



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

**Σχεδιασμός θερμαινόμενου θαλάμου μεταφοράς φαγητού  
τροφοδοτούμενου από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

**Παύλου – Γουλιέλμου Μερκούρη**

**Επιβλέπων:** Βασίλειος Σπιτάς

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2019



## Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι ο σχεδιασμός ενός προϊόντος, επαγγελματικής κυρίως χρήσης, με εφαρμογή στον κλάδο του επισιτισμού.

Πρόκειται για το σχεδιασμό θερμοθαλάμου μεταφοράς ζεστών τροφίμων για δίκυκλο κυρίως όχημα με σύστημα αναπλήρωσης των θερμικών απωλειών που υφίστανται κατά τη λειτουργία του.

Σε όλα τα συστήματα μεταφοράς τροφίμων, λαμβάνει χώρα το φυσικό φαινόμενο μεταφοράς θερμότητας, είτε πρόκειται για συστήματα ψυχόμενων χώρων είτε για συστήματα θερμαινόμενων χώρων. Το φαινόμενο αυτό σχεδόν πάντοτε επιδρά αρνητικά στη διαδικασία μεταφοράς των προϊόντων, διότι μεταβάλλεται το επιθυμητό θερμοκρασιακό πεδίο στον όγκο ελέγχου που περιβάλλει τα μεταφερόμενα προϊόντα. Αν θεωρηθεί το προϊόν μαύρο κουτί ( black box ), το οποίο βρίσκεται σε κάποιο σημείο του θερμοθαλάμου κι υποτεθεί ότι στο εσωτερικό του βρίσκονται ζεστά τρόφιμα, η θερμότητα ρέει από το μαύρο κουτί προς το περιβάλλον του δηλαδή την αέρια μάζα που βρίσκεται στο εσωτερικό του θερμοθαλάμου. Ακόμη κι αν υποτεθεί ότι τα τοιχώματα του θερμοθαλάμου είναι αδιαβατικά, επιτυγχάνεται δηλαδή τέλεια μόνωση στις επιφάνειες του θερμοθαλάμου, η ροή της θερμότητας από τα τρόφιμα προς τον εσωτερικό χώρο του θερμοθαλάμου έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της επιθυμητής θερμοκρασίας τους καθώς επίσης και τη δημιουργία συμπυκνωμάτων στο εσωτερικό της συσκευασίας των τροφίμων και συχνά και στο εσωτερικό του θερμοθαλάμου. Επίσης κατά τη διαδικασία παραλαβής των τροφίμων, η θύρα του θερμοθαλάμου ανοίγει πλήρως με αποτέλεσμα να καταργείται πλήρως η μόνωση σε αυτό το επίπεδο .

Κύριος στόχος του σχεδιασμού είναι η εξάλειψη των συνεπειών που συνοδεύουν το φαινόμενο μεταφοράς θερμότητας στα ζεστά τρόφιμα εντός του θερμοθαλάμου, μέσω ενός κυκλώματος αντιστάσεων οι οποίες προσαρμόζονται στις επιφάνειες έδρασης των τροφίμων του θερμοθαλάμου με σκοπό να παρέχεται η απαιτούμενη θερμική ενέργεια στα ζεστά τρόφιμα ώστε η θερμοκρασία τους να μην μεταβάλλεται λόγω μεταφοράς θερμότητας.

Η απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύς των αντιστάσεων αυτών παρέχεται άμεσα από το πρωτοβάθμιο σύστημα ενέργειας το οποίο αποτελείται από έναν συσσωρευτή και έμμεσα από το δευτεροβάθμιο σύστημα ενέργειας, το οποίο αποτελείται από δύο ανεμογεννήτριες τύπου «crossflow fan» στις οποίες προσπίπτει η ροή που επιταχύνεται στους συγκλίνοντες αεραγωγούς του θερμοθαλάμου.



## Abstract

The subject of the current master dissertation is the designing of a professional product, particularly dedicated for use in the food industry. The projected solution refers to an innovative hot heated food delivery box comprised of a heat loss replenishment system, mounted mostly on either a scooter or a tricycle.

Until now, it has been common place the natural phenomenon of heat loss occurring in all food delivery systems - in cooling and heated food delivery systems. This phenomenon almost always has a negative effect on the process of transportation of products (e.g. delivery of freshly cooked food), due to the change of the ideal temperature level inside the delivery system which surrounds the transported products.

The main purpose of this project is to eliminate the negative effects into the delivery heat chamber caused by the natural phenomenon of heat loss on the freshly cooked hot foods, through the use of a resistor circuit which is adapted and placed on to the heat chamber's shelves in order to provide the required thermal energy on the hot freshly cooked foods during the delivery time, keeping them at an optimum temperature level. The required electrical power of these resistors is provided directly by a primary energy system which consists of a battery and indirectly by the secondary energy system, which consists of two crossflow fan wind turbines where diffuses the flow accelerating into its convergent air ducts.



## Ευχαριστίες

Με την εκπόνηση της διπλωματικής αυτής εργασίας φτάνει στο τέλος του ένα υπέροχο ταξίδι προπτυχιακών σπουδών στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους εξαιρετικούς καθηγητές που είχα την τιμή να παρακολουθήσω τη διδασκαλία τους καθώς επίσης και το εξάίρετο διδακτικό προσωπικό, οι οποίοι συνετέλεσαν στην καλλιέργεια του συνόλου της προσωπικότητας και του πνεύματος μου.

Θα ήθελα ιδιαιτέρως να εκφράσω τις απέραντες ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής αυτής εργασίας, τον κύριο Βασίλειο Σπιτά. Η εμπειρία που αποκόμισα τόσο από τη διδασκαλία του στα προπτυχιακά μαθήματα όσο κι από την καθοδήγηση του στη διπλωματική εργασία είναι ανεκτίμητης αξίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω για τη σημαντικότερη συνεισφορά τους, την ομάδα του εργαστηρίου «Στοιχείων Μηχανών» του Ε.Μ.Π. η οποία υπό την καθοδήγηση του κυρίου Βασίλειου Σπιτά εργάζεται αδιακόπως και με αμέριστο μεράκι προς την παραγωγή νέας γνώσης και τεχνολογίας.

## Περιεχόμενα

Περίληψη.....	3
Abstract .....	5
Κεφάλαιο 1 .....	10
1.1 Η διαδικασία διανομής φαγητού στην εγχώρια και παγκόσμια αγορά. ....	10
1.2 Οικονομικά στοιχεία της αγοράς διανομής φαγητού. ....	11
1.3 Ανάλυση υφιστάμενων μεθόδων διανομής φαγητού .....	13
Κεφάλαιο 2. Προδιαγραφές θερμοθαλάμου .....	16
2.1 Καθορισμός προδιαγραφών προκαταρκτικής διαστασιολόγησης θερμοθαλάμου. ...	16
2.1.1 Ανάλυση φάσεων λειτουργίας θερμοθαλάμου. ....	16
2.1.2 Καθορισμός χρονικού διαστήματος κύκλου αποστολής παραγγελίας. ....	17
2.1.3 Καθορισμός εξωτερικών διαστάσεων. ....	19
2.1.4 Κατάρτιση βασικών προδιαγραφών σχεδιασμού .....	19
2.2 Επιλογή υλικών θερμοθαλάμου. ....	24
2.2.1 Υλικά κυρίως σώματος θερμοθαλάμου. ....	24
2.2.2 Θερμομονωτικά υλικά εσωτερικών επιφανειών θερμοθαλάμου. ....	24
2.2.3 Υπολογισμός θερμοπερατότητας (U- Value) μόνωσης θερμοθαλάμου .....	25
Κεφάλαιο 3. Μελέτη μεταφοράς θερμότητας στο θερμοθάλαμο .....	27
3.1 Περιγραφή του φαινομένου στον όγκο ελέγχου που περιβάλλει το θερμοθάλαμο. ..	27
3.2 Υπολογισμός συντελεστών μετάδοσης θερμότητας σε κάθε στοιχείο του θερμοθαλάμου. ....	28
3.3 Επίλυση θερμοκρασιακού πεδίου στο θερμοθάλαμο .....	29
3.3.1 Σενάριο Α : Υπολογισμός θερμοκρασιακού πεδίου στο θερμοθάλαμο χωρίς αντιστάσεις .....	29



3.3.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων σεναρίου A. ....	33
3.4 Σενάριο B : Υπολογισμός θερμοκρασιακού πεδίου στο θερμοθάλαμο κατόπιν της εισαγωγής των αντιστάσεων. ....	36
3.4.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων σεναρίου B. ....	42
3.4.2 Υπολογισμός ελάχιστης θερμοκρασίας περιβάλλοντος για την οποία απαιτείται η ενεργοποίηση των αντιστάσεων. ....	46
Κεφάλαιο 4. Συστήματα αναπλήρωσης θερμικών απωλειών. ....	48
4.1 Πρωτοβάθμιο σύστημα αναπλήρωσης θερμικών απωλειών (συσσωρευτής).....	49
4.2 Δευτεροβάθμιο σύστημα αναπλήρωσης θερμικών απωλειών/cross flow turbine. 54	
4.2.1 Υπολογισμός ισχύος στροβίλων. ....	55
4.2.2 Σχεδιασμός αεραγωγών (intakes) δευτεροβάθμιου συστήματος .....	57
Βιβλιογραφία.....	66
Ιστότοποι .....	66

## Κεφάλαιο 1

### 1.1 Η διαδικασία διανομής φαγητού στην εγχώρια και παγκόσμια αγορά.

Στην πλειοψηφία των καταστημάτων επισιτιστικού ενδιαφέροντος, στην Ελλάδα, παρέχεται η δυνατότητα διανομής των προϊόντων τους σε σημεία που βρίσκονται στην ευρύτερη περιοχή της έδρας του καταστήματος. Η διανομή των προϊόντων αυτών πραγματοποιείται, σχεδόν κατά κανόνα, με δίκυκλα μηχανοκίνητα οχήματα, στα οποία προσαρμόζεται στο οπίσθιο τμήμα τους ένα θερμικά μονωμένο κυτίο (thermobox / delivery box). Στο κυτίο αυτό τοποθετούνται τα προϊόντα είτε με την εξωτερική συσκευασία τους (σακούλα), είτε σε κάποια ισοθερμική τσάντα. Σε χώρες του εξωτερικού η μεταφορά των προϊόντων πραγματοποιείται στην πλειοψηφία με δίκυκλα μηχανοκίνητα οχήματα ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις, στις Ασιατικές κυρίως χώρες, η μεταφορά μπορεί να γίνεται και με τρίκυκλο ή και όχημα τύπου βαν. Επίσης υπάρχει κι ένα μικρό ποσοστό στο οποίο η διανομή πραγματοποιείται με ποδήλατο.

Τα κυτία μεταφοράς των προϊόντων κατασκευάζονται από πολυεστέρα ή αλουμίνιο. Για την επένδυση των επιφανειών συναλλαγής θερμότητας επιλέγεται ένα από τα τρία θερμομονωτικά υλικά, αφρώδες πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC), πολυουρεθανική (PUR) μόνωση αφρού και πολυεστερική αφρώδης μόνωση.

Τα προς διανομή προϊόντα τοποθετούνται είτε απευθείας στο εσωτερικό του θερμοθαλάμου (Εικόνα 1) είτε σε θερμικά μονωμένη τσάντα κι εν συνεχεία στο θερμοθάλαμο (Εικόνα 2).



**Εικόνα 1.** Τοποθέτηση προϊόντων απευθείας στο κούτι.



**Εικόνα 2.** Τοποθέτηση προϊόντων σε ισοθερμική τσάντα και κούτι.

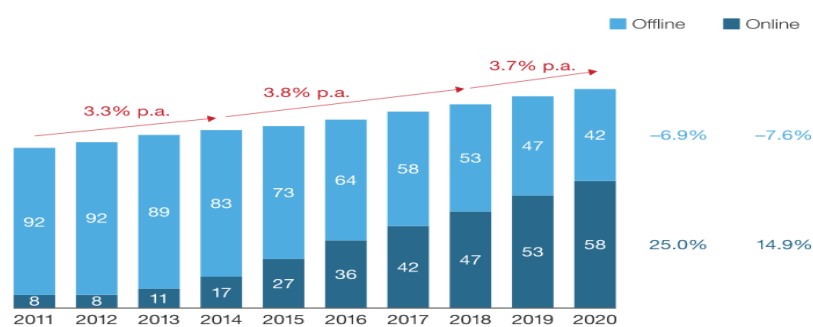
## 1.2 Οικονομικά στοιχεία της αγοράς διανομής φαγητού.

Τα οικονομικά στοιχεία για τη διανομή φαγητού στην εγχώρια και παγκόσμια αγορά προκύπτουν από στατιστικές μελέτες στον κλάδο του επισιτισμού και του ηλεκτρονικού εμπορίου. Σύμφωνα με τις μελέτες αυτές παρουσιάζεται ο αριθμός των παραγγελιοληψιών και μέσω αυτού εκτιμάται το οικονομικό μέγεθος της αντίστοιχης αγοράς. Εν συνεχεία διερευνάται η ύπαρξη εταιρειών αμιγούς δραστηριότητας στον κλάδο της διανομής φαγητού, δηλαδή εταιρειών που διαθέτουν στόλο επαγγελματικών οχημάτων κι αναλαμβάνουν αποκλειστικά και μόνο τη διανομή των προϊόντων. Επίσης μελετώνται οι τάσεις/προβλέψεις για το μέλλον αυτής της αγοράς.

Στον ελληνικό χώρο ο κλάδος της διανομής έτοιμου φαγητού διεκπεραιώνει παραγγελίες που πραγματοποιούνται είτε τηλεφωνικώς είτε μέσω online πλατφορμών. Οι παραγγελίες που πραγματοποιούνται μέσω online πλατφορμών κι οι οποίες αντιστοιχούν τουλάχιστον στο 60 % των συνολικών παραγγελιών, εκτιμάται ότι θα φτάσουν τα 400 εκατομμύρια Ευρώ (2018-2019). Η παραγγελιοληψία που πραγματοποιείται μέσω τηλεφώνου, κι η οποία αντιστοιχεί σε ποσοστό 40% των συνολικών παραγγελιών, παρουσιάζει μια συνεχή πτωτική τάση μεταπίπτοντας στις online πατφόρμες ενώ το αντίστοιχο οικονομικό μέγεθος της εκτιμάται στα 100 εκατομμύρια ευρώ ετησίως. Ειδικότερα για το χώρο του online delivery, η αγορά είναι

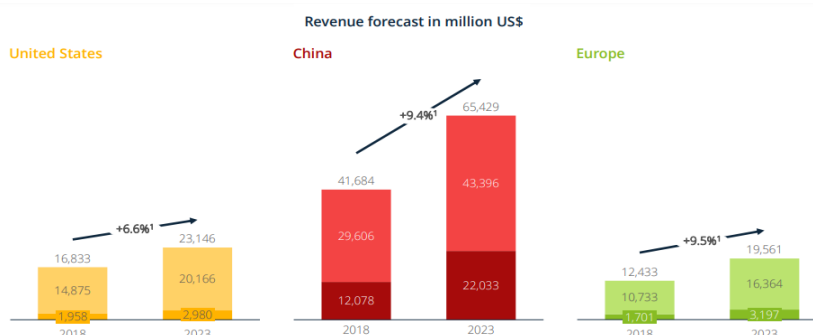
ολιγοπωλιακή και δραστηριοποιούνται δύο εταιρείες, μια γερμανικών συμφερόντων με μερίδιο 90% επί των εσόδων και μια ελληνική με έδρα την Πάτρα. Γενικότερα παρατηρείται μεγάλη κινητικότητα στη συγκεκριμένη αγορά καθώς μεταβάλλεται η ισορροπία μεταξύ online και τηλεφωνικών παραγγελιών, προς την κατεύθυνση των online. Πρόσφατα, το 2018, εισήλθε στην ελληνική αγορά και μια φιλανδική startup εταιρεία (Wolt) η οποία έχει παγκόσμια παρουσία και δραστηριοποιείται αποκλειστικά και μόνο στη διανομή φαγητού. Διαθέτει το δικό της στόλο οχημάτων κι αναλαμβάνει αποκλειστικά τη μεταφορά των προϊόντων για λογαριασμό των συνεργαζόμενων εστιατορίων. Έχει ρυθμούς ανάπτυξης της τάξεως του 200% ενώ ο κύκλος εργασιών της για το 2018 ήταν 28,8 εκατ. Ευρώ.

Η ευρωπαϊκή αγορά διανομής φαγητού παρουσιάζει ετήσιους ρυθμούς ανάπτυξης 3,5% (McKinsey & Company, Διάγραμμα 1) ενώ η παγκόσμια αγορά αγγίζει τα 83 δις. δολάρια κι εκτιμάται ότι μέχρι το 2023 θα φτάσει στα 180 δεκατομμύρια δολάρια (Statista Digital Market Outlook, Διάγραμμα 2).



McKinsey&Company

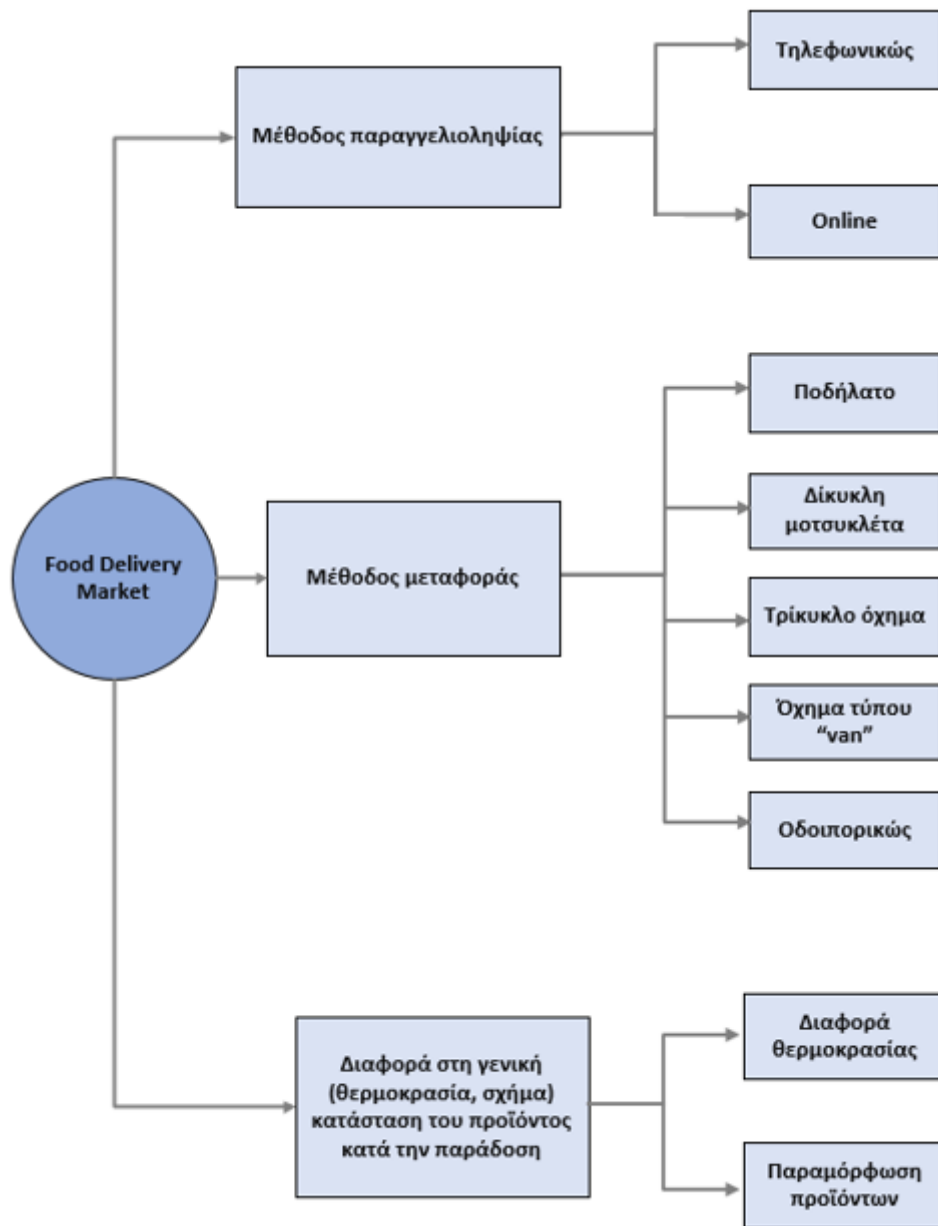
**Διάγραμμα 1.** Ρυθμός ανάπτυξης της αγοράς διανομής φαγητού σε ευρωπαϊκές χώρες. (Πηγή: McKinsey & Company).



**Διάγραμμα 2.** Εκτίμηση εσόδων για την παγκόσμια αγορά διανομής φαγητού μέχρι το έτος 2023. (Πηγή : Statista Digital Market Outlook)

### 1.3 Ανάλυση υφιστάμενων μεθόδων διανομής φαγητού

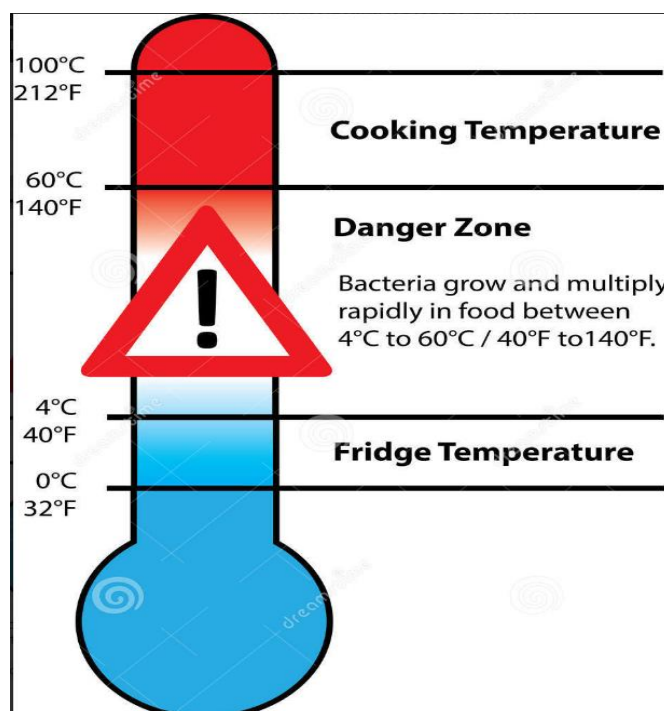
Προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η αγορά της διανομής φαγητού στο πεδίο της μεταφοράς των διανεμόμενων προϊόντων, προκύπτουν τρεις βασικές μεταβλητές. Η μέθοδος παραγγελιοληψίας, η μέθοδος μεταφοράς των προϊόντων κι η διαφορά στη θερμοκρασία και το σχήμα (λ.χ. συμπιεσμένα τρόφιμα λόγω κακής τοποθέτησης) δηλαδή την εν γένει κατάσταση του προϊόντος κατά την παράδοση (Διάγραμμα 3).



