



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

ΔΠΜΣ Συστήματα Αυτοματισμού

Μεταπτυχιακή Εργασία

**Ανάπτυξη Συστήματος Ελέγχου Θερμοκρασίας με χρήση  
Θερμοηλεκτρικών στοιχείων**

Όνοματεπώνυμο: Ξαγοράρης Γεώργιος

Επιβλέπων Καθηγητής: Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Αθήνα, 2019





**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

ΔΠΜΣ Συστήματα Αυτοματισμού

Μεταπτυχιακή Εργασία

Όνοματεπώνυμο: Ξαγοράρης Γεώργιος

Επιβλέπων Καθηγητής: Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή

.....  
Ε. Χριστοφόρου  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Π. Τσαραμπάρης,                      Ν. Θεοδώρου,  
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ    Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, 2019



Copyright © Ξαγοράρης Γεώργιος, 2019

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

## Ευχαριστίες

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Ηλεκτρονικών Αισθητηρίων της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π. Η εκπόνηση της εργασίας αυτής δεν θα ήταν εφικτή χωρίς τη συνεργασία και την υποστήριξη της ερευνητικής ομάδας του εργαστηρίου. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω:

Τον κ. Ευάγγελο Χριστοφόρου, Καθηγητή της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π., για την προσπάθεια εύρεσης κοινού επιστημονικού τομέα για την εργασία καθώς και για τη πολύτιμη καθοδήγηση, για τη μύηση μου στην ερευνητική διαδικασία και για τις ενδιαφέρουσες και χρήσιμες συζητήσεις μας.

Τον κ. Σπύρο Κουτρούμπα, Υποψήφιο Διδάκτορα Ε.Μ.Π, χωρίς την συνεχή καθοδήγηση επιστημονική και οργανωτική του οποίου δε θα ήταν εφικτή η διεξαγωγή και ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής εργασίας. Οι γνώσεις στον Τομέα της Θερμοδυναμικής και της Φυσικής, ήταν πολύτιμες και χρήσιμες. Επίσης η επίβλεψη για την σύνταξη του θεωρικού τμήματος αλλά και το ευχάριστο και φιλικό κλίμα στο εργαστήριο ήταν καθοριστικά για το πέρας της εργασίας αυτής.

Τον κ. Σπύρο Αγγελόπουλο, Υποψήφιο Διδάκτορα Ε.Μ.Π., για τη συνεχή προσπάθεια βελτίωσης αυτής της εργασίας τόσο με τις καινοτόμες ιδέες του όσο και με τις συμβουλές του και την καλοπροαίρετη χρήσιμη βοήθειά του για σύνδεση και τον προγραμματισμό του ελεγκτή.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς την οικογένειά μου για την συνεχή υποστήριξη σε ψυχολογικούς και οικονομικούς τομείς, και σε όλους τους υπόλοιπους φίλους που με δίδαξαν, με τη συμπεριφορά τους και μου ενέπνευσαν την ανάγκη για την κατάκτηση της γνώσης.

## Περίληψη

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε Σύστημα ελέγχου το οποίου βασίζεται στο θερμοηλεκτρικό φαινόμενο Peltier βάσει του οποίου εφαρμόζοντας ηλεκτρικό ρεύμα στα άκρα ενός θερμοηλεκτρικού στοιχείου αποτελούμενο από πλήθος θερμοζευγών, παρατηρείται θέρμανση στην μία πλευρά του θερμοστοιχείου ενώ παράλληλα ψύξη στην άλλη. Το φαινόμενο αυτό είναι συμπληρωματικό στο φαινόμενο Seebeck στο οποίο δημιουργείται τάση στα άκρα ενός θερμοζεύγους παρουσία θερμοκρασιακής διαφοράς. Τα θερμοηλεκτρικά στοιχεία είναι διατάξεις στερεάς κατάστασης που μετατρέπουν την θερμική ενέργεια σε ηλεκτρική και το αντίστροφο.

Αρχικά, στο πρώτο κεφάλαιο έπειτα από μία σύντομη Ιστορική αναδρομή στον θερμοηλεκτρισμό, γίνεται αναφορά των Θερμικών φαινομένων όπως τα φαινόμενα Seebeck, Peltier, Thomson και Joule. Στη συνέχεια γίνεται η ανάπτυξη της θεωρίας των ημιαγωγών και των ιδιοτήτων τους καθώς αποτελούν δομικό στοιχείων των θερμοηλεκτρικών στοιχείων. Μετά παρουσιάζονται τα είδη των θερμοηλεκτρικών εφαρμογών που λαμβάνουν χώρα όπως και μελλοντικές τάσεις που υπάρχουν.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται η πειραματική διάταξη για την αύξηση ή την μείωση της θερμοκρασίας ενός συγκεκριμένου χώρου (όγκος ελέγχου). Η διάταξη αυτή ολοκληρώνεται με το κατάλληλο Σύστημα Αυτομάτου Ελέγχου και η μεταβολή θερμοκρασίας επιτυγχάνεται με χρήση θερμοηλεκτρικού στοιχείου Thermal Electric Cooler (TEC).

Εν συνεχεία παρατίθενται οι εργαστηριακές μετρήσεις μαζί με την αξιολόγηση της πειραματικής διάταξης και τέλος γίνεται μία αναφορά κατά του πόσο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αντίστοιχες διατάξεις μεγαλύτερης κλίμακας.

**Λέξεις-κλειδιά:** Θερμοστοιχεία, Θερμοηλεκτρικό στοιχείο, Θερμοηλεκτρικό Φαινόμενο Peltier, Thermo Electric Cooler TEC, Σύστημα ελέγχου θερμοκρασίας, Arduino Microcontroller.

## Abstract

Begun In 1823 Seebeck investigate a thermoelectric phenomenon which converts the heat directly into electricity at the junction of different types of wire. A few years later, a complementary effect was discovered by Peltier, who observed temperature changes in the vicinity of the junction between dissimilar conductors when a current passed. The study of the Peltier effect is also the main subject of this Thesis.

Initially, in chapter one, after a brief historical review of Thermoelectricity, the Thermoelectric phenomena such as Seebeck, Peltier, Thomson and Joule are reported. Moreover, the Theory of the semiconductors was analyzed due the fact that the thermoelectric modules consist of them. The types of thermoelectric applications that exist and future trends are presented.

In chapter two the use of a thermoelectric module (Peltier TEC) combined with an Automatic Control System, the control of the Temperature of an specific and thermal isolated space was tested in a experimental procedure. The automation control system was consisted by an Arduino based microcontroller, the necessary sensors and power adapters. The development of this experimental device is aimed at studying the behavior of the thermoelectric element both at temperatures above ambient (heating) and lower (cooling). The performance of the Thermoelectric Module was examined as well.

In conclusion, the performance of the experimental setup is valuated with the addition of the complementary graphs. Finally, a reference was made and an estimate of how it can be used in corresponding larger-scale devices.

**Key words:** Automatic Control System of Temperature, Thermoelectric Module, Peltier Thermoelectric Effect, Thermoelectric Cooler, TEC, Arduino, temperature sensor.



# Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή .....	1
1.1.	Ιστορική Αναδρομή .....	1
1.2.	Φαινόμενο Seebeck .....	3
1.3.	Φαινόμενο Peltier .....	6
1.4.	Φαινόμενο Thomson.....	9
1.5.	Φαινόμενο Joule .....	10
1.6.	Ημιαγωγοί – Θερμοζεύγη .....	11
1.7.	Θερμοηλεκτρικά στοιχεία - Ιδιότητες.....	22
1.8.	Υπολογισμός Βαθμού απόδοσης (COP).....	32
1.9.	Εφαρμογές Θερμοηλεκτρικών στοιχείων-State of the art .....	34
2	Πειραματική Διάταξη .....	42
2.1.	Γενική Περιγραφή του πειράματος. ....	42
2.2.	Περιγραφή της διάταξης.....	42
2.3.	Σύστημα Αυτομάτου Ελέγχου .....	51
2.4.	Πειραματική διαδικασία.....	60
3	Αποτελέσματα – Επόμενα βήματα .....	66
3.1.	Παράθεση αποτελεσμάτων .....	66
3.2.	Συμπεράσματα.....	71
3.3.	Μελλοντική έρευνα – Χρήση σε μεγαλύτερη κλίμακα.....	71
4	Παράρτημα- Πίνακες Χαρακτηριστικών Καμπύλων. ....	74

# 1 Εισαγωγή

## 1.1. Ιστορική Αναδρομή

Η πρώτη ανακάλυψη των θερμοηλεκτρικών μηχανισμών ανήκει στον φυσικό Thomas Johann Seebeck, ως αποτέλεσμα των πειραμάτων που πραγματοποιούσε ώστε να εντοπίσει μία πιθανή σχέση ανάμεσα στο ρεύμα και τη θερμότητα. Το 1823 ο Seebeck τοποθετώντας μια βελόνα σε κλειστό κύκλωμα ανόμοιων αγωγών, παρατήρησε ότι αυτή παρέκκλινε όταν μία από τις επαφές θερμαινόταν. Το 1823 ο Seebeck τοποθετώντας μια βελόνα σε κλειστό κύκλωμα ανόμοιων αγωγών, παρατήρησε ότι αυτή παρέκκλινε όταν μία από τις επαφές θερμαινόταν, πράγμα που εσφαλμένα απέδωσε στο μαγνητικό πεδίο της γης και την θερμοκρασιακή διαφορά των πόλων με τον Ισημερινό. Στην πραγματικότητα, στο κύκλωμα του εμφανιζόταν μία τάση λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας των δυο αγωγών. Η τάση αυτή αποδείχτηκε ότι σχετίζεται άμεσα από αυτή τη διαφορά θερμοκρασίας.

Αργότερα το 1835, ο Γάλλος φυσικός Peltier ανακάλυψε ένα συμπληρωματικό φαινόμενο καθώς παρατηρούσε θερμοκρασιακές αλλαγές στην περιοχή που έρχονταν σε επαφή δύο ανόμοιοι αγωγοί όταν διέρχονταν από ένα ηλεκτρικό ρεύμα. Παρόλο που χρησιμοποιούσε το φαινόμενο Seebeck στα πειράματά του, ο Peltier δεν κατάφερε να θεμελιώσει τον χαρακτήρα των παρατηρήσεών του. Μερικά χρόνια αργότερα το 1838 ο Lenz κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ανάλογα με την κατεύθυνση της ροής ρεύματος, απορροφάται ή παράγεται θερμότητα στο σημείο επαφής δύο αγωγών. Αυτό το απέδειξε αυτό πειραματικά με την δημιουργία πάγου σε μία ένωση Βισμούθιου και με την τήξη του πάγου αντιστρέφοντας την πολικότητα του ρεύματος [1].

Το 1851 ο τομέας του θερμοηλεκτρισμού προσέλκυσε ξανά το ερευνητικό ενδιαφέρον από τον W. Thomson (Λόρδος Kelvin) ο οποίος καθιέρωσε μια σχέση μεταξύ των συντελεστών Seebeck και Peltier. Επίσης, προέβλεψε την ύπαρξη ενός ακόμα θερμοηλεκτρικού φαινομένου το οποίο και επαλήθευσε πειραματικά. Το φαινόμενο Thomson αφορά την απορρόφηση ή έκλυση θερμότητας, όταν ομογενής αγωγός

διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα και παρουσιάζει θερμοκρασιακή μεταβολή κατά το μήκος του.

Η δυνατότητα χρήσης θερμοηλεκτρικών φαινομένων στην παραγωγή ηλεκτρισμού εξετάστηκε το 1885 από τον Rayleigh ο οποίος πρώτα υπολόγισε την απόδοση μιας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας. Το 1911 ο Altenkirch πραγματοποίησε με επιτυχία θερμοηλεκτρική παραγωγή και ψύξη και έδειξε ότι τα καλά θερμοηλεκτρικά υλικά θα πρέπει να διαθέτουν μεγάλους συντελεστές Seebeck με χαμηλή θερμική αγωγιμότητα για να συγκρατούν τη θερμότητα στη σύνδεση και χαμηλή την ηλεκτρική αντίσταση ώστε να ελαχιστοποιείται η θέρμανση Joule. Αυτές οι επιθυμητές ιδιότητες που αναφερθήκαν ενσωματώθηκαν σε ένα μέγεθος για να περιγράψει την απόδοση της μεθόδου, η οποία είναι γνωστή ως Θερμοηλεκτρικός συντελεστής (figure of merit ZT).

Το 1947 ο Telkes δημιούργησε μια γεννήτρια που λειτουργούσε με απόδοση της τάξεως περίπου 5%, ενώ το 1949 ο Abram Fedorovich Ioffe ανέλυσε την θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα των απλών αγωγών αλλά και των ημιαγωγών. Το 1954 ο Goldsmid και ο Douglas απέδειξαν ότι ήταν δυνατή η ψύξη από τις συνήθεις θερμοκρασίες περιβάλλοντος κάτω από τους 0°C [1].

Η ερευνητική διαδικασία για την ένωση ημιαγωγών για μια πειραματική εφαρμογή τρανζίστορ στη δεκαετία του 1950 οδήγησε στην δημιουργία νέων υλικών με βελτιωμένες θερμοηλεκτρικές ιδιότητες. Το 1956 ο Ioffe έδειξε ότι ο λόγος της θερμικής προς την ηλεκτρική αγωγιμότητα ενός θερμοηλεκτρικού υλικού, μπορεί να γίνει μικρότερος με την προσθήκη ενός ισόμορφου στοιχείου ή κάποιας ένωσης. Άρχισε λοιπόν, μια εντατική έρευνα πάνω στα υλικά αυτά, με σκοπό την ανάπτυξη στρατιωτικών εφαρμογών.

Η δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα από τα θερμοηλεκτρικά φαινόμενα εξετάστηκε περισσότερο καθώς παρατηρήθηκε αύξηση της τιμής του αργού πετρελαίου το 1974. Παράγοντες που καθορίσαν αυτήν την τάση, ήταν και η ανησυχία για την εξάντληση της ζώνης του όζοντος, στα τέλη της δεκαετίας του 1980, και το γενικό δημόσιο συμφέρον σε φιλικές προς το περιβάλλον πηγές ενέργειας.

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα για να γίνει βιώσιμη, θα απαιτούσε τη φθινή παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων ημιαγωγών, μαζί με τη σημαντική βελτίωση του λόγου απόδοσης τους.

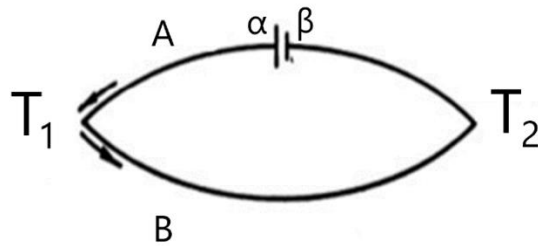
Στην σημερινή εποχή, η ανάπτυξη των θερμοηλεκτρικών υλικών και διατάξεων γίνεται ολοένα και πιο μεγάλη, λόγω της ποικιλίας των εφαρμογών στην ανάκτηση απορριπτόμενης θερμικής ενέργειας, σε κλιματιστικά μικρών χώρων και θαλάμων, σε εργαστηριακές πλάκες ψύξης και θέρμανσης, σε ψύκτες νερού, στην ψύξη ευαίσθητων ηλεκτρονικών διατάξεων, υγρών και αναψυκτικών, σε εφαρμογές laser, σε όργανα ακριβείας και ελέγχου. Τέλος, το ιδιαίτερο ενδιαφέρον και συμμετοχή ανεπτυγμένων χωρών (πχ. Ιαπωνία) σε όλο το τομέα, προμηνύουν την μελλοντική αύξηση της εμπορικής εκμετάλλευσης αυτού του μοναδικού φαινομένου μετατροπής ενέργειας [1].

## 1.2. Φαινόμενο Seebeck

Η μετατροπή της θερμικής ενέργειας, που εμφανίζεται ως ροή θερμότητας από σώματα υψηλής προς σώματα χαμηλότερης θερμοκρασίας, σε ηλεκτρική ενέργεια, γίνεται μέσω του φαινόμενο Seebeck [2].

Η πιο απλή διάταξη με τη βοήθεια της οποίας μπορεί να περιγραφεί ο τρόπος που αναπτύσσεται το φαινόμενο Seebeck ,είναι ένα θερμοζεύγος που αποτελείται από δύο διαφορετικά θερμοηλεκτρικά υλικά (θερμοστοιχεία). Τα δύο αυτά διαφορετικά θερμοηλεκτρικά υλικά A και B, έχουν αντίστοιχα στις άκρες διαφορετικές θερμοκρασίες,  $T_1$  (χαμηλότερη) και  $T_2$  (υψηλότερη). Όταν ενωθούν ηλεκτρικά σε σειρά μεταξύ τους, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1, τότε εμφανίζεται ηλεκτρεγερτική δύναμη  $E_{\alpha\beta}$  κατά μήκος των μη συζευγμένων άκρων  $\alpha$  και  $\beta$ , η οποία είναι ανάλογη της διαφοράς θερμοκρασίας  $T_2 - T_1$  και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις ιδιότητες των δύο χρησιμοποιούμενων θερμοηλεκτρικών υλικών. Η διαφορά δυναμικού αυτή, οφείλεται κατά βάση στη μετακίνηση των ελεύθερων φορτίων, όπως είναι τα ηλεκτρόνια και οι οπές. Πιο συγκεκριμένα, οι φορείς ενός είδους (είτε ηλεκτρόνια είτε οπές, ανάλογα με

το είδος του αγωγού) που βρίσκονται στον θερμότερο αγωγό έχουν μεγαλύτερη κινητική ενέργεια, άρα και μεγαλύτερες ταχύτητες σε σχέση με αυτά του ψυχρότερου αγωγού. Επομένως οι φορείς αυτοί, λόγω της υπάρχουσας διαφοράς θερμοκρασίας, αρχίζουν να μετακινούνται από τον θερμότερο αγωγό προς τον ψυχρότερο. Εάν για παράδειγμα οι φορείς οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την κίνηση φορτίων είναι ηλεκτρόνια (αγωγός τύπου n), θα παρατηρηθεί διάχυση τους από τον θερμότερο αγωγό στον ψυχρότερο, με αποτέλεσμα τη συσσώρευση ηλεκτρονίων στην ψυχρή περιοχή του κυκλώματος και τη δημιουργία απογυμνωμένων θετικών μεταλλικών ιόντων (οπών) στην θερμή περιοχή του κυκλώματος. Ο μηχανισμός αυτός θα συνεχιστεί έως ότου δημιουργηθεί μία τάση Seebeck, η οποία θα λάβει τιμή τέτοια ώστε να αντισταθεί την περαιτέρω μετακίνηση φορέων από τον έναν αγωγό στον άλλο [3].



Σχήμα 1. Θερμοδυναμικός κύκλος για τον συντελεστή Seebeck [1].

Η ηλεκτρεγερτική δύναμη που παράγεται από την παραπάνω διαδικασία δίνεται από τον τύπο:

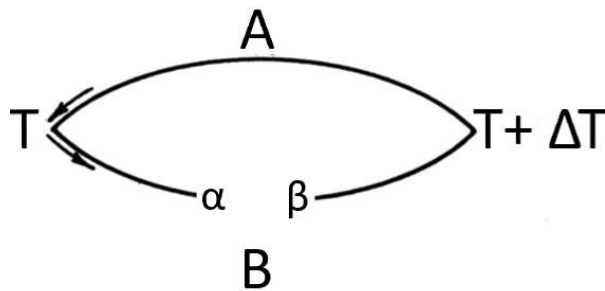
$$E_{\alpha\beta} = \int_{T_1}^{T_2} [S_B(T) - S_A(T)] dT \quad (1.1)$$

με  $S_A$  και  $S_B$  τους συντελεστές Seebeck των θερμοηλεκτρικών στοιχείων A και B, και T η θερμοκρασία στους αντίστοιχους αγωγούς. Αυτές είναι μη-γραμμικές συναρτήσεις της

θερμοκρασίας τους που εξαρτώνται από την απόλυτη θερμοκρασία, τη μοριακή δομή αλλά και το υλικό των αγωγών. Η σταθερά που δίνεται από τον λόγο:

$$\alpha_{\alpha\beta} = \frac{dE_{\alpha\beta}}{dT} \quad (1.2)$$

ονομάζεται συντελεστής Seebeck του θερμοζεύγους A-B ή αλλιώς διαφορικός συντελεστής Seebeck του θερμοζεύγους. Ο διαφορικός συντελεστής Seebeck μετράται σε V/K ή συνηθέστερα σε  $\mu\text{V/K}$ . Εάν η πλειονότητα των φορέων που μετακινούνται, όπως θα εξηγηθεί παρακάτω είναι οπές, τότε ο συντελεστής Seebeck του θερμοζεύγους έχει θετικό πρόσημο και η ηλεκτρεγερτική δύναμη  $E_{\alpha\beta}$  προκαλεί ρεύμα δεξιόστροφης φοράς, όταν το κύκλωμα με το θερμοζεύγος A-B κλείσει. Αντιστρόφως όταν η πλειονότητα των φορέων που μετακινούνται είναι τα ηλεκτρόνια, όταν το πρόσημο του συντελεστή Seebeck είναι αρνητικό και όταν το κύκλωμα κλείσει, η  $E_{\alpha\beta}$  προκαλεί ρεύμα αριστερόστροφης φοράς. Με βάση αυτή την ανάλυση και κοιτώντας τη Σχέση (1.1), εύκολα συμπεραίνουμε πως για να επιτευχθεί μεγαλύτερη ηλεκτρεγερτική δύναμη  $E_{\alpha\beta}$  μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε θερμοηλεκτρικά στοιχεία με αντίθετο πρόσημο συντελεστή Seebeck, ώστε η απόλυτη τιμή της  $E_{\alpha\beta}$  να αυξάνεται [3].



Σχήμα 2. Θερμοδυναμικός κύκλος για φαινόμενο Seebeck.

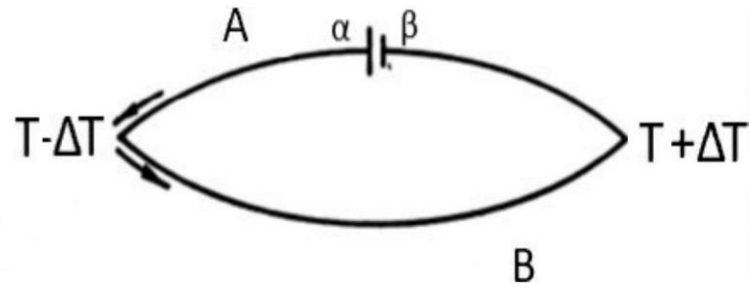
Η κύρια εφαρμογή του φαινομένου Seebeck είναι τα ηλεκτρικά θερμόμετρα δεδομένου ότι τα θερμοηλεκτρικά κυκλώματα μετατρέπουν τη θερμική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια [1].

### 1.3. Φαινόμενο Peltier

Το φαινόμενο Peltier παρατηρείται όταν μια πηγή ηλεκτρεγερτικής δύναμης εφαρμοστεί στα δύο άκρα ενός ημιαγωγού, ώστε να δημιουργηθεί ηλεκτρικό ρεύμα, τότε ένα ποσό θερμότητας απάγεται από την μια επαφή και απορροφάται από την άλλη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η μια επαφή να θερμαίνεται και η άλλη να ψύχεται αντίστοιχα [4].

Όπως και στην περίπτωση του φαινομένου Seebeck, η θερμότητα ρέει στην ίδια κατεύθυνση με αυτή του ηλεκτρικού φορτίου, επειδή αυτό λειτουργεί στην πραγματικότητα ως το μέσο που μεταφέρει τη θερμότητα. Ως αποτέλεσμα, η θερμότητα μπορεί να απορροφηθεί ή να παραχθεί, ανάλογα με την κατεύθυνση της ροής ρεύματος. Επιπλέον, έχει καθιερωθεί η αναλογική σχέση μεταξύ της εισόδου του ρεύματος, του μεγέθους των αγωγών και του ποσού της θερμότητας που είτε απορροφάται είτε απελευθερώνεται. Η σχέση θερμότητας και ρεύματος, όπως θα εξηγηθεί παρακάτω εκφράζονται από μία σταθερά, η οποία πήρε το όνομα του Peltier, δηλαδή έχει καθιερωθεί η αναλογική σχέση μεταξύ της εισόδου του ρεύματος, και του ποσού της θερμότητας που είτε απορροφάται είτε απελευθερώνεται. Στην ουσία πρόκειται για τον αντίστροφο μηχανισμό του φαινομένου Seebeck, δηλαδή εδώ γίνεται απορρόφηση θερμότητας από μία επαφή και αντίστοιχα αποβολή θερμότητας από μία δεύτερη επαφή, όταν σε αυτές τις δύο επαφές επιδρά μία διαφορά δυναμικού.

Πρέπει να αναφερθεί ότι το φαινόμενο Peltier παρατηρείται ανεξάρτητα από την κατεύθυνση του ρεύματος που ρέει μέσω των αγωγών. Κατά συνέπεια, η απορρόφηση της θερμότητας ρυθμίζεται τόσο για το ρεύμα που εισάγεται εξωτερικά, όσο και για το ρεύμα που προκαλείται από την ίδια την ένωση των θερμοστοιχείων από την επίδραση του φαινομένου Seebeck. Αυτό συμβαίνει επίσης και στους ανομοιογενείς αγωγούς, στην συγκέντρωση πεδίου ή σε διεπαφές μεταξύ φάσεων εντός πολυφασικών υλικών [1].



Σχήμα 3. Θερμοδυναμικός κύκλος για το φαινόμενο Peltier [1].

Αν στα σημεία α και β του θερμοζεύγους προστεθεί μια πηγή Ηλεκτρεγερτικής δύναμης (ΗΕΔ) δημιουργώντας ρεύμα έντασης  $I$ , ένα ποσό θερμότητας  $Q$  απορροφάται από την επαφή Β στη μονάδα του χρόνου, ενώ ταυτόχρονα εκλύεται ως θερμότητα  $Q$  από την επαφή Α. Το αποτέλεσμα που μπορεί να διαπιστωθεί εξωτερικά, είναι η ψύξη της επιφάνειας της επαφής και η θέρμανση της επαφής Β [5].

Η θερμότητα που απορροφάται ή που εκλύεται καλύτερα δίνεται από τον τύπο:

$$Q = (\Pi_A - \Pi_B) I = \Pi_{AB} I \quad (1.3)$$

και εκφράζει το ισοζύγιο θερμότητας από και προς τη διεπαφή Α-Β των δύο μεταλλικών αγωγών.  $\Pi_A$ ,  $\Pi_B$  είναι η σταθερά Peltier των υλικών Α και Β αντίστοιχα και  $\Pi_{AB}$  είναι ο συντελεστής Peltier του θερμοζεύγους και  $I$  η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που παρέχεται. Ο συντελεστής Peltier  $\Pi_A$ , εκφράζει τη μεταβολή του αναστρέψιμου θερμικού περιεχομένου στη σύνδεση Α, και αντίστοιχα ο συντελεστής Peltier  $\Pi_B$  τη μεταβολή στη σύνδεση Β όταν το ρεύμα ρέει στην διάταξη, ανά μονάδα χρόνου. Ο συντελεστής Peltier μετριέται σε W/A ή σε V.

