



ΔΙΕΘΝΕΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΕΛΛΑΔΟΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΘΕΡΜΙΚΗ ΣΥΓΚΟΜΙΔΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΤΟ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΣΩΜΑ

Το ανθρώπινο σώμα ως μπαταρία

Παραστατίδου Δήμητρα

Επιβλέπων καθηγητής: Κιζήρογλου Μιχάλης
Θεσσαλονίκη 2022

Thermal Energy Harvest from Human Body

As the technology of wireless electronics applications (such as portable electronics, implantable medical devices, assisted biomedical devices) develops rapidly, so its power requirements, till the point that the batteries won't be able to fulfill their needs. Therefore, the need for their development becomes urgent both in terms of their supply or even in terms of their autonomy. With energy harvesting, mostly from renewable energy sources such as light radiation, temperature difference, air flow, electromagnetic radiation and acoustic noise, many applications have already been developed for the uninterrupted and autonomous operation of these applications. The last years however, the heat and mechanical energy which is available in everyday human activities have received increasing attention from researchers as alternatives to this major problem.

The purpose of this dissertation is to study the various ways and forms of energy collection and storage from the human body. In the context of this study, the construction of a system is presented that absorbs the heat of the human palm and converts it into electricity. The system was built with the help of three thermoelectric generators (TEG) which are used to collect thermal energy from the human palm. The construction is based on the Seebeck-Peltier thermoelectric effect (or combined effect) which takes advantage of the temperature difference to convert it into electrical voltage. This phenomenon is reversible which means that if a temperature difference creates a potential difference then a potential difference can cause a temperature difference. Therefore, through this phenomenon the production of electricity is possible from temperature differences that either exist in nature or are the result of human activity.

The following materials were used for the construction: three heat sinks of dimensions 40x40mm, thermal paste for better conductivity, heat-shrinkable for the protection of cables. A digital oscilloscope was used to collect measurement data and form diagrams after the integration of the construction, to determine the energy that was produced. Also in this dissertation a theoretical design of a system is presented, which includes the construction with thermal generators, in combination with a voltage boost circuit. The proposed integrated system may allow powering of an LED, in order to demonstrate a flashlight that works with the thermal energy of the palm.

Περίληψη-σκοπός διπλωματικής εργασίας

Καθώς η τεχνολογία των ασύρματων ηλεκτρονικών εφαρμογών (όπως φορητές ηλεκτρονικές συσκευές, εμφυτεύσιμα ιατρικά βοηθήματα, βοηθητικές βιοϊατρικές συσκευές) αναπτύσσεται ραγδαία προκύπτει και η αύξηση των απαιτήσεων ισχύος τους με αποτέλεσμα οι χρησιμοποιούμενες μπαταρίες να μην μπορούν να ικανοποιήσουν τις ανάγκες τους. Καθίσταται έτσι, επιτακτική η ανάγκη της ανάπτυξής τους τόσο ως προς την τροφοδότησή τους ή ακόμη και ως προς την αυτονομία τους. Μέσω της συγκομιδής ενέργειας, κυρίως από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως η φωτεινή ακτινοβολία, η διαφορά θερμοκρασίας, η ροή του αέρα, η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και ο ακουστικός θόρυβος, έχουν ήδη αναπτυχθεί εφαρμογές για την αδιάκοπη και αυτόνομη λειτουργία των εφαρμογών αυτών. Τα τελευταία χρόνια όμως η θερμότητα και η μηχανική ενέργεια που διατίθεται στις καθημερινές δραστηριότητες του ανθρώπου έχουν λάβει αυξανόμενη προσοχή από τους ερευνητές ως εναλλακτικές λύσεις του μείζονος προβλήματος αυτού.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των διάφορων τρόπων και μορφών συλλογής και αποθήκευσης ενέργειας από το ανθρώπινο σώμα. Στα πλαίσια της μελέτης αυτής παρουσιάζεται η κατασκευή ενός συστήματος που απορροφά την θερμότητα της παλάμης του ανθρώπου και την μετατρέπει σε ηλεκτρική. Το σύστημα κατασκευάστηκε με την βοήθεια τριών θερμοηλεκτρικών γεννητριών (TEG) οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη συλλογή θερμικής ενέργειας από το ανθρώπινο σώμα. Η κατασκευή βασίζεται στο θερμοηλεκτρικό φαινόμενο (ή συνδυασμένο φαινόμενο) Seebeck-Peltier το οποίο εκμεταλλεύεται την θερμοκρασιακή διαφορά την οποία μετατρέπει σε ηλεκτρική τάση. Το φαινόμενο αυτό είναι αντιστρέψιμο που σημαίνει ότι εάν κάποια διαφορά θερμοκρασίας δημιουργήσει μια διαφορά δυναμικού τότε μια διαφορά δυναμικού μπορεί να προκαλέσει διαφορά θερμοκρασίας. Συνεπώς μέσω του φαινομένου αυτού γίνεται αντιληπτό πως η παραγωγή ηλεκτρικής είναι εφικτή από διαφορές θερμοκρασίας που είτε υπάρχουν στη φύση, είτε είναι αποτέλεσμα ανθρώπινης δραστηριότητας.

Επιπλέον για την κατασκευή χρησιμοποιήθηκαν τα εξής υλικά: τρεις ψύκτρες των διαστάσεων 40x40mm, θερμική πάστα για καλύτερη αγωγιμότητα, θερμό- συστελλόμενα για την προστασία των καλωδίων. Στη συνέχεια για την διαπίστωση της παραγόμενης ενέργειας χρησιμοποιήθηκε ψηφιακός παλμογράφος, από τον οποίο αντλήθηκαν στοιχεία για την διαμόρφωση διαγραμμάτων. Επίσης παρουσιάζεται μία θεωρητική σχεδίαση ενός συστήματος, που περιλαμβάνει την κατασκευή με τις θερμοηλεκτρογεννήτριες, ενώ σε συνδυασμό με ένα κύκλωμα ενίσχυσης τάσης μας επιτρέπει τη τροφοδότηση ενός LED. Ουσιαστικά πρόκειται για έναν φακό ο οποίος λειτουργεί με την θερμική ενέργεια της παλάμης.

Ευχαριστίες

Με την περάτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου Κιζήρογλου Μιχάλη για την υποστήριξη και τη διαθεσιμότητά του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, όπως επίσης και για τον χρόνο που διέθεσε ώστε να μου προσφέρει χρήσιμες συμβουλές και οδηγίες.

Οφείλω επίσης ένα μεγάλο ευχαριστώ στους προϊστάμενους και συνεργάτες μου κατά τη περίοδο της πρακτικής μου άσκησης, οι οποίοι συνέβαλαν έμμεσα ή άμεσα στην καθοδήγηση απόκτησης πολύτιμων γνώσεων για την ολοκλήρωση της εργασίας μου.

Τέλος, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την οικονομική τους υποστήριξη, καθώς επίσης συγγενείς και φίλους για την ηθική υποστήριξη σε όλο το διάστημα των σπουδών μου.

Πίνακας Περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο:

- 1.1 Το ενεργειακό πρόβλημα στην σύγχρονη εποχή.
- 1.2 Πηγές ενέργειας για την τροφοδότηση αυτόνομων συσκευών.
- 1.3 Εφαρμογές και τρόποι αποθήκευσης ενέργειας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο :

- 2.1 Ιστορική αναδρομή.
- 2.2 Ανάλυση φυσικών φαινομένων από τα οποία εξαρτάται το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο.
 - 2.2.1 Τρόπος μετάδοσης θερμότητας.
 - 2.2.2 Φαινόμενο Joule.
 - 2.2.3 Φαινόμενο Seebeck.
 - 2.2.4 Φαινόμενο Peltier.
 - 2.2.5 Φαινόμενο Thomson.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο :

- 3.1 Συγκομιδή ενέργειας από το ανθρώπινο σώμα.
 - 3.1.1 Κινήσεις του ανθρώπου.
 - 3.1.2 Κινήσεις της καρδιάς.
 - 3.1.3 Αρτηριακή παραμόρφωση.
 - 3.1.4 Ροή του αίματος.
 - 3.1.5 Θερμική ενέργεια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο :

- 4.1 Θερμική συγκομιδή ενέργειας μέσω TEG.
- 4.2 Ανθρώπινη ενέργεια.
- 4.3 Απώλεια θερμότητας από το σώμα.
 - 4.3.1 Εκπομπή ακτινοβολίας.
 - 4.3.2 Αγωγή θερμότητας.
 - 4.3.3 Εξάτμιση (εφίδρωση).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο :

- 5.1 Φακός ο οποίος αντλεί θερμική ενέργεια από το ανθρώπινο σώμα. Σχεδιασμός (Θεωρητική κατασκευή).
- 5.2 Μέγιστο θεώρημα μεταφοράς ισχύος.
- 5.3 Κατασκευή με θερμοηλεκτρογεννήτριες/ Υλικά.
- 5.4 Αποτελέσματα μετρήσεων σε ψηφιακό παλμογράφο.
- 5.5 Συμπεράσματα.

