



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

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΡΟΦΙΜΩΝ**

**Μεταπτυχιακή Ερευνητική Μελέτη**

Μοντελοποίηση της "πλήρωση εν θερμώ" διεργασίας τοματοχυμού  
σε γυάλινα δοχεία με χρήση της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής

**Θωμάς Α. Κούρτης**

Επιβλέπων καθηγητής:  
Νικόλαος Γ. Στοφόρος, Καθηγητής ΓΠΑ

Αθήνα, Ιούλιος 2023

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

**Μεταπτυχιακή Ερευνητική Μελέτη**

Μοντελοποίηση της "πλήρωση εν θερμώ" διεργασίας τοματοχυμού  
σε γυάλινα δοχεία με χρήση της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής

"Modeling the Hot-fill process of tomato juice in glass containers  
using Computational Fluid Dynamics"

**Θωμάς Α. Κούρτης**

Εξεταστική Επιτροπή:

Νικόλαος Γ. Στοφόρος, Καθηγητής ΓΠΑ (επιβλέπων)

Ιωάννα Μαντάλα, Καθηγήτρια ΓΠΑ

Θεοφανία Τσιρώνη, Επίκουρη Καθηγήτρια ΓΠΑ

## Μοντελοποίηση της "πλήρωση εν θερμώ" διεργασίας τοματοχυμού σε γυάλινα δοχεία με χρήση της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής

ΠΜΣ: Επιστήμη & Τεχνολογία Τροφίμων  
Τμήμα Επιστήμης Τροφίμων & Διατροφής του Ανθρώπου  
Εργαστήριο Μηχανικής & Επεξεργασίας Τροφίμων

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής ερευνητικής μελέτης ήταν η μοντελοποίηση της "πλήρωσης εν θερμώ" διεργασίας τοματοχυμού σε γυάλινα δοχεία με χρήση της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (CFD) και η βελτιστοποίησή της μέσω της αξιολόγησης των σημαντικότερων ποιοτικών χαρακτηριστικών του προϊόντος. Σε αυτή τη διεργασία, το προϊόν εισάγεται θερμό στον περιέκτη, σφραγίζεται ερμητικά, αναποδογυρίζεται και διατηρείται στον αέρα ή σε υδατόλουτρο με επακόλουθη ψύξη του σε νερό. Το κρίσιμο στάδιο είναι ο χρόνος παραμονής στον αέρα ή σε υδατόλουτρο, διάστημα στο οποίο εξασφαλίζεται ουσιαστικά η εμπορική αποστείρωση του προϊόντος και του περιέκτη/καπάκι.

Αρχικά, προσδιορίστηκαν βιβλιογραφικά και πειραματικά οι θερμοφυσικές ιδιότητες του τοματοχυμού. Επιπλέον βρέθηκαν βιβλιογραφικά οι παράμετροι θερμοανθεκτικότητας (τιμές  $D$  και  $z$ ) του μικροοργανισμού στόχου, *B. coagulans* και των ποιοτικών χαρακτηριστικών  $a/b$  και  $L$  του χρώματος, της βιταμίνης C και του Βήτα καροτένιου. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε πειραματικά η "πλήρωση εν θερμώ" διεργασίας τοματοχυμού με παραμονή του γυάλινου περιέκτη στον αέρα  $T_{air} = 25^{\circ}\text{C}$  και σε δεύτερη περίπτωση, παραμονή σε υδατόλουτρο θερμοκρασίας  $50^{\circ}\text{C}$  χωρίς επακόλουθη ψύξη σε νερό. Υπολογίστηκε πειραματικά ο επιφανειακός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας για τον αέρα,  $h_{air} = 11.4 \pm 0.10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , και για υδατόλουτρο θερμοκρασίας 20, 50, 70 και  $90^{\circ}\text{C}$ , ίσος προς  $h_{WC} = 450.2 \pm 12.1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,  $h_W = 596.8 \pm 32.4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,  $h_W = 801.6 \pm 17.1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , και  $h_W = 1103.5 \pm 18.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  αντίστοιχα. Ακολούθησε η ανάπτυξη του αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης με δημιουργία της 3D γεωμετρίας του γυάλινου περιέκτη (βάζο) με διαστάσεις: ύψος  $L = 89 \text{ mm}$ , εσωτερική διάμετρο  $d = 54 \text{ mm}$ , πάχος  $x = 2 \text{ mm}$  και όγκο  $V = 190.14 \text{ mL}$ . Κατασκευάστηκε πλέγμα με πυκνότητα 1 209 232 κελίων και επιθυμητής ποιότητας. Με την επίλυση του μοντέλου έγινε σύγκριση των πειραματικών και των προβλεπόμενων αποτελεσμάτων με αποτέλεσμα την επιβεβαίωση του μοντέλου. Διερευνήθηκε η "πλήρωση εν θερμώ" διεργασία σε διαφορετικές θερμοκρασίες πλήρωσης 94, 96 ή  $98^{\circ}\text{C}$  και με παραμονή στον αέρα και σε

υδατόλουτρο θερμοκρασίας 50, 70 ή 90°C χωρίς να επακόλουθη ψύξη σε νερό με στόχο, να βρεθούν οι συνθήκες που οδηγούν στην επίτευξη της ολοκληρωμένης τιμής  $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 5 \text{ min}$  και  $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 12.6 \text{ min}$ . Οι περιπτώσεις που οδήγησαν στην επίτευξη των τιμών  $F_s$  εξετάστηκαν, με ψύξη σε νερό  $T_{WC} = 20^{\circ}\text{C}$  μετά την παραμονή στον αέρα ή σε υδατόλουτρο αντίστοιχα, ως προς τη διατήρηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών και τη σημειακή τιμή  $F$  στο κρίσιμο σημείο (cold spot), το καπάκι στο τέλος της διεργασίας. Βιβλιογραφικά, η επιθυμητή τιμή για την εμπορικής αποστείρωση στο καπάκι αναφέρεται μεταξύ των τιμών  $F_{87.78^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 0.07 \text{ min}$  και  $F_{87.78^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 2 \text{ min}$ . Από τους ποιοτικούς παράγοντες, τα καροτενοειδή έδειξαν τη μεγαλύτερη θερμοανθεκτικότητα ενώ τη μεγαλύτερη θερμοευαισθησία έδειξε το χρώμα και ιδιαίτερα η παράμετρος  $L$ , με την παράμετρο  $a/b$  και τη βιταμίνη C να ακολουθούν.

**Επιστημονικό Πεδίο:** Μηχανική τροφίμων

**Λέξεις κλειδιά:** Τοματοχυμός, θερμική επεξεργασία, θερμοανθεκτικότητα, υπολογιστική Ρευστοδυναμική (CFD), "πλήρωση εν θερμώ"

## Modeling the Hot-fill process of tomato juice in glass containers using Computational Fluid Dynamics

MSc: Food Science & Technology  
Department of Food Science & Human Nutrition  
Food Engineering & Processing Laboratory

### ABSTRACT

The objective of this work was the modeling of the "hot-fill" process of tomato juice in glass containers using Computational Fluid Dynamics (CFD) and its optimization through the evaluation of the most important quality characteristics of the product. In this process, the container is filled with the hot product, sealed tightly, inverted, and maintained in the air or in a water bath before subsequent cooling in water. The critical stage is the residence time in the air or water bath, during which the commercial sterilization of the product and the container/lid is essentially ensured.

Initially, the thermophysical properties of tomato juice were determined through literature review and experimentation. Additionally, the thermal resistance parameters ( $D$  and  $z$  values) of the target microorganism, *B. coagulans*, and the quality characteristics of  $a/b$  and  $L$  color parameters, vitamin C, and Beta-carotene were found in the literature. Subsequently, the "hot-fill" process of tomato juice was experimentally performed with the glass container remaining in the air at  $T_{air} = 25^{\circ}\text{C}$ , and in a second case, with the container remaining in a water bath at a temperature of  $50^{\circ}\text{C}$  without subsequent cooling in water. The experimental heat transfer coefficient was experimentally estimated for the air as  $h_{air} = 11.4 \pm 0.10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , and for the water bath at temperatures of 20, 50, 70, and  $90^{\circ}\text{C}$  as  $h_{WC} = 450.2 \pm 12.1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,  $h_W = 596.8 \pm 32.4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,  $h_W = 801.6 \pm 17.1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,  $h_W = 1103.5 \pm 18.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  respectively.

The development of the numerical simulation model followed, with the creation of the 3D geometry of the container with dimensions of internal height  $L = 89 \text{ mm}$ , internal diameter  $d = 54 \text{ mm}$ , thickness  $x = 2 \text{ mm}$ , and volume  $V = 190.14 \text{ mL}$ . A grid with a density of 1 209 232 cells was constructed with desired quality. The experimental and predicted temperatures were in good agreement, confirming model's accuracy. The "hot-fill" process was investigated at different filling temperatures of 94, 96, or  $98^{\circ}\text{C}$ , with the container remaining in the air or in a water bath at temperatures of 50, 70, or  $90^{\circ}\text{C}$  without subsequent cooling in water, aiming to find the conditions that lead to the achievement of the integral

value  $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 5$  min and  $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 12.6$  min. The cases that resulted in achieving these  $F_s$  values were further examined with subsequent cooling in water at a temperature of  $T_{WC} = 20^{\circ}\text{C}$ , in terms of remaining quality characteristics and the point  $F$  value at the container lid at the end of the process. Based on literature data, the desired value for commercial sterilization of the container lid is between  $F_{87.78^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 0.07$  min and  $F_{87.78^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 2$  min. Among the quality factors examined, carotenoids exhibited the highest thermal resistance, while color, particularly the  $L$  parameter, showed the highest thermal sensitivity, followed by the  $a/b$  parameter and vitamin C.

**Scientific Field:** Food engineering

**Keywords:** Tomato juice, thermal processing, hot-fill-hold, thermal resistance, Computational Fluid Dynamics (CFD).

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το θέμα της παρούσας διπλωματικής μεταπτυχιακής μελέτης ήταν η μοντελοποίηση της "πλήρωση εν θερμώ" διεργασίας τοματοχυμού σε γυάλινα δοχεία με χρήση της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (Computational Fluid Dynamics, CFD), που εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Μηχανικής και Επεξεργασίας Τροφίμων, στο πλαίσιο του μεταπτυχιακού προγράμματος του τμήματος Επιστήμης Τροφίμων και Διατροφής του Ανθρώπου, του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών (ΓΠΑ).

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, καθηγητή κ. Νικόλαο Στοφόρο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου το συγκεκριμένο θέμα, την επιστημονική του καθοδήγηση, τις υποδείξεις του, την επιμονή του, το αμείωτο ενδιαφέρον του και τη συμπαράστασή του από την αρχή μέχρι το τέλος.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο Διδάκτορα Στυλιανό Χατζηδάκη και τον Δρ. Γεώργιο Στοφόρο για τις υποδείξεις και τις εποικοδομητικές συμβουλές τους. Επιπλέον, ευχαριστώ όλα τα μέλη του εργαστηρίου για το καλό κλίμα συνεργασίας, αλλά και τη βοήθειά τους όταν χρειάστηκε. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και συμφοιτητές μου, για την υποστήριξή τους και για τη συμβολή τους στη δημιουργία αυτής της εργασίας.

Τέλος την οικογένειά μου για την ενθάρρυνσή τους, τη συμπαράστασή τους και την υπομονή τους, κατά τη διάρκεια αυτής της διπλωματικής εργασίας.

---

Με την άδειά μου, η παρούσα εργασία ελέγχθηκε από την Εξεταστική Επιτροπή μέσα από λογισμικό ανίχνευσης λογοκλοπής που διαθέτει το ΓΠΑ και διασταυρώθηκε η εγκυρότητα και η πρωτοτυπία της

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	ii
<b>ABSTRACT</b> .....	iv
<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</b> .....	vi
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ</b> .....	vii
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	1
<b>1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ</b> .....	3
1.1 Τομάτα .....	3
1.1.1 Συστατικά της τομάτας .....	4
1.1.2 Προϊόντα τομάτας .....	10
1.1.3 Τομάτα στη βιομηχανία .....	12
1.1.4 Τοματοπολτός .....	14
1.1.5 Παθογόνοι μικροοργανισμοί στη τομάτα .....	15
1.2 Θερμική επεξεργασία τροφίμων .....	19
1.2.1 Αρχές θερμικής επεξεργασίας .....	19
1.2.2 Κατηγορίες θερμικής επεξεργασίας στα προϊόντα τροφίμων .....	20
1.2.3 Επιλογή κατάλληλης θερμικής επεξεργασίας .....	22
1.2.4 Σχεδιασμός θερμικής επεξεργασίας .....	23
1.2.5 Κινητική καταστροφής μικροοργανισμών .....	24
1.2.6 Τιμές $D$ και $z$ .....	25
1.2.7 "Πλήρωση εν θερμώ" διεργασία .....	28
1.3 Υπολογιστική ρευστοδυναμική (Computational Fluid Dynamics, CFD) .....	30
1.3.1 Πλεονεκτήματα.....	31
1.3.2 Εμπορικά πακέτα CFD .....	32
1.3.3 Θεμελιώδεις αρχές της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής .....	32
1.3.4 Αριθμητικές μέθοδοι διακριτοποίησης .....	34
1.3.5 Στάδια επίλυσης ενός προβλήματος με χρήση CFD .....	35
1.3.6 Εφαρμογές CFD στη βιομηχανία τροφίμων.....	37
<b>2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ</b> .....	40
2.1 Θερμοφυσικές ιδιότητες .....	40
2.2 Πειραματική διαδικασία .....	41
2.3 Μέθοδος υπολογισμού $h$ διεργασίας .....	42
2.4 Αριθμητική επίλυση με τη χρήση CFD .....	44



2.5	Προκαταρκτική μελέτη .....	44
2.6	Σχεδιασμός γεωμετρίας .....	47
2.7	Δημιουργία πλέγματος .....	48
2.8	Ανεξαρτησία πλέγματος .....	50
2.9	Καθορισμός παραμέτρων επίλυσης .....	51
2.10	Υπολογισμός της τιμής $F$ της διεργασίας.....	52
2.11	Υπολογισμός της υποβάθμισης των ποιοτικών παραγόντων .....	54
2.12	Αξιολόγηση της "πλήρωση εν θερμώ" διεργασίας .....	55
<b>3.</b>	<b>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ</b> .....	<b>57</b>
3.1	Υπολογισμός συντελεστή μεταφοράς θερμότητας $h$ .....	57
3.2	Αξιολόγηση ποιότητας πλέγματος .....	60
3.3	Ανεξαρτησία πλέγματος .....	61
3.4	Διερεύνηση αρχικής θερμοκρασίας τοιχωμάτων .....	65
3.5	Σύγκριση πειραματικών και προβλεπόμενων αποτελεσμάτων.....	66
3.6	Επίλυση της "πλήρωση εν θερμώ" διεργασίας .....	69
3.7	Βελτιστοποίηση της διεργασίας .....	69
<b>4.</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b> .....	<b>104</b>
	<b>ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ</b> .....	<b>106</b>
	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	<b>109</b>

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η θερμική επεξεργασία είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη και καθιερωμένη μέθοδος συντήρησης που χρησιμοποιείται τη βιομηχανία τροφίμων για τη διασφάλιση της ασφάλειας των τροφίμων και την παράταση της διάρκειας ζωής των προϊόντων διατροφής. Εκτός από το προϊόν διατροφής, η θερμική επεξεργασία αφορά και στη συσκευασία για να επιτευχθούν οι απαιτούμενοι στόχοι ασφαλείας. Επιπλέον, στη σύγχρονη βιομηχανική πρακτική επιζητείται διασφάλιση οριακής θερμικής επεξεργασίας έτσι ώστε αφενός το τρόφιμο να είναι ασφαλές και αφετέρου να μην υπάρχει υποβάθμιση σε ποιοτικά χαρακτηριστικά όπως χρώμα και βιταμίνες (Velioglu *et al.*, 2011).

Η "πλήρωση εν θερμώ" διεργασία είναι μια μέθοδος θερμικής επεξεργασίας τροφίμων, που εφαρμόζεται σε όξινα τρόφιμα ( $\text{pH} < 4.6$ ), όπως μη ανθρακούχα αναψυκτικά, χυμούς και προϊόντα τομάτας (Ashurst, 2005; Sandoval *et al.*, 1994; Rodrigo *et al.*, 1990). Κατά την "πλήρωση εν θερμώ" διεργασία το τρόφιμο θερμαίνεται σε κατάλληλη θερμοκρασία πριν από το γέμισμα και θεωρείται ότι η θερμοκρασία του τροφίμου θα αποστειρώσει και τον περιέκτη/καπάκι.

Ο τοματοπολτός στην ελληνική βιομηχανική πρακτική, γεμίζεται στον περιέκτη σε θερμοκρασίες  $>93.3^{\circ}\text{C}$ , συνήθως στους  $95^{\circ}\text{C}$  σφραγίζεται, αναποδογυρίζεται για να αποστειρωθεί και το καπάκι και διατηρείται στον αέρα για 20 λεπτά, πριν ψυχθεί στο νερό. Παράγοντες που επηρεάζουν τη διεργασία και επομένως λαμβάνονται υπόψη κατά τον σχεδιασμό της είναι ο τρόπος ψύξης, το σχήμα, το μέγεθος και ο τύπος του περιέκτη, το pH και οι θερμοφυσικές ιδιότητες του προϊόντος, ενώ πιο σημαντικός παράγοντας της διεργασίας φαίνεται να είναι η θερμοκρασία πλήρωσης (Silva and Silva, 1997). Επίσης, αναφέρεται ότι στην πράξη δεν ακολουθείται ακριβώς η ελάχιστη θερμοκρασία πλήρωσης επειδή κατά το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από το ένα στάδιο της διεργασίας στο άλλο, αν έχουμε θερμοκρασία πιο χαμηλή από την ενδεικνυόμενη, υπάρχει πιθανότητα να μην γίνει σωστή επεξεργασία και να υπάρξει αλλοίωση στο τελικό προϊόν (Silva and Silva, 1997). Η διαφοροποίηση των χαρακτηριστικών μεταφοράς θερμότητας μεταξύ τοματοπολτού (π.χ.,  $28-30^{\circ}\text{Brix}$ ) και τοματοχυμού ( $\sim 4-6^{\circ}\text{Brix}$ ) διαφοροποιεί και τις συνθήκες της "πλήρωση εν θερμώ" διεργασίας.

Η μελέτη των παραμέτρων της "πλήρωση εν θερμώ" διεργασίας και η εύρεση των βέλτιστων συνθηκών αποτέλεσε αντικείμενο ερευνών, οι οποίες έλαβαν ώθηση με την εξέλιξη της τεχνολογίας και των υπολογιστών, έχοντας ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη κατάλληλων προγραμμάτων, βασισμένα στην επίλυση πολύπλοκων μαθηματικών

εξισώσεων. Η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (Computational Fluid Dynamics, CFD) αποτελεί ένα ισχυρό υπολογιστικό εργαλείο το οποίο χρησιμοποιείται σήμερα όλο και περισσότερο για την προσομοίωση πολλών διεργασιών στη βιομηχανία τροφίμων (Yanniotis and Stoforos, 2014).

Με βάση τα παραπάνω, αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής ερευνητικής μελέτης ήταν η προσομοίωση με χρήση Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (CFD) της “πλήρωση εν θερμώ” διεργασίας για την παραγωγή τοματοχυμού σε γυάλινους περιέκτες (βάζα χωρητικότητας ~190 mL). Διερευνήθηκε το επίπεδο ασφάλειας του προϊόντος που επιτυγχάνεται κατά τη διεργασία, η ποιοτική υποβάθμιση που δέχεται το προϊόν και οι δυνατότητες που υπάρχουν να βελτιστοποιηθεί η ποιότητα του προϊόντος με τη χρήση των πλέον κατάλληλων συνθηκών θερμοκρασίας γεμίσματος και χρόνου παραμονής στον αέρα ή σε υδατόλουτρο.

## 1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

### 1.1 Τομάτα

Η τομάτα είναι ο καρπός του φυτού *Solanum lycopersicum* και αποτελεί φρούτο με τόπο καταγωγής τη Νότια Αμερική, και συγκεκριμένα το Μεξικό. Παρόλα αυτά πολλοί τη θεωρούν λαχανικό καθώς χρησιμοποιείται περισσότερο σε σαλάτες (Peralta, 2007). Η τομάτα αποτελεί εδώ και πολλά χρόνια πρωταγωνιστή της διατροφής του ανθρώπου και ειδικά της μεσογειακής διατροφής, λόγω της θρεπτικής της αξίας, της γεύσης και της οικονομικής προσιότητάς της. Η ραγδαία αύξηση της κατανάλωσης της τομάτας παγκοσμίως απαιτεί εκτεταμένο ποιοτικό έλεγχο τόσο στο στάδιο της παραγωγής, όσο και στο στάδιο της συντήρησης, πριν τα τελικά προϊόντα φτάσουν στον καταναλωτή.

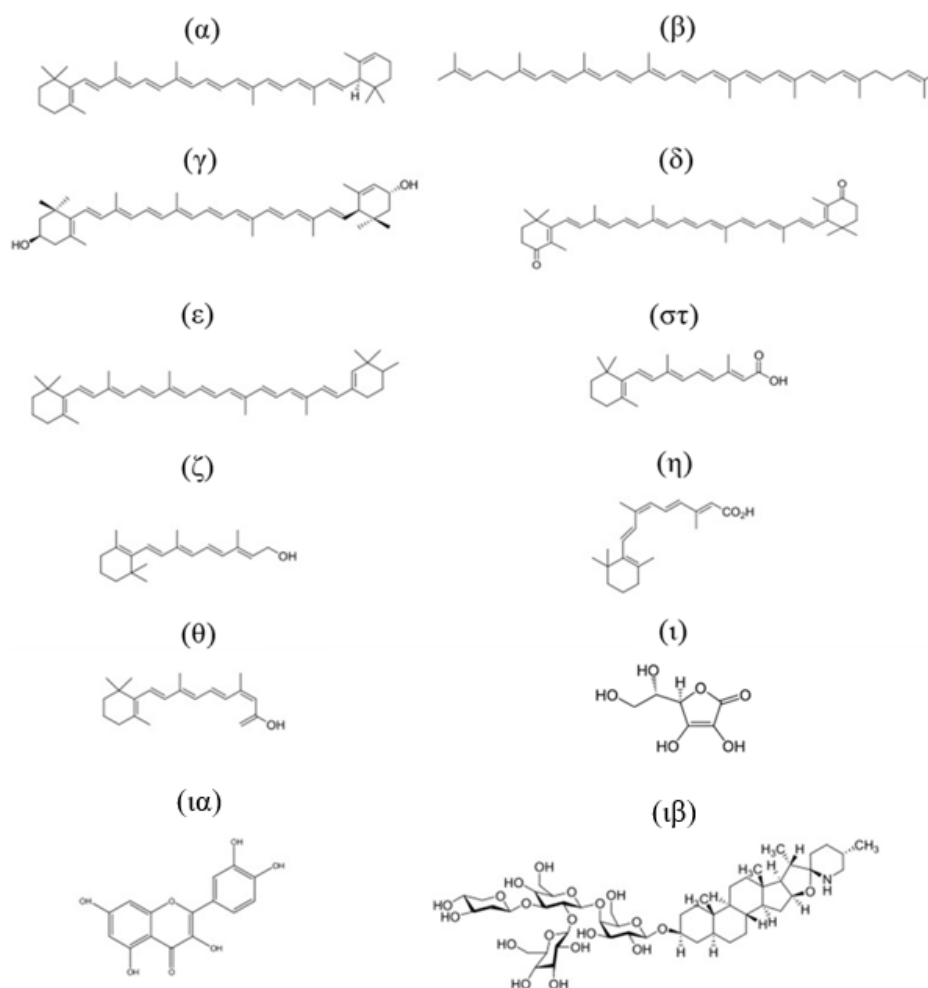
Υπάρχουν πάρα πολλές ποικιλίες τομάτας που διαφέρουν σε μέγεθος και χρώμα, σε ανθεκτικότητα στις ασθένειες, σε πρωιμότητα ή σε καταλληλόλητα καλλιέργειας τους σε διαφορετικά κλίματα (Brekka *et al.*, 2015). Όσο αναφορά το σχήμα, οι τομάτες μπορεί να είναι στρόγγυλες, μακρόστενες ή κερασόμορφες και όσο αναφορά το χρώμα της φλούδας μπορεί να είναι κίτρινες, κόκκινες, με λωρίδες μαύρου ή πράσινου ή ακόμη και εντελώς μαύρες. Οι περισσότερες σύγχρονες ποικιλίες τομάτας έχουν ομαλή επιφάνεια, αλλά κάποιες ποικιλίες τομάτας συχνά εμφανίζουν έντονες νευρώσεις (Σχήμα 1). Οι ποικιλίες που καλλιεργούνται σήμερα σε μεγαλύτερο βαθμό διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες, αυτές που η ανάπτυξη τους σταματά από μόνη της όταν φθάσουν σε ένα ορισμένο στάδιο και αυτές που αναπτύσσονται συνέχεια όσο διαρκεί η καλλιέργεια. Στην Ελλάδα προτιμώνται μεγαλόκαρπες ποικιλίες και υβρίδια όπως: Mountain Fresh F1, Mountain Spring F1, Bobcat F1, Super Galli, Troy F1, Kalisti F1, EuBoia F1, Formula F1, Verona F1, Florina F1, Mirsini F1, Dual large F1, Glodin F1, Meteor F1, Ismini, Fedra, Soraya F1 (Ολύμπιος, 2015).



Σχήμα 1. Διάφορες ποικιλίες τομάτας.

### 1.1.1 Συστατικά της τομάτας

Η τομάτα είναι ένα φρούτο πλούσιο σε φυτοχημικά που προάγουν την υγεία και είναι ευεργετικά στην πρόληψη σημαντικών χρόνιων κληρονομικών ασθενειών, καθώς τα συστατικά της έχουν αντιοξειδωτική, αντιμεταλλαξιγόνο, αντιπολλαπλασιαστική, αντιφλεγμονώδη και αντιαθηρωματική δράση. Οι χημικές δομές ορισμένων βιοδραστικών ενώσεων της τομάτας παρουσιάζονται στο Σχήμα 2. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 1, η τομάτα είναι καλή πηγή φαινολικών ενώσεων (φαινολικά οξέα και φλαβονοειδή), καροτενοειδών (λυκοπένιο,  $\alpha$  και  $\beta$  καροτίνη), βιταμινών (ασκορβικό οξύ και βιταμίνη Α), γλυκοαλκαλοειδών (τοματίνη) και μεταλλικών στοιχείων. Γενικά, οι ευεργετικές δράσεις της τομάτας λόγω των φυτοχημικών συστατικών της δεν επηρεάζονται από τις συνήθεις διαδικασίες μαγειρέματος, καθιστώντας την ακόμη πιο ωφέλιμη για ανθρώπινη κατανάλωση (Chaudhary, 2018).



Σχήμα 2. Χημικές δομές ορισμένων βιοδραστικών ενώσεων στην τομάτα: (α)  $\alpha$ -καροτένιο, (β) λυκοπένιο, (γ) λουτεΐνη, (δ) κανθαξανθίνη, (ε)  $\beta$ -καροτίνη, (στ) trans-ρετινοϊκό οξύ, (ζ) trans-ρετινόλη, (η) 9-cis-ρετινοϊκό οξύ, (θ) 13-cis-ρετινοϊκό οξύ (ι) L-ασκορβικό οξύ (ια) κερσετίνη και (ιβ)  $\alpha$ -τοματίνη.

Πίνακας 1. Θρεπτικά συστατικά που υπάρχουν σε διαφορετικούς τύπους τομάτας  
(Chaudhary, 2018).

Συστατικό	Κόκκινη ωμή ώριμη τομάτα	Κόκκινη μαγειρεμένη ώριμη τομάτα	Πράσινη ωμή τομάτα
Νερό, g	94.52	94.34	93
Ενέργεια, kcal (kJ)	18 (74)	18 (73)	23 (95)
Πρωτεΐνες, g	0.88	0.95	1.2
Ολικά λιπίδια, g	0.2	0.11	0.2
Υδατάνθρακες, g	3.89	4.01	5.1
Ολικές φυτικές ίνες, g	1.2	0.7	1.1
Ολικά σάκχαρα, g	2.63	2.49	4
Γλυκόζη, g	1.25	1.18	-
Φρουκτόζη, g	1.37	1.31	-
Ασβέστιο, Ca, mg	10	11	13
Σίδηρος, Fe, mg	0.27	0.68	0.51
Μαγνήσιο, Mg, mg	11	9	10
Φωσφόρος, P, mg	24	28	28
Κάλιο, K, mg	237	218	204
Νάτριο, N, mg	5	11	13
Ψευδάργυρο, Zn, mg	0.17	0.14	0.07
Χαλκό, Cu, mg	0.059	0.075	0.09
Μαγγάνιο, Mn, mg	0.114	0.105	0.1
Σελήνιο, Se, μg	-	0.5	0.1
Φθόριο, F, μg	2.3	-	-
<b>Βιταμίνες</b>			
Βιταμίνη C, ασκορβικό οξύ, mg	13.7	22.8	23.4
Βιταμίνη B <sub>1</sub> , θειαμίνη, mg	0.037	0.036	0.06
Βιταμίνη B <sub>2</sub> , ριβοφλαβίνη, mg	0.019	0.022	0.04
Βιταμίνη B <sub>3</sub> , νιασίνη, mg	0.594	0.532	0.5
Βιταμίνη B <sub>5</sub> , παντοθενικό οξύ, mg	0.089	0.129	0.5
Βιταμίνη B <sub>6</sub> , πυροξοδίνη, mg	0.08	0.079	0.081
Βιταμίνη B <sub>9</sub> , φυλλικό ή φολικό οξύ, μg	15	13	9
Χολίνη, mg	6.7	6.9	8.6
Βιταμίνη A, μg	42	24	32
Βιταμίνη E, α-τοκοφερόλη, mg	0.54	0.56	0.38
β-τοκοφερόλη	0.01	0.01	-
γ-τοκοφερόλη	0.12	0.21	-
δ-τοκοφερόλη	-	0.01	-
Βιταμίνη K, μg	7.9	2.8	10.1

(συνεχίζεται)

Πίνακας 1. Θρεπτικά συστατικά που υπάρχουν σε διαφορετικούς τύπους τομάτας  
(Chaudhary, 2018). (συνέχεια)

<b>Προβιταμίνες</b>			
β-καροτένιο, μg	449	293	346
α-καροτένιο, μg	101	-	78
Λυκοπένιο, μg	2573	3041	-
Λουτεΐνη και κανθαξανθίνη, μg	123	94	-
<b>Λιπίδια</b>			
Ολικά κορεσμένα λιπαρά οξέα, g	0.028	0.015	0.028
Ολικά μονοακόρεστα λιπαρά οξέα, g	0.031	0.016	0.03
Ολικά πολυακόρεστα λιπαρά οξέα, g	0.083	0.044	0.081
Φυτοστερόλες, mg	7	9	-
<b>Αμινοξέα</b>			
Τρυπτοφάνη, g	0.006	0.008	0.009
Θρεονίνη, g	0.027	0.027	0.03
Ισολευκίνη, g	0.018	0.026	0.029
Λευκίνη, g	0.025	0.039	0.044
Λυσίνη, g	0.027	0.039	0.044
Μεθειονίνη, g	0.006	0.009	0.01
Κυστίνη, g	0.009	0.014	0.016
Φαινυλαλανίνη, g	0.027	0.028	0.031
Τυροσίνη, g	0.014	0.018	0.021
Βαλίνη, g	0.018	0.027	0.031
Αργινίνη, g	0.021	0.026	0.029
Ιστιδίνη, g	0.014	0.016	0.018
Αλανίνη, g	0.027	0.03	0.034
Ασπαρτικό οξύ, g	0.135	0.148	0.166
Γλουταμινικό οξύ, g	0.431	0.393	0.442
Γλυκίνη, g	0.019	0.026	0.03
Προλίν, g	0.015	0.02	0.023
Σερίν, g	0.026	0.028	0.032
<b>Φλαβονοειδή</b>			
Ναριγκενίνη, mg	0.7	-	-
Καμφερόλη, mg	0.1	-	-
Μυρικετίνη, mg	0.1	-	-
Κερκετίνη, mg	0.6	0.7	-

### Φαινολικές ενώσεις

Οι φαινολικές ενώσεις είναι η κατηγορία των φυτικών δευτερογενών μεταβολιτών που διαθέτουν μία ή περισσότερες υδροξυλομάδες συνδεδεμένες σε ένα ή περισσότερους δακτυλίους βενζολίου. Δομικά, ποικίλλουν από απλά φαινολικά σε σύνθετα πολυμερή (πολυφαινόλες) με βάση τον αριθμό και τη θέση των υδροξυλομάδων που συνδέονται (Singh *et al.*, 2017). Οι πολυφαινόλες είναι γνωστό ότι μειώνουν το οξειδωτικό στρες και έτσι εξουδετερώνουν διάφορα ζητήματα υγείας, συμπεριλαμβανομένης της καρδιαγγειακής νόσου και του καρκίνου (Singh *et al.*, 2018). Οι φαινολικές ενώσεις που αναφέρονται στη τομάτα είναι τα φαινολικά οξέα (καφεϊκό, χλωρογενικό, σιναπικό, π-κουμαρικό και φερουλικό οξύ) και τα φλαβονοειδή (κερκετίνη, ρουτίνη, καμφερόλη και ναριγκενίνη). Η συσσώρευση φλαβονοειδών συμβαίνει κατά την ωρίμανση της τομάτας με μείωση της περιεκτικότητας σε χλωροφύλλη και ωρίμανση της φλούδας. Η κερκετίνη και το χλωρογενικό οξύ είναι οι πιο άφθονες φαινολικές ενώσεις στη τομάτα (Sharma, 2017).

### Πολυσακχαρίτες

Η τομάτα είναι πλούσια σε πολυσακχαρίτες και συγκεκριμένα σε πηκτίνες που εμφανίζονται στο κυτταρικό τοίχωμα, με κύριο χαρακτηριστικό τους την υψηλή περιεκτικότητά τους σε μερικώς μεθυλεστεροποιημένο γαλακτουρονικό οξύ (GalA) και την παρουσία ουδέτερων σακχάρων στις πλευρικές αλυσίδες. Οι ενώσεις αυτές σχηματίζουν πηκτές/πηκτώματα και συγκρατούν ποσότητες νερού και συνεπώς διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην υφή και τη συνεκτικότητα των φρούτων και λαχανικών και είναι ο λόγος της χαρακτηριστικής σαρκώδης υφής της τομάτας (Bonnin, 2020).

Οι μεταβολές των πηκτινικών ουσιών έχουν ως αποτέλεσμα το μαλάκωμα της σάρκας φρούτων κατά την ωρίμανση, καθώς και μεταβολές της θολερότητάς των πολτών και συμπυκνωμένων φρούτων. Η τομάτα καθώς αναπτύσσεται αλλάζει το χρώμα, την υφή της εσωτερικής σάρκας, καθώς και του εξωτερικού κυτταρικού τοιχώματος. Αυτό συμβαίνει γιατί στα πρώτα στάδια ανάπτυξης της τομάτας εντοπίζεται η πρωτοπηκτίνη, μία μη υδατοδιαλυτή πηκτινική ουσία η οποία συνδέει τα κύτταρα μεταξύ τους ισχυρά δημιουργώντας ένα σκληρό κυτταρικό τοίχωμα. Κατά την ωρίμανση του φρούτου αυτή η ένωση υδρολύεται και μετατρέπεται σε υδατοδιαλυτή πηκτίνη που κρατά συνδεδεμένα τα κύτταρα, ωστόσο με λιγότερη ισχύ, με αποτέλεσμα το φρούτο να είναι πιο μαλακό. Με το πέρασμα του χρόνου η πηκτίνη αποικοδομείται περαιτέρω σε διαλυτά συστατικά που δεν



μπορούν να συγκρατήσουν τα κύτταρα συνδεδεμένα και έτσι το φρούτο γίνεται αρκετά μαλακό (Σχήμα 3). Οι αλλαγές που συμβαίνουν στη χημεία της πηκτίνης οφείλονται σε συγκεκριμένα ενδογενή ένζυμα που εμφανίζονται στα κύτταρα του φυτού καθώς αυτό αναπτύσσεται και δρουν ανασταλτικά στη δράση της πηκτίνης. Τα πιο διαδεδομένα πηκτινολυτικά ένζυμα που δρουν στους πηκτικούς πολυσακχαρίτες των φρούτων είναι η πολυγαλακτουρονάση (PG), η πηκτινομεθυλεστεράση (PME), η πηκτική λυάση (PL) και η β-γαλακτοσιδάση (β-GALase). Πιο συγκεκριμένα, η PME υδρολύει τις μεθυλιωμένες καρβοξυλικές ομάδες των πηκτινών παράγοντας πολυγαλακτουρονικό οξύ, η PG διασπά με υδρόλυση τους α-1,4 γλυκοζιτικούς δεσμούς μεταξύ μονάδων γαλακτουρονικού οξέος, η πηκτική λυάση είναι ικανή αποπολυμερισμού της κύριας αλυσίδας πολυγαλακτουρονάνης με εξουδετερωτική διάσπαση του πηκτικού στα μη αναγωγικά άκρα του, αποδίδοντας ολιγοσακχαρίτες (4,5-ακόρεστες ολιγογαλακτουρονάνες) και τέλος η β-γαλακτοσιδάση καταλύει τη διάσπαση τερματικών υπολειμμάτων γαλακτόζης από πλευρικές αλυσίδες β-(1,4)-d-γαλακτάνης πηκτίνης (Kalamaki *et al.*, 2012).

Η υποβάθμιση της ποιότητας των προϊόντων τομάτας λόγω της μείωσης του ιξώδους συνδέεται άμεσα με τη δράση αυτών των πηκτινολυτικών ενζύμων πάνω στους δομικούς πολυσακχαρίτες του φρούτου. Η διαλυτοποίηση και ο αποπολυμερισμός των πηκτινικών ουσιών κατά την ωρίμανση και την επεξεργασία της τομάτας έχουν δραματικές συνέπειες στη ρεολογία των πολυμερών και τελικά στο κυτταρικό τοίχωμα, επηρεάζοντας την ανάπτυξη των φυτών, την ευαισθησία των φυτών στους παθογόνους μικροοργανισμούς, καθώς και την ποιότητα των τελικών προϊόντων. Η απενεργοποίηση των ενζύμων αυτών



Σχήμα 3. Τα στάδια ωρίμανσης μιας τομάτας. Από πράσινη άγουρη τομάτα (αριστερά) σε κόκκινη υπερώριμη τομάτα (Hyodo 2013).

κατά την επεξεργασία της τομάτας είναι καθοριστικής σημασίας για την παραγωγή προϊόντων υψηλού ιξώδους. Ωστόσο, η μερική διατήρηση της ενεργότητας της PME μπορεί να είναι επιθυμητή, διότι τα προϊόντα δράσης της μπορούν να συνδεθούν με δισθενή ιόντα ασβεστίου και να σχηματίσουν πήγματα (gels), αυξάνοντας τη συνεκτικότητα των προϊόντων τομάτας (Gould, 1992). Οι Eriksson *et al.* (2004) διαπίστωσαν ότι μειωμένη έκφραση γονιδίου PME σε μεταλλαγμένα στελέχη τομάτας συμβάλλει θετικά στη διατήρηση της ακεραιότητας του κυτταρικού τοιχώματος.

### *Βιταμίνες*

Η τομάτα είναι πλούσια σε βιταμίνη C και περιέχει επίσης βιταμίνη A, B και E. Μελέτες έχουν αποκαλύψει ότι η περιεκτικότητα σε βιταμίνη C αρχικά αυξάνεται με την ωρίμανση του καρπού και στη συνέχεια μειώνεται καθώς ωριμάζει ο καρπός. Η βιταμίνη A υπάρχει με τη μορφή καροτενοειδών, ενώ η βιταμίνη B υπάρχει ως θειαμίνη, νιασίνη, βιταμίνη B6 και φολικά. Η βιταμίνη E υπάρχει σε μικρότερες ποσότητες σε σχέση με τις υπόλοιπες βιταμίνες και συναντάται ως α- και β- τοκοφερόλες. Η περιεκτικότητα σε βιταμίνες στην τομάτα επηρεάζεται από το έδαφος της καλλιέργειας, τον τύπο της ποικιλίας και τον χρόνο συγκομιδής (Watada *et al.*, 1976).

### *Καροτενοειδή*

Τα καροτενοειδή είναι χρωστικές που αποτελούν πρόδρομες ενώσεις της βιταμίνης A (προβιταμίνες) και μετατρέπονται σε βιταμίνη A κατά την απορρόφησή τους στο λεπτό έντερο. Αποτελούνται από υδρογονάνθρακες στα καροτένια και από οξυγονωμένους υδρογονάνθρακες στις ξανθοφύλλες με αλυσίδες 40 ατόμων άνθρακα που περιέχουν συζυγιακά συστήματα διπλών δεσμών (τερπένια). Σε αυτό οφείλεται και το χρώμα των καροτενοειδών (κίτρινες, πορτοκαλί και κόκκινες χρωστικές). Η τομάτα είναι πλούσια σε λυκοπένιο, μία άλλη ένωση που ανήκει στα καροτένια και είναι η κύρια ένωση που ευθύνεται για το έντονο κόκκινο χρώμα της ώριμης τομάτας και των προϊόντων της. Το λυκοπένιο υπάρχει επίσης σε άλλες φυτικές τροφές όπως το καρπούζι, το ροζ γκρέιπφρουτ, τα βερίκοκα και η παπάγια, αν και τα προϊόντα τομάτας (κέτσαπ, πάστα τομάτας, σάλτσα τομάτας και σούπα τομάτας παραμένουν οι πιο άφθονες πηγές. Τα πιθανά οφέλη του λυκοπενίου για την υγεία, όπως ο μειωμένος κίνδυνος καρκίνου του προστάτη, του μαστού και του πνεύμονα, έχουν αποδειχθεί κυρίως μέσω δοκιμών *in vitro* και πειραμάτων σε ζώα, αλλά υπάρχουν ελάχιστα στοιχεία από κλινικές δοκιμές σε ανθρώπους. Ωστόσο, ο κίνδυνος αυτών των χρόνιων ασθενειών φαίνεται να μειώνεται με την αύξηση της

ποσότητας λυκοπενίου που βρίσκεται στους ιστούς και τον ορό των ανθρώπων. Ο κύριος μηχανισμός δράσης έχει αποδοθεί στις ισχυρές αντιοξειδωτικές ιδιότητες του λυκοπενίου που θα μπορούσαν να προστατεύσουν τους ανθρώπους από τις καταστροφικές επιπτώσεις των ελευθέρων ριζών οξυγόνου (ROS) και άλλων ενδογενών ελεύθερων ριζών. Οι αντικαρκινικές ιδιότητες του λυκοπενίου πιστεύεται ότι οφείλονται στην ικανότητά του να παρεμβαίνει στην παραγωγή αυξητικών παραγόντων που μοιάζουν με ινσουλίνη, οι οποίοι είναι γνωστό ότι διεγείρουν την ανάπτυξη και εξάπλωση των καρκινικών κυττάρων. Το λυκοπένιο ως αντιοξειδωτικό προλαμβάνει την οξειδωτική καταστροφή της LDL και μπορεί να είναι ανασταλτικός παράγοντας κατά της παθογένεση της αθηροσκλήρωσης. Οι συγκεντρώσεις του λυκοπενίου σχετίζονται αντιστρόφως με το πάχος του εσωτέρου τοιχώματος των αιμοφόρων αγγείων και τον κίνδυνο εμφράγματος του μυοκαρδίου, γεγονός που υποδηλώνει αντιαθηρογόνο ρόλο για το λυκοπένιο. Η αντιοξειδωτική δράση του λυκοπενίου αποτρέπει επίσης την καταστροφή του DNA που προκαλείται λόγω των ελεύθερων ριζών, διατηρώντας έτσι τις φυσιολογικές κυτταρικές πληροφορίες και αποτρέποντας τη μεταλλαξιογένεση (Aluko, 2011).

Το χαρακτηριστικό κόκκινο χρώμα της τομάτας αναπτύσσεται λόγω της συσσώρευσης λυκοπενίου (κόκκινη χρωστική ουσία) και της αποικοδόμησης των χλωροφύλλων, οι οποίες από πράσινες γίνονται λευκές. Η βιοσύνθεση του λυκοπενίου ρυθμίζεται προς τα πάνω κατά την ωρίμανση και τα ένζυμα που μετατρέπουν το λυκοπένιο σε άλλους μεταβολίτες μειώνονται δραματικά (Vega-López *et al.*, 2022).

### *Γλυκοαλκαλοειδή*

Τα γλυκοαλκαλοειδή είναι μια ομάδα αλκαλοειδών στα οποία συνδέεται το σάκχαρο. Αυτές οι ενώσεις παρέχουν προστασία από παθογόνα όπως βακτήρια, ιούς και μύκητες. Τα γλυκοαλκαλοειδή της τομάτας υπάρχουν με τη μορφή τοματίνης. Η τοματίνη είναι ένα μείγμα δύο γλυκοαλκαλοειδών: ατομίνη και δεϋδροξυτοματίνη που είναι γνωστό ότι υπάρχουν τόσο στα φύλλα της τομάτας όσο και στους καρπούς. Στα πράσινα φρούτα, η περιεκτικότητα σε α-τοματίνη είναι υψηλή (500 mg/kg) σε σύγκριση με τα ώριμα κόκκινα φρούτα (5 mg/kg) (Friedman *et al.*, 2009; Friedman, 2013).

#### **1.1.2 Προϊόντα τομάτας**

Η τομάτα καταναλώνεται ευρέως σε πολύ μεγάλες ποσότητες είτε ως νωπός καρπός είτε με τη μορφή επεξεργασμένων προϊόντων της όπως φυσικός χυμός τομάτας, συμπυκνωμένος χυμός τομάτας, τοματοπολτός, αποφλοιωμένες τομάτες ολόκληρες ή σε

μορφή τεμαχίων ή φετών, κονσερβοποιημένες και κέτσαπ (Motamedzadegan, 2018). Παρακάτω παρουσιάζονται τα κυριότερα προϊόντα της τομάτας και η παρασκευή τους:

- Φυσικός χυμός τομάτας: Παρασκευάζεται από φρέσκες τομάτες που συμπιέζονται και στραγγίζονται για να αφαιρέσουν τον πολτό και τους σπόρους.
- Συμπυκνωμένος χυμός τομάτας: Παρασκευάζεται με την ίδια διαδικασία όπως ο φυσικός χυμός, αλλά μειώνεται η περιεκτικότητα σε νερό για να γίνει πιο παχύρρευστος χυμός.
- Τοματοπολτός: αποτελεί ένα παχύρρευστο, συμπυκνωμένο προϊόν τομάτας που παρασκευάζεται από βραστές και στραγγισμένες τομάτες όπου έχουν αφαιρεθεί τα σπόρια και η φλούδα.
- Αποφλοιωμένες τομάτες: Παρασκευάζεται από τομάτες χωρίς φλοιό. Οι αποφλοιωμένες τομάτες μπορεί να είναι ολόκληρες ή σε κομμάτια και συνήθως κονσερβοποιούνται στον δικό τους χυμό.
- Κονσερβοποιημένες τομάτες: Οι τομάτες μπορούν να βρεθούν σε διάφορες μορφές, όπως ολόκληρες αποφλοιωμένες, κομμένες σε κύβους ή θρυμματισμένες και παρασκευάζονται από κομμένες φρέσκες και ώριμες τομάτες. Συνήθως διατηρούνται σε νερό ή χυμό τομάτας.
- Σάλτσα Τομάτας: Παρασκευάζεται με μαγείρεμα τοματών σε συνδυασμό με επιπρόσθετα λαχανικά όπως κρεμμύδια και άλλων μπαχαρικών.
- Πελτές Τομάτας: Αποτελείται από αποξηραμένα κομμάτια τομάτας.
- Κέτσαπ: Προϊόν τομάτας που έχει επιπλέον γεύση από ξύδι, ζάχαρη, αλάτι και μπαχαρικά.

Η τιμή pH, καθώς και η ενεργότητα νερού ( $a_w$ ) ενός προϊόντος διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην εξάπλωση και ανάπτυξη ενός μικροοργανισμού σε αυτό. Προϊόντα με pH υψηλότερο από 4.6 κινδυνεύουν από τη βλάστηση των σπορίων και επομένως πρέπει να διατηρούνται στο ψυγείο για όλη τη διάρκεια ζωής του προϊόντος. Σε γενικές γραμμές, το pH του προϊόντος τομάτας είναι χαμηλό, παρόλα αυτά πολλές φορές συνιστάται να οξινίζονται περαιτέρω σε τιμές pH κάτω από το 4.6 (Λάζος 2010). Τα περισσότερα τρόφιμα έχουν δραστηριότητα νερού πάνω από 0.95 και αυτό θα παρέχει επαρκή υγρασία για να υποστηρίξει την ανάπτυξη βακτηρίων, ζυμομυκήτων και μούχλας. Η ποσότητα της διαθέσιμης υγρασίας μπορεί να μειωθεί σε σημείο που θα εμποδίσει την ανάπτυξη των οργανισμών (Schmidt, 2020).

Στους Πίνακες 2 και 3, παρουσιάζονται οι διαφορετικές τιμές pH και οι ενεργότητες νερού, αντίστοιχα, των διαφόρων προϊόντων της τομάτας.

Πίνακας 2. Τιμές pH διάφορων προϊόντων τομάτας (FDA 2003).

Προϊόντα τομάτας	Τιμές pH
Τομάτες	4.30-4.90
Τοματίνια	3.83
Αμπελοτομάτες	4.42-4.65
Χυμός τομάτας	4.10-4.60
Τοματοπολτός	3.50-4.70
Πουρές τομάτας	4.30-4.47
Στραγγισμένες τομάτες	4.32-4.58
Τομάτες σε κονσέρβα	3.50-4.70
Σούπα τομάτας (κρεμώδη υφή σε κονσέρβα)	4.62
Τοματόσουπα με ρύζι, συμπυκνωμένη	5.50
Κέτσαπ	3.89-3.92

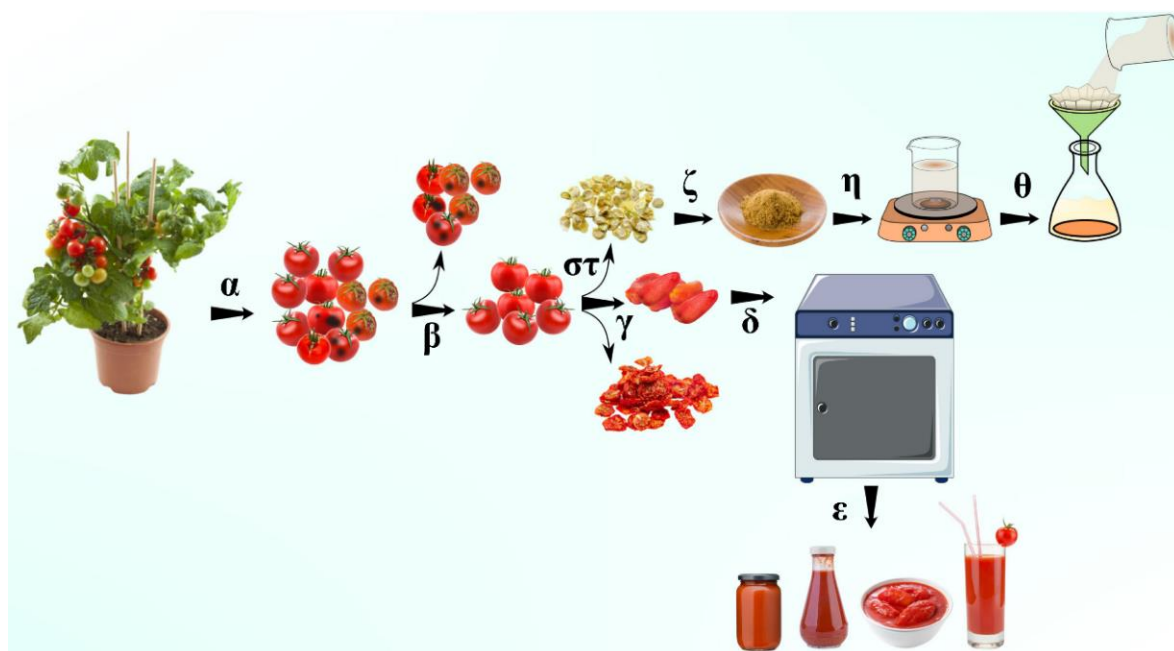
Πίνακας 3. Τιμές της ενεργότητας νερού διάφορων προϊόντων τομάτας.

Προϊόντα τομάτας	Ενεργότητα νερού ( $a_w$ )	Αναφορά
Τομάτες	0.991-0.998	Chirife, 1982
Κονσερβοποιημένος χυμός τομάτας	0.993	Alzamora, 1983
Κονσερβοποιημένος τοματοπολτός	0.934	Favetto, 1983
Κονσερβοποιημένος τοματοπολτός	0.967	Alzamora, 1983
Κονσερβοποιημένος τοματοπολτός	0.975	Alzamora, 1983
Κονσερβοποιημένος πουρές τομάτας	0.992-0.987	Alzamora, 1983
Πελτές τομάτας	0.993	Chirife, 1982

### 1.1.3 Τομάτα στη βιομηχανία

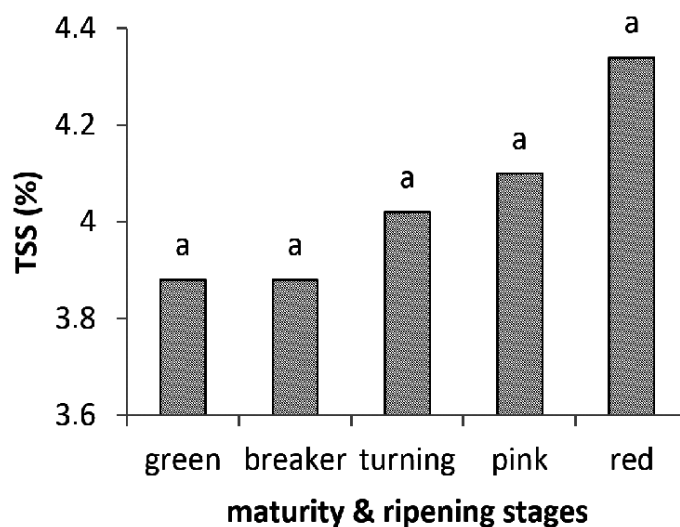
Στη βιομηχανία χρησιμοποιούνται κυρίως ώριμες κόκκινες τομάτες με λεία επιφάνεια χωρίς πτυχώσεις που είναι πλούσιες σε ολικά στερεά και σάκχαρα, ενώ παράλληλα έχουν χαμηλή οξύτητα (Goose & Binsted, 1964). Η τομάτα περνά από πολλά στάδια μέχρι να παραχθεί το επιθυμητό τελικό προϊόν τομάτας. Αρχικά οι τομάτες συλλέγονται από το φυτό και έπειτα πλένονται και ταξινομούνται. Τα περιττά υλικά αφαιρούνται και τα φρούτα ταξινομούνται χειροκίνητα ή μέσω ηλεκτρονικών συστημάτων. Οι καρποί στη συνέχεια

ξεφλουδίζονται χρησιμοποιώντας αλυσίδα, ατμό ή ζεστό νερό. Μετά την αποφλούωση, οι τομάτες ταξινομούνται ξανά για τελική επεξεργασία. Αυτές οι τομάτες χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για την παρασκευή διαφόρων προϊόντων όπως μαρμελάδες, πολτούς, χυμούς και σάλτσες. Κατά τη διάρκεια αυτής της επεξεργασίας, οι σπόροι και οι φλούδες λαμβάνονται ως υποπροϊόντα. Αυτοί οι σπόροι μπορούν να ομογενοποιηθούν σε λεπτή σκόνη και να υποβληθούν σε εκχύλιση με διαλύτη για την παρασκευή εκχυλίσματος σπόρων τομάτας (TSE) (Σχήμα 4) (Kumar *et al.*, 2021).



Σχήμα 4. Επεξεργασία φρούτων τομάτας: (α) Συγκομιδή, (β) Ταξινόμηση και διαβάθμιση, (γ) Ξεφλούδισμα φρούτων τομάτας και ξήρανση, (δ) Αποστείρωση και θερμική επεξεργασία τομάτας, (ε) Ανάπτυξη προϊόντων, (στ) Αφαίρεση των σπόρων τομάτας από τον πολτό, (ζ) Ομογενοποίηση σπόρων σε λεπτή σκόνη, (η, θ) Παρασκευή εκχυλίσματος σπόρων τομάτας (TSE) με χρήση ειδικών διαλυτών (πηγή Kumar *et al.*, 2021).

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τομάτες που προορίζονται για μεταποίηση από τη βιομηχανία απαιτούν ελάχιστο °Brix 4.5. Αυτό μεταφράζεται με ένα αποδεκτό εύρος 3.5 – 5.5 στη φρέσκια τομάτα. Οι βαθμοί Brix είναι ένα μέτρο της περιεκτικότητας σε ολικά διαλυτά στερεά (TSS) της τομάτας ή του προϊόντος τομάτας. Το TSS στις τομάτες είναι κυρίως σάκχαρα (φρουκτόζη) και η τιμή του σε κάθε στάδιο ωριμότητας της τομάτας είναι διαφορετική (Σχήμα 5) (Kasim, 2015).



Σχήμα 5. Ολικά διαλυτά στερεά (TSS) τομάτας σε διαφορετική ωριμότητα συγκομιδής. Κάθε μπάρα είναι ο μέσος όρος δώδεκα φρούτων. Τα μέσα με διαφορετικά γράμματα διαφέρουν σημαντικά στο  $p \leq 0,05$  (πηγή: Kasim, 2015).

#### 1.1.4 Τοματοπολτός

Πιο συγκεκριμένα, κατά την επεξεργασία του τοματοπολτού, ο καρπός τομάτας συνθλίβεται και υποβάλλεται σε αρχική θερμική επεξεργασία για την αδρανοποίηση των ενδογενών ενζύμων τομάτας που αποικοδομούν τις πηκτικές ουσίες. Το προϊόν που προκύπτει στη συνέχεια εκτίθεται σε περαιτέρω παρατεταμένη θέρμανση κατά τη διάρκεια της συμπύκνωσης (Ciruelos, 2001). Στο διάγραμμα ροής, που απεικονίζεται στο Σχήμα 5 αναφέρονται όλα τα στάδια της παραγωγής τοματοπολτού. Ο τοματοπολτός παρουσιάζει ποσοστό ολικών διαλυτών στερεών γύρω στο 24% ( $\beta/\beta$ ) (USDA 2000-01). Αξίζει να σημειωθεί ότι τα προϊόντα τομάτας που έχουν υποστεί θερμική επεξεργασία, όπως ο κονσερβοποιημένος τοματοπολτός, περιέχουν συνήθως πολύ περισσότερο λυκοπένιο σε σχέση με την ίδια ποσότητα από φρέσκες τομάτες. Αυτό συμβαίνει διότι η θερμότητα που χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια της θερμικής κατεργασίας προκαλεί διάσπαση των κυττάρων της φλούδας, επιτρέποντας στο λυκοπένιο να απορροφηθεί πιο αποτελεσματικά από το πεπτικό σύστημα του ανθρώπου (Dewanto, 2002).



