

**ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΤΡΟΦΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΥ**  
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ**

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

**Μεταπτυχιακή Διατριβή**

**Σχεδιασμός ασηπτικών διεργασιών για ετερογενή μίγματα τροφίμων με  
τη χρήση Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής**

**Ιωάννης-Αίας Ξ. Μανιάς**

Επιβλέπων καθηγητής:

Στοφόρος Νικόλαος, Καθηγητής ΓΠΑ

Αθήνα

2021

**ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΤΡΟΦΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΥ**  
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ**

**Μεταπτυχιακή Διατριβή**

**Σχεδιασμός ασηπτικών διεργασιών για ετερογενή μίγματα τροφίμων με  
τη χρήση Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής**

**“Design of aseptic processes for liquid/particulate foods using CFD”**

**Ιωάννης-Αίας Ξ. Μανιάς**

Εξεταστική Επιτροπή:

Στοφόρος Νικόλαος, Καθηγητής ΓΠΑ (επιβλέπων)

Γιαννακούρου Μαρία, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΠΑΔΑ

Μαντάλα Ιωάννα, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΓΠΑ

# Σχεδιασμός ασηπτικών διεργασιών για ετερογενή μίγματα τροφίμων με τη χρήση Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής

*Τμήμα Επιστήμης Τροφίμων και Διατροφής του Ανθρώπου*

*Εργαστήριο Μηχανικής και Επεξεργασίας Τροφίμων*

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το θέμα της παρούσας διπλωματικής μελέτης είναι ο σχεδιασμός ασηπτικών διεργασιών για ετερογενή μίγματα τροφίμων που αποτελούνται από υγρά και στερεά προϊόντα (σωματίδια) με χρήση του προγράμματος υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (Computational Fluid Dynamics, CFD). Η ασηπτική επεξεργασία (aseptic processing) αποτελείται από τη θέρμανση του προϊόντος, τη διέλευση του προϊόντος μέσω ενός σωλήνα παραμονής όπου στο προϊόν επιτυγχάνεται η απαιτούμενη θερμοκρασία στο απαιτούμενο χρονικό διάστημα (επίτευξη εμπορικής αποστείρωσης) και τέλος την ψύξη του προϊόντος όσο πιο σύντομα γίνεται. Ο χρόνος διατήρησης του σωματιδίου μέσα στο υγρό στον σωλήνα παραμονής θεωρείται κρίσιμο στάδιο για την ασφαλή επεξεργασία του προϊόντος.

Η προσομοίωση έγινε με τη βοήθεια του προγράμματος Ansys Fluent αφού πρώτα προσδιορίστηκαν οι θερμοφυσικές ιδιότητες βιβλιογραφικά, σχεδιάστηκε η γεωμετρία, και έγινε δημιουργία-ανεξαρτητοποίηση του πλέγματος. Η γεωμετρία αποτελείται από ένα αγωγό κυκλικής διατομής μήκους 6 εκατοστών και πλάτους 4,75 εκατοστών με 4 ανακλαστήρες (baffles). Όταν περιστρέφεται ο αγωγός, παρομοιάζεται η λειτουργία με αυτήν ενός εναλλάκτη ενώ όταν είναι ακίνητος, με τον σωλήνα παραμονής έτσι ώστε η θερμοκρασία να μεταφέρεται ομοιόμορφα στην ακτινική κατεύθυνση.

Στη συνέχεια, αναπτύχθηκε το υπολογιστικό μοντέλο εξετάζοντας την επίδραση των κυριότερων παραγόντων της διεργασίας, σε διάφορους συνδυασμούς, για τον υπολογισμό του απαιτούμενου χρόνου παραμονής για την επίτευξη δεδομένης τιμής  $F$ . Οι παράμετροι που εξετάστηκαν, ήταν το μέγεθος του σωματιδίου (1,016 cm, 1,27 cm, 1,524 cm και 1,778 cm), η θερμική αγωγιμότητα του σωματιδίου (0,433 W/mK, 0,62 W/mK και 0,79 W/mK) και οι θερμοκρασίες θέρμανσης (160 °C και 130 °C) και ψύξης (1,666 °C και 20 °C).

Με βάση τα παραπάνω, προέκυψε ότι με την αύξηση του μεγέθους των σωματιδίων αυξήθηκε ο χρόνος παραμονής στον σωλήνα παραμονής για θερμοκρασία θέρμανσης 160

°C και και ψύξης 1,666 °C. Έτσι, από το μικρότερο προς το μεγαλύτερο μέγεθος οι χρόνοι ήταν: 55 s, 94,5 s, 145 s και 202,5s. Επιπλέον, με την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας μειώθηκε ο απαιτούμενος χρόνος παραμονής. Για το σωματίδιο μεγέθους 1,27 cm και θερμοκρασία ατμού 160 °C, από την μικρότερη προς την μεγαλύτερη τιμές θερμικής αγωγιμότητας βρέθηκαν οι εξής χρόνοι: 160,5 s, 126 s και 110,5 s. Όσο αφορά στη χαμηλότερη θερμοκρασία θέρμανσης (130 °C) για μέγεθος 1,27 cm και θερμική αγωγιμότητα 0,62 W/mK προέκυψε ότι χρειάστηκε τριπλάσιος χρόνος παραμονής (286 s) στον σωλήνα παραμονής.

Τέλος, ο ποιοτικός παράγοντας της θειαμίνης έδειξε ότι ήταν θερμοανθεκτικός παράγοντας και η διατήρηση της μειωνόταν με την αύξηση του μεγέθους των σωματιδίων. Έτσι, για το σωματίδιο 1,016 cm η διατήρηση στο τέλος της διεργασίας ήταν 89,78-91,47 %, για μέγεθος 1,27 cm η διατήρηση κυμάνθηκε 86,45-89,55 % και για μέγεθος 1,524 cm κυμάνθηκε 82,4-87,86 % για θερμοκρασίες ατμού 130 °C, 140 °C, 150 °C και 160 °C.

**Επιστημονική περιοχή:** Μηχανική Τροφίμων

**Λέξεις Κλειδιά:** Ασηπτική επεξεργασία, Υπολογιστική Ρευστοδυναμική, Ετερογενές τρόφιμο, Βιομηχανική αποστείρωση, Ποιοτική υποβάθμιση

## **Design of aseptic processes for liquid/particulate foods using CFD**

*Department of Food Science and Human Nutrition*

*Laboratory of Food Process Engineering*

### **ABSTRACT**

The objective of this study was the design of aseptic processes for liquid/particulate foods using the Computational Fluid Dynamics (CFD) commercial software. Aseptic processing consists of heating the product, passing the product through a holding tube, where the required  $F$  value, for commercial sterilization, is achieved and finally cooling the product to as fast as possible. The residence time of the particle and the liquid in the holding tube is considered a critical step for the safe processing of the product.

The simulation was performed with the help of the Ansys Fluent software. Initially, the thermophysical properties were determined in the literature, the geometry was designed, and meshed. The geometry consists of circular pipe 6 cm long and 4.75 cm wide with 4 baffles. When the pipe rotates, the operation is similar to that of a heat exchanger, while when it is stationary, it is similar to that of the hold tube so that the temperature is transferred evenly in the radial direction.

Next, the model was developed to calculate the time required for aseptic processing and to examine the effect of the main factors of the process. The parameters examined were the particle size (1,016 cm, 1,27 cm, 1,524 cm and 1,778 cm), the thermal conductivity of the particle (0,433 W/mK, 0,62 W/mK and 0,79 W/mK) and the heating (60 °C and 130 °C) and cooling (1,666 °C and 20 °C) temperatures.

Based on the above, it was concluded that with the increase in size of the particle, the residence time in the hold tube also increased for temperatures of 160 °C (heating) and 1,666 °C (cooling): 55 s (1,016 cm) 94,5 s (1,27 cm), 145 s (1,524 cm) and 202,5 s (1,778 cm). Furthermore, with the increase of thermal conductivity, the residence time in the hold tube for the particle size of 1.27 cm and steam temperature of 160 °C was reduced. Thus, from the lowest to the highest value of thermal conductivity were found the following results: 160,5 s, 126 s and 110,5 s. Regarding the lowest heating temperature (130 °C) it turned out that it took three times the residence time (286 s) in the hold tube in relation to the temperature of 160 °C.

Finally, the nutrient of thiamine was shown to be a heat resistant nutrient and its retention decreased with increasing particle size. Thus, for the 1,016  $\mu\text{m}$  particle the retention at the end of the process was 89.78-91.47%, for a size of 1.27  $\mu\text{m}$  the retention ranged from 86.45-89.55% and for a size of 1,524  $\mu\text{m}$  ranged from 82.4- 87.86% for steam temperatures 130 °C, 140 °C, 150 °C and 160 °C.

**Scientific area:** Food Engineering

**Keywords:** Particulate food, Aseptic processing, Lethality, Computational Fluid Dynamics (CFD)

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή μελέτη εκπονήθηκε στο «Εργαστήριο Μηχανικής και Επεξεργασίας Τροφίμων» στο πλαίσιο του ΠΜΣ με τίτλο «Επεξεργασία, Συντήρηση και Βιοτεχνολογικές Διεργασίες Τροφίμων – Ανάπτυξη Προϊόντων Βιο-οικονομίας» του Τμήματος Επιστήμης Τροφίμων και Διατροφής του Ανθρώπου του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Στοφόρου Γ. Νικολάου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κύριο Στοφόρο τόσο για την ανάθεση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας όσο και για την εμπιστοσύνη και την στήριξη που μου έδωσε σε όλη τη διάρκεια της ολοκλήρωσης της μεταπτυχιακής μου διατριβής. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω, τον Υποψήφιο Διδάκτορα Στυλιανό Χατζηδάκη για την αμέριστη βοήθεια και κατανόηση που έδειξε για οποιοδήποτε πρόβλημα ή απορία πρόκυπτε κατά την διεξαγωγή της διπλωματικής.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου οι οποίοι με στήριξαν με όλους τους τρόπους σε όλα τα χρόνια των σπουδών μου και μου έδωσαν την δυνατότητα με υπομονή και διακριτικότητα να μπορέσω να επιτύχω τους στόχους μου.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	i
ABSTRACT.....	iii
ΠΡΟΛΟΓΟΣ .....	v
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....	vi
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ .....	3
1.1 Θερμικές διεργασίες .....	3
1.1.1 Ανασκόπηση θερμικών διεργασιών.....	3
1.1.1.1 Παστερίωση .....	3
1.1.1.2 Αποστείρωση.....	4
1.1.1.3 Ζεμάτισμα .....	6
1.2 Ασηπτική επεξεργασία .....	7
1.2.1 Εισαγωγή .....	7
1.2.2 Ιστορική αναδρομή .....	7
1.2.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.....	8
1.2.4 Στάδια της ασηπτικής επεξεργασίας.....	9
1.2.4.1 Θέρμανση του προϊόντος .....	10
1.2.4.2 Σωλήνας παραμονής.....	13
1.2.4.3 Ψύξη του προϊόντος .....	13
1.3 Σχεδιασμός της ασηπτικής επεξεργασίας.....	14
1.3.1 Ταχύτητα ρευστού και χρόνος παραμονής .....	14
1.3.2 Κινητική της μικροβιακής καταστροφής.....	18
1.3.3 Υπολογισμός θνησιμότητας θερμικών διεργασιών .....	21
1.3.4 Επίδραση της θερμικής επεξεργασίας στα ποιοτικά χαρακτηριστικά .....	23
1.3.5 Μεταφορά θερμότητας .....	24
1.3.5.1 Μεταφορά θερμότητας με αγωγή σε σταθερή κατάσταση .....	25
1.3.5.2 Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή.....	25
1.3.5.3 Μεταφορά θερμότητας με αγωγή σε μη σταθερή κατάσταση .....	25
1.3.5.4 Μεταφορά θερμότητας κατά την ασηπτική διεργασία (εναλλάκτης θερμότητας, σωλήνας παραμονής, τμήμα ψύξης).....	26
1.3.6 Μαθηματική μοντελοποίηση .....	27
1.4 Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (Computational Fluid Dynamics).....	28
1.4.1 Εισαγωγή .....	28



1.4.2 Εφαρμογές της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής.....	30
1.4.3 Εφαρμογές της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής στην βιομηχανία τροφίμων .....	30
1.4.4 Πλεονεκτήματα της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής .....	31
1.4.5 Περιορισμοί του CFD .....	32
1.4.6 Εμπορικοί Κώδικες του CFD.....	33
1.4.7 Θεμελιώδης αρχές της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής .....	34
1.4.8 Αριθμητικές μέθοδοι διακριτοποίησης .....	37
1.4.8.1 Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών.....	37
1.4.8.2 Μέθοδος πεπερασμένων όγκων .....	37
1.4.8.3 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων.....	38
1.4.9 Στάδια επίλυσης ενός προβλήματος με τη χρήση του CFD .....	38
1.4.10 Δημιουργία UDFs .....	42
2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	43
2.1 Αριθμητική επίλυση με τη χρήση του λογισμικού προσομοίωσης.....	43
2.2 Σχεδιασμός γεωμετρίας .....	44
2.3 Παραδοχές για τη μοντελοποίηση της ασηπτικής επεξεργασίας.....	45
2.4 Θερμοφυσικές ιδιότητες .....	46
2.5 Δημιουργία πλέγματος.....	46
2.6 Ανεξαρτησία πλέγματος .....	48
2.7 Ανεξαρτησία χρονικού βήματος.....	52
2.8 Υπολογισμός της τιμής F της διεργασίας.....	52
2.9 Υπολογισμός της ποιοτικής υποβάθμισης της διεργασίας .....	54
2.10 Αξιολόγηση της ασηπτικής επεξεργασίας.....	54
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ .....	56
3.1 Αξιολόγηση ποιότητας πλέγματος με βάση τις παραμέτρους στρέβλωσης και ορθογωνικότητας .....	56
3.2 Αξιολόγηση του χρονικού βήματος της προσομοίωσης .....	58
3.3 Προσομοίωση της ασηπτικής επεξεργασίας .....	61
4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	85
ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ.....	87
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	90

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Βασικός στόχος των βιομηχανιών τροφίμων είναι η παραγωγή ασφαλών και ποιοτικών προϊόντων από την αρχή μέχρι το τέλος της παραγωγής τους μέχρι και την αποθήκευσή τους. Τα τρόφιμα επεξεργάζονται με διάφορες μεθόδους και κατά τη διάρκεια αυτών των διεργασιών εξελίσσονται ταχύτερα μεταβολές στα χημικά συστατικά και στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των τροφίμων, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας. Οι μεταβολές αυτές προκαλούν υποβάθμιση της ποιότητας του τροφίμου. Έτσι, οι τεχνολογικές εξελίξεις στις θερμικές κατεργασίες συντήρησης στοχεύουν στην παραγωγή ασφαλούς τροφίμου, με μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, και παράλληλα στον περιορισμό της ποιοτικής υποβάθμισης που προκαλείται από τη θέρμανση.

Τα τρόφιμα μπορούν να παστεριωθούν ή αποστειρωθούν είτε συσκευασμένα (κονσερβοποίηση), είτε προ της συσκευασίας τους, οπότε η συσκευασία που ακολουθεί γίνεται σε ασηπτικές συνθήκες ώστε να αποφευχθεί η επαναμόλυνσή τους. Και στις δύο περιπτώσεις ο υπολογισμός των κρίσιμων παραμέτρων της διεργασίας (θερμοκρασίας και χρόνου) στηρίζεται στα κινητικά δεδομένα για τη θερμική θανάτωση των μικροοργανισμών (ή ενζύμων) που υπάρχουν στο τρόφιμο και στο ρυθμό διεξόδου της θερμότητας στο τρόφιμο.

Η βιομηχανία επεξεργασίας τροφίμων έχει δείξει σημαντικό ενδιαφέρον για την ασηπτική επεξεργασία ετερογενών τροφίμων χαμηλής οξύτητας ( $pH > 4,6$ ). Η ασηπτική επεξεργασία (aseptic processing) αποτελεί μέρος των θερμικών διεργασιών και σε αυτήν το τρόφιμο θερμαίνεται σε υψηλές θερμοκρασίες, διέρχεται από σωλήνα παραμονής όπου η θερμοκρασία παραμένει σταθερή και τέλος ψύχεται όσο το δυνατόν πιο σύντομα. Το πρόβλημα που προκύπτει και έχει ιδιαίτερη σημασία για τη ασηπτική επεξεργασία των τροφίμων, που αποτελούνται από υγρά και από στερεά τρόφιμα, είναι η κατανομή των χρόνων παραμονής του τροφίμου στο σύστημα και η μεταβολή της θερμοκρασίας με τον χρόνο παραμονής (Lund, 1993).

Σύμφωνα με τα παραπάνω, είναι αναγκαίο να μελετηθεί περαιτέρω η ασηπτική επεξεργασία, καθώς σε πολλές περιπτώσεις βιομηχανικής πρακτικής για να διασφαλιστεί η ασφάλεια του τροφίμου, αυτό υφίσταται μεγαλύτερη θερμική επεξεργασία με αποτέλεσμα την ποιοτική υποβάθμιση τόσο σε βιταμίνες όσο και στο χρώμα. Με την

βοήθεια Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (CFD) γίνεται προσπάθεια επίλυσης τέτοιων προβλημάτων.

Η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική ή Computational Fluid Dynamics είναι μία σύγχρονη αριθμητική τεχνική η οποία χρησιμοποιείται για την ανάλυση και την προσομοίωση συστημάτων τα οποία περιλαμβάνουν ροή ρευστών, μεταφορά θερμότητας και φαινομένων όπως οι χημικές αντιδράσεις με την χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών (Versteeg and Malalasekera, 2007, Sun, 2007). Αποτελεί ένα σχεδιαστικό ερευνητικό εργαλείο η εφαρμογή του οποίου βοηθά την κατανόηση μηχανισμών που διέπουν τις διεργασίες μηχανικής τροφίμων.

Με βάση όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η προσομοίωση της ασηπτικής επεξεργασίας ενός ετερογενούς τρόφιμου που αποτελείται από στερεά και υγρά προϊόντα για τον προσδιορισμό του απαιτούμενου χρόνου αποστείρωσης στον σωλήνα παραμονής με τη χρήση της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής. Σε αυτήν την προσομοίωση, μελετήθηκε η επίδραση του μεγέθους του σωματιδίου, της θερμικής αγωγιμότητας και της θερμοκρασίας θέρμανσης και ψύξης του προϊόντος σε σχέση με τον χρόνο παραμονής στον σωλήνα παραμονής με μοναδικό στόχο ένα ασφαλές ποιοτικό προϊόν.

## 1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Το θεωρητικό μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας περιλαμβάνει μία βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τις θερμικές διεργασίες στην βιομηχανία τροφίμων, την ασηπτική επεξεργασία και την Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (CFD).

### 1.1 Θερμικές διεργασίες

#### 1.1.1 Ανασκόπηση θερμικών διεργασιών

Η παστερίωση και η βιομηχανική ή εμπορική αποστείρωση των τροφίμων έχουν ως στόχο την καταστροφή μικροοργανισμών ή και την αδρανοποίηση των ενζύμων που υπάρχουν στο τρόφιμο. Παράλληλα όμως, στη διάρκεια των διεργασιών αυτών, λόγω υψηλής θερμοκρασίας, εξελίσσονται με ταχύτερο ρυθμό δράσεις υποβάθμισης της ποιότητας του τροφίμου (αλλοίωση οργανοληπτικών χαρακτηριστικών, μεταβολές των συστατικών). Επιπλέον της παστερίωσης και αποστείρωσης, θερμική διεργασία αποτελεί το ζεμάτισμα και η εξάτμιση των τροφίμων (Rahman, 2007).

Η χρήση υψηλών θερμοκρασιών στην επεξεργασία των τροφίμων εφαρμόζεται για να διασφαλίσει τη μέγιστη μικροβιολογική και ενζυμική σταθερότητα και μερικές φορές για να προσδώσει συγκεκριμένα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά. Οι υψηλές θερμοκρασίες και ο χρόνος θέρμανσης χρησιμοποιούνται σε ένα μεγάλο εύρος τιμών, για τα διάφορα τρόφιμα. Ο χρόνος και η τιμή της θερμοκρασίας θέρμανσης καθορίζουν την ένταση της θερμικής επεξεργασίας, στην οποία υπόκεινται ένα τρόφιμο. Βάση της έντασης της θερμικής επεξεργασίας, γίνεται ο διαχωρισμός των θερμικών διεργασιών σε ήπιες και έντονες. Οι ήπιες θερμικές διεργασίες είναι το ζεμάτισμα και η παστερίωση, ενώ οι έντονες θερμικές διεργασίες είναι το μαγείρεμα και η αποστείρωση (Brennan et al., 1976). Οι βασικοί στόχοι και οι διαφορές μεταξύ αυτών των διεργασιών συνοψίζονται στη συνέχεια.

##### 1.1.1.1 Παστερίωση

Μια από τις σημαντικότερες θερμικές διεργασίες που εφαρμόζονται στα τρόφιμα είναι η παστερίωση. Ο στόχος της παστερίωσης είναι η καταστροφή όλων των παθογόνων μικροοργανισμών και η μείωση του πληθυσμού άλλων μικροοργανισμών. Ως θερμική επεξεργασία, η παστερίωση δεν αρκεί ώστε το παραγόμενο προϊόν να αποθηκευτεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, γι' αυτό απαραίτητη είναι η χρήση επιπλέον μεθόδων επεξεργασίας και αποθήκευσης, όπως η προσθήκη συντηρητικών ουσιών ή η αποθήκευση

υπό ψύξη αντίστοιχα. Σε πολλές περιπτώσεις ο κύριος στόχος της παστερίωσης είναι η καταστροφή των παθογόνων μικροοργανισμών (π.χ. στο γάλα), αλλά εφαρμόζεται και για την καταστροφή αλλοιογόνων μικροοργανισμών (π.χ. στη μύρα).

Για να επιτευχθεί η παστερίωση είναι απαραίτητος ο κατάλληλος συνδυασμός θερμοκρασίας – χρόνου θέρμανσης. Χαρακτηριστικοί συνδυασμοί θερμοκρασίας – χρόνου θέρμανσης που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανική πρακτική για την παστερίωση π.χ. του γάλακτος είναι: 145°F για 30 min ή 161°F για 15 s (FDA, 2020). Τα παραπάνω ζεύγη θερμοκρασίας – χρόνου θέρμανσης υπολογίστηκαν με βάση τον μικροοργανισμό στόχο, ο οποίος για την παστερίωση του γάλακτος είναι το παθογόνο βακτήριο *Coxiella Burnetii*. Σε άλλα τρόφιμα για να επιτευχθεί η παστερίωση χρησιμοποιούνται διαφορετικά ζεύγη θερμοκρασίας – χρόνου θέρμανσης και αυτό εξαρτάται από το ίδιο το τρόφιμο, τον μικροοργανισμό στόχο και τις μετέπειτα συνθήκες αποθήκευσης του τροφίμου.

Από τα παραπάνω γίνεται σαφές ότι η παστερίωση είναι μια ήπια θερμική επεξεργασία που δεν υποβαθμίζει ποιοτικά τα παραγόμενα προϊόντα, λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών που χρησιμοποιούνται. Τέλος, για την παστερίωση χρησιμοποιούνται μηχανήματα που ονομάζονται παστεριωτές (pasteurizer) και αποτελούνται από τον εναλλάκτη θερμότητας, τον σωλήνα παραμονής και τον εναλλάκτη ψύξης (Rahman, 2007).

#### 1.1.1.2 Αποστείρωση

Η αποστείρωση είναι η θερμική διεργασία που στοχεύει στην καταστροφή όλων των μικροοργανισμών και των σπορίων τους. Στείρο είναι το προϊόν στο οποίο δεν έχει επιβιώσει κανένας μικροοργανισμός, ώστε να είναι ικανός να αναπτυχθεί όταν βρεθεί σε ευνοϊκές συνθήκες. Στην πραγματικότητα είναι δυνατή η επιβίωση σπορίων αρκεί να είναι αδύνατο να βλαστήσουν και να αναπτυχθούν στο περιβάλλον που θα αποθηκευτεί το τρόφιμο. Επομένως οι όροι στείρο και αποστείρωση δεν είναι δόκιμοι για τα τρόφιμα και την θερμική κατεργασία αυτών που στοχεύει στην πραγματικότητα στη μείωση της πιθανότητας επιβίωσης των μικροοργανισμών και των σπορίων τους, ώστε υπό τις προβλεπόμενες συνθήκες συντήρησης του τροφίμου να μειώνεται σημαντικά η πιθανότητα ανάπτυξης αυτών των μικροοργανισμών. Πιο δόκιμος θα ήταν ο όρος βιομηχανική αποστείρωση (commercial sterility). Η αποστείρωση εφαρμόζεται σε τρόφιμα με στόχο να μειώσει τους πληθυσμούς όλων των μικροοργανισμών και των σπορίων τους. Τα σπόρια

είναι τα πλέον θερμοάαντοχα και η ένταση της κατεργασίας εξαρτάται κυρίως από την αντίσταση αυτών στη θερμική καταστροφή.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ένταση της θερμικής επεξεργασίας του τροφίμου είναι το pH, η ενεργότητα του νερού ( $a_w$ ), η ύπαρξη ή μη πρόσθετων υλών, η σύσταση του τροφίμου, ο αριθμός και το είδος των μικροοργανισμών που περιέχονται στο τρόφιμο και η φάση ανάπτυξης αυτών των μικροοργανισμών (Adams and Moss, 2008). Η επίδραση του pH στην θερμική επεξεργασία είναι πολύ σημαντική και για αυτό τον λόγο τα τρόφιμα χωρίζονται σε :

α) χαμηλής οξύτητας με  $pH > 4,5$ ,

β) μέσης οξύτητας με  $4,2 < pH \leq 4,5$ ,

γ) όξινα με  $3,8 < pH \leq 4,2$  και

δ) υψηλής οξύτητας με  $pH \leq 3,8$ .

Γενικά, τα βακτήρια αναπτύσσονται πιο γρήγορα σε ένα εύρος pH μεταξύ 6 και 8, οι ζύμες μεταξύ 4,5 και 6 και οι μύκητες μεταξύ 3,5 και 4 (Adams and Moss, 2008). Σε τρόφιμα χαμηλής και μέσης οξύτητας είναι δυνατόν να αναπτυχθούν στελέχη σποριογόνων βακτηρίων, συνεπώς ο σχεδιασμός της θερμικής επεξεργασίας γίνεται, κατ' ελάχιστον, με μικροοργανισμό στόχο το πιο θερμοανθεκτικό σποριογόνο παθογόνο βακτήριο που είναι το *Clostridium botulinum*. Η μείωση του αριθμού των σπορίων του *Clostridium botulinum* κατά 12 λογαριθμικούς κύκλους, με την επίδραση της θερμότητας καθιστά το τρόφιμο ασφαλές. Στα όξινα τρόφιμα η ανάπτυξη των σποριογόνων βακτηρίων είναι σχεδόν αδύνατη με αποτέλεσμα η θερμική επεξεργασία να είναι ηπιότερη. Στις περιπτώσεις αυτές η θερμική επεξεργασία σχεδιάζεται για την καταστροφή λιγότερο θερμοανθεκτικών μικροοργανισμών. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι διάφορα είδη του γένους *Clostridium* και *Bacillus*, όπως το *C. butyricum* και το *B. coagulans*.

Επίσης η εμπορική αποστείρωση ως διεργασία συντήρησης είναι ικανή από μόνη της να επιτύχει μεγάλους χρόνους σταθερότητας χωρίς την συνέργεια άλλων μορφών συντήρησης, όπως για παράδειγμα τη χρήση χαμηλών θερμοκρασιών κατά την αποθήκευση. Αυτό οφείλεται στη θανατηφόρο δράση της θερμότητας, αλλά και το γεγονός ότι ο περιέκτης δεν έρχεται σε άμεση επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον. Η θέρμανση

κατά την διάρκεια της εμπορικής αποστείρωσης μπορεί να γίνει με κορεσμένο ατμό ή νερό σε θερμοκρασία βρασμού. Συνήθως στις θερμικές επεξεργασίες τροφίμων χαμηλής οξύτητας χρησιμοποιείται ατμός υπό πίεση. Η θέρμανση των τροφίμων πραγματοποιείται σε κλιβάνους και έπειτα οι περιέκτες μεταφέρονται και εμβαπτίζονται σε κρύο νερό για να ψυχθούν.

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

#### *1.1.1.3 Ζεμάτισμα*

Το ζεμάτισμα είναι μια θερμική διεργασία που εφαρμόζεται στα τρόφιμα πριν καταψυχθούν, αφυδατωθούν ή κονσερβοποιηθούν. Ο στόχος του ζεματίσματος εξαρτάται από την επεξεργασία που θα ακολουθηθεί στο τρόφιμο. Το ζεμάτισμα εφαρμόζεται κυρίως πριν την κατάψυξη φρούτων και λαχανικών για την αδρανοποίηση ενζύμων, που προκαλούν καστανίωση στα κατεψυγμένα τρόφιμα. Επίσης πριν την κονσερβοποίηση φρούτων το ζεμάτισμα βοηθά στην αποφλοιώση και στο μαλάκωμα των φρούτων ώστε να είναι ευκολότεροι οι χειρισμοί στο επόμενο στάδιο.

Δύο από τα πιο θερμοάντοχα ένζυμα που υπάρχουν στους φυτικούς ιστούς είναι η περοξειδάση και η καταλάση. Η αποτελεσματικότητα του ζεματίσματος συχνά ελέγχεται μέσω της ενεργότητας αυτών των ενζύμων. Πριν την κονσερβοποίηση το ζεμάτισμα εφαρμόζεται κυρίως για την απομάκρυνση των αερίων από τους φυτικούς ιστούς, τη συρρίκνωση του φλοιού, το μαλάκωμα της σάρκας του τροφίμου που διευκολύνει τη συσκευασία και τον καθαρισμό του τρόφιμου. Η απενεργοποίηση των ενζύμων δεν αποτελεί συνήθως στόχο σε αυτή την περίπτωση, δεδομένου ότι θα ακολουθήσει μία θερμική κατεργασία ικανή να αδρανοποιήσει τα ένζυμα. Τα τρόφιμα που υπόκεινται σε ζεμάτισμα εμβαπτίζονται στο ζεστό νερό για τον κατάλληλο χρόνο και έπειτα είτε καταψύχονται αμέσως, είτε μεταφέρονται για το επόμενο στάδιο επεξεργασίας και τοποθετούνται σε θερμοκρασίας περιβάλλοντος (Holdsworth, 1997, Rahman, 2007).

## 1.2 Ασηπτική επεξεργασία

### 1.2.1 Εισαγωγή

Η ασηπτική επεξεργασία (aseptic processing) αποτελεί μέρος των θερμικών διεργασιών και σε αυτήν το τρόφιμο θερμαίνεται σε υψηλές θερμοκρασίες για σύντομο χρονικό διάστημα (HTST thermal process), διέρχεται από τον σωλήνα παραμονής και τέλος ψύχεται όσο το δυνατόν πιο σύντομα. Η ασηπτική συσκευασία (aseptic packaging) που είναι επιπρόσθετο τμήμα της ασηπτικής επεξεργασίας αποτελείται από την τοποθέτηση των προϊόντων, αμέσως μετά την ψύξη τους, σε προ-αποστειρωμένους περιέκτες και στο ερμητικό κλείσιμο των περιεκτών κάτω από ασηπτικές συνθήκες. Η συσκευασία τροφίμων σε προ-αποστειρωμένους περιέκτες κάτω από ασηπτικές συνθήκες, αποτρέπει την επιμόλυνσή τους με μικροοργανισμούς, είναι ειδικότερα γνωστή ως ασηπτική συσκευασία. Παράδειγμα αποτελεί η HTST ασηπτική επεξεργασία των χυμών στους 93 °C για 30 sec (Wicker and Temelli, 1988). Συνηθέστερα όμως κατά την ασηπτική επεξεργασία εφαρμόζονται θερμοκρασίες πολύ υψηλότερες από τους 121 °C όποτε η HTST θερμική επεξεργασία αντιστοιχεί στην εμπορική αποστείρωση. Η HTST θερμική επεξεργασία, που εφαρμόζεται κατά την ασηπτική επεξεργασία σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, χαρακτηρίζεται ως UHT επεξεργασία (Ultra High Temperature Processing), όταν ο χρόνος διατήρησης του προϊόντος στην υψηλή θερμοκρασία είναι μηδέν ή της τάξεως λίγων δευτερολέπτων, συνήθως 2-8 s (FDA, 2020).

Η ασηπτική επεξεργασία εφαρμόζεται : α) σε ρευστά τρόφιμα με χαμηλό ιξώδες, όπως το γάλα και οι χυμοί φρούτων, β) σε ρευστά προϊόντα με κοκκώδη συστατικά, όπως το ρυζόγαλο, οι σούπες και οι σάλτσες, γ) σε ημίρευστα προϊόντα με υψηλό ιξώδες, όπως ο τοματοπολτός και δ) σε στερεά προϊόντα από αυτοτελή τεμάχια, μεγέθους 15-25 mm, μέσα σε ρευστή φάση (Lund 1993). Το πρόβλημα που προκύπτει και έχει ιδιαίτερη σημασία για τη ασηπτική επεξεργασία των τροφίμων είναι η κατανομή των χρόνων παραμονής του τροφίμου στο σύστημα και η μεταβολή της θερμοκρασίας με τον χρόνο παραμονής (Lund, 1993).

### 1.2.2 Ιστορική αναδρομή

Ιστορικά, η πρώτη ασηπτική συσκευασία των τροφίμων (γάλα σε μεταλλικά δοχεία) έγινε από τον Nielsen στη Δανία το 1913. Το 1923, το ασηπτικά συσκευασμένο γάλα από



τη Ν. Αφρική έφτασε σε εμπορική έκθεση στο Λονδίνο σε άριστη κατάσταση. Έπειτα υπήρξε η μελέτη του Olin Ball ο οποίος ανέπτυξε κατάλληλη επεξεργασία για ταχεία θέρμανση-ψύξη-πλήρωση υγρών (διαδικασία HCF) και ημίρευστων προϊόντων, για την οποία έλαβε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το 1938. Ακολούθησε η διεργασία Avoset το 1942 (ψεκασμός με ατμό του προϊόντος σε συνδυασμό με θέρμανση ή αποστείρωση συσκευασιών όπως κονσέρβες και μπουκάλια) και οι Dole-Martin το 1948 συνέχισαν το έργο (αποστείρωση προϊόντος σε εναλλάκτη θερμότητας, αποστείρωση μεταλλικών δοχείων με υπέρθερμο ατμό σε θερμοκρασία 450 °F). Στα τέλη της δεκαετίας του 1960 υπήρξε η έλευση της μηχανής ασηπτικής επεξεργασίας Tetra Brick και στα τέλη της δεκαετίας του 1970 η τεχνολογία του ασηπτικού συστήματος Combibloc. Ένα από τα σημαντικότερα ορόσημα στην ιστορία της ασηπτικής επεξεργασίας είναι η έγκριση από το FDA το 1981 της χρήσης υπεροξειδίου του υδρογόνου για την αποστείρωση των εύκαμπτων υλικών συσκευασίας. Τέλος, μια σημαντική εξέλιξη για την βιομηχανία ήταν όταν το 1997 η Tetra Pak έλαβε τη δυνατότητα από τον FDA για ασηπτική επεξεργασία τροφίμων χαμηλής οξύτητας που περιέχουν μεγάλα σωματίδια (large particulates) (Hui 2006).

### **1.2.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα**

Τα πλεονεκτήματα της ασηπτικής επεξεργασίας έναντι άλλων μεθόδων επεξεργασίας είναι: η καλύτερη ποιότητα προϊόντος (θρεπτικά συστατικά, γεύση, χρώμα, υφή), η λιγότερη κατανάλωση ενέργειας, οι λιγότεροι χειριστές μηχανημάτων, οι λιγότερες απαιτήσεις χώρου, η ευρεία εφαρμογή του αυτοματισμού, η χρήση οποιουδήποτε μεγέθους συσκευασίας, η χρήση ευέλικτων συσκευασιών, και το φθηνότερο κόστος συσκευασίας (Hui 2006).

Η ασηπτική διεργασία απαιτεί καλύτερο έλεγχο ποιότητας των πρώτων υλών, καλύτερη εκπαίδευση του προσωπικού και καλύτερο έλεγχο της διεργασίας και των μηχανημάτων. Μερικά από τα μειονεκτήματα της ασηπτικής επεξεργασίας περιλαμβάνουν την υποβάθμιση ορισμένων βιταμινών (ορισμένες βιταμίνες είναι σταθερές σε θερμοκρασίες παστερίωσης αλλά όχι σε θερμοκρασίες αποστείρωσης), τον διαχωρισμό στερεών και λιπών, την καθίζηση αλάτων και αλλαγή της γεύσης ή της υφής του προϊόντος σε σχέση με το τι έχουν συνηθίσει οι καταναλωτές. Αν και η ασηπτική επεξεργασία θα μπορούσε ενδεχομένως να οδηγήσει σε καλύτερη ποιότητα προϊόντος, πρέπει να

σημειωθεί, ότι πολλές χημικές αλλαγές λαμβάνουν χώρα κατά την διάρκεια υψηλών θερμοκρασιών. Μερικές από αυτές τις χημικές αλλαγές περιλαμβάνουν την ζελατινοποίηση, τις αντιδράσεις οξείδωσης και τις αλλαγές στο χρώμα (Nielsen, 1993, Van Eijk, 1993).

Τέλος, ένα ακόμη θετικό αποτέλεσμα της ασηπτικής επεξεργασίας είναι τα προϊόντα που ονομάζονται «προϊόντα με παρατεταμένη διάρκεια ζωής» («extended shelf-life products»). Τέτοιες διεργασίες είναι πιο εύκολο να υιοθετηθούν καθώς απαιτούν λιγότερη παρακολούθηση (δεδομένου ότι η συσκευασία δεν χρειάζεται να είναι αποστειρωμένη από πριν). Μία τέτοια διεργασία περιλαμβάνει υπερπαστερίωση γάλακτος (ultra-pasteurization) όπου μπορεί να επιτευχθεί μια μεγαλύτερη διάρκεια ζωής (Hui, 2006).

