

ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

Π.Μ.Σ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΤΡΟΦΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΥ

ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**Υπολογισμός ποιοτικής υποβάθμισης και ποιοτικά ισοδύναμων σημείων σε προϊόντα
που θερμαίνονται με αγωγή με χρήση CFD**



Δημήτριος Α. Μάρας

Επιβλέπων καθηγητής: Νικόλαος Γ. Στοφόρος, Αναπληρωτής Καθηγητής

Εξεταστική Επιτροπή

Σταύρος Γιαννιώτης, Καθηγητής

Απόστολος Κουτίνας, Επίκουρος Καθηγητής

Αθήνα 2015

Πρόλογος

Το θέμα της παρούσας διπλωματικής μελέτης είναι ο υπολογισμός της ποιοτικής υποβάθμισης και των ισοδύναμων ποιοτικά σημείων σε προϊόντα τα οποία θερμαίνονται με αγωγή και τα οποία βρίσκονται σε κυλινδρικό περιέκτη με χρήση του προγράμματος υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (Computational Fluid Dynamics, CFD).

Το θέμα προτάθηκε από τον κύριο Στοφόρο Καθηγητή ΕΤΑΔΑ και οι υπολογισμοί διεξήχθησαν στο εργαστήριο Μηχανικής τροφίμων, Επεξεργασίας και Συντήρησης Γεωργικών Προϊόντων.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κύριο Στοφόρο για την εμπιστοσύνη και την στήριξη καθώς και για την καθοδήγηση και τον άριστο τρόπο επίβλεψης της εργασίας που μου έδωσε σε όλη τη διάρκεια της ολοκλήρωσης της μεταπτυχιακής μου διατριβής. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω καθένα ξεχωριστά για την βοήθεια που μου προσέφεραν, τον κύριο Εμμανουήλ Αναγνωσταρά, την Αγγελική Αργύρη, τον Αντρέα Δήμου και τους Στυλιανό Μαραγκουδάκη, Στυλιανό Χατζιδάκη.

Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ και στην οικογένεια μου η οποία με στήριξε με όλους τους τρόπους και μου έδωσε την δυνατότητα να παρακολουθήσω το Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα σπουδών του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών.

Περίληψη

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας επικεντρώνεται στον υπολογισμό της ποιοτικής υποβάθμισης και των ισοδύναμων ποιοτικά σημείων σε προϊόντα τα οποία θερμαίνονται με αγωγή και τα οποία βρίσκονται σε κυλινδρικό περιέκτη με χρήση του προγράμματος υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (Computational Fluid Dynamics, CFD). Με βάση τα δεδομένα που προέκυψαν από το CFD προσδιορίστηκαν τα ποιοτικά ισοδύναμα σημεία, τα οποία ορίζονται σαν σημεία στα οποία η τιμή δεδομένου δείκτη ποιότητας του προϊόντος μετά από δεδομένη θερμική διεργασία ισούται με την μέση τιμή του δείκτη στο τέλος της θερμικής διεργασίας.

Η θερμική επεξεργασία αφορούσε θέρμανση με αγωγή με ομοιόμορφη αρχική θερμοκρασία και σταθερή θερμοκρασία θέρμανσης και ψύξης, ενώ θεωρήθηκε άπειρος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με σταθερές θερμοφυσικές ιδιότητες προϊόντος. Εν συνεχεία Οι τιμές D και z των ποιοτικών παραμέτρων για τη μελέτη που πραγματοποιήθηκε επιλέχθηκαν από τη βιβλιογραφία. Αρχικά με τη βοήθεια του σχεδιαστικού προγράμματος Gambit® 2,3.16 πραγματοποιήθηκαν διάφορες δοκιμές με σκοπό τη δημιουργία της κονσέρβας (307×409 , $L=0.1095$ m, $R=0.04207$ m) και την επιλογή του καταλληλότερου πλέγματος για την συγκεκριμένη γεωμετρία. Οι επιλογές που πραγματοποιήθηκαν αφορούσαν σε δύο διαφορετικούς τύπους πλέγματος τα οποία διέφεραν και στον αριθμό των κελιών τους (πυκνότητα). Αυτά αποτελούσαν (τετράεδρα και εξάεδρα κελιά- Tet/Hybrid - Hex/Wedge). Σε επόμενο στάδιο ακολούθησε η αλλαγή του απόλυτου κριτηρίου σύγκλισης (10^{-6} και 10^{-9}) και η διακριτοποίηση του χρόνου (πρώτης και δεύτερης τάξης). Κατόπιν μελετήθηκαν κάποια χρονικά βήματα για δοκιμή του καταλληλότερου και με τα ακριβέστερα αποτελέσματα (time step, 1s, 10s, 20s, 60s). Η τιμή α (θερμική αγωγιμότητα) θεωρήθηκε σταθερή ($\alpha=1,56 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$). Η ακρίβεια του μοντέλου αξιολογήθηκε συγκρίνοντας τα αποτελέσματα χρονοθερμοκρασιακού προφίλ του CFD με την αναλυτική λύση μιας τυπικής θερμικής διεργασίας (70 min θέρμανση και 110 min ψύξη). Η αριθμητική λύση η οποία χαρακτηρίζεται από εξάεδρο πλέγμα 0,5% Shortest Edge (επιλογή στο πρόγραμμα Gambit που αφορά την πυκνότητα του πλέγματος), με αριθμό κελιών 320988, απόλυτο κριτήριο σύγκλισης 10^{-9} και δεύτερης τάξης διακριτοποίησης έδωσε την πιο αποδοτική λύση του μοντέλου με τα πιο ακριβή αποτελέσματα τόσο για την εξέλιξη της θερμοκρασίας στην κονσέρβα όσο και για τον υπολογισμό των τιμών F (για μικροοργανισμό στόχο και για ποιοτικούς παράγοντες). Ο υπολογισμός της τιμής F πραγματοποιήθηκε με την προσθήκη ενός εξωτερικού

προγράμματος UDF (User Defined Functions) στο λειτουργικό περιβάλλον του υπολογιστικού προγράμματος Fluent v14.5.

Τέλος με το πέρας της θερμικής διεργασίας της κυλινδρικής κονσέρβας υπολογίσθηκε η μέση διατήρηση ποιοτικού παράγοντα για μια σειρά από διαφορετικές περιπτώσεις με ίδια γεωμετρία αλλά με διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας αυτοκλείστου (T_{RT}) και διαφορετικές τιμές α , D και z .

ABSTRACT

Calculation of quality degradation and equivalent quality points on products which are heated by conduction with the use of CFD

The object of this paper focused on the calculation of quality degradation and equivalent quality points on products which are heated by conduction inside a cylindrical container using computational fluid dynamics program (Computational Fluid Dynamics, CFD). Based on the data generated by the CFD we identified quality equivalent points, which are defined as the points at which the value as a quality index of the product after a given thermal process is equal to the average value of the index at the end of the thermal process. The D and z values of the quality indices were determined from literature. Initially, with the help of the design program Gambit® 2,3.16 several tests were performed in order to create the can (307×409, L=0.1095 m, R=0.04207 m), and then select the most suitable matrix for the particular geometry. The cases that were examined concerned two different types of mesh which also varied at the number of their cells (density). These were (tetrahedrons and hexahedrons cells- Tet / Hybrid - Hex / Wedge). In the next stage followed by a change in absolute convergence criterion (10^{-6} and 10^{-9}) and the discretization time (first and second class). Then we studied different time steps for selecting the most suitable (time step, 1s, 10s, 20s, 60s). The α value (thermal conductivity) was initially constant ($\alpha = 1,56 \times 10^{-7} \text{m}^2 / \text{s}$). The accuracy of the model was evaluated in comparison to the analytical solution of a time-temperature profile of a typical thermal process (70 min 110 min heating and cooling). The numerical solution characterized by a Hexahedron mesh 0,5% Shortest Edge (option in Gambit program relating to the density of the matrix), with a number of cells 320988, absolute convergence criterion 10^{-9} and second order discretization gave the most effective solution of the model with the most accurate results. In addition to the critical point (center of geometry) different points were selected for calculating both the temperature of the can and the F values (for target microorganism and qualitative factors). The calculation of the F value was performed by adding an external program UDF (User Defined Functions) in the operating environment of the computational program Fluent v14.5. Finally upon completion of the thermal process of the cylindrical can, the mean concentration of the quality factor at the end of the process was calculated for a number of different cases with the same geometry but with different values of temperature of the autoclave (T_{RT}) and with different values of α , D and z.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Εισαγωγή	1
Κεφάλαιο 1 ^ο Θερμική επεξεργασία	3
1.1 Θερμική επεξεργασία στα τρόφιμα	3
1.1.1 Μαγείρεμα (<i>Cooking</i>)	4
1.1.2 Ζεμάτισμα (<i>Blanching</i>)	4
1.1.3 Παστερίωση (<i>Pasteurization</i>)	5
1.1.4 Εμπορική αποστείρωση (<i>Commercial Sterilization</i>)	6
1.1.5 Κονσερβοποίηση (<i>Canning</i>)	7
1.2 Σχεδιασμός θερμικών διεργασιών	8
1.3 Θερμοανθεκτικότητα μικροοργανισμών	9
1.4 Μικροοργανισμός στόχος	11
1.5 Ρυθμός μεταφοράς θερμότητας	12
Κεφάλαιο 2 ^ο Εισαγωγή στην Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (<i>Computational Fluid Dynamics-CFD</i>)	14
2.1 Πλεονεκτήματα του CFD	15
2.2 CFD και Βιομηχανία Τροφίμων	16
2.2.1 Βασικές Αρχές του CFD	16
2.2.2 Αριθμητική Ανάλυση	17
2.2.3 Λύση του προβλήματος ροής	18
2.2.4 Ερμηνεία της λύσης	19
2.3 Εμπορικοί Κώδικες του CFD	19
2.3.1 CFX [®] (<i>ANSYS Inc.</i>)	20
2.3.2 FLUENT [®] (<i>FLUENT Inc.</i>)	20
2.3.3 PHOENICS (<i>CHAM Ltd.</i>)	20
2.3.4 STAR-CD	21
2.4 Μέθοδοι βελτίωσης της ακρίβειας της μοντελοποίησης	21
2.4.1 Κατασκευή γεωμετρίας-πλέγματος	22
2.4.2 Χρήση πλέγματος	22
2.4.3 Συρόμενο Πλέγμα	24
2.4.4 Πολλαπλά πλαίσια αναφοράς	24
2.4.5 Τεχνικές σύγκλισης	25
2.4.6 Εισαγωγή δεδομένων	25

2.4.7 Διαφορικές εξισώσεις και διακριτοποίηση	26
2.4.8 Μετεπεξεργασία αποτελεσμάτων	26
2.5 Εφαρμογές της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής	
στη Μηχανική Τροφίμων	27
2.5.1 Ξήρανση	27
2.5.2 Αποστείρωση	27
2.5.3 Ανάμιξη	28
2.5.4 Κατάψυξη	29
2.6 Μελλοντική χρήση του CFD στη βιομηχανία τροφίμων	29
Κεφάλαιο 3^ο Μεθοδολογία λύσης του προβλήματος	30
3.1 Τιμή F και υπολογισμός της	30
3.2 Επιλογή παραμέτρων	32
3.3 Ενέργειες στο CFD	34
3.4 Επίλυση με την βοήθεια των αναλυτικών εξισώσεων	38
3.5 Επιλογές ορισμένες από τον χρήστη (UDF)	40
3.6 Κατασκευή πλέγματος	41
3.7 Ανεξαρτησία πλέγματος	43
3.8 Αναλυτική λύση προβλήματος	44
3.8.1 Θέρμανση με αγωγή σε μη σταθερή κατάσταση	44
3.8.2 Άπειρο επίπεδο (πλάκα)	44
3.8.3 Άπειρος Κύλινδρος (<i>infinite cylinder</i>)	45
3.9 Επιλογές ορισμένες από τον χρήστη (UDF)	46
Κεφάλαιο 4^ο Αποτελέσματα	48
4.1 Εξέλιξη θερμοκρασίας κονσερβοποιημένου στερεού προϊόντος	50
4.2 Κατανομή των τιμών F	55
4.3 Διατήρηση ποιοτικού παράγοντα	64
4.4 Ποιοτικά ισοδύναμα σημεία.....	75
Συμπεράσματα	89
Ονοματολογία	90
Βιβλιογραφία	92

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1	Ο εφευρέτης της κονσερβοποίησης Nicolas François Appert (1749-1841).....	8
Σχήμα 2	Καμπύλη ρυθμού θερμικής καταστροφής (Stoforos & Taoukis, 2004).	10
Σχήμα 3	Φαινομενική καμπύλη χρόνου θερμικής καταστροφής (Stoforos & Taoukis, 2004)	11
Σχήμα 4	Καμπύλη θερμικής διείσδυσης (Stoforos & Taoukis, 2004).	13
Σχήμα 5	Εφαρμογή πλέγματος από το πρόγραμμα Gambit σε απλή γεωμετρία σωλήνα.	23
Σχήμα 6	Εφαρμογή πλέγματος από το πρόγραμμα Gambit σε μια πιο πολύπλοκη γεωμετρία	24
Σχήμα 7	Πλέγμα τύπου τετράεδρου (Tet/Hybrid 1% Shortest Edge-πυκνό)	35
Σχήμα 8	Πλέγμα τύπου τετράεδρου (Tet/Hybrid 5% Shortest Edge-αραιό)	35
Σχήμα 9	Πλέγμα τύπου εξάεδρου (Hex/Wedge 1% Shortest Edge-πυκνό).....	35
Σχήμα 10	Πλέγμα τύπου εξάεδρου (Hex/Wedge 5% Shortest Edge-αραιό)	36
Σχήμα 11	Εικόνα κονσέρβας με την εμφάνιση του εξάεδρου πλέγματος και της κατεύθυνσης των αξόνων στο κάτω δεξιό μέρος του σχήματος.....	36
Σχήμα 12	Εικόνες εξάεδρου (Hex/Wedge) πλέγματος με πυκνότητα (0,5% Shortest edge) από διαφορετικές πλευρές. Αριστερά κέντρο της γεωμετρίας, κεντρικά από την κορυφή της γεωμετρίας και δεξιά πλάγια της γεωμετρίας.....	37
Σχήμα 13	Τρεις διαφορετικές περιπτώσεις εξάεδρου (Hex/Wedge) πλέγματος με διαφορετικές πυκνότητες (αριστερά Shortest Edge 5%-352) κελιά, στο κέντρο Shortest Edge 1% 36531 κελιά, δεξιά Shortest Edge 0,5% 320988 κελιά	39
Σχήμα 14	Διάγραμμα καμπυλών θερμοκρασίας-χρόνου με διαφορετικές τιμές κελίων για την επαλήθευση ανεξαρτησίας πλέγματος	40
Σχήμα 15	Σημεία που χρησιμοποιήθηκαν στη γεωμετρία για την καταγραφή διαφόρων τιμών (θερμοκρασία, τιμή, F, ποιοτική υποβάθμιση κ.τ.λ.)	41
Σχήμα 16	Εξέλιξη της θερμοκρασίας των 7 σημείων που επιλέχθηκαν, για $T_{RT}=121.11^{\circ}\text{C}$ και $F_0=9$ min	42
Σχήμα 17	Εικόνα της Τομής στο κέντρο της γεωμετρίας (half plane)	42
Σχήμα 18	Επίδραση του τύπου (τετράεδρα -Tet/Hybrid και εξάεδρα -Hex/Wedge) και της πυκνότητας πλέγματος στην πρόβλεψη της θερμοκρασίας στο κέντρο του προϊόντος, σε σύγκριση με την αναλυτική λύση, για κριτήριο σύγκλισης 10^{-6} και χρονικό βήμα 1s	49

Σχήμα 19 Επίδραση του τύπου (τετράεδρα -Tet/Hybrid και εξάεδρα -Hex/Wedge) και της πυκνότητας πλέγματος στην πρόβλεψη της θερμοκρασίας στο κέντρο του προϊόντος, σε σύγκριση με την αναλυτική λύση, για κριτήριο σύγκλισης 10^{-9} και χρονικό βήμα 1s.....	49
Σχήμα 20 Διάγραμμα σφάλματος, (αναλυτική θερμοκρασία μείον προβλεπόμενη), για διαφορετικές πυκνότητες πλέγματος, για 10^{-9} κριτήριο σύγκρισης και χρονικό διάστημα 1s.	50
Σχήμα 21 Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας του προϊόντος κατά την διάρκεια του κύκλου θέρμανσης της θερμικής επεξεργασίας ($T_{RT}= 121,11^{\circ}\text{C}$, $T_{IT}= 20^{\circ}\text{C}$). Η κλίμακα αριστερά αναφέρεται σε $^{\circ}\text{C}$	51
Σχήμα 22 Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας του προϊόντος κατά την διάρκεια του κύκλου ψύξης της θερμικής επεξεργασίας($T_{RT}= 121,11^{\circ}\text{C}$, $T_{cw}= 25^{\circ}\text{C}$, $F_0= 9 \text{ min}$).	52
Σχήμα 23 Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας του προϊόντος κατά την διάρκεια του κύκλου ψύξης της θερμικής επεξεργασίας ($T_{RT}= 121,11^{\circ}\text{C}$, $T_{cw}= 25^{\circ}\text{C}$, $F_0= 6 \text{ min}$).	53
Σχήμα 24 Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας του προϊόντος κατά την διάρκεια του κύκλου ψύξης της θερμικής επεξεργασίας ($T_{RT}= 121,11^{\circ}\text{C}$, $T_{cw}= 25^{\circ}\text{C}$, $F_0= 3 \text{ min}$).	54
Σχήμα 25 Εξέλιξη της κατανομής της τιμής F_0 στη διεργασία κατά τη διάρκεια του κύκλου θέρμανσης της θερμικής επεξεργασίας για $z=10^{\circ}\text{C}$ ($T_{RT}=121.11^{\circ}\text{C}$, $T_{IT}=20^{\circ}\text{C}$, $F_0=3 \text{ min}$). Η κλίμακα αριστερά αναφέρεται σε min.	56
Σχήμα 26 Εξέλιξη της κατανομής της τιμής F_0 στη διεργασία κατά τη διάρκεια του κύκλου ψύξης της θερμικής επεξεργασίας για $z=10^{\circ}\text{C}$ ($T_{RT}=121.11^{\circ}\text{C}$, $T_{IT}=20^{\circ}\text{C}$, $F_0=3 \text{ min}$). Η κλίμακα αριστερά αναφέρεται σε min.	57
Σχήμα 27 : Εξέλιξη της κατανομής της τιμής $F_{121,11^{\circ}\text{C}}$ στη διεργασία κατά τη διάρκεια του κύκλου θέρμανσης της θερμικής επεξεργασίας για $z=25^{\circ}\text{C}$ ($T_{RT}=121.11^{\circ}\text{C}$, $T_{IT}=20^{\circ}\text{C}$, $F_0=3 \text{ min}$). Η κλίμακα αριστερά αναφέρεται σε min.	58
Σχήμα 28 Εξέλιξη της κατανομής της τιμής F στη διεργασία κατά τη διάρκεια του κύκλου ψύξης της θερμικής επεξεργασίας για $z=25^{\circ}\text{C}$ ($T_{RT}=121.11^{\circ}\text{C}$, $T_{IT}=20^{\circ}\text{C}$, $F_0=3 \text{ min}$). Η κλίμακα αριστερά αναφέρεται σε min.	59

- Σχήμα 29** Εξέλιξη της κατανομής της τιμής F στη διεργασία κατά τη διάρκεια του κύκλου θέρμανσης και ψύξης της θερμικής επεξεργασίας για $z=10^{\circ}\text{C}$ ($T_{RT}=121.11^{\circ}\text{C}$, $T_{IT}=20^{\circ}\text{C}$, $F_0=6$ min). Η κλίμακα αριστερά αναφέρεται σε min.60
- Σχήμα 30** Εξέλιξη της κατανομής της τιμής F στη διεργασία κατά τη διάρκεια του κύκλου θέρμανσης και ψύξης της θερμικής επεξεργασίας για $z=25^{\circ}\text{C}$ ($T_{RT}=121.11^{\circ}\text{C}$, $T_{IT}=20^{\circ}\text{C}$, $F_0=6$ min). Η κλίμακα αριστερά αναφέρεται σε min.61
- Σχήμα 31** Εξέλιξη της κατανομής της τιμής F στη διεργασία κατά τη διάρκεια του κύκλου θέρμανσης και ψύξης της θερμικής επεξεργασίας για $z=10^{\circ}\text{C}$ ($T_{RT}=121.11^{\circ}\text{C}$, $T_{IT}=20^{\circ}\text{C}$, $F_0=9$ min). Η κλίμακα αριστερά αναφέρεται σε min.62
- Σχήμα 32** Εξέλιξη της κατανομής της τιμής F στη διεργασία κατά τη διάρκεια του κύκλου θέρμανσης και ψύξης της θερμικής επεξεργασίας για $z=25^{\circ}\text{C}$ ($T_{RT}=121.11^{\circ}\text{C}$, $T_{IT}=20^{\circ}\text{C}$, $F_0=9$ min). Η κλίμακα αριστερά αναφέρεται σε min.63
- Σχήμα 33** Εξέλιξη της κατανομής της διατήρησης της ποιοτικής παραμέτρου (%) στη διεργασία κατά τη διάρκεια του κύκλου θέρμανσης και ψύξης της θερμικής επεξεργασίας για $z=25^{\circ}\text{C}$ ($T_{RT}=121.11^{\circ}\text{C}$, $T_{IT}=20^{\circ}\text{C}$, $F_0=3$ min). Η κλίμακα στα αριστερά αναφέρεται σε % διατήρηση63
- Σχήμα 34** Εξέλιξη της κατανομής της διατήρησης της ποιοτικής παραμέτρου (%) στη διεργασία κατά τη διάρκεια του κύκλου θέρμανσης και ψύξης της θερμικής επεξεργασίας για $z=25^{\circ}\text{C}$ ($T_{RT}=121.11^{\circ}\text{C}$, $T_{IT}=20^{\circ}\text{C}$, $F_0=6$ min). Η κλίμακα στα αριστερά αναφέρεται σε % διατήρηση66
- Σχήμα 35** Εξέλιξη της κατανομής της διατήρησης της ποιοτικής παραμέτρου (%) στη διεργασία κατά τη διάρκεια του κύκλου θέρμανσης και ψύξης της θερμικής επεξεργασίας για $z=25^{\circ}\text{C}$ ($T_{RT}=121.11^{\circ}\text{C}$, $T_{IT}=20^{\circ}\text{C}$, $F_0=9$ min). Η κλίμακα (αριστερά του σχήματος αναφέρεται σε ποσοστό % διατήρηση.67
- Σχήμα 36** Επίδραση της τιμής z στην επι της εκατό εναπομείνασα συγκέντρωση της ποιοτικής παραμέτρου στο τέλος της θερμικής διεργασίας με στόχο $F_0=3$ min (Επάνω σειρά), $F_0=6$ min (μεσαία σειρά) και $F_0=9$ min (κάτω σειρά). Η κλίμακα αριστερά του σχήματος αναφέρεται σε % διατήρηση.68

- Σχήμα 37** Επίδραση της τιμής θερμοκρασίας του αυτοκλείστου (T_{RT}) στην επι της εκατό εναπομείνασα συγκέντρωση της ποιοτικής παραμέτρου στο τέλος της θερμικής διεργασίας με στόχο $F_0=3\text{min}$. Η κλίμακα αριστερά του σχήματος αναφέρεται σε ποσοστό % διατήρησης.69
- Σχήμα 38** Επίδραση της τιμής θερμοκρασίας του αυτοκλείστου (T_{RT}) στην επι της εκατό εναπομείνασα συγκέντρωση της ποιοτικής παραμέτρου στο τέλος της θερμικής διεργασίας με στόχο $F_0=6\text{min}$. Η κλίμακα αριστερά του σχήματος αναφέρεται σε ποσοστό % διατήρησης.70
- Σχήμα 39** Επίδραση της τιμής θερμοκρασίας του αυτοκλείστου (T_{RT}) στην επι της εκατό εναπομείνασα συγκέντρωση της ποιοτικής παραμέτρου στο τέλος της θερμικής διεργασίας με στόχο $F_0=9\text{min}$. Η κλίμακα αριστερά του σχήματος αναφέρεται σε ποσοστό % διατήρησης71
- Σχήμα 40** Επίδραση της τιμής D στην επι της εκατό εναπομείνασα συγκέντρωση της ποιοτικής παραμέτρου στο τέλος της θερμικής διεργασίας με στόχο $F_0=3\text{min}$. Η κλίμακα αριστερά του σχήματος αναφέρεται σε ποσοστό % διατήρησης .72
- Σχήμα 41** Επίδραση της τιμής D στην επι της εκατό εναπομείνασα συγκέντρωση της ποιοτικής παραμέτρου στο τέλος της θερμικής διεργασίας με στόχο $F_0=6\text{min}$. Η κλίμακα αριστερά του σχήματος αναφέρεται σε ποσοστό % διατήρησης .73
- Σχήμα 42** Επίδραση της τιμής D στην επι της εκατό εναπομείνασα συγκέντρωση της ποιοτικής παραμέτρου στο τέλος της θερμικής διεργασίας με στόχο $F_0=9\text{min}$. Η κλίμακα αριστερά του σχήματος αναφέρεται σε ποσοστό % διατήρησης....74
- Σχήμα 43** Κατανομή του ποσοστού διατήρησης της ποιοτικής παραμέτρου στο τέλος της θερμικής διεργασίας ($D=150\text{min}$, $z=25^\circ\text{C}$) (αριστερά) και ποιοτικά ισοδύναμα σημεία (δεξιά), για $F_0=3\text{min}$. Η κλίμακα αριστερά του σχήματος αναφέρεται σε ποσοστό % διατήρησης76
- Σχήμα 44** Κατανομή του ποσοστού διατήρησης της ($D=150\text{min}$, $z=25^\circ\text{C}$) (αριστερά) και ποιοτικά ισοδύναμα σημεία (δεξιά), κεντρικές τιμέςκαι τιμή μεταβλητής $F_0=6\text{min}$. Η κλίμακα αριστερά του σχήματος αναφέρεται σε ποσοστό % διατήρησης77
- Σχήμα 45** Κατανομή του ποσοστού διατήρησης της ($D=150\text{min}$, $z=25^\circ\text{C}$) (αριστερά) και ποιοτικά ισοδύναμα σημεία (δεξιά), κεντρικές τιμέςκαι τιμή μεταβλητής $F_0=9\text{min}$. Η κλίμακα αριστερά του σχήματος αναφέρεται σε ποσοστό % διατήρησης78

- Σχήμα 46** Κατανομή του ποσοστού διατήρησης της ποιοτικής παραμέτρου στο τέλος της θερμικής διεργασίας ($D=150\text{min}$, $z=25^\circ\text{C}$) (αριστερά) και ποιοτικά ισοδύναμα σημεία (δεξιά), για $F_0=6\text{ min}$ και $\alpha=1,04\times 10^{-7}\text{ m}^2/\text{s}$. Η κλίμακα αριστερά του σχήματος αναφέρεται σε ποσοστό % διατήρησης 79
- Σχήμα 47** Κατανομή του ποσοστού διατήρησης της ($D=150\text{min}$, $z=25^\circ\text{C}$) (αριστερά) και ποιοτικά ισοδύναμα σημεία (δεξιά), κεντρικές τιμές και τιμή μεταβλητής, με $\alpha=2,34\times 10^{-7}\text{ m}^2/\text{s}$ και τιμή μεταβλητής $F_0=6\text{min}$. Η κλίμακα αριστερά του σχήματος αναφέρεται σε ποσοστό % διατήρησης 80
- Σχήμα 48** Κατανομή του ποσοστού διατήρησης της ($D=150\text{min}$, $z=25^\circ\text{C}$) (αριστερά) και ποιοτικά ισοδύναμα σημεία (δεξιά), κεντρικές τιμές και τιμή μεταβλητής, με $T_{RT}=110^\circ\text{C}$ και τιμή μεταβλητής $F_0=6\text{min}$. Η κλίμακα αριστερά του σχήματος αναφέρεται σε ποσοστό % διατήρησης..... 81
- Σχήμα 49** Κατανομή του ποσοστού διατήρησης της ($D=150\text{min}$, $z=25^\circ\text{C}$) (αριστερά) και ποιοτικά ισοδύναμα σημεία (δεξιά), κεντρικές τιμές και τιμή μεταβλητής, με $T_{RT}=140^\circ\text{C}$ και τιμή μεταβλητής $F_0=6\text{min}$. Η κλίμακα αριστερά του σχήματος αναφέρεται σε ποσοστό % διατήρησης..... 82
- Σχήμα 50** Κατανομή του ποσοστού διατήρησης της ($D=20\text{min}$, $z=25^\circ\text{C}$) (αριστερά) και ποιοτικά ισοδύναμα σημεία (δεξιά), κεντρικές τιμές και τιμή μεταβλητής $F_0=6\text{min}$. Η κλίμακα αριστερά του σχήματος αναφέρεται σε ποσοστό % διατήρησης 83
- Σχήμα 51** Κατανομή του ποσοστού διατήρησης της ($D=1000\text{min}$, $z=25^\circ\text{C}$) (αριστερά) και ποιοτικά ισοδύναμα σημεία (δεξιά), κεντρικές τιμές και τιμή μεταβλητής $F_0=6\text{min}$. Η κλίμακα αριστερά του σχήματος αναφέρεται σε ποσοστό % διατήρησης 84
- Σχήμα 52** Κατανομή του ποσοστού διατήρησης της ($D=150\text{min}$, $z=30.6^\circ\text{C}$) (αριστερά) και ποιοτικά ισοδύναμα σημεία (δεξιά), κεντρικές τιμές και τιμή μεταβλητής $F_0=6\text{min}$. Η κλίμακα αριστερά του σχήματος αναφέρεται σε ποσοστό % διατήρησης 85
- Σχήμα 53** Κατανομή του ποσοστού διατήρησης της ($D=150\text{min}$, $z=44.4^\circ\text{C}$) (αριστερά) και ποιοτικά ισοδύναμα σημεία (δεξιά), κεντρικές τιμές και τιμή μεταβλητής $F_0=6\text{min}$. Η κλίμακα αριστερά του σχήματος αναφέρεται σε ποσοστό % διατήρησης 86

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Εξισώσεις Συνέχειας (3), Ορμής (4) και Ενέργειας (5)	17
Πίνακας 2 Εύρος των παραμέτρων που εξετάστηκαν	30
Πίνακας 3 Επιλογές στη γεωμετρία, στο πλέγμα, στο υλικό που χρησιμοποιήθηκε και το χρονικό βήμα που επιλέχθηκαν.....	33
Πίνακας 4 Είδη πλεγμάτων, αριθμοί κελιών και το ποσοστό πυκνότητας ανά περίπτωση που σχεδιάστηκαν με το Gambit.....	38
Πίνακας 5 Κεντρικές τιμές των παραμέτρων που εξετάστηκαν.....	43
Πίνακας 6 Αρχείο UDF για τον υπολογισμό των τιμών F για διαφορετικές τιμές z.....	47
Πίνακας 7 Ποσοστά διατήρησης της τιμής F_0 για κονσέρβα 307×409 με διαφορετικές παραμέτρους σε τιμές «z, T_{RT} και α ».....	87
Πίνακας 8 Χρόνοι θέρμανσης της τιμής F_0 για κονσέρβα 307×409 με διαφορετικές παραμέτρους σε τιμές « T_{RT} και α ».	88

Εισαγωγή

Η ασφάλεια του τροφίμου είναι το κυριότερο μέλημα των βιομηχανιών τροφίμων από την αρχή της δημιουργίας τους. Η κονσερβοποίηση θεωρείται μια από τις πιο βασικές μεθόδους επεξεργασίας για την αύξηση της διάρκειας ζωής των τροφίμων. Ως κονσερβοποίηση νοείται η θερμική επεξεργασία, είτε παστερίωση είτε εμπορική αποστείρωση, τροφίμων τα οποία βρίσκονται σε ερμητικά κλειστούς περιέκτες (Στοφόρος, 2013). Το κρίσιμο σημείο ορίζεται ως το σημείο στο προϊόν που δέχεται τη μικρότερη επίδραση της επεξεργασίας, όσον αφορά στην καταστροφή των ανεπιθύμητων παραγόντων (μικροοργανισμοί, ένζυμα, κλπ.) και αποτελούν τον στόχο της θερμικής επεξεργασίας. Εάν ο στόχος της θερμικής επεξεργασίας έχει επιτευχθεί στο κρίσιμο σημείο τότε έχει επιτευχθεί και σε όλο το προϊόν. Η θέση του κρίσιμου σημείου τους μπορεί να προσδιοριστεί πειραματικά (Pflug, 1975). Παράλληλα με την καταστροφή ανεπιθύμητων παραγόντων κατά την διάρκεια μιας θερμικής επεξεργασίας παρουσιάζεται και υποβάθμιση ποιοτικών παραγόντων (απώλεια θρεπτικών συστατικών, χρώματος, γεύσης, κλπ.) του τροφίμου. Η εκτίμηση της ασφάλειας και της ποιοτικής υποβάθμισης μπορούν να πραγματοποιηθούν πειραματικά, απαιτείται όμως εξειδικευμένο προσωπικό, χρόνος και χρηματική δαπάνη για να πραγματοποιηθούν οι κατάλληλοι έλεγχοι από την εκάστοτε βιομηχανία.

Από τα παραπάνω γίνεται κατανοητή η ανάγκη για περαιτέρω βελτίωση της διαδικασίας μέσω εξεύρεσης λύσεων οι οποίες θα είναι γρήγορες και οικονομικές. Στις μέρες μας με την πρόοδο των ηλεκτρονικών υπολογιστών οι οποίοι έχουν εισχωρήσει σε όλους τους τομείς εργασίας, η εμφάνιση και μετέπειτα η καθιέρωση της χρήσης του προγράμματος υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) για τον έλεγχο και την προσομοίωση παρόμοιων αλλά και διαφορετικών υπολογισμών έγινε πραγματικότητα. Το CFD αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο το οποίο χρησιμοποιείται σήμερα όλο και περισσότερο για την προσομοίωση πολλών διεργασιών στη βιομηχανία τροφίμων (Yanniotis & Stoforos, 2014). Ο υπολογισμός της ποιοτικής υποβάθμισης ποιοτικού παράγοντα είναι μια διαδικασία η οποία δεν μπορεί να αποδοθεί μόνο από τον έλεγχο του κρίσιμου σημείου της κονσέρβας. Σε προϊόντα που θερμαίνονται με αγωγή απαιτείται γνώση της συγκέντρωσης της ποιοτικής παραμέτρου υπό διερεύνηση σε όλο τον όγκο του προϊόντος προκειμένου να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα. Εναλλακτικά κατ' αντιστοιχία με το κρίσιμο σημείο του προϊόντος που ενδιαφέρει για την εκτίμηση της ασφάλειας της διεργασίας, ο εντοπισμός ποιοτικά ισοδύναμων σημείων επιτρέπει την

εξαγωγή συμπερασμάτων όσον αφορά στην ποιοτική υποβάθμιση του προϊόντος. Ως ποιοτικά ισοδύναμα σημεία ορίζονται τα σημεία στα οποία η τιμή δεδομένου δείκτη ποιότητας του προϊόντος μετά από δεδομένη θερμική διεργασία ισούται με τη μέση τιμή του δείκτη (τιμή F) στο τέλος της θερμικής διεργασίας. Με γνώμονα τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, στόχος της παρούσας μελέτης είναι ο υπολογισμός της ποιοτικής υποβάθμισης και των ποιοτικά ισοδύναμων σημείων σε προϊόντα που θερμαίνονται με αγωγή με την χρήση του προγράμματος υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD).

Κεφάλαιο 1^ο Θερμική επεξεργασία

Από την αρχή της χρήσης της τροφής από τον άνθρωπο με την πιο σύγχρονη μορφή (μαγείρεμα), λόγω του ευαλλοίωτου της φύσης των τροφίμων είχε δημιουργηθεί η ανάγκη για την περαιτέρω συντήρησή τους. Αρχικά οι λύσεις συντήρησης δίνονταν από τη φύση είτε με ψύξη είτε με ξήρανση (θερμοκρασίες περιβάλλοντος) των τροφίμων με ό,τι μπορεί να σήμαινε αυτό για την ποιότητα και διατήρησή τους. Με την εξέλιξη του πολιτισμού καθώς και του αριθμού των ανθρώπων, οι ανάγκες αυξήθηκαν στην ποσότητα, στην ποιότητα αλλά και στη διάρκεια ζωής των τροφίμων. Αυτή η ανάγκη των καταναλωτών οδήγησε στην εξεύρεση τρόπων αύξησης της διάρκειας ζωής των τροφίμων από τις βιομηχανίες δημιουργώντας άνθιση στον τομέα της επεξεργασίας τροφίμων. Ο κυριότερος και πιο αναγνωρισμένος εκπρόσωπος ακόμα και στις μέρες μας αποτελεί το θερμικά επεξεργασμένο τρόφιμο απαρτίζοντας ένα πολύ μεγάλο κομμάτι στη βιομηχανία τροφίμων.

1.1 Θερμική επεξεργασία στα τρόφιμα

Η ασφάλεια ενός τροφίμου τοποθετημένου σε ένα περιέκτη και θερμικά επεξεργασμένου, μπορεί να ελεγχθεί και να αξιολογηθεί κατάλληλα από την εκτίμηση δεδομένων θερμοκρασίας τα οποία λαμβάνονται κατά τη διάρκεια θερμικής διεργασίας στο κρίσιμο σημείο του προϊόντος. Το σημείο αυτό, (κρίσιμο) είναι στο κάθε τρόφιμο το σημείο το οποίο δέχεται πιο αργά από τα υπόλοιπα του σημεία του την επίδραση της θερμικής διεργασίας που υφίσταται. Εάν στο κρίσιμο σημείο είναι ασφαλές το τρόφιμο τότε όλο το προϊόν είναι και αυτό ασφαλές.

Η θερμική επεξεργασία στα τρόφιμα αποτελεί έναν γενικό τίτλο ο οποίος απαρτίζεται από διαφορετικές υπό-κατηγορίες. Οι υπό-κατηγορίες αυτές αποτελούν μια διαφορετική προσέγγιση στο εκάστοτε τρόφιμο και απαιτούν ξεχωριστό κομμάτι στη βιομηχανία επεξεργασίας τροφίμων. Οι υπό-κατηγορίες αυτές αφορούν το είδος της θερμικής επεξεργασίας που εφαρμόζεται στο εκάστοτε τρόφιμο και εξαρτάται από τον στόχο που έχει τεθεί ως στόχος και ασφαλώς από τις ιδιαιτερότητες-είδος του ίδιου του τροφίμου. Οι αρχές που αφορούν την μεταφορά θερμότητας και την συμπεριφορά των τροφίμων στη θερμική ενέργεια μπορούν να βρουν εφαρμογή σε όλες τις θερμικές διεργασίες, όμως κάθε είδος θερμικής διεργασίας έχει συγκεκριμένους στόχους. Έτσι γίνεται κατανοητό ότι ανάλογα με τον στόχο που πρέπει να επιτευχθεί στο κάθε τρόφιμο εξαρτάται και η αντίστοιχη ένταση της θερμικής διεργασίας.

Τα στερεά τρόφιμα συνήθως θεωρούνται ότι θερμαίνονται με αγωγή μόνο. Ο απαιτούμενος χρόνος επεξεργασίας γενικά προσδιορίζεται από αναλυτική ή αριθμητική λύση της εξίσωσης της θέρμανσης σε μη σταθερή κατάσταση (Datta et al, 1986).

1.1.1 Μαγείρεμα (Cooking)

Το μαγείρεμα αποτελεί τη διαδικασία της θέρμανσης ενός τροφίμου με σκοπό αυτό να γίνει πιο εύγευστο για κατανάλωση. Η λέξη μαγείρεμα όμως αποτελεί ένα ευρύτερο όρο ο οποίος περιλαμβάνει κάποιες κατηγορίες-είδη θέρμανσης. Αυτά είναι το ψήσιμο, το καβούρδισμα, το τηγάνισμα και το βράσιμο, καθένα με την σειρά του αποτελεί κομμάτι του όρου μαγείρεμα. Η διαδικασία εφαρμογής και ο χρόνος διαφέρουν σε κάθε μια από αυτές της κατηγορίες του μαγειρέματος. Στις περιπτώσεις του ψησίματος και καβουρδίσματος αναφερόμαστε σε ξηρή θέρμανση των τροφίμων και υψηλότερες των 100°C. Αντίθετα στην περίπτωση του τηγανίσματος η θέρμανση πραγματοποιείται με βοήθεια ελαίου και σε πιο υψηλές θερμοκρασίες, ενώ στην περίπτωση του βρασίματος πραγματοποιείται θέρμανση με τη βοήθεια του νερού. Το μαγείρεμα έχει αποδειχθεί ότι αυξάνει τη διάρκεια ζωής των τροφίμων σε σχέση με τα ωμά τρόφιμα με την προϋπόθεση της ελαχιστοποίησης των αλλοιωγόνων μικροοργανισμών, συνήθως με την τοποθέτηση τους σε ψυγείο.

Από τη διαδικασία του μαγειρέματος στο τρόφιμο επιτυγχάνονται και κάποιες αλλαγές εκτός της αλλαγής της γεύσης του οι οποίες δικαιολογούν και την αυξημένη διάρκεια διατήρησης του τροφίμου. Η μείωση του αριθμού των μικροοργανισμών και η αδρανοποίηση ανεπιθύμητων ενζύμων είναι δύο από αυτές. Επιπλέον παρατηρούνται και αλλαγές στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του τροφίμου όπως είναι η γεύση, το χρώμα και η υφή του τροφίμου. Αξίζει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι δεν είναι μόνο ευεργετικές οι αλλαγές που προέρχονται από τη θερμική επεξεργασία στα τρόφιμα και συγκεκριμένα στο μαγείρεμα, η υποβάθμιση θρεπτικών συστατικών και αλλαγή στην υφή αλλά και στη γεύση είναι τέτοιες περιπτώσεις. Για αυτό τον λόγο χρειάζεται κάθε τρόφιμο διαφορετική μεταχείριση τόσο στην τιμή της θερμοκρασίας που υπόκειται όσο και στον χρόνο που υποβάλλεται στη θερμοκρασία. Οι τιμές για το κάθε τρόφιμο εξαρτώνται από το είδος του (κρέας, ψάρι, όσπρια κ.τ.λ.).