Επεξήγηση ακρωνύμων

Σ.Ε.	Συγκομιδή ενέργειας (Energy Harvesting)
H/Y	Ηλεκτρονικός Υπολογιστής
MEMS	Μικρο-ηλεκτρομηχανικό σύστημα (Microelectromechanical system)
Cu	Χαλκός
Ni	Νικέλιο
ZT	Συντελεστής κέρδους
Bi ₂ Te ₃	Τελλουριούχο βισμούθιο
PbTe	Τελλουριούχος μόλυβδος
SiGe	Γερμάνιο του πυριτίου
m	Μέτρα
m ²	Τετραγωνικά μέτρα
K	Κέλβιν (Kelvin)
W	Βατ (Watt)
Ω	Ωμ (Ohm)
A	Αμπέρ (Ampere)
T _c	Χαμηλή θερμοκρασία
T _h	Υψηλή θερμοκρασία
V/K	Βολτ ανά κέλβιν (Volts per Kelvin)
J	Τζάουλ (Joule)
Hz	Hertz
Bpm	Beats per minute (heart rate)
in vitro	Πείραμα που πραγματοποιείται σε αυστηρά ελεγχόμενες συνθήκες και όχι σε ζωντανούς οργανισμούς
in vivo	Πείραμα που πραγματοποιείται σε ιστούς ζωντανών οργανισμών
bpm	Παλμοί το λεπτό (beats per minute)

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Τα τελευταία χρόνια η ραγδαία ανάπτυξη της παγκόσμιας τεχνολογίας των ηλεκτρικών συστημάτων έχει οδηγηθεί στην περαιτέρω σμίκρυνσή τους, με σκοπό να αναπτυχθούν οι φορητές ηλεκτρικές συσκευές και διατάξεις. Καταλυτικό ρόλο στη δημιουργία ολοένα και μικρότερων εξαρτημάτων ηλεκτρονικών συσκευών έχουν παίξει οι μέθοδοι της μικρο-μηχανικής και της νανοτεχνολογίας καθώς χαρακτηρίζονται από μικρού μέγεθος και βάρος, μειωμένο κόστος όπως και χαμηλότερες απαιτήσεις για ενεργειακή τροφοδότηση.

Παρ' όλα αυτά η τροφοδότηση ενέργειας σε τέτοια μικρο-ηλεκτρικά συστήματα από μακροσκοπικές πηγές θέτει αρκετά εμπόδια στα όρια και στον τρόπο λειτουργίας τους όπως επίσης και στο εύρος των εφαρμογών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Για παράδειγμα οι μπαταρίες, οι οποίες είναι η πιο διαδεδομένη πηγή τροφοδότησης των ασύρματων ηλεκτρικών συσκευών, μειονεκτούν ως προς τον χρόνο ζωής που προϋποθέτει την συχνή τους αντικατάσταση με αποτέλεσμα να επιφέρει μεγάλο κόστος.

Συνεπώς είναι επιτακτική η ανάγκη για μια πιο μόνιμη λύση ενεργειακής τροφοδότησης. Έχουν γίνει πολλές μελέτες γύρω από τη συγκομιδή ενέργειας από το περιβάλλον των ασύρματων ηλεκτρονικών διατάξεων (όπως για παράδειγμα οι αισθητήρες) αλλά και για την αποθήκευση της ενέργειας αυτής για μεταγενέστερη χρήση. Πιο συγκεκριμένα περιλαμβάνει μεθόδους συλλογής ενέργειας από μεταβολές της πίεσης και της θερμοκρασίας, από κραδασμούς και μηχανικές κινήσεις όπως και από την φωτεινή ενέργεια. Τα πλεονεκτήματα που μπορούμε να έχουμε μέσω αυτών των μεθόδων είναι μεγαλύτερη βιωσιμότητα και συνεχής λειτουργία χωρίς την ανάγκη για συνεχή συντήρηση αλλά και ο περιορισμός τους κόστους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1°

1.1 Το ενεργειακό πρόβλημα στην σύγχρονη εποχή

Η διευκόλυνση της καθημερινότητας, της σύγχρονης ανθρώπινης κοινότητας βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην κατανάλωση ενέργειας και κυρίως αυτής της ηλεκτρικής. Αυτό συμβαίνει καθώς η δαπάνη αυτής της ενέργειας χρησιμοποιείται για την τροφοδότηση κατοικιών και βιομηχανιών που είναι απαραίτητες για την ανθρώπινη επιβίωση. Μπορούμε εύκολα να κατανοήσουμε την σημαντικότητα της ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια μιας διακοπής ρεύματος η οποία μας αποτρέπει από το να εκτελέσουμε κάποιες αναπόσπαστες συνήθειες της καθημερινότητας, όπως για παράδειγμα την χρήση ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Η ηλεκτρική ενέργεια αυτή μπορεί να αντληθεί από διάφορες πηγές όπως το πετρέλαιο, ο άνθρακας και το αέριο, και να χρησιμοποιηθεί αφού πρώτα μετατραπεί βέβαια. Οι πηγές αυτές δεν είναι ανανεώσιμες όμως καθώς ο ρυθμός κατά τον οποίο σχηματίζονται είναι μικρότερος από εκείνον που καταναλώνονται, με αποτέλεσμα να εξαντλούνται. Εκτός αυτού έχουν και αρκετές αρνητικές επιπτώσεις στο φυσικό περιβάλλον καθώς μέσω της καύσης τους παράγονται απόβλητα.

Ο συνδυασμός λοιπόν των σύγχρονων ενεργειακών απαιτήσεων με την εξάντληση των φυσικών πόρων και την μόλυνση του περιβάλλοντος έχει δημιουργήσει ένα μείζον ενεργειακό πρόβλημα. Στο κοντινό μέλλον οι παγκόσμιες ενεργειακές ανάγκες, οι οποίες μάλιστα αυξάνονται εκθετικά με την πάροδο του χρόνου, δεν θα μπορούν να εξυπηρετηθούν. Για αυτόν τον λόγο μια πιο μόνιμη λύση του ενεργειακού προβλήματος αποτελεί η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ως εναλλακτικές πηγές. Για την μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας από πηγές που προέρχονται από φυσικές διαδικασίες μπορούμε να εκμεταλλευτούμε τον ήλιο, τον άνεμο, τη κυκλοφορία του νερού, τον κυματισμό της θάλασσας, την βιομάζα και την γεωθερμία. Μέσω της αξιοποίησης των πηγών αυτών επιτυγχάνεται η μείωση της ρύπανσης ενώ παράλληλα η παροχή ενέργειας εκτός από συνεχής εμφανίζεται και ως μια μακροχρόνια οικονομικότερη λύση.

Ακόμη ένας τεχνολογικός τομέας ο οποίος εμφανίζει ραγδαία ανάπτυξη σήμερα, αποτελεί αυτός των ασύρματων αυτόνομων ηλεκτρονικών συστημάτων. Οι ασύρματες ηλεκτρονικές φορητές συσκευές κυριεύουν την καθημερινότητα μας. Η κατασκευή των αυτό-τροφοδοτούμενων μικροσυστημάτων εξυπηρετεί πολλές εφαρμογές. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν οι αισθητήρες που διαμορφώνονται έτσι ώστε να μπορούν να ενσωματωθούν στο ανθρώπινο σώμα στην υγειονομική περίθαλψη όπως και οι αισθητήρες που προσαρτώνται σε συσκευές με σκοπό τον έλεγχο περιβαλλοντικών δυσμενών συνθηκών και για την επίβλεψη αυτών (κυρίως σε περιοχές με δύσκολη έως αδύνατη πρόσβαση).

Η κύρια πηγή τροφοδότησης που εξυπηρετούσε την τεχνολογία των ασύρματων συστημάτων εδώ και αρκετά χρόνια είναι οι μπαταρίες. Ως πηγή όμως απαιτεί συχνή επαναφόρτιση ή

ακόμη και αντικατάσταση, περιορίζοντας έτσι αρκετά τη διάρκεια ζωής των συσκευών και αρκετά μεγάλο κόστος.

Αποτέλεσμα όλων αυτών καταλήγει η ανάγκη για αμείωτη παροχή ενέργειας στα συστήματα έτσι ώστε η λειτουργία τους να γίνει αδιάλειπτη. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την ανάπτυξη συστημάτων που συλλέγουν ενέργεια από το περιβάλλον που θα τροφοδοτεί συνεχώς τις ηλεκτρονικές διατάξεις χωρίς παράλληλα να εξαντλείται. Έτσι τα συστήματα θα είναι σε θέση να εκμεταλλεύονται την υπολειπόμενη ενέργεια μικρής κλίμακας και να την μετατρέπουν σε ηλεκτρική.

1.2 Πηγές ενέργειας για την τροφοδότηση αυτόνομων συσκευών

Η έννοια της συγκομιδής ενέργειας (Σ.Ε) ή αλλιώς μάζευση ενέργειας (Energy Harvesting), ευρέως γνωστή και ως συγκομιδή/μάστευση ισχύος, πρόκειται για την διαδικασία κατά την οποία συλλαμβάνεται, αποθηκεύεται και χρησιμοποιείται ενέργεια. Η ενέργεια αυτή βέβαια προέρχεται από εξωτερικές πηγές όπως η φωτεινή ακτινοβολία (π.χ. η ηλιακή ενέργεια), η διαφορά θερμοκρασίας, η ροή του αέρα, η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και ο ακουστικός θόρυβος.

Με τη Σ.Ε. επιτυγχάνεται η συλλογή ισχύος της τάξης μερικών nanowatts έως και μερικές εκατοντάδες milliwatts. Μπορεί η ποσότητα αυτή να μας φαίνεται πολύ μικρή αλλά υπάρχουν αρκετές εφαρμογές τις οποίες εξυπηρετούν καθώς διαθέτουν χαμηλές απαιτήσεις ισχύος. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι ασύρματοι αισθητήριοι κόμβοι οι οποίοι χρησιμεύουν στην παρακολούθηση φυσικών ή περιβαλλοντικών συνθηκών.

Συμπερασματικά ο στόχος της Σ.Ε. είναι η επίτευξη της ενεργειακής αυτονομίας των συστημάτων με βασικά συστατικά τμήματα την συλλογή ενέργειας, την μετατροπή της ενέργειας αυτής σε ηλεκτρική όπως και την αποθήκευσή της με την δυνατότητα έτσι της επαναχρησιμοποίησής της.

