

Διπλωματική Εργασία

«ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΓΙΑ
ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΚΑΙ ΨΥΞΗ ΚΤΗΡΙΩΝ»

Σκουρτανιώτη Έλλη-Βαρβάρα

Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Χανιά Κρήτης, 2018

Περιεχόμενα

1	Περίληψη	5
2	Εισαγωγή	7
3	Θεωρητικό Υπόβαθρο	10
3.1	Θερμοηλεκτρικό υλικό.....	10
3.1.1	Ημιαγωγοί p-type.....	10
3.1.2	Ημιαγωγοί n-type.....	11
3.1.3	Διασταύρωση p-n	13
3.1.4	Τύποι θερμοηλεκτρικών υλικών.....	14
3.2	Θερμοηλεκτρικό φαινόμενο	16
3.2.1	Απόδοση μετατροπής ενέργειας	18
3.2.2	Figure of merit	18
3.2.3	Συντελεστής Seebeck	20
3.3	Θερμοηλεκτρική διάταξη	21
3.4	Ψύκτρα	22
4	Πειραματικό Μέρος.....	23
4.1	Υλικά και Μεθοδολογία.....	23
4.1.1	Χαρακτηριστικά θερμοηλεκτρικού στοιχείου	23
4.1.2	Μετρητικά όργανα.....	26
4.2	Ανάπτυξη ψηφιακού μοντέλου	29
4.3	Κατασκευή φυσικού μοντέλου.....	31

4.4	Πειραματική διαδικασία.....	35
5	Αποτελέσματα-Σχολιασμός.....	39
5.1	Αποτελέσματα box 1	39
5.2	Αποτελέσματα box 2	43
6	Συμπεράσματα	49
7	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	51
8	Βιβλιογραφία	52
9	Παράρτημα	54

1 Περίληψη

Το θέμα της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι «Ανάλυση απόδοσης θερμοηλεκτρικών διατάξεων για θέρμανση και ψύξη κτηρίων». Σκοπός της είναι η παρατήρηση της συμπεριφοράς των θερμοστοιχείων κάτω από διάφορες συνθήκες που σχετίζονται με παραμέτρους του παρεχόμενου ηλεκτρικού ρεύματος, καθώς και ο έλεγχος των αποτελεσμάτων που προκαλούν σε ένα φυσικό μοντέλο.

Αρχικά, αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο που σχετίζεται με τα θερμοηλεκτρικά στοιχεία και τις διάφορες μεταβλητές που τα χαρακτηρίζουν, όπως είναι το figure of merit (zT) και ο συντελεστής Seebeck. Ταυτόχρονα, αναλύεται το φαινόμενο Seebeck, η ικανότητα δηλαδή των θερμοηλεκτρικών υλικών να μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε θερμοκρασιακό δυναμικό και τούμπαλιν.

Ύστερα, περιγράφεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε στην συγκεκριμένη εργασία. Πρώτα από όλα, πραγματοποιήθηκε το στάδιο της προεργασίας, κατά το οποίο κατασκευάστηκε ένα ψηφιακό μοντέλο μέσω της πλατφόρμας του EnergyPlus, ώστε να εξεταστεί θεωρητικά το μοντέλο σε για την θερμοκρασία που θα αναπτύξει εντός του, βάσει των καιρικών της Σούδας Χανίων. Στη συνέχεια δημιουργήθηκε το φυσικό μοντέλο από πολυουρεθάνη, του οποίου μετρήθηκε η θερμοκρασία εσωτερικά και συνεκρίθηκε με την περιβαλλοντική, με σκοπό την απόφαση του θερμοκρασιακού εύρους που έπρεπε να έχει το υλικό που θα χρησιμοποιούταν. Αυτό κατέληξε να είναι το Bi_2Te_3 , διότι επιδεικνύει τον υψηλότερο συντελεστή zT για χαμηλό θερμοκρασιακό εύρος, που συνάδει με αυτό του γήινου περιβάλλοντος.

Έπειτα, έλαβε χώρα η κύρια πειραματική διαδικασία, κατά την οποία κατασκευάστηκε ένα ακόμα μοντέλο από πολυουρεθάνη. Σε αυτό τοποθετήθηκαν πέντε θερμοηλεκτρικά στοιχεία και μετρούταν η θερμοκρασία, συγκρίνοντάς την με την θερμοκρασία του μοντέλου που δεν είχε ενσωματωμένα θερμοηλεκτρικά. Σε αυτή την φάση, εξετάστηκαν διάφοροι συνδυασμοί αναφορικά με το πλήθος των θερμοηλεκτρικών που ήταν σε λειτουργία και την ύπαρξη ή μη αερισμού για την απαγωγή θερμότητας από το μοντέλο.

Ο βέλτιστος συνδυασμός παρατηρήθηκε με την ενεργοποίηση μιας μόνο θερμοηλεκτρικής διάταξης και τον αερισμό μέσω ανεμιστήρα, ενώ η χειρίστη περίπτωση ήταν με την λειτουργία και των πέντε θερμοηλεκτρικών διατάξεων με απουσία ανεμιστήρα. Αυτό αιτιολογείται λαμβάνοντας υπόψη την ισχύ του τροφοδοτικού, η οποία ήταν χαμηλή και δεν μπορούσε να υποστηρίξει την ταυτόχρονη λειτουργία όλων των διατάξεων.

Τέλος, αναφέρονται κάποιες προτάσεις για μελλοντική έρευνα σε αυτό το θέμα. Σε αυτές συμπεριλαμβάνονται και η χρήση ανεμιστήρων για πιο ομοιόμορφη διάχυση της θερμότητας στο εσωτερικό του μοντέλου, καθώς και η χρήση ισχυρότερου τροφοδοτικού προς την ύπαρξη μεγαλύτερης θερμοκρασιακής διαφοράς στις θερμοηλεκτρικές διατάξεις. Ακόμα θα ήταν ενδιαφέρον να παρατηρηθεί η συμπεριφορά των θερμοηλεκτρικών σε εποχές πέραν του καλοκαιριού και σε λειτουργία θέρμανσης, και όχι ψύξης.

2 Εισαγωγή

Η θερμική άνεση ορίζεται ως η ψυχική κατάσταση του ατόμου, που εκφράζει την ικανοποίηση του ιδίου σχετικά με το αν αισθάνεται ζεστά ή κρύα. Οι έξι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη θερμική άνεση είναι η θερμοκρασία του αέρα, η ακτινοβολούμενη θερμοκρασία, η ταχύτητα του αέρα, η υγρασία, η μόνωση λόγω του ρουχισμού και η μεταβολική θερμότητα. Με άλλα λόγια, ανάλογα με τους διάφορους παράγοντες, κάθε άτομο εκφράζει θερμική άνεση όταν αισθάνεται ικανοποιητικά με την θερμοκρασία ενός χώρου και δεν επιθυμεί να την αλλάξει. Φυσικά, όπως καταλαβαίνει κανείς, η θερμική άνεση διαφέρει από άτομο σε άτομο και γι αυτό το λόγο έχουν εφευρεθεί διάφορα συστήματα για την θέρμανση και την ψύξη ενός χώρου.

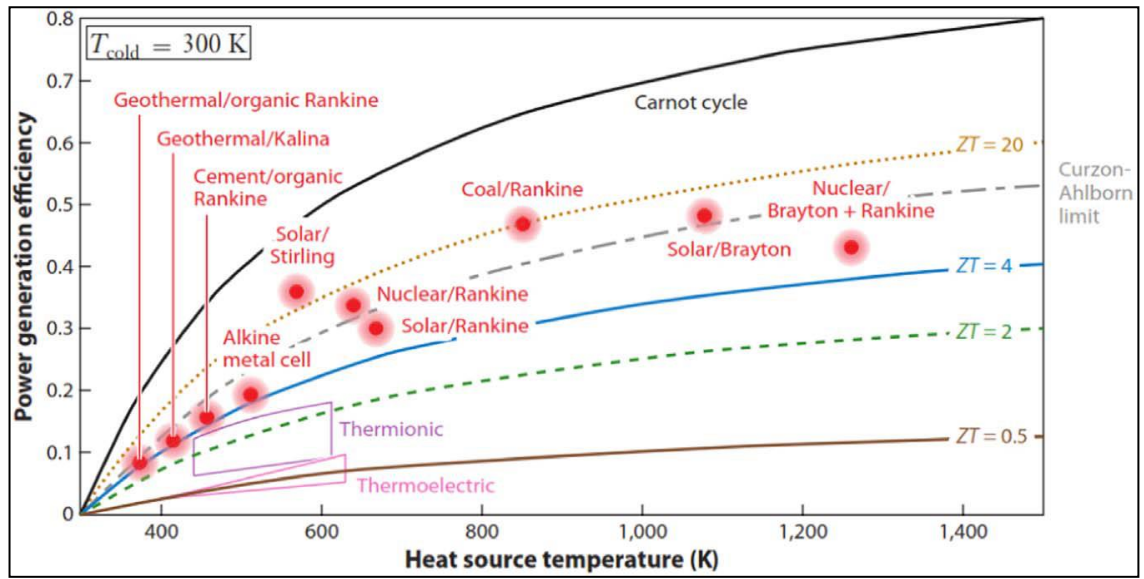
Τα συστήματα θέρμανσης, αερισμού και ψύξης (Heating, Ventilation and Air Conditioning-HVAC), που καθορίζουν μερικούς από τους προαναφερθέντες παράγοντες χωρίζονται σε κατηγορίες. Μια από αυτές τις κατηγορίες είναι τα συστήματα θέρμανσης και ψύξης ενός σταδίου, δηλαδή η θέρμανση ή η ψύξη του αέρα πραγματοποιείται σε ένα στάδιο (βλ. κλίβανος). Αντίθετα, υπάρχουν και τα συστήματα πολλαπλών σταδίων, τα οποία επιτρέπουν τη θερμοκρασία εξόδου να είναι ελεγχόμενη. Έπειτα, στο εμπόριο συναντώνται συστήματα που μπορούν να θερμάνουν ένα κτήριο ανά ζώνες, όπως είναι οι αφυγραντήρες που χρησιμοποιούνται σε περιοχές με πολύ υγρό κλίμα. Τα συστήματα θέρμανσης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με το θερμαντικό μέσο, δηλαδή σε κλίβανους με μέσο θέρμανσης τον αέρα και σε συστήματα με νερό υπό πίεση, όπου το θερμαντικό μέσο είναι το νερό. Αντίστοιχα για την ψύξη, τα συστήματα που βρίσκονται πιο συχνά στην αγορά είναι το παράθυρο κλιματισμού, το κλιματιστικό με μια εσωτερική και μια εξωτερική μονάδα, το συσκευασμένο κλιματιστικό και το κεντρικό σύστημα κλιματισμού. Όλα τα συστήματα ψύξης χρησιμοποιούν ως ψυκτικό μέσο τον αέρα.

Τα περισσότερα από αυτά τα συστήματα χρειάζονται παροχή ηλεκτρικής ενέργειας για να λειτουργήσουν, γεγονός το οποίο επιδεινώνει την ήδη επιβεβαρυμένη κατάσταση του περιβάλλοντος. Γι' αυτό το λόγο τα τελευταία χρόνια, η προσοχή στρέφεται μέσω της έρευνας στα παθητικά ηλιακά συστήματα. Τα παθητικά ηλιακά συστήματα είναι ενσωματωμένα στα δομικά στοιχεία ενός κτηρίου

και αξιοποιούν την ηλιακή ενέργεια για τη θέρμανση των χώρων του. Το πιο συνηθισμένο παθητικό ηλιακό σύστημα είναι η τοποθέτηση των παραθύρων με τέτοιο προσανατολισμό, ώστε να αξιοποιείται στο μέγιστο δυνατό η ηλιακή ενέργεια, που διαφορετικά θα πήγαινε χαμένη.

Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, μελετάται ένα νέο είδος παθητικού ηλιακού συστήματος, δηλαδή η χρήση των θερμοηλεκτρικών υλικών για τη θέρμανση και την ψύξη ενός κτηρίου, με σκοπό τον έλεγχο της απόδοσής τους σε περιορισμένο περιβάλλον. Τα θερμοηλεκτρικά υλικά έχουν λάβει αρκετή προσοχή για την ιδιότητά τους να μετατρέπουν την θερμότητα σε ηλεκτρική ενέργεια, παρέχοντας έτσι έναν εναλλακτικό τρόπο για την παραγωγή πολύτιμης ενέργειας. Αποτελέσματα από στατιστικές μελέτες δείχνουν, πως περίπου το 60% της ενέργειας χάνεται εις μάτην, κυρίως σε μορφή χαμένης θερμότητας (*Kanatzidis MG., Nanostructured thermoelectrics: the new paradigm?*). Τα τελευταία χρόνια, θερμοηλεκτρικά υλικά, που χαρακτηρίζονται από υψηλή απόδοση μετατροπής ενέργειας, εξετάζονται συνεχώς ως προς τη λειτουργία τους για την ψύξη και την θέρμανση διάφορων μέσων, όπως είναι ο αέρας. Το μικρό μέγεθος των θερμοηλεκτρικών διατάξεων, η σχεδόν μηδενική ρύπανση του περιβάλλοντος, η λειτουργία σε ένα μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος και το σχετικά μικρό κόστος καθιστούν την τεχνολογία αυτή ως πολλά υποσχόμενη (*Xiao Zhang, Li-Dong Zhao, 2015*).

Φυσικά η ενέργεια που παράγεται από την λειτουργία των θερμοηλεκτρικών διατάξεων είναι αρκετά μικρότερη από αυτή που παράγεται από άλλα μέσα, όπως είναι η καύση ορυκτών πόρων ή η πυρηνική ενέργεια και σίγουρα, όπως φαίνεται και στο *Γράφημα 1*, δεν μπορεί να ανταγωνιστεί την απόδοση του κύκλου Carnot. Ταυτόχρονα, όμως, είναι εμφανές πως το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των θερμοηλεκτρικών διατάξεων είναι πολύ μικρότερο, με αποτέλεσμα να είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για ένα λιγότερο ρυπασμένο φυσικό περιβάλλον.



Γράφημα 2.1: Σύγκριση συστημάτων παραγωγής ισχύος (Πηγή: Muhammad Sajid et al., 2017)

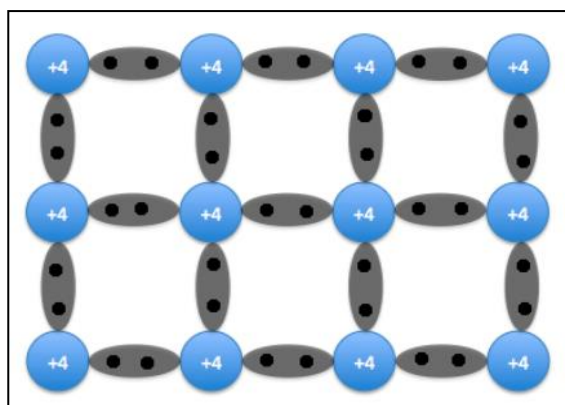
3 Θεωρητικό Υπόβαθρο

3.1 ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΥΛΙΚΟ

Τα θερμοηλεκτρικά υλικά είναι τα μέσα που χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της χαμένης θερμότητας σε ηλεκτρικό ρεύμα. Η επιλογή του θερμοηλεκτρικού υλικού πραγματοποιείται βάσει διάφορων παραμέτρων, όπως είναι η θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητά του, ο συντελεστής Seebeck και η συμπεριφορά του υλικού σε θερμοκρασιακές αλλαγές.

3.1.1 Ημιαγωγοί p-type

Σε έναν καθαρό ημιαγωγό Si ή Ge, κάθε πυρήνας χρησιμοποιεί τα 4 ηλεκτρόνια σθένους προς τον σχηματισμό 4 ομοιοπολικών δεσμών με τα γειτονικά άτομα. Κάθε πυρήνας μαζί με τα ηλεκτρόνια των εσωτερικών στοιβάδων έχουν συνολικό φορτίο +4 και είναι περικυκλωμένα από 4 ηλεκτρόνια σθένους.

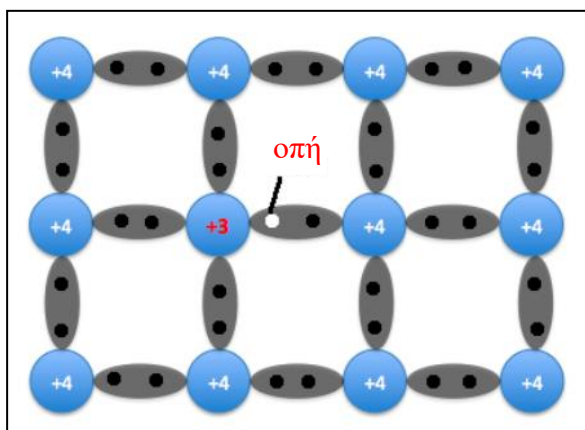


Εικόνα 3.1: Καθαρός ημιαγωγός

Αν ένα από τα άτομα του πλέγματος του ημιαγωγού αντικατασταθεί από ένα στοιχείο με 3 ηλεκτρόνια σθένους, όπως είναι το βόριο (B) ή το γάλλιο (Ga), τότε η ισορροπία ηλεκτρονίων και οπών θα αλλάξει. Αυτή η «νοθεία» μπορεί να συμβάλει 3 ηλεκτρόνια σθένους, αφήνοντας μία οπή. Αφού το κενό δύναται να δεχθεί ηλεκτρόνιο, το άτομο που προστέθηκε θα ονομαστεί αποδέκτης.

Επειδή ένας αποδέκτης προσφέρει παραπάνω οπές, που θεωρούνται φορείς θετικού φορτίου, ένας ημιαγωγός, που έχει προσμιχθεί με έναν αποδέκτη,

αποκαλείται p-type ημιαγωγός, όπου το “p” σημαίνει θετικός (positive). Σημειώνεται πως το συνολικό φορτίο του υλικού παραμένει ουδέτερο. Σε έναν ημιαγωγό p-type το ηλεκτρικό ρεύμα μεταφέρεται κυρίως μέσω των οπών, που είναι περισσότερα από τα ηλεκτρόνια.

