



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ  
ΙΔΡΥΜΑ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ &  
ΔΙΑΤΡΟΦΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μελέτη Χρόνου Αποστείρωσης Κονσέρβας με Υπολογιστική  
Ρευστοδυναμική**

Αθανασιάδου Βαρβάρα

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2013

# **Μελέτη Χρόνου Αποστείρωσης Κονσέρβας με Υπολογιστική Ρευστοδυναμική**

Αθανασιάδου Βαρβάρα

Αλεξάνδρειο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό ίδρυμα Θεσσαλονίκης (ATEI), Τμήμα  
Τεχνολογίας Τροφίμων, 57400 Θεσσαλονίκη ΤΘ 141,

Υποβολή Πτυχιακής διατριβής που αποτελεί μέρος των απαιτήσεων για την  
απονομή του Πτυχίου του Τμήματος Τεχνολογίας Τροφίμων του ΤΕΙ  
Θεσσαλονίκης.

Ημερομηνία Παρουσίασης: 25-06-2013    Εισηγητής: Κουλούρης Αλέξανδρος

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Κουλούρη Αλέξανδρο, για την άριστη συνεργασία που είχαμε καθ' όλη τη διάρκεια της πτυχιακής μου εργασίας, καθώς επίσης και για την πολύτιμη βοήθεια του στα προβλήματα που αντιμετώπιζα. Κυρίως όμως για την υπομονή του!

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά, τον μεταπτυχιακό φοιτητή του τμήματος, Αρουτίδη Γεώργιο, ο οποίος με βοήθησε από το ξεκίνημα της πτυχιακής μου και ήταν πάντα πρόθυμος να λύσει τις απορίες μου και να απαντήσει στα ερωτήματά μου.

## **Μελέτη Χρόνου Αποστείρωσης Κονσέρβας με Υπολογιστική Ρευστοδυναμική**

Αθανασιάδου Βαρβάρα

Αλεξάνδρειο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό ίδρυμα Θεσσαλονίκης (ΑΤΕΙ), Τμήμα  
Τεχνολογίας Τροφίμων, 57400 Θεσσαλονίκη ΤΘ 141,

### **Περίληψη**

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε ο χρόνος αποστείρωσης κυλινδρικής κονσέρβας τοματοχυμού με τη βοήθεια υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD). Η υπολογιστική ρευστοδυναμική είναι μία αριθμητική τεχνική η οποία χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων που αφορούν την ροή ρευστών ενώ συμβάλλει και στην κατανόηση της μεταφοράς θερμότητας, μάζας και άλλων φαινομένων, χωρίς τη διεξαγωγή πειραμάτων.

Μελετήθηκε εκτενώς η μεταφορά θερμότητας και η διαμόρφωση του προφίλ της θερμοκρασίας μετά από χρόνο 2320s, με αγωγή, φυσική συναγωγή, φυσική συναγωγή με ταυτόχρονη περιστροφή της κονσέρβας, καθώς επίσης και η επίδραση του προσανατολισμού της (οριζόντιος, κάθετος) στο ρυθμό μεταφοράς θερμότητας. Διαπιστώθηκε μεγάλη ακρίβεια στην απεικόνιση των φαινομένων μεταφοράς και ταύτιση του θεωρητικού με τον υπολογιστικό, υπολογισμό της θερμοκρασίας του ψυχρού σημείου για την περίπτωση της αγωγής. Αποδείχθηκε επίσης, ότι στη φυσική συναγωγή, λόγω των ρευμάτων μεταφοράς η θέρμανση γίνεται ταχύτερα απ' ό τι στην αγωγή, ενώ οριακή βελτίωση εμφανίζεται και στην περίπτωση της περιστροφής της κονσέρβας. Η ταχύτητα περιστροφής δεν φάνηκε να προκαλεί σημαντική επιτάχυνση στον ρυθμό θέρμανσης με την οποιαδήποτε βελτίωση να κορυφώνεται στην ταχύτητα των 7rpm. Σε όλες τις περιπτώσεις στις οποίες συμπεριλήφθηκε η φυσική συναγωγή, καταγράφηκε και οπτικοποιήθηκε η μετακίνηση της θέσης του ψυχρού σημείου από το γεωμετρικό κέντρο της κονσέρβας. Στην κονσέρβα με κατακόρυφο προσανατολισμό, το ψυχρό σημείο βρέθηκε σε ύψος 10% από το κάτω μέρος της κονσέρβας, ενώ στην κονσέρβα με οριζόντιο προσανατολισμό βρέθηκε σε ύψος 16,5% με μετάβαση στο 49,57% μετά από περίπου 1000s σε σχέση με την διάμετρο της κονσέρβας. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων του χρόνου αποστείρωσης μεταξύ του οριζόντιου και του κατακόρυφου προσανατολισμού της κονσέρβας δεν έδειξε σημαντικές διαφορές.

## **Calculation of sterilization time for a food can using CFD**

### **Abstract**

The objective of this work was the calculation of sterilization time for a cylindrically shaped tomato juice can with the help of Computational Fluid Dynamics (CFD). CFD is a numerical computational method used for the development and solution of fluid flow models; its purpose is to enhance our understanding of phenomena of heat, mass and momentum transfer without the need for conducting physical experiments.

The heat transfer rate and the formation of the temperature profile were studied during heating of the can for 2320s under three different model configurations (conduction only, natural convection, rotation) and two can orientations (vertical and horizontal). The conduction only CFD results showed excellent agreement with the results obtained by theoretical analysis. The position of the cold spot was also predicted with accuracy in the case of natural convection; the results in this case showed a significant and expected acceleration of the heating rate compared with the conduction only case. A small improvement on heating time was observed when the can was rotated with any improvement peaking at the rotation speed of 7rpm. In all cases where natural convection was included, the positioning of the cold spot away from the geometrical center of the can was verified. When the can is placed vertically, the position of the cold spot was found to be at around 10% of the total height of the can while for horizontal orientation the cold spot shifted from the 16.5% position of the diameter to 49.57% after around 1000s. No significant differences were observed when comparing the heating times between the vertical and horizontal orientation.

## Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή.....	1
2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση .....	2
2.1 Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (CFD- Computational Fluid Dynamics).....	2
2.2 Χρήση και εφαρμογές CFD .....	2
2.2.1 Εφαρμογή και χρήση στα τρόφιμα.....	3
2.3 Πλεονεκτήματα χρήσης του CFD .....	4
2.4 Ansys Inc – Λογισμικά πακέτα .....	4
2.4.1 FIDAP .....	5
2.4.2 POLYFLOW .....	5
2.4.3 FLUENT .....	5
2.5 Πραγματοποίηση ανάλυσης CFD με χρήση λογισμικού πακέτου .....	6
2.5.1 Προ-επεξεργασία (pre-processing).....	6
2.5.2 Επεξεργασία – Λύση (processing –solving).....	6
2.5.3 Μετά – επεξεργασία (Post-processing).....	7
2.6 Ρευστά και Μηχανική Ρευστών .....	7
2.7 Δυναμική ρευστών .....	8
2.8 Μεταφορά θερμότητας.....	8
2.8.1 Μεταφορά θερμότητας στη βιομηχανία τροφίμων.....	8
2.8.2 Μόνιμη και μη μόνιμη (μεταβατική) κατάσταση .....	9
2.8.3 Μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας.....	9
2.9 Μοντελοποίηση μεταφοράς θερμότητας σε εφαρμογές τροφίμων .....	12
3. Σκοπός της εργασίας.....	13
4. Πειραματικό μέρος.....	14
4.1 Υπολογιστική διαδικασία.....	14
4.2 Χαρακτηριστικά Ηλεκτρονικού Υπολογιστή – Μοντέλου προσομοίωσης.....	15
4.2.1 Παραδοχές για απλοποίηση του προβλήματος.....	16

4.2.2 Περιγραφή υπολογιστικού πλέγματος (mesh).....	19
5. Αποτελέσματα – Συζήτηση .....	20
5.1 Μεταφορά θερμότητας με Αγωγή σε μη μόνιμη κατάσταση.....	20
5.2 Μεταφορά θερμότητας με Φυσική Συναγωγή.....	24
5.3 Μεταφορά θερμότητας με Φυσική Συναγωγή και ταυτόχρονη περιστροφή της κονσέρβας .....	33
5.4 Μεταφορά θερμότητας με Φυσική Συναγωγή σε κονσέρβα με οριζόντιο προσανατολισμό.....	39
6. Συμπεράσματα .....	43
7. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα .....	44
8. Βιβλιογραφία .....	45
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α .....	48
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β .....	50

## 1. Εισαγωγή

Η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (CFD) χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων που αφορούν τη ροή ρευστών (Da-Wen Sun, 2007), ενώ έχει μεγάλη εφαρμογή στη μελέτη - απεικόνιση των φαινομένων μεταφοράς (θερμότητα, μάζα), αλλαγών φάσεων, χημικών αντιδράσεων καθώς επίσης και αλληλεπιδράσεων υγρών – αερίων (Kaushal & Sharma, 2012).

Οι εφαρμογές του CFD έχουν πολλαπλασιαστεί τελευταία στη βιομηχανία τροφίμων (Norton & Sun, 2006) καθώς συμβάλουν στην καλύτερη κατανόηση των πολύπλοκων φυσικών μηχανισμών που διέπουν τις θερμικές, φυσικές και ρεολογικές ιδιότητες των συστατικών των τροφίμων (Xia & Sun, 2002).

Το λογισμικό πακέτο υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, Fluent, που επιλέχθηκε στην παρούσα μελέτη θεωρείται κατάλληλο για την προσομοίωση διεργασιών τροφίμων γιατί περιλαμβάνει εξειδικευμένα μοντέλα όπως για εναλλάκτες θερμότητας, διακριτά μοντέλα πολυφασικών ροών καθώς και μοντέλα αλλαγής φάσεων τα οποία παρακολουθούν την τήξη και την κατάψυξη στον κύριο όγκο ενός υγρού (Da-Wen Sun, 2007).

Η θερμική επεξεργασία είναι το πιο σημαντικό τμήμα της βιομηχανίας τροφίμων, και αποτελεί τον πλέον αποτελεσματικό τρόπο διατήρησης των τροφίμων (Ghani et al. 2003). Στη θερμική επεξεργασία με αποστείρωση κονσερβοποιημένου ρευστού προϊόντος (μετά τη συσκευασία), η θερμότητα μεταφέρεται σε αυτό μέσω συνδυασμένης αγωγής και φυσικής συναγωγής (Farid & Ghani, 2004). Σημαντικό ρόλο παίζει ο χρόνος αποστείρωσης ο οποίος μπορεί να προσδιοριστεί και αριθμητικά και υπολογιστικά [(Ghani et al. 2003), (Ghani & Farid, 2006)] τόσο για θέματα ασφάλειας όσο και για θέματα ποιότητας. Για να θεωρηθεί επαρκής ο χρόνος αποστείρωσης, θα πρέπει η θερμοκρασία του ψυχρού σημείου (cold spot) του προϊόντος να αποκτήσει μια ορισμένη τιμή. Για την περίπτωση της αγωγής η θέση του ψυχρού σημείου βρίσκεται στο γεωμετρικό κέντρο της κονσέρβας, ενώ για την περίπτωση της φυσικής συναγωγής η θέση του μετακινείται προς το κάτω τμήμα της (Ghani et al. 1999a). Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η μελέτη του φαινομένου μεταφοράς θερμότητας με τους μηχανισμούς της αγωγής και φυσικής συναγωγής. Επιπλέον ο προσδιορισμός του απαιτούμενου χρόνου αποστείρωσης για κονσέρβα με κάθετο και οριζόντιο προσανατολισμό καθώς και η σύγκριση του με τον θεωρητικό υπολογισμό.



## 2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

### 2.1 Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (CFD- Computational Fluid Dynamics)

Η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (CFD) είναι μία αριθμητική τεχνική η οποία χρησιμοποιείται για την επίλυση των προβλημάτων που αφορούν την ροή ρευστών. Οι CFD υπολογισμοί χρησιμοποιούν ένα υπολογιστικό πλέγμα για να λύσουν τις βασικές εξισώσεις που περιγράφουν τη ροή ενός ρευστού, όπως είναι η εξίσωση συνέχειας και το σύνολο των εξισώσεων Navier- Stokes, καθώς επίσης και για τις επιπλέον εξισώσεις διατήρησης όπως είναι το ισοζύγιο ενέργειας. Όλες οι εξισώσεις επιλύονται για κάθε κελί του πλέγματος ακολουθώντας μία επαναληπτική διαδικασία, η οποία έχει ως σκοπό την πρόβλεψη και την απεικόνιση του προφίλ της ταχύτητας, της θερμοκρασίας, της πίεσης και άλλων παραμέτρων (Da-Wen Sun, 2007).

Η υπολογιστική ρευστοδυναμική είναι ένα χρήσιμο εργαλείο προσομοίωσης το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως, όχι μόνο για την κατανόηση της ροής των ρευστών, αλλά και για τη μεταφορά θερμότητας, μάζας και άλλων φαινομένων μεταφοράς, χωρίς τη βοήθεια οργάνων μέτρησης. Χρησιμοποιείται επίσης για την περιγραφή των αλλαγών φάσεων, των χημικών αντιδράσεων (Kaushal & Sharma, 2012), καθώς και των αλληλεπιδράσεων υγρών – αερίων οι επιφάνειες των οποίων ορίζονται από τις οριακές συνθήκες.

### 2.2 Χρήση και εφαρμογές CFD

Το CFD χρησιμοποιεί ισχυρούς υπολογιστές και εφαρμοσμένα μαθηματικά ώστε να μοντελοποιήσει τις περιπτώσεις ροής ρευστών. Η επιτυχία της προσομοίωσης εξαρτάται από το πόσο συμβατά είναι τα αριθμητικά αποτελέσματα που προκύπτουν από αυτήν σε σχέση με αυτά που προκύπτουν από τα εργαστηριακά πειράματα, όταν αυτά εκτελούνται, καθώς επίσης και από το πόσο καλά η προσομοίωση μπορεί να προβλέψει ιδιαίτερα πολύπλοκα φαινόμενα τα οποία δεν μπορούν να εκτελεστούν στο εργαστήριο (Xia & Sun, 2002).

Λόγω της ικανότητας του να προβλέπει την απόδοση νέων σχεδίων ή διεργασιών πριν ακόμη κατασκευαστούν ή εφαρμοστούν, το CFD έγινε ένα αναπόσπαστο μέρος του μηχανολογικού σχεδιασμού και ανάλυσης πολλών εταιριών (Xia & Sun, 2002). Ο πίνακας 1 παρουσιάζει τα πεδία εφαρμογών του CFD (πέραν της επεξεργασίας τροφίμων).

Πίνακας 1. Εφαρμογές CFD σε διάφορους τομείς

### **Βιομηχανικές εφαρμογές**

Αεροδιαστημική  
Αρχιτεκτονική  
Αυτοκινητοβιομηχανία  
Βιοϊατρική  
Χημικά και Τεχνικά  
Καύση  
Ηλεκτρονικά και Υπολογιστές  
Παραγωγή Γυαλιού  
HVAC (θέρμανση, αερισμός, ψύξη)  
Πετρέλαια  
Ενέργεια  
Ναυτιλία  
Μηχανική  
Μεταλλουργία  
Πυρηνική  
Σχεδιασμό αμαξοστοιχίας  
Στροβιλομηχανές (Turbo machinery)  
Ύδρευση

### **Περιβαλλοντικές εφαρμογές**

Ατμοσφαιρική ρύπανση  
Κλιματικοί υπολογισμοί  
Πυρκαγιές κτηρίων  
Θαλάσσια ρεύματα  
Ρύπανση φυσικών υδάτων  
Ασφάλεια

### **Κλινικές εφαρμογές**

Καρδιαγγειακή ροή (καρδιά, μεγάλα αγγεία)  
Ροή στους πνεύμονες και την αναπνευστική οδό

(Xia & Sun, 2002)

#### **2.2.1 Εφαρμογή και χρήση στα τρόφιμα**

Η σχέση μεταξύ του CFD και της επεξεργασίας τροφίμων και ποτών (ανάμιξη, ξήρανση, αποστείρωση, ψύξη, κατάψυξη κλπ) είναι στενή. Τέτοιες μέθοδοι επεξεργασίας χρησιμοποιούνται συχνά ώστε να ενισχύσουν την ποιότητα, την ασφάλεια και την διάρκεια ζωής του προϊόντος στο χώρο αποθήκευσης του. Με άμεσα οφέλη για τους καταναλωτές και το φυσικό περιβάλλον, οι εφαρμογές του CFD έχουν γίνει αρκετά διαδεδομένες στη βιομηχανία τροφίμων (Norton & Sun, 2006). Δεδομένου ότι τα τελευταία χρόνια, η ζήτηση των καταναλωτών για υψηλής

ποιότητας προϊόντα έχει αυξηθεί, η χρήση του CFD είχε ως αποτέλεσμα και την ανάπτυξη νέων πρακτικών και τεχνολογιών στην επεξεργασία τροφίμων.

Η εφαρμογή του CFD στη βιομηχανία τροφίμων συμβάλει στην καλύτερη κατανόηση των πολύπλοκων φυσικών μηχανισμών που διέπουν τις θερμικές, φυσικές και ρεολογικές ιδιότητες των συστατικών των τροφίμων (Xia & Sun, 2002). Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί από τη βιομηχανία προκειμένου να περιγράψει φαινόμενα και διεργασίες όπως αποστείρωση, ανάμιξη, ξήρανση (Norton & Sun, 2006), μεταφορά σε ψυγεία, χρήση στατικών αναδευτήρων, ροή σε αγωγούς, εναλλάκτες θερμότητας (Xia & Sun, 2002), πρόβλεψη της κίνησης του αέρα στο εσωτερικό του εξοπλισμού επεξεργασίας τροφίμων (Scott & Richardson, 1997) κ.λπ.

Επιπλέον, το CFD, μπορεί να βοηθήσει τις εταιρίες τροφίμων να ανταποκριθούν σε μια επεκτεινόμενη αγορά συμβάλλοντας στην επίλυση προβλημάτων (Xia & Sun, 2002), στη βελτίωση και την ανάπτυξη στρατηγικών επεξεργασίας, διατηρώντας ταυτόχρονα σε υψηλά επίπεδα την ποιότητα των προϊόντων (Da-Wen Sun, 2007).

### 2.3 Πλεονεκτήματα χρήσης του CFD

Μερικά πλεονεκτήματα που προκύπτουν από τη χρήση του CFD είναι (Xia & Sun, 2002):

- Συμβάλλει στη λεπτομερή κατανόηση της κατανομής ροής, απώλειας βάρους, μεταφορά μάζας και θερμότητας, διαχωρισμό σωματιδίων κ.λπ. Κατά συνέπεια όλα αυτά θα δώσουν στους υπεύθυνους λειτουργίας των εγκαταστάσεων (μιας βιομηχανίας) μια καλύτερη άποψη για το τι συμβαίνει σε μια συγκεκριμένη διεργασία ή σε ένα σύστημα.
- Καθιστά δυνατή την αξιολόγηση γεωμετρικών αλλαγών σε πολύ λιγότερο χρόνο και κόστος απ' ό,τι αν γινόταν μια πειραματική δοκιμή.
- Μπορεί να δώσει απαντήσεις σε σύντομο χρονικό διάστημα σε πολλά σενάρια που απαντούν ερωτήσεις του τύπου «τι θα γινόταν αν».
- Είναι ιδιαίτερα χρήσιμο όταν πρόκειται να προσομοιωθούν συνθήκες όπου δεν είναι δυνατόν να ληφθούν λεπτομερείς μετρήσεις, όπως σε περιπτώσεις πολύ υψηλών θερμοκρασιών ή σε επικίνδυνα περιβάλλοντα όπως αυτό του εσωτερικού ενός κλιβάνου / φούρνου.

### 2.4 Ansys Inc – Λογισμικά πακέτα

Η εταιρία ANSYS προσφέρει τρία λογισμικά πακέτα στα πλαίσια του CFD τα οποία είναι κατάλληλα για τις ανάγκες μοντελοποίησης - προσομοίωσης στη μηχανική τροφίμων. Τα τρία πακέτα είναι το FIDAP (για τη μοντελοποίηση πολύπλοκων φαινομένων φυσικής), το POLYFLOW (για τη μοντελοποίηση πολυμερών μοντέλων) και το FLUENT (γενικής χρήσεως με ικανότητες πολλαπλών φυσικών μοντέλων).

### 2.4.1 FIDAP

Το FIDAP έχει βάση τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Σύμφωνα με τους Xia & Sun (2002) η μέθοδος αυτή προσφέρει πλήρη ευελιξία στο δημιουργούμενο πλέγμα (καθώς επίσης αξιόλογους και αποτελεσματικούς υπολογισμούς), προσφέρει μοναδικές δυνατότητες μοντελοποίησης των μη- Νευτώνειων ροών και των ελεύθερων επιφανειακών ροών. Περιέχει επίσης, εξελιγμένα μοντέλα ακτινοβολίας, διασποράς και μεταφοράς θερμότητας (Norton & Sun, 2006) Χρησιμοποιείται επίσης για εφαρμογές στη βιοϊατρική, μεταλλουργεία, ανάπτυξη κρυστάλλων κλπ ([www.ansys.com](http://www.ansys.com)).

