



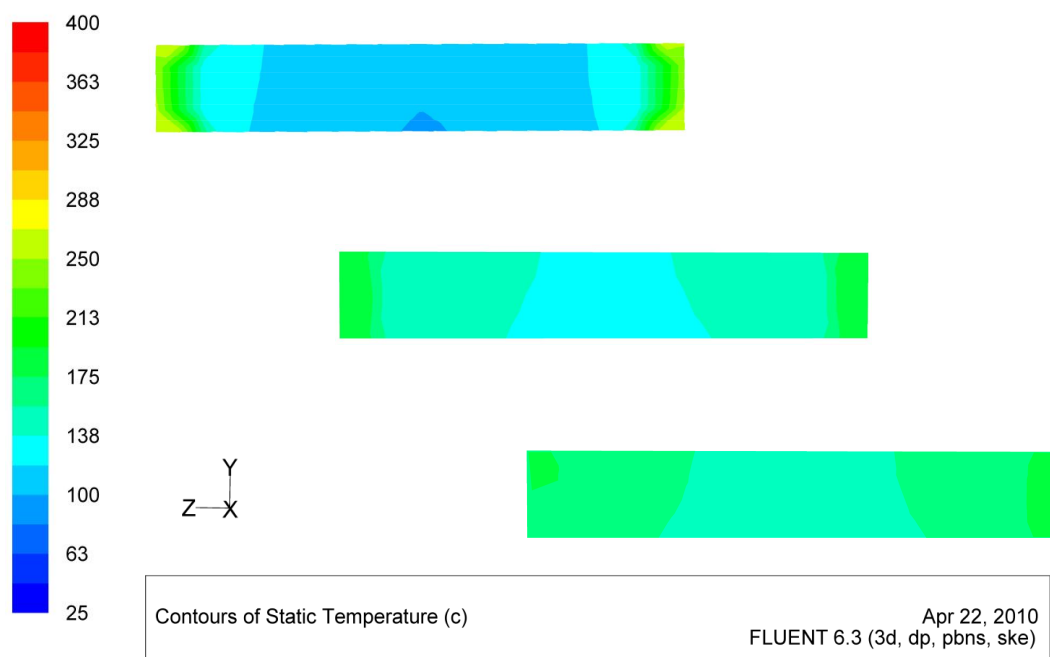
ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ, ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

ΠΜΣ «ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΤΡΟΦΗ ΑΝΘΡΩΠΟΥ»

ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ: ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΡΟΦΙΜΩΝ – ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ Η/Υ ΣΤΗΝ ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

### ΤΙΤΛΟΣ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ:

ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ (3-D) ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΨΗΣΙΜΑΤΟΣ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΑΡΤΟΠΟΙΙΑΣ ΣΕ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟ ΦΟΥΡΝΟ ΜΕ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ (CFD)



ΟΝΟΜΑ/ΝΥΜΟ ΦΟΙΤΗΤΡΙΑΣ: **ΕΥΤΥΧΙΑ ΠΑΝΤΕΛΑΚΗ**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Σ. ΓΙΑΝΝΙΩΤΗΣ

Α' ΕΞΕΤΑΣΤΗΣ: Α. ΚΟΥΤΙΝΑΣ

Β' ΕΞΕΤΑΣΤΗΣ: Ν. ΣΤΟΦΟΡΟΣ

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| ΚΕΦ.       | ΤΙΤΛΟΣ   | ΣΕΛ. |
|------------|--|------|
|            | ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ  | 3    |
|            | ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ  | 4    |
|            | ΛΙΣΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ   | 10   |
|            | ΠΕΡΙΛΗΨΗ   | 13   |
|            | ABSTRACT   | 14   |
| 1)         | ΕΙΣΑΓΩΓΗ   | 15   |
| 2)         | ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΘΕΜΑΤΟΣ                                   | 17   |
| 2.Α)       | ΤΟ ΠΡΟΪΟΝ  | 17   |
| 2.Α.α)     | ΜΠΙΣΚΟΤΑ – ΕΙΣΑΓΩΓΗ  | 17   |
| 2.Α.β)     | ΚΥΡΙΑ ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΜΠΙΣΚΟΤΩΝ                                    | 18   |
| 2.Α.γ)     | ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΖΥΜΗΣ ΜΠΙΣΚΟΤΩΝ                                   | 20   |
| 2.Α.δ)     | ΙΔΙΑΙΤΕΡΟΤΗΤΕΣ ΜΠΙΣΚΟΤΩΝ ΣΤΟΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ ΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΓΚΩΣΗΣ | 20   |
| 2.Α.ε)     | ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΠΙΣΚΟΤΩΝ  | 21   |
| 2.Β)       | Η ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ  | 22   |
| 2.Β.α)     | ΤΟ ΨΗΣΙΜΟ ΑΡΤΟΣΚΕΥΑΣΜΑΤΩΝ ΩΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ                       | 22   |
| 2.Β.β)     | ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΠΟΥ ΕΠΙΣΥΜΒΑΙΝΟΥΝ ΚΑΤΑ ΤΟ ΨΗΣΙΜΟ                  | 23   |
| 2.Β.β.i)   | Μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας                              | 23   |
| 2.Β.β.ii)  | Μηχανισμοί μεταφοράς μάζας                                   | 25   |
| 2.Β.γ)     | ΑΛΛΑΓΕΣ ΣΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΑΡΤΟΣΚΕΥΑΣΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑ ΤΟ ΨΗΣΙΜΟ        | 26   |
| 2.Β.γ.i)   | Διόγκωση   | 26   |
| 2.Β.γ.ii)  | Στερεοποίηση   | 26   |
| 2.Β.γ.iii) | Εξέλιξη του χρώματος   | 28   |
| 2.Β.γ.iv)  | Ανάπτυξη αρώματος και γεύσης                                 | 28   |
| 2.Β.γ.v)   | Απώλεια υγρασίας   | 29   |
| 2.Γ)       | ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ                                     | 30   |
| 2.Γ.α)     | ΤΥΠΟΙ ΦΟΥΡΝΩΝ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥΣ                    | 30   |
| 2.Γ.β)     | ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΜΕΡΩΝ ΦΟΥΡΝΟΥ ΤΟΥΝΕΛ                 | 32   |
| 2.Γ.β.i)   | Γενικές αρχές σχεδιασμού φούρνου τούνελ έμμεσης καύσης       | 32   |
| 2.Γ.β.ii)  | Σχηματοποίηση μπισκότων μαλακής ζύμης                        | 33   |
| 2.Γ.β.iii) | Μεταφορική ταινία  | 34   |
| 2.Δ)       | CFD – ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ                                     | 36   |
| 2.Δ.α)     | ΟΡΙΣΜΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ                        | 36   |
| 2.Δ.β)     | ΙΣΤΟΡΙΚΑ – ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ   | 36   |
| 2.Δ.γ)     | FLUENT: ΕΜΠΟΡΙΚΟΣ ΚΩΔΙΚΑΣ CFD ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΕ            | 38   |
| 2.Δ.δ)     | ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ – ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ                                   | 39   |
| 2.Δ.δ.i)   | Διατήρηση της μάζας  | 39   |
| 2.Δ.δ.ii)  | Διατήρηση της ορμής  | 39   |
| 2.Δ.δ.iii) | Διατήρηση της ενέργειας                                      | 40   |
| 2.Δ.δ.iv)  | Διατήρηση χημικών στοιχείων, ενζύμων κτλ.                    | 40   |
| 2.Δ.δ.v)   | Γενικευμένη αρχή διατήρησης                                  | 40   |
| 2.Δ.δ.vi)  | Διακριτοποίηση   | 42   |
| 2.Δ.ε)     | ΠΩΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙ ΤΟ CFD  | 43   |
| 2.Δ.στ)    | ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΧΡΗΣΗΣ CFD                                     | 46   |
| 2.Δ.ζ)     | ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΤΟΥ CFD  | 46   |
| 2.Ε)       | ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΩΝ ΜΕΛΕΤΩΝ                 | 48   |
| 3)         | ΥΛΙΚΑ & ΜΕΘΟΔΟΙ  | 52   |
| 3.Α)       | ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΜΠΙΣΚΟΤΩΝ                   | 52   |
| 3.Α.α)     | ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΞΗΡΑΣ ΟΥΣΙΑΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΗΣ ΜΕΣΗΣ              | 52   |

|             |  |     |
|-------------|--|-----|
|             | ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΜΠΙΣΚΟΤΩΝ ΣΤΑ ΔΙΑΦΟΡΑ ΣΤΑΔΙΑ ΨΗΣΙΜΑΤΟΣ  |     |
| 3.Α.β)      | ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ   | 54  |
| 3.Α.γ)      | ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΜΠΙΣΚΟΤΟΥ   | 57  |
| 3.Α.δ)      | ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΠΙΣΚΟΤΟΥ   | 59  |
| 3.Α.ε)      | ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΟ ΚΕΝΤΡΟ ΤΟΥ ΜΠΙΣΚΟΤΟΥ ΣΕ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΙΑ ΜΕ ΤΗΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΤΟΥ ΑΕΡΑ                       | 60  |
| 3.Β)        | ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΣΥΝΘΗΚΩΝ   | 63  |
| 3.Β.α)      | ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ  | 63  |
| 3.Β.β)      | ΣΥΝΘΗΚΕΣ   | 63  |
| 3.Β.γ)      | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ   | 64  |
| 3.Γ)        | ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ CFD  | 66  |
| 3.Γ.α)      | ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΦΟΥΡΝΟΥ  | 66  |
| 3.Γ.β)      | ΠΟΡΕΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ  | 71  |
| 3.Γ.β.i)    | ΔΟΚΙΜΕΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΚΑΙ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗΣ-ΣΤΑΔΙΟ 1 <sup>ο</sup>  | 71  |
| 3.Γ.β.ii)   | ΔΟΚΙΜΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ-ΣΤΑΔΙΟ 2 <sup>ο</sup>   | 78  |
| 3.Γ.β.iii)  | ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΛΥΣΕΩΝ ΤΟΥ FLUENT (VALIDATION)-ΣΤΑΔΙΟ 3 <sup>ο</sup>   | 82  |
| 3.Γ.β.iv)   | ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΝΕΞΑΡΤΗΣΙΑΣ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΤΙΣ ΛΥΣΕΙΣ-ΣΤΑΔΙΟ 4 <sup>ο</sup>  | 89  |
| 3.Γ.β.v)    | ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΤΙΜΗΣ ΤΟΥ $Y^+$ (ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΗΣ ΤΥΡΒΗΣ ΚΟΝΤΑ ΣΤΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ)-ΣΤΑΔΙΟ 5 <sup>ο</sup>                             | 90  |
| 3.Γ.β.vi)   | ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΑΡΟΧΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΤΟΝ ΑΕΡΑ ΤΟΥ ΦΟΥΡΝΟΥ-ΣΤΑΔΙΟ 6 <sup>ο</sup>   | 91  |
| 3.Γ.β.vii)  | ΠΡΟΣΠΑΘΕΙΑ ΜΕΙΩΣΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ-ΣΤΑΔΙΟ 7 <sup>ο</sup>   | 98  |
| 3.Γ.β.viii) | ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΠΡΟΪΟΝΤΟΣ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΣΤΟ MS EXCEL-ΣΤΑΔΙΟ 8 <sup>ο</sup>   | 101 |
| 4)          | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ  | 103 |
| 4.i)        | ΣΤΑΔΙΟ 1 <sup>ο</sup> - ΔΟΚΙΜΕΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΚΑΙ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗΣ  | 103 |
| 4.ii)       | ΣΤΑΔΙΟ 2 <sup>ο</sup> - ΔΟΚΙΜΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ   | 126 |
| 4.iii)      | ΣΤΑΔΙΟ 3 <sup>ο</sup> - ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΛΥΣΕΩΝ ΤΟΥ FLUENT (VALIDATION)   | 133 |
| 4.iv)       | ΣΤΑΔΙΟ 4 <sup>ο</sup> - ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΝΕΞΑΡΤΗΣΙΑΣ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΤΙΣ ΛΥΣΕΙΣ  | 141 |
| 4.v)        | ΣΤΑΔΙΟ 5 <sup>ο</sup> - ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΤΙΜΗΣ ΤΟΥ $Y^+$ (ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΗΣ ΤΥΡΒΗΣ ΚΟΝΤΑ ΣΤΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ)                           | 143 |
| 4.vi)       | ΣΤΑΔΙΟ 6 <sup>ο</sup> - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΑΡΟΧΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΤΟΝ ΑΕΡΑ ΤΟΥ ΦΟΥΡΝΟΥ   | 145 |
| 4.vii)      | ΣΤΑΔΙΟ 7 <sup>ο</sup> - ΠΡΟΣΠΑΘΕΙΑ ΜΕΙΩΣΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ   | 157 |
| 4.viii)     | ΣΤΑΔΙΟ 8 <sup>ο</sup> - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΠΡΟΪΟΝΤΟΣ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΣΤΟ MS EXCEL | 159 |
| 5)          | ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ   | 164 |
|             | ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ   | 166 |
|             | ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ  | 170 |

## ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Διαστάσεις μπισκότου

ΠΙΝΑΚΑΣ 2: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΞΗΡΑΣ ΟΥΣΙΑΣ / ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΣΤΑΔΙΑ ΨΗΣΙΜΑΤΟΣ

Πίνακας 3: Πυκνότητα μπισκότου (μέσος όρος 2 επαναλήψεων)

Πίνακας 4: Αντιστοιχία cr με συγκέντρωση υγρασίας

Πίνακας 5: Αντιστοιχίες θερμοκρασιών και υγρασίας τις ίδιες χρονικές στιγμές

Πίνακας 6: Παροχές καυσαερίων στην 1η περίπτωση

Πίνακας 7: Παροχές καυσαερίων στην 2η περίπτωση

Πίνακας 8: Κύρια χαρακτηριστικά 1ου πειράματος 6ου ΣΤΑΔΙΟΥ προσομοίωσης

Πίνακας 9: Κύρια χαρακτηριστικά 2ου πειράματος 6ου ΣΤΑΔΙΟΥ προσομοίωσης

Πίνακας 10: Κύρια χαρακτηριστικά 3ου πειράματος 7ου ΣΤΑΔΙΟΥ προσομοίωσης

Πίνακας 11: Παροχές καυσαερίων στην 1η περίπτωση ( $\approx 10\%$  χαμηλότερη της βασικής)

Πίνακας 12: Παροχές καυσαερίων στην 2η περίπτωση ( $\approx 25\%$  χαμηλότερη της βασικής)

Πίνακας 13: Σύγκριση απαιτούμενης ενέργειας από τους καυστήρες

## ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Πάνω φούρνος τύπου deck, κάτω φούρνος τύπου rack.

Εικόνα 2: Σχήμα φούρνου τύπου τούνελ.

Εικόνα 4: Φαίνεται η δεξαμενή της ζύμης, το τύμπανο που αποτελεί το καλούπι των μπισκότων και την χαλύβδινη μεταφορική ταινία πάνω στην οποία τοποθετούνται τα μορφοποιημένα μπισκότα.

Εικόνα 5: Μεταφορική ταινία με ψημένα μπισκότα όπως εξέρχεται από τον φούρνο τούνελ.

Εικόνα 6: Σχηματισμός πλέγματος σε γεωμετρίες. Αριστερά, κελιά σχήματος τετραεδρικού, δεξιά, κελιά σχήματος εξαεδρικού/υβριδικού.

Εικόνα 7: Διάγραμμα σύγκλισης λύσεων όλων των εξισώσεων που λύνει το Fluent σε αυτήν την περίπτωση. Στον άξονα x φαίνεται ο αριθμός των επαναλήψεων των υπολογισμών και στον άξονα y ο βαθμός σύγκλισης των λύσεων (residuals).

Εικόνα 8: Η επιφάνεια εργασίας του Fluent κατά τη διάρκεια υπολογισμών. Οι λύσεις έχουν συγκλίνει και οι υπολογισμοί σταμάτησαν. Το διάγραμμα σύγκλισης που φαίνεται στην προηγούμενη εικόνα, διαγράφεται κατά τη διάρκεια των λύσεων και είναι η απεικόνιση όσων φαίνονται αριθμητικά στην επιφάνεια εργασίας.

Εικόνα 9: Ένα παράδειγμα χρωματικών απεικονίσεων αποτελεσμάτων όπου στην πάνω σειρά φαίνονται οι απεικονίσεις της κατανομής της θερμοκρασίας και στην κάτω σειρά οι χρωματικές απεικονίσεις του μεγέθους της ταχύτητας.

Εικόνα 10: Σχέδιο της εισόδου του φούρνου όπου φαίνεται η αρχή των αξόνων





Εικόνα 11: Κάτοψη του φούρνου. Από αριστερά η είσοδος, και οι δύο κάθετες γραμμές που φαίνεται να χωρίζουν τον φούρνο, είναι νοητές στην θέση που τελειώνει η κάθε ζώνη ψησίματος.

Εικόνα 12: Προοπτική όψη του φούρνου κοιτώντας τον από την είσοδο προς το τέλος του.

Εικόνα 13: Σχέδιο αγωγού απομάκρυνσης της υγρασίας όπως είναι στην πραγματικότητα.

Εικόνα 14: Τμήμα του θαλάμου του φούρνου κοντά στην είσοδο, όπου φαίνεται στην οροφή ο πρώτος αγωγός υγρασίας.

Εικόνα 15: Σχέδιο απλουστευμένης απεικόνισης των βασικών οριακών συνθηκών του φούρνου.

 : οι θέσεις των οπών απομάκρυνσης της υγρασίας ,  : οι θέσεις εξόδου των καυσαερίων ,  : οι θέσεις εισόδου των καυσαερίων (οι θέσεις των καυστήρων) , (όλες οι οπές είναι επίπεδες χωρίς πάχος και βρίσκονται στο επίπεδο xz, παρόλο που στο σχήμα αναγκαστικά σχεδιάστηκαν διαφορετικά) ,  : τα ενσωματωμένα στον φούρνο

θερμόμετρα , οι δύο κάθετες γραμμές δείχνουν τα σημεία που είναι διαχωρισμένα εσωτερικά τα διπλά τοιχώματα ώστε να μην συγκοινωνούν τα καυσαέρια της κάθε ζώνης. (Το σχήμα δείχνει τον φούρνο από το πλάι.)

Εικόνα 16: Γεωμετρία θαλάμου όπου φαίνονται και οι έξοδοι του αέρα στην οροφή.

Εικόνα 17: Κάτοψη του θαλάμου όπου φαίνεται το σημείο ελέγχου A1 (και στο παράρτημα), διαμήκης γραμμή ακριβώς στο κέντρο του φούρνου, ως προς τους άξονες y και z.

Εικόνα 18: Το ίδιο σημείο ελέγχου A1 βλέποντάς το ανάμεσα στην οροφή και τον πάτο του φούρνου.

Εικόνα 19: Κάτοψη του θαλάμου όπου φαίνεται το σημείο ελέγχου A2, η εγκάρσια γραμμή στην μέση του φούρνου, ως προς τους άξονες x και y.

Εικόνα 20: Τμήμα του θαλάμου όπου φαίνεται το σημείο ελέγχου A3, οριζόντιο διάμηκες επίπεδο ανάμεσα στην οροφή και τον πάτο του φούρνου.

Εικόνα 22: Ακτινοβολία με το μοντέλο DO πάνω σε έναν αδιαφανή τοίχο (πηγή: manual Fluent)

Εικόνα 23: Προοπτική όψη του φούρνου με σκοπό να παρουσιαστούν οι θέσεις των οριακών συνθηκών που υπάρχουν στο στάδιο αυτό προσομοίωσης.

Εικόνα 24: Προοπτική όψη του φούρνου όπου φαίνεται το πλέγμα του πάτου φούρνου, εξόδων υγρασίας, εισόδου και εξόδου του φούρνου και μανδύα.

Εικόνα 25: Δείγμα πλέγματος του εσωτερικού του φούρνου και του εσωτερικού του μανδύα και των οριακών συνθηκών.

Εικόνα 26: Κάτοψη του φούρνου όπου φαίνονται με μπλε χρώμα οι οπές παροχής υγρασίας στον πάτο του φούρνου.

Εικόνα 27: Δείγμα πλέγματος όπως έχει διαμορφωθεί σε τμήμα του οριζόντιου επιπέδου στην μέση του φούρνου, συμπεριλαμβανομένου και του μανδύα (σημείο ελέγχου 1- στο παράρτημα αναλυτικά ).

Εικόνα 28: Τμήμα της γεωμετρίας του φούρνου κοντά στην είσοδο, όπου φαίνονται τα μπλοκ που έχουν προστεθεί στη γεωμετρία.

Εικόνα 29: Χρωματική απεικόνιση της πίεσης όπως αυτή διαμορφώνεται στο οριζόντιο επίπεδο του φούρνου (σημείο ελέγχου A3).

Εικόνα 30: Χρωματική απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας όπως αυτή διαμορφώνεται στο οριζόντιο επίπεδο του φούρνου (σημείο ελέγχου A3).

Εικόνα 31: Χρωματική απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας της ακτινοβολίας όπως αυτή διαμορφώνεται στο οριζόντιο επίπεδο του φούρνου (σημείο ελέγχου A3).



Εικόνα 49: Χρωματική απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας όπως αυτή διαμορφώνεται στο οριζόντιο επίπεδο του φούρνου (σημείο ελέγχουΑ3).

Εικόνα 50: Χρωματική απεικόνιση με βέλη του μεγέθους της ταχύτητας όπως αυτή διαμορφώνεται σε τμήμα του οριζόντιου επιπέδου του φούρνου (σημείο ελέγχουΑ3).

Εικόνα 51: Χρωματική απεικόνιση της πίεσης όπως αυτή διαμορφώνεται στο οριζόντιο επίπεδο του φούρνου (σημείο ελέγχουΑ3).

Εικόνα 52: Χρωματική απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας όπως αυτή διαμορφώνεται στο οριζόντιο επίπεδο του φούρνου (σημείο ελέγχουΑ3).

Εικόνα 53: Χρωματική απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας όπως αυτή διαμορφώνεται στο οριζόντιο επίπεδο του φούρνου (σημείο ελέγχουΑ3).

Εικόνα 54: Χρωματική απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας όπως αυτή διαμορφώνεται στο οριζόντιο επίπεδο του φούρνου (σημείο ελέγχουΑ3).

Εικόνα 55: Χρωματική απεικόνιση με βέλη του μεγέθους της ταχύτητας όπως αυτή διαμορφώνεται σε τμήμα του οριζόντιου επιπέδου του φούρνου (σημείο ελέγχουΑ3).

Εικόνα 56: Μεγέθυνση τμήματος του διαγράμματος της εικόνας... ώστε να είναι εμφανείς οι διαφορές στις καμπύλες.

Εικόνα 57: Χρωματική απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας όπως αυτή διαμορφώνεται στο εσωτερικό του φούρνου πάνω στο οριζόντιο επίπεδο (σημείο ελέγχου Α3)

Εικόνα 58: Χρωματική απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας όπως αυτή διαμορφώνεται στο εσωτερικό του φούρνου πάνω στο οριζόντιο επίπεδο (σημείο ελέγχου Α3)

Εικόνα 59: Χρωματική απεικόνιση με βέλη του μεγέθους της ταχύτητας όπως αυτή διαμορφώνεται κατά την ροή του αέρα στο εσωτερικό του φούρνου και φαίνεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο (σημείο ελέγχου Α3)

Εικόνα 60: Χρωματική απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας όπως αυτή διαμορφώνεται στο εσωτερικό του φούρνου πάνω στο οριζόντιο διάμηκες επίπεδο (σημείο ελέγχου Α3)

Εικόνα 61: Χρωματική απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας όπως αυτή διαμορφώνεται στο εσωτερικό του φούρνου πάνω στο οριζόντιο διάμηκες επίπεδο (σημείο ελέγχου Α3)

Εικόνα 62: Χρωματική απεικόνιση της πίεσης όπως αυτή διαμορφώνεται στο εσωτερικό του φούρνου πάνω στο οριζόντιο διάμηκες επίπεδο (σημείο ελέγχου Α3)

Εικόνα 63: Χρωματική απεικόνιση με βέλη του μεγέθους της ταχύτητας όπως αυτή διαμορφώνεται κατά την ροή του αέρα στο εσωτερικό του φούρνου και φαίνεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο (σημείο ελέγχου Α3)



Εικόνα 64: Χρωματική απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας όπως αυτή φαίνεται στο εγκάρσιο επίπεδο στην μέση του πρώτου θαλάμου (σημείο ελέγχου 7)

Εικόνα 65: Χρωματική απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας όπως αυτή φαίνεται στο εγκάρσιο επίπεδο στην μέση του δεύτερου θαλάμου (σημείο ελέγχου 8)

Εικόνα 66: Χρωματική απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας όπως αυτή φαίνεται στο εγκάρσιο επίπεδο στην μέση του τρίτου θαλάμου (σημείο ελέγχου 9)

Εικόνα 67: Χρωματική απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας όπως αυτή φαίνεται στο οριζόντιο διάμηκες επίπεδο στην μέση (ως προς τον άξονα y) του εσωτερικού του φούρνου (σημείο ελέγχου 1)

Εικόνα 68: Απεικόνιση με βέλη της κατεύθυνσης της ροής του αέρα και χρωματική απεικόνιση με βέλη του μεγέθους της ταχύτητας σε κάθε σημείο του εγκάρσιου επιπέδου που βρίσκεται στη θέση της 5ης εξόδου υγρασίας της οροφής ενώ παράλληλα φαίνεται και η τομή στον μανδύα (σημείο ελέγχου 6).

Εικόνα 69: Ίδια απεικόνιση με της προηγούμενης εικόνας 68, με τη διαφορά ότι η τομή φαίνεται υπό γωνία (σημείο ελέγχου 6).

Εικόνα 70: Ίδια απεικόνιση με της εικόνας 68, με τη διαφορά ότι εδώ η χρωματική εναλλαγή των βελών γίνεται σύμφωνα με την θερμοκρασία (σημείο ελέγχου 6).

Εικόνα 71: Απεικόνιση με βέλη της κατεύθυνσης της ροής του αέρα και χρωματική απεικόνιση με βέλη της θερμοκρασίας σε κάθε σημείο του διαμήκους κάθετου επιπέδου που βρίσκεται στη θέση των 5ων εξόδων υγρασίας της οροφής (σημείο ελέγχου 5)

Εικόνα 72: Απεικόνιση με βέλη της κατεύθυνσης της ροής του αέρα και χρωματική απεικόνιση με βέλη της κατανομής της θερμοκρασίας του αέρα του φούρνου, σε κάθε σημείο του εγκάρσιου επιπέδου που βρίσκεται στην μέση του πρώτου θαλάμου, ενώ παράλληλα φαίνεται και η τομή στον μανδύα (σημείο ελέγχου 7).

Εικόνα 73: Απεικόνιση ίδια με της προηγούμενης εικόνας στην μέση του δεύτερου θαλάμου (σημείο ελέγχου 8).

Εικόνα 74: Απεικόνιση με βέλη της κατεύθυνσης της ροής των καυσαερίων και χρωματική απεικόνιση με βέλη του μεγέθους της ταχύτητας, όπως αυτά φαίνονται στις εισόδους (οροφή) και εξόδους τους (πάτος) δεξιά και αριστερά του πρώτου θαλάμου.

Εικόνα 75: Ίδια απεικόνιση με την προηγούμενη εικόνα 74 με τη διαφορά ότι εδώ η χρωματική εναλλαγή γίνεται σύμφωνα με την θερμοκρασία.

Εικόνα 76: Χρωματική απεικόνιση της κατανομής των υδρατμών μέσα στον φούρνο όπως φαίνεται στο οριζόντιο επίπεδο (σημείο ελέγχου 1)

Εικόνα 77: Χρωματική απεικόνιση της αναλογίας των υδρατμών όπως αυτοί κατανέμονται στο οριζόντιο επίπεδο στην μέση του φούρνου (σημείο ελέγχου 1)

Εικόνα 78: Χρωματική απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας στο οριζόντιο επίπεδο στην μέση του φούρνου (σημείο ελέγχου 1). (Φαίνεται και ο μανδύας δεξιά και αριστερά του θαλάμου του φούρνου).

Εικόνα 79: Χρωματική απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας όπως αυτή φαίνεται στο οριζόντιο επίπεδο του φούρνου (σημείο ελέγχου 1)

Εικόνα 80: Χρωματική απεικόνιση της αναλογίας του υγρού νερού από τις τρεις σπές παροχής του στον πάτο του φούρνου

Εικόνα 81: Χρωματική απεικόνιση της αναλογίας του υγρού νερού όπως αυτό εξέρχεται από τις εξόδους υγρασίας στην οροφή του φούρνου

Εικόνα 82: Χρωματική απεικόνιση της αναλογίας των υδρατμών όπως αυτοί εξέρχονται από τις εξόδους υγρασίας στην οροφή του φούρνου

Εικόνα 83: Χρωματική απεικόνιση της κατανομής των υδρατμών στο εσωτερικό του φούρνου όπως φαίνεται στο οριζόντιο επίπεδο (σημείο ελέγχου 1)

## ΛΙΣΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1: Καμπύλες μεταβολής με τον χρόνο της μέσης συγκέντρωσης υγρασίας του μπισκότου σε τέσσερις διαφορετικές θερμοκρασίες.

Διάγραμμα 2: Καμπύλες μεταβολής της μέσης συγκέντρωσης υγρασίας όπως προβλέπεται από το μοντέλο και όπως υπολογίστηκε πειραματικά στους 110°C.

Διάγραμμα 3: Καμπύλες μεταβολής της μέσης συγκέντρωσης υγρασίας όπως προβλέπεται από το μοντέλο και όπως υπολογίστηκε πειραματικά στους 150°C.

Διάγραμμα 4: Καμπύλες μεταβολής της μέσης συγκέντρωσης υγρασίας όπως προβλέπεται από το μοντέλο και όπως υπολογίστηκε πειραματικά στους 200°C.

Διάγραμμα 5: Καμπύλες μεταβολής της μέσης συγκέντρωσης υγρασίας όπως προβλέπεται από το μοντέλο και όπως υπολογίστηκε πειραματικά στους 230°C.

Διάγραμμα 6: Καμπύλη μεταβολής με τον χρόνο της πυκνότητας του μπισκότου, όπως υπολογίστηκε με πειράματα σε εργαστηριακό φούρνο.

Διάγραμμα 7: Μεταβολή της ειδικής θερμότητας σύμφωνα με την μεταβολή της μέσης συγκέντρωσης υγρασίας του μπισκότου.

Διάγραμμα 8: Μεταβολή της μέσης συγκέντρωσης υγρασίας με τον χρόνο ψησίματος.

Διάγραμμα 9: Καμπύλες πειραματικών τιμών θερμοκρασίας αέρα εργαστηριακού φούρνου σε σύγκριση με τιμές θερμοκρασίας στο εσωτερικό του μπισκότου, όπως καταγράφηκαν με θερμοζεύγη K.

Διάγραμμα 10: Καμπύλη πειραματικών τιμών θερμοκρασίας αέρα του βιομηχανικού φούρνου όπως καταγράφηκε από τα θερμοζεύγη κατά την λειτουργία του.

Διάγραμμα 11: Υπολογισμός σφάλματος των θερμοκρασιών που καταγράφει το Omega OM-220, με τη βοήθεια βαθμονομημένων γυάλινων θερμομέτρων.

Διάγραμμα 12: Καμπύλες τιμών θερμοκρασίας από τις πειραματικές μετρήσεις και όπως εξήχθησαν από την λύση του πειράματος 3 ΣΤΑΔΙΟΥ 6.

Διάγραμμα 13: Καμπύλες τιμών πίεσης όπως αυτή διαμορφώνεται κατά μήκος της διαμήκου γραμμής που αποτελεί το σημείο ελέγχου A1, στους διάφορους συνδυασμούς λύτη που δοκιμάστηκαν.

Διάγραμμα 14: Καμπύλες τιμών θερμοκρασίας όπως αυτή διαμορφώνεται κατά μήκος της διαμήκου γραμμής (σημείο ελέγχου A1), και εξήχθησαν ως λύσεις από τον κάθε συνδυασμό.

Διάγραμμα 15: Καμπύλες τιμών θερμοκρασίας όπως αυτή διαμορφώνεται κατά μήκος της εγκάρσιας γραμμής (σημείο ελέγχου A2), και εξήχθησαν ως λύσεις από τον κάθε συνδυασμό.

Διάγραμμα 16: Καμπύλες σύγκλισης λύσεων όλων των εξισώσεων που λύνει το Fluent σε αυτήν την περίπτωση. Στον άξονα x φαίνεται ο αριθμός των επαναλήψεων των υπολογισμών και στον άξονα y ο βαθμός σύγκλισης των λύσεων (residuals).

Διάγραμμα 17: Καμπύλες σύγκλισης λύσεων όλων των εξισώσεων που λύνει το Fluent σε αυτήν την περίπτωση. Στον άξονα x φαίνεται ο αριθμός των επαναλήψεων των υπολογισμών και στον άξονα y ο βαθμός σύγκλισης των λύσεων (residuals).

Διάγραμμα 18: Καμπύλες σύγκρισης τιμών θερμοκρασίας από τις πειραματικές μετρήσεις με θερμοζεύγη και από την λύση που εξήχθη από το πρόγραμμα CFD όπως διαμορφώνονται κατά μήκος της γραμμής στην θέση του θερμοζεύγους (σημείο ελέγχου 2)

Διάγραμμα 19: Καμπύλη απεικόνισης των τιμών της θερμοκρασίας όπως αυτή κατανέμεται κατά μήκος της εγκάρσιας γραμμής στην μέση του φούρνου (σημείο ελέγχου 6)

Διάγραμμα 20: Καμπύλες απεικόνισης των τιμών της θερμοκρασίας όπως αυτή κατανέμεται εν συγκρίσει κατά μήκος της διαμήκου γραμμής στην μέση του φούρνου (μαύρη καμπύλη) και της γραμμής όπου έγιναν οι μετρήσεις των πειραματικών τιμών θερμοκρασίας (κόκκινη καμπύλη). (σημεία ελέγχου 3 και 2)

Διάγραμμα 21: Συγκριτικές καμπύλες τιμών θερμοκρασίας κατά μήκος της διαμήκου γραμμής μέσα στον φούρνο (σημείο ελέγχου 3).

Διάγραμμα 22: Συγκριτικές καμπύλες τιμών θερμοκρασίας κατά μήκος της εγκάρσιας γραμμής μέσα στον φούρνο (σημείο ελέγχου 4).

Διάγραμμα 23: Τιμές Y+ σε απόσταση 5mm από όλα τα τοιχώματα της γεωμετρίας (πλέγμα shortest edge 550%).

Διάγραμμα 24: Τιμές Y+ σε απόσταση 5mm από όλα τα τοιχώματα της γεωμετρίας (πλέγμα shortest edge 500%).

Διάγραμμα 25: Σύγκριση τιμών θερμοκρασίας αέρα φούρνου όπως εξήχθη από τις λύσεις του Fluent για το 1ο πείραμα (σημείο ελέγχου 2), και από τις πειραματικές μετρήσεις με θερμοζεύγη

Διάγραμμα 26: Σύγκριση τιμών θερμοκρασίας αέρα φούρνου όπως εξήχθη από τις λύσεις του Fluent και από τις πειραματικές μετρήσεις με θερμοζεύγη πριν εισαχθεί η υγρασία

Διάγραμμα 27: Σύγκριση τιμών θερμοκρασίας αέρα φούρνου μεταξύ των λύσεων που εξήχθησαν από το Fluent για το 1ο πείραμα, για το 2ο πείραμα μετά τις αλλαγές (σημείο ελέγχου 2) και από τις πειραματικές μετρήσεις με θερμοζεύγη.

Διάγραμμα 28: Σύγκριση τιμών θερμοκρασίας αέρα φούρνου όπως εξήχθη από τις λύσεις του Fluent για το 3ο πείραμα (σημείο ελέγχου 2), και από τις πειραματικές μετρήσεις με θερμοζεύγη

Διάγραμμα 29: Άμεση σύγκριση τιμών θερμοκρασίας μεταξύ του προβλήματος που αποτελεί την βάση, του προβλήματος που οι παροχές στον 1ο και στον 2ο καυστήρα είναι 10 % χαμηλότερες και του προβλήματος που οι παροχές στους ίδιους καυστήρες είναι 25 % χαμηλότερες. Φαίνεται και το προφίλ θερμοκρασίας αέρα φούρνου όπως αυτές μετρήθηκαν πειραματικά. (σημείο ελέγχου 2)

Διάγραμμα 30: Καμπύλες μεταβολής της θερμοκρασίας μέσα σε ένα μπισκότο (πειραματικές μετρήσεις στο εργαστήριο)

Διάγραμμα 31: Καμπύλες μεταβολής της συγκέντρωσης της υγρασίας μέσα σε ένα μπισκότο (πειραματικές μετρήσεις στο εργαστήριο)

Διάγραμμα 32: Καμπύλες μεταβολής της θερμοκρασίας μέσα σε ένα μπισκότο με συνθήκες θέρμανσης του βιομηχανικού φούρνου (πειραματικές μετρήσεις στο Εργοστάσιο)

Διάγραμμα 33: Καμπύλες μεταβολής της συγκέντρωσης της υγρασίας μέσα σε ένα μπισκότο (πειραματικές μετρήσεις στο Εργοστάσιο)

Ευτυχία Παντελάκη: Τρισδιάστατη προσομοίωση του ψησίματος προϊόντων αρτοποιίας σε βιομηχανικό φούρνο με την εφαρμογή Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (CFD)

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το βιομηχανικό ψήσιμο αρτοσκευασμάτων συνήθως πραγματοποιείται σε φούρνους τύπου τούνελ, οι οποίοι δίνουν στον χρήστη μεγάλη ευελιξία στην προσαρμογή των συνθηκών ψησίματος προς επίτευξη άριστου αποτελέσματος. Το προφίλ θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της διεργασίας, το οποίο εξαρτάται από την κατανομή της θερμότητας και την διαμόρφωση της ροής του αέρα μέσα στον θάλαμο ψησίματος, καθορίζει την τελική ποιότητα του προϊόντος. Η παρούσα εργασία ασχολείται με την ανάπτυξη ενός τρισδιάστατου μοντέλου Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (CFD), για ολόκληρο τον θάλαμο ψησίματος μπισκότων μαλακής ζύμης, ώστε να διευκολυνθεί η καλύτερη κατανόηση της διεργασίας αυτής. Εξαιτίας της πολυπλοκότητας της διεργασίας και της λειτουργίας του φούρνου, η μέθοδος της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής, ίσως να είναι η πιο αποτελεσματική. Το μοντέλο σχεδιάστηκε για να προβλέπει την θερμοκρασία και την ροή του αέρα, εξαιτίας της μεταφοράς θερμότητας μέσω συναγωγής και ακτινοβολίας, και το μέγεθος της ταχύτητας σε κάθε σημείο του θαλάμου. Ειδικότερα, σχεδιάστηκε για να περιγράψει την πολύπλοκη κυκλοφορία του αέρα, η οποία προκύπτει από τους μηχανισμούς εισόδου και εξόδου του από τα άκρα του φούρνου και από την απαγωγή του από τους διάφορους αγωγούς απομάκρυνσης υγρασίας κατά το μήκος του. Συμπληρωματικά στο μοντέλο αυτό, έδρασε η ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου πρόβλεψης των φαινομένων μεταφοράς ενέργειας και μάζας μέσα στο προϊόν. Η έλλειψη επαρκούς υπολογιστικής ισχύος, δεν επέτρεψε ώστε η πρόβλεψη αυτή να γίνει επίσης με την μέθοδο CFD. Σύγκριση των αριθμητικών λύσεων με τις πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας, απέδωσε πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα, γεγονός που αποδεικνύει ότι η μοντελοποίηση της διεργασίας ψησίματος με CFD είναι μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος για την βιομηχανία τροφίμων.

## ABSTRACT

The industrial baking of bakery products is commonly performed in tunnel ovens, which give operators high flexibility for adjusting baking conditions to optimum values. The temperature profile, during the process, which depends on the distribution of temperature and air flow in the oven chamber, dominates the final product quality. In this study, a three-dimensional (3-D) CFD model for the whole baking oven chamber used for soft-dough biscuit baking, has been developed to facilitate a better understanding of this process. Due to the complexity of the certain process and the oven's function, Computational Fluid Dynamics may be the most effective method. The model was established to predict the temperature and airflow pattern due to the convective and radiation heat transfer, and also the value of velocity at each point of the oven chamber. Specifically, it was used in order to describe the complex air circulation resulting from the mechanisms of air input and exit at the ends of the oven and of air extraction through the different extraction points located along the oven length. Finally, it was integrated with a mathematical model developed for the prediction of the heat and mass transfer phenomena inside the product. This prediction, unfortunately, was not allowed to be performed using CFD, due to the lack of sufficient computational power. Comparison of numerical results with experimental measurements of temperature shows a fairly close agreement, fact that proves the modeling of baking process with CFD is a promising method about the food industry.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως αναφέρουν οι Emmanuel Purlis and Viviana O. Salvadori (2009), η προσομοίωση μπορεί να ορισθεί ως η διαδικασία ανάπτυξης ενός μοντέλου πραγματικού συστήματος, και εκτέλεσης πειραμάτων μέσω του μοντέλου αυτού, με σκοπό την μελέτη, ανάλυση, σχεδιασμό ή επανασχεδιασμό, έλεγχο και πρόβλεψη μιας πραγματικής συγκεκριμένης διεργασίας. Εκτός από την επιβεβαίωση της αξιοπιστίας του μοντέλου (validation), η αριθμητική προσομοίωση δεν περιλαμβάνει πειράματα σε εργαστήριο, παρά μόνο την ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου και χρήση υπολογιστή για την λύση και τα αποτελέσματα, συνήθως πιο οικονομικά από τα πραγματικά πειράματα. Επιπλέον, η προσομοίωση δίνει τη δυνατότητα εργασίας υπό τυποποιημένες συνθήκες λειτουργίας, ελαχιστοποιώντας τις ανακρίβειες των πολύπλοκων διεργασιών, ειδικά εκείνων που είναι παραδοσιακά μη αυτοματοποιημένες.

Η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική είναι μια μέθοδος προσομοίωσης και αριθμητικής επίλυσης των διεργασιών σχετικών με την ροή των ρευστών και μεταφοράς θερμότητας, και μπορεί να εφαρμοστεί σχεδόν σε οποιοδήποτε επιστημονικό πεδίο. Η εφαρμογή της στις διεργασίες των τροφίμων είναι σχετικά πρόσφατη και αποδείχθηκε πολύ χρήσιμη καθώς τα τρόφιμα ως σύσταση και τα φαινόμενα που επισυμβαίνουν σε αυτά είναι πολύ πιο πολύπλοκα από άλλα συστήματα.

Στην προκειμένη περίπτωση η διεργασία ψησίματος αρτοποιημάτων είναι μια από τις πολύπλοκες διαδικασίες στην βιομηχανία τροφίμων καθώς η διάχυση θερμότητας μέσα στον φούρνο εξαρτάται από έναν αριθμό παραμέτρων συμπεριλαμβανομένης της πηγής θερμότητας, του προφίλ της ροής του αέρα, του ρυθμού ροής, του ποσοστού πληρότητας του φούρνου, της διάρκειας ψησίματος κλπ. Η σχέση μεταξύ αυτών των παραμέτρων είναι απαραίτητο να καθορισθεί, ώστε να είναι δυνατή η ρύθμιση των συνθηκών του φούρνου προς επίτευξη του βέλτιστου προφίλ θερμοκρασιών.

Σύμφωνα με τους Weibiao Zhou and Nantawan Therdthai,(2007), κατά το ψήσιμο η ωμή ζύμη μετατρέπεται σε ένα προϊόν ελαφρύ, πορώδες, εύπεπτο και εύγευστο, κάτω από την επίδραση της θερμότητας. Οι προδιαγραφές ποιότητας του κάθε προϊόντος ζύμης προϋποθέτουν μία πολύ προσεκτική διαδικασία ψησίματος. Οι παράγοντες ζωτικής σημασίας που επηρεάζουν την ποιότητα του τελικού προϊόντος περιλαμβάνουν τον ρυθμό και το ποσό της θερμότητας, τα επίπεδα υγρασίας στον χώρο ψησίματος και τον χρόνο που διαρκεί η διαδικασία. Οι πιο εμφανείς επιδράσεις στο προϊόν είναι η διόγκωση, η δημιουργία κόρας (σκληρή επιφάνεια), η αδρανοποίηση των ζυμών (εάν υπάρχουν) και των ενζυματικών δραστηριοτήτων, η πήξη των πρωτεϊνών, η ζελατινοποίηση του αμύλου στη ζύμη και η απώλεια υγρασίας.

Πιθανότατα, το μόνο μέσο επίλυσης αυτού του πολύπλοκου προβλήματος, να είναι η μοντελοποίηση με την εφαρμογή της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (Computational Fluid Dynamics-CFD).



Η εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε με **σκοπό** να προσδιορισθούν και να παρουσιασθούν, με τρόπο κατανοητό, οι συνθήκες που επικρατούν στο εσωτερικό βιομηχανικού φούρνου τύπου τούνελ έμμεσης καύσης με εξωτερική ταινία, κατά το ψήσιμο μπισκότων μαλακής ζύμης. Πιο συγκεκριμένα, να μελετηθεί η διαμόρφωση (προφίλ) της ροής, της υγρασίας και της θερμοκρασίας του αέρα μέσα στον φούρνο αλλά και η κατανομή της θερμοκρασίας και της υγρασίας μέσα στο προϊόν κατά τη διάρκεια του ψησίματος. Ο στόχος αυτός μπορεί να επιτευχθεί με την ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων προσομοίωσης της γεωμετρίας και της λειτουργίας του φούρνου, με την εφαρμογή Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

### ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΘΕΜΑΤΟΣ

#### 2.A) ΤΟ ΠΡΟΪΟΝ

##### 2.A.α) ΜΠΙΣΚΟΤΑ –ΕΙΣΑΓΩΓΗ

###### Φυσικά χαρακτηριστικά των μπισκότων, crackers και cookies

Όπως αναφέρεται από τους Stanley P. Cauvain and Linda S. Young,(2006), τα μπισκότα, καθώς και τα παρεμφερή με αυτά προϊόντα, αποτελούν τμήμα του ανθρώπινου διαιτολογίου για πολλές εκατονταετίες. Ο όρος μπισκότο, 'biscuit', προέρχεται από την λατινική ορολογία 'bis coctus' ή την αρχαία γαλλική 'bescoit' που σημαίνει διπλά ψημένη, καθώς το προϊόν ψηνόταν πρώτα σε ζεστό φούρνο και στην συνέχεια μεταφερόταν σε ένα ψυχρό προκειμένου να ολοκληρωθεί η ξήρανση του προϊόντος.

Τα βασικά υλικά που χρησιμοποιούνται στην μπισκοτοποιία είναι το σιτάλευρο, το λίπος και η ζάχαρη. Το νερό είναι επίσης απαραίτητο στο στάδιο ανάμειξης της ζύμης, αλλά θα ήταν πιο σωστό να το θεωρήσουμε σαν βοηθητικό παράγοντα παρά σαν απαραίτητο υλικό καθώς το προστιθέμενο νερό, μαζί με αυτό που ήδη υπάρχει στο αλεύρι και άλλα υλικά όπως τα σιρόπια, απομακρύνονται κατά τη διάρκεια του ψησίματος.

Υπάρχουν πολλές σημαντικές διαφορές μεταξύ των μπισκότων, cookies, crackers και των άλλων κατηγοριών αρτοποιημάτων. Πρώτη και πιο εμφανής, είναι το μέγεθός τους και το βάρος τους. Τα περισσότερα προϊόντα αυτής της ομάδας ζυγίζουν λιγότερο από 100g και κυρίως το βάρος της μονάδας είναι μεταξύ 15-16g. Τα μπισκότα και τα cookies είναι λεπτά, συχνά λεπτότερα από 10mm, και συνήθως στρογγυλού σχήματος ή παραλληλόγραμμου. Η περιεκτικότητα σε υγρασία των μπισκότων είναι πολύ χαμηλή, τυπικά κάτω από 5%. Η χαμηλή περιεκτικότητα, συνδυασμένη με το λεπτό πάχος, τους δίνει χαρακτήρα τραγανό και σκληρό. Τα τελευταία χρόνια ο χαρακτήρας των μπισκότων, όσον αφορά την υφή, έχει επεκταθεί σε μεγαλύτερο εύρος περιλαμβάνοντας μια πιο μαλακή υφή, τα λεγόμενα μαστιχωτά-cookies. Κατά ένα μέρος αυτό προέρχεται από την υψηλότερη υγρασία και κατά ένα άλλο σε αλλαγές της συνταγής.

Η χαμηλή περιεκτικότητα σε υγρασία και η χαμηλή ενεργότητα νερού αυτών των προϊόντων, σημαίνει ότι έχουν μακροχρόνια διάρκεια ζωής (συνήθως πολλούς μήνες) χωρίς κίνδυνο για επιμολύνσεις από μούχλες. Η οργανοληπτική διάρκεια ζωής τους είναι επίσης πολύ μεγάλη καθώς το μπαγιάτεμα και η απώλεια βάρους δεν είναι σύνηθες πρόβλημα. Ωστόσο, υπάρχουν άλλα προβληματικά πεδία. Ένα από αυτά είναι η απορρόφηση υγρασίας από το περιβάλλον, το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε μαλακή υφή και έλλειψη τραγανότητας. Το δεύτερο είναι ο κίνδυνος της οξειδωσης του λίπους, πρόβλημα που προκύπτει από τον συνδυασμό μακροχρόνιας αποθήκευσης και χαμηλής ενεργότητας νερού (Manley, 2000).

Όπως συμβαίνει και με τα cakes, το άρωμα και η γεύση των μπισκότων προσδιορίζεται από τα συστατικά και την συνταγή που χρησιμοποιείται. Υπάρχει κάποια συνεισφορά και από την διαδικασία ψησίματος. Δεν υπάρχει σχεδόν καθόλου σχηματισμός

κόρας, όμως μπορεί να υπάρχει μια μικρή διαβάθμιση στην υγρασία μέσα στο πάχος του προϊόντος. Τα μπισκότα και τα cookies είναι πιο συνεκτικά από τα ψωμιά ή τα cakes, κυρίως γιατί συμβαίνει περιορισμένη ανάπτυξη γλουτένης και καθόλου σημαντικός σχηματισμός αφρού κατά την ανάμειξη και ως συνέπεια, περιορισμένη ανάπτυξη δομής σφουγγαριού κατά τη διάρκεια του ψησίματος.

## 2.Α.β) ΚΥΡΙΑ ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΜΠΙΣΚΟΤΩΝ

### Αλεύρι

Όπως αναφέρεται από τον W. P. Edwards (2007), το ιδανικό αλεύρι για μπισκότα είναι χαμηλής περιεκτικότητας σε πρωτεΐνες, και χαμηλής αποδόμησης του αμύλου. Ο λόγος είναι ότι επιθυμείται η παραγωγή ενός προϊόντος με χαμηλή περιεκτικότητα σε υγρασία, αφού είναι γνωστός ο ρόλος των πρωτεϊνών και του αποδομημένου αμύλου ως παγίδες νερού. Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό στην ζύμη των μπισκότων είναι η ελαστικότητα. Η αντίσταση δεν είναι επιθυμητό χαρακτηριστικό.

### Λιπαρή ύλη

Όπως αναφέρεται από τους Stanley P. Cauvain and Linda S. Young (2006), οι περισσότεροι τύποι μπισκότων περιέχουν μεγάλες ποσότητες λίπους. Το παραδοσιακό λιπαρό συστατικό ήταν το βούτυρο, και υπάρχουν μπισκότα μόνο με βούτυρο. Είναι αυτό που δίνει το άρωμα και ένα ακόμη πλεονέκτημα στο προϊόν όσον αφορά την πώλησή του. Το λίπος δεν προστίθεται στη ζύμη των μπισκότων για κάποιον άλλο λόγο πέραν από τις ιδιότητες που προσδίδει στην υφή του προϊόντος.

Καθώς τα μπισκότα είναι προϊόντα με μεγάλη διάρκεια ζωής, το λίπος που χρησιμοποιείται πρέπει οπωσδήποτε να είναι ανθεκτικό στις διάφορες συνθήκες αποθήκευσης. Το ένα χαρακτηριστικό είναι ότι πρέπει να αντιστέκεται στην λιπολυτική δραστηριότητα ενζύμων. Ένα έλαιο με αυτήν την ιδιότητα είναι το φοινικέλαιο. Άλλο χαρακτηριστικό του λιπαρού συστατικού πρέπει να είναι η ανθεκτικότητα στην οξειδωση. Ένας τρόπος να αποφευχθεί είναι να μην υπάρχουν στο έλαιο διπλοί δεσμοί, όπως υπάρχουν για παράδειγμα στο ηλιέλαιο. Παλιότερα χρησιμοποιούνταν υδρογονωμένα φυτικά έλαια, αλλά πλέον θεωρούνται βλαβερά για την υγεία. Και ένας δεύτερος είναι να χρησιμοποιείται ένας αντιοξειδωτικός παράγοντας μέσα στο προϊόν, όπως επισημαίνεται από τον W. P. Edwards (2007).

### Σάκχαρα

Πέρα από την προφανή λειτουργία των σακχάρων, αυτά επίσης επηρεάζουν την δομή των μπισκότων. Τα μπισκότα παρασκευασμένα από μαλακή ζύμη (short-dough) περιέχουν τα περισσότερα σάκχαρα, τα ημίγλυκα μπισκότα λιγότερα και τα crackers ελάχιστα. Ένα παράδειγμα της επίδρασης που έχουν τα σάκχαρα στην δομή και υφή των μπισκότων είναι σε αυτά της μαλακής ζύμης, τα οποία έχουν χαμηλή περιεκτικότητα σε νερό και έτσι η σουκρόζη δεν μπορεί να διαλυθεί. Από κει και πέρα ρόλο στην υφή του προϊόντος παίζει το μέγεθος των κρυστάλλων που θα βρίσκονται στην στερεή μορφή πλέον

του μπισκότου. Επίσης, τα σάκχαρα δεξτρόζη, φρουκτόζη, μαλτόζη και λακτόζη μπορούν, ως ανάγοντα σάκχαρα, μέσω της αντίδρασης Maillard να προσδώσουν στο προϊόν ελκυστικά αρώματα και χρώμα, όπως αναφέρουν οι Stanley P. Cauvain and Linda S. Young (2006).

### Γάλα

Καθώς το υγρό γάλα αποφεύγεται για την παρασκευή μπισκότων για πρακτικούς λόγους όπως η έλλειψη σταθερότητας, χρησιμοποιείται αποβουτυρωμένο γάλα σε στερεή μορφή, με πιο κατάλληλη την σκόνη γάλακτος. Η σκόνη γάλακτος περιέχει κάποια χρήσιμα συστατικά όπως η λακτόζη, η οποία είναι ανάγων σάκχαρο, και πρωτεΐνες, οι οποίες εκτός από την συμμετοχή τους στις αντιδράσεις Maillard, έχουν και ικανότητες γαλακτωματοποιητή. Στην Ε.Ε. τα τελευταία χρόνια μειώνεται η χρήση γάλακτος στα μπισκότα πρώτον για οικονομικούς λόγους και δεύτερον γιατί υπάρχει μεγάλη διαθεσιμότητα των χρήσιμων συστατικών ξεχωριστά, όπως αναφέρεται από τον W. P. Edwards (2007).

### Baking powders

Στο βιβλίο του W. P. Edwards (2007), αναφέρεται ότι, οι σκόνες ψησίματος αποτελούν συνήθως ένα μίγμα δικαρβονικού νατρίου και ένα όξινο μέσο, που χρησιμοποιείται ως πηγή αερίου διοξειδίου του άνθρακα. Η συνολική ποσότητα του διοξειδίου του άνθρακα που απελευθερώνεται από το baking powder εξαρτάται από την ποσότητα του δικαρβονικού νατρίου που βρίσκεται στο μίγμα, αλλά μόνο ως το σημείο που το οξύ του μίγματος μπορεί να αντιδράσει με αυτό. Συνήθως το επίπεδο του οξέως είναι υπολογισμένο να εκτελεί μια πλήρη αντίδραση με το δικαρβονικό νάτριο. Αυτό αναφέρεται ως βαθμός εξουδετέρωσης του οξέος: η ποσότητα του οξέος που απαιτείται για να ελευθερώσει όλο το διαθέσιμο διοξείδιο του άνθρακα από το δικαρβονικό νάτριο.

### Πρόσθετα υλικά - π.χ. Αποξηραμένα φρούτα

Όπως αναφέρεται από τους Stanley P. Cauvain and Linda S. Young (2006), οι σταφίδες και τα κόκκινα φρούτα (βατόμουρα, φράουλες κλπ.) προστίθενται για να αρωματίσουν πολλά προϊόντα. Τα αποξηραμένα φρούτα έχουν σχετικά υψηλά επίπεδα σακχάρων και έτσι συνεισφέρουν στην γλυκύτητα των προϊόντων, και η φύση τους έχει επίδραση στην παρασκευή της ζύμης καθώς και στις ιδιότητες του τελικού προϊόντος. Έχουν μια σχετικά χαμηλή περιεκτικότητα σε υγρασία και υψηλή συγκέντρωση σακχάρων, πράγμα το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε μετανάστευση της υγρασίας από την ψίχα του προϊόντος προς τα φρούτα, κάνοντας το προϊόν ξηρό (Cauvain and Young, 2001). Τα υψηλά επίπεδα υγρασίας όμως συνεισφέρουν στην επιμήκυνση της διάρκειας ζωής χωρίς επιμόλυνση από μούχλες.

## 2.Α.γ) ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΖΥΜΗΣ ΜΠΙΣΚΟΤΩΝ

### Μπισκότα μαλακής ζύμης

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι περισσότεροι τύποι βουτημάτων και τα cookies. Στα άλευρα που χρησιμοποιούνται, η γλουτένη πρέπει να κυμαίνεται από 7-9% και να είναι αδύνατη, γιατί η ανάπτυξή της στη ζύμη πρέπει να είναι ελάχιστη ή μηδαμινή.

Η ανάμειξη πρέπει να γίνει σε δύο στάδια: α) πρώτα αναμειγνύεται το λίπος και η ζάχαρη παρέχοντας πολύ ενέργεια ώστε να γίνει ένα γαλάκτωμα και β) έπειτα προστίθεται το αλεύρι και ξαναγίνεται ανάμειξη αλλά πιο αργά και για λιγότερη ώρα ώστε να μην σχηματιστεί πλέγμα γλουτένης, όπως επισημαίνεται από τον Καζάζη Ι. (1981).

### Μπισκότα σκληρής ζύμης

Στο σύγγραμμα του Καζάζη Ι. (1981), επίσης, αναφέρεται ότι, μία κατηγορία των μπισκότων σκληρής ζύμης, είναι τα μπισκότα που παρασκευάζονται με μαγιά και μία άλλη κατηγορία είναι τα ημίγλυκα μπισκότα. Στην πρώτη κατηγορία χαρακτηριστικά είναι τα κράκερς κρέμας (cream crackers). Για την παρασκευή της ζύμης οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι παρεμφερείς με αυτές του ψωμιού. Όσον αφορά τα ημίγλυκα μπισκότα, η ανάμειξη των υλικών είναι συνδεδεμένη με την χρήση αλάτων του θειικού οξέος. Αυτού του είδους τα άλατα διευκολύνουν την ανάμειξη και την μορφοποίηση της σκληρής ζύμης.

## 2.Α.δ) ΙΔΙΑΙΤΕΡΟΤΗΤΕΣ ΜΠΙΣΚΟΤΩΝ ΣΤΟΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ ΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΓΚΩΣΗΣ

Όπως αναλυτικά περιγράφουν οι Weibiao Zhou and Nantawan Therdthai (2007), οι διάφορες μορφές μπισκότων και cookies ψήνονται άμεσα πάνω στην μεταφορική ταινία και όντας τόσο λεπτά, είναι έτοιμα σε μικρό χρονικό διάστημα σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες. Κάποια διόγκωση των μπισκότων συμβαίνει κατά το ψήσιμο, αφού τα αέρια απελευθερώνονται από τους παράγοντες αερισμού (π.χ. διογκωτικές ύλες), και λόγω της θερμότητας. Ειδικά το διάλυμα σακχάρων και τα λιπαρά κάνουν τα μπισκότα εύκαμπτα τόσο ώστε να μεγαλώσουν σε μέγεθος για λίγο. Καθώς τα προϊόντα βρίσκονται ελεύθερα πάνω στην ταινία, η διόγκωση μπορεί να γίνει και στις τρεις κατευθύνσεις του προϊόντος. Εξάπλωση της ζύμης κατά το ψήσιμο συμβαίνει μόνο όταν η περιεκτικότητα σε ζάχαρη είναι μεγάλη, και αυτό πρέπει να ελέγχεται όταν δεν είναι επιθυμητό το πολύ λεπτό προϊόν. Η μεγάλη περιεκτικότητα σε ζάχαρη εμποδίζει και την πλήρη ζελατινοποίηση του αμύλου.

Η δυνατότητα σχηματισμού αφρού στα μπισκότα και τα cookies είναι περιορισμένη λόγω του μικρού σχηματισμού δομής γλουτένης. Επιπλέον, τα χαμηλά επίπεδα νερού που χρησιμοποιούνται κατά την παρασκευή της ζύμης μειώνουν τη δυνατότητα της διασποράς του αέρα μέσα στην λιπαρή φάση και την επακόλουθη διασπορά του στην υδατική φάση, όπως θα συνέβαινε στα cakes. Είναι πιθανό να υπάρχει μικρή συνεισφορά στην δομή του μπισκότου από το πλέγμα γλουτένης και τους μηχανισμούς σταθεροποίησης των λιπαρών, αλλά αφού δεν αναμένεται σημαντική διόγκωση από τα μπισκότα και τα cookies, ο μη σχηματισμός αφρού δεν αποτελεί πρόβλημα. Ωστόσο, ο ρόλος του αέρα κατά την

προετοιμασία της ζύμης μπισκότων και cookies είναι σημαντικός επειδή χωρίς αυτόν, το προϊόν θα έχανε την ικανότητά του να αυξηθεί σε μέγεθος κατά το ψήσιμο.

Οπότε πώς αυτός ο αέρας λαμβάνει μέρος στην ζύμη; Κάποιο μέρος του μεταφέρεται στην ζύμη μαζί με τα συστατικά όπως το αλεύρι, η ζάχαρη και το λίπος και ένα ποσοστό κατά την ανάμειξη. Καθώς δεν υπάρχει σημαντική ανάπτυξη πλέγματος γλουτένης για να παγιδεύσει τις φυσαλίδες αέρα, το λίπος είναι αυτό που παίζει καθοριστικό ρόλο στην διαδικασία αερισμού της ζύμης, αλλά και πάλι το επίπεδο συγκράτησης του αέρα είναι χαμηλό. Στα ημίγλυκα μπισκότα πιο σημαντικό ρόλο στον αερισμό της ζύμης παίζει η γλουτένη έστω και περιορισμένη, ενώ στα short-dough (μαλακής ζύμης) μπισκότα, το λίπος.

## 2.α.ε) ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΠΙΣΚΟΤΩΝ

Ενδεικτικά θα αναφερθούν οι θερμικές ιδιότητες μπισκότων, που περιλαμβάνονται στην βιβλιογραφία, και συγκεκριμένα από το άρθρο των Jose Caro-Corrales et al. (2002). Δεν είναι δυνατόν να συμπίπτουν με τις πειραματικές μετρήσεις που θα γίνουν στην περίπτωση που μελετάται στην παρούσα εργασία, λόγω της μεγάλης ποικιλίας αυτών των προϊόντων και άρα της διαφορετικής σύστασης των μπισκότων.

### Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας ( $k$ , $W/mK$ )

Στην συγκεκριμένη εργασία μετρήθηκε η θερμική αγωγιμότητα από τους 10 έως τους 50°C, και βρέθηκε ότι λαμβάνει τιμές από 0,1 – 2 W/mK.

Μέσος όρος :  $k = 0,102 \text{ W/mK}$

### Ειδική θερμότητα του ρευστού ( $C_p$ , $J/kg K$ )

Από την ίδια πηγή, με μετρήσεις που έγιναν από τους 10 έως τους 90°C, βρέθηκε ότι ο μέσος όρος της  $C_p$  για το μπισκότο ήταν :

$C_p = 1710 \text{ J/kg K}$

### Πυκνότητα ( $d$ , $kg/m^3$ )

Η πυκνότητα του μπισκότου μετρήθηκε με συνδυασμό δύο μεθόδων.

Μέσος όρος :  $d = 505,7 \text{ kg/m}^3$

### Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ( $h$ , $W/m^2K$ )

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας υπολογίστηκε για τρεις διαφορετικές ταχύτητες ροής αέρα γύρω από τα μπισκότα, και πήρε τις εξής τιμές κατά μέσο όρο:

|                           |                           |                           |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| $u = 1 \text{ m/s}$       | $u = 1,5 \text{ m/s}$     | $u = 2 \text{ m/s}$       |
| $h = 21,7 \text{ W/m}^2K$ | $h = 29,1 \text{ W/m}^2K$ | $h = 35,3 \text{ W/m}^2K$ |

## 2.Β) Η ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ

### 2.Β.α) ΤΟ ΨΗΣΙΜΟ ΑΡΤΟΣΚΕΥΑΣΜΑΤΩΝ ΩΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ

Όπως σημειώθηκε νωρίτερα στην εισαγωγή και καθώς αναφέρουν οι Weibiao Zhou and Nantawan Therdtai (2007), η θερμοκρασία καθορίζει την ποιότητα του προϊόντος κατά το ψήσιμο. Αυτό συμβαίνει λόγω της επίδρασης της θερμοκρασίας στην ενζυματική αντίδραση, τη διόγκωση, την ζελατινοποίηση, την μετουσίωση των πρωτεϊνών, την μη ενζυματική αντίδραση αμαύρωσης και την μετανάστευση της υγρασίας. Η διαβάθμιση της θερμοκρασίας δημιουργεί ακολούθως διαβάθμιση πίεσης μέσα στο τρόφιμο. Αυτή με την σειρά της προκαλεί το πλέγμα της ζύμης να διασταλεί προς μία διεύθυνση, από το κέντρο του προϊόντος προς την επιφάνειά του. Ένα τέτοιο πλέγμα αφρού μετατραπεί σε ένα πορώδες σύστημα, αυτή η δομή τότε θα παρουσιάσει την ίδια διαστολή. Ωστόσο, για να αποφευχθούν οι συνέπειες της διαστολής, η διαβάθμιση της θερμότητας μέσα στον φούρνο πρέπει να ρυθμιστεί και να προσαρμοστεί σύμφωνα με τη δύναμη της μεμβράνης της γλουτένης που σχηματίζει την διεπιφάνεια των κελιών αέρα. Δεν είναι μόνο η τιμή της θερμοκρασίας που έχει σημασία, αλλά επίσης και ο χρόνος που πρέπει αυτή να εφαρμοστεί. Για παράδειγμα, η βέλτιστη θερμοκρασία είναι απαραίτητο να διατηρηθεί την σωστή χρονική στιγμή και με κατάλληλη διάρκεια.

Η θερμοκρασία του αέρα κατά το ψήσιμο είναι επίσης σημαντική. Ωστόσο, η συσχέτιση μεταξύ αυτής και της ποιότητας του προϊόντος είναι άνευ μεγάλης σημασίας λόγω του ότι υπάρχουν μερικές άλλες παράμετροι που επηρεάζουν την ποιότητα συγχρόνως. Ένας εναλλακτικός τρόπος μέτρησης της συνδυαστικής επίδρασης της θερμοκρασίας ψησίματος και των άλλων παραμέτρων είναι η μέτρηση του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας που απαιτείται από τον φούρνο προς το προϊόν για το ψήσιμο (heat flux  $W/m^2K$ ). Υπάρχουν ισχυρισμοί πως η μέτρηση αυτής της μονάδας είναι πιο χρήσιμη μέθοδος από ότι η μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα, με σκοπό τον έλεγχο της ποιότητας των αρτοσκευασμάτων.

Εκτός από την θερμοκρασία αέρα και επιφάνειας των προϊόντων, επίδραση στην ποιότητα των αρτοποιημάτων έχει και η ταχύτητα αέρα. Η ανομοιομορφία που παρουσιάζουν συνήθως τα ψημένα προϊόντα οφείλεται στην ανομοιομορφία της ροής του αέρα κατά το ψήσιμο μέσα στον φούρνο και στο μικροπεριβάλλον της περιοχής γύρω ακριβώς από τα τεμάχια. Είναι επιβεβαιωμένο ότι η heat flux του προϊόντος μπορεί να αυξηθεί αυξανόμενης της ταχύτητας του αέρα. Σύμφωνα με τους Sato et al., η αύξηση της ταχύτητας καταλήγει σε μεγαλύτερη απώλεια βάρους του προϊόντος, σε μεγαλύτερη σκληρότητα και πιο σκούρο χρώμα επιφάνειας. Συνεπώς, λόγω της αύξησης της μεταφοράς θερμότητας θα πρέπει να μειωθεί είτε η διάρκεια είτε η θερμοκρασία ψησίματος. Βέβαια, η διαδικασία του ψησίματος απαιτεί μία ελάχιστη θερμοκρασία ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα που αφορά στο χρώμα. Όταν τα αρτοσκευάσματα ψήνονται σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, απαιτείται πιο μεγάλη ταχύτητα αέρα για να αυξηθεί ο ρυθμός ξήρανσης της επιφάνειας. Παρόλα αυτά ο ρυθμός ξήρανσης από μόνος του δεν αρκεί για να παράγει ένα αποδεκτό χρώμα κρούστας.

Οι κινητικές αντιδράσεις, συμπεριλαμβανομένης της ζελατινοποίησης του αμύλου και της αντίδρασης αμαύρωσης, εξαρτώνται όχι μόνο από την θερμοκρασία αλλά και από

τη διάρκεια ψήσιματος. Συνεπώς, για να μειώσουμε τη διάρκεια ψήσιματος αυξάνοντας είτε την ταχύτητα αέρα είτε την θερμοκρασία, πρέπει να επιβεβαιωθεί πρώτα ότι οι αντιδράσεις αυτές έχουν ολοκληρωθεί. Σε αντίθετη περίπτωση η ποιότητα του προϊόντος υποβαθμίζεται. Αλλά ακόμη και αν έχουν ολοκληρωθεί, υπάρχει διαφορά στην ποιότητα μεταξύ του σύντομα ψημένου προϊόντος και αυτού σε μακρύ χρονικό διάστημα. Τα ψημένα με μεγάλης χρονικής διάρκειας διαδικασία είναι πολύ πιθανό να εμφανίσουν κοιλότητες στις επιφάνειές τους καθώς και να μην είναι τόσο μαλακά όσο χρειάζεται.

Μια άλλη σημαντική παράμετρος που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά το ψήσιμο, είναι η υγρασία στον χώρο του φούρνου, είτε αυτή παράγεται από τα ίδια τα προϊόντα (λόγω εξάτμισης του νερού της ζύμης) είτε από ψεκάσμο μέσα στον φούρνο σε διαδικασίες που περιλαμβάνουν και κάτι τέτοιο. Η υγρασία αυξάνει τον ρυθμό μεταφοράς θερμότητας που απαιτείται για το ψήσιμο (heat flux). Για παράδειγμα: σύμφωνα με ένα μοντέλο CFD, η μέση θερμοκρασία ενός φούρνου που περιέχει 100% υδρατμούς μπορεί να είναι 5°C υψηλότερη από ότι ενός φούρνου που περιέχει εντελώς ξηρό αέρα.

## 2.Β.β) ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΠΟΥ ΕΠΙΣΥΜΒΑΙΝΟΥΝ ΚΑΤΑ ΤΟ ΨΗΣΙΜΟ

### 2.Β.β.ι) Μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας

Όπως αναφέρουν οι Stanley P. Cauvain and Linda S. Young (2006), ένας από τους κρίσιμους παράγοντες επίτευξης της παραγωγής της τόσο μεγάλης ποικιλίας αρτοσκευασμάτων είναι η παροχή και η απομάκρυνση θερμότητας. Όλα τα αρτοποιήματα υπόκεινται σε τουλάχιστον ένα στάδιο θέρμανσης – ψήσιμο – και σε ένα στάδιο απαγωγής θερμότητας – ψύξη. Παράγοντες κλειδιά που ελέγχουν την μεταφορά θερμότητας στα προϊόντα αυτά είναι η θερμική αγωγιμότητα του υλικού και οι διαστάσεις του προϊόντος.

Στα αρτοσκευάσματα η μετατροπή από αφρό σε σπογγώδη μορφή και η απώλεια υγρασίας είναι κρίσιμα σημεία για την τελική ποιότητα. Σε κάποιες περιπτώσεις, το πρώτο είναι πιο σημαντικό από το δεύτερο, ενώ σε άλλες το αντίστροφο. Στο ψήσιμο, όλα τα προϊόντα χάνουν υγρασία. Κάποια απώλεια μπορεί να συμβεί κατά την διάρκεια της ψύξης, όμως οι παραγωγοί λαμβάνουν μέτρα για να μειωθούν οι απώλειες όσο το δυνατόν περισσότερο. Σε όλα τα στάδια μεταφοράς θερμότητας, το μέγεθος του προϊόντος, το σχήμα και η μορφή του έχουν αξιοσημείωτη επίδραση στην συνολική ποιότητά του.

Σύμφωνα με τους Weibiao Zhou and Nantawan Therdthai (2007), κατά το ψήσιμο, η θερμότητα μεταφέρεται μέσω του συνδυασμού των τριών γνωστών μηχανισμών: αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία. Ωστόσο, η πραγματική μορφή συνδυασμού και οι αναλογίες είναι πολύ διαφορετικές για την μεταφορά θερμότητας μέσα στα τεμάχια ζύμης και μέσα στον θάλαμο του φούρνου.

Η μεταφορά θερμότητας μέσα στην ζύμη συντελείται από τον συνδυασμό α) αγωγής από την μεταφορική ταινία προς την ζύμη, β) αγωγής μέσα στην συνεχή φάση υγρού/στερεού της ζύμης και γ) του φαινομένου εξάτμισης/συμπύκνωσης μέσα στην αέρια



φάση της ζύμης. Τέσσερα είναι τα στάδια μεταφοράς θερμότητας μέσα στην ζύμη. Αρχικά, το νερό εξατμίζεται στην θερμότερη πλευρά ενός κελιού αέρα που λαμβάνει την λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης. Έπειτα, οι υδρατμοί μεταναστεύουν μέσω της αέριας φάσης. Όταν φτάσουν στην πιο ψυχρή πλευρά του κελιού αέρα, οι υδρατμοί συμπυκνώνονται και μετατρέπονται σε νερό. Τέλος, θερμότητα και νερό μεταφέρονται με αγωγή και διάχυση, αντίστοιχα, μέσω του gel γλουτένης προς την θερμότερη πλευρά του διπλανού κελιού. Ο μηχανισμός διάχυσης του νερού παίζει σημαντικό ρόλο στην μεταφορά θερμότητας καθώς η ζύμη τείνει να είναι κακός αγωγός γεγονός που περιορίζει την μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγής.

Μέσα στον θάλαμο του φούρνου, τα μόρια αέρα, οι υδρατμοί ή ακόμη και τα καυσάερια, κυκλοφορούν και μεταφέρουν θερμότητα με συναγωγή έως ότου έρθουν σε επαφή με τις στερεές επιφάνειες όπως η μεταφορική ταινία. Από εκείνο το σημείο η μορφή μεταφοράς θερμότητας αλλάζει σε αγωγή.

Η ακτινοβολία που πηγάζει από τον καυστήρα και από όλα τα θερμά μεταλλικά μέρη του φούρνου, "ταξιδεύει" με ευθύγραμμη πορεία. Αρκετή από αυτή ποτέ δεν προσεγγίζει το προϊόν γιατί εμποδίζεται και διακόπτεται η πορεία της από υλικά και ουσίες που παρεμβάλλονται και δεν είναι διαπερατά σε αυτήν την μορφή ενέργειας. Η ακτινοβολία έχει δύο χαρακτηριστικά διαφορετικά από τις άλλες μορφές μεταφοράς. Πρώτον, μειονεκτεί στο ότι είναι πιθανόν να εμποδιστεί ή να ανακλαστεί από επίπεδα που μεσολαμβάνουν και δεν είναι διαπερατά στην ακτινοβολία. Δεύτερον, ανταποκρίνεται σε αλλαγές της ικανότητας απορρόφησης της ζύμης. Για παράδειγμα, αλλαγές στο χρώμα επηρεάζουν την πρόοδο του ψησίματος λόγω αύξησης της απορρόφησης υπέρυθρων ακτινών. Το γεγονός αυτό, παρόλο που δεν είναι οπτικά εμφανές, έχει ως επακόλουθο ορατές αλλαγές. Το αποτέλεσμα είναι να υπάρχει μια τάση για επιτάχυνση χρωματικών μεταβολών μετά τα πρώτα σημάδια κασάνωσης. Η τάση αυτή μπορεί να χαρακτηρισθεί θετική ή μη, ανάλογα με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος. Η ακτινοβολία έχει αποδειχθεί ο κύριος τρόπος μεταφοράς θερμότητας στο ψήσιμο ψωμιού για sandwich π.χ. , ενώ η αγωγή ο κύριος τρόπος για το ψήσιμο Ινδικού επίπεδου ψωμιού. Σύμφωνα με διάφορες μελέτες [P.J. Jones et al. (2007), V. Yakhot et al. (2007), D.C. Wilcox (1998), S.V. Patankar et al. (1972)], η αύξηση της ταχύτητας του αέρα μέσα στον φούρνο προκαλεί αύξηση του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας του προϊόντος. Επιπρόσθετα, μια αλλαγή στην σύσταση του αέρα του φούρνου κατά τη διάρκεια του ψησίματος, επίσης επηρεάζει τον ρυθμό μεταφοράς θερμότητας. Όταν ο φούρνος γεμίσει με αέρια που απορροφούν την ακτινοβολία, όπως οι υδρατμοί και το διοξείδιο του άνθρακα, η μέση θερμοκρασία εκτιμήθηκε αυξημένη κατά 5°C. Η επίδραση της μετανάστευσης του νερού και των υδρατμών δεν έχουν εκτεταμένα μελετηθεί και ληφθεί υπόψη στην μεταφορά θερμότητας στον φούρνο, σε αντίστοιχες μελέτες.

Μετά το πέρας του ψησίματος, τα περισσότερα αρτοσκευάσματα απαιτούν μια περίοδο ψύξης πριν συνεχιστεί η επεξεργασία τους και το τύλιγμά τους σε συσκευασίες (είναι απαραίτητη η ψύξη του προϊόντος πριν συσκευασθεί, διότι οι υδρατμοί θα συμπυκνωθούν πάνω στην συσκευασία και έπειτα το προϊόν θα είναι ευάλωτο από αναπτυσσόμενες μούχλες). Όπως σε όλες τις διαδικασίες μεταφοράς θερμότητας, ο ρυθμός με τον οποίο τα προϊόντα ψύχονται εξαρτάται από τις διαστάσεις τους και τη διαφορά

θερμοκρασίας μεταξύ της ατμόσφαιρας και του προϊόντος. Η μεταφορά θερμότητας στο γύρω περιβάλλον περιλαμβάνει κυρίως συναγωγή και ακτινοβολία. Η θερμότητα επίσης χάνεται μέσω της εξάτμισης της υγρασίας αλλά συνήθως τέτοιες απώλειες είναι ελαχιστοποιημένες. Κατά βάση η ψύξη γίνεται χωρίς ψυγεία και στηρίζεται στην ροή κρύου αέρα πάνω στο προϊόν. Η κίνηση του αέρα θα αυξήσει τις απώλειες από την εξάτμιση αν η σχετική υγρασία του αέρα είναι χαμηλότερη από του προϊόντος. Μεγάλες παραγωγικές μονάδες χρησιμοποιούν συχνά ψυγεία με ροή υγρού αέρα για να επιταχύνουν την διαδικασία και να ελαχιστοποιήσουν τις απώλειες υγρασίας (Wiggins, 1998).