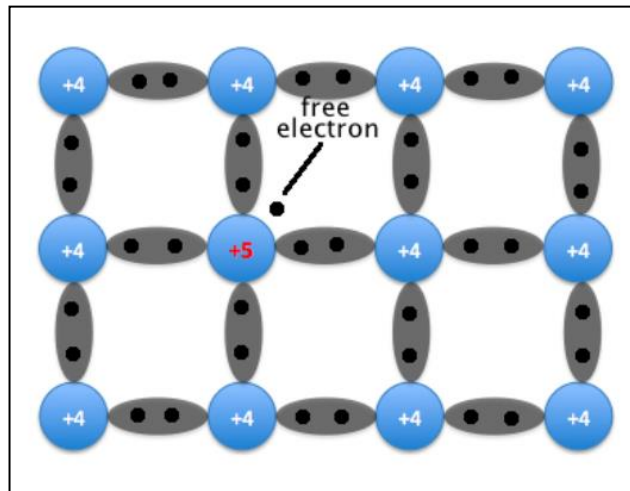


Εικόνα 3.2: Ημιαγωγός νοθευμένος με αποδέκτη

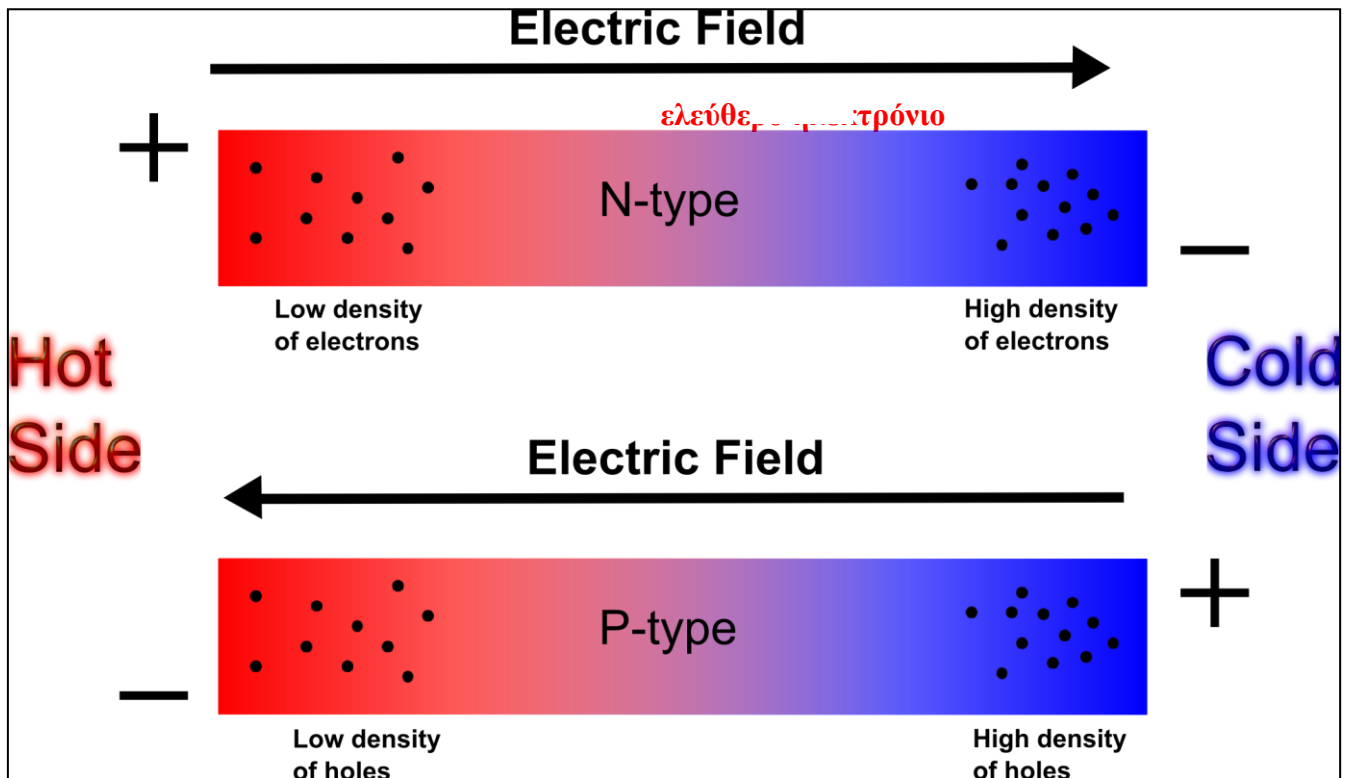
3.1.2 Ημιαγωγοί n-type

Αντίθετα από τους ημιαγωγούς p-type, σε έναν καθαρό ημιαγωγό δύναται να προστεθεί ένα άτομο με 5 ηλεκτρόνια σθένους, όπως είναι το αρσενικό (As) ή ο φώσφορος (P), ενώ το πλέγμα μπορεί να συγκρατήσει 4. Αυτό σημαίνει, πως ο ημιαγωγός έχει ένα παραπάνω ηλεκτρόνιο, ενώ πάλι το σύστημα παραμένει ηλεκτρικά ουδέτερο. Το άτομο που προσφέρει τα 5 ηλεκτρόνια σθένους αποκαλείται δωρητής.

Ένας ημιαγωγός που έχει νοθευτεί με έναν δωρητή αποκαλείται n-type ημιαγωγός, όπου το “n” σημαίνει αρνητικός (negative). Τα ηλεκτρόνια είναι περισσότερα σε έναν ημιαγωγό n-type από ότι οι οπές, επομένως το ρεύμα μεταφέρεται κυρίως μέσω των ηλεκτρονίων.



Εικόνα 3.3: Ημιαγωγός n-type



Εικόνα 3.4: Απεικόνιση του ηλεκτρικού πεδίου σε υλικά p-type και n-type (Πηγή: <http://www.mn.uio.no>)

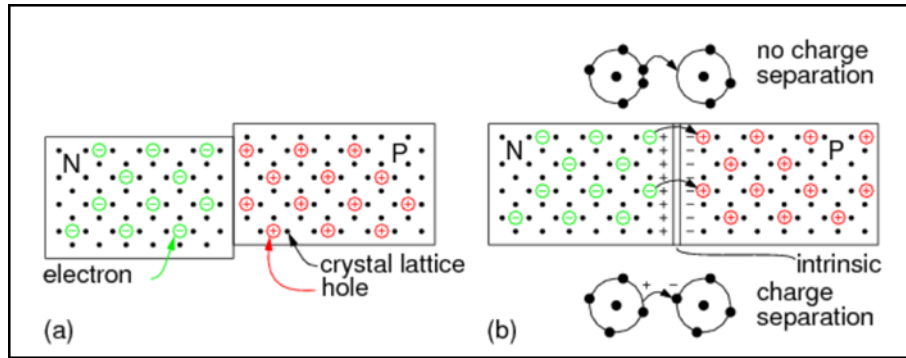
3.1.3 Διασταύρωση p-n

Αν ένα κομμάτι ημιαγωγού p-type έρθει σε επαφή με ένα κομμάτι ημιαγωγού n-type, τότε δεν θα υπάρξουν αξιοσημείωτα αποτελέσματα. Αυτό συμβαίνει, διότι ο αριθμός των ηλεκτρονίων και ο αριθμός των πρωτονίων είναι ίσος σε κάθε κομμάτι ημιαγωγού, άρα και οι δύο ημιαγωγοί έχουν συνολικό φορτίο ίσο με το μηδέν.

Ωστόσο, ένας ημιαγωγός που κατασκευάζεται με υλικό p-type στη μία του άκρη και υλικό n-type στην άλλη άκρη έχει μοναδικές ιδιότητες. Το υλικό p-type έχει πληθώρα οπών, θετικών φορέων φορτίου δηλαδή, που είναι ελεύθερες να μετακινούνται στο κρυσταλλικό πλέγμα. Αντίστοιχα, το υλικό n-type έχει αφθονία αρνητικών φορέων φορτίου, δηλαδή ηλεκτρονίων. Κοντά στη σύζευξη, τα ηλεκτρόνια του n-type υλικού διαχέονται προς την σύζευξη και συνδυάζονται με τις οπές του υλικού p-type. Η περιοχή του υλικού p-type κοντά στην σύζευξη αποκτά ένα συνολικό αρνητικό φορτίο, επειδή τα ηλεκτρόνια του n-type υλικού έχουν διαχυθεί. Αφού τα ηλεκτρόνια από το n-type υλικό έχουν διαχυθεί, το ίδιο αποκτά ένα θετικό φορτίο.

Το λεπτό στρώμα κρυσταλλικού πλέγματος ανάμεσα σε αυτές τις φορτίσεις, εξαντλείται από το μεγαλύτερο μέρος των φορέων φορτίου, εξ' ου και η ονομασία της: «ζώνη εξάντλησης». Με την παραπάνω εξήγηση καταλαβαίνει κανείς, πως η ζώνη εξάντλησης λειτουργεί ως μια περιοχή με μονωτικές ιδιότητες, σχεδόν σαν να υπάρχει ένα μονωτικό υλικό μεταξύ των ημιαγωγών.

Αυτό το φαινόμενο δημιουργεί ένα πιθανό εμπόδιο στη διασταύρωση p-n και υφίσταται συνήθως στην κατασκευαστική φάση. Προκειμένου να ξεπεραστεί αυτό το κώλυμα, είναι απαραίτητο να δημιουργηθεί μια εξωτερική πηγή τάσης, ώστε να γίνει αγωγίμο το σημείο. Το μέγεθος του εμποδίου αυτού εξαρτάται από το υλικό, με τη διασταύρωση p-n πυριτίου να εμφανίζει μεγαλύτερο εμπόδιο από αυτή του γερμανίου.



Εικόνα 3.5: (a) Κομμάτια ημιαγωγών *p-type* και *n-type* που δε δημιουργούν κανένα αξιοσημείωτο γεγονός & (b) Μονοκρυσταλλικό υλικό νοθευμένο με *n-* και *p-type* δημιουργεί δυναμικό

3.1.4 Τύποι θερμοηλεκτρικών υλικών

3.1.4.1 Bulk θερμοηλεκτρικά υλικά

Όσον αφορά αυτή την κατηγορία των θερμοηλεκτρικών υλικών, η εξέλιξή τους πραγματοποιείται με αρκετά σταθερό ρυθμό. Αυτό σημαίνει πως διάφορα υλικά με θερμοηλεκτρικές ιδιότητες μπορούν να γίνουν κράματα μεταξύ τους, προκειμένου να βελτιωθούν οι ιδιότητές τους, ώστε να αυξηθεί η απόδοσή τους και το figure of merit.

Τα πιο δημοφιλή στο εμπόριο θερμοηλεκτρικά υλικά τέτοιου τύπου είναι αυτά που έχουν ως βάση τους το Bi_2Te_3 , τα *p-type* $\text{Bi}_x\text{Sb}_{2-x}\text{Te}_3$ και τα *n-type* $\text{Bi}_2\text{Te}_{1-x}\text{Se}_x$, όπου έχουν τιμή zT γύρω στο 1 για θερμοκρασίες $< 500 \text{ K}$. Για τα διάφορα εύρη θερμοκρασιών υπάρχουν και τα αντίστοιχα θερμοηλεκτρικά υλικά, όπου έχουν τη μέγιστη τιμή zT σε αυτά τα εύρη. Για παράδειγμα, για εύρος θερμοκρασιών $600 - 800 \text{ K}$. Τα κράματα από PbTe , όπως είναι το *p-type* $\text{Pb}_2\text{Te}_{1-x}\text{Se}_x$ και το *n-type* $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$, παρουσίασαν τιμή zT περίπου ίσο με 1 για θερμοκρασίες κοντά στους 300 K . Για υψηλότερο εύρος θερμοκρασιών, δηλαδή $> 900 \text{ K}$, τα κράματα από SiGe είναι καλοί υποψήφιοι, καθώς εμφανίζουν τη μέγιστη τιμή zT σε αυτό το εύρος θερμοκρασιών και δείχνουν υψηλή αξιοπιστία στην πάροδο του χρόνου.

Ως ιδανικά θερμοηλεκτρικά υλικά εμφανίζονται τα phonon-glass electron-crystals (PGECs), διότι παρομοιάζουν θερμική αγωγιμότητα όπως το πλέγμα γυαλιού, αλλά με μεταφορά ηλεκτρονίων που μοιάζει με αυτή των κρυστάλλων. Δύο αντιπροσωπευτικές κλάσεις αυτής της κατηγορίας είναι οι skutterudites και οι clathrates (Zhiting Tian et al., 2014).

3.1.4.1.1 Skutterudites

Αυτή η ομάδα υλικών ερευνάται όσον αφορά το δυναμικό παραγωγής ισχύος για εύρος θερμοκρασίας 500 – 900K. Ο κρυσταλλικός τύπος των skutterudites είναι ο MX_3 , όπου M μπορεί να είναι Co, Rh ή Ir και το X μπορεί να είναι P, As ή Sb. Η ιδιότητα κλειδί των skutterudites είναι η μεγάλη απόσταση μεταξύ των M ατόμων, επιτρέποντας έτσι να γεμίσει ο ελεύθερος χώρος με άλλα άτομα από σπάνιες ή αλκαλικές γαίες ή ακόμα και από βαρέα άτομα.

3.1.4.1.2 Clathrates (Κλαθρικά)

Η επόμενη κλάση υλικών, δηλαδή τα κλαθρικά, έχουν επίσης μια δομή με αρκετό ελεύθερο χώρο, ώστε να υποδεχθούν νέα άτομα με χαλαρούς δεσμούς. Το κάθε μόριο αποτελείται γενικά από πολλά άτομα και ως υλικό έχει μικρή θερμική αγωγιμότητα σε θερμοκρασία δωματίου. Τα κλαθρικά υλικά κατηγοριοποιούνται σε 2 επιμέρους κλάσεις, τύπου I και τύπου II. Τα κλαθρικά τύπου I, αναπαρίστανται ως $\text{X}_2\text{Y}_6\text{E}_{46}$, όπου X και Y είναι τα άτομα που μπορούν να προστεθούν στον ελεύθερο χώρο, ενώ το E είναι Si, Ge ή Sn. Η υψηλότερη τιμή zT που έχει παρατηρηθεί είναι περίπου 1.4 για το n-type μονοκρυσταλλικό $\text{Ba}_8\text{Ga}_{16}\text{Ge}_{30}$.

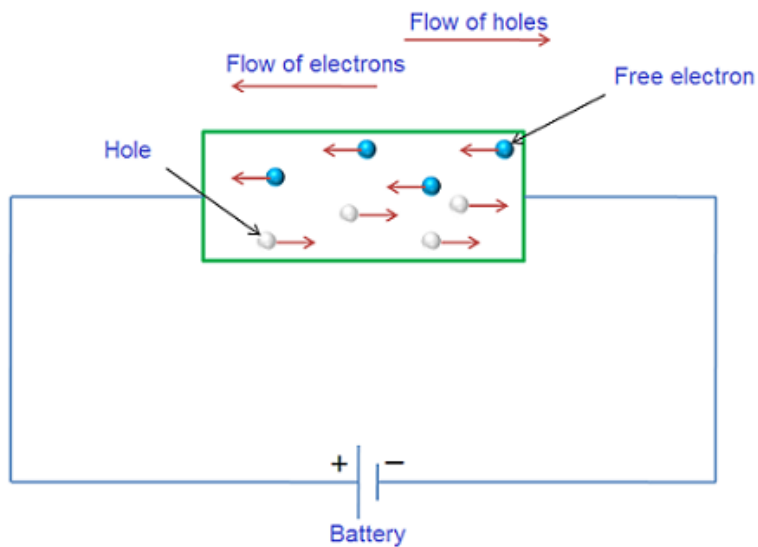
3.1.4.2 Νανοδομημένα θερμοηλεκτρικά υλικά

Εκτός από τις προσπάθειες για την ανάδειξη των θερμοηλεκτρικών υλικών της πρώτης κατηγορίας, υπάρχουν και τα νανοδομημένα θερμοηλεκτρικά υλικά, με κύριο στόχο την αύξηση της τιμής zT. Τα χαμηλής διάστασης θερμοηλεκτρικά υλικά πιστεύεται ότι έχουν υψηλότερες θερμοηλεκτρικές ιδιότητες από τα θερμοηλεκτρικά υλικά πρώτης κατηγορίας, επειδή το επίπεδο DOS κοντά στο επίπεδο Fermi μπορεί να ενισχυθεί μέσω κβαντικών περιορισμών, και συνεπώς οδηγεί στην αύξηση της θερμοδυναμικής ισχύος και / ή επειδή τα φωνόνια σε μεγάλη κλίμακα mfr μπορούν να είναι αποτελεσματικά διασκορπισμένα από υψηλή πυκνότητα διεπαφών, με αποτέλεσμα να προκύπτει μείωση της θερμικής αγωγιμότητας του πλέγματος (Zhi-Gang Chen et al., 2012).

3.2 ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

Η λειτουργία των θερμοηλεκτρικών στοιχείων βασίζεται στο θερμοηλεκτρικό φαινόμενο ή αλλιώς Seebeck Effect. Κατά το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο, παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας στην πλάκα του θερμοηλεκτρικού στοιχείου. Πιο αναλυτικά, αυτό εκφράζεται ως η έντονη κίνηση των ηλεκτρονίων του θερμοηλεκτρικού υλικού, λόγω της θερμοκρασιακής διαφοράς, με αποτέλεσμα την ύπαρξη διαφοράς δυναμικού και την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Από μια άλλη σκοπιά, το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο μπορεί να πραγματοποιηθεί και με τον αντίθετο τρόπο, δηλαδή μέσω της κίνησης των ηλεκτρονίων στα ηλεκτρόδια να δημιουργηθεί μια θερμοκρασιακή διαφορά στη θερμοηλεκτρική διάταξη. Όταν συμβαίνει αυτό, το φαινόμενο ονομάζεται Peltier Effect. Αυτή η θερμοκρασιακή πόλωση δημιουργείται με τη μία πλευρά της διάταξης να είναι θερμή και την άλλη πλευρά να είναι ψυχρή. Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία εξετάζεται η δεύτερη περίπτωση.

Πιο αναλυτικά, στους αγωγούς το ρεύμα προκαλείται μόνο από την κίνηση των ηλεκτρονίων, αλλά στους ημιαγωγούς το ρεύμα προκαλείται και από τα ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας και τις οπές στη ζώνη σθένους. Όταν το ηλεκτρόνιο σθένους μετακινείται από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας, τότε δημιουργείται μια κενή θέση στη ζώνη σθένους, η οποία ονομάζεται οπή. Το ρεύμα που προκαλείται από την κίνηση ηλεκτρονίων ονομάζεται ηλεκτρικό ρεύμα, ενώ το ρεύμα που προκαλείται από την κίνηση των οπών ονομάζεται ρεύμα οπής. Το ηλεκτρόνιο είναι ένας φορέας αρνητικού φορτίου, ενώ η οπή είναι ένας φορέας θετικού φορτίου, ενώ και τα δύο ονομάζονται φορείς φορτίου.



Εικόνα 3.6: Απεικόνιση της ροής των φορέων φορτίου ενός ημιαγωγού συνδεδεμένου με μπαταρία
(Πηγή: <http://www.physics-and-radio-electronics.com>)

Το ρεύμα οπής σε έναν ημιαγωγό συμβαίνει, όταν τα ηλεκτρόνια της ζώνης σθένους από ένα προσκείμενο άτομο μετατοπίζονται για να καλύψουν μια οπή (σπασμένος ομοιοπολικός δεσμός) σε ένα γειτονικό άτομο. Το ηλεκτρόνιο που απελευθερώθηκε από τον σπασμένο ομοιοπολικό δεσμό κινείται ελεύθερα στον ημιαγωγό. Η κίνηση αυτού του ηλεκτρονίου είναι κάπως παρόμοια με την κίνηση των ηλεκτρονίων στα μέταλλα ή στο συμβατικό ρεύμα. Οι δύο διαδικασίες αγωγής / κίνησης των φορέων φορτίου δεν είναι οι ίδιες-είναι πρόσθετες και, ως εκ τούτου, στους ημιαγωγούς υπολογίζεται επιπλέον ρεύμα λόγω της κίνησης των οπών.

Σε απόλυτα μηδενική θερμοκρασία ο ημιαγωγός συμπεριφέρεται ως μονωτής. Ωστόσο, σε θερμοκρασία δωματίου τα ηλεκτρόνια που υπάρχουν στην εξωτερική τροχιά απορροφούν θερμική ενέργεια. Όταν τα ηλεκτρόνια σθένους αποκτήσουν αρκετή ενέργεια, τότε σπάζουν τη σύνδεση με τον πυρήνα του ατόμου και θα μεταπηδούν στη ζώνη αγωγιμότητας. Έτσι, τα ηλεκτρόνια που υπάρχουν στη ζώνη αγωγιμότητας δεν συνδέονται με τον πυρήνα ενός ατόμου και έτσι είναι ελεύθερα να μετακινηθούν.

Όπως φαίνεται και στην *Εικόνα 3.6*, ο ημιαγωγός είναι συνδεδεμένος με μια μπαταρία. Γενικά, είναι γνωστό πως τα όμοια φορτία απωθούνται, ενώ τα αντίθετα έλκονται. Με παρόμοιο τρόπο, οι φορείς αρνητικού φορτίου (ηλεκτρόνια) έλκονται στον θετικό ακροδέκτη της μπαταρίας, ενώ οι φορείς θετικού φορτίου (οπές) έλκονται προς τον αρνητικό αποδέκτη. Η κίνηση που προκαλείται από αυτές τις δύο έλξεις, παράγει και το αντίστοιχο ρεύμα (ηλεκτρικό ή οπής). Σε έναν ημιαγωγό, το πλήθος των ελεύθερων ηλεκτρονίων είναι ίσο με το πλήθος των οπών, ενώ η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος είναι ίση με την ένταση του ρεύματος οπής.