### 2.4.2 POLYFLOW

Το POLYFLOW είναι ένα εργαλείο γενικής χρήσης πεπερασμένων στοιχείων του CFD και χρησιμοποιείται για την ανάλυση της επεξεργασίας πολυμερών, όπως σχηματισμός γυαλιού, θερμική διαμόρφωση και περιστροφή ινών (Norton & Sun, 2006). Βρίσκει επίσης εφαρμογή σε βιομηχανίες επεξεργασίας μετάλλων και τσιμέντου, και στην ανάπτυξη καλύτερων υλικών συσκευασίας (για παράδειγμα, σχεδιασμός ελαφρύτερης συσκευασίας με καλύτερη απόδοση) ([www.ansys.com](http://www.ansys.com)).

### 2.4.3 FLUENT

Το FLUENT περιλαμβάνει τις βασικές - φυσικές ικανότητες μοντελοποίησης που απαιτούνται για τη μοντελοποίηση της ροής, στροβιλισμού, μεταφοράς θερμότητας, αντιδράσεων κλπ , βιομηχανικών εφαρμογών που κυμαίνονται από την ροή του αέρα πάνω από το φτερό ενός αεροσκάφους μέχρι την καύση εντός κλιβάνου, από στήλες φουσαλίδων μέχρι εξέδρες άντλησης πετρελαίου, από τη ροή του αίματος μέχρι την κατασκευή ημιαγωγών και από αίθουσες καθαρισμού μέχρι εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων ([www.ansys.com](http://www.ansys.com)). Χρησιμοποιεί τεχνολογία μη δομημένου πλέγματος, ώστε η περίπλοκη γεωμετρία ενός σχήματος να μπορεί με ευκολία να μοντελοποιηθεί. Μεταξύ μίας μεγάλης γκάμας μοντέλων τύρβης (turbulence models), το FLUENT περιέχει τις ικανότητες για προσομοίωση μεγάλων και άμεσων δινών, και διαθέτει την δυνατότητα διαμόρφωσης δυναμικού πλέγματος (dynamic meshing capability) που του επιτρέπει τη μοντελοποίηση διαφόρων κινούμενων μερών στην ίδια προσομοίωση. Το πιο ενδιαφέρον χαρακτηριστικό του είναι ότι περιλαμβάνει μοντέλα για εναλλάκτες θερμότητας, διακριτά μοντέλα πολυφασικών ροών καθώς και μοντέλα αλλαγής φάσεων τα οποία παρακολουθούν την τήξη και την κατάψυξη στον κύριο όγκο ενός υγρού (Da-Wen Sun, 2007).

Και τα τρία αυτά λογισμικά μπορούν με επιτυχία να εφαρμοστούν στη βιομηχανία τροφίμων (Da-Wen Sun, 2007).

## **2.5 Πραγματοποίηση ανάλυσης CFD με χρήση λογισμικού πακέτου**

Για την πραγματοποίηση μιας CFD μελέτης, απαιτείται η εκτέλεση τριών σταδίων ανάλυσης μέσα από το λογισμικό. Κάθε στάδιο αντιπροσωπεύει ένα εξίσου σημαντικό τμήμα της μοντελοποίησης (Da-Wen Sun, 2007). Αρχικά ο αναλυτής θα πρέπει να διατυπώσει το πρόβλημα και χρησιμοποιώντας τις επιστημονικές του γνώσεις να το εκφράσει μαθηματικά (προ-επεξεργασία) (Xia & Sun, 2002). Το στάδιο αυτό είναι κατά τον Da-Wen Sun (2007) το σημαντικότερο δεδομένου ότι η τελική επιτυχία της προσομοίωσης εξαρτάται από αυτό. Στη συνέχεια το λογισμικό πακέτο του CFD θα ενσωματώσει αυτή τη γνώση και θα εκφράσει το καθορισμένο πρόβλημα με επιστημονικούς όρους. Τέλος, ο υπολογιστής θα εκτελέσει τους υπολογισμούς που υπαγορεύονται από το CFD λογισμικό θα τους οπτικοποιήσει (Da-Wen Sun, 2007) κι έτσι ο αναλυτής θα ελέγξει και θα αξιολογήσει τα αποτελέσματα που θα προκύψουν (Xia & Sun, 2002).

### **2.5.1 Προ-επεξεργασία (pre-processing)**

Σύμφωνα με τους Xia & Sun (2002), το στάδιο αυτό περιλαμβάνει όλες εκείνες οι διεργασίες που πραγματοποιούνται πριν από την αριθμητική διαδικασία επίλυσης. Περιλαμβάνουν τον ορισμό του προβλήματος, τη δημιουργία του πλέγματος και τη δημιουργία του υπολογιστικού μοντέλου.

Το πρώτο σημαντικό στάδιο είναι η εξέταση, από φυσικής πλευράς, του προβλήματος. Με αυτόν τον τρόπο καθορίζονται οι φυσικές διεργασίες που μπορούν να απεικονιστούν με ακρίβεια σε ένα CFD μοντέλο (Da-Wen Sun, 2007). Στο στάδιο αυτό, πρέπει επίσης, να εξεταστεί και να κατανοηθεί το πρόβλημα της ροής (Xia & Sun, 2002). Το δεύτερο σημαντικό στάδιο είναι ο σχεδιασμός της γεωμετρίας του μοντέλου και ο καθορισμός του πλέγματός του. Η γεωμετρία ορίζεται είτε επιλέγοντας μία από τις προσχεδιασμένες που βρίσκονται στη βάση δεδομένων του λογισμικού, είτε εισάγοντας την από άλλα προγράμματα (πχ πρότυπα CAD). Τα περισσότερα λογισμικά πακέτα CFD χρησιμοποιούν μία αυτόματη δημιουργία πλέγματος που επιτρέπει τον ορισμό του γύρω από τη γεωμετρία του μοντέλου (Da-Wen Sun, 2007). Μόλις ολοκληρωθεί η δημιουργία του πλέγματος, μπορεί να οριστεί το φυσικό μοντέλο, οι απαραίτητες οριακές συνθήκες του και οι ιδιότητες του ρευστού (Xia & Sun, 2002). Το στάδιο αυτό απαιτεί, την ταυτόχρονη γνώση της αρχικής κατάστασης του μοντέλου και έναν προϋποθέσμο της πιθανής λύσης του (Da-Wen Sun, 2007).

### **2.5.2 Επεξεργασία – Λύση (processing –solving)**

Η επεξεργασία – λύση, περιλαμβάνει τη χρήση ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή με σκοπό τη λύση των μαθηματικών εξισώσεων της ροής ενός ρευστού. Μόλις ολοκληρωθεί το πλέγμα, πρέπει να καθοριστούν και οι τιμές εισόδου (input values) του μοντέλου, ώστε το λογισμικό να μπορέσει να λύσει ξεχωριστά τις εξισώσεις σε κάθε κελί του πλέγματος, μέχρι να επιτευχθεί μια αποδεκτή σύγκλιση. Είναι μία πολύ

εντατική διαδικασία η οποία απαιτεί από τον υπολογιστή να λύσει χιλιάδες εξισώσεις. Σε κάθε περίπτωση, οι εξισώσεις αυτές ολοκληρώνονται (integrated) ενώ παράλληλα εφαρμόζονται και οι οριακές συνθήκες. Η χρονοβόρα αυτή διαδικασία, είναι γνωστή και ως διακριτοποίηση των εξισώσεων και εφαρμόζεται –κατ’ επανάληψη- για κάθε κελί του πλέγματος, μέχρις ότου επιτευχθεί η απαιτούμενη από τον χρήστη ακρίβεια (Xia & Sun, 2002).

### 2.5.3 Μετά – επεξεργασία (Post-processing)

Η μετά - επεξεργασία επιτρέπει στον αναλυτή να οπτικοποιήσει και να ελέγξει τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την CFD ανάλυση τόσο σε μοντέλα δύο διαστάσεων (2-D) όσο και στα πιο περίπλοκα τριών διαστάσεων (3-D) . Τα αποτελέσματα μπορούν να αναλυθούν τόσο αριθμητικά όσο και γραφικά (περιγράμματα, διανύσματα, στατιστικά γραφήματα, κινούμενα πεδία ροής κλπ) συμβάλλοντας με αυτόν τον τρόπο στη καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων. Επίσης δίνεται η ευκαιρία της περαιτέρω επεξεργασίας τους και από άλλα προγράμματα [(Xia & Sun, 2002), (Da-Wen Sun, 2007)].

## 2.6 Ρευστά και Μηχανική Ρευστών

Μία ουσία είναι σε ρευστή κατάσταση όταν υπό την επίδραση μηχανικής διαταραχής (πίεση, διατμητική τάση κλπ) υποχρεώνεται σε αλλαγή του σχήματός της το οποίο και δεν ανακτά (ούτε προσπαθεί να ανακτήσει) όταν η διαταραχή αυτή σταματήσει να εφαρμόζεται.

Από άποψη μηχανικής, η έννοια του ρευστού περιλαμβάνει τα αέρια, τα υγρά καθώς επίσης και τα στερεά τα οποία είναι δυνατόν να ρευστοποιηθούν όπως είναι τα κονιοποιημένα υλικά (πχ αλεύρι). Η μελέτη των ρευστών χωρίζεται στη μελέτη των ρευστών εν ηρεμία (στατική των ρευστών) και στη μελέτη των ρευστών σε κίνηση (δυναμική των ρευστών). Στη βιομηχανία τροφίμων τα ρευστά διαφέρουν (και διαχωρίζονται) ανάλογα με τις ιδιότητες τους. Έτσι έχουμε τα λεπτόρευστα υγρά (πχ γάλα), τα παχύρευστα υγρά (πχ μέλι), τα αέρια (πχ άζωτο) και τα ρευστοποιημένα στερεά (πχ σιτηρά). Ένας άλλος τρόπος διαχωρισμού είναι βάση πυκνότητας η οποία θεωρείται δεδομένη για δεδομένες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας.

Η μεταβολή της πυκνότητας οφείλεται στις μεταβολές των συνθηκών αυτών (πίεση, θερμοκρασία) και ανάλογα με τον τρόπο μεταβολής της τα ρευστά κατατάσσονται σε

- Ασυμπιεστά: ελάχιστη ή μηδενική μεταβολή της πυκνότητας με την πίεση (παραδοχή για τα υγρά)
- Συμπιεστά: σημαντική μεταβολή της πυκνότητας με την πίεση (κανόνας για τα αέρια)

## 2.7 Δυναμική ρευστών

Στη δυναμική ρευστών, αντικείμενο μελέτης αποτελούν τόσο οι ρεολογικές ιδιότητες των ρευστών όσο και το είδος ροής τους.

Ως προς τη ρεολογική συμπεριφορά τους, τα ρευστά, διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες,

- νευτώνια και
- μη νευτώνια

Στα μη νευτώνια ρευστά υπάρχει και μία περαιτέρω διάκριση η οποία κρίνει τη ρεολογική συμπεριφορά ως χρονικά ανεξάρτητη και χρονικά εξαρτώμενη. Στη χρονικά ανεξάρτητη συναντάμε τα ψευδοπλαστικά ρευστά, τα διασταλτικά ρευστά καθώς και τα ρευστά τύπου Bingham και Casson. Τα ρευστά με εξαρτώμενη χρονικά ρεολογική συμπεριφορά διακρίνονται σε θιξότροπα και τα ρεοπηκτικά.

Η ροή των ρευστών διακρίνεται σε

- Στρωτή ή γραμμική (laminar flow)
- Τυρβώδη ή στροβιλώδη (turbulent flow)

Στη στρωτή ροή τα ρευστά έχουν την τάση να ρέουν χωρίς πλευρική ανάμιξη, σε αντίθεση με την τυρβώδη ροή όπου παρατηρείται σχηματισμός δινών προς όλες τις κατευθύνσεις. Η μετάβαση από τη στρωτή στην τυρβώδη ροή είναι συνάρτηση του αριθμού Reynolds.

## 2.8 Μεταφορά θερμότητας

Μεταφορά θερμότητας είναι η δυναμική διεργασία κατά την οποία ενέργεια με την μορφή θερμότητας μεταφέρεται αυθόρμητα από ένα σώμα σε ένα άλλο, χαμηλότερης θερμοκρασίας. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασιακή τους διαφορά τόσο μεγαλύτερη είναι και η ταχύτητα ροής της θερμότητας. Πέρα όμως από τη διαφορά θερμοκρασίας των δύο σωμάτων, η ταχύτητα μεταφοράς της θερμότητας εξαρτάται και από την αντίσταση που προβάλλει το υλικό μέσα στο οποίο ρέει το σώμα.

### 2.8.1 Μεταφορά θερμότητας στη βιομηχανία τροφίμων

Είναι υπεύθυνη για ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών στη βιομηχανία τροφίμων καθώς σε αυτήν οφείλονται πολλές διεργασίες όπως:

θέρμανση, ψύξη, κατάψυξη, ξήρανση, συμπίκνωση, αφυδάτωση, παστερίωση, αποστείρωση, κλπ.

## 2.8.2 Μόνιμη και μη μόνιμη (μεταβατική) κατάσταση

Μόνιμη κατάσταση σημαίνει ότι δεν υπάρχει μεταβολή στις ιδιότητες του συστήματος με το χρόνο, σε ένα δεδομένο σημείο. Υπάρχει όμως μεταβολή από σημείο σε σημείο του συστήματος και σε αυτήν οφείλεται η μεταφορά θερμότητας η οποία γίνεται με σταθερό ρυθμό. Για να βρεθεί ένα σύστημα μεταφοράς θερμότητας σε μόνιμη κατάσταση, θα πρέπει οι θερμοκρασίες (οι οποίες αποτελούν τις οριακές συνθήκες) να μη μεταβάλλονται με το χρόνο (Μπέλλης, 2012).

Σε πολλές εφαρμογές όμως οι θερμοκρασίες μεταβάλλονται με τον χρόνο, με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται και η ταχύτητα μεταφοράς της θερμότητας. Σε αυτή την περίπτωση θεωρούμε ότι το σύστημα εισέρχεται σε μία μη μόνιμη (μεταβατική) κατάσταση (Μπέλλης, 2012). Παραδείγματα μεταφοράς θερμότητας σε μη μόνιμη κατάσταση στη βιομηχανία τροφίμων είναι η θέρμανση και ψύξη κονσερβών κατά την αποστείρωση, η κατάψυξη τροφίμων κλπ.

## 2.8.3 Μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας

Διακρίνονται τρεις θεμελιώδεις μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας:

- Αγωγή
- Συναγωγή
- Ακτινοβολία

### 2.8.3.1 Αγωγή

Λόγω διαφορετικών θερμοκρασιών μεταξύ δύο περιοχών ενός υλικού, παρατηρείται μεταφορά θερμότητας από ένα μόριο της ύλης στο γειτονικό του μέσω των μεταξύ τους συγκρούσεων. Η μεταφορά αυτή γίνεται χωρίς τη μακροσκοπική μετακίνηση του υλικού από τη μία θέση του χώρου στην άλλη (Μπέλλης, 2012). Ισχύει κυρίως για τα στερεά και τα ακινητοποιημένα ρευστά.

Η διαφορά θερμοκρασίας μέσα σε ένα ομογενές υλικό οδηγεί σε ένα ρυθμό μεταφοράς ενέργειας εντός του μέσου, ο οποίος υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση η οποία είναι γνωστή και ως «νόμος του Fourier» :

$$\frac{q}{A} = -k \frac{dT}{dx}$$

Όπου q: ρυθμός ροής θερμότητας σε διεύθυνση κάθετη στην επιφάνεια

A: εμβαδό επιφάνειας κάθετη στη ροή

k: θερμική αγωγιμότητα

T: θερμοκρασία

x: απόσταση μετρημένη κάθετα στην επιφάνεια



Το αρνητικό πρόσημο στον τύπο απαιτείται από το δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο σύμφωνα με τον οποίο, η θερμική μεταφορά ενέργειας που προέρχεται από μία διαφορά θερμοκρασίας πρέπει να είναι από τη θερμότερη προς τη ψυχρότερη περιοχή (Pitts & Sissom, 2001).

Σε περίπτωση μόνιμης κατάστασης (steady state) λέμε ότι η μεταφορά θερμότητας πραγματοποιείται όταν η θερμοκρασία κάθε σημείου του σώματος και των επιφανειών, είναι ανεξάρτητη του χρόνου (Pitts & Sissom, 2001).

### 2.8.3.2 Συναγωγή

Η συναγωγή αναφέρεται στη ροή θερμότητας η οποία σχετίζεται με την κίνηση ενός ρευστού, ή στη μεταφορά θερμότητας από μία θερμή επιφάνεια σε ένα εν κινήσει ρευστό (McCabe et al. 2003). Στη δεύτερη περίπτωση, η ενέργεια μεταφέρεται ή συνάγεται από ή προς το σώμα από το ρευστό. Η μεταφορά θερμότητας ανά μονάδα χρόνου δίνεται από τη παρακάτω σχέση γνωστή και ως «νόμος ψύξης του Newton» :

$$\frac{q}{A} = h(T_s - T_{\infty})$$

Όπου q: ρυθμός ροής θερμότητας σε διεύθυνση κάθετη στην επιφάνεια

A: εμβαδό επιφάνειας

h: συντελεστής μεταφοράς θερμότητας

T<sub>s</sub>: θερμοκρασία επιφάνειας

T<sub>∞</sub>: θερμοκρασία ελεύθερου ρεύματος του ρευστού (πριν συναντήσει την επιφάνεια του σώματος (Pitts & Sissom, 2001).

Η συναγωγή διαχωρίζεται σε φυσική (natural convection) και σε εξαναγκασμένη (forced convection).

Φυσική συναγωγή είναι το φαινόμενο κατά το οποίο, τα ρεύματα που υπάρχουν μέσα σε ένα ρευστό προκαλούνται από δυνάμεις άνωσης, οι οποίες οφείλονται στη διαφορά πυκνότητας, η οποία δημιουργείται με τη σειρά της λόγω θερμοκρασιακών διαβαθμίσεων στη μάζα του ρευστού (McCabe et al. 2003).

Εξαναγκασμένη συναγωγή είναι το φαινόμενο κατά το οποίο, τα ρεύματα προκαλούνται από μία εξωτερική μηχανική διάταξη (αντλία, αναδευτήρας κλπ). Η ροή σε αυτή την περίπτωση είναι ανεξάρτητη της διαφοράς πυκνότητας (McCabe et al. 2003) και ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας είναι μεγαλύτερος σε σχέση με τη φυσική συναγωγή.

### 2.8.3.3. Ακτινοβολία

Ο όρος ακτινοβολία αποδίδεται στη μεταφορά ενέργειας μέσα στο χώρο μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Αν η ακτινοβολία διέρχεται δια μέσου κενού χώρου δε μετατρέπεται σε θερμότητα ή σε κάποια άλλη μορφή ενέργειας, ούτε αποκλίνει από την πορεία της. Αν όμως συναντήσει κατά τη διάρκεια της διαδρομής της κάποια ύλη/σώμα, τότε η ακτινοβολία θα μεταδοθεί ή θα ανακλαστεί ή θα απορροφηθεί. Μόνο η απορροφούμενη ενέργεια εμφανίζεται με τη μορφή θερμότητας και η μετατροπή αυτή είναι ποσοτική.

Η ακτινοβολία δρα ανεξάρτητα από το μέσο το οποίο προέρχεται και εξαρτάται από τις σχετικές θερμοκρασίες, τις γεωμετρικές διαμορφώσεις καθώς επίσης και από τα χαρακτηριστικά των επιφανειών των υλικών που εκπέμπουν ή απορροφούν τη θερμότητα. Γίνεται σημαντική σε υψηλές θερμοκρασίες και είναι ανεξάρτητη από τις συνθήκες ροής του ρευστού.

Η βασική εξίσωση για την ακτινοβολούμενη θερμική μεταφορά βρέθηκε ότι είναι ανάλογη προς την τέταρτη δύναμη της απόλυτης θερμοκρασίας. Δίνεται από τον παρακάτω, θεμελιώδη, νόμο γνωστό και ως «νόμος των Stefan-Boltzmann» :

$$q = \epsilon \sigma A T^4$$

Όπου  $\sigma$ : σταθερά Stefan-Boltzmann (ανεξάρτητη θερμοκρασίας, μέσου, επιφάνειας) και ισούται με  $5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$

A: ακτινοβολούμενη επιφάνεια

T: απόλυτη θερμοκρασία

Ο νόμος αυτός δίνει την ακτινοβολούμενη ενέργεια που εκπέμπεται από το “μέλαν” σώμα (ή ιδανικό θερμοπομπό), δίνοντας το μέγιστο ποσό ακτινοβολίας σε δεδομένη θερμοκρασία.

Για πραγματικά σώματα, η εκπεμπόμενη ενέργεια είναι λιγότερη. Στην εξίσωση εισάγεται ως συντελεστής διόρθωσης η ικανότητα εκπομπής,  $\epsilon$  κι έτσι η εξίσωση τροποποιείται σε:

$$q = \epsilon \sigma A T^4$$

“Φαιά” σώματα έχουν την ίδια ικανότητα εκπομπής σε όλα τα μήκη κύματος ακτινοβολίας

Στα τρόφιμα  $\epsilon \approx 0,9$ , σε τραχιές μεταλλικές επιφάνειες  $\epsilon \approx 0,7-0,25$ , σε λείες μεταλλικές επιφάνειες  $\epsilon < 0,05$ .