## 2.Β.β.ii) Μηχανισμοί μεταφοράς μάζας

Σύμφωνα με τους Weibiao Zhou and Nantawan Therdthai (2007), η διάχυση μαζί με την εξάτμιση και την συμπύκνωση θεωρούνται οι μηχανισμοί μεταφοράς μάζας μέσα στην ζύμη. Η μεταφορά του νερού καθορίζεται από την περιεκτικότητά του. Όσο διαρκεί η διόγκωση της ζύμης η περιεκτικότητα του νερού κυρίως στο κέντρο του τεμαχίου μειώνεται, όπως είναι λογικό. Ωστόσο, η συνολική περιεκτικότητα του νερού στα αρτοσκευάσματα θα πρέπει να παραμένει σταθερή καθώς η ζύμη τους δεν αποτελείται από συνεχές πορώδες σύστημα. Όταν όμως θερμανθεί αρκετά, συμβαίνουν κάποιες δομικές αλλαγές, που ως αποτέλεσμα έχουν οι πόροι να γίνουν συνεχείς και να επιτρέπουν στο νερό να κινείται ελεύθερα. Με σκοπό να μειωθεί η μερική πίεση ατμών λόγω θέρμανσης, το νερό κινείται προς το κέντρο και προς την επιφάνεια του τεμαχίου με συμπύκνωση και με εξάτμιση. Ως επακόλουθο, η αύξηση της θερμοκρασίας της ψίχας (του εσωτερικού μαλακού μέρους του αρτοσκευάσματος) επιταχύνεται. Στην επιφάνεια που εκτίθεται στον αέρα του φούρνου του οποίου η μερική πίεση ατμών είναι πολύ μακριά από τον κορεσμό, οι υδρατμοί διαχέονται μέσα στον αέρα. Έτσι, η επιφάνεια αρχίζει να στεγνώνει. Σε αυτό το στάδιο παρατηρείται μια διαφοροποίηση στην δομή του προϊόντος: η ψίχα είναι ένας υγρός πυρήνας που περιέχει όση υγρασία και η ζύμη, ενώ η κόρα αποτελεί ένα ξηρό μέρος το οποίο όσο περισσότερο διαρκεί το ψήσιμο τόσο πιο παχύ είναι. Η κίνηση της υγρασίας στην ψίχα και την κόρα μπορεί να περιγραφεί από τον νόμο του Fick:

*Εάν εφαρμόσουμε ένα ισοζύγιο μάζας σε έναν κύβο διαφορικού όγκου  $dx dy dz$ , στον οποίο η μάζα εισέρχεται και εξέρχεται μόνο με διάχυση και ο συντελεστής διάχυσης είναι σταθερός, τότε η μεταβολή της συγκέντρωσης σε ένα σημείο ως συνάρτηση του χρόνου και της θέσης του σημείου δίνεται από την εξίσωση:*

$$\frac{\partial c_A}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 c_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c_A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c_A}{\partial z^2} \right)$$

Όπου  $c_A$  η συγκέντρωση της ουσίας που διαχέεται,  $D$  ο συντελεστής διάχυσης,  $t$  ο χρόνος,  $x, y, z$  οι συντεταγμένες του σημείου. (Σ. Γιαννιώτης, 2000).

Οι Audidier και Battail (1968), δήλωσαν ότι η αρχική αύξηση της θερμοκρασίας σε ένα μπισκότο ήταν ταχύτερη σε έναν φούρνο με υγρή ατμόσφαιρα από ότι σε έναν ξηρό φούρνο. Η υψηλότερη υγρασία στο πρώτο μέρος του τούνελ του φούρνου μπορεί να αυξήσει τον βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας των μπισκότων, είτε μειώνοντας τον βαθμό της εξάτμισης του νερού από το προϊόν, είτε συμπυκνώνοντας την υγρασία πάνω στο κρύο μπισκότο. Αυτή η συμπύκνωση συγκρατεί την λανθάνουσα θερμότητα στην επιφάνεια. Το ποσό της υγρασίας στην ατμόσφαιρα του φούρνου στα πρώτα στάδια του ψησίματος

(συνήθως στο ένα τρίτο του μήκους του φούρνου) προκαλεί σημαντικές αλλαγές σε μερικούς τύπους μπισκότων. Γενικά, η αντικειμενική μέτρηση της υγρασίας της ατμόσφαιρας ενός φούρνου παρουσιάζει δυσκολίες, όπως αναφέρεται από τον Peter Wade(1989).

## 2.Β.γ) ΑΛΛΑΓΕΣ ΣΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΑΡΤΟΣΚΕΥΑΣΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑ ΤΟ ΨΗΣΙΜΟ

### 2.Β.γ.i) Διόγκωση

Το φαινόμενο της διόγκωσης, όπως περιγράφεται από τους Stanley P. Cauvain and Linda S. Young (2006), σε προϊόντα που περιέχουν ζύμες (μαγιά), όπως το ψωμί, έχει ήδη ξεκινήσει πριν από το ψήσιμο. Το τελικό στάδιο της συμβαίνει όταν εισέλθουν τα προϊόντα στον φούρνο, και προκαλείται από το διοξείδιο του άνθρακα που παράγεται από της ζύμες, από την διαστολή του αέρα και από την μετατροπή του νερού σε ατμό. Οι ζύμες καταστρέφονται σε θερμοκρασίες πάνω από 55°C.

Στα προϊόντα όπου χρησιμοποιούνται χημικά σκευάσματα για την διόγκωση, κατά το ψήσιμο συμβαίνουν οι της διεργασίες, μόνο που το διοξείδιο του άνθρακα παράγεται χημικά, από το baking powder. Ο ρυθμός και η θερμοκρασία στην οποία παράγεται το CO<sub>2</sub> εξαρτάται από τα συστατικά που έχουν επιλεγεί για την σύνθεση του baking powder. Συνηθίζεται στην Μεγάλη Βρετανία η χρήση της μίγματος διογκωτικών, γιατί πιστεύεται ότι διαφορετικοί παράγοντες ενεργούν σε διαφορετικά στάδια του ψησίματος.

Τα μπισκότα της, που είναι φτιαγμένα από σκληρό ζυμάρι (κράκερ και ημίγλυκα μπισκότα), τείνουν να γίνουν ελαφρώς μικρότερα από ότι τα καλούπια και όχι να διογκωθούν κατά το ψήσιμο. Αυτό οφείλεται της ελαστικές ιδιότητες αυτού του τύπου ζύμης και το ποσοστό της συρρίκνωσης ποικίλει ανάλογα με την έκταση του φύλλου την στιγμή που κόβεται σε κομμάτια. Τα μπισκότα από μαλακή και λιπαρή ζύμη είναι αυτά που διογκώνονται και είναι μεγαλύτερα από τα καλούπια που τα σχηματοποιούν, καθώς αυτοί οι τύποι ζύμης τείνουν να απλώνουν στα πρώτα στάδια του ψησίματος.

### 2.Β.γ.ii) Στερεοποίηση

Όπως αναφέρουν οι Weibiao Zhou and Nantawan Therdthai (2007), η μεταμόρφωση της ζύμης σε έτοιμο προϊόν αρτοποιίας περιλαμβάνει κρίσιμα στάδια προκαλούμενα από την ζελατινοποίηση του αμύλου και την μετατροπή του gel σε coagel. Οι πιο εντυπωσιακές αλλαγές είναι το άνοιγμα των κελιών αέρα τύπου αφρού, προς σχηματισμό πόρων και η στερεοποίηση του υδατικού μέσου. Η στερεοποίηση οφείλεται κατά ένα μέρος της στην ζελατινοποίηση και κατά το άλλο μέρος της στην απώλεια συνεκτικότητας κατά την μετατροπή του gel γλουτένης σε coagel.

### Ζελατινοποίηση αμύλου

Το μόριο αμύλου συντίθεται από αμυλόζη και αμυλοπηκτίνη, που μαζί σχηματίζουν μια κρυσταλλική μορφή μορίου. Ο χώρος μεταξύ των κρυστάλλων ονομάζεται άμορφη στοιβάδα. Με την παρουσία νερού, όταν τα μόρια θερμαίνονται μέχρι το σημείο όπου το νερό έχει αρκετή ενέργεια για να σπάσει τον δεσμό στην άμορφη στοιβάδα, η ζελατινοποίηση ξεκινά. Σύμφωνα με ένα πείραμα Πυρηνικού Μαγνητικού Συντονισμού (NMR) σε διαδικασία ψησίματος, η ζελατινοποίηση ξεκινά στους 55°C και ολοκληρώνεται στους 85°C όπου η εξάτμιση στην επιφάνεια κυριαρχεί. Μια σειρά διεργασιών σε κλίμακα μορίου περιλαμβάνει διόγκωση, τήξη, ρήξη των μορίων αμύλου. Ως συνέπεια της ζελατινοποίησης είναι ότι τα μερικώς διογκωμένα μόρια μπορούν να εκταθούν προς πιο επιμηκυμένες μορφές ώστε να επιτρέψουν στα κελιά αέρα να διευρυνθούν. Έτσι, συμπεραίνεται ότι η υφή και η δομή του προϊόντος εξαρτάται από την ζελατινοποίηση του αμύλου. Η έκταση της ζελατινοποίησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης ψησίματος. Εκτός από τις συνθήκες ψησίματος, η προσθήκη κάποιων συστατικών μπορεί να επηρεάσει επίσης, την ζελατινοποίηση. Οι γαλακτωματοποιητές, για παράδειγμα, καθυστερούν αυτήν την διαδικασία και ως αποτέλεσμα, η χρονική διάρκεια της αύξησης του όγκου επιμηκύνεται ή η αύξηση του ιξώδους καθυστερεί. Άρα, οι προστιθέμενοι γαλακτωματοποιητές αναμένεται να βελτιώσουν το αποτέλεσμα του ψησίματος.

### Μετουσίωση πρωτεϊνών

Σε προϊόντα που χρησιμοποιείται κυρίως σιτάλευρο, όπως ψωμί, crackers, cookies κ.ά., η ζύμη προετοιμάζεται μέσω του σχηματισμού ενός πλέγματος γλουτένης σιταριού. Όταν η ζύμη υπόκειται σε υψηλές θερμοκρασίες κατά το ψήσιμο, παρουσιάζονται κάποιες αλλαγές στις ιξωδοελαστικές της ιδιότητες, εξαρτώμενες από τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά της γλουτένης σιταριού. Η επίδραση της θερμότητας προκαλεί την μεταβολή από gel γλουτένης σε coagel. Η αλλαγή της φάσης της γλουτένης ενδυναμώνει επίσης την επίδραση της ζελατινοποίησης του αμύλου, όπως με την μετατροπή της ιξώδους ζύμης σε ελαστικό υλικό. Αφού η πρωτεΐνη μετουσιωθεί με το ψήσιμο, το νερό που έχει απορροφηθεί στη γλουτένη απελευθερώνεται. Έπειτα το άμυλο χρησιμοποιεί αυτό το νερό για ζελατινοποίηση. Συνεπακόλουθα, η ζύμη γίνεται ένα ημιάκαμπτο υλικό. Πριν το ψήσιμο, το νερό της ζύμης εκτιμάται να είναι συνδεδεμένο με το άμυλο κατά 46%, με τις πρωτεΐνες κατά 31% και την πεντοζάνη κατά 23%. Αμέσως μετά το τέλος του ψησίματος, το ζελατινοποιημένο μόριο αμύλου βρίσκεται στην άμορφη φάση. Όταν το προϊόν κρυσώσει, το νερό αναδιανέμεται καθώς περισσότερο άμυλο επιστρέφει στην κρυσταλλική μορφή. Πιο πολύ νερό απελευθερώνεται από τη γλουτένη ώστε να συμμετάσχει στην κρυσταλλική δομή του αμύλου. Συνέπεια αυτών των διαδικασιών είναι η εξέλιξη του μπαγιατέματος. Αυτήν την στιγμή, θεωρείται ότι με τις πρωτεΐνες δεν συνδέεται καθόλου νερό. Ωστόσο, κάποια ποσότητα νερού είναι ακόμη συνδεδεμένη με την πεντοζάνη χάρη στην υψηλή της υγροσκοπική ικανότητα.

### 2.Β.γ.iii) Εξέλιξη του χρώματος

Σύμφωνα με τους Weibiao Zhou and Nantawan Therdthai (2007), το χρώμα είναι ένα από τα πιο ουσιαστικά χαρακτηριστικά των ψημένων προϊόντων, συνεισφέροντας και στις προτιμήσεις των καταναλωτών. Στην εξωτερική επιφάνεια των αρτοσκευασμάτων, η υψηλότερη θερμοκρασία και η χαμηλότερη περιεκτικότητα σε νερό, ενεργοποιούν την μη ενζυματική αντίδραση αμαύρωσης συμπεριλαμβανομένων των αντιδράσεων Maillard και της καραμελοποίησης. Με το ξεκίνημα της αντίδρασης Maillard, σχηματίζεται το αμινοξύ φουροζίνη (furosine). Ωστόσο, η φουροζίνη μειώνεται όταν φτάσει σε μεγάλη ένταση. Αντιθέτως, η υδροξυμεθυλφουρφουράλη, ένα ενδιάμεσο προϊόν στην αντίδραση Maillard και την υποβάθμιση των σακχάρων, όλο και αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και της διάρκειας ψήσιματος. Το παραγόμενο καστανόχρωμο πολυμερές ονομάζεται μελανοϊδίνη. Ο ρυθμός καστανώσης εξαρτάται από την ενεργότητα νερού και την θερμοκρασία. Η ενεργότητα νερού που παράγει τον υψηλότερο ρυθμό καστανώσης είναι μέσα στο εύρος του 0,4 – 0,6 εξαρτώμενη από τον τύπο των συστατικών του τροφίμου. Σε θερμοκρασίες χαμηλότερες των 60°C, η καστανώση παρουσιάζεται ως μηδενικής τάξης αντίδραση. Όταν η θερμοκρασία είναι υψηλότερη, η καμπύλη της αντίδρασης ακολουθεί αυτήν της πρώτης τάξης. Χάρη στην πολύ σύντομη περίοδο κατά την οποία η θερμοκρασία της επιφάνειας βρίσκεται κάτω από 60°C, η συνολική αντίδραση θεωρείται ότι ακολουθεί τις κινητικές πρώτης τάξης. Η κινητική σταθερά της αυξάνεται αυξανόμενης της θερμοκρασίας και μειούμενης της περιεκτικότητας σε νερό ακολουθώντας την εξίσωση Arrhenius. Στην επεξεργασία των προϊόντων αρτοποιίας, η αντίδραση καστανώσης συνήθως συμβαίνει σε θερμοκρασίες πάνω από 110°C.

Η ένταση του χρώματος της επιφάνειας μπορεί να μετρηθεί με αισθητήρες υπερύθρων ή με την κλίμακα Hunterlab και άλλες μεθόδους. Ωστόσο, κάποιες μελέτες υποστηρίζουν ότι η μέτρηση της έντασης χρώματος είναι λιγότερο ευαίσθητη από ότι η μέτρηση του ενδιάμεσου συστατικού, της υδροξυμεθυλφουρφουράλης.

### 2.Β.γ.iv) Ανάπτυξη αρώματος και γεύσης

Όπως αναλυτικά περιγράφουν οι Weibiao Zhou and Nantawan Therdthai (2007), το άρωμα και η γεύση είναι ένα άλλο ποιοτικό χαρακτηριστικό που αναπτύσσεται κατά το ψήσιμο με την μορφή των n-ετεροκυκλινών μέσω των αντιδράσεων Maillard. Η 2-ακετυλ-1-πυρολίνη και η 2-ακετυλτετραυδροπυριδίνη είναι τα κύρια συστατικά αρώματος που παράγονται στην επιφάνεια των προϊόντων αρτοποιίας όπου χρησιμοποιείται σιτάλευρο. Πέρα από αυτά τα βασικά στις, σημαντικά συστατικά γεύσης και αρώματος σχηματίζονται από το ψήσιμο των άλλων συστατικών που έχουν προστεθεί για αυτόν τον σκοπό στα προϊόντα. Ειδικά στα μπισκότα, τα cookies, τα τσουρέκια αλλά και σε ιδιαίτερα ψωμιά, προστίθενται μίγματα συστατικών για διαφοροποίηση στη γεύση και το άρωμα. Στις μαχλέπι, σταφίδες, γλυκάνισος, μέλι, σοκολάτα και ποικίλα άλλα συστατικά που κάνουν τα προϊόντα αυτά ιδιαίτερα και στόχο έχουν την προτίμηση των καταναλωτών.

Κατά τη διάρκεια του ψήσιματος, οι αρωματικές ουσίες που σχηματίζονται εγκλωβίζονται μέσα στις κοιλότητες των πόρων. Η σκληρότερη επιφάνεια των αρτοσκευασμάτων λειτουργεί και ως φράγμα ενάντια στην απώλεια των αρωμάτων.

## 2.β.γ.ν) Απώλεια υγρασίας

Σύμφωνα με τους Stanley P. Cauvain and Linda S. Young (2000), σχεδόν όλη η απώλεια υγρασίας στα προϊόντα αρτοποιίας πραγματοποιείται κατά τη διαδικασία ψήσιματος εξαιτίας της εξάτμισης. Διαφορές στην απώλεια υγρασίας προκύπτουν λόγω της φύσης της κάθε ζύμης και των συνθηκών ψήσιματος. Όπως σημειώθηκε και προηγουμένως, λόγω της επίδρασης της θερμότητας κατά το ψήσιμο, η δομή της ζύμης μεταβάλλεται προς ένα συνεχές πορώδες σύστημα ώστε να επιτρέπει στο νερό να κινείται. Κάποιοι υδρατμοί χάνονται μέσω της κόρας με εξάτμιση, ενώ κάποιοι άλλοι συμπυκνώνονται στο κέντρο της ζύμης. Συνεπώς, η περιεκτικότητα σε υγρασία και η ενεργότητα νερού μεταβάλλονται και σχηματίζονται διαβαθμίσεις υγρασίας ακόμη και μέσα στο πάχος ενός λεπτού μπισκότου. Η διαφοροποίηση της υγρασίας μπορεί να έχει επίδραση στους μηχανισμούς μπαγιατέματος (για τα αρτοσκευάσματα εννοούμε την διαδικασία που στεγνώνουν και σκληραίνουν). Για παράδειγμα, μπορεί να επηρεάσει την δραστηριότητα των σταθερών-στη-θερμότητα αμυλολυτικών ενζύμων κατά του μπαγιατέματος, επειδή η αμυλολυτική δραστηριότητα αυξάνεται όταν είναι αυξημένη η υγρασία της ζύμης.

Όπως αναφέρουν οι Stanley P. Cauvain and Linda S. Young (2006), καθώς το νερό μετακινείται από το πιο υγρό κέντρο προς την πιο ξηρή επιφάνεια, οι συστολές – διαστολές που επισυμβαίνουν προκαλούν ρωγμές οι οποίες ακολούθως δημιουργούν μια πιο αδύναμη δομή προϊόντος. Αυτό το πρόβλημα αναφέρεται ως “checking” και σε πολλές περιπτώσεις το μπισκότο σπάει σε δύο κομμάτια (Cauvain and Young, 2001). Η απώλεια νερού μπορεί να ελεγχθεί από τον ρυθμό διάχυσής του από το κέντρο προς την επιφάνεια. Κάποιοι παραγωγοί έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούν και ραδιοκύματα για να ελαττώσουν κι άλλο την υγρασία ώστε να αυξήσουν την διάρκεια ζωής του προϊόντος και ακόμη και αν απορροφήσουν υγρασία κατά την αποθήκευση, να μην μαλακώνουν.

Η τελική περιεκτικότητα σε υγρασία είναι συνήθως 5-10%. Σύμφωνα με τα μοντέλα που βασίζονται στην εξάτμιση του νερού και την διάχυση, η περιεκτικότητα σε νερό της ψίχας μετά το ψήσιμο παραμένει ίδια με την αρχική περιεκτικότητα της ζύμης, ενώ της κόρας τείνει προς το μηδέν. Άρα, η συνολική απώλεια υγρασίας οφείλεται βασικά από την απώλεια στην επιφάνεια, όπως επισημαίνεται από τον W. P. Edwards (2007).

## 2.Γ) ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

### Φούρνοι ψησίματος αρτοσκευασμάτων

Στην δημοσίευση του Peter Wade (1989), αναφέρεται πως για χιλιάδες χρόνια, οι φούρνοι είχαν απλούς κυψελοειδείς θαλάμους κατασκευασμένους από βράχους ή τούβλα που θερμαίνονταν από άναμμα φωτιάς μέσα στον θάλαμο ψησίματος. Όταν όλος ο θάλαμος κρίνονταν ότι είναι επαρκώς θερμός, η φωτιά και η στάχτη σκαλίζονταν και το ζυμάρι ψηνόταν τοποθετημένο στο δάπεδο του φούρνου. Η διανομή της θερμότητας ήταν ακανόνιστη και η μόνη μέθοδος ελέγχου του ψησίματος ήταν η ποικιλία των χρόνων ψησίματος. Με την απόκτηση εμπειρίας ο παρασκευαστής μάθαινε τον καλύτερο συνδυασμό τοποθέτησης και χρόνου που απαιτούνταν για την παραγωγή ενός ικανοποιητικού προϊόντος. Ωστόσο, σε μοντέρνους φούρνους μπισκότων οι οποίοι αποτελούνται από τούνελ θέρμανσης μέσα από τους οποίους περνάνε τα προϊόντα με ατέρμονους μεταφορείς, ο χρόνος ψησίματος δεν ελέγχεται καθώς η ταχύτητα ολοκλήρωσης της παραγωγής προσαρμόζεται στην διαδικασία ψησίματος.

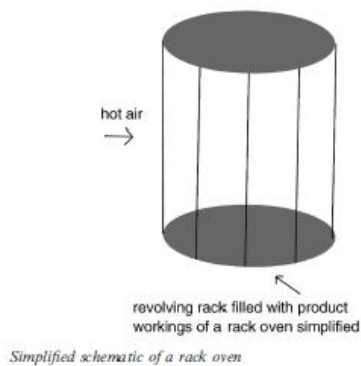
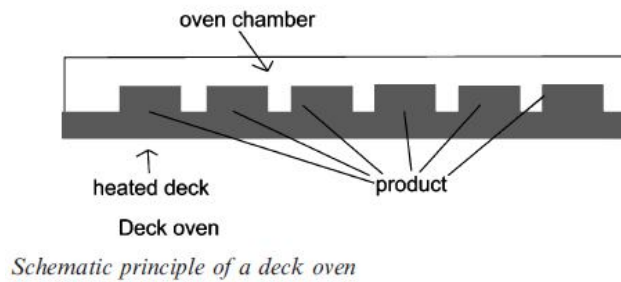
#### 2.Γ.α) ΤΥΠΟΙ ΦΟΥΡΝΩΝ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥΣ

Σύμφωνα με τους P.S. Mirade et al. (2004), κατά τη διάρκεια του ψησίματος, η μεταφορά ενέργειας με την μορφή της θερμότητας μεταφέρεται προς την επιφάνεια του προϊόντος κυρίως μέσω της ακτινοβολίας από τα τοιχώματα του φούρνου, μέσω συναγωγής από τον θερμό αέρα που ρέει στο εσωτερικό του φούρνου και μέσω αγωγής από την επιφάνεια προς την ψίχα του προϊόντος. Για το ψήσιμο των μπισκότων, συγκεκριμένα, σε φούρνους με μεταφορική ταινία, σημειώθηκε από τον Standing (1974) ότι και οι τρεις μορφές μεταφοράς θερμότητας εμπλέκονταν, και από το σύνολο της μεταφοράς θερμότητας το 43% γινόταν μέσω ακτινοβολίας, το 37% μέσω συναγωγής και το 20% μέσω αγωγής από την ταινία προς την κάτω επιφάνεια των μπισκότων.

Το βιομηχανικό ψήσιμο αρτοσκευασμάτων συνήθως πραγματοποιείται σε φούρνους τούνελ με διάφορα μήκη (από λίγα μέτρα έως 100m) και πλάτη (περίπου 1m). Όπως αναφέρθηκε από τους Baik, Marcotte and Castaigne (2000), αυτός ο τύπος φούρνου δίνει στον χρήστη μεγαλύτερη ευελιξία να προσαρμόσει τις συνθήκες ψησίματος με στόχο την βέλτιστη ποιότητα των προϊόντων, ενώ παράλληλα μειώνει την κατανάλωση ενέργειας και αυξάνει την παραγωγή συγκριτικά με άλλους φούρνους τύπου batch.

Όπως περιγράφεται αναλυτικά στο βιβλίο του Da-Wen Sun (2007), από τους Weibiao Zhou and Nantawan Therdthai, τα μπισκότα μπορούν να ψηθούν σε οποιοδήποτε τύπο φούρνου. Σε τύπου deck, σε τύπου rack αλλά συνήθως ψήνονται σε τύπου travelling. Οι τελευταίοι είναι οι επονομαζόμενοι φούρνοι tunnel. Αυτοί αρμόζουν περισσότερο σε μεγάλες μονάδες παραγωγής μπισκότων και η κύρια λειτουργία τους βασίζεται στο ότι ο φούρνος μπορεί να χωριστεί νοητά σε διαφορετικές ζώνες όπου εφαρμόζονται διαφορετικές θερμοκρασίες. Συγκεκριμένα για το ψήσιμο των μπισκότων είναι προτιμότερο να χωρίζεται ο φούρνος σε τρεις διαφορετικές ζώνες ψησίματος όπου η πρώτη να έχει πιο χαμηλή θερμοκρασία από τη δεύτερη ώστε να αποφευχθεί η δημιουργία πολύ σκληρής επιφάνειας πολύ σύντομα και να μην προλάβει το νερό να μετακινηθεί προς τα έξω. Η τρίτη

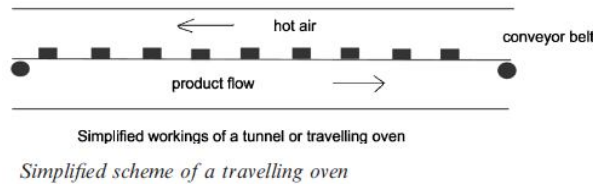
ζώνη είναι η λιγότερο ζεστή όπου γίνεται το τελικό στάδιο ψησίματος και το προϊόν λαμβάνει τα τελικά ποιοτικά του χαρακτηριστικά.



Εικόνα 1: Πάνω φούρνος τύπου deck, κάτω φούρνος τύπου rack.

Υπάρχουν δύο κύρια είδη φούρνου τούνελ: οι άμεσης θέρμανσης όπου η θερμότητα παράγεται μέσα στον θάλαμο του φούρνου χρησιμοποιώντας καυστήρες αερίου ή στοιχεία ηλεκτρικής θέρμανσης τοποθετημένα πάνω και κάτω από την μεταφορική ταινία, και οι έμμεσης θέρμανσης στους οποίους οι καυστήρες και ο θάλαμος ψησίματος είναι διαχωρισμένα με τοιχώματα από χάλυβα.





Εικόνα 2: Σχήμα φούρνου τύπου τούνελ.

### Συνθήκες του φούρνου

Σύμφωνα με τον Peter Wade (1989), εξαιτίας των δυσκολιών μετρήσεως στο εσωτερικό ενός φούρνου μπισκότων, οι συνθήκες ψησίματος για διαφορετικούς τύπους μπισκότων δεν είναι ακόμη πλήρως καθορισμένες. Τα μπισκότα ψήνονται ικανοποιητικά σε στατικούς φούρνους με τον χρόνο να είναι ο μόνος άμεσα ελεγχόμενος παράγοντας. Οι συνθήκες κατά μήκος του φούρνου με τούνελ μπορούν να θεωρηθούν ομοιόμορφες και καθορίστηκαν έπειτα από δοκιμές για να παραλάβουμε τα επιθυμητά προϊόντα. Γενικά η πιο υψηλή θερμοκρασία (300-350°C) χρησιμοποιείται για κράκερ τα οποία περιέχουν λίγη ή καθόλου ζάχαρη, και μπορούν να ψηθούν πλήρως μέσα σε 2 min. Τα ημίγλυκα μπισκότα και τα κράκερ που περιέχουν ζάχαρη ψήνονται σε χαμηλότερη θερμοκρασία (περίπου 250°C) και τα μαλακά και λιπαρά ζυμάρια σε 200°C περίπου και ο χρόνος ψησίματος κυμαίνεται από 6-14 min.

## 2.Γ.β) ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΜΕΡΩΝ ΦΟΥΡΝΟΥ ΤΟΥΝΕΛ

### 2.Γ.β.ι) Γενικές αρχές σχεδιασμού φούρνου τούνελ έμμεσης καύσης

Όπως αναφέρεται από τον Peter Wade (1989), η πλειοψηφία των εμπορικών μπισκότων σήμερα ψήνονται με θέρμανση σε τούνελ τα οποία μπορούν να ψήνουν συνεχώς καθώς αποτελούνται από συνεχόμενους μεταφορείς οι οποίοι είναι είτε ταινίες χαλύβδινες είτε πλέγμα συρμάτινο. Αυτά τα τούνελ έχουν μήκος από 30m έως και 150m περίπου. Οι ταινίες των φούρνων έχουν πλάτος 1-1,2m, αν και μερικοί φούρνοι έχουν πλάτος μεγαλύτερο από 1,5m. Τα χαρακτηριστικά της κατασκευής ενός φούρνου μπισκότων φαίνονται στην παρακάτω εικόνα 3. Η ταινία μεταφοράς μεταφέρει το προϊόν μέσα από το θερμαινόμενο τούνελ και το προϊόν εισέρχεται ωμό και εξέρχεται εντελώς έτοιμο. Μόλις το ψήσιμο ολοκληρωθεί, το προϊόν μεταφέρεται σε έναν ψυχόμενο μεταφορέα (δεν φαίνεται στο σχήμα) και η μεταφορική ταινία περνάει γύρω από ένα τύμπανο και γυρίζει από κάτω από τον φούρνο σε ένα άλλο τύμπανο στο οποίο τροφοδοτείται το νέο προϊόν.



Εικόνα 3: Ενδεικτική εικόνα φούρνου τούνελ

Τα πλαϊνά τοιχώματα του θαλάμου του φούρνου είναι διπλά, μονωμένα στην εξωτερική τους επιφάνεια και στον κενό χώρο τους κυκλοφορεί το θερμό αέριο που παράγεται από τους καυστήρες. Το αέριο παρέχεται με μεγάλη πίεση μέσα στα διπλά τοιχώματα και ανακυκλώνεται κατευθυνόμενο πάλι στον καυστήρα για να θερμανθεί ξανά. Ο φούρνος χωρίζεται σε τρία τμήματα συνήθως. Μέσα στον θάλαμο ψησίματος δεν φαίνεται ο διαχωρισμός, όμως υπάρχει μέσα στον μανδύα με το αέριο, ώστε να είναι εφικτή η εφαρμογή διαφορετικών θερμοκρασιών στην κάθε ζώνη του φούρνου. Σε κάθε ζώνη αντιστοιχεί και ένας καυστήρας.

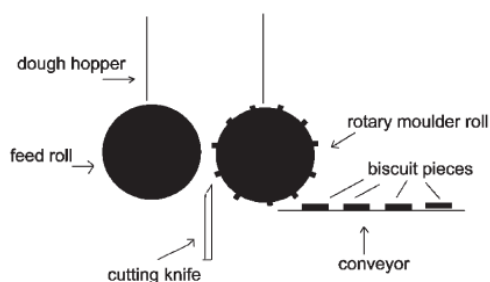
Οι φούρνοι μπορούν να θερμανθούν με αέριο, λάδι, κωκ, ξύλα ή ατμό. Αν ο φούρνος θερμαίνεται με ατμό, πρέπει να υπάρχει κάπου έξω από τον φούρνο ένα boiler να παράγει τον ατμό. Αυτό δεν θα πρέπει να συγχέεται με το ψήσιμο υπό ατμό, όπου ατμός εισέρχεται μέσα στον φούρνο για να προσδώσει μια πιο τραγανή κόρα.

Η υγρασία που παράγεται από τα προϊόντα κατά το ψήσιμο, αποβάλλεται διαμέσου εξατμιστήρων αγωγών. Από κάθε αγωγό με μια βαλβίδα εξάτμισης ελέγχεται το ποσοστό αποβολής αερίων. Για ιδανική εξάτμιση των αερίων (μη χρήσιμων) από κάθε εξατμιστήρα θα έπρεπε να αντισταθμιστεί αυτή με μια εισροή από θερμαινόμενο αέρα στο τμήμα του φούρνου. Με αυτόν τον τρόπο πλάγια μεταφορά της ατμόσφαιρας από το ένα τμήμα του φούρνου στο άλλο εμποδίζεται. Από τους εξατμιστήρες τα αέρια του φούρνου καθοδηγούνται σε καμινάδες από όπου αποβάλλονται και κάποια προϊόντα καύσης και υγρασία των καυσαερίων.

#### 2.Γ.β.ii) Σχηματοποίηση μπισκότων μαλακής ζύμης

Καθώς ο τύπος μπισκότων που μελετάται είναι μαλακής ζύμης, η σχηματοποίησή ενός γίνεται κυρίως με καλούπια σε τύμπανα. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται σε αυτήν την περίπτωση φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 4. Η ζύμη ωθείται με ένα αυλακωτό περιστρεφόμενο τύμπανο (αριστερό) σε καλούπια στο σχήμα των μπισκότων, τα οποία είναι χαραγμένα σε έναν δεύτερο περιστρεφόμενο κύλινδρο (δεξιός). Το πλεόνασμα ενός ζύμης απομακρύνεται με μια λεπίδα και επιστρέφει στην δεξαμενή ενός ζύμης. Τα μορφοποιημένα τεμάχια ενός ζύμης τοποθετούνται στην μεταφορική ταινία, που κινείται

με τη βοήθεια ενός τρίτου κυλίνδρου, και μεταφέρει τα μπισκότα μέσα στον φούρνο τούνελ.



Εικόνα 4: Φαίνεται η δεξαμενή της ζύμης, το τύμπανο που αποτελεί το καλούπι των μπισκότων και την χαλύβδινη μεταφορική ταινία πάνω στην οποία τοποθετούνται τα μορφοποιημένα μπισκότα. (πηγή: W. P. Edwards (2007))

### 2.Γ.β.iii) Μεταφορική ταινία

Για τα μπισκότα σκληρής ζύμης χρησιμοποιείται ταινία καλωδιακού πλέγματος είτε αραιή (Μεγάλη Βρετανία) είτε πυκνή (Η.Π.Α.). Ένα πλεονέκτημα της ταινίας από πλέγμα είναι η αργή απελευθέρωση των αερίων και του ατμού από την βάση του προϊόντος κατά τη διάρκεια του ψήσιματος. Ο σχηματισμός του πλέγματος έχει σημαντική επιρροή στην εμφάνιση και δομή της βάσης του προϊόντος.

Όλα τα μπισκότα μαλακής ζύμης (η κατηγορία που μελετάται στην εργασία αυτή) και κάποια ημίγλυκα μπισκότα, ψήνονται σε μη διακοπτόμενες ατσάλινες ταινίες (αυτός ο τύπος χρησιμοποιείται στην περίπτωση που μελετάται). Αυτές οι μπάντες είναι πάχους 2mm. Επιτρέπουν την ροή ή το άπλωμα των μαλακών και λιπαρών ζυμαριών κατά το ψήσιμο. Επίσης παράγουν μια λεπτή κρούστα στην βάση συγκρινόμενες με τις ταινίες πλέγματος και έτσι συνεισφέρουν σε μια μαλακότερη υφή στο τελικό προϊόν. Από την άλλη πλευρά, μπορούν να οδηγήσουν σε προβλήματα με την απελευθέρωση ατμού και αερίων από την βάση των μπισκότων, παράγοντας ανώμαλα ή κενά τμήματα. Πολλές προσπάθειες έχουν γίνει με μερική επιτυχία για να μειώσουν αυτό το πρόβλημα, κατασκευάζοντας ατσάλινες ταινίες με μικρές τρύπες διευκολύνοντας έτσι την απελευθέρωση των αερίων.



Εικόνα 5: Μεταφορική ταινία με ψημένα μπισκότα όπως εξέρχεται από τον φούρνο τούνελ.

Η ταινία όπως προαναφέρθηκε, κινείται μέσα στον φούρνο με τη βοήθεια ενός τυμπάνου στην είσοδο του φούρνου, όπου γίνεται η φόρτωση των ωμών μπισκότων, και ενός δεύτερου τυμπάνου στην έξοδο του φούρνου όπου τα ψημένα μπισκότα μεταφέρονται σε ένα ψυχόμενο μεταφορικό μέσο. Η ταινία μόλις εξέλθει από τον φούρνο, επιστρέφει κάτω από αυτόν και μπορεί να είναι ανοιχτή και να έχει θερμοκρασία περιβάλλοντος, κατά την οποία η ταινία χάνει πολύ από την θερμότητα που απέκτησε κατά τη διάρκεια του ψησίματος ή μπορεί να είναι κλειστή και μονωμένη, οπότε η ταινία γυρίζει με την ίδια θερμότητα. Στη δεύτερη αυτή περίπτωση η θερμή ταινία λειτουργεί ως μέρος του ψησίματος γι' αυτό πρόσθετη θερμότητα της παρέχεται από ένα ειδικό θερμαντικό ἴ έσο. Η περιγραφή της λειτουργίας της μεταφορικής ταινίας, αναφέρεται αναλυτικά από τον Peter Wade (1989).

## 2.Δ) CFD - ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

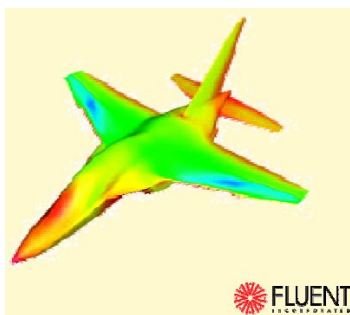
### 2.Δ.α) ΟΡΙΣΜΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (CFD), είναι η τεχνολογία πρόβλεψης της ροής, της μετάδοσης θερμότητας και άλλων σχετικών φαινομένων χρησιμοποιώντας Η/Υ, όπως χαρακτηριστικά αναφέρει ο Μαρκάτος Νικ., 1995. Το CFD είναι μια τεχνική *αριθμητικής επίλυσης* των μερικών διαφορικών εξισώσεων. Το κυριότερο χαρακτηριστικό αυτής της τεχνικής είναι η άμεση διακριτοποίηση των εξισώσεων που περιγράφουν το φαινόμενο. Το πεδίο που επιλύεται χωρίζεται σε έναν αριθμό κελιών, γνωστά ως όγκοι ελέγχου (Μαθιουλάκης, Καραθάνος, Μπελεσιώτης, 1998). Οι εξισώσεις που περιγράφουν την διατήρηση της μάζας, της ενέργειας και της ορμής καθώς το ρευστό ρέει, χρησιμοποιούνται για να λύσουν προβλήματα ρευστοδυναμικής (Scott & Richardson, 1997).

Όπως αναφέρεται από τους Lijun Wang and Da-Wen Sun (2003), η χρήση των αριθμητικών μεθόδων όπως οι πεπερασμένες διαφορές, τα πεπερασμένα στοιχεία και οι πεπερασμένοι όγκοι, στην περιγραφή των διεργασιών θέρμανσης/ψύξης στην βιομηχανία τροφίμων, έχει παράγει έναν πολύ μεγάλο αριθμό μοντέλων. Ωστόσο, η ακρίβεια των αριθμητικών μοντέλων μπορεί να βελτιωθεί ακόμη περισσότερο με τη βοήθεια περισσότερων πληροφοριών σχετικά με τους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας και μάζας στην επιφάνεια, τις ιδιότητες των τροφίμων, τις αλλαγές όγκου κατά τις διεργασίες και αναλύσεις ευαισθησίας. *Η αριθμητική μέθοδος που χρησιμοποιείται στο CFD είναι αυτή των πεπερασμένων όγκων ελέγχου (finite volume method)*, η οποία ανήκει στις ολοκληρωτικές μεθόδους αριθμητικής επίλυσης των μερικών διαφορικών εξισώσεων. Στις ολοκληρωτικές μεθόδους η διακριτοποιημένη εξίσωση, μέσω της οποίας προσδιορίζεται η αριθμητική λύση, προκύπτει από την ολοκλήρωση της εξίσωσης μεταφοράς πάνω σε κάποιο πεπερασμένο όγκο ελέγχου.

### 2.Δ.β) ΙΣΤΟΡΙΚΑ-ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Από τους Tomas Norton and Da-Wen Sun (2006), αναφέρεται ότι η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική ξεκίνησε να αναπτύσσεται από τους πρωτοπόρους Richardson (1910), Courant, Friedrichs and Lewy (1928) οι οποίοι στην προσπάθειά τους να εντρυφήσουν στην ροή των ρευστών, υποκίνησαν την ανάπτυξη ισχυρών αριθμητικών μεθόδων οι οποίες έχουν αναβαθμίσει την αριθμητική περιγραφή όλων των τύπων ροής ρευστών (Shang, 2004). Οι πρώτοι εμπορικοί κώδικες κυκλοφόρησαν στις αρχές της δεκαετίας του 1970. Στις αρχές του 1980 όμως έγινε διαθέσιμη η δυνατότητα εύκολης και αναλυτικής απεικόνισης πολύπλοκων γεωμετριών όπως αυτές που συναντώνται σε πρακτικά προβλήματα. Η εξέλιξη των υπολογιστών κατέστησε το CFD οικονομικό και πρακτικό σχεδιαστικό εργαλείο. Οι κλασικές εφαρμογές του CFD είναι η μελέτη της αεροδυναμικής αεροπλάνων, ελικοπτέρων και οχημάτων.



Οι Bin Xia, Da-Wen Sun (2002) αναφέρουν ότι, η υπολογιστική ρευστοδυναμική χρησιμοποιεί σύγχρονους υπολογιστές και εφαρμοσμένα μαθηματικά για την μοντελοποίηση των συνθηκών ροής των ρευστών. Η επιτυχία χρήσης της κρίνεται από το πόσο πολύ συμφωνούν τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης με τα πειραματικά αποτελέσματα, και από το πόσο καλά η προσομοίωση μπορεί να προβλέψει πολύπλοκα φαινόμενα που δεν μπορούν να απομονωθούν και να υπολογιστούν στο εργαστήριο (Sethian, 1993). Ως μια επιστήμη αναπτυσσόμενη, το CFD δέχεται την προσοχή ολόκληρης της επιστημονικής κοινότητας από την αρχή της χρήσης των υπολογιστών. Κατά συνέπεια, το CFD έχει γίνει πολύ χρήσιμο για πολλές εταιρείες, όσον αφορά στον βιομηχανικό σχεδιασμό και την ανάλυση διεργασιών, χάρη στην ικανότητά του να προβλέπει την λειτουργία νέων σχεδίων ή διεργασιών πριν αυτά πραγματοποιηθούν στην πράξη.

Ωστόσο, από τους Tomas Norton and Da-Wen Sun (2006), αναφέρεται ότι είναι πολύ πρόσφατη η εφαρμογή του CFD στην βιομηχανία τροφίμων. Ο καταναλωτής ήταν αυτός που πίεσε για την εφαρμογή σύγχρονων μεθόδων στην τεχνολογία σχεδιασμού και παραγωγής τροφίμων, με την τάση του για εύκολα στην επεξεργασία και χρήση, και υψηλής ποιότητας τρόφιμα. Το CFD στην βιομηχανία τροφίμων θα συμβάλλει στην καλύτερη κατανόηση των πολύπλοκων φυσικών μηχανισμών που κυριαρχούν στις θερμικές, φυσικές και ρεολογικές ιδιότητες των συστατικών των τροφίμων. Η σύνδεση μεταξύ του CFD και των διεργασιών σχετικών με την βιομηχανία τροφίμων και ποτών όπως η ανάμιξη, η ξήρανση, το ψήσιμο, η αποστείρωση, η ψύξη και η αποθήκευση υπό συνθήκες, είναι προφανής. Διεργασίες σαν αυτές εφαρμόζονται κανονικά για να βελτιώσουν την ασφάλεια, την ποιότητα και τη διάρκεια ζωής των τροφίμων (Wang & Sun, 2003). Με άμεσα οφέλη για τους καταναλωτές αλλά και για το φυσικό περιβάλλον, οι εφαρμογές του CFD έχουν αρχίσει να γίνονται πολύ διαδεδομένες στην βιομηχανία τροφίμων. Η έρευνα με CFD έχει δείξει ότι τα προϊόντα μπορούν να επεξεργαστούν και να αποθηκευτούν με πιο αποτελεσματικά συστήματα. Επιπλέον, το CFD μπορεί να βοηθήσει τις βιομηχανίες να ανταποκριθούν στις ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις της αγοράς, εμπλουτίζοντας και αναπτύσσοντας στρατηγικές επεξεργασίας, ενώ συγχρόνως προσπαθούν να διατηρήσουν υψηλά επίπεδα ποιότητας προϊόντων.

Έτσι, οι ερευνητές, οι σχεδιαστές εξοπλισμού και οι μηχανικοί διεργασιών ολοένα και περισσότερο ασχολούνται με το CFD ώστε να αναλύσουν την ροή και την λειτουργία του μηχανολογικού εξοπλισμού όπως π.χ. στους φούρνους, σε χώρους ψύξης, σε δοχεία ανάδευσης, ξηραντήρες καταιονισμού και εναλλάκτες θερμότητας. Στον σχεδιασμό και την ανάπτυξη, τα προγράμματα CFD, σήμερα θεωρούνται αξιόλογα εργαλεία αριθμητικής

μοντελοποίησης που προβλέπουν εκτός από την συμπεριφορά στην ροή των ρευστών, την μεταφορά θερμότητας, της μάζας, τις αλλαγές φάσης, τις χημικές αντιδράσεις, την μηχανική κίνηση και την αποδόμηση συσχετιζόμενων στερεών.

Επιπλέον, το CFD, εκτός από την εφαρμογή του στις διεργασίες τροφίμων, έχει εφαρμοστεί στην λύση προβλημάτων σχετικών με το περιβάλλον, την αρχιτεκτονική, την ιατρική και εφαρμογές άλλων βιομηχανιών εκτός των τροφίμων, όπως αναφέρουν οι Bin Xia, Da-Wen Sun (2002). Μερικές από αυτές είναι:

- Βιομηχανικές εφαρμογές: αεροναυπηγική, αυτοκίνηση, ηλεκτρονικά και υπολογιστές, παρασκευή γυαλιού, μεταλλουργία, πυρηνική, μηχανική turbo, κατασκευή τραίνων
- Εφαρμογές περιβάλλοντος: ατμοσφαιρική μόλυνση, πυρκαγιά σε κτήρια, ρεύματα ωκεανών, μόλυνση φυσικών υδάτων
- Ιατρικές εφαρμογές: ροή στο καρδιακό-αρτηριακό σύστημα, ροή στους πνεύμονες και τις αναπνευστικές οδούς.

#### 2.Δ.γ) FLUENT: ΕΜΠΟΡΙΚΟΣ ΚΩΔΙΚΑΣ CFD ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΕ

Η Fluent είναι μία από τις μεγαλύτερες εταιρίες που παρέχει εμπορικό λογισμικό CFD. Υπάρχουν πολλοί ερευνητές που χρησιμοποιούν το λογισμικό του Fluent, για παράδειγμα ο Rousseaux (2001), που το εφήρμοσε στην προσομοίωση της μηχανής ανάμιξης. Επίσης το Fluent χρησιμοποιείται για την βελτιστοποίηση των συνθηκών ροής του αέρα κατά τη διάρκεια της ψύξης και της αποθήκευσης των σφάγιων και των προϊόντων κρέατος. Το εμπορικό αυτό λογισμικό, βασίζεται στην επίλυση των εξισώσεων με την μέθοδο των πεπερασμένων όγκων. Το πεδίο χωρίζεται σε πεπερασμένο αριθμό όγκων ελέγχου ή στοιχείων/κελιών. *Η γενική εξίσωση μεταφοράς (διατήρησης) για την μάζα, ορμή, ενέργεια κλπ, διακρίνεται πάνω στο πλέγμα και παίρνει την μορφή συστήματος αλγεβρικών εξισώσεων όπου όλες οι εξισώσεις επιλύονται για την εύρεση λύσης.* Οι τελευταίες εκδόσεις του προσφέρουν εύχρηστο περιβάλλον και δυνατότητα ορισμού συναρτήσεων από τον ίδιο τον χρήστη (udf). Ως πρώτο βήμα στη δόμηση και την ανάλυση ενός μοντέλου ροής, προεργασία πραγματοποιείται σε ένα άλλο εργαλείο του Fluent, το Gambit. Το Fluent παρέχει μια μεγάλη ποικιλία αναβαθμισμένων φυσικών μοντέλων για τυρβώδη ροή, καύσεις, και πολυφασικές ροές.

2.Δ.δ) ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ – ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ (πηγή: Μαρκάτος Ν. 1995, Κ. Σάρδη, 2009)

2.Δ.δ.i) Διατήρηση της μάζας (αρχή της συνέχειας)

Ισοζύγιο:

|   |
|---|
| Ρυθμός αύξησης της πυκνότητας<br>+<br>Ρυθμός καθαρής εκροής μάζας στον όγκο ελέγχου<br>=<br>Μηδέν |
|---|

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0$$

Όπου  $i = 1, 2, 3$

$x_i$  = οι τρεις διευθύνσεις ( $x_1, x_2, x_3$  ή  $x, y, z$ )

$u_i$  = οι τρεις συνιστώσες της ταχύτητας

2.Δ.δ.ii) Διατήρηση της ορμής (β' νόμος του Νεύτωνα)

Ισοζύγιο:

|  |
|--|
| Ρυθμός αύξησης της ορμής στη διεύθυνση m<br>+<br>Καθαρή εκροή ορμής στον όγκο ελέγχου<br>=<br>Καθαρή δύναμη που ασκείται στον όγκο ελέγχου |
|--|

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_m) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_m) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu \frac{\partial u_m}{\partial x_i} \right) + b m_i + g_m + f_m$$

Όπου  $\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu \frac{\partial u_m}{\partial x_i} \right) + b m_i$  : η συνιστώσα στη διεύθυνση m όλων των τάσεων του ρευστού, που επηρεάζουν την ορμή στη διεύθυνση αυτή (πίεση και διατμητική τάση)

$g_m$  : επιρροές βαρύτητας

$f_m$  : οποιαδήποτε άλλη δύναμη

$b m_i + g_m + f_m$  : όρος πηγής  $S_w$



2.Δ.δ.iii) Διατήρηση της ενέργειας (α' νόμος της θερμοδυναμικής)

Ισοζύγιο:

|   |
|---|
| Ρυθμός αύξησης (εσωτερικής ενέργειας και κινητικής ενέργειας) |
| +   |
| Ρυθμός καθαρής εκροής ενθαλπίας ηρεμίας                       |
| +   |
| Ρυθμός καθαρής εκροής θερμότητας                              |
| +   |
| Ρυθμός καθαρής εκροής διατμητικού έργου                       |
| =   |
| Ακτινοβολία + Άλλες πηγές ενέργειας                           |

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + S_h$$

Όπου  $\frac{\partial}{\partial x_i} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right)$ : μετάδοση θερμότητας λόγω αγωγής

$h$ : ενθαλπία ηρεμίας του ρευστού

$S_h$ : όρος πηγής (π.χ. ακτινοβολία, μικροκύματα κτλ.)

2.Δ.δ.iv) Διατήρηση χημικών στοιχείων, ενζύμων κτλ.

$$\frac{\partial \rho m_a}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i m_a) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma_a \frac{\partial m_a}{\partial x_i} \right) + S_{ma}$$

Όπου  $\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma_a \frac{\partial m_a}{\partial x_i} \right)$ : όρος διάχυσης

$S_{ma}$ : όρος πηγής (π.χ. ρυθμός αντίδρασης)

2.Δ.δ.v) Γενικευμένη αρχή διατήρησης

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varphi) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \varphi + J_{\varphi i}) = S_\varphi$$

Μεταβατικός  
όρος

Όρος  
συναγωγής

Όρος  
διάχυσης

Όρος  
πηγής

Όπου  $\varphi$  παριστάνει τις φυσικές ποσότητες όπως  $h$ ,  $u_m$  ή την μονάδα (στην περίπτωση της εξίσωσης της συνέχειας). Οι όροι που εμφανίζονται στην εξίσωση είναι από αριστερά προς τα δεξιά: ο μεταβατικός όρος, ο όρος συναγωγής, ο όρος διάχυσης και ο όρος παραγωγής ή κατανάλωσης του  $\varphi$  (η πηγή). Για κάθε  $\varphi$  θα πρέπει να προσδιοριστούν κατάλληλα τα  $J_\varphi$  και  $S_\varphi$ .

| Συγκεντρωτικά οι εξισώσεις διατήρησης |  |  |   |            |                 |
|---------------------------------------|--|--|---|------------|-----------------|
| i)                                    | $\frac{\partial}{\partial t} \rho +$       | $\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) +$     | $0 =$   | $0$        | } Navier-Stokes |
| ii)                                   | $\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_m) +$ | $\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_m) =$ | $\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu \frac{\partial u_m}{\partial x_i} \right) +$      | $S_u$      |                 |
| iii)                                  | $\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) +$   | $\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i h) =$   | $\frac{\partial}{\partial x_i} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) +$          | $S_h$      |                 |
| iv)                                   | $\frac{\partial}{\partial t} (\rho m_a) +$ | $\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i m_a) =$ | $\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma_a \frac{\partial m_a}{\partial x_i} \right) +$ | $S_{m_a}$  |                 |
|                                       | Μεταβατικός όρος                           | Όρος συναγωγής                                   | Όρος διάχυσης   | Όρος πηγής |                 |

Μια εξίσωση μεταφοράς μετατρέπεται στη γενική μορφή, με ανακατάταξη των όρων της μέχρις ότου, για το δεδομένο  $\varphi$ , οι όροι χρονικής μεταβολής, συναγωγής και διάχυσης προσομοιάζουν σε εκείνους της γενικής μορφής. Οι εναπομένοντες όροι θεωρούνται ως όροι πηγής  $S_\varphi$ .

Με τον τρόπο αυτό καταλήγουμε να μας ενδιαφέρει η επίλυση μιας μόνο εξίσωσης, δηλ. της γενικής εξίσωσης διατήρησης, που μετά μπορεί να χρησιμοποιηθεί επαναληπτικά για οποιοδήποτε αριθμό εξαρτημένων μεταβλητών  $\varphi$ , απλώς και μόνο με αλλαγή των εκφράσεων για  $J_\varphi$ ,  $S_\varphi$  και των αρχικών και οριακών συνθηκών. Αυτή η ιδέα οδηγεί σε μια σοβαρότατη οικονομία χρόνου.

Η εξαρτημένη μεταβλητή  $\varphi$  είναι, γενικά, συνάρτηση των τριών διευθύνσεων του χώρου και του χρόνου:

$$\varphi = \varphi(x, y, z, t)$$

Για την αριθμητική επίλυση, πρέπει να εκλεγούν οι τιμές των ανεξάρτητων μεταβλητών για τις οποίες θα υπολογιστεί η τιμή της  $\varphi$ . Εάν η διεργασία είναι συνάρτηση μιας μόνο διεύθυνσης του χώρου, το πρόβλημα λέγεται *μονοδιάστατο*, αλλιώς λέγεται *δισδιάστατο* ή *τρισδιάστατο*. Εξάρτηση από τον χρόνο οδηγεί σε *μεταβατικά* προβλήματα, σε αντίθεση με αυτά της *μόνιμης* κατάστασης.

### 2.Δ.δ.vi) Διακριτοποίηση

Η μέθοδος διακριτοποίησης στην αριθμητική επίλυση προβλημάτων, μπορεί να είναι μία από τις: *πεπερασμένες διαφορές, πεπερασμένα στοιχεία, οριακά στοιχεία και πεπερασμένοι όγκοι ελέγχου.*

Συνήθως στο CFD χρησιμοποιούνται οι όγκοι ελέγχου. Για να επιλυθεί το φυσικό πρόβλημα CFD, το πρώτο βήμα είναι να διαχωρισθεί ο φυσικός χώρος της ροής σε δίκτυο κελιών (grid) όπου ολοκληρώνονται και διακριτοποιούνται οι εξισώσεις διατήρησης. Με τον τρόπο αυτό οι διαφορικές εξισώσεις μετατρέπονται σε εξισώσεις διαφορών, δηλαδή αλγεβρικές εξισώσεις, που επιλύονται διαδοχικά μέσα στα τρισδιάστατα κελιά του πλέγματος. Απαιτείται ένας αριθμός επαναλήψεων, έως ότου πάρουμε λύση με σύγκλιση.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \varphi dV + \oint_A \rho \varphi \mathbf{V} \cdot d\mathbf{A} = \oint_A \Gamma \nabla_{\varphi} \cdot d\mathbf{A} + \int_V S_{\varphi} dV$$

Μη-μόνιμος      Συναγωγή      Διάχυση      Παραγωγή

$\varphi = 1$  στην εξίσωση συνέχειας

$\varphi = U$  στην εξίσωση x- ορμής

$\varphi = V$  στην εξίσωση y- ορμής

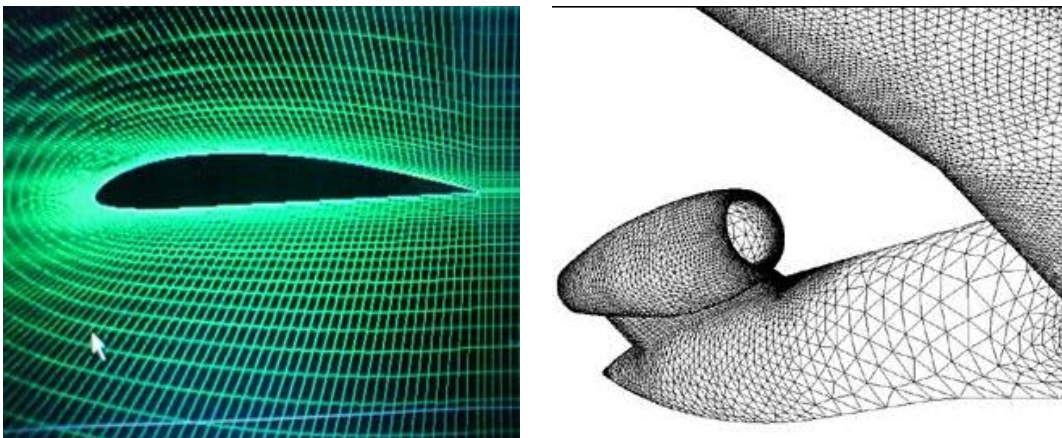
$\varphi = h$  στην εξίσωση της ενέργειας

## 2.Δ.ε) ΠΩΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙ ΤΟ CFD

Γενικά, τρία διαφορετικά κύρια στάδια ακολουθούνται για να πραγματοποιήσουμε μια προσομοίωση CFD (Shaw, 1992).

### Προεπεξεργασία

Αυτό το στάδιο περιλαμβάνει την κατανόηση του προβλήματος, τον σχεδιασμό της γεωμετρίας και του πλέγματος (κελιά), και την δημιουργία του υπολογιστικού μοντέλου. Έτσι λοιπόν, ο μελετητής, θα πρέπει να αντιληφθεί το πρόβλημα ροής και να προσπαθήσει να κατανοήσει όσο το δυνατόν περισσότερα για αυτό. Στην συνέχεια θα πρέπει να δημιουργήσει το σχήμα του πεδίου του προβλήματος που θα αναλυθεί. Αυτό συνήθως μπορεί να γίνει με σχεδιαστικά λογισμικά, όπως το Gambit που περιέχεται στο πακέτο του Fluent. Έπειτα, η γεωμετρία υποδιαιρείται σε πολυάριθμα κελιά, γνωστά ως στοιχεία ή όγκοι ελέγχου. Όταν ολοκληρωθεί το πλέγμα, πρέπει να ορισθούν οι οριακές συνθήκες του προβλήματος. Αυτές οι συνθήκες μαζί με κάποιες παραμέτρους του ρευστού και φυσικές παραμέτρους, καθορίζουν το ακριβές πρόβλημα προς επίλυση. Ωστόσο, δεν είναι εύκολο να δημιουργηθεί ένα πολύπλοκο πλέγμα. Για παράδειγμα, παρόλο που η ισχύς των υπολογιστών αυξάνεται σταθερά, είναι ακόμη και σήμερα δύσκολο να διακριτοποιηθεί ένα πεδίο επίλυσης σε περιπτώσεις 3D με τυρβώδη ροή, με ένα πλέγμα τόσο καλό που οι λύσεις να είναι εντελώς ανεξάρτητες αυτού (Mirade, 2001).

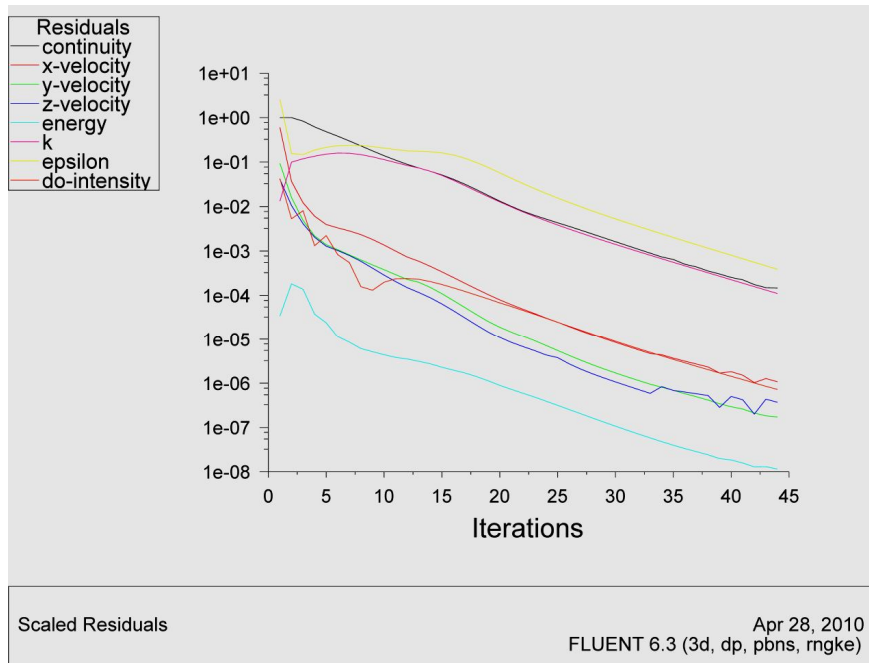


Εικόνα 6: Σχηματισμός πλέγματος σε γεωμετρίες. Αριστερά, κελιά σχήματος τετραεδρικού, δεξιά, κελιά σχήματος εξαεδρικού/υβριδικού.

### Επεξεργασία

Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει χρήση υπολογιστή ώστε να λυθούν οι μαθηματικές εξισώσεις της ροής του ρευστού. Όταν το πλέγμα ολοκληρωθεί, εισέρχονται οι αρχικές τιμές του μοντέλου και έπειτα το λογισμικό μπορεί να λύσει τις εξισώσεις διατήρησης για κάθε κελί έως ότου επιτευχθεί μία αποδεκτή σύγκλιση. Αυτή η διαδικασία είναι "επίπονη" και συχνά απαιτείται από τον υπολογιστή να λύσει πολλές χιλιάδες εξισώσεις. Σε κάθε περίπτωση, οι εξισώσεις ολοκληρώνονται και τότε εφαρμόζονται οι οριακές συνθήκες. Αυτό είναι γνωστό ως διακριτοποίηση εξισώσεων και εφαρμόζεται σε κάθε ένα κελί του πλέγματος ξεχωριστά. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να επιτευχθεί η απαιτούμενη ακρίβεια. Το στάδιο της επεξεργασίας μπορεί να γίνει πολύ χρονοβόρο και παρόλο που

είναι ο πυρήνας του κάθε λογισμικού πακέτου CFD, λίγα μπορεί κανείς να δει από την λειτουργία του.



Εικόνα 7: Διάγραμμα σύγκλισης λύσεων όλων των εξισώσεων που λύνει το Fluent σε αυτήν την περίπτωση. Στον άξονα x φαίνεται ο αριθμός των επαναλήψεων των υπολογισμών και στον άξονα y ο βαθμός σύγκλισης των λύσεων (residuals).

```

FLUENT [3d, dp, pbns, rngke]
File Grid Define Solve Adapt Surface Display Plot Report Parallel Help
domains,
mixture
zones,
default-interior
eisodos
exodos
exodoi_ugrasias
pleur_toixoi
orofi_patos
fluid.6
shell conduction zones,
Done.
Reading "C:\OVEN\3D TEST MONTEΛΩΝ RAD\3d DO(COUPLEDSTAND).dat"...
Done.

iter continuity x-velocity y-velocity z-velocity energy k epsilon do-intensi time/iter
? 43 solution is converged
43 1.4989e-04 1.2749e-06 1.8351e-07 4.3585e-07 1.3034e-08 1.3214e-04 4.6603e-04 8.5214e-07 0:00:00 25
? 44 solution is converged
44 1.4653e-04 1.0780e-06 1.7298e-07 3.7126e-07 1.1527e-08 1.1051e-04 3.8831e-04 7.2325e-07 0:02:48 24

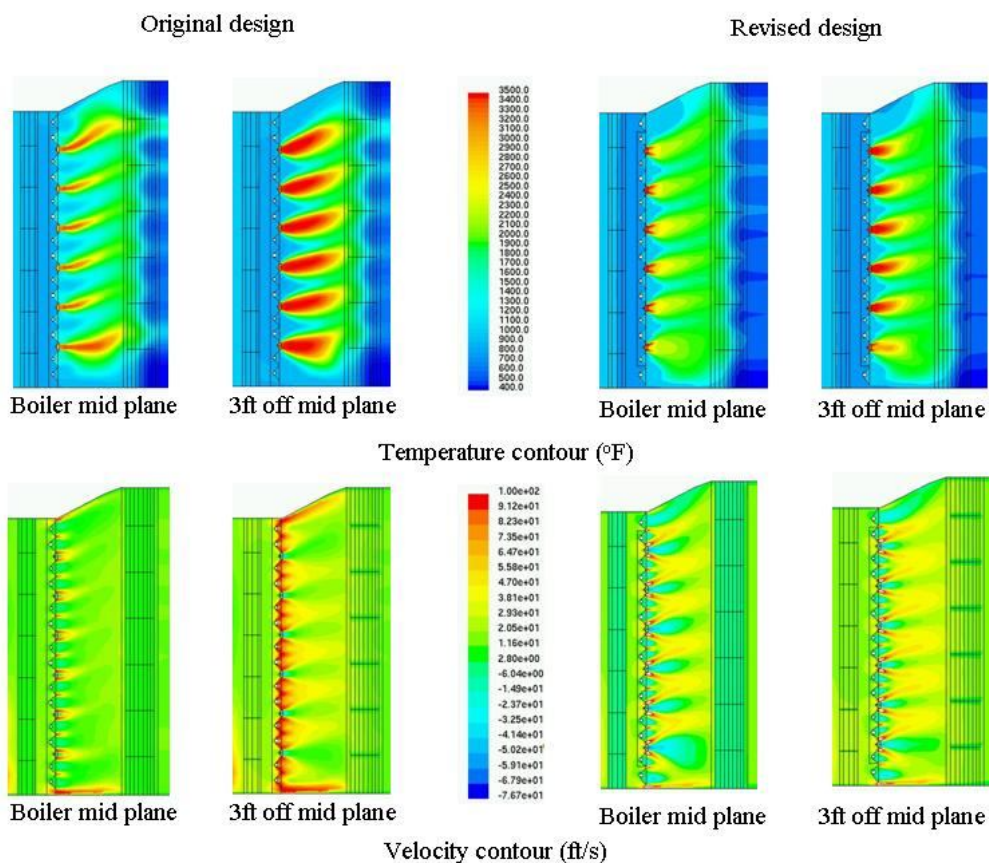
iter continuity x-velocity y-velocity z-velocity energy k epsilon do-intensi time/iter
? 44 solution is converged
44 1.4653e-04 1.0780e-06 1.7298e-07 3.7126e-07 1.1527e-08 1.1051e-04 3.8831e-04 7.2325e-07 0:00:07 1
? 45 solution is converged
45 1.0757e-04 6.4820e-07 1.3537e-07 1.5337e-07 9.3150e-09 9.2373e-05 3.2377e-04 6.0269e-07 0:00:00 0

```

Εικόνα 8: Η επιφάνεια εργασίας του Fluent κατά τη διάρκεια υπολογισμών. Οι λύσεις έχουν συγκλίνει και οι υπολογισμοί σταμάτησαν. Το διάγραμμα σύγκλισης που φαίνεται στην προηγούμενη εικόνα, διαγράφεται κατά τη διάρκεια των λύσεων και είναι η απεικόνιση όσων φαίνονται αριθμητικά στην επιφάνεια εργασίας.

### Επεξεργασία αποτελεσμάτων

Το πρόγραμμα της μετέπειτα επεξεργασίας χρησιμοποιείται για να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα που παρήγαγε η ανάλυση CFD. Όταν λυθεί το μοντέλο, τα αποτελέσματα μπορούν να αναλυθούν αριθμητικά ή γραφικά. Διάφορα εργαλεία του λογισμικού CFD μπορούν να δημιουργήσουν γραφήματα 2D ή 3D, όπου απεικονίζονται κομμάτια του πλέγματος μαζί με βέλη για την διαβάθμιση της ταχύτητας π.χ., ή μαζί με επιφάνειες διαβαθμισμένης κλίμακας για την απεικόνιση της πίεσης για παράδειγμα. Σε τέτοια γραφήματα, χρησιμοποιούνται χρώματα για την διαφοροποίηση μεταξύ των διαφορετικών μεγεθών της τιμής. Όταν παρατηρηθούν κάποια αποτελέσματα, πρέπει να αναλυθούν, πρώτον για να ελεγχθεί αν είναι ικανοποιητικά και δεύτερον για να προσδιορισθούν τα ακριβή δεδομένα της ροής που απαιτούνται από την προσομοίωση.



Εικόνα 9: Ένα παράδειγμα χρωματικών απεικονίσεων αποτελεσμάτων όπου στην πάνω σειρά φαίνονται οι απεικονίσεις της κατανομής της θερμοκρασίας και στην κάτω σειρά οι χρωματικές απεικονίσεις του μεγέθους της ταχύτητας.

## 2.Δ.στ) ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΧΡΗΣΗΣ CFD

Στο δημοσιευμένο review από τους Bin Xia, Da-Wen Sun (2002) αναφέρεται ότι, το CFD εξελίχθηκε από μια μαθηματική “εφεύρεση” σε ένα σημαντικό εργαλείο για σχεδόν όλους τους κλάδους της ρευστοδυναμικής. Δίνει τη δυνατότητα για μια βαθιά ανάλυση της μηχανικής των ρευστών και για πιο εντοπισμένες διαδικασίες σε διάφορα μηχανήματα εξοπλισμού. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

- Παρέχει μια λεπτομερή κατανόηση της κατανομής της ροής, των απωλειών βάρους, της μεταφοράς θερμότητας και μάζας, του διαχωρισμού συστατικών κ.ά..
- Γίνεται δυνατή η εκτίμηση γεωμετρικών αλλαγών με πολύ λιγότερη κατανάλωση χρόνου και κόστους από ότι θα ίσχυε σε εργαστηριακό επίπεδο.
- Μπορεί μέσα σε λίγο χρόνο να απαντήσει σε πολλά ερωτήματα του τύπου: τι θα γίνει αν...;
- Είναι ικανό να μειώσει κλιμακωτά προβλήματα διότι τα μοντέλα στηρίζονται στη βασική φυσική και είναι ανεξάρτητα κλιμάκωσης.
- Είναι ιδιαίτερος χρήσιμο στην προσομοίωση συνθηκών όπου είναι σχεδόν απίθανο να λάβουμε ακριβείς μετρήσεις όπως στις πολύ υψηλές θερμοκρασίες ή σε επικίνδυνο περιβάλλον σαν τον φούρνο.
- Καθώς αποτελεί εργαλείο σχεδίασης και ανάλυσης πριν-την-πράξη, μπορεί να επισημάνει την ρίζα του προβλήματος, και όχι απλώς τα αποτελέσματα αφού έχει εφαρμοσθεί το σχέδιο.

Πολυάριθμες διεργασίες στην επεξεργασία τροφίμων όπως η ψύξη, η ξήρανση, το ψήσιμο, η ανάμιξη, η κατάψυξη, η παστερίωση και η αποστείρωση βασίζονται στη ροή των ρευστών. Η μεταφορά του CFD στην βιομηχανία τροφίμων παρέχει στους μηχανικούς τροφίμων νέα οπτική και κατανόηση των λειτουργιών του εξοπλισμού στο επίπεδο ακόμη του σχεδιασμού και σιγουριά όσον αφορά στην ασφάλεια και την ποιότητα των προϊόντων.

## 2.Δ.ζ) ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΤΟΥ CFD

Το CFD έχει ήδη αποδειχθεί ως ένα αξιόλογο εργαλείο για τις διεργασίες στην βιομηχανία τροφίμων. Η αποτελεσματικότητα και η πρακτικότητα μιας προσομοίωσης CFD σχετική με τα τρόφιμα, στηρίζεται σε διάφορους παράγοντες:

- Ιδιαίτερες ιδιότητες των υλικών και της επεξεργασίας του τροφίμου
- Ακριβής αλγόριθμος για τις εξισώσεις της κίνησης
- Αναβαθμισμένα και ικανά πακέτα λογισμικού CFD
- Υπολογιστές μεγάλοι και ταχείς

Υπάρχουν ακόμη κάποια προβλήματα που εμποδίζουν την διαδεδομένη χρήση του CFD. Κατά πρώτον, τα υλικά στην επεξεργασία τροφίμων (γάλα, λαχανικά, φρουτοχυμός, κρέας κ.ά.) διαφέρουν κατά πολλούς τρόπους (ρεολογικές ιδιότητες, θερμοδυναμικές ιδιότητες, φυσικές ιδιότητες) από αυτά που εφαρμόζονται στο CFD για λόγους ευχρηστίας (αέρας,

νερό κτλ.). Το εύχρηστο CFD είναι ικανό να προβλέψει μόνο τις ιδιότητες μιγμάτων παρασκευασμένων κατά προσέγγιση. Ωστόσο, η ποιότητα του τροφίμου είναι στενά συνδεδεμένη με το μέγεθός του, την υφή του και την σύστασή του. Η επεξεργασία των τροφίμων μπορεί μόνο να γίνει κατανοητή και να ελεγχθεί αποτελεσματικά, όταν είναι διαθέσιμα μοντέλα φυσικο-χημικά, οργανικής χημείας και μικρο-βιολογικά, όμως, τα εύχρηστα πακέτα CFD δεν κυριαρχούν σε τέτοιες διαδικασίες.

Κατά δεύτερον, η βιομηχανία τροφίμων πρέπει να προσλάβει έμπειρο προσωπικό που να μπορεί να χειριστεί το CFD. Παρόλο που οι πωλητές των πακέτων αυτών ισχυρίζονται ότι δεν χρειάζεται κάποιος να είναι ειδικός ώστε να τα χειριστεί, κάποια γνώση αρχική είναι απολύτως απαραίτητη. Είναι χρήσιμο να έχεις εξοικειωθεί με την μοντελοποίηση φυσικών ροών και αριθμητικών τεχνικών επίλυσης ώστε να δημιουργήσεις την κατάλληλη προσομοίωση και κυρίως να κρίνεις την ορθότητα των αποτελεσμάτων του. Συνεπώς, το μεγαλύτερο πρόβλημα του CFD δεν είναι πιθανότατα ο σχηματισμός του πλέγματος και της γεωμετρίας, ούτε η απαραίτητη ισχύς του υπολογιστή που λύνει με CFD, αλλά η εύρεση επιστημόνων που πραγματικά μπορούν να κάνουν ολοκληρωμένη αυτή την δουλειά, αναφέρουν χαρακτηριστικά οι Bin Xia, Da-Wen Sun (2002).



## 2.Ε) ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΩΝ ΜΕΛΕΤΩΝ

Πολύ λίγες μελέτες έχουν ασχοληθεί με την πολυπλοκότητα της κυκλοφορίας του αέρα μέσα σε βιομηχανικούς φούρνους ψησίματος τύπου τούνελ, που προκύπτει από τους μηχανισμούς εισόδου και εξόδου του αέρα από τα άκρα του φούρνου και από την απαγωγή του αέρα μέσω διαφόρων καμινάδων απαγωγής κατά το μήκος του. Από την άλλη βέβαια, οι πειραματικές μετρήσεις της ταχύτητας του αέρα είναι εξαιρετικά δύσκολο να πραγματοποιηθούν μέσα στον θάλαμο ψησίματος, λόγω της έλλειψης αξιόπιστων αισθητήρων ικανών να λειτουργήσουν σε πολύ θερμές και υγρές ατμόσφαιρες. Μόνο ελάχιστες δημοσιευμένες μελέτες εξετάζουν τις τιμές της ταχύτητας του αέρα μέσα σε βιομηχανικούς φούρνους, παρόλο που η επίδραση αυτής της παραμέτρου στις συνθήκες ψησίματος είναι προφανής και έχει ήδη συζητηθεί στη βιβλιογραφία για διάφορους τύπους φούρνου (De Vries, Velthuis, & Koster, 1995 / Sato, Matsumura, & Shibukawa, 1987).

Η ομάδα του Zanoni το 1994 πρότεινε ένα μαθηματικό μοντέλο για το ψήσιμο ψωμιού θεωρώντας ότι η μεταβολή της συγκέντρωσης υγρασίας και της θερμοκρασίας του προϊόντος καθορίζεται από το ξεκίνημα της εξάτμισης στους 100°C. Για να λυθεί το μοντέλο, ορίστηκε ότι όταν η θερμοκρασία του ψωμιού φτάσει τους 100°C, λαμβάνει μέρος εξάτμιση σε σταθερή θερμοκρασία μέχρι όλο το ελεύθερο νερό να εξατμιστεί. Η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης υπολογίζεται από τη διαφορά μεταξύ της παρεχόμενης ενέργειας και της θερμότητας που μεταφέρεται προς την κόρα μέσω αγωγής. Κάτι αντίστοιχο την ίδια εποχή, αλλά για ψήσιμο μπισκότων, πραγματοποίησαν οι Ozilgen & Heil, 1994, συμπεριλαμβάνοντας την απώλεια της λανθάνουσας θερμότητας μέσω της απώλειας νερού στο ισοζύγιο ενέργειας, ώστε να λαμβάνεται υπόψη από το μοντέλο και η εξάτμιση από το προϊόν.

Από ένα μοντέλο CFD για γραμμική ροή, η ομάδα του De Vries το 1995, υπολόγισε την θερμοκρασία, τον ρυθμό ροής θερμότητας, την κατανομή του μεγέθους της ταχύτητας και την πτώση πίεσης μέσα σε θάλαμο ψησίματος εργαστηριακού φούρνου. Επίσης, εκτίμησαν την επίδραση μιας διάτρητης πλάκας στη βελτίωση της ομοιομορφίας της ταχύτητας και της πτώσης πίεσης στον φούρνο.