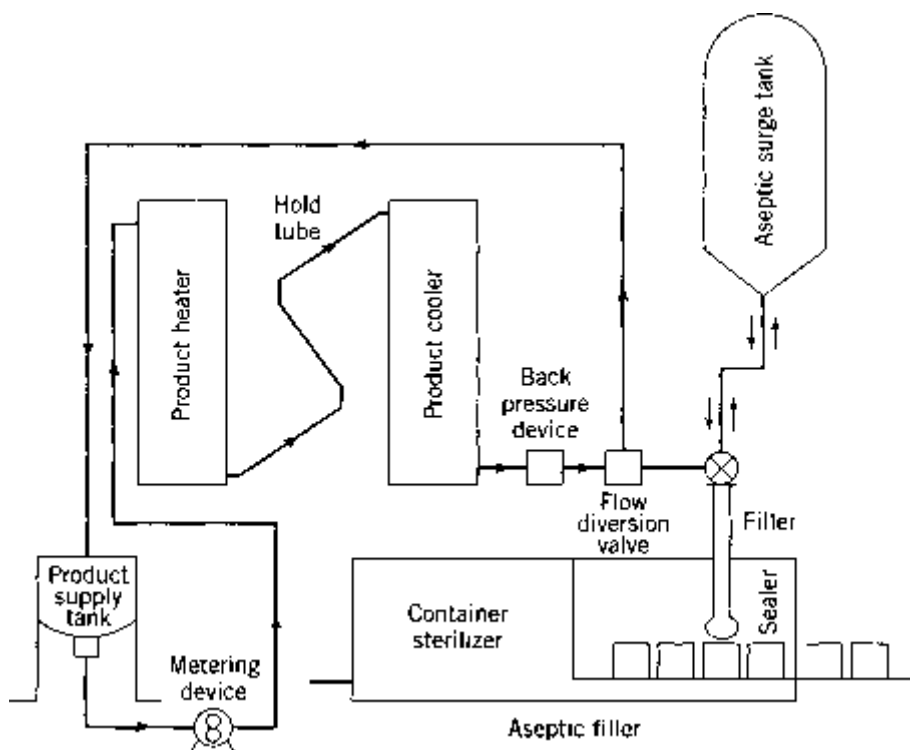
#### **1.2.4 Στάδια της ασηπτικής επεξεργασίας**

Η ασηπτική επεξεργασία αποτελείται από την απαέρωση, την θέρμανση του προϊόντος (αναφέρεται επίσης ως «προ-αποστείρωση»), την διέλευση του προϊόντος μέσω ενός σωλήνα παραμονής όπου στο προϊόν επιτυγχάνεται η απαιτούμενη θερμοκρασία στο απαιτούμενο χρονικό διάστημα (επίτευξη εμπορικής αποστείρωσης), ψύξη του προϊόντος, πιθανή παραμονή του προϊόντος μέσα ασηπτική δεξαμενή και τέλος συσκευασία του προϊόντος σε προ-αποστειρωμένο δοχείο υπό ασηπτικές συνθήκες (Σχήμα 1). Αυτή η διαδικασία έχει ως αποτέλεσμα τρόφιμα υψηλής ποιότητας και σταθερότητας σε ερμητικά σφραγισμένες συσκευασίες που αντέχουν για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Η μεταφορά του προϊόντος με τη βοήθεια αντλίας με σταθερό ρυθμό είναι πολύ σημαντική για να διασφαλιστεί ότι όλο το προϊόν λαμβάνει ομοιόμορφη θερμότητα καθώς και το απαιτούμενο ποσό θερμικής επεξεργασίας. Ο πιο κοινός τύπος αντλίας που χρησιμοποιείται για αυτόν τον σκοπό είναι μια εμβολοφόρα αντλία θετικής μετατόπισης όπου η αντίστροφη ροή του προϊόντος είναι όσο το δυνατόν ελάχιστη. Αυτός ο τύπος αντλίας παρέχει το προϊόν με σταθερό ρυθμό ακόμα και αν η πίεση στην οποία αντλεί δεν είναι σταθερή (για παράδειγμα, όταν αυξάνονται οι επικαθήσεις στον εναλλάκτη θερμότητας). Για ορισμένα ρευστά προϊόντα, μπορεί να απαιτείται ομογενοποίηση του προϊόντος και αυτό είναι επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας έναν ομογενοποιητή.

Στη συνέχεια, η απαέρωση του προϊόντος απομακρύνει τον υπερβολικό όγκο αέρα στο προϊόν. Επιτυγχάνεται σε δοχείο που διατηρείται σε κάποιο βαθμό κενού μέσω αντλίας κενού. Το προϊόν τροφοδοτείται στο δοχείο στους 55-70 °C μέσω ενός ακροφυσίου στο

κέντρο του δοχείου και χάρις στο κενό επιτυγχάνεται χαμηλή θερμοκρασία προϊόντος (περίπου 5 °C). Η εσωτερική σπείρα του συμπυκνωτή συμπυκνώνει ατμούς και άλλα αέρια και το απαεριωμένο προϊόν αποβάλλεται μέσω του πυθμένα και συνεχίζει στο τμήμα θέρμανσης. Αυτό εξυπηρετεί την αύξηση του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας κατά την θέρμανση και ψύξη, διατηρώντας τον ειδικό όγκο του προϊόντος μέσα στον σωλήνα παραμονής (για να αποφευχθεί η μείωση του χρόνου στον σωλήνα λόγω διαστολής του προϊόντος), διατηρώντας ένα σταθερό ρυθμό γεμίσματος, προλαμβάνοντας τον αφρισμό κατά την διάρκεια της συσκευασίας και ελαχιστοποιώντας τις αντιδράσεις οξείδωσης του προϊόντος κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης. Ο απαερωτής τοποθετείται πριν από την προ-θέρμανση του προϊόντος σε περιπτώσεις όπου η απώλεια πτητικών σε υψηλές θερμοκρασίες είναι πρόβλημα και μετά από την προθέρμανση σε άλλες περιπτώσεις, δεδομένου ότι είναι πιο εύκολη η αφαίρεση του αέρα σε υψηλότερες θερμοκρασίες λόγω της διαστολής (Hui, 2006).



Σχήμα 1. Απλοποιημένο διάγραμμα ενός συστήματος ασηπτικής διεργασίας.

#### 1.2.4.1 Θέρμανση του προϊόντος

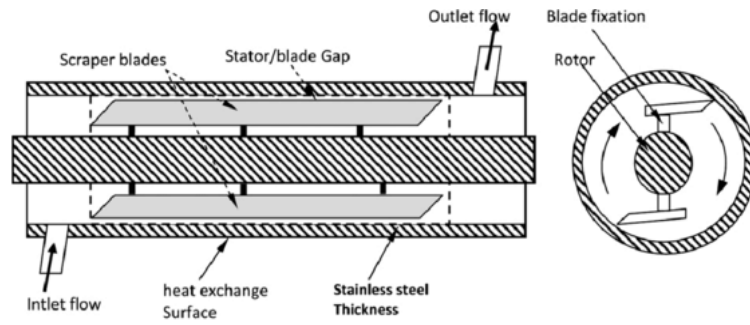
Οι υψηλές θερμοκρασίες που απαιτούνται για την ασηπτική διεργασία (125-145 °C) επιτυγχάνονται με άμεση (έγχυση ατμού) ή έμμεση (εναλλάκτης διπλού σωλήνα, εναλλάκτης κελύφους-αυλών, εναλλάκτης πλακών, εναλλάκτης αποξέομενης επιφάνειας,

μικροκύματα, ακτινοβολία με ραδιοκύματα, ωμική ή θέρμανση ηλεκτρικής αντίστασης) θέρμανση. Η επιλογή του τύπου θέρμανσης και ψύξης εξαρτάται από μια ποικιλία παραγόντων όπως ο τύπος προϊόντος (όξινο ή με χαμηλή οξύτητα, ιξώδες, υγρό ή με σωματίδια, ευαίσθητο στη θερμότητα ή θερμοάντοχο), την πιθανότητα επικαθήσεων, την ευκολία καθαρισμού και το κόστος του εναλλάκτη.

Στην άμεση θέρμανση υφίσταται απ' ευθείας επαφή του θερμαντικού μέσου (ατμός) και του προϊόντος. Για ομογενή και χαμηλού ιξώδους προϊόντα χρησιμοποιείται είτε έγχυση ατμού (steam injection) ή έγχυση προϊόντος (steam infusion). Το πλεονέκτημα της άμεσης θέρμανσης είναι η πολύ ταχεία θέρμανση που δίδει προϊόντα ανώτερης ποιότητας (μικρότερες μεταβολές των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών, μικρότερη υποβάθμιση του προϊόντος). Το κυριότερο μειονέκτημά είναι ότι το νερό που ως ατμός προστέθηκε στο προϊόν ίσως χρειαστεί να αφαιρεθεί αργότερα. Αυτό γίνεται συνήθως στο στάδιο ψύξης του τρόφιμου. Ο ατμός, επειδή προστίθεται στο τρόφιμο, πρέπει να είναι κατάλληλης ποιότητας και να μην περιέχει μη-συμπυκνώσιμα αέρια.

Στην έμμεση θέρμανση χρησιμοποιούνται εναλλάκτες με πλάκες, κελύφους-σωλήνων και αποξεόμενης επιφανείας. Οι εναλλάκτες με πλάκες χρησιμοποιούνται κυρίως για τρόφιμα χαμηλού ιξώδους. Πλεονεκτούν ως προς την ανάκτηση ενέργειας, την ευελιξία στην λειτουργία και τον καθαρισμό. Οι εναλλάκτες διπλού σωλήνα χρησιμοποιούνται επίσης για τρόφιμα σχετικά χαμηλού ιξώδους. Κύριο πλεονέκτημα τους είναι η δυνατότητα λειτουργίας σε μεγαλύτερη πίεση και μεγαλύτερη παροχή τρόφιμου που εξασφαλίζει τυρβώδη ροή, πιο ομοιόμορφη μεταφορά θερμότητας και λιγότερες αποθέσεις στα τοιχώματα σε σύγκριση με τους εναλλάκτες με πλάκες. Οι εναλλάκτες αποξεόμενης επιφάνειας (Scraped Surface Heat Exchanger-SSHE) χρησιμοποιούνται σε ιξώδη τρόφιμα ή με στερεά σωματίδια, είναι ευέλικτοι στη λειτουργία αλλά υστερούν στην ανάκτηση θερμότητας (Σχήμα 2). Οι δυο πρώτοι εναλλάκτες είναι κατάλληλοι για προϊόντα χαμηλού ιξώδους ενώ ο τελευταίος χρησιμοποιείται για υψηλού ιξώδους τρόφιμα.

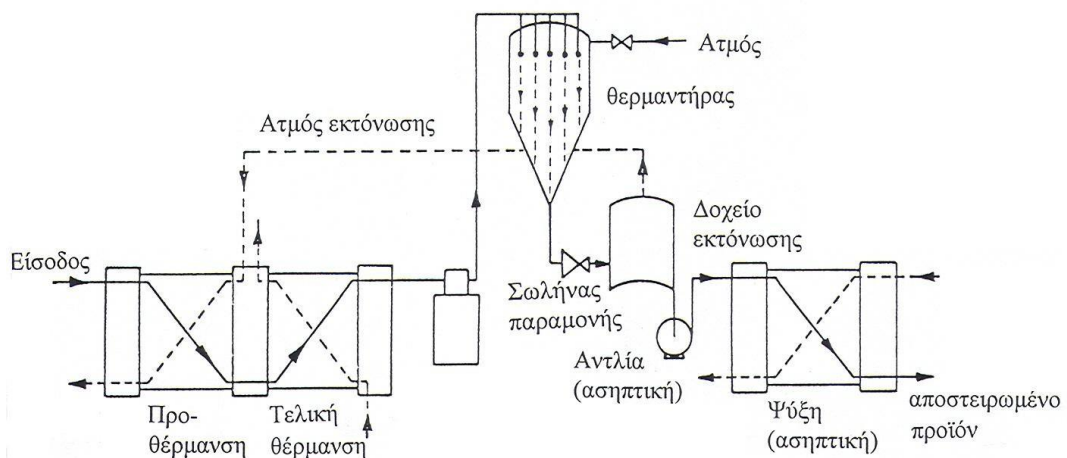
Με την έμμεση θέρμανση γίνεται καλύτερη ανάκτηση της θερμότητας και επιτυγχάνονται πιο σταθερές θερμοκρασίες εξόδου του προϊόντος. Το βασικό πλεονέκτημα της άμεσης εναλλαγής θερμότητας είναι οι μικρότεροι χρόνοι ανύψωσης και μείωσης της θερμοκρασίας. Η μέθοδος είναι κατάλληλη μόνο για τρόφιμα χαμηλού



Σχήμα 2. Σχηματική αναπαράσταση εναλλάκτη αποξέομενης επιφάνειας, διαμήκης και εγκάρσια τομή.

ιξώδους.

Οι διεργασίες αποστείρωσης των μη συσκευασμένων τροφίμων, που γίνονται σε υψηλή θερμοκρασία και για μικρό χρονικό διάστημα, καλούνται διεργασίες υπερυψηλής θερμοκρασίας (UHT: Ultra High Temperature). Για παράδειγμα, στο γάλα η επεξεργασία UHT γίνεται στους 140 °C περίπου με διάρκεια 2-5 s (Σχήμα 3). Τέλος υπάρχουν και μη θερμικές μέθοδοι που είναι πιο σπάνιες στη βιομηχανία λόγω του κόστους ή της αποτελεσματικότητας που μπορεί να έχουν όπως: οι υπέρηχοι, η επεξεργασία με μεμβράνες, οι παλμοί φωτός, το παλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο και οι υπερυψηλές υδροστατικές πιέσεις.



Σχήμα 3. Διάγραμμα ροής μονάδας UHT με άμεση θέρμανση του προϊόντος.

#### 1.2.4.2 Σωλήνας παραμονής

Ο σωλήνας παραμονής (hold tube) αποτελεί ένα σημαντικό μέρος της ασηπτικής διεργασίας δεδομένου ότι εκεί είναι που λαμβάνει το προϊόν την απαιτούμενη επεξεργασία με την βοήθεια συνδυασμού χρόνου-θερμοκρασίας για την δημιουργία προϊόντος αποστειρωμένου και κατ' επέκταση για το εμπόριο (Σχήμα 4). Ο σωλήνας παραμονής είναι πάντα κεκλιμένος προς τα πάνω (FDA, 2020) με κατακόρυφη άνοδο (ύψος) τουλάχιστον ¼ in ανά πόδι μήκους σωλήνα (0,635 cm ανά 30,48 cm μήκους σωλήνα) ή αλλιώς 1,18° κλίση. Αυτή η κλίση διασφαλίζει το προϊόν ώστε να μην δημιουργούνται στον σωλήνα νεκροί χώροι με αέρα καθώς και ότι το προϊόν δεν επιστρέφει προς τα πίσω όταν κλείνουν οι αντλίες με αποτέλεσμα να μειώνεται η πιθανότητα επιμόλυνσης του εξοπλισμού.

Η πίεση στο σωλήνα παραμονής πρέπει να διατηρείται μεγαλύτερη από την τάση ατμών του προϊόντος σε δεδομένη θερμοκρασία ώστε να αποφεύγεται ο βρασμός και η εξάτμιση του προϊόντος, που μπορούν να μειώσουν το χρόνο παραμονής στον σωλήνα. Η αποφυγή της εξάτμισης επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός μηχανισμού διατήρησης της υψηλής πίεσης (back-pressure device). Ένα άλλο πλεονέκτημα της διατήρησης όλου του συστήματος υπό υψηλή πίεση είναι ότι αν υπάρξουν διαρροές θα γίνουν από μέσα προς τα έξω και έτσι αποφεύγεται μικροβιακή επιμόλυνση. Τέλος, η θερμοκρασία του τρόφιμου στην είσοδο και την έξοδο του σωλήνα πρέπει να ελέγχεται και να καταγράφεται.



Σχήμα 4. Σωλήνας παραμονής.

#### 1.2.4.3 Ψύξη του προϊόντος

Το στείρο προϊόν ψύχεται στην κατάλληλη θερμοκρασία, που είναι συνήθως 20 °C για τα χαμηλού ιξώδους τρόφιμα (π.χ. γάλα, χυμοί) και 40 °C για τα υψηλότερου ιξώδους (κρέμες, επιδόρπια). Στα συστήματα που χρησιμοποιούν έμμεση θέρμανση, η ψύξη

γίνεται σε εναλλάκτη θερμότητας όπου αφ' ενός προθερμαίνεται το μη-στείρο προϊόν αφ' ετέρου ψύχεται το στείρο και μ' αυτό τον τρόπο εξοικονομείται ενέργεια. Σ' ένα τέτοιο σύστημα η πίεση στην πλευρά του στείρου προϊόντος πρέπει να είναι τουλάχιστον 1 psi μεγαλύτερη από την πίεση στην πλευρά του μη-στείρου προϊόντος ώστε αν υπάρξει διαρροή να είναι από το στείρο προς το μη-στείρο προϊόν και όχι ανάποδα. Αυτή η διαφορά πίεσης πρέπει να ελέγχεται συνέχεια και να καταγράφεται. Στα συστήματα που χρησιμοποιούν άμεση θέρμανση, το προϊόν οδηγείται σε θάλαμο κενού όπου εξατμίζεται στιγμιαία και διαχωρίζεται σε υγρό και ατμό. Η θερμοκρασία του μειώνεται καθώς ένα ποσοστό του νερού, που προστέθηκε κατά την άμεση θέρμανση, αφαιρείται τώρα ως ατμός.

Η ασηπτική επεξεργασία υγρών τροφίμων όπως σούπες, σάλτσες, χυμοί φρούτων και συμπυκνώματα είναι εμπορικά επιτυχής λόγω των εγγενών πλεονεκτημάτων της έναντι της συμβατικής τεχνολογίας επεξεργασίας όπου τα τρόφιμα γεμίζονται σε δοχεία και στην συνέχεια αποστειρώνονται με θέρμανση σε μια παρτίδα διαδικασία. Εξ ορισμού, η ασηπτική επεξεργασία είναι μια διαδικασία κατά την οποία το προϊόν διατροφής και οι περιέκτες αποστειρώνονται χωριστά και έπειτα συγκεντρώνονται σε ένα αποστειρωμένο περιβάλλον για πλήρωση και σφράγιση. Η διαδικασία επιτρέπει επίσης την πλήρωση μεγάλων δοχείων για μακροχρόνια αποθήκευση χύμα ή αποστολή μεταποιημένων ή ημιτελών προϊόντων διατροφής.

### **1.3 Σχεδιασμός της ασηπτικής επεξεργασίας**

Στην ασηπτική επεξεργασία υπεισέρχονται παράμετροι όπως η μηχανική ρευστών (χρόνος παραμονής, κατανομή χρόνου παραμονής (RTD)), η κινητική θερμικής απενεργοποίησης (μικροβιακή καταστροφή, ενζυμική απενεργοποίηση,  $D$ ,  $z$ ) και φαινόμενα όπως η μεταφορά θερμότητας (μεταφορά θερμότητας από το μέσο θέρμανσης στο υγρό και στη συνέχεια στα σωματίδια).

#### **1.3.1 Ταχύτητα ρευστού και χρόνος παραμονής**

Το προφίλ ταχύτητας του υγρού στο σωλήνα παραμονής επηρεάζεται από την συμπεριφορά του προϊόντος ως Νευτωνικό ή μη Νευτωνικό ρευστό. Αυτό καθορίζεται από το δείκτη ρεολογικής συνοχής,  $n$  που για ένα Νευτωνικό ρευστό είναι ίσο με ένα ( $n=1$ ). Ο

χρόνος παραμονής και η κατανομή ταχυτήτων στους εναλλάκτες και στις σωληνώσεις εξαρτώνται από το είδος της ροής και την ρεολογική συμπεριφορά του ρευστού. Για λόγους ασφαλείας ως χρόνος θερμικής κατεργασίας θεωρείται ο ελάχιστος χρόνος παραμονής του τρόφιμου στο σύστημα, που εξαρτάται από το ισοδύναμο μήκος που διατρέχει και την μέγιστη ταχύτητα του ρευστού. Ο ελάχιστος χρόνος παραμονής στις σωληνώσεις είναι:

$$t_{min} = \frac{L}{u_{max}} \quad (1)$$

Για Νευτωνικά ρευστά σε στρωτή ροή ( $Re < 2100$ ):

$$u_{max} = 2 u_{avg} \quad (2)$$

Σε πλήρως αναπτυγμένη τυρβώδη ροή ( $Re > 8000$ ) ισχύει:

$$u_{avg}/u_{max} \geq 0,82 \quad (3)$$

Επομένως

$$u_{max} \leq 1,22 u_{avg} \quad (4)$$

Και αυτή η οριακή τιμή μπορεί να ληφθεί ως τιμή ασφαλείας. Το είδος της ροής στα μη Νευτωνικά ρευστά καθορίζεται από την τιμή του γενικευμένου αριθμού Reynolds:

$$Re = \frac{d^n v^{2-n} \rho}{K} \left( \frac{n}{1+3n} \right)^n 2^{3-n} \quad (5)$$

Για ψευδοπλαστικά υγρά ( $n < 1$ ), η διαφορά μεταξύ της μέγιστης και της μέσης ταχύτητας γίνεται μικρότερη καθώς το  $n$  μειώνεται. Με άλλα λόγια, το προφίλ ταχύτητας γίνεται πιο ομοιόμορφο. Ωστόσο, για τις περισσότερες περιπτώσεις, η μέγιστη ταχύτητα εμφανίζεται κοντά στο κέντρο του σωλήνα, που σημαίνει ότι ο ελάχιστος χρόνος παραμονής αντιστοιχεί στον χρόνο παραμονής των σωματιδίων που βρίσκονται κατά μήκος του κέντρου του σωλήνα. Αυτό είναι το σημείο που υπεισέρχεται η κατανομή χρόνου παραμονής των σωματιδίων (Residence Time Distribution-RTD). Για γίνει κατανοητή η κατανομή χρόνου παραμονής, εισάγεται η εξίσωση, η οποία περιγράφει το



προφίλ ταχύτητας ενός Νευτωνικού ρευστού υπό στρωτή ροή σε ένα σωλήνα κυκλικής διατομής:

$$u = 2u_{avg}\left[1 - \left(\frac{r^2}{R^2}\right)\right] \quad (6)$$

Έτσι, από την εξίσωση (6) μπορεί να φανεί ότι διαφορετικά σημεία του ρευστού μέσα στο σωλήνα (ακτινικά) παραμένουν διαφορετικό χρονικό διάστημα στο σωλήνα. Για παράδειγμα, ένα σωματίδιο που κινείται στο κέντρο του σωλήνα θα κινηθεί δύο φορές πιο γρήγορα σε σχέση με ένα που κινείται κοντά στο τοίχωμα του αγωγού όπως έχει διατυπωθεί και παραπάνω. Η κατανομή των χρόνων σε διάφορα σημεία εντός του σωλήνα αναφέρεται ως κατανομή χρόνου παραμονής (RTD) των σωματιδίων. Ομοίως, όταν διαφορετικά σωματίδια ρέουν μέσω ενός σωλήνα, παραμένουν διαφορετικούς χρόνους μέσα στο σωλήνα η κατανομή αυτών των χρόνων ονομάζεται κατανομή χρόνου παραμονής των σωματιδίων. Η κατανομή χρόνου παραμονής των σωματιδίων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την κατανομή χρόνου παραμονής του υγρού καθώς και από την ταχύτητα ροής και το ιξώδες του ρευστού, το μέγεθος, την πυκνότητα και την συγκέντρωση σωματιδίων μέσα στον αγωγό (Hui, 2006).

Η ανάλυση του RTD είναι σχετικά απλή όταν υπάρχει μόνο ένας τύπος σωματιδίων σε ένα σύστημα. Ωστόσο, όταν διαφορετικοί τύποι σωματιδίων (διαφορετικά μεγέθη σωματιδίων ή σωματίδια με διαφορετικές πυκνότητες) υπάρχουν σε ένα προϊόν, η συμπεριφορά του προϊόντος θα είναι αρκετά διαφορετική από όταν υπάρχει μόνο ένας τύπος σωματιδίων. Επομένως, πρέπει να γίνει ανάλυση για κάθε συνδυασμό τύπων σωματιδίων που υπάρχουν σε έναν αγωγό και δεν μπορούν να εξαχθούν άμεσα συμπεράσματα για την κατανομή του χρόνου παραμονής, όταν είναι γνωστό μόνο για ένα μέρος των σωματιδίων. Η ύπαρξη της κατανομής χρόνου παραμονής των σωματιδίων έχει ως αποτέλεσμα ορισμένα σωματίδια να λαμβάνουν περισσότερη θερμική επεξεργασία από άλλα στον ίδιο σωλήνα παραμονής. Από άποψη ασφάλειας, το ταχύτερο σωματίδιο είναι αυτό που προκαλεί πρόβλημα από την σκοπιά της ασφάλειας και γι' αυτό τον λόγο, το μήκος του σωλήνα παραμονής σχεδιάζεται με βάση το σωματίδιο με τον μικρότερο χρόνο παραμονής.

Όταν η κατανομή του χρόνου παραμονής είναι μικρή η ποιότητα του τελικού προϊόντος θα είναι καλύτερη καθώς η διαφορά του χρόνου παραμονής του ταχύτερου με

το λιγότερο ταχύ σωματίδιο θα είναι η μικρότερη δυνατή ενώ αν ισχύει το αντίθετο το πρόβλημα της κατανομής του χρόνου παραμονής γίνεται πιο δύσκολο λόγω της μεγάλης διαφορετικότητας στο μέγεθος των σωματιδίων στο σωλήνα παραμονής. Μία από τις τεχνικές που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιορίσει το RTD του υγρού και των σωματιδίων είναι η χρήση ελικοειδών σωλήνων (Hui, 2006).

Όταν ρέει ένα μη Νευτωνικό μέσω ενός ευθύγραμμου σωλήνα υπό συνθήκες στρωτής ροής, το προφίλ ταχύτητας δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση (Hui, 2006):

$$u = u_{avg} \left( \frac{1+3n}{1+n} \right) \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right] \quad (7)$$

Για ψευδοπλαστικά ρευστά η μέγιστη ταχύτητα βρίσκεται από την παρακάτω σχέση

$$u_{max} = u_{avg} \left( \frac{1+3n}{1+n} \right) \quad (8)$$

Από την τελευταία σχέση μπορεί να φανεί ότι η μέγιστη ταχύτητα στο περίπτωση του ψευδοπλαστικού υγρού ( $n < 1$ ) είναι μικρότερη από το διπλάσιο της μέσης ταχύτητας του ρευστού. Έτσι για τα ψευδοπλαστικά ρευστά, στα οποία ανήκουν τα περισσότερα τρόφιμα, προκύπτει από παραπάνω ότι:

$$u_{max} < 2u_{avg} \quad (9)$$

Έτσι, το RTD του ρευστού είναι μικρότερο για ένα ψευδοπλαστικό ρευστό σε σύγκριση με ένα Νευτωνικό ρευστό. Επίσης, το RTD των σωματιδίων είναι επίσης μικρότερο όταν το μέσο είναι ένα ψευδοπλαστικό ρευστό. Τέλος για τυρβώδη ροή όλα τα μη Νευτωνικά ρευστά εμφανίζουν  $u_{max} < 2u_{avg}$ .

Οι περισσότερες μελέτες σχετικά με την κατανομή χρόνου παραμονής έχουν επικεντρωθεί στην οπτικοποίηση ή ανίχνευση ροής σωματιδίων είτε εντός είτε στην είσοδο και στην έξοδο του σωλήνα παραμονής της ασηπτικής επεξεργασίας. Οι Alhamdan και Sastry (1997), Salengke και Sastry (1995, 1996), Dutta και Sastry (1990a, 1990b), McCoy *et al.* (1987) και οι Sancho και Rao (1991) μελέτησαν με τους παραπάνω τρόπους την κατανομή χρόνου παραμονής τροφίμων με σωματίδια μέσα σε σωλήνα παραμονής. Οι Segner *et al.* (1989) εισήγαγαν ένα μικρό κομμάτι μαγνήτη στο γεωμετρικό κέντρο ενός κύβου σε σάλτσας αμύλου που ρέει σε σωλήνα παραμονής σε ένα εμπορικό σύστημα

ασηπτικής επεξεργασίας ενώ αντίστοιχη δημοσίευση είχαν και οι Chandarana και Unverferth (1996) με μαγνήτες μέσα σε σωματίδια σε σύστημα υγρού-στερεού τρόφιμου.

Ωστόσο, ο κύριος περιορισμός στις τελευταίες δημοσιεύσεις ήταν η αδυναμία διάκρισης μεταξύ πολλαπλών σωματιδίων όταν διέρχονται από τον ανιχνευτή ταυτόχρονα. Αυτό επιλύθηκε από τους Sastry και Cornelius (2002) όταν εισήγαγαν ένα σωματίδιο την φορά στο σύστημα ασηπτικής διεργασίας πριν εισάγουν το επόμενο. Οι πιο πρόσφατες δημοσιεύσεις αφορούν την τέχνη του RFID (Radio-Frequency Identification), όπου είναι δυνατή η παρακολούθηση πολλαπλών σωματιδίων και θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση του RTD των σωματιδίων με ωμικό θερμαντήρα σε μια διαδικασία συνεχούς αποστείρωσης. Ο Tulsian *et al.* (2009) χρησιμοποίησαν μεθοδολογία RFID για τον προσδιορισμό του RTD των κύβων κοτόπουλου σε ωμικό σύστημα θέρμανσης.

### 1.3.2 Κινητική της μικροβιακής καταστροφής

Κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας μικροβιακά κύτταρα, σπόρια μικροοργανισμών και ένζυμα καταστρέφονται, έτσι ώστε το παραγόμενο προϊόν να είναι μικροβιολογικά και ενζυμικά σταθερό για μεγάλο χρονικό διάστημα. Επίσης ταυτόχρονα με τη θερμική καταστροφή επιβλαβών μικροβίων και ενζύμων καταστρέφονται θρεπτικά συστατικά και ευαίσθητα ποιοτικά χαρακτηριστικά του τρόφιμου. Η αντίσταση των μικροοργανισμών στην θερμότητα επηρεάζεται από αρκετούς παράγοντες. Μερικοί από αυτούς τους παράγοντες περιλαμβάνουν την ενεργότητα του νερού, το pH, την ιοντική ισχύ, το επίπεδο του οξυγόνου, τα οργανικά οξέα και τα αντιβιοτικά. Η πιο γενική εξίσωση που αντιπροσωπεύει την κινητική της μικροβιακής απενεργοποίησης, την ενζυμική απενεργοποίηση και την καταστροφή θρεπτικών ουσιών είναι η ακόλουθη:

$$-\frac{dc}{dt} = k_n c^n \quad (10)$$

Κατά κύριο λόγο η ποσοτική μείωση όλων των παραπάνω χαρακτηριστικών ακολουθεί κινητική πρώτης τάξεως όποτε ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$-\frac{dc}{dt} = k c \quad (11)$$

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

$$-\int_{c_0}^c \frac{dc}{c} = k \int_{t_0}^t dt \Rightarrow -\ln c + \ln c_0 = kt - t_0 \quad (12)$$

$$\Rightarrow \log c / \log c_0 = -\frac{kt}{2,303} \quad (13)$$

$$\text{Άρα } D = \frac{2,303}{k} \quad (14)$$

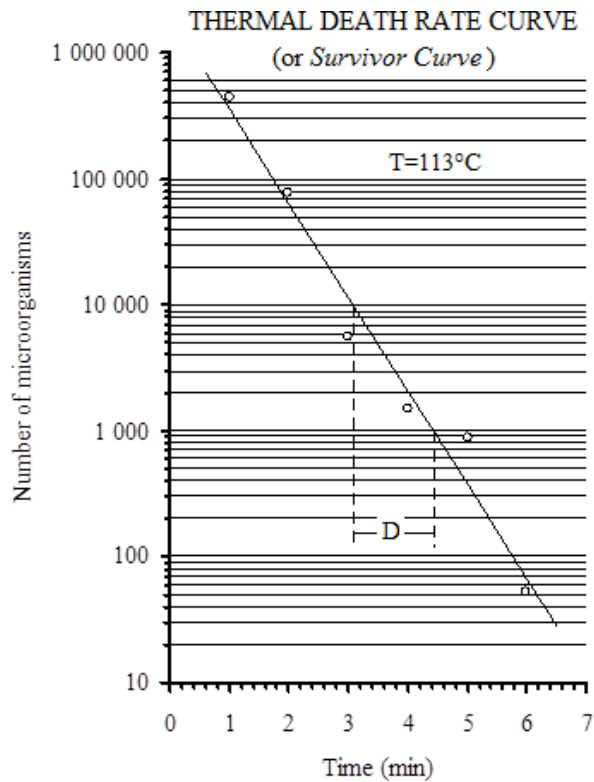
Ή αλλιώς η τιμή D ορίζεται ως ο χρόνος σε σταθερή θερμοκρασία, T, που απαιτείται για την καταστροφή του 90% του αρχικού φορτίου των μικροοργανισμών ή να το μειώσει κατά ένα λογαριθμικό κύκλο σε σχέση με την αρχική του τιμή (Σχήμα 5). Δηλαδή:

$$D = \frac{t_2 - t_1}{\log(A) - \log(B)} \quad (15)$$

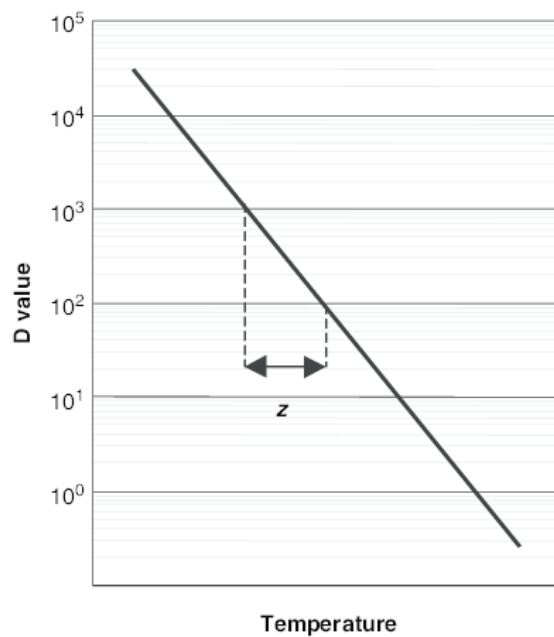
Η θερμική ευαισθησία (τιμή z) που αναπαριστά την μεταβολή της θερμοκρασίας που επιφέρει δεκαπλάσια μεταβολή της τιμής D, εκφράζεται μαθηματικά ως:

$$z = \frac{T_1 - T_2}{\log(D_1) - \log(D_2)} \quad (16)$$

όπου D<sub>1</sub> και D<sub>2</sub> οι τιμές D στις αντίστοιχες θερμοκρασίες T<sub>1</sub> και T<sub>2</sub>. Αυτή η σχέση αποδίδεται στο Σχήμα 6.



Σχήμα 5. Καμπύλη ρυθμού θερμικής καταστροφής (Stoforos & Taoukis 2004).



Σχήμα 6. Φαινομενική καμπύλη χρόνου θερμικής καταστροφής

Η τιμή D μαζί με την τιμή z, είναι τα χαρακτηριστικά θερμο-ανθεκτικότητας ενός μικροοργανισμού και χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό κάθε θερμικής επεξεργασίας

(Karel and Lund, 2003).

### 1.3.3 Υπολογισμός θνησιμότητας θερμικών διεργασιών

Τα εκτιμώμενα δεδομένα κινητικής απενεργοποίησης (χρησιμοποιώντας την κλασσική εξίσωση πρώτης τάξης) συνδέονται με το χρονοθερμοκρασιακό προφίλ σε ένα προκαθορισμένο σημείο (κρίσιμο σημείο) μέσα στο προϊόν για την αξιολόγηση της διεργασίας ή αλλιώς την καταστροφικότητα της διεργασίας (τιμή  $F$ ), κάτι που αποτελεί την βάση μιας αξιόπιστης θερμικής διεργασίας (Ball and Olson, 1957) (εξίσωση (17)).

Η τιμή  $F$  δεδομένης θερμικής επεξεργασίας ορίζεται ως ο ισοδύναμος χρόνος κατεργασίας σε μία σταθερή θερμοκρασία αναφοράς μίας υποθετικής ισοθερμικής επεξεργασίας που παράγει το ίδιο αποτέλεσμα (όσο αφορά την καταστροφή των ίδιων παραγόντων αλλοίωσης ή ποιοτικών χαρακτηριστικών) με την δεδομένη θερμική επεξεργασία (Στοφόρος, 2014).

$$F_{T_{ref}}^z = \int_0^t 10^{(T(t)-T_{ref})/z} dt \quad (17)$$

Το δεξιό σκέλος της παραπάνω εξίσωσης δίνει την δυνατότητα υπολογισμού της τιμής  $F$  χρησιμοποιώντας δεδομένα σχετικά με το χρόνο και την θερμοκρασία στην οποία υποβλήθηκε το προϊόν κατά την επεξεργασία. Η τιμή  $F$  αναφέρεται σε συγκεκριμένο σημείο μέσα στο προϊόν για το οποίο τα δεδομένα θερμοκρασίας χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του ολοκληρώματος της εξίσωσης (17). Όταν υπάρχει κατανομή θερμοκρασίας στο προϊόν τότε κάθε σημείο μέσα στο προϊόν θα χαρακτηρίζεται από μια ξεχωριστή τιμή  $F$ . Το σημείο στο προϊόν που δέχεται την μικρότερη επίδραση θερμότητας κατά την διάρκεια της διεργασίας ονομάζεται κρίσιμο σημείο.

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

αποστείρωση είναι να εξασφαλιστεί ότι ο λόγος της τιμής  $F$  της διεργασίας προς την απαιτούμενη τιμή  $F$  να είναι τουλάχιστον ίσος με μονάδα δηλαδή:

$$\frac{F_{process}}{F_{required}} \geq 1. \quad (18)$$

Η Υπηρεσία Τροφίμων και Φαρμάκων (FDA) δέχθηκε ασηπτικές θερμικές διεργασίες με βάση τη θνησιμότητα που συσσωρεύεται στο σωλήνα παραμονής (holding tube) σε ισοθερμοκρασιακές συνθήκες, ενώ θεωρούσε τη θερμική καταστροφή που προκαλείται κατά τη θέρμανση και την ψύξη ως παράγοντα ασφαλείας. Έτσι λοιπόν, η θνησιμότητα στα τμήματα θέρμανσης και ψύξης, σύμφωνα με το FDA, θεωρείται μηδενική.

Ως χρόνος κατεργασίας θεωρείται ο ελάχιστος χρόνος παραμονής ( $t_{min}$ ) στον σωλήνα παραμονής και στον εναλλάκτη όπου ψύχεται το προϊόν έτσι ώστε να υπάρχει η απαιτούμενη τιμή  $F$  ή αλλιώς η απαιτούμενη τιμή  $F$  μπορεί να υπολογιστεί με βάση την γνώση αυτού του ελάχιστου χρόνου παραμονής. Κατά συνέπεια, το μήκος του σωλήνα παραμονής, που απαιτείται για την επίτευξη της απαιτούμενης τιμής  $F$ , παίζει πολύ βασικό ρόλο στο σχεδιασμό της θερμικής διεργασίας.

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικοί συνδυασμοί χρόνου-θερμοκρασίας θέρμανσης και διαφορετικές μέθοδοι επεξεργασίας, συστήματα και τεχνικές για να επιτευχθεί η απαιτούμενη τιμή  $F$ . Κάθε σύστημα θα επηρέαζε σε διαφορετικό βαθμό την ποιότητα του τελικού προϊόντος. Το χρονοθερμοκρασιακό προφίλ ενός προϊόντος το οποίο δέχεται θερμική διεργασία θα εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες που περιλαμβάνουν αλλά δεν περιορίζονται στους: 1) σύστημα επεξεργασίας, όπως συμβατικό (στατικά ή περιστρεφόμενα αυτόκλειστα) ή ασηπτικό, 2) το μέσο θέρμανσης ή ψύξης (ατμός, εμβάπτιση σε νερό, καταιονισμός νερού, ή μίξη ατμού/αέρα), 3) τα χαρακτηριστικά του προϊόντος όπως σύσταση, λόγος στερεού/υγρού, και θερμοφυσικές ιδιότητες, 4) η αρχική θερμοκρασία του προϊόντος και του μέσου θέρμανσης/ψύξης και 5) ο τύπος, το σχήμα και το μέγεθος του περιέκτη.