## 2.9 Μοντελοποίηση μεταφοράς θερμότητας σε εφαρμογές τροφίμων

Η θερμική επεξεργασία των τροφίμων είναι μία από τις πλέον διαδεδομένες μεθόδους συντήρησης, γι' αυτό και η μοντελοποίηση της μεταφοράς θερμότητας είναι μεγάλης σημασίας. Οι μηχανισμοί της αγωγής, της φυσικής συναγωγής, και της εξαναγκασμένη συναγωγή είναι αυτοί που μελετήθηκαν περισσότερο για διάφορα προϊόντα και συνθήκες. Μερικές από τις εφαρμογές του CFD στην επεξεργασία τροφίμων για την μοντελοποίηση φαινομένων μεταφοράς θερμότητας αποτελούν η θέρμανση με φυσική συναγωγή κονσερβοποιημένων τροφίμων σε κωνικούς και κυλινδρικούς περιέκτες (Varma & Kannan, 2006), η αξιολόγηση της παστερίωσης μπίρας και της επίδρασης του προσανατολισμού των κουτιών (Augusto et al., 2010), η 3-D προσομοίωση της αποστείρωσης σπαραγγιών σε μεταλλική κονσέρβα (Dimou & Yanniotis, 2011), η μεταφορά θερμότητας με συνδυασμένη αγωγή και συναγωγή σε μοντέλα αυγών (Denys et al., 2004), η ανάλυση θερμικής αποστείρωσης σε κονσέρβες με μίγμα υγρού-στερεού τροφίμου (Ghani & Farid, 2006), η προσομοίωση μίγματος στερεού-υγρού τροφίμου σε μονάδα επεξεργασίας υψηλής πίεσης (Ghani & Farid, 2007), η αναστολή δράσης βακτηρίων σε ρευστό κονσερβοποιημένο τρόφιμο κατά τη διάρκεια της αποστείρωσης (Ghani et al., 1999b), η προσομοίωση παροδικής θερμοκρασίας και των προφίλ ταχυτήτων σε οριζόντια κονσέρβα κατά τη διάρκεια της αποστείρωσης (Ghani et al., 2002a), η θεωρητική και πειραματική μελέτη της θερμικής καταστροφής της βιταμίνης C σε σακουλάκια τροφίμων (Ghani et al., 2002), και η θεωρητική και πειραματική μελέτη της θερμικής αδρανοποίησης του *Bacillus stearothermophilus* σε σακουλάκια τροφίμων (Ghani et al., 2002b).

### 3. Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν:

- Η προσομοίωση και απεικόνιση του φαινομένου μεταφοράς θερμότητας, για συγκεκριμένο χρόνο, σε κυλινδρική κονσέρβα (κάθετα τοποθετημένη) η οποία περιέχει τοματοχυμό, με το μηχανισμό της αγωγής, φυσικής συναγωγής και φυσικής συναγωγής με ταυτόχρονη περιστροφή της κονσέρβας σε διάφορες ταχύτητες, με τη βοήθεια του λογισμικού υπολογιστικής ρευστοδυναμικής Fluent.
- Ο υπολογισμός του χρόνου αποστείρωσης κονσέρβας τοματοχυμού με τη βοήθεια του λογισμικού υπολογιστικής ρευστοδυναμικής Fluent για τις περιπτώσεις: αγωγή, φυσική συναγωγή και φυσική συναγωγή με ταυτόχρονη περιστροφή της κονσέρβας σε διάφορες ταχύτητες.
- Η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τον θεωρητικό υπολογισμό του χρόνου αποστείρωσης, με τον υπολογισμό μέσω του λογισμικού υπολογιστικής ρευστοδυναμικής Fluent.
- Η εύρεση της βέλτιστης ταχύτητας περιστροφής της κονσέρβας, για αποστείρωση σε συγκεκριμένο χρόνο, με τη βοήθεια του λογισμικού υπολογιστικής ρευστοδυναμικής Fluent.
- Η σύγκριση του χρόνου που απαιτείται για την αποστείρωση κονσέρβας τοποθετημένης σε οριζόντια θέση, σε σχέση με τον αντίστοιχο χρόνο που απαιτείται για την αποστείρωση κονσέρβας τοποθετημένης σε κάθετη θέση με τη βοήθεια του λογισμικού υπολογιστικής ρευστοδυναμικής Fluent.

## 4. Πειραματικό μέρος

### 4.1 Υπολογιστική διαδικασία

Προτού ξεκινήσει η ανάλυση-λύση ενός προβλήματος με υπολογιστική ρευστοδυναμική, θα πρέπει να προσδιοριστούν από τον χρήστη όλες οι παράμετροι του προβλήματος καθώς επίσης και τα φυσικά φαινόμενα που το διέπουν (pre-analysis).

Αφού γίνει αυτό και ξεκαθαριστούν και οι στόχοι και τα ζητούμενα του προβλήματος, τα βασικά βήματα που πρέπει να ακολουθηθούν προκειμένου να επιτευχθεί η λύση είναι:

- Κατασκευή της γεωμετρίας του μοντέλου (geometry)
- Δημιουργία υπολογιστικού πλέγματος στη γεωμετρία (mesh)
- Προσθήκη όλων των παραμέτρων, εξισώσεων, οριακών συνθηκών του προβλήματος (setup)
- Λύση του προβλήματος (solution)
- Αποτελέσματα, εξέταση και αξιολόγηση (results)

## 4.2 Χαρακτηριστικά Ηλεκτρονικού Υπολογιστή – Μοντέλου προσομοίωσης

Δεδομένου ότι η προσομοίωση (συνεπώς και τα αποτελέσματα που προκύπτουν από αυτήν), γίνεται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, είναι σημαντικό να αναφερθούν τα χαρακτηριστικά αυτού καθώς επίσης και η έκδοση του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε.

Έτσι, για τη μοντελοποίηση χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό **ANSYS Fluent v13.0** σε ηλεκτρονικό υπολογιστή με τα εξής χαρακτηριστικά:

Κατασκευαστής: OKTAVIT

Μοντέλο: Vero PC

Επεξεργαστής: AMD Athlon™ II X4 630 Processor 2.80 GHz

Εγκατεστημένη μνήμη (RAM) 2.00 GB

Λειτουργικό σύστημα: Windows 7 Home Premium (32-bit)

Ως φυσικό μοντέλο θεωρήθηκε κυλινδρική κονσέρβα αλουμινίου με τις εξής διαστάσεις:

- **Διάμετρος**  $D= 75\text{mm}$
- **Ύψος**  $H= 110\text{mm}$
- **Πάχος τοιχώματος**  $1\text{mm}$

Για τον τοματοχυμό ορίστηκαν οι εξής θερμικές ιδιότητες:

- **Πυκνότητα**  $\rho= 980 \text{ kg/m}^3$
- **Ειδική θερμότητα**  $C_p= 3980 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$
- **Θερμική αγωγιμότητα**  $k= 0.531 \text{ w/m } ^\circ\text{C}$
- **Ιξώδες**  $\mu= 0.22 \text{ kg/m s}$

**Αρχική θερμοκρασία**  
(*κονσέρβα + τοματοχυμός*):  
 $80 \text{ } ^\circ\text{C}$  ( $353.15 \text{ K}$ )

**Θερμοκρασία**  
αποστείρωσης :  
 $98^\circ\text{C}$  ( $371.15 \text{ K}$ )

**Θερμοκρασία μέσου**  
αποστείρωσης :  
 $110 \text{ } ^\circ\text{C}$  ( $383.15 \text{ K}$ )

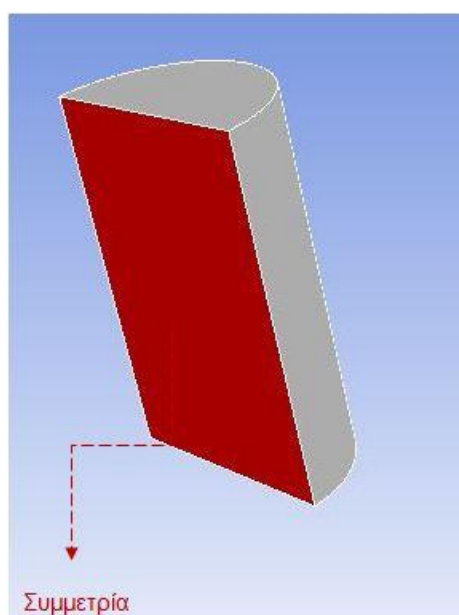
---

Χρόνος επεξεργασίας (αποστείρωση): Ως χρόνος επεξεργασίας επιλέχτηκε η τιμή των 2320s γιατί με βάση την αναλυτική επίλυση του μοντέλου για την περίπτωση της αγωγής (Παράρτημα Α) αυτός είναι ο χρόνος που απαιτείται για την επίτευξη της

επιθυμητής θερμοκρασίας αποστείρωσης. Ο χρόνος αυτός χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις περιπτώσεις μεταφοράς θερμότητας, με σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων.

#### 4.2.1 Παραδοχές για απλοποίηση του προβλήματος

- Σε όλες τις περιπτώσεις, θεωρήθηκε ότι η κονσέρβα θερμαίνεται απ' όλες τις μεριές της ταυτόχρονα.
- Η γεωμετρία της δημιουργήθηκε σε τρεις διαστάσεις (3-D). Λόγω συμμετρίας, σχεδιάστηκε μόνο η μισή κονσέρβα θέτοντας την τομή της ως συμμετρική όπως φαίνεται στο σχήμα 3.



**Σχήμα 3.** Γεωμετρία κονσέρβας και ορισμός συμμετρίας

- Η ειδική θερμότητα  $C_p$ , και η θερμική αγωγιμότητα  $k$ , είναι σταθερές και ανεξάρτητες από την θερμοκρασία καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.
- Θεωρήθηκε ότι στο εσωτερικό των τοιχωμάτων της κονσέρβας δεν υπάρχει ολίσθηση (no-slip conditions).
- Ο ατμός που συμπυκνώνεται διατηρεί συνθήκες σταθερής θερμοκρασίας στην εξωτερική επιφάνεια της κονσέρβας.
- Οι οριακές συνθήκες θερμοκρασίας (thermal boundary conditions), εφαρμόζονται στο υγρό (τοματοχυμός) και όχι στα εξωτερικά τοιχώματα της κονσέρβας, γιατί θεωρείται ότι η θερμική αντίσταση του μετάλλου της κονσέρβας (αλουμίνιο) είναι αμελητέα.

- Ο τοματοχυμός στο εσωτερικό της κονσέρβας, βρίσκεται, αρχικά, σε κατάσταση ηρεμίας έχοντας την ίδια θερμοκρασία σε όλη τη μάζα του.
- Υποτέθηκε στρωτή ροή λειτουργίας καθ' όλη την διάρκεια της επεξεργασίας.

Στην περίπτωση της φυσικής συναγωγής, και φυσική συναγωγή με ταυτόχρονη περιστροφή της κονσέρβας, έγινε επιπλέον και η παρακάτω παραδοχή:

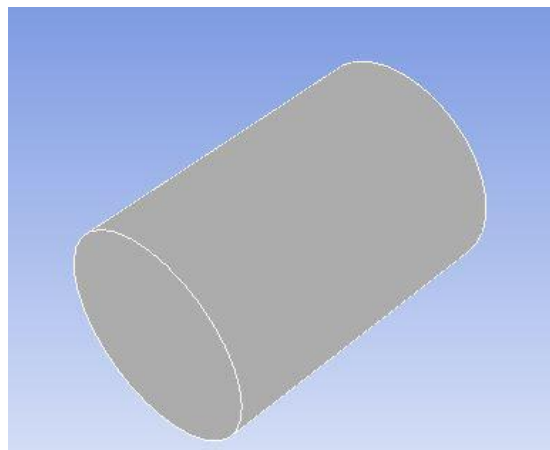
- Οι φυσικές ιδιότητες παραμένουν σταθερές εκτός από τη πυκνότητα η οποία ακολουθεί την προσέγγιση Boussinesq (Boussinesq Approximation – η πυκνότητα θεωρείται σταθερή στις βασικές εξισώσεις, με εξαίρεση στον όρο της πλευστότητας (Ghani et al. 2001)).  
Η εξίσωση 1 περιγράφει την σχέση (μεταβολή) της πυκνότητας του υγρού με τη θερμοκρασία

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

Όπου  $\beta$ : συντελεστής θερμικής διαστολής του υγρού ( $\beta=0.0018 \text{ 1/K}$ )

$\rho_{\text{ref}}$ ,  $T_{\text{ref}}$ : πυκνότητα και θερμοκρασία αναφοράς

Το μοντέλο διαφοροποιείται για την περίπτωση προσομοίωσης σε οριζόντια θέση. Επειδή δεν ισχύει η συμμετρία (σχήμα 3), η κονσέρβα σχεδιάστηκε ολόκληρη σε τρεις διαστάσεις (3-D) όπως φαίνεται στο σχήμα 4.



**Σχήμα 4.** Σχεδιασμός κονσέρβας σε οριζόντια θέση



Σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, θεωρήθηκε ότι η κονσέρβα ήταν πλήρως γεμισμένη με τον τοματοχυμό, δηλαδή με μηδενικό διάκενο (head space), με σκοπό να αποφευχθεί η πολυπλοκότητα που θα δημιουργούσε η διεπιφάνεια μεταξύ τοματοχυμού και αέρα. Η υπόθεση αυτή χρησιμοποιείται από πολλούς ερευνητές, διότι έχει αποδειχθεί ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δεν επηρεάζονται από την ύπαρξη ή μη του διακένου (Dimou & Yanniotis, 2011).

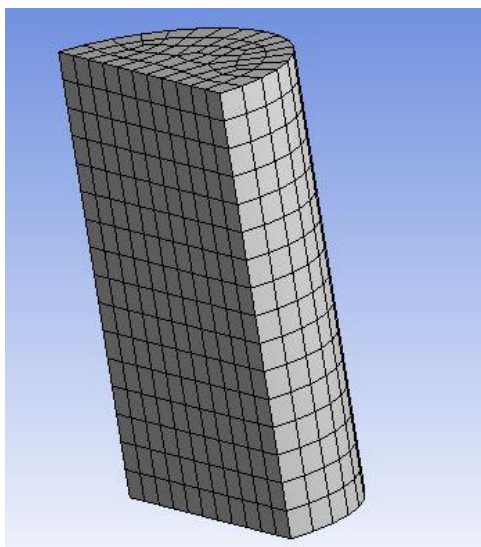
Επίσης, θεωρήθηκε ότι η θερμοκρασία των τοιχωμάτων της κονσέρβας, παραμένει σταθερή. Σύμφωνα με τους Varma & Kannan (2006), όταν πρόκειται για προσομοίωση θερμικής επεξεργασίας όπου η θέρμανση γίνεται ομοιόμορφα απ' όλες τις μεριές της κονσέρβας, τότε μπορεί να θεωρηθεί σταθερή η θερμοκρασία στα τοιχώματα της κονσέρβας, υποθέτοντας μία πολύ χαμηλή θερμική αντίσταση των τοιχωμάτων της κονσέρβας και έναν πολύ υψηλό συντελεστή θερμικής μεταφοράς (Kiziltas et al. 2010).

Τέλος, όλες οι περιπτώσεις ορίσθηκαν ως *Transient time* (μοντέλο μη μόνιμης κατάστασης), *pressure-based* και επιλύθηκαν χρησιμοποιώντας *Time step size* (s): 1s και μέγιστο αριθμό επαναλήψεων ανά Time step : 50 (*Iterations/Time step*).

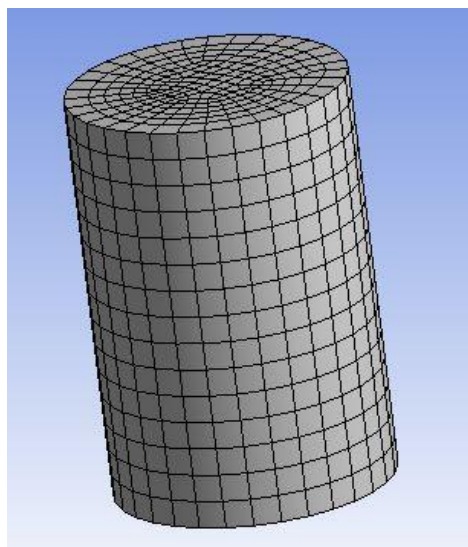
#### 4.2.2 Περιγραφή υπολογιστικού πλέγματος (mesh)

Το υπολογιστικό πλέγμα, στηρίζεται στη δημιουργία ενός σετ διακριτών σημείων στα οποία επιλύονται οι εξισώσεις πεπερασμένων στοιχείων. Συνήθως το δημιουργούμενο πλέγμα μετατρέπεται σε ένα ορθογωνικό πλέγμα, αποτελούμενο από ισαπέχοντα σημεία.

Τόσο ο αριθμός των σημείων, όσο και η πυκνότητα του πλέγματος, ποικίλουν ανάλογα με την πολυπλοκότητα του μοντέλου και με την ακρίβεια που επιζητά ο χρήστης του προγράμματος. Στα σχήματα 1, 2 παρουσιάζεται το mesh που επιλέχθηκε για την περίπτωση της κάθετα τοποθετημένης κονσέρβας και της οριζόντιας.



**Σχήμα 1.** Mesh για κάθετο μοντέλο



**Σχήμα 2.** Mesh για οριζόντιο μοντέλο

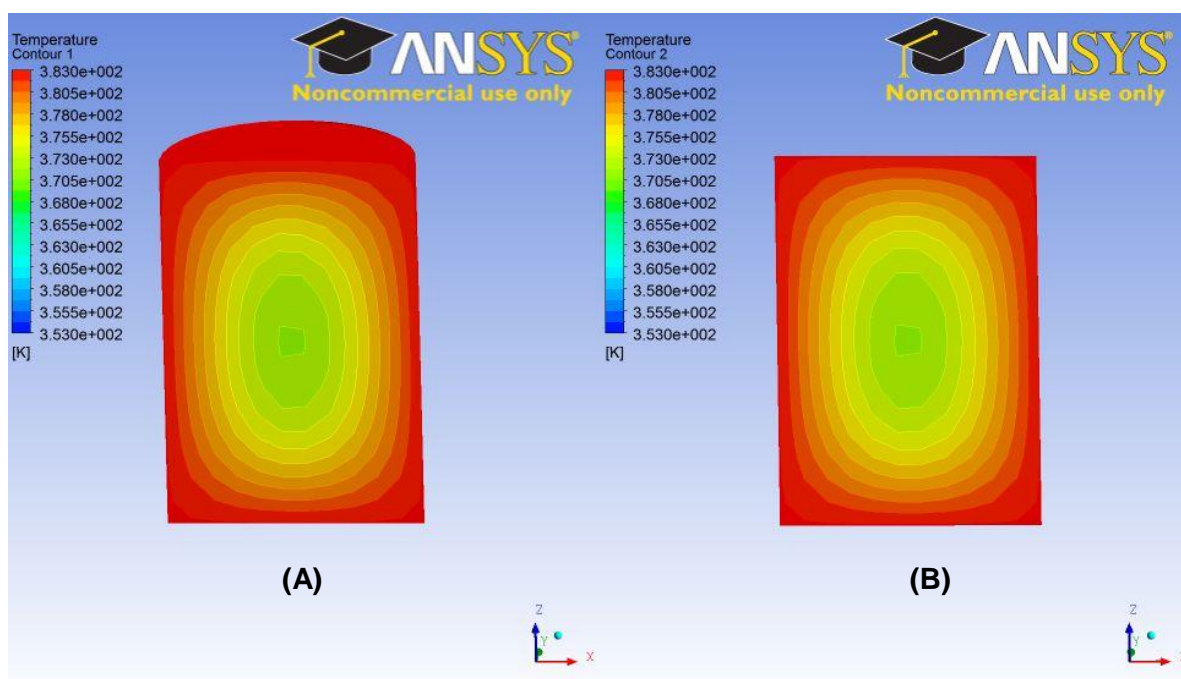
Έτσι στο πλέγμα της κάθετα τοποθετημένης κονσέρβας υπάρχουν 1275 κομβικά σημεία (nodes) με 960 κελιά (elements/cells), ενώ στην οριζόντια υπάρχουν 3424 κόμβοι με 2955 κελιά. Το συγκεκριμένο πλέγμα, ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις της προσομοίωσης των μελετούμενων μοντέλων.