1.1.2 Ζεμάτισμα (Blanching)

Ως ζεμάτισμα αναφερόμαστε σε μια θερμική επεξεργασία η οποία εφαρμόζεται πριν από την κατάψυξη, την ξήρανση ή την κονσερβοποίηση τροφίμου. Οι στόχοι του

ζεματίσματος εξαρτώνται από τη διαδικασία που θα ακολουθηθεί στην μετέπειτα θερμική επεξεργασία του τροφίμου καθώς από μόνο του το ζεμάτισμα δεν μπορεί να ανταποκριθεί στη δημιουργία ασφαλούς τροφίμου. Στην περίπτωση της συνέχειας με κατάψυξη τότε χρησιμοποιείται για την αδρανοποίηση ενζύμων. Σε προϊόντα που δεν έχουν προηγουμένως υποβληθεί σε ζεμάτισμα παρατηρείτε γρηγορότερη εμφάνιση αλλοιώσεων, όπως αλλαγή χρώματος και γεύσης λόγω ανεπιθύμητης ενζυμικής δραστηριότητας.

Από τα ένζυμα που επηρεάζουν τον φυτικό ιστό ευρέως γνωστά είναι η καταλάση και η υπεροξειδάση. Επομένως αποτελέσματα των δραστηριοτήτων τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο της αποτελεσματικότητας του ζεματίσματος στα τρόφιμα φυτικής προέλευσης. Οι χρόνοι θέρμανσης και για την καταστροφή της υπεροξειδάσης και της καταλάσης εξαρτάται και από παράγοντες όπως ο τύπος φρούτων και λαχανικών, η μέθοδος θέρμανσης, το μέγεθος και η ένταση της θερμοκρασίας του θερμαντικού μέσου.

1.1.3 Παστερίωση (Pasteurization)

Σαν παστερίωση χαρακτηρίζεται η θερμική επεξεργασία που εφαρμόζεται στα τρόφιμα, σε θερμοκρασίες κατά κανόνα μικρότερες από 100°C. Σκοπός της η καταστροφή ενδογενών ενζύμων, βλαστικών μορφών όλων των παθογόνων μικροοργανισμών καθώς και τις βλαστικές μορφές των βακτηρίων, τις ζύμες και τους μύκητες που θα μπορούσαν να αλλοιώσουν το προϊόν κάτω από τις συγκεκριμένες συνθήκες διατήρησής τους.

Η παστερίωση κατατάσσεται ως μια ήπια θερμική επεξεργασία που καταστρέφει τα ενδογενή ένζυμα και τους θερμοευαίσθητους μικροοργανισμούς, τις ζύμες, τους μύκητες και τις βλαστικές μορφές των βακτηρίων όχι όμως των σπορίων τους. Λόγω του χαρακτήρα της ήπιας θερμικής επεξεργασίας η παστερίωση προκαλεί ασήμαντες έως καθόλου μεταβολές στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά και τη θρεπτική αξία των τροφίμων. Επιπροσθέτως επιτυγχάνει τη συντήρησή τους για περιορισμένο χρονικό διάστημα, μερικών ημερών ή και εβδομάδων κατά κανόνα σε συνδυασμό με άλλη μέθοδο συντήρησης. Η παστερίωση χρησιμοποιείται κυρίως από τη βιομηχανία τροφίμων για υγρά κυρίως τρόφιμα με βασικό τρόφιμο το γάλα.

Στην παστερίωση μπορούμε να αναφέρουμε τρεις διαφορετικές διεργασίες οι οποίες διαφέρουν μεταξύ τους στη θερμοκρασία και στον χρόνο που εφαρμόζονται.

- Πρώτη η HTST (High Temperature Short Time), δηλαδή υψηλή θερμοκρασία για σύντομο διάστημα. Συγκεκριμένα θέρμανση 72-74°C για 15-30 sec).
- Η LTLT (Low Temperature Long Time), αφορά χαμηλή θερμοκρασία για αυξημένο διάστημα δηλαδή 62-65°C για 30 min.
- Τέλος η UHT (Ultra High Temperature), δηλαδή υπέρ-υψηλή θερμοκρασία για πολύ σύντομο διάστημα. Συγκεκριμένα 135-140°C για 3-5 sec.

Αξίζει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο και οι τρεις ανωτέρω τιμές θερμοκρασιών και χρόνων εφαρμογής τους αφορούν συγκεκριμένα την περίπτωση του γάλακτος και δεν είναι γενικής εφαρμογής σε όλα τα τρόφιμα που χρησιμοποιείται η τεχνική της παστερίωσης. Η βελτιστοποίηση της διαδικασίας της παστερίωσης εξαρτάται από τον σχετικό ρυθμό καταστροφής των μικροοργανισμών σε σύγκριση με τους παράγοντες ποιότητας. Η HTST μέθοδος γενικά αποτελεί την καλύτερη επιλογή διότι αποδίδει καλύτερης ποιότητας προϊόντα (Μπλούκας, 2004).

1.1.4 Εμπορική Αποστείρωση (Commercial Sterilization)

Ένα τρόφιμο ορίζεται ως εμπορικά αποστειρωμένο όταν δεν περιέχει βιώσιμη μορφή μικροοργανισμών. Λόγο της λογαριθμικής καταστροφής των μικροοργανισμών δεν είναι εφικτή η πλήρης καταστροφή τους για αυτό χρησιμοποιείται ο όρος εμπορική αποστείρωση. Σαν βιώσιμος μικροοργανισμός θεωρείται εκείνος ο οποίος μπορεί όταν βρεθεί σε ευνοϊκές για αυτόν συνθήκες να πολλαπλασιαστεί. Η διεργασία της εμπορικής αποστείρωσης ορίζεται ως μια θερμική επεξεργασία τροφίμων η οποία πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες υψηλότερες των 100°C και αποβλέπει στην καταστροφή των σπορίων των βακτηρίων. Επίσης με την εμπορική αποστείρωση καταστρέφονται όλες οι βλαστικές μορφές των βακτηρίων, οι ζύμες και οι μύκητες επειδή είναι λιγότερο ανθεκτικοί στη θέρμανση από τα σπόρια των βακτηρίων.

Η τεχνική της εμπορικής αποστείρωσης είναι ευρέως διαδεδομένη στη βιομηχανία τροφίμων και αποτελεί πολύ συνήθη μέθοδο επεξεργασίας των τροφίμων. Επιπλέον η εμπορική αποστείρωση συναντάται τις περισσότερες φορές σε κονσερβοποιημένα τρόφιμα (σε αυτά χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά η τεχνική), με τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται η βιομηχανική στείρωση του προϊόντος (εμπορική αποστείρωση) καθιστώντας το τρόφιμο ανεπηρέαστο για μεγάλο διάστημα από μικροοργανισμούς και αλλοιωγόνους παράγοντες όσο βρίσκεται κλειστό στην κονσέρβα. Με συσκευασία υπό κενό ελλείψει οξυγόνου εμποδίζεται η ανάπτυξη των αερόβιων μικροοργανισμών. Έχουν

παρατηρηθεί περιπτώσεις στις οποίες το οξυγόνο της κονσέρβας (κονσέρβα με προϊόν κρέατος) δεν έχει αφαιρεθεί τελείως, και έχουν εφαρμοστεί ήπιες θερμικές επεξεργασίες σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους συντήρησης, οδήγησε η εμφάνιση αερόβιων μικροοργανισμών (*Bacillus subtilis*) προκαλώντας αλλοίωση στο τρόφιμο.

Η εμπορική αποστείρωση του κονσερβοποιημένου τροφίμου πραγματοποιείται συνήθως με τη θέρμανση με ατμό σε θερμοκρασία τέτοια ώστε να καταστραφεί ένας ζητούμενος αριθμός μικροοργανισμών. Ο απαιτούμενος χρόνος για την εμπορική αποστείρωση εξαρτάται, από τα χαρακτηριστικά του τροφίμου, το είδος του περιέκτη (γυαλί, Tetrapak, κονσέρβα), το μέγεθος του περιέκτη, τον προσανατολισμό του όπως επίσης και τα χαρακτηριστικά του μέσου θέρμανσης.

Σημαντικό ρόλο στην επιλογή τόσο της θερμικής διεργασίας που θα εφαρμοστεί όσο και στην ομάδα μικροοργανισμών που θα αντιμετωπιστούν παίζει σημαντικό ρόλο η τιμή του pH. Τα προϊόντα με βάση την τιμή τους χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες (Πανάγου, 2013):

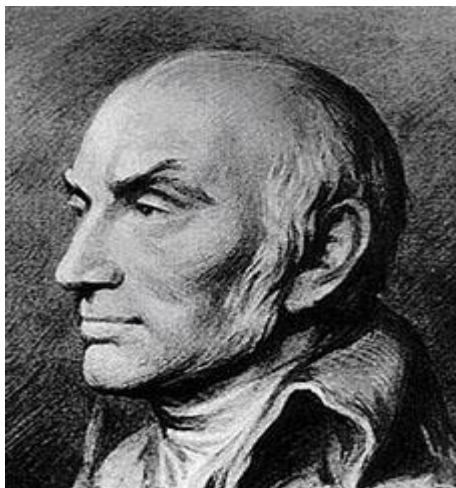
- Υψηλής οξύτητας τρόφιμα με $pH \leq 3.7$
- Οξίνα τρόφιμα με $pH 3.7-4.5$
- Χαμηλής οξύτητας τρόφιμα $pH \geq 4.5$

1.1.5 Κονσερβοποίηση (Canning)

Η κονσερβοποίηση αποτελεί μια από τις παλαιότερες μεθόδους συντήρησης τροφίμων. Η κονσερβοποίηση νοείται σαν θερμική επεξεργασία είτε παστερίωση είτε εμπορική αποστείρωση τροφίμων τα οποία βρίσκονται σε ερμητικά κλειστούς περιέκτες (Στοφόρος, 2013). Για στερεά τρόφιμα τα οποία θερμαίνονται με αγωγή, η θέση του κρίσιμου σημείου τους βρίσκεται στο γεωμετρικό κέντρο της κονσέρβας (Pflug, 1975).

Η κονσερβοποίηση ανακαλύφθηκε από τον Nicolas Francois Appert (1749-1841) στη Γαλλία το 1790. Ο Ναπολέων είχε προκηρύξει διαγωνισμό με χορήγηση βραβείου με σκοπό την ανάπτυξη μιας μεθόδου συντήρησης τροφίμων για τις ανάγκες του Γαλλικού στρατού προκειμένου να αντιμετωπιστεί η ασθένεια του σκορβούτου που έπληττε επί χρόνια όλους όσους ταξίδευαν στη θάλασσα. Το βραβείο πήρε το Nicholas Appert, οι εργασίες του οποίου οδήγησαν στην ανάπτυξη της εμπορικής αποστείρωσης. Οι αρχές που ακολούθησε ο Appert για την κονσερβοποίηση ισχύουν πρακτικά μέχρι και σήμερα (Στοφόρος, 2013). Στα περισσότερα κονσερβοποιημένα προϊόντα μικροοργανισμός στόχος αποτελεί το *Clostridium botulinum*. Το *C. botulinum* είναι υποχρεωτικά αναερόβιος μικροοργανισμός ο οποίος υπάρχει ευρύτατα στην φύση και παράγει μια

τοξίνη η οποία είναι θανατηφόρα για τον άνθρωπο. Επιπλέον τα σπόρια του είναι οι πιο θερμοάντοχα και μπορούν να αναπτυχθούν σε χαμηλής οξύτητας κονσερβοποιημένα τρόφιμα για το λόγο αυτό η ελάχιστη θερμική επεξεργασία προϊόντων χαμηλής οξύτητας στοχεύει στην καταστροφή των σπορίων του *Clostridium botulinum*.



Σχήμα 1: Ο εφευρέτης της κονσερβοποίησης Nicolas François Appert (1749-1841).

Στις μέρες μας η κονσερβοποίηση χρησιμοποιείται σχεδόν σε όλα τα είδη τροφίμων (λαχανικά, προϊόντα κρέατος, φρούτα) εφαρμόζοντας βέβαια στην κάθε περίπτωση τροφίμου διαφορετικές θερμικές επεξεργασίες. Η κονσερβοποίηση έφερε την επανάσταση στην συντήρηση τροφίμων και για αυτό τον λόγο προτιμάται ακόμα και στις μέρες μας σε πολλές περιπτώσεις. Η εξέλιξη της όμως δεν σταματάει και πλέον και με την προσθήκη του CFD στη βιομηχανία τροφίμων και των πολλών μελετών που έχουν πραγματοποιηθεί αποκτά ακόμα μεγαλύτερη χρηστικότητα και νέες ιδέες βελτίωσης.

1.2 Σχεδιασμός θερμικών διεργασιών

Η μελέτη της μετάδοσης της θερμότητας στα τρόφιμα είναι μεγάλης σημασίας, επειδή η θερμική επεξεργασία αποτελεί την πιο συνηθισμένη τεχνική η οποία χρησιμοποιείται για τη διατήρηση των τροφίμων στις μέρες μας. Δύο διαφορετικές μέθοδοι θερμικής επεξεργασίας είναι γνωστές, η ασηπτική επεξεργασία κατά την οποία το τρόφιμο αποστειρώνεται πριν τοποθετηθεί στην συσκευασία και η κονσερβοποίηση κατά την οποία τα τρόφιμα συσκευάζονται και κατόπιν αποστειρώνονται (Barbosa et al, 1997).

Ο σχεδιασμός θερμικών διεργασιών αποτελεί σημαντικό κομμάτι για τη δημιουργία ενός ασφαλούς τροφίμου από τη βιομηχανία. Ο σχεδιασμός αυτός απαιτεί γνώση:

- της θερμοανθεκτικότητας των μικροοργανισμών για κάθε τρόφιμο ξεχωριστά, και
- του ρυθμού θέρμανσης του τροφίμου προς επεξεργασία ανά περίπτωση.

Ο ρυθμός θέρμανσης μπορεί να προσδιοριστεί ως μια ανάλυση των παραμέτρων οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα να επηρεάσουν τη θερμική συμπεριφορά ενός προϊόντος.

1.3 Θερμοανθεκτικότητα μικροοργανισμών

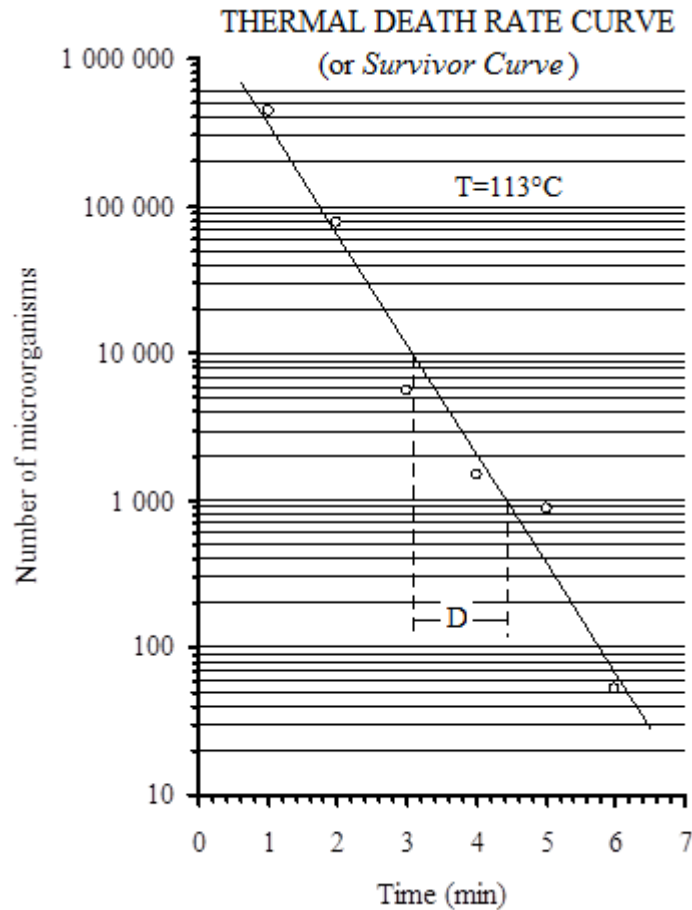
Η συλλογή των κινητικών δεδομένων της θερμικής απενεργοποίησης των μικροοργανισμών γίνεται με τη χρήση μιας καμπύλης σε μορφή διαγράμματος γνωστή ως «καμπύλη επιβίωσης». Η καμπύλη αυτή αναφέρεται σε ένα ημι-λογαριθμικό διάγραμμα το οποίο απαρτίζεται από τον αριθμό των μικροοργανισμών που επιβιώνουν μιας δεδομένης θερμικής επεξεργασίας συναρτήσει του αντίστοιχου χρόνου θέρμανσης.

Οι δύο κύριες παράμετροι είναι οι τιμές D και z οι οποίες με την σειρά τους προσδιορίζονται από κατάλληλα διαγράμματα (Σχήματα 2 και 3).

Η τιμή D ορίζεται ως ο χρόνος σε σταθερή θερμοκρασία, T , που απαιτείται για την καταστροφή του 90% του αρχικού φορτίου των μικροοργανισμών (Στοφόρος, 2014). Η τιμή αυτή εκφράζεται μαθηματικά με τον εξής τύπο:

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

Όπου A και B αφορούν μικροβιακούς πληθυσμούς για χρονικές στιγμές t_1 και t_2 αντίστοιχα. Παρακάτω παρουσιάζεται μια τυπική καμπύλη ρυθμού θερμικής καταστροφής (Σχήμα 3) για τον προσδιορισμό της τιμής D .

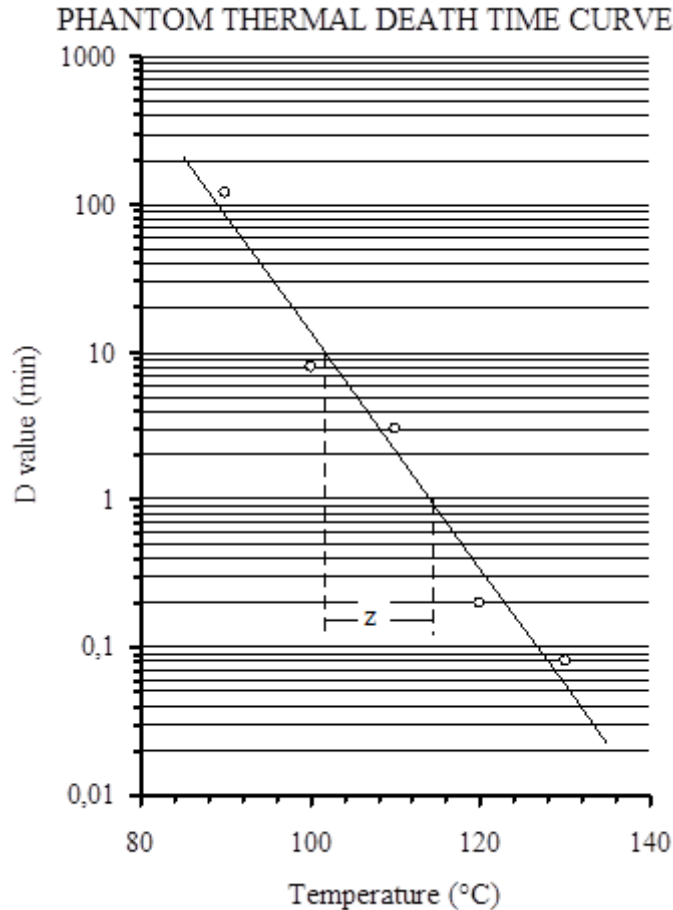


Σχήμα 2: Καμπύλη ρυθμού θερμικής καταστροφής (Stoforos & Taoukis, 2004).

Η τιμή z ορίζεται σαν τη διαφορά θερμοκρασίας η οποία απαιτείται για να δεκαπλασιαστεί ή να υποδεκαπλασιαστεί η τιμή D_T . Η τιμή z εκφράζεται μαθηματικά ως:

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

Όπου D_1 και D_2 οι τιμές D στις αντίστοιχες θερμοκρασίες T_1 και T_2 . Η σχέση αυτή εμφανίζεται και σε μορφή διαγράμματος σε λογαριθμική κλίμακα στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3: Φαινομενική καμπύλη χρόνου θερμικής καταστροφής (Stoforos & Taoukis, 2004).

1.4 Μικροοργανισμός στόχος

Ο μικροοργανισμός στόχος σε μια θερμική επεξεργασία ενός τροφίμου, είναι ο μικροοργανισμός ο οποίος αρχικά βρίσκεται συνθήκες για να αναπτυχθεί στο συγκεκριμένο τρόφιμο καθώς και επίσης αυτός του οποίου τα στελέχη είναι τα πιο ανθεκτικά στη θερμική επεξεργασία στο τρόφιμο. Η απενεργοποίηση του μικροοργανισμού αυτού και των спорίων ή βλαστικών μορφών του στο τρόφιμο αυτόματα συνεπάγεται ότι το τρόφιμο είναι ασφαλές προς κατανάλωση (Στοφόρος, 2013).

Το pH καθορίζει το είδος των μικροοργανισμών που αναπτύσσονται σε ένα προϊόν (Μπλούκας, 2004). Στα προϊόντα χαμηλής οξύτητας, με $pH > 4.5$, είναι πολύ πιθανό να βρίσκεται το *Clostridium Botulinum*, το οποίο αποτελεί τον πλέον θερμοανθεκτικό μεσόφιλο σπορογόνο παθογόνο βακτήριο.

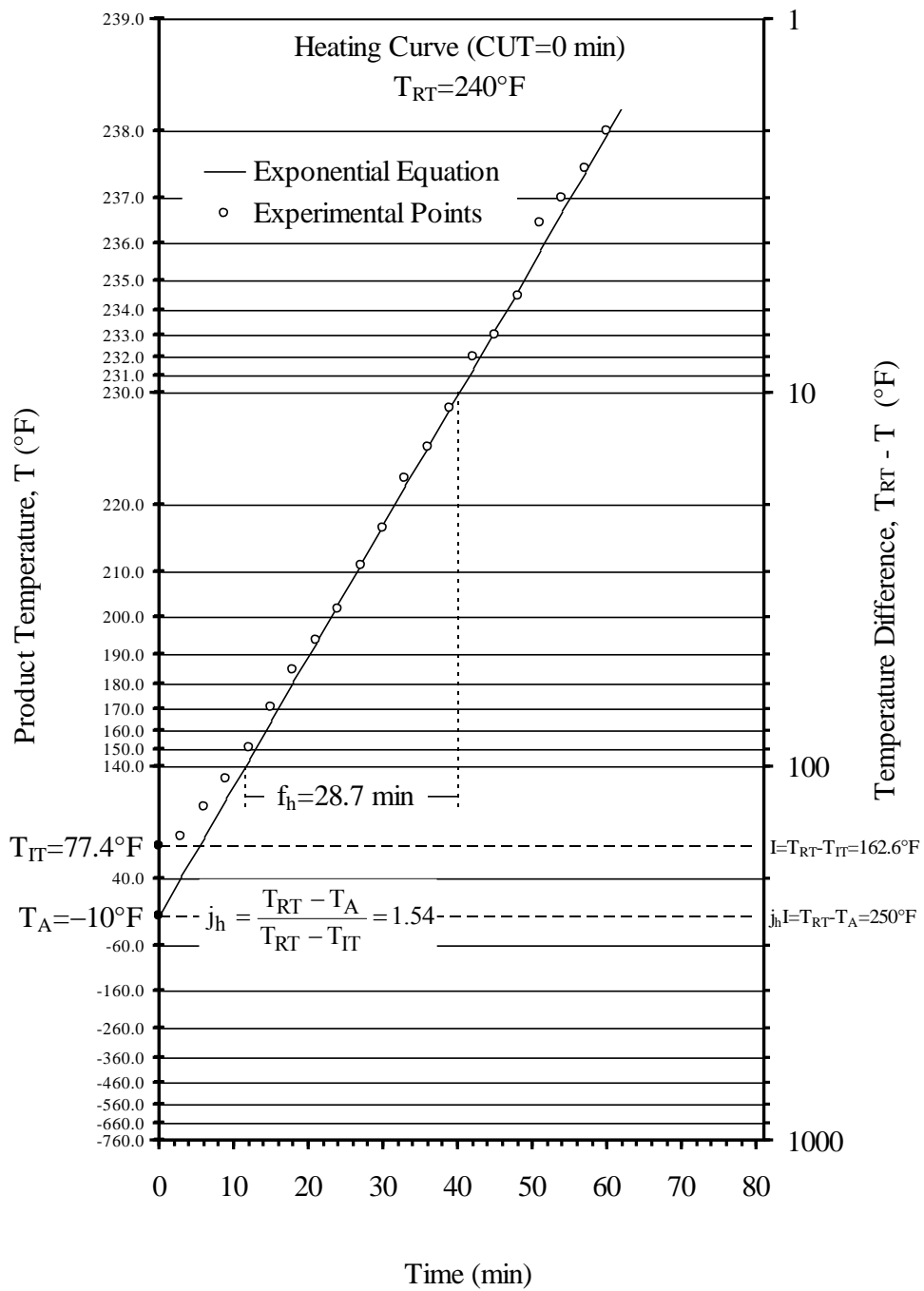
Κατά την κονσερβοποίηση των προϊόντων αφαιρείται από τις κονσέρβες ο αέρας. Συνεπώς στο εσωτερικό των κονσερβών μετά το ερμητικό κλείσιμο τους δημιουργείται

ένα αναερόβιο περιβάλλον. Κάτω από αυτές τις συνθήκες τα σπόρια του *C. botulinum* βρίσκουν ιδανικό περιβάλλον για να αναπτυχθούν, να βλαστήσουν και οι βλαστικές μορφές τους πολλαπλασιασθούν και να παράγουν την τοξίνη. Η παραγόμενη τοξίνη είναι άκρως δραστική. Το ποσοστό θνησιμότητας ατόμων που κατανάλωσαν τρόφιμα τα οποία περιείχαν την τοξίνη ξεπερνά το 65% (Μπλούκας, 2004).

Το *C. botulinum* είναι ευρύτατα διαδεδομένο στην φύση και ιδίως στο χώμα, όλα τα τρόφιμα θεωρούνται μολυσμένα από τα σπόρια του (Μπλούκας, 2004). Το *C. botulinum* είναι μία αναερόβιος Gram-θετική, σπορογόνος ράβδος που παράγει μία ισχυρή νευροτοξίνη. Τα σπόρια είναι ανθεκτικά στη θερμότητα και μπορούν να επιζήσουν στα τρόφιμα που υποβάλλονται σε ελάχιστη ή λανθασμένη επεξεργασία. Επτά τύποι (A, B, C, D, E, F και G) της αλλαντίασης έχουν αναγνωρισθεί, με βάση την αντιγονική ιδιομορφία της τοξίνης που παράγεται από κάθε στέλεχος. Οι τύποι A, B, E και F προκαλούν την ανθρώπινη αλλαντίαση. Οι τύποι C και D προκαλούν τις περισσότερες περιπτώσεις αλλαντίασης στα ζώα. Τα συνηθέστερα ζώα που επηρεάζονται είναι τα άγρια πτηνά και πουλερικά, τα βοοειδή, τα άλογα και μερικά είδη ψαριών. Αν και ο τύπος C έχει απομονωθεί από το χώμα στην Αργεντινή, κανένα ξέσπασμα από αυτό δεν έχει αναγνωριστεί. Η συνολική πρόληψη δεν είναι δυνατή. Όλα τα εμπορικά κονσερβοποιημένα και συντηρημένα τρόφιμα είναι κανονικά ασφαλή για κατανάλωση (όλα αποστειρώνονται ή είναι πάρα πολύ όξινα ή συντηρούνται διαφορετικά). Στα φρέσκα προϊόντα δεν υπάρχει κανένας κίνδυνος. Η τοξίνη καταστρέφεται στους 75-80°C, οπότε τα κατάλληλα θερμικά επεξεργασμένα και μαγειρεμένα τρόφιμα είναι ασφαλή (Food-info, 2014).

1.5 Ρυθμός μεταφοράς θερμότητας

Δύο παράγοντες οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την περιγραφή μιας καμπύλης θερμικής διείσδυσης είναι οι εμπειρικές παράμετροι f και j , που πρώτα αναφέρθηκαν από τον Ball (1923) με σκοπό την περιγραφή της εξέλιξης της θερμοκρασίας ενός προϊόντος κατά την διάρκεια μιας θερμικής επεξεργασίας (Stoforos, 2003). Στο Σχήμα 3 που ακολουθεί παρουσιάζεται το διάγραμμα που ορίζει τους παράγοντες f και j .



Σχήμα 4: Καμπύλη θερμικής διείσδυσης (Stoforos & Taoukis, 2004).

Κεφάλαιο 2^ο Εισαγωγή στην Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (CFD)

Η υπολογιστική ρευστοδυναμική ή αλλιώς CFD (Computational Fluid Dynamics) είναι ένα ισχυρό εργαλείο το οποίο στις μέρες μας χρησιμοποιείται ευρέως για την προσομοίωση πολλών διεργασιών οι οποίες αφορούν την ροή ρευστών, ενώ τελευταία έχουν εισχωρήσει και στη βιομηχανία τροφίμων. Στη συγκεκριμένη βιομηχανία και με την ταυτόχρονη εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών, οι οποίοι αποτελούν συνδετικό κρίκο με την περαιτέρω βελτίωση του προγράμματος, αποτελούν μια μείζονος σημασίας τεχνική, που παρέχει αποτελεσματικές και αξιόπιστες σχεδιαστικές λύσεις για διάφορα θέματα. Αρχικά, το CFD δημιουργήθηκε από καινοτόμα επιτεύγματα άρτια καταρτισμένων ατόμων όπως ο Richardson (1910) και οι Courant, Friedrichs και Lewy (1928) οι οποίοι στην προσπάθειά τους να λάβουν μια εικόνα από την κίνηση ρευστών ανέπτυξαν μια σειρά από ισχυρές αριθμητικές τεχνικές που με την σειρά τους εξέλιξαν την αριθμητική περιγραφή από όλα τα είδη ροών των ρευστών (Shang, 2004).

Αρχικά, σκοπός της μηχανικής των ρευστών ήταν η προσομοίωση της ροής διαφόρων ρευστών με τη βοήθεια ηλεκτρονικών υπολογιστών. Η υπολογιστική ρευστοδυναμική έγινε σημείο αναφοράς για τον συνδυασμό της φυσικής, των αριθμητικών μεθόδων των μαθηματικών αλλά και γενικότερα όλων των τότε γνωστών επιστημονικών μεθόδων για τον υπολογισμό της ροής των ρευστών. Η μεγάλη άνθηση στην χρήση του CFD πραγματοποιήθηκε και παράλληλα ενισχύθηκε από την μεγάλη ταχύτητα εξέλιξης που γνώρισαν και οι ίδιοι οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές σε επεξεργαστική ισχύ, προσθέτοντας με αυτόν τον τρόπο στοιχεία στη βελτίωση του αρχικού λογισμικού. Το αρχικό λογισμικό διέθετε πλέον μεγαλύτερη αξιοπιστία, ταχύτητα επεξεργασίας δεδομένων και αποτελεσμάτων και μια γενικότερη πιο φιλική προς τον χρήστη λειτουργία. Πλέον η υπολογιστική ρευστοδυναμική είναι άμεσα συνδεδεμένη με την εξέλιξη και την πρόοδο των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Στις αρχές της δεκαετίας του 1980 πραγματοποιήθηκε για πρώτη φορά λύση εξισώσεων γνωστές ως εξισώσεις Euler για περιπτώσεις δύο διαστάσεων (2-D) και αργότερα τριών διαστάσεων (3-D). Φτάνοντας στις αρχές της δεκαετίας του 1990 και μέχρι τις μέρες μας η βελτίωση των τεχνικών του CFD είναι ραγδαία και χρησιμοποιείται σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών από αεροναυτιλία μέχρι μελέτες σε βιομηχανία τροφίμων (Sun, 2007).

2.1 Πλεονεκτήματα του CFD

Το CFD δημιουργήθηκε από μια συνένωση μικρότερων υποπρογραμμάτων τα οποία ήταν κατασκευασμένα για την επίλυση ενός συγκεκριμένου προβλήματος ροής και κατέληξε στο να είναι ένα υπολογιστικό περιβάλλον για κάθε κλάδο της ρευστοδυναμικής. Χάρη στο CFD είναι εφικτή μια εκ βάθους ανάλυση της μηχανικής ρευστών (Bakker, 2001). Τα πλεονεκτήματα του CFD μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής (Wanot, 1996):

- Προσφέρει μια λεπτομερή και κατανοητή κατανομή ροής, απώλειες βάρους, μάζας και μεταφοράς θερμότητας, διαχωρισμό σωματιδίων κλπ.
- Είναι εφικτό να μελετά αλλαγές στη γεωμετρία σε πολύ λιγότερο χρόνο και κόστος από ότι αν γινόταν ένα εργαστηριακό τεστ.
- Μπορεί να λύσει πολλές απορίες και ερωτήματα για κάποιο θέμα ρευστοδυναμικής σε σύντομο χρονικό διάστημα.
- Μπορεί να μειώσει τα προβλήματα κλιμάκωσης επειδή τα μοντέλα βασίζονται σε θεμελιώδεις φυσικούς νόμους και είναι ανεξάρτητα της κλίμακας.
- Είναι ιδιαιτέρως χρήσιμο στην εξομοίωση συνθηκών όπου δεν είναι εύκολο να ληφθούν λεπτομερείς μετρήσεις όπως η υψηλή θερμοκρασία και το επικίνδυνο περιβάλλον σε ένα φούρνο.
- Επειδή είναι μια ενεργή ανάλυση και σχεδιαστικό εργαλείο, μπορεί να υποδείξει την ροή των λαθών και όχι μόνο των αποτελεσμάτων όταν εκτιμά προβλήματα σε μια διεργασία.

Πολλές εργασίες επεξεργασίας τροφίμων όπως, ψύξη, ξήρανση, ψήσιμο, ανάμιξη, κατάψυξη, μαγείρεμα, παστερίωση και εμπορική αποστείρωση αναφέρονται σε ροές ρευστών. Η άφιξη του CFD στη βιομηχανία τροφίμων έφερε ένα διαφορετικό τρόπο οπτικής στους μηχανικούς τροφίμων επειδή κατανόησαν καλύτερα τον εξοπλισμό των τροφίμων σε σχεδιαστικό επίπεδο και πρόσφερε καλύτερα αποτελέσματα στην ποιότητα και την ασφάλεια των τροφίμων (FRPERC, 1995).

Εξοπλισμός όπως φούρνοι, εναλλάκτες θερμότητας, συστήμα ψύξης βελτιώθηκαν μέσω της εφαρμογής των τεχνικών του CFD που βοήθησαν στην κατανόηση της λειτουργίας και της διαδικασίας σχεδιασμού. Το CFD εξελίχθηκε σε ένα πολύ ισχυρό εργαλείο, στην ανάπτυξη και βελτιστοποίηση της επεξεργασίας των τροφίμων.

2.2 CFD και Βιομηχανία Τροφίμων

Οι δεσμοί μεταξύ του CFD και των διεργασιών που αφορούν τις βιομηχανίες τροφίμων, όπως ανάμιξη, ξήρανση, μαγείρεμα, εμπορική αποστείρωση, ψύξη και κατάψυξη, είναι ισχυροί. Οι παραπάνω διεργασίες χρησιμοποιούνται τακτικά για να ενισχύσουν την ποιότητα, την ασφάλεια και τη διάρκεια ζωής των τροφίμων (Wang & Sun, 2003). Το κομμάτι που καθιστά το CFD επιτυχές είναι το πόσο πολύ τα αριθμητικά αποτελέσματα συμφωνούν με τα αντίστοιχα πειραματικά και σε ποιο βαθμό μπορεί το πρόγραμμα να προβλέψει πολύπλοκα φαινόμενα τα οποία δεν μπορούν να απομονωθούν για επαλήθευση στο εργαστήριο (Sethian, 1993). Η έρευνά μέσω του CFD έχει σαν σκοπό τα προϊόντα να μπορούν να επεξεργαστούν και να αποθηκευτούν σε πιο αποδοτικά συστήματα. Επιπλέον, μπορεί να βοηθήσει τις βιομηχανίες τροφίμων να ανταποκριθούν σε μια αναπτυσσόμενη αγορά δημιουργώντας και ενισχύοντας στρατηγικές επεξεργασίας, επιδιώκοντας ταυτόχρονα στη διατήρηση υψηλών επιπέδων ποιότητας προϊόντων.

2.2.1 Βασικές Αρχές του CFD

Οι κύριες εξισώσεις της ροής ρευστών και της μεταφοράς θερμότητας μπορούν να θεωρηθούν σαν μαθηματικές εκφράσεις των νόμων διατήρησης της μηχανικής ρευστών και είναι γνωστές ως εξισώσεις Navier-Stokes. Όταν εφαρμόζονται σε ένα συνεχές ρευστό, σχετίζονται με το ρυθμό αλλαγής μιας επιθυμητής ιδιότητας ενός ρευστού που ανήκει στις εξωτερικές δυνάμεις και μπορεί να θεωρηθεί ως:

- Ο νόμος της διατήρησης της μάζας, ο οποίος αναφέρει ότι, ροή μάζας που εισέρχεται σε ένα ρευστό περιβάλλον πρέπει να ισορροπήσει ακριβώς με εκείνη που εξέρχεται.
- Ο νόμος της διατήρησης της ορμής (Δεύτερος νόμος του Νεύτωνα), αναφέρει ότι το άθροισμα των εξωτερικών δυνάμεων που δρα πάνω σε ένα ρευστό σωματίδιο ισούται με τον ρυθμό αλλαγής της γραμμικής ορμής.
- Ο νόμος της διατήρησης της ενέργειας (Πρώτος νόμος της Θερμοδυναμικής), ορίζει ότι ο ρυθμός αλλαγής της ενέργειας ενός ρευστού σωματιδίου ισούται με την προστιθέμενη θερμότητα και ενέργεια που έλαβαν χώρο στο σωματίδιο.

Εφαρμόζοντας αυτούς τους νόμους διατήρησης πάνω σε γεωμετρικές συγκεκριμένων διαστάσεων σε ένα ρευστό περιβάλλον, είναι εφικτό να κάνουμε μια συστηματική εκτίμηση των αποτελεσμάτων και των αλλαγών που επέρχονται.

Πίνακας 1: Εξισώσεις Συνέχειας (3), Ορμής (4) και Ενέργειας (5)

Continuity Equation (Εξίσωση συνέχειας)	$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0$						
Momentum Equation (Εξίσωση Ορμής)	$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[-\rho \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i$						
Energy Equation (Εξίσωση Ενέργειας)	$\frac{\partial}{\partial t} (\rho C_a T) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j C_a T) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = S_T$						

Υπάρχουν δύο τρόποι να μοντελοποιήσουμε τις αλλαγές στην πυκνότητα. Η πρώτη είναι να υποθέσουμε ότι οι αλλαγές στην πυκνότητα των ρευστών χρειάζονται μόνο στις εξισώσεις της ορμής και έχουν την παρακάτω μορφή:

$$\rho = \rho_{ref} [1 - \beta(T - T_{ref})] \quad (6)$$

όπου:

- ρ η πυκνότητα του προϊόντος kg/m^3
- T η θερμοκρασία $^{\circ}\text{C}$

Η παραπάνω μέθοδος είναι γνωστή ως υπόθεση Buossinesq και έχει εφαρμοστεί σε πολλές εφαρμογές μηχανικής τροφίμων με επιτυχία (Abdul Ghani, Farid, Chen & Richards, 1999). Παρόλα αυτά σε περιπτώσεις όπου έχουμε υψηλές θερμοκρασιακές διαφορές, η προσέγγιση δεν είναι πλέον η σωστή και πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια διαφορετική μέθοδος (Ferziger & Peric, 2002). Μπορούμε να θεωρήσουμε το ρευστό ως ιδανικό αέριο και να εκφράσουμε τη διαφορά πυκνότητας

Η ανωτέρω μέθοδος μπορεί να θεωρηθεί σαν μέθοδο ελαφριάς συμπίεσης, το οποίο σημαίνει ότι η πυκνότητα του ρευστού είναι εξαρτημένη της θερμοκρασίας και της σύνθεσης αλλά όχι και της πίεσης. Αυτή η εκδοχή έχει επίσης, χρησιμοποιηθεί για ζητήματα μηχανικής τροφίμων, αν και τα αποτελέσματα εμφάνισαν μεγαλύτερη δυσκολία στην σύγκληση (Foster et al, 2002).

2.2.2 Αριθμητική Ανάλυση

Ένα από τα σημαντικότερα θέματα που απασχόλησε του δημιουργούς του CFD ήταν η επιλογή της καταλληλότερης τεχνικής ώστε να διακριτοποιήσουν το πρότυπο συνεχές ρευστό. Από τις πολλές υπάρχουσες τεχνικές η πιο σημαντική είναι αυτή που περιλαμβάνει την πεπερασμένη διαφορά, πεπερασμένα στοιχεία και πεπερασμένους

όγκους. Παρόλο που όλες αυτές δίνουν ίδια αποτελέσματα σε περιπτώσεις με πυκνά πλέγματα, το εύρος των κατάλληλων προβλημάτων είναι διαφορετικό για το κάθε ένα από αυτά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η εφαρμοζόμενη αριθμητική τεχνική να καθορίζεται από το φάσμα των κωδικοποιημένων εφαρμογών που λαμβάνονται.

Οι τεχνικές στις πεπερασμένες διαφορές περιορίζονται σε χρήση λόγω δυσκολιών που αντιμετωπίζονται σε περιπτώσεις με πολύπλοκες γεωμετρίες. Αυτό έφερε ως αποτέλεσμα την αυξημένη χρήση πεπερασμένων στοιχείων και όγκων, που χρησιμοποιούν κατασκευές πλέγματος ώστε να αντιμετωπίσουν επιτυχώς αυθαίρετες γεωμετρίες. Πεπερασμένα στοιχεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να έχουμε τις βέλτιστα δυνατά αποτελέσματα για κάποια είδη εξισώσεων (Ferziger & Peric, 2002). Παρόλα αυτά ο αριθμός των εμπορικών πακέτων με πεπερασμένα στοιχεία είναι περιορισμένος, κάτι που αντικατοπτρίζει και τις δυσκολίες που αφορούν τον προγραμματισμό και την κατανόηση αυτής της τεχνικής.