Για την ασηπτική επεξεργασία ετερογενών τροφίμων (μίγματα υγρού και σωματιδίων) έχει γίνει αρκετή έρευνα και έχουν διατυπωθεί ορισμένα μοντέλα για την πρόβλεψη της θερμοκρασίας του υγρού και των σωματιδίων. Οι τιμές  $F$  που προκύπτουν για το υγρό και τα σωματίδια έχουν διαφορά μεταξύ τους, η οποία αυξάνει όσο αυξάνει το μέγεθος των σωματιδίων. Αυτό σημαίνει ότι για τρόφιμα με σχετικά μεγάλα στερεά κομμάτια η ασηπτική διεργασία οδηγεί σε υπερθέρμανση του υγρού ή ανεπαρκή θερμική κατεργασία των στερεών.

Στην ασηπτική επεξεργασία συνηθισμένες θερμοκρασίες αναφοράς ( $T_{ref}$ ) 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

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι για θερμοκρασία αναφοράς τους 250 °F (121,111°C) και με το  $z$  να ισούται με 18°F (10°C) το  $F$  αναφέρεται ως  $F_o$  για τον μικροβιολογικό στόχο *Clostridium botulinum*. Σε αυτήν την περίπτωση η τιμή του  $F$  πρέπει να λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες των 6 min (Holdsworth, 2004).

#### 1.3.4 Επίδραση της θερμικής επεξεργασίας στα ποιοτικά χαρακτηριστικά

Κατά τη θερμική διεργασία μαζί με την καταστροφή των μικροοργανισμών υφίσταται και υποβάθμιση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του προϊόντος. Οι παράγοντες οι οποίοι επιταχύνουν ή αναστέλλουν τη μικροβιακή καταστροφή με τη θερμότητα, επηρεάζουν επίσης και την καταστροφή των θρεπτικών συστατικών.

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

$$C_{T_{ref}}^z = \int_0^t 10^{(T(t)-T_{ref})/z} dt \quad (19)$$

Η αξιολόγηση της ποιοτικής υποβάθμισης μπορεί να εκφραστεί καλύτερα, μέσω της έκφρασης που δίνει την % διατήρηση ποιοτικού παράγοντα ( $C/C_o$ ) και γράφεται ως εξής:



$$\% \text{ διατήρηση} = \frac{C}{C_o} \times 100 = 10^{\frac{C_{T_{ref}}}{D_{T_{ref}}}} \times 100 \quad (20)$$

Η μέση διατήρηση ενός ποιοτικού παράγοντα για έναν όγκο τροφίμου δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\frac{C}{C_o} = \frac{1}{V} \int_0^V 10^{\frac{-1}{D_{T_{ref}}} \int_0^t 10^{\frac{T-T_{ref}}{z}} dt} dV \quad (21)$$

### 1.3.5 Μεταφορά θερμότητας

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

Η θερμότητα μεταδίδεται από και προς τα τρόφιμα με τρεις διαφορετικούς τρόπους, οι οποίοι είναι αγωγή (conduction), συναγωγή (convection) και ακτινοβολία (radiation). Σε προβλήματα που αφορούν τη μεταφορά θερμότητας, συχνά υπάρχουν συνθήκες σταθερής (steady state) και μη σταθερής κατάστασης (unsteady state). Στις συνθήκες σταθερής κατάστασης ο χρόνος δεν επηρεάζει την κατανομή θερμοκρασίας εντός ενός αντικειμένου, αν και η θερμοκρασία μπορεί να είναι διαφορετική σε διαφορετικές θέσεις εντός του αντικειμένου. Σε συνθήκες μη σταθερής κατάστασης, η θερμοκρασία αλλάζει ανάλογα με τον χρόνο (Singh and Heldman, 2009).

Στην περίπτωση της ασηπτικής επεξεργασίας η θερμότητα μεταφέρεται από το μέσο θέρμανσης (ατμός ή νερό) στο προϊόν με τη βοήθεια ενός εναλλάκτη θερμότητας. Για υγρά τρόφιμα ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας του προϊόντος εξαρτάται από το συνολικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του μέσου θέρμανσης και του προϊόντος. Για τρόφιμα που περιέχουν σωματίδια (particulate foods), υπάρχει ένας πρόσθετος παράγοντας: η θερμότητα από το ρευστό προϊόν πρέπει να μεταφερθεί και στα σωματίδια. Αυτό επηρεάζεται από τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μεταξύ των σωματιδίων και του ρευστού και επίσης τη θερμική αγωγιμότητα εντός των σωματιδίων.

#### 1.3.5.1 Μεταφορά θερμότητας με αγωγή σε σταθερή κατάσταση

Η επαφή μεταξύ δύο στερεών σωμάτων διαφορετικής θερμοκρασίας προκαλεί τη μεταφορά θερμότητας από το θερμό προς το ψυχρό σώμα και η μεταφορά αυτή της θερμικής ενέργειας καλείται αγωγή. Η αγωγή περιγράφεται από το νόμο του Fourier και απεικονίζεται από την εξίσωση (22):

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (22)$$

#### 1.3.5.2 Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή

Η ροή ενός ρευστού πάνω σε επιφάνεια στερεού διαφορετικής θερμοκρασίας προκαλεί τη μεταφορά θερμότητας από το θερμό ρευστό προς την ψυχρή επιφάνεια ή και αντίστροφα, δηλαδή από τη θερμή επιφάνεια προς το ψυχρό ρευστό. Η μαθηματική περιγραφή της ροής θερμότητας φαίνεται από την εξίσωση (23):

$$q = hA(T_s - T_\infty) \quad (23)$$

Η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή χωρίζεται σε ελεύθερη (natural convection) ή εξαναγκασμένη (forced convection). Στην εξαναγκασμένη κίνηση το ρευστό κινείται στην επιφάνεια του στερεού λόγω της διαφοράς πίεσης μεταξύ του αρχικού και του τελικού σημείου της ροής, η οποία διαφορά πίεσης είναι αποτέλεσμα εξωτερικού παράγοντα (π.χ. φυσστήρας). Από την εξίσωση (23) ορίζεται το μέγεθος του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας  $h$ , μέγεθος το οποίο περιγράφει ποσοτικά την ταχύτητα με την οποία μεταφέρεται η θερμότητα. Ο υπολογισμός του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας γίνεται μέσω του αριθμού Nusselt, όπως φαίνεται στην εξίσωση (24):

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (24)$$

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

$$Nu = f(Re, Pr, Gr) \quad (25)$$

#### 1.3.5.3 Μεταφορά θερμότητας με αγωγή σε μη σταθερή κατάσταση

Στις περισσότερες περιπτώσεις θερμικών διεργασιών η μετάδοση θερμότητας γίνεται

σε μη σταθερή κατάσταση. Η μαθηματική αποτύπωση της μεταβολής της θερμοκρασίας σε σχέση με την απόσταση και το χρόνο φαίνεται στην εξίσωση (26):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T \quad (26)$$

1.3.5.4 *Μεταφορά θερμότητας κατά την ασηπτική διεργασία (εναλλάκτης θερμότητας, σωλήνας παραμονής, τμήμα ψύξης)*

✓ Εναλλάκτης θερμότητας

Με τη βοήθεια ενός εναλλάκτη που συνήθως είναι ένας εναλλάκτης αποξεόμενης επιφάνειας (SSHE) ο ατμός χάνει ενέργεια και την προσδίδει στο ρευστό το οποίο τη δίνει με τη σειρά του στα σωματίδια. Το ισοζύγιο ενέργειας στον εναλλάκτη είναι το ακόλουθο (Chandarana and Gavin, 1989):

$$U_{he} A_{he} (T_s - T_f) = m_f c_{pf} (T_f(t) - T_f) + h_p A_p N_p (T_f - T_{pm}(t)) \quad (27)$$

✓ Σωλήνας παραμονής

Στο σωλήνα παραμονής το ρευστό με τα σωματίδια το υγρό και τα σωματίδια χάνουν στο περιβάλλον ένα τμήμα της ενέργειάς τους άρα ισχύει:

$$U_{ht} A_{ht} (T_f - T_e) = m_f c_{pf} (T_f(t) - T_f) - h_p A_p N_p (T_f - T_{pm}(t)) \quad (28)$$

✓ Τμήμα ψύξης

Στο τμήμα ψύξης με τη βοήθεια ενός εναλλάκτη το προϊόν ψύχεται, χάνει ενέργεια και την προσδίδει στο ψυκτικό υγρό. Το ολικό ισοζύγιο ενέργειας στον εναλλάκτη έχει ως εξής:

$$U_c A_c (T_f - T_w) = m_f c_{pf} (T_f(t) - T_f) + h_p A_p N_p (T_f - T_{pm}(t)) \quad (29)$$

✓ Μεταφορά θερμότητας στο σωματίδιο

Η εξίσωση της μεταφοράς θερμότητας για κινούμενα σωματίδια που θερμαίνονται δίνεται από τον παρακάτω τύπο (Ibrahim *et al.*, 2019):

$$\rho_p c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (k_p \nabla T) \quad (30)$$

Για την επίλυση της παραπάνω εξίσωσης πρέπει να είναι γνωστές οι οριακές συνθήκες (Ibrahim *et al.*, 2019):

$$\nabla(k_p \partial T) \cdot \mathbf{n} = h_{fp}(T_{surf} - T_f(t)) \quad (31)$$

### 1.3.6 Μαθηματική μοντελοποίηση

Οι De Ruyter και Brunet (1973) ανέπτυξαν ένα μοντέλο για προϊόν που περιέχει σφαιρικά σωματίδια που υποβάλλονται σε ασηπτική επεξεργασία σε ένα σύστημα με εναλλάκτη αποξεόμενης επιφάνειας. Στο μοντέλο εφαρμόστηκε μια αναλυτική λύση με τη βοήθεια μερικών διαφορικών εξισώσεων για τη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή στο σωματίδιο όπου υπέθεσαν άπειρο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στην διεπιφάνεια ρευστού-σωματιδίων και ίδια θερμοκρασία του υγρού με την επιφάνεια του σωματιδίου ενώ υπήρχε ένα γραμμικό προφίλ των θερμοκρασιών του προϊόντος μεταξύ εισόδου και εξόδου του εναλλάκτη. Ωστόσο, το μοντέλο δεν διευκρίνισε την κατανομή χρόνου σωματιδίων ή την ταχύτητα στο σύστημα, που είναι ιδιαίτερα σημαντικό όταν υπάρχει στρωτή ροή στους αγωγούς.

Οι Manson και ο Cullen (1974) ανέπτυξαν ένα μοντέλο για κυλινδρικά σωματίδια σε σύστημα ασηπτικής επεξεργασίας με εναλλάκτη αποξεόμενης επιφάνειας και εφάρμοσαν τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών με ένα γραμμικά αυξανόμενο προφίλ θερμοκρασίας μεταξύ της εισόδου και εξόδου στον εναλλάκτη και υπέθεσαν ένα άπειρο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας. Ο Sastry (1986) χρησιμοποίησε τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών για να μοντελοποιήσει τη διαδικασία συνεχούς αποστείρωσης σε τρόφιμα χαμηλής οξύτητας που περιέχουν σωματίδια για σύστημα εναλλακτών θερμότητας αποξεόμενης επιφάνειας με την υπόθεση ότι το σωματίδιο κινείται με την ίδια ταχύτητα σε σχέση με το ρευστό. Τέλος, χρησιμοποιήθηκε το χειρότερο σενάριο για τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας ο οποίος αντιστοιχεί σε αριθμό  $Nu=2$ . Οι Chang και Toledo (1989) χρησιμοποίησαν επίσης μια μέθοδο πεπερασμένων διαφορών για να αξιολογήσουν την επίδραση της θερμοκρασίας σε κομμάτια γλυκοπατάτας σε νερό σε σύστημα με εναλλάκτη αποξεόμενης επιφάνειας. Η θερμοκρασία στο τμήμα θέρμανσης θεωρήθηκε ότι αυξάνεται εκθετικά. Οι ερευνητές έθεσαν τιμές του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας υγρού-σωματιδίου ( $239 \text{ W/m}^2\text{K}$  και  $303 \text{ W/m}^2\text{K}$ ), οι οποίες προσδιορίστηκαν πειραματικά.

Οι Sastry και Cornelius (2002) διατύπωσαν μια αναλυτική λύση για την επίλυση του ισοζυγίου ενέργειας στο ρευστό στο τμήμα θέρμανσης, στον σωλήνα παραμονής και στο τμήμα ψύξης και μία αναλυτική λύση για μονοδιάστατη μεταφορά θερμότητας με αγωγή σε σφαιρικά σωματίδια. Επίσης, έχει γίνει η παραδοχή ότι το υγρό αναμίχθηκε τέλεια στην ακτινική κατεύθυνση. Μέχρι στιγμής, οι προαναφερθείσες δημοσιεύσεις εφαρμόστηκαν

για σύστημα με εναλλάκτη θερμότητας αποξεόμενης επιφανείας, όπου με τις περιστρεφόμενες λεπίδες υπήρξε άριστη ανάμιξη των σωματιδίων μέσα στο μίγμα ρευστού-σωματιδίων. Γι' αυτό τον λόγο το υγρό αναμιγνυόταν τέλεια στην ακτινική διεύθυνση του εναλλάκτη.

Οι Sandeep *et al.* (1999) παρουσίασαν ένα μαθηματικό μοντέλο σε αυλωτό εναλλάκτη, όπου έγινε η παραδοχή ότι η θερμοκρασία του υγρού ήταν, κατά την ακτινική διεύθυνση, παντού ίδια. Έτσι χρησιμοποίησαν τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων για τον προσδιορισμό των προφίλ θερμοκρασίας σε σφαιρικά σωματίδια, καθώς τα σωματίδια κινούνται μέσω του πειραματικού εξοπλισμού της ασηπτικής επεξεργασίας. Η προσέγγιση ήταν παρόμοια με εκείνη του Sastry και Cornelius (2002). Τέλος ένα μαθηματικό μοντέλο γραμμένο στο υπολογιστικό περιβάλλον της Fortran από τους Stoforos και Sawada (2007) παρουσιάστηκε για τρόφιμα που περιέχουν σφαιρικά σωματίδια και διέρχονται μέσω ενός εναλλάκτη αποξεόμενης επιφάνειας. Σε αυτή την δημοσίευση παρουσιάστηκαν αναλυτικές λύσεις για τον προσδιορισμό των θερμοκρασιών στο ρευστό και στα σωματίδια καθώς θεωρήθηκε ότι υπήρξε αποτελεσματική ανάμιξη του ρευστού στην ακτινική κατεύθυνση άρα η θερμοκρασία του ρευστού ήταν παντού η ίδια ακτινικά και ότι τα σωματίδια είχαν την ίδια μέση ταχύτητα παντού.

## **1.4 Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (Computational Fluid Dynamics)**

### **1.4.1 Εισαγωγή**

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

Η αυξανόμενη χρήση της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής τα τελευταία χρόνια ήταν αναπόφευκτη καθώς τα υψηλά κόστη και η κατανάλωση σε χρόνο και ενέργεια που σχετίζονται με τις πειραματικές διεργασίες, συχνά εμποδίζουν την παραγωγή ικανών και εις βάθος αποτελεσμάτων (Norton *et al.*, 2007). Επιπλέον, οι σχετικές θεωρητικές υποθέσεις, οι γενικεύσεις και οι προσεγγίσεις αποτέλεσαν περιοριστικούς παράγοντες για τα μοντέλα που χρησιμοποιούν αναλυτικές μεθόδους, για την παραγωγή λύσεων σε

προβλήματα ροής. Προσθέτοντας σε αυτούς τους περιορισμούς και την πρόοδο στη χρήση αριθμητικών λύσεων για τις εξισώσεις Navier-Stokes και την ενίσχυση της απόδοσης και δύναμης των ηλεκτρονικών υπολογιστών, γίνεται εύκολα κατανοητό γιατί η εφαρμογή της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής έχει εξελιχθεί σε μια βιώσιμη εναλλακτική λύση στη βιομηχανία τροφίμων και όχι μόνο.

Η διασύνδεση που υπάρχει μεταξύ Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής και της βιομηχανίας τροφίμων και ποτών είναι βαθιά, και γίνεται μέσα από διεργασίες όπως η ανάμιξη, η ζήρανση, η παστερίωση, η αποστείρωση, η ψύξη, και η κατάψυξη. Τέτοιες διεργασίες χρησιμοποιούνται σταθερά στη βιομηχανία τροφίμων για την ενίσχυση της ποιότητας, της ασφάλειας και της διάρκειας ζωής των τροφίμων και εξελίσσονται για να γίνουν πιο αποτελεσματικές. Η εφαρμογή της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής από τους μηχανικούς τροφίμων ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του 90, κυρίως λόγω της μεγάλης βελτίωσης των υπολογιστικών συστημάτων και των λογισμικών προγραμμάτων Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής.

Πλέον το CFD έχει αναγνωριστεί ως ένα τμήμα της υπολογιστικά βοηθούμενης μηχανικής (Computer-Aided Engineering, CAE). Πιο πρόσφατα, η χρήση των CFDs αυξήθηκε σε σημαντικό βαθμό, και πάλι λόγω της συνεχούς αύξησης της μέσης διαθέσιμης υπολογιστικής ισχύος, αλλά και την ανάγκη για τεχνικές λεπτομερούς προσέγγισης προβλημάτων ροής ρευστών. Στις μέρες μας πλέον, τα υπολογιστικά αυτά εργαλεία έχουν βελτιωθεί κατά πολύ προσφέροντας σπουδαίες δυνατότητας ευελιξίας από πρόβλημα σε πρόβλημα ενσωματώνοντας ποικίλα μοντέλα για την περιγραφή ανεξάρτητων μεταξύ τους φαινομένων που μπορεί όμως να συμμετέχουν σε ένα φυσικό πρόβλημα (όπως π.χ. σε ένα πρόβλημα καύσης αερίου όπου διεξάγονται διεργασίες μεταφοράς μάζας, ενέργειας, ορμής και ακτινοβολίας, τυρβώδης ανάμιξη και χημική αντίδραση παράλληλα). Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τις εξαιρετικές δυνατότητες οπτικοποίησης που παρέχουν, τα καθιστούν ιδιαίτερα περιζήτητα στην επίλυση προβλημάτων σε διάφορους τομείς όπως η μηχανική, το περιβάλλον και η αεροναυπηγική,. Βέβαια, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να τονιστεί ότι για την αξιοποίηση ενός κώδικα σε ένα συγκεκριμένο πεδίο εφαρμογής, χρειάζεται πρώτα απ' όλα η επιβεβαίωσή του με πειραματικά αποτελέσματα, ώστε να επιβεβαιωθεί η αποτελεσματικότητα του εκάστοτε προτύπου (μοντέλου) που προτείνεται.

Αυτή η διαρκής εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών και λογισμικού συστήματος οδήγησε σε μια εκθετική, μέχρι σήμερα, αύξηση στη δημοσίευση άρθρων και μελετών που σχετίζονται με εφαρμογές της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής στη βιομηχανία τροφίμων (Norton *et al.*, 2007).

### **1.4.2 Εφαρμογές της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής**

Η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική έχει χρησιμοποιηθεί σε ένα πλήθος βιομηχανικών ή άλλων εφαρμογών, μερικές από τις οποίες είναι: στην κατασκευή πλοίων και αεροσκαφών, στην κατασκευή οχημάτων (αυτοκίνητα, μεταφορικά μέσα, στρατιωτικά οχήματα κ.α.), σε μελέτες για περιβαλλοντικούς σκοπούς (κατασκευή ανεμογεννητριών, γεωθερμία κ.α.), στην κατασκευή μεγάλων έργων (φράγματα, γέφυρες, κανάλια νερού, τούνελ κ.α.), στην βιοϊατρική (προσομοιώσεις ροής αίματος και αέρα στην καρδιά – αγγεία και τους πνεύμονες), σε μελέτες ρύπανσης του υπεδάφους, άντλησης υγρών καυσίμων και φυσικού αερίου, στη χημική βιομηχανία, σε μελέτες για βιολογικούς καθαρισμούς και σε διάφορους άλλους τομείς (Xia and Sun, 2002).

Ο συνδυασμός κρίκος μεταξύ της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής και της βιομηχανίας των τροφίμων είναι διεργασίες όπως η ανάμιξη και η ανάδευση, η ξήρανση, το μαγείρεμα, η παστερίωση και η αποστείρωση, η κατάψυξη και η συντήρηση υπό ψύξη. Όλες αυτές οι διεργασίες στόχο έχουν τη διασφάλιση της ποιότητας και της ασφάλειας των τροφίμων καθώς και την αύξηση του χρόνου ζωής τους και διέπονται από φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας ή και μάζας και συνεπώς εμπίπτουν στο πεδίο εφαρμογών της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Σήμερα το CFD βρίσκει ευρεία εφαρμογή σε θέματα σχεδιασμού και βελτιστοποίησης μηχανολογικού εξοπλισμού βιομηχανιών τροφίμων αλλά και μεθόδων επεξεργασίας των τροφίμων (Norton and Sun, 2006, Sun, 2018).

### **1.4.3 Εφαρμογές της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής στην βιομηχανία τροφίμων**

Γενικά, οι εφαρμογές της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής στην βιομηχανία τροφίμων μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: α) οι εφαρμογές σε πεδία ροής και β) οι εφαρμογές με συνδυασμό πεδίου ροής και μεταφοράς θερμότητας ή/και μάζας (Norton *et al.*, 2007). Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τις απλούστερες εφαρμογές καθώς η προσομοίωση των πεδίων ροής δεν απαιτεί την επίλυση εξισώσεων που αφορούν τη μεταφορά θερμότητας και μάζας. Αναφορικά, τέτοιες εφαρμογές περιλαμβάνουν τη μοντελοποίηση συστημάτων εξαερισμού στις βιομηχανίες τροφίμων για τον περιορισμό του κινδύνου από αερόβιους μικροοργανισμούς, τη μοντελοποίηση του πεδίου ροής σε περιστρεφόμενες δεξαμενές και σε ακίνητους αναμίκτες (Norton *et al.*, 2007). Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει την προσομοίωση πιο πολύπλοκων διεργασιών όπως ψήσιμο, ξήρανση, εμπορική αποστείρωση, παστερίωση, εναλλάκτες θερμότητας, ψύξη και

κατάψυξη. Από αυτές ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον, τα τελευταία χρόνια παρουσιάζουν οι τρεις πρώτες (Yanniotis and Stoforos, 2014).

Πιο συγκεκριμένα στην ασηπτική επεξεργασία, αυτό που έχει σημασία είναι ο εντοπισμός του κρίσιμου σημείου, το σημείο στο κατάλληλο σωματίδια το οποίο δέχεται τη λιγότερη θερμότητα, και να εξασφαλιστεί ότι το ο χρόνος θέρμανσης για αυτό το σημείο θα είναι αρκετός για να επιφέρει την απαιτούμενη καταστροφή των μικροοργανισμών. Διάφορες μελέτες έχουν δημοσιευτεί μεταξύ της δεκαετίας του 1970 και του 2020 για τη μοντελοποίηση της συνεχούς αποστείρωσης τροφίμων που αποτελούνται από δύο φάσεις (ρευστό-σωματίδια).

#### **1.4.4 Πλεονεκτήματα της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής**

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

- Είναι φθηνότερη και πιο γρήγορη στη διεξαγωγή σε σχέση με κάποιο πείραμα. Η διεξαγωγή ενός πειράματος είναι μια χρονοβόρα διαδικασία καθώς επίσης και ακριβή πολλές φορές. Μια ανάλυση CFD είναι πιο γρήγορη στη διεξαγωγή της, από την συντέλεση ενός πραγματικού πειράματος, μιας και η προσομοίωση του, αλλά και οι υπολογισμοί, πραγματοποιούνται σε πιο σύντομο χρονικό διάστημα.
- Παρέχει μια λεπτομερή κατανόηση της κατανομής της ροής, των φαινομένων μεταφοράς μάζας και θερμότητας, κτλ. Έτσι, όλα αυτά δίνουν στους υπεύθυνους των εργοστασίων τη δυνατότητα να έχουν μια πολύ καλύτερη εικόνα και βαθύτερη κατανόηση των φαινομένων που συντελούνται σε μια συγκεκριμένη διεργασία ή κατά τη λειτουργία ενός συστήματος.
- Πραγματοποιείται σε πραγματική κλίμακα, χωρίς περιορισμούς. Οι αναλύσεις υπολογιστικής ρευστομηχανικής έχουν την δυνατότητα προσομοίωσης πραγματικών συνθηκών και σε πραγματική κλίμακα και αφορούν εφαρμογές, οι οποίες σε καμία περίπτωση δεν θα μπορούσαν να μελετηθούν με πειραματική διαδικασία. Έτσι λοιπόν, αμέτρητες εφαρμογές που στην πράξη θα ήταν πολύ δύσκολο και σε αρκετές περιπτώσεις αδύνατο να μελετηθούν, πλέον με την βοήθεια του CFD, η μελέτη τους καθίσταται δυνατή.



- Δίνει πληροφορίες για κάθε σημείο ενός χώρου και όχι μόνο σε μεμονωμένα σημεία Ένα ακόμη πλεονέκτημα του CFD είναι ότι, ενώ με ένα πείραμα τα αποτελέσματα που παίρνουμε είναι περιορισμένα, δηλαδή το εύρος του συστήματος προς ανάλυση είναι περιορισμένο, τα αποτελέσματα που μας δίνει το CFD αναφέρονται σαφώς σε ευρύτερο πεδίο του συστήματος, γεγονός που επιτυγχάνεται με τη δημιουργία του πλέγματος και με την πυκνότητα του. Το γεγονός αυτό επιτρέπει μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματά.
- Παρέχει τη δυνατότητα να μειωθούν προβλήματα που προκύπτουν από τη μεταφορά σε βιομηχανική κλίμακα συμπερασμάτων που έχουν προκύψει σε εργαστηριακή κλίμακα, διότι τα μοντέλα βασίζονται σε θεμελιώδεις αρχές της φυσικής και είναι ανεξάρτητα κλίμακας.
- Είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στην προσομοίωση συνθηκών στις οποίες οι μετρήσεις με κλασσικές μεθόδους είναι αδύνατος να πραγματοποιηθούν ή είναι επικίνδυνο.
- Μπορεί να βρει τη βασική αιτία κι όχι μόνο το αποτέλεσμα κατά τη αξιολόγηση των προβλημάτων δεδομένου ότι το CFD είναι εργαλείο λεπτομερούς ανάλυσης.

#### 1.4.5 Περιορισμοί του CFD

Ωστόσο, η τεχνολογία της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής δεν παύει να χαρακτηρίζεται και από αρκετούς σημαντικούς περιορισμούς. Καταρχάς, ως προς τα μαθηματικά μοντέλα τα οποία χρησιμοποιεί. Οι επιλύσεις των μοντέλων αυτών βασίζονται σε μοντέλα των πραγματικών φαινομένων, όπως μοντέλα τύρβης, πολυφασικής ροής ή ακόμα και χημικών αντιδράσεων. Έτσι, οι λύσεις που αποκτώνται από αυτά θα είναι τόσο ακριβείς όσο και τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται. Σε συνδυασμό με τα παραπάνω, το αριθμητικό σφάλμα επηρεάζει επίσης την ποιότητα της λύσης. Η επίλυση με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή αναπόφευκτα εισάγει σφάλμα. Η στρογγυλοποίηση εισάγει σφάλμα εξαιτίας της πεπερασμένης μνήμης αποθήκευσης των αριθμών, ενώ σφάλμα προκαλείται και λόγω της αποκοπής εξαιτίας της προσέγγισης κατά τη διακριτοποίηση των εξισώσεων (μετατροπή διαφορικών εξισώσεων σε αλγεβρικές). Το σφάλμα λόγω της στρογγυλοποίησης είναι σχεδόν αναπόφευκτο, ενώ το σφάλμα αποκοπής είναι δυνατόν να περιοριστεί στο ελάχιστο με την αυξημένη πυκνωση του υπολογιστικού πλέγματος ή με τη χρήση σχημάτων μεγαλύτερης ακρίβειας. Περιορισμοί, όμως, προκύπτουν και λόγω των οριακών συνθηκών. Όπως και με τα μαθηματικά μοντέλα έτσι και εδώ η ακρίβεια της λύσης είναι τόσο καλή όσο και οι αρχικές/οριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν. Η

ποιότητα των αρχικών/οριακών συνθηκών ουσιαστικά εκφράζεται μέσω της ρεαλιστικότητας με την οποία αυτές χρησιμοποιούνται.

#### **1.4.6 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 διασκή ροή και τις ιδιότητες ρευστών.

- **FLUENT® (ANSYS Inc.)**

Το FLUENT είναι ένα λογισμικό πεπερασμένων όγκων και η ANSYS αποτελεί σήμερα έναν από τους κορυφαίους προμηθευτές λογισμικών τόσο σε ιδιώτες όσο και σε βιομηχανίες. Περιλαμβάνει μοντέλα μεταφοράς θερμότητας, μοντέλα διακριτής φάσης για πολυφασικές ροές, μεγάλο αριθμό μοντέλων αντιδράσεων καθώς και μοντέλα αλλαγής φάσης. Το FLUENT είναι ένα πακέτο λογισμικού το οποίο είναι κατάλληλο για χρήση σε προβλήματα μηχανικής τροφίμων.

- **CFX® (ANSYS Inc.)**

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.

- PHOENICS® (CHAM Ltd.)

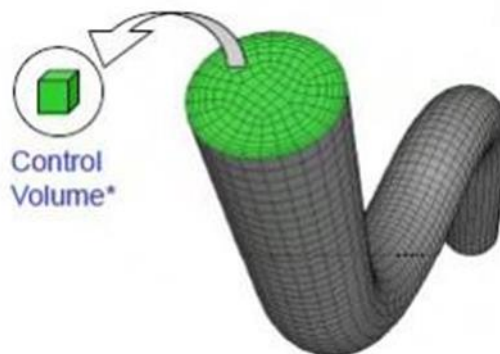
Το PHOENICS® είναι ένα πολλαπλών χρήσεων πρόγραμμα του CFD το οποίο περιλαμβάνει διάφορες δυνατότητες μοντελοποίησης ώστε να μπορεί να ανταπεξέλθει στις απαιτήσεις του μηχανικού τροφίμων. Επίσης, περιλαμβάνει μοντέλα Νευτώνειων και μη Νευτώνιων ρευστών, ροή διαμέσου πορώδους υλικού με αντιστάσεις εξαρτημένες από τη κατεύθυνση και συζυγούς μεταφοράς θερμότητας

- COMSOL *Multiphysics*®

Το COMSOL *Multiphysics*® είναι ένα λογισμικό προσομοίωσης γενικής χρήσης για τη μοντελοποίηση σχεδίων, συσκευών και διαδικασιών σε όλους τους τομείς της μηχανικής και της επιστημονικής έρευνας. Το προϊόν πλατφόρμας μπορεί να χρησιμοποιηθεί από μόνο του ή να επεκταθεί με λειτουργικότητα από διάφορους συνδυασμούς συμπληρωματικών ενοτήτων για προσομοίωση ηλεκτρομαγνητικών, ακουστικής, ροής ρευστών, μεταφοράς θερμότητας και χημικής μηχανικής (Comsol, 2020).

#### 1.4.7 Θεμελιώδης αρχές της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής

Η εφαρμογή της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής για την περιγραφή της ροής των ρευστών βασίζεται στη θεμελιώδη θεώρηση της διακριτοποίησης ενός όγκου σε κάποιους στοιχειώδεις χώρους (όγκους ελέγχου), εντός των οποίων βρίσκονται σωματίδια του ρευστού (Σχήμα 7).



Σχήμα 7: Διακριτοποίηση με πεπερασμένους όγκους ελέγχου σε ροή ρευστού σε αγωγό.

Οι όγκοι αυτοί πρέπει να είναι οι μικρότεροι ικανοί έτσι ώστε να εξασφαλίσουν ότι οι ιδιότητες του ρευστού σε μακροσκοπική κλίμακα ( $>1\mu\text{m}$ ) δεν επηρεάζονται από τη μοριακή δομή και τις κινήσεις ανεξάρτητων μορίων κι έτσι για την περιγραφή της συμπεριφοράς του ρευστού θα χρησιμοποιηθούν μόνο μακροσκοπικά μεγέθη όπως η πίεση, η θερμοκρασία, η πυκνότητα και η ταχύτητα ως συναρτήσεις του χρόνου και της θέσης κάθε όγκου ελέγχου. Με την πάροδο του χρόνου τα σωματίδια αυτά κινούνται και μεταφέρονται σε έναν αντίστοιχο διπλανό όγκο ελέγχου, ενώ στον προηγούμενο όγκο ελέγχου μεταφέρονται άλλα σωματίδια του ρευστού. Το φαινόμενο αυτό, η μεταφορά δηλαδή ορισμένου αριθμού σωματιδίων από ένα στοιχειώδη χώρο σε άλλο κάτω από ορισμένες συνθήκες, ορίζεται ως «συνέχεια».

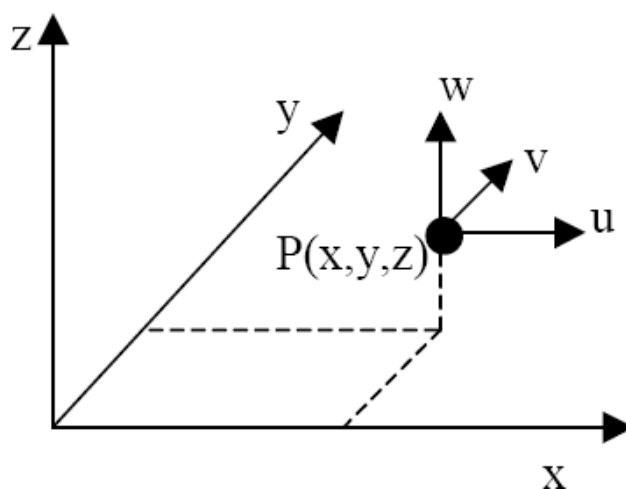
Με την παραδοχή ότι τα σωματίδια του ρευστού που βρίσκονται σε κάθε έναν από αυτούς τους στοιχειώδεις χώρους, έχουν μεταξύ τους τις ίδιες φυσικές ιδιότητες (ταχύτητα, πίεση, θερμοκρασία, πυκνότητα κλπ.), καθίσταται δυνατόν με την επίλυση συγκεκριμένων διαφορικών εξισώσεων, οι οποίες περιγράφουν την ροή των ρευστών, να υπολογιστούν σε κάθε σημείο τα μεγέθη αυτά. Όσο καλύτερα έχει γίνει η διακριτοποίηση του συνολικού όγκου σε μικρότερους (όγκους ελέγχου), τόσο η παραπάνω παραδοχή τείνει πιο κοντά στην πραγματικότητα. Αντικείμενο λοιπόν της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής είναι η περιγραφή του υπόβαθρου, της επίλυσης και του αποτελέσματος της επίλυσης των εξισώσεων αυτών, εξηγώντας έτσι τα διάφορα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά τη ροή των ρευστών (Versteeg and Malalasekera, 2007, Xia and Sun, 2002, Norton and Sun, 2006).

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

#### 1. Αρχή διατήρησης της μάζας (Αρχή της συνέχειας).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (32)$$

Ο πρώτος όρος της παραπάνω εξίσωσης είναι ο ρυθμός μεταβολής της πυκνότητας (μάζα ανά μονάδα όγκου). Οι υπόλοιποι τρεις όροι περιγράφουν την ροή μάζας σ' έναν όγκο ελέγχου διαμέσου των ορίων του και καλούνται όροι συναγωγής (Σχήμα 8).



Σχήμα 8: Συνιστώσες της ταχύτητας στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων.

2. Αρχή διατήρησης της ορμής (Δεύτερος νόμος του Νεύτωνα).

Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ορμής, ο ρυθμός μεταβολής της ορμής ως προς μια διεύθυνση (x, y, z) ανά μονάδα όγκου ισούται με την καθαρή εισροή ορμής μαζί με την καθαρή δύναμη ανά μονάδα όγκου.

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{zx})}{\partial z} + S_{Mx} \quad (33)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial(\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{zy})}{\partial z} + S_{My} \quad (34)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial(\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(-p + \tau_{zz})}{\partial z} + S_{Mz} \quad (35)$$

3. Αρχή διατήρησης της ενέργειας (Πρώτος νόμος της Θερμοδυναμικής).

Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ενέργειας, η ενέργεια δεν παράγεται ούτε

καταστρέφεται αλλά μόνο αλλάζει μορφή, άρα η μεταβολή της ενέργειας ενός στοιχειώδους όγκου ρευστού ισούται με το άθροισμα της θερμότητας που προστίθεται ή απάγεται στο ρευστό και του έργου που παράγεται ή καταναλώνεται από το ρευστό.

$$\rho \frac{DE}{Dt} = -\text{div}(pu) + \left[ \begin{array}{ccc} \partial \frac{(u\tau_{xx})}{\partial x} + \partial \frac{(u\tau_{yx})}{\partial y} & + \partial \frac{(u\tau_{zx})}{\partial z} & + \partial \frac{(v\tau_{xy})}{\partial x} \\ + \partial \frac{(v\tau_{yy})}{\partial y} & + \partial \frac{(v\tau_{zy})}{\partial z} & + \\ + \partial \frac{(w\tau_{xz})}{\partial x} & + \partial \frac{(w\tau_{yz})}{\partial y} & + \partial \frac{(w\tau_{zz})}{\partial z} \end{array} \right] + \text{div}(k \text{ grad}T) + S_E \quad (36)$$

#### 1.4.8 Αριθμητικές μέθοδοι διακριτοποίησης

Οι εξισώσεις αυτές δεν είναι δυνατόν να επιλυθούν αναλυτικά. Για την επίλυσή τους γίνεται διακριτοποίηση. Η διακριτοποίηση αυτή μπορεί να γίνει με τρεις βασικές μεθόδους:

- μέθοδος πεπερασμένων διαφορών
- μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων
- μέθοδος πεπερασμένων όγκων

##### 1.4.8.1 Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών

Η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών είναι απλή και περιγράφει μία σειρά από διακριτές εξισώσεις μεταφοράς με διαφορικό τρόπο. Η μέθοδος αυτή μπορεί εύκολα να εφαρμοστεί σε προβλήματα πολλών διαστάσεων, σε απλές γεωμετρίες όπως σφαίρα, πλάκα και κύλινδρο. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιείται ευρέως στη λύση μοντέλων που περιγράφουν διεργασίες κατά τις οποίες λαμβάνει χώρα ταυτόχρονα μεταφορά μάζας και θερμότητας. Στις περιπτώσεις αυτές υπάγονται για παράδειγμα πολλές θερμικές διεργασίες όπως το μαγείρεμα, το τηγάνισμα, η ξήρανση και η ψύξη (Wang and Sun, 2003).