## 5. Αποτελέσματα – Συζήτηση

### 5.1 Μεταφορά θερμότητας με Αγωγή σε μη μόνιμη κατάσταση

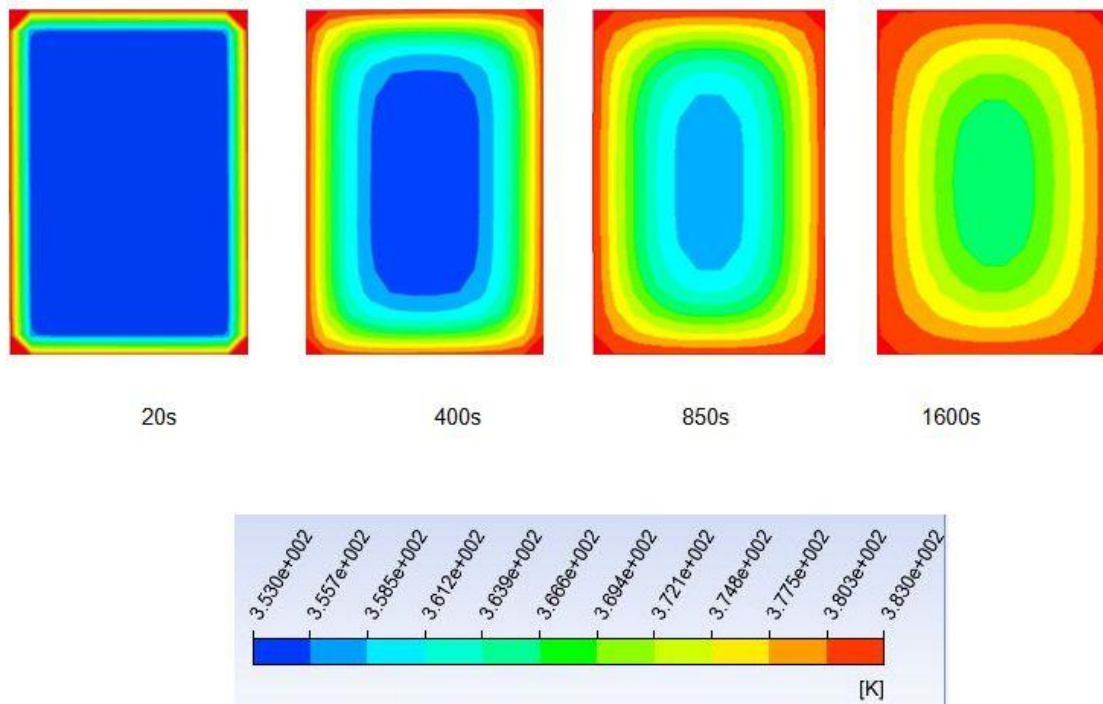
Στο πρώτο υπολογιστικό πείραμα θεωρήθηκε το περιεχόμενο της κονσέρβας ως στερεό το οποίο θερμαίνεται μόνο με τον μηχανισμό της αγωγής. Υπό αυτές τις συνθήκες δεν υπάρχει ροή και επομένως η μόνη εξίσωση που επιλύεται μέσω του Fluent είναι η εξίσωση του ισοζυγίου ενέργειας. Η περίπτωση όμως αυτή επιδέχεται αναλυτική λύση κι έτσι επιτρέπει την σύγκριση των αποτελεσμάτων του Fluent με τα θεωρητικά αποτελέσματα.

Το θερμοκρασιακό προφίλ μετά από χρόνο αποστείρωσης 2320s, ολόκληρης της κονσέρβας και του τμήματος που ορίστηκε ως επίπεδο συμμετρίας, παρουσιάζονται στο σχήμα 5. Είναι γνωστό ότι στην περίπτωση μεταφοράς θερμότητας με αγωγή, το ψυχρό σημείο (cold spot) βρίσκεται στο γεωμετρικό κέντρο της κονσέρβας. Απουσία φυσικής συναγωγής, ο τοματοχυμός, θεωρείται ότι θερμαίνεται με αγωγή, επιβεβαιώνοντας τη θέση του ψυχρού σημείου (cold spot) και στις δύο εικόνες.



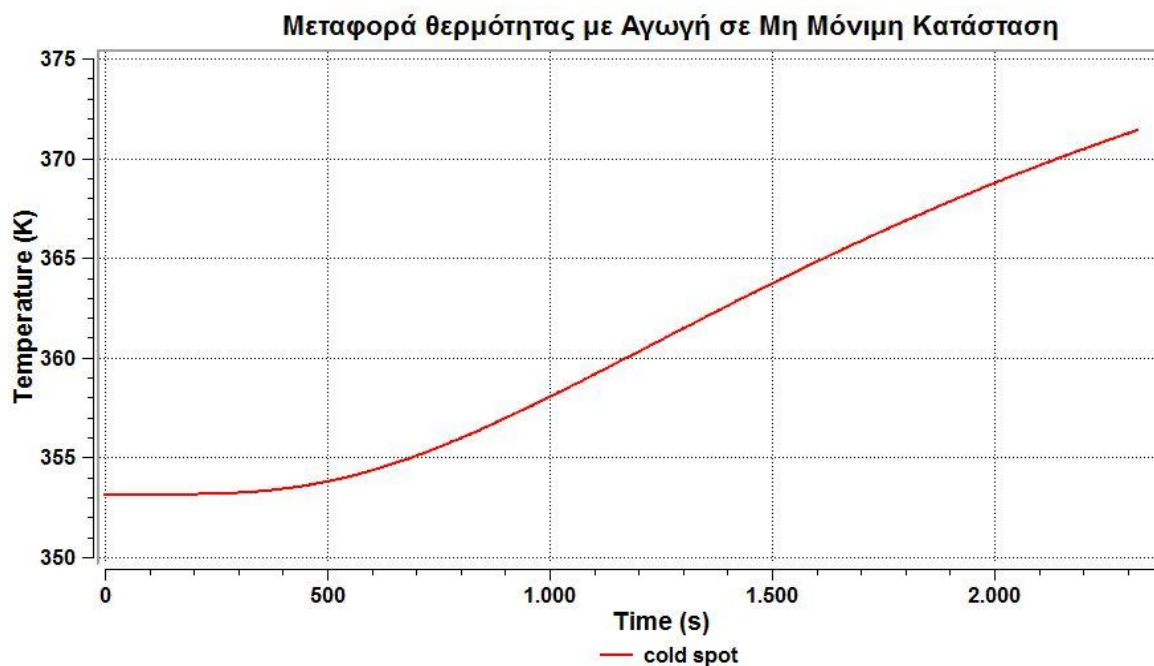
**Σχήμα 5.** Ολόκληρη η γεωμετρία της κονσέρβας (A) και το τμήμα συμμετρίας της (B), στην περίπτωση της αγωγής για χρόνο 2320s

Στο σχήμα 6 παρατηρείται το προφίλ της θερμοκρασίας (εστιασμένο στη συμμετρία της κονσέρβας) σε διαφορετικές χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας (αποστείρωση).



**Σχήμα 6.** Προφίλ θερμοκρασιών σε διαφορετικούς χρόνους κατά τη διάρκεια της αποστείρωσης

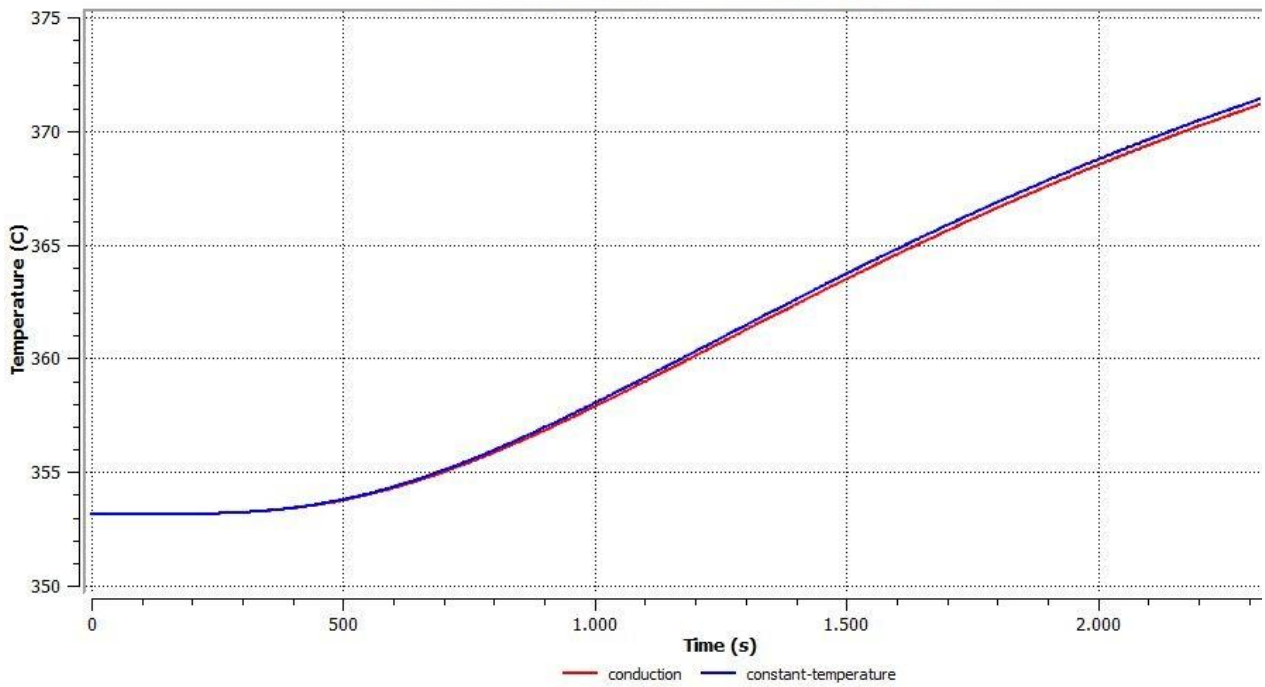
Η τελική θερμοκρασία στην οποία φτάνει το cold spot, στο τέλος του χρόνου αποστείρωσης, ταυτίζεται με τον θεωρητικό υπολογισμό της θερμοκρασίας του, όπως αυτός παρουσιάζεται στο Παράρτημα Α. Το διάγραμμα μεταβολής της θερμοκρασίας με το χρόνο δίνεται από το σχήμα 7.



**Σχήμα 7.** Μεταβολή της θερμοκρασίας του ψυχρού σημείου για την περίπτωση της αγωγής

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο (4.2.2) ο συντελεστής θερμικής μεταφοράς θεωρήθηκε ότι είναι πολύ υψηλός (στη θεωρητική λύση του Παραρτήματος Α, η τιμή του τέθηκε ίση με  $2000 \text{ W/m}^2\text{C}$ ). Σαν αποτέλεσμα, η θέρμανση του εξωτερικού περιβλήματος της κονσέρβας γίνεται πολύ γρήγορα και η θερμοκρασία του σχεδόν ακαριαία εξισορροπείται με την θερμοκρασία του ατμού. Επομένως, η χρήση της οριακής συνθήκης με συναγωγή και τον παραπάνω συντελεστή μεταφοράς θερμότητας αναμένεται να δώσει παρόμοια αποτελέσματα με την χρήση οριακής συνθήκης σταθερής θερμοκρασίας (και ίσης με τη θερμοκρασία του θερμαντικού μέσου). Αυτό επιβεβαιώνεται στο σχήμα 8 που ακολουθεί όπου παρατηρείται ότι τόσο στην περίπτωση της συναγωγής όσο και στην υπόθεση της σταθερής θερμοκρασίας (λύση χωρίς να συμπεριληφθεί ο συντελεστής θερμικής μεταφοράς), η θέρμανση του ψυχρού σημείου και κατ' επέκταση όλης της κονσέρβας γίνεται με τον ίδιο ρυθμό.

### Σύγκριση Αγωγής - Σταθερής θερμοκρασίας

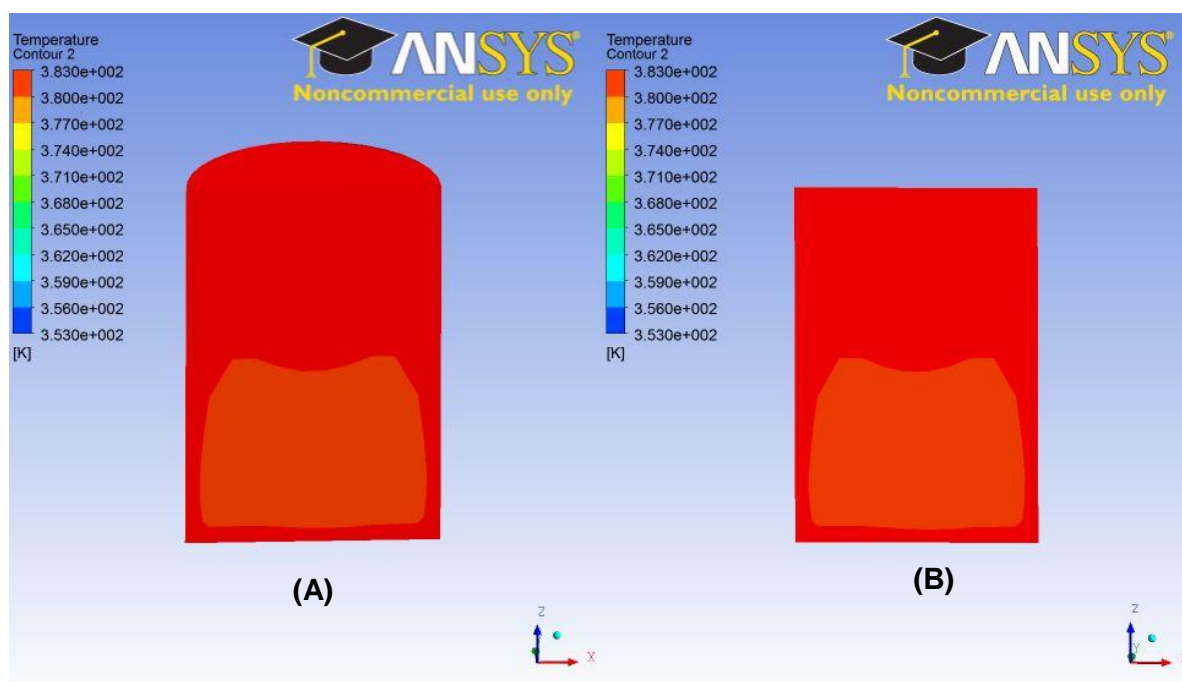


**Σχήμα 8.** Σύγκριση της μεταβολής της θερμοκρασίας του ψυχρού σημείου για τις δύο διαφορετικές οριακές συνθήκες της συναγωγής και της σταθερής θερμοκρασίας

## 5.2 Μεταφορά θερμότητας με Φυσική Συναγωγή

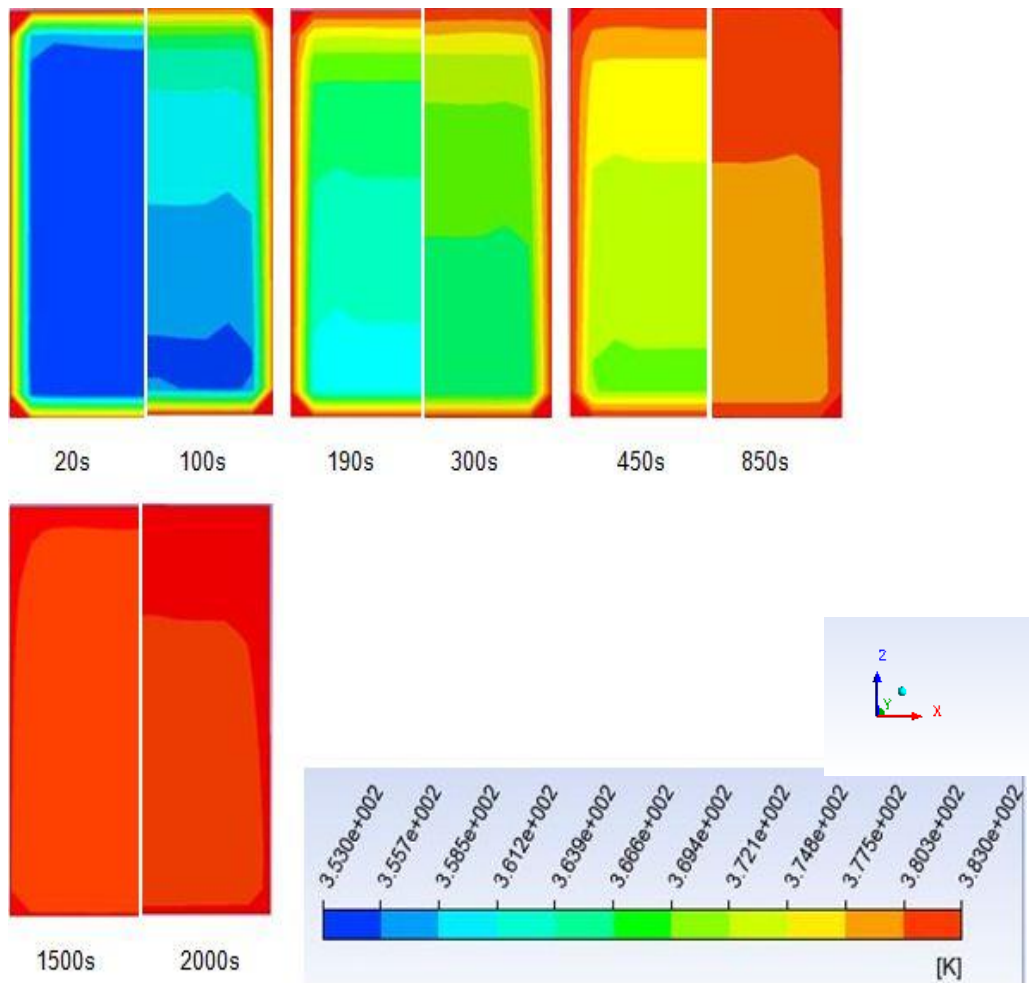
Λόγω των θερμοκρασιακών διαφορών στο εσωτερικό της κονσέρβας, προκαλούνται μεταβολές στην πυκνότητα του ρευστού με αποτέλεσμα την κίνησή του λόγω των δημιουργούμενων δυνάμεων άνωσης (φυσική συναγωγή). Στο δεύτερο υπολογιστικό πείραμα, θεωρήθηκε, επομένως, το περιεχόμενο της κονσέρβας ως ρευστό, προσδιορίστηκε η πυκνότητά του μέσω της προσέγγισης Boussinesq και ορίστηκε το μέγεθος και η κατεύθυνση της βαρύτητας κατά μήκος του κατακόρυφου άξονα της κονσέρβας. Στο μαθηματικό μοντέλο προστέθηκαν, επομένως, και οι εξισώσεις συνέχειας και διατήρησης της ορμής.

Είναι γνωστό ότι παρουσία ρευμάτων φυσικής συναγωγής, η θέρμανση του προϊόντος γίνεται γρηγορότερα, και το ψυχρό σημείο μετακινείται από το γεωμετρικό κέντρο. Στο σχήμα 9 δίνεται το θερμοκρασιακό προφίλ της κονσέρβας, καθώς και του τμήματος συμμετρίας της μετά από επεξεργασία 2320s. Η σύγκριση με το αντίστοιχο σχήμα 5 του προηγούμενου πειράματος επαληθεύει την σημαντική επιτάχυνση στην εξέλιξη του φαινομένου που προκαλείται από την φυσική συναγωγή.



**Σχήμα 9.** Θερμοκρασιακό προφίλ ολόκληρης κονσέρβας (A), τμήμα συμμετρίας (B), σε χρόνο 2320s

Όπως προαναφέρθηκε, το ψυχρό σημείο δεν βρίσκεται στο κέντρο της κονσέρβας, αλλά μετακινείται προς το κάτω μέρος της. Αυτό παρατηρείται στο σχήμα 10 όπου παρατίθενται τα θερμοκρασιακά προφίλ στο εσωτερικό της κονσέρβας και σε διάφορα χρονικά σημεία της θερμικής επεξεργασίας.

