλικών του AnsysFluent .....	28
Εικόνα 5. Θερμοφυσικές ιδιότητες διαφόρων σποροελαίων .....	29
Εικόνα 6 Γεωμετρία πρώτης περίπτωσης .....	34
Εικόνα 7 Γεωμετρία δεύτερης περίπτωσης, με πράσινο χρώμα δίνεται το κενό.....	34
Εικόνα 8 Γεωμετρία τρίτης περίπτωσης, με κόκκινο χρώμα ορίζεται ο χυμός ενώ με πράσινο το κενό στην κονσέρβα. ....	35
Εικόνα 9 Γεωμετρία τρίτης περίπτωσης, με πράσινο χρώμα παρουσιάζεται το ντολμαδάκι που περιέχεται στην κονσέρβα. ....	35
Εικόνα 10. Σχηματισμός των ντολμαδών για τη γεωμετρία της τέταρτης περίπτωσης. ...	36
Εικόνα 11. Σχηματισμός των ντολμαδών για τη γεωμετρία της τέταρτης περίπτωσης ύπο κάθετη όψη.....	37
Εικόνα 12. Γεωμετρία τέταρτης περίπτωσης όπου διαφαίνονται οι διαφορετικές διαστάσεις στα ντολμαδάκια.....	37
Εικόνα 13 Τριγωνικά και τετράγωνα κελιά με τιμή στρέβλωσης 1 (αριστερά) και 0.1 (δεξιά) .....	39
Εικόνα 14 Είδη κελίων που χρησιμοποιούνται από το πρόγραμμα Mesh.....	40
Εικόνα 15β. Κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για τη προσομοίωση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος ( $T_{RT}$ ) που ακολουθείται από τη βιομηχανία.....	43
Εικόνα 16. Κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της τιμής $F$ της διεργασίας. ....	45
Εικόνα 17. Κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της τιμής της υποβάθμισης των ποιοτικών παραγόντων. ....	46
Εικόνα 18 Θερμοφυσικές ιδιότητες αλουμινίου από βάση δεδομένων υλικών του AnsysFluent .....	48
Εικόνα 19 Θερμοφυσικές ιδιότητες υδρατμών από βάση δεδομένων υλικών του AnsysFluent .....	48
Εικόνα 20. Σημεία που εξετάστηκαν στο σενάριο 1.....	49
Εικόνα 21. Σημεία που εξετάστηκαν στο σενάριο 2.....	50
Εικόνα 22. Σημεία που εξετάστηκαν στο σενάριο 3.....	50
Εικόνα 23. Σημεία που εξετάστηκαν στο σενάριο 4.....	50
Εικόνες 24α, 24β. Τομές που χρησιμοποιήθηκαν για το σενάριο 1 ως προς τον άξονα $z$ ( $\alpha$ ) και ως προς τον άξονα $x,y$ ( $\beta$ ).....	51
Εικόνες 25α-25β. Τομές που χρησιμοποιήθηκαν για το σενάριο 2 ως προς τον άξονα $z$ ( $\alpha$ ) και ως προς τον άξονα $x,y$ ( $\beta$ ).....	51
Εικόνες 26-27, Τομή ως προς τον άξονα $z$ που χρησιμοποιήθηκαν για το σενάριο 3 .....	51
Εικόνα 28α. Τομή ως προς τον άξονα $x,y$ που χρησιμοποιήθηκε για το σενάριο 3.....	52
Εικόνα 29. Τομή ως προς τον άξονα $z$ που χρησιμοποιήθηκε για το τέταρτο σενάριο.....	52
Εικόνα 30. Τομή ως προς τον άξονα $z$ που χρησιμοποιήθηκε για το σενάριο 4 .....	53
Εικόνα 31. Τομή ως προς τον άξονα $x,y$ που χρησιμοποιήθηκε για το σενάριο 4 .....	53

<i>Εικόνα 32. Τομή ως προς τον άξονα x,y που χρησιμοποιήθηκε για το σενάριο 4</i> .....	53
Εικόνα 33, Κρίσιμο σημείο για τον μεταλλικό περιέκτη στο πρώτο σενάριο.....	60
Εικόνα 34, Κρίσιμο σημείο (B) και γεωμετρικό κέντρο (A) για τον μεταλλικό περιέκτη κατά το δεύτερο σενάριο .....	61
Εικόνα 35. Το κάτω μέρος του εσωτερικού της κονσέρβας για το τρίτο σενάριο, με κόκκινο χρώμα ορίζεται ο χυμός ενώ με πράσινο το ντολμαδάκι.....	63
Εικόνα 36. Κρίσιμο σημείο για το σενάριο 3 .....	63
Εικόνα 37. Σημείο μέτρησης θερμοκρασιακής εξέλιξης κατά τη διεργασία του χυμού της κονσέρβας για το σενάριο 3 .....	64
Εικόνα 38. . Κρίσιμο σημείο και σημείο συλλογής πειραματικών δεδομένων για το τέταρτο σενάριο από οριζόντια τομή.....	66
Εικόνα 38. Κρίσιμο σημείο και σημείο συλλογής πειραματικών δεδομένων για το τέταρτο σενάριο από κάθετη τομή.....	66

## ΠΙΝΑΚΕΣ

Σελίδα

Πίνακας 1. Αναλογία % συστατικών των ντολμάδων γιαλατζί υπό μορφή κονσέρβας των 200gr πριν τη θερμική επεξεργασία.....	16
Πίνακας 2. ιδιότητες διαλύματος κιτρικού οξέος με νερό.....	30
Πίνακας 3. Τιμές ορθογωνικής ποιότητας πλέγματος .....	38
Πίνακας 4. Τιμές στρέβλωσης πλέγματος .....	39
Πίνακας 5. Θερμοφυσικές ιδιότητες υλικών .....	54
Πίνακας 6. Επίδραση του πλέγματος και του υπολογιστικού χρόνου CPU με διακριτοποίηση χρόνου 2nd order implicit, χρονικό βήμα 5s, 10 επαναλήψεις ανά χρονικό βήμα και απόλυτο κριτήριο σύγκλισης $10^{-9}$ .....	56

## ΣΧΗΜΑΤΑ

Σελίδα

Σχήμα 1. Πειραματικά δεδομένα της εξέλιξης της θερμοκρασίας στο κέντρο έξι κονσερβών, του μέσου όρου τους, και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος κατά την επεξεργασία τους στο αυτόκλειστο θέρμανσης .....	32
Σχήμα 2. Εξέλιξη της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (retort) και της προσομοίωση (wall) των 50 min θέρμανσης.....	43
Σχήμα 3. Διαφορά θερμοκρασίας στο κρίσιμο σημείο μεταξύ του πυκνότερου πλέγματος (E) με τα άλλα πλέγματα για το σενάριο 1 με χρονικό βήμα 5s και κριτήριο σύγκλισης $10^{-9}$ . .....	56
Σχήμα 4 Διαφορά θερμοκρασίας στο κρίσιμο σημείο μεταξύ του πυκνότερου πλέγματος (E) με τα άλλα πλέγματα για το σενάριο 2 με χρονικό βήμα 5s και κριτήριο σύγκλισης $10^{-9}$ . .....	57
Σχήμα 5 Διαφορά θερμοκρασίας στο κρίσιμο σημείο μεταξύ του πυκνότερου πλέγματος (E) με τα άλλα πλέγματα για το σενάριο 3 με χρονικό βήμα 5s και κριτήριο σύγκλισης $10^{-9}$ . .....	57
Σχήμα 6. Διαφορά θερμοκρασίας στο κρίσιμο σημείο μεταξύ του πυκνότερου πλέγματος (E) με τα άλλα πλέγματα για το σενάριο 4 με χρονικό βήμα 5s και κριτήριο σύγκλισης $10^{-9}$ . .....	58
Σχήμα 7. Εξέλιξη της θερμοκρασίας σε διάφορα σημεία του προϊόντος όπως δίνονται στην Εικόνα 20 για το σενάριο 1 .....	60
Σχήμα 8. Εξέλιξη της θερμοκρασίας στο κρίσιμο σημείο (B) και γεωμετρικό κέντρο (A) κατά το δεύτερο σενάριο .....	61
Σχήμα 9. Εξέλιξη της θερμοκρασίας κατά τη θερμική διεργασία σε διάφορα σημεία του προϊόντος όπως δίνονται στην Εικόνα 21 για το σενάριο 2 .....	62
Σχήμα 10. Εξέλιξη της θερμοκρασίας κατά τη θερμική διεργασία σε διάφορα σημεία του προϊόντος όπως δίνονται στην Εικόνα 22 για το σενάριο 3 .....	64
Σχήμα 11. Τα θερμοκρασιακά προφίλ της διεργασίας του χυμού της κονσέρβας (liq), της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (TRT) και του κρίσιμου σημείου (A) για το τρίτο σενάριο. ....	65
Σχήμα 12. Το χρονοθερμοκρασιακό προφίλ για το κρίσιμο σημείο και το σημείο συλλογής πειραματικών δεδομένων για το τέταρτο σενάριο όπως παρουσιάζονται στην Εικόνα 38. ....	67
Σχήμα 13. Το χρονοθερμοκρασιακό προφίλ σε διάφορα σημεία του προϊόντος όπως δίνονται στην Εικόνα 23 για το σενάριο 4.....	67
Σχήμα 14. Τα θερμοκρασιακά προφίλ της διεργασίας του χυμού της κονσέρβας, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και του κρίσιμου σημείου για το τέταρτο σενάριο.....	68
Σχήμα 15. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας κατά τη θέρμανση για Σενάριο 1 με κάθετη τομή .....	69
Σχήμα 16. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας κατά τη ψύξη για Σενάριο 1 με κάθετη τομή .....	70
Σχήμα 17. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας κατά τη θέρμανση για Σενάριο 1 με οριζόντια τομή .....	71
Σχήμα 18. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας κατά τη ψύξη για Σενάριο 1 με οριζόντια τομή .....	72

Σχήμα 19. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας κατά τη θέρμανση για Σενάριο 2 με κάθετη τομή .....	73
Σχήμα 20. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας κατά τη ψύξη για Σενάριο 2 με κάθετη τομή .....	74
Σχήμα 21. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας κατά τη θέρμανση για Σενάριο 2 με οριζόντια τομή .....	75
Σχήμα 22. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας κατά τη ψύξη για Σενάριο 2 με οριζόντια τομή .....	76
Σχήμα 23. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας κατά τη θέρμανση για Σενάριο 3 με κάθετη τομή .....	77
Σχήμα 24. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας κατά τη ψύξη για Σενάριο 3 με κάθετη τομή .....	78
Σχήμα 25. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας κατά τη θέρμανση για Σενάριο 3 με οριζόντια τομή .....	79
Σχήμα 26. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας κατά τη ψύξη για Σενάριο 3 με οριζόντια τομή .....	80
Σχήμα 27. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας κατά τη θέρμανση για Σενάριο 4 με κάθετη τομή .....	81
Σχήμα 28. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας κατά τη ψύξη για Σενάριο 4 με κάθετη τομή .....	82
Σχήμα 29. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας κατά τη θέρμανση για Σενάριο 4 με οριζόντια τομή .....	83
Σχήμα 30. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας κατά τη ψύξη για Σενάριο 4 με οριζόντια τομή .....	84
Σχήμα 31. Η τιμή της διεργασίας F για $F_{105.11^{\circ}\text{C}}^{10^{\circ}\text{C}}$ για το κρίσιμο σημείο στο σενάριο 1...85	85
Σχήμα 32. Η τιμή της διεργασίας F για $F_{105.11^{\circ}\text{C}}^{10^{\circ}\text{C}}$ για το κρίσιμο σημείο στο σενάριο 2..86	86
Σχήμα 33. Η τιμή της διεργασίας F για $F_{105.11^{\circ}\text{C}}^{10^{\circ}\text{C}}$ για το κρίσιμο σημείο στο τρίτο σενάριο. ....86	86
Σχήμα 34. Η τιμή της διεργασίας F για $F_{105.11^{\circ}\text{C}}^{10^{\circ}\text{C}}$ για το κρίσιμο σημείο στο τέταρτο σενάριο.....87	87
Σχήμα 35. Οι τιμές της διεργασίας F για $F_{105.11^{\circ}\text{C}}^{10^{\circ}\text{C}}$ για το κρίσιμο σημείο και το σημείο συλλογής πειραματικών δεδομένων για το τέταρτο σενάριο. ....87	87
Σχήμα 36. Οι τιμές της διεργασίας F για $F_{105.11^{\circ}\text{C}}^{10^{\circ}\text{C}}$ για στο κρίσιμο σημείο για τα τέσσερα σενάρια.....88	88
Σχήμα 37. Εξέλιξη της κατανομής της διεργασίας F για $F_{105.11^{\circ}\text{C}}^{10^{\circ}\text{C}}$ τά τη θέρμανση για Σενάριο 1 με κάθετη τομή.....89	89
Σχήμα 38. Εξέλιξη της κατανομής της διεργασίας F για $F_{105.11^{\circ}\text{C}}^{10^{\circ}\text{C}}$ κατά τη ψύξη για Σενάριο 1 με κάθετη τομή.....90	90
Σχήμα 39. Εξέλιξη της κατανομής της διεργασίας F για $F_{105.11^{\circ}\text{C}}^{10^{\circ}\text{C}}$ κατά τη θέρμανση για Σενάριο 1 με οριζόντια τομή.....91	91
Σχήμα 40. Εξέλιξη της κατανομής της διεργασίας F για $F_{105.11^{\circ}\text{C}}^{10^{\circ}\text{C}}$ κατά τη ψύξη για Σενάριο 1 με οριζόντια τομή.....92	92
Σχήμα 41. Εξέλιξη της κατανομής της διεργασίας F για $F_{105.11^{\circ}\text{C}}^{10^{\circ}\text{C}}$ κατά τη θέρμανση για Σενάριο 2 με κάθετη τομή.....93	93



Σχήμα 66. Εξέλιξη της κατανομής % διατήρηση της θειαμίνης $C_{121.11}^{10^{\circ}C}$ κατά τη ψύξη για σενάριο 2 με κάθετη τομή.....	117
Σχήμα 67. Εξέλιξη της κατανομής % διατήρηση της θειαμίνης $C_{121.11}^{10^{\circ}C}$ κατά τη θέρμανση για σενάριο 3 με οριζόντια τομή.....	118
Σχήμα 68. Εξέλιξη της κατανομής % διατήρηση της θειαμίνης $C_{121.11}^{10^{\circ}C}$ κατά τη ψύξη για σενάριο 3 με οριζόντια τομή.....	119
Σχήμα 69. Εξέλιξη της κατανομής % διατήρηση της θειαμίνης $C_{121.11}^{10^{\circ}C}$ κατά τη θέρμανση για σενάριο 4 με κάθετη τομή.....	120
Σχήμα 70. Εξέλιξη της κατανομής % διατήρηση της θειαμίνης $C_{121.11}^{10^{\circ}C}$ κατά τη ψύξη για σενάριο 4 με κάθετη τομή.....	121
Σχήμα 71. Εξέλιξη της κατανομής % διατήρηση της θειαμίνης $C_{121.11}^{10^{\circ}C}$ κατά τη θέρμανση για σενάριο 4 με οριζόντια τομή.....	122
Σχήμα 72. Εξέλιξη της κατανομής % διατήρηση της θειαμίνης $C_{121.11}^{10^{\circ}C}$ κατά τη ψύξη για σενάριο 4 με οριζόντια τομή.....	123
Σχήμα 73. θερμοκρασιακή εξέλιξη κατά την διεργασία στο κρίσιμο σημείο για τις τέσσερις περιπτώσεις και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος.....	125
Σχήμα 74. Διαφορά θερμοκρασίας στο κρίσιμο σημείο μεταξύ της πρώτης περίπτωσης (c1) με τις άλλες περιπτώσεις (c2, c3 και c4).....	126
Σχήμα 75. Διαφορά θερμοκρασίας στο κρίσιμο σημείο μεταξύ της δεύτερης περίπτωσης (c2) με τις άλλες περιπτώσεις (c1, c3 και c4).....	126
Σχήμα 76. Διαφορά θερμοκρασίας στο κρίσιμο σημείο μεταξύ της τρίτης περίπτωσης (c3) με τις άλλες περιπτώσεις (c1, c3 και c4).....	127
Σχήμα 77. Διαφορά θερμοκρασίας στο κρίσιμο σημείο μεταξύ της τέταρτης περίπτωσης (c4) με τις άλλες περιπτώσεις (c1, c3 και c4).....	127
Σχήμα 78. θερμοκρασιακό προφίλ των τεσσάρων περιπτώσεων στο κρίσιμο σημείο και μέσο όρο πειραματικών δεδομένων.....	129
Σχήμα 79. θερμοκρασιακό προφίλ της τέταρτης περίπτωσης και των πειραματικών δεδομένων στο σημείο συλλογής πειραματικών δεδομένων και θερμοκρασίας περιβάλλοντος πειραματικών δεδομένων (TRT) και προσομοίωσης (wall).....	130
Σχήμα 80. θερμοκρασιακό προφίλ της τέταρτης περίπτωσης (A), μέσου όρου των πειραματικών δεδομένων (M.O.) και θερμοκρασίας περιβάλλοντος πειραματικών δεδομένων (TRT) και προσομοίωσης (wall). ....	130
Σχήμα 81. Διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των πειραματικών δεδομένων (p1) με την τέταρτη περίπτωση στο σημείο συλλογής πειραματικών δεδομένων. ....	131
Σχήμα 82. Διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του μέσου όρου πειραματικών δεδομένων (M.O) με την τέταρτη περίπτωση στο σημείο συλλογής πειραματικών δεδομένων. ....	131
Σχήμα 83. Εξέλιξη της τιμής διεργασίας F για $F_{105.11}^{10^{\circ}C}$ του μέσου όρου πειραματικών δεδομένων (M.O), με την τέταρτη περίπτωση στο σημείο συλλογής πειραματικών δεδομένων (σημείο A). ....	132



## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ως τρόφιμο ορίζεται κάθε υλικό ή ουσία που άμεσα ή μετά από επεξεργασία χρησιμοποιείται για τη διατροφή του ανθρώπου. Από την αρχαιότητα έως τις μέρες μας η ανάγκη εξασφάλισης και διατήρησης των τροφίμων για μεγάλο χρονικό διάστημα, οδήγησε στην εφεύρεση πολλών τρόπων συντήρησης των τροφίμων. Στο σύγχρονο βιομηχανικό διατροφικό σύστημα η εμπορευματοποίηση της τροφής, καθώς και οι σημαντικές αλλαγές στον τρόπο κάλυψης των διατροφικών μας αναγκών, έχουν κάνει επιτακτική την ανάγκη ανάπτυξης και μελέτης της επεξεργασίας-συντήρησης και ασφάλειας των τροφίμων. Μια μέθοδος συντήρησης τροφίμων είναι η κονσερβοποίηση, που ορίζεται ως η θερμική επεξεργασία, είτε παστερίωση είτε εμπορική αποστείρωση, τροφίμων τα οποία βρίσκονται σε ερμητικά κλειστούς περιέκτες (Στοφόρος, 2017).

Σήμερα, περισσότερες περιπτώσεις επεξεργασμένων τροφίμων, όπως και στην κονσερβοποίηση, η βιομηχανία τροφίμων ακολουθεί αυτοματοποιημένες μεθόδους κατά την επεξεργασία τροφίμων, ώστε να εξασφαλίσει τη βέλτιστη δυνατότητα ενός ασφαλές και ποιοτικού προϊόντος σε όσο το δυνατόν ταχύτερους χρόνους και μικρότερο κόστος. Ο χρόνος και η ένταση της θερμικής επεξεργασίας που δέχεται το εκάστοτε προϊόν, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες (το μέγεθος του προϊόντος, την οξύτητα του προϊόντος, το μικροβιακό στόχο κλπ). Η επίτευξη αποστείρωσης ενός προϊόντος καθορίζεται στο σημείο της μικρότερης θνησιμότητας (Silva et al., 1993) που ονομάζεται κρίσιμο σημείο του προϊόντος. Ως κρίσιμο σημείο ορίζεται το σημείο στο προϊόν που δέχεται τη μικρότερη επίδραση της επεξεργασίας, όσον αφορά στην καταστροφή των ανεπιθύμητων παραγόντων (μικροοργανισμοί, ένζυμα, κλπ.) και αποτελεί τον στόχο της θερμικής επεξεργασίας. Οι Teixeira κ.α.(1969b) συμπέραναν ότι το σημείο ελάχιστης θνησιμότητας εξαρτάται από τη γεωμετρία του προϊόντος και τις συνθήκες επεξεργασίας, ενώ οι Silva και Korczak (1994) αναφέρουν ότι η θέση του κρίσιμου σημείου μπορεί να προσδιοριστεί πειραματικά. Η εύρεση της βέλτιστης θερμικής επεξεργασίας για ένα προϊόν έχει ιδιαίζουσα σημασία αφού μια ηπιότερη θερμική επεξεργασία οδηγεί σε ένα μη ασφαλές προϊόν, ενώ μια μεγαλύτερη θερμική επεξεργασία, διασφαλίζει την ασφάλεια του προϊόντος, αλλά οδηγεί στην ποιοτική υποβάθμιση του (Velioglu et al., 2011).

Η ραγδαία εξέλιξη που συντελείται τις τελευταίες δεκαετίες στην τεχνολογία και στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές, έδωσε τη δυνατότητα ανάπτυξης προγραμμάτων, που με την επίλυση πολύπλοκων μαθηματικών εξισώσεων, παρέχουν στο χρήστη τη δυνατότητα προσομοίωσης με ακρίβεια πολύπλοκων συστημάτων. Με τον τρόπο αυτό δόθηκε η

δυνατότητα σε πολλούς κλάδους, και ιδιαιτέρως στη μηχανική, διεξαγωγής πειραμάτων με ανέξοδο, γρήγορο και αποτελεσματικό τρόπο. Η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (Computational Fluid Dynamics, CFD) είναι μια σύγχρονη αριθμητική τεχνική για την επίλυση προβλημάτων ροής ρευστού, μεταφοράς θερμότητας και μάζας, δίνοντας τη δυνατότητα σχεδιασμού και ανάλυσης μεθόδων επεξεργασίας τροφίμων που ακολουθούνται στη βιομηχανία τροφίμων, παρέχοντας τη δυνατότητα ποιοτικής και ποσοτικής αξιολόγησης τους. Με το CFD, πολλοί διαφορετικοί συνδυασμοί παραμέτρων, σχεδιασμού και συνθηκών μπορούν να αξιολογηθούν στον υπολογιστή, ξεπερνώντας έτσι την ανάγκη πραγματικής δοκιμής τους με κάθε τροποποίηση, οδηγώντας στη βελτιστοποίηση των υφιστάμενων συστημάτων (sun 2007).

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η προσομοίωση της θερμικής επεξεργασίας, που ακολουθείται στη βιομηχανία, για την παρασκευή κονσερβοποιημένων προϊόντων τύπου ντολμαδάκια γιαλατζί, με τη χρήση της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής, και η διερεύνηση των δυνατοτήτων της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής, να παρέχει στο χρήστη αξιόπιστα αποτελέσματα όσο αναφορά τη μεταφορά θερμότητας, το επίπεδο ασφάλειας και την ποιοτική υποβάθμιση που δέχεται το προϊόν κατά τη διεργασία.

## 2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Για αιώνες ο άνθρωπος αντιμετώπισε το πρόβλημα της συντήρησης των τροφίμων που παρήγαγε, λόγω της αλλοίωσης που παρατηρούσε σε αυτά μετά το πέρας ορισμένου χρόνου. Αρχικά οι λύσεις συντήρησης των τροφίμων χρησιμοποιούσαν χαμηλές θερμοκρασίες είτε με ψύξη είτε με ξήρανση. Με την πάροδο του χρόνου η αύξηση του πληθυσμού καθώς και οι αλλαγές στη δομή της κοινωνίας, οδήγησαν στη βιομηχανοποίηση της παραγωγής τροφίμων, δημιουργώντας την ανάγκη εξεύρεσης τρόπων αύξησης της διάρκειας ζωής των τροφίμων, για την ασφαλή μεταφορά του από τον παραγωγό στον καταναλωτή.

### 2.1 Θερμική επεξεργασία στα τρόφιμα

#### 2.1.1 Η ανάγκη συντήρησης των τροφίμων

Η θερμική επεξεργασία αποτελεί ίσως την πιο ευρέως διαδεδομένη μέθοδο επεξεργασίας και συντήρησης τροφίμων. Ως θερμική επεξεργασία τροφίμων ορίζεται η διαδικασία κατά την οποία το προϊόν εκτίθεται, για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, σε υψηλές θερμοκρασίες. Στόχος της θερμικής επεξεργασίας είναι η μείωση του μικροβιακού φορτίου η καταστροφή των τοξίνων και η αδρανοποίηση των ενζύμων σε τέτοιο βαθμό ώστε να μην επιβιώσουν παθογόνοι και αλλοιογόνοι μικροοργανισμοί αλλά και να μην υποβαθμίζεται ποιοτικά το τρόφιμο. Κατά τη διάρκεια μιας θερμικής επεξεργασίας προκαλούνται μεταβολές στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά και τη θρεπτική αξία των τροφίμων (βιταμίνες, χρώμα, άρωμα, γεύση) που μπορεί να οδηγήσει στην ποιοτική υποβάθμιση του προϊόντος. Για το λόγο αυτό είναι ιδιαίζουσας σημασίας να βρεθεί η χρυσή τομή του είδους, του χρόνου και της έντασης της θερμικής επεξεργασίας που θα εφαρμοστεί σε κάθε προϊόν.

Η θερμική επεξεργασία ακολουθεί διαφορετική προσέγγιση στο εκάστοτε τρόφιμο και η κάθε μια αποτελεί ξεχωριστό κομμάτι στη βιομηχανία επεξεργασίας τροφίμων. Η εφαρμογή του πραγματοποιείται με διαφορετικές μεθόδους (άμεση επαφή μέσου θέρμανσης με το τρόφιμο ή έμμεσα), και εντάσεις αναλόγως του επιδιωκόμενου αποτελέσματος (ζεμάτισμα, μαγείρεμα, παστερίωση, βιομηχανική αποστείρωση) και του προϊόντος στο οποίο εφαρμόζονται (υγρό, στερεό).

Η θερμική επεξεργασία περιλαμβάνει δύο διαφορετικές μεθόδους αποστείρωσης των τροφίμων :

- α) την ασηπτική επεξεργασία όπου η θερμική επεξεργασία πραγματοποιείται πριν τη συσκευασία,
- β) την κονσερβοποίηση όπου η θερμική επεξεργασία πραγματοποιείται αφού τα τρόφιμα συσκευασθούν.

Ο στόχος και στις δύο μεθόδους είναι η καταστροφή των μικροοργανισμών, που θα μπορούσαν να προκαλέσουν αλλοίωση στο τρόφιμο ή βλάβη στην υγεία των καταναλωτών.

## **2.2 Η κονσερβοποίηση**

Η κονσερβοποίηση αποτελεί μία από τις σπουδαιότερες μεθόδους συντήρησης των τροφίμων, και ανακαλύφθηκε από τον Nicolas Francois Appert (1749-1841) στη Γαλλία το 1790. Η κονσερβοποίηση νοείται σαν θερμική επεξεργασία, είτε παστερίωση είτε εμπορική αποστείρωση, τροφίμων τα οποία βρίσκονται σε ερμητικά κλειστούς περιέκτες (Στοφόρος, 2013). Η κονσερβοποίηση περιλαμβάνει την θέρμανση των τροφίμων μετά τη σφράγιση τους με στόχο την καταστροφή των μικροοργανισμών, που θα μπορούσαν να προκαλέσουν αλλοίωση στο τρόφιμο ή βλάβη στην υγεία των καταναλωτών. Τα κονσερβοποιημένα τρόφιμα που διατίθενται στο εμπόριο, υφίστανται θερμική επεξεργασία ώστε να καταστήσουν το προϊόν εμπορικώς αποστειρωμένο, έτσι ώστε το προϊόν, να μπορεί να αποθηκευτεί σε θερμοκρασία δωματίου και να αποφευχθεί η μικροβιολογική αλλοίωση, απεριόριστα από μικροβιολογική άποψη. Η έννοια της ελάχιστης ασφαλούς διεργασίας αποστείρωσης αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1920 από τους Ball και Bigelow (Bigelow et al., 1920). Η Αρχή Τροφίμων και Φαρμάκων των ΗΠΑ ορίζει την εμπορική αποστείρωση ως την κατάσταση που επιτυγχάνεται σε ένα προϊόν μέσω της εφαρμογής θερμότητας σε θερμοκρασίες υψηλότερες των 100 °C ή σε συνδυασμό με άλλες κατάλληλες επεξεργασίες, για να καταστεί το τρόφιμο απαλλαγμένο από μικροοργανισμούς ικανούς να αναπτυχθούν σε ένα τρόφιμο που αποθηκεύεται και διανέμεται κάτω από συνήθεις περιβαλλοντικές συνθήκες (FDA, 2018).

### **2.2.1 Ο σχεδιασμός της θερμικής διεργασίας**

Ο σχεδιασμός της θερμικής διεργασίας που θα εφαρμοστεί για κάθε τρόφιμο εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Η ένταση της θερμικής επεξεργασίας που θα υποστεί ένα τρόφιμο για να διασφαλιστεί ότι είναι ασφαλές, εξαρτάται από το pH, την ενεργότητα νερού ( $a_w$ ), την αλατότητα του τροφίμου, την ύπαρξη πρόσθετων υλικών, καθώς και την θερμοανθεκτικότητα των μικροοργανισμών που το απαρτίζουν. Ακόμα ο ρυθμός

θέρμανσης ενός τροφίμου έχει ιδιαίτερη σημασία στο σχεδιασμό της θερμικής διεργασίας και καθορίζεται από το μέγεθος, το σχήμα, και τη σύσταση του τροφίμου, καθώς και του υλικού συσκευασίας.

Γενικά στη βιομηχανία τροφίμων ο σχεδιασμός της θερμικής επεξεργασίας, καθορίζεται κυρίως βάση δυο παραμέτρων :

- α) της θερμοανθεκτικότητας του μικροβιακού στόχου του εκάστοτε τροφίμου
- β) του ρυθμού θέρμανσης του τροφίμου προς επεξεργασία ανά περίπτωση.

Ο μικροοργανισμός στόχος σε μια θερμική επεξεργασία ενός τροφίμου, είναι ο μικροοργανισμός ο οποίος αναπτύσσεται όταν οι συνθήκες είναι ευνοϊκές για την ανάπτυξη του στο συγκεκριμένο τρόφιμο και επίσης, αυτός του οποίου τα στελέχη, είναι τα πιο ανθεκτικά στη θερμική επεξεργασία στο τρόφιμο. Η απενεργοποίηση του μικροοργανισμού αυτού και των σπορίων ή βλαστικών μορφών του στο τρόφιμο αυτόματα συνεπάγεται ότι το τρόφιμο είναι ασφαλές προς κατανάλωση (Στοφόρος, 2013). Η επίδραση του pH είναι πολύ σημαντική στο καθορισμό του μικροβιακού στόχου, και για το λόγο αυτό η Αρχή Τροφίμων και Φαρμάκων των ΗΠΑ έχει κατηγοριοποιήσει τα τρόφιμα σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με την οξύτητα τους (FDA, 2018) :

1. μεγάλης οξύτητας τρόφιμα με  $pH < 4$
2. όξινα τρόφιμα με  $pH 4$  έως  $4,6$
3. χαμηλής οξύτητας τρόφιμα με  $pH > 4,6$ .

Στα όξινα και μεγάλης οξύτητας τρόφιμα, είναι αδύνατη η ανάπτυξη σπορογόνων βακτηρίων, όπως οι σπόροι του *Clostridium botulinum* που δεν αναπτύσσονται σε  $pH$  μικρότερο του 4,8 (Gavin and Weddig, 1995) Η συνθήκη αυτή παρέχει την δυνατότητα ηπίας επεξεργασίας στα προϊόντα. Αντίθετα στα προϊόντα χαμηλής οξύτητας ο μικροοργανισμός στόχος κατά τη θερμική επεξεργασία είναι το *Clostridium botulinum*. Το *Clostridium botulinum* είναι αναερόβιος, Gram -θετικό, σπορογόνο βακτήριο που παράγει μία ισχυρή νευροτοξίνη. Τα σπόρια του είναι ανθεκτικά στη θερμότητα και μπορούν να επιζήσουν στα τρόφιμα που υποβάλλονται σε ελάχιστη ή λανθασμένη επεξεργασία.

### **2.2.2 Κινητικές θερμικής απενεργοποίησης**

Κατά την κλασική μεθοδολογία, η εκτίμηση των κινητικών παραμέτρων θερμικής απενεργοποίησης βασίζεται σε δεδομένα από πειράματα σε ισοθερμοκρασιακές συνθήκες

και στον σταδιακό προσδιορισμό των παραμέτρων. Ο ρυθμός καταστροφής των μικροοργανισμών κατά τη διάρκεια μια θερμικής επεξεργασίας, αποδίδεται με τον χρόνο υποδεκαπλασιασμού  $D_T$  ο οποίος ορίζεται από την παρακάτω εξίσωση

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

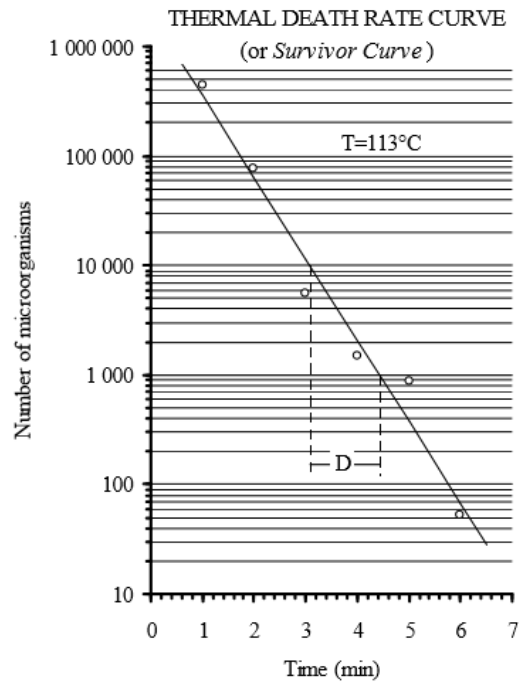
Όπου :

- $D_T$  ο χρόνος θέρμανσης, σε σταθερή θερμοκρασία  $T$ , που απαιτείται για την καταστροφή του 90% του αρχικού φορτίου των μικροοργανισμών
- $N_0$  ο αρχικός μικροβιακός πληθυσμός στο προϊόν
- $N$  ο μικροβιακός πληθυσμός στο τέλος της θερμικής επεξεργασίας
- $t$  ο χρόνος θέρμανσης

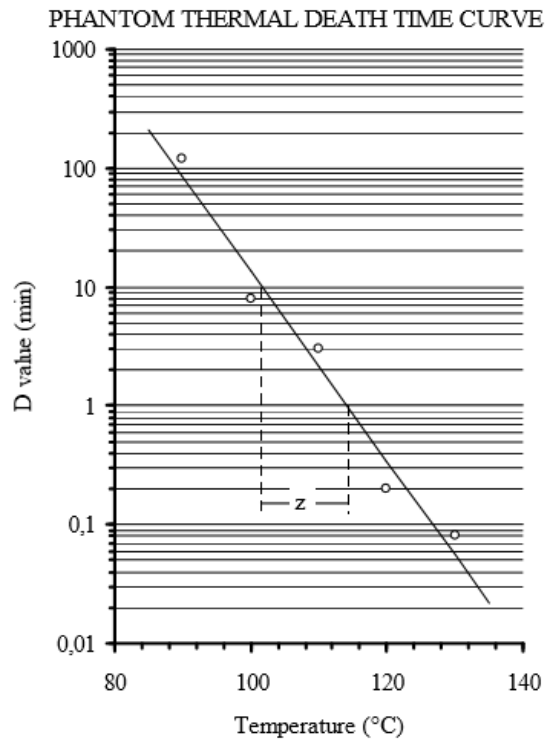
Η επίδραση της θερμοκρασίας στο χρόνο υποδεκαπλασιασμού περιγράφεται με την τιμή  $z$  που είναι η σταθερά θερμικής αντίστασης και συγκεκριμένα, ορίζεται ως η διαφορά θερμοκρασίας που απαιτείται για να δεκαπλασιαστεί ή να υποδεκαπλασιαστεί η τιμή  $D_T$ . Η σχέση που περιγράφει την εξάρτηση του χρόνου υποδεκαπλασιασμού από τη θερμοκρασία, με βάση την παράμετρο  $z$ , δίνεται από την εξίσωση.

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

Ο κλασικός προσδιορισμός για τις κύριες παράμετρος  $D_T$  και  $z$ , προϋποθέτει την κατασκευή της Καμπύλης Ρυθμού Θερμικής Καταστροφής (Εικόνα 1) και την Φαινόμενη Καμπύλη Χρόνου Θερμικής Καταστροφής (Εικόνα 2) αντίστοιχα. Για την κατασκευή της καμπύλης Ρυθμού Θερμικής Καταστροφής συναρτήσει του χρόνου θέρμανσης, χρησιμοποιείται ο λογάριθμος του αριθμού των επιζώντων μικροοργανισμών, μετά από θέρμανση σε σταθερή θερμοκρασία. Αφού σχεδιαστεί η ευθεία περιγράφοντας με το καλύτερο δυνατό τρόπο τα πειραματικά δεδομένα, λαμβάνεται η τιμή  $D_T$  από το διάγραμμα ως ο χρόνος που απαιτείται ώστε η Καμπύλη Ρυθμού Θερμικής Καταστροφής να διανύσει έναν λογαριθμικό κύκλο. Αφού κατασκευαστεί η εν λόγω καμπύλη χρησιμοποιούνται οι τιμές  $D_T$  για να σχεδιαστεί η Φαινόμενη Καμπύλη Χρόνου Θερμικής Καταστροφής συναρτήσει της θερμοκρασίας, από την οποία υπολογίζεται η τιμή  $z$  με τρόπο παρόμοιο του υπολογισμού της τιμής  $D_T$ . Οι παραπάνω παράμετροι είναι απαραίτητες για να εκτιμηθεί η θερμική απενεργοποίηση (Stoforos and Taoukis, 2006).



Εικόνα 1. Καμπύλη Ρυθμού Θερμικής Καταστροφής (Στοφόρος, 2005).



Εικόνα 2. Φαινόμενη Καμπύλη Χρόνου Θερμικής Καταστροφής (Στοφόρος, 2005).

### 2.2.3 Υπολογισμός θνησιμότητας θερμικών διεργασιών

Για τον σχεδιασμό των θερμικών διεργασιών, είναι θεμελιώδους σημασίας ο υπολογισμός της τιμής  $F$  μιας δεδομένης διεργασίας. Η τιμή  $F$  δεδομένης θερμικής επεξεργασίας, ορίζεται ως ο ισοδύναμος χρόνος κατεργασίας σε μια σταθερή θερμοκρασία αναφοράς ( $T_{REF}$ ) μιας υποθετικής θερμικής επεξεργασίας που παράγει το ίδιο αποτέλεσμα (όσον αφορά στην καταστροφή των ίδιων παραγόντων αλλοίωσης ή ποιοτικών χαρακτηριστικών) με τη δεδομένη θερμική επεξεργασία (Στοφόρος, 2005). Η τιμή  $F$  μιας θερμικής διεργασίας η οποία είναι γνωστό ότι παράγει εμπορικά αποστειρωμένο προϊόν ορίζει την απαιτούμενη τιμή  $F$  ( $F$  required). Ο τελικός στόχος για να επιτευχθεί εμπορική αποστείρωση είναι να εξασφαλιστεί ότι ο λόγος της τιμής  $F$  της διεργασίας προς την απαιτούμενη τιμή  $F$  να είναι τουλάχιστον ίσος με τη μονάδα.

Η παρακάτω εξίσωση αποτελεί τη θεμελιώδη εξίσωση για το σχεδιασμό και την αξιολόγηση των θερμικών διεργασιών. Το αριστερό σκέλος της δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού της τιμής  $F$  γνωρίζοντας τη συγκέντρωση του υπό εξέταση παράγοντα (π.χ. βιταμίνη C) πριν και μετά την επεξεργασία. Το δεξιό σκέλος της επιτρέπει τον υπολογισμό της τιμής  $F$  χρησιμοποιώντας δεδομένα σχετικά με το χρόνο και τη θερμοκρασία στην οποία υποβλήθηκε το προϊόν κατά την επεξεργασία

$$F_{T_{ref}}^z = D_{T_{ref}}(\log(C_0) - \log(C)) = \int_{t_a}^{t_b} 10^{T-T_{ref}/z} dt \quad (3)$$

### 2.2.4. Προγραμματισμός μιας θερμικής διεργασίας

Η ανάγκη ευελιξίας και ακρίβειας κατά τον υπολογισμό του απαιτούμενου χρόνου για την επίτευξη δεδομένης θνησιμότητας μιας θερμικής διεργασίας, οδήγησε στην ανάπτυξη διάφορων μεθόδων υπολογισμού, η μέθοδος που ανέπτυξε ο Ball παραμένει η πιο ευρέως χρησιμοποιημένη στη βιομηχανία τροφίμων. Η μέθοδος υπολογισμού του Ball προκύπτει από την καμπύλη θερμικής διείσδυσης και βασίζεται στην παρακάτω εξίσωση (Στοφόρος, 2005) :

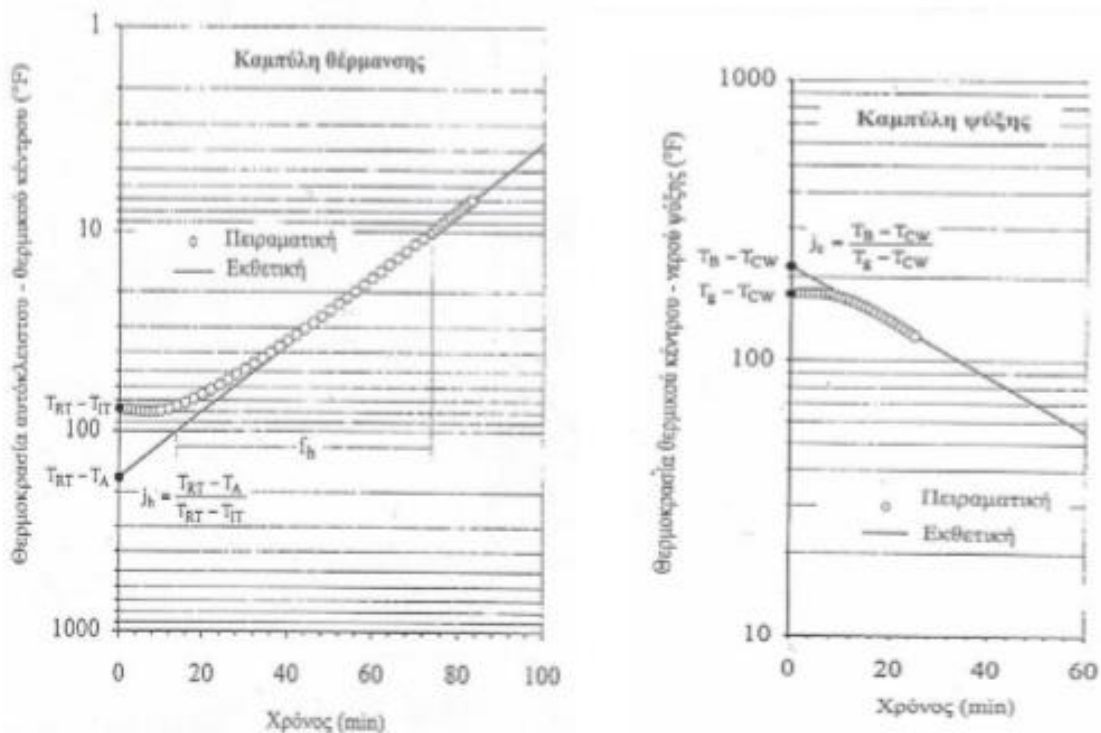
$$B = f_h \log\left[\frac{j_h(T_{RT}-T_{IT})}{g}\right] \quad (4)$$

όπου :

- $B$  ο χρόνος θέρμανσης που απαιτείται για βιομηχανική αποστείρωση



- $t_h$  ο χρόνος που απαιτείται για να δεκαπλασιαστεί (ή να υποδεκαπλασιαστεί) η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ αυτοκλείστου και προϊόντος, min.
- $J_h$  ο παράγοντας καθυστέρησης, παράμετρος του ευθύγραμμου τμήματος της καμπύλης θερμικής διείσδυσης 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  $J_c = \frac{T_B-T_{CW}}{T_{hT}-T_{IT}}$  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 διείσδυσης με τον άξονα των θερμοκρασιών.



Εικόνα 3. Καμπύλες θέρμανσης και ψύξης κονσερβοποιημένου τροφίμου.

### 2.2.5 Επίδραση της θερμικής επεξεργασίας στα ποιοτικά χαρακτηριστικά

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω κατά τη διενέργεια μιας θερμικής επεξεργασίας προκαλείται υποβάθμιση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του προϊόντος. Θρεπτικά

συστατικά του τροφίμου καταστρέφονται και φυσικές ιδιότητες του μεταβάλλονται, με τη χρήση υψηλών θερμοκρασιών. Οι διαφορές στις τιμές των παραμέτρων D και z των μικροοργανισμών και των θρεπτικών συστατικών αποτελούν τον λόγο για τον οποίο μπορούν να βελτιστοποιηθούν οι θερμικές διεργασίες. Οι τιμές z που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την υποβάθμιση των θρεπτικών συστατικών είναι μεγαλύτερες από αυτές των μικροοργανισμών. Για κάθε 10°C αύξηση της θερμοκρασίας, ο ρυθμός υποβάθμισης των θρεπτικών συστατικών διπλασιάζεται, ενώ ο ρυθμός αποστείρωσης των μικροοργανισμών δεκαπλασιάζεται (Holdsworth, 1997).

Ο προσδιορισμός της ποιοτικής υποβάθμισης, τιμή C, υπολογίζεται μέσω της παρακάτω εξίσωσης που αρχικά προτάθηκε από τον Mansfield το 1962 :

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

## 2.3 Μεταφορά θερμότητας

Η μεταφορά θερμότητας αναφέρεται στην πρόβλεψη του ρυθμού με τον οποίο η θερμότητα ρέει μέσα από διάφορα υλικά, κάτω από διαφορετικές εξωτερικές συνθήκες που οφείλονται σε διαφορετικές θερμοκρασίες (Νίκας 2010)

Υπάρχουν τρεις διακριτοί τρόποι μετάδοσης της θερμότητας.

- αγωγή (conduction)
- συναγωγή (convection) και
- ακτινοβολία (radiation)

### 2.3.1 Αγωγή

Ως αγωγή (thermal conduction) ορίζεται ως ο μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας από μία περιοχή (ή σύστημα) υψηλής θερμοκρασίας σε μια άλλη (ή άλλο) χαμηλότερης θερμοκρασίας, μέσω ενός μέσου (στερεού, υγρού ή αέριου σε ηρεμία), λόγω της φυσικής επαφής. Η μεταφορά αυτή επιτυγχάνεται είτε με μοριακή αλληλεπίδραση, δηλαδή μεταφορά ενέργειας από τα περισσότερο ενεργητικά μόρια στα γειτονικά τους, με χαμηλότερο επίπεδο ενέργειας, είτε μέσω της συγκέντρωσης των ελεύθερων ηλεκτρονίων, στα καθαρώς μεταλλικά στερεά (Lienhard 2010)| .

Κατά τη θέρμανση ή ψύξη πολλών τροφίμων, συσκευασμένων ή μη, η ροή θερμότητας από την επιφάνεια στο εσωτερικό του τροφίμου γίνεται με αγωγή σε μη μόνιμη κατάσταση. Για ένα δισδιάστατο κυλινδρικό σώμα η εξίσωση της μεταφοράς θερμότητας είναι η

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (5)$$

Όπου :

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

$$Y_{can} = \frac{T_{\infty} - T(x,t)}{T_{\infty} - T_0} = Y_{finite\ cylinder} = Y_{infinite\ slab} * Y_{infinite\ cylinder} \quad (6)$$

Όπου :

- $Y_{can}$ , η αδιάστατη θερμοκρασία σε κάθε σημείο της μεταλλικής κονσέρβας
- $Y_{infinite\ slab}$ , η αδιάστατη θερμοκρασία άπειρης πλάκας
- $Y_{infinite\ cylinder}$ , η αδιάστατη θερμοκρασία άπειρου κυλίνδρου
- $T_{\infty}$ , θερμοκρασία περιβάλλοντος
- $T_0$ , αρχική θερμοκρασία προϊόντος

*Εξισώσεις για αδιάστατη θερμοκρασία άπειρης πλάκας και αδιάστατης θερμοκρασίας άπειρου κυλίνδρου*

$$Y_{slab} = \frac{T_{\infty} - T(x,t)}{T_{\infty} - T_0} = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2 \sin(\lambda m)}{\lambda m + \sin(\lambda m) \cos(\lambda m)} \cos(\lambda m \frac{x}{L/2}) e^{-\lambda m \frac{at}{(\frac{L}{2})^2}} \quad (7)$$

$$Y_{slab} = \frac{T_{\infty} - T(x,t)}{T_{\infty} - T_0} = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2(-1)^{m+1}}{\lambda m} \cos(\lambda m \frac{x}{L/2}) e^{-\lambda m \frac{at}{(\frac{L}{2})^2}} \quad (8)$$

$$Y_{slab} = \frac{T_{\infty} - T(x,t)}{T_{\infty} - T_0} = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2 J_0(\beta n (\frac{r}{R}))}{\beta n J_1(\beta n)} e^{-\beta^2 (\frac{at}{R^2})} \quad (9)$$

$$Y_{slab} = \frac{T_{\infty} - T(x,t)}{T_{\infty} - T_0} = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2 Bi J_0(\beta n (\frac{r}{R}))}{(\beta n^2 + Bi^2) J_0(\beta n)} e^{-\beta^2 (\frac{at}{R^2})} \quad (10)$$

### 2.3.2 Συναγωγή

Η μετάδοση θερμότητας με συναγωγή είναι αποτέλεσμα των μεγαλύτερης κλίμακας κινήσεων ενός ρευστού, είτε αυτό είναι υγρό ή αέριο. Όσο υψηλότερη είναι η ταχύτητα της ροής του ρευστού, τόσο υψηλότερος είναι ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή γενικά. Η μαθηματική περιγραφή της ροής θερμότητας είναι :

$$q = h * A * (T_s - T_\infty) \quad (11)$$

όπου:

- $q$  : θερμική ισχύς ή θερμοροή λόγω συναγωγής (W)
- $h$  συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (W/m<sup>2</sup>K)
- $A$  το εμβαδόν της επιφάνειας συναγωγής (m<sup>2</sup>)
- $T_s$  θερμοκρασία της θερμής επιφάνειας
- $T_\infty$  θερμοκρασία ψυχρού ρευστού

Επομένως διακρίνονται δύο είδη συναγωγής τη φυσική ή ελεύθερη συναγωγή και την εξαναγκασμένη. Η ελεύθερη συναγωγή προκύπτει από τις διαφορές πυκνότητας που δημιουργούνται στο ρευστό, λόγω της επαφής του με μια επιφάνεια από την οποία παίρνει ή αποδίδει θερμότητα. Η άνωση είναι η κινητήρια δύναμη για τη φυσική (ή ελεύθερη) συναγωγή. Εξαναγκασμένη συναγωγή έχουμε όταν μια εξωτερική δύναμη (εκτός από τη βαρύτητα) μεταφέρει το ρευστό πάνω από μια θερμότερη ή ψυχρότερη επιφάνεια. Συνήθως τόσο οι ταχύτητες του ρευστού, όσο και ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας στην εξαναγκασμένη συναγωγή είναι σημαντικά μεγαλύτερες από εκείνες που συναντάμε στην ελεύθερη συναγωγή (Lienhard 2010).

## 2.4 Ντολμαδάκια γιαλατζί - Το υπό μελέτη τρόφιμο

### 2.4.1 Προέλευση

Ο ντολμάς ( dūlma) αποτελεί μια οικογένεια γεμιστών πιάτων κοινών στην ανατολική Μεσόγειο και τη μέση ανατολή αλλά και γύρω περιοχών στην κεντρική και νότια Ασία. Αποτελείται από γεμιστά φρέσκα ή προψημένα φύλλα λαχανικών η φρούτων. Η λέξη dolma είναι τουρκικής προέλευσης από τη λέξη dolmak που σημαίνει γεμίζω (lexico 2019). Οι ντολμάδες υφίστανται με διάφορες παραλλαγές ανά την υφήλιο, ανάλογα τα συστατικά που αποτελούνται, από τη γέμισή τους που μπορεί να περιέχει διαφόρων ειδών κρέας, κρεμμύδι, ρύζι, μπιζέλια σαφράν και διαφόρων ειδών μπαχαρικά, έως το περιτύλιγμά τους όπου χρησιμοποιούνται φύλλα κράμβης, λάχανου, σπανακιού και αμπέλου αλλά και αγγούρια, μελιτζάνες, μήλα κυδώνια, μύδια και εντόσθια. Ο πιο διαδεδομένος ντόλμάς αποτελείται από γεμιστά φύλλα αμπέλου. Στην ελληνική κουζίνα οι ντολμάδες, αποτελούνται από γεμίσεις με κιμά και ρύζι, ή μόνο με ρύζι και μυρωδικά που τυλίγονται μέσα σε φύλλα λαχανικών (αμπελόφυλλα, λαχανόφυλλα, μαρουλόφυλλα, κρεμμυδόφυλλα, λάπαθα κλπ.).

Η ακριβής προέλευση του ντολμά είναι άγνωστη, με πολλές χώρες να ανταγωνίζονται για τα εύσημα, αναμεσά τους και η Ελλάδα. Ο ντολμάς αποτελεί μέρος της κουζίνας της μέσης ανατολής εδώ και αιώνες. Αν και η λέξη dolma έχει τις ρίζες της στην κουζίνα του οθωμανικού παλατιού Top karı, τα γεμιστά λαχανικά πιστοποιούνται σε βιβλία μαγειρικής της προ-οθωμανικής περιόδου, της μέσης ανατολής που περιλαμβάνουν συνταγές όπως μελιτζάνες γεμιστές με κρέας. Παραλλαγές του ντολμά χρησιμοποιούνταν στην Περσία τουλάχιστον από τον 17ο αιώνα. Ο Mīrzā'Alī-Akbar σεφ στην αυλή του Nāser-al-Dīn Shah (1848-96), κατέγραψε τον ντολμά ως μέρος της περσικής κουζίνας και έδωσε συνταγές για γέμιση φύλλων αμπέλου, μελιτζανών, μήλων και κυδωνιών. Στην αρχαία Ελλάδα, χρησιμοποιούταν το φύλλο συκής γεμισμένο με ζαχαρούχο τυρί και ονομαζόταν ως θριόν (Perry 2014).

Στην Ελλάδα τα ντολμαδάκια γιαλατζί με αμπελόφυλλο είναι από τις πιο διαδεδομένες παραλλαγές ντολμάδων που συναντάται στο εμπόριο. Ο όρος γιαλατζί, προέρχεται από την τούρκικη λέξη yalanci, που σημαίνει ψεύτικος, και χρησιμοποιείται λόγω της μη ύπαρξης κιμά στη γέμιση. Τα ντολμαδάκια γιαλατζί είναι από τα λίγα προϊόντα που ο συνηθέστερος τρόπος εμπορίας τους είναι υπό μορφή κονσέρβας, λόγω της μεγάλης διάρκειας ζωής τους, την ευκολία κατά την αποθήκευση τους, καθώς και της κατανάλωσης σε σχέση με τη φρέσκια η κατεψυγμένη μορφή τους. Οι κονσερβοποιημένοι ντολμάδες γιαλατζί

απαντώνται στο εμπόριο σε τέσσερα μεγέθη των 200gr, των 280gr των 370gr και των 2kg, ενώ ο μεταλλικός περιέκτης συσκευασίας αποτελείται από αλουμίνιο.

#### **2.4.2 Σύσταση**

Τα συστατικά που αποτελούνται τα ντολμαδάκια γιαλατζί υπό μορφή κονσέρβας στο εμπόριο, δόθηκαν από την εταιρία Ζαναε και είναι :

- Το περιτύλιγμα αποτελείται από αμπελόφυλλα
- Το μίγμα ρυζιού που αποτελείται από ρύζι, φρέσκο κρεμμύδι, αλάτι, νερό, λάδι (σογιέλαιο),
- αφυδατωμένα βότανα (δυόσμος, άνηθος) και μπαχαρικά
- Ο χυμός της κονσέρβας που αποτελείται από νερό, λάδι και χυμό λεμονιού

Η κονσέρβα των 200 g που χρησιμοποιήθηκε κατά την εκπόνηση της εργασίας αποτελείται από :

- Έξι ντολμαδάκια συνολικού βάρους 145 g
- Χυμό κονσέρβας 50 g
- Σογιέλαιο 5-6 g

Πίνακας 1. Αναλογία % συστατικών των ντολμάδων γιαλατζί υπό μορφή κονσέρβας των 200gr πριν τη θερμική επεξεργασία

ΜΙΓΜΑ ΡΥΖΙΟΥ (%)				
ΚΡΕΜΜΥΔΙ αφυδατωμένο	4		ΚΡΕΜΜΥΔΙ φρέσκο	31
ΝΕΡΟ	61.7		ΝΕΡΟ	34.7
ΛΑΔΙ	8.5		ΛΑΔΙ	8.5
ΑΛΑΤΙ	1.2		ΑΛΑΤΙ	1.2
ΚΙΤΡΙΚΟ ΟΞΥ	0.5		ΚΙΤΡΙΚΟ ΟΞΥ	0.5
ΡΥΖΙ	23		ΡΥΖΙ	23
ΒΟΤΑΝΑ αφυδατωμένα	1		ΒΟΤΑΝΑ αφυδατωμένα	1
ΜΠΑΧΑΡΙΚΑ	0.1		ΜΠΑΧΑΡΙΚΑ	0.1
ΣΥΝΟΛΟ	100		ΣΥΝΟΛΟ	100
ΕΞΑΤΜΙΣΗ κατά τον προβρασμό ≈ 15 - 17%				
ΧΥΜΟΣ (%)		ΒΑΡΟΣ ΤΕΜΑΧΙΟΥ (g)		
ΝΕΡΟ	99.3	ΜΙΓΜΑ ΡΥΖΙΟΥ	17	
ΑΛΑΤΙ	0.4	ΑΜΠΕΛΟΦΥΛΛΟ	4	
ΚΙΤΡΙΚΟ ΟΞΥ	0.3			
ΣΥΝΟΛΟ	100	ΣΥΝΟΛΟ	21	

### 2.4.3 Διαδικασία κονσερβοποίησης

Παρά το γεγονός, ότι η διαδικασία κονσερβοποίησης εξαρτάται πάντα από το είδος της Α ύλης, και από το είδος του τελικού προϊόντος, η γενική πορεία περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

1. Την προπαρασκευή του τροφίμου
2. Το γέμισμα των κουτιών
3. Την απαέρωση
4. Το κλείσιμο των κουτιών
5. Την θερμική κατεργασία (βιομηχανική αποστείρωση)
6. Την ψύξη
7. Την επικόλληση ετικετών
8. Την συσκευασία και την αποθήκευση.



Πιο κάτω θα αναλυθούν εν συντομία τα εξής στάδια που ακολουθούνται από την εταιρεία Ζαναε κατά την Παρασκευή του τροφίμου :



## **1. Προπαρασκευή του τροφίμου**

Κατά την προπαρασκευή του τροφίμου, το ρύζι θερμαίνεται, κατά το ήμισυ της απαιτούμενης βράσης που απαιτείται για την κατανάλωση, και αφήνεται να ψυχθεί σε θερμοκρασία δωματίου μέχρι τους 30-35 C. Στην συνέχεια αναμιγνύεται με τα υπόλοιπα υλικά που αποτελείται η γέμιση (φρέσκο κρεμμύδι, αλάτι, νερό, σογιέλαιο, αφυδατωμένα βότανα (δύσμος, άνηθος) και μπαχαρικά) και περιτυλίγεται με αμπελόφυλλα. Οι συγκεκριμένες διεργασίες γίνονται χειρωνακτικά. Παράλληλα γίνεται η παρασκευή του χυμού της κονσέρβας (νερό, λάδι και χυμό λεμονιού) και διατήρηση του στους 75 °C.

## **2. Γέμισμα των κουτιών**

Το γέμισμα γίνεται χειρωνακτικά τοποθετώντας τον απαιτούμενο αριθμό από ντολμαδάκια. Αμέσως μετά την τοποθέτηση του τροφίμου στο μεταλλικό περιέκτη προστίθεται και ο χυμός με θερμοκρασία 75°C. Το γέμισμα των δοχείων δεν είναι ποτέ πλήρες, αλλά φροντίζουμε να παραμείνει πριν το κλείσιμο λίγος κενός χώρος (headspace). Ο χώρος αυτός συντελεί στην καλύτερη διατήρηση του κονσερβοποιημένου τροφίμου, γιατί πάνω από την επιφάνεια μετά την ψύξη, δημιουργείται κενό της τάξεως των 300 έως 500 mm στήλης Hg.