1.3 Εφαρμογές και τρόποι αποθήκευσης ενέργειας

Στο πλαίσιο της ανάπτυξης της τεχνολογίας της Σ.Ε. εξυπηρετήθηκαν αρκετοί κλάδοι όπως ο εμπορικός και ο στρατιωτικός τομέας. Για παράδειγμα αναπτύχθηκαν συστήματα τα οποία εκμεταλλεύονται την κίνηση των κυμάτων του ωκεανού, η οποία μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια για να αξιοποιηθεί στη συνέχεια από ωκεανογραφικούς αισθητήρες παρακολούθησης με αυτόνομη λειτουργία. Ακόμη ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι wearable ηλεκτρονικές συσκευές οι οποίες με την βοήθεια εφαρμογών Σ.Ε. έχουν την δυνατότητα τόσο να τροφοδοτούν όσο και να επαναφορτίζουν κινητά τηλέφωνα, φορητούς Η/Υ κλπ. Επιπλέον, η ενέργεια αυτή που συλλέγεται, βρίσκεται σε θέση που μπορεί να τροφοδοτεί μικρούς αυτόνομους αισθητήρες όπως εκείνους που χρησιμοποιούνται κατά τη χρήση της τεχνολογίας MEMS. Μπορεί τα συστήματα αυτά να χαρακτηρίζονται από μικρό μέγεθος και συνεπώς να απαιτούν μικρές ποσότητες ενέργειας, αλλά υπάρχει μεγάλος

περιορισμός των εφαρμογών τους. Αυτό συμβαίνει καθώς η λειτουργία τους εξαρτάται άμεσα από την χρήση μπαταριών, οι οποίες μειονεκτούν ως προς τον χρόνο ζωής που προϋποθέτει την συχνή τους αντικατάσταση με αποτέλεσμα να επιφέρει μεγάλο κόστος. Αντιθέτως η Σ.Ε. από δονήσεις του περιβάλλοντος, τον άνεμο ή τη θερμότητα θα μπορούσε να επιτρέψει σε “έξυπνους” αισθητήρες να λειτουργούν τόσο αυτόνομα όσο και μόνιμα.

Υπάρχουν διάφορα μέσα στα οποία μπορεί να αποθηκευτεί η συλλεγόμενη ενέργεια όπως οι μπαταρίες (batteries), οι πυκνωτές (capacitors) και οι υπερπυκνωτές (supercapacitors). Κάθε ένας από αυτούς τους τρόπους εξυπηρετεί και διαφορετικές απαιτήσεις αναλόγως με τις ανάγκες της συσκευής που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί η αποθηκευμένη ενέργεια. Οι πυκνωτές χρησιμοποιούνται όταν απαιτούνται μεγάλες αιχμές ενέργειας, ενώ οι μπαταρίες καθώς παρουσιάζουν μικρότερη διαρροή ενέργειας χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που η συσκευή πρέπει να παρέχει μια σταθερή ροή ενέργειας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο

2.1 Ιστορική αναδρομή

Υπάρχουν πολλές διεργασίες κατά τις οποίες μεγάλο μέρος των απωλειών, εκπέμπεται υπό τη μορφή θερμότητας. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν οι μηχανές εσωτερικής καύσης εργοστασίων ή μέσων μεταφοράς. Επιπλέον τα φωτοβολταϊκά πάνελ ή ακόμη και τα κοντέινερ που με τη βοήθεια της ηλιακής ενέργειας θερμαίνονται οι μεταλλικές τους επιφάνειες, μπορούν να λειτουργήσουν ως μεγάλες αντλίες θερμικής ενέργειας. Βέβαια μια τέτοιου είδους μορφή ενέργειας είναι σημαντικά δύσκολο να αξιοποιηθεί, να μετατραπεί και να αποθηκευτεί όμως εφόσον υπάρχει σε τόσο μεγάλη αφθονία στο περιβάλλον αξίζει να μελετηθεί και να βρεθεί τρόπος για την αξιοποίησή της.

Αρχικά το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο ανακαλύφθηκε από τον Εσθονό Thomas Johann Seebeck, ο οποίος ήτα φυσικός και διαπίστωσε ότι δημιουργώντας διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα σε μία επαφή δύο ανόμοιων μετάλλων είναι δυνατόν να εκτραπεί ο μαγνήτης μια πυξίδα. Αυτό σημαίνει ότι στα άκρα της επαφής αυτής εμφανίζεται ένα ηλεκτρικό δυναμικό το οποίο είναι ικανό να δώσει ροή ρεύματος σε ένα κλειστό κύκλωμα. Η τάση που δημιουργείται είναι ανάλογη με την διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στους δύο κόμβους, ενώ η σταθερά που συνδέει τα δύο μεγέθη ονομάστηκε συντελεστής Seebeck.

Λίγο αργότερα, το 1834 ο Γάλλος Jean Charles A. Peltier, ωρολογοποιός και ερασιτέχνης φυσικός, μελέτησε την αντίστροφη μέθοδο σύμφωνα με το φαινόμενο Seebeck. Πιο συγκεκριμένα παρείχε ηλεκτρική ισχύ στη διμεταλλική επαφή, στη συνέχεια απορροφούσε θερμότητα από την μία επαφή ενώ απέβαλλε από την άλλη υπό την επίδραση διαφοράς δυναμικού.

Το 1851 ο Γερμανός Gustav Magnus, φυσικός και χημικός, ανακάλυψε πως η τάση κατά το φαινόμενο Seebeck δεν εξαρτάται από το πως κατανέμεται η θερμοκρασία κατά μήκος των μετάλλων, αλλά από την διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα σε αυτά. Αυτό συμβαίνει καθώς τα ηλεκτρόνια που κινούνται ανάμεσα στις δύο ανόμοιες μεταλλικές περιοχές, στην περιοχή που θερμαίνεται εμφανίζουν μεγαλύτερη ενέργεια και ταχύτητα σε σύγκριση με εκείνα στην ψυχρή περιοχή.

Την ίδια χρονιά ο Ιρλανδός-Βρετανός William Thomson (γνωστός και ως Kelvin), φυσικομαθηματικός και μηχανικός, ολοκλήρωσε τις μελέτες γύρω από το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο. Αυτό επιτεύχθηκε συσχετίζοντας τα φαινόμενα Seebeck και Peltier θεμελιώνοντας το τρίτο θερμοηλεκτρικό φαινόμενο, το οποίο ονομάστηκε φαινόμενο Thomson. Κατά το φαινόμενο αυτό παρατηρείται παραγωγή ή απορρόφηση θερμότητας καθώς το ρεύμα ρέει μέσα από ένα υλικό ενώ παράλληλα η θερμοκρασία μεταβάλλεται κατά το μήκος της ροής.

Μεταγενέστερα ακολούθησαν πιο εκτεταμένες μελέτες γύρω από την τεχνολογία αυτήν καθώς ήταν επιτακτική η ανάγκη για ψύξη και παραγωγή ενέργειας για την κάλυψη διαφόρων αναγκών. Έτσι μελετήθηκαν περαιτέρω τα ημιαγώγιμα υλικά και τα κράματα

χαλκού (Cu) και νικελίου (Ni) καθώς εμφανίζαν εντονότερα το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο. Επιπλέον το 1949 ο Ρώσος Abram Fedorovich Ioffe ο οποίος ήταν φυσικός, εισήγαγε τον όρο του συντελεστή κέρδους ZT, δηλαδή ενός δείκτη ποιότητας του κάθε υλικού. Επίσης μελέτησε τη χρήση ημιαγωγών κατά τη θερμοηλεκτρική παραγωγή συμπεραίνοντας ότι τα ημιαγώγιμα υλικά εμφανίζουν υψηλότερο θερμοηλεκτρικό συντελεστή κέρδους. Τα πιο γνωστά ημιαγώγιμα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι το τελλουριούχο βισμούθιο (Bi₂Te₃) για θερμοκρασίες δωματίου (20 °C- 25 °C), ο τελλουριούχος μόλυβδος (PbTe) για θερμοκρασίες μέχρι 576.9 °C και το γερμάνιο του πυριτίου (SiGe) για θερμοκρασίες μέχρι - 272.2 °C. Ο βαθμός απόδοσης των στοιχείων αυτών έως το 1950 ήταν πολύ χαμηλός. Έτσι η χρηματοδοτήσεις γύρω από την έρευνες της τεχνολογίας αυτής μειώθηκαν και οι εφαρμογές όπου χρησιμοποιήθηκε ήταν αρκετά εξειδικευμένες.

Το ενδιαφέρον για την θερμοηλεκτρική τεχνολογία αναζωπυρώθηκε κατά τη δεκαετία του '90 λόγω των αυξημένων ενεργειακών αναγκών οι οποίες οδήγησαν στην εύρεση λύσεων μέσω των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Σημαντικό ρόλο για την επιστροφή της θερμοηλεκτρικής τεχνολογίας έπαιξε επίσης και η ανάγκη για μεγαλύτερη δυνατότητα κατασκευής και επεξεργασίας υλικών. Ο συντελεστής κέρδους ZT έχει αυξηθεί πάνω από 3 σε υψηλές θερμοκρασίες, σε εργαστηριακό επίπεδο, ενώ σήμερα η τεχνολογία αυτή θα μπορούσε να βρει εφαρμογές κυρίως σε συμβατικά εργοστάσια τα οποία κατέχουν εγκαταστάσεις που αποβάλλουν μεγάλα ποσά θερμότητας, αλλά και σε οχήματα τα οποία χρησιμοποιούν κινητήρες εσωτερικής καύσης που αποβάλλουν μεγάλα ποσά ενέργειας.

2.2 Ανάλυση φυσικών φαινομένων από τα οποία εξαρτάται το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο

Μέσω της ιστορικής αναδρομής είδαμε πως τα θερμοηλεκτρικά στοιχεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν όχι μόνο ως γεννήτριες ηλεκτρικής ενέργειας (Seebeck Effect), αλλά και ως ψυκτικά συστήματα (Peltier Effect). Για να κατανοήσουμε όμως καλύτερα την λειτουργία και την συμπεριφορά ενός θερμοηλεκτρικού ζεύγους αρκεί αναλύσουμε τις σχέσεις από τις οποίες αποτελούνται τα πέντε φυσικά φαινόμενα που διέπουν την θερμοηλεκτρική παραγωγή ενέργειας. Τα φυσικά φαινόμενα αυτά είναι: τον τρόπο μετάδοσης της θερμότητας, το φαινόμενο Joule, το φαινόμενο Seebeck, το φαινόμενο Peltier και το φαινόμενο Thomson.