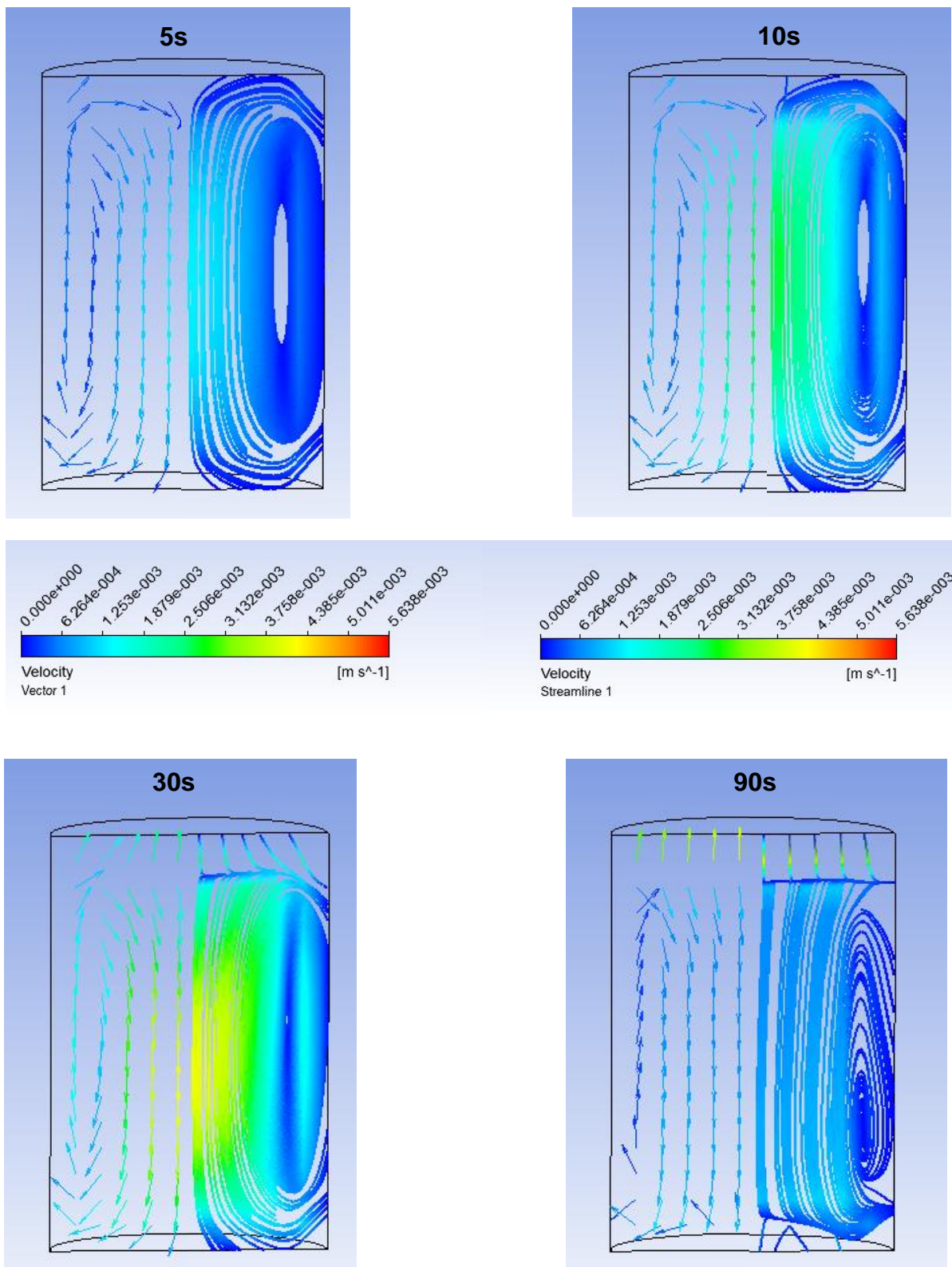


**Σχήμα 10.** Μετακίνηση της θέσης του ψυχρού σημείου κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας

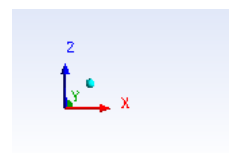
Με τη χρήση UDF (User Defined Function), προσδιορίστηκε με ακρίβεια ότι η θέση του ψυχρού σημείου παρέμεινε σταθερή σε ύψος περίπου 10% (Παράρτημα 2) από το κάτω μέρος της κονσέρβας. Η θέση αυτή είναι αποδεκτή καθώς συμβαδίζει με το 10-12% που υπολογίστηκε από τους [Ghani et al. (1999a), Da-Wen Sun, (2007)], με το επίσης 10% των Zechman & Pflug (1989) και βρίσκεται στο 5-20% που υπολογίστηκε από τους Chen et al. (2005).

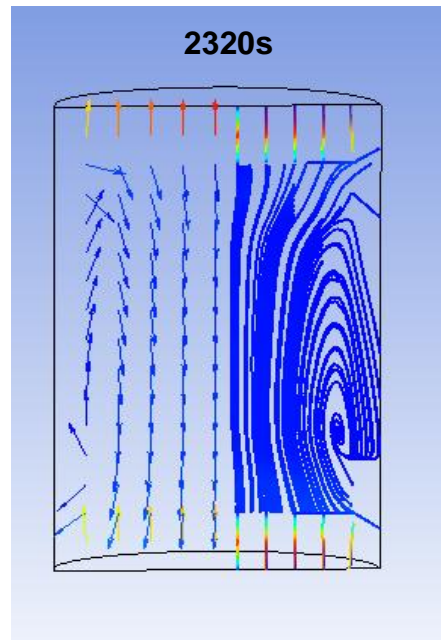
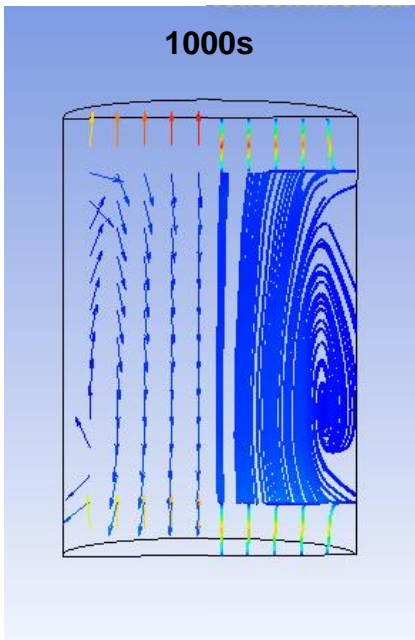
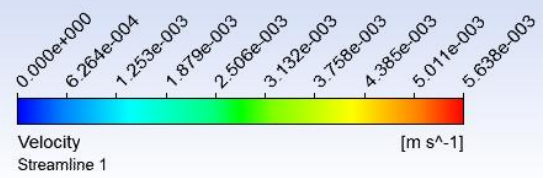
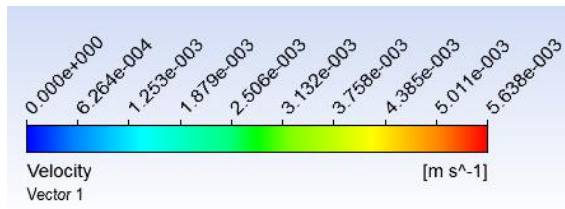
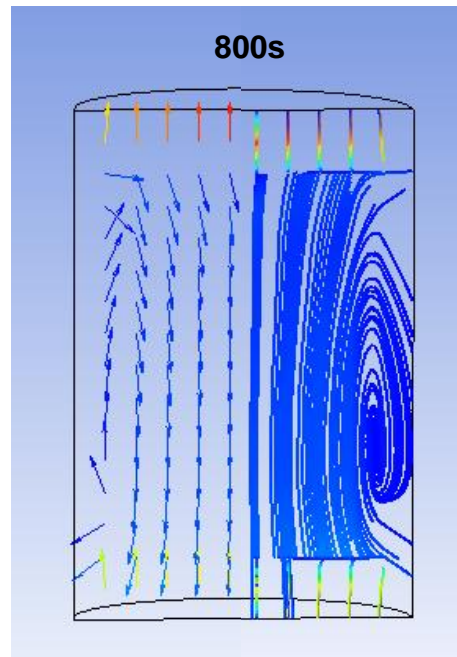
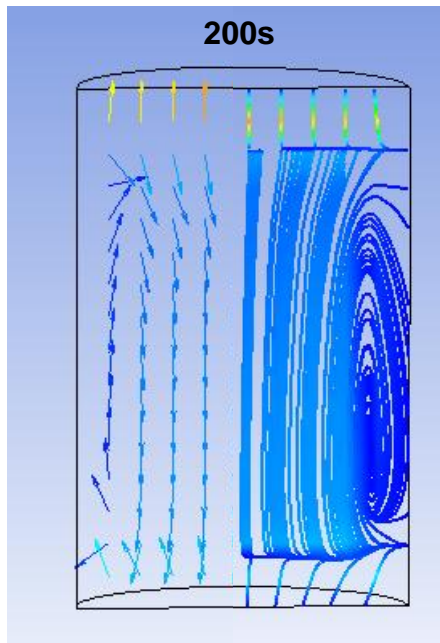
Παρατηρείται μια διακύμανση της ταχύτητας στην αρχή της θερμικής επεξεργασίας η οποία όμως καθώς η θερμοκρασιακές διαφορές μειώνονται, γίνεται πιο σταθερή, όπως παρατηρήθηκε και από τους Dimou & Yanniotis (2011) και παρουσιάζεται στο σχήμα 11α,β.



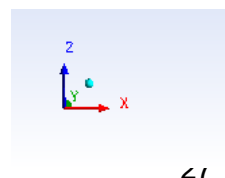


**Σχήμα 11α.** Προφίλ ταχυτήτων και ροής στο τμήμα της συμμετρίας σε διάφορους χρόνους θερμικής επεξεργασίας

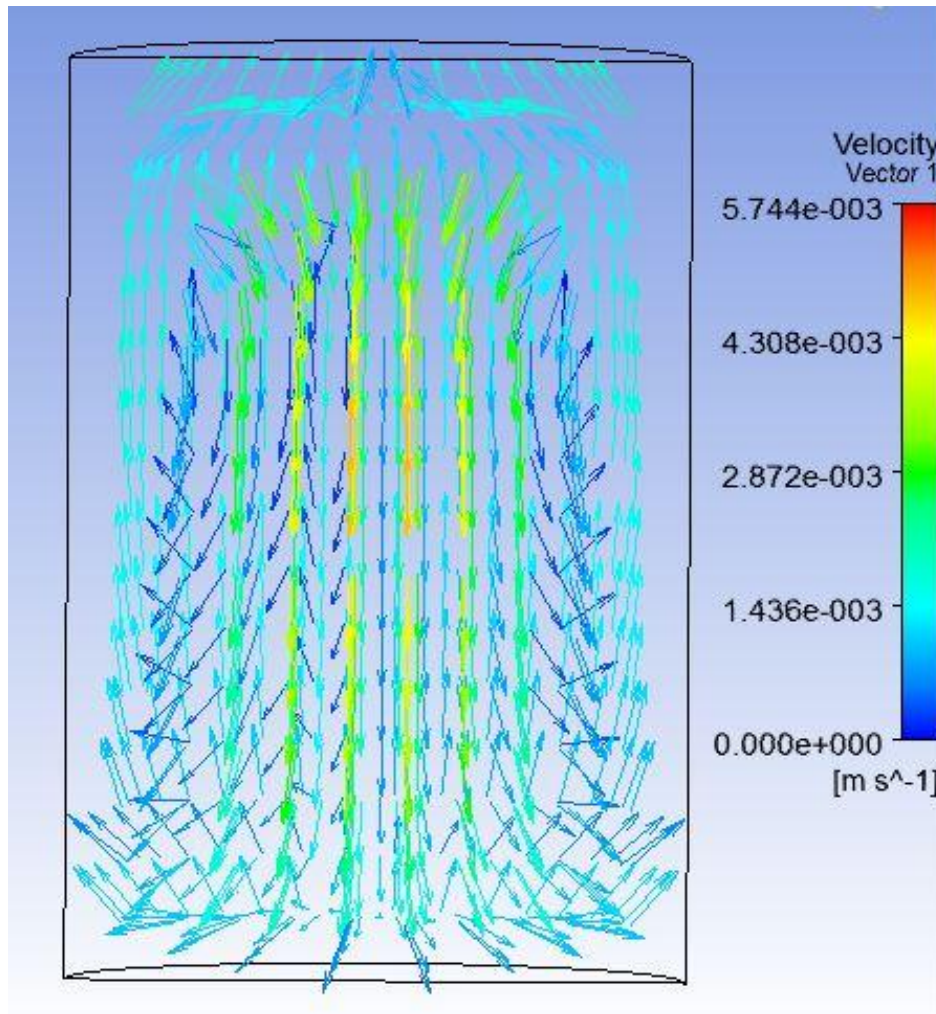




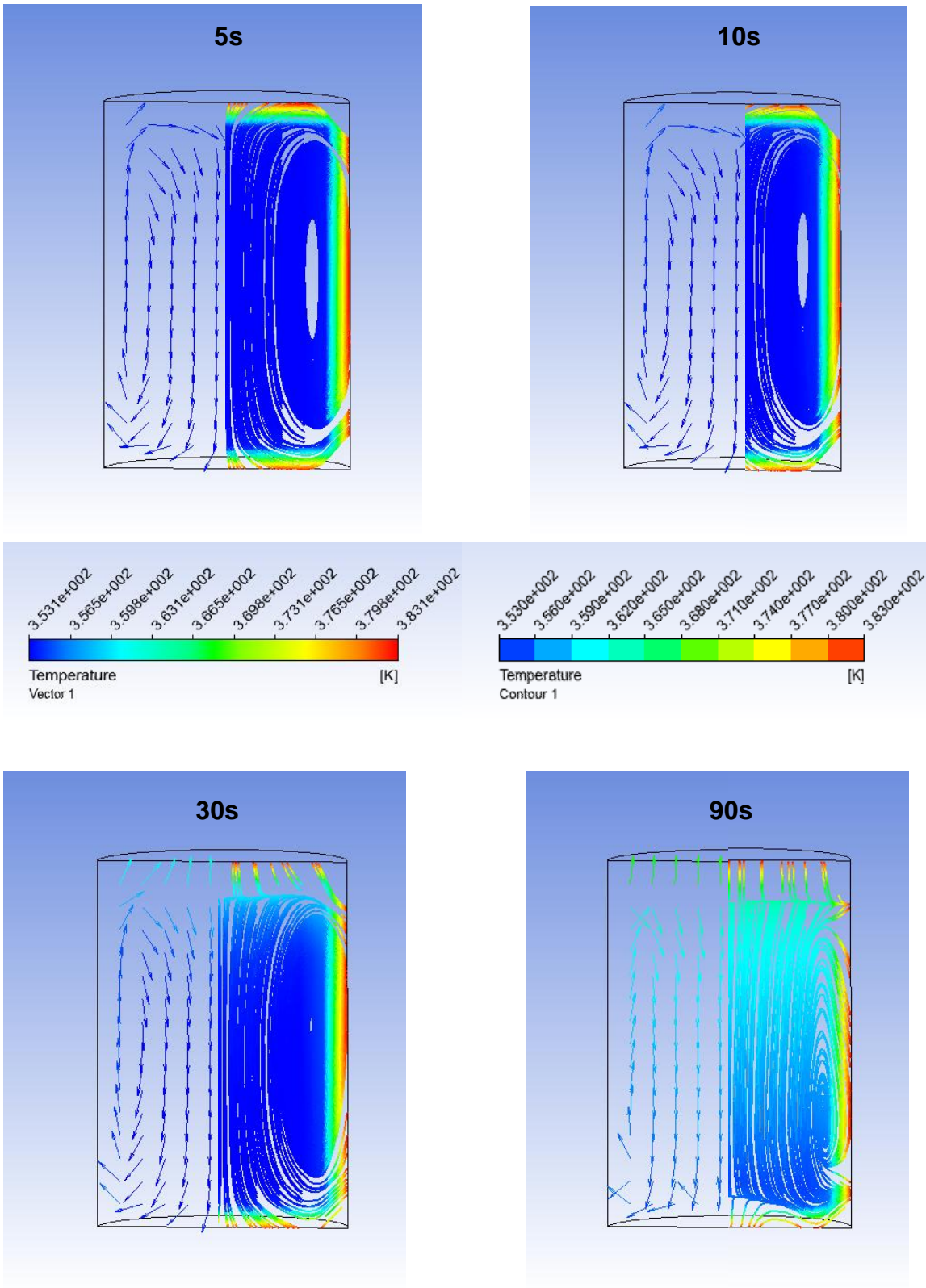
**Σχήμα 11β.** Προφίλ ταχυτήτων και ροής στο τμήμα της συμμετρίας σε διάφορους χρόνους θερμικής επεξεργασίας



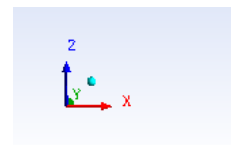
Στο σχήμα 11γ παρουσιάζεται ενδεικτικά το προφίλ ταχύτητας όλου του ρευστού στα 20s.

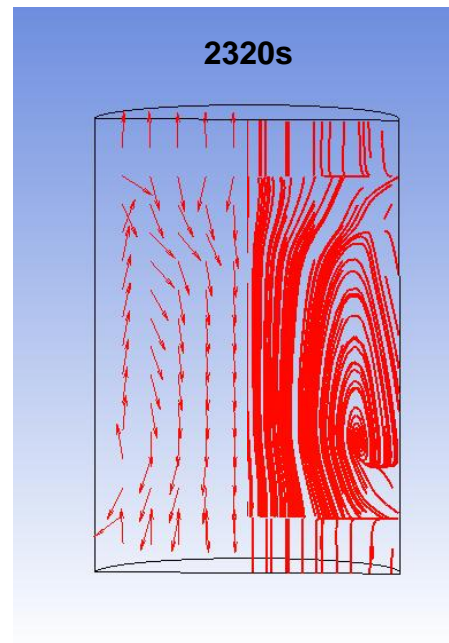
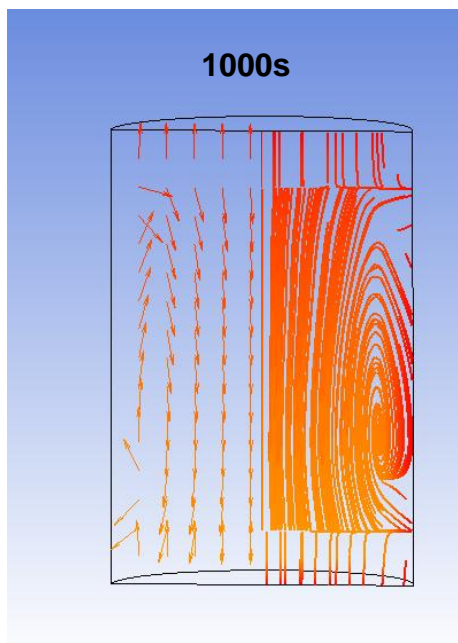
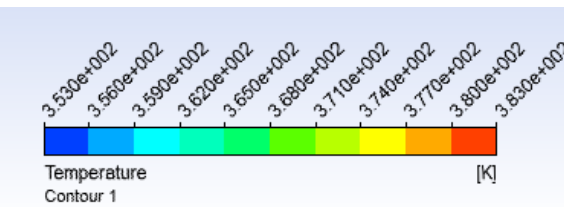
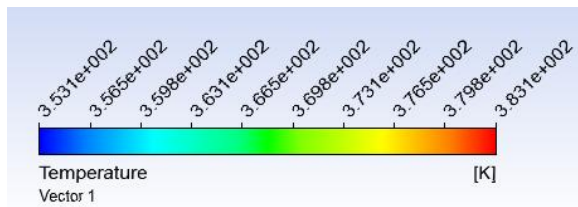
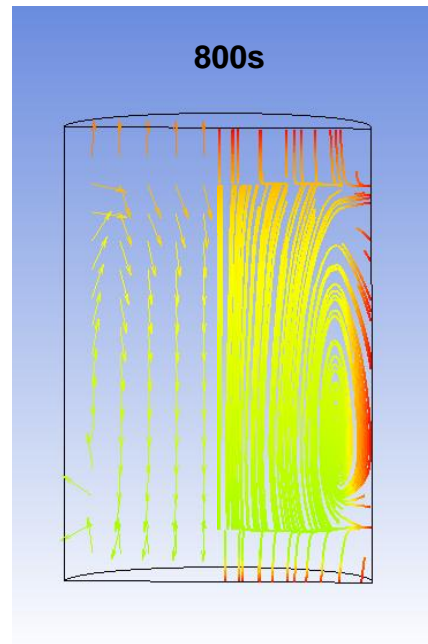
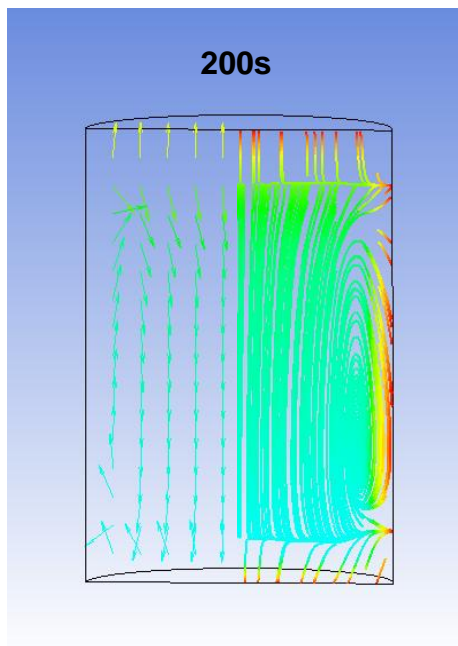


Σχήμα 11γ. Προφίλ ταχύτητας όλου του ρευστού σε χρόνο 20s

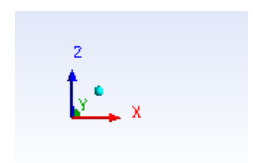


**Σχήμα 12α.** Κατανομή θερμοκρασιών κατά τη ροή του ρευστού στο τμήμα της συμμετρίας σε χρόνους ίδιους με το σχήμα 11α,β.