## **3. Απαέρωση**

Πριν από το κλείσιμο των κουτιών είναι απαραίτητο να γίνει απομάκρυνση του αέρα από αυτά

Έτσι :

- A. Περιορίζεται στο ελάχιστο η διόγκωση των κουτιών κατά την θερμική επεξεργασία της αποστείρωσης λόγω διαστολής του αέρα.
- B. Απομακρύνεται το οξυγόνο, η παραμονή του οποίου στην κονσέρβα επιταχύνει την εσωτερική διάβρωση και προκαλεί διάφορες οξειδώσεις με αποτέλεσμα την αλλοίωση της ποιότητας του κονσερβοποιημένου τροφίμου
- Γ. Δημιουργείται μερικό κενό, μέσα στο κουτί μετά το κλείσιμο και την ψύξη. Αυτό είναι απαραίτητη προϋπόθεση για να παραμείνουν επίπεδα ή ελαφρά στραμμένα προς τα μέσα τα καλύμματα του κουτιού, όπως απαιτείται για τις κονσέρβες.

Ως κενό στις κονσέρβες, χαρακτηρίζεται η διαφορά μεταξύ της ατμοσφαιρικής πίεσης του χώρου όπου βρίσκεται και της πίεσης εντός του κλειστού δοχείου. Π.χ. εάν η πίεση μέσα

στο κουτί είναι 0,2 atm, τότε το κενό είναι 0,8 atm. Εάν η πίεση μέσα στο κουτί είναι ίση με 1 atm, τότε το κενό είναι ίσο με το μηδέν. Η απομάκρυνση του αέρα από τα κουτιά επιτυγχάνεται συνήθως είτε με γέμισμα υπό κενό, είτε με διοχέτευση ατμού.

#### **4. Κλείσιμο του κουτιού**

Αμέσως μετά την απαέρωση γίνεται το ερμητικό κλείσιμο των κουτιών με ειδικές μηχανές. Το κλείσιμο δεν γίνεται με απλή συγκόλληση, αλλά με διπλή ραφή (double seaming), η οποία επιτυγχάνεται με συμπίεση από την μηχανή διπλών στρωμάτων του ελάσματος του κουτιού με τρία στρώματα του ελάσματος του καλύμματος, στο διάκενο των οποίων έχει προστεθεί διάλυμα ελαστικού.

#### **5. Θερμική κατεργασία, εμπορική αποστείρωση**

Αυτή είναι η σπουδαιότερη κατεργασία στην οποία υποβάλλονται οι κονσέρβες. Με αυτήν διασφαλίζεται η σταθερότητα του τροφίμου η υγιεινή και η ασφάλεια του. Η θερμική κατεργασία γίνεται σε ειδικά «autoclaves», μορφής κάθετου βαρελιού, με την βοήθεια ατμού υπό πίεση για αποστείρωση. Η αρχική θερμοκρασία ( $T_{IT}$ ) που έχουν τα ντολμαδάκια κυμαίνεται από 30 έως 35 °C ενώ του χυμού 70-75 °C. Η θερμική επεξεργασία είναι συνολικά 46 λεπτά όπου τα πρώτα δέκα λεπτά αποτελούν το χρόνο που χρειάζεται ώστε η θερμοκρασία περιβάλλοντος ( $T_{RT}$ ) να φτάσει τους 105 °C (CUT), ενώ τα υπόλοιπα 36 λεπτά ακολουθεί η κύρια διεργασία όπου το προϊόν θερμαίνεται στους 105 °C.

Πάντοτε επιδιώκεται να χρησιμοποιούνται οι χαμηλότερες επιτρεπτές θερμοκρασίες και ο μικρότερος χρόνος, πάντα όμως με την προϋπόθεση ότι εξασφαλίζεται η υγιεινή, η ποιότητα και η σταθερότητα του τροφίμου. Όπως έχει ήδη αναφερθεί κατά την κονσερβοποίηση γίνεται εμπορική αποστείρωση. Ακολουθεί ψύξη των κονσερβών με την βοήθεια νερού.

#### **6. Ψύξη**

Η ψύξη των κονσερβών πραγματοποιείται αμέσως μετά το τέλος της θερμικής κατεργασίας με βαθμιαία πτώση της πίεσης μέσα στο αυτόκαυστο μέχρι να εξισωθεί με την ατμοσφαιρική και με διοχέτευση νερού υπό θερμοκρασία δωματίου, Η εισαγωγή του νερού γίνεται από τον πυθμένα του αυτόκαυστου ενώ απομακρύνεται η περίσσεια με ειδικό σωλήνα υπερχειλίσης, που βρίσκεται σε ψηλότερο σημείο από την στάθμη του νερού που καλύπτει τις κονσέρβες.

Η ψύξη έχει διάρκεια δέκα λεπτών. Ακολουθεί γρήγορη ξήρανση των κουτιών.

## **7. Επικόλληση ετικετών**

Μετά την ψύξη και ξήρανση των κονσερβών και πριν την συσκευασία σε χαρτοκιβώτια ή δίσκους επικολλώνται ετικέτες με αυτόματα μηχανικά μέσα. Στην ετικέτα υπάρχει η περιγραφή του προϊόντος, τα συστατικά του τροφίμου, αλλά και ο κωδικός της παρτίδας, ο κωδικός βάρδιας και συσκευαστικής μηχανής, η ώρα συσκευασίας καθώς και η ημερομηνία ανάλωσης του προϊόντος και όποιες άλλες πληροφορίες απαιτούνται από την νομοθεσία.

## **8. Συσκευασία και αποθήκευση**

Μετά την επικόλληση των ετικετών οι κονσέρβες συσκευάζονται σε κατάλληλο χαρτοκιβώτιο ή δίσκο με θερμοσυρρικνούμενο φιλμ πολυαιθυλενίου. Οι αποθηκευτικοί χώροι, αλλά και τα μέσα μεταφοράς, πρέπει να έχουν σταθερή θερμοκρασία περιβάλλοντος, (πολλές μελέτες αναφέρουν ότι η βέλτιστη θερμοκρασία είναι 10° C περίπου) να είναι ξηροί και να αερίζονται καλά.

## 2.5 Υπολογιστική Ρευστοδυναμική

Η υπολογιστική ρευστοδυναμική ή αλλιώς CFD (Computational Fluid Dynamics) είναι μια ταχέως εξελισσόμενη επιστήμη, αριθμητικής επίλυσης των εξισώσεων της κίνησης ρευστών, για την παραγωγή ποσοτικών προβλέψεων ή / και αναλύσεων φαινομένων ροής ρευστού (Hua 2012). Αποτελεί ένα εργαλείο προσομοίωσης, το οποίο έχει τη δυνατότητα, μέσω της χρήσης ηλεκτρονικών υπολογιστών, σχεδίασης, ανάλυσης και προσομοίωσης συστημάτων που περιλαμβάνουν ροή ρευστών, μεταφορά θερμότητας και μάζας, αλλαγή φάσης (τήξη, κατάψυξη, βρασμός), χημικές αντιδράσεις, καταπονήσεις υλικών και άλλων σχετιζόμενων φαινομένων (Xia and Sun 2002).

Ο χαμηλός χρόνος απόκρισης και το χαμηλό κόστος σε σχέση με την πρακτική εφαρμογή ενός πειράματος, καθώς και η δυνατότητα διεξαγωγής πειραμάτων μέσω της προσομοίωσής τους, που διαφορετικά θα ήταν ανέφικτο ή αδύνατο να διεξαχθούν, είναι τα κύρια πλεονεκτήματα που έχουν καταστήσει το CFD απαραίτητο σε πολλούς επιστημονικούς τομείς κυρίως της μηχανικής. Τις τελευταίες δεκαετίες εφαρμόζεται σε ένα ευρύ φάσμα βιομηχανικών και μη βιομηχανικών κλάδων, όπως στην αεροδυναμική των αεροσκαφών, στην αυτοκινητοβιομηχανία, στον έλεγχο της ρύπανσης, στα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, στην ηλεκτρονική και πολιτική μηχανική, στην υδρολογία και την ωκεανογραφία, στην ιατρική επιστήμη (Versteeg & Malalasekera 1995).

Η ανάπτυξη της υπολογιστικής δυναμικής ρευστού (CFD) μπορεί να ανιχνευθεί στις αρχές της δεκαετίας του 1900. Οι πρωτοποριακές προσπάθειες από τους 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). Το πρώτο λειτουργικό μοντέλο προσομοίωσης ηλεκτρονικών υπολογιστών CFD, αρχικά αναπτύχθηκε από μια ομάδα στο Los Alamos National Lab το 1957 φέρνοντας στην πράξη το CFD. Ο πυρήνας του στηρίχθηκε στις εξισώσεις Navier-Stokes οι οποίες βασίζονται στην τάση της κίνησης του ρευστού. Οι πλήρεις δυναμικές εξισώσεις ενσωματώθηκαν στην τεχνολογία του CFD από τη Boeing στη δεκαετία του '70, ενώ κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του '80. άρχισαν να εφαρμόζονται οι πρώτοι εμπορικοί κώδικες μέσω του ακαδημαϊκού και του βιομηχανικού τομέα (Shang 2004).

## Πλεονεκτήματα της CFD

Υπάρχουν διάφοροι λόγοι για τους οποίους το CFD είναι τόσο σημαντικό σε πολλούς τομείς όπως

- επιτρέπει την αριθμητική προσομοίωση ροών ρευστών, τα αποτελέσματα των οποίων είναι διαθέσιμα για μελέτη ακόμη και μετά την ολοκλήρωση της ανάλυσης.
- επιτρέπει την παρατήρηση των ιδιοτήτων ροής χωρίς να διαταράσσεται η ίδια η ροή, κάτι που δεν είναι πάντα εφικτό με συμβατικά όργανα μέτρησης.
- Παρέχει λεπτομερή κατανόηση των απωλειών βάρους κατανομής ροής, μεταφοράς μάζας και θερμότητας, διαχωρισμού σωματιδίων κ.λπ.
- Είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για την προσομοίωση συνθηκών όπου δεν είναι δυνατόν να ληφθούν λεπτομερείς μετρήσεις όπως η υψηλή θερμοκρασία ή το επικίνδυνο περιβάλλον σε ένα φούρνο
- Καθιστά δυνατή την αξιολόγηση των αλλαγών στη γεωμετρία 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.
- μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ποιοτικό εργαλείο για την απόρριψη (ή τον περιορισμό των επιλογών μεταξύ), διάφορων σχεδίων. Οι σχεδιαστές και οι αναλυτές μπορούν να μελετήσουν πολλά διαφορετικά μοντέλα και στη συνέχεια να δοκιμάσουν με πειράματα μόνο εκείνα που δείχνουν δυνατότητες.

## Μειονεκτήματα της CFD

- 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 (Xia and Sun, 2002).
- Διαθεσιμότητα ανθρώπινου δυναμικού εξειδικευμένου στη χρήση του CFD

- Υψηλό κόστος για τη αγορά των προγραμμάτων CFD καθώς και υπολογιστών υψηλής ταχύτητας.

### **2.5.1 Εμπορικά Πακέτα CFD**

Τις τελευταίες δύο δεκαετίες υπήρξε τεράστια ανάπτυξη εμπορικών κωδικών CFD για να ενισχυθεί η σύνδεσή τους με τις εξελιγμένες απαιτήσεις μοντελοποίησης πολλών ερευνητικών πεδίων, ενισχύοντας έτσι την ευελιξία τους. Αυτές οι προκλήσεις έχουν οδηγήσει σε άνευ προηγουμένου ανταγωνισμό μεταξύ προγραμματιστών και έχουν επιταχύνει την ανομοιογενή ανάπτυξη, προκαλώντας το εύρος των παρεχόμενων λειτουργιών να διαφέρουν από κώδικα σε κώδικα. Έτσι, μεταξύ των πολλών κωδικών που υπάρχουν σήμερα, δεν παρέχουν όλα τα χαρακτηριστικά που απαιτούνται από τον μηχανικό τροφίμων. Τέτοιες απαιτήσεις περιλαμβάνουν τη δυνατότητα εισαγωγής γεωμετρίας πλέγματος, οριακών συνθηκών και αρχικών συνθηκών από ένα εξωτερικό αρχείο κειμένου, καθώς και τη μοντελοποίηση μη Νευτώνων ρευστών, δύο φάσεων ροής, εξαρτώμενων από τη ροή ιδιοτήτων, την έναρξη αλλαγής φάσης και ροής μέσω πορώδους μέσων. Επομένως, οι λειτουργικές εκτιμήσεις ενός κώδικα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη πριν από την επιλογή (Sun 2007).

#### ANSYS-FLUENT

Η FLUENT, Inc. είναι σήμερα ένας από τους κορυφαίους προμηθευτές λογισμικού CFD στον κόσμο Το ANSYS Fluent είναι ένα ισχυρό και ευέλικτο πακέτο λογισμικού που είναι κατάλληλο για τις ανάγκες μοντελοποίησης των μηχανικών τροφίμων. Περιλαμβάνει μοντέλα μεταφοράς θερμότητας, μοντέλα διακριτής φάσης για πολυφασικές ροές, μεγάλο αριθμό μοντέλων αντιδράσεων καθώς και μοντέλα αλλαγής φάσης. Επίσης περιλαμβάνει δύο σχεδιαστικά εργαλεία το Design Modeler και το Space Claim πλέγματος έτσι ώστε πολύπλοκες γεωμετρίες να μπορούν εύκολα να μοντελοποιηθούν. Η ANSYS Inc προσφέρει άλλα δυο πακέτα λογισμικού στο πλαίσιο του CFD τα οποία είναι κατάλληλα για την χρήση σε προβλήματα μηχανικής τροφίμων, το FIDAP® (μοντελοποίηση περίπλοκων γεωμετριών) και το POLYFLOW® (μοντελοποίηση πολυμερούς) (Sun 2007).

#### ANSYS-CFX

Το CFX, το οποίο απορροφήθηκε από την ANSYS Inc, 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 και προχωρημένα μοντέλα τύρβης που περιέχουν ένα μοντέλο που προβλέπει την μεταβολή της ροής από γραμμική σε τυρβώδη (Menter-Langtry  $\gamma$ - $\theta$  μοντέλο) (Sun 2007).

### PHOENICS (CHAM Ltd.)

Το PHOENICS είναι ένα πανίσχυρο πακέτο CFD πολλαπλών χρήσεων που αναπτύχθηκε από τον Brian Spalding, έναν από τους κορυφαίους πρωτοπόρους στην μοντελοποίηση CFD. Το PHOENICS προσομοιώνει μια σειρά διαδικασιών που περιλαμβάνουν τη ροή υγρών, τις ροές πολλών φάσεων, τη μεταφορά θερμότητας ή μάζας, τη χημική αντίδραση και την καύση και έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία από πολλά άτομα στη βιομηχανία τροφίμων. Αποτελείται από ένα δομημένα κώδικα πλέγματος και χρειάζεται συγκεκριμένες συντεταγμένες για να μοντελοποιήσει πολύπλοκες γεωμετρίες. Διαθέτει επίσης πολλές δυνατότητες μοντελοποίησης σεναρίων που υπάρχουν στη μηχανική τροφίμων. όπως νευτώνειων και μη νευτώνειων ρευστών, ροών μέσα σε πορώδες που εξαρτώνται από την κατεύθυνση της αντίστασης, συζευγμένης μεταφοράς θερμότητας κ.λπ. (Xia and Sun, 2002, Sun, 2007).

### **2.5.2 Αρχές της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής**

Η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (Computational Fluid Dynamics, CFD) είναι μία μέθοδος πρόβλεψης της συμπεριφοράς των ρευστών, η οποία βασίζεται στην αριθμητική επίλυση των εξισώσεων συνέχειας και ορμής (εξισώσεις Navier-Stokes) σε συνδυασμό με τις εξισώσεις διατήρησης μάζας και ενέργειας, σε γεωμετρία που ορίζεται από το χρήστη.

Η Αρχή Διατήρησης της Μάζας υποδηλώνει ότι η ροή μάζας διαμέσου ενός ροϊκού στοιχείου παραμένει σταθερή και εκφράζεται από την παρακάτω εξίσωση :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (12)$$

Η Αρχή Διατήρησης της Ορμής (Δεύτερος Νόμος του Νεύτωνα) ορίζει ότι ο ρυθμός μεταβολής της ορμής ισούται με το άθροισμα των δυνάμεων που ασκούνται στο ρευστό.

Στη διεύθυνση x :

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (13)$$

Στη διεύθυνση  $y$  :

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial(-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + S_{My} \quad (14)$$

Στη διεύθυνση  $z$  :

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p + \tau_{zz})}{\partial z} + S_{Mz} \quad (15)$$

Η Αρχή Διατήρησης της Ενέργειας (1<sup>ος</sup> νόμος της θερμοδυναμικής) όπου ο ρυθμός μεταβολής της Ενέργειας ισούται με το άθροισμα της θερμότητας που ανταλλάσσει το ρευστό με το περιβάλλον και του Μηχανικού Έργου που παράγει η παραλαμβάνει το ρευστό

$$\rho \frac{DE}{Dt} = \left[ \begin{array}{c} \frac{\partial (ut_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (ut_{yx})}{\partial x} + \frac{\partial (ut_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial (vt_{xy})}{\partial x} \\ + \frac{\partial (vt_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial (vt_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial (wt_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial (wt_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial (wt_{zz})}{\partial z} \end{array} \right] + \text{div}(k \text{ grad } T) + S_E$$

(16)

### Αριθμητικές μέθοδοι διακριτοποίησης

Για να επιλυθεί ένα πρόβλημα μέσω του CFD, το πρώτο βήμα είναι να διαχωριστεί ο φυσικός χώρος της ροής σε δίκτυο κελιών (grid) όπου διακριτοποιούνται οι εξισώσεις που περιγράφουν το φαινόμενο. Με τον τρόπο αυτό οι διαφορικές εξισώσεις μετατρέπονται σε εξισώσεις διαφορών, δηλαδή αλγεβρικές εξισώσεις, που επιλύονται διαδοχικά μέσα στα τρισδιάστατα κελιά του πλέγματος. Το σχήμα διακριτοποίησης αποτελεί μία από τις βασικότερες παραμέτρους, η οποία επηρεάζει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Η επιλογή του σχήματος διακριτοποίησης εξαρτάται από τον τύπο της ροής, την πυκνότητα του πλέγματος καθώς και από την ίδια την συμπεριφορά του σχήματος. Για την επίλυση των μοντέλων χρησιμοποιούνται ευρέως οι μέθοδοι πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων καθώς και μέθοδοι πεπερασμένων όγκων (Wang and Sun 2003).

### **2.5.3 Μεθοδολογία επίλυσης προβλημάτων CFD**

Τα απαιτούμενα βήματα για την ανάπτυξη και εφαρμογή αριθμητικής προσομοίωσης προβλημάτων Μηχανικής Ρευστών είναι η αναγνώριση του προβλήματος, η προσομοίωση του προβλήματος και η επίλυσή του. Η προσομοίωση ενός προβλήματος της ρευστομηχανικής αποτελείται από τρία στάδια



- Προ-εξεργασία
- Επίλυση
- Μετά-επεξεργασία

Στη φάση της προ-επεξεργασίας εισάγονται τα δεδομένα και γίνεται παραμετροποίηση του προβλήματος, ώστε να είναι συμβατό με τη μέθοδο λειτουργίας του CFD. Για τη πραγμάτωση του, απαιτείται η σχεδίαση της γεωμετρίας του προβλήματος και η δημιουργία πλέγματος του οποίου η πυκνότητα ποικίλει ανάλογα των απαιτήσεων του προβλήματος. Το πλέγμα αυτό υποδιαιρεί τη γεωμετρία, αναλόγως του υπολογιστικού ενδιαφέροντος της εκάστοτε περιοχής, ώστε να προκύψουν ακριβή αποτελέσματα κατά τη διάρκεια της επίλυσης. Μετά τη βελτιστοποίηση του πλέγματος μέσω της ανεξαρτητοποίησης του, ακολουθεί 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 περιγράψει κατάλληλα το πρόβλημα (Xia and Sun 2002, Versteeg and Malalasekera 2007, Ardejani et al 2011).

Η επίλυση του συστήματος επιτυγχάνεται με επαναληπτική μέθοδο, αφού οριστούν κατά την εκκίνηση της επίλυσης ο χρόνος κατεργασίας (time step). Στόχος της επίλυσης είναι η σύγκλιση του προβλήματος στην επιθυμητή λύση. Ως κριτήριο σύγκλισης χρησιμοποιείται το σφάλμα που προεπιλέγεται από το χρήστη (Xia and Sun 2002, Versteeg and Malalasekera 2007, Ardejani et al 2011).

Το τελικό στάδιο της προσομοίωσης αποτελείται από την μετεπεξεργασία των αποτελεσμάτων. Σκοπός είναι η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων, ώστε μέσω της ανάλυσης τους να εξαχθούν τα απαιτούμενα συμπεράσματα (Xia and Sun 2002, Versteeg and Malalasekera 2007, Ardejani et al 2011).

#### **2.5.4 Εφαρμογές Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής στη βιομηχανία τροφίμων**

Η εφαρμογή του CFD στη βιομηχανία τροφίμων μπορεί να βοηθήσει στην καλύτερη κατανόηση των σύνθετων φυσικών μηχανισμών. Δεδομένου ότι η τεχνική CFD μπορεί να αποφέρει μεγάλα οφέλη στη βιομηχανία επεξεργασίας τροφίμων, έχει σημειωθεί ταχεία ανάπτυξη κατά τα τελευταία χρόνια. Το CFD ως εργαλείο έρευνας για την ενίσχυση της διαδικασίας σχεδιασμού και την κατανόηση της βασικής φυσικής φύσης της δυναμικής

ρευστών μπορεί να προσφέρει οφέλη στη βιομηχανία επεξεργασίας τροφίμων σε πολλές διεργασίες, όπως η ζήρανση, η αποστείρωση, η ανάμιξη, η ψύξη και άλλες.

#### Αναφορικά με την Εμπορική αποστείρωση

Η εμπορική αποστείρωση τροφίμων είναι μία από τις πολλές εφαρμογές μεταφοράς θερμότητας στις οποίες το CFD απολαμβάνει ευρύτερη χρήση. Η μοντελοποίηση μέσω του CFD συνέβαλε στην αντιμετώπιση δυσκολιών που σχετίζονται με τη μεταφορά θερμότητας στα τρόφιμα, στα επίπεδα αποστείρωσης και θρεπτικής ποιότητας, καθώς και στον εντοπισμό του κρίσιμου σημείου σε ένα τρόφιμο. Το CFD έχει επίσης αλλάξει τον τρόπο σκέψης στη λειτουργία συμβατικών πρακτικών αποστείρωσης. Για παράδειγμα, το CFD έχει αποδείξει ότι η εφαρμογή βραχυχρόνιας υψηλής θερμοκρασίας (HTST) δεν πρέπει να χρησιμοποιείται υπό ορισμένες συνθήκες λειτουργίας (Jung & Fryer, 1999). Επιπλέον, το CFD έχει δείξει ότι η αποτελεσματικότητα της διαδικασίας αποστείρωσης είναι συνάρτηση τόσο των ιδιοτήτων των τροφίμων όσο και της γεωμετρίας των συσκευασιών (Norton and Sun 2006). Μία από τις πρώτες εφαρμογές των αριθμητικών μεθόδων στη θερμική επεξεργασία των τροφίμων ήταν αυτή των Teixeira et al. (1969) οι οποίοι προέβλεψαν αριθμητικά προφίλ θερμοκρασίας και ταχύτητας κατά τη διάρκεια της θέρμανσης με φυσική συναγωγή κονσερβοποιημένων υγρών τροφίμων. Ο Abdul Ghani (1999) πραγματοποίησε μια σειρά από ερευνητικές εργασίες για την εμπορική αποστείρωση κονσερβοποιημένων τροφίμων με προσομοίωση CFD. Οι Quarini, Scott (1997) χρησιμοποίησαν ένα πακέτο CFD για την πρόβλεψη της θερμικής συμπεριφοράς ενός μη Νευτώνειου υγρού τροφίμου που θερμαίνεται σε ένα κάθετο δοχείο. Εν κατακλείδι το CFD βοηθάει στην κατανόηση των φυσικών μηχανισμών που διέπουν τις θερμικές, φυσικές και ρεολογικές ιδιότητες των τροφίμων βελτιώνοντας την αποτελεσματικότητα των διεργασιών αποστείρωσης. Η χρήση του προγράμματος αποτελεί για την βιομηχανία τροφίμων όσο και για τους ερευνητές ένα αναπόσπαστο κομμάτι και μια επιπλέον επιβεβαίωση μιας πειραματικής διαδικασίας. (Wolti-Chanes et al 2005).

### 3. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Για την επίτευξη της προσομοίωσης μέσω του προγράμματος ANSYS FLUENT απαιτήθηκε ο ορισμός των υλικών που απαρτίζουν την κονσέρβα, ακριβής σχεδιασμός της γεωμετρίας του προϊόντος, δημιουργία και ανεξαρτητοποίηση του πλέγματος επιλογή του κατάλληλου μοντέλου προσομοίωσης. Ο ορισμός των υλικών πραγματοποιήθηκε με προσδιορισμό των θερμοφυσικών ιδιοτήτων τους ,μέσω πειραμάτων και βιβλιογραφικής ανασκόπησης.

Ο μεταλλικός περιέκτης, που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη, είναι η κονσέρβα 200 gr της εταιρείας Ζαναε για ντολμαδάκια γιαλατζί. Οι διαστάσεις του μεταλλικού περιέκτη, που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία, υπολογίσθηκαν μέσω μέτρησης και ελέγχθηκαν μέσω βιβλιογραφικής ανασκόπησης από την ιστοσελίδα της εταιρείας παραγωγής του προϊόντος. Οι διαστάσεις που χρησιμοποιήθηκαν στη προσομοίωση είναι:

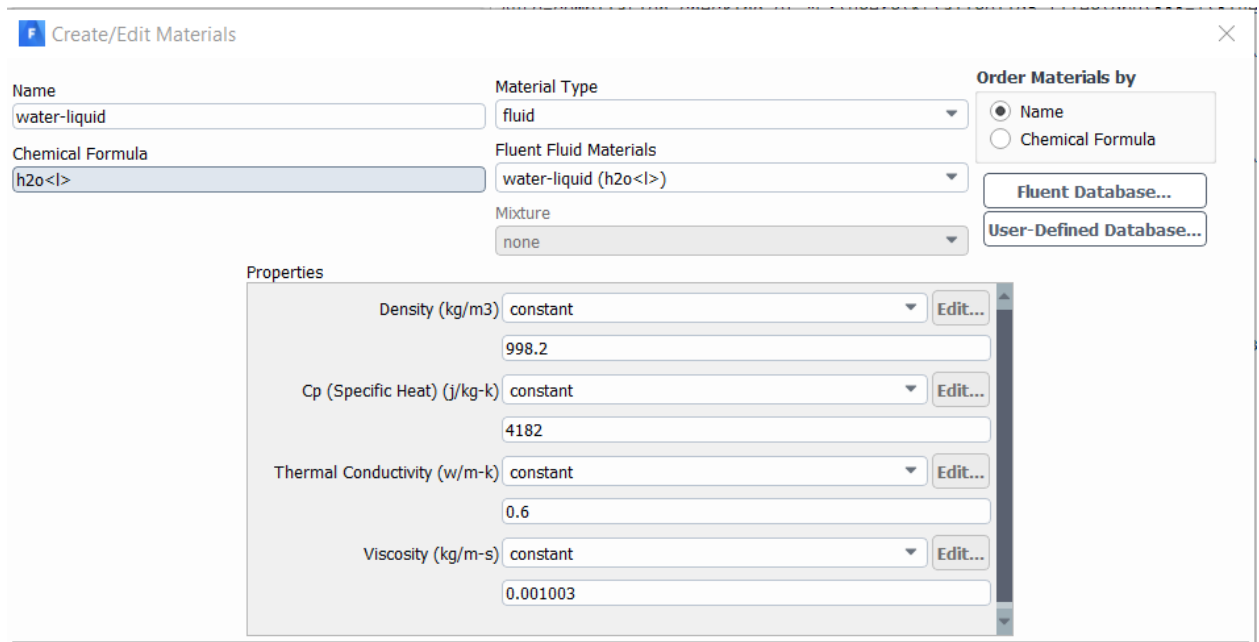
Διάμετρος  $d=9.66$  cm

Ύψος  $h= 3$  cm

#### 3.1 Θερμοφυσικές ιδιότητες

Οι θερμοφυσικές ιδιότητες που είναι απαραίτητες, στο πρόγραμμα ANSYS FLUENT για τη μοντελοποίηση ενός στερεού υλικού είναι η πυκνότητα, η ειδική θερμότητα ( $c_p$ ), και η θερμική αγωγιμότητα, ενώ για τη μοντελοποίηση ενός υγρού υλικού χρειάζονται επιπλέον το ιξώδες (viscosity) και το μοριακό βάρος. Η κονσέρβα όπως αναφέρθηκε αναλυτικά παραπάνω αποτελείται από τα ντολμαδάκια, το χυμό της κονσέρβας, καθώς και ένα στρώμα αέρα (κενό). Ο υπολογισμός των θερμοφυσικών ιδιοτήτων στα ντολμαδάκια διεξήχθη πειραματικά σε ομογενοποιημένο δείγμα λόγω των διαφορετικών υλικών που αποτελούνται και δεν μπορούν να οριστούν κατά τη μοντελοποίηση τους.

Ο χυμός που περιέχει η κονσέρβα ορίσθηκε στο πρόγραμμα ως μίγμα (mixture), αποτελούμενο από νερό, λάδι και κιτρικό οξύ. Για το νερό χρησιμοποιήθηκε το υλικό water liquid, που περιλαμβάνεται στη βάση δεδομένων εισαγωγής υλικών του προγράμματος Ansys Fluent (εικόνα 4). Οι θερμοφυσικές ιδιότητες για το λάδι και το κιτρικό οξύ ( $C_6H_8O_7$ ), που είναι απαραίτητες, για το πρόγραμμα ώστε να οριστεί ένα νέο υλικό προσδιορίστηκαν μέσω βιβλιογραφικής ανασκόπησης.



Εικόνα 4. Θερμοφυσικές ιδιότητες νερού από βάση δεδομένων υλικών του AnsysFluent

Το λάδι που χρησιμοποιείται για την παρασκευή του προϊόντος είναι το σπορέλαιο. Ως σπορέλαιο ορίζεται το λάδι που παρασκευάζεται από τους σπόρους (καρπούς) φυτών, και περιλαμβάνει διαφόρων ειδών λάδια που χωρίζονται ανάλογα με το φυτό προέλευσης τους, όπως το ηλιέλαιο, το σογιέλαιο, το αραβοσιτέλαιο. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5 από τους Rojas et al (2013) οι τιμές της πυκνότητας, της ειδικής θερμότητας, της θερμικής αγωγιμότητας και του ιξώδους εξαρτώνται από την τιμή της θερμοκρασίας. Για τις ανάγκες της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε το ηλιέλαιο. Η πυκνότητα του ηλιέλαιου υπολογίστηκε από τους Nita et al (2010) με τιμή  $918.8 \text{ kg/m}^3$  στους  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Οι Tavman et al (2009) αναφέρουν ως τιμή πυκνότητας του ηλιέλαιου τα  $910 \text{ kg/m}^3$ , ενώ υπολόγισαν ότι η τιμή της θερμικής αγωγιμότητας κυμαίνεται από  $0.168$  ως  $0.162 \text{ W/mK}$  από  $25^\circ\text{C}$  έως  $80^\circ\text{C}$ , καταλήγοντας ότι η μείωση στην τιμή της θερμικής αγωγιμότητας μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η ειδική θερμότητα μετρήθηκε από τους Fasina et al (2007) από  $2.244 \text{ kJ/kgK}$  ως  $2.237 \text{ kJ/kgK}$  από  $35^\circ\text{C}$  ως  $105^\circ\text{C}$ . Για το ιξώδες οι Diamante et al (2014) αναφέρουν ως τιμή  $0.0445 \text{ Pas}$  στους  $26 \text{ }^\circ\text{C}$  και  $0.0234 \text{ Pas}$  στους  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ . Το μοριακό βάρος μετρήθηκε από τους Sánchez et al (2012)  $876.16 \text{ g/mol}$ , ενώ οι Khine et al (2013) αναφέρουν ως τιμή τα  $881.32 \text{ g/mol}$ .

**Table 2** Vegetable oil density.

Oil	Temperature (K)														
	293.15	303.15	313.15	323.15	333.15	343.15	353.15	363.15	373.15	383.15	393.15	403.15	413.15	423.15	433.15
	$\frac{\rho}{\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}}$	$\frac{\rho}{\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}}$	$\frac{\rho}{\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}}$	$\frac{\rho}{\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}}$	$\frac{\rho}{\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}}$	$\frac{\rho}{\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}}$	$\frac{\rho}{\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}}$	$\frac{\rho}{\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}}$	$\frac{\rho}{\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}}$	$\frac{\rho}{\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}}$	$\frac{\rho}{\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}}$	$\frac{\rho}{\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}}$	$\frac{\rho}{\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}}$	$\frac{\rho}{\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}}$	$\frac{\rho}{\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}}$
Cotton	926.6	927.1	922.9	925.4	921.3	919.3	923.2	921.2	914.1	918.2	911.1	912.5	905.4	912.1	911.4
Canola	920.2	918.3	915.2	914.0	910.7	908.2	907.3	904.7	900.8	900.0	895.9	894.3	890.3	890.2	888.0
Sunflower	919.6	916.7	916.4	917.8	913.3	913.0	914.3	910.7	909.6	910.1	905.3	905.0	901.6	904.7	901.9
Corn	931.6	928.6	925.7	926.3	921.7	920.0	919.6	916.4	914.4	913.6	908.8	907.7	904.9	904.6	901.7
Soybean	922.7	920.3	913.7	910.6	906.9	902.0	898.7	896.0	889.8	887.1	882.5	879.2	874.7	870.8	867.9

**Table 3** Heat capacity of vegetable oils.

Oil	Temperature (K)														
	293.15	303.15	313.15	323.15	333.15	343.15	353.15	363.15	373.15	383.15	393.15	403.15	413.15	423.15	433.15
	$\frac{C_p}{\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}}$	$\frac{C_p}{\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}}$	$\frac{C_p}{\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}}$	$\frac{C_p}{\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}}$	$\frac{C_p}{\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}}$	$\frac{C_p}{\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}}$	$\frac{C_p}{\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}}$	$\frac{C_p}{\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}}$	$\frac{C_p}{\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}}$	$\frac{C_p}{\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}}$	$\frac{C_p}{\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}}$	$\frac{C_p}{\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}}$	$\frac{C_p}{\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}}$	$\frac{C_p}{\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}}$	$\frac{C_p}{\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}}$
Cotton	1.950	2.016	2.007	2.066	2.108	2.131	2.185	2.249	2.248	2.314	2.338	2.393	2.426	2.464	2.529
Canola	1.837	1.904	1.938	2.010	2.052	2.099	2.181	2.235	2.249	2.336	2.355	2.426	2.440	2.544	2.607
Sunflower	2.124	2.153	2.179	2.268	2.266	2.314	2.388	2.410	2.453	2.520	2.509	2.570	2.598	2.675	2.700
Corn	1.956	2.008	1.985	2.029	2.057	2.066	2.105	2.154	2.140	2.190	2.201	2.241	2.259	2.283	2.332
Soybean	1.918	1.974	1.957	2.006	2.038	2.052	2.095	2.148	2.140	2.194	2.209	2.254	2.277	2.306	2.359

**Table 4** Thermal conductivity of vegetable oil.

Oil	Temperature (K)														
	293.15	303.15	313.15	323.15	333.15	343.15	353.15	363.15	373.15	383.15	393.15	403.15	413.15	423.15	433.15
	$\frac{k}{\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}}$	$\frac{k}{\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}}$	$\frac{k}{\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}}$	$\frac{k}{\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}}$	$\frac{k}{\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}}$	$\frac{k}{\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}}$	$\frac{k}{\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}}$	$\frac{k}{\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}}$	$\frac{k}{\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}}$	$\frac{k}{\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}}$	$\frac{k}{\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}}$	$\frac{k}{\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}}$	$\frac{k}{\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}}$	$\frac{k}{\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}}$	$\frac{k}{\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}}$
Cotton	0.174	0.176	0.175	0.177	0.178	0.178	0.180	0.182	0.181	0.183	0.184	0.185	0.186	0.187	0.189
Canola	0.166	0.167	0.168	0.169	0.169	0.170	0.172	0.172	0.173	0.175	0.175	0.176	0.176	0.178	0.179
Sunflower	0.161	0.161	0.162	0.163	0.162	0.163	0.164	0.164	0.164	0.165	0.164	0.165	0.165	0.167	0.167
Corn	0.162	0.162	0.163	0.165	0.164	0.165	0.167	0.167	0.168	0.169	0.168	0.169	0.169	0.171	0.172
Soybean	0.153	0.154	0.154	0.155	0.155	0.156	0.157	0.158	0.158	0.159	0.159	0.160	0.160	0.161	0.162

**Table 5** Dynamic viscosity of vegetable oil.

Oil	Temperature (K)														
	293.15	303.15	313.15	323.15	333.15	343.15	353.15	363.15	373.15	383.15	393.15	403.15	413.15	423.15	433.15
	$\text{mPa}\cdot\text{s}$	$\text{mPa}\cdot\text{s}$	$\text{mPa}\cdot\text{s}$	$\text{mPa}\cdot\text{s}$	$\text{mPa}\cdot\text{s}$	$\text{mPa}\cdot\text{s}$	$\text{mPa}\cdot\text{s}$	$\text{mPa}\cdot\text{s}$	$\text{mPa}\cdot\text{s}$	$\text{mPa}\cdot\text{s}$	$\text{mPa}\cdot\text{s}$	$\text{mPa}\cdot\text{s}$	$\text{mPa}\cdot\text{s}$	$\text{mPa}\cdot\text{s}$	$\text{mPa}\cdot\text{s}$
Cotton	52.246	33.504	21.875	15.922	11.847	9.084	7.404	6.131	4.948	4.325	3.662	3.253	2.831	2.585	2.366
Canola	93.990	61.280	40.668	29.203	20.989	15.645	12.208	9.586	7.528	6.234	5.039	4.261	3.566	3.106	2.695
Sunflower	63.941	41.671	28.772	21.416	15.910	12.476	10.159	8.274	6.932	5.964	5.044	4.444	3.910	3.538	3.166
Corn	69.903	45.732	29.681	21.144	16.172	12.288	9.916	8.368	6.633	5.787	5.005	4.430	3.850	3.482	3.241
Soybean	60.598	40.494	28.001	20.576	14.997	11.436	9.135	7.198	5.729	4.818	3.905	3.337	2.783	2.494	2.167

*Εικόνα 5. Θερμοφυσικές ιδιότητες διαφόρων σποροελαίων.*

Το κιτρικό οξύ είναι ασθενές οργανικό τρικαρβοξυλικό οξύ με χημικό τύπο  $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ , απαντάται κυρίως στα εσπεριδοειδή, με το λεμόνι να έχει τη μεγαλύτερη συγκέντρωση κιτρικού οξέος έως  $0,30 \text{ mol / L}$  (Pennistonetal 2008). Στον Πίνακα 2 από τους Sies et al (2016) δίνεται η μοριακή μάζα, το ιζώδες και η πυκνότητα, για διαλύματα κιτρικού οξέος με νερό, σε διάφορες συγκεντρώσεις. Η θερμική αγωγιμότητα των υδατικών διαλυμάτων

του κιτρικού οξέος όπως παρατηρείται από τους Averbukh et al (1977) εξαρτάται από τη θερμοκρασία του διαλύματος καθώς και από τη συγκέντρωση του κιτρικού οξέος στο διάλυμα. Αντίστοιχα η ειδική θερμότητα, όπως έχει παρατηρηθεί από τους Patterson and Wooley (2001) σε σταθερή θερμοκρασία, μειώνεται με την αύξηση της συγκέντρωσης του κιτρικού οξέος. Ως κιτρικό οξύ χρησιμοποιείται ο χυμός λεμονιού για την παρασκευή του προϊόντος. Η πυκνότητα για το χυμό λεμόνι δίνεται από τον Rahman (2009) ίση με  $930\text{kg/m}^3$ . Η θερμική αγωγιμότητα του χυμού λεμονιού μετρήθηκε από τον Sweat (1974)  $0.525\text{W/mK}$  στους  $28^\circ\text{C}$ , ενώ και οι Singh and Heldman, (1993) την υπολόγισαν  $0.525\text{W/mK}$  στους  $50^\circ\text{C}$ . Η ειδική θερμότητα δίνεται από τους Minim et al (2009)  $3923.3\text{J/(kgK)}$  στους  $27^\circ\text{C}$ . Η ειδική θερμότητα αναφέρεται στο ASHRAE Handbook (2006) ίση με  $3.89\text{kJ/kgK}$ . Το μοριακό βάρος δίνεται από το NCBI (National Center for Biotechnology Information)  $754.5\text{g/mol}$ .

Πίνακας 2. ιδιότητες διαλύματος κιτρικού οξέος με νερό

Organic citric acid (%)	Water (%)	Nomenclature	T(°C)	pH	M (g/mol)	$\mu$ (cP)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\sigma$ (N/m)
0	100	L0	28	7.6	18.02	0.7	992.33	$7.15\text{E}^{-2}$
10	90	L10		2.7	35.41	0.7	997.44	$7.10\text{E}^{-2}$
20	70	L20		2.4	52.84	0.7	1000.60	$7.09\text{E}^{-2}$
30	80	L30		2.3	70.25	0.8	1001.60	$7.06\text{E}^{-2}$
40	60	L40		2.3	87.66	0.8	1007.35	$7.02\text{E}^{-2}$
50	50	L50		2.2	105.07	0.8	1010.56	$6.97\text{E}^{-2}$
100	0	L100		2.1	192.12	0.9	1018.08	$6.39\text{E}^{-2}$

### 3.1.1. Πειραματική μέτρηση θερμοφυσικών ιδιοτήτων .

- Ο προσδιορισμός της πυκνότητας ( $\rho$ ) για το ντολμαδάκι υπολογίσθηκε πειραματικά με τη μέθοδο της άνωσης. Ως πυκνότητα ( $\rho$ ) ενός σώματος ορίζεται το πηλίκο της μάζας του ( $m$ ) ως προς τον όγκο του ( $V$ ).

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (17)$$

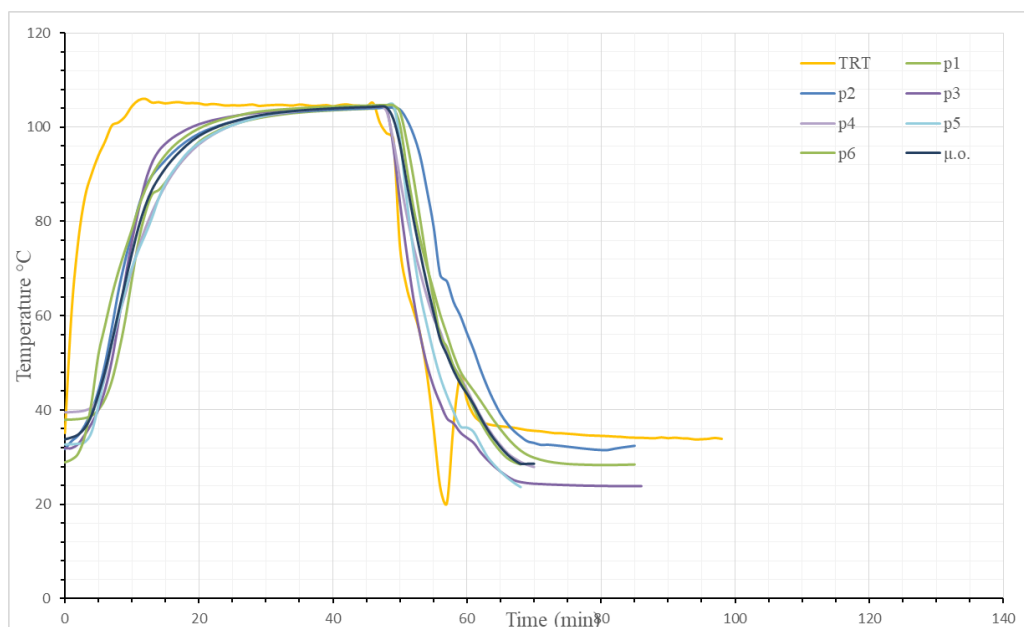
Για τον υπολογισμό της μάζας χρειάστηκε η μέτρηση του ξηρού βάρους στο ντολμαδάκι, ώστε να αφαιρεθεί το βάρος του χυμού. Η αφαίρεση της υγρασίας πραγματοποιήθηκε με τη χρήση φούρνου ξήρανσης. Η ξήρανση διήρκεσε 8 ώρες στους  $50^\circ\text{C}$ , και κατά τη διάρκεια της το ντολμαδάκι απώλεσε  $19,916\text{gr}$  ( $93,92-74,004$ ) του βάρους του. Για τον υπολογισμό της πυκνότητας χρησιμοποιήθηκε ογκομετρικός σωλήνας όπου το ντολμαδάκι αφού περιτυλίχθηκε με αδιάβροχη ζελατίνα βυθίστηκε εξ' ολοκλήρου στο νερό.

- Η ειδική θερμότητα ( $c_p$ ) για το ντολμαδάκι υπολογίστηκε αριθμητικά βάση των συστατικών που αποτελείται.
- Η θερμική αγωγιμότητα ( $k$ ) προσδιορίστηκε πειραματικά με τη χρήση κατάλληλης συσκευής μέτρησης θερμικής αγωγιμότητας (Thermal Conductivity Probe, model KD2, Decagon Devises Inc. Pullman, Wash., U.S.A). Ο De Vries (1952) και οι Von Herzen και Maxwell (1959) εισήγαγαν τη μέθοδο του αισθητήρα βελόνας για τη μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας στα εδάφη και τα ιζήματα. Η μέθοδος χρησιμοποιεί μια λεπτή χαλύβδινη βελόνα που εισάγεται στο υλικό ενδιαφέροντος. Η βελόνα θερμαίνεται και μετρείται η μεταβολή της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της θερμάνσεως και του κύκλου ψύξεως (Ritche et al 2010). Πιο συγκεκριμένα 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 πέντε φορές και χρησιμοποιήθηκε ο μέσος όρος των τιμών αυτών.
- Για τον υπολογισμό της θερμικής διαχυτότητας ( $\alpha$ ) για το ντολμαδάκι χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω εξίσωση (Lightfoot et al 1960)

$$\alpha = k/\rho c_p \quad (18)$$

### 3.2 Συλλογή πειραματικών δεδομένων

Η συλλογή των πειραματικών δεδομένων πραγματοποιήθηκε από την εταιρεία ZANAE, στο εργοστάσιο της εταιρείας, όπου πραγματοποιείται η παρασκευή του προϊόντος. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν η τοποθέτηση τεσσάρων θερμοστοιχείων στο εσωτερικό τεσσάρων διαφορετικών κονσερβών. Συγκεκριμένα το κάθε θερμοστοιχείο τοποθετήθηκε εσωτερικά στο κέντρο ενός από τα κεντρικά ντολμαδάκια που περιέχονται στο μεταλλικό περιέκτη. Οι κονσέρβες σφραγίσθηκαν με διπλή ραφή και τοποθετήθηκαν σε διαφορετικά σημεία του αυτόκλειστου στατικού κλίβανου (μορφής κάθετου βαρελιού). Για τη θερμική διεργασία ως θερμαντικό μέσο χρησιμοποιήθηκε ατμός υπό πίεση 1.22atm. Ακολούθησε η τυπική θερμική διεργασία που πραγματοποιείται κατά τη παρασκευή του προϊόντος, όπου ο κλίβανος θερμαίνεται για 10-14 min μέχρι η θερμοκρασία στο εσωτερικό του να φτάσει τους 105°C, όπου παραμένει για 36 min. Στη συνέχεια ακολουθεί ψύξη με εισαγωγή νερού στον κλίβανο σε θερμοκρασία 25 °C για δέκα λεπτά. Ο κλίβανος ανοίγεται και ακολουθεί δεύτερη ψύξη 6 min. Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν χρησιμοποιήθηκαν για την σύγκριση με την αριθμητική λύση. Λόγω των μεγάλων διαφορών που παρουσιάζουν τα θερμοκρασιακά δεδομένα από τα τέσσερα θερμοστοιχεία, πιθανώς λόγω της διαφορετικής θέσης τους στον κλίβανο, υπολογίστηκε ο μέσος όρος τους για τη σύγκριση με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (Σχήμα 1).



Σχήμα 1. Πειραματικά δεδομένα της εξέλιξης της θερμοκρασίας στο κέντρο έξι κονσερβών, του μέσου όρου τους, και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος κατά την επεξεργασία τους στο αυτόκλειστο θέρμανσης



### **3.3 Αριθμητική επίλυση με τη χρήση λογισμικού προσομοίωσης**

Η προσομοίωση της θερμικής διεργασίας πραγματοποιήθηκε σε ηλεκτρονικό υπολογιστή με λειτουργικό σύστημα Windows 10 Home Premium 64-bit, και επεξεργαστή intel core i7 7700HQ 8core 2.80GHz, 16 GB RAM.

Για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης της θερμικής διεργασίας χρησιμοποιήθηκαν δυο προγράμματα λογισμικού. Χρησιμοποιήθηκε ένα εμπορικό πρόγραμμα λογισμικού Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής, το Workbench 2019R1 της εταιρείας Ansys, που περιλαμβάνει το πρόγραμμα CAD (DesignModeler) για το σχεδιασμό της γεωμετρίας, το Meshing για τη δημιουργία του πλέγματος καθώς και το Fluent για την επίλυση της αριθμητικής λύσης. Επίσης χρησιμοποιήθηκε ένα λογισμικό πρόγραμμα για δισδιάστατη (2D) και τρισδιάστατη (3D) σχεδίαση το AutoCAD της εταιρείας Autodesk για το σχεδιασμό της γεωμετρίας.

### **3.4 Μεθοδολογία CFD**

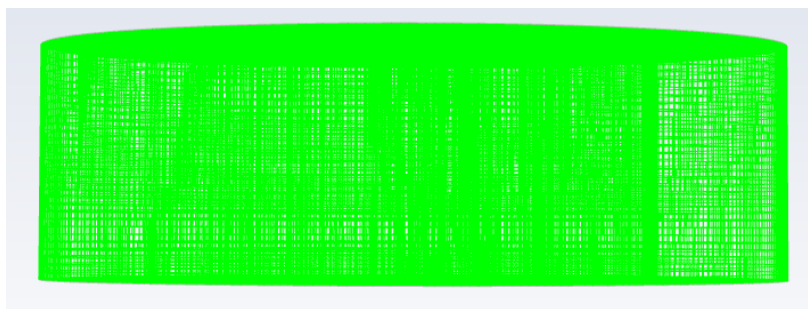
Όπως αναφέρθηκε παραπάνω στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η προσομοίωση και σύγκριση της θερμικής διεργασίας που ακολουθείται στη βιομηχανία για την παρασκευή του συγκεκριμένου προϊόντος, με τέσσερα διαφορετικά σενάρια. Στα σενάρια χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες διαστάσεις μεταλλικού περιέκτη, ενώ η διαφοροποίηση τους έγκειται στη διαφορετική σύσταση του προϊόντος. Οι διαφορετικές περιπτώσεις που προσομοιωθήκαν, κατά σειρά αυξανόμενης πολυπλοκότητας και καλύτερης προσέγγισης της πραγματικής κατάστασης του προϊόντος, είναι οι ακόλουθες:

1. Όλη η κονσέρβα αποτελείται από το προϊόν ομογενοποιημένο.
2. Η κονσέρβα αποτελείται από το προϊόν ομογενοποιημένο με ένα στρώμα αέρα (κενό) 0.1 cm στο πάνω μέρος του μεταλλικού περιέκτη.
3. Η κονσέρβα αποτελείται από το χυμό ένα ντολμαδάκι στο κέντρο και ένα στρώμα αέρα (κενό) 0.1 cm στο πάνω μέρος του μεταλλικού περιέκτη.
4. Η κονσέρβα αποτελείται από το χυμό έξι ντολμαδάκια και ένα στρώμα αέρα (κενό) 0.1 cm στο πάνω μέρος του μεταλλικού περιέκτη.

### 3.5 Σχεδιασμός γεωμετρίας

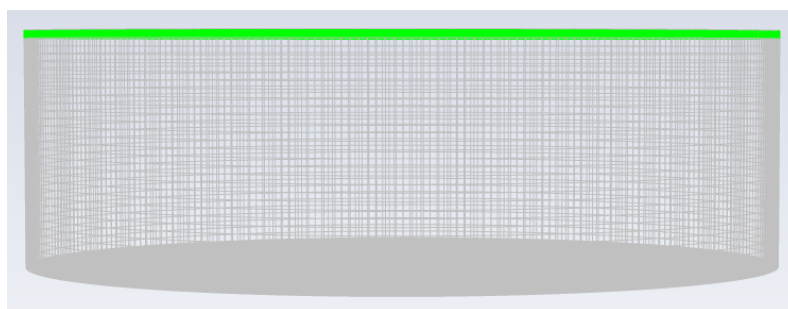
Για την επίλυση του προβλήματος σχεδιάσθηκαν τέσσερις διαφορετικές τρισδιάστατες γεωμετρίες. Η σχεδίαση της γεωμετρίας για τα σενάρια 1,2 και 3 πραγματοποιήθηκε με τη χρήση μόνο του σχεδιαστικού λογισμικού Design Modeler ενώ για το σενάριο 4 χρησιμοποιήθηκε και το σχεδιαστικό λογισμικό AutoCAD.

- Για το σενάριο 1 σχεδιάστηκε τρισδιάστατος κυλινδρικός περιέκτης με διάμετρο 9,66 cm (άξονες x και y) ύψος 3 cm (άξονας z). Στη περίπτωση αυτή όλος ο όγκος της κονσέρβας αποτελείται από το προϊόν ομογενοποιημένο σε στερεή μορφή.



*Εικόνα 6 Γεωμετρία πρώτης περίπτωσης*

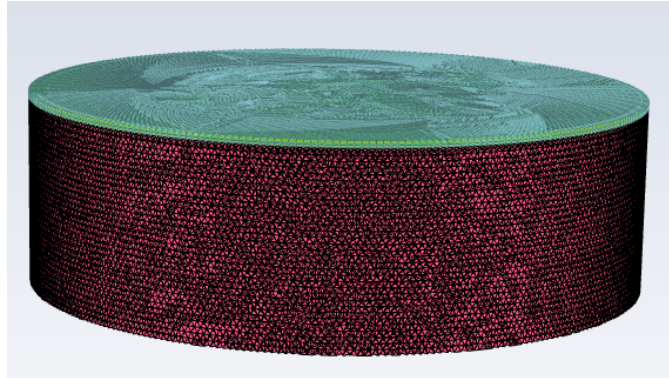
- Για το σενάριο 2 σχεδιάστηκε τρισδιάστατος κυλινδρικός περιέκτης με διάμετρο 9,66 cm (άξονες x και y) και ύψος 3 cm (άξονας z). Στο εσωτερικό του τοποθετήθηκε τρισδιάστατος κυλινδρικός με διάμετρο 9,66 cm (άξονες x και y) και ύψος 0,1cm (άξονας z) ο οποίος εμπεριέχεται στο πάνω μέρος του αρχικού κυλίνδρου. Ο όγκος του εσωτερικού κυλίνδρου ορίσθηκε ως ρευστό και αποτελεί τον χώρο του περιέκτη που καταλαμβάνεται από αέρα (κενό).



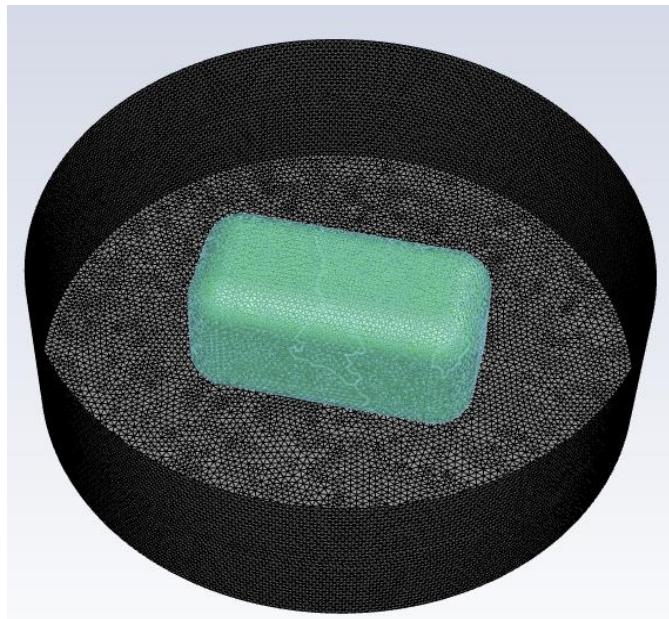
*Εικόνα 7 Γεωμετρία δεύτερης περίπτωσης, με πράσινο χρώμα δίνεται το κενό.*

- Στο σενάριο 3 σχεδιάστηκε τρισδιάστατος κυλινδρικός περιέκτης με διάμετρο 9,66 cm (άξονες x και y) και ύψος 3 cm (άξονας z), με κενό 0,1 cm στο πάνω μέρος του περιέκτη όπως παρουσιάζεται στο σενάριο 2. Στο κέντρο του κάτω μέρους του

περιέκτη σχεδιάστηκε τρισδιάστατο παραλληλεπίπεδο με στρογγυλεμένες ακμές και μήκος 4,6 cm (άξονας y), πλάτος 2.25 cm (άξονας x) και ύψος 2.5cm (άξονας z) (Εικόνα 9). Ο περισσευόμενος όγκος της κονσέρβας ορίστηκε ως ρευστό και αποτελείται από το χυμό του προϊόντος.



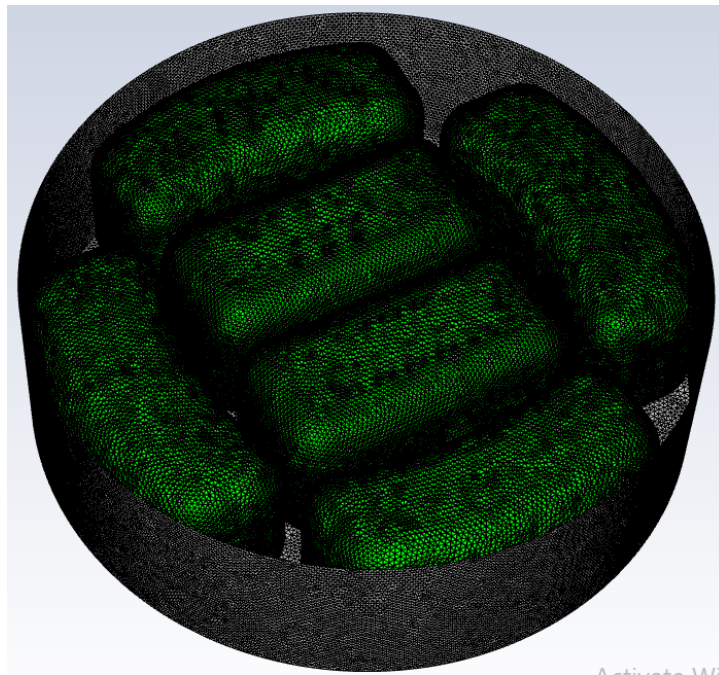
*Εικόνα 8 Γεωμετρία τρίτης περίπτωσης, με κόκκινο χρώμα ορίζεται ο χυμός ενώ με πράσινο το κενό στην κονσέρβα.*



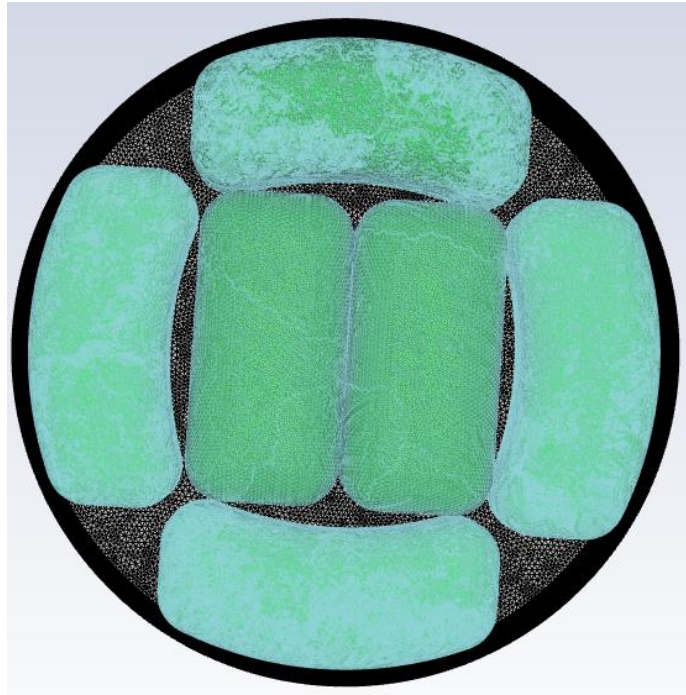
*Εικόνα 9 Γεωμετρία τρίτης περίπτωσης, με πράσινο χρώμα παρουσιάζεται το ντολμαδάκι που περιέχεται στην κονσέρβα.*

- Για το σενάριο 4 σχεδιάστηκε τρισδιάστατος κυλινδρικός περιέκτης με διάμετρο 9.66 cm (άξονες x και y) και ύψος 3 cm (άξονας z) με κενό 0,1 cm στο πάνω μέρος του περιέκτη όπως παρουσιάζεται στις Εικόνες 10,11. Όπως παρατηρείται στην Εικόνα 12 η γεωμετρία περιλαμβάνει έξι ντολμαδάκια διαφορετικών διαστάσεων. Στο κέντρο του κάτω μέρους του περιέκτη σχεδιάστηκαν δυο τρισδιάστατα

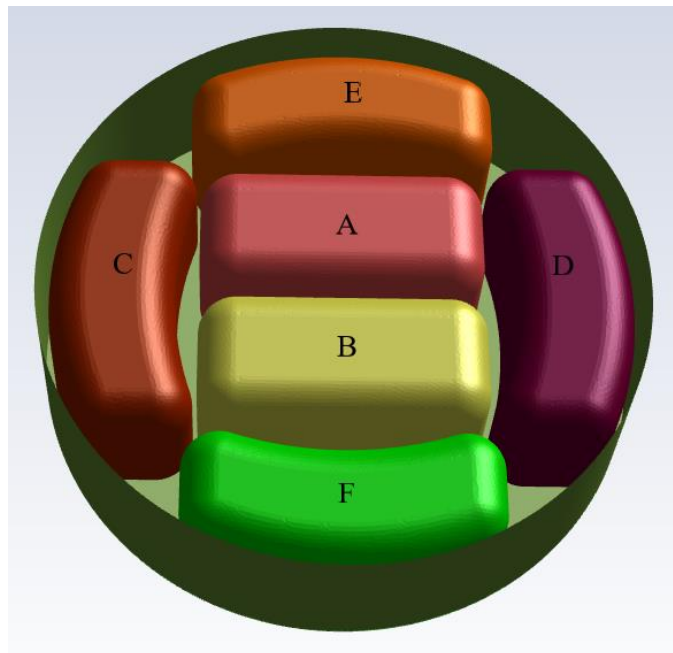
παραλληλεπίπεδα με στρογγυλεμένες ακμές και (ντολμαδάκια A,B) με μήκος 4,6 cm (άξονας y), πλάτος 2.25 cm (άξονας x) και ύψος 2.5cm(άξονας z). Στις δύο άκρες του περιέκτη ως προς τον άξονα y, σχεδιάστηκαν δύο κυρτά τρισδιάστατα παραλληλεπίπεδα με στρογγυλεμένες ακμές και (ντολμαδάκια C,D) με μήκος 5.2 cm (άξονας x), πλάτος 2 cm (άξονας y) και ύψος 2.5cm(άξονας z).). Στις δύο άκρες της κονσέρβας ως προς τον άξονα x, τοποθετήθηκαν δύο κυρτά τρισδιάστατα παραλληλεπίπεδα με στρογγυλεμένες ακμές (ντολμαδάκια E,F) με μήκος 5 cm (άξονας y), πλάτος 2 cm (άξονας x) και ύψος 2.5cm(άξονας z). Ο περισσευούμενος όγκος της κονσέρβας ορίστηκε ως ρευστό και αποτελείται από το χυμό του προϊόντος.