**Διάγραμμα 3.** Παρουσίαση των μεταβλητών βελτιστοποίησης στην αγορά της διανομής φαγητού.

Ο θερμοθάλαμος με αυτόνομο σύστημα αναπλήρωσης θερμικών απωλειών σχεδιάζεται έτσι ώστε η μεταβλητή «διαφορά στη γενική κατάσταση του προϊόντος κατά την παράδοση» να σταθεροποιηθεί στη βέλτιστη τιμή για την αντίστοιχη αντικειμενική συνάρτηση.

Σε ό,τι αφορά τη θερμοκρασία συντήρησης των προϊόντων, υπάρχουν ειδικοί κανονισμοί που πρέπει να τηρούνται προκειμένου τα τρόφιμα να είναι ασφαλή προς κατανάλωση. Σύμφωνα με τον ενιαίο φορέα ελέγχου τροφίμων (Ε.Φ.Ε.Τ.) ζεστά τρόφιμα τα οποία πρόκειται να καταναλωθούν σε εύρος δύο ωρών, θα πρέπει να διατηρούνται σε θερμοκρασίες τουλάχιστον 65 °C ενώ το αντίστοιχο θερμοκρασιακό όριο στην Αμερική και την Ευρώπη είναι 60 °C (Εικόνα 3). Υπάρχει ένα θερμοκρασιακό εύρος μεταξύ 5°C και 60 °C (5 °C έως 65 °C στην Ευρώπη και την Αμερική) το οποίο ονομάζεται «ζώνη κινδύνου» και στο οποίο ευνοείται η ανάπτυξη των βακτηρίων *Staphylococcus*, *Salmonella Enteritidis*, *Escherichia coli* και *Campylobacter*. Τα βακτήρια αυτά όταν βρίσκονται σε τρόφιμα εντός θερμοκρασιακής ζώνης κινδύνου, πολλαπλασιάζονται με χρόνο διπλασιασμού είκοσι λεπτά με εξαιρετικά δυσχερείς συνέπειες στην υγεία του καταναλωτή διότι μπορούν να προκαλέσουν ισχυρές τροφικές δηλητηριάσεις, απειλώντας ακόμη και την ανθρώπινη ζωή . Είναι καταφανές λοιπόν ότι η ελάχιστη θερμοκρασία σε κάθε σημείο στο εσωτερικό ενός θερμοθαλάμου πρέπει να είναι τουλάχιστον 60 °C.



**Εικόνα 3.** Επικίνδυνη θερμοκρασιακή ζώνη (Πηγή: United States Department of Agriculture)

Ένας άλλος παράγοντας ο οποίος επηρεάζει την ποιότητα των ζεστών τροφίμων εντός συσκευασίας, είναι η δημιουργία συμπυκνωμάτων στις εσωτερικές επιφάνειες της συσκευασίας τα οποία έχουν ως αποτέλεσμα την αλλοίωση των τροφίμων. Η εμφάνιση συμπυκνωμάτων εννοείται στις βίαιες θερμοκρασιακές αλλαγές, για παράδειγμα τη στιγμή της τοποθέτησης ενός ζεστού τροφίμου σε μία συσκευασία που βρίσκεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος χώρου. Στην περίπτωση που η συσκευασία διαθέτει οπές διαφυγής υδρατμών (επαρκούς μεγέθους) κι είναι τοποθετημένη σε ένα κυτίο μεταφοράς, το φαινόμενο εξελίσσεται και στο εσωτερικό του κυτίου λειτουργώντας αφενός ευνοϊκά διότι υποβαθμίζεται η ξηρότητα της αέριας μάζας εντός του κυτίου, αφετέρου όμως δημιουργούνται επισφαλείς υγειονομικές συνθήκες στις επιφάνειες του κυτίου στις οποίες και εναποτίθενται τα συμπυκνώματα.

Σε περίπτωση που η συσκευασία δεν διαθέτει οπές διαφυγής ή αν διαθέτει δεν έχουν επαρκές μέγεθος, κάτι που είναι σύνηθες σε συσκευασίες πίτσας, δημιουργείται φιλμ συμπυκνωμάτων στα εσωτερικά τοιχώματα της συσκευασίας επιδρώντας αφενός ευνοϊκά διότι λόγω της υψηλής θερμοχωρητικότητας των συμπυκνωμάτων δημιουργείται περιβάλλον μόνωσης το οποίο ευνοεί τη συντήρηση του ζεστού τροφίμου σε υψηλή θερμοκρασία, αφετέρου όμως προκαλεί υγροποίηση του τροφίμου. Για να αποφευχθούν οι αρνητικές επιδράσεις των συμπυκνωμάτων θα πρέπει η θερμοκρασία του χώρου φιλοξενίας της συσκευασίας να έχει όσο το δυνατόν μικρότερη διαφορά από τη θερμοκρασία του ζεστού τροφίμου ει δυνατόν και της συσκευασίας.

## Κεφάλαιο 2. Προδιαγραφές θερμοθαλάμου

### 2.1 Καθορισμός προδιαγραφών προκαταρκτικής διαστασιολόγησης θερμοθαλάμου.

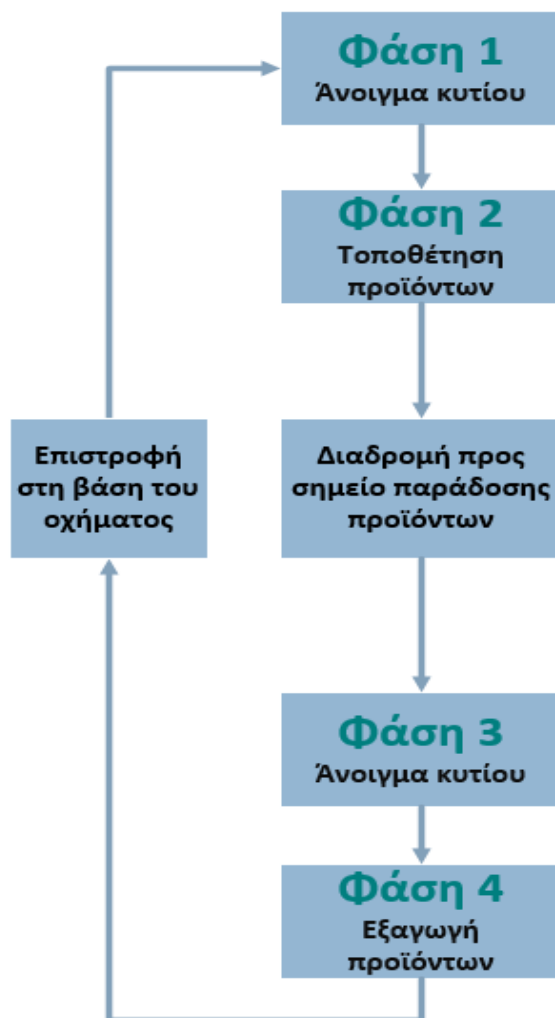
Προκειμένου να μελετηθεί το φαινόμενο της μεταφοράς θερμότητας που λαμβάνει χώρα στο θερμοθάλαμο, απαιτείται να αναλυθούν οι ενέργειες που πραγματοποιεί ένας μέσος διανομέας κατά τη διάρκεια ενός κύκλου παραγγελιών, σε φάσεις (Διάγραμμα 4) και στη συνέχεια να καθοριστεί το χρονικό διάστημα που αντιστοιχεί στην κίνηση του οχήματος για την κάλυψη αυτού του κύκλου. Με τον καθορισμό αυτού του χρονικού διαστήματος είναι δυνατός ο υπολογισμός των απαιτήσεων θερμικής ισχύος για το πρωτοβάθμιο και το δευτεροβάθμιο σύστημα αναπλήρωσης θερμικών απωλειών σε όλες τις φάσεις λειτουργίας τους, δηλαδή τόσο στη μεταβατική όσο και στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Επίσης καθορίζονται οι προδιαγραφές του θερμοθαλάμου οι οποίες αφορούν τις διαστάσεις και τον καθορισμό της θερμοδυναμικής μεταβολής που πραγματοποιεί η αέρια μάζα στο εσωτερικό του θερμοθαλάμου καθώς επίσης και το είδος των μεταφερόμενων προϊόντων.

#### 2.1.1 Ανάλυση φάσεων λειτουργίας θερμοθαλάμου.

Φάσεις λειτουργίας του θερμοθαλάμου είναι το σύνολο των ενεργειών που πραγματοποιεί ο διανομέας κατά τη διάρκεια ενός κύκλου αποστολής παραγγελίας. Ένας κύκλος αποστολής παραγγελίας περιλαμβάνει την τοποθέτηση των προϊόντων στο θερμοθάλαμο, τη μεταφορά τους με δίκυκλο όχημα στο σημείο παράδοσης και την επιστροφή στη βάση του οχήματος. Στη συγκεκριμένη μελέτη το είδος των μεταφερόμενων προϊόντων είναι ζεστά τρόφιμα (πίτσες). Σε κάθε διαδρομή θεωρείται ότι μεταφέρεται μόνο μία συσκευασία ζεστού τροφίμου διαμορφώνοντας με αυτόν τον τρόπο ένα σενάριο στο οποίο είναι αυξημένες οι απαιτήσεις θερμότητας για τη διατήρηση σταθερής υψηλής κι εκτός ζώνης κινδύνου θερμοκρασίας, καθότι η ύπαρξη μόνο μιας συσκευασίας συνεπάγεται μία και μοναδική πηγή θερμότητας στο εσωτερικό του θερμοθαλάμου.

Στο διάγραμμα (4) παρουσιάζονται οι φάσεις λειτουργίας του θερμοθαλάμου. Μεταξύ των φάσεων (2) και (3) όπως επίσης και μετά τη φάση (4) πραγματοποιείται η κίνηση του οχήματος.





**Διάγραμμα 4.** Φάσεις λειτουργίας θερμοθαλάμου.

### 2.1.2 Καθορισμός χρονικού διαστήματος κύκλου αποστολής παραγγελίας.

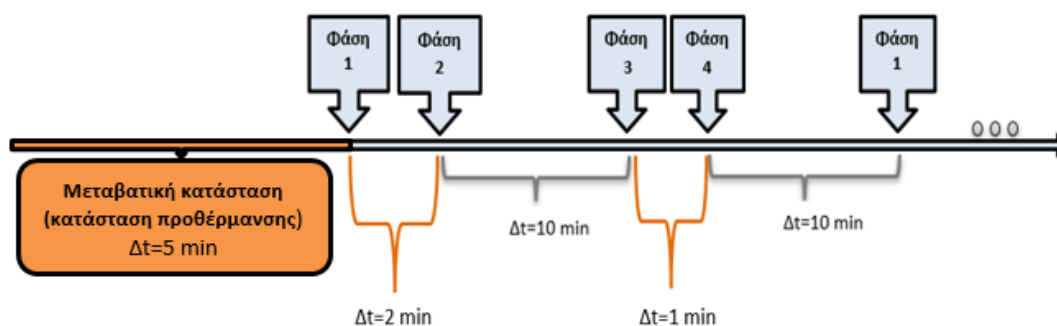
Ο καθορισμός του χρονικού διαστήματος που αντιστοιχεί σε έναν κύκλο αποστολής παραγγελίας είναι μεγάλης σημασίας και σε συνδυασμό με τον ορισμό των αρχικών συνθηκών του προβλήματος είναι δυνατός ο υπολογισμός των απαιτήσεων ενέργειας του συστήματος.

Στα συμβατικά κντία μεταφοράς τροφίμων, πριν τη φάση (1), (Διάγραμμα 4) θεωρείται ότι στο εσωτερικό τους επικρατεί η θερμοκρασία του περιβάλλοντος χώρου κι επομένως αν βρίσκονται σε κλειστό θερμαινόμενο χώρο ( λ.χ. στο εσωτερικό του καταστήματος) έχουν θερμοκρασία της τάξης των 25 °C ενώ αν βρίσκονται σε εξωτερικό χώρο λ.χ. στο χώρο στάθμευσης του οχήματος θεωρείται οτι έχουν θερμοκρασία 0 °C. Δεδομένου ότι ο σχεδιασμός αφορά ένα σύστημα αναπλήρωσης θερμικών απωλειών οι απαιτούμενες παραδοχές σε επίπεδο προδιαγραφών σχεδιασμού για τον υπολογισμό της απαιτούμενης παραγωγής θερμότητας απο το σύστημα,

πραγματοποιούνται προς την κατεύθυνση των δυσμενέστερων θερμοκρασιακών συνθηκών και κατά συνέπεια η επικρατούσα θερμοκρασία στο εσωτερικό ενός συμβατικού θερμοθαλάμου στη φάση (1) τίθεται  $T_i = 0\text{ }^\circ\text{C}$ . Επομένως πριν τη φάση (1) ο θερμοθάλαμος θα πρέπει ήδη να έχει τεθεί σε λειτουργία (μεταβατική κατάσταση/κατάσταση προθέρμανσης) προκειμένου η θερμοκρασία της αέριας μάζας στο εσωτερικό του στην έναρξη του κύκλου αποστολής παραγγελίας να είναι:  $T_i = 70\text{ }^\circ\text{C}$ .

Σύμφωνα με τα παραπάνω πριν τη φάση (1) θεωρείται ότι ο θερμοθάλαμος είναι προθερμασμένος κι ότι το θερμοκρασιακό πεδίο στο εσωτερικό του είναι ομοιογενές θερμοκρασίας  $70\text{ }^\circ\text{C}$ . Το χρονικό διάστημα που αντιστοιχεί στην κίνηση του οχήματος τόσο προς το σημείο παράδοσης της παραγγελίας όσο και κατά την επιστροφή προς τη βάση του οχήματος ορίζεται εμπειρικά και με βάση τις συνθήκες που επικρατούν σε μια βάρδια καταστήματος με μεγάλο όγκο παραγγελιών. Επιλέγεται κατάσταση με μεγάλο όγκο παραγγελιών διότι ενισχύεται το δυσμενέστερο σενάριο σε ό,τι αφορά το θερμοκρασιακό πεδίο στο εσωτερικό του θερμοθαλάμου, καθότι ελαχιστοποιείται ο χρόνος που μεσολαβεί από την παράδοση της προηγούμενης παραγγελίας μέχρι τη λήψη της επόμενης γεγονός που οδηγεί σε μεγιστοποίηση των απαιτήσεων ενέργειας.

Το χρονικό διάστημα που αντιστοιχεί στην κίνηση του οχήματος, προς το σημείο παράδοσης κι από το σημείο παράδοσης προς τη βάση του οχήματος, ορίζεται  $\Delta t|_1 = 10\text{ min}$ . Τα χρονικά διαστήματα που αντιστοιχούν στις φάσεις (1) έως (2) και (3) έως (4), ορίζονται επίσης εμπειρικά ως  $\Delta t|_2 = 2\text{ min}$  και  $\Delta t|_3 = 1\text{ min}$  αντίστοιχα (διάγραμμα 5).



**Διάγραμμα 5.** Χρονικά διαστήματα μεταξύ των φάσεων λειτουργίας.

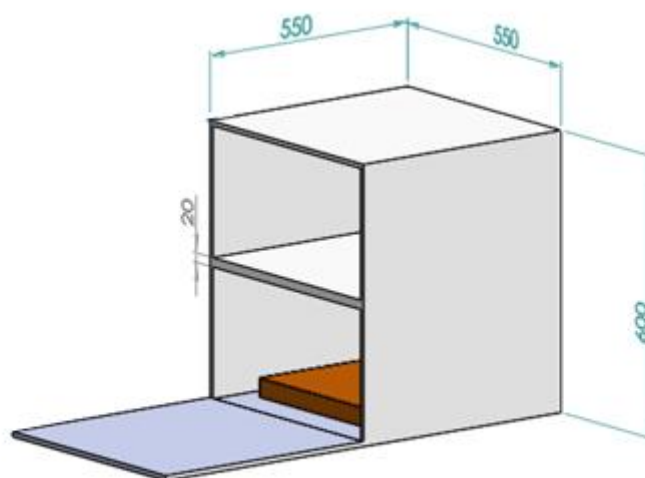
Η διαφορά του ενός λεπτού στα χρονικά διαστήματα των φάσεων (1) έως (2) και (3) έως (4) έγκειται στο γεγονός ότι στη φάση (1) έως (2) απαιτείται κατά τι περισσότερος χρόνος για την ορθή τοποθέτηση/ζύγιση των προϊόντων στο εσωτερικό του θερμοθαλάμου και την προετοιμασία εκκίνησης του οχήματος.

### 2.1.3 Καθορισμός εξωτερικών διαστάσεων.

Ο καθορισμός των εξωτερικών διαστάσεων του θερμοθαλάμου εξαρτάται αφενός από τον όγκο παραγγελιών που σχεδιάζεται να καλύψει κι αφετέρου από τις μέγιστες διαστάσεις των μεταφερόμενων προϊόντων. Το τυπικό μέγεθος για μία συσκευασία ζεστού τροφίμου (πίτσας) μεγάλου μεγέθους είναι:

$$\begin{aligned} \text{Μήκος} & : 500 \text{ mm} \\ \text{Πλάτος} & : 500 \text{ mm} \\ \text{Ύψος} & : 40 \text{ mm} \end{aligned} \quad (1)$$

Οι εσωτερικές διαστάσεις του θερμοθαλάμου πρέπει να είναι μεγαλύτερες κατά κάποιο ποσοστό από το τυπικό μέγεθος της συσκευασίας ώστε να είναι ευχερής η τοποθέτηση των συσκευασιών στο εσωτερικό του, ταυτόχρονα όμως δεν πρέπει να υπερβούν αυτό το ποσοστό διότι αυξάνεται η ποσότητα του αέρα στο εσωτερικό του θερμοθαλάμου γεγονός που επιδρά αρνητικά στη διατήρηση υψηλής θερμοκρασίας στο ζεστό τρόφιμο. Στο εσωτερικό υπάρχουν δύο χώροι υποδοχής τροφίμων κι η πρόσβαση σε αυτούς γίνεται μέσω της θύρας στην πρόοψη του θερμοθαλάμου. Ο άξονας ανάκλησης της θύρας τοποθετείται στο κάτω τμήμα της πρόοψης (Σχήμα 1).



Σχήμα 1. Βασικές διαστάσεις θερμοθαλάμου

### 2.1.4 Κατάρτιση βασικών προδιαγραφών σχεδιασμού

Ο θερμαινόμενος θάλαμος μεταφοράς ζεστών τροφίμων διαθέτει δύο συστήματα αναπλήρωσης θερμικών απωλειών, το πρωτοβάθμιο και το δευτεροβάθμιο. Ο ρόλος των συστημάτων αυτών είναι διττός διότι σχεδιάζονται έτσι ώστε, αφενός να παρέχεται η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια στο σύστημα των αντιστάσεων που ενσωματώνεται

στις επιφάνειες του θερμοθαλάμου κι αφετέρου να αναπληρώνεται το σύνολο των θερμικών απωλειών που υφίστανται κατά την κίνηση του οχήματος.

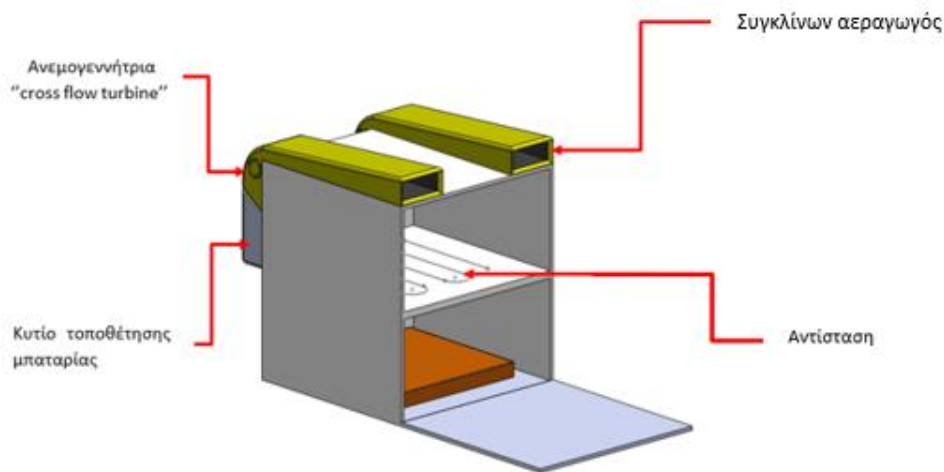
Ειδικότερα το πρωτοβάθμιο σύστημα αποτελείται από ένα συσσωρευτή μολύβδου ο οποίος

τροφοδοτεί με ρεύμα τις αντιστάσεις πριν τη φάση (1) (μεταβατική κατάσταση, διάγραμμα 5) στην οποία απαιτείται η μέγιστη ισχύς κι επιπλέον παρέχει την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια στις αντιστάσεις όταν το όχημα δεν κινείται (λ.χ. αναμονή σε φωτεινό σηματοδότη).

Το δευτεροβάθμιο σύστημα αποτελείται από δύο ανεμογεννήτριες εφαπτομενικής ροής τύπου «cross flow» κι η τροφοδοσία τους με αέρα πραγματοποιείται μέσω κατάλληλων αεραγωγών (intakes) που εδράζονται στην πάνω πλευρά του θερμοθαλάμου.

Οι αεραγωγοί είναι ορθογωνικής διατομής και συγκλίνοντες προκειμένου να επιτυγχάνεται επιτάχυνση της εισερχόμενης ροής. Η διατομή εξόδου των αεραγωγών εφάπτεται με τη διατομή εισόδου του κελύφους των ανεμογεννητριών, όπου η εισερχόμενη ροή επιταχύνεται περαιτέρω και τελικώς προσπίπτει εφαπτομενικά στα πτερύγια των ανεμογεννητριών. Ο δρομέας είναι συζευγμένος με δυναμό και καθώς περιστρέφεται παράγεται ηλεκτρική ενέργεια. Η παραχθείσα ηλεκτρική ενέργεια παρέχεται στο συσσωρευτή προκειμένου ένα ποσοστό να διατεθεί στις αντιστάσεις, ώστε δεδομένων των θερμικών απωλειών η θερμοκρασία του θερμοθαλάμου να κυμαίνεται στο εύρος:  $\Delta\theta = 67\text{ }^{\circ}\text{C} - 70\text{ }^{\circ}\text{C}$  μέσω κατάλληλου θερμοστάτη χώρου και το υπόλοιπο ποσοστό να παραμείνει στο συσσωρευτή ως ενέργεια φόρτισης αναπληρώνοντας την ηλεκτρική ενέργεια που διατίθεται στη μεταβατική κατάσταση και στις φάσεις όπου το όχημα είναι ακίνητο.