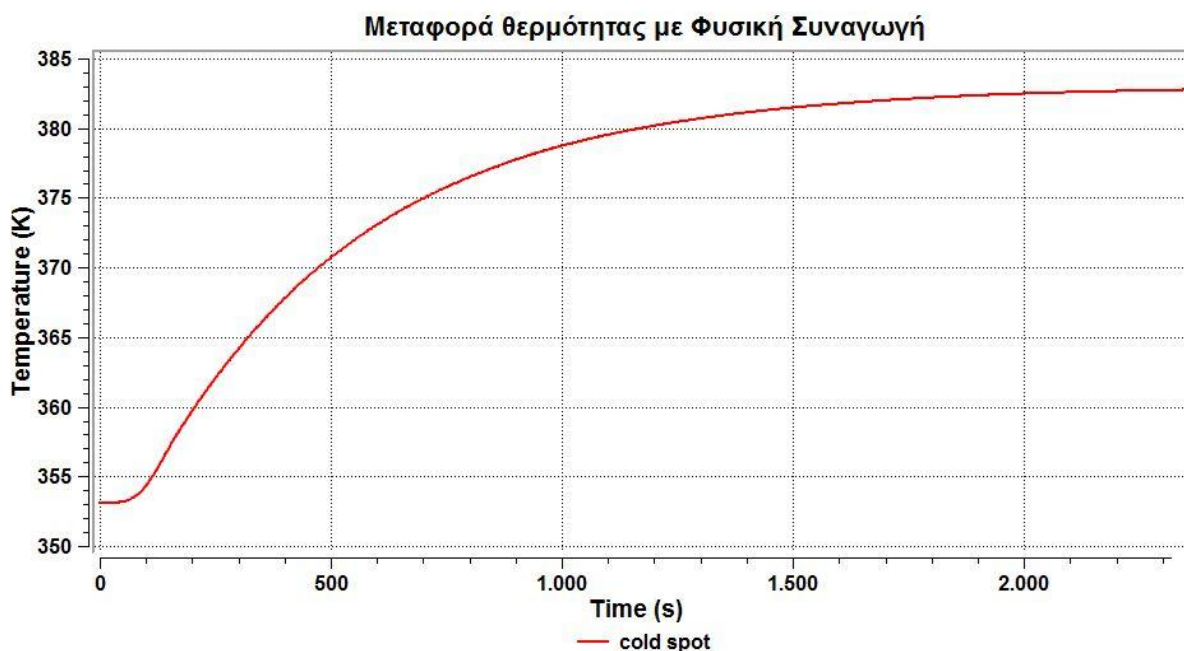
**Σχήμα 12β.** Κατανομή θερμοκρασιών κατά τη ροή του ρευστού στο τμήμα της συμμετρίας σε χρόνους ίδιους με το σχήμα 11α,β



Παρατηρείται ότι στην αρχή της θερμικής επεξεργασίας το τμήμα του ρευστού που έρχεται σε επαφή με τα τοιχώματα της κονσέρβας, θερμαίνεται μέσω αγωγής αποκτώντας τη θερμοκρασία των τοιχωμάτων σε αντίθεση με το υπόλοιπο ρευστό το οποίο έχει ακόμη την αρχική θερμοκρασία [(Kumar et al. 1990), (Datta & Teixeira 1988)] (σχήμα 12α). Οι καθοδικές ταχύτητες είναι μέγιστες στο κέντρο της κονσέρβας, επιτρέποντας την θερμότητα να διεισδύσει ταχύτερα σε σχέση με την περιφέρεια της κονσέρβας, δημιουργώντας με αυτό τον τρόπο τις κοιλότητες που παρατηρούνται και στα άκρα του περιγράμματος της θερμοκρασίας (Varma & Kannan, 2006) για κάθε χρονική στιγμή όπως παρατηρείται και στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο σχήμα 10.

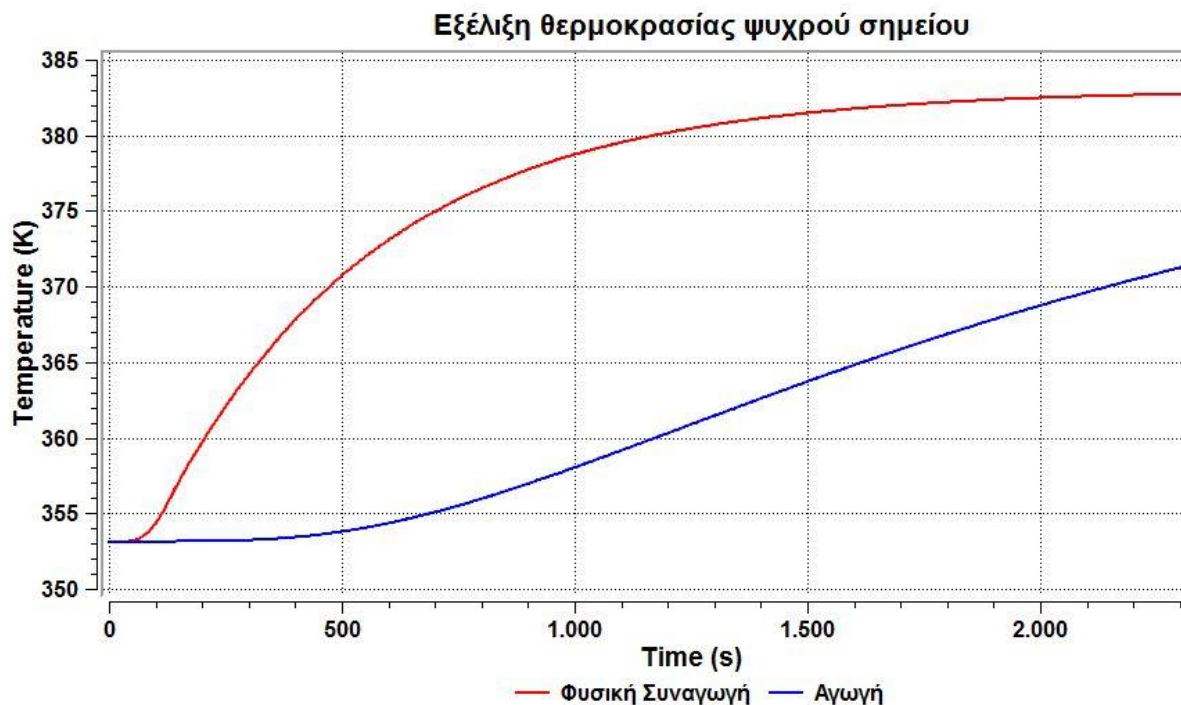
Καθώς θερμαίνεται το ρευστό, διαστέλλεται, με αποτέλεσμα να γίνεται ελαφρύτερο. Η δημιουργούμενη άνωση οφείλεται στη βαρύτητα και στην αλλαγή της πυκνότητας λόγω μεταβολής της θερμοκρασίας. Έτσι το θερμότερο και συγχρόνως ελαφρύτερο ρευστό αντικαθίσταται από ένα ψυχρότερο κοντά στα τοιχώματα της κονσέρβας. Το ελαφρύτερο ρευστό κατά την άνοδο του συμπαρασύρει και το ψυχρότερο με το οποίο βρίσκεται σε επαφή. Η ανοδική αυτή κίνηση διακόπτεται από το πάνω μέρος της κονσέρβας, με αποτέλεσμα το θερμό ρευστό να απλώνεται ακτινικά προς το εσωτερικό της «αναγκάζοντας» το ψυχρότερο να κινηθεί προς το κάτω μέρος και στη συνέχεια προς τα τοιχώματα. Η κίνηση αυτή προς τα τοιχώματα επιτρέπει μια ροή επανακυκλοφορίας. Τα συμπεράσματα αυτά των Kumar et al. (1990) και Ghani et al. (1999a) για ροή με φυσική συναγωγή περιγράφουν τη ροή που παρουσιάζεται στα σχήματα 11α,β και σχήμα 12α,β

Όπως προαναφέρθηκε, το ψυχρό σημείο βρίσκεται σε ύψος μόλις 10% από το κάτω μέρος της κονσέρβας. Η μεταβολή της θερμοκρασίας του με το χρόνο δίνεται από το σχήμα 13.



**Σχήμα 13.** Μεταβολή της θερμοκρασίας του ψυχρού σημείου για την περίπτωση της Φυσικής Συναγωγής

Στο σχήμα 14 φαίνεται η εξέλιξη της θερμοκρασίας του ψυχρού σημείου στον ίδιο χρόνο για τις δύο περιπτώσεις αγωγή - φυσική συναγωγή, επιβεβαιώνοντας την άποψη ότι η θέρμανση προϊόντος γίνεται ταχύτερα με φυσική συναγωγή απ' ότι με αγωγή.



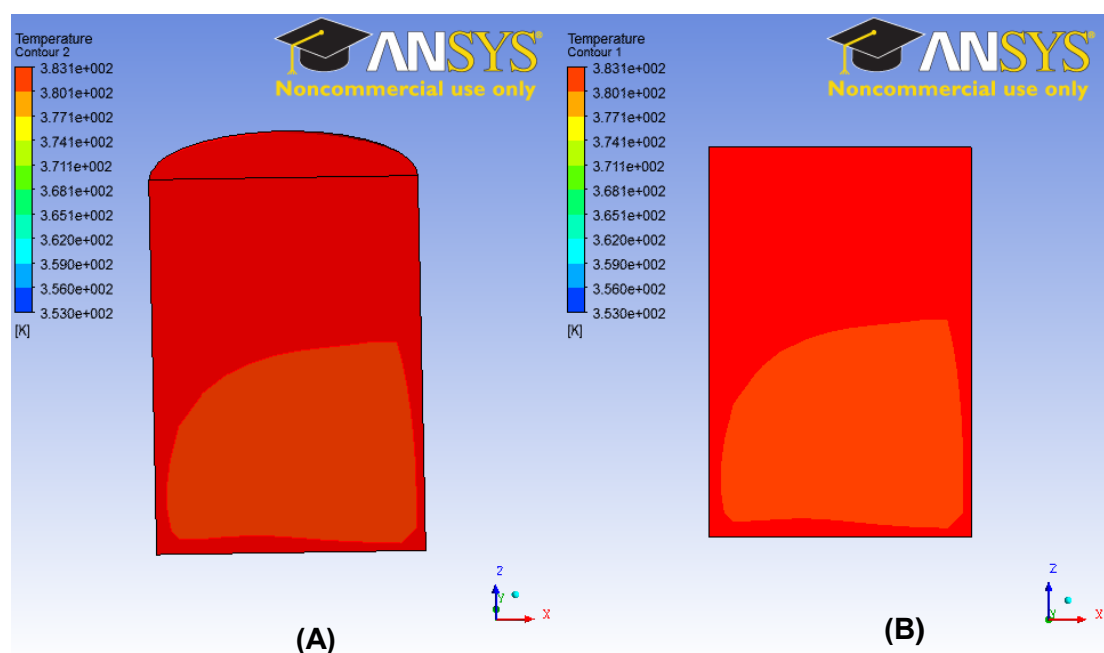
**Σχήμα 14.** Μεταβολή της θερμοκρασίας του ψυχρού σημείου για τις περιπτώσεις φυσική συναγωγή και αγωγή

Παρατηρείται ότι στην περίπτωση της φυσικής συναγωγής, η θερμοκρασία των 371.15K που απαιτείται στην περίπτωση της αγωγής, ώστε σε χρόνο 2320s η κονσέρβα να θεωρείται αποστειρωμένη, επιτυγχάνεται σε χρόνο μόλις 500s .

### 5.3 Μεταφορά θερμότητας με Φυσική Συναγωγή και ταυτόχρονη περιστροφή της κονσέρβας

Στο τρίτο υπολογιστικό πείραμα συμπεριλήφθηκε και εξαναγκασμένη συναγωγή λόγω περιστροφής της κονσέρβας. Η περιστροφή των κονσερβών, εφαρμόζεται με σκοπό την αύξηση του ρυθμού θέρμανσης στο εσωτερικό τους ώστε η να μειωθεί ο απαιτούμενος χρόνος θερμικής επεξεργασίας (Ghani et al. 2003).

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται προέκυψαν από την αξονική περιστροφή της κονσέρβας με ταχύτητα 5rpm και κάθετο προσανατολισμό.

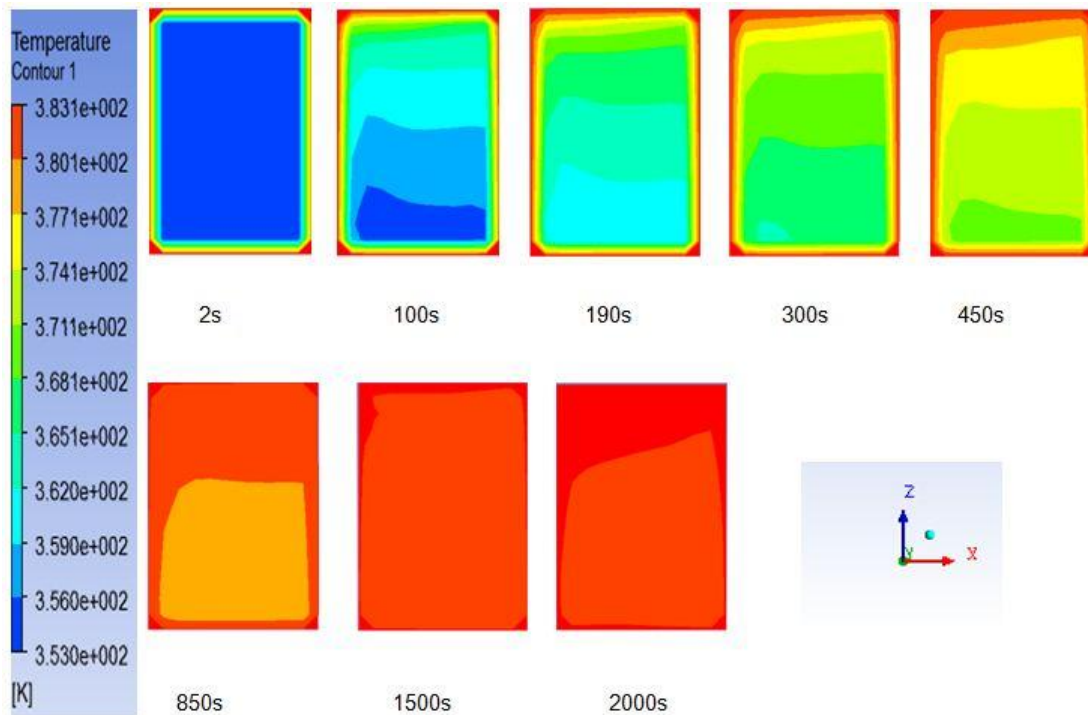


**Σχήμα 15.** Θερμοκρασιακό προφίλ ολόκληρης κονσέρβας (A), τμήμα συμμετρίας (B), σε χρόνο 2320s

Όπως στη περίπτωση της φυσικής συναγωγής, έτσι και στη περίπτωση της φυσικής συναγωγής με περιστροφή, το ψυχρό σημείο βρίσκεται σε περιοχή κοντά στο κάτω μέρος της κονσέρβας (σχήμα 15).

Η μεταβολή της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας στο εσωτερικό της κονσέρβας (επίπεδο συμμετρίας) παρουσιάζεται στο σχήμα 16. Επιλέχθηκαν ίδιες χρονικές στιγμές με αυτές της φυσικής συναγωγής (σχήμα 10).

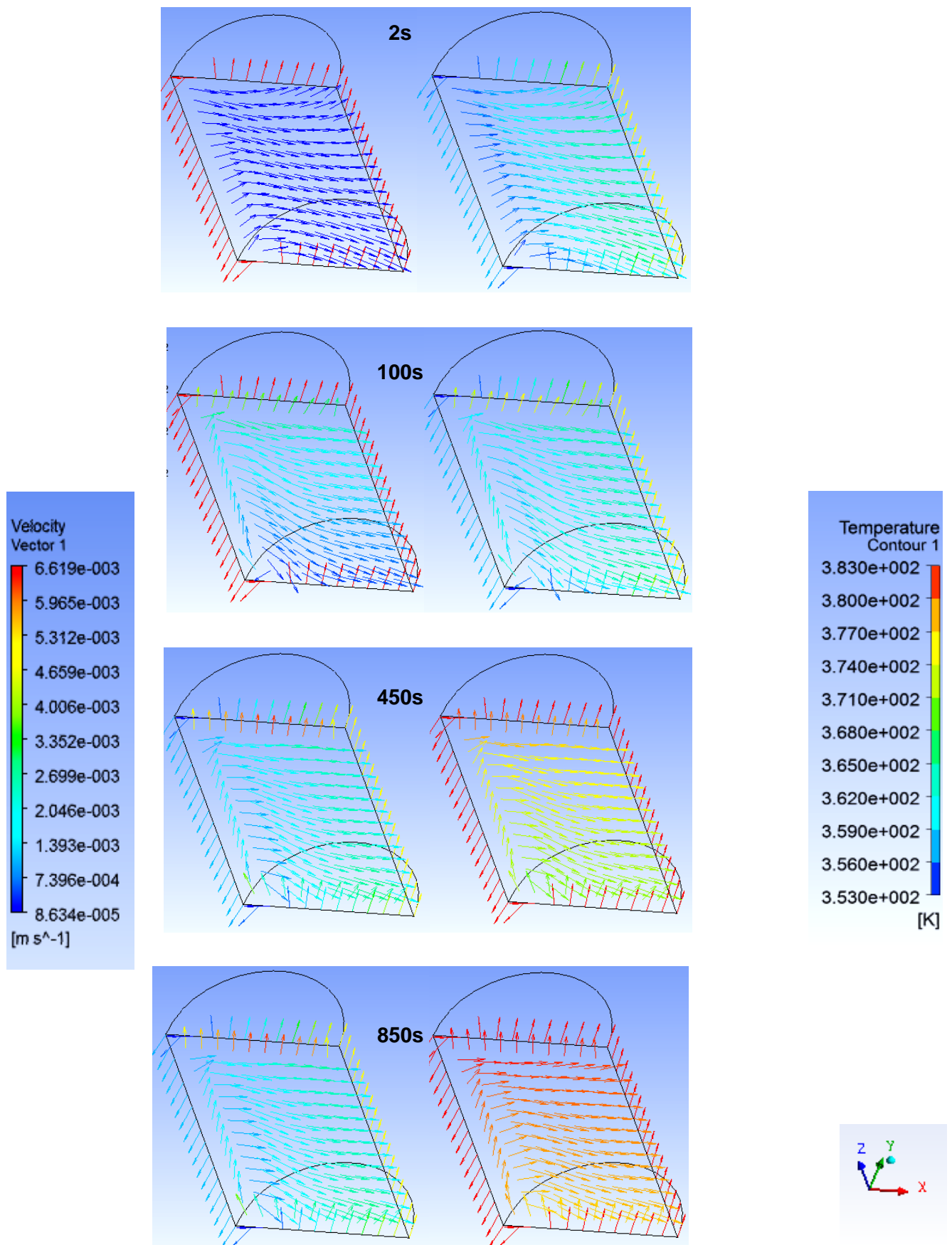




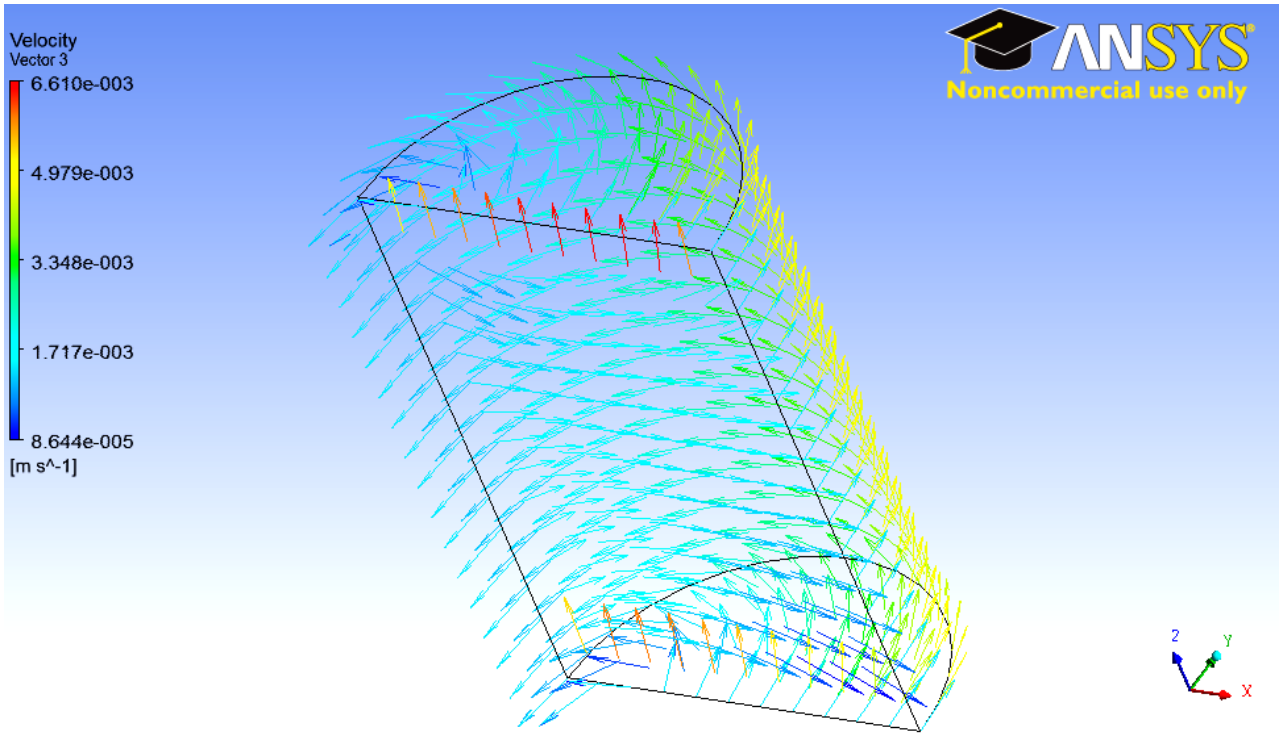
**Σχήμα 16.** Μετακίνηση της θέσης του ψυχρού σημείου κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας ενώ η κονσέρβα περιστρέφεται με ταχύτητα 5rpm

Τα προφίλ των θερμοκρασιών δεν διαφέρουν από αυτά του σχήματος 10 (μικρή διαφορά στα 2000s). Το αποτέλεσμα αυτής της σύγκρισης μπορεί να επιβεβαιωθεί και από το γεγονός ότι η θέση του ψυχρού σημείου που εντοπίστηκε με χρήση UDF, βρίσκεται σε ύψος περίπου 10% από το κάτω μέρος της κονσέρβας, όπως ακριβώς και στη περίπτωση της φυσικής συναγωγής χωρίς περιστροφή.