Εικόνα 10. Σχηματισμός των ντολμάδων για τη γεωμετρία της τέταρτης περίπτωσης.



Εικόνα 11. Σχηματισμός των ντολμάδων για τη γεωμετρία της τέταρτης περίπτωσης ύπο κάθετη όψη.




Εικόνα 12. Γεωμετρία τέταρτης περίπτωσης όπου διαφαίνονται οι διαφορετικές διαστάσεις στα ντολμάκια.

### 3.6 Δημιουργία πλέγματος

Για την επίλυση ενός προβλήματος μέσω της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής απαιτείται η κατασκευή του πλέγματος. Η κατασκευή του πλέγματος για κάθε γεωμετρία πραγματοποιήθηκε μέσω του λογισμικού Meshing. Το πλέγμα διαχωρίζει τη γεωμετρία σε ένα πεπερασμένο αριθμό κελίων (cells) που συνδέονται μεταξύ τους, κατά την εκτέλεση μιας ανάλυσης. Το λογισμικό επιλύει τις εξισώσεις που απαιτούνται σε ένα κελί και τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται για την επίλυση των εξισώσεων του επόμενου κελίου. Η ποιότητα του πλέγματος έχει καθοριστικό ρόλο στην ακρίβεια και τη σταθερότητα του αριθμητικού υπολογισμού, για αυτό ανεξάρτητα του πλέγματος που επιλέχθηκε ο έλεγχος ποιότητας του είναι απαραίτητος. Το πρόγραμμα ANSYS FLUENT μέσω του Meshing δίνει τη δυνατότητα ελέγχου της ποιότητας μέσω διαφόρων παραμέτρων, ιδιαίτερες σημαντικές θεωρούνται:

- Το πόσο ορθογωνικά (orthogonal quality) είναι τα κελιά που απαρτίζουν τη γεωμετρία, το εύρος των τιμών κυμαίνεται από 0 έως 1, όπου οι τιμές κοντά στο 0 αντιστοιχούν σε χαμηλή ποιότητα (πίνακας).

Πίνακας 3. Τιμές ορθογωνικής ποιότητας πλέγματος



Unacceptable	Bad	Acceptable	Good	Very good	Excellent
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00

- Η στρέβλωση (skewness) καθορίζεται από το πόσο "κοντά" στο ιδανικό σχήμα είναι το σχήμα των κελιών (εικόνα 12). Ως αποδεκτή τιμή για τη στρέβλωση θεωρείται μεγαλύτερη του 0.1. Η στρέβλωση προσδιορίζεται με δυο μεθόδους
- Με την εξίσωση απόκλισης όγκου (Equilateral Volume deviation) που χρησιμοποιείται για τριγωνικά και τετράεδρα

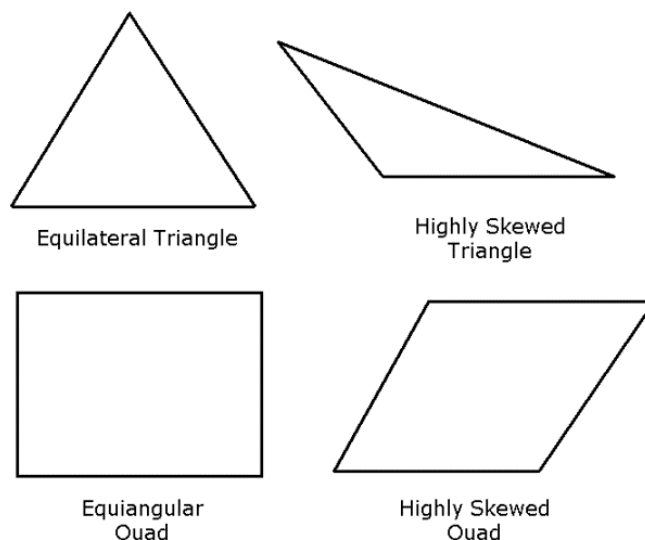
$$\text{Στρέβλωση} = \frac{\text{βέλτιστο μέγεθος κελίου} - \text{μέγεθος κελιού}}{\text{βέλτιστο μέγεθος κελιού}} \quad (19)$$

- Με την εξίσωση κανονικοποιημένης απόκλισης γωνίας (Normalized Angle deviation) η οποία ισχύει για σχήματα κελιών όλων των ειδών και χρησιμοποιείται σε εξάεδρα, πρίσματα και πυραμίδες.

$$\text{Στρέβλωση} = \max \left[ \frac{\theta_{max} - \theta_e}{180 - \theta_e} - \frac{\theta_e - \theta_{min}}{\theta_e} \right] \quad (20)$$

Όπου  $\theta_e$  η ισοδύναμη γωνιά όψης/κελί (60°για τετράεδρα και τρίγωνα και 90°για εξάεδρα και τετράγωνα). ( ANSYS 2017).

Figure 76: Ideal and Skewed Triangles and Quadrilaterals

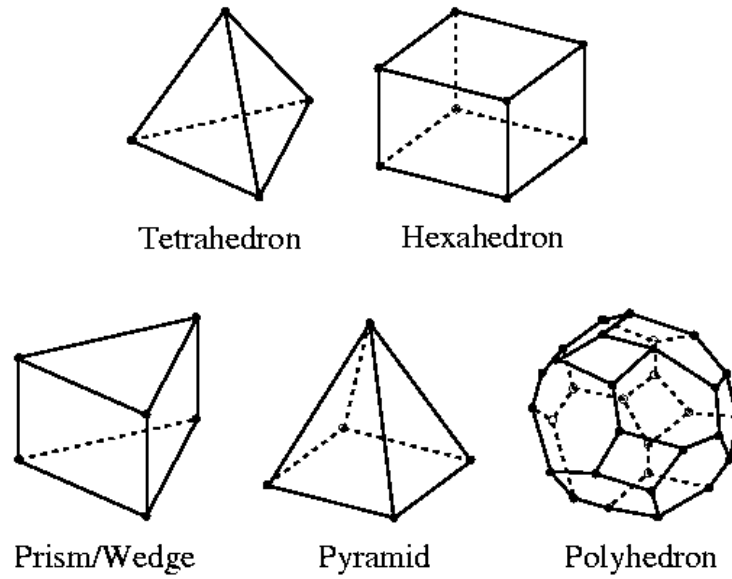


Εικόνα 13 Τριγωνικά και τετράγωνα κελιά με τιμή στρέβλωσης 1 (αριστερά) και 0.1 (δεξιά)

Πίνακας 4. Τιμές στρέβλωσης πλέγματος

Excellent	Very good	Good	Acceptable	Bad	Unacceptable
0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.94	0.95-0.97	0.98-1.00

Στη παρούσα εργασία για όλα τα σενάρια χρησιμοποιήθηκαν κελιά σχήματος hex/wedge (εικόνα 14) και η ομαλότητα (Smoothness) ορίστηκε υψηλή. Για τα σενάρια τρία και τέσσερα λόγω της πολυπλοκότητας της γεωμετρίας χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο inflation. Το εργαλείο inflation δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας στρωμάτων κελίων πολύ μικρού όγκου, που καθορίζονται από τον χρήστη, σε περιοχές της γεωμετρίας που παρουσιάζουν απότομες αλλαγές σε βασικές μεταβλητές της όπως η πίεση, η ταχύτητα και η θερμοκρασία λόγω εναλλαγής υλικών (Ansys 2017).



Εικόνα 14 Είδη κελίων που χρησιμοποιούνται από το πρόγραμμα Mesh

### 3.7 Ανεξαρτησία πλέγματος

Μετά το σχεδιασμό της γεωμετρίας και πριν την επίλυση της προσομοίωσης, είναι απαραίτητη η εύρεση του κατάλληλου πλέγματος το οποίο να είναι ανεξάρτητο της λύσης. Η καταλληλότητα του πλέγματος εξαρτάται από την πυκνότητα του (ο αριθμός κελίων που απαρτίζουν το πλέγμα). Η επιλογή ενός αραιού πλέγματος οδηγεί σε μη ακριβή αποτελέσματα και πολλές φορές σε μη σύγκλιση των αποτελεσμάτων. Αντίθετα η επιλογή ενός πιο πυκνού πλέγματος, δίνει αποτελέσματα με μεγαλύτερη ακρίβεια, εις βάρος όμως του χρόνου επίλυσης καθώς και πολλές φορές την ανάγκη αύξησης της υπολογιστικής ισχύος (Kulkarni 2016). Για την επιλογή του κατάλληλου πλέγματος επιλέχθηκαν συγκεκριμένα σημεία εντός της γεωμετρίας, για κάθε σενάριο και συγκρίθηκαν, για κάθε σενάριο ξεχωριστά, τα θερμοκρασιακά αποτελέσματα συναρτήσει του χρόνου των διαφόρων πλεγμάτων. Η πυκνότητα των κελίων αυξήθηκε μέχρις ότου η διαφορά των θερμοκρασιακών δεδομένων ( $\Delta T$ ) για το ίδιο σημείο αναφοράς να είναι τόσο μικρή, σε σχέση με πυκνότερα πλέγματα, ώστε να θεωρείται αμελητέα ως προς την αξιοπιστία της λύσης.



### 3.8 Θερμοκρασία αυτόκλειστου

Η προσομοίωση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος ( $T_{RT}$ ) πραγματοποιήθηκε με τη χρήση ενός αρχείου UDF (User Defined Functions) που εισήχθη στο πρόγραμμα. Ο κώδικας που αποτελείται το αρχείο UDF (Εικόνα 15α,15β), βασίστηκε στα θερμοκρασιακά δεδομένα συναρτήσεως του χρόνου (Σχήμα 3), που μετρήθηκαν με τη χρήση θερμοστοιχείου, στο εσωτερικό του αυτόκλειστου βαρελιού όπου πραγματοποιείται η θερμική διεργασία του προϊόντος. Στο αρχείο UDF εισήχθησαν τέσσερις εντολές συναρτήσεως του χρόνου ώστε να οριστεί η θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τη θερμική διεργασία. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω για την περάτωση της εργασίας δημιουργήθηκαν δυο θερμοκρασίες περιβάλλοντος σε ξεχωριστά αρχεία UDF με διαφορά στο χρόνο θέρμανσης. Η πρώτη με χρόνο θέρμανσης 50 λεπτών χρησιμοποιήθηκε κατά την αριθμητική επίλυση των περιπτώσεων και κατά τη σύγκριση αποτελεσμάτων αριθμητικής επίλυσης στο κρίσιμο σημείο. Η δεύτερη θερμοκρασία περιβάλλοντος που προσομοιάζει τη θερμική επεξεργασία που ακολουθείται στη βιομηχανία με διάρκεια θέρμανσης 46 λεπτών χρησιμοποιήθηκε κατά τη σύγκριση αποτελεσμάτων αριθμητικής επίλυσης με πειραματικά δεδομένα.

Πρώτη θερμοκρασία περιβάλλοντος ( $T_{RT}$ )

Από 0-1060 sec η θερμοκρασία του αυτόκλειστου αυξάνεται από 32°C στους 105 °C(CUT)

Από 1060-3000 sec η θερμοκρασία περιβάλλοντος παραμένει 105 °C (κύρια θερμική διεργασία)

Από 3000-3600 sec η θερμοκρασία περιβάλλοντος μειώνεται από 105 °C στους 35 °C (ψύξη)

Από 3600- 6000sec η θερμοκρασία περιβάλλοντος παραμένει 35 °C

Δεύτερη θερμοκρασία περιβάλλοντος ( $T_{RT}$ )

Από 0-1060 sec η θερμοκρασία του αυτόκλειστου αυξάνεται από 32°C στους 105 °C(CUT)

Από 1060-2760 sec η θερμοκρασία περιβάλλοντος παραμένει 105 °C (κύρια θερμική διεργασία)

Από 2760-3360 sec η θερμοκρασία περιβάλλοντος μειώνεται από 105 °C στους 35 °C (ψύξη)

Από 3360- 6000sec η θερμοκρασία περιβάλλοντος παραμένει 35 °C

Για το χρόνο που απαιτείται ώστε η θερμοκρασία περιβάλλοντος να φτάσει στους 105 °C (CUT) , καθώς και το χρόνο που απαιτείται για τη μείωση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος στους 35°C, υπολογίστηκαν δυο εξισώσεις με την μέθοδο των ελαχίστων τετράγωνών (εξίσωση 21). Για την επίλυση για τον υπολογισμό των εξισώσεων χρησιμοποιήθηκε το Solver του προγράμματος Excel. Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται η σύγκρισή των θερμοκρασιακών δεδομένων συναρτήσει του χρόνου, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος των πειραματικών δεδομένων (retort) και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος της προσομοίωσης (wall).

$$SSE = \sum_{i=1}^n (Y_i - Y_i^{est})^2 \quad (21)$$

$Y_i$  = πραγματική τιμή i-παρατήρησης

$Y_i^{est}$  = εκτιμωμένη τιμή i-παρατήρησης

```
#include "udf.h"

DEFINE_PROFILE(unsteady_temperature, thread, position)
{
    face_t f;
    real t = CURRENT_TIME;
    begin_f_loop(f, thread)
    {
        if (CURRENT_TIME <= 1060)
            F_PROFILE(f, thread, position) = 378.7-72.83*exp(-t/94.7306);
        else if (CURRENT_TIME <= 3000 && CURRENT_TIME>1060)
            F_PROFILE(f, thread, position) = 378.15;
        else if (CURRENT_TIME <= 3600 && CURRENT_TIME>3000)
            F_PROFILE(f, thread, position) = -0.000217019555*t*t+1.32207906*t-1635.40434;
        else
            F_PROFILE(f, thread, position) = 308;
    }
    end_f_loop(f, thread)
}
```

*Εικόνα 15α. Κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για τη προσομοίωση της πρώτης θερμοκρασίας περιβάλλοντος ( $T_{RT}$ )*

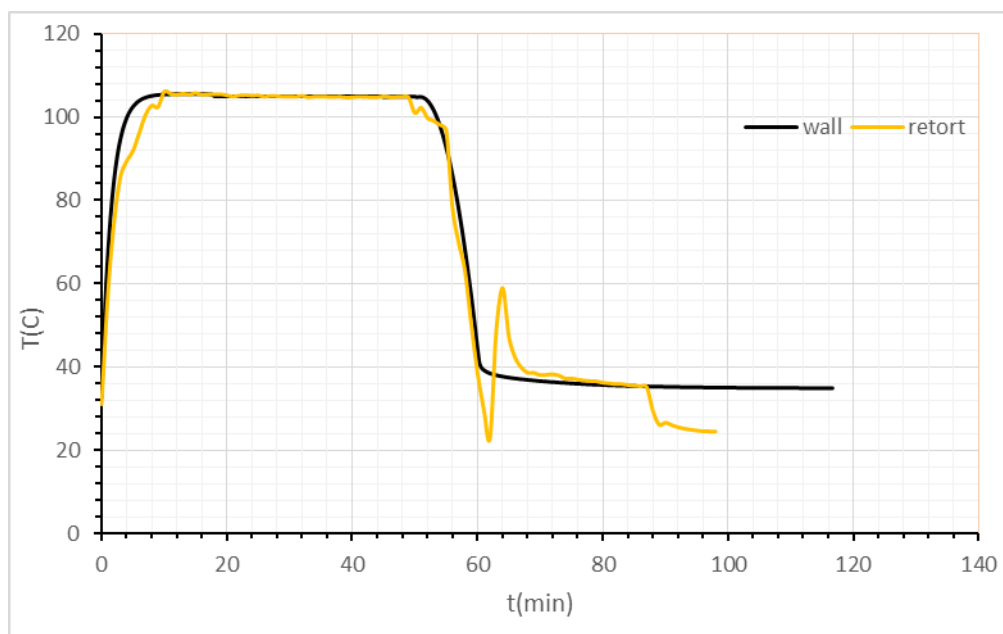
```

#include "udf.h"

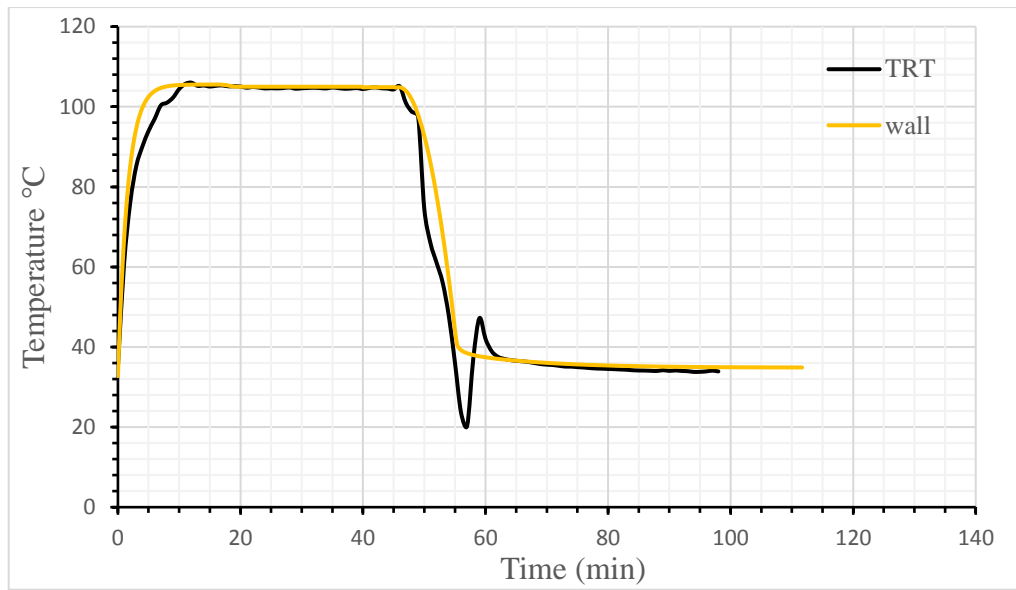
DEFINE_PROFILE(unsteady_temperature, thread, position)
{
    face_t f;
    real t = CURRENT_TIME;
    begin_f_loop(f, thread)
    {
        if (CURRENT_TIME <= 1060)
            F_PROFILE(f, thread, position) = 378.7-72.83*exp(-t/94.7306);
        else if (CURRENT_TIME <= 2760 && CURRENT_TIME>1060)
            F_PROFILE(f, thread, position) = 378.15;
        else if (CURRENT_TIME <= 3360 && CURRENT_TIME>2760)
            F_PROFILE(f, thread, position) = -0.00195317599*t*t + 10.9195437*t - 14885.0093;
        else
            F_PROFILE(f, thread, position) = 308;
    }
    end_f_loop(f, thread)
}

```

Εικόνα 15β. Κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για τη προσομοίωση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος ( $T_{RT}$ ) που ακολουθείται από τη βιομηχανία.



Σχήμα 2. Εξέλιξη της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (retort) και της προσομοίωση (wall) των 50 min θέρμανσης.



Σχήμα 3. Εξέλιξη της θερμοκρασίας περιβάλλοντος ( $T_{RT}$ ) βάση των πειραματικών δεδομένων και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (wall) κατά τη προσομοίωση των 46 min θέρμανσης.

### 3.9 Υπολογισμός της τιμής F της διεργασίας

Για τον υπολογισμό της τιμής F της διεργασίας χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση των Ball and Olson, 1957, όπου περιγράφεται σε προηγούμενη ενότητα. Η εξίσωση αυτή βασίζεται σε κινητική μικροβιακής απενεργοποίησης πρώτης τάξης και γραμμική εξάρτηση του λογαρίθμου του χρόνου δεκαδικής μείωσης (D) από τη θερμοκρασία. Για την εισαγωγή της εξίσωσης στο πρόγραμμα Fluent χρησιμοποιήθηκε αρχείο UDF (User Defined Functions). Στην εξίσωση ορίσθηκε τιμή z ίση προς 10°C και θερμοκρασία αναφοράς 105°C.

Η τιμή F υπολογίστηκε σε όλα τα σενάρια σε κάθε σημείο του περιέκτη για κάθε χρονική στιγμή της επεξεργασίας. Λόγω του όγκου των δεδομένων και της σημασίας της τιμής F, επιλέχθηκε η χρησιμοποίηση των αποτελεσμάτων μόνο για το κρίσιμο σημείο για κάθε χρονική στιγμή της διεργασίας. Όλα τα δεδομένα επιλέχθηκε να παρουσιαστούν μέσω του εργαλείου contour με τη μορφή εικόνας (animation) και διαγραμμάτων.

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

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

    domain=Get_Domain(1);

    thread_loop_c (t,domain) {
        begin_c_loop (c,t)
        {
            C_UDMI(c,t,0) = C_UDMI(c,t,0) + (curr_ts * pow(10, ((C_T (c, t) - 394) / 10)));
        }
        end_c_loop (c,t)
    }
}
```

Εικόνα 16. Κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της τιμής F της διεργασίας.

### 3.10 Υπολογισμός της υποβάθμισης των ποιοτικών παραγόντων του προϊόντος.

Λόγω των πολλών διαφορετικών συστατικών που αποτελείται το προϊόν όπως περιεγράφηκε σε παραπάνω ενότητα, όντας ένα ανομοιογενές προϊόν που για την ανάγκη του προγράμματος θεωρήθηκε ομογενοποιημένο, επιλέχθηκε για τον υπολογισμό των ποιοτικών παραγόντων να χρησιμοποιηθεί η θειαμίνη. Ο υπολογισμός πραγματοποιήθηκε μέσω μιας Λειτουργίας Ορισμένης από τον Χρήστη (UDF) όπως περιεγράφηκε και για τη τιμή της διεργασίας F. Χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω εξίσωση όπου ορίστηκε τιμή z ίση προς 44°C και θερμοκρασία αναφοράς 121°C.

$$C_{T_{ref}}^z = \int_0^t 10^{(T(t)-T_{ref})/z} dt \quad (22)$$

Για την καλύτερη απεικόνιση της υποβάθμισης του ποιοτικού παράγοντα, ώστε τα αποτελέσματα να είναι κατανοητά, υπολογίστηκε η % διατήρηση ποιοτικού παράγοντα μέσω, του εργαλείου του προγράμματος fluent, custom field functions βάσει της εξίσωσης

$$\% \text{διατήρηση} = \frac{C_t}{C_0} \times 100 = 10^{-\frac{C_{T_{ref}}^z}{D_{T_{ref}}}} \times 100 \quad (23)$$

```
# include "udf.h"
# define domain_ID 4

DEFINE_EXECUTE_AT_END (store2_temp_time)
{
    Domain *domain;
    cell_t c;
    Thread *t;

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

    domain=Get_Domain(1);