Με την εισαγωγή του πρωτοβάθμιου και δευτεροβάθμιου συστήματος επιτυγχάνεται η διατήρηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του θερμοθαλάμου σε επιτρεπτά κι ασφαλή όρια για την υγεία του καταναλωτή. Παράλληλα το κατάστημα έχει τη δυνατότητα κάλυψης μεγαλύτερων αποστάσεων αυξάνοντας δυνάμει τον αριθμό των παραγγελιών καθότι διπλασιάζοντας φερειπείν την ακτίνα δράσης του οχήματος, τετραπλασιάζεται η επιφάνεια κάλυψης παραγγελιών δηλαδή ο αριθμός των πιθανών πελατών.



**Σχήμα 2.** Πρωτοβάθμιο & δευτεροβάθμιο σύστημα αναπλήρωσης θερμικών απωλειών θερμοθαλάμου.

Στον ορισμό των βασικών προδιαγραφών περιλαμβάνονται: η ταχύτητα κίνησης του οχήματος, οι θερμοκρασίες των ζεστών τροφίμων, η χαμηλότερη θερμοκρασία του περιβάλλοντος στο οποίο σχεδιάζεται να λειτουργεί, τα χαρακτηριστικά των ζεστών τροφίμων και οι ιδιότητες της αέριας μάζας στους χώρους του θερμοθαλάμου.

Η μέση ταχύτητα κίνησης του οχήματος για έναν κύκλο πόλης ορίζεται ως:

$$\bar{u}_z = 40 \text{ km/h} \rightarrow 11,2 \text{ m/s} \quad (2)$$

Ωστόσο τα συστήματα σχεδιάζονται με τρόπο ώστε να είναι δυνατή η κίνηση του οχήματος και σε μεγαλύτερες ταχύτητες, χωρίς να υπάρχει κίνδυνος αστοχίας κάποιου υποσυστήματος (λ.χ. εξ' αιτίας αεροδυναμικών αντιστάσεων).

Η θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος ορίζεται ως:

$$T_e = 0 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3)$$

Η μάζα του ζεστού τροφίμου ορίζεται ως :

$$m_p = 0.7 \text{ kg} \quad (4)$$

Η θερμοκρασία του ζεστού τροφίμου (πίτσας) ορίζεται ως:

$$T_p = 70 \text{ }^\circ\text{C} \quad (5)$$

Ο καθαρός όγκος στους χώρους του θερμοθαλάμου υπολογίζεται ως:

$$V_{net} = (\text{Ολικός όγκος} - \text{όγκος επιφάνειας έδρασης τροφίμων}) = \\ = (0.55 \times 0.55 \times 0.6) - (0.55 \times 0.55 \times 0.02) = 0.176 \text{ m}^3 \quad (6)$$

Η μάζα του αέρα στους χώρους υποδοχής τροφίμων του θερμοθαλάμου προκύπτει αφαιρώντας από τον καθαρό όγκο του θερμοθαλάμου (σχέση 6) τον όγκο των συσκευασιών που τοποθετούνται στο εσωτερικό του. Το δυσμενέστερο σενάριο από την πλευρά της ικανότητας διατήρησης υψηλής θερμοκρασίας στο εσωτερικό του θερμοθαλάμου είναι εκείνο το οποίο περιλαμβάνει τον ελάχιστο αριθμό ζεστών συσκευασιών και κατά συνέπεια θεωρείται ότι στο εσωτερικό του θερμοθαλάμου τοποθετείται μια συσκευασία.

Ο όγκος μίας συνήθους συσκευασίας οικογενειακού μεγέθους σύμφωνα με τη σχέση (1)

είναι:

$$V_p = 0.5 \times 0.5 \times 0.04 = 0.01 \text{ m}^3 \quad (7)$$

Επομένως μάζα του αέρα με μία τοποθετημένη συσκευασία στο εσωτερικό του θερμοθαλάμου υπολογίζεται ως:

$$m_{air} = (\rho |_{T=0 \text{ } ^\circ\text{C}}) \cdot (V_{net} - V_p) = 0.22 \text{ kg} \quad (8)$$

Δεδομένου ότι η θερμοκρασία (σχέση 3) περιβάλλοντος κι επομένως και του εσωτερικού χώρου του θερμοθαλάμου είναι  $T_e = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ , η επιδιωκόμενη μεταβολή στη θερμοκρασία της αέριας μάζας στο εσωτερικό του θερμοθαλάμου υπολογίζεται ως:

$$\Delta T = (70 - 0) \text{ } ^\circ\text{C} = 70 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9)$$

Η θερμική ενέργεια που απαιτείται να προσδοθεί στην αέρια μάζα στο εσωτερικό του θερμοθαλάμου προκειμένου να επιτευχθεί η επιδιωκόμενη μεταβολή στη θερμοκρασία της (σχέση 9), υπολογίζεται ως:

$$Q_{\omega\phi} = m_{air} C_{p \text{ air}} \Delta T = \\ = 0.166 \cdot 1,006 \cdot 70 = 15,500 \text{ J} \quad (10)$$

Η ωφέλιμη θερμική ισχύς του θερμοθαλάμου δηλαδή η θερμική ισχύς που απαιτείται από τις αντιστάσεις, προκύπτει από την προσδιδόμενη θερμική ενέργεια στο εσωτερικό του θερμοθαλάμου (σχέση 10), προς το χρονικό διάστημα το οποίο απαιτείται για την παραγωγή αυτής της ενέργειας. Ειδικότερα το χρονικό διάστημα αυτό είναι ο χρόνος

οποίος απαιτείται προκειμένου η θερμοκρασία της αέριας μάζας σε κάθε εσωτερικό σημείο του θερμοθαλάμου να ανέλθει από τους 0 °C στους 70 °C κι η επιλογή του επαφίεται στην κρίση του σχεδιαστή, πλην όμως συνδέεται άμεσα με το χρόνο που μεσολαβεί από την έναρξη της βάρδιας μέχρι την πρώτη τοποθέτηση ζεστών τροφίμων στο εσωτερικό του θερμοθαλάμου. Εμπειρικά αυτό το χρονικό διάστημα δεν είναι μικρότερο των δέκα λεπτών ωστόσο στους υπολογισμούς ορίζεται μικρότερο χρονικό διάστημα προς αποφυγήν και του ελαχίστου κινδύνου υποδιαστασιολόγησης των αντιστάσεων.

Το απαιτούμενο χρονικό διάστημα ορίζεται ως:

$$t = 5 \text{ min} = 300 \text{ s} \quad (11)$$

Και η ωφέλιμη θερμική ισχύς υπολογίζεται ως:

$$P_{\omega\phi} \geq \frac{m_{\text{air}} \cdot c_{p \text{ air}} \cdot \Delta T}{t} \geq \frac{15,500 \text{ J}}{300 \text{ s}} \geq 52 \frac{\text{J}}{\text{s}} \geq 52 \text{ W} \quad (12)$$

Σύμφωνα με τη σχέση (12) η ωφέλιμη θερμική ισχύς πρέπει να είναι τουλάχιστον

52 W. Δεδομένου του γεγονότος ότι στο θερμοθάλαμο υπάρχει θερμοστάτης χώρου με τον οποίο ρυθμίζονται τα ιδανικά θερμοκρασιακά επίπεδα, επιλέγεται μεγαλύτερη τιμή ωφέλιμης ισχύος. Με αυτήν την επιλογή παρέχεται η δυνατότητα αξιοποίησης της ταχύτερης προθέρμανσης που επιτυγχάνεται, σε περίπτωση που αυτό απαιτηθεί.

Η επιλεγείσα τιμή ωφέλιμης θερμικής ισχύος είναι:

$$P_{\omega\phi} = 120 \text{ W} \quad (13)$$

Συγκεντρωτικά ο πίνακας προδιαγραφών έχει ως εξής:

Ταχύτητα	$\bar{u}_z = 11.2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
Πυκνότητα αέρα	$\rho  _{T=0^\circ\text{C}} = 1.3 \text{ kg/m}^3$
Ειδική θερμοχωρητικότητα αέρα υπό σταθερή πίεση στους 0 °C	$c_{p \text{ Air}}  _{T=0^\circ\text{C}, p=1\text{bar}} = 1.006 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	$T_e = 0^\circ\text{C}$
Θερμοκρασία ζεστού τροφίμου	$T_p = 70^\circ\text{C}$
Θερμοκρασία άνω τμήματος συσκευασίας	$T_\Sigma = 50^\circ\text{C}$
Θερμοκρασία στο εσωτερικό του θερμοθαλάμου στη φάση 1	$T_{\theta 1} = 70^\circ\text{C}$
Μάζα αέρα	0.22 kg
Απαιτούμενη θερμική ενέργεια	$Q_{\omega\phi} = 15,500 \text{ J}$
Ωφέλιμη θερμική ισχύς	$P_{\omega\phi} = 120 \text{ W}$

Πίνακας 1. Βασικές προδιαγραφές θερμοθαλάμου.

## 2.2 Επιλογή υλικών θερμοθαλάμου.

### 2.2.1 Υλικά κυρίως σώματος θερμοθαλάμου.

Το υλικό κατασκευής του θερμοθαλάμου είναι ορθοφθαλικός και προεπιταχυνόμενος πολυεστέρας γενικών κατασκευών. Ανήκει στην κατηγορία των συνθετικών πολυμερών και κατασκευάζεται από τον διμεθυλεστέρα του τερεφθαλικού οξέος, τερεφθαλικό διμεθύλιο και 1,2 αιθανοδιόλη. Ο επιταχυντής είναι διάλυμα κοβαλτίου σε ποσοστό 5%-6% κατά βάρος και προστίθεται στον πολυεστέρα σε ποσοστό 0,1% κατά βάρος. Ο συνηθέστερος καταλύτης που χρησιμοποιείται για την παραγωγή πολυεστέρα είναι το τριοξείδιο του αντιμονίου. Η διαδικασία παραγωγής πολυεστέρα περιλαμβάνει δυο κυρίως στάδια: την παραγωγή του μονομερούς και τον πολυμερισμό του μονομερούς. Κατά την παραγωγή του μονομερούς ο διμεθυλεστέρας υφίσταται αντίδραση ανταλλαγής εστέρα παρουσία καταλυτών 1,5%-2% κατά βάρος. Κατά τον πολυμερισμό του μονομερούς πραγματοποιείται πολυσυμπύκνωση δικαρβοξυλικού οξέως και διόλης. Ο πολυεστέρας αποτελείται χημικώς από τουλάχιστον 85% κατά βάρος από τον εστέρα της αιθανοδιόλης και του τεραφθαλικού οξέος. Επί της ουσίας ο πολυμερισμός ενός μονοεστέρα καρβοξυλικού οξέος και αλκοόλης σχηματίζει πολυεστέρα. Ο πολυεστέρας έχει υψηλή αντοχή, υδρόφοβη φύση και την ιδιότητα να επιδέχεται πρόσθετα όπως χρώματα και να αναμιγνύεται πλήρως με αυτά.

Το υλικό των επιφανειών στις οποίες ενδιάμεσως τοποθετείται το φιλμ αντιστάσεων, είναι αλουμίνιο σε μορφή διάτρητης πλάκας.

### 2.2.2 Θερμομονωτικά υλικά εσωτερικών επιφανειών θερμοθαλάμου.

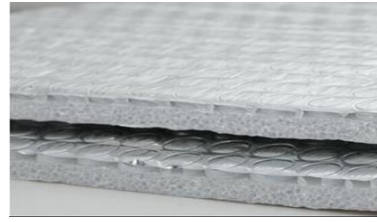
Η μόνωση των εσωτερικών επιφανειών του θερμοθαλάμου αποτελείται από τη σύνθεση σε επαπτόμενα επίπεδα δύο υλικών. Αρχικά τοποθετείται πλάκα φαινολικού αφρού πάχους 20mm (Εικόνα 4) στην οποία επικολλάται ανακλαστική ταινία αλουμινίου με ενδιάμεση κλειστή κυψελίδα αέρα πάχους 5 mm (Εικόνα 5). Με το συνδυασμό των δυο αυτών υλικών αυξάνει η θερμική αντίσταση της μόνωσης, ως άθροισμα των θερμικών αντιστάσεων των επιμέρους υλικών και ταυτόχρονα επιτυγχάνεται σχεδόν πλήρης ανάκλαση της ακτινοβολούμενης θερμότητας στο εσωτερικό του θερμοθαλάμου λόγω της παρουσίας της ανακλαστικής ταινίας αλουμινίου.

Η θερμική αγωγιμότητα της πλάκας φαινολικού αφρού είναι:  $\lambda_2=0,020 \frac{W}{m \cdot K}$  και της ανακλαστικής ταινίας αλουμινίου είναι:  $\lambda_1=0,024 \frac{W}{m \cdot K}$  ενώ ο συντελεστής ημισφαιρικής ανακλαστικότητας για την ανακλαστική ταινία αλουμινίου είναι:  $\rho_2 = 0,97$ .





**Εικόνα 4.** Πλάκα φαινολικού αφρού.  
αλουμινίου |



**Εικόνα 5.** Ανακλαστική ταινία  
κυψελίδα αέρα.

### 2.2.3 Υπολογισμός θερμοπερατότητας (U- Value) μόνωσης θερμοθαλάμου

Προκειμένου να υπολογιστεί η θερμοπερατότητα στο τοίχωμα του θερμοθαλάμου πρέπει να συντεθούν οι θερμικές αγωγιμότητες των στοιχείων που απαρτίζουν τη μόνωση, ώστε να προκύψει η ολική θερμοπερατότητα των τοιχωμάτων του θερμοθαλάμου. Δεδομένου ότι τα τοιχώματα του θερμοθαλάμου είναι όμοια σε όλες τις πλευρές, ο υπολογισμός της ολικής θερμοπερατότητας πραγματοποιείται για μία οποιαδήποτε πλευρά.

Η ολική θερμοπερατότητα ( U-Value) ορίζεται ως :

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_{si} + R_{se} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2}} \quad (14)$$

Όπου:

$R_T$ : Ολική θερμική αντίσταση  $\left[ \frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$

$R_{si}$ : Θερμική αντίσταση επιφάνειας αλουμινίου πάχους 2 mm,  $0.19 \frac{m^2 \cdot K}{W}$  .

$R_{se}$ : Θερμική αντίσταση επιφάνειας πολυεστέρα πάχους 5 mm,  $0.12 \frac{m^2 \cdot K}{W}$  .

$d_1$ : Πάχος υλικού 1 (Ανακλαστική ταινία αλουμινίου με κυψελίδα αέρα), 9 mm.

$d_2$ : Πάχος υλικού 2 (Πλάκα φαινολικού αφρού), 20 mm.

$\lambda_1$ : Θερμική αγωγιμότητα ανακλαστικής ταινίας αλουμινίου με κυψελίδα αέρα,

$$\lambda_1 = 0.024 \frac{W}{m \cdot K}$$

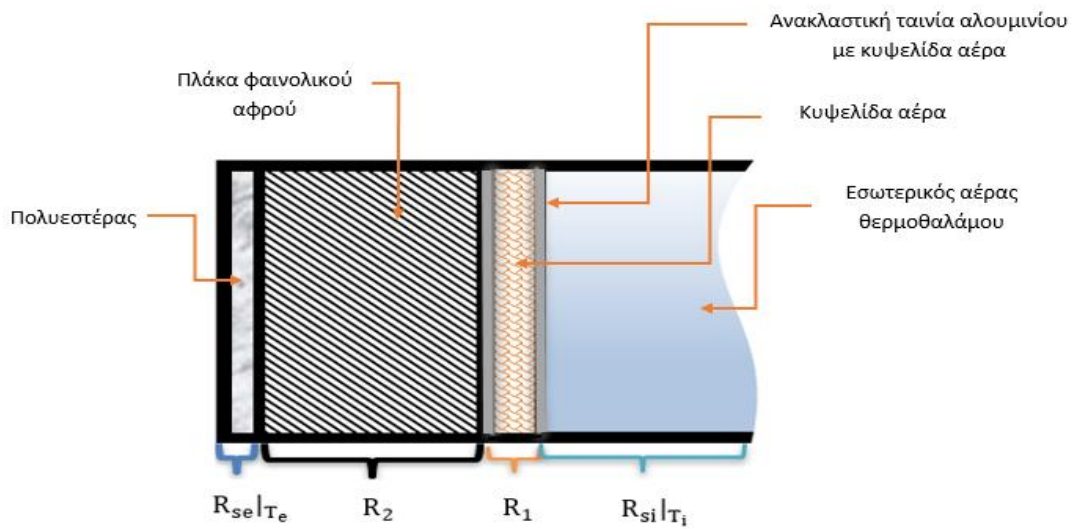
$\lambda_2$ : Θερμική αγωγιμότητα πλάκας φαινολικού αφρού  $\lambda_2 = 0.05 \frac{W}{m \cdot K}$  .

Και η σχέση (14) γίνεται:

$$(1) \rightarrow U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{0.19 + 0.12 + \frac{0.005}{0.024} + \frac{0.020}{0.05}} = 1,1 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

(15)

Στο σχήμα (3) παρουσιάζεται η τομή μιας τυχαίας πλευράς του θερμοθαλάμου στην οποία περιλαμβάνονται τα στοιχεία μόνωσης και το υλικό της εξωτερικής επιφάνειας του θερμοθαλάμου με τις αντίστοιχες θερμικές αντιστάσεις του κάθε στοιχείου.



**Σχήμα 3.** Στοιχεία μόνωσης θερμοθαλάμου.

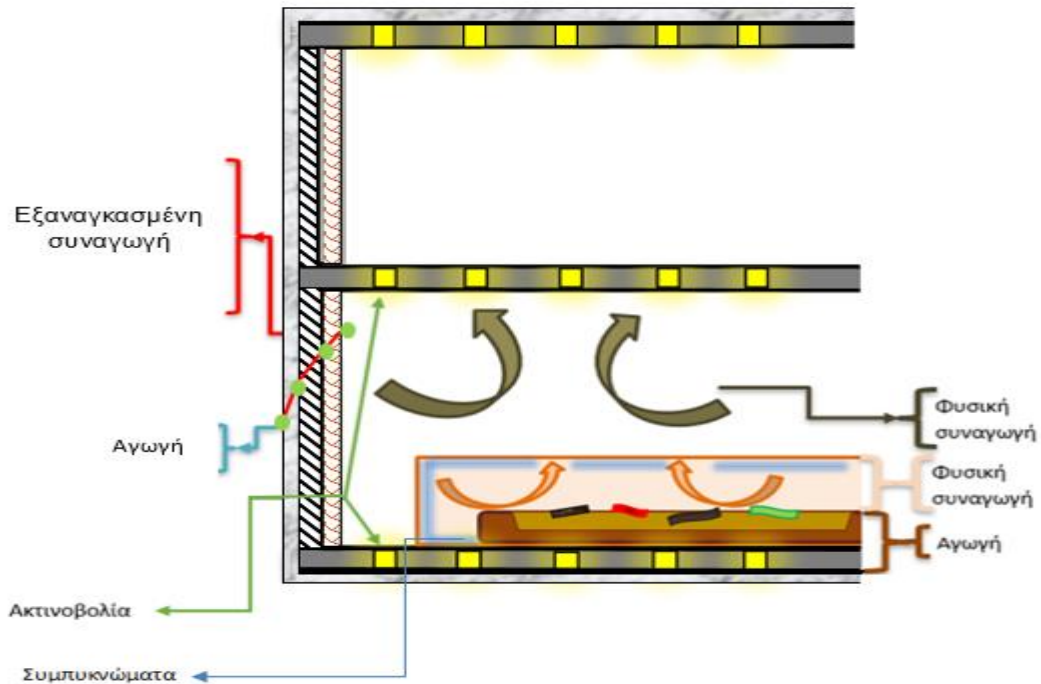
## Κεφάλαιο 3. Μελέτη μεταφοράς θερμότητας στο θερμοθάλαμο

### 3.1 Περιγραφή του φαινομένου στον όγκο ελέγχου που περιβάλλει το θερμοθάλαμο.

Το φυσικό φαινόμενο της μεταφοράς θερμότητας λαμβάνει χώρα σε οποιοδήποτε θερμοδυναμικό σύστημα υπάρχουν περιοχές με διαφορετικά θερμοκρασιακά πεδία. Κατά την εξέλιξη του φαινομένου αυτού μεταφέρεται θερμότητα, από περιοχές υψηλότερης θερμοκρασίας σε περιοχές χαμηλότερης θερμοκρασίας, με τρεις διακριτούς τρόπους ή/και συνδυασμό αυτών: i) μεταφορά θερμότητας με αγωγή ii) μεταφορά θερμότητας με συναγωγή (εξαναγκασμένη, φυσική) και μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία. Στο θερμοθάλαμο τόσο στη μεταβατική όσο και στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, λαμβάνουν χώρα και οι τρεις τρόποι μεταφοράς θερμότητας.

Ειδικότερα, αν πραγματοποιηθεί μια κάθετη τομή στην κάτοψη, τα στοιχεία που διακρίνονται και στα οποία εξελίσσεται το φαινόμενο είναι :

- Συσκευασία ζεστού τροφίμου (πίτσας) με το ζεστό τρόφιμο στο εσωτερικό.
- Ράφι έδρασης των συσκευασιών.
- Αντιστάσεις στο ράφι έδρασης των συσκευασιών και στις επιφάνειες εκατέρωθεν αυτού.
- Πλευρική μόνωση του θερμοθαλάμου συνιστάμενη από ανακλαστική ταινία αλουμινίου πάχους 7 mm ( 5 mm οι φυσσαλίδες αέρα συν 2mm η ταινία αλουμινίου) και πλάκα φαινολικού αφρού πάχους 20 mm. Διακρίνεται επίσης και το υλικό του κυρίως σώματος του θερμοθαλάμου δηλαδή ο πολυεστέρας πάχους 5 mm.