Ευτυχώς, αυτές οι δυσκολίες μπορούν να ξεπεραστούν μέσα από την εφαρμογή των μεθόδων των πεπερασμένων όγκων. Όταν οι κύριες εξισώσεις εκφράζονται μέσω πεπερασμένων όγκων, σχηματίζουν μια φυσική διαισθητική μέθοδο για την επίτευξη ενός συστηματικού λογαριασμού των αλλαγών στην μάζα, ορμή και ενέργεια καθώς το ρευστό διασχίζει τα όρια διακριτών όγκων μέσα στον υπολογιστικό χώρο (Versteeg & Malesekeera, 1995). Η ευκολία στην κατανόηση, προγραμματισμό και την ευκολία που παρουσιάζουν στην περιστροφή των γεωμετριών των πεπερασμένων όγκων είχε ως αποτέλεσμα να είναι για τους προγραμματιστές κωδικών του CFD οι πιο συχνά χρησιμοποιήσιμες.

2.2.3 Λύση του προβλήματος ροής

Ένας κώδικας του CFD για να μπορέσει να επιλύσει ένα πρόβλημα ροής πρέπει να λάβει κάποιες παραμέτρους από το χρήστη, να τους βάλει στη σωστή σειρά και να τους επιλύσει για τις συγκεκριμένες οριακές συνθήκες. Επαναληπτικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται κυρίως από κώδικες του CFD για να λύσουν ένα ολόκληρο μέρος από διακριτοποιημένες εξισώσεις ώστε να εφαρμοστούν σε μία ενιαία εξαρτημένη μεταβλητή. Ο ανεξάρτητος λύτης SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) που κατασκευάστηκε από τους Patankar and Spalding (1972) προσδιορίζει το πεδίο πίεσης έμμεσα, κλείνοντας τις διακριτοποιημένες εξισώσεις ορμής με τις εξισώσεις συνέχειας με διαδοχικό τρόπο. Επομένως, καθώς αυξάνεται ο αριθμός των κελιών, η ελλειπτική φύση του πεδίου πίεσης γίνεται πιο έντονη και ο ρυθμός σύγκλισης μειώνεται

αισθητά (Ferry, 2002). Η εξέλιξη των τεχνικών των πολλαπλών πλεγμάτων που υπολογίζουν τις διορθώσεις ταχύτητας και πίεσης με ταυτόχρονο τρόπο διαμόρφωσης, βελτιώνουν τα εύρη σύγκλισης. Η βελτίωση στην αποδοτικότητα του λύτη που προήλθε από τη χρήση του πολλαπλού πλέγματος, έχει ως μειονέκτημα την αυξημένη χρήση μνήμης η οποία μεταβάλλεται αναλογικά του αριθμού των κελιών. Έτσι, με τις σημερινές επεξεργαστικές ικανότητες των υπολογιστών, σε ορισμένες περιπτώσεις υπάρχει δυσκολία στην επίτευξη ανεξαρτησίας του πλέγματος. Πολλά πακέτα του CFD συμπεριλαμβανομένου και αυτών που βασίζονται σε μη δομημένα πλέγματα, εφαρμόζουν την μέθοδο του πολλαπλού πλέγματος ως την αρχική επιλογή λύσης (Ferry, 2002).

2.2.4 Ερμηνεία της λύσης

Η οπτική εμφάνιση των αποτελεσμάτων μιας λύσης είναι συχνά απαραίτητη διότι βοηθούν στην καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων. Επιπλέον έχουν χρησιμοποιηθεί σε πολλές μελέτες ώστε να βοηθήσουν το σύστημα σχεδιασμού (Foster, et al, 2005). Επιπροσθέτως, δεδομένα πεδίων εύκολα λαμβάνονται ώστε κατόπιν να επεξεργασθούν σε ένα άλλο πρόγραμμα μοντελοποίησης περαιτέρω. Επιπλέον πεδία σε μορφή κινούμενης εικόνας έχουν πλέον αυξημένη ζήτηση και εμφανίζονται σε μελέτες επιστημονικών περιοδικών στο διαδίκτυο (D'Agaro et al, 2006).

2.3 Εμπορικοί Κώδικες του CFD

Οι εμπορικοί κώδικες του CFD έχουν παρουσιάσει σημαντική πρόοδο τις τελευταίες δύο δεκαετίες με αποτέλεσμα να επιβαρυνθούν με απαιτήσεις μοντελοποίησης διαφορετικών ερευνητικών τομέων καθιστώντας το πρόγραμμα λιγότερο ευέλικτο. Έτσι, δημιουργήθηκε μεγάλος ανταγωνισμός μεταξύ των προγραμματιστών που οδήγησε στην ανάπτυξη ενός φάσματος λειτουργιών οι οποίες διαφέρουν από κώδικα σε κώδικα. Από τους υπάρχοντες, μία μικρή ομάδα εξ αυτών καλύπτει τις απαιτήσεις ενός μηχανικού τροφίμων. Οι απαιτήσεις αυτές αφορούν: την ικανότητα εισαγωγής της γεωμετρίας, τις οριακές και αρχικές συνθήκες από ένα εξωτερικό αρχείο κειμένου, όπως τη διφασική ροή και τις ιδιότητες ρευστών. Κατά συνέπεια οι λειτουργικές παράμετροι ενός κώδικα θα πρέπει να ληφθούν υπόψη πριν την επιλογή του.

2.3.1 CFX[®] (ANSYS Inc.)

Η CFX[®] πρόσφατα (2003) απορροφήθηκε από την ANSYS Inc. και ονομάζεται πλέον ANSYS CFX[®]. Μέσα στην ANSYS CFX[®] υπάρχει ένα πλήθος πακέτων λογισμικού τα οποία χρησιμοποιούνται ώστε να λύσουν διάφορα θέματα ροής ρευστών. Υπάρχει επίσης και ένας μεγάλος αριθμός ενημερωμένων και πλήρως λειτουργικών φυσικών μοντέλων, τα οποία περιλαμβάνουν πολυφασικές ροές, πορώδη υλικά μεταφορά θερμότητας, μοντέλα ακτινοβολίας και καύσης. Περιλαμβάνονται επίσης προχωρημένα μοντέλα τύρβης που περιέχουν ένα μοντέλο που προβλέπει την μεταβολή της ροής από γραμμική σε τυρβώδη (Menter-Langtry γ-θ μοντέλο). Η ANSYS CFX[®] παρέχει επίσης μια εύκολη στην χρήση και πλήρως παραμετροποιημένο CAD εργαλείο με ένα αμφίδρομο δεσμό που συνεργάζεται με τα περισσότερα CAD λογισμικά.

2.3.2 FLUENT[®] (FLUENT Inc.)

Η FLUENT Inc. προσφέρει τρία πακέτα λογισμικού στο πλαίσιο του CFD τα οποία είναι κατάλληλα για την χρήση σε προβλήματα μηχανικής τροφίμων. Τα τρία αυτά πακέτα λογισμικού περιλαμβάνουν το FLUENT[®] (γενικής χρήσης με πολυφασικές δυνατότητες), το FIDAP[®] (μοντελοποίηση περίπλοκων γεωμετριών) και το POLYFLOW[®] (μοντελοποίηση πολυμερούς). Η FLUENT Inc είναι σήμερα ένας από τους κορυφαίους προμηθευτές του CFD στον κόσμο. Τα στοιχεία που συγκεντρώνουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον στο FLUENT[®] περιλαμβάνουν μοντέλα για ανταλλαγή θερμότητας, μοντέλα διακριτής φάσης για πολυφασικές ροές, μεγάλο αριθμό από υψηλής ποιότητας μοντέλα αντίδρασης καθώς και μοντέλα αλλαγής φάσης τα οποία εντοπίζουν την τήξη και την πήξη ρευστού όγκου. Το FIDAP[®] ένα πρόγραμμα βασισμένο σε ένα πεπερασμένο «στοιχείο» το οποίο προσφέρει σε μη- Νευτώνια ρευστά και ρευστά σε ελεύθερες επιφάνειες μοναδικές ικανότητες. Επιπλέον προσφέρει εξελιγμένα μοντέλα ακτινοβολίας, διασποράς και μεταφοράς θερμότητας. Τέλος το POLYFLOW[®] ένα γενικής χρήσης και πεπερασμένο εργαλείο του CFD για την ανάλυση πολυμερών, την επεξεργασία τους όπως τη δημιουργία γυαλιού. Το POLYFLOW[®] περιέχει επίσης ένα εύρος εφαρμογών τα οποία επεκτείνονται μέχρι τη βιομηχανία τροφίμων (Fernandes, 2006).

2.3.3 PHOENICS (CHAM Ltd.)

Το PHOENICS[®] είναι ένα πολλαπλών χρήσεων πρόγραμμα του CFD το οποίο περιλαμβάνει διάφορες δυνατότητες μοντελοποίησης ώστε να μπορεί να ανταπεξέλθει

στις απαιτήσεις του μηχανικού τροφίμων. Επίσης, περιλαμβάνει μοντέλα Νευτώνιων και μη Νευτώνιων ρευστών, ροή διαμέσου πορώδους υλικού με αντιστάσεις εξαρτημένες από τη κατεύθυνση και συζυγούς μεταφοράς θερμότητας. Επιπλέον, υπάρχει ένα εκτενές πακέτο με ενσωματωμένα μοντέλα τύρβης, που περιλαμβάνουν το μοναδικό μοντέλο τοιχώματος αντίστασης τύρβης (LVEL), το οποίο δεν επιτρέπει να εμφανίζονται ανακρίβειες που σχετίζονται με υπολογισμούς και λειτουργίες του τοιχώματος των πιο τυρβωδών μοντέλων. Αυτό επιτυγχάνεται με τη γνώση των αποστάσεων του τοιχωμάτων και των τοπικών ταχυτήτων, ώστε να υπολογιστεί η ροή κοντά στο τοίχωμα. Το PHOENICS[®] αποτελείται από ένα δομημένα κώδικα πλέγματος και χρειάζεται συγκεκριμένες συντεταγμένες για να μοντελοποιήσει πολύπλοκες γεωμετρίες. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να επιτευχθεί εντυπωσιακή αύξηση στην προεργασία και στους χρόνους λύσης μιας προσομοίωσης.

2.3.4 STAR-CD

Το STAR-CD είναι εμπορικός κώδικας CFD ο οποίος απευθύνεται σε πολυπλοκότητες βιομηχανικών γεωμετριών χρησιμοποιώντας μη δομημένα υβριδικά πλέγματα σε συνδυασμό με πεπερασμένου όγκου μεθοδολογίας λύσης. Τα προαναφερθέντα CFX, FLUENT, PHOENICS και το STAR-CD χρησιμοποιείται από τη βιομηχανία τροφίμων. Ο Sorensen (2001) διερεύνησε την συνεισφορά της τοπικής μεταφοράς θερμότητας και της ροής σε έναν βιομηχανικό, 3 βαθμίδων, εναλλάκτη θερμότητας με τη βοήθεια του STAR-CD. Το STAR-CD μπορεί να χειριστεί πολύπλοκες γεωμετρίες, μέσω τελευταίας τεχνολογίας μεταβλητού πλέγματος και τεχνολογίας λύση ο οποίος επιτυγχάνει ακριβείς λύσεις σε ένα μεγάλο εύρος τύπων πλέγματος.

2.4 Μέθοδοι βελτίωσης της ακρίβειας της μοντελοποίησης

Σε πολλές περιπτώσεις οι εξισώσεις Navier-Stokes χρησιμοποιούνται με γενικές υποθέσεις και χαμηλού επιπέδου τεχνικές μοντελοποίησης, οι οποίες επηρεάζουν την ποιότητα των προσομοιώσεων του CFD. Υπάρχουν και παλαιότερα παραδείγματα από ένα εύρος ανεπαρκών εφαρμογών από μοντέλα τύρβης, μέχρι και σε ανακριβή αποτελέσματα που οφείλονται στην κακή ποιότητα της γεωμετρίας, πλέγματα και πρώτης τάξεως συστήματα συναγωγής (Gosman, 1998). Παρόλα αυτά με το πέρασμα του χρόνου και χάρη στην έμφαση που δόθηκε στην κατασκευή μεγαλύτερης ακρίβειας λύσεων σε όλα τα είδη των ροών, αυξήθηκε ο αριθμός των εφαρμογών. Πλέον οι κώδικες CFD προσφέρουν ένα μεγάλο εύρος από συστήματα συναγωγής, μοντέλα τύρβης και διάφορες

επιλογές πλέγματος οι οποίες βελτιώνουν την ακρίβεια της μοντελοποίησης και καλύπτουν τις ανάγκες βιομηχανίας τροφίμων (*Kumaresan & Joshi, 2006 – Wong, Zhou & Hua, 2006*).

2.4.1 Κατασκευή γεωμετρίας-πλέγματος

Για την αντιμετώπιση ενός οποιοδήποτε ζητήματος στο CFD αρχικό βήμα και το πιο σημαντικό της όλης διαδικασίας που θα ακολουθήσουμε είναι αυτό της κατασκευής της γεωμετρίας μας, τόσο για γεωμετρία δύο διαστάσεων (2D) όσο και για τριών διαστάσεων γεωμετρία (3D). Αρχικά πρέπει να καταστεί σαφής η οριοθέτηση του υπολογιστικού πεδίου, καθώς επίσης οι αρχικές και οριακές συνθήκες που διέπουν τη γεωμετρία μας ανάλογα την περίπτωση. Ένας σημαντικός παράγοντας για την επίσπευση του χρόνου λύσης του προβλήματος αφορά και τον έλεγχο ύπαρξης συμμετρίας στη γεωμετρία. Η διάταξη του πλέγματος μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους:

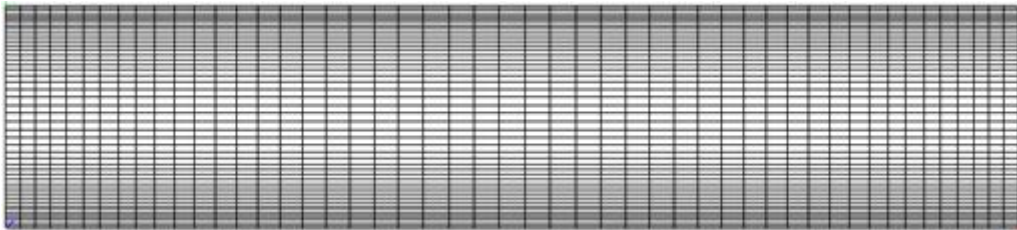
- 1) Επιλογή της τοποθεσίας των κόμβων από 1 έως N. Ο όγκος ελέγχου τοποθετείται ανάμεσα στους δύο κόμβους. Παρουσιάζεται όμως πρόβλημα στους κόμβους 2 και N-1 οπότε θεωρείται ότι συμπίπτουν με τους κόμβους 1 και N αντίστοιχα οπότε θεωρούμαι ότι δεν υπάρχουν κελιά σε αυτούς τους κόμβους. Το διάστημα μεταξύ των παρακείμενων κελιών είναι και αυτό που καθορίζει τον όγκο ελέγχου. Σε αυτή την περίπτωση οι κόμβοι δεν θα βρίσκονται στο επίκεντρο των όγκων ελέγχων τους.
- 2) Επιλέγεται αρχικά η θέση που έχουν τα κελιά και κατόπιν τοποθετούνται κόμβοι του πλέγματος στο κέντρο του όγκου ελέγχου που έχει σχηματιστεί.

2.4.2 Χρήση πλέγματος

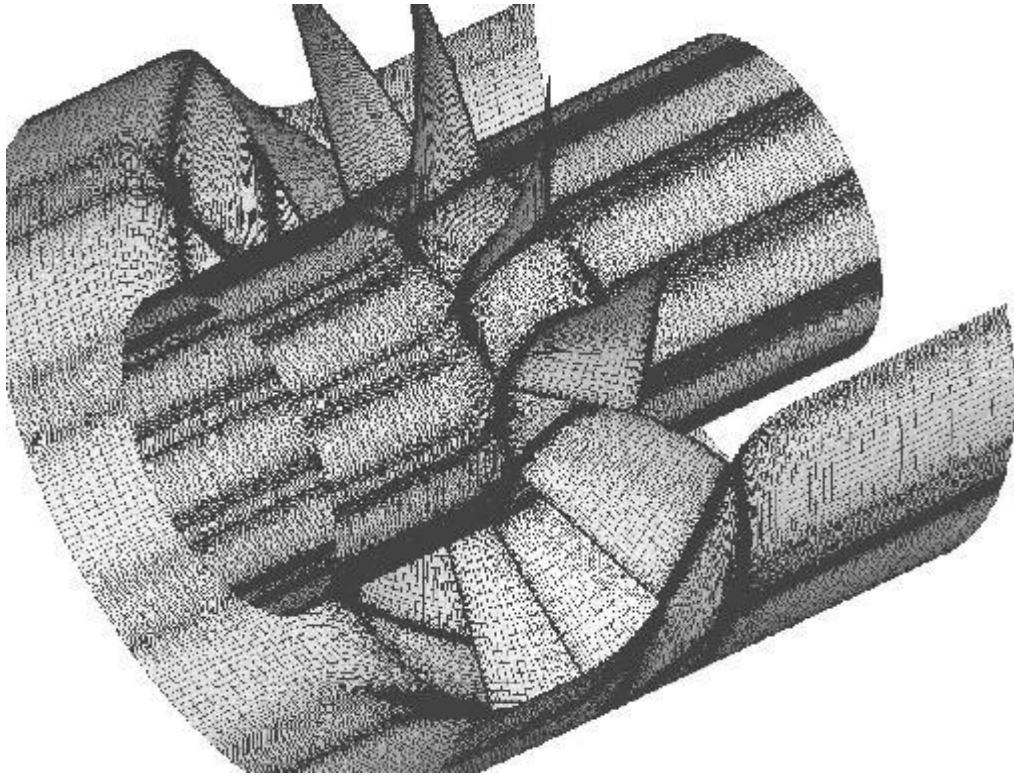
Μη δομημένο πλέγμα

Οι περισσότεροι κώδικες CFD προήλθαν από τυπικά Καρτεσιανού τύπου ακαδημαϊκά προγράμματα. Αυτό σήμαινε πως για πολλά χρόνια τα πραγματικά γεωμετρικά κριτήρια της διαδικασίας μοντελοποίησης δεν μπορούσαν να επιτευχθούν και έπρεπε να τροποποιηθούν ώστε να ταιριάζουν στη διαμόρφωση του κώδικα (*Gosman, 1998*). Μία από τις μεγαλύτερες καινοτομίες που συνέβησαν στην τεχνολογία της κατασκευής του πλέγματος τα τελευταία χρόνια ήταν η ικανότητα της χρήσης εξάεδρων υβριδικών πλεγμάτων μέσα στους γενικούς κώδικες. Έτσι, μπορούσε ένα πλέγμα να χρησιμοποιηθεί σε μια αυθαίρετη γεωμετρία, ενισχύοντας έτσι την επίτευξη λύσεων του CFD για πολλές βιομηχανικές εφαρμογές, στα (Σχήματα 5 και 6) εμφανίζονται εφαρμογές πλέγματος σε

απλή και περίπλοκη γεωμετρία. Επιπλέον, ένα ακόμα μεγάλο πλεονέκτημα των μη δομημένων υβριδικών πλεγμάτων είναι η «χαλάρωση» της κατασκευής, μία συνηθισμένη απαίτηση πολλών γενικών κωδικών CFD (Gosman, 1998). Αυτό είχε ως αποτέλεσμα η τοπική βελτίωση του πλέγματος να γίνεται περισσότερο αποτελεσματική αλλά και αποδοτική, με μία λύση που μπορεί να δημιουργηθεί ώστε να καλύπτει όλα τα επιθυμητά χαρακτηριστικά ροής, χωρίς ταυτόχρονα να δημιουργεί κακής ποιότητας κελιά, που θα επηρέαζαν αρνητικά την συμπεριφορά σύγκλισης. Οι δυνατότητες των καινούργιων πλεγμάτων οδήγησαν στην αύξηση της χρήσης τους ώστε να πετυχαίνουν πιο ακριβή και ποιοτικά αποτελέσματα σε πολλές εφαρμογές της βιομηχανίας τροφίμων (Foster, 2002 – Mirade, 2003). Παρόλα αυτά, αυτή η μορφή πλέγματος χρειάζεται διαφορετικό προγραμματισμό και τεχνικές επίλυσης, που δεν είναι τόσο διαισθητικές στην εφαρμογή τους όσο οι Καρτεσιανές. Γι' αυτό το λόγο, τα μη δομημένα πλέγματα δεν χρησιμοποιούνται ακόμα πλήρως στην αγορά του CFD, με κώδικες όπως ο PHOENICS, να χρησιμοποιούνται για τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής (Abdul Ghani *et al*, 2003).



Σχήμα 5: Εφαρμογή πλέγματος από το πρόγραμμα *Gambit* σε απλή γεωμετρία σωλήνα.



Σχήμα 6: Εφαρμογή πλέγματος από το πρόγραμμα Gambit σε μια πιο πολύπλοκη γεωμετρία.

2.4.3 Κινούμενο Πλέγμα

Αυτό το είδος τεχνικής πλέγματος χρησιμοποιείται ευρέως για να μοντελοποιήσει την επίδραση ανάδευσης ή κίνησης μιας προσκείμενης γεωμετρίας, επιτρέποντας του την εφαρμογή του σε εργοστάσια για τη εξομοίωση διαδικασιών, όπως ψησίματος και ανάδευσης. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία χρησιμοποιείται σε πολλούς τομείς της μηχανικής τροφίμων. Επιπρόσθετα, επιτρέπει τμήματα ενός πλέγματος να ολισθήσουν αναλογικά το ένα με το άλλο σε μια κοινή επιφάνεια, η οποία στην περίπτωση της δεξαμενής ανάδευσης, βρίσκεται μεταξύ των άκρων των λεπίδων και των διαφραγμάτων. Ενώ στην περίπτωση του ψησίματος αφορά την συνεχόμενη κίνηση του προϊόντος στο φούρνο (Aubin et al, 2004 – Wong et al, 2006).

2.4.4 Πολλαπλά πλαίσια αναφοράς

Με αυτό το είδος πλέγματος προστέθηκε μια επιπλέον παρατήρηση που έχει να κάνει με μια εξομοίωση όπου κάθε στατικό τμήμα ροής το οποίο εξέρχεται από ένα πλέγμα το οποίο περιστρέφεται. Αντί να προκληθεί περιστροφή απευθείας στο πλέγμα, η περιστροφή προκαλείται από την εισαγωγή του παράγοντα της δύναμης του σώματος στην εξίσωση της ορμής. Από αυτό το γεγονός γίνεται κατανοητό ότι αλλάζοντας τους

υπολογισμούς του CFD στην επιφάνεια μεταξύ περιστρεφόμενης και σταθερής ροής συστήματος, μια εξομοίωση σταθερής μορφής μπορεί έπειτα να πραγματοποιηθεί σε ένα στατικό πλέγμα (Gosman, 1998).

2.4.5 Τεχνικές σύγκλισης

Όταν πραγματοποιείται ο σχεδιασμός ενός CFD μοντέλου, πρέπει να ληφθούν υπόψη πιθανές διαφορές δυναμικού που μπορεί να εμφανιστούν ώστε η υπολογιζόμενη περιοχή να μπορεί να λάβει το κατάλληλο πλέγμα. Έπειτα το πλέγμα με την σειρά του να βελτιωθεί για να μπορέσει να μας δοθεί λύση ανεξάρτητη του πλέγματος. Παρόλα αυτά υπάρχουν και στις μέρες μας ακόμα περιπτώσεις στις οποίες δεν μπορούμε να έχουμε λύσεις ανεξάρτητες του πλέγματος (Mirade & Daudin, 2006-Sorensen & Nielsen, 2003). Επομένως πρέπει να πετύχουμε με πιο χαλαρές απαιτήσεις να λάβουμε σταθερές λύσεις για τις κύριες εξισώσεις. Μία τεχνική σύγκλισης που προτάθηκε από τον Roache, (1998) και βασίστηκε στην παρέκταση του Richardson (1910) χρησιμοποιήθηκε σε πολλές εφαρμογές μηχανικής του CFD (Sorensen & Nielsen, 2003). Η βασική αρχή στην οποία βασίζεται η προαναφερθείσα τεχνική είναι να ενημερώνει τον χρήστη του CFD με μια εκτίμηση του λάθους (GCI) μεταξύ μιας καλής λύσης πλέγματος και μιας άγνωστης ακρίβειας λύση. Η λύση στο πρόβλημα αυτό είναι το ζευγάρι από τις ίδιες εξισώσεις που διέπουν από δύο διαφορετικές αναλύσεις πλέγματος. Επιπλέον και οι δύο CFD λύσεις θα πρέπει να είναι από ένα πλέγμα το οποίο θα είναι στο ασυμπτωτικό εύρος σύγκλισης. Συγκεκριμένα η λύση που θα ληφθεί, θα πρέπει να γίνει με κριτήρια, την πλήρη χρήση της επεξεργαστικής ισχύς του συστήματος που είναι σε διάθεση μας. Η λύση του πλέγματος που αποτελείται από φαρδιές γραμμές μπορεί να πραγματοποιηθεί αφαιρώντας τις από το πλέγμα σε κάθε κατεύθυνση. Επίσης για να βεβαιωθούμε ότι το πλέγμα δεν θα ξεφύγει από το ασυμπτωτικό εύρος σύγκλισης, η αναλογία βελτίωσης πλέγματος (r) μεταξύ δύο πλεγμάτων θα πρέπει να είναι το λιγότερο 1,1. Με τον τρόπο αυτό το σφάλμα διακριτοποίησης διαφοροποιείται από άλλες πηγές σφάλματος (Slater, 2006).

2.4.6 Εισαγωγή δεδομένων

Όταν έχουν ολοκληρωθεί οι ανωτέρω ενέργειες για τη γεωμετρία καθώς και τις οριακές και αρχικές συνθήκες ακολουθεί η διαδικασία εισαγωγής δεδομένων στο λογισμικό ανάλογα ώστε να επιλεγεί και ο τρόπος λύσης. Από τις αρχικές παραμέτρους που επιλέγει ο χρήστης αφορούν, την ταχύτητα, πίεση, θερμοκρασία κ.λ.π. Εν συνεχεία

ορίζονται κάποιοι επιπρόσθετες παράμετροι που αφορούν τον τύπο ροής (γραμμική, τυρβώδης ροή), καύση, ηλιακή ακτινοβολία κ.λ.π. Έπειτα ακολουθεί η διαδικασία της προσθήκης των φυσικών ιδιοτήτων του εκάστοτε υλικού, όπως η πυκνότητα, το ιξώδες, η θερμική αγωγιμότητα, η ειδική θερμοχωρητικότητα κ.α. Κατόπιν σειρά έχει ο ορισμός των αρχικών συνθηκών (ταχύτητα εισόδου, αρχική θερμοκρασία) τελειώνοντας με αυτό τον τρόπο τις ρυθμίσεις του λύτη. Ο χρόνος για τη λύση του εκάστοτε προβλήματος εξαρτάται από τον αριθμό των κελιών του πλέγματος και γενικότερα της γεωμετρίας (πολυπλοκότητα 2D , 3D κ.τ.λ.), από την πολυπλοκότητα του προβλήματος και από την ίδια την επεξεργαστική ισχύ του υπολογιστικού συστήματος λύνεται το πρόβλημα.

2.4.7 Διαφορικές εξισώσεις και διακριτοποίηση

Το λογισμικό Fluent, με την χρήση του οποίου πραγματοποιήθηκε η παρούσα εργασία, κάνει χρήση εξισώσεων τις οποίες επιλύει με την μέθοδο των πεπερασμένων όγκων. Επιπλέον το πεδίο λύσης απαρτίζεται από πεπερασμένο αριθμό όγκων ελέγχου ή κελιών. Η γενική εξίσωση διατήρησης για την μάζα, ορμή, ενέργεια κ.λ.π. διακριτοποιείται στο πλέγμα και λαμβάνει την μορφή συστήματος αλγεβρικών εξισώσεων οι οποίες κατόπιν επιλύονται για την εύρεση λύσης. Στις τελευταίες εκδόσεις του προγράμματος έχουν προστεθεί και κάποια καινούργια στοιχεία όπως το πιο φιλικό περιβάλλον στον χρήστη, και η δυνατότητα να εισάγει ο χρήστης δικές του συναρτήσεις (UDF-User Defined Functions). Η μαθηματική απόδοση της διατήρησης πραγματοποιείται με διαφορικές εξισώσεις. Η επίλυση μιας διαφορικής εξίσωσης είναι αριθμητική.

2.4.8 Μετεπεξεργασία αποτελεσμάτων

Μετά την ολοκλήρωση της λύσης του προβλήματος λαμβάνονται τα αποτελέσματα ώστε να αξιολογηθούν και να παρουσιαστούν. Ο έλεγχος των αποτελεσμάτων και το κατά πόσο είναι σωστά και ακριβή, εξαρτάται από την εμπειρία του χρήστη που τα ελέγχει. Παρόλα αυτά υπάρχουν κάποια βασικά στοιχεία φυσικής (νόμοι) με χρήση των οποίων μπορούμε να αποδεχθούμε ή να απορρίψουμε μια λύση.

Τα καινούργια πακέτα CFD περιλαμβάνουν πλέον μια σειρά από ευέλικτα και προηγμένα εργαλεία για την οπτικοποίηση δεδομένων. Κάποια από αυτά αφορούν το πεδίο ορισμού της γεωμετρίας, την κατασκευή πλέγματος, διανυσματικά γραφήματα (γράφημα ταχύτητας, ροής, θερμοκρασίας κ.α.), γραφήματα περιγραμμάτων (contours,

xy-plots). Επιπλέον περιλαμβάνουν δισδιάστατα (2D) και τρισδιάστατα (3D) γραφήματα επιφάνειας, γραφικές παραστάσεις και κινούμενη απεικόνιση αποτελεσμάτων (video).

2.5 Εφαρμογές της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής στη Μηχανική Τροφίμων

Η υπολογιστική ρευστοδυναμική αποτελεί ένα εργαλείο έρευνας για τη βελτίωση των διαδικασιών σχεδιασμού και την κατανόηση των φυσικών φαινομένων της δυναμικής των ρευστών, το οποίο μπορεί να προσφέρει οφέλη στη βιομηχανία επεξεργασίας τροφίμων σε πολλούς τομείς, όπως η ξήρανση, εμπορική αποστείρωση, ανάμιξη, ψύξη και άλλους τομείς εφαρμογών (Dimou & Yanniotis, 2011).

2.5.1 Ξήρανση

Η ξήρανση είναι μια βασική διαδικασία ξήρανσης τροφίμων. Ο ρυθμός της ξήρανσης εξαρτάται από την ροή και την ταχύτητα του αέρα. Έτσι γίνεται αντιληπτή η σημασία της γνώσης της ροής και της ταχύτητας του αέρα στο θάλαμο ξήρανσης, βοηθώντας έτσι στον εντοπισμό των σημείων στο θάλαμο τα οποία δεν επαρκούν για την ξήρανση. Η διαδικασία όμως εύρεσης των τιμών αυτών είναι δύσκολη στον υπολογισμό, αλλά με τη βοήθεια όμως του CFD μπορεί να πραγματοποιηθεί μια προσομοίωση της διαδικασίας ξήρανση. Όπως γίνεται λοιπόν αντιληπτό με την αύξηση της πολυπλοκότητας στις εφαρμογές και στις απαιτήσεις της διαδικασίας ξήρανσης υπάρχει και μεγαλύτερη ζήτηση για χρήση του CFD, για τη βελτίωση των διεργασιών και για τη δυνατότητα παροχής γρήγορα και πολύτιμων πληροφοριών.

2.5.2 Αποστείρωση

Η κύρια ανάγκη και έγνοια τόσο στους καταναλωτές όσο και στις βιομηχανίες τροφίμων, είναι η ανάγκη για παραγωγή ποιοτικών αλλά κυρίως ασφαλών προϊόντων. Φυσιολογικά υπάρχει μια αυξανόμενη τάση για ποιοτικότερα και ασφαλέστερα τρόφιμα τόσο στην μεταφορά τους όσο και στην παραμονή τους σε αποθηκευτικούς χώρους. Η τεχνική της εμπορική αποστείρωσης αποτελεί μια σημαντική παράμετρο στη βοήθεια της πραγματοποίησης των αναγκών αυτών. Το CFD χρησιμοποιείται για την μελέτη τόσο της κατανομής όσο και της ροής της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της εμπορική αποστείρωσης βοηθώντας στη βελτιστοποίηση της ποιότητας των προϊόντων.

Η θερμική επεξεργασία παραμένει ακόμα και σήμερα η σημαντικότερη τεχνική της συντήρησης τροφίμων η οποία στοχεύει στην μικροβιακή αδρανοποίηση με ταυτόχρονη βέβαια απώλεια ποιοτικών χαρακτηριστικών του τροφίμου. Επομένως η υπερβολική

θέρμανση επηρεάζει την ποιότητα των τροφίμων και τις θρεπτικές τους ιδιότητες. Με την συμβολή του CFD έχουν παρουσιασθεί μια σειρά από μελέτες για τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας της θερμικής αποστείρωσης των τροφίμων, οδηγώντας με αυτό τον τρόπο στη βελτίωση του ελέγχου της διαδικασίας αποστείρωσης και στη διατήρηση των θρεπτικών και οργανοληπτικών χαρακτηριστικών των τροφίμων. Ένας από τους κύριους εκφραστές της χρήσης του CFD για την προσομοίωση της διαδικασίας της εμπορικής αποστείρωσης είναι ο Abdul Ghani ο οποίος πραγματοποίησε (1999) μια σειρά από ερευνητικές εργασίες για την εμπορική αποστείρωση κονσερβοποιημένων τροφίμων με προσομοίωση CFD. Επιπλέον το 2001 με χρήση ξανά του προγράμματος με σκοπό την προσομοίωση της αποστείρωσης σούπας καρότων για την μελέτη της ταχύτητας μετάδοσης της θερμότητας καθώς και την εύρεση του αργότερα θερμαινόμενου σημείου. Πλέον σήμερα η χρήση του προγράμματος τόσο στη βιομηχανία τροφίμων όσο και από ερευνητές αποτελεί ένα αναπόσπαστο κομμάτι και μια επιπλέον επιβεβαίωση μιας πειραματικής διαδικασίας.

2.5.3 Ανάμιξη

Η διαδικασία της ανάμιξης αποτελεί μια από τις πιο συνηθισμένες λειτουργίες στη βιομηχανία μεταποίησης τροφίμων αλλά και γενικότερα. Περιλαμβάνει την ανάμιξη διαφόρων ουσιών, αέριων, στερεών, υγρών. Από τις προαναφερθείσες, η ανάμιξη υγρών αποτελεί μια από τις σημαντικότερες στη βιομηχανία επεξεργασίας των τροφίμων. Η πολυπλοκότητα της ανάμιξης από την σκοπιά της χρήσης της με το CFD έγκειται στο κομμάτι του αναδευτήρα.

Το CFD αποτελεί τον συνδετικό κρίκο για την σύνδεση της επεξεργασίας τροφίμων με τις πληροφορίες ροής ρευστών. Παράλληλα αποτελεί και ένα χρήσιμο εργαλείο για την μοντελοποίηση της διαδικασίας της ανάμιξης. Με τη βοήθεια του CFD γίνεται δυνατή η βελτιστοποίηση της διαδικασίας ανάμιξης με την ελαχιστοποίηση της εισαγόμενης ενέργειας και του χρόνου επεξεργασίας. Έτσι οι διάφορες έρευνες που έχουν διεξαχθεί εστιάζουν στην κατανομή ενέργειας στο δοχείο ανάμιξης και τις επιπτώσεις που έχει η ανάμιξη όταν πραγματοποιείται με την χρήση του αναδευτήρα σε διαφορετικές θέσεις. Παλαιότερα μια τέτοια πρόβλεψη θεωρούταν αδύνατη, φτάνοντας μετέπειτα στις πρώτες μελέτες με χρήση μοντέλων CFD σε δεξαμενές ανάμιξης (Sahu, 1999). Συνοψίζοντας, η ανάπτυξη της χρήσης αλλά και της ίδιας της εφαρμογής του CFD στη βιομηχανία μεταποίησης τροφίμων θα οδηγήσει στην καλύτερη παρακολούθηση, έλεγχο και βελτιστοποίηση της διαδικασίας της ανάμιξης.

2.5.4 Κατάψυξη

Η μεγάλη επανάσταση στον τομέα των τροφίμων πραγματοποιήθηκε με την παρασκευή των πρώτων κατεψυγμένων τροφίμων, ανοίγοντας με αυτό τον τρόπο ένα διαφορετικό μονοπάτι στους βιομηχανίες τροφίμων, με εξελίξεις στον τομέα που παλαιότερα ήταν αδύνατο να πραγματοποιηθούν. Τα κατεψυγμένα τρόφιμα με το πέρασμα του χρόνου έχουν επιδείξει μια σταθερά καλή ποιότητα και ασφάλεια κερδίζοντας έτσι το αγοραστικό κοινό, αυξάνοντας σαν αποτέλεσμα τη ζήτηση στους από τους καταναλωτές. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την εφαρμογή του CFD από διάφορους ερευνητές στην μοντελοποίηση στους μεταφοράς θερμότητας και μάζας κατά τη διάρκεια ψύξης και κατάψυξης. Ορισμένες εφαρμογές στους προγράμματος για την προσομοίωση στους διαδικασίας κατάψυξης στους προσομοίωση ψύξης υπό κενό (Hu & Sun, 1999-2000), προσομοίωση θαλάμου κατάψυξης (Mariotti, 1995) αποτέλεσαν την αρχή χρήσης του CFD για την προσομοίωση στους ψύξης.

Με την χρήση του CFD δίνεται η δυνατότητα στους χρήστες να μελετήσουν μεταβλητές οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν το τρόφιμο κατά την κατάψυξη θετικά επιτυγχάνοντας έτσι τη βέλτιστη απόδοση. Με αυτό τον τρόπο είναι εφικτή η παραγωγή ποιοτικού προϊόντος με χαμηλή τιμή.

2.6 Μελλοντική χρήση του CFD στη βιομηχανία τροφίμων

Η χρήση του CFD στη βιομηχανία τροφίμων έχει φέρει πολλές επαναστατικές μεθόδους ελέγχου και βελτίωσης στον τρόπο παραγωγής. Πλέον θεωρείται αξιόπιστο μέσο και είναι ένα απαραίτητο εργαλείο στη βιομηχανία τροφίμων. Παρόλα αυτά υπάρχουν και περιορισμοί στο πρόγραμμα οι οποίοι αφορούν την αύξηση της φιλικότητας του προγράμματος στον χρήστη, την ταχύτερη εξαγωγή αποτελεσμάτων και την μείωση του κόστους των εφαρμογών του CFD. Το μέλλον του CFD στη βιομηχανία τροφίμων προβλέπει την δημιουργία ενός πιο ποιοτικού προγράμματος και ταυτόχρονα πιο αποτελεσματικού στην εργασία (FLUENT, 2000).

Οι μηχανικοί τροφίμων δεν θα χρειάζεται να αναλώνονται για θέματα όπως η κατασκευή πλέγματος και το σχήμα του όγκου ελέγχου, λόγω ανάπτυξης πλήρως αυτοματοποιημένων μεθόδων παραγωγής του (Afstomis, 1997).

Η παράλληλη ανάπτυξη στους υπολογιστές και την επεξεργαστική τους ισχύ θα επιτρέψει την αυτοματοποίηση του σχεδιασμού και τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών δίνοντας τη δυνατότητα της αύξησης του αριθμού των χρηστών του προγράμματος.

Κεφάλαιο 3^ο Μεθοδολογία λύσης του προβλήματος

Στην παρούσα μελέτη υπολογίσθηκε η ποιοτική υποβάθμιση και η εύρεση των ποιοτικά ισοδύναμων σημείων σε προϊόντα που θερμαίνονται με αγωγή με χρήση CFD. στα οποία η τιμή δεδομένου δείκτη ποιότητας του προϊόντος (όπως συγκέντρωση βιταμίνης) μετά από δεδομένη θερμική διεργασία είναι ίση με τη μέση τιμή (αναφερόμενη σε όλη την μάζα του προϊόντος) του εν λόγω δείκτη στο τέλος της θερμικής διεργασίας. Σαν ποιοτική υποβάθμιση αναφερόμαστε ουσιαστικά στη μέση τιμή διατήρησης δεδομένου ποιοτικού χαρακτηριστικού (π.χ. βιταμίνης). Επιπλέον τα ποιοτικά ισοδύναμα σημεία αναφέρονται στα σημεία των οποίων η τιμή ενός δείκτη ποιότητας του προϊόντος ισούται με την μέση τιμή του δείκτη αυτού στο τέλος της διεργασίας για διάφορα εύροι παραμέτρων (Πίνακας 2).

Το προϊόν που επιλέχθηκε ήταν στερεό τρόφιμο σε κονσέρβα μεγέθους 307×409 με εσωτερικές διαστάσεις (ύψος 10,95375 cm και ακτίνα 4,206875 cm). Άπειρος θεωρήθηκε ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας. Επιπλέον θεωρήθηκε ομοιόμορφη αρχική θερμοκρασία (T_{IT}).

Πίνακας 2: Εύρος των παραμέτρων που εξετάστηκαν

Παράμετροι	Σύμβολο	Εύρος που μελετήθηκε
Χρόνος υποδεκαπλασιασμού ποιότητας	$D_{121,11^{\circ}C}$	20 -1000 min
Δείκτης ποιότητας	z	25 - 44,4°C
Θερμική αγωγιμότητα	α	$1.04 * 10^{-7} - 2.34 * 10^{-7} m^2/s$
Θερμοκρασία αυτοκλείστου	T_{RT}	100-140°C
Θερμοκρασία ψύξης	T_{CW}	25°C
Αρχική θερμοκρασία	T_{IT}	20°C
Δείκτης ασφάλειας τροφίμου	F_0	3,6,9 min
Μέγεθος κονσέρβας		307×409

3.1 Τιμή F και υπολογισμός της

Η τιμή F μιας δεδομένης θερμικής επεξεργασίας μπορεί να ορισθεί, σαν τον ισοδύναμο χρόνο μιας κατεργασίας σε μια σταθερή θερμοκρασία αναφοράς μιας υποθετικής θερμικής επεξεργασίας η οποία παράγει το ίδιο αποτέλεσμα (σε θέμα καταστροφής παραγόντων αλλοίωσης ή ποιοτικών χαρακτηριστικών) με την συγκεκριμένη θερμική επεξεργασία.