3.2.1 Απόδοση μετατροπής ενέργειας

Η απόδοση της μετατροπής ενέργειας στα φαινόμενα Seebeck και Peltier συμβολίζεται ως η_{TE} και υπολογίζεται από την εξής σχέση:

$$\eta_{TE} = \left(\frac{T_H - T_C}{T_H} \right) \left(\frac{\sqrt{1 + zT} - 1}{\sqrt{1 + zT} + (T_C/T_H)} \right) \quad (1)$$

Όπου

- T_H : η υψηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος
- T_C : η χαμηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος
- zT : figure of merit

Ο όρος της πρώτης παρένθεσης δείχνει ουσιαστικά την απόδοση κατά Carnot του θερμοηλεκτρικού στοιχείου που λειτουργεί μεταξύ θερμού και ψυχρού περιβάλλοντος με T_H και T_C , αντίστοιχα (Muhammad Sajid et al., 2017).

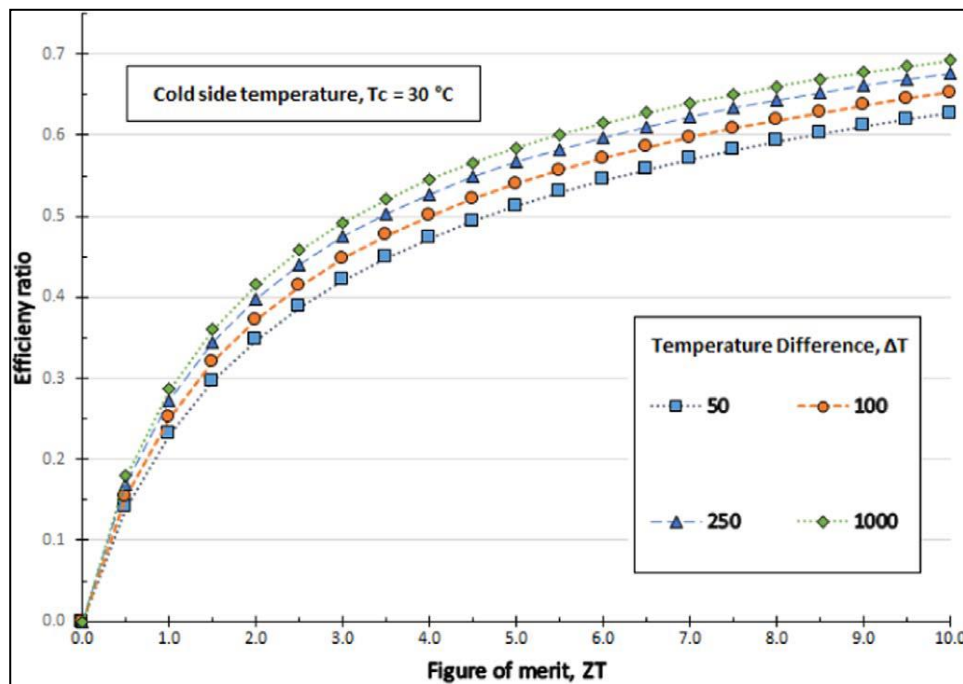
3.2.2 Figure of merit

Στην πραγματικότητα, το χαρακτηριστικό μέγεθος του προαναφερθέντος φαινομένου διακρίνεται από το μέγεθος zT , όπου χρησιμοποιείται κυρίως για την εκτίμηση της καταλληλότητας του θερμοηλεκτρικού υλικού. Η παράμετρος zT , ονομάζεται figure of merit και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$zT = \frac{\sigma \cdot S^2 \cdot T}{\kappa} \quad (2)$$

Όπου

- σ : η ηλεκτρική αγωγιμότητα (S/m)
- κ : η θερμική αγωγιμότητα (W/m/K)
- T : θερμοκρασία (K)
- S : συντελεστής Seebeck (V/K)



Γράφημα 3.1: Αναλογία της θερμοηλεκτρικής απόδοσης με την απόδοση Carnot σε συνάρτηση με το figure of merit για ένα εύρος θερμοκρασιακών διαφορών (Πηγή: Muhammad Sajid et al., 2017)

Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του zT , τόσο μεγαλύτερη είναι η απόδοση του θερμοηλεκτρικού υλικού. Θεωρητικά, η τιμή του zT δεν έχει ανώτατο όριο, ωστόσο δεν έχουν ανακαλυφθεί ακόμη θερμοηλεκτρικά υλικά που να έχουν zT μεγαλύτερο από 3. Η πραγματική πρόκληση βρίσκεται στην απόξευση των αλληλοεξαρτώμενων θερμοηλεκτρικών παραμέτρων (S , σ και κ), που είναι ισχυρά συνδεδεμένα με την συγκέντρωση των φορέων φορτίου, δηλαδή με τον αριθμό των ηλεκτρονίων ή των οπών ανά μονάδα όγκου στη ζώνη αγωγιμότητας (Mi-Kyung Han et al., 2017).

Όπως φαίνεται και από την σχέση (2), η παράμετρος zT είναι ανάλογη της θερμοκρασίας, επομένως όσο μεγαλύτερη η τιμή της θερμοκρασίας τόσο μεγαλύτερη

και η τιμή zT . Υπό φυσιολογικές συνθήκες η θερμοκρασία στην Ελλάδα δεν ξεπερνά τους $40 - 45^{\circ}\text{C}$. Γι' αυτό και το θερμοηλεκτρικό στοιχείο που επιλέχθηκε για την πειραματική διαδικασία είχε υψηλή απόδοση σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες.

3.2.3 Συντελεστής Seebeck

Στην συγκεκριμένη ενότητα αναλύεται ο συντελεστής Seebeck ως μια ιδιότητα που καθορίζει την επίδοση των θερμοστοιχείων. Ουσιαστικά, ο συντελεστής Seebeck σχετίζεται με την ιδιότητα των ηλεκτρονίων να είναι ταυτόχρονα φορείς ηλεκτρικού ρεύματος και θερμότητας. Αν ένα θερμοκρασιακό δυναμικό υφίσταται σε ένα καλώδιο, τότε πραγματοποιείται διάχυση των ηλεκτρονίων από την θερμή πλευρά του καλωδίου προς την ψυχρή πλευρά, με αποτέλεσμα να δημιουργείται η λεγόμενη τάση Seebeck.

Ο συντελεστής Seebeck ορίζεται ως η τάση Seebeck ανά μονάδα διαφοράς θερμοκρασίας και πρόκειται για μια ιδιότητα, που διαφέρει στο εκάστοτε θερμοηλεκτρικό υλικό. Αυτός ο ορισμός, βέβαια, δεν εξηγεί, γιατί ο συντελεστής Seebeck διαφέρει από υλικό σε υλικό και αυτό συμβαίνει, επειδή η φυσική επεξήγηση είναι αρκετά περίπλοκη. Το μέγεθος του συντελεστή σχετίζεται με την ασύμμετρη κατανομή των ηλεκτρονίων στο επίπεδο Fermi.

Από τον προαναφερθέν ορισμό, η πιο απλή σχέση που δίνει τον συντελεστή Seebeck είναι η εξής:

$$S = -\frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (3)$$

Όπου

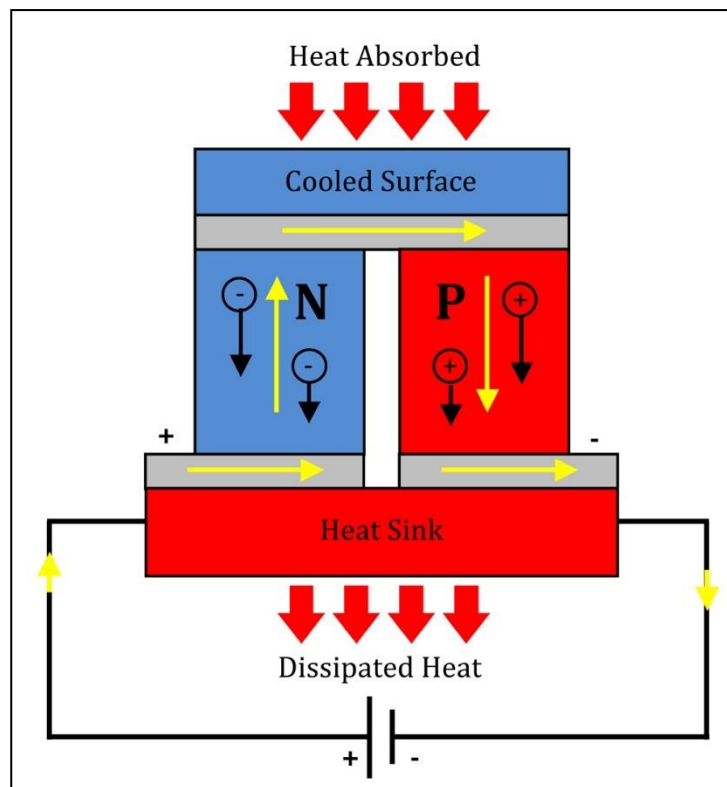
- ΔV : η διαφορά τάσης σε ένα θερμοηλεκτρικό υλικό
- ΔT : η θερμοκρασιακή διαφορά στις πλευρές του θερμοηλεκτρικού στοιχείου

Γενικά ο συντελεστής Seebeck σχετίζεται με την ποσότητα του ηλεκτρικού ρεύματος, που υφίσταται λόγω του θερμοκρασιακού δυναμικού, όπως φαίνεται και στην παρακάτω διαφορική εξίσωση:

$$\mathbf{J} = -\sigma \nabla V - \sigma S \nabla T \quad (4)$$

Όπου \mathbf{J} η πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος.

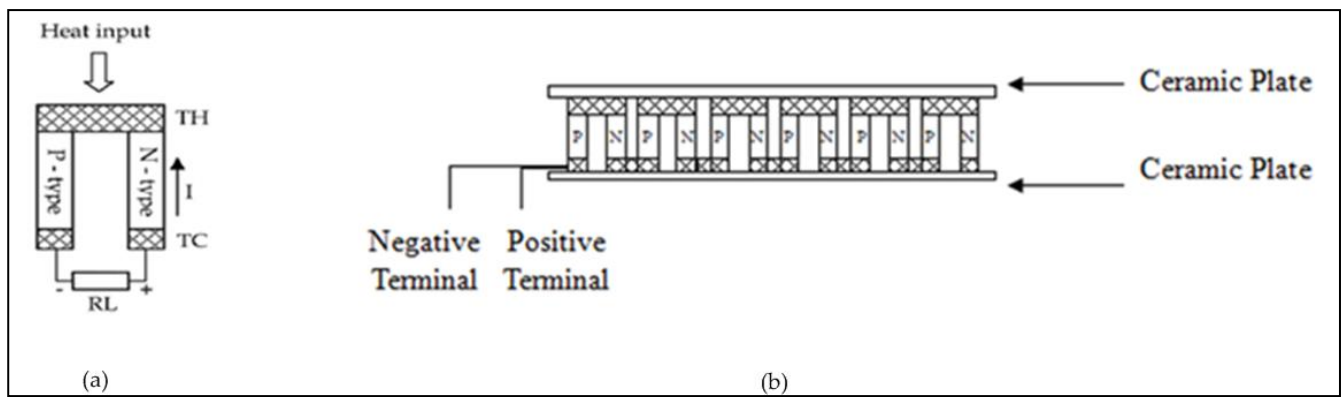
3.3 ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ



Εικόνα 3.7: Διάταξη θερμοηλεκτρικού στοιχείου (Πηγή: uaf.edu)

Όπως προαναφερθηκε, για να είναι λειτουργικό ένα θερμοηλεκτρικό στοιχείο πρέπει να υπάρχει η σύζευξη p-n. Αυτό σημαίνει, πως δύο κομμάτια ημιαγωγού (συνήθως Bi_2Te_3) νοθεύονται με δωρητή και αποδέκτη. Τα δύο αυτά κομμάτια νοθευμένου ημιαγωγού, έρχονται σε επαφή με ένα φιλμ χαλκού ανάμεσά τους και δυο κεραμικές πλάκες σε κάθε εξωτερική πλευρά, για προστασία του στοιχείου, ταυτόχρονη έκλυση θερμότητας και ηλεκτρική απομόνωση.

Τα θερμοηλεκτρικά στοιχεία που υπάρχουν στο εμπόριο έχουν πολλές τέτοιες συζεύξεις σε σειρά για παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος και παράλληλα για παραγωγή θερμότητας. Τυπικά, τέτοιες κατασκευές περιέχουν το ελάχιστο 3 συζεύξεις.



Εικόνα 3.8: (α) Προσόψεις για την εσωτερική σύζευξη P-N των θερμοηλεκτρικών στοιχείων μεμονωμένα και (β) σε ολοκληρωμένη μορφή

Στην Εικόνα 3.8(α) μπορεί να δει κανείς συνοπτικά τη διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος μέσω ενός θερμοηλεκτρικού υλικού. Στην αρχή, υφίσταται εισροή θερμότητας, όπου συναντάται η σύζευξη p-n. Σε εκείνο το σημείο, λόγω της διαφοράς δυναμικού ξεκινάει η κίνηση των ηλεκτρονίων, δηλαδή η παραγωγή ρεύματος (I). Στη Εικόνα 3.8(β) μπορεί να διακρίνει κανείς πως η σύζευξη p-n επεκτείνεται σε μεγαλύτερη κλίμακα, έχοντας πολλαπλές συζεύξεις σε κάθε θερμοηλεκτρικό στοιχείο. Φυσικά στην ολοκληρωμένη του μορφή το στοιχείο έχει τις κεραμικές πλάκες για την προστασία του υλικού, καθώς και το φύλλο χαλκού για την αγωγιμότητα, όπως προαναφέρθηκε.

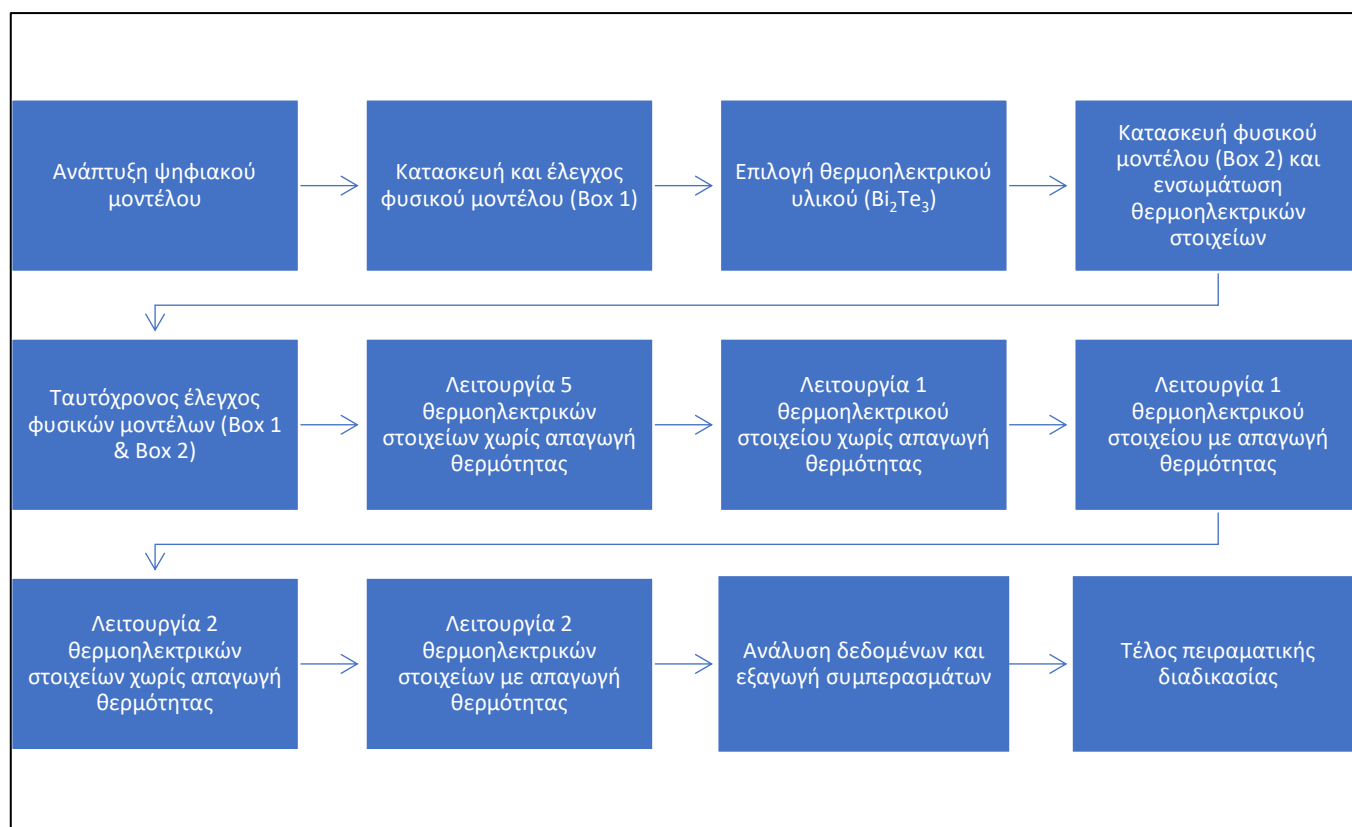
3.4 ΨΥΚΤΡΑ

Για την καλύτερη μετάδοση της θερμότητας εντός και εκτός του κύβου πολυουρεθάνης είναι απαραίτητη η χρήση ψυκτρών. Η ψύκτρα είναι ένα μεταλλικό κατασκευάσμα με πτερύγια ίδιου υλικού και έχει ως σκοπό την μεταφορά της θερμότητας από το θερμοηλεκτρικό στοιχείο στην ψύκτρα με αγωγή και από το θερμοηλεκτρικό στοιχείο στον αέρα με συναγωγή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αποτελεσματικότερη διάδοση της θερμότητας στον αέρα εντός του κύβου και την βελτίωσης της θερμοκρασιακής ομοιομορφίας στο μοντέλο.

4 Πειραματικό Μέρος

4.1 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στο *Διάγραμμα 4.1* απεικονίζεται το διάγραμμα ροής της πειραματικής διαδικασίας.

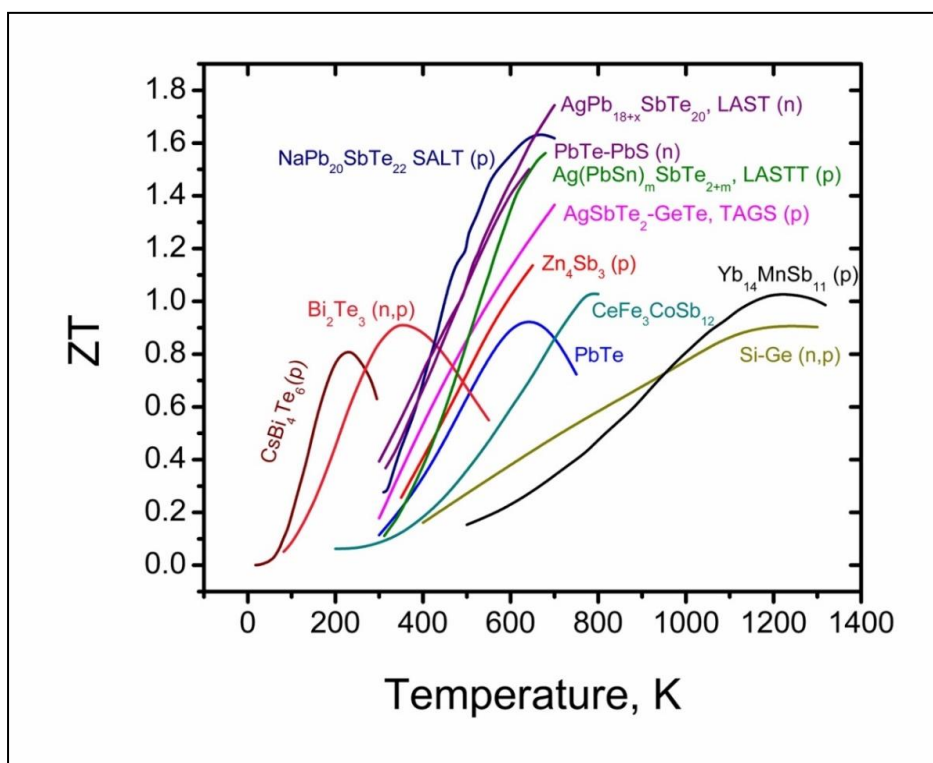


Διάγραμμα 4.1: Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής μεθοδολογίας

4.1.1 Χαρακτηριστικά θερμοηλεκτρικού στοιχείου

Το θερμοηλεκτρικό υλικό που επρόκειτο να χρησιμοποιηθεί, θα έπρεπε να έχει το μέγιστο συντελεστή zT σε θερμοκρασία Όπως είναι εμφανές και από το *Γράφημα 4.1*, το καταλληλότερο υλικό για έλεγχο της απόδοσης ενός θερμοηλεκτρικού υλικού σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος είναι το Bi_2Te_3 . Το συγκεκριμένο υλικό έχει τον υψηλότερο συντελεστή zT σε χαμηλό θερμοκρασιακό εύρος, με αποτέλεσμα να βελτιστοποιείται η απόδοση της λειτουργίας του για τη ζητούμενη χρήση.