##### 1.4.8.2 Μέθοδος πεπερασμένων όγκων

Η διαδικασία των υπολογισμών στα περισσότερα εμπορικά πακέτα λογισμικού υπολογιστικής ρευστοδυναμικής βασίζεται στην αριθμητική μέθοδο των πεπερασμένων όγκων. Η εν λόγω μέθοδος προέκυψε από τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών και σε

αυτήν ο όγκος μελέτης διαιρείται σε διακριτούς όγκους ελέγχου. Το κλειδί της μεθόδου είναι η ενσωμάτωση εξισώσεων μεταφοράς μεταξύ των όγκων ελέγχου ώστε να προκύψουν διακριτοποιημένες εξισώσεις στα κομβικά σημεία επίλυσης. Οι γενικές εξισώσεις διατήρησης της μάζας, της ορμής και της ενέργειας διακριτοποιούνται πάνω στο πλέγμα και παίρνουν τη μορφή συστήματος αλγεβρικών εξισώσεων όπου όλες οι εξισώσεις επιλύονται για την εύρεση γενικευμένης λύσης (Versteeg and Malalasekera, 2007, Wang and Sun, 2003).

#### *1.4.8.3 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων*

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι ένα αριθμητικό εργαλείο για τον καθορισμό προσεγγιστικών λύσεων σε μια μεγάλη κατηγορία προβλημάτων μηχανικής. Αυτή η μέθοδος έχει λάβει μεγάλη προσοχή στην τεχνική εκπαίδευση και στη βιομηχανία λόγω της ποικιλομορφίας και της ευελιξίας της ως εργαλείου ανάλυσης. Θεωρεί ότι η περιοχή λύσης περιλαμβάνει πολλές διασυνδεδεμένες περιοχές ή στοιχεία και δίνει μια τμηματική προσέγγιση προς τις εξισώσεις που τις διέπουν. Έτσι, οι σύνθετες διαφορικές εξισώσεις περιορίζονται σε ένα σύνολο είτε γραμμικών είτε μη γραμμικών εξισώσεων και με αυτό τον τρόπο η διαδικασία διακριτοποίησης πεπερασμένων στοιχείων χωρίζει την περιοχή σε μία σειρά μικρότερων περιοχών (Bathe, 2006).

### **1.4.9 Στάδια επίλυσης ενός προβλήματος με τη χρήση του CFD**

Το CFD συνήθως εφαρμόζεται για τον σχεδιασμό ενός μοντέλου, αλλά τις περισσότερες φορές εφαρμόζεται για την ανάλυση και βελτίωση ενός ήδη υπάρχοντος. Πρώτο στάδιο είναι ο σχεδιασμός της γεωμετρίας του προβλήματος. Αυτή μπορεί να σχεδιαστεί από την αρχή, αλλά όπως συμβαίνει τις περισσότερες φορές, γεγονός το οποίο είναι μεγάλο πλεονέκτημα των προγραμμάτων CFD, εισάγεται έτοιμη, έχοντας σχεδιαστεί με τη βοήθεια κάποιου άλλου λογισμικού. Στην συνέχεια ακολουθεί ο ορισμός της περιοχής ενδιαφέροντος, δηλαδή του όγκου ελέγχου. Αφού έχει οριστεί ο όγκος ελέγχου, δημιουργείται το πλέγμα (mesh). Στη συνέχεια, ορίζονται οι οριακές συνθήκες στα διάφορα τμήματα του όγκου ελέγχου.

Τέλος, το εκάστοτε υπολογιστικό πρόγραμμα επιλύει το πρόβλημα και δημιουργεί ένα ή περισσότερα αρχεία αποτελεσμάτων τα οποία περιέχουν τις μεταβολές της ταχύτητας, πίεσης, θερμοκρασίας και των άλλων προς μελέτη μεγεθών. Τα αποτελέσματα μπορούν να οπτικοποιηθούν με στόχο την κατανόηση της συμπεριφοράς του ρευστού στο εσωτερικό

του όγκου ελέγχου γεγονός το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε σχεδιαστικές τροποποιήσεις οι οποίες μπορούν να ελέγχονται, αλλάζοντας την γεωμετρία του CFD μοντέλου και παρατηρώντας τα αποτελέσματα της εκάστοτε επίλυσης.

Η διαδικασία επίλυσης ενός προβλήματος υπολογιστικής ρευστοδυναμικής αποτελείται από τέσσερα βήματα:

1. Γεωμετρία-Υπολογιστικό/Αριθμητικό Πλέγμα (Geometry/Mesh)
2. Ορισμός Οριακών Συνθηκών (Physics Definition)
3. Επίλυση (Solver)
4. Παρουσίαση Αποτελεσμάτων (Post-Processor)

#### *Βήμα 1: Δημιουργία Γεωμετρίας-Πλέγματος (Geometry-Mesh)*

Αυτή η διαδικασία είναι το πρώτο βήμα της προσομοίωσης. Στόχος είναι η δημιουργία του κατάλληλου υπολογιστικού πλέγματος. Τα βασικά στάδια αυτού του τμήματος περιλαμβάνουν:

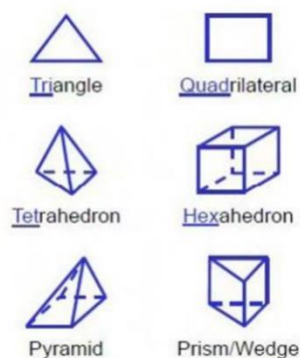
- ✓ Καθορισμός της γεωμετρίας (όγκου ελέγχου)
- ✓ Δημιουργία των απαραίτητων τμημάτων στα οποία στη συνέχεια θα εφαρμοστούν οριακές συνθήκες
- ✓ Ρύθμιση των παραμέτρων του πλέγματος

Το σύνολο των πεπερασμένων όγκων που αποτελούν τη γεωμετρία του προβλήματος που έχει διακριτοποιηθεί, ονομάζεται πλέγμα (mesh ή grid). Το πλέγμα πρέπει να είναι κατάλληλο για την εξαγωγή σωστών αποτελεσμάτων. Η αύξηση των κελιών του πλέγματος βοηθάει στο να υπάρχουν πιο ακριβή αποτελέσματα αλλά αυξάνει το υπολογιστικό κόστος. Γι' αυτό το λόγο το πλέγμα γίνεται πιο πυκνό επιλεκτικά, δηλαδή αυξάνονται τα κελιά σε περιοχές όπου υπάρχουν μεγάλες μεταβολές της ταχύτητας, της πίεσης, της θερμοκρασίας κτλ.

Ο επιλυτής (solver) χρησιμοποιεί διάφορα στοιχεία πεπερασμένων όγκων (Σχήμα 9). Στα δισδιάστατα υπολογιστικά πεδία υπάρχουν τα τριγωνικά και τα τετραπλευρικά στοιχεία για τη δημιουργία του πλέγματος. Στα τρισδιάστατα έχουμε τα τετράεδρα, τα εξαέδρα, τα στοιχεία πυραμίδας και τα πρισματικά. Τα τετράπλευρα και τα εξαέδρα δίνουν



καλύτερης ποιότητας αποτελέσματα με λιγότερα κελιά από ότι τα τριγωνικά και τα τετράεδρα αντίστοιχα, συνήθως όμως απαιτείται μεγαλύτερη προσπάθεια για τη δημιουργία πλέγματος με τετράπλευρα ή εξάεδρα.



Σχήμα 9: Στοιχεία πεπερασμένων όγκων στο Fluent.

### *Βήμα 2: Ορισμός οριακών συνθηκών (Physics definition)*

Στο στάδιο αυτό εισάγεται το υπολογιστικό πλέγμα, ορίζονται οι οριακές συνθήκες στα επιμέρους τμήματα τα οποία έχουν δημιουργηθεί στο προηγούμενο τμήμα της επίλυσης και προσδιορίζονται οι ιδιότητες του ρευστού του προβλήματος (θερμοφυσικές ιδιότητες κτλ).

### *Βήμα 3: Επίλυση (Solver)*

Το ANSYS FLUENT παρέχει ολοκληρωμένες δυνατότητες μοντελοποίησης για ένα ευρύ φάσμα προβλημάτων που αφορούν ασυμπίεστα και συμπιεστά ρευστά σε οποιαδήποτε ροή (στρωτή ή τυρβώδης). Στο ANSYS FLUENT , ένα ευρύ φάσμα μαθηματικών μοντέλων για φαινόμενα μεταφοράς (όπως η μεταφορά θερμότητας και χημικές αντιδράσεις) συνδυάζεται με την ικανότητα μοντελοποίησης πολύπλοκων γεωμετριών.

Παράλληλα ισχυρά και ακριβή μοντέλα τύρβης είναι ένα ζωτικής σημασίας στοιχείο των μοντέλων του προγράμματος. Τα μοντέλα τύρβης που παρέχονται έχουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογής , και περιλαμβάνουν τις επιδράσεις άλλων φυσικών φαινομένων, όπως η πλευστότητα και η συμπίεστότητα. Ιδιαίτερη προσοχή έχει δοθεί στην αντιμετώπιση των θεμάτων της ακρίβειας κοντά στο τοίχωμα μέσω της χρήσης εκτεταμένων λειτουργιών και μοντέλων.

Ο επιλυτής (solver) παράγει ένα αρχείο το οποίο περιέχει τα αποτελέσματα της επίλυσης. Τα βήματα επίλυσης είναι τα ακόλουθα:

- i. Οι μερικές διαφορικές εξισώσεις ολοκληρώνονται σε ολόκληρο τον όγκο ελέγχου. Με τον τρόπο αυτό εφαρμόζονται οι βασικοί νόμοι διατήρησης σε κάθε επιμέρους όγκο ελέγχου.
- ii. Αυτές οι εξισώσεις μετατρέπονται σε ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων.
- iii. Οι αλγεβρικές εξισώσεις επιλύονται επαναληπτικά μέχρις ότου η λύση συγκλίνει.

Συνεπώς, απαιτείται επαναληπτική διαδικασία εξαιτίας της μη γραμμικής φύσης αυτών των εξισώσεων έως ότου η αριθμητική λύση φτάσει σε σύγκλιση, όπου εκεί παίρνουμε την ακριβή λύση. Σε κάθε επανάληψη, ένα σφάλμα ή υπόλοιπο (residual), καταγράφεται ως τιμή της συνολικής διατήρησης των ιδιοτήτων του ρευστού, σε όλο τον όγκο ελέγχου. Η σύγκλιση της τελικής λύσης στην ακριβή λύση εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Αυτοί είναι το μέγεθος και το σχήμα των επιμέρους όγκων ελέγχου και οι τιμές των τελικών σφαλμάτων. Στο τέλος αυτού του σταδίου ο επιλυτής δημιουργεί τα αρχεία των αποτελεσμάτων, τα οποία στη συνέχεια εισάγονται στο τελευταίο τμήμα της διαδικασίας επίλυσης, το οποίο είναι η παρουσίαση των αποτελεσμάτων (post-processing).

#### *Βήμα 4: Παρουσίαση αποτελεσμάτων (Post-processor)*

Το τελευταίο τμήμα της επίλυσης του προβλήματος είναι η απεικόνιση των αποτελεσμάτων χρωματικά και με διάφορους τρόπους. Τα αποτελέσματα μπορούν να παρουσιαστούν με ποικίλους τρόπος σε οποιαδήποτε περιοχή, επιφάνεια του όγκου ελέγχου θελήσει ο χρήστης. Οι τρόποι οι οποίοι αναφέρθηκαν είναι: γραμμές ροής (streamlines), επίπεδα κάθετα στους τρεις άξονες (τομές-planes δηλαδή του όγκου ελέγχου), όγκοι οι οποίοι τοποθετούνται στο εσωτερικό του όγκου ελέγχου και απεικονίζονται πάνω σε αυτούς οι κατανομές των διάφορων μεγεθών (ταχύτητα, θερμοκρασία κτλ).

Ακόμη, μπορούν να δημιουργηθούν εικόνες οι οποίες παρέχουν οπτικοποιημένα αποτελέσματα αλλά και βίντεο, στο οποίο να παρουσιάζεται η μεταβολή ενός μεγέθους. Τέλος, το post-processor εξάγει και αρχεία διαφόρων τύπων (.txt, .dat) τα οποία περιέχουν τις υπολογιζόμενες τιμές διαφόρων μεγεθών σε οποιοδήποτε τμήμα του όγκου ελέγχου. Στη συνέχεια, τα αρχεία αυτά μπορούν να υποστούν περαιτέρω επεξεργασία σε διάφορα προγράμματα και να οδηγήσουν σε χρήσιμα αποτελέσματα τα οποία θα συμβάλλουν στην κατανόηση και επεξήγηση των αποτελεσμάτων.

#### 1.4.10 Δημιουργία UDFs

Μια συνάρτηση UDF (User-Defined Function), είναι μια συνάρτηση γραμμένη σε κώδικα C ή C ++ που μπορεί να φορτωθεί στον επιλυτή του ANSYS FLUENT για να βελτιώσει τα τυπικά χαρακτηριστικά του. Μια τέτοια συνάρτηση μπορεί να γραφτεί από τον χρήστη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για:

- Προσαρμογή των οριακών συνθηκών, των ιδιοτήτων των υλικών, των ρυθμών αντίδρασης σε μια επιφάνεια ή σε ένα όγκο ελέγχου κτλ.
- Αρχικοποίηση μιας λύσης.
- Εκτέλεση κατ 'απαίτηση ενός άλλου UDF.
- Εκτέλεση κάποιας εντολής στο τέλος μιας επανάληψης
- Βελτίωση της επεξεργασίας των αποτελεσμάτων
- Βελτίωση των υπαρχόντων μοντέλων (όπως το μοντέλο διακριτής φάσης, το μοντέλο μίγματος, το μοντέλο πολλαπλών φάσεων).

Τα UDFs αναγνωρίζονται με επέκταση .c ή .cpp (π.χ. asepticprocess.c). Ένα αρχείο προέλευσης μπορεί να περιέχει ένα μεμονωμένο UDF ή πολλαπλά UDFs και μπορούν να οριστούν πολλαπλά αρχεία προέλευσης (multiple source files).

## 2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Για την επιλογή των κατάλληλων συνθηκών έτσι ώστε να έχουμε ασφαλή τρόφιμα απαιτείται η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου προσομοίωσης. Για την επίτευξη της σωστής προσομοίωσης απαιτήθηκε προσδιορισμός θερμοφυσικών ιδιοτήτων, ακριβής σχεδιασμός της γεωμετρίας του προϊόντος, και δημιουργία-ανεξαρτητοποίηση του πλέγματος. Αρχικά, ο ορισμός των υλικών πραγματοποιήθηκε με προσδιορισμό των θερμοφυσικών ιδιοτήτων τους μέσω βιβλιογραφικής ανασκόπησης. Στη συνέχεια κατασκευάστηκε η γεωμετρία και τέλος έγινε η προσομοίωση της ασηπτικής επεξεργασίας.

### 2.1 Αριθμητική επίλυση με τη χρήση του λογισμικού προσομοίωσης

Η προσομοίωση στο FLUENT πραγματοποιήθηκε με τις επιλεγμένες συνθήκες τρισδιάστατου (3D) περιβάλλοντος, διπλής ακρίβειας (double precision), 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. Οι διαφορικές εξισώσεις της αρχής της συνέχειας, της αρχής διατήρησης της ορμής και της αρχής διατήρησης της ενέργειας, διακριτοποιούνται σε ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων.

Για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης της θερμικής διεργασίας χρησιμοποιήθηκε ένα πρόγραμμα λογισμικού. Χρησιμοποιήθηκε ένα εμπορικό πρόγραμμα λογισμικού Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής, το Workbench 2020R1 της εταιρείας ANSYS η οποία εδρεύει στο Canonsburg της Pennsylvania των ΗΠΑ. Η ANSYS αναπτύσσει και εμπορεύεται λογισμικό προσομοίωσης μηχανικής για σχεδιασμό προϊόντων, δοκιμών και λειτουργίας και προσφέρει τα προϊόντα και τις υπηρεσίες του σε πελάτες παγκοσμίως.

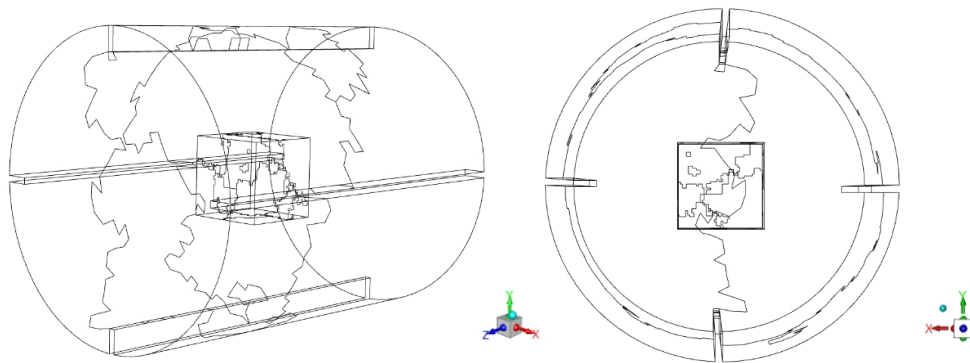
Το λογισμικό πρόγραμμα ANSYS FLUENT, περιλαμβάνει το πρόγραμμα CAD (Design Modeler) για το σχεδιασμό της γεωμετρίας, το Meshing για τη δημιουργία του πλέγματος καθώς και το Fluent για την επίλυση της αριθμητικής λύσης. Η προσομοίωση της ασηπτικής διεργασίας σε υγρό τρόφιμο αποτελούμενο από σωματίδια έγινε σε ηλεκτρονικό υπολογιστή με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Λειτουργικό Σύστημα: Windows 10 Home 64-bit Version 20H2
- Επεξεργαστής: Intel Core i5-840 2,8 GHz
- RAM: 8GB, OEM

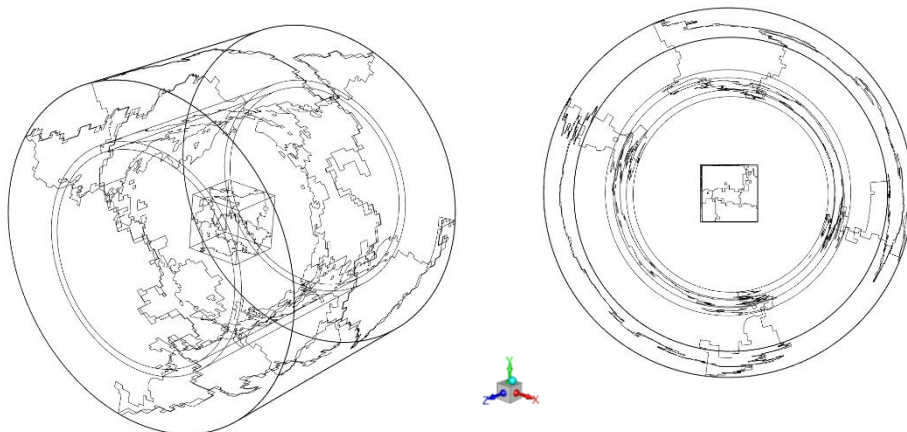
## 2.2 Σχεδιασμός γεωμετρίας

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω η ασηπτική επεξεργασία περιλαμβάνει από την θέρμανση στη συνέχεια το μίγμα διέρχεται από τον σωλήνα παραμονής και τέλος ακολουθεί η ψύξη. Για την επίλυση του προβλήματος σχεδιάστηκε μία τρισδιάστατη γεωμετρία. Η σχεδίαση της γεωμετρίας πραγματοποιήθηκε με τη χρήση μόνο του σχεδιαστικού λογισμικού Design Modeler.

Η βασική (πρωτεύουσα) γεωμετρία αποτελείται από ένα αγωγό κυκλικής διατομής μήκους 6 εκατοστών και εσωτερικής διαμέτρου 4,75 εκατοστών οποίος έχει 4 ανακλαστήρες (baffles) πλάτους 1,75 mm και πάχους 1 mm και ο οποίος περιέχει υγρό (fluid) και στο κέντρο της γεωμετρίας έχει σχεδιαστεί το σωματίδιο (solid) σε σχήμα κύβου με το κέντρο του κύβου να συμπίπτει με το κέντρο της ολόκληρης της γεωμετρίας δηλαδή στο σημείο (0,0,0) (Σχήμα 10). Η διάταξη αποτελείται από το σωματίδιο, το υγρό, καθώς και τον αγωγό (ανοξείδωτο ατσάλι) εσωτερικής διαμέτρου 4,75 cm και εξωτερικής 5,08 cm. Για τον σωλήνα παραμονής υπάρχει και μονωτικό υλικό συγκεκριμένου πάχους (2,54 cm). Επιπλέον, δημιουργήθηκε μία δευτερεύουσα γεωμετρία (Σχήμα 11) αντίστοιχη στις διαστάσεις με αυτή που φαίνεται στο Σχήμα 10 και αναπαριστά έναν σωλήνα παραμονής.



Σχήμα 10. Γεωμετρία του αγωγού ασηπτικής επεξεργασίας με το σωματίδιο σε τρισδιάστατη απεικόνιση (αριστερά) και σε κάτοψη (δεξιά).



Σχήμα 11. Γεωμετρία του σωλήνα παραμονής ασηπτικής επεξεργασίας με το σωματίδιο σε τρισδιάστατη απεικόνιση (αριστερά) και σε κάτοψη (δεξιά).

### 2.3 Παραδοχές για τη μοντελοποίηση της ασηπτικής επεξεργασίας

Για τον σχεδιασμό της γεωμετρίας της παρούσας διπλωματικής εργασίας έγιναν κάποιες παραδοχές-απλοποιήσεις στην κατασκευή της διάταξης της ασηπτικής επεξεργασίας λόγω έλλειψης υπολογιστικής ισχύος στην επίλυση της προσομοίωσης.

Αρχικά, η ύπαρξη των ανακλαστήρων αντικατέστησε την κατασκευή εναλλάκτη στον πρόγραμμα προσομοίωσης. Ο ρόλος των ανακλαστήρων είναι τέτοιος ώστε με την περιστροφή του σωλήνα αξονικά να αναδεύεται το υγρό και έτσι σε κάθε χρονικό βήμα η θερμοκρασία του υγρού κοντά στα τοιχώματα να μεταφέρεται στιγμιαία σε όλο τον όγκο του υγρού ακτινικά. Η δημιουργία των ανακλαστήρων σε ένα περιστρεφόμενο σωλήνα, εξυπηρετεί την ανάγκη να υπάρχει θέρμανση και ψύξη του υγρού και κατά συνέπεια του σωματιδίου ακτινικά, με τελικό σκοπό να παρομοιάζεται η λειτουργία ενός εναλλάκτη διπλού σωλήνα.

Επίσης, έχει γίνει η υπόθεση ότι οι βάσεις του σωλήνα είναι αδιαβατικές έτσι ώστε να αναπαριστούν τη συνέχεια του μήκους ενός αγωγού, είτε αυτός είναι σωλήνας παραμονής, είτε εναλλάκτης. Επιπλέον, για τον σωλήνα παραμονής επιλέχθηκε στο περιβάλλον του υπολογιστικού προγράμματος ένα τεχνητό τοίχωμα (artificial) που αντικαθιστά τον αγωγό (πάχους 0,33 cm) και το μονωτικό υλικό (πάχους 2,54 cm). Το τεχνητό τοίχωμα δεν εμφανίζει κάποια διάσταση (μήκος, πλάτος, ύψος) στην γεωμετρία του Σχήματος 10 αλλά οι παράμετροι και οι διαστάσεις εισάγονται στο πρόγραμμα χειροκίνητα χωρίς να είναι απαραίτητο να σχεδιαστούν στη γεωμετρία (geometry).

## 2.4 Θερμοφυσικές ιδιότητες

Οι θερμοφυσικές ιδιότητες που είναι απαραίτητες, στο πρόγραμμα ANSYS FLUENT για τη μοντελοποίηση ενός υλικού είναι η πυκνότητα, η ειδική θερμότητα ( $C_p$ ), η θερμική αγωγιμότητα (thermal conductivity) και το ιξώδες (viscosity). Ο υπολογισμός των θερμοφυσικών ιδιοτήτων στο σύστημα αυτό βρέθηκε μέσω βιβλιογραφικής ανασκόπησης (Chandarana and Austin, 1989, Ibrahim *et al.*, 2019) και μαζί με άλλες παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Ιδιότητες και παράμετροι του προϊόντος ασηπτικής επεξεργασίας που χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση του προβλήματος στο Fluent.

$\rho_f$ (kg/m <sup>3</sup> )	1082
$C_{p_f}$ (J/kgK)	3680
$k_f$ (W/mK)	0,606
$\mu_f$ (kg/ms)	10
$\rho_p$ (kg/m <sup>3</sup> )	1041
$k_p$ (W/mK)	0,433-0,79
$\rho_{ins}$ (kg/m <sup>3</sup> )	30
$C_{p_{ins}}$ (J/kgK)	133
$k_{ins}$ (W/mK)	0,0346
$\rho_{steel}$ (kg/m <sup>3</sup> )	8030
$C_{p_{steel}}$ (J/kgK)	502,48
$k_{steel}$ (W/mK)	16,27
particle dimension (cm)	1,016-1,778

## 2.5 Δημιουργία πλέγματος

Για την επίλυση ενός προβλήματος μέσω της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής απαιτείται η κατασκευή του πλέγματος. Η κατασκευή του πλέγματος όλες τις γεωμετρίες πραγματοποιήθηκε μέσω του λογισμικού Meshing. Το πλέγμα διαχωρίζει τη γεωμετρία σε ένα πεπερασμένο αριθμό κελίων (cells) που συνδέονται μεταξύ τους, κατά την εκτέλεση μιας ανάλυσης. Το λογισμικό επιλύει τις εξισώσεις που απαιτούνται σε ένα κελί και τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται για την επίλυση των εξισώσεων του επόμενου κελίου. Η ποιότητα του πλέγματος έχει καθοριστικό ρόλο στην ακρίβεια και τη σταθερότητα του

αριθμητικού υπολογισμού, για αυτό ανεξάρτητα του πλέγματος που επιλέχθηκε ο έλεγχος ποιότητας του είναι απαραίτητος. Στην ποιότητα του πλέγματος εξετάζονται δύο παράμετροι. Η πρώτη είναι πόσο ορθογωνικά είναι τα κελιά από τα οποία αποτελείται το πλέγμα οπότε η τιμή πρέπει να είναι μεγαλύτερη του 0,1 (Πίνακας 2) και όσο το δυνατόν κοντά στο 1 (Ansys, 2020).

Πίνακας 2. Τιμές ορθογωνικής ποιότητας πλέγματος

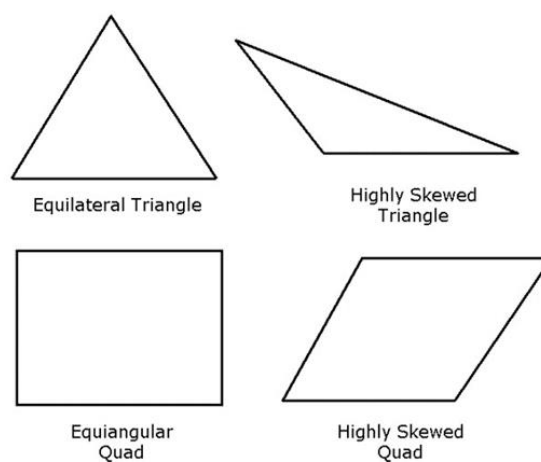
					
Unacceptable	Bad	Acceptable	Good	Very good	Excellent
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00

Η δεύτερη παράμετρος είναι η στρέβλωση (skewness) του πλέγματος (Σχήμα 12). Υπάρχουν δύο τρόποι υπολογισμού της στρέβλωσης. Η πρώτη μέθοδος είναι η απόκλιση του όγκου η οποία ισχύει μόνο για τριγωνικά και τετράεδρα σχήματα και περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\text{Στρέβλωση} = \frac{\text{βέλτιστο μέγεθος κελιού} - \text{μέγεθος κελιού}}{\text{βέλτιστο μέγεθος κελιού}} \quad (37)$$

όπου το βέλτιστο μέγεθος κελιού είναι το μέγεθος ενός ισόπλευρου κελιού με τον ίδιο περίμετρο.

Figure 76: Ideal and Skewed Triangles and Quadrilaterals



Σχήμα 12. Τριγωνικά και τετράγωνα κελιά με τιμή στρέβλωσης 1 (αριστερά) και 0,1 (δεξιά).



Η δεύτερη μέθοδος είναι η κανονικοποιημένη απόκλιση γωνίας η οποία ισχύει για σχήματα κελιών όλων των ειδών και χρησιμοποιείται σε εξάεδρα πρίσματα και πυραμίδες και περιγράφεται ως εξής:

$$\text{Στρέβλωση} = \max\left[\frac{\theta_{\max} - \theta_e}{180 - \theta_e}, \frac{\theta_e - \theta_{\min}}{\theta_e}\right] \quad (38)$$

όπου  $\theta_{\max}$ : η μεγαλύτερη γωνία σε ένα κελί,  $\theta_{\min}$ : η μικρότερη γωνία σε ένα κελί,  $\theta_e$ : γωνία σε ένα ισόπλευρο κελί ( $60^\circ$  για τρίγωνο,  $90^\circ$  για τετράγωνο κ.ο.κ.).

Με βάση τα παραπάνω η τιμή στρέβλωσης πρέπει να είναι μικρότερη από 0,95 και όσο το δυνατόν πιο μικρή (Πίνακας 3).

Πίνακας 3. Τιμές στρέβλωσης πλέγματος.



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

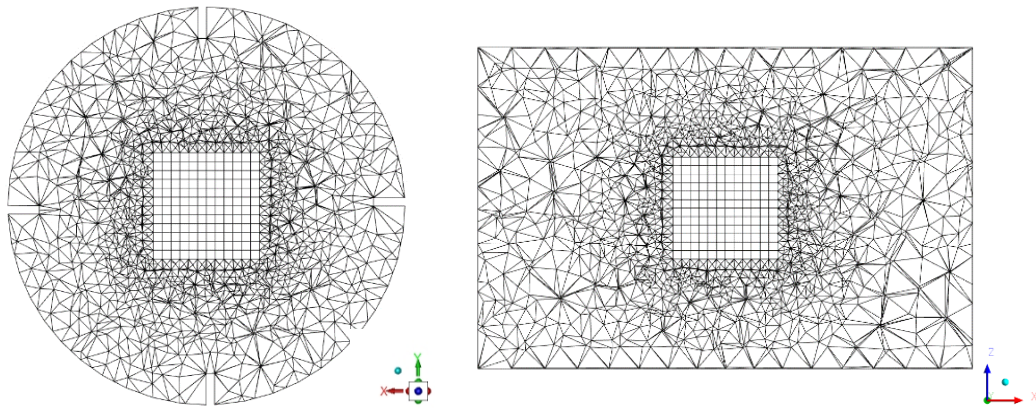
Στη παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν κελιά τριών σχημάτων: τετράεδρα εξάεδρα και πυραμίδες και η ομαλότητα (Smoothness) ορίστηκε υψηλή. Με βάση όλα τα παραπάνω, επιλέχθηκε τελικά πλέγμα που περιλαμβάνει στο όγκο του υγρού τετράεδρα και πυραμίδες ενώ στο σωματίδιο σχηματίστηκαν εξάεδρα. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 12 το πλέγμα πύκνωσε πιο κοντά στο σωματίδιο εκεί δηλαδή που γίνεται η μεταφορά θερμότητας από το υγρό στο στερεό.

## 2.6 Ανεξαρτησία πλέγματος

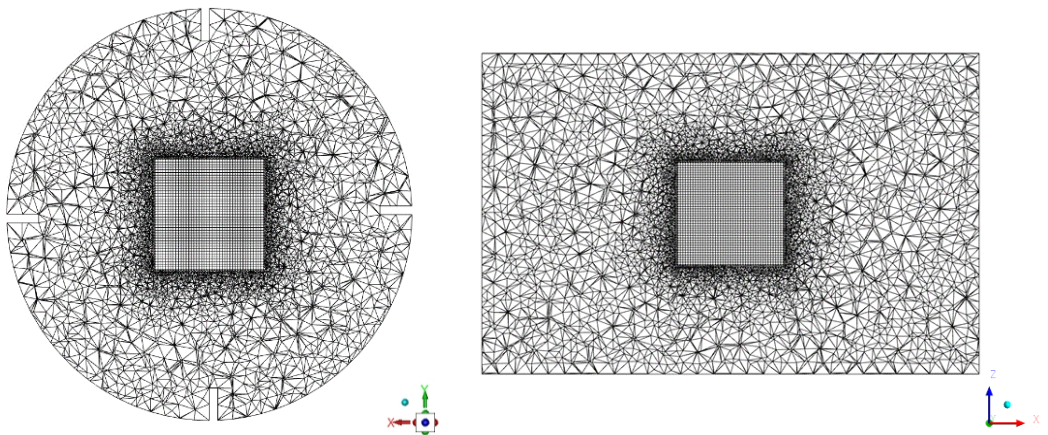
Μετά το σχεδιασμό της γεωμετρίας και πριν την επίλυση της προσομοίωσης, είναι απαραίτητη η εύρεση του κατάλληλου πλέγματος το οποίο να είναι ανεξάρτητο της λύσης. Η καταλληλότητα του πλέγματος εξαρτάται και από την πυκνότητα του. Η επιλογή ενός αραιού πλέγματος οδηγεί σε μη ακριβή αποτελέσματα και πολλές φορές σε μη σύγκλιση των αποτελεσμάτων. Αντίθετα η επιλογή ενός πιο πυκνού πλέγματος, δίνει αποτελέσματα με μεγαλύτερη ακρίβεια, εις βάρος όμως του χρόνου επίλυσης.

Για την επιλογή του κατάλληλου πυκνότητας πλέγματος δημιουργήθηκε ένα αραιό πλέγμα με 56006 κελιά (Σχήμα 13) που στη συνέχεια πύκνωσε μέχρι να φτάσει τα 345417 κελιά (Σχήμα 14). Τα Σχήματα 13 και 14 είναι δισδιάστατες απεικονίσεις (τομές) των

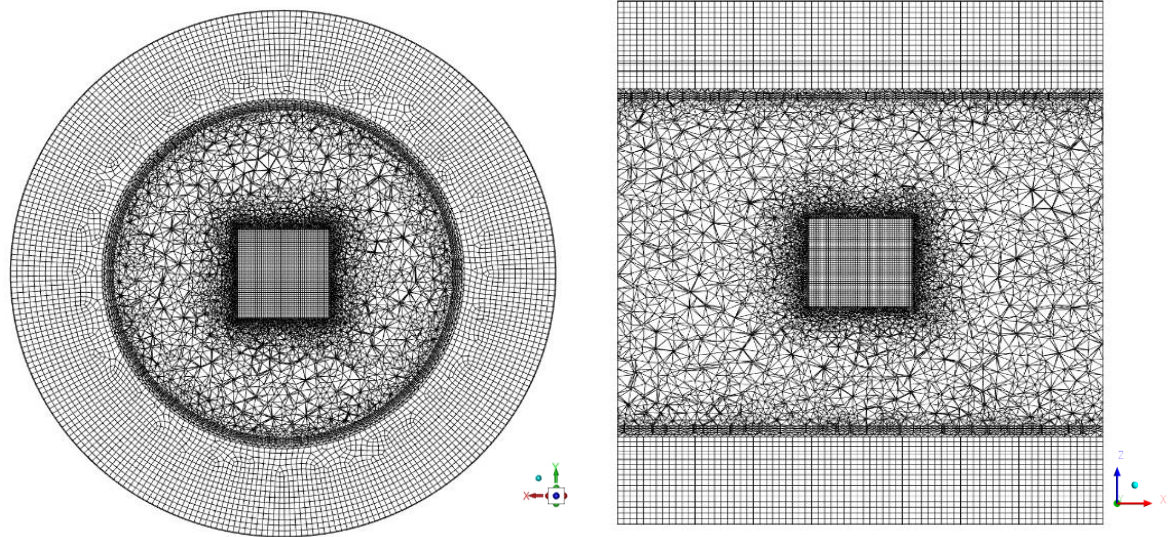
διαφορετικών σε πυκνότητα, πλεγμάτων της γεωμετρίας. Στη συνέχεια επιλέχθηκαν συγκεκριμένα δύο σημεία εντός της γεωμετρίας, και εξήχθησαν τα θερμοκρασιακά αποτελέσματα συναρτήσει του χρόνου των διαφόρων πλεγμάτων. Τα δύο σημεία ήταν το ένα στην επιφάνεια του σωματιδίου (σημείο D) και το δεύτερο το κέντρο του σωματιδίου (σημείο A) (Σχήμα 16). Αντίστοιχη διαδικασία έγινε και για την περίπτωση της γεωμετρίας του Σχήματος 11 και το τελικό πλέγμα που επιλέχθηκε παρουσιάζεται στα Σχήματα 14 και 15 για τη βασική γεωμετρία και τη γεωμετρία μόνο με τον σωλήνα παραμονής αντίστοιχα.



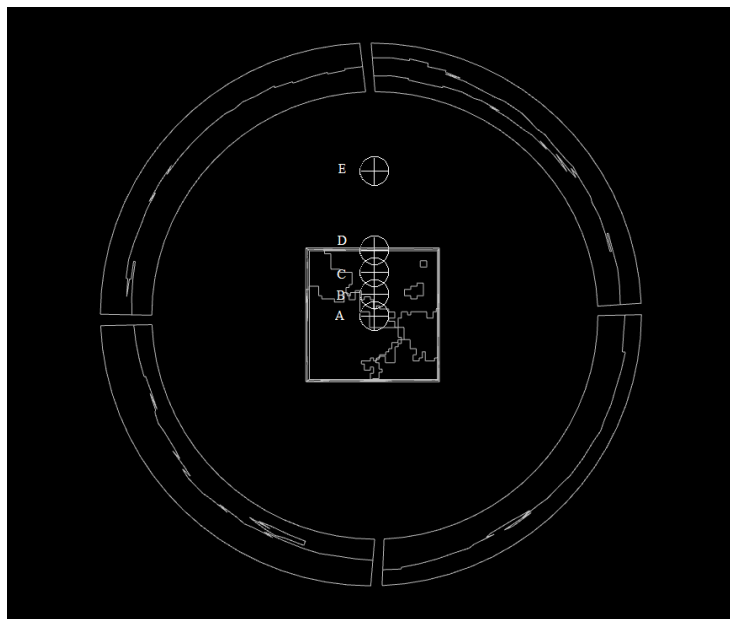
Σχήμα 13. Τομή κατά του επιπέδου XY (αριστερά) και ZX (δεξιά) στην περίπτωση αραιού πλέγματος (56006 κελιά).



Σχήμα 14. Τομή κατά του επιπέδου XY (αριστερά) και ZX (δεξιά) στην περίπτωση πυκνού πλέγματος (345417 κελιά).



