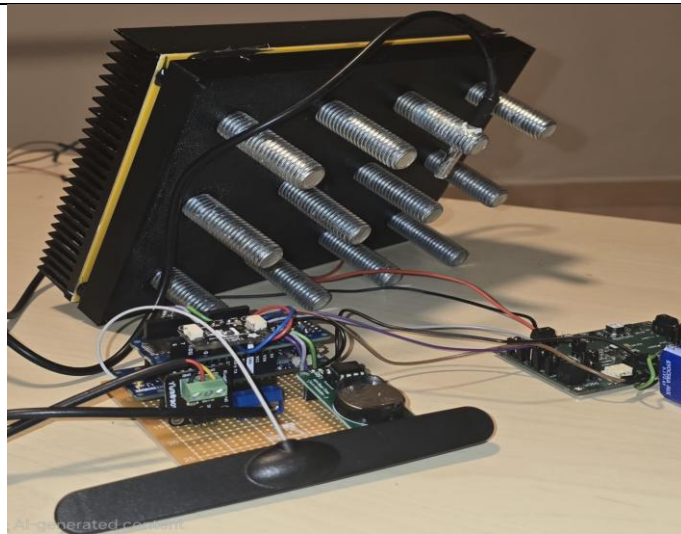


ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΠΜΣ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ
«Εκμετάλλευση της θερμότητας για την παραγωγή
ηλεκτρικής ενέργειας»



Του φοιτητή
Γεώργιου Δεληγιάννη
Αρ. Μητρώου: 52306Μ

Επιβλέπων
Ονοματεπώνυμο Κιοσκερίδης
Ιορδάνης
Βαθμίδα Καθηγητής

Ημερομηνία 29/09/2025

Τίτλος Δ.Ε. Εκμετάλλευση της θερμότητας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Κωδικός Δ.Ε. **21133**

Όνοματεπώνυμο φοιτητή Γεώργιος Δεληγιάννης

Όνοματεπώνυμο εισηγητή Κιοσκερίδης Ιορδάνης

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. 20-09-2024

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 29-09-2025

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Γεώργιου Δεληγιάννη που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

Πρόλογος

Ζούμε σε ένα κόσμο που τεχνολογία του σήμερα φαντάζει σαν ένα αναπόσπαστο κομμάτι από την καθημερινότητα μας. Καθημερινά επιστήμονες και ερευνητές παλεύουν σε έναν αγώνα σκυταλοδρομίας, προσπαθώντας να μελετήσουν ολοένα και περισσότερο τον κόσμο που ζούμε με στόχο την ανακάλυψη νέων πληροφοριών που θα οδηγήσουν στην περεταίρω ανάπτυξη της τεχνολογίας. Ένα από τα μεγαλύτερα ζητήματα που καλείται η επιστημονική κοινότητα να αντιμετωπίσει, είναι παραγωγή και αποθήκευση της ενέργειας με χαμηλό αντίκτυπο αρνητικών επιπτώσεων στο περιβάλλον, καθώς και το χαμηλό κόστος παραγωγής. Μία τεχνολογία που αξιοποιεί το φαινόμενο Seebeck χρησιμοποιώντας ημιαγωγούς φαίνεται να δίνει ελπίδες στην παραγωγή ενέργειας χαμηλής ισχύος η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ποικίλα συστήματα από την βιομηχανία έως και την οικιακή χρήση. Γνωρίζοντας λοιπόν πως η συγκεκριμένη τεχνολογία δεν έχει πάρει πολύ μεγάλη έκταση στον τομέα παραγωγής ενέργειας όσο οι υπόλοιπες ανανεώσιμες πηγές, έγινε μια μελέτη ώστε να διαπιστωθεί αν η απουσία της από την παραγωγή ενέργειας είναι δικαιολογημένη, η απλώς ένα κομμάτι του ορίζοντα που δεν έχει ερευνηθεί ακόμα αρκετά.

Περίληψη

Σε αυτήν την διπλωματική εργασία γίνεται η μελέτη της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω θερμοηλεκτρικών γεννητριών Peltier module (TEG). Η τεχνολογία αυτή βασίζεται στο φαινόμενο Seebeck και Peltier που επιτρέπει την άμεση μετατροπή θερμικών βαθμίδων σε ηλεκτρική ενέργεια. Η εργασία επικεντρώνεται στην λειτουργία των Peltier module SP1848 σε συνθήκες μικρών θερμοκρασιακών διαφορών ($2\sim 10^{\circ}C$), με στόχο την φόρτιση υπερπυκνωτών μέσω ελεγκτή συγκομιδής, και την αξιοποίηση της ενέργειας σε αυτόνομα συστήματα χαμηλής ισχύος. Μέσα από την πειραματική διερεύνηση αναδεικνύονται οι κρίσιμοι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος, όπως είναι η θερμική επαφή, η γεωμετρία συστήματος και τα υλικά κατασκευής. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν σε αυτή την εργασία δεν είναι πολύ ενθαρρυντικά σύμφωνα με τον στόχο που τέθηκε. Δεν αποκλείεται όμως ότι είναι μία τεχνολογία που δίνει την δυνατότητα για ανάπτυξη πράσινων και βιώσιμων ενεργειακών λύσεων, ικανών να υποστηρίξουν αυτόνομα ενεργειακά συστήματα σε εφαρμογές διαδικτύου των πραγμάτων (IOT).

«Harnessing Thermal Energy for Electrical Power Generation»

«George Deligiannis»

Abstract

This thesis investigates the generation of electrical energy using thermoelectric generators (TEGs) based on Peltier modules. This technology relies on the Seebeck and Peltier effects, which enable the direct conversion of temperature gradients into electrical energy. The study focuses on the operation of SP1848 Peltier module under small temperature differences (2-10°C), aiming at charging supercapacitors through an energy harvesting controller and utilizing the stored energy in low-power autonomous systems. The experimental investigation highlights critical factors affecting system's performance, such as thermal contact quality, system geometry, and material properties of Peltier modules. The results obtained in this work are not particularly encouraging in relation to the initial objectives. Nevertheless, this technology demonstrates potential for the development of green and sustainable energy solutions, capable of supporting autonomous power systems in Internet of Things (IoT) applications.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όσους με στήριξαν στην πορεία ολοκλήρωσης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Πρώτα απ' όλα στην οικογένεια μου για την αμέριστη αγάπη, υπομονή και ενθάρρυνση που μου παρείχε σε κάθε βήμα της ζωής μου. Στην σύζυγο μου, για την κατανόηση την ψυχολογική στήριξη και την πίστη της στις δυνατότητες μου, δίνοντας μου πηγή δύναμης και επιμονής. Στους φίλους μου, για την στήριξη τους και τις τρελές ιδέες τους, που αποτέλεσαν για μένα πηγή έμπνευσης. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στην εταιρεία DEL ELECTRONICS για την οικονομική ενίσχυση και την πολύτιμη συμβολή της, χωρίς την οποία η υλοποίηση και ολοκλήρωση της εργασίας αυτής θα ήταν εξαιρετικά δύσκολη. Βεβαίως δεν θα μπορούσαν να λείπουν οι ευχαριστίες μου στον διδάκτορα και επιβλέπων καθηγητή μου Κ. Ιορδάνη Κιοσκερίδη για την πολύτιμη βοήθεια του και κατατόπιση του στην έρευνα αυτή.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	iii
Περίληψη.....	iv
Abstract	v
Ευχαριστίες	vi
Περιεχόμενα	vii
Κατάλογος Εικόνων	x
Κατάλογος Πινάκων.....	xi
Συντομογραφίες.....	xii
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Σκοπός και δομή συστήματος	1
1.3 Συνεισφορά.....	2
1.4 Δομή διπλωματικής εργασίας.....	2
1.5 Επίλογος.....	2
Κεφάλαιο 2ο: Βασικές έννοιες στην συγκομιδή θερμικής ενέργειας	3
2.1 Εισαγωγή.....	3
2.2 Το φαινόμενο Seebeck	3
2.2.1 Αρχή λειτουργίας φαινομένου Seebeck.....	3
2.3 Το φαινόμενο Peltier	4
2.3.1 Βασική αρχή λειτουργίας Peltier	4
2.3.2 Πλεονεκτήματα των TEG(Peltier module).....	5
2.3.3 Μειονεκτήματα TEG.....	5
2.3.4 Εσωτερική δομή και μοντέλο θερμοηλεκτρικού στοιχείου TEG.....	5
2.3.5 Απόδοση TEG	8
2.4 Ενεργειακές πηγές συγκομιδής ενέργειας	9
2.4.1 Ολοκληρωμένα κυκλώματα συγκομιδής και διαχείρισης ενέργειας.....	10
2.4.2 Αποθήκευση ενέργειας σε υπερπυκνωτές	10
2.4.3 Μηχανική ενέργεια και συγκομιδή.....	12
2.4.4 Ηλιακή ενέργεια και συγκομιδή	14
2.4.5 Ραδιοσυχνότητες και συγκομιδή	14
2.4.6 Θερμοηλεκτρικές γεννήτριες και συγκομιδή.....	15

2.5	Ολοκληρωμένα κυκλώματα διαχείρισης ενέργειας (Power Management Integrated Circuit PMIC) 16	
2.6	Μικροελεγκτές χαμηλής κατανάλωσης (Low Power Mcu).....	17
2.6.1	Αρχές χαμηλής κατανάλωσης	17
2.6.2	Αρχιτεκτονικές μικροελεγκτών χαμηλής κατανάλωσης	17
2.7	Τεχνολογία LoRa	20
2.7.1	Διαμόρφωση Chirp Spread Spectrum(CSS).....	20
2.7.2	Ζώνες συχνοτήτων.....	20
2.7.3	Τεχνικές προδιαγραφές.....	20
2.7.4	Τοπολογία δικτύου LoRaWAN.....	21
2.7.5	Πρακτικές εφαρμογές LoRa	22
2.8	Επίλογος.....	22
Κεφάλαιο 3ο: Μελέτη και σχεδίαση του συστήματος.....		23
3.1	Εισαγωγή.....	23
3.2	Βασική Μεθοδολογία σχεδίασης.....	23
3.3	Επιλογή θερμοηλεκτρικής γεννήτριας Peltier Module.....	24
3.4	Επιλογή ελεγκτή συγκομιδής ενέργειας MPPT controller.....	26
3.5	Υπερπυκνωτές.....	28
3.6	Επιλογή μικροελεγκτή MCU.....	29
3.7	Επίλογος.....	29
Κεφάλαιο 4ο: Υλοποίηση του συστήματος		30
4.1	Εισαγωγή.....	30
4.2	Μοντέλο 1 ^ο σύνδεση θερμοηλεκτρικών γεννητριών.....	30
4.3	Μοντέλο 2 ^ο σύνδεση θερμοηλεκτρικών γεννητριών.....	33
4.4	Μοντέλο 3 ^ο	35
4.4.1	Σύνδεση κατασκευής παραγωγής ενέργειας με τον ελεγκτή διαχείρισης ενέργειας	46
4.4.2	Data logger	47
4.4.3	Συσκευή μέτρησης κατανάλωσης ρεύματος.....	48
4.5	Επίλογος.....	49
Κεφάλαιο 5ο: Μετρήσεις συστήματος.....		50
5.1	Εισαγωγή.....	50
5.2	Πείραμα 1 ^ο	50
5.3	Πείραμα 2 ^ο	52
5.4	Πείραμα 3 ^ο	53
5.5	Πείραμα 4 ^ο	54

5.6	Πείραμα 5 ^ο	55
5.7	Πείραμα 6 ^ο	56
5.8	Επίλογος.....	60
Κεφάλαιο 6ο:	Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα.....	61
6.1	Εισαγωγή.....	61
6.2	Ανάλυση στόχων.....	61
6.3	Αποτελέσματα.....	61
6.4	Μελλοντικές αναβαθμίσεις συστήματος.....	62
6.5	Σύγκρισή με παρόμοια συστήματα.....	62
6.6	Επίλογος.....	63
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		64

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2.1:Φαινόμενο Seebeck.....	3
Εικόνα 2.2 : Θερμοηλεκτρική συσκευή	6
Εικόνα 2.3 : Θερμοηλεκτρική συσκευή εμπορίου	9
Εικόνα 2.4 : Σχέδιο από θερμοηλεκτρική γεννήτρια με n αριθμό θερμοηλεκτρικών στοιχείων	9
Εικόνα 2.5 : Ολοκληρωμένο σχηματικό κύκλωμα συγκομιδής ενέργειας.....	10
Εικόνα 2.6 : Εσωτερική δομή υπερπυκνωτών.....	11
Εικόνα 2.7 : Block διάγραμμα από μηχανική συγκομιδή ενέργειας	13
Εικόνα 2.8 : Block διάγραμμα συγκομιδής ενέργειας από ραδιοσυχνότητες	14
Εικόνα 2.9 : Block διάγραμμα συγκομιδής ενέργειας με θερμοηλεκτρική γεννήτρια.....	15
Εικόνα 2.10 : Φάσμα κάλυψης τεχνολογίας LoRa.....	21
Εικόνα 2.11 : Δίκτυο επικοινωνίας τεχνολογίας LoRaWAN.....	22
Εικόνα 3.1: Block διάγραμμα του συστήματος που σχεδιάστηκε.....	24
Εικόνα 3.2 : SP1848-TEG στοιχεία απόδοσης ενέργειας $\Delta T(5-100^{\circ}\text{C})$	24
Εικόνα 3.3 : Διάγραμμα τιμών ισχύος Peltier module SP1848-TEG $\Delta T(5-25^{\circ}\text{C})$	25
Εικόνα 3.4 : Ελεγκτής PMIC AEM20940.....	26
Εικόνα 3.5 : Εσωτερικό block διάγραμμα λειτουργίας του AEM20940.....	27
Εικόνα 3.6: Πυκνωτές εμπορίου της AVX	28
Εικόνα 3.7 :Αναπτυξιακή πλακέτα MKR WAN1310	29
Εικόνα 4.1: Ολοκληρωμένη κατασκευή Peltier σε ψύκτρες	31
Εικόνα 4.2 : Peltier module σε σειρά	31
Εικόνα 4.3 : θερμοκάμερα μέτρηση θερμής πλευράς και θερμομέτρο μέτρηση κρύας πλευράς στοιχείων TEG	31
Εικόνα 4.4: Μέτρηση δύο TEG εν σειρά σε $\Delta T 10^{\circ}\text{C}$	32
Εικόνα 4.5 : Μετρήσεις 1 ^{ου} μοντέλου	32
Εικόνα 4.6 : Παράλληλη σύνδεση Peltier	33
Εικόνα 4.7: Εφαρμογή θερμοαγωγίμης πάστας και σιλικόνης	33
Εικόνα 4.8 : Τοποθέτηση ψύκτρας στο 2 ^ο μοντέλο.....	34
Εικόνα 4.9 : Σύγκριση τιμών SP1848 κατασκευαστή με μετρούμενη πραγματική. Οι τιμές αριστερά της στήλης είναι στην μονάδα mV, mA	34
Εικόνα 4.10 : Σχεδίαση ψύκτρας στο Fushion360	35
Εικόνα 4.11 : Κάτω πλευρά ψύκτρας.....	35
Εικόνα 4.12 : Επάνω πλευρά ψύκτρας.....	35
Εικόνα 4.13 : Κατασκευή ψύκτρας από το μηχανουργείο κάτω πλευρά	36
Εικόνα 4.14 : Κατασκευή ψύκτρας από το μηχανουργείο πάνω πλευρά.....	36
Εικόνα 4.15 : Τοποθέτηση Peltier στην ψύκτρα	37
Εικόνα 4.16 :Εφαρμογή του συστήματος σε κρύο νερό	38
Εικόνα 4.17: Τοποθέτηση ψύκτρας και στις δύο πλευρές των Peltier	38
Εικόνα 4.18 :Ρεύμα σε σχέση με τον χρόνο για $\Delta T 10^{\circ}\text{C}$	39
Εικόνα 4.19 : Μοντέλο ψύκτρας Peltier από σχεδίαση στο Fushion360	40
Εικόνα 4.20 : Peltier module σχεδιασμένα στο Fushion360	40
Εικόνα 4.21: Peltier module σε εφαρμογή με τα μπουλόνια σχεδίαση στο Fushion360	41
Εικόνα 4.22 : Κατασκευή των Peltier με το σύστημα.....	41
Εικόνα 4.23 : εφαρμογή μπουλονιών πάνω στα Peltier	42
Εικόνα 4.24:Μήτρα υποδοχής για τα Peltier module 3D σχέδιο	42

Εικόνα 4.25: Μήτρα υποδοχής για τα Peltier module πραγματικό μοντέλο	43
Εικόνα 4.26 : Τοποθέτηση των Peltier στην μήτρα υποδοχής	43
Εικόνα 4.27 : κατασκευή μήτρας μπουλονιών στο Fushion360	44
Εικόνα 4.28	44
Εικόνα 4.29 Εκτυπωμένο μοντέλο μήτρας από 3D εκτυπωτή	45
Εικόνα 4.30 : Ολοκληρωμένο μοντέλο της κατασκευής στο Fushion360	45
Εικόνα 4.31: Σύνθεση εκτυπωμένων μοντέλων τελική κατασκευή	46
Εικόνα 4.32 : Ελεγκτής AEM20940 αναπτυξιακή πλακέτα της EPEAS	46
Εικόνα 4.33 : PMIC ελεγκτής	47
Εικόνα 4.34	47
Εικόνα 4.35 : Data logger.....	47
Εικόνα 4.36	47
Εικόνα 4.37 : Τοποθέτηση αισθητήρων θερμοκρασίας θερμή πλευρά.....	48
Εικόνα 4.38 : Τοποθέτηση αισθητήρων θερμοκρασίας κρύα πλευρά.....	48
Εικόνα 4.39 : Μετρητής κατανάλωσης κυκλωμάτων	48
Εικόνα 5.1 : Στοιχεία πειράματος.....	51
Εικόνα 5.2 : Διάγραμμα πειράματος 1 Κάθετος άξονας αριστερά θερμοκρασία και δεξιά τάση	
Εικόνα 5.3 : Στοιχεία πειράματος 2.....	52
Εικόνα 5.4 : Διάγραμμα πειράματος 2 Κάθετος άξονας αριστερά θερμοκρασία και δεξιά τάση	
Εικόνα 5.5 : Διάγραμμα πειράματος 3 Αριστερά θερμοκρασία, δεξιά τάση	
Εικόνα 5.6 : Μετρήσεις ρεύματος. Κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης.....	53
Εικόνα 5.7: Κατάσταση εκπομπής LoRa	54
Εικόνα 5.8: Διάγραμμα πειράματος 4. Αριστερά θερμοκρασία, δεξιά τάση	
Εικόνα 5.9:	55
Εικόνα 5.10: Διάγραμμα πειράματος 5. Αριστερά θερμοκρασία, δεξιά τάση	
Εικόνα 5.11: Διάγραμμα πειράματος 6. Αριστερά θερμοκρασία, δεξιά τάση	
Εικόνα 5.12:Κατανάλωση ρεύματος MCU σε εκπομπή LoRa	57
Εικόνα 5.13: Κατάσταση μη λειτουργίας MCU.....	57
Εικόνα 5.14 : κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης MCU.....	58
Εικόνα 5.15: Κατάσταση εκκίνησης μικροελεγκτή από απώλεια τροφοδοσίας.....	58
Εικόνα 5.16 Διαδικασία πειράματος 6	59
Εικόνα 5.17: Διαδικασία πειράματος 6 οπτική 2	59

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1 Τυπικές τιμές συντελεστή Seebeck.....	4
Πίνακας 2.2 : Σύγκριση μονάδων αποθήκευσης ενέργειας.....	11
Πίνακας 2.3 Στοιχεία μηχανικής συγκομιδής ενέργειας	13
Πίνακας 2.4 : Στοιχεία συγκομιδής ενέργειας από θερμοηλεκτρικά στοιχεία	15
Πίνακας 3.1: Αναλυτικός πίνακας τιμών στοιχείου SP1848-TEG $\Delta T(5-25^{\circ}C)$	25
Πίνακας 4.1 : Τάση σε $\Delta T 10^{\circ}$ ανά δύο στοιχεία εν σειρά	

Συντομογραφίες

Δ.Ε. Διπλωματική Εργασία

ΔΙΠΙΑΕ Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδος

Π.Ε. Πτυχιακή Εργασία

TEG Thermoelectric Generator θερμοηλεκτρική γεννήτρια

Peltier module αναφέρεται σε θερμοηλεκτρική γεννήτρια TEG

IOT Internet Of Things Διαδίκτυο των πραγμάτων

PMIC Power Management Integrated Circuit Ελεγκτής συγκομιδής και διαχείρισης ενέργειας

ADC Analog to Digital Converter

Onewire Πρωτόκολλο επικοινωνίας

LORA LongRange πρωτόκολλο ασύρματης μετάδοσης δεδομένων

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή

Στην σύγχρονη εποχή η ανάγκη για αυτόνομα ενεργειακά συστήματα IOT (Internet Of Things) αυξάνεται εκθετικά. Οι ανάγκες της βιομηχανίας, τις κοινωνίας αλλά και του ίδιου του πλανήτη για περισσότερη χρήση πράσινης ενέργειας, έχουν επιστρατεύσει ολόκληρες εταιρείες τεχνολογίας με σκοπό την παραγωγή νέων καινοτόμων τεχνολογιών, που θα χρησιμοποιούν νέους τρόπους παραγωγής ενέργειας.

Ένας νέος τέτοιος τρόπος είναι και η εκμετάλλευση των θερμικών αποβλήτων που παράγονται από την χρήση άλλων μορφών ενέργειας. Ο τρόπος αυτός βασίζεται σε δύο βασικά φαινόμενα της φυσικής. Το φαινόμενο Seebeck που μας περιγράφει την παραγωγή ηλεκτρικού φορτίου, όταν υπάρχουν δύο διαφορετικά επίπεδα θερμοκρασίας μεταξύ μετάλλων ή ημιαγωγών και το φαινόμενο Peltier που δημιουργεί το αντίστροφο φαινόμενο. Εάν εφαρμοστεί ηλεκτρική τάση σε δύο διαφορετικούς ημιαγωγούς, η κίνηση των ηλεκτρικών φορτίων προκαλεί μεταφορά θερμότητας και δημιουργία διαφοράς θερμοκρασίας. Όσο μεγαλύτερη διαφορά θερμοκρασίας τόσο πιο έντονο το φαινόμενο. Κάποιοι από τους τομείς που χρησιμοποιούν την τεχνολογία αυτή είναι η ιατρική, η αυτοκινητοβιομηχανία, η στρατιωτική τεχνολογία, η διαστημική και οι κτηριακές εγκαταστάσεις με πρωτοπόρο στην σχεδίαση τέτοιων συστημάτων την NASA.

1.2 Σκοπός και δομή συστήματος

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των θερμοηλεκτρικών φαινομένων και η σχεδίαση ενός συστήματος το οποίο θα παράγει, θα αποθηκεύει και θα διαχειρίζεται την παραγόμενη ενέργεια. Η κατεύθυνση στην σχεδίαση του συστήματος είναι αρκετά διαφορετική από την συνήθη εφαρμογή που ακολουθούν παρόμοια συστήματα. Δεν στοχεύει στην εκμετάλλευση παραγόμενων αποβλήτων θερμοκρασίας, αλλά στην αξιοποίηση της θερμοκρασίας από τον περιβάλλοντα χώρο στο οποίο βρίσκεται η συσκευή. Στην παρούσα εργασία η προσέγγιση θα γίνει σε περιβάλλον που υπάρχει τρεχούμενο νερό από την μία μεριά και από την άλλη η θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η προσέγγιση αυτή είναι σπάνια για τον λόγο, ότι είναι αρκετά δύσκολη η συγκομιδή ενέργειας από θερμοκρασιακές στάθμες που δεν έχουν μεγάλη διαφορά μεταξύ τους (<15°C). Από μόνο του αυτό αποτελεί μια πρόκληση, η οποία δίνει ισχυρό κίνητρο για την μελέτη και σχεδίαση ενός συστήματος που θα ανταπεξέλθει σε αυτήν την απαίτηση.

Στόχος είναι να μελετηθεί και να δημιουργηθεί ένα σύστημα το οποίο θα είναι ενεργειακά αυτόνομο και να μην χρήζει περαιτέρω συντήρηση σε διάστημα πολλών ετών.

Το σύστημα θα αποτελείται από θερμοηλεκτρικά στοιχεία (Peltier Modules), τα οποία θα χρησιμοποιηθούν ως γεννήτριες τους συστήματος. Η μεταφορά και η αποθήκευση της ενέργειας από τα Peltier Module σε μονάδα αποθήκευσης ενέργειας με κατευθείαν σύνδεση είναι πρακτικά αδύνατη, λόγω της μικρής διαφοράς θερμοκρασίας, η παραγόμενη τάση θα είναι στην μονάδα των ελάχιστων mV. Οπότε η χρήση κατάλληλων ολοκληρωμένων κυκλωμάτων για την διαμεσολάβηση μεταξύ των Peltier και της μονάδας αποθήκευσης είναι απαραίτητη και αναγκαία. Η επιλογή τέτοιων κυκλωμάτων δεν είναι εύκολη καθώς η τεχνολογία σε αυτό το κομμάτι δεν έχει ωριμάσει αρκετά και βρίσκεται συνεχώς στην έρευνα και ανάπτυξη πιο αποδοτικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, καθιστώντας έτσι την επιλογή για το σύστημα περιορισμένη και δύσκολη. Στο σύστημα ως στοιχείο για αποθήκευση ενέργειας χρησιμοποιούνται υπερπυκνωτές οι οποίοι μας δίνουν αρκετά πλεονεκτήματα όπως θα δούμε και στα επόμενα κεφάλαια. Αυτή την ενέργεια στην συνέχεια την διαχειρίζεται ένα σύστημα το οποίο και αξιοποιεί ώστε να αποστείλει ασύρματα τα δεδομένα χρησιμοποιώντας την τεχνολογία Long Range (LoRa). Τέλος κατασκευάστηκε ένα πρωτότυπο μοντέλο του συστήματος όπου και έγιναν οι κατάλληλες μετρήσεις. Στην συνέχεια προχωρήσαμε στην κατασκευή της τελικής πλακέτας που έγιναν

οι κατάλληλες διορθώσεις του προηγούμενου μοντέλου δίνοντας επίσης και μία πιο επαγγελματική προσέγγιση. Αφού έγιναν μετρήσεις και στο δεύτερο σύστημα η εργασία προχωράει με την μελέτη, επεξήγηση και σύγκριση των αποτελεσμάτων, καθώς και στα συμπεράσματα που προκύπτουν και την λειτουργία και δομή ενός τέτοιου συστήματος.

1.3 Συνεισφορά

Η συνεισφορά των συστημάτων συγκομιδής ενέργειας με θερμοηλεκτρικές γεννήτριες αξιοποιώντας είτε την απορριπτόμενη θερμότητα είτε την διαφορά θερμοκρασίας από το περιβάλλον είναι καίριας σημασίας καθώς συμβάλει στην ενεργειακή αποδοτικότητα των συστημάτων και την μείωση της σπατάλης ενέργειας. Αποτελεί μία πράσινη μορφή ενέργειας, χωρίς εκπομπές ρύπων πράγμα που καθιστά αυτή την τεχνολογία φιλική προς το περιβάλλον. Οι απαιτήσεις συντήρησης της τεχνολογίας αυτής είναι μηδαμινές καθώς δεν αποτελείται από κινούμενα μέρη. Επιπλέον η δυνατότητα για παροχή ενέργειας σε αισθητήρες και συσκευές ενσωματωμένων συστημάτων χωρίς την απαίτηση μπαταρίας καθιστά την τεχνολογία αυτή ιδιαίτερα χρήσιμη σε ιδιαίτερες εφαρμογές που η λειτουργικότητα και η αξιοπιστία είναι πρωταρχικές απαιτήσεις. Η συνεχής ανακάλυψη νέων υλικών με υψηλότερη απόδοση διευρύνει τις προοπτικές αυτής της τεχνολογίας σε βιομηχανικές και οικιακές εφαρμογές δίνοντας λύση στην συνεχή ενεργειακή ζήτηση.

1.4 Δομή διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από 6 κεφάλαια το καθένα αποτελούμενο από υποενότητες. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στο θέμα της διπλωματικής εργασίας. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μία συνοπτική αναφορά στις αρχές θεωρίας των θερμοηλεκτρικών φαινομένων καθώς και στην βασική θεωρία και επεξήγηση των συστημάτων που χρησιμοποιούνται σε αυτή την έρευνα. Στο τρίτο κεφάλαιο πραγματοποιείται η μελέτη και ο σχεδιασμός του συστήματος. Αναφέρονται αναλυτικά τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν, ο τρόπος σχεδίασης και δίνονται βασικές μετρήσεις από τα πρωταρχικά συστήματα που δημιουργήθηκαν. Στο τέταρτο κεφάλαιο αναφέρεται στην υλοποίηση του συστήματος στην μηχανολογική και ηλεκτρονική σχεδίαση καθώς γίνεται αναφορά σε ενδεικτικές τιμές από μετρήσεις του συστήματος κατά την διάρκεια του κατασκευαστικού μέρους. Στο πέμπτο κεφάλαιο είναι το κεφάλαιο που πραγματοποιούνται όλες οι μετρήσεις του συστήματος σε 6 διαφορετικά πειράματα. Μέσω αυτών των πειραμάτων προχωράει το κεφάλαιο 6 όπου βγαίνουν τα βασικά συμπεράσματα για την συγκεκριμένη μελέτη, καθώς αποδίδονται και ενδεικτικές προτάσεις για την βελτίωση του συστήματος.

1.5 Επίλογος

Εν κατακλείδι, η παρούσα διπλωματική εργασία μελετά και αναπτύσσει ένα αυτόνομο ενεργειακό σύστημα συγκομιδής ενέργειας που χρησιμοποιεί θερμοηλεκτρικές γεννήτριες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Διερευνώνται οι αρχές λειτουργίας του συστήματος καθώς ο σχεδιασμός και η υλοποίηση του, με σκοπό την ανάδειξη της πρακτικής αξίας των θερμοηλεκτρικών γεννητριών σε εφαρμογές χαμηλής διαφοράς θερμοκρασίας. Η εργασία φιλοδοξεί να συμβάλει στην κατανόηση και αξιοποίηση αυτής της μορφής παραγωγής ενέργειας, προτείνοντας μία λύση σε εφαρμογές που επιζητούν μεγάλη ενεργειακή αυτόρκεια, ανοίγοντας δρόμο για νέες εφαρμογές και εξελιγμένα ενεργειακά συστήματα.

Κεφάλαιο 2ο: Βασικές έννοιες στην συγκομιδή θερμικής ενέργειας

2.1 Εισαγωγή

Για την ορθή κατανόηση της λειτουργίας του συστήματος που σχεδιάστηκε οφείλουμε να γνωρίζουμε κάποιες βασικές αρχές για τα θερμοηλεκτρικά φαινόμενα. Το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο είναι η μετατροπή των διαφορετικών επιπέδων θερμοκρασίας σε ηλεκτρική τάση και αντιστρόφως. Η θερμοηλεκτρική συσκευή μπορεί να παράγει τάση όταν κάθε μία από τις πλευρές της βρίσκεται σε διαφορετική θερμοκρασία. Αντιθέτως, όταν εφαρμόζεται τάση σε αυτή δημιουργείται διαφορά θερμοκρασίας. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να αξιοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, για την μέτρηση θερμοκρασίας, την θέρμανση ή ψύξη αντικειμένων. Ο όρος θερμοηλεκτρικό φαινόμενο ή θερμοηλεκτρισμός περιλαμβάνει τρία ξεχωριστά φαινόμενα. Το φαινόμενο Seebeck, το φαινόμενο Peltier και το φαινόμενο Thomson.

2.2 Το φαινόμενο Seebeck

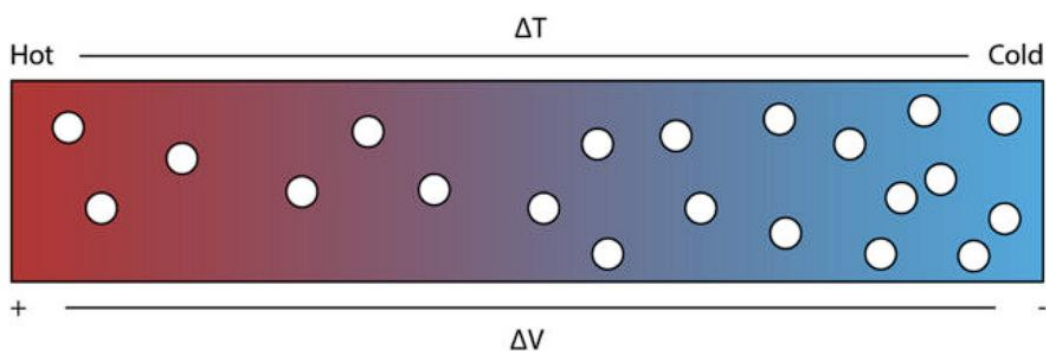
Το 1822 ο Γερμανός φυσικός Thomas Johan Seebeck ανακαλύπτει μία θεμελιώδη φυσική αρχή πίσω από την θερμοηλεκτρική παραγωγή ενέργειας [10]. Στο πείραμα αυτό ο Seebeck παρατηρεί ότι ένα κύκλωμα το οποίο αποτελείται από δύο διαφορετικά μέταλλα, και διατηρούν διαφορετικές θερμοκρασίες μεταξύ τους παράγει ηλεκτρεγερτική δύναμη. Αρχικά ο Seebeck απέδωσε το φαινόμενο σε θερμομαγνητική επίδραση, αλλά ο Hans Christian Orsted, διορθώνει την ερμηνεία εξηγώντας πως η διαφορά θερμοκρασίας παράγει ηλεκτρικό ρεύμα, και ότι παραγωγή μαγνητικού πεδίου είναι δευτερογενής συνέπεια.

2.2.1 Αρχή λειτουργίας φαινομένου Seebeck

Το φαινόμενο Seebeck περιγράφει πως όταν δύο διαφορετικά μέταλλα ή ημιαγωγοί που είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους εκτεθούν σε διαφορετικές θερμοκρασίες μπορεί να παραχθεί τάση [10].

$$S = \Delta V / \Delta T \quad (2.1)$$

Ο S είναι ο συντελεστής Seebeck μεταξύ των δύο υλικών. Το ΔV είναι η τάση και το ΔT είναι η διαφορά θερμοκρασίας (Kelvin) [10].