Το τριτελλουριδιο διβισμούθιο (Bi_2Te_3) έχει υπάρξει στο επίκεντρο εκτεταμένων θεωρητικών και πειραματικών μελετών ως συστατικό διάφορων θερμοηλεκτρικών συσκευών, όπως είναι τα θερμοηλεκτρικά δομοστοιχεία. Τα δομοστοιχεία που βρίσκονται στο εμπόριο αποτελούνται από ζεύγη ημιαγωγών p-type και n-type.



Γράφημα 4.1: Τιμές zT συναρτήσει της θερμοκρασίας για διάφορα θερμοηλεκτρικά υλικά (Πηγή: eejournal.com)

Οι τιμές του zT των εμπορικών στοιχείων με Bi_2Te_3 είναι περίπου 1.35 για p-type, ενώ για n-type ισούται με περίπου 0.9. Κάτι τέτοιο έχει ως αποτέλεσμα το μικρό περιθώριο για βελτίωση των στοιχείων που αποτελούνται από Bi_2Te_3 . Μέσω της χημικής σύστασης του στοιχείου τα p-type και n-type χαρακτηριστικά του Bi_2Te_3 μπορούν να ελεγχθούν και βρίσκονται κάθε φορά στην επιθυμητή αναλογία (Mi-Kyung *et al.*, 2017)

Για την πειραματική διαδικασία αγοράστηκαν πέντε θερμοηλεκτρικά στοιχεία με τις ίδιες ιδιότητες. Τα στοιχεία που επιλέχθηκαν τελικά φέρουν ιδιότητες ως φαίνονται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 4.1: Ιδιότητες υλικού σε δύο θερμοκρασίες

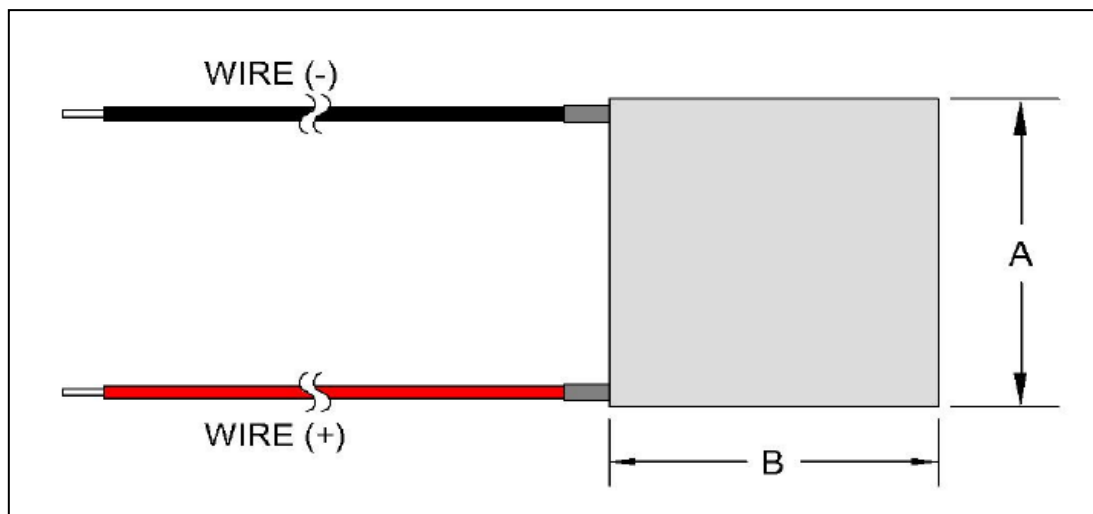
	27°C (θερμοκρασία θερμής πλευράς)	50°C (θερμοκρασία θερμής πλευράς)
V_{\max} (V)	24,6	27,3
I_{\max} (A)	11,3	11,3
Q_{\max} (W)	172,0	188,7
ΔT_{\max} (°C)	69,0	78,0
Θερμοκρασία λειτουργίας	−40°C έως +80°C	

Πίνακας 4.2: Ιδιότητες θερμοηλεκτρικού υλικού σε θερμοκρασία 300K

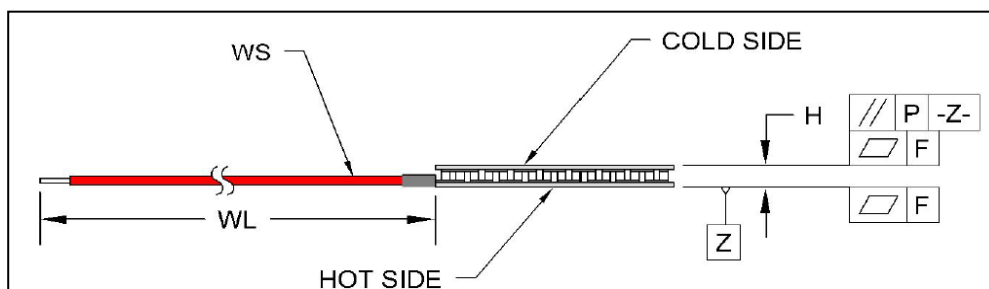
Συντελεστής Seebeck ($\mu\text{V/K}$)	208
Ηλεκτρική αντίσταση ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)	1030
Θερμική αγωγιμότητα (mW/cm/K)	16

Πίνακας 4.3: Διαστάσεις θερμοηλεκτρικού δομοστοιχείου

Πλάτος, A (mm)	$40,00 \pm 0,20$
Μήκος, B (mm)	$40,00 \pm 0,20$
Πάχος, (mm)	$3,20 \pm 0,05$
Μήκος καλωδίου, (mm)	120,00



Εικόνα 4.1: Κάτοψη στοιχείου Peltier



Εικόνα 4.2: Πλάγια όψη του θερμοηλεκτρικού στοιχείου

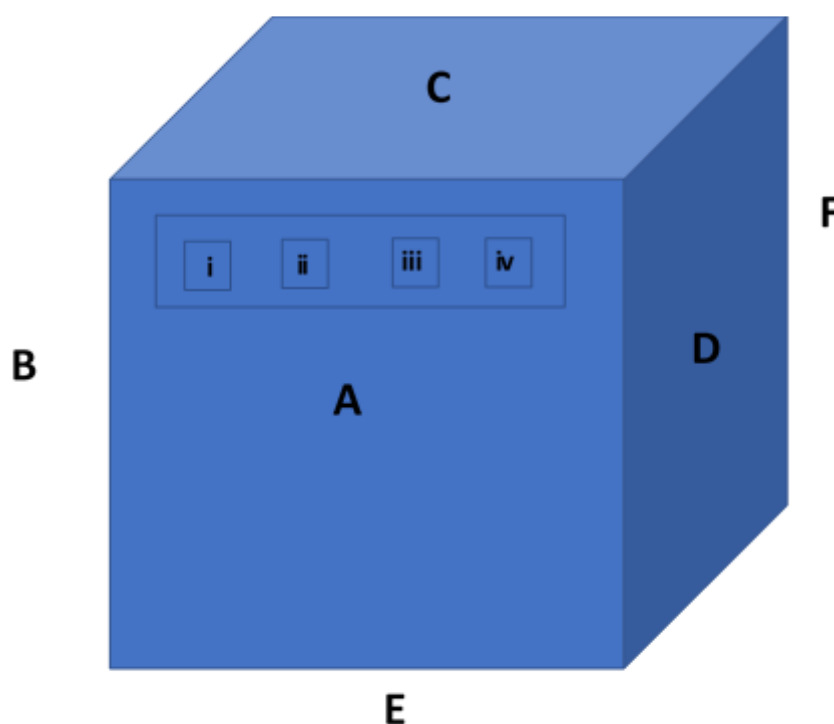
4.1.2 Μετρητικά όργανα

4.1.2.1 Θερμοκρασία

Για το συγκεκριμένο στάδιο της κύριας πειραματικής διαδικασίας χρησιμοποιήθηκε ένας μετρητής με τριάντα δύο θέσεις για θερμοζεύγη. Αυτό σημαίνει πως το συγκεκριμένο όργανο έχει τη δυνατότητα να καταγράφει ταυτόχρονα τη θερμοκρασία σε τριάντα δύο θέσεις. Γι αυτό το λόγο και επιλέχθηκε να μετρηθούν θερμοκρασίες σε πολλά σημεία του box 2, τόσο εντός όσο και εκτός του. Το ίδιο όργανο χρησιμοποιήθηκε κατά την ίδια φάση του πειράματος προς την καταγραφή

της θερμοκρασίας του box 2 και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Σε αυτό το σημείο είναι απαραίτητο να καταστεί σαφής η θέση του κάθε θερμοστοιχείου πάνω στον κύβο πολυουρεθάνης.

Στην *Εικόνα 4.3* βλέπει κανείς την σχηματική απεικόνιση του φυσικού μοντέλου, που δημιουργήθηκε για την συγκεκριμένη έρευνα. Τα κεφαλαία γράμματα (A, B,...) χρησιμοποιούνται για να ονομαστούν τις πλευρές του κύβου, ενώ τα πεζά λατινικά (i, ii,...) για να δείξουν τις θέσεις που τοποθετήθηκαν τα θερμοστοιχεία στην πλευρά A, όπου είναι και η πλευρά με την κατασκευή των στοιχείων Peltier.



Εικόνα 4.1: Απεικόνιση του κύβου πολυουρεθάνης

Για να είναι πιο εύκολη η αναγνώριση του κάθε θερμοζεύγους κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων, το κάθε θερμοζεύγος κωδικοποιήθηκε. Ο κωδικός του κάθε θερμοζεύγους αποτελείται από δύο γράμματα XY. Το X αντιστοιχεί στην πλευρά που βρίσκεται ο εκάστοτε αισθητήρας, ενώ το Y μπορεί να είναι είτε στο γράμμα E (external=εξωτερικό) για τον αισθητήρα στο εξωτερικό μέρος του κύβου, είτε στο γράμμα I (internal=εσωτερικό) για τον αισθητήρα που βρίσκεται στην εσωτερική πλευρά του μοντέλου.

Εξαίρεση στα παραπάνω αποτελούν τα θερμοζεύγη της πλευράς Α, καθώς πέραν των δύο γραμμμάτων προστίθεται στον κωδικό και μια παρένθεση με τη λατινική αρίθμηση, όπως προαναφέρθηκε. Έτσι, καταλαβαίνει κανείς πως στην πλευρά Α την θερμοκρασία μετρούσαν τέσσερις αισθητήρες εντός του κουτιού και τέσσερις εκτός του. Τέλος, για την αναγνώριση της μέσης θερμοκρασίας εντός του μοντέλου, τοποθετήθηκε ένας ακόμη αισθητήρας στο κέντρο του box 2 αιωρούμενος από την πλευρά C, όπως και ένας αισθητήρας με επαφή στον αέρα του περιβάλλοντος για την καταγραφή της θερμοκρασίας.

Για να υπάρχει σύγκριση μεταξύ του box 2 και του box 1, τοποθετήθηκε ένα θερμοζεύγος ακόμα στο box 1 και, πιο συγκεκριμένα, στο κέντρο του μοντέλου κρεμάμενο από την επάνω πλευρά του. Οι μετρήσεις πάρθηκαν χρησιμοποιώντας το ίδιο μετρητικό όργανο.

Το όργανο αυτό προέρχεται από την εταιρία Campbell Scientific και ονομάζεται CR800 Measurement and Control Datalogger. Η χρήση του ήταν η συλλογή και η αποθήκευση των δεδομένων θερμοκρασίας σε τριάντα δύο θέσεις, ενώ το σφάλμα της κάθε μέτρησης είναι $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$.

4.1.2.2 Ένταση ηλεκτρικού ρεύματος και τάση

Εκτός της θερμοκρασίας, ακόμα μερικά μεγέθη είναι απαραίτητα για να αποφασιστεί η διαφορά που υπάρχει λόγω των θερμοηλεκτρικών στοιχείων μεταξύ των δύο κουτιών. Αυτά είναι η τάση και η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος, οι οποίες ρυθμίζονται μέσω ενός τροφοδοτικού μηχανήματος. Ωστόσο, είναι σημαντικό να τονιστεί το γεγονός πως αυτό το σύστημα σχεδιάζεται με σκοπό την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος από φωτοβολταϊκή διάταξη και όχι από το κλασσικό σύστημα ηλεκτροδότησης. Τα ηλεκτρόδια των στοιχείων συνδέονται παράλληλα, ώστε κάθε ένα να το διατρέχει η ίδια ένταση ρεύματος, ενώ η τάση στο εκάστοτε στοιχείο ισούται με τη συνολική τάση που δίνει το τροφοδοτικό δια το πλήθος των συνδεδεμένων στοιχείων.

Τα δύο αυτά μεγέθη, στην συγκεκριμένη μελέτη, καταγράφονταν καθημερινά. Η καθημερινή καταγραφή τους βοήθησε στον έλεγχο των παραμέτρων που επηρέαζαν το πείραμα σε μεγάλο βαθμό. Για την αποφυγή παρανοήσεων, παρόλο που το τροφοδοτικό έδινε τη δυνατότητα παροχής ηλεκτρικού ρεύματος με ρυθμιζόμενη

τάση και ένταση, η ένταση συχνά μεταβαλλόταν. Αυτό ήταν απόρροια της μεταβολής της θερμοκρασίας και των καιρικών συνθηκών κατά τη διάρκεια της ημέρας. Τέλος, οι προεκτάσεις των καλωδίων ήταν συνδεδεμένες με το τροφοδοτικό.

Ταυτόχρονα για την αποφυγή ατυχημάτων χρησιμοποιήθηκε μια κάμερα, η οποία μαγνητοσκοπούσε και αποθήκευε τα δεδομένα που εμφανίζονταν στην οθόνη του τροφοδοτικού. Έτσι, παρατηρήθηκε η διακύμανση της έντασης ρεύματος κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας και εξήχθηκε το συμπέρασμα πως η διακύμανση ήταν φυσιολογική και σε γενικές γραμμές σταθερού ρυθμού.

Το τροφοδοτικό είναι της εταιρίας UNI-T και έχει σφάλμα $\pm 0,1$.

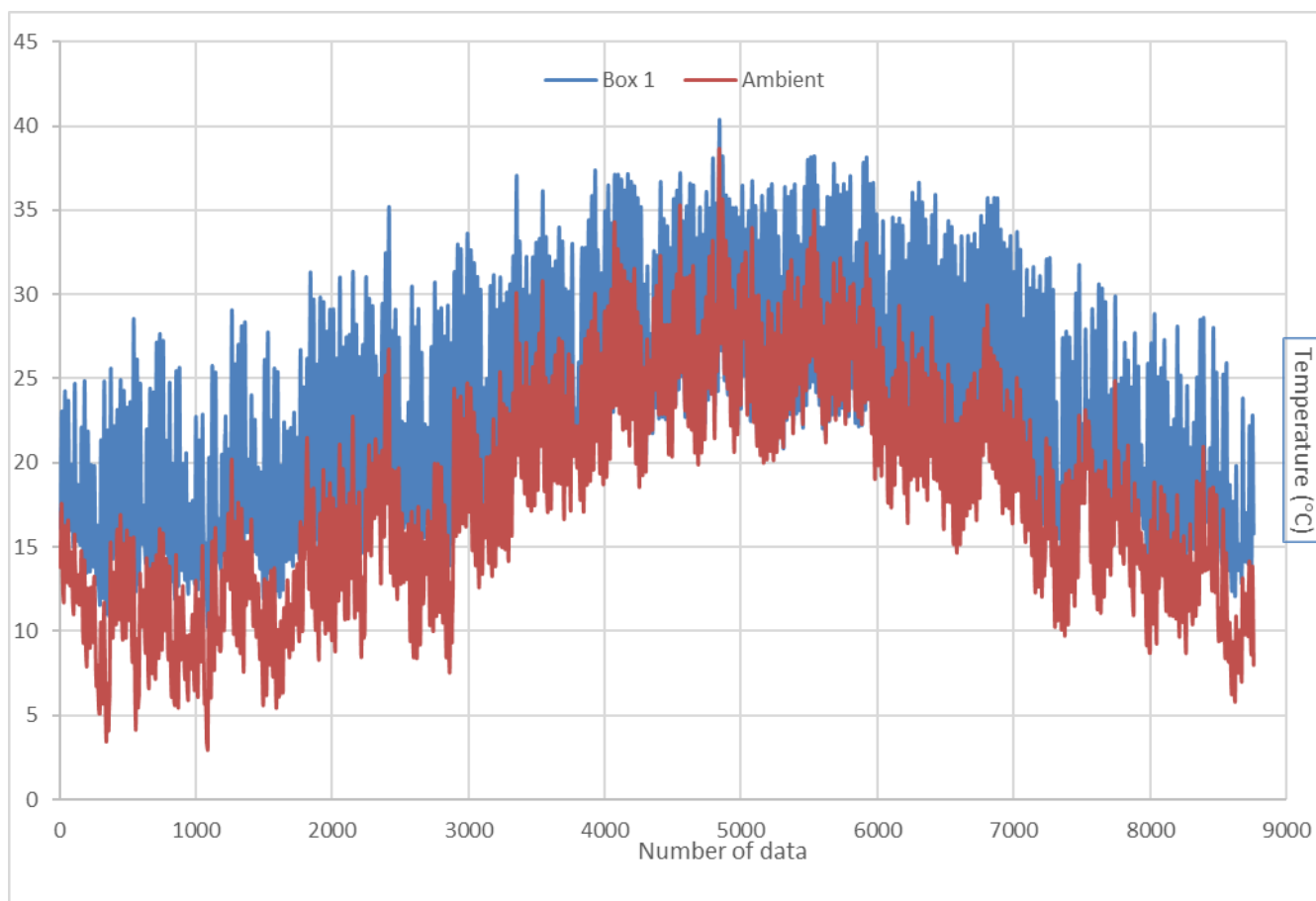
4.1.2.3 Ταχύτητα αέρα

Για την αποτελεσματικότερη λειτουργία του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε επίσης ένας ανεμιστήρας, ο οποίος έστελνε τον αέρα στην εξωτερική μεριά του κύβου πολυουρεθάνης και, πιο συγκεκριμένα, επάνω στην κατασκευή αλουμινίου που περιείχε τα θερμοηλεκτρικά στοιχεία. Αυτό έγινε για να υπάρχει η στοιχειώδης απαγωγή θερμότητας από το κουτί. Γι αυτό και μετρήθηκε η ταχύτητα ριπής του ανέμου λόγω του ανεμιστήρα που προσέπιπτε επάνω στην κατασκευή με τα στοιχεία.

4.2 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Σε αυτό το στάδιο της προεργασίας πραγματοποιήθηκε η ανάπτυξη του μοντέλου με ψηφιακά μέσα. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα EnergyPlus, μέσω της πλατφόρμας του OpenStudio. Με το πρόγραμμα SketchUp σχεδιάστηκε το προβλεπόμενο μοντέλο με εσωτερικές διαστάσεις $1,0\text{m} \times 1,0\text{m} \times 1,0\text{m}$, αρχείο μετεωρολογικών συνθηκών από τον κόλπο της Σούδας Χανίων και υλικό την πολυουρεθάνη πάχους 5cm. Για το box 1, θεωρήθηκε υφιστάμενο φορτίο μέσω ηλεκτρικών συσκευών ίσο με 30W.