Η σύγκριση διαφόρων τιμών F που προέρχονται από διαφορετικές θερμικές επεξεργασίες δίνει τη δυνατότητα σύγκρισης της αποτελεσματικότητας των επεξεργασιών αυτών.

Επιπλέον η τιμή F είναι μια μονάδα χρόνου η οποία εκφράζει την ένταση μιας θερμικής επεξεργασίας με δύο διαφορετικούς τρόπους:

Βιολογικούς όρους (αρχική και τελική συγκέντρωση μικροοργανισμών)

Φυσικομαθηματικούς όρους (χρονοθερμοκρασιακά δεδομένα) επιτρέποντας την σύγκριση διαφορετικών θερμικών διεργασιών (Στοφόρος, 2014).

Συνηθισμένες θερμοκρασίες αναφοράς της τιμής F είναι:

- 250°F (121,11°C) για την εμπορική αποστείρωση προϊόντων χαμηλής οξύτητας
- 212°F (100°C) για εμπορική αποστείρωση προϊόντων υψηλής οξύτητας
- 160-200°F (70-90°C) για παστερίωση

Η θεμελιώδης εξίσωση για τον σχεδιασμό και την αξιολόγηση των θερμικών διεργασιών:

$$F_{T_{ref}}^z = D_{T_{ref}} (\log(C_a) - \log(C_b)) = \int_{t_a}^{t_b} 10^{\frac{T-T_{ref}}{z}} dt \quad (7)$$

όπου

- $F_{T_{ref}}^z$ 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.
- $D_{T_{ref}}$ χρόνος υποδεκαπλασιασμού, χρόνος σε σταθερή θερμοκρασία, T , που απαιτείται για την καταστροφή του 90% των μικροοργανισμών (ή άλλων θερμικά ευαίσθητων ουσιών), min.
- C_a αρχική συγκέντρωση μιας θερμικά ευαίσθητης ουσίας, π.χ. αριθμός μικροοργανισμών ανά mL, g/L.
- C_b τελική (μετά το πέρας της θερμικής διεργασίας) συγκέντρωση μιας θερμικά ευαίσθητης ουσίας, π.χ., αριθμός μικροοργανισμών ανά mL, g/L.
- t_a χρόνος αρχικής συνθήκης min.
- t_b χρόνος τελικής συνθήκης min.

- **t** χρόνος min.

Το αριστερό σκέλος της εξίσωσης δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού της τιμής F γνωρίζοντας τη συγκέντρωση του υπό εξέταση παράγοντα (αριθμός σπορίων κλπ.) πριν και μετά την επεξεργασία. Ενώ το δεξιό σκέλος της μας δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού της τιμής F χρησιμοποιώντας δεδομένα σχετικά με το χρόνο και τη θερμοκρασία στην οποία υποβλήθηκε το προϊόν κατά την επεξεργασία. Η τιμή F όσο και οι τιμές συγκέντρωσης που υπολογίσθηκαν μέσω της εξίσωσης (8) αναφέρονται σε συγκεκριμένο σημείο μέσα στο προϊόν για το οποίο τα δεδομένα θερμοκρασίας χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του ολοκληρώματος της εξίσωσης (8). Όταν υπάρχει κατανομή θερμοκρασίας στο προϊόν τότε κάθε σημείο μέσα στο προϊόν θα χαρακτηρίζεται από μια ξεχωριστή τιμή F . Για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης ενός παράγοντα σε δεδομένο σημείο χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω εξίσωση (9). Οι ολοκληρωμένες τιμές F , όσο και οι εναπομείνουσες μέσες συγκεντρώσεις, θα χρειαστούν μια επιπλέον ολοκλήρωση σε όλη την γεωμετρία όπως αναφέρεται στην εξίσωση (10) για τους υπολογισμούς της μέσης συγκέντρωσης (Stoforos et al, 1997).

$$\frac{C_b}{C_a} * 100 = 10^{-\frac{F T_{ref}}{D T_{ref}}} \quad (8)$$

$$\bar{C}_b = \frac{1}{V_p} \int_0^{V_p} C_b(V) dV \quad (9)$$

3.2 Μεθοδολογία CFD

Σε πρώτο στάδιο υπολογίσθηκαν οι διαστάσεις του μεταλλικού περιέκτη που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη (Πίνακας 3). Κατόπιν επιλέχθηκαν κάποιες κεντρικές τιμές για την πραγματοποίηση της αρχικής προσομοίωσης της θερμικής επεξεργασίας, με σκοπό να επιλεγθεί ο καλύτερος δυνατός συνδυασμός από τις διαφορετικές περιπτώσεις τύπου πλέγματος, πυκνότητα πλέγματος και χρονικού βήματος. Οι επιλογές αναφέρονται αναλυτικότερα στον Πίνακα 3.

Για την παρούσα μελέτη το λογισμικό πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε είναι:

- Το Gambit[®] 2,3.16 για την σχεδίαση της γεωμετρίας (κονσέρβας) και κατόπιν του κατάλληλου πλέγματος.

- Το Fluent v.14.5 επιλέχθηκε σαν λογισμικό για την επιλογή του κατάλληλου χρονικού βήματος για την σωστότερη πρόβλεψη της θερμοκρασίας του προϊόντος. Ακολουθούν οι επιλογές του προγράμματος παρακάτω (Πίνακας 3).

Πίνακας 3: Επιλογές στη γεωμετρία, στο πλέγμα, στο υλικό που χρησιμοποιήθηκε και το χρονικό βήμα που επιλέχθηκαν.

Διαστάσεις Κυλίνδρου (CAN 307×409)	
3D Κύλινδρος	Height: 10,95375 cm
	Radius 1,2 : 4,206875 cm
	Can_bottom: wall
	Can_top : wall
Γεωμετρία	Can_around: wall
	Can main: solid
	Cylinder Z centered
	Hex/Wedge-Tgrid
Πλέγμα	Shortest Edge (0,5%)
	Αριθμός κελιών : 320988
	Ενιαίο πλέγμα σε όλη την γεωμετρία
	Solver : Transient (Μη σταθερή κατάσταση)
Fluent	Επιλογή μοντέλου ενέργειας
	Αρχική θερμορασία 293,15 K-(20°C)
Materials	beef-ground
	Air
Time step (size)	1s-(Δευτερόλεπτα)

Η προσομοίωση στο Fluent πραγματοποιήθηκε με τις επιλεγμένες συνθήκες τρισδιάστατου (3D) περιβάλλοντος, διπλής ακρίβειας (double precision), γραμμικής ροής (laminar), μεταβλητού χρόνου (time unsteady), pressured-based. Επιπλέον ενεργοποιήθηκε η εξίσωση της ενέργειας για τον υπολογισμό της μεταβολής της θερμοκρασίας κατά την μεταφορά της θερμότητας. Το μοντέλο διακριτοποίησης της εξίσωσης της διατήρησης της ενέργειας που επιλέχθηκε ήταν το «Second Order Upwind» δηλαδή δεύτερης τάξης αντί πρώτης τάξης για την αύξηση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων. Κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας της κονσέρβας κρέατος μελετήθηκαν διαφορετικά χρονικά βήματα (time steps) για 1, 10, 20 και 60 δευτερόλεπτα ώστε να επιλεγεί το καταλληλότερο και με τα πιο ακριβή αποτελέσματα χρονικό βήμα.

Οι διαφορικές εξισώσεις της αρχής της συνέχειας, της αρχής διατήρησης της ορμής και της αρχής διατήρησης της ενέργειας, διακριτοποιούνται σε ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων. Όταν βρεθούν κάτω από ένα σημείο (τιμών) τότε αναφέρεται ότι η λύση έχει συγκλίνει. Στη συγκεκριμένη μελέτη οι βαθμοί ελευθερίας έχουν αλλάξει από 10^{-6} σε 10^{-9} αυξάνοντας τους με αυτό τον τρόπο τη δυσκολία της σύγκλισης και βελτιώνοντας την ακρίβεια στα αποτελέσματα του προγράμματος.

Τέλος με χρήση ενός αρχείου UDF (user defined functions), πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός της τιμής (F) τόσο για τον υπολογισμό της καταστροφής που προκλήθηκε από τη θερμική επεξεργασία που εφαρμόστηκε στην κονσέρβα κρέατος. Ως θερμοκρασία αναφοράς, T_{ref} , για όλες τις περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκαν οι $121,11^{\circ}\text{C}$ (250°F). Ταυτόχρονα όμως υπολογίστηκαν και παράγοντες διατήρησης ποιοτικού παράγοντα για διάφορες τιμές (z).

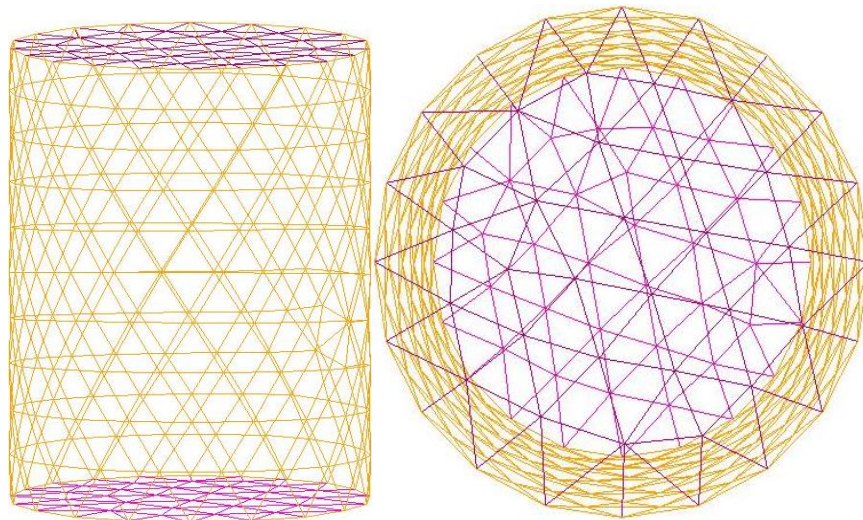
3.3 Επιλογή πλέγματος

Η αξιολόγηση της αριθμητικής λύσης με την χρήση του CFD πραγματοποιήθηκε σε σύγκριση με την αναλυτική λύση. Με τον γνώμονα αυτό επιλέχθηκε με την χρήση αναλυτικών εξισώσεων μια τυπική θερμική διεργασία, αποτελούμενη από κύκλο θέρμανσης 70 min και κύκλο ψύξης 60 min.

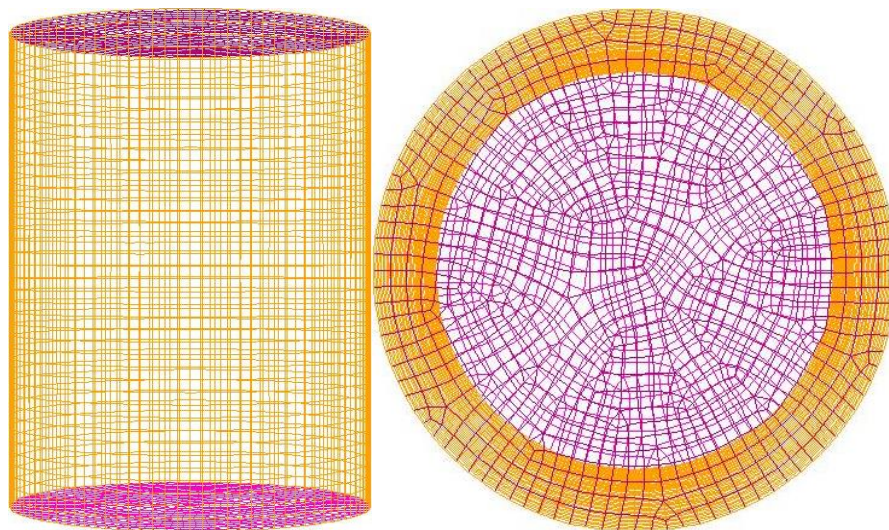
Για την πραγματοποίηση της κατασκευής της γεωμετρίας χρησιμοποιήθηκε το σχεδιαστικό λογισμικό “Gambit[®] 2,3.16”. Το προϊόν το οποίο μελετήθηκε στην παρούσα μελέτη αφορούσε κονσέρβα κυλινδρικού σχήματος και μεγέθους 307×409 , η οποία περιείχε στερεό προϊόν. Εξετάστηκαν διαφορετικά πλέγματα για την επιλογή του κατάλληλου τύπου πλέγματος και πυκνότητας πλέγματος (Σχήματα 7-11). Επιπλέον απεικονίζεται και η τελική επιλογή τύπου και πυκνότητας πλέγματος που επιλέχθηκε για την λύση του προβλήματος (Σχήμα 11) το οποίο παρουσίασε την καλύτερη ποιότητα από το Gambit για να μας δώσει τα αποτελέσματα με την μεγαλύτερη ακρίβεια από τις υπόλοιπες περιπτώσεις που μελετήθηκαν και από διαφορετικές οπτικές πλευρές (Σχήμα 11).



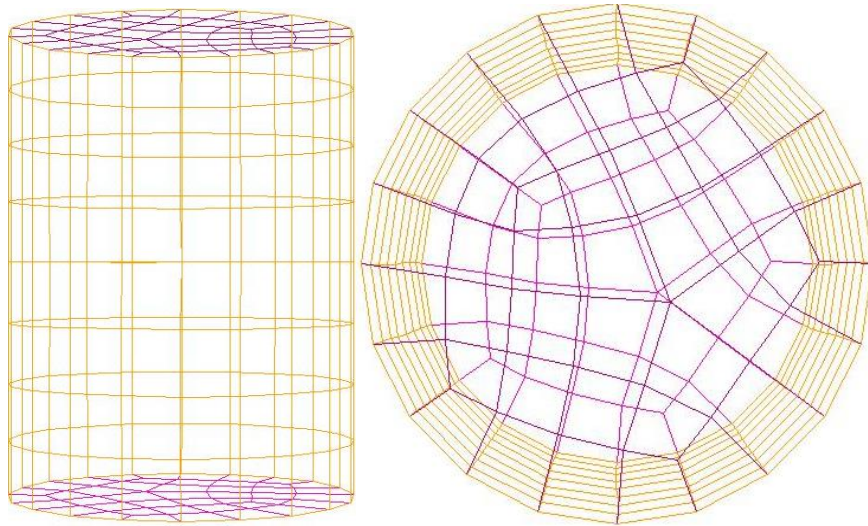
Σχήμα 7: Πλέγμα τύπου τετράεδρου (Tet/Hybrid 1% Shortest Edge-πυκνό).



Σχήμα 8: Πλέγμα τύπου τετράεδρου (Tet/Hybrid 5% Shortest Edge-αραιό).



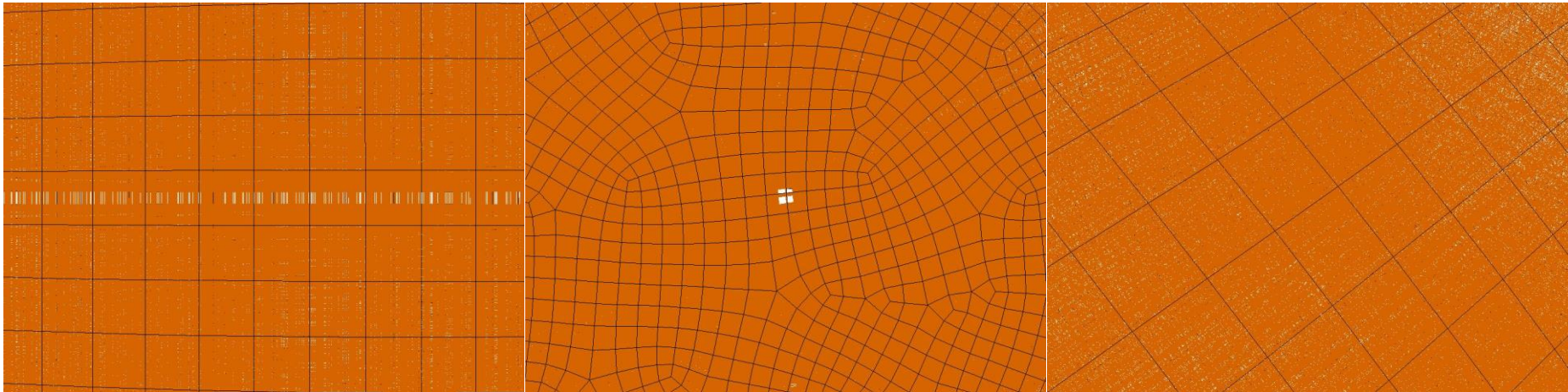
Σχήμα 9: Πλέγμα τύπου εξάεδρου (Hex/Wedge 1% Shortest Edge-πυκνό).



Σχήμα 10: Πλέγμα τύπου εξάεδρου (Hex/Wedge 5% Shortest Edge-αραιό).



Σχήμα 11: Εικόνα κονσέρβας με την εμφάνιση του εξάεδρου πλέγματος και της κατεύθυνσης των αξόνων στο κάτω δεξιό μέρος του σχήματος.



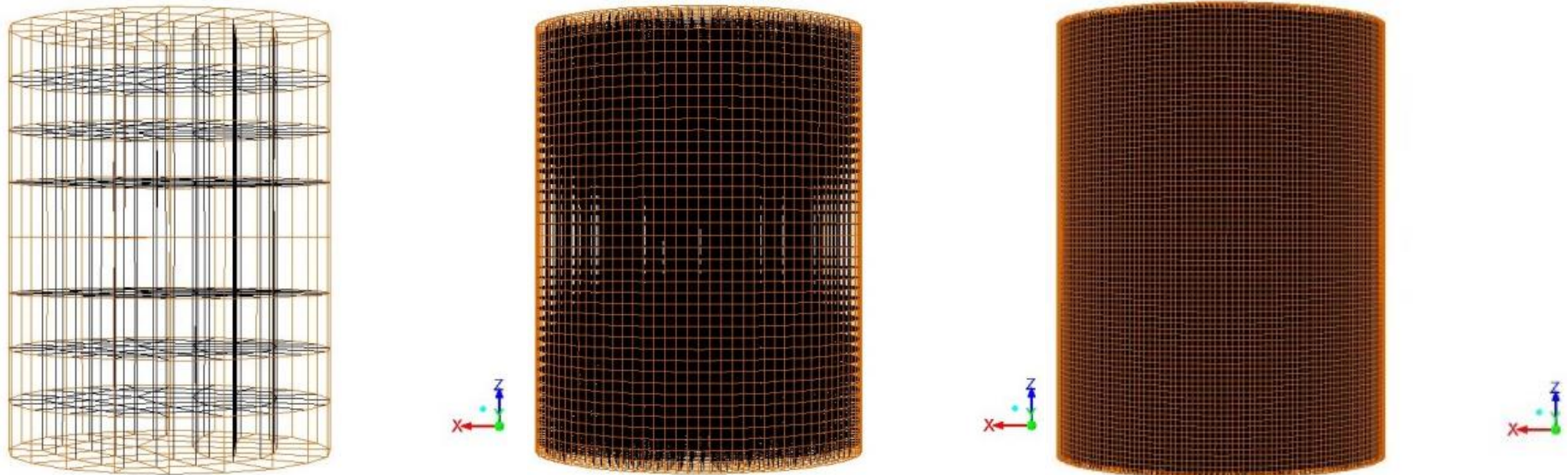
Σχήμα 12: Εικόνες εξάεδρου (Hex/Wedge) πλέγματος με πυκνότητα (0,5% Shortest edge) από διαφορετικές πλευρές. Αριστερά κέντρο της γεωμετρίας, κεντρικά από την κορυφή της γεωμετρίας και δεξιά πλάγια της γεωμετρίας.

3.4 Κατασκευή πλέγματος

Η επιλογή του κατάλληλου πλέγματος είναι από τα σημαντικότερα βήματα στη λύση ενός προβλήματος με χρήση του CFD. Στην συγκεκριμένη μελέτη αρχικά χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά είδη πλέγματος καθώς και σε διαφορετικές πυκνότητες (μεγαλύτερη πυκνότητα => μεγαλύτερος αριθμός κελίων => μεγαλύτερη ακρίβεια στους υπολογισμούς) ώστε να διαπιστωθεί πια ήταν η σωστότερη επιλογή για το συγκεκριμένο πρόβλημα. Η πυκνότητα του πλέγματος τόσο για το στερεό προϊόν όσο και για ολόκληρη τη γεωμετρία καθορίστηκε από την επιλογή ‘‘Shortest Edge’’. Αναλυτικός Πίνακας 4 με τις διαφορετικές πυκνότητες, είδη πλέγματος και τους αριθμούς των κελιών για την κάθε περίπτωση. Με βάση τους ανωτέρω αριθμούς κελιών (Πίνακας 4) για τη γεωμετρία του στερεού προϊόντος πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί για να εξακριβωθεί εάν προκύπτει το ίδιο αποτέλεσμα για πυκνό και αραιό πλέγμα γνωστοί και ως έλεγχος ανεξαρτησίας του πλέγματος.

Πίνακας 4: Είδη πλεγμάτων, αριθμοί κελιών και το ποσοστό πυκνότητας ανά περίπτωση που σχεδιάστηκαν με το Gambit.

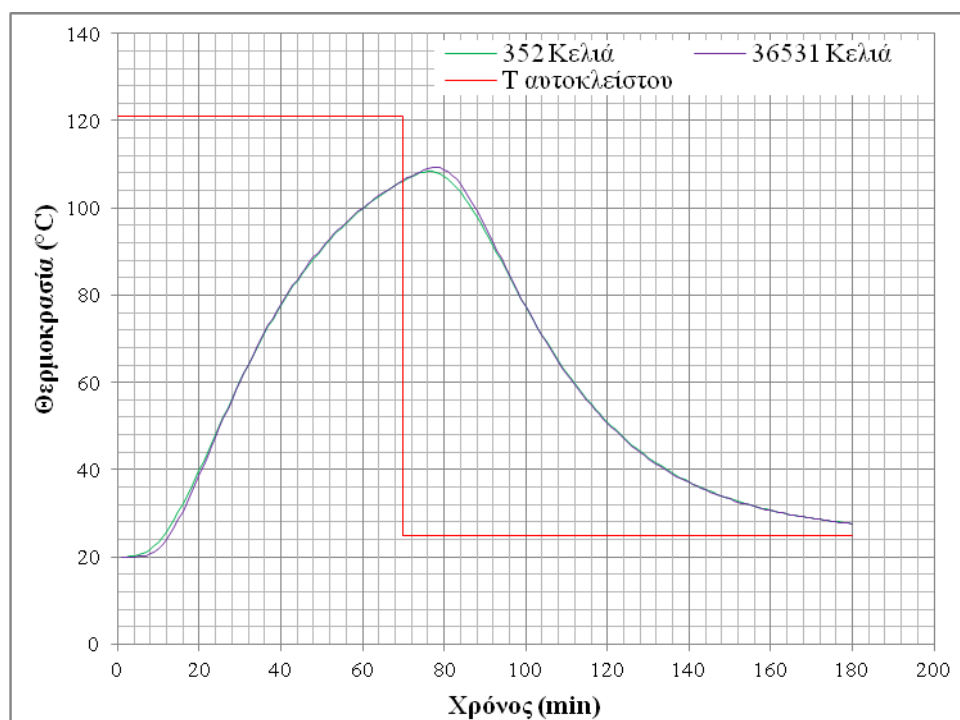
Τύπος πλέγματος	Πυκνότητα πλέγματος (Shortest Edge %)	Πληροφορίες Επιλογής πλεγμάτων	Αριθμός κελιών (Cells)
Tet/Hybrid	0,05	Αραιό πλέγμα με τετράεδρου σχήματος κελιά	2012
Tet/Hybrid	0,01	Πυκνό πλέγμα με τετράεδρου σχήματος κελιά	228614
Hex/Wedge	0,05	Αραιό πλέγμα με εξάεδρου σχήματος κελιά	352
Hex/Wedge	0,01	Πυκνό πλέγμα με εξάεδρου σχήματος κελιά	36531
Hex/Wedge	0,005	Πυκνότερο πλέγμα με εξάεδρου σχήματος κελιά (τελική επιλογή)	320988



Σχήμα 13: Τρεις διαφορετικές περιπτώσεις εξάεδρου (Hex/Wedge) πλέγματος με διαφορετικές πυκνότητες (αριστερά Shortest Edge 5%-352) κελιά, στο κέντρο Shortest Edge 1% 36531 κελιά, δεξιά Shortest Edge 0,5% 320988 κελιά.

3.5 Ανεξαρτησία πλέγματος

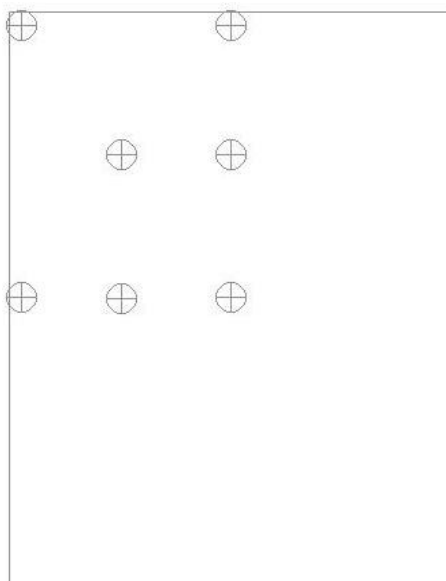
Η προσομοίωση θερμικών διεργασιών τροφίμων αλλά και οποιαδήποτε μελέτη υπολογιστικής ρευστοδυναμικής έχουν σαν προϋπόθεση αρχικά την επιβεβαίωση της ύπαρξης ανεξαρτησίας του πλέγματος. Σε πρώτη φάση κατασκευάστηκε γεωμετρία με χρήση αραιού πλέγματος (μικρότερος αριθμός κελιών) και κατόπιν ένα πλέγμα αρκετά πιο πυκνό. Ο χρόνος που απαιτείται για τον υπολογισμό μιας λύσης είναι αντιστρόφως ανάλογη με την πυκνότητα του πλέγματος, για αυτό τον λόγο είναι σημαντική η εύρεση μιας λύσης με ικανοποιητικά αποτελέσματα σε ένα λογικό χρονικό πλαίσιο. Στην περίπτωση της θέρμανσης με ομοιόμορφη θερμοκρασία τοιχωμάτων κατασκευάστηκε στην αραιή του εκδοχή με εξάεδρου τύπου πλέγμα (Hex/Wedge 5%). Το 5% αφορά την τιμή της πυκνότητας του πλέγματος βάση της επιλογής (Shortest Edge) στο Fluent, δίνοντας με τον συνδυασμό αυτό (352 κελιά) και έπειτα την πυκνότερη γεωμετρία (Hex/Wedge 1%) με αριθμό κελιών (36531 κελιά). Από το διάγραμμα (Σχήμα 14) φαίνεται ότι η διαφορά στην πυκνότητα των δυο πλεγμάτων δεν επηρεάζει την επίλυση. Οι δύο καμπύλες θερμοκρασίας χρόνου για το ίδιο σημείο αναφοράς (κέντρο γεωμετρίας) ταυτίζονται σχεδόν απόλυτα.



Σχήμα 14: Διάγραμμα καμπυλών θερμοκρασίας-χρόνου με διαφορετικές τιμές κελιών για την επαλήθευση ανεξαρτησίας πλέγματος.

3.6 Σημεία μέτρησης θερμοκρασίας

Για την σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ της αναλυτικής και της λύσης στη γεωμετρία που μελετήθηκε εκτός του κρίσιμου σημείου (κέντρο γεωμετρίας) χρησιμοποιήθηκαν και κάποια επιπλέον σημεία για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας κατά τη θερμική επεξεργασία της κονσέρβας στερεού προϊόντος (Σχήμα 15). Αυτά τα σημεία εμφανίζονται αναλυτικά:



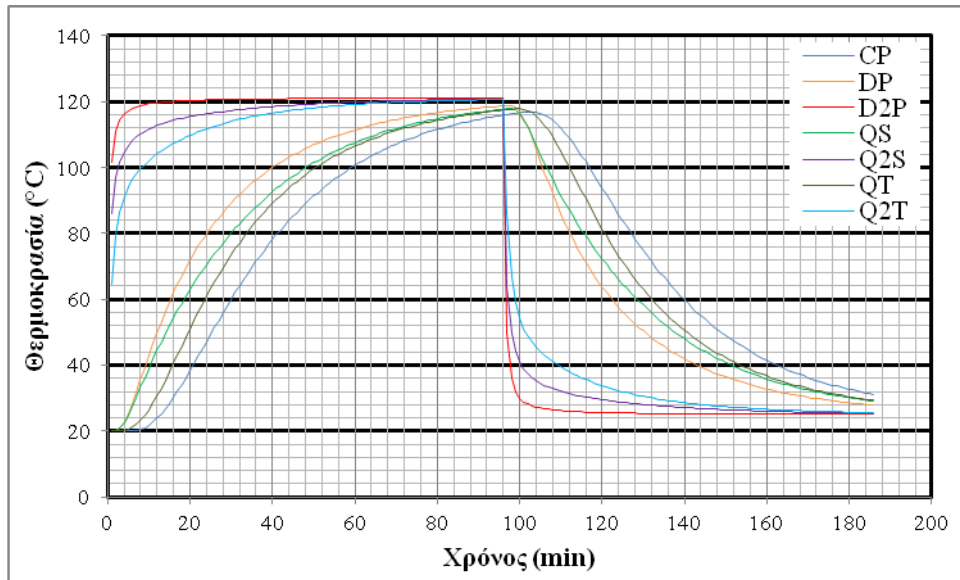
Σχήμα 15: Σημεία που χρησιμοποιήθηκαν στη γεωμετρία για την καταγραφή διαφόρων τιμών (θερμοκρασία, τιμή, F, ποιοτική υποβάθμιση κ.τ.λ.)

Τα σημεία που απεικονίζονται στην ανωτέρω κατανομή χρησιμοποιήθηκαν σε όλες τις δοκιμές (runs) που πραγματοποιήθηκαν και καταχωρήθηκαν με τα εξής ονόματα στο πρόγραμμα:

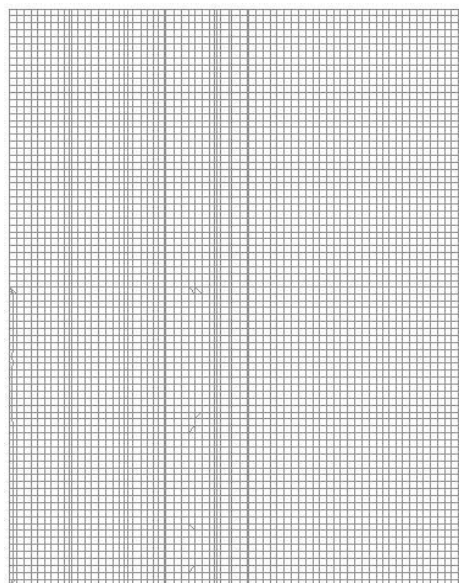
- Center point (κέντρο-1)
- Quarter top point (πάνω από το κεντρικό-2)
- Quarter top 2 point (κοντά στην κορυφή της γεωμετρίας-3)
- Quarter side point (αριστερά από το κέντρο-4)
- Quarter side 2 point (το σημείο δίπλα στο αριστερό τοίχωμα-5)
- Diagonal point (διαγώνιο σημείο-6)
- Diagonal 2 point (το πιο απομακρυσμένο διαγώνιο σημείο-7)

Για τα επτά αυτά σημεία στην γεωμετρία υπολογίστηκαν τιμές θερμοκρασίας κατά την διάρκεια της θερμικής διεργασίας του προϊόντος (Σχήμα 16). Επιπλέον η τομή στη

γεωμετρία δημιουργήθηκε από το σχεδιαστικό πρόγραμμα Fluent και χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη εικόνας της διεργασίας στο κεντρικό (μέσο) τμήμα της γεωμετρίας. Επίσης η χρήση της τομής αυτής (half plane) χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις κατανομές που ελήφθησαν από το Fluent (Σχήμα 17).



Σχήμα 16: Εξέλιξη της θερμοκρασίας των 7 σημείων που επιλέχθηκαν, για $T_{RT}=121.11^{\circ}\text{C}$ και $F_0=9$ min.



Σχήμα 17: Εικόνα της Τομής στο κέντρο της γεωμετρίας (half plane).

3.7 Κεντρικές τιμές

Ανάμεσα σε ένα αριθμό παραμέτρων που αφορούν την θερμική επεξεργασία, εξετάστηκε η δράση των κινητικών παραμέτρων της θερμικής καταστροφής για τον παράγοντα της ποιότητας ($D_{121.11^{\circ}\text{C}}$ και τιμές z), η τιμή στόχος F_0 . (η τιμή $F_{T_{ref}}^z$ για $T_{ref}=121.11^{\circ}\text{C}$ και για $z=10^{\circ}\text{C}$, τιμή z αφορά στα σπόρια του *C. botulinum*) στο γεωμετρικό κέντρο της κονσέρβας, η θερμική αγωγιμότητα, η θερμοκρασία αυτοκλείστου, το μέγεθος κονσέρβας, η μέση συγκέντρωση εξετάστηκαν. Με τις τιμές αυτές έγινε μια διαδικασία δοκιμής και σφάλματος για να γίνει η τελική επιλογή των μεταβλητών που χρησιμοποιήθηκαν στο CFD. Το εύρος των τιμών F_0 που εξετάστηκε στην παρούσα μελέτη αφορά τιμές F_0 για 3, 6 και 9 min αντίστοιχα σύμφωνα με τον Πίνακα 2 όπου αναφέρονται τα εύρη των μεταβλητών που χρησιμοποιήθηκαν για την εύρεση της λύσης με την καλύτερη ταύτιση τιμών σε σύγκριση με την αναλυτική λύση.

Πίνακας 5: Κεντρικές τιμές των παραμέτρων που εξετάστηκαν.

	Κεντρικές Τιμές		
$D_{121.11^{\circ}\text{C}} = 150 \text{ min}$	$z=25^{\circ}\text{C}$	$T_{RT} = 121.11^{\circ}\text{C}$	$a = 1.56 * 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

Οι τιμές αυτές αναφέρονται σαν αρχικές διότι χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες σε όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν εκτός εάν αναφέρεται κάτι διαφορετικό σαν τιμή σε κάποιο σχήμα. Σε αντίθετη περίπτωση υποθέτουμε ότι χρησιμοποιήθηκαν οι ανωτέρω τιμές.

3.8 Αναλυτική λύση προβλήματος

Για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων του CFD πραγματοποιήθηκαν διάφορες δοκιμές με την χρήση της μεθόδου προσπάθειας και λάθους. Ο σκοπός ήταν η εύρεση των καταλληλότερων επιλογών τόσο σε τύπο πλέγματος της γεωμετρίας όσο και σε πυκνότητα αυτού (Shortest Edge) αλλά και επιλογή του κατάλληλου χρονικού βήματος (time step). Τα αποτελέσματα για την κάθε περίπτωση συγκρίθηκαν με αυτά της αναλυτικής λύσης η οποία είναι αυτή που παρουσιάζεται παρακάτω (Kookos and Stoforos, 2014).

3.8.1. Θέρμανση με αγωγή σε μη σταθερή κατάσταση

Κατά τη θερμική επεξεργασία του προϊόντος με αγωγή χρησιμοποιήθηκε ο αέρας ως μέσο θέρμανσης για θερμοκρασία αναφοράς τους 121,11°C και διαφορετικές θερμοκρασίες αυτοκλείστου ανά περίπτωση. Επιπλέον το κομμάτι της ψύξης πραγματοποιήθηκε σε θερμοκρασία των 25°C.

Σε αυτό το κομμάτι θα αναφερθούμε στη θέρμανση με αγωγή σε μη σταθερή κατάσταση και τους τύπους που διέπουν για την χρήση της αναλυτικής λύσης, για την περίπτωση άπειρου επίπεδου αλλά και για την περίπτωση απείρου κυλίνδρου (Kookos and Stoforos, 2014).

3.8.2. Άπειρο επίπεδο (πλάκα)

Το πρόβλημα που πρέπει να λάβουμε υπόψη είναι μια στερεή πλάκα με πάχος (L). Οι δύο εναπομένουσες διαστάσεις υποθέτουμε ότι τείνουν στο άπειρο ή για πρακτικούς λόγους είναι μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερες από το πάχος της πλάκας με αυτό τον τρόπο κάθε μεταφορά θερμότητας από αυτές τις πλευρές μπορεί να αγνοηθεί. Η πλάκα έχει αρχικά σταθερή θερμοκρασία (T_0) παντού ενώ την χρονική στιγμή ($t=0$) φέρεται σαν μέση θερμοκρασία (T_∞). Αναζητούμε μια έκφραση της εξέλιξης της θερμοκρασίας για κάθε σημείο στην πλάκα αυτή η έκφραση για $T(x, t)$ με το (x) να είναι η απόσταση από το γεωμετρικό κέντρο της πλάκας.

Ο τύπος που διέπει την μερική διαφορική εξίσωση δίνεται παρακάτω (Kookos and Stoforos, 2014) :

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

Σύμφωνα με τις ακόλουθες αρχικές και οριακές συνθήκες(Kookos and Stoforos, 2014) :

Αρχικές συνθήκες (IC)

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

Οριακές συνθήκες (BC):

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

Οποιαδήποτε από τις δύο εξισώσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της μεταφοράς θερμότητας σε άπειρο κύλινδρο. Η λύση μπορεί να εκφραστεί ως:

$$Y_{Can} = Y_{cylinder}^{finite} = Y_{slab} Y_{cylinder}^{infinite} \quad (13)$$

3.8.3 Άπειρος Κύλινδρος (*infinite cylinder*)

Στην περίπτωση της περιγραφής του άπειρου κυλίνδρου θα ακολουθήσουμε την ίδια διαδικασία με αυτήν της άπειρης πλάκας για να εξηγήσουμε τη διαδικασία. Αναφερόμαστε σε ένα κύλινδρο με ακτίνα R (radius) αλλά με άπειρο μήκος. Ο τύπος που διέπει την μερική διαφορική για τις συντεταγμένες του κυλίνδρου δίνεται παρακάτω(Kookos and Stoforos, 2014) :

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad \text{ή} \quad \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \quad (14)$$

Σύμφωνα με τις ακόλουθες οριακές συνθήκες:

Αρχικές συνθήκες (IC)

$$T(r, t = 0) = T_0 = \text{constant} \quad (15)$$

Οριακές συνθήκες (BC):

$$k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0 \quad (16)$$

Το Y_{slab} δίνεται από τις εξισώσεις A, B και το $Y_{infinite\ cylinder}$ από τις εξισώσεις Γ, Δ που σχετίζονται με μια συγκεκριμένη εφαρμογή.

(Εξίσωση A):

$$Y_{slab} = \frac{T_{\infty} - T(x,t)}{T_{\infty} - T_0} = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2 \sin(\lambda' m)}{\lambda m + \sin(\lambda m) \cos(\lambda' m)} \cos(\lambda' m \frac{x}{L/2}) e^{-\lambda m \frac{at}{(L/2)^2}} \quad (17)$$

(Εξίσωση B):

$$Y_{slab} = \frac{T_{\infty} - T(x,t)}{T_{\infty} - T_0} = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2(-1)^{m+1}}{\lambda m} \cos(\lambda m \frac{x}{L/2}) e^{-\lambda^2 m \frac{at}{(L/2)^2}} \quad (18)$$

(Εξίσωση Γ):

$$Y_{infinite\ cylinder} = \frac{T_{\infty} - T(r,t)}{T_{\infty} - T_0} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 J_0(\beta n(r/R))}{\beta n J_1(\beta n)} e^{-\beta^2 (at/R^2)} \quad (19)$$

(Εξίσωση Δ):

$$Y_{infinite\ cylinder} = \frac{T_{\infty} - T(r,t)}{T_{\infty} - T_0} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 Bi J_0(\beta' n(r/R))}{(\beta n^2 + Bi^2) J_0(\beta' n)} e^{-\beta^2 (at/R^2)} \quad (20)$$

3.9 Επιλογές ορισμένες από τον χρήστη (UDF)

Στην συγκεκριμένη μελέτη πραγματοποιήθηκε υπολογισμός της τιμής F μέσω του CFD και με την επιπρόσθετη χρήση (UDF) αρχείου στο πρόγραμμα, με σκοπό τον υπολογισμό της τιμής F τόσο για τον μικροοργανισμό στόχο (*Clostridium botulinum*) όσο και για τον ποιοτικό παράγοντα.

Για την επεξεργασία κάποιων παραμέτρων (π.χ. τιμής F) στο πρόγραμμα Fluent είναι απαραίτητη η προσθήκη ενός εξωτερικού αρχείου το οποίο περιλαμβάνει κάποιες εντολές και ακολουθίες εξισώσεων. Αυτές οι εντολές δημιουργούνται σε ένα κατάλληλο τύπο αρχείου (.c) προκειμένου να είναι αναγνωρίσιμα από το πρόγραμμα και βοηθούν στην επεξεργασία περισσότερων παραγόντων. Το αρχείο αυτό είναι γνωστό ως λειτουργίες προσδιοριζόμενες από τον χρήστη (User Defined Functions-UDF-Πίνακας 6). Στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε το UDF αρχείο για τον υπολογισμό των τιμών F καθώς και για τον υπολογισμό του ποσοστού διατήρησης ποιοτικού παράγοντα.