Εικόνα 2.1: Φαινόμενο Seebeck

Η φυσική του φαινομένου στηρίζεται στην διαφορά των επιπέδων Fermi των δύο υλικών. Όταν δύο υλικά με διαφορετικά επίπεδα συνδεθούν, τα ηλεκτρόνια ρέουν από το υλικό με υψηλότερο επίπεδο Fermi προς εκείνο με χαμηλότερο, δημιουργώντας έτσι μία διαφορά δυναμικού.

Τυπικές τιμές του συντελεστή Seebeck είναι:

Πίνακας 2.1 Τυπικές τιμές συντελεστή Seebeck

Μέταλλα	$\alpha_{AB} = 1-10\mu\text{V/KS}$
Ημιαγωγοί	$\alpha_{AB} = 10-1000\mu\text{V/KS}$

Η εξίσωση 2.1 μπορεί να γραφεί αλλιώς

$$\Delta V = S \cdot \Delta T \quad (2.2)$$

Για παράδειγμα αν έχουμε δύο υλικά με διαφορά συντελεστή Seebeck $S_A - S_B = 200\mu\text{V/K}$ και διαφορά θερμοκρασίας $\Delta T = 50\text{K}$ τότε η παραγόμενη τάση είναι :

$$V = 200 \times 10^{-6} \cdot 50 = 10\text{mV}$$

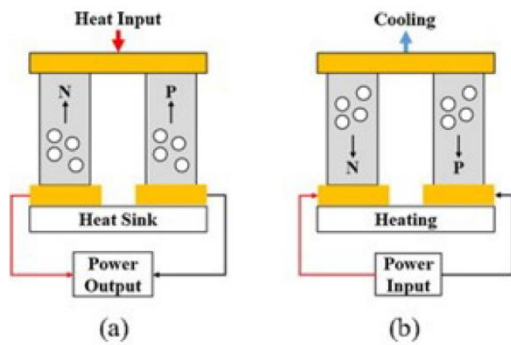
Γι' αυτό και τα θερμοηλεκτρικά στοιχεία Peltier (Thermoelectric Generator TEG) φτιάχνονται από ημιαγωγά υλικά, συνήθως από βισμούθιο τελλούριο (Bi_2Te_3). Υπάρχουν αρκετά θερμοηλεκτρικά ζεύγη συνδεδεμένα σε σειρά, μέσα σε ένα TEG ώστε η τάση να μπορεί να είναι σε χρήσιμα επίπεδα για εφαρμογές.

2.3 Το φαινόμενο Peltier

Η αντίστροφη διαδικασία από αυτή που περιγράψαμε παραπάνω, δηλαδή του Seebeck, ονομάζεται Peltier και είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους. Ενώ το φαινόμενο Seebeck μετατρέπει την διαφορά θερμοκρασίας σε ηλεκτρική ενέργεια, το φαινόμενο Peltier χρησιμοποιεί ηλεκτρικό ρεύμα και δημιουργεί θερμοκρασιακή διαφορά. Αυτή η σχέση μεταξύ τους αποτελεί το θεμέλιο της σύγχρονης θερμοηλεκτρικής τεχνολογίας που χρησιμοποιείται τόσο στην ψύξη, όσο και για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το φαινόμενο αυτό ανακαλύφθηκε το 1834 από τον Γάλλο φυσικό Jean Athanase Peltier.

2.3.1 Βασική αρχή λειτουργίας Peltier

Το φαινόμενο Peltier παρατηρείται όταν το ηλεκτρικό ρεύμα διαρρέει δύο διαφορετικούς αγωγούς. Στην ένωση τους παρατηρείται παραγωγή ή απορρόφηση της θερμότητας, ανάλογα με την φορά που εφαρμόζεται το ρεύμα. Αυτό συμβαίνει διότι τα ηλεκτρόνια φέρουν διαφορετική ενέργεια σε κάθε υλικό και έτσι όταν το ρεύμα μεταβαίνει από το ένα υλικό στο άλλο η διαφορά ενέργειας εκδηλώνεται με την μορφή θερμικού φαινομένου.



Εικόνα 2.2 : Θερμοηλεκτρική συσκευή



Εικόνα 2.3 : Θερμοηλεκτρική συσκευή εμπορίου

Η θερμότητα που παράγεται ή απορροφάται στην ένωση ανά μονάδα χρόνου δίνεται από :

$$Q = (P\alpha - P\beta) \cdot I \quad (2.3)$$

Όπου $P\alpha$ και $P\beta$ είναι οι συντελεστές Peltier των αγωγών α και β . I είναι το ηλεκτρικό ρεύμα και Q είναι ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας (W).

Η θεμελιώδης σχέση που συνδέει τα φαινόμενα Peltier και Seebeck είναι η δεύτερη σχέση Thomson

$$\Pi = T \cdot S \quad (2.4)$$

Όπου Π είναι ο συντελεστής Peltier (V) και T η απόλυτη θερμοκρασία (K).

2.3.2 Πλεονεκτήματα των TEG (Peltier module)

Οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες TEG είναι συσκευές στερεάς κατάστασης πράγμα που τις καθιστά ιδανικές για συνθήκες μηδενικής βαρύτητας, σε καταστάσεις υψηλών πιέσεων ακόμα και σε υποθαλάσσιες εφαρμογές. Δεν έχουν κινούμενα μέρη πράγμα που τις καθιστά αξιόπιστες μη χρίζοντας κάποια απαραίτητη συντήρηση. Η αντοχή και η περιβαλλοντική ανοσία σε ακραίες συνθήκες, τα καθιστά απαραίτητες συσκευές σε διαστημικές αποστολές. Ένα ακόμη πλεονέκτημα τους είναι ότι μπορούν να εγκατασταθούν σε υπάρχουσες τεχνολογίες, ώστε να ενισχύσουν την απόδοσή τους μειώνοντας έτσι το περιβαλλοντικό αντίκτυπο σε σημαντικό βαθμό, καθώς αξιοποιούν την απορριπτόμενη θερμότητα για παραγωγή έργου.

2.3.3 Μειονεκτήματα TEG

Η θερμοηλεκτρικές γεννήτριες χρειάζονται κατάλληλα ολοκληρωμένα κυκλώματα ώστε η ενέργεια που παράγουν να είναι σε χρήσιμα επίπεδα. Αυτό αυξάνει την πολυπλοκότητα κατασκευής τέτοιου συστήματος. Έχουν χαμηλή απόδοση για πρακτικές εφαρμογές. Ακόμα χρειάζονται υψηλή διαφορά θερμοκρασίας για ικανοποιητική λειτουργία, πρέπει να γίνεται θερμική διαχείριση με παθητικά συστήματα ψύξης ώστε να είναι αποδοτικά ικανά. Επιπλέον το υψηλό κόστος κατασκευής λόγω σπάνιων στοιχείων δόμησης είναι ένα αρνητικό στοιχείο που αποτρέπει την εφαρμογή τους σε πιο καθημερινές εφαρμογές.

2.3.4 Εσωτερική δομή και μοντέλο θερμοηλεκτρικού στοιχείου TEG

Η διάταξη μίας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας αποτελείται από ένα ή περισσότερα θερμοηλεκτρικά ζεύγη. Το απλούστερο TEG αποτελείται από ένα θερμοζεύγος θερμοηλεκτρικών στοιχείων τύπου P και τύπου N, τα οποία συνδέονται ηλεκτρικά σε σειρά και θερμικά σε παράλληλη

διάταξη. Η διάκριση μεταξύ υλικών τύπου P και N είναι σημαντική. Το στοιχείο P έχει θετικό συντελεστή Seebeck και περίσσεια οπών. Το στοιχείο N έχει αρνητικό συντελεστή Seebeck και περίσσεια ελεύθερων ηλεκτρονίων. Τα δύο αυτά στοιχεία ενώνονται στη μία πλευρά με έναν ηλεκτρικό αγωγό, σχηματίζοντας επαφή (Junction), συνήθως από χαλκό. Όπως φαίνεται στην εικόνα 2.4 συμβολίζεται μία τάση V_2 στην επαφή τύπου N (ψυχρή πλευρά), και μία τάση V_1 στην επαφή τύπου P. Συνδέοντας ένα ηλεκτρικό φορτίο αντίστασης R σχηματίζεται κύκλωμα. Όταν το ρεύμα ρέει μέσα από το φορτίο αναπτύσσεται μία τάση στα άκρα του. Το θερμοηλεκτρικό στοιχείο θα παράγει ρεύμα όσο υπάρχει θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στις δύο πλευρές. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασιακή διαφορά τόσο μεγαλύτερη ισχύς παράγεται. Πολλά θερμοηλεκτρικά ζεύγη σχηματίζουν ένα TEG, συνδεδεμένα ηλεκτρικά σε σειρά και εγκιβωτισμένα ανάμεσα σε δύο κεραμικές πλάκες, ώστε να μεγιστοποιείται η παραγόμενη τάση.

Η ισοδύναμη εσωτερική αντίσταση των θερμοηλεκτρικών στοιχείων τα οποία είναι συνδεδεμένα σε σειρά μεταξύ τους, δίνεται από την σχέση:

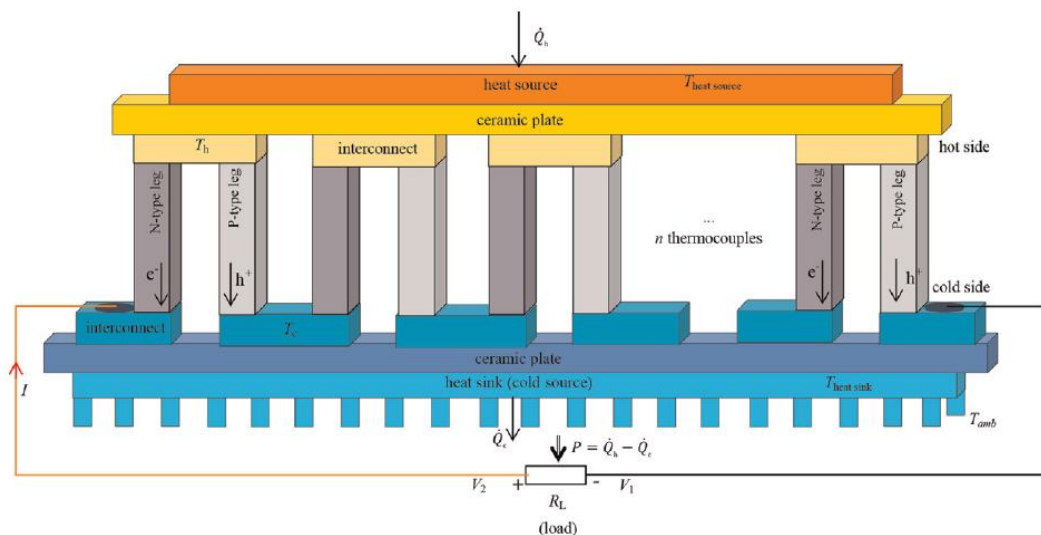
$$R = n \left(\frac{\rho_p L_p}{S_p} + \frac{\rho_N L_N}{S_N} \right) \quad (2.5)$$

Όπου n , είναι ο αριθμός θερμοηλεκτρικών στοιχείων.

Η ισοδύναμη θερμική αγωγιμότητα δίνεται από την σχέση:

$$K = n \left(\frac{k_p S_p}{L_p} + \frac{k_N S_N}{L_N} \right) \quad (2.6)$$

- Το $\rho = R \cdot \frac{S}{L}$ είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση κάθε στοιχείου.
- S είναι διατομή κάθε στοιχείου σε m^2 .
- L είναι το μήκος κάθε στοιχείου σε m .
- K είναι η θερμική αγωγιμότητα κάθε στοιχείου $K = \frac{kS}{L}$ σε $[W \cdot (m \cdot K)^{-1}]$



Εικόνα 2.4 : Σχέδιο από θερμοηλεκτρική γεννήτρια με αριθμό n θερμοηλεκτρικών στοιχείων [9].

Αυτές οι σχέσεις απλοποιούνται αρκετά, εάν υποθέσουμε ότι τα στοιχεία P και N έχουν ακριβώς τις ίδιες ιδιότητες ($L = L_p = L_N$ και $S = S_p = S_N$). Επιπλέον ($\rho = \rho_p = \rho_N$ και $K = K_p = K_N$). Οπότε γίνονται :

$$R = n \cdot \frac{2\rho L}{S} \quad (2.7)$$

$$K = n \cdot \frac{2kS}{L} \quad (2.8)$$

Η τάση στα άκρα του TEG δίνεται από την σχέση

$$V_{TEG} = V_2 - V_1 = n I R - \alpha_{PN} \Delta T = n I R - V_{Seebeck} \quad (2.9)$$

Όπου $\alpha_{PN} = \alpha_P - \alpha_N$ συντελεστής Seebeck του θερμοζεύγους

Το ρεύμα που παρέχεται στο κύκλωμα είναι

$$I = \frac{V_{Seebeck}}{n \cdot R + R_L} = \frac{n \cdot \alpha_{PN} \cdot \Delta T}{n \cdot R + R_L} \quad (2.10)$$

Η ηλεκτρική ισχύς εξόδου που αποδίδεται από το TEG στο φορτίο είναι

$$P = n \cdot \alpha_{PN} \cdot I \cdot \Delta T - R \cdot I^2 \quad (2.11)$$

Από την άλλη μεριά, η ηλεκτρική ισχύς εξόδου που απορροφάται από το φορτίο λαμβάνοντας υπόψη την εικόνα 2.4 είναι :

$$P = -V_{TEG} \cdot I = n \cdot R \cdot I^2 - \alpha_{PN} \cdot I \cdot \Delta T \quad (2.12)$$

Η ηλεκτρική ισχύς που απορροφάται από την αντίσταση φορτίου RL είναι :

$$P_R = I^2 \cdot R_L = \left(\frac{n \cdot \alpha_{PN} \cdot \Delta T}{n \cdot R + R_L} \right)^2 \cdot R_L \quad (2.13)$$

Η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς εξόδου ενός TEG επιτυγχάνεται όταν η ισχύς μεγιστοποιείται ως προς το ηλεκτρικό ρεύμα.

$$P_{max} = \frac{n \cdot (\alpha_{PN} \cdot \Delta T)^2}{4R} \quad (2.14)$$

$$I_{max} = \frac{\alpha_{PN} \cdot \Delta T}{2R} \quad (2.15)$$

Η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς εξόδου αποδίδεται από το TEG όταν η αντίσταση φορτίου είναι ίση με την ισοδύναμη εσωτερική αντίσταση των θερμοηλεκτρικών ζευγών σε σειρά ($R_L = R$). Γι' αυτό τον λόγο χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικά κυκλώματα τα οποία συνδέονται μεταξύ των TEG και του στοιχείου αποθήκευσης ενέργειας, ώστε να απορροφάτε η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς. Την ανάλυση αυτών των κυκλωμάτων γίνεται στην επόμενη υπό ενότητα.

Η θερμική ροή που απορροφάται στην θερμή επαφή εξαρτάται από τις ιδιότητες του θερμοηλεκτρικού υλικού και την γεωμετρία των στοιχείων του.

$$Q = n \cdot \alpha_{PN} \cdot T_h \cdot I - \frac{R \cdot I^2}{2} + K \cdot \Delta T \quad (2.16)$$

2.3.5 Απόδοση TEG

Η τυπική απόδοση των TEG κυμαίνεται μεταξύ 3-8%, αν και μπορεί να φτάσει υψηλότερα. Οι παλαιότερες συσκευές χρησιμοποιούσαν διμεταλλικές επαφές και ήταν ογκώδεις, πράγμα που δυσκόλευε την αξιοποίηση τους σε εφαρμογές που απαιτούσαν μικρό μέγεθος. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας και των ημιαγωγών, ο όγκος αυτών των συσκευών μειώθηκε αισθητά φτάνοντας ακόμα και τα μερικά χιλιοστά. Τα πιο πρόσφατα μοντέλα χρησιμοποιούν ντοπαρισμένους ημιαγωγούς με Βισμουθίο Τελλούριο Bi₂Te₃, Τελλούριο του μόλυβδου (PbTe), οξείδιο μαγγανίου του ασβεστίου (Ca₂Mn₃O₈) ή συνδυασμούς αυτών ανάλογα την θερμοκρασία εφαρμογής.

Η ηλεκτρική απόδοση μίας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας (TEG), ή αλλιώς θερμοηλεκτρική απόδοση μετατροπής, ορίζεται ο λόγος της ηλεκτρικής ισχύος εξόδου P, που παραδίδεται στο φορτίο, προς τον ρυθμό θερμότητας Q_h που απορροφάται στη θερμή επαφή του TEG και μεταφέρεται μέσω της διάταξης. Το TEG δηλαδή μετατρέπει τον ρυθμό θερμότητας εισόδου Q_h σε ηλεκτρική ισχύ εξόδου P με απόδοση n_{TEG}

$$n_{TEG} = \frac{P}{Q_h} \quad (2.17)$$

Η εξίσωση αυτή αναλύεται περαιτέρω ως

$$n_{TEG} = \frac{n \cdot R_L \cdot \Delta T \cdot \alpha_{PN}^2}{K \cdot (nR + R_L)^2 + n \cdot R_L \cdot T_h \cdot \alpha_{PN}^2 + n \cdot R \cdot T \cdot \alpha_{PN}^2} \quad (2.18)$$

Όπου

- n ο αριθμός των θερμοηλεκτρικών ζευγών
- R_L η αντίσταση φορτίου
- ΔT η διαφορά θερμοκρασίας $T_h - T_c$ σε K
- α_{PN} ο συντελεστής Seebeck του θερμοζεύγους
- K η θερμική αγωγιμότητα [W/K]
- R η εσωτερική αντίσταση TEG
- T_h η θερμοκρασίας θερμής πλευράς
- T η μέση θερμοκρασία λειτουργίας $T = \frac{T_h + T_c}{2}$ σε K

Η απόδοση που αντιστοιχεί στη μέγιστη παραγόμενη ισχύ P_{max} είναι:

$$n_{TEG} = \frac{\Delta T}{4} \cdot \frac{Z}{1 + T_h + T} \quad (2.19)$$

Όπου

$$Z = \frac{\alpha_{PN}^2}{K \cdot R} \quad (2.20)$$

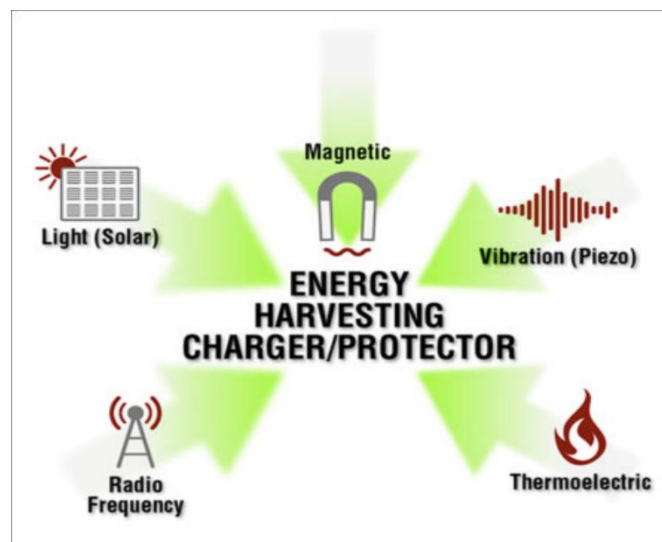
Είναι ο συντελεστής απόδοσης (figure of merit) ενός θερμοζεύγους.

2.4 Ενεργειακές πηγές συγκομιδής ενέργειας

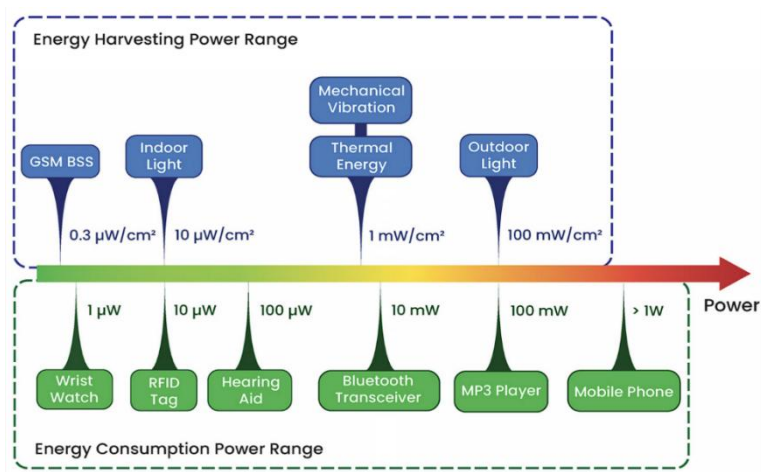
Η συγκομιδή ενέργειας (energy harvesting) είναι η διαδικασία κατά την οποία η ενέργεια συλλαμβάνεται από το περιβάλλον ενός συστήματος και μετατρέπεται σε αξιοποιήσιμη ηλεκτρική ισχύ.

Η συγκομιδή ενέργειας επιτρέπει σε ηλεκτρονικές συσκευές να λειτουργούν σε περιοχές όπου δεν υπάρχει συμβατική πηγή ισχύος, εξαλείφοντας την ανάγκη για καλώδια τροφοδοσίας ή συχνές αντικαταστάσεις μπαταριών.

Ένα σύστημα τέτοιο συνήθως περιλαμβάνει κυκλώματα για την φόρτιση του στοιχείου αποθήκευσης της ενέργειας και την διαχείριση της ισχύος, παρέχοντας ρύθμιση και προστασία στα υπόλοιπα κυκλώματα. Στην εικόνα 2.5 παρουσιάζονται πηγές ενέργειας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αυτά τα συστήματα.

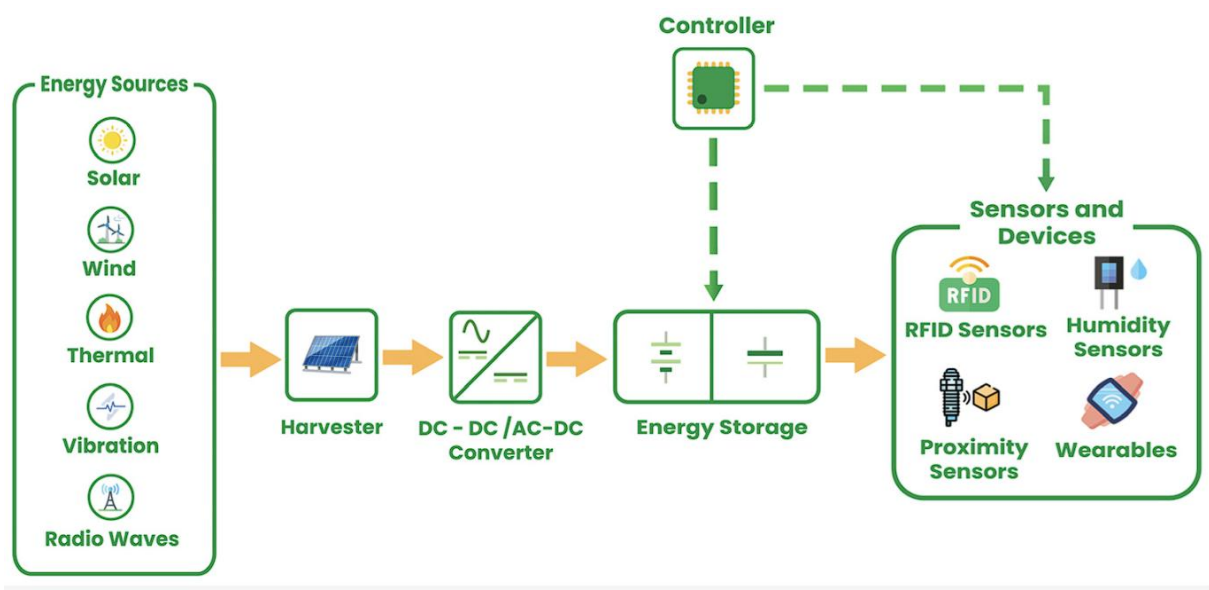


Εικόνα 2.5 : Πηγές ενέργειας για συγκομιδή



Εικόνα 2.6 : Τιμές ενέργειας από πηγές παραγωγής και αντιστοίχιση με φορτία

2.4.1 Ολοκληρωμένα κυκλώματα συγκομιδής και διαχείρισης ενέργειας



Εικόνα 2.7 : Ολοκληρωμένο σχηματικό κύκλωμα συγκομιδής ενέργειας

Τα στάδια ενός συστήματος συγκομιδής ενέργειας φαίνονται στην εικόνα 2.7. Η ενέργεια από την εκάστοτε πηγή συλλέγεται και μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω του ενεργειακού συλλέκτη. Στην συνέχεια, ο μετατροπέας ισχύος προσαρμόζει την παραγόμενη τάση και το ρεύμα σε κατάλληλα επίπεδα, προκειμένου να μπορεί να αποθηκευτεί η ενέργεια στο στοιχείο φόρτισης. Ένα τέτοιο στοιχείο μπορεί να είναι μία μπαταρία ή ένας υπερπυκνωτής. Ο ελεγκτής του συστήματος διαχειρίζεται τόσο την αποθήκευση της ενέργειας στο στοιχείο όσο και την τροφοδότηση του φορτίου. Στα προηγμένα βελτιστοποιημένα συστήματα, η απόδοση αυξάνεται μέσω της εφαρμογής αλγορίθμων που χρησιμοποιούν οι ελεγκτές. Τέτοιοι αλγόριθμοι ανιχνεύουν το σημείο μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracking- MPPT) και επιτρέπουν την μέγιστη δυνατή μεταφορά ενέργειας από την πηγή προς το στοιχείο αποθήκευσης της ενέργειας.

2.4.2 Αποθήκευση ενέργειας σε υπερπυκνωτές

Στα συστήματα συγκομιδής ενέργειας οι πιο συχνές μέθοδοι αποθήκευσης της ενέργειας είναι ή μέσω μπαταριών ή μέσω πυκνωτών υψηλής χωρητικότητας. Παρακάτω θα γίνει μία ανάλυση στην τεχνολογία των υπερπυκνωτών, καθώς θα γίνει και σύγκριση με την τεχνολογία των μπαταριών.

Λόγω ότι οι υπερπυκνωτές είναι κατασκευασμένοι από ηλεκτρόδια με μεγαλύτερη επιφάνεια και λεπτότερα διηλεκτρικά υλικά, μπορούν και έχουν χωρητικότητα έως και ένα εκατομμύριο φορές μεγαλύτερη από τους συμβατικούς πυκνωτές. Έτσι μπορούν και γεφυρώνουν το χάσμα που υπάρχει ανάμεσα στους συμβατικούς πυκνωτές και στις μπαταρίες, δίνοντας λύσεις σε βιομηχανικές, ενεργειακές και υπολογιστικές εφαρμογές.

Στον παρακάτω εικόνα γίνεται μία σύγκριση στις βασικές διαφορές μεταξύ των πυκνωτών, των υπερπυκνωτών και των μπαταριών.

Πίνακας 2.2 : Σύγκριση μονάδων αποθήκευσης ενέργειας

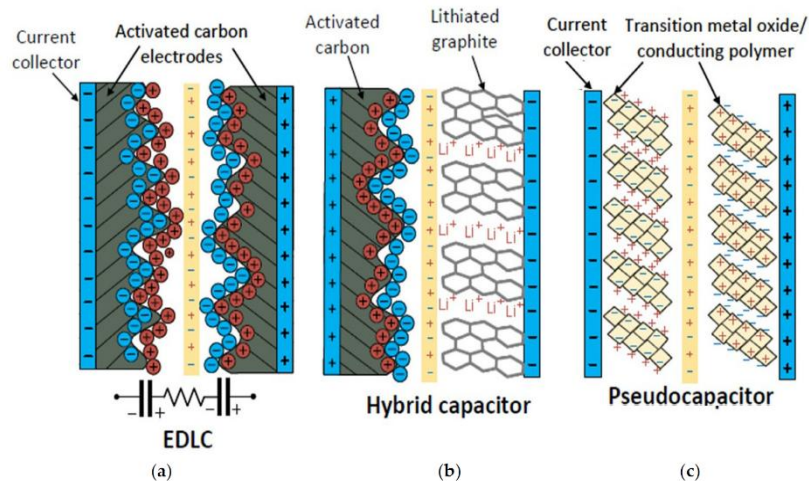
Characteristics	Capacitors	Supercapacitors	Batteries
Power density (W/kg)	$>10^6$	60,000	<3000
Energy density (Wh/kg)	<0.1	1 to 73	10 to 250
Equivalent series resistance	Typically, in mΩ range	Typically, in mΩ range	Fractional Ω to few Ω
Charge time (s)	10^{-3} to 10^{-6}	0.3 to 60	3600 to 18,000
Discharge time (s)	10^{-3} to 10^{-6}	0.1 to 1800	600 to 10,800
Lifetime cycles	10^6	50,000 to 1,100,000	500 to 18,000
Typical lifetime (years)	30	30	5–20
Operating temperature range (°C)	-40 to +125	-40 to +70	-20 to +65

Όπως βλέπουμε και στον πίνακα 2.2 τα πλεονεκτήματα των υπερπυκνωτών όπως η μεγάλη διάρκεια ζωής, η χαμηλή εσωτερική αντίσταση, η ανθεκτικότητα και η αμεσότητα στον τρόπο φόρτισης εκ φόρτισης και η μη απαίτηση πολύπλοκων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων διαχείρισης είναι ελκυστικά χαρακτηρισίσηκα για να επιλεγούν σε εφαρμογές συγκομιδής ενέργειας.

Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε την δομή των τριών βασικών υπερπυκνωτών. Υπάρχουν οι συμμετρικοί υπερπυκνωτές διπλού ηλεκτρικού στρώματος (EDLCs), οι υβριδικοί υπερπυκνωτές και οι ψευδοπυκνωτές. Οι EDLCs κατασκευάζονται από δύο ηλεκτρόδια βάση τον άνθρακα και διαχωρίζονται με ένα διηλεκτρικό όπως φαίνεται στην εικόνα 2.8a όταν εφαρμόζεται τάση στα ηλεκτρόδια, τα φορτία στο υλικό μετακινούνται προς τα ηλεκτρόδια αντίθετου δυναμικού. Το διπλό ηλεκτρικό στρώμα που σχηματίζεται δίπλα σε ένα ηλεκτρόδιο μεγάλης επιφάνειας και ένα ηλεκτρολύτη αξιοποιείται αποτελεσματικά. Οι μεγαλύτερες επιφάνειες πλακών και οι μικρότερες αποστάσεις μπορούν να προσφέρουν υψηλότερη αποτελεσματική χωρητικότητα.

Οι υβριδικοί πυκνωτές (Hybrid SCs) είναι ένας συνδυασμός από μπαταρία και πυκνωτή. Στην εσωτερική τους δομή χρησιμοποιούν κατά ένα μέρος την χημεία της μπαταρίας και στο άλλο αυτή του πυκνωτή σε μία ενιαία δομή εικόνα 2.8b Λόγω της υψηλότερης ενέργειας σε σύγκριση με τους EDLCs και της καλής πυκνότητας ισχύος, υπάρχει μεγάλη ζήτηση γι' αυτού του τύπου πυκνωτών τα τελευταία χρόνια. Στους υβριδικούς το ένα ηλεκτρόδιο είναι από ενεργοποιημένο άνθρακα και το άλλο είναι παρόμοιο με ηλεκτρόδιο που χρησιμοποιούν οι μπαταρίες ιόντων λιθίου.

Ο τρίτος τύπος είναι ο πυκνωτής-μπαταρία που βασίζεται στην έννοια της ψευδοχωρητικότητας. Αν και οι πυκνωτές αυτοί έχουν ενεργειακή πυκνότητα συγκρίσιμη με αυτή των μπαταριών μόλυβδου-οξέος παρουσιάζουν σχετική χαμηλή πυκνότητα ισχύος και έλλειψη σταθερότητας στους κύκλους φόρτισης σε σχέση με τους EDLCs.



Εικόνα 2.8 : Εσωτερική δομή υπερπυκνωτών

2.4.3 Μηχανική ενέργεια και συγκομιδή

Στην εικόνα 2.5 παρατηρούμε τις πιο σύνηθες μορφές ενέργειας όπου μπορούμε να αξιοποιήσουμε για την παραγωγή ισχύος. Στην εικόνα 2.6 παρατηρούμε τιμές παραγόμενης ισχύος ανάλογα την πηγή της ενέργειας, καθώς και για ποια εφαρμογή είναι βέλτιστη.

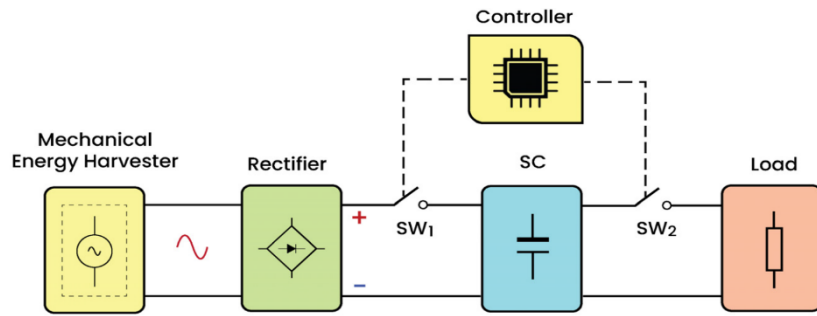
Αρκετές είναι η βιομηχανικές συσκευές όπου κατά την λειτουργία τους παράγουν δονήσεις. Μπορεί λοιπόν να χρησιμοποιηθεί μια αδρανής μάζα που όταν εκτίθεται σε αυτές τις δονήσεις να παράγει κίνηση. Αυτή η κίνηση μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια με τρεις μηχανισμούς. Το πιεζοηλεκτρικό, το ηλεκτροστατικό και το ηλεκτρομαγνητικό.

Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά μπορούν και αξιοποιούν την μηχανική ενέργεια. Λόγω της ικανότητας τους να ανιχνεύουν δονήσεις, τα καθιστά μία από τις επιλογές για την συγκομιδή ενέργειας. Σήμερα υπάρχουν υλικά όπως πχ (χαλαζίας, μολυβδαίνιο, ζirkόνιο-τιτάνιο) τα οποία θεωρούνται και ιδιαίτερα αποδοτικά. Μελέτες έδειξαν ότι μπορούν να φτάσουν και το 35% σε βαθμό απόδοσης σε ανάλογες βέβαια συνθήκες. Οι εφαρμογές ποικίλουν όπως για παράδειγμα σε πειραματικά για έλεγχο πειραματικών δοκιμών κάμψης, σε ασύρματους διακόπτες φωτισμού, σε εκμετάλλευση της ανθρώπινης κίνησης, και σε ορθοπεδικά εμφυτεύματα.

Η ηλεκτροστατική συγκομιδή ενέργειας βασίζεται στην μεταβολή της χωρητικότητας (μεταβλητούς πυκνωτές) που εξαρτώνται από δονήσεις. Αυτές οι δονήσεις μπορούν και απομακρύνουν τα ηλεκτρόδια ενός μεταβλητού πυκνωτή και έτσι η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Η βασική αρχή λειτουργίας εξηγείται από τους Beedy, et al, όπου η συγκομιδή ενέργειας πραγματοποιείται μέσω του έργου που ασκείται ενάντια στην δύναμη Coulomb μεταξύ των πλακών του πυκνωτή. Ο Roundy, et al, ταξινομεί αυτές τις γεννήτριες σε τρεις τύπους: In plane overlap (επικάλυψη εντός επιπέδου). In-plane gap closing (κλείσιμο διακένου εντός επιπέδου). Out-of-plane gap (κλείσιμο διακένου εκτός επιπέδου). Αρκετές εργασίες περιγράφουν παραλλαγές αυτών των γεννητριών, ενώ άλλες ερευνητικές ομάδες (Arakawa, Peano, Sterken) μελέτησαν γεννήτριες που χρησιμοποιούν υλικά με μόνιμο ηλεκτρικό φορτίο.

Ακόμη ένας τρόπος συγκομιδής ενέργειας είναι μέσω του ηλεκτρομαγνητισμού ο οποίος βασίζεται στην αρχή της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Η κατασκευή αυτών των συσκευών περιλαμβάνει μόνιμους μαγνήτες πάνω σε έναν άξονα που ταλαντώνονται γύρω από ένα πηνίο. Από τα τέλη της δεκαετίας του 1990, ερευνητές έχουν αναπτύξει διάφορες τεχνικές τέτοιου τύπου για συγκομιδή ενέργειας. Αυτές οι συσκευές προσφέρουν το πλεονέκτημα ότι είναι έγκλειστες και δεν εκτίθενται στο εξωτερικό περιβάλλον. Είναι αξιόπιστες καθώς δεν υπάρχει κάποια μηχανική επαφή στα μέρη της, ώστε να χρίζει συντήρηση. Το μειονέκτημα όμως είναι ότι τα ηλεκτρομαγνητικά υλικά είναι ογκώδη πράγμα που την κάνει αυτή την τεχνολογία να ενσωματώνεται πιο δύσκολα σε μικροσυστήματα, όπως οι τεχνολογίες MEMS.

Ένα σύστημα συγκομιδής μηχανικής ενέργειας με υπερπυκνωτές απεικονίζεται στην εικόνα 2.9. Το σύστημα αποτελείται από 5 βασικά τμήματα. Την μηχανική συσκευή που μετατρέπει την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική, το κύκλωμα ανόρθωσης λόγω το ότι η παραγόμενη τάση είναι εναλλασσόμενη τους υπερπυκνωτές για την αποθήκευση της ενέργειας, το κύκλωμα ελέγχου και το φορτίο. Η αποθηκευμένη ενέργεια αξιοποιείται ανάλογα με την ζήτηση που έχει το φορτίο και ελέγχεται μέσω του ελεγκτή. Ο πίνακας 2.3 μας δείχνει διάφορες εφαρμογές που χρησιμοποιούν την μηχανική ενέργεια για συγκομιδή και υπερπυκνωτές για αποθήκευση.



Εικόνα 2.9 : Block διάγραμμα από μηχανική συγκομιδή ενέργειας

Πίνακας 2.3 Στοιχεία μηχανικής συγκομιδής ενέργειας

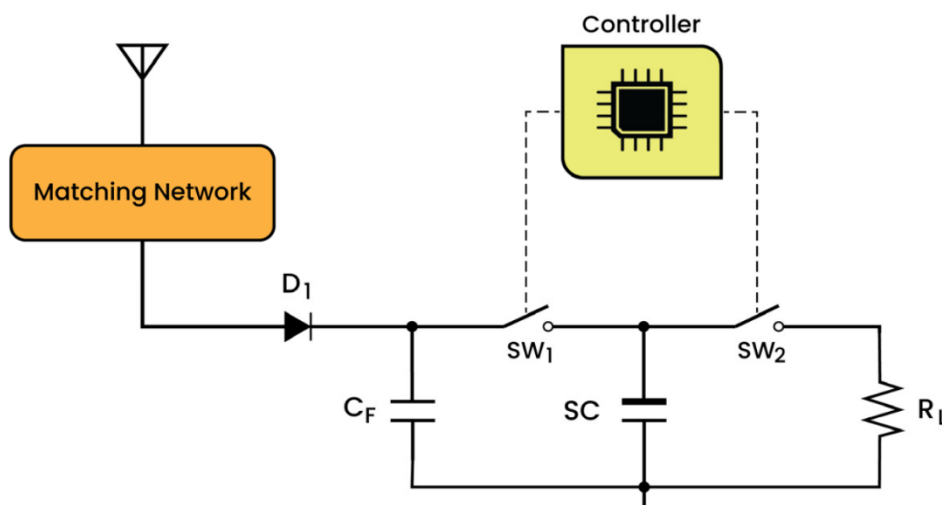
Converter Type	Study	Hardware	Applications	Role of Supercapacitors
Piezoelectric	Energy harvesting and storage with ceramic piezoelectric transducers coupled with an ionic liquid-based supercapacitor [27]	Integrated piezoelectric unit, ionic liquid-based micro-SC, and a bridge rectifier	Wearable electronics	To reduce the charge times and overall system volume
	Piezoelectric-driven self-powered supercapacitor for wearable device applications [43]	LTC3588-1 (from Analog Devices, Wilmington, NC, USA) based circuit designs which combine a low-loss full-wave bridge rectifier with a high-efficiency buck converter	Wearable electronics	Energy storage element with low leakage current
	Analysis of batteries or supercapacitor as energy storage device for a sound energy harvester system [44]	Q220-A4-503YB (from https://piezo.com/ , Woburn, MA, USA) piezoelectric energy transducer, 0.22 F SC, voltage multiplier, voltage regulator	Low-power electronic devices, LEDs	More efficient energy storage device due to their better charging and discharging characteristics
	Self-charging piezo-supercapacitor: one-step mechanical energy conversion and storage [37]	Fabricated piezoelectric driven self-charging SC	Portable electronic devices	To harvest sporadic mechanical energy, convert it to electrical energy, and simultaneously store energy
Electromagnetic	A portable high-efficiency electromagnetic energy harvesting system using supercapacitors for renewable energy applications in railroads [45]	Mechanical transmission system, regulating circuit, SCs	Safety facilities/standby power supplies for rail-side equipment	To permit the storage of energy from rapidly changing transient currents and act as a steady power supply for external loads
	Maximum power transfer tracking for ultralow-power electromagnetic energy harvesters [46]	Rectifier, boost rectifier, voltage regulators, controller with MPTT, SCs	Resistive loads	The low output power and large storage capacitance of SCs enable the MPTT control to rely solely on output current measurement.
	Ultralow power, fully autonomous boost rectifier for electromagnetic energy harvesters [47]	Full-wave boost rectifier, SC	Wireless sensor nodes	Energy storage element which is fed by a boost rectifier
Electrostatic	A flexible all-solid-state micro supercapacitor and its application in electrostatic energy management system [32]	Flexible micro-SC, rectifier, buck-boost converter, low-dropout regulator, controller	Wearable electronics	Flexible energy storage element

2.4.4 Ηλιακή ενέργεια και συγκομιδή

Η ηλιακή ενέργεια είναι μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, που αξιοποιείται με την χρήση φωτοβολταϊκών στοιχείων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Κάνοντας λόγο όμως για συγκομιδή ενέργειας τα φωτοβολταϊκά στοιχεία που χρησιμοποιούνται σε ένα τέτοιο σύστημα είναι σχεδιασμένα να λειτουργούν έστω και σε συνθήκες χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας τα συστήματα αυτά γίνονται ολοένα πιο αποδοτικά. Για την αξιοποίησή τους όμως χρίζουν απαραίτητα κυκλώματα ώστε η τάση που παράγουν να είναι σε κατάλληλα επίπεδα ώστε η ενέργεια να μπορεί να αποθηκευτεί σε στοιχεία υπερπυκνωτών. Όπως και σε οποιοδήποτε σύστημα συγκομιδής ενέργειας χρειάζεται ένας ελεγκτής ο οποίος αναλύει τα δεδομένα που υπάρχουν εκείνη την στιγμή και ανάλογα διενεργεί στο κύκλωμα. Για παράδειγμα σε περίπτωση σκίασης του φωτοβολταϊκού στοιχείου η τάση ανοιχτού κυκλώματος που διαβάζει ο ελεγκτής μπορεί να είναι μικρότερη από την τάση που χρειάζονται οι υπερπυκνωτές για να φορτίσουν. Ο ελεγκτής οπότε χρησιμοποιεί κυκλώματα ανύψωσης της τάσης έτσι ώστε να είναι σε κατάλληλο επίπεδο για την φόρτιση των στοιχείων. Σε αντίθετη περίπτωση που η τάση είναι υψηλότερη από αυτή που χρειάζονται οι πυκνωτές για φόρτιση ο ελεγκτής κάνει υποβιβασμό της τάσης, φέρνοντας την στο κατάλληλο επίπεδο. Επιπλέον ελέγχει και το μέγιστο σημείο απόδοσης του φωτοβολταϊκού στοιχείου ώστε να γίνεται η μέγιστη μεταφορά ενέργειας από το φωτοβολταϊκό προς τους πυκνωτές.

2.4.5 Ραδιοσυχνότητες και συγκομιδή

Ένας ακόμη τρόπος συγκομιδής ενέργειας και αποθήκευσης της σε υπερπυκνωτές είναι μέσω ραδιοσυχνότητων. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί την ενέργεια από ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο σε ηλεκτρική ενέργεια. Υπάρχει πληθώρα ενέργειας στο περιβάλλον καθώς ολοένα και περισσότερα ασύρματα συστήματα εγκαθίστανται για αποστολή χρήσιμων δεδομένων. Από τα κινητά τηλέφωνα μέχρι τα ασύρματα δίκτυα WiFi έως και σήματα τηλεοπτικών και ραδιοφωνικών σταθμών είναι κάποιες από τις πηγές που μπορεί αυτή η τεχνολογία να αξιοποιήσει. Για να μετατραπεί ένα σήμα ραδιοσυχνότητας σε συνεχές ρεύμα είναι απαραίτητη η ανάπτυξη ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Χρειάζεται να γίνει προσαρμογή της κεραίας του συστήματος συγκομιδής έτσι ώστε η λήψη της ενέργειας να είναι όσο το δυνατόν μέγιστη. Επιπλέον χρειάζονται και ιδικά φίλτρα και κυκλώματα ανόρθωσης που ελέγχονται από ελεγκτή έτσι ώστε να μπορεί η τάση να είναι σε κατάλληλα επίπεδα για την αποθήκευση της στους πυκνωτές. Στην εικόνα 2.10 απεικονίζεται ένα απλουστευμένο κύκλωμα ενός τέτοιου συστήματος.



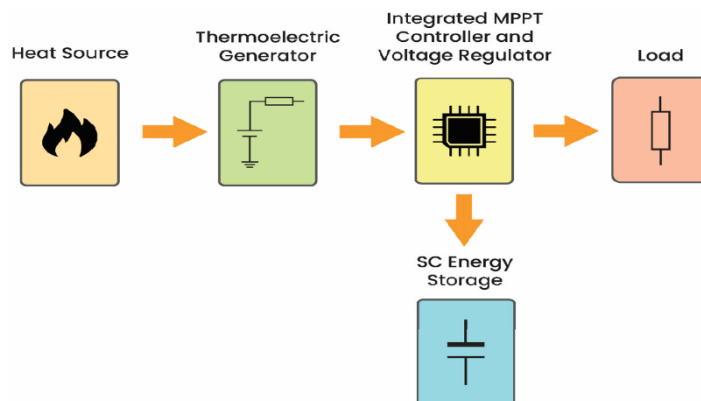
Εικόνα 2.10 : Block διάγραμμα συγκομιδής ενέργειας από ραδιοσυχνότητες

2.4.6 Θερμοηλεκτρικές γεννήτριες και συγκομιδή

Οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες αποτελούν επίκεντρο στη μέθοδο συγκομιδής ενέργειας λόγω της δυνατότητας τους να μετατρέπουν την διαφορά θερμοκρασίας σε ηλεκτρική ενέργεια. Η αξιοπιστία που έχουν ως συσκευές αλλά και οι ποικίλες εφαρμογές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνεργασία με συστήματα αποθήκευσης ενέργειας όπως οι υπερπυκνωτές τα καθιστά μία από τις πρωτοπόρες τεχνολογίες των τελευταίων χρόνων. Ωστόσο η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια χρίζει μετατροπής διότι η έξοδος τάσης αυτών των συσκευών σε χαμηλές θερμοκρασιακές διαφορές είναι τις τάξεως των λίγων mV. Οπότε τέτοια συστήματα συνοδεύονται από ολοκληρωμένα συστήματα ελέγχου και διαχείρισης της ενέργειας. Περιέχουν ελεγκτή ο οποίος είναι υπεύθυνος για την μέγιστη μεταφοράς ενέργειας από τις θερμοηλεκτρικές γεννήτριες στους υπερπυκνωτές και στην συνέχεια για τον διαμοιρασμό της ενέργειας στα φορτία. Παρακάτω ο πίνακας 2.4 δείχνει κάποιες εφαρμογές που χρησιμοποιείται η τεχνολογία των θερμοηλεκτρικών γεννητριών σε συνεργασία με υπερπυκνωτές.

Πίνακας 2.4 : Στοιχεία συγκομιδής ενέργειας από θερμοηλεκτρικά στοιχεία

Study	Hardware	Applications	Role of Supercapacitors
Powering a low-power wireless sensor in a harsh industrial environment: energy recovery with a thermoelectric generator and storage on supercapacitors [54]	Eureca TEG1-30-30-8.5/200 TEG module, commercial energy harvesting IC (The BQ25504 (Texas Instruments, Dallas, TX, USA), SC storage, TPS610995 (Texas Instruments, Dallas, TX, USA) boost converter and TPS71533 (Texas Instruments, Dallas, TX, USA) low-dropout regulator	Battery-free autonomous power supply, wireless sensor networks	Battery-free energy storage that operates at temperatures of up to 80 °C
High-efficient energy harvesting architecture for self-powered thermal-monitoring wireless sensor node based on a single thermoelectric generator [3]	Thermoelectric generator, DC-DC boost converter with MPPT, 30 mF SC energy storage, microcontroller	Wireless sensor nodes	Energy storage module
Wearable thermoelectric power generators combined with flexible supercapacitor for low-power human diagnosis devices [56]	Wearable thermoelectric generator, flexible SC	Low-power human diagnosis devices, sensor nodes	Flexible energy storage element to realize the combination of renewable energy and wearable devices.
A laterally designed all-in-one energy device using a thermoelectric generator-coupled micro supercapacitor [57]	A thermoelectric generator-coupled micro SC	Self-powered electronic devices	All-in-one energy devices with space efficacy
Carbon nanotube-based thermoelectric generator and graphite nanoparticle-based supercapacitor for smart wearable sensors [58]	Nanoparticle-based thermoelectric generator and SC, DC-DC boost converter	Self-powered wearable sensors	Stabilize the voltage output of the TEG and power out the loads under different conditions



Εικόνα 2.11 : Block διάγραμμα συγκομιδής ενέργειας με θερμοηλεκτρική γεννήτρια

2.5 Ολοκληρωμένα κυκλώματα διαχείρισης ενέργειας (Power Management Integrated Circuit PMIC)

Σε όλα τα συστήματα συγκομιδής ενέργειας όπως αναφέρεται παραπάνω, είναι απαραίτητο να διαμεσολαβεί μία ηλεκτρονική διάταξη ολοκληρωμένου συστήματος (PMIC), η οποία είναι υπεύθυνη για την μετατροπή, την μεταφορά και την διανομή της ενέργειας στο σύστημα. Πρακτικά το μέγεθος της ηλεκτρικής ενέργειας που προκύπτει από όλα τα παραπάνω συστήματα συγκομιδής ενέργειας είναι πρακτικά αδύνατο να την αποθηκεύσουν σε κάποιο μέσο. Γι' αυτό το λόγο επιστήμονες ανέπτυξαν ειδικά ολοκληρωμένα κυκλώματα για αυτή τη δουλειά. Ο PMIC αποτελεί την καρδιά ενός συστήματος συγκομιδής ενέργειας.

Οι PMIC μπορούν να συλλέγουν, να μετατρέπουν και να διαχειρίζονται την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά, τα θερμοηλεκτρικά, τα πιεζοηλεκτρικά, τις ραδιοσυχνότητες και τις δονήσεις. Περιέχουν έξυπνα συστήματα τα οποία έχουν αλγόριθμους MPPT για το βέλτιστο σημείο λειτουργίας κάθε συστήματος. Επίσης περιέχουν DC-DC μετατροπείς και ελέγχουν την τάση ώστε να είναι δυνατή η φόρτιση σε μέσα αποθήκευσης ενέργειας. Επιπλέον παρέχουν προστασίες υπέρτασης, υπότασης υπερέντασης και θερμοκρασίας. Ακόμα πολλοί PMIC περιέχουν ενσωματωμένα κυκλώματα ρύθμισης τάσης για τα φορτία του συστήματος.

Κάποιες από τις τοπολογίες μέγιστου σημείου απόδοσης (MPPT) είναι :

- **Perturb and Observe** : Εδώ ο PMIC εισάγει στο σύστημα της πηγής σήματα υψηλής συχνότητας και παρατηρεί την επίδραση που έχουν στην παραγόμενη ισχύ. Εάν η ισχύς μειώνεται τότε προσαρμόζεται ανάλογα ώστε να την μεγιστοποιήσει.
- **Incremental Conductance** : Με αυτήν την τοπολογία ο PMIC παρατηρεί την κλίση της καμπύλης ισχύος-τάσης και προσαρμόζει ανάλογα την αντίσταση εισόδου για να μεγιστοποιήσει την μεταφορά ενέργειας.
- **Fractional Open-Circuit Voltage** : Ο PMIC σε αυτήν την σχεδίαση παρατηρεί την γραμμική σχέση της μέγιστης ισχύος με την τάση του ανοιχτού κυκλώματος. Ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα ο PMIC αποσυνδέει την πηγή για να κάνει μέτρηση στην τάση ανοιχτού κυκλώματος έτσι ώστε να μπορέσει να κάνει τους απαραίτητους υπολογισμούς. Με το πέρας της μέτρησης επαναφέρει την πηγή στο κύκλωμα έχοντας πλέον κάνει τις απαραίτητες διορθώσεις στην αντίσταση εισόδου του.
- **Fuzzy logic** : Η συγκεκριμένη προσέγγιση για την μεγιστοποίηση της απόδοσης μεταφοράς ενέργειας είναι αρκετά δύσκολη, αλλά προσφέρει την καλύτερη εφαρμογή καθώς το σύστημα μπορεί και αποθηκεύει τις μετρήσεις κάνει τους απαραίτητους ελέγχους υπολογίζοντας ακόμη και τα σφάλματα. Έτσι το σύστημα μπορεί και προσαρμόζεται ανάλογα το περιβάλλον το οποίο βρίσκεται.

Επίσης οι PMIC χρησιμοποιούν τοπολογίες έτσι ώστε να μπορούν να αυξομειώνουν την τάση στα κατάλληλα επίπεδα για την αποθήκευση της.

- **Boost Converters** : Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει να αυξηθεί η τάση σε κατάλληλο επίπεδο ώστε να μπορέσει να γίνει φόρτιση. Η τάση πηγής μπορεί να αξιοποιηθεί σε τέτοιου είδους κυκλώματα ακόμη και από τα 30mV.
- **Buck Converter** : η τοπολογία αυτή επιτρέπει την συσκευή να υποβιβάζει την παραγόμενη τάση από την πηγή στα κατάλληλα επίπεδα εάν αυτή ξεπερνάει τα όρια φόρτισης των στοιχείων.
- **Charge Pumps** : Αυτή η τοπολογία επιτρέπει την αύξηση της τάσης σε υψηλότερα επίπεδα χωρίς την χρήση πηνίων, είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε σημεία που απαιτούνται χαμηλά επίπεδα ηλεκτρομαγνητικού θορύβου. Το μειονέκτημα τους είναι ότι έχουν πολύ χαμηλή απόδοση.

Σε αυτά τα συστήματα υπάρχει η δυνατότητα εκκίνησης λειτουργίας από πολύ χαμηλές τάσεις(Cold-start capabilities), πράγμα που τα καθιστά ιδανικά για εφαρμογές συγκομιδής ενέργειας.

2.6 Μικροελεγκτές χαμηλής κατανάλωσης (Low Power Mcu)

Οι Μικροελεγκτές χαμηλής κατανάλωσης είναι πλέον το πιο σημαντικό κομμάτι των σύγχρονων συστημάτων ενεργειακής συλλογής και των εφαρμογών Internet Of Things(IOT). Η ζήτηση για αυτόνομα συστήματα τα οποία λειτουργούν χωρίς εξωτερική τροφοδοσία για μεγάλες χρονικές περιόδους, απαιτεί μικροελεγκτές με εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και υψηλή υπολογιστική ισχύ. Η παγκόσμια αγορά των μικροελεγκτών χαμηλής ισχύος υπολογίζεται περίπου στα 9.78 δισεκατομμύρια το 2025 και προβλέπεται να φτάσει τα 15.27 δισεκατομμύρια έως το 2030. Η ανάπτυξη αυτή πήρε ώθηση από την εκθετική αύξηση των IOT συσκευών, την ανάγκη για βιώσιμες τεχνολογικές λύσεις (μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος), και τις πρωτοβουλίες της πράσινης βιομηχανοποίησης(κυβερνητικές επενδύσεις).

2.6.1 Αρχές χαμηλής κατανάλωσης

Η κατανάλωση ισχύος σε CMOS κυκλώματα αποτελείται από δύο κύριες κατηγορίες. Την Δυναμική ισχύ η οποία είναι η ισχύς που καταναλώνεται κατά την αλλαγή της κατάστασης των διακοπών και εκφράζεται ως :

$$P_{dynamic} = a \cdot C \cdot V^2 \cdot f \quad (2.21)$$

Όπου a είναι η δραστηριότητα switching, C η χωρητικότητα φόρτισης, V η τάση τροφοδοσίας και f η συχνότητα λειτουργίας.

Η στατική ισχύς είναι εκείνη που καταναλώνεται λόγω ρευμάτων διαρροής όταν το κύκλωμα είναι σε στατική κατάσταση.

$$P_{static} = I_{leak} \cdot V \quad (2.22)$$

Όπου I_{leak} τα ρεύματα διαρροής των διακοπών.

2.6.1.1 Τεχνικές μείωσης κατανάλωσης

- Dynamic Voltage and Frequency Scaling(DVFS) : Η τεχνική αυτή προσαρμόζει την τάση και την συχνότητα λειτουργίας του μικροελεγκτή ανάλογα το υπολογιστικό φορτίο, επιτρέποντας έτσι περαιτέρω εξοικονόμηση ενέργειας.
- Power Gating: Η λειτουργία αυτή αποκόπτει την τροφοδοσία από αχρησιμοποίητα τμήματα του μικροελεγκτή.
- Clock Gating : Με την λειτουργία αυτή απενεργοποιούνται συστήματα του επεξεργαστή τα οποία δεν χρειάζεται να χρησιμοποιούν το ρολόι του επεξεργαστή.

2.6.2 Αρχιτεκτονικές μικροελεγκτών χαμηλής κατανάλωσης

- ARM CORTEX-M0+

Η κατηγορία Cortex-M0+ αποτελεί τον πιο αποδοτικό επεξεργαστή της οικογένειας ARM. Η αρχιτεκτονική δύο σταδίων pipeline έχει κατανάλωση μόλις 11.2μW/Mhz.

Κάποια από τα χαρακτηριστικά είναι :

- Αρχιτεκτονική ARMv6-M
- Εύρος δεδομένων 32-bit
- Συχνότητα έως 48Mhz
- Κατανάλωση 50-150uA/Mhz
- Μνήμη χωρίς cache. Harvard architecture

Τα πλεονεκτήματα αυτής της σειράς είναι το πολύ μικρό silicon footprint, το χαμηλό κόστος υλοποίησης, ιδανική για εφαρμογές που τροφοδοτούνται από μπαταρίες και ο εύκολος προγραμματισμός σε C,C++.

- Cortex-M33

Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική εισάγει επιπλέον προηγμένα χαρακτηριστικά στην ασφάλεια και την απόδοση του επεξεργαστή. τα χαρακτηριστικά αυτά είναι :

- TrustZone Technology Hardware-enforced isolation
- DSP Extensions MAC λειτουργίες
- MPU : Memory Protection Unit για ασφάλεια.

- Texas Instruments MSP430

Η σειρά MSP304 αποτελεί το κύριο σημείο αναφοράς στο κομμάτι των ultra low power εφαρμογών. Κάποια από τα χαρακτηριστικά είναι :

- Active Mode <100uA/Mhz
- Stand by Mode 1.3uA με λειτουργία RTC
- Deep Sleep 0.1uA με διατήρηση interrupt capability
- Wake up time <6uS για πλήρη λειτουργικότητα

- RISC-V

Πλεονεκτήματα τις αρχιτεκτονικής αυτής είναι :

- Modularity : Δυνατότητα επιλογής μόνο των απαραίτητων εντολών
- Extensibility : Προσθήκη custom instructions
- Royalty-free : δεν έχει κόστος αδειοδότησης
- Πλήρως ανοιχτές προδιαγραφές
- Ferroelectric RAM. Προσφέρει 250 φορές χαμηλότερη κατανάλωση σε σχέση με Flash εγγραφές. Γρήγορες non-volatile εγγραφές και απεριόριστοι κύκλοι εγγραφής

Κάποια παραδείγματα αυτής της αρχιτεκτονικής είναι ο επεξεργαστής :

RENESAS R9A02G021

- Πυρήνας 32-bit RISC-V custom core
- Συχνότητα 48Mhz
- Μνήμη 128KB Flash, 16KB SRAM
- Λειτουργία έως και τους 125C

OniO.zero

- Αρχιτεκτονική RV32EMC
- Συχνότητα 24Mhz 1.8V, 1Mhz 0.8V
- Ελάχιστη τάση τα 450mV
- Ιδανικός για energy harvesting εφαρμογές

- STML0 series

Η σειρά L0 είναι η entry level κατηγορία των STM32 low power MCU

Η κατανάλωση είναι της τάξεως των 36μΑ/Mhz στα 1.8V. Σε stop mode είναι 350nA με συγκράτηση δεδομένων στην SRAM μνήμη. Σε Standby mode η κατανάλωση είναι 230nA.

- Σειρά nRF52. Η συγκεκριμένη σειρά εξειδικεύεται σε εφαρμογές που απαιτούν ασύρματη τεχνολογία Bluetooth με χαμηλή κατανάλωση. Κάποια από τα χαρακτηριστικά της είναι :

Active mode : 50-60uA/Mhz

SleepMode : 2-6uA με RTC

System Off Mode : 400-600nA

BLE LE Advertising : 265uA

BLE LE Connection : 200uA

- SAM L21(Cortex-M0+)

Τα χαρακτηριστικά αυτής της σειράς είναι :

Active Mode : 35uA/Mhz

Sleep Mode : 900nA με SRAM retention

Deep sleep Mode : 200nA

Η επεξεργαστής αυτής της οικογένειας χρησιμοποιούν την τεχνολογία picoPower technology η οποία είναι πατέντα της Microchip.

2.7 Τεχνολογία LoRa

Η τεχνολογία LoRa(Long Range) είναι ένα ασύρματο πρωτόκολλο επικοινωνίας χαμηλής ισχύος και μεγάλης εμβέλειας. Η τεχνολογία αναπτύχθηκε από την Cycleo, μια γαλλική εταιρεία που εξαγοράστηκε από την Semtech Corporation το 2012. Αποτελεί μία καινοτομία για τον λόγο ότι επιλύει την αντίθεση μεταξύ της εμβέλειας, της κατανάλωσης ενέργειας και του ρυθμού δεδομένων μετάδοσης με την χρήση διαμόρφωσης Chirp Spread Spectrum(CSS). Είναι μια τεχνική από την τεχνολογία ραντάρ που επιτρέπει επικοινωνία μεγάλης εμβέλειας με ελάχιστη απαίτηση ενέργειας.

2.7.1 Διαμόρφωση Chirp Spread Spectrum(CSS)

Η τεχνολογία Chirp Spread Spectrum, όπου Chirp σημαίνει Compressed High Intensity Radar Pulse. Αυτή η τεχνική διαμόρφωσης αναπαριστά πληροφορίες χρησιμοποιώντας chirps συχνότητας, είναι σήματα που μεταβάλλουν συνεχώς την συχνότητα τους με τον χρόνο διατηρώντας παράλληλα σταθερό πλάτος σε ολόκληρη την διάρκεια μετάδοσης. Πλεονεκτήματα όπως η μεγάλη αντίσταση σε παρεμβολές, η ανοχή στη μετατόπιση Doppler, η χαμηλή πολυπλοκότητα σε σύγκριση με παραδοσιακά συστήματα διάχυσης φάσματος και ότι δεν απαιτείται υψηλή ακρίβεια σε χρονισμούς αναφοράς, καθιστά αυτή την τεχνολογία πρωτοπόρο σε συστήματα IOT.

2.7.2 Ζώνες συχνότητας

Η τεχνολογία LoRa λειτουργεί σε μη αδειοδοτημένες ζώνες ISM.

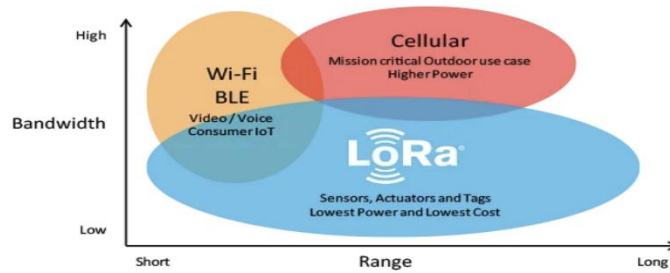
- Ευρώπη :EU433(433MHz),EU868(863-870/873MHz)
- Βόρεια Αμερική :US915(902-928MHz)
- Ασία : AS923(915-928MHz)
- Αυστραλία : AU915(915-928MHz)
- Ινδία:IN865-867MHz)

2.7.3 Τεχνικές προδιαγραφές

Η τεχνολογία LoRa χρησιμοποιεί παράγοντες διάχυσης(Spread Factor) από SF7 έως SF12(SF5-SF6 διαθέσιμα για ορισμένες εφαρμογές)

Όσο πιο υψηλός είναι ο παράγοντας διάχυσης έχουμε, καλύτερη ευαισθησία, μεγαλύτερη εμβέλεια, χαμηλότερος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων, υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας. Όσο πιο χαμηλός έχουμε, χαμηλότερη ευαισθησία, μικρότερη εμβέλεια, υψηλότερος ρυθμός δεδομένων και χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας. Οι διαφορετικοί παράγοντες διάχυσης είναι ορθογώνιοι μεταξύ τους και δεν παρεμβάλλονται ο ένας με τον άλλο.

Το πιο κοινό εύρος ζώνης που χρησιμοποιείται από εφαρμογές είναι στα 125Khz. Στα 250Khz ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων αυξάνεται αλλά μειώνεται η εμβέλεια. Στα 500Khz ο ρυθμός μετάδοσης αυξάνεται ακόμα πιο πολύ αλλά η εμβέλεια βρίσκεται στο ελάχιστο.



Εικόνα 2.12 : Φάσμα κάλυψης τεχνολογίας LoRa

Το εύρος του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων κυμαίνεται από 0.3kbit/s έως 27kbit/s, σε ορισμένες διαμορφώσεις φτάνει και τα 50kbit/s. Αυτό διαφέρει ανάλογα με τον παράγοντα διάχυσης, το εύρος ζώνης, τον ρυθμό κωδικοποίησης.

Η εμβέλεια ενός συστήματος LoRa σε αστική περιοχή μπορεί να φτάσει από 2-6χλμ. Σε περιοχές έκτος πόλης η εμβέλεια αυξάνεται στα 10-20χλμ εφόσον υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη. Επιπλέον η διεύθυνση που έχει σε εσωτερικούς χώρους είναι μεγάλη δίνοντας ακόμα ένα πλεονέκτημα στην αξιοποίηση αυτής της τεχνολογίας για τηλεμετρία και εποπτεία κτηριακών εγκαταστάσεων.

2.7.4 Τοπολογία δικτύου LoRaWAN

Η τεχνολογία LoRaWAN χρησιμοποιεί τοπολογία αστέρα αστέρων (star-of-stars). Τα στοιχεία του δικτύου που την αποτελούν είναι :

1. Τελικές συσκευές (κόμβοι) οι οποίοι επικοινωνούν απευθείας με πύλες, υπάρχουν τρεις κλάσεις συσκευών A,B,C.
 - Κλάση A: ΣΕ αυτή την κλάση έχουμε την χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας. Η Επικοινωνία ξεκινάει από την συσκευή(Uplink) και υπάρχουν δύο παράθυρα λήψης μετά από το Uplink. Η περιπτώσεις χρήσης είναι σε απλούς αισθητήρες θερμοκρασίας υγρασίας.
 - Κλάση B: εδώ η επικοινωνία είναι προγραμματισμένη downlink και γίνεται με περιοδικός συγχρονισμό (beacon). Υπάρχουν προγραμματισμένες θέσεις λήψης. Η χρήση είναι για εφαρμογές που απαιτούν τακτικές ενημερώσεις.
 - Κλάση C: εδώ η συσκευή κάνει συνεχή ακρόαση. Έχουμε μέγιστη δυνατότητα downlink, αλλά υπάρχει αυξημένη κατανάλωση ισχύος λόγω συνεχούς λήψης.
2. Πύλες (Gateways). Είναι δέκτες πολλαπλών καναλιών τα οποία προωθούν πακέτα στον διακομιστή δικτύου.
3. Διακομιστής Δικτύου(NS). Ο διακομιστής δικτύου διαχειρίζεται τον έλεγχο της ταυτότητας των συσκευών σε ένα δίκτυο, ελέγχει ρυθμούς δεδομένων και ισχύ καθώς προωθεί και όλα τα δεδομένα των εφαρμογών.
4. Διακομιστής εφαρμογών (AS). Ο συγκεκριμένος επεξεργάζεται δεδομένα ειδικά για εφαρμογές και τα διασυνδέει με εφαρμογές τελικών χρηστών.
5. Διακομιστής σύνδεσης (JS LoRaWAN1.1+). Αυτός ο διακομιστής διαχειρίζεται τον έλεγχο ταυτότητας συσκευών, χειρίζεται την παραγωγή ειδικών κλειδιών και υποστηρίζει την περιαγωγή μεταξύ δικτύων.