Ο μηχανισμός του φαινομένου Peltier, μπορεί να περιγραφεί φυσικά ως εξής: Ας πούμε ότι αναφερόμαστε σε έναν αγωγό με πλειονότητα ηλεκτρονίων (τύπου n). Όταν στους δύο αγωγούς εφαρμοστεί εξωτερική τάση, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα ηλεκτρόνια λόγω της ύπαρξης ηλεκτρικού πεδίου, τείνουν να μετατοπιστούν από τον



αγωγό στον οποίο βρίσκονται. Αυτά είναι υπεράριθμα ως προς τον άλλο αγωγό, στον οποίο υπάρχουν θετικά φορτία προκαλώντας έτσι ηλεκτρικό ρεύμα και μεταφέροντας προς τον αγωγό στον οποίο μετακινούνται, ενέργεια με τη μορφή θερμότητας. Έτσι, η πλευρά του αγωγού τύπου  $n$  ψύχεται, ενώ η άλλη πλευρά θερμαίνεται. Η ποσότητα της θερμότητας που μεταφέρεται κατ' αυτό τον τρόπο εξαρτάται από τον αριθμό των φορέων που μετακινούνται, οι οποίοι με τη σειρά τους δημιουργούν και το ηλεκτρικό ρεύμα. Αντιστοίχως, εάν έχουμε έναν αγωγό τύπου  $p$ , στον οποίο δηλαδή υπάρχει πλειονότητα οπών για μεταφορά φορτίου, όταν επιδράσει η τάση, οπές μετακινούνται προς την άλλη πλευρά όπου υπάρχουν αρνητικά φορτία. Η φορά αυτή των οπών, την οποία ακολουθεί και η θερμότητα (θερμικό ρεύμα) είναι αντίθετη από τη φορά του ηλεκτρικού ρεύματος. Έτσι η πλευρά του αγωγού τύπου  $p$  ψύχεται, ενώ η άλλη πλευρά θερμαίνεται. Κατά συνέπεια, αλλάζοντας τη φορά του ηλεκτρικού ρεύματος, είναι δυνατό να γίνει ρύθμιση της φοράς με την οποία μεταφέρεται η θερμότητα [3].

Ο κανόνας που ισχύει για το πρόσημο του συντελεστή Peltier, είναι ίδιος με τον κανόνα για το πρόσημο του συντελεστή Seebeck: αγωγοί τύπου  $p$ , έχουν θετικό συντελεστή Peltier. Αντιστρόφως, αγωγοί τύπου  $n$ , έχουν αρνητικό συντελεστή Peltier. Με βάση τα παραπάνω, όπως και στον συντελεστή Seebeck, είναι προφανές ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν στοιχεία με αντίθετο πρόσημο συντελεστή Peltier προκειμένου το θερμοζεύγος να έχει ακολούθως μεγαλύτερο συντελεστή Peltier  $\Pi_{AB}$ , καθώς έτσι η απόλυτη τιμή του αυξάνεται [3]. Το φαινόμενο Peltier είναι αποτέλεσμα της αλλαγής στην εντροπία των φορέων ηλεκτρικού φορτίου όπως αυτό διέρχεται από την σύνδεση των αγωγών. Το φαινόμενο Peltier, όπως και το φαινόμενο Seebeck, δεν σχετίζεται με το δυναμικό επαφής.

## 1.4. Φαινόμενο Thomson

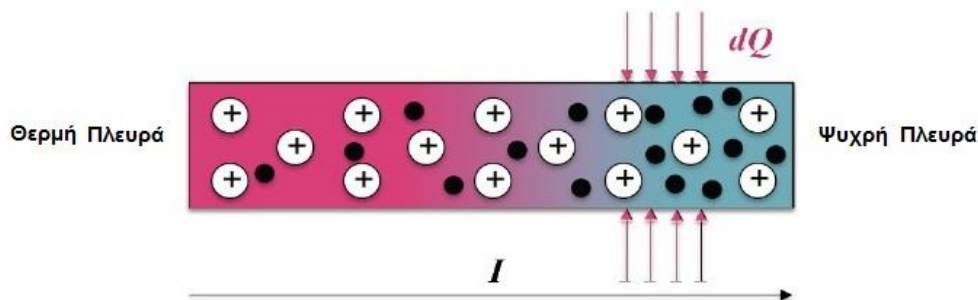
Το φαινόμενο Thomson εκφράζεται ως ένας συνδυασμός των φαινομένων Seebeck και Peltier και περιγράφει τον μηχανισμό κατά τον οποίο εκλύεται ή απορροφάται θερμότητα από έναν αγωγό με διαφορετική θερμοκρασία κατά μήκος του, όταν αυτός διαρρέεται από κάποιο ρεύμα. Έτσι, κατά την διέλευση ρεύματος μέσα από ένα αγώγιμο υλικό με σταθερή θερμοκρασιακή διαβάθμιση, εκλύεται ή απορροφάται θερμότητα η οποία είναι ανάλογη του ηλεκτρικού ρεύματος και της διαφοράς θερμοκρασίας του υλικού, όπως φαίνεται από την κάτωθι σχέση [3]:

$$Q = \tau i (\nabla T) \quad (1.4)$$

όπου σταθερά  $\tau$  ονομάζεται συντελεστής Thomson και όπως ο συντελεστής Seebeck, μετράται σε V/K,  $i$  η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος. Η σχέση που συνδέει τη σταθερά Thomson με τη σταθερά Seebeck ( $\alpha_{AB}$ ) είναι η εξής:

$$\tau = T \cdot \frac{d\alpha_{AB}}{dT} \quad (1.5)$$

Το φαινόμενο Thomson μπορεί να συμβεί σε οποιοδήποτε τμήμα ενός αγωγού με διαφορά θερμοκρασίας. Είναι μια εκδήλωση της κατεύθυνσης της ροής των φορέων μεταφοράς ηλεκτρικού φορτίου σε σχέση με ρυθμό μεταβολής της θερμοκρασίας στο εσωτερικό ενός αγωγού. Αυτοί απορροφούν ενέργεια (θερμότητα) που ρέει προς μία κατεύθυνση αντίθετη ως προς το θερμικό ρεύμα, αυξάνοντας την κινητική τους ενέργεια και, όταν ρέει στην ίδια κατεύθυνση απελευθερώνουν θερμότητα, μειώνοντας τη κινητική τους ενέργεια. Το πρόσημο του συντελεστή Thomson εξαρτάται από τη φορά του ηλεκτρικού ρεύματος, εάν δηλαδή αυτό κινείται από τη θερμότερη προς την ψυχρότερη πλευρά ή το αντίστροφο, ακολουθώντας τον ίδιο κανόνα με τους συντελεστές Seebeck και Peltier. Η απεικόνιση του φαινομένου παρουσιάζεται στο παρακάτω Σχήμα 4:



Σχήμα 4. Φαινόμενο Thomson σε έναν ομογενή αγωγό με θερμοκρασιακή διαφορά [3]

Το φαινόμενο Thomson δεν περιλαμβάνει τάση, ωστόσο όπως αναφέραμε ο συντελεστής του μετριέται σε  $W/A$  ή σε  $V$  όπως και αυτός του φαινομένου Peltier. Ο Thomson το χαρακτήρισε ως "παραγωγή ειδικής θερμότητας της ηλεκτρικής ενέργειας". Ως μηχανισμός έχει μικρή επίδραση στις θερμοηλεκτρικές διατάξεις, ωστόσο πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψη ώστε να γίνονται σωστοί υπολογισμοί.

Συμπερασματικά, το φαινόμενο Seebeck δεν προκύπτει ως αποτέλεσμα της διασταύρωσης των ανόμοιων υλικών, ούτε επηρεάζεται άμεσα από το φαινόμενο Thomson ή το φαινόμενο Peltier. Τα φαινόμενα αυτά είναι παρόντα μόνο όταν το ρεύμα ρέει σε ένα θερμοηλεκτρικό κύκλωμα. Αυτές οι αποκρίσεις σε αντίθεση με εκείνες του σχετικού φαινομένου Seebeck, υπάρχουν όσο διατηρείται το θερμοκρασιακό πεδίο, ανεξάρτητα από το εάν διαχέεται από ρεύμα ή όχι. Αποδεικνύεται ότι το σχετικό δυναμικό Seebeck είναι η κινητήρια δύναμη της τρέχουσας ροής ηλεκτρικού ρεύματος που είναι υπεύθυνη για τα αποτελέσματα των φαινομένων Peltier και Thomson, στα θερμοηλεκτρικά κυκλώματα, χωρίς την εφαρμογή άλλων τάσεων [1].

## 1.5. Φαινόμενο Joule

Το φαινόμενο Joule αν και δεν κατατάσσεται στα θερμοηλεκτρικά φαινόμενα, αναφέρεται στην παρούσα εργασία διότι όπου υπάρχει διέλευση ρεύματος, προκαλεί (ανεξάρτητα της κατεύθυνσης του ρεύματος) έκλυση θερμότητας. Το φαινόμενο Joule σε αντίθεση με τα υπόλοιπα θερμοηλεκτρικά φαινόμενα δεν είναι θερμοδυναμικά

αντιστρεπτό και εξαρτάται από τις διαστάσεις της επαφής και των αγωγών. Η ροή θερμότητας του φαινομένου παράγεται περιγράφεται από τη γνωστή σχέση:

$$P_j \propto I^2 R = P_{el} \quad (1.6)$$

όπου  $P_{el}$  η ηλεκτρική ισχύς του που καταναλώνεται υπό μορφή ροής θερμότητας στη μονάδα του χρόνου ( $P_j$ ),  $I$  η ένταση του ρεύματος και  $R$  η αντίσταση του αγωγού [6].

Γενικά σε θερμοηλεκτρικές διεργασίες, το φαινόμενο Joule αν και αναπόφευκτο, δεν είναι επιθυμητό, καθώς μετατρέπει μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιούν οι διατάξεις σε διαχεόμενη θερμότητα, η οποία λογίζεται ως ενεργειακή απώλεια συγκεκριμένα ως “Ωμική απώλεια”.

## 1.6. Ημιαγωγοί – Θερμοζεύγη

Στην συνέχεια θα εξεταστούν τα θερμοηλεκτρικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα σε μοριακό και ατομικό. Στις προηγούμενες ενότητες έγινε μία μακροσκοπική μελέτη των φαινομένων, ενώ σε αυτήν την ενότητα θα δοθεί μία περιγραφή των φαινομένων σε μοριακό και ατομικό επίπεδο, σε μια μικροσκοπική προσέγγιση.

Προηγουμένως στην ανάλυση των φαινομένων Seebeck και Peltier τα ηλεκτρόνια από τη θερμή περιοχή του μετάλλου έχουν περισσότερη κινητική ενέργεια συγκριτικά μ’ αυτά στην ψυχρή, άρα και μεγαλύτερες ταχύτητες. Παρατηρείται διάχυση ηλεκτρονίων από τη θερμή περιοχή στην ψυχρή, εφόσον αυτά είναι φορείς που βρίσκονται σε μεγαλύτερη συγκέντρωση μέσα στο υλικό. Η διάχυση αυτή συνεπάγεται τη συσσώρευση ηλεκτρονίων στην ψυχρή περιοχή και δημιουργία απογυμνωμένων θετικών μεταλλικών ιόντων (οπών) στην θερμή. Η διαδικασία αυτή έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία δυναμικού το οποίο τελικά θα πάρει τιμή ικανή να εμποδίσει οποιαδήποτε περαιτέρω μετατόπιση ηλεκτρονίων [5].

Στα άτομα κάθε υλικού, τα ηλεκτρόνια είναι ταξινομημένα σε ενεργειακές στάθμες γύρω από τον πυρήνα. Κάθε ομάδα χωριστών ενεργειακών σταθμών

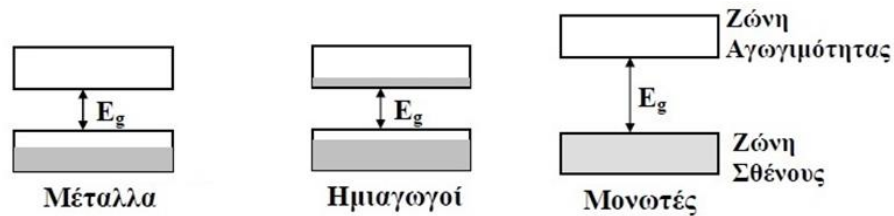
ονομάζεται ενεργειακή ζώνη. Οι ζώνες διαχωρίζονται μεταξύ τους από ενεργειακά χάσματα, δηλαδή περιοχές στις οποίες δεν μπορούν να υπάρχουν ελεύθεροι φορείς. Οι ελεύθεροι φορείς μπορούν μόνο να μεταπηδήσουν από μία ενεργειακή ζώνη σε άλλη. Το ενεργειακό χάσμα  $E_g$  που χωρίζει δύο ζώνες, αντιπροσωπεύει ουσιαστικά την ενέργεια που πρέπει να αποκτήσει ένα ηλεκτρόνιο ώστε να μεταπηδήσει από τη μία ζώνη προς την αμέσως υψηλότερη και μετριέται σε eV. Η τελευταία πλήρης ζώνη, δηλαδή η πιο απομακρυσμένη ζώνη από το πυρήνα του ατόμου ονομάζεται ζώνη σθένους και τα ηλεκτρόνια της δε συμμετέχουν στην αγωγιμότητα του στερεού, αφού δεν υπάρχουν διαθέσιμες ενεργειακές καταστάσεις, που μπορούν να τις καταλάβουν υπό την επίδραση εξωτερικού πεδίου. Η αμέσως επόμενη ζώνη, η οποία μπορεί είτε να είναι κενή είτε μερικώς πληρωμένη, ονομάζεται ζώνη αγωγιμότητας.

Οι κενές ζώνες δεν περιέχουν ηλεκτρόνια και δεν συμμετέχουν στην ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού. Μερικώς πληρωμένες ζώνες περιέχουν ηλεκτρόνια και έχουν διαθέσιμες ενεργειακές στάθμες, στις οποίες μπορούν να μεταπηδήσουν ηλεκτρόνια. Οι ελεύθερες αυτές ενεργειακές στάθμες, επιτρέπουν στους φορείς να αποκτήσουν ενέργεια, όταν μετακινούνται υπό την επίδραση εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου. Σ' αυτή την περίπτωση, τα ηλεκτρόνια συμμετέχουν στην ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού. Οι τελείως πληρωμένες ζώνες περιέχουν μεγάλο αριθμό ηλεκτρονίων, ωστόσο δε συμμετέχουν στην ηλεκτρική αγωγιμότητα καθώς δεν αποκτούν ενέργεια, αφού δεν υπάρχουν διαθέσιμες ενεργειακές στάθμες.

Για να περιγραφεί η διαφορά που έχουν οι ημιαγωγοί με τα αγώγιμα και τα μονωτικά υλικά, θα εξετασθούν τα ηλεκτρόνια σθένους των ατόμων των υλικών αυτών. Τα ηλεκτρόνια σθένους είναι αυτά που παρουσιάζουν ενδιαφέρον, καθώς τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται κοντά στον πυρήνα, λόγω της ισχυρής έλξης, δεν μπορούν να κινηθούν ελεύθερα στο υλικό. Τα μέταλλα, αποτελούνται από άτομα με ένα ή δύο ηλεκτρόνια σθένους ανά άτομο και παρουσιάζουν υψηλή αγωγιμότητα. Τέτοια υλικά είναι ο χαλκός, το ασήμι και ο χρυσός. Στη περίπτωση των μονωτών, η αγωγιμότητα του υλικού είναι μηδενική, λόγω του μεγάλου ενεργειακού χάσματος, το οποίο δεν επιτρέπει στα ηλεκτρόνια σθένους να αλλάξουν ενεργειακή ζώνη. Τέλος, στην περίπτωση των

ημιαγωγών, μία μερικώς πλήρης ενεργειακή ζώνη διαχωρίζεται από μία σχεδόν κενή ζώνη με μικρό ενεργειακό χάσμα (περίπου 1eV), το οποίο επιτρέπει στα ηλεκτρόνια να μετακινηθούν προς την αμέσως υψηλότερη ενεργειακή ζώνη. Ως αποτέλεσμα, υπάρχει μια σχεδόν πλήρης ζώνη (ζώνη σθένους) κάτω από μια σχεδόν κενή ζώνη (ζώνη αγωγιμότητας). Υπό αυτές τις συνθήκες το υλικό συμπεριφέρεται ως ημιαγωγός [7].

Η παραπάνω ανάλυση των ενεργειακών ζωνών και χασμάτων, ανάλογα με το είδος του υλικού (μονωτής, αγωγός ή ημιαγωγός) απεικονίζεται στο επόμενο Σχήμα 5:



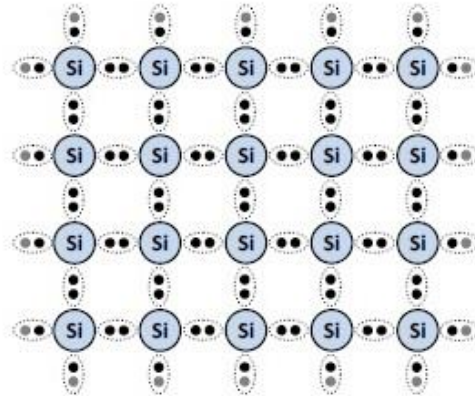
Σχήμα 5. Ενεργειακά διαγράμματα κρυστάλλων [7].

Οι ημιαγωγοί αποτελούν μια κατηγορία στερεών σωμάτων που χαρακτηρίζονται από μικρό αριθμό ελεύθερων ηλεκτρονίων, σε αντίθεση με τα μέταλλα που παρουσιάζουν μεγάλο πλήθος ελεύθερων ηλεκτρονίων και τους μονωτές που διαθέτουν ελάχιστα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Πιο συγκεκριμένα, οι ημιαγωγοί έχουν τιμές ειδικής αντίστασης στην περιοχή  $10^{-4} - 10^{-7} \Omega m$ , ενώ τα μέταλλα παίρνουν τιμές των  $10^{-8} \Omega m$  και οι μονωτές μεγαλύτερες των  $10^{12} \Omega m$  [5].

### 1.1.1 Ενδογενείς ημιαγωγοί

Ενδογενείς ημιαγωγοί ονομάζονται αυτοί οι οποίοι δεν έχουν καμία πρόσμιξη. Οι πλέον συνηθισμένοι ημιαγωγοί σε ηλεκτρονικές διατάξεις είναι το Γερμάνιο (Ge) και το Πυρίτιο (Si). Η κρυσταλλική δομή ενός ενδογενούς ημιαγωγού είναι τέτοια, ώστε όλα τα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στιβάδας να σχηματίζουν δεσμούς με τα ηλεκτρόνια των γειτονικών ατόμων, δηλαδή ζεύγη ηλεκτρονίων που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με τέτοιο τρόπο, ώστε η ενέργεια κάθε ζεύγους να ελαχιστοποιείται. Με τον σχηματισμό

των δεσμών αυτών η εξωτερική στιβάδα κάθε ατόμου είναι πλήρως συμπληρωμένη και βρίσκεται σε κατάσταση ευστάθειας, στην οποία όλα τα ηλεκτρόνια της στιβάδας αυτής βρίσκονται εγκλωβισμένα στη ζώνη σθένους. Η κρυσταλλική δομή που περιγράφηκε προηγουμένως, φαίνεται στο επόμενο Σχήμα 6 για τα άτομα του πυριτίου:

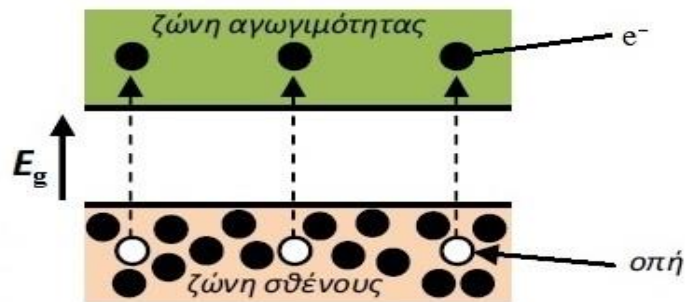


Σχήμα 6. Κρυσταλλική δομή ενδογενούς ημιαγωγού (πυριτίου). [8]

Το άτομο του Γερμάνιου (Ge) αποτελείται από πυρήνα με 32 πρωτόνια γύρω από τον οποίο περιστρέφονται 32 ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια σθένους που βρίσκονται στην εξωτερική στιβάδα είναι 4. Κάθε άτομο γερμάνιου συνεισφέρει ένα από τα 4 ηλεκτρόνια σε κάθε αντίστοιχο γειτονικό άτομο και έτσι δημιουργούνται ομοιοπολικοί δεσμοί που συγκρατούν τα άτομα μεταξύ τους στο κρυσταλλικό πλέγμα. Όταν η θερμοκρασία του ημιαγωγού είναι κοντά στο απόλυτο μηδέν τα ηλεκτρόνια σθένους συγκρατούνται στους ομοιοπολικούς αυτούς δεσμούς. Αντίθετα, ενώ όταν η θερμοκρασία αυξηθεί ή όταν επιδράσει εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο είναι δυνατό ορισμένα ηλεκτρόνια σθένους να αποκτήσουν αρκετή ενέργεια ώστε να μεταπηδήσουν στη ζώνη αγωγιμότητας, ξεπερνώντας το ενεργειακό χάσμα. Τα ηλεκτρόνια που μεταπηδούν στη ζώνη αγωγιμότητας αποτελούν φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος. Επειδή οι φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος προέρχονται από άτομα του ίδιου του ημιαγωγού, η αντίστοιχη αγωγιμότητα ονομάζεται ενδογενής.

Έτσι, δημιουργούνται ελεύθερα ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας τα οποία αφήνουν ένα ενεργειακό κενό που ονομάζεται οπή, με φορτίο ( $h^+$ ) η κάθε μια. Οι οπές

έχουν τη δυνατότητα να κινούνται εντός του ημιαγωγού. Όταν στον ημιαγωγό εφαρμοστεί ηλεκτρικό πεδίο θα συμβεί όχι μόνο μετακίνηση των ηλεκτρονίων της ζώνης αγωγιμότητας αλλά ταυτόχρονα και οπών σε αντίθετη φορά. Στου ενδογενείς ημιαγωγούς, ηλεκτρόνια αγωγιμότητας και οπές δημιουργούνται κατά ζεύγη. Η μετακίνηση των ηλεκτρονίων από τη ζώνη σθένους προς τη ζώνη αγωγιμότητας και η δημιουργία ισάριθμων οπών, που οφείλεται στη μετακίνηση τους, φαίνεται στο Σχήμα 7 που ακολουθεί:



Σχήμα 7. Μετακίνηση ηλεκτρονίων από τη ζώνη σθένους προς τη ζώνη αγωγιμότητας και δημιουργία ισάριθμων οπών). [8]

Εξαιτίας του ηλεκτρικού πεδίου που δρα στον ενδογενή ημιαγωγό, όλα τα ηλεκτρόνια τείνουν να κινηθούν με φορά αντίθετη από αυτήν του πεδίου. Βέβαια τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται στη ζώνη αγωγιμότητας είναι πιο εύκολο να κινηθούν, σε σχέση με τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται στη ζώνη σθένους και συγκρατούνται από τους δεσμούς που σχηματίζουν. Ωστόσο ένα ηλεκτρόνιο στη ζώνη σθένους, το οποίο γειτνιάζει με μία οπή έχει μεγαλύτερη ενέργεια από τα υπόλοιπα ηλεκτρόνια σθένους και μπορεί υπό την επίδραση του πεδίου να μεταπηδήσει στο γειτονικό του άτομο, όπου έχει δημιουργηθεί η οπή, ώστε να την καλύψει. Με τη μεταπήδηση αυτή, θα δημιουργηθεί μία νέα οπή στο άτομο από το οποίο μετακινήθηκε το ηλεκτρόνιο σθένους. Η αρχική οπή θα μετακινηθεί με τη φορά του ηλεκτρικού πεδίου. Η διαδικασία αυτή θα συνεχιστεί, μέχρι ηλεκτρόνιο και οπή να καταλήξουν στους αντίθετους πόλους του πεδίου, δηλαδή το ηλεκτρόνιο στον θετικό πόλο και η οπή στον αρνητικό [9].



### 1.1.2 Ημιαγωγοί προσμίξεων

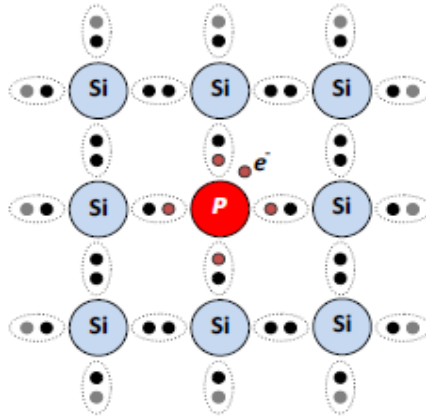
Στον κρύσταλλο ενός ενδογενούς ημιαγωγού, είναι δυνατό με κατάλληλες χημικές διεργασίες να πραγματοποιηθεί προσθήκη προσμίξεων χρησιμοποιώντας κατάλληλες χημικές διεργασίες. Με τον τρόπο αυτό άτομα του ημιαγωγού αντικαθιστούνται με άτομα του στοιχείου με το οποίο γίνεται η πρόσμιξη.

- **Ημιαγωγοί τύπου n**

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου ημιαγωγού θα προκύψει εάν σε έναν ενδογενή ημιαγωγό, όπως το Ge ή το Si, προστεθεί μικρή ποσότητα πεντασθενούς στοιχείου π.χ αρσενικού (As) ή φωσφόρου (P). Τα πεντασθενή στοιχεία, όπως μαρτυρά και η ονομασία τους, έχουν 5 ηλεκτρόνια στη ζώνη σθένους. Όταν γίνει η πρόσμιξη, τα 4 ηλεκτρόνια σθένους του ενδογενούς ημιαγωγού, όπως το Ge που είναι τετρασθενές, θα δημιουργήσουν ομοιοπολικούς δεσμούς με τα αντίστοιχα 4 των γειτονικών ατόμων του πεντασθενούς στοιχείου πρόσμιξης. Το 5<sup>ο</sup> ηλεκτρόνιο του ατόμου του πεντασθενούς στοιχείου θα μείνει αδέσμευτο και θα είναι αδύνατο να συνάψει δεσμούς με ηλεκτρόνια γειτονικών ατόμων του ενδογενούς ημιαγωγού, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 8. Το ηλεκτρόνιο αυτό, καθώς δε θα συμμετέχει σε κάποιον δεσμό θα έχει πολύ μεγαλύτερη ενέργεια από τα υπόλοιπα που βρίσκονται στη ζώνη σθένους. Η τιμή της ενέργειας που θα έχει, βρίσκεται στη ζώνη του ενεργειακού χάσματος του ημιαγωγού και πολύ κοντά στη ζώνη αγωγιμότητας. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να απομακρυνθεί σχετικά εύκολα ακόμη και σε χαμηλή θερμοκρασία και να μεταπηδήσει στη ζώνη αγωγιμότητας, αποτελώντας φορέα του ηλεκτρικού ρεύματος.