Το 2000 η ομάδα των Verboven, Scheerlinck, De Baerdemaeker and Nicolai, αποπειράθηκε να ασχοληθεί με την πιο σύγχρονη εκδοχή της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής, πάνω στο θέμα των βιομηχανικών φούρνων ψησίματος. Είναι οι πρώτοι από τους ελάχιστους που μελέτησαν την ταχύτητα του αέρα μέσα στον φούρνο. Σε δύο μελέτες την ίδια εποχή, υπολόγισαν την ταχύτητα του αέρα και την κατανομή της θερμοκρασίας μέσα σε έναν βιομηχανικό ηλεκτρικό φούρνο βεβιασμένης κυκλοφορίας αέρα μήκους 10m, με τρισδιάστατη γεωμετρία και όγκους μικρότερους του ενός κυβικού μέτρου. Στην *πρώτη μελέτη*, η ακρίβεια των λύσεων του CFD περιορίζεται μόνο στα κύρια χαρακτηριστικά της ροής, καθώς παρουσιάστηκε απόκλιση από τις πειραματικές τιμές, 22%, λόγω της *έλλειψης μοντέλων για την τύρβη και την συμπεριφορά της ροής κοντά στα τοιχώματα*. Παρατήρησαν επίσης, ότι η διαμόρφωση της ροής του αέρα αλλάζει από την παρουσία των προϊόντων. Στην *δεύτερη μελέτη* τους ασχολήθηκαν με την επιβεβαίωση της ακρίβειας των λύσεων ενός μοντέλου CFD για την μεταφορά θερμότητας μέσα στον βιομηχανικό φούρνο. Το μοντέλο είναι ικανό να παράγει μία ποιοτική απεικόνιση της

κατανομής της θερμότητας μέσα στον θάλαμο κατά τη διάρκεια της αύξησης της θερμοκρασίας, και της ομοιομορφίας των συνθηκών στις οποίες υποβάλλεται το προϊόν κατά την επεξεργασία του. Το τελευταίο ήταν αυτό που αποτέλεσε την κινητήρια δύναμη ώστε να ξεκινήσει η ομάδα την μελέτη. Η ομοιομορφία θέρμανσης μπορεί να συνδέεται με την συνδυασμένη επίδραση της θερμοκρασίας του φούρνου, της ταχύτητας και της έντασης της τύρβης. Οι αυθαίρετες υποθέσεις και οι απλουστεύσεις στην γεωμετρία και σε άλλες παραμέτρους που εφαρμόστηκαν κατά τη δημιουργία του μοντέλου, από την μία πλευρά επιτρέπουν την προσομοίωση της διεργασίας με τρόπο οικονομικό όσον αφορά την υπολογιστική ισχύ, από την άλλη όμως περιορίζουν την ποσοτική ακρίβεια των προβλέψεων του μοντέλου. Έτσι, η απόκλιση των λύσεων του μοντέλου όσον αφορά την θερμοκρασία σε σχέση με τις πειραματικές τιμές ήταν  $4,6^{\circ}\text{C}$ . *(Παρατηρήσεις: χρησιμοποίησαν για την μοντελοποίηση παλιότερη μορφή προγραμμάτων CFD, το CFX 4.1. Ο φούρνος που μελέτησαν δεν ήταν τύπου τούνελ αλλά με ράφια και θερμαινόταν με διοχέτευση θερμού αέρα μέσα στον θάλαμο. Αντί για τρόφιμα, τοποθέτησαν στον φούρνο πολυμερείς παραλληλόγραμμες γεωμετρίες.)*

Αργότερα, το 2003, η ομάδα του Therdthai προσομοίωσε, σε δύο διαστάσεις, το προφίλ θερμοκρασιών και τη διαμόρφωση της ροής μέσα στον θάλαμο ψησίματος ενός βιομηχανικού φούρνου συνεχούς λειτουργίας μήκους 16,5m, πλάτους 3,65m και ύψους 3,75m. Όλος ο φούρνος χωρίστηκε μόνο σε 21822 κελιά. Μελετήθηκε η επίδραση των διαφορετικών παροχών ενέργειας και όγκου ανεμιστήρα, στην θερμοκρασία και την ροή του αέρα του φούρνου. Έγινε επίσης, παραμετρική μελέτη του προφίλ θερμοκρασιών αλλάζοντας την ροή του αέρα. Τα αποτελέσματα των μελετών αυτών απέδωσαν πληροφορίες κατασκευαστικές για την επίτευξη των άριστων θερμοκρασιών ψησίματος, και για την κατάλληλη θέση των αισθητήρων ελέγχου της διαδικασίας. *(Παρατηρήσεις: οι απλουστεύσεις που έκαναν ήταν η μοντελοποίηση δισδιάστατης γεωμετρίας αγνοώντας τις μεταβολές στον άξονα z, σχημάτισαν πλέγμα με πολύ λίγα κελιά (21822))*

Ο Mirade και η ομάδα συνεργατών του, το 2004, δημοσίευσαν μια μελέτη όπου εφήρμισαν δύο τρισδιάστατα μοντέλα CFD (με χρήση του Fluent), με σκοπό να προβλέψουν το μέγεθος της ταχύτητας του αέρα και την κατανομή της θερμοκρασίας μέσα στον θάλαμο ψησίματος μπισκότων βιομηχανικού φούρνου τύπου τούνελ. Συνέκριναν τα αποτελέσματα της αριθμητικής λύσης με τις τιμές ταχύτητας και θερμοκρασίας που μέτρησαν πειραματικά. Ο φούρνος είχε μήκος 50m, πλάτος 1m και ύψος 0,3m. Χωριζόταν νοητά σε 25 ζώνες και είχε 2 καυστήρες πάνω και κάτω από τον θάλαμο. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων αποκάλυψε μια πολύ καλή σύμπτωση των θεωρητικών και των πειραματικών τιμών θερμοκρασίας, και μια αρκετά μεγάλη απόκλιση στις τιμές της ταχύτητας. Για να γίνει αξιόπιστη μέτρηση ταχύτητας σε συνθήκες όπως αυτές στο εσωτερικό του φούρνου και άρα καλύτερη σύγκριση με τις αριθμητικές λύσεις, είναι απαραίτητοι αισθητήρες κατάλληλοι να μετρούν πολύ χαμηλές ταχύτητες σε πολύ θερμή ατμόσφαιρα. *(Παρατηρήσεις: οι απλουστεύσεις που έγιναν στο μοντέλο ήταν κατ' αρχήν ότι δεν έλαβαν υπόψη την ύπαρξη υγρασίας μέσα στον αέρα του φούρνου, (όμως δεν θεώρησαν σταθερές τις ιδιότητες του αέρα με την θέρμανση όπως όλες οι άλλες εργασίες), και επίσης αντί να θερμαίνεται ο αέρας του φούρνου από την θέρμανση των τοιχωμάτων από τα καυσαέρια όπως είναι στην πραγματικότητα, έθεσαν σταθερή θερμοκρασία τοιχωμάτων.)*

Η ομάδα του Therdthai συνέχισε τις σχετικές μελέτες, και σε μια δημοσιευμένη εργασία της το 2004 προσομοίωσε την δυναμική ανταπόκριση κατά τη λειτουργία ενός βιομηχανικού φούρνου ψησίματος ψωμιού συνεχούς λειτουργίας, εφαρμόζοντας ένα τρισδιάστατο μοντέλο CFD με κινούμενα πλέγματα. Μελετήθηκε η επίδραση του ποσοστού πληρότητας του φούρνου με προϊόν, στην μεταφορά θερμότητας. Ενσωματώνοντας τα μαθηματικά μοντέλα που είχαν αναπτύξει σε προηγούμενη μελέτη τους, σε αυτό το τρισδιάστατο μοντέλο CFD, έγιναν προβλέψεις στις μεταβολές των ποιοτικών χαρακτηριστικών του προϊόντος εξαιτίας της πλήρωσης του φούρνου. Έρευνα έγινε επίσης, στις συνθήκες λειτουργίας του φούρνου ώστε να επιτευχθεί το άριστο προφίλ θερμοκρασιών. Από τα αποτελέσματα κατέληξαν στο *συμπέρασμα*, ότι η παροχή θερμότητας πρέπει να μειωθεί ενώ η παροχή αέρα να αυξηθεί, ενώ πιο σημαντικό αποτέλεσμα, ήταν ότι η απώλεια βάρους έτσι θα μπορούσε να μειωθεί κατά 1,4%, χωρίς επιρροή σε άλλα ποιοτικά χαρακτηριστικά. Συγκρίνοντας τις θεωρητικές με τις πειραματικές τιμές ταχύτητας αέρα, οι πρώτες παρουσιάζουν κάποιες *ανεπιθύμητες κορυφές* και πτώσεις. Αντίθετα, η πρόβλεψη της θερμοκρασίας ήταν καλή για την κάτω και τις πλαϊνές επιφάνειες του φούρνου. *(Παρατηρήσεις: οι απλουστεύσεις που έγιναν στην γεωμετρία και την λειτουργία του φούρνου ήταν ότι δεν προσομοίωσαν την μορφή του φούρνου σε σχήμα U αλλά έκαναν κάποιες παραδοχές και επίσης αγνόησαν τους καυστήρες. Ο αέρας του φούρνου θεώρησαν ότι θερμαίνεται με συναγωγή από τα σταθερώς θερμά τοιχώματα χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η ακτινοβολία. Τέλος, μοντελοποίησαν μόνο μία τομή κατά μήκος του χ άξονα του φούρνου, πάχους 280mm (στον άξονα z).)*

Από το πανεπιστήμιο της Σιγκαπούρης, η ομάδα του Shin-Yee Wong το 2007, ανέπτυξε ένα δισδιάστατο μοντέλο CFD για τον θάλαμο ψησίματος ψωμιού βιομηχανικού φούρνου συνεχούς λειτουργίας. Χρησιμοποιώντας την τεχνική των κυλιόμενων πλεγμάτων, προσομοίωσαν την συνεχή μεταφορά των προϊόντων μέσα στον φούρνο. Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής, συγκρινόμενα με τα πειραματικά, σε γενικές γραμμές ήταν ικανοποιητικά για την κατανομή της θερμοκρασίας, αλλά εξακολουθούν να υπάρχουν αποκλίσεις. Σε αυτήν την εργασία, δόθηκε έμφαση στην μεταφορά θερμότητας και την ροή του αέρα μέσα στον θάλαμο ψησίματος, ενώ οι μηχανισμοί μέσα στην ζύμη απλουστεύθηκαν. Οπότε, καλύτερη πρόβλεψη έγινε σε σημεία κοντά στην επιφάνεια του προϊόντος παρά στο κέντρο του. Γενικότερο συμπέρασμά τους ήταν, ότι η θερμοκρασία του αέρα μπορεί να προβλεφθεί λογικά, αλλά είναι πολύ *περιορισμένη όταν το μοντέλο είναι δισδιάστατο*, και επίσης έχει αγνοηθεί η εξάτμιση του νερού από την μεταφορά θερμότητας μέσω ακτινοβολίας. *(Παρατηρήσεις: η κυριότερη απλούστευση της γεωμετρίας ήταν ότι μοντελοποίησαν μόνο δύο διαστάσεις του φούρνου. Ο καυστήρας θεωρήθηκε ως κύλινδρος με σταθερής θερμοκρασίας τοιχώματα, δεν προστέθηκε υγρασία στον αέρα του φούρνου παρά μόνο θεωρήθηκε ότι υπάρχει στον συντελεστή απορροφητικότητας του αέρα του φούρνου, ο οποίος είχε σταθερές ιδιότητες σε όλη τη διάρκεια της θέρμανσης.)*

Η πιο πρόσφατη σχετική μελέτη είναι του 2009 από τους Emmanuel Purlis, Viviana O. Salvadori. Δημιούργησαν ένα μοντέλο ταυτόχρονης μεταφοράς θερμότητας και μάζας για να περιγράψουν την διαδικασία ψησίματος του ψωμιού. Ασχολήθηκαν μόνο με το τι συμβαίνει *μέσα στο προϊόν*. Έκαναν πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας και συγκέντρωσης υγρασίας μέσα στην ζύμη, κατά το ψήσιμο, και τις συνέκριναν με τις τιμές που προέβλεψε το μαθηματικό μοντέλο. Το μοντέλο μπορούσε να σκιαγραφήσει τις δύο

χαρακτηριστικές ζώνες του προϊόντος: την ψίχα και την κόρα. Η ψίχα δεν ξεπερνά τους 100°C και η υγρασία της παραμένει σταθερή, ενώ η κόρα τείνει να φτάσει την θερμοκρασία του αέρα με συνεχή αφυδάτωση. Έκαναν διάφορες παραμετρικές μελέτες και τεστ ευαισθησίας για τον συντελεστή διάχυσης μάζας  $D_{\text{effective}}$ , αλλάζοντας τον παράγοντα σχηματισμού της κόρας.

Οι προηγούμενες αναφορές στην βιβλιογραφία δείχνουν την πορεία των μελετών που έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια στην μοντελοποίηση με CFD των βιομηχανικών φούρνων ψησίματος αρτοσκευασμάτων. Για να ανταπεξέλθουν στις απαιτήσεις που έχει μια μοντελοποίηση με τόσες πολλές παραμέτρους, καθώς αφορά σε μια διεργασία επεξεργασίας πολύπλοκων συστημάτων σαν τα τρόφιμα, προέβησαν σε διάφορες απλουστεύσεις. Σε όποιες θεωρούσε απαραίτητες κάθε ομάδα ερευνητών. Έτσι, συνοπτικά, έγιναν απλουστεύσεις όσον αφορά στις διαστάσεις της γεωμετρίας, στην παρουσία ή μη διαφόρων μερών μηχανολογικού εξοπλισμού, στον τρόπο θέρμανσης του αέρα του φούρνου, στην σύσταση και τις ιδιότητες του αέρα.

**Αυτή η εργασία** που παρουσιάζεται στα κεφάλαια που ακολουθούν, ασχολήθηκε με την τρισδιάστατη προσομοίωση βιομηχανικού φούρνου τύπου τούνελ εφαρμοσμένη στο εμπορικό λογισμικό CFD, Fluent 6.3.26, με στόχο την πρόβλεψη του μεγέθους της ταχύτητας και την διαμόρφωση της ροής του αέρα μέσα στον θάλαμο ψησίματος μπισκότων καθώς και την κατανομή της θερμοκρασίας. Ελέγχθηκαν τα μοντέλα επίλυσης, έγινε ανάλυση ευαισθησίας των λύσεων από την πυκνότητα του πλέγματος, συγκρίθηκαν οι πειραματικές τιμές με τις λύσεις του θεωρητικού μοντέλου, προσομοιώθηκε και η ύπαρξη υγρασίας στον αέρα του φούρνου, έγινε παραμετρική μελέτη για την κατανάλωση ενέργειας, και τέλος δημιουργήθηκε μαθηματικό μοντέλο πρόβλεψης της μεταφοράς μάζας και ενέργειας μέσα στο προϊόν. Οι απλουστεύσεις που έγιναν για την διευκόλυνση της επίλυσης ήταν, η ελαφρώς διαφορετική γεωμετρία των απαγωγών υδρατμών και η αναγκαστική αντικατάσταση των μπισκότων από οπές παροχής υγρασίας. Το μοντέλο λύθηκε σε σταθερή κατάσταση, δηλαδή όταν η παροχή ενέργειας και οι απώλειες θερμότητας βρίσκονταν σε ισορροπία, γι' αυτό και δεν προσομοιώθηκε η κίνηση της ταινίας μεταφοράς μπισκότων προς τον θάλαμο ψησίματος.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

### ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Στην εργασία αυτή, όπως έχει προαναφερθεί, έγινε προσπάθεια της όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικής προσομοίωσης της γεωμετρίας και της λειτουργίας του βιομηχανικού φούρνου μπισκότων τύπου τούνελ, με την εφαρμογή Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής. Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα η γεωμετρία του φούρνου και οι βασικές συνθήκες λειτουργίας του, όπως η θερμοκρασία των καυσαερίων μέσα στα διπλά τοιχώματα, η ταχύτητα του αέρα που εισέρχεται από την είσοδο του φούρνου, ο αριθμός των μπισκότων ανά λεπτό της ώρας που εισέρχονται και οι ιδιότητες των μπισκότων που μετρήθηκαν πειραματικά. Πειραματικές μετρήσεις έγιναν επίσης και για την θερμοκρασία στο εσωτερικό του φούρνου κατά την λειτουργία του. Χρησιμοποιήθηκαν όμως ως συγκριτικές τιμές για την επιβεβαίωση της ακρίβειας του μοντέλου.

#### 3.Α) ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΜΠΙΣΚΟΤΩΝ

Για την μέτρηση των ιδιοτήτων των μπισκότων ελήφθη δείγμα από διάφορα στάδια ψησίματος μέσα από τον βιομηχανικό φούρνο τούνελ. Τα παράθυρα του φούρνου που αναφέρονται παρακάτω, είναι ανοίγματα στην μία πλαϊνή πλευρά του φούρνου τα οποία παραμένουν κλειστά καθ' όλη τη διάρκεια του ψησίματος, ενώ χρησιμεύουν στην οπτική παρακολούθηση της διεργασίας από τους χρήστες όταν αυτό είναι αναγκαίο. Τα δείγματα ανήκουν στα εξής στάδια:

- άμορφη ζύμη ακριβώς πριν το μηχάνημα μορφοποίησης στην είσοδο του φούρνου
  - νωπό μπισκότο μορφοποιημένο ακριβώς στην είσοδο του φούρνου
  - μπισκότο από το 1<sup>ο</sup> παράθυρο του φούρνου (περίπου 14 m από την είσοδο)
  - μπισκότο από το 2<sup>ο</sup> παράθυρο του φούρνου (περίπου 18 m από την είσοδο)
  - μπισκότο από το 3<sup>ο</sup> (τελευταίο) παράθυρο του φούρνου (περίπου 21m από την είσοδο)
  - μπισκότο ψημένο ακριβώς μετά την έξοδο του φούρνου
- Οι διαστάσεις του μορφοποιημένου μπισκότου είναι:

|               |                    |                |
|---------------|--------------------|----------------|
| <b>Νωπό</b>   | Διάμετρος = 4,1 cm | Πάχος = 1 cm   |
| <b>Ψημένο</b> | Διάμετρος = 5,5 cm | Πάχος = 0,7 cm |

#### 3.Α.α) ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΞΗΡΑΣ ΟΥΣΙΑΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΗΣ ΜΕΣΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΜΠΙΣΚΟΤΩΝ ΣΤΑ ΔΙΑΦΟΡΑ ΣΤΑΔΙΑ ΨΗΣΙΜΑΤΟΣ (g νερού / g ξηράς ουσίας)

Για κάθε ένα από τα παραπάνω στάδια με δύο επαναλήψεις έγινε μέτρηση ξηράς ουσίας. Η μέθοδος που ακολουθήθηκε ήταν η εξής: σε πορσελάνινη κάψα ζυγίστηκαν 2 g περίπου δείγματος από κάθε στάδιο τα οποία θερμάνθηκαν στους 103°C για 2 ώρες, ώπου να σταθεροποιηθεί το βάρος τους. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για την ξηρά ουσία φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

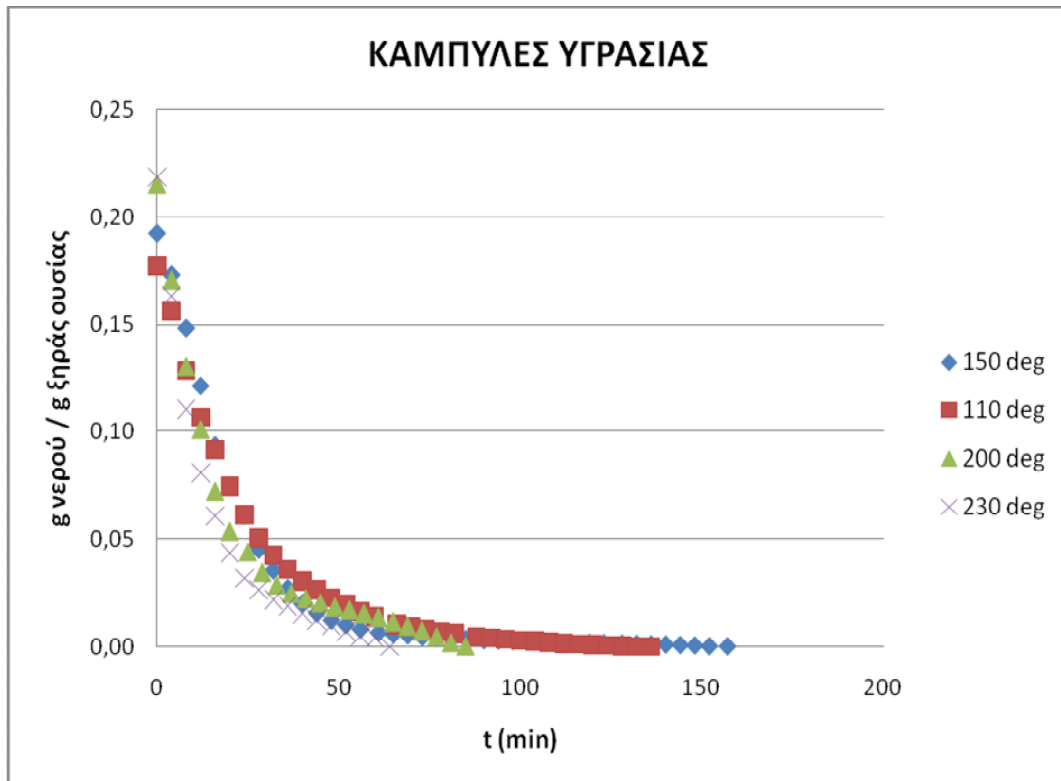
**ΠΙΝΑΚΑΣ 2: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΞΗΡΑΣ ΟΥΣΙΑΣ / ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΣΤΑΔΙΑ ΨΗΣΙΜΑΤΟΣ**

|                    | ΔΕΙΓΜΑ 1               |                | ΔΕΙΓΜΑ 2    |                | ΔΕΙΓΜΑ 1               | ΔΕΙΓΜΑ 2     |
|--------------------|------------------------|----------------|-------------|----------------|------------------------|--------------|
|                    | g ΠΡΟΪΟΝΤΟΣ            | g ΞΗΡΑΣ ΟΥΣΙΑΣ | g ΠΡΟΪΟΝΤΟΣ | g ΞΗΡΑΣ ΟΥΣΙΑΣ | g ΝΕΡΟΥ                |              |
| ΝΩΠΗ ΖΥΜΗ          | 2,003                  | 1,6721         | 2,0062      | 1,6893         | 0,3309                 | 0,3169       |
| ΠΑΡΑΘΥΡΟ 1         | 2,0007                 | 1,7008         | 2,012       | 1,703          | 0,2999                 | 0,309        |
| ΠΑΡΑΘΥΡΟ 2         | 1,996                  | 1,7421         | 2,0452      | 1,7694         | 0,2539                 | 0,2758       |
| ΠΑΡΑΘΥΡΟ 3         | 1,9996                 | 1,8345         | 2,0256      | 1,8521         | 0,1651                 | 0,1735       |
| ΕΞΟΔΟΣ             | 2,0007                 | 1,878          | 1,9827      | 1,8852         | 0,1227                 | 0,0975       |
| Συνέχεια<br>πίνακα | ΔΕΙΓΜΑ 1               | ΔΕΙΓΜΑ 2       | ΔΕΙΓΜΑ 1    | ΔΕΙΓΜΑ 2       | Μ.Ο. ΥΓΡΑΣΙΑΣ          |              |
|                    | g ΝΕΡΟΥ/g ΞΗΡΑΣ ΟΥΣΙΑΣ |                | % ΥΓΡΑΣΙΑ   |                | g ΝΕΡΟΥ/g ΞΗΡΑΣ ΟΥΣΙΑΣ | %<br>ΥΓΡΑΣΙΑ |
| ΝΩΠΗ ΖΥΜΗ          | 0,1979                 | 0,1876         | 16,52       | 15,80          | 0,1927                 | 16,16        |
| ΠΑΡΑΘΥΡΟ 1         | 0,1763                 | 0,1814         | 14,99       | 15,36          | 0,1789                 | 15,17        |
| ΠΑΡΑΘΥΡΟ 2         | 0,1457                 | 0,1559         | 12,72       | 13,49          | 0,1508                 | 13,10        |
| ΠΑΡΑΘΥΡΟ 3         | 0,0900                 | 0,0937         | 8,26        | 8,57           | 0,0918                 | 8,41         |
| ΕΞΟΔΟΣ             | 0,0653                 | 0,0517         | 6,13        | 4,92           | 0,0585                 | 5,53         |

### 3.Α.β) ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ( $D \text{ m}^2/\text{s}$ )

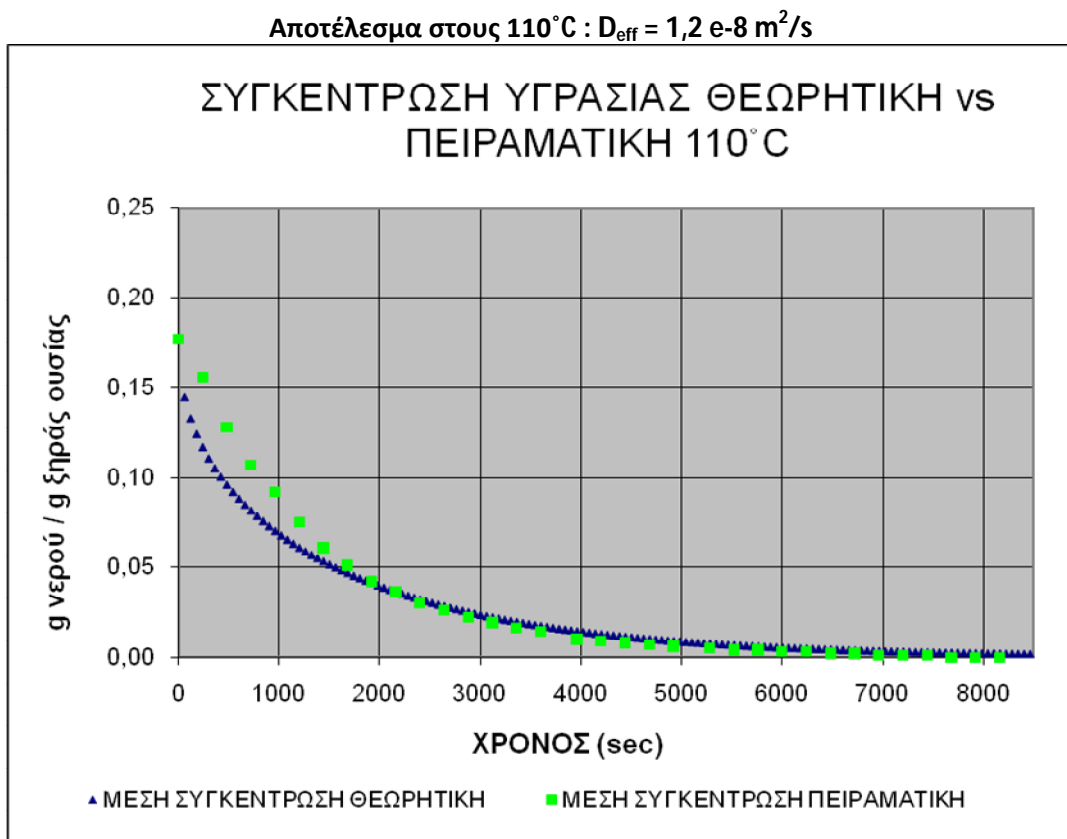
#### Πειραματική πορεία:

- Δημιουργήθηκαν μπισκότα από νωπή ζύμη όμοια μεταξύ τους ως προς τις διαστάσεις, οι οποίες ήταν ίδιες με τις πραγματικές των μπισκότων, όπως αναφέρονται στον πίνακα 1.
- Ο εργαστηριακός θερμοθάλαμος προθερμάνθηκε κάθε φορά σε μία από τις τέσσερις διαφορετικές θερμοκρασίες που έγιναν τα πειράματα:  $110^\circ\text{C}$ ,  $150^\circ\text{C}$ ,  $200^\circ\text{C}$ ,  $230^\circ\text{C}$ .
- Από την πρώτη στιγμή που εισήχθη το μπισκότο στον θάλαμο ( $t=0$ ), μετρούνταν το βάρος του κάθε 4 min, αφού πρώτα είχε μετρηθεί το αρχικό βάρος του νωπού  $\bar{\iota}$  μπισκότου.
- Γνωρίζοντας την ξηρά ουσία του μπισκότου, υπολογιζόταν για κάθε πείραμα (με διαφορετική θερμοκρασία αέρα φούρνου) ο λόγος  $g$  νερού /  $g$  ξηράς ουσίας για κάθε 4 min. Έτσι, σχηματιζόταν μια καμπύλη με άξονες την μέση συγκέντρωση υγρασίας προς τον χρόνο. Παρακάτω φαίνονται οι καμπύλες για τις 4 θερμοκρασίες:



Διάγραμμα 1: Καμπύλες μεταβολής με τον χρόνο της μέσης συγκέντρωσης υγρασίας του μπισκότου σε τέσσερις διαφορετικές θερμοκρασίες.

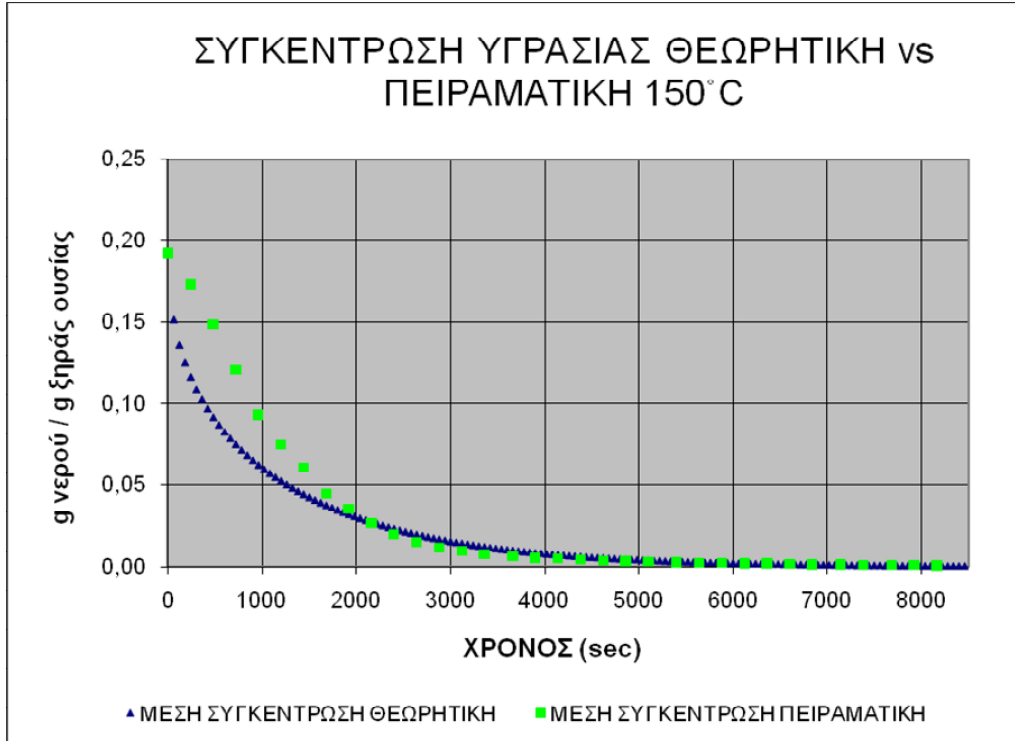
- Σε πρόγραμμα στο Microsoft Excel όπου γίνεται προσομοίωση της διάχυσης νερού μέσα στο μπισκότο, εισάγοντας ως δεδομένα τις διαστάσεις του, την αρχική συγκέντρωση υγρασίας, τον συντελεστή μεταφοράς μάζας και τον συντελεστή διάχυσης  $D_{\text{effective}}$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ ), δημιουργούνται δύο καμπύλες συγκέντρωσης υγρασίας. Η μία εκ των δύο προέρχεται από τις θεωρητικές τιμές του μοντέλου και η άλλη από τις πειραματικές τιμές συγκέντρωσης υγρασίας. Αλλάζοντας την τιμή της διάχυσης στα δεδομένα του μοντέλου, επιτυγχάνεται σύμπτωση των δύο καμπυλών. Η τιμή του συντελεστή διάχυσης με την οποία αυτό επετεύχθη, θεωρείται ότι είναι το αποτέλεσμα των πειραμάτων για τη διάχυση σε κάθε θερμοκρασία ξεχωριστά. Στο σημείο αυτό να αναφερθεί, ότι ο συντελεστής διάχυσης που υπολογίζεται δεν λαμβάνει υπόψη τις μεταβολές του όγκου του μπισκότου κατά το ψήσιμο, γι' αυτό και τα αποτελέσματα αφορούν το  $D_{\text{effective}}$ . Τα αποτελέσματα των πειραμάτων αυτών από την μοντελοποίηση φαίνονται στα παρακάτω τέσσερα διαγράμματα:



Διάγραμμα 2: Καμπύλες μεταβολής της μέσης συγκέντρωσης υγρασίας όπως προβλέπεται από το μοντέλο και όπως υπολογίστηκε πειραματικά στους 110°C.

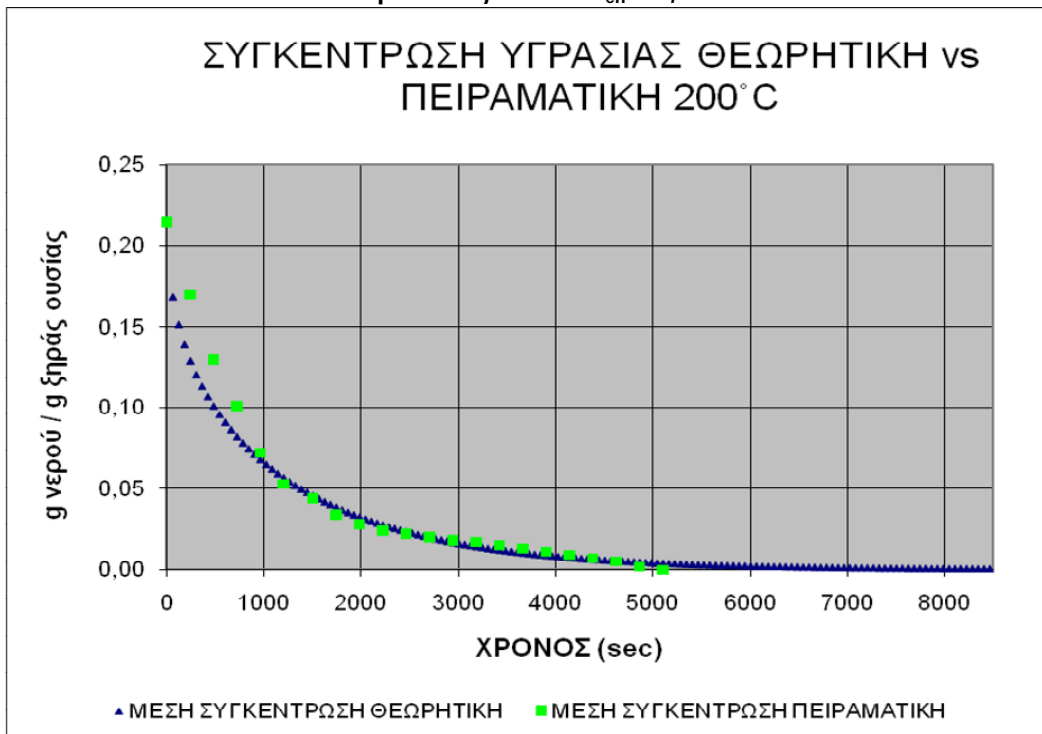


Αποτέλεσμα στους 150°C :  $D_{\text{eff}} = 2,3 \text{ e-}8 \text{ m}^2/\text{s}$



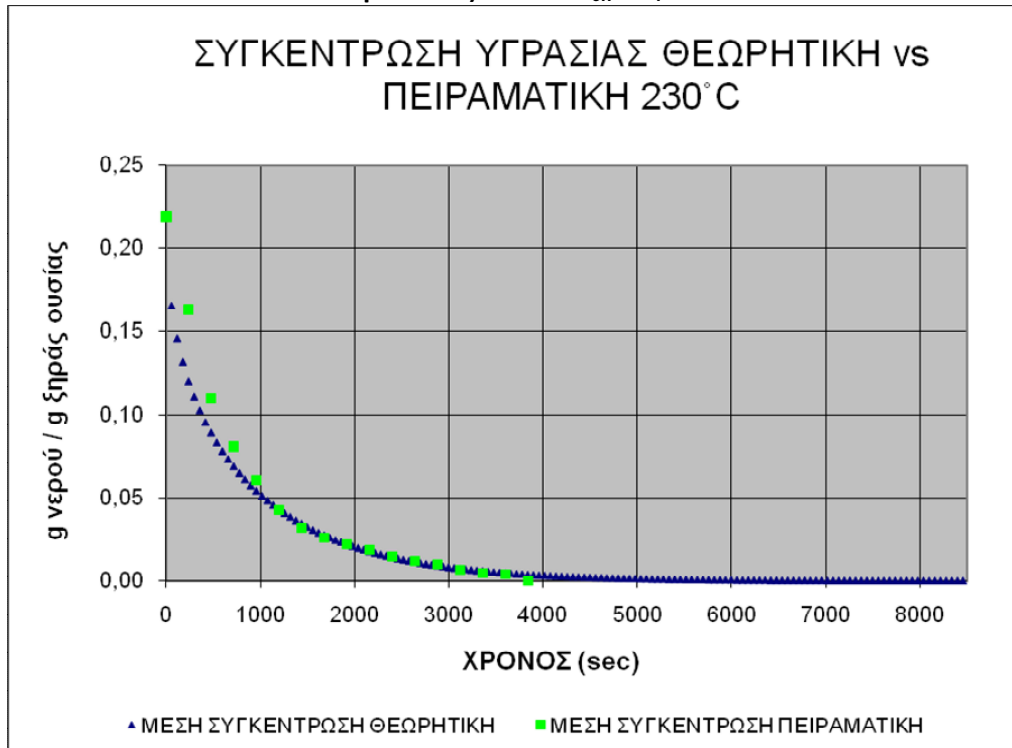
Διάγραμμα 3: Καμπύλες μεταβολής της μέσης συγκέντρωσης υγρασίας όπως προβλέπεται από το μοντέλο και όπως υπολογίστηκε πειραματικά στους 150°C.

Αποτέλεσμα στους 200°C :  $D_{\text{eff}} = 2,4 \text{ e-}8 \text{ m}^2/\text{s}$



Διάγραμμα 4: Καμπύλες μεταβολής της μέσης συγκέντρωσης υγρασίας όπως προβλέπεται από το μοντέλο και όπως υπολογίστηκε πειραματικά στους 200°C.

Αποτέλεσμα στους 230°C :  $D_{\text{eff}} = 3,2 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$



Διάγραμμα 5: Καμπύλες μεταβολής της μέσης συγκέντρωσης υγρασίας όπως προβλέπεται από το μοντέλο και όπως υπολογίστηκε πειραματικά στους 230°C.

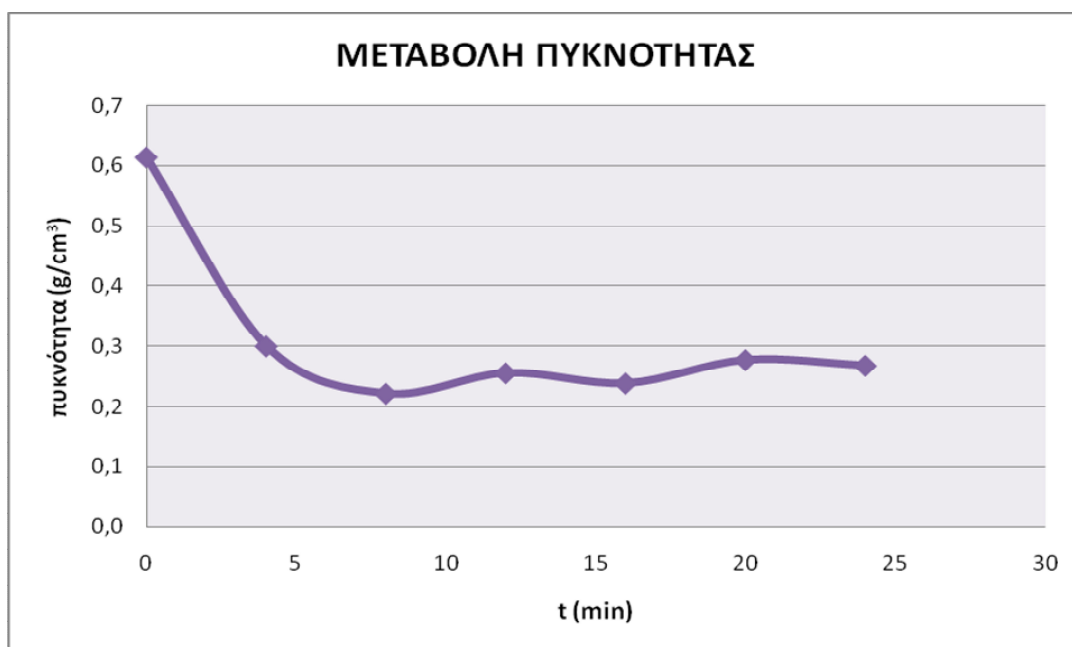
### 3.Α.γ) ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΜΠΙΣΚΟΤΟΥ ( $\rho \text{ kg/m}^3$ )

Η πυκνότητα μεταβάλλεται με τον χρόνο κατά τη διάρκεια ψησίματος του μπισκότου.

#### Πειραματική πορεία

- Δημιουργήθηκαν δύο όμοια μπισκότα όσον αφορά τις διαστάσεις (ίδιες με πραγματικές νωπού μπισκότου: πίνακας 1)
- Ζυγίστηκαν νωπά
- Ο εργαστηριακός θερμοκλίβανος προθερμάνθηκε στους 210°C
- Από την στιγμή που εισήχθησαν στον φούρνο ( $t=0$ ), κάθε 4min ζυγίζονταν και μετρούνταν οι διαστάσεις τους κατά τη διάρκεια 24min
- Άρα, έχοντας τις τιμές του όγκου τους και του βάρους τους σε σχέση με τον χρόνο, υπολογίστηκε η πυκνότητά τους ( $\text{g/cm}^3$ ) προς τον χρόνο (min):

| Πίνακας 3: Πυκνότητα μπισκότου (μέσος όρος 2 επαναλήψεων) |    |                          |    |                   |
|---|----|--------------------------|----|-------------------|
| ΜΑΖΑ (g)  |    | ΟΓΚΟΣ (cm <sup>3</sup> ) |    | ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ         |
| M.O.  | t  | M.O.                     | t  | g/cm <sup>3</sup> |
| 24,405  | 0  | 39,804                   | 0  | 0,613             |
| 23,895  | 4  | 79,681                   | 4  | 0,300             |
| 22,865  | 8  | 103,199                  | 8  | 0,222             |
| 22,22   | 12 | 86,951                   | 12 | 0,256             |
| 21,775  | 16 | 91,295                   | 16 | 0,239             |
| 21,335  | 20 | 76,978                   | 20 | 0,277             |
| 21,085  | 24 | 78,703                   | 24 | 0,268             |



Διάγραμμα 6: Καμπύλη μεταβολής με τον χρόνο της πυκνότητας του μπισκότου, όπως υπολογίστηκε με πειράματα σε εργαστηριακό φούρνο.

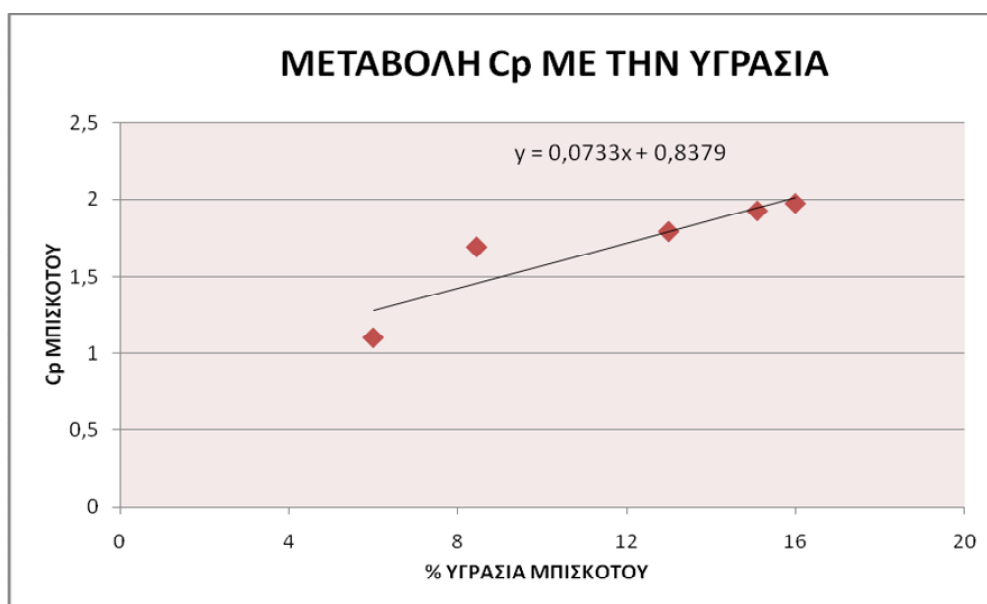
### 3.A.δ) ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΠΙΣΚΟΤΟΥ ΥΠΟ ΣΤΑΘΕΡΗ ΠΙΕΣΗ ( $c_p$ J/kg K)

Η ειδική θερμότητα υπολογίστηκε για κάθε ένα από τα στάδια ψησίματος που αναφέρονται στο κεφάλαιο 3A (δείγματα από τον βιομηχανικό φούρνο), χρησιμοποιώντας το σύστημα μέτρησης ειδικής θερμότητας DSC Q100 V9.4 Build 287.

#### Πειραματική πορεία

- Στα ειδικά καψάκια του μηχανήματος DSC τοποθετήθηκε δείγμα λίγων mg από το προϊόν για κάθε ένα από τα στάδια ψησίματος (ξεχωριστή μέτρηση για το κάθε ένα)
- Η μέθοδος που εφαρμόστηκε στο μηχάνημα μέτρησης  $c_p$  είναι η εξής: ξεκινώντας από τους 5°C και διατηρώντας την για 2min, να γίνεται άνοδος θερμοκρασίας 10°C / min έως τους 95°C. Η κάθε θερμοκρασία να διατηρείται για 2min.
- Ο τρόπος υπολογισμού του  $c_p$  είναι ο εξής:
  - είναι γνωστό το  $c_p$  για ένα συγκεκριμένο υλικό σε κάθε θερμοκρασία, που δίνει ο κατασκευαστής του DSC από το οποίο μπορεί να υπολογιστεί και ο συντελεστής διόρθωσης E
  - ο τύπος υπολογισμού του  $c_p$  για το προϊόν είναι :  $c_p = (E * H * 60) / (H_r * M)$  όπου E = ο συντελεστής διόρθωσης , H = ροή θερμότητας (mW) , 60 sec γιατί η άνοδος της θερμοκρασίας γίνεται ανά min,  $H_r$  = βήμα ανόδου θερμοκρασίας (°C) , M = μάζα δείγματος (mg) ,  $c_p$  (J/g °C)
  - για παράδειγμα: σε θερμοκρασία 86,9°C, το  $c_p$  για το πρότυπο υλικό είναι ίσο με 0,8878 J/g °C και ο συντελεστής διόρθωσης E = -0,774. Το δείγμα του προϊόντος στην ίδια θερμοκρασία 86,9°C δίνει τα εξής στοιχεία: M = 16 mg ,  $H_r = 10^\circ\text{C}$  , H = -6,797 mW, άρα  $c_p = (E * H * 60) / (H_r * M) = [(-0,774)*(-6,797)*60] / (10*16) = 1,973$  J/g °C.
- Για τα τέσσερα στάδια ψησίματος υπολογίστηκε η ειδική θερμότητα του προϊόντος. Η παρακάτω καμπύλη απεικονίζει την μεταβολή της ειδικής θερμότητας προς την συγκέντρωση υγρασίας που αντιστοιχεί σε κάθε ένα από τα πέντε αυτά στάδια (στον πίνακα 2 αναγράφεται το ποσοστό υγρασίας που περιέχει το προϊόν σε κάθε στάδιο ψησίματος). Φαίνεται και η γραμμική εξίσωση πρώτου βαθμού μεταβολής της ειδικής θερμότητας με την μεταβολή της υγρασίας του προϊόντος ( $y = 0,0733x + 0,8379$ ):

| Πίνακας 4: Αντιστοιχία $c_p$ με συγκέντρωση υγρασίας |           |       |
|--|-----------|-------|
| ΣΤΑΔΙΟ   | % ΥΓΡΑΣΙΑ | $C_p$ |
| ΝΩΠΟ   | 16        | 1,973 |
| ΠΑΡΑΘΥΡΟ 1   | 15,1      | 1,924 |
| ΠΑΡΑΘΥΡΟ 2   | 13        | 1,791 |
| ΠΑΡΑΘΥΡΟ 3   | 8,45      | 1,693 |
| ΕΞΟΔΟΣ   | 6         | 1,102 |



Διάγραμμα 7: Μεταβολή της ειδικής θερμότητας σύμφωνα με την μεταβολή της μέσης συγκέντρωσης υγρασίας του μπισκότου.

### 3.Α.ε) ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΟ ΚΕΝΤΡΟ ΤΟΥ ΜΠΙΣΚΟΤΟΥ ΣΕ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΙΑ ΜΕ ΤΗΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΤΟΥ ΑΕΡΑ ΤΟΥ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΥ ΦΟΥΡΝΟΥ

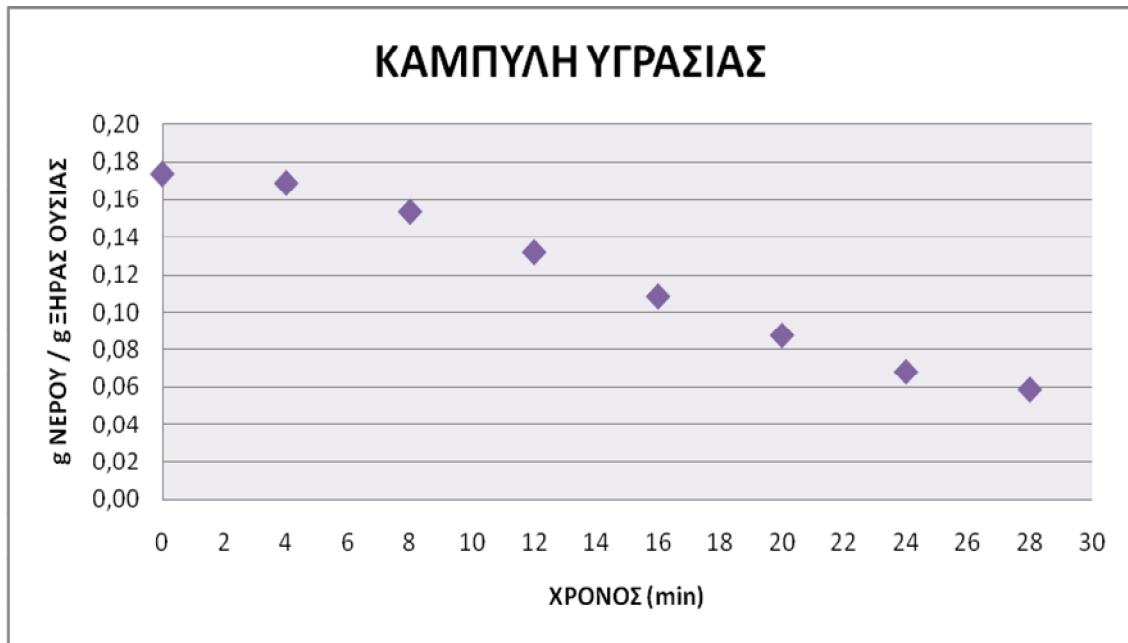
#### Πειραματική πορεία

- Δημιουργήθηκαν δύο πανομοιότυπα μπισκότα με διαστάσεις σαν τις πραγματικές.
- Στο κέντρο του ενός από τα δύο μπισκότα τοποθετήθηκε ένα θερμοζεύγος τύπου Κ.
- Ζυγίστηκε η αρχική μάζα του δεύτερου μπισκότου.
- Προθερμάνθηκε ο φούρνος σε θερμοκρασία 210°C.

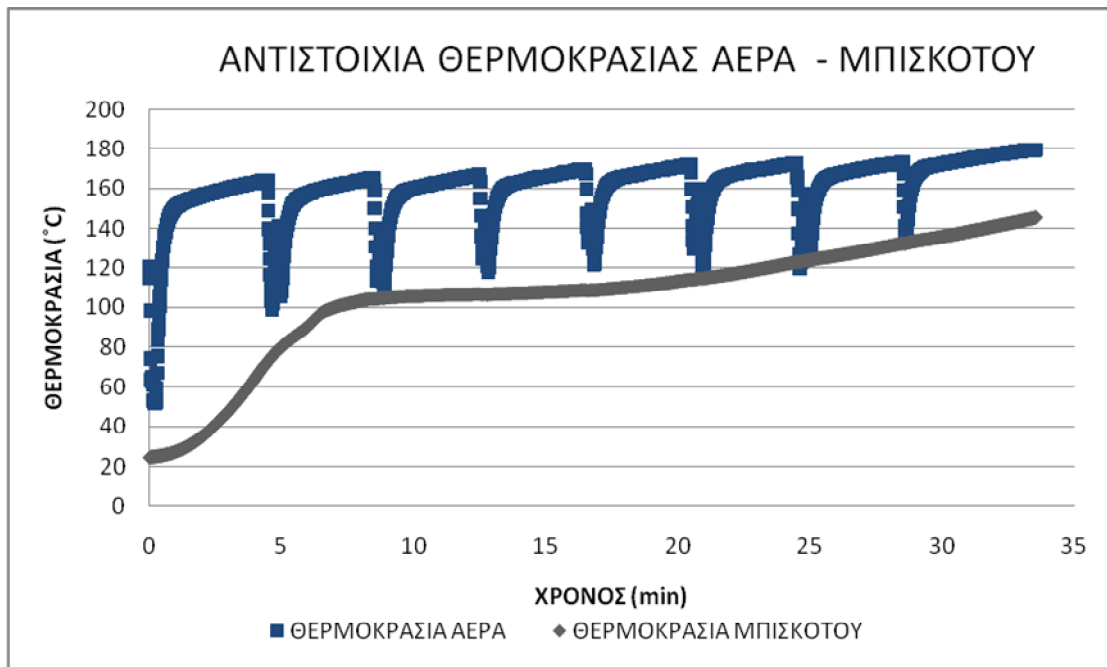
- Τα δύο μπισκότα τοποθετήθηκαν στον φούρνο και κοντά σε αυτά ένα άλλο θερμοζεύγος τύπου K για να καταγράφει την θερμοκρασία του αέρα του φούρνου.
- Η θερμοκρασία που μετρούν τα δύο θερμοζεύγη καταγράφεται στην καταγραφική μονάδα του μηχανήματος OM-220, Omega. Διάρκεια μέτρησης θερμοκρασίας 34 min.
- Κάθε 4 min γινόταν μέτρηση της μάζας του μπισκότου χωρίς θερμοζεύγος. Διάρκεια μέτρησης υγρασίας 28 min.
- Παρακάτω φαίνεται ένα διάγραμμα που δείχνει την συγκέντρωση υγρασίας προς τον χρόνο και ένα άλλο διάγραμμα που απεικονίζει την θερμοκρασία του αέρα φούρνου σε αντιστοιχία με την θερμοκρασία μέσα στο μπισκότο προς τον χρόνο. Οι διακυμάνσεις που παρατηρούνται στην θερμοκρασία του φούρνου προκλήθηκαν από το άνοιγμα του φούρνου για να γίνουν οι μετρήσεις υγρασίας στο δεύτερο μπισκότο.

**Πίνακας 5:** Αντιστοιχίες θερμοκρασιών και υγρασίας τις ίδιες χρονικές στιγμές

| t  | % Y      | T αέρα °C | T μπισκότου °C |
|----|----------|-----------|----------------|
| 0  | 14,77918 | 120,7     | 24,5           |
| 4  | 14,42971 | 162,6     | 63,8           |
| 8  | 13,30097 | 163,8     | 103,4          |
| 12 | 11,64465 | 165,8     | 106,6          |
| 16 | 9,760891 | 168,4     | 108,6          |
| 20 | 8,046155 | 170,6     | 113,3          |
| 24 | 6,372103 | 171,6     | 121,8          |
| 28 | 5,534973 | 172,1     | 131,3          |
| 32 |          | 177,1     | 141,1          |



Διάγραμμα 8: Μεταβολή της μέσης συγκέντρωσης υγρασίας με τον χρόνο ψησίματος.



Διάγραμμα 9: Καμπύλες πειραματικών τιμών θερμοκρασίας αέρα εργαστηριακού φούρνου σε σύγκριση με τιμές θερμοκρασίας στο εσωτερικό του μπισκότου, όπως καταγράφηκαν με θερμοζεύγη Κ.

### 3.Β) ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΣΥΝΘΗΚΩΝ

#### 3.Β.α) ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ

Η πρώτη ενέργεια με το ξεκίνημα της εργασίας, ήταν η μέτρηση και αποτύπωση της γεωμετρίας του φούρνου που μελετήθηκε. Μετρήθηκε το μήκος του φούρνου-τούνελ, η διατομή της εισόδου και της εξόδου, το πλάτος της μεταφορικής ταινίας, το πάχος των διπλών τοιχωμάτων στις δύο πλευρές του φούρνου, τα οποία διατρέχει θερμό καυσαέριο, και ο αριθμός και απόσταση μεταξύ των καυστήρων, οι οποίοι διαχωρίζουν νοητά τον φούρνο σε ζώνες διαφορετικών συνθηκών. Επίσης από μικρά ανοίγματα (παρέμεναν κλειστά κατά το ψήσιμο αλλά υπήρχε η δυνατότητα να ανοίξουν ώστε να παρακολουθηθεί η διεργασία) στην μία πλευρά του φούρνου μετρήθηκαν οι διαστάσεις της γεωμετρίας των αγωγών της οροφής του φούρνου, οι οποίοι χρησιμεύουν στην απομάκρυνση της συσσωρευμένης υγρασίας του περιβάλλοντος στο εσωτερικό του φούρνου κατά το ψήσιμο. Μετρήθηκε ο αριθμός και η απόσταση μεταξύ των αγωγών αυτών.

#### 3.Β.β) ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Επόμενο βήμα ήταν οι πειραματικές μετρήσεις των συνθηκών λειτουργίας του φούρνου.

##### Διαδικασία μετρήσεων:

- Ο φούρνος είχε έρθει σε σταθερή κατάσταση, προετοιμασμένος για να ξεκινήσει το ψήσιμο της πρώτης παρτίδας μπισκότων. Από ψηφιακά θερμομέτρα ενσωματωμένα στα τοιχώματα του φούρνου καταγράφηκαν οι θερμοκρασίες των καυσαερίων (μέσα στα διπλά τοιχώματα) στις διάφορες ζώνες του φούρνου. Πριν ξεκινήσουν τα μπισκότα να εισέρχονται μετρήθηκε η ταχύτητα του αέρα στην είσοδο και στην έξοδο του φούρνου με το σύστημα testo 451 που αποτελείται από τον αισθητήρα (testovent) και το καταγραφικό μηχάνημα.

- Όταν ξεκίνησε η διαδικασία ψησίματος, τοποθετήθηκαν θερμοζεύγη πάνω στην μεταφορική ταινία ανάμεσα από τα δύο πλαϊνά μπισκότα στο σημείο: 12,5cm απόσταση από την άκρη της ταινίας και 4,5cm ψηλότερα από την ταινία. Τα θερμοζεύγη ακολούθησαν την πορεία των μπισκότων μέχρι την έξοδό τους από τον φούρνο και πριν ξεκινήσει η ψύξη τους. Τα καλώδια των θερμοζευγών ήταν τύπου K, διαμέτρου 0,508mm από υλικό που δεν επηρεάζεται από τις υψηλές θερμοκρασίες του φούρνου, και είχαν μήκος 42m. Γινόταν καταγραφή θερμοκρασίας αέρα κάθε ένα sec στο καταγραφικό μηχάνημα OM-220, Omega. Για τα θερμοζεύγη που χρησιμοποιήθηκαν έγινε βαθμονόμηση με την χρήση γυάλινων πιστοποιημένων θερμομέτρων απ' όπου προέκυψαν εξισώσεις διόρθωσης για τα θερμοζεύγη. Υπολογίστηκε και η ταχύτητα της ταινίας.

- Καταγράφηκε το βήμα εισόδου των μπισκότων στον φούρνο και ο αριθμός των μπισκότων ανά σειρά.



### 3.Β.γ) ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ

- Θερμοκρασία καυσαερίων

1<sup>ος</sup> θάλαμος: 667 K (394°C)

2<sup>ος</sup> θάλαμος: 473 K (200°C)

3<sup>ος</sup> θάλαμος: 568 K (295°C)

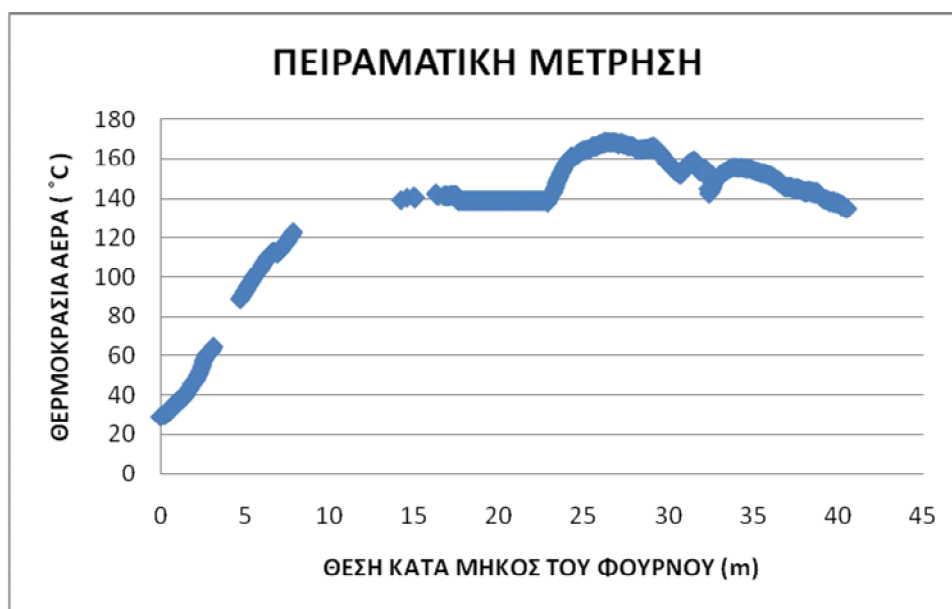
- Ταχύτητα αέρα

Είσοδος φούρνου: από τα πλευρικά τοιχώματα προς το κέντρο διαβάθμιση ταχύτητας από 0 έως 1 m/s.

Έξοδος φούρνου: 0 m/s (το όργανο όμως δεν έχει πολύ μεγάλη ευαισθησία, οπότε θεωρείται ότι υπάρχει μια πολύ μικρή ταχύτητα της τάξης του 0,05 m/s)

- Θερμοκρασία αέρα κατά την λειτουργία του φούρνου

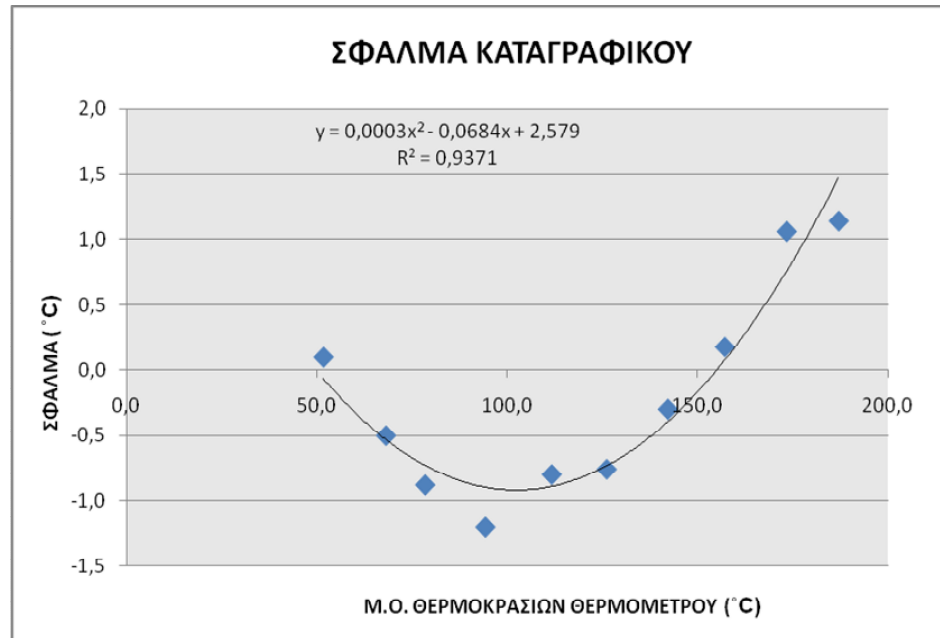
Ο τρόπος που έγινε η πειραματική μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα με τα θερμοζεύγη περιγράφεται παραπάνω. Το καταγραφικό μετρούσε την θερμοκρασία σε °C ανά 1 sec. Έγινε μετατροπή του χρόνου σε απόσταση από την είσοδο του φούρνου, ως εξής: το καταγραφικό έχει μετρήσει τιμές θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια 14 min (840 sec) για συνεχόμενα 42 m. Άρα κάθε sec αντιστοιχεί σε 0,05 m. Οι καταγεγραμμένες τιμές φαίνονται στον αντίστοιχο πίνακα στο Παράρτημα (πίνακας 4).



Διάγραμμα 10: Καμπύλη πειραματικών τιμών θερμοκρασίας αέρα του βιομηχανικού φούρνου όπως καταγράφηκε από τα θερμοζεύγη κατά την λειτουργία του.

- Βαθμονόμηση καταγραφικού με γυάλινα θερμομέτρα

Τα θερμοζεύγη του καταγραφικού βαθμονομήθηκαν με γυάλινα θερμομέτρα ώστε να γίνει διόρθωση των τιμών θερμοκρασίας που κατέγραψε. Το παραπάνω διάγραμμα απεικονίζει τις τιμές διορθωμένες και την θερμοκρασία σε σχέση με την απόσταση και όχι με τον χρόνο. Στον αντίστοιχο πίνακα του Παραρτήματος (πίνακας 5) φαίνεται η εξίσωση διόρθωσης των τιμών του καταγραφικού.



Διάγραμμα 11: Υπολογισμός σφάλματος των θερμοκρασιών που καταγράφει το Omega OM-220, με τη βοήθεια βαθμονομημένων γυάλινων θερμομέτρων.

- Ταχύτητα ταινίας

Τα θερμοζεύγη του καταγραφικού διένυσαν 42m, όσο είναι το μήκος του θαλάμου ψησίματος, σε 14 min όπως φαίνεται στον πίνακα 4 του παραρτήματος. Άρα,  $u = 42m/840sec = 0,05m/s$  ταχύτητα ταινίας.

- Αριθμός μπισκότων που εισέρχονται σε σχέση με τον χρόνο

Σε κάθε βήμα της μηχανής σχηματισμού της ζύμης, τοποθετούνται πάνω στην ταινία 9 μπισκότα, μετρώντας κατά τον άξονα z, και 44 σειρές μπισκότων / min (μετρώντας κατά τον άξονα x). Άρα, στον φούρνο εισέρχονται 396 μπισκότα / min.

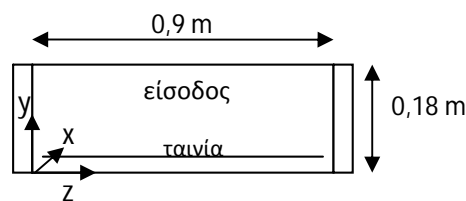
### 3. Γ) ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ CFD

Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκαν τα προγράμματα Gambit 2.3.16 και Fluent 6.3.26. Το Gambit χρησίμευσε στον σχεδιασμό της γεωμετρίας, την κατασκευή του πλέγματος και τον ορισμό των οριακών συνθηκών, ενώ το Fluent ήταν ο λύτης. Στην εύχρηστη πλατφόρμα του Fluent, εισάγονται τα δεδομένα, όπως, τα μεγέθη στις οριακές συνθήκες (ταχύτητα και θερμοκρασία ρευστού εισόδου, πίεση, μετάδοση θερμότητας από και προς τα τοιχώματα κ.ά.), ενεργοποιούνται και επιλέγονται τα επιπλέον κατάλληλα μοντέλα που πρέπει να λυθούν (τύρβη, ακτινοβολία, πολυφασικά κ.ά.), επιλέγονται τα υλικά και εισάγονται οι φυσικές τους ιδιότητες (πυκνότητα, ειδική θερμότητα, θερμική αγωγιμότητα κ.ά.), ορίζονται οι αρχικές συνθήκες, ρυθμίζεται ο λύτης ανάλογα με το πρόβλημα και ξεκινά η επίλυση.

Τέλος, μετά το πέρας των λύσεων, ακολουθεί η μετεπεξεργασία των αποτελεσμάτων με τη βοήθεια γραφικών εργαλείων του Fluent, όπως γραφήματα πλέγματος, ισοϋψών και ανυσμάτων, γραμμές ροής και τροχιές σωματιδίων, διαγράμματα  $xy$ , και κινούμενα αποτελέσματα (animations). Επίσης, περιλαμβάνονται τα εργαλεία αριθμητικής αναφοράς όπως ισοζύγια παροχών και θερμότητας και μέσες τιμές σε σημεία, γραμμές, επιφάνειες και όγκους.

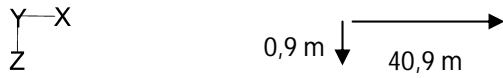
#### 3.Γ.α) ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΦΟΥΡΝΟΥ

Ο σχεδιασμός της γεωμετρίας έγινε σε τρισδιάστατη μορφή με την χρήση καρτεσιανού συστήματος  $(x,y,z)$  του οποίου η αρχή των αξόνων βρίσκεται στην κάτω αριστερή εσωτερική γωνία της εισόδου του φούρνου. Όπου  $x$  ο άξονας κατά μήκος του φούρνου,  $y$  ο άξονας κατά το ύψος του φούρνου και  $z$  ο άξονας του πλάτους του φούρνου.

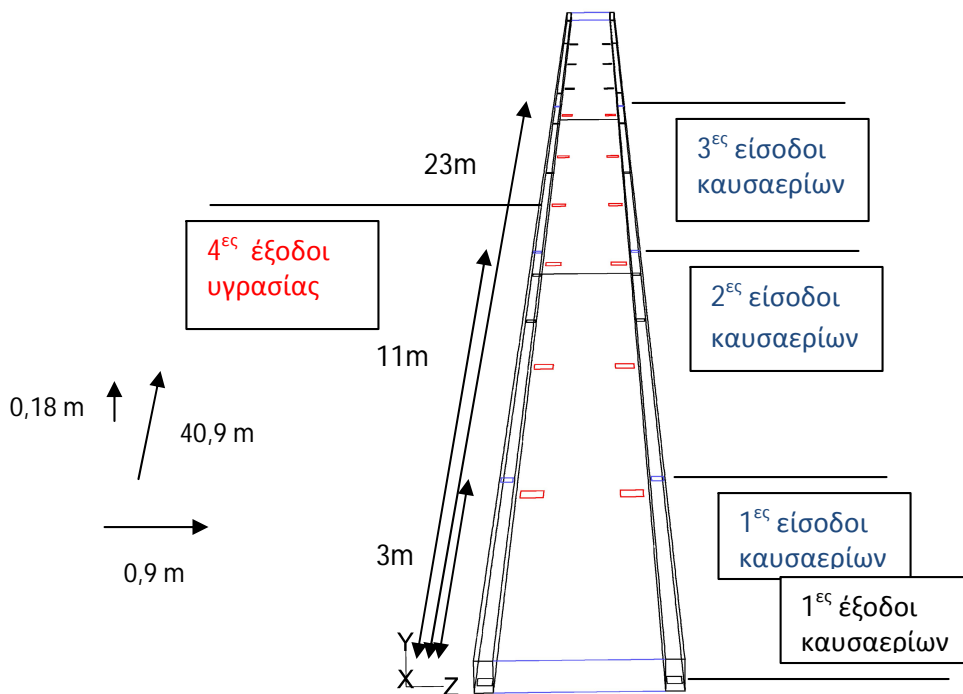


Εικόνα 10: Σχέδιο της εισόδου του φούρνου όπου φαίνεται η αρχή των αξόνων

Οι διαστάσεις του βιομηχανικού θαλάμου ψησίματος που μελετήθηκε για να εξυπηρετηθεί ο σκοπός της εργασίας, είναι: μήκος φούρνου 40,9m, ύψος φούρνου (θαλάμου) 0,18m, πλάτος φούρνου (άνοιγμα εισόδου/εξόδου) 0,9m και πλάτος ταινίας 0,8m (απόσταση από τα πλαϊνά τοιχώματα του θαλάμου 0,05m από κάθε πλευρά). Η απόσταση της ταινίας από τον πάτο του φούρνου είναι 0,04m.



Εικόνα 11: Κάτοψη του φούρνου. Από αριστερά η είσοδος, και οι δύο κάθετες γραμμές που φαίνεται να χωρίζουν τον φούρνο, είναι νοητές στην θέση που τελειώνει η κάθε ζώνη ψησίματος.

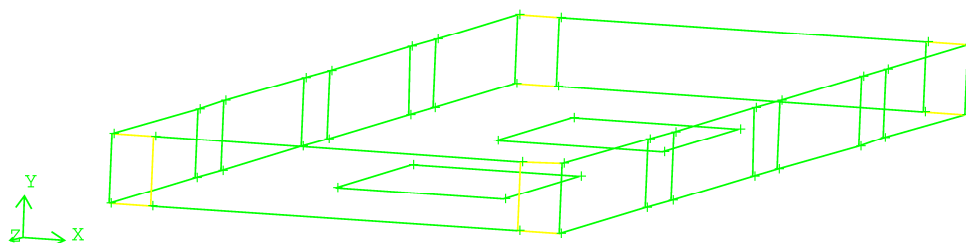


Εικόνα 12: Προοπτική όψη του φούρνου κοιτώντας τον από την είσοδο προς το τέλος του.

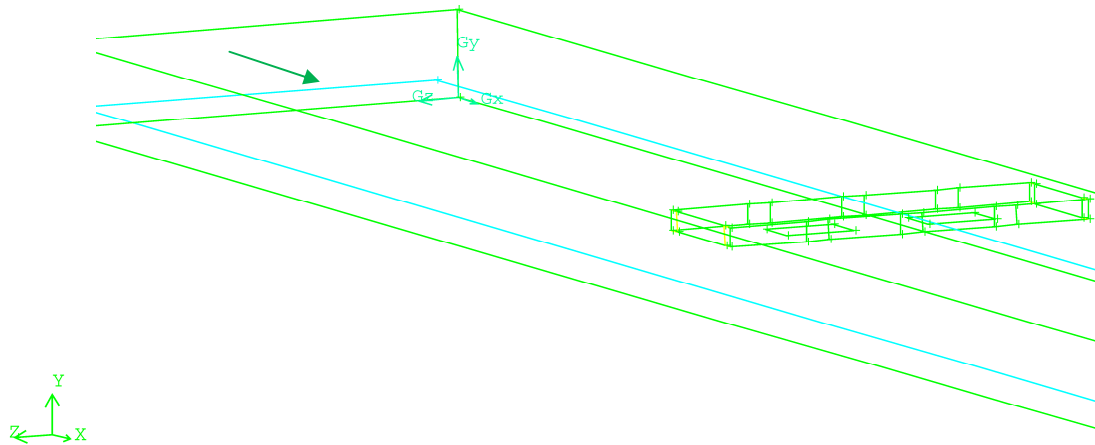
Ο φούρνος λειτουργεί με θέρμανση των πλαϊνών τοιχωμάτων, τα οποία είναι διπλά και από μέσα τους περνά θερμό αέριο το οποίο παρέχουν οι καυστήρες. Ο συγκεκριμένος φούρνος διαθέτει τρεις καυστήρες τοποθετημένους στην οροφή του φούρνου και οι οποίοι είναι ρυθμισμένοι να θερμαίνουν το αέριο σε διαφορετικές θερμοκρασίες, ώστε να εξυπηρετούν τις διαφορετικές ανάγκες σε θερμότητα που χρειάζεται το προϊόν σε κάθε στάδιο του ψησίματός του. Αποτέλεσμα αυτού, είναι ο νοητός διαχωρισμός του φούρνου σε τρεις ζώνες. Ο πρώτος καυστήρας βρίσκεται 3m από την είσοδο του φούρνου, ο δεύτερος 11m από την είσοδο του φούρνου και ο τρίτος στα 23m από την είσοδο. Από τους καυστήρες το θερμό αέριο διοχετεύεται δεξιά και αριστερά του θαλάμου ψησίματος, στο εσωτερικό των διπλών τοιχωμάτων, μέσω οπών στην οροφή τους που βρίσκονται στις αποστάσεις που αναφέρθηκαν για την θέση των τριών καυστήρων, με διαστάσεις οπών: 0,08 x 0,1m. Τα διπλά τοιχώματα, στο σημείο που αρχίζει ο επόμενη ζώνη, διαχωρίζονται με μεταλλικό τοίχωμα, ώστε ο μανδύας της κάθε ζώνης να είναι απομονωμένος από τον

επόμενο, για να ρυθμίζεται καλύτερα έτσι η διαφορετική θέρμανση. Στον πάτο του κάθε μανδύα το καυσαέριο απομακρύνεται από εξόδους και ανακυκλώνεται μέσω του καυστήρα για λόγους οικονομίας ενέργειας. Άρα, η πρώτη ζώνη έχει μία έξοδο καυσαερίων στην αρχή του μανδύα (σημείο στον άξονα  $x=0,1m$ ), και μία άλλη  $0,1m$  πριν από το τέλος του πρώτου μανδύα, ώστε το καυσαέριο να διατρέχει όλο τον  $1^{\circ}$  θάλαμο, και αντίστοιχα τις ίδιες στην απέναντι πλευρά του φούρνου. Η δεύτερη ζώνη έχει μία έξοδο  $0,1m$  πριν το τέλος του δεύτερου μανδύα και αντίστοιχα στην απέναντι πλευρά, και η τρίτη ζώνη επίσης μία έξοδο  $0,1m$  από το τέλος του τελευταίου μανδύα. Οι διαστάσεις των οπών εξόδου των καυσαερίων είναι ίδιες με των εισόδων:  $0,08 \times 0,1m$ . Τα διπλά τοιχώματα δεξιά και αριστερά του θαλάμου ψησίματος έχουν πάχος  $0,1m$ .

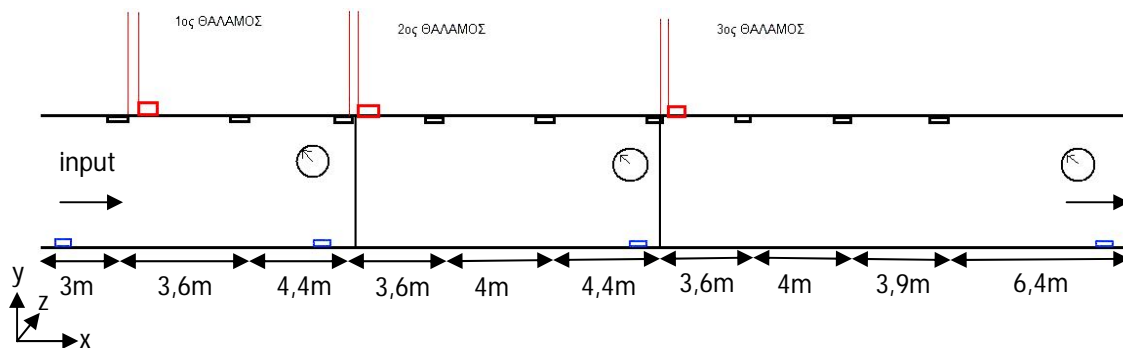
Στην οροφή του φούρνου υπάρχουν οι αγωγοί που απομακρύνουν την υγρασία, και με μοχλό από την εξωτερική επιφάνεια του φούρνου μπορεί ο χρήστης να ρυθμίσει το άνοιγμα και άρα το κατά πόσο θα απομακρυνθεί η υγρασία. Οι αγωγοί αυτοί βρίσκονται στις θέσεις:  $1^{ος}$  –  $3m$  από την είσοδο,  $2^{ος}$  – στα επόμενα  $3,6m$ ,  $3^{ος}$  – στα επόμενα  $4,4m$ ,  $4^{ος}$  – στα επόμενα  $3,6m$ ,  $5^{ος}$  – στα επόμενα  $4m$ ,  $6^{ος}$  – στα επόμενα  $4,4m$ ,  $7^{ος}$  – στα επόμενα  $3,6m$ ,  $8^{ος}$  – στα επόμενα  $4m$ ,  $9^{ος}$  – στα επόμενα  $3,9m$  δηλαδή  $6,4m$  από το τέλος του φούρνου. Οι αγωγοί αυτοί στην πραγματικότητα έχουν την γεωμετρία που φαίνεται στο παρακάτω σχέδιο (εικόνα 13) και έτσι σχεδιάστηκαν αρχικά και χρησιμοποιήθηκαν στις πρώτες λύσεις του προβλήματος. Όμως λόγω του πολύπλοκου σχηματισμού τους και των πολλών μικρών οπών, δυσκόλευε πολύ την δημιουργία ικανοποιητικού πλέγματος στην περιοχή αυτή και έτσι δημιουργούταν πρόβλημα και στην λύση (ανακριβή αποτελέσματα). Για λόγους διευκόλυνσης λοιπόν, και υποθέτοντας ότι δεν αποκλίνουν πολύ της πραγματικής τους λειτουργίας, οι αγωγοί που σχεδιάστηκαν στα τελικά σχήματα γεωμετρίας ήταν δύο οπές (μία δεξιά και μία αριστερά, στην οροφή του φούρνου αντικριστά, όπως οι δύο μεγάλες οπές στον πάτο του αγωγού υγρασίας)  $0,15 \times 0,15m$  (υδραυλική διάμετρος  $0,15m$ ), σε απόσταση από τα πλευρικά τοιχώματα  $0,05m$ .