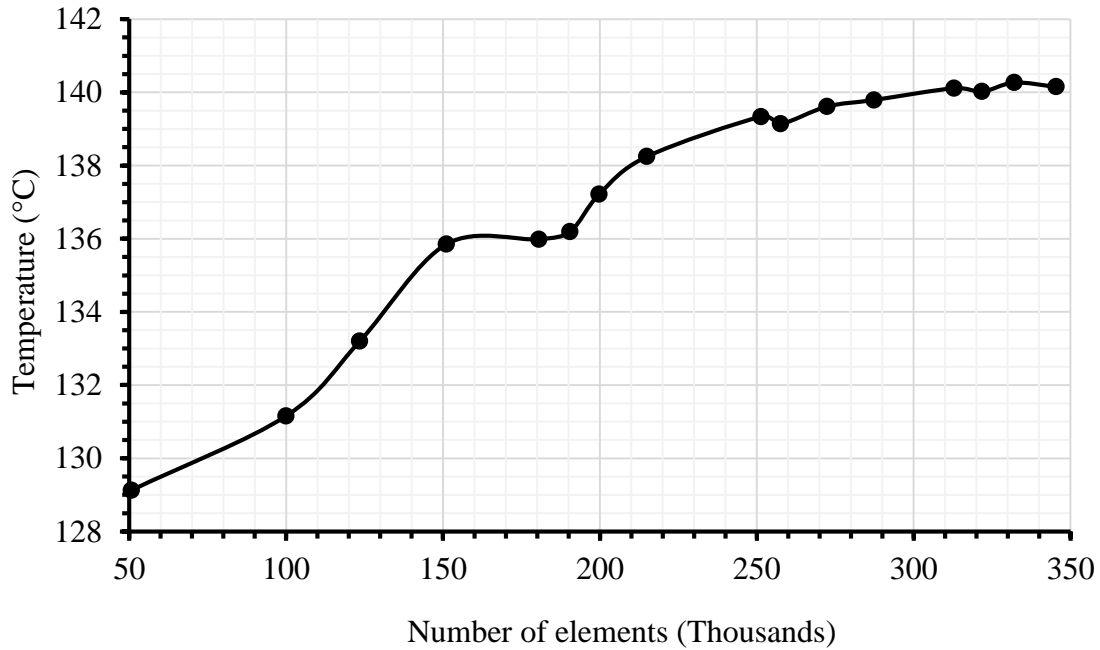
Σχήμα 15. Τομή κατά του επιπέδου XY (αριστερά) και ZX (δεξιά) στην περίπτωση της γεωμετρίας με τον σωλήνα παραμονής μόνο (Σχήμα 11).



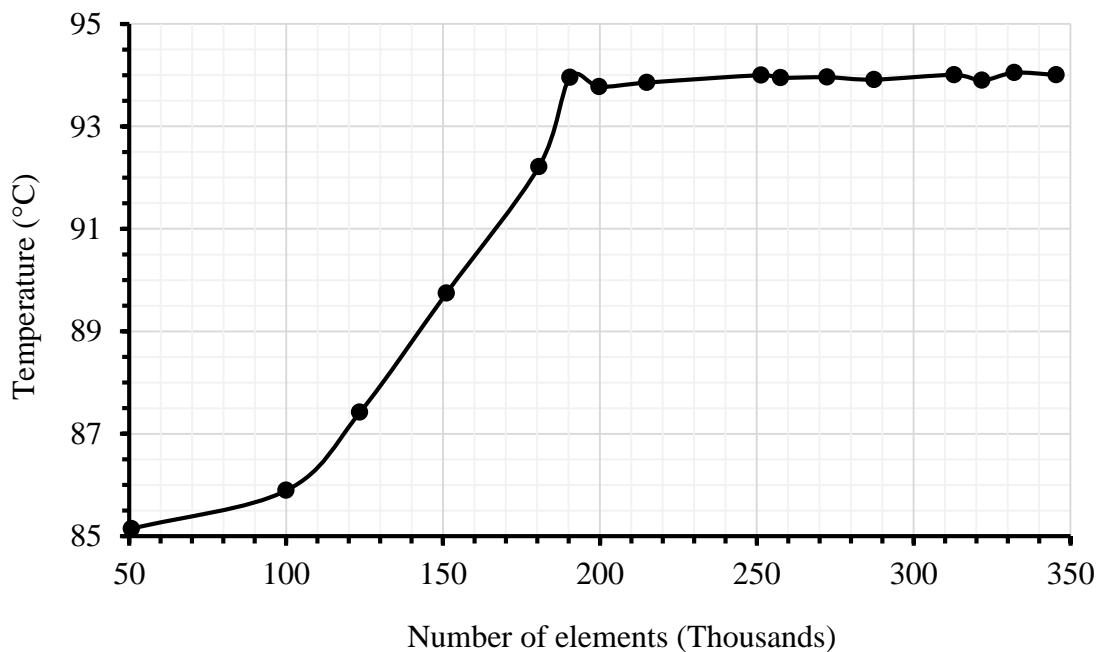
Σχήμα 16. Σημεία που επιλέχθηκαν για τη σύγκριση μεταξύ των πλεγμάτων.

Η πυκνότητα των κελίων αυξήθηκε μέχρις ότου η διαφορά των θερμοκρασιακών δεδομένων για το ίδιο σημείο αναφοράς να είναι τόσο μικρή, σε σχέση με αραιότερα πλέγματα, ώστε να θεωρείται αμελητέα ως προς την αξιοπιστία της λύσης ( $\Delta T \leq 2\%$ ). Αξίζει να σημειωθεί ότι η πυκνωση του πλέγματος πραγματοποιήθηκε όσο το δυνατόν καλύτερα στην οριακή ζώνη της επιφάνειας του σωματιδίου με το υγρό. Τα αποτελέσματα της ανεξαρτησίας πλέγματος παρουσιάζονται στα Σχήματα 17 και 18. Η περίπτωση του πλέγματος που επιλέχθηκε ήταν αυτή με τα 345.417 κελιά καθώς επιτυγχάνεται μία διαφορά  $\Delta T \leq 2\%$  του τελικού πλέγματος

σε σχέση με το προηγούμενο αραιότερο (332.052 κελιά) και στην περίπτωση της επιφάνειας και στο κέντρο του σωματιδίου. Όμοια διαδικασία ακολουθήθηκε και για την περίπτωση της γεωμετρίας του Σχήματος 11 όπου επιλέχθηκε το πλέγμα του Σχήματος 15.



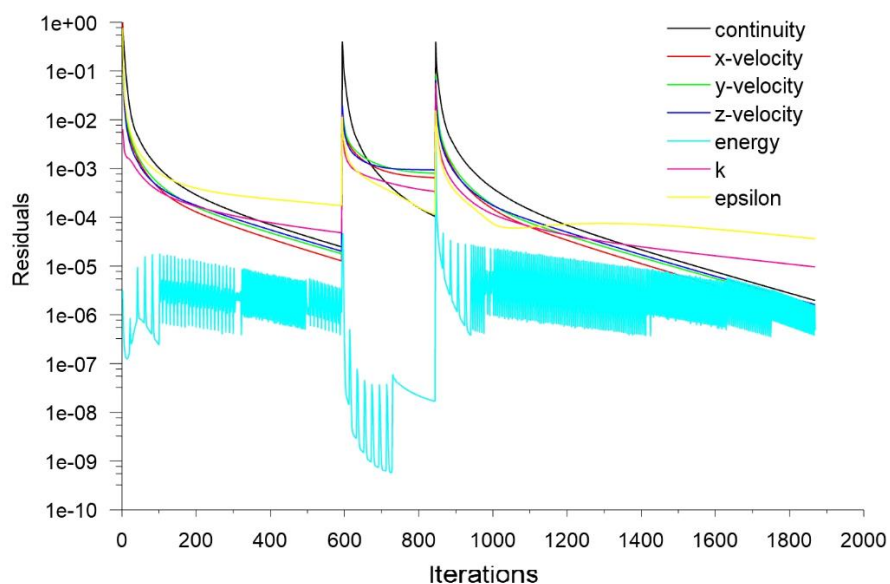
Σχήμα 17. Ανεξαρτησία πλέγματος στην επιφάνεια του σωματιδίου (σημείο D).



Σχήμα 18. Ανεξαρτησία πλέγματος στο κέντρο του σωματιδίου (σημείο A).

## 2.7 Ανεξαρτησία χρονικού βήματος

Το ANSYS Fluent μπορεί να προσομοιώσει μια ευρεία ποικιλία φαινομένων που εξαρτώνται από το χρόνο όπως και η μεταφορά θερμότητας σε μη μόνιμη κατάσταση. Όταν επιλέγεται μια μη μόνιμη κατάσταση, το πρώτο ερώτημα που τίθεται είναι ποια χρονική τιμή πρέπει να ληφθεί. Το πρόβλημα προκύπτει όταν εκτελείται ο υπολογισμός και βρίσκεται ότι η σύγκλιση της λύσης δεν επιτυγχάνεται με την πρόοδο της προσομοίωσης. Αυτό μπορεί να οφείλεται είτε στη δημιουργία αραιού πλέγματος είτε στην ύπαρξη ενός μεγάλου χρονικού βήματος (Σχήμα 19). Στο Σχήμα 19 παρουσιάζονται τα υπόλοιπα των εξισώσεων διατήρησης (ταχύτητας, ορμής, ενέργειας, τύρβης) που επιλύονται στον συνολικό όγκο ελέγχου της διάταξης. Αυτό που παρατηρείται είναι ότι τα υπόλοιπα της ενέργειας συγκλίνουν σε πολύ μεγάλο βαθμό ( $\sim 10^{-6}$  στην θέρμανση και ψύξη,  $\sim 10^{-8}$  στον σωλήνα παραμονής).



Σχήμα 19. Τα υπόλοιπα της προσομοίωσης της ασηπτικής επεξεργασίας.

## 2.8 Υπολογισμός της τιμής F της διεργασίας

Εκτός από το πεδίο της Ρευστομηχανικής, στο οποίο δόθηκε έμφαση σε όλες τις περιπτώσεις επίλυσης, κρίθηκε σκόπιμο να ερευνηθεί το θανατηφόρο αποτέλεσμα που είχε η διείσδυση της θερμότητας στο εσωτερικό του σωματιδίου. Για το λόγο αυτό ενσωματώθηκε στο πρόγραμμα ένας κώδικας (UDF) που γράφτηκε σε γλώσσα προγραμματισμού C, εντός του οποίου υπήρχαν εξισώσεις που ενεργοποιούνταν κατά τη διάρκεια της επίλυσης και

υπολόγιζαν τον ισοδύναμο χρόνο σε κάθε σημείο για κάθε χρονικό βήμα “dt”.

Η εξίσωση που ενσωματώθηκε στον κώδικα ήταν η εξίσωση των Ball and Olson (Ball and Olson 1957) (εξίσωση (17)), όπως περιγράφεται στην ενότητα 1.3.3. Η εξίσωση αυτή βασίζεται σε κινητική μικροβιακής απενεργοποίησης πρώτης τάξης και γραμμική εξάρτηση του λογαρίθμου του χρόνου δεκαδικής μείωσης (D) από τη θερμοκρασία και ο μικροοργανισμός στόχος του οποίου υπολόγιζε την θερμική υποβάθμιση ήταν το *Clostridium Botulinum* άρα το  $T_{ref}$  θα ισούται με 121,11 °C και το  $z=10$  °C. Η τιμή F υπολογίστηκε σε όλα τα σενάρια στο κρίσιμο σημείο (κέντρο του σωματιδίου) της ασηπτικής επεξεργασίας για κάθε χρονική στιγμή της επεξεργασίας. Οι εξισώσεις ενσωματώθηκαν στο πρόγραμμα μέσω ενός κώδικα γραφής λογικών ή μαθηματικών σχέσεων. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στο Σχήμα 20.

```
# 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) - 394.261111) / 10)));
      C_UDMI(c,t,1) = C_UDMI(c,t,1) + (curr_ts * pow(10, ((C_T (c, t) - 394.261111) / 26.666667)));
    }
    end_c_loop (c,t)
  }
}
```

Σχήμα 20. Κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των ισοδύναμων χρόνων.

Κατά την επίλυση της κάθε γεωμετρίας από το πρόγραμμα της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής για κάθε περίπτωση υπολογιζόταν ο συνολικός ισοδύναμος χρόνος από την στιγμή που το προϊόν εισερχόταν στον σωλήνα παραμονής κι όχι από της αρχή της διεργασίας όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα. Τέλος, τα αποτελέσματα αποθηκεύονταν στα αρχεία του συστήματος και στη συνέχεια γινόταν επεξεργασία των αποτελεσμάτων ώστε η τελική τιμή του  $F_0$  να δίνεται σε λεπτά (min) κι όχι σε δευτερόλεπτα (s) που εξάγει το ANSYS FLUENT.

## 2.9 Υπολογισμός της ποιοτικής υποβάθμισης της διεργασίας

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, παράλληλα με την καταστροφή των μικροοργανισμών, κατά τη θερμική επεξεργασία επέρχεται και υποβάθμιση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του προϊόντος. Έτσι μελετήθηκε και υπολογίστηκε με τη βοήθεια της προσομοίωσης, η μερική καταστροφή ενός (θερμικά ευαίσθητου) ποιοτικού παράγοντα της θειαμίνης με  $D_{121,11^{\circ}\text{C}}=130$  min και  $z=26,67$  °C (Feliciotti and Esselen 1957). Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκε η % μέση διατήρηση της θειαμίνης στο σωματίδιο με τη βοήθεια αντίστοιχου κώδικα του Σχήματος 20 και χρησιμοποιώντας την εξίσωση (20).

## 2.10 Αξιολόγηση της ασηπτικής επεξεργασίας

Αφού σχεδιάστηκε η γεωμετρία και έγινε η επιλογή του καλύτερου πλέγματος έγινε η αξιολόγηση της ασηπτικής διεργασίας. Έτσι εξετάστηκε η ασηπτική επεξεργασία υπολογίζοντας το θερμοκρασιακό προφίλ στα σημεία A, B, C, D και E (Σχήμα 16) συναρτήσει του χρόνου και την τιμή  $F_0$  στο κρίσιμο σημείο (σημείο A) για τις παραμέτρους του Πίνακα 1. Η τιμή  $F_0$  υπολογίστηκε με τη βοήθεια της εξίσωσης (17) που εισάγεται στο πρόγραμμα με κώδικα όπως φαίνεται στο Σχήμα 20 και σε κάθε χρονικό βήμα εξάγεται το  $F_0$ .

Η ασηπτική επεξεργασία εξετάστηκε κυρίως, ως προς δύο παραμέτρους. Η μία παράμετρος είναι το μέγεθος του σωματιδίου και η άλλη η θερμική αγωγιμότητα του σωματιδίου. Όσο αφορά το μέγεθος του σωματιδίου εξετάστηκαν τέσσερα μεγέθη τα οποία ήταν τα εξής (μήκος κάθε ακμής) : 1,016 cm (0.4 in), 1,27 cm (0.5 in), 1,524 cm (0.6 in) και 1,778 cm (0.7 in). Οι θερμικές αγωγιμότητες που επιλέχθηκαν για το σωματίδιο είναι 0,433 W/(mK) 0,62 W/(mK) και 0,72 (W/mK). Επίσης, μελετήθηκε εκτός από θέρμανση σε υψηλές θερμοκρασίες (160 °C) και ψύξη σε χαμηλή θερμοκρασία (1,667 °C) και η θέρμανση σε χαμηλότερη θερμοκρασία (130 °C) και ψύξη σε υψηλότερη θερμοκρασία (20 °C). Σε όλες τις περιπτώσεις η αρχική θερμοκρασία του σωματιδίου ήταν 65,556 °C. Ο χρόνος παραμονής του προϊόντος στον σωλήνα παραμονής προσδιορίστηκε με δοκιμή και σφάλμα αυξάνοντας και μειώνοντας κατάλληλα το χρόνο διατήρησης του σωματιδίου για κάθε περίπτωση κάθε περίπτωση ώστε η τιμή  $F_0$  να φτάσει την τιμή 6.

Για να υπάρχει η προσομοίωση της γεωμετρίας (Σχήμα 10) με έναν εναλλάκτη θερμότητας όπως έχει περιγραφεί στην Ενότητα 2.2, ο αγωγός περιστρέφεται με άξονα περιστροφής το κέντρο του αγωγού με ταχύτητα περιστροφής τα 20 rad/s έτσι ώστε η θερμότητα που μεταφέρεται από τα τοιχώματα του αγωγού στο υγρό να μεταφέρεται στιγμιαία σε όλο τον όγκο του. Για αυτό το λόγο έχει εισαχθεί στο πρόγραμμα, η ύπαρξη

εξαναγκασμένης συναγωγής από ρευστό που ρέει εξωτερικά του αγωγού με τους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας από το τοίχωμα προς το υγρό και για τη θέρμανση και για την ψύξη να είναι  $3109 \text{ W/m}^2\text{C}$ . Τέλος οι θερμοφυσικές ιδιότητες που χρησιμοποιήθηκαν αναφέρονται στον Πίνακα 1.

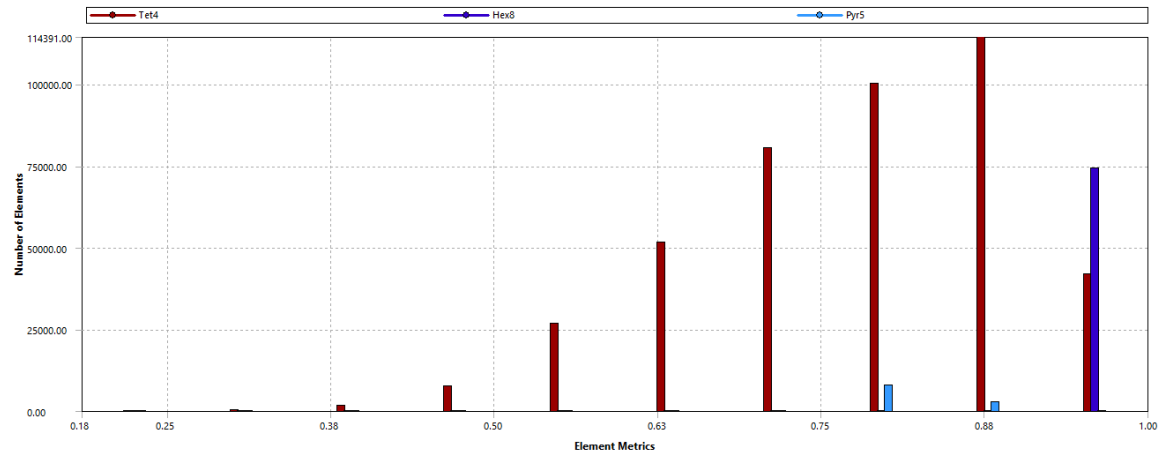


### **3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ**

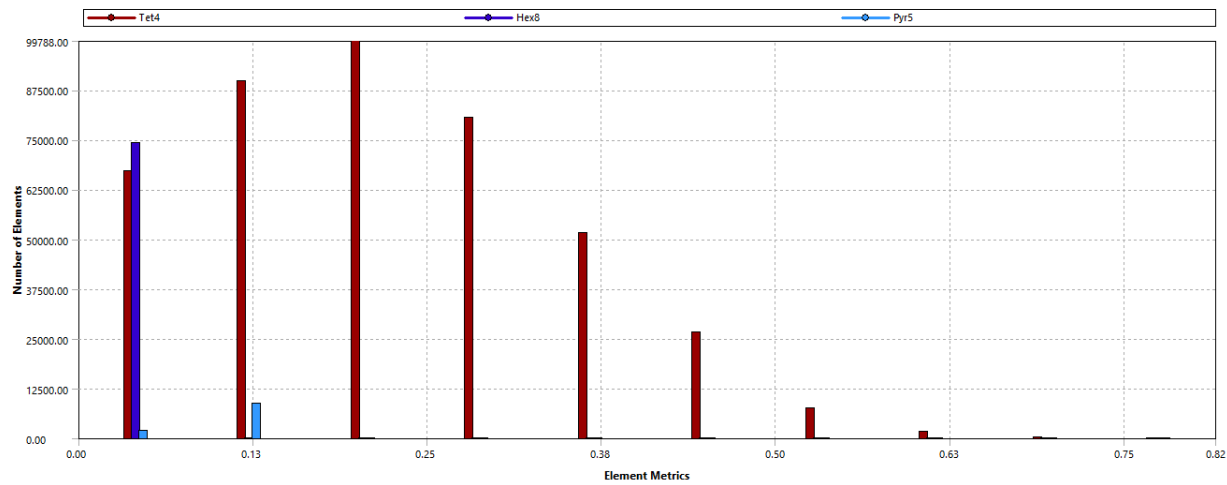
Σε αυτή την ενότητα θα παρατεθούν και θα συζητηθούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της ασηπτικής επεξεργασίας που έγινε με την βοήθεια του λογισμικού ANSYS FLUENT.

#### **3.1 Αξιολόγηση ποιότητας πλέγματος με βάση τις παραμέτρους στρέβλωσης και ορθογωνικότητας**

Αφού έγινε σχεδίαση της γεωμετρίας μελετήθηκε η ποιότητα των πλεγμάτων με βάση τις παραμέτρους της ορθογωνικότητας και στρέβλωσης. Με βάση το Meshing του προγράμματος η μέση τιμή της ορθογωνικότητας είναι στο 0,8 ενώ της στρέβλωσης η μέση τιμή είναι στο 0,19. Στα παρακάτω Σχήματα 21 και 22 απεικονίζονται η κατανομή της ορθογωνικότητας και της στρέβλωσης αντίστοιχα στο τελικό πλέγμα που δημιουργήθηκε στο Meshing. Με βάση και αυτά που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα ο μεγαλύτερος αριθμός κελιών έχει πολύ καλή τιμή ορθογωνικότητας και άριστη τιμή στρέβλωσης. Αντίστοιχα αποτελέσματα προέκυψαν και από τη δημιουργία του πλέγματος της γεωμετρίας (Σχήμα 15).



Σχήμα 21. Κατανομή ορθογωνικής ποιότητας του πλέγματος του Σχήματος 14.



Σχήμα 22. Κατανομή στρέβλωσης του πλέγματος του Σχήματος 14.

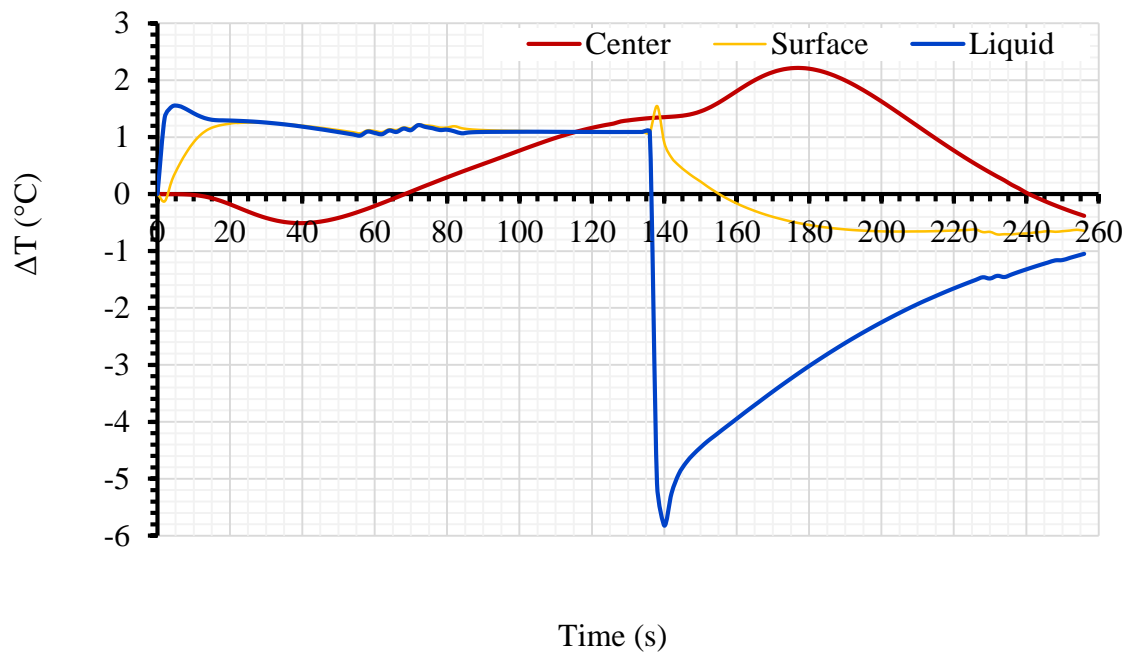
### 3.2 Αξιολόγηση του χρονικού βήματος της προσομοίωσης

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα μεγάλο ρόλο παίζει το χρονικό βήμα που θα επιλεγεί στην προσομοίωση καθώς σε περιπτώσεις που πρέπει να εφαρμοστεί ένα μοντέλο τύρβης (π.χ. αεροδυναμικής) παίζει τεράστιο ρόλο. Σε τέτοια περίπτωση το χρονικό βήμα πρέπει να είναι ίσο ή μικρότερο σε σχέση με την κίνηση ενός κελιού σε σχέση με την ταχύτητα του ρευστού. Το τελευταίο θα μπορούσε να εκφραστεί και ως εξής (Ansys, 2020):

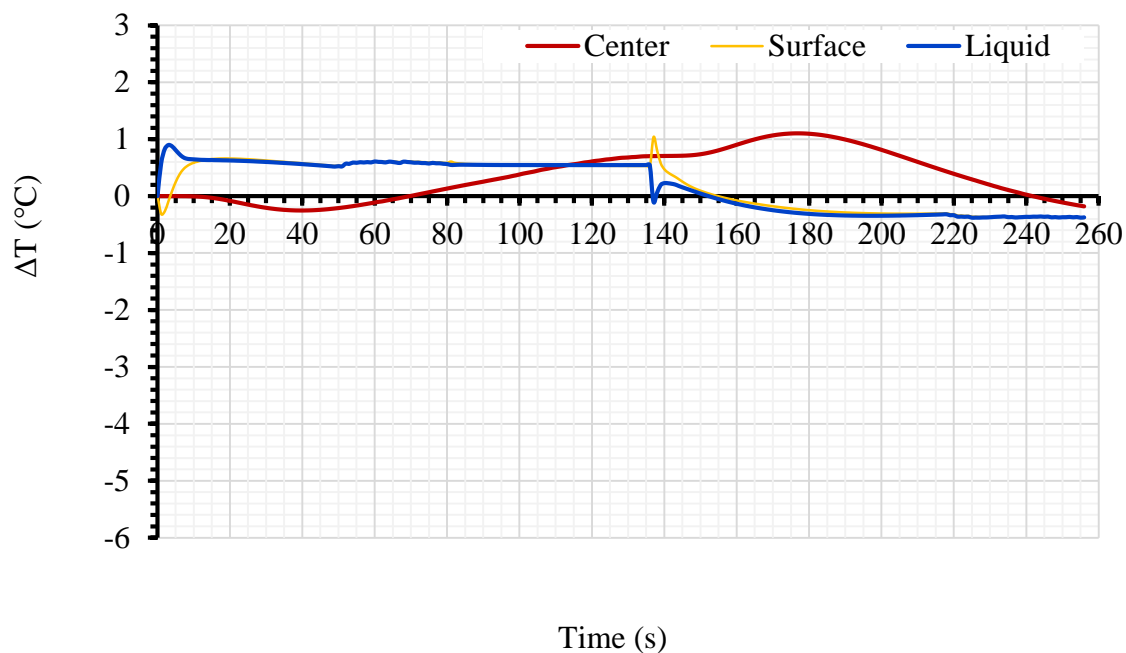
$$\Delta t < \frac{h}{u} \quad (39)$$

Στην περίπτωση της ασηπτικής επεξεργασίας το μεγαλύτερο ρόλο θα παίζει η μεταφορά θερμότητας οπότε δεν επηρεάζει σε τέτοιο μεγάλο βαθμό την επιλογή του χρονικού βήματος. Παρ' όλ' αυτά όσο το δυνατόν μικρότερο χρονικό βήμα τόσο καλύτερη η διακριτοποίηση του χρόνου στην παρούσα προσομοίωση.

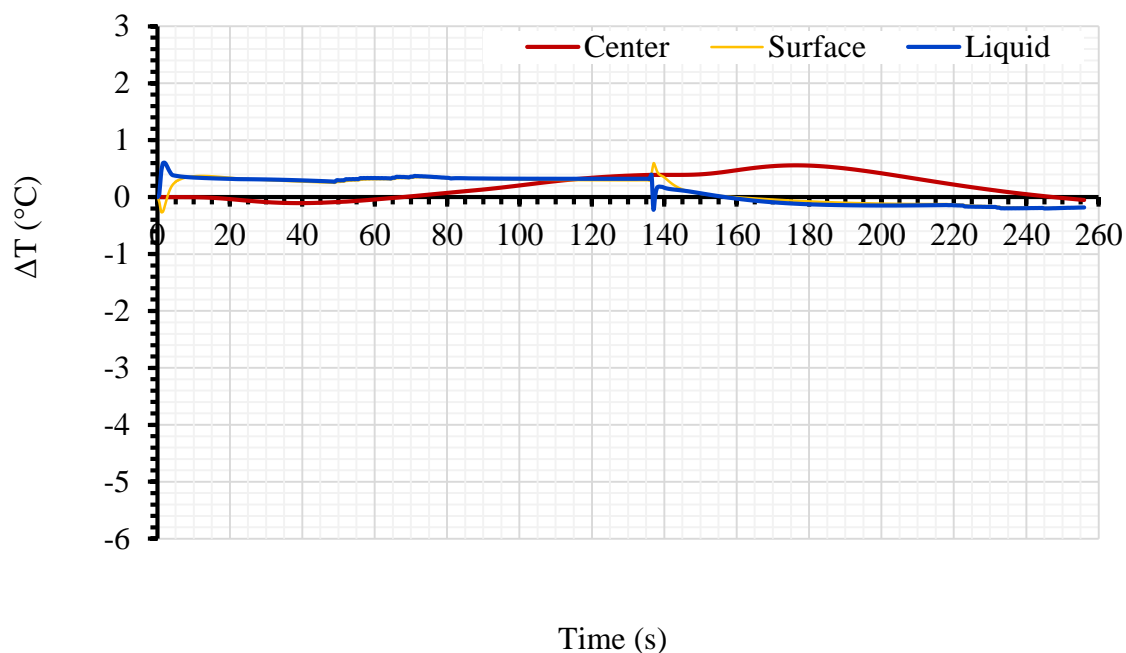
Μεγάλο χρονικό βήμα σημαίνει ότι θα αυξηθεί η ταχύτητα με την οποία η μεταφορά θερμότητας θα μεταφερθεί στο σωματίδιο σε κάθε επανάληψη ενώ μικρότερο σημαίνει μικρότερη ταχύτητα άρα θα όσο μικρότερο χρονικό βήμα τόσο μεγαλύτερη σύγκλιση υπάρχει χωρίς να διακυβεύεται η ακρίβεια της λύσης. Για αυτόν τον λόγο έγινε προσομοίωση για διαφορετικά χρονικά βήματα (0,1s, 0,5s, 1s, 2s) στο κέντρο του σωματιδίου και έγινε η σύγκριση του μικρότερου δηλαδή  $\Delta t=0,1s$  σε σχέση με όλα τα υπόλοιπα (Σχήματα 23, 24, 25).



Σχήμα 23. Ανεξαρτησία χρονικού βήματος. Διαφορά θερμοκρασίας στο σωματίδιο (κέντρο, επιφάνεια) και στο υγρό σε προσομοίωση με χρονικό βήμα  $\Delta t=2s$  σε σχέση με προσομοίωση με χρονικό βήμα  $\Delta t= 0,1s$ .



Σχήμα 24. Ανεξαρτησία χρονικού βήματος. Διαφορά θερμοκρασίας στο σωματίδιο (κέντρο, επιφάνεια) και στο υγρό σε προσομοίωση με χρονικό βήμα  $\Delta t=1s$  σε σχέση με προσομοίωση με χρονικό βήμα  $\Delta t= 0,1s$ .



Σχήμα 25. Ανεξαρτησία χρονικού βήματος. Διαφορά θερμοκρασίας στο σωματίδιο (κέντρο, επιφάνεια) και στο υγρό σε προσομοίωση με χρονικό βήμα  $\Delta t=0,5s$  σε σχέση με προσομοίωση με χρονικό βήμα  $\Delta t= 0,1s$ .

Στην συνέχεια παρουσιάζεται ο υπολογιστικός χρόνος που χρειάζεται για όλη την ασηπτική επεξεργασία σε σχέση με το χρονικό βήμα στον Πίνακα 2. Με βάση τα αποτελέσματα παρατηρείται ότι όσο μειώνεται το χρονικό βήμα τόσο αυξάνεται λογαριθμικά ο χρόνος για την επίλυση όλης της διεργασίας.

Πίνακας 2. Επίδραση του χρονικού βήματος στον υπολογιστικό χρόνο CPU της αριθμητικής επίλυσης με τη χρήση λογισμικού προσομοίωσης.

Χρονικο Βήμα (s)	Χρόνος (s)
2	984,669
1	1384,666
0,5	2084,864
0,1	6244,285

Συγκρίνοντας τα τρία τελευταία Σχήματα φαίνεται ότι η διαφορά της θερμοκρασίας για χρονικό βήμα ίσο με 1s ως προς 0,1 s οι διαφορές στη θερμοκρασία κυμαίνονται από 1,1 °C έως -0,37 °C ενώ για το χρονικό βήμα ίσο με 0,5 s ως προς 0,1 s οι διαφορές στη

θερμοκρασία κυμαίνονται από 0,6 °C έως -0,25 °C. Τέλος συγκρίνοντας για τους υπολογιστικούς χρόνους CPU (Πίνακας 2) επιλέχθηκε το χρονικό βήμα που ισούται με 0,5 s. Τέλος, σημειώνεται ότι το ίδιο χρονικό βήμα επιλέχθηκε και για τη γεωμετρία (Σχήμα 11).

### 3.3 Προσομοίωση της ασηπτικής επεξεργασίας

Αφού έγινε ο σχεδιασμός της γεωμετρίας και η δημιουργία των πλεγμάτων, επιλέχθηκαν οι αρχικές και οριακές συνθήκες του προβλήματος και έγινε προσομοίωση της ασηπτικής επεξεργασίας μέσω CFD για την εξαγωγή αποτελεσμάτων. Στα Σχήματα 26, 27, 28 και 29 παρουσιάζεται η εξέλιξη της θερμοκρασίας για τα διάφορα μεγέθη σωματιδίων που εξετάστηκαν σε 5 διαφορετικά σημεία: στο κέντρο των σωματιδίων, στο σημείο που αντιστοιχεί σε απόσταση ίση με 1/3 από το κέντρο ως την επιφάνεια (σημείο B), στο σημείο που αντιστοιχεί σε απόσταση ίση με 2/3 από το κέντρο ως την επιφάνεια (σημείο C), το σημείο που αντιστοιχεί στην επιφάνεια του σωματιδίου και στο σημείο που αντιστοιχεί στο υγρό.

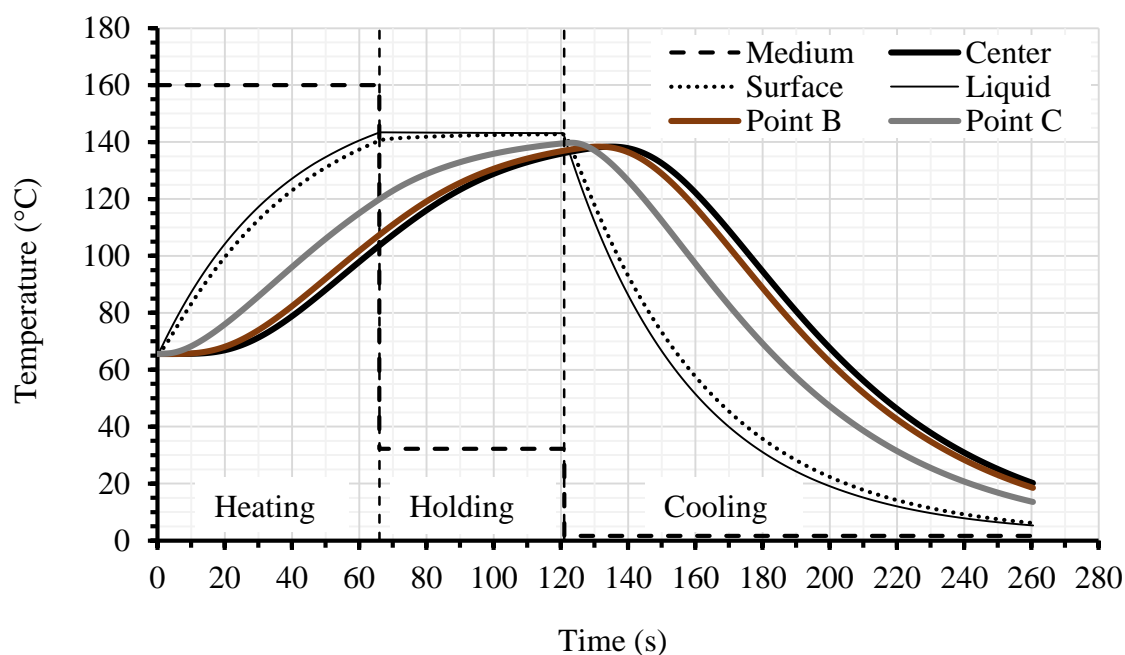
Σύμφωνα με τα Σχήματα 26, 27, 28 και 29 ο χρόνος θέρμανσης βρέθηκε 66 s έτσι ώστε το υγρό να έχει φτάσει σε θερμοκρασία τους 143,33 °C. Αυτή η θερμοκρασία έπρεπε να υπάρχει ως στόχος στην έξοδο του εναλλάκτη σύμφωνα με τους Chandarana και Gavin (1989) κι έτσι στο τέλος της θέρμανσης βρέθηκε ότι έπρεπε να θερμανθεί το υγρό και το σωματίδιο για 66 δευτερόλεπτα. Στο τέλος της θέρμανσης παρατηρήθηκε ότι η θερμοκρασία στην επιφάνεια του σωματιδίου ήταν σχεδόν ίδια για όλες τις περιπτώσεις ως προς το μέγεθος του σωματιδίου. Έτσι, για το μικρότερο σωματίδιο (1,016 cm) η θερμοκρασία στην επιφάνεια ήταν 140,47 °C, για το σωματίδιο μεγέθους 1,27 cm ήταν 139,36 °C, για αυτό με μέγεθος 1,524 cm ήταν 138,69 °C και τέλος για το μεγαλύτερο μέγεθος (1,778 cm) ήταν 138,03 °C. Συνεπώς, αν και στην θερμοκρασία της επιφάνειας στο τέλος της θέρμανσης δεν παίζει ρόλο το μέγεθος του σωματιδίου, το κέντρο του σωματιδίου είχε προσλάβει διαφορετικό ποσό θερμότητας αντιστρόφως ανάλογο με το μέγεθος του στο τέλος της θέρμανσης.