Το άτομο του αρσενικού ή φωσφόρου ονομάζεται δότης, καθώς η πρόσμιξη του προσφέρει ηλεκτρικούς φορείς, δηλαδή ηλεκτρόνια αγωγιμότητας. Αυξάνοντας τον αριθμό των δοτών σ' έναν ενδογενή ημιαγωγό γερμανίου, αυξάνεται ο αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων με αποτέλεσμα την δημιουργία ενός μικρού ρεύματος, όταν ο ημιαγωγός βρεθεί σε ηλεκτρικό πεδίο, αυξάνοντας έτσι στην ουσία την αγωγιμότητα του κρυστάλλου. Επομένως η αγωγιμότητα ενός τέτοιου τύπου κρυστάλλου οφείλεται στα ηλεκτρόνια της ζώνης αγωγιμότητας, τα οποία υπερτερούν σε πλήθος έναντι των οπών

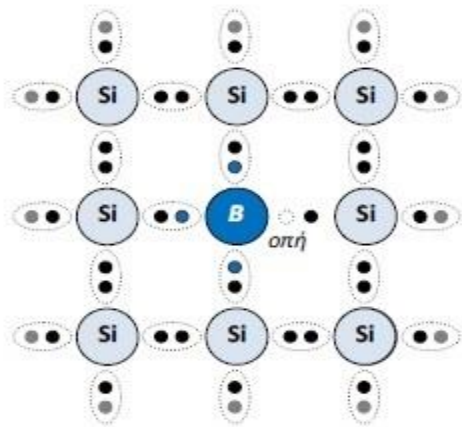
στη ζώνη σθένους και για τον λόγο αυτό καλούνται φορείς πλειοψηφίας. Οι ημιαγωγοί του τύπου αυτού καλούνται ημιαγωγοί τύπου n [10].



Σχήμα 8. Κρυσταλλικό πλέγμα πυριτίου με πρόσμιξη Φωσφόρου. [8]

- **Ημιαγωγοί τύπου p**

Στην περίπτωση που αντί για πεντασθενές υλικό, ένα τρισθενές στοιχείο όπως το Γάλλιο (Ga) ή το Βόριο (B), εισαχθεί στον ημιαγωγό Πυριτίου (Si) τότε τα τρία ηλεκτρόνια σθένους του τρισθενούς στοιχείου δημιουργούν ομοιοπολικούς δεσμούς με τα τρία ηλεκτρόνια σθένους τριών γειτονικών ατόμων Si. Αυτό δεν συμβαίνει με το 4<sup>ο</sup> γειτονικό άτομο του Si όπως φαίνεται στο Σχήμα 9. Στη θέση που θα υπήρχε ένα ηλεκτρόνιο, στην περίπτωση ενός καθαρού ενδογενή ημιαγωγού, εκεί δηλαδή που το άτομο του Βορίου παρουσιάζει έλλειμμα ενός ηλεκτρονίου, τώρα υπάρχει μια οπή στο κρυσταλλικό πλέγμα, η θέση της οποίας μπορεί να καλυφθεί από ένα ηλεκτρόνιο σθένους ενός γειτονικού ατόμου Si που θα μεταπηδήσει στη θέση αυτή.



Σχήμα 9. Κρυσταλλικό πλέγμα πυριτίου με πρόσμιξη βορίου. [8]

Στην περίπτωση αυτή το άτομο του υλικού πρόσμιξης μπορεί να δεχτεί ηλεκτρόνια και για τον λόγο αυτό ονομάζεται αποδέκτης. Καθώς οι σπές, όπως έχει ήδη αναφερθεί, έχουν δυνατότητα μετακίνησης, αποτελούν και αυτές φορείς ηλεκτρικού ρεύματος και η αύξηση της συγκέντρωσης τους αυξάνει την αγωγιμότητα του εξωγενούς ημιαγωγού. Η τιμή της ενέργειας των ελεύθερων σπών, καθώς αυτές δε συμμετέχουν σε δεσμούς, είναι στη ζώνη του ενεργειακού χάσματος και πολύ κοντά στην τιμή της ζώνης σθένους, από τη οποία μπορούν να μεταπηδήσουν ηλεκτρόνια, ώστε να καλύψουν τις σπές αυτές. Το κενό που αφήνουν στη ζώνη σθένους τα ηλεκτρόνια αυτά αντιστοιχεί, επίσης, σε σπές. Με τον τρόπο αυτό, δημιουργείται μεγάλος αριθμός σπών εντός της ζώνης σθένους, η πλειοψηφία των οποίων αφορά ηλεκτρόνια που μεταπήδησαν στο ενεργειακό επίπεδο των σπών του υλικού-αποδέκτη.

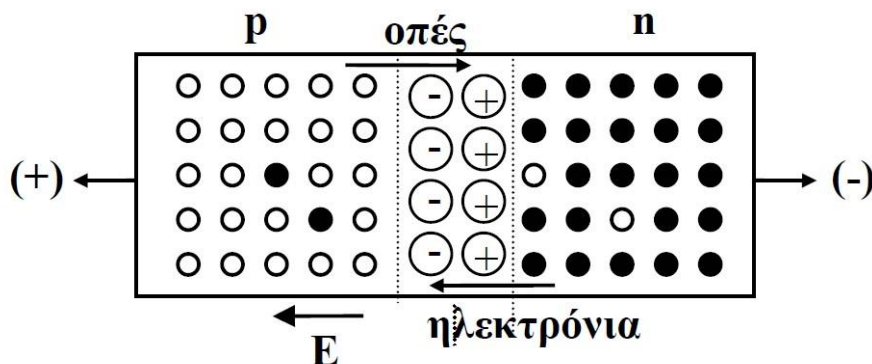
Επομένως η αγωγιμότητα των κρυστάλλων αυτού του τύπου οφείλεται στις σπές στη ζώνη σθένους, οι οποίες υπερτερούν σε αριθμό έναντι των ηλεκτρονίων, αποτελώντας τους φορείς πλειονότητας. Καθώς το φορτίο των φορέων πλειονότητας είναι θετικό, οι ημιαγωγοί ονομάζονται τύπου p [10].

- **Η επαφή p-n**

Έστω ένας ενδογενής ημιαγωγός από τον οποίο έχουν προκύψει με προσμίξεις δυο τύποι εξωγενών ημιαγωγών: ένας τύπου p και ένας τύπου n, με τη διαδικασία που προαναφθίκε. Εάν έρθουν σε επαφή ένα τμήμα του ημιαγωγού p και ένα τμήμα του ημιαγωγού n, τότε προκύπτει μία επαφή p-n ή αλλιώς ένα θερμοζεύγος. Αμέσως μετά την ένωση των δυο εξωγενών ημιαγωγών, τα ηλεκτρόνια που πλεονάζουν στην περιοχή n θα αρχίσουν να διαχέονται προς την περιοχή p και αντιστρόφως, οι οπές θα διαχέονται από την περιοχή p προς την περιοχή n.

Τα εισερχόμενα ηλεκτρόνια από την περιοχή n προς την περιοχή p, εξουδετερώνουν ένα αριθμό οπών, με αποτέλεσμα τη δημιουργία αρνητικών ιόντων. Έτσι η περιοχή p φορτίζεται θετικά. Ο αντίστροφος μηχανισμός παρατηρείται στην περιοχή n, όπου οι εισερχόμενες οπές εξουδετερώνονται από τα ηλεκτρόνια αυτού του τμήματος, με αποτέλεσμα τη δημιουργία θετικών ιόντων, καθώς τα κάθε ηλεκτρόνιο που εξουδετερώνει μία εισερχόμενη οπή, αφήνει πίσω του μία νέα οπή. Έτσι η περιοχή n, αφού χάνει ηλεκτρόνια μετά την εξουδετέρωση, τα οποία δημιουργούν ελεύθερες οπές, φορτίζεται αρνητικά. Η παραπάνω διαδικασία απεικονίζεται στο Σχήμα 10.

Με αυτόν τον τρόπο σε μία στενή περιοχή γύρω από την επαφή (τάξης 1-2  $\mu\text{m}$ ) δεν υπάρχουν ούτε ελεύθερα ηλεκτρόνια ούτε οπές. Υπό αυτή την έννοια η περιοχή καλείται περιοχή απογύμνωσης.



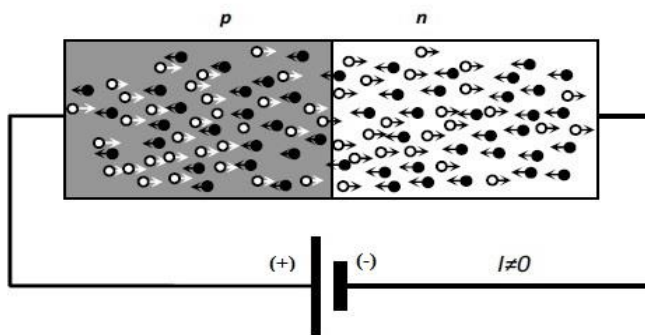
Σχήμα 10. Η επαφή p-n ημιαγωγού και διάχυση ηλεκτρονίων και οπών προς την περιοχή p και n αντίστοιχα [10].

Όσο αυξάνεται ο αριθμός των οπών στην περιοχή τύπου  $n$ , τόσο δυσχεραίνεται η επιπλέον μετακίνηση οπών προς την περιοχή αυτή, καθώς απωθούνται από ήδη μεγάλο αριθμό οπών που έχουν συγκεντρωθεί στην περιοχή αυτή. Ομοίως, όσο αυξάνεται ο αριθμός των ηλεκτρονίων στην περιοχή τύπου  $p$ , τόσο δυσκολότερη γίνεται η περαιτέρω μετακίνηση ηλεκτρονίων, λόγω της απώσης των ηλεκτρονίων που έχουν ήδη συγκεντρωθεί εκεί. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται στην περιοχή αυτή κατευθύνεται από την περιοχή  $n$  προς την περιοχή  $p$ .

Το φαινόμενο αυτό θα φτάσει σε κατάσταση ισορροπίας, όταν εξισορροπηθούν τα δύο αντικρουόμενα δυναμικά ανά τύπο φορέα. Με άλλα λόγια, όταν η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται στην περιοχή απογύμνωσης με κατεύθυνση από την περιοχή τύπου  $n$  προς την περιοχή τύπου  $p$  αποκτήσει ορισμένη τιμή, η οποία να αντιτίθεται στην περαιτέρω μετακίνηση φορέων εκατέρωθεν, με αποτέλεσμα να παύει το φαινόμενο της διάχυσης των ηλεκτρονίων και οπών.

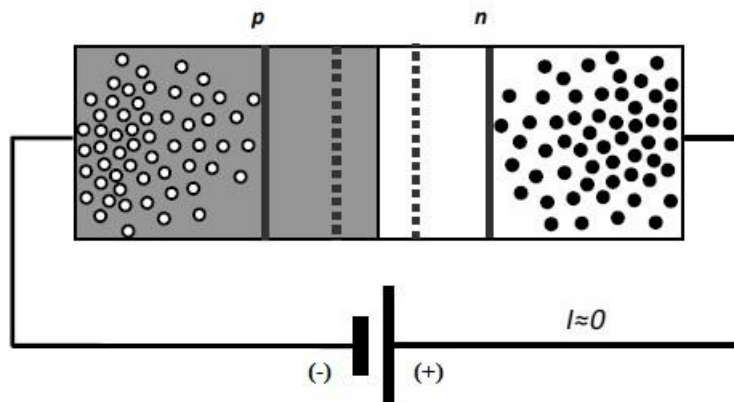
- **Ορθή και Ανάστροφη Πόλωση Επαφής  $p$ - $n$**

Εάν συνδεθούν τα άκρα μίας επαφής  $p$ - $n$  με μία πηγή συνεχούς τάσης, ώστε ο θετικός πόλος της πηγής να συνδεθεί στο τμήμα  $p$  και ο αρνητικός πόλος στο τμήμα  $n$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 11 τότε προκύπτει μία επαφή  $p$ - $n$  ορθά πολωμένη. Έτσι ελεύθερα ηλεκτρόνια κινούνται από την περιοχή  $n$  στην περιοχή  $p$  και ελεύθερες οπές κινούνται από την περιοχή  $p$  προς την περιοχή  $n$ . Έτσι δημιουργείται ένα συνεχές ρεύμα, το οποίο αυξάνεται, όσο αυξάνεται η τάση που εφαρμόζεται στα άκρα της επαφής.



Σχήμα 11. Λειτουργία επαφής  $p$ - $n$  κατά την ορθή πόλωση [8]

Εάν πάλι συνδεθούν τα άκρα μίας επαφής p-n με μία πηγή συνεχούς τάσης, ώστε ο θετικός πόλος της πηγής να συνδεθεί στο τμήμα n και ο αρνητικός πόλος στο τμήμα p, όπως φαίνεται στο Σχήμα 12 τότε προκύπτει μία επαφή p-n πολωμένη ανάστροφα. Στην περίπτωση αυτή, οι οπές στην περιοχή p καθώς αποτελούν θετικό φορτίο, θα έλκονται από τον αρνητικό πόλο της πηγής και αντίστοιχα τα ηλεκτρόνια στην περιοχή τύπου n θα έλκονται από τον θετικό πόλο της πηγής. Έτσι εμποδίζεται η διάχυση ηλεκτρονίων από την περιοχή n προς την περιοχή p και η διάχυση οπών από την περιοχή n προς την περιοχή p, λόγω της επίδρασης της πηγής. Επομένως δεν υπάρχει κίνηση των φορέων που βρίσκονται σε πλειονότητα σε κάθε τμήμα. Στην επαφή p-n θα υπάρχει μόνο ένα πολύ μικρό ρεύμα, που οφείλεται στην κίνηση ενός πολύ μικρού αριθμού φορέων μειονότητας, δηλαδή μετακίνηση ηλεκτρονίων από την περιοχή p προς την περιοχή n και οπών από την περιοχή n προς την περιοχή p. Οι φορείς αυτοί κινούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις και η κίνηση τους αυτή οφείλεται στον μικρό αριθμό θερμικών διασπάσεων που συμβαίνουν στο κρυσταλλικό πλέγμα.



Σχήμα 12. Λειτουργία επαφής p-n κατά την ανάστροφη πόλωση [8]

## 1.7. Θερμοηλεκτρικά στοιχεία - Ιδιότητες

Οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες (ThermoElectric Generators –TEG), δηλαδή οι διατάξεις εκείνες οι οποίες μετατρέπουν τη θερμότητα απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω του φαινομένου Seebeck είναι στερεάς κατάστασης πηγές ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς αποτελούνται από κυκλώματα ημιαγωγών και δεν έχουν κινούμενα μέρη. Λόγω της αρχής λειτουργίας τους ονομάζονται και γεννήτριες Seebeck.

Οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες έχουν προσελκύσει το ενδιαφέρον στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, κυρίως της πράσινης ενέργειας, λόγω του τρόπου λειτουργίας τους και των ιδιαίτερων πλεονεκτημάτων όπως θα αναφερθούν παρακάτω. Αυτό σημαίνει ότι μπορούν να εκμεταλλευτούν τη θερμότητα που οφείλεται στην ύπαρξη διαφοράς θερμοκρασίας και να τη μετατρέψουν σε ηλεκτρική ενέργεια. Είναι σχετικά αθόρυβες κατά τη λειτουργία τους και καθώς δεν έχουν κινούμενα μηχανικά μέρη, όπως αναφέρθηκε, δε χρειάζονται μηχανική συντήρηση, όπως απαιτείται σε άλλες μεθόδους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Το μέγεθος και το βάρος τους είναι μικρό σε σχέση με τις ανάγκες που καλύπτουν και ανάλογα με τις ιδιότητες των υλικών από τα οποία έχουν κατασκευαστεί, μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλές θερμοκρασίες. Ένα επιπλέον σημαντικό πλεονέκτημα σε σχέση με τις συμβατικές γεννήτριες παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος, είναι η μη εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα [11].

Ωστόσο, το μεγαλύτερο μειονέκτημα των θερμοηλεκτρικών γεννητριών είναι ο πολύ μικρός συντελεστής απόδοσης τους, δηλαδή ο λόγος της ενέργειας που παράγουν προς την ενέργεια που καταναλώνουν, ο οποίος σε μία τυπική γεννήτρια TEG δεν ξεπερνά το 6% με 7%. Παρ' όλα αυτά σε περιπτώσεις που υπάρχει μεγάλη ποσότητα εκλυόμενης θερμότητας, όπως συμβαίνει κατά κόρον στη βιομηχανία και στις μεταφορές, οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες αποτελούν ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για την ανάκτηση και την εκμετάλλευση της θερμότητας. Εκεί, ο χαμηλός βαθμός απόδοσης δεν αποτελεί πρόβλημα, καθώς χρησιμοποιείται ως είσοδος η θερμότητα που σε κάθε περίπτωση θα έμενε ανεκμετάλλευτη και θα διασκορπιζόταν προς το περιβάλλον. Κατά συνέπεια, η θερμότητα που παράγεται σε καθημερινή βάση από βιομηχανικές και

μεταφορικές διαδικασίες, αντί να διαχυθεί στο περιβάλλον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως είσοδος για τη λειτουργία θερμοηλεκτρικών γεννητριών [11].

Αυτό αποτελεί μία σημαντική και θετική διαδικασία με διπλό όφελος. Τόσο λόγω της δυνατότητας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έστω και με χαμηλό συντελεστή απόδοσης από μία πηγή θερμότητας η οποία απλά θα διαχεόταν στο περιβάλλον, όσο και ως προς το οικολογικό κομμάτι. Αυτό, διότι μπορεί να μειωθούν οι απαιτήσεις παραγωγής ενέργειας με τις κλασσικές μεθόδους οι οποίες επιβαρύνουν το περιβάλλον, όπως για παράδειγμα η καύση λιγνίτη η οποία απελευθερώνει προς το περιβάλλον τοξικά βαρέα μέταλλα και αέριους ρύπους. Η μείωση της χρήσης των επιβαρυντικών προς το περιβάλλον μεθόδων παραγωγής ενέργειας, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες δεν εκλύουν διοξείδιο του άνθρακα κατά τη λειτουργία τους, μπορούν να αποτελέσουν σημαντικούς παράγοντες για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής (φαινόμενο του θερμοκηπίου, άνοδος της θερμοκρασίας του πλανήτη κ.τ.λ [1]).

Αξίζει επίσης να αναφερθεί πως οι λιγνιτικές μονάδες πληρώνουν μεγάλα ποσά για να διατηρούν δικαιώματα εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, μετακυλώντας στον τελικό οικιακό ή βιομηχανικό καταναλωτή ένα επιπλέον κόστος. Ενδεικτικά στην Ελλάδα, η αγορά δικαιωμάτων εκπομπών από τις λιγνιτικές μονάδες θα στοιχίζει 360-530 εκατ. ευρώ κατά το έτος 2030. Με τη στροφή σε οικολογικές μεθόδους παραγωγής ενέργειας λοιπόν, στις οποίες ανήκουν και οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες, θα υπάρξει ακολούθως και μείωση του κόστους ενέργειας για τον τελικό καταναλωτή [12].

Για όλους τους παραπάνω λόγους, η χρήση των TEG μπορεί να αποβεί ιδιαίτερα συμφέρουσα σε περιπτώσεις μετατροπής απορριπτόμενης θερμικής ενέργειας από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και από τους κινητήρες εσωτερικής καύσης των αυτοκινήτων σε ηλεκτρική. Επίσης και σε απομακρυσμένες περιοχές εκτός δικτύου αλλά και στη διαστημική τεχνολογία.

Οι θερμοηλεκτρικοί ψύκτες (ThermoElectric Coolers-TEC) είναι αντλίες θερμότητας στερεάς κατάστασης οι οποίες λειτουργούν με βάση το φαινόμενο Peltier,



δηλαδή μεταφέρουν θερμότητα (προκαλούν διαφορά θερμοκρασίας) από μία πλευρά της διάταξης προς μία άλλη καταναλώνοντας ηλεκτρική ενέργεια. Η μεταφορά της θερμότητας εξαρτάται από τη φορά του ρεύματος μέσα στη διάταξη. Λόγω της αρχής λειτουργίας τους, οι θερμοηλεκτρικοί ψύκτες ονομάζονται και συσκευές Peltier ή αντλίες θερμότητας Peltier. Οι θερμοηλεκτρικοί ψύκτες έχουν πολύ μικρό βαθμό απόδοσης, όπως άλλωστε και οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες, ωστόσο η χρήση τους σε εφαρμογές ψύξης παρουσιάζει ορισμένα πλεονεκτήματα συγκριτικά με τις συμβατικές διατάξεις ψύξης που λειτουργούν με συμπιεστή. Τα πλεονεκτήματα αυτά, τα περισσότερα εκ των οποίων τα έχουν και οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες είναι τα εξής:

- Έχουν μικρό βάρος και όγκο, ανάλογα πάντα από τα υλικά από τα οποία έχουν κατασκευαστεί.
- Δεν έχουν κινούμενα μηχανικά μέρη, επομένως χρειάζονται ελάχιστη μηχανική συντήρηση.
- Η διάρκεια ζωής τους ξεπερνά τις 100000 ώρες αδιάλειπτης λειτουργίας.
- Με τη βοήθεια κατάλληλων διατάξεων, μπορεί να επιτευχθεί εξαιρετικά ακριβής έλεγχος της θερμοκρασίας (με ακρίβεια  $\pm 0.1$  °C).
- Τροφοδοτούνται από συνεχές ρεύμα χαμηλής τάσης, καθιστώντας έτσι εύκολη την άμεση εφαρμογή τους σε ψύξη τμημάτων αυτοκινήτου, φωτοβολταϊκών διατάξεων και λοιπών εγκαταστάσεων που λειτουργούν με συνεχές ρεύμα.
- Απλά με μια αλλαγή της πολικότητας του ρεύματος μπορούν να λειτουργήσουν ως θερμαντήρες, προσφέροντας ευελιξία στη χρήση τους.
- Δεν περιέχουν υλικά που χρειάζονται αναπλήρωση ανά τακτά χρονικά διαστήματα, όπως είναι τα συμβατικά ψυκτικά υλικά (π.χ χλωροφθοράνθρακες) [6].

Κατά συνέπεια, η θερμοηλεκτρική ψύξη είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική, και αρκετές φορές κρίνεται ως η πιο ταιριαστή λύση σε περιπτώσεις όπου απαιτείται ακριβής έλεγχος θερμοκρασίας, όπως οι εφαρμογές laser ή η ψύξη ολοκληρωμένων

κυκλωμάτων. Με το κατάλληλο κύκλωμα ελέγχου θερμοκρασίας οι TECs μπορούν να σταθεροποιήσουν τη θερμοκρασία σε επίπεδα με πιο υψηλή ακρίβεια. Εκτός αυτού, χρησιμοποιούνται συνήθως σε περιπτώσεις όπου τα δεσμευτικά κριτήρια μίας διαδικασίας περιλαμβάνουν υψηλή αξιοπιστία, μικρό μέγεθος και μικρό βάρος [5].

Η δομή μίας τυπικής θερμογεννήτριας, η οποία αποτελείται από θερμοηλεκτρικά στοιχεία, απεικονίζεται στο Σχήμα 13 .



Σχήμα 13. Τυπική δομή θερμοηλεκτρικής γεννήτριας [13]

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 13 και όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα θερμοηλεκτρικά στοιχεία αποτελούνται από δυο επιφάνειες, μία θερμή και μία ψυχρή. Αυτές οι επιφάνειες αποτελούνται συνήθως από θερμικά αγωγίμα κεραμικά υλικά. Στην εσωτερική πλευρά των επιφανειών βρίσκονται οι ενώσεις των υλικών που αποτελούν τα θερμοζεύγη. Για την κατασκευή των θερμοζευγών χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο κράματα ημιαγωγών τύπου p και τύπου n, ώστε να είναι πιο εύκολη η πρόκληση του φαινομένου Seebeck κατά την ηλεκτρική ένωση [4].

Οι θερμοηλεκτρικοί ψύκτες είναι όμοιες κατασκευαστικά διατάξεις με τις θερμοηλεκτρικές γεννήτριες και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ίδια ακριβώς λειτουργία. Η διαφορά τους είναι ότι οι ψύκτες είναι κατασκευασμένοι από διαφορετικά θερμοηλεκτρικά υλικά, σε σχέση με τις γεννήτριες, τα οποία είναι καταλληλότερα και πιο αποτελεσματικά για την θέρμανση ή ψύξη επιφανειών με την εφαρμογή του φαινομένου Peltier, παρά για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα θερμοηλεκτρικά υλικά που χρησιμοποιούνται στην εκάστοτε κατασκευή, είτε αυτή προορίζεται για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είτε για ψύξη/θέρμανση, θα πρέπει να επιλέγονται πρωτίστως σύμφωνα με τις αναμενόμενες θερμοκρασίες λειτουργίας. Σε ό,τι αφορά την κατασκευή μίας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας, πλέον τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά είναι η παραγόμενη τάση  $E_{\alpha\beta}$  που αναφέρθηκε παραπάνω και η μέγιστη παραγόμενη ισχύς. Η παραγόμενη ισχύς των θερμοηλεκτρικών στοιχείων περιορίζεται σε μεγάλο βαθμό λόγω της ισοδύναμης αντίστασης  $R$  του θερμοζεύγους, καθώς επίσης και από την απόδοση μετατροπής ισχύος που ορίζεται ως το πηλίκο της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος προς την συνολική ροή θερμότητας. Η ισοδύναμη αντίσταση σειράς μιας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας περιορίζει το ρεύμα με το οποίο μπορεί να τροφοδοτηθεί ένα φορτίο. Η απόδοση μετατροπής ισχύος ή ο συντελεστής απόδοσης είναι το ποσοστό της καταναλισκόμενης θερμότητας που μπορεί να μετατραπεί σε ωφέλιμη ηλεκτρική ενέργεια. Έτσι, οι βασικές παράμετροι για την επιλογή των χρησιμοποιούμενων θερμοηλεκτρικών υλικών ενός θερμοζεύγους είναι ο επιθυμητός υψηλός συντελεστής Seebeck  $S$ , η επιθυμητή υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα και η επιθυμητή χαμηλή θερμική αγωγιμότητα [14].