Μέσω αυτού του προγράμματος δύναται κανείς να δει τις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις μέσα στο μοντέλο, βάσει των μετεωρολογικών συνθηκών που έχουν εισαχθεί. Έτσι, λοιπόν, είναι εύκολο να συγκριθεί η θερμοκρασία που θα υπάρχει μέσα στο μοντέλο με αυτή που θα υπάρχει έξω από το μοντέλο. Το γεγονός αυτό διευκολύνει τη διαδικασία επιλογής του θερμοηλεκτρικού υλικού για την μετέπειτα χρήση τους στο κύριο πειραματικό μέρος, αφού κάθε θερμοηλεκτρικό υλικό παρουσιάζει βέλτιστο figure of merit σε διαφορετικά εύρη θερμοκρασιών.

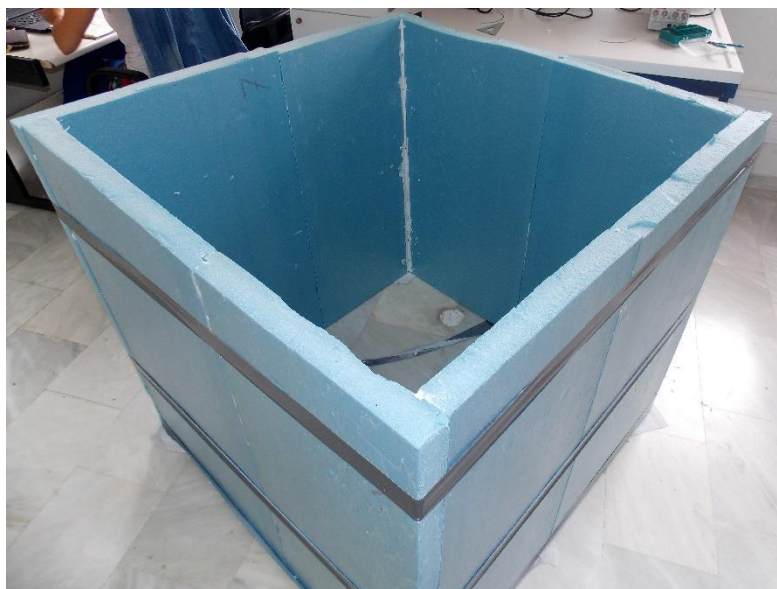


Γράφημα 4.2: Θερμοκρασιακή διακύμανση εντός και εκτός του θεωρητικού μοντέλου

Όπως διαφαίνεται και από το Γράφημα 4.2., η μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας που παρατηρείται μεταξύ του εσωτερικού του μοντέλου πολυουρεθάνης και του περιβάλλοντος ισούται με $\Delta T \cong 16^{\circ}\text{C}$ και εντοπίζεται κατά την άνοιξη και το φθινόπωρο. Κάτι τέτοιο δείχνει πως τα θερμοηλεκτρικά στοιχεία αναμένεται να έχουν τη μέγιστη απόδοση τους ανοιξιάτικους και φθινοπωρινούς μήνες. Όσον αφορά τους χειμερινούς και τους θερινούς μήνες, παρατηρείται μια σχετική μείωση στη διαφορά θερμοκρασίας. Κάτι τέτοιο οδηγεί στην παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος μειωμένης έντασης.

4.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΦΥΣΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Η διαδικασία συνεχίστηκε με το στάδιο κατασκευής του φυσικού μοντέλου, όπου χρησιμοποιήθηκε πολουρεθάνη πάχους 5cm, ειδική κόλλα για την συγκόλληση των κομματιών πολουρεθάνης μεταξύ τους και στόκος για την τελική μόνωση σε κάθε ένωση. Κάθε κομμάτι πολουρεθάνης κοπήκε με τέτοιο τρόπο, ώστε το τελικό αποτέλεσμα να είναι ένας κύβος διαστάσεων $1,1\text{m} \times 1,1\text{m} \times 1,1\text{m}$. Αφού η πολουρεθάνη είχε πάχος ίσο με 5,0cm, οι εσωτερικές διαστάσεις του κουτιού ισούνταν με $1,0\text{m} \times 1,0\text{m} \times 1,0\text{m}$, όπως δηλαδή είχε σχεδιαστεί και το ψηφιακό μοντέλο. Το μοντέλο αυτό ονομάστηκε “box 1”.



Εικόνα 4.4: Συγκόλληση τοιχωμάτων box 1



Εικόνα 4.5: Το box 1 εκτεθειμένο στα καιρικά φαινόμενα

Στο κέντρο του κουτιού τοποθετήθηκε ένας μετρητής θερμοκρασίας και υγρασίας, κρεμάμενος από την επάνω πλευρά του κουτιού. Τα δεδομένα θερμοκρασίας που συλλέχθηκαν υπάγονται σε δύο κατηγορίες: (α) όταν είχε την κάτω πλευρά του και ένα μικρό άνοιγμα σε μια πλευρά του και (β) όταν ο κύβος ήταν πλήρως μονωμένος. Ταυτόχρονα σε ένα διαφορετικό, μη μονωμένο κουτί καταγραφόταν με ίδιου τύπου μετρητή η θερμοκρασία και η υγρασία, οι οποίες αντιστοιχούσαν στον περιβάλλοντα χώρο την εκάστοτε στιγμή. Σε αυτό το σημείο πρέπει να ειπωθεί πως και τα δύο κουτιά τοποθετήθηκαν σε μια ταράτσα, ώστε να είναι εκτεθειμένα στις διάφορες καιρικές συνθήκες, όπως ακριβώς είναι δηλαδή και ένα κτήριο.

Η μεγαλύτερη διαφορά θερμοκρασίας (ΔT) μεταξύ του κύβου πολυουρεθάνης και του περιβάλλοντος χώρου παρατηρήθηκε, όταν το κουτί ήταν πλήρως μονωμένο, καθώς τότε οι απώλειες θερμότητας από το μοντέλο ήταν οι ελάχιστες από τις δύο περιπτώσεις. Αυτό το γεγονός εξηγεί, γιατί η θερμοκρασία εντός του μοντέλου έφτανε σε υψηλά επίπεδα, δηλαδή περίπου 45°C , ενώ η περιβαλλοντική θερμοκρασία ήταν σε γενικές γραμμές μερικούς βαθμούς χαμηλότερη.

Το μόνο όργανο που χρησιμοποιήθηκε στη συγκεκριμένη φάση του πειράματος ήταν ο μετρητής υγρασίας και θερμοκρασίας, που ήταν της εταιρίας HOBO και είναι το μοντέλο HOBO Temperature/Relative Humidity/2 External Channel Data Logger - U12-013 με σφάλμα $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$.



Εικόνα 4.6: Απεικόνιση μετρητή θερμοκρασίας και υγρασίας στο κέντρο του box 1

Μόλις ολοκληρώθηκε η συλλογή των τιμών θερμοκρασίας από το box 1, ξεκίνησε η κατασκευή του δεύτερου φυσικού μοντέλου (box 2), το οποίο θα στέγαζε και τα θερμοηλεκτρικά στοιχεία. Η κατασκευή του box 2 όσον αφορά τον κύβο πολυουρεθάνης, ακολούθησε το ίδιο μοτίβο όπως και η κατασκευή του box 1 στο προηγούμενο στάδιο. Ωστόσο, στην συγκεκριμένη φάση του πειράματος προστέθηκαν επιπλέον βήματα για να καλυφθούν όλες οι πιθανές ανάγκες.

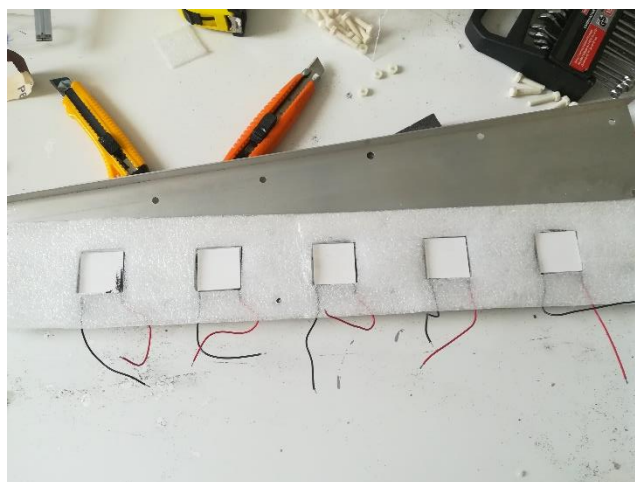
Γι αρχή, σε μια από τις κάθετες στο δάπεδο πλευρές, δημιουργήθηκε μια εγκοπή ορθογώνιου παραλληλόγραμμου σχήματος προκειμένου να εισαχθεί η κατασκευή με τα πέντε θερμοηλεκτρικά στοιχεία. Αυτή η κατασκευή δημιουργήθηκε προκειμένου τα θερμοηλεκτρικά στοιχεία να παραμένουν στην προκαθορισμένη θέση τους, να προστατεύονται από τα καιρικά φαινόμενα και να διευκολύνεται η μέτρηση των επιθυμητών παραμέτρων.



Εικόνα 4.7: Εγκοπή για την εισαγωγή των θερμοηλεκτρικών στοιχείων

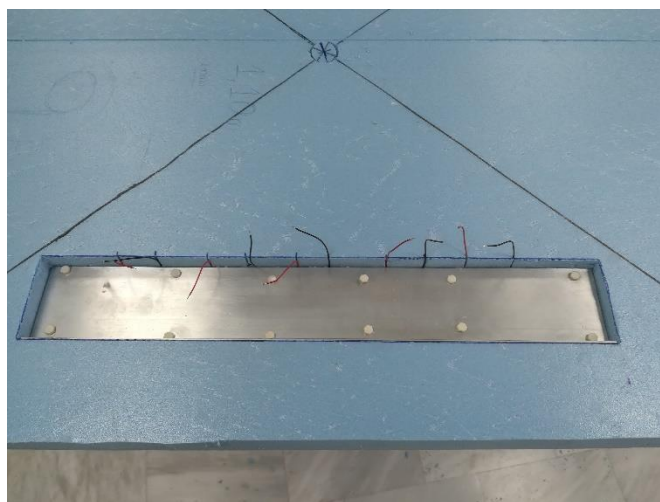
Το υλικό που περικλύει τα θερμοηλεκτρικά στοιχεία επιλέχθηκε να είναι το αλουμίνιο για τρεις λόγους. Ο πρώτος ήταν η τιμή του στο εμπόριο, που όντας τέτοια ήταν επιτρεπτό να αγοραστεί. Ο δεύτερος και πιο σημαντικός ήταν πως το αλουμίνιο έχει υψηλή θερμική αγωγιμότητα, γεγονός που βοηθά τη μεταφορά θερμότητας από την εσωτερική και εξωτερική πλευρά του κύβου προς το θερμοηλεκτρικό στοιχείο, έτσι ώστε να υφίσταται η διαφορά θερμοκρασίας στις δύο πλευρές του στοιχείου και να παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα. Η τελευταία αιτία ήταν, πως λόγω του ασημένιου χρώματός του δε θα πραγματοποιούνταν υψηλή απορρόφηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, γεγονός που θα είχε ως συνέπεια την μετατροπή των αποτελεσμάτων.

Ανάμεσα στα φύλλα αλουμινίου και στα θερμοηλεκτρικά στοιχεία τοποθετήθηκε μια πάστα με υψηλή θερμική αγωγιμότητα, προκειμένου να υποβοηθηθεί η μεταφορά θερμότητας και στις δύο πλευρές του στοιχείου. Επειδή τα θερμοηλεκτρικά στοιχεία μέσα στην κατασκευή προβλεπόταν να έχουν μια μικρή απόσταση, τόσο για την επιτυχημένη συγκράτησή τους όσο και για τον περιορισμό της θερμότητας προς την επιθυμητή κατεύθυνση, τοποθετήθηκε μονωτικό υλικό. Τέλος, τα δύο φύλλα αλουμινίου βιδώθηκαν έχοντας μεταξύ τους τα πέντε θερμοηλεκτρικά στοιχεία, με αποτέλεσμα να δημιουργεί η κατασκευή με τα θερμοηλεκτρικά. Οι βίδες που χρησιμοποιήθηκαν δεν ήταν μεταλλικές, αλλά πλαστικές, προκειμένου να υπάρχει όσο μικρότερη διαφυγή της θερμότητας από αυτές γίνεται.



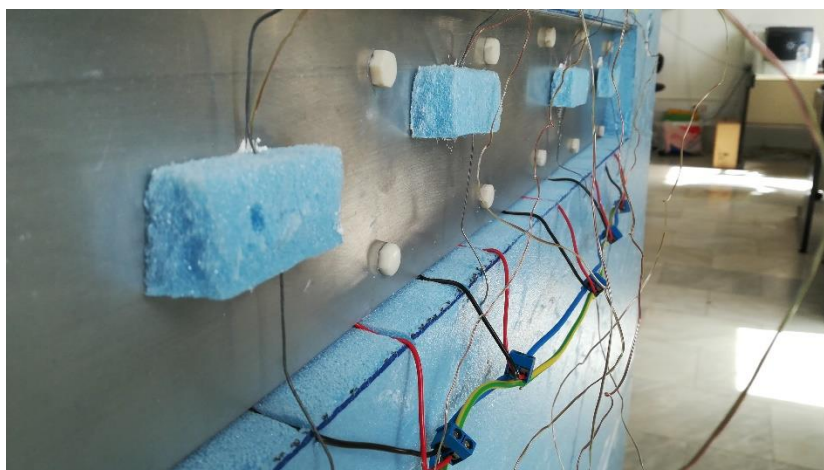
Εικόνα 4.8: Κατασκευή με αλουμίνιο που περιέχει τα πέντε θερμοηλεκτρικά στοιχεία

Στη συνέχεια, τα καλώδια των θερμοηλεκτρικών στοιχείων συνδέθηκαν παράλληλα μεταξύ τους, ώστε να υπάρχει ένα ενιαίο ηλεκτρικό ρεύμα και να είναι πιο εύκολη η μέτρηση των παραμέτρων. Η κατασκευή αυτή, λοιπόν, τοποθετήθηκε στην προαναφερθείσα εγκοπή της πολυουρεθάνης, όπου και παρέμεινε μέχρι το τέλος της πειραματικής διαδικασίας.



Εικόνα 4.9: Η κατασκευή με τα θερμοηλεκτρικά στοιχεία εγκατεστημένη στη μία πλευρά του box 2

Τέλος, τοποθετήθηκαν επάνω στο box 2 τα θερμοζεύγη που θα μετρούσαν τη θερμοκρασία στις διάφορες επιφάνειές του, τόσο εντός όσο και εκτός του.



Εικόνα 4.10: Τοποθέτηση μετρητών θερμοκρασίας και σύνδεση ακροδεκτών

4.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Αφού εγκαταστάθηκαν όλες οι μετρητικές συσκευές και τα μοντέλα (box 1 και box 2) σε χώρο εκτεθειμένο στα καιρικά φαινόμενα, ξεκίνησε η διαδικασία συλλογής τιμών θερμοκρασίας. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου μεταβλήθηκαν διάφορες παράμετροι, όμως κυρίως άλλαξε ο αριθμός των θερμοηλεκτρικών στοιχείων που χρησιμοποιούνταν, καθώς και η ύπαρξη ή μη ανεμιστήρα και ψυκτρών. Σκοπός της συγκεκριμένης διαδικασίας ήταν η ψύξη του box 2, σε σύγκριση με το box 1.

Η πειραματική διαδικασία ξεκίνησε στις 29 Ιουνίου 2018 θέτοντας σε λειτουργία και τα πέντε θερμοηλεκτρικά στοιχεία που υπήρχαν σε διαθεσιμότητα,

χωρίς τη λειτουργία του ανεμιστήρα. Η τιμή της τάσης του τροφοδοτικού ισούταν με 25.6V, ενώ η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος ισούταν με $1.58A \pm 0.20A$. σύμφωνα με το φύλλο δεδομένων του θερμοηλεκτρικού στοιχείου, αυτές οι τιμές θα έδιναν θερμοκρασία θερμής πλευράς ίση με 70°C και διαφορά θερμοκρασίας ίση με 30°C. Στην συνέχεια, στις 7 Ιουλίου προσαρμόστηκαν η τιμή της τάσης σε 23.0V και η τιμή της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος σε $1.29A \pm 0.20A$, ώστε να επιτευχθεί θερμοκρασία θερμής πλευράς ίση με 30°C και θερμοκρασιακή διαφορά 20°C, σύμφωνα με το φύλλο δεδομένων των στοιχείων. Στο εξής, οι στόχοι για την θερμοκρασία θερμής πλευράς και θερμοκρασιακής διαφοράς παρέμειναν οι ίδιοι για όλη την υπόλοιπη διάρκεια του πειράματος.



Εικόνα 4.11: Η πειραματική διάταξη σε λειτουργία

Έπειτα, στις 10 Ιουλίου 2018 τέθηκε σε λειτουργία μόνο το κεντρικό θερμοηλεκτρικό στοιχείο. Εφόσον ξεκίνησε η λειτουργία του ενός στοιχείου, το τροφοδοτικό λειτουργούσε με τιμή τάσης 8.0V και τιμή έντασης ηλεκτρικού ρεύματος ίση με $2.60A \pm 0.25A$.

Στις 13 Ιουλίου 2018, αποφασίστηκε να μπει σε λειτουργία ο ανεμιστήρας και να τοποθετηθούν δύο ψύκτρες, με σκοπό την απαγωγή της θερμότητας. Ταυτόχρονα, προσαρμόστηκε η τάση (8.0V) και η ένταση ($2.86A \pm 0.1A$), του ηλεκτρικού

ρεύματος του τροφοδοτικού ώστε η θερμή πλευρά του δομοστοιχείου να βρίσκεται στους 30°C.



Εικόνα 4.12: Τα box 1, box 2 και τα μετρητικά όργανα

Στις 20 Ιουλίου 2018 αποφασίστηκε να λειτουργήσουν δύο εκ των πέντε στοιχείων, χωρίς απαγωγή θερμότητας λόγω του ανεμιστήρα, όπου η τάση του ηλεκτρικού ρεύματος προσαρμόστηκε στα 16 V, ενώ η ένταση του ρεύματος παρέμεινε στα ίδια επίπεδα ($2.50\text{A} \pm 0.15\text{A}$). Τέλος, στις 23 Ιουλίου 2018, τέθηκε σε λειτουργία και ο ανεμιστήρας με σκοπό την απαγωγή της θερμότητας έως τις 30 Ιουλίου 2018. Η τάση παρέμεινε η ίδια, ενώ η ένταση του ρεύματος μειώθηκε αυτόματα, κατά 0.4A.

Πίνακας 4.4: Παράμετροι που εξετάστηκαν κατά τις διάφορες δοκιμές της πειραματικής διαδικασίας

Δοκιμή	Αριθμός θερμοηλεκτρικών στοιχείων σε λειτουργία	Τάση (V)	Ένταση ρεύματος (A)	Απαγωγή θερμότητας	Θερμοκρασία θερμής πλευράς (°C)	Περίοδος λειτουργίας
1	5	25,6	1,58±0,20	Όχι	70	29/06-07/07
2	5	23,0	1,29±0,20	Όχι	30	07/07-09/07
3	1	8,0	2,60±0,25	Όχι	30	10/07-13/07
4	1	8,0	2,86±0,10	Ναι	30	13/07-16/07
5	2	16,0	2,50±0,15	Όχι	30	20/07-23/07
6	2	16,1	2,10±0,10	Ναι	30	23/07-30/07

5 Αποτελέσματα-Σχολιασμός

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, θα γίνει μία επισκόπηση των αποτελεσμάτων και ταυτόχρονα, θα λάβει χώρα η αναλυτική περιγραφή και ο σχολιασμός τους. Τα αποτελέσματα που θα αναλυθούν σχετίζονται μόνο με τις περιπτώσεις λειτουργίας του ενός θερμοηλεκτρικού στοιχείου, με και χωρίς απαγωγή θερμότητας.