Εικόνα 13: Σχέδιο αγωγού απομάκρυνσης της υγρασίας όπως είναι στην πραγματικότητα.



Εικόνα 14: Τμήμα του θαλάμου του φούρνου κοντά στην είσοδο, όπου φαίνεται στην οροφή ο πρώτος αγωγός υγρασίας.



Εικόνα 15: Σχέδιο απλουστευμένης απεικόνισης των βασικών οριακών συνθηκών του φούρνου.

☐ : οι θέσεις των οπών απομάκρυνσης της υγρασίας , ☐ : οι θέσεις εξόδου των καυσαερίων , ☐ : οι θέσεις εισόδου των καυσαερίων (οι θέσεις των καυστήρων) , (όλες οι οπές είναι επίπεδες χωρίς πάχος και βρίσκονται στο επίπεδο xz, παράλο που στο σχήμα αναγκαστικά σχεδιάστηκαν διαφορετικά) , ⊙ : τα ενσωματωμένα στον φούρνο θερμομέτρα , οι δύο κάθετες γραμμές δείχνουν τα σημεία που είναι διαχωρισμένα εσωτερικά τα διπλά τοιχώματα ώστε να μην συγκοινωνούν τα καυσαέρια της κάθε ζώνης. (Το σχήμα δείχνει τον φούρνο από το πλάι.)

Η μεταφορική ταινία, λόγω του ότι είναι πολύ μικρή η απόστασή της από τον πάτο του φούρνου και υποτίθεται ότι ροή σημαντική δεν υπάρχει κάτω από αυτήν, την θεωρήσαμε ανύπαρκτη και τα μπισκότα ακουμπούν ουσιαστικά στον πάτο του φούρνου. Η απόκλιση σίγουρα είναι αμελητέα καθώς η ταινία αποτελείται από το ίδιο υλικό με τον πάτο και τα τοιχώματα του φούρνου, δεν είναι διάτρητη, άρα δεν γίνεται μεταφορά θερμότητας με συναγωγή, παρά μόνο με αγωγή, αφού αυτή θερμανθεί με συναγωγή από τον θερμό αέρα του φούρνου και με ακτινοβολία που εκπέμπεται από τα πλαϊνά τοιχώματα.

Ο φούρνος κυρίως ψήνει το προϊόν μέσω ακτινοβολίας από τα πλαϊνά τοιχώματα. Ο αέρας του φούρνου θερμαίνεται και αυτός καθώς επίσης και τα τοιχώματα του φούρνου, και έτσι στο ψήσιμο συμμετέχουν και οι άλλες δύο μορφές μετάδοσης θερμότητας, συναγωγή και αγωγή. Το μόνο μέρος του προϊόντος που ψήνεται κυρίως με αγωγή είναι η κάτω επιφάνεια των μπισκότων που εφάπτονται στην συμπαγή ταινία. Ο αέρας του φούρνου χαρακτηρίζεται από φυσική ροή, καθώς δεν υπάρχουν σε κανένα σημείο του εσωτερικά, ανεμιστήρες. Στο μόνο σημείο που υπάρχει εξοπλισμός που να προκαλεί μια μικρή βεβιασμένη κυκλοφορία είναι στην άκρη των καμινάδων, που αναγκάζουν την υγρασία και τον αέρα να κινείται με μικρή όμως ταχύτητα έξω, μέσω των αγωγών της οροφής του φούρνου.

### 3.Γ.β) ΠΟΡΕΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Ο καταλληλότερος τρόπος, καθώς έχει δείξει η εμπειρία, για να λυθεί ένα πολύπλοκο πρόβλημα CFD, με πολλές παραμέτρους, είναι να ξεκινήσει από μια πιο απλή και ευκολότερη στην λύση γεωμετρία και σταδιακά να εμπλουτίζεται με νέα στοιχεία γεωμετρίας και δεδομένων. Έτσι, αποφεύγονται τα κρίσιμα λάθη, είναι πιο εύκολο ο ερευνητής να ανακαλύψει την αιτία των προβλημάτων που δημιουργούνται στην πορεία και επιπλέον οι προσαρμογές και αλλαγές που γίνονται κατά την μοντελοποίηση είναι λιγότερο χρονοβόρες όταν εφαρμόζονται σε πιο απλή βάση.

Σε αυτήν την εργασία ακολουθήθηκε ο ενδεδειγμένος αυτός τρόπος και παρακάτω παρουσιάζεται η πορεία των εργασιών, η μέθοδος που ακολουθήθηκε και τα απαραίτητα στοιχεία για την κατανόηση των αποτελεσμάτων.

#### Κριτήρια σύγκλισης

Καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων προσομοίωσης, διατηρήθηκαν τα προεπιλεγμένα από τον λύτη (Fluent) κριτήρια σύγκλισης:

Για εξισώσεις συνέχειας, ορμής και στους τρεις άξονες, k, epsilon, διατήρηση μάζας υλικών (air, H<sub>2</sub>O (l)) = 0,001 , ενώ για εξισώσεις ενέργειας και μοντέλου ακτινοβολίας = 1 e -06.

#### Χαρακτηριστικά υπολογιστή που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση

Επεξεργαστής : 2.4 GHz DUO CORE

Μνήμη RAM : 2 GB

Μνήμη κάρτας γραφικών :512 MB

Λογισμικό : Windows XP SP3

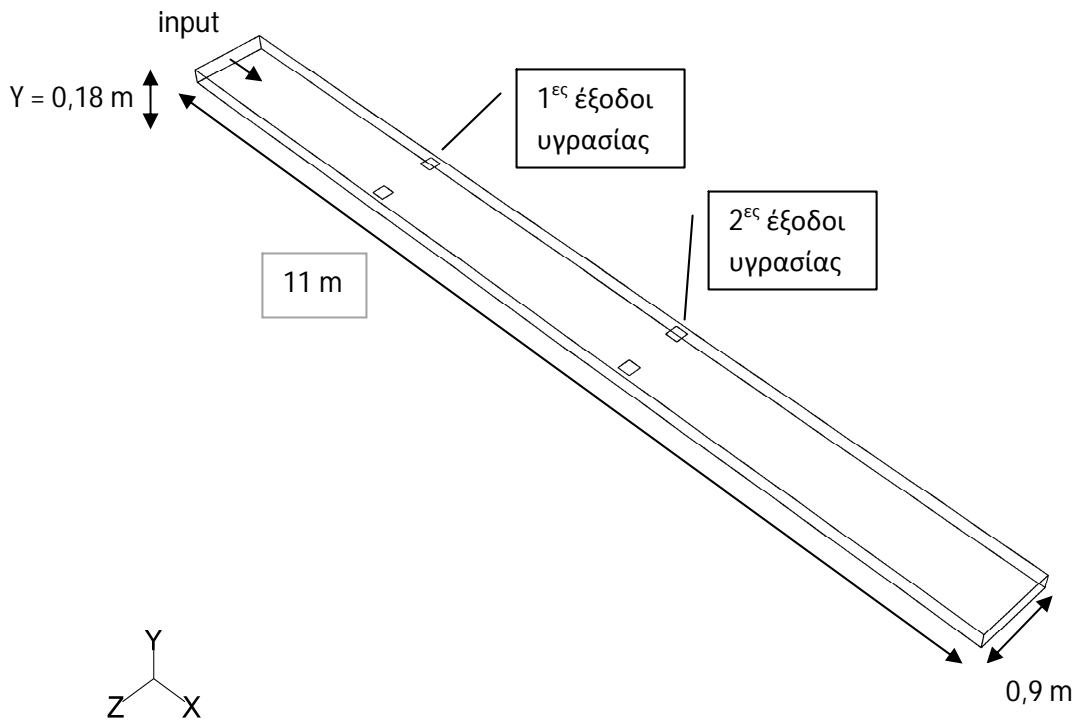
Λογισμικό προσομοίωσης : Fluent 6.3.26 , Gambit 2.3.16

#### 3.Γ.β.ι) ΔΟΚΙΜΕΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΚΑΙ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗΣ - ΣΤΑΔΙΟ 1<sup>ο</sup>

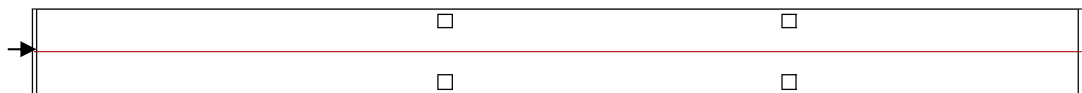
Στον 1<sup>ο</sup> θάλαμο του φούρνου, για λόγους ταχύτητας λήψης αποτελεσμάτων, έγιναν **δοκιμές** με τις διάφορες επιλογές που δίνει το **Fluent ως λύτες**, ώστε να αποφασιστεί ποιος θα είναι αυτός που θα χρησιμοποιηθεί στην πορεία της εργασίας. Αυτό δεν σημαίνει ότι στην συνέχεια δεν έγιναν διάφοροι πειραματισμοί με όλους σχεδόν τους λύτες πάνω στην προσπάθεια κατανόησης της αιτίας διαφόρων προβλημάτων.



Σχηματική απεικόνιση



Εικόνα 16: Γεωμετρία θαλάμου όπου φαίνονται και οι έξοδοι του αέρα στην οροφή.



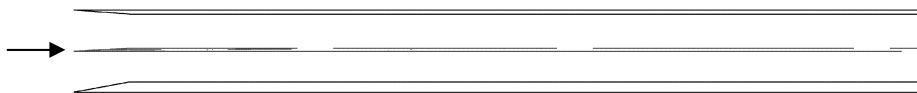
Εικόνα 17: Κάτοψη του θαλάμου όπου φαίνεται το σημείο ελέγχου A1 (και στο παράρτημα), διαμήκης γραμμή ακριβώς στο κέντρο του φούρνου, ως προς τους άξονες  $y$  και  $z$ .



Εικόνα 18: Το ίδιο σημείο ελέγχου A1 βλέποντάς το ανάμεσα στην οροφή και τον πάτο του φούρνου.



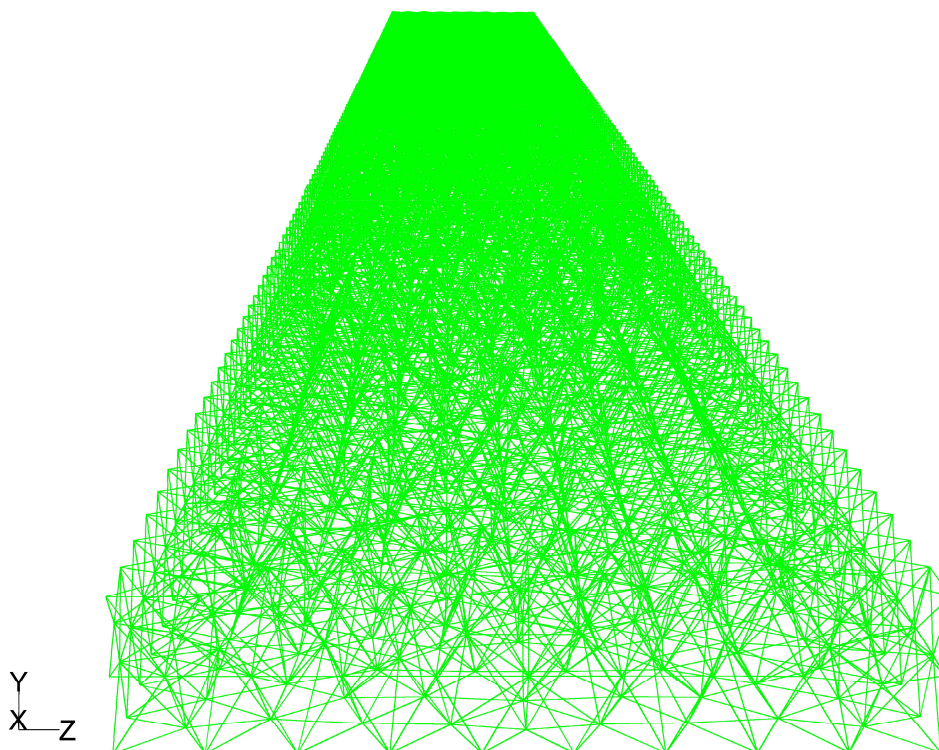
Εικόνα 19: Κάτοψη του θαλάμου όπου φαίνεται το σημείο ελέγχου A2, η εγκάρσια γραμμή στην μέση του φούρνου, ως προς τους άξονες x και y.



Εικόνα 20: Τμήμα του θαλάμου όπου φαίνεται το σημείο ελέγχου A3, οριζόντιο διάμηκες επίπεδο ανάμεσα στην οροφή και τον πάτο του φούρνου.

### Σχεδιασμός πλέγματος

- Αριθμός κελιών (cells): 14353
- Αριθμός επιφανειών (faces): 31632
- Αριθμός κόμβων (nodes): 3980



### Οριακές συνθήκες

| Περιοχή που εφαρμόζονται | Είδος οριακής συνθήκης   | Αιτιολόγηση-Παρατηρήσεις   |
|--------------------------|--|--|
| Είσοδος φούρνου          | Velocity inlet<br>0,8 m/s παράλληλα στον άξονα x (Υδραυλ. Διάμετρος = 0,3 m)   | Είναι γνωστή η ταχύτητα εισόδου του αέρα   |
| Έξοδος φούρνου           | Pressure outlet<br>0 Pa (θα λυθεί από το Fluent)<br>(Υδραυλ. Διάμετρος = 0,3m) | Είναι προτιμότερη σε περιπτώσεις που δεν γνωρίζουμε την ταχύτητα αέρα στην έξοδο, και επίσης συγκλίνει πολύ πιο εύκολα σε περιπτώσεις οπισθοροής |

|                       |   |  |
|-----------------------|---|--|
| Έξοδοι υγρασίας       | Pressure outlet<br>0 Pa (θα λυθεί από το Fluent)<br>(Υδραυλ. Διάμετρος = 0,15m)             | Υπάρχει η δυνατότητα ορισμού της στατικής πίεσης στην περιοχή ή να παραμείνουν στην προεπιλεγμένη τιμή 0 από το Fluent ώστε να ληφθεί λύση |
| Οροφή – Πάτος φούρνου | Wall<br>Απώλειες = 100W/m <sup>2</sup><br>Ικανότητα εκπομπής ακτινοβολίας = 0,7             | Ορίζεται το υλικό, οι απώλειες θερμότητας και η συμμετοχή στην ακτινοβολία   |
| Πλευρικοί τοίχοι      | Wall<br>Ικανότητα εξωτερικής & εσωτερικής εκπομπής = 0,7<br>Θερμοκρασία ακτινοβολίας = 500K | Είναι αυτοί που εκπέμπουν θερμότητα μέσω ακτινοβολίας  |

#### Αρχικές συνθήκες

Οι τιμές εκκίνησης είναι οι προεπιλεγμένες που προτείνει το Fluent.

#### Μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν

##### Τύπος μοντέλου

##### Επιλογές μοντέλων

|                      |  |  |
|----------------------|--|--|
| Μοντέλα επίλυσης     | Pressure based solver  | Σταθερή στον χρόνο κατάσταση (μελετήθηκε όταν το σύστημα βρισκόταν σε ισορροπία) |
| Μοντέλο ιξώδους      | k – epsilon 2 εξισώσεων<br>Μοντέλο RNG                           | Συμπεριφορά κοντά στα τοιχώματα : Standard Wall Functions                        |
| Μοντέλο ακτινοβολίας | Discrete Ordinates (DO)<br>Ανενεργό μοντέλο ηλιακής ακτινοβολίας | Γωνιακή διακριτοποίηση:<br>θ, φ divisions = 3<br>θ, φ pixels = 1                 |

## Υλικά που ορίστηκαν

| Είδος υλικού | Υλικό   | Παρατηρήσεις   |
|--------------|---|--|
| Ρευστό       | Αέρας (κυκλοφορεί στον θάλαμο ψησίματος)        | Εισαγωγή θερμοφυσικών ιδιοτήτων αέρα σε μορφή piecewise-linear από την θερμοκρασία 250K έως και 1100K (Παράρτημα – πίνακας 1)<br><br>Συντελεστής απορρόφησης: 0,02 1/m<br><br>Συντελεστής σκέδασης: 0,01 1/m |
| Στερεό       | Χάλυβας (αποτελούνται τα τοιχώματα του φούρνου) | Συντελεστής απορρόφησης: 10000 1/m<br><br>Συντελεστής σκέδασης: 0,1 1/m  |

## Επιλογές λύτη

Οι εξισώσεις που επιλύονται είναι της ροής, της τύρβης, της ενέργειας και της ακτινοβολίας (μοντέλο DO).

Οι δοκιμές στο στάδιο αυτό έγιναν αλλάζοντας τους αλγόριθμους σύζευξης πίεσης – ταχύτητας (pressure-velocity coupling) και τα σχήματα διακριτοποίησης της πίεσης και της ορμής (discretization) διατηρώντας τις προεπιλεγμένες τιμές των παραγόντων υποχαλάρωσης (under-relaxation factors).

Οι συνδυασμοί που δοκιμάστηκαν είναι οι εξής:

| ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ     | ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΙΕΣΗΣ/ΟΡΜΗΣ                          |
|----------------|--|
| <b>SIMPLE</b>  | STANDARD / 1 <sup>st</sup> order upwind              |
| <b>SIMPLEC</b> | STANDARD / 1 <sup>st</sup> order upwind              |
| <b>PISO</b>    | STANDARD / 1 <sup>st</sup> order upwind              |
| <b>COUPLED</b> | STANDARD / 1 <sup>st</sup> order upwind              |
| <b>SIMPLE</b>  | PRESTO! / 1 <sup>st</sup> order upwind               |
| <b>SIMPLE</b>  | 2 <sup>nd</sup> order / 2 <sup>nd</sup> order upwind |
| <b>SIMPLEC</b> | PRESTO! / 1 <sup>st</sup> order upwind               |
| <b>SIMPLEC</b> | 2 <sup>nd</sup> order / 2 <sup>nd</sup> order upwind |
| <b>PISO</b>    | PRESTO! / 1 <sup>st</sup> order upwind               |
| <b>PISO</b>    | 2 <sup>nd</sup> order / 2 <sup>nd</sup> order upwind |
| <b>COUPLED</b> | PRESTO! / 1 <sup>st</sup> order upwind               |
| <b>COUPLED</b> | 2 <sup>nd</sup> order / 2 <sup>nd</sup> order upwind |

Στο σημείο αυτό είναι αναγκαίο να αναφερθούν οι περιπτώσεις χρήσης των αλγορίθμων σύζευξης πίεσης – ταχύτητας και των σχημάτων διακριτοποίησης.

#### Αλγόριθμοι

- SIMPLE, SIMPLEC: για χρονικά μόνιμες ροές (το πρόβλημα που επιλύεται στην εργασία είναι στο μεγαλύτερο μέρος του χρονικά σταθερό)
- PISO: για μη μόνιμες ροές (unsteady) ή/και για πολύ παραμορφωμένα πλέγματα
- COUPLED: λύνει μαζί τις εξισώσεις ορμής και τη διόρθωση πίεσης
  - δίνει σταθερότερες αριθμητικές λύσεις σε χρονικά μόνιμες ροές σε σχέση με τα άλλα σχήματα
  - λειτουργεί πολύ καλά σε μη μόνιμες ροές με κακά πλέγματα ή όταν υπάρχει ανάγκη μεγάλων χρονικών βημάτων

#### Σχήματα διακριτοποίησης

- STANDARD: είναι ικανοποιητικό σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις
- Body-force-weighted scheme: σε περιπτώσεις που οι δυνάμεις λόγω βαρύτητας είναι σημαντικές
- PRESTO!: σε ροές με υψηλή συστροφή
  - υψηλές τιμές του αριθμού Rayleigh
  - μέσα από πορώδη υλικά
  - σε ροές με υψηλή καμπυλότητα
- Second order: σε συμπιεστές ροές ή όταν τίποτα από τα παραπάνω δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί

Από τα παραπάνω εξηγείται, ακόμη και πριν παρουσιαστούν τα αποτελέσματα, ο λόγος που ο συνδυασμός COUPLED – STANDARD έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα.

### 3.Γ.β.ii) ΔΟΚΙΜΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ - ΣΤΑΔΙΟ 2<sup>ο</sup>

Στην ίδια γεωμετρία που έγιναν οι δοκιμές για τους λύτες, δοκιμάστηκαν τα **μοντέλα ακτινοβολίας**. Το στάδιο αυτό πραγματοποιήθηκε περισσότερο για επιβεβαίωση της επιλογής που είχε ήδη γίνει βάσει της θεωρίας (εγχειρίδιο λειτουργίας του Fluent) λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς και τις προϋποθέσεις χρήσης τους. Δηλαδή, το καταλληλότερο μοντέλο από αυτά φαίνεται να είναι το Discrete Ordinates (DO). Το σημείο ελέγχου για τις λύσεις ήταν το A3 (βλ. κεφ. 3.Γ.β.i , εικόνα 20)

Τα υπόλοιπα μοντέλα επίλυσης και οι συνθήκες είναι οι ίδιες με το προηγούμενο στάδιο. Εκτός από την ταχύτητα του αέρα στην είσοδο που ορίστηκε στα 0,5 m/s. Ως λύτης χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος COUPLED και σχήμα διακριτοποίησης της πίεσης / ορμής το STANDARD / 1<sup>st</sup> order upwind (όπως θα αναλυθεί στο κεφάλαιο των αποτελεσμάτων, ήταν ο προτιμότερος συνδυασμός). Τα μοντέλα ακτινοβολίας που δοκιμάστηκαν ήταν:

- Rosseland
- P1
- DTRM (1 επανάληψη ροής για κάθε επανάληψη ακτινοβολίας κατά την επίλυση, αριθμός DTRM Sweeps = 1, οι υπόλοιπες τιμές default)
- DO (1 επανάληψη ροής για κάθε επανάληψη ακτινοβολίας κατά την επίλυση, γωνιακή διακριτοποίηση: θ και φ divisions = 3, θ και φ pixels = 1)
- S2S (δεν υπήρχαν αρκετά δεδομένα ώστε να είναι δυνατή η χρήση αυτού του μοντέλου)

Στο σημείο αυτό μπορεί να αναφερθεί και η διαδικασία επιλογής του μοντέλου ακτινοβολίας, θεωρητικά.

#### Μοντέλα ακτινοβολίας Fluent (πηγή: Εγχειρίδιο λειτουργίας του Fluent)

Το Fluent παρέχει πέντε μοντέλα ακτινοβολίας που επιτρέπουν να συμπεριληφθεί η ακτινοβολία, με ή χωρίς μέσο, στις προσομοιώσεις μεταφοράς θερμότητας. Τα μοντέλα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από το Fluent αναλόγως με την περίπτωση ακτινοβολίας που ισχύει στο πρόβλημα, είναι τα παρακάτω:

- Discrete Transfer Radiation Model (DTRM)
- P-1 Radiation Model
- Rosseland Radiation Model
- Surface-to-Surface (S2S) Radiation Model
- Discrete Ordinates (DO) Radiation Model

Πρέπει να συνυπολογισθεί η μεταφορά θερμότητας λόγω ακτινοβολίας στην προσομοίωση όταν ο ρυθμός θερμότητας λόγω ακτινοβολίας, είναι συγκρίσιμος με τον ρυθμό ροής μεταφοράς θερμότητας λόγω αγωγής και συναγωγής.

$$Q_{rad} = \sigma(T_{max}^4 - T_{min}^4) \quad : \text{ο ρυθμός ροής θερμότητας λόγω ακτινοβολίας}$$

Για ποιο λόγο επιλέχθηκε το μοντέλο DO:

Ο μοναδικός περιορισμός που υπήρχε στην χρήση του DTRM μοντέλου για την περίπτωση του πειράματός μας, ήταν ότι δεν μπορεί να εφαρμοσθεί σε κυλιόμενα πλέγματα, όπως είναι η ταινία μεταφοράς του φούρνου. Όπου, όμως δεν εφαρμοστεί στην εργασία η περίπτωση του κυλιόμενου πλέγματος, κάλλιστα μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτό το μοντέλο.

Το μοντέλο P-1, δεν δίνει ακριβή αποτελέσματα, εξαρτώμενο από την πολυπλοκότητα της γεωμετρίας, αν η οπτική πυκνότητα είναι μικρή. Στην προκειμένη περίπτωση είναι ίση με:

$$a \cdot D = 0,02 * (2LW/L+W) = 0,02 * 0,3 = 0,006$$

όπου a: συντελεστής απορρόφησης αέρα, D: υδραυλική διάμετρος διατομής θαλάμου ψησίματος.

Το μοντέλο Rosseland μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε οπτικά πολύ πυκνό μέσο. Συστήνεται να επιλεχθεί μόνο σε οπτική πυκνότητα που ξεπερνά το 3.

Το μοντέλο S2S λειτουργεί χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το μέσο μεταξύ των επιφανειών (π.χ. ο αέρας του φούρνου). Στην περίπτωση όμως που μελετάμε ο αέρας περιέχει υγρασία και συμμετέχει στην ακτινοβολία.

Άρα ως καταλληλότερο μοντέλο επιλέχθηκε το DO, καθώς μπορεί να λειτουργήσει καλά σε οποιαδήποτε οπτική πυκνότητα, και να λύσει προβλήματα στα οποία είτε είναι σημαντικό είτε όχι το μέσο μεταξύ των ακτινοβολούντων επιφανειών. Η υπολογιστική ισχύς που απαιτείται να λυθεί το μοντέλο αυτό είναι μέτρια για την τυπική γωνιακή διακριτοποίηση, το ίδιο και η μνήμη που απαιτείται.

Η εξίσωση μεταφοράς ακτινοβολίας για ένα μέσο που απορροφά, εκπέμπει και σκεδάζει στην θέση  $\vec{r}$  στην κατεύθυνση  $\vec{s}$  είναι:

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (a + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) = \alpha n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega'$$

Όπου

$\vec{r}$  = διάνυσμα θέσης

$\vec{s}$  = διάνυσμα διεύθυνσης

$\vec{s}'$  = διάνυσμα διεύθυνσης σκέδασης

$s$  = μήκος πορείας

$\alpha$  = συντελεστής απορρόφησης

$n$  = δείκτης διάθλασης



$\sigma_s$  = συντελεστής σκέδασης

$\sigma$  = σταθερά Stefan-Boltzmann ( $5,672 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ )

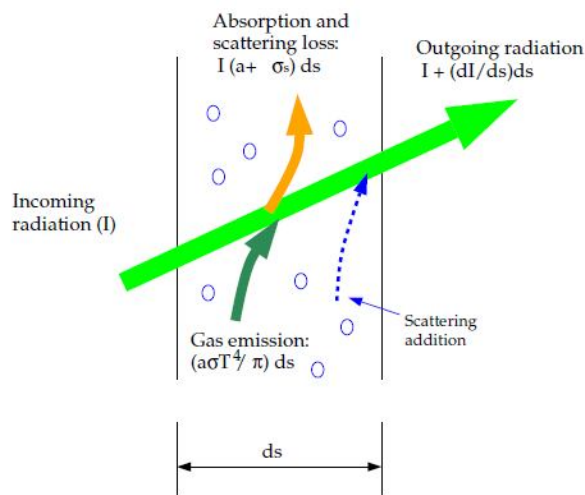
$I$  = ένταση ακτινοβολίας, εξαρτάται από την θέση ( $\vec{r}$ ) και την διεύθυνση ( $\vec{s}$ )

$T$  = τοπική θερμοκρασία

$\Phi$  = συνάρτηση φάσης

$\Omega'$  = στερεή γωνία

$(\alpha + \sigma_s)\rho$  είναι η οπτική πυκνότητα του μέσου. Ο δείκτης διάθλασης  $n$  είναι σημαντικός όταν αναφερόμαστε σε ακτινοβολία μέσα από ημιδιαπερατά μέσα.



Εικόνα 21: Μεταφορά θερμότητας μέσω ακτινοβολίας (πηγή: Εγχειρίδιο λειτουργίας του Fluent)

Τα μοντέλα DTRM, P-1, Rosseland και DO απαιτούν ως δεδομένο τον συντελεστή απορρόφησης  $\alpha$ . Το μοντέλο Rosseland απαιτεί να δοθεί ως δεδομένος ο δείκτης διάθλασης, ή να χρησιμοποιηθεί η προεπιλεγμένη τιμή 1.

### Θεωρία μοντέλου ακτινοβολίας DO

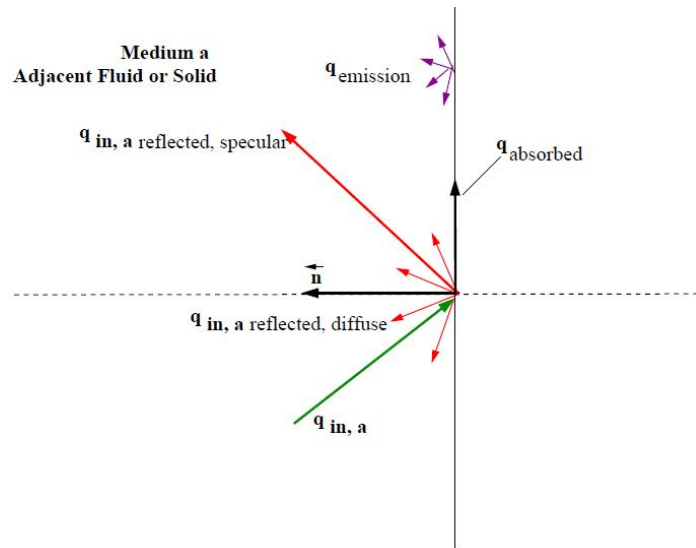
Το μοντέλο αυτό λύνει την εξίσωση μεταφοράς ακτινοβολίας για έναν πεπερασμένο αριθμό διακριτών στερεών γωνιών. Επίσης, λύνει τόσες εξισώσεις μεταφοράς όσες είναι οι διευθύνσεις  $\vec{s}$ . Η μέθοδος λύσης είναι ίδια με αυτή των εξισώσεων ροής του ρευστού και ενέργειας. Δύο εφαρμογές του μοντέλου είναι διαθέσιμες στο Fluent: μη-συζευγμένη και συζευγμένη με την ενέργεια. Το *Fluent*, όταν έχει επιλεγθεί το μοντέλο DO, λύνει την εξίσωση:

$$\nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + (\alpha + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) = \alpha n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_{\Omega} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega'$$

Το μοντέλο DO επιτρέπει να συμπεριληφθεί η επίδραση μιας δεύτερης διακριτής φάσης σωματιδίων, στην ακτινοβολία. Σε αυτήν την περίπτωση, το Fluent αγνοεί όλες τις άλλες πηγές σκέδασης στην αέρια φάση.

### Οριακές συνθήκες με την χρήση του μοντέλου DO

#### Αδιαφανείς τοίχοι



Εικόνα 22: Ακτινοβολία με το μοντέλο DO πάνω σε έναν αδιαφανή τοίχο (πηγή: Εγχειρίδιο λειτουργίας του Fluent)

Η εικόνα 22 παρουσιάζει την ακτινοβολία  $q_{in,a}$  στην πλευρά  $a$  ενός αδιαφανούς τοίχου. Ένα μέρος της ακτινοβολούμενης ενέργειας ανακλάται διάχυτα και ένα άλλο υπό ορθή γωνία με το αρχικό, ανάλογα με τον λόγο διάχυσης  $f_d$  της πλευράς  $a$  του τοίχου που ορίζεται ως οριακή συνθήκη. Κάποιο μέρος της αρχικής ακτινοβολίας απορροφάται από την επιφάνεια του τοίχου και κάποιο άλλο εκπέμπεται από την επιφάνεια.

Η απορρόφηση από την επιφάνεια θεωρεί ότι η απορροφητικότητα είναι ίση με την ικανότητα εκπομπής. Για έναν τοίχο που μόνο διαχέει και δεν ανακλά την ακτινοβολία κάθετα,  $f_d = 1$ . Ενώ  $f_d = 0$  όταν συμβαίνει το αντίθετο. Το ποσοστό διάχυσης μεταξύ 0 και 1 έχει ως αποτέλεσμα μερικώς την διάχυση και μερικώς την ανάκλαση ενέργειας.

#### Είσοδοι και έξοδοι ροής

Ο καθαρός ρυθμός ροής ακτινοβολίας στις εισόδους και εξόδους υπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο όπως και στους τοίχους. Το Fluent θεωρεί ότι η ικανότητα εκπομπής αυτών των οριακών συνθηκών είναι 1 (απορρόφηση μαύρου σώματος), εκτός αν επιλεγεί ο επαναπροσδιορισμός της τιμής αυτής.

Το Fluent παρέχει μια επιλογή που επιτρέπει τον ορισμό διαφορετικών θερμοκρασιών ακτινοβολίας και συναγωγής στις εισόδους-εξόδους. Αυτό είναι χρήσιμο όταν η θερμοκρασία έξω από την είσοδο διαφέρει σημαντικά από αυτή στο εσωτερικό της γεωμετρίας.

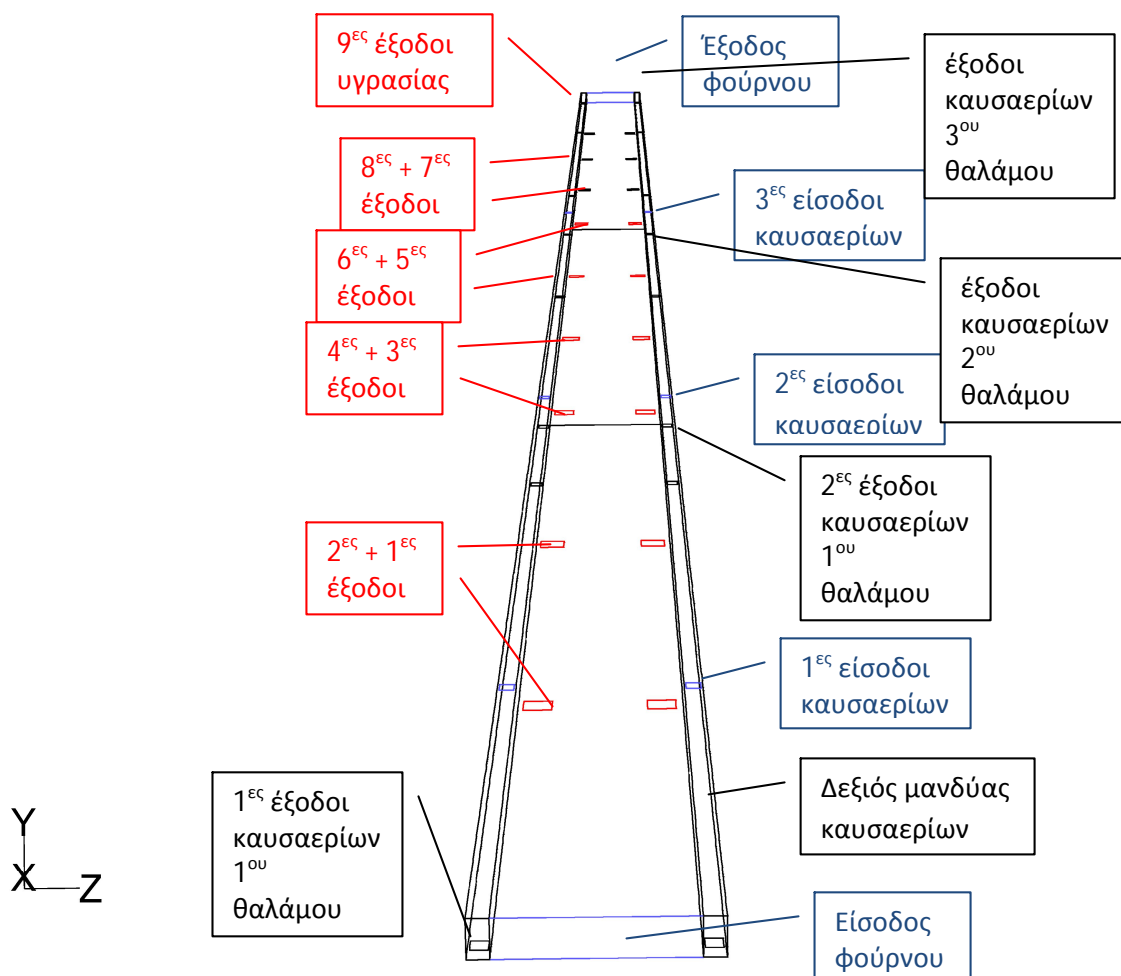
### 3.Γ.β.iii) ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΛΥΣΕΩΝ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ CFD (FLUENT) – VALIDATION - ΣΤΑΔΙΟ 3<sup>ο</sup>

Έπειτα από τον έλεγχο των μοντέλων, ο οποίος βοήθησε στο να υπάρχει μια εικόνα στις διαφορές μεταξύ τους, ακολούθησαν πειραματισμοί αλλάζοντας στοιχεία της γεωμετρίας και των εισαχθέντων πληροφοριών που χρειάζεται το πρόγραμμα CFD ώστε να λύσει με επιτυχία το πρόβλημα που τίθεται. Οι πειραματισμοί αυτοί, από τους οποίους προέκυπταν διάφορα προβλήματα για τα οποία έπρεπε να βρεθούν τρόποι αντιμετώπισης, βοήθησαν στην καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του προγράμματος αλλά κυρίως του τρόπου προσομοίωσης της λειτουργίας του φούρνου.

Συνεπακόλουθα, τα πειράματα προσομοίωσης συνεχίζονται στην γεωμετρία που αποτελεί όλο τον φούρνο όπως είναι στην πραγματικότητα. Έχοντας ως δεδομένο το προφίλ θερμοκρασίας του αέρα του φούρνου από τις πειραματικές μετρήσεις, γίνονται προσπάθειες να συμπέσουν οι λύσεις του Fluent για την θερμοκρασία με τις πειραματικές, έτσι ώστε να γίνει **επιβεβαίωση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων** του Fluent και της ορθής χρήσης του, για την προσομοίωση λειτουργίας του βιομηχανικού φούρνου τούνελ.

Σε αυτό το στάδιο της εργασίας, το επίπεδο προσομοίωσης του φούρνου βρίσκεται στο σημείο όπου: η γεωμετρία του φούρνου είναι αυτή που περιγράφεται στο κεφάλαιο 3.Γ.α και φαίνεται στις εικόνες 12, 15, και η ταινία του φούρνου (πάτος του με απλούστευση της γεωμετρίας) έχει χωριστεί σε τρία μέρη, όπως οι ζώνες του φούρνου, έτσι ώστε να ρυθμίζεται στην κάθε μία διαφορετικά ο ρυθμός ροής θερμότητας προς το περιβάλλον (heat flux) αντικαθιστώντας κατά κάποιον τρόπο τις απώλειες θερμότητας που θα υπήρχαν αν βρίσκονταν μπισκότα στην ταινία των οποίων η υγρασία μεταβάλλεται σταδιακά. Οι προσπάθειες που έγιναν στο στάδιο αυτό μέχρι το σημείο που οι πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας συμπίπτουν με τις λύσεις του Fluent, είναι αλλαγές στις απώλειες θερμότητας από τον πάτο του φούρνου και αλλαγές στην παροχή καυσαερίων από τις εισόδους τους. Το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα εξήχθη με τα δεδομένα που φαίνονται παρακάτω στην ανάλυση του προβλήματος.

## Σχεδιασμός γεωμετρίας

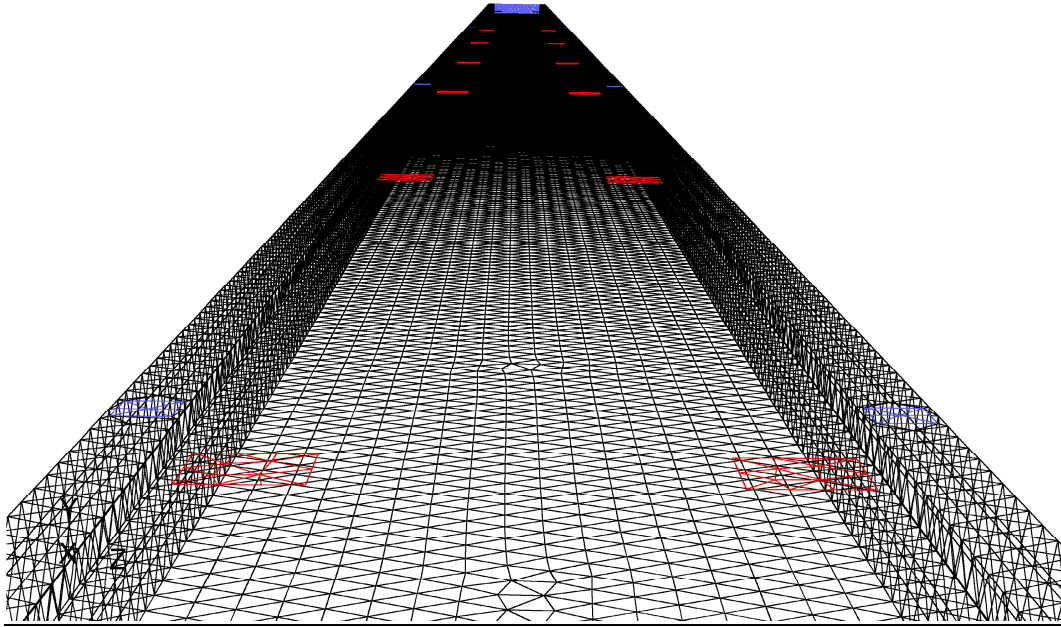


Εικόνα 23: Προοπτική όψη του φούρνου με σκοπό να παρουσιαστούν οι θέσεις των οριακών συνθηκών που υπάρχουν στο στάδιο αυτό προσομοίωσης.

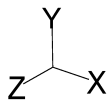
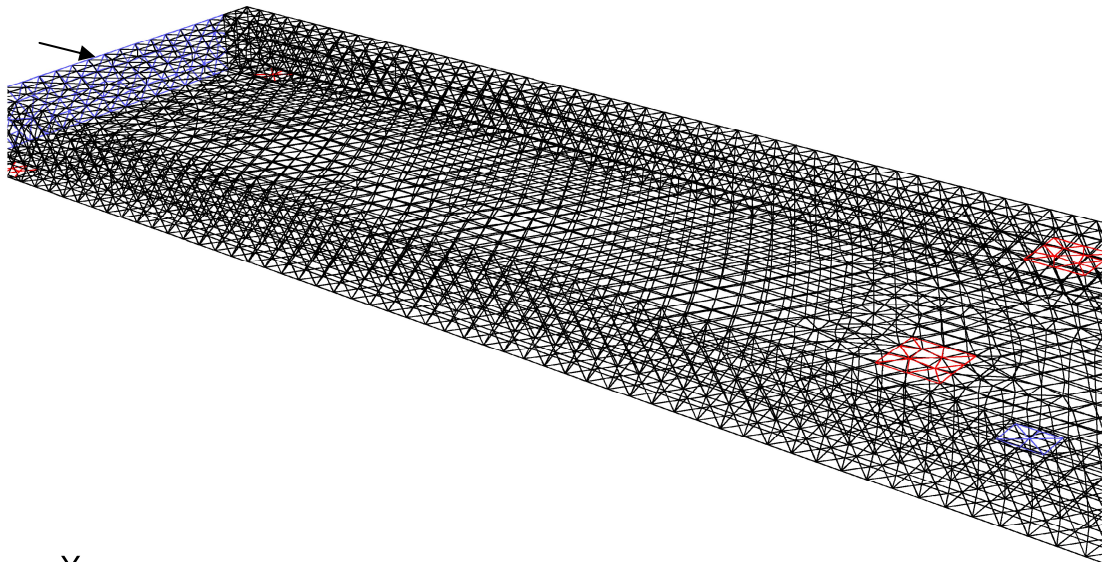
## Σχεδιασμός πλέγματος

- Αριθμός κελιών (cells): 317839
- Αριθμός επιφανειών (faces): 688328
- Αριθμός κόμβων (nodes): 78480

Όλοι οι όγκοι της γεωμετρίας επιλέγονταν ώστε να δημιουργηθούν στοιχεία τετραεδρικά ή υβριδικά (elements: tet / hybrid), τύπου TGrid. Ο τρόπος δημιουργίας πλέγματος που επιλέχθηκε ήταν ο Shortest edge 550%.



Εικόνα 24: Προοπτική όψη του φούρνου όπου φαίνεται το πλέγμα του πάτου φούρνου, εξόδων υγρασίας, εισόδου και εξόδου του φούρνου και μανδύα.



Εικόνα 25: Δείγμα πλέγματος του εσωτερικού του φούρνου και του εσωτερικού του μανδύα και των οριακών συνθηκών.

## Οριακές συνθήκες

| Περιοχή που εφαρμόζονται                 | Είδος οριακής συνθήκης   | Αιτιολόγηση-Παρατηρήσεις   |
|--|--|--|
| Είσοδος φούρνου                          | Velocity inlet   | Είναι γνωστή η ταχύτητα εισόδου του αέρα   |
| Έξοδος φούρνου                           | Velocity inlet (με κατεύθυνση προς τα θετικά του άξονα x, δηλαδή προς την έξοδο του φούρνου) | Είναι γνωστή από μετρήσεις η ταχύτητα του αέρα, επίσης αναγκάζεται να μην οπισθοδρομεί προς το εσωτερικό του φούρνου   |
| Έξοδοι υγρασίας                          | Pressure outlet<br>(Wall = οι δύο τελευταίες)*   | Υπάρχει η δυνατότητα ορισμού της στατικής πίεσης στην περιοχή αναγκάζοντας τον αέρα να εξέρχεται (στο τέλος του φούρνου δεν χρησιμεύουν σε κάτι καθώς η υγρασία είναι ελάχιστη)* |
| Είσοδοι καυσαερίων                       | Velocity inlet   | Είναι το πιο λογικό είδος οριακής συνθήκης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί  |
| Έξοδοι καυσαερίων                        | Pressure outlet  | Το Fluent δίνει τη δυνατότητα χρήσης της προεπιλεγμένης τιμής 0 ώστε να δοθεί λύση   |
| Οροφή - Πάτος φούρνου – Τοιχώματα μανδύα | Wall   | Ορίζεται το υλικό, οι απώλειες θερμότητας και η συμμετοχή στην ακτινοβολία   |
| Πλευρικοί τοίχοι εσωτερικά               | Wall   | Είναι αυτοί που εκπέμπουν θερμότητα μέσω ακτινοβολίας  |

Τα δεδομένα που εισήχθησαν στην πλατφόρμα του Fluent για να λυθεί το πρόβλημα είναι τα παρακάτω:

- **Είσοδος φούρνου:**

Ταχύτητα εισόδου του αέρα = 1 m/s με κατεύθυνση παράλληλη του x άξονα προς την έξοδο του φούρνου.

- **Έξοδος φούρνου**

Ταχύτητα εξόδου του αέρα = 0,04 m/s με κατεύθυνση παράλληλη του x άξονα προς την έξοδο του φούρνου.

- **Έξοδοι υγρασίας**

- 1<sup>η</sup>: πίεση Gauge (Pa) = -1
- 2<sup>η</sup>: πίεση Gauge (Pa) = -2
- 3<sup>η</sup>: πίεση Gauge (Pa) = -3
- 4<sup>η</sup>: πίεση Gauge (Pa) = -5
- 5<sup>η</sup>: πίεση Gauge (Pa) = -7
- 6<sup>η</sup>: πίεση Gauge (Pa) = -7
- 7<sup>η</sup>: πίεση Gauge (Pa) = -4
- 8<sup>η</sup>: (Wall) Heat flux (W/m<sup>2</sup>) = -100
- 9<sup>η</sup>: (Wall) Heat flux (W/m<sup>2</sup>) = -100

- **Είσοδοι καυσαερίων**

- 1<sup>η</sup>: παροχή καυσαερίων 0,256 m<sup>3</sup>/s με κατεύθυνση προς τα αρνητικά του άξονα y  
Θερμοκρασία εισόδου καυσαερίων = 667 K (394 °C)
- 2<sup>η</sup>: παροχή καυσαερίων 0,352 m<sup>3</sup>/s με κατεύθυνση προς τα αρνητικά του άξονα y  
Θερμοκρασία εισόδου καυσαερίων = 473 K (200 °C)
- 3<sup>η</sup>: παροχή καυσαερίων 0,016 m<sup>3</sup>/s με κατεύθυνση προς τα αρνητικά του άξονα y  
Θερμοκρασία εισόδου καυσαερίων = 568 K (295 °C)

- **Έξοδοι καυσαερίων:** πίεση Gauge (Pa) = 0 που είναι η προεπιλεγμένη τιμή του Fluent έτσι ώστε να την λύσει.

- **Οροφή φούρνου:** ρυθμός ροής θερμότητας (heat flux W/m<sup>2</sup>) = -10

- **Πάτος φούρνου**

- 1<sup>ου</sup> θαλάμου: heat flux = -500 W/m<sup>2</sup>
- 2<sup>ου</sup> θαλάμου: heat flux = -500 W/m<sup>2</sup>
- 3<sup>ου</sup> θαλάμου: heat flux = -200 W/m<sup>2</sup>

Στους πρώτους δύο θαλάμους όπου τα μπισκότα είναι νωπά, λόγω λανθάνουσας θερμότητας η απώλεια είναι μεγαλύτερη από ότι στον τελευταίο θάλαμο.

- **Τοιχώματα μανδύα και οροφή φούρνου:** ρυθμός ροής θερμότητας =  $-10 \text{ W/m}^2$  (είναι μονωμένο προς το περιβάλλον)
- **Πλευρικοί τοίχοι φούρνου εσωτερικά:** θερμική συνθήκη Coupled
- Σε όλες τις περιοχές της γεωμετρίας χαρακτηρισμένες ως Wall, ορίζεται ως εσωτερική εκπομπή (internal emissivity) = 0,7 και ο τύπος της οριακής συνθήκης ως αδιαφανής με κλάσμα διάχυσης = 1
- Η Υδραυλική Διάμετρος στις εισόδους και εξόδους καυσαερίων = 0,09 m ( $D = (2 \cdot 0,08 \cdot 0,1) / (0,08 + 0,1)$ ), στις εξόδους υγρασίας = 0,15 m ( $D = (2 \cdot 0,15 \cdot 0,15) / (0,15 + 0,15)$ ), στην είσοδο και έξοδο του φούρνου = 0,3 ( $D = (2 \cdot 0,9 \cdot 0,18) / (0,9 + 0,18)$ ), και η Ένταση της Τύρβης = 10% σε όλες τις οριακές συνθήκες εισόδου – εξόδου.
- Σε όλες τις εισόδους – εξόδους (εκτός από τις εισόδους καυσαερίων) η θερμοκρασία του αέρα παραμένει στην προτεινόμενη από το Fluent τιμή τους 300K.
- Σε όλες τις εισόδους – εξόδους του φούρνου η εσωτερική εκπομπή (όσον αφορά την συμμετοχή στην θέρμανση με ακτινοβολία) = 0.

#### Αρχικές συνθήκες

Οι τιμές εκκίνησης είναι οι προεπιλεγμένες που προτείνει το Fluent.

#### Μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν

| Τύπος μοντέλου       | Επιλογές μοντέλων  |
|----------------------|--|
| Μοντέλα επίλυσης     | Pressure based solver  |
| Μοντέλο ιξώδους      | k – epsilon 2 εξισώσεων<br>Μοντέλο Standard                      |
| Μοντέλο ακτινοβολίας | Discrete Ordinates (DO)<br>Ανενεργό μοντέλο ηλιακής ακτινοβολίας |



### Υλικά που ορίστηκαν

| Είδος υλικού | Υλικό  | Παρατηρήσεις   |
|--------------|--|--|
| Ρευστό       | Αέρας (κυκλοφορεί στον θάλαμο ψησίματος και εσωτερικά στον μανδύα – διπλά τοιχώματα) | Εισαγωγή θερμοφυσικών ιδιοτήτων αέρα σε μορφή piecewise-linear από την θερμοκρασία 250K έως και 1100K (Παράρτημα – πίνακας 1)<br><br>Συντελεστής απορρόφησης: 0,06 1/m<br><br>Συντελεστής σκέδασης: 0,01 1/m |
| Στερεό       | Χάλυβας (αποτελούνται τα τοιχώματα του φούρνου)                                      | Συντελεστής απορρόφησης: 10000 1/m<br><br>Συντελεστής σκέδασης: 0,1 1/m  |

### Επιλογές λύτη

Οι εξισώσεις που επιλύονται κατά την λύση του προβλήματος είναι της ροής, της τύρβης, της ενέργειας και του μοντέλου ακτινοβολίας DO. Ο αλγόριθμος σύζευξης πίεσης – ταχύτητας είναι ο SIMPLE με τις προεπιλεγμένες τιμές των παραγόντων υποχαλάρωσης. Χρησιμοποιήθηκε τελικά στα πειράματα από αυτό το στάδιο και μετά ο αλγόριθμος SIMPLE που είναι και ο προεπιλεγμένος από το Fluent, καθώς και αυτός έδωσε πολύ καλά αποτελέσματα. Σχήμα διακριτοποίησης πίεσης το Standard και ορμής, τύρβης, υδρατμών, ενέργειας και DO το 1<sup>st</sup> order upwind.

### 3.Γ.β.iv) ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΝΕΞΑΡΤΗΣΙΑΣ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΤΙΣ ΛΥΣΕΙΣ - ΣΤΑΔΙΟ 4<sup>ο</sup>

Μετά το στάδιο της επιβεβαίωσης των λύσεων, και από την στιγμή που τα αποτελέσματα ήταν θετικά (ανάλυση στο κεφάλαιο 4.iii των αποτελεσμάτων), για την ορθότερη συνέχεια των πειραμάτων προσομοίωσης, σε αυτό το σημείο πρέπει να γίνει **έλεγχος της ανεξαρτησίας του πλέγματος** από τις λύσεις. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να αποδείξουμε πως οι λύσεις του Fluent δεν επηρεάζονται από τις αλλαγές στην πυκνωση του πλέγματος.

Η γεωμετρία που χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο της ανεξαρτησίας του πλέγματος είναι η ίδια που χρησιμοποιήθηκε στο στάδιο της επιβεβαίωσης των λύσεων (ΣΤΑΔΙΟ 3<sup>ο</sup>).

Η πυκνωση του πλέγματος κάθε φορά γινόταν από αρχικό στάδιο μέσω του Gambit ως εξής:

Όλοι οι όγκοι της γεωμετρίας επιλέγονταν ώστε να δημιουργηθούν στοιχεία τετραεδρικά ή υβριδικά (elements: tet / hybrid), τύπου TGrid. Ο τρόπος δημιουργίας πλέγματος που επιλέχθηκε ήταν ο Shortest edge %.

Τρεις διαφορετικές πυκνώσεις δοκιμάστηκαν: Shortest edge **600%** (tetrahedral size 0,06), Shortest edge **550%** (tetrahedral size 0,055) και Shortest edge **500%** (tetrahedral size 0,05).

| Shortest edge             | 600%   | 550%   | 500%   |
|---------------------------|--------|--------|--------|
| <b>Αριθμός κελιών</b>     | 263894 | 317839 | 449695 |
| <b>Αριθμός επιφανειών</b> | 573134 | 688328 | 959252 |
| <b>Αριθμός κόμβων</b>     | 65850  | 78480  | 104034 |

Και οι τρεις περιπτώσεις επιλύθηκαν από το Fluent με τα δεδομένα που εισήχθησαν στο ΣΤΑΔΙΟ 3<sup>ο</sup> καθώς το validation των λύσεων ήταν ικανοποιητικό (ανάλυση στο κεφάλαιο 4.iii των αποτελεσμάτων).

### 3.Γ.β.ν) ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΤΙΜΗΣ ΤΟΥ $Y^+$ (ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΗΣ ΤΥΡΒΗΣ ΚΟΝΤΑ ΣΤΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ)

#### - ΣΤΑΔΙΟ 5<sup>ο</sup>

Λόγω του ότι μέχρι αυτό το στάδιο, στην επιλογή μοντέλων χρησιμοποιούνταν η *Standard συμπεριφορά της τύρβης κοντά στα τοιχώματα*, ήταν αναγκαίο να **ελεγχθεί η τιμή του  $Y^+$  κοντά στα τοιχώματα**, ώστε να συνεχιστεί η προσομοίωση στα επόμενα στάδια με σωστή βάση.

$$Y^+ = (\rho \cdot u_\tau \cdot y) / \mu$$

όπου  $\rho$  = πυκνότητα ρευστού ,  $u_\tau$  = ταχύτητα τριβής ,  $y$  = απόσταση από τον τοίχο ,  $\mu$  = ιξώδες ρευστού

*Κοντά στα όρια της γεωμετρίας οι κλίσεις των μεταβλητών είναι εξαιρετικά απότομες. Συνεπώς, κοντά στα όρια υπάρχει ανάγκη χρήσης πυκνού πλέγματος για την ακριβή ανάλυση των απότομων βαθμίδων των μεταβλητών, που όμως απαιτεί πολύ χρόνο και μνήμη υπολογιστή. Μια μέθοδος να παρακάμψουμε τη χρήση πυκνού πλέγματος είναι η εισαγωγή των συναρτήσεων τοιχώματος. Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή, η τιμή της παράλληλης προς το τοίχωμα ταχύτητας και η διατμητική τάση που ασκείται από τα τοιχώματα υπολογίζονται με τη βοήθεια πολύ γνωστών και καλά τεκμηριωμένων πειραματικών συσχετίσεων, όπως η λογαριθμική κατανομή της ταχύτητας σε τυρβώδη ροή. (Μαρκάτος, 1995)*

Το  $Y^+$  πρέπει να παίρνει τιμές από 30 έως 500 όταν έχει επιλεχθεί ως μοντέλο τύρβης το  $k - \epsilon$ . Αν το  $Y^+ < 11$  (όριο ανοχής), τότε δύο επιλογές υπάρχουν για να διορθωθεί: είτε ως μοντέλο συμπεριφοράς κοντά στον τοίχο να επιλεχθεί το Enhanced Wall Treatment, που όμως παρουσιάζει προβλήματα στην σύγκλιση, είτε να αραιωθεί το πλέγμα κοντά στα τοιχώματα. Η δεύτερη περίπτωση διορθώνει το πρόβλημα λόγω του ότι με αρραίωση του πλέγματος κοντά στα τοιχώματα μόνο, αυξάνεται η τιμή του  $y$  της εξίσωσης του  $Y^+$ . Αν το πρόβλημα είναι ότι η τιμή του είναι μεγαλύτερη του 500, χρειάζεται πυκνωση του πλέγματος κοντά στα τοιχώματα.

Για τον έλεγχο του  $Y^+$  χρησιμοποιήθηκαν οι λύσεις του προβλήματος του ΣΤΑΔΙΟΥ 3 που είναι σε αρκετά καλό επίπεδο προσομοίωσης, και συγκρίθηκαν με αυτές των λύσεων γεωμετρίας με το πιο πυκνό πλέγμα 500% shortest edge. Για τον έλεγχο των τιμών του  $Y^+$  δημιουργήθηκαν επίπεδα ίδιων διαστάσεων με τις επιφάνειες του φούρνου σε απόσταση 5mm από τα τέσσερα τοιχώματά του.

### 3.Γ.β.νι) ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΑΡΟΧΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΤΟΝ ΑΕΡΑ ΤΟΥ ΦΟΥΡΝΟΥ - ΣΤΑΔΙΟ 6<sup>ο</sup>

Στα προηγούμενα ΣΤΑΔΙΑ 3,4,5 αναφέρθηκε η πορεία της προσομοίωσης στην ολοκληρωμένη γεωμετρία του φούρνου και αφού τα αποτελέσματα ήταν ικανοποιητικά, το επόμενο **στάδιο προσομοίωσης είναι η προσθήκη υγρασίας μέσα στον αέρα του φούρνου** με τρόπο που να μοιάζει με την εξαγωγή υδρατμών από τα μπισκότα. Σκοπός του σταδίου αυτού είναι να μελετηθεί η συμπεριφορά και τα αποτελέσματα του λύτη (Fluent), όταν στο περιβάλλον του φούρνου υπάρχει και παροχή υγρασίας, πριν προχωρήσουμε στην πραγματική παροχή υδρατμών από τα μπισκότα.

Μια χονδρική προσομοίωση παροχής υγρασίας πραγματοποιήθηκε, στα κύρια σημεία του φούρνου όπου πιστεύεται πως γίνεται η μεγαλύτερη εξάτμιση νερού από τα μπισκότα. Έτσι, τρεις οπές στον πάτο του φούρνου βοήθησαν στην παροχή υγρασίας στο περιβάλλον του.

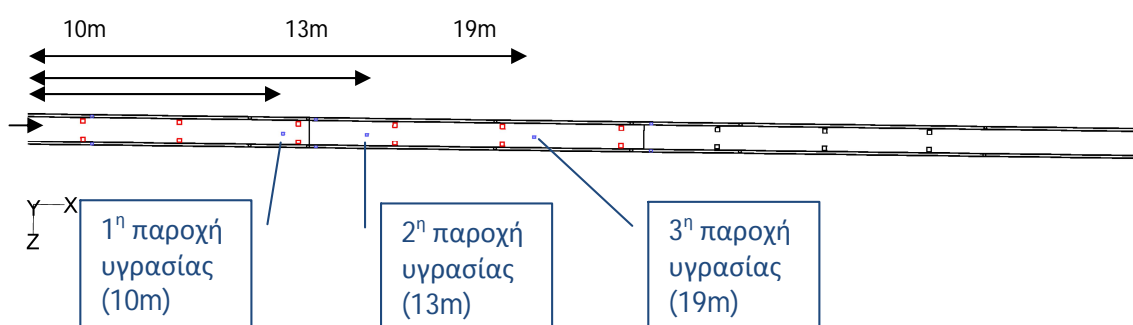
Υπολογίστηκε η ποσότητα νερού που εξατμίζεται ανά λεπτό της ώρας μέσα στον φούρνο κατά το ψήσιμο των μπισκότων, και καταμερίστηκε λογικά στις τρεις οπές παροχής.

Υπολογισμός απώλειας νερού: 8 άψητα μπισκότα ζυγίζουν 187g , 8 ψημένα μπισκότα ζυγίζουν 160g , άρα η απώλεια νερού από 8 μπισκότα μέσω εξάτμισης κατά το ψήσιμο είναι ίση με 27g.

Υπολογισμός μπισκότων / min στον φούρνο: κάθε σειρά μπισκότων που εναποθέτει το μηχάνημα μορφοποίησης πάνω στην ταινία περιλαμβάνει 9 μπισκότα, και κάθε min εναποτίθενται 44 σειρές, άρα 396 μπισκότα / min εισέρχονται στον φούρνο.

Υπολογισμός ποσότητας υδρατμών ανά min στον φούρνο: από 8 μπισκότα εξατμίζονται 27g νερού -> από 396/min μπισκότα εξατμίζονται 1336g νερού/min, άρα 1,34 kg νερό/min = **0,022 kg νερό/sec.**

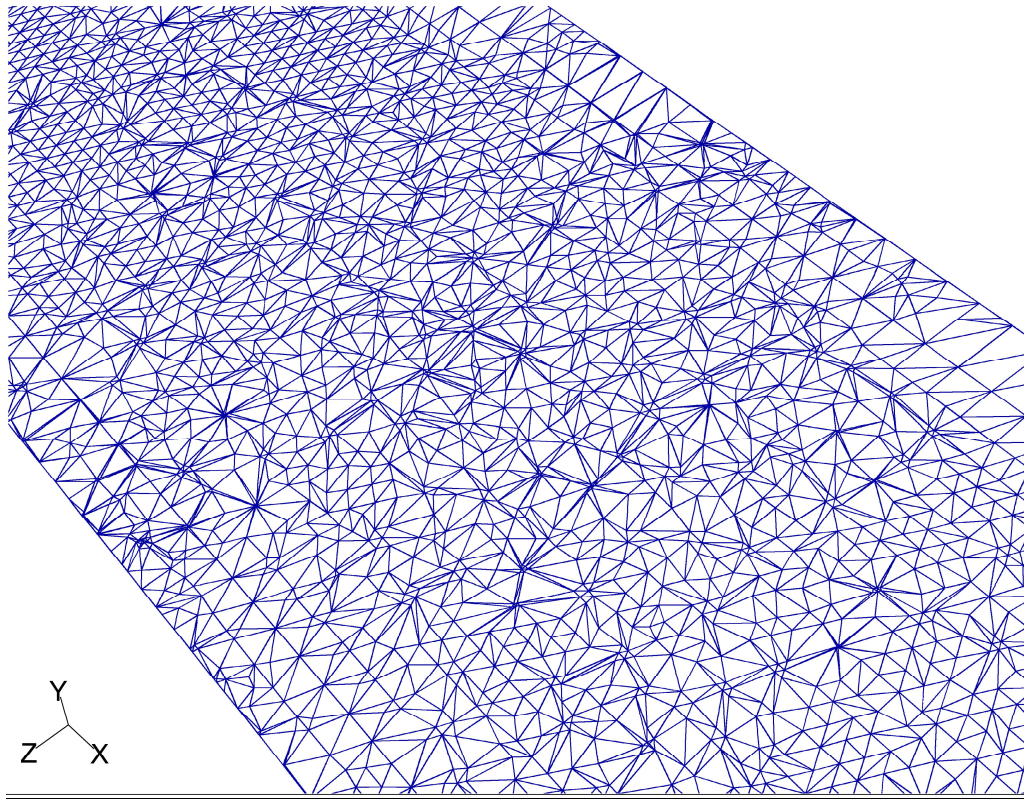
#### Σχεδιασμός γεωμετρίας



Εικόνα 26: Κάτοψη του φούρνου όπου φαίνονται με μπλε χρώμα οι οπές παροχής υγρασίας στον πάτο του φούρνου.

Τελικός στόχος των πειραματισμών σε αυτό το στάδιο είναι τα αποτελέσματα θερμοκρασίας αέρα φούρνου να πλησιάσουν τα πειραματικά. Αυτό θα επιτευχθεί με ρυθμίσεις στην παροχή των καυστήρων, στις εξόδους υγρασίας από την οροφή και τέλος ρυθμίσεις στην θερμοκρασία των οπών παροχής υγρασίας γιατί επηρεάζουν την θερμοκρασία του αέρα.

## Σχεδιασμός πλέγματος



Εικόνα 27: Δείγμα πλέγματος όπως έχει διαμορφωθεί σε τμήμα του οριζόντιου επιπέδου στην μέση του φούρνου, συμπεριλαμβανομένου και του μανδύα (σημείο ελέγχου 1- στο παράρτημα αναλυτικά).

Το πλέγμα δημιουργήθηκε με στοιχεία σχήματος τετραεδρικού / υβριδικού, τύπου TGrid.

- Αριθμός κελιών: 265206
- Αριθμός επιφανειών: 575930
- Αριθμός κόμβων: 66142

### Υλικά που ορίστηκαν

| Είδος υλικού | Υλικό  | Παρατηρήσεις  |
|--------------|--|---|
| Ρευστό       | Αέρας (κυκλοφορεί στον θάλαμο ψησίματος κατά ένα ποσοστό, και εσωτερικά στον μανδύα – διπλά τοιχώματα εξολοκλήρου) | Εισαγωγή θερμοφυσικών ιδιοτήτων αέρα σε μορφή piecewise-linear από την θερμοκρασία 250K έως και 1100K (Παράρτημα – πίνακας 1)<br><br>Συντελεστής απορρόφησης: 0,06 1/m<br><br>Συντελεστής σκέδασης: 0,01 1/m  |
| Μίγμα        | Αέρας + Υδρατμός<br><br>(σε κάποια πειράματα προστέθηκε στο μίγμα και Νερό (υγρό))                                 | Σε κάθε είσοδο και έξοδο των οριακών συνθηκών πρέπει να ορίζεται η αναλογία των δύο ρευστών. Ο αέρας έχει τις ιδιότητες που αναφέρονται ακριβώς προηγουμένως. Ιδιότητες του μίγματος:<br><br>Συντελεστής απορρόφησης: 0,6 1/m<br><br>Συντελεστής σκέδασης: 0,01 1/m |
| Στερεό       | Χάλυβας (αποτελούνται τα τοιχώματα του φούρνου)  | Συντελεστής απορρόφησης: 10000 1/m<br><br>Συντελεστής σκέδασης: 0,1 1/m   |

### Οριακές συνθήκες

#### Περιοχή που εφαρμόζονται Είδος οριακής συνθήκης

|                    |  |
|--------------------|--|
| Είσοδος φούρνου    | Velocity inlet   |
| Έξοδος φούρνου     | Velocity inlet (με κατεύθυνση προς τα θετικά του άξονα x, δηλαδή προς την έξοδο του φούρνου) |
| Έξοδοι υγρασίας    | Pressure outlet<br><br>(Wall = οι τρεις τελευταίες, παράμετρος που αλλάζει στα πειράματα)    |
| Είσοδοι καυσαερίων | Velocity inlet   |
| Έξοδοι καυσαερίων  | Pressure outlet  |

|   |  |
|---|--|
| <b>Παροχές υγρασίας πάτου</b>                   | Mass flow inlet (Δίνει την δυνατότητα ορισμού του ρυθμού ροής (kg/s) και της κατεύθυνσης του ρεύματος) |
| <b>Οροφή - Πάτος φούρνου – Τοιχώματα μανδύα</b> | Wall   |
| <b>Πλευρικοί τοίχοι εσωτερικά</b>               | Wall   |

Παρακάτω αναφέρονται τα δεδομένα που εισήχθησαν στην πλατφόρμα του *Fluent* για τις οριακές συνθήκες, ενώ κάποια από αυτά είναι μεταβαλλόμενα κατά τη διάρκεια των πειραμάτων αυτού του σταδίου με σκοπό την αριστοποίηση των λύσεων. Για τις παραμέτρους που μεταβάλλονται, καταγράφονται στα Υλικά και Μεθόδους (δηλαδή στις παρακάτω παραγράφους) τα δεδομένα που εισήχθησαν αρχικά μόνο στο **1<sup>ο</sup> πείραμα**, ενώ οι διαφοροποιήσεις θα αναφερθούν αναλυτικά στο αντίστοιχο κεφάλαιο των Αποτελεσμάτων αυτού του σταδίου 4.νί, ώστε να είναι πιο εύκολη η σύγκριση μεταξύ τους. **Συνολικά καταγράφονται και αναλύονται στα Αποτελέσματα 3 πειράματα.**

- **Είσοδος φούρνου:**

Ταχύτητα εισόδου του αέρα = 1 m/s με κατεύθυνση παράλληλη του x άξονα προς την έξοδο του φούρνου.

Εισερχόμενο ρευστό ορίζεται το μίγμα αέρα – υδρατμών με αναλογία υλικών: 0,95 αέρας : 0,05 H<sub>2</sub>O(v)

- **Έξοδος φούρνου**

Ταχύτητα εξόδου του αέρα = 0,04 m/s με κατεύθυνση παράλληλη του x άξονα προς την έξοδο του φούρνου.

Ως εξερχόμενο ρευστό ορίζεται η προεπιλεγμένη τιμή του *Fluent*: 0 H<sub>2</sub>O(v) ώστε να είναι ελεύθερη η ροή οποιουδήποτε ρευστού εκ των δύο.

- **Έξοδοι υγρασίας**

- 1<sup>η</sup>: πίεση Gauge (Pa) = -1
- 2<sup>η</sup>: πίεση Gauge (Pa) = -2
- 3<sup>η</sup>: πίεση Gauge (Pa) = -3
- 4<sup>η</sup>: πίεση Gauge (Pa) = -5
- 5<sup>η</sup>: πίεση Gauge (Pa) = -7
- 6<sup>η</sup>: πίεση Gauge (Pa) = -7

- 7<sup>η</sup>: (Wall) Heat flux ( $W/m^2$ ) = -50 (αλλάζει σε κάποια πειράματα προς Pressure outlet όπως και οι υπόλοιπες)
- 8<sup>η</sup>: (Wall) Heat flux ( $W/m^2$ ) = -50 (αλλάζει σε κάποια πειράματα προς Pressure outlet όπως και οι υπόλοιπες)
- 9<sup>η</sup>: (Wall) Heat flux ( $W/m^2$ ) = -50 (αλλάζει σε κάποια πειράματα προς Pressure outlet όπως και οι υπόλοιπες)

Ως εξερχόμενο ρευστό ορίζεται η προεπιλεγμένη τιμή του Fluent: 0 H<sub>2</sub>O(v) ώστε να είναι ελεύθερη η ροή οποιουδήποτε ρευστού εκ των δύο.

- **Είσοδοι καυσαερίων** (παροχή: μεταβλητή παράμετρος έως καλύτερη λύση)
  - 1<sup>η</sup>: παροχή καυσαερίων πρώτου πειράματος σταδίου, 0,48 m<sup>3</sup>/s με κατεύθυνση προς τα αρνητικά του άξονα y  
Θερμοκρασία εισόδου καυσαερίων = 667 K (394 °C)
  - 2<sup>η</sup>: παροχή καυσαερίων πρώτου πειράματος σταδίου, 0,896 m<sup>3</sup>/s με κατεύθυνση προς τα αρνητικά του άξονα y  
Θερμοκρασία εισόδου καυσαερίων = 473 K (200 °C)
  - 3<sup>η</sup>: παροχή καυσαερίων πρώτου πειράματος σταδίου, 0,048 m<sup>3</sup>/s με κατεύθυνση προς τα αρνητικά του άξονα y  
Θερμοκρασία εισόδου καυσαερίων = 568 K (295 °C)
- **Έξοδοι καυσαερίων**: πίεση Gauge (Pa) = 0 που είναι η προεπιλεγμένη τιμή του Fluent έτσι ώστε να την λύσει.

Στον αέρα του μανδύα ορίζεται ότι διακινείται εξολοκλήρου αέρας με μηδενικό ποσοστό υδρατμών.

- **Παροχές υγρασίας πάτου**
  - 1<sup>η</sup>: Mass flow rate (kg/s) = 0,006, με κατεύθυνση προς τα θετικά του άξονα y
  - 2<sup>η</sup>: Mass flow rate (kg/s) = 0,01, με κατεύθυνση προς τα θετικά του άξονα y
  - 3<sup>η</sup>: Mass flow rate (kg/s) = 0,006, με κατεύθυνση προς τα θετικά του άξονα y
  - Σύνολο παροχής υγρασίας 0,022 kg/s

Σε προηγούμενη παράγραφο υπολογίστηκε ο ρυθμός ροής υδρατμών μέσα στον φούρνο όπως συμβαίνει στις πραγματικές συνθήκες. Ο καταμερισμός της ποσότητας υδρατμών που παρέχουν οι οπές στον πάτο του φούρνου έγινε λογικά, θεωρώντας ότι:



- στο τέλος του πρώτου θαλάμου (1<sup>η</sup> παροχή υγρασίας, 10m) μόλις αρχίζει η αύξηση του ρυθμού εξάτμισης νερού από τα μπισκότα
- στην αρχή του δεύτερου θαλάμου (2<sup>η</sup> παροχή υγρασίας, 13m) συμβαίνει η μεγαλύτερη εξάτμιση νερού καθώς σε αυτήν τη ζώνη πραγματοποιείται το κύριο στάδιο ψησίματος των μπισκότων και η θερμοκρασία αέρα είναι η υψηλότερη
- στο τέλος του δεύτερου θαλάμου (3<sup>η</sup> παροχή υγρασίας, 19m) ο ρυθμός εξάτμισης αρχίζει να μειώνεται καθώς η μεγαλύτερη ποσότητα νερού έχει ήδη εξατμιστεί στο τέλος αυτής της φάσης διεργασίας και το προϊόν εισέρχεται στην τρίτη φάση ψησίματος όπου γίνονται οι αλλαγές υφής και χρώματος. Οι απώλειες βάρους μειώνονται.
- Εισερχόμενο ρευστό από τις οπές παροχής υγρασίας ορίστηκε εξολοκλήρου ο υδρατμός H<sub>2</sub>O(v) (παράμετρος μεταβλητή)
- Θερμοκρασία εισερχόμενου ρευστού 430K (παράμετρος μεταβαλλόμενη ανάλογα με τις λύσεις γιατί επηρεάζει την θερμοκρασία του αέρα του φούρνου)
- **Οροφή φούρνου:** ρυθμός ροής θερμότητας (heat flux W/m<sup>2</sup>) = -50
- **Πάτος φούρνου:** heat flux = -100 W/m<sup>2</sup>

Στα προηγούμενα στάδια όπου δεν υπήρχε υγρασία μέσα στον αέρα του φούρνου, οι απώλειες στον πάτο θεωρούνταν διαφορετικές για κάθε ζώνη του φούρνου. Από την στιγμή όμως που παρέχεται υγρασία στην πραγματική της ποσότητα και σε σημεία τέτοια, όπου πιστεύεται πως η εξάτμιση είναι μεγαλύτερη, οι απώλειες θερμότητας θεωρούνται όμοιες σε όλες τις ζώνες.

- **Τοιχώματα μανδύα και οροφή φούρνου:** ρυθμός ροής θερμότητας = -50 W/m<sup>2</sup> (είναι μονωμένο προς το περιβάλλον)
- **Πλευρικοί τοίχοι φούρνου εσωτερικά:** θερμική συνθήκη Coupled
- Σε όλες τις περιοχές της γεωμετρίας χαρακτηρισμένες ως Wall, ορίζεται ως ικανότητα εσωτερικής εκπομπής (internal emissivity) = 0,7 και ο τύπος της οριακής συνθήκης ως αδιαφανής με κλάσμα διάχυσης = 1. (Ακριβώς επειδή έχει ορισθεί ότι γίνεται 100% διάχυση από τα τοιχώματα, για το μοντέλο DO ισχύει ότι η ικανότητα εκπομπής ακτινοβολίας είναι ίση με την απορροφητικότητα.)
- Η Υδραυλική Διάμετρος στις εισόδους και εξόδους καυσαερίων, και στις οπές παροχής υγρασίας πάτου = 0,09 m ( $D = (2 \cdot 0,08 \cdot 0,1) / (0,08 + 0,1)$ ), στις εξόδους υγρασίας = 0,15 m ( $D = (2 \cdot 0,15 \cdot 0,15) / (0,15 + 0,15)$ ), στην είσοδο και έξοδο του φούρνου = 0,3 ( $D = (2 \cdot 0,9 \cdot 0,18) / (0,9 + 0,18)$ ), και η Ένταση της Τύρβης = 10% σε όλες τις οριακές συνθήκες εισόδου – εξόδου (προεπιλεγμένη τιμή από το Fluent).

- Σε όλες τις εισόδους – εξόδους (εκτός από τις εισόδους καυσαερίων) η θερμοκρασία του αέρα παραμένει στην προτεινόμενη από το Fluent τιμή τους 300K.
- Σε όλες τις εισόδους – εξόδους του φούρνου η απορροφητικότητα (εσωτερική εκπομπή) = 0.
- Λόγω του ότι στα υλικά πλέον έχει οριστεί μίγμα αέρα – υδρατμών, σε κάθε είσοδο και έξοδο ρευστού πρέπει να ορίζεται το ποσοστό των δύο υλικών, (τρία υλικά σε κάποιες περιπτώσεις).