Με βάση τα παραπάνω, για την κατασκευή αποδοτικών TEC και TEG, απαιτείται από τα θερμοηλεκτρικά υλικά να έχουν οπωσδήποτε μεγάλη τιμή του συντελεστή Seebeck. Δε φτάνει όμως μόνο αυτό, καθώς χρειάζεται και μεγάλη ηλεκτρική αγωγιμότητα ώστε να μην υπάρχει υψηλή ηλεκτρική αντίσταση και κατ' επέκταση απώλειες με τη μορφή θερμότητας. Επιπλέον, ένα καλό θερμοηλεκτρικό υλικό πρέπει να έχει μικρή θερμική αγωγιμότητα, ώστε να μπορεί να διατηρηθεί εύκολα η θερμή και ψυχρή περιοχή στα δύο άκρα του. Τα τρία αυτά χαρακτηριστικά ενσωματώνονται σε

έναν συντελεστή ποιότητας  $Z$ , ο οποίος βοηθάει στην κρίση της καταλληλότητας ενός θερμοηλεκτρικού υλικού και δίνεται από τον τύπο:

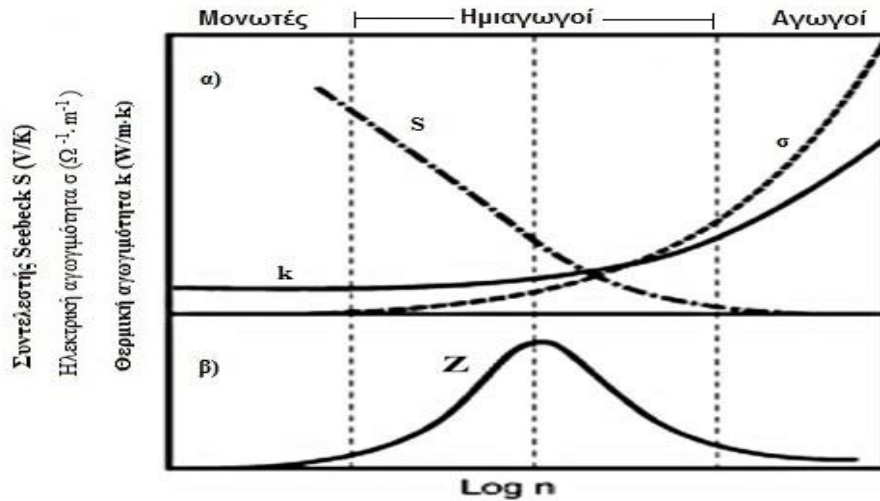
$$Z = \frac{\sigma \cdot S^2}{k} \quad (1.7)$$

όπου  $S$  είναι ο συντελεστής Seebeck,  $\sigma$  η ηλεκτρική αγωγιμότητα και  $k$  η θερμική αγωγιμότητα. Επειδή ο συντελεστής  $Z$  είναι αντιστρόφως ανάλογος της θερμοκρασίας, (μονάδα μέτρησης  $\frac{1}{T}$ ), είναι προτιμότερο για την επιλογή των θερμοηλεκτρικών υλικών να χρησιμοποιείται ο αδιάστατος συντελεστής  $ZT$ , δηλαδή ο  $Z$  πολλαπλασιασμένος με τη θερμοκρασία. ( Στη συνέχεια θα τον αναφέρουμε ως  $ZT$ ) [4].

Από τον τύπο του  $ZT$ , είναι προφανές ότι ένα θερμοηλεκτρικό υλικό αναζητά κανείς να έχει μεγάλη τιμή για το συντελεστή Seebeck και την ηλεκτρική αγωγιμότητα για μικρή τιμή συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας. Για κατασκευή τόσο μίας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας όσο και ενός θερμοηλεκτρικού ψύκτη, τα επιθυμητά χαρακτηριστικά δεν είναι δυνατόν να εντοπιστούν σε αμιγώς μονωτικά ή αγώγιμα υλικά. Αυτό συμβαίνει διότι τα μονωτικά υλικά υπάρχει πιθανότητα να έχουν αρκετά υψηλό συντελεστή Seebeck. Αντιθέτως, η ηλεκτρική αγωγιμότητα τους είναι υπερβολικά μικρή με αποτέλεσμα ο συντελεστής  $ZT$  να είναι επίσης πολύ μικρός. Οι αγωγοί από την άλλη πλευρά, αν και έχουν αρκετά μεγάλη ηλεκτρική αγωγιμότητα, παρουσιάζουν μικρό συντελεστή Seebeck αλλά και μεγάλη θερμική αγωγιμότητα, με αποτέλεσμα ο συντελεστής  $ZT$  να προκύπτει επίσης πολύ μικρός [2].

Η βελτιστοποίηση του  $ZT$  είναι δύσκολη υπόθεση διότι η ηλεκτρική αγωγιμότητα και η θερμική αγωγιμότητα εξαρτώνται από συγκεκριμένες ηλεκτρονικές δομές του κάθε υλικού. Η λύση στους παραπάνω περιορισμούς δίνεται από τους ημιαγωγούς, καθώς και από διάφορα κράματα που προκύπτουν έπειτα από διάφορες διαδικασίες πρόσμιξης, όπως η είναι η διαδικασία του “ντοπαρίσματος”. Με τις διαδικασίες αυτές, υλικά που προσφέρονται για χρήση σε θερμοηλεκτρικές εφαρμογές γίνονται προσμίξεις τύπου  $n$  ή  $p$  και προκύπτουν αντίστοιχα κράματα, που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία θερμοζευγών. Οι τρεις παράμετροι που εμπεριέχονται στον συντελεστή ποιότητας  $ZT$

εξαρτώνται από τη συγκέντρωση των φορέων. Με τις προσμίξεις εξασφαλίζονται ημιαγωγοί υψηλής πρόσμιξης (heavily doped) με συγκέντρωση φορέων  $10^{19}$ - $10^{20}$   $\text{cm}^{-3}$  και με τιμές  $\sigma$  και  $S$  ενδιάμεσα σε αυτές των αγωγών και των μονωτών. Στην περιοχή αυτή εντοπίζονται και οι μέγιστες τιμές του δείκτη, όπως φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα [1].



Σχήμα 14. α) Θερμοηλεκτρικά χαρακτηριστικά των μετάλλων, ημιαγωγών και μονωτών συναρτήσει της συγκέντρωσης φορέων  $n$ , β) Καμπύλη συντελεστή ποιότητας  $Z$  στο ίδιο διάγραμμα [6].

Όπως φαίνεται από το παραπάνω διάγραμμα, είναι αδύνατον να αλλαχθεί μία εκ των τριών παραμέτρων, χωρίς να επηρεαστούν οι υπόλοιπες. Ωστόσο υπάρχει μία περιοχή τιμών των παραμέτρων (περιοχή ημιαγωγών) για τις οποίες ο συντελεστής ποιότητας  $Z$  λαμβάνει τη βέλτιστη τιμή.

Η κατεύθυνση του φαινομένου Seebeck και του φαινομένου Peltier εξαρτάται από το είδος των φορέων, αν δηλαδή επικρατούν τα ηλεκτρόνια ή οι οπές. Όταν σε ένα υλικό υπάρχουν και οι δύο τύποι φορέων, ο συντελεστής Seebeck δίνεται από τον τύπο:

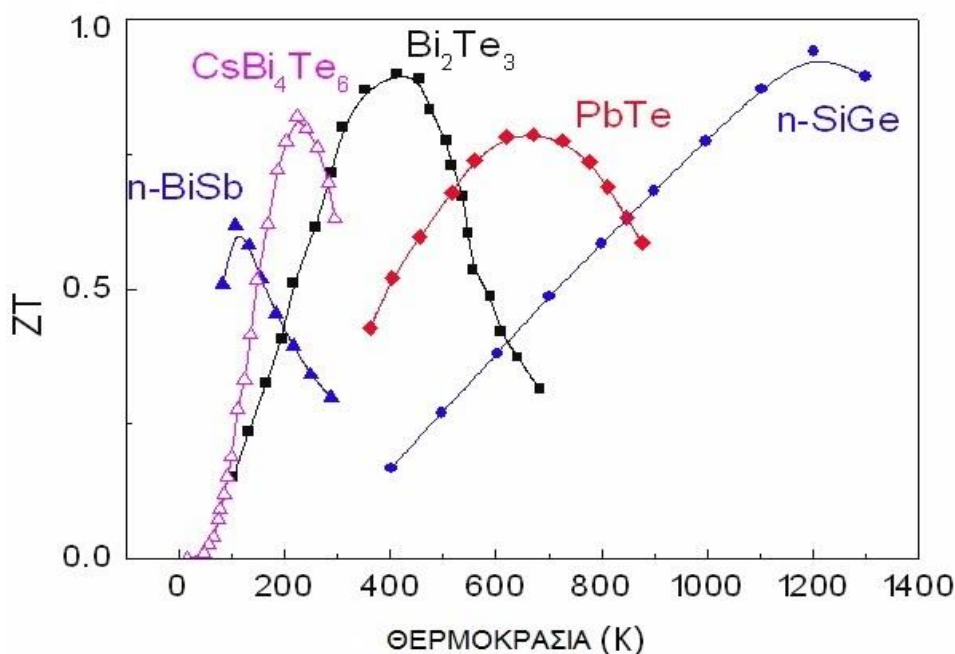
$$S = \frac{a_n \cdot \sigma_n + a_p \cdot \sigma_p}{\sigma_n + \sigma_p} \quad (1.8)$$

Όπου  $\alpha_n$  και  $\alpha_p$  είναι οι συνεισφορές (πλήθος) των ηλεκτρονίων και οπών στο υλικό αντίστοιχα και  $\sigma_n$  και  $\sigma_p$  οι ηλεκτρικές τους αγωγιμότητες. Με δεδομένο το ότι  $\alpha_n$  και  $\alpha_p$  έχουν αντίθετα πρόσημα, είναι προφανές ότι η τιμή του συντελεστή Seebeck μειώνεται αρκετά όταν το πλήθος των δύο τύπων φορέων μέσα στο υλικό έχει ίδια τάξη μεγέθους. Οι καθαροί ημιαγωγοί, πριν δεχθούν κάποια διαδικασία πρόσμιξης περιέχουν τους δύο τύπους φορέων σε συγκρίσιμες ποσότητες, γι αυτό το λόγο δε χρησιμοποιούνται απευθείας ως θερμοηλεκτρικά υλικά. Ωστόσο, έπειτα από κατάλληλες προσμίξεις, όπου επικρατεί ένας τύπος φορέων σε πολλαπλάσια ποσότητα από τον άλλο, προκύπτει ημιαγωγός που είναι η κατάλληλη επιλογή για θερμοηλεκτρικές εφαρμογές [15].

Λειτουργικά, οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες έχουν λίγα κοινά με τους θερμοηλεκτρικούς ψύκτες. Οι ψύκτες παρουσιάζουν μέγιστο συντελεστή απόδοσης για σχετικά μικρές διαφορές θερμοκρασίας, σε αντίθεση με τις γεννήτριες οι οποίες για να επιτύχουν μέγιστη απόδοση χρειάζονται μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές. Επομένως για καθεμιά από τις δυο αυτές λειτουργίες χρησιμοποιούνται διαφορετικές τεχνολογίες συγκόλλησης και διαφορετικά είδη θερμοηλεκτρικών υλικών, τα οποία έχουν υποστεί βελτιστοποίηση, ώστε να αντέχουν σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας. Τα πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενα θερμοηλεκτρικά για την κατασκευή θερμοηλεκτρικών γεννητριών είναι κράματα χημικής ενώσεως Μολύβδου και Τελλουρίου (PbTe) τα οποία μπορούν να αντέξουν σε θερμοκρασίες έως 700 °C καθώς και Πυριτίου και Γερμανίου ( $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ) με δυνατότητα λειτουργίας έως 1000 °C. Στους θερμοηλεκτρικούς ψύκτες χρησιμοποιούνται κατά βάση κράματα p-τύπου Βισμούθιου-Τελλουρίου ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) και Αντιμονίου-Τελλουρίου ( $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ ) και κράματα n-τύπου Βισμούθιου-Τελλουρίου ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) και Βισμούθιου- Σεληνίου ( $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ) τα οποία μπορούν να λειτουργήσουν μέχρι και τους 150 °C. Τα υλικά αυτά γενικότερα, παρουσιάζουν την καλύτερη θερμοηλεκτρική απόδοση μέσα σε ένα εύρος θερμοκρασιών από -90 έως 120 °C, είτε πρόκειται για λειτουργία ψύξης, είτε για παραγωγή θερμότητας, είτε για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Από τα παραπάνω, γίνεται κατανοητό πως ένας θερμοηλεκτρικός ψύκτης, σε μικρές θερμοκρασιακές διαφορές, όπως αυτές που συναντώνται στο περιβάλλον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με μεγαλύτερη απόδοση σε

σχέση με μια θερμοηλεκτρική γεννήτρια, η οποία θα απαιτούσε μεγαλύτερες διαφορές θερμοκρασίας για να πιάσει αντίστοιχη απόδοση [4].

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η καταλληλότητα ενός θερμοηλεκτρικού υλικού αξιολογείται από τον συντελεστή ποιότητας ZT. Ο συντελεστής αυτός για τα περισσότερα από τα προαναφερθέντα θερμοηλεκτρικά υλικά, έχει τιμές γύρω στο 0.7 σε θερμοκρασία δωματίου. Στο Σχήμα 15 που ακολουθεί απεικονίζεται η τιμή του ZT σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία, για μερικά από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα θερμοηλεκτρικά υλικά.



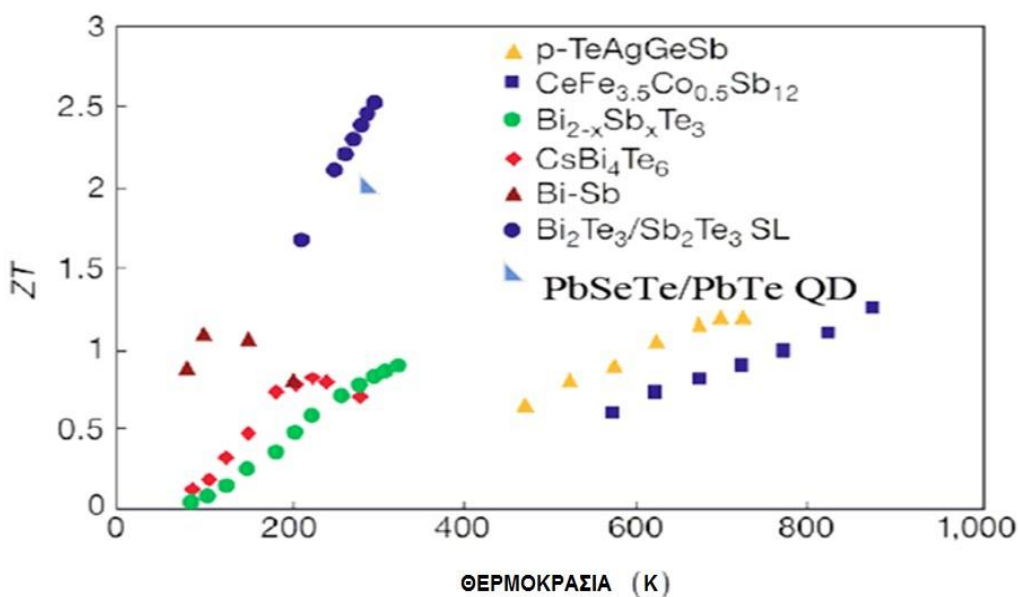
Σχήμα 15. Αδιάστατος συντελεστής ZT θερμοηλεκτρικών υλικών στην περιοχή θερμοκρασιών 0-1300K [6]

Με την ανάπτυξη της Νανοτεχνολογίας τα τελευταία χρόνια, δίνεται η δυνατότητα τροποποίησης των υπάρχοντων θερμοηλεκτρικών υλικών και μέσω αυτών να κατασκευάζονται καινούρια. Η τελευταία τάση στην έρευνα των θερμοηλεκτρικών υλικών είναι η ενασχόληση με μικροσκοπικές δομές κβαντικών διαστάσεων. Η θερμική

αγωγιμότητα στις μικρές διαστάσεις διαφέρει από την αντίστοιχη του στερεού λόγω της μειωμένης διάστασης και της ύπαρξης διεπιφανειών.

Σε θερμοκρασία δωματίου, που είναι και κατά βάση ο στόχος στην έρευνα των θερμοηλεκτρικών υλικών, ο συντελεστής ZT ενώσεων Bi-Te-Sb, παρουσιάζει τιμή ZT κοντά στο 1, ενώ για να επιτευχθεί η τιμή ZT πάνω από 2-2.5, θα πρέπει να κατασκευαστούν νέα θερμοηλεκτρικά υλικά. Τέτοιου είδους καινούρια υλικά που κατασκευάστηκαν εργαστηριακά είναι και τα κβαντικά πηγάδια (Quantum Wells). Αυτά αποτελούνται από διαδοχικά στρώματα Πυριτίου και κράματος Γερμανίου-Πυριτίου, πάχους 10 nm (thin film). Με τα υλικά αυτά βελτιώνονται όλες οι θερμοηλεκτρικές ιδιότητες, με αποτέλεσμα πειραματικές μετρήσεις να έχουν δώσει τιμές ZT μεγαλύτερες από 3 σε θερμοκρασία δωματίου [4].

Στο ακόλουθο διάγραμμα απεικονίζεται ο αδιάστατος συντελεστής ZT σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία, για τα θερμοηλεκτρικά υλικά που εμφανίζουν το μεγαλύτερο ερευνητικό ενδιαφέρον.



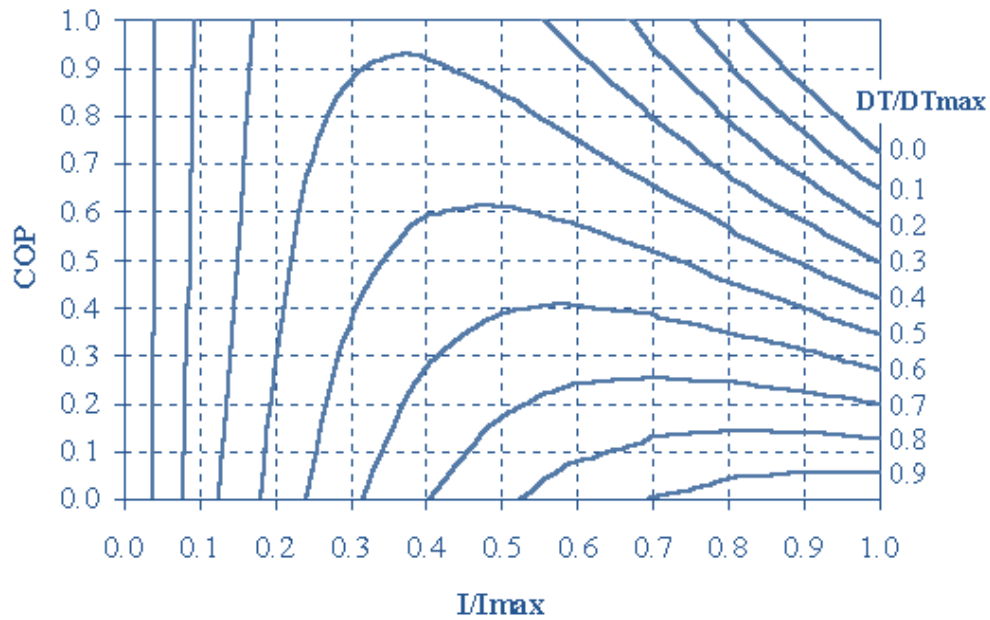
Σχήμα 16. Αδιάστατος συντελεστής ZT θερμοηλεκτρικών υλικών που απασχολούν ερευνητικά, στην περιοχή θερμοκρασιών 0-1000K [16]



## 1.8. Υπολογισμός Βαθμού απόδοσης (COP)

Από τεχνική άποψη, ο ορισμός της αποδοτικότητας σχετίζεται με την αναλογία της ποσότητας του έργου ενός μηχανήματος ως προς την ισχύ που καταναλώνει. Στις εφαρμογές άντλησης θερμότητας, αυτός ο όρος χρησιμοποιείται σπάνια επειδή αφαιρείται περισσότερη ποσότητα θερμότητας από αυτήν της ισχύος που χρειάζεται για να μεταφερθεί αυτή η θερμότητα. Για ένα θερμοηλεκτρικό στοιχείο (TEC), χρησιμοποιείται ο όρος του συντελεστή απόδοσης (Coefficient of Performance COP) και όχι της αποδοτικότητας. Ο συντελεστής απόδοσης είναι η ποσότητα της αντλούμενης θερμότητας διαιρούμενη με το ποσό της παρεχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

Ο COP εξαρτάται από την μεταφερόμενη θερμότητα, την ισχύ που παρέχεται και την απαιτούμενη διαφορά θερμοκρασίας. Συνήθως, ένας ικανοποιητικός COP είναι μεταξύ 0,3 και 0,7 για θερμοηλεκτρικές εφαρμογές με χρήση ενός θερμοηλεκτρικού στοιχείου. Εντούτοις, μπορούν να επιτευχθούν COP μεγαλύτερα του 1,0, ειδικά όταν το θερμοηλεκτρικό στοιχείο αντλεί θερμότητα (δηλαδή αφαιρεί τη θερμότητα από ένα αντικείμενο που είναι θερμότερο από το περιβάλλον). Το παρακάτω Σχήμα 17 δείχνει ένα κανονικοποιημένο γράφημα COP ως προς τον λόγο  $I / I_{max}$  (ο λόγος του ρεύματος εισόδου με της μέγιστης τιμής του ρεύματος του θερμοηλεκτρικού στοιχείου). Κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε σταθερή τιμή  $\Delta T / \Delta T_{max}$  (αναλογία της απαιτούμενης διαφοράς θερμοκρασίας προς την μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας του TEC) [17].



Σχήμα 17. Καμπύλες απόδοση Συντελεστή απόδοσης (COP) [17].

Για τον υπολογισμό του Συντελεστή απόδοσης αρκεί να υπολογιστεί το ποσό θερμότητας που απορροφάται από την ψυχρή πλευρά της διάταξης. Αυτό δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$Q_L = S \cdot I \cdot T_C - I^2 \cdot R - k \cdot (T_h - T_C) \quad (1.9)$$

όπου  $S$  συντελεστής Seebeck ενώ  $k$  η θερμική αγωγιμότητα.

Ο υπολογισμός της καταναλισκόμενης ισχύος δίνεται από τον γνωστό τύπο:

$$P_{el} = V \cdot I \quad (1.10)$$

Τέλος ο συντελεστής απόδοσης (COP) μπορεί να υπολογιστεί από τον παρακάτω τύπο:

$$COP = \frac{Q_L}{W} \quad (1.11)$$

[18]

## 1.9. Εφαρμογές Θερμοηλεκτρικών στοιχείων.

### 1.1.3 Ιατρική και Βιομηχανία Τροφίμων

Ως γνωστόν, στον τομέα της ιατρικής η διατήρηση εμβολίων, του ορού αίματος και άλλων βιολογικών προϊόντων εντός συγκεκριμένου εύρους θερμοκρασίας για σκοπούς αποθήκευσης και μεταφοράς είναι μείζονος σημασίας. Έχουν ήδη αναπτυχθεί φορητές διατάξεις θερμοηλεκτρικής ιατρικής ψύξης, ελεγχόμενα από ένα μικροεπεξεργαστή, με σκοπό τη διατήρηση του ανθρώπινου αίματος κατά τη μεταφορά. Τέτοια kit λειτουργούν με τάση 12V DC (ώστε να παρέχεται και από οχήματα) και ρεύμα 4A. Η χρήση της θερμοηλεκτρικής τεχνολογίας στην ιατρική προσφέρει πιο ευέλικτους τρόπους μεταφοράς ιατρικών προϊόντων κυρίως σε απομακρυσμένες περιοχές.

Παρόμοιες ψυκτικές απαιτήσεις με την ιατρική, μπορούν επίσης να καλυφθούν και στη βιομηχανία τροφίμων, η οποία χρειάζεται έλεγχο θερμοκρασίας κατά τη διαδικασία μεταφοράς και αποθήκευσης τροφίμων [19].

### 1.1.4 Τομέας Ηλεκτρονικών διατάξεων

Στον τομέα της ηλεκτρονικής, είναι πολλές οι συσκευές που χρησιμοποιούνται στην καθημερινότητα, όπως ενισχυτές ισχύος, τροφοδοτικά, μικροεπεξεργαστές οι οποίες έχουν υψηλή ισχύ και συνεπώς λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες, κοντά στα όρια αξιοπιστίας τους. Καθώς το γεγονός αυτό θα μπορούσε να έχει σοβαρό αντίκτυπο στην απόδοση και τη διάρκεια ζωής τους, κρίνεται απαραίτητη η ψύξη των συσκευών αυτών κατά τη λειτουργία τους. Οι συμβατικές διατάξεις ψύξης που λειτουργούν με συμπιεστή δεν προσφέρονται τόσο για ηλεκτρονικές εφαρμογές, λόγω του γενικά μεγάλου μεγέθους τους. Αντιθέτως, οι θερμοηλεκτρικοί ψύκτες μπορούν να δώσουν λύση σε αυτό το πρόβλημα με αποτελεσματική τοπική ψύξη. Δε θα πρέπει επίσης να παραγκωνίζεται και το πλεονέκτημα της αθόρυβης λειτουργίας τους, το οποίο μπορεί να

είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε ηλεκτρονικές διατάξεις που βρίσκονται σε χώρους εργασίας.

Στη χρήση της θερμοηλεκτρικής ψύξης σε ηλεκτρονικές εφαρμογές, μια ηλεκτρονική συσκευή που πρόκειται να ψυχθεί συνήθως συναρμολογείται απευθείας στην ψυχρή πλευρά μίας ή περισσότερων θερμοηλεκτρικών διατάξεων, ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη θερμική μεταφορά μεταξύ της ηλεκτρονικής συσκευής και της ψυχρής πλευράς. Έτσι, μία μεταβλητή τάση συνεχούς ρεύματος συνδεδεμένη με τον θερμοηλεκτρικό ψύκτη επιτρέπει τον έλεγχο και τη μείωση της θερμοκρασίας της συσκευής. Η θερμή πλευρά είναι συνήθως συνδεδεμένη με ένα ψύκτη με ανεμιστήρα ή με νερό [20].