**Σχήμα 4.** Στοιχεία θερμοθαλάμου σε τομή και τρόποι μεταφοράς θερμότητας.

### 3.2 Υπολογισμός συντελεστών μετάδοσης θερμότητας σε κάθε στοιχείο του θερμοθαλάμου.

#### I. Μετάδοση θερμότητας με αγωγή λαμβάνει χώρα στα εξής στοιχεία :

- Στα τοιχώματα της συσκευασίας.
- Στο ζεστό τρόφιμο.
- Στη μόνωση και το τοίχωμα πολυεστέρα όπου η θερμότητα ρέει από υψηλότερες θερμοκρασίες στο εσωτερικό του θερμοθαλάμου, προς χαμηλότερες στην ατμόσφαιρα.
- Στο ράφι έδρασης της συσκευασίας και τις επιφάνειες εκατέρωθεν αυτού όπου η θερμότητα ρέει δια μέσου του υλικού των στοιχείων αυτών.

#### II. Φυσική συναγωγή λαμβάνει χώρα στα εξής στοιχεία :

- Στο εσωτερικό της συσκευασίας.
- Στο εσωτερικό του χώρου υποδοχής τροφίμων.

#### III. Εξαναγκασμένη συναγωγή λαμβάνει χώρα στα εξής στοιχεία :

- Στις εξωτερικές πλευρές του θερμοθαλάμου.

#### IV. Ακτινοβολία λαμβάνει χώρα στα εξής στοιχεία :

- Στις αντιστάσεις.
- Στην εξωτερική επιφάνεια του ζεστού τροφίμου.

### 3.3 Επίλυση θερμοκρασιακού πεδίου στο θερμοθάλαμο

Για την επίλυση του θερμοκρασιακού πεδίου στο θερμοθάλαμο εξετάζονται δύο σενάρια σε κάθε ένα από τα οποία ορίζονται διαφορετικές αρχικές συνθήκες. Το σενάριο «Α» αφορά τη λειτουργία του θερμοθαλάμου χωρίς αντιστάσεις, προσομοιώνοντας επί της ουσίας την υφιστάμενη κατάσταση στη διανομή ζεστών τροφίμων. Στο σενάριο «Β» μελετάται η λειτουργία του θερμοθαλάμου με την εισαγωγή των αντιστάσεων.

Η επίλυση του θερμοκρασιακού πεδίου πραγματοποιείται με το λογισμικό «*Comsol Multiphysics*» στο οποίο εισάγονται οι αρχικές συνθήκες του προβλήματος και λαμβάνονται τρεις απεικονίσεις του θερμοκρασιακού πεδίου για κάθε σενάριο.

#### 3.3.1 Σενάριο «Α»: Υπολογισμός θερμοκρασιακού πεδίου στο θερμοθάλαμο χωρίς αντιστάσεις.

Στο σενάριο «Α» υπολογίζεται το θερμοκρασιακό πεδίο στο θερμοθάλαμο με μοναδική πηγή θερμότητας στο εσωτερικό του τη συσκευασία του ζεστού τροφίμου.

Οι αρχικές συνθήκες του προβλήματος προκύπτουν από τις ορισθείσες προδιαγραφές (πίνακας 1) οι οποίες είναι:

- Ταχύτητα οχήματος:  $\bar{u}_z = 40 \text{ km/h} = 11,2 \text{ m/sec}$
- Θερμοκρασία ζεστού τροφίμου (πίτσας):  $T_p = 70 \text{ }^\circ\text{C}$
- Θερμοκρασία άνω τμήματος συσκευασίας:  $T_\Sigma = 50 \text{ }^\circ\text{C}$
- Θερμοκρασία αέρα στο περιβάλλον :  $T_{en} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$
- Θερμοκρασία αέρα στο εσωτερικό του θερμοθαλάμου :  $T_{in} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των υλικών είναι:

- $d_1$ : Πάχος ανακλαστική ταινίας αλουμινίου με κυψελίδα αέρα (υλικό 1), 9 mm.
- $d_2$ : Πάχος πλάκα φαινολικού αφρού (υλικού 2), 20 mm.
- $d_3$ : Πάχος τοιχώματος πολυεστέρα 5 mm.

Σύμφωνα με το σχήμα (4) η μετάδοση θερμότητας πραγματοποιείται:

#### I. Με αγωγή:

α) Στο σύστημα τοιχώματα-μόνωση του θερμοθαλάμου.

β) Στα τοιχώματα και στο σώμα του ζεστού τροφίμου.

Οι συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας των υλικών στα οποία πραγματοποιείται μετάδοση θερμότητας με αγωγή είναι :

- $\lambda_1$ : Θερμική αγωγιμότητα ανακλαστικής ταινίας αλουμινίου με κυψελίδα αέρα,  $0.024 \frac{W}{m \cdot K}$
- $\lambda_2$ : Θερμική αγωγιμότητα πλάκας φαινολικού αφρού,  $0,023 \frac{W}{m \cdot K}$ .
- $\lambda_3$ : Θερμική αγωγιμότητα πολυεστέρα,  $0.05 \frac{W}{m \cdot K}$
- $\lambda_4$ : Θερμική αγωγιμότητα διάτρητης πλάκας αλουμινίου,  $205 \frac{W}{m \cdot K}$
- 

**II.** Με φυσική συναγωγή:

α) Από το ζεστό τρόφιμο μέσω του αέρα προς τα εσωτερικά τοιχώματα της συσκευασίας.

β) Από τη συσκευασία του ζεστού τροφίμου (πλην των εφαιπτόμενων με το θερμοθάλαμο επιφανειών) προς την περιβάλλουσα αέρια μάζα.

Ο υπολογισμός του συντελεστή φυσικής συναγωγής “h” πραγματοποιείται για τη συσκευασία του ζεστού τροφίμου, έχοντας ληφθεί υπόψιν έμμεσα και η φυσική συναγωγή από το ζεστό στο τρόφιμο προς τον αέρα στο εσωτερικό της συσκευασίας, στον καθορισμό της θερμοκρασίας της επιφάνειας της συσκευασίας (πίνακας 1).

Ο συντελεστής φυσικής συναγωγής υπολογίζεται στα ακόλουθα βήματα :

Η μέση θερμοκρασία θερμής επιφάνειας (επιφάνεια συσκευασίας ζεστού τροφίμου) κι αρχικής θερμοκρασίας αέριας μάζας στο εσωτερικό του θερμοθαλάμου υπολογίζεται ως :

$$T_f = \frac{T_\Sigma + T_\infty}{2} = \frac{323.15 + 273.15}{2} = 298.15 \text{ K} \quad (16)$$

Οι ιδιότητες του αέρα στη μέση θερμοκρασία  $T_f = 298.15 \text{ K}$  και πίεση  $P = 1 \text{ bar}$  είναι:

$$\rho|_{298.15 \text{ K}} = 1.18 \frac{kg}{m^3}$$

$$\nu|_{298.15 \text{ K}} = 1.568 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}$$

$$\lambda|_{298.15 \text{ K}} = 0.027 \frac{W}{m \cdot K}$$

$$\alpha|_{298.15 \text{ K}} = 22,06 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$C_p|_{298.15 \text{ K}} = 1.005 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

Ο αριθμός Prandtl υπολογίζεται ως:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = 0.71 \quad (17)$$

Και το χαρακτηριστικό μήκος της οριζόντιας επιφάνειας είναι:

$$L = \frac{\text{εμβαδόν}}{\text{περίμετρος}} = 0.125 \quad (18)$$

Ο αριθμός Rayleigh υπολογίζεται ως :

$$Ra_L = \frac{g(\beta = \frac{1}{T})\Delta T L^3}{\nu \cdot \alpha} = 9.3 \cdot 10^6 < 10^9 \rightarrow \text{Στρωτή ροή} \quad (19)$$

Ο αριθμός Nusselt υπολογίζεται ως:

$$Nu_L = 0.54 Ra_L^{0.25} = 29.82 \quad (20)$$

Και από τις σχέσεις (18) και (20) ο συντελεστής φυσικής συναγωγής “h” υπολογίζεται ως:

$$h = Nu_L \frac{\lambda}{L} = 6.44 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \quad (21)$$

**III.** Με εξαναγκασμένη συναγωγή στις εξωτερικές επιφάνειες του θερμοθαλάμου.

Για τον υπολογισμό του συντελεστή εξαναγκασμένης συναγωγής ακολουθούνται τα εξής βήματα:

Η μέση θερμοκρασία του στρώματος μεταξύ αέρα και επιφάνειας πολυεστέρα είναι:

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} = \frac{273.15 + 273.15}{2} = 273.15 \text{ K} \quad (22)$$

Οι ιδιότητες του αέρα σε θερμοκρασία  $T_f = 273.15 \text{ K}$  και πίεση  $P = 1 \text{ bar}$  είναι:

$$\rho|_{273.15 \text{ K}} = 1.3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\nu|_{273.15 \text{ K}} = 1.343 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$\lambda|_{273.15 \text{ K}} = 0.0244 \frac{\text{W}}{\text{m K}}$$

$$\alpha|_{273.15 \text{ K}} = 18.68 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$c_p|_{273.15 \text{ K}} = 1.0038 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

Ο αριθμός Reynolds υπολογίζεται ως:

$$\begin{aligned} Re_L &= \frac{U_\infty L}{\nu} = \\ &= 4.14 \cdot 10^5 < (Re_{cr} = 5 \times 10^5) \rightarrow \\ &\rightarrow \text{Στρωτή ροή} \end{aligned} \quad (23)$$

Ο αριθμός Prandtl υπολογίζεται ως:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = 0.72 \quad (24)$$

Ο αριθμός Nusselt υπολογίζεται ως:

$$\begin{aligned} Nu_L &= 0.664 Re_L^{0.5} Pr^{1/3} = \\ &= 379.35 \end{aligned} \quad (25)$$

Και σύμφωνα με τη σχέση (25) ο συντελεστής εξαναγκασμένης συναγωγής υπολογίζεται ως:

$$h = Nu_L \frac{\lambda}{L} = 16.83 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \quad (26)$$

**IV.** Με ακτινοβολία αφενός από το ζεστό τρόφιμο θερμοκρασίας  $T_p = 70 \text{ }^\circ\text{C}$  και αφετέρου από την ακτινοβολία του ζεστού τροφίμου που ανακλάται στις ανακλαστικές επιφάνειες αλουμινίου με κυψελίδα αέρα. Ο μηχανισμός μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία έχει ελάχιστη επιρροή στο δημιουργηθέν θερμοκρασιακό πεδίο. Αυτό οφείλεται στη θερμοκρασία και τις διαστάσεις του σώματος που εκπέμπει την ακτινοβολία. Επίσης ελάχιστες, είναι κι οι θερμικές απώλειες λόγω ακτινοβολίας γεγονός που οφείλεται στο υλικό των ανακλαστικών επιφανειών αλουμινίου των οποίων η ημισφαιρική ανακλαστικότητα είναι:  $\rho = 0.97$ .



Σύμφωνα με το νόμο των Stefan-Boltzmann η εκπεμπόμενη ισχύς μέλανος σώματος υπολογίζεται ως:

$$E_b(T) = A\sigma T^4 \quad (27)$$

Όπου:

- $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2K^4}$ , η σταθερά των Stefan-Boltzmann.
- $T=70$  K (πίνακας 1), η απόλυτη θερμοκρασία του σώματος.
- $A = \pi r^2 = 3.24 \cdot 0.04 = 0,126 \text{ m}^2$ , το εμβαδόν της ακτινοβολούσας επιφάνειας (επιφάνεια πίτσας ακτίνας 0.2 m).

Η σχέση (27) γίνεται:

$$E_b(T) = 0,126 \cdot 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot (273.15 + 70)^4 = 99.1 \text{ W} \quad (28)$$

Και τελικώς οι απώλειες της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας υπολογίζονται ως:

$$E_b(T)_o = E_b(T)(1 - \rho) = 2.98 \text{ W} \quad (29)$$

Επίσης στις εσωτερικές επιφάνειες της συσκευασίας δημιουργείται ένα φιλμ συμπυκνωμάτων, η παρουσία του οποίου λαμβάνεται υπόψιν εμμέσως, στον ορισμό της θερμοχωρητικότητας του υλικού της συσκευασίας, ορίζοντας ένα νέο υλικό του οποίου η θερμοχωρητικότητα αντιστοιχεί στη θερμοχωρητικότητα σκληρής και υγροποιημένης χάρτινης επιφάνειας.

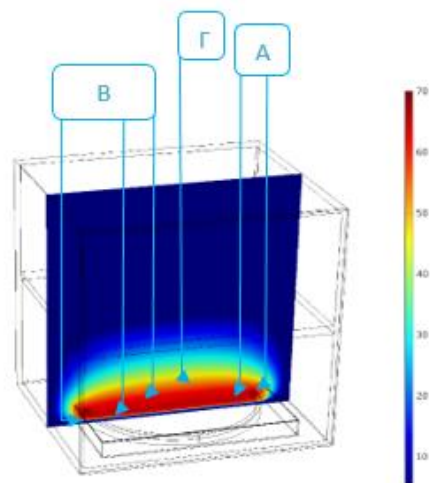
### 3.3.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων σεναρίου «Α».

Κατόπιν της εισαγωγής των δεδομένων όπως αυτά υπολογίζονται στην (§ 3.3.1), στο λογισμικό «Comsol Multiphysics», επιλύεται το θερμοκρασιακό πεδίο στο θερμοθάλαμο κατά τη διάρκεια ενός κύκλου αποστολής παραγγελίας (φάση: 2,3, διάγραμμα 5) με το χρονικό βήμα αποτελεσμάτων ίσο με ένα λεπτό. Δεδομένου ότι το χρονικό διάστημα ενδιαφέροντος είναι δέκα λεπτά, λαμβάνονται τρία στιγμιότυπα τα οποία αντιστοιχούν στις χρονικές στιγμές  $t_1 = 1 \text{ min}$ ,  $t_2 = 5 \text{ min}$  και  $t_3 = 10 \text{ min}$  για κάθε ένα από τα οποία παρουσιάζεται το θερμοκρασιακό πεδίο.

Χρονική στιγμή  $t_1 = 1 \text{ min}$

**Εικόνα 6**

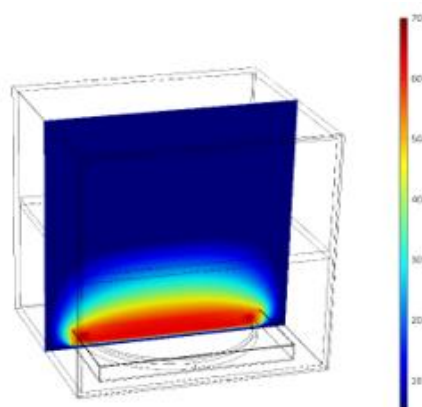
Θερμοκρασιακό πεδίο θερμοθαλάμου τη χρονική στιγμή  $t_1 = 1 \text{ min}$ .



Χρονική στιγμή  $t_2 = 5 \text{ min}$

**Εικόνα 7**

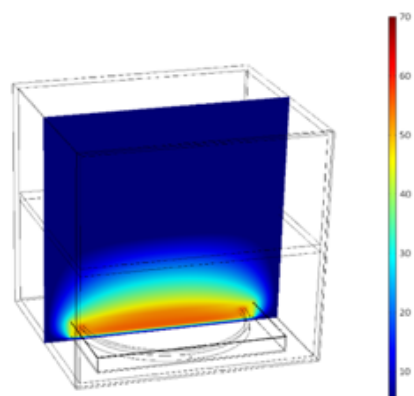
Θερμοκρασιακό πεδίο θερμοθαλάμου τη χρονική στιγμή  $t_2 = 5 \text{ min}$ .



Χρονική στιγμή  $t_3 = 10 \text{ min}$

**Εικόνα 8**

Θερμοκρασιακό πεδίο θερμοθαλάμου τη χρονική στιγμή  $t_3 = 10 \text{ min}$ .



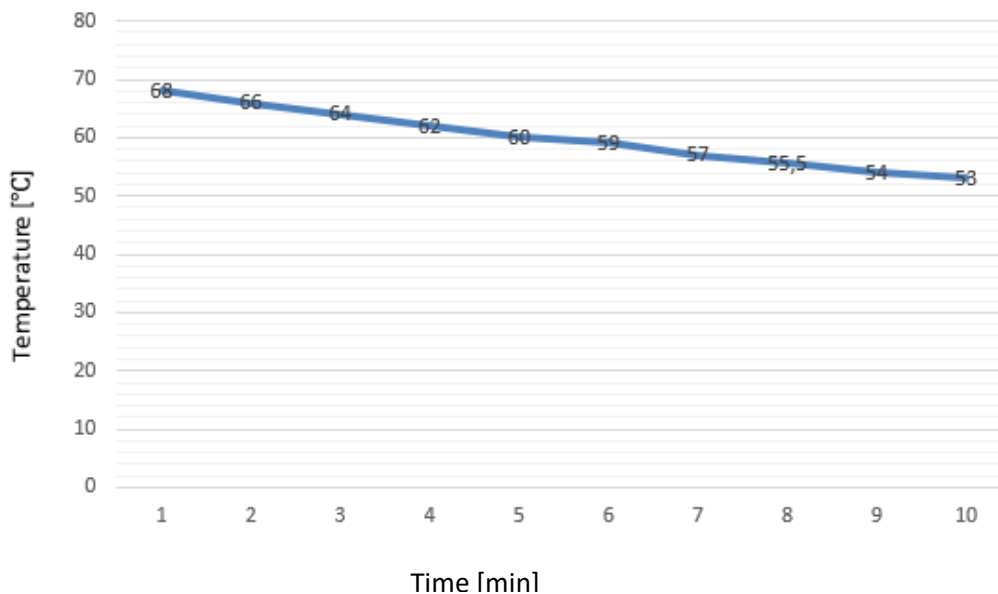
Τη χρονική στιγμή  $t_1 = 1 \text{ min}$ , στην περιφέρεια και τη βάση του ζεστού τροφίμου (περιοχή «Α») όπου και βρίσκεται το συμπαγές τμήμα ζύμης με υψηλή θερμοχωρητικότητα, παρουσιάζεται η μέγιστη θερμοκρασία:  $T_{1max.b} = 68 \text{ }^\circ\text{C}$ . Στις εσωτερικές επιφάνειες της συσκευασίας (περιοχή «Β») όπου υπάρχει συγκέντρωση συμπυκνωμάτων η μέση θερμοκρασία είναι:  $\overline{T}_{1c} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ . Το φιλμ των συμπυκνωμάτων λειτουργεί επί της ουσίας ως μόνωση μεταξύ του ζεστού τροφίμου και της συσκευασίας, της οποίας η μέγιστη θερμοκρασία στην άνω εξωτερική επιφάνεια της (περιοχή «Γ») είναι της τάξης των  $T_{max.P} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Τη χρονική στιγμή  $t_2 = 5 \text{ min}$  η μέγιστη θερμοκρασία στην περιφέρεια του ζεστού τροφίμου είναι:  $T_{2max.b} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$  ενώ η μέση θερμοκρασία του φιλμ συμπυκνωμάτων είναι:  $\overline{T}_{2c} = 56 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Τελικώς τη χρονική στιγμή  $t_3 = 10 \text{ min}$  η μέγιστη θερμοκρασία στην περιφέρεια του ζεστού τροφίμου είναι:  $T_{3max.b} = 53 \text{ }^\circ\text{C}$ , η μέση θερμοκρασία του φιλμ συμπυκνωμάτων είναι:  $\overline{T}_{3c} = 52 \text{ }^\circ\text{C}$  κι οι συνολικές απώλειες θερμότητας από το θερμοθάλαμο στο περιβάλλον είναι:  $Q_A = 8 \text{ W}$ .

Είναι φανερό ότι η μέγιστη θερμοκρασία του ζεστού τροφίμου εισέρχεται εντός επικίνδυνης θερμοκρασιακής ζώνης (Εικόνα 8) ήδη από τη χρονική στιγμή  $t_2 = 5 \text{ min}$ . Στο χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μέχρι τη λήξη του κύκλου αποστολής παραγγελίας (Διάγραμμα 5) η θερμοκρασία του ζεστού τροφίμου μειώνεται περαιτέρω και τελικά τη χρονική στιγμή παράδοσης της παραγγελίας το ζεστό τρόφιμο έχει μέγιστη θερμοκρασία της τάξης των  $53 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $T_{3max.b}$ ), γεγονός που σημαίνει ότι τη στιγμή της κατανάλωσης η θερμοκρασία θα είναι ακόμη μικρότερη και φυσικά εντός επικίνδυνης θερμοκρασιακής ζώνης.

Στο διάγραμμα (5) παρουσιάζεται η γραφική παράσταση της μέγιστης θερμοκρασίας στο εσωτερικό του θερμοθαλάμου συναρτήσει του χρόνου για έναν κύκλο αποστολής παραγγελίας διάρκειας δέκα λεπτών.



**Διάγραμμα 6.** Θερμοκρασία συναρτήσει του χρόνου για το “Α” σενάριο.

### 3.4 Σενάριο «B» : Υπολογισμός θερμοκρασιακού πεδίου στο θερμοθάλαμο κατόπιν της εισαγωγής των αντιστάσεων.

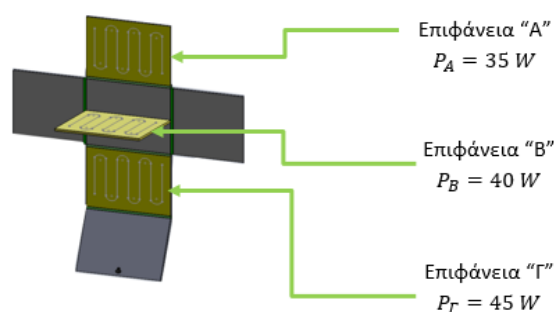
Στο σενάριο «B» υπολογίζεται το θερμοκρασιακό πεδίο στο θερμοθάλαμο με πηγές θερμότητας τη συσκευασία του ζεστού τροφίμου και τις εισαχθείσες αντιστάσεις.