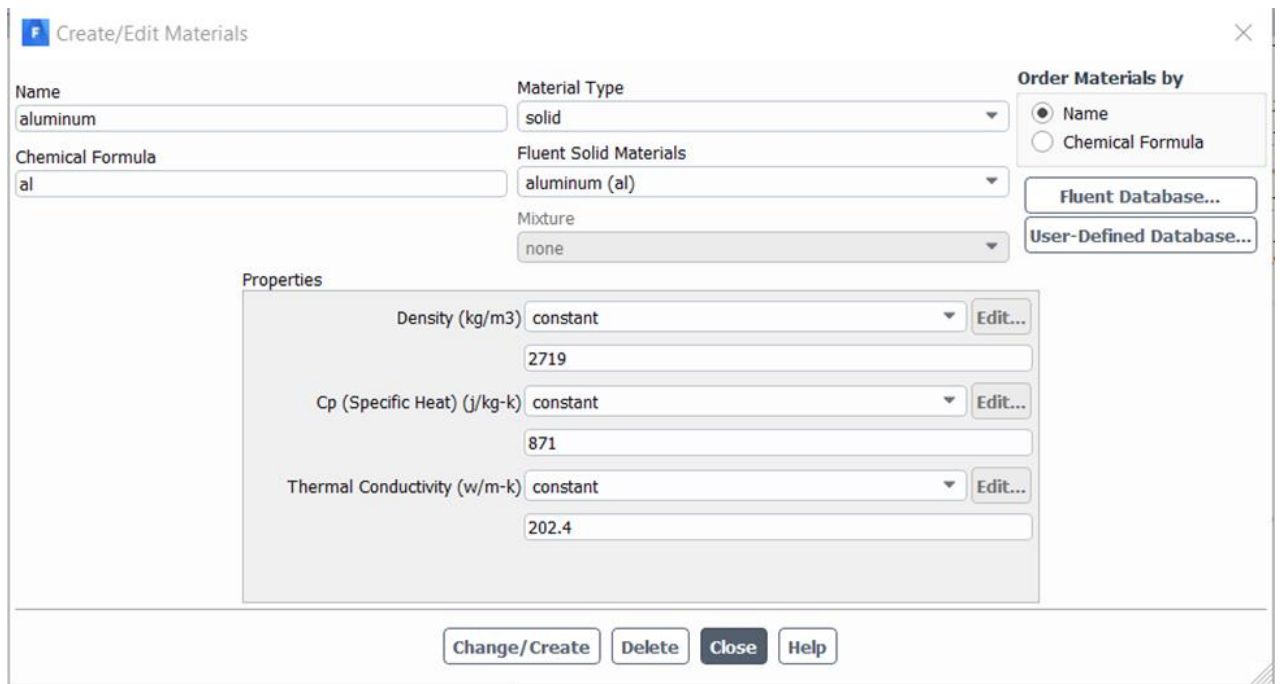
    thread_loop_c (t,domain) {
        begin_c_loop (c,t)
        {
            C_UDMI(c,t,0) = C_UDMI(c,t,0) + (curr_ts * pow(10, ((C_T (c, t) - 394) / 44)));
        }
        end_c_loop (c,t)
    }
}
```

Εικόνα 17. Κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της τιμής της υποβάθμισης των ποιοτικών παραγόντων.

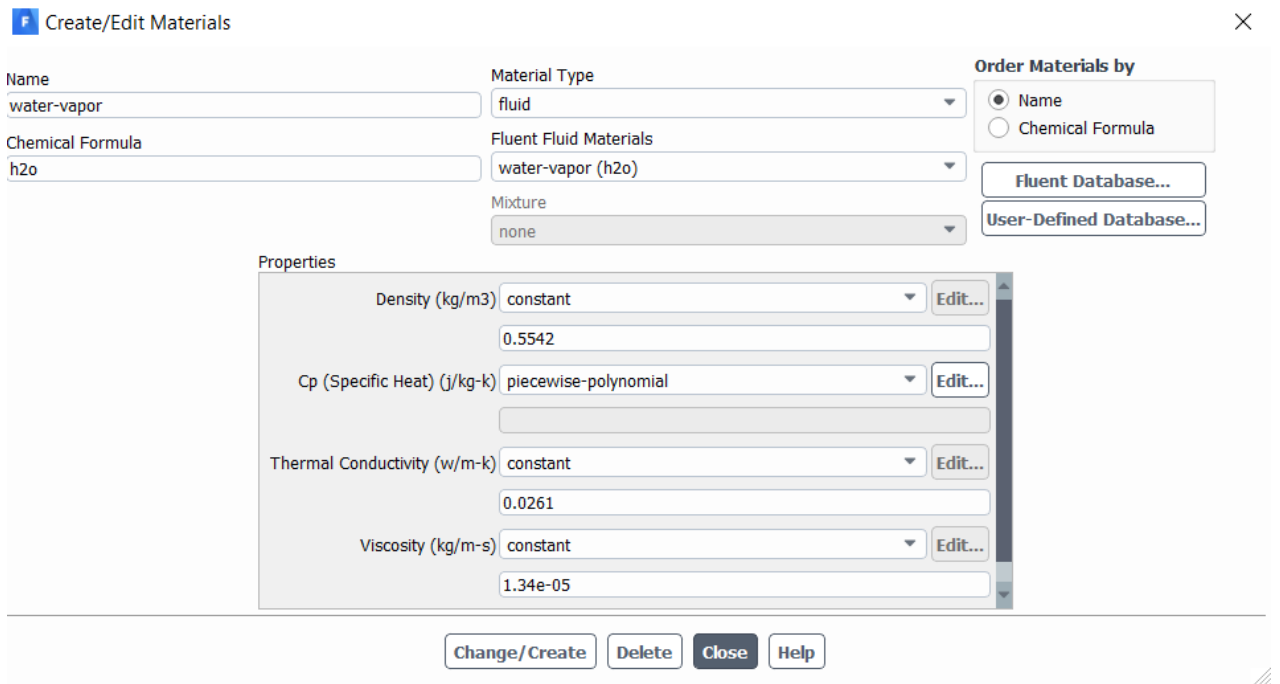
### 3.11 Αξιολόγηση της θερμικής διεργασίας μέσω του λογισμικού προσομοίωσης

Για την πραγμάτωση της προσομοίωσης ορίσθηκαν στο πρόγραμμα fluent οι εξής συνθήκες

- Η χρονική διάρκεια της θερμικής διεργασίας καθορίστηκε, βάση των δοθέντων δεδομένων, στα 100 min, αποτελούμενη από ένα κύκλο θέρμανσης 50 min (CUT 10min), και ένα κύκλο ψύξης 50 min όπως περιγράφεται αναλυτικότερα στην ενότητα.
- Η ειδική θερμότητα,  $C_p$ , η θερμική αγωγιμότητα  $k$ , η πυκνότητα και η θερμική διαχυτότητα,  $\alpha$ , θεωρούνται σταθερές και η επίδραση της θερμοκρασίας και άλλων παραγόντων θεωρείται αρκετά μικρή ώστε να μπορεί να αγνοηθεί.
- Ο περιέκτης θεωρήθηκε ότι έχει αρχική ομοιόμορφη θερμοκρασία ( $T_{IT}$ ) σε όλη τη μάζα του. Η αρχική θερμοκρασία του μέσου θέρμανσης ( $T_{RT}$ ) και η αρχική θερμοκρασία ( $T_{IT}$ ) του προϊόντος ορίσθηκαν της  $32^{\circ}\text{C}$ . Για τα σενάρια 3 και 4 η αρχική θερμοκρασία ( $T_{IT}$ ) του χυμού της κονσέρβας ορίσθηκε στους  $72^{\circ}\text{C}$ .
- Τα τοιχώματα του περιέκτη λαμβάνουν άμεσα τη θερμοκρασία του μέσου θέρμανσης, υπάρχει δηλαδή άπειρος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας  $h=\infty$   $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ .
- Πραγματοποιήθηκε ορισμός δυο υλικών, ενός στερεού (solid) ως ντολμαδάκι και ενός υγρού μίγματος (fluid mixture) όπως περιγράφεται παραπάνω. Χρησιμοποιήθηκαν δύο υλικά από τη βάση δεδομένων υλικών του προγράμματος Fluent, το υλικό αλουμίνιο ως τοίχωμα για την μεταλλική κονσέρβα με θερμοφυσικές ιδιότητες, θερμική αγωγιμότητα  $k=202.4$   $\text{W}/\text{mK}$ , πυκνότητα  $\rho=2719$   $\text{kg}/\text{m}^3$  και ειδική θερμότητα  $C_p=871$   $\text{J}/\text{kg K}$  (Εικόνα 18) και το υλικό water vapor ως υδρατμοί για τα σενάρια που περιλαμβάνουν κενό (Εικόνα 19).



Εικόνα 18 Θερμοφυσικές ιδιότητες αλουμινίου από βάση δεδομένων υλικών του AnsysFluent



Εικόνα 19 Θερμοφυσικές ιδιότητες υδρατμών από βάση δεδομένων υλικών του AnsysFluent

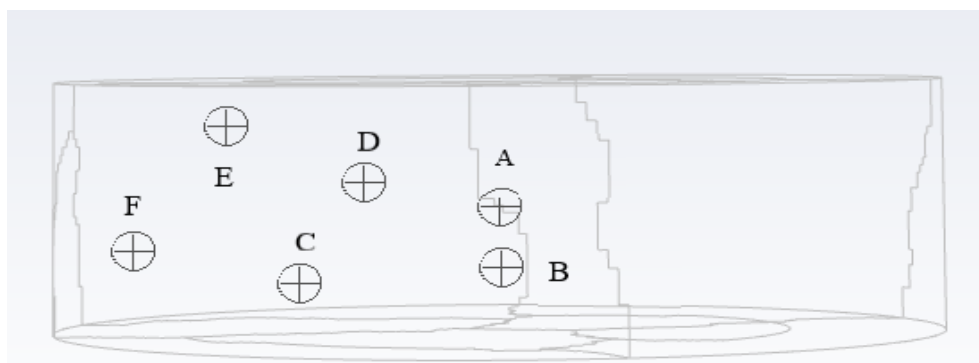
Για την επίλυση όλων των σεναρίων επιλέχθηκαν τρισδιάστατο (3D) περιβάλλον με διπλή ακρίβεια, (double precision), και παράλληλη (parallel) επεξεργασία για ταχύτερα αποτελέσματα κατά την επίλυση. Ως μοντέλο επιλέχθηκε γραμμικής ροής (laminar), με



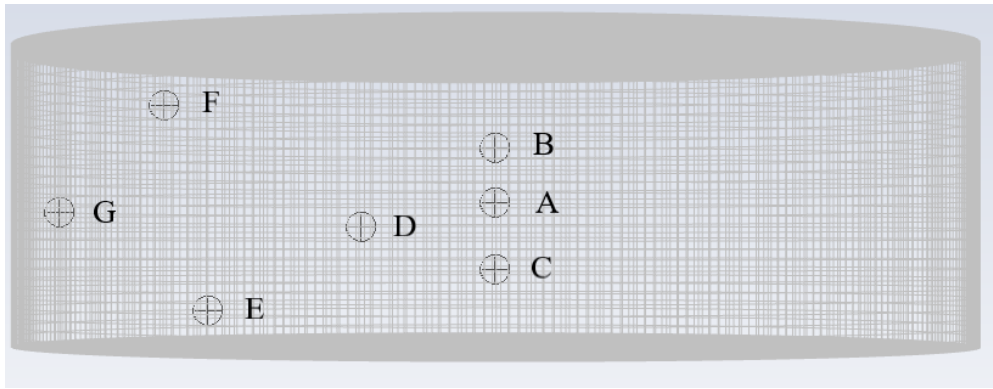
χρόνο μεταβλητό (time unsteady), pressured-based. Για τον υπολογισμό της μεταβολής της θερμοκρασίας κατά τη μεταφορά θερμότητας ενεργοποιήθηκε η εξίσωση της ενέργειας. Για τη χωρική διακριτοποίηση χρησιμοποιήθηκε το Gradiend: Green-Gausscell based, Pressure: Standard, Momentum: 2<sup>nd</sup>orderupwind, Energy: 2<sup>nd</sup>orderupwind για την αύξηση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων, με απλή (SIMPLE) συσχέτιση πίεσης-ταχύτητας και απόλυτο κριτήριο σύγκλισης  $10^{-9}$ . Για τα σενάρια 2, 3 και 4 ενεργοποιήθηκε και η βαρύτητα με τιμή  $9.81\text{m/s}^2$ . Για τα σενάρια 3 και 4, λόγω της χρήσης μίγματος ενεργοποιήθηκε το εργαλείο species. Λόγω της αλληλεπίδρασης δυο ρευστών υλικών που εφάπτονται μεταξύ τους, κατά τη διεργασία, στα σενάρια τρία και τέσσερα, η μεταφοράς θερμότητας μεταξύ τους πραγματοποιείται μέσω συναγωγής. Για τον υπολογισμό της μεταφοράς θερμότητας μέσω του προγράμματος ενεργοποιήθηκε η πολυφασική (multiphase) επίλυση, με χρήση του μοντέλου volume of fluid (vof), όπου ορίστηκαν δυο φάσεις του χυμού της κονσέρβας και των υδρατμών. Το μοντέλο VOF μπορεί να μοντελοποιήσει δύο ή περισσότερα μη αναμίξιμα ρευστά, επιλύοντας το σύνολο των εξισώσεων ορμής και εντοπίζοντας το κλάσμα όγκου καθενός από τα υγρά σε όλο τον χώρο που καταλαμβάνουν (Ansys. 2015)

### 3.12 Σημεία μέτρησης τιμών και εντοπισμού κρίσιμου σημείου

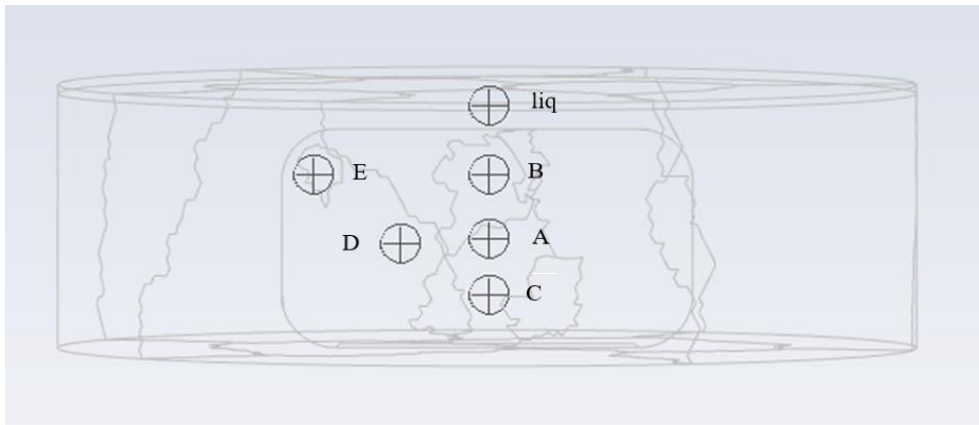
Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των σεναρίων, καθώς και εκτενέστερης κατανόησης της θερμικής διεργασίας για κάθε σενάριο, επιλέχθηκαν και άλλα σημεία, εκτός του κρίσιμου σημείου (σημείο A), όπου συλλέχθηκαν οι θερμοκρασιακές μεταβολές κατά τη διάρκεια της διεργασίας. Η σύγκριση με τα δεδομένα από τη διεργασία που εφαρμόζεται στην βιομηχανία είχε ουσιαστική σημασία μόνο με το κρίσιμο σημείο, λόγω έλλειψης περισσότερων δεδομένων.



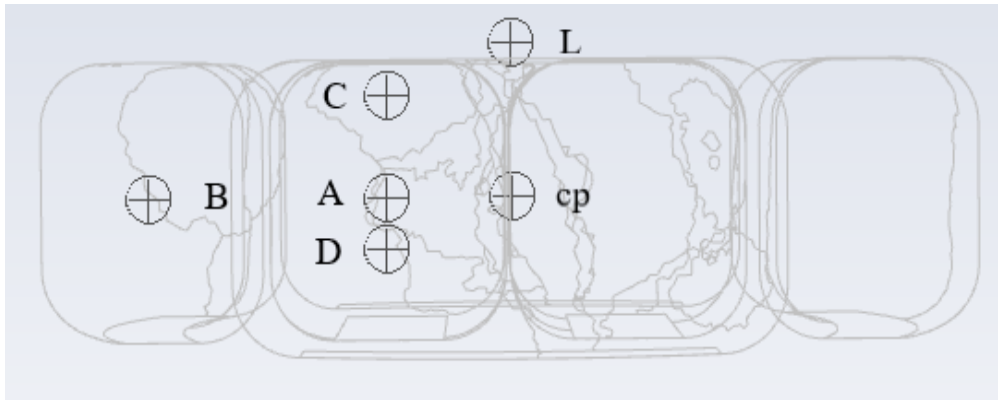
Εικόνα 20. Σημεία που εξετάστηκαν στο σενάριο 1



Εικόνα 21. Σημεία που εξετάστηκαν στο σενάριο 2

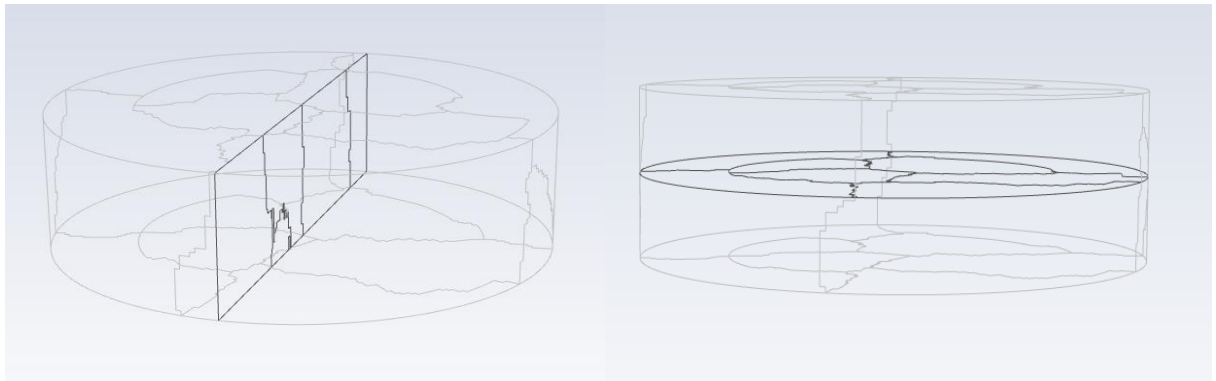


Εικόνα 22. Σημεία που εξετάστηκαν στο σενάριο 3

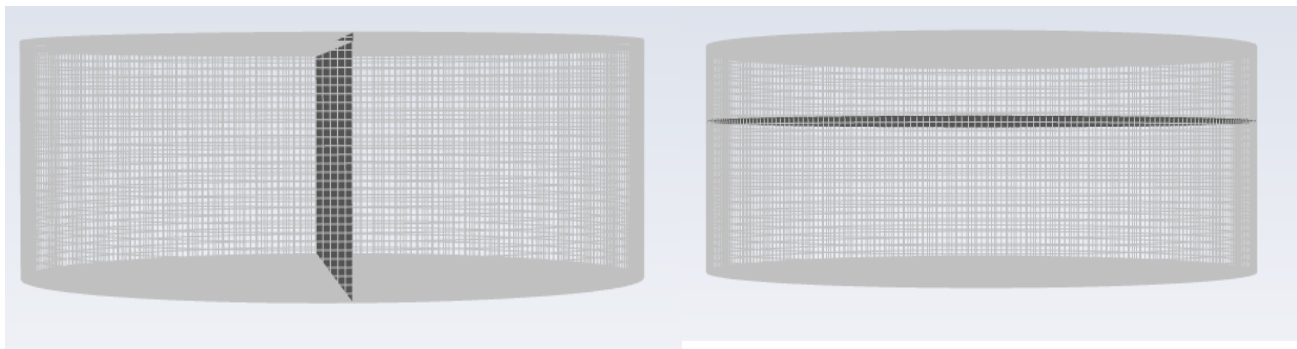


Εικόνα 23. Σημεία που εξετάστηκαν στο σενάριο 4

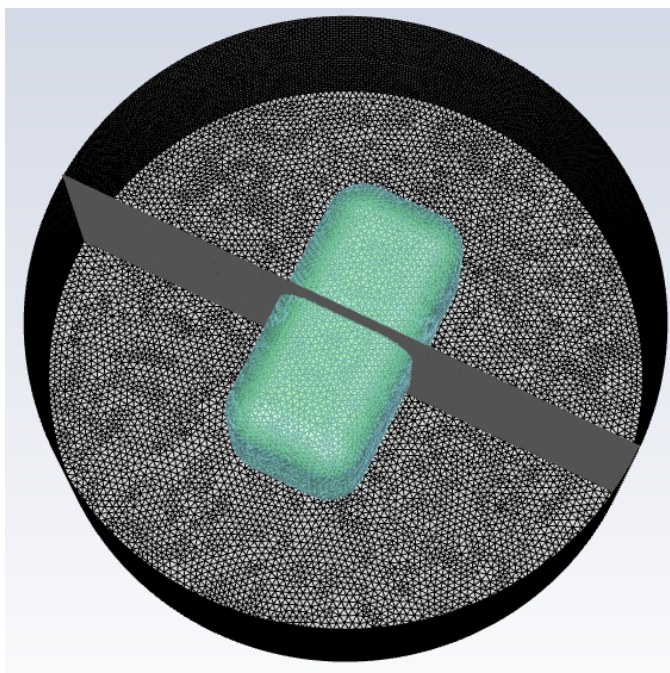
Για τον υπολογισμό διαφόρων τιμών σε κάθε σημείο σε όλη την έκταση του εκάστοτε σεναρίου, σχεδιάσθηκαν δυο τομές για κάθε γεωμετρία και χρησιμοποιήθηκαν για τη λήψη εικόνων κατά τη διάρκεια της διεργασίας. Οι τομές όπως παρατηρείται και στις εικόνες 24 έως 32 σχεδιάσθηκαν να χωρίζουν την γεωμετρία στο κρίσιμο σημείο του κάθε σεναρίου, η μια ως προς τον άξονα x,y και η άλλη ως προς τον άξονα z.



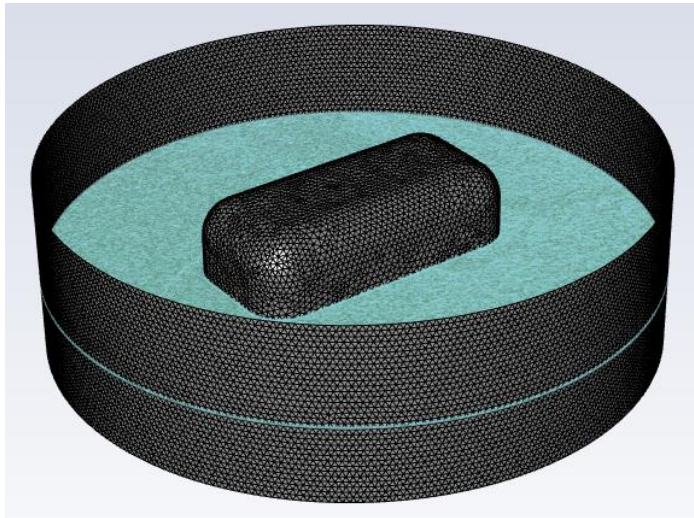
Εικόνες 24α, 24β. Τομές που χρησιμοποιήθηκαν για το σενάριο 1 ως προς τον άξονα z (α) και ως προς τον άξονα x,y (β)



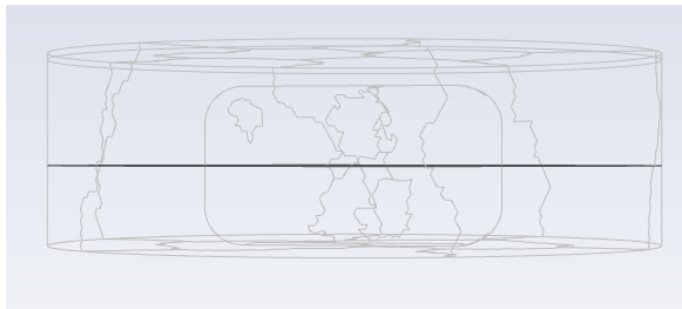
Εικόνες 25α-25β. Τομές που χρησιμοποιήθηκαν για το σενάριο 2 ως προς τον άξονα z (α) και ως προς τον άξονα x,y (β)



Εικόνες 26-27, Τομή ως προς τον άξονα z που χρησιμοποιήθηκαν για το σενάριο 3

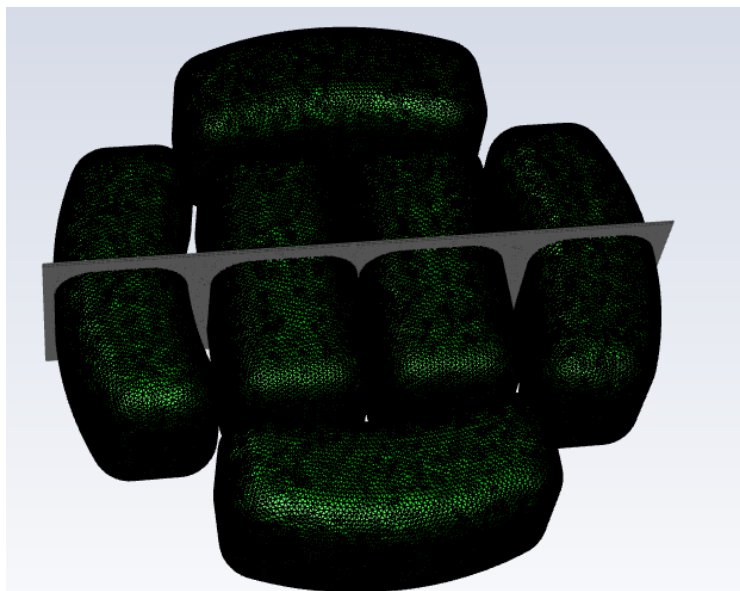


*Εικόνα 28α. Τομή ως προς τον άξονα x,y που χρησιμοποιήθηκε για το σενάριο 3*

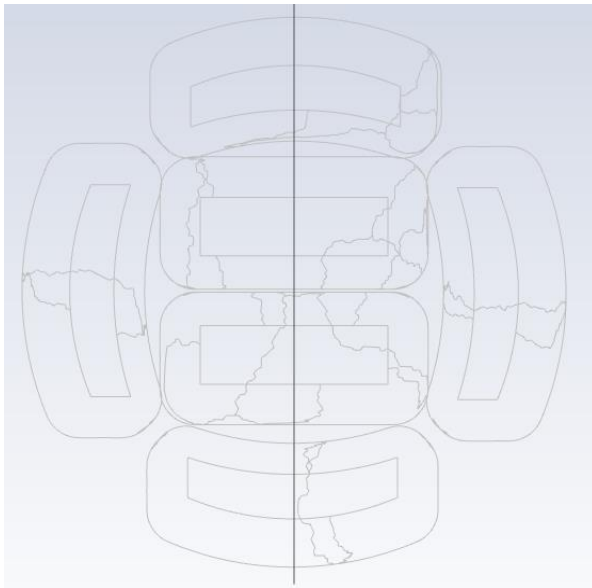


*Εικόνα 28β. Τομή ως προς τον άξονα z που χρησιμοποιήθηκε για το σενάριο*

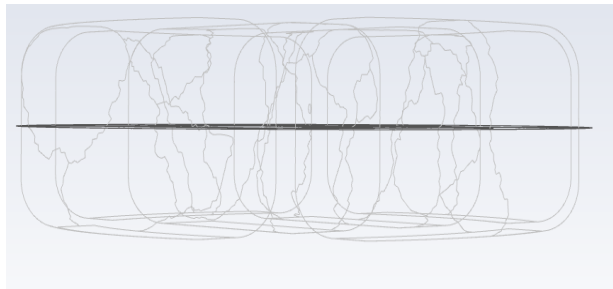
4



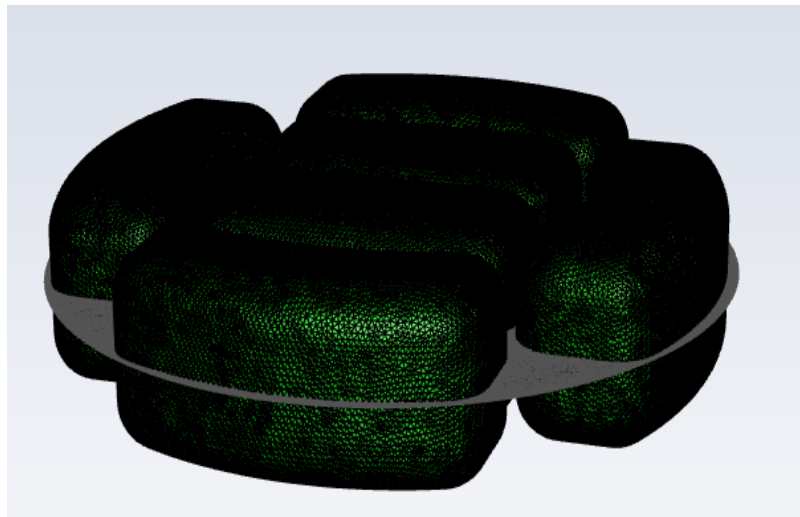
*Εικόνα 29. Τομή ως προς τον άξονα z που χρησιμοποιήθηκε για το τέταρτο σενάριο*



*Εικόνα 30. Τομή ως προς τον άξονα z που χρησιμοποιήθηκε για το σενάριο 4*



*Εικόνα 31. Τομή ως προς τον άξονα x,y που χρησιμοποιήθηκε για το σενάριο 4*



*Εικόνα 32. Τομή ως προς τον άξονα x,y που χρησιμοποιήθηκε για το σενάριο 4*

## 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ

### 4.1 Θερμοφυσικές ιδιότητες

Οι Θερμοφυσικές ιδιότητες για τα ντολμαδάκια προσδιορίστηκαν πειραματικά, όπως αναφέρθηκε στην ενότητα υλικά και μέθοδοι χρησιμοποιώντας ομογενοποιημένο δείγμα. Οι τιμές που βρέθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση είναι η πυκνότητα ( $\rho$ ) με τιμή  $1400 \text{ kg/m}^3$ , η θερμική αγωγιμότητα ( $k$ ) με τιμή  $0.52 \text{ W/mK}$  ενώ η ειδική θερμότητα ( $C_p$ ) βρέθηκε ίση με  $3300 \text{ J/kgK}$ . Με βάση τις παραπάνω τιμές των θερμοφυσικών ιδιοτήτων υπολογίστηκε ο συντελεστής θερμικής διαχυτότητας ( $\alpha$ ) στα ντολμαδάκια χρησιμοποιώντας την εξίσωση και βρέθηκε  $1.12 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ . Για το λάδι και το κιτρικό οξύ, που οι θερμοφυσικές ιδιότητες βρέθηκαν μέσω βιβλιογραφικής ανασκόπησης, ορίστηκαν χρησιμοποιώντας μια μέση τιμή ως:

Για το λάδι πυκνότητα ( $\rho$ ) ίση με  $914 \text{ kg/m}^3$ , η θερμική αγωγιμότητα ( $k$ ) με τιμή  $0.164 \text{ W/mK}$ , η ειδική θερμότητα ( $C_p$ ) ίση με  $2240 \text{ J/kgK}$ , το ιξώδες ίσο με  $0.0345 \text{ Pa s}$  ενώ το μοριακό βάρος  $878.5 \text{ g/mol}$ .

Για το κιτρικό οξύ πυκνότητα ( $\rho$ ) ίση με  $1005 \text{ kg/m}^3$ , η θερμική αγωγιμότητα ( $k$ ) με τιμή  $0.525 \text{ W/mK}$ , η ειδική θερμότητα ( $C_p$ ) ίση με  $3890 \text{ J/kgK}$ , το ιξώδες ίσο με  $0.0008 \text{ Pa s}$  ενώ το μοριακό βάρος  $754.5 \text{ g/mol}$ .

Πίνακας 5. Θερμοφυσικές ιδιότητες υλικών

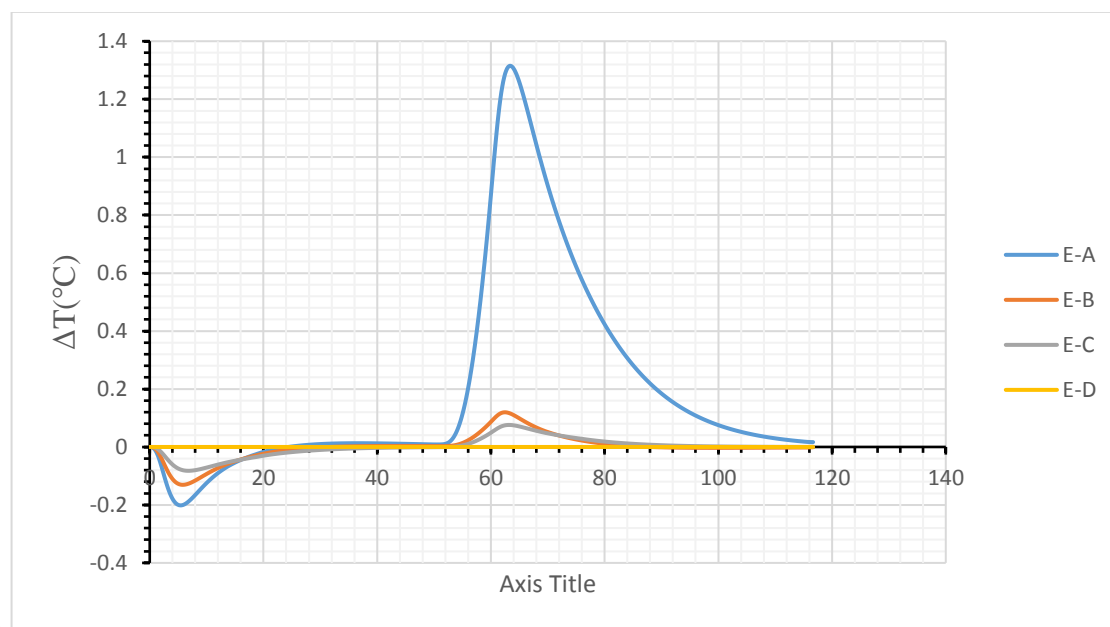
Υλικά	Θερμική αγωγιμότητα	Πυκνότητα	Ειδική θερμότητα	Ιξώδες	Μοριακο βάρος
	$k \text{ (W/mK)}$	$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$C_p \text{ (J/Kg K)}$	$\mu \text{ (Pa s)}$	$\text{g/mol}$
ντολμαδάκι	0.52	1400	3300		
λάδι	0.164	914	2240	0.0345	878.5
κιτρικό οξύ	0.525	1005	3890	0.008	754.5
νερό	0.6	998.2	4182	0.001	
υδρατμοί	0.0261	0.5542		1.34E-05	
αλουμίνιο	202.4	2719	871		

#### **4.2 Σύγκριση αριθμητικής λύσης μεταξύ των πλεγμάτων**

Για την επιλογή του κατάλληλου πλέγματος για κάθε σενάριο, όπως αναφέρθηκε παραπάνω πραγματοποιήθηκε επίλυση διαφορετικής πυκνότητας πλεγμάτων. Επιλέχθηκε το αραιότερο πλέγμα για κάθε σενάριο, όπου η θερμοκρασιακή διαφορά των αποτελεσμάτων σε συγκεκριμένο σημείο της γεωμετρίας, να είναι μηδαμινή σε σχέση με πυκνότερο πλέγμα. Στον Πίνακα 6 παρουσιάζονται τα διαφορετικά πλέγματα τα οποία συγκρίθηκαν για την επιλογή του κατάλληλου πλέγματος. Στον πίνακα παρουσιάζονται ο αριθμός των κελίων που περιείχε το κάθε πλέγμα, ο τύπος του κάθε πλέγματος καθώς και ο χρόνος επίλυσης τους. Όπως παρατηρείται και στον Πίνακα 6 η αύξηση της πυκνότητας του κάθε πλέγματος αυξάνει και τον χρόνο επίλυσής του. Για όλες τις περιπτώσεις πραγματοποιήθηκε σύγκριση της θερμοκρασιακής διαφοράς του πυκνότερου πλέγματος κάθε περίπτωσης με τα αραιότερα πλέγματα που επιλεχθήκαν να ερευνηθούν (Σχήματα 3,4,5 και 6). Από τα σχήματα προκύπτει ότι η αύξηση της πυκνότητας των πλεγμάτων μειώνει τη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των πλεγμάτων και μετά από ένα αριθμό κελίων, τα αποτελέσματα είναι ανεξάρτητα της πυκνότητας της γεωμετρίας. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων σε όλες τις περιπτώσεις, παρατηρείται ότι η μεγαλύτερη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των πλεγμάτων, παρατηρείται στην αρχή της θέρμανσης και ψύξης της διεργασίας, όπου υπάρχουν μεγάλες διακυμάνσεις στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

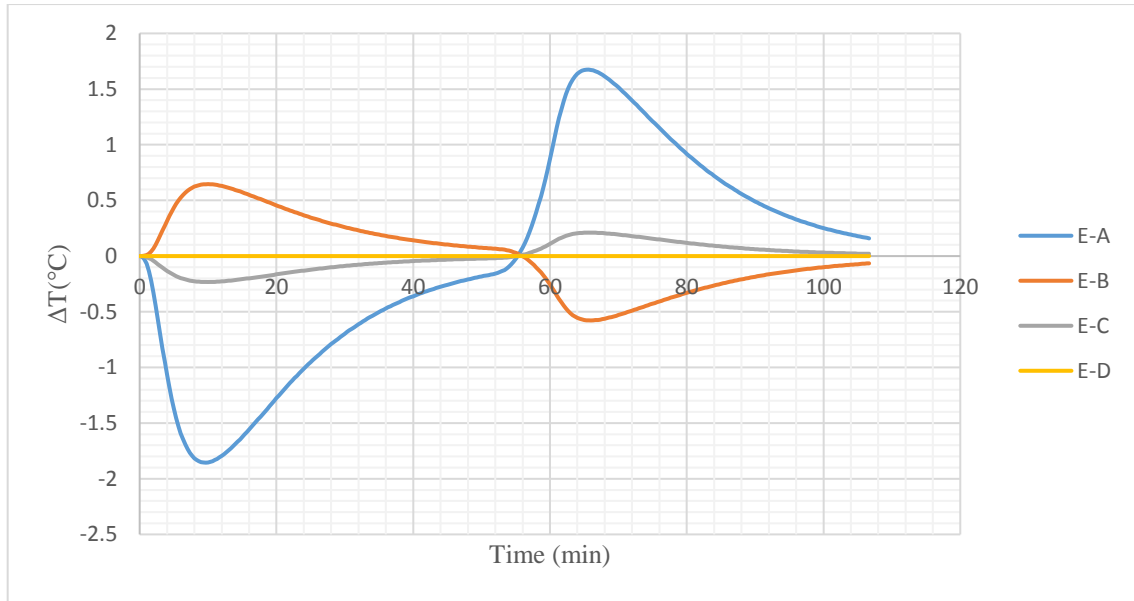
Πίνακας 6. Επίδραση του πλέγματος και του υπολογιστικού χρόνου CPU με διακριτοποίηση χρόνου 2nd order implicit, χρονικό βήμα 5s, 10 επαναλήψεις ανά χρονικό βήμα και απόλυτο κριτήριο σύγκλισης  $10^{-9}$

Σενάριο	1			Σενάριο	2		
Πλέγμα	Ποιότητα κελίων	Αριθμός κελίων	CPU (min)	Πλέγμα	Ποιότητα κελίων	Αριθμός κελίων	CPU (min)
A	Hex/wedge	55104	3.41	A	Hex/wedge	191724	6.03
B	Hex/wedge	114080	4.61	B	Hex/wedge	373344	10.86
C	Hex/wedge	190918	6.04	C	Hex/wedge	506310	14.01
D	Hex/wedge	376805	8.83	D	Hex/wedge	601692	17.66
E	Hex/wedge	422178	9.67	E	Hex/wedge	851092	25.7
Σενάριο	3			Σενάριο	4		
Πλέγμα	Ποιότητα κελίων	Αριθμός κελίων	CPU (min)	Πλέγμα	Ποιότητα κελίων	Αριθμός κελίων	CPU (min)
A	Hex/wedge	887992	104.36	A	Hex/wedge	1927559	208.05
B	Hex/wedge	1173201	155.21	B	Hex/wedge	2237270	264.45
C	Hex/wedge	1559791	217.34	C	Hex/wedge	2784032	302.87
D	Hex/wedge	2086703	271.19	D	Hex/wedge	3743946	355.73
E	Hex/wedge	2599521	318.22	E	Hex/wedge	4983137	418.91

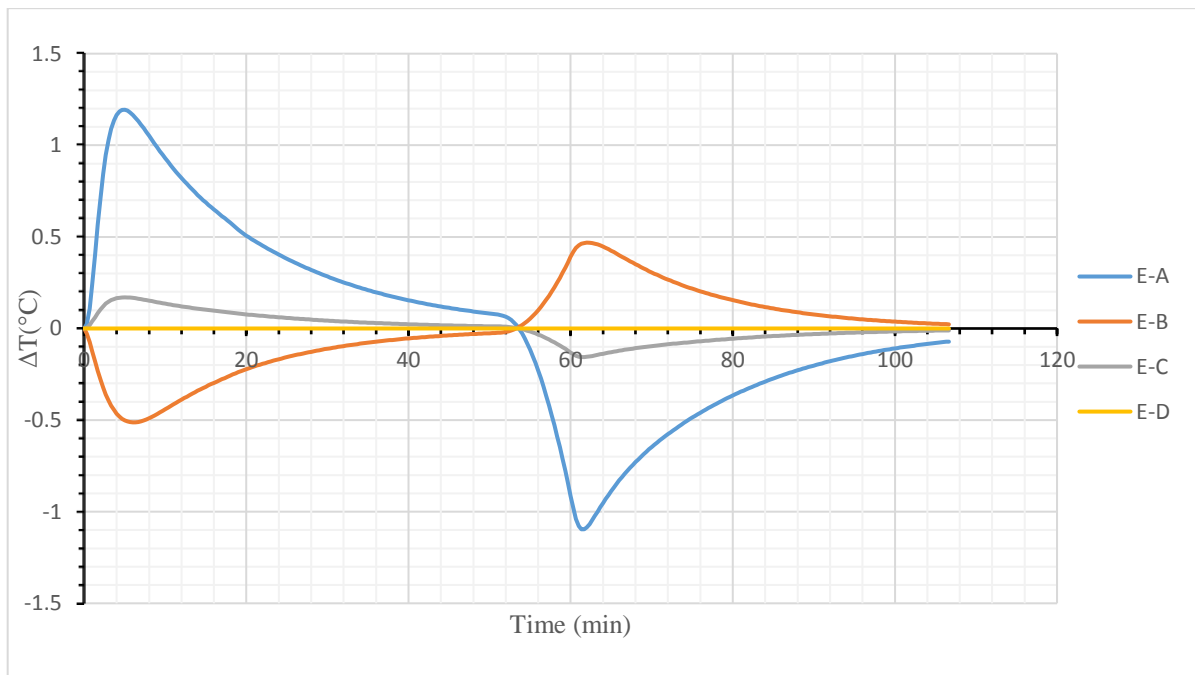


Σχήμα 3. Διαφορά θερμοκρασίας στο κρίσιμο σημείο μεταξύ του πυκνότερου πλέγματος (E) με άλλα πλέγματα για το σενάριο 1 με χρονικό βήμα 5s και κριτήριο σύγκλισης  $10^{-9}$ .

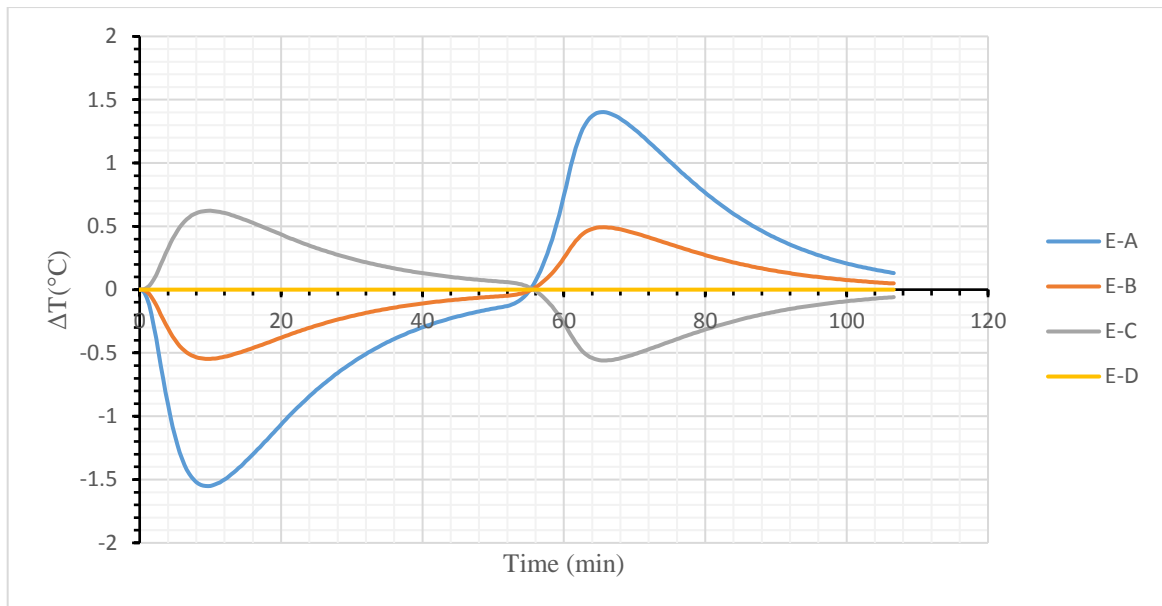




Σχήμα 4 Διαφορά θερμοκρασίας στο κρίσιμο σημείο μεταξύ του πυκνότερου πλέγματος (E) με τα άλλα πλέγματα για το σενάριο 2 με χρονικό βήμα 5s και κριτήριο σύγκλισης  $10^{-9}$ .



Σχήμα 5 Διαφορά θερμοκρασίας στο κρίσιμο σημείο μεταξύ του πυκνότερου πλέγματος (E) με τα άλλα πλέγματα για το σενάριο 3 με χρονικό βήμα 5s και κριτήριο σύγκλισης  $10^{-9}$ .



Σχήμα 6. Διαφορά θερμοκρασίας στο κρίσιμο σημείο μεταξύ του πυκνότερου πλέγματος (E) με τα άλλα πλέγματα για το σενάριο 4 με χρονικό βήμα 5s και κριτήριο σύγκλισης  $10^{-9}$ .