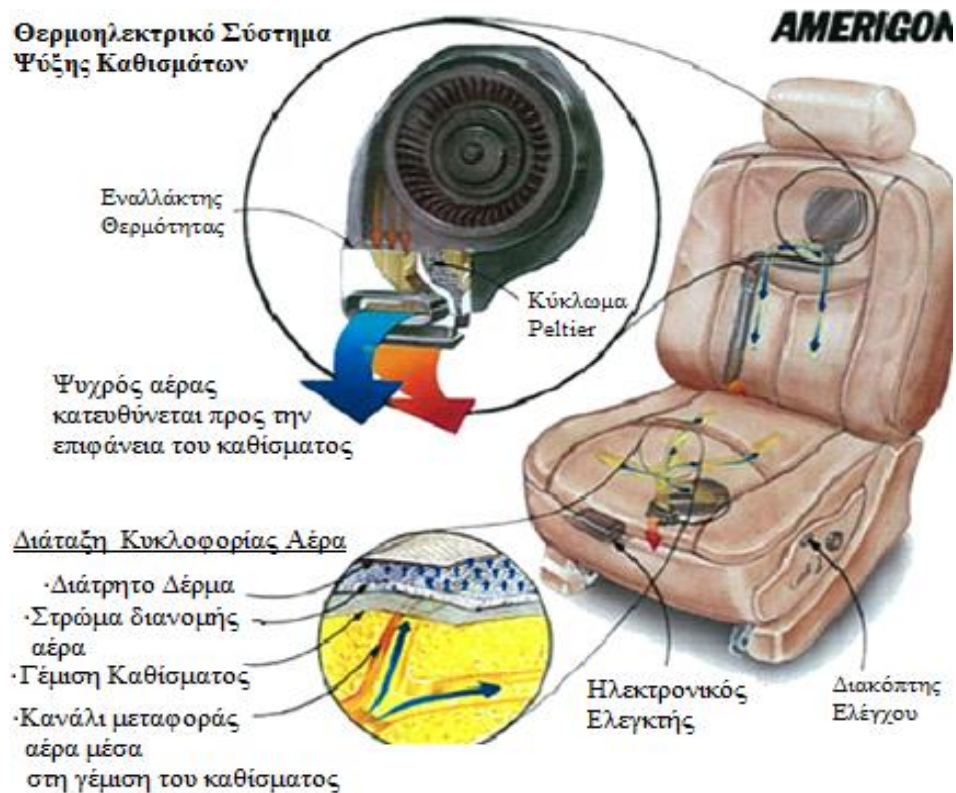
#### 1.1.5 Ψύξη και Θέρμανση Οχημάτων

Το συμβατικό σύστημα ψύξης και θέρμανσης που χρησιμοποιείται στην αυτοκινητοβιομηχανία και είναι καθιερωμένο ως σύστημα HVAC (Heat, Ventilation, Air-Conditioning) περιλαμβάνει μηχανικό ψυγείο και απορροφητικά ψυγεία. Χαρακτηρίζεται από υψηλό βαθμό απόδοσης, αρκετά μεγαλύτερο από τον βαθμό απόδοσης των θερμοηλεκτρικών διατάξεων και αυξημένη αξιοπιστία. Ωστόσο έχει σύνθετη δομή, αποτελούμενη από κινούμενα μέρη και θορυβώδη λειτουργία. Επίσης το σύστημα αυτό απαιτεί τη χρήση ψυκτικού υγρού και καταλαμβάνει μεγάλο χώρο μέσα στα οχήματα.

Τα συστήματα TEC, παρά τον ιδιαίτερα χαμηλό βαθμό απόδοσης, παρουσιάζουν ορισμένα σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των μηχανικών ψυγείων. Τα πλεονεκτήματα αυτά είναι πως λειτουργούν αθόρυβα, χωρίς κινούμενα μέρη, χωρίς τις απαιτήσεις για συντήρηση μηχανικών μερών και χωρίς τον κίνδυνο διαρροής υγρών και κατ' επέκταση χωρίς το σημαντικό κόστος αναπλήρωσης τους. Το πλεονεκτήματα αυτά προσδίδουν στα συστήματα TEC μακροχρόνια διάρκεια ζωής και συνδυασμό με την ευελιξία που προσφέρουν, καθώς μπορούν να λειτουργήσουν με αναλογικό έλεγχο και όχι με λογική

ON-OFF καθιστούν τα TEC μία σοβαρή υποψήφια λύση για την αντικατάσταση του συστήματος HVAC [21].

Αρκετοί μεγάλοι κατασκευαστές (FORD, Hyundai, Jaguar, Nissan, Toyota) χρησιμοποιούν ήδη διάταξη TEC για να ψύξουν ή να θερμάνουν τα καθίσματα των οχημάτων τους. Το σύγχρονο σύστημα κλιματισμού καθισμάτων το οποίο το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως και κατασκευάζεται από την Amerigon για λογαριασμό των κατασκευαστών οχημάτων παρουσιάζεται στο Σχήμα 18 που ακολουθεί.



Σχήμα 18. Θερμοηλεκτρικό σύστημα κλιματισμού οχημάτων τοποθετημένο στα καθίσματα [20].

Τέτοιες μονάδες κλιματισμού είναι σχεδιασμένες για να ψύξουν ή να θερμάνουν τον επιβάτη και όχι ολόκληρη την καμπίνα και μπορούν εκτός από τα καθίσματα, να τοποθετηθούν και στο ταμπλό ή στο πάτωμα. Η εναλλαγή της λειτουργίας από ψύξη σε

θέρμανση, μπορεί να επιτευχθεί με μία απλή αλλαγή πολικότητας του συνεχούς ρεύματος, όπως έχει περιγραφεί στην ανάλυση του φαινομένου Peltier [22].

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, με τη βοήθεια εργαστηριακών ερευνών, με κατάλληλες προσμίξεις ημιαγωγών και τη μελέτη νέων υλικών, έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος σε ό,τι αφορά την απόδοση και το κόστος των θερμοηλεκτρικών υλικών και συσκευών που χρησιμοποιούνται για ψύξη, θέρμανση και παραγωγή ενέργειας. Η πρόοδος αυτή, σε συνδυασμό με τη χρήση αποτελεσματικών συστημάτων θερμικής διαχείρισης αποτελεί το κλειδί για την καθιέρωση της χρήσης θερμοηλεκτρικών διατάξεων στην αυτοκινητοβιομηχανία. Αξίζει να αναφερθεί πως η τεχνολογία TEC, η οποία χρησιμοποιείται εδώ και δεκαετίες σε στρατιωτικές και διαστημικές εφαρμογές, έχει καταστεί οικονομικά αποδοτική για μαζική παραγωγή. Επομένως, έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στο μέλλον η χρήση της τεχνολογίας αυτής σε μία βιομηχανία όπως αυτής των αυτοκινήτων, με πωλήσεις της τάξης των 50 εκατομμυρίων μονάδων ετησίως [21].

#### 1.1.6 Κλιματισμός κτιριακών εγκαταστάσεων

Η ενέργεια που καταναλώνεται για την ψύξη των πάσης φύσεως κτιριακών εγκαταστάσεων (οικίες, επαγγελματικοί και βιομηχανικοί χώροι) στις ανεπτυγμένες χώρες, αποτελεί το 6,4% της συνολικής που καταναλώνουν οι χώρες αυτές συνολικά. Η αγορά ψυκτικών συστημάτων διπλασιάστηκε στη Γαλλία την περίοδο 1993-2002, ενώ στο Ηνωμένο Βασίλειο τετραπλασιάστηκε την ίδια περίοδο. Στην Ευρώπη συνολικά υπολογίζεται πως η ενέργεια που καταναλώνεται για σκοπούς κτιριακής ψύξης το 2020 θα είναι τετραπλάσια σε σχέση με το 1995, έχοντας παρουσιάσει αύξηση της τάξης των 45TWh.

Με την υλοποίηση ενός ολοκληρωμένου συστήματος θερμοηλεκτρικής ψύξης τροφοδοτούμενου από ηλιακή ενέργεια, με εφαρμογή κυρίως στην κεντρική και Νότια Ευρώπη, θα μπορούσε να μειωθεί έως 20-30 % το ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας που

απαιτείται για ψύξη κτιριακών εγκαταστάσεων με τις συμβατικές μεθόδους. Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί πως βάσει υπολογισμών που έχουν γίνει, για να παραχθεί ενέργεια 1 MWh με τη συμβατική μέθοδο της καύσης λιγνίτη, εκλύονται στο περιβάλλον περίπου 450 kg κιλά διοξειδίου του άνθρακα, κατά μέσο όρο στις ευρωπαϊκές χώρες. Η μείωση επομένως της ηλεκτρικής ενέργειας που δαπανάται για τη συμβατική χρήση ψυκτικών εφαρμογών με συμπίεση και η στροφή προς θερμοηλεκτρικές διατάξεις που θα τροφοδοτούνται από φωτοβολταϊκά συστήματα, είναι δυνατόν να μειώσει τις απαιτήσεις παραγωγής ενέργειας με την καύση λιγνίτη. Εάν επιτευχθεί στην Ευρώπη μία μείωση της απαίτησης αυτής της τάξης του 20-30% όπως αναφέραμε προηγουμένως, αυτό συνεπάγεται τη μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα κατά περίπου 4 εκατομμύρια τόνους ετησίως. Αναλογιζόμενοι πως ο πλανήτης είναι αντιμέτωπος με μία σοβαρή κλιματική αλλαγή και αύξηση της θερμοκρασίας, καθώς και τις επιπτώσεις της ύπαρξης μεγάλης συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, η στροφή προς την χρήση θερμοηλεκτρικών στοιχείων για ψυκτικούς και φυσικά και άλλους σκοπούς, είναι ένα πλάνο το οποίο θα πρέπει να εξεταστεί σοβαρά [23].

Μελέτες που έχουν γίνει πάνω στο θέμα της κλιματικής αλλαγής τα τελευταία χρόνια, εκτιμούν πως η μέση θερμοκρασία στις ευρωπαϊκές χώρες αυξήθηκε με ρυθμό 0.3-0.7 °C ανά δεκαετία και θα εξακολουθήσει να αυξάνεται τουλάχιστον μέχρι τα μέσα του 21<sup>ου</sup> αιώνα. Το πρόβλημα είναι ακόμα εντονότερο στις μεγάλες πόλεις, λόγω της αυξημένης κίνησης και της βιομηχανικής δραστηριότητας, με αποτέλεσμα μεγάλα αστικά κέντρα να παρουσιάζουν θερμοκρασίες μεγαλύτερες κατά 3 έως 5 °C σε σχέση με την επαρχία. Η αύξηση αυτή της θερμοκρασίας μοιραία θα αυξήσει και τις απαιτήσεις για ψύξη των κτιρίων, προκαλώντας έτσι έναν φαύλο κύκλο.

Η υλοποίηση της τεχνολογίας TEC, σε συνδυασμό με τροφοδοσία ρεύματος απευθείας από ηλιακή ενέργεια για ψύξη κτιρίων, περιλαμβάνει την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάνελ στην πρόσοψη των κτιρίων κι έπειτα με τη βοήθεια του φαινομένου Peltier θα μπορούν να ψύχονται οι εσωτερικές επιφάνειες τους και προαιρετικά να ψύχεται και ο αέρας που παρέχεται από τον εξαερισμό. Ο συνδυασμός

της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας και της τεχνολογίας TEC με σκοπό την ψύξη εσωτερικών χώρων παρουσιάζει τα εξής πλεονεκτήματα σε σχέση με τις κλασικές μεθόδους ψύξης που βασίζονται στη λειτουργία συμπιεστή:

- Οι θερμοηλεκτρικές διατάξεις μπορούν να συνδεθούν απευθείας στην έξοδο των φωτοβολταϊκών συστημάτων, χωρίς τη διαμεσολάβηση inverter, καθώς λειτουργούν με συνεχές ρεύμα
- Υψηλή αξιοπιστία, μεγάλη διάρκεια ζωής και μηδαμινό κόστος συντήρησης, καθώς δεν υπάρχουν κινούμενα μέρη (εκτός από την προαιρετική χρήση εξωτερικού συστήματος ανεμιστήρων) και δεν απαιτείται συντήρηση ή αναπλήρωση ψυκτικού υγρού.
- Σημαντική μείωση του θορύβου κατά τη λειτουργία ψύξης (ή θέρμανσης). Εφόσον δεν υπάρχει συμπιεστής και ανεμιστήρας στο εσωτερικό του συστήματος TEC, ο θόρυβος μπορεί να μηδενιστεί.
- Η θερμοκρασία μπορεί να ρυθμιστεί εύκολα και με μεγάλη ακρίβεια και κυρίως τοπικά, ρυθμίζοντας απλώς την τάση εισόδου στα αντίστοιχα κυκλώματα Peltier, ενώ με τη συμβατική τεχνολογία κλιματισμού η θερμοκρασία ρυθμίζεται για ολόκληρο τον χώρο. Αυτό το πλεονέκτημα είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε μεγάλους χώρους εργασίας.
- Προσφέρει μεγαλύτερη ευεξία, καθώς όπως είπαμε η ψύξη γίνεται σε εσωτερικές επιφάνειες, δίνοντας την αίσθηση ενός δροσερού χώρου, χωρίς να υπάρχει ροή ψυχρού αέρα, ο οποίος σε αρκετούς ανθρώπους προκαλεί δυσφορία.

Γενικά η υλοποίηση ενός συστήματος ψύξης TEC σε μεγάλους επαγγελματικούς χώρους, απαιτεί λιγότερο χώρο και βάρος σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα κτιριακή ψύξης και ο σχεδιασμός είναι αρκετά ευκολότερος, καθώς δεν απαιτούνται εξωτερικές μονάδες-ανεμιστήρες, κανάλια ροής αέρα με ψευδοροφές, ηλεκτρολογικοί Πίνακες κ.τ.λ [24].



Από την παραπάνω ανάλυση, γίνεται κατανοητό πως η τεχνολογία TEC έχει προοπτική να προσφέρει μεγάλη ευελιξία και εξοικονόμηση ενέργειας στην ψύξη των εσωτερικών χώρων κτιριακών εγκαταστάσεων, ιδίως εάν συνδυασθεί με την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας. Όσο μεγαλύτεροι είναι οι χώροι στους οποίους μπορεί να γίνει χρήση της τεχνολογία αυτής, τόσο πιο ευδιάκριτη θα είναι και η ευελιξία που παρέχει.

Ωστόσο, αν και η τεχνολογία θερμοηλεκτρικής ψύξης έχει χρησιμοποιηθεί σε ηλεκτρονικές εφαρμογές και σε άλλες εφαρμογές ψύξης μικρής κλίμακας, δεν έχει ακόμα υλοποιηθεί ευρέως σε κτιριακές εγκαταστάσεις, καθώς βρίσκεται ακόμα σε ερευνητικό στάδιο. Ο μεγαλύτερος περιορισμός για την εφαρμογή του σε μεγάλους εσωτερικούς χώρους είναι αφενός ο συντελεστής απόδοσης τους, ο οποίος όπως έχει αναφερθεί μέχρι και σήμερα είναι χαμηλός και αφετέρου το κόστος υλοποίησης ενός τέτοιου συστήματος για ψύξη μεγάλης κλίμακας είναι υψηλό. Επίσης η λειτουργία της θερμοηλεκτρικών συστημάτων ψύξης σε συνδυασμό με φωτοβολταϊκά συστήματα βρίσκεται σε στάδιο μελέτης και δεν έχει διερευνηθεί επαρκώς, ώστε να μπορεί να προταθεί για ευρεία χρήση. Επίσης όπως έχει αναφερθεί, τα συστήματα TEC πρέπει να βρίσκονται σε περιβάλλον μικρών θερμοκρασιακών διαφορών, ώστε να έχουν τη μέγιστη απόδοση που μπορούν να επιτύχουν, γεγονός που προϋποθέτει πως η χρήση τους πρέπει να συνδυασθεί με κατάλληλα σχεδιασμένα συστήματα απαγωγής της θερμότητας, ώστε οι 2 πλευρές των μονάδων Peltier να μην έχουν μεγάλη διαφορά θερμοκρασίας [23].

Οι παραπάνω περιορισμοί δεν είναι απαγορευτικοί για πιθανή μελλοντική ευρεία χρήση σε εφαρμογή των TEC για ψύξη σε μεγάλη κλίμακα. Όπως έχει αναλυθεί, οι περισσότεροι ημιαγωγοί οι οποίοι προκύπτουν από κατάλληλες προσμίξεις και χρησιμοποιούνται στην κατασκευή θερμοηλεκτρικών διατάξεων παρουσιάζουν έναν συντελεστή ποιότητας γύρω στο 0.7, ενώ έχουν κατασκευαστεί και ημιαγωγοί ενώσεων Bi-Te-Sb οι οποίοι σε θερμοκρασία δωματίου έχουν συντελεστή ποιότητας κοντά στο 1. Πέραν τούτου έχουν κατασκευαστεί και νέα θερμοηλεκτρικά υλικά κβαντικών διαστάσεων, τα οποία βρίσκονται ακόμα σε στάδιο εργαστηριακών μελετών και σε

πειραματικές μετρήσεις σε θερμοκρασία δωματίου, έχουν παρουσιάσει τιμές συντελεστή ποιότητας μεγαλύτερες από 3. Τέλος σε ό,τι αφορά το υφιστάμενο υψηλό κόστος κατασκευής θερμοηλεκτρικών διατάξεων TEC, το οποίο είναι υψηλότερο από το αντίστοιχο κόστος κατασκευής συμβατικών μονάδων κλιματισμού, αρκεί να ληφθεί υπόψη πως το αρχικό αυτό κόστος κατασκευής των TEC μπορεί να αντισταθμιστεί με το κόστος συντήρησης και αναπλήρωσης ψυκτικού υγρού που έχουν οι συμβατικές μονάδες κλιματισμού καθώς και με το κόστος για τα δικαιώματα εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα που πληρώνουν τα κράτη λόγω της καύσης του λιγνίτη. Το κόστος αυτό των εκπομπών, το οποίο οι εταιρίες ηλεκτρισμού το μετακυλούν στον καταναλωτή, μπορεί να εκμηδενιστεί εφόσον τα συστήματα TEC λειτουργούν με απευθείας τροφοδοσία συνεχούς ρεύματος από ηλιακή ενέργεια, χωρίς την παρουσία αντιστροφέα. Η σημαντική μείωση του κόστους ηλεκτρικού ρεύματος για ψύξη, σε συνδυασμό με τη μείωση του κόστους κατασκευής θερμοηλεκτρικών διατάξεων, εφόσον αυτές περάσουν σε στάδιο μαζικής παραγωγής, είναι παράγοντες που θα ληφθούν σοβαρά υπόψη σε μελλοντικές αποφάσεις για χρήση συστημάτων TEC για ψύξη εσωτερικών χώρων κτιρίων [25].

Εν κατακλείδι, οι περιορισμοί που σχετίζονται με τη θερμοηλεκτρική τεχνολογία και οι οποίοι δεν επιτρέπουν την ευρεία εφαρμογή της για ψυκτικούς σκοπούς εσωτερικών χώρων, δύναται στο μέλλον να αρθούν με την πρόοδο των εργαστηριακών μελετών ως προς τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή θερμοηλεκτρικών διατάξεων. Επιπλέον το κόστος κατασκευής των διατάξεων αυτών, μπορεί να μειωθεί όταν η κατασκευή τους γίνεται μαζικά και να γίνει σταδιακά συγκρίσιμο με το κόστος ψύξης με συμβατικές μεθόδους, εάν μπουν στην εξίσωση και τα παράπλευρα κόστη συντήρησης, τα οποία είναι δυνατόν να μειωθούν σε πολύ σημαντικό βαθμό με τη χρήση συστημάτων TEC.

## 2 Πειραματική Διάταξη

### 2.1. Γενικά.

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία έχει ως σκοπό την μελέτη θερμικής συμπεριφοράς ψύξης-θέρμανσης ενός ορισμένου κλειστού χώρου (Όγκου ελέγχου) μέσω της χρήσης θερμοστοιχείου (Peltier Module TEC), το οποίο αποτελείται από σύνολο θερμοζευγών, όπου με την εφαρμογή τάσης στους ακροδέκτες, δημιουργείται διαφορά θερμοκρασίας στις δυο πλευρές, σύμφωνα με το φαινόμενο Peltier (βλ. κεφάλαιο 1).

Για τον έλεγχο της θερμοκρασίας του χώρου, αναπτύχθηκε Σύστημα Αυτόματου Ελέγχου, με χρήση των απαραίτητων αισθητήρων και επενεργητών, όπως θα περιγραφούν αναλυτικά παρακάτω, κατά το οποίο καθορίζεται η επιθυμητή θερμοκρασία που απαιτείται να επιτευχθεί και γίνεται μία συνεχής καταμέτρηση της εσωτερικής θερμοκρασίας του όγκου ελέγχου. Τέλος με την επίτευξη της επιθυμητής θερμοκρασίας το σύστημα συνεχίζει τον έλεγχο (σύστημα κλειστού βρόγχου) μέχρι να βρει την ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά, ώστε να τεθεί σε λειτουργία ξανά ή μέχρι να εκχωρηθεί μία νέα επιθυμητή θερμοκρασία από τον χρήστη. Η λειτουργία αυτή με την οποία το σύστημα μέσω του αισθητήρα θερμοκρασίας ελέγχει αν έχει επιτευχθεί η επιθυμητή θερμοκρασία ονομάζεται έλεγχος με ανατροφοδότηση (AT).

### 2.2. Περιγραφή της διάταξης

Η διάταξη που κατασκευάστηκε και χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή αυτού του πειράματος αποτελείται από τα επιμέρους βασικά στοιχεία, τα οποία με την κατάλληλη συνδεσμολογία τους απαρτίζουν ένα ολοκληρωμένο σύστημα ελέγχου θερμοκρασίας ενός συγκεκριμένου μονωμένου όγκου. Τα υποσυστήματα αυτά είναι τα εξής:

### 2.1.1 Όγκος Ελέγχου

Με απώτερο σκοπό την μελέτη της απόδοσης ενός θερμοστοιχείου (TEC) ως μέσο ψύξης θέρμανσης ενός συγκεκριμένου όγκου ατμοσφαιρικού αέρα, χρησιμοποιήθηκε ένας κύβος διαστάσεων 32x26x32 cm (ΜήκοςxΠλάτοςxΎψος) κατασκευασμένο από Διογκωμένη Πολυστυρένιο (EPS - Expanded polystyrene) όπως φαίνεται στο Σχήμα 19 οποίο είναι ένα ελαφρύ θερμομονωτικό υλικό με συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας της τάξεως του 0,032 (W/mK) που είναι τέτοιας τάξης μεγέθους ώστε να εξαχθούν ικανοποιητικά συμπεράσματα σχετικά με την απόδοση του θερμοηλεκτρικού ψύκτη.

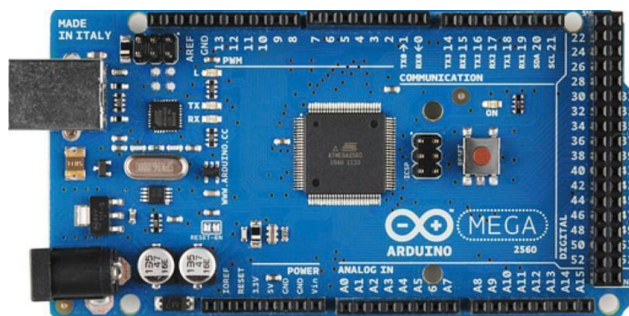


Σχήμα 19. Όγκος Ελέγχου αέρα προς θέρμανση-ψύξη.

### 2.1.2 Σύστημα Αυτόματου Ελέγχου (Arduino Controller)

Για τον Έλεγχο της πειραματικής διάταξης επιλέχθηκε η χρήση του ελεγκτή Arduino Controller όπως φαίνεται στο Σχήμα 20 ο οποίος είναι μια ανοικτού κώδικα υπολογιστική πλατφόρμα βασισμένη σε μια απλή πλακέτα με εισόδους/εξόδους, έναν μικροελεγκτή και ένα προγραμματιστικό περιβάλλον για το γράψιμο του κώδικα. Οι λόγοι για τους οποίους έγινε η επιλογή του συγκεκριμένου ελεγκτή σε σχέση με άλλους αντίστοιχους είναι:

- Η απλότητα και λειτουργικότητα είναι από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα του Arduino. Αποτελεί ιδανικό δημιουργικό εργαλείο για την απόκτηση ηλεκτρονικών και μηχανικών δεξιοτήτων.
- Χαρακτηρίζεται από υψηλό βαθμό λειτουργικότητας (cross-platform). Το πρόγραμμα του arduino εκτελείται και στα τρία λειτουργικά συστήματα (windows, macintosh, linux) αγκαλιάζοντας όλο το εύρος των χρηστών προσωπικών υπολογιστών.
- Μεγάλη ποικιλία εκδόσεων. Η Arduino είναι μια οικογένεια από πλακέτες μικροελεγχτών που σκοπό έχουν να κάνουν ευκολότερη την κατασκευή διαδραστικών αντικείμενων. Κάθε έκδοση καλύπτει διαφορετικές ανάγκες και έχει διαφορετικές δυνατότητες. Έκτος από τις διαφορετικές εκδόσεις υπάρχουν και οι πλακέτες επέκτασης (shield's) που έρχονται να ενισχύσουν και να δώσουν νέες δυνατότητες στις πλατφόρμες του Arduino. Όπως γίνεται κατανοητό πάντα θα υπάρχουν διάφορες εκδόσεις του Arduino που θα καλύπτουν την τρέχουσα τεχνολογία. Συγκεκριμένα για την εκπόνηση της εργασίας αυτής χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Arduino Mega το οποίο σε σχέση με το βασικό μοντέλο είναι ότι διαθέτει περισσότερες εισόδους, εξόδους καθώς και μνήμη Ram για την περίπτωση που χρησιμοποιηθεί μετέπειτα σε κάποια διάταξη μεγαλύτερου μεγέθους με περισσότερα θερμοστοιχεία TEC.



Σχήμα 20. Ο μικροελεγκτής Arduino Mega.

- Το Ανοικτού κώδικα και επέκτασης λογισμικό Arduino (IDE) το οποίο έχει αναπτυχθεί σε περιβάλλον Java και αυτό το καθιστά συμβατό με τα περισσότερα λειτουργικά συστήματα. Το IDE του Arduino περιέχει έναν έξυπνο συντάκτη, μεταγλωττιστή της C, C++ και τερματικό για σειριακή επικοινωνία με τον ελεγκτή. Ο καθένας μπορεί να βρει τον πηγαίο κώδικά, να τον μελετήσει και να τον τροποποιήσει σύμφωνα με τις ανάγκες του. Έμπειροι χρήστες μπορούν μέσα από τις βιβλιοθήκες της C++ άλλα και μέσα από τις βιβλιοθήκες του Arduino να γράψουν τον δικό τους κώδικα και να τον μοιραστούν σε μία κοινότητα από forum και ιστοσελίδες διαδικτυακά ενώ αρχάριοι χρήστες μπορούν να χρησιμοποιήσουν αυτόν το κώδικά χωρίς να γνωρίζουν προγραμματισμό χαμηλού επίπεδου.
- Τα σχέδια των πλατφορμών είναι ανοικτού κώδικά πράγμα που σημαίνει ότι έμπειροι χρήστες στον προγραμματισμό μπορούν να επεκτείνουν τις διαθέσιμες βιβλιοθήκες ή/και να τις αναβαθμίσουν.