Σχήμα 6. Διάγραμμα ροής παραγωγής τοματοπολτού.

### 1.1.5 Παθογόνοι μικροοργανισμοί στη τομάτα

Η μικροβιακή επιμόλυνση της τομάτας μπορεί να συμβεί κατά την περίοδο της καλλιέργειας, της συγκομιδής, της αποθήκευσης, της μεταφοράς, καθώς και κατά την επεξεργασία της από τους καταναλωτές (Barth, 2009). Επίσης, μια τέτοια μόλυνση μπορεί να προκληθεί ακόμα και κατά τη διάρκεια της έκθεσής των τοματών σε πάγκους και καλάθια στις ανοιχτές αγορές για πελάτες (Baiyewu, 2007). Η μόλυνση της τομάτας μπορεί να προκαλέσει είτε ασθένεια στο φυτό και συνεπώς να υποβαθμίσει την ποιότητα της τομάτας, είτε μετά από κατανάλωσή της να επιμολύνει τον ανθρώπινο οργανισμό, διαταράσσοντας έτσι τη δημόσια ασφάλεια και υγεία.

Η ποιότητα της τομάτας μπορεί να αλλοιωθεί όταν προσβληθεί από κάποιο παθογόνο μικροοργανισμό και να μην μπορεί να αξιοποιηθεί από τη βιομηχανία για την παραγωγή νέων προϊόντων. Η πιο συχνή ασθένεια προκαλείται από το βακτήριο *Xanthomonas campestris* pv. *vesicatoria*, και η νόσος ονομάζεται βακτηριακή κηλίδα. Αυτή η ασθένεια προκαλεί σκούρες, εμποτισμένες με νερό κηλίδες στα φύλλα, τους μίσχους και τους καρπούς. Μπορεί να οδηγήσει σε φυλλόπτωση, μειωμένη ποιότητα καρπού και απώλεια απόδοσης (Potnis, 2015). Μετά από διάφορες μελέτες διαπιστώθηκε ότι οι μύκητες ήταν η πηγή αλλοίωσης στα περισσότερα από τα δείγματα τομάτας και όχι τα βακτήρια (Ghosh, 2009). Κάποιοι από αυτούς είναι ο μύκητας *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* που προκαλεί μαρασμό, κιτρίνισμα και θάνατο των φύλλων, καθώς και καθυστερημένη ανάπτυξη και μειωμένη παραγωγή καρπών και ο μύκητας *Alternaria solani* που προκαλεί σκούρους, ομόκεντρους δακτυλίους στα φύλλα, καρκινώματα στελέχους και σήψη των καρπών (Ma, 2023). Τέλος, οι πιο διαδεδομένοι ιός που μπορεί να εντοπίσουμε στη τομάτα



σήμερα είναι ο ιός του καστανού καρπού της τομάτας (ToBRFV). Είναι ένας φυτικός ιός του γένους *Tobamovirus* που περιγράφηκε για πρώτη φορά το 2015. Ο ιός προκαλεί σοβαρές απώλειες στις καλλιέργειες και απειλεί την παραγωγή τομάτας παγκοσμίως (Zhang, 2022).



**Σχήμα 7.** Τομάτα με βακτηριακή κηλίδα (πηγή: Potnis 2015).

Η υψηλή περιεκτικότητα της τομάτας σε νερό, την προδιαθέτει σε επιμόλυνση με παθογόνους μικροοργανισμούς, που μπορούν να αποτελέσουν σημαντική απειλή για την υγεία των καταναλωτών (Obeng, 2018). Έχουν καταγραφεί πάρα πολλά περιστατικά μόλυνσης των ωμών φρούτων τομάτας αλλά και των προϊόντων τομάτας όπως οι κονσέρβες. Τα βακτήρια διαδραματίζουν πρωταγωνιστικό ρόλο στα ξεσπάσματα επιδημιών στις Ηνωμένες Πολιτείες, με τα κυριότερα να αναφέρονται στον Πίνακα 3. Βέβαια και άλλοι παθογόνοι μικροοργανισμοί όπως το παράσιτο *Cyclospora cayetanensis* που προκαλεί μια διαρροϊκή ασθένεια που ονομάζεται κυκλοσπορίαση και ο νοροϊός που είναι το συχνότερο αίτιο εμφάνισης ιογενούς γαστρεντερίτιδας, ήταν συχνά η αιτία ασθένειας των καταναλωτών τομάτας (CDC, 2023).

Στην Ινδία, μια μελέτη που πραγματοποιήθηκε σε πουρέ τομάτας αποκάλυψε την παρουσία των *Klebsiella sp.*, *Proteus mirabilis*, *Vibrio sp.* και *Pseudomonas sp.* (Garg, 2013). Στη Νιγηρία, οι Wogu και Ofuase (Wogu, 2014) απομόνωσαν τους *Bacillus subtilis*, *Klebsiella aerogenes*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Salmonella typhi*, *Proteus mirabilis* και *Staphylococcus aureus* από χαλασμένες τομάτες στην πόλη του Μπενίν. Μια παρόμοια μελέτη αποκάλυψε επίσης υψηλά επίπεδα *Staphylococcus sp.* (22.5%), *Bacillus sp.* (20%) και *Escherichia coli* (15%) στο Λάγος της Νιγηρίας (Ogundipe, 2012). Μία μολυσμένη σαλάτα *Kachumbari* (ψιλοκομμένη τομάτα/κρεμμύδι) στην Κένυα αναφέρθηκε ότι έθεσε το 64-69% του πληθυσμού σε κίνδυνο σαλμονέλλωσης. Το επίπεδο σαλμονέλλας σε

ορισμένα από τα δείγματα σαλάτας στη μελέτη περιείχε  $8.3 \times 10^4$  κύτταρα σαλμονέλας ανά μερίδα (Imathiu, 2018).

Πίνακας 4. Κρούσματα από παθογόνα βακτήρια στην τομάτα από το 2010 μέχρι το 2021 (CDC, 2023).

Χρονιά	Παθογόνο βακτήριο	Ορότυπος	Ασθενείς
2010	<i>Shigella sonnei</i>		314
2011	<i>Salmonella enterica</i>	Saintpaul	14
2010	<i>Salmonella enterica</i>	Javiana	30
2012	<i>Salmonella enterica</i>	Newport	102
2011	<i>Salmonella enterica</i>	Newport	10
2011	<i>Salmonella enterica</i>	Newport	166
2013	<i>Salmonella enterica</i>	Newport	14
2013	<i>Escherichia coli, Shiga toxin-producing</i>	O157:H7	20
2010	<i>Salmonella enterica</i>	Newport	64
2010	<i>Salmonella enterica</i>	Newport	24
2013	<i>Salmonella enterica</i>	Newport	9
2013	<i>Salmonella enterica</i>	Enteritidis	27
2013	<i>Salmonella enterica</i>	Saintpaul	131
2014	<i>Bacillus cereus</i>		31
2015	<i>Salmonella enterica</i>	Typhimurium	10
2015	<i>Salmonella enterica</i>	Hartford	19
2015	<i>Salmonella enterica</i>	Braenderup	6
2015	<i>Salmonella enterica</i>	Newport	119
2015	<i>Salmonella enterica</i>	Enteritidis	38
2015	<i>Salmonella enterica</i>	Enteritidis	2
2016	<i>Escherichia coli, Shiga toxin-producing</i>	O157:H7	9
2016	<i>Salmonella enterica</i>	Newport	10
2017	<i>Campylobacter; Salmonella enterica</i>	Enteritidis	6
2017	<i>Shigella sonnei</i>		2
2017	<i>Bacillus cereus</i>		3
2018	<i>Shigella sonnei</i>		61
2018	<i>Salmonella enterica</i>	Enteritidis	51
2018	<i>Salmonella enterica</i>	Newport	65
2019	<i>Salmonella enterica; Salmonella enterica</i>	Braenderup; Braenderup	7
2019	<i>Salmonella enterica</i>	Braenderup	24
2020	<i>Salmonella enterica</i>	Baildon	6
2020	<i>Clostridium botulinum</i>		2
2020	<i>Salmonella enterica</i>	Miami	65
2021	<i>Salmonella enterica</i>	Saintpaul	60

Ιδιαίτερη σημασία πρέπει να δοθεί στα βακτήρια που σχηματίζουν σπόρια, όπως τα *Clostridium botulinum* και *Bacillus coagulans*. Τα βακτήρια αυτά έχουν τη δυνατότητα σε δυσμενής συνθήκες να σχηματίζουν σπόρια, τα οποία όταν βρεθούν σε ευνοϊκό περιβάλλον βλαστάνουν και αναπτύσσονται. Για αυτό το λόγο είναι απαραίτητη η θερμική επεξεργασία σε τρόφιμα τομάτας που δεν έχει ρυθμιστεί το pH σε τιμές 4.6 ή λιγότερο. Για παράδειγμα, μια ακατάλληλα επεξεργασμένη κονσέρβα τοματοπολτού με  $pH > 4.6$ , παρέχει ένα ιδανικό περιβάλλον για την ανάπτυξη των σπορίων του *Clostridium botulinum*, καθώς τα βακτήρια αναπτύσσονται σε αναερόβιο περιβάλλον. Το *Clostridium botulinum* παράγει μια εξαιρετικά ισχυρή νευροτοξίνη που συγκαταλέγεται στα πιο θανατηφόρα δηλητήρια που είναι γνωστά. Τα ίχνη αυτής της τοξίνης, η οποία προκαλεί την τροφιογενή ασθένεια γνωστή ως αλλαντίαση, είναι αρκετές για να σκοτώσουν (Λάζος, 2010).

## 1.2 Θερμική επεξεργασία τροφίμων

Μια από τις πιο ευρέως διαδεδομένες μεθόδους για τη συντήρηση των τροφίμων είναι η θερμική επεξεργασία. Η θερμική, αυτή επεξεργασία είναι η διαδικασία που διατηρεί το τρόφιμο σε μια προκαθορισμένη θερμοκρασία για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα με επερχόμενη ψύξη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ή χαμηλότερη. Με τον κατάλληλο αυτό συνδυασμό θερμοκρασίας-χρόνου έχουμε ως σκοπό την παραγωγή ασφαλών, από μικροοργανισμούς, προϊόντων και την ανάλογη ποιότητα που επιθυμεί ο καταναλωτής (Holdsworth and Simpson, 2016).

Η θερμική επεξεργασία των τροφίμων εμπνεύστηκε από τον Nicolas Appert, ο οποίος το 1810 παρουσίασε τη μελέτη με τίτλο «Η τέχνη της συντήρησης όλων των ζωικών και φυτικών ουσιών, για αρκετά χρόνια». Επεξεργασμένα τρόφιμα φαίνεται να υπήρχανε τουλάχιστον για 30 χρόνια πριν τη δημοσίευση αυτή. Ουσιαστικά ο Appert παρουσιάζει με λεπτομέρεια την προετοιμασία του προϊόντος, τον τρόπο συσκευασίας σε διαφορετικούς περιέκτες όπως είναι τα γυάλινα μπουκάλια και βάζα, το χρόνο, τη θερμοκρασία του νερού για την επίτευξη της διεργασίας και το πως πρέπει να χρησιμοποιούνται τα τρόφιμα πριν την κατανάλωσή τους (Stoforos, 2005).

Στις μέρες μας, η ζήτηση για επεξεργασμένα τρόφιμα είναι μεγάλη και δεν αρκείται μόνο στις στοιχειώδεις αρχές της ασφάλειας του προϊόντος και τη διάρκειας ζωής του κατά την αποθήκευση του σε σταθερό περιβάλλον. Ο καταναλωτής δίνει μεγαλύτερη έμφαση στη σωστή επισήμανση της ετικέτας, την ιδιαίτερη προστιθέμενη αξία και την υψηλή ποιότητα του τροφίμου. Βελτιώσεις στην ποιότητα και την ασφάλεια των επεξεργασμένων τροφίμων έχουν επιτευχθεί μέσω διάφορων ρυθμιστικών κανονισμών στη βιομηχανία τροφίμων από την εθνική/διεθνή νομοθεσία, που προτείνει και επιβάλλει σε συγκεκριμένα επίπεδα την τελική ποιότητα του προϊόντος και διάφορους μεθόδους για την επίτευξη της ασφάλειας (Awuah *et al.*, 2007).

### 1.2.1 Αρχές θερμικής επεξεργασίας

Η επιλογή της σωστής θερμικής επεξεργασίας (παστερίωση, αποστείρωση) και ο κατάλληλος συνδυασμός των παραμέτρων της διεργασίας (χρόνος, θερμοκρασία) πρέπει να εξεταστούν με βάση μια εκτενής ανάλυση, συμπεριλαμβανομένων των κινητικών εκτιμήσεων. Η θερμική επεξεργασία είναι η τεχνολογική λύση στην αντοχή των μικροβιολογικών παραγόντων που μπορούν να καταστήσουν επικίνδυνη την ανθρώπινη υγεία και να προκαλέσουν σημαντική υποβάθμιση των τροφίμων (Jen *et al.*, 1971).

Ο κατάλληλος συνδυασμός θερμοκρασίας-χρόνου έχει ως στόχο την:

- Απενεργοποίηση και καταστροφή παθογόνων και αλλοιογόνων μικροοργανισμών, με στόχο την αποφυγή της υποβάθμισης της ποιότητας των τροφίμων.
- Διατήρηση των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών του προϊόντος (χρώμα, υφή, γεύση κ.α.) στο βέλτιστο βαθμό.
- Διατήρηση του μεγαλύτερου ποσοστού των θρεπτικών συστατικών του προϊόντος (βιταμίνες, ανόργανα στοιχεία κ.α.).

### **1.2.2 Κατηγορίες θερμικής επεξεργασίας στα προϊόντα τροφίμων**

Οι συνθήκες κάθε θερμικής διεργασίας επιλέγονται έτσι ώστε να δίνουν σταθερό προϊόν με τη μικρότερη δυνατή υποβάθμιση της ποιότητάς του. Η ένταση της θερμικής επεξεργασίας που δέχεται ένα τρόφιμο καθορίζεται από τη σχέση θερμοκρασίας-χρόνου και ανάλογα με την ένταση οι θερμικές διεργασίες ταξινομούνται σε ήπιες και έντονες. Ήπιες θερμικές διεργασίες αποτελούν το ζεμάτισμα και η παστερίωση, ενώ έντονες θερμικές διεργασίες το μαγείρεμα και η αποστείρωση (Rahman, 2020).

#### *Αποστείρωση*

Η αποστείρωση είναι μια θερμική επεξεργασία κατά την οποία τα τρόφιμα θερμαίνονται σε συνδυασμό υψηλών θερμοκρασιών και χρόνου και χρησιμοποιείται κυρίως για την αδρανοποίηση και τη καταστροφή των βλαστικών μικροβιακών κυττάρων, των σπορίων και των ενζύμων. Αυτή η θερμική επεξεργασία χρησιμοποιείται για τη μείωση των κινδύνων για τη δημόσια υγεία από παθογόνους μικροοργανισμούς και την παράταση της διάρκειας ζωής σε τρόφιμα χαμηλής οξύτητας, που αποτελούνται από pH μεγαλύτερο από 4.6. Η εφαρμογή της αποστείρωσης παράγει προϊόντα με διάρκεια ζωής έξι μήνες και άνω (Richardson, 2001).

Η ασηπτική επεξεργασία είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται για την επεξεργασία χαμηλής οξύτητας τροφίμων. Αυτή η διαδικασία ορίζεται από την πλήρωση ενός αποστειρωμένου προϊόντος σε ένα προ-αποστειρωμένο δοχείο σε ασηπτικό περιβάλλον που ακολουθείται από την ερμητική σφράγιση του περιέκτη για την αποφυγή επαναμόλυνσης. Η ερμητική σφράγιση αποτρέπει οποιαδήποτε μορφή μεταφορά μάζας μεταξύ του συσκευασμένου προϊόντος και του περιβάλλοντος, όπως μικροοργανισμούς, υδρατμούς και άλλα αέρια. Σε αντίθεση με τη βιομηχανική αποστείρωση, το προϊόν και η συσκευασία αποστειρώνονται ανεξάρτητα (David, Graves, & Szemplenski, 2013).

### *Βιομηχανική αποστείρωση*

Η βιομηχανική αποστείρωση χρησιμοποιείται για την καταστροφή των περισσότερων ανθεκτικών στη θερμοκρασία μικροβιακών πληθυσμών. Αυτή η θερμική επεξεργασία είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε να καταστρέφει τόσο τα βλαστικά κύτταρα των μικροοργανισμών όσο και τα σπόρια αυτών. Οι θερμοκρασίες που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι 115°C με 130°C. Πιο συγκεκριμένα, ο στόχος της είναι η καταστροφή των ανθεκτικών σπορίων του *Clostridium botulinum*, ενός μικροοργανισμού που παράγει μια θανατηφόρο για τον άνθρωπο νευροτοξίνη, την αλλαντική τοξίνη. Το προϊόν που προκύπτει μετά την αποστείρωση θεωρείται εμπορικά στείρο χωρίς την παρουσία μικροοργανισμών ικανών να αναπαραχθούν κατά την έκθεσή τους σε συνθήκες συνήθους αποθήκευσης και διακίνησης (Stumbo *et al.*, 1975).

### *Παστερίωση*

Η παστερίωση στοχεύει στον έλεγχο των παθογόνων μικροοργανισμών και καταστρέφει μέρος των βλαστικών κυττάρων που υπάρχουν στο τρόφιμο. Λόγω του ότι δεν επιδρά στα σπόρια, χρησιμοποιείται κυρίως για τρόφιμα που υφίστανται και κάποια άλλη επεξεργασία ή συντηρούνται υπό συνθήκες οι οποίες δεν ευνοούν την ανάπτυξη σπορίων. Συνήθως, οι μικροοργανισμοί που σχετίζονται με την αλλοίωση ενός τροφίμου επιδεικνύουν μεγαλύτερη ανθεκτικότητα στη θέρμανση απ' ό,τι οι παθογόνοι μικροοργανισμοί και για αυτό το λόγο, για την παρεμπόδιση της μικροβιακής αλλοίωσης ενός τροφίμου απαιτείται πιο έντονη θερμική επεξεργασία απ' ό,τι για τη διασφάλιση της δημόσιας υγείας (Lund, 1975).

### *Ζεμάτισμα*

Το ζεμάτισμα είναι ένα είδος παστερίωσης που εφαρμόζεται γενικά σε φρούτα και λαχανικά κυρίως για την αδρανοποίηση των φυσικών ενζύμων των τροφίμων. Αυτή η διεργασία χρησιμοποιείται όταν πρόκειται να καταψύξουμε τέτοια προϊόντα, εφόσον η αποθήκευση σε τέτοιο περιβάλλον δεν θα σταματούσε από μόνη της τη δράση του ενζύμου. Το ζεμάτισμα, ανάλογα με τη δραστηρότητά του, θα καταστρέψει και ορισμένους μικροοργανισμούς, όπως και η παστερίωση αντίστοιχα είναι ικανή να απενεργοποιήσει ορισμένα ένζυμα (Potter and Hotchkiss, 1995).

### 1.2.3 Επιλογή κατάλληλης θερμικής επεξεργασίας

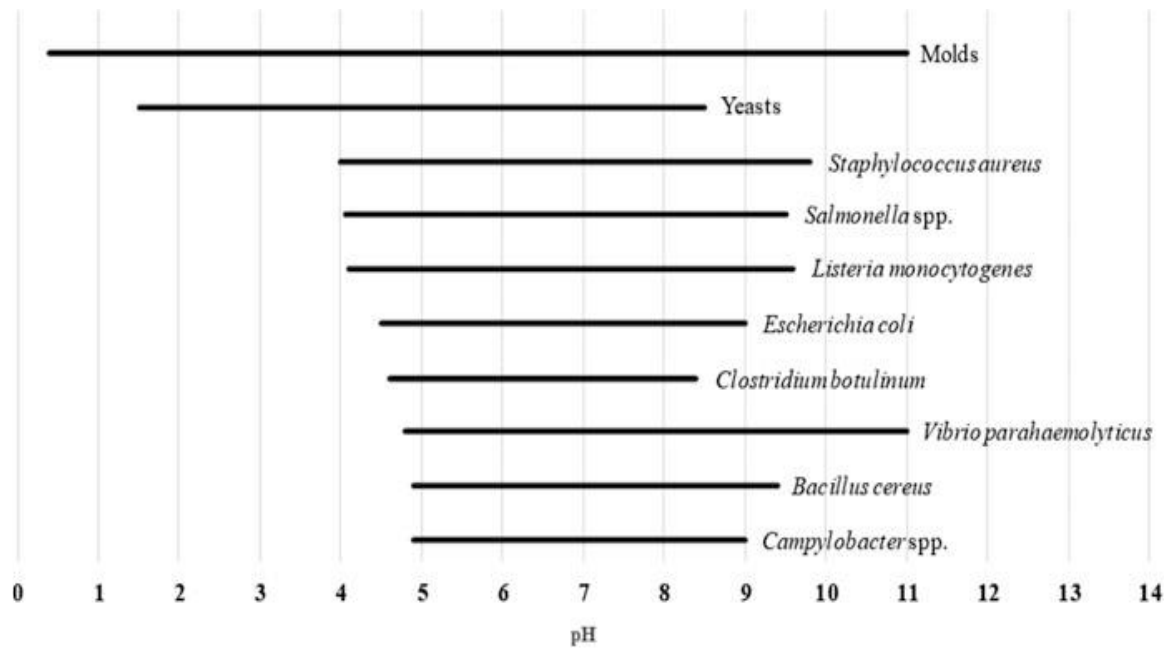
Για τον καθορισμό της θερμικής επεξεργασίας που θα υποστεί το τρόφιμο, πρέπει να είναι γνωστές οι θερμοφυσικές ιδιότητές του, οι οποίες καθορίζουν τον τρόπο μεταφοράς θερμότητάς (αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία), ο μικροοργανισμός στόχος και η θερμοανθεκτικότητά του, το φορτίο των μικροοργανισμών και μεγίστης σημασίας το pH και η ενεργότητα νερού ( $a_w$ ) του τροφίμου.

Οι όροι της παστερίωσης και της εμπορικής αποστείρωσης έχουν μικρή διαφορά, ειδικά όταν χρησιμοποιούνται για όξινα τρόφιμα ( $\text{pH} < 4.6$ ). Σύμφωνα με τον Stumbo (1973), είτε χρησιμοποιηθεί ο όρος αποστείρωση είτε παστερίωση για μια θερμική επεξεργασία που αποσκοπεί στη μείωση του μικροβιακού πληθυσμού ενός τροφίμου, ο βασικός στόχος αυτής της θερμικής διεργασίας είναι ο ίδιος, δηλαδή, η απελευθέρωση των τροφίμων από μικροοργανισμούς που μπορεί να θέσουν σε κίνδυνο την υγεία των καταναλωτών ή να προκαλέσουν αλλοίωση των τροφίμων κατά την αποθήκευση και τη διανομή.

Η ικανότητα επιβίωσης των μικροοργανισμών αλλά και η θερμική αντίσταση αυτών, είναι συνάρτηση του pH των τροφίμων. Για το λόγο αυτό τα τρόφιμα ταξινομούνται ανάλογα με την οξύτητα τους σε τρεις κατηγορίες σύμφωνα με την Αρχή Τροφίμων και Φαρμάκων των ΗΠΑ (FDA, 2022):

- Σε όξινα τρόφιμα με φυσικό  $\text{pH} \leq 4.6$ .
- Σε όξινοσμένα τρόφιμα όπου είναι χαμηλής οξύτητας τρόφιμα στα οποία προστίθενται ένα ή περισσότερα όξινα τρόφιμα ή συστατικά που δίνουν ένα προϊόν με τελικό  $\text{pH} \leq 4.6$  και ενεργότητα νερού,  $a_w > 0.85$ .
- Σε τρόφιμα χαμηλής οξύτητας με  $\text{pH} > 4.6$  και ενεργότητα νερού  $a_w > 0.85$ . (Οι τομάτες και τα προϊόντα τομάτας με τελικό  $\text{pH} < 4.7$  δεν ταξινομούνται ως τρόφιμα χαμηλής οξύτητας).

Στα όξινα τρόφιμα ( $\text{pH} \leq 4.6$ ) επιβιώνουν ορισμένα σπορογόνα βακτήρια, ενώ στα τρόφιμα χαμηλής οξύτητας ( $\text{pH} > 4.6$ ) επιβιώνουν σπορογόνα βακτήρια μεταξύ των οποίων πολλά είναι παθογόνα. Το κατώτερο όριο του  $\text{pH} = 4.6$  καθορίστηκε με βάση την ικανότητα εκβλάστησης και ανάπτυξης της νευροτοξίνης του *Clostridium botulinum*, ο οποίος είναι ένας από τους πιο επικίνδυνους αναερόβιους μικροοργανισμούς Gram(+), που παράγει τοξίνη ικανή να επιφέρει το θάνατο σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες ή ίσες από 0.2  $\mu\text{g}/\text{άτομο}$  (Stumbo, 1973).



Σχήμα 8. Εύρος του pH για τους μικροοργανισμούς που υπάρχουν και αναπτύσσονται στα τρόφιμα (Jay, 2005).

#### 1.2.4 Σχεδιασμός θερμικής επεξεργασίας

Για την επιλογή της κατάλληλης θερμικής διεργασίας που θα χρησιμοποιηθεί ώστε το προϊόν να είναι ασφαλές για τους καταναλωτές, θα πρέπει πρώτα να γνωρίζουμε την θερμοανθεκτικότητα διαφόρων μικροοργανισμών (βλαστικών μορφών και σπορίων) του προϊόντος, δηλαδή τη μέγιστη θερμική κατεργασία, συνδυασμού χρόνου-θερμοκρασίας, που μπορεί να επιβιώσει ένας μικροοργανισμός. Επίσης θα πρέπει να είναι γνωστά τα χαρακτηριστικά μεταφοράς θερμότητας στο τρόφιμο, συμπεριλαμβανομένου των υλικών του περιέκτη που είναι συσκευασμένο.

Κατά τη διαδικασία της θερμικής επεξεργασίας, πρέπει να διασφαλίζεται ότι το πιο απομακρυσμένο σωματίδιο του τροφίμου μέσα στη συσκευασία ή κατά τη batch διεργασία θα λάβει επαρκή θερμότητα, για αρκετό χρόνο, ώστε να αδρανοποιηθεί και ο πιο ανθεκτικός παθογόνος μικροοργανισμός και οποιοσδήποτε άλλος μικροοργανισμός αλλοίωσης, εάν πρόκειται να επιτευχθεί ασηπτική, είτε εμπορική αποστείρωση. Σε διαφορετικά τρόφιμα αναπτύσσονται διαφορετικοί παθογόνοι μικροοργανισμοί και μικροοργανισμοί αλλοίωσης, οπότε ο στόχος της θερμικής επεξεργασίας διαφοροποιείται ανάλογα με το τρόφιμο (Potter and Hotchkiss, 1995).



### 1.2.5 Κινητική καταστροφής μικροοργανισμών

Οι αντιδράσεις που εμπλέκονται σε μια θερμική επεξεργασία επηρεάζονται από τα στάδια της θέρμανσης, της διατήρησης σε σταθερή θερμοκρασία και της ψύξης του προϊόντος. Σε κάθε στάδιο της διεργασίας η καταστροφή των μικροοργανισμών είναι διαφορετική, με πιο σημαντικό στάδιο αυτό της διατήρησης, όπου η θερμοκρασία δεν μεταβάλλεται και επηρεάζει την τελική καταστροφή σε μεγαλύτερο βαθμό (Lewis, 2011).

Με την παραδοχή ότι η θερμική καταστροφή ακολουθεί την κινητική μιας αντίδρασης πρώτης τάξης (Esty and Meyer, 1922), ο ρυθμός καταστροφής των μικροοργανισμών (η αλλαγή της συγκέντρωσης των μικροοργανισμών,  $dC$ , ως προς το χρόνο) κατά τη διάρκεια μιας θερμικής κατεργασίας δίνεται από την παρακάτω Εξ. (1):

$$-\frac{dC}{dt} = k_T C \quad (1)$$

όπου:

$dC$ : η μείωση της συγκέντρωσης του μικροβιακού φορτίου σε χρόνο  $dt$ .

$C$ : η συγκέντρωση του μικροβιακού φορτίου (g/L)

$t$ : είναι ο χρόνος επεξεργασίας σε min.

$k_T$ : είναι η σταθερά του ρυθμού θερμικής καταστροφής σε  $\text{min}^{-1}$  (ή  $\text{s}^{-1}$ ). Ο δείκτης  $T$  σε  $k_T$  δείχνει το ρυθμό εξάρτησης της σταθεράς από τη θερμοκρασία.

Ολοκληρώνοντας την Εξ. (1) μεταξύ των ορίων για  $C_0$  σε χρόνο  $t_0=0$  και  $C$  σε χρόνο  $t$ , βρίσκεται ότι:

$$-\int_{C_0}^C \frac{dC}{C} = k \cdot \int_{t_0}^t dt \Rightarrow \ln(C_0) - \ln(C) = k_0(t - t_0) \quad (2)$$

Αντί της συγκέντρωσης  $C$  συχνά χρησιμοποιείται ο πληθυσμός των μικροοργανισμών ανά περιέκτη ή ανά μονάδα όγκου, που συμβολίζεται με  $N$  (σπορίων/mL). Αντικαθιστώντας τη συγκέντρωση  $C$  των μικροοργανισμών με τον αριθμό  $N$  στην Εξ. (2) και μετατρέποντας την εξίσωση από φυσικούς λογάριθμους ( $\ln$ ) σε κοινούς λογάριθμους (βάση 10 λογάριθμος,  $\log$ ) έχουμε ότι:

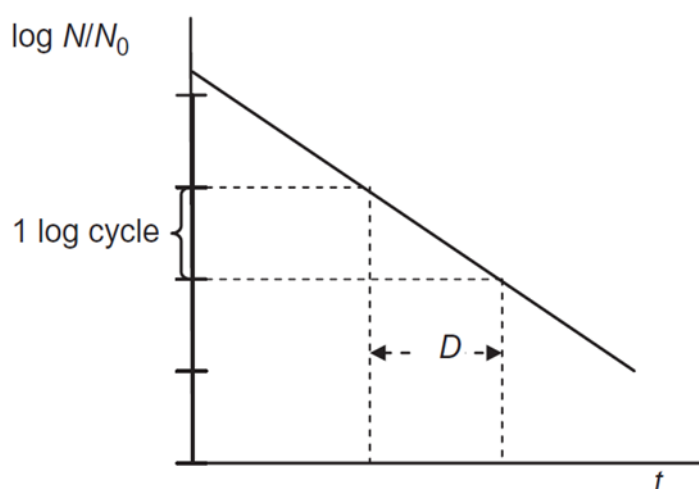
$$\log(N) = \log(N_0) - \frac{k_T}{\ln(10)} t \quad (3)$$

Έτσι η εναπομένουσα συγκέντρωση μετά από χρόνο  $t$  θερμικής κατεργασίας, συχνά αποδίδεται ως σπόρια ανά δοχείο συσκευασίας και εκφράζει την πιθανότητα μικροβιακής αλλοίωσης στο θερμικά κατεργασμένο τρόφιμο. Για παράδειγμα, εάν η απομένουσα συγκέντρωση είναι  $10^{-3}$  σπόρια ανά δοχείο συσκευασίας, αυτό σημαίνει ότι έστω 1 σπόριο έχει επιβιώσει σε 1000 δοχεία και το περιεχόμενο του αντίστοιχου δοχείου μπορεί να αλλοιωθεί ή γενικότερα να υπάρξει ανάπτυξη του μικροοργανισμού σε αυτό. Οποιαδήποτε τιμή της συγκέντρωσης  $C \geq 1$  σημαίνει αλλοίωση όλων των δοχείων (Stoforos, 1995).

### 1.2.6 Τιμές $D$ και $z$

Στην κλασική θερμοβακτηριολογία, η παράμετρος  $D_T$  αποτελεί το χρόνο υποδεκαπλασιασμού (Decimal reduction time) και ορίζεται ως ο χρόνος (min) που απαιτείται για την καταστροφή του 90% ή την επιβίωση του 10% του αρχικού φορτίου των μικροοργανισμών (ή άλλων θερμικά ευαίσθητων ουσιών) (Katzin *et al.*, 1942), σε σταθερή θερμοκρασία  $T$ .

Η ευθεία στο Σχήμα 9 δείχνει τη μείωση του μικροοργανισμών σε λογαριθμική κλίμακα  $\log(N/N_0)$  σε σχέση με το χρόνο θέρμανσης  $t$ .



Σχήμα 9. Καμπύλη Ρυθμού Θερμικής Καταστροφής (Thermal Death Rate Curve) (Berk, 2009).

Η παράμετρος  $D_T$ , της γραφικής παράστασης, ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται ώστε η Καμπύλη Ρυθμού Θερμικής Καταστροφής να διανύσει ένα λογαριθμικό κύκλο. Χρησιμοποιώντας την Εξ. (3) έχουμε ότι:

$$D_T = -\frac{1}{\text{slope}} = \frac{\ln(10)}{k_T} \quad (4)$$

Συνήθως η κλασική θερμοβακτηριολογική ( $D_T$  και  $z$ ) προσέγγιση χρησιμοποιείται για την περιγραφή της θερμικής απενεργοποίησης των μικροοργανισμών (Holdsworth and Simpson, 2016), ενώ η σχέση του Arrhenius χρησιμοποιείται για την έκφραση της επίδρασης της θερμοκρασίας στην υποβάθμιση των ποιοτικών παραμέτρων του προϊόντος.

Η τιμή  $D$  ( $D$ -value) μαζί με την τιμή  $z$  ( $z$ -value), που θα αναφερθεί παρακάτω είναι τα χαρακτηριστικά θερμοανθεκτικότητας ενός μικροοργανισμού και χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό κάθε θερμικής επεξεργασίας (Karel and Lund 2003). Ο Bigelow το 1921, διαπίστωσε ότι υπάρχει μια γραμμική σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας και του λογάριθμου του  $D$ -value, που απαιτείται για την καταστροφή όλων των μικροοργανισμών. Το μοντέλο, που χρησιμοποιείται πιο συχνά για το  $D$ - και  $z$ -value το βλέπουμε στην Εξ. (5):

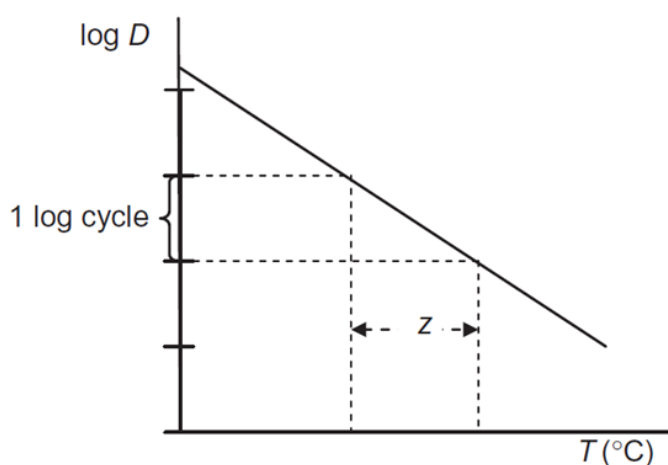
$$\log(D_T) = \log(D_{T_{ref}}) + \frac{T_{ref} - T}{z} \quad (5)$$

όπου:

$D_T$ : ο χρόνος υποδεκαπλασιασμού σε θερμοκρασία  $T$ ,

$D_{T_{ref}}$ : ο χρόνος υποδεκαπλασιασμού σε σταθερή θερμοκρασία αναφοράς  $T_{ref}$ .

Η τιμή  $z$  προέρχεται από τη θέρμο-βακτηριολογία και αντιπροσωπεύει την εξάρτηση του ρυθμού μικροβιακής αδρανοποίησης από τη θερμοκρασία. Συγκεκριμένα, η τιμή  $z$  ορίζεται ως η διαφορά θερμοκρασίας που απαιτείται για να δεκαπλασιαστεί ή να υποδεκαπλασιαστεί η τιμή  $D_T$ . Η τιμή  $z$  υπολογίζεται από την κλίση της ευθείας του χρόνου θερμικού θανάτου ( $TDT$ ) σε σχέση με τη θερμοκρασία, όπως βλέπουμε και στο Σχήμα 10.



Σχήμα 10. Φαινομενική Καμπύλη Χρόνου Θερμικής Καταστροφής (Phantom Thermal Death Time (TDT) Curve) (Berk, 2009).

Για τους περισσότερους μικροοργανισμούς που εμφανίζονται σε τρόφιμα που υποβάλλονται σε θερμική επεξεργασία, η τιμή  $z$  είναι περίπου 10 K ή 10°C (18°F). Συνεπώς, μια μεγάλη τιμή  $z$  δείχνει ότι ο ρυθμός της διεργασίας δεν είναι πολύ ευαίσθητος στη θερμοκρασία (δηλαδή απαιτείται μια μεγάλη αλλαγή στη θερμοκρασία για να αλλάξει ο ρυθμός κατά 10). Αντίθετα, μια μικρή τιμή  $z$ , όμως σημαίνει ο ρυθμός είναι εξαιρετικά ευαίσθητος στη θερμοκρασία.

Η λογαριθμική σχέση μεταξύ του ρυθμού θερμικής καταστροφής και της θερμοκρασίας συμφωνεί με το μοντέλο του *Arrhenius* για την επίδραση της θερμοκρασίας σχετικά με τη σταθερά του ρυθμού αντίδρασης και εκφράζεται με την ακόλουθη Εξ. (6) (Karel and Lund 2003):

$$\log\left(\frac{k_1}{k_2}\right) = \frac{-E_a}{2.3R} \left(\frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2}\right) \quad (6)$$

όπου,

$k_1, k_2$ : σταθερές ρυθμού αντίδρασης σε απόλυτες θερμοκρασίες  $T_1$  και  $T_2$  (K), αντίστοιχα,

$E_a$ : ενέργεια ενεργοποίησης,  $R_g$ , παγκόσμια σταθερά αερίων, 8.31 J mol<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>.

Ο Πίνακας 5 δείχνει ορισμένες τυπικές τιμές δεδομένων θερμικής απενεργοποίησης για μικροοργανισμούς και ένζυμα, που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς της θερμικής επεξεργασίας. Τα περισσότερα ένζυμα είναι ευαίσθητα στη θερμότητα και αδρανοποιούνται εύκολα. Υπάρχουν όμως και μερικά πολύ ανθεκτικά ένζυμα, όπως για παράδειγμα η υπεροξειδάση, η οποία μπορεί να επιβιώσει σε μια θερμική διαδικασία που είναι σχεδιασμένη να αδρανοποιεί τους κοινούς μικροοργανισμούς (Saravacos and Maroulis, 2011).

Επίσης, η τιμή  $z$  που ήταν εξαρτώμενη από το στέλεχος, κυμαινόταν από 3,1 °C έως 6,5 °C. Αυτό δείχνει ότι οι πειραματικές δοκιμές στα τρόφιμα, πρέπει να γίνονται με στελέχη που έχουν τη μεγαλύτερη θερμοανθεκτικότητα (Lemaire *et al.*, 1989).

Πίνακας 5. Χρόνος υποδεκαπλασιασμού ( $D$ ) μικροοργανισμών και ενζύμων (Saravacos and Maroulis, 2011).

Μ.ο. ή Ένζυμα	Θερμοκρασία, °C	D, min	Z, °C	m, -	Προϊόν Διατροφής
<i>C. botulinum</i>	121	0.30	11	12	Χαμηλής οξύτητας pH > 4,5
<i>C. sporogenes</i>	121	1.50	11	5	Κρέας
<i>B. stearothermophilus</i>	121	3.00	10	5	Λαχανικά, κρέας
<i>Bacillus subtilis</i>	121	0.40	7	6	Γαλακτοκομικά προϊόντα
<i>Bacillus coagulans</i>	121	0.07	10	6	Τομάτα
<i>Clostridium pasteurianum</i>	100	0.50	8	5	Φρούτα
<i>Lactobacilli, Yeasts, Molds</i>	65	0.80	10	-	Υψηλής οξύτητας pH < 4,5
<i>Pectin enzymes</i>	75	0.20	5	-	Τομάτα, εσπεριδοειδή
<i>Peroxidase</i>	121	3.00	30	-	Λαχανικά

$D$ , χρόνος υποδεκαπλασιασμού.  $z$ , παράμετρος θερμοκρασίας,  $m$ , εκθέτης μείωσης.

Η αναλογία  $D_{ref}/D$  είναι γνωστή ως βαθμός καταστροφικότητας (*lethality*,  $L$ ) και αποτελεί ένα ποσοτικό μέτρο του ρυθμού αδρανοποίησης των μικροοργανισμών σε μια δεδομένη θερμοκρασία:

$$L = \left( \frac{D_{T_{ref}}}{D} \right) = 10^{\frac{T-T_{ref}}{z}} \quad (7)$$

Μια σημαντική ιδιότητα του ρυθμού καταστροφής είναι ότι προστίθεται κατά την διάρκεια της διεργασίας, επομένως είναι δυνατό να γίνει ποσοτικοποίηση του ισοδύναμου χρόνου της θερμικής επεξεργασίας στο εύρος της θερμοκρασίας που χρησιμοποιείται. Το συνολικό άθροισμα είναι γνωστό ως τιμή  $F$  value (Holdsworth and Simpson, 2016).

### 1.2.7 "Πλήρωση εν θερμώ" διεργασία

Κατά την "πλήρωση εν θερμώ" διεργασία (Hot-Fill-hold) το τρόφιμο δέχεται εμπορική αποστείρωση πριν από το γέμισμα της συσκευασίας με αυτό και θεωρείται ότι η θερμοκρασία του τροφίμου θα αποστειρώσει και τον περιέκτη. Το τρόφιμο, είτε σε batch είτε σε συνεχής παραγωγή θερμαίνεται σε έναν εναλλάκτη θερμότητας πριν γεμίσει τις συσκευασίες και αμέσως μετά σφραγίζεται ερμητικά προτού κρυώσει. Η "πλήρωση εν

θερμό" διεργασία απαιτεί λίγο χρόνο παραμονής (holding) σε υψηλή θερμοκρασία, έτσι ώστε οι εσωτερικές επιφάνειες του περιέκτη να αποστειρωθούν (Rahman, 2011).

Οι θερμοκρασίες που απαιτούνται για αυτή τη διαδικασία είναι 85°C (185°F) ή υψηλότερες, ιδανικά μεταξύ 90-95°C, καθώς μπορεί να απαιτείται και χρόνος παραμονής σε θερμό περιβάλλον πριν κρυώσει ο περιέκτης. Οι θερμοκρασίες σε μια τέτοια διεργασία πρέπει να είναι αρκετά υψηλές ώστε να μειώσουν τη μικροβιακή συγκέντρωση σε ασφαλή επίπεδα ώστε να αδρανοποιήσουν τα ένζυμα που θα μπορούσαν να προκαλέσουν ποιοτική υποβάθμιση στο χρώμα ή και ζύμωση. Η "πλήρωση εν θερμώ" είναι κατάλληλη σε όξινα τρόφιμα, όπως μη ανθρακούχα αναψυκτικά, χυμούς και προϊόντα τομάτας (Ashurst, 2005; Sandoval *et al.*, 1994; Rodrigo *et al.*, 1990).

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για τη συσκευασία των προϊόντων κατά την "πλήρωση εν θερμώ" διεργασία πρέπει να εξασφαλίζουν την ασφάλεια όταν εκτίθενται σε υψηλές θερμοκρασίες και να παρέχουν καλή προστασία για την πρόληψη της επιμόλυνσης μετά την επεξεργασία. Η εφαρμογή αυτής της διεργασίας περιορίζεται σε υλικά που είναι ευαίσθητα στη θερμότητα. Μερικά πλεονεκτήματα της εμπορικής αποστείρωσης με "πλήρωση εν θερμώ" είναι η απλότητά της μεθόδου, καθώς το προϊόν και ο περιέκτης αποστειρώνονται μαζί, το χαμηλό κόστος του εξοπλισμού και η έλλειψη επιπλοκών κατά τον ποιοτικό έλεγχο (Adegoke, 2004).

Αρχικά, το τρόφιμο θερμαίνεται και στη συνέχεια γεμίζεται σε δοχείο. Πιο συγκεκριμένα, τα προϊόντα θερμαίνονται σε θερμοκρασίες πάνω από 85°C (185°F) και γεμίζονται σε έναν περιέκτη για να εξασφαλιστεί ένα ασφαλές προϊόν. Μόλις το δοχείο γεμίσει και σφραγιστεί, μπορεί να αναστραφεί και να παραμείνει στον αέρα για τρία λεπτά πριν κρυώσει με νερό. Η αναστροφή της συσκευασίας γίνεται για να αποστειρωθεί ο χώρος των τοιχωμάτων και το καπάκι. Αυτή η μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί στη βιομηχανία τροφίμων για πλήρωση σε γυάλινα βάζα, πλαστικούς περιέκτες (PET), tetrapak και rouches. Το προϊόν ψύχεται μετά την περίοδο παραμονής για να διατηρηθεί η ποιότητα και να αποφευχθεί η υπερβολική έκθεση στη θερμότητα. Εάν συμβεί αλλοίωση εντός του προϊόντος, είναι πιθανό να οφείλεται σε ανεπαρκή θέρμανση των επιφανειών της συσκευασίας ή σε αστοχία της συσκευασίας που μπορεί να προκαλέσει μόλυνση μετά τη διαδικασία (Bown, 2010; Hariyadi, 2013).

Οι διεργασίες της παστερίωσης και της "πλήρωση εν θερμώ" μπορούν να βελτιστοποιηθούν με τρόπο τέτοιο που θα επιτυγχάνουν την ασφάλεια του τροφίμου με την καλύτερη δυνατή ποιότητα. Εάν μια θερμική επεξεργασία εφαρμοστεί για περισσότερο χρόνο από όσο χρειάζεται, μπορεί να συμβάλει στη μείωση της ποιότητας του προϊόντος.

Μια μελέτη των Silva *et al.* (2003) περιέγραψε το σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση των συνθηκών παστερίωσης με "πλήρωση εν θερμώ" μέσω διαφόρων υπολογιστικών μοντέλων. Για τη βελτιστοποίηση μιας θερμικής διεργασίας πρέπει να μοντελοποιηθούν η θερμική κινητική του μικροβιακού στόχου, οι σχετικοί ποιοτικοί παράγοντες και η μεταφορά θερμότητας της διεργασίας στο προϊόν. Η βελτιστοποίηση της διαδικασίας μπορεί επίσης να λάβει υπόψη μη ποιοτικούς παράγοντες όπως η παραγωγικότητα και η κατανάλωση ενέργειας (Silva *et al.*, 2003).

Στην παραγωγή τοματοχυμού, ο χυμός θερμαίνεται στους 93.33-96.11°C (200-205°F) και η πλήρωση γίνεται σε θερμοκρασίες 91-93°C, με αναποδογύρισμα του περιέκτη, διατήρηση για 3 min και ψύξη σε νερό. Σύμφωνα με τον Gould (1992), αυτή η μέθοδος δεν επαρκεί για να εμποδίσει την αλλοίωση του τοματοχυμού ειδικά όταν το pH > 4.35 και δεν προτείνεται. Οι Sandoval *et al.* (1994) εξετάζοντας τη μέθοδο αυτή για παραγωγή τοματοπολτού σε γυάλινα βάζα διαστάσεων 200, 500, 4000 cm<sup>3</sup> και θερμοκρασίες γεμίσματος 85, 90, 92, 94, 95°C με διατήρηση στον αέρα μετά την πλήρωση και το σφράγισμα, πρότειναν ελάχιστες θερμοκρασίες γεμίσματος για να επιτευχθεί η απαιτούμενη τιμή *F*, τις 94, 92 και 90°C για τα βάζα των 200, 500 και 4000 cm<sup>3</sup> αντίστοιχα.

### 1.3 Υπολογιστική ρευστοδυναμική (Computational Fluid Dynamics, CFD)

Η υπολογιστική ρευστοδυναμική ή Computational Fluid Dynamics (CFD) έχει αναδειχθεί ως ένα ισχυρό εργαλείο για την ανάλυση και την πρόβλεψη φαινομένων ροής ρευστών, προσφέροντας σημαντική πρόοδο στην κατανόηση της συμπεριφοράς και της πολυπλοκότητας των ρευστών.

Ο τομέας της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής προέκυψε αρχικά από το πρωτοποριακό έργο των ερευνητών Richardson και Courant (1910) και Friedrichs και Lewy (1928). Μελετώντας την κίνηση των ρευστών, οι ερευνητές αυτοί ανέπτυξαν εξαιρετικά αποτελεσματικές αριθμητικές τεχνικές που τους επέτρεψαν να παράγουν ακριβείς προσομοιώσεις όλων των τύπων ροής ρευστών στον H/Y. Σήμερα, οι προσομοιώσεις αυτές βασίζονται στις θεμελιώδεις αρχές των εξισώσεων Navier-Stokes, οι οποίες περιγράφουν τη συμπεριφορά των ρευστών σε κίνηση (Shang, 2004).

Χρησιμοποιώντας αριθμητικές μεθόδους και αλγόριθμους για την επίλυση των εξισώσεων συνέχειας και Navier-stokes της ρευστοδυναμικής, το CFD παρέχει ένα μέσο για την προσομοίωση και τη μελέτη της ροής ρευστού, της μεταφοράς θερμότητας και συναφών φαινομένων σε ένα ευρύ φάσμα μηχανικών και επιστημονικών εφαρμογών. Αυτό το διεπιστημονικό πεδίο συνδυάζει αρχές από τη μηχανική των ρευστών, τα εφαρμοσμένα

μαθηματικά και την επιστήμη των υπολογιστών, επιτρέποντας σε ερευνητές και μηχανικούς να διερευνήσουν τη συμπεριφορά των ρευστών σε διάφορα συστήματα με αξιοσημείωτη ακρίβεια και αποτελεσματικότητα. Με την ικανότητά του να αντιμετωπίζει πολύπλοκες γεωμετρίες, οριακές συνθήκες και ιδιότητες ρευστών, το CFD έχει γίνει απαραίτητο εργαλείο σε βιομηχανίες όπως η αεροδιαστημική, η αυτοκινητοβιομηχανία, η ενέργεια, η περιβαλλοντική μηχανική και επεξεργασίας τροφίμων (Versteeg and Malalasekera 2007; Xia and Sun 2002; Norton and Sun 2006).

### **1.3.1 Πλεονεκτήματα**

Η υπολογιστική ρευστοδυναμική (CFD) έχει εξελιχθεί από ένα αρχικό ενδιαφέρον για τα μαθηματικά σε ένα απαραίτητο εργαλείο σχεδόν κάθε πεδίου της ρευστοδυναμικής, επιτρέποντας μια εμβριθή ανάλυση της μηχανικής των ρευστών. Τα αποτελέσματα του CFD προσφέρουν βελτιωμένη απόδοση, μεγάλη αξιοπιστία, συνέπεια στην παραγωγή και αυξημένη παραγωγικότητα. Ορισμένοι μηχανικοί σχεδιασμού χρησιμοποιούν το CFD για να αναλύσουν νέα συστήματα πριν λάβουν αποφάσεις σχετικά με τις δοκιμές επικύρωσης που απαιτούνται.

Σύμφωνα με τους Xia and Sun το 2002 μερικά από τα πλεονεκτήματα του CFD αποτελούν τα εξής:

- Παρέχει λεπτομερή κατανόηση της ροής μέσα στο σύστημα, της απώλειας βάρους, των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας και μάζας και άλλων παραμέτρων, παρέχοντας στους αναλυτές μια πιο εμπειριστατωμένη κατανόηση της διαδικασίας ή του συστήματος.
- Επιτρέπει την αξιολόγηση γεωμετρικών μεταβολών και συνθηκών με μικρότερο χρόνο και κόστος σε σύγκριση με τις παραδοσιακές εργαστηριακές δοκιμές.
- Είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για την προσομοίωση συνθηκών όταν οι κλασικές μέθοδοι μέτρησης δεν είναι εφικτές ή απειλούν την ασφάλεια.
- Μπορεί να εντοπίσει την βασική αιτία προβλημάτων λόγω της λεπτομερούς ανάλυσης και σχεδιασμού που προσφέρει
- Δίνει απαντήσεις σε προβλήματα στη φάση της κλιμάκωσης (scale-up) σε μια βιομηχανία, επειδή τα μοντέλα βασίζονται σε θεμελιώδεις νόμους της φυσικής και είναι ανεξάρτητα κλίμακας (Xia and Sun, 2002).



### 1.3.2 Εμπορικά πακέτα CFD

Υπάρχουν αρκετά εμπορικά πακέτα λογισμικού που είναι διαθέσιμα για την υπολογιστική ρευστομηχανική CFD. Στον Πίνακα 6 παρατηρούμε κάποια από αυτά μαζί με τις διευθύνσεις τους στο διαδίκτυο. Το πιο δημοφιλές από αυτά είναι το Ansys® CFX και το Ansys® FLUENT, λογισμικά πεπερασμένων όγκων, τα οποία εμπεριέχουν πολλές δυνατότητες για τον χρήστη στην επεξεργασία των δεδομένων με εντυπωσιακές γραφικές παραστάσεις χρωμάτων και κίνησης. Το COMSOL Multiphysics® είναι και αυτό ένα αξιόπιστο λογισμικό προσομοίωσης γενικής χρήσης για τη μοντελοποίηση σχεδίων, συσκευών και διαδικασιών σε όλους τους τομείς της μηχανικής, της κατασκευής και της επιστημονικής έρευνας. Κάθε λογισμικό διαφέρει στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων, στην ευκολία της λειτουργίας και στο κόστος εγκατάστασης, οπότε ο χρήστης επιλεγεί ανάλογα με τις ανάγκες του CFD (Tu *et al.*, 2018).

Πίνακας 6. Σύνδεσμοι στο Διαδίκτυο σε ορισμένα δημοφιλή εμπορικά πακέτα CFD (Tu *et al.*, 2018).

Developer	Code	Distributor Web Address
ANSYS, Inc.	CFX	<a href="http://www.ansys.com/">http://www.ansys.com/</a>
ANSYS, Inc.	FLUENT	<a href="http://www.fluent.com/">http://www.fluent.com/</a>
CD-adapco	STAR-CCM+	<a href="http://www.cd-adapco.com/">http://www.cd-adapco.com/</a>
CHAM	PHOENICS	<a href="http://www.cham.co.uk/">http://www.cham.co.uk/</a>
COMSOL, Inc.	COMSOL	<a href="http://www.comsol.com/">http://www.comsol.com/</a>
ESI Group	CFD-ACE+	<a href="http://www.esi-group.com/">http://www.esi-group.com/</a>
Flow Science	FLOW-3D	<a href="http://www.flow3d.com/">http://www.flow3d.com/</a>

### 1.3.3 Θεμελιώδεις αρχές της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής

Η υπολογιστική ρευστοδυναμική εφαρμόζεται για τη μοντελοποίηση της ροής των ρευστών με βάση την αρχή της τμηματοποίησης του όγκου σε μικρότερες περιοχές, γνωστές ως όγκοι ελέγχου, εντός των οποίων υπάρχουν σωματίδια του ρευστού. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί μακροσκοπικά μεγέθη όπως η πίεση, η θερμοκρασία, η πυκνότητα και η ταχύτητα για να περιγράψει τη συμπεριφορά του ρευστού. Κατά τη μεταβολή του χρόνου, τα σωματίδια μετακινούνται και μεταφέρονται σε διπλανούς όγκους ελέγχου, με τη μεταφορά αυτή να ονομάζεται "συνέχεια". Με την υπόθεση ότι τα σωματίδια σε κάθε όγκο ελέγχου έχουν τις ίδιες φυσικές ιδιότητες, μπορούν να λυθούν συγκεκριμένες διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν τη ροή του ρευστού για να υπολογιστούν αυτές οι

μεταβλητές σε κάθε σημείο. Η υπολογιστική ρευστοδυναμική ασχολείται με την περιγραφή, την επίλυση και τα αποτελέσματα αυτών των εξισώσεων, προκειμένου να εξηγήσει τα διάφορα φαινόμενα που συμβαίνουν κατά τη ροή των ρευστών (Versteeg and Malalasekera 2007, Norton 2006).

Οι εξισώσεις Navier-Stokes αφορούν τη διατήρηση της ορμής των ρευστών και σε συνδυασμό με τις εξισώσεις της συνέχειας και της ενέργειας αποτελούν τη βασική έκφραση των αρχών διατήρησης της μηχανικής των ρευστών. Αυτές οι εξισώσεις περιγράφουν πώς μια ιδιότητα του ρευστού αλλάζει μέσα σε έναν όγκο ελέγχου λόγω της επίδρασης εξωτερικών δυνάμεων. Συγκεκριμένα, αυτές οι αρχές περιλαμβάνουν (Sun, 2012):

- Τον νόμο διατήρησης της μάζας (Αρχή της συνέχειας), όπου αναφέρει ότι οι ροές μάζας που εισέρχονται σε ένα στοιχείο του ρευστού πρέπει να ισορροπούν ακριβώς με αυτές που εξέρχονται. Αυτό μπορεί να εκφραστεί με την Εξ. (7):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

- Το νόμο διατήρησης της ορμής (δεύτερος νόμος του Νεύτωνα), που αναφέρει ότι το άθροισμα των εξωτερικών δυνάμεων που δρουν σε ένα σωματίδιο του ρευστού είναι ίσο με τον ρυθμό μεταβολής της γραμμικής ορμής του. Οι Εξ. (8), (9) και (10) της διατήρησης της ορμής για καρτεσιανές συντεταγμένες (x, y, z) είναι:

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (8)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \rho F_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (9)$$

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho F_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (10)$$

- Το νόμο διατήρησης της ενέργειας (Πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής), που αναφέρει ότι ο ρυθμός μεταβολής της ενέργειας ενός σωματιδίου του ρευστού ισούται με τη θερμότητα που προστίθεται και του έργου που παράγεται ή καταναλώνεται από το ρευστό και για συντεταγμένες (x, y, z) χρησιμοποιείται η Εξ. (11).