Όπως παρατηρείται στο σχήμα 3 για το σενάριο 1 πέραν του πλέγματος A όπου παρατηρείται μεγάλη διαφορά ως και  $1.29\text{ }^{\circ}\text{C}$  με το πλέγμα E, τα άλλα πλέγματα παρουσιάζουν διαφορά μικρότερη των  $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$  με το πυκνότερο πλέγμα. Για το πρώτο σενάριο επιλέχθηκε το πλέγμα D με αριθμό κελίων 376,805 και χρόνο επίλυσης 8.83 min. Για το σενάριο 2 (σχήμα 4) το πλέγμα A παρουσιάζει μεγάλη διαφορά με το πλέγμα E με μεγαλύτερη στα 10.33 min με διαφορά  $1.85\text{ }^{\circ}\text{C}$ , που μειώνεται αισθητά στη σύγκριση με το πλέγμα B, ενώ το πλέγμα C είναι πολύ κοντά στα αποτελέσματα των πλεγμάτων D,E με μεγαλύτερη διαφορά  $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Το πλέγμα D με αριθμό κελίων 601,692 και χρόνο επίλυσης 17.66 min παρουσιάζει ταύτιση με τα αποτελέσματα με το πλέγμα E και επιλέχθηκε για το δεύτερο σενάριο. Στο σενάριο 3 όπως φαίνεται στο σχήμα 5 παρατηρείται στο πλέγμα A διαφορά ως και  $1.18\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ενώ τα πλέγματα B και C παρουσιάζουν μεγαλύτερη θερμοκρασιακή διαφορά  $0.51\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $0.16\text{ }^{\circ}\text{C}$  αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα του πλέγματος D με αριθμό κελίων 2,086,703 και χρόνο επίλυσης 271.19 min ταυτίζονται απόλυτα με του πλέγματος E και για αυτό θεωρήθηκε κατάλληλο. Βάση του σχήματος 6 στο σενάριο 4 το πλέγμα A παρουσιάζει διαφορά ως και  $1.53\text{ }^{\circ}\text{C}$  στα 10.66 min. Το πλέγμα B παρουσιάζει μικρότερη θερμοκρασιακή διαφορά από το πλέγμα C, το αποτέλεσμα αυτό μπορεί να οφείλεται σε τοπικά κακής ποιότητας πλέγματα. Για το τέταρτο σενάριο επιλέχθηκε το πλέγμα D με αριθμό κελίων 3,743,946 και χρόνο επίλυσης 355.73 min.

### 4.3 Επίλυση της θερμικής επεξεργασίας

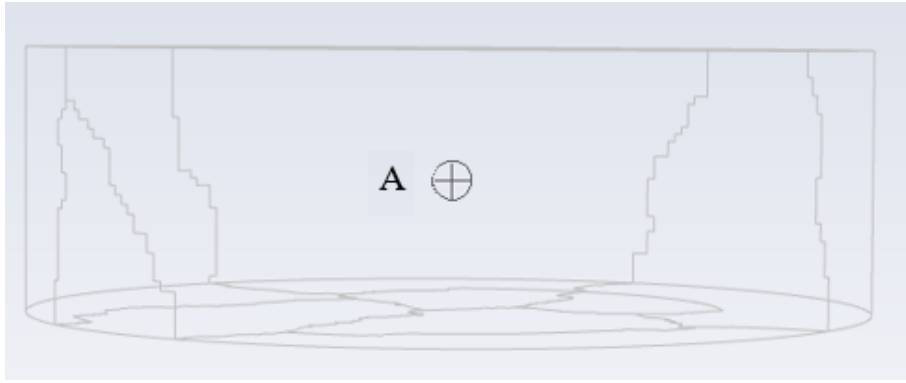
Μετά τη πραγματοποίηση όλων των απαραίτητων βημάτων για το στήσιμο της προσομοίωσης, όπως περιγράφονται αναλυτικά στο κεφάλαιο υλικά και μέθοδοι, ακολούθησε επίλυση της θερμικής επεξεργασίας μέσω CFD, για κάθε σενάριο. Για κάθε σενάριο υπολογίσθηκαν α) το θερμοκρασιακό προφίλ, β) η τιμή της F διεργασίας, γ) το ποσοστό (%) της διατήρησης ποιοτικού παράγοντα. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν συνάρτηση του χρόνου διεργασίας, στο κρίσιμο σημείο του προϊόντος, καθώς και σε όλη την έκταση της κονσέρβας, χρησιμοποιώντας δυο επίπεδες τομές της κονσέρβας. Η θερμοκρασιακή εξέλιξη του προϊόντος κατά την διεργασία εξετάστηκε σε διάφορα σημεία εκτός του κρίσιμου σημείου (Εικόνες 20 έως 23), όπως αναφέρεται στην ενότητα σημεία μέτρησης τιμών.

Για την συνολική έκταση της κονσέρβας για κάθε περίπτωση πραγματοποιήθηκαν οι υπολογισμοί στις δυο επίπεδες τομές

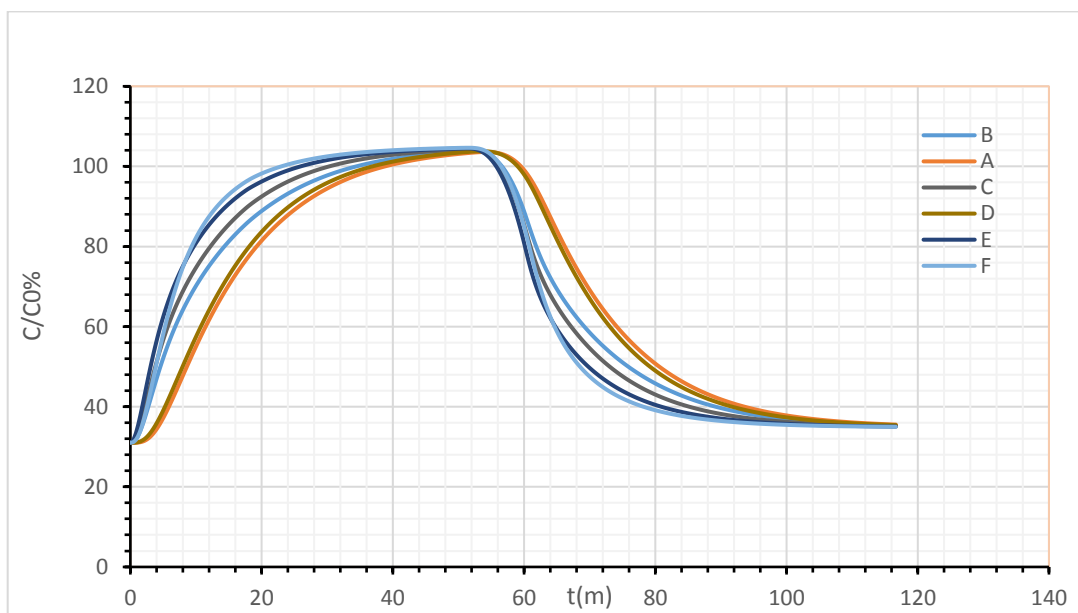
- a) Της εξέλιξης της κατανομής του θερμοκρασιακού προφίλ της διεργασίας με θερμοκρασιακό εύρος 30-110 °C.
- b) Της εξέλιξης της κατανομής της διεργασίας F για για  $F|_{105.11^{\circ}\text{C}}^{10^{\circ}\text{C}}$ .
- c) Της εξέλιξης της κατανομής της θειαμίνης ως ποσοστό διατήρησης (%) της κατά τη διεργασία για  $F|_{121.11^{\circ}\text{C}}^{10^{\circ}\text{C}}$

#### 4.3.1 Θερμοκρασιακό προφίλ

Στο πρώτο σενάριο όλη η κονσέρβα αποτελείται από το προϊόν ομογενοποιημένο σε στέρεα μορφή. Το κρίσιμο σημείο βρέθηκε στο γεωμετρικό κέντρο της κονσέρβας (Εικόνα 33), όπως παρατηρείται και από το Σχήμα 7, όπου το σημείο Α που θεωρήθηκε ως κρίσιμο δέχεται πιο αργά από τα υπόλοιπα σημεία που μελετήθηκαν, την επίδραση της θερμικής διεργασίας κατά τη θέρμανση και την ψύξη. Για το κρίσιμο σημείο πραγματοποιήθηκε μέτρηση της τιμής F της διεργασίας για  $F|_{121.11^{\circ}\text{C}}^{10^{\circ}\text{C}}$  και για  $F|_{105.11^{\circ}\text{C}}^{10^{\circ}\text{C}}$ , μέτρηση ποσοστού διατήρησης (%) της θειαμίνης κατά τη διεργασία για  $F|_{121.11^{\circ}\text{C}}^{10^{\circ}\text{C}}$



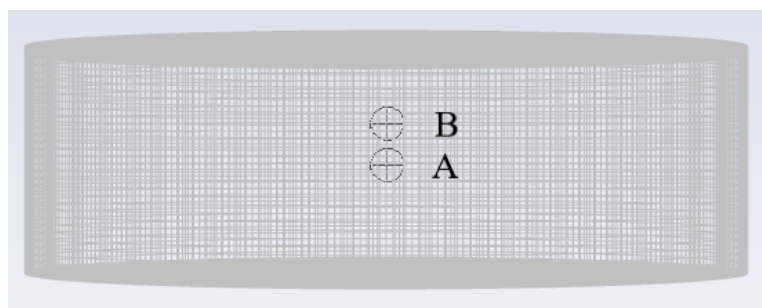
Εικόνα 33, Κρίσιμο σημείο για τον μεταλλικό περιέκτη στο πρώτο σενάριο.



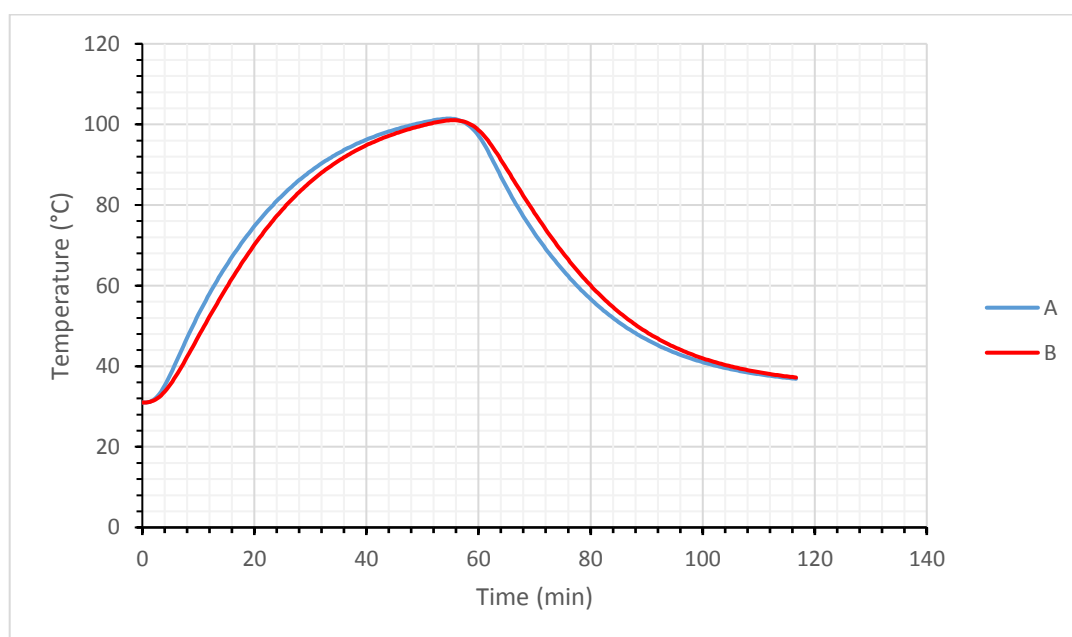
Σχήμα 7. Εξέλιξη της θερμοκρασίας σε διάφορα σημεία του προϊόντος όπως δίνονται στην Εικόνα 20 για το σενάριο 1

Για το δεύτερο σενάριο η κονσέρβα αποτελείται από το προϊόν ομογενοποιημένο σε στερεά μορφή, με ένα στρώμα αέρα ύψους 0.1 cm στο πάνω μέρος (Εικόνα 34). Το κρίσιμο σημείο στην κονσέρβα υπολογίστηκε στο σημείο B (0,0,2) cm αντί του κέντρου του προϊόντος σημείο A (Εικόνα 35) όπως παρατηρήθηκε στο πρώτο σενάριο. Η μετατόπιση προς το πάνω μέρος της κονσέρβας του κρίσιμου σημείου κατά 0.5 cm, εξηγείται από τη δράση του κενού (στρώματος αέρα) ως μονωτικού που μειώνει τη μεταφορά θερμότητας από το τοίχωμα της κονσέρβας στο ομογενοποιημένο στερεό προϊόν (Σχήμα 8). Όπως παρατηρείται στο σχήμα 8 στο σημείο B το προϊόν θερμαίνεται και ψύχεται με πιο αργό ρυθμό από το σημείο A. Το φαινόμενο αυτό εξηγείται γιατί αντίθετα με τα τοιχώματα του πρώτου σεναρίου αποτελούμενου συνολικά από ομογενοποιημένου στερεού προϊόντος

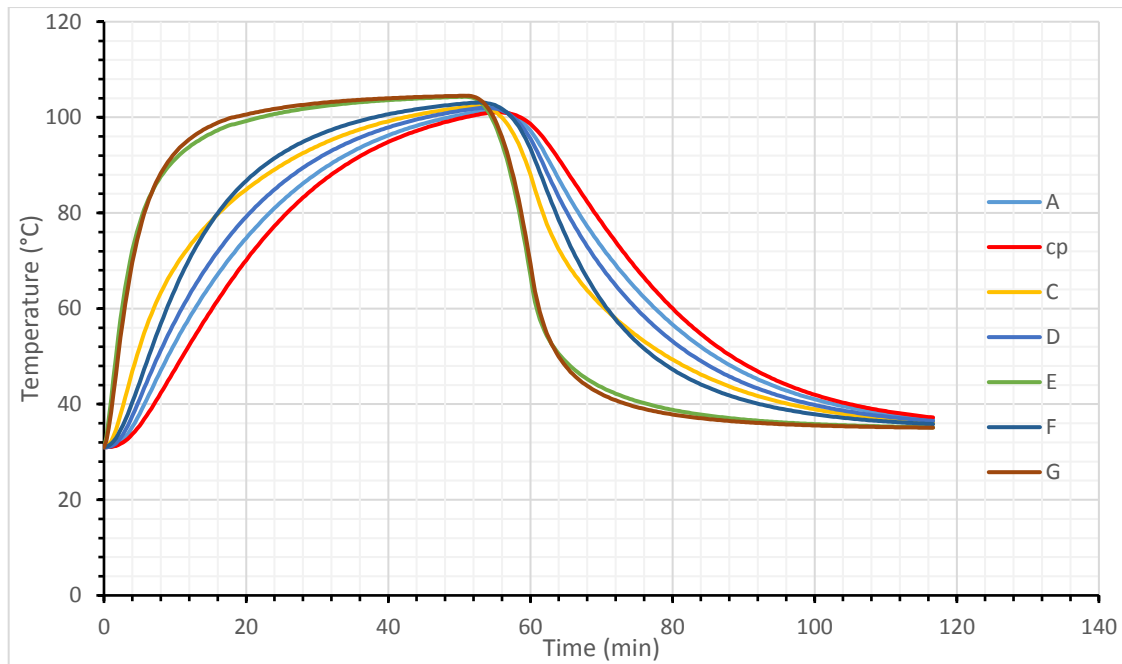
όπου η μεταφορά θερμότητας πραγματοποιείται μέσω αγωγής παρουσιάζοντας συμμετρικότητα και ομοιομορφία σε όλες τις πλευρές της κονσέρβας, στο δεύτερο σενάριο, υπάρχει το στρώμα υδρατμών (κενό) όπου η μεταφορά της θερμότητας στο προϊόν πραγματοποιείται μέσω συναγωγής.



Εικόνα 34, Κρίσιμο σημείο (B) και γεωμετρικό κέντρο (A) για τον μεταλλικό περιέκτη κατά το δεύτερο σενάριο

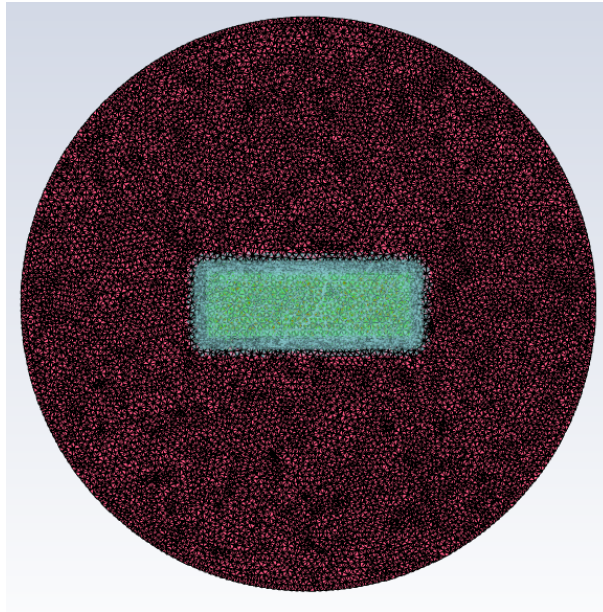


Σχήμα 8. Εξέλιξη της θερμοκρασίας στο κρίσιμο σημείο (B) και γεωμετρικό κέντρο (A) κατά το δεύτερο σενάριο

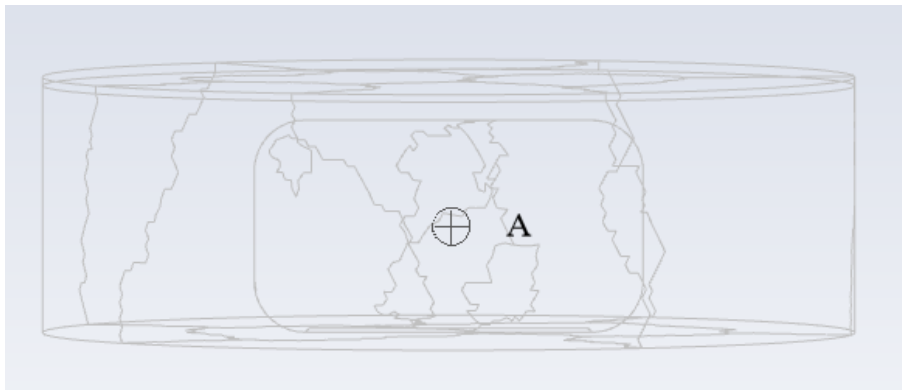


Σχήμα 9. Εξέλιξη της θερμοκρασίας κατά τη θερμική διεργασία σε διάφορα σημεία του προϊόντος όπως δίνονται στην Εικόνα 21 για το σενάριο 2

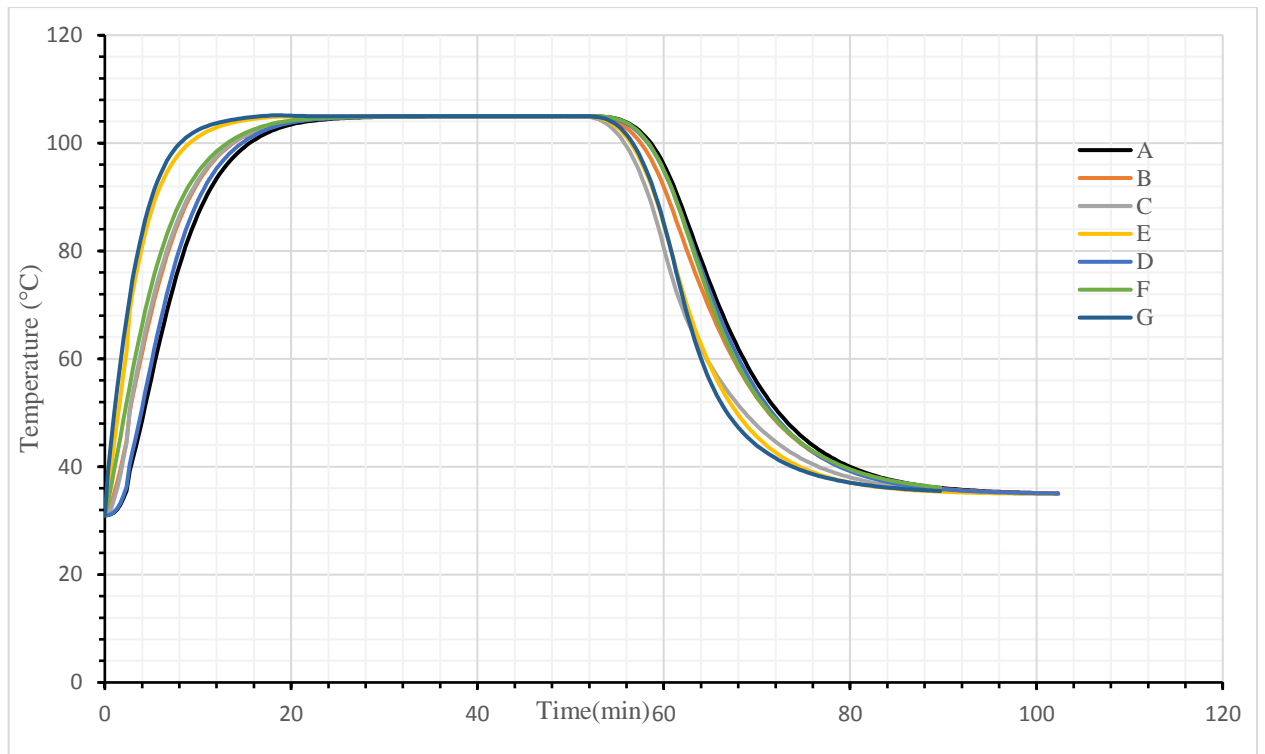
Στο τρίτο σενάριο η κονσέρβα αποτελείται από ένα ντολμαδάκι ομογενοποιημένο σε στερεή μορφή στο κέντρο, ενώ το υπόλοιπο μέρος της κονσέρβας αποτελείται το χυμό και ένα στρώμα αέρα ύψους 0.1cm στο πάνω μέρος (κενό). Στην περίπτωση αυτή το ντολμαδάκι περικλείεται από το χυμό με αποτέλεσμα να θερμαίνεται μέσω συναγωγής από όλες τις πλευρές, πέραν του κάτω μέρους (Εικόνα 35) του που εφάπτεται με το μεταλλικό περιεκτικό και θερμαίνεται μέσω αγωγής. Ως κρίσιμο σημείο υπολογίστηκε το σημείο A, που αποτελεί το γεωμετρικό κέντρο του ντολμαδακίου (Εικόνα 36), όπως παρατηρείται και από το Σχήμα 10, όπου συγκρίνεται η θερμοκρασιακή εξέλιξη κατά τη διεργασία διαφόρων σημείων της κονσέρβας, για τους λόγους που αναφέρθηκαν στα προηγούμενα σενάρια. Ενώ ως αρχική θερμοκρασία κατά την διεργασία χρησιμοποιήθηκαν οι 32 °C, ο χυμός ορίστηκε με αρχική θερμοκρασία ( $T_{IT}$ ) 72 °C. Το θερμοκρασιακό προφίλ του χυμού μετρήθηκε στο σημείο liq (Εικόνα 37) και παρουσιάζεται στο σχήμα 11, όπου παρατηρείται ότι από τα 0.66 min έως τα 60 min της διεργασίας η θερμοκρασία του χυμού είναι πολύ κοντά στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.



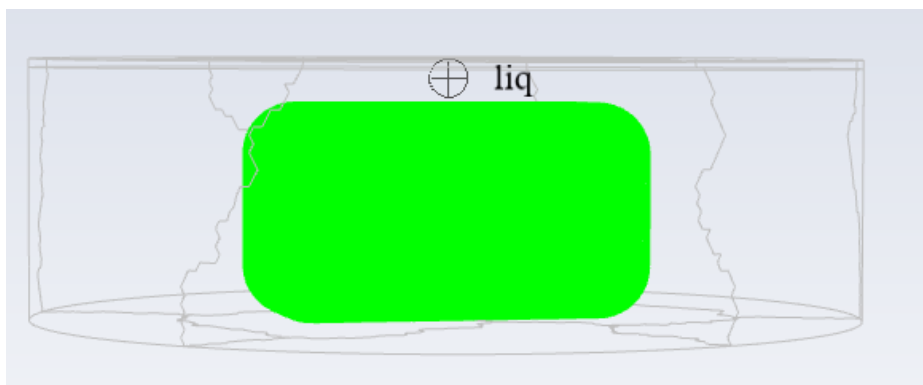
*Εικόνα 35. Το κάτω μέρος του εσωτερικού της κονσέρβας για το τρίτο σενάριο, με κόκκινο χρώμα ορίζεται ο χυμός ενώ με πράσινο το ντολμαδάκι*



*Εικόνα 36. Κρίσιμο σημείο για το σενάριο 3*

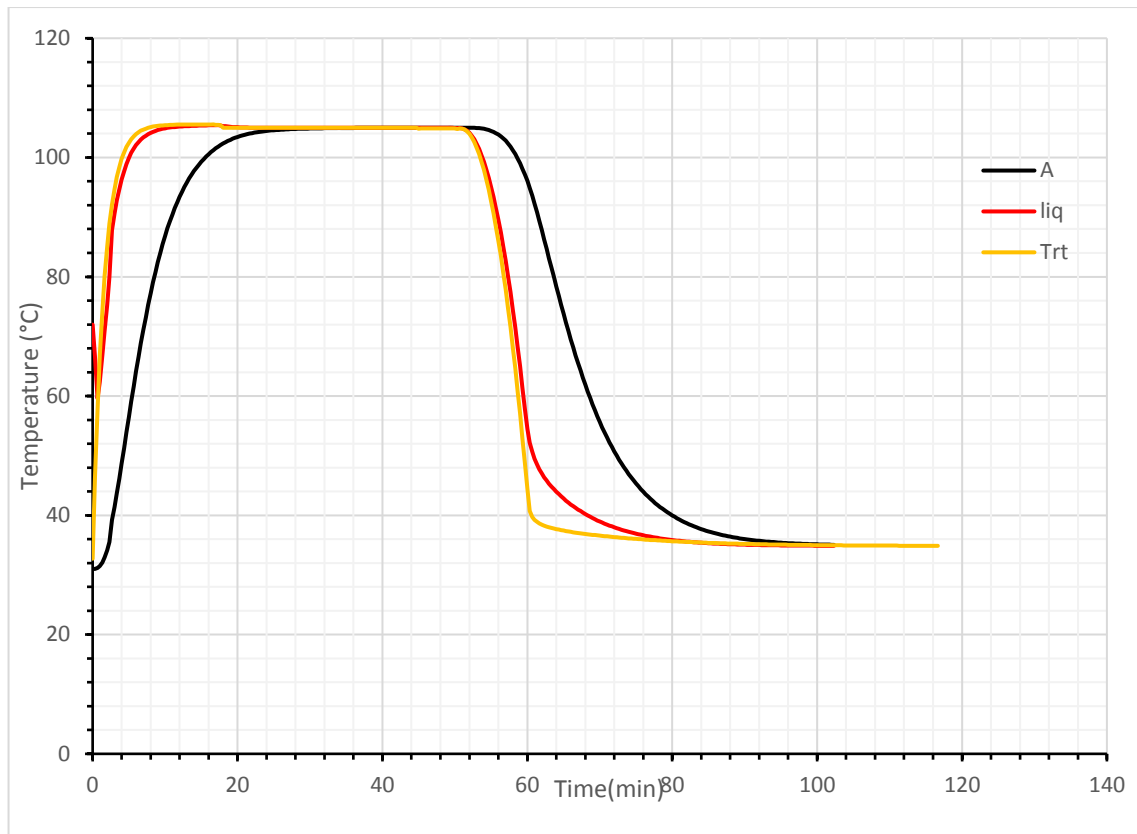


Σχήμα 10. Εξέλιξη της θερμοκρασίας κατά τη θερμική διεργασία σε διάφορα σημεία του προϊόντος όπως δίνονται στην Εικόνα 22 για το σενάριο 3



Εικόνα 37. Σημείο μέτρησης θερμοκρασιακής εξέλιξης κατά τη διεργασία του χυμού της κονσέρβας για το σενάριο 3

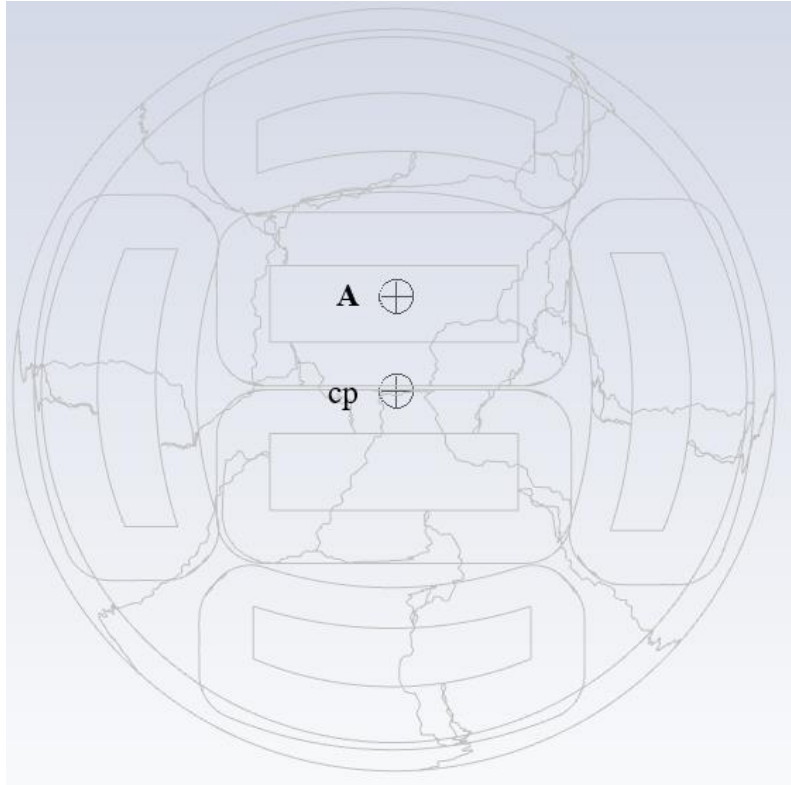




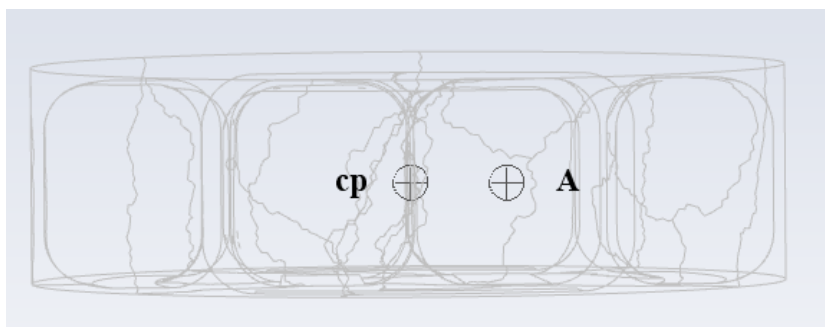
Σχήμα 11. Τα θερμοκρασιακά προφίλ της διεργασίας του χυμού της κονσέρβας (liq), της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (TRT) και του κρίσιμου σημείου (A) για το τρίτο σενάριο.

Στο τέταρτο σενάριο πραγματοποιήθηκε η εξομοίωση της κονσέρβας με ντολμαδάκια γιαλατζί όπως απαντάται στην πραγματικότητα. Το περιεχόμενο της κονσέρβας αποτελείται από έξι ντολμαδάκια τα οποία βρίσκονται εμβαπτισμένα στον χυμό της κονσέρβας που καλύπτει τον υπόλοιπο όγκο της κονσέρβας, εκτός από ένα στρώμα αέρα ύψους 0.1cm στο πάνω μέρος που αναφέρεται ως κενό. Τα πειραματικά δεδομένα όπως προαναφέρθηκε αναλυτικά σε προηγούμενο κεφάλαιο, συλλεχθήκαν από το σημείο A. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 12, το κρίσιμο σημείο δεν βρέθηκε στο εσωτερικό ενός από τα κεντρικά ντολμαδάκια, αλλά στο μέσο των πλευρών που τα δυο κεντρικά ντολμαδάκια εφάπτονται. Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγει και το Σχήμα 13 όπου συγκρίνεται η θερμοκρασιακή εξέλιξη κατά τη διεργασία διαφόρων σημείων της κονσέρβας. Λόγω έλλειψης παραπάνω πειραματικών δεδομένων, δεν μπορεί να εκτιμηθεί η ορθότητα του αποτελέσματος. Αν θεωρηθεί ως λανθασμένο, το αποτέλεσμα μπορεί να οφείλεται στο ότι τα ντολμαδάκια ορίστηκαν ως ένα ενιαίο υλικό (ομογενοποιημένα) στο πρόγραμμα, με αποτέλεσμα να υπολογίστηκαν ως ένα ενιαίο σώμα κατά την επίλυση. Όπως και στο τρίτο σενάριο τα ντολμαδάκια θερμαίνονται μέσω αγωγής στις επιφάνειες που εφάπτονται με τα

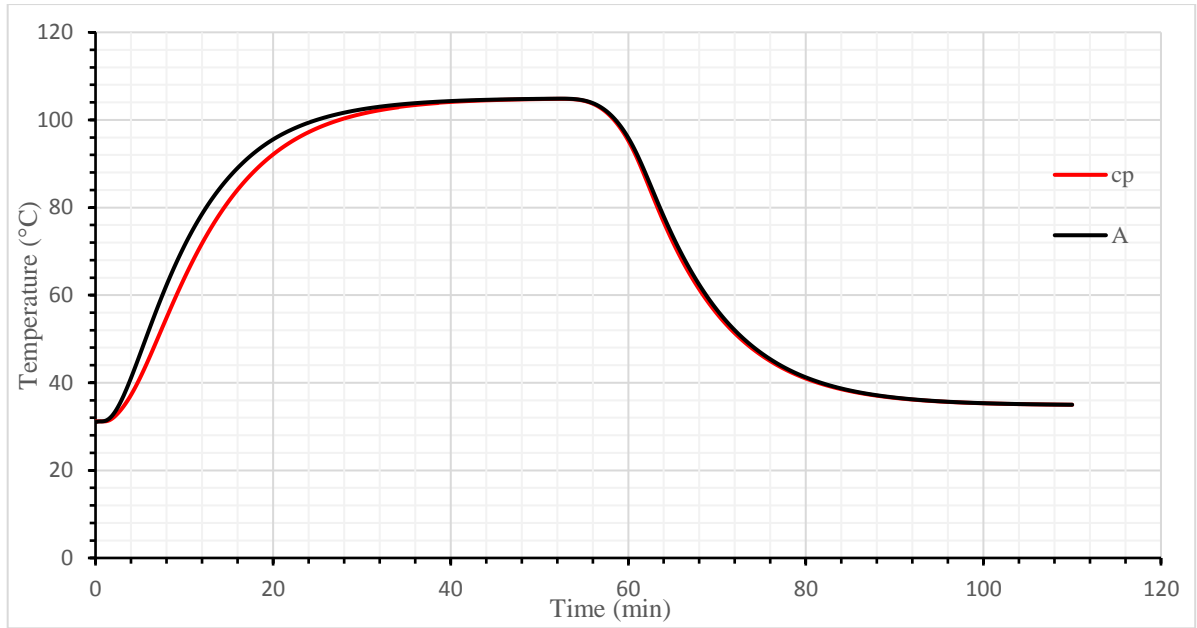
τοιχώματα η μεταξύ τους καθώς και στο εσωτερικό τους, αλλά και μέσω συναγωγής στις υπόλοιπες επιφάνειές τους από το χυμό του προϊόντος. Στο Σχήμα 14 δίνεται η εξέλιξη της θερμοκρασίας του χυμού της κονσέρβας με αρχική θερμοκρασία ( $T_{Π}$ ) 72 °C, και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος ( $T_{RT}$ ) κατά τη διεργασία



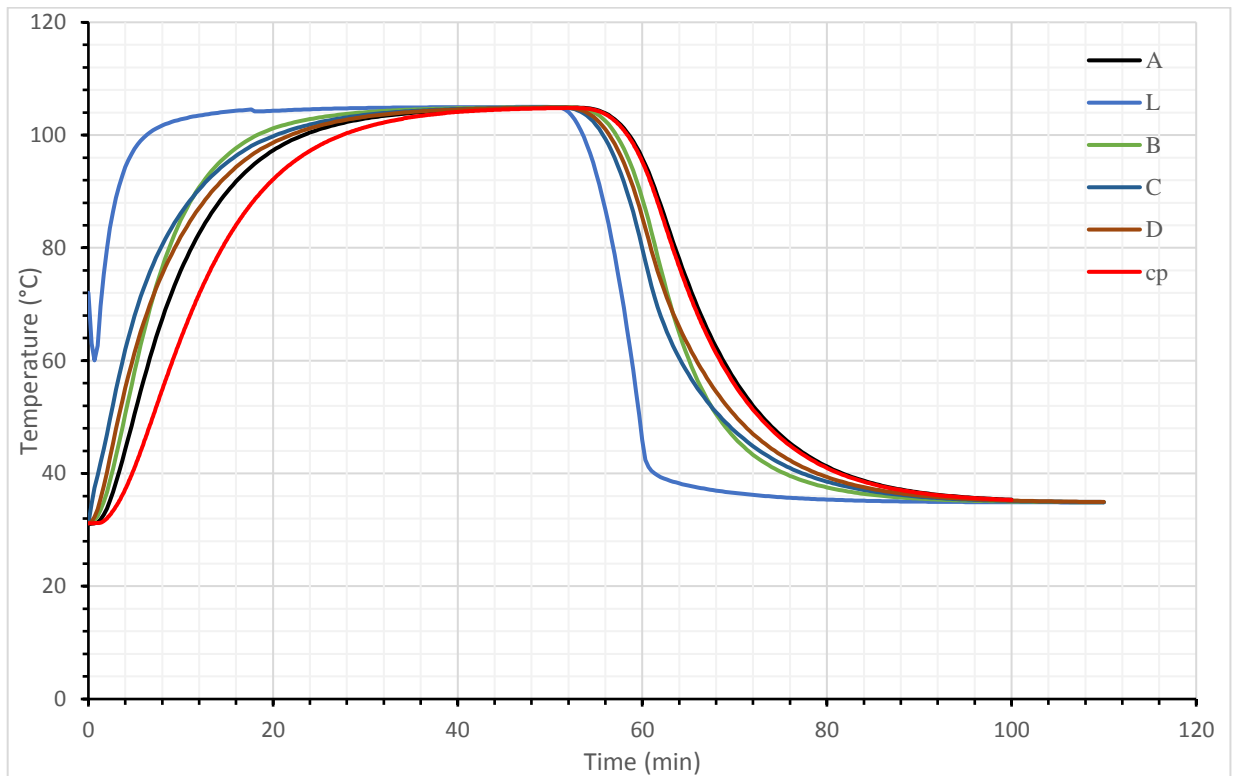
Εικόνα 38. . Κρίσιμο σημείο και σημείο συλλογής πειραματικών δεδομένων για το τέταρτο σενάριο από οριζόντια τομή



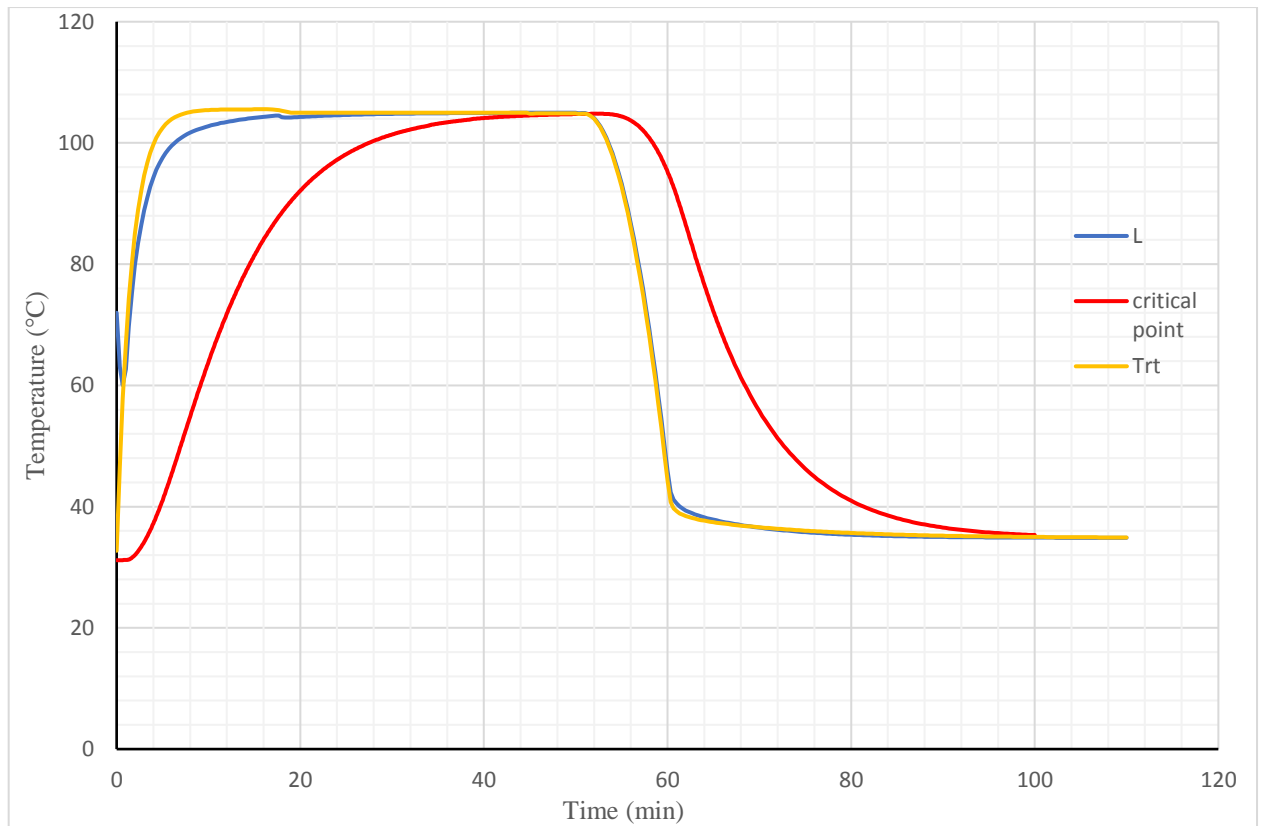
Εικόνα 39. Κρίσιμο σημείο και σημείο συλλογής πειραματικών δεδομένων για το τέταρτο σενάριο από κάθετη τομή



Σχήμα 12. Το χρονοθερμοκρασιακό προφίλ για το κρίσιμο σημείο και το σημείο συλλογής πειραματικών δεδομένων για το τέταρτο σενάριο όπως παρουσιάζονται στην Εικόνα 38.



Σχήμα 13. Το χρονοθερμοκρασιακό προφίλ σε διάφορα σημεία του προϊόντος όπως δίνονται στην Εικόνα 23 για το σενάριο 4.

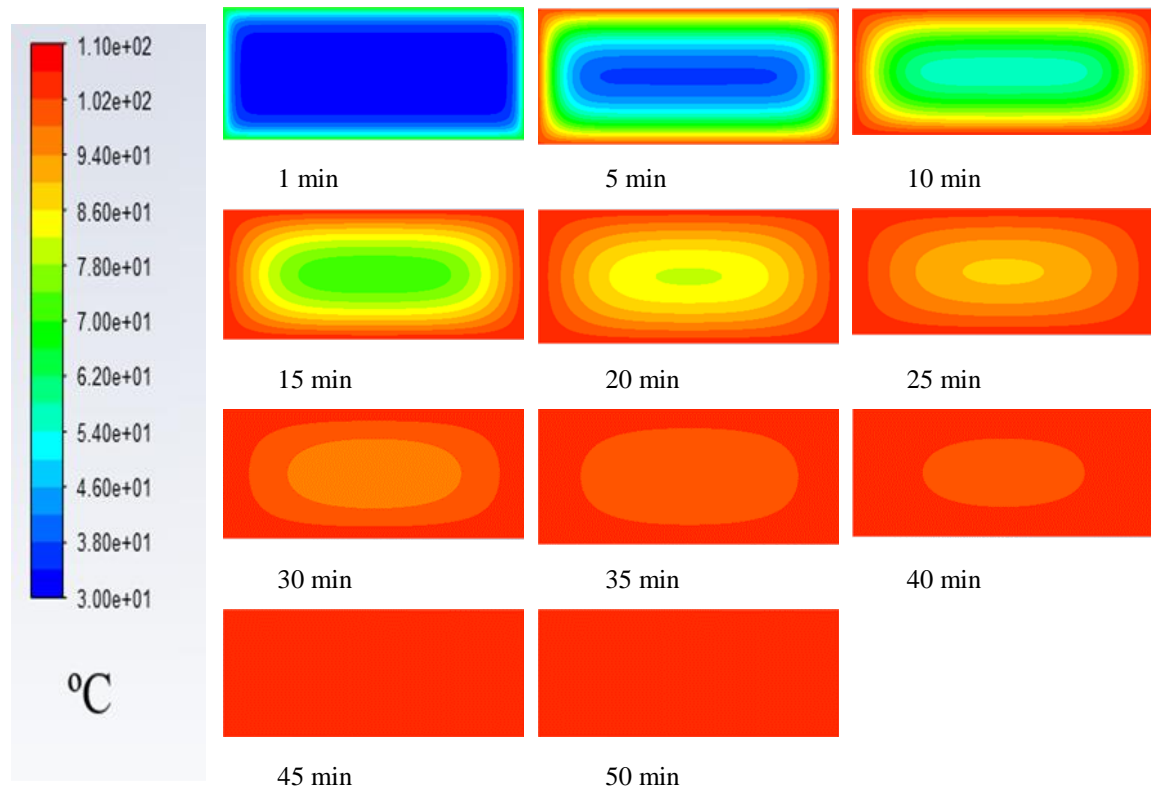


Σχήμα 14. Τα θερμοκρασιακά προφίλ της διεργασίας του χυμού της κονσέρβας, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και του κρίσιμου σημείου για το τέταρτο σενάριο.

Για την απόδοση της εξέλιξης της θερμοκρασίας κατά τη διεργασία σε όλη την έκταση της κονσέρβας χρησιμοποιήθηκαν δυο επίπεδες τομές όπως αναφέρθηκε αναλυτικά στην ενότητα (Εικόνες 24 έως 29). Στα Σχήματα 15 έως 30 παρουσιάζονται οι κατανομές του θερμοκρασιακού προφίλ που καταγράφηκαν για κάθε σενάριο. Η καταγραφή πραγματοποιήθηκε ανά 5 min και θερμοκρασιακό εύρος 30-110 °C (κλίμακα) τόσο στον κύκλο της θέρμανσης όσο και στον κύκλο της ψύξης. Για την τέταρτη περίπτωση επιλέχθηκε η καταγραφή ανά λεπτό για τα πρώτα 5 λεπτά της διεργασίας (Σχήματα 27,29).

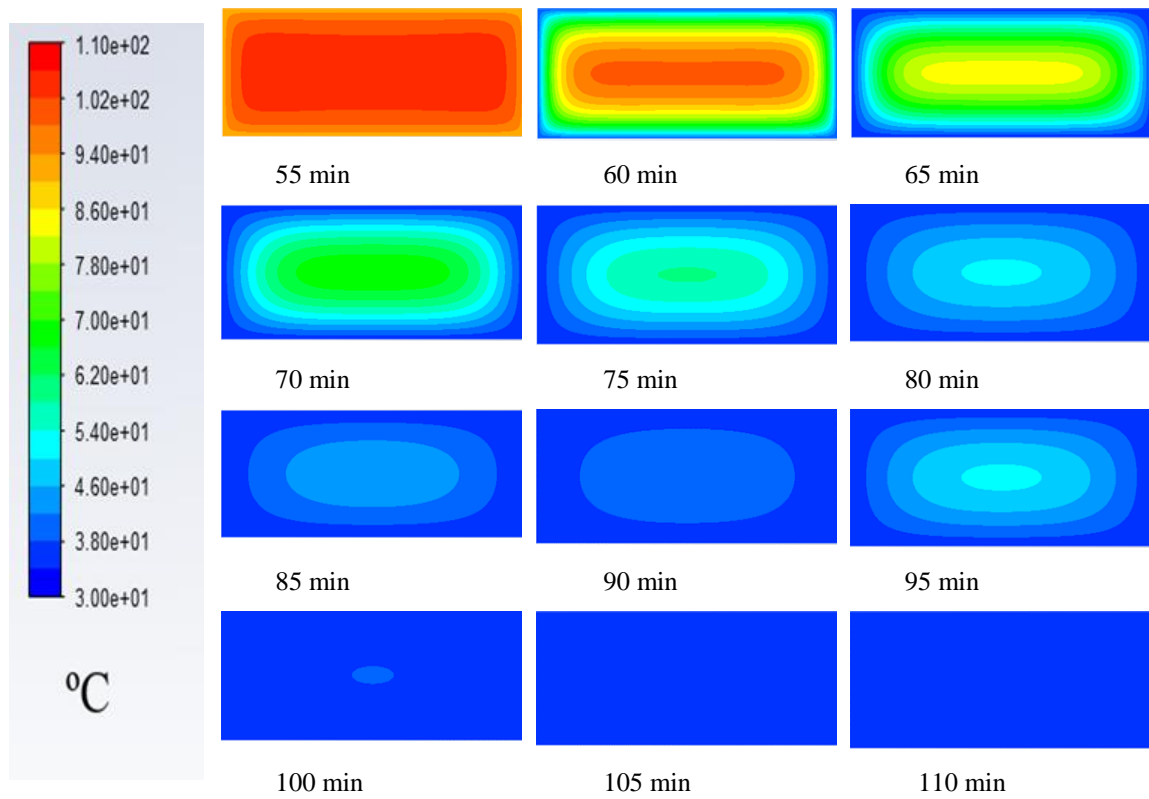
**Κλίμακα**

**ΘΕΡΜΑΝΣΗ**



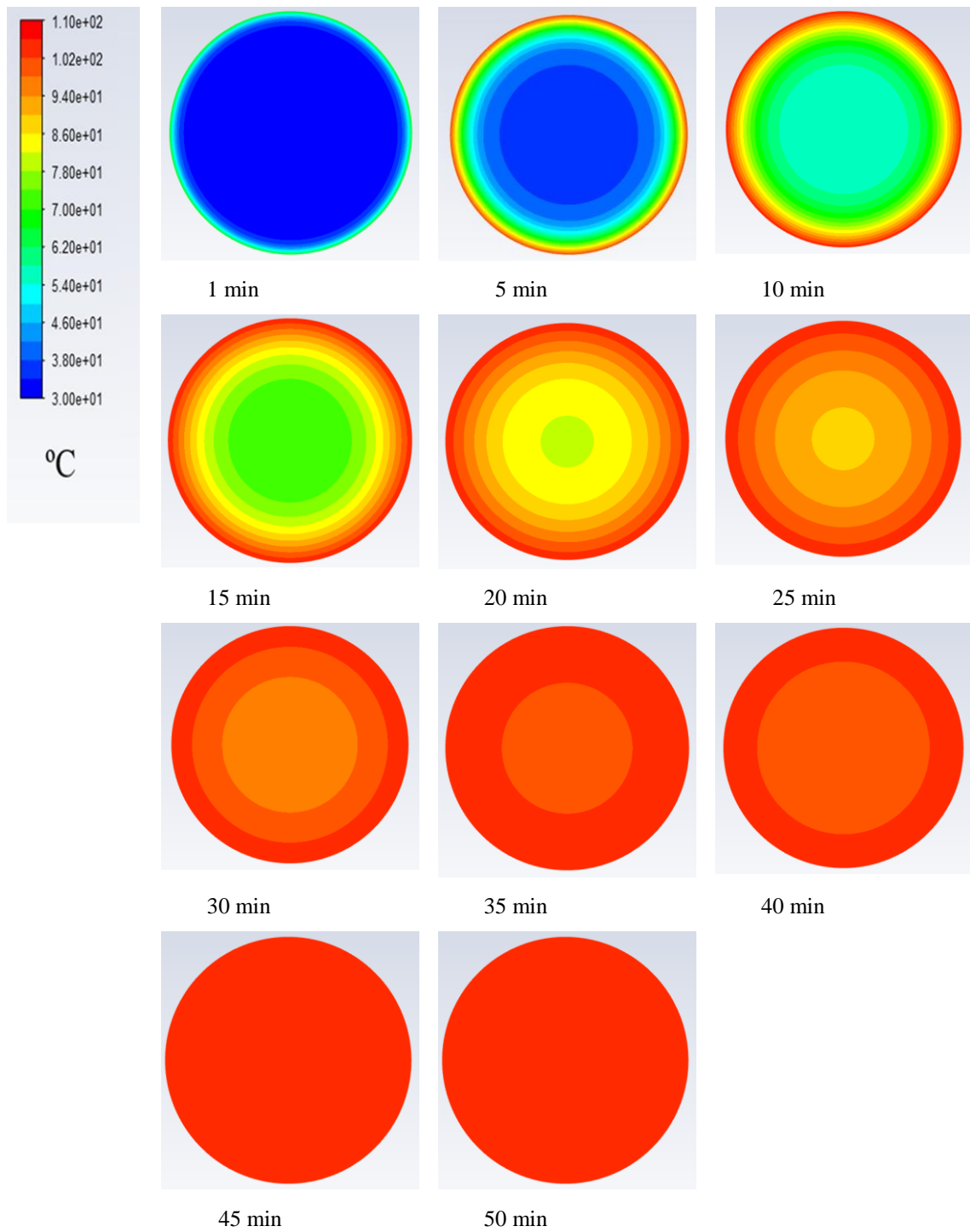
*Σχήμα 15. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας κατά τη θέρμανση για Σενάριο 1 με κάθετη τομή*

## Κλίμακα ΨΥΞΗ



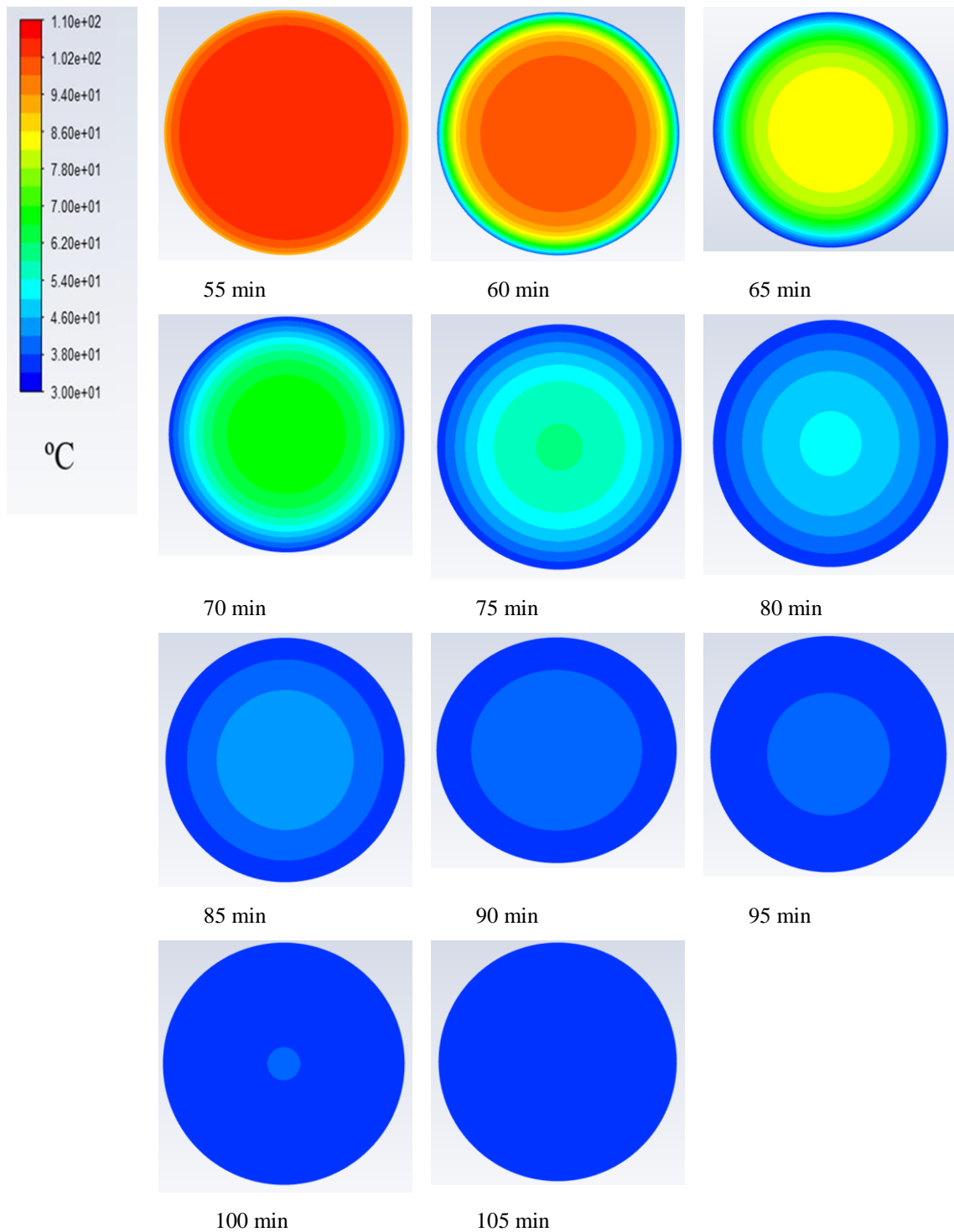
Σχήμα 16. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας κατά τη ψύξη για Σενάριο 1 με κάθετη τομή

**Κλίμακα ΘΕΡΜΑΝΣΗ**



Σχήμα 17. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας κατά τη θέρμανση για Σενάριο 1 με οριζόντια τομή

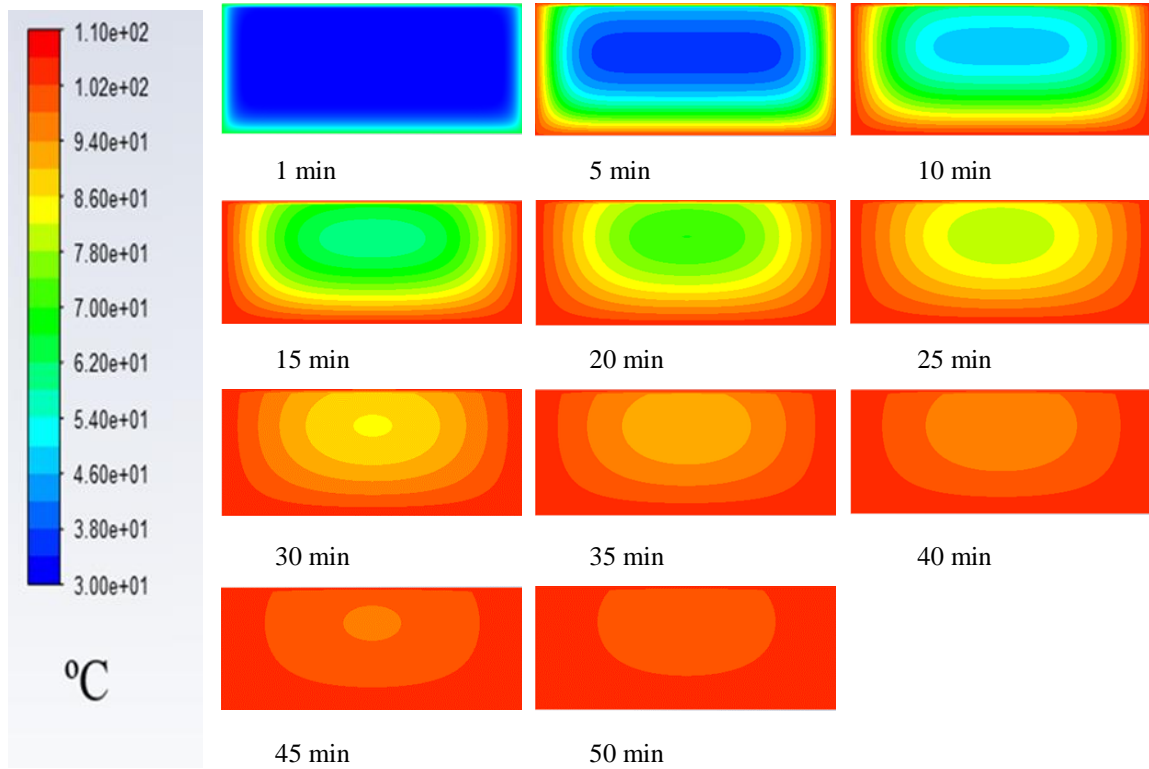
**Κλίμακα ΨΥΞΗ**



Σχήμα 18. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας κατά τη ψύξη για Σενάριο 1 με οριζόντια τομή

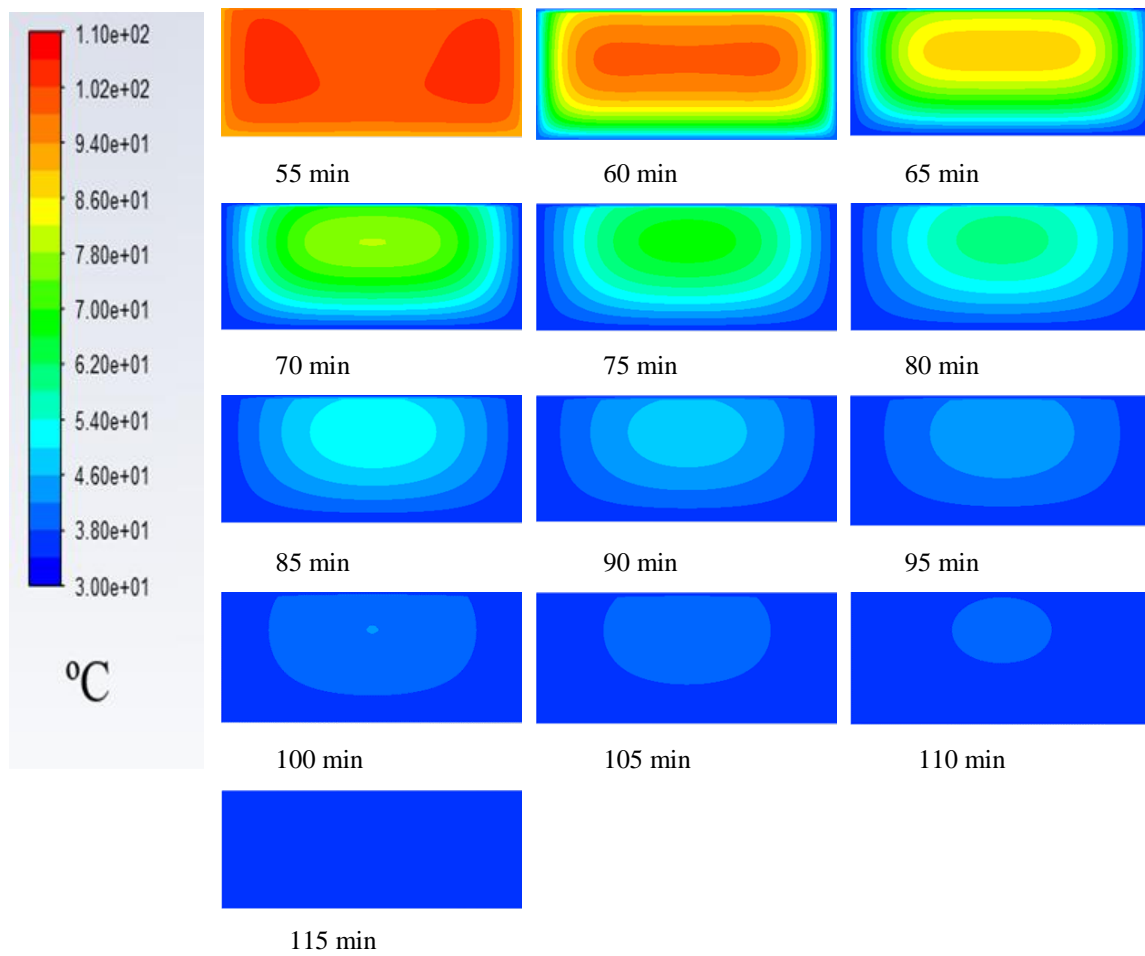


**Κλίμακα. ΘΕΡΜΑΝΣΗ**



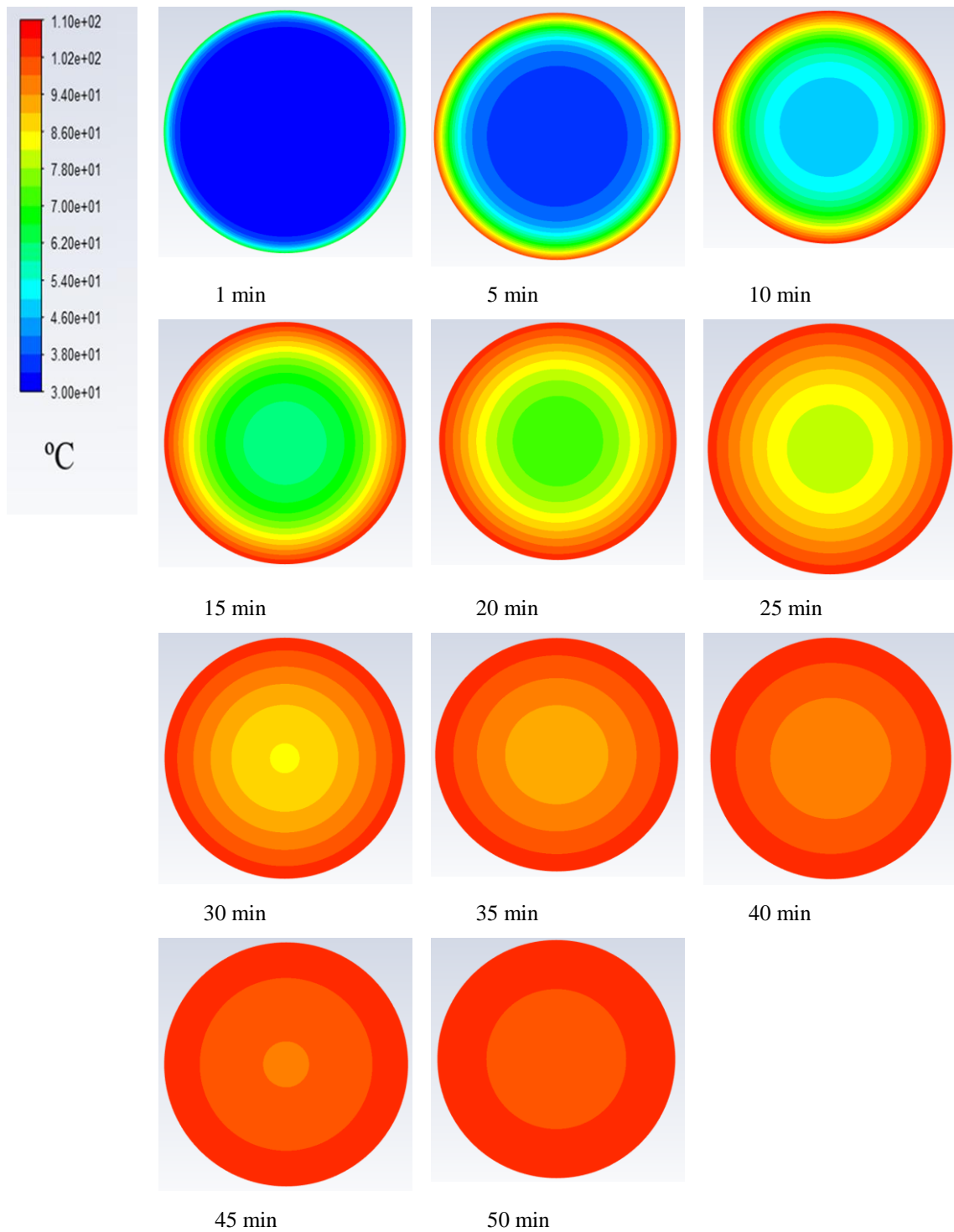
*Σχήμα 19. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας κατά τη θέρμανση για Σενάριο 2 με κάθετη τομή*

**Κλίμακα ΨΥΞΗ**



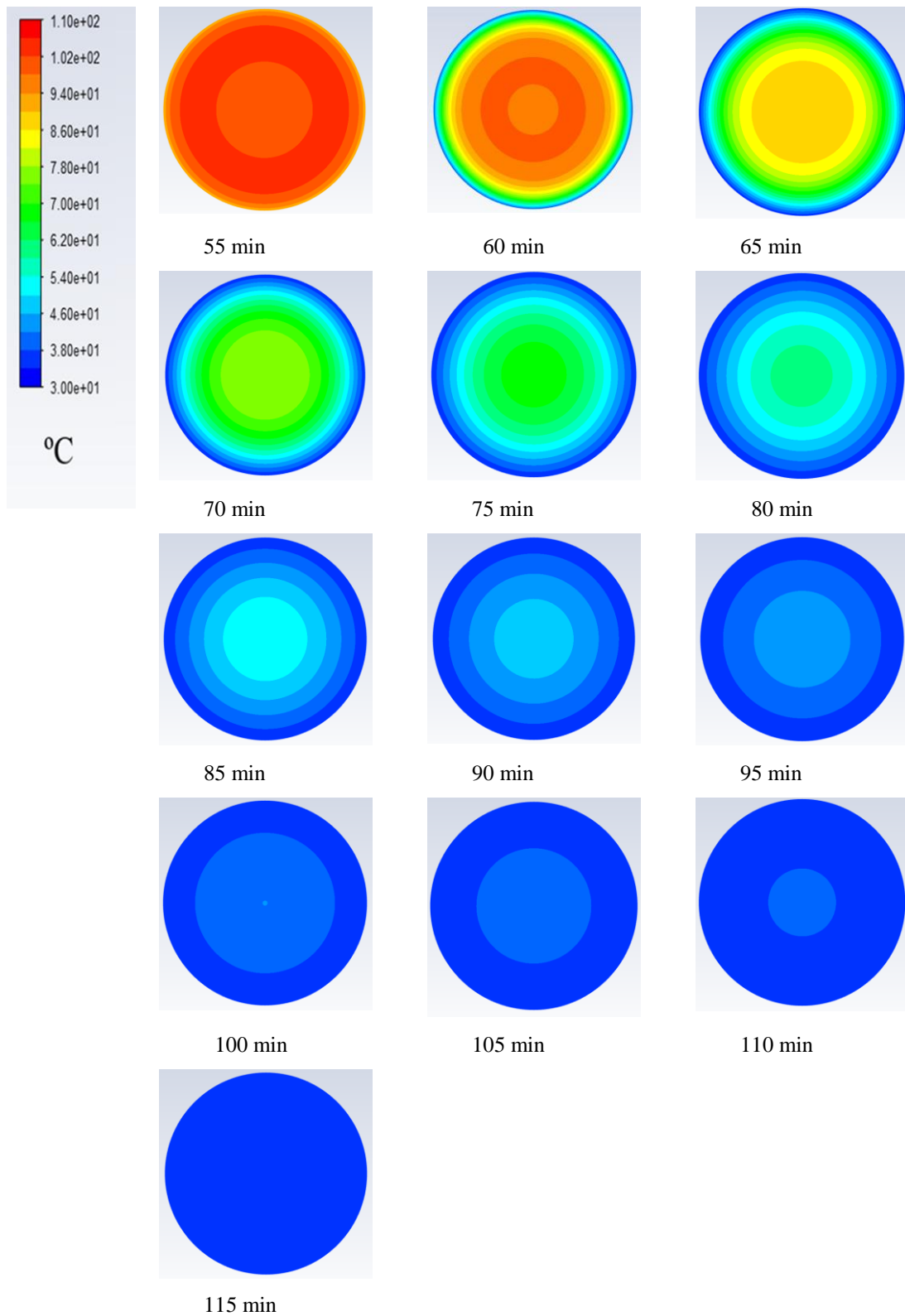
Σχήμα 20. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας κατά τη ψύξη για Σενάριο 2 με κάθετη τομή

**Κλίμακα ΘΕΡΜΑΝΣΗ**



Σχήμα 21. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας κατά τη θέρμανση για Σενάριο 2 με οριζόντια τομή

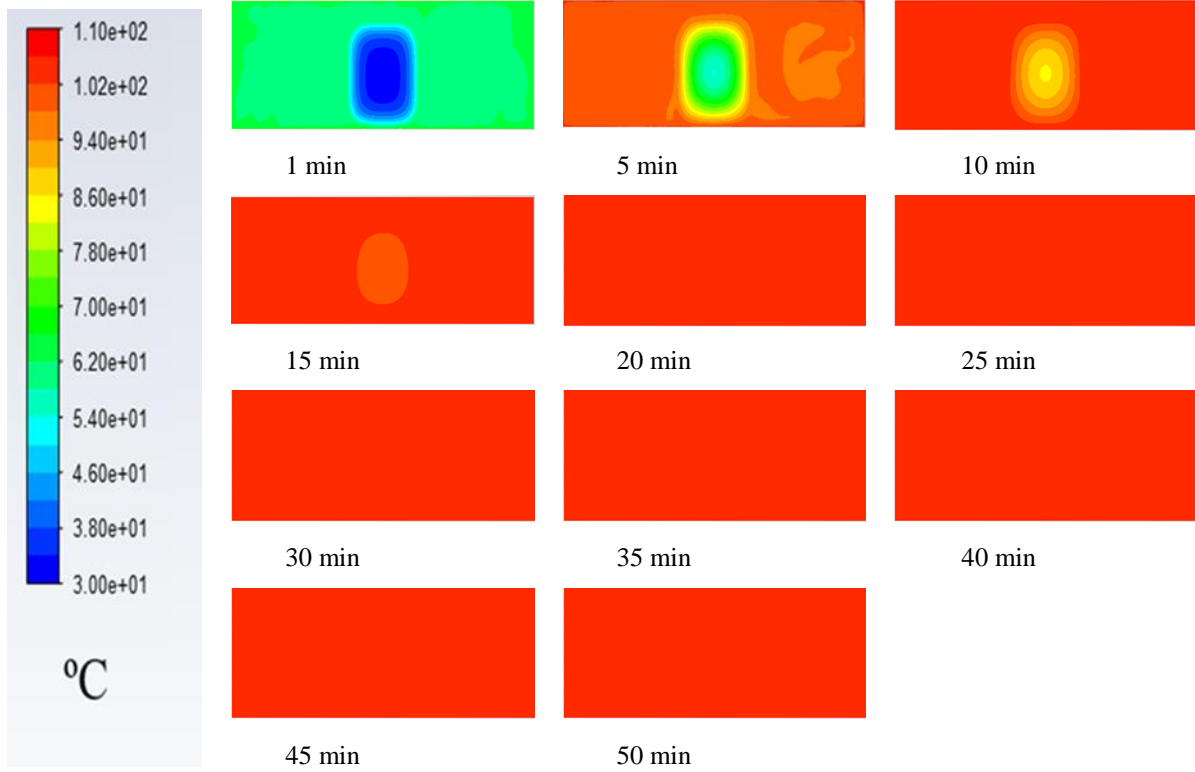
**Κλίμακα ΨΥΞΗ**



Σχήμα 22. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας κατά τη ψύξη για Σενάριο 2 με οριζόντια τομή

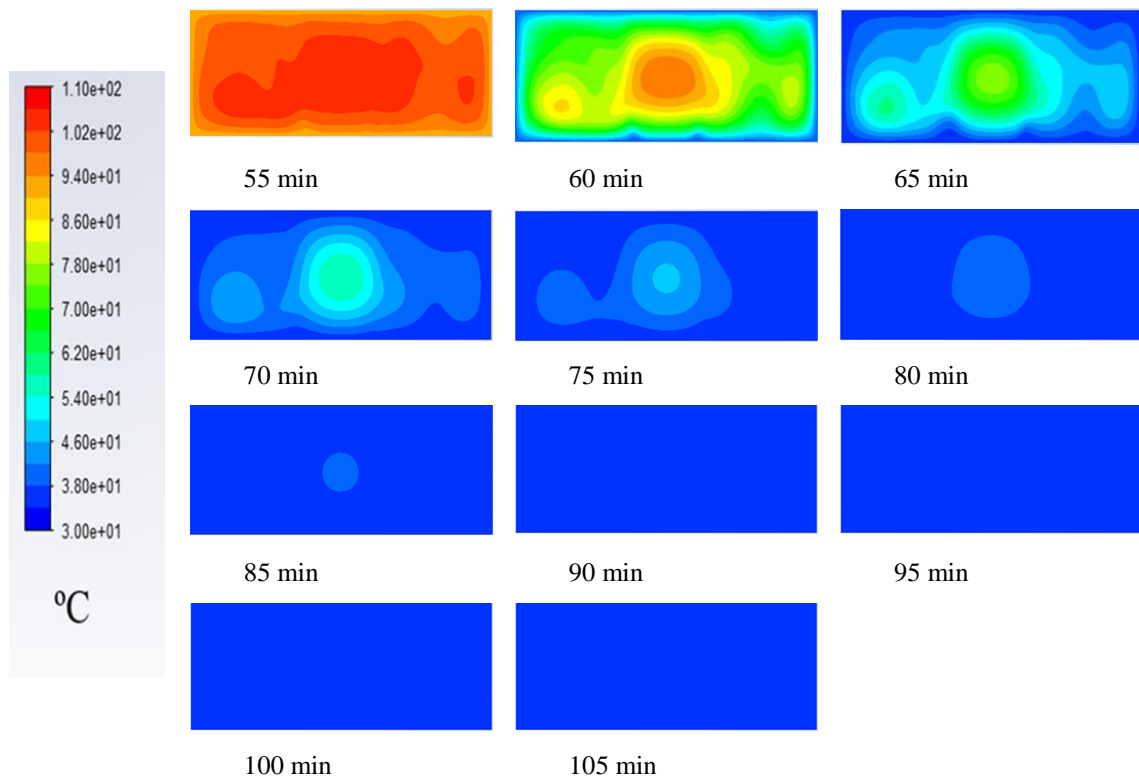
## Κλίμακα

## ΘΕΡΜΑΝΣΗ



Σχήμα 23. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας κατά τη θέρμανση για Σενάριο 3 με κάθετη τομή

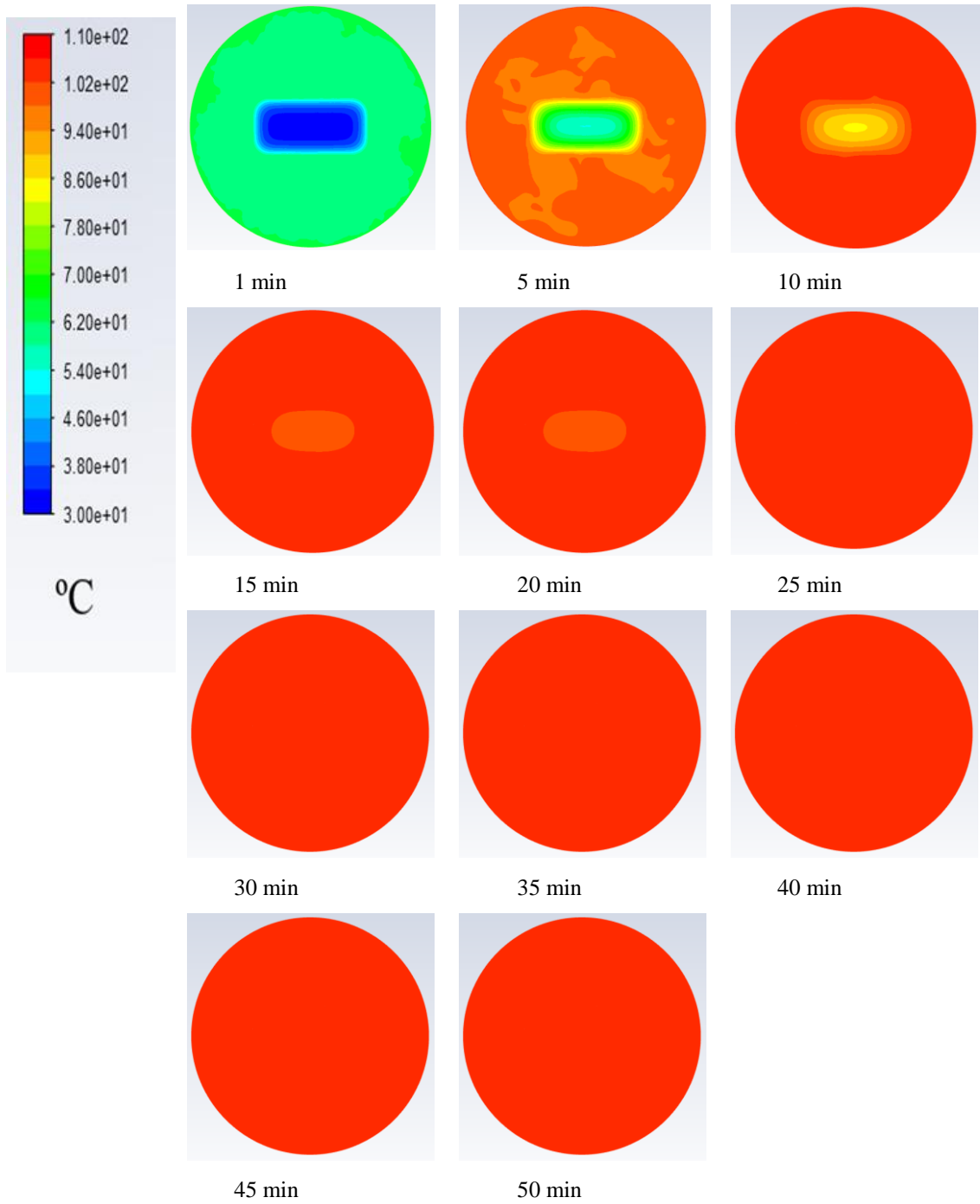
**Κλίμακα ΨΥΞΗ**



Σχήμα 24. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας κατά τη ψύξη για Σενάριο 3 με κάθετη τομή

**Κλίμακα**

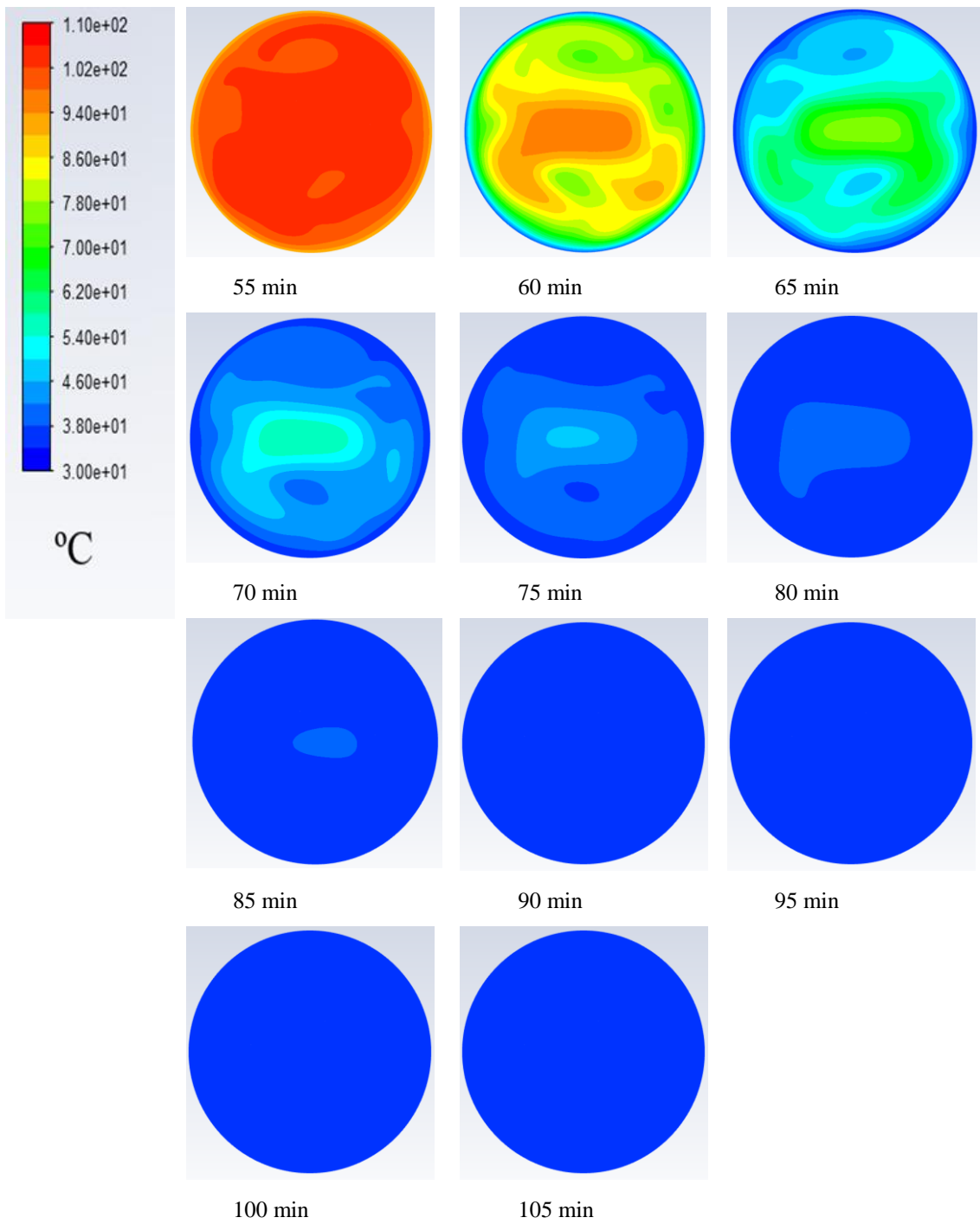
**ΘΕΡΜΑΝΣΗ**



Σχήμα 25. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας κατά τη θέρμανση για Σενάριο 3 με οριζόντια τομή