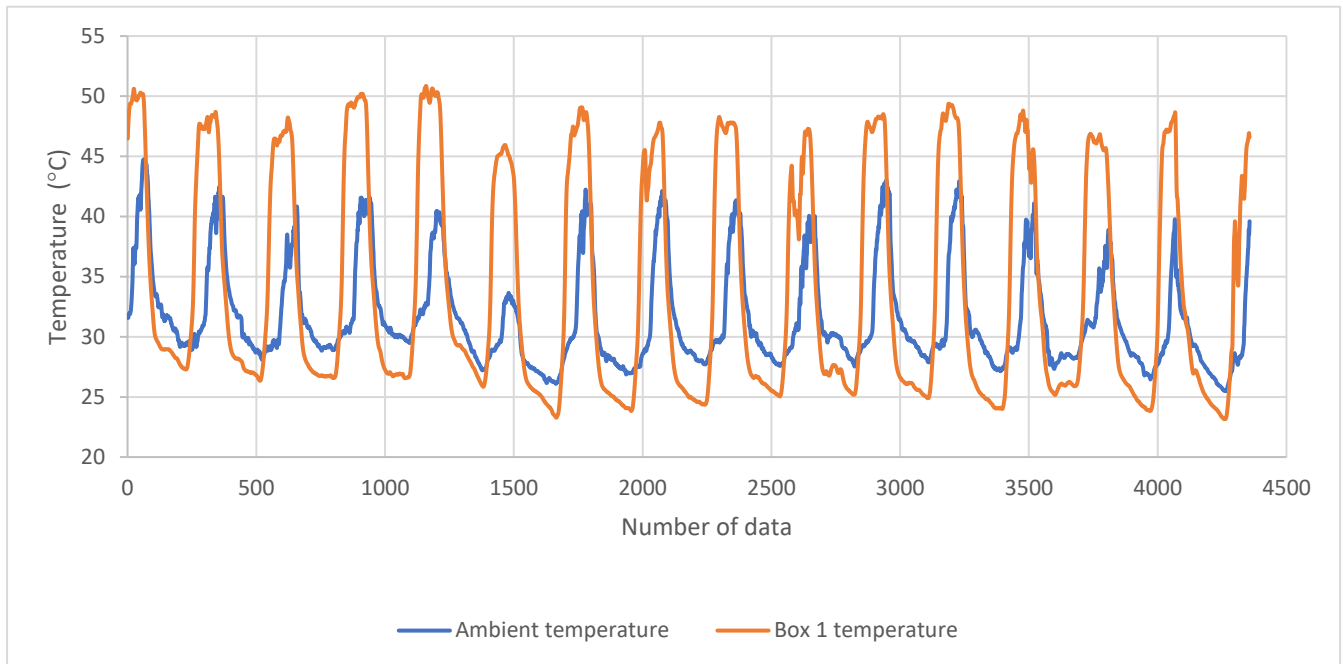
Πίνακας 5.1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δοκιμών πειραματικής διαδικασίας

Δοκιμή	Αριθμός θερμοηλεκτρικών στοιχείων σε λειτουργία	Τάση (V)	Ένταση ρεύματος (A)	Απαγωγή θερμότητας	Θερμοκρασία θερμής πλευράς (°C)	Περίοδος λειτουργίας	Λόγος επιτυχίας/αποτυχίας
1	5	25,6	1,58±0,20	Όχι	70	29/06- 07/07	Χαμηλή ένταση ηλεκτρικού ρεύματος- υπερθέρμανση/Αποτυχία
2	5	23,0	1,29±0,20	Όχι	30	07/07- 09/07	Χαμηλή ένταση ηλεκτρικού ρεύματος- υπερθέρμανση/Αποτυχία
3	1	8,0	2,60±0,25	Όχι	30	10/07- 13/07	Ανύπαρκτη απαγωγή θερμότητας-θέρμανση αέρα box 2/ Αποτυχία
4	1	8,0	2,86±0,10	Ναι	30	13/07- 16/07	Μείωση θερμοκρασίας box 2 συγκριτικά με box 1/ Επιτυχία
5	2	16,0	2,50±0,15	Όχι	30	20/07- 23/07	Ανύπαρκτη απαγωγή θερμότητας/Αποτυχία
6	2	16,1	2,10±0,10	Ναι	30	23/07- 30/07	Χαμηλή ένταση ηλεκτρικού ρεύματος/Αποτυχία

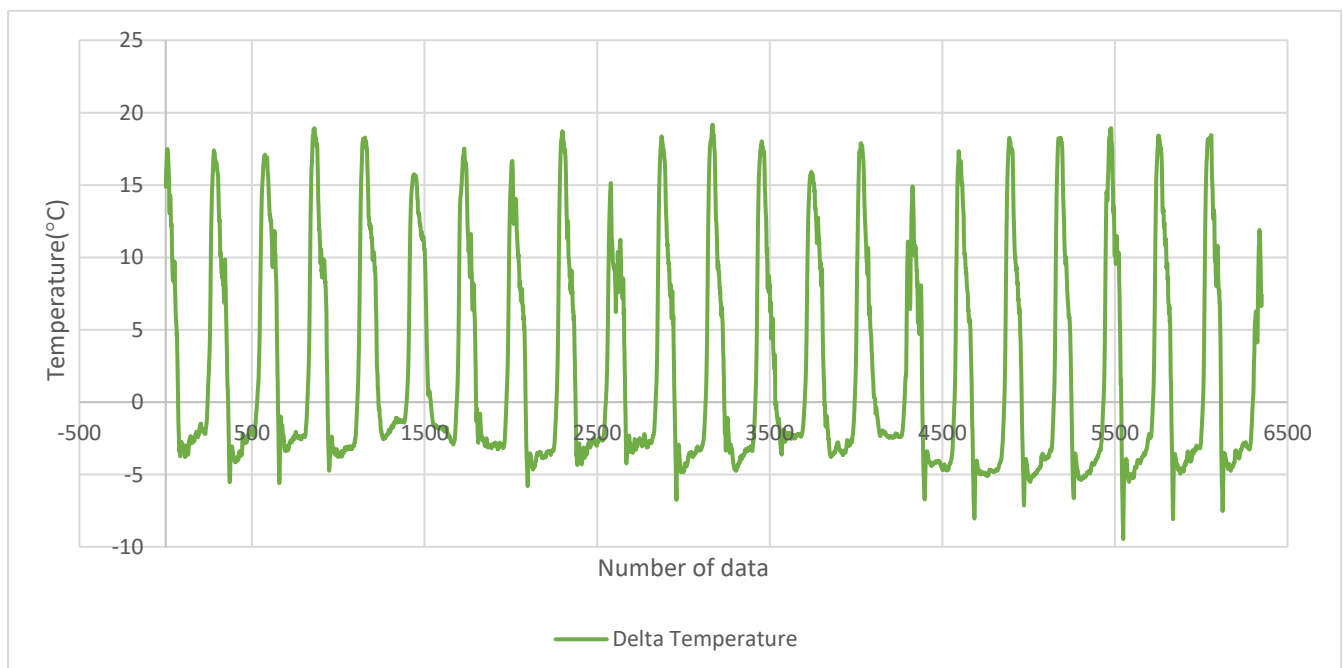
5.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ BOX 1

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, θα γίνει μία επισκόπηση των αποτελεσμάτων και ταυτόχρονα, θα λάβει χώρα η αναλυτική περιγραφή και ο σχολιασμός τους. Τα αποτελέσματα που θα αναλυθούν σχετίζονται μόνο με τις περιπτώσεις λειτουργίας του ενός θερμοηλεκτρικού στοιχείου, με και χωρίς απαγωγή θερμότητας.

Στην πρώτη περίπτωση εξετάζεται το box 1 με μόνωση σε σύγκριση με το περιβάλλον, με την θερμοκρασία. Από το *Γράφημα 5.1* παρατηρείται ότι η μέγιστη θερμοκρασία του box 1 αγγίζει τους 50°C , ενώ η χαμηλότερη θερμοκρασία είναι οι 21°C. Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος σαφώς κινείται σε μικρότερα εύρη.



Γράφημα 5.1: Θερμοκρασιακή διακύμανση για το box 1 και το περιβάλλον

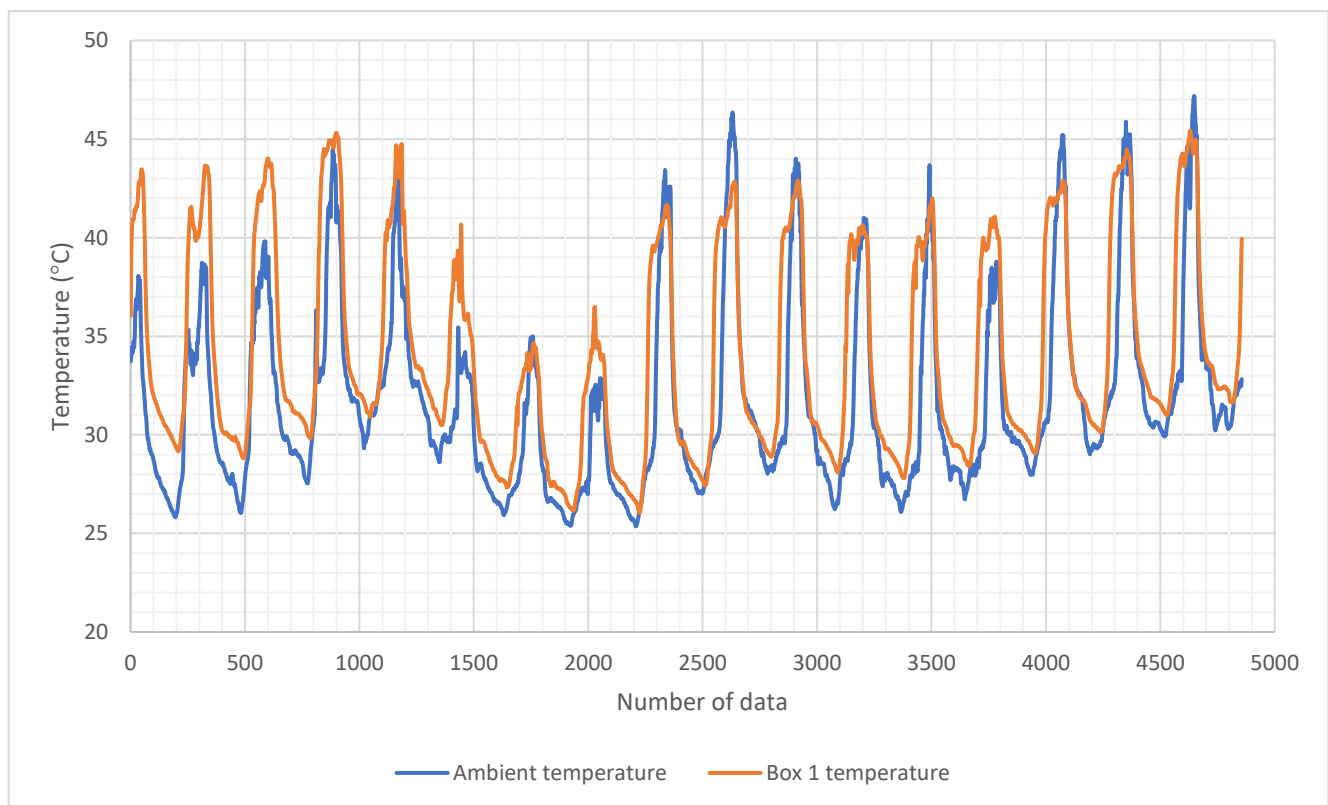


Γράφημα 5.2.: Διακύμανση της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του εσωτερικού του box 1 και του περιβάλλοντος

Στο *Γράφημα 5.2* απεικονίζεται η διακύμανση της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του box 1 και του περιβάλλοντος. Οι αρνητικές τιμές δείχνουν πως η θερμοκρασία του περιβάλλοντος ήταν υψηλότερη από την θερμοκρασία του box 1, ενώ το αντίστροφο ισχύει για τις θετικές τιμές.

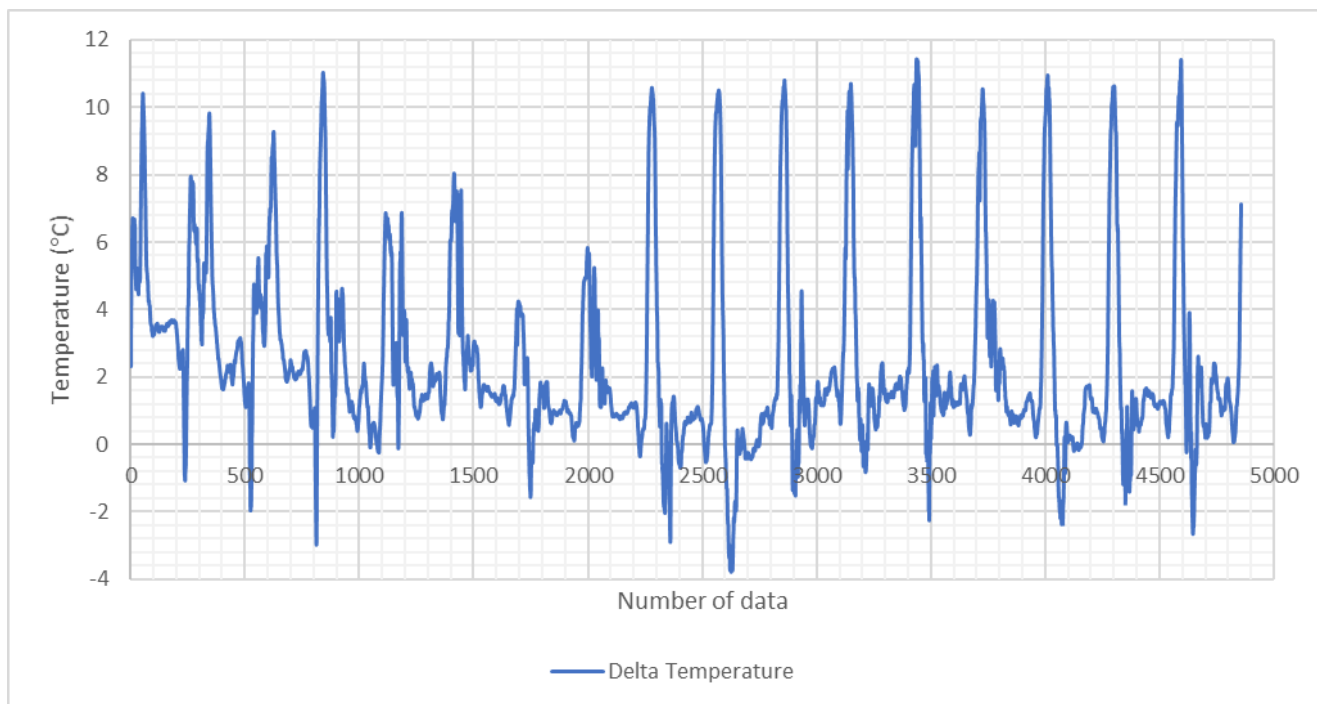
Παρατηρώντας το *Γράφημα 5.1* και το *Γράφημα 5.2*, οι μέγιστες διαφορές θερμοκρασίας φτάνουν τα επίπεδα των 19°C, ενώ η μέση διαφορά είναι στους 6°C.

Όσον αφορά τη δεύτερη περίπτωση, όπου ο κύβος δεν είναι πλήρως μονωμένος το γράφημα, που υποδεικνύει τη θερμοκρασιακή διακύμανση για διάστημα 12 ημερών, είναι το *Γράφημα 5.3*.



Γράφημα 5.3: Θερμοκρασιακή διακύμανση του box 1 και του περιβάλλοντος

Στο *Γράφημα 5.4* απεικονίζεται η διαφορά θερμοκρασίας του box 1 και του περιβάλλοντος για μη μονωμένο μοντέλο.



Γράφημα 5.4: Διαφορά θερμοκρασίας του box 1 και του περιβάλλοντος

Από ότι φαίνεται σύμφωνα με τα Γραφήματα 5.3 και 5.4, η μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά για μη μονωμένο box 1 φτάνει τους 12°C, ενώ η μέση βρίσκεται στους 4°C.

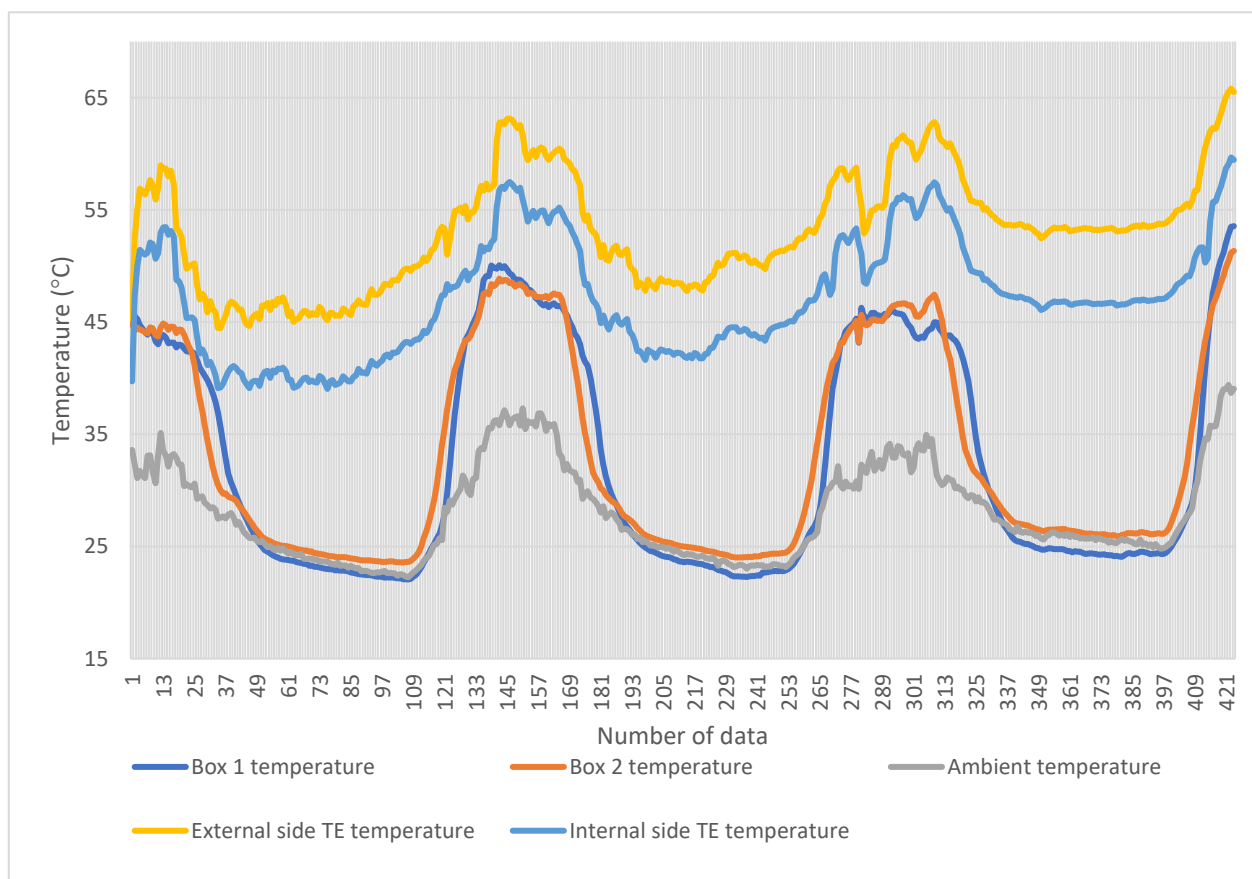
Όπως φαίνεται από την σύγκριση του Γραφήματος 5.2 και του Γραφήματος 5.4, στην περίπτωση του μη μονωμένου μοντέλου η θερμοκρασιακή διαφορά, μεταξύ του εσωτερικού του box 1 και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, είναι μικρότερη από την περίπτωση του μονωμένου κύβου. Πιο συγκεκριμένα, το εύρος της θερμοκρασιακής διαφοράς στο μονωμένο box 1 ήταν $[-10^{\circ}\text{C}, 19^{\circ}\text{C}]$, ενώ στο μη μονωμένο μοντέλο $[-4^{\circ}\text{C}, 12^{\circ}\text{C}]$. Η εξήγηση αυτού είναι ότι, αφού στην περίπτωση της κακής ή της ανύπαρκτης μόνωσης η μεταφορά θερμότητας από τον αέρα στο εσωτερικό προς το περιβάλλον -και τούμπαλιν- γίνεται με πολύ μεγαλύτερους ρυθμούς, από ότι αν ήταν πλήρως μονωμένο μιας και υπάρχει κίνηση του αέρα.