Οι συσκευές που χρησιμοποιούν το LoRaWAN τον περισσότερο χρόνο είναι σε καταστολή ισχύος και η κατανάλωση τους είναι περίπου 1.2μΑ. Κατά την μετάδοση πληροφορίας η κατανάλωση αυξάνεται στα 58-110mA ανάλογα την επιλογή της ισχύος εξόδου.

Η κατανάλωση ενέργειας σχετίζεται άμεσα με το time-on-air. Υψηλότερα SF αυξάνουν το airtime κατά την μετάδοση και αυτό ως αποτέλεσμα έχει την υψηλότερη κατανάλωση ισχύος. Μια τεχνική για βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας είναι η αυτόματη προσαρμογή του SF βάσει των συνθηκών του link για ελαχιστοποίηση του airtime. Επιπλέον η τεχνική Wake On Radio(WOR) βασίζεται στην περιοδική αποστολή δεδομένων έχοντας τον υπόλοιπο χρόνο την συσκευή σε καταστολή λειτουργίας, πράγμα που μπορεί να μειώσει την κατανάλωση. Ακόμη ένας τρόπος περιορισμού της ενέργειας είναι η κατάλληλη ρύθμιση των πακέτων αποστολής, ώστε να μειωθεί όσο το δυνατόν πιο πολύ ο χρόνος μετάδοσης.

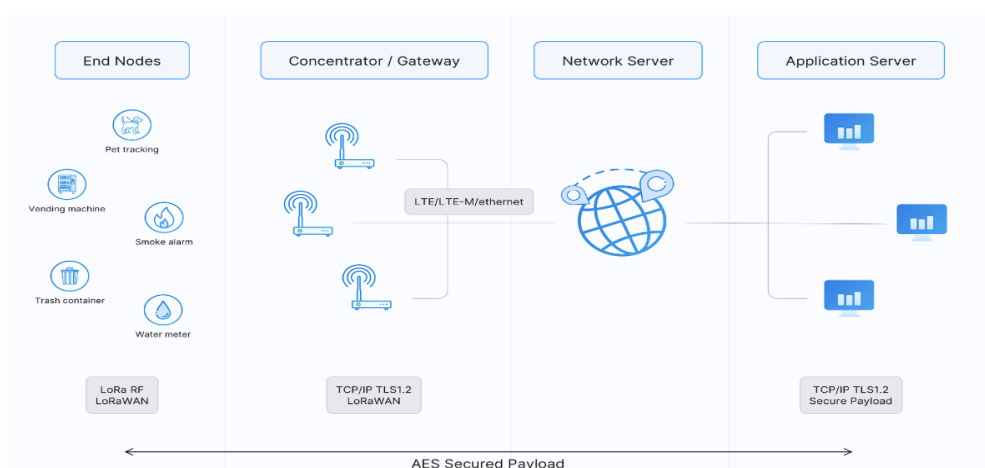
Σημαντικό πλεονέκτημα είναι οι κρυπτογραφικοί μηχανισμοί που έχει η τεχνολογία αυτή, καθώς μπορούν να διατηρούνται τα δεδομένα αποστολής ασφαλή. Χρησιμοποιείται AES-128 Encryption σε counter mode για κρυπτογράφηση των δεδομένων και Cipher-based Message Authentication Code (CMAC) για την ασφάλεια ολόκληρου μηνύματος αποστολής. Η κρυπτογράφηση μπορεί να γίνει είτε σε επίπεδο εφαρμογής είτε σε επίπεδο δικτύου.

2.7.5 Πρακτικές εφαρμογές LoRa

Η τεχνολογία LoRa μπορεί να αξιοποιηθεί σε ποικίλες εφαρμογές δίνοντας λύσεις σε σημαντικά ζητήματα αποστολής δεδομένων. Μερικές από αυτές είναι η έξυπνη γεωργία, η εγκατάσταση σε έξυπνες πόλεις, στην βιομηχανία

2.8 Επίλογος

Η ανάλυση των παραπάνω ενοτήτων αποτελεί τον κορμό του συστήματος που κατασκευάστηκε. Η μελέτη και η έρευνα ήταν απαραίτητο στοιχείο, ώστε να γίνουν κατανοητές οι έννοιες και οι τεχνολογίες οι οποίες ενσαρκώνουν την κατασκευή. Η συνοπτική ανάλυση των ενοτήτων δίνει τα απαραίτητα στοιχεία για την μελέτη και κατασκευή της συσκευής που πρόκειται να υλοποιηθεί. Στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται η μελέτη και η σχεδίαση του συστήματος, η επιλογή κρίσιμων εξαρτημάτων καθώς και η σύνδεση όλων των συστημάτων. Τέλος η παρατήρηση και μελέτη του συστήματος από σωστή οπτική είναι ένας σημαντικός παράγοντας που θα διακριβώσει εάν αυτή η συσκευή μπορεί να ανταπεξέλθει στις απαιτήσεις που τέθηκαν.



Εικόνα 2.13 : Δίκτυο επικοινωνίας τεχνολογίας LoRaWAN

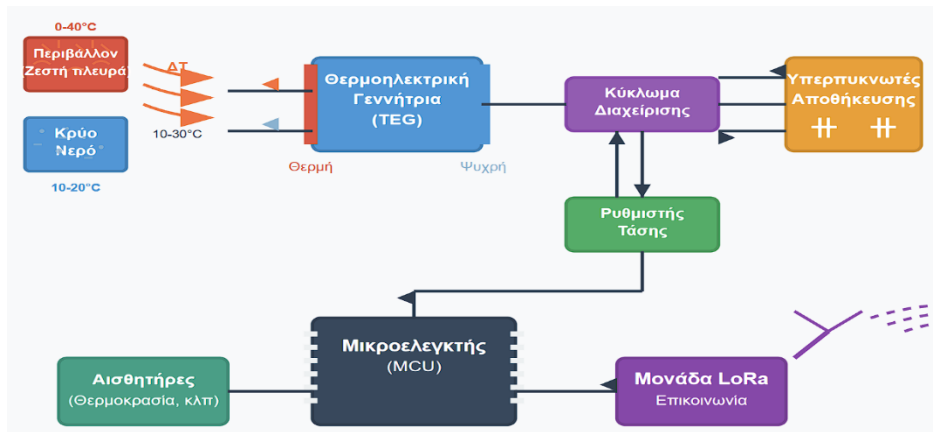
Κεφάλαιο 3ο: Μελέτη και σχεδίαση του συστήματος

3.1 Εισαγωγή

Η μελέτη και σχεδίαση είναι το βασικότερο στοιχείο για την δημιουργία οποιουδήποτε συστήματος στον χώρο των επιστημών. Η σωστή έρευνα και προετοιμασία δίνει το πλεονέκτημα των πολλαπλών επιλογών, ακόμα και εκεί που φαντάζει να μην υπάρχουν. Είναι το πιο ισχυρό όπλο στην φαρέτρα του μηχανικού όταν είναι να μελετήσει και να σχεδιάσει ένα σύστημα το οποίο πολλές φορές μπορεί να είναι πρωτότυπο. Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η σχεδίαση, και η κατασκευή του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, αξιοποιώντας την διαφορά θερμοκρασίας από το περιβάλλον εγκατάστασης. Η συνήθης κατεύθυνση αντίστοιχων συστημάτων είναι η εκμετάλλευση της θερμότητας από απόβλητα θερμοκρασίας που δημιουργούνται συνήθως από καύσεις. Παρατηρείται εγκατάσταση συστημάτων συγκομιδής ενέργειας σε καμινάδες, σε εξατμίσεις αυτοκινήτων σε ηλιακά πάνελ. Το κοινό σημείο αυτού του τύπου εγκατάστασης είναι ότι η θερμοκρασιακή διαφορά ΔT είναι πάνω από 20 βαθμούς κελσίου, πράγμα που καθιστά την συγκομιδή ενέργειας σχετικά πολύ πιο εύκολη. Η προσέγγιση που γίνεται σε αυτή την εργασία είναι η συγκομιδή ενέργειας σε πολύ χαμηλά ΔT από 1 έως 15 βαθμούς κελσίου. Η δυσκολίες που προέκυψαν για την κατασκευή του συστήματος ήταν αρκετές πράγμα που καθιστούσε πολύ δύσκολη την εφαρμογή στον πραγματικό κόσμο. Παρόλα αυτά έγινε μια προσπάθεια, από την οποία προέκυψαν σημαντικά αποτελέσματα βοηθώντας έτσι να προκύψουν τα κατάλληλα συμπεράσματα για την συγκομιδή ενέργειας από συστήματα που αξιοποιούν την θερμότητα.

3.2 Βασική Μεθοδολογία σχεδίασης

Η μελέτη και σχεδίαση απαιτούν ένα βασικό στοιχείο για την δημιουργία ενός συστήματος, αυτή είναι η κατεύθυνση. Λειτουργεί ως πυξίδα κατά την διάρκεια της σχεδίασης του συστήματος. Πολλές φορές, λόγω του μεγάλου όγκου πληροφοριών παρατηρείται απόκλιση από τον αρχικό στόχο επίλυσης του προβλήματος. Στο σύστημα μας η κατεύθυνση είναι η εξής. Η δημιουργία μίας συσκευής που θα μπορεί να συλλέγει ενέργεια από την διαφορά θερμοκρασίας που έχει το περιβάλλον στο σημείο που τοποθετείται. Για να γίνει πιο ξεκάθαρο η διαφορά θερμοκρασίας θα προκύπτει από τρεχούμενο νερό το οποίο θα έρχεται σε επαφή με την μία μεριά της συσκευής και η άλλη της μεριά θα έρχεται σε επαφή με την θερμοκρασία του αέρα που έχει το περιβάλλον την δεδομένη χρονική στιγμή. Αφού είναι ξεκάθαρη πλέον η πηγή της διαφοράς θερμοκρασίας το επόμενο βήμα είναι να γίνει μελέτη των υλικών που υπάρχουν στο εμπόριο ώστε να μετατραπεί η διαφορά της θερμοκρασίας σε ηλεκτρικό μέγεθος. Στην συνέχεια σημαντικό βήμα είναι η επιλογή κατάλληλου ελεγκτή ο οποίος είναι υπεύθυνος για την διαχείριση της ενέργειας του συστήματος. Η επιλογή κατάλληλων στοιχείων για την αποθήκευση της αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την λειτουργία του συστήματος καθώς και η επιλογή μικροελεγκτή ο οποίος θα χρησιμοποιεί αυτή την ενέργεια για να αποστείλει πληροφορίες. Ένα συνοπτικό σχέδιο του συστήματος φαίνεται στην εικόνα 3.1. Βασικό μέρος της μελέτης είναι και η μηχανολογική σχεδίαση η οποία προκύπτει κατά ανάγκη για την πιο ορθή τοποθέτηση των εξαρτημάτων και έτσι την αύξηση της απόδοσης του συστήματος. Στις επόμενες ενότητες αναλύεται κάθε εξάρτημα ξεχωριστά δίνοντας έτσι πλήρη εικόνα στην πορεία σχεδίασης του συστήματος.

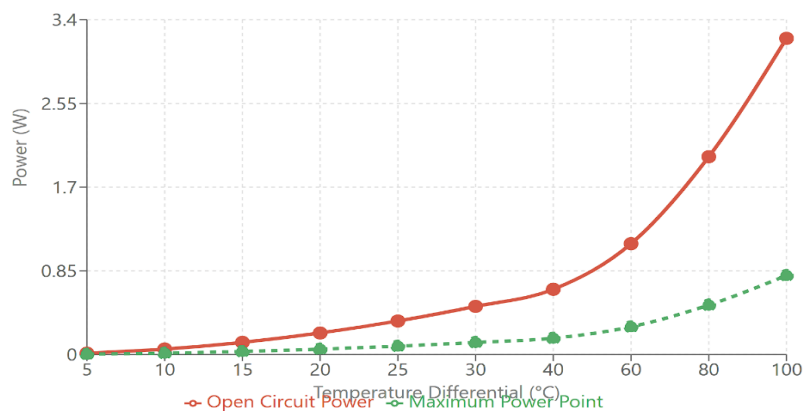


Εικόνα 3.1: Block διάγραμμα του συστήματος που σχεδιάστηκε

3.3 Επιλογή θερμοηλεκτρικής γεννήτριας Peltier Module

Το εξάρτημα το οποίο μπορεί να μετατρέψει την διαφορά θερμοκρασίας σε ηλεκτρική ενέργεια είναι η θερμοηλεκτρική γεννήτρια (Peltier Module). Στο εμπόριο υπάρχει μεγάλη ποικιλία από αυτές τις συσκευές. Ελάχιστες όμως είναι αυτές που πληρούν τα κριτήρια για την κατασκευή του συστήματος αυτής της εργασίας. Σημαντικός παράγοντας στην επιλογή των εξαρτημάτων είναι και η τιμή, καθώς υπάρχουν TEG module τα οποία επειδή είναι πολύ εξειδικευμένα η τιμή τους είναι αρκετά υψηλή. Στην έρευνα αυτή λοιπόν επιλέχθηκε το TEG module SP1848-27145 τα χαρακτηριστικά της συσκευής είναι:

- Περιέχει 127 ζευγάρια ημιαγωγών
- Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας :150°C
- Εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας :-30°C – +120°C
- Μέγιστη τάση ανοιχτού κυκλώματος : 4.8V
- Ισχύς εξόδου ανάλογα την διαφορά θερμοκρασίας :
 - 20°C : 0.97V, 225mA
 - 40°C : 1.8V, 368mA
 - 60°C : 2.4V , 469mA
- Μέγεθος 40X40X40mm
- Ώρες λειτουργίας 200.000
- Περίβλημα κεραμικό υπόστρωμα αλουμίνιας(AL203)

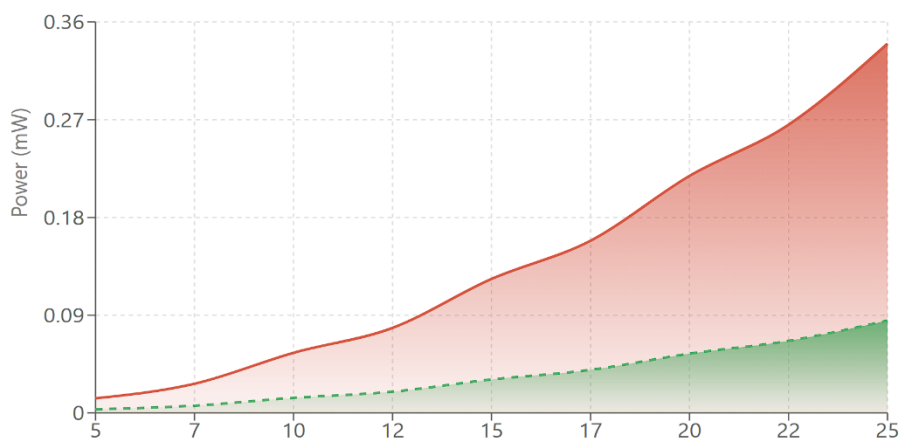


Εικόνα 3.2 : SP1848-TEG στοιχεία απόδοσης ενέργειας $\Delta T(5-100^\circ\text{C})$

Πίνακας 3.1: Αναλυτικός πίνακας τιμών στοιχείου SP1848-TEG $\Delta T(5-25^{\circ}\text{C})$

ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	VOLTAGE (V)	CURRENT (mA)	OPEN CIRCUIT (mW)	MAX POWER (mW)
5	0.24	56	13.4	3.4
7	0.34	79	26.9	6.7
10	0.49	113	55.4	13.8
12	0.58	135	78.3	19.6
15	0.73	169	123.4	30.8
17	0.83	191	158.5	39.6
20	0.97	225	218.3	54.6
22	1.07	248	265.4	66.3
25	1.21	281	340.0	85.0

Όπως φαίνεται και από τις τιμές του πίνακα 3.1 η παραγόμενη τάση που μας δίνει η θερμοηλεκτρική γεννήτρια (TEG), είναι σε χαμηλά επίπεδα όταν η διαφορά θερμοκρασίας είναι χαμηλή (ΔT 5-15 $^{\circ}\text{C}$). Επειδή το σύστημα προορίζεται να μελετηθεί ώστε να λειτουργεί σε αυτές τις χαμηλές θερμοκρασίες η παραγόμενη τάση σε αυτά τα επίπεδα δεν είναι ωφέλιμη. Στην επόμενη υποενότητα θα γίνει επιλογή κατάλληλου ελεγκτή διαχείρισης και συγκομιδής ενέργειας, ώστε αυτή η τάση να μπορεί να φτάσει ωφέλιμα επίπεδα και να αξιοποιηθεί.



Εικόνα 3.3 : Διάγραμμα τιμών ισχύος Peltier module SP1848-TEG $\Delta T(5-25^{\circ}\text{C})$

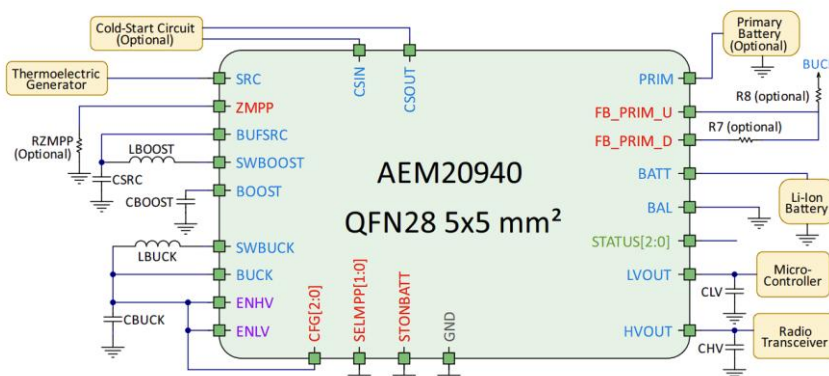
3.4 Επιλογή ελεγκτή συγκομιδής ενέργειας MPPT controller.

Βασικό στοιχείο ενός συστήματος συγκομιδής ενέργειας, αποτελεί ο ελεγκτής ενέργειας (PMIC). Είναι υπεύθυνος για την προσαρμογή της τάσης εισόδου στα κατάλληλα επίπεδα ώστε να είναι ωφέλιμη για αποθήκευση, καθώς αναλαμβάνει και τον ρόλο του διαχειριστή ενέργειας που ελέγχει συνεχώς τα επίπεδα της αποθηκευμένης ενέργειας και ανάλογα την διαμοιράζει στα φορτία.

Υπάρχουν αρκετά μοντέλα από πολλές εταιρείες που κατασκευάζουν τέτοιου είδους ολοκληρωμένα κυκλώματα. Κάποια από αυτά απαιτούν πολλά εξωτερικά εξαρτήματα, ώστε να μπορέσουν να λειτουργήσουν π.χ. (μετασχηματιστές), δημιουργώντας παράλληλα έτσι έναν περιορισμό στα επίπεδα των τάσεων που μπορούν να διαχειριστούν. Κάποια άλλα εξειδικεύονται για συγκεκριμένες εφαρμογές αυξάνοντας κατά πολύ το κόστος τους και περιορίζοντας έτσι τις δυνατότητες για την επιλογή.

Σε αυτό το σύστημα επιλέχθηκε μία μέση λύση. Η επιλογή έγινε από την εταιρεία E-PEAS semiconductors η οποία εξειδικεύεται σε συστήματα συγκομιδής ενέργειας. Από τον κατάλογο της επιλέχθηκε ο ελεγκτής PMIC AEM20940 ο οποίος εξειδικεύεται στην συγκομιδή ενέργειας από θερμοηλεκτρικές γεννήτριες.

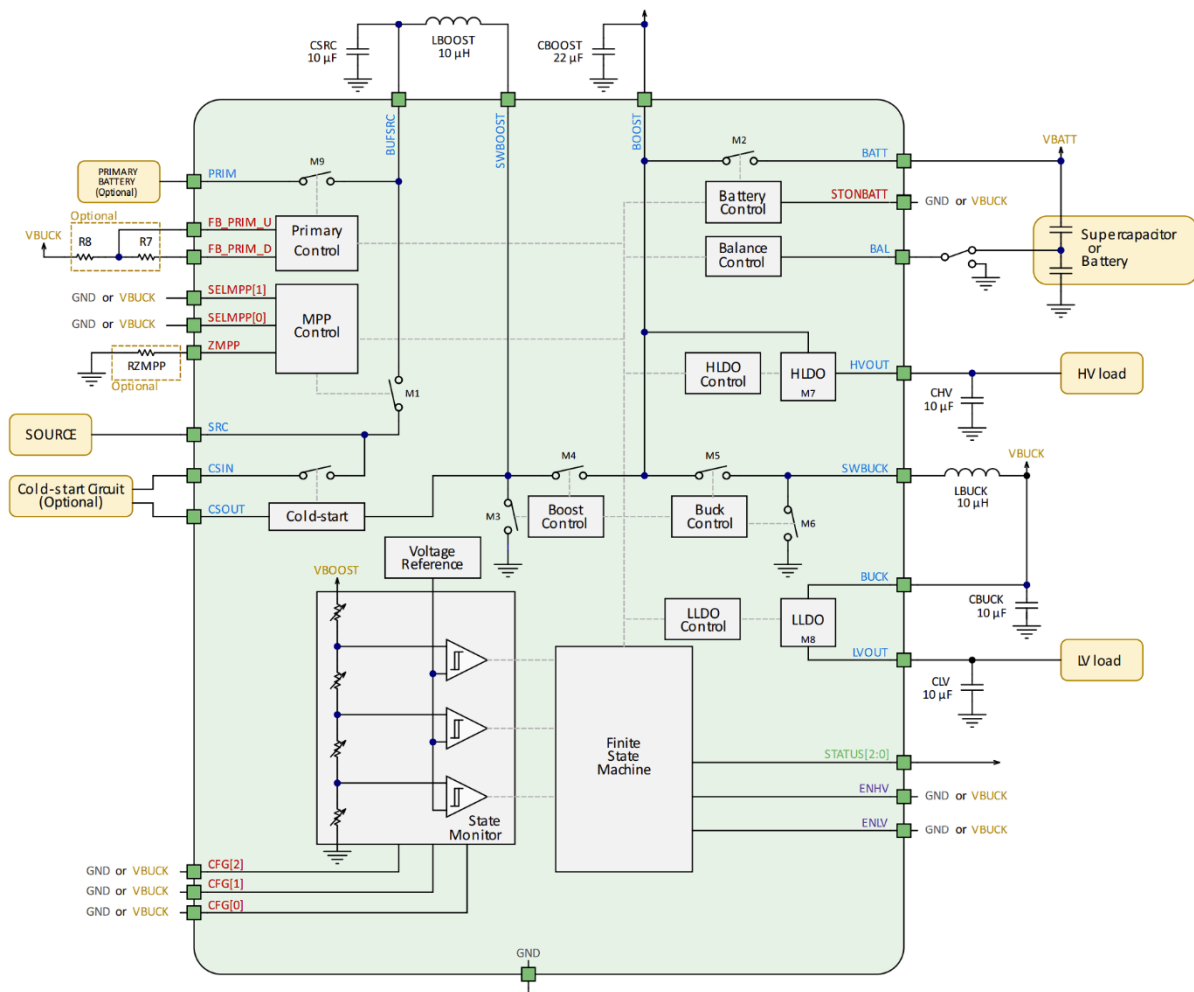
Ο PMIC AEM20940 μεγιστοποιεί την εξαγωγή ενέργειας από θερμοηλεκτρικές γεννήτριες με ενσωματωμένους αλγόριθμους που επιτρέπουν την ρύθμιση και εύρεση του σημείου μέγιστης απόδοσης MPPT. Επίσης περιέχει εξωτερικό κύκλωμα cold start το οποίο επιτρέπει την εκκίνηση της λειτουργίας του σε πολύ χαμηλές τάσεις. Διαθέτει ρυθμιζόμενα επίπεδα προστασίας για το στοιχείο αποθήκευσης της ενέργειας καθώς και δύο διαφορετικές εξόδους τάσης που επιτρέπουν την συμβατότητα με ποικίλα ενσωματωμένα συστήματα. Επιπλέον μπορεί ταυτόχρονα να αποθηκεύει ενέργεια και να τροφοδοτεί τα φορτία μία εφαρμογής. Περιέχει ακόμα κύκλωμα εξισορρόπησης που επιτρέπει την ασφαλή φόρτιση υπερπυκνωτών σε περίπτωση σύνδεσης των στοιχείων σε σειρά.



Εικόνα 3.4 : Ελεγκτής PMIC
AEM20940

Παρακάτω γίνεται αναφορά στα κύρια χαρακτηριστικά της συσκευής.

- Εκκίνηση ελεγκτή από 60 mV και 150uW ισχύος με επιπλέον εξωτερικό κύκλωμα.
- Εκκίνηση ελεγκτή από 380mV χωρίς την χρήση επιπλέον κυκλώματος.
- Ο ελεγκτής μετράει την τάση του ανοιχτού κυκλώματος της πηγής κάθε 21 δευτερόλεπτα και ρυθμίζει τον αλγόριθμο του σημείου μέγιστου σημείου απόδοσης.
- Υπάρχει επιλογή για την αλλαγή του αλγορίθμου MPPT με δύο εξωτερικά pins.
- Το εύρος της τάσης εισόδου από την πηγή είναι από 50mV έως 3.5V.
- Επιλογή για συνεχή μεταβολή του MPPT (ZMPPT)
- Ενσωματωμένο σύστημα για την ρύθμιση τάσης φορτίου έως 20mA κατανάλωση στα 1.2/1.8V
- Ενσωματωμένο σύστημα για την ρύθμιση τάσης φορτίου έως 80mA κατανάλωση στα 1.8/4.1V
- Προστασία για υπερφόρτιση και αποφόρτιση υπερπυκνωτών
- Προαιρετική χρήση μπαταρίας όταν η κύρια πηγή φόρτισης είναι εξαντλημένη.



Εικόνα 3.5 : Εσωτερικό block διάγραμμα λειτουργίας του AEM20940

3.5 Υπερπυκνωτές

Για μονάδα αποθήκευσης της ενέργειας στο σύστημα επιλέχθηκαν οι υπερπυκνωτές καθώς για την συγκεκριμένη εφαρμογή αποτελούν την βέλτιστή επιλογή. Λόγο της ελάχιστης ενέργειας που μεταφέρεται από την πηγή στα στοιχεία φόρτισης, εάν χρησιμοποιούταν μπαταρία ο χρόνος φόρτισης θα ήταν πάρα πολύ μεγάλος και ως αποτέλεσμα θα είχε την συνεχή εκφόρτωση του στοιχείου. Αυτό μελλοντικά θα οδηγούσε στην μη λειτουργικότητα της μπαταρίας από την μακροχρόνια έκθεση της σε εκ φόρτιση. Ο ρόλος του συστήματος αποθήκευσης είναι σημαντικός για τον λόγο το ότι το σύστημα θα πρέπει να λειτουργεί για πολλά χρόνια δίχως την συντήρηση του συστήματος. Οι υπερπυκνωτές έχουν το πλεονέκτημα των πολλών ωρών λειτουργίας και την ανθεκτικότητα σε κύκλους πλήρης φόρτισης και εκ φόρτισης.

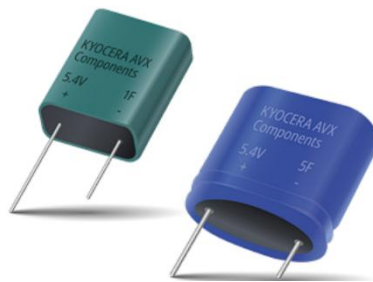
Οι πυκνωτές που επιλέχθηκαν είναι της εταιρείας AVX KYOCERA SCMR22L105MRBB0 με τα εξής χαρακτηριστικά.

- Χωρητικότητα : 1F
- Τάση λειτουργίας : 9V
- Εσωτερική αντίσταση : 350mΩ
- Ρεύμα διαρροής : 18uA

Και η δεύτερη επιλογή AVX KYOCERA SCMR18J604SRBA0

- Χωρητικότητα : 0.6F
- Τάση λειτουργίας : 8.1V
- Εσωτερική αντίσταση : 400mΩ
- Ρεύμα διαρροής : 7 uA

Έγιναν δύο επιλογές για να μελετηθεί η απόκριση που έχουν στο σύστημα και ποια ταιριάζει καλύτερα σε αυτή την εφαρμογή.



Εικόνα 3.6: Πυκνωτές εμπορίου της AVX

3.6 Επιλογή μικροελεγκτή MCU

Η επιλογή μικροελεγκτή για το σύστημα είναι επίσης καίριας σημασίας. Η κατανάλωση ενέργειας στο σύστημα πρέπει να γίνεται με έλεγχο έτσι ώστε το σύστημα να μπορεί να έχει μακροχρόνια αυτονομία. Οι υπερπυκνωτές αν και έχουν αρκετά προτερήματα γι' αυτά τα συστήματα, η πυκνότητα ενέργειας που έχουν δεν είναι τόσο μεγάλη όσο αυτή των μπαταριών. Ως εκ τούτου αποφορτίζουν πιο γρήγορα από μία μπαταρία. Ένας μικροελεγκτής πολύ χαμηλής κατανάλωσης μπορεί να προσφέρει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Ο μικροελεγκτής που επιλέχθηκε για το σύστημα αυτό είναι ο SAMD21. Αυτός ο επεξεργαστής βασίζεται στην δομή ARM Cortex-M0+. Βασικά χαρακτηριστικά αυτού του επεξεργαστή είναι :

- CPU : ARM CORTEX-M0+ 32-bit 48Mhz
- Μνήμη : Flash 256 kb
- SRAM : 32kb
- Τροφοδοσία : 1.62V-3.3V
- UART, SPI ,I2C
- USB 2
- I2S
- 12 bit ADC
- 10 bit DAC
- Low power mode : 40-70uA
- Deep sleep mode : 0.5 – 1uA

Ο μικροελεγκτής χρησιμοποιήθηκε σε αναπτυξιακή πλακέτα ώστε να είναι πιο εύκολη η διαχείριση και η διασύνδεση στο σύστημα. Η αναπτυξιακή πλακέτα που χρησιμοποιήθηκε είναι η MKRWAN1310 η οποία περιλαμβάνει επιπλέον χαρακτηριστικά.

Στην πλακέτα πάνω βρίσκεται και το LoRa module το οποίο είναι υπεύθυνο για την ασύρματη επικοινωνία. Το module ασύρματης επικοινωνίας είναι το MURATA CMWX1ZZABZ. Αποτελείται από τον STM32L0 και το LoRa SX1276. Το module αυτό επικοινωνεί με τον κεντρικό επεξεργαστή του συστήματος μέσω SPI και αναλαμβάνει όλη την ασύρματη επικοινωνία. Η ασύρματη συχνότητα μπορεί να οριστεί είτε στα 868Mhz είτε στα 915Mhz. Η ισχύς εκπομπής φτάνει στα 100mW(+20dBm). Η ευαισθησία δέκτη είναι στα -137dBm.

3.7 Επίλογος

Η επιλογή υλικών είναι μια από τις πιο σημαντικές διαδικασίες, καθώς ορίζουν σε ένα μεγάλο ποσοστό την επιτυχία αυτού του εγχειρήματος. Επιλέχθηκαν υλικά από εταιρείες του χώρου που κατασκευάζουν παρόμοια συστήματα έτσι ώστε να μπορούν να αποκλειστούν συνθήκες αβεβαιότητας αποτελεσμάτων στο σύστημα.



Εικόνα 3.7 :Αναπτυξιακή πλακέτα

Κεφάλαιο 4ο: Υλοποίηση του συστήματος

4.1 Εισαγωγή

Η υλοποίηση των συστημάτων είναι μία επίπονη διαδικασία που απαιτεί υπομονή και πείσμα. Πολλές φορές χρειάζεται να γίνουν ανασχεδιασμοί και εκ νέου μελέτες στο σύστημα, διότι η υλοποίηση είναι αυτή που θέτει σε εφαρμογή όλα όσα έχουν υπολογιστεί αποδεικνύοντας ότι ο πραγματικός κόσμος είναι πολύ διαφορετικός από αυτό που έχουμε υπολογίσει σε ιδανικές συνθήκες. Σε αυτό το κεφάλαιο λοιπόν γίνεται μια επεξήγηση στον τρόπο με τον οποίο υλοποιήθηκε το σύστημα, στις δυσκολίες που προέκυψαν στον ανασχεδιασμό και στην κατασκευή εκ νέου άλλου συστήματος. Σχεδιάστηκαν τρία διαφορετικά συστήματα, στα οποία δύο έγιναν μετρήσεις. Η προσέγγιση της έρευνας είναι αρκετά δύσκολη, διότι απαιτήθηκαν αρκετά μέσα ώστε να γίνουν οι κατάλληλες μετρήσεις καθώς και ένα εύλογο χρηματικό ποσό για να διεκπεραιωθεί

4.2 Μοντέλο 1^ο σύνδεση θερμοηλεκτρικών γεννητριών

Στην πρώτη προσπάθεια κατασκευής του συστήματος τοποθετήθηκαν δύο ηλεκτρογεννήτριες εν σειρά. Αυτό έγινε διότι η μία ηλεκτρογεννήτρια δεν μπορούσε να αποδώσει αρκετή ηλεκτρική ενέργεια ώστε να αξιοποιηθεί. Σύμφωνα με μετρήσεις που έγιναν οι ηλεκτρογεννήτριες είχαν αρκετή απόκλιση από τις τιμές που έδινε ο κατασκευαστής. Λόγου αυτού έγιναν μετρήσεις σε ακόμη δώδεκα στοιχεία όπου διαπιστώθηκε πανομοιότυπη απόκλιση. Οι μετρήσεις έγιναν σε διαφορά θερμοκρασίας 10°C ανά δύο στοιχεία συνδεδεμένα ένα σειρά.