**Κλίμακα**

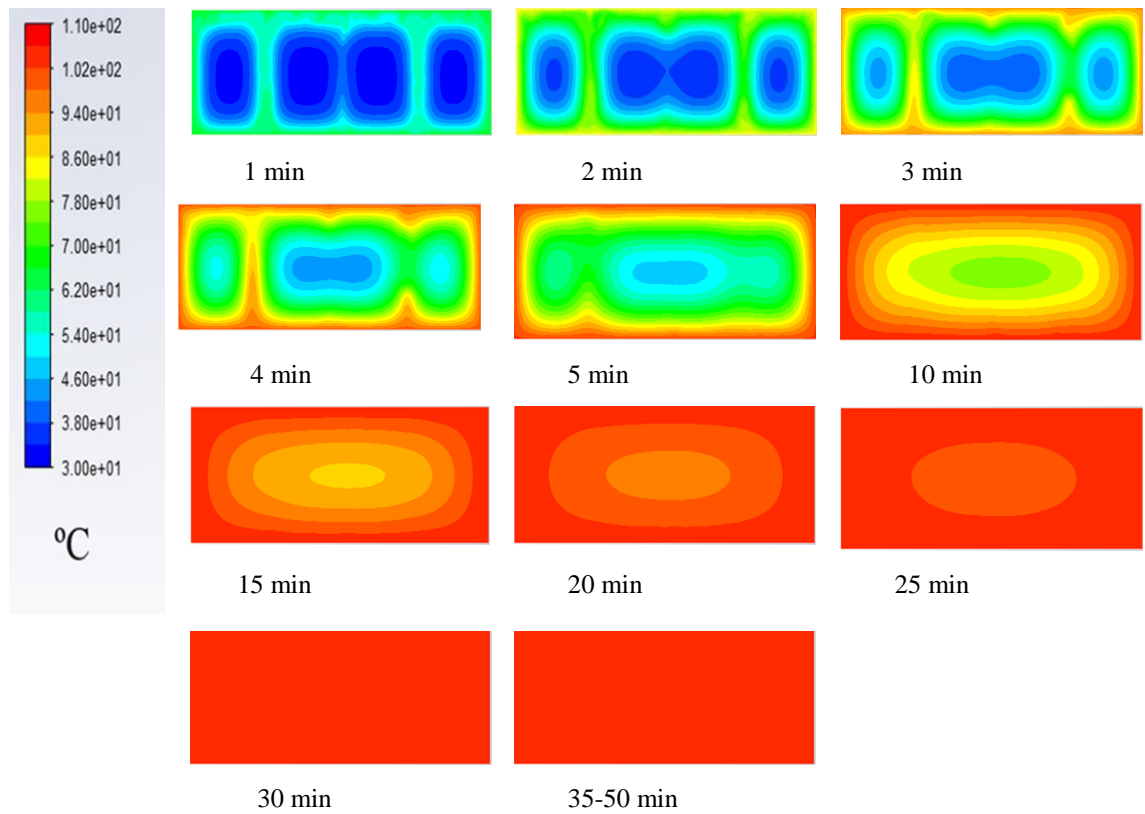
**ΨΥΞΗ**



Σχήμα 26. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας κατά τη ψύξη για Σενάριο 3 με οριζόντια τομή

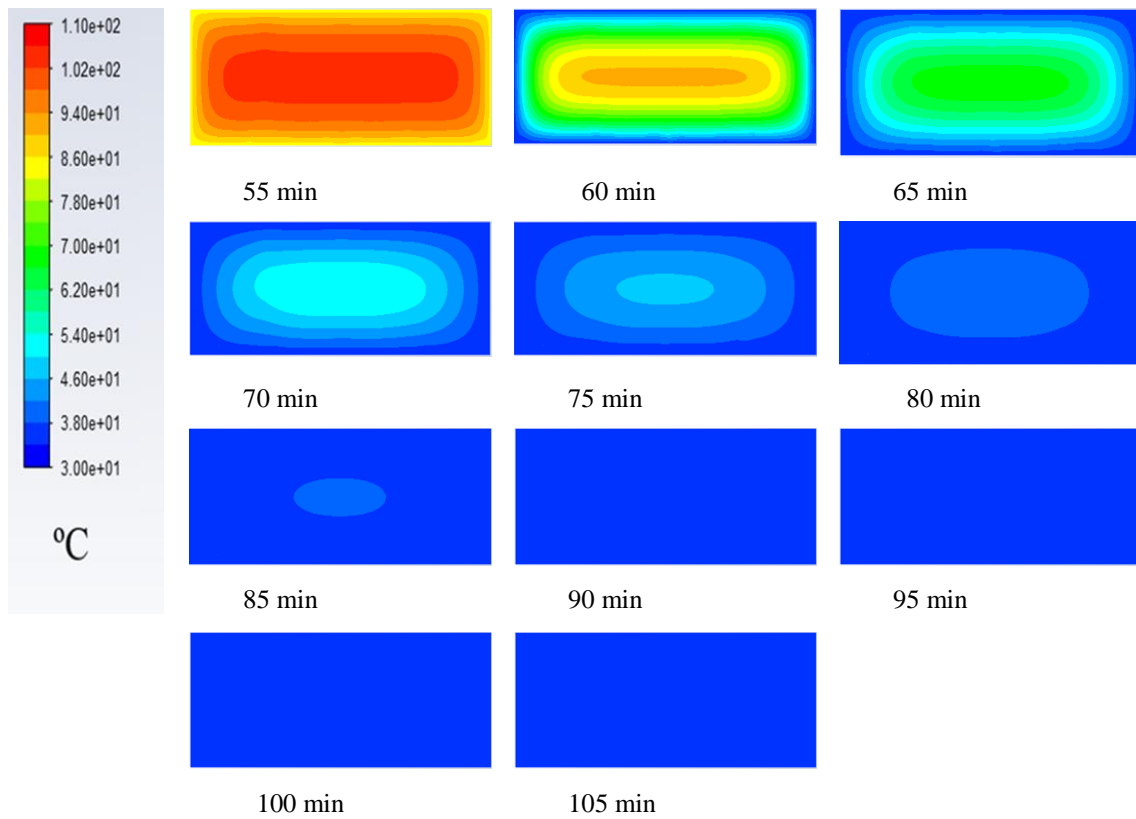


**Κλίμακα ΘΕΡΜΑΝΣΗ**



Σχήμα 27. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας κατά τη θέρμανση για Σενάριο 4 με κάθετη τομή

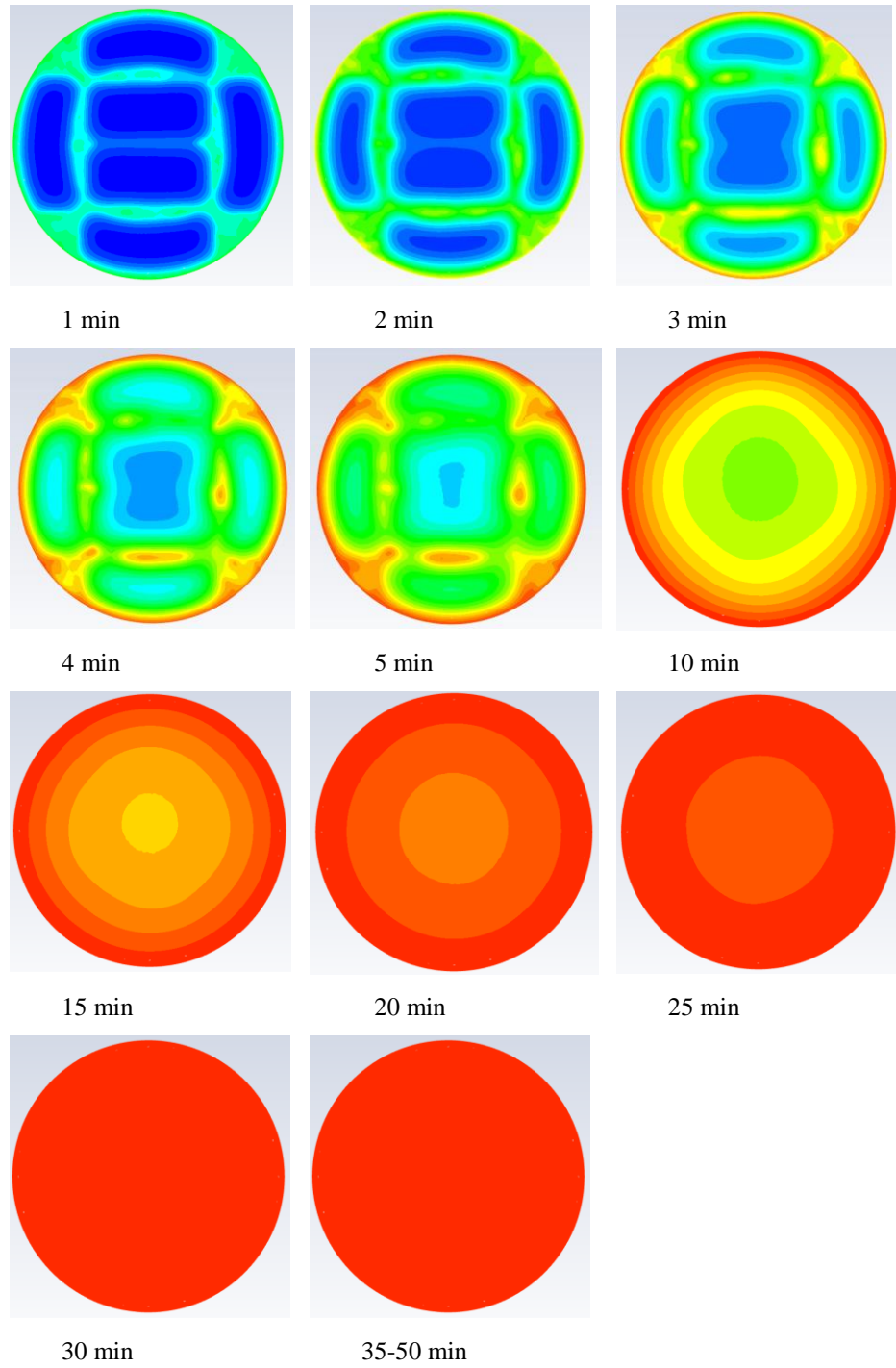
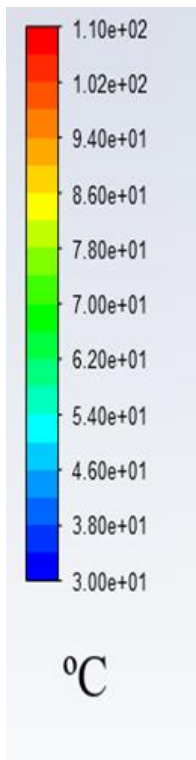
**Κλίμακα ΨΥΞΗ**



Σχήμα 28. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας κατά τη ψύξη για Σενάριο 4 με κάθετη τομή

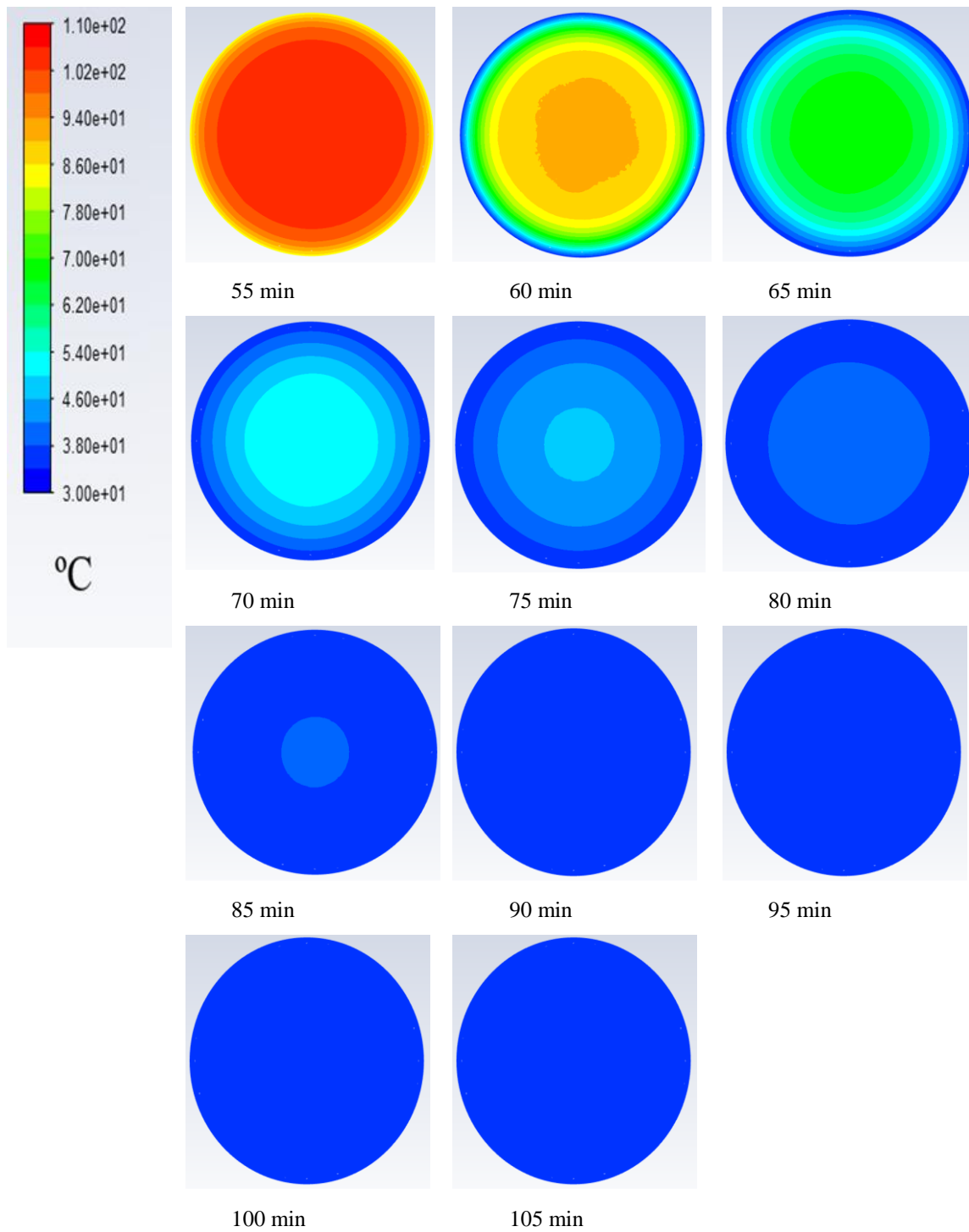
**Κλίμακα**

**ΘΕΡΜΑΝΣΗ**



Σχήμα 29. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας κατά τη θέρμανση για Σενάριο 4 με οριζόντια τομή

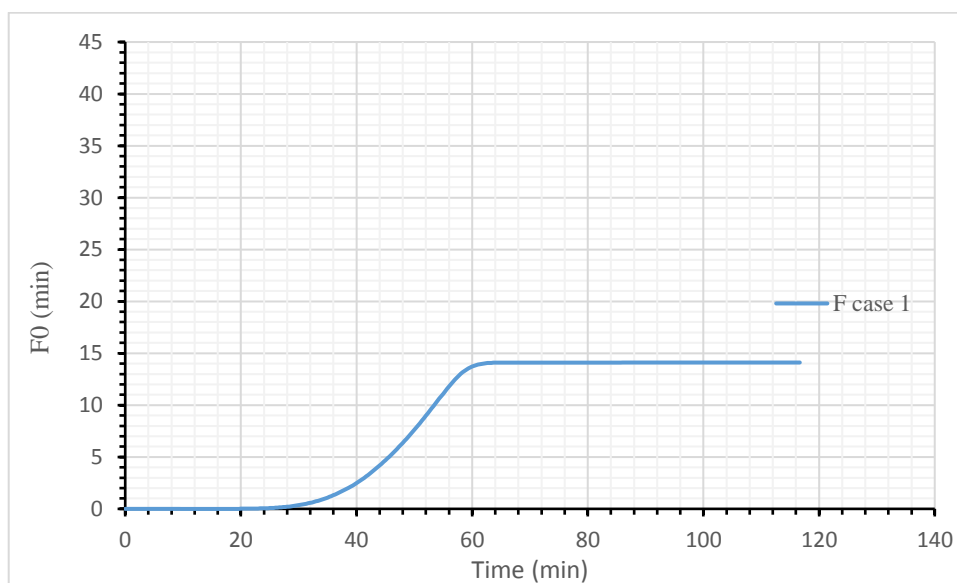
**Κλίμακα ΨΥΞΗ**



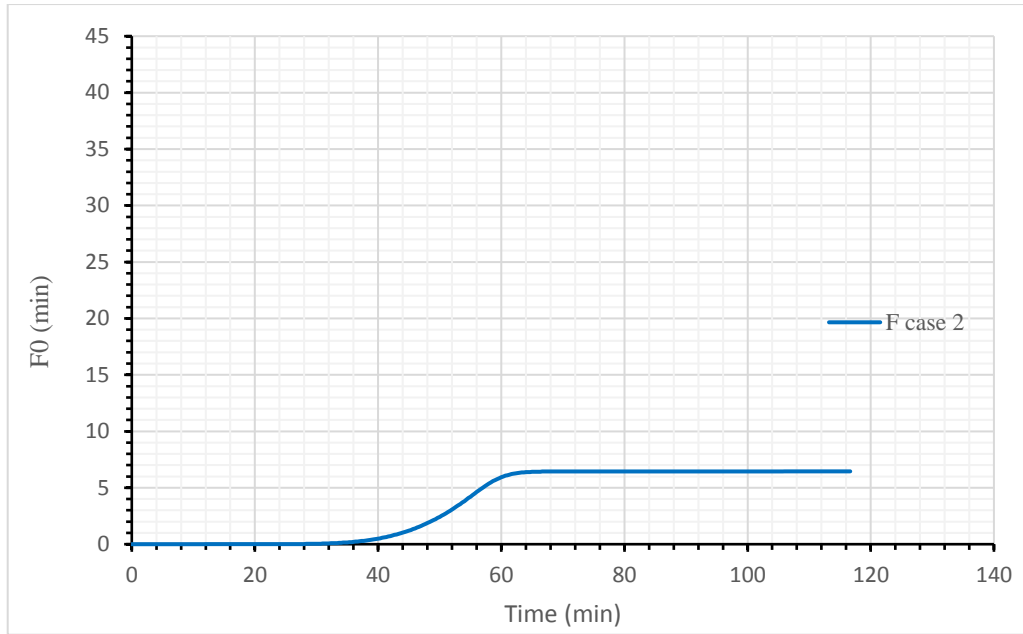
Σχήμα 30. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας κατά τη ψύξη για Σενάριο 4 με οριζόντια τομή

### 4.3.2 Αποτελέσματα υπολογισμού της τιμής F της διεργασίας

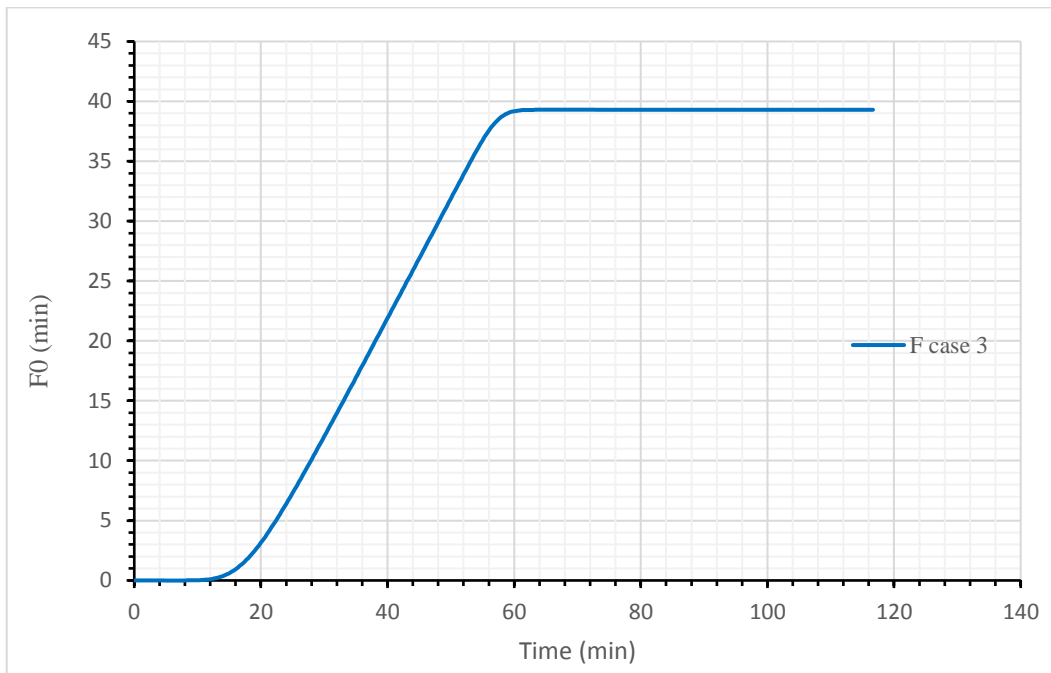
Στα Σχήματα 31 έως 34 παρουσιάζεται η κατανομή των τιμών F για  $F_{121.11^{\circ}\text{C}}^{10^{\circ}\text{C}}$  και για  $F_{105.11^{\circ}\text{C}}^{10^{\circ}\text{C}}$  στο κρίσιμο σημείο για κάθε σενάριο, συνάρτηση του χρόνου διεργασίας. Στο σχήμα 35 παρουσιάζεται η κατανομή των τιμών F για  $F_{121.11^{\circ}\text{C}}^{10^{\circ}\text{C}}$  και για  $F_{105.11^{\circ}\text{C}}^{10^{\circ}\text{C}}$  στο κρίσιμο σημείο και στο σημείο συλλογής των πειραματικών δεδομένων για την τέταρτη περίπτωση, συνάρτηση του χρόνου διεργασίας. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 36, όπου συγκρίνονται οι τιμές της διεργασίας F για  $F_{105.11^{\circ}\text{C}}^{10^{\circ}\text{C}}$  στο κρίσιμο σημείο για τα τέσσερα σενάρια, το σενάριο 3 έχει τη μεγαλύτερη τιμή  $F_{105.11^{\circ}\text{C}}^{10^{\circ}\text{C}}$  κατά τη διεργασία ίση προς 39,3 min, ακολουθεί το σενάριο 4 με τιμή 27,36 min, μετά το σενάριο 1 που υπολογίστηκε στα 14,1 min και τέλος το σενάριο 2 με τιμή 6,45 min.



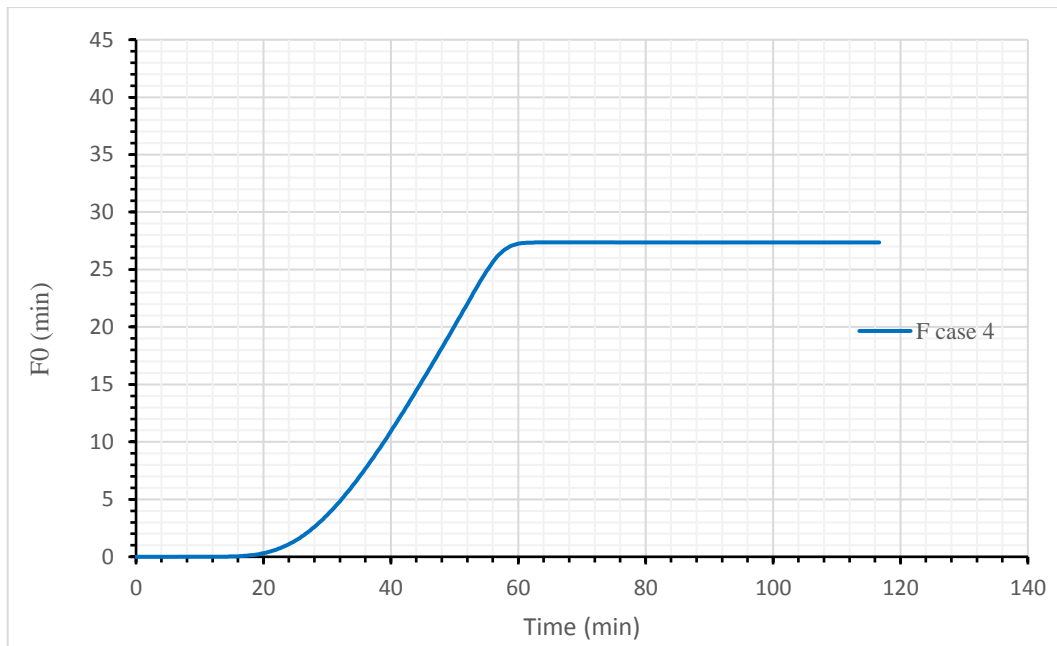
Σχήμα 31. Η τιμή της διεργασίας F για  $F_{105.11^{\circ}\text{C}}^{10^{\circ}\text{C}}$  για το κρίσιμο σημείο στο σενάριο 1.



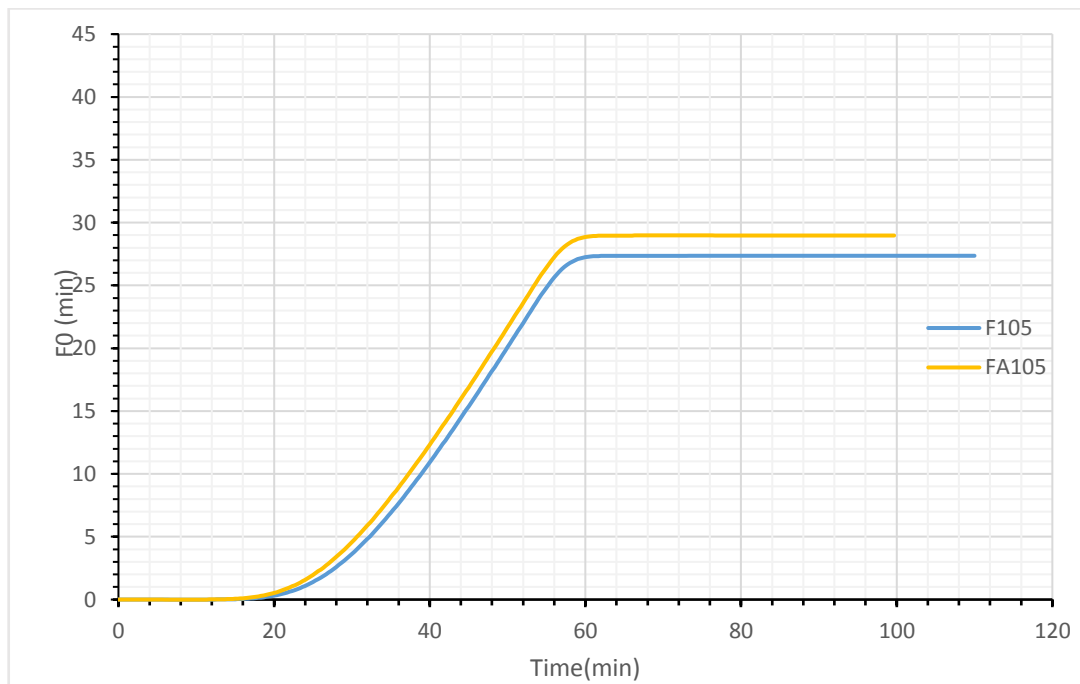
Σχήμα 32. Η τιμή της διεργασίας  $F$  για  $F_{105.11^{\circ}\text{C}}^{10^{\circ}\text{C}}$  για το κρίσιμο σημείο στο σενάριο 2.



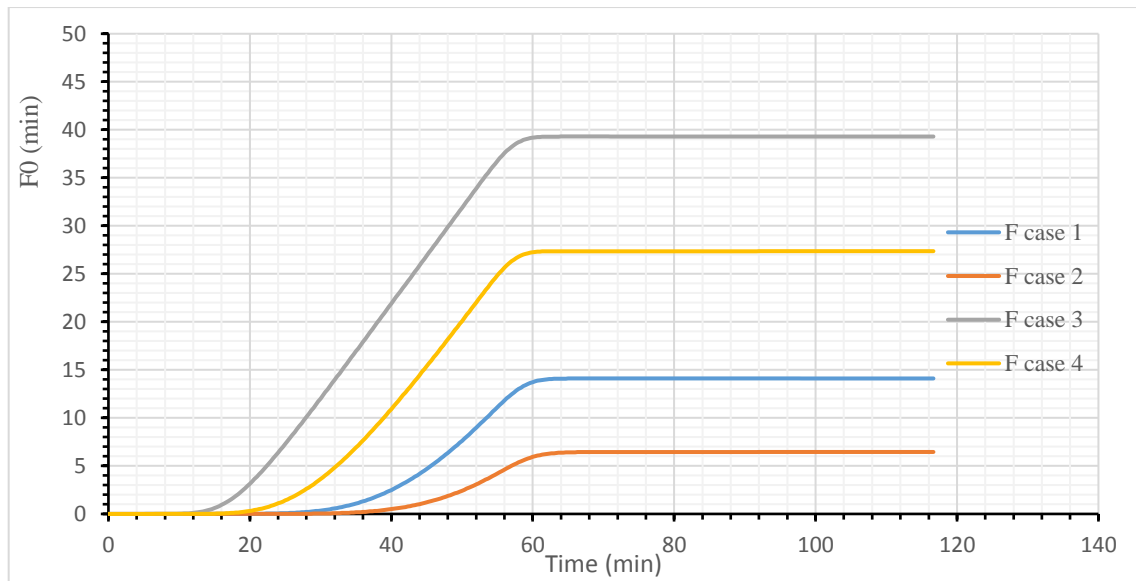
Σχήμα 33. Η τιμή της διεργασίας  $F$  για  $F_{105.11^{\circ}\text{C}}^{10^{\circ}\text{C}}$  για το κρίσιμο σημείο στο τρίτο σενάριο.



Σχήμα 34. Η τιμή της διεργασίας  $F$  για  $F_{105.11^{\circ}\text{C}}^{10^{\circ}\text{C}}$  για το κρίσιμο σημείο στο τέταρτο σενάριο.



Σχήμα 35. Οι τιμές της διεργασίας  $F$  για  $F_{105.11^{\circ}\text{C}}^{10^{\circ}\text{C}}$  για το κρίσιμο σημείο και το σημείο συλλογής πειραματικών δεδομένων για το τέταρτο σενάριο.

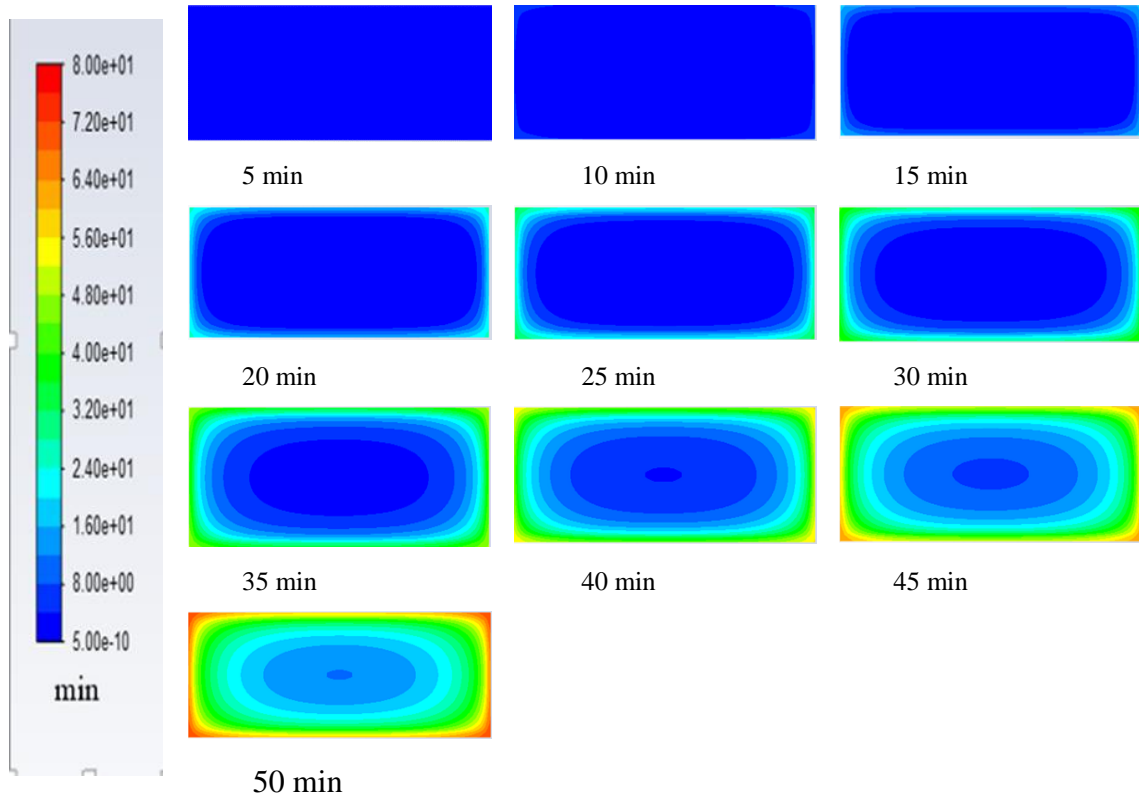


Σχήμα 36. Οι τιμές της διεργασίας  $F$  για  $F_{105.11^{\circ}\text{C}}^{10^{\circ}\text{C}}$  για στο κρίσιμο σημείο για τα τέσσερα σενάρια

Στα Σχήματα 37 έως 52 που ακολουθούν δίνονται οι τιμές της διεργασίας  $F$  για  $F_{105.11^{\circ}\text{C}}^{10^{\circ}\text{C}}$  και για τα τέσσερα σενάρια σε όλη την έκταση της κονσέρβας χρησιμοποιώντας δυο επίπεδες τομές της κονσέρβας, όπως αναφέρθηκε παραπάνω (Σχήματα 24 έως 29). Για την παρουσίαση επιλέχθηκε η χρήση συγκεκριμένων χρονικών διαστημάτων ανά 5 min. Για κάθε σενάριο χρησιμοποιήθηκε διαφορετικό εύρος τιμών για καλύτερη απεικόνιση των αποτελεσμάτων, και δίνεται στο σχήμα υπό μορφή κλίμακας. Από τα Σχήματα 37 έως 52 για όλες τις περιπτώσεις παρατηρείται, ότι τα σημεία που είναι εσωτερικά κοντά στο γεωμετρικό κέντρο της κονσέρβας έχουν μικρότερες τιμές  $F$  σε σχέση με τα σημεία τα οποία είναι κοντά στα τοιχώματα του περιέκτη. Συγκρίνοντας με τα σχήματα όπου παρουσιάζονται οι κατανομές θερμοκρασίας παρατηρείται ότι, η εξέλιξη των τιμών των κατανομών της διεργασίας  $F$ , ακολουθεί το παράδειγμα των κατανομών της εξέλιξη της θερμοκρασίας.

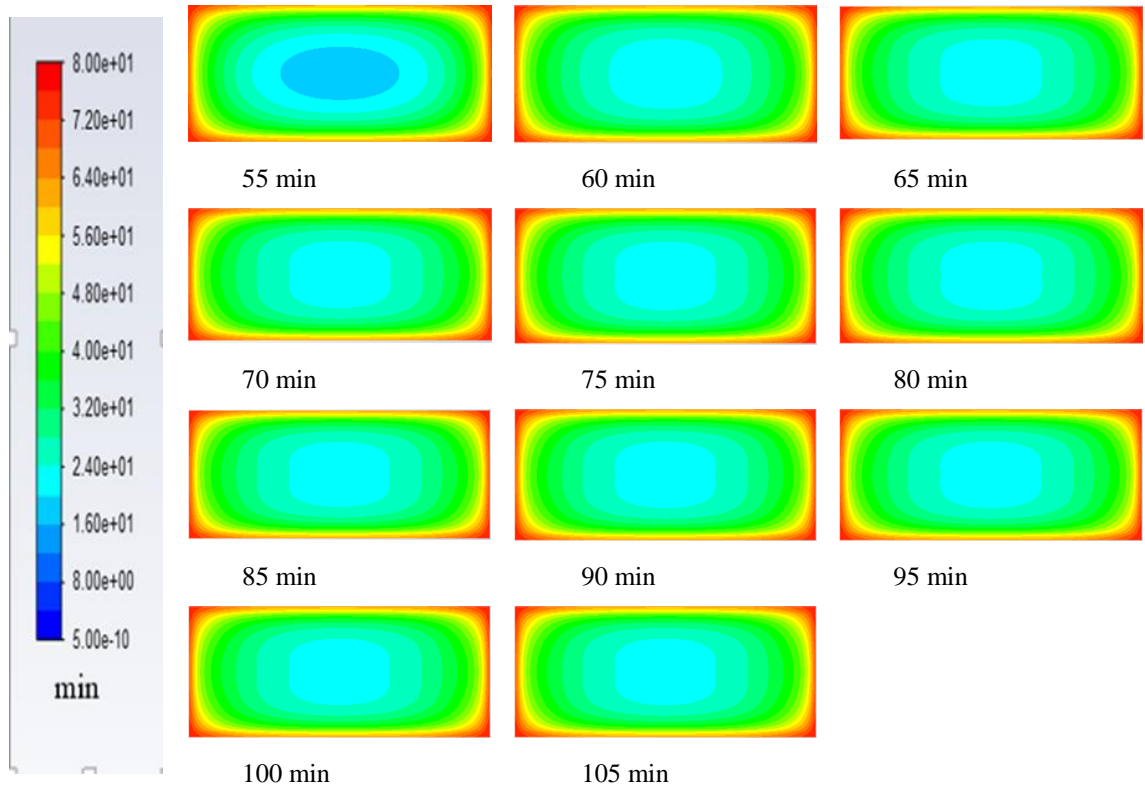


**Κλίμακα ΘΕΡΜΑΝΣΗ**



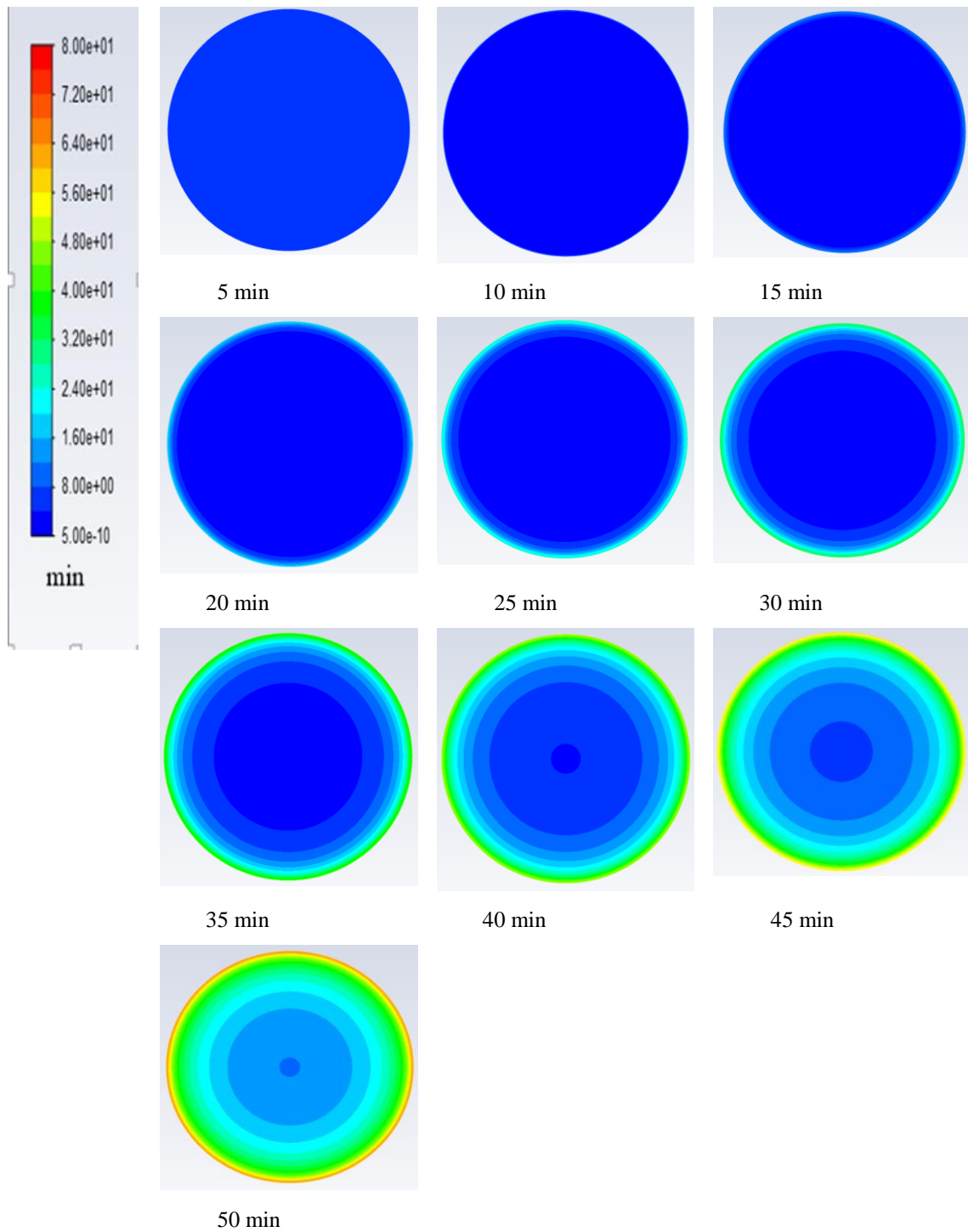
Σχήμα 37. Εξέλιξη της κατανομής της διεργασίας  $F$  για  $F_{105.11^{\circ}C}^{10^{\circ}C}$  κατά τη θέρμανση για Σενάριο 1 με κάθετη τομή

**Κλίμακα ΨΥΞΗ**



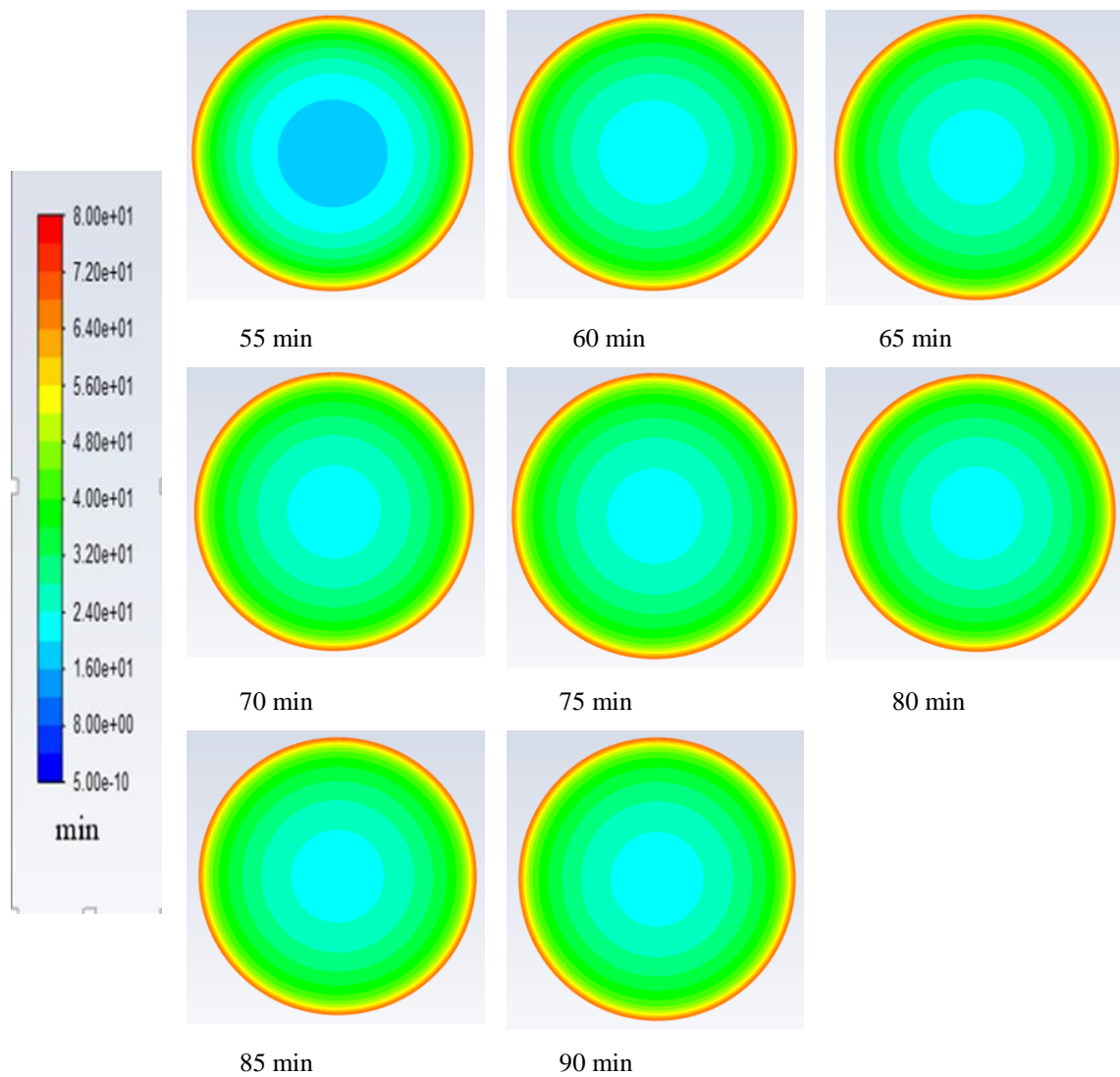
Σχήμα 38. Εξέλιξη της κατανομής της διεργασίας  $F$  για  $F_{105.11^{\circ}\text{C}}^{10^{\circ}\text{C}}$  κατά τη ψύξη για Σενάριο 1 με κάθετη τομή

**Κλίμακα ΘΕΡΜΑΝΣΗ**



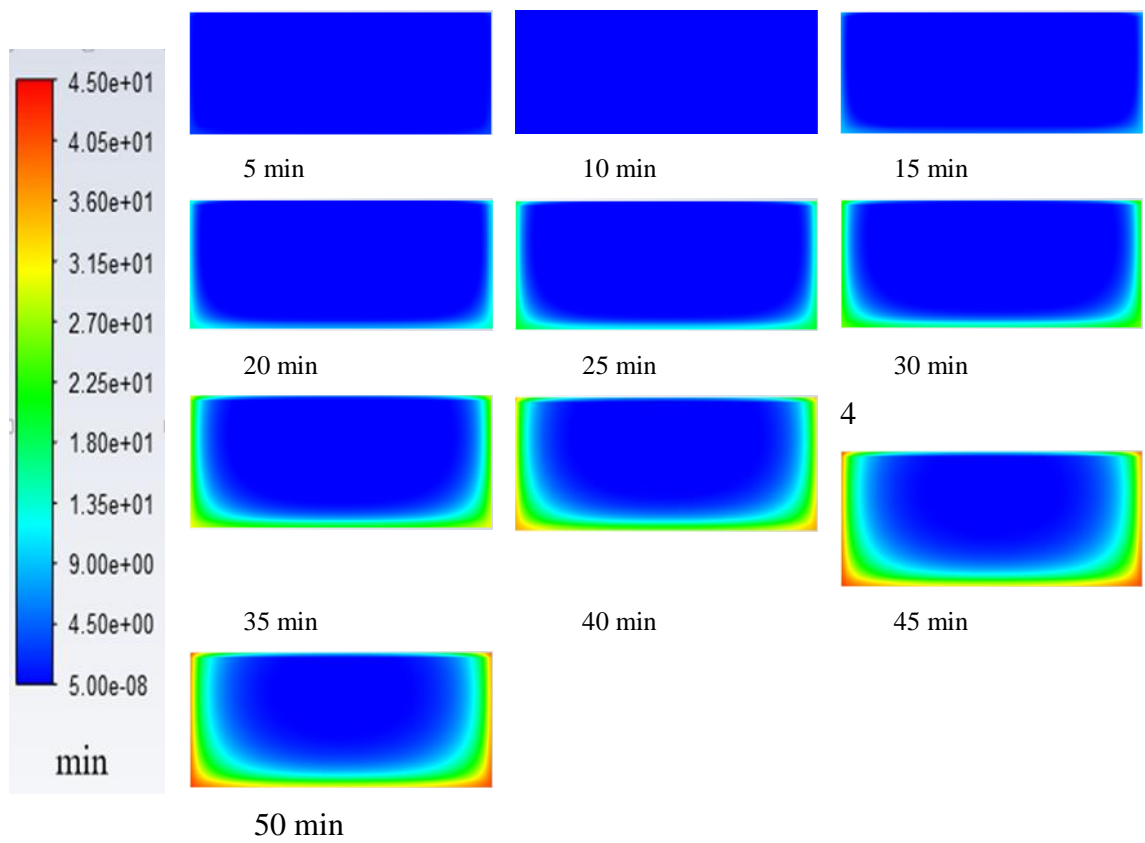
Σχήμα 39. Εξέλιξη της κατανομής της διεργασίας  $F$  για  $F_{105.11^{\circ}\text{C}}^{10^{\circ}\text{C}}$  κατά τη θέρμανση για Σενάριο 1 με οριζόντια τομή

## Κλίμακα ΨΥΞΗ



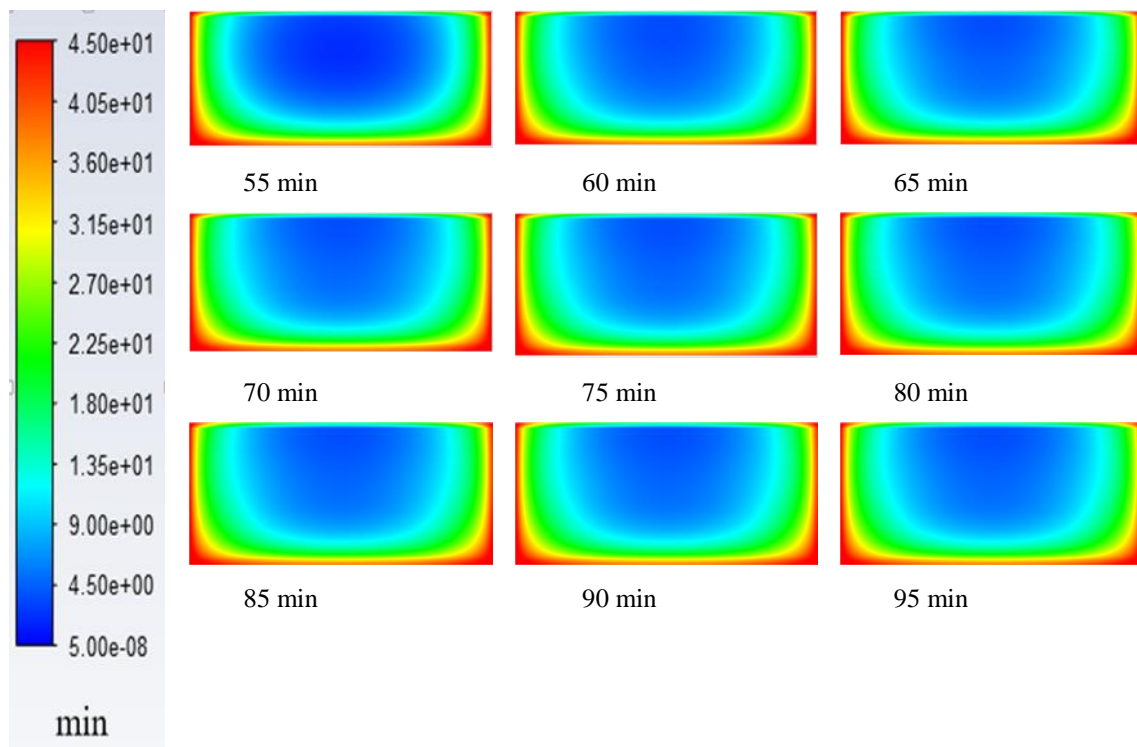
Σχήμα 40. Εξέλιξη της κατανομής της διεργασίας  $F$  για  $F_{105.11^{\circ}\text{C}}^{10^{\circ}\text{C}}$  κατά τη ψύξη για Σενάριο 1 με οριζόντια τομή

**Κλίμακα ΘΕΡΜΑΝΣΗ**



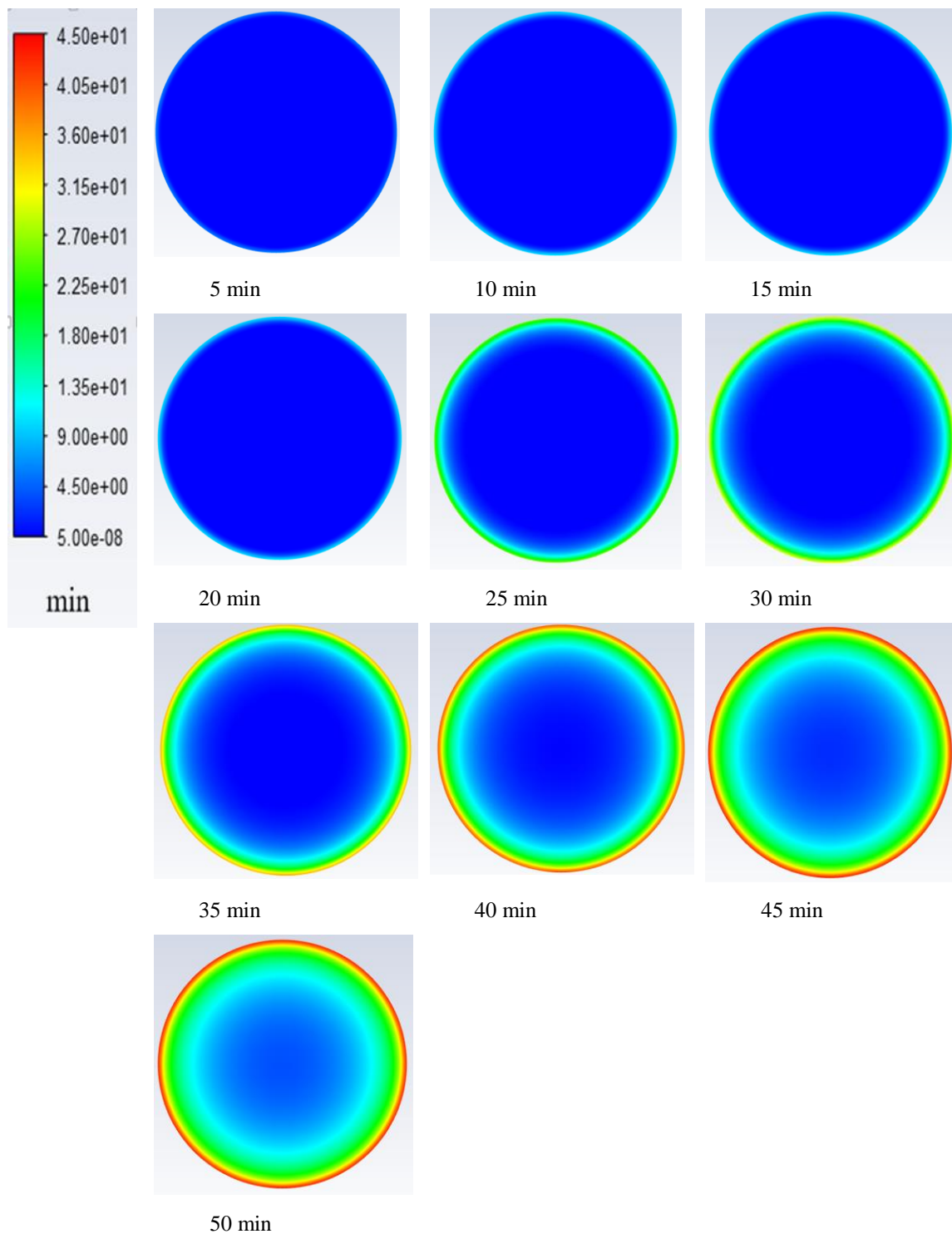
Σχήμα 41. Εξέλιξη της κατανομής της διεργασίας  $F$  για  $F_{105.11^{\circ}\text{C}}^{10^{\circ}\text{C}}$  κατά τη θέρμανση για Σενάριο 2 με κάθετη τομή

**Κλίμακα ΨΥΞΗ**



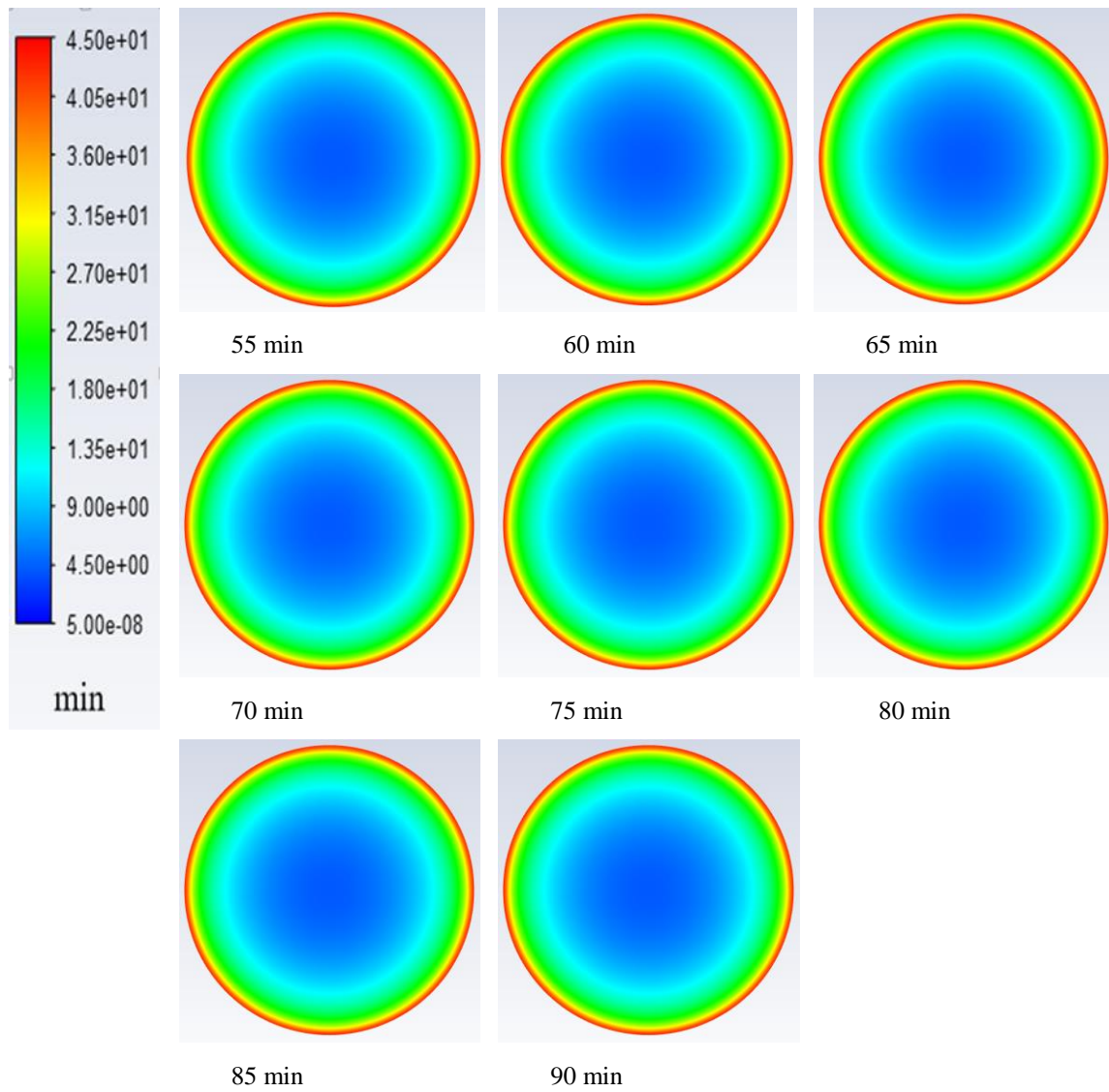
Σχήμα 42. Εξέλιξη της κατανομής της διεργασίας  $F$  για  $F_{105.11^{\circ}\text{C}}^{10^{\circ}\text{C}}$  κατά τη ψύξη για Σενάριο 2 με κάθετη τομή

**Κλίμακα ΘΕΡΜΑΝΣΗ**



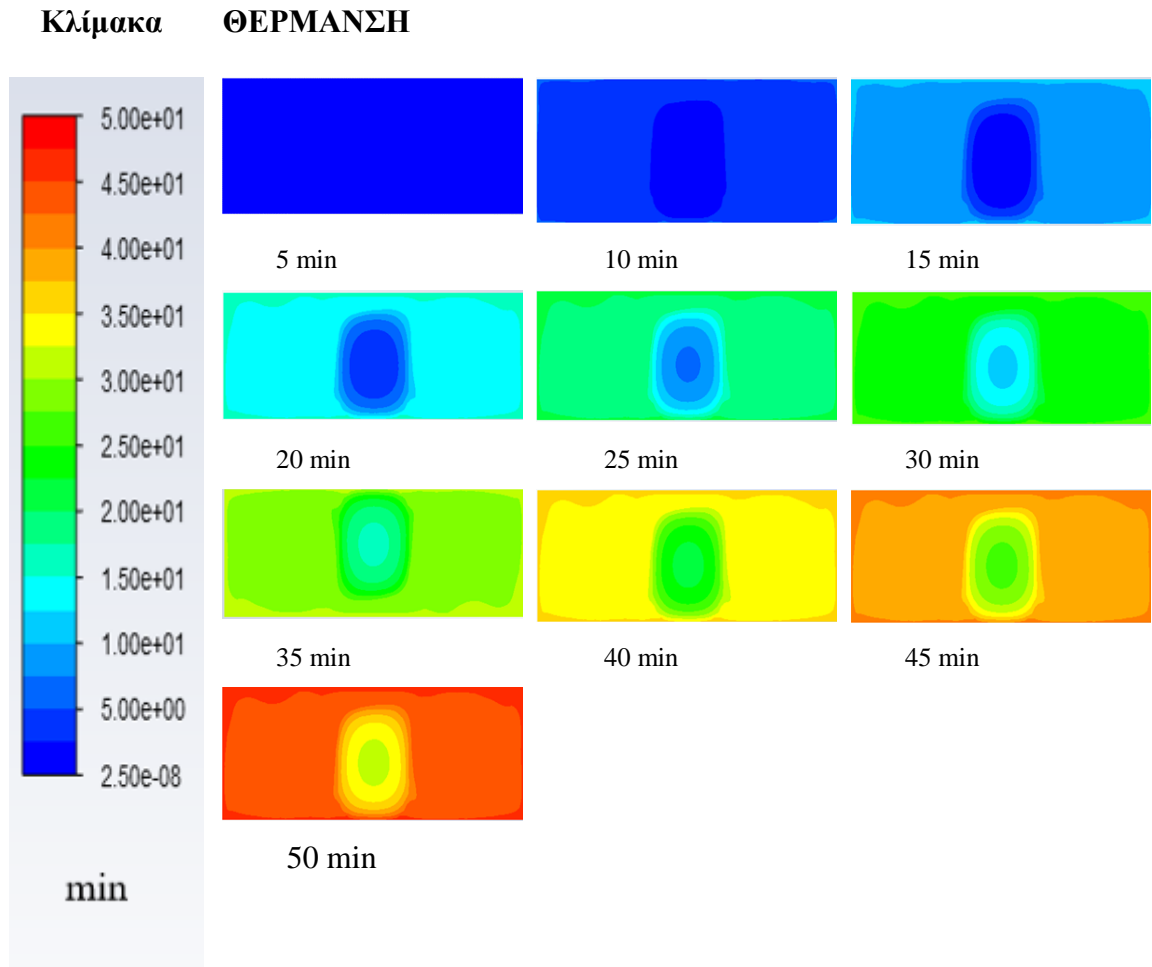
Σχήμα 43. Εξέλιξη της κατανομής της διεργασίας  $F$  για  $F_{105.11^{\circ}\text{C}}^{10^{\circ}\text{C}}$  κατά τη θέρμανση για Σενάριο 2 με οριζόντια τομή

**Κλίμακα ΨΥΞΗ**



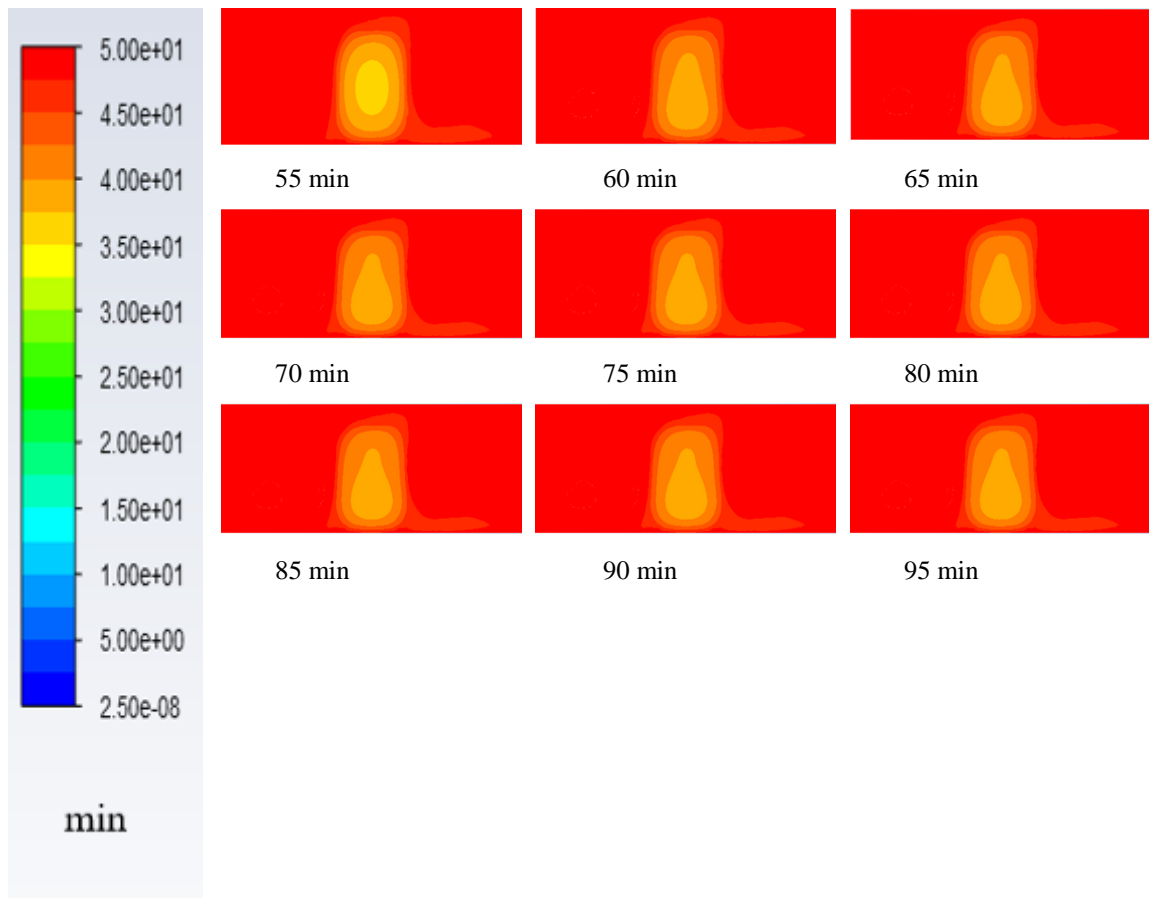
Σχήμα 44. Εξέλιξη της κατανομής της διεργασίας  $F$  για  $F_{105.11^{\circ}\text{C}}^{10^{\circ}\text{C}}$  κατά τη ψύξη για Σενάριο 2 με οριζόντια τομή





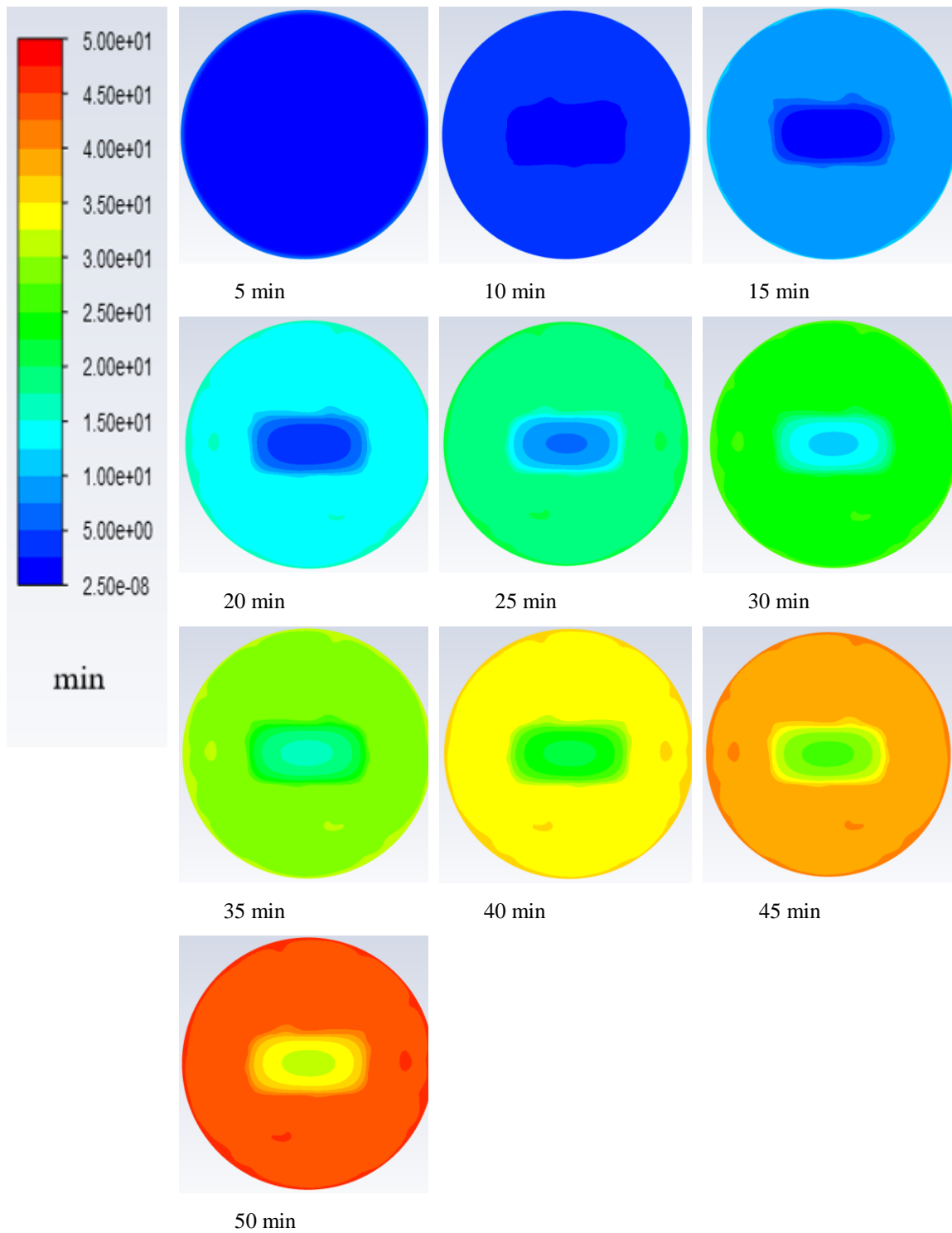
Σχήμα 45. Εξέλιξη της κατανομής της διεργασίας  $F$  για  $F_{105.11^{\circ}\text{C}}^{10^{\circ}\text{C}}$  κατά τη θέρμανση για σενάριο 3 με κάθετη τομή

**Κλιμακα ΨΥΞΗ**



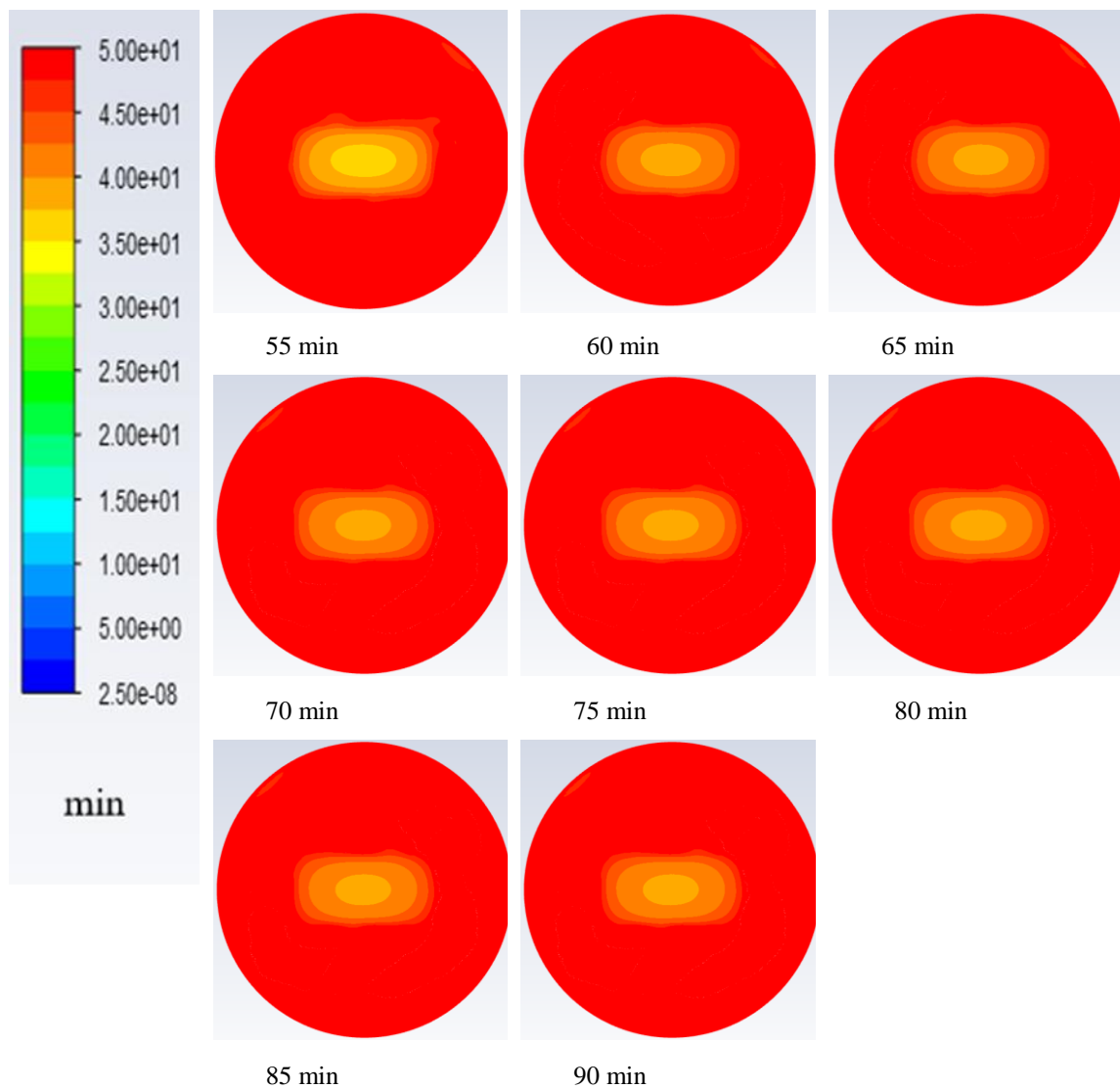
Σχήμα 46. Εξέλιξη της κατανομής της διεργασίας  $F$  για  $F_{105.11^{\circ}\text{C}}^{10^{\circ}\text{C}}$  κατά τη ψύξη για Σενάριο 3 με κάθετη τομή

**Κλίμακα ΘΕΡΜΑΝΣΗ**



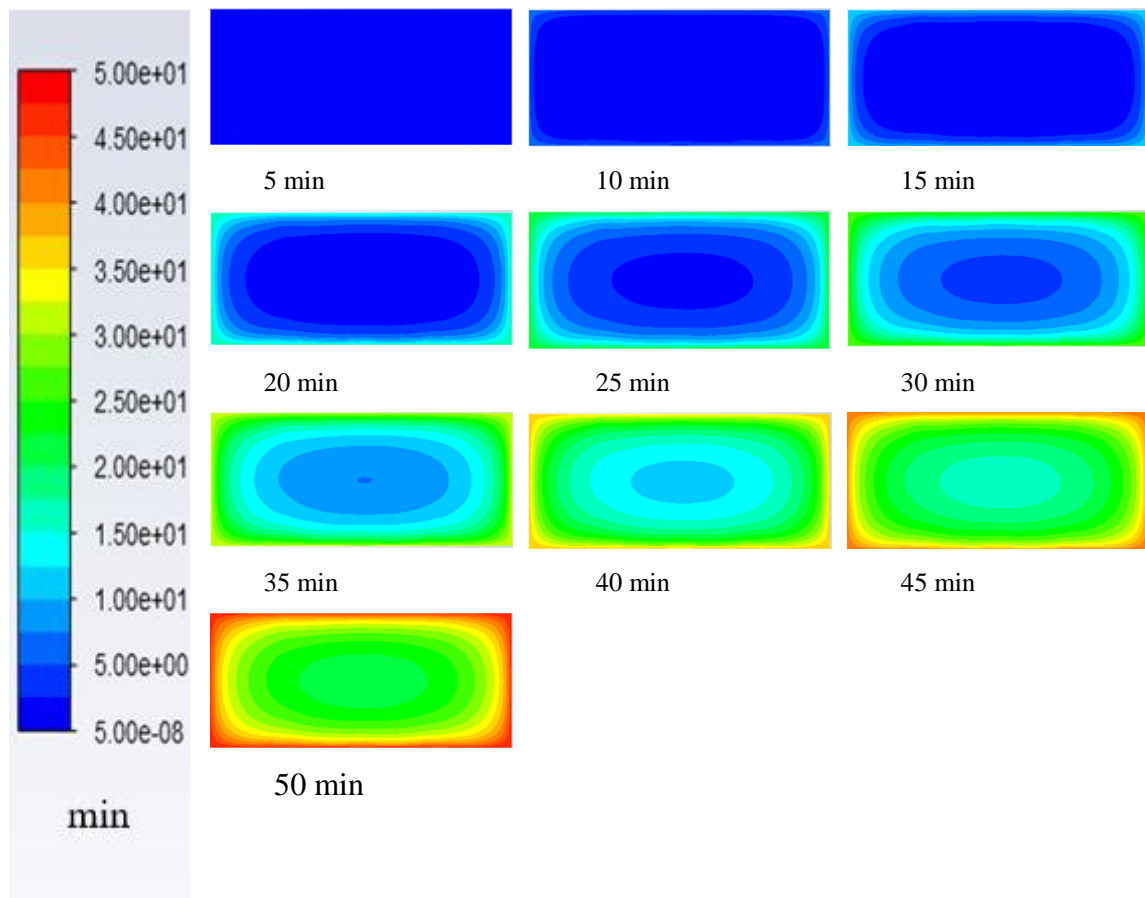
Σχήμα 47. Εξέλιξη της κατανομής της διεργασίας  $F$  για  $F_{105.11^{\circ}\text{C}}^{10^{\circ}\text{C}}$  κατά τη θέρμανση για σενάριο 3 με οριζόντια τομή

**Κλιμακα ΨΥΞΗ**



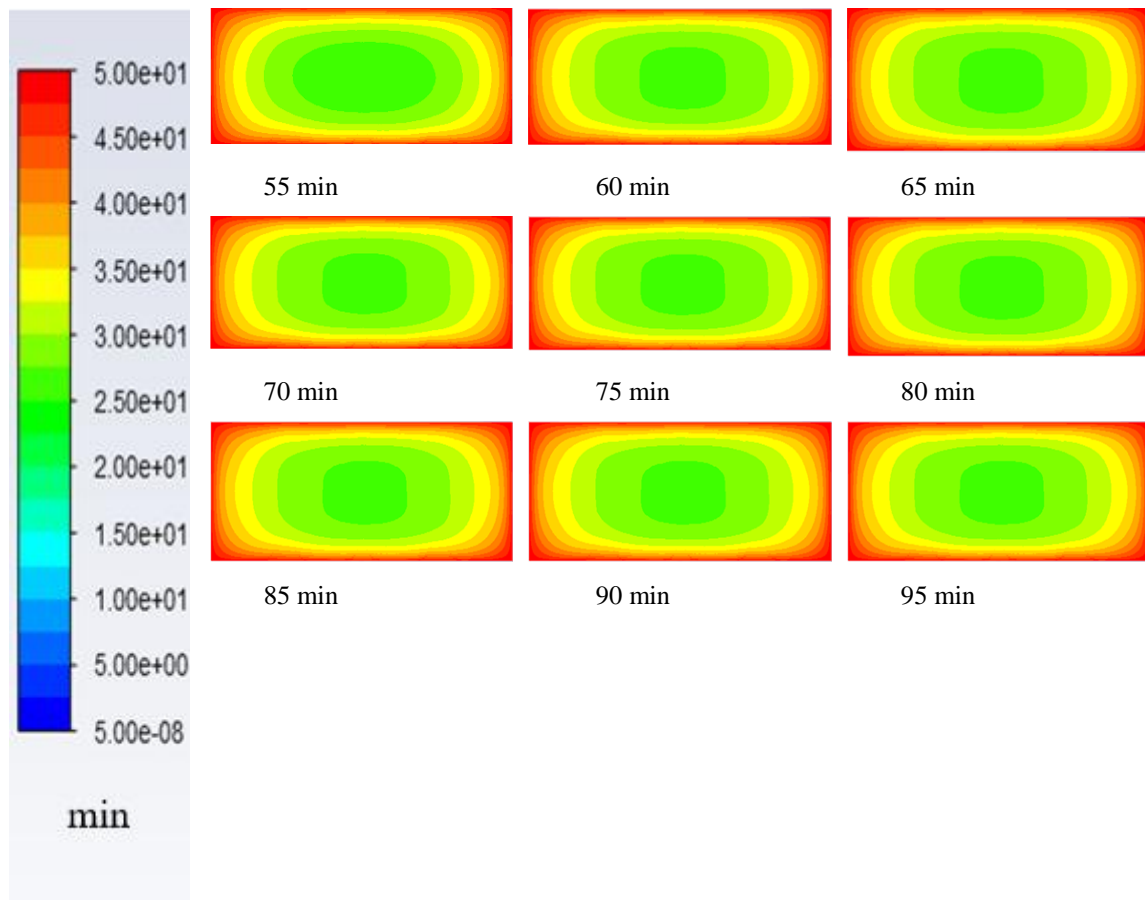
Σχήμα 48. Εξέλιξη της κατανομής της διεργασίας  $F$  για  $F_{105.11^{\circ}\text{C}}^{10^{\circ}\text{C}}$  κατά τη ψύξη για Σενάριο 3 με οριζόντια τομή

**Κλιμακα ΘΕΡΜΑΝΣΗ**



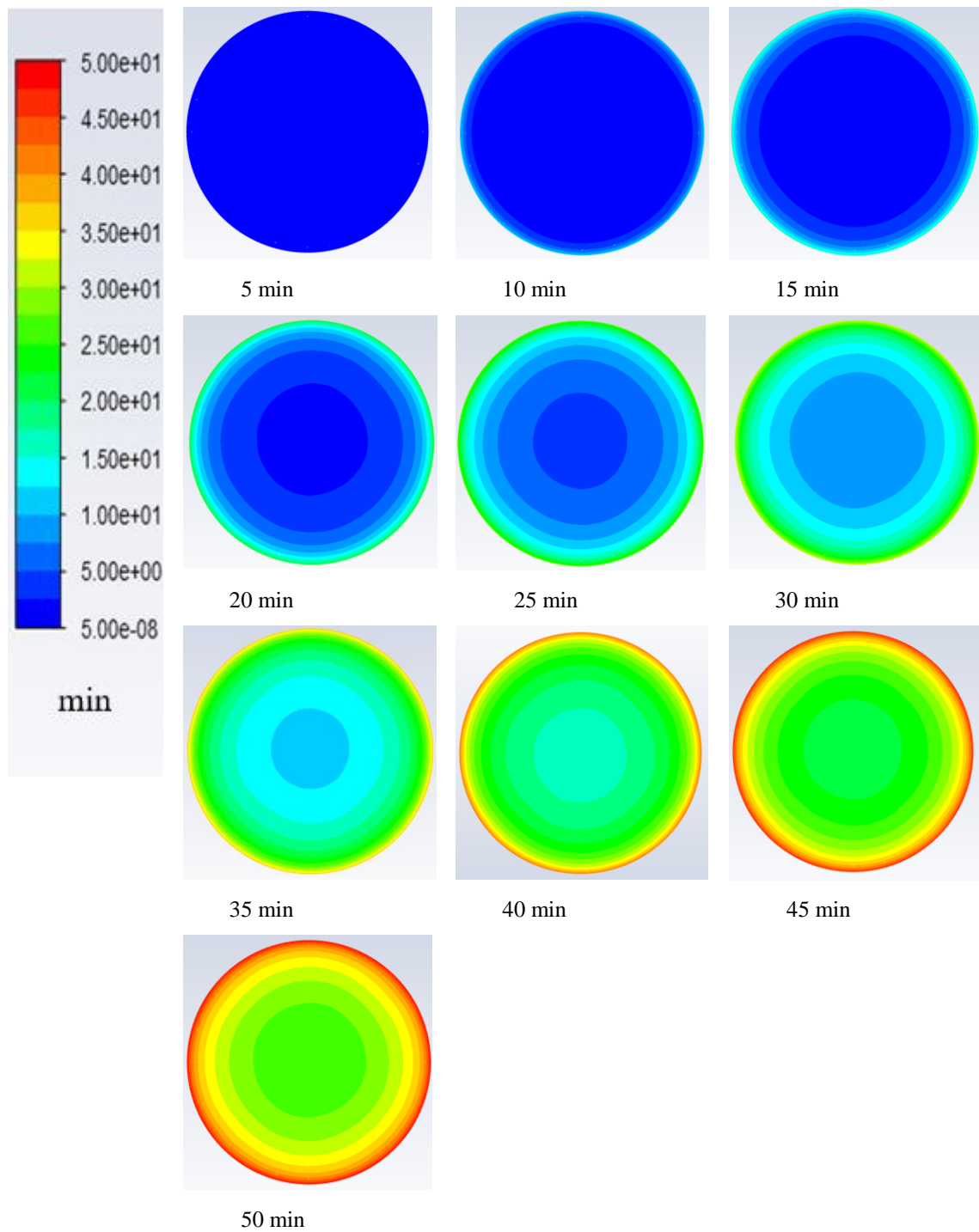
Σχήμα 49. Εξέλιξη της κατανομής της διεργασίας  $F$  για  $F_{105.11^{\circ}\text{C}}^{10^{\circ}\text{C}}$  κατά τη θέρμανση για σενάριο 4 με κάθετη τομή

**Κλίμακα ΨΥΞΗ**



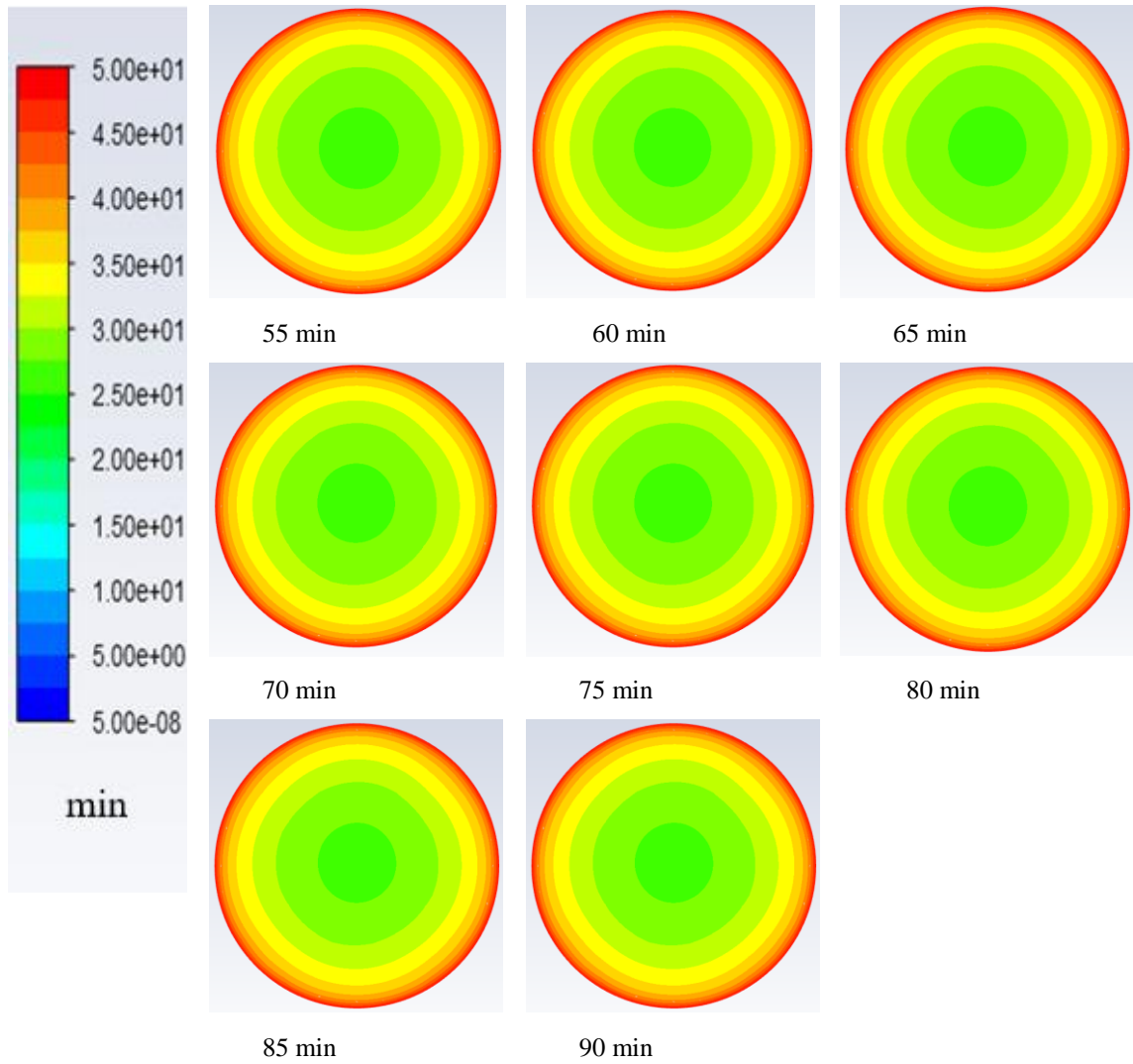
Σχήμα 50. Εξέλιξη της κατανομής της διεργασίας  $F$  για  $F_{105.11^{\circ}C}^{10^{\circ}C}$  κατά τη ψύξη για Σενάριο 4 με κάθετη τομή

**Κλιμακα ΘΕΡΜΑΝΣΗ**



Σχήμα 51. Εξέλιξη της κατανομής της διεργασίας  $F$  για  $F_{105.11^{\circ}\text{C}}^{10^{\circ}\text{C}}$  κατά τη θέρμανση για σενάριο 4 με οριζόντια τομή

**Κλίμακα ΨΥΞΗ**

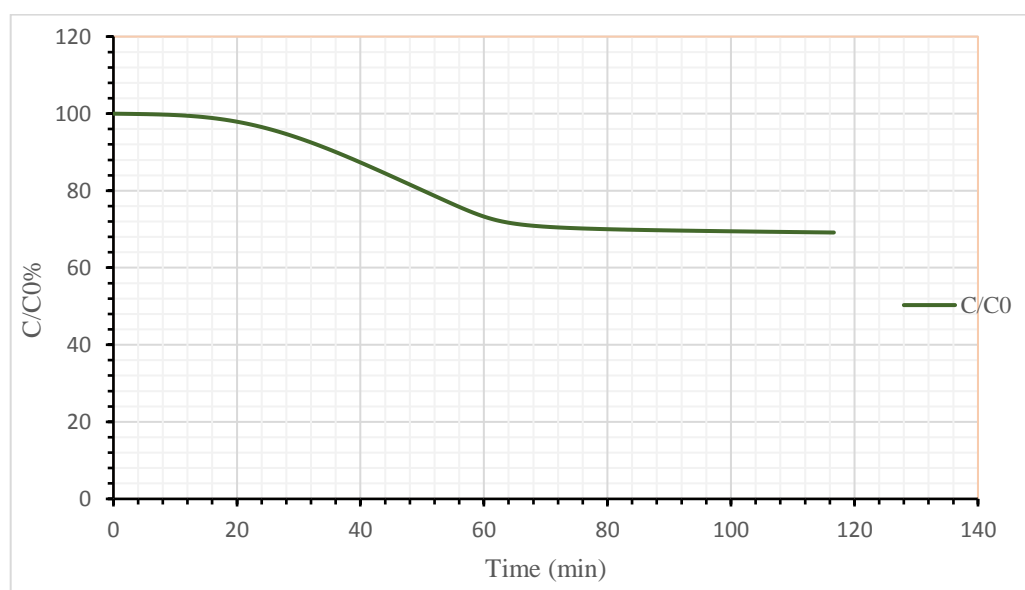


Σχήμα 52. Εξέλιξη της κατανομής της διεργασίας  $F$  για  $F_{105.11^{\circ}\text{C}}^{10^{\circ}\text{C}}$  κατά τη ψύξη για Σενάριο 4 με οριζόντια τομή

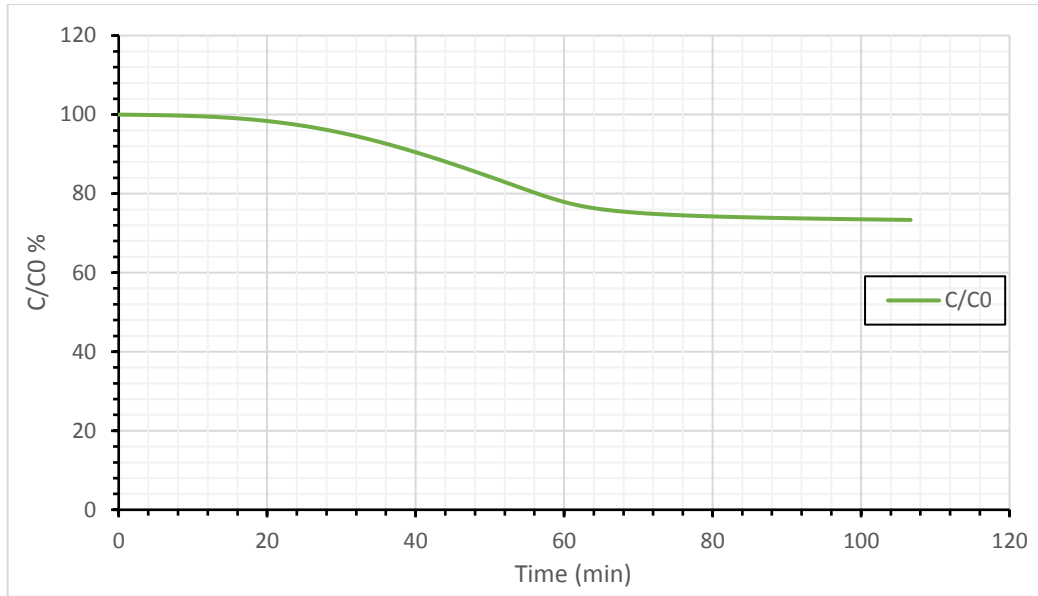


### 4.3.3 Ποιοτική υποβάθμιση προϊόντος

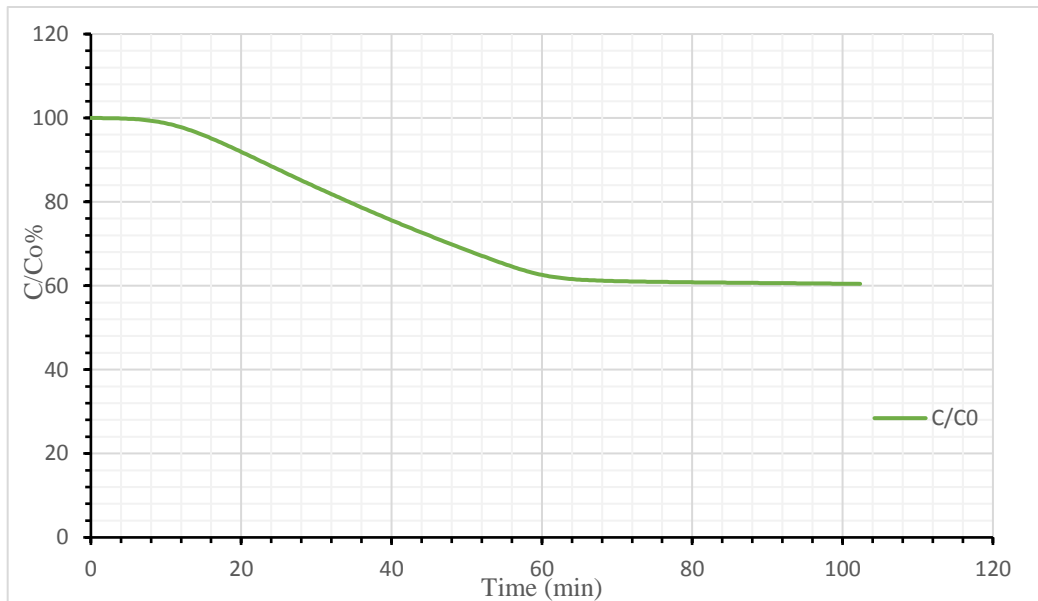
Για τον υπολογισμό της υποβάθμισης των ποιοτικών παραγόντων του προϊόντος, εξετάστηκε η % διατήρηση της θειαμίνης. Στα Σχήματα 53-56 παρουσιάζεται η % διατήρηση της θειαμίνης στο κρίσιμο σημείο και για τις τέσσερις περιπτώσεις. Μεγαλύτερη διατήρηση της θειαμίνης μετά το πέρας της διεργασίας, παρατηρείται στη δεύτερη περίπτωση με ποσοστό διατήρησης 73,13%, ακολουθεί η πρώτη περίπτωση με ποσοστό διατήρησης 69,14 %, ενώ για τη τέταρτη και τρίτη περίπτωση το ποσοστό διατήρησης μετρήθηκε με τιμή 63,75% και 60,44% αντίστοιχα. Στα σχήματα 57-72 παρουσιάζονται οι κατανομές των ποιοτικών παραμέτρων, με τη χρήση των δυο επίπεδων τομών, για την % διατήρηση της θειαμίνης για όλες τις περιπτώσεις. Όπως παρατηρείται και από τα σχήματα, η υποβάθμιση των ποιοτικών χαρακτηριστικών είναι μεγαλύτερη στα εξωτερικά σημεία της μεταλλικής κονσέρβας, από ότι στα εσωτερικά της σημεία.



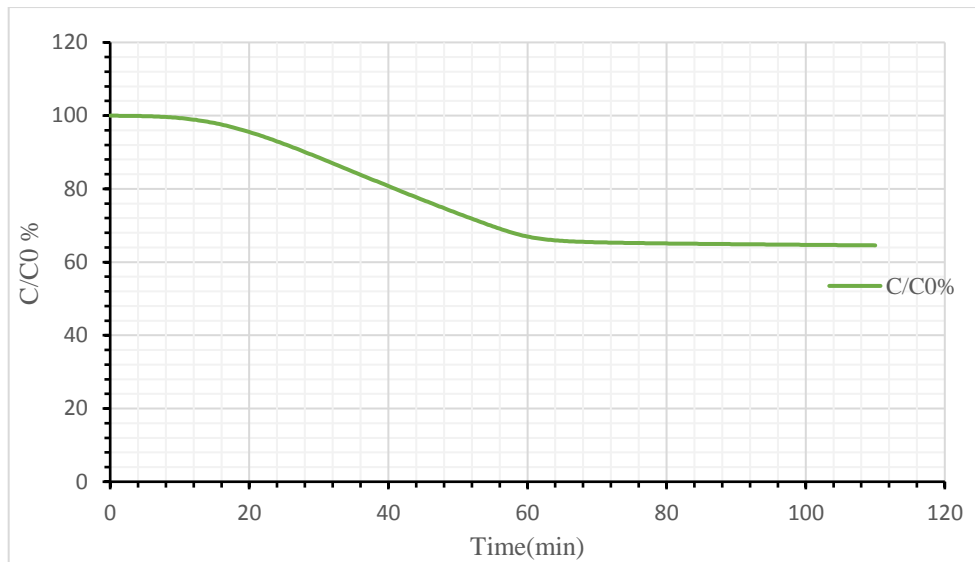
Σχήμα 53. Η % διατήρηση της θειαμίνης  $C_{121.11}^{10^{\circ}C}$  για την περίπτωση 1



Σχήμα 54. Η % διατήρηση της θειαμίνης C<sub>121.11°C</sub><sup>10°C</sup> για την περίπτωση 2

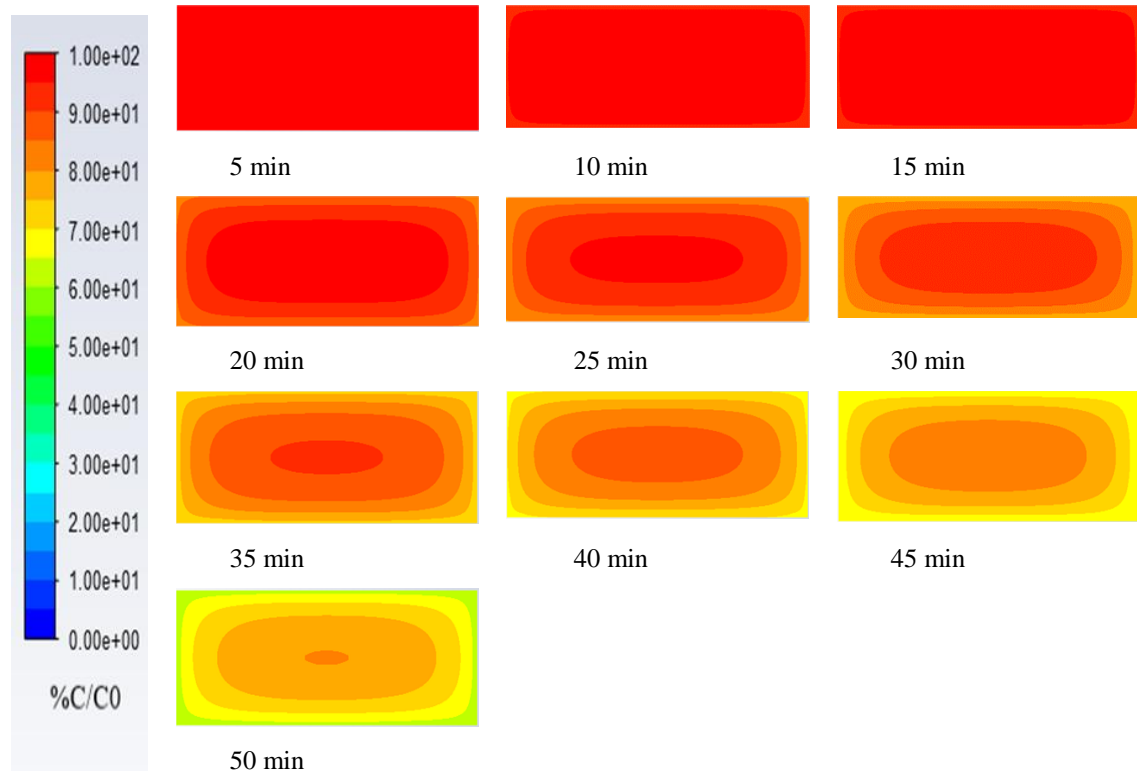


Σχήμα 55. Η % διατήρηση της θειαμίνης C<sub>121.11°C</sub><sup>10°C</sup> για την περίπτωση 3



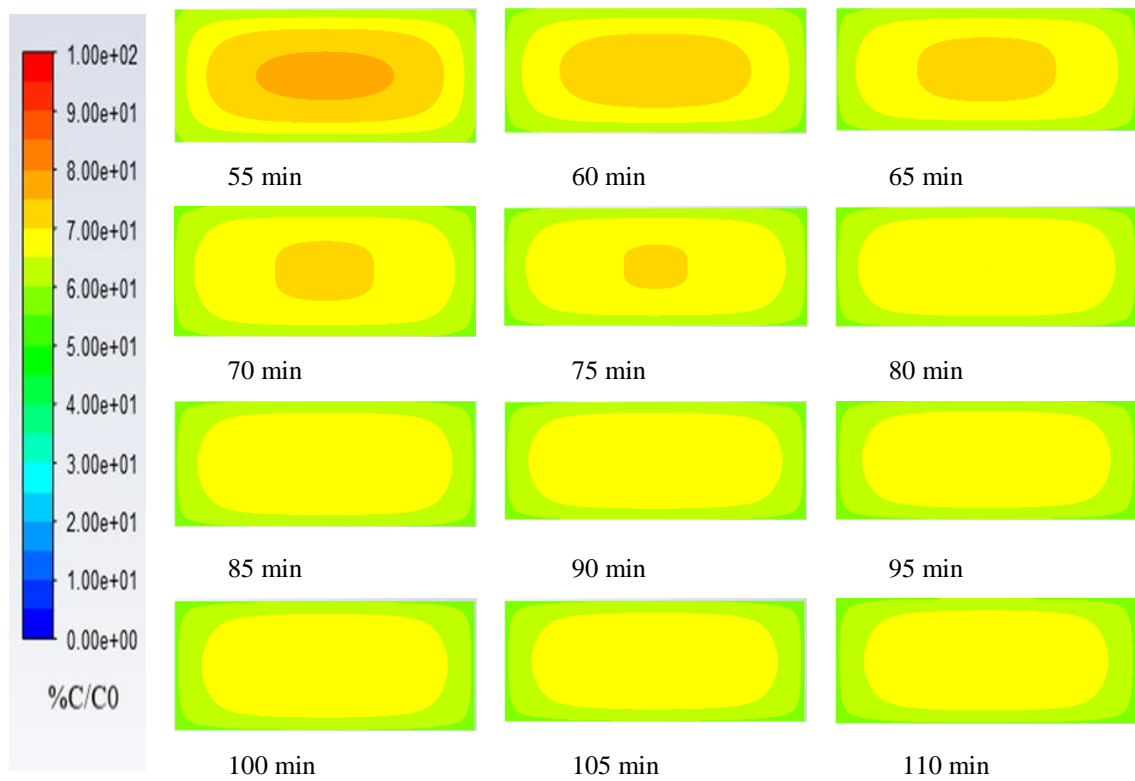
Σχήμα 56. Η % διατήρηση της θειαμίνης  $C_{121.11}^{10^{\circ}C}$  για την περίπτωση 4

**Κλίμακα ΘΕΡΜΑΝΣΗ**



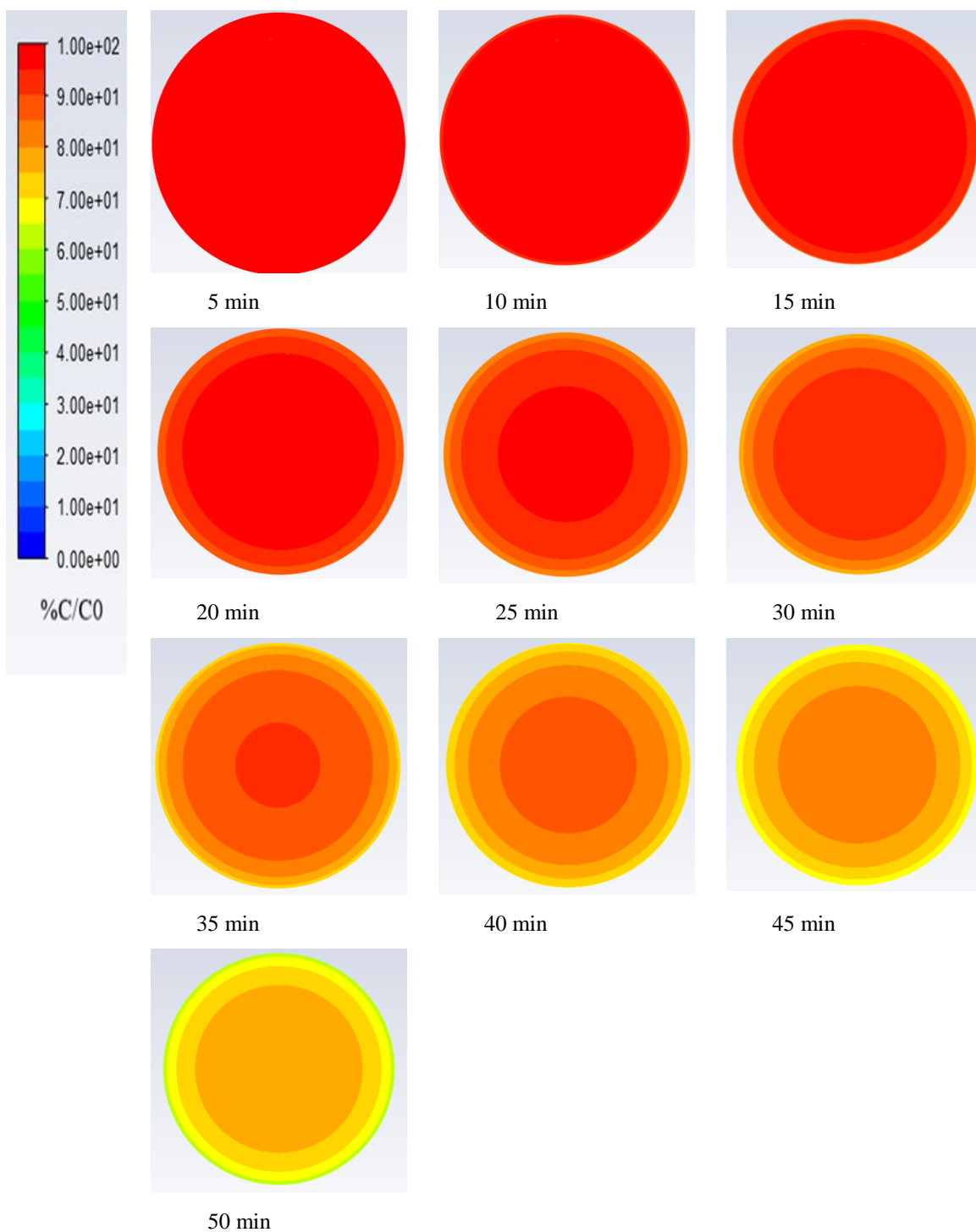
Σχήμα 57 . Εξέλιξη της κατανομής % διατήρηση της θειαμίνης  $C_{121.11}^{10^{\circ}C}$  κατά τη θέρμανση για σενάριο 1 με κάθετη τομή

## Κλίμακα. ΨΥΞΗ



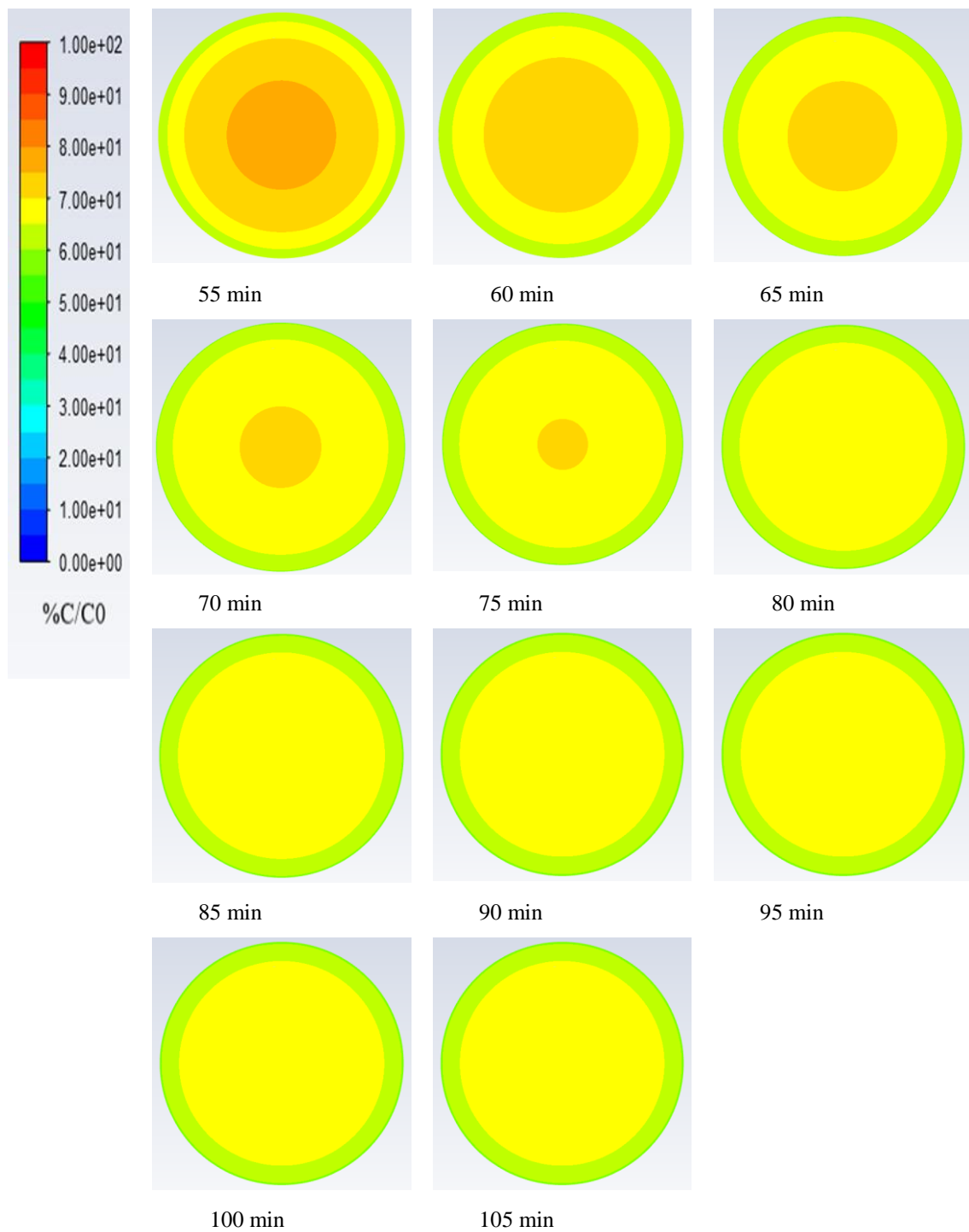
Σχήμα 58. Εξέλιξη της κατανομής % διατήρησης της θειαμίνης C<sub>121.11°C</sub><sup>10°C</sup> κατά τη ψύξη για σενάριο 1 με κάθετη τομή

**Κλίμακα ΘΕΡΜΑΝΣΗ**



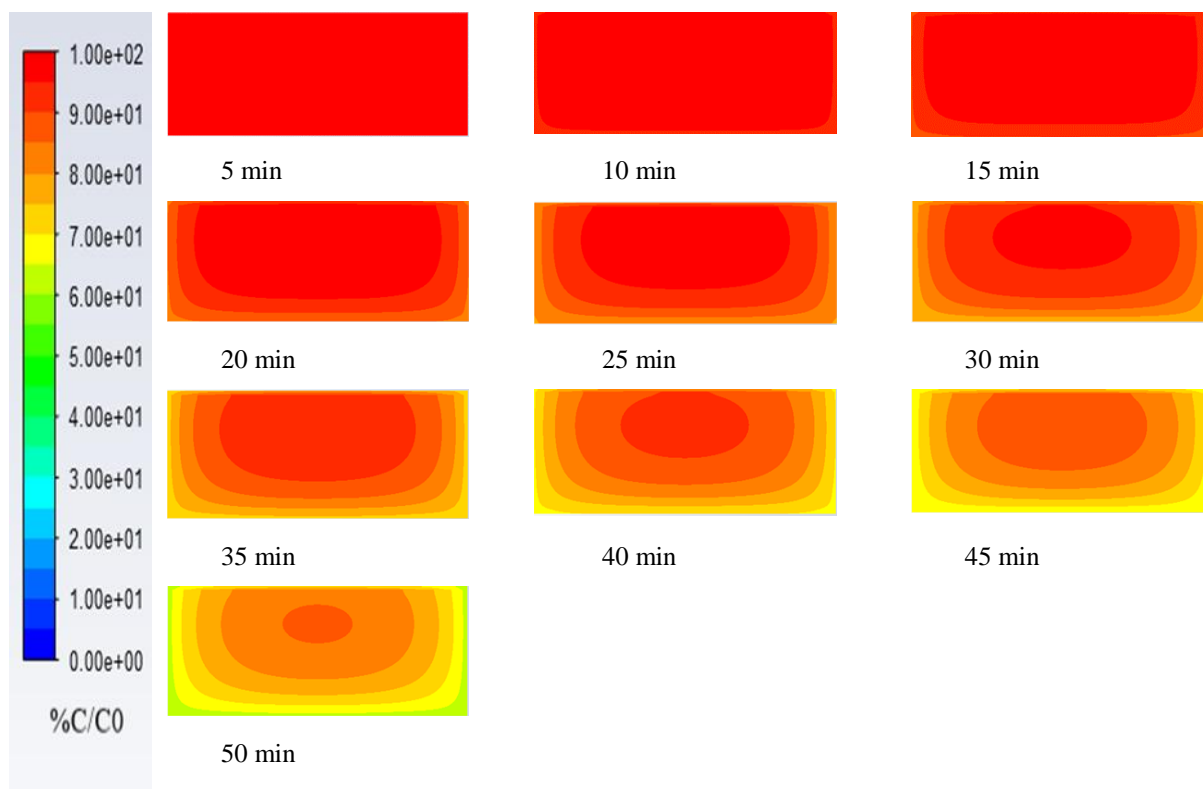
Σχήμα 59. Εξέλιξη της κατανομής % διατήρησης της θειαμίνης  $C_{121.11}^{10^{\circ}C}$  κατά τη θέρμανση για σενάριο 1 με οριζόντια τομή

## Κλίμακα ΨΥΞΗ



Σχήμα 60. Εξέλιξη της κατανομής % διατήρηση της θειαμίνης  $C_{121.11^{\circ}C}^{10^{\circ}C}$  κατά τη ψύξη για σενάριο 1 με οριζόντια τομή

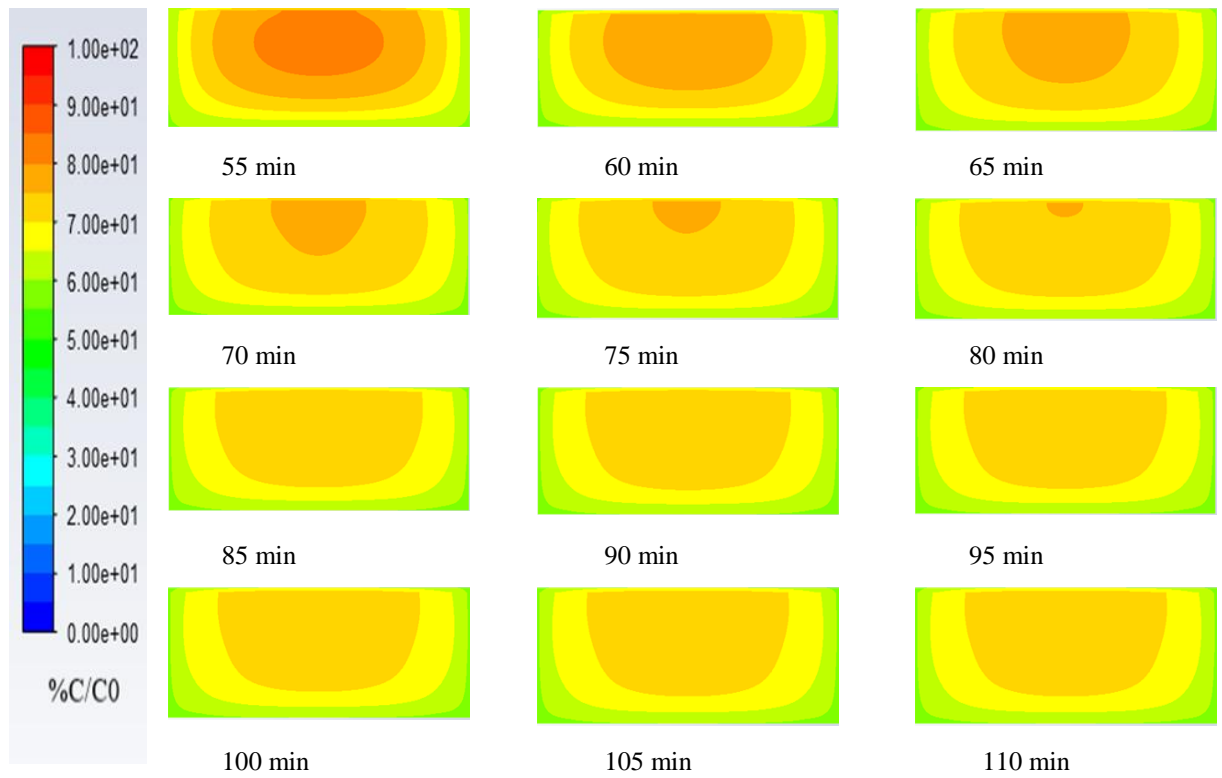
## Κλίμακα ΘΕΡΜΑΝΣΗ



Σχήμα 61. Εξέλιξη της κατανομής % διατήρησης της θειαμίνης  $C_{121.11}^{10^{\circ}C}$  κατά τη θέρμανση για σενάριο 2 με κάθετη τομή

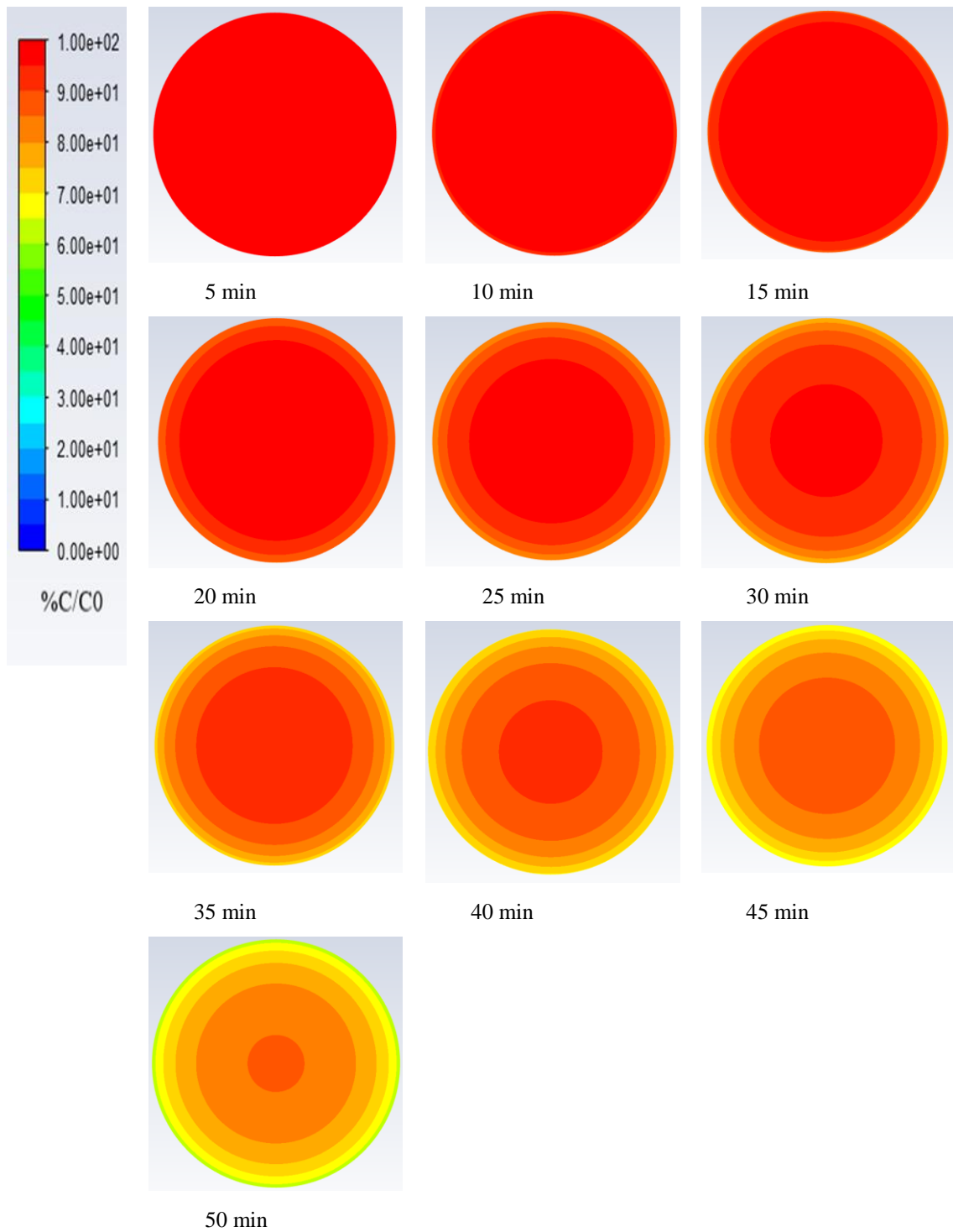


## Κλίμακα ΨΥΞΗ



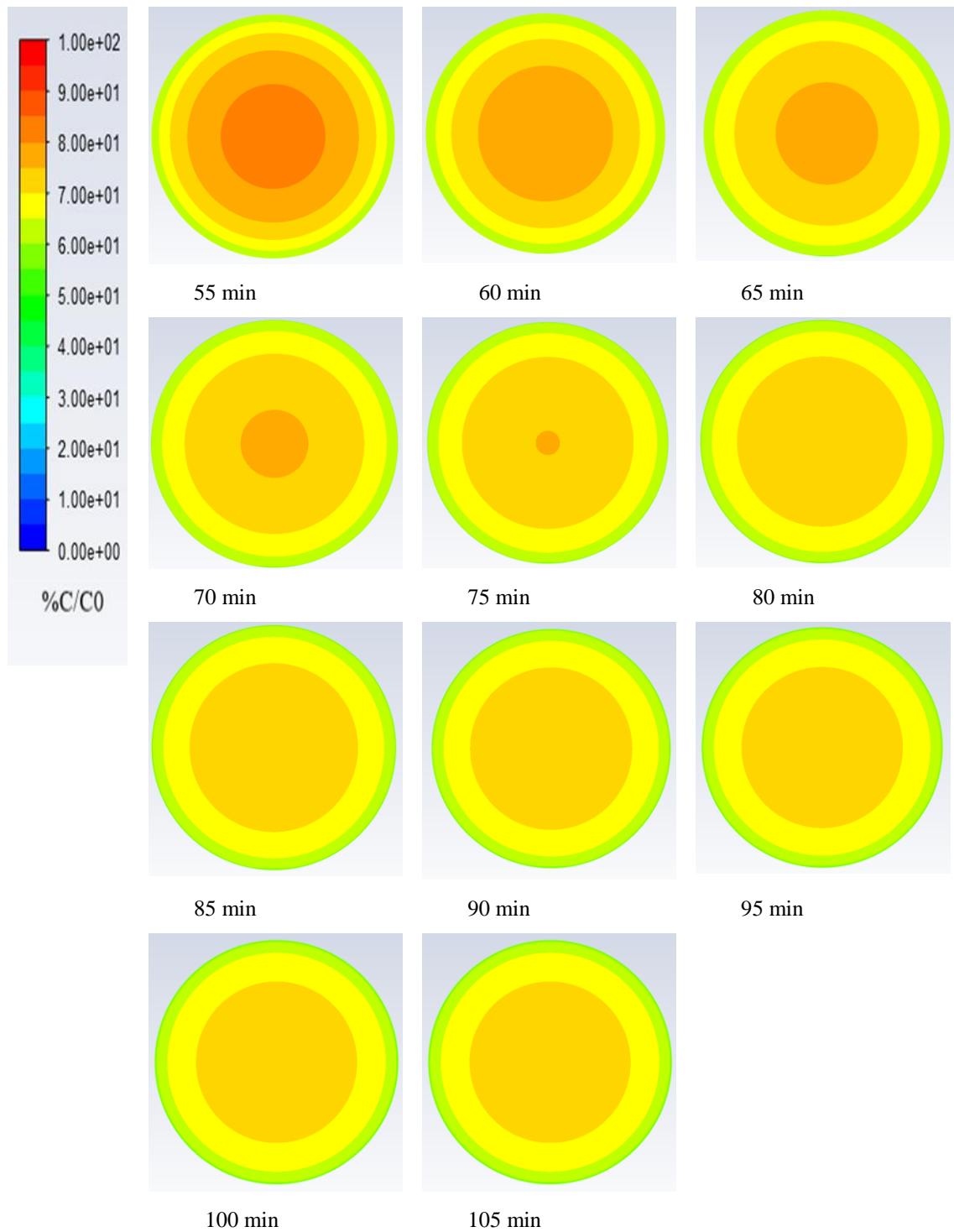
Σχήμα 62. Εξέλιξη της κατανομής % διατήρησης της θειαμίνης  $C_{121.11}^{10^{\circ}\text{C}}$  κατά τη ψύξη για σενάριο 2 με κάθετη τομή

**Κλίμακα. ΘΕΡΜΑΝΣΗ**



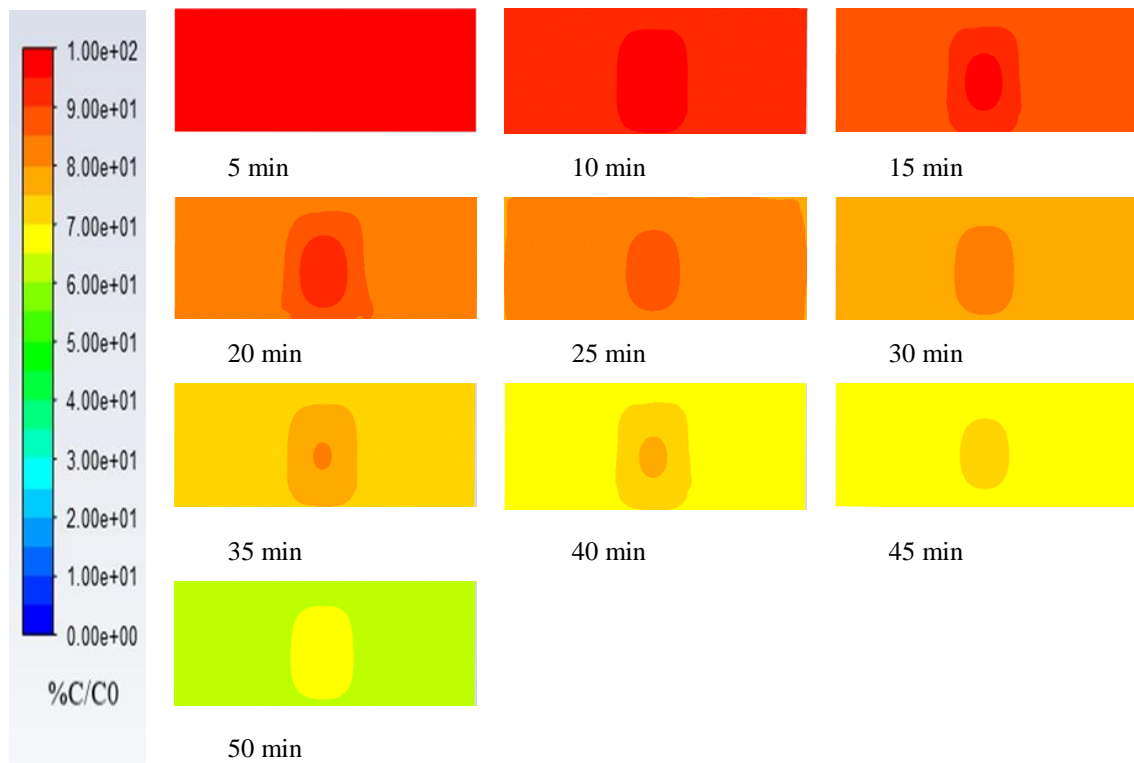
Σχήμα 63. Εξέλιξη της κατανομής % διατήρησης της θειαμίνης  $C_{121.11^{\circ}C}^{10^{\circ}C}$  κατά τη θέρμανση για σενάριο 2 με οριζόντια τομή

**Κλίμακα ΨΥΞΗ**



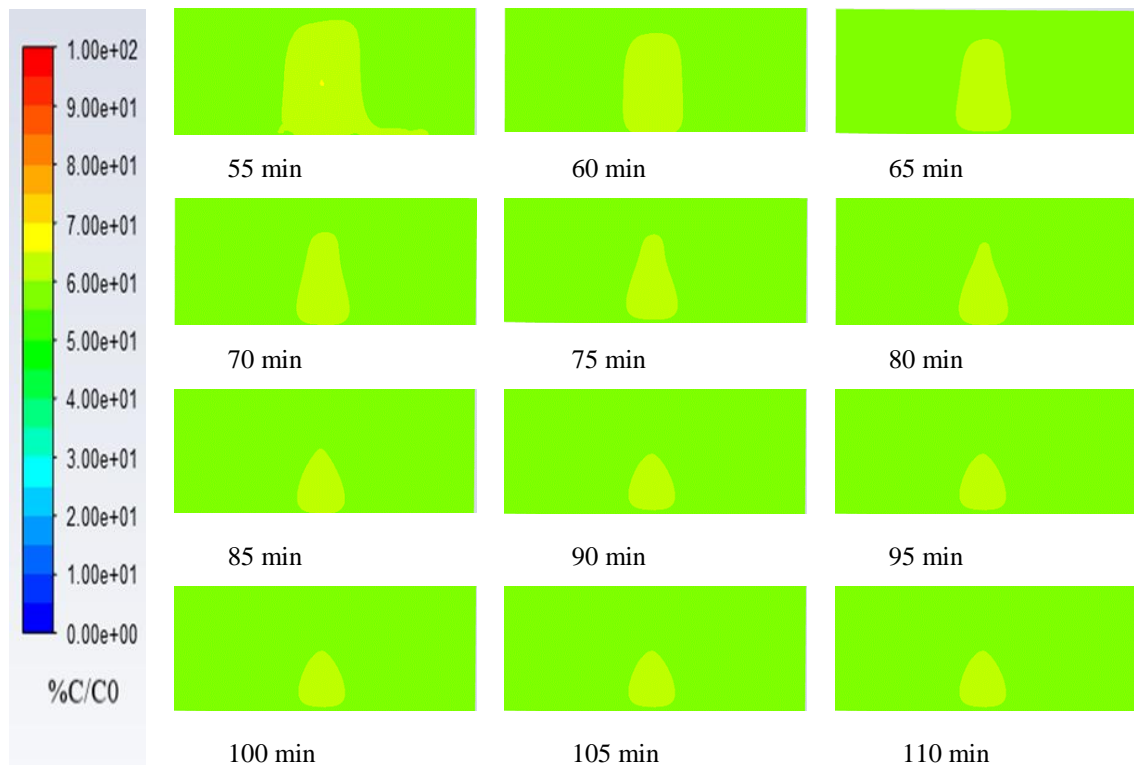
Σχήμα 64. Εξέλιξη της κατανομής % διατήρησης της θειαμίνης  $C_{121.11^{\circ}C}^{10^{\circ}C}$  κατά τη ψύξη για σενάριο 2 με οριζόντια τομή

## Κλίμακα. ΘΕΡΜΑΝΣΗ



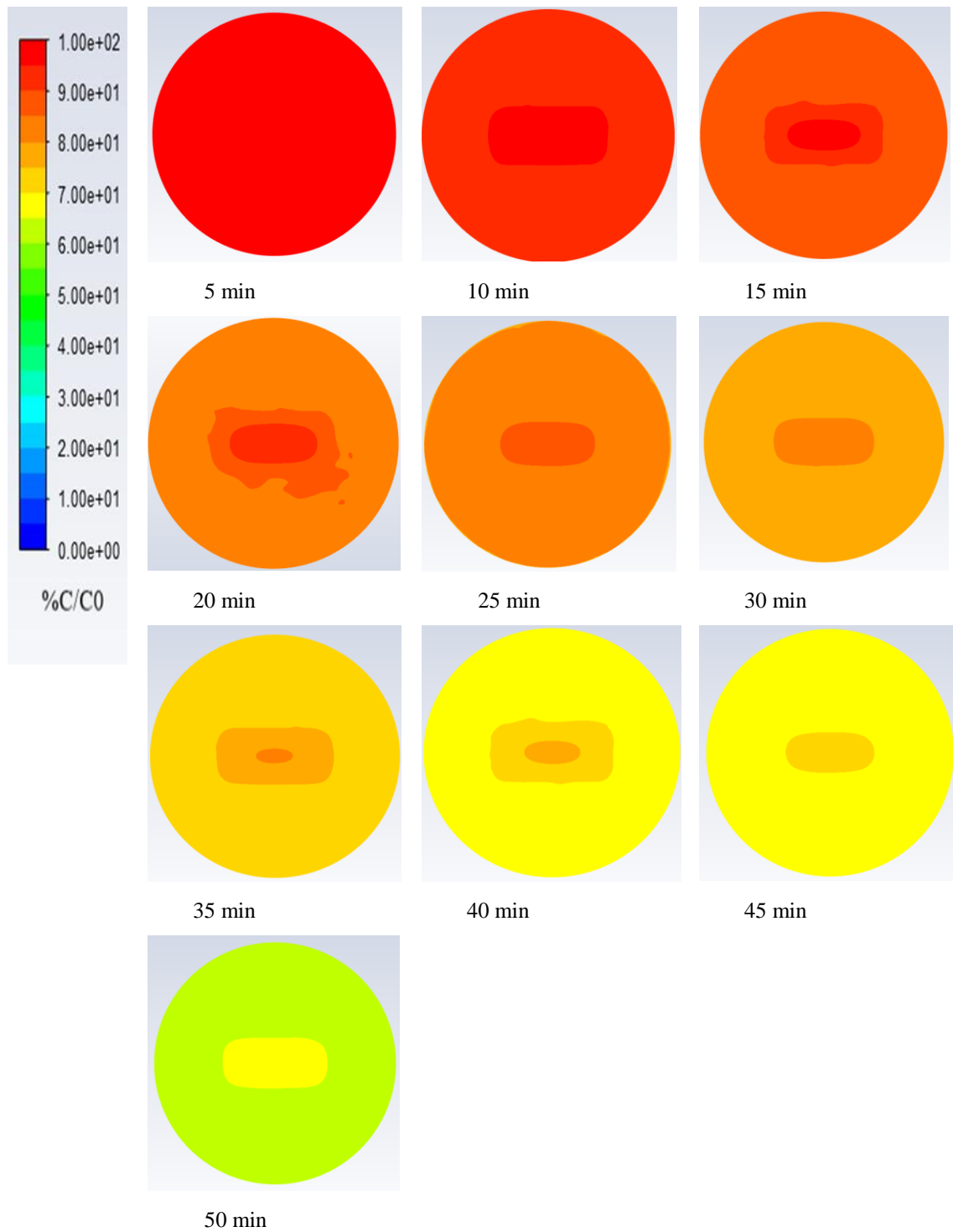
Σχήμα 65. Εξέλιξη της κατανομής % διατήρηση της θειαμίνης  $C_{121.11^{\circ}C}^{10^{\circ}C}$  κατά τη θέρμανση για σενάριο 3 με κάθετη τομή

## Κλίμακα ΨΥΞΗ



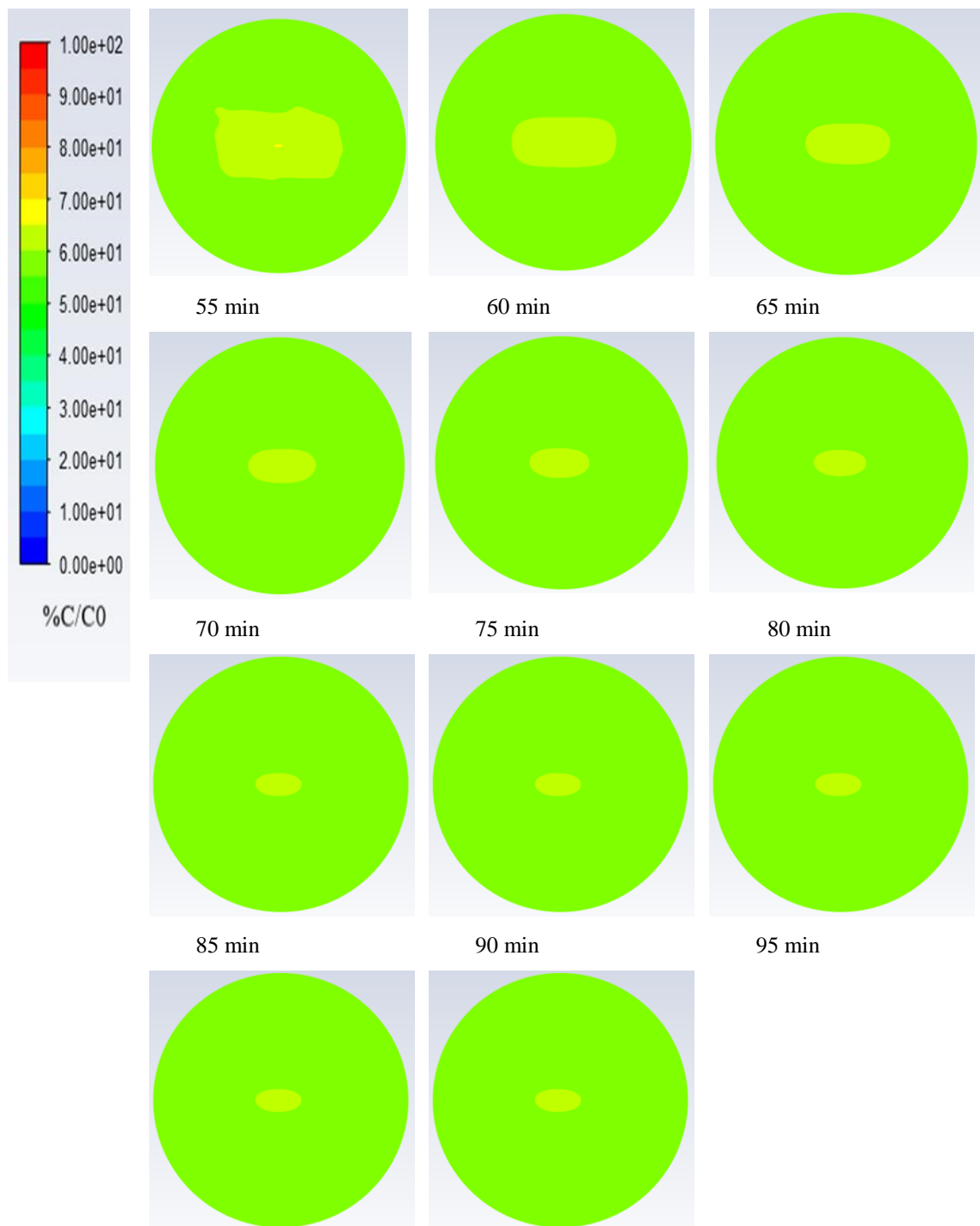
Σχήμα 66. Εξέλιξη της κατανομής % διατήρησης της θειαμίνης  $C_{121.11^{\circ}C}^{10^{\circ}C}$  κατά τη ψύξη για σενάριο 2 με κάθετη τομή

**Κλίμακα ΘΕΡΜΑΝΣΗ**



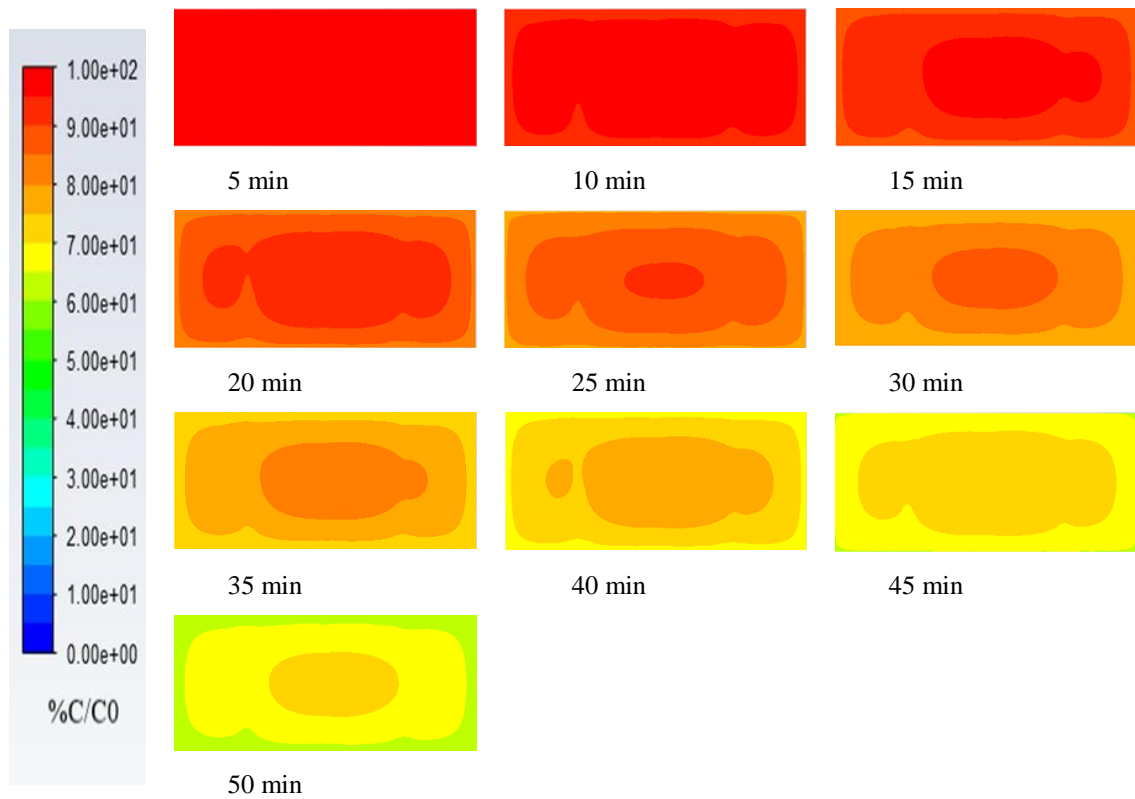
Σχήμα 67. Εξέλιξη της κατανομής % διατήρηση της θειαμίνης  $C_{121.11}^{10^{\circ}C}$  κατά τη θέρμανση για σενάριο 3 με οριζόντια τομή

## Κλίμακα ΨΥΞΗ



Σχήμα 68. Εξέλιξη της κατανομής % διατήρησης της θειαμίνης  $C_{121.11^{\circ}C}^{10^{\circ}C}$  κατά τη ψύξη για σενάριο 3 με οριζόντια τομή

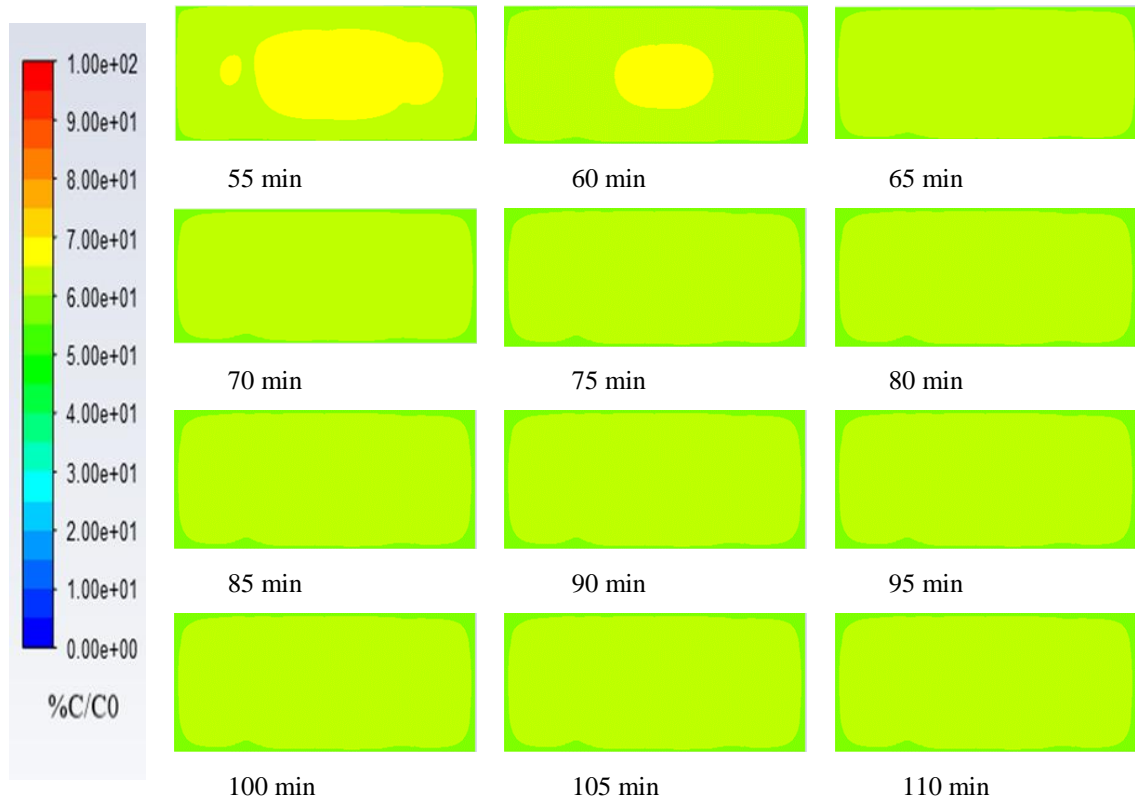
## Κλίμακα ΘΕΡΜΑΝΣΗ



Σχήμα 69. Εξέλιξη της κατανομής % διατήρησης της θειαμίνης  $C_{121.11}^{10^{\circ}C}$  κατά τη θέρμανση για σενάριο 4 με κάθετη τομή

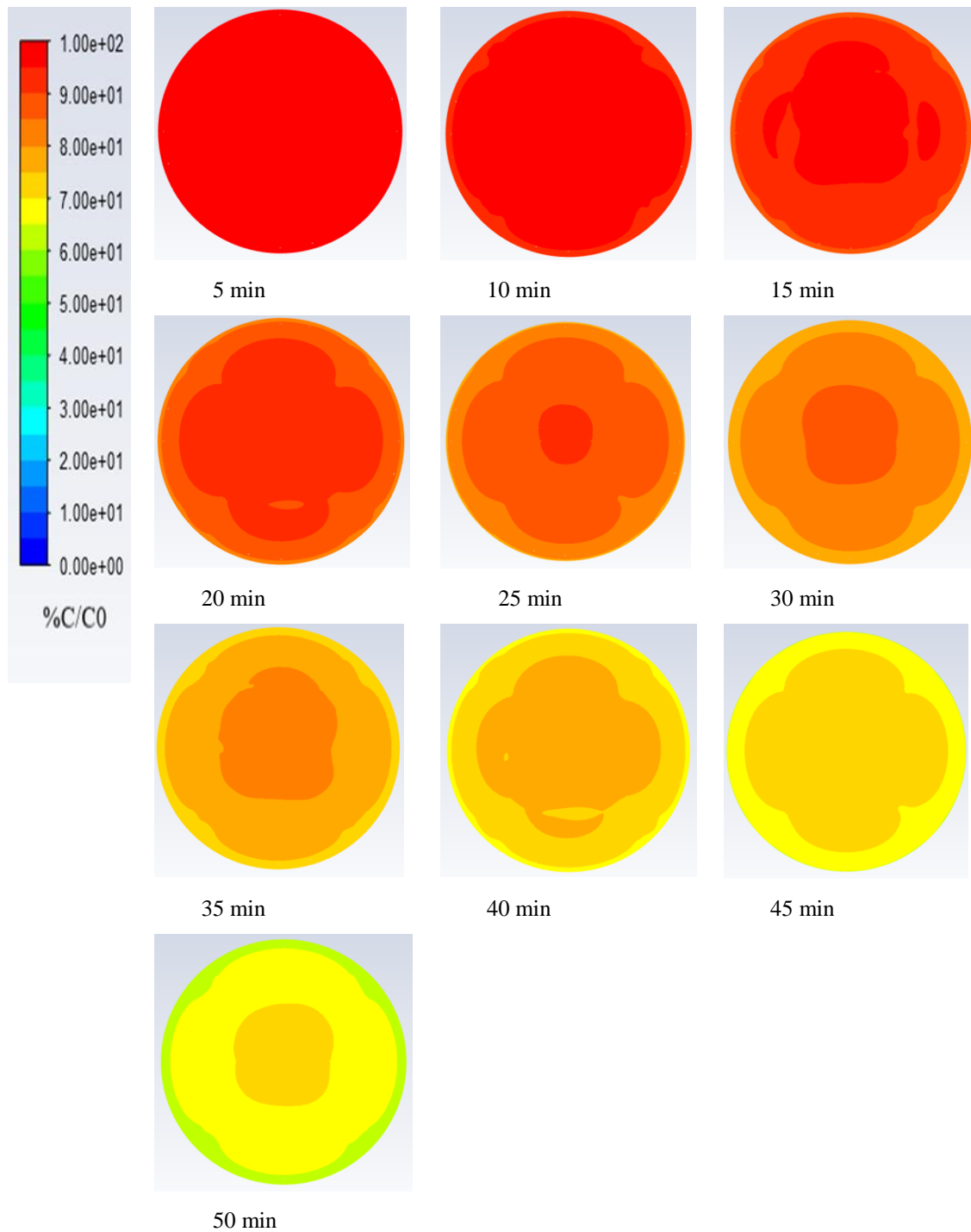


## Κλίμακα ΨΥΞΗ



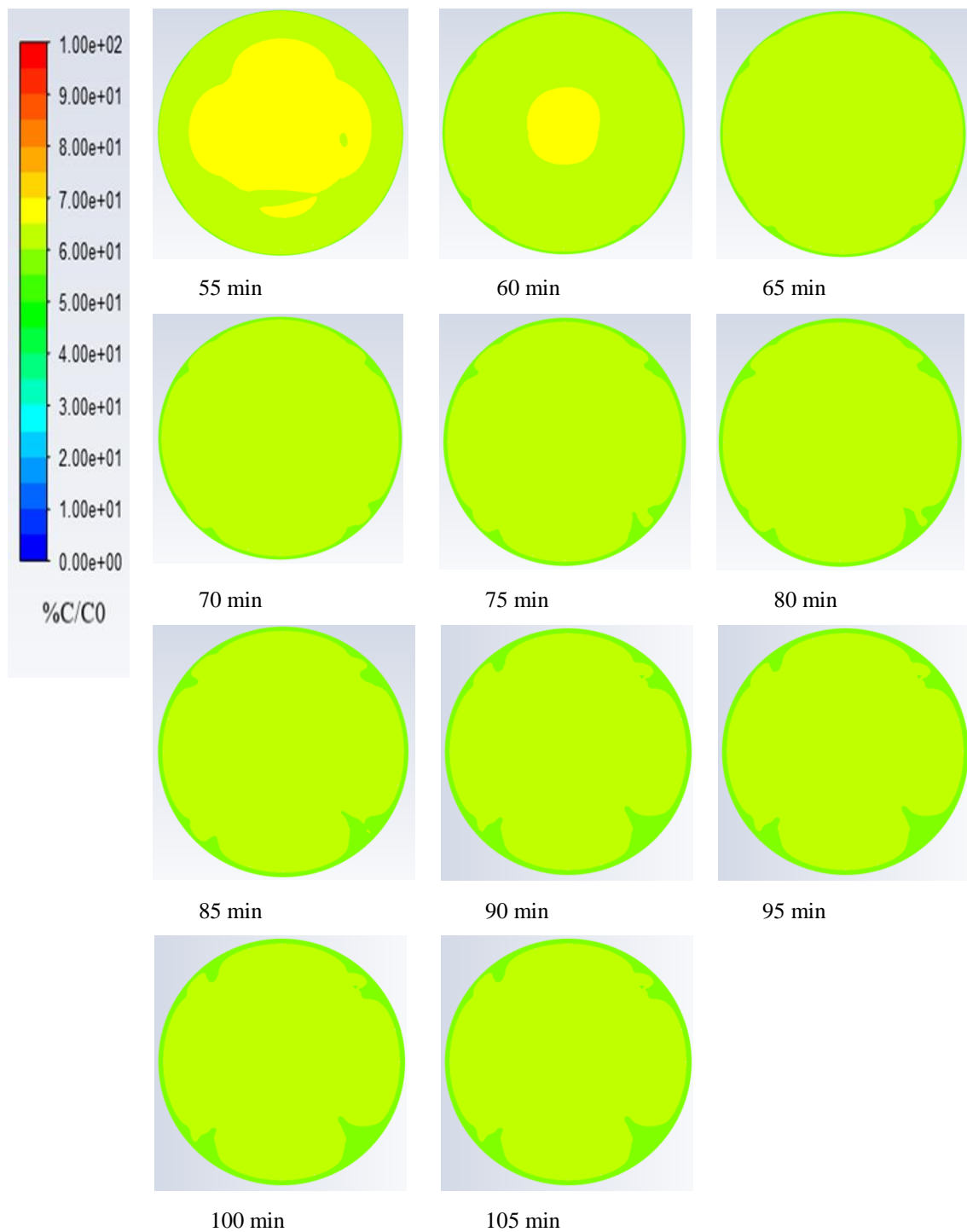
Σχήμα 70. Εξέλιξη της κατανομής % διατήρησης της θειαμίνης  $C_{121.11^{\circ}C}^{10^{\circ}C}$  κατά τη ψύξη για σενάριο 4 με κάθετη τομή

**Κλίμακα ΘΕΡΜΑΝΣΗ**



Σχήμα 71. Εξέλιξη της κατανομής % διατήρησης της θειαμίνης  $C_{121.11}^{10^{\circ}C}$  κατά τη θέρμανση για σενάριο 4 με οριζόντια τομή