Έτσι λοιπόν από το μικρότερο σωματίδιο προς το μεγαλύτερο η θερμοκρασία στο γεωμετρικό κέντρο των σωματιδίων είναι 103,59 °C, 86,69 °C, 75,79 °C και 69,98 °C αντίστοιχα στο τέλος της θέρμανσης. Από αυτά, συμπεραίνεται ότι για κάθε αύξηση 0.1 in στο μέγεθος του σωματιδίου οι διαφορές θερμοκρασιών στο κέντρο του μικρότερου με το

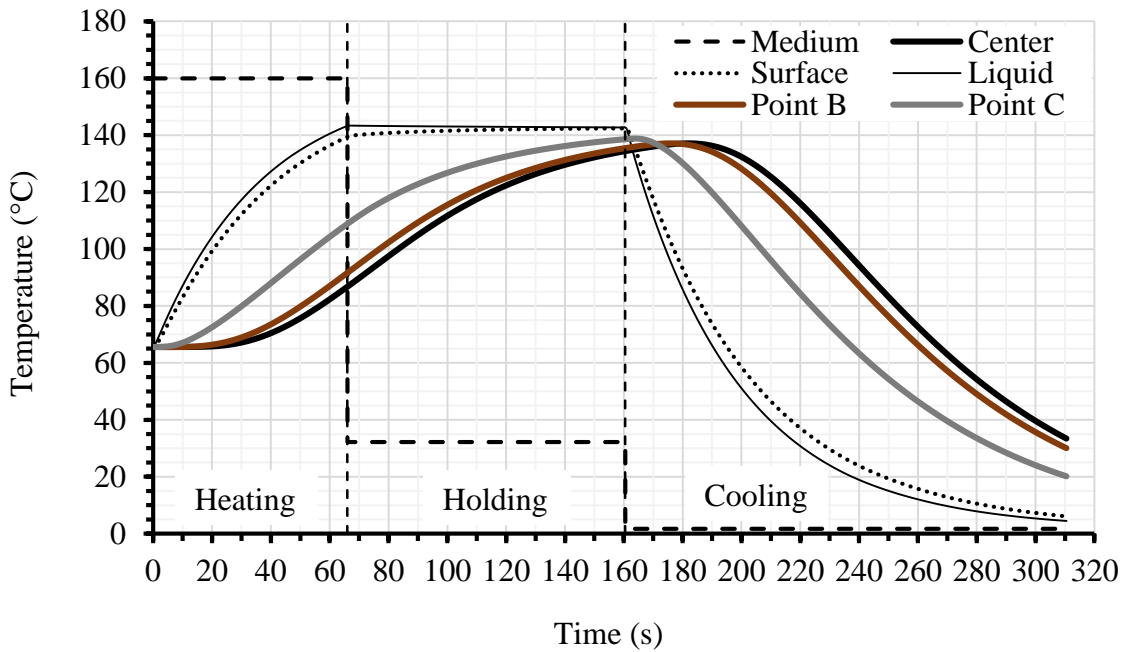
αμέσως μεγαλύτερο σωματίδιο είναι  $\Delta T_1=16,9\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T_2=10,9\text{ }^\circ\text{C}$  και  $\Delta T_3=5,81\text{ }^\circ\text{C}$  για τον ίδιο χρόνο θέρμανσης για όλες τις περιπτώσεις.

Ακόμη, οι χρόνοι παραμονής όπως υπολογίστηκαν με βάση την ενότητα 2.8, από τα Σχήματα 26 με 29 είναι 55 δευτερόλεπτα για το μικρότερο σωματίδιο, 94,5 δευτερόλεπτα για το σωματίδιο μεγέθους 1,27 cm, 145 δευτερόλεπτα για το σωματίδιο μεγέθους 1,524 cm και 202,5 δευτερόλεπτα για το μεγαλύτερο σωματίδιο μεγέθους 1,778 cm. Τέλος οι χρόνοι ψύξης είναι 189 s, 150 s, 149 s και 185,5 s αντίστοιχα.

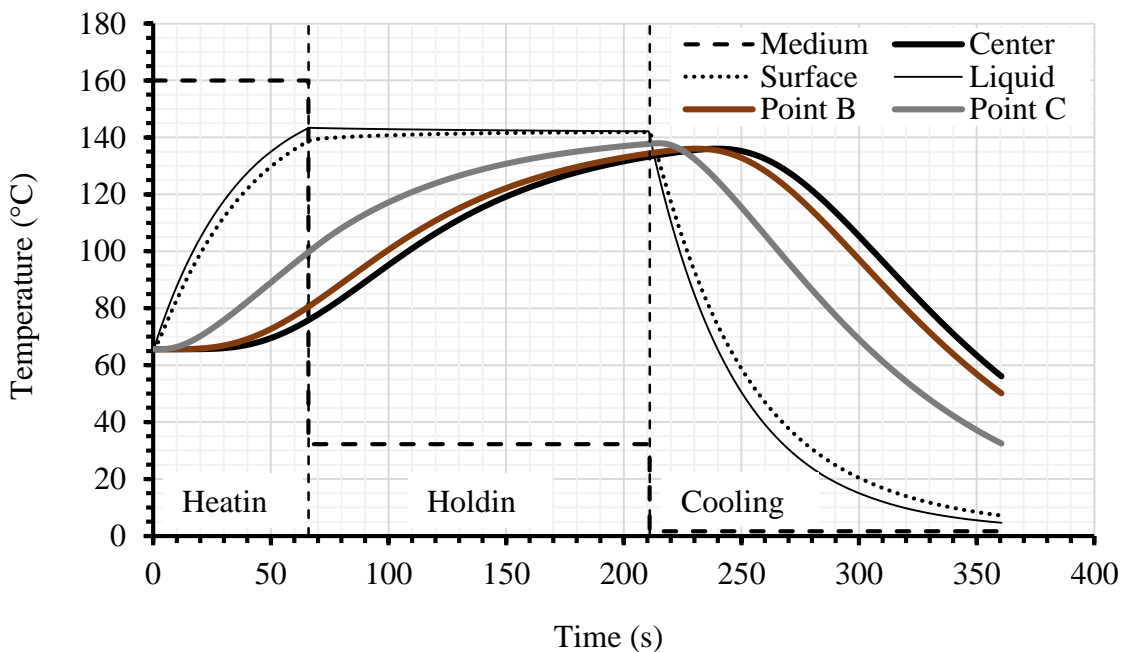
Επίσης στο Σχήμα 26 παρατηρείται ότι η θερμοκρασία στο κέντρο για το σωματίδιο μεγέθους 1,016 έχει φτάσει τους  $136,06\text{ }^\circ\text{C}$  στο τέλος του σωλήνα παραμονής και όταν έχει υπάρξει επίτευξη της απαιτούμενης τιμής  $F_0$ . Αντίστοιχα από τα Σχήματα 27 με 29 παρατηρείται ότι η θερμοκρασία στο κέντρο για το σωματίδιο μεγέθους 1,27 cm έχει φτάσει τους  $134,16\text{ }^\circ\text{C}$ , για το σωματίδιο 1,524 cm είναι  $133,23\text{ }^\circ\text{C}$  και για το μεγαλύτερο σωματίδιο είναι  $132,06\text{ }^\circ\text{C}$ .



Σχήμα 26. Εξέλιξη της θερμοκρασίας στα πέντε σημεία κατά την ασηπτική επεξεργασία στα τμήματα θέρμανσης ( $T_{med}=160\text{ }^\circ\text{C}$ ), ψύξης ( $T_{med}=1,667\text{ }^\circ\text{C}$ ) και στον σωλήνα παραμονής ( $T_{med}=32,222\text{ }^\circ\text{C}$ ) για  $k_p=0,433\text{ W/mK}$  και σωματίδιο μεγέθους 1,016 cm (0.4 in).

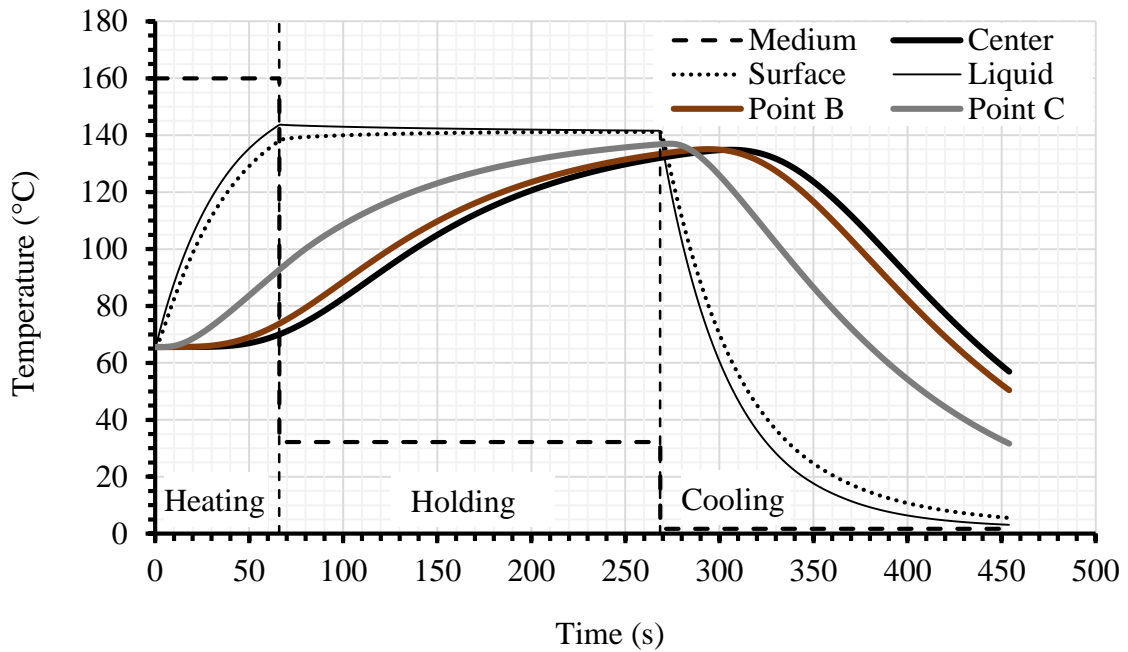


Σχήμα 27. Εξέλιξη της θερμοκρασίας στα πέντε σημεία κατά την ασηπτική επεξεργασία στα τμήματα θέρμανσης ( $T_{med}=160\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), ψύξης ( $T_{med}=1,667\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) και στον σωλήνα παραμονής ( $T_{med}=32,222\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) για  $k_p=0,433\text{ W/mK}$  και σωματίδιο μεγέθους 1,27 cm (0.5 in).

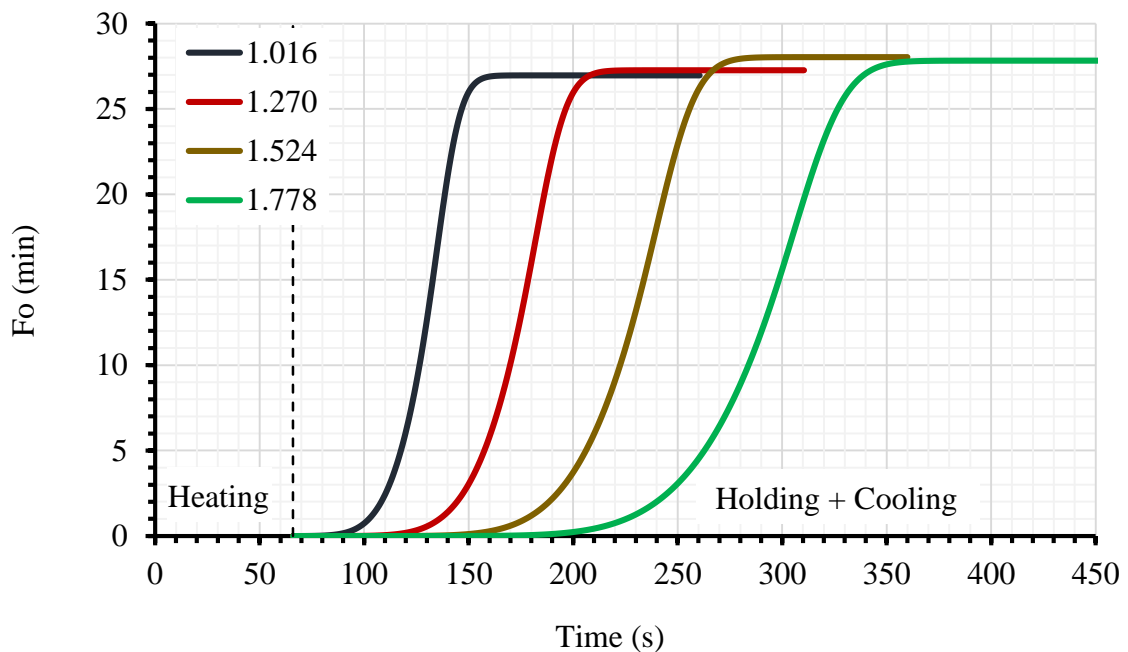


Σχήμα 28. Εξέλιξη της θερμοκρασίας στα πέντε σημεία κατά την ασηπτική επεξεργασία στα τμήματα θέρμανσης ( $T_{med}=160\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), ψύξης ( $T_{med}=1,667\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) και στον σωλήνα παραμονής ( $T_{med}=32,222\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) για  $k_p=0,433\text{ W/mK}$  και σωματίδιο μεγέθους 1,524 cm (0.6 in).



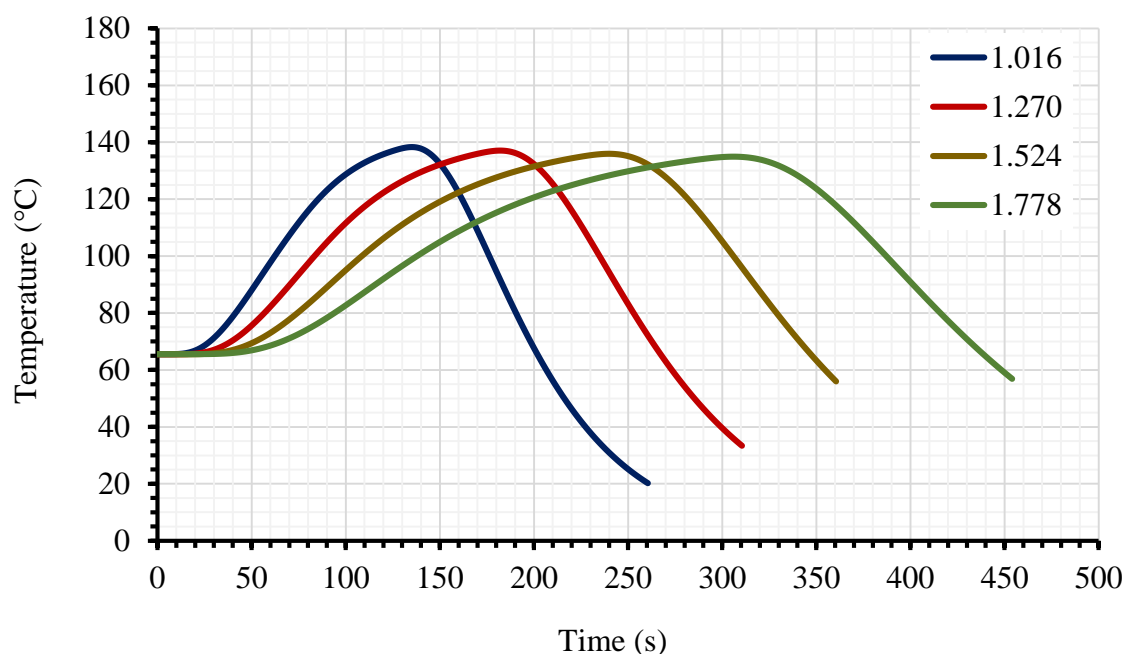


Σχήμα 29. Εξέλιξη της θερμοκρασίας στα πέντε σημεία κατά την ασηπτική επεξεργασία στα τμήματα θέρμανσης ( $T_{med}=160\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), ψύξης ( $T_{med}=1,667\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) και στον σωλήνα παραμονής ( $T_{med}=32,222\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) για  $k_p=0,433\text{ W/mK}$  και σωματίδιο μεγέθους  $1,778\text{ cm}$  ( $0.7\text{ in}$ ).



Σχήμα 30. Εξέλιξη της τιμής  $F_o$  στο κέντρο του σωματιδίου κατά την ασηπτική επεξεργασία στα τμήματα θέρμανσης ( $T_{med}=160\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), ψύξης ( $T_{med}=1,667\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) και στον σωλήνα παραμονής ( $T_{med}=32,222\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) για  $k_p=0,433\text{ W/mK}$  και όλα τα μεγέθη σωματιδίων.

Στο Σχήμα 31, παρουσιάζεται η εξέλιξη της θερμοκρασίας στο κέντρο του σωματιδίου για όλα τα μεγέθη σωματιδίου και ίδια θερμική αγωγιμότητα  $k_p=0,433 \text{ W/mK}$ . Έτσι, παρατηρείται ότι η μέγιστη θερμοκρασία στο κέντρο για το σωματίδιο μεγέθους 1,016 cm είναι 138,34 °C μετά την πάροδο 135 δευτερολέπτων από την αρχή της επεξεργασίας, για το σωματίδιο μεγέθους 1,27 cm είναι 137,06 °C μετά την πάροδο 182 δευτερολέπτων, για το σωματίδιο μεγέθους 1,524 cm είναι 135,99 °C στα 240 δευτερόλεπτα και τέλος για το μεγαλύτερο σε μέγεθος σωματίδιο η μέγιστη θερμοκρασία φτάνει τους 134,92 °C μετά από 306 δευτερόλεπτα.

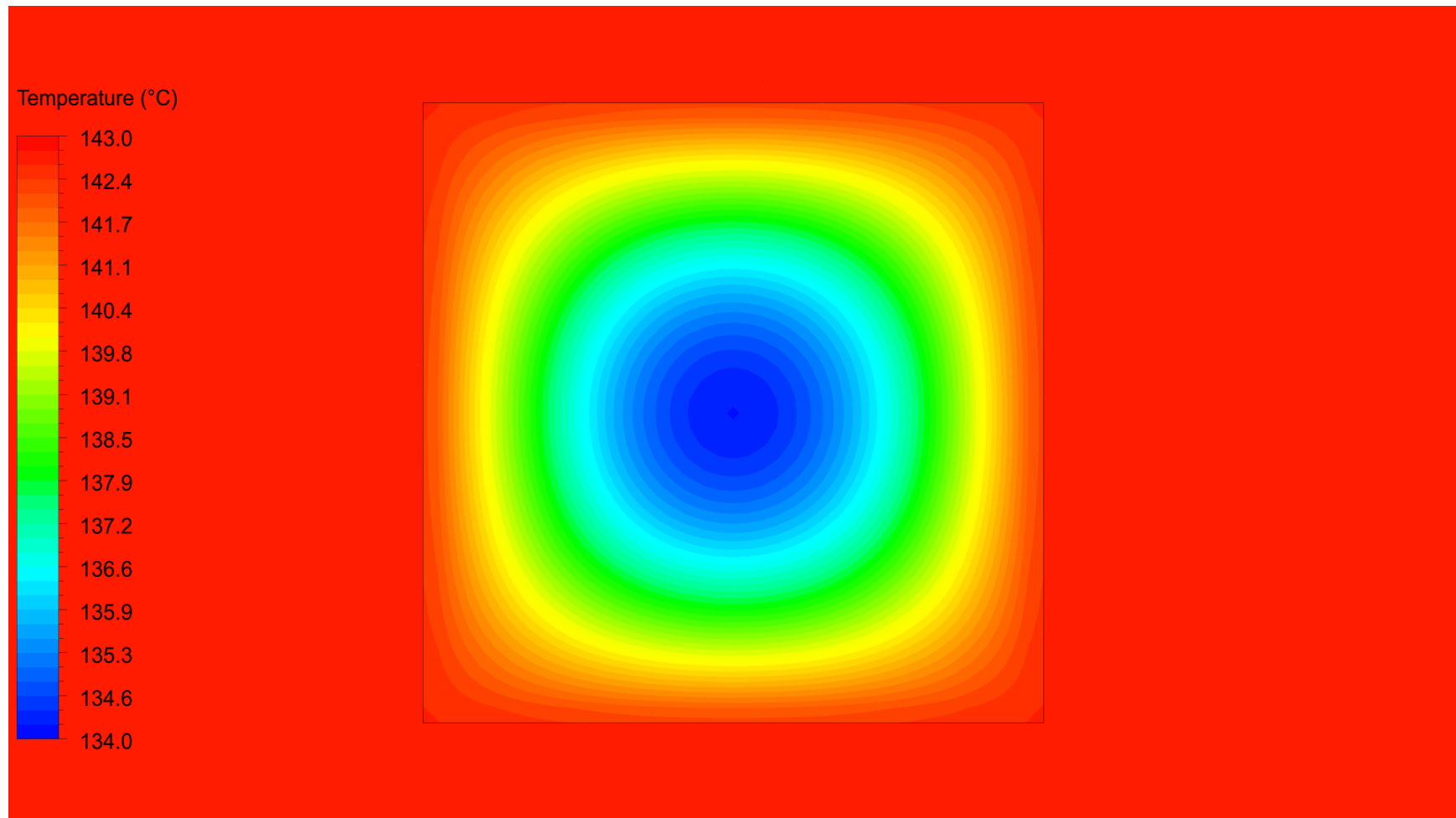


Σχήμα 31. Εξέλιξη της θερμοκρασίας στο κέντρο του σωματιδίου κατά την ασηπτική επεξεργασία στα τμήματα θέρμανσης ( $T_{med}=160 \text{ }^\circ\text{C}$ ), ψύξης ( $T_{med}=1,667 \text{ }^\circ\text{C}$ ) και στον σωλήνα παραμονής ( $T_{med}=32,222 \text{ }^\circ\text{C}$ ) για  $k_p=0,433 \text{ W/mK}$  και όλα τα μεγέθη σωματιδίων.

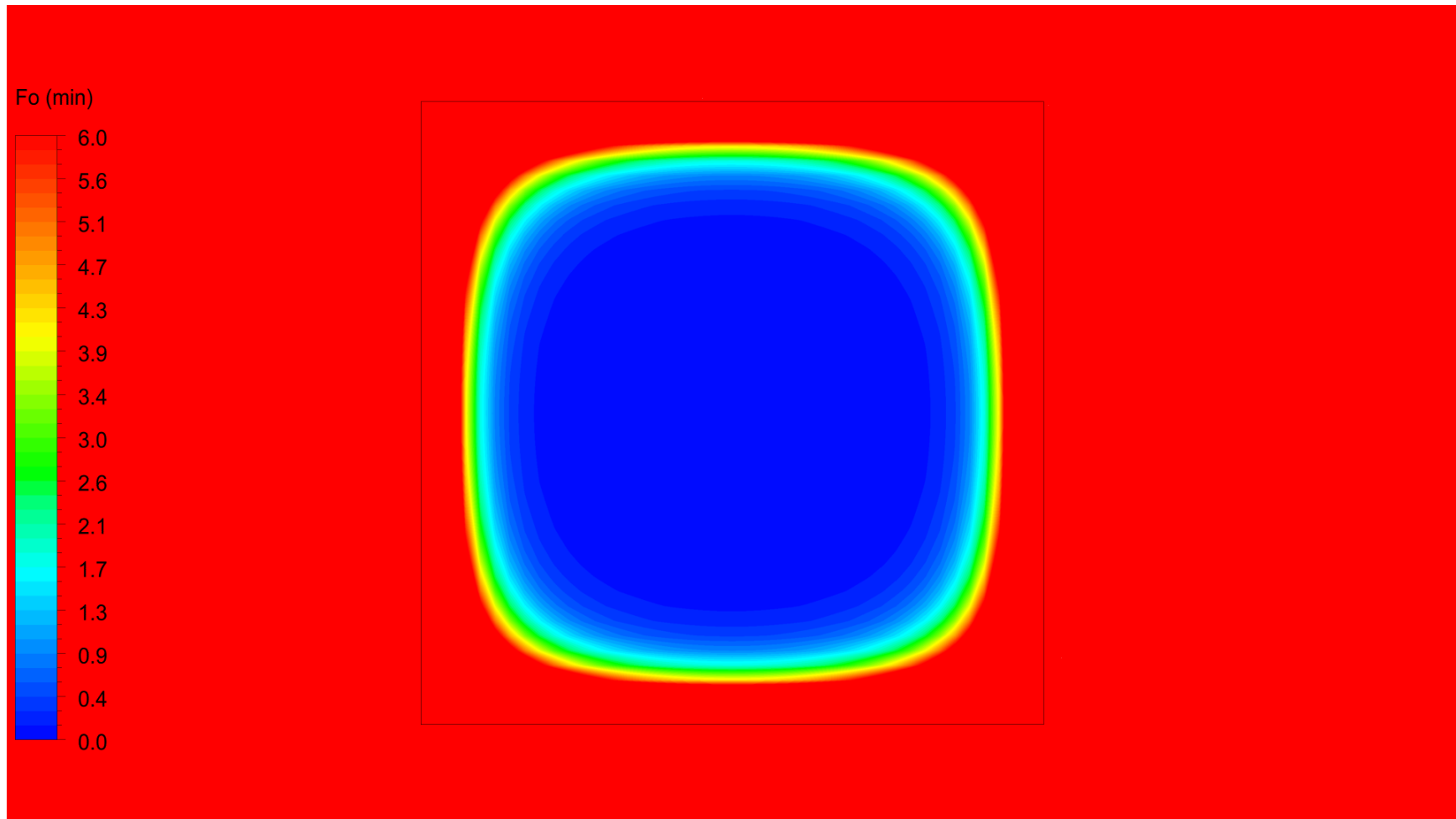
Στα Σχήματα 32 και 33 παρουσιάζεται η κατανομή της θερμοκρασίας σε διαγράμματα ισοϋψών θερμοκρασίας σε δύο διαστάσεις (temperature contour plots) στο σωματίδιο στο τέλος του σωλήνα παραμονής (160,5 s) και η κατανομή της τιμής  $F$  αντίστοιχα για το σωματίδιο μεγέθους 1,27 cm σε τομή (plane) κάτοψης. Στα Σχήματα 34 και 35 παρουσιάζεται η κατανομή της θερμοκρασίας σε διαγράμματα ισοϋψών θερμοκρασίας για όλη την διεργασία και μόνο στον σωλήνα παραμονής αντίστοιχα, για το ίδιο μέγεθος σωματιδίου σε τομή πλάγιας όψης. Στο Σχήμα 36 παρουσιάζεται η εξέλιξη της τιμής  $F_o$  με

την μορφή διαγράμματος ισοϋψών τιμής  $F_0$  σε δύο διαστάσεις ( $F_0$  value contour plots) μόνο στο σωματίδιο μεγέθους 1,27 cm και μόνο όταν αυτό βρίσκεται στον σωλήνα παραμονής ενώ στα Σχήμα 37 και 38 παρουσιάζονται τα ίδια αποτελέσματα με αυτά το ίδια με αυτά των Σχημάτων 34 και 35 με τη διαφορά ότι το μέγεθος του σωματιδίου είναι 1,524 cm (0.6 in). Τέλος, στα Σχήματα 39 και 40 παρουσιάζεται η κατανομή της θερμοκρασίας σε διαγράμματα ισοϋψών θερμοκρασίας για όλη την διεργασία και μόνο στον σωλήνα παραμονής αντίστοιχα, για μέγεθος σωματιδίου 1,778 cm.

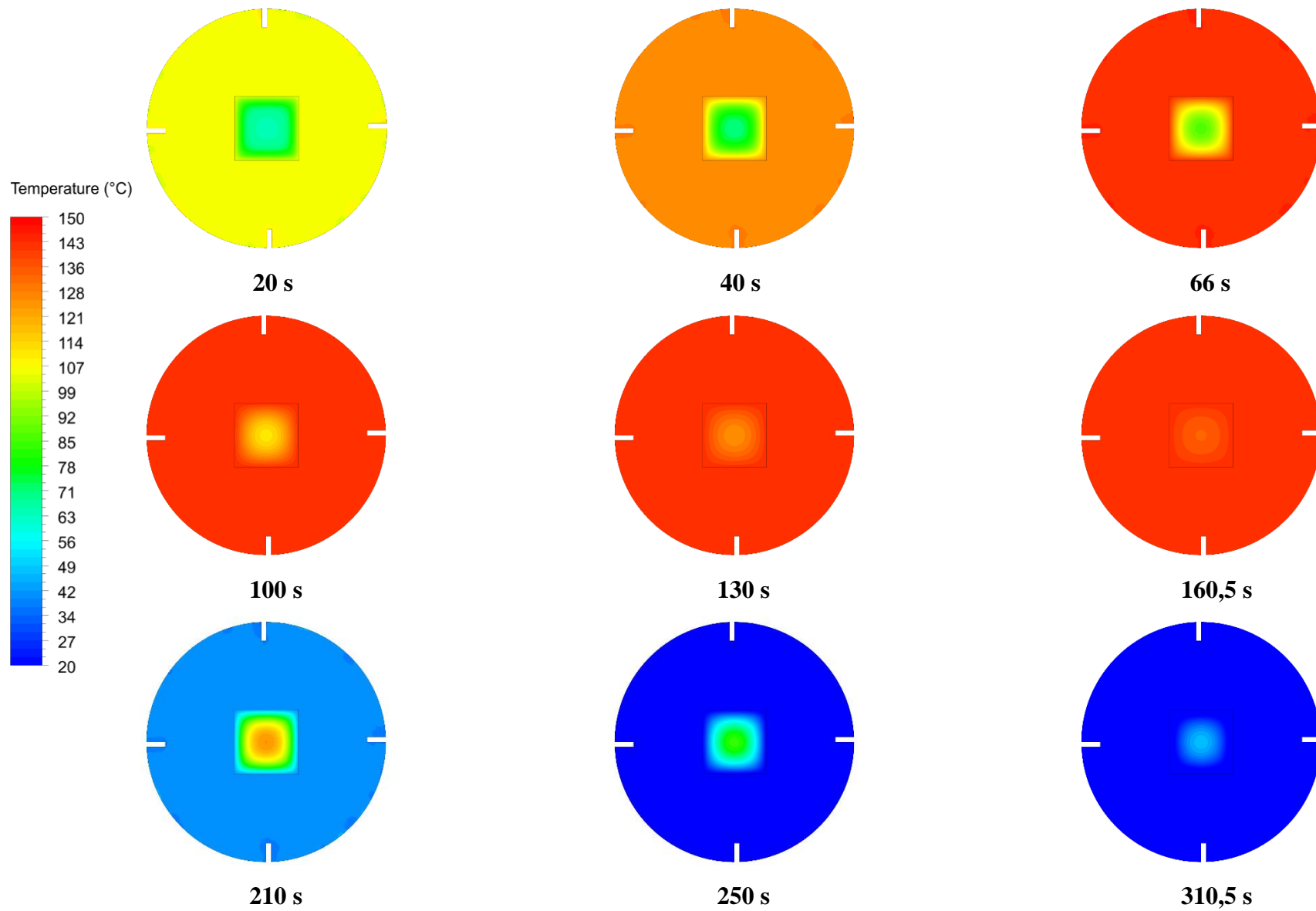
Στη συνέχεια, στο Σχήμα 41 παρουσιάζεται η εξέλιξη της θερμοκρασίας στα πέντε σημεία που έχουν αναφερθεί και παραπάνω στην περίπτωση μόνο του σωλήνα παραμονής για 200 s. Η αρχική θερμοκρασία του σωματιδίου είναι 65,55 °C και η αρχική θερμοκρασία του μέσου ήταν 143,33 °C. Η γραμμή χρώματος μπλε που υπάρχει στο γράφημα δείχνει το χρονικό σημείο κατά το οποίο το  $F_0$  ισούται με 6. Στο Σχήμα 42 παρουσιάζεται η σύγκριση των δύο γεωμετριών (Σχήματα 10 και 11) ως προς την εξέλιξη της θερμοκρασίας στα πέντε σημεία. Οι συνεχείς γραμμές στο Σχήμα 42 αντιστοιχούν στη γεωμετρία του Σχήματος 10 που με βάσει αυτή γίνονται όλες οι προσομοιώσεις στην παρούσα μελέτη και οι διακεκομμένες με αυτές του Σχήματος 11. Αυτό που εμφανίζεται στο Σχήμα 42 είναι μια ταύτιση των αποτελεσμάτων των δύο γεωμετριών (Σχήματα 10 και 11).



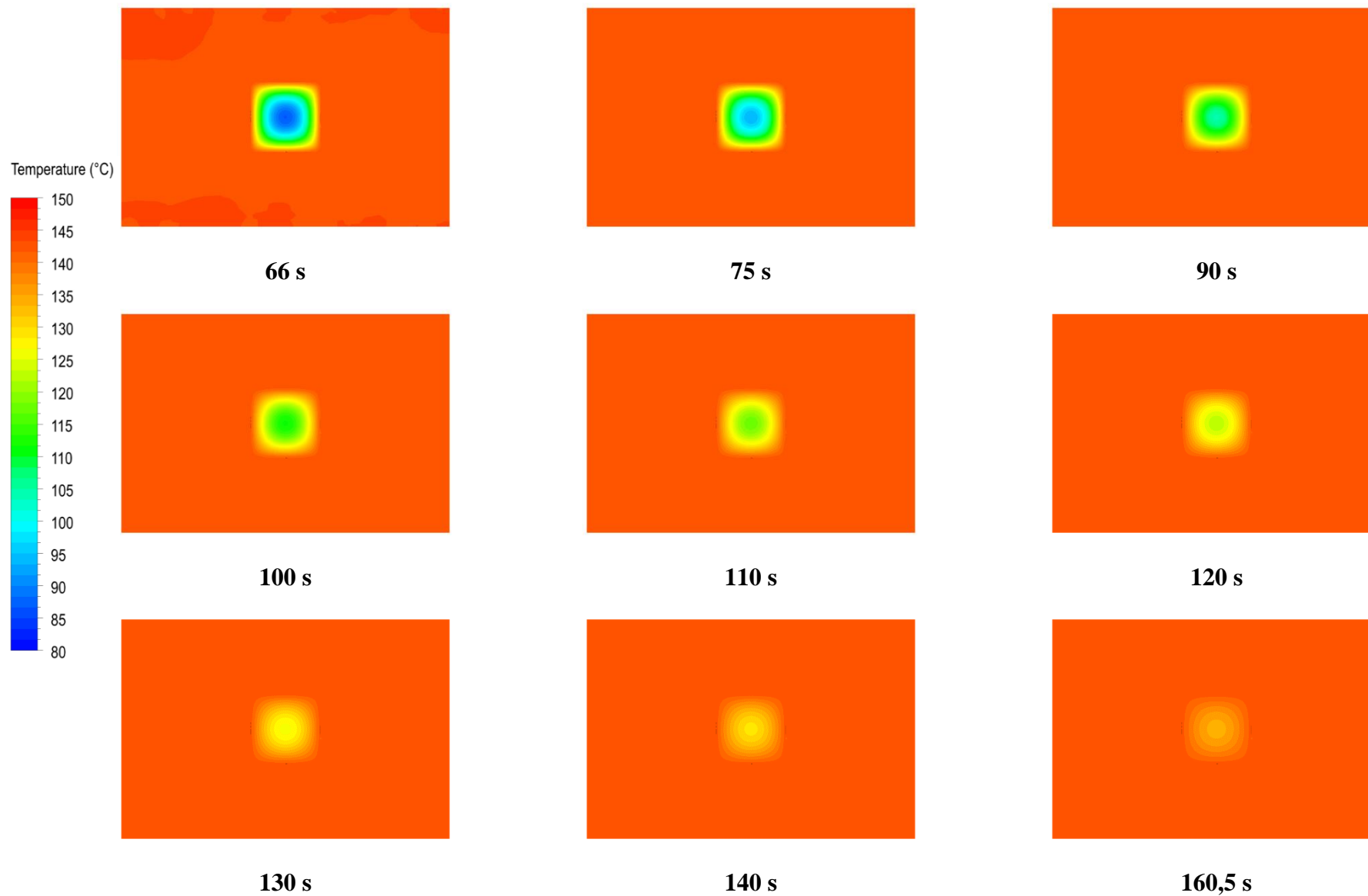
Σχήμα 32. Κατανομή θερμοκρασίας σε σωματίδιο μεγέθους 1,27 cm (0.5 in) στο τέλος του σωλήνα παραμονής (160,5 s).



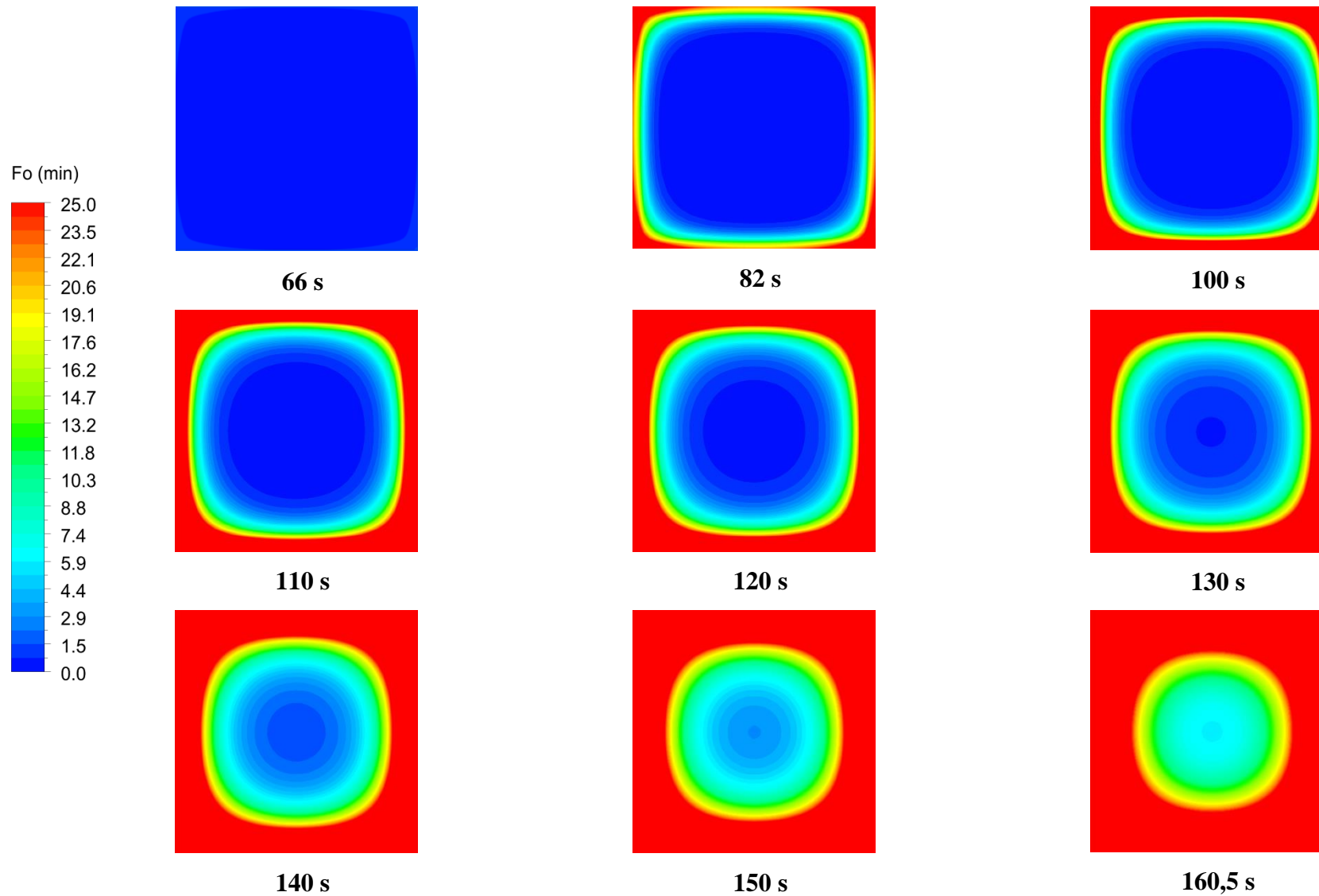
Σχήμα 33. Κατανομή τιμής  $F_o$  σε σωματίδιο μεγέθους 1,27 cm (0.5 in) στον σωλήνα παραμονής την χρονική στιγμή 90 s.