#### Αρχικές συνθήκες

Οι τιμές εκκίνησης είναι οι προεπιλεγμένες που προτείνει το Fluent.

#### Μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν

##### Τύπος μοντέλου

##### Επιλογές μοντέλων

|                             |  |  |
|-----------------------------|--|--|
| <b>Μοντέλα επίλυσης</b>     | Pressure based solver  | Σταθερή στον χρόνο κατάσταση   |
| <b>Μοντέλο ιώδους</b>       | k – epsilon 2 εξισώσεων<br>Μοντέλο Standard  | Συμπεριφορά κοντά στα τοιχώματα : Standard Wall Functions                                    |
| <b>Μοντέλο ακτινοβολίας</b> | Discrete Ordinates (DO)<br><br>Ανενεργό μοντέλο ηλιακής ακτινοβολίας                               | Γωνιακή διακριτοποίηση:<br><br>$\theta, \phi$ divisions = 3<br><br>$\theta, \phi$ pixels = 1 |
| <b>Μοντέλο σωματιδίων</b>   | Species transport (μεταφορά σωματιδίων)<br><br>Ιδιότητες: inlet diffusion, diffusion energy source | Μίγμα 2 υλικών (αέρας + υδρατμός)<br><br>(σε κάποια πειράματα 3 υλικά)                       |

#### Επιλογές λύτη

Οι εξισώσεις που επιλύονται κατά την λύση του προβλήματος είναι της συνέχειας, της τύρβης, της ενέργειας συμπεριλαμβανομένου και του μοντέλου ακτινοβολίας DO, και της διατήρησης της μάζας των υλικών (υδρατμών ή αέρα και νερού). Ο αλγόριθμος σύζευξης πίεσης – ταχύτητας είναι ο SIMPLE με τις προεπιλεγμένες τιμές των παραγόντων υποχαλάρωσης. Σχήμα διακριτοποίησης πίεσης το Standard και ορμής, τύρβης, υδρατμών, ενέργειας και DO το 1<sup>st</sup> order upwind.

### 3.Γ.β.vii) ΠΡΟΣΠΑΘΕΙΑ ΜΕΙΩΣΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ - ΣΤΑΔΙΟ 7<sup>ο</sup>

Καθώς στο ΣΤΑΔΙΟ 6<sup>ο</sup> γίνονταν διάφοροι πειραματισμοί για να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή λύση, παρατηρήθηκε ότι με τις μεταβολές στην παροχή καυσαερίων, από κάποιο σημείο αύξησής τους και πάνω, δεν φαινόταν μεγάλη διαφορά στις λύσεις. Έτσι, γεννήθηκε η απορία: **μπορεί να αποφευχθεί η άσκοπη σπατάλη ενέργειας χωρίς να επηρεάζεται η θερμοκρασία του φούρνου;** Χρειάζεται παραπάνω ενέργεια ώστε ο καυστήρας να διοχετεύει το αέριο από τις εισόδους μέσα στον μανδύα, με μεγαλύτερη παροχή από ότι χρειάζεται. Μπορεί να βρεθεί το ποσόν της ενέργειας που αποδίδει το καυσαέριο μέσα στον μανδύα του φούρνου, εκείνο το οποίο θα είναι το κρίσιμο σημείο, πέραν του οποίου η παραπάνω αύξηση παροχής καυσαερίων, μόνο υπερκατανάλωση ενέργειας μπορεί να αποφέρει.

Στο στάδιο αυτό, λοιπόν, θα συγκριθούν οι λύσεις της θερμοκρασίας του αέρα του φούρνου αλλάζοντας την παροχή των καυσαερίων στον πρώτο και στον δεύτερο καυστήρα. Το συγκριτικό μέγεθος θα είναι η ενέργεια που αποδίδει το καυσαέριο μέσα στον μανδύα. Του 3<sup>ου</sup> καυστήρα δεν μεταβάλλεται γιατί έχει ήδη βρεθεί η κατάλληλη παροχή (κεφάλαιο αποτελεσμάτων 4.νί). Μεταβολές αυτής, λόγω του ότι είναι ούτως ή άλλως χαμηλή, επηρεάζουν τις λύσεις και απομακρύνονται από τις πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας.

Ως βάση για τον έλεγχο κατανάλωσης ενέργειας, θα χρησιμοποιηθεί το πρόβλημα του τελευταίου πειράματος 3, του προηγούμενου σταδίου 6 (κεφ. 4.νί). Αναλυτικά τα δεδομένα του προβλήματος αυτού περιγράφονται στον ακόλουθο πίνακα:

**Δεδομένα 3<sup>ου</sup> προβλήματος ΣΤΑΔΙΟΥ 6**

|                                |                                |                 |
|--------------------------------|--------------------------------|-----------------|
| 1 <sup>ος</sup> καυστήρας      | Παροχή 2,16 m <sup>3</sup> /s  | Ισχύς 112,26 kW |
| 2 <sup>ος</sup> καυστήρας      | Παροχή 1,28 m <sup>3</sup> /s  | Ισχύς 179,02 kW |
| 3 <sup>ος</sup> καυστήρας      | Παροχή 0,008 m <sup>3</sup> /s | Ισχύς 1,4 kW    |
| 1 <sup>η</sup> έξοδος υγρασίας | -3 Pa                          |                 |
| 2 <sup>η</sup> έξοδος υγρασίας | -3 Pa                          |                 |
| 3 <sup>η</sup> έξοδος υγρασίας | -4 Pa                          |                 |
| 4 <sup>η</sup> έξοδος υγρασίας | -5 Pa                          |                 |
| 5 <sup>η</sup> έξοδος υγρασίας | -7 Pa                          |                 |
| 6 <sup>η</sup> έξοδος υγρασίας | -7 Pa                          |                 |
| 3 τελευταίες έξοδοι            | κλειστές                       |                 |
| 1 <sup>η</sup> παροχή υγρασίας | 0,006 kg/s                     | 460 K           |
| 2 <sup>η</sup> παροχή υγρασίας | 0,01 kg/s                      | 440 K           |
| 3 <sup>η</sup> παροχή υγρασίας | 0,006 kg/s                     | 410 K           |

Η ενέργεια ανά δευτερόλεπτο που αποδίδουν τα καυσαέρια μέσα στον μανδύα του φούρνου υπολογίστηκε ως εξής:

- $q = Q * \rho * c_p * \Delta T$
- όπου  $Q = \eta$  παροχή καυσαερίων από τις εισόδους ( $m^3/s$ ) =  $u$  ( $m/s$ )\* $A(m^2)$ = ταχύτητα καυσαερίων στην είσοδο \* διατομή οπής εισόδου \* 2 γιατί σε κάθε καυστήρα αντιστοιχούν δύο εισοδοι καυσαερίων, μία σε κάθε πλευρά του φούρνου.

$$\rho = \eta \text{ πυκνότητα των καυσαερίων (kg/m}^3\text{)}$$

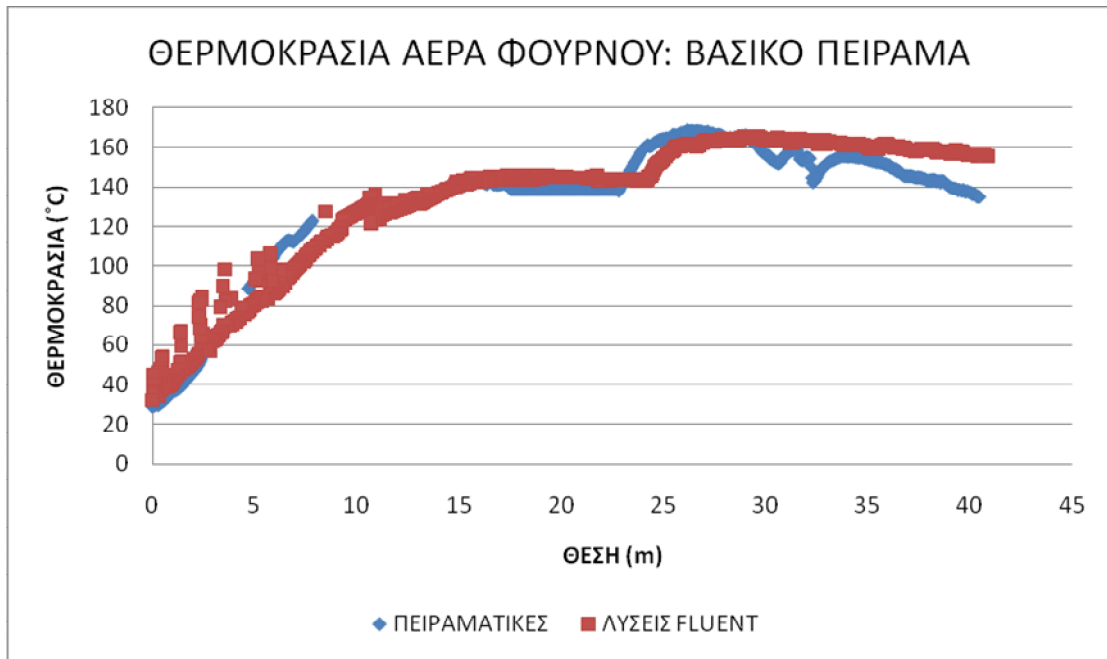
$$c_p = \eta \text{ ειδική θερμότητα των καυσαερίων στους } 200^\circ\text{C (kJ/kg }^\circ\text{C)}$$

$$\Delta T = (\text{θερμοκρασία καυσαερίων στην είσοδο} - \text{θερμοκρασία τους στην έξοδο})$$

- Για τις ιδιότητες αυτές χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές  $c_p = 2,7 \text{ kJ/kg }^\circ\text{C}$  , και  $\rho = 0,7 \text{ kg/m}^3$ .
- Άρα, π.χ. για το  $q_1 = 2,16 \text{ (m}^3\text{/s)} * 0,7 \text{ (kg/m}^3\text{)} * 2,7 \text{ (kJ/kg }^\circ\text{C)} * (394-366,5 \text{ }^\circ\text{C)} = 112,26 \text{ kJ/s} = 112,26 \text{ kW}$

Η μόνη παράμετρος που μεταβάλλεται ώστε να συγκριθούν τα αποτελέσματα της ενέργειας, είναι η παροχή των καυσαερίων, άρα η ενέργεια που αποδίδουν στον μανδύα δεξιά και αριστερά του θαλάμου του φούρνου. Σκοπός των αλλαγών της ενέργειας που χρειάζεται να αποδοθεί μέσα στον μανδύα για να θερμανθεί ο φούρνος κατάλληλα, είναι το αποτέλεσμα στην θέρμανση του αέρα του φούρνου να μην παρουσιάζει αισθητές διαφορές και να μην αποκλίνει από τις πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας αέρα. Από κει και πέρα, όποιο κι αν είναι το αποτέλεσμα, καλό θα ήταν να μπορούσαν να γίνουν πειράματα στην πράξη ώστε να φανεί στο προϊόν πλέον η ύπαρξη ή μη διαφοράς λόγω της προσπάθειας μείωσης κατανάλωσης ενέργειας.

Το αρχικό προφίλ θερμοκρασιών βάσει του οποίου θα γίνουν οι συγκρίσεις, παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 12: Καμπύλες τιμών θερμοκρασίας από τις πειραματικές μετρήσεις και όπως εξήχθησαν από την λύση του πειράματος 3 ΣΤΑΔΙΟΥ 6.

Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται οι αλλαγές στις παροχές καυσαερίων, που έγιναν:

**Πίνακας 6: Παροχές καυσαερίων στην 1<sup>η</sup> περίπτωση**

|                           |                                |
|---------------------------|--------------------------------|
| 1 <sup>ος</sup> καυστήρας | Παροχή 2 m <sup>3</sup> /s     |
| 2 <sup>ος</sup> καυστήρας | Παροχή 1,12 m <sup>3</sup> /s  |
| 3 <sup>ος</sup> καυστήρας | Παροχή 0,008 m <sup>3</sup> /s |

Όπως παρατηρείται, στην 1<sup>η</sup> περίπτωση, στους 2 πρώτους καυστήρες η παροχή μειώθηκε κατά 10 % σε σχέση με το βασικό πείραμα.

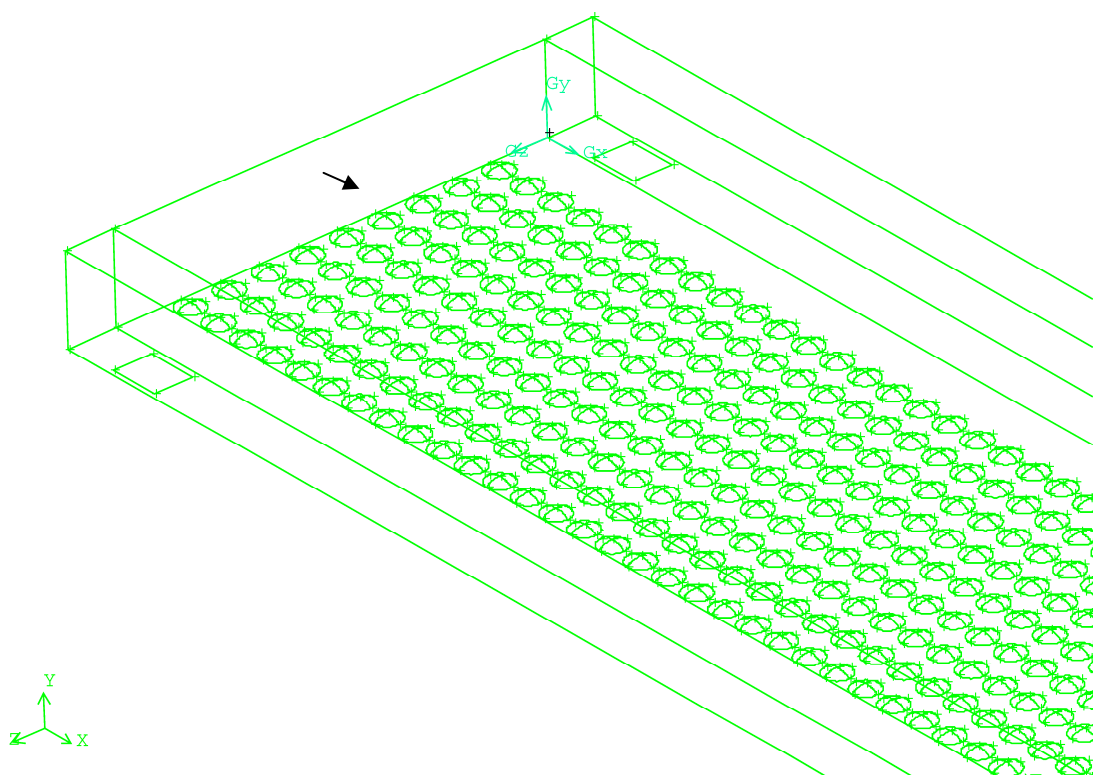
**Πίνακας 7: Παροχές καυσαερίων στην 2<sup>η</sup> περίπτωση**

|                           |                                |
|---------------------------|--------------------------------|
| 1 <sup>ος</sup> καυστήρας | Παροχή 1,76 m <sup>3</sup> /s  |
| 2 <sup>ος</sup> καυστήρας | Παροχή 0,88 m <sup>3</sup> /s  |
| 3 <sup>ος</sup> καυστήρας | Παροχή 0,008 m <sup>3</sup> /s |

Όπως παρατηρείται, στην 2η περίπτωση συγκρίσεων, η παροχή καυσαερίων στους 2 πρώτους καυστήρες μειώθηκε σε σχέση με το βασικό πείραμα κατά 25 %.

3.Γ.β.viii) ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΠΡΟΪΟΝΤΟΣ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΣΤΟ MS EXCEL - ΣΤΑΔΙΟ 8<sup>ο</sup>

Επόμενο βήμα στην πορεία της προσομοίωσης, αφού ήδη έχει γίνει προσπάθεια παροχής υγρασίας από σπές στον πάτο του φούρνου, είναι να προσομοιωθεί η διεργασία ενώ υπάρχουν μπισκότα στο εσωτερικό του φούρνου. Σχηματίζεται η γεωμετρία του μπισκότου στις πραγματικές του διαστάσεις, τοποθετούνται ίδια μπισκότα στις θέσεις που βρίσκονται στην πραγματικότητα, μέσα στη γεωμετρία του φούρνου πάνω στον πάτο του (που θεωρείται ότι είναι η ταινία) και το αποτέλεσμα είναι ο πάτος του φούρνου να είναι γεμάτος από πολύ μικρούς όγκους που αποτελούν τα μπισκότα (εικόνα 28).



Εικόνα 28: Τμήμα της γεωμετρίας του φούρνου κοντά στην είσοδο, όπου φαίνονται τα μπισκότα που έχουν προστεθεί στη γεωμετρία.

Για να χρησιμοποιηθεί η γεωμετρία από τον λύτη των εξισώσεων (εδώ Fluent), πρέπει πρώτα να δημιουργηθεί το πλέγμα, σε κάθε κελί του οποίου θα λύνονται όλες οι εξισώσεις σε κάθε επανάληψη. Στο σημείο αυτό, παρουσιάστηκε πρόβλημα λόγω της ανεπαρκούς ισχύος του υπολογιστή που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση. Ήταν αδύνατον να δημιουργηθεί πλέγμα σε μια τόσο πολύπλοκη γεωμετρία, στην οποία υπάρχουν τμήματα που πρέπει να καλυφθούν από πλέγμα, της τάξεως μεγέθους  $19\text{cm}^3$ . Για να καλυφθούν από πλέγμα οι μικροί όγκοι των μπισκότων και οι αποστάσεις μεταξύ τους, μέσα σε μία γεωμετρία φούρνου που έχει μήκος 40,9 m, πρέπει να δημιουργηθούν εκατομμύρια κελιά, γεγονός αδύνατο από έναν συμβατικό υπολογιστή.

Άρα, η προσομοίωση συνεχίστηκε πάλι με αριθμητική μέθοδο, αλλά όχι με την εφαρμογή CFD. Έγινε **μοντελοποίηση με τη δημιουργία προγράμματος** λύσεως των εξισώσεων μεταφοράς ενέργειας και μάζας, στο **Microsoft Excel**. Ως δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν οι ιδιότητες των μπισκότων που υπολογίστηκαν με πειραματικές μετρήσεις στο εργαστήριο, η μεταβολή της θερμοκρασίας μέσα στο μπισκότο που μετρήθηκε με θερμοζεύγη, η μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα του φούρνου (εργαστηριακού φούρνου) και η μεταβολή της μέσης υγρασίας μέσα στο μπισκότο (βλ. αναλυτικά κεφάλαιο 3.Α ιδιοτήτων μπισκότου, κυρίως 3.Α.ε). Οι λύσεις του προγράμματος αποτελούν την θεωρητική πρόβλεψη, όπου έγινε προσπάθεια προσέγγισης των πειραματικών μετρήσεων για την μεταβολή της θερμοκρασίας μέσα στο μπισκότο και την μεταβολή της υγρασίας.

Το πρόγραμμα αυτό, λύνει με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών τις εξισώσεις μεταφοράς θερμότητας και υγρασίας για κύλινδρο, δηλαδή:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \text{ για την θερμοότητα,}$$

και

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) \text{ για την υγρασία.}$$

Η γεωμετρία του μπισκότου χωρίστηκε σε κελιά ίδιου μεγέθους (περίπου 0,2 mm απόσταση μεταξύ δύο κόμβων), όπου στον κόμβο του καθενός λύνονται τις οι εξισώσεις σε κάθε μία επανάληψη.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

#### 4.ι) ΣΤΑΔΙΟ 1<sup>ο</sup> - ΔΟΚΙΜΕΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΚΑΙ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Στο ΣΤΑΔΙΟ 1<sup>ο</sup> όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο των Υλικών & Μεθόδων, έγιναν δοκιμές με τις επιλογές που δίνει το Fluent ως λύτες, σε τρισδιάστατη γεωμετρία που απεικονίζει τον πρώτο θάλαμο του φούρνου.

Στο συγκεκριμένο πρόβλημα προς επίλυση όλα τα δεδομένα έμεναν σταθερά ενώ κάθε φορά άλλαζε ο αλγόριθμος και το σχήμα διακριτοποίησης της πίεσης / ορμής, με τους συνδυασμούς που φαίνονται στο κεφάλαιο 3.Γ.β.ι. Οι λύτες είναι μεταξύ τους συγκρίσιμοι ως προς την ταχύτητα και ευκολία σύγκλισης των λύσεων, και ως προς την ορθότητα των αποτελεσμάτων. Δηλαδή, μπορεί κάποιος από τους συνδυασμούς να συγκλίνει πολύ εύκολα και άρα να είναι μεγαλύτερο το όφελος ως προς τον χρόνο επίλυσης, αλλά τα αποτελέσματα να μην είναι ορθά και ακριβή ή να μην αρμόζει να χρησιμοποιηθεί στο συγκεκριμένο πρόβλημα (λόγω περιορισμών όπως φαίνονται στην ανάλυσή τους στο κεφάλαιο 3.Γ.β.ι).

***Αναλυτικά οι απεικονίσεις, η περιγραφή και οι συντεταγμένες των σημείων ελέγχου για τα στάδια i , ii , βρίσκονται στο παράρτημα στο αντίστοιχο κεφάλαιο και στον πίνακα 6.***

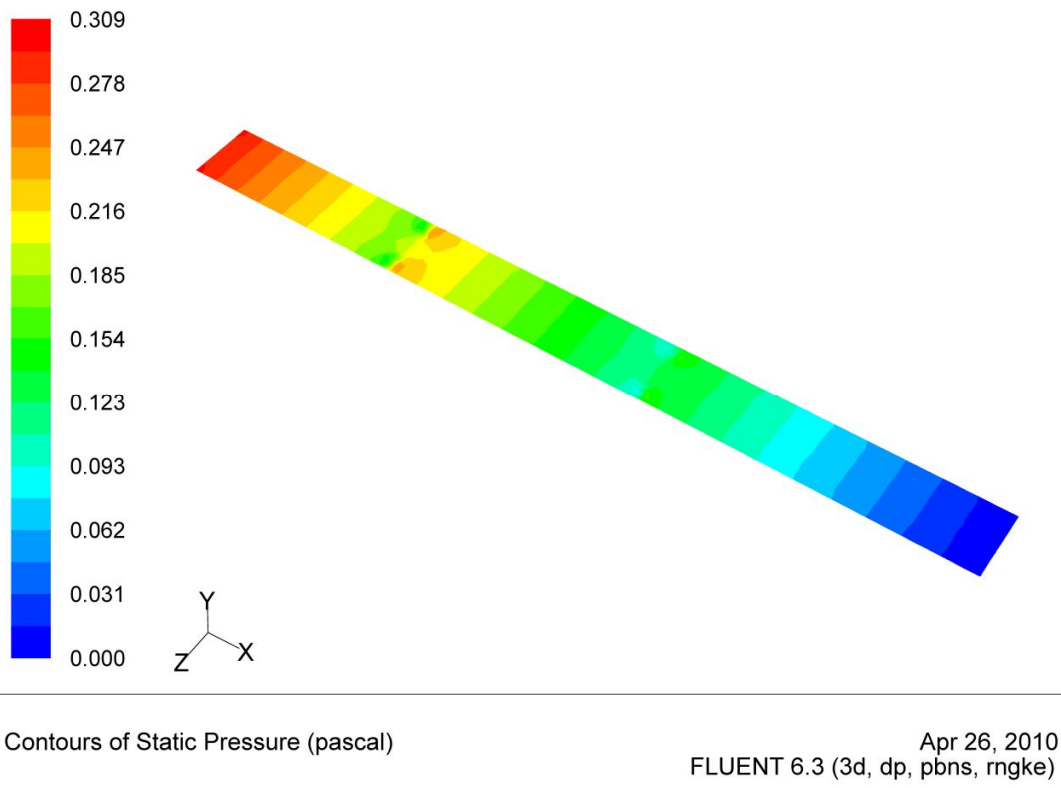
##### a) SIMPLE – STANDARD / 1<sup>st</sup> order upwind

Έγινε σύγκλιση των λύσεων σε 163 επαναλήψεις, ενώ στις πρώτες γινόταν αντίστροφη ροή από την 2<sup>η</sup> έξοδο υγρασίας (λόγω του ότι βρίσκεται κοντά η έξοδος του φούρνου). Τα αποτελέσματα της λύσης ήταν λογικά όπως έδειξαν οι χρωματικές απεικονίσεις της θερμοκρασίας, της πίεσης και της θερμοκρασίας ακτινοβολίας, καθώς και η χρωματική απεικόνιση με βέλη της ταχύτητας του αέρα.

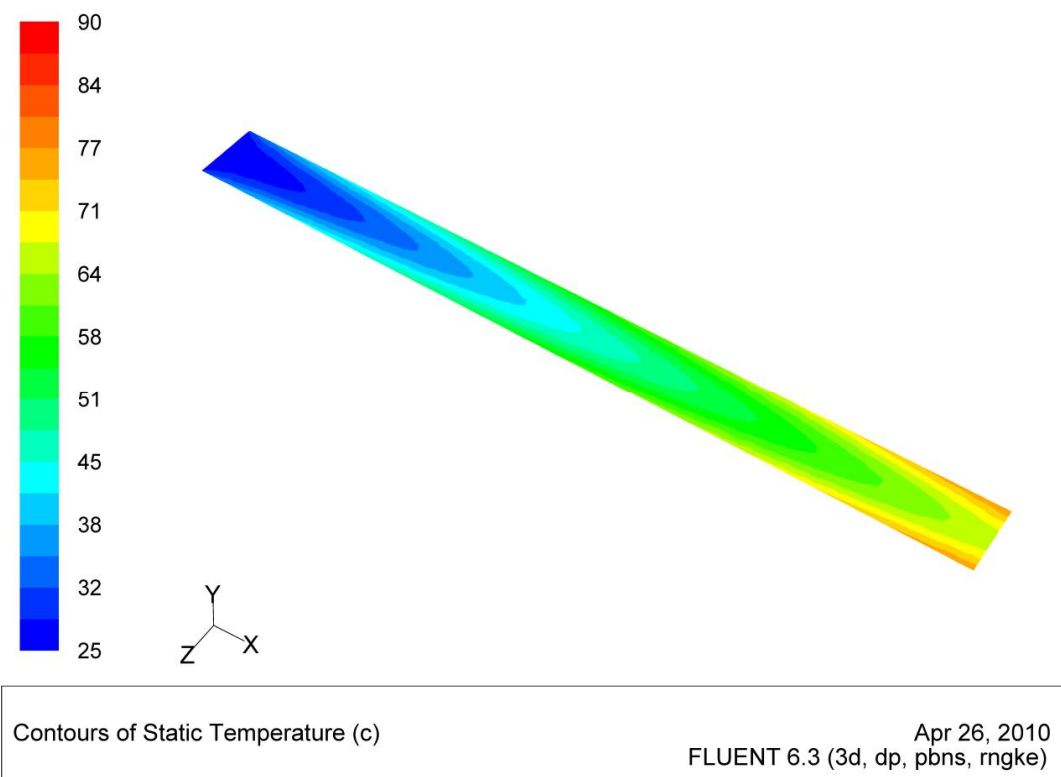
Στην χρωματική απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας παρατηρείται ότι, η αύξησή της από τα τοιχώματα προς το κέντρο του φούρνου και από την είσοδο προς την έξοδο, ακολουθεί την ροή του αέρα. Ο αέρας εισέρχεται από την είσοδο με ταχύτητα 0,8 m/s, οπότε λογικό είναι για κάποια απόσταση από την είσοδο να παραμένει ψυχρός όσο στην αρχική θερμοκρασία του αέρα, και να θερμαίνεται στην πορεία προς το τέλος του θαλάμου. Επίσης η ταχύτητα του αέρα είναι χαμηλότερη στα τοιχώματα και αυξάνεται έως το μέγιστο στο κέντρο του φούρνου, οπότε ο αέρας είναι πιο θερμός κοντά στα τοιχώματα όπου δεν επηρεάζεται τόσο, και επίσης βρίσκεται κοντά στα πολύ θερμά ακτινοβολούντα τοιχώματα. Από την εικόνα της διαμόρφωσης της πίεσης στο εσωτερικό του φούρνου, φαίνεται ότι ορθά η πίεση μειώνεται προς το τέλος του φούρνου, δηλαδή προς την κατεύθυνση της ροής του αέρα.

Όπως επισημαίνεται από την θεωρία (κεφ. 3.Γ.β.ι) τόσο ο αλγόριθμος όσο και το σχήμα διακριτοποίησης, αρμόζουν στην περίπτωση αυτού του προβλήματος.

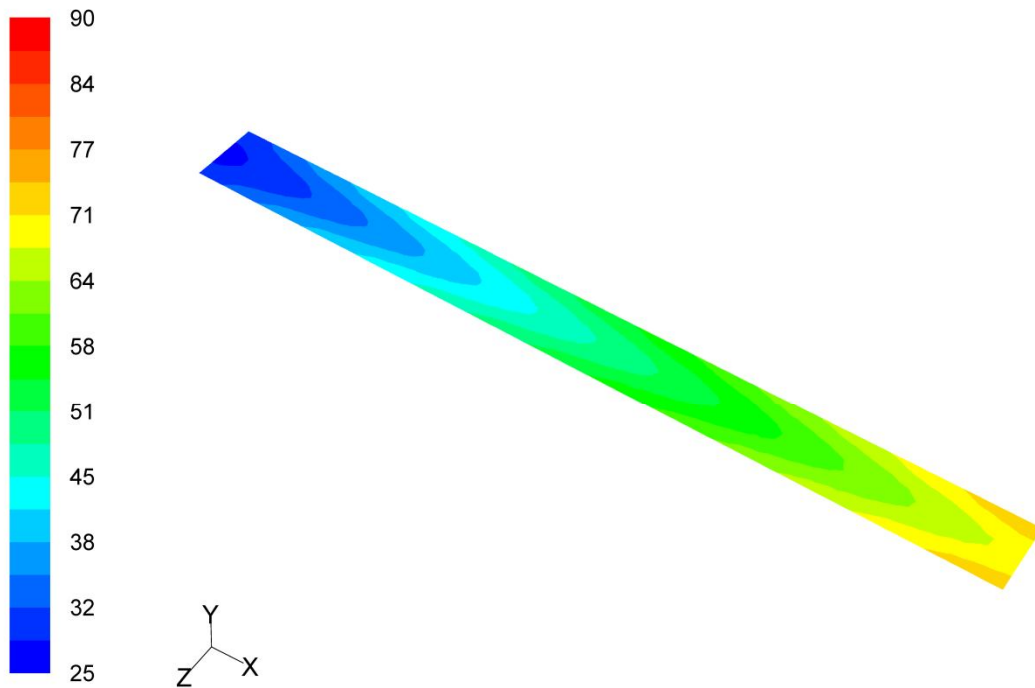




Εικόνα 29: Χρωματική απεικόνιση της πίεσης όπως αυτή διαμορφώνεται στο οριζόντιο επίπεδο του φούρνου (σημείο ελέγχου A3).



Εικόνα 30: Χρωματική απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας όπως αυτή διαμορφώνεται στο οριζόντιο επίπεδο του φούρνου (σημείο ελέγχου A3).



Contours of Radiation Temperature (c)

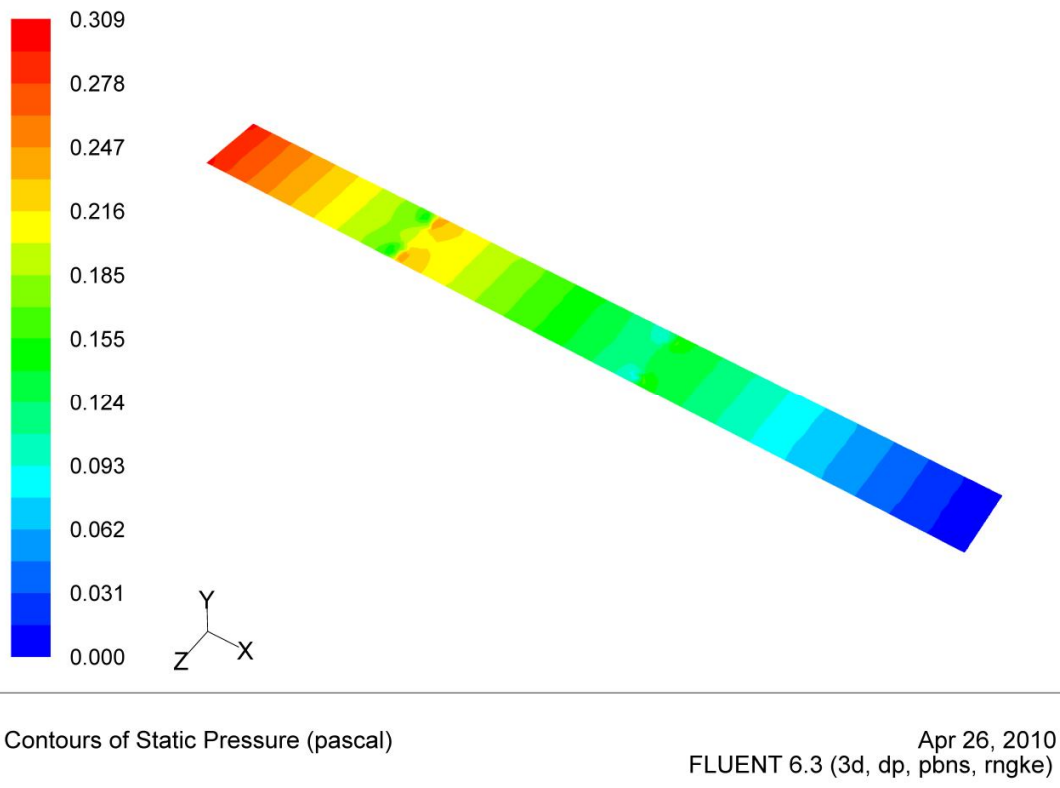
Apr 26, 2010  
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, rngke)

Εικόνα 31: Χρωματική απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας της ακτινοβολίας όπως αυτή διαμορφώνεται στο οριζόντιο επίπεδο του φούρνου (σημείο ελέγχουA3).

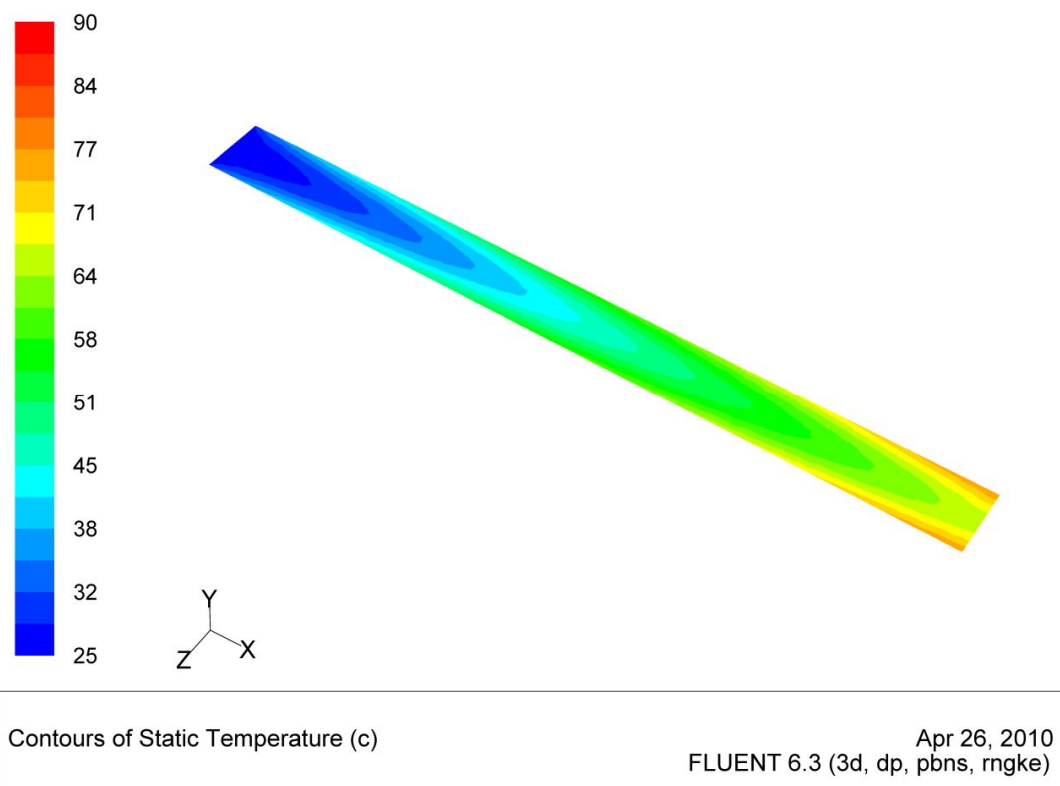
b) SIMPLEC – STANDARD / 1<sup>st</sup> order upwind

Έγινε σύγκλιση λύσεων στις 148 επαναλήψεις και η αντίστροφη ροή είχε την ίδια συμπεριφορά με την (α) περίπτωση. Επίσης και με αυτόν τον συνδυασμό τα αποτελέσματα ήταν λογικά.

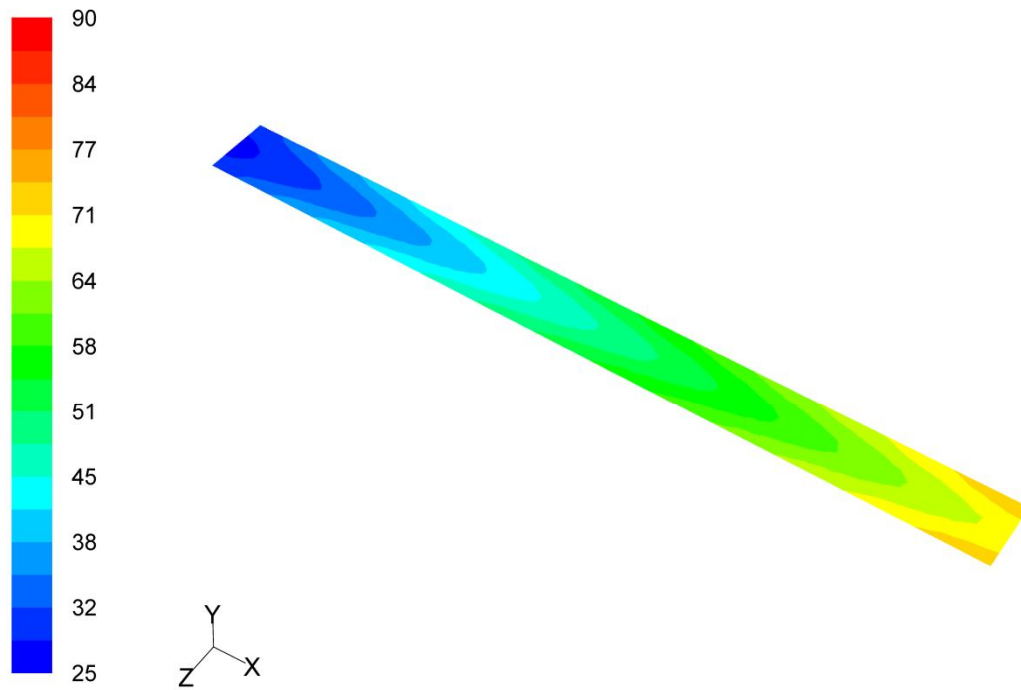
Λαμβάνοντας υπόψη τη θεωρία, αυτός ο συνδυασμός είναι σωστός για μόνιμες ροές και δίνει καλά αποτελέσματα για όλες σχεδόν τις περιπτώσεις (ομοίως με (α)).



Εικόνα 32: Χρωματική απεικόνιση της πίεσης όπως αυτή διαμορφώνεται στο οριζόντιο επίπεδο του φούρνου (σημείο ελέγχουA3).



Εικόνα 33: Χρωματική απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας όπως αυτή διαμορφώνεται στο οριζόντιο επίπεδο του φούρνου (σημείο ελέγχουA3).



Contours of Radiation Temperature (c)

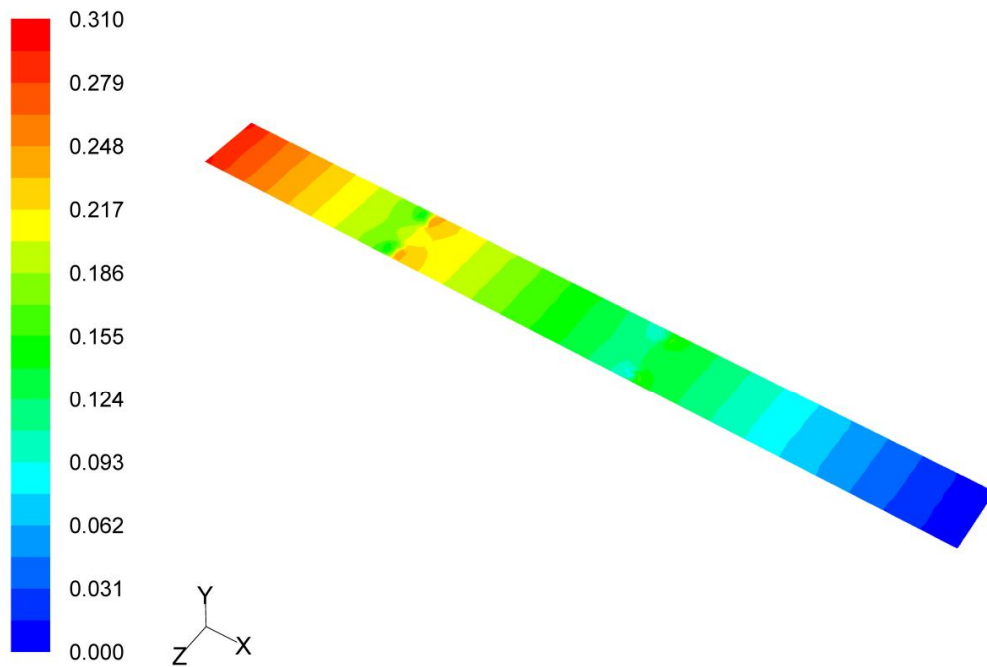
Apr 26, 2010  
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, rngke)

Εικόνα 34: Χρωματική απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας της ακτινοβολίας όπως αυτή διαμορφώνεται στο οριζόντιο επίπεδο του φούρνου (σημείο ελέγχουA3).

### c) PISO – STANDARD / 1<sup>st</sup> order upwind

Σύγκλιση συνέβη στις 161 επαναλήψεις και υπήρχε στην αρχή των λύσεων αντίστροφη ροή μέχρι να αρχίσει να σταθεροποιείται η ροή. Τα αποτελέσματα όπως φάνηκαν στις χρωματικές απεικονίσεις δεν είχαν καμία διαφορά με τις προηγούμενες δύο δοκιμές.

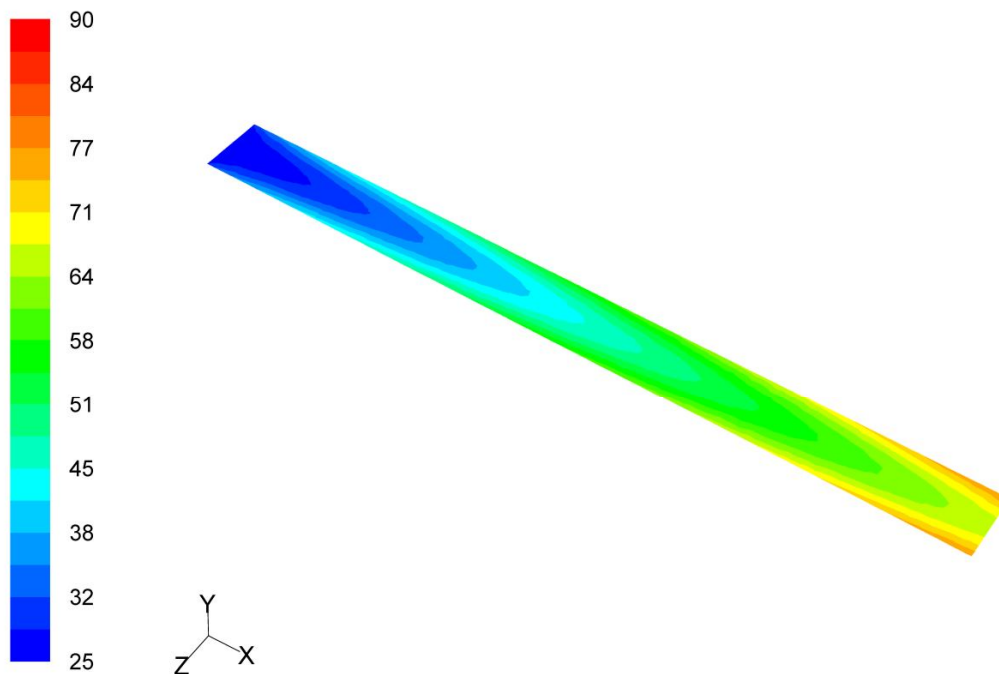
Σύμφωνα με την θεωρία ο αλγόριθμος PISO δεν είναι ιδανικός για την περίπτωση μας καθώς χρησιμοποιείται κυρίως για μη μόνιμες ροές.



Contours of Static Pressure (pascal)

Apr 26, 2010  
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, rngke)

Εικόνα 35: Χρωματική απεικόνιση της πίεσης όπως αυτή διαμορφώνεται στο οριζόντιο επίπεδο του φούρνου (σημείο ελέγχουA3).



Contours of Static Temperature (c)

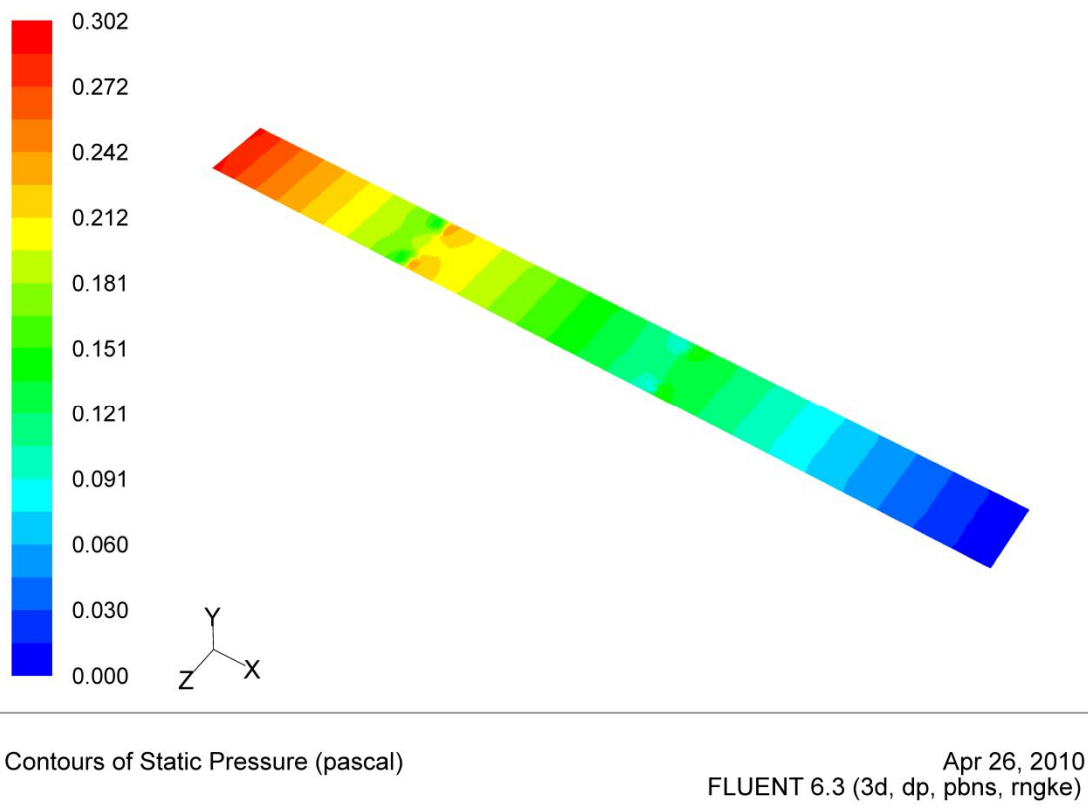
Apr 26, 2010  
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, rngke)

Εικόνα 36: Χρωματική απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας όπως αυτή διαμορφώνεται στο οριζόντιο επίπεδο του φούρνου (σημείο ελέγχουA3).

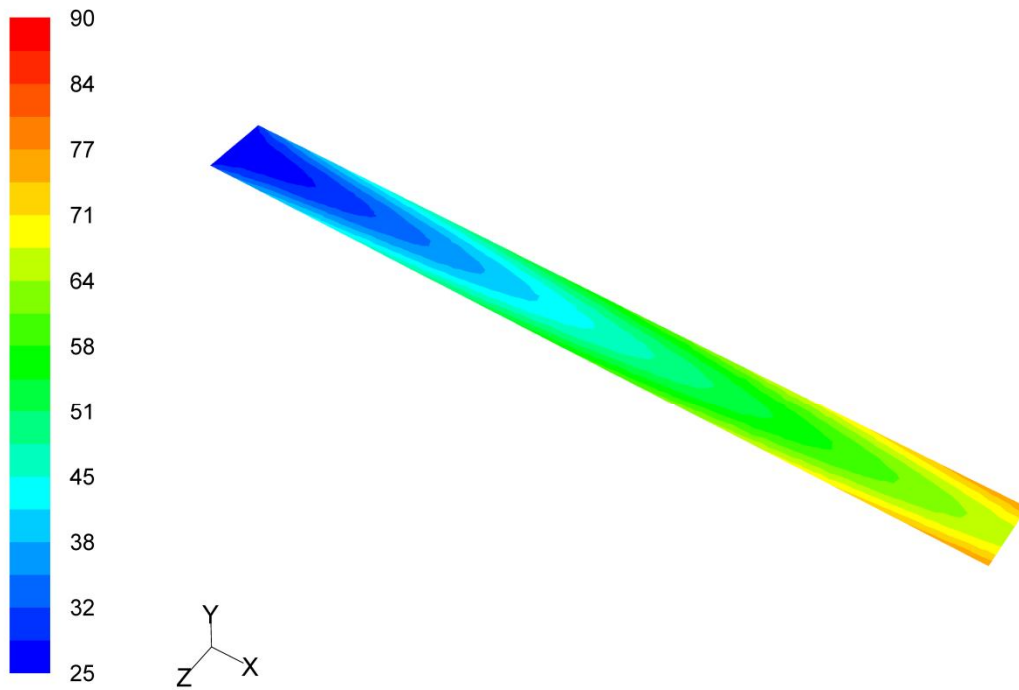
d) COUPLED – STANDARD / 1<sup>st</sup> order upwind

Συνέκλινε σε μόλις 41 επαναλήψεις και παρατηρήθηκε ότι η αντίστροφη ροή συνέβη μόνο για 3 επαναλήψεις στην αρχή της επίλυσης. Τα αποτελέσματα στις χρωματικές απεικονίσεις δεν δείχνουν να έχουν διαφορές με τα προηγούμενα.

Όπως επισημαίνεται και στην θεωρία, ο αλγόριθμος αυτός δίνει σταθερότερες αριθμητικές λύσεις σε χρονικά μόνιμες ροές σε σχέση με τα άλλα σχήματα.



Εικόνα 37: Χρωματική απεικόνιση της πίεσης όπως αυτή διαμορφώνεται στο οριζόντιο επίπεδο του φούρνου ([σημείο ελέγχουA3](#)).



Contours of Static Temperature (c)

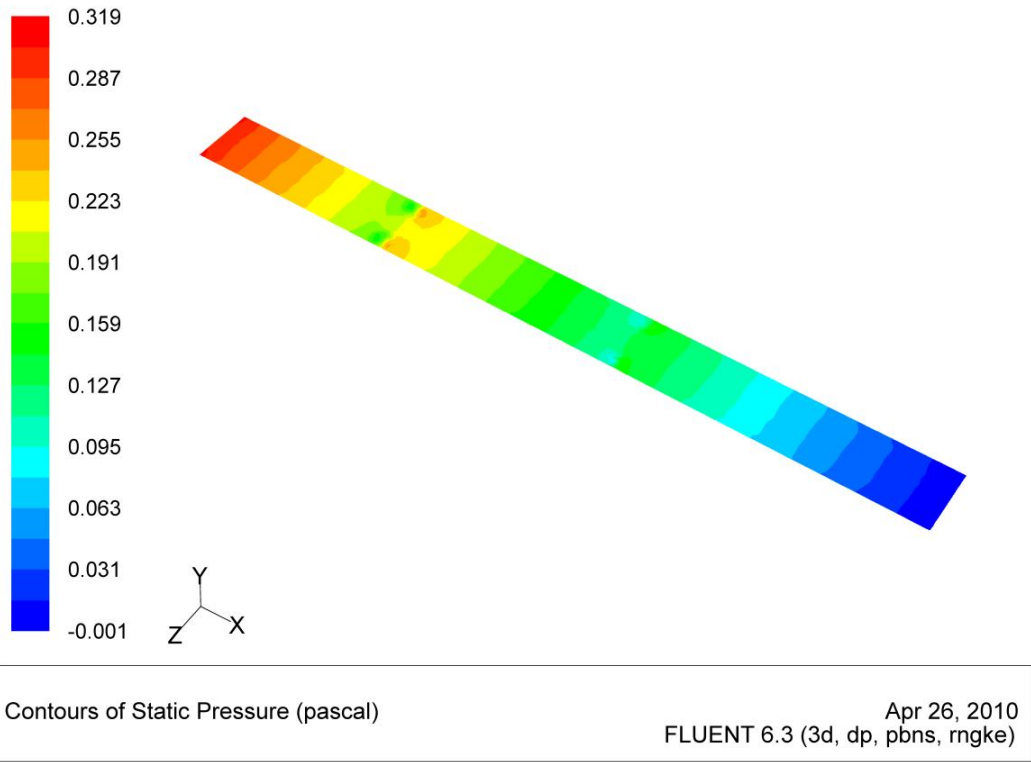
Apr 26, 2010  
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, rngke)

Εικόνα 38: Χρωματική απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας όπως αυτή διαμορφώνεται στο οριζόντιο επίπεδο του φούρνου (σημείο ελέγχουΑ3).

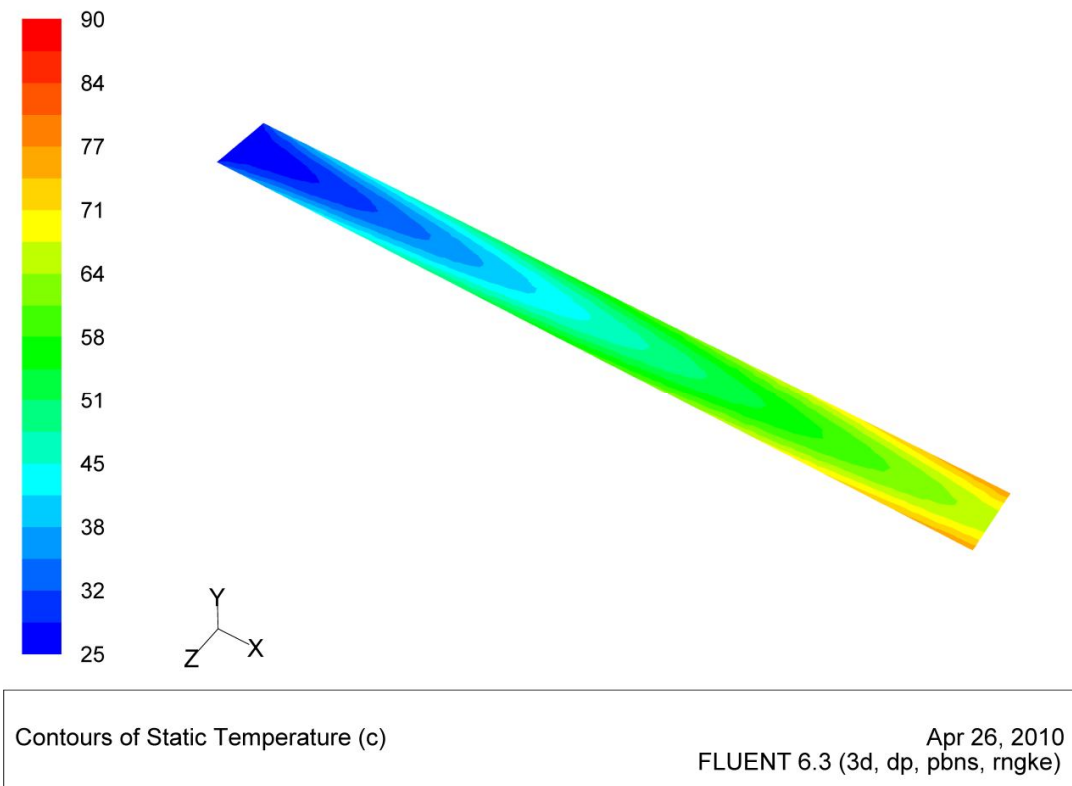
e) SIMPLE – PRESTO! / 1<sup>st</sup> order upwind

Συνέκλινε σε 142 επαναλήψεις παρουσιάζοντας τα ίδια αποτελέσματα στις απεικονίσεις.

Σύμφωνα με την θεωρία ο αλγόριθμος αυτός μπορεί να χρησιμοποιηθεί ικανοποιητικά σε μόνιμες ροές, ενώ το σχήμα PRESTO! είναι κατάλληλο για πιο πολύπλοκες ροές.

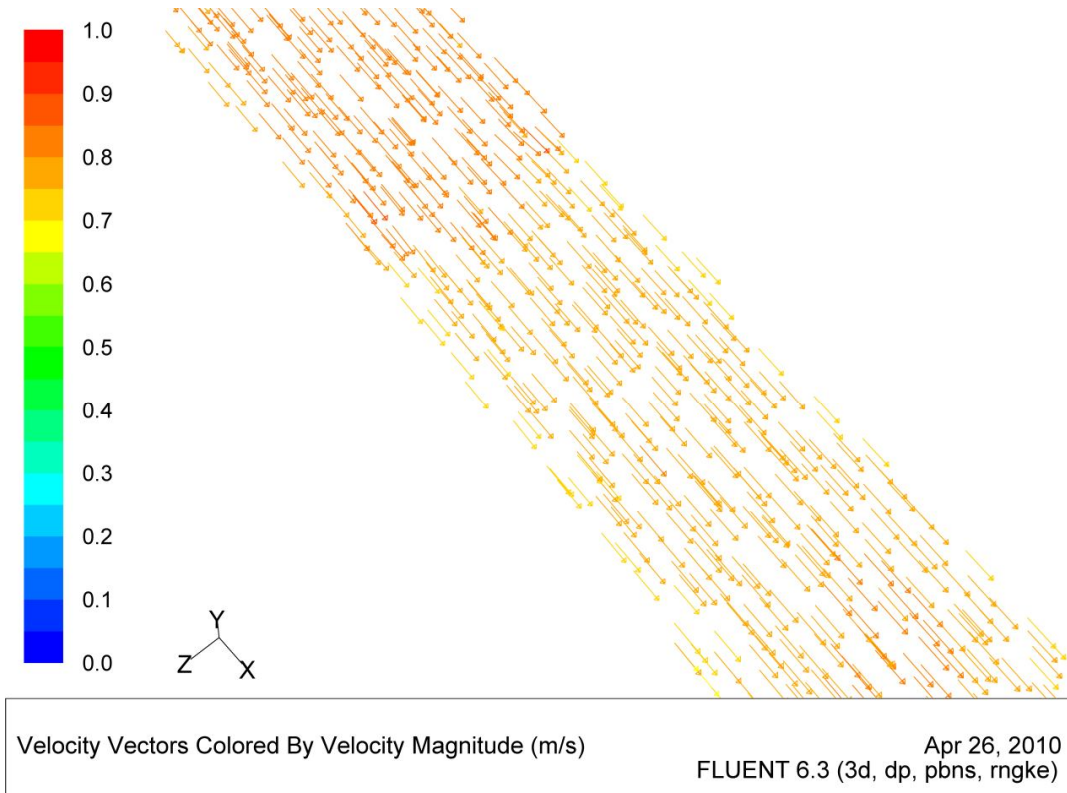


Εικόνα 39: Χρωματική απεικόνιση της πίεσης όπως αυτή διαμορφώνεται στο οριζόντιο επίπεδο του φούρνου (σημείο ελέγχουA3).



Εικόνα 40: Χρωματική απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας όπως αυτή διαμορφώνεται στο οριζόντιο επίπεδο του φούρνου (σημείο ελέγχουA3).

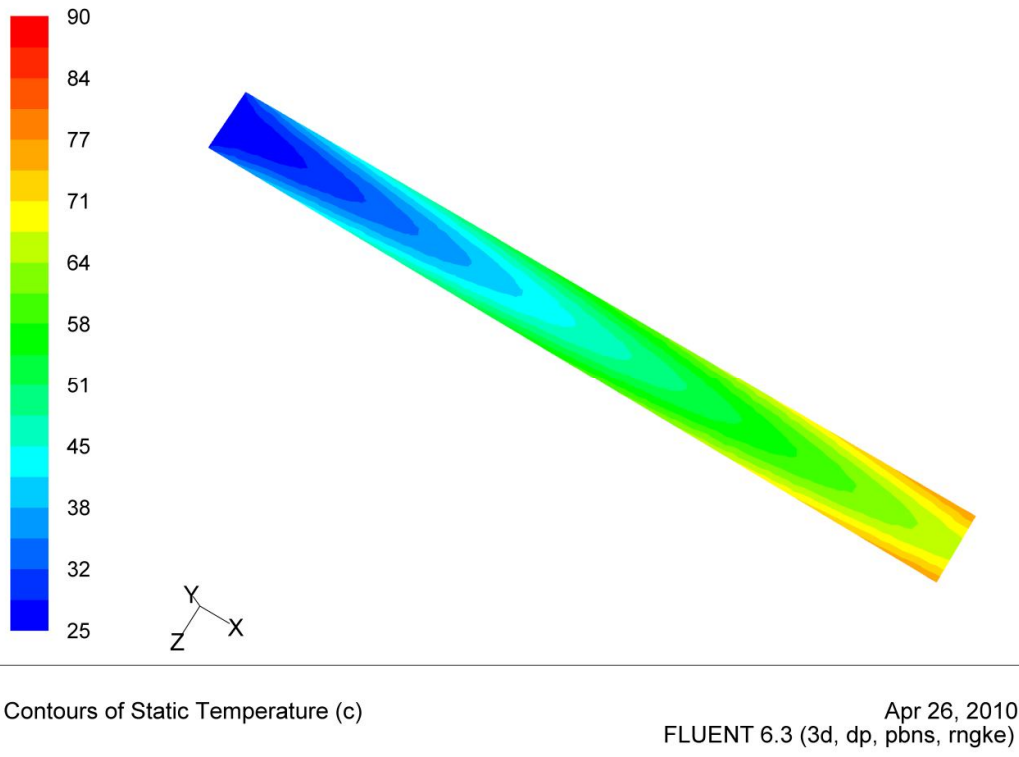




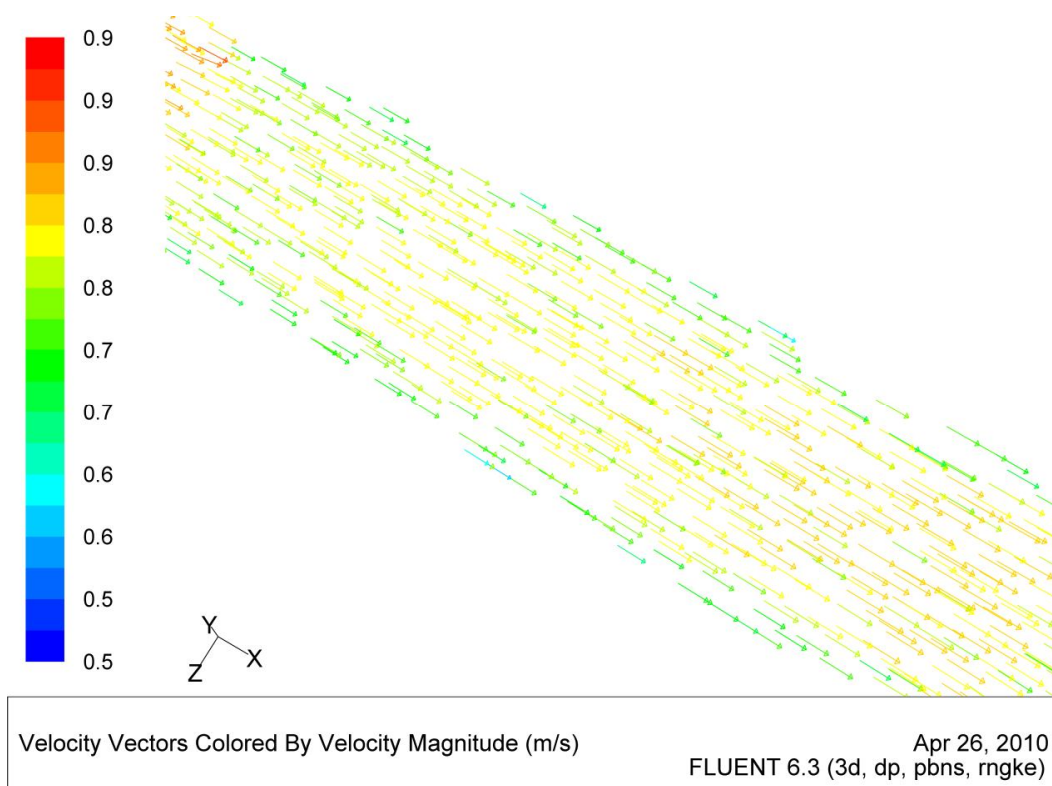
Εικόνα 41: Χρωματική απεικόνιση με βέλη του μεγέθους της ταχύτητας όπως αυτή διαμορφώνεται σε τμήμα του οριζόντιου επιπέδου του φούρνου (σημείο ελέγχουA3).

f) SIMPLE – 2<sup>nd</sup> order / 2<sup>nd</sup> order upwind

Έγινε σύγκλιση σε 167 επαναλήψεις με αντίστροφη ροή μόνο σε 7 επαναλήψεις. Τα αποτελέσματα όμως των χρωματικών απεικονίσεων δείχνουν τα βέλη της ταχύτητας να είναι ανομοιόμορφα κατανομημένα (η εναλλαγή χρωμάτων δείχνει το μέγεθος της ταχύτητας), δηλαδή φαίνονται βέλη με διάφορες ταχύτητες προς το κέντρο του φούρνου. Θα έπρεπε η ταχύτητα να είναι μικρή κοντά στα τοιχώματα του φούρνου και να αυξάνεται σταδιακά με μέγιστο το κέντρο του φούρνου, όπως λογικά φαίνεται στις προηγούμενες λύσεις.



Εικόνα 42: Χρωματική απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας όπως αυτή διαμορφώνεται στο οριζόντιο επίπεδο του φούρνου (σημείο ελέγχουA3).

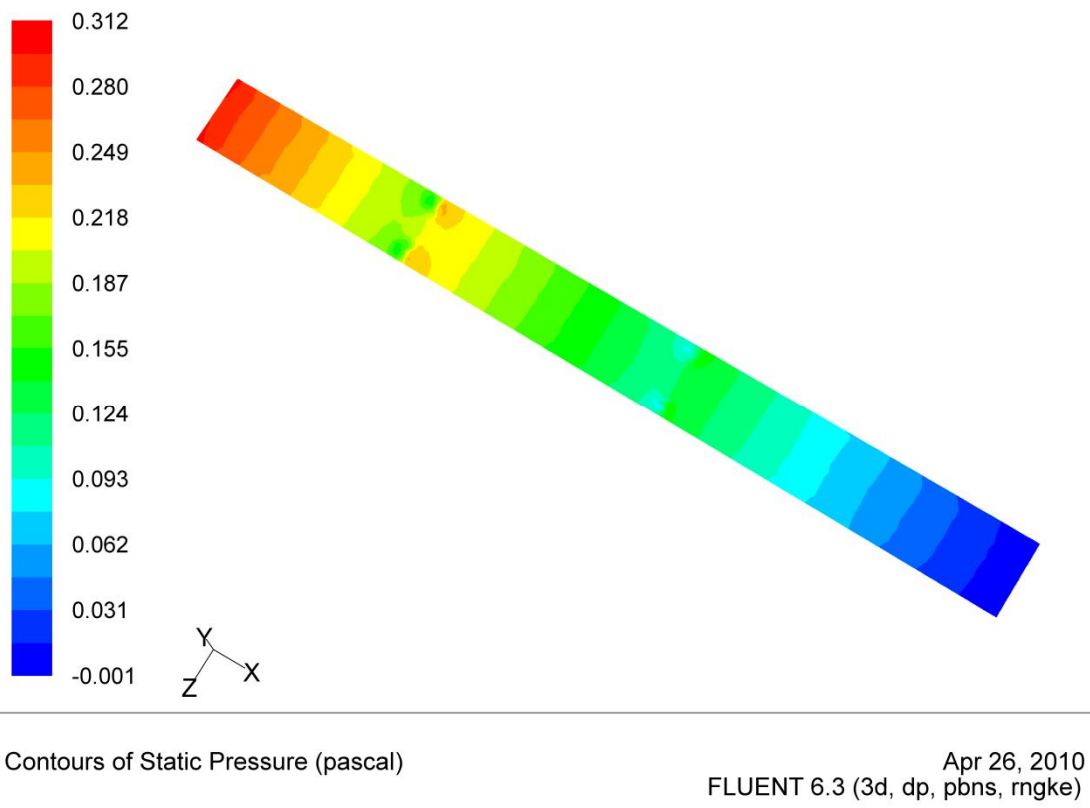


Εικόνα 43: Χρωματική απεικόνιση με βέλη του μεγέθους της ταχύτητας όπως αυτή διαμορφώνεται σε τμήμα του οριζόντιου επιπέδου του φούρνου (σημείο ελέγχουA3).

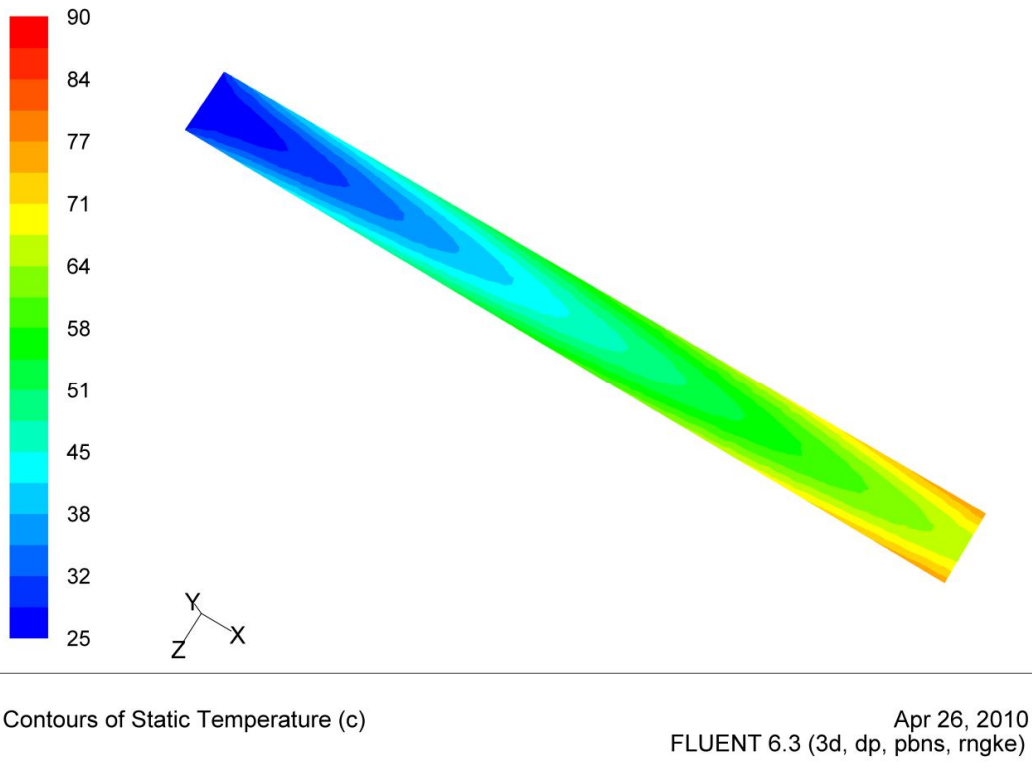
g) SIMPLEC – PRESTO! / 1<sup>st</sup> order upwind

Συνέκλινε στις 235 επαναλήψεις ενώ μέχρι την 86<sup>η</sup> επανάληψη συνέβαινε αντίστροφη ροή. Τα αποτελέσματα στις χρωματικές απεικονίσεις δεν έχουν αισθητές διαφορές με τα προηγούμενα (a – e).

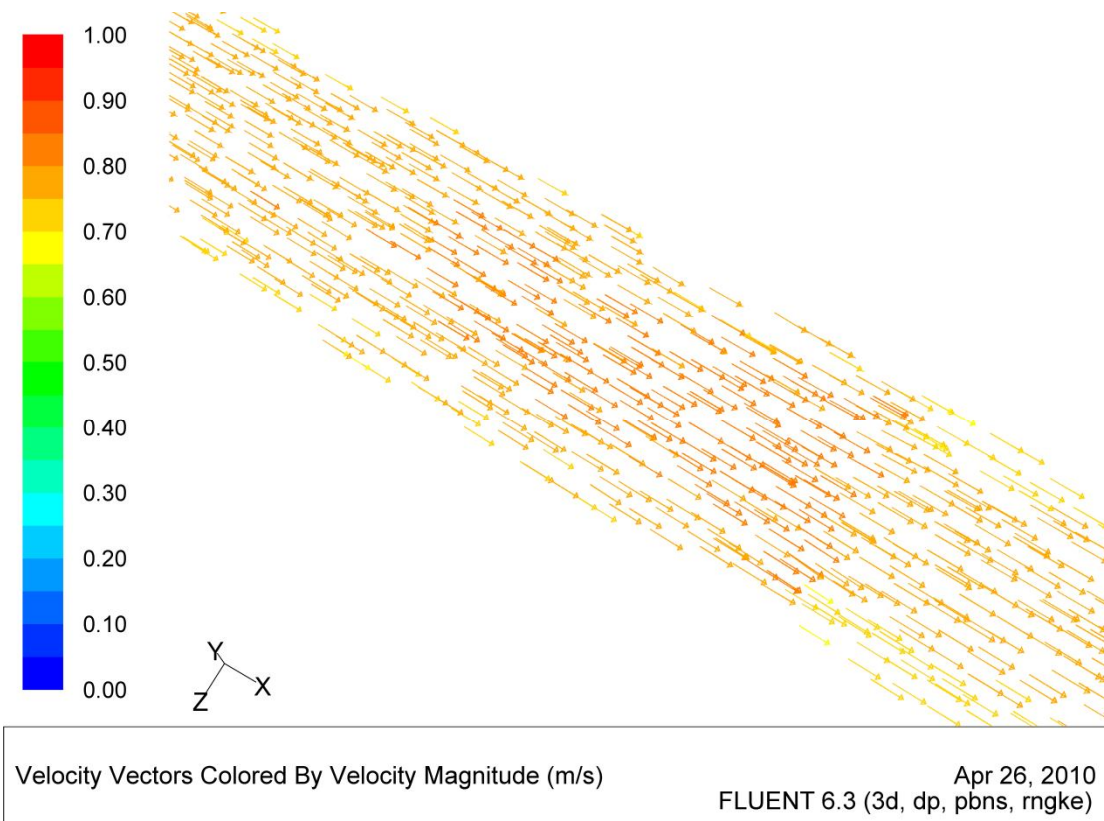
Λαμβάνοντας υπόψη την θεωρία ο αλγόριθμος αυτός είναι κατάλληλος για την περίπτωση ενώ το σχήμα διακριτοποίησης είναι για πιο πολύπλοκες ροές.



Εικόνα 44: Χρωματική απεικόνιση της πίεσης όπως αυτή διαμορφώνεται στο οριζόντιο επίπεδο του φούρνου ([σημείο ελέγχουA3](#)).



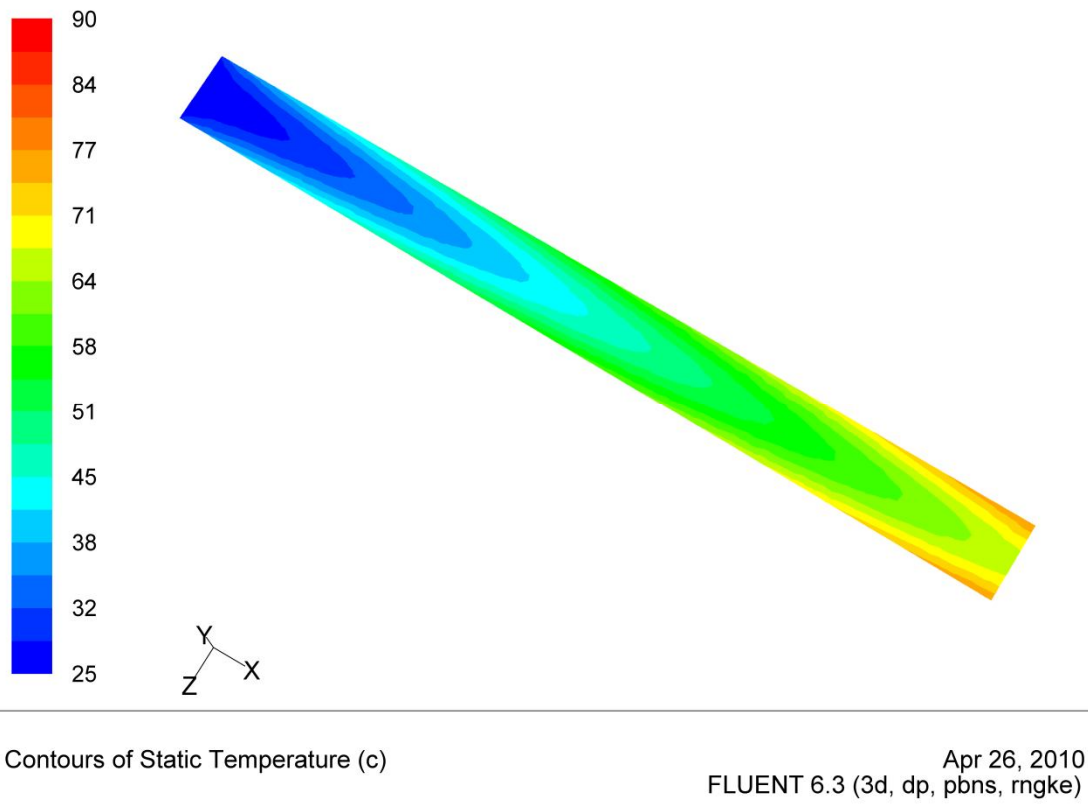
Εικόνα 45: Χρωματική απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας όπως αυτή διαμορφώνεται στο οριζόντιο επίπεδο του φούρνου (σημείο ελέγχουA3).