## Κλίμακα ΨΥΞΗ



Σχήμα 72. Εξέλιξη της κατανομής % διατήρησης της θειαμίνης  $C_{121.11}^{10^{\circ}C}$  κατά τη ψύξη για σενάριο 4 με οριζόντια τομή

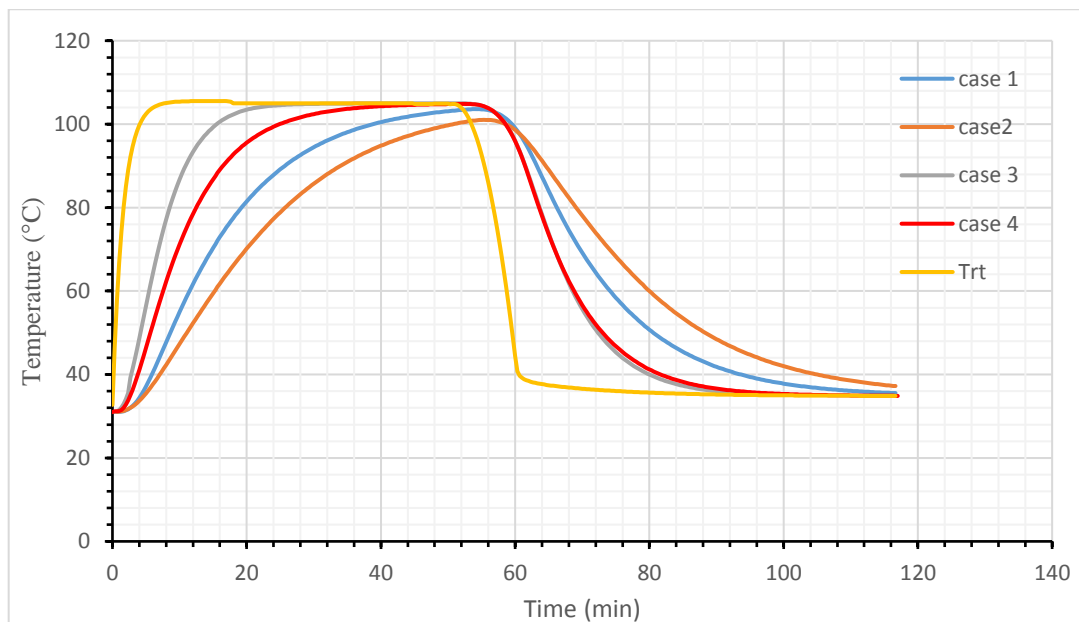
## 4.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων

### 4.4.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων αριθμητικής επίλυσης στο κρίσιμο σημείο

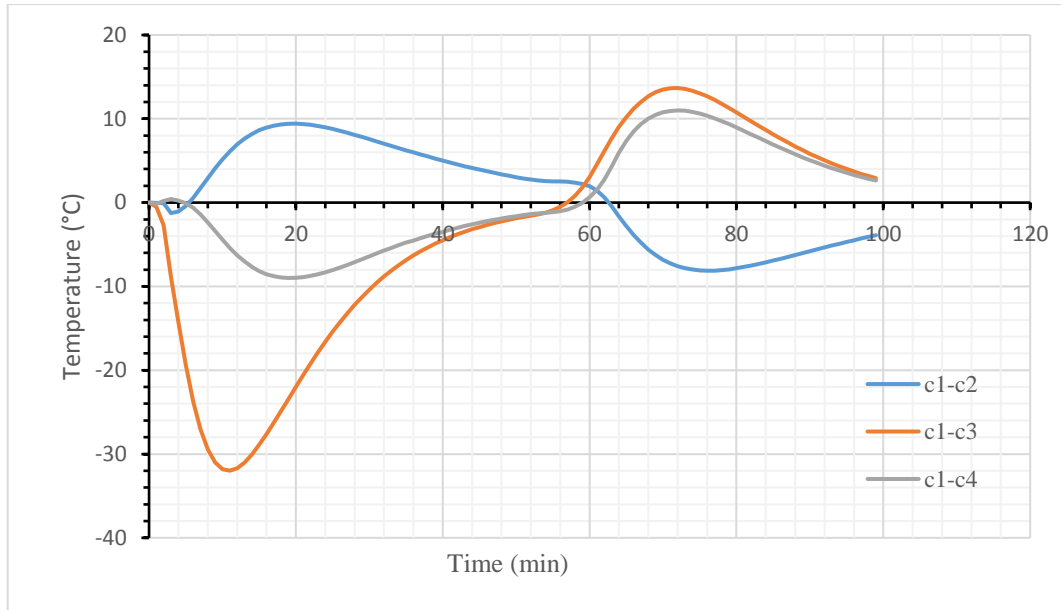
Στο Σχήμα 73 παρουσιάζεται η θερμοκρασιακή εξέλιξη κατά τη διεργασία για τις τέσσερις περιπτώσεις στο κρίσιμο σημείο για δεδομένη θερμοκρασία περιβάλλοντος ( $T_{RT}$ ). Στα Σχήματα 74 έως 77 δίνεται η διαφορά θερμοκρασίας στο κρίσιμο σημείο μεταξύ των περιπτώσεων. Από τα σχήματα για κάθε σενάριο παρατηρείται ότι:

- Η δεύτερη περίπτωση παρουσιάζει την μικρότερη αύξηση της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της θέρμανσης και τη μικρότερη μείωση κατά τη διάρκεια της ψύξης. Ακόμα παρατηρείται η μεγαλύτερη υστέρηση κατά τη διάρκεια της ψύξης καθώς και της θέρμανσης με χρονική διάρκεια έξι λεπτών και δύο λεπτών αντίστοιχα, ενώ η μεγαλύτερη θερμοκρασία που επιτυγχάνεται κατά τη διάρκεια της διεργασίας είναι οι 101 °C στα 56 min κατά τη διάρκεια της ψύξης. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται από την επίδραση της ύπαρξης κενού που φαίνεται να λειτουργεί ως θερμομονωτικό. Η περίπτωση που πλησιάζει περισσότερο στα αποτελέσματα της δεύτερης περίπτωσης είναι του πρώτου σεναρίου με μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ τους 9,4 °C στο εικοστό λεπτό της διεργασίας
- Η πρώτη περίπτωση κατέχει τη δεύτερη μικρότερη αύξηση της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της θέρμανσης και τη δεύτερη μικρότερη μείωση κατά τη διάρκεια της ψύξης. Η υψηλότερη θερμοκρασία που φτάνει το πρώτο σενάριο κατά τη διάρκεια της διεργασίας είναι οι 103 °C στα 54.33 min κατά τη διάρκεια της ψύξης. Το σενάριο που πλησιάζει περισσότερο στα αποτελέσματα της πρώτης περίπτωσης είναι του τέταρτου σεναρίου, με μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ τους 9 °C στο δέκατο ένατο λεπτό της διεργασίας.
- Η τέταρτη περίπτωση κατέχει τη τρίτη μικρότερη αύξηση της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της θέρμανσης και τη τρίτη μικρότερη μείωση κατά τη διάρκεια της ψύξης. Αντίθετα με το πρώτο και δεύτερο σενάριο, η τέταρτη περίπτωση φτάνει τους 104 °C, θερμοκρασία πολύ κοντά στη θερμοκρασία περιβάλλοντος ( $T_{RT}$ ) στα 39,16 min και παραμένει μεταξύ 104-105°C έως τα 56 min, η μεγαλύτερη θερμοκρασία κατά τη διεργασία επιτυγχάνεται στα 53 min κατά τη διάρκεια της ψύξης ίση με 104.81 °C. Το σενάριο πιο κοντά στο τέταρτο σενάριο είναι το πρώτο για τα πρώτα είκοσι τέσσερα λεπτά της διεργασίας, μετά φαίνεται να ταυτίζεται με το τρίτο σενάριο ιδιαίτερα από τα 40 έως 57 λεπτά.

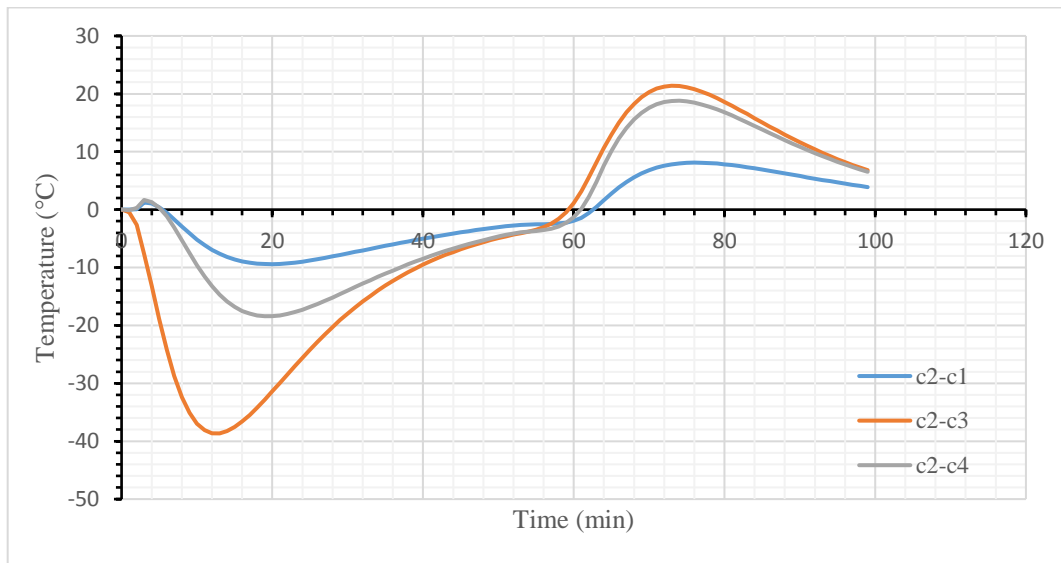
- Το τρίτο σενάριο παρουσιάζει τις μεγαλύτερες θερμοκρασιακές μεταβολές τόσο κατά τη διάρκεια της θέρμανσης όσο και της ψύξης. Αυτό εξηγείται λόγω του μικρότερου όγκου στερεού υλικού σε σχέση με τις άλλες περιπτώσεις. Η θερμοκρασία στο κρίσιμο σημείο φτάνει τους 104 °C στα 21.66 min και παραμένει μεταξύ 104-105°C έως τα 55 min. Η υψηλότερη θερμοκρασία που φτάνει κατά τη διάρκεια της διεργασίας είναι οι 104.97 °C από τα 49 min έως τα 50.66 min, έχοντας τη μικρότερη υστέρηση, κατά τη διάρκεια της ψύξης και της θέρμανσης, με χρονική διάρκεια 0,86 min. Η περίπτωση που πλησιάζει περισσότερο στα αποτελέσματα του τρίτου σεναρίου είναι του τέταρτου σεναρίου με μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ τους 27,3 °C στο δέκατο λεπτό της διεργασίας.



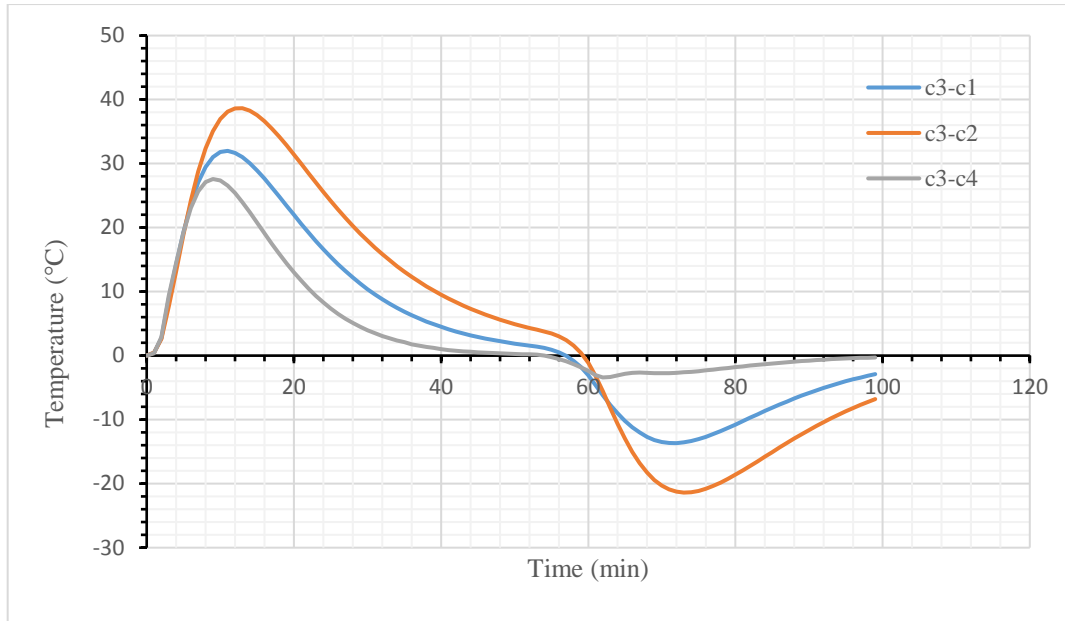
Σχήμα 73. θερμοκρασιακή εξέλιξη κατά την διεργασία στο κρίσιμο σημείο για τις τέσσερις περιπτώσεις και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος



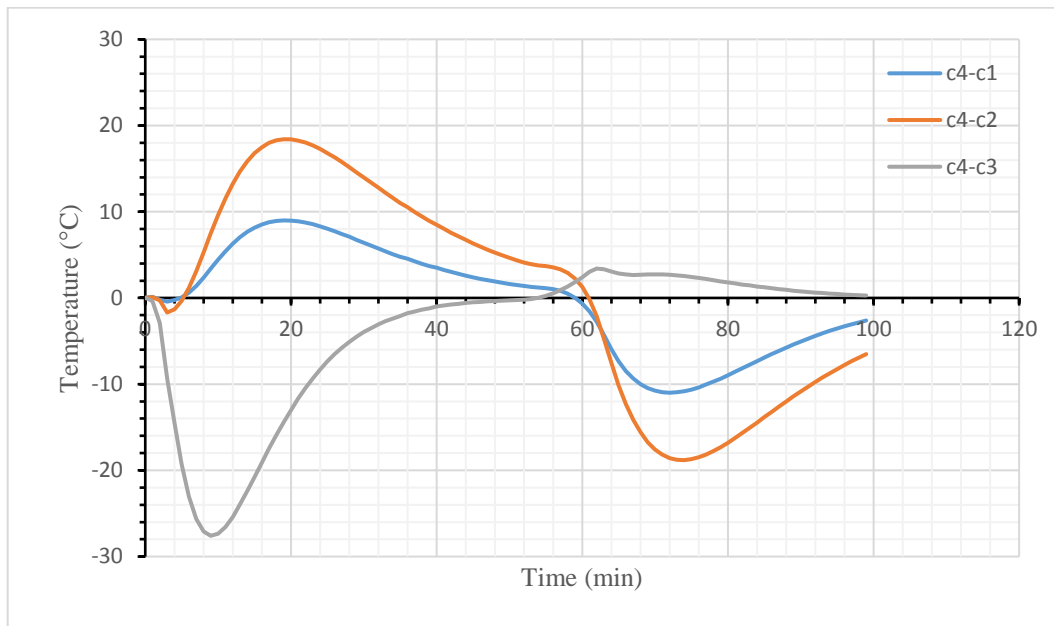
Σχήμα 74. Διαφορά θερμοκρασίας στο κρίσιμο σημείο μεταξύ της πρώτης περίπτωσης (c1) με τις άλλες περιπτώσεις (c2, c3 και c4)



Σχήμα 75. Διαφορά θερμοκρασίας στο κρίσιμο σημείο μεταξύ της δεύτερης περίπτωσης (c2) με τις άλλες περιπτώσεις (c1, c3 και c4)



Σχήμα 76. Διαφορά θερμοκρασίας στο κρίσιμο σημείο μεταξύ της τρίτης περίπτωσης (c3) με τις άλλες περιπτώσεις (c1, c3 και c4)



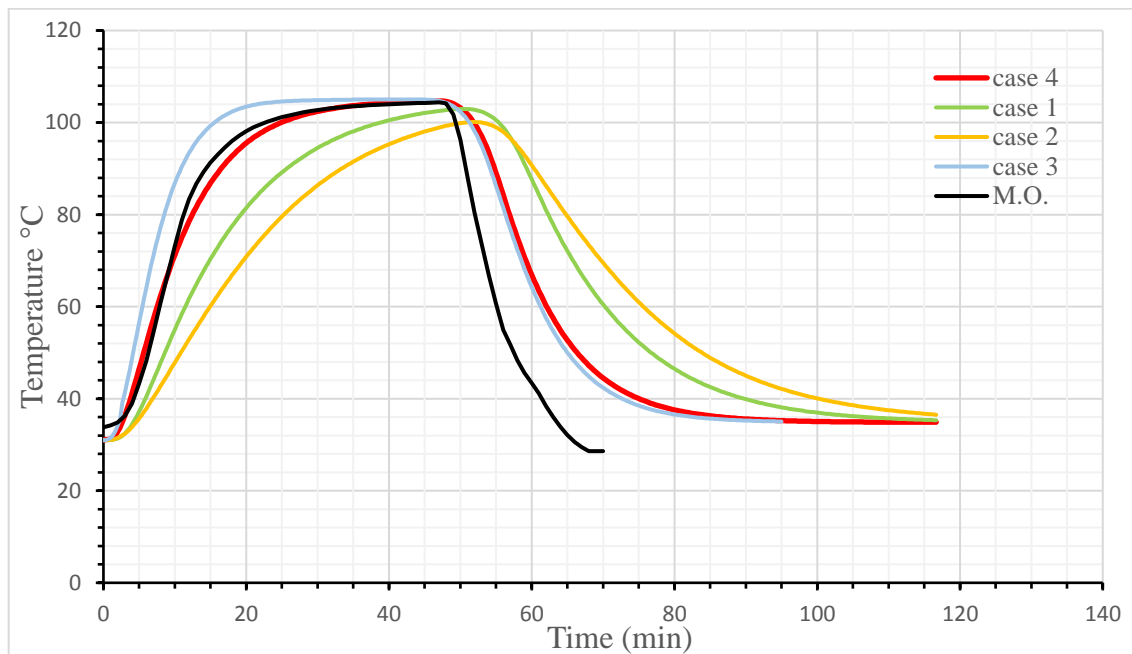
Σχήμα 77. Διαφορά θερμοκρασίας στο κρίσιμο σημείο μεταξύ της τέταρτης περίπτωσης (c4) με τις άλλες περιπτώσεις (c1, c3 και c4)

#### 4.4.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων αριθμητικής επίλυσης με πειραματικά δεδομένα

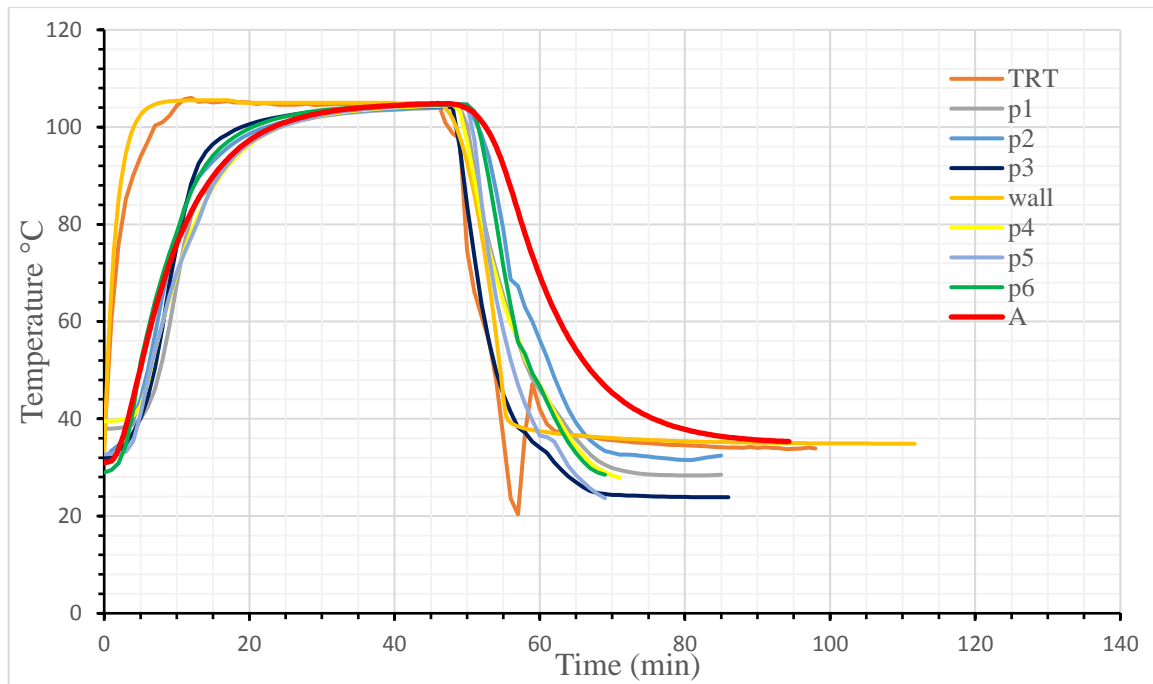
Η σύγκριση της αριθμητικής επίλυσης με τα πειραματικά δεδομένα, πραγματοποιήθηκε με τη τέταρτη περίπτωση αφού είναι η μόνη γεωμετρία που προσομοιάζει την πραγματικότητα ενώ όπως είναι αναμενόμενο τα αποτελέσματα της συγκλίνουν περισσότερο με τα πειραματικά δεδομένα (Σχήμα 78). Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, για την τέταρτη περίπτωση το σημείο όπου συλλέχθηκαν τα πειραματικά δεδομένα, διαφέρει από το κρίσιμο σημείο της περίπτωσης, όπως υπολογίσθηκε από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Για το λόγο αυτό η σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα πραγματοποιήθηκε με το σημείο συλλογής των πειραματικών δεδομένων (σημείο A Εικόνες 38-39) και όχι με το κρίσιμο σημείο. Για τις ανάγκες της σύγκρισης η τέταρτη περίπτωση υπολογίσθηκε ξανά βάση της θερμικής διεργασίας που ακολουθείται από τη βιομηχανία για το συγκεκριμένο μέγεθος κονσέρβας όπου η θέρμανση πραγματοποιείται στους 105°C για 46 λεπτά. Στο Σχήμα 79 παρουσιάζεται το θερμοκρασιακό προφίλ της τέταρτης περίπτωσης και των πειραματικών δεδομένων (p1,p2,p3,p4,p5,p6). Στο Σχήμα 80 συγκρίνεται η θερμοκρασιακή εξέλιξη του μέσου όρου (M.O) των πειραματικών δεδομένων με τη τέταρτη περίπτωση. Στο Σχήμα 81 δίνεται η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των πειραματικών δεδομένων (p1,p2,p3,p4,p5,p6) με την τέταρτη περίπτωση, ενώ στο σχήμα 82 η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του μέσου όρου των πειραματικών δεδομένων και του τέταρτου σεναρίου. Στο Σχήμα 83 δίνεται η τιμή της F διεργασίας για  $F_{105.11^{\circ}\text{C}}^{10^{\circ}\text{C}}$  του μέσου όρου των πειραματικών δεδομένων και του τέταρτου σεναρίου. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι η προσομοίωση περιγράφει ικανοποιητικά τη θερμική διεργασία του προϊόντος. Λόγω των μεγάλων θερμοκρασιακών διαφορών που παρουσιάζουν τα πειραματικά δεδομένα μεταξύ τους, όπως παρατηρείται από τα Σχήματα 78 και 81, είναι δύσκολο να εξαχθούν ασφαλή ακριβή συμπεράσματα κατά τη σύγκριση των δεδομένων, πέρα ότι η προσομοίωση δείχνει να ακολουθεί ικανοποιητικά τη θερμοκρασιακή εξέλιξη του σύνολο των πειραματικών δεδομένων κατά τη θέρμανση του προϊόντος. Όπως φαίνεται από τα Σχήματα 80 και 82 η θερμική εξέλιξη του μέσου όρου των πειραματικών δεδομένων ταυτίζεται με την θερμική εξέλιξη που προκύπτει από την προσομοίωση, με μεγαλύτερη θερμοκρασιακή διαφορά τους 15,3°C στο δωδέκατο λεπτό. Παρατηρείται μικρή θερμοκρασιακή απόκλιση κατά την υστέρηση στην αρχή της θερμικής διεργασίας, καθώς και στην κλίση της θερμοκρασιακής εξέλιξης κατά τη περίοδο του CUT που ίσως εξηγείται από την διαφορετική αρχική θερμοκρασία του προϊόντος (T<sub>IT</sub>). Αντίθετα κατά την περίοδο ψύξης παρατηρούνται μεγάλες



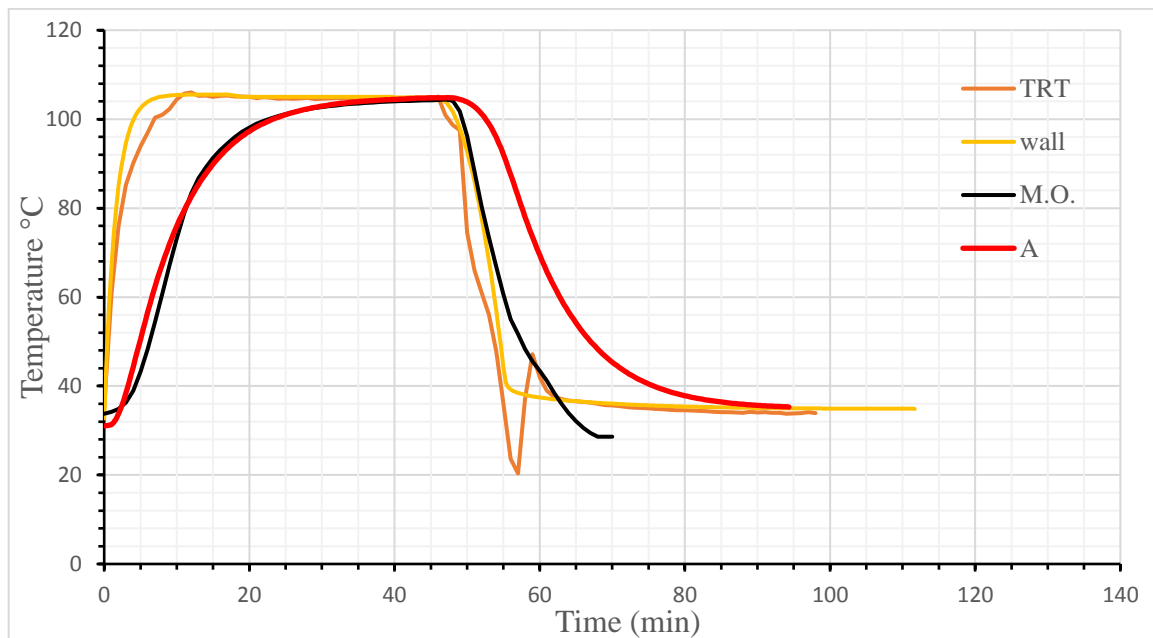
θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ των πειραματικών δεδομένων και της προσομοίωσης, όπου η διαφορά του μέσου όρου των πειραματικών δεδομένων και της προσομοίωσης φτάνει μέχρι τους 43,5°C. Η θερμοκρασιακή εξέλιξη του σεναρίου, κατά την ψύξη, δεν προσομοιάζει την θερμοκρασιακή εξέλιξη των πειραματικών δεδομένων, τα οποία παρουσιάζουν όπως παρατηρείται και στα Σχήματα 79 και 80 πολύ πιο απότομη κλίση. Η υστέρηση κατά την ψύξη των πειραματικών δεδομένων είναι πολύ μικρότερη, όχι μόνο από την αντίστοιχη του σεναρίου, αλλά και από την υστέρηση που παρουσίασαν κατά τη θέρμανση τους. Η εξέλιξη της τιμής της F διεργασίας για  $F_{105.11^{\circ}\text{C}}^{10^{\circ}\text{C}}$ , όπως φαίνεται και στο Σχήμα 83, του μέσου όρου των πειραματικών δεδομένων και του τέταρτου σεναρίου, ταυτίζεται σε ικανοποιητικό βαθμό, με τελικές τιμές 21.41 και 20,92 λεπτά αντίστοιχα.



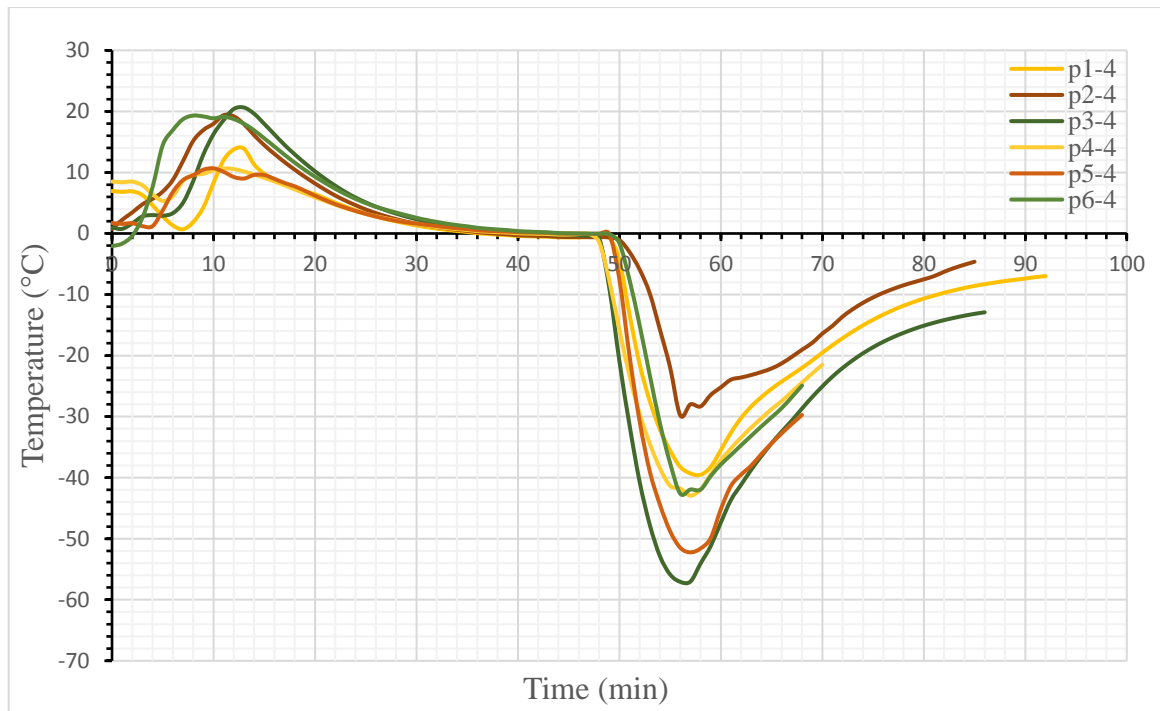
Σχήμα 78.θερμοκρασιακό προφίλ των τεσσάρων περιπτώσεων στο κρίσιμο σημείο και μέσο όρο πειραματικών δεδομένων



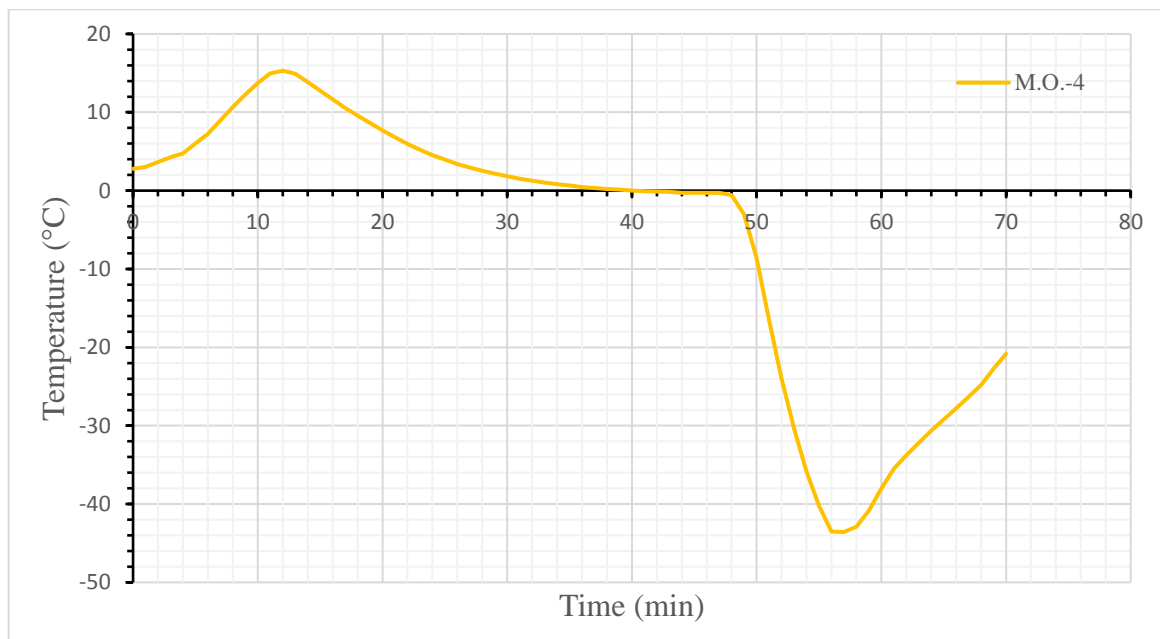
Σχήμα 79.Θερμοκρασιακό προφίλ της τέταρτης περίπτωσης και των πειραματικών δεδομένων στο σημείο συλλογής πειραματικών δεδομένων και θερμοκρασίας περιβάλλοντος πειραματικών δεδομένων (TRT) και προσομοίωσης (wall)



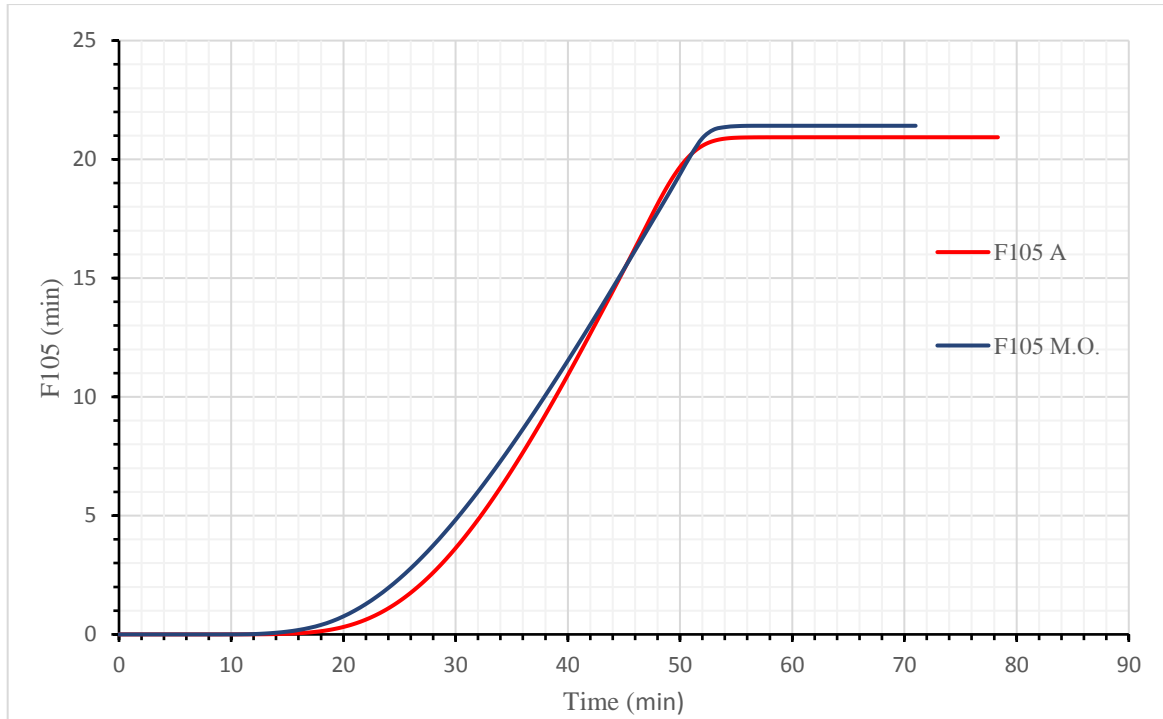
Σχήμα 80.Θερμοκρασιακό προφίλ της τέταρτης περίπτωσης(A), μέσω ορου των πειραματικών δεδομένων (M.O.) και θερμοκρασίας περιβάλλοντος πειραματικών δεδομένων (TRT) και προσομοίωσης (wall).



Σχήμα 81. Διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των πειραματικών δεδομένων (p1) με την τέταρτη περίπτωση στο σημείο συλλογής πειραματικών δεδομένων.



Σχήμα 82. Διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του μέσου όρου πειραματικών δεδομένων (M.O) με την τέταρτη περίπτωση στο σημείο συλλογής πειραματικών δεδομένων.



Σχήμα 83. Εξέλιξη της τιμής διεργασίας  $F$  για  $F_{105.11^{\circ}\text{C}}^{10^{\circ}\text{C}}$  του μέσου όρου πειραματικών δεδομένων (M.O), με την τέταρτη περίπτωση στο σημείο συλλογής πειραματικών δεδομένων (σημείο A).

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Σκοπός της παρούσας μελέτης ήταν η προσομοίωση της θερμικής διεργασίας που συντελείται κατά τη παραγωγή του προϊόντος ντολμαδάκια γιαλατζί σε κονσέρβα, καθώς και αξιολόγηση της προσομοίωσης, μέσω της σύγκρισής της με δεδομένα από τη διαδικασία παραγωγής. Για το σκοπό αυτό δημιουργήθηκαν διαφορετικές περιπτώσεις

1. Όλη η κονσέρβα αποτελείται από το προϊόν ομογενοποιημένο.
2. Η κονσέρβα αποτελείται από το προϊόν ομογενοποιημένο με ένα στρώμα αέρα (κενό) 0.1 cm στο πάνω μέρος του μεταλλικού περιέκτη.
3. Η κονσέρβα αποτελείται από το χυμό, ένα ντολμαδάκι στο κέντρο και ένα στρώμα αέρα (κενό) 0.1 cm στο πάνω μέρος του μεταλλικού περιέκτη.
4. Η κονσέρβα αποτελείται από το χυμό, έξι ντολμαδάκια και ένα στρώμα αέρα (κενό) 0.1 cm στο πάνω μέρος του μεταλλικού περιέκτη.

Για τις περιπτώσεις αυτές αναπτύχθηκαν αντίστοιχα υπολογιστικά μοντέλα για κάθε περίπτωση, που επιλύθηκαν βάση της ίδιας θερμικής διεργασίας και ακολούθησε η αξιολόγηση τους. Η αξιολόγηση των περιπτώσεων εξετάστηκε πρωτίστως βάση του χρονοθερμοκρασιακού προφίλ κατά τη διεργασία και δευτερευόντως της τιμής  $F$  της διεργασίας και της ποιοτικής υποβάθμισης που συντελείται. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων παρατηρήθηκε μεγάλη διαφορά στα αποτελέσματα των περιπτώσεων, όπως και ότι το κρίσιμο σημείο διαφέρει σε κάθε περίπτωση. Η δεύτερη περίπτωση δέχεται ηπιότερη κατεργασία λόγω της επίδρασης ύπαρξης κενού και της μεγάλης μάζας στερεών υλικών που αποτελείται, ενώ αντίθετα η τρίτη περίπτωση δέχεται εντονότερη κατεργασία σε σχέση με τις άλλες περιπτώσεις. Η περίπτωση που συγκλίνει περισσότερο στα πειραματικά δεδομένα αποδείχθηκε η τέταρτη, που είναι η γεωμετρία που προσομοιάζει καλύτερα την πραγματικότητα. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων της τέταρτης περίπτωσης με τα πειραματικά δεδομένα, τουλάχιστον κατά τη περίοδο της θερμικής επεξεργασίας, έδειξε ότι τα δεδομένα ταυτίζονται σε ικανοποιητικό βαθμό. Αντίθετα παρατηρήθηκε μεγάλη θερμοκρασιακή διαφορά κατά την ψύξη που δεν μπόρεσε να δικαιολογηθεί και χρήζει περαιτέρω διερεύνηση.

Ως μελλοντική έρευνα προτείνεται η εξέταση της θερμικής επεξεργασίας με τη χρήση μη ομογενοποιημένου προϊόντος διαχωρίζοντας τα υλικά, την εξέταση της επίδρασης του

μεταλλικού περιέκτη κατά τη θερμική επεξεργασία, την πειραματική επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων, καθώς και τη διερεύνηση της μεταβολής των τιμών των θερμοφυσικών ιδιοτήτων των συστατικών που απαρτίζουν το προϊόν, που συντελείται κατά τη θερμική επεξεργασία.

## ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ

B	χρόνος θέρμανσης (από άνοιγμα μέχρι κλείσιμο της παροχής ατμού) που απαιτείται για βιομηχανική αποστείρωση, min
Bi	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