2.2.1 Τρόπος μετάδοσης θερμότητας

Η μετάδοση της θερμότητας εξαρτάται από την θερμική αγωγιμότητα και τη γεωμετρία των στοιχείων. Περιγράφεται μέσω της εξίσωσης Fourier και τη θερμική αγωγιμότητα k (W/mK). Έτσι προκύπτουν οι εξής εξισώσεις της θερμικής αντίστασης κάθε ζεύγους:

$$\Theta = \frac{1}{k} * \frac{h}{A} \quad (2.1)$$

$$T = \Theta * q \quad (2.2)$$

Με h συμβολίζεται το ύψος του κάθε στοιχείου (m), A το εμβαδόν της επιφάνειας του στοιχείου (m^2), T η θερμοκρασία (K) και q η θερμότητα (W).

2.2.2 Φαινόμενο Joule

Ο όρος θερμότητα Joule συμβολίζεται με q_j (W) και αναφέρεται στη παραγωγή θερμότητας των ωμικών στοιχείων ανά μονάδα του χρόνου. Η αντίσταση R (Ω) κάθε ζεύγους προκύπτει από τις σχέσεις:

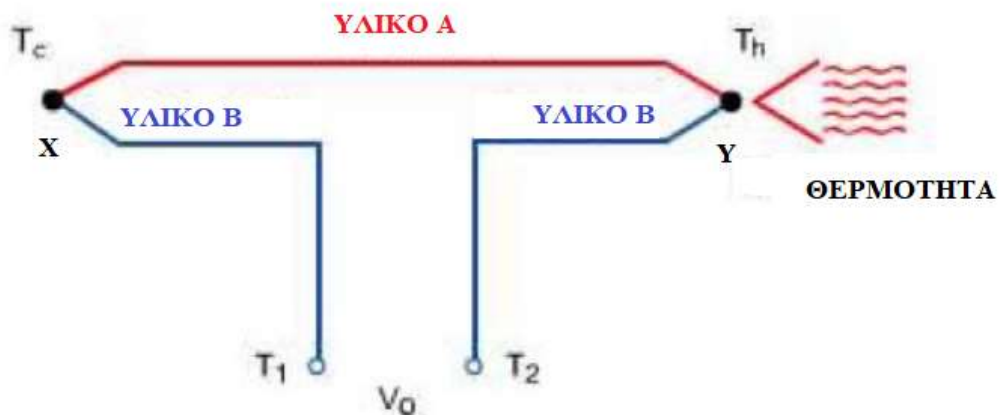
$$R = \rho * \frac{h}{A} \quad (2.3)$$

$$q_j = I^2 * R \quad (2.4)$$

Με ρ συμβολίζεται η ειδική αντίσταση ($\Omega * m$) και με I το ηλεκτρικό ρεύμα (A).

2.2.3 Φαινόμενο Seebeck

Το φαινόμενο Seebeck πρόκειται για την διαδικασία κατά την οποία μέσω της θέρμανσης ή της ψύξης στις επαφές δύο ανόμοιων μετάλλων παράγεται ηλεκτρική ενέργεια. Πρόκειται για



Σχήμα 2. 1 Κύκλωμα θερμοηλεκτρικού ζεύγους (Θεόδωρος Μ. Γιαννάκης) [2]

την αντίστροφη διαδικασία του φαινομένου Peltier ενώ μπορεί να εξηγηθεί εύκολα μέσω ενός απλού κυκλώματος θερμοηλεκτρικού ζεύγους.

Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε τους αγωγούς του θερμοζεύγους, οι οποίοι είναι δύο ανόμοια μέταλλα με ονομασία Υλικό A και Υλικό B αντίστοιχα. Εάν παραδείγματος χάρι θέλουμε να μετρήσουμε την θερμοκρασία, τότε το ζεύγος X μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέτρο σύγκρισης και θα διατηρηθεί σε χαμηλή θερμοκρασία T_c , ενώ το ζεύγος Y θα χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση της θερμοκρασίας T_h ($T_c < T_h$). Επιπλέον με την θερμότητα που εφαρμόζεται στο θερμοηλεκτρικό ζεύγος Y θα έχουμε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία διαφοράς δυναμικού μεταξύ των δύο επαφών T1 και T2. Η διαφορά δυναμικού αυτή εκφράζεται από τη σχέση:

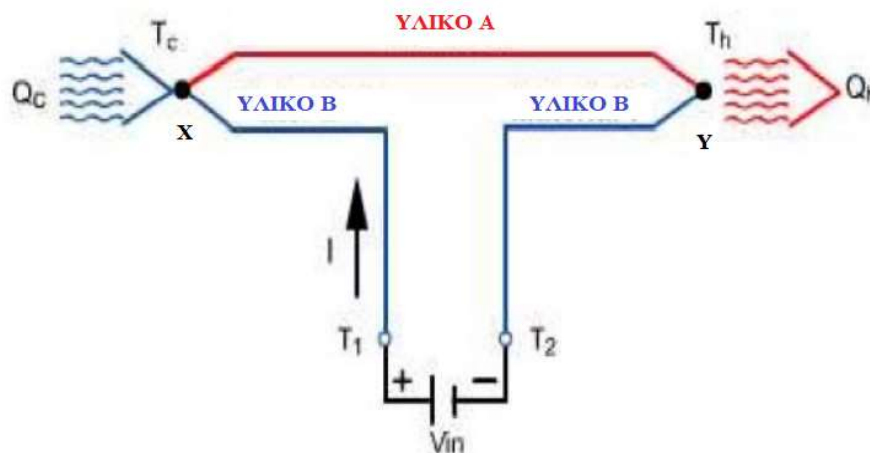
$$V_{out} = \pi_e - \pi_a = \alpha * (T_e - T_a) = \alpha * \Delta T \quad (2.6)$$

$$\pi = \alpha * T \quad (2.7)$$

Με α συμβολίζεται ο συντελεστής Seebeck (V/K) ο οποίος διαφέρει από υλικό σε υλικό, π_a το δυναμικό του κόμβου απορρόφησης, π_e το δυναμικό του κόμβου απαγωγής, T_a η θερμοκρασία που απορροφάται και T_e η θερμοκρασία που απάγεται.

2.2.4 Φαινόμενο Peltier

Το φαινόμενο Peltier πρόκειται για την διαδικασία κατά την οποία αν συνδέσουμε δύο διαφορετικά αγώγιμα υλικά και ακολουθήσει έκκληση ή απορρόφηση θερμότητας από αυτά, τότε το ρεύμα μπορεί να τα διαπεράσει. Με μια μικρή τροποποίηση στο κύκλωμα του προηγούμενου παραδείγματος μπορούμε να αντιληφθούμε ότι πρόκειται για το αντίστροφο φαινόμενο του Seebeck.



Σχήμα 2. 2 Κύκλωμα θερμοηλεκτρικού ζεύγους (Θεόδωρος Μ. Γιαννάκης) [2]

Πιο απλά, εφαρμόζοντας τάση V_{in} στους ακροδέκτες T1 και T2 παρατηρούμε ροή ρεύματος στο κύκλωμα. Συνεπώς η θερμότητα Q_c θα μειωθεί ελάχιστα στον κόμβο σύνδεσης X ενώ η θερμότητα Q_h θα αυξηθεί στον κόμβο σύνδεσης Y. Η θερμότητα q που απορροφάται ή παράγεται δίνεται από την εξής σχέση:

$$q = \Pi * I \quad (2.5)$$

Με Π συμβολίζεται ο συντελεστής Peltier (V).

2.2.5 Φαινόμενο Thomson

Το φαινόμενο Thomson αναλύει την απορρόφηση ή την παραγωγή θερμότητας όταν ένα ομογενές και αγώγιμο υλικό διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα. Το εάν η θερμότητα θα απορροφάται ή θα παράγεται εξαρτάται από τη φορά του ηλεκτρικού ρεύματος και από τη θερμική αντίσταση που παρουσιάζει το αγώγιμο υλικό. Το φαινόμενο αυτό, δίνεται από τη σχέση:

$$Q = \frac{\beta}{\Delta T} \quad (2.6)$$

Με β συμβολίζεται ο συντελεστής Thomson και με ΔT η μεταβολή της θερμοκρασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

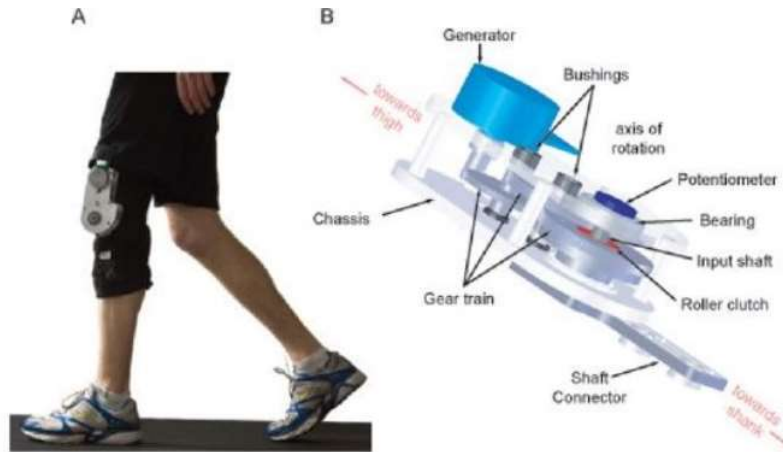
3.1 Συγκομιδή ενέργειας από το ανθρώπινο σώμα

Το ανθρώπινο σώμα αποτελεί μία ακατάπαυστη πηγή ενέργειας και μάλιστα χωρίς ιδιαίτερη προσπάθεια. Η ενέργεια αυτή μπορεί να είναι κινητική, χημική και θερμική καθώς κατά τις καθημερινές συνήθειες του ανθρώπου το σώμα παράγει πολλαπλές ενεργειακές πυκνότητες. Το μεγαλύτερο μέρος των ενεργειακών πυκνοτήτων αυτών, αποβάλλονται στο περιβάλλον σε διάφορες μορφές ενώ θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ωφέλιμης ηλεκτρικής ενέργειας. Στο πεδίο δράσης της συγκομιδής ενέργειας από το ανθρώπινο σώμα είναι η εκμετάλλευση, η μετατροπή και η αποθήκευση της διαθέσιμης ενέργειας αυτής, χωρίς παράλληλα να επηρεάζονται οι φυσιολογικές λειτουργίες του οργανισμού. Κάποιες δραστηριότητες του ανθρώπου από τις οποίες μπορεί να παραχθεί ενέργεια είναι: η θερμοκρασία του σώματος, οι κινήσεις της καρδιάς ή ακόμη και ολόκληρου του σώματος, η ροή του αίματος και η παραμόρφωση των αρτηριών. Οι μέθοδοι αυτοί επεξηγούνται αναλυτικά παρακάτω.