Οι μετρήσεις που έγιναν βρίσκονται στον παρακάτω πίνακα.

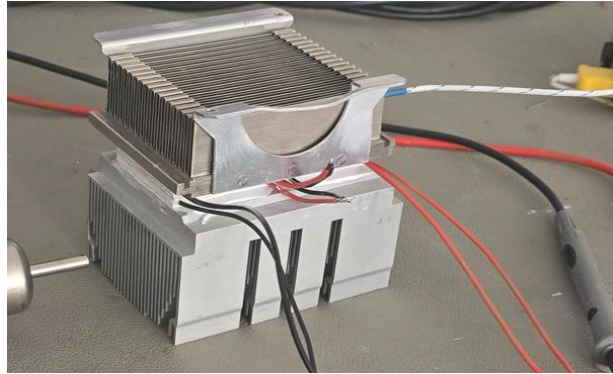
Πίνακας 4.1: Τάση ΔT 10°C σε συνδεσμολογία δυο στοιχείων Peltier σε σειρά

Ζεύγος θερμοηλεκτρικής γεννήτριας	Τάση εξόδου θερμοηλεκτρικής γεννήτριας
	$\Sigma \epsilon \Delta T \sim 10^{\circ}\text{C}$
1 -2	0.573V
3-4	0.530
5-6	0.460
7-8	0.581
9-10	0.453
11-12	0.431

Τα αποτελέσματα είναι διαφορετικά από τα αναμενόμενα του κατασκευαστή. Σύμφωνα με τα δεδομένα του το ένα στοιχείο σε διαφορά θερμοκρασίας έπρεπε να αποδίδει 0.49V. Υπολογίζοντας τα δυο στοιχεία πρέπει να αποδίδουν γύρω στα 0.98V. Αυτό που παρατηρήθηκε στις μετρήσεις είναι ότι η τάση ήταν σχεδόν η μισή από την αναμενόμενη. Η απόκλιση είναι μεγάλη πράγμα που γεννά ερωτήματα τόσο για τα δεδομένα που παρέχει ο κατασκευαστής όσο και για την ποιότητα των παραπάνω θερμοηλεκτρικών στοιχείων. Έχοντας υπόψιν αυτές τις μετρήσεις και τα δεδομένα συνεχίστηκαν τα πειράματα.

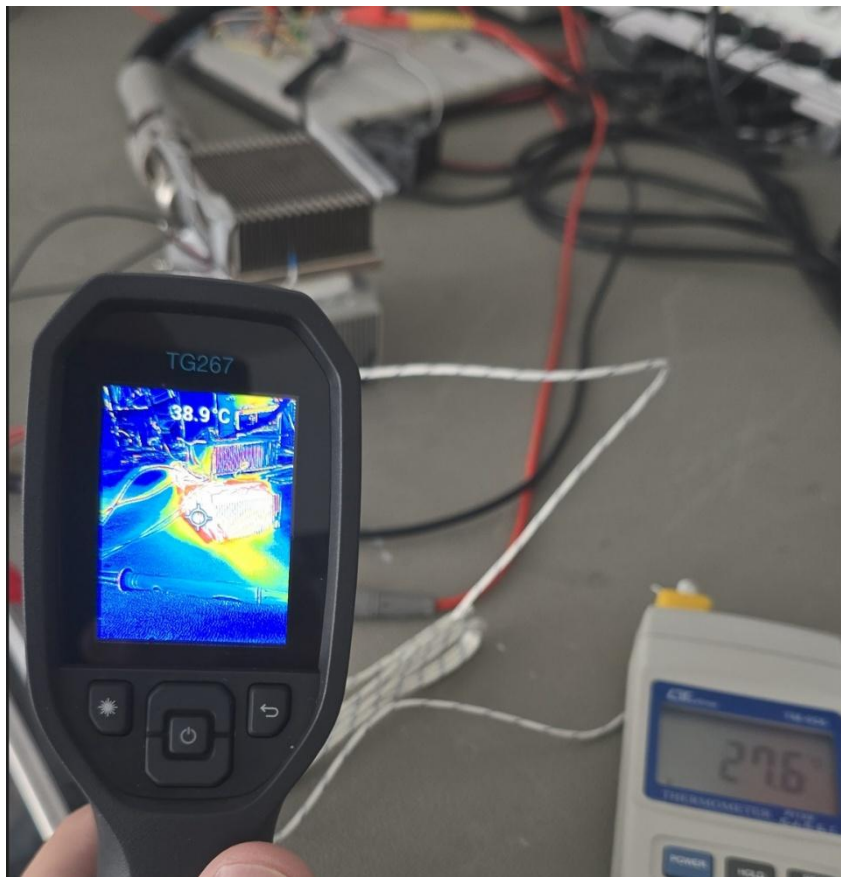


Εικόνα 4.1 : Peltier module σε σειρά

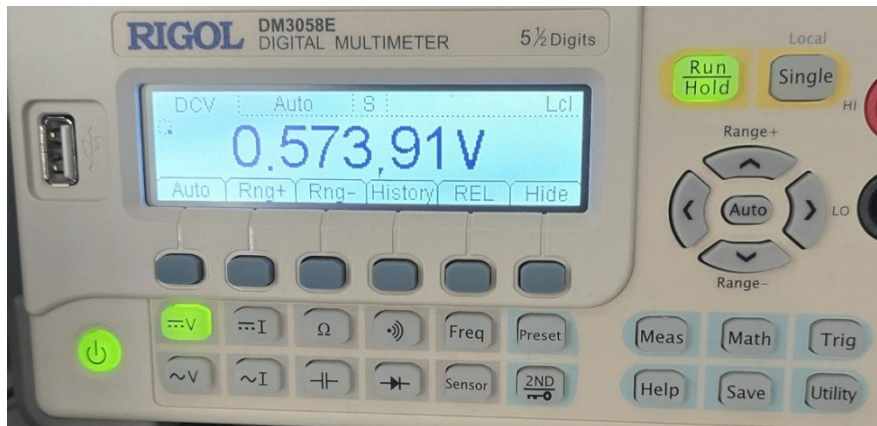


Εικόνα 4.2: Ολοκληρωμένη κατασκευή Peltier σε ψύκτρες

Οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες τοποθετήθηκαν σε ψύκτρες για την καλύτερη απαγωγή θερμότητας. Επιπλέον τοποθετήθηκε θερμοαγώγιμη πάστα μεταξύ της ψύκτρας και της θερμογεννήτριας ώστε η επαφή μεταξύ των υλικών τα είναι πιο άριστη. Εάν δεν τοποθετηθούν ψύκτρες και η μια μεριά υπερθερμανθεί παραπάνω ενέχει ο κίνδυνος καταστροφής της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας. Η θέρμανση έγινε με πιστόλι θερμού αέρα ελεγχόμενης ροής και θερμοκρασίας. Η κρύα πλευρά είναι εκτεθειμένη στον αέρα.



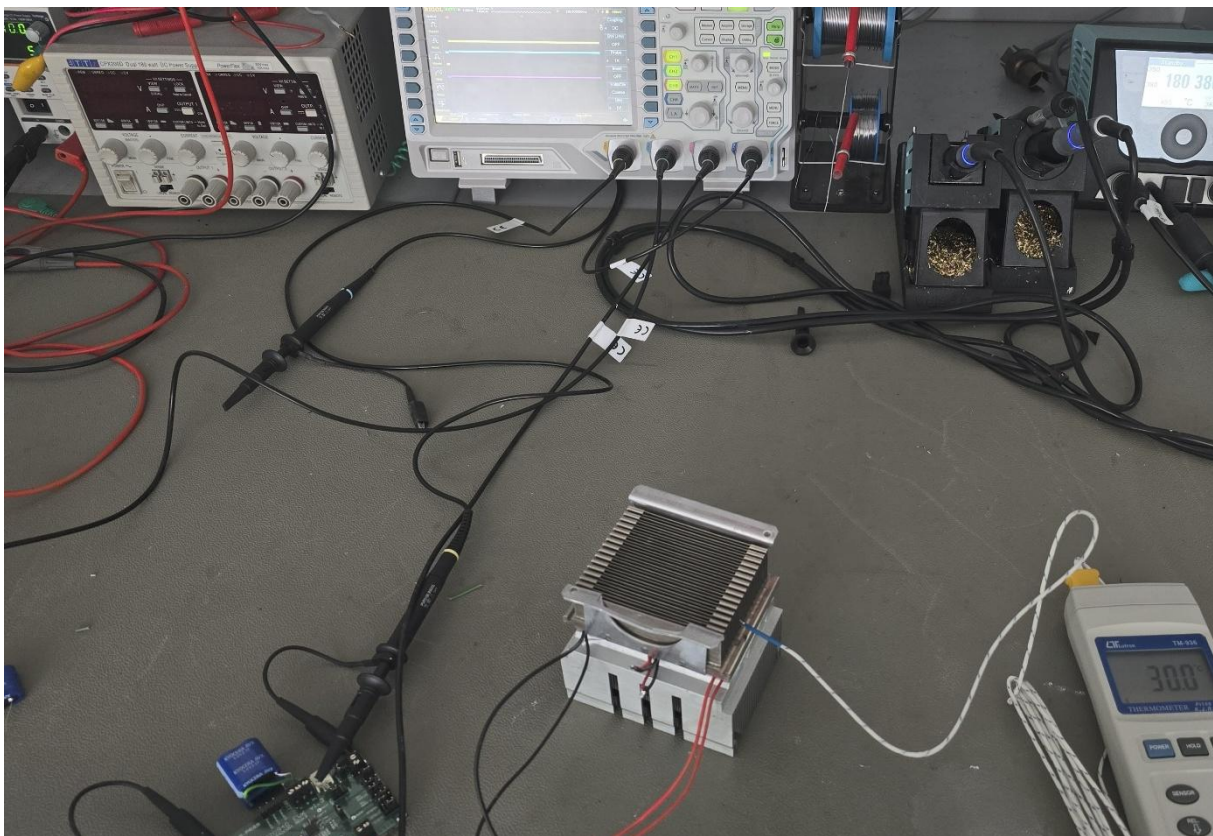
Εικόνα 4.3 : θερμοκάμερα μέτρηση θερμής πλευράς και θερμόμετρο μέτρηση κρύας πλευράς στοιχείων TEG



Εικόνα 4.4: Μέτρηση δύο TEG εν σειρά σε $\Delta T 10^{\circ}\text{C}$

Στην συνέχεια έγιναν μετρήσεις για την μέτρηση ρεύματος του συστήματος. Για άλλη μία φορά τα αποτελέσματα ήταν πολύ διαφορετικά από τα αναμενόμενα. Ενώ ο κατασκευαστής δίνει ρεύμα βραχυκύκλωσης ανά στοιχείο 113mA σε $\Delta T 10^{\circ}$ το ρεύμα που μετρήθηκε ήταν μόλις 50mA.

Παρατηρείται λοιπόν πως και η τάση αλλά και το ρεύμα που αποδίδει το TEG SP1848, είναι περίπου στο μισό από τα αναγραφόμενα του κατασκευαστή.



Εικόνα 4.5 : Μετρήσεις 1^{ου} μοντέλου

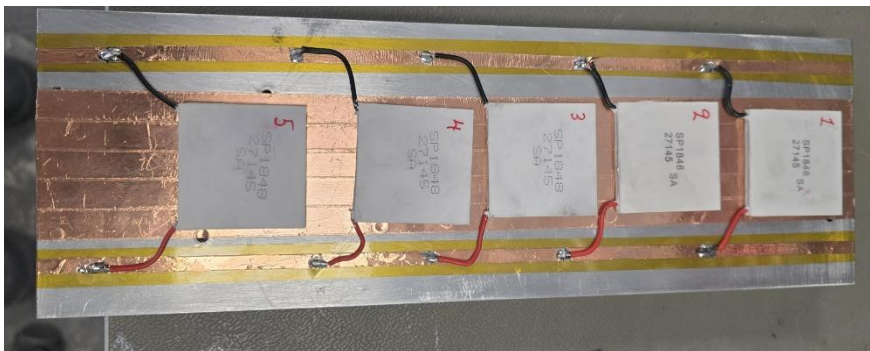
4.3 Μοντέλο 2^ο σύνδεση θερμοηλεκτρικών γεννητριών

Σε αυτό το μοντέλο έγινε προσπάθεια να συνδεθούν τα στοιχεία TEG σε παράλληλη σύνδεση με σκοπό την αύξηση του συνολικού ρεύματος. Αυτό θα επιτρέψει την πιο γρήγορη φόρτιση των πυκνωτών.

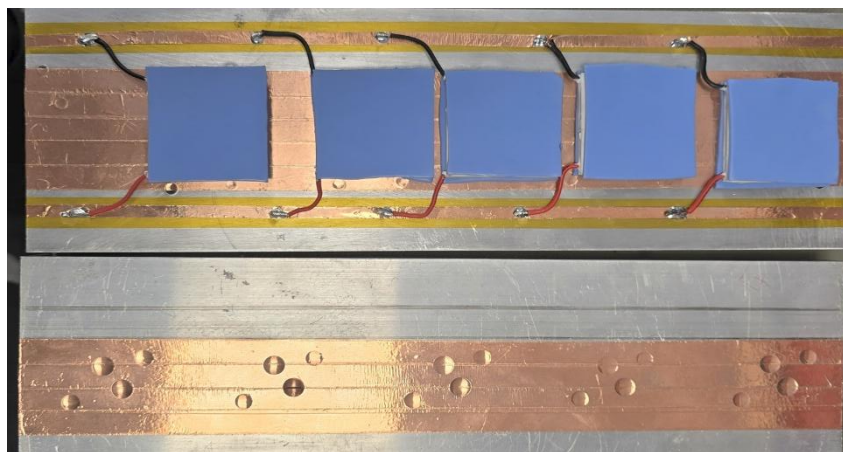
Δημιουργήθηκε λοιπόν μία κατασκευή στην οποία τοποθετήθηκαν 5 θερμοηλεκτρικά στοιχεία TEG. Η κατασκευή που τοποθετήθηκαν είναι ψύκτρα αλουμινίου η οποία λόγω όγκου είναι κατάλληλη για την πιο άμεση απαγωγή θερμότητας.

Λόγο όμως ότι η ψύκτρα είναι μεταχειρισμένη από άλλο σύστημα ισχύος η επιφάνεια της ήταν αρκετά τραχιά με αποτέλεσμα τα στοιχεία να μην εφάπτονται καλά πάνω στην επιφάνεια του αλουμινίου. Το αποτέλεσμα είναι να μην γίνεται σωστή απαγωγή της θερμότητας και ως εκ τούτου να πέφτει η απόδοση των θερμοηλεκτρικών γεννητριών.

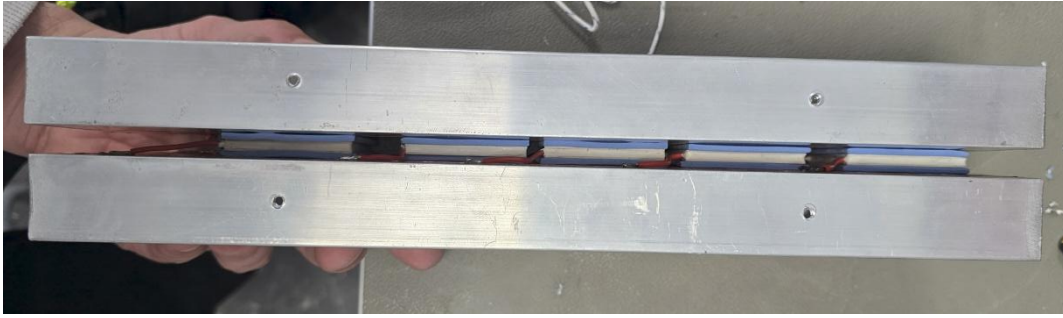
Το πρόβλημα αυτό λύθηκε με την τοποθέτηση φύλλων χαλκού στο μέρος μεταξύ ψύκτρας και των TEG καθώς επίσης θερμοαγώγιμη πάστα μαζί με θερμοαγώγιμη σιλικόνη. Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται η τοποθέτηση.



Εικόνα 4.6 : Παράλληλη σύνδεση Peltier



Εικόνα 4.7: Εφαρμογή θερμοαγώγιμης πάστας και σιλικόνης

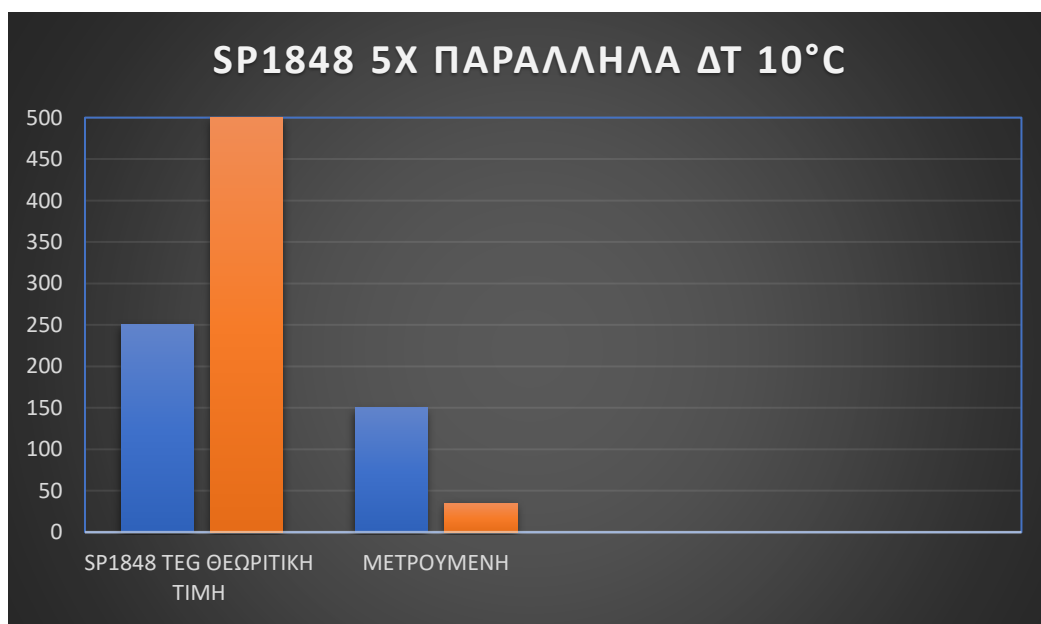


Εικόνα 4.8 : Τοποθέτηση ψύκτρας στο 2^ο μοντέλο

Στην συνέχεια αφού τοποθετήθηκαν οι ψύκτρες και από τις δύο μεριές, εφαρμόστηκε θερμός αέρας στην μια μεριά ώστε να δημιουργηθεί διαφορά θερμοκρασίας 10°C . Το αποτέλεσμα που αναμένεται είναι η τάση να βρίσκεται στα όρια του ενός στοιχείου TEG και το ρεύμα να έχει αυξηθεί κατά 5 φορές.

Η τάση όπως μετρήθηκε στο προηγούμενο πείραμα αναμένεται στα 250mV και το ρεύμα περίπου στα 500mA. Γι' άλλη μια φορά όμως τα αποτελέσματα έρχονται να δημιουργήσουν και άλλα ερωτήματα καθώς η τάση μετρήθηκε στα 150mV και το ρεύμα δεν μπόρεσε να ξεπεράσει την τιμή των 35mA.

Παρατηρείται ότι οι ημιαγωγοί έχουν διαφορετική συμπεριφορά όταν συνδέονται σε παράλληλη σύνδεση και δεν ανταποκρίνονται όπως αναμένεται από τις θεωρητικές τιμές. Γι' αυτό το λόγο θα σχεδιαστεί διαφορετική προσέγγιση.



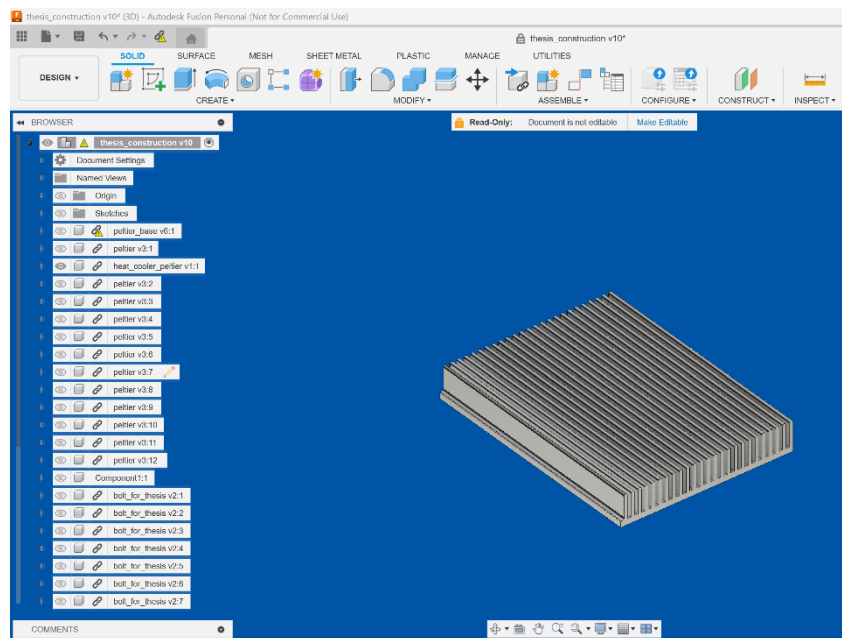
Εικόνα 4.9 : Σύγκριση τιμών SP1848 κατασκευαστή με μετρούμενη πραγματική. Οι τιμές αριστερά της στήλης είναι στην μονάδα mV, mA

4.4 Μοντέλο 3^ο

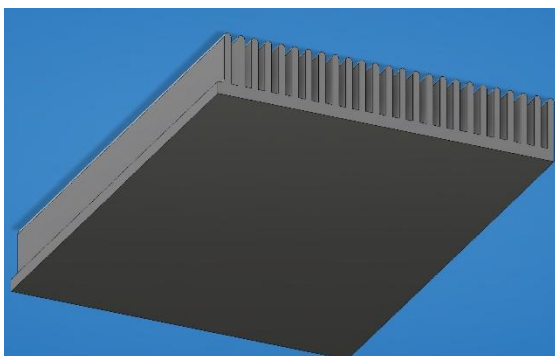
Με τις προηγούμενες μετρήσεις παρατηρείται πως το σύστημα για να λειτουργήσει απαιτεί παραπάνω θερμοηλεκτρικές γεννήτριες (στοιχεία TEG). Οι μετρήσεις του κατασκευαστή δεν ταυτίζονται με τις μετρήσεις που έγιναν στο εργαστήριο, οπότε το σύστημα ξανασχεδιάζεται ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό.

Για τον σχεδιασμό του τελευταίου μοντέλου χρειάστηκαν επιπλέον μηχανολογικές διαδικασίες ώστε να διορθωθεί όσο το δυνατόν η επαγωγή της θερμότητας από αστοχίες επαφής υλικών έτσι ώστε να έχουμε το μέγιστο δυνατό αποτέλεσμα. Επιπλέον χρειάστηκε να γίνει σχεδιασμός ψύκτρας ώστε να μπορούν να τοποθετηθούν δώδεκα στοιχεία TEG σε συνδεσμολογία σειράς μεταξύ τους.

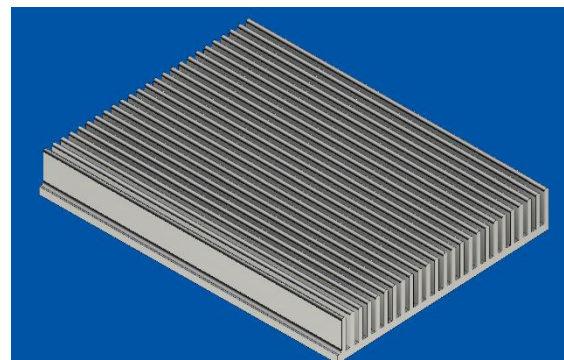
Για τον σχεδιασμό της ψύκτρας χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Fusion360. Παρακάτω στις εικόνες φαίνεται ο σχεδιασμός.



Εικόνα 4.10 : Σχεδίαση ψύκτρας στο Fusion360



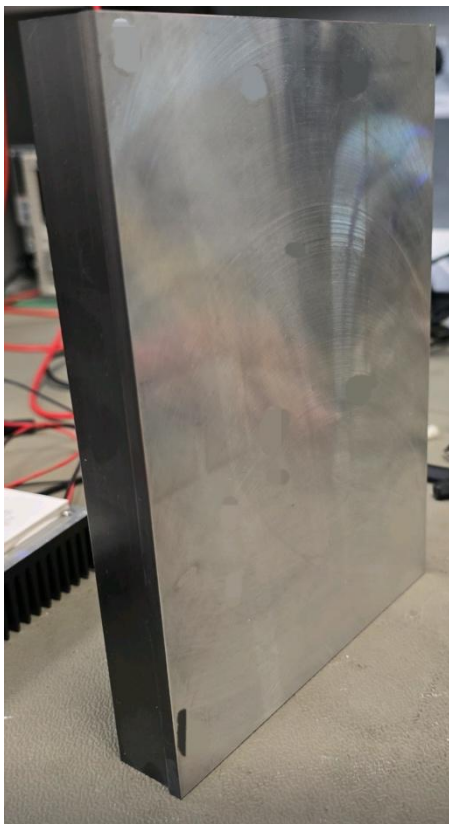
Εικόνα 4.11 : Κάτω πλευρά ψύκτρας



Εικόνα 4.12 : Επάνω πλευρά ψύκτρας

Η ψύκτρα έχει διαστάσεις 200mm X 150 mm. Αφού σχεδιάστηκε η ψύκτρα το επόμενο βήμα ήταν να κατασκευαστεί. Για να γίνει αυτό η βοήθεια ενός μηχανουργείου με τα κατάλληλα μηχανήματα είναι απαραίτητη.

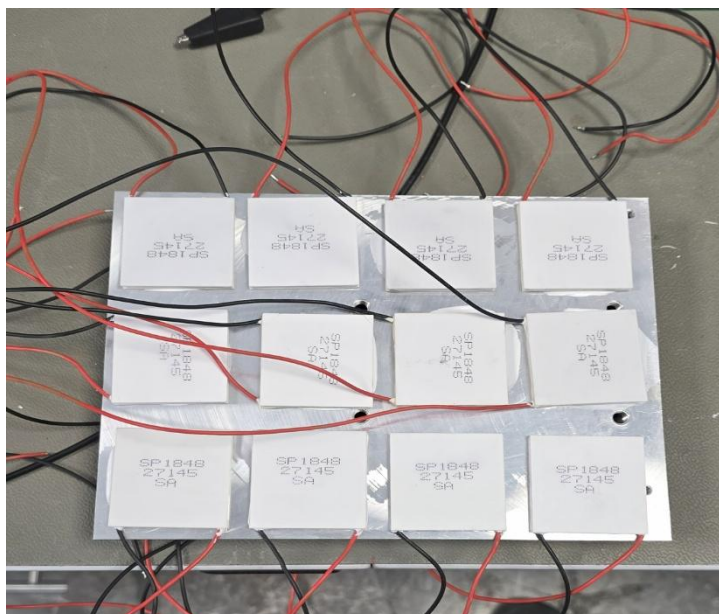
Η επιλογή κράματος αλουμινίου παίζει επίσης σημαντικό ρόλο καθώς καθορίζει την θερμική αγωγιμότητα του υλικού. Το καθαρό αλουμίνιο 99.9% είναι το πιο θερμικά αγωγίμο 235 W/mK, αλλά το μειονέκτημα του είναι ότι επειδή είναι πολύ μαλακό είναι αρκετά δύσκολο για κατεργασία. Επίσης δεν έχει καλές μηχανικές αντοχές. Έπειτα από έρευνα το καταλληλότερο κράμα για την συγκεκριμένη εφαρμογή είναι το AL6063-T5. Η θερμική του αγωγιμότητα είναι περίπου 200 -210 W/mK και είναι εξαιρετικά ιδανικό για επεξεργασία. Οι περισσότερες ψύκτρες του εμπορίου για εφαρμογές χρησιμοποιούν αυτό το υλικό. Αφού έγινε η επιλογή και η κατεργασία η βάση ήταν έτοιμη να υποδεχτεί τις θερμοηλεκτρικές γεννήτριες (TEG module). Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η τελική κατασκευή της ψύκτρας.



Εικόνα 4.13 : Κατασκευή ψύκτρας από το μηχανουργείο κάτω πλευρά



Εικόνα 4.14 : Κατασκευή ψύκτρας από το μηχανουργείο πάνω πλευρά



Εικόνα 4.15 : Τοποθέτηση Peltier στην ψύκτρα

Αφού κατασκευάστηκε η πλευρά στην οποία θα ακουμπάει η μια μεριά των θερμοηλεκτρικών γεννητριών εικόνα 4.15 (θερμή πλευρά), στην συνέχεια έπρεπε να μελετηθεί η συνδεσμολογία των TEG module μεταξύ τους, καθώς τα καλώδια ήταν αρκετά και η συνδεσμολογίες δύσκολές λόγω χώρου. Επειδή η κρύα πλευρά θα ακουμπάει σε νερό έπρεπε να γίνει μελέτη και για την ασφάλεια με αδιαβροχοποίηση των συνδέσεων.

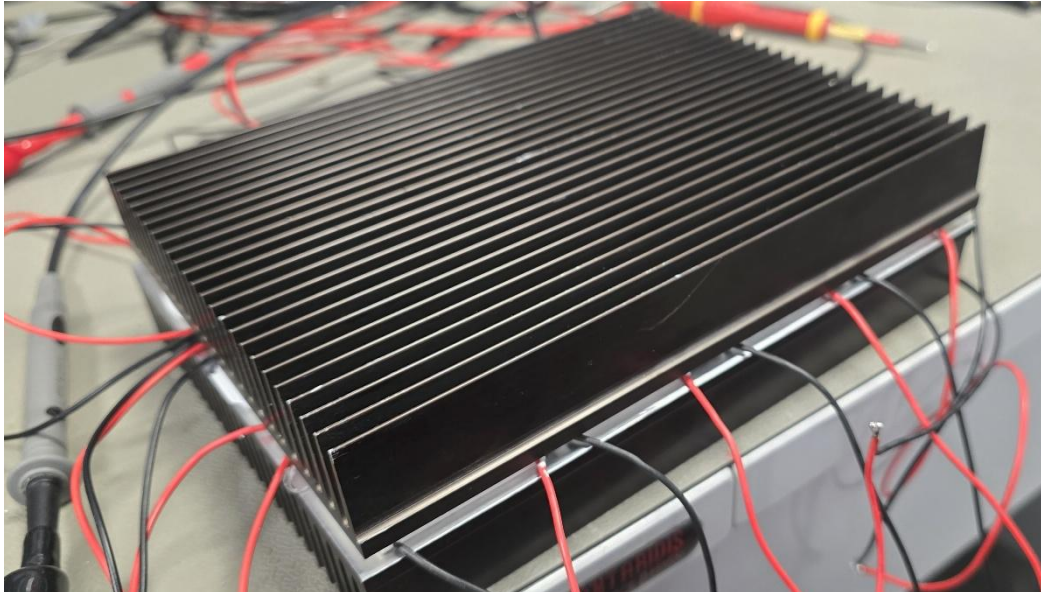
Στην πρώτη προσπάθεια έγινε μία απόπειρα να κολληθούν τα στοιχεία στην ψύκτρα με θερμοαγώγιμη κόλλα. Αφού έγινε αυτό τοποθετήθηκε ένα ακόμη κομμάτι από την ψύκτρα που κατασκευάστηκε από την άλλη μεριά. Έτσι και οι δύο μεριές των θερμοηλεκτρικών γεννητριών είναι εκτεθειμένες στις πλευρές από τις ψύκτρες. Η μία μεριά έχει μελετηθεί ώστε να είναι εκτεθειμένη στον αέρα του περιβάλλοντος(θερμή πλευρά) και η άλλη μεριά θα ακουμπάει στο νερό(κρύα πλευρά).

Σύμφωνα με τον δεύτερο νόμο θερμοδυναμικής η θερμότητα μεταβαίνει από την περιοχή με την υψηλότερη θερμοκρασία σε αυτή με την χαμηλότερη. Έτσι επειδή υπολογίζεται πως το περιβάλλον θα βρίσκεται σε θερμοκρασία υψηλότερη από αυτή του νερού που εκτίθεται η άλλη μεριά, θα μπορεί να υπάρξει ροή θερμότητας και έτσι να δημιουργείται το επιθυμητό ΔT ώστε να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια από τις θερμοηλεκτρικές γεννήτριες.

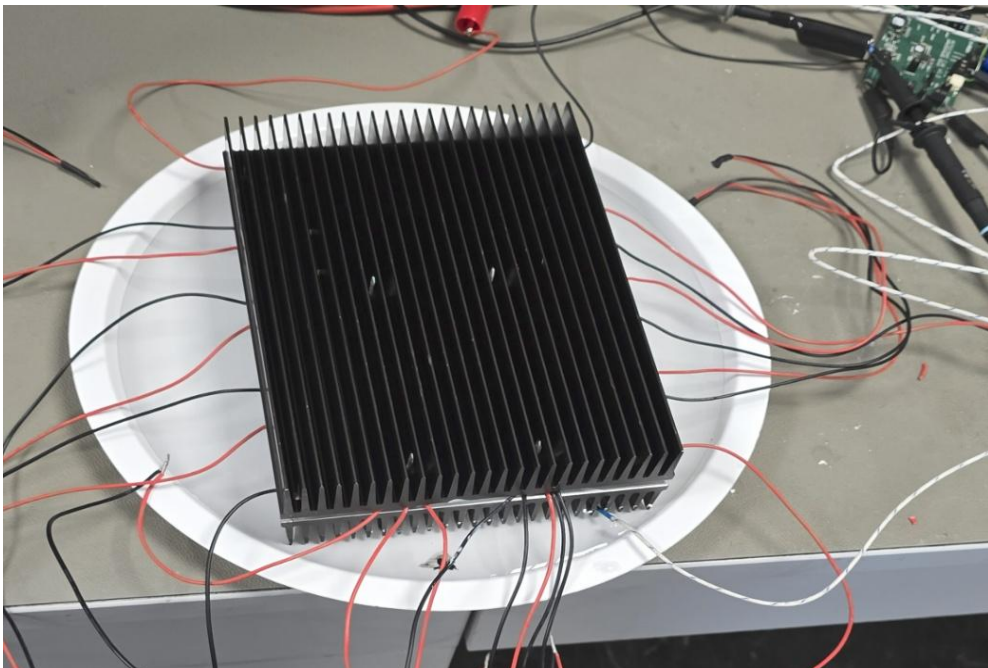
Αυτό όμως εισάγει απευθείας ένα βασικό περιορισμό στο σύστημα. Ότι δεν θα μπορεί να λειτουργεί όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι ίση ή μικρότερη από αυτή του νερού.