### 2.1.3 Οθόνη υγρών κρυστάλλων – Περιστροφικός Κωδικοποιητής

Για τον προγραμματισμό του ελεγκτή χρησιμοποιήθηκε το αντίστοιχο λογισμικό του Arduino (IDE) όπως θα περιγραφεί αναλυτικότερα στο εδάφιο του κώδικα. Για την αυτονομία του και την διεπαφή του με τον χρήστη χωρίς απαραίτητα την χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή έγινε η χρήση των επιμέρους εξαρτημάτων όπως φαίνονται παρακάτω:

- I. Οθόνη υγρών Κρυστάλλων (LCD) δύο γραμμών με προσαρμογέα I2C, επιτρέποντας τον έλεγχο χρησιμοποιώντας μόνο τέσσερις ακίδες. Με την οθόνη αυτή γίνεται η εκτύπωση των απαραίτητων στοιχείων όπως είναι η επιθυμητή θερμοκρασία αλλά και η στιγμιαία θερμοκρασία του όγκου ελέγχου.
- II. Περιστροφικός Κωδικοποιητής (Rotary encoder) ο οποίος κινούμενος αριστερόστροφα η δεξιόστροφα έχει την λειτουργία του αυξομειωτή (+,-) ενώ πιέζοντάς τον κεντρικά έχει την χρήση και σαν ένα απλό κομβίο (Button),

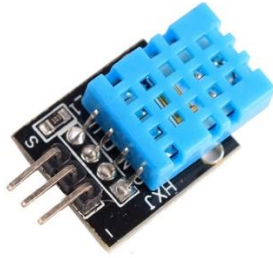
παρέχοντάς την δυνατότητα του ελέγχου της θερμοκρασίας και της καταχώρησης μιας νέας επιθυμητής θερμοκρασίας.



Σχήμα 21. Α) Οθόνη υγρών κρυστάλλων (LCD) Β) Περιστροφικός Κωδικοποιητής ( Rotary Encoder).

#### 2.1.4 Αισθητήρας Ελέγχου Θερμοκρασίας

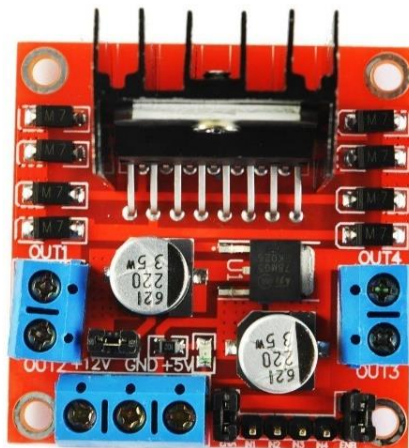
Για τον έλεγχο της θερμοκρασίας του όγκου ελέγχου, επιλέχθηκε ο αισθητήρας θερμοκρασίας και υγρασίας DHT-11 ο οποίος είναι μια αρκετά αξιόπιστη και ευρέως διαδεδομένη επιλογή καθώς μπορεί να τροφοδοτηθεί κατευθείαν από τον ελεγκτή (Arduino), λόγω της μικρής έντασης ρεύματος του απαιτεί (2.5mA ) και παρέχει μια αρκετά καλού επιπέδου ακρίβεια της τάξεως του 0.5 °C, ενώ παράλληλα το εύρος τιμών που μπορεί να υποστηρίξει κυμαίνεται από 0 μέχρι 50°C που είναι εντός των ορίων που είναι απαιτούμενα στο συγκεκριμένο πείραμα.



Σχήμα 22. Αισθητήρα θερμοκρασίας και υγρασίας DHT-11.

### 2.1.5 Πλακέτα ρύθμισης τάσης

Για τον έλεγχο της τάσης του ρεύματος που καταναλώνει το Θερμοστοιχείο TEC, χρησιμοποιήθηκε μια πλακέτα L298N H-Bridge Motor Driver (Σχήμα 23) η οποία λειτουργεί σαν μεσολαβητής ( γέφυρα) μεταξύ του θερμοστοιχείου (TEC) και του Ελεγκτή (Arduino) ώστε να μπορεί να γίνει ρύθμιση στην τάση δηλαδή, τον βαθμό που θα λειτουργεί το θερμοστοιχείο.



© solowheel

Σχήμα 23. Η πλακέτα L298N H-Bridge Motor Driver

Η πλακέτα L298N παρέχει τη δυνατότητα ελέγχου τάσεων από 5 V έως 35 V και μέγιστη ένταση ανά κανάλι τα 2 A , χαρακτηριστικά τα οποία υπερκαλύπτουν τις απαιτήσεις για τον έλεγχο ενός θερμοστοιχείου.



### 2.1.6 Θερμοηλεκτρικό στοιχείο Peltier TEC

Για την θέρμανση και την ψύξη του όγκου ελέγχου επιλέχθηκε η χρήση ενός θερμοστοιχείου Peltier TEC1-12706 όπως φαίνεται στο Σχήμα 24, το οποίο αποτελείται από 127 θερμοζεύγη από Βισμούθιου και Τελούριου ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ), οι κεραμικές του πλάκες εξωτερικά αποτελούνται από Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , κατά 96% λευκό) και η κατασκευή των κολλήσεων με τις ράβδους χαλκού (Cu) έγινε με κράμα Βισμούθιου και Κασίτερου ( $\text{BiSn}$ ) με θερμοκρασία τήξης,  $T_{\text{melt}} = 138 \text{ }^\circ\text{C}$ .

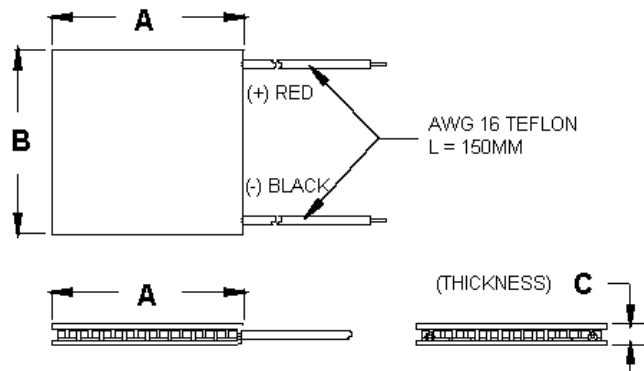


Σχήμα 24. Θερμοστοιχείο Peltier TEC 12706. [26]

Παρακάτω παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά όπως φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα. Οι χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας επισυνάπτονται στο Παράρτημα στο τέλος της εργασίας.

Τεχνικά Χαρακτηριστικά Θερμοστοιχείου Peltier TEC. [26] , [18]		
Hot Side Temperature ( $^\circ\text{C}$ )	25 $^\circ\text{C}$	50 $^\circ\text{C}$
$Q_{\text{max}}$ (Watts)	50	57
Delta $T_{\text{max}}$ ( $^\circ\text{C}$ )	66	75
$I_{\text{max}}$ (Amps)	6.4	6.4
$V_{\text{max}}$ (Volts)	14.4	16.4
Module Resistance (Ohms)	1.98	2.30
Συντελεστής Seebeck	0.01229 V/K	
Θερμική αγωγιμότητα	0.1815 W/K	

Οι διαστάσεις του Θερμοστοιχείου φαίνονται στο Σχήμα 25, όπου  $A=B= 40 \text{ mm}$  και  $C=3.9 \text{ mm}$ .

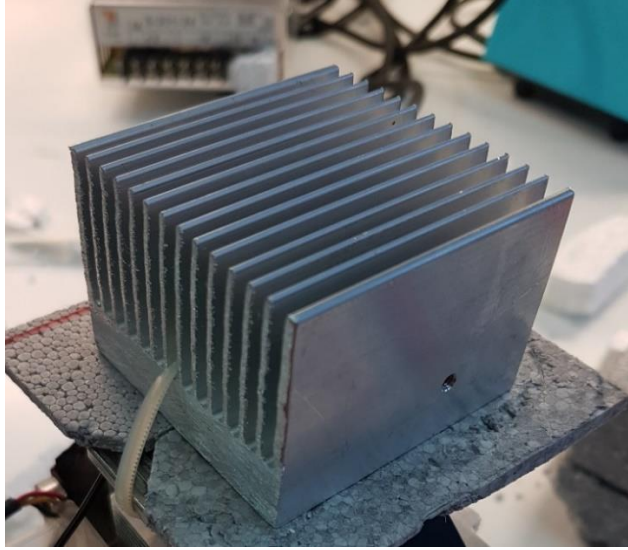


Σχήμα 25. Διαστασιολόγηση Θερμοστοιχείου TEC. [26]

Το συγκεκριμένο Θερμοστοιχείο που επιλέχθηκε για την εργαστηριακή αυτή άσκηση είναι αρκετά διαδεδομένο στην αγορά και αξιόπιστο καθώς φτάνει τις 200.000 ώρες λειτουργίας και περίπου 0.2 % πιθανότητα παρουσίασης βλάβης. [26]

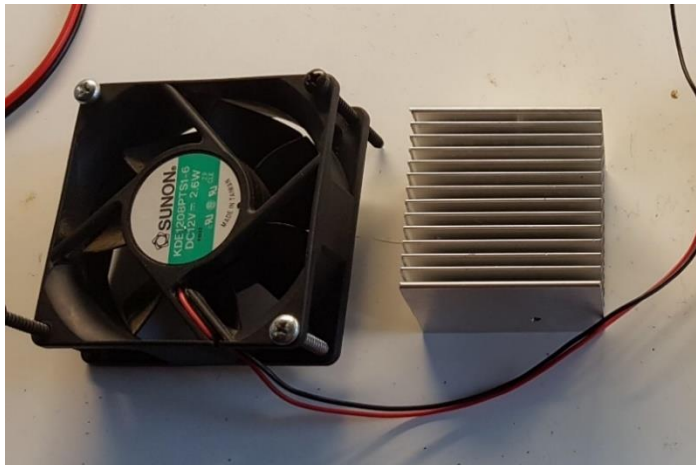
### 2.1.7 Ψύκτρες – Ανεμιστήρες

Για την μεταφορά της θερμότητας από το Θερμοστοιχείο στον ατμοσφαιρικό αέρα αλλά και το αντίστροφο έγινε η χρήση κατάλληλα τοποθετημένων ψυκτρών με πλήθος πτερυγίων τα οποία ήρθαν σε επαφή με τις κεραμικές επιφάνειες του Θερμοστοιχείου με την επάλειψη της απαραίτητης θερμικής πάστας. Η πάστα αυτή χρησιμοποιείται ως διασύνδεση μεταξύ ψυκτρών θερμότητας και πηγών θερμότητας κύριος ρόλος της είναι η εξάλειψη των κενών ή των χώρων που λειτουργούν ως θερμικός μονωτήρας από την περιοχή διεπαφής έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η μεταφορά θερμότητας.



Σχήμα 26. Ψύκτρα με πλήθος πτερυγίων τοποθετημένη πάνω στο TEC.

Με την επιλογή κατάλληλων ανεμιστήρων (Cooler Fan) όπως φαίνεται στο Σχήμα 27 και μέσω της εξαναγκασμένης συναγωγής του αέρα επιτυγχάνεται τελικά η μεταφορά της θερμότητας από τις επιφάνειες των πτερυγίων της ψύκτρας στον ατμοσφαιρικό αέρα και το αντίστροφο. Έτσι επιτυγχάνεται η ψύξη ή η θέρμανση του όγκου ελέγχου.



Σχήμα 27. Ανεμιστήρας (Cooler Fan).

### 2.1.8 Πηγή Τροφοδοσίας

Για την τροφοδοσία της Πειραματικής διάταξης χρησιμοποιήθηκε τροφοδοτικό συνεχούς τάσης όπως φαίνεται στο Σχήμα 28 το οποίο υπήρχε στο εξοπλισμό του εργαστηρίου. Με το τροφοδοτικό ήταν δυνατή η επιλογή της τάσης αλλά και της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος έτσι ώστε να βρεθεί το επιθυμητό σημείο λειτουργίας του συστήματος.



Σχήμα 28. Τροφοδοτικό Συνεχούς Τάσης.

## 2.3. Σύστημα Αυτομάτου Ελέγχου

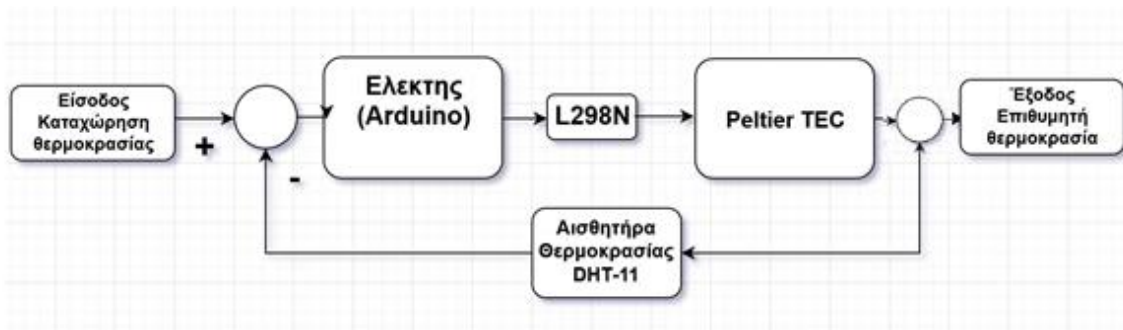
### 2.1.9 Δομικό Διάγραμμα

Σε αυτό το σημείο παρουσιάζεται το δομικό διάγραμμα του Συστήματος Αυτομάτου ελέγχου (ΣΑΕ) με τα επιμέρους τμήματα. Το γενικό διάγραμμα ΣΑΕ παρουσιάζεται στο ακόλουθο Σχήμα 29.



Σχήμα 29. Πρότυπο δομικού διαγράμματος ενός ΣΑΕ.

Συγκεκριμένα για την ανάπτυξη του συστήματος ελέγχου θερμοκρασίας που είναι υπό μελέτη για είσοδο  $R(t)$  καταχωρείται η επιθυμητή θερμοκρασία μέσω της διεπαφής του χρήστη από το Button και από την Οθόνη LCD. Για τον ελεγκτή  $F(s)$  χρησιμοποιήθηκε πλακέτα ελεγκτή Arduino Uno το οποίο μέσω της πλακέτας τροφοδοσίας L298N H-Bridge γίνεται η ρύθμιση της τάσης του ρεύματος του οποίου θα φτάσει στο Σύστημα  $G(s)$  το οποίο αποτελείται από τον επενεργητή που είναι το θερμοστοιχείο Peltier TEC. Η ανατροφοδότηση του συστήματος γίνεται μέσω του αισθητήρα θερμοκρασίας DHT-11 οποίος πηγαίνει ξανά στην είσοδο  $R(t)$ . Ως έξοδος του συστήματος  $Y(t)$  είναι η επίτευξη της επιθυμητής θερμοκρασίας στον όγκο ελέγχου μέσω της συναγωγής από τους ανεμιστήρες και την κυκλοφορία του αέρα. Το προσαρμοσμένο δομικό διάγραμμα παρουσιάζεται παρακάτω στο Σχήμα 30.

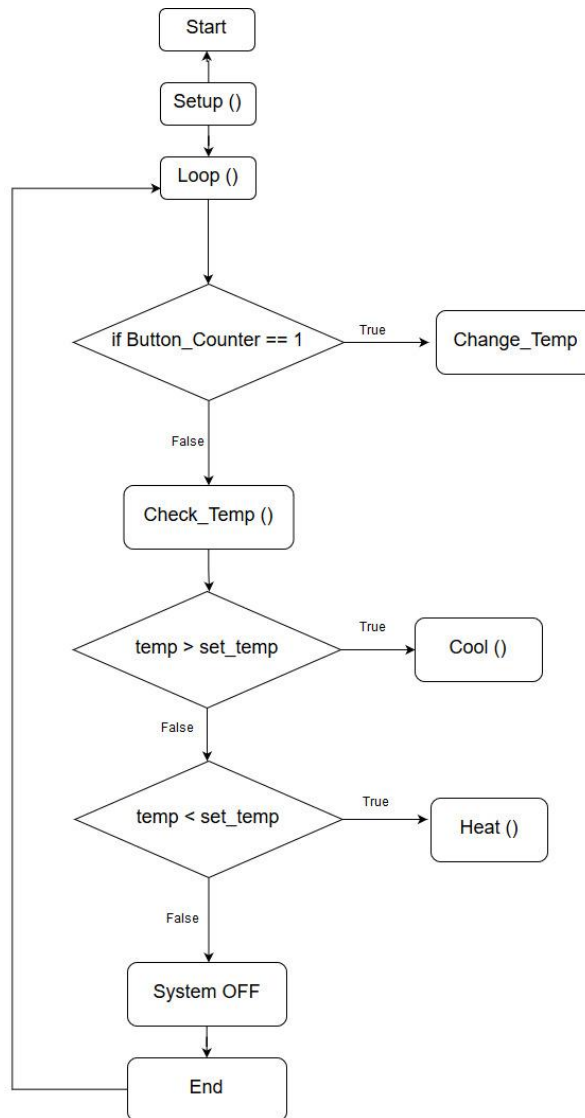


Σχήμα 30. Δομικό διάγραμμα του συστήματος ελέγχου θερμοκρασίας.

#### 2.1.10 Διάγραμμα Ροής Κώδικα

Ο κώδικας που δημιουργήθηκε έγινε στο ανοικτού κώδικα και επέκτασης λογισμικό Arduino (IDE) με βασική λογική την αυτονομία ενός τέτοιου συστήματος αλλά παράλληλα την απλή και εύκολη διεπαφή του με κάποιον χρήστη χωρίς να απαιτούνται εξειδικευμένες γνώσεις.

Στο σημείο αυτό παρουσιάζεται ένα Διάγραμμα ροής του κώδικα που δημιουργήθηκε με σκοπό την κατανόηση της βασικής λογικής που ακολουθήθηκε.



Σχήμα 31. Διάγραμμα ροής του Κώδικα.

### 2.1.11 Κώδικας

Παρακάτω παρουσιάζονται και περιγράφονται αναλυτικά τα επιμέρους τμήματα του κώδικα αυτού.

Αρχικά γίνεται μία περιγραφή των επιμέρους εξαρτημάτων και της σύνδεσής τους έτσι ώστε να υπάρχει μια αναφορά και μια εικόνα για κάποια επόμενη φορά που θα γίνει η επεξεργασία ή η ανάγνωση του κώδικα.

```

/* -----
Temp: DHT11
Vcc: 5V, GND, OUT: D2
-----

LCD I2C 16x2
Vcc: 5V, GND, SDA: D20, SCL: D21
-----

L298N A
Jumper OFF
Vcc: 5V, GND, A_in1: D6, A_in2: D7, A_in3: D8, A_in2: D9
-----

L298N B
Jumper OFF
Vcc: 5V, GND, B_in1: D10, B_in2: D11, B_in3: D12, B_in2: D13
-----

Rotary encoder
Vcc: 5V, GND, button: D3, outputA: D4, outputB: D5
-----
*/

```

Αρχικά, γίνεται η δήλωση των μεταβλητών, η αρχικοποίηση των τιμών και δήλωση των απαραίτητων βιβλιοθηκών όπου θα χρησιμοποιηθούν παρακάτω από τον κώδικα.

```

byte set_temp = 25;
byte new_temp = set_temp;
byte temp;
byte hmdt;
volatile int buttonCounter = 0;
unsigned long previousMillis = 0;
unsigned long currentMillis = 0;
String state = "Initializing...";
int aState;
int aLastState;

#include <EEPROM.h>

#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 2, 1, 0, 4, 5, 6, 7, 3, POSITIVE);
byte snow[8] = {
  B00100,
  B10101,
  B01110,
  B00100,
  B00100,
  B01110,
  B10101,
  B00100
};
byte flame[8] = {
  B00110,
  B01100,

```

```

    B01101,
    B00111,
    B10011,
    B11111,
    B11110,
    B11100
};
byte arrow[8] = {
    B01000,
    B00100,
    B00010,
    B11111,
    B00010,
    B00100,
    B01000,
    B00000
};

#include <dht.h>
dht DHT;
#define DHT11_PIN 2

#define button 3
#define outputA 4
#define outputB 5

#define A_in1 6
#define A_in2 7
#define A_in3 8
#define A_in4 9

#define B_in1 11
#define B_in2 12
#define B_in3 13
#define B_in4 14

```

Στο σημείο αυτό παρουσιάζεται μία από τις δύο κύριες συναρτήσεις που απαιτούνται. Στην συνάρτηση `setup ()` ορίζονται οι είσοδοι και οι έξοδοι που θα χρησιμοποιηθούν από τον μικροελεγκτή και ορίζεται ο ρυθμός της σειριακής επικοινωνίας.

```

void setup() {
    lcd.begin(16, 2);
    lcd.createChar(0, snow);
    lcd.createChar(1, flame);
    lcd.createChar(2, arrow);
    lcd.setCursor(0, 0);
    delay(3000);
    lcd.clear();
    Serial.begin(9600);

    pinMode(A_in1, OUTPUT);
    pinMode(A_in2, OUTPUT);

```



```

pinMode(A_in3, OUTPUT);
pinMode(A_in4, OUTPUT);

pinMode(B_in1, OUTPUT);
pinMode(B_in2, OUTPUT);
pinMode(B_in3, OUTPUT);
pinMode(B_in4, OUTPUT);

pinMode (outputA, INPUT);
pinMode (outputB, INPUT);
pinMode (button, INPUT);

```

Σε περίπτωση κάποιας διακοπής της τροφοδοσίας χρησιμοποιείται η τιμή θερμοκρασίας που είναι αποθηκευμένη στη μνήμη ROM.

```

aLastState = digitalRead(outputA);

byte saved_temp = EEPROM.read(0);
if (saved_temp > 10 && saved_temp < 40) {
  set_temp = saved_temp;
  new_temp = set_temp;
  Serial.print("Saved temp found: ");
  Serial.print(saved_temp);
  Serial.println("C");
}

```

Στο σημείο αυτό ορίζεται μέσω ενός interrupt η δυνατότητα διακοπής της ροής του κώδικα έτσι ώστε να είναι δυνατή η άμεση είσοδος στο μενού καταχώρησης νέας θερμοκρασίας ώστε να αλλάξει ο χρήστης την τιμή της.

```

attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(button), changeISR, RISING);
}

```

Παρακάτω παρουσιάζεται η δεύτερη κύρια συνάρτηση που εκτελείται για όση ώρα τροφοδοτείται ο μικροελεγκτής.

```

void loop()
{
  if (buttonCounter == 1) {
    Serial.println("Changing Temperature:");
    change_temp();
  }
  else if (buttonCounter > 1) {
    buttonCounter = 0;
  }
}

```

Ο χρονοδιακόπτης για μέτρηση της θερμοκρασίας ρυθμίζεται στα δύο δευτερόλεπτα ο οποίος είναι ο ελάχιστος χρόνος που δίνεται από τον κατασκευαστή του αισθητήρα για λήψη μέτρησης.

```

currentMillis = millis();

```

```

if (currentMillis - previousMillis >= 2000) {
  check_temp();
  previousMillis = currentMillis;
}

```

Στο στάδιο αυτό γίνεται ο έλεγχος της θερμοκρασίας σε σχέση με την καταχωρημένη τιμή της. Εάν είναι μεγαλύτερη θα καλέσει την συνάρτηση της ψύξης, ενώ στην αντίθετη περίπτωση θα καλέσει την συνάρτηση της θέρμανσης. Στην περίπτωση που οι δύο τιμές είναι ίσες θα απενεργοποιηθεί η τροφοδοσία του θερμοστοιχείου.

```

if (temp > set_temp) {
  cool();
  state = "Cooling ---";
}
else if (temp < set_temp) {
  heat();
  state = "Heating +++";
}
else {
  digitalWrite(A_in1, LOW);
  digitalWrite(A_in2, LOW);
  digitalWrite(A_in3, LOW);
  digitalWrite(A_in4, LOW);
  digitalWrite(B_in1, LOW);
  digitalWrite(B_in2, LOW);
  digitalWrite(B_in3, LOW);
  digitalWrite(B_in4, LOW);
  lcd.setCursor(14, 0);
  lcd.print("OK");
  state = "OK";
}
}

```

Παρατηρείται στο σημείο αυτό η συνάρτηση ελέγχου της θερμοκρασίας και της υγρασίας από τον αντίστοιχο αισθητήρα η οποία είναι υπεύθυνη και για την εμφάνισή τους στην οθόνη.

```

void check_temp()
{
  int chk = DHT.read11(DHT11_PIN);
  temp = DHT.temperature;
  hmdt = DHT.humidity;
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Temp: ");
  lcd.print(temp);
  lcd.write(byte(2));
  lcd.print(set_temp);
  lcd.print((char)223);
  lcd.print("C ");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("Humidity: ");
  lcd.print(hmdt);
  lcd.print("%");
}

```

```

Serial.print("Curent temp: ");
Serial.print(temp);
Serial.println("C");
Serial.print("Humidity: ");
Serial.print(hmdt);
Serial.println("%");
Serial.println(state);
Serial.println("=====");
}

```

Σε αυτό το σημείο παρουσιάζεται η συνάρτηση για την αλλαγή της θερμοκρασίας από τον χρήστη κατά την οποία γίνεται και έλεγχος ώστε αυτή να είναι εντός των θερμοκρασιακών ορίων που έχουν ορισθεί. Επίσης εμφανίζεται παράθυρο διαλόγου για την καταχώρηση της νέας θερμοκρασίας.

```

void change_temp()
{
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Set temp: ");
  lcd.print(set_temp);
  lcd.print((char)223);
  lcd.print("C");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("New temp: ");
  while (buttonCounter < 2) {
    aState = digitalRead(outputA);
    if (aState != aLastState) {
      if (digitalRead(outputB) != aState) {
        if (new_temp > 10) {
          new_temp --;
        }
      }
      else {
        if (new_temp < 40) {
          new_temp ++;
        }
      }
    }
    lcd.setCursor(10, 1);
    lcd.print(new_temp);
    lcd.print((char)223);
    lcd.print("C");
    delay(100);
    Serial.print("New temp: ");
    Serial.print(new_temp);
    Serial.println("C");
  }
  aLastState = aState;
  set_temp = new_temp;
  EEPROM.write(0, set_temp);
  Serial.println("New temperature set!");
  Serial.println("-----");
  lcd.clear();
}

```

```
}
```

Παρακάτω εμφανίζεται η συνάρτηση που σχετίζεται με το Interrupt ώστε να διακοπεί η εκτέλεση του κώδικα για να αλλάξει η επιθυμητή τιμή θερμοκρασίας.

```
void changeISR()  
{  
  buttonCounter++;  
}
```

Η συνάρτηση για την ψύξη φαίνεται παρακάτω, η οποία ελέγχει τις τιμές των εισόδων της πλακέτας τροφοδοσίας L298N ώστε να τροφοδοτηθεί κατάλληλα .