3.1.1 Κινήσεις του ανθρώπου

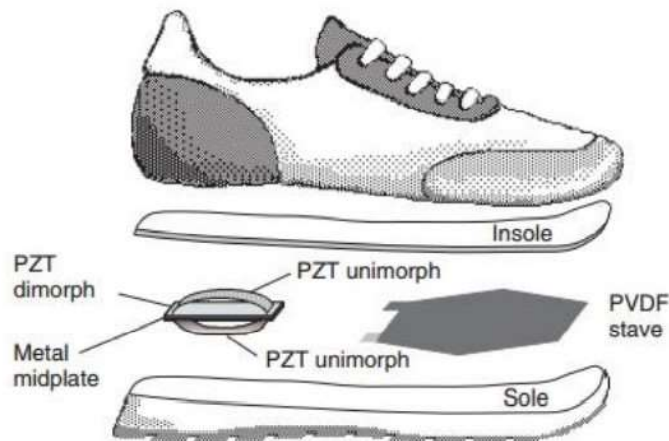
Μια από τις πιο αναπόφευκτες κινήσεις του ανθρώπινου σώματος είναι το περπάτημα. Κατά το περπάτημα διάφορα μέρη του σώματος πραγματοποιούν κινήσεις οι οποίες δαπανούν ενέργεια που μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική. Όταν όμως χρησιμοποιείται θετική ενέργεια από το ανθρώπινο σώμα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του μεταβολικού κόστους. Έτσι με τη βοήθεια μιας συσκευής συγκομιδής ενέργειας είναι εφικτό να αντικατασταθεί ένα ποσοστό της μυϊκής δραστηριότητας όταν οι μύες δράνε αντίθετα στην κίνηση με αποτέλεσμα να προκαλούν αντίσταση. Πιο συγκεκριμένα έχουν πραγματοποιηθεί έρευνες κατά τις οποίες αξιολογήθηκαν οι κύριες κινήσεις κατά το περπάτημα και παρατηρήθηκε πως υπάρχουν φάσεις της κινήσεις στις αρθρώσεις όπου οι μύες λειτουργούν ως φρένα με αποτέλεσμα να χάνεται ενέργεια στο περιβάλλον. Κατά τη διάρκεια αυτών των φάσεων κίνησης, η απαιτούμενη δύναμη πέδησης ή ροπής μπορεί να αντικατασταθεί με μία ηλεκτρική γεννήτρια με σκοπό τη συγκομιδή της ενέργειας που τείνει να χαθεί. (Αρθρογράφοι: Raziell Riemer, Amir Shapiro 2011)

Στο σχήμα 3.1 απεικονίζεται μία εφαρμογή ορθοπεδικής επιγονατίδας η οποία με την βοήθεια μιας μαγνητικής περιστροφικής γεννήτριας καταπολεμά το αρνητικό μηχανικό έργο που δημιουργούν οι μυς. Κατά την έκταση του γόνατος ένα σύστημα μετάδοσης της ταχύτητας ενισχύει την γωνιακή ταχύτητα ενώ η μαγνητική περιστροφική γεννήτρια μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Υπάρχει επίσης και ένα σύστημα ελέγχου το οποίο είναι υπεύθυνο για τη λειτουργία ή μη του κυκλώματος παραγωγής ενέργειας. Έτσι η συσκευή παράγει ενέργεια ίση με 4,8W, κατά το τέλος της έκτασης του γόνατος, με βηματισμό ταχύτητας 1,5m/s ενώ η αύξηση του μεταβολικού κόστους είναι μόλις 5W. (Αρθρογράφοι: Nathan S. Shenck & Joseph A. Paradiso)[5]



Σχήμα 3. 1 Ορθοπεδική επιγονατίδα με μαγνητική γεννήτρια (Qingguo Li, Veronica Naing & Maxwell Donelan)[4]

Μία ακόμα κίνηση από την οποία μπορεί να αξιοποιηθεί η ενέργεια που δημιουργεί, είναι η πρόσκρουση της φτέρνας στο έδαφος. Σύμφωνα με υπολογισμούς που έχουν πραγματοποιηθεί η ενέργεια που διατίθεται είναι 2 Joule ανά βήμα. Στην εφαρμογή του σχήματος 3.2 στο κάτω μέρος του παπουτσιού έχει ενσωματωθεί πιεζοηλεκτρικό υλικό, με αποτέλεσμα κατά τη διάρκεια της πρόσκρουσης του πέλματος με το έδαφος να παράγεται ηλεκτρική ενέργεια. Η μέση ισχύς που παράγεται είναι 8,3mW όταν η συχνότητα του βήματος είναι 0,9Hz.



Σχήμα 3. 2 Εφαρμογή παπουτσιού με πιεζοηλεκτρικό υλικό (Nathan S. Shenck & Joseph A. Paradiso)[5]

3.1.2 Κινήσεις της καρδιάς

Η καρδιά αποτελεί μια αξιόπιστη πηγή ενέργειας και η συγκομιδή ενέργειας από αυτήν είναι ικανή να βοηθήσει στην ανάπτυξη βιοϊατρικών εφαρμογών όπως και σε εμφυτεύσιμες ιατρικές διατάξεις. Αυτό συμβαίνει καθώς λειτουργεί ακατάπαυστα με αποτέλεσμα να εξασφαλίζει αξιόλογες ποσότητες ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα ο καρδιακός μυς εκτελεί 1,8 δισεκατομμύρια παλμούς σε χρονικό διάστημα 70 χρόνων, ενώ ο μέσος καρδιακός ρυθμός υπολογίζεται στα 70bpm. Ένα ακόμη πλεονέκτημα είναι οι μετατοπίσεις που πραγματοποιούν τα εξωτερικά τοιχώματα του οργάνου, γεγονός που αυξάνει την δημιουργία της κινητικής ενέργειας.

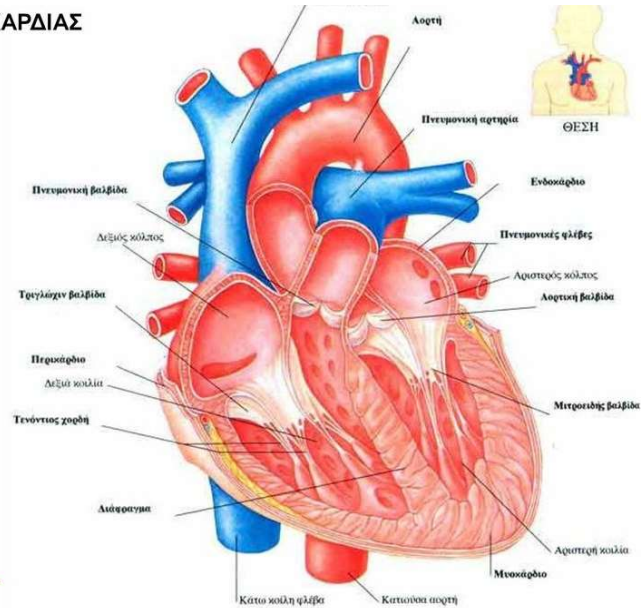
Η συσκευή που θα παρουσιαστεί σε αυτή τη παράγραφο υλοποιεί την μέθοδο που αναφέρθηκε παραπάνω. Πρόκειται για μια κατασκευή συγκομιδής ενέργειας που εκμεταλλεύεται την τεχνολογία που χρησιμοποιείται σε ένα αυτόματο ρολόι χειρός, μετατρέπει δηλαδή την μηχανική ενέργεια που παράγεται λόγω της κίνησης σε ηλεκτρική. Η μέθοδος αυτή εστιάζει όχι μόνο στη μεγαλύτερη διάρκεια ζωής αλλά και στην εξάλειψη των μπαταριών ενώ παράλληλα θα μπορούσε να απαλλάξει τους ασθενείς από επαναλαμβανόμενες χειρουργικές επεμβάσεις.

Παρακάτω αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας της κατασκευής που αποτελείται από ένα αυτόματο ρολόι χειρός του εμπορίου το οποίο τροποποιήθηκε με την προσθήκη μίας γεννήτριας ταλάντωσης και μια ασύμμετρη μάζα αδράνειας. Επίσης η μάζα αυτή αναρτάται από ένα ελατήριο το οποίο είναι υπεύθυνο για την αποθήκευση της μηχανικής ενέργειας. Όταν η αποθηκευμένη ενέργεια ξεπεράσει ένα όριο το ελατήριο απελευθερώνεται και με την ενέργεια που δημιουργεί θέτει σε λειτουργία για αμελητέο χρόνο μία ηλεκτρομαγνητική γεννήτρια με αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικών παλμών. Η ενέργεια που παράγεται αποθηκεύεται σε έναν συσσωρευτή για να τροφοδοτεί το ρολόι ενώ οι μηχανισμοί που δεν αποτελούσαν εργαλεία συγκομιδής ενέργειας αποσυναρμολογήθηκαν από την κατασκευή.