Γι αυτό το λόγο, επιλέχθηκε το κουτί με τα ενσωματωμένα θερμοηλεκτρικά στοιχεία (box 2), να πραγματοποιηθεί σε συνθήκες σχεδόν μηδενικού αερισμού, ώστε να εξεταστεί η απόδοση των θερμοηλεκτρικών, όταν ο αέρας δεν απάγει την θερμότητα από το εσωτερικό του κύβου.

5.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ BOX 2

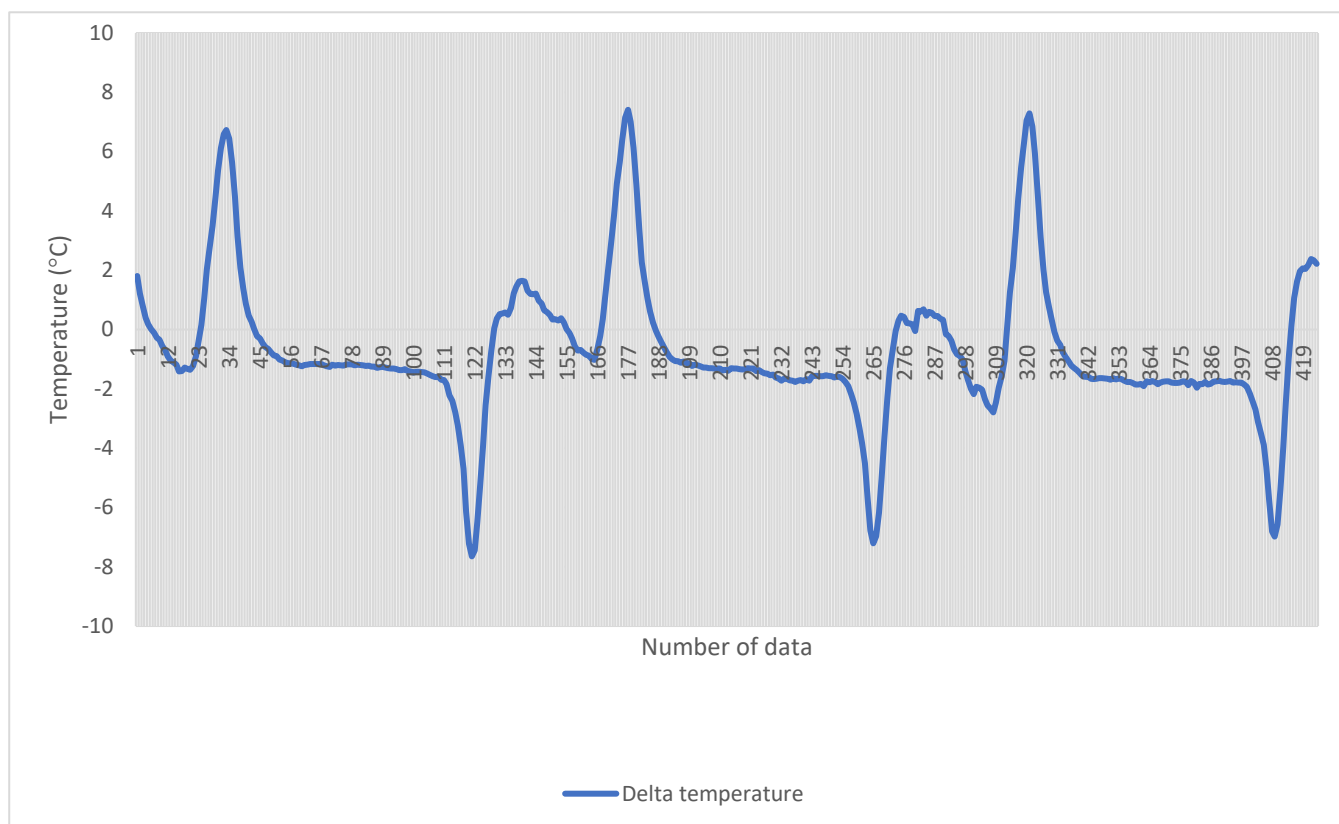
Εφόσον εξετάστηκαν όλες οι απαραίτητες παράμετροι στο προηγούμενο στάδιο, ξεκίνησαν οι διαδικασίες για το κύριο πειραματικό μέρος. Υπενθυμίζεται, πως το box 1 είχε χρήση και στην κύρια πειραματική διαδικασία ως μέσο σύγκρισης, μιας και σε αυτό δεν τοποθετήθηκαν θερμοηλεκτρικά στοιχεία.

Η περίπτωση που θα αναλυθεί σε μεγαλύτερο βαθμό περιελάμβανε την ενεργοποίηση μόνο ενός εκ των πέντε θερμοηλεκτρικών στοιχείων. Το αποτέλεσμα αυτής της κατάστασης, ήταν η μείωση της εσωτερικής θερμοκρασίας του αέρα, όχι όμως σε σημείο που να είναι μόνιμα χαμηλότερη από την αντίστοιχη του απλού κουτιού. Αυτό φαίνεται με ακρίβεια στο *Γράφημα 5.5*.



Γράφημα 5.5: Διάγραμμα θερμοκρασίας για τη λειτουργία ενός θερμοηλεκτρικού

Στο *Γράφημα 5.6* εμφανίζεται η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του box 1 και του box 2.

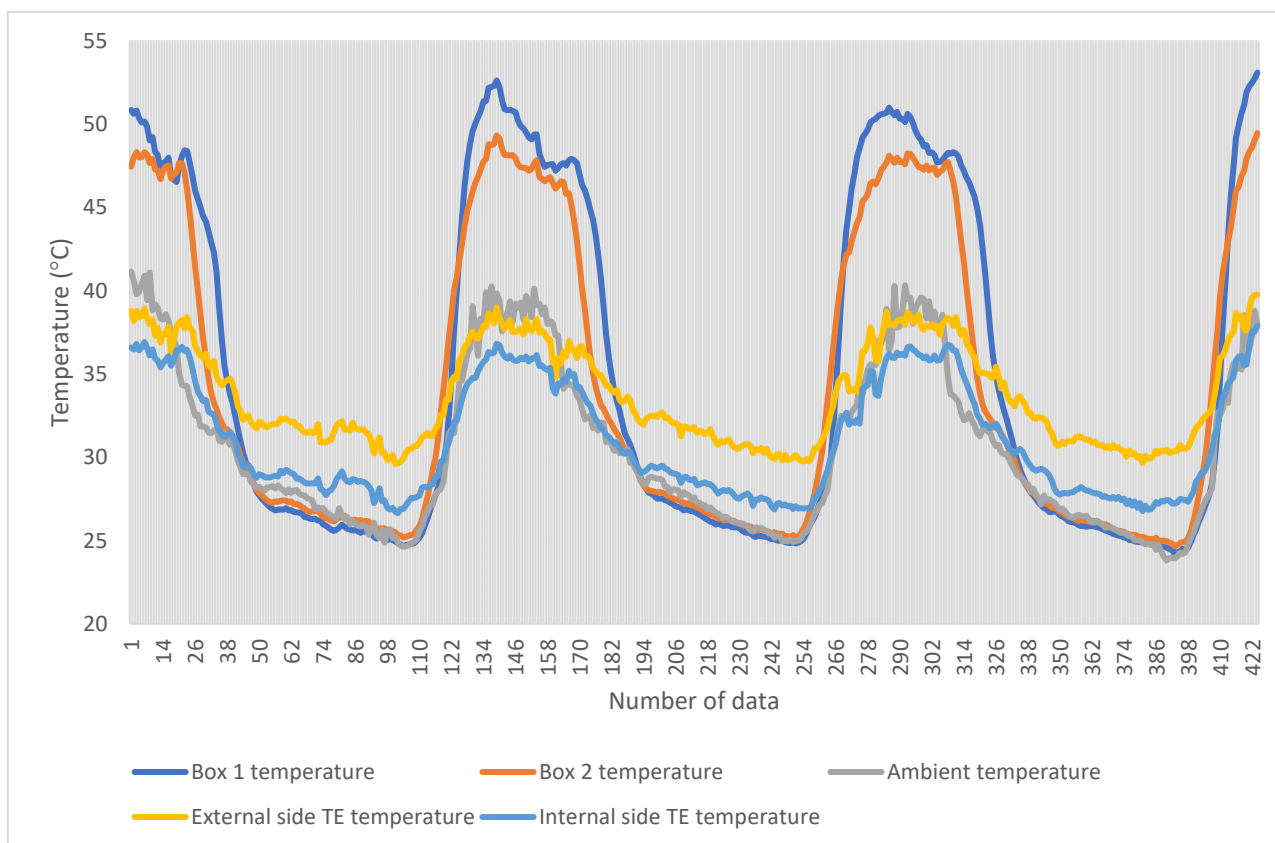


Γράφημα 5.6: Διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ box 1 και box 2

Αφού η επιθυμητή λειτουργία του θερμοηλεκτρικού είναι η ψύξη του box 2, οι θετικές τιμές διαφοράς θερμοκρασίας δείχνουν πως η ψύξη επιτυγχάνεται. Όμως, επειδή ακόμα και στην περίπτωση λειτουργίας του ενός θερμοηλεκτρικού η θερμοκρασία του αέρα δεν ήταν αρκετά χαμηλή, αποφασίστηκε να τεθεί σε λειτουργία ένας ανεμιστήρας. Η κατεύθυνση του αέρα ήταν τέτοια, ώστε να προσπίπτει στην εξωτερική πλευρά της κατασκευής με τα θερμοηλεκτρικά, με σκοπό την απαγωγή της θερμότητας.

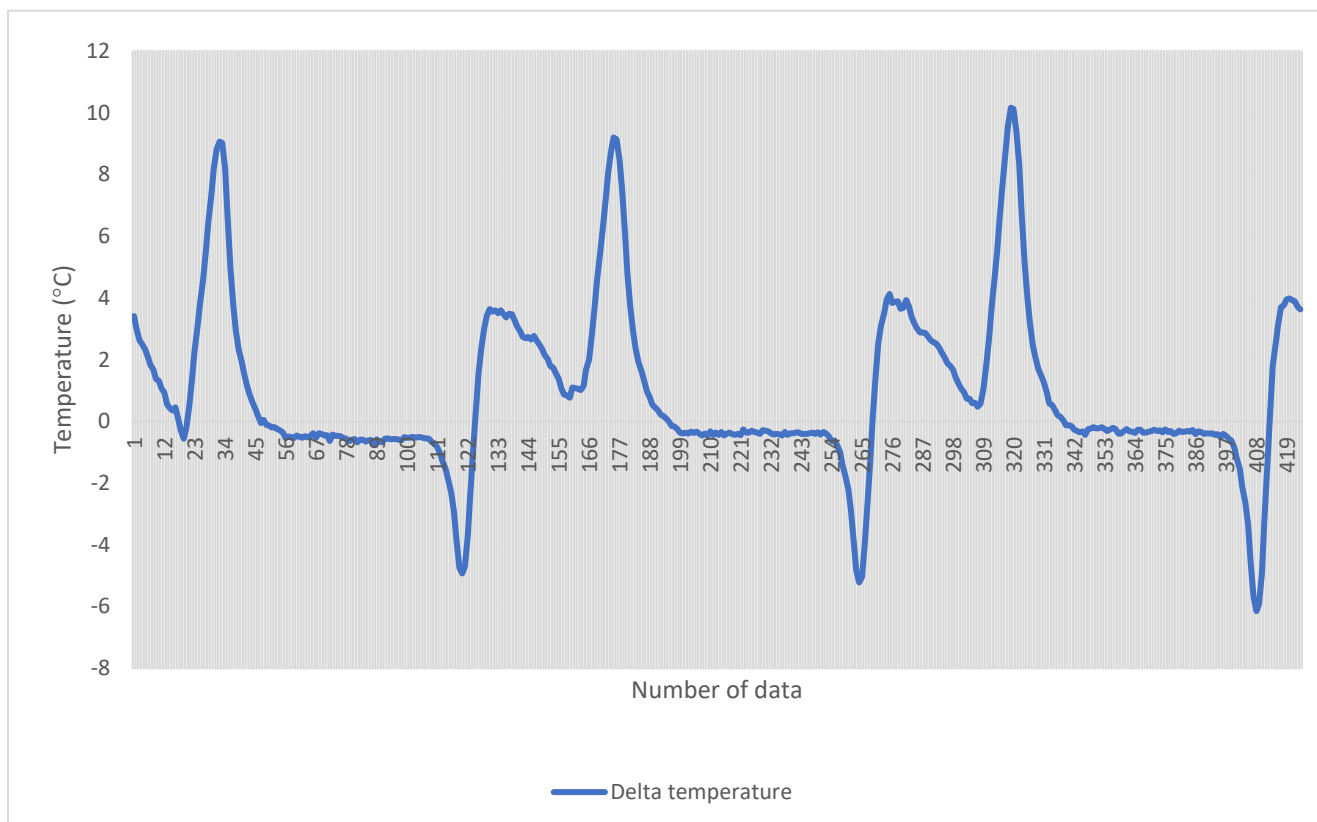
Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τη συμμεταφορά της θερμότητας με τον διερχόμενο αέρα και, ως εκ τούτου, τη μείωση της θερμοκρασίας στην κατασκευή που συγκρατούσε τα θερμοηλεκτρικά και στο εσωτερικό του κουτιού. Ταυτόχρονα, για τη μέγιστη δυνατή απαγωγή θερμότητας τοποθετήθηκαν δύο ψύκτρες στην

εξωτερική-θερμή πλευρά του θερμοηλεκτρικού. Η αποσυγκέντρωση της θερμότητας ήταν ένα σημείο-κλειδί στην συγκεκριμένη φάση του πειράματος. Στο *Γράφημα 5.7* αναπαρίσταται η αλλαγή αυτή.



Γράφημα 5.7: Θερμοκρασιακή διακύμανση για λειτουργία ενός θερμοηλεκτρικού στοιχείου με απαγωγή θερμότητας

Όπως φαίνεται από το *Γράφημα 5.7*, η θερμοκρασία τόσο της ψυχρής όσο και της θερμής πλευράς του θερμοηλεκτρικού στοιχείου έχουν μειωθεί σε πολύ μεγάλο βαθμό, όντας χαμηλότερες ακόμα και από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Στην πραγματικότητα, αυτό είχε ως αποτέλεσμα να υπάρχει σαφής και συνεχόμενη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του box 2 και του box 1, η οποία φαίνεται στο *Γράφημα 5.8*.



Γράφημα 5.8: Διακύμανση της θερμοκρασίας μεταξύ του box 2 και του box 1.

Από το Γράφημα 5.8 μπορεί να δει κανείς πως οι θετικές τιμές της διαφοράς θερμοκρασιών επιτυγχάνουν υψηλότερα επίπεδα από τις αντίστοιχες στο Γράφημα 5.6. Αυτό σημαίνει, πως η ψύξη του box 2 είναι πιο αποτελεσματική με την χρήση ανεμιστήρα και την ύπαρξη ψυκτρών. Κάτι τέτοιο είναι αρκετά ενθαρρυντικό για την παρούσα μελέτη, καθώς δείχνει πως ο συνδυασμός κατάλληλης έντασης, τάσης και απαγωγής θερμότητας δημιουργεί τις συνθήκες για ικανοποιητική ψύξη σε ένα κλειστό σύστημα.

Σε αυτό το σημείο, είναι αναγκαίο να αναφερθεί πως η ταχύτητα του αέρα που προερχόταν από τον ανεμιστήρα κυμαινόταν από 0.3 m/s στα κατω μέρος των θερμοηλεκτρικών δομοστοιχείων από την εξωτερική τους πλευρά μέχρι και 4 m/s στο άνω μέρος τους. Κάτι τέτοιο σημαίνει πως από το άνω μέρος των θερμοηλεκτρικών, η θερμοκρασία απαγόταν με μεγαλύτερη ένταση από ότι στο κατω μέρος.

Ο βέλτιστος συνδυασμός, προέκυψε με την χρήση ενός θερμοηλεκτρικού και την ταυτόχρονη απαγωγή θερμότητας μέσω ψυκτρών και ανεμιστήρα. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, Σε αυτή την φάση, θα υπολογιστεί το ποσό της ενέργειας που χρειάζεται, ώστε να μειωθεί η θερμοκρασία του αέρα στο box 2 στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, Q, μέσω του εξής τύπου:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (1)$$

Όπου m: μάζα μέσου (kg)

c: ειδική θερμοχωρητικότητα του υγρού αέρα (= 0.718 kJ/kg/ K)

Ο όγκος του αέρα που υπάρχει μέσα στο μοντέλο ισούται με $V = 1\text{m}^3$, ενώ η πυκνότητά του (συμπεριλαμβανομένης της περιεχόμενης υγρασίας 20%) στους 37.7 °C ισούται με $\rho_{@37.7^\circ\text{C}} = 1.127 \text{ kg/m}^3$.

Επομένως, η μάζα του αέρα που εμπεριέχεται στο φυσικό μοντέλο ισούται με

$$m = \rho \cdot V \Rightarrow m = 1.127 \text{ kg}$$

Για μία τυχαία μέρα του χρόνου, λοιπόν, η ενέργεια που χρειάζεται για να μειωθεί η θερμοκρασία του box 2 στην περιβαλλοντική ανά πάσα στιγμή ισούται με 1101.3 kJ, ή αλλιώς 305.9 Wh. Με όμοια διαδικασία, υπολογίζεται πως, για να μειωθεί η θερμοκρασία του box 1 στην περιβαλλοντική, χρειάζονται 1210.9 kJ, ή αλλιώς 336.4 Wh. Τέλος, υπολογίζεται πως για να μειωθεί η θερμοκρασία του box 1 στην θερμοκρασία του box 2 χρειάζονται 109.5 kJ ή αλλιώς 30,5 Wh.

Στην συγκεκριμένη κατάσταση, η τροφοδοσία ηλεκτρικού ρεύματος στο θερμοηλεκτρικό στοιχείο γινόταν κατά μέσο όρο με 8 V και 2.86 A. Για ένα εικοσιτετράωρο η ενέργεια που προκύπτει είναι ίση με 549,1 Wh. Παρόλο που το ποσό αυτό είναι πολύ μεγαλύτερο από το προαναφερθέν 30,5 Wh, υπάρχει λογική εξήγηση, η οποία είναι πως οι θερμικές απώλειες από τα θερμοηλεκτρικά είναι τεράστιες, ειδικά αν σκεφτεί κανείς πως επιδιώκονταν μέσω της απαγωγής θερμότητας.

Με αυτό τον τρόπο, καταλαβαίνει κανείς, πως για να μειωθεί η θερμοκρασία του box 2 ικανοποιητικά, είναι απαραίτητο να υπάρχει ένα ισχυρότερο τροφοδοτικό,

το οποίο θα παρέχει στο θερμοηλεκτρικό στοιχείο την απαραίτητη ενέργεια. Αυτό με τη σειρά του θα δημιουργήσει μια μεγάλη θερμοκρασιακή διαφορά στις δύο πλευρές του, με αποτέλεσμα την εντονότερη θερμοκρασιακή μείωση. Η τροφοδοσία του ηλεκτρικού ρεύματος, ωστόσο, υπολογίζεται να πραγματοποιείται σε μελλοντικές εφαρμογές μέσω χρήσης φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων.