Πίνακας 6: Αρχείο UDF για τον υπολογισμό των τιμών F για διαφορετικές τιμές z.

```
#include "udf.h"
#define domain_ID 2

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

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

    domain=Get_Domain(1);

    thread_loop_c(t,domain) {
        begin_c_loop(c,t)
        {
            C_UDMI(c,t,0) = C_UDMI(c,t,0) + (curr_ts * pow(10, ((C_T(c, t) - 394.25) / 10)));
            C_UDMI(c,t,1) = C_UDMI(c,t,1) + (curr_ts * pow(10, ((C_T(c, t) - 394.25) / 25)));
            C_UDMI(c,t,2) = C_UDMI(c,t,2) + (curr_ts * pow(10, ((C_T(c, t) - 394.25) / 26.7)));
            C_UDMI(c,t,3) = C_UDMI(c,t,3) + (curr_ts * pow(10, ((C_T(c, t) - 394.25) / 27.8)));
            C_UDMI(c,t,4) = C_UDMI(c,t,4) + (curr_ts * pow(10, ((C_T(c, t) - 394.25) / 30.6)));
            C_UDMI(c,t,5) = C_UDMI(c,t,5) + (curr_ts * pow(10, ((C_T(c, t) - 394.25) / 33.3)));
            C_UDMI(c,t,6) = C_UDMI(c,t,6) + (curr_ts * pow(10, ((C_T(c, t) - 394.25) / 38.9)));
            C_UDMI(c,t,7) = C_UDMI(c,t,7) + (curr_ts * pow(10, ((C_T(c, t) - 394.25) / 44.4)));
        }
        end_c_loop(c,t)
    }
}
```

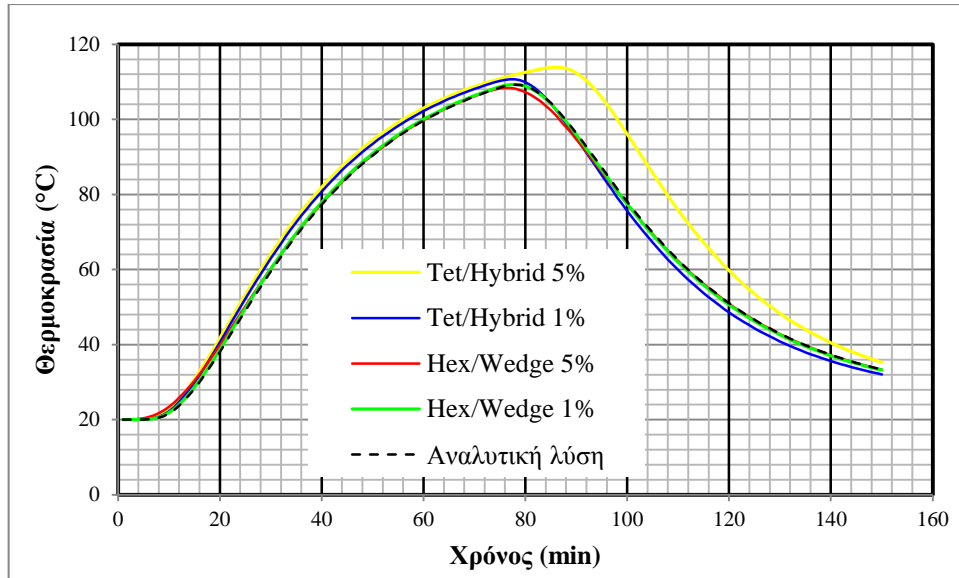
Κεφάλαιο 4^ο Αποτελέσματα

Για το στερεό τρόφιμο σε κονσέρβα με εσωτερικές διαστάσεις 307×409 θεωρήθηκε άπειρος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, ενώ αφορά θέρμανση με αγωγή. Επιπλέον είχε ομοιόμορφη αρχική ταχύτητα (T_{IT}), ενώ η θερμοκρασία αναφοράς ήταν η ίδια για όλες τις περιπτώσεις 121,11°C ενώ η θερμοκρασίας ψύξης παρέμεινε σταθερή σε όλες τις περιπτώσεις στους 25°C. Στα αποτελέσματα που προέκυψαν από το CFD αρχικά εξετάστηκε η καλύτερη λύση, η οποία επιλέχθηκε βάση του πόσο πολύ ταυτίζονται τα αποτελέσματά της με αυτά της αναλυτικής λύσης που αναφέρθηκε προηγουμένως. Παρακάτω ακολουθούν διαγράμματα (Σχήματα 18,19) στα οποία παρουσιάζονται οι συγκρίσεις που έγιναν για τις διάφορες περιπτώσεις που εξετάστηκαν σε σύγκριση με την αναλυτική λύση και η τελική επιλογή της λύσης που επιλέχθηκε ως καταλληλότερη. Τα διαγράμματα αυτά δημιουργήθηκαν με τα αποτελέσματα που λάβαμε από το CFD και κατόπιν επεξεργαστήκαμε στο σχεδιαστικό πρόγραμμα Excel 2013.

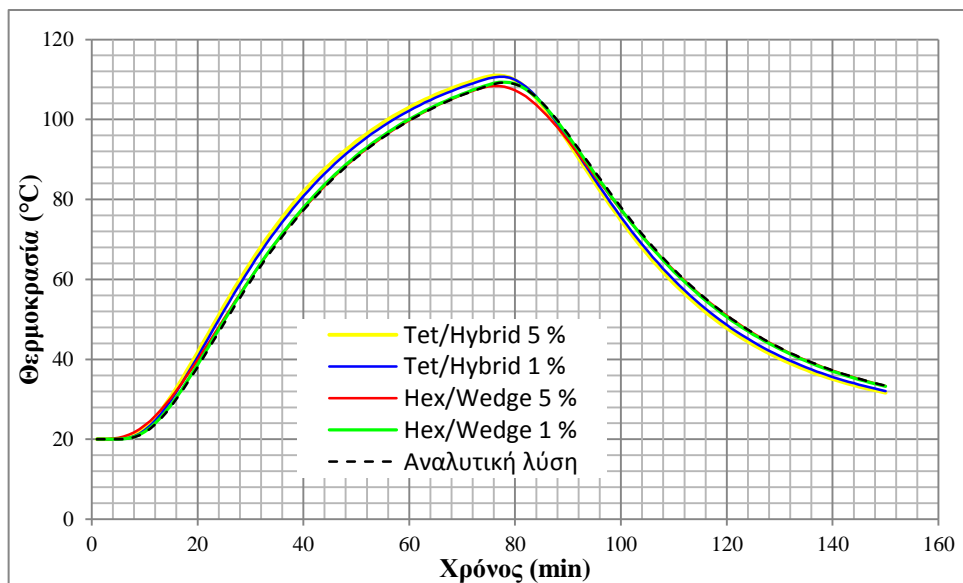
Αρχικά και για κριτήριο σύγκλισης 10^{-6} έγιναν υπολογισμοί για διαφορετικές πυκνότητες (5 και 1%) και για διαφορετικούς τύπους πλέγματος (τετράεδρα και εξάεδρα πλέγματα) σε σύγκριση με την αναλυτική λύση. Από το διάγραμμα που προέκυψε η περίπτωση με το εξάεδρου τύπου πλέγμα και με μεγαλύτερη πυκνότητα μας έδωσε τα πιο καλά αποτελέσματα έχοντας την καλύτερη ταύτιση με την καμπύλη τιμών της αναλυτικής λύσης (Σχήμα 18).

Κατόπιν με κριτήριο σύγκλισης 10^{-9} το οποίο μας δίνει πιο ακριβή αποτελέσματα έγινε το αντίστοιχο διάγραμμα με προηγουμένως δίνοντας και πάλι η ίδια περίπτωση τα καλύτερα αποτελέσματα (Σχήμα 19). Τελικά για να δούμε με μεγαλύτερη ακρίβεια την καταλληλότητα της λύσης που έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα δημιουργήθηκε ένα διάγραμμα σφάλματος με την αναλυτική λύση για τις δύο περιπτώσεις εξάεδρων, για διαφορετικές πυκνότητες (Σχήμα 20).

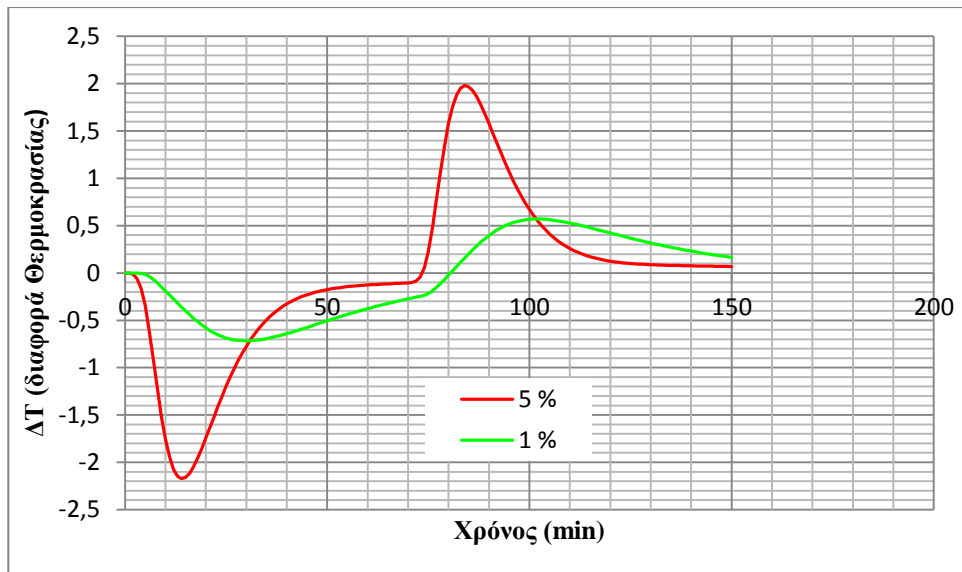
Με βάση τα αποτελέσματα που πήραμε από τα διαγράμματα (Σχήμα 18, 19, 20), ο πυκνότερος τύπος πλέγματος σε σύγκριση με τον χρόνο που χρειάστηκε για τον υπολογισμό, μας δίνει καλύτερα αποτελέσματα και για τον λόγο αυτό προτιμήθηκε στην συγκεκριμένη μελέτη.



Σχήμα 18: Επίδραση του τύπου (τετράεδρα -Tet/Hybrid και εξάεδρα -Hex/Wedge) και της πυκνότητας πλέγματος στην πρόβλεψη της θερμοκρασίας στο κέντρο του προϊόντος, σε σύγκριση με την αναλυτική λύση, για κριτήριο σύγκλισης 10^{-6} και χρονικό βήμα 1s.



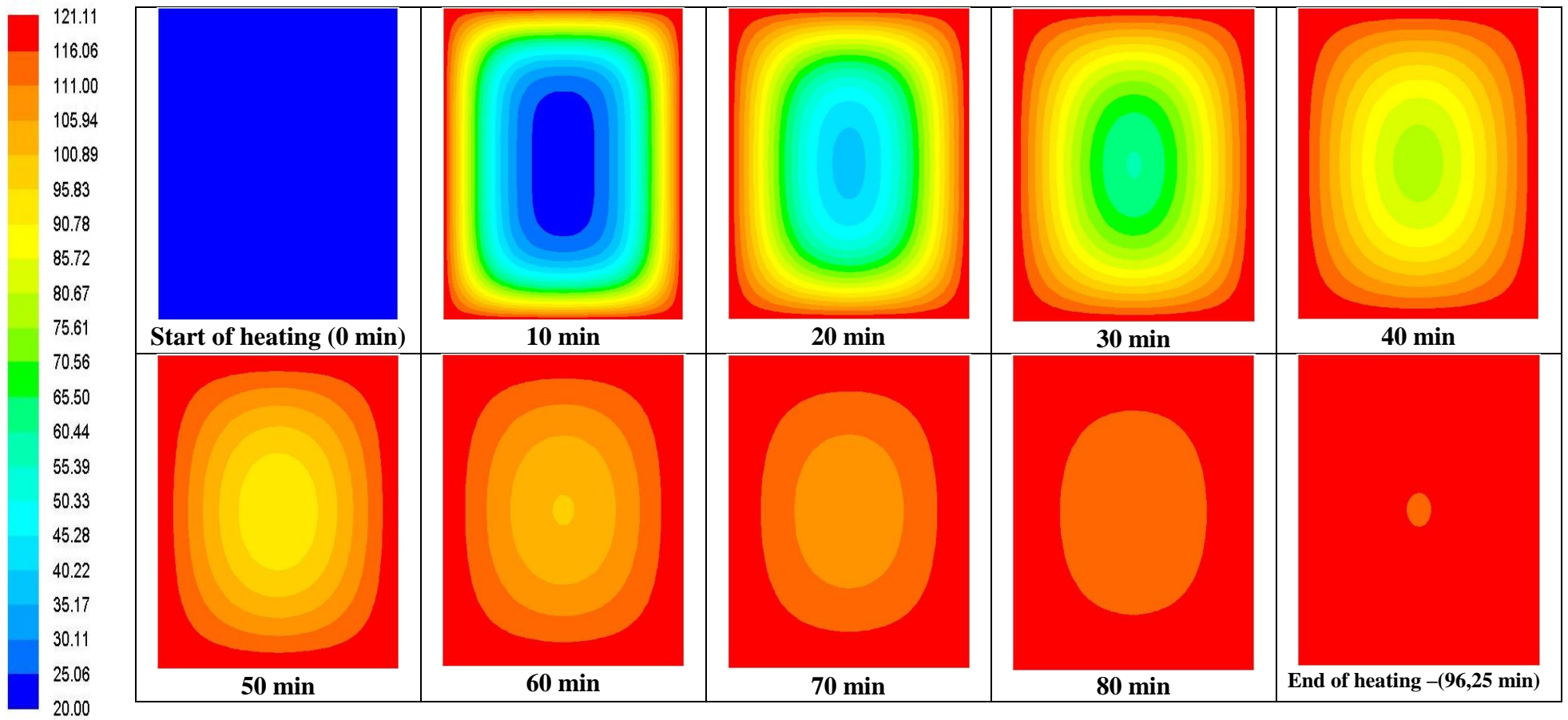
Σχήμα 19: Επίδραση του τύπου (τετράεδρα -Tet/Hybrid και εξάεδρα -Hex/Wedge) και της πυκνότητας πλέγματος στην πρόβλεψη της θερμοκρασίας στο κέντρο του προϊόντος, σε σύγκριση με την αναλυτική λύση, για κριτήριο σύγκλισης 10^{-9} και χρονικό βήμα 1s.



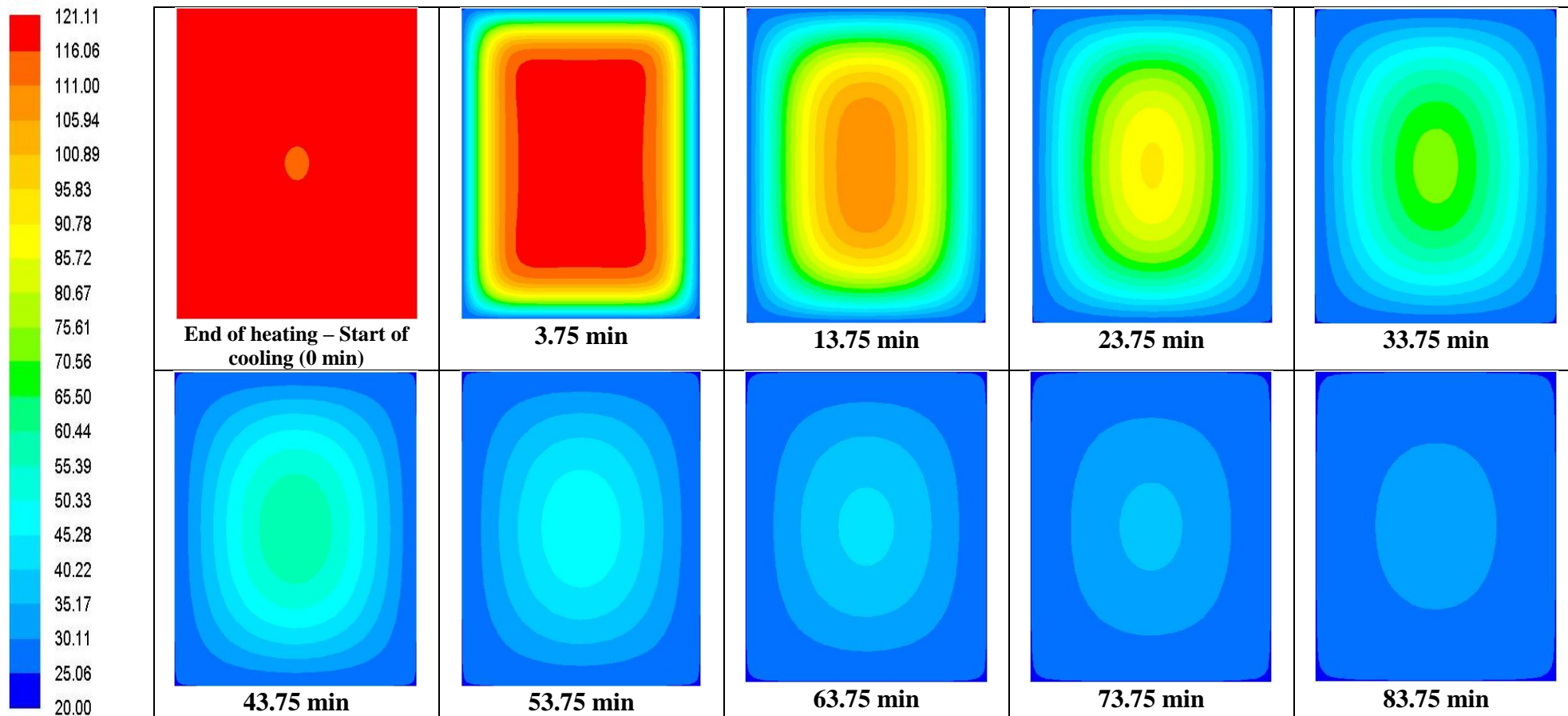
Σχήμα 20: Διάγραμμα σφάλματος, (αναλυτική θερμοκρασία μείον προβλεπόμενη), για διαφορετικές πυκνότητες πλέγματος, για 10^{-9} κριτήριο σύγκρισης και χρονικό διάστημα 1s.

4.1 Εξέλιξη θερμοκρασίας κονσερβοποιημένου στερεού προϊόντος

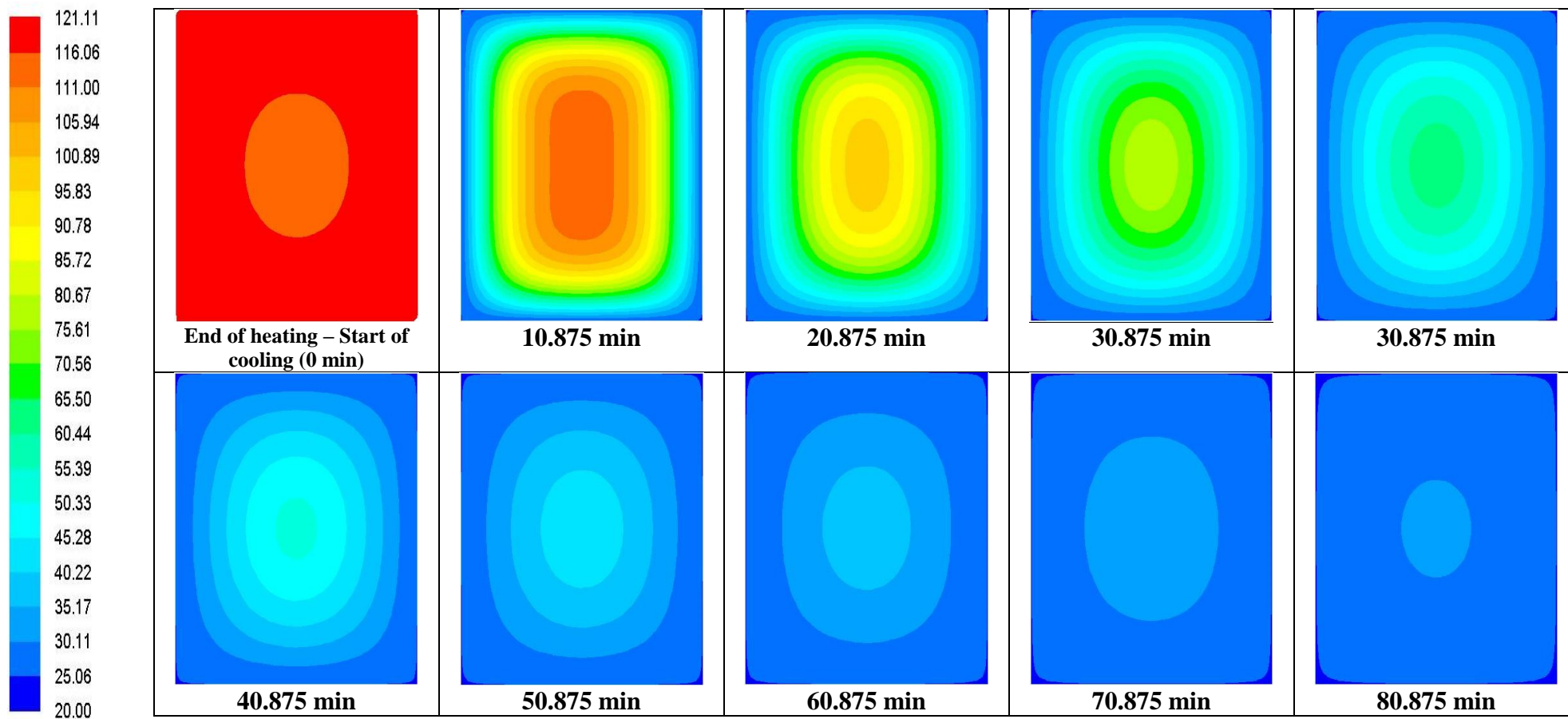
Στο στάδιο της θερμικής προσομοίωσης του στερεού τροφίμου κατά τη διάρκεια του κύκλου θέρμανσης και του κύκλου ψύξης, καταγράφηκαν κατανομές σε κάθετη τομή (half-plane) στο κέντρο της κονσέρβας, για διαφορετικές χρονικές στιγμές δείχνοντας με τον τρόπο αυτό την εξέλιξη της θερμοκρασίας στο τρόφιμο. Οι κατανομές θερμοκρασίας που ακολουθούν αφορούν τις περιπτώσεις για τιμές $F_0=3, 6, 9$ min και αφορούν τις κεντρικές τιμές των υπολοίπων παραμέτρων (Πίνακας 4) που επιλέχθηκαν για την εργασία. Επιπλέον είναι αντιπροσωπευτικές για όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις που μελετήθηκαν με διαφορετικές παραμέτρους όσον αφορά στο κομμάτι της θερμικής επεξεργασίας της κονσέρβας του στερεού τροφίμου, η κλίμακα (αριστερά του σχήματος αναφέρεται σε °C) (Σχήμα 21, 22, 23, 24).



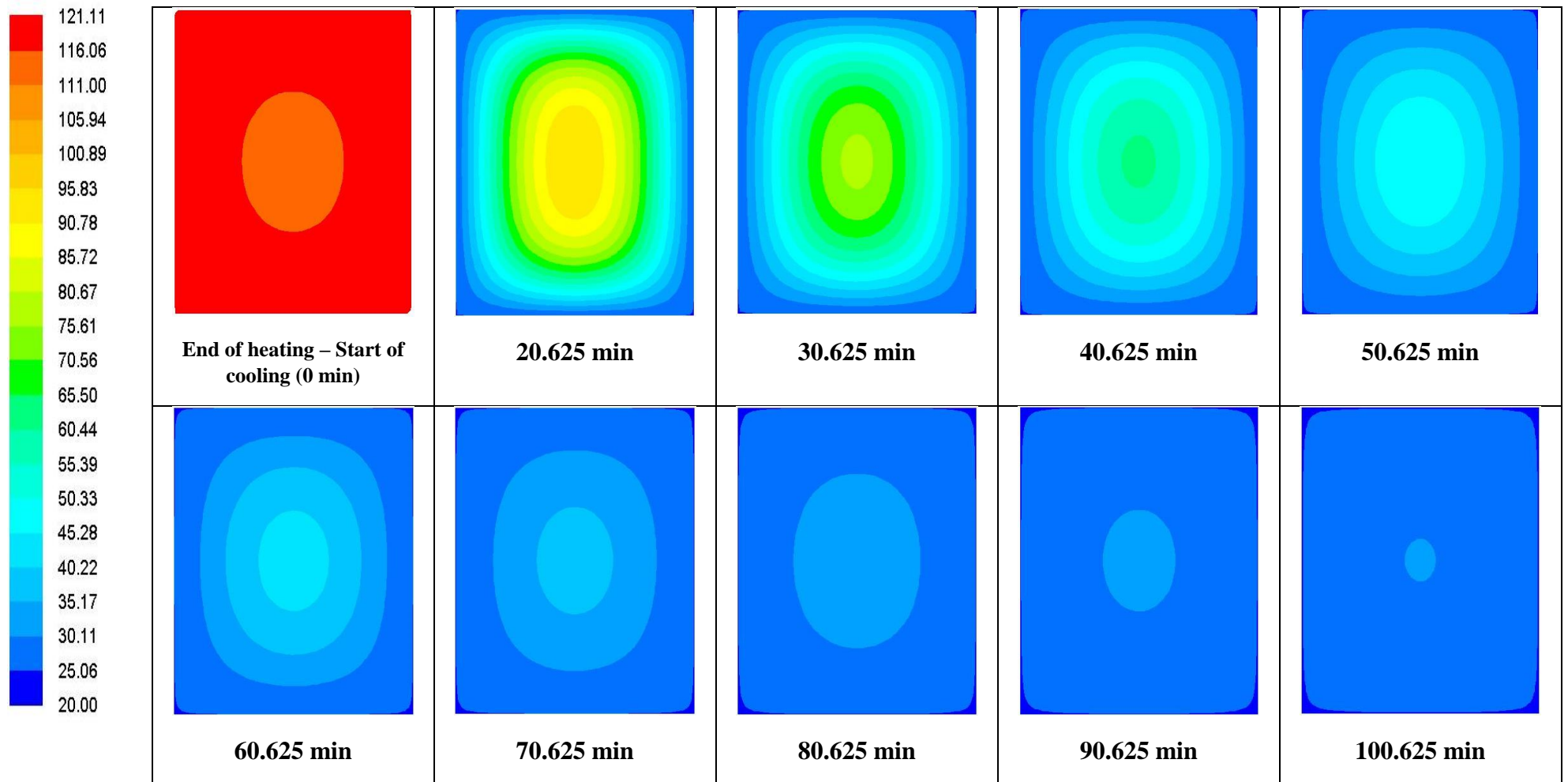
Σχήμα 21: Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας του προϊόντος κατά την διάρκεια του κύκλου θέρμανσης της θερμικής επεξεργασίας ($T_{RT}= 121,11^{\circ}\text{C}$, $T_{IT}= 20^{\circ}\text{C}$). Η κλίμακα αριστερά αναφέρεται σε $^{\circ}\text{C}$.



Σχήμα 22: Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας του προϊόντος κατά την διάρκεια του κύκλου ψύξης της θερμικής επεξεργασίας ($T_{RT}= 121,11^{\circ}\text{C}$, $T_{cw}= 25^{\circ}\text{C}$, $F_0= 9 \text{ min}$). Η κλίμακα αριστερά αναφέρεται σε $^{\circ}\text{C}$



Σχήμα 23: Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας του προϊόντος κατά την διάρκεια του κύκλου ψύξης της θερμικής επεξεργασίας ($T_{RT}= 121,11^{\circ}\text{C}$, $T_{cw}= 25^{\circ}\text{C}$, $F_0= 6 \text{ min}$). Η κλίμακα αριστερά αναφέρεται σε $^{\circ}\text{C}$

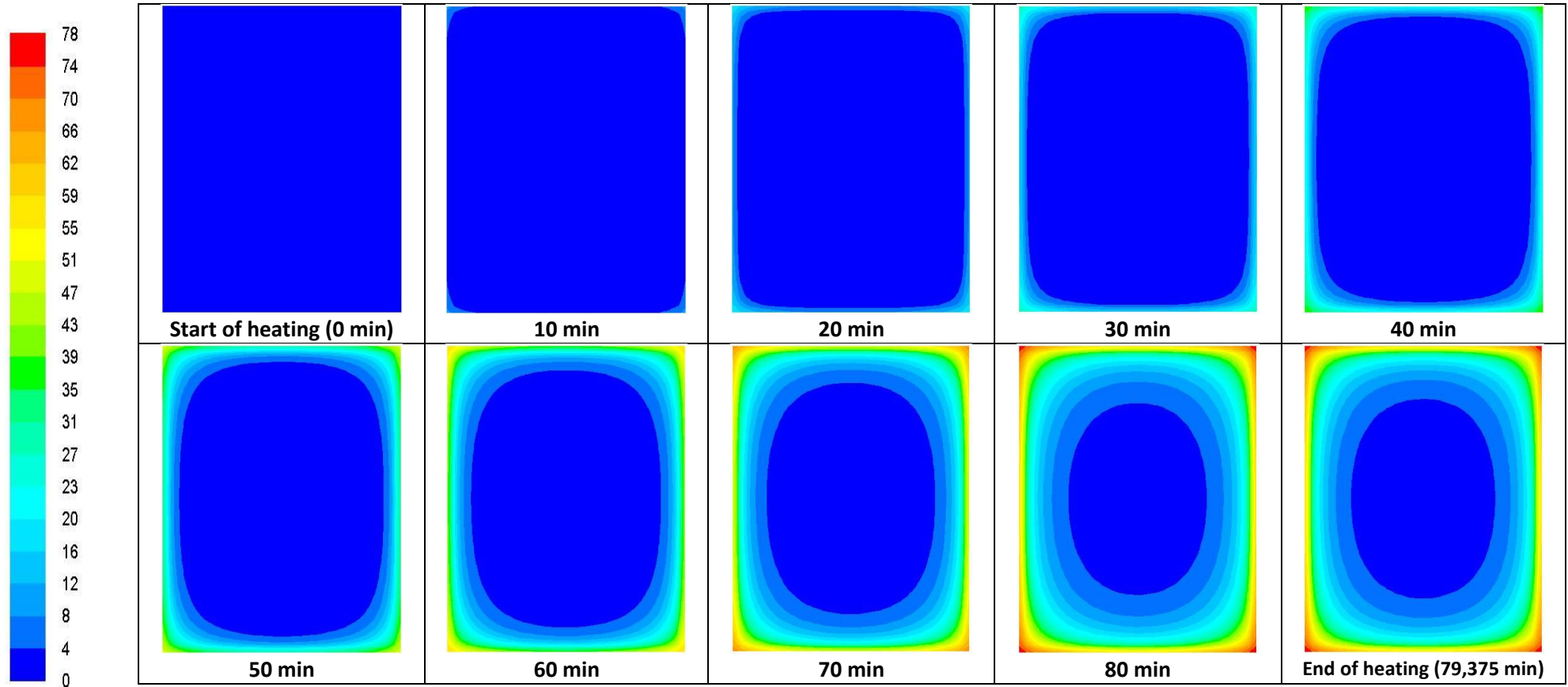


Σχήμα 24: Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας του προϊόντος κατά την διάρκεια του κύκλου ψύξης της θερμικής επεξεργασίας ($T_{RT}= 121,11^{\circ}\text{C}$, $T_{cw}= 25^{\circ}\text{C}$, $F_0= 3 \text{ min}$). Η κλίμακα αριστερά αναφέρεται σε $^{\circ}\text{C}$

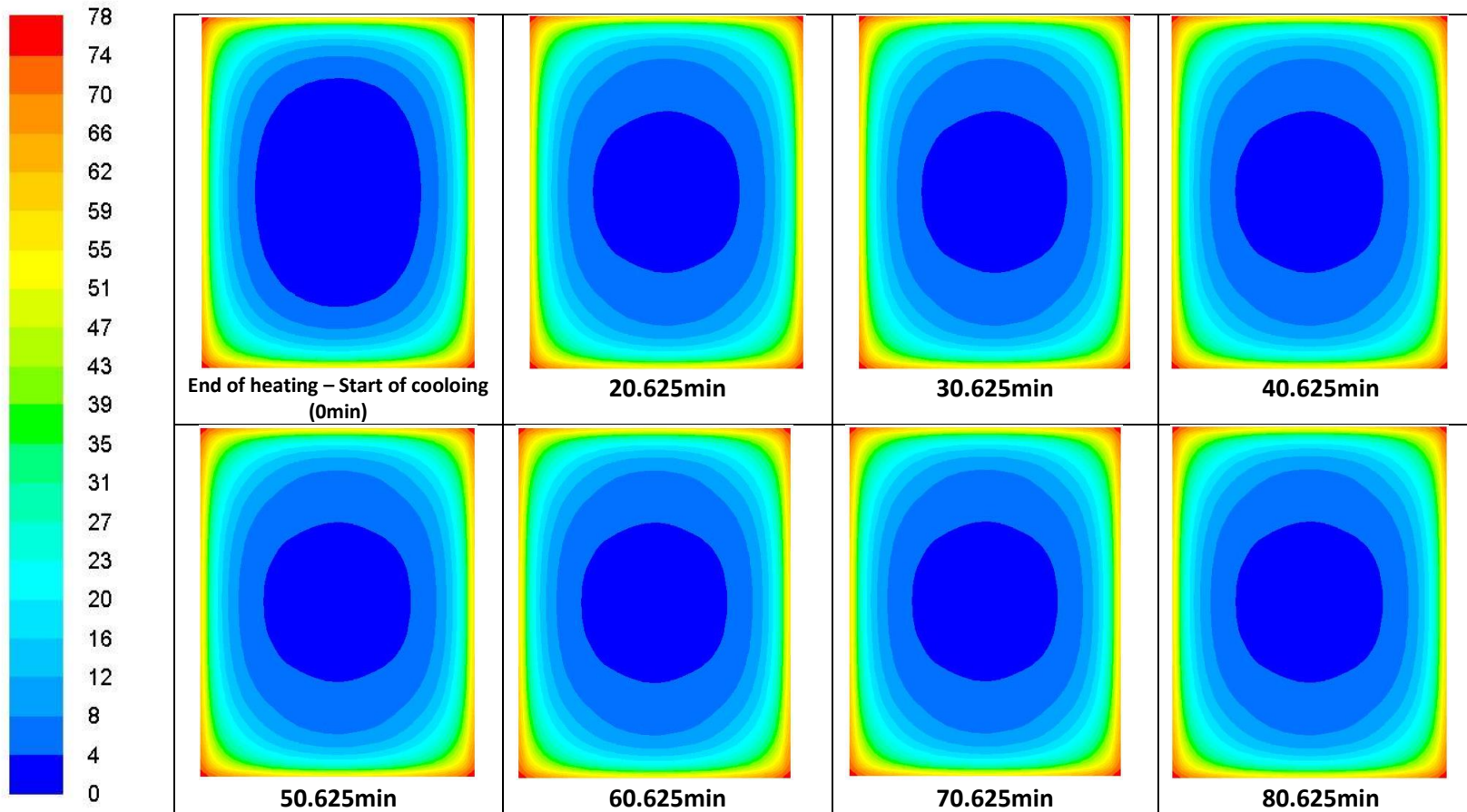
Αρχικά βλέπουμε τη διαδικασία της θέρμανσης στην κονσέρβα κρέατος ξεκινώντας από την αρχική των 20°C. Η κλίμακα θερμοκρασιών είναι κοινή για όλες τις περιπτώσεις και αλλάζει με διαβαθμίσεις χρωματικές (κόκκινες διαβαθμίσεις πιο υψηλή θερμοκρασία, μπλε πιο χαμηλή). Αξίζει να αναφερθεί σε αυτό το σημείο ότι οι εικόνες της θερμοκρασίας (Contours of Temperature) δείχνουν ομοιόμορφη θέρμανση από όλες τις πλευρές της όπως θεωρήθηκε γεωμετρία με τη θερμοκρασία να εισέρχεται σιγά σιγά στο κέντρο της γεωμετρίας που αποτελεί και το κρίσιμο σημείο της κονσέρβας. Στο τέλος του κύκλου θέρμανσης η θερμοκρασία στο κέντρο της κονσέρβας έφτασε στους 116°C για 92,26 min θέρμανσης.

4.2 Κατανομή των τιμών F

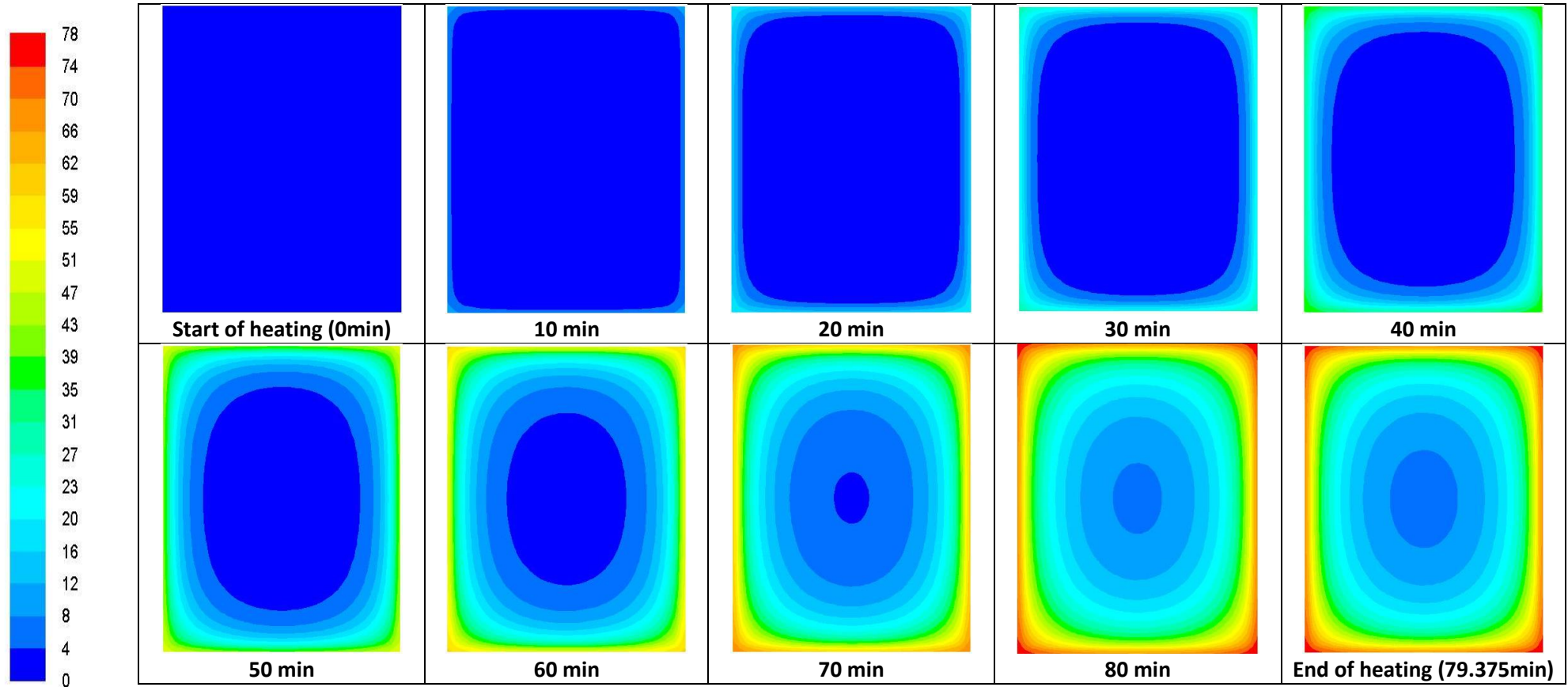
Στο σημείο αυτό της εργασίας παρουσιάζονται οι κατανομές της τιμής F για διαφορετικές περιπτώσεις ($z=10$ και 25°C αντίστοιχα) σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, τόσο στον κύκλο της θέρμανσης όσο και στον κύκλο της ψύξης. Επιλέχθηκαν οι πιο χαρακτηριστικές περιπτώσεις των κατανομών των τιμών F. Όπως θα παρατηρήσουμε σε όλες τις περιπτώσεις κατανομών τιμών F που ακολουθούν η εξέλιξη των τιμών ακολουθεί το παράδειγμα της περίπτωσης κατανομών της εξέλιξη της θερμοκρασίας. Συγκεκριμένα εξελίσσεται με φορά από έξω προς τα μέσα δίνοντας τις μεγαλύτερες τιμές εξωτερικά και τις χαμηλότερες στο κέντρο στόχος η επίτευξη της τιμής στόχου F_0 στο κέντρο της γεωμετρίας στο τέλος της διεργασίας (Σχήμα 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32).



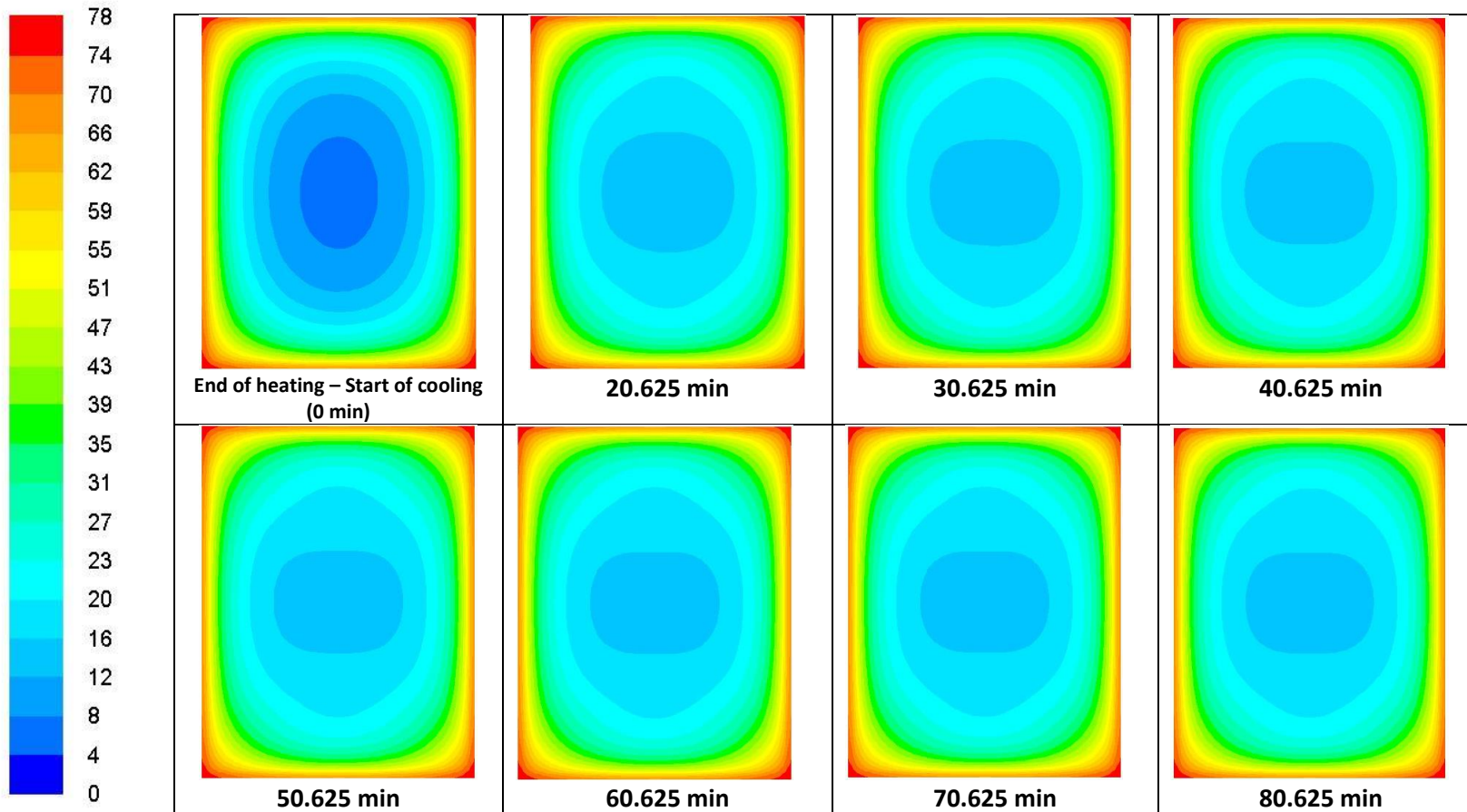
Σχήμα 25: Εξέλιξη της κατανομής της τιμής F_0 στη διεργασία κατά τη διάρκεια του κύκλου θέρμανσης της θερμικής επεξεργασίας για $z=10^\circ\text{C}$ ($T_{RT}=121.11^\circ\text{C}$, $T_{IT}=20^\circ\text{C}$, $F_0=3$ min). Η κλίμακα αριστερά αναφέρεται σε min.