Οι αντιστάσεις τοποθετούνται σε μορφή φιλμ στο ράφι έδρασης των συσκευασιών και τις επιφάνειες εκατέρωθεν του ραφιού (σχήμα 2). Οι αντιστάσεις συνδέονται παράλληλα έτσι ώστε η ενδεχόμενη αστοχία κάποιας αντίστασης, να μην επηρεάσει τη λειτουργία των υπολοίπων. Η ισχύς των αντιστάσεων είναι:  $P = 120 \text{ W}$  (πίνακας 1). Δεδομένου ότι τα φιλμ αντιστάσεων απαντώνται στην αγορά με εξαιρετική ευκολία και συγχρόνως υπάρχει η δυνατότητα εύρεσης φιλμ αντίστασης εξατομικευμένης ισχύος, οι αντιστάσεις στις ανωτέρω επιφάνειες τοποθετούνται ως εξής:

- Ισχύς αντίστασης στην επιφάνεια «Α»:  $P_A = 35 \text{ W}$
- Ισχύς αντίστασης στην επιφάνεια «B»:  $P_B = 40 \text{ W}$
- Ισχύς αντίστασης στην επιφάνεια «Γ»:  $P_\Gamma = 45 \text{ W}$

Η λογική αυτής της τοποθέτησης έγκειται στο γεγονός ότι στις επιφάνειες «Α» και «Γ», οι αντιστάσεις εφάπτονται στην ανακλαστική επιφάνεια αλουμινίου η οποία έχει ημισφαιρική ανακλαστικότητα  $\rho = 0,97$ , δηλαδή απορροφά το 3% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε αυτήν. Κατά συνέπεια οι εφάπτομενες αντιστάσεις στην ανακλαστική ταινία αλουμινίου θα πρέπει να έχουν κατά τι μεγαλύτερη ισχύ, από την ισχύ της

αντίστασης στην επιφάνεια του ραφιού. Ωστόσο η αντίσταση στην άνω επιφάνεια εσωτερικά του θερμοθαλάμου (επιφάνεια «Α») μολονότι εφάπτεται σε ανακλαστική ταινία αλουμινίου και θα έπρεπε σύμφωνα με την παραπάνω θεώρηση να έχει κατάτι μεγαλύτερης ισχύς αντίσταση, επιλέγεται να έχει τη μικρότερη από όλες τις αντιστάσεις. Η επιλογή αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι στην επιφάνεια «Γ» δεν εδράζεται κάποια συσκευασία κι επομένως η συμβολή της αντίστασης αυτής στη μεταφορά θερμότητας πραγματοποιείται κυρίως μέσω φυσικής συναγωγής κι ελάχιστα μέσω ακτινοβολίας, ενώ στις επιφάνειες «Β» και «Γ» οι αντιστάσεις συμβάλλουν στη μεταφορά θερμότητας και μέσω αγωγής.



**Σχήμα 5.** Επιφάνειες τοποθέτησης αντιστάσεων στο θερμοθάλαμο.

Οι αρχικές συνθήκες του προβλήματος είναι όμοιες με τις αρχικές συνθήκες του σεναρίου «Α», πλην της θερμοκρασίας του αέρα στο εσωτερικό του θερμοθαλάμου ο οποίος βρίσκεται στη φάση (1) (Διάγραμμα 5), είναι δηλαδή προθερμασμένος κι η θερμοκρασία στο εσωτερικό του είναι:  $T_{in} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ . Επιπροσθέτως λαμβάνονται υπόψιν κι οι επιφάνειες στις οποίες τοποθετούνται οι αντιστάσεις, ως μόνιμες πηγές θερμότητας με σταθερή θερμοκρασία

$T_{srf} = 70^\circ\text{C}$ . Κατά συνέπεια οι αρχικές συνθήκες οι οποίες προκύπτουν από τις ορισθείσες προδιαγραφές (πίνακας 1) είναι:

- Ταχύτητα οχήματος:  $\bar{u}_z = 40 \text{ km/h} = 11,2 \text{ m/sec}$
- Θερμοκρασία ζεστού τροφίμου (πίτσας):  $T_p = 70 \text{ }^\circ\text{C}$
- Θερμοκρασία άνω τμήματος συσκευασίας:  $T_\Sigma = 50 \text{ }^\circ\text{C}$
- Θερμοκρασία αέρα στο περιβάλλον :  $T_{en} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$
- Θερμοκρασία αέρα στο εσωτερικό του θερμοθαλάμου :  $T_{in} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$
- Θερμοκρασία επιφανειών Α,Β και Γ (σχήμα 10) :  $T_{srf} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των υλικών είναι κι η μετάδοση θερμότητας μέσω αγωγής παραμένουν ίδια με τα αντίστοιχα που εκτέθηκαν στην παράγραφο 3.3.1.

## II. Με φυσική συναγωγή:

α) Από την πίτσα, μέσω του αέρα, προς τα εσωτερικά τοιχώματα της συσκευασίας και  
β) από τη συσκευασία της πίτσας (πλην των επαπτόμενων με το θερμοθάλαμο επιφανειών) προς την περιβάλλουσα αέρια μάζα.

Ο υπολογισμός του συντελεστή φυσικής συναγωγής «h» πραγματοποιείται για τη συσκευασία του ζεστού τροφίμου, έχοντας ληφθεί υπόψιν έμμεσα και η φυσική συναγωγή από το ζεστό στο τρόφιμο προς τον αέρα στο εσωτερικό της συσκευασίας, μέσω της θερμοκρασίας της επιφάνειας της συσκευασίας.

Ο συντελεστής φυσικής συναγωγής υπολογίζεται ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα ως εξής :

Η μέση θερμοκρασία θερμής επιφάνειας (επιφάνεια συσκευασίας ζεστού τροφίμου) και αρχικής θερμοκρασίας αέρα στο εσωτερικό του θερμοθαλάμου υπολογίζεται ως :

$$T_f = \frac{T_\Sigma + T_\infty}{2} = \frac{323.15 + 343.15}{2} = 333.15 \text{ K} \quad (30)$$

Οι ιδιότητες του αέρα στη μέση θερμοκρασία  $T_f = 333.15 \text{ K}$  και πίεση  $P = 1 \text{ bar}$  είναι:

$$\rho|_{333.15 \text{ K}} = 1.07 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\nu|_{333.15 \text{ K}} = 1.82 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$\lambda|_{333.15 \text{ K}} = 0.029 \frac{\text{W}}{\text{m K}}$$

$$\alpha|_{333.15 \text{ K}} = 25,2 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$c_p|_{333.15 \text{ K}} = 1.007 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

Ο αριθμός Prandtl υπολογίζεται ως:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = 0.71 \quad (31)$$

Και το χαρακτηριστικό μήκος της οριζόντιας επιφάνειας είναι:

$$L = \frac{\text{εμβαδόν}}{\text{περίμετρος}} = 0.125 \quad (32)$$

Ο αριθμός Rayleigh υπολογίζεται ως :

$$Ra_L = \frac{g(\beta = \frac{1}{T})\Delta T L^3}{\nu \cdot \alpha} = 2.51 \cdot 10^6 < 10^9 \rightarrow \text{Στρωτή ροή} \quad (33)$$

Ο αριθμός Nusselt υπολογίζεται ως:

$$Nu_L = 0.54 Ra_L^{0.25} = 22.01 \quad (34)$$

Και από τις σχέσεις (18) και (20) ο συντελεστής φυσικής συναγωγής «h» υπολογίζεται ως:

$$h = Nu_L \frac{\lambda}{L} = 5.11 \frac{W}{m^2 K} \quad (35)$$

**III.** Με εξαναγκασμένη συναγωγή στις εξωτερικές επιφάνειες του θερμοθαλάμου.

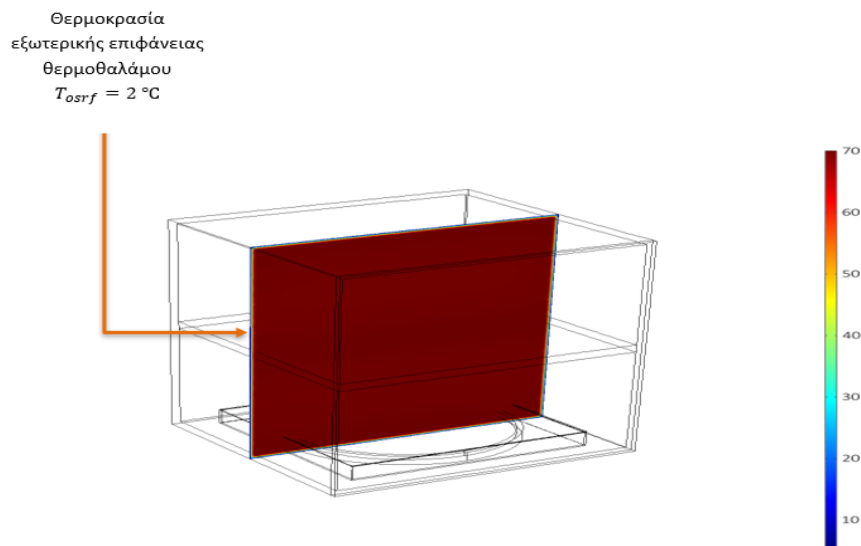
Για τον υπολογισμό του συντελεστή εξαναγκασμένης συναγωγής απαιτείται η γνώση της θερμοκρασίας στην εξωτερική επιφάνεια του τοιχώματος του θερμοθαλάμου (πολυεστέρα). Δεδομένου ότι τη χρονική στιγμή που εκκινεί το φαινόμενο της εξαναγκασμένης συναγωγής το όχημα μόλις έχει ξεκινήσει τον κύκλο αποστολής παραγγελίας, βρίσκεται δηλαδή αμέσως μετά τη φάση (2) (Διάγραμμα 5) η θερμοκρασία στο εσωτερικό του θερμοθαλάμου είναι:  $T_{in} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ . Επομένως δύναται να υποτεθεί ότι το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ του τέλους της φάσης (2) και της έναρξης κίνησης του οχήματος, είναι αρκούντως μικρό ώστε η επίδραση της εξαναγκασμένης συναγωγής στη θερμοκρασία των εξωτερικών τοιχωμάτων του θερμοθαλάμου να θεωρηθεί αμελητέα. Κατά συνέπεια ο υπολογισμός της εξωτερικής θερμοκρασίας του πολυεστέρα πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψιν τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας που λαμβάνουν χώρα μόνο στο εσωτερικό του θερμοθαλάμου.

Προκειμένου να υπολογιστεί η θερμοκρασία στο εξωτερικό τοίχωμα του πολυεστέρα εισάγονται στο λογισμικό «Comsol Multiphysics» οι εξής αρχικές συνθήκες:

- Ταχύτητα οχήματος: Όχημα ακίνητο ( $\bar{u}_z = 0 \text{ m/s}$ )
- Θερμοκρασία ζεστού τροφίμου (πίτσας):  $T_p = 70 \text{ }^\circ\text{C}$
- Θερμοκρασία άνω τμήματος συσκευασίας:  $T_\Sigma = 50 \text{ }^\circ\text{C}$
- Θερμοκρασία αέρα στο περιβάλλον :  $T_{en} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$
- Θερμοκρασία αέρα στο εσωτερικό του θερμοθαλάμου :  $T_{in} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$

- Θερμοκρασία επιφανειών στις οποίες τοποθετούνται οι αντιστάσεις: :  $T_{srf} = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$

Από την επίλυση του θερμοκρασιακού πεδίου στο θερμοθάλαμο λαμβάνονται τα αποτελέσματα (Εικόνα 6) για τη χρονική στιγμή  $t = 2\text{ min}$  (φάση (2), Διάγραμμα 5), ωστόσο ο θερμοθάλαμος είναι ήδη από τη φάση (1) προθερμασμένος (σχέση 11) και ουσιαστικά τη χρονική στιγμή  $t = 2\text{ min}$  βρίσκεται σε ήδη λειτουργία για χρόνο:  $t = 2 + 5 = 7\text{ min}$ . Σύμφωνα με την εικόνα (6) η θερμοκρασία στο εξωτερικό τοίχωμα του θερμοθαλάμου είναι:  $T_{osrf} = 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  και αποτελεί την τιμή της θερμοκρασίας που εισάγεται στις σχέσεις για τον υπολογισμό του συντελεστή εξαναγκασμένης συναγωγής.



**Εικόνα 9.** Θερμοκρασιακό πεδίο θερμοθαλάμου με αντιστάσεις σε λειτουργία στη φάση (2).

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα από την επίλυση του θερμοκρασιακού πεδίου στη φάση (2), η μέση θερμοκρασία του στρώματος μεταξύ αέρα και επιφάνειας πολυεστέρα υπολογίζεται ως εξής:

$$T_f = \frac{T_s + (T_{\infty} = T_{osrf})}{2} = \frac{273.15 + 275.15}{2} = 274.15\text{ K} \quad (36)$$

Οι ιδιότητες του αέρα σε θερμοκρασία  $T_f = 274.15\text{ K}$  και πίεση  $P = 1\text{ bar}$  είναι:

$$\rho|_{274.15\text{ K}} = 1.285 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\nu|_{274.15\text{ K}} = 1.344 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$



$$\lambda|_{274.15 \text{ K}} = 0.0244 \frac{W}{m \text{ K}}$$

$$\alpha|_{274.15 \text{ K}} = 19.01 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}$$

$$c_p|_{274.15 \text{ K}} = 1.0038 \frac{kJ}{kg \text{ K}}$$

Ο αριθμός Reynolds υπολογίζεται ως:

$$\begin{aligned} Re_L &= \frac{U_\infty L}{\nu} = \\ &= 4.6 \cdot 10^5 < (Re_{cr} = 5 \times 10^5) \rightarrow \\ &\rightarrow \text{Και η ροή είναι στρωτή.} \end{aligned} \quad (37)$$

Ο αριθμός Prandtl υπολογίζεται ως:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = 0.71 \quad (38)$$

Ο αριθμός Nusselt υπολογίζεται ως:

$$\begin{aligned} Nu_L &= 0.664 Re_L^{0.5} Pr^{1/3} = \\ &= 401.8 \end{aligned} \quad (39)$$

Και σύμφωνα με τη σχέση (39) ο συντελεστής εξαναγκασμένης συναγωγής υπολογίζεται ως:

$$h = Nu_L \frac{\lambda}{L} = 17.83 \frac{W}{m^2 \text{ K}} \quad (40)$$

**IV.** Με ακτινοβολία από το ζεστό τρόφιμο θερμοκρασίας  $T_p = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ , από την ακτινοβολία του ζεστού τροφίμου που ανακλάται στις ανακλαστικές επιφάνειες αλουμινίου με κυψελίδα αέρα και φυσικά από τις αντιστάσεις. Ο μηχανισμός μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία στο σενάριο «B» έχει μεγαλύτερη επιρροή στο δημιουργηθέν θερμοκρασιακό πεδίο από ό,τι στο σενάριο «A» αλλά είναι σαφώς μικρότερης δυναμικότητας από τη συνεισφορά των υπόλοιπων μηχανισμών μετάδοσης θερμότητας στο εσωτερικό του θερμοθαλάμου. Ειδικότερα αν θεωρηθεί ότι οι θερμοκρασίες μεταξύ των πλακών στις οποίες εφάπτονται οι αντιστάσεις είναι περίπου ίσες τότε η πυκνότητα θερμικής ροής από τη μία πλάκα στην άλλη είναι σχεδόν μηδενική (σχέση 41).

Αναφορικά με τις θερμικές απώλειες λόγω ακτινοβολίας, παραμένουν εξαιρετικά χαμηλές εν συγκρίσει με τις απώλειες που οφείλονται στους υπόλοιπους μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας και κυρίως της εξαναγκασμένης συναγωγής. Το γεγονός αυτό οφείλεται τόσο στο υλικό των ανακλαστικών επιφανειών αλουμινίου οι οποίες έχουν ημισφαιρική ανακλαστικότητα  $\rho = 0.97$  όσο και στη μηδενική σχεδόν πυκνότητα θερμικής ροής μεταξύ των πλακών.

Η ροή θερμότητας λόγω ακτινοβολίας μεταξύ δύο παράλληλων επιφανειών με ίσους συντελεστές εκπομπής  $\varepsilon_1$  και  $\varepsilon_2$  υπολογίζεται ως:

$$q_{1 \rightarrow 2} \equiv \frac{Q_{1 \rightarrow 2}}{A} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad [W] \quad (41)$$

Όπου:

- $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$ , η σταθερά των Stefan-Boltzmann.
- $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.05$ , οι συντελεστές εκπομπής.
- $A = \pi r^2 = 3.24 \cdot 0.04 = 0,126 m^2$ , το εμβαδόν της επιφάνειας του ζεστού τροφίμου.

Και η σχέση (41) γίνεται :  $\frac{Q_{1 \rightarrow 2}}{A} = \frac{5.67 \cdot 10^{-8} (\approx 0)}{39} \approx 0 W$ .

### 3.4.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων σεναρίου B.

Κατόπιν της εισαγωγής των δεδομένων στο λογισμικό «Comsol Multiphysics» όπως αυτά υπολογίζονται στην (§ 3.4), επιλύεται το θερμοκρασιακό πεδίο στο θερμοθάλαμο με χρονικό βήμα αποτελεσμάτων ίσο με ένα λεπτό (ομοίως με το σενάριο «Α»). Το χρονικό διάστημα ενδιαφέροντος στο σενάριο (B) περιλαμβάνει το χρόνο που αντιστοιχεί στην κατάσταση προθέρμανσης του θερμοθαλάμου και το οποίο είναι πέντε λεπτά καθώς επίσης και το χρονικό διάστημα των δέκα λεπτών, που αντιστοιχούν στον κύκλο αποστολής παραγγελίας (φάση: 2,3, Διάγραμμα 5).

Αναφορικά με τα αποτελέσματα που αφορούν την κατάσταση προθέρμανσης του θερμοθαλάμου, η εξέταση τους αποσκοπεί στην επιβεβαίωση των υπολογισμών (σχέσεις: 11, 12 ,13). Ειδικότερα, εξετάζεται η επάρκεια των τοποθετηθέντων αντιστάσεων, συγκρίνοντας τη θερμοκρασία που προκύπτει από την επίλυση του θερμοκρασιακού πεδίου στο λογισμικό «Comsol Multiphysics», με τη θερμοκρασία που τίθεται στη σχέση (9).

Οι χρονικές στιγμές για τις οποίες θα ληφθούν τα στιγμιότυπα του θερμοκρασικού πεδίου είναι:

- $t_1 = 1 \text{ min}$ : Ένα λεπτό μετά την έναρξη προθέρμανσης του θερμοθαλάμου
- $t_2 = 3 \text{ min}$  : Σύμφωνα με το χρονικό διάστημα που έχει ορισθεί στη σχέση (11), η θερμοκρασία του θερμοθαλάμου εκτιμάται ότι θα είναι  $T_{in} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$  σε χρόνο πέντε λεπτών κι η ισχύς που απαιτείται για αυτήν τη θερμοκρασιακή μεταβολή ( $\Delta T = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ ), είναι:  $P_{\omega\phi} = 52 \text{ W}$  όπως αυτή υπολογίζεται στη σχέση (12). Ωστόσο η επιλεγείσα τιμή για την ισχύ των αντιστάσεων ορίστηκε  $P_{\omega\phi} = 120 \text{ W}$  . Κατά συνέπεια ο χρόνος που απαιτείται τελικώς για τη θερμοκρασιακή μεταβολή του αέρα ( $\Delta T = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ ) , ο χρόνος δηλαδή στον οποίο διατίθεται ενέργεια  $Q = 15,500 \text{ J}$  (σχέση 10) από αντιστάσεις ισχύος  $P_{\omega\phi} = 120 \text{ W}$  , υπολογίζεται ως:

$$t = \frac{Q}{P_{\omega\phi}} = \frac{15,500}{120} = 129.2 \text{ s} \rightarrow 2.2 \text{ min} \quad (42)$$

Κι επειδή το χρονικό βήμα των αποτελεσμάτων είναι ίσο με ένα λεπτό, επιλέγεται η τιμή  $t_2 = 3 \text{ min}$ .

- $t_3 = t_{\pi} + t_{\phi 12} = 5 + 2 = 7 \text{ min}$  : Έναρξη κύκλου αποστολής παραγγελίας.

Όπου:  $t_{\pi} = 5 \text{ min}$ , ο χρόνος προθέρμανσης (βλ. σχέση 11)

Και  $t_{\phi 12} = 2 \text{ min}$ , ο χρόνος που αντιστοιχεί στις φάσεις (2) και (3) του διαγράμματος (5).

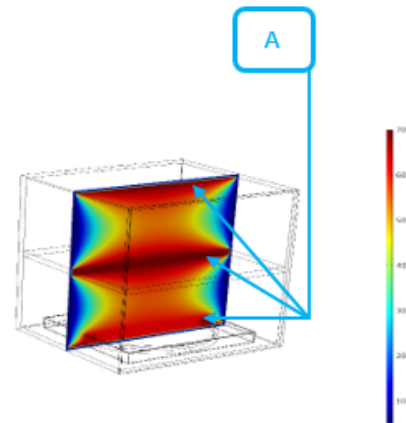
- $t_4 = t_3 + 5 = 12 \text{ min}$  : Μέσο χρονικού εύρους ( $\Delta T = 10 \text{ min}$ ) κύκλου αποστολής παραγγελίας.
- $t_5 = 17 \text{ min}$  : Λήξη του κύκλου αποστολής παραγγελίας, φάση 3 (βλ. Διάγραμμα 5)

Ακολουθούν οι χρωματικοί χάρτες αναπαράστασης του θερμοκρασικού πεδίου για τις ανωτέρω χρονικές στιγμές:

Χρονική στιγμή  $t_1 = 1 \text{ min}$

**Εικόνα 10**

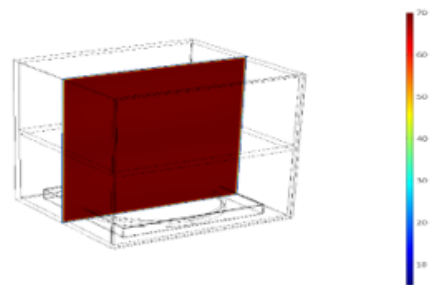
Θερμοκρασιακό  
πεδίο θερμοθαλάμου  
τη χρονική στιγμή  
 $t_1 = 1 \text{ min}$ .



Χρονική στιγμή  $t_2 = 3 \text{ min}$

**Εικόνα 11**

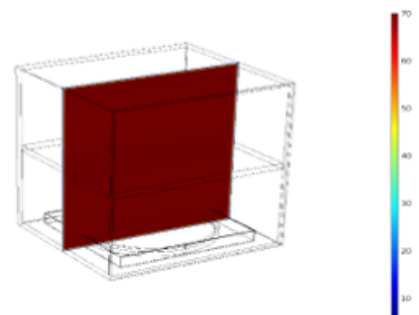
Θερμοκρασιακό  
πεδίο θερμοθαλάμου  
τη χρονική στιγμή  
 $t_2 = 3 \text{ min}$ .