Στο σχήμα 17, παρουσιάζονται τα προφίλ της ταχύτητας και της θερμοκρασίας σε διάφορους χρόνους κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας.

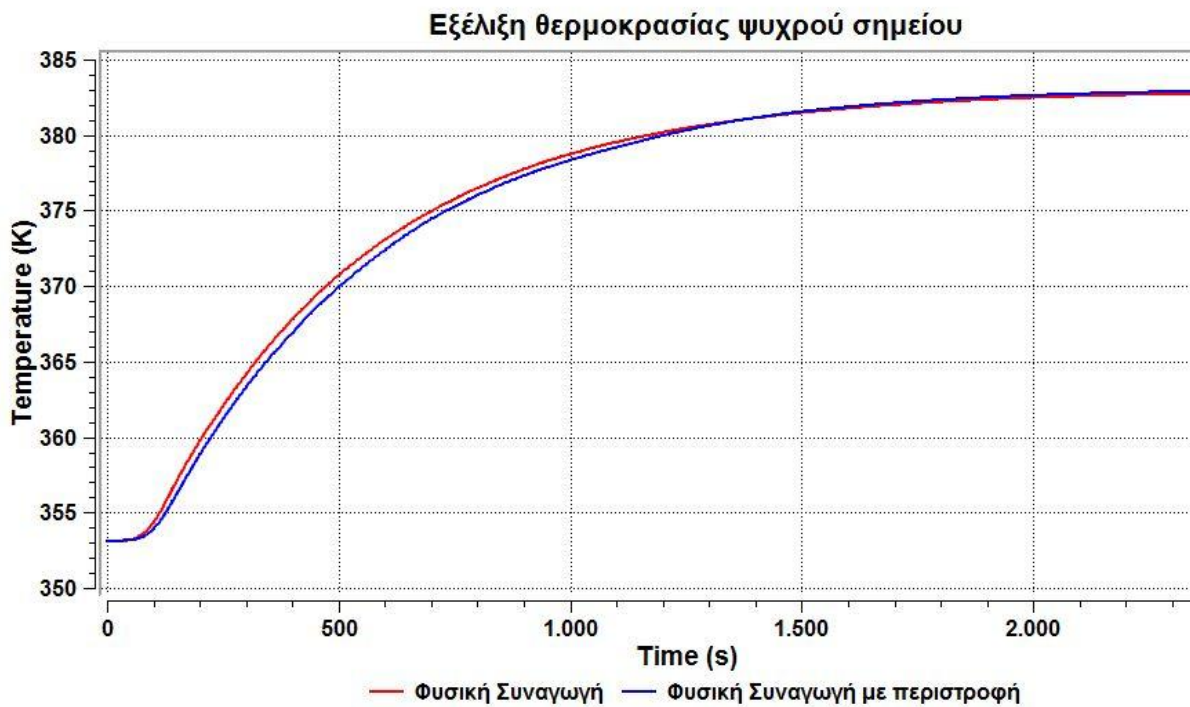


**Σχήμα 17.** Προφίλ ταχύτητας και θερμοκρασίας στο τμήμα συμμετρίας σε διάφορους χρόνους κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας.



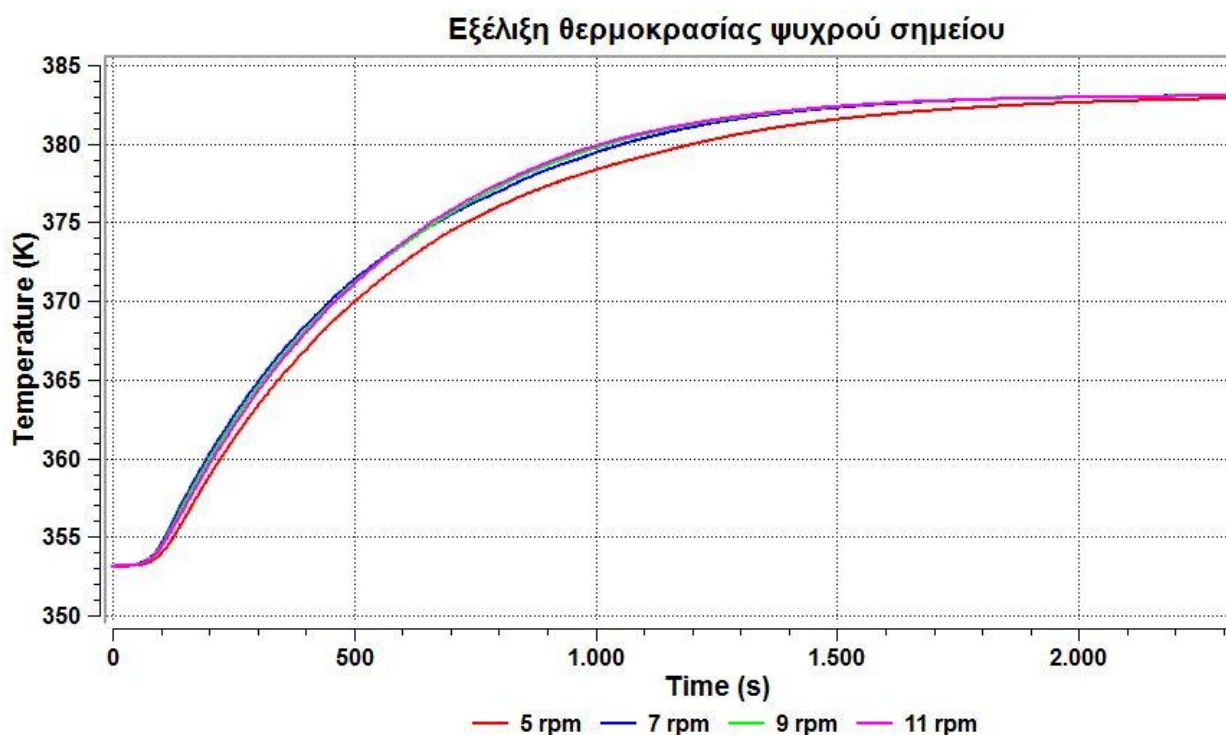
**Σχήμα 18.** Προφίλ ταχυτήτων σε χρόνο 2320s για όλη τη γεωμετρία της κονσέρβας.

Στο σχήμα 19 δίνεται η γραφική παράσταση σύγκρισης της μεταβολής της θερμοκρασίας του ψυχρού στην περίπτωση της φυσικής συναγωγής και φυσικής συναγωγής με ταυτόχρονη περιστροφή.



**Σχήμα 19.** Σύγκριση θερμοκρασιών του ψυχρού σημείου για την περίπτωση φυσικής συναγωγής και φυσικής συναγωγής με ταυτόχρονη περιστροφή (5rpm)

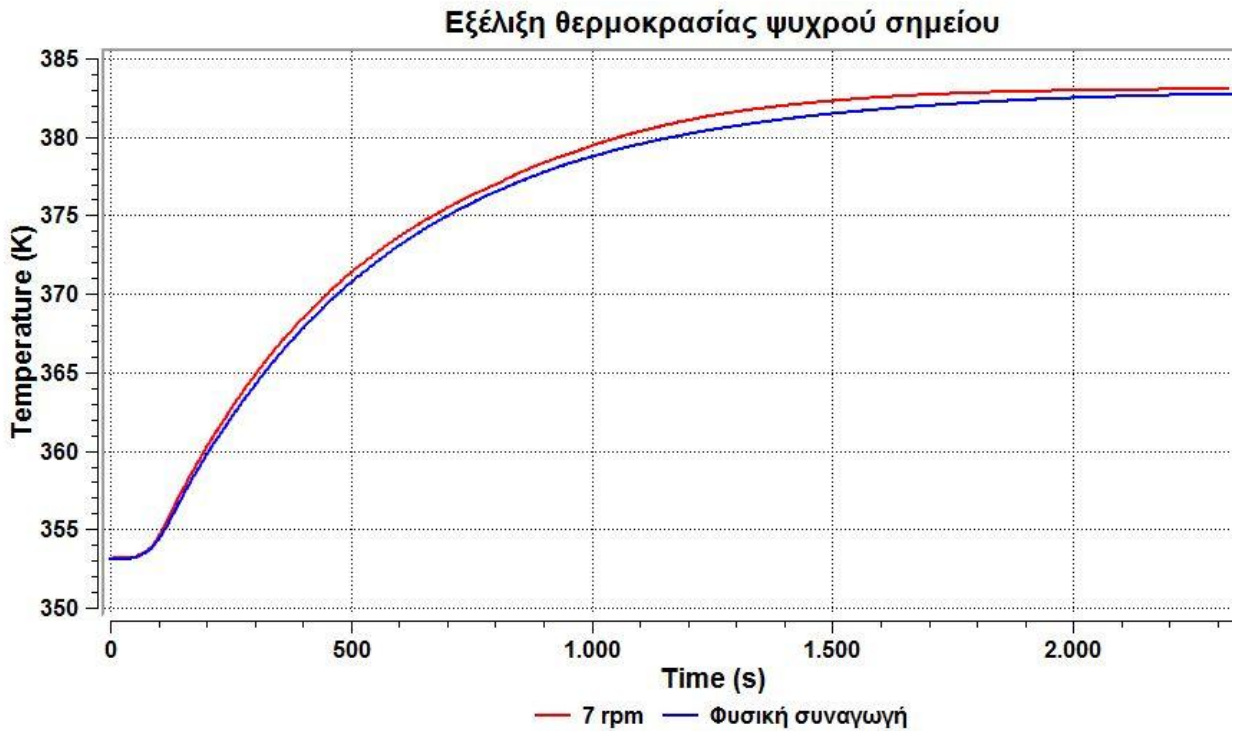
Παρατηρείται ότι οι δύο καμπύλες είναι περίπου ταυτόσημες με την θερμοκρασία του ψυχρού σημείου στην περίπτωση της φυσικής συναγωγής με περιστροφή να είναι ελαφρώς χαμηλότερη για χρόνο μέχρι 1300s. Για να διερευνηθεί η επίδραση της ταχύτητας περιστροφής στον χρόνο αποστείρωσης, έγιναν οι δοκιμές που φαίνονται στο σχήμα 20 .



**Σχήμα 20.** Μεταβολή της θερμοκρασίας του ψυχρού σημείου για τη περίπτωση της Φυσικής Συναγωγής με περιστροφή της κονσέρβας με 5, 7, 9, 11 rpm

Όπως φαίνεται υπάρχει μία μικρή διαφορά στα αποτελέσματα για ταχύτητα 5 rpm όπου η αύξηση της θερμοκρασίας του ψυχρού σημείου είναι μικρότερη σε σχέση με τις υπόλοιπες τιμές. Στις ταχύτητες 7, 9, 11 rpm εμφανίζεται ταύτιση θερμοκρασιών γι' αυτό και δεν εξετάστηκαν άλλες μεγαλύτερες ταχύτητες.

Για τη σύγκριση με την περίπτωση της φυσικής συναγωγής χωρίς περιστροφή, επιλέχθηκε η ταχύτητα 7 rpm, για λόγους ενεργειακής οικονομίας του μέσου στο οποίο γίνεται η θερμική επεξεργασία (σχήμα 21).

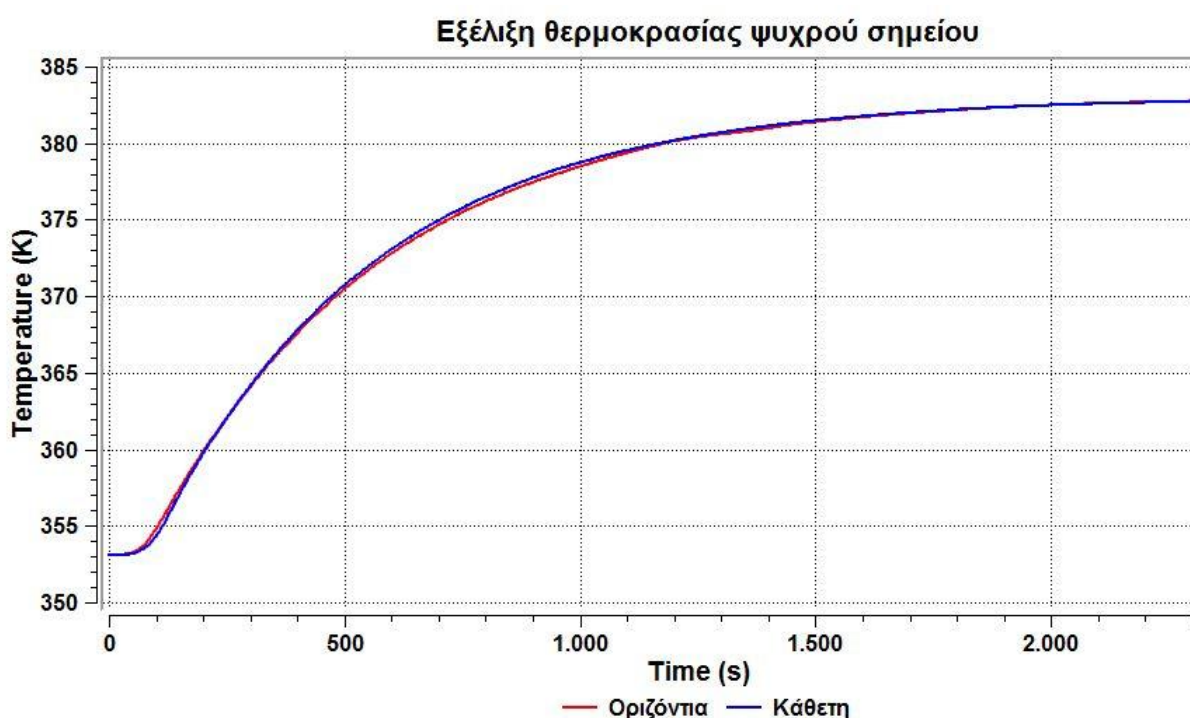


**Σχήμα 21.** Σύγκριση θερμοκρασιών του ψυχρού σημείου για την περίπτωση φυσικής συναγωγής και φυσικής συναγωγής με ταυτόχρονη περιστροφή (7rpm)

Με βάση την σύγκριση των αποτελεσμάτων στο σχήμα 21 συμπεραίνεται ότι δεν υπάρχει σημαντική επίπτωση στο θερμοκρασιακό προφίλ από την περιστροφή της κονσέρβας. Βιβλιογραφικά, θα πρέπει να σημειωθεί ότι αναφέρονται επίσης περιπτώσεις μη σαφούς επίδρασης της περιστροφής (όπως, για παράδειγμα από τους Ghani et al (2003) για κονσέρβα λευκών φασολιών) ή οι αναφερόμενες επιπτώσεις είναι σχετικά μικρές (1-4°C). Στην περίπτωση που εξετάσαμε το αποτέλεσμα ήταν αναμενόμενο δεδομένου ότι η περιστροφή γίνεται οριζόντια (γύρω από τον άξονα της κάθετα τοποθετημένης κονσέρβας) ενώ οι θερμοκρασιακές αποκλίσεις λόγω φυσικής συναγωγής είναι στην κατακόρυφη διεύθυνση. Η εξαναγκασμένη συναγωγή που προκαλεί η περιστροφή επομένως συμβάλλει στην καλύτερη μεταφορά θερμοκρασίας μόνο στην οριζόντια κατεύθυνση εκεί όμως όπου δεν υπάρχουν (ακόμα και χωρίς την περιστροφή) σημαντικές θερμοκρασιακές διαφορές.

#### 5.4 Μεταφορά θερμότητας με Φυσική Συναγωγή σε κονσέρβα με οριζόντιο προσανατολισμό

Σ' αυτή τη περίπτωση θέλουμε να συγκρίνουμε το χρόνο που απαιτείται για να αποστειρωθεί μία κονσέρβα τοποθετημένη οριζόντια, σε σχέση με το χρόνο που χρειάζεται όταν τοποθετηθεί κάθετα. Στη οριζόντια θέση, ισχύουν όλες οι παραπάνω υποθέσεις με εξαίρεση το τμήμα συμμετρίας (παράγραφος 4.2.2).



**Σχήμα 22.** Σύγκριση θερμοκρασιών του ψυχρού σημείου για χρόνο θερμικής επεξεργασίας 2320s, σε οριζόντια και κάθετα τοποθετημένη κονσέρβα

Ο εντοπισμός του ψυχρού σημείου έγινε και για την περίπτωση της οριζόντιας κονσέρβας με χρήση UDF και βρέθηκε σε ύψος περίπου 16.5% (Παράρτημα Β) επί της διαμέτρου.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο σχήμα 22 δείχνουν ότι υπάρχει ελάχιστη διαφορά θερμοκρασίας στο ψυχρό σημείο της κάθετα τοποθετημένης κονσέρβας από αυτό της οριζόντιας, χωρίς όμως αυτό να σημαίνει ότι το θερμοκρασιακό προφίλ και στις δύο περιπτώσεις είναι το ίδιο δεδομένου ότι η θέση του ψυχρού σημείου διαφέρει σημαντικά ανάμεσα στον κατακόρυφο και τον οριζόντιο προσανατολισμό.

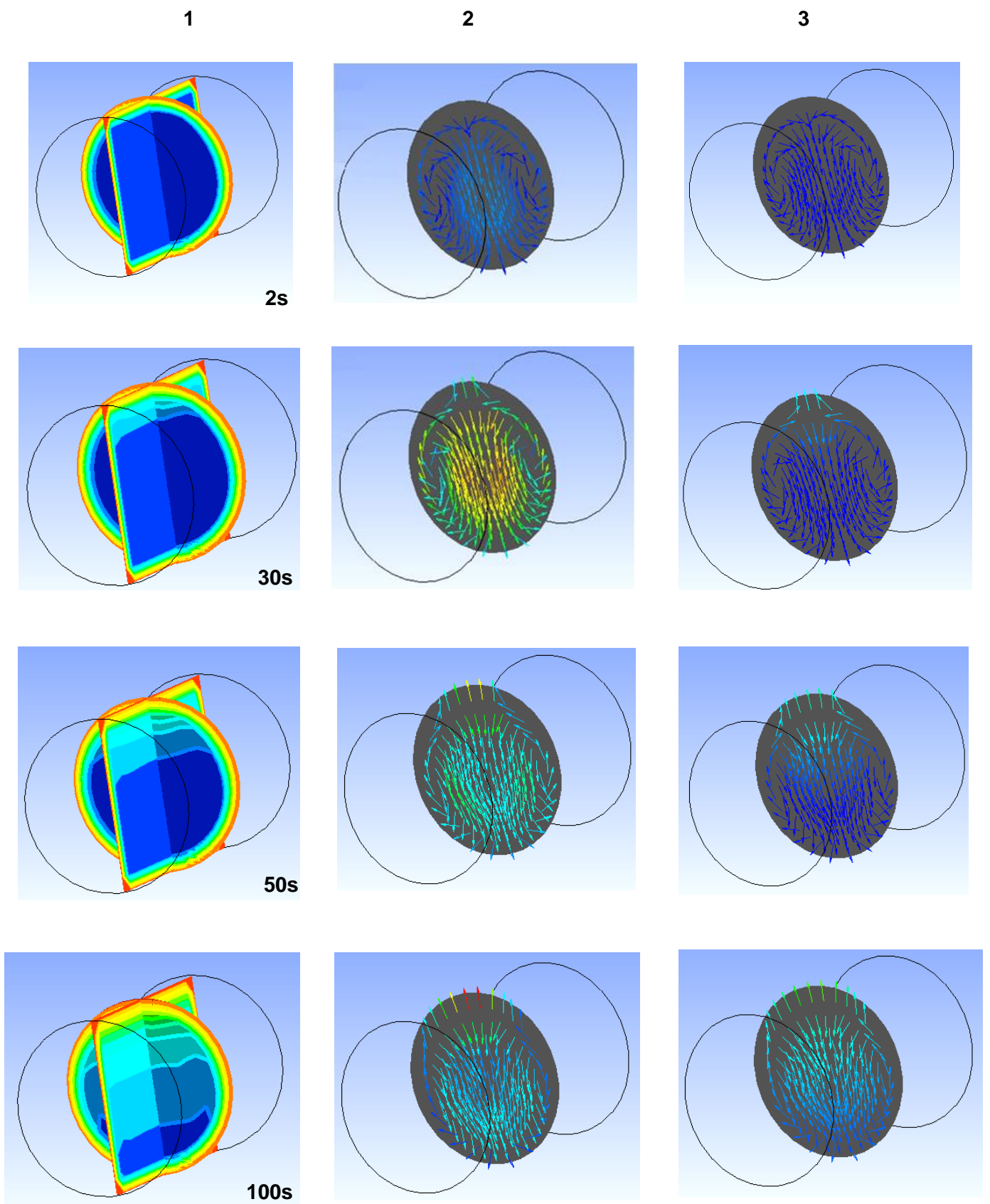
Βιβλιογραφικά, αναφέρεται από τον Ghani et al. (2002a) ότι σε κάθετα τοποθετημένες κονσέρβες, παρατηρήθηκε ταχύτερη θέρμανση σε σχέση με τις οριζόντια τοποθετημένες κάτι το οποίο αποδόθηκε στο γεγονός ότι η φυσική συναγωγή ενισχύεται από το ύψος και συγκεκριμένα από τη μεγάλη αναλογία του ύψους προς τη διάμετρο. Κάτι τέτοιο δεν παρατηρήθηκε στην περίπτωση που εξετάσαμε και αυτό

μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι η προσομοίωση αφορά δύο μοντέλα με διαφορετικά χαρακτηριστικά σε διαφορετικές συνθήκες (παχύρευστο προϊόν, για περισσότερο χρόνο επεξεργασίας και μεγάλη θερμοκρασιακή διαφορά υλικού-μέσου θέρμανσης).