Στην συνέχεια του πειράματος χρησιμοποιήθηκε ένας κουβάς με πάγο ώστε να εκτεθεί η μία μεριά σε κρύο και η άλλη μεριά στην θερμοκρασία του δωματίου. Όταν ακούμπησε η μία μεριά στο νερό προέκυψε κατευθείαν και το πρώτο πρόβλημα το οποίο ήταν ότι η απόσταση ήταν πολύ μικρή με αποτέλεσμα να βρέχονται οι συνδέσεις και τα TEG module.

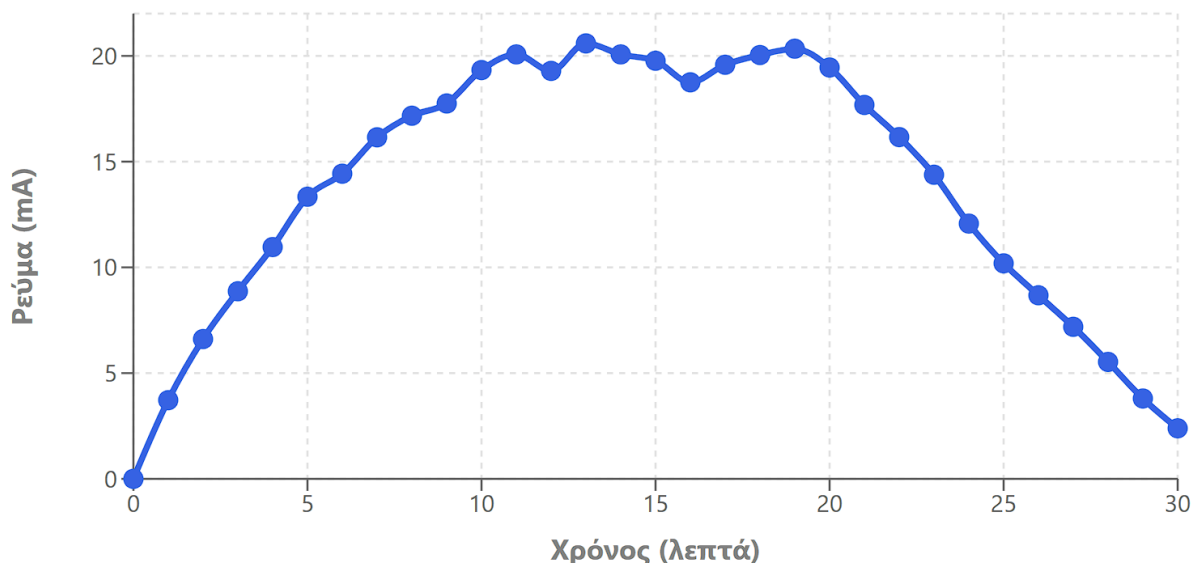
Στην συνέχεια έγιναν μετρήσεις στο ρεύμα εξόδου που βγάζουν τα στοιχεία TEG σε σχέση με την διαφορά θερμοκρασίας ΔT και τον χρόνο στον οποίο μπορούν να αποδίδουν σταθερά αυτό το ρεύμα. Στην παρακάτω εικόνα 4.18 φαίνεται η πορεία του ρεύματος σε σχέση με τον χρόνο.



Εικόνα 4.16: Τοποθέτηση ψύκτρας και στις δύο πλευρές των Peltier



Εικόνα 4.17 :Εφαρμογή του συστήματος σε κρύο νερό



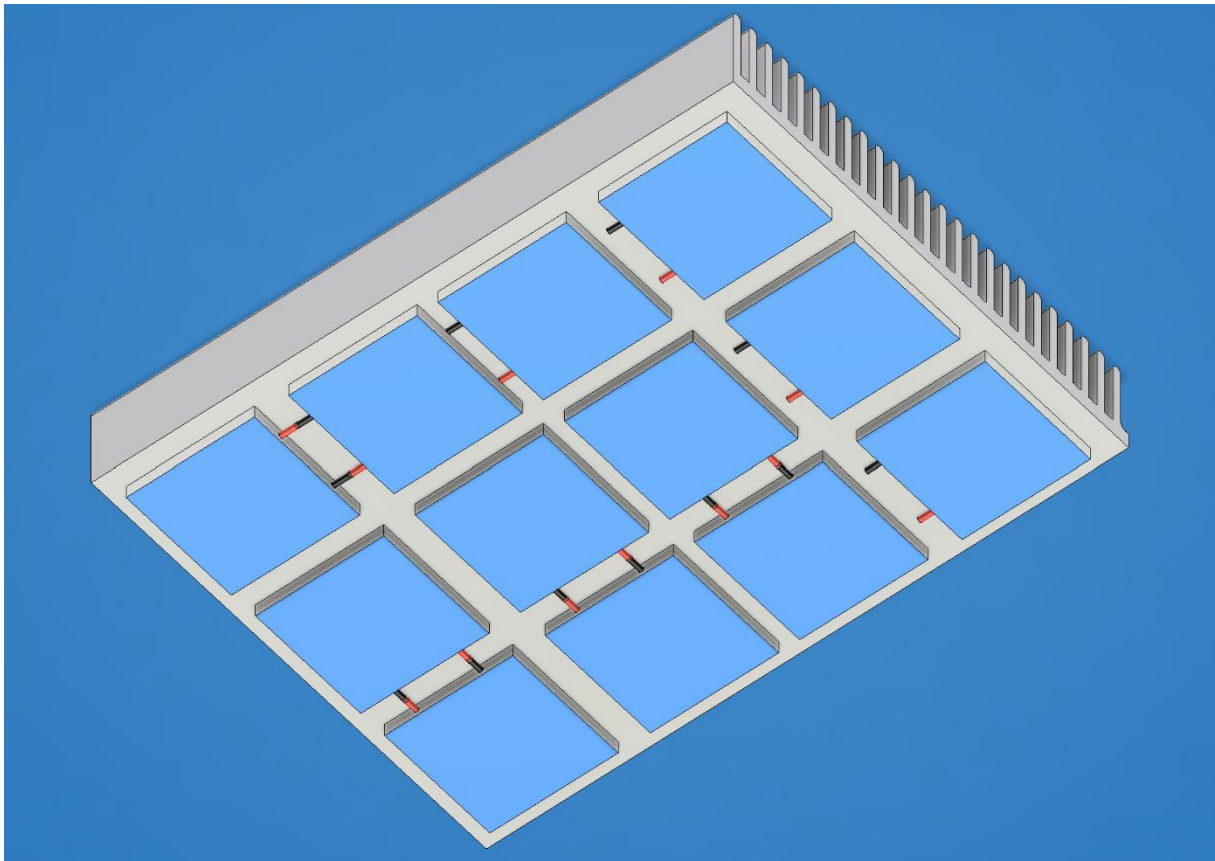
Εικόνα 4.18 :Ρεύμα σε σχέση με τον χρόνο για $\Delta T 10^{\circ}C$

Αυτό που παρατηρήθηκε είναι ότι ενώ το ρεύμα είχε αυξητική πορεία στην αρχή μετά από λίγη ώρα ήταν πτωτική η καμπύλη. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι όταν το σύστημα ήταν σε ισορροπία το ΔT ήταν $0^{\circ}C$, και δεν υπήρχε ροή ρεύματος. Μετά που τοποθετήθηκε στο κρύο η μία μεριά το ρεύμα ξεκίνησε να αυξάνεται μέχρι το σημείο του χρόνου 10 λεπτών. Μετά η πτωτική τάση του ρεύματος οφείλεται στο γεγονός ότι η θερμή πλευρά πλέον έτεινε να αποκτήσει παρόμοια θερμοκρασία με αυτή της κρύας πλευράς οδηγώντας έτσι σε χαμηλότερο ΔT .

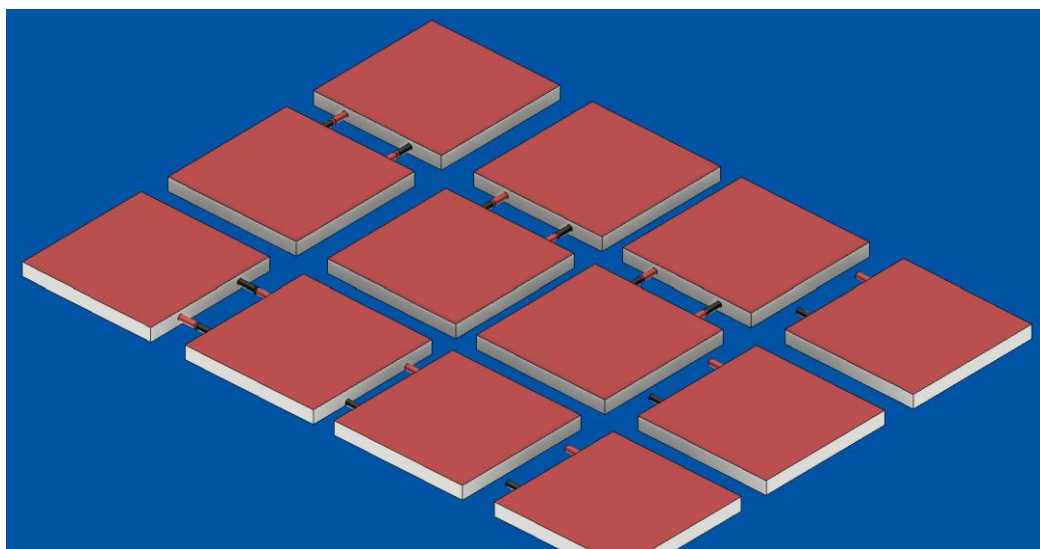
Το γεγονός ότι και οι δύο πλευρές έχουν ακριβώς την ίδια επιφάνεια για μεταφορά θερμότητας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η μεταφορά θερμότητας από την θερμή πλευρά προς την κρύα γίνεται με μεγαλύτερο ρυθμό από ότι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος στην θερμή πλευρά της ψήκτρας. Αυτό είναι λογικό καθώς στην πρώτη περίπτωση υπάρχει επαφή κατά την μεταφορά θερμότητας ενώ στην δεύτερη μεσολαβεί ο αέρας και η μεταφορά θερμότητας γίνεται με πιο αργό ρυθμό.

Αυτό το πρόβλημα που προέκυψε δημιουργεί ένα μεγάλο πρόβλημα καθώς το σύστημα δεν θα μπορεί να δουλεύει συνεχώς. Για την λύση του προβλήματος αποφασίστηκε η κρύα πλευρά των TEG module να εκτίθεται λιγότερο σε σχέση με την θερμή πλευρά ώστε να εξισορροπηθεί η γρήγορη μεταφορά θερμότητας και να εισαχθεί έτσι μια υστέρηση.

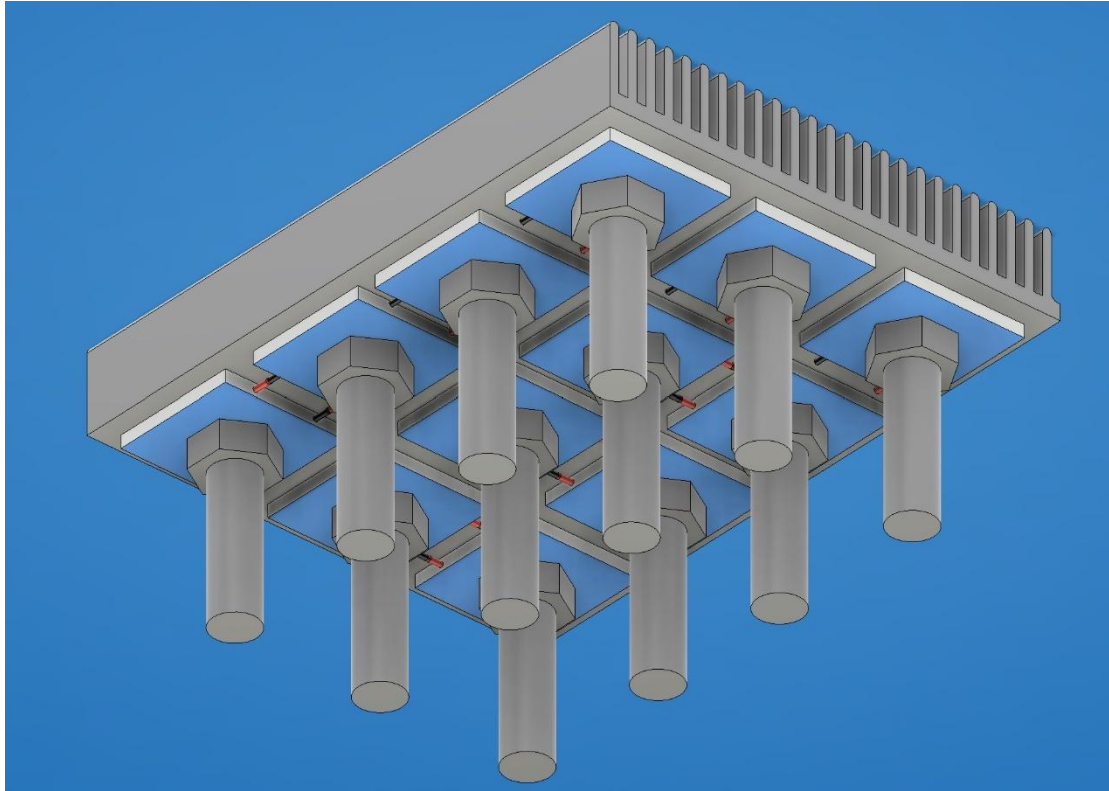
Με γνώμονα αυτό αλλά και ότι η κρύα πλευρά πρέπει να απέχει από το νερό για να μην βρέχεται, γρήγορη σκέψη ήταν η κατασκευή μεταλλικών ράβδων μικρής διαμέτρου. Το εγχείρημα αυτό για την κατασκευή θα επιβάρυνε το κόστος, οπότε σαν εναλλακτική χρησιμοποιήθηκαν βίδες(μπουλόνια) τα οποία θα είχαν τον ρόλο των μεταλλικών ράβδων. Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται ο σχεδιασμός που έγινε στο πρόγραμμα 3D σχεδίασης αλλά και η πραγματική κατασκευή. Τα μπουλόνια έχρηζαν ειδικής επεξεργασίας καθώς το κεφάλι τους ήταν οβάλ και δεν επέτρεπε την καλή επαφή με τα Peltier module. Η λείανση με έναν τροχό δημιούργησε την κατάλληλη επιφάνεια για να υπάρχει καλή εφαρμογή με τα Peltier module.



Εικόνα 4.19 : Μοντέλο ψύκτρας Peltier από σχεδίαση στο Fusion360



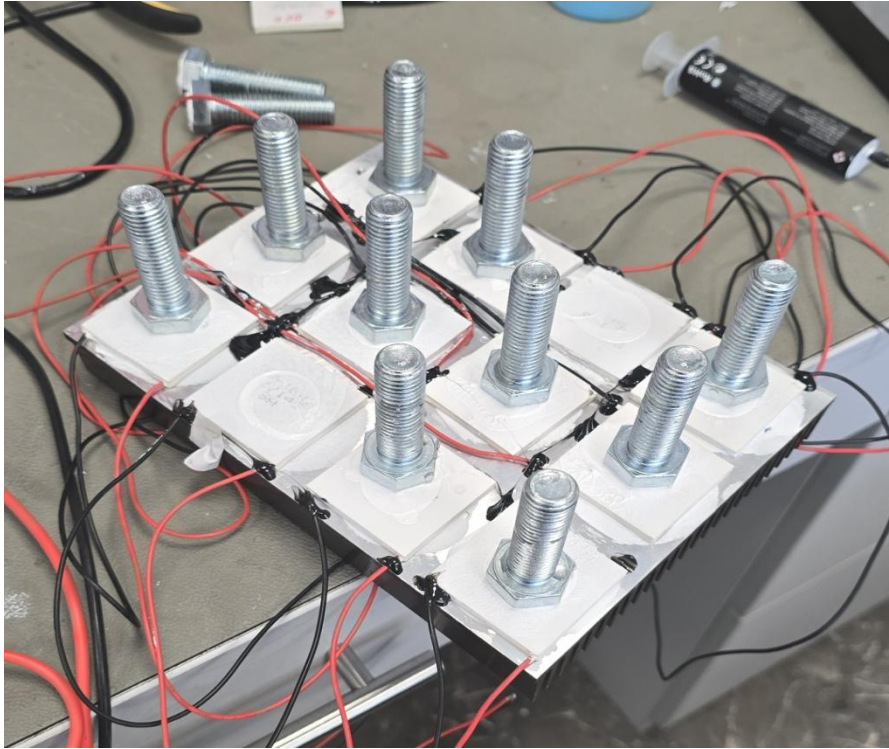
Εικόνα 4.20 : Peltier module σχεδιασμένα στο Fusion360



Εικόνα 4.21: Peltier module σε εφαρμογή με τα μπουλόνια σχεδίαση στο Fusion360



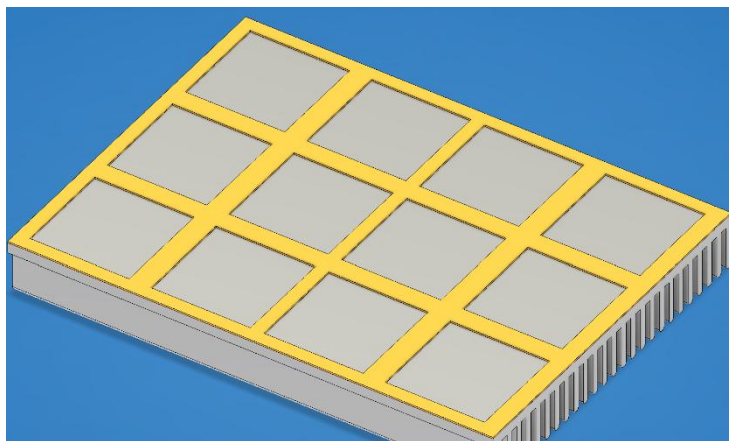
Εικόνα 4.22 : Κατασκευή των Peltier με το σύστημα



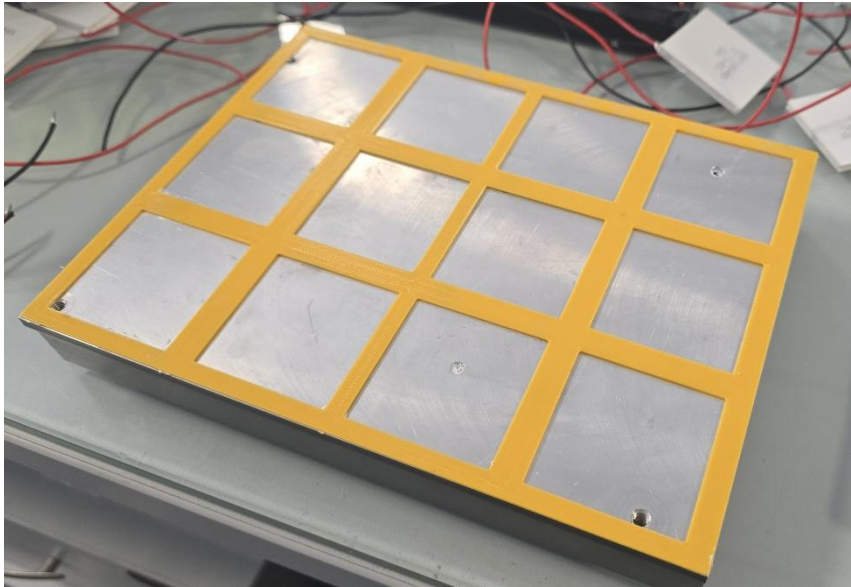
Εικόνα 4.23 : εφαρμογή μπουλονιών πάνω στα Peltier

Αφού έγινε η κατασκευή το επόμενο πρόβλημα δεν άργησε να εμφανιστεί. Η αστάθεια των μπουλονιών καθώς και η μη ευθυγράμμιση στα Peltier δημιουργούσε απώλειες στο σύστημα λόγω κακής επαφής. Σχεδιάστηκε λοιπόν στο πρόγραμμα 3D δύο μήτρες. Η μία είναι υπεύθυνη για την ευθυγράμμιση των Peltier και η άλλη για την στήριξη των μπουλονιών σε βάση τα οποία θα εφάπτονται μόνο στο επάνω μέρος με τα Peltier. Στις εικόνες παρακάτω φαίνεται η σχεδίαση και η τελική κατασκευή.

Για την κατασκευή όλων των παραπάνω χρησιμοποιήθηκε 3D εκτυπωτής. Τα υλικά κατασκευής είναι από υλικό PETG το οποίο προσφέρει μηχανικές και θερμικές αντοχές, ιδανικό για την εφαρμογή του συστήματος μας. Έπειτα από την σχεδίαση στο 3D πρόγραμμα τα μοντέλα πρέπει να εισαχθούν σε ένα δεύτερο πρόγραμμα το οποίο είναι του εκτυπωτή. Σε αυτό γίνονται οι απαραίτητες ρυθμίσεις θερμοκρασίας, πυκνότητας υλικού, τύπος υλικού και άλλες, οι οποίες είναι απαραίτητες για την εκτύπωση του μοντέλου που έχει σχεδιαστεί. Έπειτα το πρόγραμμα εξάγει τον G κώδικα και τον αποστέλλει στον εκτυπωτή ώστε να ξεκινήσει η εκτύπωση.



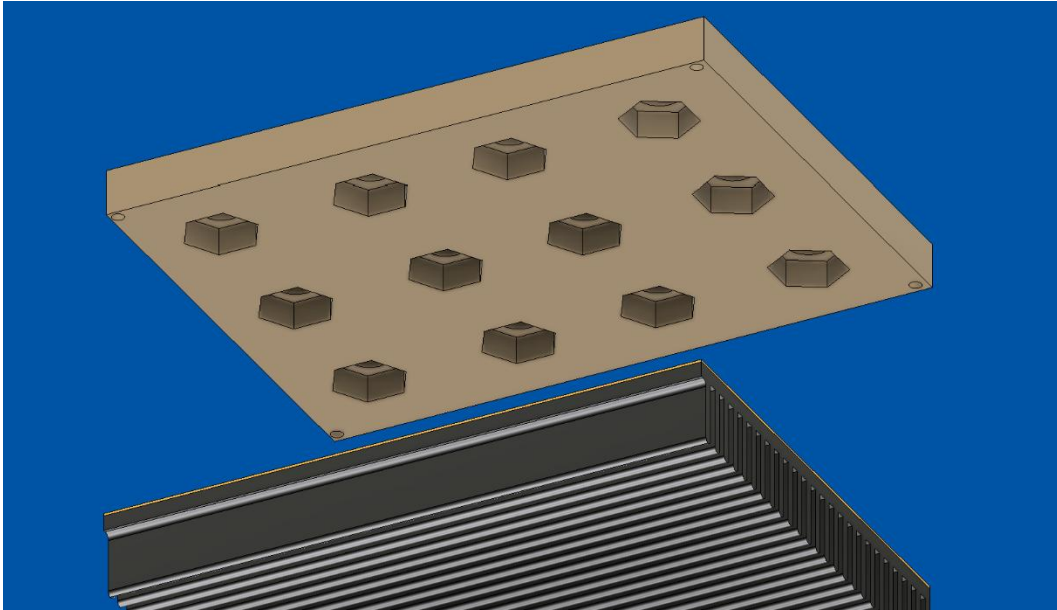
Εικόνα 4.24:Μήτρα υποδοχής για τα Peltier module 3D σχέδιο



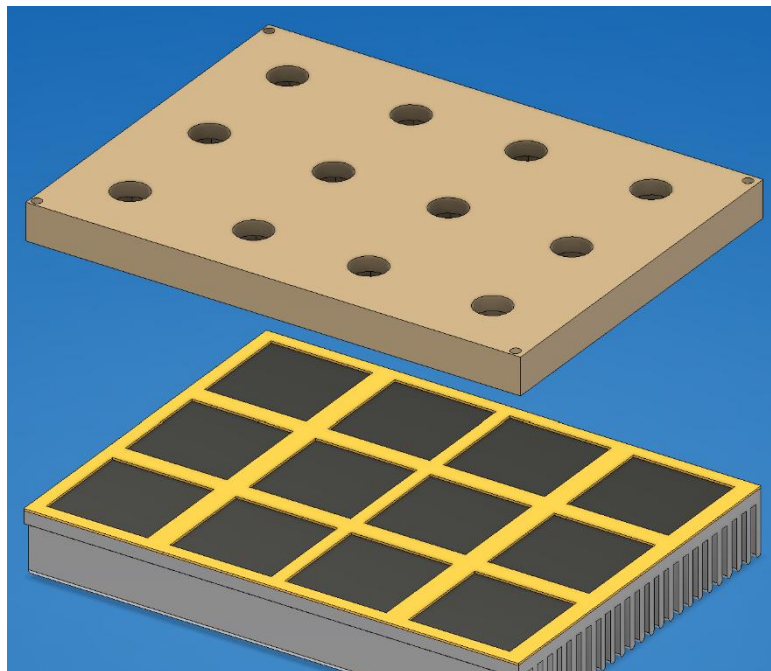
Εικόνα 4.25: Μήτρα υποδοχής για τα Peltier module πραγματικό μοντέλο



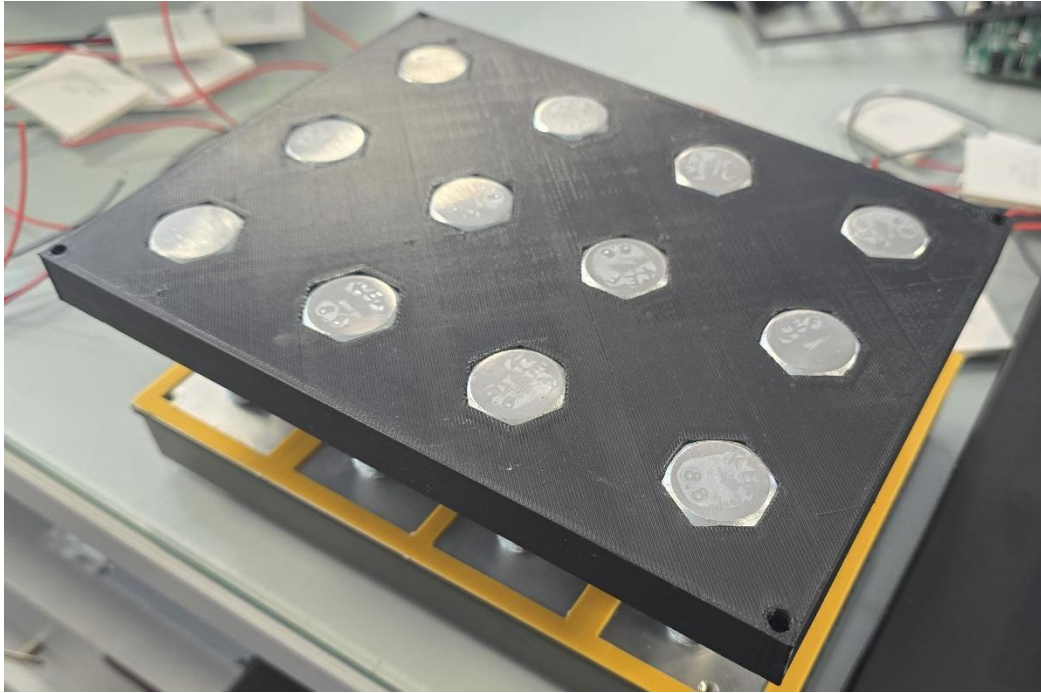
Εικόνα 4.26 : Τοποθέτηση των Peltier στην μήτρα υποδοχής



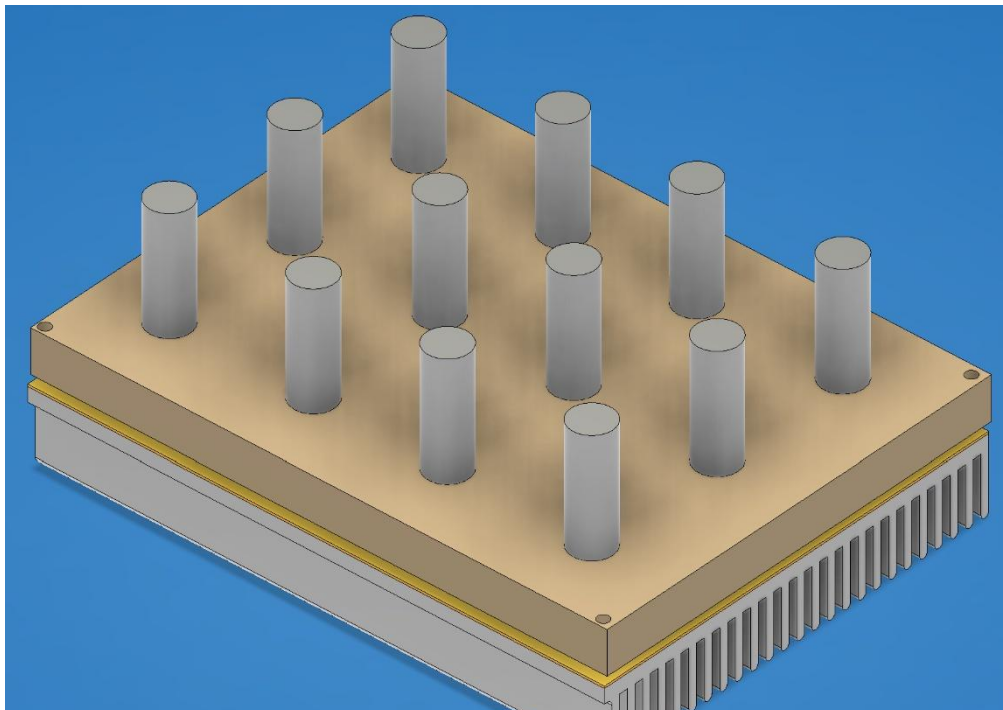
Εικόνα 4.27 : Κατασκευή μήτρας μπουλονιών στο Fushion360



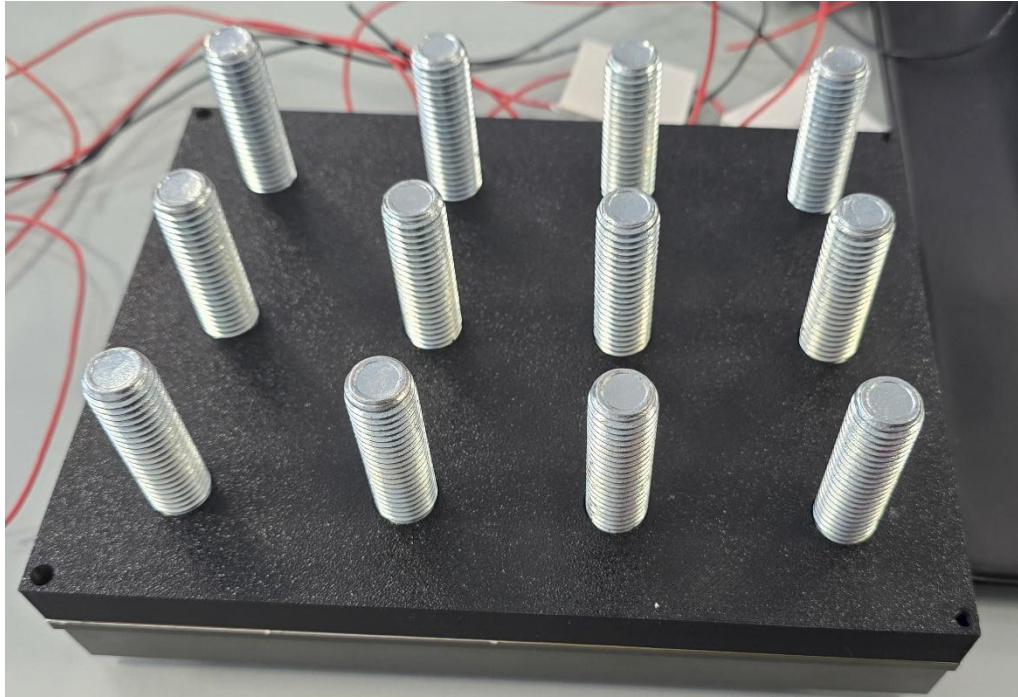
Εικόνα 4.28 : Επάνω όψη μήτρας μπουλονιών



Εικόνα 4.29 Εκτυπωμένο μοντέλο μήτρας από 3D εκτυποτή



Εικόνα 4.30 : Ολοκληρωμένο μοντέλο της κατασκευής στο Fusion360

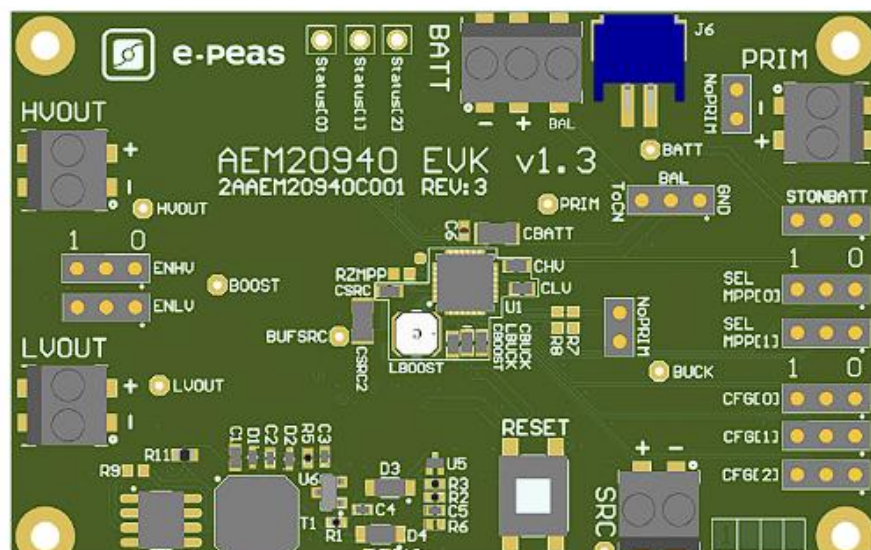


Εικόνα 4.31: Σύνθεση εκτυπωμένων μοντέλων τελική κατασκευή

4.4.1 Σύνδεση κατασκευής παραγωγής ενέργειας με τον ελεγκτή διαχείρισης ενέργειας

Αφού ολοκληρώθηκε η κατασκευή στην οποία έχουν τοποθετηθεί οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες σειρά έχει η σύνδεση της πηγής με τον ελεγκτή ο οποίος είναι υπεύθυνος για την συγκομιδή της ενέργειας από την πηγή και την διαχείριση της.