Χρονική στιγμή  $t_3 = 7 \text{ min}$

**Εικόνα 12**

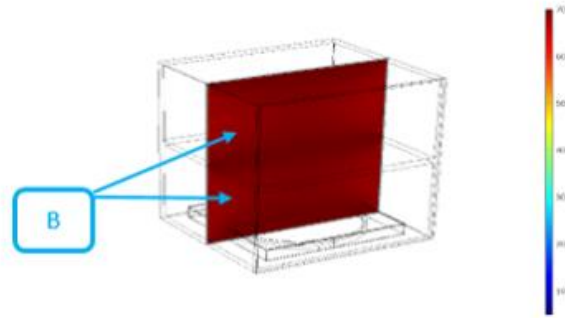
Θερμοκρασιακό  
πεδίο θερμοθαλάμου  
τη χρονική στιγμή  
 $t_3 = 7 \text{ min}$ .



Χρονική στιγμή  $t_4 = 12 \text{ min}$

**Εικόνα 13**

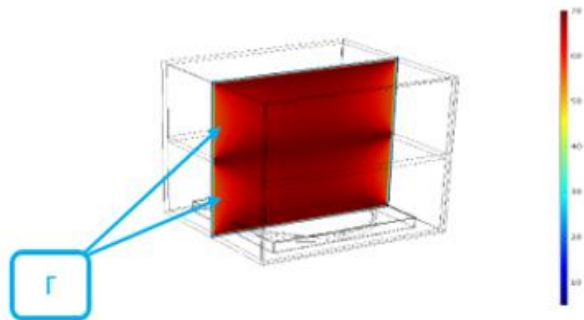
Θερμοκρασιακό  
πεδίο θερμοθαλάμου  
τη χρονική στιγμή  
 $t_4 = 12 \text{ min}$ .



Χρονική στιγμή  $t_5 = 17 \text{ min}$

**Εικόνα 14**

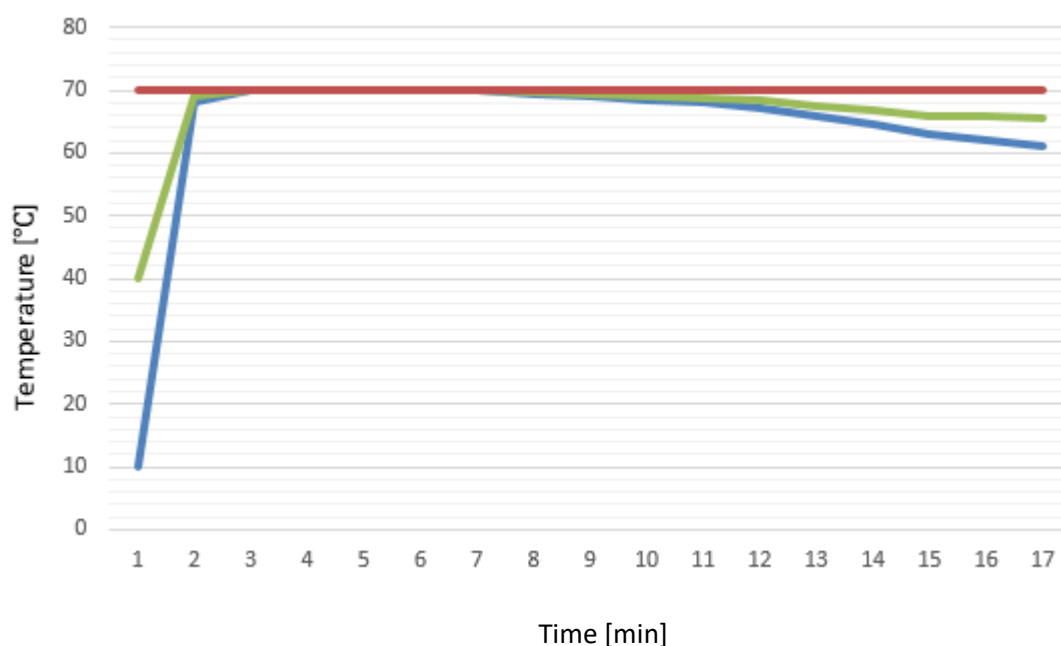
Θερμοκρασιακό  
πεδίο θερμοθαλάμου  
τη χρονική στιγμή  
 $t_5 = 17 \text{ min}$ .



Τη χρονική στιγμή  $t_1 = 1 \text{ min}$  (Εικόνα 10), παρατηρείται η συμβολή των τοποθετηθέντων αντιστάσεων (περιοχή «Α») στη διαμόρφωση του θερμοκρασιακού πεδίου στο εσωτερικό του θερμοθαλάμου. Η θερμοκρασία στον περιβάλλοντα όγκο των αντιστάσεων είναι της τάξης των  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  πλην της αντίστασης στη βάση του θερμοθαλάμου όπου η θερμοκρασία βαίνει αυξανόμενη από τους  $64 \text{ }^\circ\text{C}$ . Τη χρονική στιγμή  $t_2 = 3 \text{ min}$  το θερμοκρασιακό πεδίο στο θερμοθάλαμο είναι ομοιόμορφο με μέση θερμοκρασία  $\bar{T}_2 = 70^\circ$  όπως ανεμένετο σύμφωνα με τη σχέση (42). Τη χρονική στιγμή  $t_4 = 12 \text{ min}$  το όχημα βρίσκεται στη μέση του κύκλου αποστολής παραγγελίας κι οι απώλειες θερμότητας κυρίως λόγω εξαναγκασμένης συναγωγής δημιουργούν μία μικρή μεταβολή στην περιοχή «Β» του θερμοκρασιακού πεδίου στην οποία η μέση θερμοκρασία είναι:  $\bar{T}_B = 67 \text{ }^\circ\text{C}$ . Η θερμοκρασία στον όγκο ελέγχου που περιλαμβάνει το ζεστό τρόφιμο είναι  $T_V = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ . Τη χρονική στιγμή  $t_5 = 17 \text{ min}$  που τελειώνει ο κύκλος αποστολής παραγγελίας, παρατηρείται στην περιοχή «Γ» η δημιουργία ενός ημισφαιρικού (κατα προσέγγιση) θερμοκρασιακού πεδίου, στο οποίο η ελάχιστη τιμή της θερμοκρασίας είναι:  $T_{\Gamma min} = 61 \text{ }^\circ\text{C}$ . Το γεγονός αυτό οφείλεται φυσικά στην επίδραση των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας και κυρίως της εξαναγκασμένης συναγωγής. Οι απώλειες θερμότητας από τη μεταβατική κατάσταση μέχρι την έναρξη του κύκλου αποστολής παραγγελίας είναι αμελητέες ενώ οι συνολικές απώλειες στον κύκλο αποστολής παραγγελίας είναι:  $Q_B = 29 \text{ W}$ .

Μολονότι η επιρροή των απωλειών στη διαμόρφωση του θερμοκρασιακού πεδίου της περιοχής (Γ) είναι σημαντική, η επίδραση των αντιστάσεων στο θερμοκρασιακό πεδίο εσωτερικά του θερμοθαλάμου είναι καταλυτικής σημασίας. Όπως προκύπτει από την εικόνα (14) η θερμοκρασία στην περιοχή «Α» είναι σταθερή στην τιμή:  $T_A = 70\text{ }^\circ\text{C}$  και συνεπώς το ζεστό τρόφιμο παραδίδεται στη σωστή θερμοκρασία και φυσικά εκτός επικίνδυνης θερμοκρασιακής ζώνης.

Στο διάγραμμα (7) παρουσιάζεται η μεταβολή της ελάχιστης, μέσης και μέγιστης τιμής της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του θερμοθαλάμου για το σενάριο «B», στο χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από την προθέρμανση του θερμοθαλάμου μέχρι την έναρξη της φάσης (3) (Διάγραμμα 5).



**Διάγραμμα 7.** Μεταβολή της μέγιστης, μέσης και ελάχιστης τιμής της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του θερμοθαλάμου συναρτήσει του χρόνου. Με μπλε χρώμα παρουσιάζεται η ελάχιστη θερμοκρασία, με κόκκινο χρώμα παρουσιάζεται η μέγιστη θερμοκρασία και με πράσινο χρώμα η μέση θερμοκρασία.

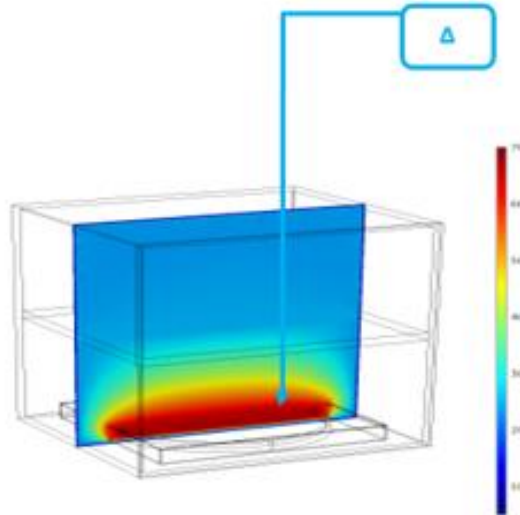
3.4.2 Υπολογισμός ελάχιστης θερμοκρασίας περιβάλλοντος για την οποία απαιτείται η ενεργοποίηση των αντιστάσεων.

Στο εσωτερικό του θερμοθαλάμου εγκαθιστάται θερμοστάτης χώρου τύπου «0/100» έτσι ώστε να ρυθμίζεται η παροχή ενέργειας από το συσσωρευτή προς τις αντιστάσεις. Ο θερμοστάτης ρυθμίζεται να λειτουργεί στο θερμοκρασιακό εύρος:  $\Delta T: 67\text{ }^\circ\text{C} \leftrightarrow 70\text{ }^\circ\text{C}$ . Επομένως τη χρονική στιγμή κατά την οποία η θερμοκρασία του θερμοθαλάμου βρίσκεται στους  $70\text{ }^\circ\text{C}$ , διακόπτεται η παροχή ενέργειας από τον συσσωρευτή προς τις αντιστάσεις μέχρι η θερμοκρασία του θερμοθαλάμου, στο σημείο που είναι εγκατεστημένος ο θερμοστάτης να γίνει  $67\text{ }^\circ\text{C}$ , οπότε και κλείνει το

κύκλωμα των αντιστάσεων προκειμένου να αυξηθεί η θερμοκρασία μέχρι τους 70 °C. Όμως αυτή η λειτουργία του θερμοστάτη αφορά τέτοιες θερμοκρασιακές συνθήκες περιβάλλοντος οι οποίες επιδρούν στο θερμοκρασιακό πεδίο του θερμοθαλάμου, με τρόπο που τείνει να μειώσει τη θερμοκρασία στο ζεστό τρόφιμο που είναι τοποθετημένο στο εσωτερικό του. Ωστόσο υπάρχουν αρκετές μέρες στη διάρκεια του έτους (λ.χ. θερινοί μήνες) στις οποίες η θερμοκρασία περιβάλλοντος δύναται να θεωρηθεί αρκούντως ικανή, ώστε να μπορεί να ολοκληρωθεί ένας κύκλος παραγωγής χωρίς τη λειτουργία των αντιστάσεων και ταυτόχρονα η θερμοκρασία του ζεστού προϊόντος να μην βρεθεί εντός επικίνδυνης θερμοκρασιακής ζώνης. Πρόκειται ουσιαστικά για περίπτωση μελέτης που εμπίπτει στο σενάριο «Α» με την έννοια ότι δεν λαμβάνονται υπόψη οι αντιστάσεις. Επομένως αναζητείται εκείνη η θερμοκρασία περιβάλλοντος για την οποία είναι δυνατόν να τοποθετηθεί στο θερμοθάλαμο ζεστό τρόφιμο θερμοκρασίας 70 °C στη φάση (1), (Διάγραμμα 5) και να ολοκληρωθεί ο κύκλος αποστολής παραγωγής στη φάση (3) κι η θερμοκρασία του ζεστού τροφίμου στο σημείο χαμηλότερης θερμοκρασίας δηλαδή στην άνω επιφάνεια του, να είναι τουλάχιστον 65 °C δηλαδή πέντε βαθμούς χαμηλότερα από την ιδανική θερμοκρασία παράδοσης του ζεστού τροφίμου.

Για την εύρεση αυτής της θερμοκρασίας περιβάλλοντος εισάγεται στο λογισμικό «Comsol Multiphysics» η θερμοκρασία του ζεστού τροφίμου (70 °C) και μία εκτίμηση της ζητούμενης θερμοκρασίας περιβάλλοντος προκειμένου να επιλυθεί το θερμοκρασιακό πεδίο στο θερμοθάλαμο. Η ζητούμενη θερμοκρασία είναι εκείνη κατά την οποία στην περιοχή «Δ» (Εικόνα 10) η ελάχιστη θερμοκρασία είναι 65 °C.

Εφαρμόζοντας την ανωτέρω διαδικασία προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα για χρονικό διάστημα που αντιστοιχεί σε έναν κύκλο αποστολής παραγωγής  $t = 10 \text{ min}$  :



**Εικόνα 15.** Θερμοκρασιακό πεδίο στο εσωτερικό του θερμοθαλάμου τη χρονική στιγμή  $t=10 \text{ min}$ .

Όπως παρατηρείται στην εικόνα (15), η θερμοκρασία στην περιοχή ( $\Delta$ ) του ζεστού του τροφίμου η οποία αποτελεί και την περιοχή ελάχιστης θερμοκρασίας στο ζεστό τρόφιμο, είναι:  $T \geq 65 \text{ }^\circ\text{C}$  και η αντίστοιχη θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι:  $T_{env.} = 27 \text{ }^\circ\text{C}$ .

## Κεφάλαιο 4 Συστήματα αναπλήρωσης θερμικών απωλειών.

Τα συστήματα αναπλήρωσης των θερμικών απωλειών στο θερμοθάλαμο είναι επιφορτισμένα με την παροχή ενέργειας στις αντιστάσεις προκειμένου η θερμοκρασία στο εσωτερικό του θερμοθαλάμου να κυμαίνεται μεταξύ των τιμών:  $67 \text{ }^\circ\text{C}$  έως  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ . Οι απώλειες θερμότητας από το εσωτερικό του θερμοθαλάμου προς το περιβάλλον κατά τη διάρκεια ενός κύκλου αποστολής παραγγελίας είναι:  $Q_B = 29 \text{ W}$ , όπως υπολογίζονται με χρήση του λογισμικού «Comsol Multiphysics» (§ 3.4.1.) κι επομένως τα συστήματα αναπλήρωσης θερμικών απωλειών σχεδιάζονται έτσι ώστε:

α) Να παρέχουν ίσο ποσό θερμότητας στο εσωτερικό του θερμοθαλάμου με αυτό που διαφεύγει στο περιβάλλον κατά την κίνηση του οχήματος, σε έναν κύκλο αποστολής παραγγελίας.

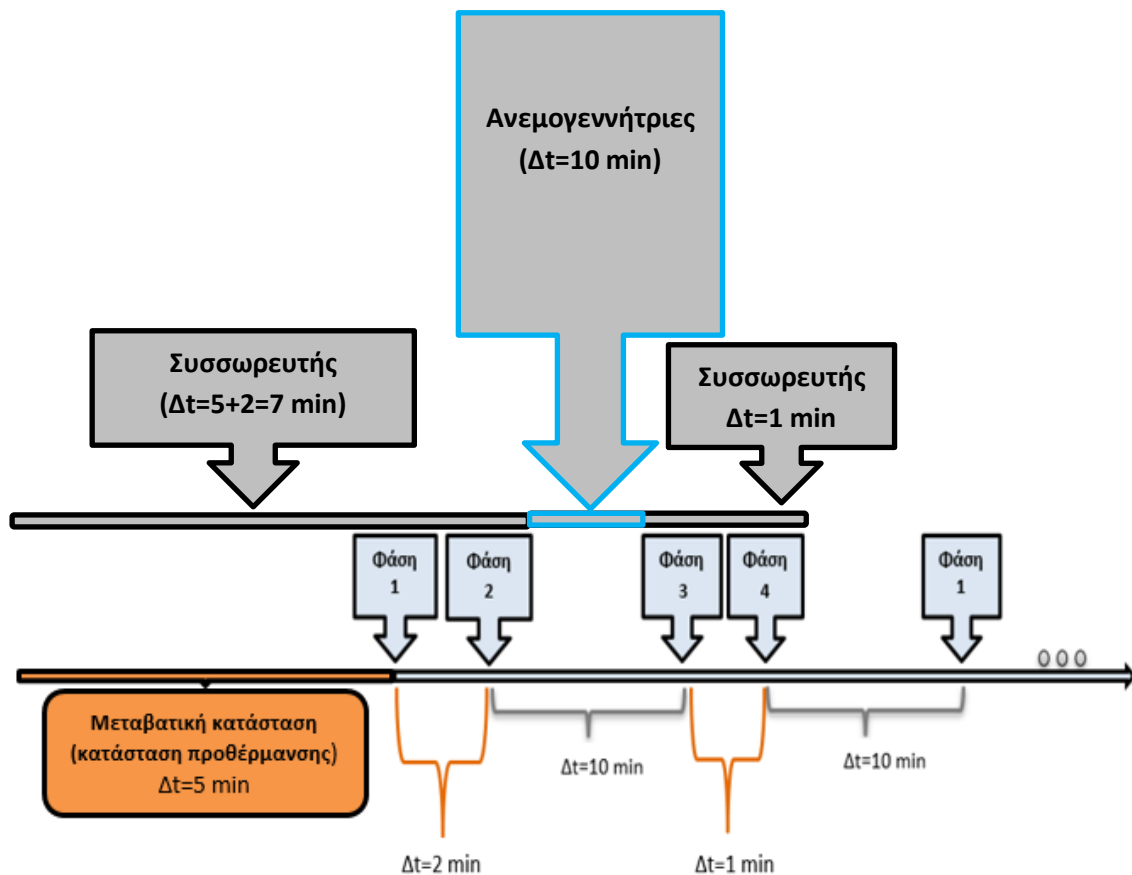
β) Ο συσσωρευτής να παρέχει την απαιτούμενη ενέργεια για την τροφοδοσία των αντιστάσεων στη μεταβατική κατάσταση (κατάσταση προθέρμανσης) του θερμοθαλάμου.

γ) Οι ανεμογεννήτριες αφενός να παρέχουν την ισχύ που απαιτείται έτσι ώστε η θερμοκρασία στο εσωτερικό του θερμοθαλάμου να κυμαίνεται στο θερμοκρασιακό εύρος:  $\Delta T$ :  $67 \text{ }^\circ\text{C}$  έως  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  στο οποίο είναι ρυθμισμένος ο θερμοστάτης (§ 3.4.2) κι αφετέρου να παρέχουν την απαιτούμενη ενέργεια φόρτισης της μπαταρίας.



#### 4.1 Πρωτοβάθμιο σύστημα αναπλήρωσης θερμικών απωλειών (συσσωρευτής)

Το πρωτοβάθμιο σύστημα αναπλήρωσης θερμικών απωλειών αποτελείται από έναν συσσωρευτή μολύβδου πολλαπλών κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης. Ο ρόλος του συσσωρευτή είναι η παροχή της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας στις αντιστάσεις κατά τη μεταβατική κατάσταση και τις φάσεις (1) και (2) (Διάγραμμα 5) καθώς επίσης και καθόλη τη διάρκεια του κύκλου αποστολής παραγγελίας. Αναφορικά με την ενέργεια που παρέχει ο συσσωρευτής στις ηλεκτρικές αντιστάσεις στη διάρκεια του κύκλου αποστολής παραγγελίας, αυτή θα προέρχεται από το σύστημα των ανεμογεννητριών διαμορφώνοντας το εξής σχήμα ροής ενέργειας:



**Διάγραμμα 8.** Ροή ενέργειας στα συστήματα αναπλήρωσης θερμικών απωλειών.

Σύμφωνα με το διάγραμμα (8) ο χρόνος παροχής ενέργειας αποκλειστικά από το συσσωρευτή είναι:

- $\Delta t_1 = 5 + 2 + 1 = 8 \text{ min}$ , όταν υπάρχει μεταβατική κατάσταση, δηλαδή στον κύκλο πρώτου δρομολογίου.

- $\Delta t_2 = 2 + 1 = 3 \text{ min}$  σε κάθε επανάληψη του κύκλου.

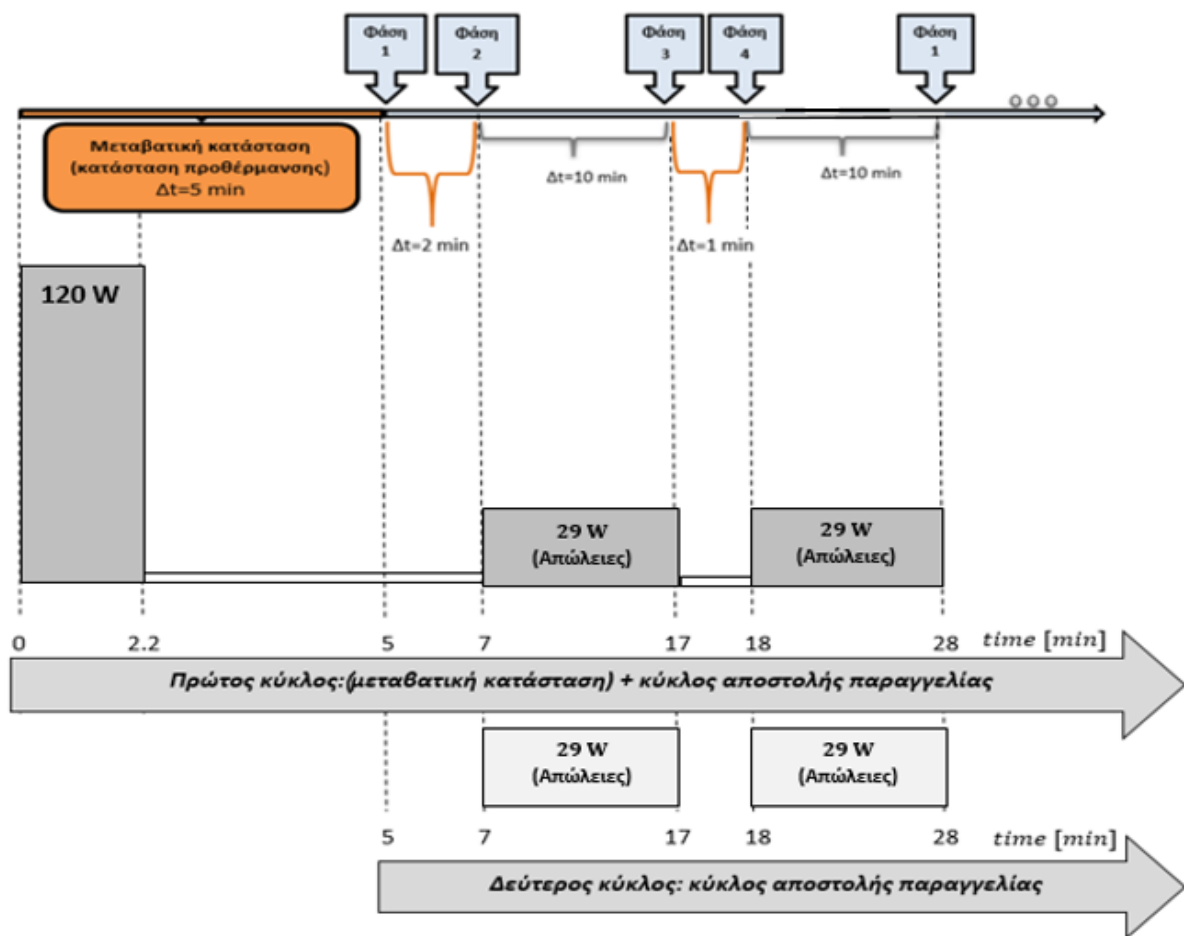
Σύμφωνα με τα ανωτέρω χρονικά διαστήματα θα επαρκούσε ένας συσσωρευτής του οποίου η χωρητικότητα θα ήταν τόση ώστε να διατηρεί σε λειτουργία το σύστημα για χρονικό διάστημα:  $\Delta t_T = 8 + 3 = 11 \text{ min}$ , διότι κατά τη διάρκεια του κύκλου αποστολής παραγγελίας (φάση 2 έως 3, Διάγραμμα 8) από το σύνολο της ενέργειας που παράγεται από τις ανεμογεννήτριες, ένα ποσοστό είναι η ενέργεια φόρτισης του συσσωρευτή, η οποία είναι ίση με την ενέργεια που δαπανήθηκε κατά τη μεταβατική κατάσταση και τις φάσεις (1) έως (2) και (3) έως (4). Επομένως ο συσσωρευτής θα έχει επαναφορτιστεί και θα κάλυπτε τις απαιτήσεις ενέργειας του χρονικού διαστήματος ( $\Delta t=2 \text{ min}$ ) που ακολουθεί στον αμέσως επόμενο κύκλο.