Πραγματοποιήθηκαν δύο πειράματα, ένα *in vitro* στο οποίο χρησιμοποιήθηκε ένα ρομποτικό χέρι και ένα *in vivo* κατά το οποίο η συσκευή τοποθετήθηκε στην καρδιά ενός προβάτου. Πριν τα πειράματα όμως για να επιβεβαιωθεί η φυσική λειτουργία της κατασκευής και να γίνει αντιληπτό το μέρος της καρδιάς που δημιουργεί τις ισχυρότερες κινήσεις ένας υγιής άντρας 30 χρονών υποβλήθηκε σε μαγνητική τομογραφία. Έπειτα από ανάλυση των κινήσεων της αριστερής κοιλίας της καρδιάς και κυρίως εκείνες τις χρονικές στιγμές που τα περιφερειακά τοιχώματα του μυ μετακινούνται, παρατηρήθηκε πως οι ισχυρότερες κινήσεις δημιουργούνται στην πλευρική περιοχή (*lateral*) και πιο συγκεκριμένα στην βάση. Επιπλέον κατά την ανάλυση της περιστροφικής κίνησης, οι μεγαλύτερες περιστροφές παρατηρήθηκαν στην κατώτερη και πίσω πλάγια περιοχή (*inferolateral*). Έτσι κατά τα πειράματα η περιοχή για την συγκομιδή ενέργειας από την συσκευή θεωρήθηκε η βασική πίσω πλάγια περιοχή (*basal- inferolateral*).

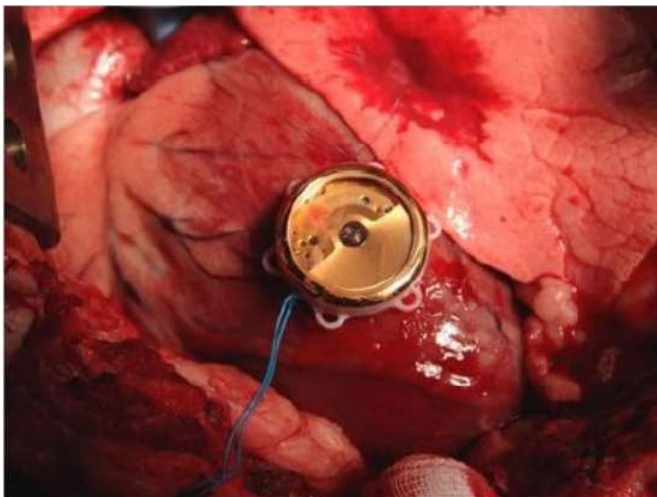
Κατά το πείραμα *in vitro* το ρομποτικό χέρι προγραμματίστηκε έτσι ώστε να αναπαραστή την κίνηση της καρδιάς στο σημείο που επιλέχθηκε με βάση τα αποτελέσματα της μαγνητικής τομογραφίας. Πιο συγκεκριμένα το ρομποτικό χέρι ακολουθούσε την τροχιά δύο σημείων. Το πρώτο βρίσκεται στη βασική πίσω πλάγια περιοχή όπου παρατηρήθηκαν οι μεγαλύτερες κινήσεις, ενώ το δεύτερο βρίσκεται στο επίπεδο της κορυφής όπου παρατηρήθηκαν οι μικρότερες κινήσεις. Μετά από την αναπαραγωγή 600 καρδιακών κύκλων του ρομποτικού χεριού παρατηρήθηκε μέση ισχύς ίση με 30μW στο πρώτο σημείο και μέση ισχύς ίση με 23,2μW στο δεύτερο σημείο. (Αρθρογράφοι : A. Zurbuchen, A. Pfenniger, A. Stahel, C. T. Stoeck, S. Vandenberghe, V. M. Koch, Rolf Vogel)[7]

ΑΝΑΤΟΜΙΑ ΤΗΣ ΚΑΡΔΙΑΣ



Σχήμα 3. 3 Ανατομία της καρδιάς[6]

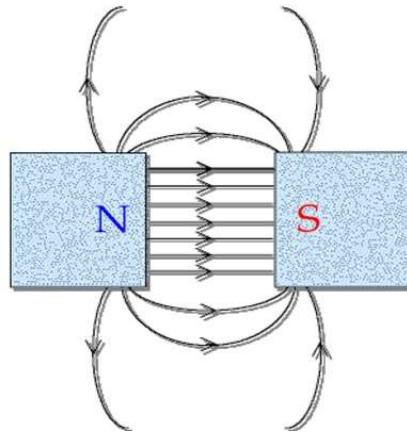
Κατά το πείραμα *in vivo* η κατασκευή τοποθετήθηκε στην αριστερή κοιλία και πιο συγκεκριμένα στο μεσοπλευρικό τοίχωμα της καρδιάς ενός προβάτου όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4. Ο μέσος καρδιακός παλμός ήταν 90bpm ενώ καταγράφηκαν τρεις μετρήσεις ισχύος σε διάρκεια 18 λεπτών και 45 δευτερολέπτων. Εντός αυτού του χρονικού περιθωρίου η συσκευή συγκομιδής ενέργειας παρήγαγε 330 ενεργειακούς παλμούς με μέση ισχύ 16,7μW που αντιστοιχούν σε 1,1μJ ανά καρδιακό κύκλο.



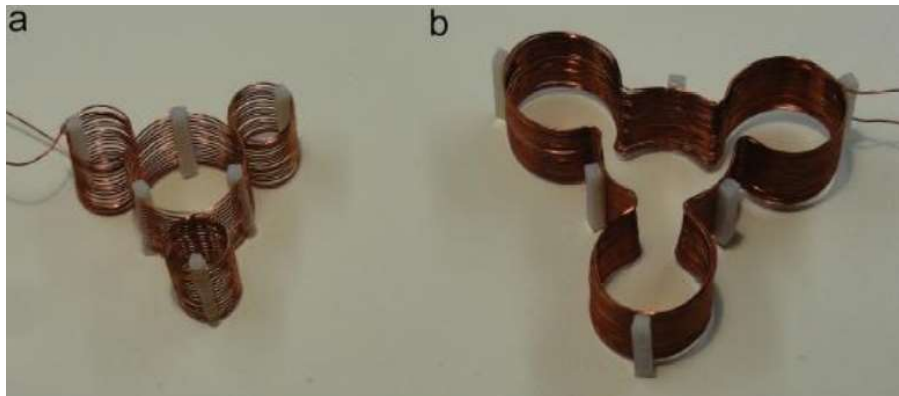
Σχήμα 3. 4 Συσκευή συγκομιδής ενέργειας τοποθετημένη στην καρδιά ενός προβάτου (A. Zurbuchen, A. Pfenniger, A. Stahel, C. T. Stoeck, S. Vandenberghe, V. M. Koch, Rolf Vogel) [7]

3.1.3 Αρτηριακή παραμόρφωση

Με τον όρο αρτηριακή παραμόρφωση εννοείται η μεταβολή της πίεσης που δημιουργείται μεταξύ της διαστολής και της συστολής των αρτηριών. Η ιδιότητα αυτή των αρτηριών συνοδεύεται από την μεταβολή του όγκου του αυλού της αρτηρίας και κατά συνέπεια την κίνηση του αρτηριακού τοιχώματος. Πιο συγκεκριμένα κατά τη διαστολή η διάμετρος του αρτηριακού τοιχώματος μπορεί να αυξηθεί και έως 10% από την αρχική του διάμετρο. Με την χρήση μίας μεθόδου συγκομιδής ενέργειας η κίνηση αυτή μπορεί να αξιοποιηθεί ώστε να παραγάγει ηλεκτρική ενέργεια. (Αρθρογράφοι: Pfenniger, Jonsson, Zurbuchein, Koch, Artorg 2013)[8]



Σχήμα 3. 5 Μαγνητική ροή μεταξύ δύο μόνιμων μαγνητών (Ζησίμου Αριστοτέλης) [9]



Σχήμα 3.6 Πηνία που κατασκευάστηκαν για το πείραμα (Pfenniger, Jonsson, Zurbuchein, Koch, Artorg 2013)[8]

Η μέθοδος που αναλύεται παρακάτω εκμεταλλεύεται την κίνηση των αρτηριών μέσα σε μαγνητικό πεδίο, έτσι ώστε να παραχθεί επαγόμενη τάση. Αυτό συμβαίνει καθώς ακολουθεί τον νόμο Lorentz. Η δύναμη Lorentz ασκείται σε ένα φορτισμένο σωματίδιο το οποίο βρίσκεται εντός ενός μαγνητικού πεδίου. Επιπλέον όταν ένας ηλεκτροφόρος αγωγός κινείται εντός του μαγνητικού πεδίου δημιουργείται επαγόμενη τάση στα άκρα του η οποία μάλιστα είναι ανάλογη της ταχύτητάς του. Ακόμη μία ιδιότητα του φαινομένου αυτού είναι πως η

μέγιστη τιμή της τάσης που δημιουργείται εμφανίζεται στο σημείο εκείνο όπου η διεύθυνση της κίνησης του αγωγού είναι κάθετη στις μαγνητικές γραμμές του πεδίου. Το σχήμα 3.5 απεικονίζει το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται ανάμεσα σε δύο μαγνήτες όπου οι αντίθετοι πόλοι βρίσκονται απέναντι. Στον ενδιάμεσο χώρο μεταξύ τους οι μαγνητικές γραμμές βρίσκονται σε οριζόντια μορφή, κάνοντας το σημείο κατάλληλο για την κάθετη κίνηση του αγωγού και συνεπώς τη δημιουργία μέγιστης τάσης.

Κατά τη πειραματική διαδικασία της μελέτης για την παραγωγή του κατάλληλου μαγνητικού πεδίου χρησιμοποιήθηκαν δύο δακτύλιοι μόνιμοι μαγνήτες, οι οποίοι τοποθετήθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε η αρτηρία να περνά ενδιάμεσο της οπής των μαγνητών. Στην συνέχεια όπως φαίνεται στο σχήμα 3.6 κατασκευάστηκαν τυλίγματα από εύκαμπτο σύρμα με σκοπό να τυλιχθεί γύρω από την αρτηρία και θα κινείται ακτινικά μέσω της κίνησης των τοιχωμάτων της αρτηρίας. Επίσης το τύλιγμα κατασκευάστηκε με τρεις παράπλευρους βρόχους με σκοπό να είναι πιο εύκολη η ακτινική διαστολή.