Ο ελεγκτής χρησιμοποιήθηκε πάνω σε αναπτυξιακή πλακέτα που δίνει η εταιρεία που τον κατασκευάζει.



Εικόνα 4.32 : Ελεγκτής AEM20940 αναπτυξιακή πλακέτα της EPEAS

Η συγκεκριμένη πλακέτα δίνει επιλογές στον χρήστη για την επιλογή του αλγορίθμου MPPT, για την επιλογή τάσης εξόδου καθώς δίνει και σημεία στα οποία δίνει ανατροφοδότηση στον χρήστη για την κατάσταση των τάσεων και των στοιχείων αποθήκευσης της ενέργειας. Στο σημείο σύνδεσης SRC συνδέεται η πηγή, στο σημείο HVOUT συνδέεται το φορτίο για τάση 3.3V. Στο σημείο σύνδεσης BATT συνδέονται οι υπερπυκνωτές. Στο σημείο αυτό παρέχεται ένα επιπλέον σημείο στο οποίο συνδέεται το ενδιάμεσο σημείο από τους πυκνωτές που συνδέονται σε σειρά ώστε να υπάρχει ισορροπία στην φόρτιση μεταξύ των στοιχείων.

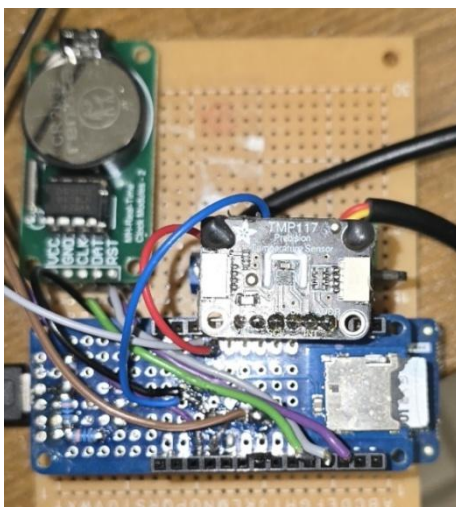
4.4.2 Data logger

Συνδέοντας τα απαραίτητα σημεία λοιπόν έγιναν οι απαραίτητες μετρήσεις σε αυτό το σύστημα σε διαφορετικά σενάρια, που θα βοηθήσουν την καλύτερη μελέτη του συστήματος. Επιπλέον δημιουργήθηκε επιπλέον μία πλακέτα η οποία λειτουργεί ως data logger. Η πλακέτα αυτή είναι το αναπτυξιακό σύστημα MKRWAN1310 που φιλοξενεί τον επεξεργαστή SAMD21.

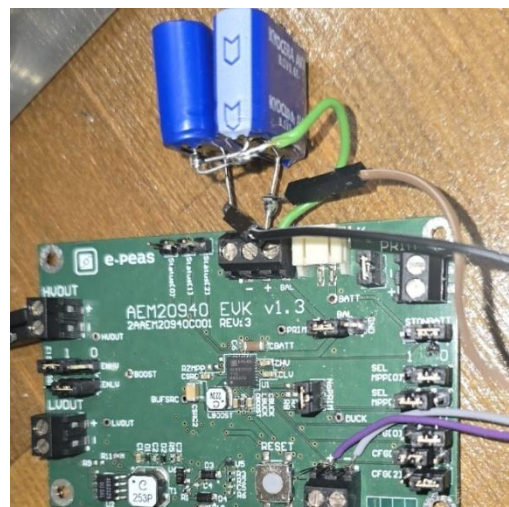
Σε αυτή την πλακέτα συνδέθηκαν τρία διαφορετικά θερμόμετρα. Τα δύο είναι αισθητήρες DS18B20 και η επιλογή έγινε διότι μπορούν και παρέχουν αξιόπιστα αποτελέσματα, προσφέροντας επιπλέον αδιαβροχοποίηση. Οι αισθητήρες αυτοί είναι υπεύθυνοι για την μέτρηση των θερμοκρασιών της ψύκτρας στην θερμή πλευρά, και των μπουλονιών στην κρύα πλευρά που ακουμπάει το νερό. Η επικοινωνία των αισθητήρων διεκπεραιώνεται μέσω πρωτοκόλλου one-wire με τον μικροελεγκτή του συστήματος.

Το τρίτο θερμόμετρο είναι ο αισθητήρας TMP117 οποίος είναι τοποθετημένος στην επάνω μεριά του data logger και είναι υπεύθυνος για την μέτρηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Επιπλέον έχουν χρησιμοποιηθεί δύο ADC από τον μικροελεγκτή που μετριοούνται η τάση που έχουν οι υπερπυκνωτές και η τάση που παράγουν οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες.

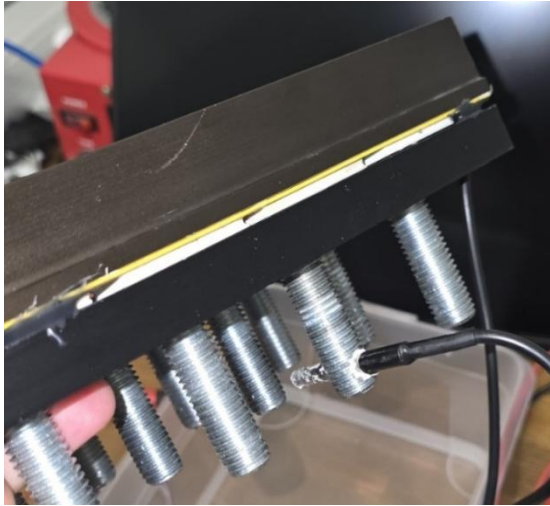
Πρόσθετο στοιχείο στο κύκλωμα είναι ένα ρολόι RTC το οποίο θα βοηθήσει στην καταγραφή του χρόνου που γίνονται οι μετρήσεις. Όλα αυτά αποθηκεύονται σε μία κάρτα SD από την οποία εξάγουμε τα δεδομένα για να τα αναλύσουμε.



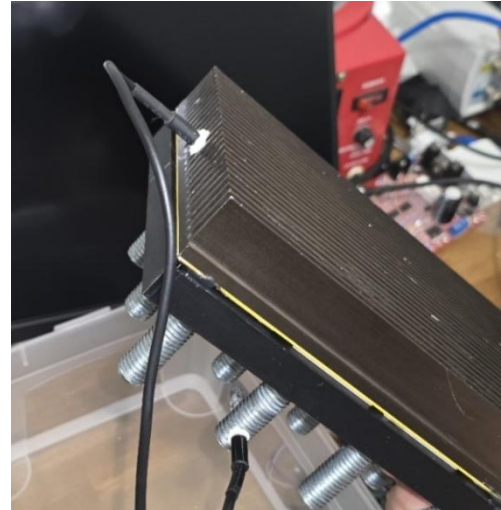
Εικόνα 4.33 : Data logger



Εικόνα 4.34 : PMIC ελεγκτής



Εικόνα 4.35 : Τοποθέτηση αισθητήρων θερμοκρασίας κρύα πλευρά



Εικόνα 4.36 : Τοποθέτηση αισθητήρων θερμοκρασίας θερμή πλευρά

4.4.3 Συσκευή μέτρησης κατανάλωσης ρεύματος

Πολύ σημαντικό στις μετρήσεις είναι να μετρηθεί και η κατανάλωση ρεύματος του φορτίου. Στην συγκεκριμένη περίπτωση του μικροελεγκτή όταν είναι σε κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης και όταν αποστέλλει δεδομένα. Για να γίνει αυτό χρειάζεται ειδικός εξοπλισμός για την μέτρηση και καταγραφή αυτών των δεδομένων.

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε είναι το Power Profiler II της εταιρείας Nordic εικόνα 4.37. Ο μετρητής έχει την δυνατότητα μέτρησης ρεύματος από την τιμή των nA μέχρι 1A. Επιπλέον προσφέρει την δυνατότητα καταγραφής ρεύματος και τάσης κατά την διάρκεια των μετρήσεων και την εξαγωγή των τιμών σε αρχείο ώστε να χρησιμοποιηθούν από τον χρήστη για περαιτέρω ανάλυση. Ο χρήστης μπορεί να παίρνει δεδομένα ή ρεύματος ή τάσης. Ταυτόχρονη μέτρηση δεν μπορεί να πραγματοποιήσει. Είναι ένα σημαντικό εργαλείο στα ενσωματωμένα συστήματα καθώς μπορούν να γίνουν αναλύσεις και βελτιστοποιήσεις στο σύστημα όπως για παράδειγμα η βελτιστοποίηση του κώδικα ή των κυκλωμάτων του συστήματος.



Εικόνα 4.37 : Μετρητής κατανάλωσης κυκλωμάτων

4.5 Επίλογος

Βλέπουμε λοιπόν πως η υλοποίηση ενός συστήματος είναι μια περίπλοκη διαδικασία που απαιτεί εξοπλισμό και μέσα ώστε να δημιουργηθεί το σύστημα που έχει μελετηθεί. Παρατηρείτε επίσης πως στην υλοποίηση το πραγματικό περιβάλλον διαφέρει αρκετά από αυτό της θεωρητικής μελέτης, καθώς υπάρχουν αρκετοί παράγοντες που κατά την μελέτη δεν συμπεριλαμβάνονται ή δεν είναι εφικτό να προβλεφθούν. Παρόλα αυτά το σύστημα έφτασε σε ένα ικανοποιητικό επίπεδο με τις απαραίτητες παραμετροποιήσεις και αλλαγές ώστε να μπορέσει να ανταποκριθεί σε αυτό που στοχεύει η μελέτη.

Κεφάλαιο 5ο: Μετρήσεις συστήματος

5.1 Εισαγωγή

Οι μετρήσεις και δεδομένα που συλλέγονται από ένα σύστημα είναι το πιο σημαντικό μέρος, το οποίο βοηθάει τους μηχανικούς να αναλύσουν τα δεδομένα και να εξάγουν τα κατάλληλα συμπεράσματα. Σε αυτό το κεφάλαιο πραγματοποιούνται πειράματα και συλλέγονται μετρήσεις από ποικίλα σενάρια που πραγματοποιούνται ώστε να εξαχθούν όσο το δυνατόν περισσότερα δεδομένα και να βοηθήσουν στην καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του συστήματος. Στο τέλος προκύπτουν ποικίλα συμπεράσματα τα οποία αφορούν την υποστήριξη του πρωταρχικού σκοπού. Άραγε ένα τέτοιο σύστημα θα μπορούσε να ανταπεξέλθει σε συνθήκες που η συγκομιδή ενέργειας να είναι εφικτή πάντοτε, αντιπροσωπεύοντας ένα σύστημα το οποίο θα λειτουργεί για πολλά χρόνια χωρίς συντήρηση;

5.2 Πείραμα 1^ο

Στο πρώτο πείραμα η συσκευή τοποθετήθηκε σε εξωτερικό χώρο με ηλιοφάνεια. Η ψύκτρα είναι εκτεθειμένη στον ήλιο και έχει τοποθετηθεί λάστιχο με τρεχούμενο νερό στην πλευρά που είναι τα μπουλόνια.

Σύμφωνα με το AEM20940 σε περίπτωση συνδεσμολογίας δύο πυκνωτών σε σειρά, η τάση εξόδου είναι σε δύο προγραμματισμένα επίπεδα 3.3V και 1.8V. Επιπλέον προγραμματισμένα είναι και τα κατώφλια φόρτισης και εκφόρτισης των πυκνωτών. Ο ελεγκτής εάν μετρήσει τάση κάτω από 3.6V αποκόπτει το κύκλωμα που τροφοδοτεί τα φορτία. Για να δώσει εντολή να ενεργοποιηθεί και πάλι το κύκλωμα η τάση πρέπει να φτάσει το όριο των 3.92V. Στα 4.5V οι πυκνωτές είναι πλήρως φορτισμένοι.

Σε αυτό το πείραμα έγινε ελεγχόμενη κατανάλωση ενέργειας με δύο φορτία. Στην πρώτη περίπτωση το ρεύμα φορτίου είναι 1mA και στην δεύτερη περίπτωση το ρεύμα είναι 50mA. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα εικόνα μπορούμε να διακρίνουμε το γόνατο που δημιουργείται όταν συνδέονται τα φορτία.

Παρατηρώντας της καμπύλες γίνεται πιο κατανοητή η λειτουργία του συστήματος σε σχέση με τον χρόνο. Γίνεται αντιληπτό πως όσο αυξάνεται το ΔT το σύστημα ξεκινάει συλλέγει ενέργεια και να φορτίζουν οι πυκνωτές. Επειδή η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι σε υψηλά επίπεδα και λόγω της απευθείας έκθεσης στον ήλιο, η θερμή πλευρά μπορεί να απορροφά θερμότητα και να την διατηρεί, όσο από την κρύα πλευρά γίνεται απόρριψη της θερμότητας στο νερό. Η θερμή πλευρά, που απορροφά θερμότητα από τον αέρα είναι πιο δύσκολη από την κρύα πλευρά όπου υπάρχει απευθείας επαφή με το νερό. Οπότε λόγω της μικρότερης επιφάνειας που έχει δημιουργηθεί στην κρύα πλευρά η απόρριψη της θερμότητας γίνεται με χαμηλότερο ρυθμό από την απορρόφηση. Αυτό φαίνεται και στο διάγραμμα καθώς μπορεί και δημιουργείται μεγάλο ΔT και έτσι το σύστημα τίθεται σε λειτουργία.

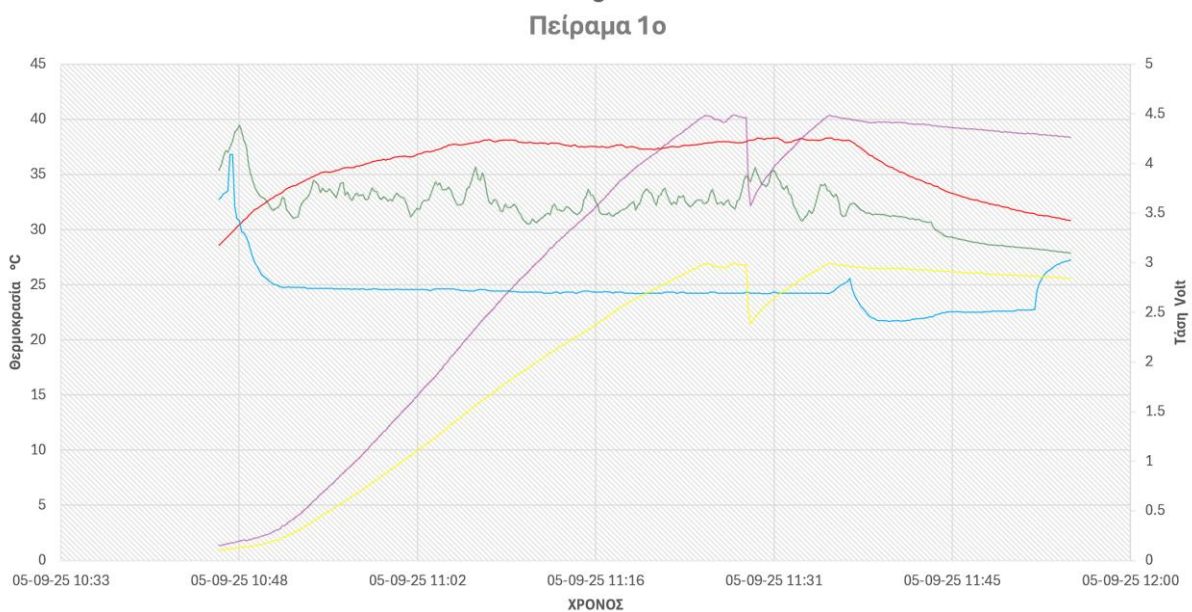
Αυτό όμως ισχύει όσο η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι υψηλή, καθώς στο επόμενο πείραμα θα διαπιστώσουμε διαφορετικά αποτελέσματα.

☀️ Σύστημα Εξωτερικού Χώρου - Θερμική Ανάλυση 🌍

☀️ Ηλιοφάνεια 💧 Ροή Νερού 🔄 Θερμική Μεταφορά



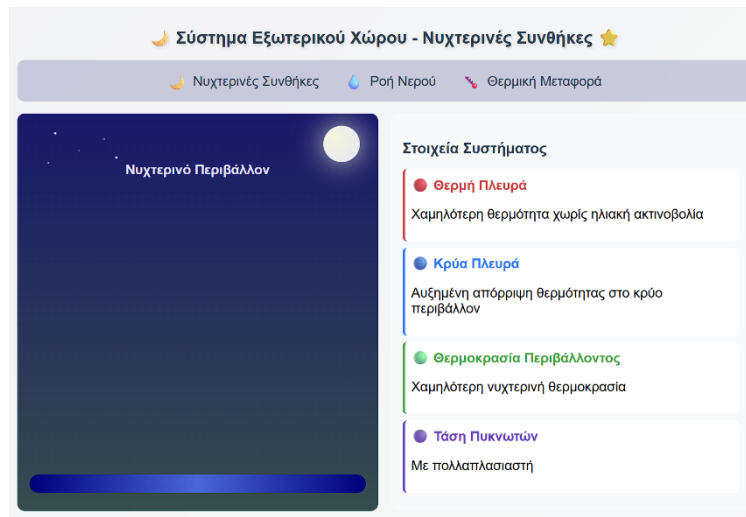
Εικόνα 5.1 : Στοιχεία πειράματος



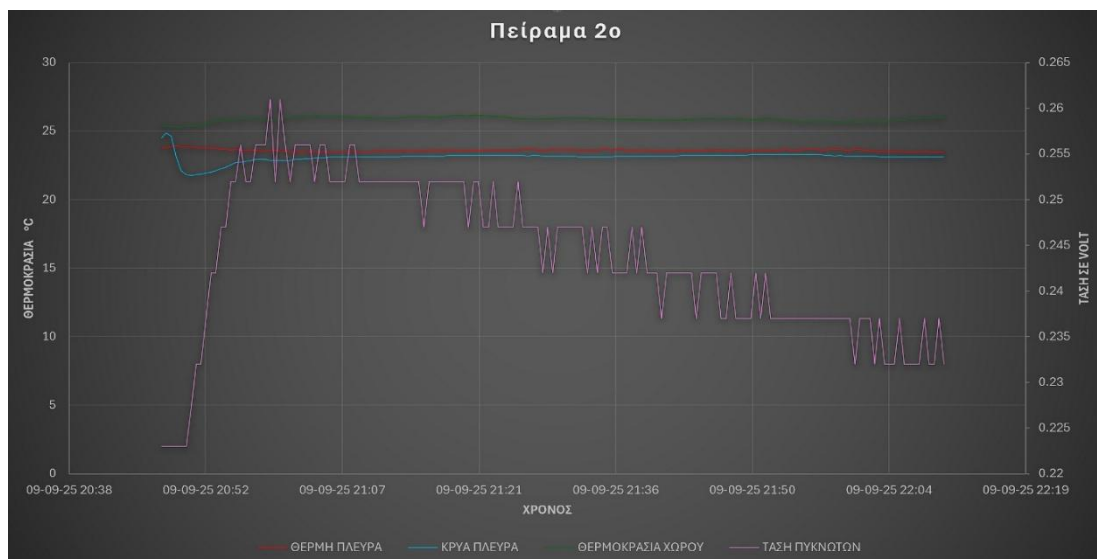
Εικόνα 5.2: Διάγραμμα πειράματος 1

5.3 Πείραμα 2°

Σε αυτό το πείραμα οι μετρήσεις είχαν πολύ ενδιαφέρον. Η θερμοκρασία στο νυχτερινό περιβάλλον είναι πολύ χαμηλότερη και σε απουσία της ηλιακής ακτινοβολίας βλέπουμε πως το σύστημα δυσκολεύεται να ανταπεξέλθει. Κατά την εκκίνηση του συστήματος παρατηρείται μία διαφορά ΔT ικανοποιητική ώστε το σύστημα να εκκινήσει. Μετά από διάστημα 10 λεπτών παρατηρείται πως το ΔT μειώνεται και έτσι το σύστημα δεν μπορεί να αποδώσει. Ο ρυθμός απόρριψης θερμότητας είναι υψηλότερος από τον ρυθμό απορρόφησης από τον περιβάλλον, εξισορροπώντας έτσι την θερμή πλευρά, με την θερμοκρασία της κρύας. Η τάση ενώ αυξάνεται στην συνέχεια παρατηρείται σταδιακή μείωση καθώς υπάρχει ρεύμα διαρροής στον πυκνωτές. Το σύστημα δεν μπορεί να συντηρήσει την τάση λόγω χαμηλής απόδοσης. Ένας τρόπος που θα μπορούσε να δουλέψει είναι εάν η θερμοκρασία του νερού ήταν σε πολύ χαμηλότερα επίπεδα, αν και μπορεί να προβλεφθεί ότι το σύστημα θα λειτουργούσε μεν στην αρχή αλλά μετά από πεπερασμένο χρονικό διάστημα θα ερχόταν πάλι στην ίδια κατάσταση. Θα υπήρχε απλά με καθυστέρηση στο φαινόμενο αυτό.



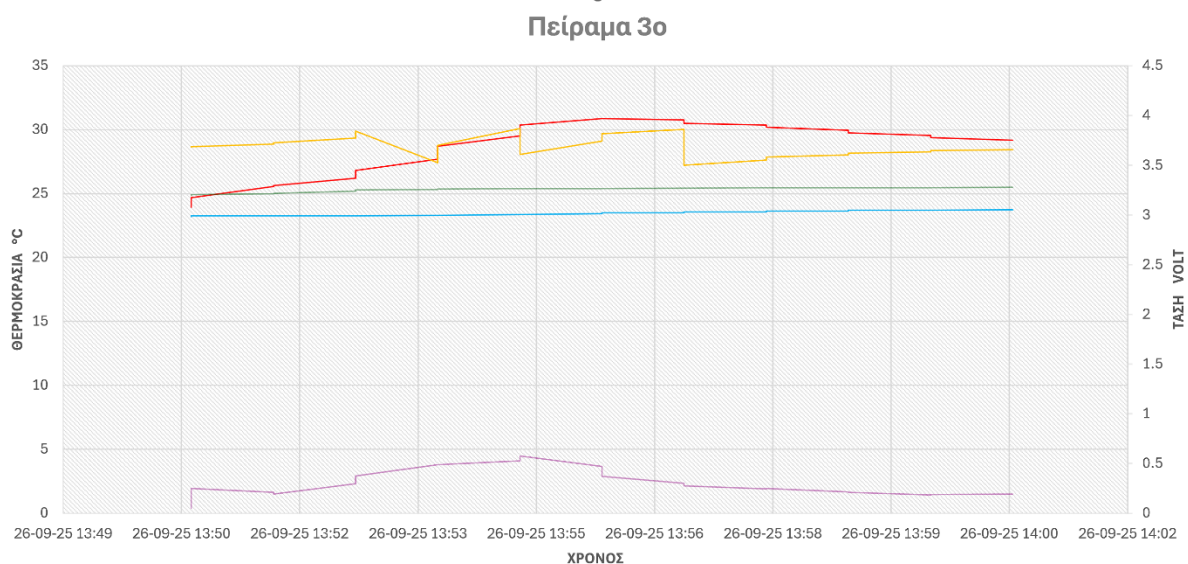
Εικόνα 5.3 : Στοιχεία πειράματος 2



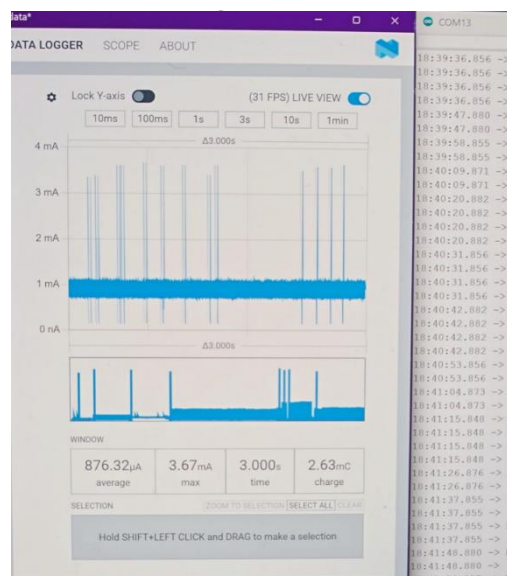
Εικόνα 5.4: Διάγραμμα πειράματος 2

5.4 Πείραμα 3^ο

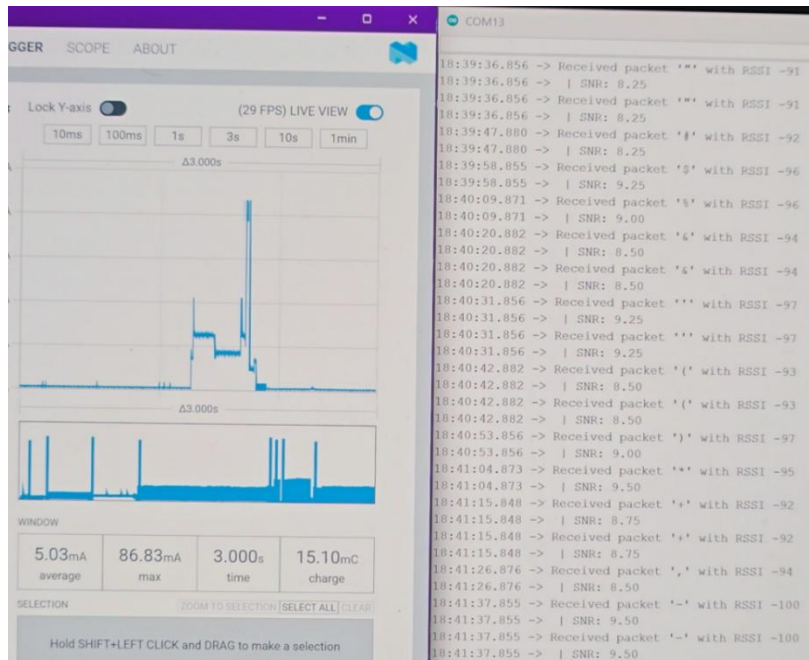
Στο επόμενο πείραμα έγιναν μετρήσεις σε εσωτερικό χώρο. Η κρύα πλευρά εκτίθεται σε ένα δοχείο με παγωμένο νερό, ενώ η θερμή πλευρά εκτίθεται στην θερμοκρασία του δωματίου. Στο πείραμα αυτό οι πυκνωτές ήδη βρίσκονταν φορτισμένοι σε επίπεδο τάσης λίγο πριν το σημείο εκκίνησης του συστήματος. Παρατηρείται εδώ σταδιακή αύξηση της τάσης μέχρι το σημείο που ο ελεγκτής δίνει σήμα στο κύκλωμα να τροφοδοτήσει το φορτίο. Σαν φορτίο σε αυτό το σύστημα έχει τοποθετηθεί μια πλακέτα MKRWAN1310 που όταν τροφοδοτηθεί θα αποστείλει δεδομένα μέσω του συστήματος ασύρματης επικοινωνίας LoRa. Το φορτίο καταναλώνει σε κατάσταση αναμονής 3mA, ενώ σε στην αποστολή των δεδομένων καταναλώνει περίπου 80mA. Στην διάρκεια που η τάση είναι επαρκής δηλαδή από το σημείο εκκίνησης των 3.9V έως το σημείο 3.5V το σύστημα εκπομπής πραγματοποιεί 4 αποστολές δεδομένων, ως που η τάση να μειωθεί και ο ελεγκτής να δώσει σήμα για την αποκοπή του φορτίου. Στα διαγράμματα παρακάτω φαίνεται αναλυτικά η λειτουργία του.



Εικόνα 5.5: Διάγραμμα πειράματος 3



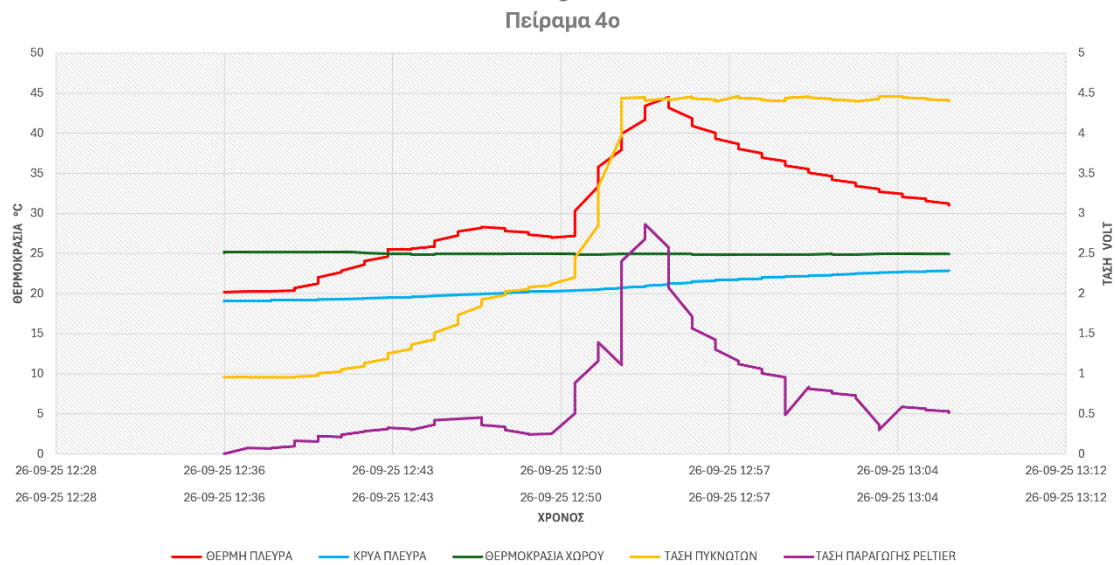
Εικόνα 5.6 : Μετρήσεις ρεύματος. Κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης



Εικόνα 5.7: Κατάσταση εκπομπής LoRa

5.5 Πείραμα 4^ο

Το πείραμα αυτό πραγματοποιήθηκε σε εργαστηριακό περιβάλλον. Στο πείραμα αυτό έγινε έλεγχος λειτουργίας των θερμοηλεκτρικών γεννητριών καθώς τα αποτελέσματα στα προηγούμενα πειράματα δεν αντιπροσώπευαν τις μετρήσεις του κατασκευαστή. Έτσι χρησιμοποιήθηκε ένα δοχείο με νερό για την κρύα πλευρά των TEG και θερμός αέρας για την θερμή πλευρά. Παρατηρείται πως η απόδοση του συστήματος είναι σημαντικά αυξημένη καθώς το ΔT είναι υψηλό. Ο χρόνος πλήρους φόρτισης των πυκνωτών ανέρχεται περίπου στα 20 λεπτά. Η τάση παραγωγής της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας του συστήματος για άλλη μία φορά δεν αποδίδει σύμφωνα με τον κατασκευαστή γι' αυτήν την διαφορά θερμοκρασίας. Βεβαιώνεται όμως πως το φαινόμενο έχει καλύτερη ανταπόκριση σε μεγαλύτερα ΔT . Ακόμα παρατηρείται πως ενώ υπάρχει ενεργό φορτίο στο σύστημα κατανάλωσης 1mA, το σύστημα μπορεί και συντηρεί τους πυκνωτές διότι η ενέργεια που παράγεται είναι περισσότερη από αυτή της κατανάλωσης. Το μέγιστο ρεύμα της πηγής σύμφωνα με μέτρηση ήταν 23.9mA. Η μέγιστη απόδοση ισχύος που είχαμε σε αυτό το σύστημα ήταν 59.8mW. Αυτή είναι και η μέγιστη απόδοση που επιτεύχθηκε σε όλα τα πειράματα.