Σχήμα 34. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας για όλη τη διεργασία σε σωματίδιο μεγέθους 1,27 cm (0.5 in).

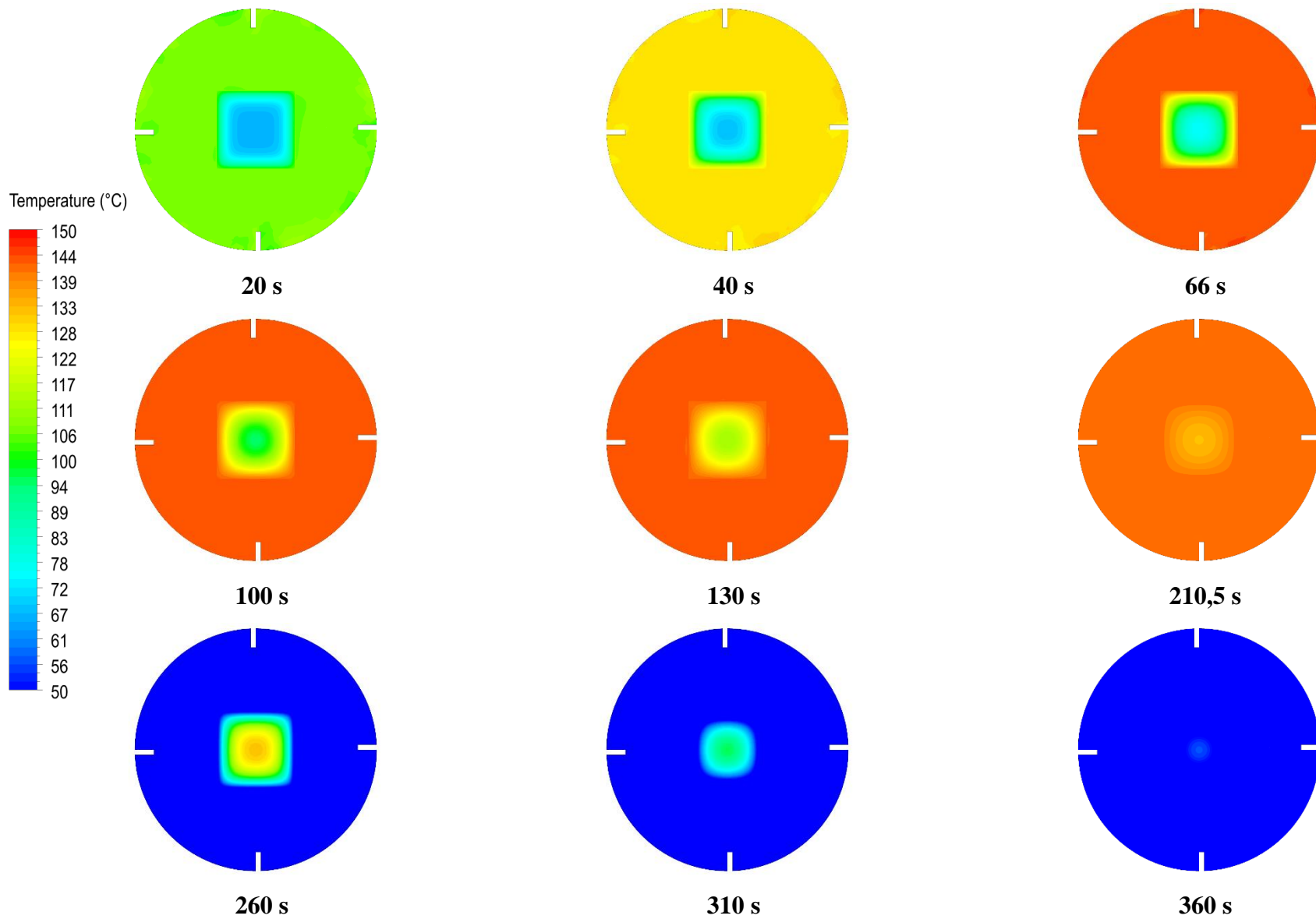


Σχήμα 35. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας στον σωλήνα παραμονής και σε σωματίδιο μεγέθους 1,27 cm (0.5 in).

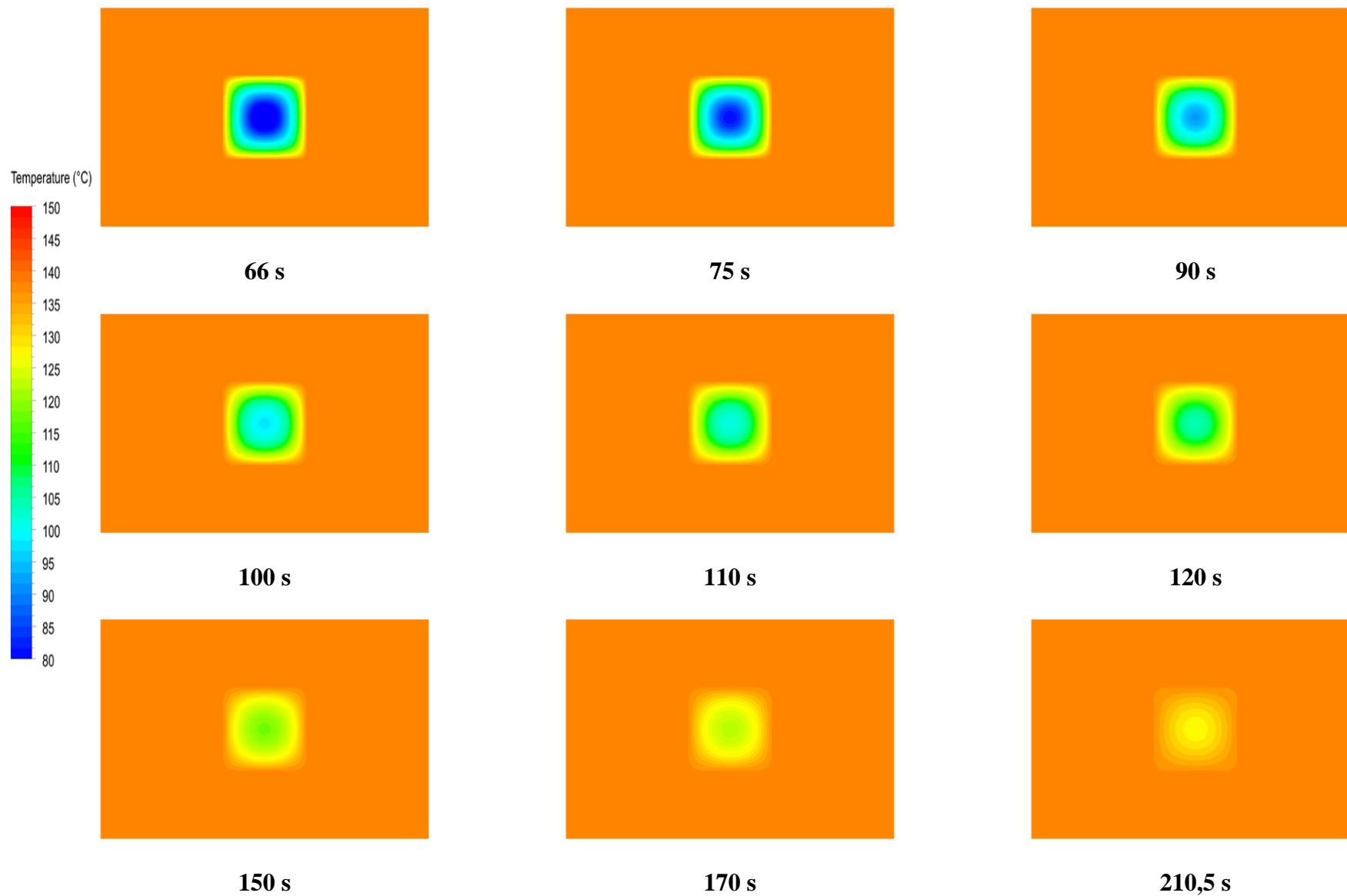


Σχήμα 36. Εξέλιξη της κατανομής της τιμής  $F_o$  σε σωματίδιο μεγέθους 1,27 cm (0.5 in) μόνο στον σωλήνα παραμονής.

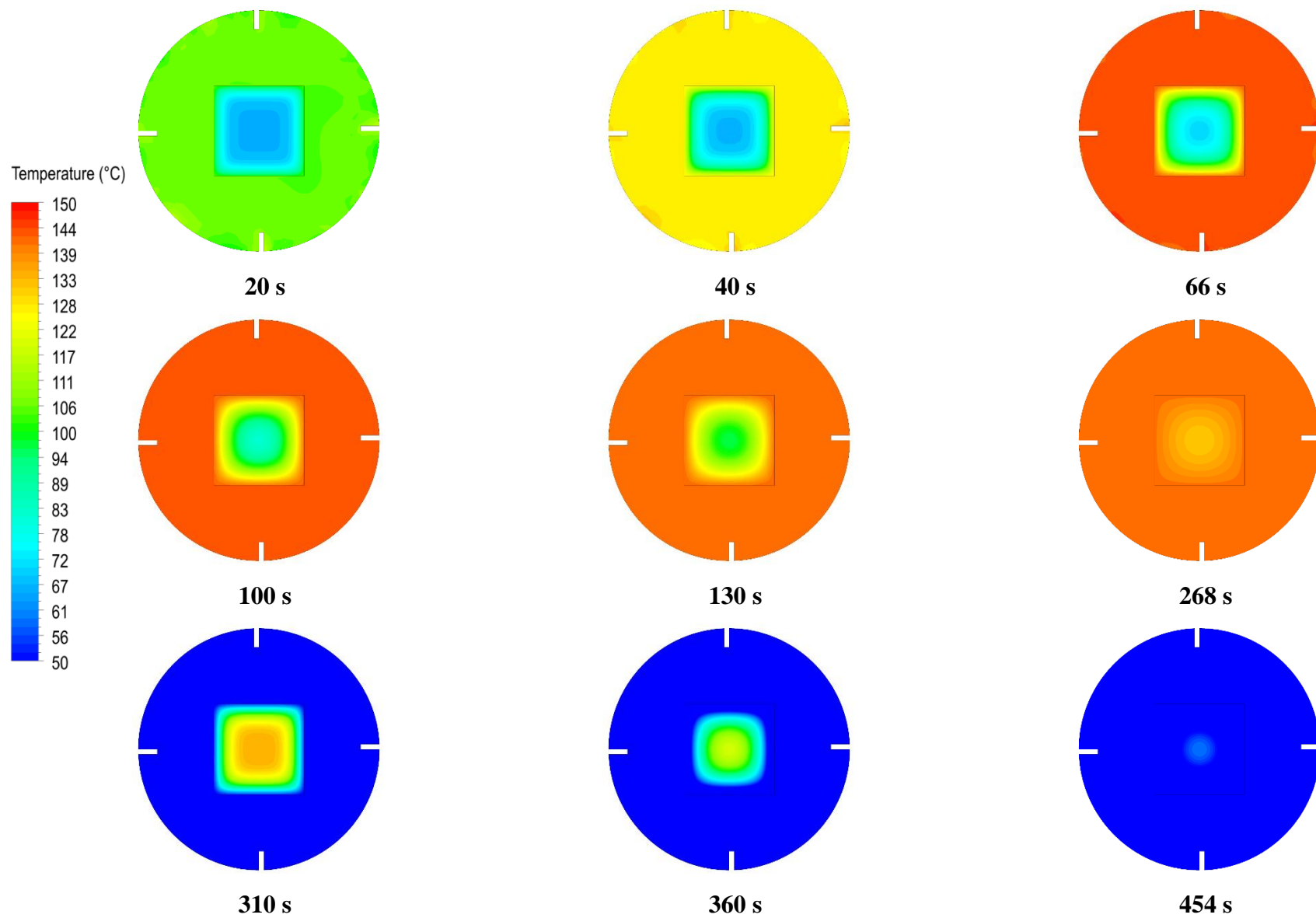




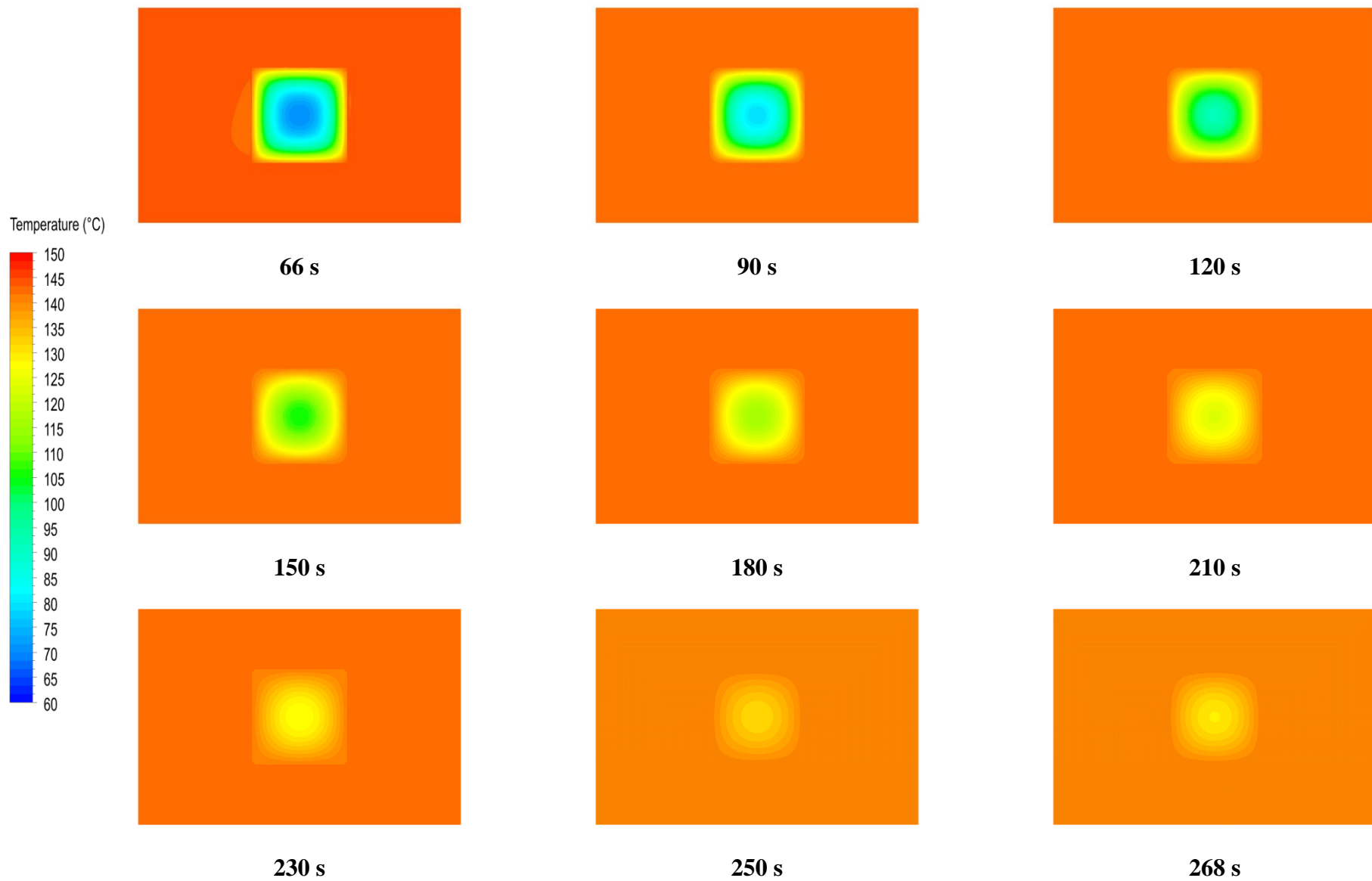
Σχήμα 37. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας για όλη την διεργασία σε σωματίδιο μεγέθους 1,524 cm (0.6 in).



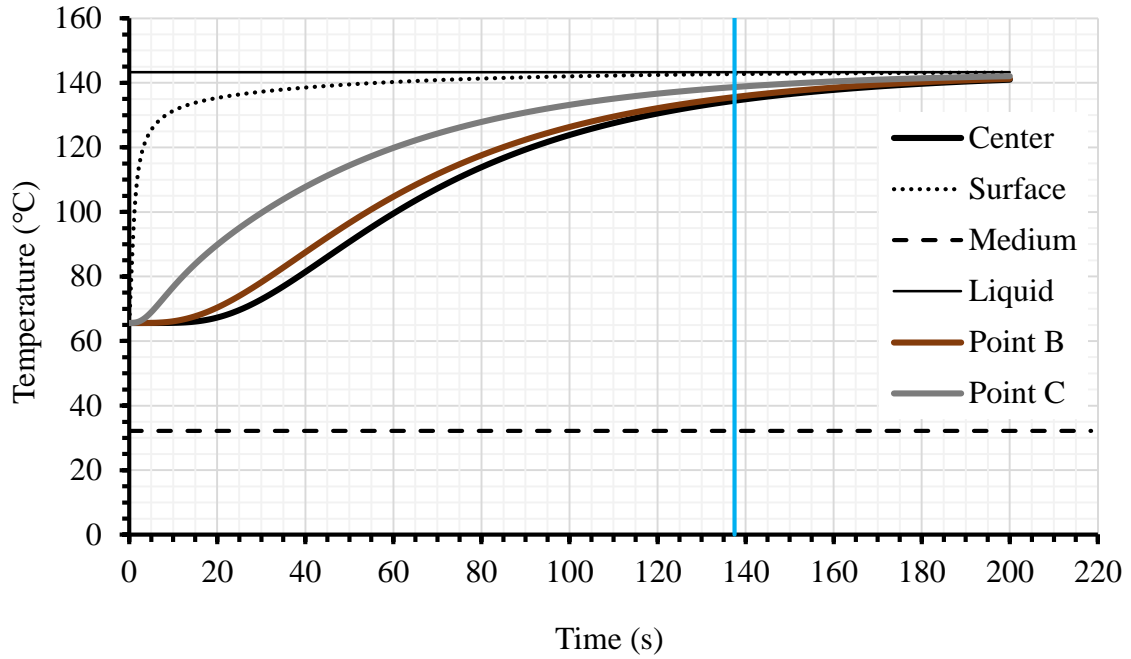
Σχήμα 38. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας στον σωλήνα παραμονής και σε σωματίδιο μεγέθους 1,524 cm (0.6 in).



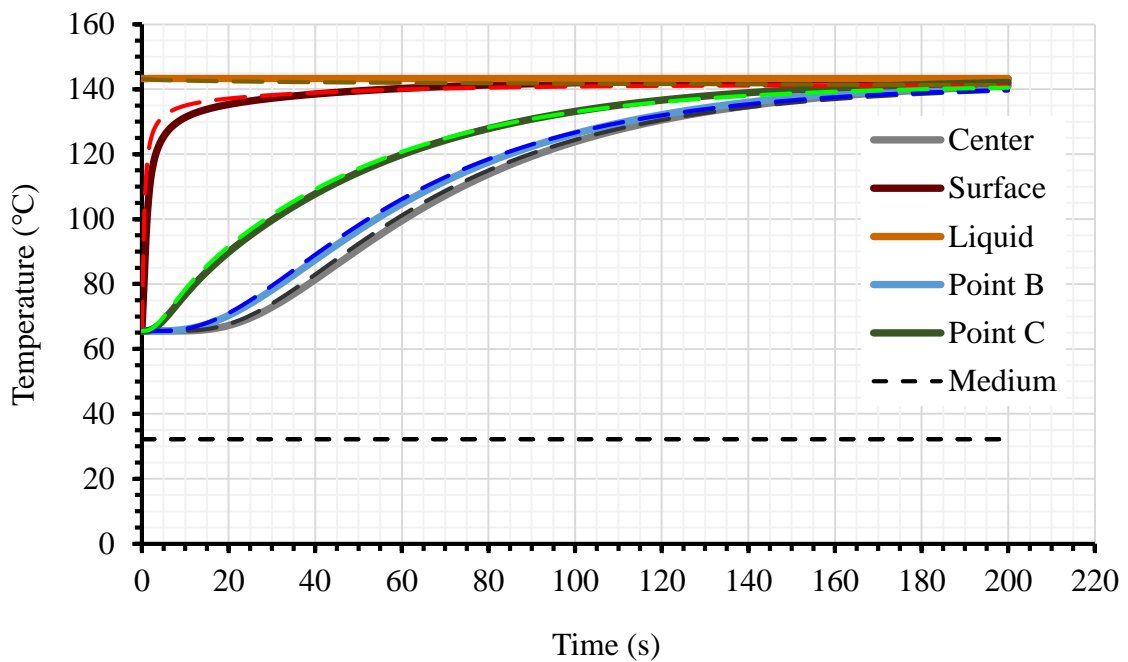
Σχήμα 39. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας για όλη την διεργασία σε σωματίδιο μεγέθους 1,778 cm (0.7 in).



Σχήμα 40. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας στον σωλήνα παραμονής και σε σωματίδιο μεγέθους 1,778 cm (0.7 in).



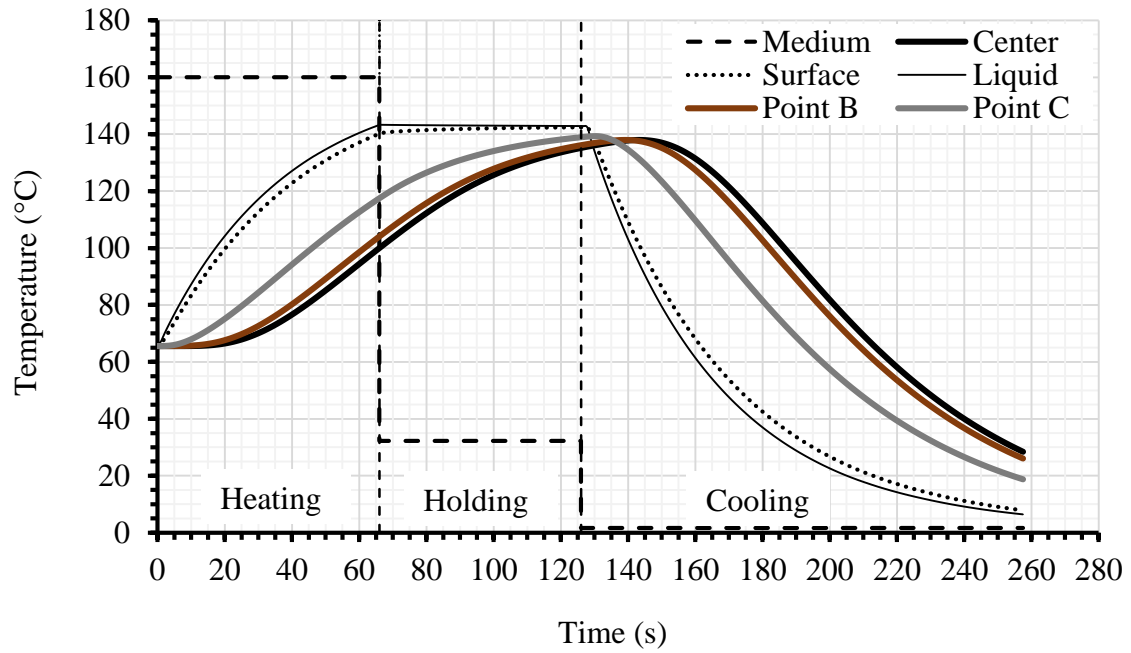
Σχήμα 41. Εξέλιξη της θερμοκρασίας στα πέντε σημεία κατά την ασηπτική επεξεργασία στον σωλήνα παραμονής ( $T_{med}=32,222\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) για  $k_p=0,433\text{ W/mK}$  και σωματίδιο μεγέθους 1,27 cm (0.5 in).



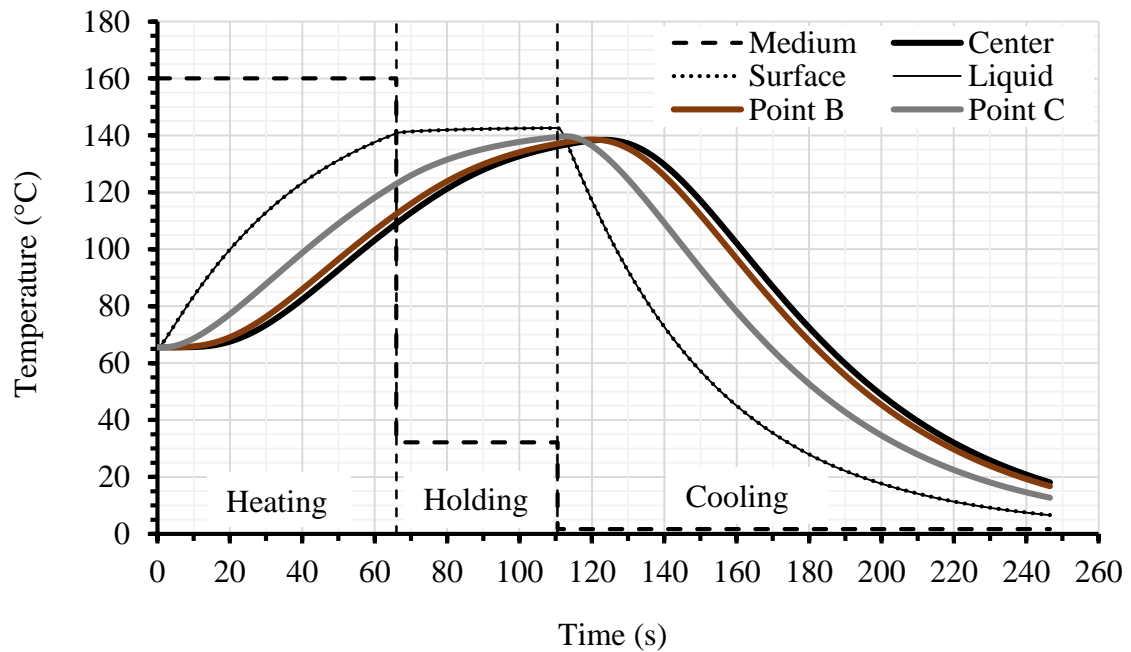
Σχήμα 42. Σύγκριση της εξέλιξης της θερμοκρασίας στα πέντε σημεία κατά την ασηπτική επεξεργασία στον σωλήνα παραμονής ( $T_{med}=32,222\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) για τις δύο διαφορετικές γεωμετρίες για  $k_p=0,433\text{ W/mK}$  και σωματίδιο μεγέθους 1,27 cm (0.5 in).

Στα Σχήματα 43 και 44 παρουσιάζονται η εξέλιξη της θερμοκρασίας για τιμές της θερμικής αγωγιμότητας ίσες με 0,62 W/(mK) και 0,79 W/(mK) αντίστοιχα και για το ίδιο μέγεθος σωματιδίου 1,27 cm. Αυτό που παρατηρείται είναι μία μείωση του χρόνου παραμονής του σωματιδίου όσο αυξάνεται η θερμική αγωγιμότητα. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση που η θερμική αγωγιμότητα του σωματιδίου είναι 0,62 W/(mK) ο χρόνος παραμονής είναι 60 s ενώ στην περίπτωση που ισούται με 0,79 W/(mK) ο χρόνος παραμονής είναι 44,5 s. Επίσης, στο Σχήμα 44 παρατηρείται ότι η καμπύλη της εξέλιξης της θερμοκρασίας του υγρού συμπίπτει απόλυτα με αυτήν της επιφάνειας του σωματιδίου για όλη την χρονική διάρκεια της ασηπτικής επεξεργασίας. Αυτό συμβαίνει λόγω της μεγάλης θερμικής αγωγιμότητας με αποτέλεσμα να μεταφέρεται η θερμότητα από το υγρό στην επιφάνεια αμέσως.

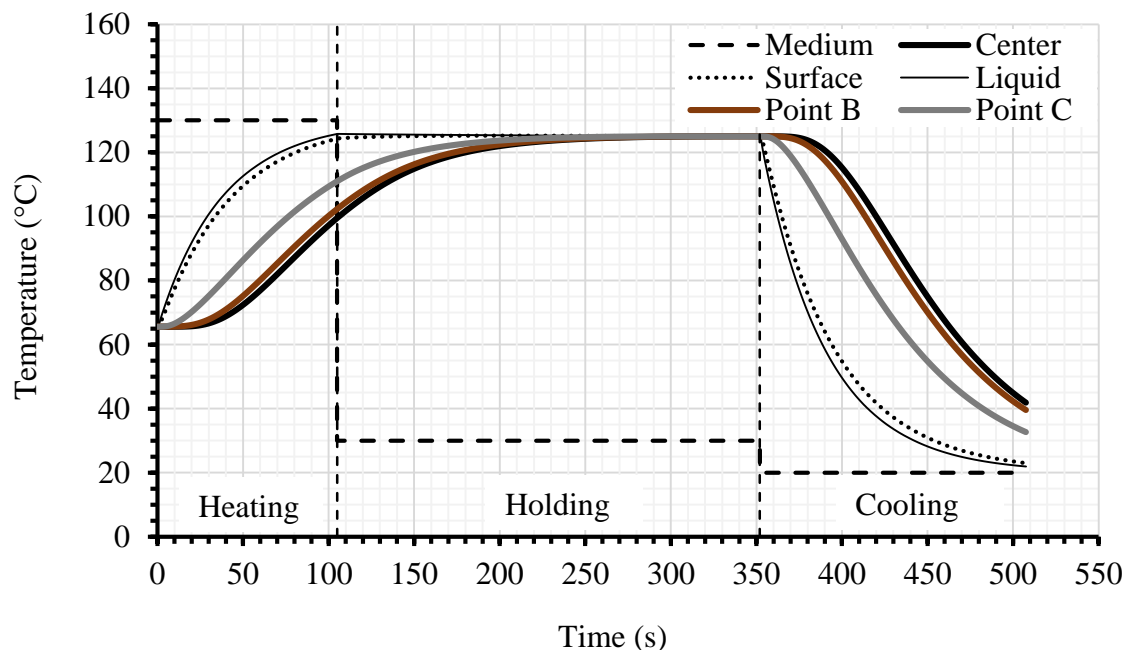
Στο Σχήμα 45 παρουσιάζεται η εξέλιξη της θερμοκρασίας για χαμηλότερες θερμοκρασίες θέρμανσης (130 °C) και υψηλότερες ψύξης (20 °C) για μέγεθος σωματιδίου 1,27 cm σε σχέση με τις παραπάνω περιπτώσεις στα Σχήματα 26 έως 29. Αυτό που παρατηρείται στο Σχήμα 45 σε σχέση με το Σχήμα 27 είναι το γεγονός ότι ο χρόνος παραμονής στην πρώτη περίπτωση είναι 247 s ενώ στη δεύτερη είναι 94,5 s δηλαδή 2,5 φορές περίπου περισσότερο για χαμηλότερες θερμοκρασίες θέρμανσης έτσι ώστε να φτάσει η τιμή  $F_0$  την τιμή 6.



Σχήμα 43. Εξέλιξη της θερμοκρασίας στα πέντε σημεία κατά την ασηπτική επεξεργασία στα τμήματα θέρμανσης ( $T_{med}=160\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), ψύξης ( $T_{med}=1,667\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) και στον σωλήνα παραμονής ( $T_{med}=32,222\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) για  $k_p=0,62\text{ W/mK}$  και σωματίδιο μεγέθους  $1,27\text{ cm}$  ( $0.5\text{ in}$ ).



Σχήμα 44. Εξέλιξη της θερμοκρασίας στα πέντε σημεία κατά την ασηπτική επεξεργασία στα τμήματα θέρμανσης ( $T_{med}=160\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), ψύξης ( $T_{med}=1,667\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) και στον σωλήνα παραμονής ( $T_{med}=32,222\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) για  $k_p=0,79\text{ W/mK}$  και σωματίδιο μεγέθους  $1,27\text{ cm}$  ( $0.5\text{ in}$ ).

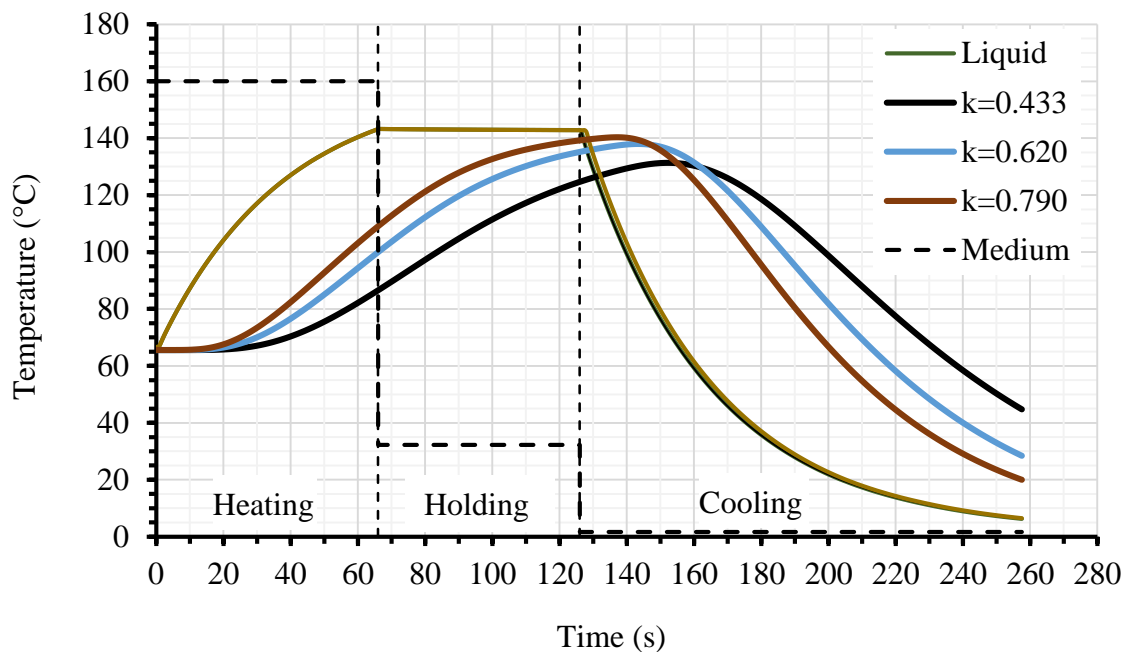


Σχήμα 45. Εξέλιξη της θερμοκρασίας στα πέντε σημεία κατά την ασηπτική επεξεργασία στα τμήματα θέρμανσης ( $T_{med}=130\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), ψύξης ( $T_{med}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) και στον σωλήνα παραμονής ( $T_{med}=30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) για  $k_p=0,433\text{ W/mK}$  και σωματίδιο μεγέθους  $1,27\text{ cm}$  ( $0.5\text{ in}$ ).

Στη συνέχεια, στο Σχήμα 46 παρουσιάζεται η επίδραση της θερμικής αγωγιμότητας του σωματιδίου στην εξέλιξη της θερμοκρασίας με ίσο χρόνο παραμονής στη θέρμανση στην ψύξη και στον σωλήνα παραμονής και για τις τρεις περιπτώσεις έτσι φανεί η επίδραση της θερμικής αγωγιμότητας στην θέρμανση των σωματιδίων:  $0,433\text{ W/(mK)}$ ,  $0,62\text{ W/(mK)}$ , και  $0,79\text{ W/(mK)}$ . Ο χρόνος παραμονής για όλες τις περιπτώσεις αντιστοιχεί στον χρόνο παραμονής του σωματιδίου με θερμική αγωγιμότητα  $0,62\text{ W/(mK)}$  έτσι ώστε να φτάσει η τιμή  $F_0$  να ισούται με 6 (Σχήμα 34). Έτσι λοιπόν, έγινε προσομοίωση για σωματίδιο μεγέθους  $1,27\text{ cm}$  ( $0.5\text{ in}$ ) για χρόνο θέρμανσης  $66\text{ s}$ , για χρόνο ψύξης  $131,5\text{ s}$  και χρόνο στο σωλήνα παραμονής  $60\text{ s}$ .

Αυτό που εμφανίζεται στο Σχήμα 46, είναι ότι όσο αυξάνεται η θερμική αγωγιμότητα τόσο πιο γρήγορα αυξάνεται η θερμοκρασία στο κέντρο (καφέ χρώμα) ενώ όσο μειώνεται τόσο πιο αργά αυξάνεται η θερμοκρασία (μαύρο χρώμα). Αντίθετα, στο τμήμα της ψύξης όσο μεγαλύτερη είναι θερμική αγωγιμότητα τόσο μικρότερη τελική θερμοκρασία αποκτά το κέντρο του σωματιδίου. Τέλος, παρατηρείται ότι οι καμπύλες που αντιστοιχούν στην θερμοκρασία του υγρού για κάθε περίπτωση συμπίπτουν σχεδόν απόλυτα.





Σχήμα 46. Επίδραση της θερμικής αγωγιμότητας στην εξέλιξη της θερμοκρασίας στο κέντρο του σωματιδίου κατά την ασηπτική επεξεργασία στα τμήματα θέρμανσης ( $T_{med}=160$  °C), ψύξης ( $T_{med}=1,667$  °C) και στον σωλήνα παραμονής ( $T_{med}=32,222$  °C) για σωματίδιο μεγέθους 1,27 cm (0.5 in).