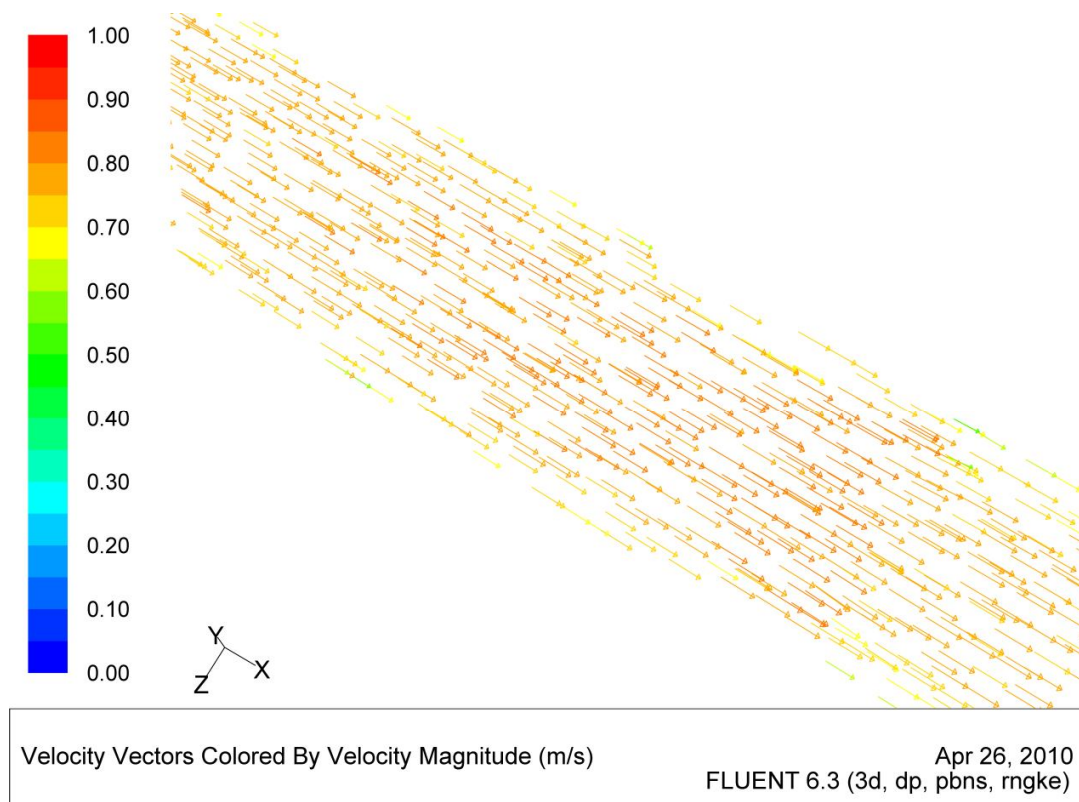
Εικόνα 46: Χρωματική απεικόνιση με βέλη του μεγέθους της ταχύτητας όπως αυτή διαμορφώνεται σε τμήμα του οριζόντιου επιπέδου του φούρνου (σημείο ελέγχουA3).

h) SIMPLEC – 2<sup>nd</sup> order / 2<sup>nd</sup> order upwind

Οι λύσεις συνέκλιναν στις 170 επαναλήψεις, ενώ για πολλές επαναλήψεις στην αρχή γινόταν αντίστροφη ροή. Τα αποτελέσματα στις απεικονίσεις ήταν λογικά.



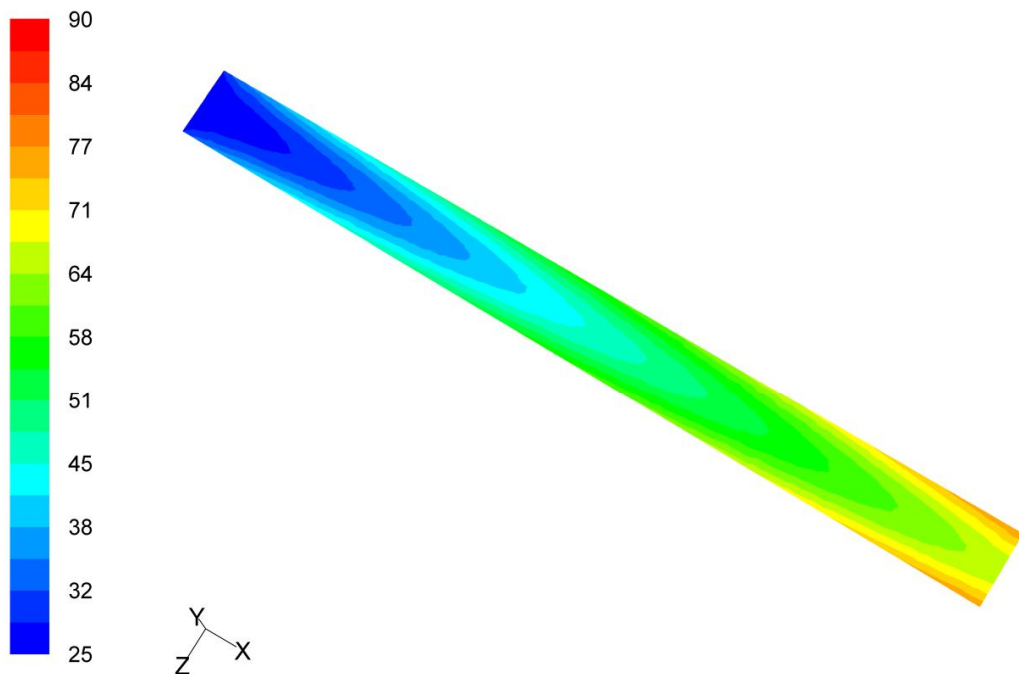
Εικόνα 47: Χρωματική απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας όπως αυτή διαμορφώνεται στο οριζόντιο επίπεδο του φούρνου (σημείο ελέγχουA3).



Εικόνα 48: Χρωματική απεικόνιση με βέλη του μεγέθους της ταχύτητας όπως αυτή διαμορφώνεται σε τμήμα του οριζόντιου επιπέδου του φούρνου (σημείο ελέγχου A3).

i) PISO – PRESTO! / 1<sup>st</sup> order upwind

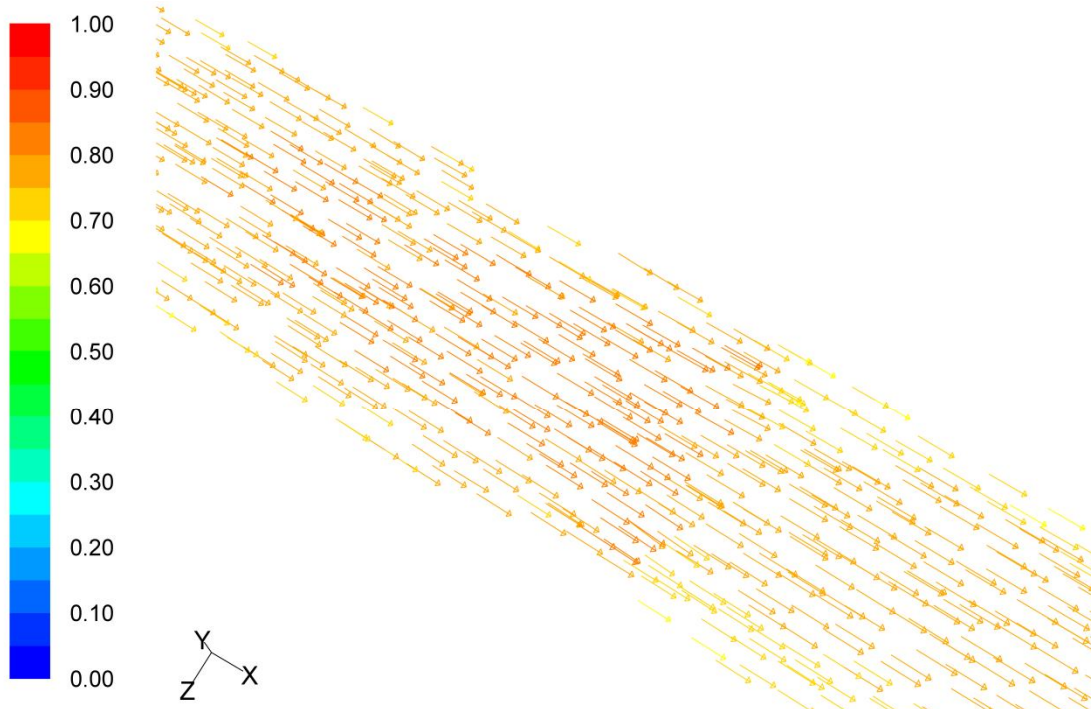
Συνέκλινε στις 146 επαναλήψεις και τα αποτελέσματα δεν μοιάζουν λανθασμένα. Σύμφωνα με την θεωρία, ο αλγόριθμος PISO είναι κυρίως για μη μόνιμες ροές.



Contours of Static Temperature (c)

Apr 26, 2010  
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, rngke)

Εικόνα 49: Χρωματική απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας όπως αυτή διαμορφώνεται στο οριζόντιο επίπεδο του φούρνου (σημείο ελέγχουΑ3).



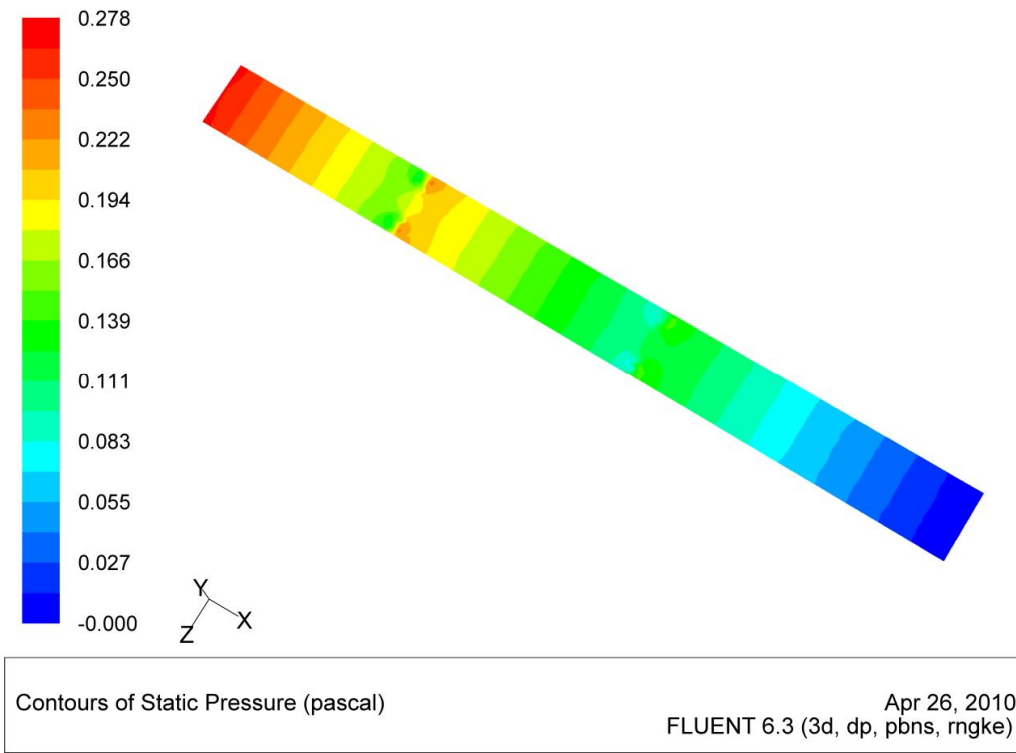
Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s)

Apr 26, 2010  
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, rngke)

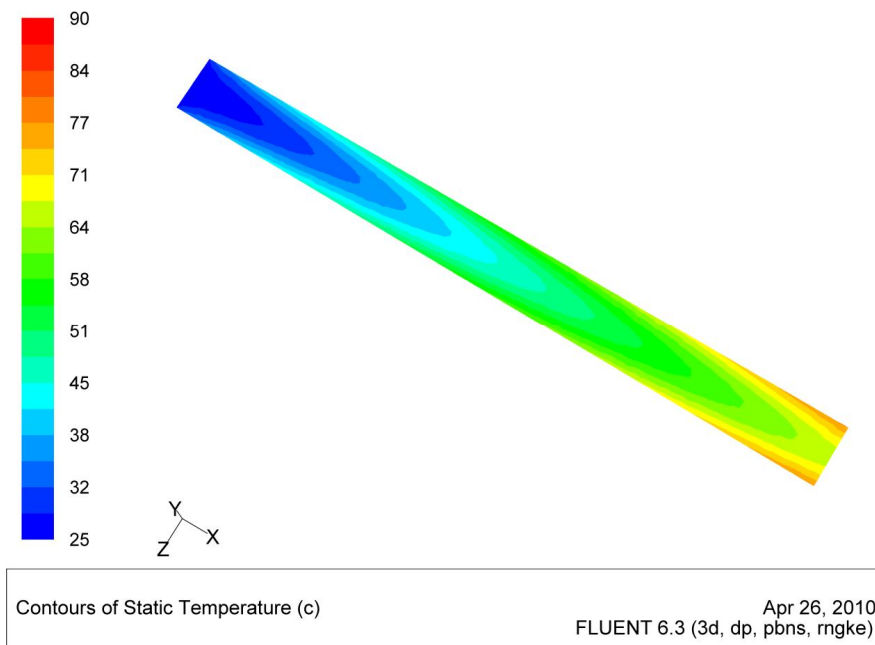
Εικόνα 50: Χρωματική απεικόνιση με βέλη του μεγέθους της ταχύτητας όπως αυτή διαμορφώνεται σε τμήμα του οριζόντιου επιπέδου του φούρνου (σημείο ελέγχουΑ3).

j) PISO – 2<sup>nd</sup> order / 2<sup>nd</sup> order upwind

Οι λύσεις συνέκλιναν στις 170 επαναλήψεις και δεν παρατηρείται καμία ουσιαστική διαφορά με τα προηγούμενα αποτελέσματα.



Εικόνα 51: Χρωματική απεικόνιση της πίεσης όπως αυτή διαμορφώνεται στο οριζόντιο επίπεδο του φούρνου (σημείο ελέγχουA3).

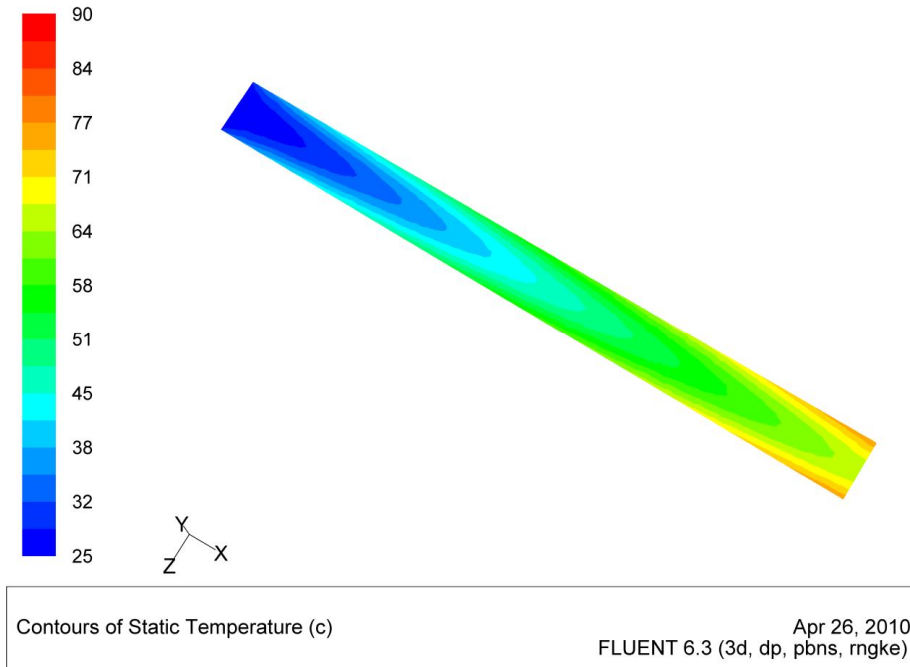


Εικόνα 52: Χρωματική απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας όπως αυτή διαμορφώνεται στο οριζόντιο επίπεδο του φούρνου (σημείο ελέγχουA3).



κ) COUPLED – PRESTO! / 1<sup>st</sup> order upwind

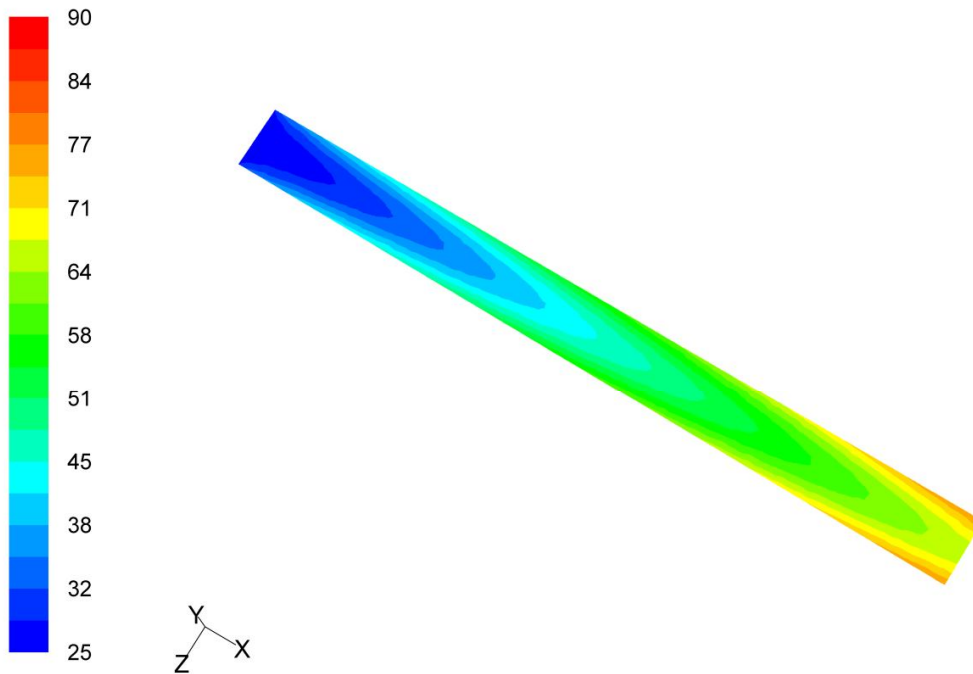
Συνέκλινε στις 193 επαναλήψεις, η αντίστροφη ροή συνέβαινε μόνο για 4 επαναλήψεις. Ο αλγόριθμος αυτός όπως έχει προαναφερθεί, δίνει τα πιο σταθερά αποτελέσματα.



Εικόνα 53: Χρωματική απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας όπως αυτή διαμορφώνεται στο οριζόντιο επίπεδο του φούρνου (σημείο ελέγχουA3).

ι) COUPLED – 2<sup>nd</sup> order / 2<sup>nd</sup> order upwind

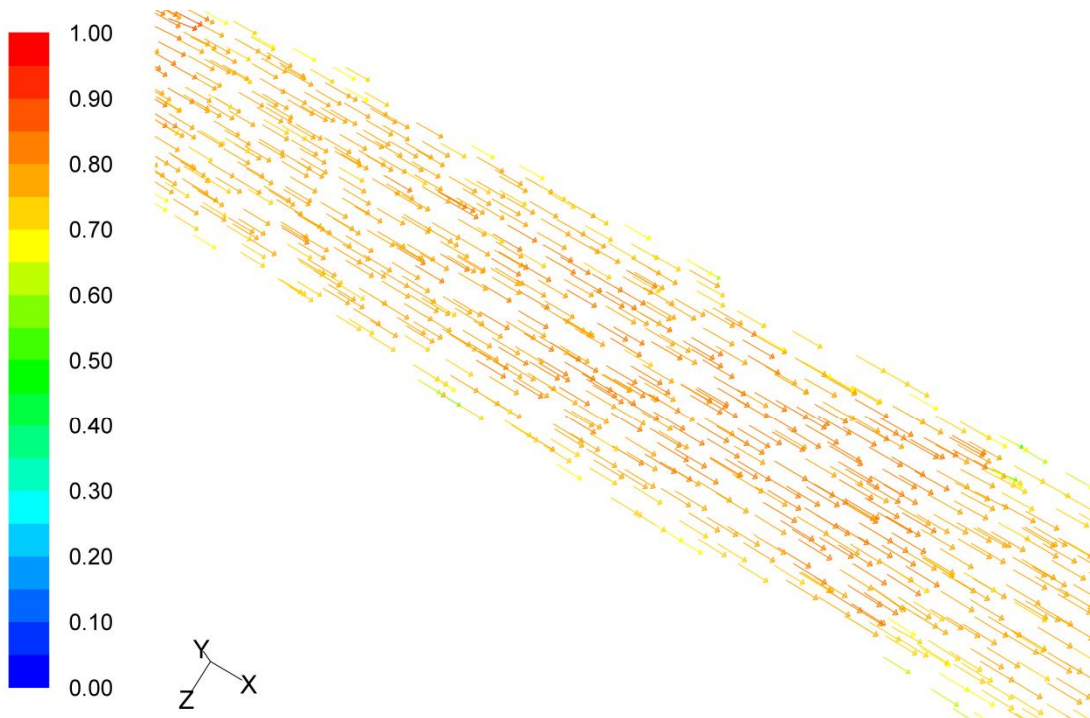
Οι λύσεις συνέκλιναν στις 68 μόνο επαναλήψεις και η αντίστροφη ροή δεν συνεχίστηκε περισσότερο από 4 επαναλήψεις στην αρχή, παρουσιάζεται όμως το πρόβλημα με την ταχύτητα όπως και στην περίπτωση (f). Βέλη χρώματος πορτοκαλί (0,6 m/s περίπου) και χρώματος κόκκινου (0,9 m/s περίπου) είναι αναμεμιγμένα στην ροή προς το κέντρο του φούρνου.



Contours of Static Temperature (c)

Apr 26, 2010  
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, rngke)

Εικόνα 54: Χρωματική απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας όπως αυτή διαμορφώνεται στο οριζόντιο επίπεδο του φούρνου (σημείο ελέγχουΑ3).

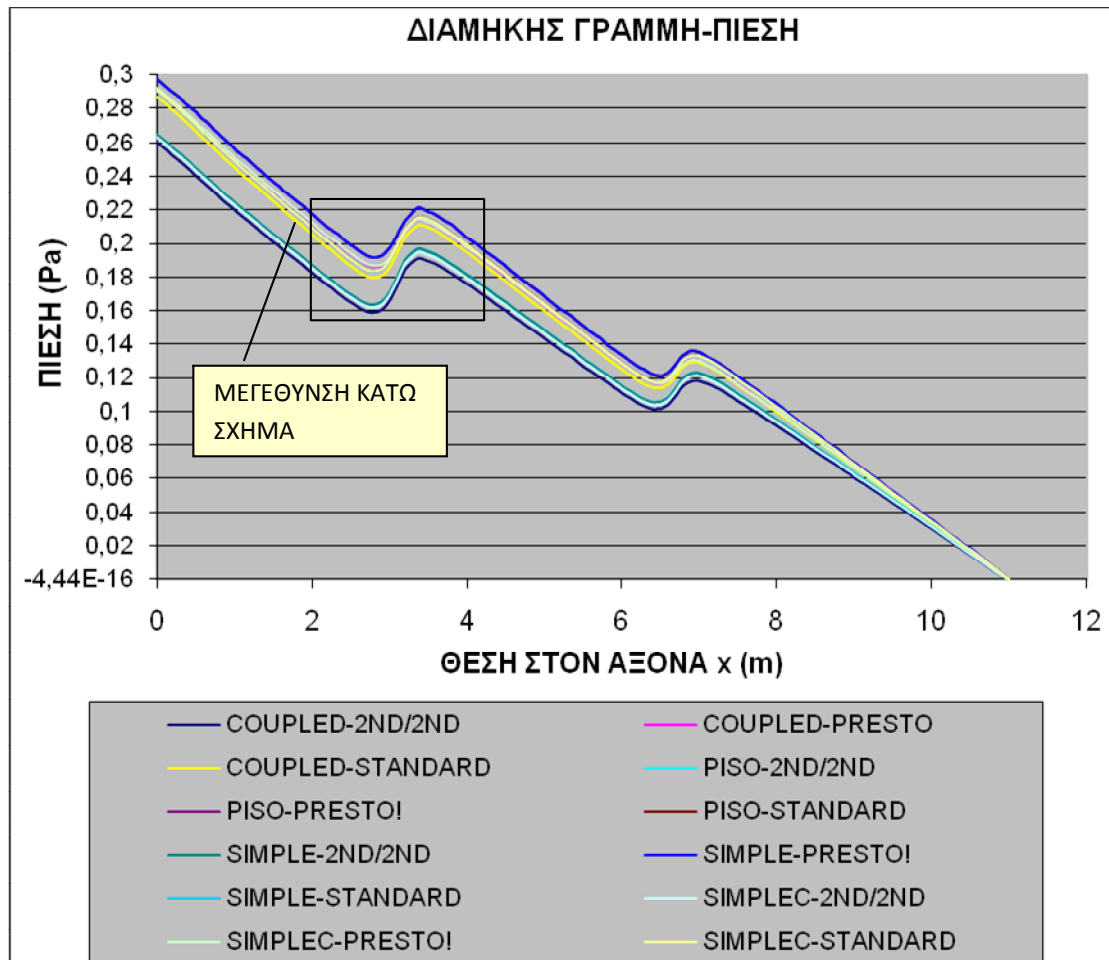


Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s)

Apr 26, 2010  
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, rngke)

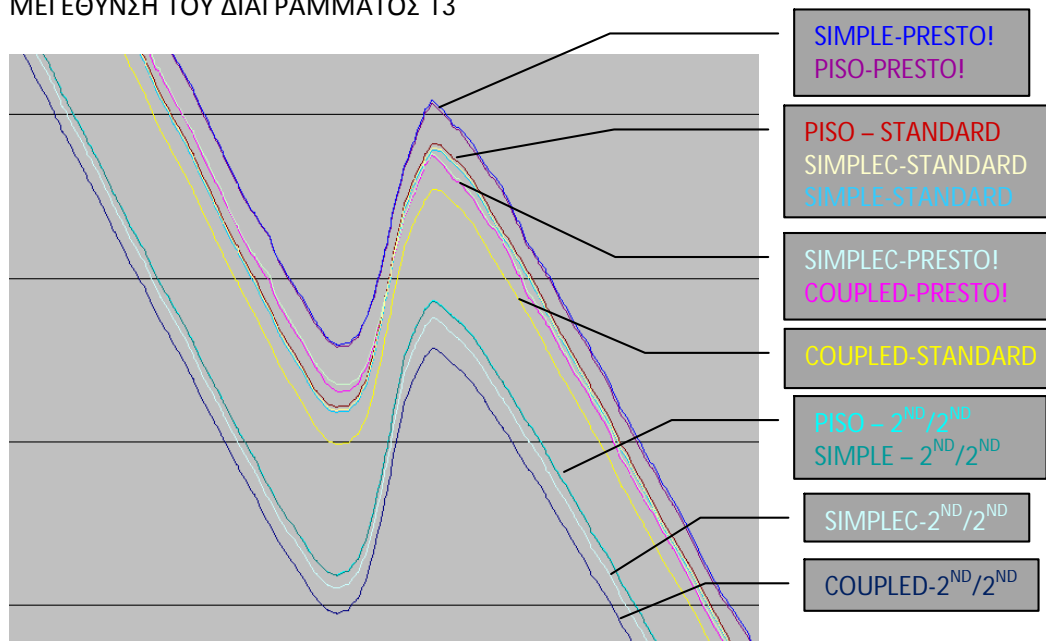
Εικόνα 55: Χρωματική απεικόνιση με βέλη του μεγέθους της ταχύτητας όπως αυτή διαμορφώνεται σε τμήμα του οριζόντιου επιπέδου του φούρνου (σημείο ελέγχουΑ3).

Για την ορθότερη σύγκριση των αποτελεσμάτων δημιουργήθηκαν δύο γραμμές μέσα στη γεωμετρία του φούρνου, μία διαμήκης και μία εγκάρσια (σημεία ελέγχου A1, A2) με τη βοήθεια των οποίων δημιουργήθηκαν τα παρακάτω διαγράμματα πίεσης και θερμοκρασίας.

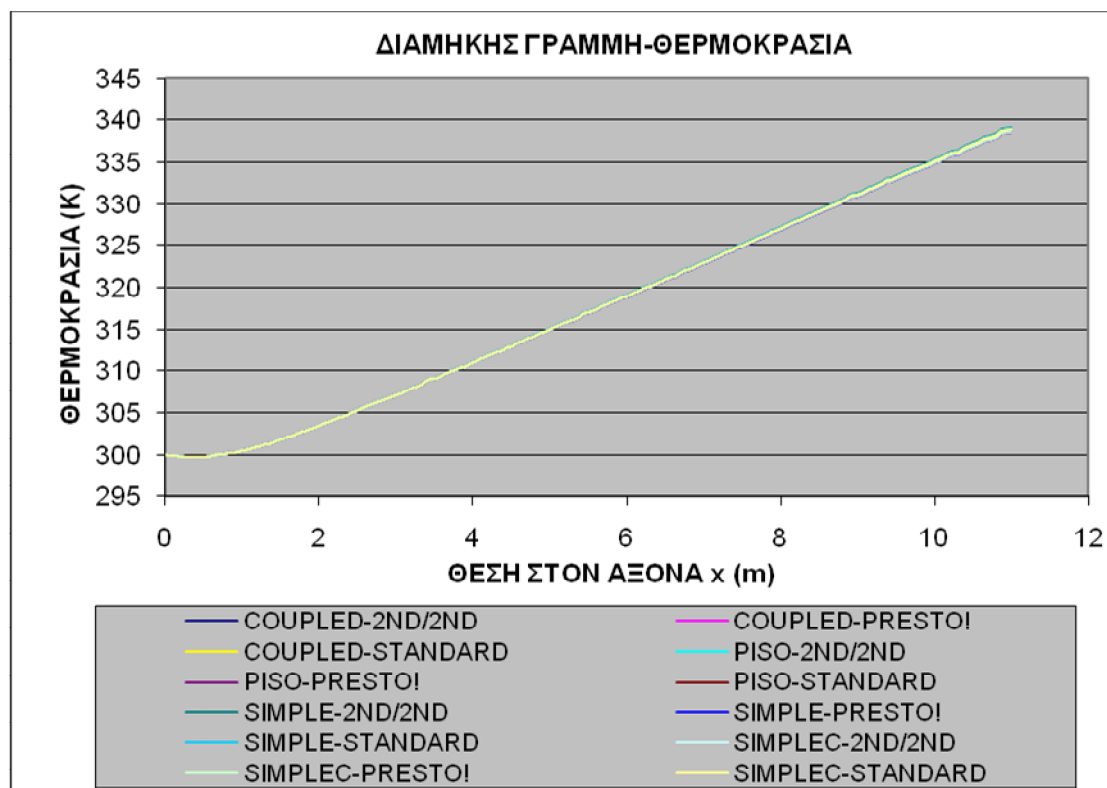


Διάγραμμα 13: Καμπύλες τιμών πίεσης όπως αυτή διαμορφώνεται κατά μήκος της διαμήκουσ γραμμής που αποτελεί το σημείο ελέγχου A1, στους διάφορους συνδυασμούς λύτη που δοκιμάστηκαν.

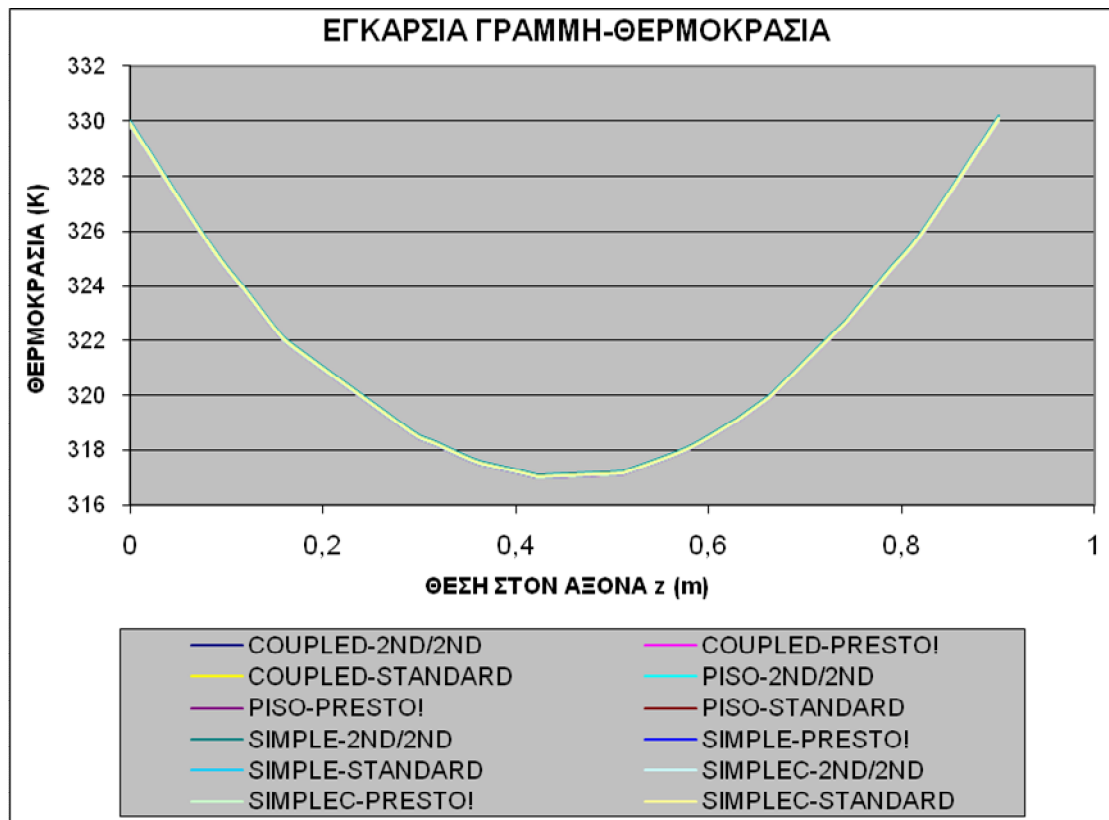
ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ ΤΟΥ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ 13



Εικόνα 56: Μεγέθυνση τμήματος του διαγράμματος 13 ώστε να είναι εμφανείς οι διαφορές στις καμπύλες.



Διάγραμμα 14: Καμπύλες τιμών θερμοκρασίας όπως αυτή διαμορφώνεται κατά μήκος της διαμήκου γραμμής (σημείο ελέγχου A1), και εξήχθησαν ως λύσεις από τον κάθε συνδυασμό.



Διάγραμμα 15: Καμπύλες τιμών θερμοκρασίας όπως αυτή διαμορφώνεται κατά μήκος της εγκάρσιας γραμμής (σημείο ελέγχου A2), και εξήχθησαν ως λύσεις από τον κάθε συνδυασμό.

Από τα παραπάνω διαγράμματα (13 - 15) φαίνεται ότι η εξίσωση της ενέργειας δεν λύνεται με διαφορετικό τρόπο σε κάθε μία από τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν. Η πίεση όμως παρουσιάζει διαφορές καθώς επηρεάζεται άμεσα από την επιλογή του αλγόριθμου σύζευξης πίεσης-ταχύτητας και του σχήματος διακριτοποίησης της πίεσης.

Τα συμπεράσματα από όλες τις παρατηρήσεις συνολικά, (από τις χρωματικές απεικονίσεις και από τα διαγράμματα) είναι:

- Ο συνδυασμός COUPLED – STANDARD / 1<sup>st</sup> order upwind είναι αυτός που έδωσε την πιο σύντομη λύση με τις λιγότερες επαναλήψεις με αντίστροφη ροή και παράλληλα, καλά αποτελέσματα. Στο διάγραμμα 13 της πίεσης είναι η μοναδική καμπύλη που είναι ξεχωριστή από τις άλλες, το αποτέλεσμα αυτού του συνδυασμού δεν μοιάζει με κανενός άλλου και βρίσκεται σχεδόν στις μεσαίες τιμές πίεσης. Λαμβάνοντας υπόψη και την θεωρία, θεωρείται ιδανικός συνδυασμός για το πρόβλημα που επιλύθηκε.
- Ανομοιόμορφη κλιμάκωση της ταχύτητας από το ένα τοίχωμα του φούρνου στο άλλο, που ήταν και το μοναδικό πρόβλημα που παρατηρήθηκε, εμφανίστηκε στις περιπτώσεις όπου είχε γίνει ακατάλληλη επιλογή λύτη και σχήματος διακριτοποίησης, σύμφωνα πάντα με την θεωρία. Δηλαδή, όταν επιλέχθηκε σχήμα διακριτοποίησης 2<sup>nd</sup> order / 2<sup>nd</sup> order upwind με τους αλγόριθμους COUPLED,

SIMPLE (στο διάγραμμα της πίεσης αυτές οι καμπύλες συγκεντρωμένες στις χαμηλές τιμές πίεσης).

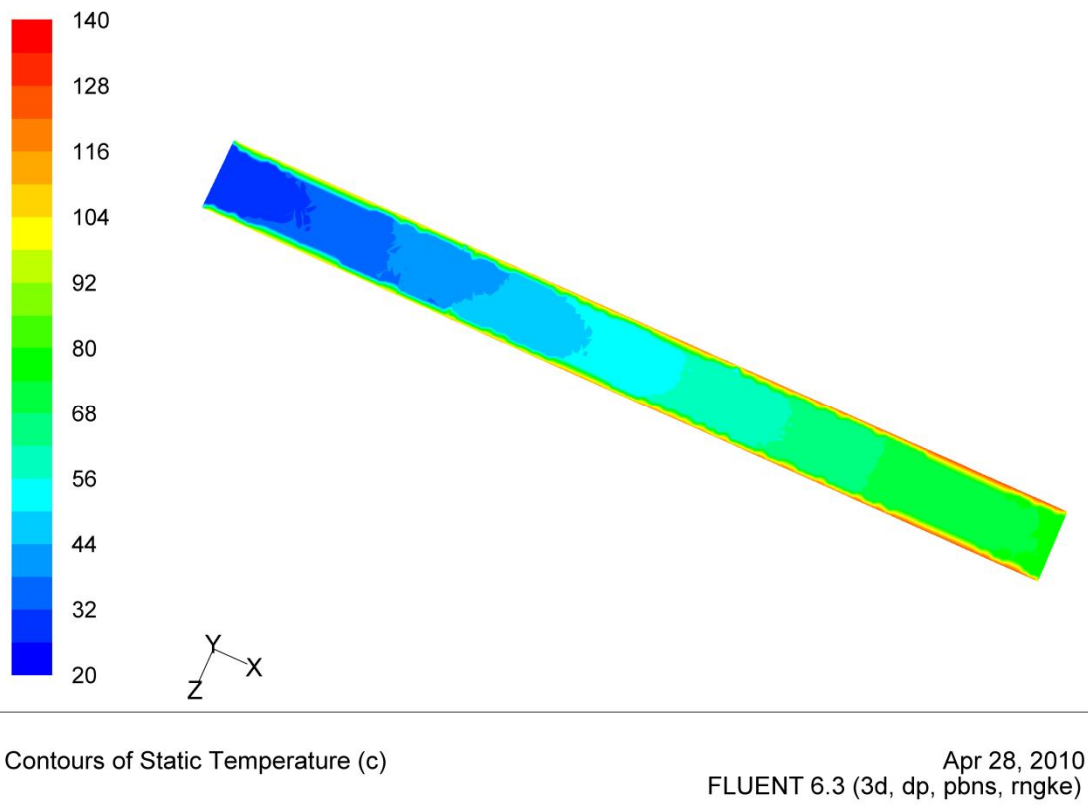
- Όλοι οι συνδυασμοί αλγορίθμων (εκτός του COUPLED) με το σχήμα διακριτοποίησης πίεσης STANDARD, έχουν πανομοιότυπα αποτελέσματα πίεσης.
- Ο συνδυασμός του σχήματος διακριτοποίησης πίεσης PRESTO! με τους αλγόριθμους SIMPLE και PISO, δίνουν τα ίδια αποτελέσματα πίεσης με τις υψηλότερες τιμές.
- Ο συνδυασμός του σχήματος διακριτοποίησης πίεσης PRESTO! με τους αλγόριθμους SIMPLEC και COUPLED, δίνουν τα ίδια αποτελέσματα πίεσης.
- Άρα, δεν πρέπει στη συνέχεια της εργασίας να χρησιμοποιηθεί το σχήμα διακριτοποίησης πίεσης / ορμής 2<sup>nd</sup> order / 2<sup>nd</sup> order upwind και ο συνδυασμός SIMPLEC – PRESTO! καθώς ήταν ο πιο χρονοβόρος στην επίλυση και με πολλές επαναλήψεις με αντίστροφη ροή.

#### 4.ii) ΣΤΑΔΙΟ 2<sup>ο</sup> - ΔΟΚΙΜΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Το συμπέρασμα από το προηγούμενο στάδιο (4.i) είναι ότι καταλληλότερος συνδυασμός λύτη είναι ο COUPLED – STANDARD / 1<sup>st</sup> order upwind, καθώς δίνει ταχύτερα σωστή λύση και είναι αποδεκτό με βάση την θεωρία. Έτσι, η δοκιμή των μοντέλων ακτινοβολίας έγινε με αυτόν τον λύτη. Έχουν αναφερθεί στο κεφάλαιο 3.Γ.β.ii, η θεωρία, οι περιορισμοί και οι προϋποθέσεις χρήσης των πέντε μοντέλων ακτινοβολίας του Fluent. Το στάδιο αυτό πραγματοποιήθηκε για να παρατηρηθούν τα αποτελέσματα όλων των μοντέλων, διατηρώντας σταθερές όλες τις άλλες συνθήκες του προβλήματος, και να αποδειχθεί ότι πράγματι η επιλογή ήταν εξ' αρχής σωστή.

- Μοντέλο ακτινοβολίας Rosseland

Οι λύσεις συνέκλιναν σε 41 επαναλήψεις χωρίς να παρατηρηθεί για πολλές επαναλήψεις αντίστροφη ροή (μόνο στις πρώτες 4). Όμως παρατηρώντας την χρωματική απεικόνιση της θερμοκρασίας σε οριζόντια διαμήκη τομή στη μέση του ύψους του φούρνου, γίνεται αντιληπτό ότι η κατανομή της θερμότητας δεν ακολουθεί την ροή του αέρα και δεν φαίνεται καθόλου λογική. Δεν έχει ομαλή κατανομή από τα τοιχώματα προς το κέντρο του φούρνου, καθώς φαίνεται να είναι κατά μήκος όλου του φούρνου η θερμοκρασία του αέρα κοντά στα τοιχώματα σχεδόν ίση. Επίσης από την είσοδο του φούρνου προς την έξοδο, και μάλιστα εμφανίζει αυξανόμενη θερμοκρασία, αλλά μοιάζει να θερμαίνεται σε ζώνες χωρίς να επηρεάζεται από την ροή του αέρα (μπορεί να γίνει σύγκριση με τις χρωματικές απεικονίσεις του προηγούμενου σταδίου). Ήταν αναμενόμενη η λανθασμένη επίλυση καθώς το μοντέλο αυτό συστήνεται να χρησιμοποιείται μόνο σε οπτική πυκνότητα μέσου που ξεπερνά την τιμή 3 (στην περίπτωση που μελετάται  $\alpha = 0,006$ ).

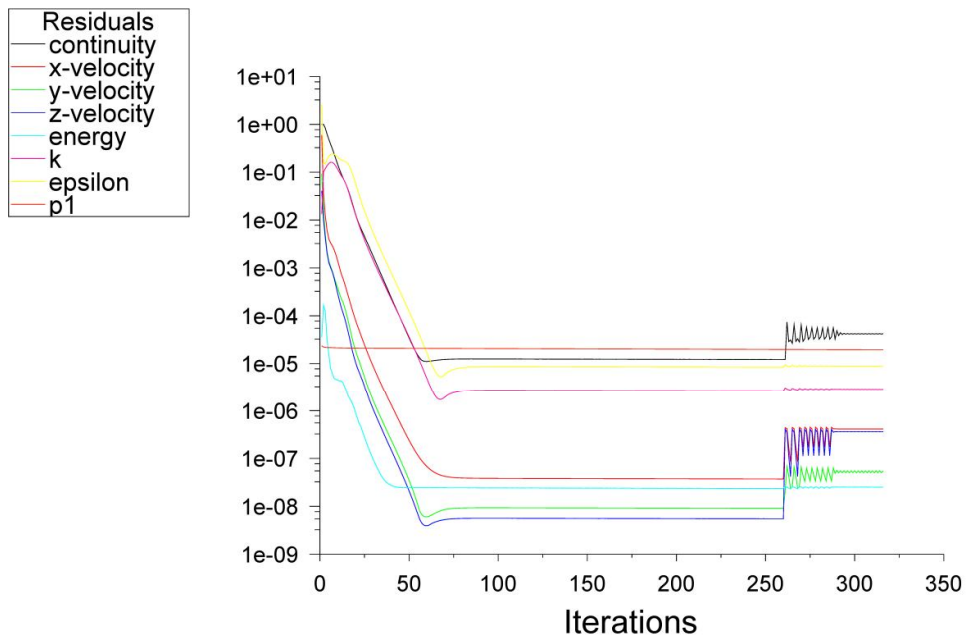


Εικόνα 57: Χρωματική απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας όπως αυτή διαμορφώνεται στο εσωτερικό του φούρνου πάνω στο οριζόντιο επίπεδο (σημείο ελέγχου A3)

- Μοντέλο ακτινοβολίας P1

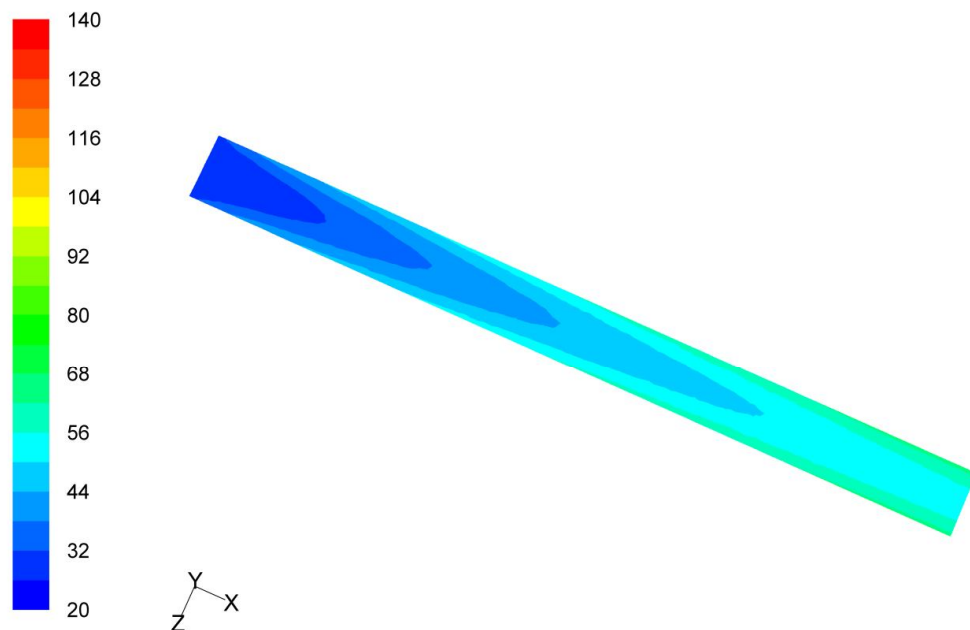
Το πρόβλημα που παρουσιάστηκε κατά την επίλυση, ήταν ότι οι λύσεις δεν συνέκλιαν. Παρόλα αυτά, η κατανομή της θερμοκρασίας όπως φαίνεται στην χρωματική απεικόνιση, δεν μοιάζει παράλογη, καθώς κανονικά η αύξηση της θερμοκρασίας από τα τοιχώματα προς το κέντρο του φούρνου και από την είσοδο προς την έξοδο, ακολουθεί την ροή του αέρα. Ο αέρας εισέρχεται από την είσοδο με ταχύτητα 0,5 m/s, οπότε λογικό είναι για κάποια απόσταση από την είσοδο να παραμένει ψυχρός όσο στην αρχική θερμοκρασία του αέρα, και να θερμαίνεται στην πορεία προς το τέλος του θαλάμου. Επίσης η ταχύτητα του αέρα είναι μικρότερη στα τοιχώματα και αυξάνεται έως το μέγιστο στο κέντρο του φούρνου, οπότε ο αέρας είναι πιο θερμός κοντά στα τοιχώματα όπου δεν επηρεάζεται τόσο, και επίσης βρίσκεται κοντά στα πολύ θερμά ακτινοβολούντα τοιχώματα. Η κατανομή της θερμότητας, πάντως δεν είναι ακριβώς ίδια όπως στα επόμενα δύο μοντέλα DTRM, DO.





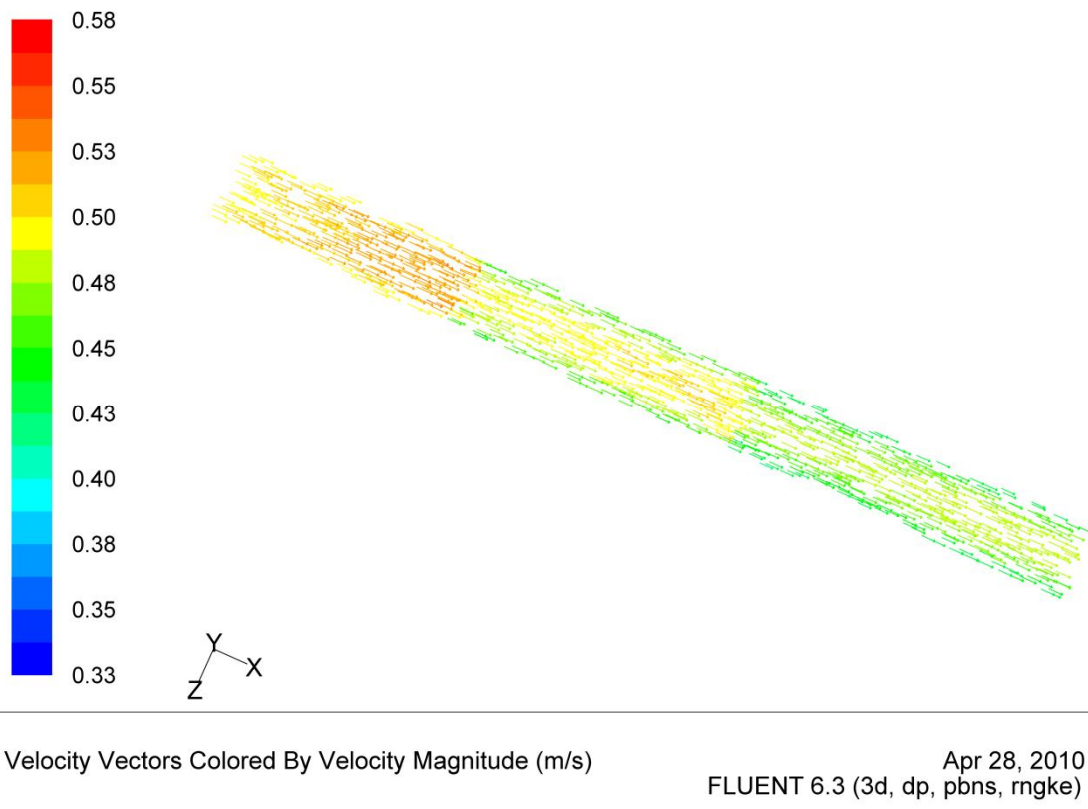
Scaled Residuals Apr 28, 2010  
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, rngke)

Διάγραμμα 16: Καμπύλες σύγκλισης λύσεων όλων των εξισώσεων που λύνει το Fluent σε αυτήν την περίπτωση. Στον άξονα x φαίνεται ο αριθμός των επαναλήψεων των υπολογισμών και στον άξονα y ο βαθμός σύγκλισης των λύσεων (residuals).



Contours of Static Temperature (c) Apr 28, 2010  
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, rngke)

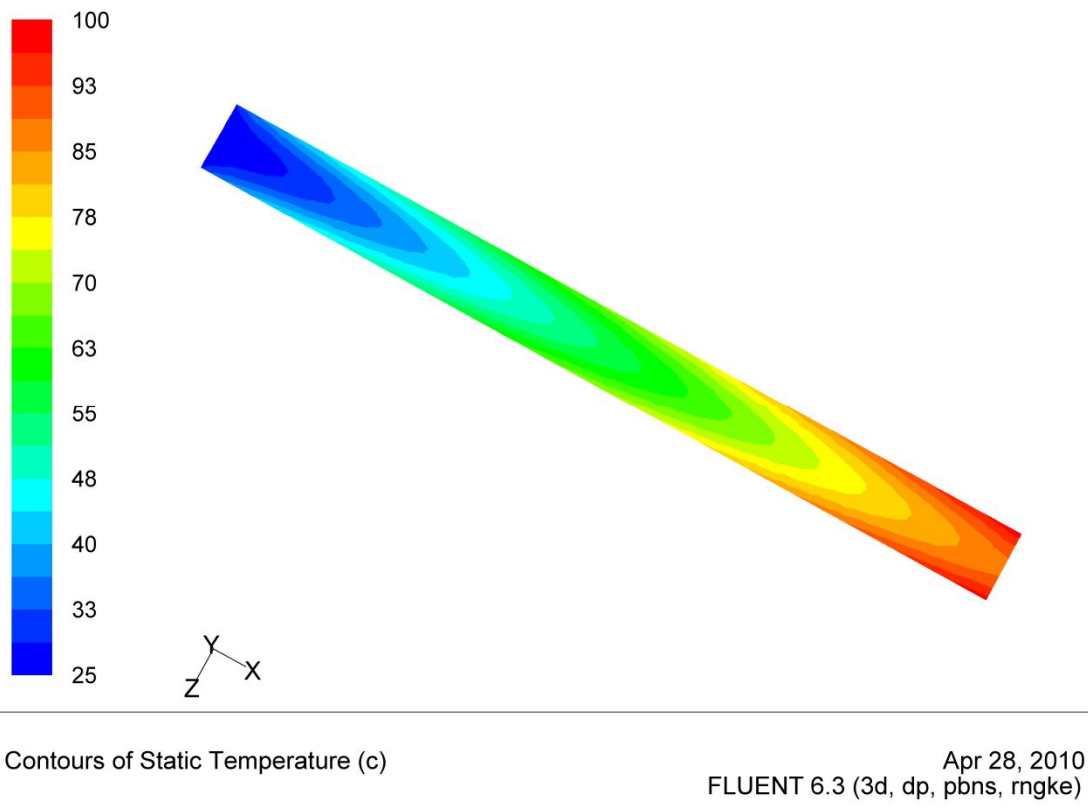
Εικόνα 58: Χρωματική απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας όπως αυτή διαμορφώνεται στο εσωτερικό του φούρνου πάνω στο οριζόντιο επίπεδο (σημείο ελέγχου A3)



Εικόνα 59: Χρωματική απεικόνιση με βέλη του μεγέθους της ταχύτητας όπως αυτή διαμορφώνεται κατά την ροή του αέρα στο εσωτερικό του φούρνου και φαίνεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο (σημείο ελέγχου A3)

- Μοντέλο ακτινοβολίας DTRM

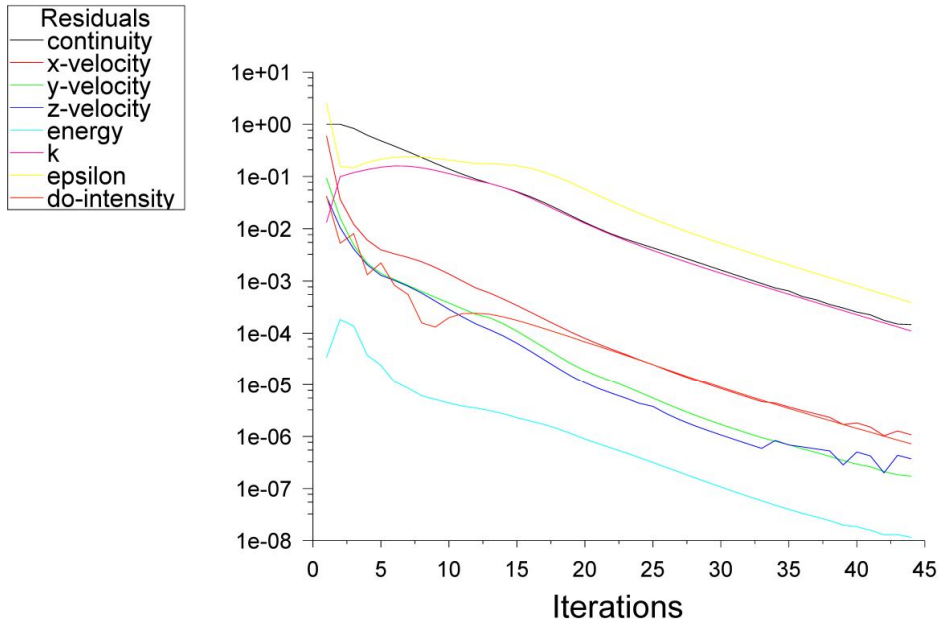
Οι λύσεις συνέκλιναν στις 39 επαναλήψεις. Τα αποτελέσματα στην χρωματική απεικόνιση της θερμοκρασίας στην τομή του φούρνου, είναι σωστά και εξηγούνται όπως στην ανάλυση των αποτελεσμάτων του παραπάνω μοντέλου P1. Φαίνεται όμως να είναι πιο ομαλή η κατανομή της θερμότητας. Αυτό ίσως εξηγείται από το ότι οι εξισώσεις στην περίπτωση του DTRM λύθηκαν και συνέκλιναν, και μάλιστα σύντομα, και έτσι τα αποτελέσματα σαφώς είναι πιο σωστά και ρεαλιστικά, από την στιγμή που και βάσει της θεωρίας το μοντέλο αρμόζει στην περίπτωση αυτή.



Εικόνα 60: Χρωματική απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας όπως αυτή διαμορφώνεται στο εσωτερικό του φούρνου πάνω στο οριζόντιο διάμηκες επίπεδο (σημείο ελέγχου A3)

- Μοντέλο ακτινοβολίας DO

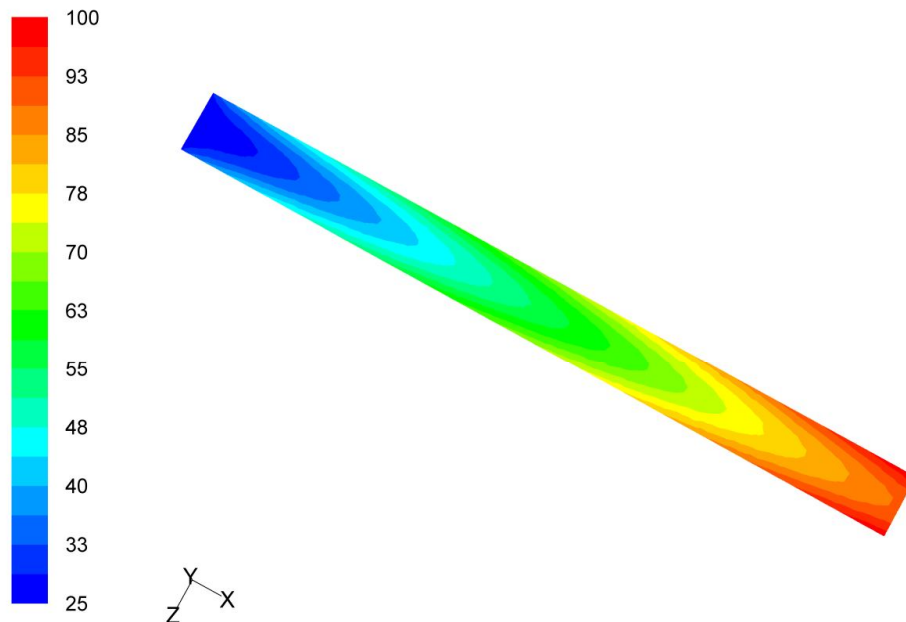
Έγινε σύγκλιση λύσεων στις 43 επαναλήψεις. Τα αποτελέσματα όπως δείχνει η απεικόνιση της θερμοκρασίας, είναι όμοια με του μοντέλου DTRM. Ουσιαστικά τα δύο τελευταία μοντέλα δεν έχουν μεγάλες διαφορές στην χρήση τους, και **μπορούν να χρησιμοποιηθούν και τα δύο στην εργασία** αυτή. Το μοντέλο DTRM δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κυλιόμενα πλέγματα, όπως αυτό της μεταφορικής ταινίας. Όποτε, βέβαια δεν εφαρμόζεται η κίνηση της ταινίας, ο περιορισμός αυτός δεν θα στεκόταν εμπόδιο στην χρήση του μοντέλου. **Για τον λόγο όμως ότι σε αυτό το στάδιο της εργασίας δεν ήταν γνωστό αν θα εφαρμόσουμε κίνηση στην ταινία ή όχι σε επόμενο στάδιο, προτιμήθηκε το μοντέλο DO ώστε να έχει εφαρμοστεί σε όλη την εργασία το ίδιο για λόγους δυνατότητας σύγκρισης.**



Scaled Residuals

Apr 28, 2010  
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, rngke)

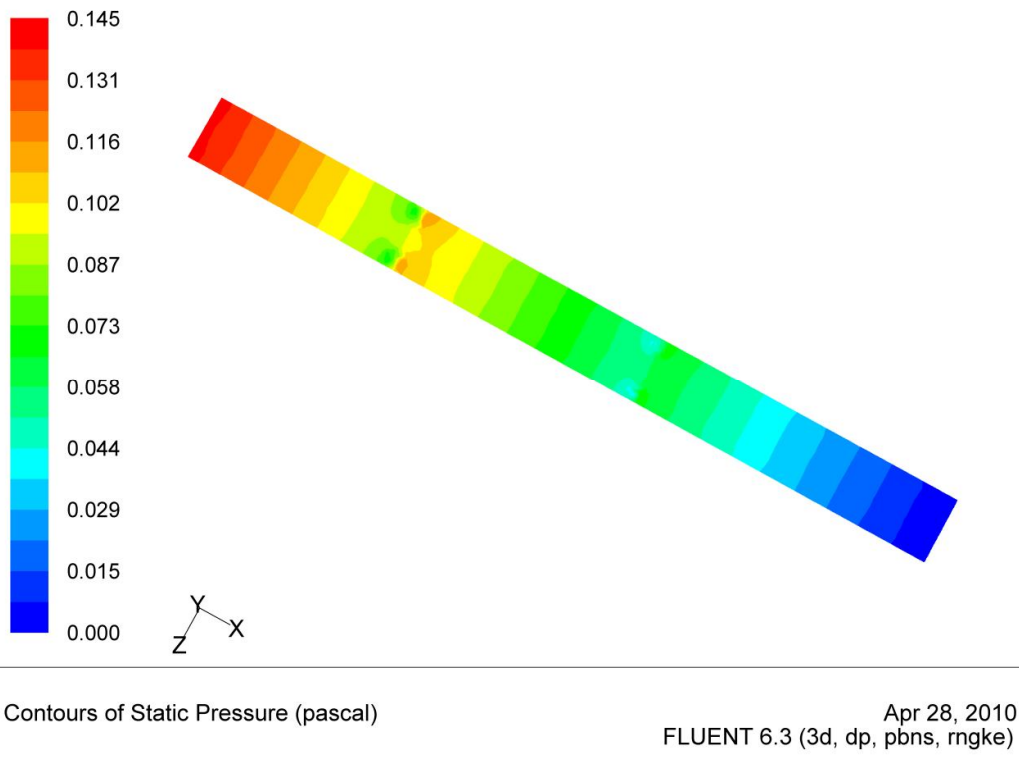
Διάγραμμα 17: Καμπύλες σύγκλισης λύσεων όλων των εξισώσεων που λύνει το Fluent σε αυτήν την περίπτωση. Στον άξονα x φαίνεται ο αριθμός των επαναλήψεων των υπολογισμών και στον άξονα y ο βαθμός σύγκλισης των λύσεων (residuals).



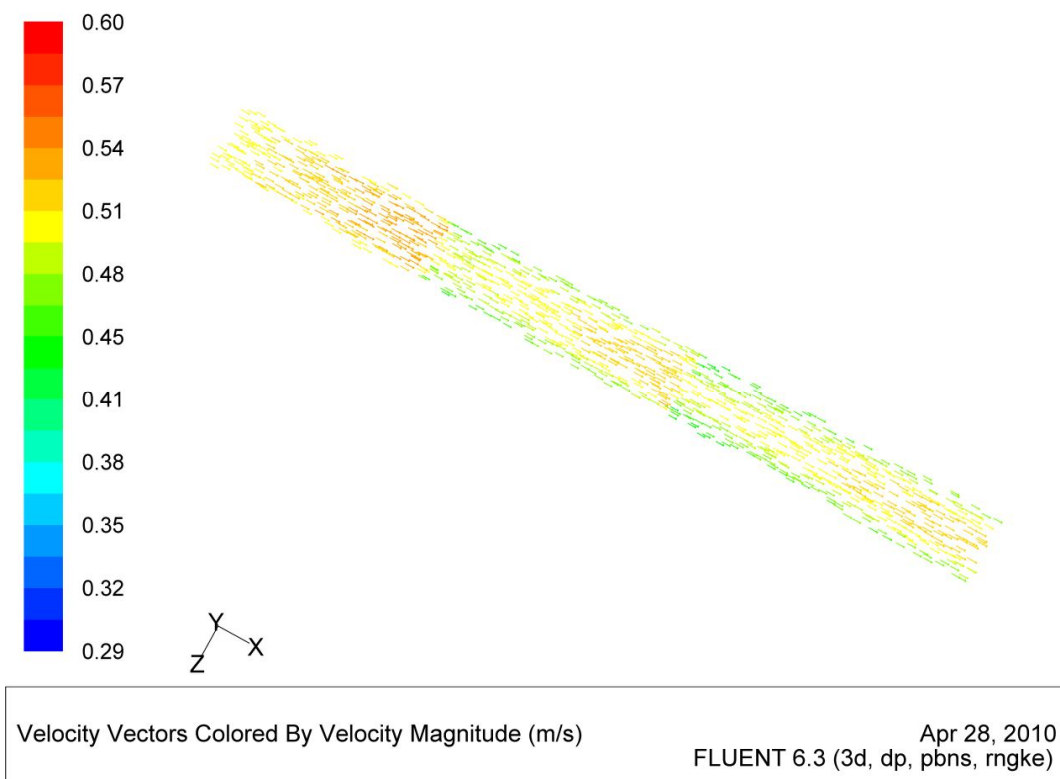
Contours of Static Temperature (c)

Apr 28, 2010  
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, rngke)

Εικόνα 61: Χρωματική απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας όπως αυτή διαμορφώνεται στο εσωτερικό του φούρνου πάνω στο οριζόντιο διάμηκες επίπεδο (σημείο ελέγχου A3)



Εικόνα 62: Χρωματική απεικόνιση της πίεσης όπως αυτή διαμορφώνεται στο εσωτερικό του φούρνου πάνω στο οριζόντιο διάμηκες επίπεδο (σημείο ελέγχου A3)

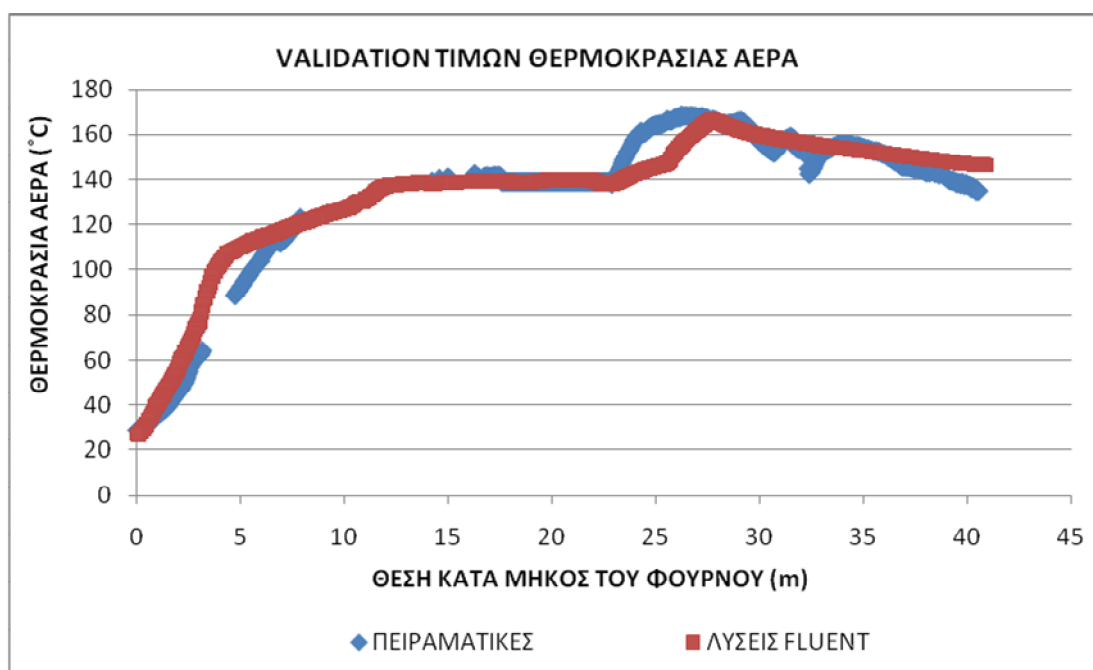


Εικόνα 63: Χρωματική απεικόνιση με βέλη του μεγέθους της ταχύτητας όπως αυτή διαμορφώνεται κατά την ροή του αέρα στο εσωτερικό του φούρνου και φαίνεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο (σημείο ελέγχου A3)

#### 4.iii) ΣΤΑΔΙΟ 3<sup>ο</sup> - ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΛΥΣΕΩΝ ΤΟΥ FLUENT (VALIDATION)

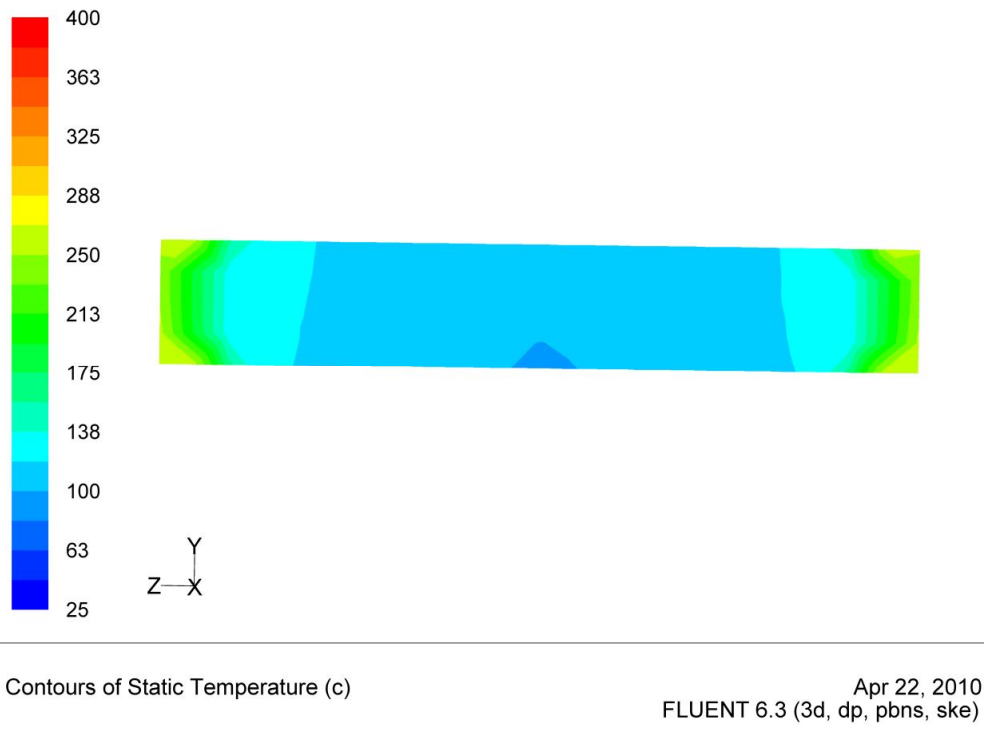
Σε όλες τις εργασίες προσομοίωσης διεργασιών είναι απαραίτητη η επιβεβαίωση της ακρίβειας και ορθότητας των λύσεων ώστε να είναι σίγουρος ο ερευνητής και οι ενδιαφερόμενοι, ότι η εισαγωγή δεδομένων και η επιλογή μοντέλων, μεθόδων κλπ ήταν η κατάλληλη. Στο στάδιο αυτό, το πρόβλημα προς επίλυση περιελάμβανε ολόκληρη τη γεωμετρία του φούρνου και ως δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν όλα τα στοιχεία που ήταν γνωστά από τις πειραματικές μετρήσεις. Ότι δεν ήταν δυνατόν να μετρηθεί, έγινε προσπάθεια υπολογισμού του ή προσέγγισής του λογικά (όπως για παράδειγμα η πίεση στις εξόδους υγρασίας, ή η παροχή των καυσαερίων και οι απώλειες θερμότητας από τον πάτο του φούρνου).

Για την επιβεβαίωση, συγκρίθηκαν οι τιμές της θερμοκρασίας του αέρα όπως αυτές μετρήθηκαν πειραματικά (κεφάλαιο 3.Β.β,γ και Παράρτημα πίνακες 4,5), με αυτές που υπολογίστηκαν με την εφαρμογή CFD. Στο αντίστοιχο κεφάλαιο 3.Γ.β.iii των Υλικών & Μεθόδων καταγράφονται οι συνθήκες και η επιλογή μοντέλων που έγινε, ώστε να φτάσει το αποτέλεσμα να έχει την μορφή που παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα. Έγιναν αρκετές αλλαγές στις τιμές των μεγεθών που ήταν άγνωστα, και το παρακάτω αποτέλεσμα ήταν το καλύτερο δυνατόν. Η μέση διαφορά πειραματικών και θεωρητικών λύσεων είναι ίση με **9,2%**. Αποδεκτό όριο για την επιβεβαίωση ακρίβειας λύσεων στις περιπτώσεις που εφαρμόζεται CFD, είναι η διαφορά 15%.