Εικόνα 5.8: Διάγραμμα πειράματος 4

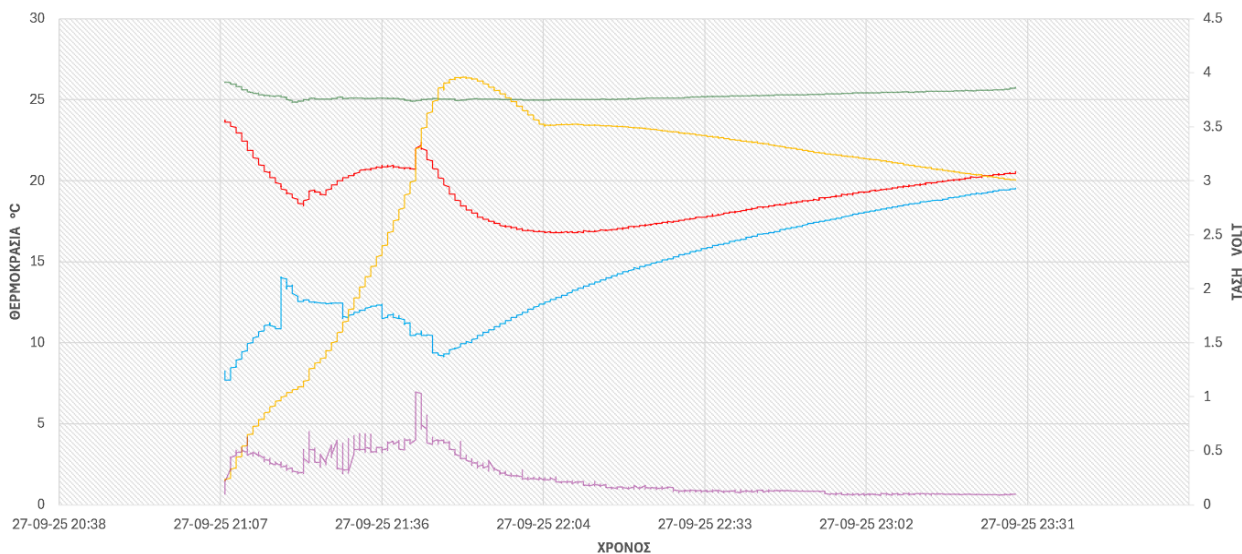


Εικόνα 5.9: Μέτρηση μέγιστου ρεύματος

5.6 Πείραμα 5^ο

Επίσης και αυτό το πείραμα έγινε κάτω από εργαστηριακές συνθήκες. Η διαφορά με το πείραμα 4 είναι ότι δεν χρησιμοποιήθηκε πηγή θερμού αέρα. Στο πείραμα αυτό η κρύα πλευρά τοποθετήθηκε σε δοχείο με κρύο νερό από ψυγείο. Στην συνέχεια το σύστημα έμεινε για περίπου 20 λεπτά δίχως κάποια επέμβαση. Αυτό που παρατηρήθηκε είναι ότι το σύστημα τείνει να φέρει σε ισορροπία την θερμοκρασιακή διαφορά που υπάρχει. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα η κρύα πλευρά έχει ανοδική πορεία και η θερμή καθοδική. Στην συνέχεια για να φτάσουμε το σύστημα σε πλήρη φόρτιση τοποθετούνταν επιπλέον κρύο νερό ανά διαστήματα. Χαρακτηριστική είναι η μπλε καμπύλη που μας δείχνει την χρονική στιγμή που γινόταν αυτό καθώς έχει καθοδική πορεία. Ταυτόχρονα εφαρμόστηκε μια ροή αέρα στην θερμή πλευρά από ένα ανεμιστήρα έτσι ώστε να μπορέσει να απορροφήσει θερμότητα από το περιβάλλον χώρο. Φαίνεται ξεκάθαρα πως με την εφαρμογή αέρα η κόκκινη καμπύλη έχει ανοδική πορεία και μεταβαίνει προς την πράσινη καμπύλη που είναι η θερμοκρασία εργαστηρίου.

Πείραμα 5ο



Εικόνα 5.10: Διάγραμμα πειράματος 5

Με ΔT περίπου 10° το σύστημα καταφέρνει να φορτίσει μετά από διάστημα 45 λεπτών. Χαρακτηριστικές είναι και οι αυξομειώσεις στην μωβ καμπύλη που είναι η παραγόμενη τάση από τα Peltier. Φαίνεται πως το ΔT επηρεάζει σημαντικά την απόδοση των στοιχείων Peltier (TEG).

Στην πλήρη φόρτιση του συστήματος απομακρύνθηκε η ροή αέρα και ενεργοποιήθηκε το φορτίο έως ότου η τάση έφτασε στο επίπεδο που ο ελεγκτής απέκοψε το φορτίο. Μετά από μεγάλη χρονική διάρκεια φαίνεται πως οι καμπύλες των θερμοκρασιών τείνουν να ισορροπήσουν μαζί σε κοινό σημείο.

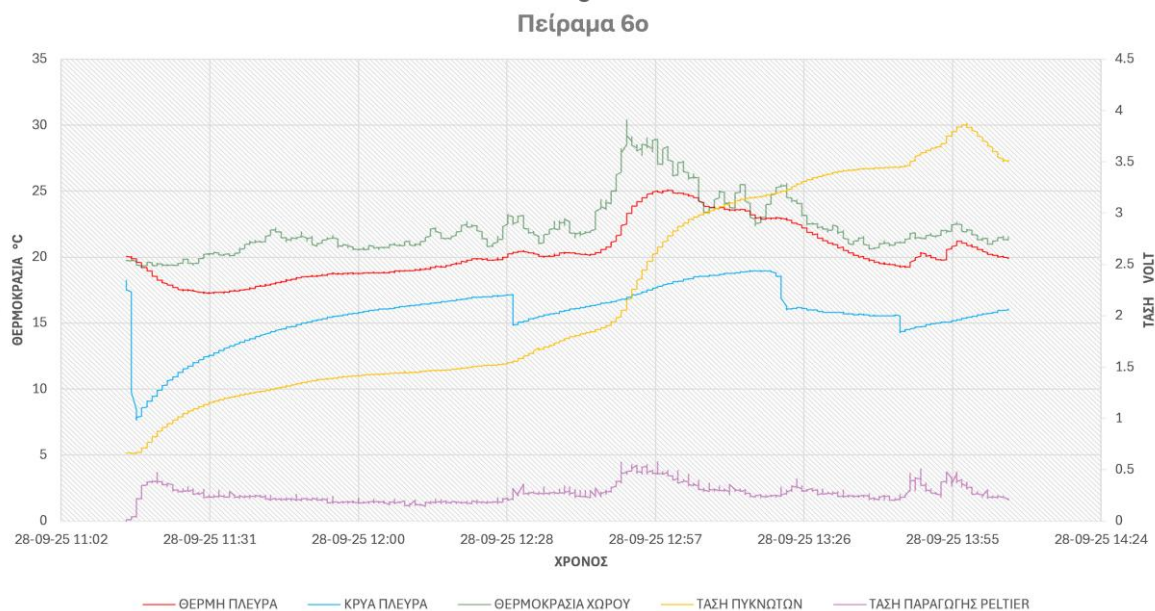
5.7 Πείραμα 6^ο

Το συγκεκριμένο πείραμα αποτελεί την πιο πιστή αναπαράσταση σε συνθήκες πραγματικού περιβάλλοντος. Η ανθρώπινη επέμβαση στο σύστημα αυτό ήταν ελάχιστη καθώς έπρεπε η θερμοκρασία του νερού να διατηρείτε σε σχετικά σταθερό επίπεδο προσομοιώνοντας την ροή ποταμού. Η διάρκεια του πειράματος ήταν σχεδόν τρεις ώρες και τριάντα λεπτά.

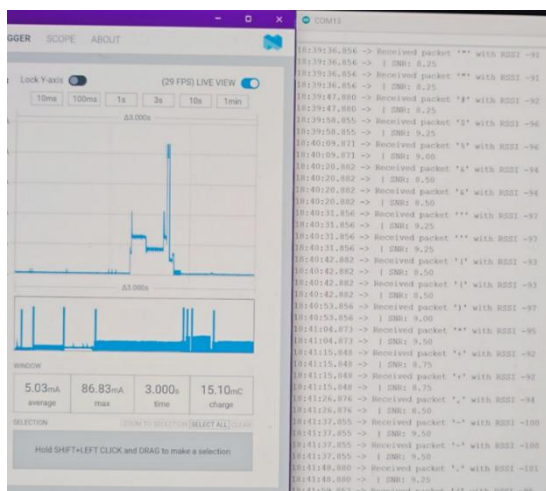
Το πείραμα έγινε σε εξωτερικό χώρο, και η κρύα πλευρά της συσκευής ήταν εμποτισμένη σε δοχείο νερού. Το πείραμα ξεκίνησε με την κατάσταση της συσκευής να βρίσκεται σε ισορροπία. Έπειτα συμπληρώθηκε το δοχείο με νερό ψυγείου και το σύστημα ξεκίνησε την λειτουργία του. Είναι ξεκάθαρο πως το σύστημα με την ψύκτρα που κατασκευάστηκε δουλεύει καθώς το σύστημα μπορεί και απορροφά ενέργεια από το περιβάλλον. Η κόκκινη καμπύλη που είναι η θερμή πλευρά της ψύκτρας ακολουθεί την πράσινη καμπύλη που είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η απόκλιση είναι γύρω στους $3-4^\circ\text{C}$. Παρατηρείται βέβαια πως το σύστημα απορρίπτει με μεγάλο βαθμό την θερμότητα στο νερό καθώς η θερμοκρασία του νερού έχει αυξητική πορεία σε μικρό χρονικό διάστημα. Βέβαια το νερό είναι στάσιμο πράγμα που δικαιολογεί την συμπεριφορά αυτή. Εάν ήταν τρεχούμενο η κόκκινη καμπύλη θα ήταν ελαφρώς μετατοπισμένη προς τα κάτω καθώς ο ρυθμός απόρριψης θερμότητας προς το νερό θα ήταν μεγαλύτερος.

Καθώς η θερμοκρασία του νερού φτάνει σε υψηλότερα επίπεδα, έγινε επέμβαση και προστέθηκε κρύο νερό επιπλέον. Φαίνεται το γόνατο που κάνει η καμπύλη της θερμοκρασίας της κρύας πλευράς. Εκεί παρατηρείται και αύξηση της καμπύλης μωβ που είναι η παραγόμενη τάση από τα στοιχεία TEG. Το σύστημα ανακάμπτει και συνεχίζει την λειτουργία του. Σ εκείνο το σημείο μετά από λίγη ώρα

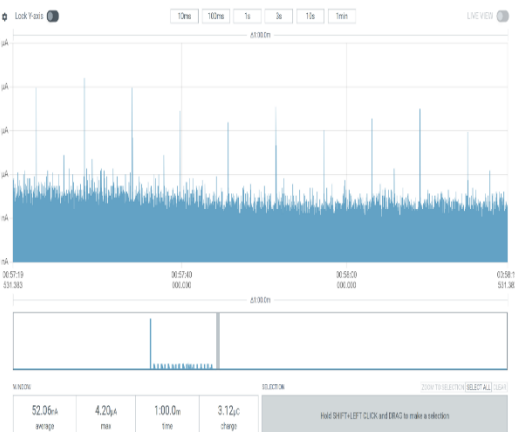
παρατηρείται μια ξαφνική άνοδο της θερμοκρασίας. Όταν ξεκίνησε το πείραμα ο καιρός ήταν συννεφιασμένος, σε εκείνο το σημείο έκανε την εμφάνιση του ο ήλιος για λίγα λεπτά δίνοντας μια ακόμη ώθηση στο σύστημα. Σχεδόν 2 ώρες μετά η τάση στους πυκνωτές δεν έχει φτάσει τα κατάλληλα επίπεδα καθώς η διαφορά θερμοκρασιών ΔT είναι $5-10^{\circ}\text{C}$. Στην συνέχεια θα χρειαστούν ακόμη δύο παρεμβάσεις συμπλήρωσής νερού στο σύστημα για να παραμείνει η θερμοκρασία νερού σε σταθερά επίπεδα. Με το πέρας της ώρας και φθάνοντας σχεδόν στις δύομιση ώρες, οι πυκνωτές φορτίζουν και το σύστημα εκτελεί την πρώτη αποστολή. Το σύστημα πραγματοποιεί επαναλαμβανόμενες αποστολές κάθε ένα λεπτό. Θα χρειαστούν περίπου 10 λεπτά για την αποφόρτιση των πυκνωτών και την διακοπή λειτουργίας του συστήματος. Εάν οι συνθήκες του πειράματος συνεχιζόντουσαν το σύστημα θα ξαναφόρτιζε τους πυκνωτές και θα επαναλάμβανε την λειτουργία του όσο η διαφορά θερμοκρασιών ΔT θα ήταν σε ικανοποιητικά επίπεδα.



Εικόνα 5.11: Διάγραμμα πειράματος 6



Εικόνα 5.12: Κατανάλωση ρεύματος MCU σε



Εικόνα 5.13: Κατάσταση μη λειτουργίας MCU

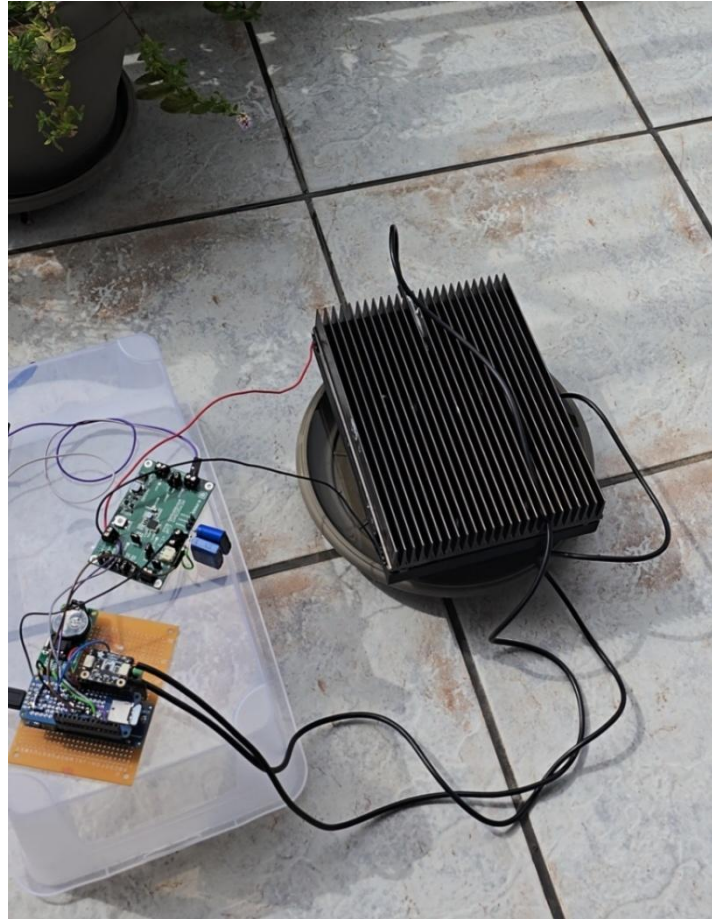


Εικόνα 5.14: Κατάσταση εκκίνησης μικροελεγκτή από απώλεια τροφοδοσίας

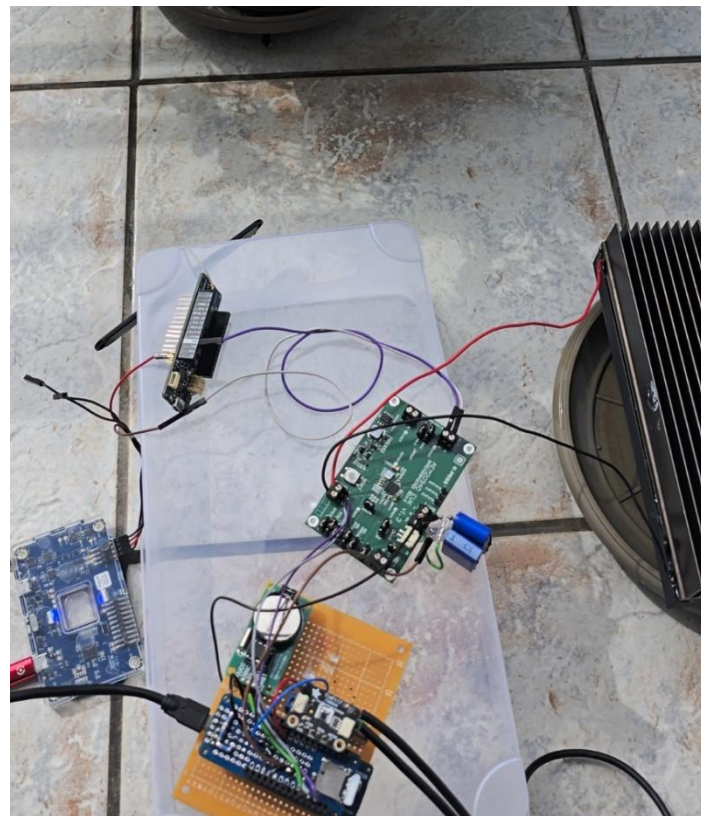
Στην εικόνα 5.14 παρατηρούμε την πρώτη εκκίνηση του μικροελεγκτή για την αποστολή των δεδομένων. Το ρεύμα κατά την πρώτη εκκίνηση φτάνει σε υψηλές λόγω της εκκίνησης όλων των συστημάτων του μικροελεγκτή. Έπειτα ο μικροελεγκτής αναλαμβάνει την απενεργοποίηση συστημάτων που δεν χρειάζονται για την λειτουργία της εφαρμογής. Μπορούμε να καταλάβουμε λοιπόν πως όσοι λιγότερες πλήρεις απενεργοποιήσεις του συστήματος γίνουν, τόσο μεγαλύτερη αυτονομία μπορεί να αποκτηθεί. Χαρακτηριστική είναι η πορεία των μετέπειτα εκκινήσεων για αποστολή των δεδομένων. Το ρεύμα φτάνει σε πολύ χαμηλότερα επίπεδα κατά την εκκίνηση.



Εικόνα 5.15 : κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης MCU



Εικόνα 5.16 Διαδικασία πειράματος 6



Εικόνα 5.17: Διαδικασία πειράματος 6 οπτική 2

5.8 Επίλογος

Όσα περισσότερα πειράματα και μετρήσεις διεξαχθούν φαίνεται πώς γίνεται μια πληρέστερη και πιο ακριβής μελέτη του συστήματος. Προκύπτουν δεδομένα τα οποία είναι αντιπροσωπευτικά της μελέτης αλλά και άλλα τα οποία η εξήγησή τους είναι δυσνόητη. Σε αυτό το σύστημα μέσω των πειραμάτων και των μελετών που έγιναν προέκυψαν αρκετά συμπεράσματα θετικά και αρνητικά όσο αφορά την λειτουργία του συστήματος. Βέβαιο είναι ότι η τεχνολογία αυτή έχει αρκετό μέλλον για την μελέτη και σχεδίαση πιο αποδοτικών υλικών.

Κεφάλαιο 6ο: Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα

6.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μία συνοπτική αποτίμηση των πειραμάτων, των διαδικασιών, και των αποτελεσμάτων που προέκυψαν δίνοντας απαντήσεις σε ερωτήματα αυτής της έρευνας και αν τελικά ο στόχος που είχε τεθεί αρχικά είναι πραγματοποιήσιμος ή όχι. Επίσης δίνονται συνοπτικές πληροφορίες για την μελλοντική έρευνα του συστήματος, για βελτιώσεις που μπορούν να γίνουν ώστε το σύστημα να έχει μεγαλύτερη αυτονομία και διάρκεια λειτουργίας.

6.2 Ανάλυση στόχων

Σε αυτή την εργασία μελετήθηκε η παραγωγή ενέργειας μέσω θερμοηλεκτρικών γεννητριών Peltier modules (TEG). Έγινε ανάλυση της λειτουργίας του φαινομένου και πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μελέτες που επιβεβαιώνουν την θεωρία αυτή. Στόχος του συστήματος ήταν η συγκομιδή ενέργειας από πολύ χαμηλές θερμοκρασιακές διαφορές ΔT . Επεξηγήθηκαν τα μέρη και οι τεχνολογίες που απαρτίζουν το σύστημα καθώς και οι διάφορες μηχανολογικές εργασίες που έγιναν ώστε να ολοκληρωθεί το μοντέλο της έρευνας.

6.3 Αποτελέσματα

Σύμφωνα με τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν σε αυτή την εργασία, επιβεβαιώνεται η αρχή λειτουργίας Peltier. Σε συνέχεια της έρευνας και θέλοντας να εισαχθεί ένας βαθμός δυσκολίας, περιορίστηκε το εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας του συστήματος δίνοντας μια διαφορετική προσέγγιση από τα κοινά συστήματα παρόμοιας τεχνολογίας. Πραγματοποιήθηκαν λοιπόν 6 πειράματα στο τελικό μοντέλο αυτής της μελέτης. Τα πειράματα έδωσαν αποτελέσματα τα οποία ήταν απρόσμενα σύμφωνα με την μελέτη που έγινε και σύμφωνα με τα δεδομένα του κατασκευαστή των στοιχείων TEG.

Διαπιστώθηκε ότι τα στοιχεία TEG δεν μπορούν να αποδώσουν το αναγραφόμενο που δίνει ο κατασκευαστής. Η ισχύς που αποδίδουν τα συγκεκριμένα είναι υπό δεκαπλάσια σε σχέση με του κατασκευαστή κάνοντας έτσι πολύ δύσκολη την λειτουργία του συστήματος. Με την κατάλληλη παρέμβαση και ηλεκτρονική και μηχανολογική το σύστημα έφτασε ως ένα βαθμό λειτουργίας. Έγινε αντιληπτό πως η λειτουργία του συστήματος δεν είναι δυνατή σε ολόκληρη την διάρκεια του χρόνου και αυτό λειτουργεί ως περιοριστικός παράγοντας. Η συσκευή για να λειτουργήσει χρειάζεται διαφορά θερμοκρασίας από 5 βαθμούς και άνω. Επειδή όμως τα στοιχεία TEG σύμφωνα με την φορά που εφαρμόζεται η διάφορά θερμοκρασίας αποδίδουν και διαφορετικό πρόσημο στην τάση εξόδου, αυτό καθιστά την συσκευή λειτουργική όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι γύρω στους 20°C, σε συνεργασία βέβαια πάντοτε με την θερμοκρασία νερού που υπολογίζεται περίπου στους 15°C. Επιπλέον ο ελάχιστος χρόνος που χρειάζεται η συσκευή από πλήρη αποφόρτιση σε πλήρη φόρτιση και λειτουργία είναι τα 20 λεπτά. Αυτό δυναμικά αλλάζει ανάλογα της θερμοκρασιακής διαφορές περιβάλλοντος φτάνοντας πολλές φορές όπως είδαμε και στο πείραμα τις 3 ώρες. Καταλήγοντας όμως, φαίνεται πως η συσκευή μπορεί να λειτουργήσει έστω και με την ελάχιστη απόδοση των TEG, κάτω από συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες.

6.4 Μελλοντικές αναβαθμίσεις συστήματος

Το παρόν σύστημα αποτελεί το πρωτότυπο και οι αναβαθμίσεις που μπορούν να γίνουν είναι ποικίλες. Ξεκινώντας από την παραγωγή ενέργειας, σίγουρα η επιλογή διαφορετικού μοντέλου θερμοηλεκτρικών γεννητριών είναι απαραίτητη. Βέβαια με το ανάλογο κόστος. Στην συνέχεια η κατασκευή πλακέτας PCB έτσι ώστε το σύστημα να είναι πιο ενοποιημένο και με επιπλέον λειτουργίες είναι μία αναβάθμιση που έγινε στην διάρκεια της έρευνας αλλά δεν πραγματοποιήθηκε λόγω κόστους. Στην μελέτη αυτή είχε γίνει επιλογή 2 διαφορετικών ελεγκτών PMIC καθώς και μικροελεγκτή με διαφορετικό module επικοινωνίας LoRa. Αυτό δίνει την δυνατότητα με κατάλληλους διακόπτες mosfet την πλήρη αποκοπή της τροφοδοσίας κυκλωμάτων που δεν χρησιμοποιούνται (LoRa) εκείνη την στιγμή. Έτσι η κατανάλωση του κυκλώματος μειώνεται αρκετά. Επιπλέον η προσθήκη εξωτερικού ρολογιού timer είναι μία τεχνική που χρησιμοποιείται σε ανάλογες εφαρμογές. Με αυτή την τεχνική δεν χρειάζεται ο μικροελεγκτής του συστήματος να κρατάει το RTC ανοιχτό, διότι το εξωτερικό ρολόι το οποίο έχει μηδαμινή κατανάλωση δίνει σήμα στον μικροελεγκτή για την αλλαγή της κατάστασης λειτουργίας του. Αυτός είναι ακόμη ένας τρόπος μείωσης κατανάλωσης ενέργειας στο σύστημα. Η επιλογή εξωτερικών μονάδων διαχείρισης τάσης ίσως είναι καλύτερη επιλογή από αυτή που προσφέρει ο AEM20940 καθώς έχει προκαθορισμένα κατώφλια ελέγχου της τάσης φόρτισης εκ φόρτισης. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να επιτευχθεί καλύτερη αξιοποίηση της ενέργειας των πυκνωτών. Τέλος η επιλογή καταλληλότερων υλικών για την θερμική μεταφορά της ενέργειας αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα στην απόδοση των στοιχείων TEG.

6.5 Σύγκρισή με παρόμοια συστήματα

Ερευνώντας την διεθνή βιβλιογραφία παρατηρείται ότι η προσέγγιση της παρούσας εργασίας ευθυγραμμίζεται με μελέτες που εξετάζουν την χρήση εμπορικών Peltier module ως θερμοηλεκτρικές γεννήτριες σε χαμηλές θερμοκρασιακές διαφορές. Οι Abdal-Kadhim και Leong(2017) έδειξαν ότι με ΔT 30°C μπορούν να τροφοδοτηθούν ασύρματοι κόμβοι αισθητήρων[12]. Οι Yadava και Azad (2019) παρουσίασαν ότι με κατάλληλες επιστρώσεις σε TEC1-12706 modules είναι δυνατή η παραγωγή τάσεων της τάξης των 2.3V, με θερμοκρασιακή διαφορά μεγαλύτερη από 15°C[13]. Παρόμοια, οι Cimen S. Neşeli, A. C. Ağaçayak and G. Yalçın (2020) συνέκριναν δύο διαφορετικούς τύπους modules και κατέληξαν ότι το TEC-12706 αποδίδει καλύτερα σε χαμηλά ΔT (<30°C) [14].

Φαίνεται ξεκάθαρο λοιπόν όπως δείχνουν και οι υπόλοιπες έρευνες πως στα μεγαλύτερα ΔT τα συστήματα αποδίδουν καλύτερα, μπορώντας να τροφοδοτήσουν και φορτία μεγαλύτερης κατανάλωσης. Η συγκεκριμένη όμως προσέγγισή αυτής της εργασίας δίνει την δική οπτική στον επιστημονικό χώρο. Δεν μπορεί να γίνει λοιπόν μια άμεση σύγκριση της λειτουργικότητας αυτού του συστήματος με παρόμοια, καθώς δεν μελετιούνται σε ίδιες περιβαλλοντικές συνθήκες. Σίγουρο είναι όμως πως με κατάλληλες βελτιώσεις το εγχείρημα θα έχει επιτυχία. Από τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, επειδή υπάρχει μεγάλη προοπτική για την εξέλιξη του συστήματος, δίνει τροφή για σκέψη και έρευνα ενός νέου συστήματος το οποίο θα επιτύχει τον στόχο αυτό.

6.6 Επίλογος

Καταλαβαίνουμε λοιπόν πως η συγκομιδή ενέργειας από διάφορες πηγές είναι ένα από τους βασικούς τεχνολογικούς δρόμους που θα ακολουθήσει η επιστήμη τα επόμενα χρόνια. Είναι τεχνολογίες που έχουν αρκετά να δώσουν ακόμα, μιας και οι επιστήμονες ανακαλύπτουν νέα υλικά για ημιαγωγούς συχνότερα.

Η εργασία αυτή αποδίδει σε ένα βαθμό τις δυσκολίες που μπορούν να προκύψουν όταν ερευνώνται συγκεκριμένες κατευθύνσεις σε συστήματα τεχνολογίας που δεν σχεδιάστηκαν γι' αυτό τον σκοπό. Γίνεται αντιληπτό πως ένα τέτοιο σύστημα που μελετήθηκε και έπειτα από αναβαθμίσεις είναι δυνατόν να λειτουργήσει για μεγάλο χρονικό διάστημα και χωρίς συντήρηση. Η έρευνα σε ανεξερεύνητα μονοπάτια δημιουργεί ένα αίσθημα ελευθερίας και δίνει χώρο για προσωπική δημιουργία, το οποίο είναι μοναδικό.

BIBΛIOΓPAΦIA

[1] M. Islam, "GENERATION OF ELECTRICITY USING PELTIER MODULE COMBINATIONS," 2023.

[2] A. M. Abdal-Kadhim and K. S. Leong, "Application of thermal energy harvesting from low-level heat sources in powering up WSN node," 2017 2nd International Conference on Frontiers of Sensors Technologies (ICFST), Shenzhen, China, 2017, pp. 131-135, doi: 10.1109/ICFST.2017.8210489. keywords: {Wireless sensor networks; Batteries; Temperature measurement; Sensors; Wireless communication; Thermal energy; component; thermal energy harvesting; low-level heat resources survey; thermoelectric cooler TEC; TEH for WSN},

[3] D. Yadav and P. Azad, "Experimental Analysis of Power Generation for Ultra-Low Power Wireless Sensor Nodes Using Various Coatings on Thermoelectric Energy Harvester," 2019 6th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN), Noida, India, 2019, pp. 13-17, doi: 10.1109/SPIN.2019.8711483. keywords: {Heating systems; Paints; Iron; Wireless sensor networks; Generators; Thermal conductivity; Wireless communication; Thermoelectric generator; Aluminium; Bismuth Telluride; Low power; Wireless sensor node},

[4] K. Ivanov, I. Belovski and A. Aleksandrov, "Study of Multi-stage Peltier Module in Generator Mode," 2020 7th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE), Ruse, Bulgaria, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/EEAE49144.2020.9279106. keywords: {Temperature; Temperature measurement; Generators; Conductivity; Layout; Heat sinks; Batteries; multi-stage Peltier module; TEG; Seebeck module},

[5] B. Haug, "Wireless Sensor Nodes Can Be Powered by Temperature Gradients; No Batteries Needed: Harvesting Energy from Thermoelectric Generators," in IEEE Power Electronics Magazine, vol. 4, no. 4, pp. 24-32, Dec. 2017, doi: 10.1109/MPEL.2017.2759938.

keywords: {Resistance; Wireless sensor networks; Batteries; Wireless communication; Power electronics; Energy harvesting; Thermal stresses; Transducers},

[6] H. C. Rocha Liborio Tenorio, D. A. Vieira and C. P. De Souza, "Measurement of parameters and degradation of thermoelectric modules," in IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, vol. 20, no. 2, pp. 13-19, April 2017, doi: 10.1109/MIM.2017.7919127.

keywords: {Degradation; Temperature measurement; Thermal degradation; Voltage measurement; Testing; Instruments; Conductivity},

[7] M. Singh et al., "Efficient autonomous solar panel and thermo-electric generator (TEG) integrated hybrid energy harvesting system," 2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS), Shanghai, China, 2016, pp. 1764-1768, doi:

10.1109/PIERS.2016.7734785. keywords: {Solar panels;Energy harvesting;Feeds;Generators;Batteries;Solar heating;DC motors},

[8] A. Das, Y. Gao and T. T. Kim, "An isolated PoR based pulse generator for TEG energy harvesting with minimum startup of 150 mV and maximum series resistance of 600 Ω ," 2016 IEEE Asian Solid-State Circuits Conference (A-SSCC), Toyama, 2016, pp. 297-300, doi: 10.1109/ASSCC.2016.7844194. keywords: {Clocks;Energy harvesting;Inductors;Solid state circuits;Logic gates;Timing;Conferences;power-on-reset;energy harvesting;startup;thermal energy},

[9] D. Enescu, "Thermoelectric Energy Harvesting: Basic Principles and Applications," IntechOpen, 2019.

[10] K. Khamil, M. Sabri, A. Yusop, and Sharuddin, "An Evaluation of TEC and TEG Characterization for a Road Thermal Energy Harvesting," 2018.

[11] H. Çimen, A. C. Ağaçayak, S. Neşeli and G. Yalçın, "Comparison of Two Different Peltiers Running as Thermoelectric Generator at Different Temperatures," 2017 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), Tangier, Morocco, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/IRSEC.2017.8477309. keywords: {Temperature measurement;Water heating;Copper;Generators;Current measurement;Ceramics;Water resources;renewables energy sources;thermoelectric modules;thermoelectric generator;electricity generation}

[12] M. Abdal-Kadhim and K. S. Leong, "Energy harvesting wireless sensor network node powered by thermoelectric generator," 2017 IEEE 13th Malaysia International Conference on Communications (MICC), Johor Bahru, Malaysia, 2017, pp. 266–271, doi: 10.1109/MICC.2017.8311758.

[13] D. Yadava and P. Azad, "Experimental Analysis of Power Generation for Ultra-Low Power Wireless Sensor Nodes Using Various Coatings on Thermoelectric Energy Harvester," 2019 6th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN), Noida, India, 2019, pp. 13–17, doi: 10.1109/SPIN.2019.8711692.

[14] H. Çimen, S. Neşeli, A. C. Ağaçayak and G. Yalçın, "Comparison of Two Different Peltiers Running as Thermoelectric Generator at Different Temperatures," 2020 8th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Glasgow, UK, 2020, pp. 334–339, doi: 10.1109/ICRERA49962.2020.9242755.

[15] S. Dalola, M. Ferrari, V. Ferrari, M. Guizzetti, D. Marioli and E. Sardini, "Autonomous sensor system with power harvesting for telemetric temperature measurements of pipes," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 58, no. 5, pp. 1471–1478, May 2009, doi: 10.1109/TIM.2009.2013705.

[16] Z. Prijić, M. Savić, Z. Stamenković and D. Rančić, "Thermoelectric Generator Energy Harvesting for Wireless Sensor Node in Smart Home Applications," 2015 23rd Telecommunications Forum Telfor (TELFOR), Belgrade, Serbia, 2015, pp. 79–82, doi: 10.1109/TELFOR.2015.7377463.

[17] O. Georgiou and U. Raza, "Low Power Wide Area Network Analysis: Can LoRa Scale?," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 6, no. 2, pp. 162–165, Apr. 2017, doi: 10.1109/LWC.2016.2647247

[18] LoRa Alliance, *LoRaWAN 1.0.4 Specification*, Oct. 2020. [Online]. Available: <https://loralliance.org/resource-hub/lorawanr-specification-v104>. [Accessed: Sep. 29, 2025].

Data Sheet

[19] E-peas, *AEM20940 – Thermal Energy Harvesting PMIC with Boost Converter and Battery Charger, Datasheet*, Rev. 1.1, 2018. [Online]. Available: https://www.mouser.com/datasheet/2/1087/E-peas_Thermal_Energy_Harvesting_AEM20940_Datasheet-1889656.pdf. [Accessed: Sep. 29, 2025].

[20] "Power Profiler Kit II," www.nordicsemi.com. <https://www.nordicsemi.com/Products/Development-hardware/Power-Profiler-Kit-2>

[21] Arduino, *MKR WAN 1310 w/o Antenna – Datasheet*, 10 Sep. 2019. [Online]. Available: https://www.mouser.com/datasheet/2/34/Arduino_ABX00029_MKR_WAN_1310_wo_Antenna-3398026.pdf. [Accessed: Sep. 29, 2025].

[22] KYOCERA AVX, *SCMR22L105MRBB0 – Cylindrical SuperCapacitor, 1.0 F, 9 V, Radial*, Datasheet, Rev. –, 2024. [Online]. Available: <https://eu.mouser.com/ProductDetail/KYOCERA-AVX/SCMR22L105MRBB0>. [Accessed: Sep. 29, 2025].