Ταυτόχρονα, για να γίνει πιο οικονομικά συμφέρον το μοντέλο, θα μπορούσε να εγκατασταθεί ένα σύστημα αποθήκευσης και περαιτέρω χρήσης της θερμότητας, όπως είναι το σύστημα θέρμανσης νερού ή αντιψυκτικού υγρού. Ακόμα, για καλύτερη διανομή της θερμότητας, θα μπορούσε να δημιουργηθεί ένα σύστημα ανακύκλωσης του αέρα στο εσωτερικό του μοντέλου και ένα σύστημα απαγωγής της θερμότητας, παρόμοιο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε στο box 2.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί, πως η εκτενής μελέτη και βελτίωση των θερμοηλεκτρικών υλικών, όσον αφορά τις ιδιότητές του, είναι καθοριστικός παράγοντας στην ανάπτυξη παρόμοιων μοντέλων, καθώς οι θερμοηλεκτρικές ιδιότητες του υλικού είναι αυτές που στην ουσία εξετάζονται.

6 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα αναλυθούν τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την πειραματική διαδικασία και τα αποτελέσματα της διπλωματικής εργασίας.

Αρχικά, κατά την πρώτη φάση του πειράματος, δηλαδή την ανάπτυξη του μοντέλου στο πρόγραμμα EnergyPlus, παρατητήθηκε πως οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονταν στο μοντέλο θα είχαν μέση τιμή διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον περίπου 5°C, ενώ οι μέγιστες τιμές έφταναν τους 16°C. Αυτό επιβεβαιώθηκε στη συνέχεια, με την κατασκευή του φυσικού μοντέλου, box 1, δηλαδή με το κουτί πολυουρεθάνης χωρίς ενσωματωμένα θερμοηλεκτρικά στοιχεία. Πιο αναλυτικά, οι θερμοκρασίες που μετρήθηκαν στο box 1 κατά το μήνα Αύγουστο, είχαν μέγιστες διαφορές 16°C, ενώ οι μέση τιμή βρισκόταν στους 5°C.

Έτσι, αποφασίστηκε να αγοραστούν πέντε θερμοηλεκτρικά στοιχεία με περιεχόμενο θερμοηλεκτρικό υλικό το Bi_2Te_3 , το οποίο εργαστηριακά έχει παρουσιάσει τη μεγαλύτερη απόδοση σε χαμηλό θερμοκρασιακό εύρος, δηλαδή μέχρι 300°C (*Complex Thermoelectric Materials, G. Jeffrey Snyder, Eric S. Toberer*).

Στη συνέχεια, αφού κατασκευάστηκε το box 2, δηλαδή το κουτί πολυουρεθάνης με τα ενσωματωμένα θερμοηλεκτρικά στοιχεία, ξεκίνησαν οι ταυτόχρονες μετρήσεις θερμοκρασίας στο box 1, στο box 2 και στον περιβάλλοντα χώρο. Αυτές οι μετρήσεις έδειξαν περισσότερο ενδιαφέροντα αποτελέσματα, όταν ήταν σε λειτουργία ένα μόνο θερμοηλεκτρικό στοιχείο και υπήρχε απαγωγή θερμότητας μέσω ανεμιστήρα. Οι μεγαλύτερες τιμές διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του box 1 και box 2 ανήλθαν στους 10°C, δηλαδή σε εκείνες τις περιπτώσεις το box 2 είχε θερμοκρασία στο κέντρο του 10°C μικρότερη από την αντίστοιχη του box 1.

Αντίθετα, στις περιπτώσεις λειτουργίας πέντε ή δύο θερμοηλεκτρικών στοιχείων, είτε υπήρχε απαγωγή θερμότητας είτε όχι, τα αποτελέσματα ήταν αποθαρρυντικά. Αναλύοντάς το, και στις 2 περιπτώσεις τα θερμοηλεκτρικά στοιχεία υπερθερμάνθηκαν, θερμαίνοντας και στη συνέχεια τον αέρα εντός του box 2.

Ταυτόχρονα, όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 5, η παροχή ενέργειας στο θερμοηλεκτρικό ήταν πολύ μεγάλη σε σύγκριση με το ποσό που τελικά ήταν ωφέλιμο

για την ψύξη του μοντέλου. Κάτι τέτοιο δείχνει πως σε μελλοντική έρευνα θα πρέπει να τοποθετηθεί σύστημα αερισμού, το οποίο θα εξυπηρετεί διπλό σκοπό: (α) την μεταφορά της θερμότητας από τα θερμοηλεκτρικά για την πιο ομοιόμορφη ψύξη του μοντέλου και (β) την απαγωγή της θερμότητας από εκεί που δεν είναι αναγκαία, δηλαδή σε λειτουργία ψύξης.

Όπως φάνηκε και στο *Γράφημα 5.7*, η θερμοκρασία του box 2 ήταν χαμηλότερη από το box 1. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, σε μια τέτοια εγκατάσταση, η ενέργεια που χρειάζεται για ψύξη έως ότου να φτάσει την περιβαλλοντική θερμοκρασία, να είναι μικρότερη από την ενέργεια που χρειάζεται το box 1. Αυτό το αποτέλεσμα φαίνεται ξεκάθαρα και στους υπολογισμούς για τα ποσά ενέργειας που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα. Για μία τυχαία μέρα, δηλαδή, όπου λειτουργούσε ένα θερμοηλεκτρικό και λάμβανε χώρα απαγωγή θερμότητας, η ενέργεια που θα χρειαζόταν το box 2 για να φτάσει την περιβαλλοντική θερμοκρασία ήταν μικρότερη κατά 30.5 Wh από αυτή που θα χρειαζόταν το box 1 για να φτάσει την περιβαλλοντική.

Εν κατακλείδι, μπορεί τα θερμοηλεκτρικά στοιχεία να είναι μια νέα και πολλά υποσχόμενη τεχνολογία, όμως δεν παύει να χρειάζεται μεγάλη διερεύνηση προκειμένου να εντοπιστούν οι κατάλληλες συνθήκες λειτουργίας και να δημιουργηθεί ένα ολοκληρωμένο πιλοτικό σύστημα. Παρόλα αυτά, τα αποτελέσματα αυτού του πειράματος συνεχίζουν να δίνουν πληροφορίες που θα χρησιμοποιηθούν στο μέλλον από άλλους ερευνητές.

7 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η ύπαρξη των θερμοηλεκτρικών χρονολογείται από τον 19^ο αιώνα. Παρόλα ταύτα, η χρήση τους δεν έχει ακόμα επεκταθεί στο πεδίο της ενεργειακής αιφορίας. Εκτός των συνθηκών που μελετήθηκαν στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, υπάρχουν ακόμη πολλές παράμετροι που επηρεάζουν τη λειτουργία και την απόδοση των θερμοηλεκτρικών στοιχείων. Μερικές από αυτές είναι η μεταφορά και διάχυση της θερμότητας από τα θερμοηλεκτρικά στο επιθυμητό μέσο (λ.χ. αέρα), η τάση και η ένταση του εισαγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος, το πλήθος των θερμοηλεκτρικών, τα διάφορα θερμοηλεκτρικά υλικά κ.α.

Για τη βελτίωση της απόδοσης των θερμοηλεκτρικών προτείνονται τα εξής:

- Χρήση τροφοδοτικού με δυνατότητα παροχής ηλεκτρικού ρεύματος μεγάλης ισχύος, ώστε να υπάρχει πιο μεγάλη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ της θερμής και της ψυχρής πλευράς του θερμοηλεκτρικού στοιχείου.
- Δημιουργία συστήματος εξαερισμού για την συνεχή κίνηση του αέρα εντός του μοντέλου, ώστε να πραγματοποιείται πιο γρήγορα η μεταφορά θερμότητας.
- Τοποθέτηση καταλληλότερων και πιο εξειδικευμένων ψυκτών, τόσο στη θερμή όσο και στην ψυχρή πλευρά των θερμοηλεκτρικών.
- Χρήση ή/και δημιουργία θερμοηλεκτρικών υλικών προς τη βελτίωση των ιδιοτήτων τους μέσω νοθείας ήδη υπάρχοντων υλικών.
- Αλλαγή της τοποθεσίας των θερμοηλεκτρικών στοιχείων στο μοντέλο (πχ. επιδαπέδια για θέρμανση και στην οροφή για την ψύξη).
- Δημιουργία μακέτας με πόρτες, παράθυρα, φεγγίτες κ.α με τα θερμοηλεκτρικά στοιχεία ενσωματωμένα στα δομικά στοιχεία του μοντέλου.
- Προσθήκη ηλιακών συλλεκτών στο εξωτερικό του μοντέλου για τη συλλογή ενέργειας, ώστε να είναι ενεργειακά αυτόνομο.

8 Βιβλιογραφία

Ahmed, H. E., Salman, B. H., Kherbeet, A. S., & Ahmed, M. I. (2018). Optimization of thermal design of heat sinks: A review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 118, 129-153.

Akbari, H., Cartalis, C., Kolokotsa, D., Muscio, A., Pisello, A. L., Rossi, F., ... & Zinzi, M. (2016). Local climate change and urban heat island mitigation techniques—the state of the art. *Journal of Civil Engineering and Management*, 22(1), 1-16.

Chen, Z. G., Han, G., Yang, L., Cheng, L., & Zou, J. (2012). Nanostructured thermoelectric materials: Current research and future challenge. *Progress in Natural Science: Materials International*, 22(6), 535-549.

Ghafouri, N. (2012). Bismuth Telluride and Antimony Telluride Based Co-evaporated Thermoelectric Thin Films: Technology, Characterization, and Optimization.

Goldsmid, H. J. (2014). Bismuth telluride and its alloys as materials for thermoelectric generation. *Materials*, 7(4), 2577-2592.

<http://www.hse.gov.uk/temperature/thermal/index.htm> [19/08/2018]

<http://www.mn.uio.no/fysikk/english/research/projects/bate/thermoelectricity/> [26/02/2018]

<http://www.physics-and-radio-electronics.com/electronic-devices-and-circuits/semiconductor/intrinsic-semiconductor/intrinsic-carrier-concentration.html>
[20/08/2018]

<https://hvacdirect.com/info/types-hvac-systems/> [19/08/2018]

<https://www.electronics-cooling.com/2006/11/the-seebeck-coefficient/#> [26/02/2018]

<https://www.jedec.org/standards-documents/dictionary/terms/diffusion-charge-carriers>
[26/02/2018]

Ibañez-Puy, M., Martín-Gómez, C., Bermejo-Busto, J., Sacristán, J. A., & Ibañez-Puy, E. (2018). Ventilated Active Thermoelectric Envelope (VATE): Analysis of its energy performance when integrated in a building. *Energy and Buildings*, 158, 1586-1592.

Ibañez-Puy, M., Martín-Gómez, C., Vidaurre-Arbizu, M., & Sacristán-Fernández, J. A. (2014). Theoretical design of an active façade system with Peltier Cells.

Khire, R. A., Messac, A., & Van Dessel, S. (2005). Design of thermoelectric heat pump unit for active building envelope systems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(19-20), 4028-4040.

Sajid, M., Hassan, I., & Rahman, A. (2017). An overview of cooling of thermoelectric devices. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 15-22.

Santamouris, M., Synnefa, A., Assimakopoulos, M., Livada, I., Pavlou, K., Papaglastra, M. & Assimakopoulos, V. (2008). Experimental investigation of the air flow and indoor carbon dioxide concentration in classrooms with intermittent natural ventilation. *Energy and Buildings*, 40(10), 1833-1843.

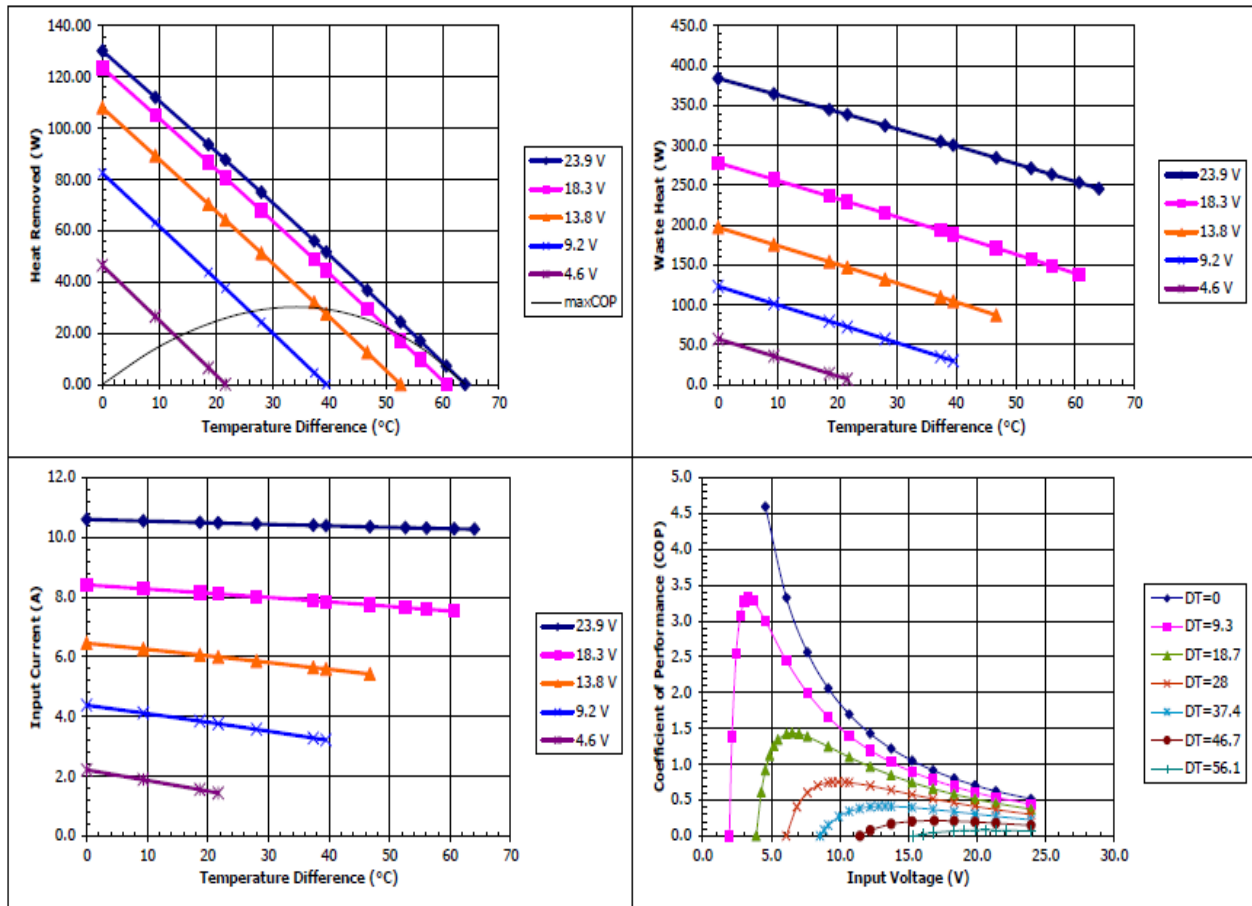
Shen, L., Pu, X., Sun, Y., & Chen, J. (2016). A study on thermoelectric technology application in net zero energy buildings. *Energy*, 113, 9-24.

Snyder, G. J., & Toberer, E. S. (2011). Complex thermoelectric materials. In *Materials For Sustainable Energy: A Collection of Peer-Reviewed Research and Review Articles from Nature Publishing Group* (pp. 101-110).

Tian, Z., Lee, S., & Chen, G. (2014). A comprehensive review of heat transfer in thermoelectric materials and devices. *Ann. Rev. Heat Transfer*, 17, 425-483.

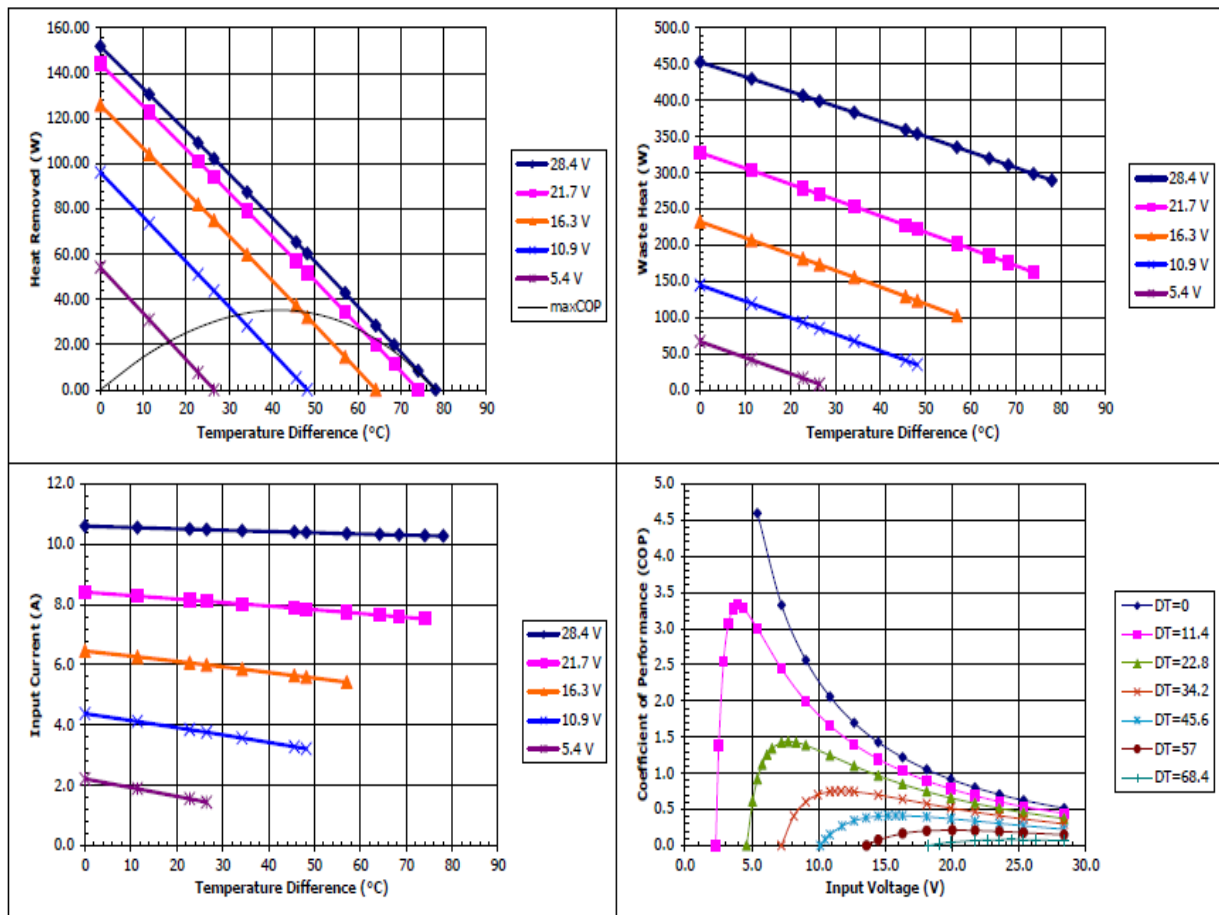
Zhang, X., & Zhao, L. D. (2015). Thermoelectric materials: Energy conversion between heat and electricity. *Journal of Materiomics*, 1(2), 92-105.

9 Παράρτημα



Potted HP-199-1.4-0.8 at a hot-side temperature of 30 °C

Γράφημα 8.1: Φύλλο δεδομένων για το θερμοηλεκτρικό στοιχείο για θερμοκρασία θερμής πλευράς 30°C με χρήση διαχτήρα θερμότητας



Potted HP-199-1.4-0.8 at a hot-side temperature of 70 °C

Γράφημα 9.2: Φύλλο δεδομένων για το θερμοηλεκτρικό στοιχείο για θερμοκρασία θερμής πλευράς 70°C με χρήση διαχυτήρα θερμότητας