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{1}{\rho c_p} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] \quad (11)$$

### 1.3.4 Αριθμητικές μέθοδοι διακριτοποίησης

Οι εξισώσεις που παρουσιάζονται στο κείμενο δεν μπορούν να επιλυθούν με αναλυτικές μεθόδους. Αντ' αυτού, απαιτούν μια διαδικασία που ονομάζεται διακριτοποίηση, η οποία περιλαμβάνει τη διάσπασή τους σε μικρότερα, πιο διαχειρίσιμα στοιχεία. Για να επιτευχθεί αυτό, χρησιμοποιούνται τέσσερις τεχνικές: μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών, μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, μέθοδος πεπερασμένων όγκων και μέθοδος οριακών στοιχείων. Μεταξύ αυτών των μεθόδων, οι προσεγγίσεις πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων όγκων χρησιμοποιούνται ευρέως, με την τελευταία να είναι η κύρια αριθμητική μεθοδολογία που χρησιμοποιείται στα τρέχοντα εμπορικά πακέτα λογισμικού υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (Wang and Sun 2003).

#### *Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών*

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι όταν πρόκειται για μοντελοποίηση, ορισμένες μεταβλητές όπως η θερμοκρασία και η υγρασία επηρεάζονται τόσο από τον χρόνο όσο και από τη θέση. Κατά συνέπεια, οι εξισώσεις μεταφοράς που εξηγούν τον φυσικό μηχανισμό θέρμανσης και ψύξης είναι συνήθως διαφορικής φύσης. Ωστόσο, η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών προσφέρει μια σχετικά απλή προσέγγιση που επιτρέπει τη διατύπωση των εξισώσεων μεταφοράς με διακριτό τρόπο, παραμένοντας ωστόσο συνεπής με τις διαφορικές εξισώσεις (Ferziger, 2002).

Η προσέγγιση που περιγράφεται είναι εύκολα εφαρμόσιμη σε πολύπλευρα προβλήματα σε βασικά σχήματα όπως σφαίρες, πλάκες και κύλινδροι. Χρησιμοποιείται εκτενώς για την επίλυση μοντέλων που αρθρώνουν διαδικασίες που περιλαμβάνουν ταυτόχρονη μεταφορά μάζας και θερμότητας. Αυτές αποτελούνται συνήθως από διάφορες θερμικές διεργασίες όπως το μαγείρεμα, το τηγάνισμα, η ξήρανση και η ψύξη (Wang and Sun 2003).

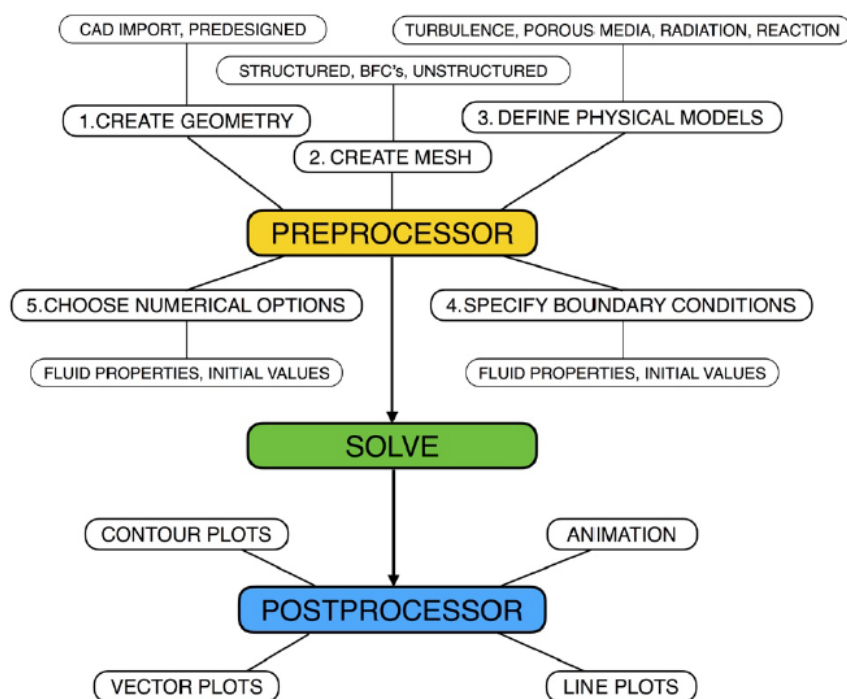
#### *Μέθοδος πεπερασμένων όγκων*

Τα περισσότερα εμπορικά πακέτα λογισμικού υπολογιστικής ρευστοδυναμικής χρησιμοποιούν τη μέθοδο πεπερασμένων όγκων για τη διαδικασία υπολογισμού τους. Η μέθοδος αυτή συνεπάγεται τη διαίρεση του όγκου μελέτης σε διακριτούς όγκους ελέγχου και την ενσωμάτωση εξισώσεων μεταφοράς μεταξύ των όγκων ελέγχου για τη λήψη διακριτοποιημένων εξισώσεων στους κόμβους επίλυσης. Οι διακριτοποιημένες εξισώσεις έχουν τη μορφή ενός συστήματος αλγεβρικών εξισώσεων που επιλύουν τις γενικές εξισώσεις διατήρησης της μάζας, της ορμής και της ενέργειας για να ληφθεί μια

γενικευμένη λύση. Η μέθοδος πεπερασμένων όγκων προέρχεται από τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών και έχει αποδειχθεί αποτελεσματική αριθμητική μέθοδος στην υπολογιστική ρευστοδυναμική (Versteeg and Malalasekera, 2007).

### 1.3.5 Στάδια επίλυσης ενός προβλήματος με χρήση CFD

Οι κώδικες της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής έχουν σχηματιστεί γύρω από τους αριθμητικούς αλγορίθμους και έχουν τη δυνατότητα να αντιμετωπίσουν προβλήματα της ροής των ρευστών. Προκειμένου να παρέχεται εύκολη πρόσβαση στη δύναμη επίλυσης, όλα τα εμπορικά πακέτα CFD περιλαμβάνουν εξελιγμένες διεπαφές για την εισαγωγή παραμέτρων προβλήματος και την εξέταση των αποτελεσμάτων. Ως εκ τούτου αυτοί οι κώδικες περιλαμβάνουν τρία στάδια: α) Την προ-επεξεργασία, β) την επίλυση και γ) τη μετα-επεξεργασία.



Σχήμα 11. Διάγραμμα ροής της ανάλυσης ενός προβλήματος με χρήση CFD (τροποποιημένο από Sun, 2019).

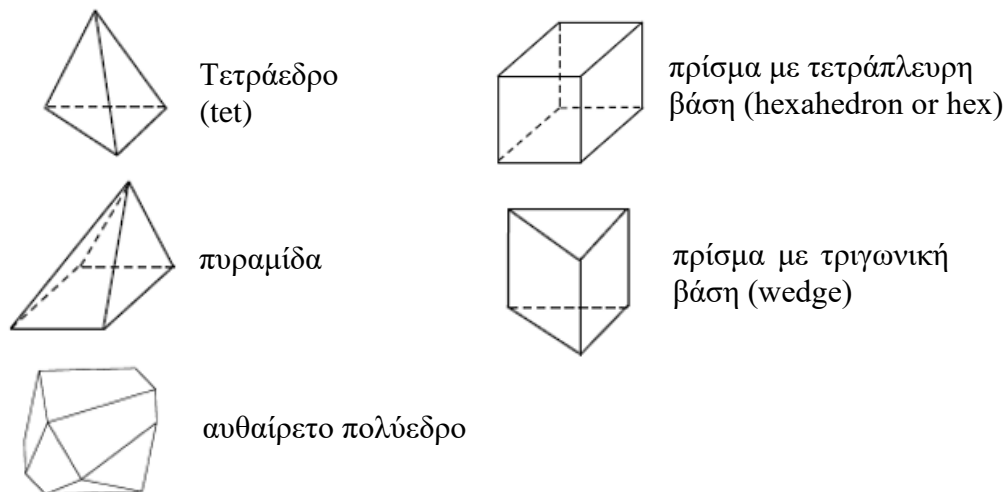
#### Προ-επεξεργασία

Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει όλες εκείνες τις ενέργειες που πραγματοποιούνται πριν την αριθμητική επίλυση του προβλήματος και μέσω των οποίων γίνεται η εισαγωγή των δεδομένων του προβλήματος στον υπολογιστή. Πιο συγκεκριμένα, οι ενέργειες που

λαμβάνουν χώρα στο στάδιο της προ-επεξεργασίας είναι (Versteeg and Malalasekera 2007, Wang and Sun 2003):

- Ορισμός και σχεδιασμός της γεωμετρίας του προβλήματος.  
Αυτό συνήθως γίνεται με τη χρήση ενός προγράμματος σχεδίασης (π.χ. Design Modeler)
- Δημιουργία πλέγματος και επεξεργασία.
- Ορισμός των αρχικών και των συνοριακών συνθηκών.

Η διαδικασία περιλαμβάνει υποδιαίρεση του όγκου σε μικρότερα πολύεδρα τρισδιάστατα σχήματα γνωστά ως κελιά, όπως τετράεδρα, εξάεδρα, πρίσματα ή πυραμίδες (Σχήμα 12). Η επιλογή του σχήματος εξαρτάται από τη γεωμετρία του προβλήματος.



Σχήμα 12. Απεικόνιση των διαφορετικών μορφών περασμένων στοιχείων-κελιών.

Τα κελιά αυτά αλληλοεπιδρούν και σχηματίζουν κόμβους στο πλέγμα. Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων εξαρτάται από την πυκνότητα των κόμβων στο πλέγμα, με τη μεγαλύτερη πυκνότητα να παρέχει μεγαλύτερη ακρίβεια. Ωστόσο, πυκνό πλέγμα απαιτεί περισσότερο χρόνο και υπολογιστική ισχύ. Ο σχεδιασμός του πλέγματος γίνεται από τον χρήστη με σκοπό την εύρεση της ιδανικής ισορροπίας μεταξύ ακρίβειας και πόρων. Αυτό συνήθως επιτυγχάνεται με το σχεδιασμό μη ομοιόμορφων πλεγμάτων, πυκνότερων σε περιοχές με μεγάλες μεταβολές και λιγότερο πυκνών σε περιοχές με μικρότερες μεταβολές. Ο σχεδιασμός γεωμετρίας και πλέγματος αποτελεί σημαντικό μέρος της διαδικασίας CFD, απορροφώντας περίπου το 50% του συνολικού χρόνου που απαιτείται για τη μελέτη.

### *Στάδιο επίλυσης*

Το στάδιο της επίλυσης των μαθηματικών εξισώσεων που περιγράφηκε προηγουμένως περιλαμβάνει τη χρήση H/Y, το οποίο μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε τρία επιμέρους στάδια.

- Η ενσωμάτωση μαθηματικών εξισώσεων σε περιορισμένους γεωμετρικούς όγκους ελέγχου αποτελεί θεμελιώδη πτυχή της πεπερασμένης γεωμετρίας.
- Η διαδικασία της διακριτοποίησης περιλαμβάνει τη μετατροπή των εξισώσεων που προκύπτουν σε ένα σύνολο αλγεβρικών εξισώσεων για καλύτερη κατανόηση και ανάλυση. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται συνήθως σε μαθηματικούς υπολογισμούς για την απλοποίηση πολύπλοκων εξισώσεων σε διαχειρίσιμα στοιχεία.
- Η επίλυση αλγεβρικών εξισώσεων, όπου μπορεί να χρησιμοποιήσει κάποιος μια επαναληπτική μέθοδο που περιλαμβάνει την επανειλημμένη βελτίωση μιας προσεγγιστικής λύσης μέχρι να επιτευχθεί το επιθυμητό επίπεδο ακρίβειας.

Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης, οι τύποι επιλύονται για κάθε κελί πλέγματος μέχρι να πληρούνται τα κριτήρια σύγκλισης και να επιτευχθεί η απαιτούμενη ακρίβεια της επίλυσης. Αυτό το στάδιο μπορεί να καταλάβει σημαντικό χρόνο καθώς απαιτεί από τον υπολογιστή να επιλύσει έναν εκτεταμένο αριθμό τύπων (Sun, 2019).

### *Μετα-επεξεργασία*

Το λογισμικό επιτρέπει στον χρήστη να οπτικοποιήσει και να εξετάσει εξονυχιστικά τα δεδομένα που προκύπτουν από την επίλυση. Η ικανότητα να παρουσιάζονται με τέτοιο τρόπο τα υπολογιστικά αποτελέσματα είναι ένα ανεκτίμητο εργαλείο σχεδιασμού. Υπάρχουν πολλοί τρόποι εμφάνισης των δεδομένων που λαμβάνονται από τη φάση επίλυσης, καθένας από αυτούς μπορεί να βοηθήσει τον χρήστη του CFD να αναλύσει καλύτερα και να οπτικοποιήσει τα σχετικά φυσικά χαρακτηριστικά του προβλήματος που αναλύθηκε (Versteeg and Malalasekera, 2007).

### **1.3.6 Εφαρμογές CFD στη βιομηχανία τροφίμων**

Οι εφαρμογές του CFD στη βιομηχανία τροφίμων περιλαμβάνουν θέματα σχεδιασμού και βελτιστοποίησης μηχανολογικού εξοπλισμού, αλλά και μεθόδων επεξεργασίας των τροφίμων (Norton and Sun, 2006; Sun, 2019). Ειδικότερα αφορούν μεθόδους επεξεργασίας όπως το μαγείρεμα, η ζήρανση, η ανάμιξη, η παστερίωση και η αποστείρωση, η κατάψυξη

και η συντήρηση υπό ψύξη, οι οποίες αφορούν φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας και μάζας.

Παραδείγματα των εφαρμογών του CFD στη βιομηχανία τροφίμων είναι η ανάλυση της ροής του αέρα σε φούρνους και ψύκτες (Foster *et al.*, 2002), ροή υγρών σωματιδίων τροφίμων στην επεξεργασία συστήματα (Mirade and Daudin, 2000), ροή μεταφοράς θερμότητας σε δοχεία κατά τη διαδικασία παστερίωσης (Ghani *et al.*, 1999a, b) και μοντελοποίηση διεργασιών ψύξης υπό κενό (Sun and Hu, 2003).

### *Ξήρανση*

Η βελτιστοποίηση της μεθόδου αυτής, απαιτεί μαθηματικό μοντέλο που θα καλύπτει τόσο τη μεταφορά θερμότητας και μάζας, καθώς και τη ροή του αέρα και την πτώση πίεσης. Το CFD μοντελοποιεί αυτά τα φαινόμενα και βοηθά στη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του ξηραντήρα, ωστόσο υπάρχουν αναφορές ότι το CFD μπορεί να χρησιμοποιηθεί για δοκιμές πιλοτικής κλίμακας χωρίς να μπορεί να αντικαταστήσει πλήρως τις πειραματικές δοκιμές και τις διαδικασίες σχεδιασμού (Tarek and Ray, 2010).

Τα περισσότερα παραδείγματα εφαρμογής CFD στην ξήρανση, αφορούν την ξήρανση με ψεκασμό (Yanniotis and Stoforos, 2014). Χρησιμοποιήθηκε CFD στην προσομοίωση της ξήρανσης σιταριού σε ξηραντήρες ρευστοποιημένης κλίνης και αναφέρθηκε καλή συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα (Assarie *et al.* 2007), καθώς χρήση του CFD έγινε και για προσομοίωση της διάχυσης της υγρασίας στον αέρα και στις στερεές φάσεις σε έναν ξηραντήρα ρευστοποιημένης κλίνης (Wang *et al.* 2008). Αργότερα, με την προσομοίωση ξήρανσης αλεύρου σόγιας σε ξηραντήρα, μελετήθηκε η αγωγιμότητα υγρού-στερεού και η επίδραση παραμέτρων όπως ο ρυθμός ξήρανσης, η περιεκτικότητα σε υγρασία και η μεταβολή της θερμοκρασίας (Da Silva *et al.* 2012). Τέλος, οι μεταβατικές κατανομές της θερμοκρασίας και της υγρασίας κατά τη διάρκεια της συνδυασμένης διαδικασίας μικροκυμάτων και θέρμανσης με συναγωγή αναλύθηκαν με ένα μοντέλο CFD και εφαρμόστηκαν στην ξήρανση πατάτας (Marra *et al.*, 2010).

### *Αποστείρωση-Παστερίωση*

Κατά τις διεργασίες αυτές, ο εντοπισμός του κρίσιμου σημείου που θερμαίνεται πιο αργά διαδραματίζει σημαντικό ρόλο για την επαρκή θερμική επεξεργασία με στόχο την καταστροφή των μικροοργανισμών. Ο απαιτούμενος χρόνος επεξεργασίας στην εμπορική αποστείρωση μπορεί να υπολογιστεί με την αναλυτική λύση της εξίσωσης θερμότητας με αγωγή για απλές περιπτώσεις στερεών τροφών όπου το πιο αργό σημείο θέρμανσης

συμπίπτει με το γεωμετρικό κέντρο του κουτιού. Διάφορες αριθμητικές λύσεις έχουν εφαρμοστεί σε προβλήματα αποστείρωσης, εστιάζοντας κυρίως σε στερεά ή με μεγάλο ιξώδες τρόφιμα, όπως πουρέδες και συμπυκνώματα. Μία από τις πρώτες εφαρμογές των αριθμητικών μεθόδων στη θερμική επεξεργασία των τροφίμων ήταν αυτή των Teixeira *et al.* (1969).

Προσπάθειες για προσομοίωση της θερμικής επεξεργασίας έγιναν από τους Datta και Teixeira (1988) κατά τη διάρκεια μεταφοράς θερμότητας με φυσική συναγωγή σε κονσερβοποιημένα υγρά τρόφιμα και από τον Yang *et al.* (1997) για θέρμανση αιωρημάτων αμύλου σε κυλινδρικό περιέκτη, εφαρμόζοντας CFD. Αργότερα, οι Ghani *et al.* (2001) χρησιμοποίησαν κώδικα CFD και μελέτησαν την προσομοίωση σε 3D για υγρά τρόφιμα (χυμού καρότου – πορτοκαλιού) σε σακούλες, με τα αποτελέσματα που βρέθηκαν να έρχονται σε συμφωνία με τις πειραματικές μετρήσεις. Άλλα παραδείγματα εφαρμογής CFD, περιλαμβάνουν την ανάλυση καταστροφής της βιταμίνης C λόγω θέρμανσης (Chani *et al.*, 2002), τη μελέτη του χρόνου αποστείρωσης των υγρών τροφίμων και των παραμέτρων που τον επηρεάζουν (Farid and Ghani 2004), τον προσδιορισμό του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας κατά τη διάρκεια της θέρμανσης με φυσική συναγωγή των διαλυμάτων CMC σε κυλινδρικά δοχεία (Kannan *et al.*, 2008), τη παστερίωση μπίρας (Augusto *et al.*, 2010) και γάλακτος (Anand *et al.*, 2011). Μία ακόμη εφαρμογή αποτελεί ο υπολογισμός με πακέτο CFD της πρόβλεψης της θερμοδυναμικής συμπεριφοράς μη Νευτωνικού υγρού τροφίμου που θερμαίνεται σε κατακόρυφο δοχείο (Quarini and Scott, 1997).

Παραδείγματα, τα οποία περιλαμβάνουν τη θέρμανση μεγάλων σωματιδίων τροφίμων στο νερό είναι οι φέτες ανανά σε χυμούς (Ghani και Farid, 2006), τα σπαράγγια σε άλμη (Dimou and Yanniotis, 2011) και τα ροδάκινα σε σιρόπι (Dimou *et al.*, 2011).



## 2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Στα πλαίσια της διεξαγωγής της πειραματικής διαδικασίας πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική ανασκόπηση για την "πλήρωση εν θερμώ" διεργασία, με σκοπό τη διερεύνηση των διάφορων παραμέτρων και συνθήκων για την ορθή διεκπεραίωση του πειράματος. Στη συνέχεια μετρήθηκαν κάποιες από τις θερμοφυσικές ιδιότητες του τοματοχυμού και οι υπόλοιπες βρέθηκαν βιβλιογραφικά. Υπολογίστηκε πειραματικά ο επιφανειακός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας  $h$ . Όταν συλλέχθηκαν όλα τα πειραματικά δεδομένα έγινε σύγκριση με τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης που προέκυψε από την επίλυση της προσομοίωσης και διαπιστώθηκε η επαλήθευση του μοντέλου. Με αυτό τον τρόπο κατέστη δυνατή η διερεύνηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του τοματοχυμού για βελτιστοποίηση της διεργασίας και την επίτευξη της ολοκληρωμένης τιμής  $F_s$ .

### 2.1 Θερμοφυσικές ιδιότητες

Η πυκνότητα ( $\rho$ ) του τοματοχυμού προσδιορίστηκε πειραματικά με την ογκομετρική μέθοδο με βάση τον όγκο συγκεκριμένης μάζας. Για τον υπολογισμό χρησιμοποιήθηκε η Εξ. (12):

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (12)$$

όπου:

$\rho$ : η πυκνότητα του τοματοχυμού ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$m$ : η μάζα του τοματοχυμού ( $\text{kg}$ )

$V$ : ο όγκος του τοματοχυμού ( $\text{m}^3$ )

Η πειραματική διαδικασία επαναλήφθηκε 7 φορές και ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων ήταν  $\rho = 1037 \pm 5 \text{ kg}/\text{m}^3$ , που είναι σε συμφωνία με τις τιμές στη βιβλιογραφία (McCarthy, 2009).

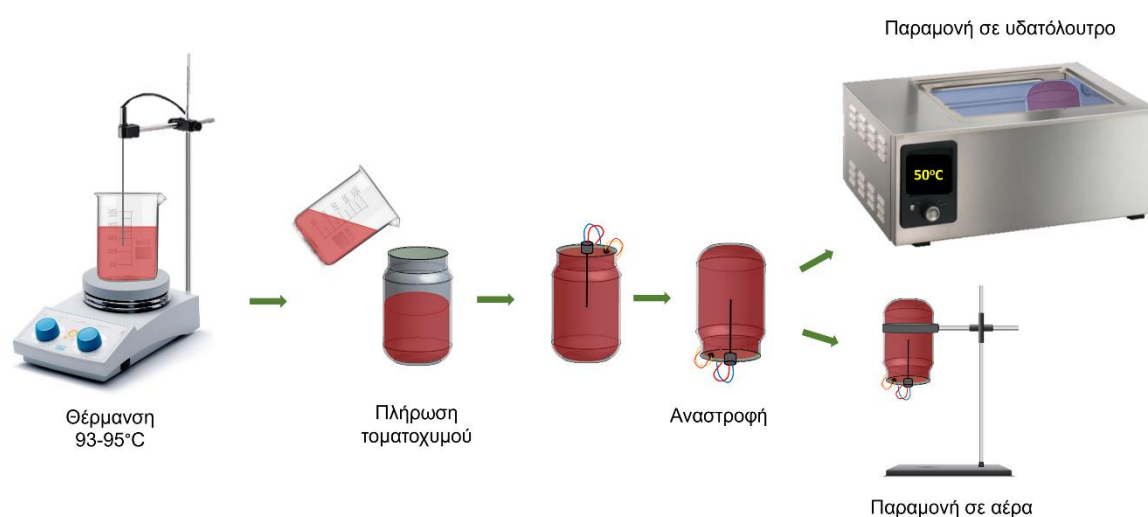
Η ειδική θερμότητα ( $C_p$ ) του τοματοχυμού βρέθηκε βιβλιογραφικά ίση προς  $C_p = 3766 \pm 0,90 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$  (Badin *et al.*, 2023). Η θερμική αγωγιμότητα ( $k$ ) προσδιορίστηκε πειραματικά με τη χρήση ειδικής συσκευής μέτρησης της θερμικής αγωγιμότητας (Thermal Conductivity Probe, model KD2, Decagon Devices Inc. Pullman, Wash., U.S.A). Η διαδικασία επαναλήφθηκε 5 φορές τοποθετώντας τον αισθητήρα (βελόνα) σε διαφορεικά σημεία μέσα στο τοματοχυμό σε θερμοκρασία δωματίου και προσδιορίστηκε ο μέσος όρος των τιμών αυτών ίσος με  $k = 0.61 \pm 0.05 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ .

## 2.2 Πειραματική διαδικασία

Στο πείραμα χρησιμοποιήθηκαν γυάλινοι περιέκτες τύπου οξειδίου νατρίου-οξειδίου ασβεστίου (soda-lime-silica glass) με χημική σύσταση 70% SiO<sub>2</sub>, 10% CaO, 15% Na<sub>2</sub>O (Martin, 2006). Οι περιέκτες περιείχαν τοματοχυμό με διαλυτά στερεά 12-14 °Brix και προμηθεύτηκαν από ελληνική βιομηχανία παραγωγής τοματοπολτού (Δ. Νομικός Α.Ε.).

Έγινε μέτρηση αρκετών γυάλινων περιεκτών λόγω του μη καθορισμένου σχήμα τους και βρέθηκαν οι διαστάσεις τους με μέσο ορό ύψους  $L = 89.0 \pm 1,8$  mm, εσωτερικής διαμέτρου  $d = 54 \pm 1,1$  mm, πάχους  $x = 2 \pm 0,2$  mm και όγκου  $V = 190 \pm 5$  mL. Στη συνέχεια ο τοματοχυμός τοποθετήθηκε σε ποτήρι ζέσεως 500 mL και θερμάνθηκε σε ένα μαγνητικό θερμαινόμενο αναδευτήρα, για περίπου 10 min. Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας στο γεωμετρικό κέντρο του περιέκτη, στο εσωτερικό του καπακιού και στο περιβάλλον χρησιμοποιήθηκαν θερμοστοιχεία τύπου T (κέντρο) και K (καπάκι, περιβάλλον), τα οποία ήταν συνδεδεμένα με το καταγραφικό μηχάνημα OM-SQ2020, τύπου 2F8mk2 (OMEGA®, Norwalk, CT, ΗΠΑ). Για τη μόνωση του καπακιού χρησιμοποιήθηκε ειδική στερεά σιλικόνη με αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες.

Όταν η θερμοκρασία έφτασε τους 93-95°C ο τοματοχυμός εισήχθη αμέσως στον περιέκτη και σφραγίστηκε άμεσα, αναποδογυρίστηκε και τοποθετήθηκε σε εξοπλισμένο στήριγμα. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο περιέκτης γέμιζε με τοματοχυμό μέχρι επάνω χωρίς να αφεθεί κενό 5% όπως γίνεται στην τυπική "πλήρωση εν θερμώ" διαδικασία.



Σχήμα 13α. Απεικόνιση των πειραματικών σταδίων της "πλήρωση εν θερμώ" διεργασίας.

Παρέμεινε στον αέρα σε θερμοκρασία  $T_{air} = 25^{\circ}\text{C}$  μέχρι να ψυχθεί τελείως. Η ίδια πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε και για ψύξη σε υδατόλουτρο θερμοκρασίας

50°C χωρίς παραμονή σε αέρα (Σχήμα 13a). Στο Σχήμα 13b απεικονίζεται ο γυάλινος περιέκτης τοματοχυμού με τοποθετημένα τα θερμοστοιχεία στο τέλος της διεργασίας. Οι πειραματικές θερμικές διεργασίες πραγματοποιήθηκαν αρκετές φορές για την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων και για την επίτευξη ικανοποιητικής επαναληψιμότητας των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 13b. Γυάλινος περιέκτης τοματοχυμού με τοποθετημένα θερμοστοιχεία σε κέντρο και καπάκι.

### 2.3 Μέθοδος υπολογισμού $h$ διεργασίας

Αν και ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ( $h$ ) δεν είναι εγγενής ιδιότητα των τροφίμων, εκφράζει τις οριακές συνθήκες μεταξύ του τροφίμου και του εξωτερικού μέσου θέρμανσης ή ψύξης, ώστε η παράμετρος αυτή να είναι σημαντική στο σχεδιασμό διεργασιών των τροφίμων (Nesvadba, 2008). Στην περίπτωση μας χρειάστηκε να υπολογίσουμε το επιφανειακό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας  $h$ , ώστε να τοποθετηθεί σαν μεταβλητή στο πρόγραμμα επίλυσης Fluent του Ansys. Στο πειραματικό προσδιορισμό χρησιμοποιήθηκε μεταλλικός κύλινδρος αλουμίνιου, υλικό που έχει υψηλή θερμική αγωγιμότητα. Γι' αυτό η εσωτερική αντίσταση στη μεταφορά θερμότητας θεωρείται αμελητέα με  $N_{Bi} < 0.1$ . Η Εξ. (13) που περιγράφει τη μεταφορά θερμότητας σε αυτή την περίπτωση μπορεί να αναπτυχθεί ως εξής (Singh and Heldman, 2014):

$$\rho c_p V \frac{dT}{dt} = hA(T_a - T) \quad (13)$$

Ολοκληρώνοντας και αναδιατάσσοντας τους όρους έχουμε:

$$\ln\left(\frac{T-T_{\infty}}{T_{IT}-T_{\infty}}\right) = -\frac{h \cdot A}{c_p \cdot m} \cdot t \quad (14)$$

όπου:

$T$ : η θερμοκρασία στο κέντρο του κυλίνδρου συναρτήσει του χρόνου  $t$ , °C.

$T_{IT}$ : η αρχική θερμοκρασία του κυλίνδρου, °C.

$T_{\infty}$ : η θερμοκρασία του υδατόλουτρου, °C.

$h$ : συντελεστής μεταφοράς θερμότητας W/(m<sup>2</sup>·K).

$C_p$ : η ειδική θερμότητα του αλουμινίου, J/kg°C.

$A$ : η επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας, m<sup>2</sup>.

$m$ : η μάζα του κυλίνδρου, kg.

Για τον υπολογισμό του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας  $h$  λήφθηκαν θερμοκρασιακά δεδομένα ανά 5 δευτερόλεπτα με θερμοστοιχείο που είχε τοποθετηθεί στο κέντρο του κυλίνδρου. Πραγματοποιήθηκαν 15 πειράματα για 5 διαφορετικές περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση ο κύλινδρος θερμάνθηκε περίπου σε θερμοκρασία 95°C και ψύχθηκε σε αέρα  $T_{air} = 25^\circ\text{C}$ . Στις επόμενες 3 περιπτώσεις, μετά τη θέρμανση του κυλίνδρου σε θερμοκρασία 95°C, ψύχθηκε με βύθιση σε υδατόλουτρο θερμοκρασίας 20, 50 και 70°C, αντίστοιχα, χωρίς εξαναγκασμένη ροή. Στην τελευταία περίπτωση, ο κύλινδρος ακολούθησε τη διεργασία θέρμανσης από θερμοκρασία δωματίου 25°C σε υδατόλουτρο 90°C. Επίσης, καταγράφηκε με θερμοστοιχεία η θερμοκρασία του περιβάλλοντος για αέρα και για υδατόλουτρο.

Με τα δεδομένα αυτά κατασκευάστηκε το διάγραμμα  $\ln\left(\frac{T-T_{\infty}}{T_{IT}-T_{\infty}}\right)$  συναρτήσει του χρόνου  $t$ . Στη συνέχεια υπολογίζοντας την κλίση (slope) της ευθείας και επειδή η Εξ. (14) είναι της μορφής  $y=a \cdot x+b$  βρίσκουμε το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας  $h$ , εφόσον οι τιμές της μάζας, της επιφάνειας και της ειδικής θερμότητας του κυλίνδρου είναι σταθερές.

Η ειδική θερμότητα του αλουμινίου είναι  $C_p = 900 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$  (ToolBox, 2003). Στο εργαστήριο μηχανικής τροφίμων μετρήθηκαν η διάμετρος του κυλίνδρου  $d = 0.015 \text{ m}$  σε θερμοκρασία δωματίου, το ύψος  $h_{cylinder} = 0.15 \text{ m}$ , η επιφάνεια (εμβαδό του κυλίνδρου)  $A = 0.003147 \text{ m}^2$  και η μάζα του κυλίνδρου ίση με  $m = 0.0715 \text{ kg}$ .

## 2.4 Αριθμητική επίλυση με τη χρήση CFD

Για την υλοποίηση και τη δημιουργία της προσομοίωσης της "πλήρωση εν θερμώ" διεργασίας χρησιμοποιήθηκε ένα από τα πιο εμπορικά λογισμικά προγράμματα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής, το Ansys® (CFD) που περιλαμβάνει το πακέτο Workbench, έκδοσης Release 2022 R2 (22.2). Για τη σχεδίαση της γεωμετρίας χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα CAD (Design Modeller), για τη δημιουργία του πλέγματος το πρόγραμμα Meshing και για την επίλυση της προσομοίωσης το πρόγραμμα Fluent. Όλη η διαδικασία πραγματοποιήθηκε σε Η/Υ που είχε τα παρακάτω χαρακτηριστικά: Βασικό λειτουργικό σύστημα: Microsoft Windows 11 Home 64-bit, μνήμη RAM: DDR4 16.0 GB, επεξεργαστής: AMD Ryzen 7 5800H with Radeon Graphics CPU@3.20 GHz 8 CPU cores και κάρτα γραφικών: Nvidia GeForce RTX 3050-Ti 6GB

## 2.5 Προκαταρκτική μελέτη

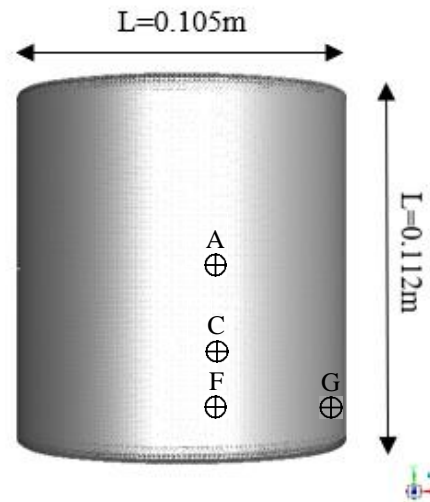
Για να επιβεβαιώσουμε την ορθότητα της προσέγγισης μας, δηλαδή της "πλήρωση εν θερμώ" διεργασίας τοματοχυμού σε γυάλινους περιέκτες, επαληθεύτηκε το υπολογιστικό μοντέλο που αναπτύχθηκε στη παρούσα εργασία με μια προγενέστερη μελέτη που έγινε στο Εργαστήριο Μηχανικής και Επεξεργασίας Τροφίμων του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών (ΓΠΑ), με τη χρήση της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (CFD).

Το θέμα της προγενέστερης μελέτης (Βασιλείου, 2018), ήταν η βελτιστοποίησης της "πλήρωση εν θερμώ" διεργασίας για την παραγωγή τοματοπολτού, διπλής συμπύκνωσης 29°Brix (pH 4.3), με τη χρήση CFD. Ο σκοπός της εργασίας ήταν η επίτευξη της εμπορικής αποστείρωσης, με βάση της απαιτούμενης ολοκληρωμένης τιμής  $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 12.6 \text{ min}$ , με την "πλήρωση εν θερμώ" διεργασίας σε μεταλλική κονσέρβα, με ψύξη αρχικά στον αέρα και στη συνέχεια στο νερό.

Οι θερμοφυσικές ιδιότητες του τοματοπολτού που χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα στο υπολογιστικό πρόγραμμα (Ansys® Academic Research Fluent, Release 22.1) ήταν η πυκνότητα  $\rho = 1126.4 \text{ kg/m}^3$ , η θερμική αγωγιμότητα  $k = 0.51 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  στους  $22.3^{\circ}\text{C}$  και ειδική θερμότητα ( $C_p$ ) του τοματοπολτού ίση με  $C_p = 3302 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ . Ο τοματοπολτός λόγω μεγάλου ιξώδους θεωρήθηκε ως στερεό, οπότε η μεταφορά θερμότητας έγινε με αγωγή. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν ήταν οι θερμοκρασίες γεμίσματος ( $88^{\circ}\text{C}$ ,  $90^{\circ}\text{C}$ ,  $93^{\circ}\text{C}$ ,  $95^{\circ}\text{C}$  και  $98^{\circ}\text{C}$ ), ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στον αέρα,  $h_{air}$  ( $5 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ ,  $7 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ ,  $9 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$  και  $15 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ ) και η επίδραση με ή χωρίς κενό αέρος. Η μεταλλική κονσέρβα αποτελείται από αλουμίνιο και οι θερμοφυσικές ιδιότητες που

χρησιμοποιήθηκαν στο Fluent είναι η θερμική αγωγιμότητα  $k = 202.4 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ , η πυκνότητα  $\rho = 2719 \text{ kg/m}^3$  και η ειδική θερμότητα  $C_p = 871 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ .

Στο πρώτο στάδιο της διαδικασίας σχεδιάστηκε η τρισδιάστατη γεωμετρία του περιέκτη με τη βοήθεια ενός σχεδιαστικού εργαλείου τύπου CAD (Computer Aided Design), το Design Modeler (Ansys® Academic Research Mesh, Release 22.1). Το σχήμα είναι κυλινδρικό με διαστάσεις  $L = 0.112 \text{ m}$  και  $D = 0.105 \text{ m}$  (Σχήμα 14).



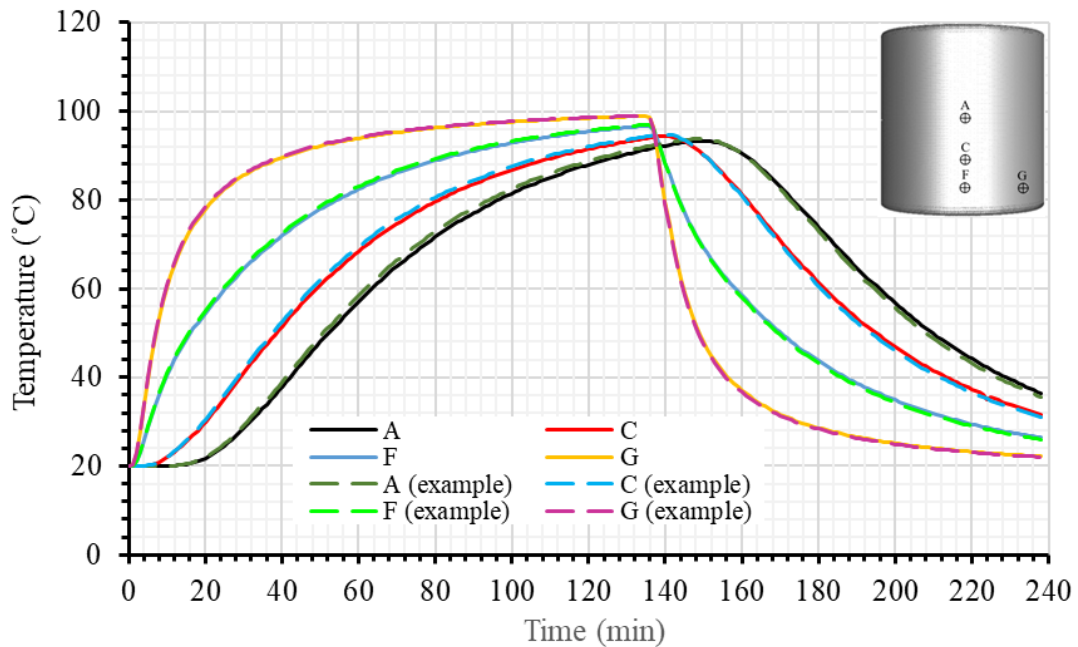
Σχήμα 14. Τρισδιάστατη γεωμετρία της μεταλλικής κονσέρβας μεγέθους 404×411.

Στη συνέχεια ακολούθησε ο σχεδιασμός του κατάλληλου πλέγματος, με τη βοήθεια του Meshing, με 1885602 τετράεδρα και εξάεδρα κελιά που είναι κοντά στην ποιότητα και την πυκνότητα του πλέγματος (1942250 κελιά) που ήδη είχε βρεθεί στην προηγούμενη μελέτη. Τα σημεία A (0,0,0.56), C (0,0,0.28), F (0,0,0.14) και G (0,0.039375,0.014) εξετάστηκαν για την ανεξαρτησία πλέγματος και την επιλογή του καλύτερου πλέγματος (Σχήμα 14).

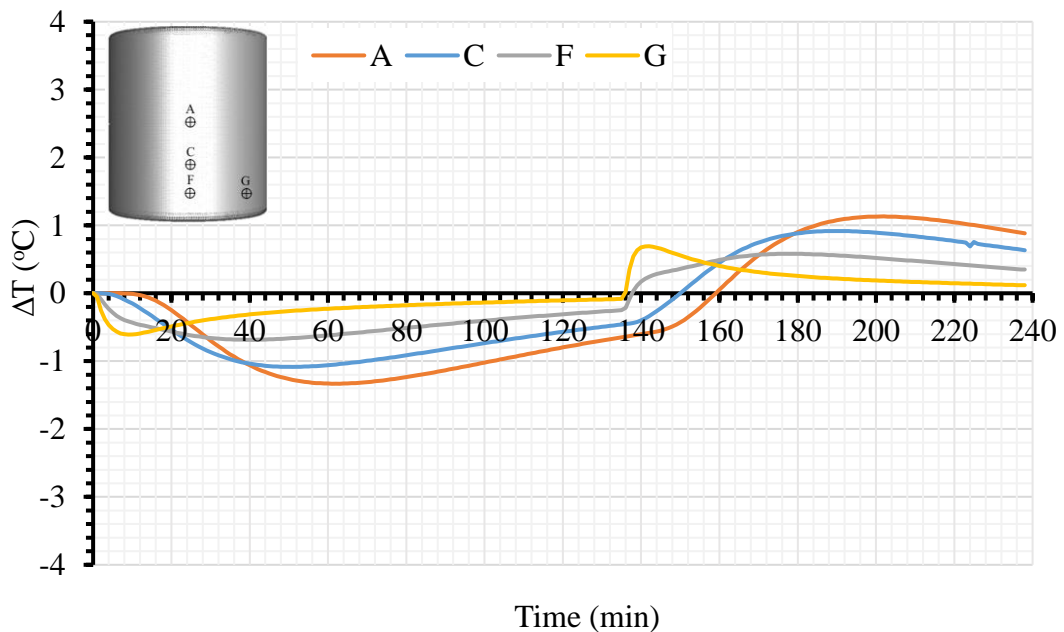
Εξετάστηκε η θερμική επεξεργασία για 135 min κύκλο θέρμανσης έτσι ώστε η θερμοκρασία του γεωμετρικού κέντρου του μεταλλικού περιέκτη να είναι μεγαλύτερη από  $90^\circ\text{C}$  ( $T_{\text{centre}} > 90^\circ\text{C}$ ), και 103 min κύκλο ψύξης έτσι ώστε η θερμοκρασία του γεωμετρικού κέντρου να είναι ίση με  $35^\circ\text{C}$  ( $T_{\text{center}} \approx 35^\circ\text{C}$ ).

Οι συνθήκες που εισάχθηκαν στο Ansys Fluent είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος  $T_{RT} = 100^\circ\text{C}$  για το κύκλο θέρμανσης, η αρχική θερμοκρασία του προϊόντος  $T_{IT} = 20^\circ\text{C}$ , η θερμοκρασία του νερού  $T_{WC} = 20^\circ\text{C}$  και ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας  $h = \infty \text{ W/m}^2\text{K}$ . Το υλικό το οποίο αποτελείται η μεταλλική κονσέρβα είναι το αλουμίνιο με θερμοφυσικές ιδιότητες θερμική αγωγιμότητα  $k = 202.4 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ , πυκνότητα  $\rho = 2719 \text{ kg/m}^3$  και ειδική θερμότητα  $C_p = 871 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ .

Στην επίλυση του προβλήματος επιλέχθηκε ως χρονικό βήμα τα 5s, μέγιστες επαναλήψεις ανά βήμα 20, απόλυτο κριτήριο σύγκλισης  $10^{-9}$ , συσχέτιση πίεσης-ταχύτητας, SIMPLE και για τη χωρική διακριτοποίηση επιλέχθηκε το Gradiend: Green-Gauss cell based, Pressure: Standard, Momentum: 2nd order upwind, Energy: 2nd order upwind.



Σχήμα 15. Συγκριση της θερμοκρασίας στα διάφορα σημεία του προϊόντος (A, C, F, G example) για τη μεταλλική κονσέρβα με τα σημεία (A, C, F, G) προγενέστερης μελέτης.

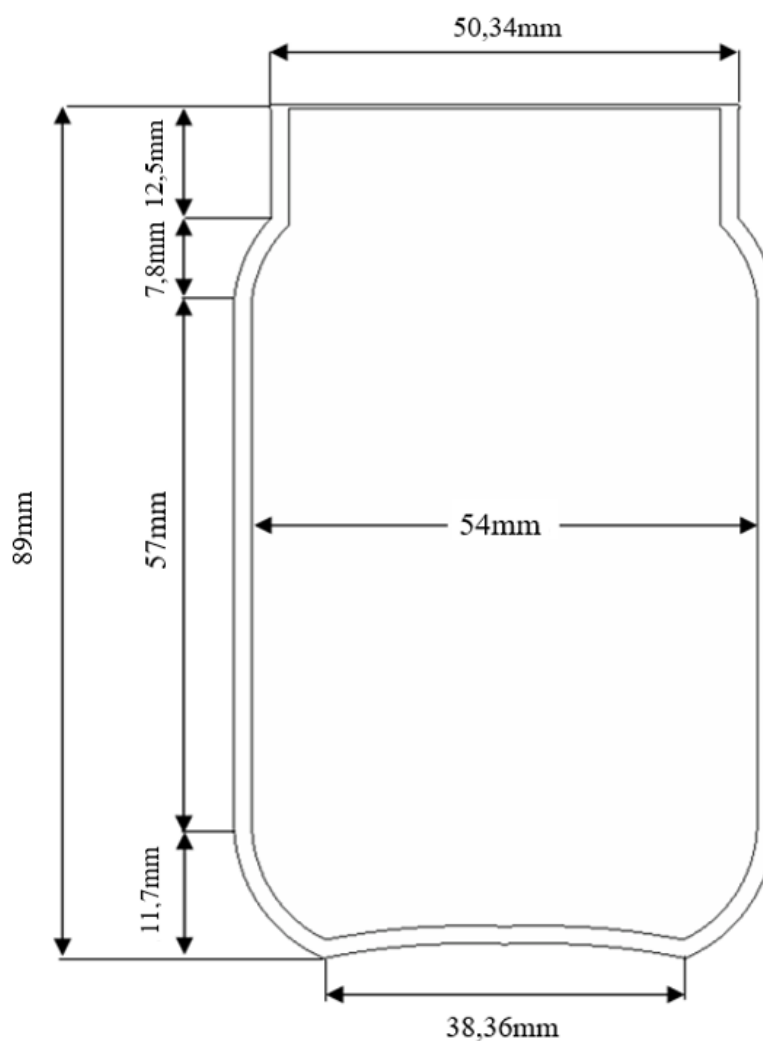


Σχήμα 16. Η διαφορά θερμοκρασίας ( $\Delta T$ ) για κάθε ζεύγος αντιστοίχων σημείων των στις δυο μελέτες.

Σχήμα 15 Σχήμα 16 Τέλος πραγματοποιήθηκε σύγκριση της διαφοράς θερμοκρασίας ( $\Delta T$ ) για κάθε ζεύγος αντιστοίχων σημείων στις δυο μελέτες και παρατηρήθηκε ένα σχετικά μικρό σφάλμα, της τάξης του  $\pm 1^\circ\text{C}$ , που μπορεί να οφείλεται είτε στη διαφορετική έκδοση λογισμικού Ansys® που χρησιμοποιήθηκε είτε σε κάποια διαφορετική παράμετρο που τοποθετήθηκε κατά την επίλυση (Βασιλείου, 2018).

## 2.6 Σχεδιασμός γεωμετρίας

Για το σχεδιασμό της τρισδιάστατης (3D) γεωμετρίας του γυάλινου περιέκτη, μετρήθηκαν με ακρίβεια στο εργαστήριο οι διαστάσεις του, χρησιμοποιώντας ψηφιακό παχύμετρο και στη συνέχεια, με βάση τις μέσες τιμές των διαστάσεων, σχεδιάστηκε ο περιέκτης με τη χρήση του προγράμματος CAD (Design Modeller), το οποίο είναι μια ενσωματωμένη εφαρμογή του πακέτου Ansys®. Στο Σχήμα 17 απεικονίζονται οι διαστάσεις των τμημάτων του γυάλινου περιέκτη με ύψος  $L = 89\text{mm}$ , εσωτερική διάμετρο  $d = 54\text{mm}$  και πάχος  $x = 2\text{mm}$ .



Σχήμα 17. Γεωμετρία και διαστάσεις του γυάλινου περιέκτη.



Ο περιέκτης είναι κυλινδρικού τύπου και συμμετρικός ως προς τον άξονα του. Η μετατροπή του σε τρισδιάστατη μορφή πραγματοποιήθηκε με την εντολή περιστροφής revolve. Το εσωτερικό του δημιουργήθηκε με την εντολή fill και έχει όγκο ίσο προς  $V = 190.14 \text{ mL}$ . Η τελική μορφή της γεωμετρίας ταυτίζεται με το γυάλινο περιέκτη που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία.

## 2.7 Δημιουργία πλέγματος

Η δημιουργία του πλέγματος (mesh) στο Ansys και η σωστή επιλογή οριακών συνθήκων είναι κάποια από τα σημαντικότερα βήματα κατά την προετοιμασία μιας αριθμητικής ανάλυσης στον Η/Υ. Στην ουσία, το meshing χωρίζει τη γεωμετρία σε μικρά τμήματα, γνωστά ως κελιά. Στην περίπτωση μας σχεδιάστηκαν 5 διαφορετικές πυκνότητες πλεγμάτων όπως φαίνεται στο Σχήμα 18 με δύο διαφορετικούς τύπους πεπερασμένων στοιχείων (Πίνακας 7), το τετράεδρο (tet) και το πρίσμα με τριγωνική βάση (wedge). Αναμεσα στις οριακές συνθήκες χρησιμοποιήθηκαν 5 επιπλέον στρώματα κελιών (inflation) για την καλύτερη καταγραφή των χαρακτηριστικών ροής κοντά στην επιφάνεια.

Στη συνέχεια επιλέχθηκαν οι οριακές συνθήκες και το είδος των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν. Ο όγκος που καταλάμβανε το γυαλί και το καπάκι καθορίστηκε ως "solid" δηλαδή στερεό υλικό και εσωτερικά ο τοματοχυμός ως "fluid" δηλαδή ρευστό. Για να υπάρχει μόνο μεταφορά θερμότητας και όχι μάζας, από το εσωτερικό στο εξωτερικό, επιλέχθηκε το γυαλί και το καπάκι ως "wall".

Πίνακας 7. Διαφορετικές περιπτώσεις πλεγμάτων που σχεδιάστηκαν.

Περιπτώσεις	Ποιότητα	Αριθμός κελίων	Cpu (min)
Case A	tet/wedge	493 574	42
Case B	tet/wedge	866 421	74
Case C	tet/wedge	1 209 232	103
Case D	tet/wedge	1 693 956	144
Case E	tet/wedge	1 973 500	168



Σχήμα 18. Οι πέντε περιπτώσεις πλεγμάτων (με τη σειρά που εμφανίζονται Case A έως Case E) που σχεδιάστηκαν στο Meshing.

Για τη δημιουργία του καταλληλότερου και πιο ποιοτικού πλέγματος έπρεπε να εξετάσουμε δυο παραμέτρους πριν από την επίλυση του προβλήματος. Πρώτη ήταν η ορθογωνική ποιότητα (orthogonal quality) των κελιών όπου η τιμή πρέπει να κυμαίνεται αναμεσα σε 0 και 1 με την ελάχιστη τιμή να είναι μεγαλύτερη του 0.1 για να θεωρείται αποδεκτό το πλέγμα (Πίνακας 8) (ANSYS, 2017).

Πίνακας 8. Τιμές ορθογωνικής ποιότητας πλέγματος.

Τιμές ορθογωνικότητας	0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00
Ποιότητα κελιών	Μη αποδεκτή	Κακή	Αποδεκτή	Καλή	Πολύ καλή	Άριστη

Η δεύτερη παράμετρος που ελέγχθηκε ήταν η στρέβλωση όπου διακρίνεται σε δύο μεθόδους. Η πρώτη μέθοδος περιλαμβάνει την ισόπλευρη απόκλιση όγκου, η οποία ισχύει μόνο για τετράεδρα και τριγωνικά σχήματα, όπως περιγράφεται και στην παρακάτω Εξ. (15):

$$\text{Στρέβλωση} = \frac{\text{βέλτιστο μέγεθος κελιού} - \text{Μέγεθος κελιού}}{\text{βέλτιστο μέγεθος κελιού}} \quad (15)$$

Η δεύτερη μέθοδος είναι η κανονικοποιημένη απόκλιση γωνίας (Normalized Angle Deviation), η οποία ισχύει για σχήματα κελιών όλων των ειδών και χρησιμοποιείται σε εξάεδρα, πρίσματα και πυραμίδες. Περιγράφεται από την παρακάτω Εξ. (16):

$$\text{Skewness} = \max \left[ \frac{\theta_{max} - \theta_e}{180 - \theta_e}, \frac{\theta_e - \theta_{min}}{\theta_e} \right] \quad (16)$$

όπου:

$\theta_{max}$ : η μεγαλύτερη γωνία ενός κελιού ή επιφάνειας.

$\theta_{min}$ : η μικρότερη γωνία ενός κελιού ή επιφάνειας.

$\theta_e$ : η γωνία που εξαρτάται από το είδος του κελιού (60° για τετράεδρα και τρίγωνα και 90° για εξάεδρα και τετράγωνα).

Με βάση τον Πίνακα 9 η μέγιστη τιμή της στρέβλωσης του πλέγματος θα πρέπει να είναι μικρότερη από 0.95 για να θεωρείται αποδεκτή (ANSYS, 2017).

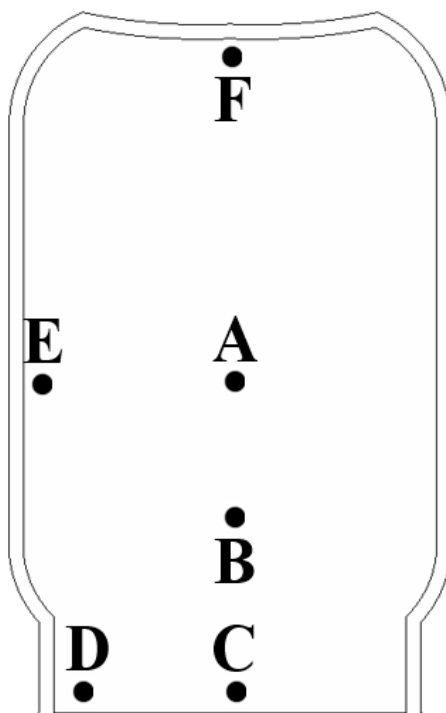
Πίνακας 9. Τιμές στρέβλωσης πλέγματος.

Τιμές στρέβλωσης	0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.95	0.95-0.99	0.99-1.00
Ποιότητα κελιών	Άριστη	Πολύ καλή	Καλή	Αποδεκτή	Κακή	Μη αποδεκτή

## 2.8 Ανεξαρτησία πλέγματος

Για την επιλογή του καλύτερου πλέγματος και τη μεγαλύτερη ακρίβεια στη λύση μας έγινε η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των πέντε διαφορετικών πλεγμάτων. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται ανεξαρτησία πλέγματος. Συνήθως η αύξηση του αριθμού των κελιών του πλέγματος βελτιώνει τη λύση της προσομοίωσης. Πολλές φορές όμως η περιοριστική υπολογιστική δύναμη και ο χρόνος λύσης για κάθε προσομοίωση καθιστά ένα πλέγμα λιγότερων κελιών πιο αποδοτικό (Boz *et al.*, 2014).

Υπολογίστηκε η διαφορά των θερμοκρασιακών δεδομένων ( $\Delta T$ ) συναρτήσει του χρόνου για κάθε πλέγμα διαδοχικά όσον αφορά στον αριθμό των κελιών σε πέντε διαφορετικά σημεία του γυάλινου περιέκτη A (0, 0.0865, 0), B (0, 0.104915, 0), C (0, 0.1265, 0), D (0.0195, 0.1268, 0), E (0.026357, 0.0865, 0), F (0, 0.040359, 0) (Σχήμα 19).



Σχήμα 19. Σημεία που εξετάστηκαν για τη σύγκριση μεταξύ των πλεγμάτων στο γυάλινο περιέκτη.

## 2.9 Καθορισμός παραμέτρων επίλυσης

Για την επίλυση της προσομοίωσης της "πλήρωση εν θερμώ" διεργασίας χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω παράμετροι που ορίστηκαν στο πρόγραμμα Fluent.

- Ο περιέκτης είχε αρχική ομοιόμορφη θερμοκρασία  $T_{IT} = 25^{\circ}\text{C}$  σε όλη τη μάζα του.
- Η ειδική θερμότητα,  $C_p$ , η θερμική αγωγιμότητα,  $k$ , η πυκνότητα,  $\rho$  θεωρήθηκαν σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια της διεργασίας (Ghani, 1999).
- Σύμφωνα με την προσέγγιση που χρησιμοποίησαν οι Kiziltas *et al.* (2010) και Dimou *et al.*, (2011), προκειμένου να μειωθεί η πολυπλοκότητα υπολογισμού του πολυφασικού ρευστού, δεν λήφθηκε υπόψη το κενό (headspace) στην προσομοίωση, υποθέτοντας ότι ο γυάλινος περιέκτης είναι πλήρως γεμάτος με το προϊόν.
- Επιλέχθηκε μοντέλο γραμμικής ροής (laminar flow) για όλη τη διάρκεια της διαδικασίας ψύξης.

- Αντί να σχεδιαστεί η γεωμετρία του περιέκτη με το καπάκι προς τα κάτω, ορίστηκε αντίστροφα η βαρύτητα στον άξονα y.
- Η μεταφορά θερμότητας έγινε με συναγωγή σε όλες τις περιπτώσεις.

Η προσομοίωση στο Fluent επιλύθηκε με τρισδιάστατη γεωμετρία (3D), διπλής ακρίβειας (double precision), χρονικά εξαρτώμενη προσομοίωση (time transient) και με βάση την πίεση (pressured-based solver). Ενεργοποιήθηκε η εξίσωση της ενέργειας για τον υπολογισμό της μεταβολής της θερμοκρασίας κατά τη μεταφορά θερμότητας.

Οι θερμοφυσικές ιδιότητες του τοματοχυμού, όπως υπολογίστηκαν παραπάνω χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα στο υπολογιστικό πρόγραμμα (Ansys®, Fluent) με πυκνότητα  $\rho = 1037 \text{ kg/m}^3$ , θερμική αγωγιμότητα  $k = 0.61 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ , ειδική θερμότητα ( $C_p$ ) ίση με  $C_p = 3766 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$  και ιξώδες  $\mu = 0.025 \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$  (Kaur *et al.*, 2007). Για το γυάλινο περιέκτη χρησιμοποιήθηκαν η πυκνότητα  $\rho = 2243 \text{ kg/m}^3$ , ειδική θερμότητα ( $C_p$ ) του γυάλινου περιέκτη ίση με  $C_p = 963 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$  (Hayes, 1987) και η θερμική αγωγιμότητα  $k = 1.4 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  (Incropera *et al.*, 1996). Για το καπάκι χρησιμοποιήθηκαν οι θερμοφυσικές ιδιότητες του αλουμινίου όπως η πυκνότητα  $\rho = 2719 \text{ kg/m}^3$ , η ειδική θερμότητα  $C_p = 900 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$  και η θερμική αγωγιμότητα  $k = 202.4 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ .

Τέλος για την επίλυση του προβλήματος επιλέχθηκε ως χρονικό βήμα τα 5s (time step) με μέγιστο απόλυτο κριτήριο σύγκλισης  $10^{-6}$ , η συσχέτιση πίεσης-ταχύτητας ορίστηκε SIMPLE, για τη χωρική διακριτοποίηση επιλέχθηκε Gradiend: Least squares cell based, Pressure: Second order, Momentum: 2<sup>nd</sup> order upwind, Energy: 2<sup>nd</sup> order upwind.

Τα δεδομένα των αποτελεσμάτων από κάθε περίπτωση που διερευνήθηκαν στο fluent είχαν τη μορφή αρχείου ASCII, τα οποία μετασχηματίστηκαν και αναλυθήκαν με γλώσσα προγραμματισμού VBA (Visual Basic for Applications) που αναπτύχθηκε στο Excel®.

## 2.10 Υπολογισμός της τιμής $F$ της διεργασίας

Για τον υπολογισμό της τιμής  $F$  της διεργασίας έγινε εισαγωγή, στο περιβάλλον του Fluent, ένα αρχείο κώδικα (User Defined Function, UDF) ο οποίος βασίζεται στην κλασσική θερμοβακτηριολογική προσέγγιση, Εξ. (17), των (Ball and Olson, 1957).

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

Με την Εξ. (17) μπορεί να υπολογιστεί η τιμή  $F$  για κάθε χρονική στιγμή της διεργασίας και για κάθε σημείο που έχουμε ορίσει στο γυάλινο περιέκτη.

Αυτό μας δίνει τη δυνατότητα να υπολογίσουμε τα θερμοκρασιακά δεδομένα στο κρίσιμο σημείο της διεργασίας μας, το οποίο είναι στο καπάκι κοντά στα τοιχώματα. Αυτό συμβαίνει επειδή αρχίζει να ψύχεται νωρίτερα από τα υπόλοιπα σημεία κατά την "πλήρωση εν θερμώ" διεργασία, ενώ το κέντρο του περιέκτη θα είναι το σημείο που θα ψυχθεί τελευταίο. Για να υπολογιστεί η κατάλληλη τιμή της εμπορικής αποστείρωσης για όλο τον περιέκτη χωρίς να υποστεί υπερβολική θερμική επεξεργασία το προϊόν, πρέπει να υπολογίσουμε την ολοκληρωμένη τιμή  $F_s$ .

Για τον υπολογισμό της ολοκληρωμένης τιμής  $F_s$ , χρειάστηκε η εξίσωση να χωριστεί σε δύο μέρη. Αρχικά υπολογίστηκε η τιμή %  $N(t)/N_o$  για κάθε σημείο του τρόφιμου, μέσω της παρακάτω Εξ. (18):

$$\% \frac{N(t)}{N_o} = \frac{N(t)}{N_o} \times 100 = 10^{-\frac{F_{T_{ref}}^z}{D_{T_{ref}}}} \times 100 \quad (18)$$

όπου:

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

$N_o$ : ο αρχικός μικροβιακός πληθυσμός σε κάθε όγκο ελέγχου και

$F_{T_{ref}}^z$ : η τιμή  $F$  σε κάθε όγκο ελέγχου για κάθε χρονική στιγμή,  $t$ .

Το πρόγραμμα μπορεί να υπολογίσει την παραπάνω τιμή για όλο τον όγκο του περιέκτη και να δώσει τη μέση τιμή του όγκου (volume average), οπότε υπολογίζει ουσιαστικά το ολοκλήρωμα της Εξ. (19), που αποτελεί τη μέση % επιβίωση του μικροοργανισμού στόχου σε κάθε χρονική στιγμή της διεργασίας και για όλο τον όγκο του περιέκτη.

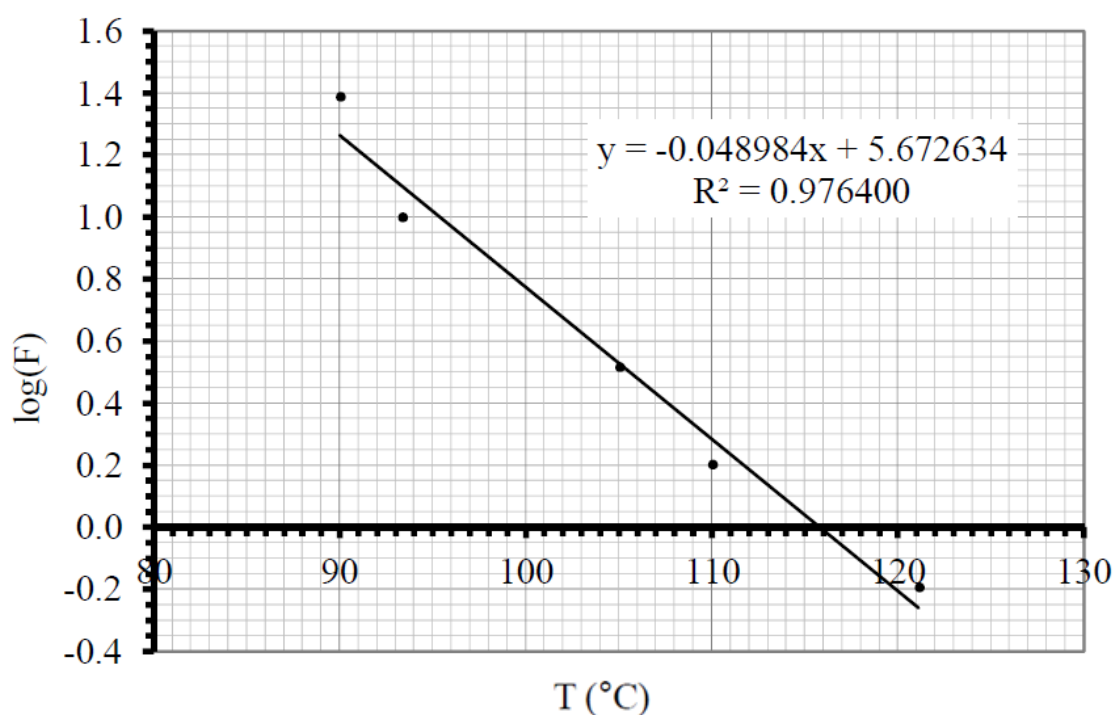
$$\frac{\bar{N}(t)}{N_o} = \frac{1}{V} \int_0^V 10^{-\frac{1}{D_{T_{ref}}} \int_0^t 10^{\frac{T(t)-T_{ref}}{z}} dt} dV \times 100 \quad (19)$$

Αφού υπολογίστηκε η τιμή %  $N(t)/N_o$ , βρέθηκε η ολοκληρωμένη τιμή  $F_s$  με τη χρήση της Εξ. (20) μέσω του Custom Field Function του Fluent:

$$F_s = D_{T_{ref}} \times \log \left( \frac{N_o}{\bar{N}(t)} \right) \quad (20)$$

Σύμφωνα με έρευνες που έγιναν στο παρελθόν, η απαιτούμενη ολοκληρωμένη τιμή  $F_s$  που χρησιμοποιήθηκε στην υπολογιστική προσομοίωση είχε την τιμή ( $F_{93.33^\circ C}^{8.89^\circ C}$ ) = 12.6 min (Μαραγκουδάκης, 2015). Αυτό προκύπτει από το διάγραμμα  $\log(F)$  προς  $T$  στο Σχήμα 20 το οποίο απεικονίζει τις διάφορες τιμές της βιβλιογραφίας όσον

αφορά στην απαιτούμενη τιμή  $F$  για τα προϊόντα τομάτας. Σε άλλες βιβλιογραφικές πηγές η τιμή  $F$  ( $F_{93.33}^{8.89^{\circ}\text{C}}$ ) για προϊόντα τομάτας με pH μεταξύ 4.0 και 4.3 προτείνεται ίση με 5 min και η τιμή αυτή χρησιμοποιείται επίσης στην παρούσα μελέτη (Toledo, 2007; Tucker, 1999). Τέλος, ζητούμενο σε κάθε περίπτωση ήταν να επιτευχθεί η απαιτούμενη τιμή  $F$  στο τέλος κάθε διεργασίας κατά την παραμονή του προϊόντος σε αέρα ή υδατόλουτρο αντίστοιχα, με επακόλουθη ψύξη σε νερό.



Σχήμα 20. Ο λογάριθμος της τιμής  $F$  σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για το *B. Coagulans* (πηγή: Μαραγκουδάκης, 2015).

## 2.11 Υπολογισμός της υποβάθμισης των ποιοτικών παραγόντων

Όπως υπολογίσαμε παραπάνω την απαιτούμενη τιμή  $F_s$ , έτσι με τον ίδιο τρόπο θα υπολογίσουμε την υποβάθμιση των ποιοτικών παραγόντων του τοματοχυμού με βάση την παρακάτω Εξ. (21). Αυτό θα χρειαστεί να εισάγουμε στην UDF την Εξ. (21) και να εφαρμόσουμε την ίδια διαδικασία.

$$C_{T_{\text{ref}}}^z = \int_0^t 10^{\frac{(T(t)-T_{\text{ref}})}{z}} dt \quad (21)$$

Για να μπορέσουμε να παρατηρήσουμε καλύτερα τις μεταβολές του ποιοτικών χαρακτηριστικών κατά τη διεργασία χρησιμοποιήσαμε την Εξ. (22) που την ορίσαμε στην επιλογή custom field functions του Fluent.

$$\% \text{διατήρηση} = \frac{C_t}{C_0} \times 100 = 10^{\frac{C_{T_{ref}}^z}{D_{T_{ref}}}} \times 100 \quad (22)$$

όπου:

$C_t$ : η συγκέντρωση του παράγοντα σε κάθε σημείο χρόνο, t.

$C_0$ : η αρχική συγκέντρωση του παράγοντα σε κάθε σημείο.

$C_{T_{ref}}^z$ : η τιμή C σε κάθε σημείο για χρόνο, t.

Οι παράμετροι που υπολογίστηκαν για τη % διατήρηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών είναι η υποβάθμιση του χρώματος (λόγος  $a/b$  και  $L$ ) και τα θρεπτικά συστατικά, όπως η βιταμίνη C και το Βήτα καροτένιο, που αναφέρονται στον Πίνακα 10 με τις αντίστοιχες τιμές  $D_{T_{ref}}$  και  $z$ .

Πίνακας 10. Παράμετροι των ποιοτικών παραγόντων που χρησιμοποιήθηκαν στη προσομοίωση (Μαραγκουδάκης, 2015).

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

## 2.12 Αξιολόγηση της "πλήρωση εν θερμώ" διεργασίας

Για τη βελτιστοποίηση της "πλήρωση εν θερμώ" διεργασίας εξετάσαμε αρκετές παραμέτρους, με πιο σημαντική να είναι η θερμοκρασία πλήρωσης, η οποία αποτελεί και το πιο κρίσιμο στάδιο της διεργασίας. Στην πρώτη περίπτωση εξετάσαμε την αρχική παραμονή του προϊόντος σε περιβάλλον αέρα  $T_{air} = 25^\circ\text{C}$  με ακολουθούμενη ψύξη σε νερό θερμοκρασίας  $T_{WC} = 20^\circ\text{C}$ . Στις υπόλοιπες περιπτώσεις ακολουθήθηκε παραμονή σε υδατόλουτρο θερμοκρασίας 50, 70 και  $90^\circ\text{C}$  με επακόλουθη ψύξη σε νερό ίδιας θερμοκρασίας με την περίπτωση του αέρα. Ο χρόνος διατήρησης του τοματοχυμού σε αέρα και σε υδατόλουτρο προσδιορίστηκε με δοκιμή και σφάλμα (trial and error) αυξάνοντας ή μειώνοντας κατάλληλα το χρόνο διατήρησης, όπου αυτό ήταν απαραίτητο. Επίσης έγινε υπολογισμός του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας  $h$  σε κάθε μία από αυτές τις περιπτώσεις ώστε το αποτέλεσμα να είναι πιο αξιόπιστο. Σε όλες τις περιπτώσεις εξετάστηκαν οι ολοκληρωμένες τιμές  $F_{93.33^\circ\text{C}}^{8.89^\circ\text{C}} = 12.6 \text{ min}$  και  $F_{93.33^\circ\text{C}}^{8.89^\circ\text{C}} = 5 \text{ min}$  που έπρεπε



να επιτευχθούν. Επίσης διερευνήθηκε η % διατήρηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του τοματοχυμού, οι παράμετροι χρώματος (a/b), L, καροτενοειδών και βιταμίνης C. Στον Πίνακα 11 βλέπουμε συγκεντρωτικά όλες τις παραμέτρους που εισάχθηκαν στην προσομοίωση.

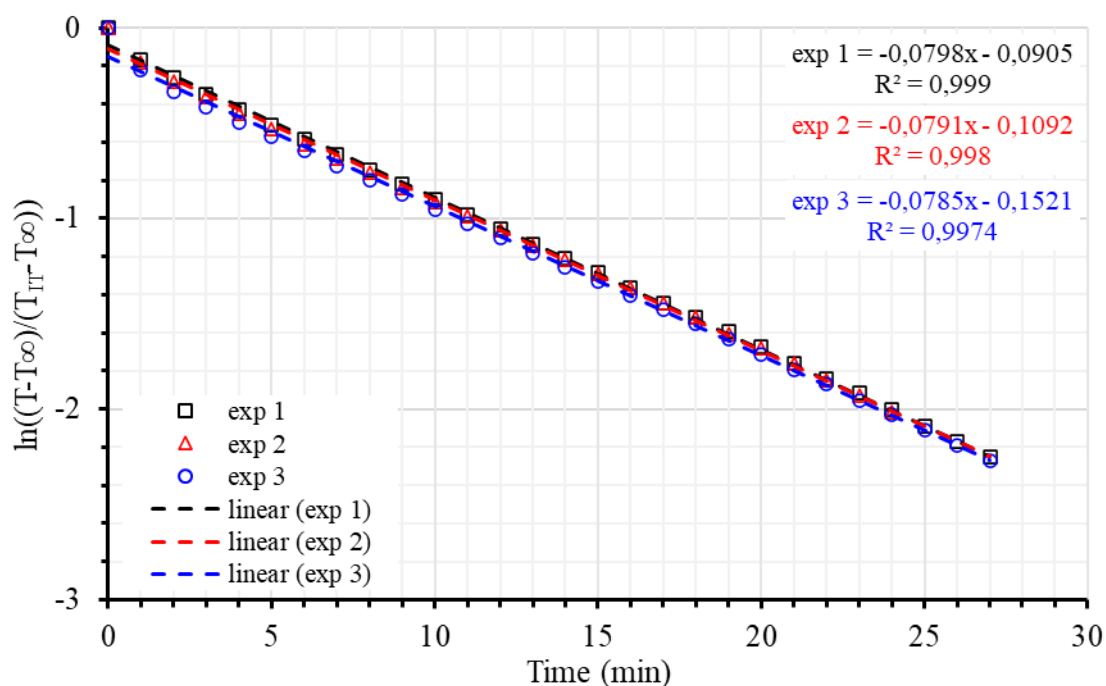
Πίνακας 11. Παράμετροι που εισάχθηκαν στο Fluent για την προσομοίωση.

<b>Παράμετροι</b>	<b>Περιπτώσεις</b>
Θερμοκρασία πλήρωσης, $T_{IT}$	94°C, 96°C, 98°C
Ολοκληρωμένη τιμή $F_s$	$F_{93.33^\circ C}^{8.89^\circ C} = 12.6 \text{ min}$ , $F_{93.33^\circ C}^{8.89^\circ C} = 5 \text{ min}$
Τιμή $z$	$z=8.89^\circ C$
Χρόνος απενεργοποίησης, $D$	$D_{93.33}=6.77 \text{ min}$
Θερμοκρασία ψύξης αέρα, $T_{air}$	25°C
Θερμοκρασία υδατόλουτρου, $T_w$	50°C, 70°C, 90°C
Θερμοκρασία ψύξης νερού, $T_{WC}$	20°C
Ποιοτική παράμετρος χρώματος, a/b	$D_{90}=364.84 \text{ min}$ , $z=85.56^\circ C$
Ποιοτική παράμετρος χρώματος, L	$D_{90}=197.59 \text{ min}$ , $z=51.04^\circ C$
Καροτενοειδή	$D_{90}=1303.84 \text{ min}$ , $z=35.24^\circ C$
Βιταμίνη C	$D_{90}=414.01 \text{ min}$ , $z=76.60^\circ C$

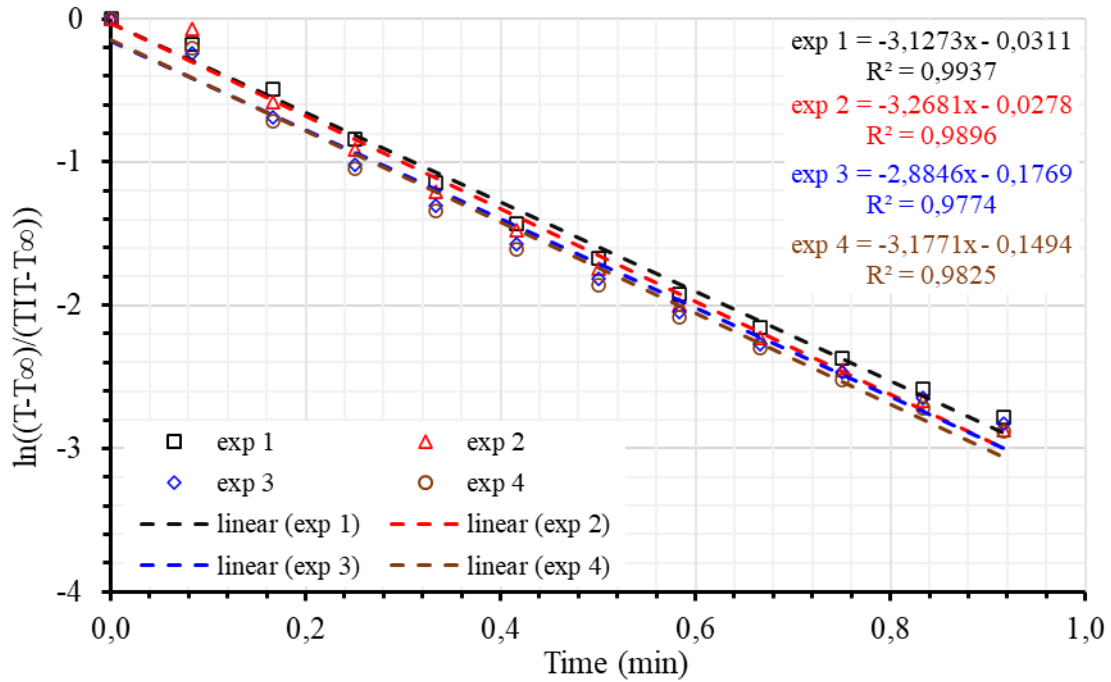
### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

#### 3.1 Υπολογισμός συντελεστή μεταφοράς θερμότητας $h$

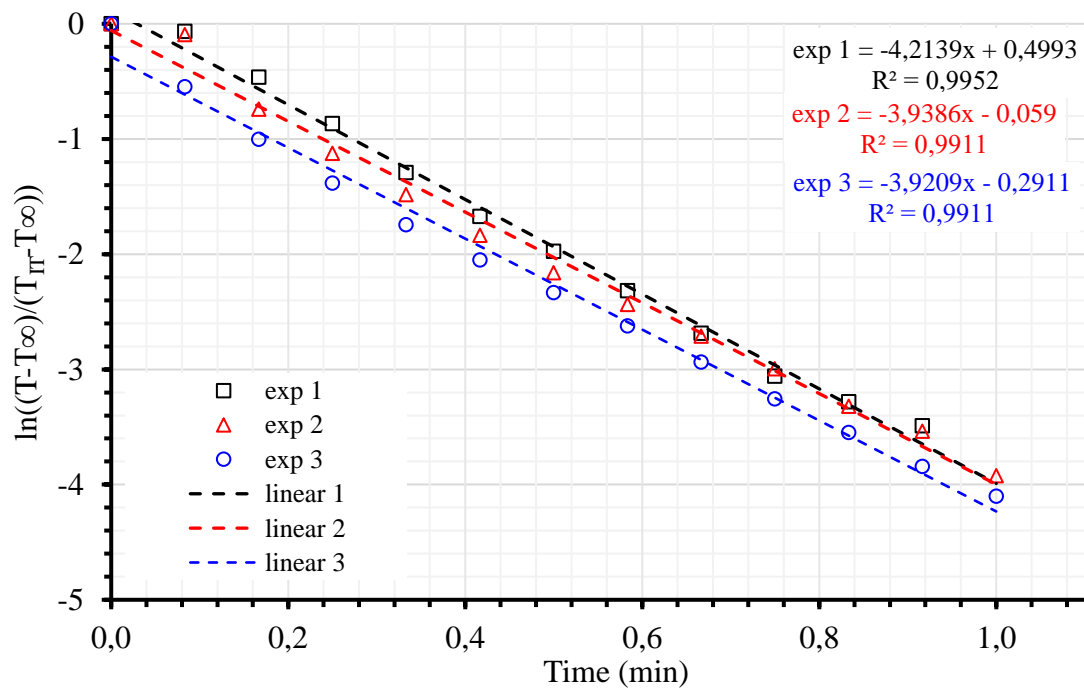
Για τον υπολογισμό του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας σε κάθε περίπτωση έγιναν πειραματικές μετρήσεις με ψύξη του κυλίνδρου σε αέρα και σε υδατόλουτρο. Σύμφωνα με τις γραμμές τάσεων (Σχήμα 21) υπολογίστηκαν οι κλίσεις των ευθειών τριών επαναλήψεων του πειράματος, για ψύξη του κυλίνδρου στον αέρα με  $T_{air} = 25^{\circ}\text{C}$  και βρέθηκε ο μέσος όρος του  $h$ , βάσει της Εξ. (14) ίσος προς  $h_{air} = 11.43 \pm 0.10 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ . Με τον ίδιο τρόπο υπολογίστηκαν και οι επόμενες περιπτώσεις για υδατόλουτρο θερμοκρασίας 20, 50 και  $70^{\circ}\text{C}$  όπως φαίνεται και στα Σχήματα (22, 23 και 24). Οι τιμές του επιφανειακού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας για ψύξη σε υδατόλουτρο θερμοκρασίας  $T_W = 20^{\circ}\text{C}$  ήταν ίση προς  $h_{WC} = 450.2 \pm 12.1 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ , για  $T_W = 50^{\circ}\text{C}$  ίση προς  $h_W = 596.8 \pm 32.4 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ , για  $T_W = 70^{\circ}\text{C}$  ίση προς  $h_W = 801.6 \pm 17.1 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  και σε υδατόλουτρο θερμοκρασίας  $T_W = 90^{\circ}\text{C}$  ίση προς  $h_W = 1103.5 \pm 18.5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  (Πίνακας 12).



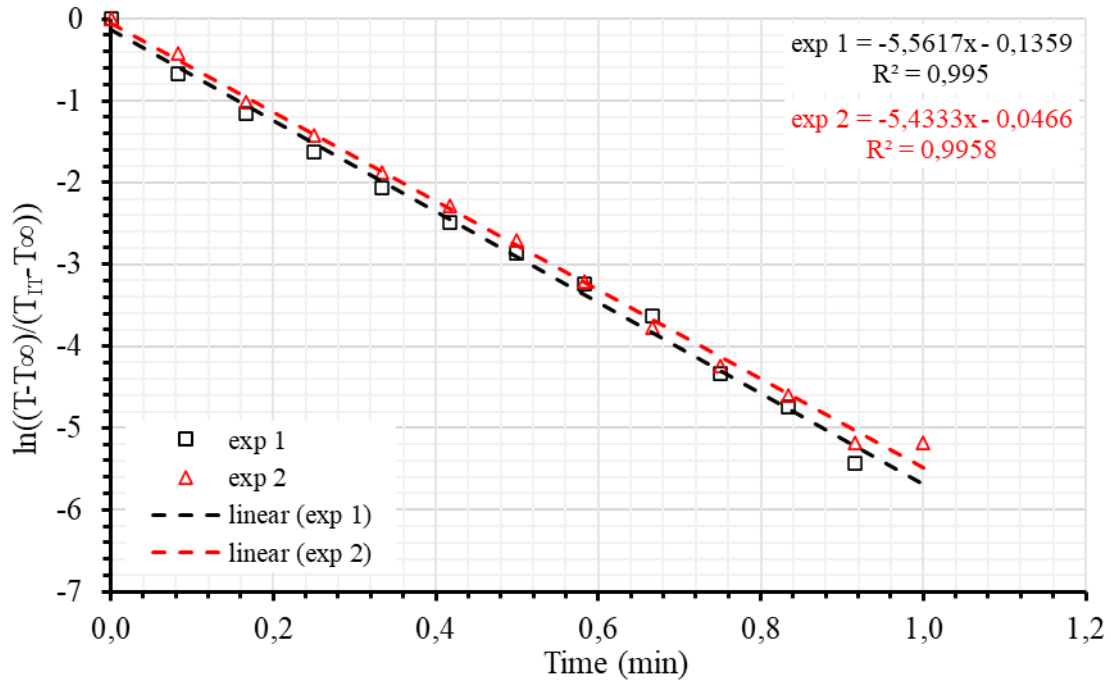
Σχήμα 21. Υπολογισμός του επιφανειακού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας κατά τη ψύξη σε αέρα θερμοκρασίας  $T_{air} = 25^{\circ}\text{C}$  (3 επαναλήψεις, exp 1 exp 2 και exp 3).



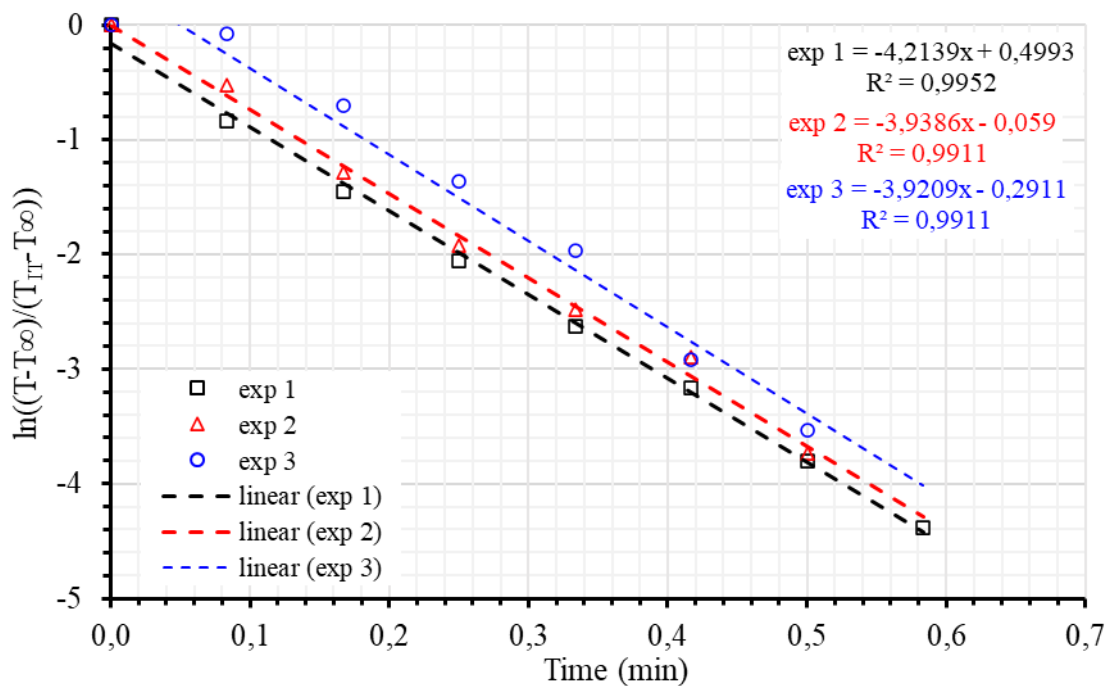
Σχήμα 22. Υπολογισμός του επιφανειακού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας κατά τη ψύξη σε υδατόλουτρο θερμοκρασίας  $T_W = 20^\circ\text{C}$  (4 επαναλήψεις, exp 1 exp 2 exp 3 και exp 4).



Σχήμα 23. Υπολογισμός του επιφανειακού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας κατά τη ψύξη σε υδατόλουτρο θερμοκρασίας  $T_W = 50^\circ\text{C}$  (3 επαναλήψεις, exp 1 exp 2 και exp 3).



Σχήμα 24. Υπολογισμός του επιφανειακού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας κατά τη ψύξη σε υδατόλουτρο θερμοκρασίας  $T_W = 70^\circ\text{C}$  (2 επαναλήψεις, exp 1 και exp 2).



Σχήμα 25. Υπολογισμός του επιφανειακού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας κατά τη ψύξη σε υδατόλουτρο θερμοκρασίας  $T_W = 90^\circ\text{C}$  (3 επαναλήψεις, exp 1 exp 2 και exp 3).

Πίνακας 12. Τιμές του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας,  $h$ .

<b>Μέσο</b>	<b><math>h</math> (W/(m<sup>2</sup>·K))</b>
Αέρας	11.43
Υδατόλουτρο 20°C	450.2
Υδατόλουτρο 50°C	596.8
Υδατόλουτρο 70°C	801.6
Υδατόλουτρο 90°C	1103.5

### 3.2 Αξιολόγηση ποιότητας πλέγματος

Όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο κατά το σχεδιασμό της γεωμετρίας του γυάλινου περιέκτη και τη δημιουργία του πλέγματος έγινε η μέτρηση των παραμέτρων της ορθογωνικής ποιότητας και της στρέβλωσης όλων των κελιών. Στον Πίνακα 13 φαίνεται ότι τα περισσότερα κελιά σε κάθε πλέγμα έχουν ορθογωνική ποιότητα από 0.75 έως 1, δηλαδή πολύ καλή ή εξαιρετική ποιότητα με μέσο όρο 0.81. Αντίστοιχα στον Πίνακα 14 τα περισσότερα κελιά έχουν πολύ καλή έως εξαιρετική ποιότητά με τιμή στρέβλωσης από 0 έως 0.25, με μέσο όρο 0.21.

Πίνακας 13. Κατανομή κελιών με βάση τις τιμές ορθογωνικότητας για τα πέντε πλέγματα

<b>Περιπτώσεις</b>	<b>Τιμές ορθογωνικότητας</b>		
	01-0.25	0.25-0.75	0.75-1
<b>Αριθμός κελιών</b>			
<b>Case A</b>	247	61 450	431 877
<b>Case B</b>	433	107 869	758 118
<b>Case C</b>	1 693	151 759	1 055 780
<b>Case D</b>	3 219	254 093	1 436 644
<b>Case E</b>	2 605	351 836	1 619 059

Πίνακας 14. Κατανομή κελιών με βάση τις τιμές στρέβλωσης για τα πέντε πλέγματα.

<b>Περιπτώσεις</b>	<b>Τιμές στρέβλωσης</b>		
	0-0.25	0.25-0.63	0.63-0.92
<b>Αριθμός κελιών</b>			
<b>Case A</b>	403 744	87 989	1 841
<b>Case B</b>	720 862	144 692	866
<b>Case C</b>	1 021 196	185 617	2 418
<b>Case D</b>	1 419 366	271 067	3 523
<b>Case E</b>	1 617 481	353 710	2 309

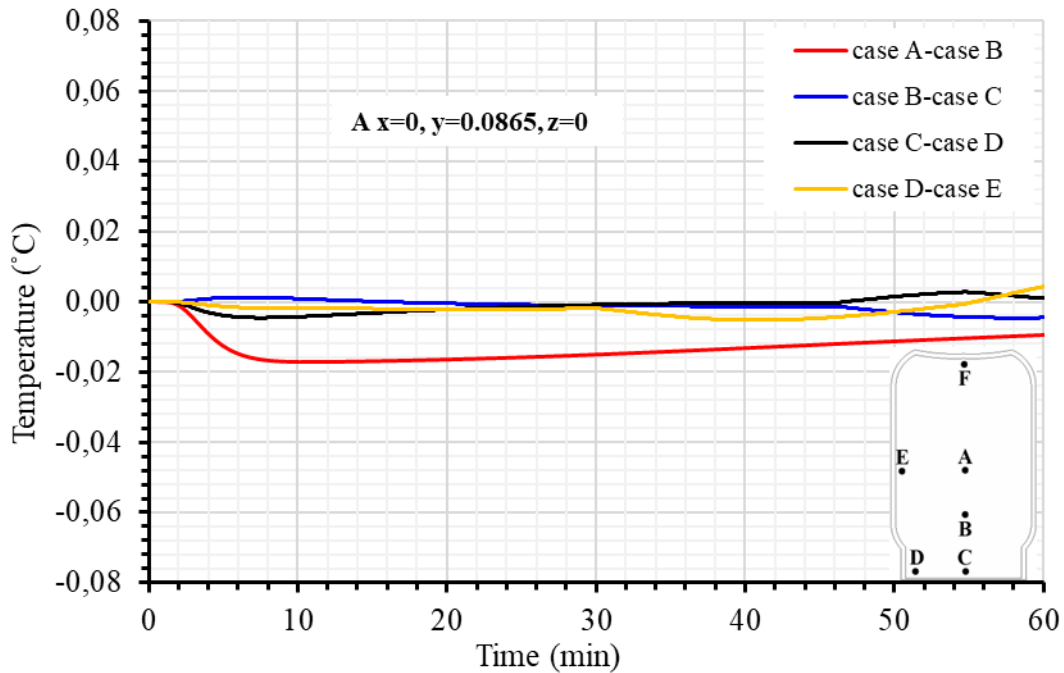
### 3.3 Ανεξαρτησία πλέγματος

Για τη σύγκριση της αριθμητικής λύσης μεταξύ των πέντε πλεγμάτων υπολογίστηκε η διαφορά θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου διαδοχικά όσον αφορά τον αριθμό των κελιών σε έξι διαφορετικά σημεία. Στο Πίνακα 15 παρουσιάζονται οι τιμές της μέσης τιμής της τετραγωνικής ρίζας του σφάλματος (RMSE) για όλους τους συνδυασμούς που έγιναν. Επίσης βλέπουμε ότι όσο αυξάνεται η πυκνότητα του πλέγματος αυξάνεται η ακρίβεια της αριθμητικής λύσης. Όταν έγινε η σύγκριση της περίπτωσης C είτε με τη περίπτωση B είτε με τη περίπτωση D, παρατηρήθηκε μικρότερη τιμή RMSE, ενώ όταν έγινε σύγκριση με τη περίπτωση A παρατηρήθηκε μεγαλύτερη τιμή RMSE. Όσο αυξανόταν η πυκνότητα του πλέγματος ο απαιτούμενος υπολογιστικός χρόνος ήταν μεγαλύτερος. Με βάση τα παραπάνω, το πλέγμα που επιλέχτηκε για την επίλυση του προβλήματος κατά την προσομοίωση του στο CFD είναι το Case C, με αριθμό κελιών 1 209 232.

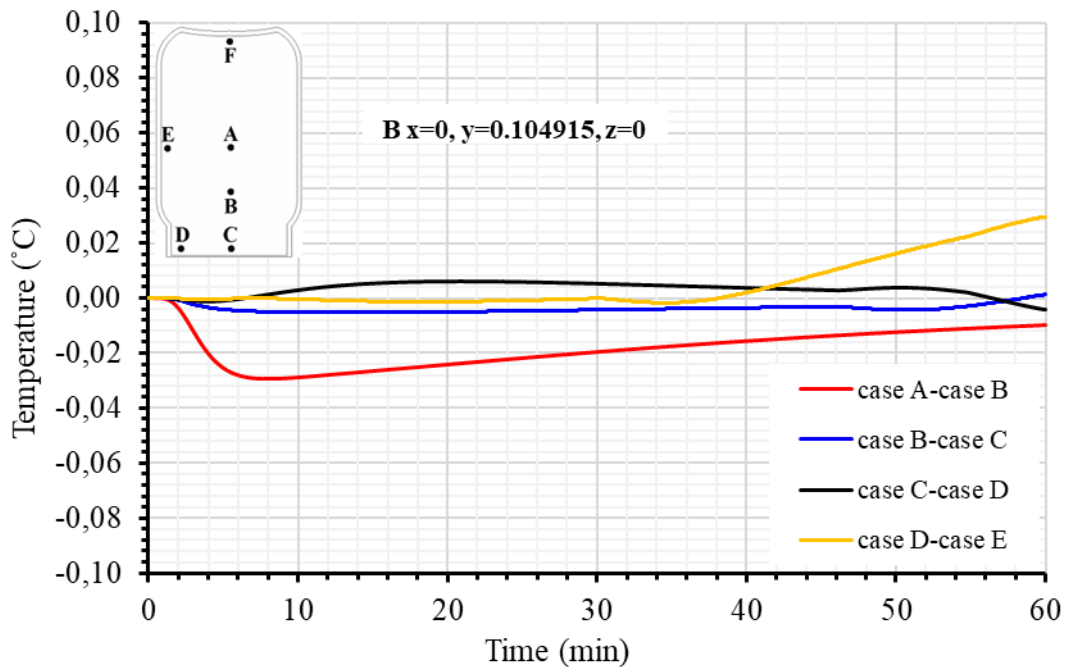
Πίνακας 15. Το μέσο τετράγωνο του σφάλματος (RMSE) μεταξύ των πλεγμάτων για τα διαφορά σημεία (A, B, C, D, E,F).

Περιπτώσεις	Σημεία					
	A	B	C	D	E	F
Case A - Case B	0.0137	0.0197	0.0128	0.0471	0.0369	0.0528
Case B - Case C	0.0020	0.0041	0.0207	0.0247	0.0162	0.0151
Case C - Case D	0.0022	0.0040	0.0224	0.0639	0.0307	0.0379
Case D - Case E	0.0029	0.0104	0.0620	0.0650	0.0344	0.0141

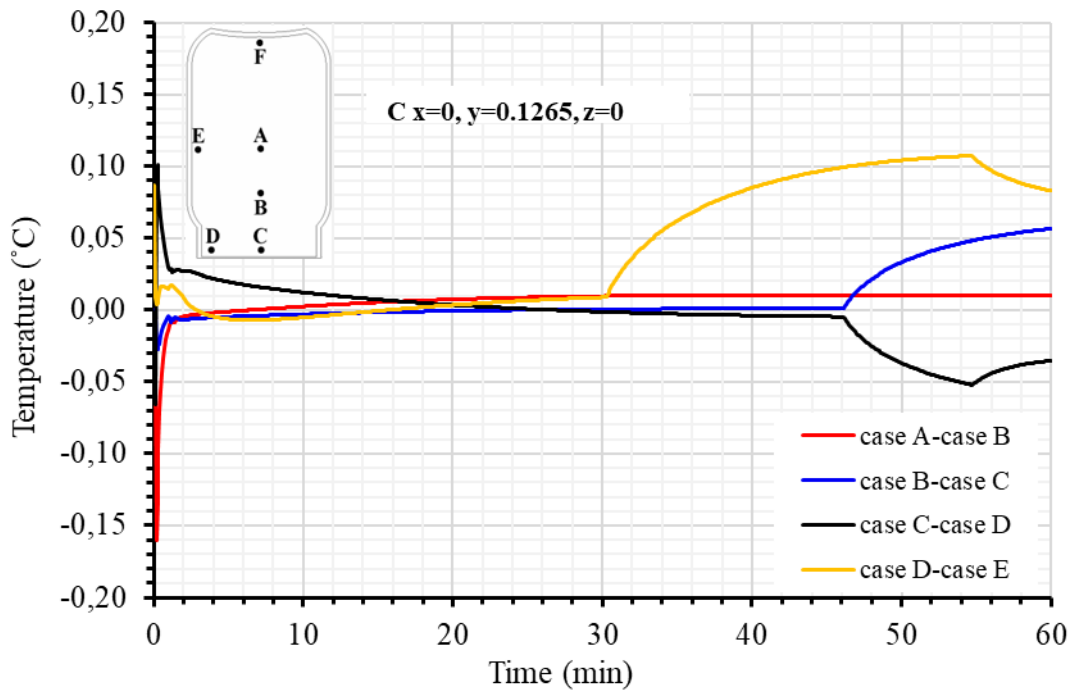
Στα σχήματα (26-31) που ακολουθούν φαίνεται η επίδραση της μεταβολής της πυκνότητας του πλέγματος στα έξι σημεία του γυάλινου περιέκτη A, B, C, D, E και F. Για τα σημεία A, C, D, E και F (Σχήματα 26, 28, 29, 30, 31) έχουμε το μικρότερο σφάλμα της σύγκρισης των πλεγμάτων Case B - Case C. Στη σύγκριση Case A - Case B, που είναι και τα αραιότερα πλέγματα, φαίνεται η μεγαλύτερη διαφορά στα θερμοκρασιακά δεδομένα, με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγαλύτερο σφάλμα. Σε όλες τις περιπτώσεις παρατηρείται ότι το σημείο D έχει μεγαλύτερο σφάλμα, ενώ η μικρότερη τιμή παρατηρείται στο σημείο A της περίπτωσης Case B - Case C.



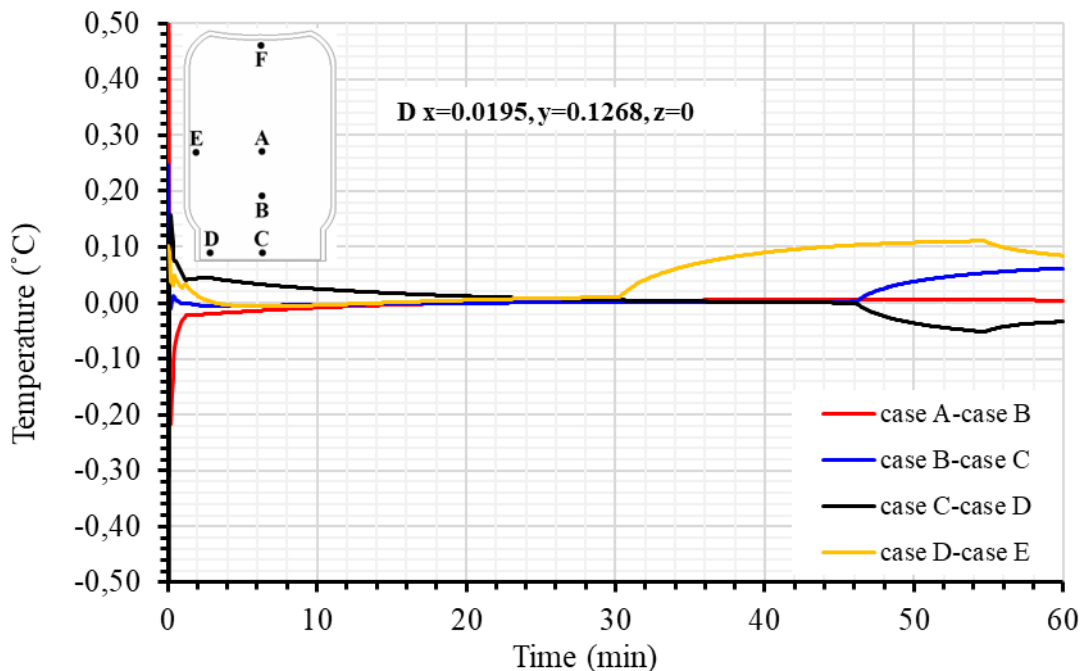
Σχήμα 26. Διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των προβλέψεων περιπτώσεων πλεγμάτων διαδοχικής αύξησης του αριθμού των κελιών (π.χ., case A-case B, case B-case C, κλπ) στο σημείο A του προϊόντος για τα πέντε διαφορετικά πλέγματα που εξετάστηκαν. Χρονικό βήμα 5s,  $T_{IT} = 93,2^{\circ}\text{C}$  και  $T_{air} = 25^{\circ}\text{C}$ .



Σχήμα 27. Διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των προβλέψεων περιπτώσεων πλεγμάτων διαδοχικής αύξησης του αριθμού των κελιών (π.χ., case A-case B, case B-case C, κλπ) στο σημείο B του προϊόντος για τα πέντε διαφορετικά πλέγματα που εξετάστηκαν. Χρονικό βήμα 5s,  $T_{IT} = 93,2^{\circ}\text{C}$  και  $T_{air} = 25^{\circ}\text{C}$ .

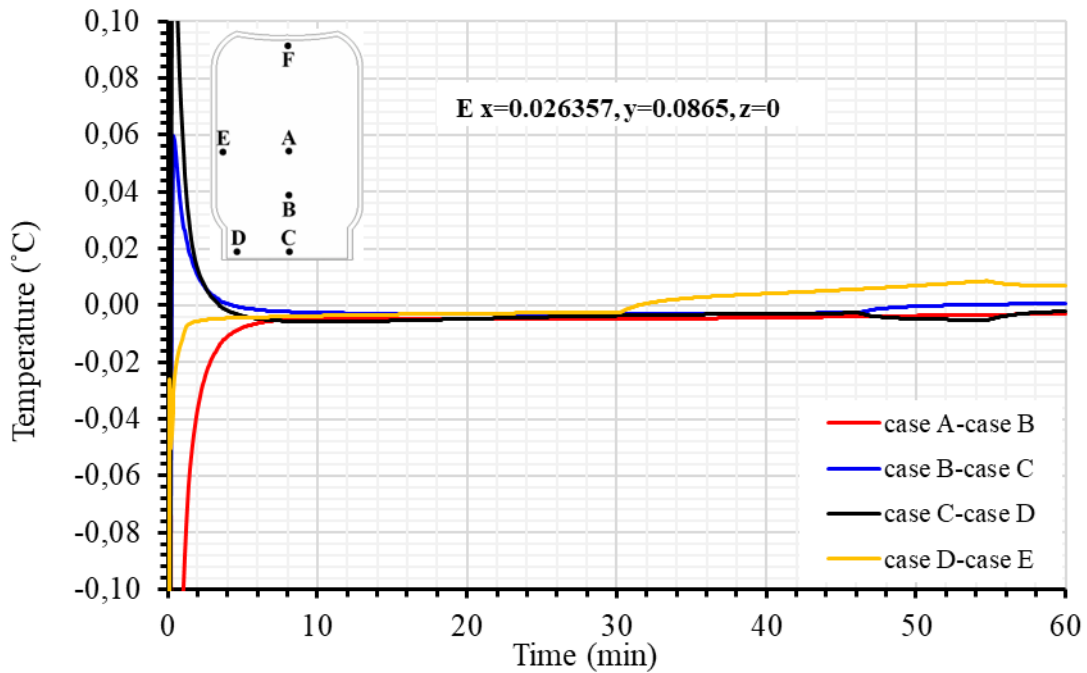


Σχήμα 28. Διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των προβλέψεων περιπτώσεων πλεγμάτων διαδοχικής αύξησης του αριθμού των κελιών (π.χ., case A-case B, case B-case C, κλπ) στο σημείο C του προϊόντος για τα πέντε διαφορετικά πλέγματα που εξετάστηκαν. Χρονικό βήμα 5s,  $T_{IT} = 93,2^{\circ}\text{C}$  και  $T_{air} = 25^{\circ}\text{C}$ .

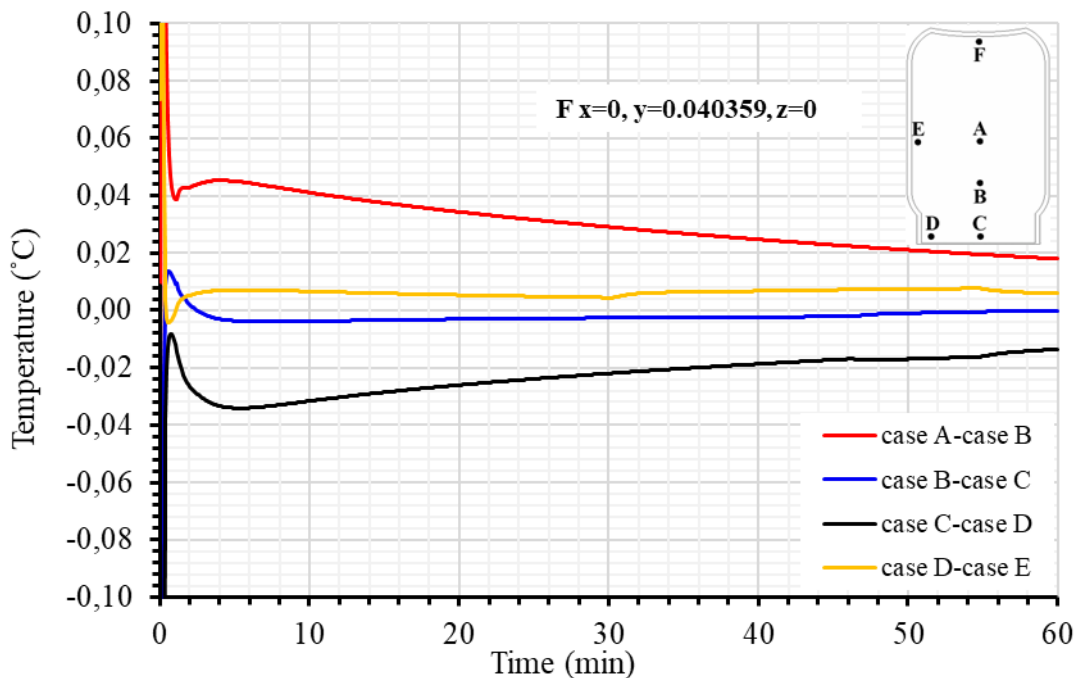


Σχήμα 29. Διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των προβλέψεων περιπτώσεων πλεγμάτων διαδοχικής αύξησης του αριθμού των κελιών (π.χ., case A-case B, case B-case C, κλπ) στο σημείο D του προϊόντος για τα πέντε διαφορετικά πλέγματα που εξετάστηκαν. Χρονικό βήμα 5s,  $T_{IT} = 93,2^{\circ}\text{C}$  και  $T_{air} = 25^{\circ}\text{C}$ .





Σχήμα 30. Διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των προβλέψεων περιπτώσεων πλεγμάτων διαδοχικής αύξησης του αριθμού των κελιών (π.χ., case A-case B, case B-case C, κλπ) στο σημείο E του προϊόντος για τα πέντε διαφορετικά πλέγματα που εξετάστηκαν. Χρονικό βήμα 5s,  $T_{IT} = 93,2^{\circ}\text{C}$  και  $T_{air} = 25^{\circ}\text{C}$ .

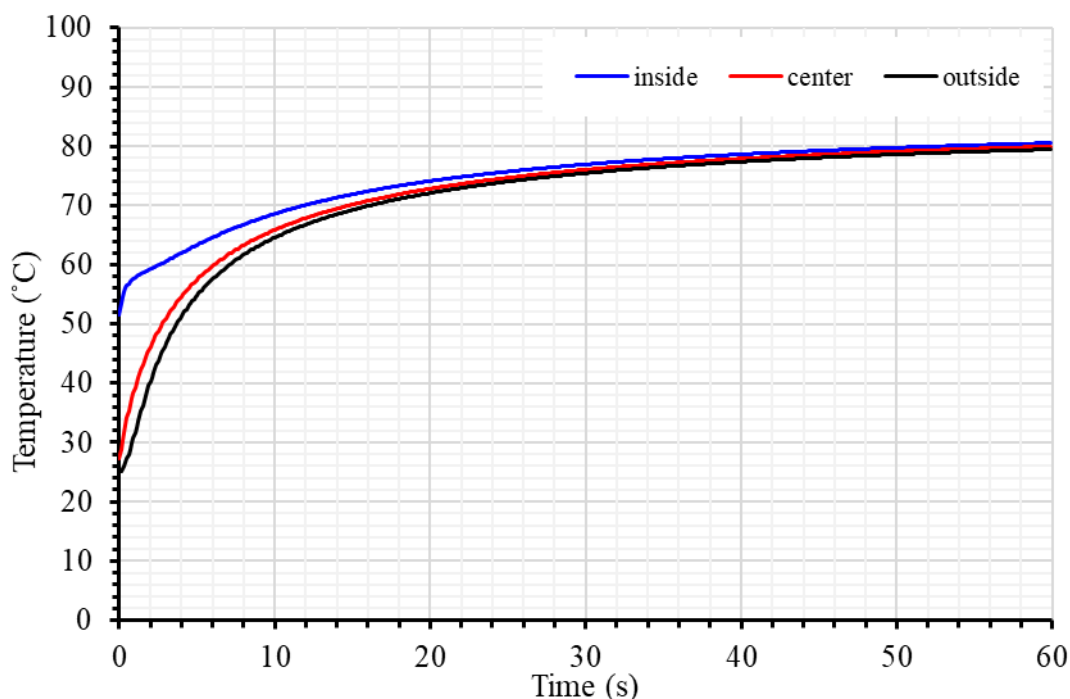


Σχήμα 31. Διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των προβλέψεων περιπτώσεων πλεγμάτων διαδοχικής αύξησης του αριθμού των κελιών (π.χ., case A-case B, case B-case C, κλπ) στο σημείο F του προϊόντος για τα πέντε διαφορετικά πλέγματα που εξετάστηκαν. Χρονικό βήμα 5s,  $T_{IT} = 93,2^{\circ}\text{C}$  και  $T_{air} = 25^{\circ}\text{C}$ .

### 3.4 Διερεύνηση αρχικής θερμοκρασίας τοιχωμάτων

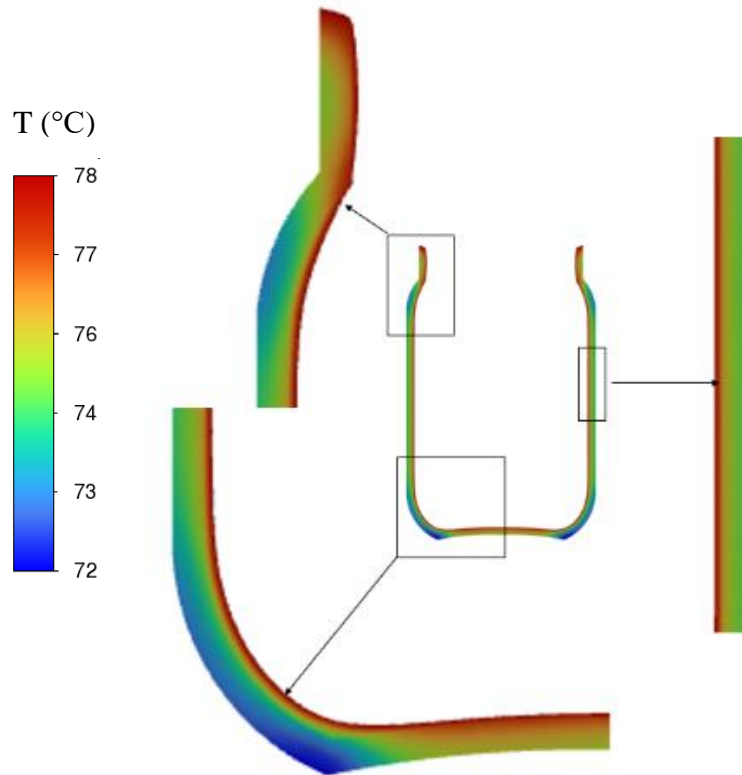
Μετά τον σχεδιασμό της γεωμετρίας, τη δημιουργία των πλεγμάτων και την επιλογή των οριακών συνθηκών της προσομοίωσης, έγινε διερεύνηση της αρχικής θερμοκρασίας των τοιχωμάτων του γυάλινου περιέκτη ώστε να ορίσουμε αυτή την παράμετρο κατά την εκκίνηση της επίλυσης.

Στο Σχήμα 32 παρατηρούμε την εξέλιξη της θερμοκρασίας στα τοιχώματα, στα σημεία που ορίστηκαν στο πλάγιο μέρος (κορμό) του γυάλινου περιέκτη, για τα πρώτα 60 sec της διεργασίας. Τα σημεία που επιλέχθηκαν είναι στο A (0.0297, 0.07958, 0) εσωτερικό (inside), B (-0.028, 0.07958, 0) μέσο (center) και C (-0.029, 0.07958, 0) εξωτερικό (outside) του τοιχώματος του γυάλινου περιέκτη κατά την ψύξη του στον αέρα. Η θερμοκρασία πλήρωσης τοματοχυμού ήταν  $T_{IT} = 98^{\circ}\text{C}$  και η θερμοκρασία του αέρα  $T_{air} = 25^{\circ}\text{C}$  με  $h_{air} = 11.43 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ . Το τοίχωμα του περιέκτη φαίνεται να θερμαίνεται στο εσωτερικό του από τη θερμότητα του τοματοχυμού και στα 60 sec καταγράφεται θερμοκρασία περίπου  $80^{\circ}\text{C}$  σε όλο το πάχος του τοιχώματος. Ως μια συντηρητική εκδοχή ορίστηκε η αρχική θερμοκρασία του τοιχώματος για όλες τις περιπτώσεις στους  $25^{\circ}\text{C}$  και ο χρόνος παραμονής μετρείτο από τη χρονική στιγμή του γεμίσματος.



Σχήμα 32. Εξέλιξη της θερμοκρασίας στο εσωτερικό, μέσο και εξωτερικό σημείο του τοιχώματος του γυάλινου περιέκτη κατά την παραμονή του στον αέρα, για θερμοκρασία πλήρωσης τοματοχυμού  $T_{IT} = 98^{\circ}\text{C}$ , θερμοκρασία αέρα  $T_{air} = 25^{\circ}\text{C}$  και  $h_{air} = 11.43 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ .

Στο Σχήμα 33 εικονίζεται η χρωματική κατανομή της θερμοκρασίας του περιέκτη από το εξωτερικό του τοιχώματος και τις πιο χαμηλές θερμοκρασίες (μπλε χρώμα) προς το εσωτερικό και τις πιο υψηλές θερμοκρασίες (κόκκινο χρώμα).



Σχήμα 33. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας στα τοιχώματα του γυάλινου περιέκτη κατά την παραμονή του στον αέρα, για θερμοκρασία πλήρωσης τοματοχυμού  $T_{IT} = 98^{\circ}\text{C}$ , θερμοκρασία αέρα  $T_{air} = 25^{\circ}\text{C}$  και  $h_{air} = 11.43 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ .

### 3.5 Σύγκριση πειραματικών και προβλεπόμενων αποτελεσμάτων

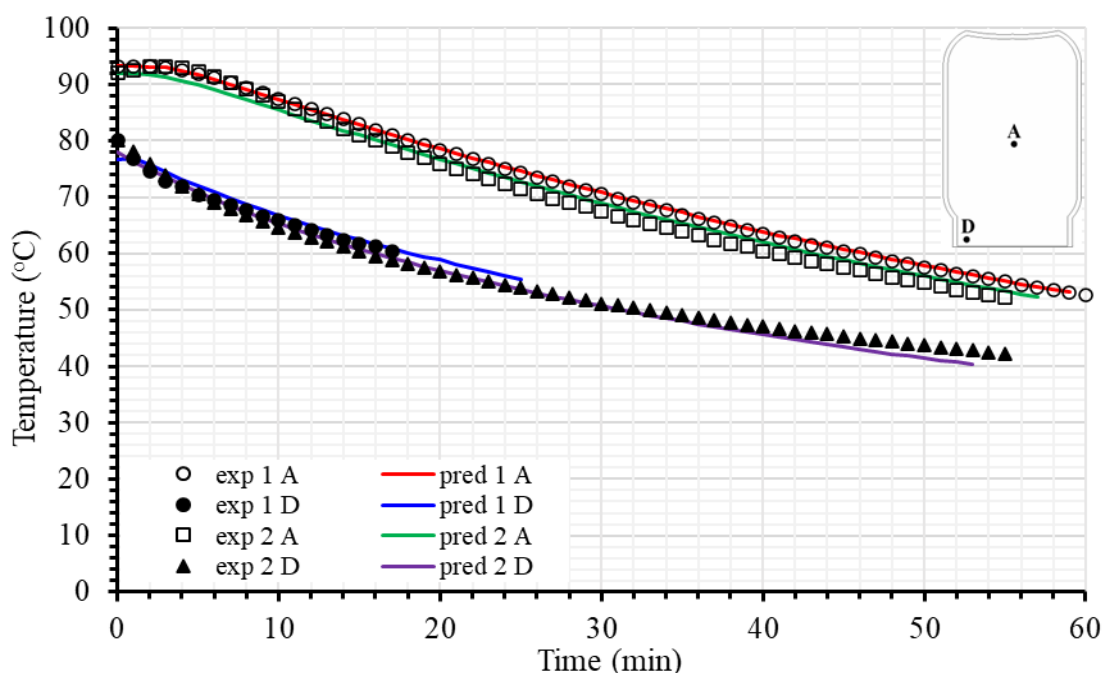
Σύμφωνα με την πειραματική διαδικασία και την επίλυση του μοντέλου έγινε σύγκριση των πειραματικών και των προβλεπόμενων αποτελεσμάτων.

Στο Σχήμα 34 παρουσιάζονται οι 2 επαναλήψεις του πειράματος (exp 1, exp2) με αρχική θερμοκρασία πλήρωσης του τοματοχυμού  $T_{IT} = 93.2^{\circ}\text{C}$  για την πρώτη περίπτωση και  $T_{IT} = 92^{\circ}\text{C}$  για τη δεύτερη. Η μέση θερμοκρασία ψύξης του αέρα ήταν  $T_{air} = 23.4^{\circ}\text{C}$  και  $T_{air} = 20.4^{\circ}\text{C}$  αντίστοιχα. Οι μετρήσεις λήφθηκαν για το κέντρο του τοματοχυμού A (0, 0.0865, 0) και για το καπάκι του περιέκτη D (0.0195, 0.1268, 0).

Ομοίως, στο Σχήμα 35 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πειράματος της "πλήρωση εν θερμώ" διεργασίας σε υδατόλουτρο μέσης θερμοκρασίας  $50^{\circ}\text{C}$  και για θερμοκρασία πλήρωσης  $T_{IT} = 93.2^{\circ}\text{C}$ . Όπως το πρώτο πείραμα επαναλήφθηκε 2 φορές η

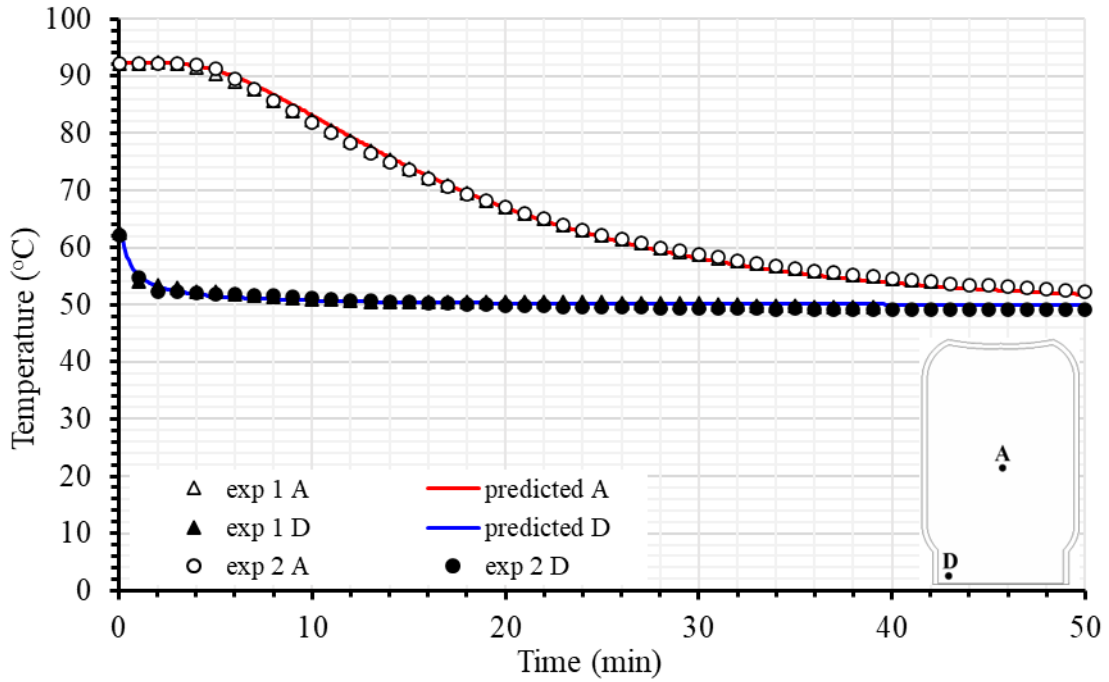
ίδια διαδικασία για τη λήψη θερμοκρασιακών δεδομένων στο κέντρο του τοματοχυμού και στο καπάκι του περιέκτη.

Παρατηρούμε (Σχήματα 34 και 35) ότι πρακτικά υπάρχει ταύτιση των πειραματικών και των προβλεπόμενων αποτελεσμάτων με πολύ μικρό σφάλμα, με αποτελέσματα την επιβεβαίωση του μοντέλου.

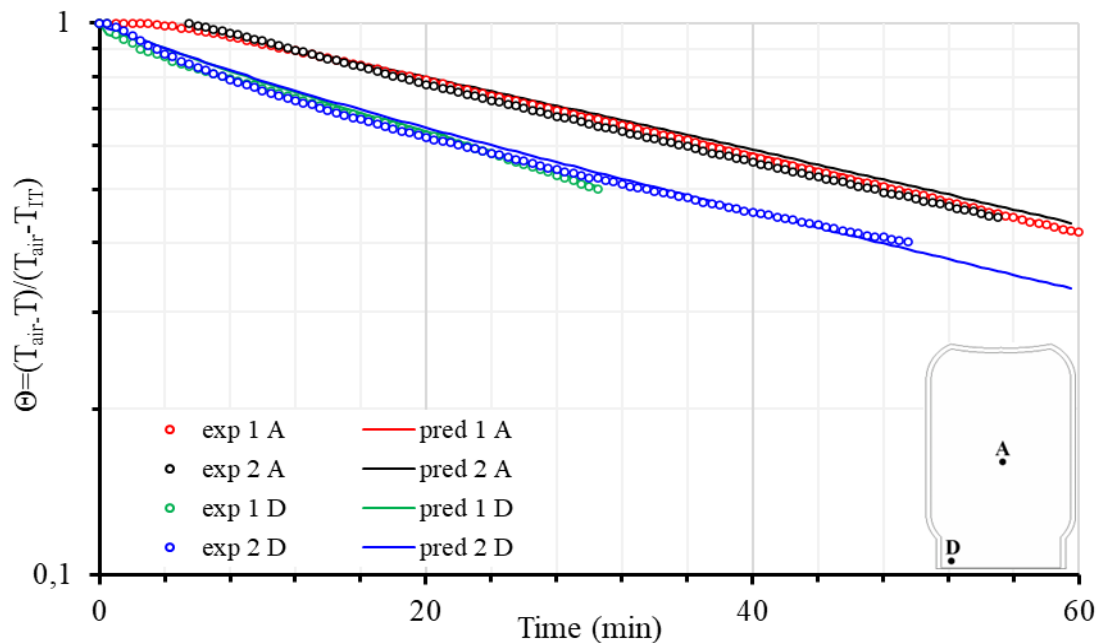


Σχήμα 34. Σύγκριση πειραματικών (σημεία) και προβλεπόμενων (γραμμές) θερμοκρασιών (2 επαναλήψεις), κατά την παραμονή του προϊόντος στον αέρα, στο κέντρο του τοματοχυμού (A) και το καπάκι του περιέκτη (D). Για την πρώτη επανάληψη (exp 1)  $T_{IT} = 93.2^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{air} = 23.4^{\circ}\text{C}$  και για τη δεύτερη επανάληψη (exp 2)  $T_{IT} = 92^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{air} = 20.4^{\circ}\text{C}$ .

Στο Σχήμα 36 συγκρίνονται πειραματικές και προβλεπόμενες κανονικοποιημένες θερμοκρασίες κατά την παραμονή του προϊόντος στον αέρα. Για την κανονικοποιημένη θερμοκρασία, ή αλλιώς  $\theta$ , ισχύει η σχέση  $\theta = (T_{RT} - T)/(T_{RT} - T_{IT})$ , όπου  $T$  η θερμοκρασία του τοματοχυμού,  $T_{IT}$  η θερμοκρασία πλήρωσης και  $T_{RT}$  η θερμοκρασία του αέρα. Χρησιμοποιώντας κανονικοποιημένες θερμοκρασίες, δεδομένα από διεργασίες με διαφορετικές θερμοκρασίες  $T_{IT}$  και  $T_{RT}$  μπορούν να συγκριθούν άμεσα, και όπως φαίνεται στο Σχήμα 36 οι κανονικοποιημένες θερμοκρασίες πρακτικά ταυτίζονται για κάθε ένα από τα δύο σημεία (A και D) που εξετάστηκαν.



Σχήμα 35. Σύγκριση πειραματικών (σημεία) και προβλεπόμενων (γραμμές) θερμοκρασιών (2 επαναλήψεις, exp 1 και exp 2), κατά την παραμονή του προϊόντος σε υδατόλουτρο θερμοκρασίας 50°C, στο κέντρο του τοματοχυμού (A) και το καπάκι του περιέκτη (D). Θερμοκρασία πλήρωσης TIT = 93.2°C.



Σχήμα 36. Σύγκριση πειραματικών (σημεία) και προβλεπόμενων (γραμμές) κανονικοποιημένων θερμοκρασιών (2 επαναλήψεις), κατά την παραμονή του προϊόντος στον αέρα, στο κέντρο του τοματοχυμού (A) και το καπάκι του περιέκτη (D). Για την πρώτη επανάληψη (exp 1) TIT = 93.2°C, Tair = 23.4°C και για τη δεύτερη επανάληψη (exp 2) TIT = 92°C, Tair = 20.4°C.

### 3.6 Επίλυση της "πλήρωση εν θερμώ" διεργασίας

Αφού έγινε ο σχεδιασμός της προσομοίωσης και εφόσον επιβεβαιώθηκε το μοντέλο, ήταν εφικτό να προχωρήσουμε περαιτέρω στη διερεύνηση της διεργασίας "πλήρωση εν θερμώ". Διερευνήσαμε διαφορετικές θερμοκρασίες πλήρωσης 94, 96 και 98°C με παραμονή στον αέρα και σε υδατόλουτρο θερμοκρασίας 50, 70 και 90°C χωρίς να επακόλουθη ψύξη σε νερό με στόχο, σε αυτό το στάδιο της μελέτης, να βρεθούν οι συνθήκες που οδηγούν στην επίτευξη της ολοκληρωμένης τιμής  $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 5 \text{ min}$  και  $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 12.6 \text{ min}$ .

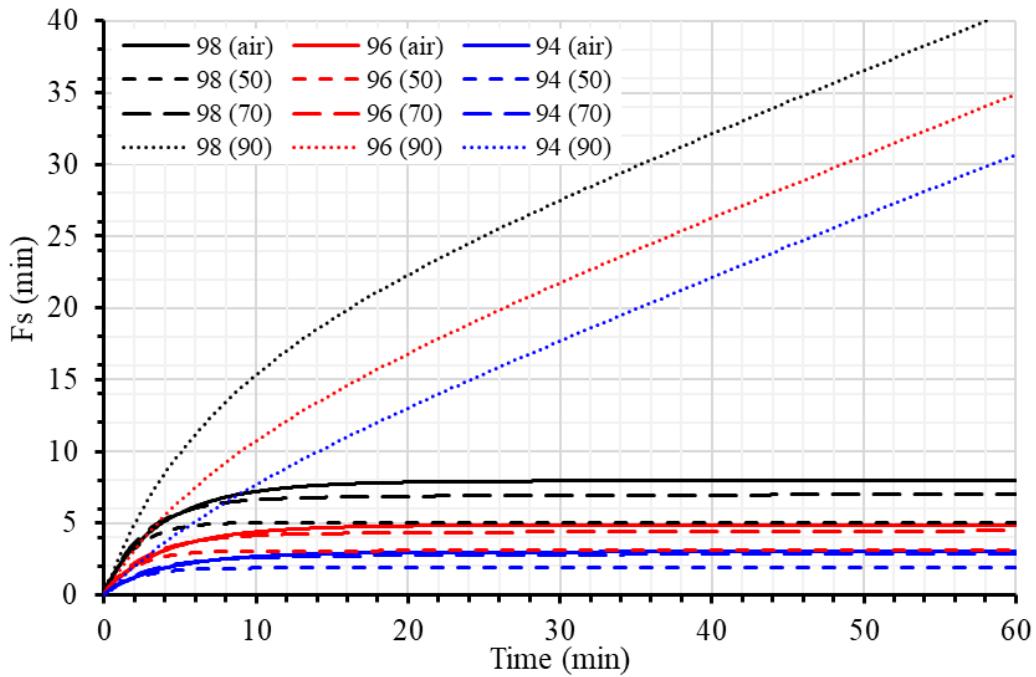
Με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων (Σχήμα 37), βρέθηκε ότι η τιμή  $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}}$  των 5 min επετεύχθη για 6 συνδυασμούς θερμοκρασιών πλήρωσης και παραμονής. Συγκεκριμένα, για την περίπτωση θερμοκρασίας πλήρωσης 98°C και παραμονή στον αέρα, για 3 περιπτώσεις για θερμοκρασία πλήρωσης 98°C και παραμονή σε υδατόλουτρο 50°C, 70°C και 90°C, και 2 περιπτώσεις για θερμοκρασία πλήρωσης 94°C και 96°C και παραμονή σε υδατόλουτρο 90°C. Για την τιμή  $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 12.6 \text{ min}$  θα εξεταστούν 3 περιπτώσεις αρχικής θερμοκρασίας 94, 96 και 98°C σε υδατόλουτρο 90°C. Σε όλες τις περιπτώσεις θα ακολουθηθεί ψύξη σε νερό  $T_{WC} = 20^{\circ}\text{C}$ . Στο Σχήμα 38 παρατηρήσαμε την εξέλιξη της μέσης θερμοκρασίας για όλες τις περιπτώσεις της διεργασίας για χρόνο 60 min.

Στα παρακάτω στάδια της μελέτης θα διερευνήσουμε την εξέλιξη της θερμοκρασίας σε διάφορα σημεία του τοματοχυμού, την κατανομή των τιμών  $F$ , την ολοκληρωμένη τιμή  $F_s$  και τη διατήρηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του τοματοχυμού.

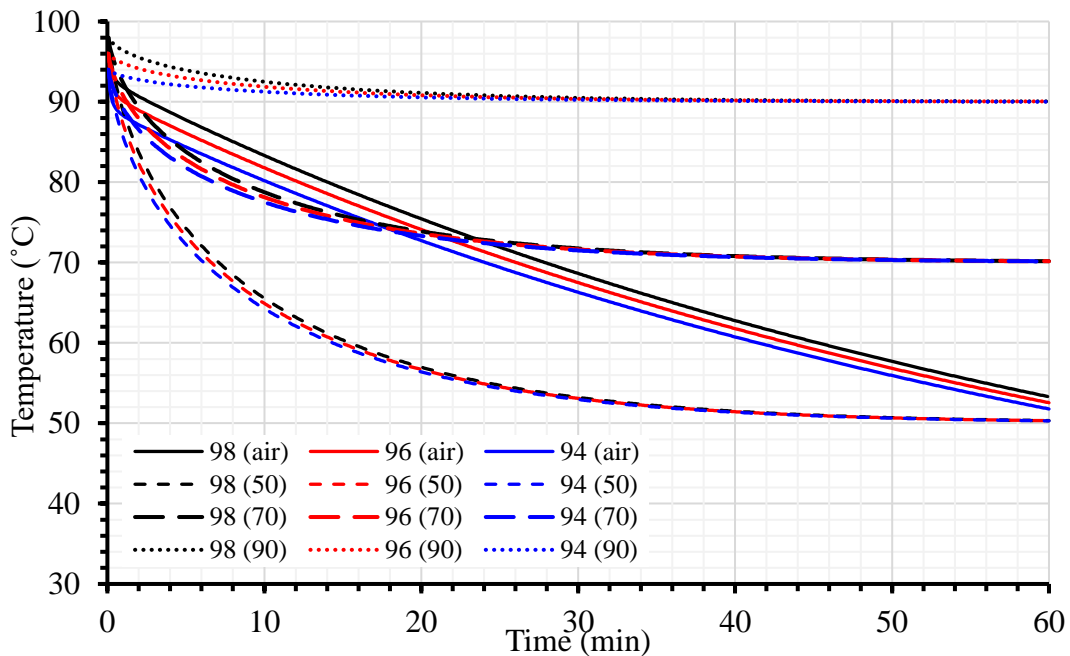
### 3.7 Βελτιστοποίηση της διεργασίας

Στα Σχήματα 39-44 παρουσιάζεται η εξέλιξη της θερμοκρασίας για τα διάφορα σημεία σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν για την επίτευξη της τιμής  $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 5 \text{ min}$ .

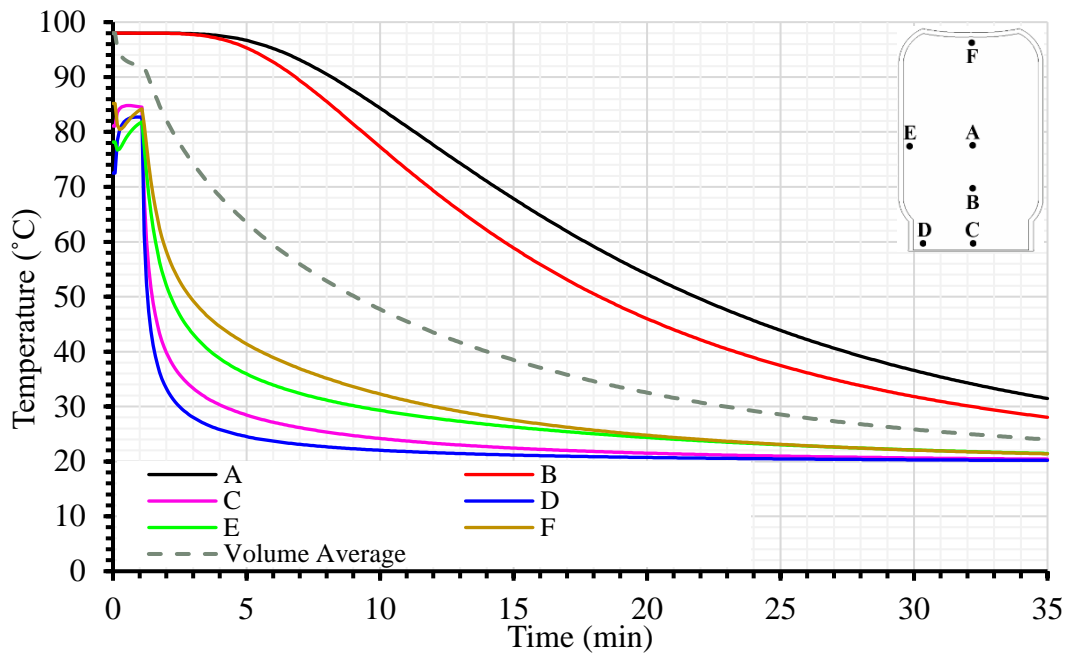
Παρατηρείται ότι σε όλες τις περιπτώσεις, υψηλότερη θερμοκρασία έχουν τα σημεία Α και Β που βρίσκονται στο κέντρο του περιέκτη. Τα σημεία που βρίσκονται κοντά στα τοιχώματα του περιέκτη φαίνονται ότι αυξάνουν τη θερμοκρασία τους το πρώτο λεπτό της διεργασίας και αυτό οφείλεται λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας στο εσωτερικό του τοματοχυμού και του εξωτερικού τοιχώματος  $T_{wall}=25^{\circ}\text{C}$ . Επίσης παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία πλήρωσης του προϊόντος μειώνεται και ο χρόνος παραμονής αντίστοιχα στον αέρα ή στο υδατόλουτρο. Τη χαμηλότερη θερμοκρασία διαπιστώνεται ότι έχουν τα σημεία κοντά στα τοιχώματα του περιέκτη με χαμηλότερη τιμή το σημείο D που είναι και το κρίσιμο σημείο (cold spot) της διεργασίας.



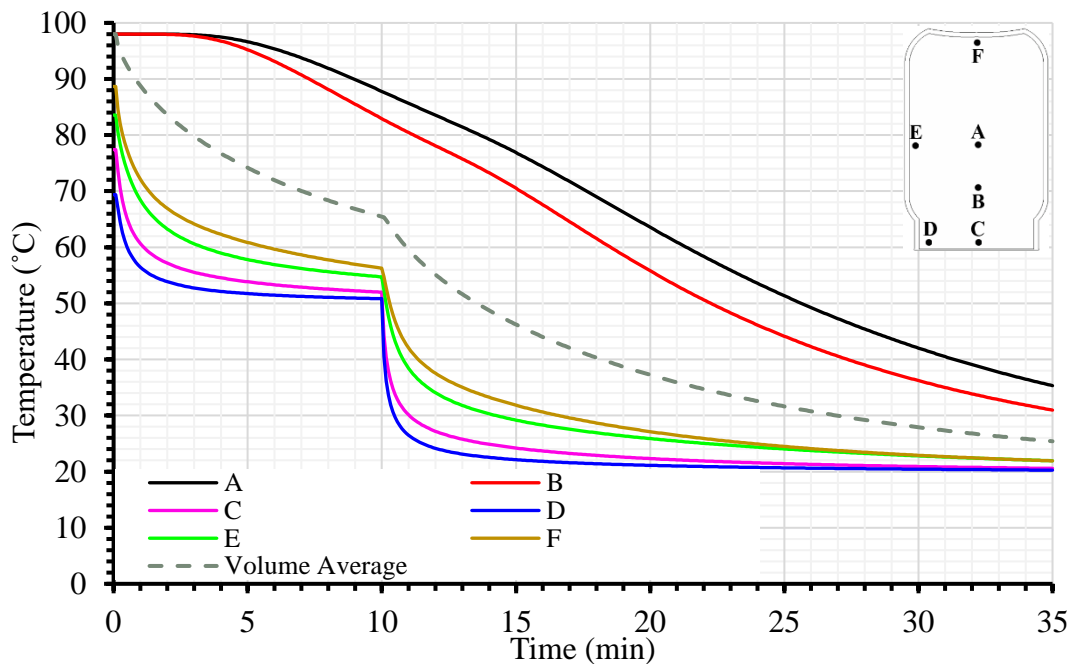
Σχήμα 37. Εξέλιξη της ολοκληρωμένης τιμή  $F_s$  ( $F_{93.33}^{8.89^\circ C}$ ) κατά το στάδιο της παραμονής (χωρίς επακόλουθη ψύξη στο νερό των  $20^\circ C$ ) για όλες τις "πλήρωση εν θερμώ" περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Στο υπόμνημα του σχήματος αναγράφεται η θερμοκρασία πλήρωσης σε  $^\circ C$  (π.χ., 98) ακολουθούμενη, σε παρένθεση, από το μέσο παραμονής (air) αν πρόκειται για αέρα, ή τη θερμοκρασία σε  $^\circ C$  (π.χ., 50) αν πρόκειται για παραμονή σε υδατόλουτρο



Σχήμα 38. Εξέλιξη της μέσης θερμοκρασίας κατά το στάδιο της παραμονής (χωρίς επακόλουθη ψύξη στο νερό των  $20^\circ C$ ) για όλες τις "πλήρωση εν θερμώ" περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Στο υπόμνημα του σχήματος αναγράφεται η θερμοκρασία πλήρωσης σε  $^\circ C$  (π.χ., 98) ακολουθούμενη, σε παρένθεση, από το μέσο παραμονής (air) αν πρόκειται για αέρα, ή τη θερμοκρασία σε  $^\circ C$  (π.χ., 50) αν πρόκειται για παραμονή σε υδατόλουτρο.

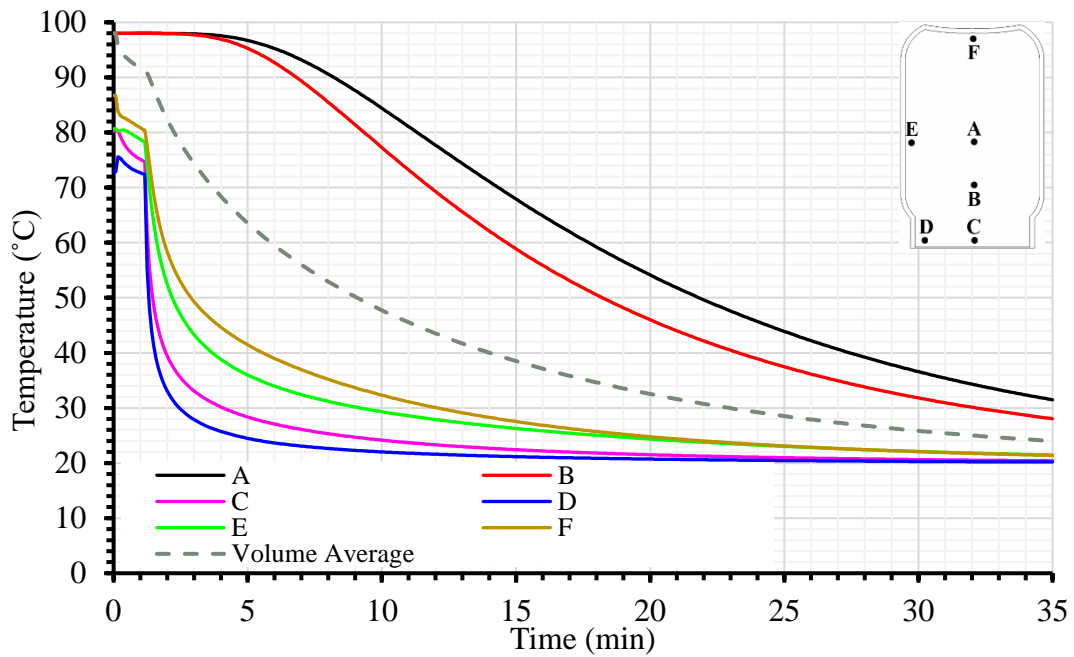


Σχήμα 39. Εξέλιξη της μέσης θερμοκρασίας (Volume Average) και της θερμοκρασίας σε διάφορα σημεία του προϊόντος (A, B, C, D, E, F) κατά την παραμονή του τοματοχυμού σε αέρα ( $T_{air} = 25^{\circ}\text{C}$ ,  $h_{air} = 11.43 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ) για  $1.08^{\circ}\text{min}$  και επακόλουθη ψύξη σε νερό ( $T_{WC} = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $h_{WC} = 450.2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ). Θερμοκρασία πλήρωσης TIT =  $98^{\circ}\text{C}$ .

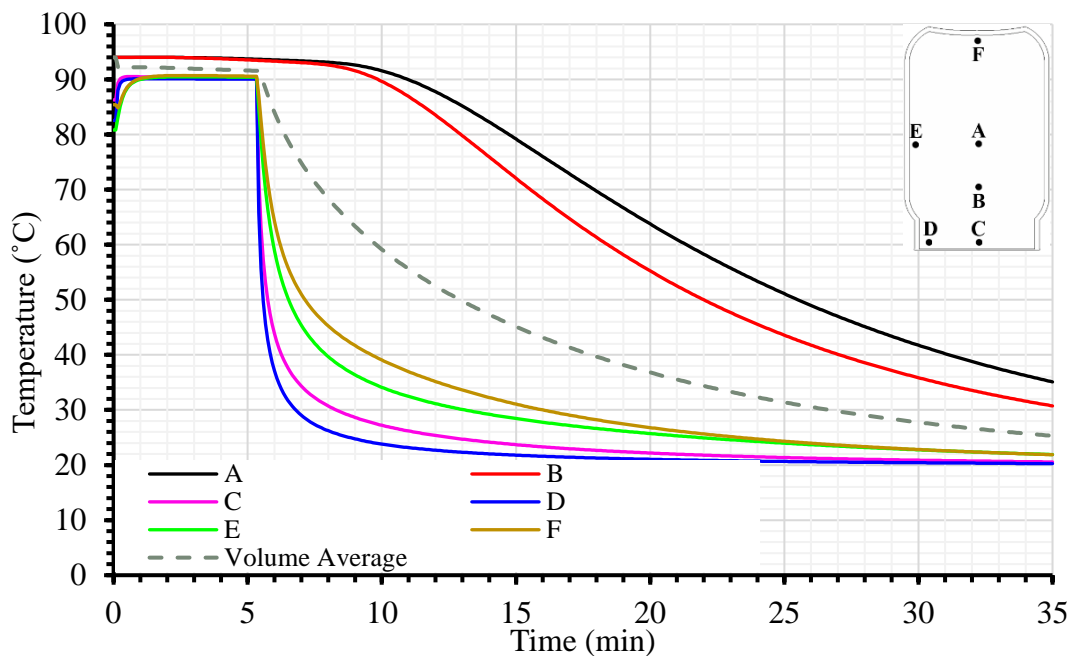


Σχήμα 40. Εξέλιξη της μέσης θερμοκρασίας (Volume Average) και της θερμοκρασίας σε διάφορα σημεία του προϊόντος (A, B, C, D, E, F) κατά την παραμονή του τοματοχυμού σε υδατόλουτρο ( $T_W = 50^{\circ}\text{C}$ ,  $h_W = 596.8 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ) για  $10^{\circ}\text{min}$  και επακόλουθη ψύξη σε νερό ( $T_{WC} = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $h_{WC} = 450.2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ). Θερμοκρασία πλήρωσης TIT =  $98^{\circ}\text{C}$ .

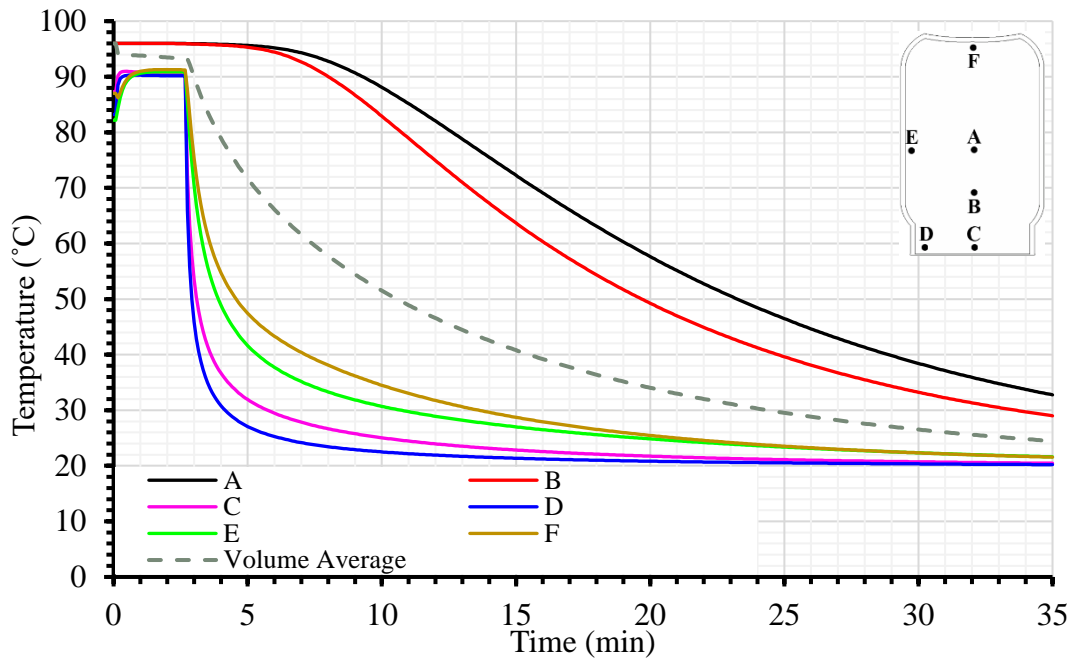




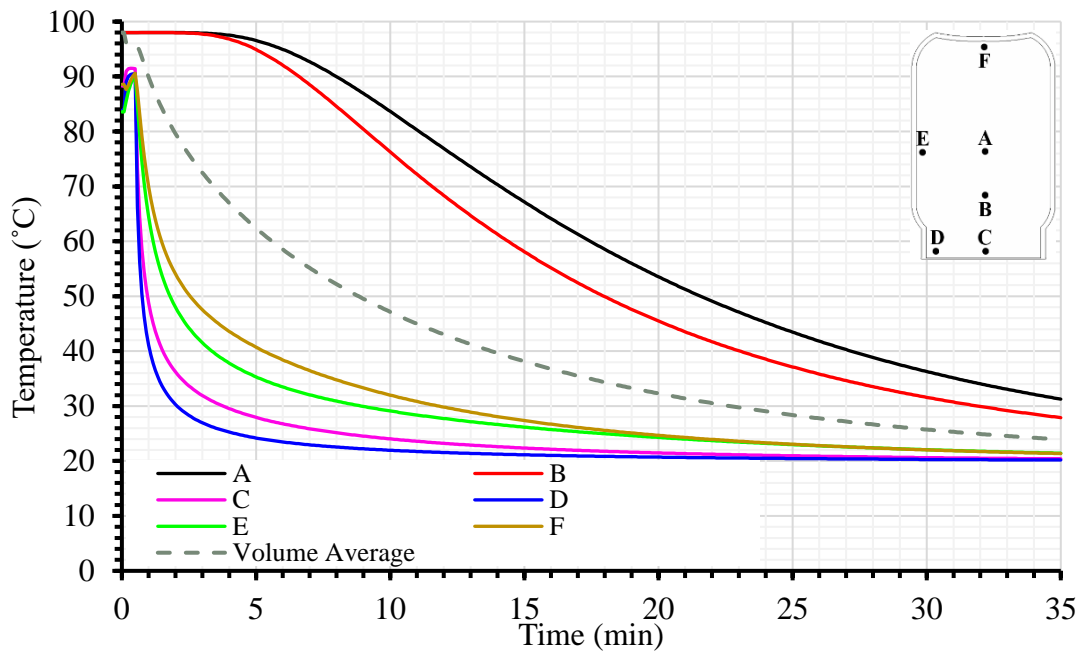
Σχήμα 41. Εξέλιξη της μέσης θερμοκρασίας (Volume Average) και της θερμοκρασίας σε διάφορα σημεία του προϊόντος (A, B, C, D, E, F) κατά την παραμονή του τοματοχυμού σε υδατόλουτρο ( $T_W = 70^\circ\text{C}$ ,  $h_W = 801.6 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ) για  $1.17^\circ\text{min}$  και επακόλουθη ψύξη σε νερό ( $T_{WC} = 20^\circ\text{C}$ ,  $h_{WC} = 450.2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ). Θερμοκρασία πλήρωσης  $T_{IT} = 98^\circ\text{C}$ .



Σχήμα 42. Εξέλιξη της μέσης θερμοκρασίας (Volume Average) και της θερμοκρασίας σε διάφορα σημεία του προϊόντος (A, B, C, D, E, F) κατά την παραμονή του τοματοχυμού σε υδατόλουτρο ( $T_W = 90^\circ\text{C}$ ,  $h_W = 1103.5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ) για  $5.33^\circ\text{min}$  και επακόλουθη ψύξη σε νερό ( $T_{WC} = 20^\circ\text{C}$ ,  $h_{WC} = 450.2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ). Θερμοκρασία πλήρωσης  $T_{IT} = 94^\circ\text{C}$ .

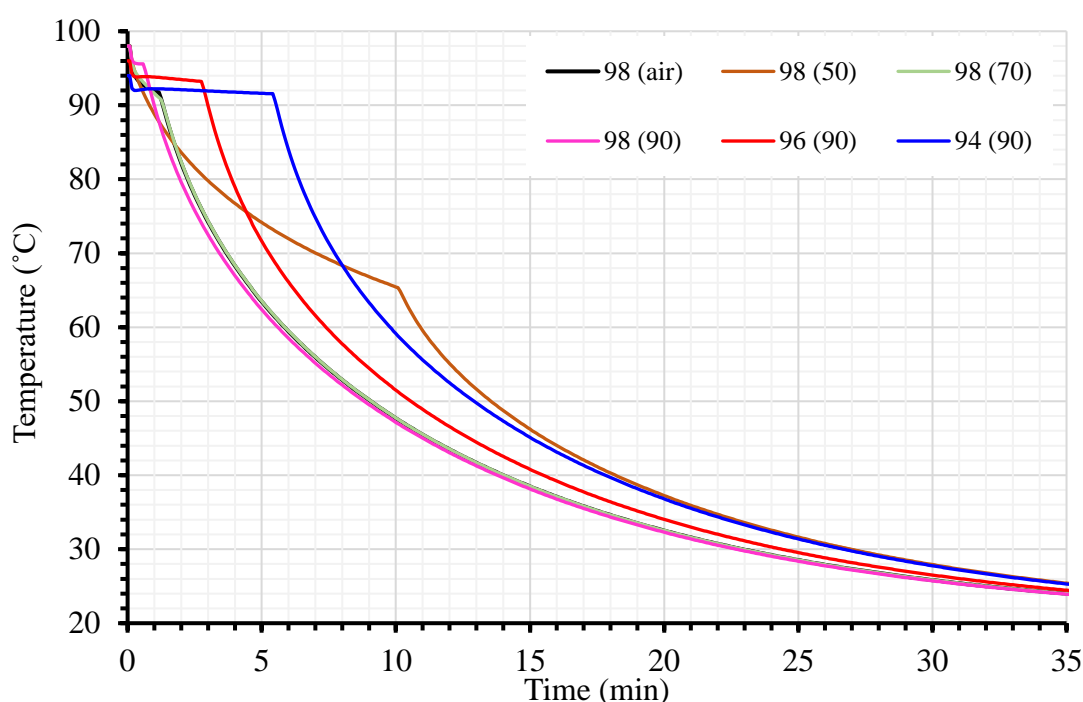


Σχήμα 43. Εξέλιξη της μέσης θερμοκρασίας (Volume Average) και της θερμοκρασίας σε διάφορα σημεία του προϊόντος (A, B, C, D, E, F) κατά την παραμονή του τοματοχυμού σε υδατόλουτρο ( $T_W = 90^\circ\text{C}$ ,  $h_W = 1103.5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ) για  $2.67^\circ\text{min}$  και επακόλουθη ψύξη σε νερό ( $T_{WC} = 20^\circ\text{C}$ ,  $h_{WC} = 450.2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ). Θερμοκρασία πλήρωσης  $T_{IT} = 96^\circ\text{C}$ .



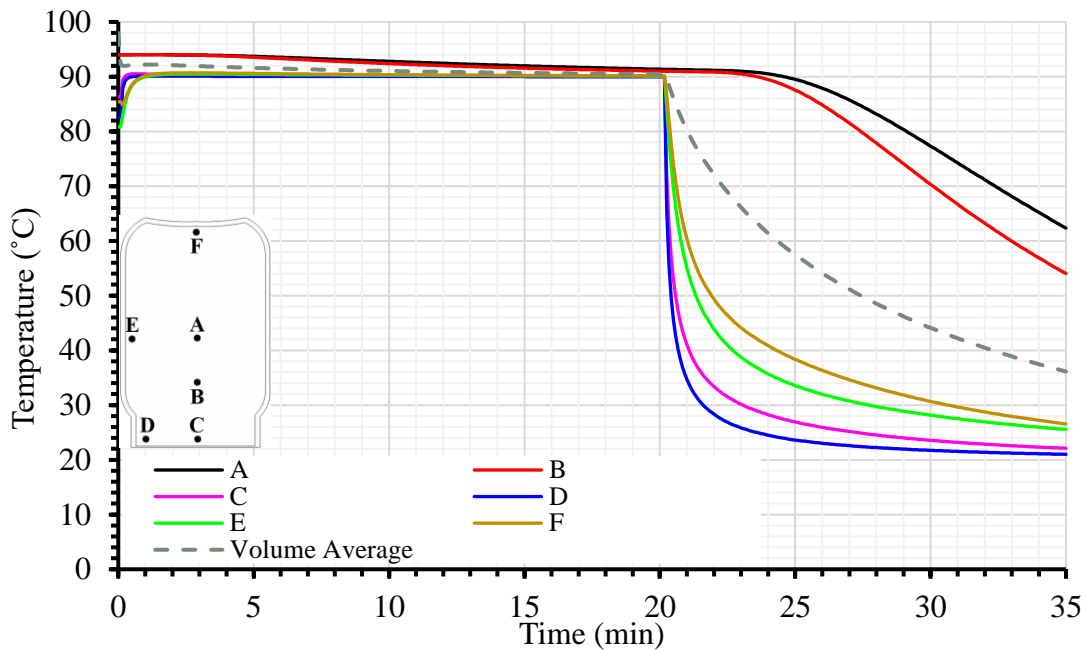
Σχήμα 44. Εξέλιξη της μέσης θερμοκρασίας (Volume Average) και της θερμοκρασίας σε διάφορα σημεία του προϊόντος (A, B, C, D, E, F) κατά την παραμονή του τοματοχυμού σε υδατόλουτρο ( $T_W = 90^\circ\text{C}$ ,  $h_W = 1103.5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ) για  $0.5^\circ\text{min}$  και επακόλουθη ψύξη σε νερό ( $T_{WC} = 20^\circ\text{C}$ ,  $h_{WC} = 450.2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ). Θερμοκρασία πλήρωσης  $T_{IT} = 98^\circ\text{C}$ .

Στο Σχήμα 45 παρουσιάζεται η εξέλιξη της μέσης θερμοκρασίας του προϊόντος για όλες τις περιπτώσεις παραμονής και θερμοκρασίας πλήρωσης. Στα σχήματα 46-48 παρατηρούμε την εξέλιξη της θερμοκρασίας κατά την επίτευξη της τιμής  $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 12.6$  min. Σε αυτή τη διερεύνηση με θερμοκρασία πλήρωσης 94, 96 και 98°C σε υδατόλουτρο θερμοκρασίας 90°C προκύπτει ότι ο χρόνος παραμονής είναι πολύ μεγαλύτερος σε σχέση με το χρόνο παραμονής της επίτευξη της τιμής  $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 5$  min με μέγιστο χρόνο 20.2 min. Η περίπτωση με θερμοκρασία πλήρωσης 94°C είναι πιο χρονοβόρα σε σχέση με τις υπόλοιπες, καθώς το κέντρο του περιέκτη έχει θερμοκρασία 60°C στα 35 min και δεν έχει ψυχθεί πλήρως στο τέλος της διεργασίας.

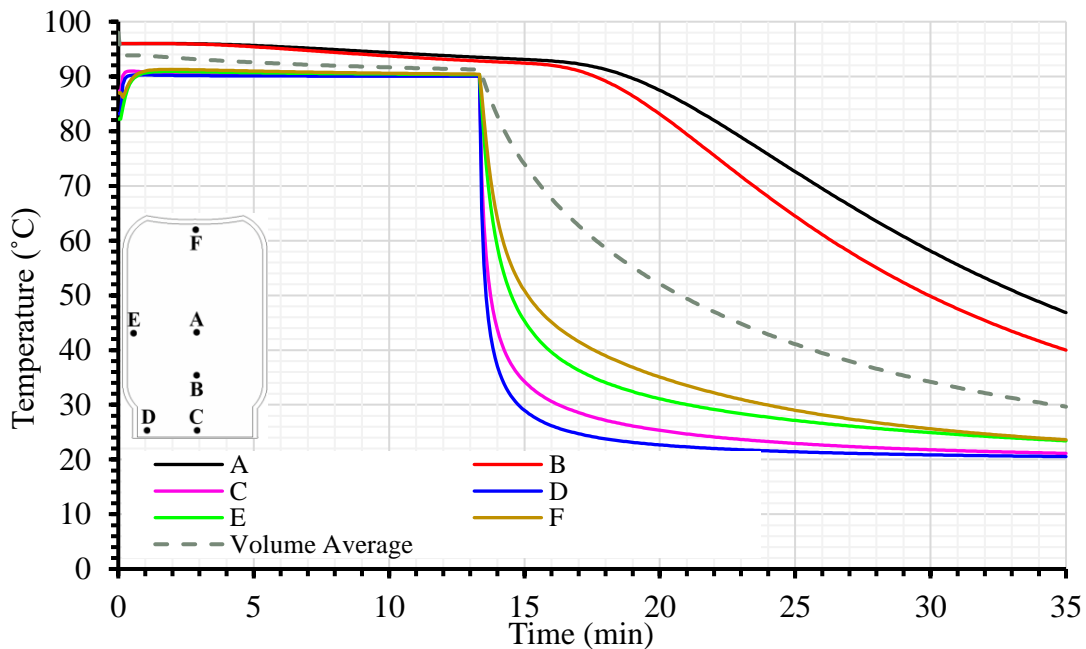


Σχήμα 45. Εξέλιξη της μέσης θερμοκρασίας για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν.

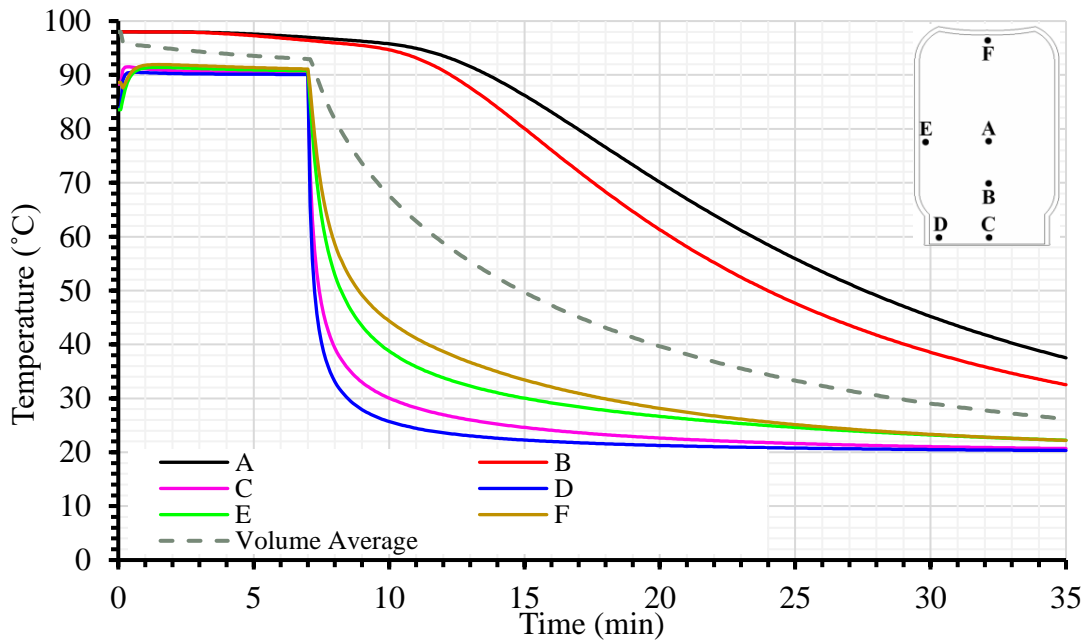
Στα Σχήματα 49-57 απεικονίζεται η χρωματική κατανομή της θερμοκρασίας και για τις 2 περιπτώσεις  $F$ , όπου εσωτερικά του περιέκτη περιγράφει τις υψηλές θερμοκρασίες του προϊόντος (κόκκινο χρώμα), ενώ προς το εξωτερικό τις χαμηλές θερμοκρασίες του προϊόντος (μπλε χρώμα). Σχεδόν σε κάθε περίπτωση παρατηρείται ότι μέχρι τα 30 min της διεργασίας έχει καλυφθεί με μπλε χρώμα (25-35°C) όλη τη επιφάνεια στο εσωτερικό του τοματοχυμού και ότι μετά το χρόνο παραμονής του περιέκτη στον αέρα ή σε υδατόλουτρο αντίστοιχα υπάρχει απότομη μεταβολή της θερμοκρασίας λόγω της ψύξης με νερό θερμοκρασίας  $T_{wc}=20^{\circ}\text{C}$ .



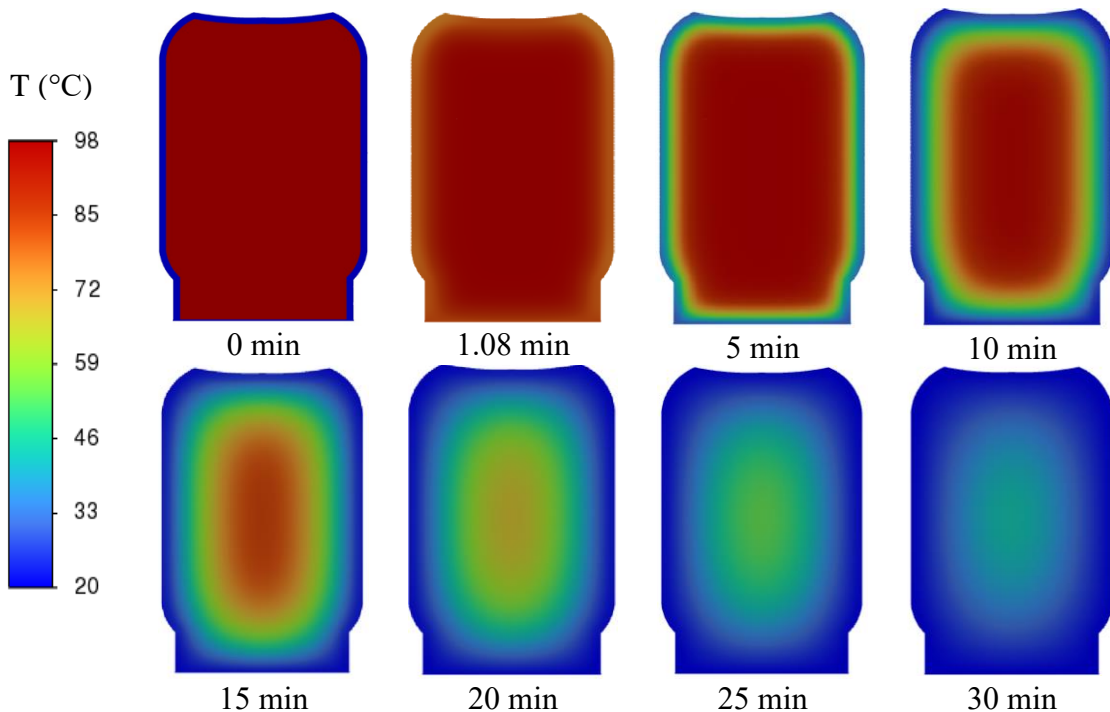
Σχήμα 46. Εξέλιξη της μέσης θερμοκρασίας (Volume Average) και της θερμοκρασίας σε διάφορα σημεία του προϊόντος (A, B, C, D, E, F) κατά την παραμονή του τοματοχυμού σε υδατόλουτρο ( $T_W = 90^\circ\text{C}$ ,  $h_W = 1103.5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ) για  $20.2^\circ\text{min}$  και επακόλουθη ψύξη σε νερό ( $T_{WC} = 20^\circ\text{C}$ ,  $h_{WC} = 450.2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ). Θερμοκρασία πλήρωσης  $T_{IT} = 94^\circ\text{C}$ .



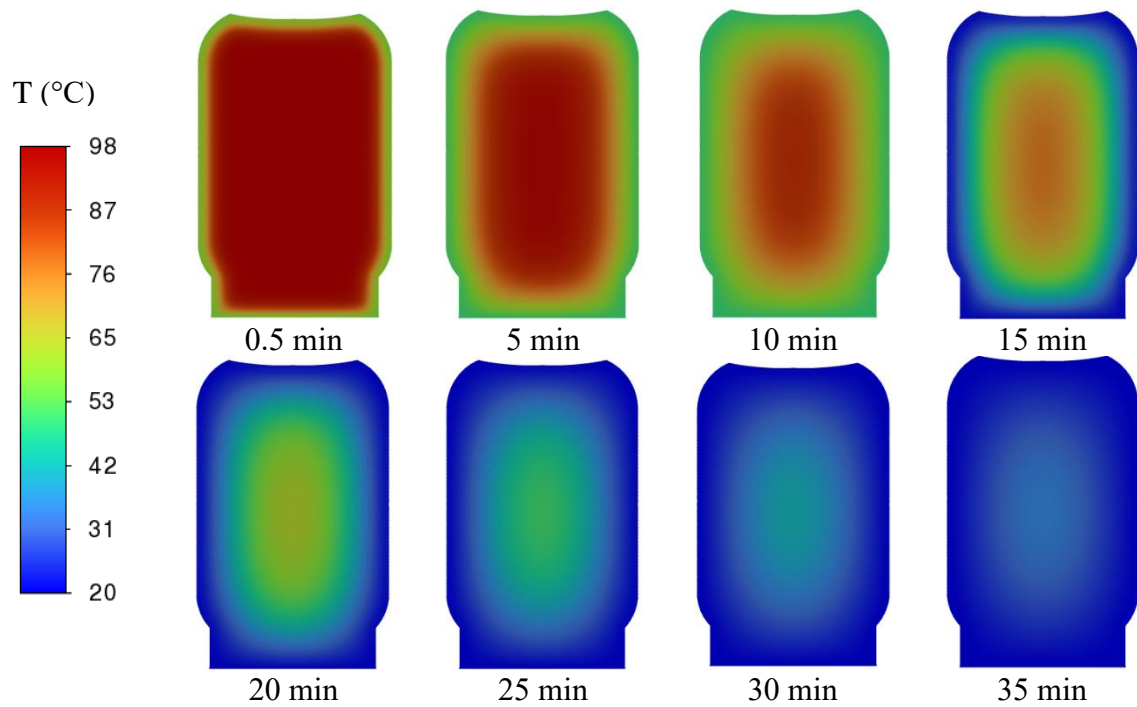
Σχήμα 47. Εξέλιξη της μέσης θερμοκρασίας (Volume Average) και της θερμοκρασίας σε διάφορα σημεία του προϊόντος (A, B, C, D, E, F) κατά την παραμονή του τοματοχυμού σε υδατόλουτρο ( $T_W = 90^\circ\text{C}$ ,  $h_W = 1103.5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ) για  $13.3^\circ\text{min}$  και επακόλουθη ψύξη σε νερό ( $T_{WC} = 20^\circ\text{C}$ ,  $h_{WC} = 450.2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ). Θερμοκρασία πλήρωσης  $T_{IT} = 96^\circ\text{C}$ .



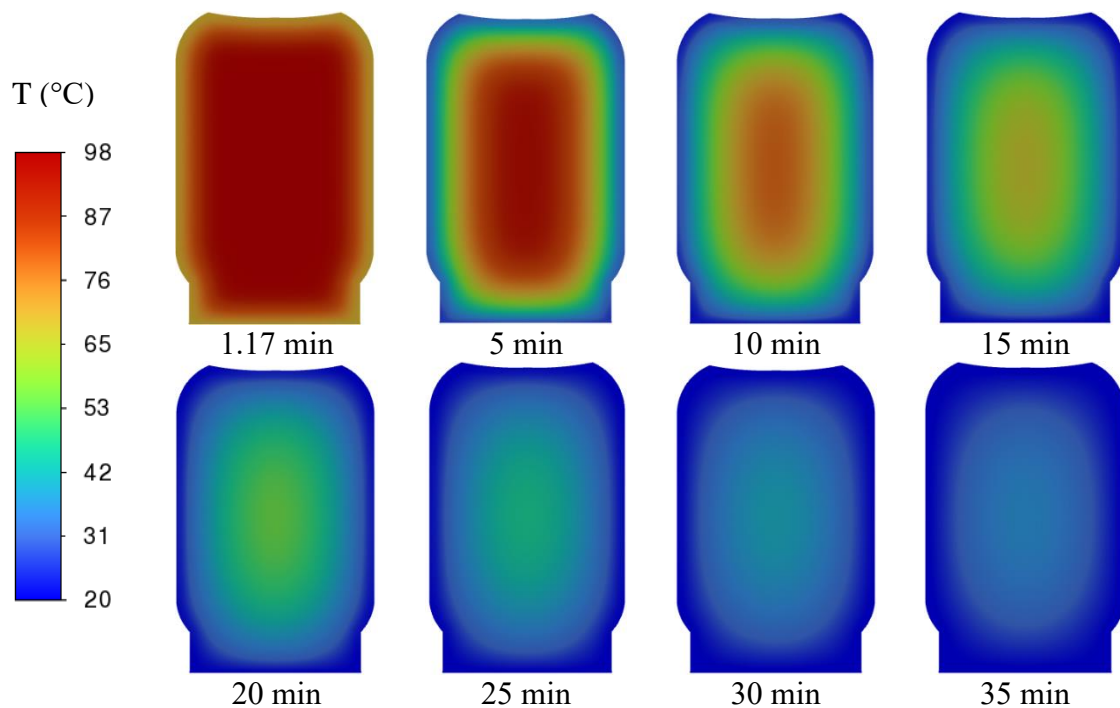
Σχήμα 48. Εξέλιξη της μέσης θερμοκρασίας (Volume Average) και της θερμοκρασίας σε διάφορα σημεία του προϊόντος (A, B, C, D, E, F) κατά την παραμονή του τοματοχυμού σε υδατόλουτρο ( $TW = 90^{\circ}C$ ,  $hW = 1103.5 W/(m^2 \cdot K)$ ) για  $7^{\circ}min$  και επακόλουθη ψύξη σε νερό ( $TWC = 20^{\circ}C$ ,  $hWC = 450.2 W/(m^2 \cdot K)$ ). Θερμοκρασία πλήρωσης  $TIT = 98^{\circ}C$ .