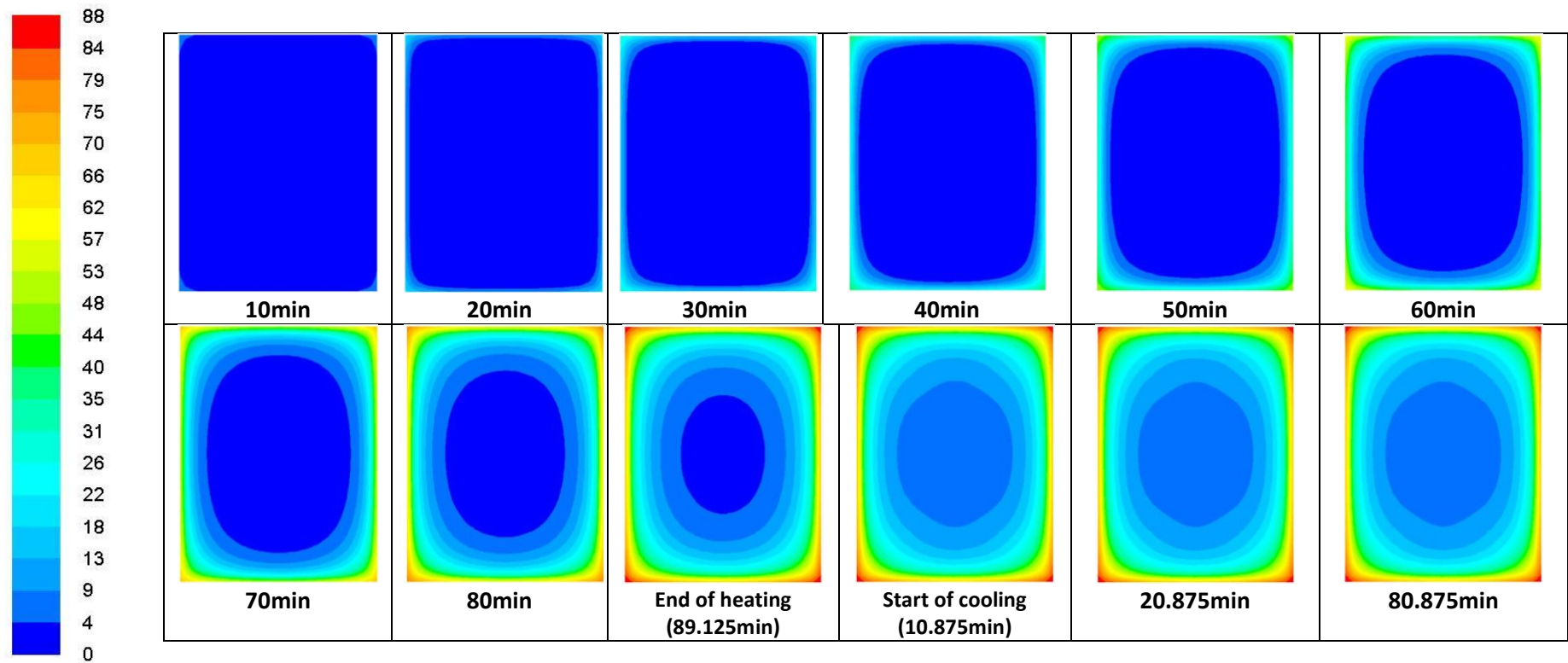
Σχήμα 26: Εξέλιξη της κατανομής της τιμής F_0 στη διεργασία κατά τη διάρκεια του κύκλου ψύξης της θερμικής επεξεργασίας για $z=10^\circ\text{C}$ ($T_{RT}=121.11^\circ\text{C}$, $T_{IT}=20^\circ\text{C}$, $F_0=3$ min). Η κλίμακα αριστερά αναφέρεται σε min.



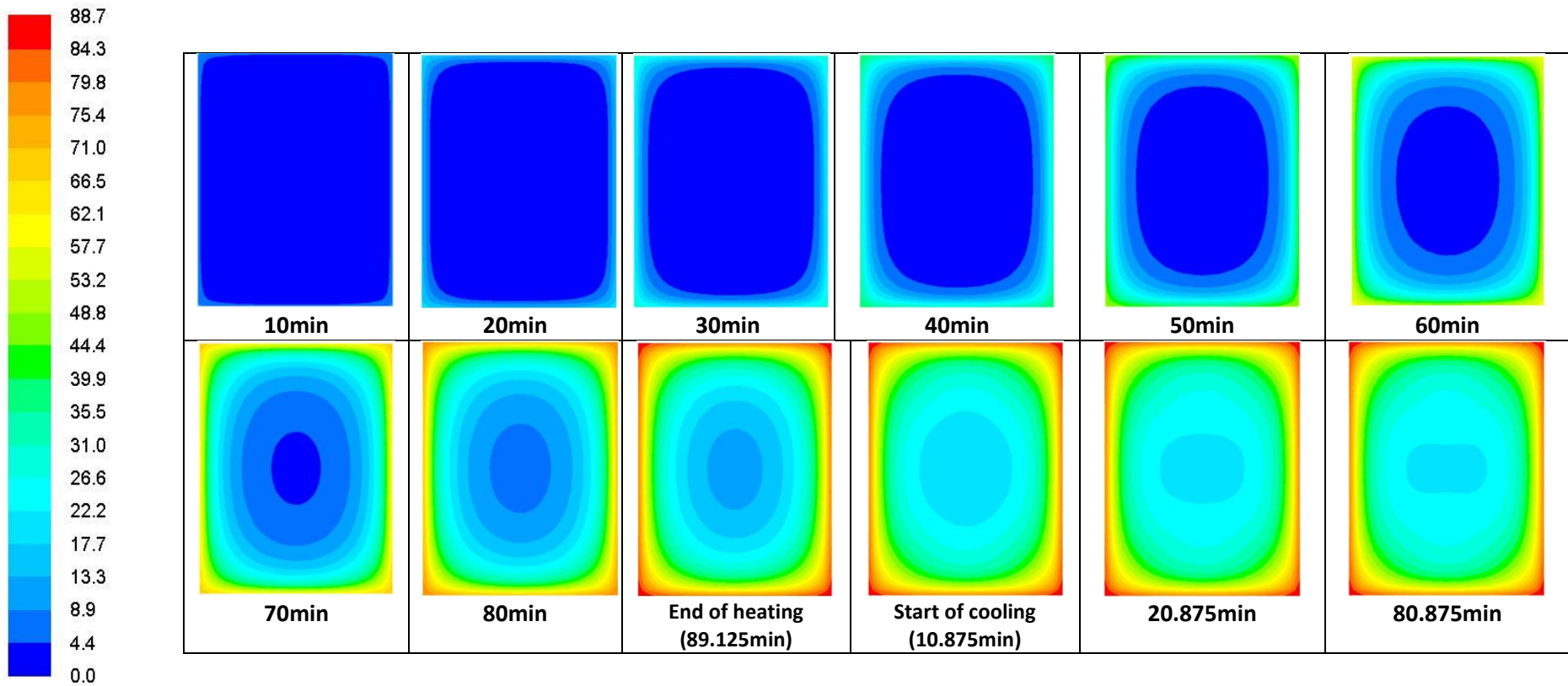
Σχήμα 27: Εξέλιξη της κατανομής της τιμής $F_{121,11}^{\circ\text{C}}$ στη διεργασία κατά τη διάρκεια του κύκλου θέρμανσης της θερμικής επεξεργασίας για $z=25^{\circ\text{C}}$ ($T_{RT}=121.11^{\circ\text{C}}$, $T_{IT}=20^{\circ\text{C}}$, $F_0=3$ min). Η κλίμακα αριστερά αναφέρεται σε min.



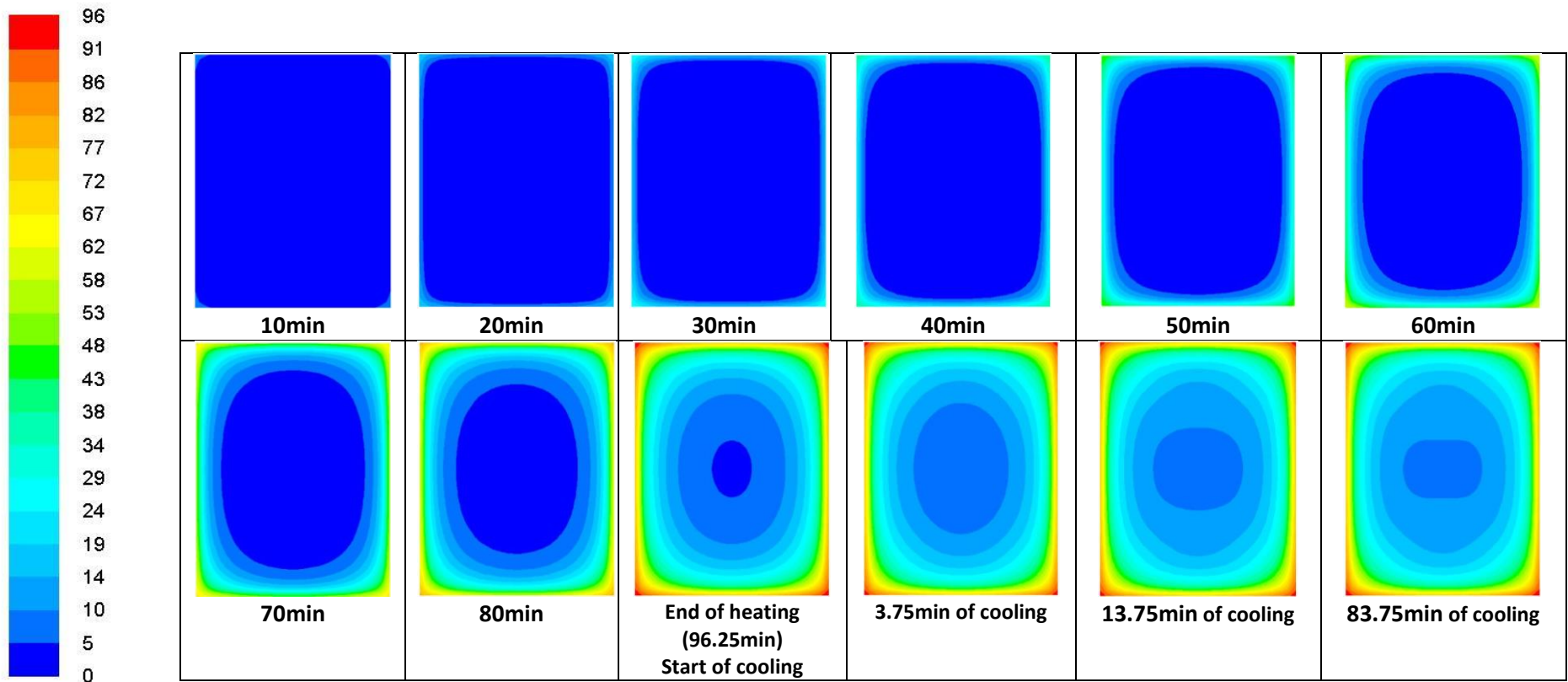
Σχήμα 28: Εξέλιξη της κατανομής της τιμής F στη διεργασία κατά τη διάρκεια του κύκλου ψύξης της θερμικής επεξεργασίας για $z=25^{\circ}\text{C}$ ($T_{RT}=121.11^{\circ}\text{C}$, $T_{IT}=20^{\circ}\text{C}$, $F_0=3$ min). Η κλίμακα αριστερά αναφέρεται σε min.



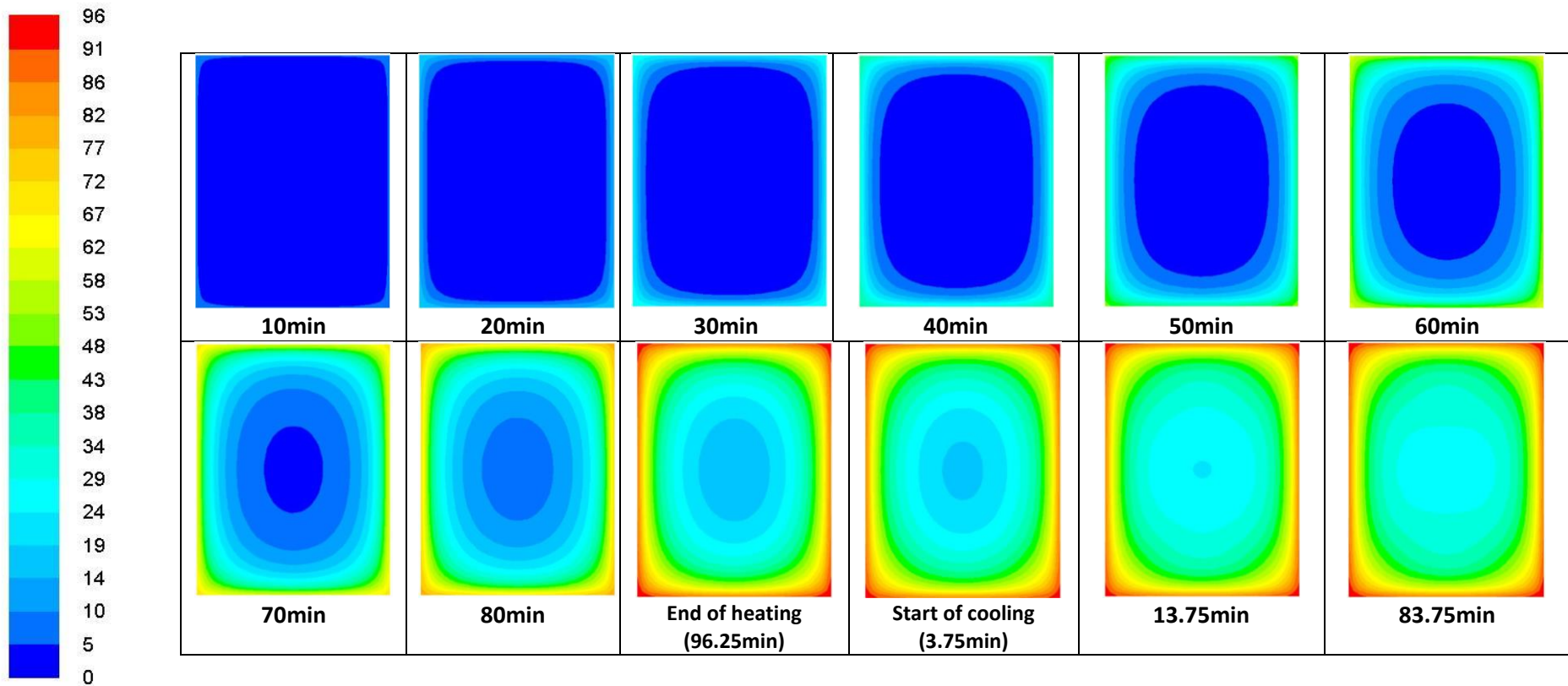
Σχήμα 29: Εξέλιξη της κατανομής της τιμής F στη διεργασία κατά τη διάρκεια του κύκλου θέρμανσης και ψύξης της θερμικής επεξεργασίας για $z=10^{\circ}\text{C}$ ($T_{RT}=121.11^{\circ}\text{C}$, $T_{IT}=20^{\circ}\text{C}$, $F_0=6$ min). Η κλίμακα αριστερά αναφέρεται σε min.



Σχήμα 30: Εξέλιξη της κατανομής της τιμής F στη διεργασία κατά τη διάρκεια του κύκλου θέρμανσης και ψύξης της θερμικής επεξεργασίας για $z=25^{\circ}\text{C}$ ($T_{RT}=121.11^{\circ}\text{C}$, $T_{IT}=20^{\circ}\text{C}$, $F_0=6$ min). Η κλίμακα αριστερά αναφέρεται σε min.



Σχήμα 31: Εξέλιξη της κατανομής της τιμής F στη διεργασία κατά τη διάρκεια του κύκλου θέρμανσης και ψύξης της θερμικής επεξεργασίας για $z=10^{\circ}\text{C}$ ($T_{RT}=121.11^{\circ}\text{C}$, $T_{IT}=20^{\circ}\text{C}$, $F_0=9$ min). Η κλίμακα αριστερά αναφέρεται σε min.



Σχήμα 32: Εξέλιξη της κατανομής της τιμής F στη διεργασία κατά τη διάρκεια του κύκλου θέρμανσης και ψύξης της θερμικής επεξεργασίας για $z=25^{\circ}\text{C}$ ($T_{RT}=121.11^{\circ}\text{C}$, $T_{IT}=20^{\circ}\text{C}$, $F_0=9$ min). Η κλίμακα αριστερά αναφέρεται σε min.

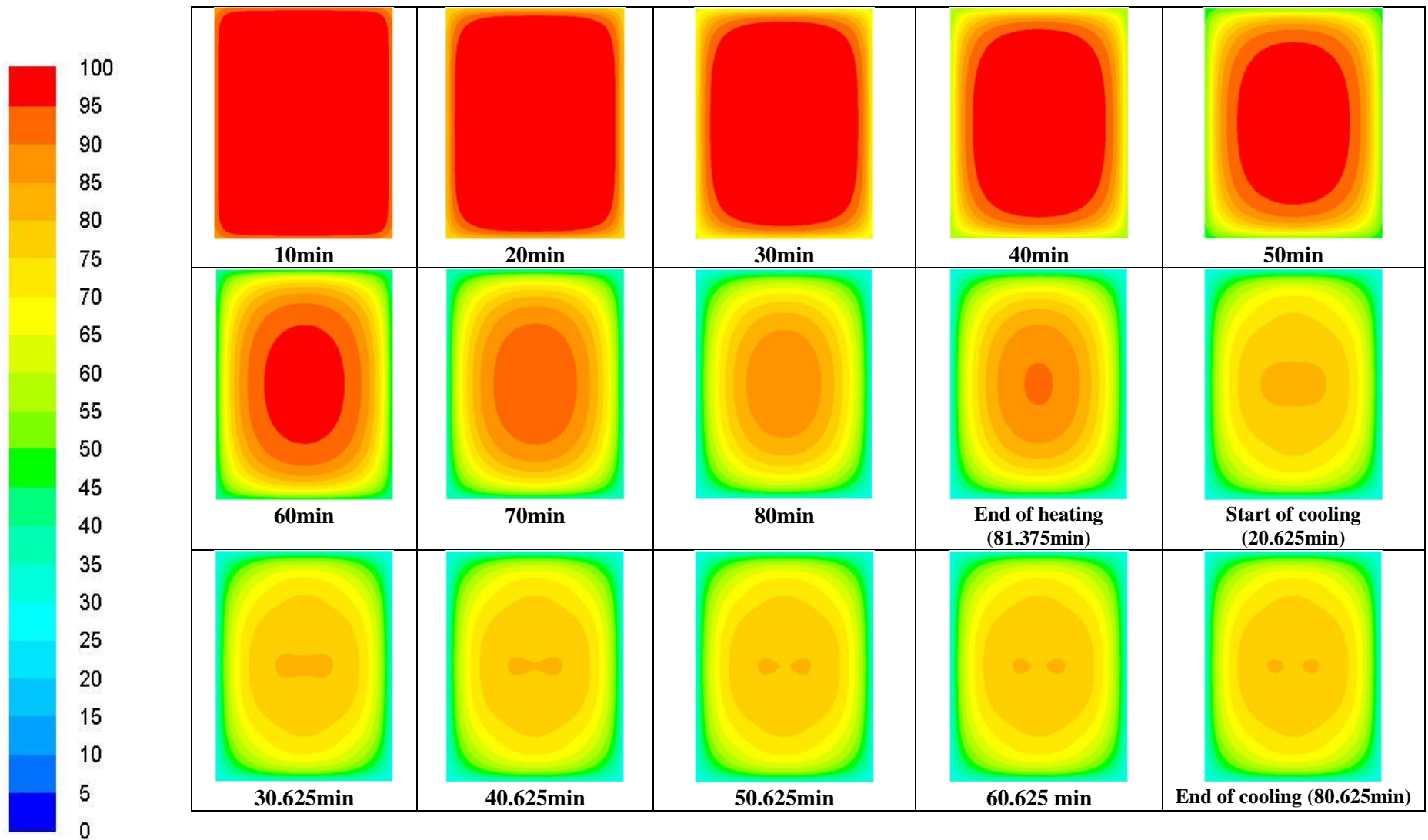
Τα παραπάνω διαγράμματα αφορούν κατανομές στο κέντρο για τιμές $F_0=3, 6, 9$ min για διαφορετικές περιπτώσεις σε τιμή $z=10, 25^\circ\text{C}$ και με τις κεντρικές τιμές στις υπόλοιπες παραμέτρους. Η εξέλιξη της τιμής F στο κέντρο διαμορφώνεται διαφορετικά ανάλογα την τιμή που θέλουμε να πετύχουμε στο κέντρο. Η διαφορά είναι φυσιολογική λόγω των διαφορετικών χρόνων θερμικής επεξεργασίας που εφαρμόζονται στο προϊόν ανάλογα με την τιμή F_0 που θα τεθεί ως στόχος στην διεργασία. Οι περιπτώσεις αφορούν δείκτη ασφάλειας $z=10^\circ\text{C}$ και δείκτη ποιότητας $z=25^\circ\text{C}$. Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι σε όλες τις περιπτώσεις των κατανομών της τιμής F από ένα χρονικό διάστημα της τάξεως των 30min από την αρχή της ψύξης του τροφίμου σταμάτησε η μεταβολή της τιμής F μέχρι και το τέλος της διεργασίας ανεξαρτήτως του οποιουδήποτε διαφορετικού παράγοντα που μπορεί να υπήρχε στην εκάστοτε περίπτωση που μελετήθηκε.

4.3 Διατήρηση ποιοτικού παράγοντα

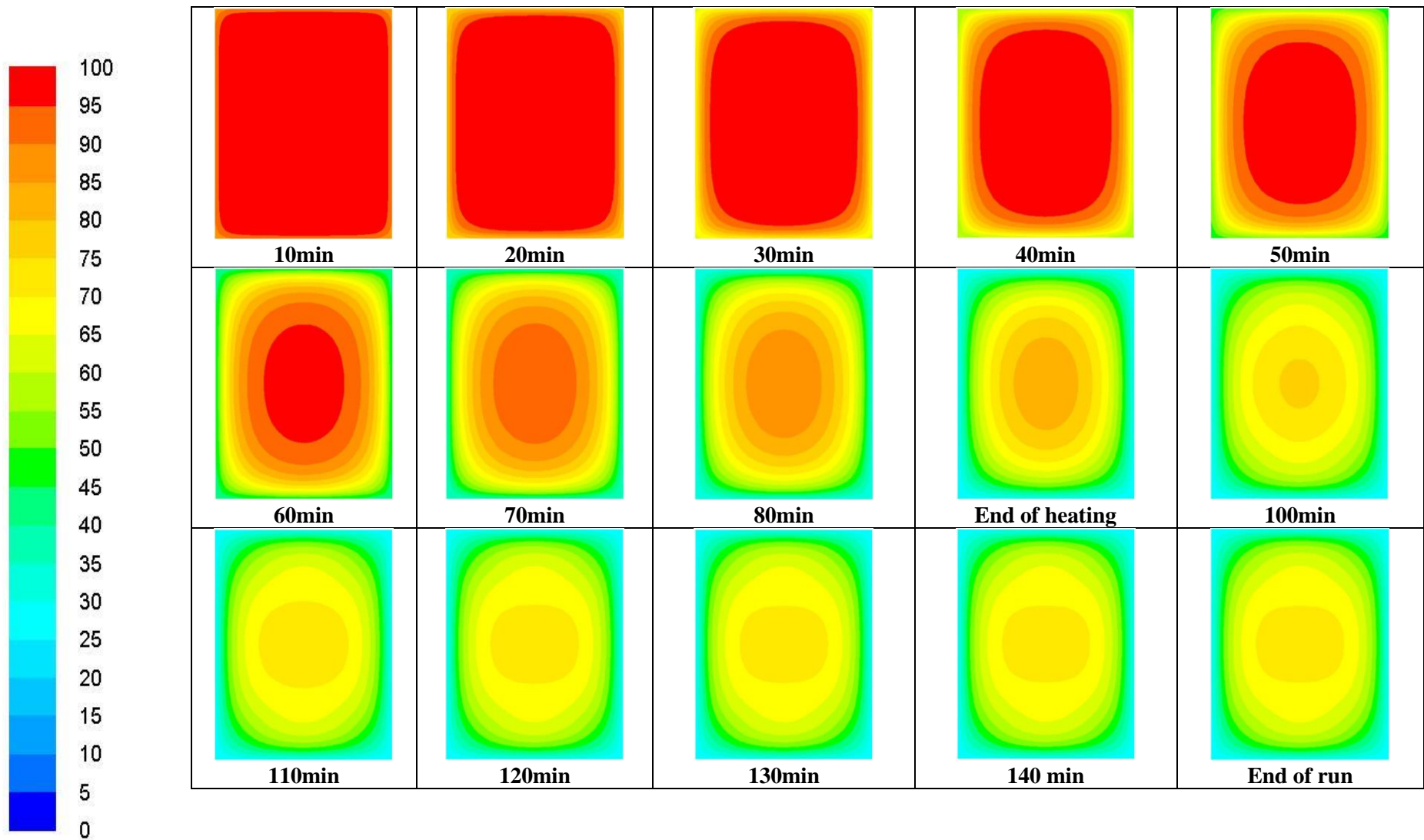
Για τον υπολογισμό της διατήρησης δεδομένου ποιοτικού παράγοντα στο στερεό προϊόν χρησιμοποιήθηκε το ίδιο εξωτερικό αρχείο που χρησιμοποιήθηκε και για τον υπολογισμό της τιμής F (UDF). Με την χρήση του αρχείου αυτού λοιπόν λάβαμε από το CFD τις κατανομές για διατήρησης της ποιοτικής παραμέτρου (%) στον κύκλο θέρμανσης και ψύξης για τις τρεις διαφορετικές τιμές $F_0=3, 6, 9$ min που μελετήθηκαν (Σχήμα 33, 34, 35).

Κατόπιν ελέγχεται η επίδραση διαφόρων παραγόντων (τιμή D (Σχήμα 40, 41, 42), τιμή z (Σχήμα 36) και τιμή T_{RT} (Σχήμα 37, 38, 39)) στην επί της εκατό εναπομείνασα συγκέντρωση ποιοτικής παραμέτρου στο τέλος της διεργασίας.

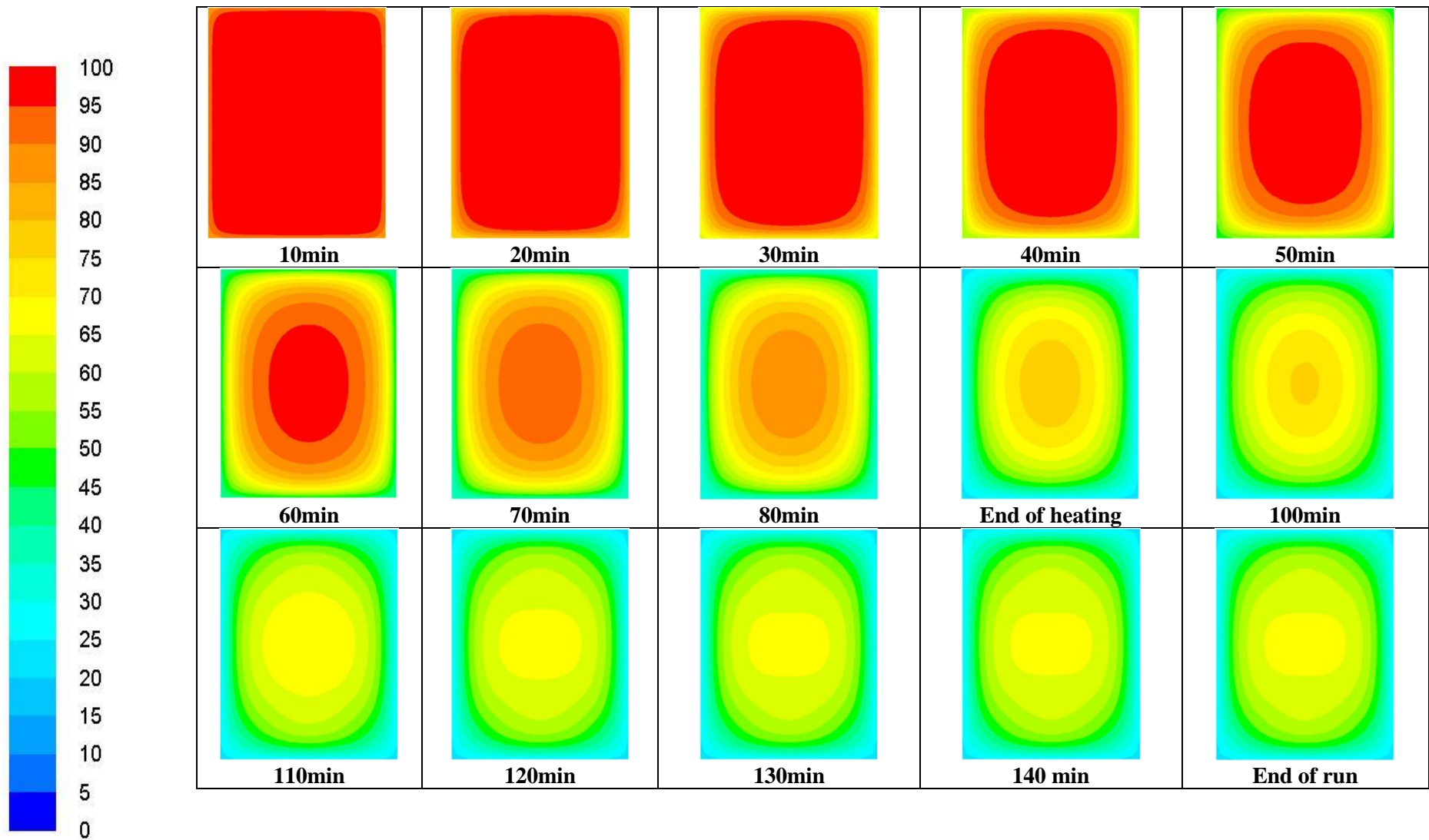
Από τα Σχήματα αυτά παρατηρούμε την εξέλιξη της μεταβολής του ποιοτικού παράγοντα σε σχέση με τον χρόνο και πώς αυτός μειώνεται ξεκινώντας της μεγαλύτερες απώλειες στην εξωτερική επιφάνεια και κατευθυνόμενη προς το κέντρο του προϊόντος. Αξίζει να σημειωθεί πώς όπως και στις περιπτώσεις των κατανομών της τιμής F έτσι και σε αυτή την περίπτωση η απώλεια δεδομένης ποιοτικής παραμέτρου από ένα χρονικό σημείο και μετά σταμάτησε να μεταβάλλεται.



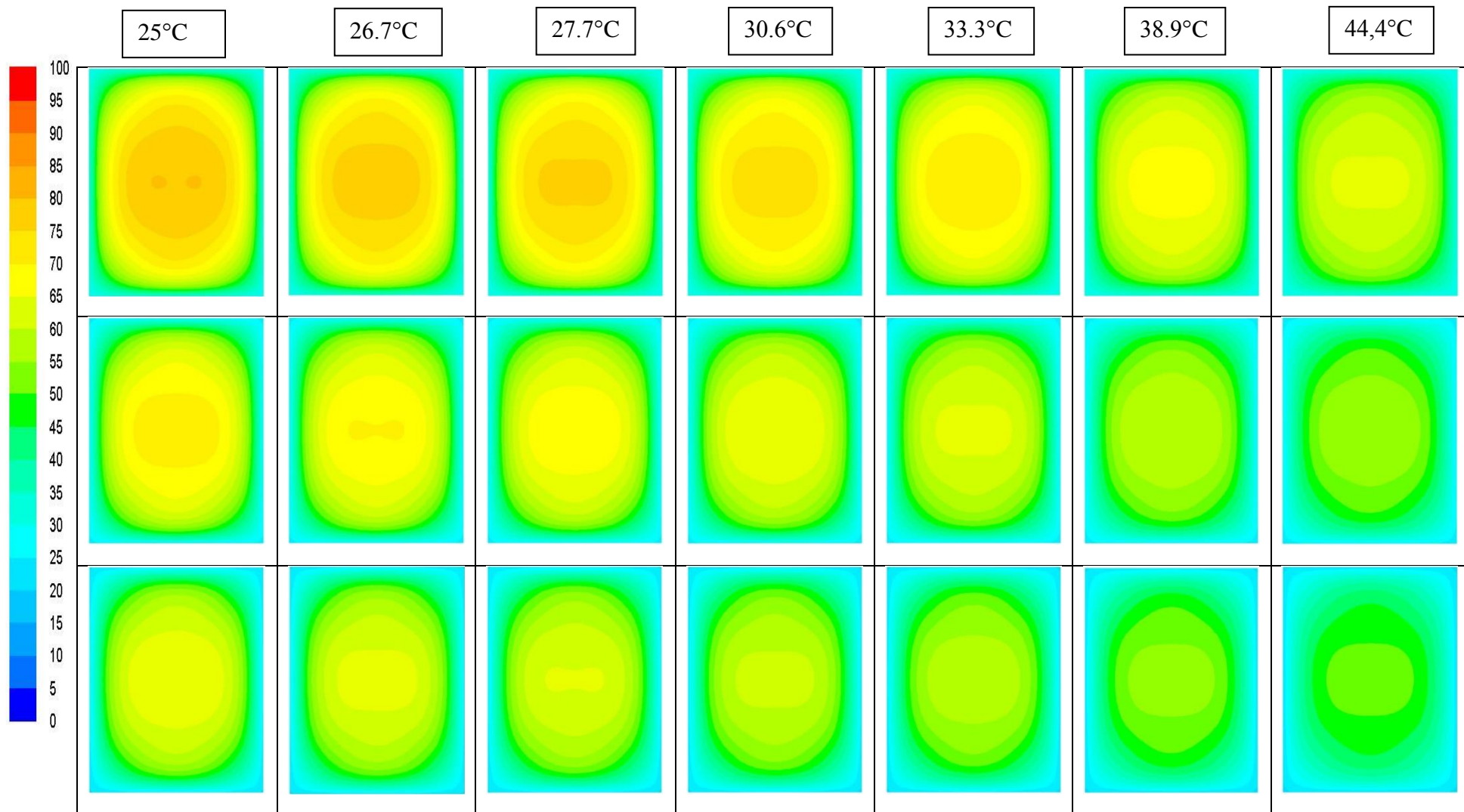
Σχήμα 33: Εξέλιξη της κατανομής της διατήρησης της ποιοτικής παραμέτρου (%) στη διεργασία κατά τη διάρκεια του κύκλου θέρμανσης και ψύξης της θερμικής επεξεργασίας για $z=25^{\circ}\text{C}$ ($T_{\text{RT}}=121.11^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{IT}}=20^{\circ}\text{C}$, $F_0=3$ min). Η κλίμακα στα αριστερά αναφέρεται σε % διατήρηση.



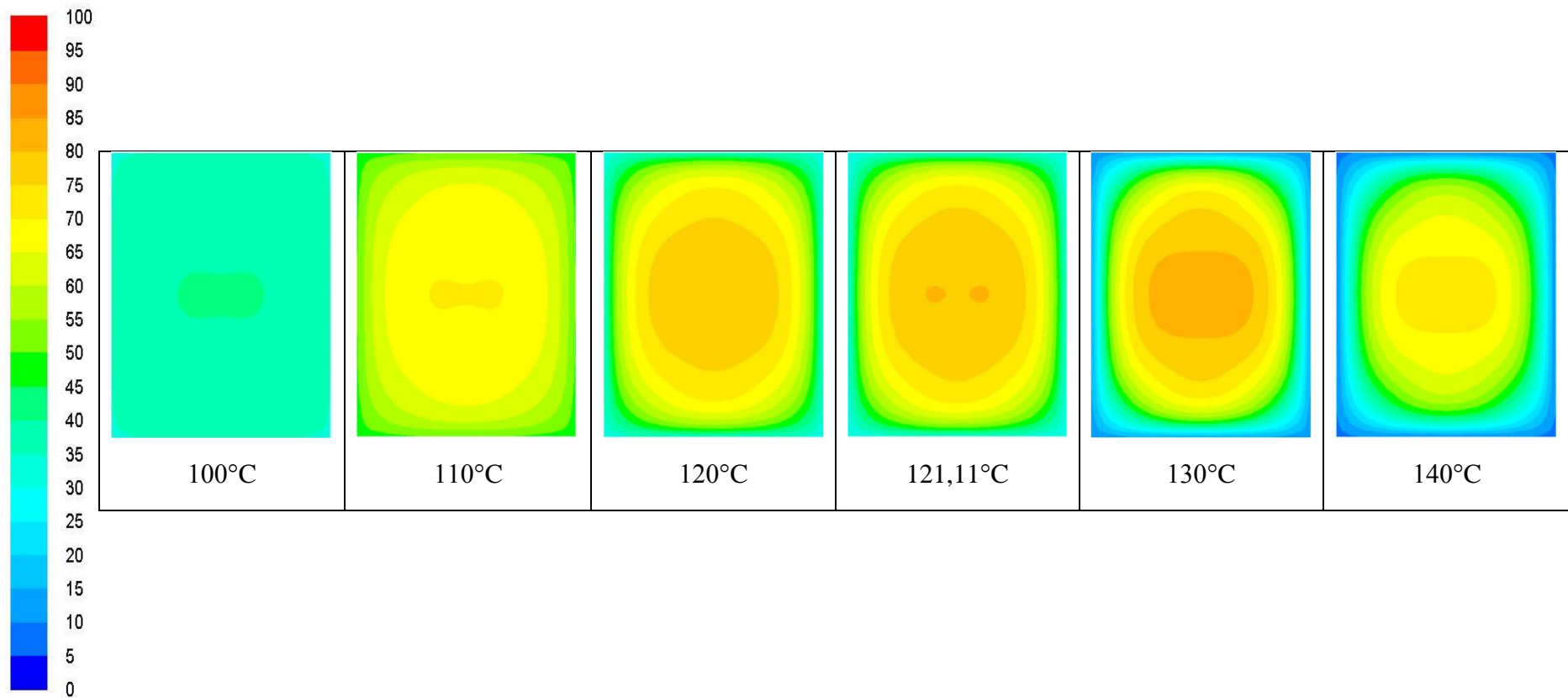
Σχήμα 34: Εξέλιξη της κατανομής της διατήρησης της ποιοτικής παραμέτρου (%) στη διεργασία κατά τη διάρκεια του κύκλου θέρμανσης και ψύξης της θερμικής επεξεργασίας για $z=25^{\circ}\text{C}$ ($T_{RT}=121.11^{\circ}\text{C}$, $T_{IT}=20^{\circ}\text{C}$, $F_0=6$ min). Η κλίμακα στα αριστερά αναφέρεται σε % διατήρηση



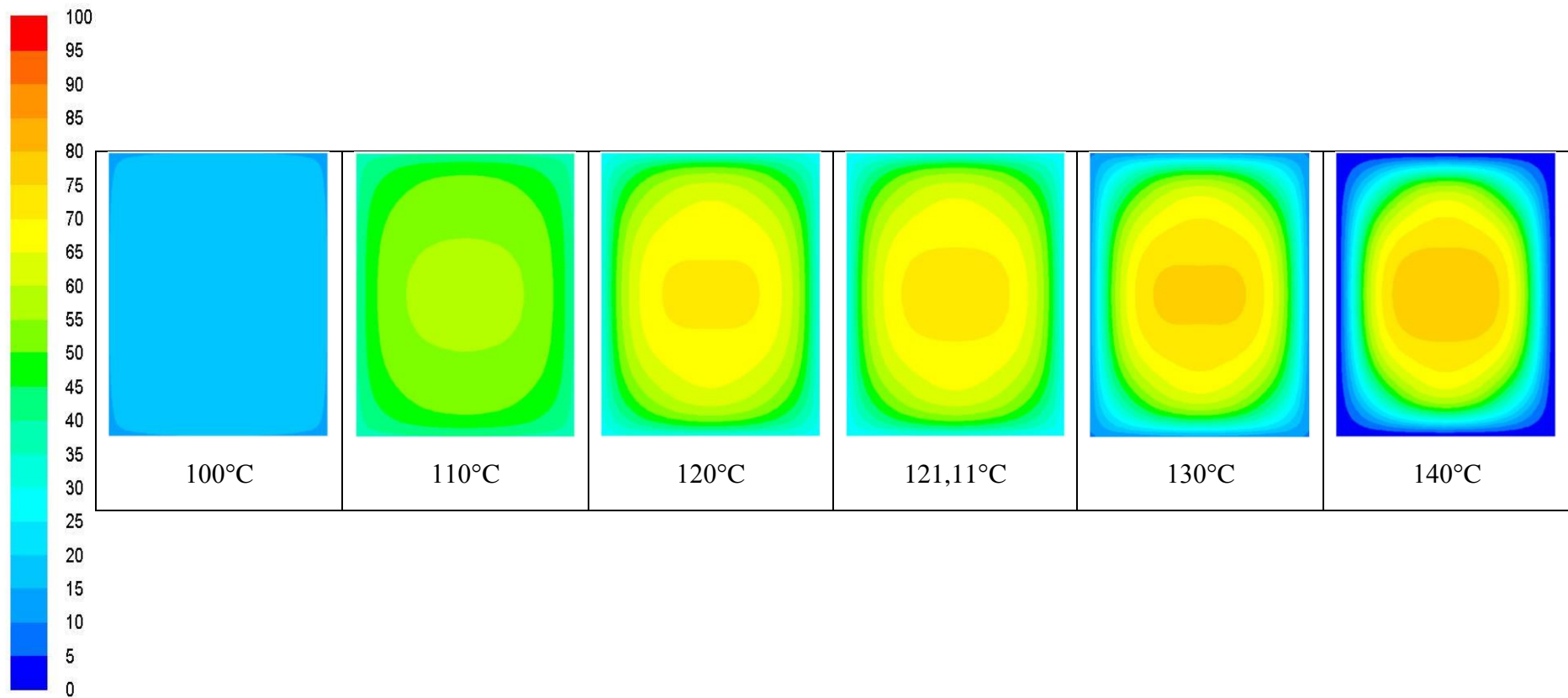
Σχήμα 35: Εξέλιξη της κατανομής της διατήρησης της ποιοτικής παραμέτρου (%) στη διεργασία κατά τη διάρκεια του κύκλου θέρμανσης και ψύξης της θερμικής επεξεργασίας για $z=25^{\circ}\text{C}$ ($T_{RT}=121.11^{\circ}\text{C}$, $T_{IT}=20^{\circ}\text{C}$, $F_0=9$ min). Η κλίμακα (αριστερά του σχήματος αναφέρεται σε ποσοστό % διατήρηση).