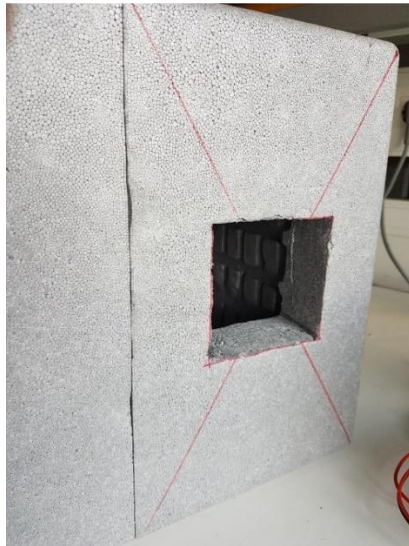
```
void cool()  
{  
  digitalWrite(A_in1, HIGH);  
  digitalWrite(A_in2, LOW);  
  
  digitalWrite(A_in3, HIGH);  
  digitalWrite(A_in4, LOW);  
  
  digitalWrite(B_in1, HIGH);  
  digitalWrite(B_in2, LOW);  
  
  digitalWrite(B_in3, HIGH);  
  digitalWrite(B_in4, LOW);  
  
  lcd.setCursor(14, 0);  
  lcd.write(byte(0));  
  lcd.write(byte(0));  
}
```

Αντιστρόφως η συνάρτηση για την θέρμανση, η οποία ελέγχει τις τιμές των εισόδων της πλακέτας τροφοδοσίας L298N αλλάζοντας ουσιαστικά την πολικότητα σε σχέση με την ψύξη, φαίνεται παρακάτω.

```
void heat()  
{  
  digitalWrite(A_in1, LOW);  
  digitalWrite(A_in2, HIGH);  
  
  digitalWrite(A_in3, LOW);  
  digitalWrite(A_in4, HIGH);  
  
  digitalWrite(B_in1, LOW);  
  digitalWrite(B_in2, HIGH);  
  
  digitalWrite(B_in3, LOW);  
  digitalWrite(B_in4, HIGH);  
  lcd.setCursor(14, 0);  
  lcd.write(byte(1));  
  lcd.write(byte(1));  
}
```

## 2.4. Πειραματική διαδικασία

Η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε έγινε σε πρώτο στάδιο με την σύνδεση του θερμοηλεκτρικού στοιχείου σε μία πηγή τάσης ούτως ώστε να διαπιστωθεί το σημείο λειτουργίας του. Σε δεύτερο στάδιο έγινε η διαμόρφωση του κατάλληλου όγκου ελέγχου στον οποίο θα γινόταν ο έλεγχος την θερμοκρασίας. Συγκεκριμένα διανοίχθηκε κατάλληλη οπή μέσω την οποίας θα γίνεται η απόρριψη ή η άντληση θερμότητας από το περιβάλλον. Η οπή αυτή, όπως φαίνεται στο ακόλουθο Σχήμα 32 έγινε με τις κατάλληλες διαστάσεις έτσι ώστε να δημιουργηθεί χώρος για την εφαρμογή της θερμοηλεκτρικής διάταξης.



*Σχήμα 32. Οπή για την μεταφορά θερμότητας από και προς το περιβάλλον.*

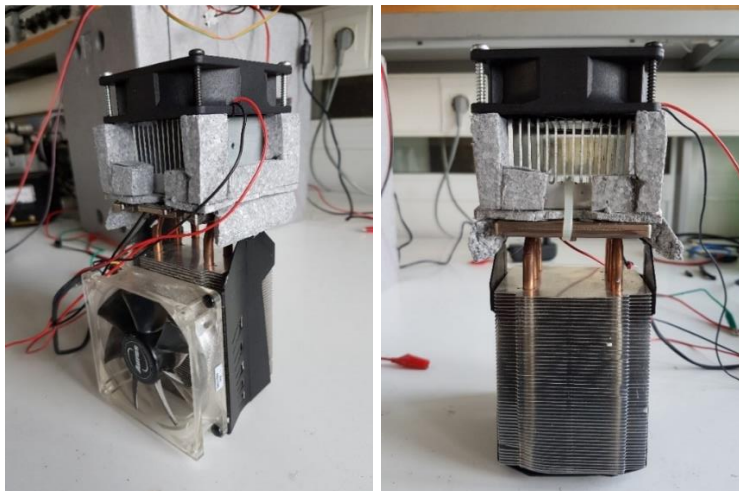
Έπειτα, συναρμολογήθηκε η θερμοηλεκτρική διάταξη, που αποτελείται από κατάλληλα επιλεγμένες ψύκτρες αλουμινίου που άγουν την θερμότητα μέσω πτερυγίων, σε συνδυασμό με ανεμιστήρες οι οποίοι δημιουργούν εξαναγκασμένη ροή του περιβάλλοντα αέρα με αποτέλεσμα να επιτυγχάνουν μεγαλύτερη συναγωγή θερμότητας τόσο με το εσωτερικό περιβάλλον του όγκου ελέγχου, όσο και με το εξωτερικό. Για την βέλτιστη αγωγή θερμότητας από το θερμοηλεκτρικό στοιχείο στις ψύκτρες, έγινε χρήση ειδικής θερμοεπαγωγικής πάστας. Κατά την συνδεσμολογία της διάταξης

δημιουργήθηκε ένα μικρό διάκενο με πάχος όσο εκείνο του στοιχείου, το οποίο καλύφθηκε με τμήματα του όγκου ελέγχου, που είχαν αφαιρεθεί στο δεύτερο στάδιο, με σκοπό την εξασφάλιση της συνοχής της μόνωσης.



Σχήμα 33. Τοποθέτηση της θερμοεπαγωγικής πάστας και της μονωτικής επιφάνειας.

Για την κατάλληλη συναρμογή όλων των προαναφερθέντων εξαρτημάτων έγινε χρήση των απαραίτητων κοχλίων και σφικτήρων, όπως φαίνονται και στο Σχήμα 34.

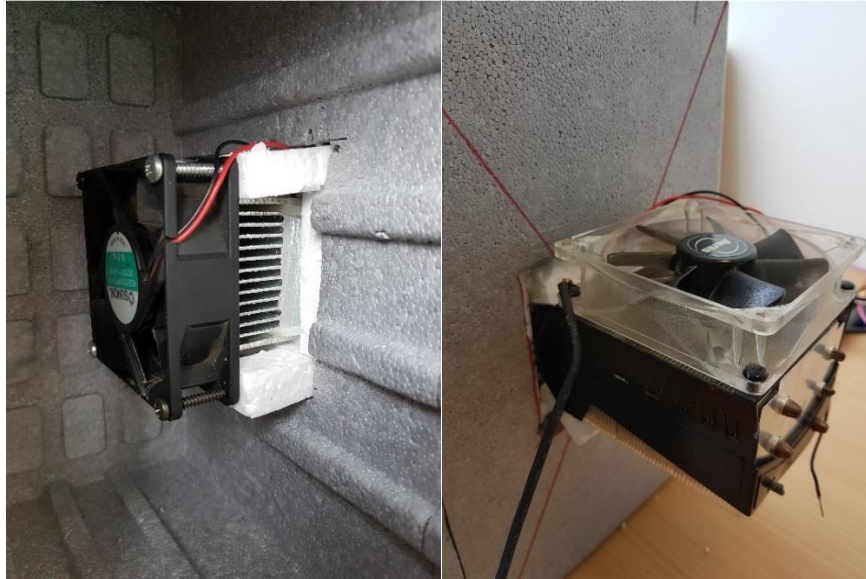


(α)

(β)

Σχήμα 34. Χρήση των απαραίτητων κοχλίων, σφικτήρων για την συναρμογή α)πλάγια όψη, β) πίσω όψη

Έπειτα από την συναρμογή όλου του συστήματος συναγωγής έγινε η τοποθέτησή του μέσα στο όγκο ελέγχου. Σε αυτό το σημείο δόθηκε προσοχή στην ελαχιστοποίηση των απωλειών με την σφιχτή τοποθέτηση του ώστε να καλυφθεί πλήρως η οπή χωρίς διάκενα μεταξύ τους. Στο Σχήμα 35 που ακολουθεί παρουσιάζεται η διαδικασία αυτή.

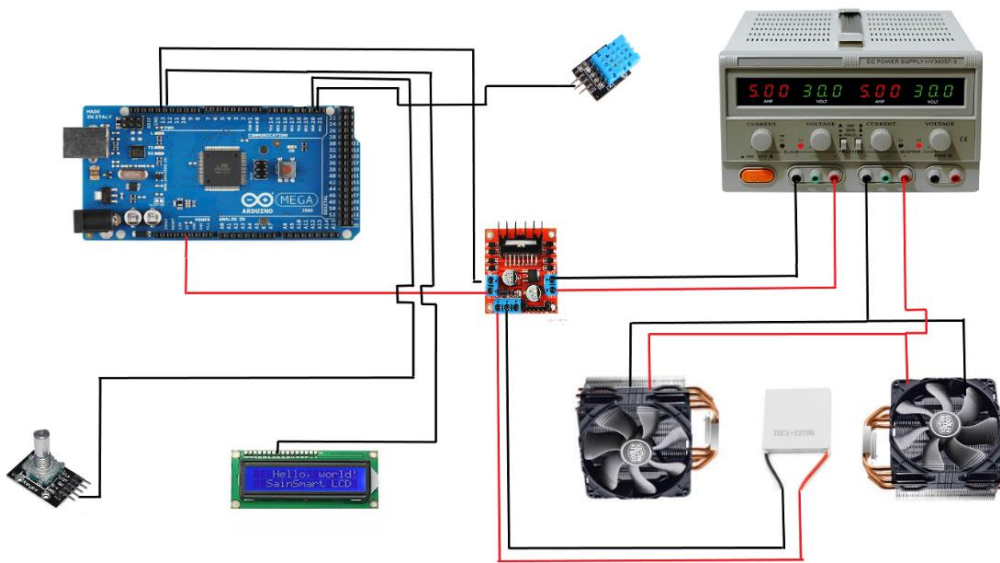


(α)

(β)

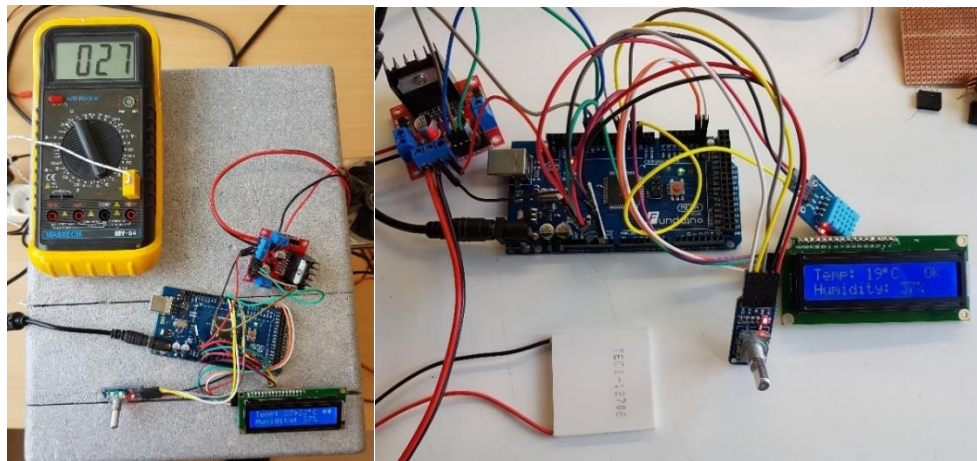
Σχήμα 35. Τοποθέτηση του συστήματος συναγωγής από : α) εσωτερική πλευρά β) εξωτερική πλευρά.

Έπειτα, πραγματοποιήθηκε η συνδεσμολογία των επιμέρους τμημάτων, ηλεκτρονικών εξαρτημάτων και πλακετών μεταξύ τους. Στο σημείο αυτό παρουσιάζεται στο ακόλουθο Σχήμα 36 η συνδεσμολογία των επιμέρους τμημάτων του συστήματος-



Σχήμα 36. Σχεδίαση συνδεσμολογίας επιμέρους εξαρτημάτων του συστήματος

Για την συνδεσή όλων των εξαρτημάτων χρησιμοποιήθηκαν τυποποιημένα καλώδια όπως φαίνονται και στο ακόλουθο Σχήμα 37. Η τελική εργαστηριακή διάταξη περιλάμβανε και ένα πολύμετρο με θερμοζεύγος κ για τον έλεγχο της ορθής λειτουργίας του συστήματος.



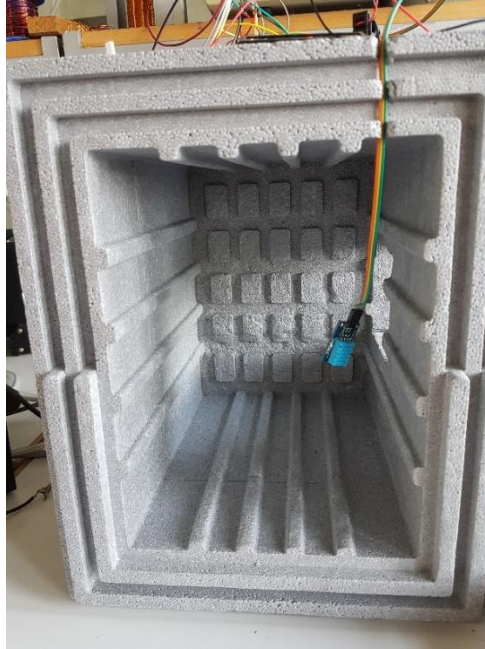
(α)

(β)

Σχήμα 37.α) Τελική πειραματική διάταξη, β) Σύνδεση εξαρτημάτων εκτός όγκου ελέγχου.



Η τοποθέτηση του αισθητήρα θερμοκρασίας DHT-11 έγινε σε κεντρικό σημείο του όγκου ελέγχου ώστε να υπάρχει ενδεικτική τιμή της θερμοκρασίας του ΟΕ και φαίνεται στο Σχήμα 38.



*Σχήμα 38. Σημείο τοποθέτησης του αισθητήρα.*

Έπειτα από την σύνδεση και την τοποθέτηση όλων των επιμέρους εξαρτημάτων μεταξύ τους έγιναν οι πρώτες δοκιμές της διάταξης με επιτυχία. Τα πρώτα πειράματα ήταν σχετικά με την επίτευξη διαφοράς στην θερμοκρασία, την απλή και ομαλή λειτουργία και την αποφυγή κάποιων υπερθερμάνσεων. Οι ενδείξεις του συστήματος ανταποκρίνονταν και η διεπαφή με τον χρήστη πραγματοποιήθηκε επιτυχώς.

Σε αυτό το σημείο, για να υπολογιστεί το σημείο λειτουργίας του συστήματος υπολογίστηκε πρώτα η ένταση του ρεύματος εισόδου η οποία  $I = 1.98 \text{ A}$ .

Έπειτα κρίθηκε απαραίτητο να βρεθεί το ποσό της θερμότητας που απορροφάται βάσει του τύπου (1.9) , έπειτα η τιμή της καταναλισκόμενης ισχύος βάση του τύπου (1.10).

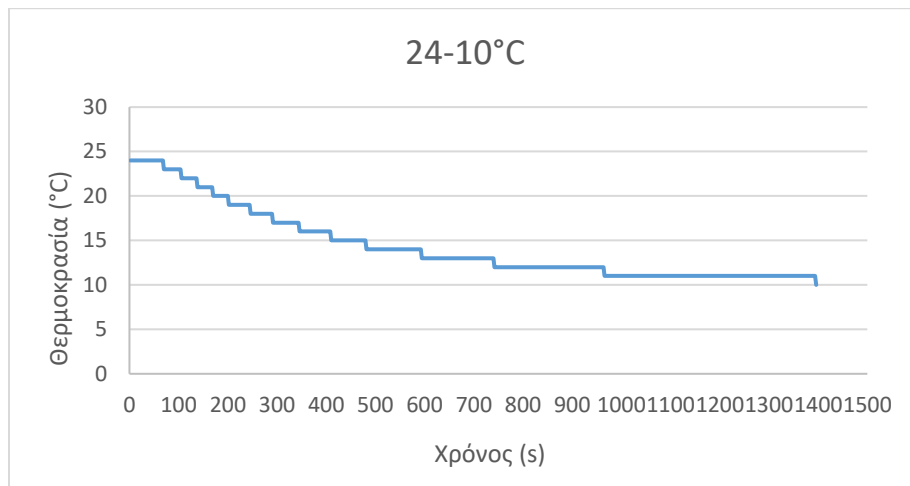
Μετά των υπολογισμών των δύο αυτών τιμών ο συντελεστής απόδοσης της διάταξης μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο (1.11). Ο συντελεστής Seebeck ( $S$ ) = 0.01229 V/k και η Θερμική αγωγιμότητα ( $K$ ) = 0.1815 W/k. Ύστερα από τους απαραίτητους μαθηματικούς υπολογισμούς το αποτέλεσμα του συντελεστή απόδοσης είναι COP = 0.3438 κάτι το οποίο επιβεβαιώνεται με τα θεωρητικά δεδομένα από τα γραφήματα του βαθμού απόδοσης των τεχνικών χαρακτηριστικών. [18]

Δοκιμάστηκε επίσης η ομαλή λειτουργία του και στις δύο πλευρές του θερμοστοιχείου αντιστρέφοντας την πολικότητα του ρεύματος από την πηγή, για τον έλεγχο επίτευξης ψύξης και θέρμανσης σε κάθε πλευρά. Τέλος, μελετήθηκαν τα περιθώρια για την επιλογή των κατάλληλων τιμών των τάσεων και των ρευμάτων βάσει των τεχνικών προδιαγραφών του συγκεκριμένου θερμοηλεκτρικού στοιχείου που επιλέχθηκε για την εργασία αυτή.

## 3 Αποτελέσματα – Επόμενα βήματα

### 3.1. Παράθεση αποτελεσμάτων

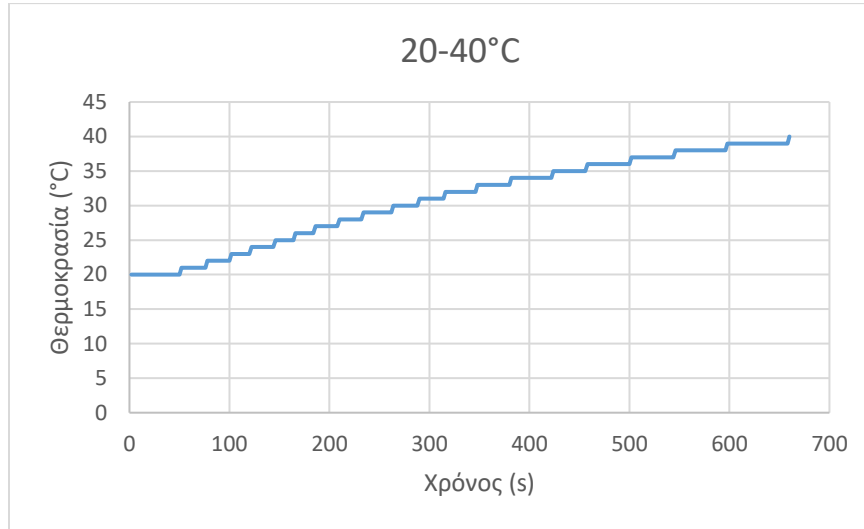
Για τον υπολογισμό της απόδοσης και της λειτουργίας του συστήματος, έγιναν πειράματα τόσο στην περίπτωση ψύξης όσο και στην περίπτωση θέρμανσης του όγκου ελέγχου. Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος την περίοδο της διεξαγωγής των πειραμάτων ήταν αρχικά στους 24°C ενώ σε άλλη χρονική περίοδο ήταν στους 20°C. Το χρονικό διάστημα που ο αισθητήρας θερμοκρασίας είχε ως ελάχιστο από την κατασκευή του, ήταν τα δύο δευτερόλεπτα. Αρχικά δοκιμάστηκε η επίτευξη της χαμηλότερης θερμοκρασίας για την ψύξη με τα αποτελέσματα όπως φαίνονται στο ακόλουθο Σχήμα 39.



Σχήμα 39. Γράφημα μεταβολής θερμοκρασίας από 24°C σε 10°C.

Όπως παρατηρήθηκε το σύστημα έφτασε σε ισορροπία σε περίπου 23 λεπτά στους 10°C. Η απόδοση του συστήματος παρατηρείται ότι φθίνει κατά την διέλευση του χρόνου, γεγονός το οποίο οφείλεται στην απόδοση του θερμοηλεκτρικού στοιχείου βάση του συντελεστή απόδοσης που γίνεται μικρότερος καθώς το  $\Delta T$  μειώνεται (ο λόγος του  $\Delta T$  ως προς το μέγιστο  $\Delta T$  αυξάνεται). (Κεφάλαιο 1.8)

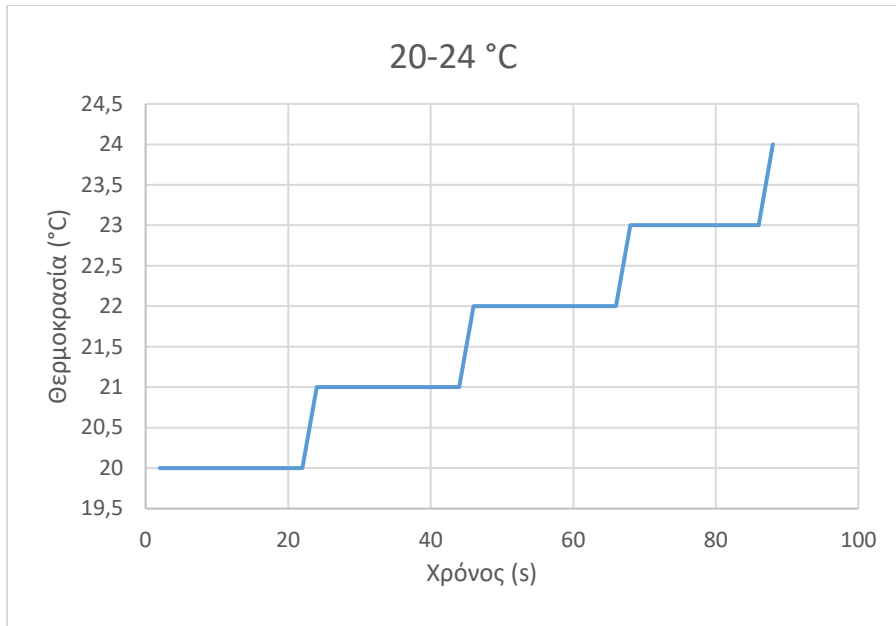
Στην συνέχεια έγινε η αντίστροφη διαδικασία όπου επιλέχθηκε η θέρμανση του όγκου ελέγχου η οποία έφτασε τους 40°C σε χρόνο 11 λεπτών, τα αποτελέσματα της οποίας φαίνονται παρακάτω στο ακόλουθο Σχήμα .



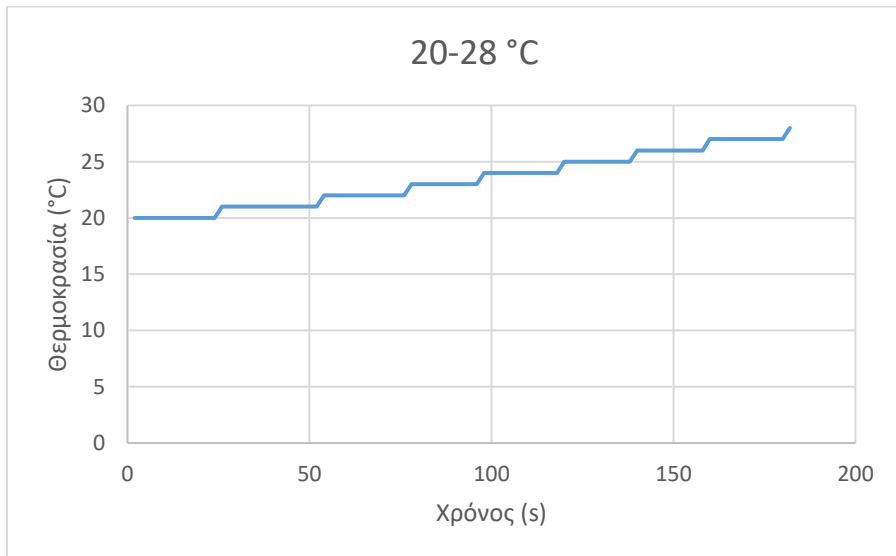
Σχήμα 40. Γράφημα μεταβολής Θερμοκρασίας από 20°C σε 40°C

Στην περίπτωση αυτή, επιτυγχάνονται σαφώς πιο γρήγορα αποτελέσματα από την προηγούμενη της ψύξης και αυτό συμβαίνει καθότι η μεταφορά της θερμότητας από το περιβάλλον στον όγκο ελέγχου λόγω είναι ευκολότερη λόγω του Δεύτερου Θερμοδυναμικού νόμου. Παρατηρείται επίσης ότι καθώς αυξάνεται ο χρόνος, ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας μειώνεται εξαιτίας της μορφής της καμπύλης του βαθμού απόδοσης.

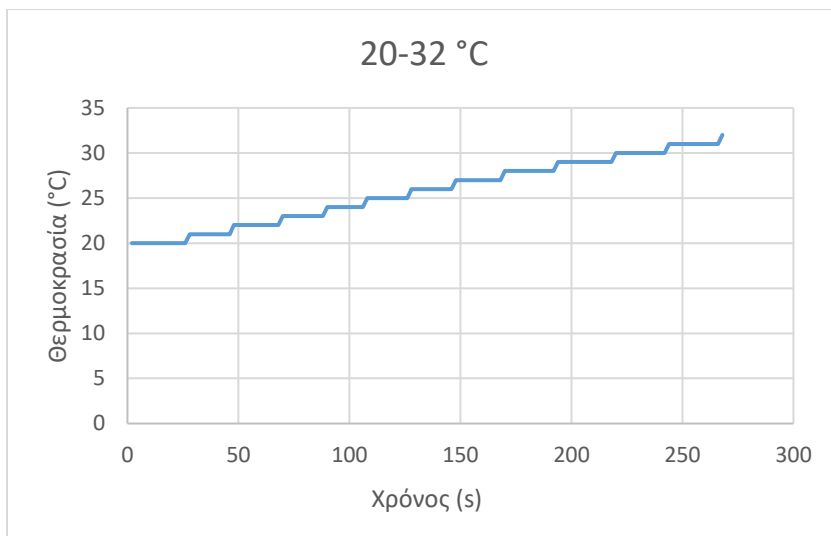
Στην πορεία των πειραμάτων πραγματοποιήθηκε μια σειρά βηματικών δοκιμών με βήμα τους 4°C και σημείο αναφοράς τους 20°C όπου ήταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων.