Ωστόσο επιβάλλεται η επιλογή μεγαλύτερης χωρητικότητας για τους εξής λόγους:

- I. Πρόκειται για το πρωτοβάθμιο σύστημα κι επιβάλλεται να τεθεί ένας συντελεστής ασφαλείας στην επιλογή της χωρητικότητας έτσι ώστε η επιλεγείσα τιμή να επαρκεί για την τροφοδοσία των αντιστάσεων αποκλειστικά από το συσσωρευτή τόσο για τον πρώτο κύκλο αποστολής παραγγελίας, στον οποίο περιλαμβάνεται κι η μεταβατική κατάσταση όσο και για έναν ακόμη. Κατά συνέπεια ο χρόνος αδιάλειπτης λειτουργίας του συσσωρευτή θα είναι σύμφωνα με το διάγραμμα (8):

$$t = 5 + 2 + 10 + 1 + 10 + 2 + 10 + 1 + 10 = 51 \text{ min} \quad (43)$$

Ο χρόνος που υπολογίζεται στη σχέση (43) αντιστοιχεί σε δύο κύκλους αποστολής παραγγελίας εκ των οποίων ο πρώτος κύκλος περιλαμβάνει και τη μεταβατική κατάσταση ενώ ο δεύτερος περιλαμβάνει μόνο τον κύκλο αποστολής παραγγελίας καθότι ο θερμοθάλαμος είναι ήδη από τον πρώτο κύκλο σε λειτουργία. Επίσης περιλαμβάνονται και τα χρονικά διαστήματα που αντιστοιχούν στις φάσεις (1) έως (2) και (3) έως (4), στις οποίες όμως οι απώλειες είναι αμελητέες κι επομένως το κύκλωμα του θερμοστάτη θα έχει διακόψει την τροφοδοσία των αντιστάσεων με ρεύμα. Η αρχική εκτίμηση για την χωρητικότητα που απαιτείται να έχει ο συσσωρευτής για την πλήρη κάλυψη των δύο κύκλων υπολογίζεται με χρήση του ακόλουθου διαγράμματος (Διάγραμμα 9), ως εξής:



Διάγραμμα 9. Επιμερισμός ισχύων για δύο πλήρεις κύκλους λειτουργίας.

$$\begin{array}{l}
 \text{Πρώτος κύκλος:} \\
 - 120 \text{ Watt} \times 2.2 \text{ min} |_{0 \rightarrow 2.2} \\
 - 29 \text{ Watt} \times 10 \text{ min} |_{7 \rightarrow 17} \\
 - 29 \text{ Watt} \times 10 \text{ min} |_{18 \rightarrow 28} \\
 \\
 \text{Δεύτερος κύκλος:} \\
 - 29 \text{ Watt} \times 10 \text{ min} |_{7 \rightarrow 17} \\
 - 29 \text{ Watt} \times 10 \text{ min} |_{18 \rightarrow 28}
 \end{array}
 \Rightarrow$$

$$\begin{aligned}
\Rightarrow \left. \begin{aligned}
Q(Ah)|_{0 \rightarrow 2.2} &= \frac{P}{V} \cdot \frac{\Delta t}{60} = \frac{120}{12} \cdot \frac{2.2}{60} = 0.37 Ah \\
Q(Ah)|_{7 \rightarrow 17} &= \frac{P}{V} \cdot \frac{\Delta t}{60} = \frac{29}{12} \cdot \frac{10}{60} = 0.41 Ah \\
Q(Ah)|_{18 \rightarrow 28} &= \frac{P}{V} \cdot \frac{\Delta t}{60} = \frac{29}{12} \cdot \frac{10}{60} = 0.41 Ah \\
Q(Ah)|_{7 \rightarrow 17} &= \frac{P}{V} \cdot \frac{\Delta t}{60} = \frac{29}{12} \cdot \frac{10}{60} = 0.41 Ah \\
Q(Ah)|_{18 \rightarrow 28} &= \frac{P}{V} \cdot \frac{\Delta t}{60} = \frac{29}{12} \cdot \frac{10}{60} = 0.41 Ah
\end{aligned} \right\} \Rightarrow \\
\Rightarrow \quad Q(Ah)|_{0 \rightarrow 42.2} = 2.01 Ah \quad (44)
\end{aligned}$$

Όπου  $\Delta t=42.2 \text{ min.}$ , είναι το συνολικό χρονικό διάστημα λειτουργίας του συσσωρευτή.

**II.** Για τη βέλτιστη χρήση του συσσωρευτή η οποία και οδηγεί στο μέγιστο πλήθος κύκλων φορτίσης-αποφόρτισης συνίσταται η λειτουργία του σε εύρος χωρητικότητας:  $\Delta Q = 85\% - 30\% = 55\%$  και προκειμένου ο φορτιστής να «εργάζεται» σε αυτό το εύρος φορτίου, είναι συνδεδεμένος με κατάλληλο ρυθμιστή φόρτισης. Επομένως το 55% της χωρητικότητας που θα επιλεγεί, θα πρέπει να επαρκεί για τη συνεχή λειτουργία του συσσωρευτή.

Ο προσδιορισμός της χωρητικότητας του συσσωρευτή για την πλήρη κάλυψη δύο κύκλων έχει ως εξής:

$$Q(Ah)|_{Tot.} = \frac{2.01}{55\%} = 3.7 Ah \rightarrow 4 Ah. \quad (45)$$

Τα χαρακτηριστικά του συσσωρευτή (Εικόνα 3) που επιλέγεται είναι συγκεντρωτικά (Πίνακας 2):

Συσσωρευτής	
Τύπος	Κλειστού τύπου, μολύβδου βαθείας εκφόρτισης.
Τάση	12 V
Χωρητικότητα	4 Ah
Βάρος	1.22 kg
Διαστάσεις	185 × 45 × 78

**Πίνακας 2.** Συγκεντρωτικά στοιχεία συσσωρευτή



**Εικόνα 16.** Συσσωρευτής πρωτοβάθμιου συστήματος.

Οι αντιστάσεις που τοποθετούνται στο θερμοθάλαμο, είναι σε μορφή “φιλμ” κι έχουν επιφάνεια:  $A = 0.3 \text{ m}^2$  έκαστη. Η ισχύς της κάθε αντίστασης είναι: 35 W, 40 W και 45 W (σχήμα 4) κι η μεταξύ τους σύνδεση είναι παράλληλη ώστε σε περίπτωση αστοχίας σε κάποια αντίσταση να μην επηρεαστεί η λειτουργία των υπολοίπων.

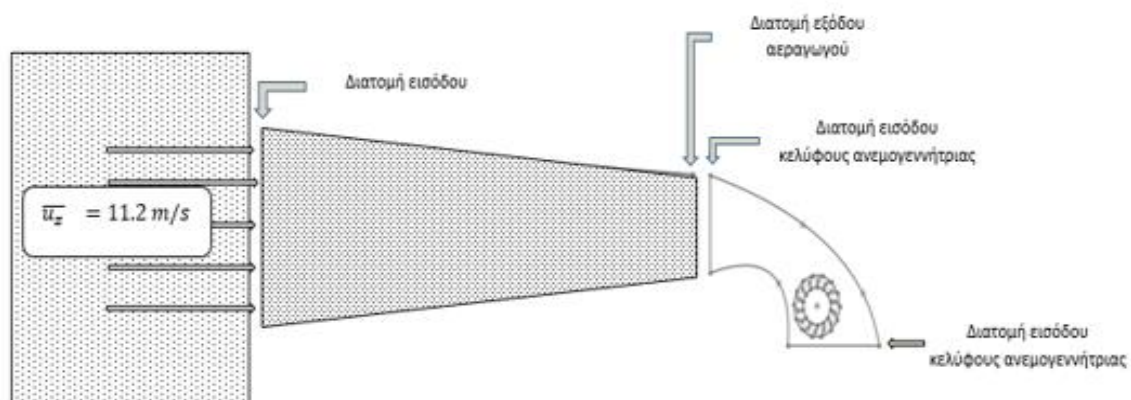


**Εικόνα 17.** Φιλμ αντίστασης θερμότητας (heating film) που τοποθετείται στο θερμοθάλαμο.

## 4.2 Δευτεροβάθμιο σύστημα αναπλήρωσης θερμικών απωλειών/cross flow turbine.

Ο ρόλος του δευτεροβάθμιου συστήματος αναπλήρωσης θερμικών απωλειών είναι η παροχή ενέργειας στο συσσωρευτή κατά την κίνηση του οχήματος τόσο στον κύκλο αποστολής παραγγελίας όσο και κατά την επιστροφή του οχήματος στη βάση του (φάσεις: 2 έως 3 και 4 έως 1 αντίστοιχα, Διάγραμμα 9). Από την παραχθείσα ενέργεια κάποιο ποσοστό τροφοδοτεί τις αντιστάσεις του θερμοθαλάμου και το υπόλοιπο αξιοποιείται για τη φόρτιση του συσσωρευτή. Η ενέργεια αυτή παράγεται μέσω των στροβίλων εφαπτομενικής ροής (cross flow turbine) του συστήματος ως εξής:

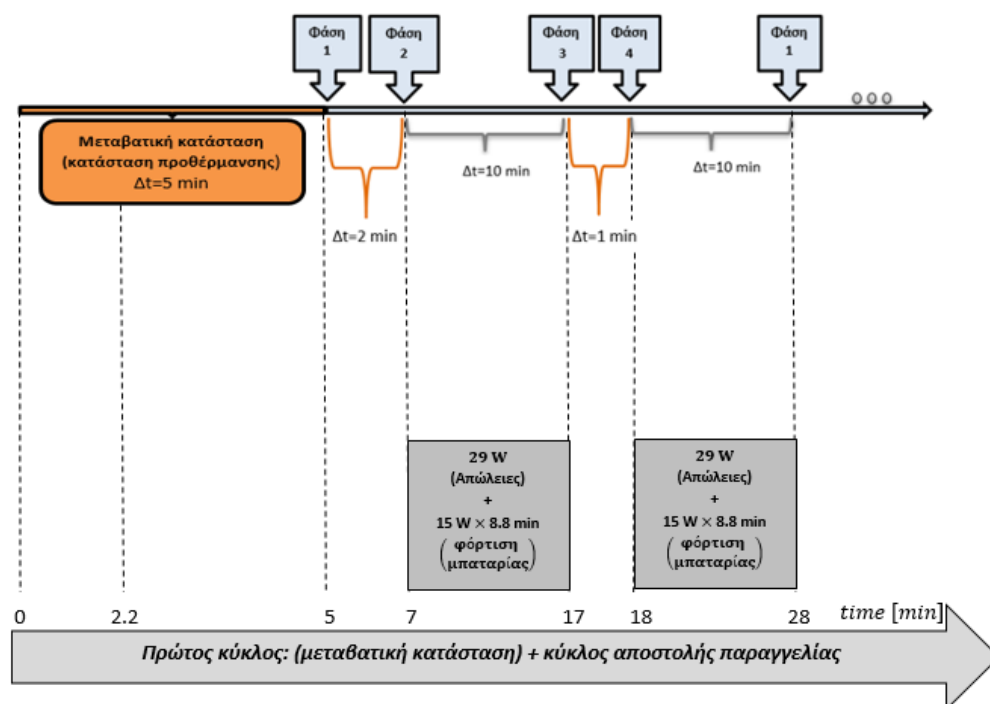
Κατά την κίνηση του οχήματος με μέση ταχύτητα  $\bar{u}_z = 11.2 \text{ m/s}$  (πίνακας 1), εισέρχεται τμήμα της προσπίπτουσας ροής αέρα στους αεραγωγούς του συστήματος οι οποίοι έχουν συγκλίνουσα μορφή. Στη διατομή εξόδου των αεραγωγών η ροή έχοντας επιταχυνθεί, εισέρχεται στη διατομή εισόδου του κελύφους των στροβίλων (σχήμα 4), στο οποίο επιταχύνεται περαιτέρω ώστε τελικά να εκτονωθεί στα πτερύγια του δρομέα τίθοντας τον σε περιστροφή. Οι δρομείς είναι συζευγμένοι με γεννήτρια συνεχούς ρεύματος, την οποία θέτουν σε περιστροφή και κατ'αυτόν τον τρόπο παράγεται συνεχές ρεύμα το οποίο κατευθύνεται στο συσσωρευτή προκειμένου με κάποιο ποσοστό να τροφοδοτηθούν οι αντιστάσεις και το υπόλοιπο να αξιοποιηθεί για την επαναφόρτιση του συσσωρευτή.



**Σχήμα 6.** Γενική διάταξη δευτεροβάθμιου συστήματος ενέργειας.

#### 4.2.1 Υπολογισμός ισχύος στροβίλων.

Η ισχύς της γεννήτριας πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με την ισχύ που απαιτείται από το σύστημα κατά την κίνηση του οχήματος στις φάσεις (2) έως (3) και (4) έως (1) έτσι ώστε να αναπληρώνονται οι θερμικές απώλειες του θερμοθαλάμου καθώς επίσης και να επαναφορτίζεται ο συσσωρευτής. Το ποσό ισχύος που απαιτείται για αυτήν τη διαδικασία υπολογίζεται με χρήση του ακόλουθου διαγράμματος (11), ως εξής:



**Διάγραμμα 10.** Απαιτήσεις ισχύος ανεμογεννητριών.

Η ισχύς των ανεμογεννητριών πρέπει να είναι τόση ώστε να αναπληρώνονται οι απώλειες κατά την κίνηση του οχήματος και ταυτόχρονα να επαναφορτίζεται ο συσσωρευτής. Ειδικότερα και σύμφωνα με το διάγραμμα (10), μεταξύ των φάσεων (2) έως (3) και (4) έως (1) οι απώλειες είναι:  $Q_B = 29 \text{ W}$ . Για την επαναφόρτιση του συσσωρευτή απαιτείται φορτίο ίσο με αυτό που καταναλώθηκε από το συσσωρευτή στη μεταβατική κατάσταση, δηλαδή:  $Q(Ah)|_{0 \rightarrow 2.2} = 0.37 \text{ Ah}$ . Η παραγωγή αυτού του φορτίου επιμερίζεται κατά το ήμισυ στις φάσεις (3) έως (4) και (4) έως (1). Η χρονική διάρκεια των φάσεων αυτών είναι:  $\Delta t = 10 \text{ min}$  ωστόσο επιλέγεται μικρότερο χρονικό διάστημα,  $\Delta t = 8.8 \text{ min}$  έτσι ώστε να καλυφθεί το ενδεχόμενο κίνησης του οχήματος με ταχύτητα μικρότερη από τη μέση ταχύτητα των προδιαγραφών ( $\bar{u}_z = 11.2 \text{ m/s}$ , πίνακας 1) για παράδειγμα στα δευτερόλεπτα που αντιστοιχούν στη φάση στάθμευσης του οχήματος κι επομένως μειωμένη ικανότητα παραγωγής ισχύος.

Ο υπολογισμός του φορτίου και της αντίστοιχης ισχύος πραγματοποιείται στα ακόλουθα βήματα:

$$Q(Ah)|_{7 \rightarrow 17} = \frac{0.37}{2} = 0.185 Ah$$

και

$$Q(Ah)|_{18 \rightarrow 28} = \frac{0.37}{2} = 0.185 Ah$$
(46)

Και η ισχύς που απαιτείται για την παραγωγή αυτού του φορτίου (σχέση 46) θα είναι:

$$P_{Q(7 \rightarrow 17, 18 \rightarrow 28)} = 0.37 \times \frac{60 \cdot 12}{8.8} = 30.3 W$$
(47)

Σύμφωνα με τα ανωτέρω η ισχύς των ανεμογεννητριών θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με τις απαιτήσεις ισχύος των φάσεων, που αντιστοιχούν στον κύκλο αποστολής παραγγελίας και στον κύκλο επιστροφής του οχήματος στη βάση (φάσεις (2) έως (3) και (4) έως (1) αντίστοιχα, Διάγραμμα 11).

Επομένως για την ισχύ των ανεμογεννητριών θα πρέπει να ισχύει:

$$P_{WT} \geq Q_B + P_{Q(7 \rightarrow 17, 18 \rightarrow 28)} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow P_{WT} \geq 50.3 W$$
(48)

Τελικώς η ισχύς των στροβίλων θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη κατάτι από την ισχύ της γεννήτριας αναπληρώνοντας τις απώλειες της μεταξύ τους σύζευξης. Ο μηχανικός βαθμός απόδοσης ενός τέτοιου συστήματος είναι της τάξης :  $\eta = 0.99$  και κατά συνέπεια η ισχύς των στροβίλων θα είναι:

$$P_{WTF} = \frac{P_G}{0.99}$$
(49)

Η γεννήτρια που επιλέγεται είναι συνεχούς ρεύματος χαμηλών στροφών λειτουργίας, ισχύος:  $P_G = 100 W$  (εικόνα 14).

Η σχέση (49) γίνεται:

$$P_{WTF} = 101 \rightarrow 110 W$$
(50)



**Εικόνα 18.** Γεννήτρια συνεχούς ρεύματος.

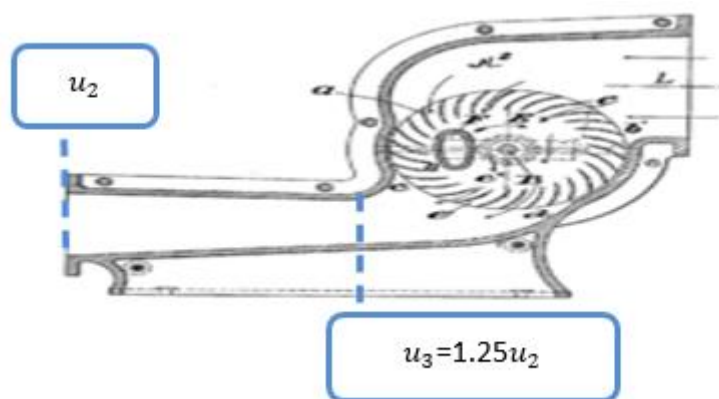


#### 4.2.2 Σχεδιασμός αεραγωγών (intakes) δευτεροβάθμιου συστήματος

Ο σχεδιασμός των αεραγωγών είναι μεγίστης σημασίας για την αποδοτική λειτουργία του δευτεροβάθμιου συστήματος διότι προσδιορίζονται οι διαστάσεις της διατομής εισόδου καθώς επίσης και η γωνία κλίσης του αεραγωγού, έτσι ώστε στη διατομή εξόδου (σχήμα 6, §4.2) να επιτευχθεί η απαιτούμενη επιτάχυνση της ροής, προκειμένου με την περαιτέρω επιτάχυνση της στο κέλυφος της τουρμπίνας και την πρόσπτωση της στα περύγια του δρομέα, να προκύπτει η απαιτούμενη ισχύς δηλαδή  $P_{WTF} = 110 W$  (σχέση 50). Επίσης επιλέγεται το σημείο τοποθέτησης των αεραγωγών στις εξωτερικές επιφάνειες του θερμοθαλάμου, έτσι ώστε να εισέρχεται η απαιτούμενη παροχή αέρα στη διατομή εισόδου των αεραγωγών. Κατά την κίνηση του οχήματος μέσα στο ρευστό (αέρας) διαμορφώνεται ένα πεδίο ροής στο οποίο δημιουργείται οριακό στρώμα στις επιφάνειες του συστήματος (αναβάτης-όχημα-θερμοθάλαμος) και φυσικά ο ομόρρους του συστήματος. Ειδικότερα, ο ομόρρους του αναβάτη δημιουργεί μία ζώνη σκίασης στην οποία επικρατούν στροβιλισμοί κι οι συνθήκες ροής δεν είναι κατάλληλες για την εισαγωγή της στους αεραγωγούς. Επομένως πρέπει να εντοπισθεί εκείνη η περιοχή όπου η ταχύτητα της ροής θα είναι τουλάχιστον ίση με την ταχύτητα του ελεύθερου ρεύματος ( $U_{\infty} = 40 m/s$ ) ει δυνατόν και μεγαλύτερη, για παράδειγμα σε σημεία πυκνώσεως των γραμμών ροής. Η επίλυση του πεδίου ροής πραγματοποιείται με το λογισμικό «Solidworks-flow» στο οποίο εισάγεται το τριδιάστατο μοντέλο σε κανονική κλίμακα.

##### I. Προσδιορισμός διαστάσεων αεραγωγών.

Το κέλυφος των στροβίλων είναι συγκλίνουσας μορφής και μεταξύ της διατομής εισόδου και της διατομής πρόσπτωσης στα περύγια επιτυγχάνεται αύξηση της ταχύτητας της τάξης : 25% ,(σχήμα 5).