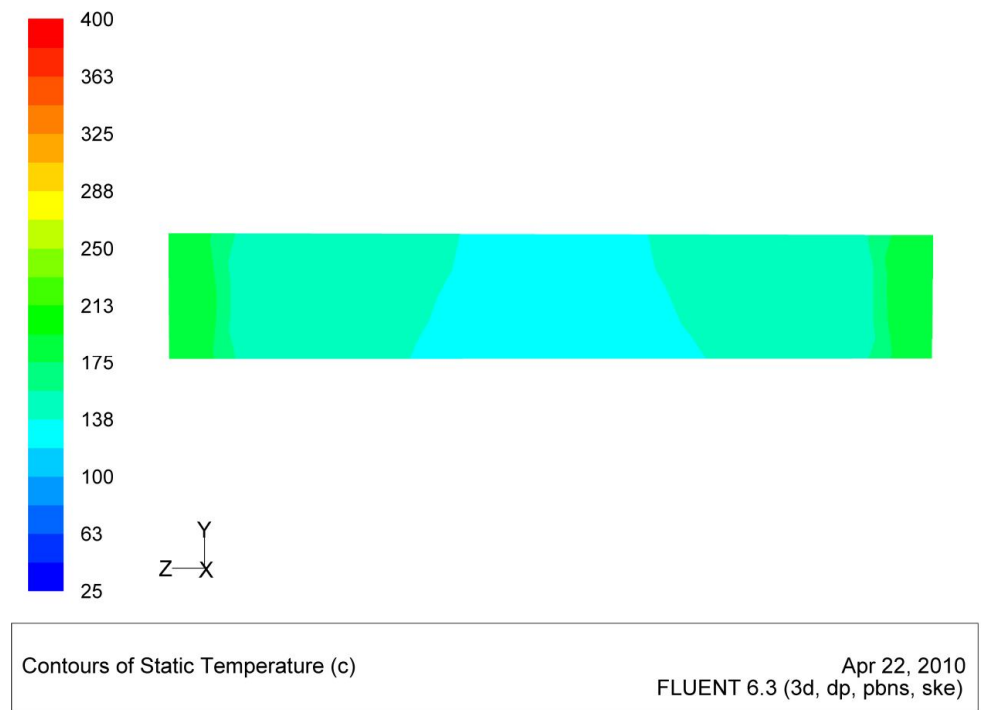


Διάγραμμα 18: Καμπύλες σύγκρισης τιμών θερμοκρασίας από τις πειραματικές μετρήσεις με θερμοζεύγη και από την λύση που εξήχθη από το πρόγραμμα CFD όπως διαμορφώνονται κατά μήκος της γραμμής στην θέση του θερμοζεύγους (σημείο ελέγχου 2)

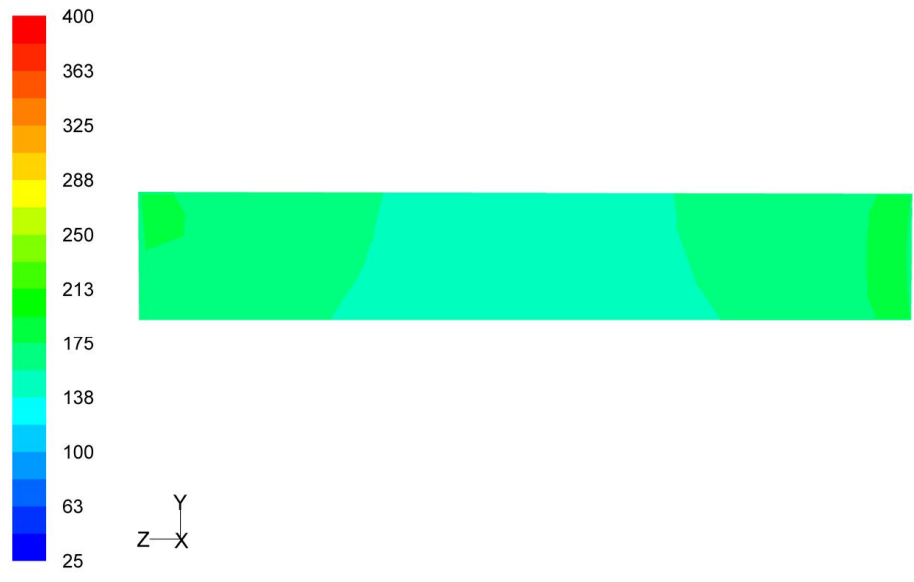
Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες χρωματικές απεικονίσεις των λύσεων του προβλήματος αυτού για την θερμοκρασία και την ταχύτητα του αέρα, όπως αυτές φαίνονται σε διάφορες τομές-σημεία ελέγχου. **(Παράρτημα αναλυτικά σημεία ελέγχου)**



Εικόνα 64: Χρωματική απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας όπως αυτή φαίνεται στο εγκάρσιο επίπεδο στην μέση του **πρώτου** θαλάμου (σημείο ελέγχου 7)



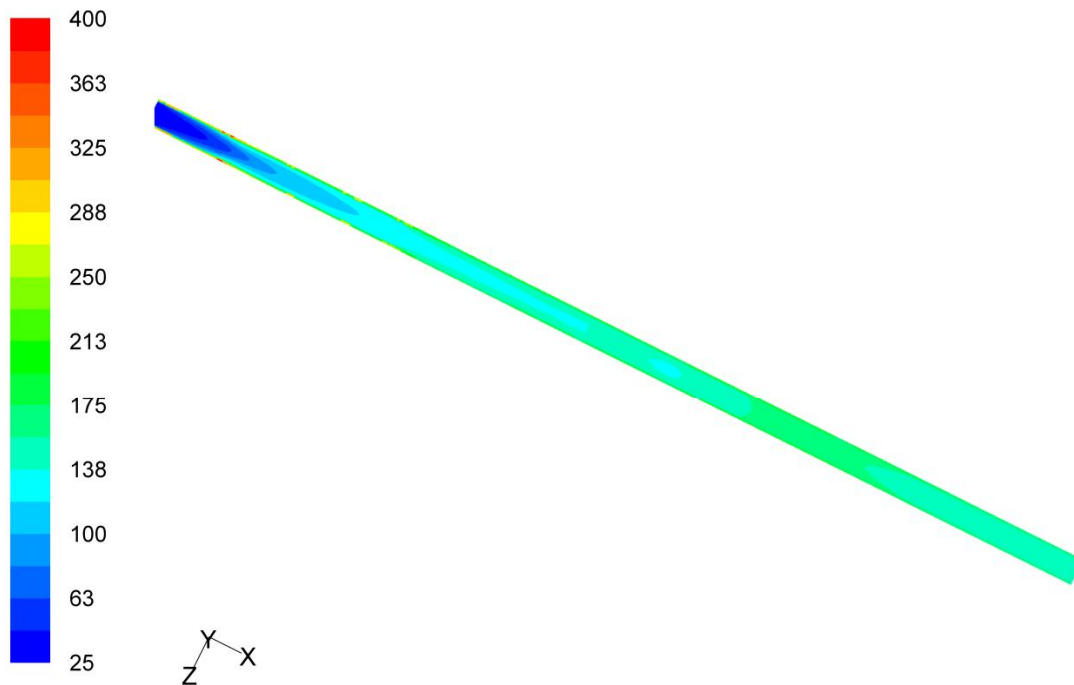
Εικόνα 65: Χρωματική απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας όπως αυτή φαίνεται στο εγκάρσιο επίπεδο στην μέση του **δεύτερου** θαλάμου (σημείο ελέγχου 8)



Contours of Static Temperature (c)

Apr 22, 2010  
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, ske)

Εικόνα 66: Χρωματική απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας όπως αυτή φαίνεται στο εγκάρσιο επίπεδο στην μέση του **τρίτου** θαλάμου (σημείο ελέγχου 9)

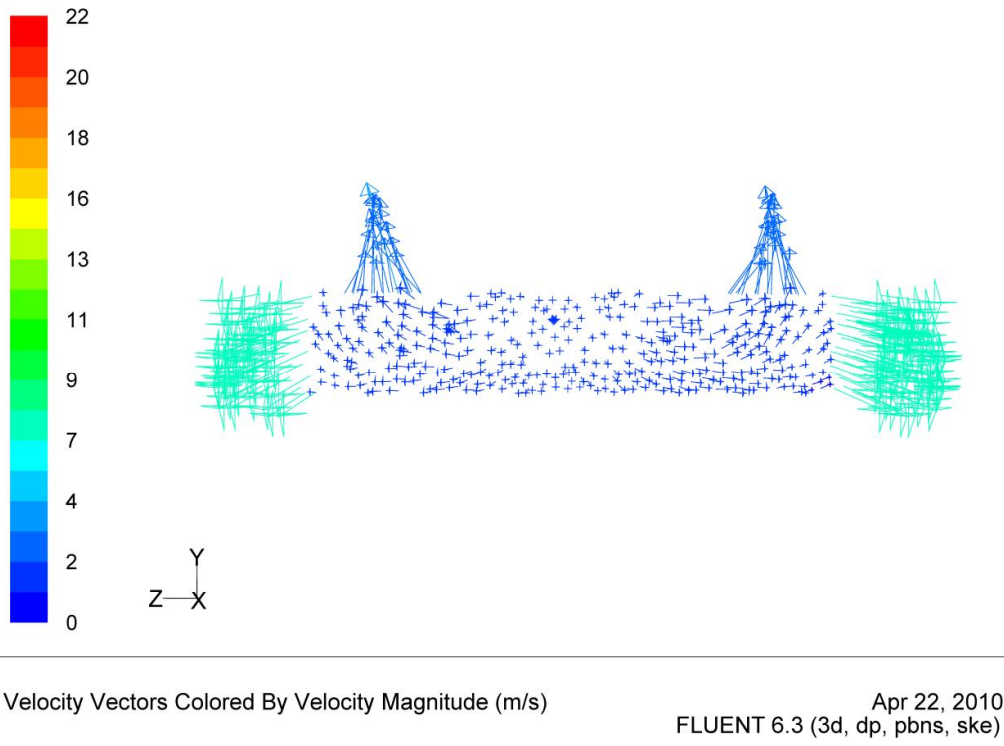


Contours of Static Temperature (c)

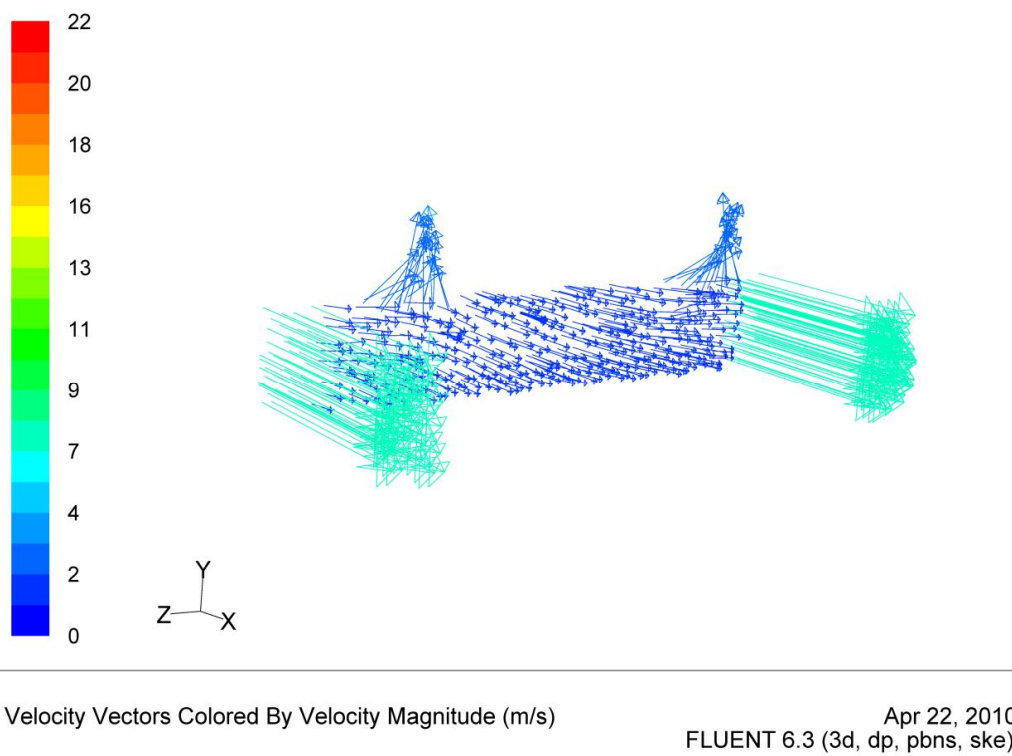
Apr 22, 2010  
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, ske)

Εικόνα 67: Χρωματική απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας όπως αυτή φαίνεται στο οριζόντιο διάμηκες επίπεδο στην μέση (ως προς τον άξονα y) του εσωτερικού του φούρνου (σημείο ελέγχου 1)

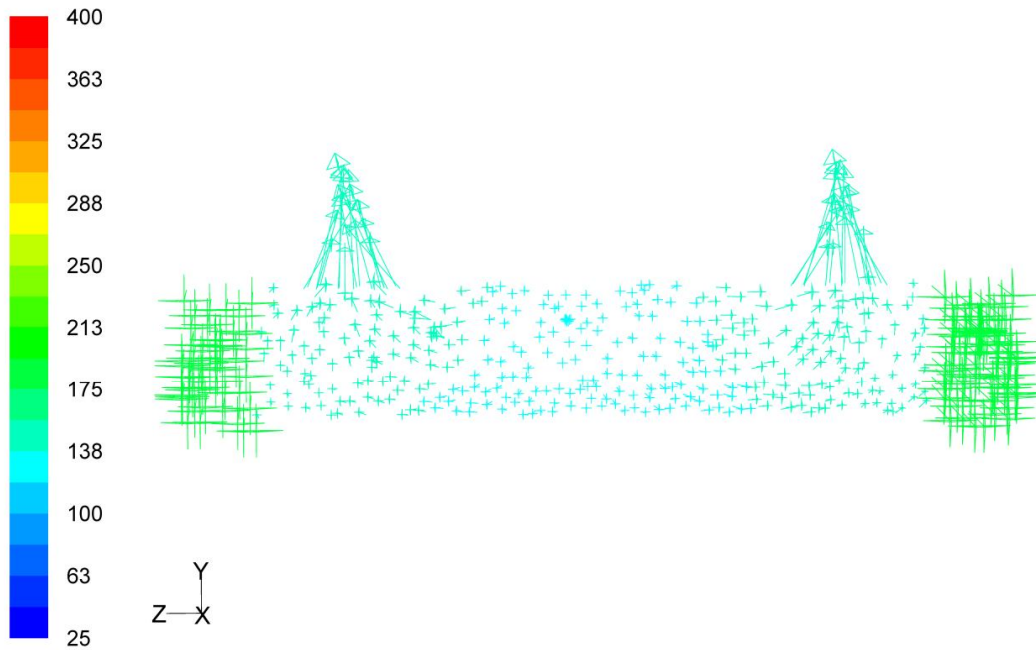




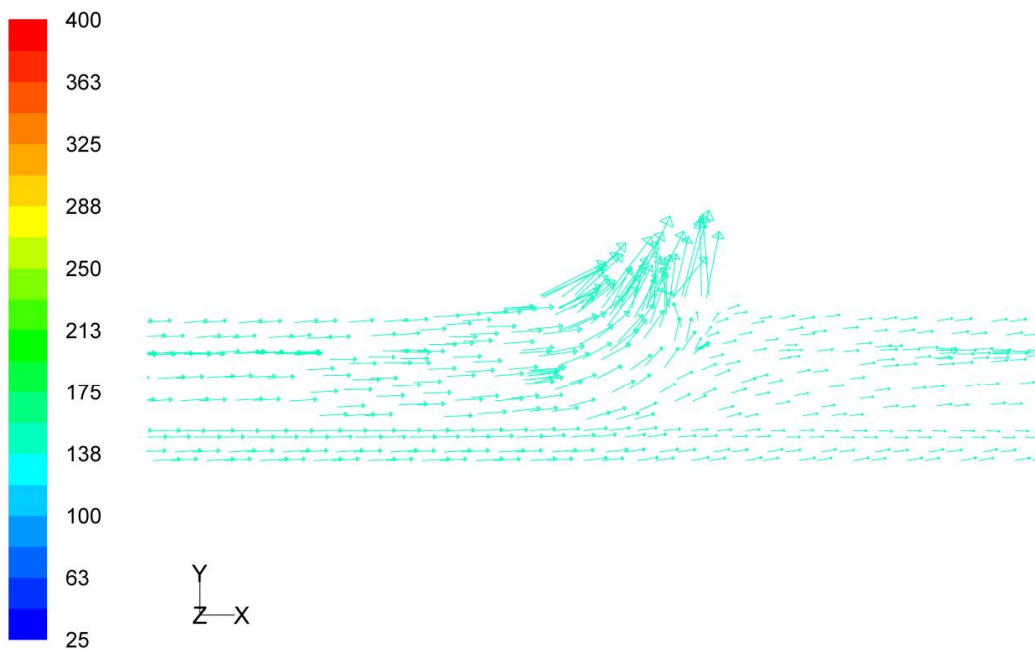
Εικόνα 68: Απεικόνιση με βέλη της κατεύθυνσης της ροής του αέρα και χρωματική απεικόνιση με βέλη του μεγέθους της ταχύτητας σε κάθε σημείο του εγκάρσιου επιπέδου που βρίσκεται στη θέση της 5<sup>ης</sup> εξόδου υγρασίας της οροφής ενώ παράλληλα φαίνεται και η τομή στον μανδύα (σημείο ελέγχου 6).



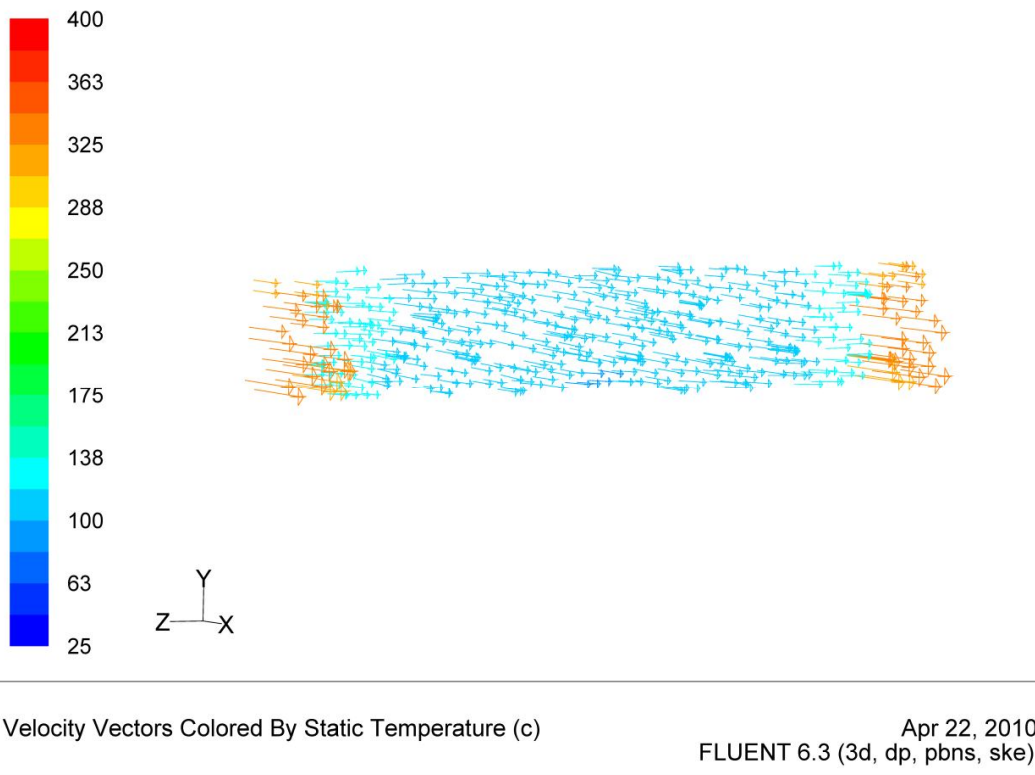
Εικόνα 69: Ίδια απεικόνιση με της προηγούμενης εικόνας 68, με τη διαφορά ότι η τομή φαίνεται υπό γωνία (σημείο ελέγχου 6).



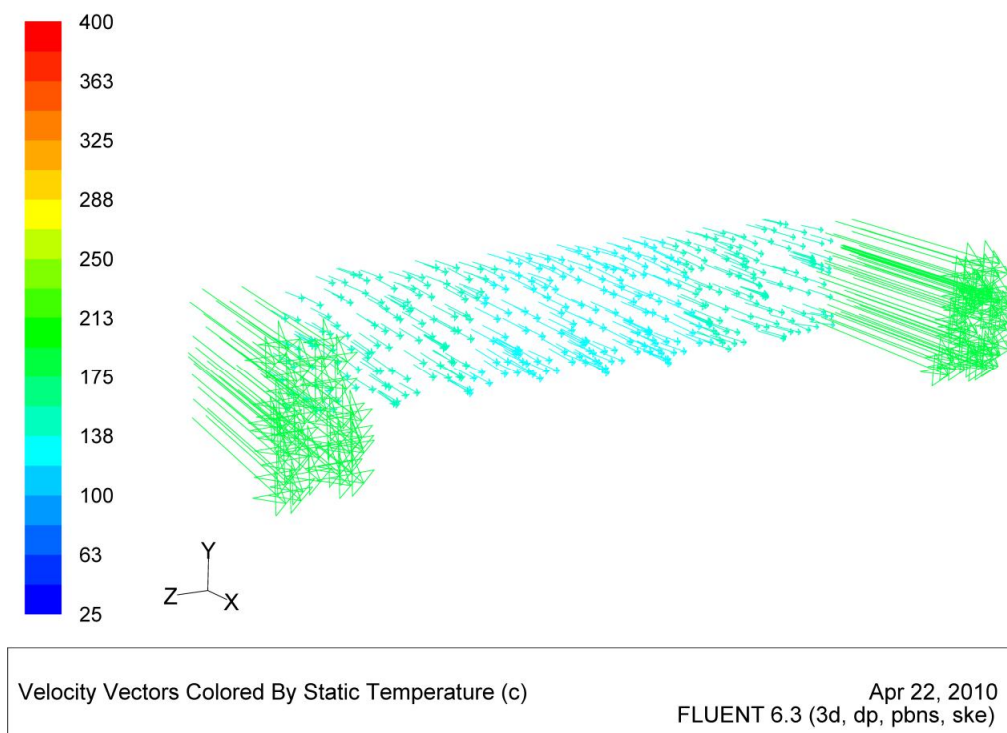
Εικόνα 70: Ίδια απεικόνιση με της εικόνας 68, με τη διαφορά ότι εδώ η χρωματική εναλλαγή των βελών γίνεται σύμφωνα με την θερμοκρασία (σημείο ελέγχου 6).



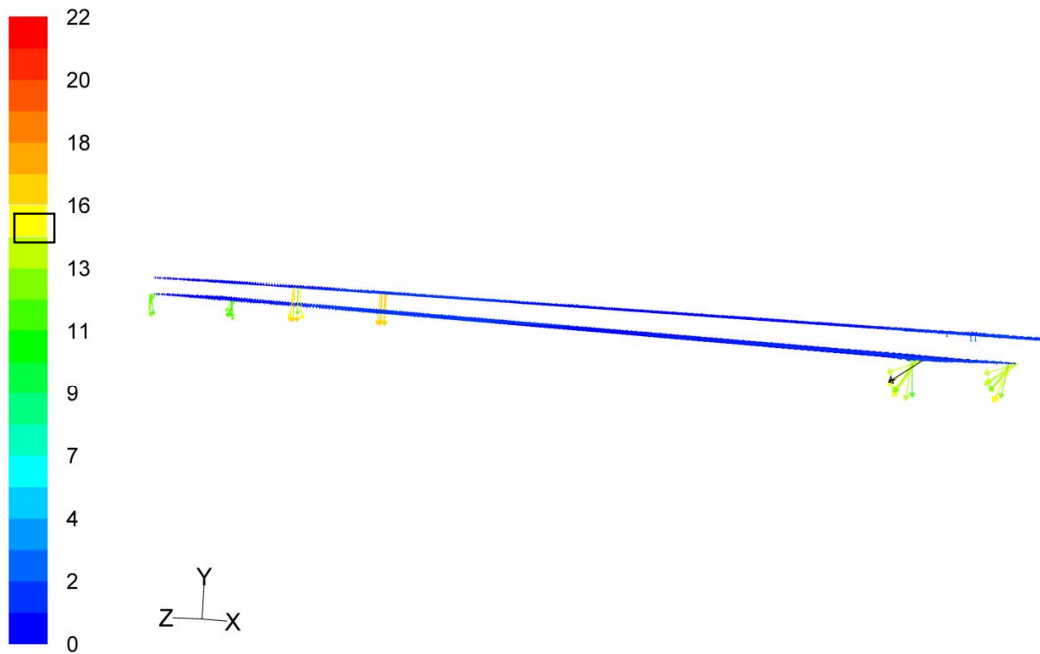
Εικόνα 71: Απεικόνιση με βέλη της κατεύθυνσης της ροής του αέρα και χρωματική απεικόνιση με βέλη της θερμοκρασίας σε κάθε σημείο του διαμήκου κάθετου επιπέδου που βρίσκεται στη θέση των  $5^{\omega v}$  εξόδων υγρασίας της οροφής (σημείο ελέγχου 5)



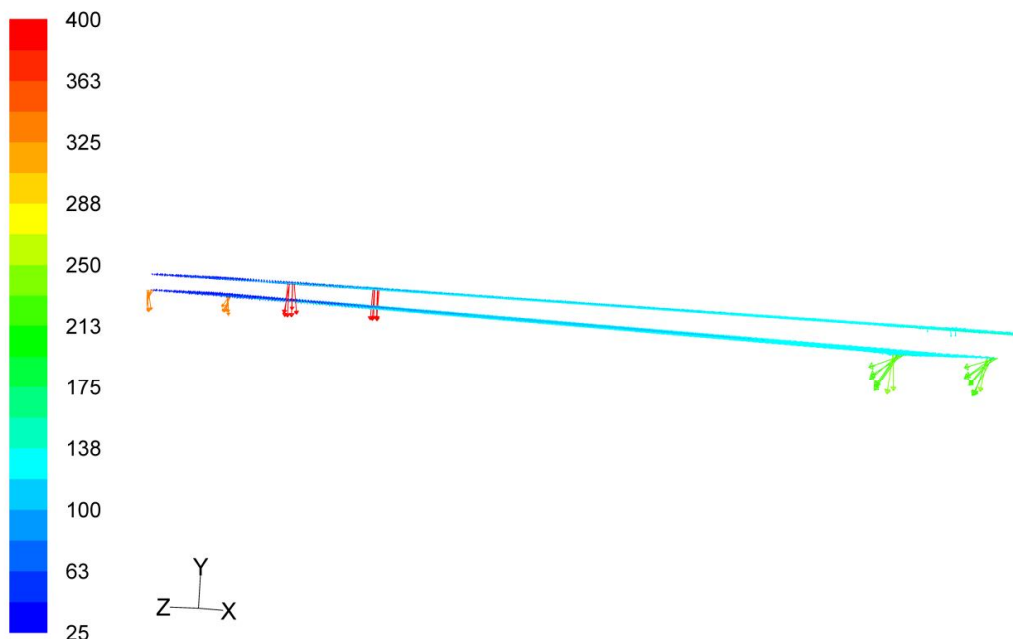
Εικόνα 72: Απεικόνιση με βέλη της κατεύθυνσης της ροής του αέρα και χρωματική απεικόνιση με βέλη της κατανομής της θερμοκρασίας του αέρα του φούρνου, σε κάθε σημείο του εγκάρσιου επιπέδου που βρίσκεται στην μέση του **πρώτου θαλάμου**, ενώ παράλληλα φαίνεται και η τομή στον μανδύα (σημείο ελέγχου 7).



Εικόνα 73: Απεικόνιση ίδια με της προηγούμενης εικόνας στην μέση του **δεύτερου θαλάμου** (σημείο ελέγχου 8).

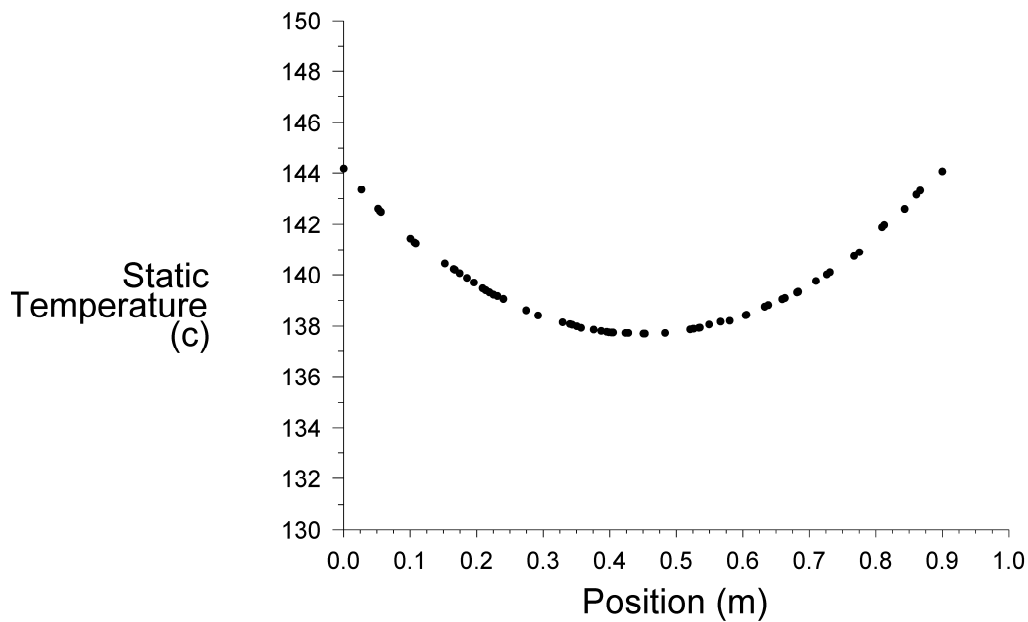


Εικόνα 74: Απεικόνιση με βέλη της κατεύθυνσης της ροής των καυσαερίων και χρωματική απεικόνιση με βέλη του μεγέθους της ταχύτητας, όπως αυτά φαίνονται στις εισόδους (οροφή) και εξόδους τους (πάτος) δεξιά και αριστερά του πρώτου θαλάμου.

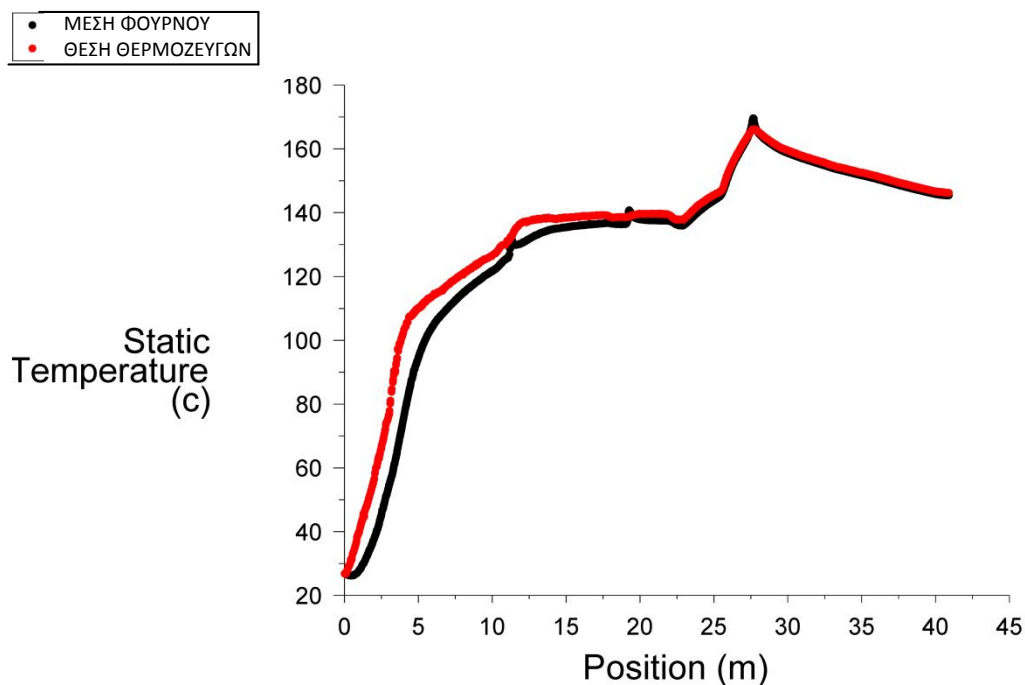


Εικόνα 75: Ίδια απεικόνιση με την προηγούμενη εικόνα 74 με τη διαφορά ότι εδώ η χρωματική εναλλαγή γίνεται σύμφωνα με την θερμοκρασία.

Στην εικόνα 74 φαίνονται η οροφή και ο πάτος του πρώτου θαλάμου. Το μαύρο βέλος δείχνει ότι σε αυτό το σημείο η ταχύτητα των καυσαερίων που εξέρχονται από τις δεύτερες εξόδους καυσαερίων φτάνει έως και τα 15 m/s.



Διάγραμμα 19: Καμπύλη απεικόνισης των τιμών της θερμοκρασίας όπως αυτή κατανέμεται κατά μήκος της εγκάρσιας γραμμής στην μέση του φούρνου (σημείο ελέγχου 6)

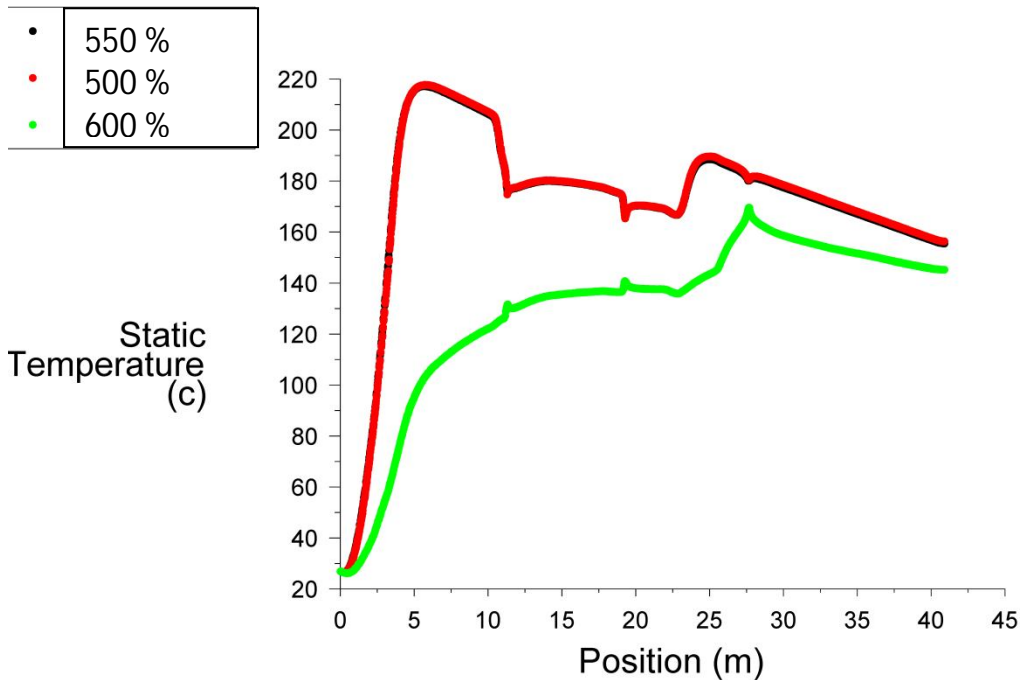


Διάγραμμα 20: Καμπύλες απεικόνισης των τιμών της θερμοκρασίας όπως αυτή κατανέμεται εν συγκρίσει κατά μήκος της διαμήκουσ γραμμής στην μέση του φούρνου (μαύρη καμπύλη) και της γραμμής όπου έγιναν οι μετρήσεις των πειραματικών τιμών θερμοκρασίας (κόκκινη καμπύλη). (σημεία ελέγχου 3 και 2)

#### 4. iv) ΣΤΑΔΙΟ 4<sup>ο</sup> - ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΝΕΞΑΡΤΗΣΙΑΣ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΤΙΣ ΛΥΣΕΙΣ

Όπως προαναφέρθηκε, ο έλεγχος αυτός είναι απαραίτητος ώστε να επιβεβαιωθεί ότι οι λύσεις δεν επηρεάζονται από τη διαφορετική πυκνωση του πλέγματος. Έγιναν τρεις δοκιμές ώστε να βρεθεί η κατάλληλη πυκνωση για το πρόβλημα: shortest edge 600%, 550%, 500% (το πιο πυκνό είναι αυτό με tetrahedral size 0,05).

Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνεται η σύγκριση των λύσεων της θερμοκρασίας για τα δύο σημεία ελέγχου:

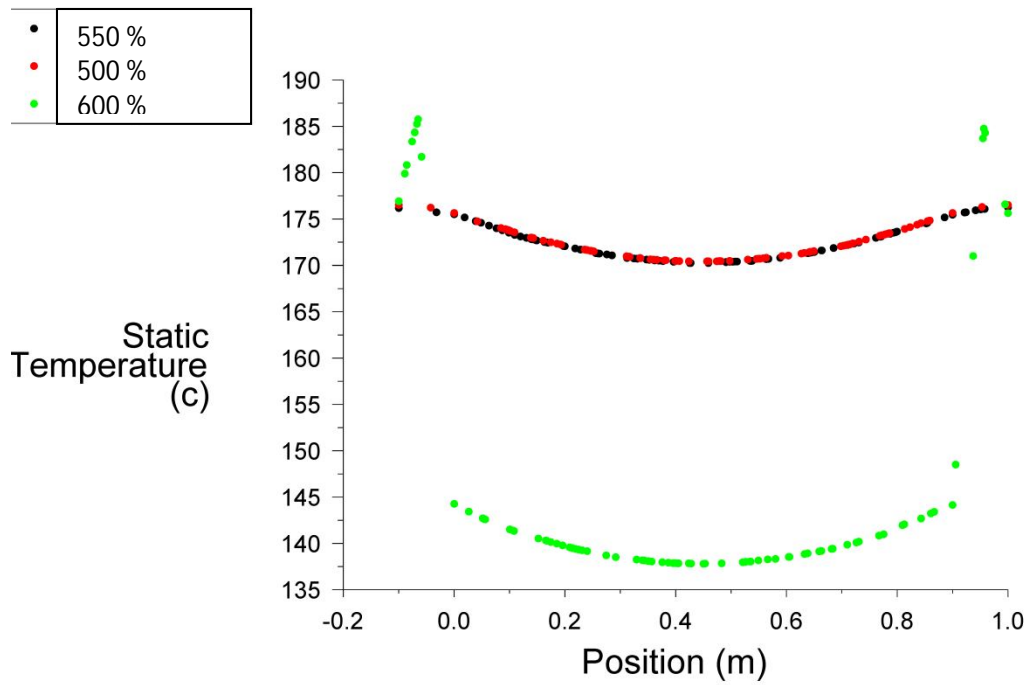


Διάγραμμα 21: Συγκριτικές καμπύλες τιμών θερμοκρασίας κατά μήκος της διαμήκου γραμμής μέσα στον φούρνο (σημείο ελέγχου 3).

Παρατηρείται ότι οι τιμές θερμοκρασίας στις λύσεις του προβλήματος με το πιο αραιό πλέγμα (shortest edge 600%, **πράσινη καμπύλη**), είναι πολύ διαφορετικές από αυτές των λύσεων των δύο άλλων προβλημάτων. Η διαφορά κυμαίνεται από 9% έως 49% σε κάποια σημεία. Επίσης, κατά την επίλυση του προβλήματος με το αραιό πλέγμα οι λύσεις δεν συνέκλιναν. Μεταξύ των λύσεων των προβλημάτων με πυκνωση 550% και 500%, δεν μπορεί να υπολογιστεί η διαφορά λόγω του ότι είναι ελάχιστη και θεωρείται αμελητέα.

Το συμπέρασμα από τις δοκιμές αυτές είναι ότι, όταν το πλέγμα είναι δημιουργημένο με shortest edge 600%, οι λύσεις δεν είναι ανεξάρτητες του πλέγματος και αυτό σημαίνει ότι δεν είναι ακριβείς. Επιπλέον, αποδεικνύεται ότι οι λύσεις είναι ανεξάρτητες του πλέγματος από την πυκνωση 550% και πάνω. Άρα, η χρήση του πλέγματος 550% που χρησιμοποιήθηκε στο ΣΤΑΔΙΟ 3<sup>ο</sup> για την επιβεβαίωση των λύσεων είναι η καταλληλότερη και θα συνεχιστούν τα πειράματα κατά αυτόν τον τρόπο. Δεν είναι απαραίτητο όπως φαίνεται από την αμελητέα διαφορά λύσεων, να χρησιμοποιηθεί το ακόμη πυκνότερο πλέγμα 500%, το οποίο θα προκαλέσει μεγαλύτερη κατανάλωση μνήμης

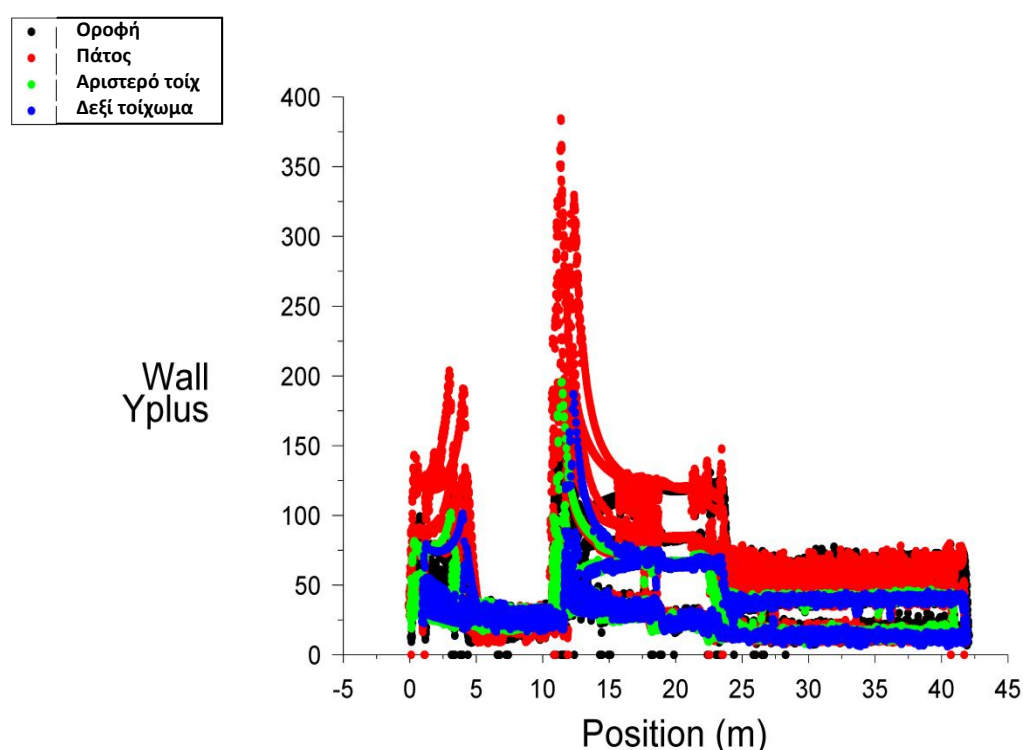
υπολογιστή και χρόνου επίλυσης. Παρόμοια επιβεβαίωση φαίνεται και στο διάγραμμα της εγκάρσιας γραμμής:



Διάγραμμα 22: Συγκριτικές καμπύλες τιμών θερμοκρασίας κατά μήκος της εγκάρσιας γραμμής μέσα στον φούρνο (σημείο ελέγχου 4).

#### 4.v) ΣΤΑΔΙΟ 5<sup>ο</sup> - ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΤΙΜΗΣ ΤΟΥ $Y^+$ (ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΗΣ ΤΥΡΒΗΣ ΚΟΝΤΑ ΣΤΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ)

Όπως προαναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3.Γ.β.v, η τιμή του  $Y^+$  πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 30 και 500 για να είναι τα αποτελέσματα ικανοποιητικά. Αν όμως είναι μικρότερο του 11, είναι απαραίτητη η αραιώση του πλέγματος κοντά στα τοιχώματα ή η χρήση του μοντέλου Enhanced Wall Treatment, ενώ αν είναι μεγαλύτερο του 500 πρέπει να γίνει πύκνωση του πλέγματος. Ο έλεγχος της τύρβης κοντά στα τοιχώματα γίνεται για τον λόγο ότι στην περιοχή αυτή η ταχύτητα μειώνεται ενώ αντίθετα η τύρβη αυξάνεται καθώς είναι μεγαλύτερη η διάτμηση κοντά στα τοιχώματα. Οι λύσεις είναι πιο σωστές αν η τιμή του  $Y^+$  βρίσκεται μέσα σε αυτά τα όρια.



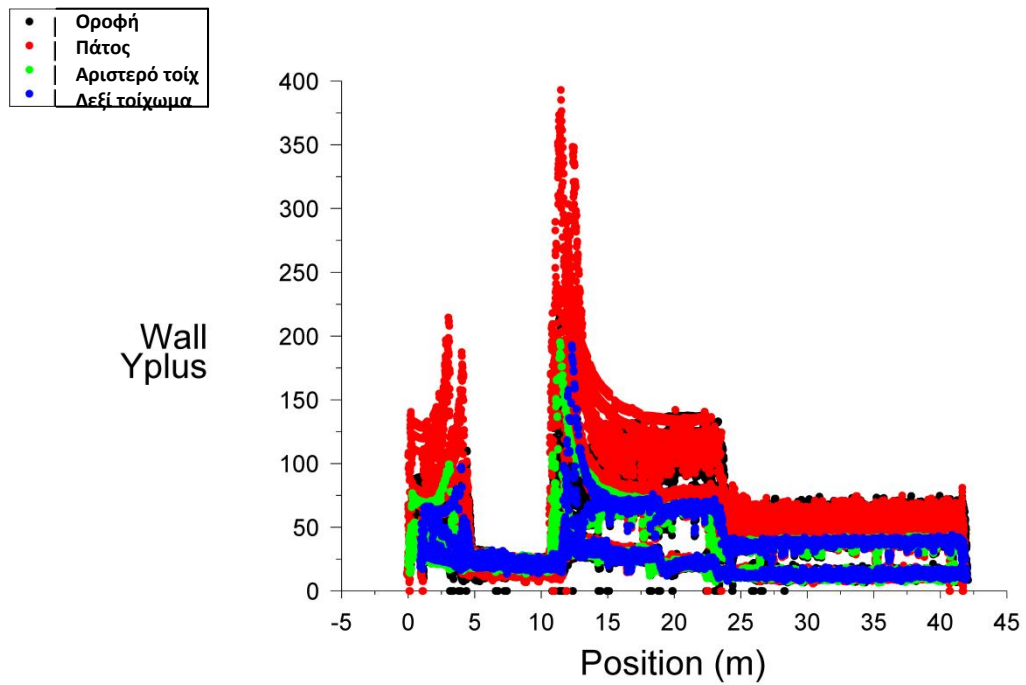
Διάγραμμα 23: Τιμές  $Y^+$  σε απόσταση 5mm από όλα τα τοιχώματα της γεωμετρίας (πλέγμα shortest edge 550%).

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 23, κατά το μεγαλύτερο μέρος τους οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 11 και 400. Το μοντέλο Standard Wall Treatment, που έχει επιλεχθεί δεν μοιάζει να είναι ακατάλληλο για την περίπτωση, καθώς οι τιμές βρίσκονται μέσα στα επιτρεπτά όρια.

Ακόμη όμως και να ήταν προτιμότερες χαμηλότερες τιμές  $Y^+$ , δηλαδή να χρειαζόταν να γίνει πύκνωση πλέγματος ώστε να μην φτάνουν ως το 400, παρακάτω φαίνεται το διάγραμμα για τη γεωμετρία με το πιο πυκνό πλέγμα 500% shortest edge. Οι τιμές  $Y^+$  όπως παρατηρείται δε διαφέρουν από το αραιότερο πλέγμα 550% shortest edge. Άρα, δεν είναι απαραίτητη η χρήση στην προσομοίωση, του πυκνότερου πλέγματος 500% shortest edge, το οποίο θα ήταν και πιο χρονοβόρο στην επίλυση. Το ίδιο συμπέρασμα εξήχθη και από τον



έλεγχο ανεξαρτησίας του πλέγματος. Επίσης, αποδείχθηκε ότι το μοντέλο Standard Wall Treatment είναι κατάλληλο.



Διάγραμμα 24: Τιμές  $Y^+$  σε απόσταση 5mm από όλα τα τοιχώματα της γεωμετρίας (πλέγμα shortest edge 500%).

#### 4.vi) ΣΤΑΔΙΟ 6<sup>ο</sup> - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΑΡΟΧΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΤΟΝ ΑΕΡΑ ΤΟΥ ΦΟΥΡΝΟΥ

Όπως αναλυτικά περιγράφεται στο αντίστοιχο κεφάλαιο των Υλικών και Μεθόδων έγινε προσπάθεια προσομοίωσης της ύπαρξης υγρασίας μέσα στον αέρα του φούρνου η οποία στην πραγματικότητα παρέχεται από τα μπισκότα μέσω της εξάτμισης του περιεχόμενου νερού. Στο στάδιο αυτό δεν παρέχεται από μπισκότα αλλά από τρεις οπές στον πάτο του φούρνου σε σημεία τέτοια που πιστεύεται ότι συμβαίνει η μεγαλύτερη εξάτμιση νερού.

Έγιναν πειραματισμοί διάφοροι με μεταβαλλόμενες παραμέτρους ώστε να επιτευχθεί η πλησιέστερη δυνατή λύση στις πειραματικές τιμές θερμοκρασίας αέρα φούρνου. Παρακάτω θα περιγραφούν τα τρία σπουδαιότερα πειράματα με τις αλλαγές που έγιναν, την αιτιολόγησή τους καθώς επίσης και ανάλυση των αποτελεσμάτων μέσω διαγραμμάτων και χρωματικών απεικονίσεων.

#### ΠΕΙΡΑΜΑ 1<sup>ο</sup>

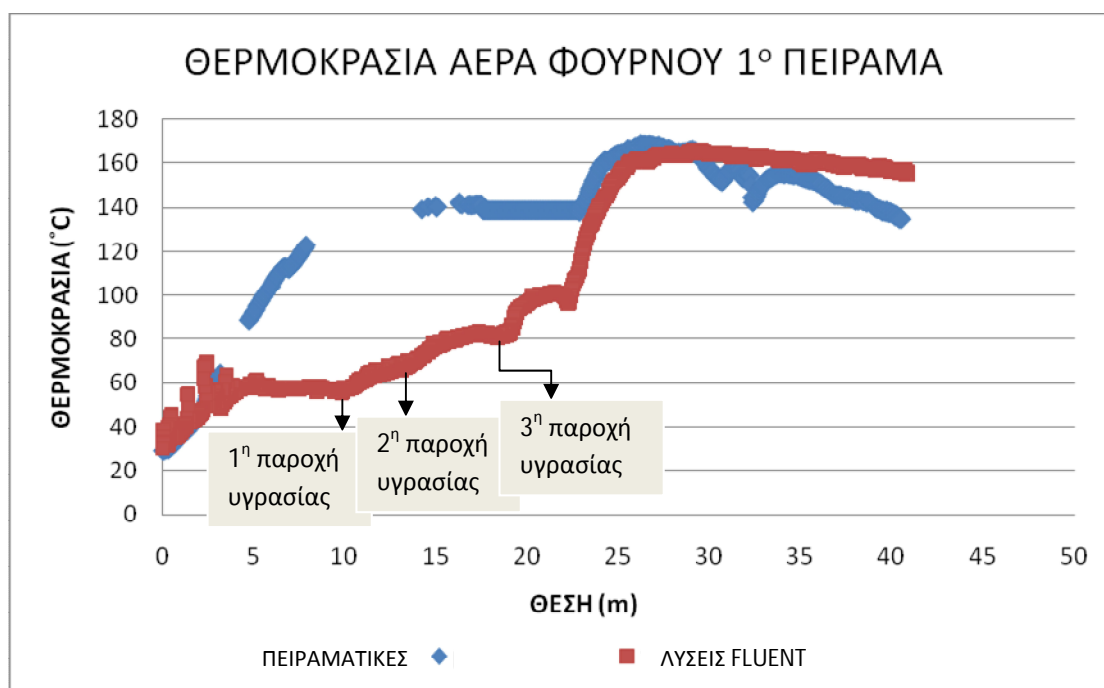
Κύριο χαρακτηριστικό αυτού του πειράματος είναι ότι από τις οπές παροχής υγρασίας διοχετεύεται *απευθείας υδρατμός*. Το πείραμα αυτό είναι το αρχικό και τα δεδομένα που εισήχθησαν στο Fluent προς επίλυση είναι αναλυτικά περιγεγραμμένα στο κεφάλαιο των Υλικών και Μεθόδων (3.Γ.β.vi). Σύντομα όμως παρατίθενται σε πίνακα τα κυριότερα σημεία που πρέπει να προσεχθούν για την καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων και γιατί αυτά αποτελούν μεταβαλλόμενες παραμέτρους για το επόμενο πείραμα:

**Πίνακας 8:** Κύρια χαρακτηριστικά 1<sup>ου</sup> πειράματος 6<sup>ου</sup> ΣΤΑΔΙΟΥ προσομοίωσης

| Μίγμα ρευστών που χρησιμοποιείται     | Αέρας + Υδρατμοί                      |               |
|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------|
| Οπή παροχής υγρασίας 1 <sup>η</sup>   | 0,006 kg/s , 430 K                    | Υδρατμοί 100% |
| Οπή παροχής υγρασίας 2 <sup>η</sup>   | 0,01 kg/s , 430 K                     | Υδρατμοί 100% |
| Οπή παροχής υγρασίας 3 <sup>η</sup>   | 0,006 kg/s , 430 K                    | Υδρατμοί 100% |
| Παροχή 1 <sup>ου</sup> καυστήρα       | 0,48 m <sup>3</sup> /s                |               |
| Παροχή 2 <sup>ου</sup> καυστήρα       | 0,896 m <sup>3</sup> /s               |               |
| Παροχή 3 <sup>ου</sup> καυστήρα       | 0,048 m <sup>3</sup> /s               |               |
| Εισερχόμενο ρευστό από είσοδο φούρνου | 0,95 αέρας : 0,05 H <sub>2</sub> O(v) |               |
| Τρεις τελευταίες έξοδοι υγρασίας      | κλειστές                              | Wall          |

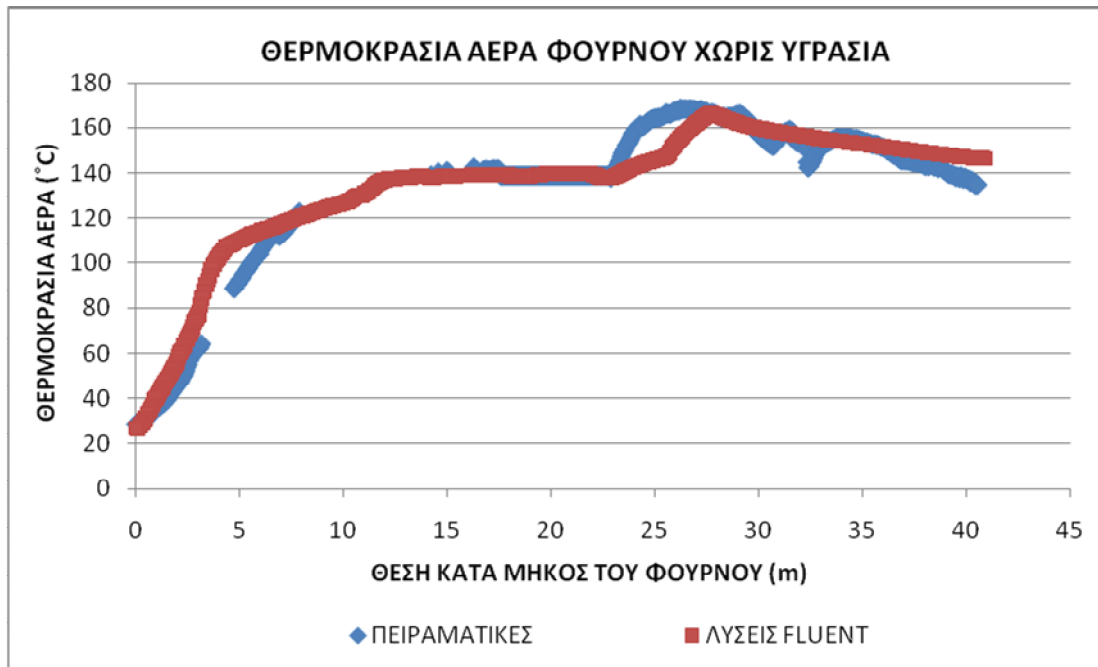
Οι τελευταίες έξοδοι υγρασίας, είχε παρατηρηθεί στα προηγούμενα στάδια ότι ήταν προτιμότερο να παραμένουν κλειστές καθώς δημιουργούνταν πρόβλημα αντίστροφης ροής από αυτές, και επίσης θεωρήθηκε ότι στον 3<sup>ο</sup> θάλαμο η εξάτμιση νερού είναι πολύ μικρή και δεν χρειαζόταν απομάκρυνση του αέρα.

Οι λύσεις του αρχικού πειράματος περιγράφονται διαγραμματικά και εικονικά παρακάτω με σκοπό να μελετηθούν και να εξαχθεί συμπέρασμα για τις επόμενες αλλαγές:

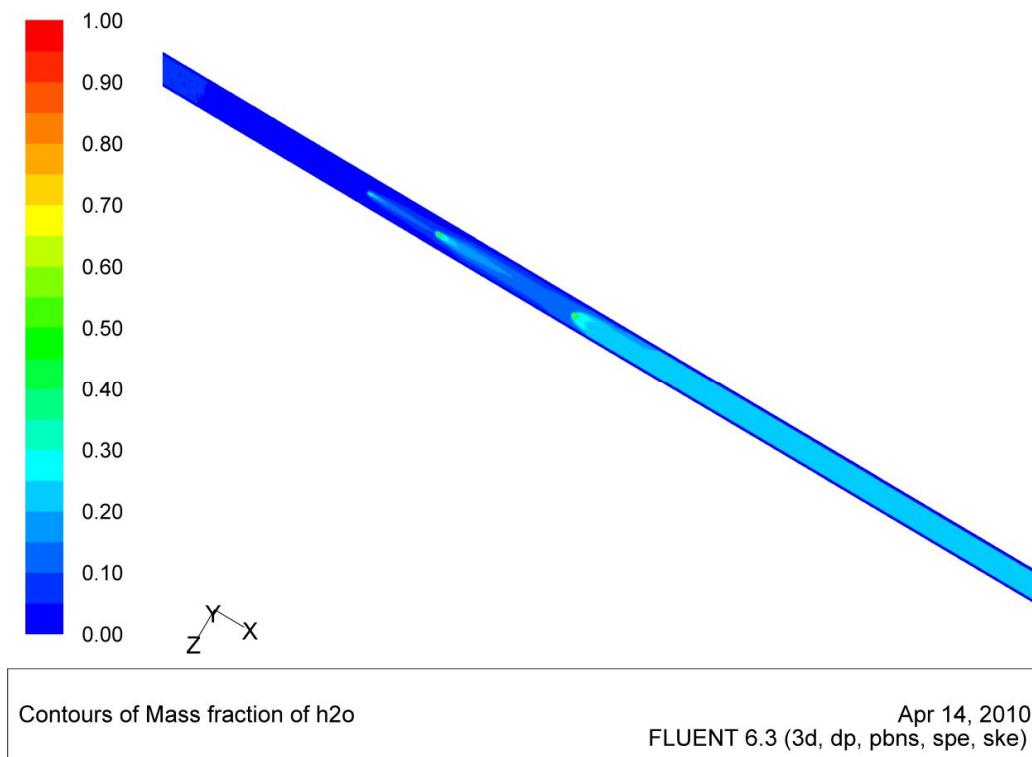


Διάγραμμα 25: Σύγκριση τιμών θερμοκρασίας αέρα φούρνου όπως εξήχθη από τις λύσεις του Fluent για το 1<sup>ο</sup> πείραμα (σημείο ελέγχου 2), και από τις πειραματικές μετρήσεις με θερμοζεύγη

Στο παραπάνω διάγραμμα το οποίο είναι ενδεικτικό για τον έλεγχο της προσέγγισης των πραγματικών λύσεων, παρατηρείται ότι στην περιοχή όπου βρίσκονται οι παροχές υγρασίας η θερμοκρασία μειώνεται περίπου στο μισό της πραγματικής. Στο στάδιο πριν εισαχθεί η υγρασία μέσα στον αέρα του φούρνου, η προσομοίωση είχε φτάσει σε πολύ ικανοποιητικό επίπεδο όπως φαίνεται στο διάγραμμα 26. Άρα, η πτώση της θερμοκρασίας οφείλεται μόνο στην ύπαρξη υδρατμών.



Διάγραμμα 26: Σύγκριση τιμών θερμοκρασίας αέρα φούρνου όπως εξήχθη από τις λύσεις του Fluent και από τις πειραματικές μετρήσεις με θερμοζεύγη πριν εισαχθεί η υγρασία



Εικόνα 76: Χρωματική απεικόνιση της κατανομής των υδρατμών μέσα στον φούρνο όπως φαίνεται στο οριζόντιο επίπεδο (σημείο ελέγχου 1)

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται ότι στον 3<sup>ο</sup> θάλαμο του φούρνου έχει συσσωρευτεί υγρασία, και η ποσότητά της αθροίζεται από την πρώτη παροχή έως την τρίτη.

Συμπέρασμα: για τις επόμενες αλλαγές στο πείραμα, πρέπει να αυξηθεί η παροχή των καυσαερίων στους δύο πρώτους θαλάμους του φούρνου ενώ του τρίτου καυστήρα θα μειωθεί για να διατηρηθεί στα ίδια επίπεδα, καθώς πλέον οι προηγούμενοι θάλαμοι θα είναι πολύ πιο θερμοί. Επιπλέον, πρέπει να ανοίξουν κάποιες από τις τρεις τελευταίες εξόδους υγρασίας στην οροφή του φούρνου, ώστε να αποσυμφορηθεί η ατμόσφαιρα, και επίσης να αυξηθεί η υποπίεση στις πρώτες εξόδους υγρασίας για να διευκολυνθεί ακόμη περισσότερο η απομάκρυνσή της.

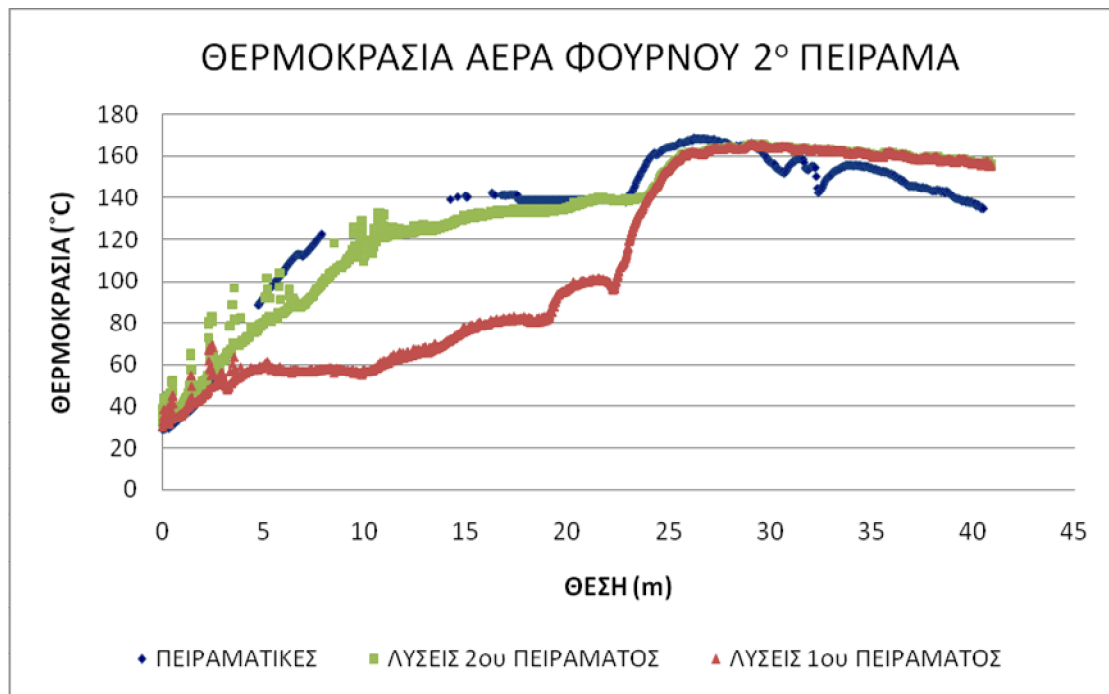
## ΠΕΙΡΑΜΑ 2<sup>ο</sup>

Οι αλλαγές που προτάθηκαν στα συμπεράσματα του 1<sup>ου</sup> πειράματος συνοψίζονται στον πίνακα 9:

**Πίνακας 9:** Κύρια χαρακτηριστικά 2<sup>ου</sup> πειράματος 6<sup>ου</sup> ΣΤΑΔΙΟΥ προσομοίωσης

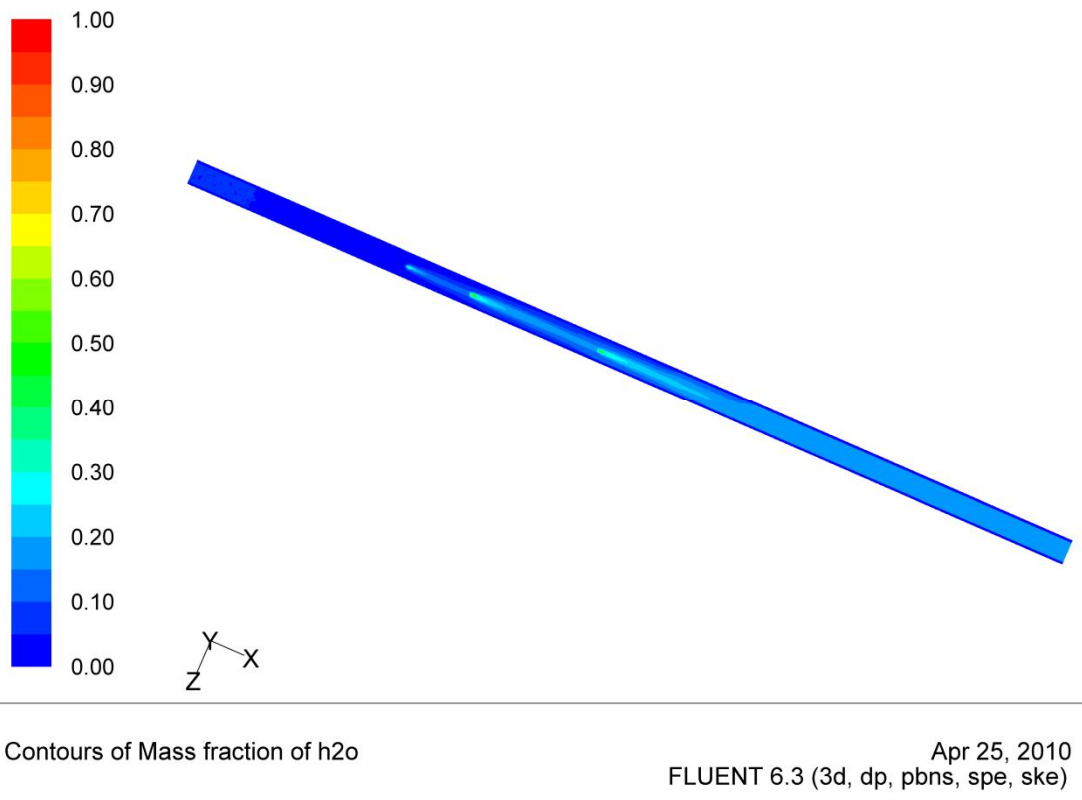
|                                       |                         |       |
|---------------------------------------|-------------------------|-------|
| 1 <sup>η</sup> έξοδος υγρασίας οροφής | Αυξημένη υποπίεση =     | -3 Pa |
| 2 <sup>η</sup> έξοδος υγρασίας οροφής | Αυξημένη υποπίεση =     | -3 Pa |
| 3 <sup>η</sup> έξοδος υγρασίας οροφής | Αυξημένη υποπίεση =     | -4 Pa |
| 7 <sup>η</sup> έξοδος υγρασίας οροφής | Pressure outlet         | -7 Pa |
| 8 <sup>η</sup> έξοδος υγρασίας οροφής | Pressure outlet         | -6 Pa |
| 9 <sup>η</sup> έξοδος υγρασίας οροφής | κλειστή                 | Wall  |
| Παροχή 1 <sup>ου</sup> καυστήρα       | 2,08 m <sup>3</sup> /s  |       |
| Παροχή 2 <sup>ου</sup> καυστήρα       | 0,96 m <sup>3</sup> /s  |       |
| Παροχή 3 <sup>ου</sup> καυστήρα       | 0,008 m <sup>3</sup> /s |       |

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του 2<sup>ου</sup> πειράματος με διάγραμμα τιμών θερμοκρασίας-θέσης κατά μήκος του x άξονα, και με χρωματική απεικόνιση.



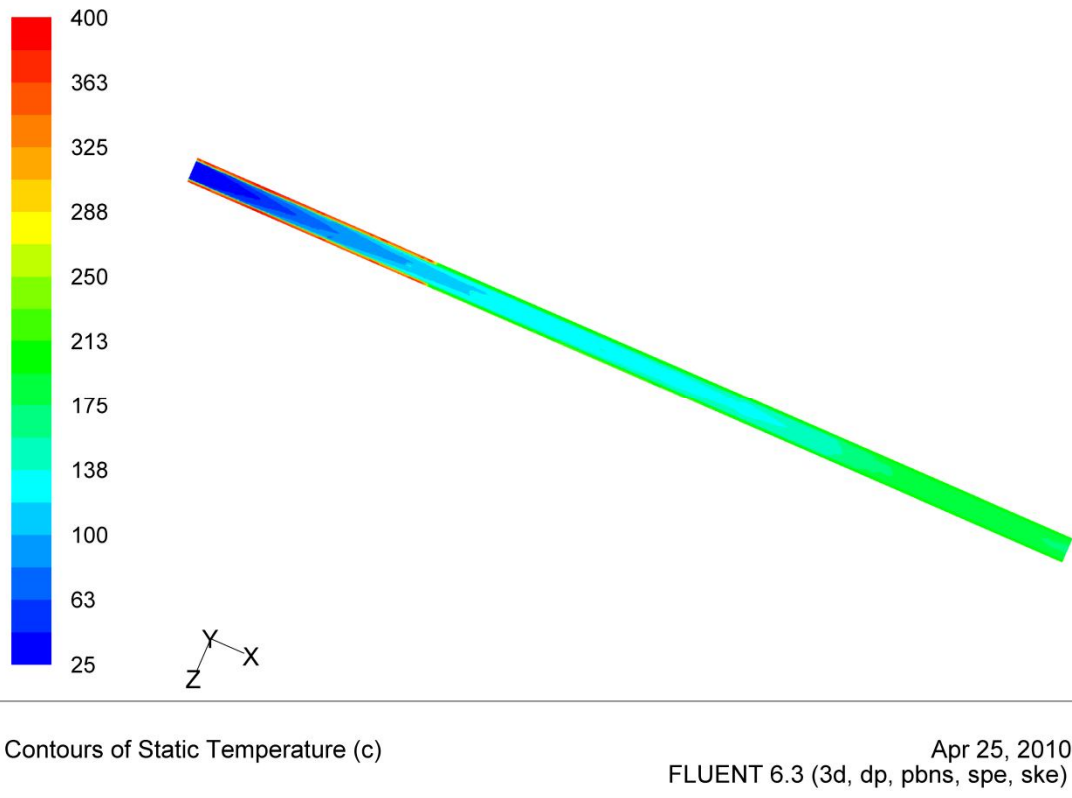
Διάγραμμα 27: Σύγκριση τιμών θερμοκρασίας αέρα φούρνου μεταξύ των λύσεων που εξήχθησαν από το Fluent για το 1<sup>ο</sup> πείραμα, για το 2<sup>ο</sup> πείραμα μετά τις αλλαγές (σημείο ελέγχου2) και από τις πειραματικές μετρήσεις με θερμοζεύγη.

Οι αλλαγές που προτάθηκαν στα συμπεράσματα των λύσεων του 1<sup>ου</sup> πειράματος ώστε να αυξηθεί η θερμοκρασία του αέρα του φούρνου στους δύο πρώτους θαλάμους όπου γίνεται η παροχή υγρασίας, φαίνεται από τα παραπάνω ότι ήταν αποτελεσματικές. Η θερμοκρασία του αέρα όπως αυτή δόθηκε ως λύση από το Fluent, πλησίασε αρκετά ικανοποιητικά τις πειραματικές μετρήσεις. Το αποτέλεσμα αυτό ήταν το καλύτερο δυνατό καθώς δεν μπορεί να αυξηθεί περισσότερο η παροχή στους πρώτους καυστήρες λόγω του ότι επηρεάζεται και ο τρίτος θάλαμος με αύξηση της θερμοκρασίας του.



Εικόνα 77: Χρωματική απεικόνιση της αναλογίας των υδρατμών όπως αυτοί κατανέμονται στο οριζόντιο επίπεδο στην μέση του φούρνου (σημείο ελέγχου 1)

Όπως φαίνεται από την παραπάνω εικόνα, και συγκρίνοντάς τη με την αντίστοιχη του 1<sup>ου</sup> πειράματος (εικόνα 76), οι υδρατμοί ναι μεν υπάρχουν προς το τέλος του φούρνου αλλά η αναλογία τους σε σχέση με τον αέρα έχει μειωθεί αισθητά. Στο 1<sup>ο</sup> πείραμα, στον 3<sup>ο</sup> θάλαμο ήταν περίπου αέρας : υδρατμοί = 0,75 : 0,25 , ενώ στο 2<sup>ο</sup> πείραμα 0,85 : 0,15.



Εικόνα 78: Χρωματική απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας στο οριζόντιο επίπεδο στην μέση του φούρνου (σημείο ελέγχου 1). (Φαίνεται και ο μανδύας δεξιά και αριστερά του θαλάμου του φούρνου).

Συμπέρασμα: οι παραπάνω εικόνες είναι ικανοποιητικές και στο επόμενο πείραμα μπορεί να βελτιωθεί ακόμη περισσότερο η προσομοίωση.

### ΠΕΙΡΑΜΑ 3<sup>ο</sup>

Θεωρήθηκε πιο ρεαλιστικό, οι σπές παροχής υγρασίας να μην διοχετεύουν στον φούρνο απευθείας υδρατμούς, αλλά υγρό νερό το οποίο λόγω της θερμότητας του αέρα του φούρνου να *εξατμίζεται* όταν βρεθεί μέσα σε αυτόν. Έτσι, το κυριότερο χαρακτηριστικό του πειράματος 3 είναι η προσθήκη στο μίγμα των υλικών και του νερού (υγρό). Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα κυριότερα σημεία που έχουν μεταβληθεί:

**Πίνακας 10:** Κύρια χαρακτηριστικά 3<sup>ου</sup> πειράματος 7<sup>ου</sup> ΣΤΑΔΙΟΥ προσομοίωσης

|                                     |                    |                  |
|-------------------------------------|--------------------|------------------|
| Τρεις τελευταίες έξοδοι υγρασίας    | κλειστές           | Wall             |
| Υλικά μίγματος                      | Αέρας + Νερό +     | Υδρατμοί         |
| 1 <sup>η</sup> σπή παροχής υγρασίας | 460 K (0,006 kg/s) | Νερό (υγρό) 100% |

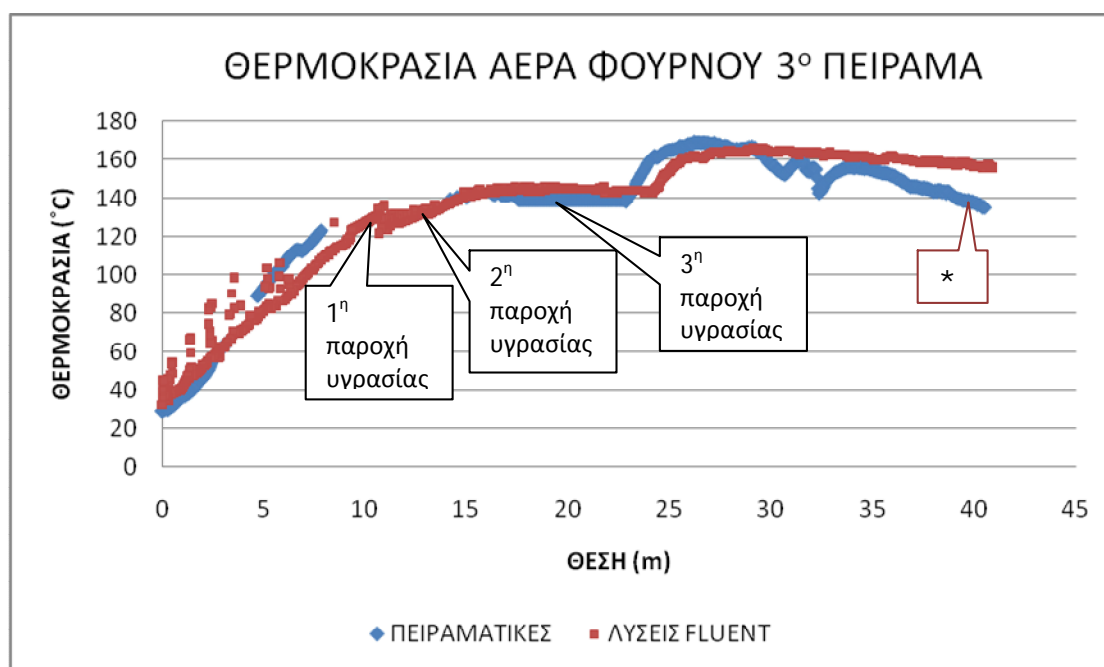


|   |                              |                     |                           |
|---|------------------------------|---------------------|---------------------------|
| <b>2<sup>η</sup> οπή παροχής υγρασίας</b> | <b>440 K</b>                 | <b>(0,01 kg/s)</b>  | <b>Νερό (υγρό) 100%</b>   |
| <b>3<sup>η</sup> οπή παροχής υγρασίας</b> | <b>410 K</b>                 | <b>(0,006 kg/s)</b> | <b>Νερό (υγρό) 100%</b>   |
| <b>Σε όλα τα τοιχώματα φούρνου</b>        | <b>Απώλειες</b>              |                     | <b>50 W/m<sup>2</sup></b> |
| <b>Παροχή 1<sup>ου</sup> καυστήρα</b>     | <b>2,16 m<sup>3</sup>/s</b>  |                     |                           |
| <b>Παροχή 2<sup>ου</sup> καυστήρα</b>     | <b>1,28 m<sup>3</sup>/s</b>  |                     |                           |
| <b>Παροχή 3<sup>ου</sup> καυστήρα</b>     | <b>0,008 m<sup>3</sup>/s</b> |                     |                           |

Όπως παρατηρείται από τον προηγούμενο πίνακα, οι παράμετροι που έχουν παραμείνει ίδιες με το 2<sup>ο</sup> πείραμα είναι οι υποπιέσεις των εξόδων υγρασίας της οροφής και οι παροχές υγρασίας από τις οπές στον πάτο, μόνο που σε αυτό το πείραμα αντί για παροχή υδρατμών υπάρχει παροχή σταγονιδίων νερού. Λόγω του ότι με την εξάτμιση του νερού που παρέχεται μέσα στον φούρνο, η θερμοκρασία του αέρα στα τμήματα αυτά θα μειώνεται αφού θα αποδίδεται ως λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης, αυξήθηκαν οι παροχές καυσαερίων και η θερμοκρασία του εισερχόμενου νερού από τις οπές.

Στο σημείο αυτό καλό είναι να αναφερθεί, ότι στο στάδιο αυτό, έγιναν παραπάνω πειραματισμοί και αλλαγές από αυτές που παρουσιάζονται. Τα ενδιάμεσα πειράματα δεν ήταν σημαντικά να αναφερθούν αλλά έδρασαν υποβοηθητικά στην λήψη αποφάσεων για τις κύριες μεταβολές παραμέτρων, όπως αυτές που φαίνονται στα 3 πειράματα του ΣΤΑΔΙΟΥ 6. Για τον λόγο αυτό, παρατηρείται μια αλλαγή στο 3<sup>ο</sup> πείραμα που δεν συνάδει με τα αποτελέσματα του 2<sup>ου</sup> πειράματος, ήταν όμως απαραίτητη: αυτή είναι το κλείσιμο πάλι των τριών τελευταίων εξόδων υγρασίας.

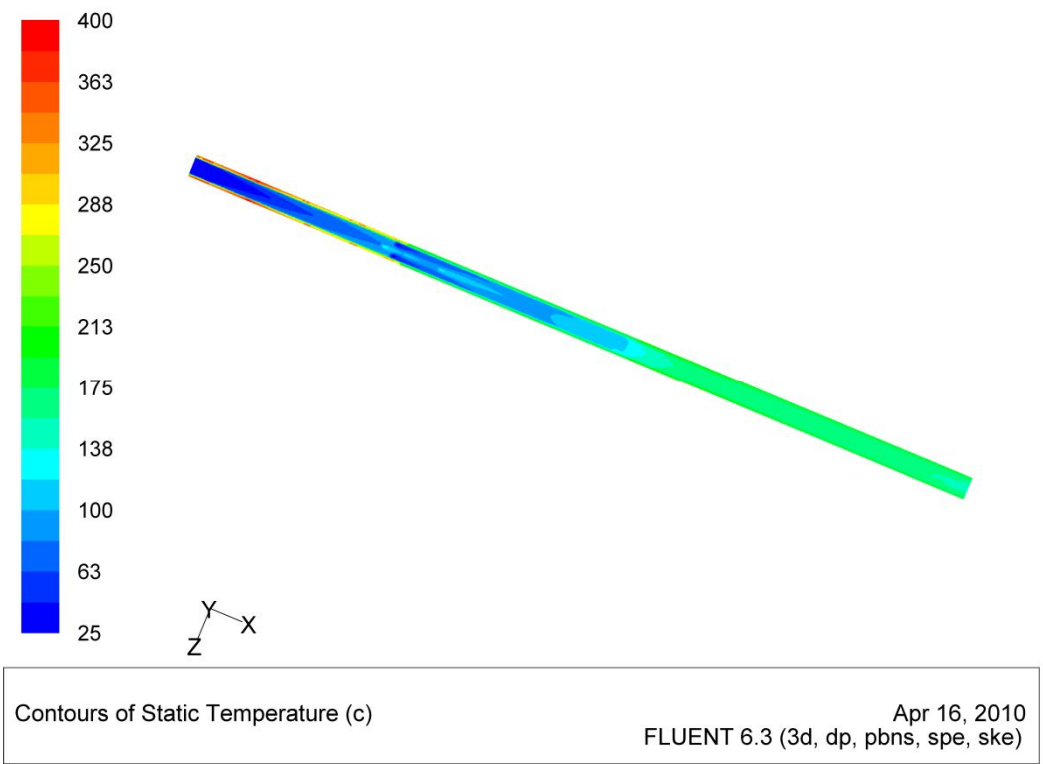
Τα αποτελέσματα φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα και εικόνες:



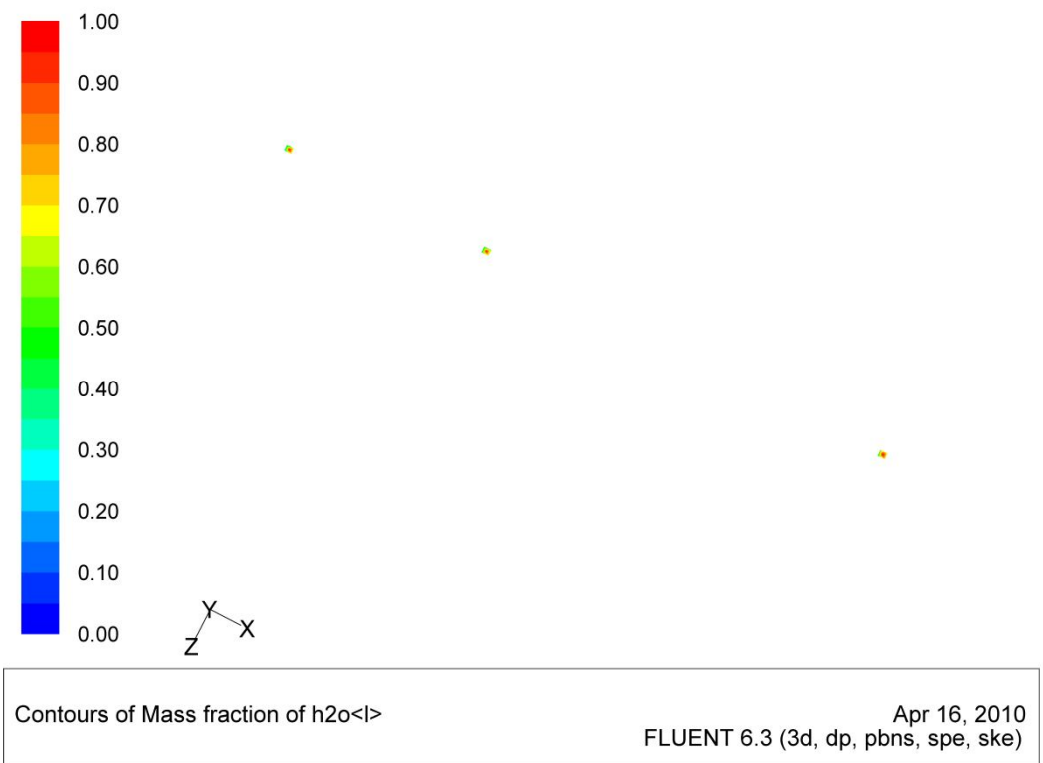
Διάγραμμα 28: Σύγκριση τιμών θερμοκρασίας αέρα φούρνου όπως εξήχθη από τις λύσεις του Fluent για το 3<sup>ο</sup> πείραμα (σημείο ελέγχου 2), και από τις πειραματικές μετρήσεις με θερμοζεύγη

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα 28, η προσέγγιση των πειραματικών τιμών θερμοκρασίας αέρα από τις θεωρητικές, είναι αρκετά ικανοποιητική και αποτελεί την καλύτερη δυνατή που μπορεί να αποδώσει η μέθοδος αυτή της προσομοίωσης για το συγκεκριμένο στάδιο. Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι η διαφορά στο σημείο (\*) είναι ίση με **10%**, ποσοστό το οποίο αντιπροσωπεύει μόνο το σημείο με **την μεγαλύτερη διαφορά** και όχι τον μέσο όρο διαφορών, ο οποίος σαφώς και είναι μικρότερος.