Co	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.
Cp	ειδική θερμότητα του προϊόντος, J/(kg·K)
D	διάμετρος μεταλλικής κονσέρβας, m
DT	(ή απλώς D) χρόνος υποδεκαπλασιασμού σε σταθερή θερμοκρασία, T, που απαιτείται για την καταστροφή του 90% των μικροοργανισμών (ή άλλων θερμικά ευαίσθητων ουσιών), min
Ea	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
FO	αριθμός Fourier, αδιάστατος αριθμός

Fs	η ολοκληρωμένη τιμή F που αναφέρεται στη τιμή F του μέσου συνολικού όγκου της μεταλλικής κονσέρβας όπως υπολογίζεται από την εξίσωση $Fs = DT_{ref} \times \log(N_0/N(t))$ min
g	η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ αυτοκλείστου και προϊόντος στο κρίσιμο σημείο, στο τέλος του χρόνου θέρμανσης, $g = TRT - T_g$ , °F
h	ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας $W/(m^2 \cdot K)$
hair	ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στον αέρα ( $W/m^2 \cdot K$ )
hcw	ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στο νερό $W/(m^2 \cdot K)$
j	παράγοντας καθυστέρησης, παράμετρος για την περιγραφή (μαζί με την τιμή f) του ευθύγραμμου τμήματος της καμπύλης θερμικής διεξόδου που προκύπτει όταν τα θερμοκρασιακά δεδομένα του προϊόντος σχεδιάζονται ως η διαφορά θερμοκρασίας (σε λογαριθμική κλίμακα) μεταξύ αυτόκλειστου και προϊόντος συναρτήσει του χρόνου.
jc	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, $W/(m \cdot K)$
kT	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, $m+g = TRT - TCW$ , °F
N	αριθμός επιζώντων μικροοργανισμών, σπορίων κ.α. (ανά περιέκτη, ανά mL κ.λ.π.) μετά από δεδομένο χρόνο θέρμανσης.



N0	ο αρχικός μικροβιακός πληθυσμός, αριθμός σπορίων κ.α. (ανά περιέκτη, ανά mLκ.λ.π.)
N/N0	το ποσοστό επιβίωσης του μικροοργανισμού-στόχου στη μεταλλική κονσέρβαστοτέλος μιας δεδομένης θερμικής διεργασίας
p	πίεση του ρευστού, N/m <sup>2</sup>
d	Διάμετρος (κυλινδρικού σχήματος) προϊόντος, m
Rg	παγκόσμια σταθερά αερίων, 8314.34 J/kmolK
T	θερμοκρασία (προϊόντος στο κρίσιμο σημείο), °C(εκτός αν καθορίζεται στο κείμενο διαφορετικά)
TA	“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
Tair	θερμοκρασία περιβάλλοντος σε αέρια ψύξη °C
TCW	θερμοκρασία περιβάλλοντος (νερού) ψύξης, °C
Th	θερμοκρασία προϊόντος στο τέλος της φάσης θέρμανσης (και αρχή του κύκλου ψύξης) μιας θερμικής διεργασίας, °C(εκτός αν καθορίζεται στο κείμενο διαφορετικά)
TIT	αρχική θερμοκρασία προϊόντος ή θερμοκρασία γεμίσματος στην κονσέρβα «πλήρωση εν θερμώ» διεργασία °C(εκτός αν καθορίζεται στο κείμενο διαφορετικά)
TRT	θερμοκρασία αυτοκλείστου κατεργασίας, °C(εκτός αν καθορίζεται στο κείμενο διαφορετικά)
t	χρόνος, min
Y	αδιάστατη, κανονικοποιημένη θερμοκρασία
u	το διάνυσμα της ταχύτητας ως προς τον άξονα x, m <sup>2</sup> /s
v	το διάνυσμα της ταχύτητας ως προς τον άξονα y, m <sup>2</sup> /s
z	διαφορά θερμοκρασίας που απαιτείται για να δεκαπλασιαστεί ή να υποδεκαπλασιαστεί η τιμή DT, °F(εκτός αν καθορίζεται στο κείμενο διαφορετικά)
α	θερμική διαχυτότητα του προϊόντος, α=k/(ρCp), m <sup>2</sup> /s

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Alpaslan Turgut , Tavman Ismail, Tavman Sebnem (2009) Measurement of Thermal Conductivity of Edible Oils Using Transient Hot Wire Method International Journal of Food Properties 12(4):741-747 · October 2009

ANSYS Meshing Advanced Techniques 17.0 (2017)

ANSYS, 2015. Engineering Simulation & 3D Design Software. ASHRAE Handbook: Refrigeration : SI Edition (2006) (International System of Units)

Ardejani Faramarz D, Baafi Ernest, Panahi Kumars Seif, Singh Raghu Nath and Shokri Behshad J 2011 Application of Computational Fluid Dynamics (CFD) for Simulation of Acid Mine Drainage Generation and Subsequent Pollutants Transportation through Groundwater Flow Systems and Rivers

Averbukh DA, Metkin VP, Chistova TG (1977) Thermophysical and physico-chemical parameters of solutions in citric acid production. CNIITENI Food Scientific-Technical Reference Book No 2, p 15

Ball C.O. 1923. Thermal Process Time for Canned Food, Bulletin of the National Research Council No. 37, Vol. 7, Part 1: National Research Council. Washington, DC, 76 p.

Ball C.O. and Olson F.C.W. 1957. Sterilization in food technology. Theory, practice and calculations. New York: McGraw-Hill Book Co. 654 p.

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.

Diamante Lemuel M. and Tianying Lan (2014) Absolute viscosities of vegetable oils at different temperatures and shear rate range of 64.5 to 4835 s

Edwin E. Garcia Rojas , Jane S.R. Coimbra & Javier Telis-Romero (2013) Thermophysical Properties of Cotton, Canola, Sunflower and Soybean Oils as a Function of Temperature in International Journal of Food Properties 16(7) · October 2013

Engineering Tool Box, (2003). Specific Heat of Liquids and Fluids.

Farid Sies M, Asmuin Norzelawati, Fakhurulrazi , Norsalim N.A., Zakaria Hanis, Pairan Rasidi, Sadikin Azmahani (2016) Determine physical properties of an organic citric acid (processed lime juice) dissolve with water using experimental apparatus

Fasina O., Colley Z. (2007) Viscosity and Specific Heat of Vegetable Oils as a Function of Temperature: 35°C to 180°C in International Journal of Food Properties 11(4):738-746 · November 2008

FDA 2018. Guidance for Industry: Acidified Foods. Draft guidance. Rockville M.D. USA. FDA. Center for Food Safety and Applied Nutrition. Phone num.: 301-436-2411. 36p. from:<http://www.fda.gov/Food/GuidanceRegulation/GuidanceDocumentsRegulatoryInformation/default.htm>. Accessed March 7, 2015.

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

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

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

Ghani A.G.A., Farid M.M., Chena X.D., Richards P. 1999b. An investigation of deactivation of bacteria in a canned liquid food during sterilization using computational fluid dynamics (CFD). Journal of Food Science 42: 207-214.

Hodgman, C.D. & N.A. Lange. *Handbook of Chemistry and Physics*. Cleveland: Chemical Rubber Co., 1924: 312-313.

Holdsworth S.D. 1985. Optimization of thermal processing: a review. Journal of Food Engineering 4: 89-116.

Holdsworth S.D. 1997. Thermal processing of packaged foods. New York: Blackie Academic & Professional. 283 p.

Holman J.P. 1990. Heat transfer 7th edition. New York: McGraw Hill.

Howard H. Hu, in Fluid Mechanics (Fifth Edition), 2012

Hua, L., Zhao, Y., Hu, J., Tao, T. et al., 2012 "Comparison Between Air-Assisted and Airless Urea Spray for Diesel SCR System by PDA and CFD," SAE Technical Paper 2012-01-1081,

Jung A, Fryer P.J. 1999 Optimising the quality of safe food: Computational modelling of a continuous sterilisation process

Khine H Aye, Tun Aye (2013) Study on the Production of Biodiesel from Sunflower Oil

Kulkarni Siddharth Suhas, Craig Chapman, Hanifa Shah (2016) Computational Fluid Dynamics (CFD) Mesh Independency Study of A Straight Blade Horizontal Axis Tidal Turbine

Laguerie C, Aubry M, Couderc JP (1976) Some physicochemical data on monohydrate citric acid in water: solubility, density, viscosity, diffusivity, pH of standard solution, and refractive index. J ChemEng Data 21:85–87

Lienhard V John H, 2011 A Heat Transfer Textbook: Fourth Edition (Dover Civil and Mechanical Engineering) Fourth Edition

Lightfoot, R. Byron Bird, Warren E. Stewart, Edwin N. (1960). Transport Phenomena. John Wiley and Sons, Inc. Eq. 8.1-7.

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.

Minim Luis A., Vania R. N. Telis, Valeria P. R. Minim, Lizzy A. P. Alcantara, and Javier Telis-Romero (2009) Thermophysical Properties of Lemon Juice as Affected by Temperature and Water Content

NCBI (National Center for Biotechnology Information)

Nita Irina , Anisoara Neagu, Sibel Geacai, Anca Dumitru and Anca Sterpu: "Study of the behavior of some vegetable oils during the thermal treatment," Technology and Chemical Engineering Department, Ovidius University, bd. Mamaia 124, Constanta, 900527, Romania

Norton Tomas, Sun Da-Wen 2006 Computational fluid dynamics (CFD) an effective and efficient design and analysis tool for the food industry: A review Tomas Norton and Da-Wen Sun 2006

Patterson BA, Wooley EM (2001) Thermodynamics of proton dissociation from aqueous citric acid: apparent molar volumes and apparent heat capacities of citric acid and its sodium salts at the pressure of 0.35 MPa and at temperatures from 278.15 K to 393.15 K. J Chem Thermodyn 33:1735–1764

Penniston KL, Nakada SY, Holmes RP, Assimios DG (2008). "Quantitative Assessment of Citric Acid in Lemon Juice, Lime Juice, and Commercially-Available Fruit Juice Products in Journal of Endourology 22(3):567-70 · March 2008

Perry, Charles (2014-11-20). "Dolma". The Oxford Companion to Food. Oxford University Press. ISBN 978-0-19-967733-7.

Pragati Kaushal, Sharma HK 2012 Concept of Computational Fluid Dynamics (CFD) and its Applications in Food Processing Equipment Design Department of Food Engineering and Technology

Rahman Mohammad Shafiur (2009) Food Properties Handbook, Second Edition CRC Press, Boca Raton, FL

Richardson Philip 2000 Thermal technologies in food processing Edited

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.

Sánchez Angel , Maceiras Rocio, Cancela Angeles and Rodríguez Mónica (2012) Influence of *n*-Hexane on *in Situ* Transesterification of Marine Macroalgae

Santos J. C. O., Santos M. G. O. , J. P. Dantas, A. G. Souza (2005) Comparative study of specific heat capacities of some vegetable oils obtained by DSC and microwave oven in *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 79(2):283-287 Department of Mechanical and Materials Science, Wright State University, Dayton, OH 45435-0001, USA

Shang J.S. 2004 Three decades of accomplishments in computational fluid dynamics

Silva C., Hendricksx M., Oliveira F. and Tobback P. 1992. Critical evaluation of commonly used objective functions to optimize overall quality and nutrient retention of heat preserved-foods. *Journal of Food Engineering* 17: 241-258.

Silva F.V.M., 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.

Singh, R. P., Heldman, D. R. (1993). *Introduction to food engineering*. Academic. San Diego.

Stoforos N.G., Taoukis P.S. 2006, Temperature-time combinations. In *Handbook of Food Technology and Food Engineering*, Y.H. Hui (Ed.), New York: Marcel Dekker, Inc.

Stumbo C.R. 1973. *Thermobacteriology in Food Processing*. New York: Academic Press. pp. 112-117.

Stumbo C.R. and Longley R.E. 1966. New parameters for process calculation. *Food Technology* 20(3): 341.

Sun Da-Wen. 2007. *Computational Fluid Dynamics in Food Processing*. CRC Press. Taylor and Francis Group.

Sweat, V. E. (1974). Experimental values of thermal conductivity of selected fruits and vegetables. *J. Food Sci.*, 39, 1080

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.

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.Malalasekera W. 1995 An introduction to computational fluid dynamics, the finite volume method, Prentice Hall, UK

Versteeg, H.K., Malalasekera W. 2007. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. Essex, England: Pearson Prentice Hall, Second Edition.

Wang, ZL, Sun, SH. 2003. Handbook of Food Safety Engineering. Edited.

Welti-Chanes J., F. Vergara-Balderas, D. Bermúdez-Aguirre 2004 Transport phenomena in food engineering: basic concepts and advances

Xia Bin, Da-Wen Sun 2002 Applications of computational fluid dynamics (cfD) in the food industry: a review in *Computers and Electronics in Agriculture* 34(1):5-24 · May 2002

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.

Βασιλείου Ηλιάνα Θ. 2019 Βελτιστοποίηση της «πλήρωσης εν θερμώ» διεργασίας παραγωγής τοματοπολτού με τη χρήση της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής Μεταπτυχιακή διατριβή, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.

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.

Νίκας Κωνσταντίνος Σ. 2010 Αρχές της Μετάδοσης Θερμότητας για Μηχανικούς - Τόμος I / Έκδοση 1η

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

Στοφόρος, Ν.Γ. 2017 Εργαστήριο μηχανικής τροφίμων εργαστηριακές ασκήσεις

[https:// https://www.ansys.com](https://www.ansys.com).

[www.lexico.com](http://www.lexico.com)