Ακολουθεί μαθηματική ανάλυση για την κατανόηση της αρχής λειτουργίας του πειράματος:

Ένας κυλινδρικός βρόχος όταν διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα δημιουργεί μαγνητικό πεδίο στους άξονες x και z όπως φαίνεται στις παρακάτω σχέσεις:

$$B_x(x, z) = \frac{\mu_0 i}{2\pi} \frac{z}{x} \frac{1}{\sqrt{(r+x)^2+z^2}} \left[E \frac{r^2+x^2+z^2}{(r-x)^2+z^2} - K \right] \quad (3.1)$$

$$B_z(x, z) = \frac{\mu_0 i}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{(r+x)^2+z^2}} \left[E \frac{r^2-x^2-z^2}{(r-x)^2+z^2} + K \right] \quad (3.2)$$

Με r συμβολίζεται η ακτίνα του βρόχου ενώ K και E είναι τα ελλειπτικά ολοκληρώματα, τα οποία ορίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$K(\varphi, k) = \int_0^\varphi \frac{d\vartheta}{\sqrt{1-k^2 \sin^2 \vartheta}} \quad (3.3)$$

$$E(\varphi, k) = \int_0^\varphi \sqrt{1-k^2 \sin^2 \theta} d\theta \quad (3.4)$$

Όπου για το k ισχύει:

$$k(x, z) = \sqrt{\frac{4rx}{(r+x)^2+z^2}} \quad (3.5)$$

Εάν υποθέσουμε πως το μαγνητικό πεδίο παράγεται από μαγνήτη με επιφάνεια πάχους dz και επιφανειακή κατανομή μαγνητικού φορτίου με πυκνότητα $\sigma_s = \pm B_r$ στις δύο ακραίες επιφάνειες τότε στην σχέση (3.1) μπορούμε να αντικαταστήσουμε το $\mu_0 i$ με το B_r . Επιπλέον εάν θεωρήσουμε έναν μαγνήτη με εσωτερική r_i και εξωτερική ακτίνα r_o , το μαγνητικό πεδίο θα υπολογιστεί αφαιρώντας από το πεδίο που δημιουργείται από επιφάνεια ακτίνας r_o , το

πεδίο που δημιουργείται από επιφάνεια ακτίνας r_1 . Έτσι από την επιφάνεια δακτυλίου πάχους dz δημιουργείται μαγνητικό πεδίο που υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$B_z(x, z) = \frac{Br}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{(ro+x)^2 + z^2}} \left[Eo \frac{ro^2 - x^2 - z^2}{(ro-x)^2 + z^2} - Ko \right] - \frac{Br}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{(ri+x)^2 + z^2}} \left[Ei \frac{ri^2 - x^2 - z^2}{(ri-x)^2 + z^2} - Ki \right] \quad (3.6)$$

Εάν υποθέσουμε πως το μήκος του μαγνήτη είναι 1 τότε το μαγνητικό πεδίο μπορεί να υπολογιστεί με ολοκλήρωση του τύπου (3.6) δηλαδή στον άξονα z . Ο παρακάτω τύπος υπολογίζει το μαγνητικό πεδίο ανάμεσα σε δύο τέτοιους μαγνήτες που βρίσκονται σε απόσταση s :

$$B_{zx, z=zz+1} B_{zx, z=dz+s} - z s - z + 1 B_{zx, z=dz} \quad (3.7)$$

Εάν τώρα η αρτηριακή παραμόρφωση ακολουθεί ημιτονοειδή κυματομορφή σε σχέση με τον χρόνο δίνεται από τον τύπο (3.8) παρακάτω. Η ταχύτητα μπορεί επίσης να βρεθεί από τον τύπο (3.8) εάν τον παραγωγίσουμε (τύπος (3.9)):

$$d(t) = do + \frac{dmax}{2} [1 - \cos(\omega t)] \quad (3.8)$$

$$u(t) = \omega \frac{dmax}{2} \sin(\omega t) \quad (3.9)$$

Με do συμβολίζεται η αρχική διάμετρος της αρτηρίας, με $dmax$ η μέγιστη παραμόρφωση της αρτηρίας και με ω η κυκλική συχνότητα.

Η αντίσταση της σπείρας μεταβάλλεται με το χρόνο και δίνεται από τον παρακάτω τύπο (3.10) :

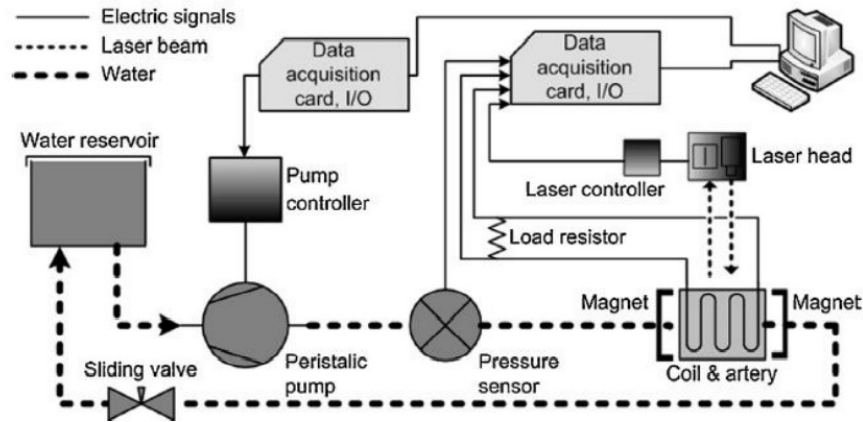
$$R(t) = \rho \frac{L}{A} = \frac{\rho \pi N k(t)}{\pi d^2/4} \quad (3.10)$$

Με ρ συμβολίζεται η ειδική αντίσταση του υλικού, L το μήκος της σπείρας, A η επιφάνεια της εγκάρσιας διατομής. Με N συμβολίζεται ο αριθμός των περιελίξεων της σπείρας και k η διάμετρος του σύρματος.

Τέλος η επαγόμενη τάση στα άκρα θα υπολογιστεί από τον νόμο του Lorentz. Όταν ένας ηλεκτροφόρος αγωγός κινείται εντός μαγνητικού πεδίου τότε η τάση είναι ανάλογη της ταχύτητας. Έτσι εάν αντικαταστήσουμε τη παράμετρο x με την μετατόπιση του τοιχώματος $d(t)$ υπολογίζεται το εξής ολοκλήρωμα:

$$V(t) = - \oint u(t) B_z \left(\frac{d(t)}{2}, z \right) dl \quad (3.11)$$

Η ισχύς θα υπολογιστεί από τον τύπο (3.12) καθώς η διάταξη λειτουργεί με φορτίο αντίστασης ίσης με την αντίσταση της σπείρας: $P(t) = \frac{\left(\frac{V(t)}{2}\right)^2}{R(t)}$ (3.12)



Σχήμα 3. 7 Διάγραμμα πειραματικής διάταξης για την αρτηριακή παραμόρφωση (Pfenniger, Jonsson, Zurbuchein, Koch, Artorg 2013)[8]

Στην συνέχεια χρησιμοποιήθηκε η πειραματική διάταξη του σχήματος 3.7 η οποία αποτελείται από μία αντλία παροχής νερού, δύο μαγνήτες, ένα πηνίο, μία αρτηρία, έναν αισθητήρα λέιζερ για τη μετατόπιση, μία βαλβίδα ολίσθησης και έναν αισθητήρα πίεσης για την παρακολούθηση της πίεσης και κάποια ηλεκτρονικά εξαρτήματα για την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος και την απόκτηση των δεδομένων του πειράματος.

Στο παραπάνω πείραμα χρησιμοποιήθηκε νερό καθώς έχει παρόμοια πυκνότητα με αυτήν του ανθρώπινου αίματος ενώ ως αρτηρίες χρησιμοποιήθηκαν ένα σωλήνας Penrose (latex) και μία πραγματική αρτηρία ενός γουρουνιού. Η αντλία (Peristaltic pump) δημιουργούσε παλμούς πίεσης με σκοπό τη μεταφορά αυτού από το δοχείο (Water reservoir) προς τη συσκευή συγκομιδής ενέργειας. Επιπλέον οι παλμοί πίεσης μεταβάλλανε τη διάμετρο των υλικών (σωλήνας latex και αρτηρία γουρουνιού) που χρησιμοποιήθηκαν ως αρτηρίες. Στην διάταξη ο αισθητήρας λέιζερ (Laser controller/Laser head) χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση της μετατόπισης της εξωτερικής επιφάνειας του υλικού. Επίσης συμπεριλαμβάνεται ένας αισθητήρας πίεσης (Pressure sensor) υπεύθυνος για την μέτρηση της εκάστοτε πίεσης του νερού. Το εξερχόμενο νερό κατέληγε στο αρχικό δοχείο μέσω της βαλβίδας ολίσθησης (Sliding valve).

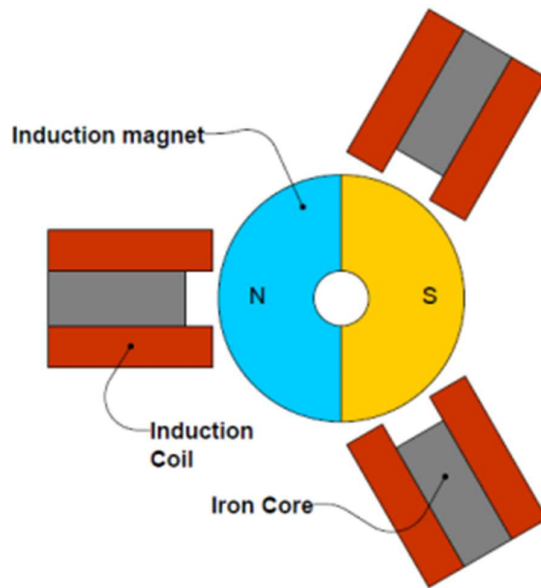
Τα αποτελέσματα έδειξαν πως η διάμετρος της αρτηρίας μεταβαλλόταν από 10 mm σε 11mm με μαγνήτες εσωτερικής διαμέτρου 10.2mm, εξωτερικής διαμέτρου 28mm και πάχους 12mm για την δημιουργία του κατάλληλου μαγνητικού πεδίου. Η τοποθέτηση των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν ως αρτηρίες έγινε στην ενδιάμεση απόσταση 12mm με συχνότητα λειτουργίας 1Hz. Έτσι η μέση ισχύς μετρήθηκε 42nW ενώ η μέγιστη ισχύς 2.38μW χωρίς διαφορά ανάμεσα στα δύο υλικά (αρτηρία ενός χοίρου, σωλήνας Penrose).