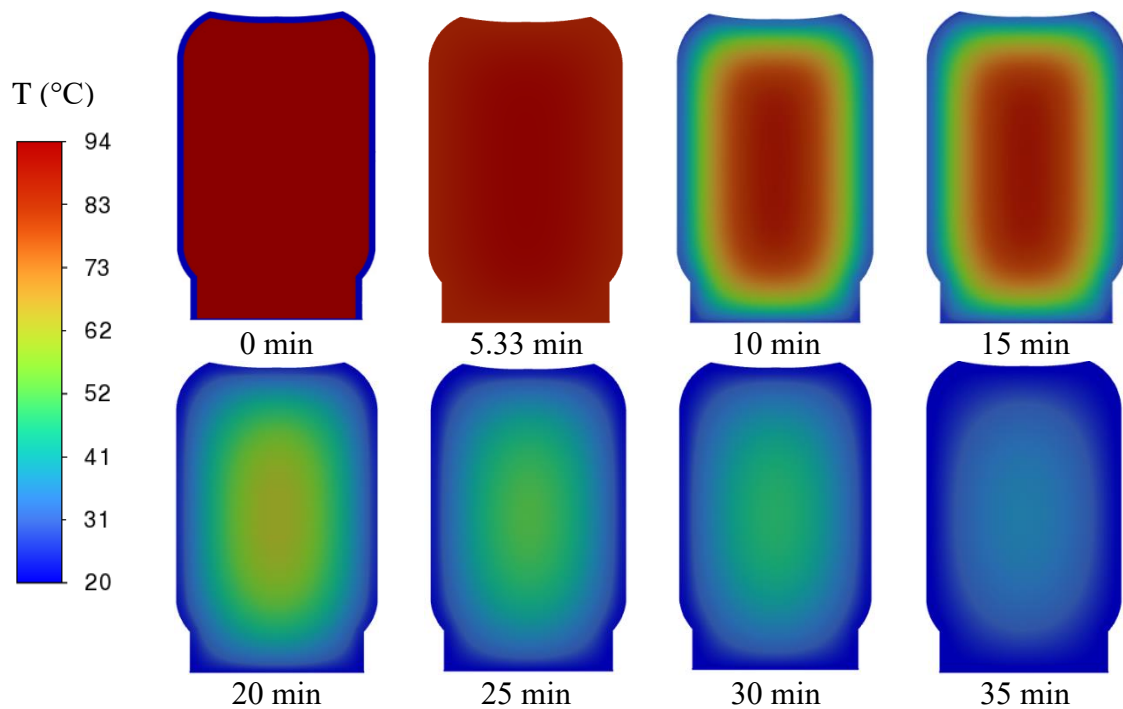
Σχήμα 49. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας τοματοχυμού με θερμοκρασία πλήρωσης  $98^{\circ}C$ , παραμονή στον αέρα ( $T_{air} = 25^{\circ}C$ ,  $h_{air} = 11.43 W/(m^2 \cdot K)$ ) για  $1.08^{\circ}min$  και επακόλουθη ψύξη σε νερό ( $TWC = 20^{\circ}C$ ,  $hWC = 450.2 W/(m^2 \cdot K)$ ).



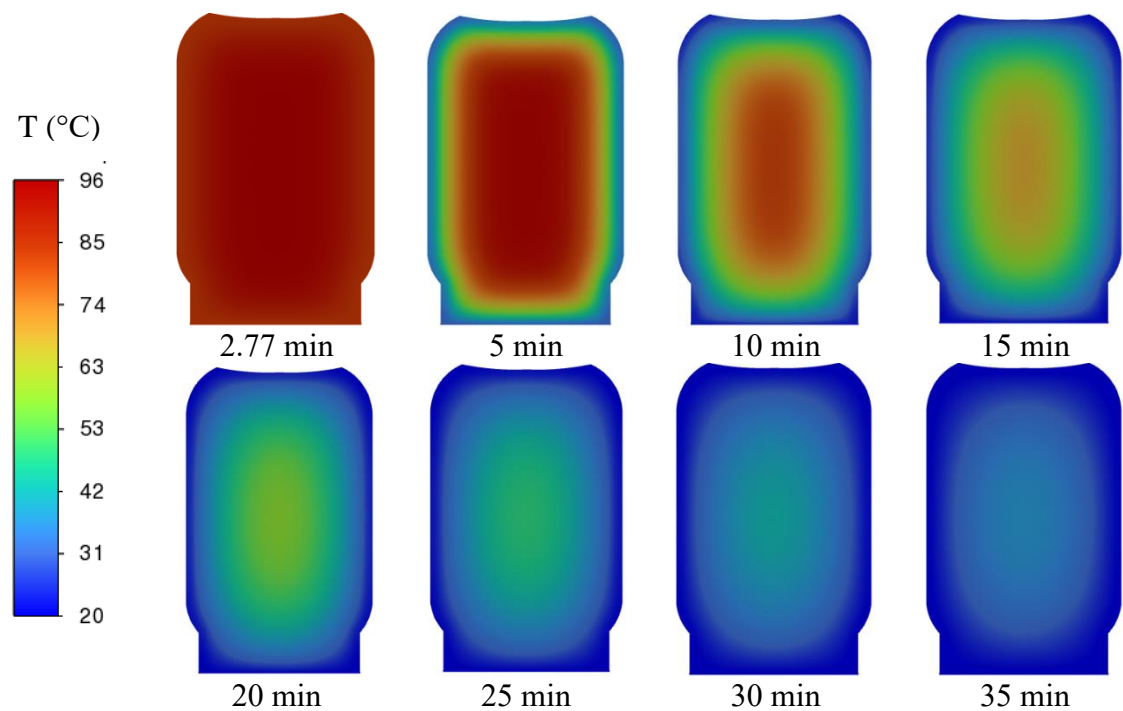
Σχήμα 50. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας τοματοχυμού με θερμοκρασία πλήρωσης  $98^{\circ}\text{C}$ , παραμονή σε υδατόλουτρο ( $T_w = 50^{\circ}\text{C}$ ,  $h_w = 596.8 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ) για 10min και επακόλουθη ψύξη σε νερό ( $T_{WC} = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $h_{WC} = 450.2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ).



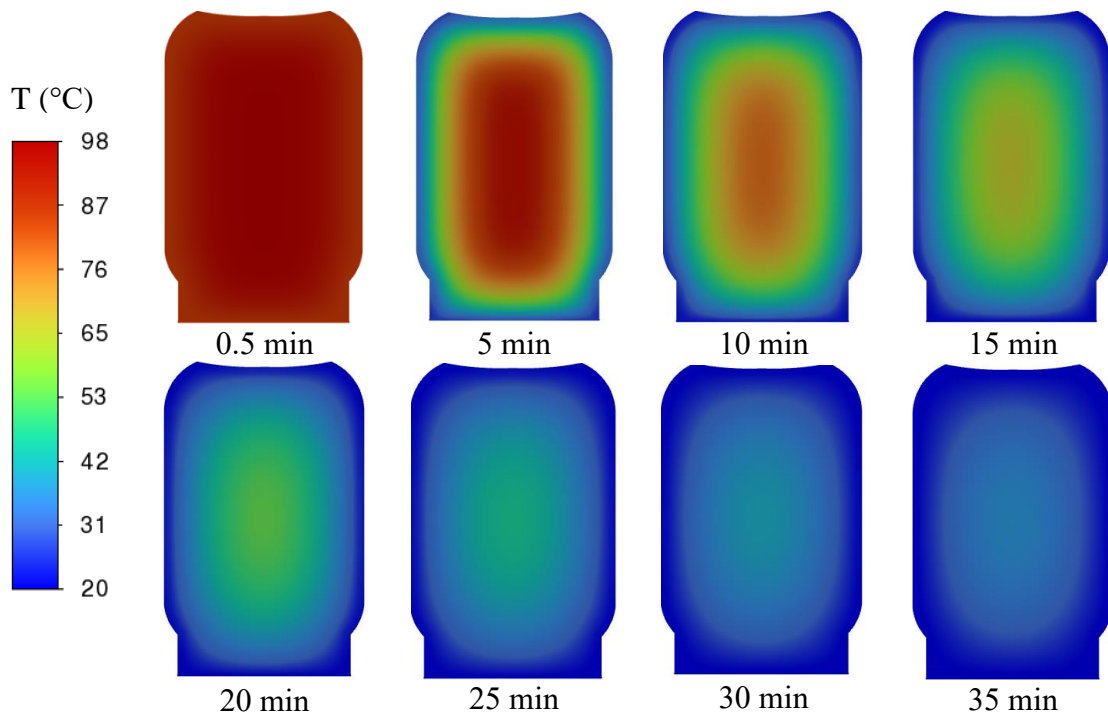
Σχήμα 51. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας τοματοχυμού με θερμοκρασία πλήρωσης  $98^{\circ}\text{C}$ , παραμονή σε υδατόλουτρο ( $T_w = 70^{\circ}\text{C}$ ,  $h_w = 801.6 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ) για 1.17 min και επακόλουθη ψύξη σε νερό ( $T_{WC} = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $h_{WC} = 450.2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ).



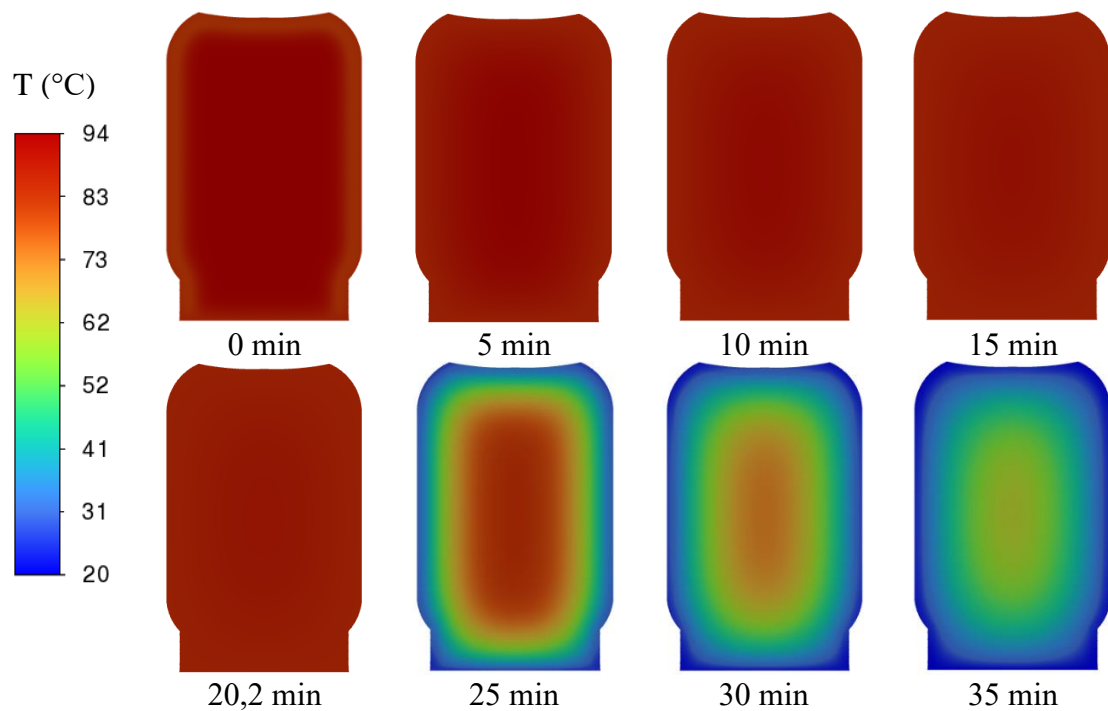
Σχήμα 52. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας τοματοχυμού με θερμοκρασία πλήρωσης  $94^{\circ}\text{C}$ , παραμονή σε υδατόλουτρο ( $T_w = 90^{\circ}\text{C}$ ,  $h_w = 1103.5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ) για 5.33 min και επακόλουθη ψύξη σε νερό ( $T_{WC} = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $h_{WC} = 450.2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ).



Σχήμα 53. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας τοματοχυμού με θερμοκρασία πλήρωσης  $96^{\circ}\text{C}$ , παραμονή σε υδατόλουτρο ( $T_w = 90^{\circ}\text{C}$ ,  $h_w = 1103.5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ) για 2.67 min και επακόλουθη ψύξη σε νερό ( $T_{WC} = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $h_{WC} = 450.2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ).

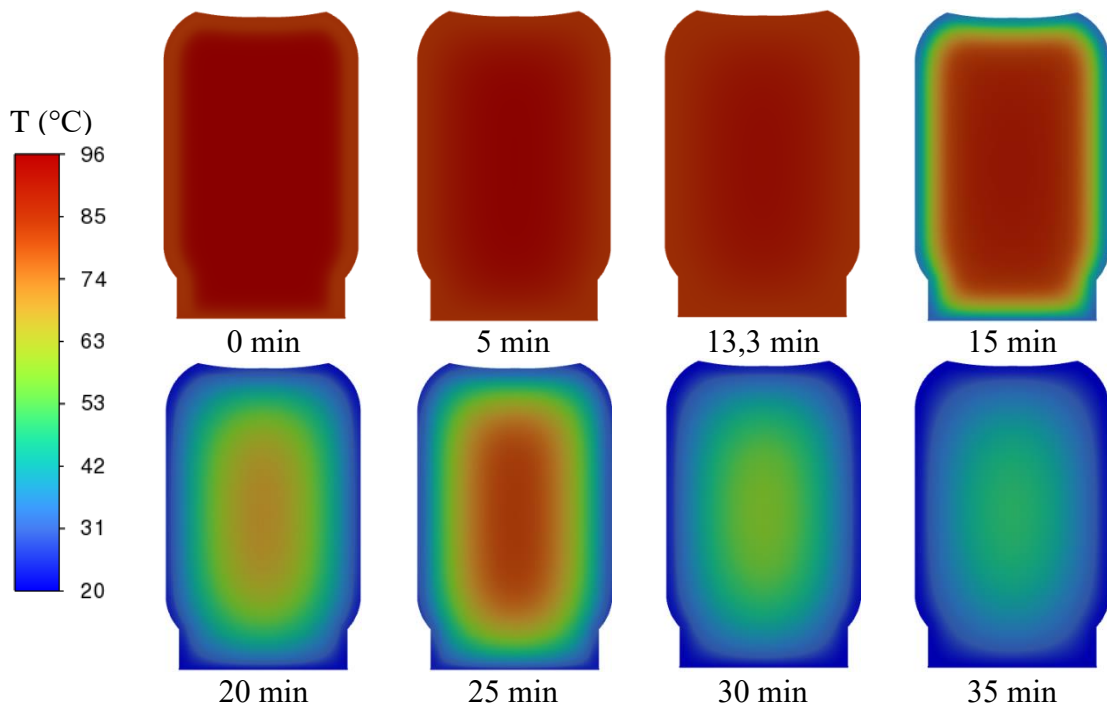


Σχήμα 54. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας τοματοχυμού με θερμοκρασία πλήρωσης  $98^{\circ}\text{C}$ , παραμονή σε υδατόλουτρο ( $T_w = 90^{\circ}\text{C}$ ,  $h_w = 1103.5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ) για 0.5 min και επακόλουθη ψύξη σε νερό ( $T_{WC} = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $h_{WC} = 450.2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ).

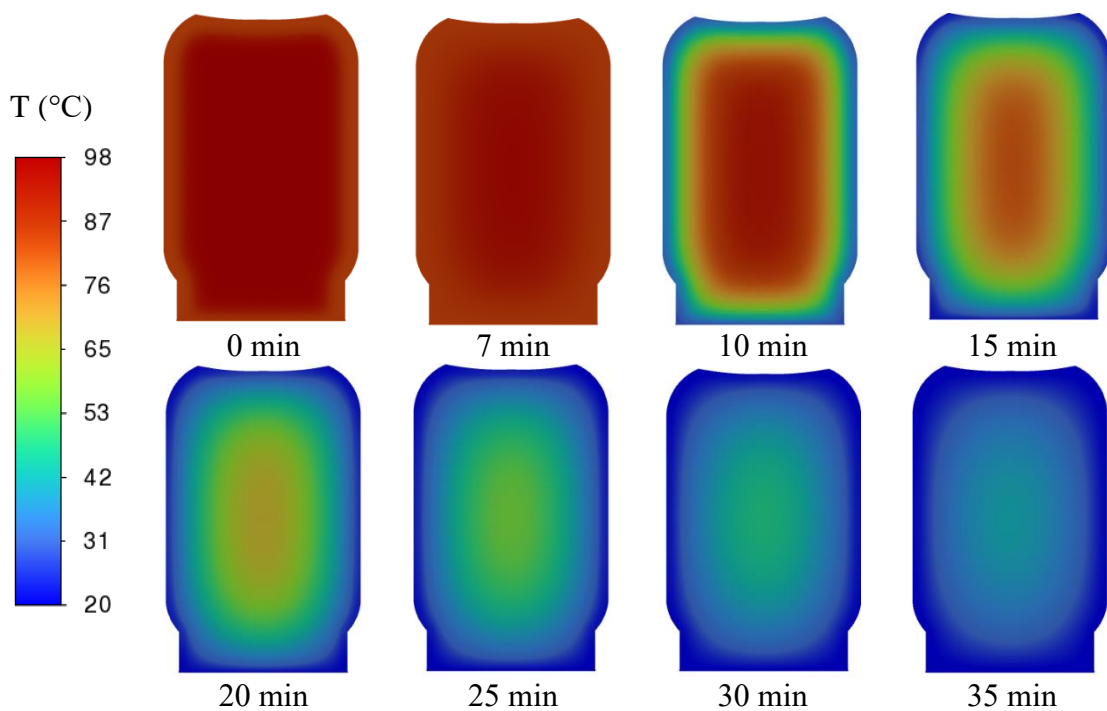


Σχήμα 55. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας τοματοχυμού με θερμοκρασία πλήρωσης  $94^{\circ}\text{C}$ , παραμονή σε υδατόλουτρο ( $T_w = 90^{\circ}\text{C}$ ,  $h_w = 1103.5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ) για 20.2 min και επακόλουθη ψύξη σε νερό ( $T_{WC} = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $h_{WC} = 450.2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ).



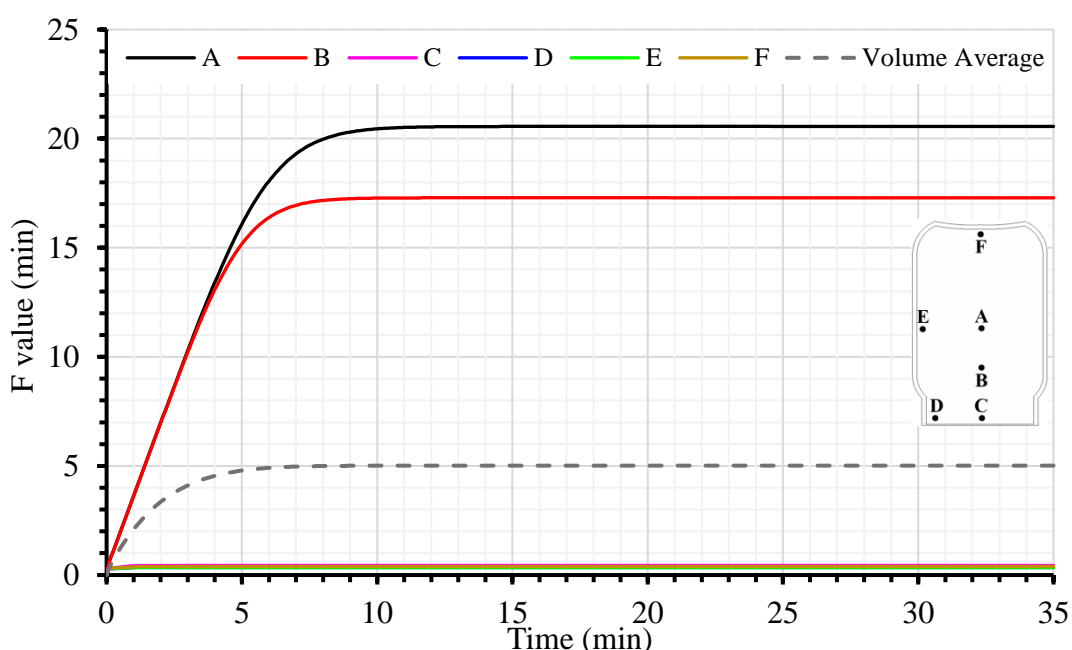


Σχήμα 56. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας τοματοχυμού με θερμοκρασία πλήρωσης  $96^{\circ}\text{C}$ , παραμονή σε υδατόλουτρο ( $T_w = 90^{\circ}\text{C}$ ,  $h_w = 1103.5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ) για 13.3 min και επακόλουθη ψύξη σε νερό ( $T_w = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $h_w = 450.2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ).

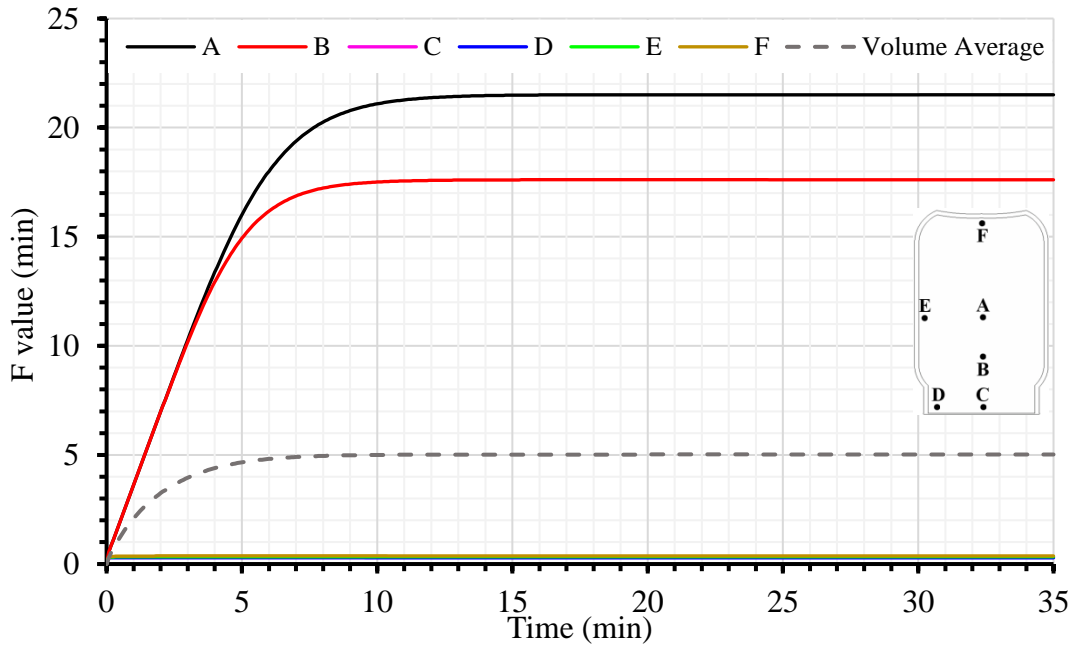


Σχήμα 57. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας τοματοχυμού με θερμοκρασία πλήρωσης  $98^{\circ}\text{C}$ , παραμονή σε υδατόλουτρο ( $T_w = 90^{\circ}\text{C}$ ,  $h_w = 1103.5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ) για 7 min και επακόλουθη ψύξη σε νερό ( $T_w = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $h_w = 450.2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ).

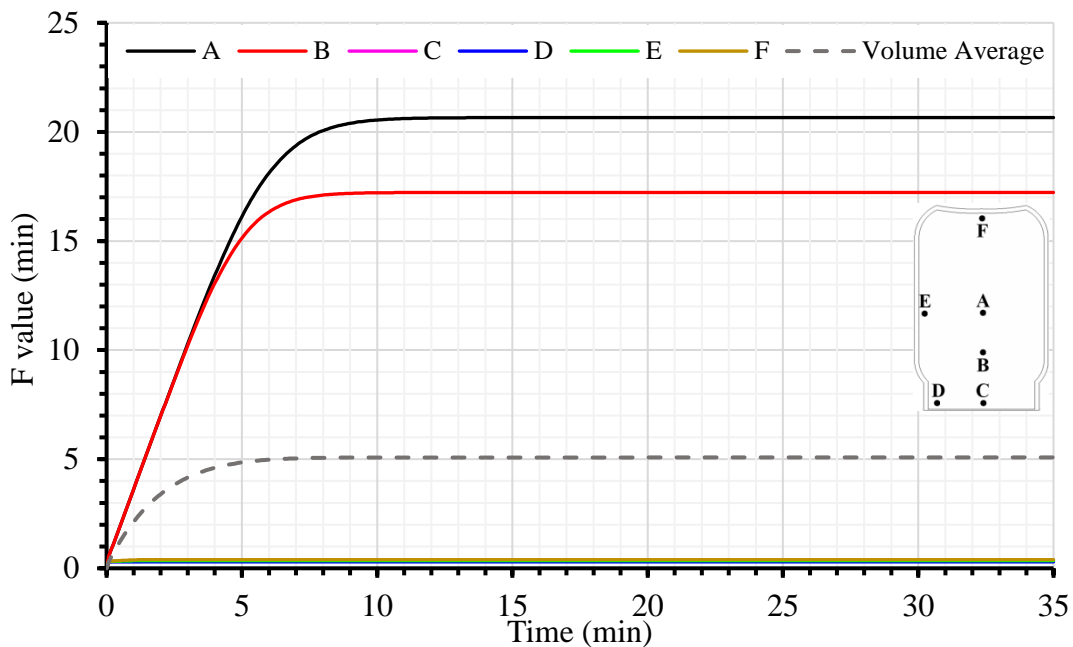
Στα Σχήματα 58-66 παρουσιάζεται η εξέλιξη της τιμής  $F$  για όλα τα σημεία καθώς και η μέση τιμή  $F$ . Τα σημεία που είναι εσωτερικά κοντά στο γεωμετρικό κέντρο του περιέκτη έχουν μεγαλύτερες τιμές  $F$  σε σχέση με τα σημεία τα οποία είναι προς την εξωτερική επιφάνεια. Στην περίπτωση με θερμοκρασία πλήρωσης  $98^{\circ}\text{C}$  σε υδατόλουτρο  $50^{\circ}\text{C}$  και τιμή επίτευξης  $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 5$  min παρατηρείται η μεγαλύτερη σημειακή τιμή  $F$ , από όλες τις άλλες, στο κέντρο του περιέκτη και συγκεκριμένα στο σημείο A (0, 0.0865, 0) ίση με  $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 21.5$  min. Αυτή η περίπτωση έχει το μεγαλύτερο χρόνο παραμονής σε υδατόλουτρο ίσο με 10 min. Κοντά στα τοιχώματα του περιέκτη παρατηρείται ότι οι τιμές  $F$  είναι αρκετά χαμηλές και με πολύ μικρές διαφορές μεταξύ τους.



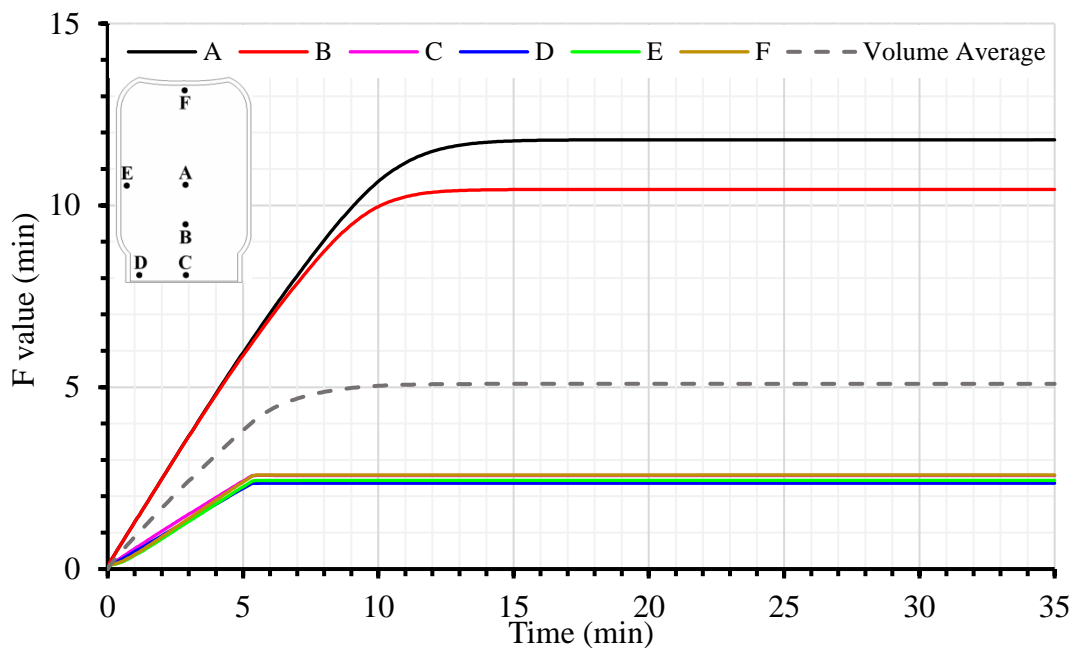
Σχήμα 58. Εξέλιξη της ολοκληρωμένης τιμή  $F_s$  (Volume Average) της διεργασίας και των αντίστοιχων σημειακών τιμών  $F$  value στα σημεία A, B, C, D, E, F του προϊόντος κατά την παραμονή του τοματοχυμού σε αέρα ( $T_{air} = 25^{\circ}\text{C}$ ,  $h_{air} = 11.43 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ) για  $1.08^{\circ}\text{min}$  και επακόλουθη ψύξη σε νερό ( $T_{WC} = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $h_{WC} = 450.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ). Θερμοκρασία πλήρωσης  $T_{IT} = 98^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{ref} = 93.33^{\circ}\text{C}$  και  $z = 8.89^{\circ}\text{C}$ .



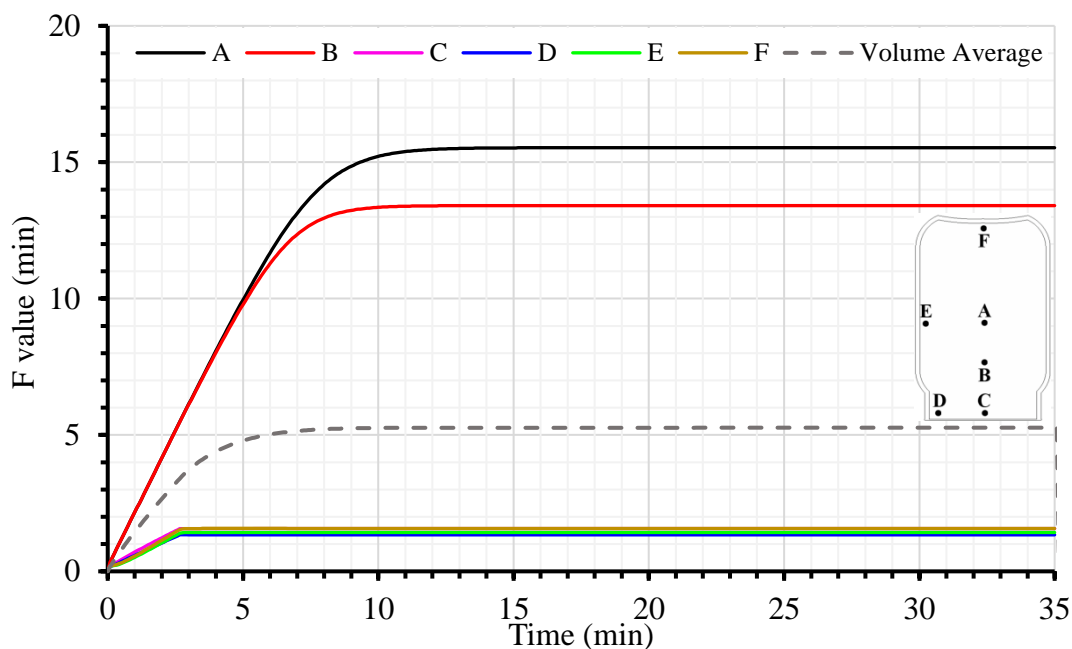
Σχήμα 59. Εξέλιξη της ολοκληρωμένης τιμή  $F_s$  (Volume Average) της διεργασίας και των αντίστοιχων σημειακών τιμών  $F$  value στα σημεία A, B, C, D, E, F του προϊόντος κατά την παραμονή του τοματοχυμού σε υδατόλουτρο ( $T_W = 50^\circ\text{C}$ ,  $h_W = 596.8 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ) για  $10^\circ\text{min}$  και επακόλουθη ψύξη σε νερό ( $T_{WC} = 20^\circ\text{C}$ ,  $h_{WC} = 450.2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ). Θερμοκρασία πλήρωσης  $T_{IT} = 98^\circ\text{C}$ ,  $T_{ref} = 93.33^\circ\text{C}$  και  $z = 8.89^\circ\text{C}$ .



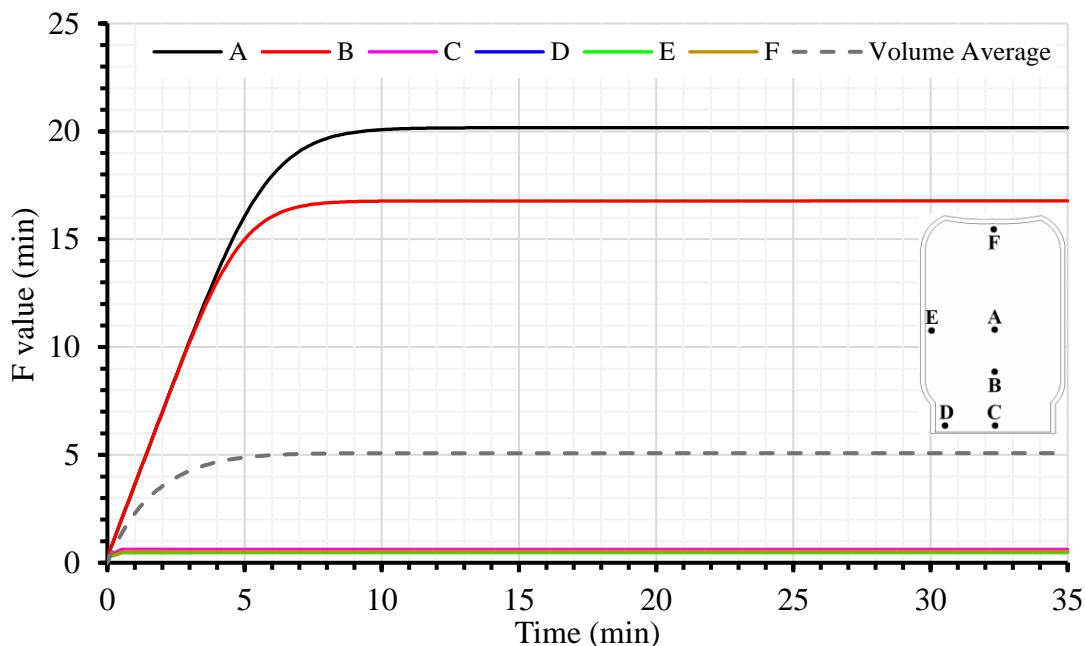
Σχήμα 60. Εξέλιξη της ολοκληρωμένης τιμή  $F_s$  (Volume Average) της διεργασίας και των αντίστοιχων σημειακών τιμών  $F$  value στα σημεία A, B, C, D, E, F του προϊόντος κατά την παραμονή του τοματοχυμού σε υδατόλουτρο ( $T_W = 70^\circ\text{C}$ ,  $h_W = 801.6 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ) για  $1.17^\circ\text{min}$  και επακόλουθη ψύξη σε νερό ( $T_{WC} = 20^\circ\text{C}$ ,  $h_{WC} = 450.2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ). Θερμοκρασία πλήρωσης  $T_{IT} = 98^\circ\text{C}$ ,  $T_{ref} = 93.33^\circ\text{C}$  και  $z = 8.89^\circ\text{C}$ .



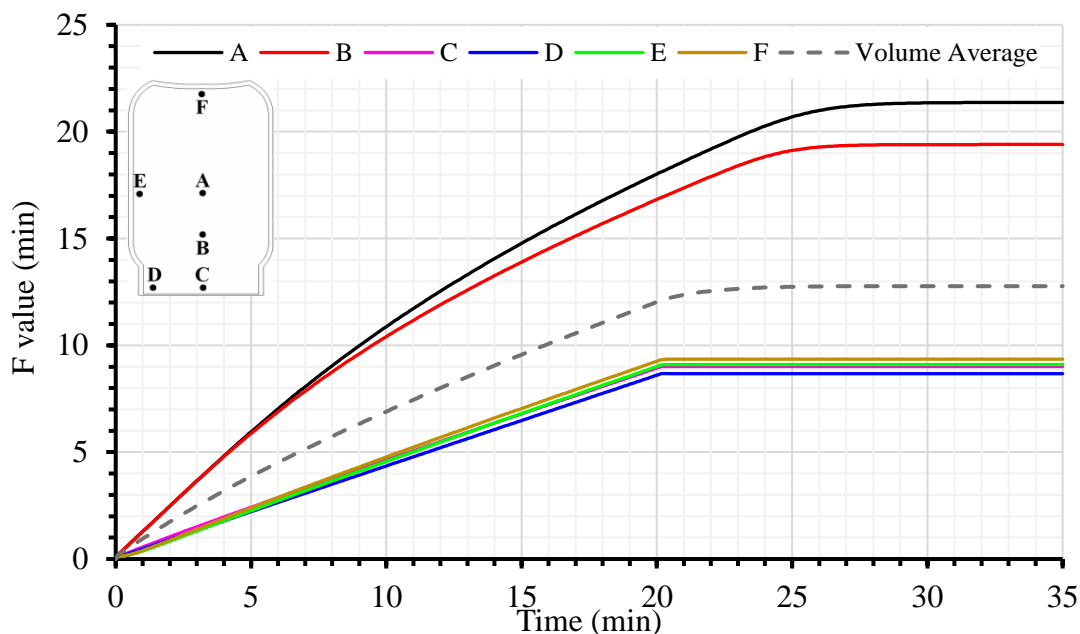
Σχήμα 61. Εξέλιξη της ολοκληρωμένης τιμή  $F_s$  (Volume Average) της διεργασίας και των αντίστοιχων σημειακών τιμών  $F$  value στα σημεία A, B, C, D, E, F του προϊόντος κατά την παραμονή του τοματοχυμού σε υδατόλουτρο ( $T_W = 90^\circ\text{C}$ ,  $h_W = 1103.5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ) για  $5.33^\circ\text{min}$  και επακόλουθη ψύξη σε νερό ( $T_{WC} = 20^\circ\text{C}$ ,  $h_{WC} = 450.2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ). Θερμοκρασία πλήρωσης  $T_{IT} = 94^\circ\text{C}$ ,  $T_{ref} = 93.33^\circ\text{C}$  και  $z = 8.89^\circ\text{C}$ .



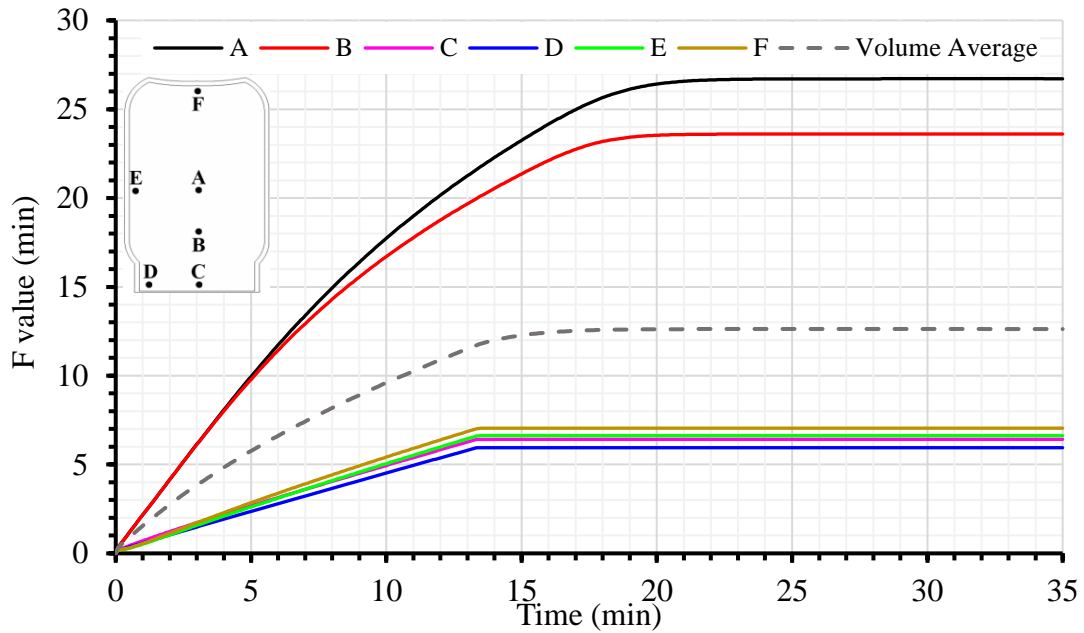
Σχήμα 62. Εξέλιξη της ολοκληρωμένης τιμή  $F_s$  (Volume Average) της διεργασίας και των αντίστοιχων σημειακών τιμών  $F$  value στα σημεία A, B, C, D, E, F του προϊόντος κατά την παραμονή του τοματοχυμού σε υδατόλουτρο ( $T_W = 90^\circ\text{C}$ ,  $h_W = 1103.5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ) για  $2.67^\circ\text{min}$  και επακόλουθη ψύξη σε νερό ( $T_{WC} = 20^\circ\text{C}$ ,  $h_{WC} = 450.2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ). Θερμοκρασία πλήρωσης  $T_{IT} = 96^\circ\text{C}$ ,  $T_{ref} = 93.33^\circ\text{C}$  και  $z = 8.89^\circ\text{C}$ .



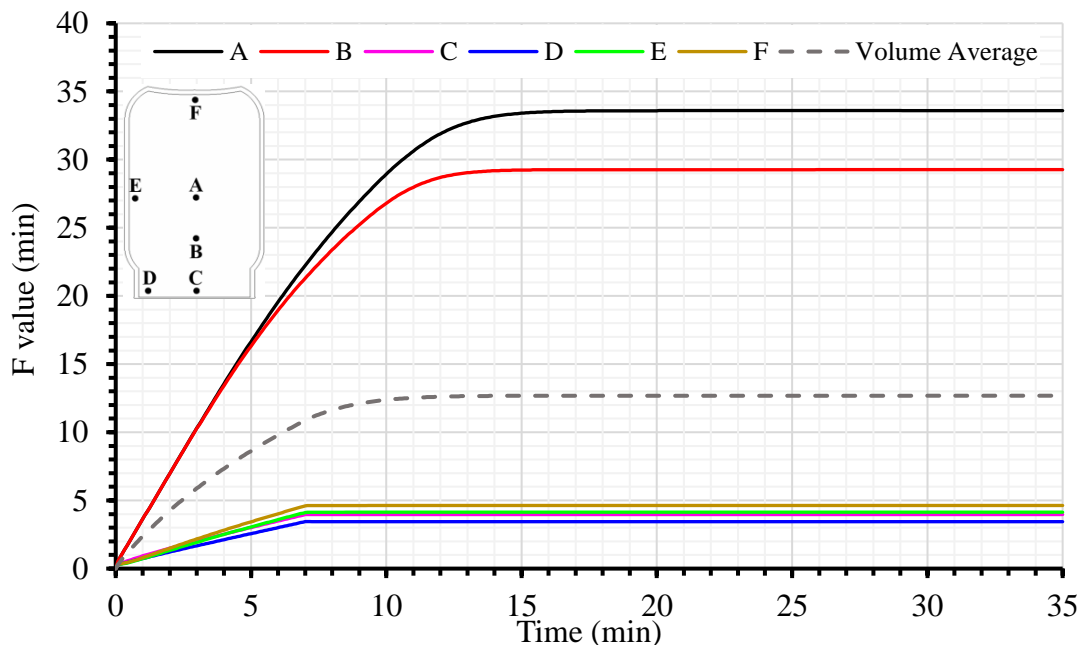
Σχήμα 63. Εξέλιξη της ολοκληρωμένης τιμής  $F_s$  (Volume Average) της διεργασίας και των αντίστοιχων σημειακών τιμών  $F$  value στα σημεία A, B, C, D, E, F του προϊόντος κατά την παραμονή του τοματοχυμού σε υδατόλουτρο ( $T_W = 90^\circ\text{C}$ ,  $h_W = 1103.5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ) για  $0.5^\circ\text{min}$  και επακόλουθη ψύξη σε νερό ( $T_{WC} = 20^\circ\text{C}$ ,  $h_{WC} = 450.2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ). Θερμοκρασία πλήρωσης  $T_{IT} = 98^\circ\text{C}$ ,  $T_{ref} = 93.33^\circ\text{C}$  και  $z = 8.89^\circ\text{C}$ .



Σχήμα 64. Εξέλιξη της ολοκληρωμένης τιμής  $F_s$  (Volume Average) της διεργασίας και των αντίστοιχων σημειακών τιμών  $F$  value στα σημεία A, B, C, D, E, F του προϊόντος κατά την παραμονή του τοματοχυμού σε υδατόλουτρο ( $T_W = 90^\circ\text{C}$ ,  $h_W = 1103.5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ) για  $20.2^\circ\text{min}$  και επακόλουθη ψύξη σε νερό ( $T_{WC} = 20^\circ\text{C}$ ,  $h_{WC} = 450.2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ). Θερμοκρασία πλήρωσης  $T_{IT} = 94^\circ\text{C}$ ,  $T_{ref} = 93.33^\circ\text{C}$  και  $z = 8.89^\circ\text{C}$ .



Σχήμα 65. Εξέλιξη της ολοκληρωμένης τιμή  $F_s$  (Volume Average) της διεργασίας και των αντίστοιχων σημειακών τιμών  $F$  value στα σημεία A, B, C, D, E, F του προϊόντος κατά την παραμονή του τοματοχυμού σε υδατόλουτρο ( $T_W = 90^\circ\text{C}$ ,  $h_W = 1103.5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ) για  $13.3^\circ\text{min}$  και επακόλουθη ψύξη σε νερό ( $T_{WC} = 20^\circ\text{C}$ ,  $h_{WC} = 450.2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ). Θερμοκρασία πλήρωσης  $T_{IT} = 96^\circ\text{C}$ ,  $T_{ref} = 93.33^\circ\text{C}$  και  $z = 8.89^\circ\text{C}$ .



Σχήμα 66. Εξέλιξη της ολοκληρωμένης τιμή  $F_s$  (Volume Average) της διεργασίας και των αντίστοιχων σημειακών τιμών  $F$  value στα σημεία A, B, C, D, E, F του προϊόντος κατά την παραμονή του τοματοχυμού σε υδατόλουτρο ( $T_W = 90^\circ\text{C}$ ,  $h_W = 1103.5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ) για  $7^\circ\text{min}$  και επακόλουθη ψύξη σε νερό ( $T_{WC} = 20^\circ\text{C}$ ,  $h_{WC} = 450.2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ). Θερμοκρασία πλήρωσης  $T_{IT} = 98^\circ\text{C}$ ,  $T_{ref} = 93.33^\circ\text{C}$  και  $z = 8.89^\circ\text{C}$ .

Στον Πίνακα 16 παρουσιάζονται όλες οι περιπτώσεις που διερευνήθηκαν για την επίτευξη της απαιτούμενης τιμής  $F_s$  ίση προς  $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 12.6$  min και  $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 5$  min. Παρατηρούμε ότι στις περιπτώσεις με θερμοκρασία πλήρωσης 94, 96 και 98°C με παραμονή στον αέρα και σε υδατόλουτρο 50 και 70°C δεν υπήρξε επίτευξη της  $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 12.6$  min. Ομοίως δεν επιτεύχθηκε η τιμή  $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 5$  min στις περιπτώσεις με πλήρωση 94 και 96°C για παραμονή στον αέρα και σε υδατόλουτρο 50 και 70°C. Ο χρόνος παραμονής του τοματοχυμού σε αέρα και σε υδατόλουτρο καθορίστηκε από το πόσο γρήγορα θα επιτευχθεί η τιμή  $F_s$ . Η περίπτωση με θερμοκρασία πλήρωσης 98°C και διατήρηση σε υδατόλουτρο 90°C έχει το λιγότερο χρόνο παραμονής με 0,5 min ενώ το μεγαλύτερο το έχει η περίπτωση σε υδατόλουτρο θερμοκρασίας 50°C με 10 min.

Πίνακας 16. Χρόνος παραμονής του γυάλινου περιέκτη στον αέρα και σε υδατόλουτρο θερμοκρασιών 50, 70 και 90°C με βάση τη θερμοκρασία πλήρωσης 94, 96 και 98°C για επίτευξη της απαιτούμενης τιμής  $F_s$  ίση προς  $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 12.6$  min και  $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 5$  min.

$F_s$	Χρόνος παραμονής (min)											
	Αέρας			Υδατόλουτρο 50°C			Υδατόλουτρο 70°C			Υδατόλουτρο 90°C		
	94°C	96°C	98°C	94°C	96°C	98°C	94°C	96°C	98°C	94°C	96°C	98°C
$F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}}=12.6$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20.2	13.3	7
$F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}}=5$	-	-	1.08	-	-	10	-	-	1.17	5.33	2.67	0.5

-:Συνθήκη όπου δεν ήταν δυνατή η επίτευξη του στόχου  $F_s$ .

Μια προσέγγιση για την εμπορική αποστείρωση του καπακιού βασίζεται στις θερμοκρασίες της επιφάνειας επαφής του προϊόντος. Αυτό περιγράφεται σε έρευνα που διεξήχθη από τους Collier και Townsend (1954). Οι συγγραφείς κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι μια καθαρή επιφάνεια επαφής του περιέκτη με το προϊόν θα μπορούσε να αποστειρωθεί από ένζυμα, μύκητες και *lactobacilli* με επίτευξη  $F_{87.78^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 0.07$  min στο σημείο επαφής. Αυτή η θερμοκρασία στην επιφάνεια του προϊόντος και ο χρόνος παραμονής ενδέχεται να μην είναι απολύτως αποτελεσματικές έναντι ορισμένων μικροοργανισμών που σχηματίζουν σπόρια όπως ο *Bacillus coagulans* και το *Clostridium butyricum* και ορισμένων πολύ θερμοάντοχων μυκήτων όπως οι *Byssochlamus fulva* και *Byssochlamus nivea*. Αυτοί οι ανθεκτικοί στη θερμότητα μικροοργανισμοί μπορούν να καταστραφούν με μεγαλύτερη παραμονή του προϊόντος σε υψηλή θερμοκρασία πριν την ψύξη. Επίσης μια πιο συντηρητική προσέγγιση για τη σχέση χρόνου/θερμοκρασίας στην

εμπορική αποστείρωση του περιέκτη/καπακιού δίνει ο FPA, με  $F_{87.78^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 2$  min που προκύπτει από ιστορικές πληροφορίες και εκτενείς μελέτες που πραγματοποιήθηκαν για βιομηχανικές πρακτικές κυρίως για όξινα τρόφιμα.

Στον Πίνακα 17 παρουσιάζονται συνοπτικά όλοι οι συνδυασμοί που επιτυγχάνουν την τιμή  $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 5$  min με βάση τη θερμοκρασία πλήρωσης 94, 96 και 98°C στο τέλος κάθε διεργασίας, με τη  $F_{\text{holding}}$  να είναι η τιμή  $F$  κατά την παραμονή του τοματοχυμού στον αέρα ή σε υδατόλουτρο και τη  $F_{\text{cooling}}$  να είναι η τιμή  $F$  κατά τη διάρκεια της ψύξης σε νερό. Εκτός από την ολοκληρωμένη τιμή  $F$  για τον όγκο του περιέκτη, υπολογίστηκε και η σημειακή  $F_{\text{cap}}$  στο κρίσιμο σημείο D (0.0195, 0.1268, 0) του καπακιού. Παρατηρείται ότι η  $F_{\text{cooling}}$  είναι ίση με 3.78 min στο στάδιο της ψύξης από τα συνολικά 5.08 min που επιτυγχάνονται.

Πίνακας 17. Συγκεντρωτικός πίνακας των τιμών  $F$ , με βάση τη θερμοκρασία πλήρωσης 94, 96 και 98°C στο τέλος κάθε διεργασίας που επιτεύχθηκε η τιμή  $F_s$  ίση προς  $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 5$  min.

	T (°C)	$F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 5$ min			$F_{87.78^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}}$
		$F_{\text{total}}$ (min)	$F_{\text{holding}}$ (min)	$F_{\text{cooling}}$ (min)	$F_{\text{cap}}$ (min)
<b>Αέρας</b>	98	5.01	2.22	2.79	1.46
<b>Υδατόλουτρο 50°C</b>	98	5.02	4.98	0.04	1.20
<b>Υδατόλουτρο 70°C</b>	98	5.08	2.38	2.70	1.25
<b>Υδατόλουτρο 90°C</b>	94	5.09	4.03	1.06	9.95
	96	5.26	3.40	1.86	5.64
	98	5.08	1.30	3.78	2.09

$F_{\text{total}}$ : ολοκληρωμένη τιμή  $F$  στο τέλος της συνολικής διεργασίας,  $F_{\text{holding}}$ : ολοκληρωμένη τιμή  $F$  που επιτυγχάνεται αποκλειστικά κατά το στάδιο της παραμονής του προϊόντος στο υδατόλουτρο,  $F_{\text{cooling}}$ : ολοκληρωμένη τιμή  $F$  που επιτυγχάνεται αποκλειστικά κατά το στάδιο της ψύξης του προϊόντος στο νερό των  $T_H = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $F_{\text{cap}}$ : σημειακή τιμή  $F$  της συνολικής διεργασίας στο καπάκι του περιέκτη (κρίσιμο σημείο).

Στον Πίνακα 18 παρουσιάζονται οι περιπτώσεις για την επίτευξη της τιμής  $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 12.6$  min. Λιγότερο χρόνο παραμονής σε υδατόλουτρο 90°C φαίνεται να έχει η περίπτωση με θερμοκρασία πλήρωσης 98°C. Η τιμή  $F_{\text{cooling}}$  είναι κατά πολύ μικρότερη από την  $F_{\text{holding}}$  με τιμές 12.10, 11.71 και 10.86 min για θερμοκρασία πλήρωσης 94, 96 και 98°C. Όπως και πριν η  $F_{\text{cap}}$  ικανοποιεί και τα δυο κριτήρια όπως φαίνεται παραπάνω για θερμοκρασία πλήρωσης 94, 96 και 98°C, με μόνο μειονέκτημα την υπερβολική τιμή



επίτευξης  $F_{cap}$  ίση προς 36.57, 25.08 και 14.51 min, αντίστοιχα, που έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη ποιοτική υποβάθμιση.

Πίνακας 18. Συγκεντρωτικός πίνακας των τιμών  $F$ , με βάση τη θερμοκρασία πλήρωσης 94, 96 και 98°C στο τέλος κάθε διεργασίας που επιτεύχθηκε η τιμή  $F_s$  ίση προς

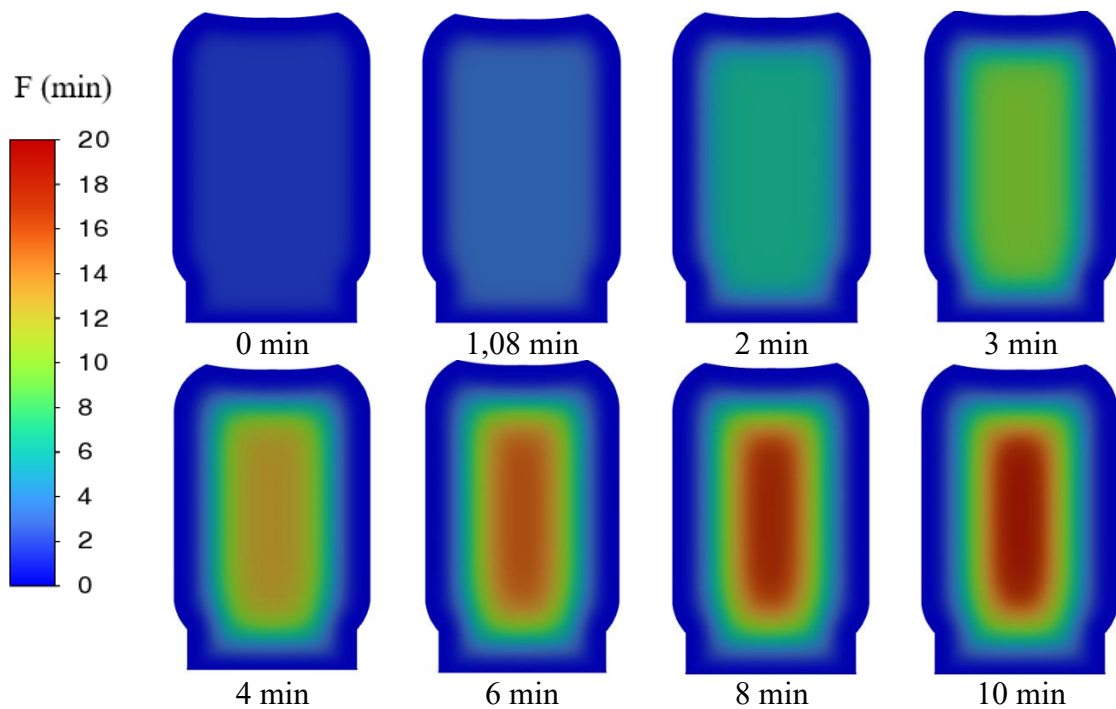
$$F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 12.6 \text{ min.}$$

	T (°C)	$F_{93.3^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}}=12.6 \text{ min}$			$F_{87.78^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}}$
		$F_s$ (min)	$F_{\text{holding}}$ (min)	$F_{\text{cooling}}$ (min)	$F_{\text{cap}}$ (min)
<b>Υδατόλουτρο 90°C</b>	94	12.76	12.10	0.66	36.57
	96	12.62	11.71	0.91	25.08
	98	12.68	10.86	1.82	14.51

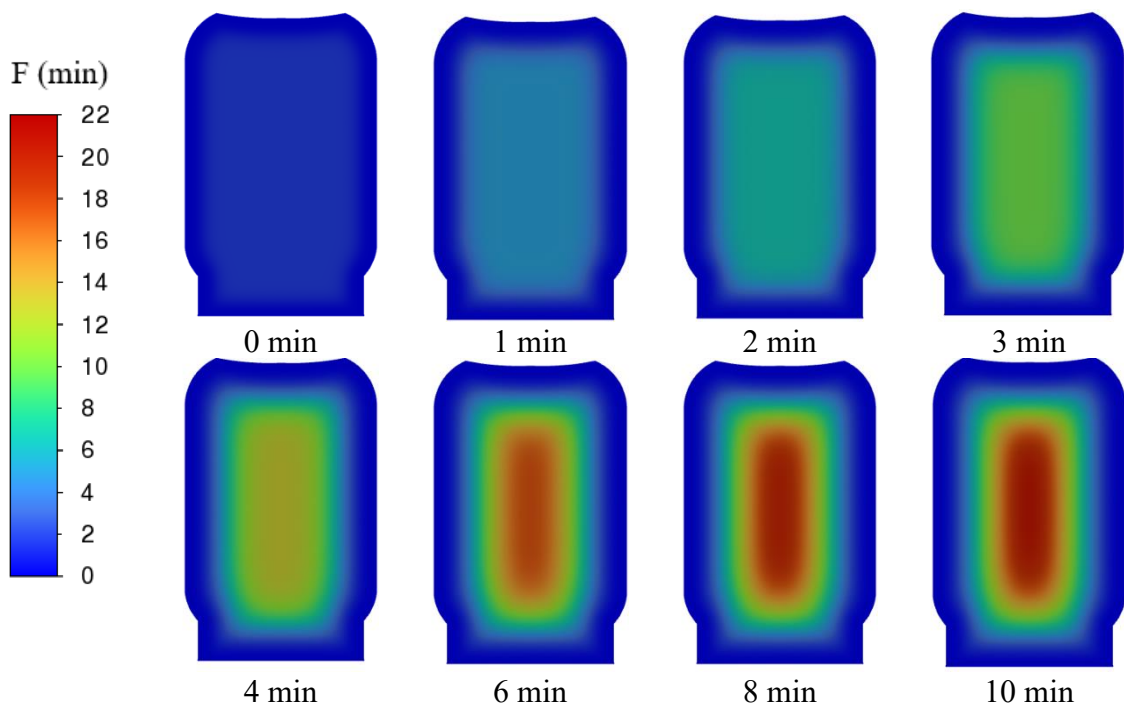
$T$ : θερμοκρασία,  $F_s$ : ολοκληρωμένη τιμή της διεργασίας στο τέλος της ψύξης με νερό,  $F_{\text{cooling}}$ : τιμή  $F$  της διεργασίας κατά την ψύξη στο νερό  $T_w=20^{\circ}\text{C}$ ,  $F_{\text{holding}}$ : τιμή  $F$  της διεργασίας στο υδατόλουτρο.  $F_{\text{cap}}$ : τιμή  $F$  της διεργασίας στο κρίσιμο σημείο στο τέλος της ψύξης.