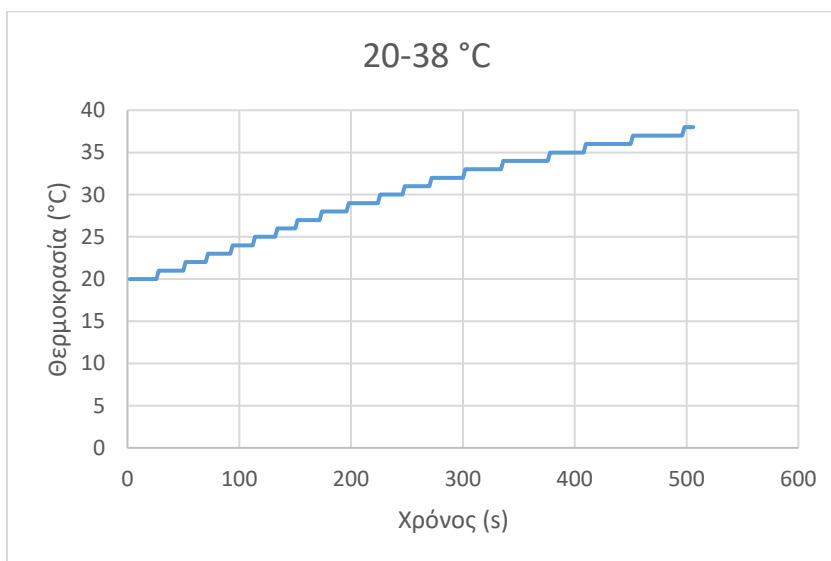
Σχήμα 41. Γράφημα μεταβολής Θερμοκρασίας από 20°C σε 24°C.



Σχήμα 42. Γράφημα μεταβολής Θερμοκρασίας από 20°C σε 28°C.

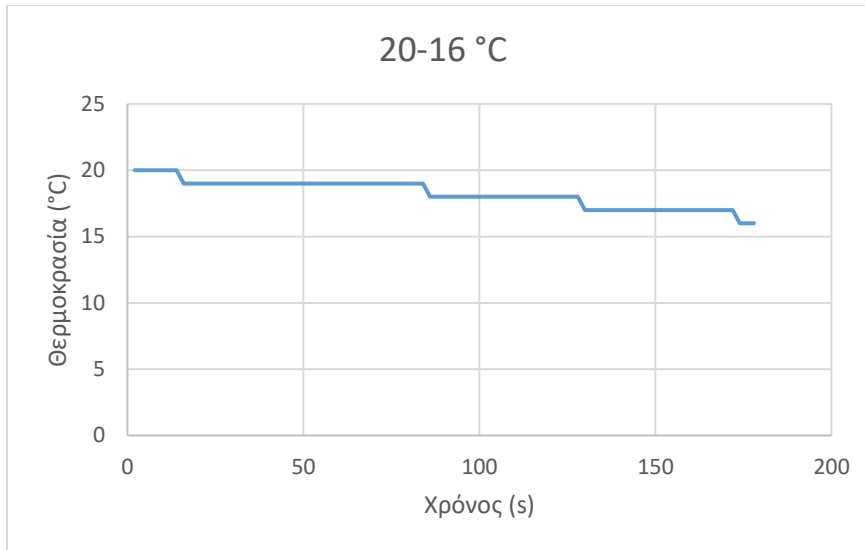


Σχήμα 43. Γράφημα μεταβολής Θερμοκρασίας από 20°C σε 32°C.

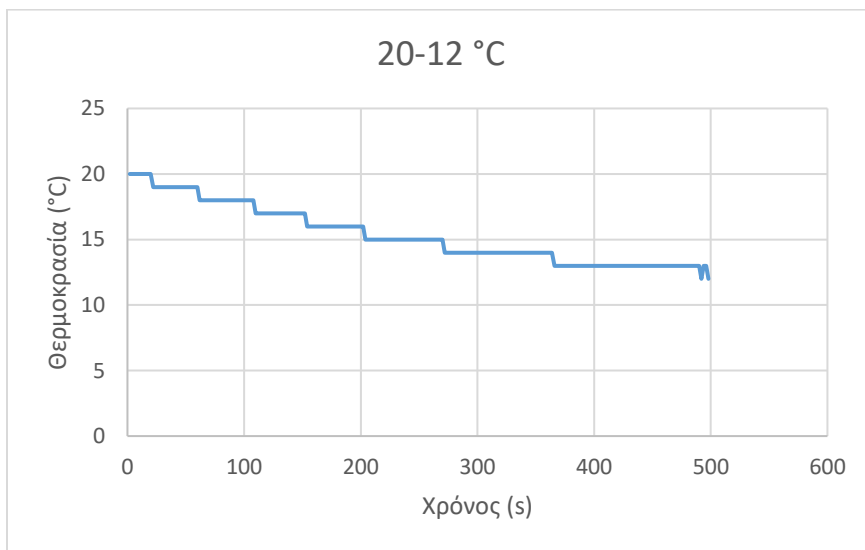


Σχήμα 44. Γράφημα μεταβολής Θερμοκρασίας από 20°C σε 38°C.

Όπως παρατηρείται η καμπύλη της θερμοκρασίας όσο αυξάνει το βήμα γίνεται πιο φανερό ότι ο ρυθμός της αύξησης της θερμοκρασίας μειώνεται. Λόγω του μικρού εύρους του βήματος στο πρώτο στάδιο δεν παρατηρείται η μείωση που περιγράφεται στο δεύτερο και στο τρίτο στάδιο όπου το εύρος γίνεται μεγαλύτερο παρατηρείται η τελική μορφή της καμπύλης.



Σχήμα 45. Γράφημα μεταβολής Θερμοκρασίας από 20°C σε 16°C.



Σχήμα 46. Γράφημα μεταβολής Θερμοκρασίας από 20°C σε 12°C.

Στην αντίστροφη διαδικασία της ψύξης, παρατηρείται ότι όσο αυξάνει το βήμα η καμπύλη της θερμοκρασίας παίρνει τέτοια κλίση έτσι ώστε ο ρυθμός της μεταβολής της θερμοκρασίας να μειώνεται.

### 3.2. Συμπεράσματα.

Συμπερασματικά, η ανάπτυξη και η λειτουργία της διάταξης πραγματοποιήθηκε συνολικά με επιτυχία και χωρίς την αντιμετώπιση σπουδαίων δυσκολιών. Τόσο το μέρος του Συστήματος αυτόματου ελέγχου όσο και το μέρος της θερμοηλεκτρικής διάταξης λειτούργησαν αυτόνομα αλλά κυρίως σε συνδυασμό το οποίο ήταν και ένας από τους βασικούς στόχους της παρούσας εργασίας.

Οι γραφικές παραστάσεις των θερμοκρασιών όπως παρουσιάστηκαν σε προηγούμενη ενότητα ήταν εντός αναμενόμενων μορφών και τιμών. Ο βαθμός αντίδρασης του συστήματος κρίθηκε ικανοποιητικός γεγονός που αποδεικνύει από τους γρήγορους χρόνους αντίδρασης του θερμοηλεκτρικού στοιχείου καθώς και του συστήματος ελέγχου.

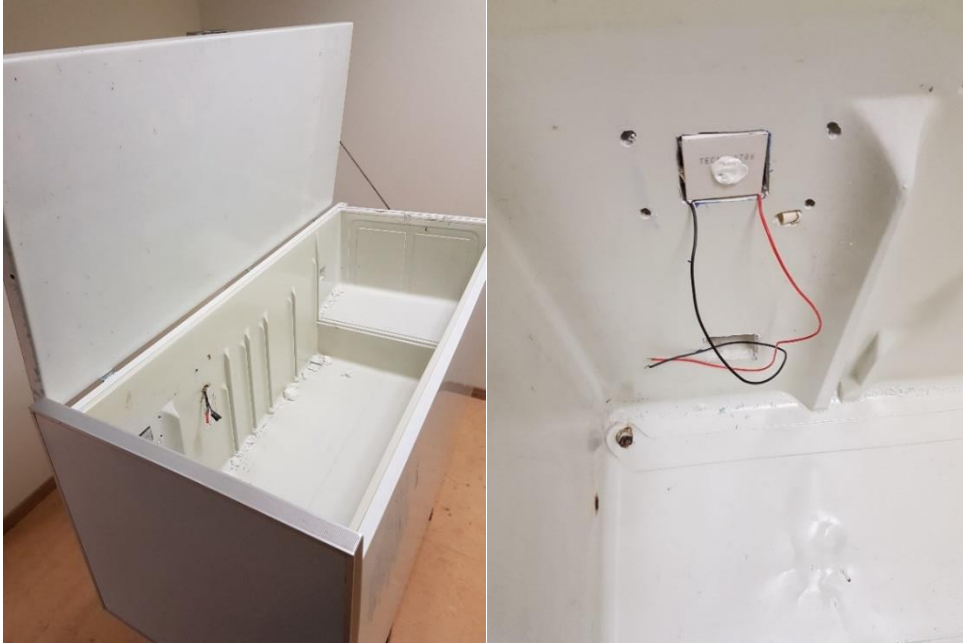
Η μετατροπή από την αύξηση της θερμοκρασίας στην μείωση όπως παρατηρήθηκε στα πειράματα, είναι μια δυνατότητα που μπορεί εύκολα να υλοποιηθεί με απλή αντιστροφή της πολικότητας του ρεύματος τροφοδοσίας των θερμοηλεκτρικών στοιχείων. Επομένως μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διατάξεις ψύξης, όπου περιστασιακά απαιτείται και θέρμανση ή το αντίστροφο.

### 3.3. Μελλοντική έρευνα – Χρήση σε μεγαλύτερη κλίμακα.

Όπως παρατηρήθηκε μετά την διεξαγωγή των πειραμάτων, η απόκριση του συστήματος στην αλλαγή της θερμοκρασίας ήταν καλή χωρίς αυτό να σημαίνει ότι μελλοντικά δεν θα μπορούσε να γίνει καλύτερη και ως προς την ταχύτητα αλλά και ως προς το εύρος των θερμοκρασιών. Τα θερμοηλεκτρικά στοιχεία (TEC) έχουν μία μεγάλη εξέλιξη και τα κράματα των ημιαγωγών που αυτή τη στιγμή βρίσκονται υπό έρευνα προμηνύουν την ακόμα καλύτερη απόδοση συστημάτων όπως αυτό που μελετήθηκε στην παρούσα εργασία.



Μια πειραματική διάταξη που κάνει χρήση των θερμοηλεκτρικών στοιχείων σε μία μεγαλύτερη κλίμακα, βρίσκεται ακόμα εν εξελίξει στα πλαίσια ενός ερευνητικού θέματος που εμπεριέχει τον έλεγχο θερμοκρασίας ενός συγκεκριμένου όγκου για την παρακολούθηση την ανάπτυξης είδους χλωρίδας. Η έκταση της διάταξης αυτής είναι 6 φορές μεγαλύτερη από την διάταξη που μελετήθηκε. Παρακάτω παρατίθενται ενδεικτικά κάποιες εικόνες από την διάταξη αυτή.



(α)

(β)

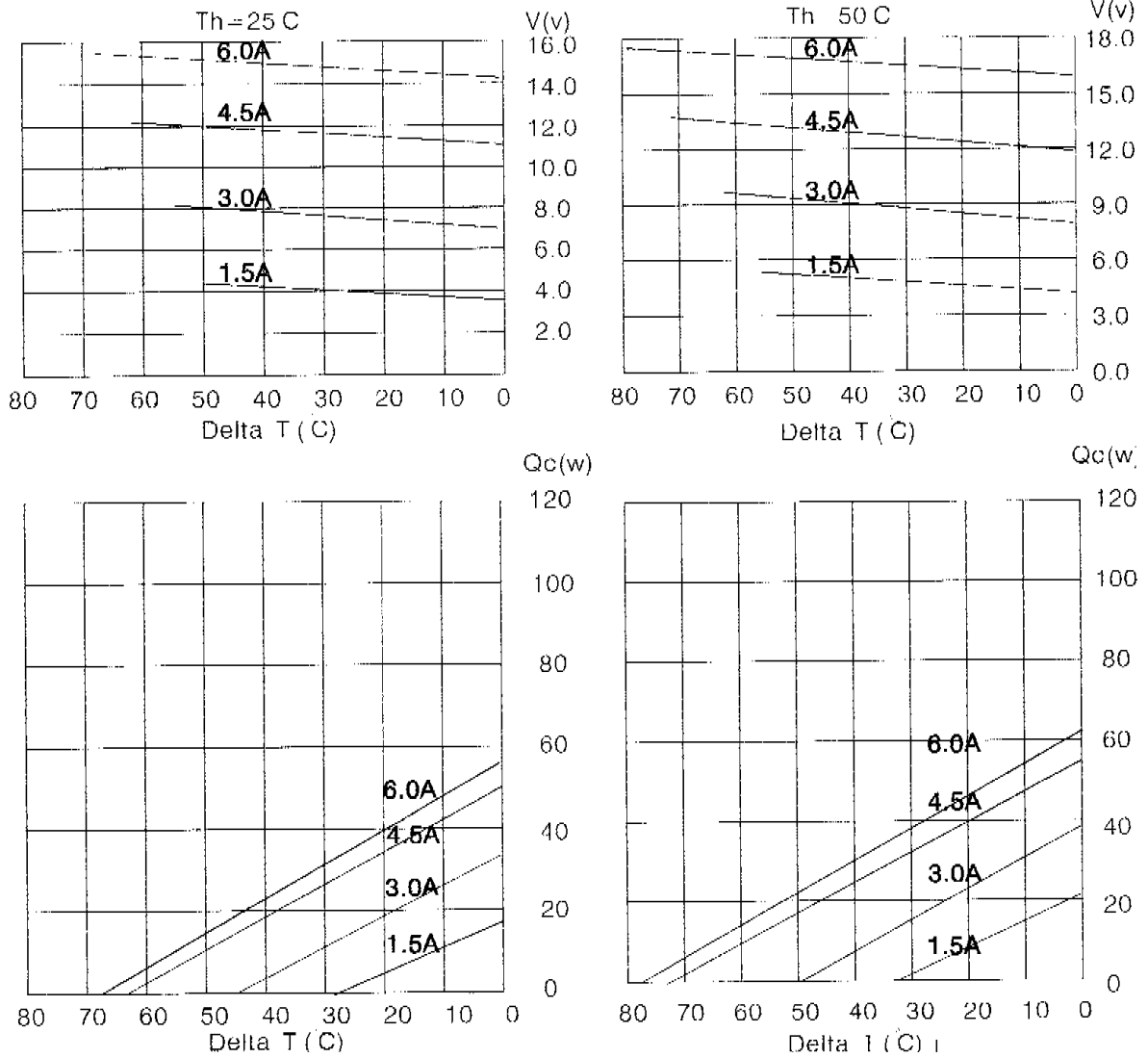
Σχήμα 48. α) Όγκος ελέγχου μεγαλύτερης κλίμακας. α) Τοποθέτηση Θερμοηλεκτρικού στοιχείου TEC.



*Σχήμα 49. Τοποθέτηση των συστημάτων συναγωγής ( Ψύκτρες και Ανεμιστήρες) από την εσωτερική και από την εξωτερική πλευρά του όγκου ελέγχου.*

## 4 Παράρτημα- Πίνακες Χαρακτηριστικών Καμπύλων.

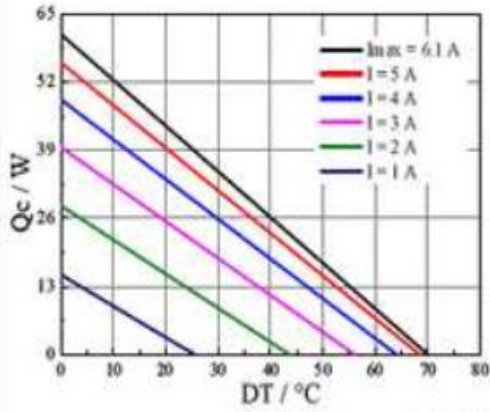
[26] [27]



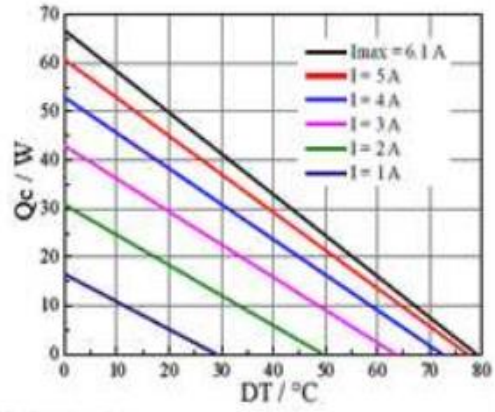
# Specification of Thermoelectric Module

TECI-12706

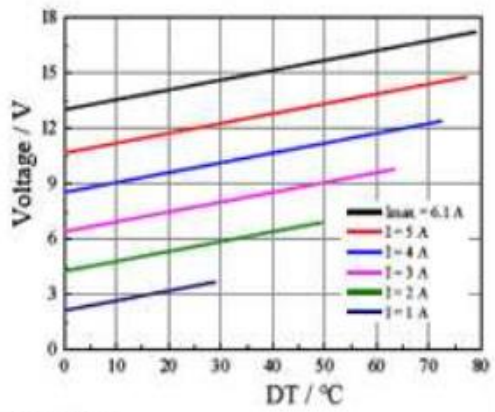
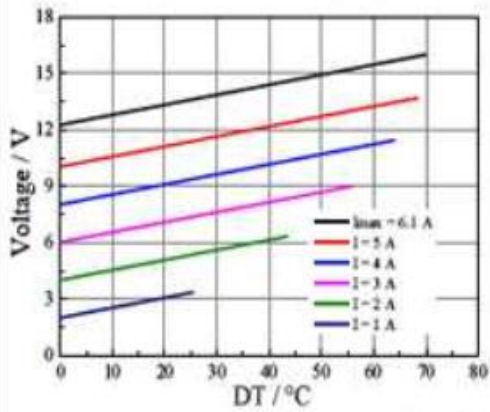
Performance Curves at  $T_h=27\text{ }^\circ\text{C}$



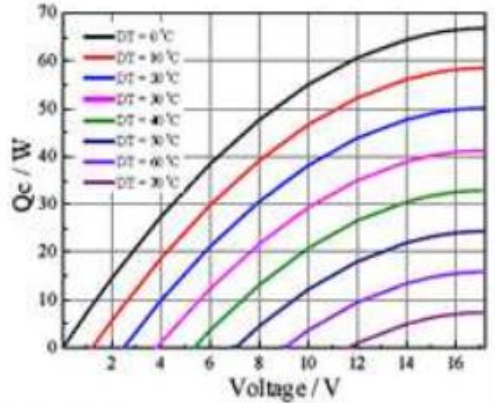
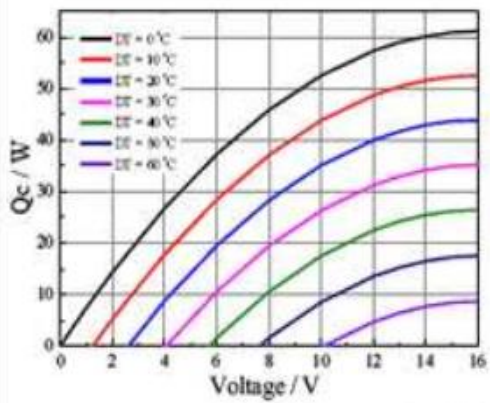
Performance Curves at  $T_h=50\text{ }^\circ\text{C}$



Standard Performance Graph  $Q_c = f(DT)$



Standard Performance Graph  $V = f(DT)$

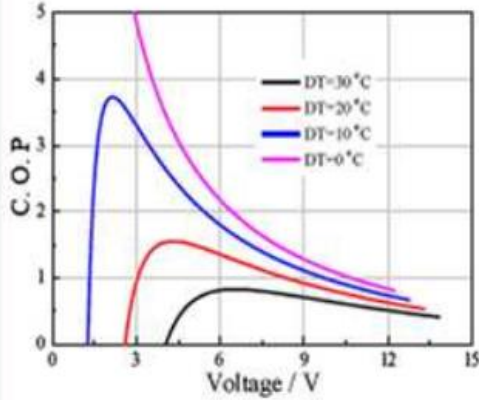


Standard Performance Graph  $Q_c = f(V)$

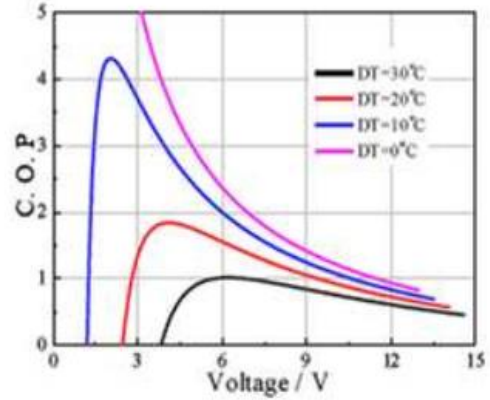
## Specification of Thermoelectric Module

**TEC1-12706**

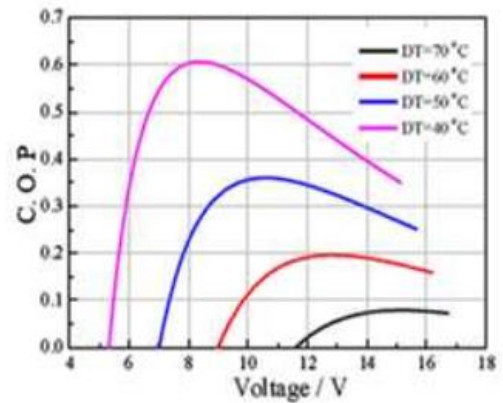
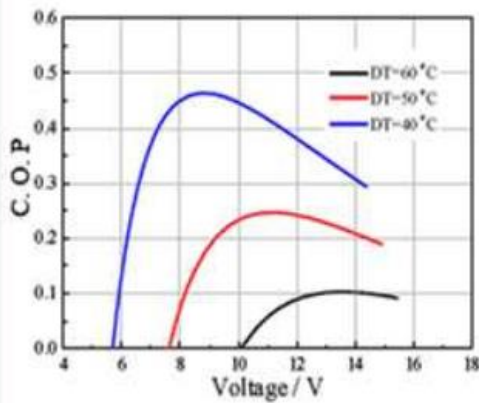
**Performance Curves at Th=27 °C**



**Performance Curves at Th=50 °C**



Standard Performance Graph COP = f(V) of  $\Delta T$  ranged from 0 to 30 °C



Standard Performance Graph COP = f(V) of  $\Delta T$  ranged from 40 to 60/70 °C

Remark: The coefficient of performance (COP) is the cooling power  $Q_c$  / input power ( $V \times I$ ).

### Operation Cautions

- Cold side of the module stuck on the object being cooled
- Hot side of the module mounted on a heat radiator
- Storage module below 100 °C
- Operation below  $I_{max}$  or  $V_{max}$

[www.thermonamic.com.cn](http://www.thermonamic.com.cn)

## Βιβλιογραφία-Αναφορές

- [1] D. Rowe, CRC Handbook of Thermoelectrics, University of Wales, Cardiff: CRC-Press, 1995.
- [2] Meisner, "Advanced Thermoelectric Materials and Generator Technology for Automotive Waste Heat at GM", San Diego, Ca, USA: Presented at 2nd Thermoelectrics Applications Workshop, Jan. 2011.
- [3] O. Bubnova, Thermoelectric properties of conducting polymers, Linköping University Department of science and technology, 2013.
- [4] Α. ΠΑΠΑΧΡΗΣΤΟΥ, ΣΥΓΚΟΜΙΔΗ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ, 2012.
- [5] Κ. ΠΡΩΤΟΨΑΛΤΗΣ, ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ TEG ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ, 2013.
- [6] Κ. Ζορμπάς, «Μελέτη της ισχύος και απόδοσης των Θερμοηλεκτρικών στοιχείων».
- [7] Γ. Μήτσου, Στοιχεία Θεωρίας Ημιαγωγών, Εργαστήριο Οπτοηλεκτρονικής και Laser.
- [8] Σ. Γιάννης Λιαπέρδος, Εισαγωγή στην Ηλεκτρονική, 2015.
- [9] Ε. Παλούρα, Στοιχεία Θεωρίας Ημιαγωγών, Θεσσαλονίκη : Τμήμα Φυσικής ΑΠΘ, , 2008.
- [10] Ν. Ντρίβας, «"ΜΕΛΕΤΗ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ"».
- [11] D. Kossyvakis και E. Hristoforou, «Development and Construction of Thermoelectric-based Devices for Energy».

- [12] «("ΤΟ ΒΗΜΑ", Άρθρο Μάχης Τράτσα, 25 Νοεμβρίου 2018».
- [13] N. B. Totala, V. P. Desai και K. N. Singh, Study and Fabrication of Thermoelectric Air Cooling and Heating System, Department of Mechanical Engineering, MIT Academy of Engineering, Alandi(D), Pune, Maharashtra.
- [14] E. Kiziroglou και M. Yeatman, Functional Materials for Sustainable Energy Applications: Materials and Techniques for Energy Harvesting, Woodhead Publishing Series in Energy No. 35, 2012.
- [15] C.Wood, "Materials for thermoelectric energy conversion",, Rep. Prog. Phys. 51, 1988.
- [16] Β. Μπίζας, Θερμοηλεκτρικά Υλικά, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- [17] <https://thermalbook.wordpress.com/cop-of-a-thermoelectric-cooler-tec/>.
- [18] P. Jatin , . M. Himanshu, P. Jigar και M. Paterl, Improvement In The COP Of Thermoelectric, INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC & TECHNOLOGY RESEARCH VOLUME 5, ISSUE 05, MAY 2016.
- [19] N. F. Gueler και R. Ahiska, Design and testing of a microprocessorcontrolled portable thermoelectric medial cooling kit, Applied Thermal Engineering, 2002.
- [20] Λιβάνιος Βασίλης και . Α. Αττάρα, "Μελέτη Θερμοηλεκτρικής Αντλίας και Βιομηχανικές Εφαρμογές", Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Αιγάλεω, 2019.
- [21] F. J., Thermoelectric application in vehicles of status, 2008.

- [22] L. E. Bell, Broader Use of Thermoelectrics Systems in Vehicles, Proceedings of the 1<sup>st</sup> Thermoelectric IA V Conference, Berlin, Germany, 2008.
- [23] C. P. FP7-ENERGY-2007-2 TREN, Solar Thermoelectric Cooling Unit For Buildings, June 2007.
- [24] Μπινιάρης Ιωάννης, Ψυκτικά Συστήματα και Εφαρμογές, Αθήνα 2015: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών.
- [25] M. Somchai και C. Lertsatitthanakorn,, Thermal Comfort Study of a Compact Thermoelectric Air Conditioner, September 2010.
- [26] L. Hebei I.T. (Shanghai) Co., Thermoelectric Cooler TEC1-12706.
- [27] [www.thermonamic.com.cn](http://www.thermonamic.com.cn), Specification of Thermoelectric Module.
- [28] D. Rowe., Thermoelectrics and its Energy Harvesting: Modules, Systems and Applications in Thermoelectrics., CRC Press, Taylor and Francis Group., 2012.
- [29] D. Pollock, Thermoelectricity: Theory, Thermometry, Tool, Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, 1985.
- [30] X. H. Luo, L. και G. Fraisse, Development and Applications of Solar-based Thermoelectric Technologies., Renewable and Sustainable Energy Reviews, June 2007.
- [31] . M. COSNIER και L. G.FRAISSE, Heat Transfer in Components and Systems for Sustainable Energy Technologies, Thermoelectric air-cooling for house ventilation, April 18 to April 20, 2007.