Αντίθετα με τους Ghani et al. (2002a) οι Augusto et al. (2012) απέδειξαν ότι ο προσανατολισμός των κουτιών μπύρας (οριζόντιος, κάθετος) κατά την παστερίωση τους δεν επηρεάζει την αποτελεσματικότητα της θερμικής μεταφοράς.

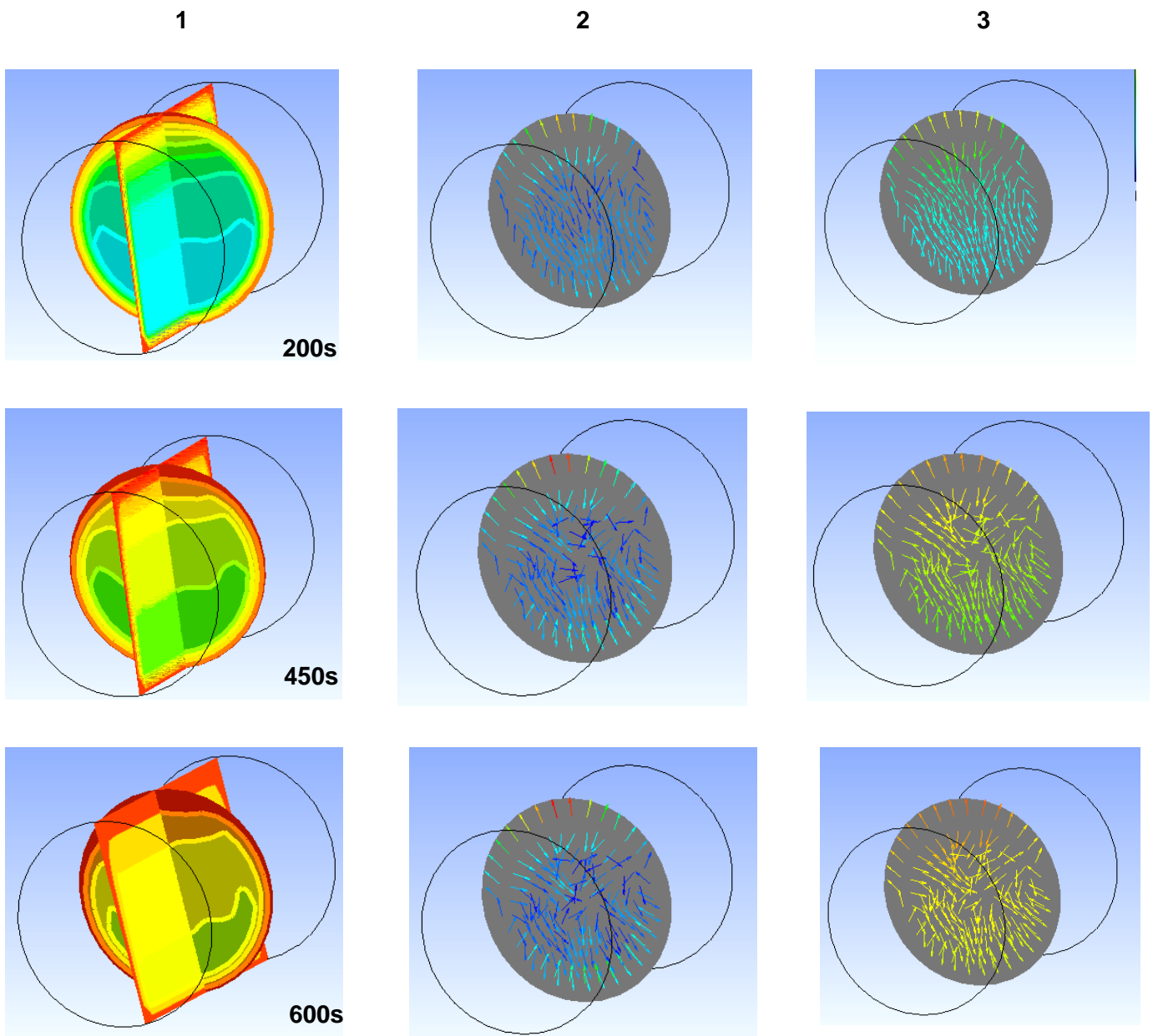
Συνεπώς είναι ανάγκη να κατανοήσουμε καλύτερα τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας που συνδέονται με τη θερμική επεξεργασία υγρών τροφίμων, με σκοπό την βελτίωση τους (Kannan & Sandaka, 2008)

Η θερμοκρασιακή μεταβολή κατά τη διάρκεια των 2320s της θερμικής επεξεργασίας της οριζόντια τοποθετημένης κονσέρβας, καθώς επίσης το προφίλ των ταχυτήτων απεικονίζονται στο σχήμα 23α,β για τυχαίες χρονικές στιγμές.

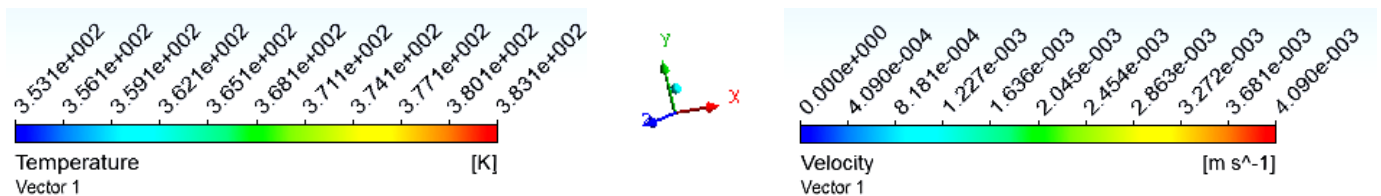


**Σχήμα 24α.** Οριζόντια κονσέρβα. Θερμοκρασιακή κατανομή (1), προφίλ ταχυτήτων (2), θερμοκρασιακό προφίλ (3), για χρόνους 2, 30, 50, 100 s





**Σχήμα 23β.** Οριζόντια κονσέρβα. Θερμοκρασιακή κατανομή (1), προφίλ ταχυτήτων (2), θερμοκρασιακό προφίλ (3), για χρόνους 200, 450, 600 s



## 6. Συμπεράσματα

Το Fluent απεικόνισε με ακρίβεια τη μετάδοση της θερμότητας σε κάθε έναν από τους μηχανισμούς μεταφοράς, επιβεβαιώνουν τις θεωρητικές γνώσεις γύρω από αυτούς.

Στην περίπτωση της αγωγής, υπάρχει ταύτιση του θεωρητικού υπολογισμού της θερμοκρασίας του ψυχρού σημείου, με τον υπολογιστικό μέσω του Fluent, επιβεβαιώνοντας ο ένας τον άλλον.

Το μοντέλο του Fluent για τη φυσική συναγωγή, επιβεβαίωσε τη μετακίνηση της θέσης του ψυχρού σημείου από το γεωμετρικό κέντρο προς το κάτω τμήμα της κονσέρβας οπτικοποιώντας και τον τρόπο με το οποίο συμβαίνει.

Το αποτέλεσμα από τη σύγκριση της αγωγής με τη φυσική συναγωγή έδειξε ταχύτερη θέρμανση στη δεύτερη περίπτωση, όπως προβλέπει η θεωρία.

Για την περίπτωση της φυσικής συναγωγής με περιστροφή, αποδείχθηκε μέσω του Fluent ότι η αρχική επιλογή των 5 rpm, ως ταχύτητα περιστροφής, δεν επαρκούσε για να επιτευχθεί ταχύτερη θέρμανση της κονσέρβας. Αντιθέτως, για ταχύτητα 7rpm και πάνω ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας, είναι ελαφρά ταχύτερος σε σχέση με τη μη περιστροφή.

Τέλος, η σύγκριση του οριζόντιου προσανατολισμού της κονσέρβας με τον κάθετο δεν έδειξε σημαντική διαφορά στο ρυθμό μεταφοράς θερμότητας, σε αντίθεση με αρχική υπόθεση.

Απ' όλα τα παραπάνω μπορούμε να πούμε ότι το Fluent επιβεβαίωσε τη θεωρητική γνώση στη μεταφορά θερμότητας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς αμφιβολία για τη μελέτη των μηχανισμών αυτών. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την εξέταση - έλεγχο διαφόρων παραμέτρων των μηχανισμών αυτών χωρίς να είναι απαραίτητη η εργαστηριακή επιβεβαίωση.

## 7. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

- Μελέτη του χρόνου ψύξης στην επεξεργασία προϊόντων
- Μελέτη φυσικής συναγωγής με περιστροφή σε κονσέρβα με οριζόντιο προσανατολισμό και εύρεση της κατάλληλης ταχύτητας περιστροφή
- Επίδραση της κλίσης στην οποία τοποθετούνται οι προς αποστείρωση κονσέρβες
- Μελέτη θερμικής επεξεργασίας κονσέρβας στερεού προϊόντος μέσα σε ρευστό
- Επίδραση του υλικού συσκευασίας στο ρυθμό μεταφοράς θερμότητας
- Επίδραση της θερμικής επεξεργασίας στα θρεπτικά συστατικά και στη μικροβιακή ανάπτυξη συσκευασμένων προϊόντων
- Επανεξέταση του χρόνου θέρμανσης του ψυχρού σημείου για οριζόντια και κάθετα τοποθετημένα κονσέρβα

## 8. Βιβλιογραφία

- Augusto P.E.D., Pinheiro T.F., Cristianini M. (2010). Using Computational Fluid-Dynamics (CFD) for the evaluation of beer pasteurization: effect of orientation of cans. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, **30(4)**, 980-986
- Chen X.D., Huang H-J., Ghani A.G. (2005). Thermal Sterilisation of Liquid Foods in a Sealed Container – Developing Simple Correlations to Account for Natural Convection. *International Journal of Food Engineering*, **1(1)**, art.5
- Datta A.K. & Teixeira A.A. (1988). Numerically Predicted Transient Temperature and Velocity Profiles During Natural Convection Heating of Canned Liquid Foods. *Journal of Food Science*, **53(1)**, 191
- Denys S., Pieters J. G., & Dewettinck K. (2004). Computational fluid dynamics analysis of combined conductive and convective heat transfer in model eggs. *Journal of Food Engineering*, **63**, 281-290
- 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
- Farid M., Ghani A.G. (2004). A new computational technique for the estimation of sterilisation time in canned food. *Chemical Engineering and Processing*, **43**, 523-531
- Ghani A.A.G., Farid M.M., (2006). Using the computational fluid dynamics to analyze the thermal sterilization of solid–liquid food mixture in cans. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, **7**, 55–61
- Ghani A.A.G., Farid M.M., (2007). Numerical simulation of solid–liquid food mixture in a high pressure processing unit using computational fluid dynamics. *Journal of Food Engineering*, **80**, 1031-1042
- Ghani A.A.G., Farid M.M., Chen X.D., (2002). Theoretical and experimental investigation of the thermal destruction of Vitamin C in food pouches. *Computers and Electronics in Agriculture*, **34**, 129-143

Ghani A.A.G., Farid M.M., Chen X.D., (2002a). Numerical simulation of transient temperature and velocity profiles in a horizontal can during sterilization using computational fluid dynamics. *Journal of Food Engineering*, **51**, 77–83

Ghani A.A.G., Farid M.M., Chen X.D., (2002b). Theoretical and experimental investigation of the thermal inactivation of *Bacillus stearothermophilus* in food pouches. *Journal of Food Engineering*, **51**, 221-228

Ghani A.A.G., Farid M.M., Chen X.D., Richards P., (1999a). Numerical simulation of natural convection heating of canned food by computational fluid dynamics. *Journal of Food Engineering*, **41**, 55–64

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

Ghani A.A.G., Farid M.M., Chen X.D., Richards P., (2001). Thermal sterilization of canned food in a 3D pouch using computational fluid dynamics. *Journal of Food Engineering*, **48**, 147–156

Ghani A.A.G., Farid M.M., Zarrouk S.J., (2003). The effect of can rotation on sterilization of liquid food using computational fluid dynamics. *Journal of Food Engineering*, **57**, 9-16

Kannan A., Sandaka P.CH.G. (2008). Heat transfer analysis of canned food sterilization in a still retort. *Journal of Food Engineering*, **88**, 2013-228

Kaushal P. & Sharma HK., (2012). Concept of Computational Fluid Dynamics (CFD) and its Applications in Food Processing Equipment Design. *J Food Process Technol*, 3:138. doi: 10.4172/2157-7110.1000138, **3(1)**

Kiziltas S., Erdogdu F., Palazoglu 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.

Kumar A., Bhattacharya M., & Blaylock, J. (1990). Numerical simulation of natural convection heating of canned thick viscous liquid food product. *Journal of Food Science*, **55(5)**, 1401–1411

McCabe W., Smith J., Harriott P., Βασικές Φυσικές Διεργασίες Μηχανικής, 6<sup>η</sup> Έκδοση, Μετάφραση: Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2003

Μπέλλης Α., (2012). Ανάπτυξη μελετών περιπτώσεων για τα μαθήματα της Μηχανικής Τροφίμων I και II με τη βοήθεια του λογισμικού υπολογιστικής ρευστοδυναμικής Fluent. Πτυχιακή εργασία ΑΤΕΙ Θεσσαλονίκης

Norton T. & Sun D-W., (2006). Computational fluid dynamics (CFD) – an effective and efficient design and analysis tool for the food industry: A review. *Trends in Food Science & Technology*, **7**, 600-620

Pitts D., Sissom L., Μεταφορά Θερμότητας, Σειρά Schaum, 2<sup>η</sup> Έκδοση, Μετάφραση: Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2001

Scott G.M., Richardson P., (1997). The application of computational fluid dynamics in the food industry. *Trends in Food Science and Technology*, **8**, 119–124

Sun, D.W. (2007). *Computational Fluid Dynamics in Food Processes*. Taylor and Francis Group, CRC Press

Varma M.N., Kannan A., (2006). CFD studies on natural convective heating of canned food in conical and cylindrical containers. *Journal of Food Engineering*, **77**, 1024–1036

Xia B., Sun D-W. (2002). Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the food industry: a review. *Computers and Electronics in Agriculture*, **34**, 5-24

Zechman L.G. & Pflug I.J., (1989). Location of the slowest heating zone for natural convection heating fluids in metal containers. *Journal of Food Science*, **54(1)**, 205–209

Ιστοσελίδα: [www.ansys.com](http://www.ansys.com)

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Υπολογισμός θερμοκρασίας ψυχρού σημείου στο κέντρο μιας κονσέρβας με διαγράμματα.

Για χρόνο θερμικής επεξεργασίας  $t = 2320\text{s}$ ,

με αρχική θερμοκρασία κονσέρβας  $T_i = 80^\circ\text{C}$

και θερμοκρασία μέσου αποστείρωσης  $T_o = 110^\circ\text{C}$

Να υπολογιστεί η θερμοκρασία στο κέντρο τα κονσέρβας  $T_c$ .

Για την κονσέρβα:

Διάμετρος  $D = 75\text{mm}$  και ύψος  $H = 110\text{mm}$ .

Για τον τοματοχυμό:

Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας  $k = 0.531\text{ W/m}^\circ\text{C}$ ,

Πυκνότητα  $\rho = 980\text{ kg/m}^3$

Ειδική θερμότητα  $C_p = 3980\text{ J/kg }^\circ\text{C}$

Συντελεστής θερμικής μεταφοράς  $h = 2000\text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$

-----

Για τον κύλινδρο:

Υπολογισμός αριθμού Fourier

$$F_o = \frac{kt}{\rho C_p l^2}$$

$$F_o = \frac{0.531 * 2320}{980 * 3980 * \left(\frac{0.075}{2}\right)^2} \rightarrow F_o \approx 0.22$$

Υπολογισμός αριθμού Biot

$$Bi = \frac{hl}{k}$$

$$Bi = \frac{2000 * \frac{0.075}{2}}{0.531} \rightarrow Bi \approx 141.24 \quad \text{Άρα } \frac{1}{Bi} = 0.0071$$

Για την πλάκα:

$$F_o = \frac{0.531 * 2320}{980 * 3980 * \left(\frac{0.11}{2}\right)^2} \rightarrow F_o \approx 0.10$$

$$Bi = \frac{2000 * \frac{0.11}{2}}{0.531} \rightarrow Bi \approx 207.16 \quad \text{Άρα} \quad \frac{1}{Bi} = 0.0048$$

Από τον συνδυασμό το αριθμού  $F_o$  και του  $Bi$  στα διαγράμματα Heisler προκύπτουν τα εξής:

Σημείο τομής αξόνων για τον κύλινδρο: 0.4

Σημείο τομής αξόνων για την πλάκα: 1

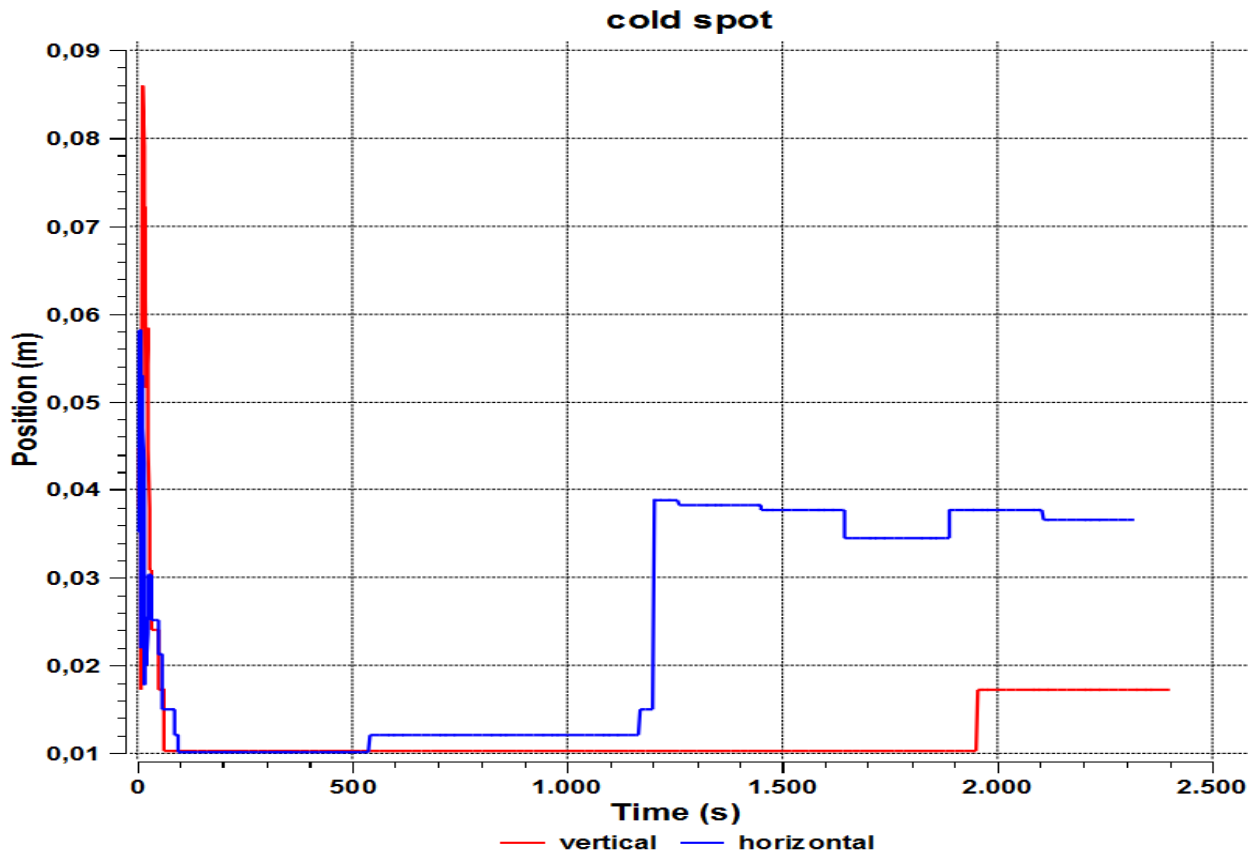
Συνεπώς η θερμοκρασία στο κέντρο της κονσέρβας είναι:

$$1 * 0.4 = \frac{T_c - T_o}{T_i - T_o} \rightarrow 0.4 = \frac{T_c - 110}{80 - 110} \rightarrow \boxed{T_c = 98^\circ\text{C}}$$



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Εντοπισμός της θέσης του ψυχρού σημείου με τη χρήση UDF για οριζόντιο και κάθετο προσανατολισμό.



Στην οριζόντια κονσέρβα η θέση του ψυχρού σημείου εκφράζεται ως προς τη διάμετρο, ενώ στη κάθετη ως προς το ύψος της κονσέρβας.