Στη σύγκριση των σημειακών τιμών  $F$  στο σημείο D (καπάκι) με τη βιβλιογραφία για την αποστείρωση του κρίσιμου σημείου, παρατηρούμε ότι για την πρώτη περίπτωση με  $F_{87.78^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 0.07 \text{ min}$ , όλες οι τιμές είναι αποδεκτές, αλλά για τη δεύτερη με  $F_{87.78^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 2 \text{ min}$  είναι αποδεκτές μόνο 3 περιπτώσεις με θερμοκρασίας πλήρωσης 94, 96 και 98°C και χρόνο παραμονής σε υδατόλουτρο 90°C.

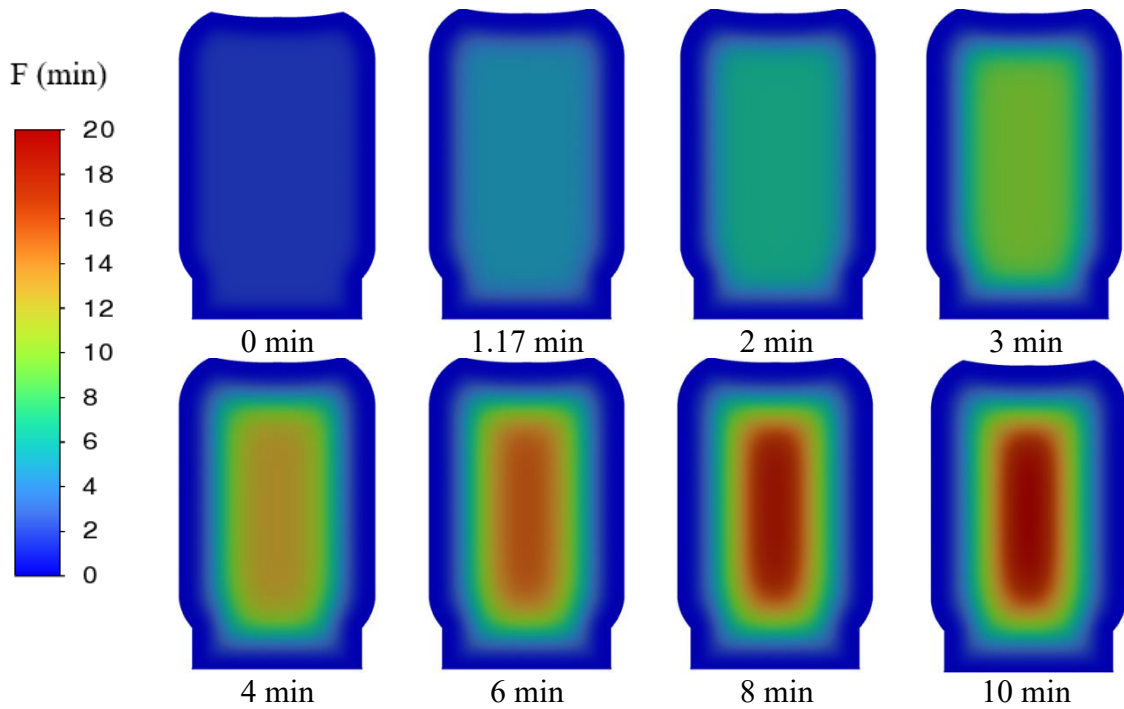
Στα Σχήματα 67-75 απεικονίζεται χρωματικά η εξέλιξη της κατανομής της  $F$  για τη διάρκεια της διεργασίας ίση με 35 min και για τις δύο τιμές  $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 12.6 \text{ min}$  και  $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 5 \text{ min}$  που έπρεπε να επιτευχθούν. Για  $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 5 \text{ min}$  παρατηρείται ότι η ολοκληρωμένη τιμή  $F_s$  αυξάνεται μέχρι τα 10-14 min της διεργασίας και ύστερα παραμένει σταθερή. Τα σημεία που είναι εσωτερικά κοντά στο γεωμετρικό κέντρο του γυάλινου περιέκτη έχουν μεγαλύτερες τιμές  $F$ , άρα και μεγαλύτερη θανάτωση σε σχέση με τα σημεία τα οποία είναι επιφανειακά. Σε κάθε σχήμα φαίνεται η διαφορετική κλίμακα της σημειακής τιμής  $F$  λόγω της μέγιστης τιμής  $F$  στο κέντρο του περιέκτη κάθε περίπτωσης. Με χρώμα μπλε απεικονίζονται η ελάχιστες τιμές  $F$  και αυξάνονται προς το κόκκινο που είναι οι μέγιστες. Στο σχήμα 35 φαίνεται η κατανομή της μεγαλύτερης σημειακής τιμής  $F$ , που επιτυγχάνεται και στις 2 περιπτώσεις που διευρυνθήκαν, ίση προς 32 min.



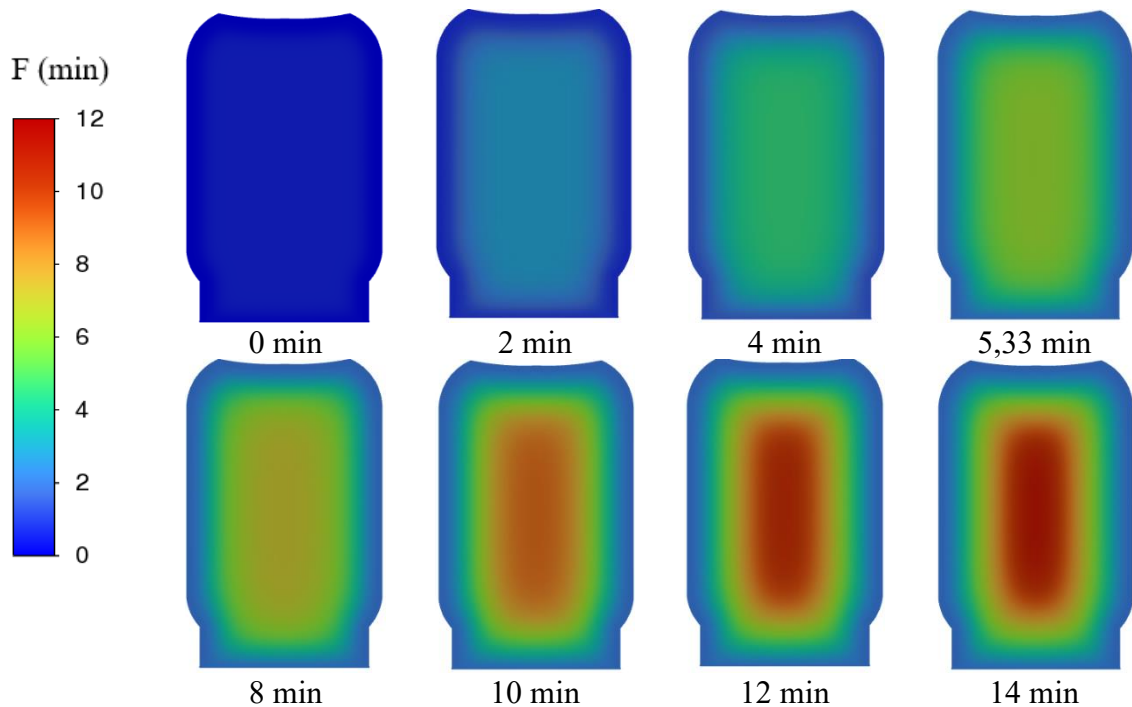
Σχήμα 67. Εξέλιξη της κατανομής της τιμής  $F$  value τοματοχυμού με θερμοκρασία πλήρωσης  $98^{\circ}\text{C}$ , παραμονή στον αέρα ( $T_{air} = 25^{\circ}\text{C}$ ,  $h_{air} = 11.43 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ) για 1.08 min και επακόλουθη ψύξη σε νερό ( $T_{WC} = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $h_{WC} = 450.2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ).



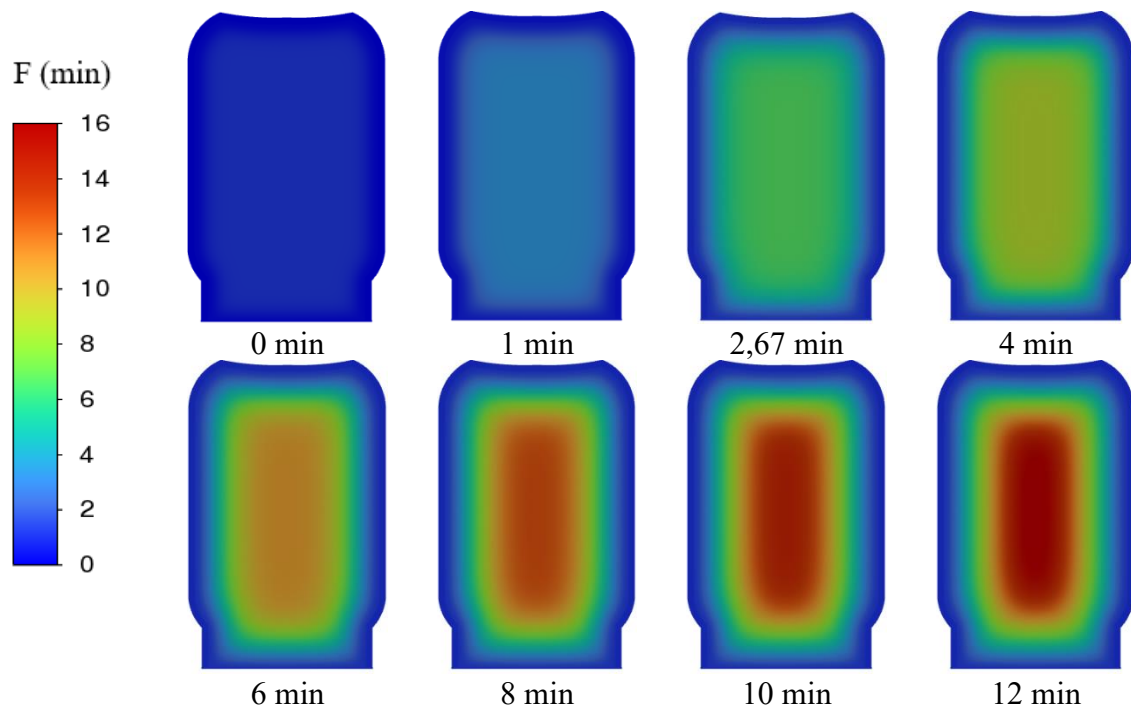
Σχήμα 68. Εξέλιξη της κατανομής της τιμής  $F$  value τοματοχυμού με θερμοκρασία πλήρωσης  $98^{\circ}\text{C}$ , παραμονή σε υδατόλουτρο ( $T_w = 50^{\circ}\text{C}$ ,  $h_w = 596.8 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ) για 10 min και επακόλουθη ψύξη σε νερό ( $T_{WC} = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $h_{WC} = 450.2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ).



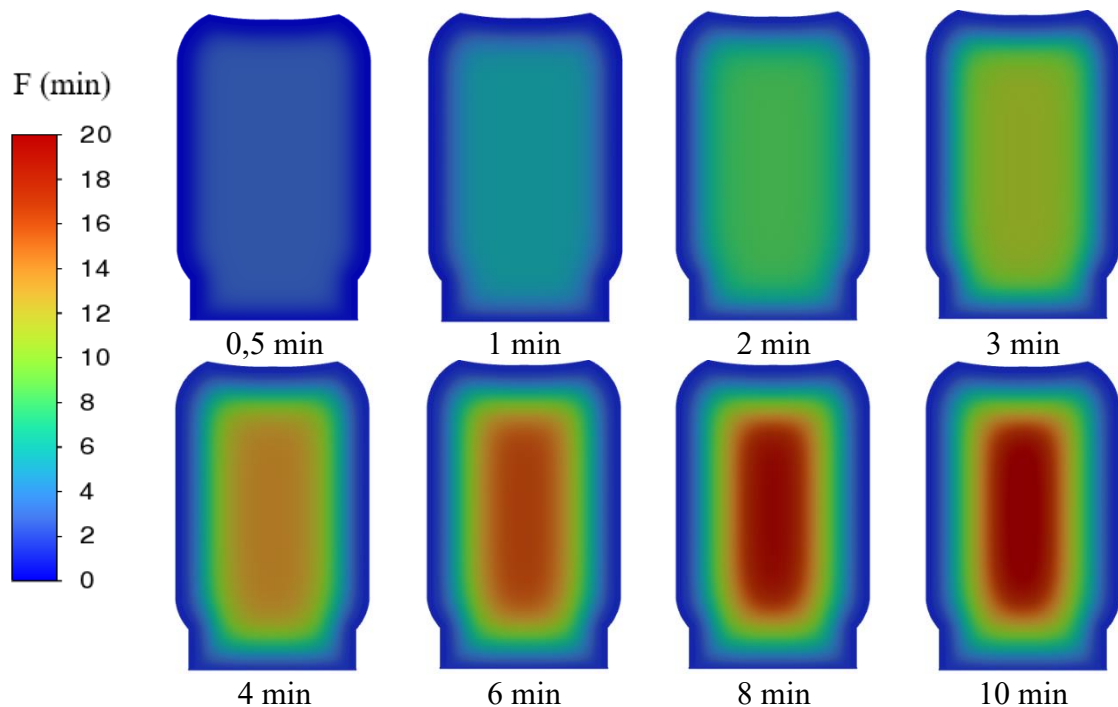
Σχήμα 69. Εξέλιξη της κατανομής της τιμής  $F$  value τοματοχυμού με θερμοκρασία πλήρωσης  $98^{\circ}\text{C}$ , παραμονή σε υδατόλουτρο ( $T_w = 70^{\circ}\text{C}$ ,  $h_w = 801.6 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ) για 1.17 min και επακόλουθη ψύξη σε νερό ( $T_{WC} = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $h_{WC} = 450.2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ).



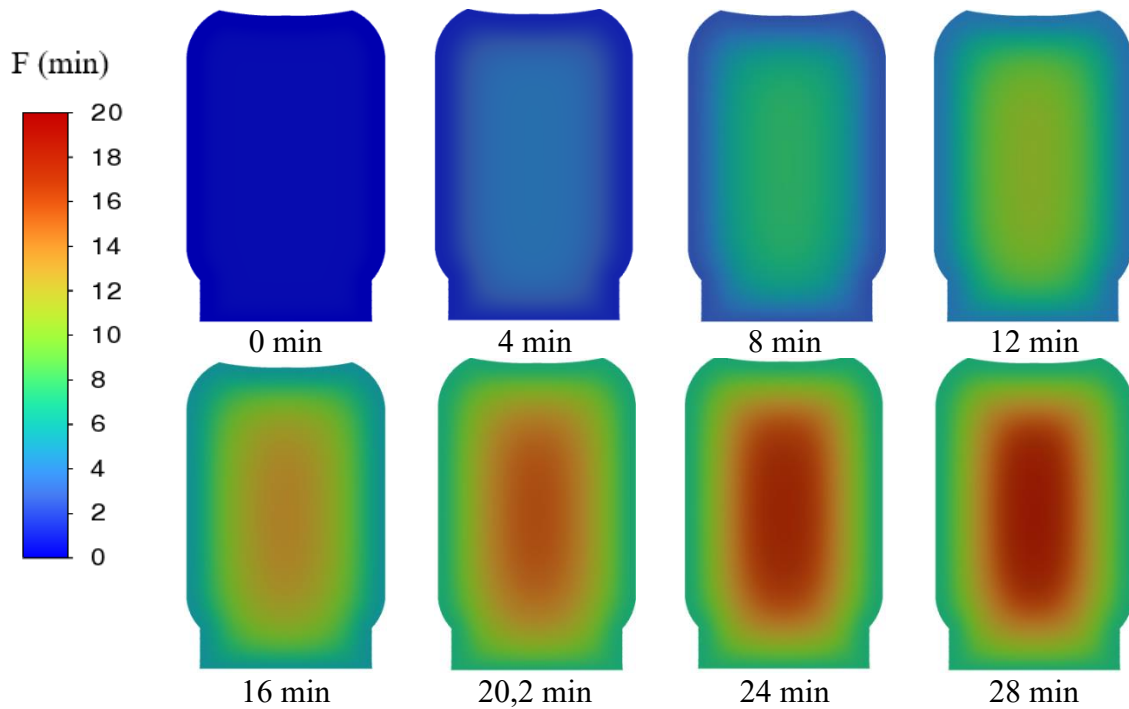
Σχήμα 70. Εξέλιξη της κατανομής της τιμής  $F$  value τοματοχυμού με θερμοκρασία πλήρωσης  $94^{\circ}\text{C}$ , παραμονή σε υδατόλουτρο ( $T_w = 90^{\circ}\text{C}$ ,  $h_w = 1103.5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ) για 5.33 min και επακόλουθη ψύξη σε νερό ( $T_{WC} = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $h_{WC} = 450.2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ).



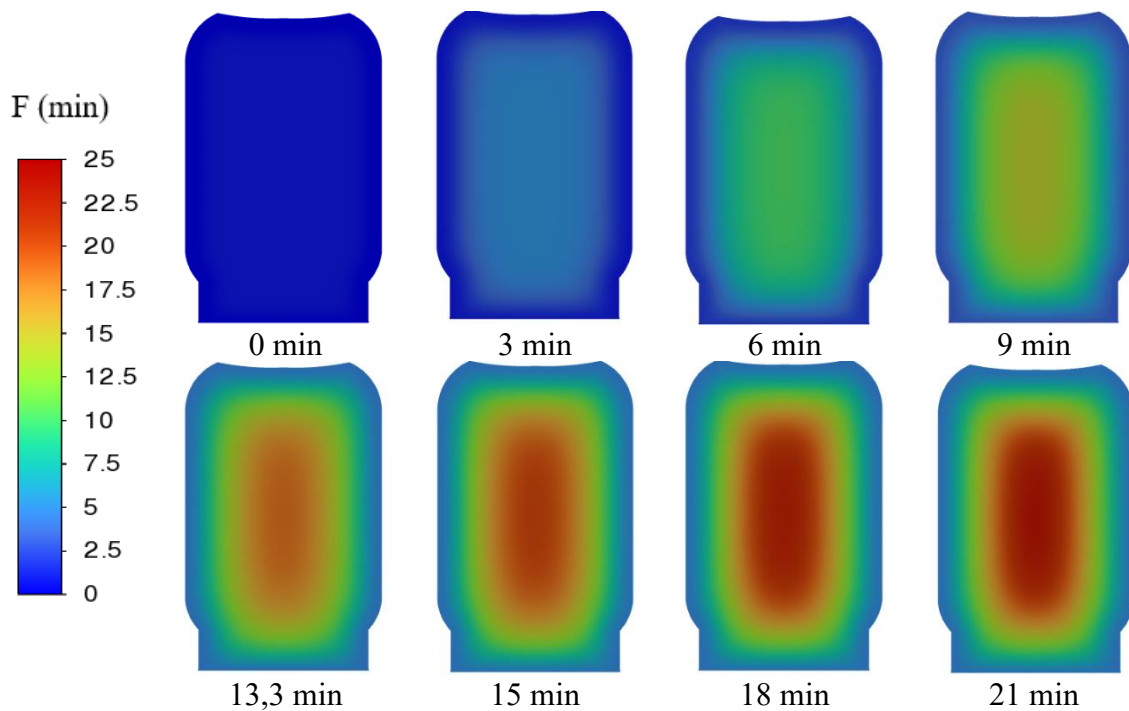
Σχήμα 71. Εξέλιξη της κατανομής της τιμής  $F$  value τοματοχυμού με θερμοκρασία πλήρωσης  $96^{\circ}\text{C}$ , παραμονή σε υδατόλουτρο ( $T_w = 90^{\circ}\text{C}$ ,  $h_w = 1103.5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ) για 2.67 min και επακόλουθη ψύξη σε νερό ( $T_{WC} = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $h_{WC} = 450.2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ).



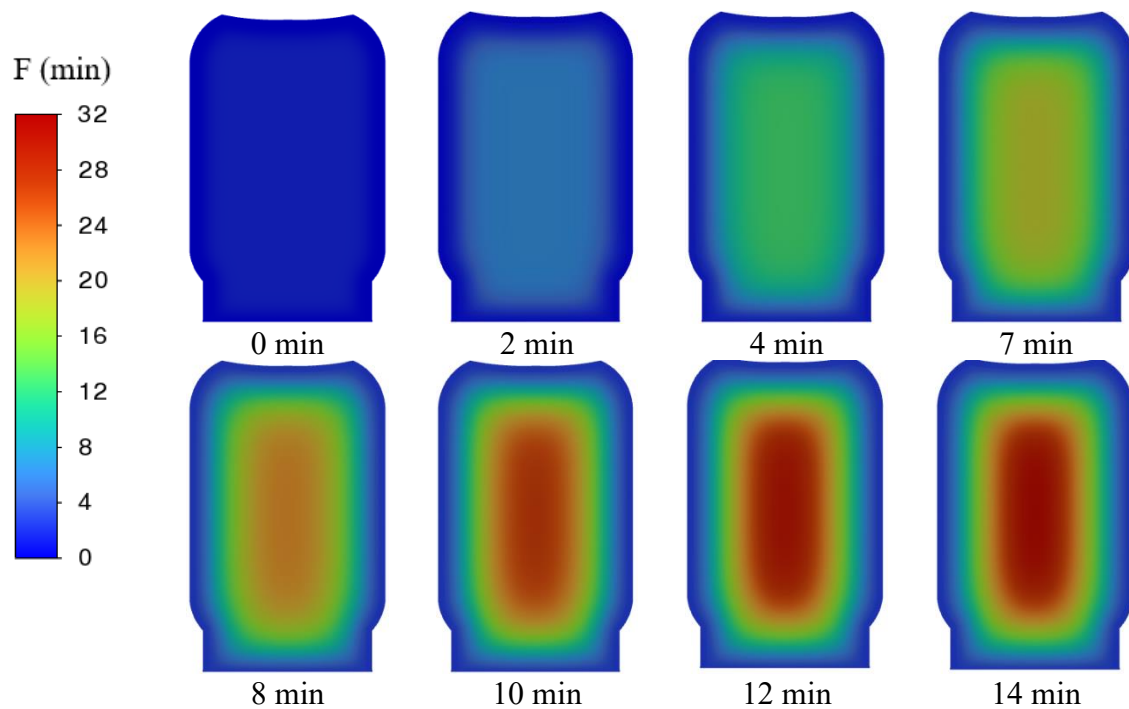
Σχήμα 72. Εξέλιξη της κατανομής της τιμής  $F$  value τοματοχυμού με θερμοκρασία πλήρωσης  $98^{\circ}\text{C}$ , παραμονή σε υδατόλουτρο ( $T_w = 90^{\circ}\text{C}$ ,  $h_w = 1103.5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ) για 0.5 min και επακόλουθη ψύξη σε νερό ( $T_{WC} = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $h_{WC} = 450.2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ).



Σχήμα 73. Εξέλιξη της κατανομής της τιμής  $F$  value τοματοχυμού με θερμοκρασία πλήρωσης  $94^{\circ}\text{C}$ , παραμονή σε υδατόλουτρο ( $T_w = 90^{\circ}\text{C}$ ,  $h_w = 1103.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ) για 20.2 min και επακόλουθη ψύξη σε νερό ( $T_{wc} = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $h_{wc} = 450.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ).

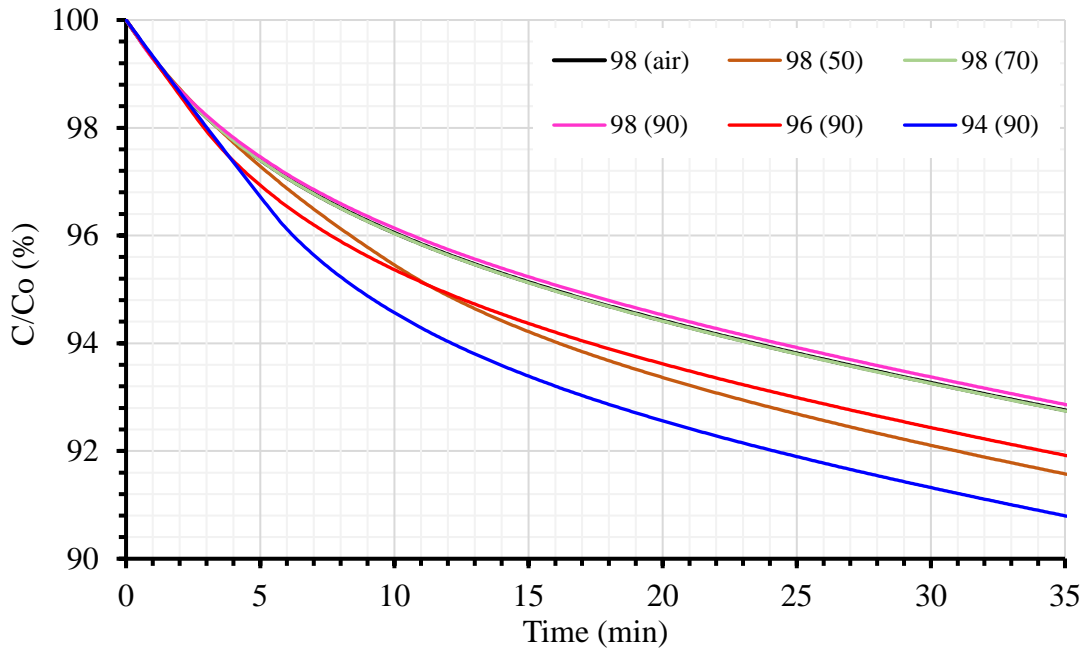


Σχήμα 74. Εξέλιξη της κατανομής της τιμής  $F$  value τοματοχυμού με θερμοκρασία πλήρωσης  $96^{\circ}\text{C}$ , παραμονή σε υδατόλουτρο ( $T_w = 90^{\circ}\text{C}$ ,  $h_w = 1103.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ) για 13.3 min και επακόλουθη ψύξη σε νερό ( $T_{wc} = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $h_{wc} = 450.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ).

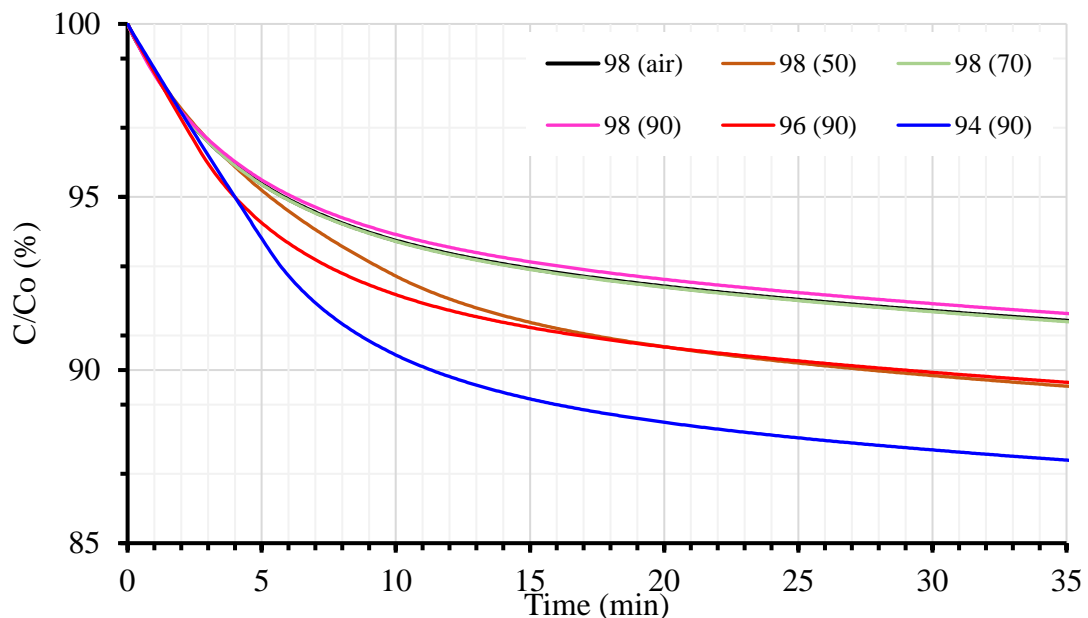


Σχήμα 75. Εξέλιξη της κατανομής της τιμής  $F$  value τοματοχυμού με θερμοκρασία πλήρωσης  $98^{\circ}\text{C}$ , παραμονή σε υδατόλουτρο ( $T_w = 90^{\circ}\text{C}$ ,  $h_w = 1103.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ) για 7 min και επακόλουθη ψύξη σε νερό ( $T_{WC} = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $h_{WC} = 450.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ).

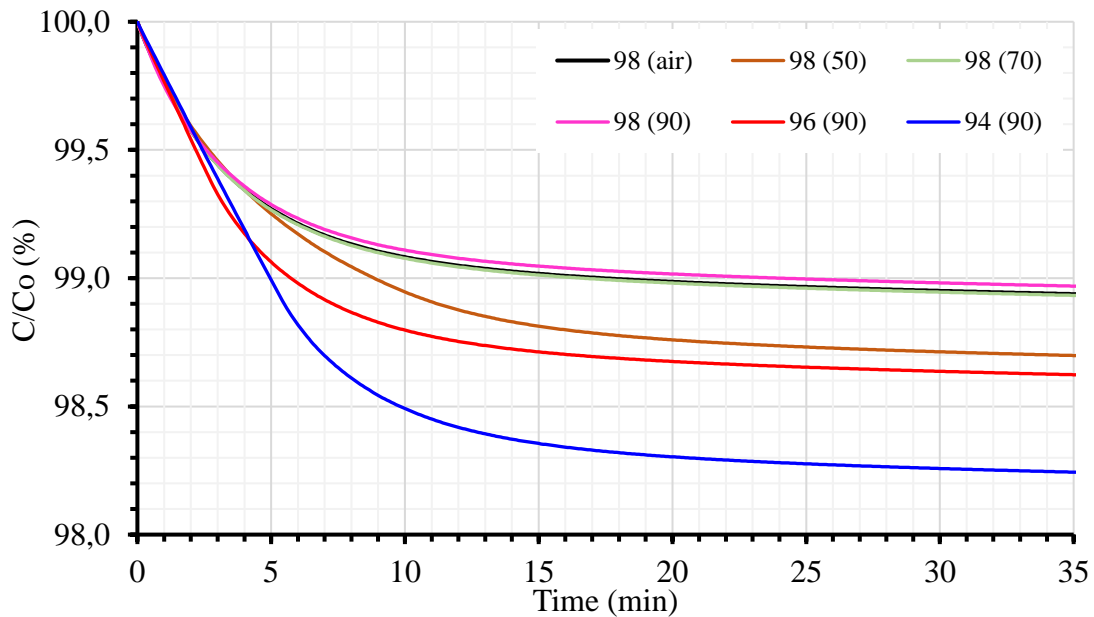
Στα Σχήματα 76-79 παρουσιάζεται η μέση τιμή της διατήρησης των παραμέτρων χρώματος  $a/b$  και  $L$ , της διατήρησης της βιταμίνης C και του Βήτα καροτένιου για τις "πλήρωση εν θερμώ" περιπτώσεις που επετεύχθη η απαιτούμενη τιμή  $F_s$  ( $F_{93.3^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}}$ ) των 5 min παραμονής σε αέρα και υδατόλουτρο με ακόλουθη ψύξη με νερό. Παρατηρείται ότι η μεγαλύτερη διατήρηση όλων των ποιοτικών παραμέτρων αντιστοιχεί στη θερμοκρασία γεμίσματος  $98^{\circ}\text{C}$  με παραμονή σε υδατόλουτρο θερμοκρασίας  $90^{\circ}\text{C}$  και συγκεκριμένα στα εξωτερικά σημεία του γυάλινου περιέκτη. Η μικρότερη διατήρηση παρατηρείται στην περίπτωση με θερμοκρασία πλήρωσης  $94^{\circ}\text{C}$  και παραμονή σε υδατόλουτρο  $90^{\circ}\text{C}$ . Τη μεγαλύτερη υποβάθμιση των ποιοτικών χαρακτηριστικών παρατηρείται στα εσωτερικά κεντρικά σημεία. Επίσης παρατηρείται ότι ο πιο θερμοανθεκτικός ποιοτικός παράγοντας είναι το Βήτα καροτένιο και ο πιο θερμοευαίσθητος παράγοντας είναι του χρώματος ( $L$ ).



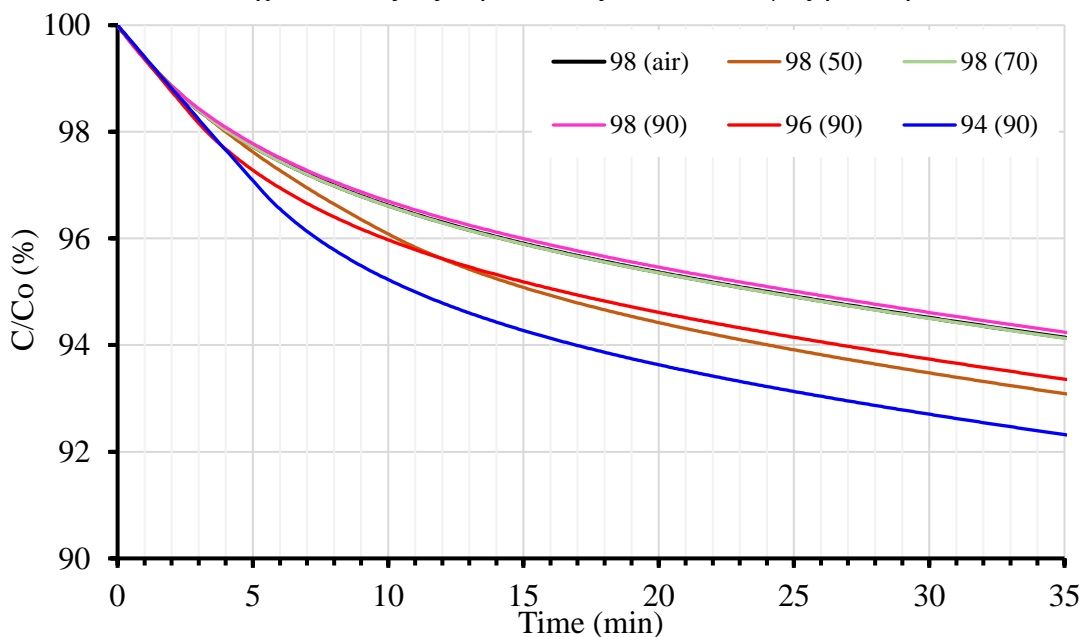
Σχήμα 76. Μέση τιμή διατήρησης του χρώματος (a/b) για τις "πλήρωση εν θερμώ" περιπτώσεις που επετεύχθη η απαιτούμενη τιμή  $F_s$  ( $F_{93.33}^{8.89^\circ C}$ ) των 5 min. Θερμοκρασία πλήρωσης 98°C και παραμονή του τοματοχυμού είτε στον αέρα, 98 (air), είτε σε υδατόλουτρο θερμοκρασίας 50°C, 98 (50), 70°C, 98 (70), και 90°C, 98 (90). Θερμοκρασία πλήρωσης 96°C ή 94°C και παραμονή του τοματοχυμού σε υδατόλουτρο θερμοκρασίας 90°C, 96 (90) και 94 (90), αντίστοιχα. Σε όλες τις περιπτώσεις, ακολουθεί ψύξη σε νερό 20°C.



Σχήμα 77. Μέση τιμή διατήρησης του χρώματος L για τις "πλήρωση εν θερμώ" περιπτώσεις που επετεύχθη η απαιτούμενη τιμή  $F_s$  ( $F_{93.33}^{8.89^\circ C}$ ) των 5 min. Θερμοκρασία πλήρωσης 98°C και παραμονή του τοματοχυμού είτε στον αέρα, 98 (air), είτε σε υδατόλουτρο θερμοκρασίας 50°C, 98 (50), 70°C, 98 (70), και 90°C, 98 (90). Θερμοκρασία πλήρωσης 96°C ή 94°C και παραμονή του τοματοχυμού σε υδατόλουτρο θερμοκρασίας 90°C, 96 (90) και 94 (90), αντίστοιχα. Σε όλες τις περιπτώσεις, ακολουθεί ψύξη σε νερό 20°C.



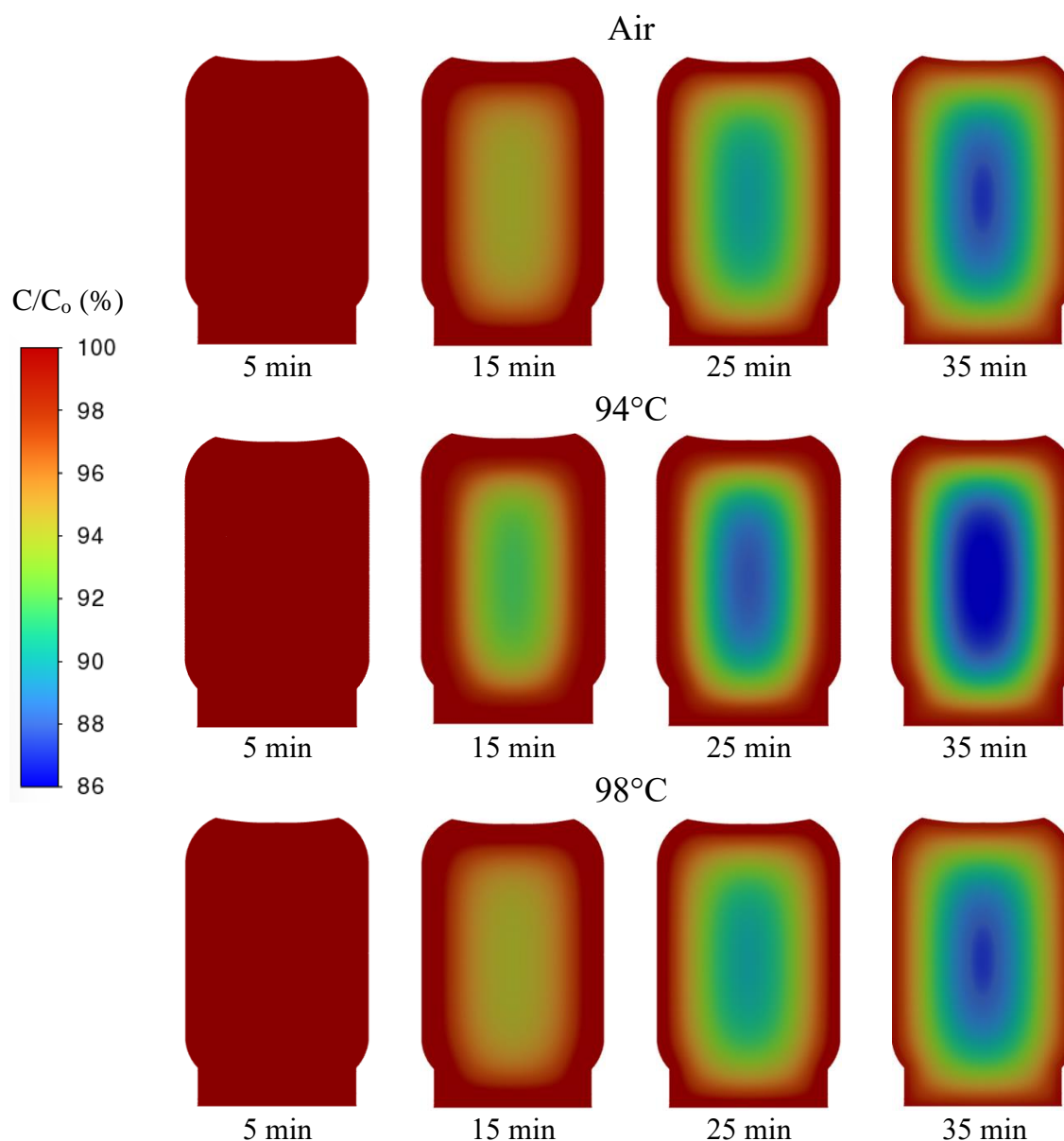
Σχήμα 78. Μέση τιμή διατήρησης του Βήτα καροτένιου για τις "πλήρωση εν θερμώ" περιπτώσεις που επετεύχθη η απαιτούμενη τιμή  $F_s$  ( $F_{93.33}^{8.89^{\circ}\text{C}}$ ) των 5 min. Θερμοκρασία πλήρωσης 98°C και παραμονή του τοματοχυμού είτε στον αέρα, 98 (air), είτε σε υδατόλουτρο θερμοκρασίας 50°C, 98 (50), 70°C, 98 (70), και 90°C, 98 (90). Θερμοκρασία πλήρωσης 96°C ή 94°C και παραμονή του τοματοχυμού σε υδατόλουτρο θερμοκρασίας 90°C, 96 (90) και 94 (90), αντίστοιχα. Σε όλες τις περιπτώσεις, ακολουθεί ψύξη σε νερό 20°C.



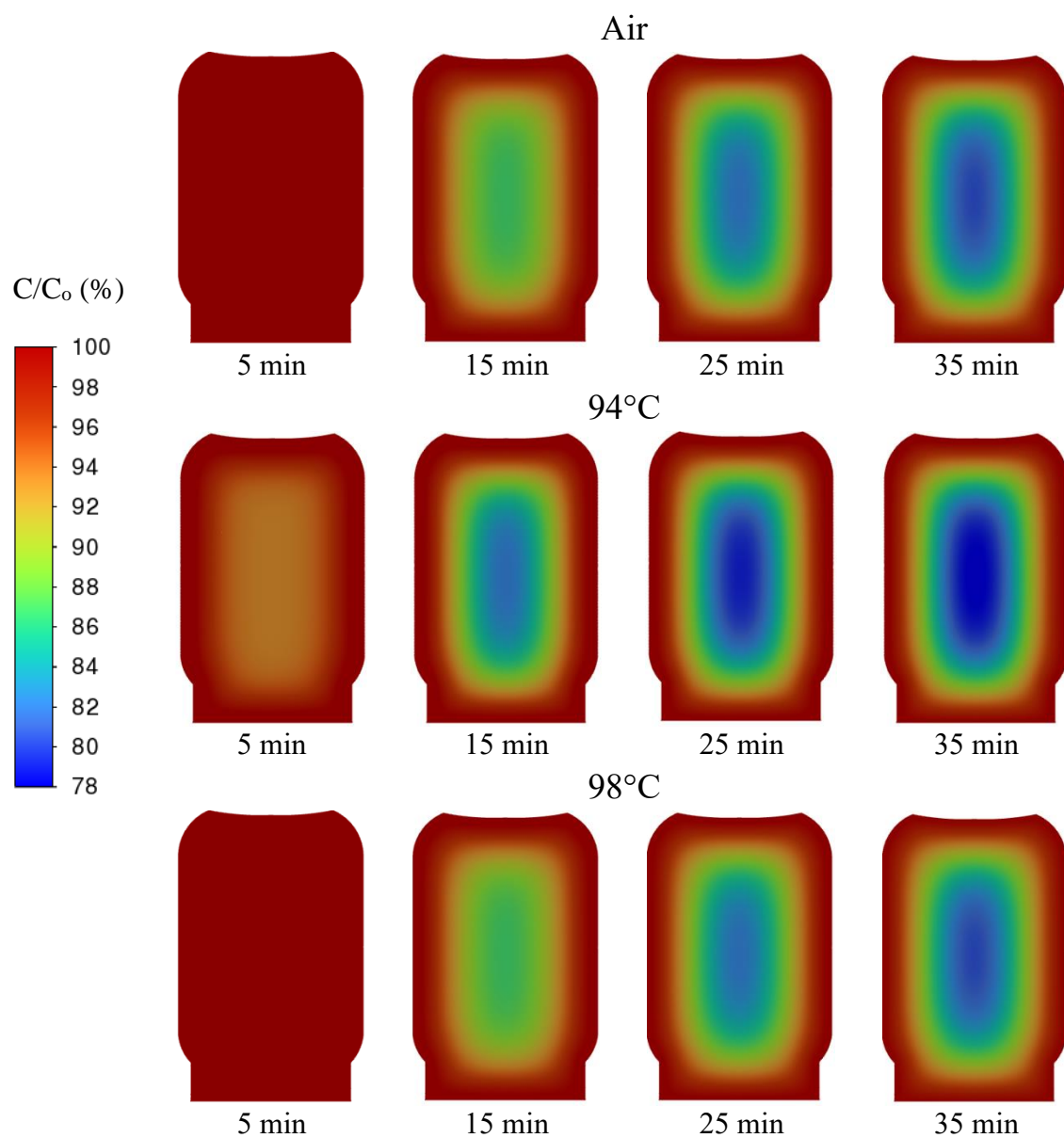
Σχήμα 79. Μέση τιμή διατήρησης της βιταμίνης C για τις "πλήρωση εν θερμώ" περιπτώσεις που επετεύχθη η απαιτούμενη τιμή  $F_s$  ( $F_{93.33}^{8.89^{\circ}\text{C}}$ ) των 5 min. Θερμοκρασία πλήρωσης 98°C και παραμονή του τοματοχυμού είτε στον αέρα, 98 (air), είτε σε υδατόλουτρο θερμοκρασίας 50°C, 98 (50), 70°C, 98 (70), και 90°C, 98 (90). Θερμοκρασία πλήρωσης 96°C ή 94°C και παραμονή του τοματοχυμού σε υδατόλουτρο θερμοκρασίας 90°C, 96 (90) και 94 (90), αντίστοιχα. Σε όλες τις περιπτώσεις, ακολουθεί ψύξη σε νερό 20°C.



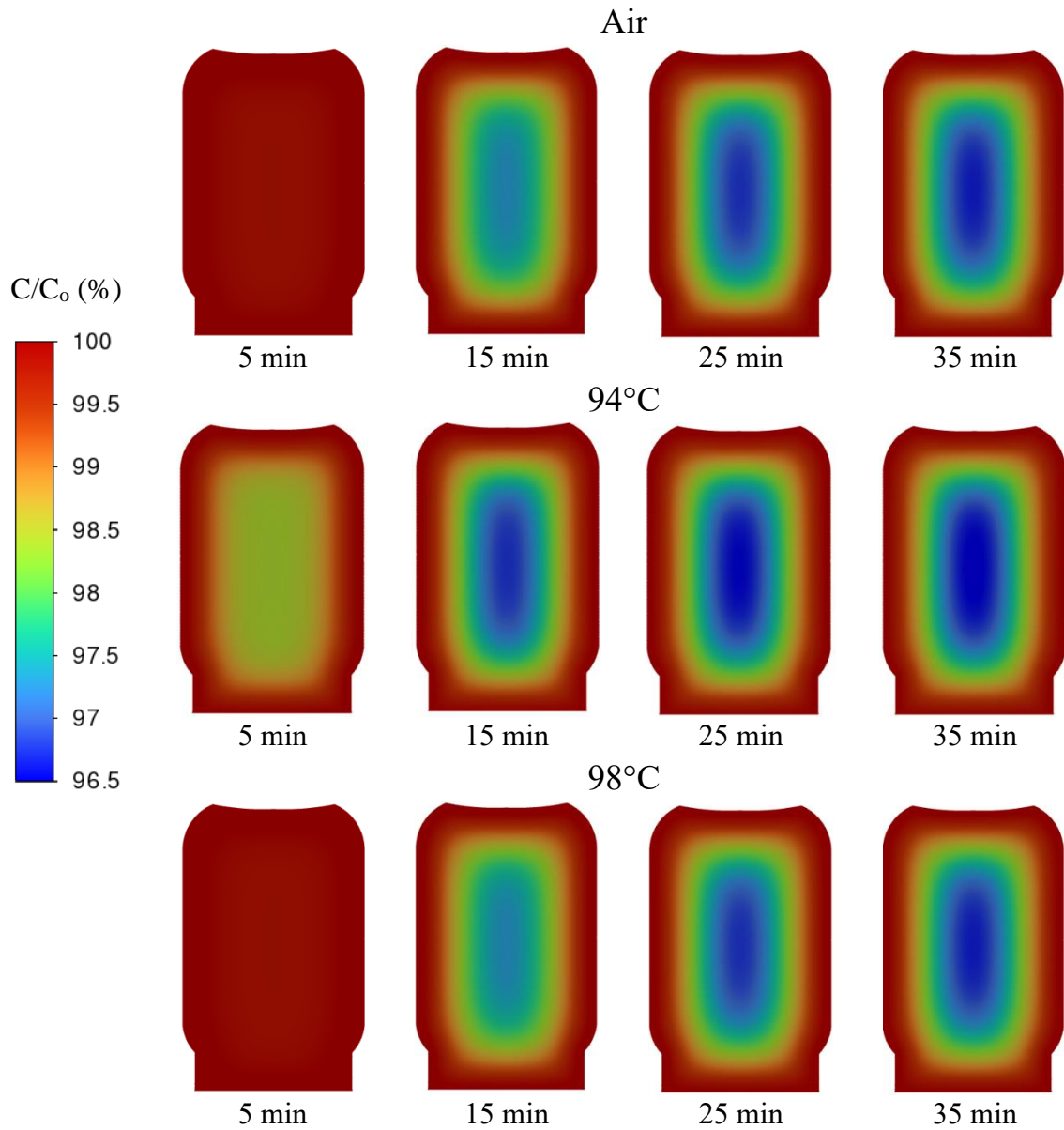
Στα Σχήματα 80-83 εμφανίζεται εξέλιξη της κατανομής της διατήρησης των ποιοτικών παραμέτρων για τις περιπτώσεις που επιτυγχάνεται η τιμή  $(F_{93.3^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}})=5 \text{ min}$ . Παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές οπου είναι στον αέρα και σε υδατόλουτρο  $90^{\circ}\text{C}$  για θερμοκρασία πλήρωσης  $98^{\circ}\text{C}$  και οι ελάχιστες τιμές διατήρησης με θερμοκρασία πλήρωσης  $94^{\circ}\text{C}$ .



Σχήμα 80. Εξέλιξη της κατανομής της διατήρησης του χρώματος (a/b) για τρεις περιπτώσεις με παραμονή σε αέρα θερμοκρασία πλήρωσης  $98^{\circ}\text{C}$  και υδατόλουτρο θερμοκρασία πλήρωσης  $94^{\circ}\text{C}$  και  $98^{\circ}\text{C}$  ( $T_{air} = 25^{\circ}\text{C}$ ,  $h_{air} = 11.43 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,  $T_w = 90^{\circ}\text{C}$ ,  $h_w = 1103.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ) για παραμονή  $0.5 \text{ min}$  ( $98^{\circ}\text{C}$ ),  $1.08 \text{ min}$  (αέρα) και  $5.33 \text{ min}$  ( $94^{\circ}\text{C}$ ) και επακόλουθη ψύξη σε νερό ( $T_{WC} = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $h_{WC} = 450.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ).

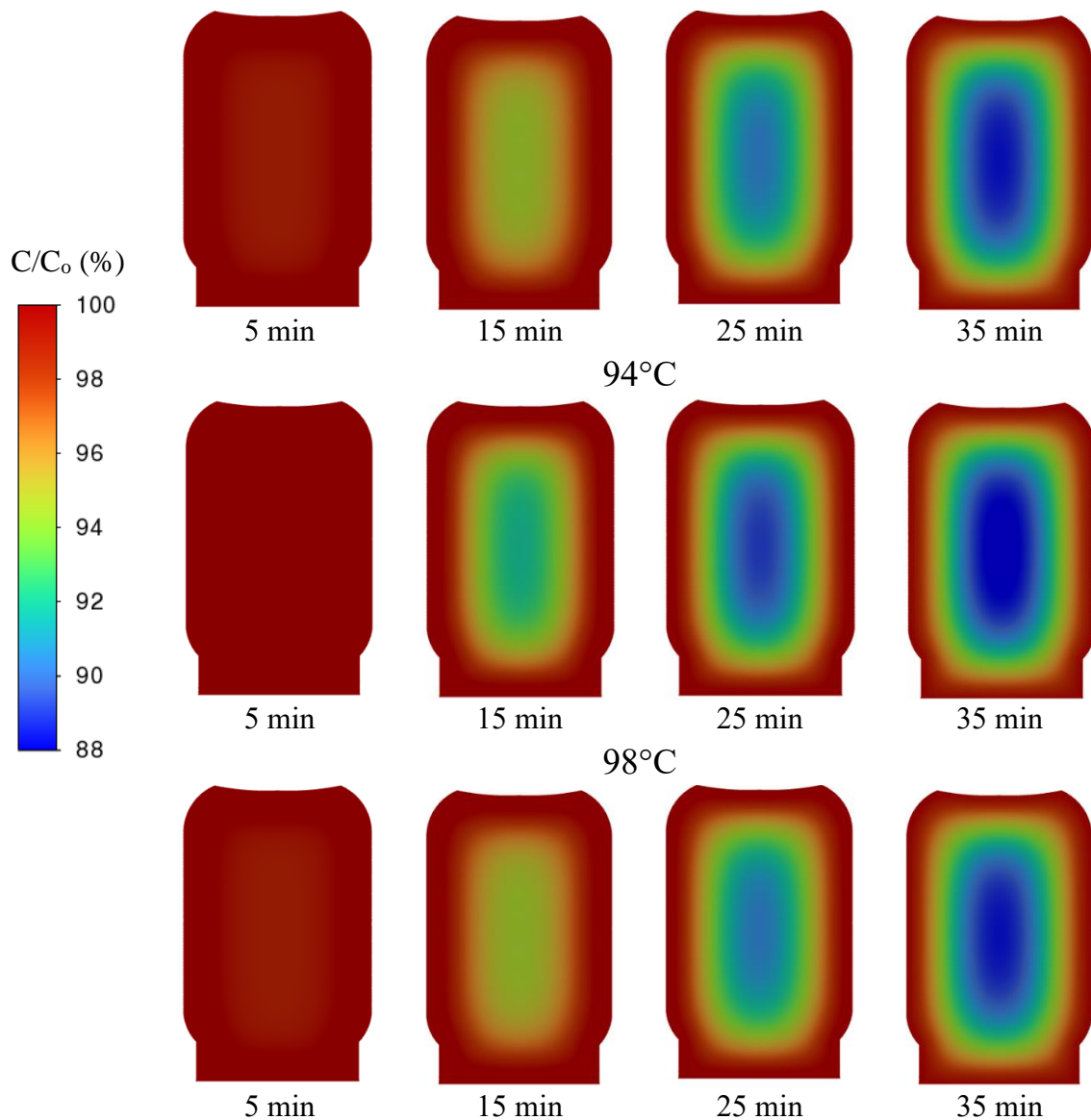


Σχήμα 81. Εξέλιξη της κατανομής της διατήρησης του χρώματος L για τρεις περιπτώσεις με παραμονή σε αέρα με θερμοκρασία πλήρωσης  $98^{\circ}\text{C}$  και υδατόλουτρο με θερμοκρασία πλήρωσης  $94^{\circ}\text{C}$ ,  $98^{\circ}\text{C}$  ( $T_{air} = 25^{\circ}\text{C}$ ,  $h_{air} = 11.43 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ,  $T_w = 90^{\circ}\text{C}$ ,  $h_w = 1103.5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ) και επακόλουθη ψύξη σε νερό ( $T_{WC} = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $h_{WC} = 450.2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ).