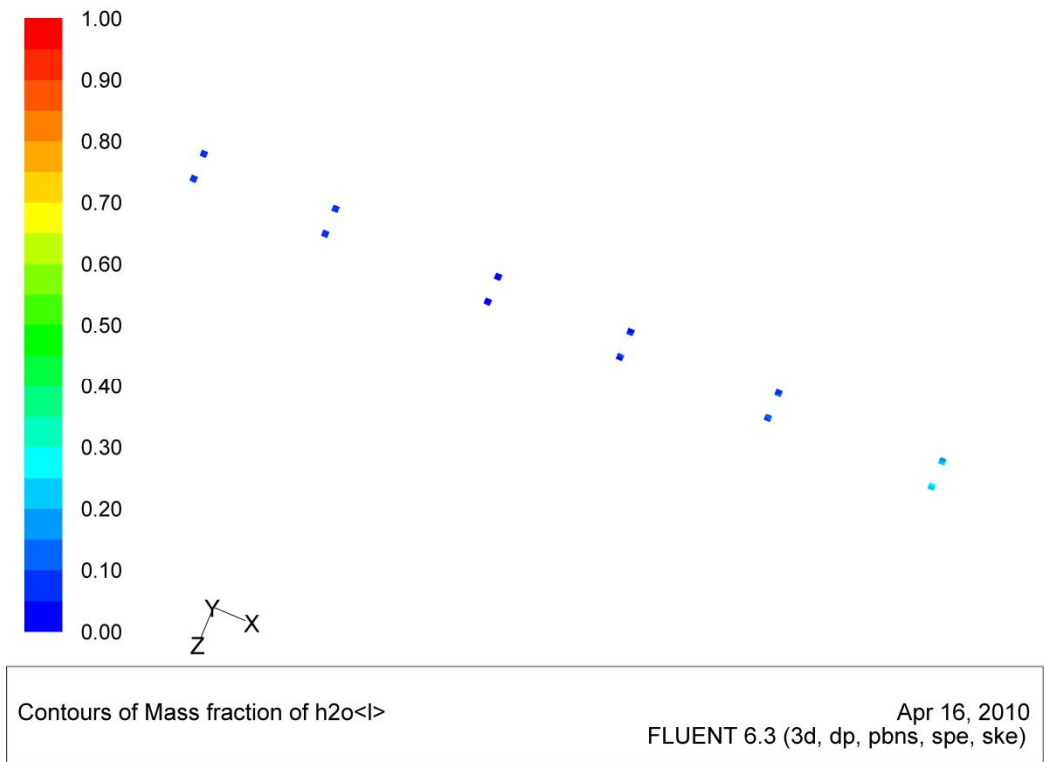
Οι επόμενες εικόνες δείχνουν την κατάσταση μέσα στον φούρνο μετά την παροχή υγρού νερού από τις παροχές και την εξάτμισή του μόλις εισέλθει σε αυτόν. Η πρώτη εικόνα απλά δείχνει την κατανομή της θερμοκρασίας στο οριζόντιο επίπεδο στην μέση του φούρνου (σημείο ελέγχου 1). Ύστερα, παρουσιάζονται χρωματικές απεικονίσεις της κατανομής της υγρασίας, και στις δύο μορφές της, μέσα στον φούρνο (οριζόντιο επίπεδο) και στις εξόδους της υγρασίας από την οροφή του φούρνου.



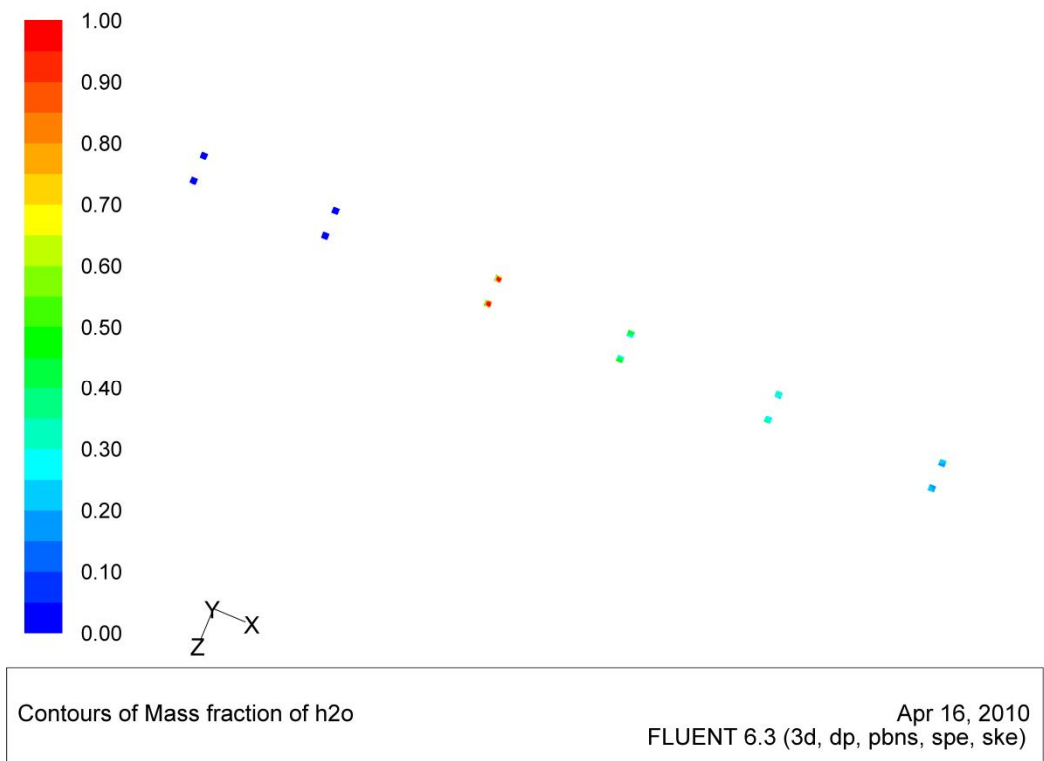
Εικόνα 79: Χρωματική απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας όπως αυτή φαίνεται στο οριζόντιο επίπεδο του φούρνου (σημείο ελέγχου 1)



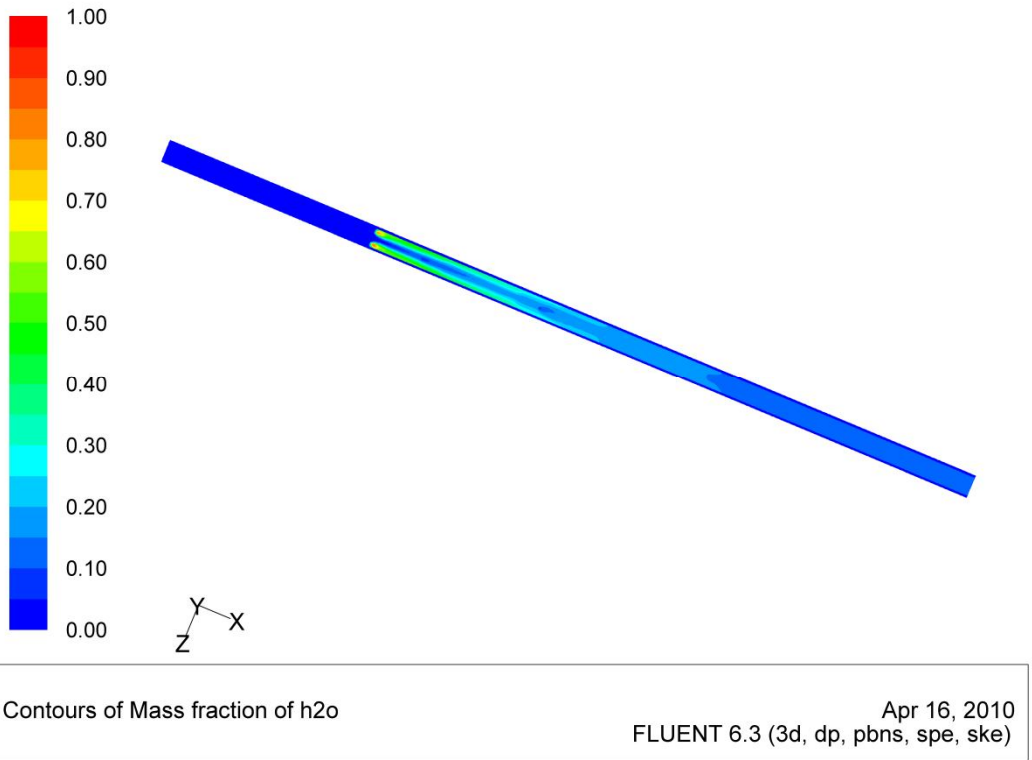
Εικόνα 80: Χρωματική απεικόνιση της αναλογίας του υγρού νερού από τις τρεις οπές παροχής του στον πάτο του φούρνου



Εικόνα 81: Χρωματική απεικόνιση της αναλογίας του υγρού νερού όπως αυτό εξέρχεται από τις εξόδους υγρασίας στην οροφή του φούρνου



Εικόνα 82: Χρωματική απεικόνιση της αναλογίας των υδρατμών όπως αυτοί εξέρχονται από τις εξόδους υγρασίας στην οροφή του φούρνου



Εικόνα 83: Χρωματική απεικόνιση της κατανομής των υδρατμών στο εσωτερικό του φούρνου όπως φαίνεται στο οριζόντιο επίπεδο (σημείο ελέγχου 1)

#### 4.vii) ΣΤΑΔΙΟ 7<sup>ο</sup> - ΠΡΟΣΠΑΘΕΙΑ ΜΕΙΩΣΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Σκοπός του σταδίου αυτού είναι να αποδειχθεί ότι μπορεί να επιτευχθεί το ίδιο αποτέλεσμα θέρμανσης του αέρα του φούρνου με την χαμηλότερη δυνατή κατανάλωση ενέργειας από τους καυστήρες, με χαμηλότερη, δηλαδή, παροχής τους στον μανδύα. Υπολογίζεται η ενέργεια που αποδίδεται στον μανδύα του φούρνου με τις αλλαγές στην παροχή των καυσαερίων, και συγκρίνονται οι τιμές θερμοκρασίας αέρα φούρνου όπως δίνονται από τον λύτη.

Έγιναν δύο συγκρίσεις, όπως αναλυτικά αναφέρθηκαν στο αντίστοιχο κεφάλαιο του ΣΤΑΔΙΟΥ 7 (3.Γ.β.vii) των Υλικών & Μεθόδων.

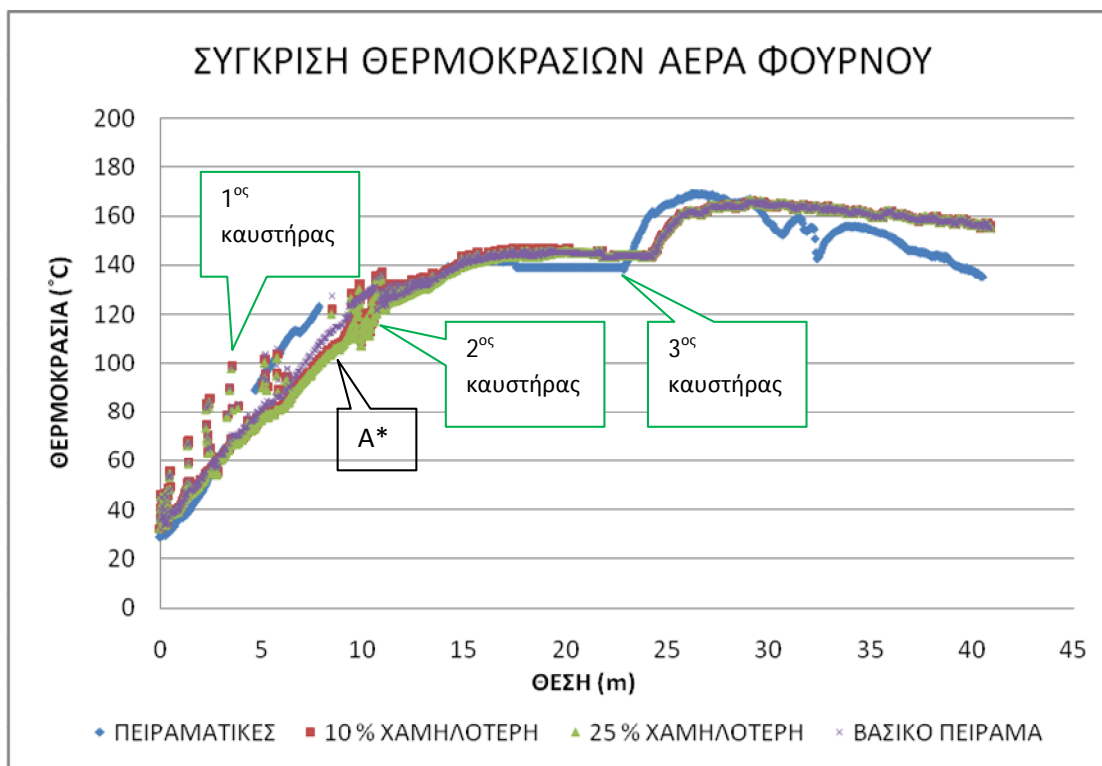
Παρακάτω απεικονίζονται διαγραμματικά οι συγκρίσεις των λύσεων θερμοκρασίας αέρα φούρνου, με σκοπό να εξετασθεί αν είναι δυνατό ο φούρνος να λειτουργεί με μικρότερη κατανάλωση ενέργειας, να μειωθεί δηλαδή η απαιτούμενη ενέργεια που πρέπει να αποδίδεται μέσα στον μανδύα για να επιτευχθεί η επιθυμητή θέρμανση φούρνου. Για λόγους διευκόλυνσης στην ανάγνωση και την κατανόηση των αποτελεσμάτων του ΣΤΑΔΙΟΥ 7, παρατίθενται ακολούθως και οι πίνακες που περιγράφουν τις μεταβολές στις παροχές καυσαερίων για τις δύο περιπτώσεις σύγκρισης:

**Πίνακας 11: Παροχές καυσαερίων στην 1<sup>η</sup> περίπτωση ( $\approx$  10% χαμηλότερη της βασικής)**

|                           |                                |                 |
|---------------------------|--------------------------------|-----------------|
| 1 <sup>ος</sup> καυστήρας | Παροχή 2 m <sup>3</sup> /s     | Ισχύς 105,84 kW |
| 2 <sup>ος</sup> καυστήρας | Παροχή 1,12 m <sup>3</sup> /s  | Ισχύς 116,42 kW |
| 3 <sup>ος</sup> καυστήρας | Παροχή 0,008 m <sup>3</sup> /s | Ισχύς 1,4 kW    |

**Πίνακας 12: Παροχές καυσαερίων στην 2<sup>η</sup> περίπτωση ( $\approx$  25% χαμηλότερη της βασικής)**

|                           |                                |                |
|---------------------------|--------------------------------|----------------|
| 1 <sup>ος</sup> καυστήρας | Παροχή 1,76 m <sup>3</sup> /s  | Ισχύς 91,48 kW |
| 2 <sup>ος</sup> καυστήρας | Παροχή 0,88 m <sup>3</sup> /s  | Ισχύς 91,48 kW |
| 3 <sup>ος</sup> καυστήρας | Παροχή 0,008 m <sup>3</sup> /s | Ισχύς 1,4 kW   |



Διάγραμμα 29: Άμεση σύγκριση τιμών θερμοκρασίας μεταξύ του προβλήματος που αποτελεί την βάση, του προβλήματος που οι παροχές στον 1<sup>ο</sup> και στον 2<sup>ο</sup> καυστήρα είναι 10 % χαμηλότερες και του προβλήματος που οι παροχές στους ίδιους καυστήρες είναι 25 % χαμηλότερες. Φαίνεται και το προφίλ θερμοκρασίας αέρα φούρνου όπως αυτές μετρήθηκαν πειραματικά. (σημείο ελέγχου 2)

Παρατηρώντας το παραπάνω διάγραμμα όπου φαίνονται οι συγκρίσεις των θερμοκρασιών αέρα φούρνου, διαπιστώνεται ότι οι διαφορές είναι πολύ μικρές: η μεγαλύτερη διαφορά θερμοκρασίας που βρίσκεται στο σημείο A\* για την 1<sup>η</sup> περίπτωση είναι 6,38%, και για τη δεύτερη περίπτωση 7,87%.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η απαιτούμενη ενέργεια από τον κάθε καυστήρα στο βασικό πείραμα και στις δύο αλλαγές, όπου γίνεται αντιληπτή η διαφορά στην κατανάλωση ενέργειας:

**Πίνακας 13: Σύγκριση απαιτούμενης ενέργειας από τους καυστήρες**

|                           | ΒΑΣΙΚΟ ΠΕΙΡΑΜΑ | 1 <sup>η</sup> ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ | 2 <sup>η</sup> ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ |
|---------------------------|----------------|--------------------------|--------------------------|
| 1 <sup>ος</sup> καυστήρας | Ισχύς 56,13 kW | Ισχύς 52,92 kW           | Ισχύς 45,74 kW           |
| 2 <sup>ος</sup> καυστήρας | Ισχύς 89,51 kW | Ισχύς 58,21 kW           | Ισχύς 45,74 kW           |
| 3 <sup>ος</sup> καυστήρας | Ισχύς 0,7 kW   | Ισχύς 0,7 kW             | Ισχύς 0,7 kW             |
| Συνολική ισχύς            | 146 kW         | 112 kW                   | 92 kW                    |

#### 4.viii) ΣΤΑΔΙΟ 8<sup>ο</sup> - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΠΡΟΪΟΝΤΟΣ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΣΤΟ MS EXCEL

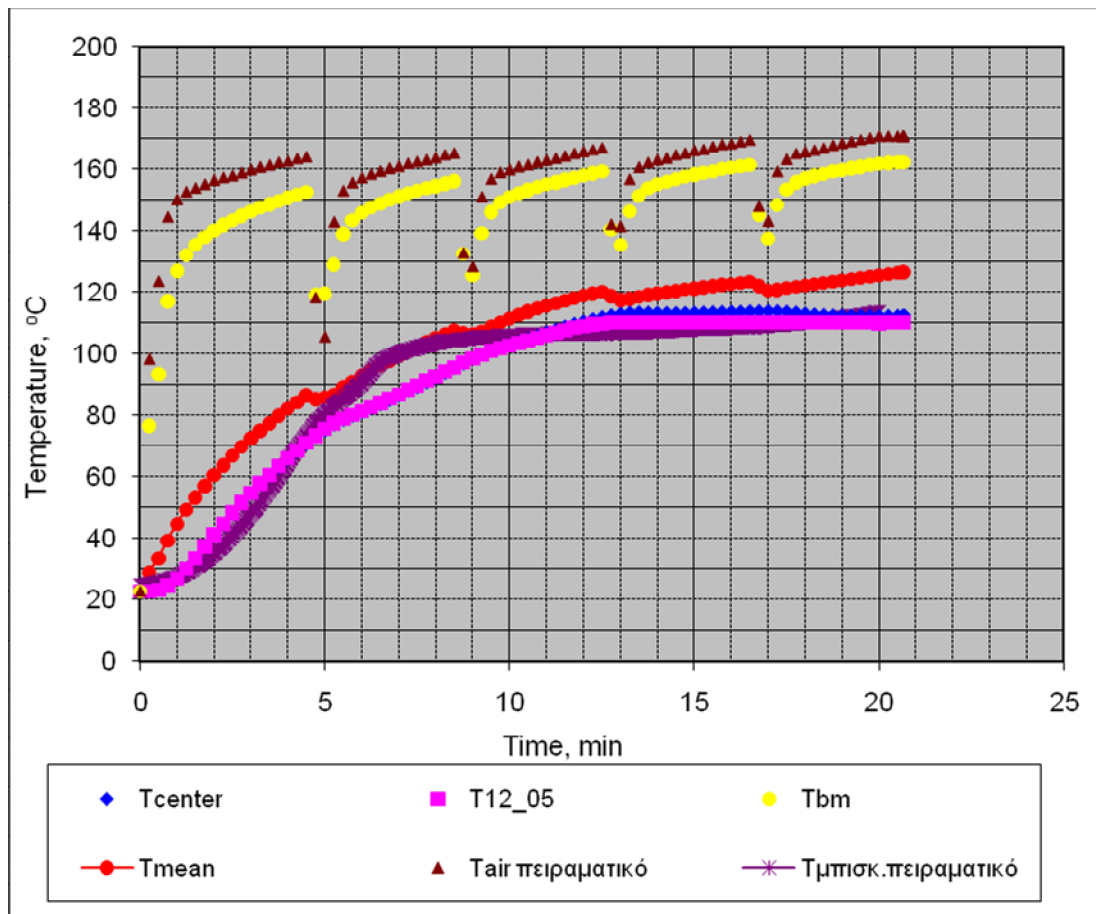
Οι λύσεις του προγράμματος αφορούν την μεταβολή της υγρασίας και της θερμοκρασίας σε κάθε σημείο του μπισκότου που παρουσιάζει ενδιαφέρον προς μελέτη, λαμβάνοντας ως δεδομένα τιμές θερμοκρασίας μπισκότου και αέρα φούρνου εργαστηριακού, τιμές θερμοκρασίας αέρα φούρνου βιομηχανικού και τιμές μέσης υγρασίας μπισκότου με μετρήσεις στον εργαστηριακό φούρνο και για τα διάφορα στάδια ψησίματος με δείγματα από τα παράθυρα του βιομηχανικού φούρνου. Οι πειραματικές αυτές μετρήσεις βοηθούν στην επιβεβαίωση των θεωρητικών λύσεων. Παρακάτω, παρουσιάζονται συνοπτικά σε διαγράμματα, τα αποτελέσματα του μοντέλου σε σύγκριση με τις πειραματικές τιμές.

Εξήγηση υπομνημάτων διαγραμμάτων:

- $T_{center}$  = θεωρητική πρόβλεψη τιμών θερμοκρασίας στο κέντρο ακριβώς του μπισκότου.
- $T_{mean}$  = θεωρητική πρόβλεψη μέσης θερμοκρασίας μπισκότου
- $T_{12\_05}$  = θεωρητική πρόβλεψη τιμών θερμοκρασίας του μπισκότου όπου βρισκόταν το θερμοζεύγος κατά την πειραματική μέτρηση θερμοκρασίας μπισκότου (12mm από το κέντρο και 5mm από την επιφάνεια)
- $T_{bm}$  = θεωρητική πρόβλεψη τιμών θερμοκρασίας στο κέντρο της κάτω επιφάνειας του μπισκότου η οποία ακουμπά στην συμπαγή ταινία
- $T_{\text{μπισκ.πειραματικό}}$  = πειραματικές τιμές θερμοκρασίας μπισκότου με θερμοζεύγος στο εσωτερικό του
- $T_{\text{air (πειραματικό)}}$  = πειραματικές τιμές θερμοκρασίας αέρα εργαστηριακού φούρνου όπου έγιναν οι μετρήσεις όλων των ιδιοτήτων, ενώ όταν οι μετρήσεις έγιναν στο εργοστάσιο η θερμοκρασία του αέρα είναι αυτή που κατέγραφαν τα θερμομέτρα του βιομηχανικού φούρνου
  
- $X_{center}$  = θεωρητική πρόβλεψη συγκέντρωσης υγρασίας στο κέντρο του μπισκότου
- $X_{11}$  = θεωρητική πρόβλεψη συγκέντρωσης υγρασίας στο σημείο του μπισκότου που βρίσκεται 1 mm από την πάνω επιφάνεια και 1 mm από την περίμετρο
- $X_{bm}$  = θεωρητική πρόβλεψη συγκέντρωσης υγρασίας στο κέντρο της κάτω επιφάνειας του μπισκότου η οποία ακουμπά στη ταινία
- $X_{\text{mean θεωρητικό}}$  = θεωρητική πρόβλεψη της μέσης συγκέντρωσης υγρασίας
- $X_{\text{πειραματικό}}$  = πειραματικές τιμές μέσης υγρασίας στα διάφορα στάδια ψησίματος όπως μετρήθηκαν από τα δείγματα που λήφθηκαν από τα «παράθυρα» του βιομηχανικού φούρνου

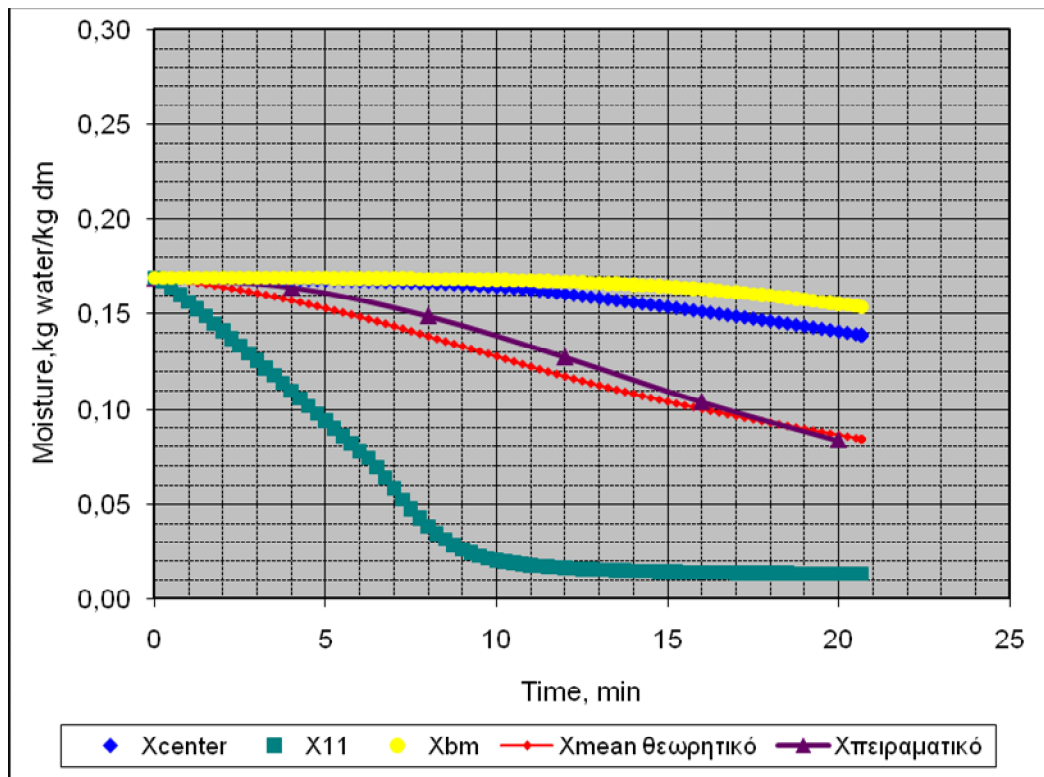






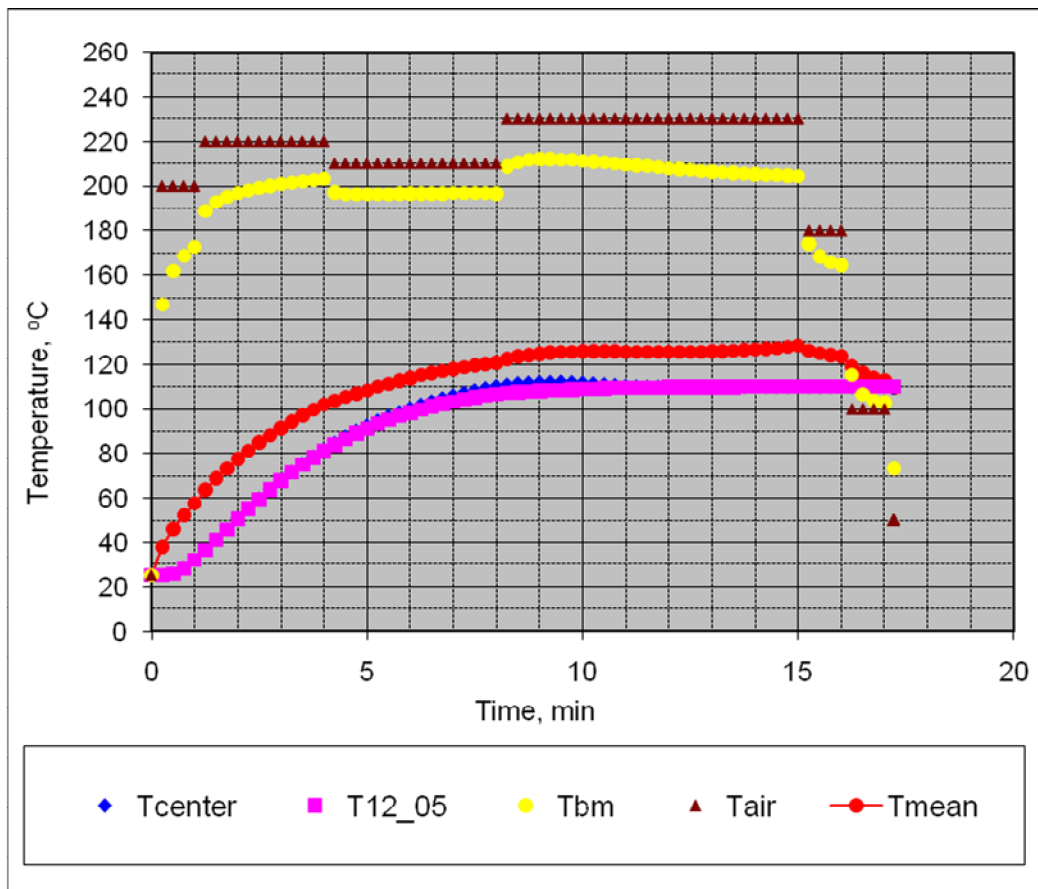
Διάγραμμα 30: Καμπύλες μεταβολής της θερμοκρασίας μέσα σε ένα μπισκότο (πειραματικές μετρήσεις στο εργαστήριο)

Πρώτα απ' όλα παρατηρείται η σύμπτωση των πειραματικών και των θεωρητικών τιμών θερμοκρασίας στο εσωτερικό του μπισκότου στη θέση του θερμοζεύγους. Η θερμοκρασία του αέρα του εργαστηριακού φούρνου όπως μετρήθηκε πειραματικά με θερμοζεύγη, παρουσιάζει κάποιες διακυμάνσεις οι οποίες οφείλονται στο άνοιγμα της πόρτας του φούρνου για να μετράται η μεταβολή του βάρους του μπισκότου με σκοπό να υπολογιστεί η μέση υγρασία του όπως φαίνεται στο επόμενο διάγραμμα. Η θερμοκρασία της κάτω επιφάνειας του μπισκότου επηρεάζεται άμεσα από την θερμοκρασία της ταινίας του φούρνου, η οποία θεωρείται ότι έχει θερμοκρασία ίση με αυτήν του αέρα.



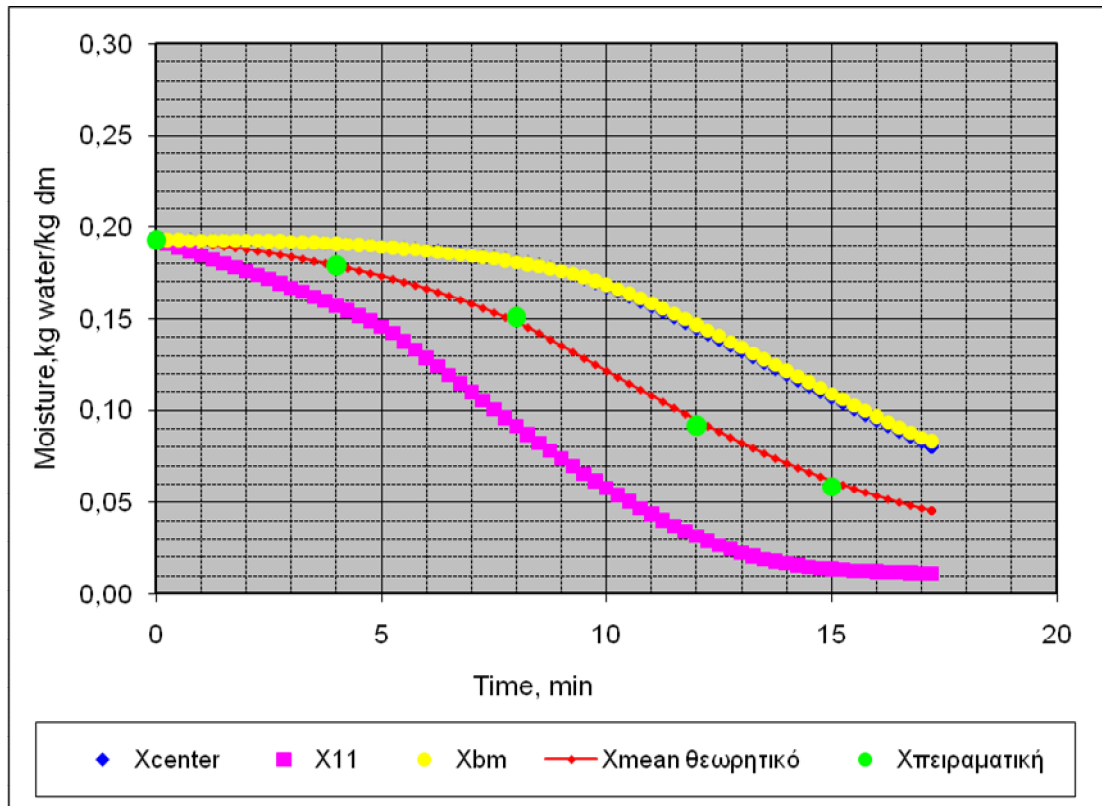
Διάγραμμα 31: Καμπύλες μεταβολής της συγκέντρωσης της υγρασίας μέσα σε ένα μπισκότο (πειραματικές μετρήσεις στο εργαστήριο)

Κατά τη διάρκεια του ίδιου πειράματος μέτρησης της θερμοκρασίας, έγιναν και μετρήσεις μέσης υγρασίας του μπισκότου. Παρατηρείται ότι οι πειραματικές με τις θεωρητικές τιμές μέσης συγκέντρωσης υγρασίας συμπίπτουν. Στο ίδιο διάγραμμα φαίνεται η καμπύλη υγρασίας σε ένα άκρο του μπισκότου, στο κέντρο του και στην κάτω επιφάνειά του. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι, το μοντέλο πρόβλεψε ορθά την μεγάλη σχετικά συγκέντρωση υγρασίας στην κάτω επιφάνεια του μπισκότου και στο κέντρο του σε σύγκριση με ένα άκρο του. Αυτό εξηγείται ως εξής: το μπισκότο ακουμπά με την κάτω επιφάνειά του σε συμπαγή ταινία εξαιτίας της οποίας όταν γίνεται η εξάτμιση νερού, οι υδρατμοί που δημιουργούνται στην κάτω επιφάνεια δεν μπορούν να διαφύγουν. Αποτέλεσμα αυτού είναι ότι στην πράξη παρατηρούνται φυσαλίδες οι οποίες φαίνονται στα ψημένα μπισκότα. Επίσης, στο κέντρο του μπισκότου παραμένει η συγκέντρωση υγρασίας σε υψηλά επίπεδα μέχρι το τέλος της διεργασίας. Η υγρασία ισοκατανέμεται σιγά – σιγά μετά το ψήσιμο



Διάγραμμα 32: Καμπύλες μεταβολής της θερμοκρασίας μέσα σε ένα μπισκότο με συνθήκες θέρμανσης του βιομηχανικού φούρνου (πειραματικές μετρήσεις στο Εργοστάσιο)

Η μόνη πειραματική μέτρηση σε αυτό το διάγραμμα είναι οι τιμές θερμοκρασίας που κατέγραφαν τα θερμόμετρα του βιομηχανικού φούρνου σε κάθε μία από τις τρεις ζώνες του. Στην εικόνα φαίνεται η θερμοκρασία που αναπτύσσεται στα διάφορα σημεία του μπισκότου κατά τη διάρκεια του ψησίματος υπό αυτές τις συνθήκες.



Διάγραμμα 33: Καμπύλες μεταβολής της συγκέντρωσης της υγρασίας μέσα σε ένα μπισκότο (πειραματικές μετρήσεις στο Εργοστάσιο)

Τα δύο τελευταία διαγράμματα προκύπτουν από μετρήσεις που έγιναν στον βιομηχανικό φούρνο. Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται η μεταβολή της μέσης συγκέντρωσης υγρασίας όπως αυτή μετρήθηκε στα δείγματα που λήφθηκαν από τα «παράθυρα» του φούρνου (βλ. κεφάλαιο 3.Α) κατά τη διάρκεια του ψησίματος. Παρατηρείται και εδώ η σύμπτωση των πειραματικών και θεωρητικών τιμών μέσης υγρασίας μπισκότου. Επίσης, φαίνεται και σε αυτό το πείραμα ότι το κέντρο του μπισκότου και η κάτω επιφάνειά του παραμένουν αρκετά υγρά μέχρι το τέλος του ψησίματος.

Συμπέρασμα όλων των αποτελεσμάτων του προγράμματος που χρησιμοποιήθηκε, είναι ότι η θεωρητική πρόβλεψη είναι πολύ κοντά στις πραγματικές τιμές, τόσο της θερμοκρασίας όσο και της υγρασίας του μπισκότου. Άρα, μπορεί να πει κανείς ότι το μοντέλο αυτό αποτελεί προσομοίωση των μεταβολών υγρασίας / θερμοκρασίας στο εσωτερικό του μπισκότου.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή, αναπτύχθηκε ένα τρισδιάστατο μοντέλο προσομοίωσης βιομηχανικού φούρνου ψησίματος μπισκότων μαλακής ζύμης, τύπου τούνελ, συνεχούς λειτουργίας, με την εφαρμογή Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (CFD). Έμφαση δόθηκε στην μελέτη και πρόβλεψη του μεγέθους της ταχύτητας και στην διαμόρφωση της ροής του αέρα μέσα στον θάλαμο ψησίματος, καθώς και στην κατανομή της θερμοκρασίας.

Όπως, αναφέρθηκε στην βιβλιογραφική επισκόπηση αντίστοιχων μελετών (κεφ. 2.Ε), σε όλες τις εργασίες προσομοίωσης είχαν γίνει κάποιες απλουστεύσεις με σκοπό την αντιμετώπιση δυσκολιών κατά τη δημιουργία και επίλυση του μοντέλου. Συνοπτικά, οι πιο κοινές ήταν, στις διαστάσεις της γεωμετρίας (2-D), στην παρουσία ή μη διαφόρων μερών μηχανολογικού εξοπλισμού (καυστήρες), στον τρόπο θέρμανσης του αέρα του φούρνου (π.χ. σταθερή παροχή θερμότητας με συναγωγή από τα τοιχώματα, αγωγή της ακτινοβολίας), στην σύσταση και τις ιδιότητες του αέρα. Και στην παρούσα εργασία προέκυψε η ανάγκη απλούστευσης της γεωμετρίας των απαγωγών υδρατμών και της απλοποίησης της διαδικασίας παροχής υγρασίας μέσα στον θάλαμο. Παρόλα αυτά όμως έγινε προσπάθεια τα υπόλοιπα στοιχεία να είναι όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικά: για παράδειγμα, δημιουργήθηκε τρισδιάστατο μοντέλο, η θέρμανση του αέρα του φούρνου πραγματοποιείται και με τις τρεις μορφές μεταφοράς θερμότητας, επίσης προστέθηκε στον αέρα υγρασία ίση με αυτήν που εξατμίζεται από τα μπισκότα και τέλος τα αποτελέσματα με την μέθοδο CFD συνδυάστηκαν με τα αποτελέσματα του μαθηματικού μοντέλου για μια πιο πλήρη εικόνα των φαινομένων που επισυμβαίνουν κατά τη διεργασία.

Τα κυριότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση των αποτελεσμάτων της μελέτης, είναι:

- Για την επίλυση του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος SIMPLE και το σχήμα διακριτοποίησης πίεσης / ορμής: STANDARD / 1<sup>st</sup> order upwind, συνδυασμός που απέδωσε ακριβή αποτελέσματα σε εύλογο χρονικό διάστημα.
- Για την προσομοίωση μεταφοράς θερμότητας μέσω ακτινοβολίας στην συγκεκριμένη περίπτωση που μελετήθηκε, μπορούσε να χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε από τα μοντέλα DO και DTRM. Τελικά επιλέχθηκε το μοντέλο DO, το οποίο ήταν πολύ ακριβές στην επίλυση αλλά απαιτούσε μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ.
- Συγκρίνοντας τις πειραματικές με τις θεωρητικές τιμές θερμοκρασίας αέρα φούρνου κατά τη λειτουργία του, προκύπτει πολύ καλή σύμπτωση. Οι θεωρητικές τιμές παρουσίασαν 9,5% μέση απόκλιση από τις πειραματικές.
- Μετά από έλεγχο που πραγματοποιήθηκε σε τρία διαφορετικής πυκνότητας πλέγματα, αποδείχθηκε ότι το πλέγμα που σχηματίστηκε για την επίλυση του μοντέλου ήταν ανεξάρτητο από τις λύσεις: πλήθος κελιών 317839.

- Το συμπέρασμα από τον έλεγχο της συμπεριφοράς της τύρβης κοντά στα τοιχώματα είναι ότι η Standard εξίσωση είναι κατάλληλη καθώς οι τιμές του  $Y^+$  κυμαίνονται μεταξύ 11 και 400.
- Με 23% μείωση κατανάλωσης ενέργειας/sec η θερμοκρασία του αέρα του φούρνου μειώνεται κατά 6,4% (μέγιστη απόκλιση), ενώ με 37% μείωση κατανάλωσης ενέργειας /sec από του καυστήρες η θερμοκρασία του αέρα μειώνεται μόλις 7,9% (μέγιστη απόκλιση).
- Όπως συμπεραίνεται από τα αποτελέσματα του μοντέλου στο MS Excel, η πάνω και η κάτω επιφάνεια του μπισκότου τείνουν να φτάσουν την θερμοκρασία του αέρα του φούρνου. Η κάτω λόγω μεταφοράς θερμότητας με αγωγή από την ταινία, ενώ η πάνω κυρίως λόγω μεταφοράς θερμότητας μέσω ακτινοβολίας.
- Στην κάτω επιφάνεια του μπισκότου καθώς και στο κέντρο του, η συγκέντρωση της υγρασίας παραμένει σε υψηλά επίπεδα καθ' όλη τη διάρκεια του ψησίματος, σε σύγκριση με ένα σημείο του προς την πάνω επιφάνεια. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι το μπισκότο ακουμπά σε συμπαγή ταινία εξαιτίας της οποίας οι υδρατμοί που δημιουργούνται στην κάτω επιφάνεια δεν μπορούν να διαφύγουν.
- Η θεωρητική πρόβλεψη είναι πολύ κοντά στις πραγματικές τιμές, τόσο της θερμοκρασίας όσο και της υγρασίας του μπισκότου μετά από σύγκριση.
- Άρα, γενικά, το μοντέλο που δημιουργήθηκε παρέχει μια ικανοποιητική προσέγγιση της μελέτης των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας και της ροής του αέρα στο εσωτερικό του θαλάμου ψησίματος, αλλά και των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας και υγρασίας μέσα στο μπισκότο. Συνεπώς, το μοντέλο αποτελεί βάση για περαιτέρω μελέτη.
- Επιπλέον, μεγαλύτερη πρόοδος αναμένεται να σημειωθεί στο μέλλον, καθώς η υπολογιστική ισχύς των Η/Υ ολοένα και αυξάνεται ενώ παράλληλα τα λογισμικά CFD γίνονται πιο εύχρηστα και ακριβή. Έτσι, είναι πιθανή μια πλήρης πρόβλεψη της λειτουργίας των βιομηχανικών φούρνων, εφαρμόζοντας αριθμητικά μοντέλα μη-σταθερής κατάστασης που θα προσομοιάζουν ακριβώς την αλληλεπίδραση (όπως ανταλλαγή μάζας και ενέργειας) μεταξύ της ατμόσφαιρας του θαλάμου ψησίματος και των εκατοντάδων αρτοσκευασμάτων που ψήνονται.
- Άρα, η έρευνα αυτή μπορεί να συνεχιστεί περαιτέρω όταν δεν θα υπάρχει ο περιορισμός που τέθηκε στην συγκεκριμένη εργασία λόγω έλλειψης μεγάλης υπολογιστικής ισχύος, στην δημιουργία πλέγματος με την ύπαρξη μπισκότων μέσα στον φούρνο και συνεπακόλουθα στην επίλυση εξισώσεων ανταλλαγής μάζας και ενέργειας μεταξύ μπισκότων και αέρα φούρνου.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Baik, O. D., Marcotte, M., & Castaigne, F.. Cake baking in tunnel type multi-zone industrial ovens. Part I. Characterization of baking conditions. *Food Research International*, 33, (2000) 587–598. Όπως αναφέρεται από τους P.S. Mirade, J. D. Daudin, F. Ducept, G. Trystram and J. Clement (2004).
- Bin Xia, Da-Wen Sun. Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the food industry: a review. *Computers and electronics in agriculture* 34 (2002) 5-24.
- D.C. Wilcox (1998) Turbulence Modelling for CFD. La Canada: DCW Industries Inc.. Όπως αναφέρεται από τον Da-Wen Sun (2007).
- De Vries U., Velthuis H. & Koster K.. Baking ovens and product quality – a computer model. *Food science and technology today*, 9 (1995) 232-234. Όπως αναφέρεται από τους P.S. Mirade, J. D. Daudin, F. Ducept, G. Trystram and J. Clement (2004).
- Emmanuel Purlis and Viviana O. Salvadori. Bread baking as a moving boundary problem. Part 2: Model validation and numerical simulation. *Journal of food engineering* 91 (2009) 434-442.
- Jose Caro-Corrales, Kevin Cronin, Kamaleldin Abodayeh, Gustavo Gutierrez-Lopez, Cesar Ordorica-Falomir. Analysis of random variability in biscuit cooling. *Journal of food engineering* 54 (2002) 147-156.
- J.S. Shang, Three decades of accomplishments in computational fluid dynamics, *Progress in Aerospace Sciences* **40** (2004), pp. 173–197. Όπως αναφέρεται από τους Tomas Norton and Da-Wen Sun (2006).
- L.F. Richardson. The approximate arithmetical solution by finite differences of physical problems involving differential equations, with an application to the stresses in a masonry dam, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A* **210** (1910), pp. 307–357. Όπως αναφέρεται από τους Tomas Norton and Da-Wen Sun (2006).
- Lijun Wang and Da-Wen Sun. Recent developments in numerical modeling of heating and cooling processes in the food industry: a review. *Trends in food science and technology* 14 (2003) 408-423.
- L. Wang and D.-W. Sun, Recent developments in numerical modeling of heating and cooling processes in the food industry – a review, *Trends in Food Science and Technology* **14** (2003), pp. 408–423. Όπως αναφέρεται από τους Tomas Norton and Da-Wen Sun (2006).
- Manley, D. (2000) *Technology of Biscuits, Crackers and Cookies*. Woodhead Publishing, Cambridge. Όπως αναφέρεται από τους Stanley P. Cauvain and Linda S. Young (2006).
- Mathioulakis, E., Karathanos, V.T., Belessiotis, V.G.. Simulation of air movement in a dryer by computational fluid dynamics: application for the drying of fruits. *Journal of Food Engineering* 36 (1998) 183–200. Όπως αναφέρεται από τους Bin Xia, Da-Wen Sun (2002).

- Mirade, P.S., 2001. Personal communication. *Όπως αναφέρεται από όπως Bin Xia, Da-Wen Sun (2002).*
- Nantawan Therdthai, Weibiao Zhou, Thomas Adamczak. Two-dimensional CFD modeling and simulation of an industrial continuous bread baking oven. *Journal of food engineering* 60 (2003) 211-217.
- Nantawan Therdthai, Weibiao Zhou, Thomas Adamczak. Three-dimensional CFD modeling and simulation of the temperature profiles and airflow patterns during a continuous industrial baking process. *Journal of food engineering* 65 (2004) 599-608.
- Ozilgen M. & Heil J.R.. Mathematical modeling of transient heat and mass transport in a baking biscuit. *Journal of food processing and preservation* 18 (1994) 133-148. *Όπως αναφέρεται από τους Emmanuel Purlis and Viviana O. Salvadori (2009).*
- Peter Wade (1989) *Biscuits, cookies and crackers, vol.1: the principles of the craft* by Peter Wade. Elsevier applied science.
- Pieter Verboven, Nico Scheerlinck, Josse De Baerdemaeker and Bart M. Nicolai. Computational fluid dynamics modeling and validation of the isothermal airflow in a forced convection oven. *Journal of food engineering* 43 (2000a) 41-53.
- Pieter Verboven, Nico Scheerlinck, Josse De Baerdemaeker and Bart M. Nicolai. Computational fluid dynamics modeling and validation of the temperature distribution in a forced convection oven. *Journal of food engineering* 43 (2000b) 61-73
- P.J. Jones and G.E. Whittle. Computational fluid dynamics for building airflow prediction: current status and capabilities. *Building and Environment* 27, (1992) 321–338. *Όπως αναφέρεται από τον Da-Wen Sun (2007).*
- P.S. Mirade, J. D. Daudin, F. Ducept, G. Trystram and J. Clement. Characterization and CFD modeling of air temperature and velocity profiles in an industrial biscuit baking tunnel oven. *Food research international* 37 (2004) 1031-1039.
- R. Courant, K. Friedrichs and H. Lewy, Die partiellen differenzgleichungen der mathematischen Physik, *Mathematische Annalen (Historical Archive)* 100 (1928), pp. 32–74. *Όπως αναφέρεται από τους Tomas Norton and Da-Wen Sun (2006).*
- Sato H., Matsumura T. & Shibukawa S.. Apparent heat transfer in a forced convection oven and properties of baked foods. *Journal of food science*, 52 (1987) 185-188. *Όπως αναφέρεται από τους P.S. Mirade, J. D. Daudin, F. Ducept, G. Trystram and J. Clement (2004).*
- S. Cauvain and L. Young (2001) *Baking Problems Solved*. Woodhead Publishing, Cambridge. *Όπως αναφέρεται από τον W. P. Edwards (2007).*
- Scott, G.M., Richardson, P.,. The application of computational fluid dynamics in the food industry. *Trends in Food Science and Technology* 8 (1997) 119–124. *Όπως αναφέρεται από τους Bin Xia, Da-Wen Sun (2002).*



Sethian, J.A., (1993) Computational fluid dynamics. In: From Desktop to Teraflop: Exploiting the USLead in High Performance Computing. NSF Publications, National Science Foundation, Washington,DC, USA. Όπως αναφέρεται από τους Bin Xia, Da-Wen Sun (2002).

Shaw, C.T., 1992. Using Computational Fluid Dynamics. Prentice Hall, New Jersey, USA. Όπως αναφέρεται από τους Bin Xia, Da-Wen Sun (2002).

Shin-Yee Wong, Weibiao Zhou, Jinsong Hua. CFD modeling of an industrial continuous bread-baking process involving U-movement. Journal of food engineering 78 (2007) 888-896.

Standing, C. N.. Individual heat transfer modes in band oven biscuit baking. Journal of Food Science, 39, (1974) 267–271. Όπως αναφέρεται από τους P.S. Mirade, J. D. Daudin, F. Ducept, G. Trystram and J. Clement (2004).

Stanley P. Cauvain and Linda S. Young (2000) Bakery food manufacture and quality: Water control and effects. Blackwell Science, UK.

Stanley P. Cauvain and Linda S. Young (2006) Baked products: Science, technology and practice. Blackwell Pub.

S.V. Patankar and D.B. Spalding. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows. International Journal of Heat and Mass Transfer 15, (1972) 1787–1806. Όπως αναφέρεται από τον Da-Wen Sun (2007).

Tomas Norton and Da-Wen Sun. Computational fluid dynamics (CFD) – an effective and efficient design and analysis tool for the food industry: a review. Trends in food science and technology, 17, (2006), 600-620.

V. Yakhot and S.A. Orszag. Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory. Journal of Scientific Computing 1, (1986) 1–51. Όπως αναφέρεται από τον Da-Wen Sun (2007).

Weibiao Zhou and Nantawan Therdtai. Three-Dimensional CFD modeling of a continuous industrial baking process. Editor: Da-Wen Sun (2007) Computational Fluid Dynamics in food processing. CRC Press

Wiggins, C. (1998) Proving, baking and cooling. In: *Technology of Breadmaking* (eds S.P. Cauvain and L.S. Young), pp. 120–48. Blackie Academic & Professional, London. Όπως αναφέρεται από τους Stanley P. Cauvain and Linda S. Young (2006).

W. P. Edwards (2007) The science of bakery products. RSC Pub., Essex UK.

Zanoni B., Pierucci S., & Peri C.. Study of bread baking process. Part II. Mathematical modeling. Journal of Food Engineering, 23 (1994) 321–336. Όπως αναφέρεται από τους Tomas Norton and Da-Wen Sun (2006).

## ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Εγχειρίδιο λειτουργίας του Fluent 6.3.26

Καζάζης Ιωάννης (1981) Τεχνολογία σιτηρών II (Τεχνολογία αρτοσκευασμάτων), Αθήνα

Κ. Σάρδη. Εισαγωγή στην Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (Computational Fluid Dynamics), Πανεπιστημιακές παραδόσεις, 2009, Αθήνα.

Μαρκάτος Ν. & Ασημακόπουλος, 1995. Υπολογιστική Ρευστοδυναμική, Εκδ. Παπασωτηρίου, Αθήνα.

Σ. Γιαννιώτης (2000) Μηχανική τροφίμων, Μέρος 1<sup>ο</sup>: Φαινόμενα μεταφοράς στην μηχανική τροφίμων. Πανεπιστημιακές εκδόσεις ΓΠΑ.

## ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ

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

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

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΙΝΑΚΑΣ 1 : ΘΕΡΜΟΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΑΕΡΑ ΣΕ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΠΙΕΣΗ

| T    | $\rho$               | $c_p$     | $i \cdot 10^7$        | $k \cdot 10^3$ |
|------|----------------------|-----------|-----------------------|----------------|
| (K)  | (kg/m <sup>3</sup> ) | (kJ/kg K) | (N s/m <sup>2</sup> ) | (W/m K)        |
| 250  | 1,3947               | 1,006     | 159,6                 | 22,3           |
| 300  | 1,1614               | 1,007     | 184,6                 | 26,3           |
| 350  | 0,9950               | 1,009     | 208,2                 | 30,0           |
| 400  | 0,8711               | 1,014     | 230,1                 | 33,8           |
| 450  | 0,7740               | 1,021     | 250,7                 | 37,3           |
| 500  | 0,6964               | 1,030     | 270,1                 | 40,7           |
| 550  | 0,6329               | 1,040     | 288,4                 | 43,9           |
| 600  | 0,5804               | 1,051     | 305,8                 | 46,9           |
| 650  | 0,5356               | 1,063     | 322,5                 | 49,7           |
| 700  | 0,4975               | 1,075     | 338,8                 | 52,4           |
| 750  | 0,4643               | 1,087     | 354,6                 | 54,9           |
| 800  | 0,4354               | 1,099     | 369,8                 | 57,3           |
| 850  | 0,4097               | 1,110     | 384,3                 | 59,6           |
| 900  | 0,3868               | 1,121     | 398,1                 | 62,0           |
| 950  | 0,3666               | 1,131     | 411,3                 | 64,3           |
| 1000 | 0,3482               | 1,141     | 424,4                 | 66,7           |
| 1100 | 0,3166               | 1,159     | 449,0                 | 71,5           |

Πηγή: Handbook of thermodynamic tables and charts, Raznjevic, K. 1978. Hemisphere Pub. Corp. Washington, DC.

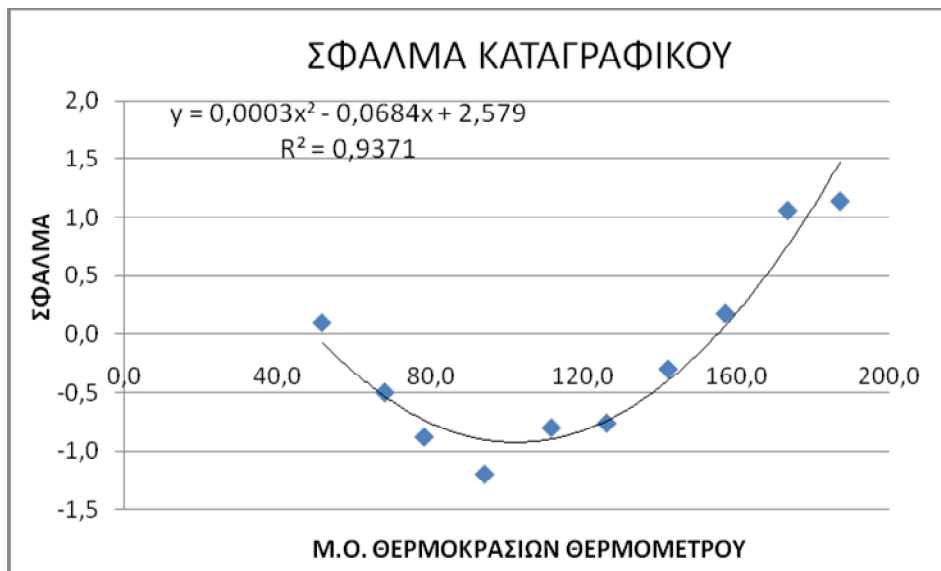
ΠΙΝΑΚΑΣ 2 : ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΘΕΡΜΟΖΕΥΓΩΝ

| ΘΕΡΜΟΜΕΤΡΟ    | ΘΕΡΜΟΖΕΥΓΗ      | ΔΙΑΦΟΡΕΣ<br>(ΘΕΡΜΟΜΕΤΡΟ – ΘΕΡΜΟΖΕΥΓΗ) |
|---------------|-----------------|---------------------------------------|
| 52,2          | 52,3            | -0,1                                  |
| 52,1          | 52              | 0,1                                   |
| 51,8          | 51,7            | 0,1                                   |
| 51,6          | 51,4            | 0,2                                   |
| 51,2          | 50,9            | 0,3                                   |
| M. O. = 51,78 | M.O. ΔΙΑΦΟΡΩΝ = | 0,1                                   |

Στον παραπάνω πίνακα φαίνεται ένα παράδειγμα καταγραφής τιμών θερμοκρασίας. Πέντε μετρήσεις για αυτήν την θερμοκρασία ανά τακτά χρονικά διαστήματα, υπολογίζεται ο μέσος όρος των τιμών θερμοκρασίας που μετρήθηκαν με το θερμόμετρο, υπολογίζονται οι διαφορές τιμών που καταγράφηκαν από το θερμόμετρο και από τα θερμοζεύγη για κάθε επανάληψη και ο μέσος όρος αυτών. Η ίδια διαδικασία έγινε για θερμοκρασίες: 50°C, 70°C, 80°C, 95°C, 110°C, 125°C, 140°C, 155°C, 170°C, 180°C. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι μέσοι όροι των διαφορών από όλες τις μετρήσεις και οι μέσοι όροι των τιμών θερμοκρασίας που καταγράφηκαν από το θερμόμετρο. Από τις τιμές αυτές σχεδιάστηκε το διάγραμμα 1 εκ του οποίου εξήχθη η εξίσωση της γραμμής τάσης. Η εξίσωση αυτή χρησιμοποιήθηκε στην διόρθωση τιμών θερμοκρασίας που καταγράφηκαν από τα θερμοζεύγη κατά την πειραματική μέτρηση θερμοκρασιών αέρα του βιομηχανικού φούρνου.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3 : ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΙΚΟΥ

| Μ.Ο. ΔΙΑΦΟΡΩΝ | Μ.Ο. ΘΕΡΜΟΜΕΤΡΟΥ |
|---------------|------------------|
| 0,1           | 51,8             |
| -0,5          | 68,2             |
| -0,9          | 78,5             |
| -1,2          | 94,3             |
| -0,8          | 111,7            |
| -0,8          | 126,1            |
| -0,3          | 142,2            |
| 0,2           | 157,1            |
| 1,1           | 173,4            |
| 1,1           | 187,1            |



Διάγραμμα 1

ΠΙΝΑΚΑΣ 4 : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΑΕΡΑ ΦΟΥΡΝΟΥ ΜΕ ΤΑ ΘΕΡΜΟΖΕΥΓΗ (ΚΑΤΑΓΡΑΦΙΚΟ)

ΧΡΟΝΟΣ (ΑΝΑ 1 sec)      °C

|             |      |
|-------------|------|
| 12:31:40 ìì | 28,0 |
| 12:31:41 ìì | 28,3 |
| 12:31:42 ìì | 28,3 |
| 12:31:43 ìì | 28,6 |
| 12:31:44 ìì | 29,2 |
| 12:31:45 ìì | 29,2 |
| 12:31:46 ìì | 28,6 |
| 12:31:47 ìì | 29,2 |
| 12:31:48 ìì | 29,8 |
| 12:31:49 ìì | 29,8 |
| 12:31:50 ìì | 30,4 |
| 12:31:51 ìì | 31,3 |

|             |       |
|-------------|-------|
| 12:31:52 ìì | 31,0  |
| 12:31:53 ìì | 31,9  |
| 12:31:54 ìì | 33,9  |
| 12:31:55 ìì | 32,5  |
| 12:31:56 ìì | 33,9  |
| 12:31:57 ìì | 34,5  |
| .           |       |
| .           |       |
| .           |       |
| .           |       |
| 12:45:30 ìì | 126,8 |
| 12:45:31 ìì | 126,8 |
| 12:45:32 ìì | 126,2 |
| 12:45:33 ìì | 124,7 |
| 12:45:34 ìì | 124,4 |
| 12:45:35 ìì | 123,2 |
| 12:45:36 ìì | 123,2 |
| 12:45:37 ìì | 122,3 |
| 12:45:38 ìì | 119,9 |
| 12:45:39 ìì | 119,3 |
| 12:45:40 ìì | 118,1 |
| 12:45:41 ìì | 116,3 |
| 12:45:42 ìì | 114,4 |
| 12:45:43 ìì | 113,5 |
| 12:45:44 ìì | 112,0 |
| 12:45:45 ìì | 111,7 |
| 12:45:46 ìì | 110,5 |
| 12:45:47 ìì | 110,2 |
| 12:45:48 ìì | 109,6 |
| 12:45:49 ìì | 109,0 |
| 12:45:50 ìì | 107,8 |

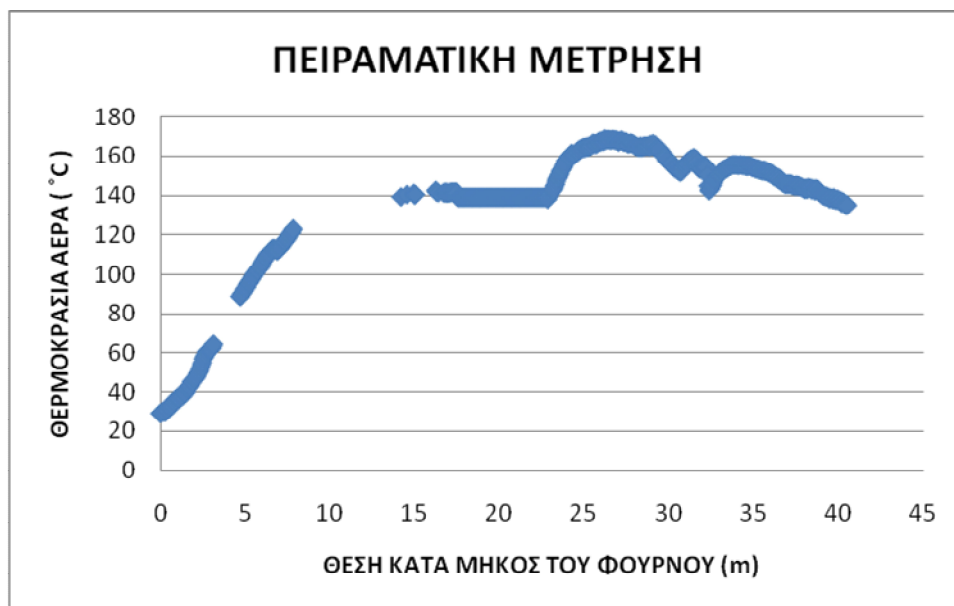
Από το καταγραφικό Omega που χρησιμοποιήθηκε για την λήψη των τιμών θερμοκρασίας μέσα στον φούρνο, πήραμε τις τιμές στην παραπάνω μορφή.

42 m φούρνου το καταγραφικό τα διένυσε σε 480 sec, άρα 0,05m/s.

Ο χρόνος στον παραπάνω πίνακα αντικαταστάθηκε με την απόσταση. Επίσης οι τιμές της θερμοκρασίας διορθώθηκαν με την εξίσωση της γραμμής τάσης που εξήχθη από την βαθμονόμηση των θερμοζευγών ( $y=0,0003x^2-0,0684x+2,579$  (εξίσωση 1) ,  $R^2=0,9371$ ). Άρα, ο πίνακας 4 παίρνει την μορφή του πίνακα 5.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5 : ΤΙΜΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΙΚΟΥ ΔΙΟΡΘΩΜΕΝΕΣ

| m<br>φούρνου         | Υπολογισμός            | T ° C<br>διορθωμένες | Υπολογισμός      |
|----------------------|------------------------|----------------------|------------------|
| 0                    | 0 sec                  | 28,9                 | = γ              |
| 0,05                 | 0 sec +<br>0,05=A=0,05 | 29,2                 | εξίσωσης 1       |
| 0,1                  | A+0,05=<br>B=0,1       | 29,2                 | γραμμής<br>τάσης |
| 0,15                 | B+0,05=Γ=<br>0,15      | 29,5                 | όπου x η         |
| 0,2                  | Κλπ                    | 30,0                 | θερμοκρασία      |
| 0,25                 | ...                    | 30,0                 | καταγραφικού     |
| 0,3                  |                        | 29,5                 | π.χ. για τα      |
| 0,35                 |                        | 30,0                 | 0 sec = 28°C     |
| 0,4                  |                        | 30,6                 | (πίνακας 4)      |
| 0,45                 |                        | 30,6                 |                  |
| Συνέχεια<br>τιμών... |                        |                      |                  |
| 41,7                 |                        | 123,1                |                  |
| 41,75                |                        | 121,9                |                  |
| 41,8                 |                        | 121,9                |                  |
| 41,85                |                        | 121,0                |                  |
| 41,9                 |                        | 118,6                |                  |
| 41,95                |                        | 118,0                |                  |
| 42                   |                        | 116,8                |                  |
| 42,05                |                        | 115,0                |                  |
| 42,1                 |                        | 113,1                |                  |
| 42,15                |                        | 112,2                |                  |
| 42,2                 |                        | 110,7                |                  |
| 42,25                |                        | 110,4                |                  |
| 42,3                 |                        | 109,2                |                  |
| 42,35                |                        | 108,9                |                  |
| 42,4                 |                        | 108,3                |                  |
| 42,45                |                        | 107,7                |                  |
| 42,5                 |                        | 106,5                |                  |



Διάγραμμα 2

## ΣΗΜΕΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ

ΓΙΑ ΣΤΑΔΙΑ 3.Γ.β.ι , ii και 4.ι,ii



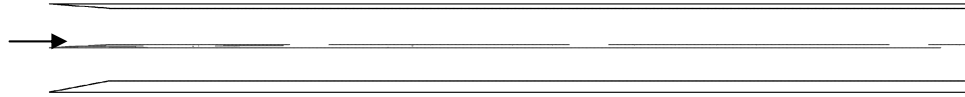
**Σημείο ελέγχου A1:** Κάτοψη του θαλάμου όπου φαίνεται η διαμήκης γραμμή ακριβώς στο κέντρο του φούρνου, ως προς τους άξονες y και z.



**Σημείο ελέγχου A1:** Το ίδιο βλέποντάς το ανάμεσα στην οροφή και τον πάτο του φούρνου.



**Σημείο ελέγχου A2:** Κάτοψη του θαλάμου όπου φαίνεται η εγκάρσια γραμμή στην μέση του φούρνου, ως προς τους άξονες x και y.

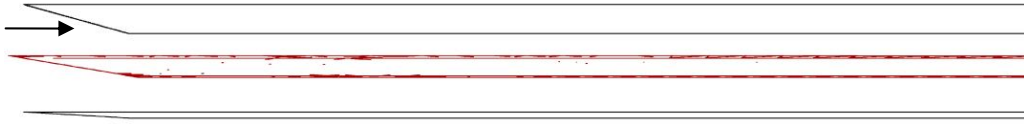


**Σημείο ελέγχου A3:** Τμήμα του θαλάμου όπου φαίνεται το οριζόντιο διάμηκες επίπεδο ανάμεσα στην οροφή και τον πάτο του φούρνου.

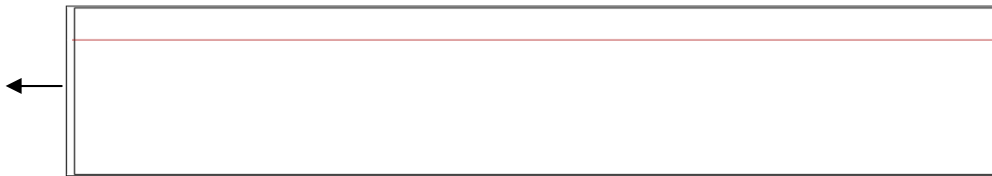
| Πίνακας 6: Συντεταγμένες σημείων ελέγχου των 2 πρώτων σταδίων προσομοίωσης (m) |           |           |           |
|--|-----------|-----------|-----------|
| <b>ΣΗΜΕΙΟ ΕΛΕΓΧΟΥ A1</b>   | X1 = 0    | X2 = 11   |           |
|  | Y1 = 0,09 | Y2 = 0,09 |           |
|  | Z1 = 0,45 | Z2 = 0,45 |           |
| <b>ΣΗΜΕΙΟ ΕΛΕΓΧΟΥ A2</b>   | X1 = 5,5  | X2 = 5,5  |           |
|  | Y1 = 0,09 | Y2 = 0,09 |           |
|  | Z1 = 0    | Z2 = 0,9  |           |
| <b>ΣΗΜΕΙΟ ΕΛΕΓΧΟΥ A3</b>   | X1 = 0    | X2 = 0    | X3 = 11   |
|  | Y1 = 0,09 | Y2 = 0,09 | Y3 = 0,09 |
|  | Z1 = 0    | Z2 = 0,9  | Z3 = 0,9  |



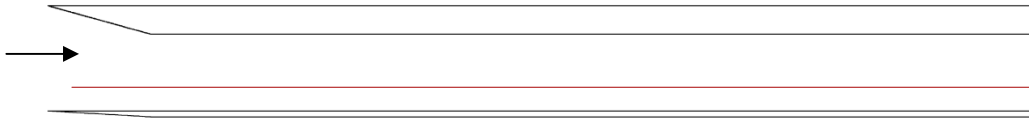
ΓΙΑ ΣΤΑΔΙΑ 3.Γ.β.iii – viii και 4.iii - viii



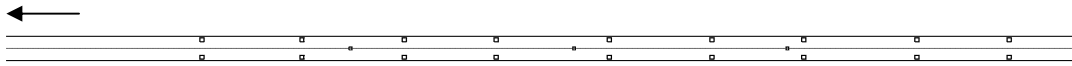
Σημείο ελέγχου 1: Οριζόντιο επίπεδο στην μέση του φούρνου ως προς τον άξονα  $y$ . Φαίνεται ανάμεσα στην οροφή και τον πάτο του φούρνου.



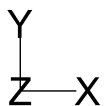
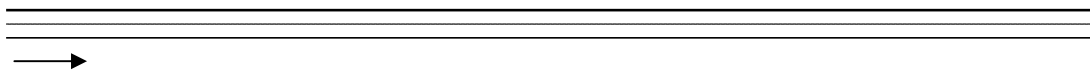
Σημείο ελέγχου 2: Κάτοψη του φούρνου όπου φαίνεται η γραμμή της θέσης του θερμοζεύγους όταν έγινε η πειραματική μέτρηση της θερμοκρασίας. Άρα η γραμμή αυτή αποτελεί σημείο ελέγχου της θερμοκρασίας από τις λύσεις του Fluent σε σύγκριση με τις πειραματικές.



**Σημείο ελέγχου 2:** Η ίδια γραμμή με την παραπάνω όπως φαίνεται ανάμεσα στην οροφή και τον πάτο του φούρνου.



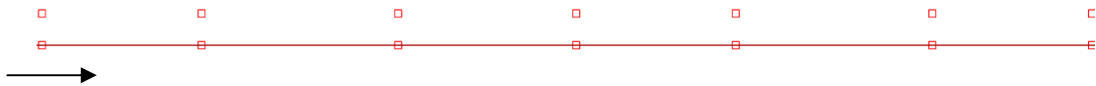
**Σημείο ελέγχου 3:** Κάτοψη του φούρνου όπου φαίνεται η διαμήκης γραμμή στην μέση του φούρνου ως προς τους άξονες y και z.



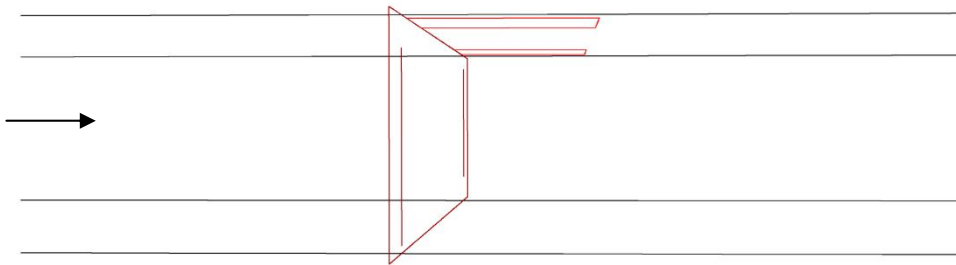
**Σημείο ελέγχου 3:** Ίδια γραμμή με την παραπάνω αλλά φαίνεται ανάμεσα στην οροφή και τον πάτο του φούρνου.



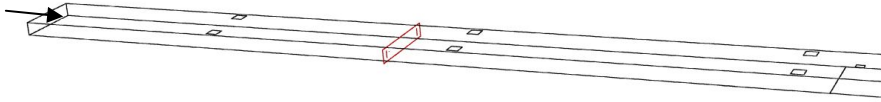
**Σημείο ελέγχου 4:** Κάτοψη του φούρνου όπου φαίνεται η εγκάρσια γραμμή στην μέση του, ως προς τους άξονες x,y.



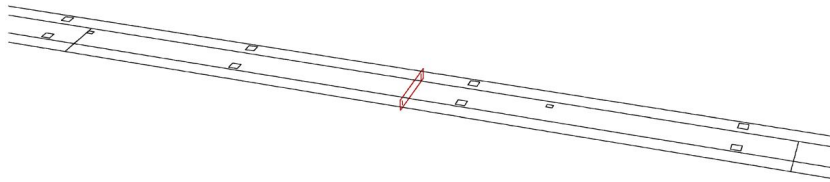
**Σημείο ελέγχου 5:** Κάτοψη της οροφής του φούρνου όπου φαίνονται μόνο οι έξοδοι υγρασίας και το διάμηκες επίπεδο που περνά από την μέση των οπών της μιας πλευράς και εκτείνεται σε όλο το μήκος του φούρνου και σε όλο το ύψος του.



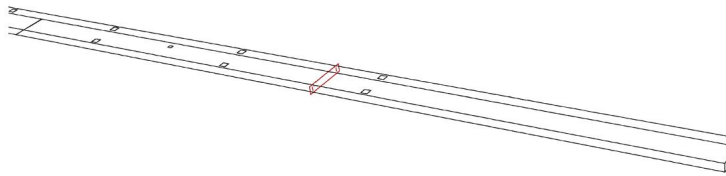
**Σημείο ελέγχου 6:** Τμήμα της πρόσοψης του φούρνου (κοιτώντας τον δηλαδή από το πλάι) όπου φαίνεται το εγκάρσιο επίπεδο που εκτείνεται σε όλο το ύψος του φούρνου, σε όλο το πλάτος του και βρίσκεται στην θέση των 5<sup>ων</sup> εξόδων υγρασίας.



**Σημείο ελέγχου 7:** Όψη του φούρνου ισομετρικά όπου φαίνεται το εγκάρσιο επίπεδο στην μέση του 1<sup>ου</sup> θαλάμου του φούρνου. Η μαύρη γραμμή στον πάτο του φούρνου, που φαίνεται στην δεξιά άκρη της εικόνας, οριοθετεί τον 1<sup>ο</sup> θάλαμο.



**Σημείο ελέγχου 8:** Ίδια όψη του φούρνου για το επίπεδο στην μέση του 2<sup>ου</sup> θαλάμου. Οι δύο μαύρες γραμμές στον πάτο του φούρνου, που φαίνονται στα δύο άκρα της εικόνας, οριοθετούν τον 2<sup>ο</sup> θάλαμο.



Grid

Apr 26, 2010  
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, ske)

**Σημείο ελέγχου 9:** Ίδια όψη του φούρνου για το επίπεδο 3<sup>ου</sup> θαλάμου. Η μαύρη γραμμή στον πάτο του φούρνου, που φαίνεται στην αριστερή άκρη της εικόνας, οριοθετεί την αρχή του 3<sup>ου</sup> θαλάμου.

**Πίνακας 7: Συντεταγμένες σημείων ελέγχου των σταδίων προσομοίωσης iii – viii (m)**

|                         |            |            |            |
|-------------------------|------------|------------|------------|
| <b>ΣΗΜΕΙΟ ΕΛΕΓΧΟΥ 1</b> | X1 = 0     | X2 = 0     | X3 = 40,9  |
|                         | Y1 = 0,09  | Y2 = 0,09  | Y3 = 0,09  |
|                         | Z1 = 0     | Z2 = 0,9   | Z3 = 0     |
| <b>ΣΗΜΕΙΟ ΕΛΕΓΧΟΥ 2</b> | X1 = 0     | X2 = 40,9  |            |
|                         | Y1 = 0,045 | Y2 = 0,045 |            |
|                         | Z1 = 0,725 | Z2 = 0,725 |            |
| <b>ΣΗΜΕΙΟ ΕΛΕΓΧΟΥ 3</b> | X1 = 0     | X2 = 40,9  |            |
|                         | Y1 = 0,09  | Y2 = 0,09  |            |
|                         | Z1 = 0,45  | Z2 = 0,45  |            |
| <b>ΣΗΜΕΙΟ ΕΛΕΓΧΟΥ 4</b> | X1 = 20,45 | X2 = 20,45 |            |
|                         | Y1 = 0,09  | Y2 = 0,09  |            |
|                         | Z1 = -0,1  | Z2 = 1     |            |
| <b>ΣΗΜΕΙΟ ΕΛΕΓΧΟΥ 5</b> | X1 = 0     | X2 = 0     | X3 = 40,9  |
|                         | Y1 = 0     | Y2 = 0,18  | Y3 = 0,18  |
|                         | Z1 = 0,775 | Z2 = 0,775 | Z3 = 0,775 |
| <b>ΣΗΜΕΙΟ ΕΛΕΓΧΟΥ 6</b> | X1 = 18,45 | X2 = 18,45 | X3 = 18,45 |
|                         | Y1 = 0     | Y2 = 0,18  | Y3 = 0,18  |
|                         | Z1 = -0,1  | Z2 = -0,1  | Z3 = 1     |
| <b>ΣΗΜΕΙΟ ΕΛΕΓΧΟΥ 7</b> | X1 = 5,5   | X2 = 5,5   | X3 = 5,5   |
|                         | Y1 = 0     | Y2 = 0     | Y3 = 0,18  |
|                         | Z1 = -0,1  | Z2 = 1     | Z3 = -0,1  |
| <b>ΣΗΜΕΙΟ ΕΛΕΓΧΟΥ 8</b> | X1 = 17    | X2 = 17    | X3 = 17    |
|                         | Y1 = 0     | Y2 = 0,18  | Y3 = 0     |
|                         | Z1 = -0,1  | Z2 = 1     | Z3 = -0,1  |
| <b>ΣΗΜΕΙΟ ΕΛΕΓΧΟΥ 9</b> | X1 = 31,95 | X2 = 31,95 | X3 = 31,95 |
|                         | Y1 = 0     | Y2 = 0,18  | Y3 = 0     |
|                         | Z1 = -0,1  | Z2 = 1     | Z3 = -0,1  |