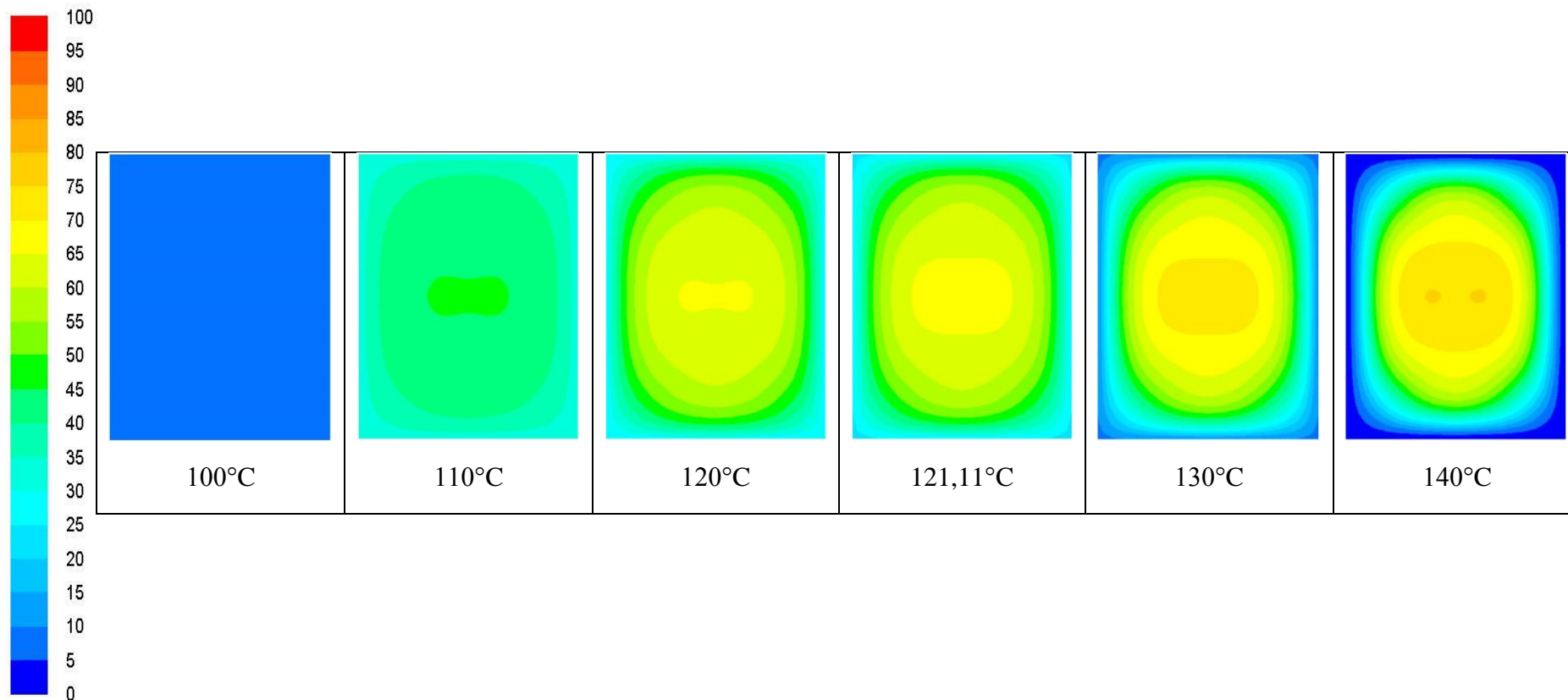
Σχήμα 36: Επίδραση της τιμής z στην επι της εκατό εναπομείνασα συγκέντρωση της ποιοτικής παραμέτρου στο τέλος της θερμικής διεργασίας με στόχο $F_0=3$ min (Επάνω σειρά), $F_0=6$ min (μεσαία σειρά) και $F_0=9$ min (κάτω σειρά). Η κλίμακα αριστερά του σχήματος αναφέρεται σε % διατήρηση.



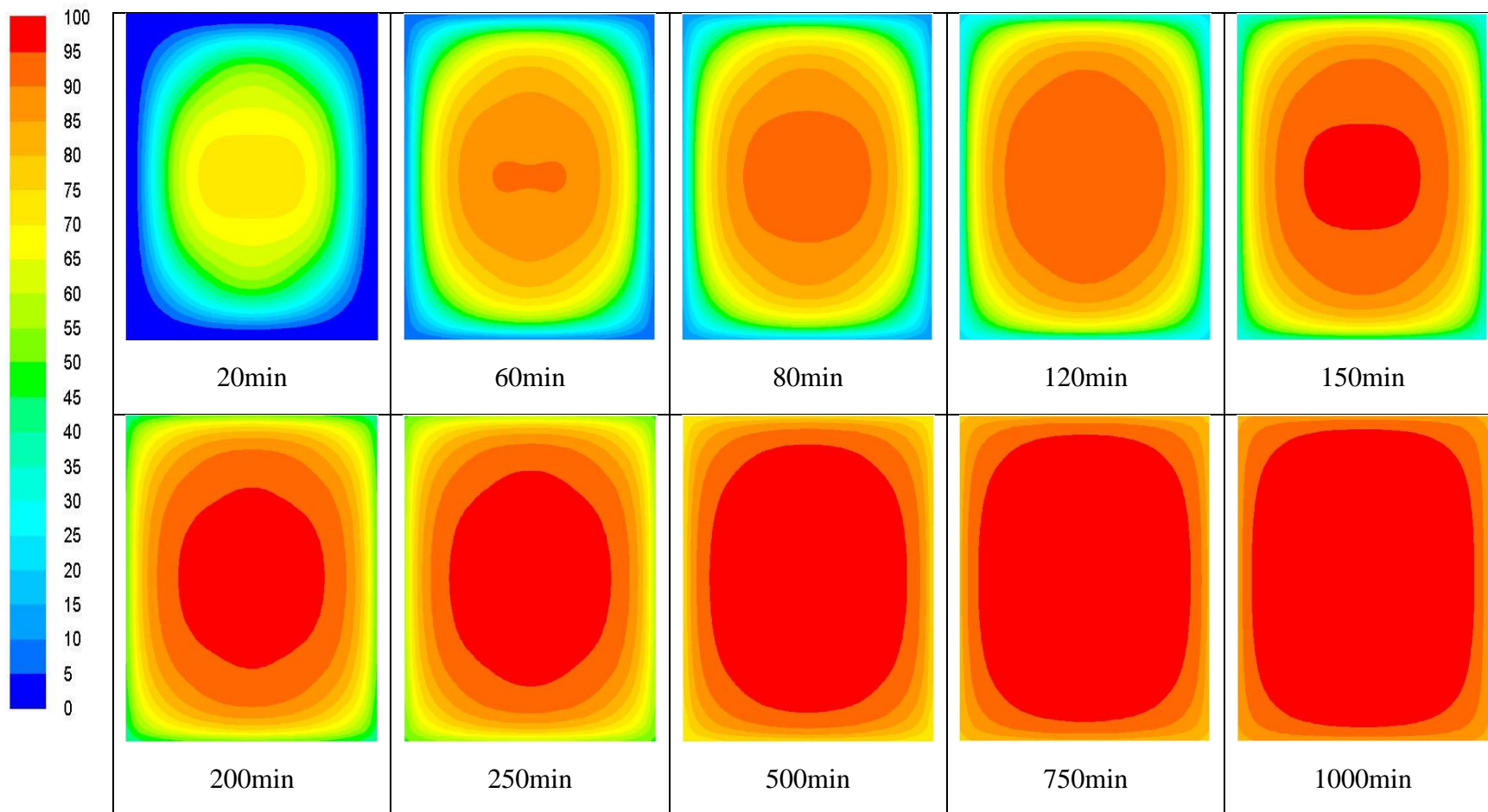
Σχήμα 37: Επίδραση της τιμής θερμοκρασίας του αυτοκλείστου (T_{RT}) στην επι της εκατό εναπομείνασα συγκέντρωση της ποιοτικής παραμέτρου στο τέλος της θερμικής διεργασίας με στόχο $F_0=3\text{min}$. Η κλίμακα αριστερά του σχήματος αναφέρεται σε ποσοστό % διατήρησης.



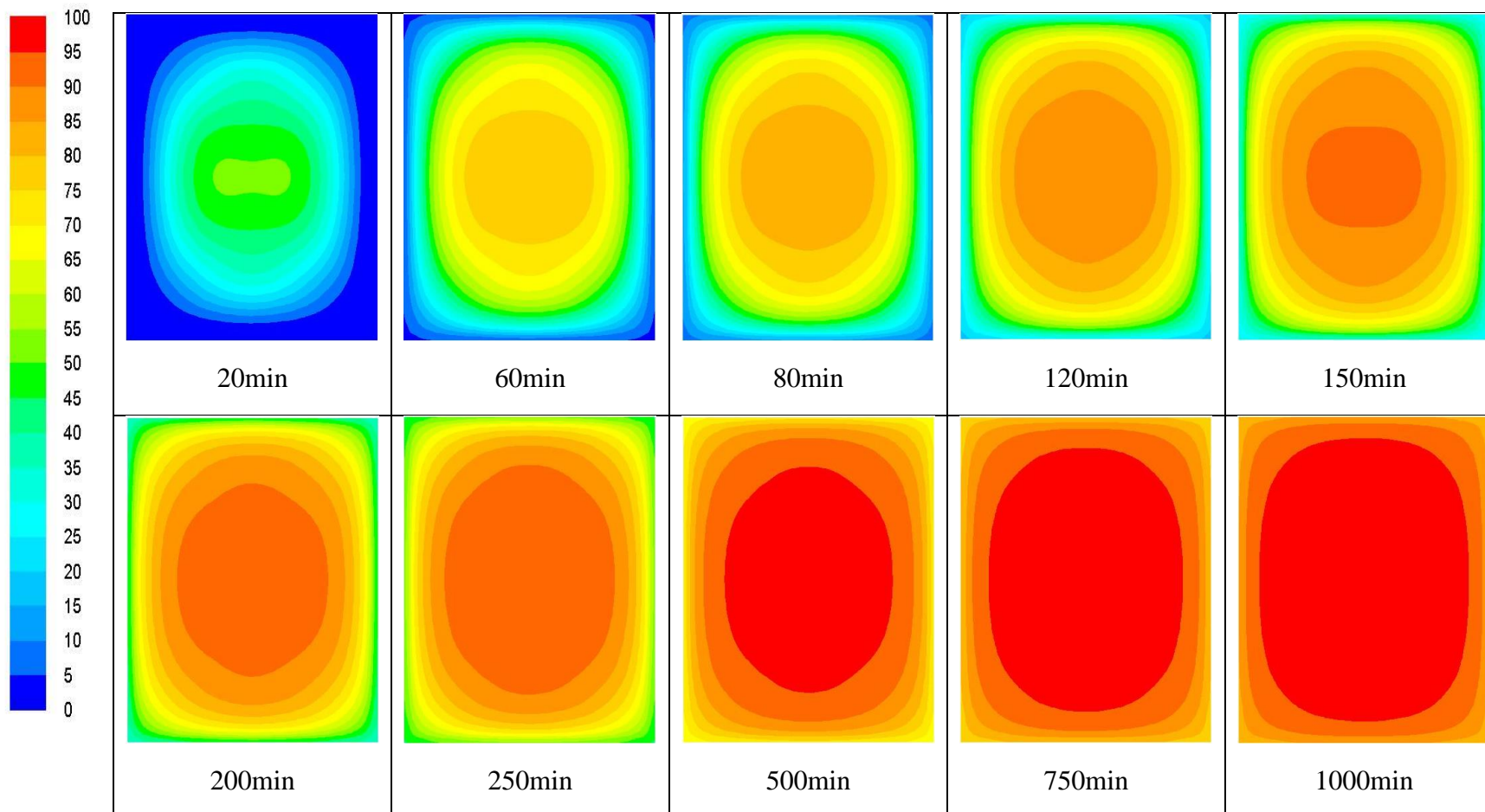
Σχήμα 38: Επίδραση της τιμής θερμοκρασίας του αυτοκλείστου (T_{RT}) στην επι της εκατό εναπομείνασα συγκέντρωση της ποιοτικής παραμέτρου στο τέλος της θερμικής διεργασίας με στόχο $F_0=6\text{min}$. Η κλίμακα αριστερά του σχήματος αναφέρεται σε ποσοστό % διατήρησης.



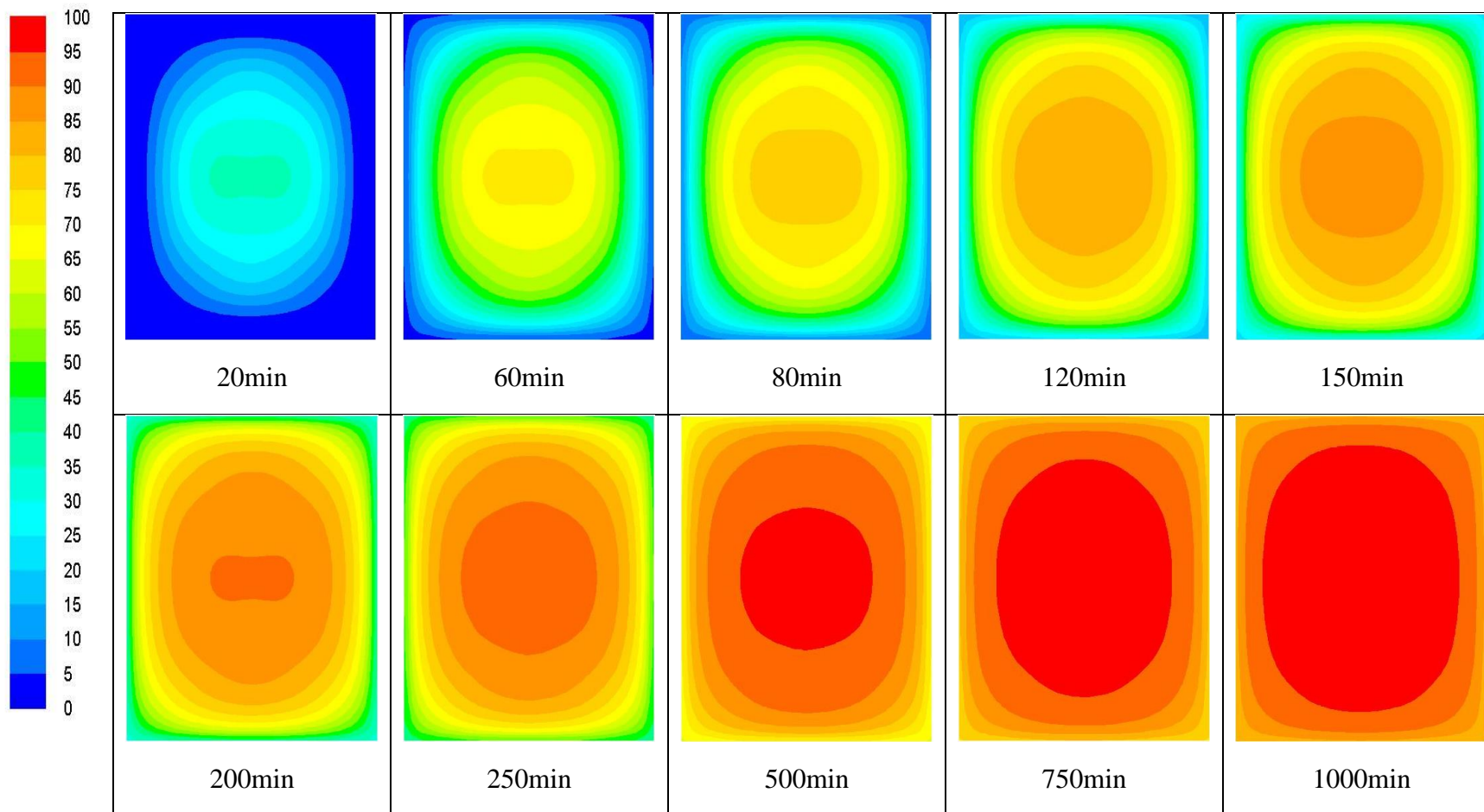
Σχήμα 39: Επίδραση της τιμής θερμοκρασίας του αυτοκλείστου (T_{RT}) στην επι της εκατό εναπομείνασα συγκέντρωση της ποιοτικής παραμέτρου στο τέλος της θερμικής διεργασίας με στόχο $F_0=9\text{min}$. Η κλίμακα αριστερά του σχήματος αναφέρεται σε ποσοστό % διατήρησης.



Σχήμα 40: Επίδραση της τιμής D στην επι της εκατό εναπομείνασα συγκέντρωση της ποιοτικής παραμέτρου στο τέλος της θερμικής διεργασίας με στόχο $F_0=3\text{min}$. Η κλίμακα αριστερά του σχήματος αναφέρεται σε ποσοστό % διατήρησης.



Σχήμα 41: Επίδραση της τιμής D στην επι της εκατό εναπομείνασα συγκέντρωση της ποιοτικής παραμέτρου στο τέλος της θερμικής διεργασίας με στόχο $F_0=6\text{min}$. Η κλίμακα αριστερά του σχήματος αναφέρεται σε ποσοστό % διατήρησης.



Σχήμα 42: Επίδραση της τιμής D στην επι της εκατό εναπομείνασα συγκέντρωση της ποιοτικής παραμέτρου στο τέλος της θερμικής διεργασίας με στόχο $F_0=9\text{min}$. Η κλίμακα αριστερά του σχήματος αναφέρεται σε ποσοστό % διατήρησης.

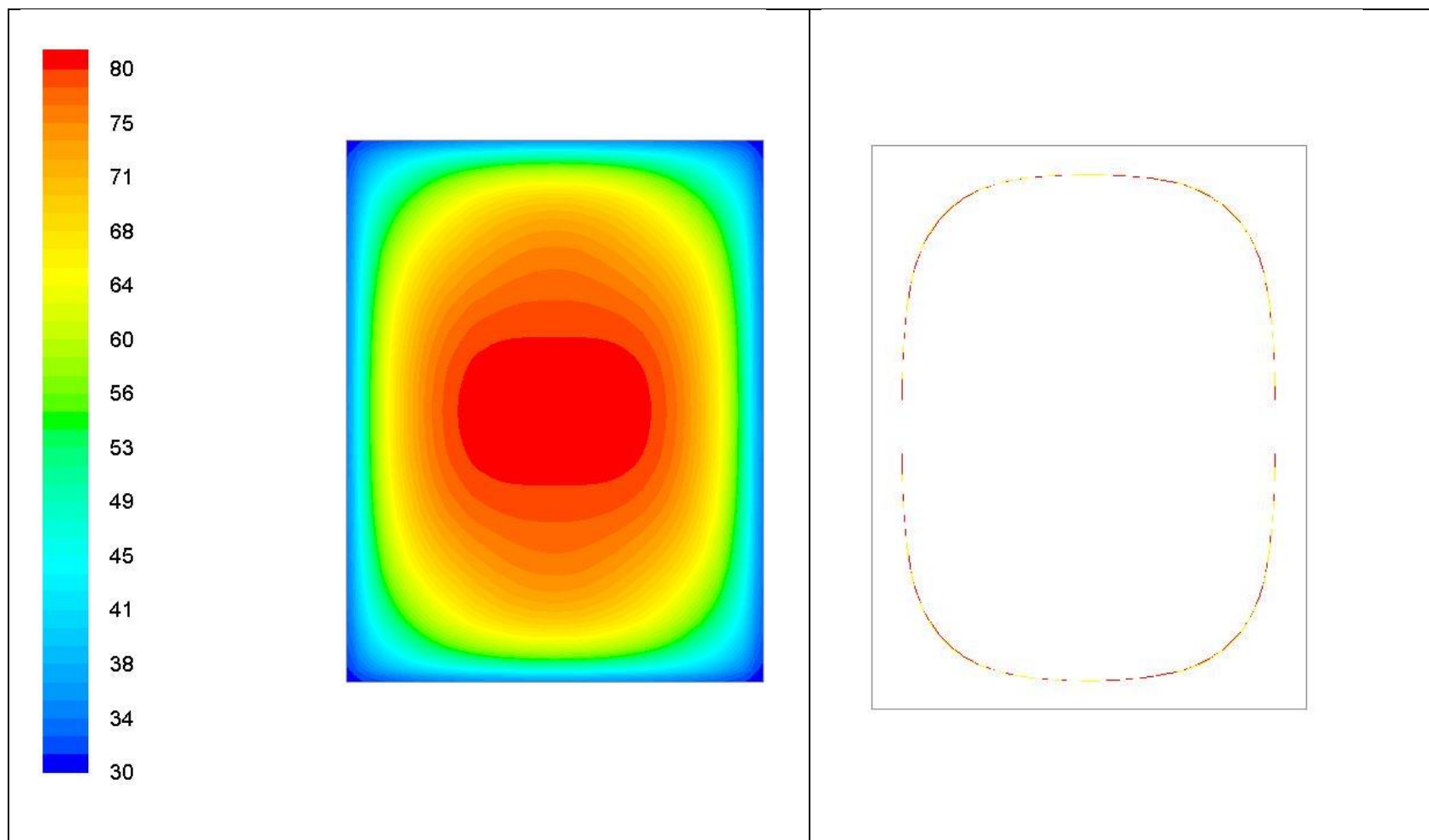
4.4 Ποιοτικά ισοδύναμα σημεία

Η εμφάνιση των σχημάτων τα οποία απεικονίζουν τα ισοδύναμα ποιοτικά σημεία πραγματοποιήθηκε μείωση του εύρους των τιμών στο υπολογιστικό πρόγραμμα Fluent. Οι περιπτώσεις αφορούν το τέλος της διεργασίας (τέλος ψύξης στερεού τροφίμου). Με αυτό τον τρόπο και σε σύγκριση με την εκάστοτε αντίστοιχη κατανομή διατήρησης ποιοτικού παράγοντα μπόρεσαν να προσδιοριστούν τα Σχήματα των ποιοτικά ισοδύναμων σημείων.

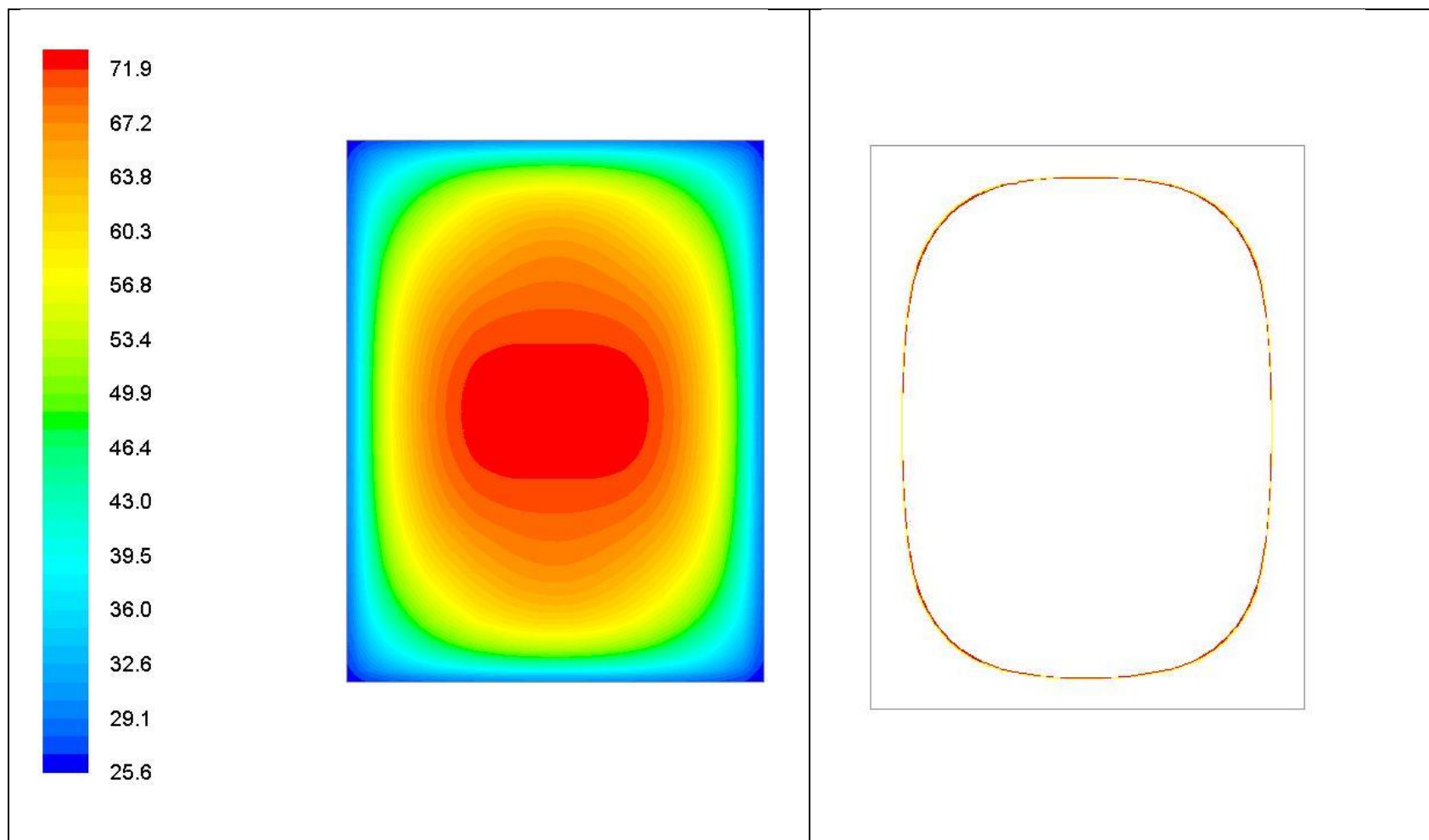
Εξετάστηκαν για τις περιπτώσεις με χρήση κεντρικών τιμών για $F_0= 3, 6, 9\text{min}$ (Σχήμα 43, 44, 45). Ενώ ελέγχθηκαν και οι επίδραση που μπορεί να παρουσιάζεται από αλλαγή διάφορων μεταβλητών στις ακραίες τιμές τους από το εύρος τιμών που μελετήθηκε. Οι μεταβλητές αυτές αφορούν τις τιμές α (Σχήμα 46, 47), τιμές T_{RT} (Σχήμα 48, 49), τιμές D (Σχήμα 50, 51) και τιμές z (Σχήμα 52, 53).

Τέλος σχετικά με τα αποτελέσματα των ποιοτικά ισοδύναμων σημείων αξίζει να σημειωθεί ότι παρά τις όποιες διαφορές στις παραμέτρους που μελετήθηκαν το εύρος της τοποθεσίας των σημείων είναι μικρό και δεν παρουσιάστηκαν μεγάλες διακυμάνσεις σε καμία από τις περιπτώσεις.

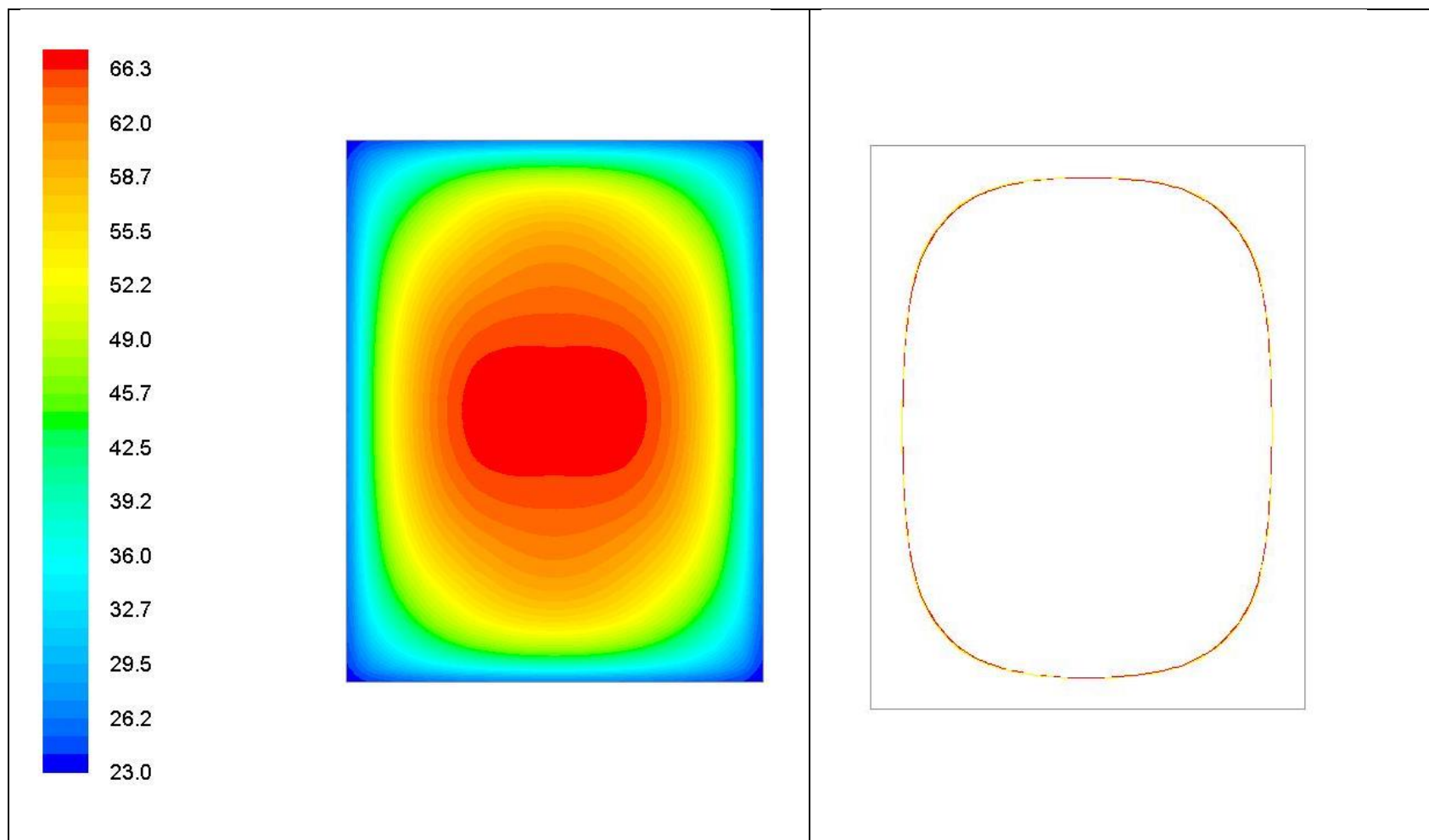
Σαν συμπέρασμα ανά περίπτωση αξίζει να αναφερθεί ότι για διαφορετικούς στόχους F_0 δεν είχαμε κάποια ιδιαίτερη αλλαγή στην τοποθεσία των σημείων, στις περιπτώσεις με διαφορετική τιμή α όσο μεγαλύτερη η τιμή α τόσο τα ποιοτικά ισοδύναμα σημεία βρίσκονται προς το κέντρο της γεωμετρίας. Επιπλέον στις περιπτώσεις με διαφορετική τιμή T_{RT} όσο μεγαλύτερη η θερμοκρασία T_{RT} τόσο τα ποιοτικά ισοδύναμα σημεία βρίσκονται προς το κέντρο της γεωμετρίας, στις περιπτώσεις με διαφορετική τιμή D όσο μεγαλύτερη η τιμή D τόσο τα ποιοτικά ισοδύναμα σημεία βρίσκονται προς το άκρα της γεωμετρίας. Τέλος για τις περιπτώσεις με διαφορετική τιμή z δεν είχαμε κάποια ιδιαίτερη αλλαγή στην τοποθεσία των σημείων.



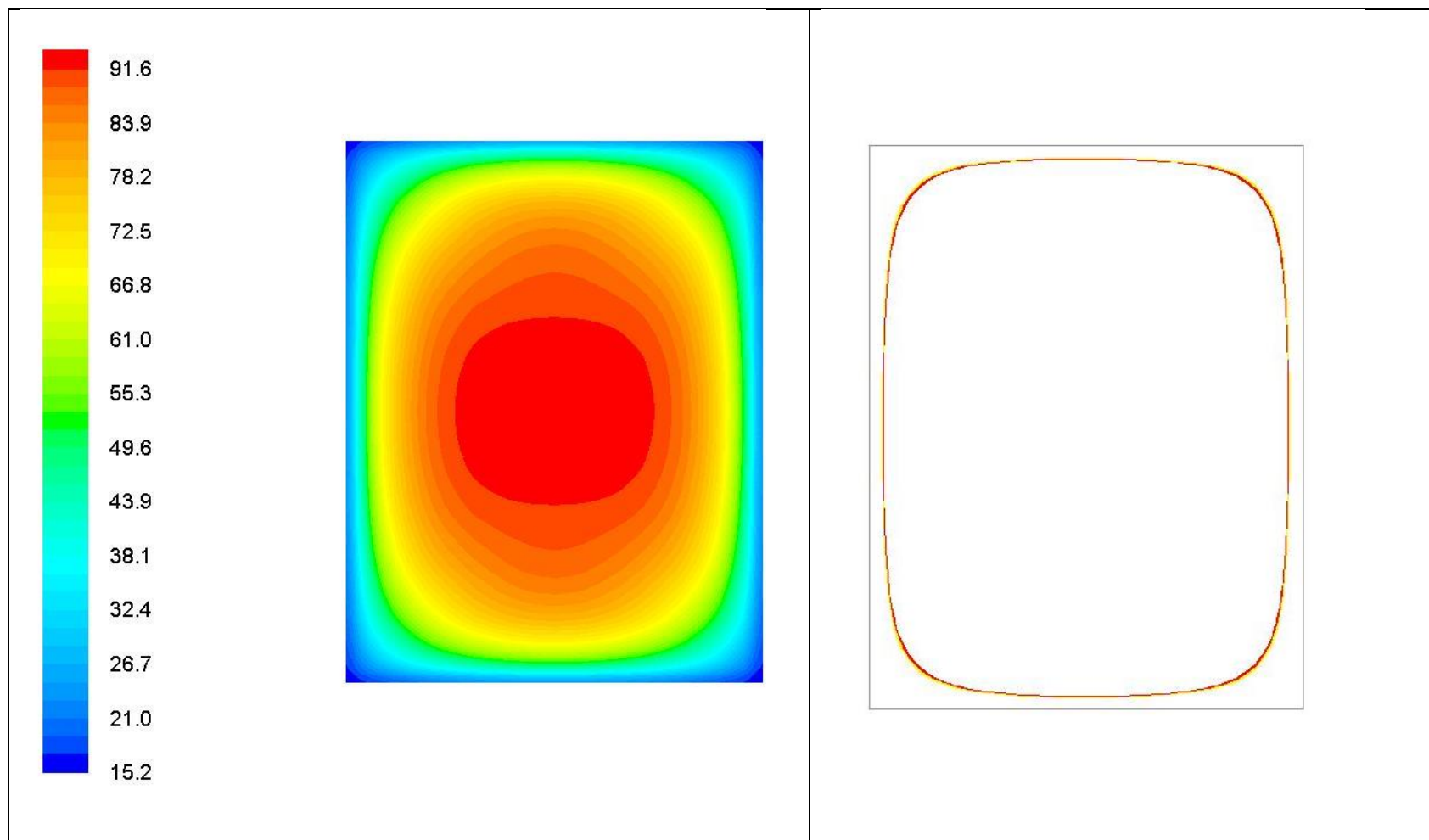
Σχήμα 43: Κατανομή του ποσοστού διατήρησης της ποιοτικής παραμέτρου στο τέλος της θερμικής διεργασίας ($D=150\text{min}$, $z=25^\circ\text{C}$) (αριστερά) και ποιοτικά ισοδύναμα σημεία (δεξιά), για $F_0=3\text{min}$. Η κλίμακα αριστερά του σχήματος αναφέρεται σε ποσοστό % διατήρησης



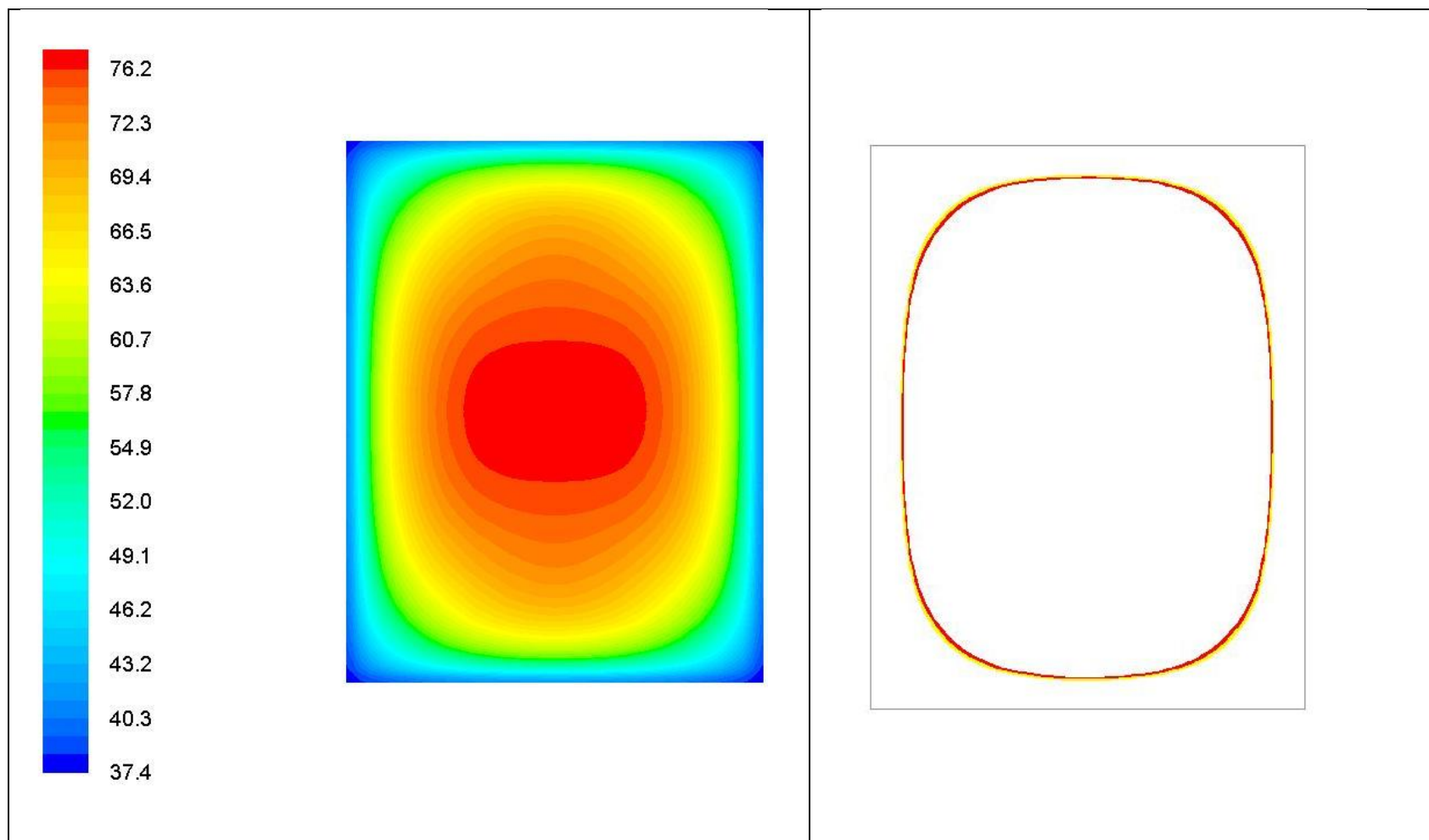
Σχήμα 44: Κατανομή του ποσοστού διατήρησης της ($D=150\text{min}$, $z=25^\circ\text{C}$) (αριστερά) και ποιοτικά ισοδύναμα σημεία (δεξιά), κεντρικές τιμές και τιμή μεταβλητής $F_0=6\text{min}$. Η κλίμακα αριστερά του σχήματος αναφέρεται σε ποσοστό % διατήρησης