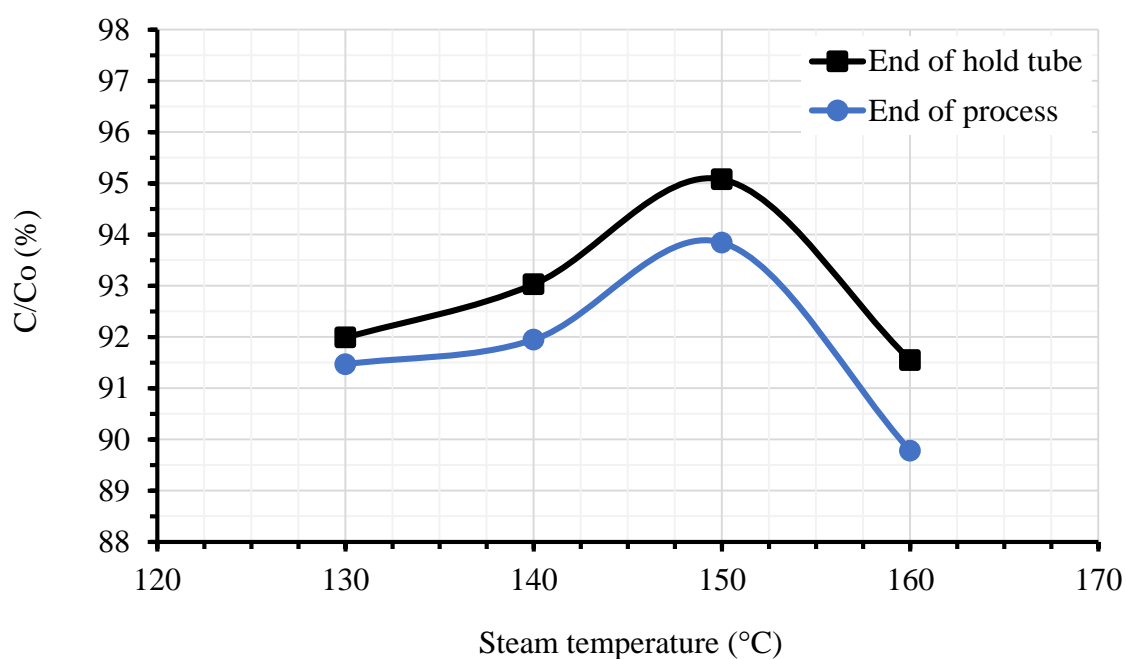
Επιπλέον, όσο αφορά την επίδραση της θερμοκρασίας του ατμού σε ποιοτικά χαρακτηριστικά εξετάστηκε η % διατήρηση της θειαμίνης στο σωματίδιο. Έτσι, στα Σχήματα 47 με 49 παρουσιάζεται η % διατήρηση της θειαμίνης για τέσσερις θερμοκρασίες θέρμανσης (130 °C, 140 °C, 150 °C, 160 °C) στο τέλος του σωλήνα παραμονής και στο τέλος του τμήματος ψύξης. Αυτό που παρατηρείται είναι ότι για κάθε σωματίδιο διαφέρει η θερμοκρασία ατμού στην οποία υπάρχει μέγιστη % διατήρηση της θειαμίνης.

Πιο συγκεκριμένα για την περίπτωση του σωματιδίου μεγέθους 1,016 cm η μέγιστη διατήρηση παρατηρείται για θερμοκρασία ατμού 150 °C (διατήρηση 93,84% στο τέλος του σωλήνα παραμονής και 95,07% στο τέλος ολόκληρης της επεξεργασίας), για την περίπτωση του σωματιδίου μεγέθους 1,27 cm η μέγιστη διατήρηση παρατηρείται για θερμοκρασία ατμού 140 °C (διατήρηση 91,04% στο τέλος του σωλήνα παραμονής και 90,01% στο τέλος ολόκληρης της επεξεργασίας) και για την περίπτωση του σωματιδίου μεγέθους 1,524 cm η μέγιστη διατήρηση παρατηρείται για θερμοκρασία ατμού 130 °C (διατήρηση 87,86% στο τέλος του σωλήνα παραμονής και 88,57% στο τέλος ολόκληρης της επεξεργασίας).

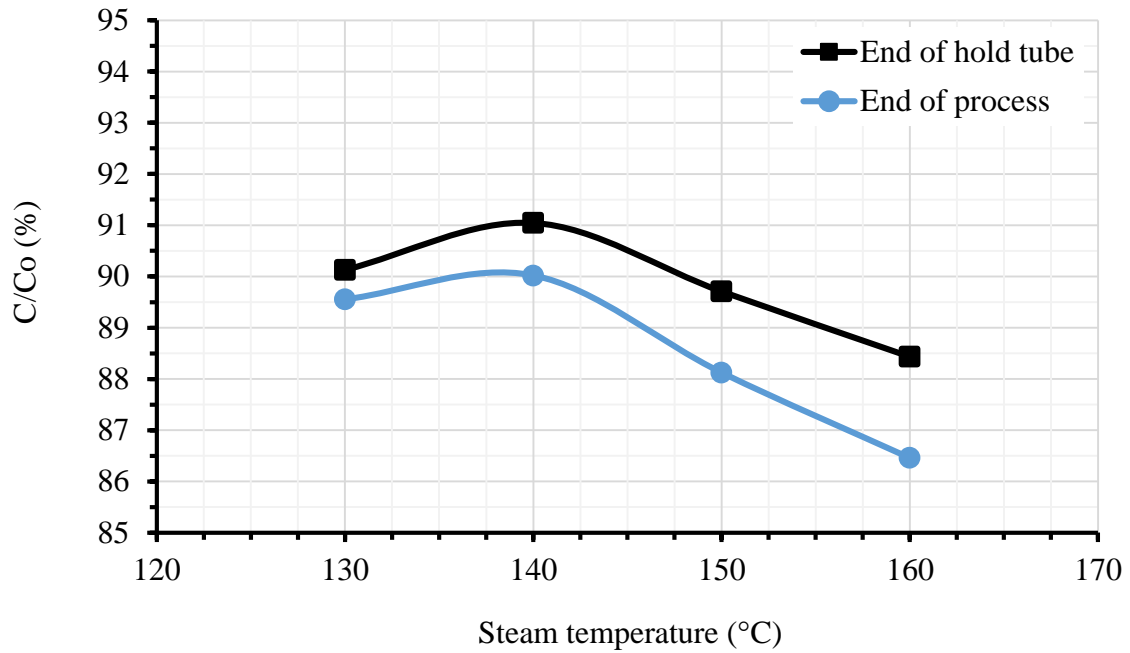
Για το σωματίδιο μεγέθους 1,016 cm το εύρος της % διατήρησης της θειαμίνης στο τέλος της διεργασίας (στο τέλος της ψύξης) για όλες τις θερμοκρασίες ατμού είναι 89,78-93,84%, για το σωματίδιο μεγέθους 1,27 cm το εύρος της % διατήρησης της θειαμίνης στο τέλος της διεργασίας είναι 86,45-90,01 % και για το σωματίδιο μεγέθους 1,524 cm το εύρος της % διατήρησης της θειαμίνης στο τέλος της διεργασίας είναι 82,40-87,86%.

Στην συνέχεια στο Σχήμα 50 παρουσιάζεται η σύγκριση της % διατήρησης της θειαμίνης για τα μεγέθη σωματιδίων 1,016 cm, 1,27 cm και 1,524 cm στο τέλος ολόκληρης της διεργασίας. Αυτό που παρατηρείται είναι ότι με την αύξηση του μεγέθους των σωματιδίων μειώνεται η % διατήρηση του ποιοτικού παράγοντα της θειαμίνης για όλες τις θερμοκρασίες θέρμανσης.

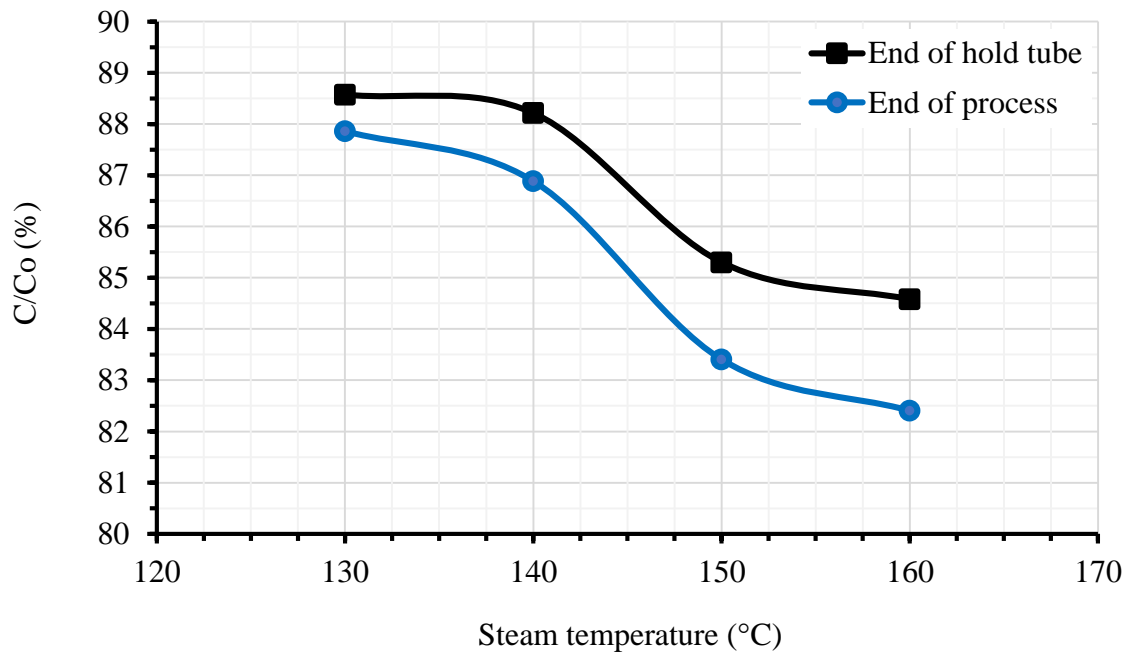
Τέλος, στο Σχήμα 51 παρουσιάζεται η κατανομή της διατήρησης της θειαμίνης σε διαγράμματα ισοϋψών % διατήρησης της θειαμίνης σε δύο διαστάσεις (% retention of thiamin contour plots) στο σωματίδιο μεγέθους 1,27 cm για όλη την διεργασία. Στο τέλος της επεξεργασίας υπάρχει 79,85 % διατήρηση της θειαμίνης στο υγρό ενώ στο τέλος του σωλήνα υπήρξε διατήρηση 80,35 % για το υγρό.



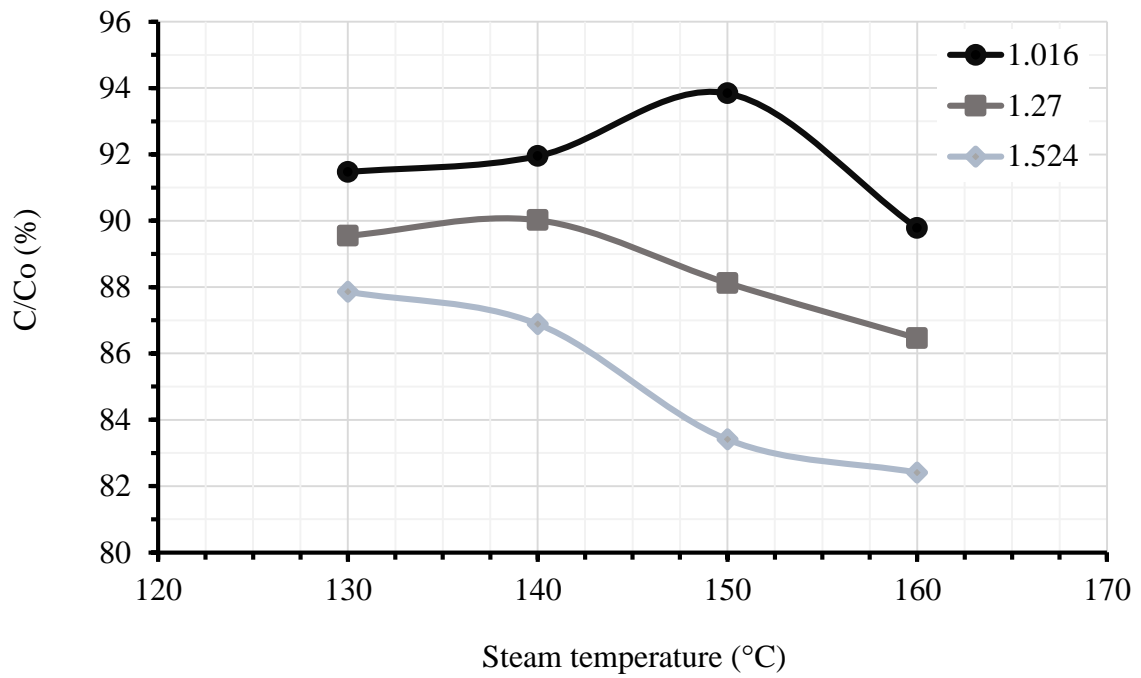
Σχήμα 47. Η % διατήρηση της θειαμίνης στο σωματίδιο στο τέλος του σωλήνα παραμονής και στο τέλος ολόκληρης της επεξεργασίας κατά την ασηπτική επεξεργασία για τέσσερις διαφορετικές θερμοκρασίες ατμού και σωματίδιο μεγέθους 1,016 cm (0.4 in).



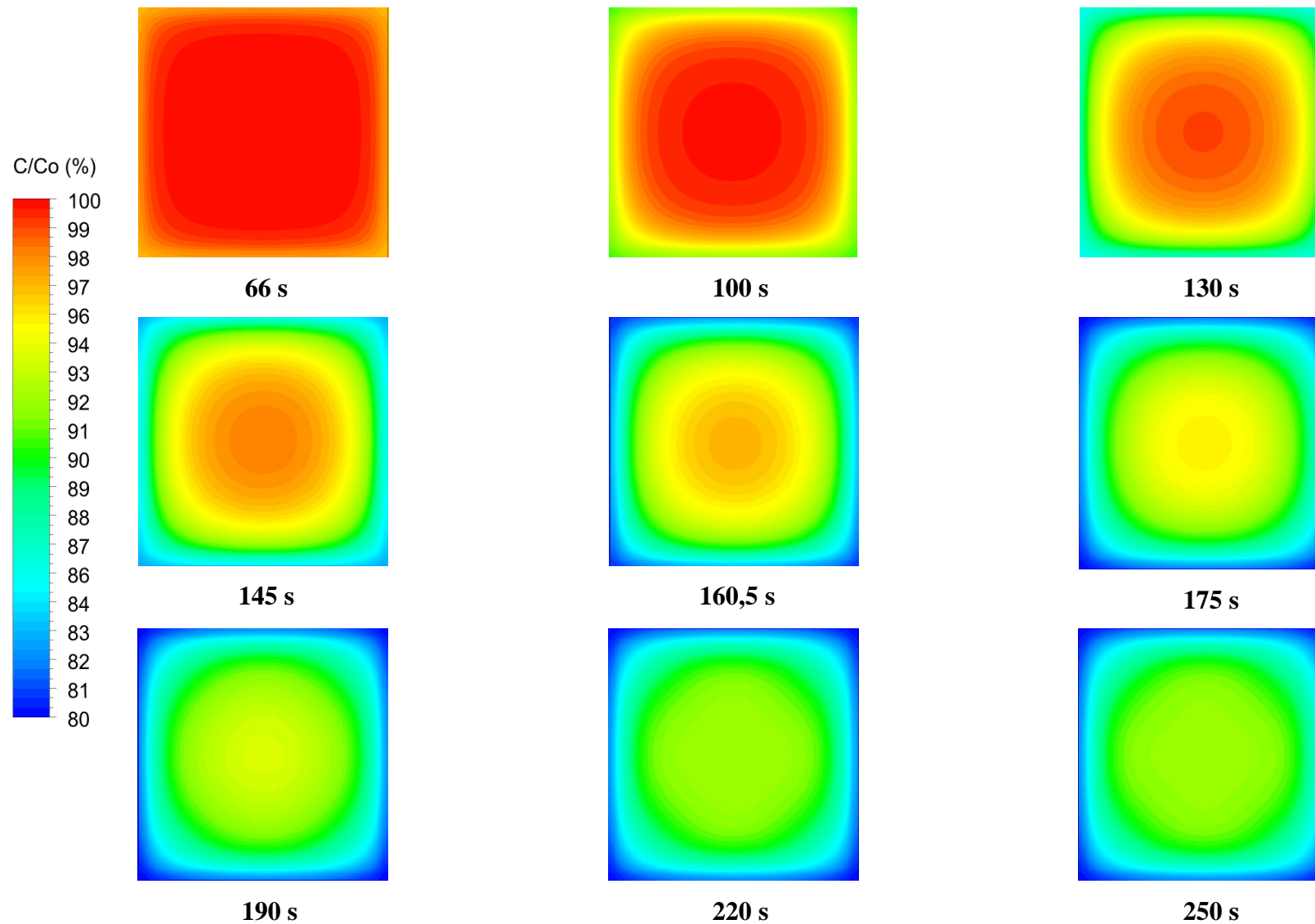
Σχήμα 48. Η % διατήρηση της θειαμίνης στο σωματίδιο στο τέλος του σωλήνα παραμονής και στο τέλος ολόκληρης της επεξεργασίας κατά την ασηπτική επεξεργασία για τέσσερις διαφορετικές θερμοκρασίες ατμού και σωματίδιο μεγέθους 1,27 cm (0.5 in).



Σχήμα 49. Η % διατήρηση της θειαμίνης στο σωματίδιο στο τέλος του σωλήνα παραμονής και στο τέλος ολόκληρης της επεξεργασίας κατά την ασηπτική επεξεργασία για τέσσερις διαφορετικές θερμοκρασίες ατμού και σωματίδιο μεγέθους 1,524 cm (0.6 in).



Σχήμα 50. Η % διατήρηση της θειαμίνης στο σωματίδιο στο τέλος ολόκληρης της επεξεργασίας κατά την ασηπτική επεξεργασία για τέσσερις διαφορετικές θερμοκρασίες ατμού και σωματίδια μεγέθους 1,016 cm, 1,27 cm 1,524 cm (0.4 in, 0.5 in, 0.6 in).



Σχήμα 51. Εξέλιξη της κατανομής της % διατήρησης της θειαμίνης σε σωματίδιο μεγέθους 1,27 cm (0.5 in) για όλη την διεργασία.

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της παρούσας μελέτης ήταν η προσομοίωση της ασηπτικής επεξεργασίας για τον προσδιορισμό του απαιτούμενου χρόνου παραμονής για την επίτευξη ενός ασφαλούς και ποιοτικού προϊόντος με την χρήση της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής. Για τον σκοπό αυτό αναπτύχθηκε υπολογιστικό μοντέλο και εξετάστηκε η επίδραση των κυριότερων παραγόντων της διεργασίας σε διάφορους συνδυασμούς για τον υπολογισμό του απαιτούμενου χρόνου παραμονής έτσι ώστε η τιμή  $F_o$  που συσσωρεύεται στο σωλήνα παραμονής να φτάσει την τιμή των 6 min. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν ήταν το μέγεθος του σωματιδίου (1,016 cm, 1,27 cm, 1,524 cm, 1,778 cm), η θερμική αγωγιμότητα του σωματιδίου (0,433 W/(mK), 0,62 W/(mK) και 0,79 W/(mK)) και οι θερμοκρασίες θέρμανσης και ψύξης της ασηπτικής επεξεργασίας.

Όσο αφορά στην επίδραση του μεγέθους του σωματιδίου, γίνεται αντιληπτό ότι αναμένονται μεγαλύτεροι χρόνοι θέρμανσης όσο αυξάνεται το μέγεθος του σωματιδίου έτσι ώστε να φτάσει η απαιτούμενη τιμή  $F_o$  να ισούται με 6 min. Έτσι αυξάνοντας το μέγεθος του σωματιδίου κατά 0.1 in σε κάθε προσομοίωση παρατηρήθηκε αύξηση στον χρόνο παραμονής στον σωλήνα παραμονής. Πιο συγκεκριμένα, οι χρόνοι που προέκυψαν ήταν 55 s, 94,5 s, 145 s και 202,5 s με την αύξηση του μεγέθους του σωματιδίου και με την θερμοκρασία του υγρού στο τέλος της θέρμανσης για όλες τις περιπτώσεις να είναι 143,33 °C. Επίσης, παρατηρήθηκε, ως συνέπεια των προηγούμενων, ότι όσο μεγαλώνει το μέγεθος του σωματιδίου τόσο μεγαλύτερη καθυστέρηση παρατηρείται έτσι ώστε η θερμοκρασία στο κέντρο στο κέντρο να λάβει τη μέγιστη τιμή της. Έτσι από το μικρότερο προς το μεγαλύτερο σωματίδιο χρειάστηκαν οι εξής χρόνοι για να φτάσει στη μέγιστη θερμοκρασία το κέντρο του σωματιδίου: 135 s, 182 s, 240 s και 306 s.

Επιπλέον, σε σχέση με την επίδραση της θερμικής αγωγιμότητας στην διεργασία παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η θερμική αγωγιμότητα τόσο πιο σύντομα επιτυγχάνεται η απαιτούμενη τιμή  $F$  της ασηπτικής επεξεργασίας λόγω του ότι η θερμότητα διαδίδεται με μεγαλύτερη ευκολία στο εσωτερικό του σωματιδίου. Έτσι, όσο αυξάνεται η θερμική αγωγιμότητα μειώνεται ο χρόνος παραμονής στο σωλήνα παραμονής δηλαδή για θερμικές αγωγιμότητες 0,433 W/mK, 0,62 W/mK και 0,79 W/mK οι χρόνοι παραμονής που αντιστοιχούν είναι 94,5 s, 60 s και 44,5 s.

Όταν η θερμοκρασία θέρμανσης (130 °C) και ψύξης (20 °C) ήταν χαμηλότερη και υψηλότερη αντίστοιχα σε σχέση με την κυρίως προσομοίωση ο χρόνος παραμονής στο σωλήνα παραμονής ήταν μεγαλύτερος κατά 182,5 s ενώ ο χρόνος παραμονής στον σωλήνα ψύξης ήταν περίπου ίδιος (155 s, 149,5 s αντίστοιχα).

Τέλος, όσον αφορά στην επίδραση της διεργασίας στην υποβάθμιση της θειαμίνης προσδιορίστηκε για το σωματίδιο μεγέθους 1,016 cm το εύρος της % διατήρησης της θειαμίνης στο τέλος της διεργασίας (στο τέλος της ψύξης) για όλες τις θερμοκρασίες ατμού 89,78-93,84%, για το σωματίδιο μεγέθους 1,27 cm το εύρος της % διατήρησης της θειαμίνης στο τέλος της διεργασίας είναι 86,45-90,01 % και για το σωματίδιο μεγέθους 1,524 cm το εύρος της % διατήρησης της θειαμίνης στο τέλος της διεργασίας είναι 82,40-87,86%. Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι όσο αυξανόταν το μέγεθος του σωματιδίου τόσο μειωνόταν η % μέση διατήρηση της θειαμίνης στο σωματίδιο.

Συμπερασματικά, παρατηρήθηκε ότι η αύξηση του μεγέθους του σωματιδίου, η μείωση της θερμικής αγωγιμότητας και η μείωση της θερμοκρασίας θέρμανσης στον εναλλάκτη επιδρά αρνητικά στον χρόνο της επεξεργασίας με αποτέλεσμα να χρειάζεται περισσότερο χρόνο επεξεργασίας άρα μεγαλύτερο μήκος σωλήνα παραμονής κι άρα μεγαλύτερο πάγιο κόστος εξοπλισμού. Όσο αφορά τη διατήρηση της θειαμίνης φάνηκε ότι δεν έπαιξε μεγάλο ρόλο η θερμοκρασία του ατμού στην διατήρηση του ποιοτικού παράγοντα σε αντίθεση με τις παραπάνω παραμέτρους για το ίδιο μέγεθος σωματιδίου.

Προτείνεται για μελλοντική έρευνα, πείραμα ασηπτικής επεξεργασίας για να γίνει επαλήθευση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και να γίνει σύγκριση μεταξύ αριθμητικής και αναλυτικής λύση, υπό συγκεκριμένες παραδοχές. Επιπροσθέτως, προτείνεται η εξέταση της ασηπτικής επεξεργασία μέσω CFD, με κινούμενο σωματίδιο, σε σχέση με το φέρον υγρό, σε μια διάταξη ενός σωλήνα παραμονής σε αντίθεση με το ακίνητο σωματίδιο της παρούσας μελέτης. Επίσης, προτείνεται να δημιουργηθεί για το σκοπό μιας ρεαλιστικής προσομοίωσης διάταξη εναλλάκτη αποξεόμενης επιφάνειας-σωλήνα παραμονής-εναλλάκτη διπλού σωλήνα για ψύξη. Για αυτό το εγχείρημα, θα χρειαζόταν ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής με μεγαλύτερη μνήμη RAM και επεξεργαστή που έχει περισσότερη υπολογιστική ισχύ καθώς το πλέγμα θα μεγάλωνε κατά πολύ περισσότερο σε σχέση με αυτό που μπορεί να επεξεργαστεί ένας προσωπικός ηλεκτρονικός υπολογιστής.

## ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ

### Λατινικά σύμβολα

$A$	επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας, $m^2$
$A_c$	επιφάνεια του όγκου ελέγχου του εναλλάκτη θερμότητας (ψύξη), $m^2$
$A_{he}$	επιφάνεια του όγκου ελέγχου του εναλλάκτη θερμότητας (θέρμανση), $m^2$
$A_{ht}$	επιφάνεια του όγκου ελέγχου του σωλήνα παραμονής, $m^2$
$A_p$	επιφάνεια σωματιδίου, $m^2$
$C_o$	αρχική συγκέντρωση μίας θερμικά ευαίσθητης ουσίας π.χ. αριθμός μικροοργανισμών ανα mL, g/L κ.α.
$C$	τελική συγκέντρωση μίας θερμικά ευαίσθητης ουσίας π.χ. αριθμός μικροοργανισμών ανα mL, g/L κ.α.
$c_p$	ειδική θερμότητα, J/kg°C
$c_{pf}$	ειδική θερμότητα του υγρού, kJ/kg°C
$d$	διάμετρος του αγωγού, m
$D$	χρόνος υποδεκαπλασιασμού, s
$E_a$	ενέργεια ενεργοποίησης, J/mol
$F_{T_{ref}}^z$	ισοδύναμος χρόνος μιας υποθετικής θερμικής διεργασίας αναφοράς σε σταθερή θερμοκρασία που επιφέρει το ίδιο αποτέλεσμα όσο αφορά στην καταστροφή (υποβάθμιση) ενός θερμικά ευαίσθητου παράγοντα, με την υπό εξέταση θερμική επεξεργασία ή που απαιτείται για την καταστροφή δεδομένου ποσοστού θερμοευαίσθητου παράγοντα, (min)
$F_o$	θνησιμότητα της διεργασίας για θερμοκρασία αναφοράς τους 121.1 °C ή 250 °F και για $z = 10$ °C ή 18 °F, min
$g$	η επιτάχυνση της βαρύτητας, 9,81 m/s <sup>2</sup>
$Gr$	ο αριθμός Grashof
$h$	συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, W/m <sup>2</sup> °C
$h_p$	συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στην επιφάνεια σωματιδίου, W/m <sup>2</sup> °C
$k$	σταθερά ταχύτητας αντίδρασης, s <sup>-1</sup> για αντιδράσεις πρώτης τάξης
$k$	συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, W/m °C



$K$	συντελεστής συνοχής της ροής του ρευστού
$m_f$	παροχή μάζας υγρού, kg/hr
$n$	σταθερά τάξης της αντίδρασης
$n$	ο δείκτης ρεολογικής συμπεριφοράς
$N_p$	αριθμός σωματιδίων σε όγκο ελέγχου
$Nu$	ο αριθμός Nusselt
$r$	ακτινική απόσταση από το κέντρο του σωλήνα, m
$Re$	ο αριθμός, Reynolds
$R$	η ακτίνα του σωλήνα, m
$T$	θερμοκρασία, °C
$T_e$	θερμοκρασία περιβάλλοντος, °C
$T_f$	θερμοκρασία υγρού, °C
$T_f(t)$	θερμοκρασία υγρού τη χρονική στιγμή 't', °C
$T_s$	θερμοκρασία ατμού, °C
$T_{pm}$	μέση θερμοκρασία στην επιφάνεια του σωματιδίου, °C
$T_w$	θερμοκρασία ψυκτικού νερού, °C
$t$	Χρόνος, s
$t_{min}$	ελάχιστος χρόνος παραμονής στους σωλήνες ασηπτικής διεργασίας, s
$u$	ταχύτητα η οποία λαμβάνει χώρο στο κέντρο του αγωγού, m/s
$U_{he}$	ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στον εναλλάκτη θερμότητας (θέρμανση), $W/m^2 \text{ } ^\circ C$
$U_{ht}$	ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στον σωλήνα παραμονής, $W/m^2 \text{ } ^\circ C$
$U_c$	ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας του εναλλάκτη θερμότητας (ψύξη), $W/m^2 \text{ } ^\circ C$
$q$	ροή θερμότητας, W

### Ελληνικά σύμβολα

$\tau$	τάση διάτμησης, $N/m^2$
--------	-------------------------

## Δείκτες

<i>avg</i>	μέση
<i>f</i>	υγρό
<i>ins</i>	μονωτικό υλικό
<i>max</i>	μέγιστο
<i>med</i>	περιβάλλον (μέσο)
<i>o</i>	αρχική κατάσταση
<i>p</i>	σωματίδιο (στερεό)
<i>ref</i>	τιμή αναφοράς
<i>steel</i>	ατσάλι
<i>surf</i>	επιφάνεια

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Adams M.R., Moss M.O. 2008. Food Microbiology. Royal Society of Chemistry, 3<sup>rd</sup> Edition, Cambridge, UK.
2. Alhamdan AM, Sastry SK. 1997. Residence time distribution of food and simulated particles in a holding tube. *Journal of Food Engineering* 34:271–92. Doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0260-8774\(97\)82151-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0260-8774(97)82151-6).
3. Ball, C.O. and Olson, F.C.W. 1957. *Sterilization in Food Technology. Theory, Practice and Calculations*, McGraw-Hill Book Co., New York, 654 pp.
4. Bathe, K. J. 2006. *Finite element procedures*. Klaus-Jurgen Bathe.
5. Brennan J.G, Butters J.R., Cowell N.D. and Lilly A.E.V. 1976. *Food Engineering Operations*, 2<sup>nd</sup> ed., Applied Science Publishers Ltd., London, pp. 251-285.
6. Buckner, N. 1993. Aseptic Processing and Packaging of Particulate Food. *Aseptic Processing And Packaging Of Particulate Foods*; Willhoft, EMA, Ed.; Blackie Academic and Professional: London.
7. Chandarana, D. I., & GAVIN III, A. U. S. T. I. N. 1989. Establishing thermal processes for heterogeneous foods to be processed aseptically: a theoretical comparison of process development methods. *Journal of Food Science*, 54(1), 198-204. Doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1989.tb08601.x>.
8. Chandarana DI, Unverferth JA. 1996. Residence time distribution of particulate foods at aseptic processing temperatures. *Journal of Food Engineering* 28:349– 60. Doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0260-8774\(95\)00046-1](http://dx.doi.org/10.1016/0260-8774(95)00046-1).
9. Chang, S. Y., & Toledo, R. T. 1989. Heat transfer and simulated sterilization of particulate solids in a continuously flowing system. *Journal of Food Science*, 54(4), 1017-1023. Doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1989.tb07935.x>.
10. De Ruyter, P.; Brunet, R. 1973. Estimation of process conditions for continuous sterilization of foods containing particulates. *Food Technol.*, 27, 44–51.
11. Dutta B, Sastry SK. 1990a. Velocity distribution of food particle suspensions in holding tube flow: experimental and modeling studies on average particle velocities. *Journal of Food Science* 55(5):1448–53. Doi: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.1990.tb03955.x>.
12. Dutta B, Sastry SK. 1990b. Velocity distribution of food particle suspensions in holding

- tube flow: distribution characteristics and faster-particle velocities. *Journal of Food Science* 55(6):1703–10. Doi: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.1990.tb03605.x>.
13. Feliciotti, E. and Esselen, W.B. 1957. Thermal destruction rates of thiamine in pureed meats and vegetables. *Food Technol.* 11(21: 77).
  14. Heldman D.R. and Singh R.P. 1981 *Food Process Engineering*, 2<sup>nd</sup> ed., The AVI Publishing Co. Inc., Westport, Connecticut, pp.87-157.
  15. Holdsworth S.D. 1997 *Thermal Processing of Packaged Foods*, Blackie Academic and Professional, London.
  16. Holdsworth, S.D. Optimising the Safety and Quality of Thermally Processed Packaged Foods. In *Improving the Thermal Processing of Foods*; Richardson, P., Ed.; Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition, Woodhead Publishing: Cambridge, UK, 2004; pp. 3–31. Doi: <http://dx.doi.org/10.1533/9781855739079.1.3>.
  17. Hui, Y. H. (Ed.). (2006). *Handbook of food science, technology, and engineering* (Vol. 149). CRC press.
  18. Ibrahim, M. T., Briesen, H., Först, P., & Zacharias, J. 2019. Lethality Calculation of Particulate Liquid Foods during Aseptic Processing. *Processes*, 7(9), 587. Doi: <http://dx.doi.org/10.3390/pr7090587>.
  19. Karel, M., & Lund, D. B. 2003. *Physical principles of food preservation: revised and expanded* (Vol. 129). CRC Press.
  20. Lund D.B. and Singh R.K. 1993 “The system and its elements” in *Principles of Aseptic Processing and Packaging*, 2<sup>nd</sup> ed., ed. J.V. Chambers and P.E. Nelson, The Food Processors Institute, Washington, D.C., pp 3-30.
  21. Mansfield, T. 1962. High temperature-short time sterilization. In *Proceedings of the 1st international congress on food science and technology* (Vol. 4, pp. 311-316). Gordon and Breach Science Publishers.
  22. Manson, J.E.; Cullen, J.F. 1974. Thermal Process Simulation for Aseptic Processing of Foods Containing Discrete Particulate Matter. *Journal of Food Science*. 1084–1089. Doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1974.tb07324.x>.
  23. McCoy S, Zuritz C, Sastry SK. 1987. Residence time distribution of simulated food particles in a holding tube. ASAE Paper nr 87-6536. ASAE, St. Joseph, MI.
  24. Nielsen, S., Marcy, J.E., Sadler, G.D. 1993. Chemistry of aseptically processed foods. In *Principles of aseptic processing and packaging* edited by Chambers, J.V., Nelson, P.E.

25. Norton, T., Sun, D. W., Grant, J., Fallon, R., & Dodd, V. 2007. Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modelling and design of ventilation systems in the agricultural industry: A review. *Bioresource technology*, 98(12),2386-2414. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2006.11.025>.
26. Palmer J.A. and JonesV.A. 1976 “Prediction of holding times for continuous thermal processing of power-law fluids” *Journal of Food Science* 41: 1233.
27. Rahman, M. S. (Ed.). 2007. *Handbook of food preservation*. CRC press.
28. Salengke S, Sastry SK. 1995. Residence time distribution of cylindrical particles in a curved section of a holding tube: the effect of particle size and flow rate. *Journal of Food Engineering* 18:363–81. Doi:<http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-4530.1995.tb00372.x>.
29. Salengke S, Sastry SK. 1996. Residence time distribution of cylindrical particles in a curved section of a holding tube: the effect of particle concentration and bend radius of curvature. *Journal of Food Engineering* 27:159–76. Doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0260-8774\(94\)00091-3](http://dx.doi.org/10.1016/0260-8774(94)00091-3).
30. Sancho MF, Rao MA. 1991. Residence time distribution in a holding tube. *J Food Engr* 15:1–19. Doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0260-8774\(92\)90037-7](http://dx.doi.org/10.1016/0260-8774(92)90037-7).
31. Sandeep, K. P., Zuritz, C. A., & Puri, V. M. (1999). Determination of lethality during aseptic processing of particulate foods. *Food and Bioproducts Processing*, 77(1), 11-17. Doi: <https://doi.org/10.1205/096030899532204>.
32. Sastry, S. K. 1986. Mathematical evaluation of process schedules for aseptic processing of low-acid foods containing discrete particulates. *Journal of Food Science*, 51(5), 1323-1328. Doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1986.tb13114.x>.
33. Sastry SK, Cornelius BD. 2002. Aseptic processing of foods containing solid particulates. New York: John Wiley and Sons, Inc. 247 p.
34. Segner WP, Ragusa TJ, Marcus CL, Soutter SL. 1989. Biological evaluation of a heat transfer simulation for sterilizing low-acid large particulate foods for aseptic packaging. *Journal of Food Processing and Preservation* 13:257–74.
35. Singh R.K. 1993 “Residence time distribution in aseptic processing” in *Principles of Aseptic Processing and Packaging*, 2<sup>nd</sup> ed., ed. J.V. Champers and P.E. Nelson, The Food Processors Institute, Washington, D.C., pp 3-30.
36. Singh, R. Paul, Heldman, Dennis R. 2009. Introduction to food engineering. (4th Ed.). Amsterdam, Holland: Elsevier/Academic Press.
37. Stoforos, N.; Sawada, H. Aseptic Processing of Liquid/Particulate Foods. In Heat

- Transfer in Food Processing—Recent Developments and Applications; WIT Press: Southampton, UK, 2007; Chapter 6, pp. 187–208.
38. Sun, D. W. (Ed.). 2018. *Computational fluid dynamics in food processing*. Boca Raton, FL, USA: CRC press. Doi: <http://dx.doi.org/10.1201/9781351263481>.
  39. Toledo R.T. 1980 *Fundamentals of Food Process Engineering*, The AVI Publishing Co. Inc., Westport, Connecticut, pp. 197-281.
  40. Tulsian P, Sarang S, Sastry SK. 2009. Measurement of residence time distribution of a multicomponent system inside an ohmic heater using radio frequency identification. *Journal of Food Engineering* 93:313–7.
  41. Van Eijk 1993. Flavorings for UHT-treated and aseptically packed soups and sauces. In *Aseptic processing of foods* edited by Reuter, H. Technomic Publishing Company. pp. 145–152.
  42. Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. 2007. *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. (2<sup>nd</sup> Ed.). Harlow, Essex, UK, Pearson Education.
  43. Wang, L., & Sun, D. W. 2003. Recent developments in numerical modelling of heating and cooling processes in the food industry—a review. *Trends in Food Science & Technology*, 14(10), 408-423. Doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-2244\(03\)00151-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-2244(03)00151-1).
  44. Wicker, L., Temelli, F. 1988. *Heat Inactivation of Pectinesterase in Orange Juice Pulp*. *Journal of Food Science*, 53(1), 162–164.
  45. Xia, B., & Sun, D. W. 2002. Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the food industry: a review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 34(1), 5-24. Doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0168-1699\(01\)00177-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-1699(01)00177-6).
  46. Yanniotis S. and Stoforos N.G. 2014. Modelling food processing operations with computational fluid dynamics: a review. *Scientia Agriculturae Bohemica* 45(1): 1-10. Doi: <http://dx.doi.org/10.7160/sab.2014.450101>.

**Grade A Pasteurized Milk Ordinance, FDA** U.S. Dept of Health and Human services, Public health service, food and administration. 2017. Retrieved 22 November 2020.

### *Ελληνική*

1. Αρβανιτογιάννης Ιωάννης Σ., Στρατάκος Αλέξανδρος Χ. (2011) *Τεχνολογίες επεξεργασίας και συσκευασίας τροφίμων*, University Studio Press, σελίδες 361-364.
2. Στοφόρος ΝΓ. 2018. Σημειώσεις του μαθήματος “Προχωρημένα μαθήματα Συντήρησης Τροφίμων”. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.

### *Ιστοσελίδες*

ANSYS, 2020 Enineering Simulation & 3D Design Software. <https://www.ansys.com/>  
Πρόσβαση στις 21/10/2020.

Comsol, 2020. Comsol Multiphysics Modeling Software. URL:  
<https://www.comsol.com/products>. Πρόσβαση στις 25/11/2020

FDA, 2020. URL: <https://www.fda.gov/> Πρόσβαση στις 2/11/2020