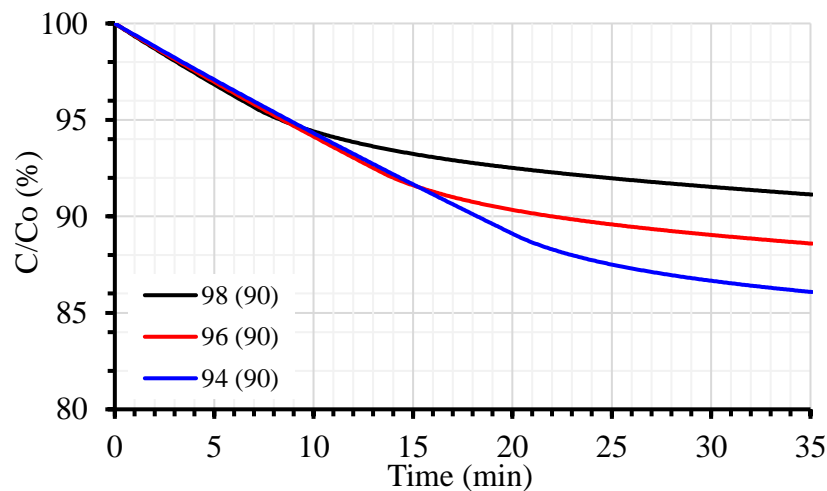
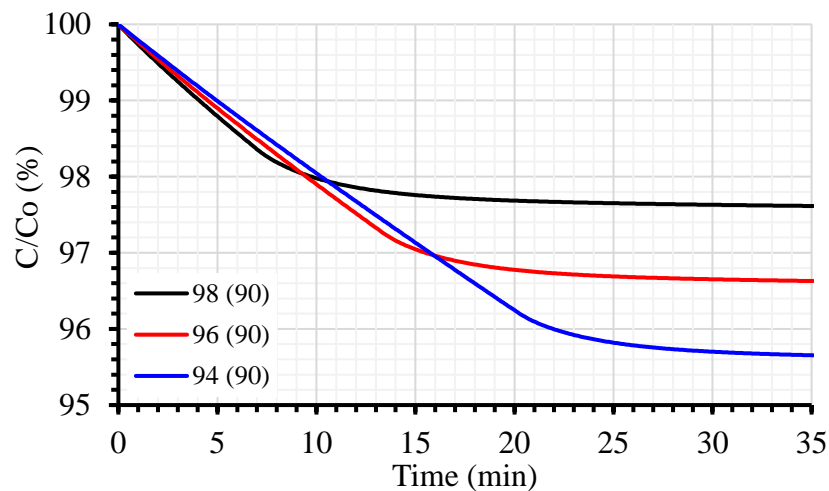
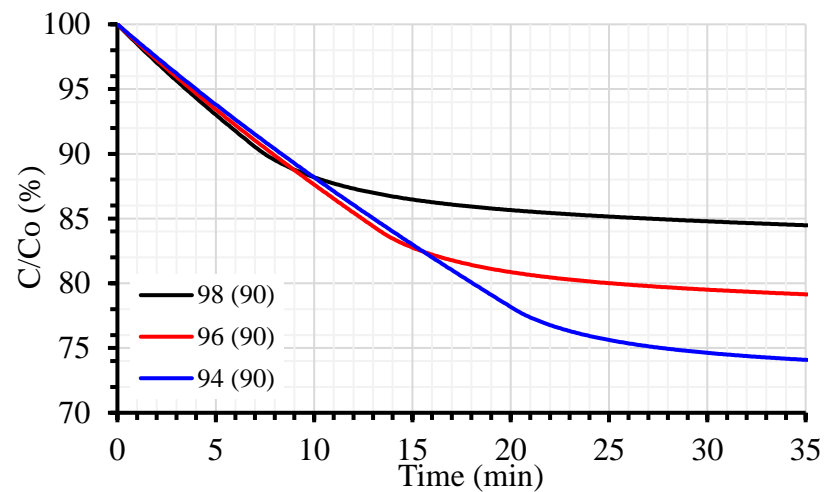
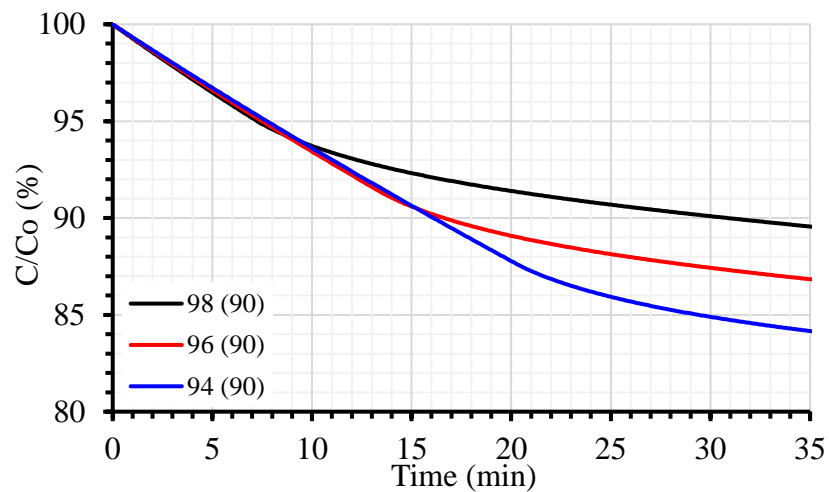
Σχήμα 82. Εξέλιξη της κατανομής της διατήρησης του Βήτα καροτένιου για τρεις περιπτώσεις με παραμονή σε αέρα με θερμοκρασία πλήρωσης 98°C και υδατόλουτρο με θερμοκρασία πλήρωσης 94°C και 98°C ( $T_{air} = 25^{\circ}\text{C}$ ,  $h_{air} = 11.43 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,  $T_w = 90^{\circ}\text{C}$ ,  $h_w = 1103.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ) και επακόλουθη ψύξη σε νερό ( $T_{WC} = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $h_{WC} = 450.2 \text{ (W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}))$ ).

Air

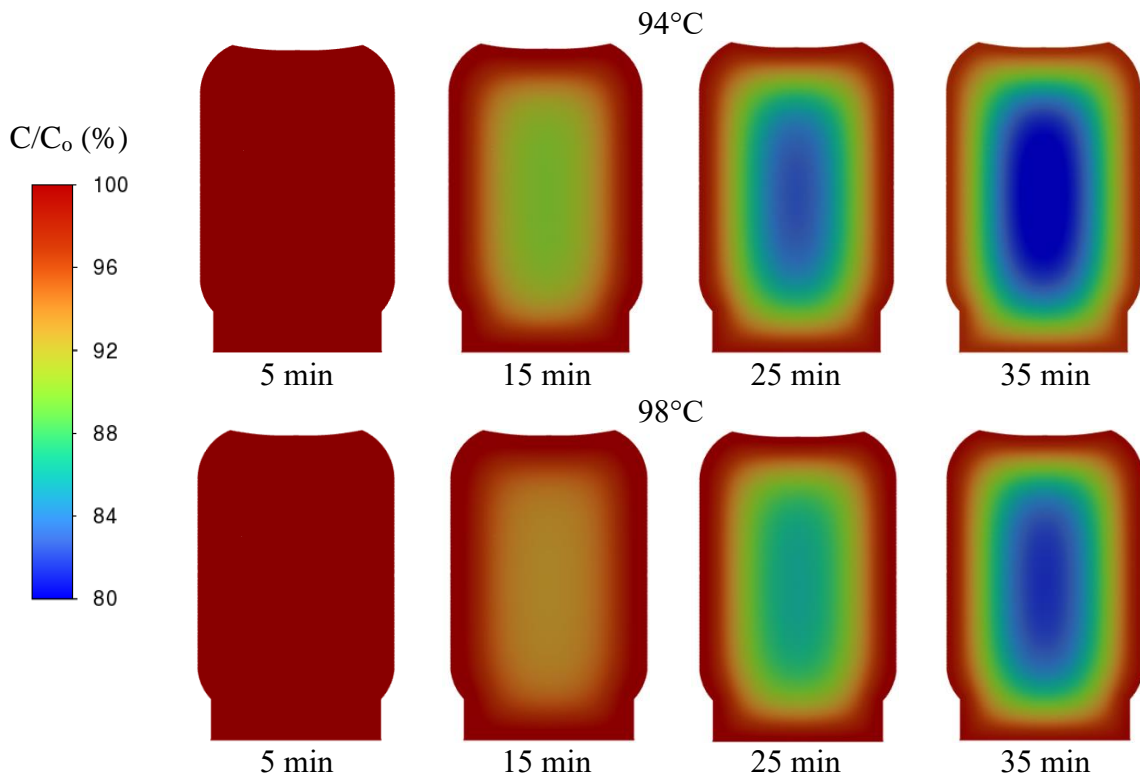


Σχήμα 83. Εξέλιξη της κατανομής της διατήρησης της βιταμίνης C για τρεις περιπτώσεις με παραμονή σε αέρα με θερμοκρασία πλήρωσης 98°C και υδατόλουτρο με θερμοκρασία πλήρωσης 94°C και 98°C ( $T_{air} = 25^\circ\text{C}$ ,  $h_{air} = 11.43 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ,  $T_w = 90^\circ\text{C}$ ,  $h_w = 1103.5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ) και επακόλουθη ψύξη σε νερό ( $T_{WC} = 20^\circ\text{C}$ ,  $h_{WC} = 450.2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ).

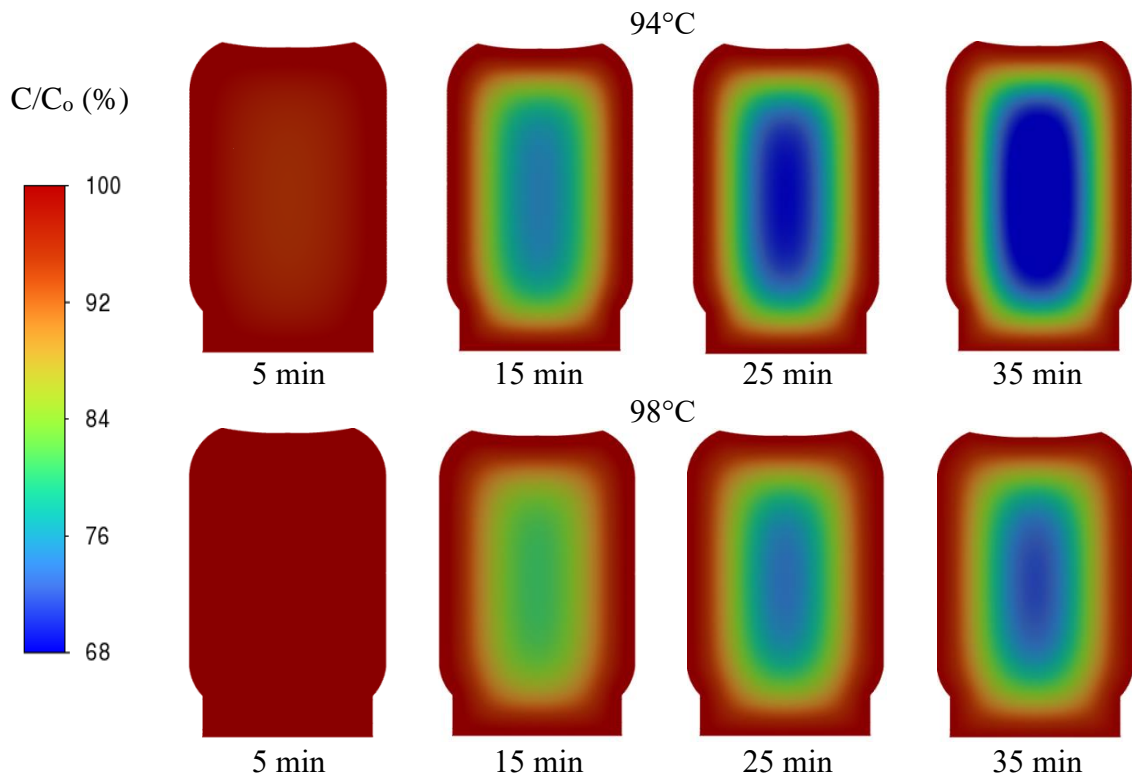
Στο Σχήμα 84 παρουσιάζεται η μέση τιμή της διατήρησης των παραμέτρων χρώματος  $a/b$  και  $L$ , της διατήρησης της βιταμίνης C και του Βήτα καροτένιου για τις "πλήρωση εν θερμώ" περιπτώσεις που επετεύχθη η απαιτούμενη τιμή  $F_s$  ( $F_{93.3^\circ\text{C}}^{8.89^\circ\text{C}}$ ) των 12.6 min παραμονής σε υδατόλουτρο 90°C με ακόλουθη ψύξη με νερό. Στα Σχήματα 85-88 απεικονίζεται η χρωματική κατανομή των ποιοτικών παραμέτρων με θερμοκρασία πλήρωσης 94 και 98°C.



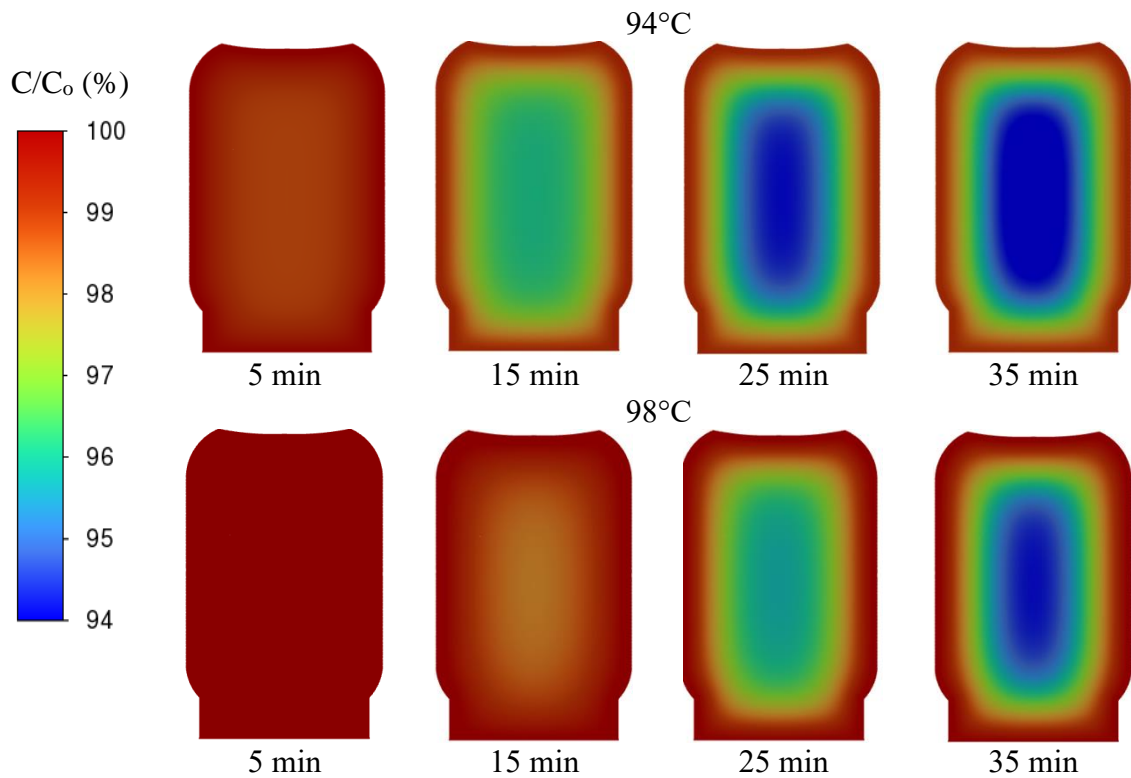
Σχήμα 84. Μέση τιμή διατήρησης του χρώματος (λόγος a/b, πάνω αριστερά και L, πάνω δεξιά), Βήτα καροτένιου (κάτω αριστερά) και βιταμίνης C (κάτω δεξιά), όπου επετεύχθη η απαιτούμενη τιμή  $F_s$  ( $F_{93.33^{\circ}C}^{8.89^{\circ}C}$ ) των 12.6 min. Θερμοκρασία πλήρωσης 94, 96 και 98°C και παραμονή του τοματοχυμού σε υδατόλουτρο θερμοκρασίας 90°C. Σε όλες τις περιπτώσεις, ακολουθεί ψύξη σε νερό 20°C.



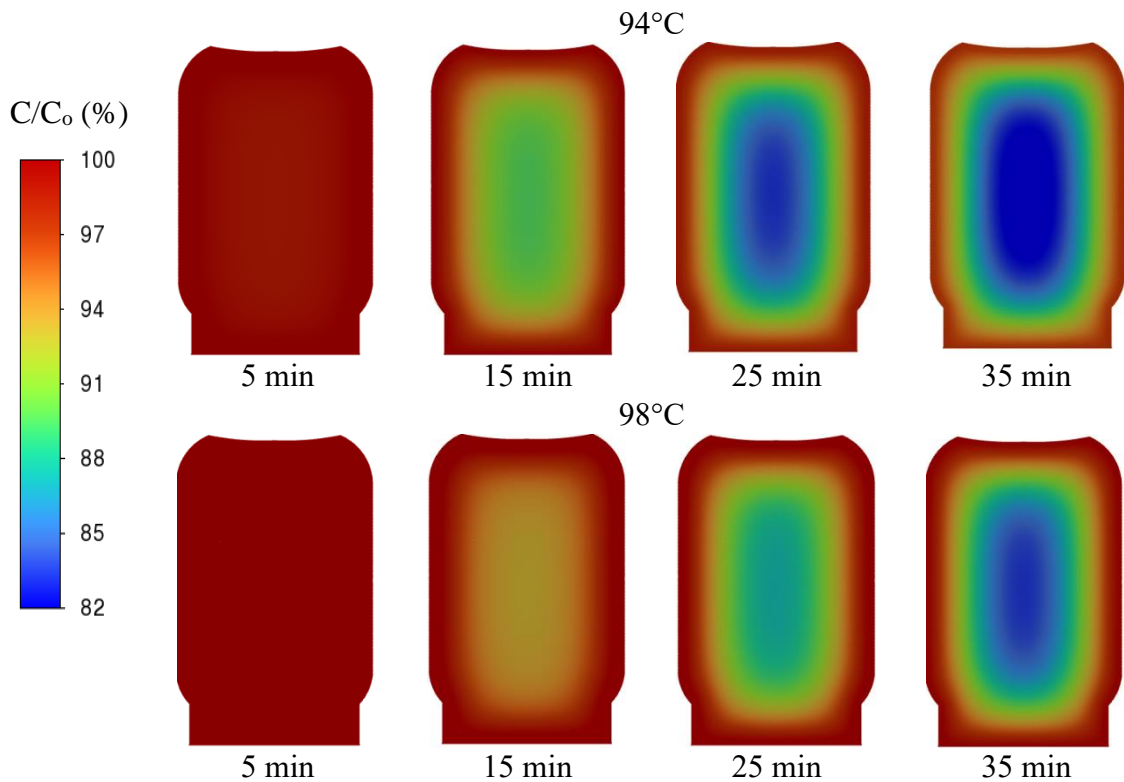
Σχήμα 85. Εξέλιξη της κατανομής της διατήρησης του χρώματος (a/b) σε θερμοκρασία πλήρωσης  $94^\circ\text{C}$  και  $98^\circ\text{C}$  για υδατόλουτρο ( $T_w = 90^\circ\text{C}$ ,  $h_w = 1103.5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ) για παραμονή 7 min ( $98^\circ\text{C}$ ) και 20.2 min ( $94^\circ\text{C}$ ) και επακόλουθη ψύξη σε νερό ( $T_{wc} = 20^\circ\text{C}$ ,  $h_{wc} = 450.2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ).



Σχήμα 86. Εξέλιξη της κατανομής της διατήρησης του χρώματος L σε θερμοκρασία πλήρωσης  $94^\circ\text{C}$  και  $98^\circ\text{C}$  για υδατόλουτρο ( $T_w = 90^\circ\text{C}$ ,  $h_w = 1103.5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ) για παραμονή 7 min ( $98^\circ\text{C}$ ) και 20.2 min ( $94^\circ\text{C}$ ) και επακόλουθη ψύξη σε νερό ( $T_{wc} = 20^\circ\text{C}$ ,  $h_{wc} = 450.2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ).



Σχήμα 87. Εξέλιξη της κατανομής της διατήρησης του Βήτα καροτένιου σε θερμοκρασία πλήρωσης 94°C και 98°C για υδατόλουτρο ( $T_w = 90^\circ\text{C}$ ,  $h_w = 1103.5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ) για παραμονή 7 min (98°C) και 20.2 min (94°C) και επακόλουθη ψύξη σε νερό ( $T_{wc} = 20^\circ\text{C}$ ,  $h_{wc} = 450.2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ).



Σχήμα 88. Εξέλιξη της κατανομής της διατήρησης της βιταμίνης C σε θερμοκρασία πλήρωσης 94°C και 98°C για υδατόλουτρο ( $T_w = 90^\circ\text{C}$ ,  $h_w = 1103.5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ) για παραμονή 7 min (98°C) και 20.2 min (94°C) και επακόλουθη ψύξη σε νερό ( $T_{wc} = 20^\circ\text{C}$ ,  $h_{wc} = 450.2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ).

Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω ακολουθεί ο Πίνακας 19 και 20 οι οποίοι παρουσιάζουν συνοπτικά όλους τους συνδυασμούς διατήρησης των ποιοτικών χαρακτηριστικών που εξετάστηκαν για να επιτευχθεί η  $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 5$  min και  $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 12.6$  min. Παρατηρούμε μικρές διαφορές ανάμεσα στα ποιοτικά χαρακτηριστικά σε όλες τις περιπτώσεις που διερευνήθηκαν. Στην περίπτωση πλήρωσης  $94^{\circ}\text{C}$  και παραμονή στους  $90^{\circ}\text{C}$  έχουμε τη μικρότερη ποιοτική διατήρηση από τις 4 που εξετάστηκαν και συγκεκριμένα του χρώματος  $L$  με 74.08%. Ενώ τη μεγάλη διατήρηση την έχει το Βήτα καροτένιο στην περίπτωσή με θερμοκρασία πλήρωσης  $98^{\circ}\text{C}$  και παραμονή σε υδατόλουτρο  $90^{\circ}\text{C}$  με 98.97%. Στις περιπτώσεις με επίτευξη  $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 5$  min έχουμε μεγαλύτερα ποσοστά διατήρησης σε όλα τα ποιοτικά χαρακτηριστικά σε σχέση με τις περιπτώσεις του  $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 12.6$  min.

Πίνακας 19. Συγκεντρωτικός πίνακας των ποσοστών διατήρησης των ποιοτικών χαρακτηριστικών, με βάση τη θερμοκρασία πλήρωσης  $94$ ,  $96$  και  $98^{\circ}\text{C}$  και στο τέλος κάθε διεργασίας που επιτεύχθηκε η τιμή  $F_s$  ίση προς  $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 12.6$  min.

	Ποσοστό διατήρησης (%)				
	T ( $^{\circ}\text{C}$ )	Χρώμα a/b	Χρώμα L	Βήτα καροτένιο	Βιταμίνη C
Υδατόλουτρο $90^{\circ}\text{C}$	94	84.15	74.08	95.65	86.08
	96	86.83	79.14	96.63	88.59
	98	89.55	84.48	97.61	91.13

Πίνακας 20. Συγκεντρωτικός πίνακας των ποσοστών διατήρησης των ποιοτικών χαρακτηριστικών με βάση τη θερμοκρασία πλήρωσης  $94$ ,  $96$  και  $98^{\circ}\text{C}$  και στο τέλος κάθε διεργασίας που επιτεύχθηκε η τιμή  $F_s$  ίση προς  $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 5$  min.

	Ποσοστό διατήρησης (%)				
	T ( $^{\circ}\text{C}$ )	Χρώμα a/b	Χρώμα L	Βήτα καροτένιο	Βιταμίνη C
Αέρας	98	92.75	91.42	98.94	94.13
Υδατόλουτρο $50^{\circ}\text{C}$	98	91.57	89.53	98.70	93.08
Υδατόλουτρο $70^{\circ}\text{C}$	98	92.74	91.40	98.93	94.12
Υδατόλουτρο $90^{\circ}\text{C}$	94	90.79	87.39	98.24	92.31
	96	91.91	89.64	98.62	93.36
	98	92.86	91.63	98.97	94.23



#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής ερευνητικής μελέτης είχε ως σκοπό τη μοντελοποίηση, με τη χρήση της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής, της "πλήρωση εν θερμώ" διεργασίας για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας πλήρωσης και του αντίστοιχου απαιτούμενου χρόνου παραμονής για την επίτευξη βιομηχανικής αποστείρωσης κατά την παραγωγή τοματοχυμού σε γυάλινους περιέκτες. Για τον σκοπό αυτό αναπτύχθηκε το ακριβές υπολογιστικό μοντέλο το οποίο επιβεβαιώθηκε με πειραματική διαδικασία, εξετάζοντας την επίδραση των κυριότερων παραγόντων της διεργασίας στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του τοματοχυμού. Ειδικότερα εξετάστηκε η επίδραση της θερμοκρασίας πλήρωσης 94, 96 και 98°C σε διαφορετικά μέσα παραμονής, όπως ο αέρας με  $T_{air} = 25^{\circ}\text{C}$  και υδατόλουτρο θερμοκρασίας 50, 70 και 90°C, της επίτευξης της απαιτούμενης ολοκληρωμένης τιμής  $F_s$  ίση προς  $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 5 \text{ min}$  και  $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 12.6 \text{ min}$  και της σημειακής τιμής  $F$  στο κρίσιμο σημείο του περιέκτη στο καπάκι.

Η επίτευξη της τιμής  $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 5 \text{ min}$  πραγματοποιήθηκε για έξι συνδυασμούς θερμοκρασιών πλήρωσης και παραμονής. Συγκεκριμένα, η πρώτη περίπτωση αφορούσε τη θερμοκρασία πλήρωσης 98°C και παραμονή στον αέρα, οι επόμενες τρεις περιπτώσεις αναφέρονται σε θερμοκρασία πλήρωσης 98°C και παραμονή σε υδατόλουτρο 50°C, 70°C και 90°C, και τέλος οι δύο περιπτώσεις που αναφέρονται σε θερμοκρασία πλήρωσης 94°C και 96°C και παραμονή σε υδατόλουτρο 90°C. Η τιμή  $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 12.6 \text{ min}$  επιτεύχθηκε σε τρεις περιπτώσεις με θερμοκρασία πλήρωσης 94, 96 και 98°C και παραμονή σε υδατόλουτρο στους 90°C. Ο χρόνος παραμονής ήταν διαφορετικός σε κάθε περίπτωση, με μικρότερη τιμή να παρατηρείται στην περίπτωση με θερμοκρασία πλήρωσης 98°C και διατήρηση σε υδατόλουτρο 90°C ίση με 0,5 min και με μεγαλύτερη τιμή στην περίπτωση με θερμοκρασία πλήρωσης 98°C σε υδατόλουτρο θερμοκρασίας 90°C ίση με 20.2 min. Όσον αφορά στη βιομηχανική πρακτική και τις τιμές βιομηχανικής αποστείρωσης του περιέκτη/καπάκι παρατηρούμε ότι για την μία περίπτωση, τη λιγότερο συντηρητική, με απαιτούμενη σημειακή τιμή  $F_{87.78^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}}$  ίση προς 0.07 min, όλες οι τιμές είναι αποδεκτές, ενώ για τη δεύτερη περίπτωση με  $F_{87.78^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 2 \text{ min}$  είναι αποδεκτές μόνο τρεις περιπτώσεις με θερμοκρασίας πλήρωσης 94, 96 και 98°C και χρόνο παραμονής σε υδατόλουτρο 90°C.

Όσον αφορά την επίδραση της διεργασίας σε διάφορους ποιοτικούς παράγοντες, οι οποίοι εξετάστηκαν στο τέλος της διεργασίας με ψύξη σε νερό, η βέλτιστη διατήρηση επιτεύχθηκε όταν η θερμοκρασία πλήρωσης ήταν 98°C με παραμονή σε υδατόλουτρο 90°C. Τα επόμενα καλύτερα αποτελέσματα προέκυψαν με ίδια θερμοκρασία πλήρωσης και

παραμονή σε υδατόλουτρο 70°C, καθώς και παραμονή του προϊόντος σε αέρα για τις περιπτώσεις με  $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 5 \text{ min}$ . Αξίζει να σημειωθεί ότι από τους ποιοτικούς παράγοντες που εξετάστηκαν ο πιο θερμοευαίσθητος παράγοντας ήταν του χρώματος  $L$ , ακολουθούμενος από τον παράγοντα  $a/b$  και τη βιταμίνη C. Επιπλέον βρέθηκε ότι ο πιο θερμοανθεκτικός ποιοτικός παράγοντας ήταν το Βήτα καροτένιο. Στην περίπτωση με  $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 5 \text{ min}$  δεν υπάρχει μεγάλη διαφοροποίηση στα ποσοστά διατήρησης μεταξύ των ποιοτικών χαρακτηριστικών σε αντίθεση με την περίπτωση  $F_{93.33^{\circ}\text{C}}^{8.89^{\circ}\text{C}} = 12.6 \text{ min}$  όπου υπάρχουν χαμηλότερες τιμές του χρώματος  $L$  με ποσοστό 74.08%.

Προτείνεται για μελλοντική μελέτη η διερεύνηση της "πλήρωση εν θερμώ" διεργασίας σε διαφορετικά μεγέθη και σχήματα του περιέκτη, καθώς και διαφορετικών υλικών συσκευασίας, όπως είναι το τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET). Επίσης μπορεί να γίνει ερευνά σε προϊόντα τομάτας με σωματίδια.

## ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ

### Λατινικοί χαρακτήρες

$A$	επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας, $m^2$ .
$a_w$	ενεργότητα νερού, αδιάστατος.
$C$	τελική (μετά το πέρας της θερμικής διεργασίας) συγκέντρωση μιας θερμικά ευαίσθητης ουσίας, π.χ., αριθμός μικροοργανισμών ανά mL, g/L, κ.α.
$C_p$	ειδική θερμότητα του προϊόντος, J/(kg·K).
$C_o$	αρχική συγκέντρωση μιας θερμικά ευαίσθητης ουσίας, π.χ. αριθμός μικροοργανισμών ανά mL, g/L, κ.α.
$d$	διάμετρος, m.
$dC$	η μείωση της συγκέντρωσης του μικροβιακού φορτίου σε χρόνο dt
$dt$	στοιχειώδης χρονική μεταβολή, s.
$D_T$	(ή απλώς D) χρόνος υποδεκαπλασιασμού σε σταθερή θερμοκρασία, T, που απαιτείται για την καταστροφή του 90% των μικροοργανισμών (ή άλλων θερμικά ευαίσθητων ουσιών), min.
$E_a$	ενέργεια ενεργοποίησης, cal/mol.
$F_{T_{ref}}^Z$	ισοδύναμος χρόνος μιας υποθετικής θερμικής διεργασίας αναφοράς, σε σταθερή θερμοκρασία, που επιφέρει το ίδιο αποτέλεσμα, όσον αφορά στην καταστροφή (υποβάθμιση) ενός θερμικά ευαίσθητου παράγοντα, με την υπό εξέταση θερμική διεργασία, min.
$F_{cap}$	σημειακή τιμή $F$ της συνολικής διεργασίας στο καπάκι του περιέκτη (κρίσιμο σημείο).
$F_{cooling}$	ολοκληρωμένη τιμή $F$ που επιτυγχάνεται αποκλειστικά κατά το στάδιο της ψύξης του προϊόντος στο νερό των $T_w=20^\circ C$ , min
$F_{holding}$	ολοκληρωμένη τιμή $F$ που επιτυγχάνεται αποκλειστικά κατά το στάδιο της παραμονής του προϊόντος στον αέρα ή σε υδατόλουτρο, min
$F_s$	η ολοκληρωμένη τιμή $F$ που αναφέρεται στη τιμή $F$ του μέσου συνολικού όγκου του γυάλινου περιέκτη όπως υπολογίζεται από την Εξ. (20), min.
$F_{total}$	ολοκληρωμένη τιμή $F$ στο τέλος της συνολικής διεργασίας, min
$g$	η επιτάχυνση της βαρύτητας, $(-9,81 m/s^2)$ .
$h$	ο επιφανειακός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, $W/(m^2 \cdot K)$ .

$h_{air}$	ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στον αέρα, $W/(m^2 \cdot K)$ .
$h_W$	ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στο υδατόλουτρο, $W/(m^2 \cdot K)$ .
$h_{wc}$	ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στο νερό ψύξης, $W/(m^2 \cdot K)$ .
$k$	θερμική αγωγιμότητα του προϊόντος, $W/(m \cdot K)$ .
$k_T$	σταθερά ταχύτητας αντίδρασης, $s^{-1}$ για αντιδράσεις πρώτης τάξης.
$L$	ύψος του περιέκτη, $m$
$lethality$	βαθμός καταστροφικότητας, ο λόγος της τιμής $F$ της διεργασίας προς την απαιτούμενη τιμή $F$ , αδιάστατος.
$m$	μάζα προϊόντος, $kg$ .
$N$	αριθμός επιζώντων μικροοργανισμών, σπορίων κ.α. μετά από δεδομένο χρόνο θέρμανσης.
$N/N_o$	το ποσοστό επιβίωσης του μικροοργανισμού-στόχου στον περιέκτη στο τέλος μιας δεδομένης θερμικής διεργασίας.
$N_{Bi}$	λόγος της αντίστασης που παρουσιάζει ένα σώμα στη ροή της θερμότητας στο εσωτερικό του με αγωγή, προς την αντίσταση μεταφορά θερμότητας με συναγωγή από ένα ρευστό προς την επιφάνεια του ρευστού, αδιάστατος αριθμός.
$N_o$	ο αρχικός μικροβιακός πληθυσμός, αριθμός σπορίων κ.α.
$R_g$	παγκόσμια σταθερά των αερίων, $(1,987 \text{ cal}/K \cdot \text{mol})$ .
$T$	θερμοκρασία, $^{\circ}C$ (εκτός αν καθορίζεται στο κείμενο διαφορετικά).
$t$	χρόνος, $s$ (εκτός αν καθορίζεται στο κείμενο διαφορετικά).
$T_{air}$	θερμοκρασία περιβάλλοντος σε αέρα, $^{\circ}C$ .
$T_{IT}$	αρχική θερμοκρασία προϊόντος, $^{\circ}C$ (εκτός αν καθορίζεται στο κείμενο διαφορετικά).
$T_{RT}$	θερμοκρασία αυτοκλείστου κατεργασίας, $^{\circ}C$ (εκτός αν καθορίζεται στο κείμενο διαφορετικά).
$T_{WC}$	θερμοκρασία περιβάλλοντος (νερού) ψύξης, $^{\circ}C$ .
$u$	το διάνυσμα της ταχύτητας ως προς τον άξονα $x$ , $m^2/s$ .
$V$	ο όγκος του περιέκτη, $mL$ .
$w$	το πλάτος του περιέκτη, $m$ (εκτός αν καθορίζεται στο κείμενο διαφορετικά).
$x$	πάχος τοιχώματος περιέκτη, $m$ .

- $x, y, z$  οι τρεις διαστάσεις (σε καρτεσιανές συντεταγμένες), m.
- $z$  διαφορά θερμοκρασίας που απαιτείται για να δεκαπλασιαστεί ή να υποδεκαπλασιαστεί η τιμή  $D_T$ , °C (εκτός αν καθορίζεται στο κείμενο διαφορετικά).
- $3D$  τρισδιάστατη επίλυση ενός πεδίου ροής.

*Ελληνικά σύμβολα*

- $\theta$  αδιάστατη κανονικοποιημένη θερμοκρασία, οριζόμενη ως  $\theta = \frac{T_{RT}-T}{T_{RT}-T_{IT}}$ .
- $\rho$  πυκνότητα του προϊόντος, kg/m<sup>3</sup>.
- $\mu$  ιξώδες του ρευστού, Pa·s ή kg/(m·s).

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### Διεθνής

- Adegoke, G.O. 2004. Control of microbial growth in foods. Understanding food microbiology (2nd ed.).
- Aluko, R.E., 2011. Agricultural and Related Biotechnologies. In: Murray Moo-Young (ed.) Comprehensive Biotechnology, vol 4, Elsevier, Canada, pp 532-545.
- Alzamora, S.M., and Chirife, J. 1983. The water activity of canned foods. Journal of Food Science 48:1385- 1387.
- Ashurst, P.R. 2005. Chemistry and technology of soft drinks and fruit juices (2nd ed.). Ames, Iowa; Oxford, UK: Blackwell Pub.
- Awuah, G.B., Ramaswamy, H.S. and Economides, A. 2007. Thermal processing and quality: Principles and overview. Chemical Engineering and Processing 46: 584-602. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2006.08.004>.
- Badin, E.E., Mercatante, M.M., Mascheroni, R.H., Quevedo-Leon, R., Ibarz, A., Ribotta, P.D., & Lespinard, A.R. 2023. Effect of pasteurization on color, ascorbic acid and lycopene of crushed tomato: A computational study with experimental validation. Journal of Food Engineering, 337, 111218. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022>.
- Baiyewu, R. A., Amusa, N.A., Ayoola, O.A., and Babalola, O.O. 2007. “Survey of the postharvest diseases and aflatoxin contamination of marketed pawpaw fruit (*Carica papaya* L) in Southwestern Nigeria,” African Journal of Agricultural Research, vol. 2, no. 4, pp. 178–181.
- Ball, C.O., and Olson, F.C.W. 1957. Sterilization in food technology. Theory, practice, and calculations. New York: McGraw-Hill Book Co. 654 p. Doi: <https://onlinebooks.library.upenn.edu/webbin/book/lookupid?key=olbp73783>.
- Barth, M., Hankinson, T. R., Zhuang, H., Breidt, F. 2009. Microbiological Spoilage of Fruits and Vegetables, p. 135–183. In Sperber W. H. and Doyle M. P. (ed.), Compendium of the microbiological spoilage of foods and beverages. Springer, New York. Doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0826-1>.
- Berk, Z. 2009. Thermal processing. Food Process Engineering and Technology, 355–373. Doi: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-373660-4.0001>.
- Bigelow, W.D. 1921. The logarithmic nature of thermal death time curves. Journal of Infectious Diseases, 29(5), 528–536. Doi: <https://doi.org/10.1093/infdis/29.5.528>.
- Bonnin, E., Pelloux, J. 2020. Pectin Degrading Enzymes. In: Kontogiorgos, V. (eds) Pectin: Technological and Physiological Properties. Springer, Cham., Switzerland, 37-60. Doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-53421-9>.
- Bown, G. 2010. Developments in conventional heat treatment. (pp. 154-178)
- Boz, Z., Erdogdu, F., and Tutar, M. 2014. Effects of mesh refinement, time step size and numerical scheme on the computational modeling of temperature evolution during natural-convection heating. Journal of Food Engineering 123: 8-16. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.09.008>.

- Brekša, A.P., Robertson, L.D., Labate J.A., King B.A., King D.E. 2015. Physicochemical and morphological analysis of ten tomato varieties identifies quality traits more readily manipulated through breeding and traditional selection methods. *Journal of Food Composition and Analysis*, 42, pp. 16-25. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2015.02.011>.
- CDC (Centers for Disease Control and Prevention). 2023. National Outbreak Reporting System (NORS). These data were last updated 17/5/2023. <https://www.cdc.gov/norsdashboard/>.
- Chaudhary, P., Sharma, A., Singh, B., Nagpal, A.K. 2018. Bioactivities of phytochemicals present in tomato. *J Food Sci Technol.*, 55(8), pp:2833-2849. Doi: <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3221-z>.
- Chick, H. 1908. An investigation of the laws of disinfection. *J Hyg* 8(1):92–158. Doi: <https://doi.org/10.1017/s0022172400006987>.
- Chirife, J., and Fontan, C.F. 1982. Water activity of fresh foods. *Journal of Food Science* 47:661-663.
- Ciruelos, A., González, C., Latorre, A., Ruiz, R.M. and Rodríguez, A. 2001. Effect of heat treatment on the pectins of tomatoes during tomato paste manufacturing. *Acta Hort.* 542, 181-186. Doi: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2001.542.22>.
- Collier, C.P. and Townsend, C.T. 1954. Container sterilization for acid products by hot fill-hold procedures. Proceedings of the technical sessions at the 47 th annual convention of the National Canners Association.
- David, J.R.D., Graves, R.H., Szemplenski, T. 2013. Handbook of aseptic processing and packaging. Boca Raton: CRC Press.
- Demirci, A., Feng, H., & Krishnamurthy, K. (Eds.). 2020. Food Safety Engineering. Food Engineering Series. Doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-42660-6>.
- Dewanto, V., Wu X., Adom, K.K., Liu R.H. 2002. Thermal processing enhances the nutritional value of tomatoes by increasing total antioxidant activity. *J Agric Food Chem.* May 8;50(10):3010-4. Doi: <https://doi.org/10.1021/jf0115589>.
- Dimou, A., Yanniotis, S., 2011. 3D numerical simulation of asparagus sterilization in a still can using computational fluid dynamics. *Journal of Food Engineering*, 104, 394-403. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.01.002>.
- Eriksson, E.M., Bovy, A., Manning, K., Harrison, L., Andrews, J., de Silva, J., Tucker, G.A., and Seymour, G.B. 2004. Effect of the colorless non-ripening mutation on cell wall biochemistry and gene expression during tomato fruit development and ripening." *Plant Physiology*, 136, pp. 4184–4197. Doi: <https://doi.org/10.1104/pp.104.045765>.
- Favetto, G., Resnik, S., Chirife, J., and Ferro-Fontan, C. 1983. Statistical evaluation of water activity measurement obtained with the Vaisala Humicap humidity meter. *Journal of Food Science* 48:534-538.
- FDA 2003, Approximate pH of Foods and Food products, [https://www.webpal.org/SAFE/aaarecovery/2\\_food\\_storage/Processing/lacf-phs.htm](https://www.webpal.org/SAFE/aaarecovery/2_food_storage/Processing/lacf-phs.htm).
- Friedman, M. 2013. Anticarcinogenic, cardioprotective, and other health benefits of tomato compounds lycopene,  $\alpha$ -tomatine, and tomatidine in pure form and in fresh and processed tomatoes. *Agric Food Chem* 61(40):9534–9550. Doi: <https://doi.org/10.1021/jf402654e>.

- Friedman, M., Levin, C.E., Lee, S.U., Kim, H.J., Lee, I.S, Byun, J.O., Kozukue, N. 2009. Tomatine-containing green tomato extracts inhibit growth of human breast, colon, liver, and stomach cancer cells. *J Agric Food Chem* 57(13):5727–5733. Doi: <https://doi.org/10.1021/jf900364j>.
- Garg, R.K., Batav, N., Silawat, N., Singh, R. K. 2013. Isolation and identification of pathogenic microbes from tomato puree and their delineation of distinctness by molecular techniques. *Journal of Applied Biology & Biotechnology*, 1(4):24–31.
- Ghani, A.G., Farid, M.M., Chen, X.D., & Richards, P. 1999. Numerical simulation of natural convection heating of canned food by computational fluid dynamics. *Journal of Food Engineering*, 41(1), 55–64. Doi: [https://doi.org/10.1016/s0260-8774\(99\)00073-4](https://doi.org/10.1016/s0260-8774(99)00073-4).
- Ghosh, A. 2009. Identification of microorganisms responsible for spoilage of tomato (*Lycopersicon esculentum*) fruit. *Journal of Phytology*, 1(6). Retrieved from <https://updatepublishing.com/journal/index.php/jp/article/view/2052>.
- Goose, P.G., Binsted, R. 1964. *Tomato Paste, Puree, Juice and Powder*, 1st ed. Great Britain: Food Trade Press Ltd.
- Gould, W.A. 1992. *Tomato Production, Processing and Technology*. 3rd ed. Baltimore, Maryland: CTI Publications. Doi: <https://doi.org/10.1533/9781845696146>.
- Hariyadi, B. 2013. Hot-fill processing of beverages. *Food Review International* 1(1): 46-50.
- Hayes, G.D., 1987. *Food Engineering Data Handbook*. Longman Scientific & Technical, Essex, UK.
- Holdsworth, S.D., & Simpson, R. 2016. *Thermal processing of packaged foods* (3rd ed.). Springer. Doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-24904-9>.
- Hyodo, H., Terao, A., Furukawa, J., Sakamoto, N., Yurimoto, H., Satoh, S., Iwai, H. 2013. Tissue Specific Localization of Pectin–Ca<sup>2+</sup> Cross-Linkages and Pectin Methyl-Esterification during Fruit Ripening in Tomato (*Solanum lycopersicum*). *PLoS ONE* 8(11): e78949. Doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0078949>.
- Imathiu, S. 2018. Quantitative microbiological risk assessment of two street foods sold in a Kenyan town with regard to Salmonella contamination, *Curr. Res. Nutr. Food Sci.*, 6 pp. 41-50, <https://doi.org/10.12944/CRNFSJ.6.1.05>.
- Incropera, F.P., DeWitt, D.P., Bergman, T.L., Lavine, A.S., 1996. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, vol. 6. Wiley, New York.
- Jay, J.M., Loessner, M.J., Golden, D.A., 2005. *Modern food microbiology*, 7th ed. Spring Science, New York. Doi: <https://doi.org/10.1007/BF03174975>.
- Jen, Y., Manson, J.E., Stumbo, C.R., and Zahradnik, J.W. 1971. A procedure for estimating sterilization of and quality factor degradation in thermally processed foods. *Journal of Food Science*, 36:692-698. Doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1971.tb15164.x>.
- Kalamaki, M.S., Stoforos, N.G., Taoukis, P. S. 2012. Pectic Enzymes in Tomatoes. *Food Biochemistry and Food Processing*, 232–246. Doi: <http://dx.doi.org/10.1002/9781118308035.ch12>.
- Karel, M., & Lund, D. B. 2003. *Physical principles of food preservation*. (Vol. 129). (2nd Ed.). New York, NY, USA: CRC Press. Doi: <https://doi.org/10.1201/9780203911792>.



- Kasim, M.U., & Kasim, R. 2015. Postharvest UV-B treatments increased fructose content of tomato (*Solanum lycopersicon* L. cv. Tayfun F1) harvested at different ripening stages. *Food Science and Technology* (Campinas), 35(4), 742–749. Doi: <https://doi.org/10.1590/1678-457x.0008>.
- Katzin, L.I., Sandholzer L.A., Strong M.E. 1942. Application of the decimal reduction principle to a study of the heat resistance of coliform bacteria to pasteurization. *J Bacteriol* 45:265–272. Doi: <https://doi.org/10.1128/jb.45.3.265-272.1943>.
- Kaur, C., George, B., Deepa, N., Jaggi, S., & Kapoor, H. C. 2007. Viscosity and quality of tomato juice as affected by processing methods. *Journal of food quality*, 30(6), 864–877. Doi: <https://doi.org/10.1111/j.1745-4557.2007.00166.x>.
- Kiziltaş, S., Erdoğan, F. & Palazoğlu, T. K., 2010. Simulation of heat transfer for solid liquid food mixtures in cans and model validation under pasteurization conditions. *Journal of Food Engineering*, 97, 449–456. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.10.042>.
- Kumar, M., Tomar, M., Bhuyan, D.J., Punia, S., Grasso, S., Sa, A.G.A., Carciofi, B.A.M., Arrutia, F., Changan, S., Radha, Singh, S., Dhumal, S., Senapathy, M., Satankar, V., Anitha, T., Sharma, A., Pandiselvam, R., Amarowicz, R., Mekhemar, M. 2021. Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) seed: A review on bioactives and biomedical activities, *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 142, Article 112018. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2021.112018>.
- Lemaire, V., Cerf, O., Audurier A. 1989. Thermal resistance of *Listeria monocytogenes*. *Annales de Recherches Vétérinaires*, 20 (4), pp.493-500. <https://hal.science/hal-00901914>.
- Lewis, M.J. & Jun, S. 2011. Thermal Processing. *Food Processing Handbook*, 31–75. Doi: <https://doi.org/10.1002/9783527634361.ch2>.
- Lund, D.B. 1975. Heat processing. In: Fennema, O.R. (eds.), *Principles of Food Science, Part II. Physical Principles of Food Preservation*, Marcel Dekker. Inc., New York, pp. 31-92.
- Ma, M., Taylor, P.W.J. Chen, D., Vaghefi, N. 2023. He, J.-Z. Major Soilborne Pathogens of Field Processing Tomatoes and Management Strategies. *Microorganisms*, 11, 263. Doi: <https://doi.org/10.3390/microorganisms11020263>.
- Maliska, Clovis, R. 2023. *Fundamentals of computational fluid dynamics: The Finite Volume Method*. S.l. : Springer International PU. Doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-18235-8>.
- Martin, J. 2006. *Materials for engineering* by John Martin. Woodhead Publishing Ltd.
- McCarthy, K.L., McCarthy, M.J. 2009. Relationship between In-line Viscosity and Bostwick Measurement during Ketchup production. *Journal of food science.*; 74(6): E291–7. Doi: <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2009.01205.x>.
- Motamedzadegan, A., Tabarestani, H. S. 2018. Tomato Production, Processing, and Nutrition. *Handbook of Vegetables and Vegetable Processing*, 839–861. Doi: <https://doi.org/10.1002/9781119098935.ch36>.
- Nesvadba, P. 2008. Thermal properties and ice crystal development in frozen foods. *Frozen Food Science and Technology* 1-25. Doi: <https://doi.org/10.1002/9781444302325.ch1>.

- Obeng, F.A., Gyasi, P.B., Olu-Taiwo, M., Ayeh-Kumi, F.P. 2018. Microbial Assessment of Tomatoes (*Lycopersicon esculentum*) Sold at Some Central Markets in Ghana. *Biomed Res Int.*, 6743826. Doi: <https://doi.org/10.1155/2018/6743826>.
- Ogundipe, F., Bamidele, F., Adebayo-Oyetoro, A., Ogundipe, O., and Tajudeen, O. 2012. "Incidence of Bacteria with Potential Public Health Implications in Raw *Lycopersicon esculentum* (Tomato) Sold in Lagos State, Nigeria," *Nigerian Food Journal*, vol. 30, no. 2, pp. 106–113.
- Peralta, I.E., Spooner, D.M. 2007. History, origin, and early cultivation of tomato (*Solanaceae*). In: Razdan MK, Mattoo AK (ed.) *Genetic improvement of solanaceous crops*, vol 2, Science Publishers, Enfield, United States, pp 1–27. Doi: <https://doi.org/10.1201/b10744>.
- Potnis, Neha & Timilsina, Sujan & Strayer-Scherer, Amanda & Shantharaj, Deepak & Barak, Jeri & Paret, Mathews & Vallad, Gary & Jones, Jeff. 2015. Bacterial spot of tomato and pepper: Diverse *Xanthomonas* species with a wide variety of virulence factors posing a worldwide challenge. *Molecular Plant Pathology*. 16. <https://doi.org/10.1111/mpp.12244>.
- Potter, N.N. and Hotchkiss, J.H. 1995. *Food Science*, 5th ed. Springer Science+Business Media, Inc., New York, 608pp. Doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4985-7>.
- Rahman, M.S. 2020. *Handbook of food preservation*, 3<sup>rd</sup> ed. Boca Raton, FL, USA: CRC press. Doi: <https://doi.org/10.1201/9780429091483>.
- Rahman, S. 2011. *Handbook of food process design* (1. Aufl.; 1 ed.). Oxford; Hoboken, N.J: Wiley-Blackwell.
- Richardson, P. 2001. *Thermal technologies in food processing*. Cambridge; Boca Raton, (Fla.): CRC Press.
- Rodrigo, M., Martinez, A., Sanchis, J., Trama, J. and Giner, V. 1990. Determination of Hotfill-hold-cool process specifications for crushed tomatoes. *Journal of Food Science* 55(4): 1029-1038. Doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1990.tb01590.x>.
- Sandoval, A.J., Barreiro, J.A., Mendoza, S. 1994. Prediction of hot-fill-air-cool sterilization processes for tomato paste in glass jars. *Journal of Food Engineering* 23: 33-50. Doi: [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(94\)90122-8](https://doi.org/10.1016/0260-8774(94)90122-8).
- Saravacos, D. George and Zacharias, B. Maroulis. 2011. *Food Process Engineering Operations*. Boca Raton, Crc Press. Doi: <https://doi.org/10.1201/b12254>.
- Schmidt, S. Fontana A.Jr. 2020. Water Activity Values of Select Food Ingredients and Products, pp. 573-591. In Barbosa-Cánovas G., Fontana |A. Jr., Schmidt S., Labuza T. (ed.) *Water Activity in Foods: Fundamentals and Applications*, Illinois, USA, Doi: <https://doi.org/10.1002/9781118765982.app5>.
- Shang, J.S. 2004. Three decades of accomplishments in computational fluid dynamics. *Progress in Aerospace Sciences*, 40, 173e197. Doi: [10.1016/j.paerosci.2004.04.001](https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2004.04.001).
- Sharma, A., Kaur M., Katnoria, J. K., Nagpal, A. K. 2017. Polyphenols in food: cancer prevention and apoptosis induction. *Curr Med*, 25 (36), 4740-4757. Doi: <https://doi.org/10.2174/0929867324666171006144208>.
- Silva, F.V.M. and Silva, C.L.M. 1997. Quality optimization of hot filled pasteurized fruit purees: Container characteristics and filling temperatures. *Journal of Food Engineering* 32: 351-364. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(97\)00031-9](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(97)00031-9).

- Silva, F.V.M., Martins, R.C., Silva, C.L.M. 2003. Design and optimization of hot filling pasteurization conditions: Cupuacu (*Theobroma grandiflorum*) fruit pulp case study. *Biotechnology Progress*, 19(4), 1261-1268. Doi: <https://doi.org/10.1021/bp030013r>.
- Singh, B., Singh, J.P., Kaur, A., Singh, N. 2017. Phenolic composition and antioxidant potential of grain legume seeds: a review. *Food Res Int* 101:1–16. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.09.026>.
- Singh, B., Singh, J.P., Kaur, A., Singh, N. 2018. Phenolic compounds as beneficial phytochemicals in pomegranate (*Punica granatum* L.) peel: a review. *Food Chem* 261:75–86. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.04.039>.
- Singh, P.R., & Heldman, D.R. 2014. *Introduction to Food Engineering*, 5th edition. Amsterdam: Elsevier, Inc. Doi: <https://doi.org/10.1016/C2011-0-06101-X>.
- Stoforos, N.G. 2015. Thermal Processing In: Varzakas T. and Tzia C., *Handbook of Food Processing: Food Preservation*, 2<sup>nd</sup> chapter, 27-56 pp. New York, CRC Press. Doi: <https://doi.org/10.1201/b19397>.
- Stoforos, N.G. 1995. Thermal process design. *Food Control*, 6(2): 81-94, Doi: [http://dx.Doi.org/10.1016/0956-7135\(95\)98911-J](http://dx.Doi.org/10.1016/0956-7135(95)98911-J).
- Stumbo, C.R. 1973. *Thermobacteriology in Food Processing*, 2nd ed., Academic Press, Inc., New York.
- Stumbo, C.R. Purohit, K.S. & Ramakrishnan, T.V. 1975. Thermal process lethality guide for low-acid foods in metal containers. *Journal of Food Science*, 40,1316-1323. Doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1975.tb01080.x>.
- Sun, D.W. (Ed.). 2019. *Computational fluid dynamics in food processing*. Boca Raton, FL, USA: CRC press. Doi: <https://doi.org/10.1201/9781351263481>.
- Sun, D.W. 2012. *Thermal Food Processing: New Technologies and Quality Issues*, CRC Press, Boca Ratón. Doi: <https://doi.org/10.1201/b12112>.
- Tarek J. Jamaledine & Madhumita B. Ray. 2010. Application of Computational Fluid Dynamics for Simulation of Drying Processes: A Review, *Drying Technology*, 28:2, 120-154, DOI: <https://doi.org/10.1080/07373930903517458>.
- Toledo, R.T. 2007: *Fundamentals of Food Process Engineering* (3rd Ed.); Springer. Doi: <https://doi.org/10.1007/0-387-29241-1>.
- ToolBox, E. 2003. Metals - Specific Heats. Retrieved from [https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-metals-d\\_152.html](https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-metals-d_152.html).
- Tu, J., Yeoh, G.H., Liu, C. 2018. *Computational Fluid Dynamics, A Practical Approach* (3<sup>rd</sup> Ed). Cambridge: Butterworth-Heinemann. Doi: <https://doi.org/10.1016/C2015-0-06135-4>.
- Tucker, G. 1999: A novel validation method: Application of Time-Temperature Integrators to Food Pasteurization Treatments. *TranslChemE*, Vol. 77, part C, September 1999. Doi: <https://doi.org/10.1205/096030899532501>.
- Vega-López, B., Carvajal-Miranda, Y., Brenes-Peralta, L., Gamboa-Murillo, M., Venegas-Padilla, J., Rodríguez, G., Jiménez-Bonillaad, P., Álvarez-Valverdea, V. 2022. Phytonutraceutical evaluation of five varieties of tomato (*Solanum lycopersicum*) during ripening and processing. *LWT-Food Science and Technology*, 164, Article 113592, Doi: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113592>.

- Velioglu, H.M., Boyaci, I.H. and Kurultay, S. 2011. Determination of visual quality of tomato paste using computerized inspection system and artificial neural networks. *Computers and Electronics in Agriculture* 77: 147-154. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.04.007>.
- Versteeg, H.K., & Malalasekera, W. 2007. An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method. (2nd Ed.). Harlow, Essex, UK, Pearson Education. <https://www.worldcat.org/title/introduction-to-computational-fluid-dynamics-the-finite-volume-method/oclc/76821177>.
- 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.
- Watada, A.E., Aulenbach, B.B., Worthington, J.T. 1976. Vitamins A and C in ripe tomatoes as affected by stage of ripeness at harvest and by supplementary ethylene. *J Food Sci* 41(4):856–858. Doi: [https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1976.tb00738\\_41\\_4.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1976.tb00738_41_4.x).
- Wogu, M.D. and Ofuase, O. 2014. “Microorganisms responsible for the spoilage of tomato fruits, *Lycopersicum esculentum*, sold in markets in Benin City, Southern Nigeria,” *School of Academics and Journal of Biosciences*, vol. 2, no. 7, pp. 459–466.
- 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: [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(01\)00177-6](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(01)00177-6).
- 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>.
- Zhang, S., Griffiths, J.S., Marchand, G., Bernards, M.A., Wang, A. 2022. Tomato brown rugose fruit virus: An emerging and rapidly spreading plant RNA virus that threatens tomato production worldwide. *Mol Plant Pathol*. Sep;23(9):1262-1277. Doi: <https://doi.org/10.1111/mpp.13229>.

### *Ελληνική*

- Βασιλείου, Η. 2018, Βελτιστοποίηση της «πλήρωσης εν θερμώ» διεργασίας παραγωγής τοματοπολτού με τη χρήση της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής, Μεταπτυχιακή μελέτη, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 119 σελίδες.
- Λάζος, Σ.Ε. 2010. Επεξεργασία Τροφίμων, Αθήνα, Εκδόσεις Interbooks.
- Μαραγκουδάκης, Σ. 2015, Μελέτη της “πλήρωση εν θερμώ” διεργασίας για την παραγωγή τοματοπολτού και βελτιστοποίηση της με τη βοήθεια υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, Μεταπτυχιακή διατριβή, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 170 σελίδες.
- Ολύμπιος, Χ. 2015. Η τεχνική της καλλιέργειας των υπαίθριων Κηπευτικών. Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Τομάτα. Σελ 26-124. Εκδόσεις Σταμούλη. Αθήνα
- Στοφόρος, Ν.Γ. 2005. Αρχές θερμικής επεξεργασίας του κρέατος και των προϊόντων του. Κεφάλαιο 18. Στο: Το κρέας και τα προϊόντα του: Παραγωγή, εμπορία, τεχνολογία, υγιεινή. Θεσσαλονίκη: Γεωργάκης Σπ. Α. Εκδόσεις Σύγχρονη Παιδεία. ([http://www.kordali.gr/product.php?id\\_product=48](http://www.kordali.gr/product.php?id_product=48)).

*Δικτυογραφία*

Αναφορές από internet: Πρόσβαση στις 3 Μαΐου 2023.

URL:<https://www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfcfr/CFRSearch.cfm?CFRPart=114&showFR=1>.

ANSYS. 2017. ANSYS Meshing Advanced Techniques, 17.0 Release. Canonsburg, Pennsylvania: ANSYS, Inc. URL: <https://www.ansys.com>