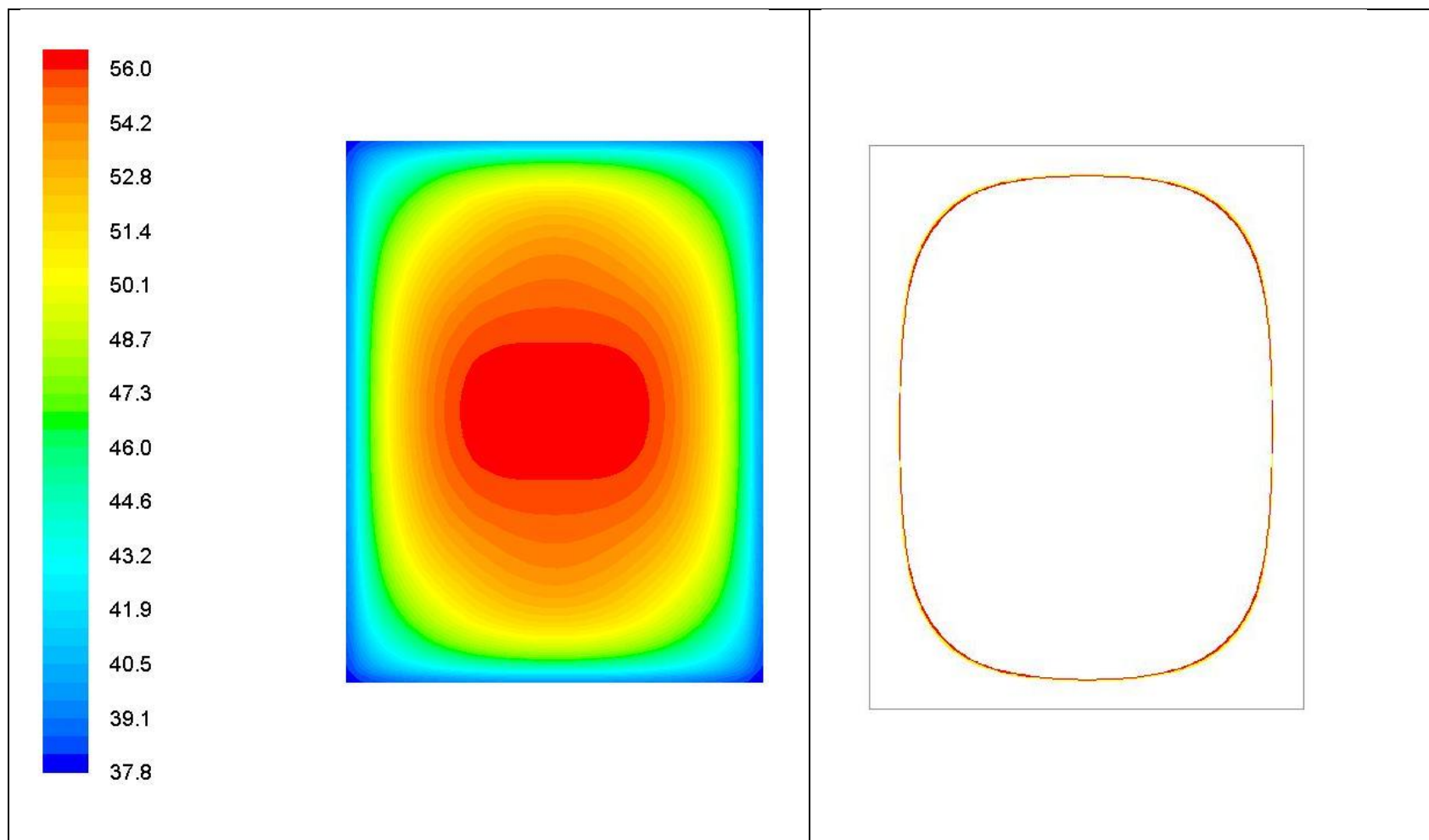
Σχήμα 45: Κατανομή του ποσοστού διατήρησης της ($D=150\text{min}$, $z=25^\circ\text{C}$) (αριστερά) και ποιοτικά ισοδύναμα σημεία (δεξιά), κεντρικές τιμές και τιμή μεταβλητής $F_0=9\text{min}$. Η κλίμακα αριστερά του σχήματος αναφέρεται σε ποσοστό % διατήρησης



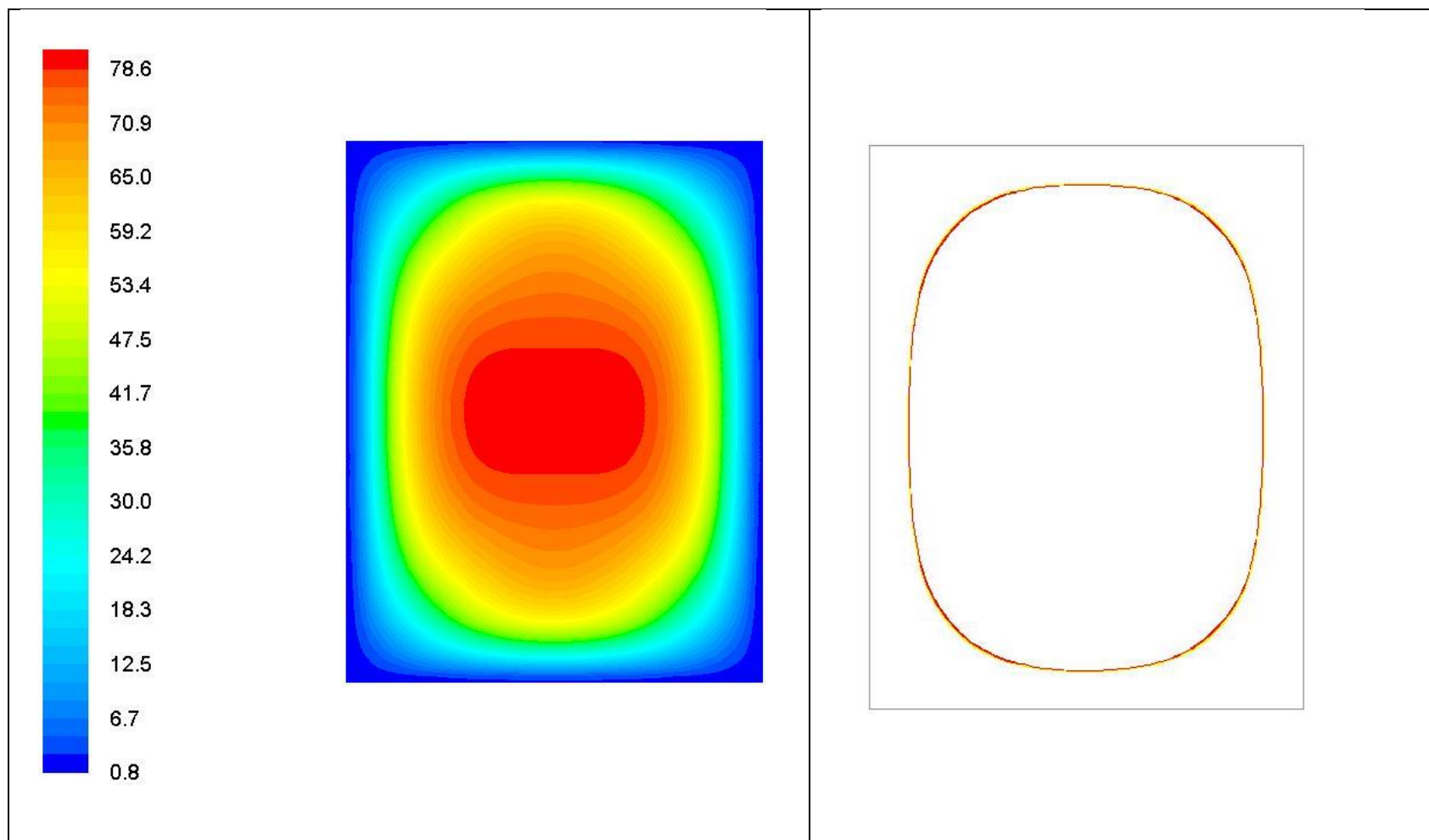
Σχήμα 46: Κατανομή του ποσοστού διατήρησης της ποιοτικής παραμέτρου στο τέλος της θερμικής διεργασίας ($D=150\text{min}$, $z=25^\circ\text{C}$) (αριστερά) και ποιοτικά ισοδύναμα σημεία (δεξιά), για $F_0=6\text{ min}$ και $\alpha= 1,04\times 10^{-7}\text{ m}^2/\text{s}$. Η κλίμακα αριστερά του σχήματος αναφέρεται σε ποσοστό % διατήρησης.



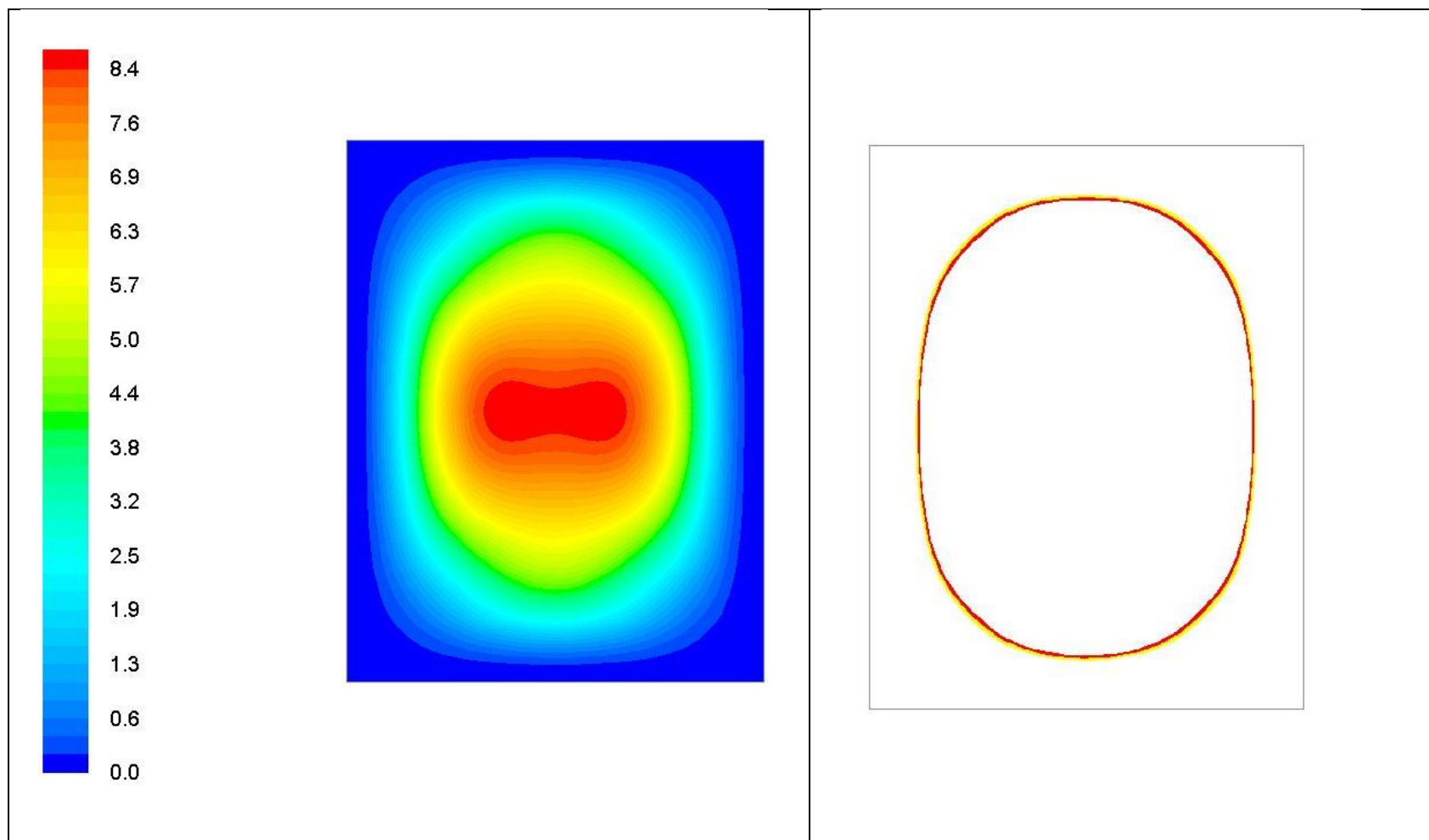
Σχήμα 47: Κατανομή του ποσοστού διατήρησης της ($D=150\text{min}$, $z=25^\circ\text{C}$) (αριστερά) και ποιοτικά ισοδύναμα σημεία (δεξιά), κεντρικές τιμές και τιμή μεταβλητής, με $\alpha= 2,34 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ και τιμή μεταβλητής $F_0=6\text{min}$. Η κλίμακα αριστερά του σχήματος αναφέρεται σε ποσοστό % διατήρησης.



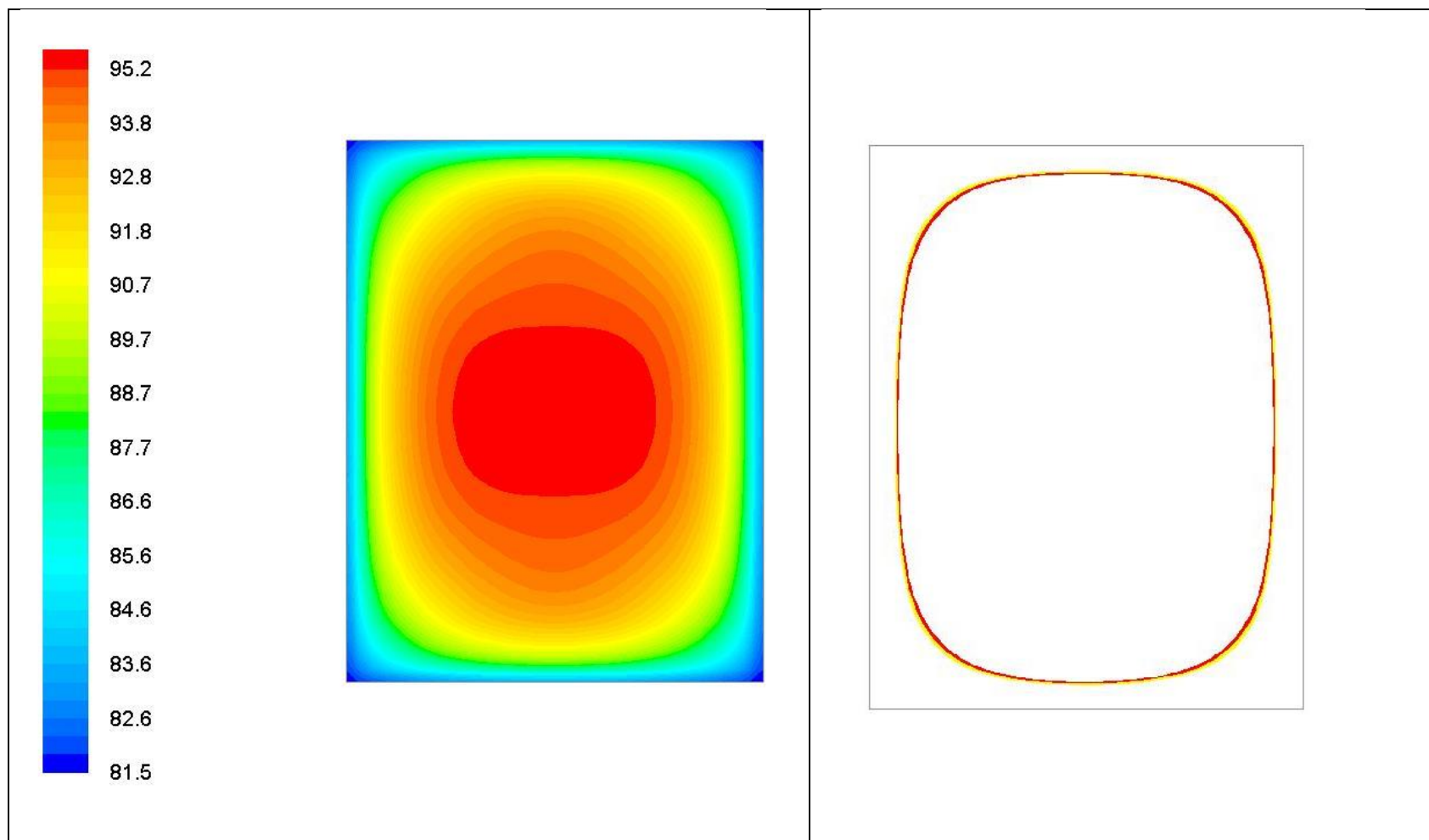
Σχήμα 48: Κατανομή του ποσοστού διατήρησης της ($D=150\text{min}$, $z=25^\circ\text{C}$) (αριστερά) και ποιοτικά ισοδύναμα σημεία (δεξιά), κεντρικές τιμές και τιμή μεταβλητής, με $T_{RT}=110^\circ\text{C}$ και τιμή μεταβλητής $F_0=6\text{min}$. Η κλίμακα αριστερά του σχήματος αναφέρεται σε ποσοστό % διατήρησης.



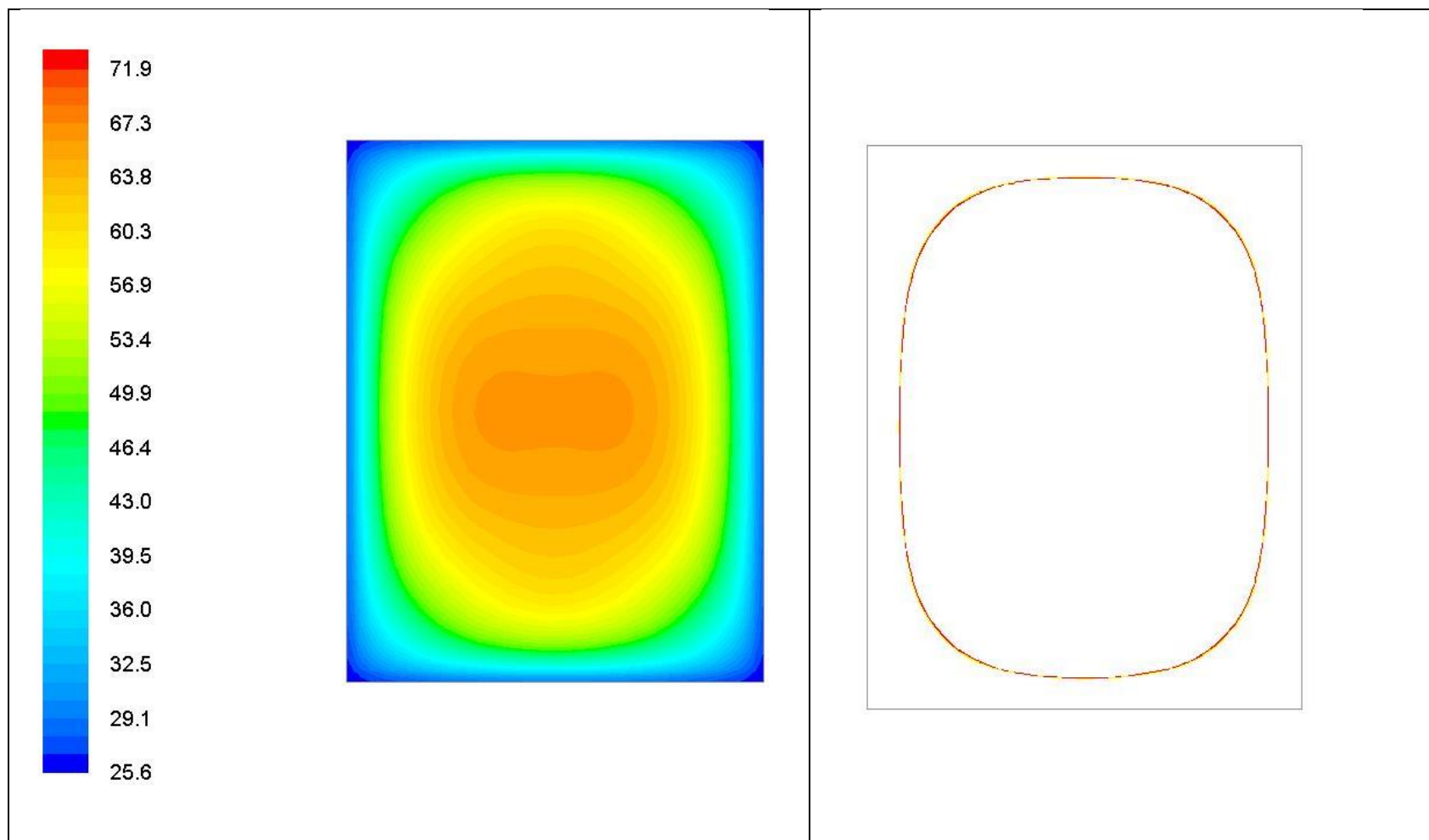
Σχήμα 49: Κατανομή του ποσοστού διατήρησης της ($D=150\text{min}$, $z=25^\circ\text{C}$) (αριστερά) και ποιοτικά ισοδύναμα σημεία (δεξιά), κεντρικές τιμές και τιμή μεταβλητής, με $T_{RT}=140^\circ\text{C}$ και τιμή μεταβλητής $F_0=6\text{min}$. Η κλίμακα αριστερά του σχήματος αναφέρεται σε ποσοστό % διατήρησης.



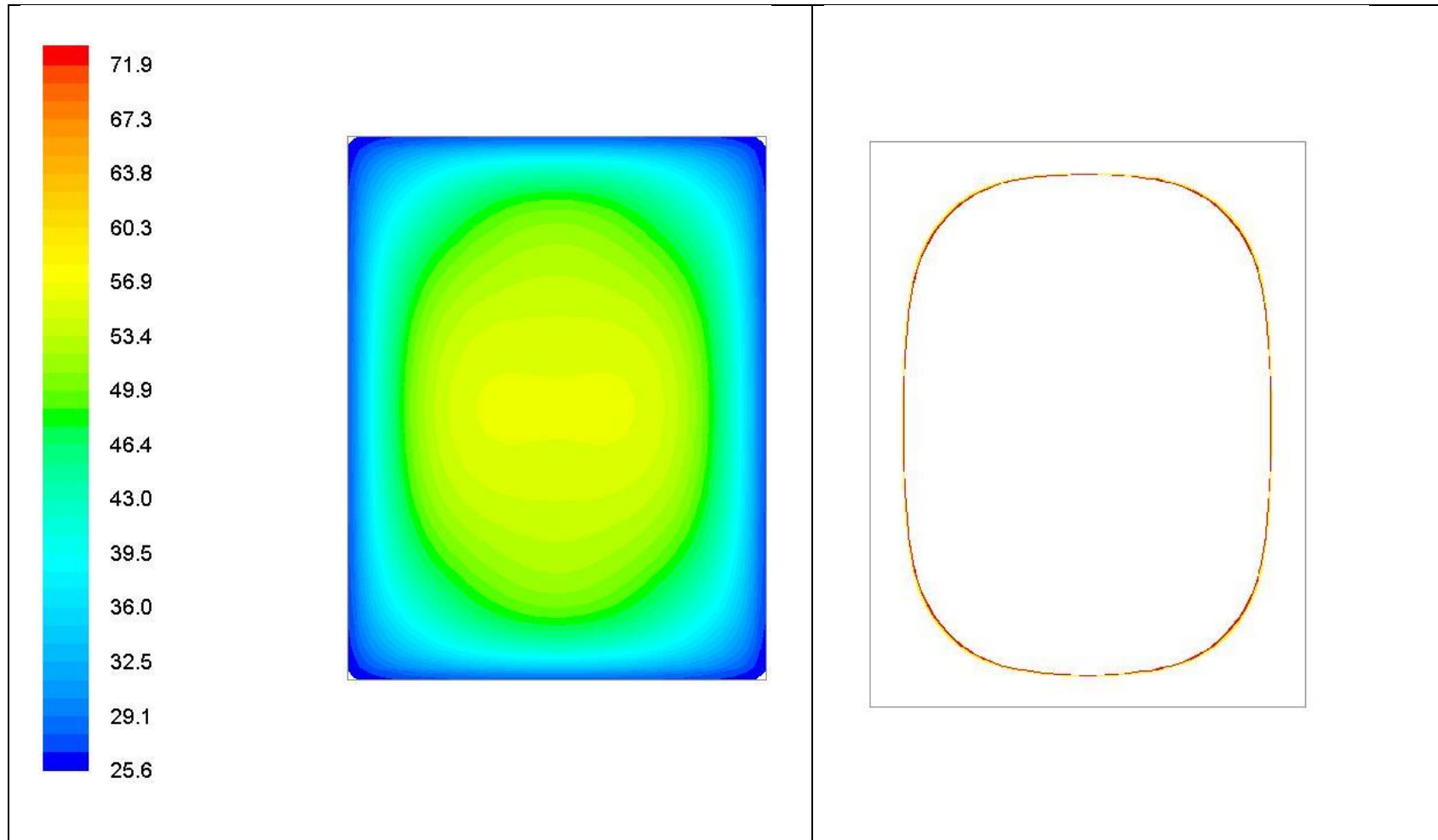
Σχήμα 50: Κατανομή του ποσοστού διατήρησης της ($D=20\text{min}$, $z=25^\circ\text{C}$) (αριστερά) και ποιοτικά ισοδύναμα σημεία (δεξιά), κεντρικές τιμές και τιμή μεταβλητής $F_0=6\text{min}$. Η κλίμακα αριστερά του σχήματος αναφέρεται σε ποσοστό % διατήρησης.



Σχήμα 51: Κατανομή του ποσοστού διατήρησης της ($D=1000\text{min}$, $z=25^\circ\text{C}$) (αριστερά) και ποιοτικά ισοδύναμα σημεία (δεξιά), κεντρικές τιμές και τιμή μεταβλητής $F_0=6\text{min}$. Η κλίμακα αριστερά του σχήματος αναφέρεται σε ποσοστό % διατήρησης



Σχήμα 52: Κατανομή του ποσοστού διατήρησης της ($D=150\text{min}$, $z=30.6^\circ\text{C}$) (αριστερά) και ποιοτικά ισοδύναμα σημεία (δεξιά), κεντρικές τιμές και τιμή μεταβλητής $F_0=6\text{min}$. Η κλίμακα αριστερά του σχήματος αναφέρεται σε ποσοστό % διατήρησης



Σχήμα 53: Κατανομή του ποσοστού διατήρησης της ($D=150\text{min}$, $z=44.4^\circ\text{C}$) (αριστερά) και ποιοτικά ισοδύναμα σημεία (δεξιά), κεντρικές τιμές και τιμή μεταβλητής $F_0=6\text{min}$. Η κλίμακα αριστερά του σχήματος αναφέρεται σε ποσοστό % διατήρησης.

Πίνακας 7: Ποσοστά διατήρησης της τιμής F_0 για κονσέρβα 307×409 με διαφορετικές παραμέτρους σε τιμές «z, T_{RT} και α ».

Average Retention			
	(%)		
Target F_0 value (min)			
Παράμετρος	3	6	9
Can 307x409			
D121,1=20 min	4,46	1,95	1,0078
D121,1=60 min	28,46	21,13	16,76
D121,1=80min	37,73	30,07	25,23
D121,1=120 min	50,99	43,72	38,83
D121,1=150 min	57,88	51,13	46,48
D121,1=200 min	65,94	60,04	55,87
D121,1=250 min	71,44	66,26	62,54
D121,1=500 min	84,26	81,11	78,79
D121,1=750 min	89,14	86,91	85,23
D121,1=1000 min	91,72	89,98	88,68
z= 25 °C	57,88	51,13	46,48
z=26,7 °C	56,77	50,1	45,47
z= 27,8 °C	56,1	49,42	44,85
z= 30,6 °C	54,47	47,88	43,41
z= 33,3 °C	53,04	46,54	42,15
z= 38,9 °C	50,4	44,09	39,86
z= 44,4 °C	48,13	42,02	37,94
TRT= 100 °C	37,76	16,1	6,86
TRT= 110 °C	60,51	48,17	38,79
TRT= 120 °C	58,52	51,68	46,85
TRT= 121,11 °C	57,88	51,13	46,48
TRT= 130 °C	49,54	43,96	40,39
TRT= 140 °C	39,45	36,32	31,97
$\alpha = 2,34 * 10^{-7} m^2/s$	65,67	59,37	54,76
$\alpha = 1,88 * 10^{-7} m^2/s$	61,2	54,9	50,32
$\alpha = 1,56 * 10^{-7} m^2/s$	57,88	51,33	46,48
$\alpha = 1,34 * 10^{-7} m^2/s$	54,7	47,8	43,17
$\alpha = 1,17 * 10^{-7} m^2/s$	51,83	44,9	40,3
$\alpha = 1,04 * 10^{-7} m^2/s$	49,28	42,28	37,71

Πίνακας 8: Χρόνοι θέρμανσης της τιμής F_0 για κονσέρβα 307×409 με διαφορετικές παραμέτρους σε τιμές « T_{RT} και α ».

	Average Retention (%)		
	Target F_0 value (min)		
Παράμετρος	3	6	9
TRT=100°C	484,1875 min	872 min	1259,75 min
TRT= 110°C	134,125 min	176,875 min	216,1875 min
TRT= 120°C	82,375 min	93,125 min	101,0625 min
TRT= 121.11°C	79,375 min	89,125 min	96,25 min
TRT= 130°C	62,75 min	68,1875 min	71,8125 min
TRT= 140°C	51,9375 min	55,4375 min	57,6875 min
$\alpha= 2,34 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$	56,75 min	64,375 min	70,0625 min
$\alpha= 1,88 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$	68,25 min	76,9375 min	83,3125 min
$\alpha= 1,56 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$	79,375 min	89,125 min	96,25 min
$\alpha= 1,34 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$	90,25 min	101,0625 min	108,8125 min
$\alpha= 1,17 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$	101 min	112,75 min	121,1875 min
$\alpha= 1,04 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$	111,5625 min	124,3125 min	133,3125 min

Τα τελικά αποτελέσματα όλων των δοκιμών στο πρόγραμμα του CFD αναφέρονται συγκεντρωτικά (Πίνακας 7), επιπλέον οι απαιτούμενοι χρόνοι θέρμανσης που χρησιμοποιήθηκαν στο υπολογιστικό πρόγραμμα Fluent αναφέρονται (Πίνακας 8). Αξίζει να σημειωθεί ότι παρατηρήθηκε στις περιπτώσεις των τιμών διατήρησης ποιοτικού παράγοντα σχετικά με τις διαφορετικές θερμοκρασίες αυτοκλείστου (T_{RT}) μέχρι τους 110°C μια αύξηση του ποσοστού διατήρησης ενώ στην περίπτωση των 120°C και μετά μια σταθερή πτώση προφανώς καταδεικνύοντας με αυτό τον τρόπο την ύπαρξη μιας βέλτιστης τιμής λύσης στους 115°C περίπου.

Συμπεράσματα

Με βάση τα αποτελέσματα της λύσης του CFD για τη θερμική επεξεργασία, της κονσέρβας του στερεού προϊόντος εκτιμήσαμε τα κινητικά δεδομένα της θερμικής υποβάθμισης και αποκτήσαμε μια γνώση της θερμοκρασιακής κατανομής σε ένα κατάλληλο σημείο.

Επιπλέον παρατηρήσαμε σε σχέση με την τοποθεσία των ποιοτικά ισοδύναμων σημείων μια στενή περιοχή μέσα στο εσωτερικό της κονσέρβας ανεξαρτήτως των διαφορετικών παραμέτρων που ίσχυαν ανά περίπτωση. Ενώ μας δόθηκε η δυνατότητα της εύρεσης της μέσης τιμής του ποιοτικού παράγοντα από ένα μοναδικό σημείο υπολογισμού.

Επίσης παρατηρήθηκε στις περιπτώσεις των τιμών διατήρησης ποιοτικού παράγοντα σχετικά με τις διαφορετικές θερμοκρασίες αυτοκλείστου (T_{RT}) μέχρι τους 110°C μια αύξηση του ποσοστού διατήρησης ενώ στην περίπτωση των 120°C και μετά μια σταθερή πτώση προφανώς καταδεικνύοντας με αυτό τον τρόπο την ύπαρξη μιας βέλτιστης τιμής λύσης στους 115°C περίπου.

Τέλος σχετικά με την μελλοντική μελέτη που θα πρέπει να πραγματοποιηθεί θα ήταν χρήσιμη η επιβεβαίωση της παρούσας μελέτης πειραματικά. Επιπλέον και η διεξαγωγή προσομοιώσεων από το CFD για διαφορετικές γεωμετρίες και με διαφορετικές εσωτερικές διαστάσεις, διαφορετικό υλικό (π.χ. γυάλινο περιέκτη) καθώς και ο υπολογισμός του προβλήματος με μεταβαλλόμενες τιμές.

Ονοματολογία

- C_a αρχική συγκέντρωση μιας θερμικά ευαίσθητης ουσίας, π.χ. αριθμός μικροοργανισμών ανα mL, g/L κ.α.
- C_b τελική (μετά την λήξη της θερμικής διεργασίας) συγκέντρωση μιας θερμικά ευαίσθητης ουσίας π.χ. αριθμός μικροοργανισμών ανα mL, g/L κ.α.
- D_T χρόνος για σταθερή θερμοκρασία που απαιτείται για να έχουμε τάξης μεγέθους μείωση της αρχικής συγκέντρωσης μιας θερμοευαίσθητης ουσίας, min (λεπτά).
- F_0 η τιμή $F_{T_{ref}}^z$ για $T_{ref}=121.1^\circ\text{C}$ και για τιμή z του μικροοργανισμού ίση με 10°C .
- F_T^z (ή αλλιώς F) χρόνος για σταθερή θερμοκρασία, T , η οποία χρειάζεται για την καταστροφή ένα ποσοστό μικροοργανισμών των οποίων η αντίσταση θερμότητας χαρακτηρίζεται από την τιμή z , min (λεπτά).
- C_p ειδική θερμότητα του προϊόντος, J/(kg K).
- T_∞ θερμοκρασία περιβάλλοντος, $^\circ\text{C}$ ή K.
- T_0 αρχική ή επιφανειακή θερμοκρασία, $^\circ\text{C}$ ή K.
- T_{cw} θερμοκρασία μέσου ψύξης (αέρα), $^\circ\text{F}$.
- T_{RT} θερμοκρασία αυτοκλείστου κατεργασίας $^\circ\text{F}$ (εκτός εάν καθορίζεται διαφορετικά από το κείμενο).
- T_{IT} αρχική θερμοκρασία προϊόντος (εκτός εάν καθορίζεται διαφορετικά από το κείμενο).
- T θερμοκρασία, $^\circ\text{C}$ ή K.
- L μήκος ενός πεπερασμένου κυλίνδρου, πάχος ορθογωνικής ράβδου, πάχος άπειρης πλάκας σε m.
- x συντεταγμένη x , m (μέτρα).
- t χρόνος, s (δευτερόλεπτα).
- R ακτίνα κυλίνδρου ή σφαίρας, m αντιστέκεται στην μεταφορά θερμότητας.
- r ακτινική απόσταση σφαίρας ή κυλίνδρου, m.
- m μάζα, kg.
- J παράγοντας καθυστέρησης, παράμετρος (επιπρόσθετος της τιμής f) για την περιγραφή του ευθύγραμμου τμήματος της καμπύλης θερμικής διεύθυνσης η οποία προκύπτει από τα θερμοκρασιακά δεδομένα του προϊόντος σχεδιάζονται σαν διαφορά θερμοκρασίας σε λογαριθμική κλίμακα σε συνάρτηση με τον χρόνο. Η

παράμετρος j ορίζεται ως $j_h = \frac{T_{RT}-T_A}{T_{RT}-T_{IT}}$ και $j_c = \frac{T_B-T_{CW}}{T_h-T_{CW}}$ για την καμπύλη θέρμανσης και ψύξης αντίστοιχα.

J_0 συνάρτηση Bessel πρώτου είδους μηδενικής τάξης.

J_i συνάρτηση Bessel πρώτου είδους πρώτης τάξης.

Bi αριθμός Biot , $Bi=h\delta/\kappa$, αδιάστατο.

Ελληνικοί χαρακτήρες

α συντελεστής θερμικής διαχυτότητας, $\alpha=\kappa/(\rho Cp)$, m^2/s

β ογκομετρικός συντελεστής θερμικής διαστολής, $1/K$

ρ πυκνότητα του προϊόντος, kg/m^3

λm η m ιδιοτιμή δίνεται από την εξίσωση

$\lambda' m$ η m ιδιοτιμή δίνεται από την εξίσωση

βn νιοστή ιδιοτιμή δίνεται από την εξίσωση

$\beta' n$ νιοστή ιδιοτιμή δίνεται από την εξίσωση

Δείκτες

a αρχική συγκέντρωση μιας θερμικά ευαίσθητης ουσίας, π.χ., αριθμός μικροοργανισμών ανά mL, g/L, κ.α.

b τελική (μετά το πέρας της θερμικής διεργασίας) συγκέντρωση μιας θερμικά

CW αναφέρεται στη θερμοκρασία ψύξης

IT αναφέρεται στην αρχική θερμοκρασία του προϊόντος

ref θερμοκρασία αναφοράς

RT αναφέρεται στη θερμοκρασία του αυτοκλείστου

i αναφέρεται στο ισοτό χρονικό βήμα (time step)

Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

- Abdul Ghani AG, Farid MM, Chen XD, Richards P. 1999. Numerical simulation of natural convection heating of canned food by computational fluid dynamics. *Journal of Food Engineering* 41: 55-64.
- Abdul Ghani AG, Farid MM, Chen XD, Richards P. 2001. Thermal sterilization of canned food in a 3-D pouch using computational fluid dynamics. *Journal of Food Engineering* 48(2): 147-156.
- Aubin, J., Fletcher, D. F., & Xuereb, C. (2004). Modelling turbulent flow in stirred tanks with CFD: the influence of the modeling approach, turbulence model and numerical scheme. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 28, 431e445.
- Baker A., Haidari AH., Oshinowo LM. 2001. Realize Greater Benefits from CFD. *Fluid/Solids Handling March*, pp. 45-53.
- Barbosa-Canovas, GV., Ma L. and Barletta B. 1997. *Food engineering laboratory manual*. Lancaster, Pennsylvania: Technomic Publishing Company.
- D'Agaro, P., Cortella, G., & Croce, G. (2006). Two- and threedimensional CFD applied to vertical display cabinets simulation. *International Journal of Refrigeration*, 29, 178e190.
- Datta, A.K., Teixeira, A.A., 1987. Numerical modelling of natural convection heating in canned liquid foods. *Transactions of the ASAE* 30 (5), 1542–1551.
- Dimou A and Yanniotis S. 2011. 3D numerical simulation of asparagus sterilization in a still can using computational fluid dynamic. *Journal of Food Engineering*, 104(3): 394-403.
- Dimou A., Panagou E, Stoforos NG. and Yanniotis S. 2013. Analysis of thermal processing pf table olives using computational fluid dynamics. *Journal of Food Science* 78(11): E1695-E1703.
- Ferry M. 2002. New Features of mical solver. *The PHoenics Journal*, 14(1), 88-96.
- Ferziger J. and Peric M. 2002. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. 3rd Edition. Springer Science.
- Foster, A. M., Barrett, R., James, S. J., & Swain, M. J. (2002). Measurement and prediction of air movement through doorways in refrigerated rooms. *International Journal of Refrigeration*, 25, 1102e1109.

- FRPERC, 1995. CFD in the food industry. Food Refrigeration and Process Engineering Research Centre Newsletter 10, 1–2.
- Gosman, A. D. (1998). Developments in industrial computational fluid dynamics. Transactions of the Institution of Chemical Engineers, 76, 153e160.
- Hu, Z., & Sun, DW. (1999). The temperature distribution of cooked meat joints in an air-blast chiller during cooling process: CFD simulation and experimental verification. Paper presented at the 20th international congress of refrigeration, Sydney, Australia.
- Hu, Z., & Sun, DW. (2000a). Simulation of heat and mass transfer for vacuum cooling of cooked meats by using computational fluid dynamics code. Paper presented at the 8th international congress on engineering and food, Paper no. O-130, Puebla, Mexico.
- Kookos, I.K., & Stoforos N.G. (2014). Handbook of Food Processing and engineering. Vol.1: Food Engineering Fundamentals Chapter 6 Heat Transfer.
- Kumaresan, T., & Joshi, J. B. (2006). Effect of impeller design on the flow pattern and mixing in stirred tanks. Chemical Engineering Journal, 115, 173e193.
- Mariotti, M., Rech, G., & Romagnoni, P. (1995). Numerical study of air distribution in a refrigerated room. In Proceedings of international congress of refrigeration, Vol. 2. Den Hague, The Netherlands (pp. 98–105).
- Mirade, PS. (2003). Prediction of the air velocity field in modern meat dryers using unsteady computational fluid dynamics (CFD) models. Journal of Food Engineering, 60, 41e48.
- Mirade PS. and Daudin JD. 2006. Computational fluid dynamics prediction and validation of gas circulation in a cheese-ripening room. Vol 16, 920-930.
- Pantakar S. 1980. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Library of Congress Cataloging in Publication Data.
- Pflug P. 1975. Processing Foods Quality. Optimization and Process Assessment. Edited by Fernanda A.R. Oliveira, Jorge C. Oliveira.
- Sahu SK., Gelfand AE. 1999. Identifiability, Improper Priors and Gibbs Sampling for Generalized Linear Models. Edited by Taylor and Francis.
- Sethian, J.A., 1993. Computational fluid dynamics. In: From Desktop to Teraflop: Exploiting the US Lead in High Performance Computing. NSF Publications, National Science Foundation, Washington, DC, USA.

- Slater, J. W. (2006). Examining spatial (grid) convergence. Public tutorial on CFD verification and validation, NASA Glenn Research Centre, MS 86 and 21000 Brookpark Road, Cleveland, Ohio 44135.
- Sorensen, D. N., & Nielsen, P. V. (2003). Quality control of computational fluid dynamics in indoor environments. *Indoor Air*, 13, 2e17.
- Stoforos NG. and Taoukis PS. 2004. Heat Processing: Temperature-Time Combinations. *Handbook of Food Science, Technology and Engineering Vol.3*. Edited by Y.H.HUI. Taylor and Francis Group.
- Sun Da-Wen. 2007. *Computational Fluid Dynamics in Food Processing*. CRC Press. Taylor and Francis Group.
- Versteeg HK. and Malalasekera W. 1995. *An introduction to Computational Fluid Dynamics. The Finite Volume Method*.
- Wang ZL. and Sun SH. 2003. *Handbook of Food Safety Engineering*. Edited by Da-Wen Sun.
- Wong, S. Y., Zhou, W., & Hua, J. (2006a). Robustness analysis of a CFD model to the uncertainties in its physical properties for a bread baking process. *Journal of Food Engineering*, 77, 784e791.
- Yanniotis S and Stoforos NG. 2014. *Modelling food processing operations with computational fluid dynamics: A Review*.

Ελληνική Βιβλιογραφία

- Μπλούκας Ι. 2004. “Επεξεργασία και Συντήρηση Τροφίμων”. Εκδόσεις Αθ. Σταμούλη.
- Πανάγου Ε. 2014. Σημειώσεις του μαθήματος “Μικροβιολογία Τροφίμων”. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- Σάρδη Κ. 2014. Σημειώσεις του μαθήματος “Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής στην Μηχανική Τροφίμων”. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- Στοφόρος ΝΓ. 2014. Σημειώσεις του μαθήματος “Προχωρημένα μαθήματα Συντήρησης Τροφίμων”. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.