Σχήμα 6. Μεταβολή ταχύτητας στο κέλυφος του στροβίλου

Δεδομένου ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα στη διατομή «3» του σχήματος (5) τόσο μικρότερη επιφάνεια διατομής στην είσοδο του αεραγωγού απαιτείται (εξίσωση συνέχειας), ο λόγος των επιφανειών της διατομής εισόδου του αεραγωγού προς τη διατομή εξόδου, επιλέγεται να είναι:  $\frac{2}{1}$ . Επομένως σύμφωνα με την εξίσωση της συνέχειας η ταχύτητα στη διατομή εξόδου του αεραγωγού η οποία συμπίπτει με τη διατομή εισόδου του κελύφους της τουρμπίνας, θα είναι:

$$(u_1 = \bar{u}_2)A_1 = u_2A_2 \Rightarrow u_2 = 2\bar{u}_2 \quad (51)$$

κι επομένως σύμφωνα με το σχήμα (5) και λόγω της σχέσης (51), η ταχύτητα του αέρα στη διατομή πρόσπτωσης της ροής στα πτερύγια του δρομέα υπολογίζεται ως:

$$u_3 = 1.25u_2 = 1.25 \cdot 2 \cdot \bar{u}_2 = 2.5 \cdot 11.2 = 28 \text{ m/s} \quad (52)$$

Η διατομή εισόδου του αεραγωγού υπολογίζεται ως:

$$P_{WTF} = \frac{1}{2} \rho u_3^3 A_1 C_L \Rightarrow$$

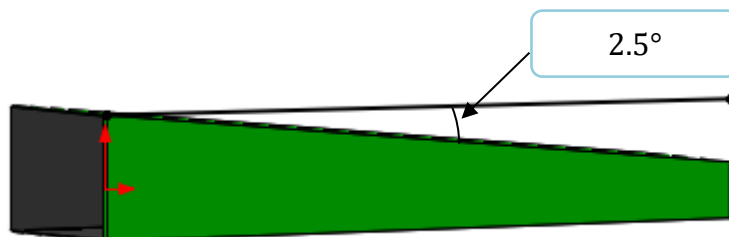
$$A_1 = \frac{2 \cdot 110}{1.3 \cdot 28^3 \cdot 0.8} = 128.5 \text{ cm}^2 \rightarrow 9 \times 15 = 135 \text{ cm}^2 \quad (53)$$

Όπου:  $C_L = 0.6$  ο συντελεστής άνωσης των πτερυγίων του δρομέα.

Το εμβαδόν « $A_1$ » είναι οι απαιτούμενες διαστάσεις της διατομής εισόδου και των δύο αεραγωγών κι απομένως αρκεί η επιφάνεια του κάθε ενός να είναι ίση με:  $67.5 \text{ cm}^2$ . Ωστόσο λόγω των σιωπηρών υποθέσεων, ατριβούς ροής και μηδενικών απωλειών πίεσης στο εσωτερικό του αγωγού, οι διαστάσεις της κάθε πλευράς της διατομής του αεραγωγού θα είναι:  $B_1 \times Y_1 = 15 \times 9 = 135 \text{ cm}^2$ . Αντίστοιχα οι διαστάσεις τις διατομής εισόδου του κελύφους της τουρμπίνας θα είναι:  $B_2 \times Y_2 = 15 \times 4.5 = 67.5 \text{ cm}^2$ .

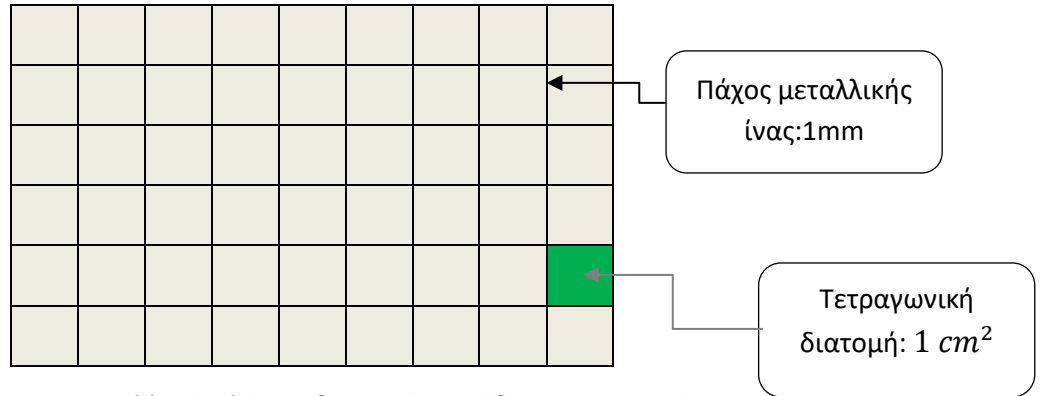
Η γωνία κλίσης του αεραγωγού υπολογίζεται ως εξής:

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{Y_2/2}{550} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{2.25}{550} \right) = 2.5^\circ$$



**Σχήμα 7.** Γωνία κλίσης αεραγωγού δευτεροβάθμιου συστήματος

Επειδή το όχημα κινείται στον αέρα προβλέπεται η τοποθέτηση πλέγματος (σχήμα 6) στη διατομή εισόδου του αεραγωγού για την προστασία των πτερυγίων του δρομέα από προσκρούσεις εντόμων. Το πλέγμα απαρτίζεται από τετραγωνικά κελιά μεταλλικών ινών εμβαδού:  $1 \text{ cm}^2$ . Το πάχος των μεταλλικών ινών είναι:  $d=0,3 \text{ mm}$ .



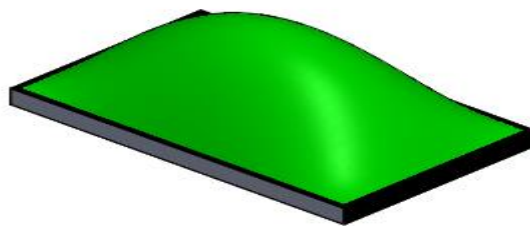
**Σχήμα 8.** Μεταλλικό πλέγμα διατομής εισόδου αεραγωγού.

Η καθαρή επιφάνεια διατομής μετά την τοποθέτηση του πλέγματος υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \text{Αριθμός ινών: } & (15-2) + (9-2) = 20 \\ \text{Εμβαδό ινών: } & (13 \times 1 \times 9) + (7 \times 15 \times 1) = \\ & = 1,17 + 1,05 = 2,22 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

Τελικώς η καθαρή διατομή εισόδου του αέρα στον αεραγωγό είναι:  $135 - 2,22 = 132,78 \text{ cm}^2$ .

Το δευτεροβάθμιο σύστημα αναπλήρωσης θερμικών απωλειών σχεδιάζεται έτσι ώστε να είναι μόνιμα εγκατεστημένο στο κυρίως σώμα του θερμοθαλάμου. Η επιλογή αυτή έγκειται αφενός στο χαμηλό πρόσθετο βάρος με το οποίο επιφορτίζεται το όχημα και το οποίο δεν δημιουργεί κάποια μη αμελητέα ροπή κι αφετέρου στο γεγονός ότι η πρόβλεψη απόσπασης του συστήματος όταν οι θερμοκρασιακές συνθήκες το επιτρέπουν, απαιτεί ειδική μέριμνα για χώρους αποθήκευσης και ενέχει τον κίνδυνο φθοράς του συστήματος. Ωστόσο, προβλέπεται η τοποθέτηση ειδικών καλυμάτων (σχήμα 7) στη διατομή εισόδου των αεραγωγών για μείωση της αεροδυναμικής αντίστασης μορφής όταν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι:  $T_e > 27^\circ\text{C}$  (§ 3.4.2).



**Σχήμα 9.** Κάλυμμα αεραγωγού

Η αεροδυναμική αντίσταση μορφής με την τοποθέτηση του καλύμματος στον αεραγωγό: υπολογίζεται ως εξής:

$$D = \frac{1}{2} \rho \bar{u}_z^2 C_D A = 1.1 \text{ Nt}, \text{ για κάθε κάλυμμα} \quad (54)$$

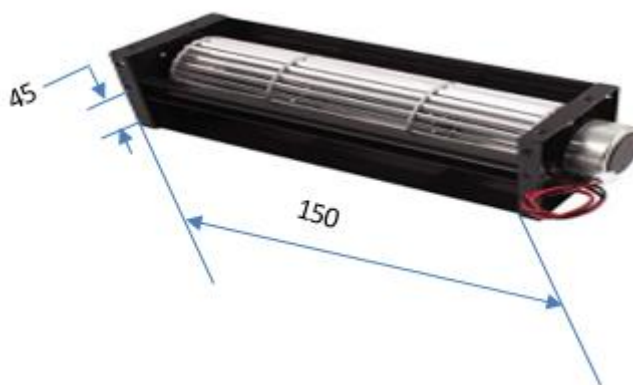
Όπου  $C_D = 0.48$  : ο συντελεστής οπισθέλκουσας του καλύμματος

και  $A=0.0135 \text{ m}^2$  η επιφάνεια πρόσπτωσης

Και συνολικά για το σύστημα των δύο αεραγωγών θα είναι:

$$D_T = 1.55 \times 2 = 2.2 \text{ Nt}$$

Στην παρακάτω εικόνα (εικόνα 19) παρουσιάζονται οι διαστάσεις της διατομής εισόδου του κελύφους του στροβίλου.



**Εικόνα 19.** Cross flow turbine και διαστάσεις κελύφους.

## II. Επιλογή σημείου τοποθέτησης διατομής εισόδου αεραγωγών.

Για την επιλογή του σημείου τοποθέτησης των αεραγωγών σχεδιάζεται το τριδιάστατο μοντέλο σε κλίμακα «1:1» και εισάγεται στο λογισμικό «Solidworks-flow» επιλύεται το πεδίο ροής γύρω από το σύστημα όχημα-αναβάτης-θερμοθάλαμος για τις εξής αρχικές συνθήκες και διαστάσεις όγκου ελέγχου συστήματος:

### I. Ιδιότητες ρευστού:

- Ταχύτητα αέρα:  $U = 11.2 \text{ m/s}$
- Θερμοκρασία αέρα:  $T_e = 0^\circ\text{C}$

## II. Διαστάσεις όγκου ελέγχου του συστήματος:

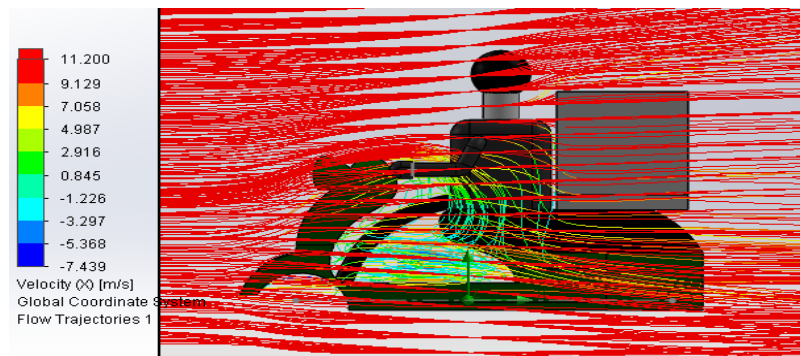
Μήκος: 1800

Πλάτος: 700

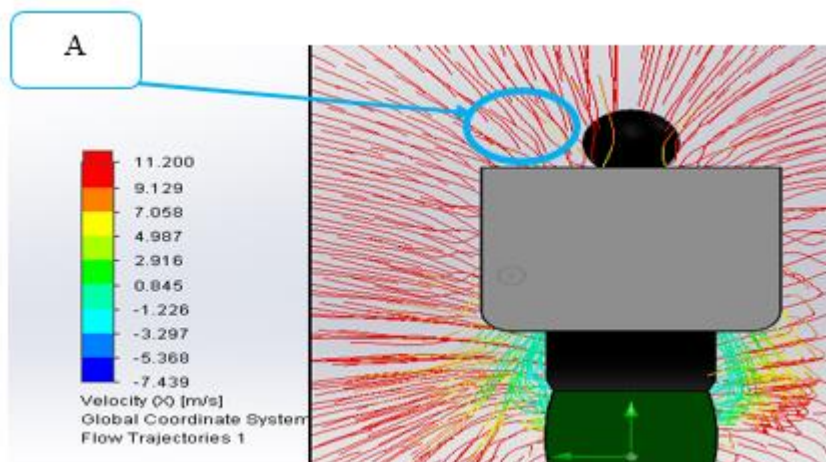
Ύψος: 1500

Κράνος αναβάτη: Σφαιρική διατομή ακτίνας  $r = 150 \text{ mm}$

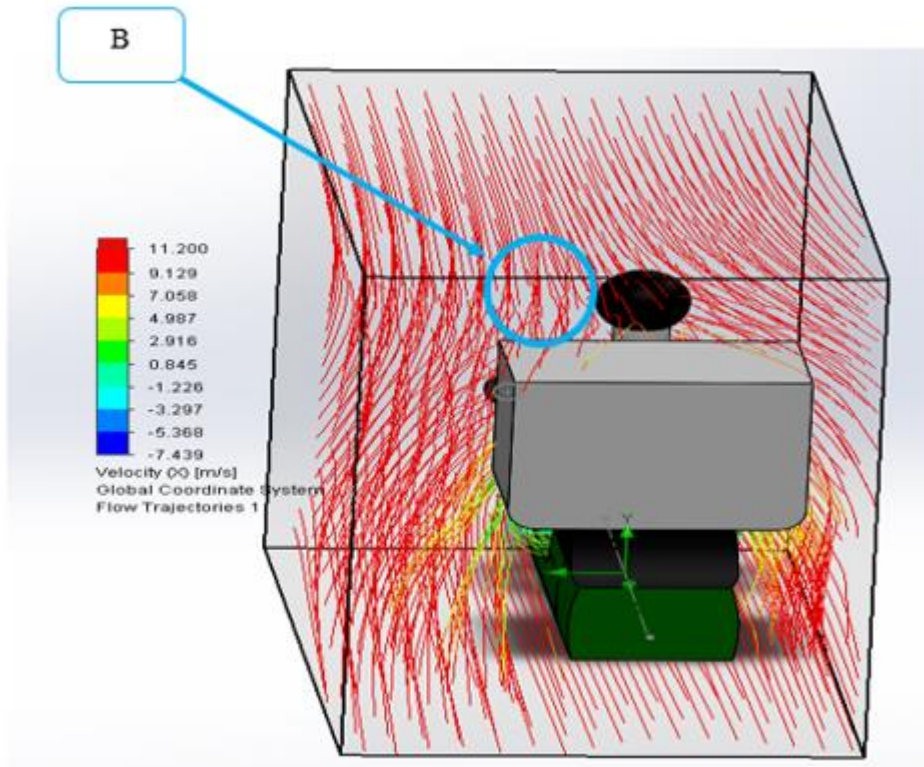
Κατόπιν της εισαγωγής του μοντέλου στο λογισμικό «solidworks-flow» προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα:



**Εικόνα 20.** Γραμμές ροής γύρω από το σύστημα όχημα-αναβάτης θερμοθάλαμος, σε πλάγια όψη.



**Εικόνα 21.** Γραμμές ροής γύρω από το σύστημα όχημα-αναβάτης θερμοθάλαμος, στην πίσω όψη.



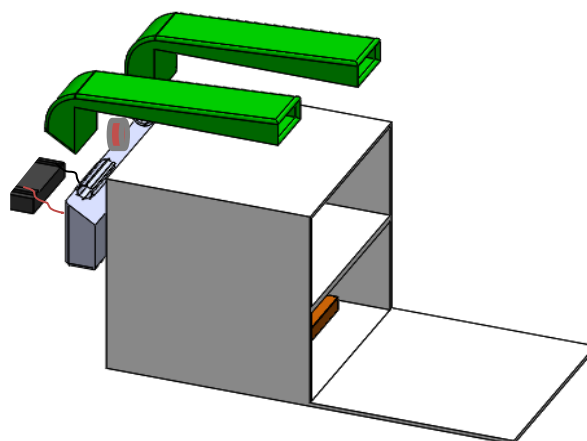
**Εικόνα 22.** Γραμμές ροής γύρω από το σύστημα όχημα-αναβάτης θερμοθάλαμος, στην πίσω όψη και πλαγίως.

Όπως φαίνεται στις εικόνες (7) και (8) οι περιοχές της αδιατάρακτης ροής στο σύστημα όχημα-αναβάτης θερμοθάλαμος είναι οι περιοχές «Α» και «Β», εκατέρωθεν και πίσω από το κράνος του αναβάτη. Εκεί η τιμή της ταχύτητας είναι:  $U = 11.2 \text{ m/s}$  όση δηλαδή κι η ταχύτητα των προδιαγραφών κι επομένως είναι κατάλληλη θέση για την τοποθέτηση των συγκλινόντων αεραγωγών έτσι ώστε η εισερχόμενη ροή να επιταχυνθεί προκειμένου στη διατομή εισόδου του στροβίλου, η τιμή της να είναι:

$$u_3 = 28 \text{ m/s} \quad (52).$$

#### 4.2.3 Σχηματική αναπαράσταση των συστημάτων συσσωρευτή-ανεμογεννητριών και κόστος πρωτοτύπου.

Η διάταξη των στοιχείων που απαρτίζουν το σύστημα αναπλήρωσης θερμικών απωλειών παρουσιάζεται παρακάτω στο σχήμα (8)



**Σχήμα 10.** Στοιχεία συστήματος αναπλήρωσης θερμικών απωλειών.

Στον παρακάτω πίνακα (3) παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα στοιχεία που απαρτίζουν το σύστημα αναπλήρωσης θερμικών απωλειών καθώς επίσης και το αντίστοιχο κόστος τους ανά μονάδα.

Στοιχείο	Κόστος (Ευρώ)
Φιλμ αντιστάσεων	15
Συσσωρευτής	34
Ρυθμιστής φόρτισης	17
Γεννήτρια	62
Cross flow turbine	48
Θερμοστάτης	8
Περιφερειακά	10
Σύνολο	194

**Πίνακας 3.** Κόστος επιμέρους στοιχείων συστήματος αναπλήρωσης θερμικών απωλειών.

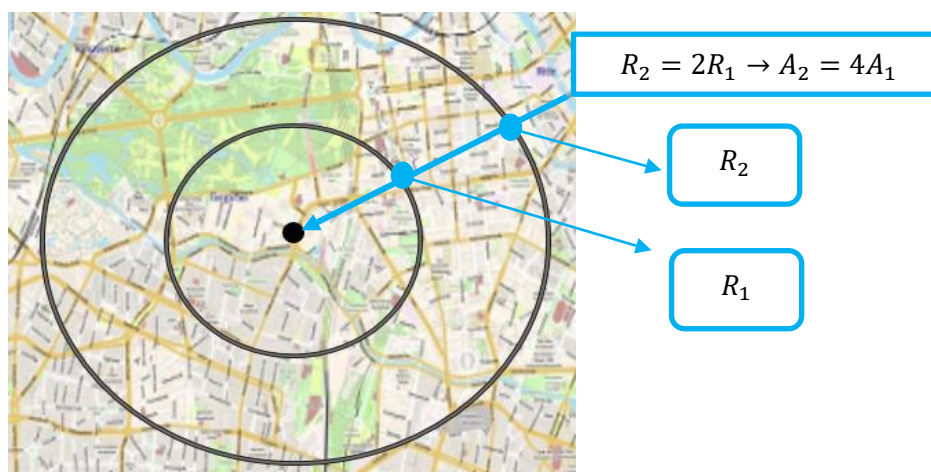


## Κεφάλαιο 5

### Συμπεράσματα εργασίας

Ο θερμοθάλαμος με αυτόνομο σύστημα αναπλήρωσης θερμικών απωλειών είναι ένα καινοτόμο προϊόν το οποίο ανεξάρτητα από την ενδεχόμενη εμπορική αξία του , στοχεύει όχι στη βελτίωση αλλά την εξιδανίκευση της διαδικασίας μεταφοράς ζεστών φαγητών, προκειμένου τα μεταφερόμενα ζεστά τρόφιμα να μην καθίστανται επιβλαβή για τον καταναλωτή λόγω πλημμελούς συντήρησης κατά τη μεταφορά τους.

Το κόστος για την κατασκευή ενός πρωτοτύπου το οποίο θα ανοίξει το δρόμο για πειραματικά αποτελέσματα υπολογίζεται περίπου στα 250 ευρώ. Τα σημερινά συμβατικά κυτία μεταφοράς ζεστών τροφίμων έχουν κόστος: 120 ευρώ. Η διαφορά στην τιμή του πρωτοτύπου με τα συμβατικά κυτία είναι: 130 Ευρώ η οποία και θεωρείται αμελητέα μπροστά στα οφέλη που προσφέρει η νέα πρόταση, αφενός στον τομέα υγιεινής και ασφάλειας των τροφίμων κι αφετέρου στη δυνατότητα επέκτασης των περιοχών δραστηριοποίησης των επιχειρήσεων του κλάδου, δεδομένου ότι με σταθερή θερμοκρασία στο θερμοθάλαμο, η ακτίνα δράσης μιας επιχείρησης δύναται να διπλασιαστεί και κατά συνέπεια να τριπλασιαστούν οι δυνάμει πελάτες της επιχείρησης (σχήμα 11.)



**Σχήμα 11.** Ακτίνα δράσης διανομής





## Βιβλιογραφία

1. Cengel, Boles, Θερμοδυναμική,
2. Brodkey R., Hersey H., Φαινόμενα μεταφοράς,
3. Λ.Θ. Παπαϊωάννου, Μηχανική ρευστών,
4. Charman S. Ηλεκτρικές μηχανές.
5. Κανάραχος Λ., Προβατιδης Χ., Πεπερασμένα στοιχεία στη μηχανολογία.
6. Προβατιδης Χ., Βελτιστοποίηση & λογισμικό κατασκευών.
7. Τσιρίκογλου, Θ. Βλαχογιάννης, Ρευστοδυναμικές μηχανές.
8. APPLICATION OF A CROSS FLOW FAN AS WIND TURBINE Toni Klemm, Martin Gabi, Jean-Nicolas Heraud Department of Fluid-Machinery, University Karlsruhe 76128 Karlsruhe, Germany [toni.klemm@ism.uka.de](mailto:toni.klemm@ism.uka.de)
9. CFD Analysis of a cross-flow turbine for wind and hydrokinetic applications. ASME 2018 International Mechanical Engineering Congress, Arian Hosseini, Navid Goudarzi.

## Ιστότοποι

1. <https://www.engineeringtoolbox.com>