3.1.4 Ροή του αίματος

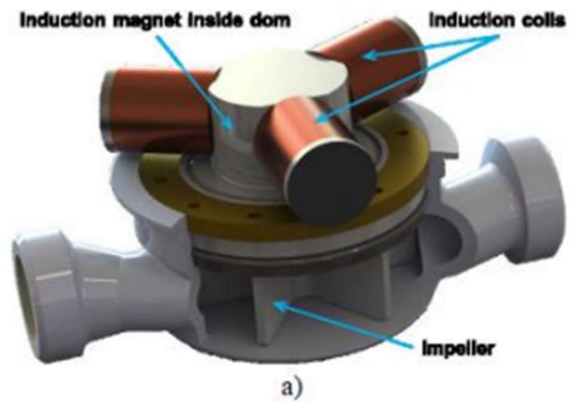
Κατά τη ροή του αίματος παράγεται κινητική ενέργεια η οποία βέβαια εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος του αγγείου που μελετάται. Για παράδειγμα η αορτή αποτελεί την κυριότερη αρτηρία του σώματος καθώς αποτελεί το σημείο από όπου ξεκινούν όλες οι αρτηρίες της μεγάλης κυκλοφορίας. Στο αγγείο αυτό η μέγιστη ταχύτητα της ροής φτάνει έως και 1,6m/s. Αν σκεφτεί κανείς ότι διαμέσου της αορτής διοχετεύεται πλούσιο σε οξυγόνο αίμα από την καρδιά σε ολόκληρο το σώμα θα συμπεράινε πως μία συσκευή συγκομιδής ενέργειας δεν θα μπορούσε ποτέ να τοποθετηθεί εκεί. Αυτό συμβαίνει καθώς η παραμικρή δυσλειτουργία της συσκευής θα προκαλούσε ανεπανόρθωτη ζημιά στον οργανισμό.

Αντιθέτως καταλληλότερα για μία τέτοια εφαρμογή είναι τα αγγεία τα οποία είναι μη ζωτικής σημασίας όπως η αριστερή και η δεξιά έσω θωρακική αρτηρία. Πιο συγκεκριμένα τα αγγεία αυτά με μόλις μήκος 20cm, διάμετρο 2 έως 3mm εμφανίζουν μέσο ρυθμό ροής 40mL/min που σημαίνει πως η ταχύτητα ροής μπορεί να φτάσει 10 έως 20cm/s. Τα αγγεία αυτά παρουσιάζουν το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό να διαμορφώνουν την διάμετρό τους ανάλογα με την εκάστοτε απαίτηση της ροής του αίματος. Επιπλέον με την χρήση μίας αρτηριοφλεβικής διακλάδωσης είναι ικανό να δημιουργηθεί ένα περιβάλλον χαμηλής ροής και υψηλής πίεσης γεγονός που θα ευνοούσε μία συσκευή συγκομιδής ενέργειας. Έτσι είναι εφικτό να δημιουργηθεί μία ενδοαγγειακή γεννήτρια ή μία γεννήτρια που θα παρεμβάλλεται στο αγγείο για την συλλογή ωφέλιμης ενέργειας, χωρία παράλληλα να επηρεάζεται το σύστημα από τη πολυπλοκότητα της βιολογικής αλληλεπίδρασης. (Αρθρογράφοι: Pfenniger, Obrist, Stahel, Koch 2013)[10]

Μελετήθηκε μία συσκευή συγκομιδής ενέργειας η οποία χρησιμοποιεί την ακτινική ροή του ρευστού με σκοπό την παραγωγή τριφασικής ενέργειας. Πιο ειδικά η συσκευή αποτελείται από έναν δακτύλιο δίπολο μαγνήτη με διαμετρική μαγνήτιση ο οποίος τοποθετείται στον άξονα ενός στροφείου. Επίσης με πηνιόσυρμα κατασκευάστηκαν τρία τυλίγματα τα οποία υλοποιούν συνδεσμολογία αστέρα, ενώ για την συγκέντρωση μαγνητικής ροής μέσα στο πηνίο χρησιμοποιούνται πυρήνες σιδήρου. Σκοπός της κατασκευής είναι η δημιουργία περιστροφικής κίνησης στο στροφείο με τον μαγνήτη καθώς το ρευστό ρέει ακτινικά πάνω της. Με τον τρόπο αυτόν δημιουργείται αντιστροφή της μαγνητικής ροής στους πυρήνες σιδήρου με αποτέλεσμα να παράγεται τριφασική τάση και ρεύμα στα πηνία. Η τάση αυτή είναι ανάλογη του ρυθμού μεταβολής της πυκνότητας της μαγνητικής ροής. Επίσης με σειριακή σύνδεση της αντίστασης φορτίου στο πηνίο επιτυγχάνεται αύξηση στην ισχύ εξόδου ως επακόλουθο της αύξησης της γωνιακής ταχύτητας του μαγνήτη. Στα παρακάτω σχήματα (3.8, 3.9) φαίνεται το διάγραμμα της συσκευής όπως και η ίδια η συσκευή. (Αρθρογράφοι: Hoffmann, Willmann, Göpfert, Becker, Folkmer, Manoli 2013)[11]



Σχήμα 3. 8 Διάγραμμα διάταξης για την συγκομιδή ενέργειας από ακτινική ροή με δίπολο (Hoffmann, Willmann, Göpfert, Becker, Folkmer, Manoli) [11]



Σχήμα 3. 9 Διάταξη για την συγκομιδή ενέργειας από ακτινική ροή με δίπολο (Hoffmann, Willmann, Göpfert, Becker, Folkmer, Manoli) [11]

3.1.5 Θερμική ενέργεια

Μία από της σημαντικότερες συσκευές θερμοηλεκτρικής συγκομιδής ενέργειας είναι οι θερμοηλεκτρογεννήτριες TEG (Thermoelectric generator). Πρόκειται για μία συσκευή η οποία εκμεταλλεύεται την διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στο σώμα και στο περιβάλλον και μέσω του φαινομένου Seebeck την μετατρέπει σε ηλεκτρική ενέργεια. Η θερμοηλεκτρική μετατροπή αυτή οφείλεται στα p-n θερμοστοιχεία (thermocouples) από τα οποία αποτελείται. Η συσκευή αυτή θα αναλυθεί περαιτέρω στο επόμενο κεφάλαιο.

Μία ενδιαφέρουσα μελέτη έγινε γύρω από την τεχνολογία αυτή και με την χρήση θερμοηλεκτρικής μετατροπής κατασκευάστηκε μία διάταξη η οποία θα μπορούσε να αξιοποιηθεί για την φόρτιση φορητών ηλεκτρονικών συστημάτων, όπως οι ιατρικοί αισθητήρες. Πιο συγκεκριμένα κατασκευάστηκε ευλύγιστος θερμοηλεκτρικός μετατροπέας ο οποίος τοποθετήθηκε σε γυάλινο ύφασμα μέσω της τεχνικής της εκτύπωσης, χωρίς υποστρώματα. Στην συνέχεια τυπώθηκαν ανόργανα υλικά στο γυάλινο ύφασμα με σκοπό η συσκευή να έχει βάρος μικρότερο από $0,13\text{g/cm}^2$ και πάχος μικρότερο από $500\mu\text{m}$. Η διάταξη αποτελούνταν από 8 θερμοστοιχεία (μεμβράνη n-type Bi_2Te_3 , μεμβράνη p-type Sb_2Te_3) ενώ παρήγαγε τάση ανοικτού κυκλώματος ίση με 90mV και ισχύ εξόδου $3,8\text{mW/cm}^2$ σε διαφορά θερμοκρασίας 50K . (Αρθρογράφοι: Kim, Hyung, Jin Cho 2014)[12]

Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε μία διάταξη με 11 θερμοστοιχεία η οποία παρήγαγε τάση $2,9\text{mV}$ ανοικτού κυκλώματος και ισχύ εξόδου $3\mu\text{W}$ σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 15°C . Βέβαια η χαμηλή αυτή τάση δημιουργεί προβλήματα ως προς την αξιοποίηση της παραγόμενης ενέργειας.

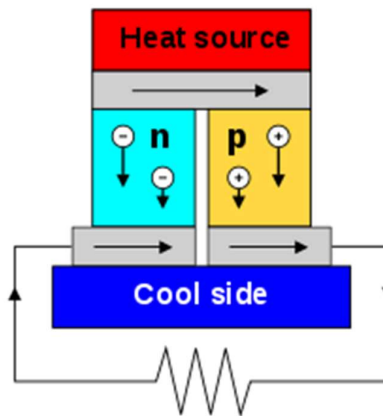


Σχήμα 3. 10 Θερμοηλεκτρικός μετατροπέας σε μορφή επίδεσμο (Kim, Hyung, Jin Cho)[12]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

4.1 Θερμική συγκομιδή ενέργειας μέσω TEG

Η διαφορά θερμοκρασίας του περιβάλλοντος μπορεί να μετατραπεί άμεσα σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω του συνδυαστικού φαινομένου Seebeck-Peltier. Πιο συγκεκριμένα η θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα σε διαφορετικά τμήματα ενός αγώγιμου υλικού φέρει ως αποτέλεσμα τη ροή ενέργειας. Η ροή ενέργειας αυτή έχει ως συνέπεια τη ροή φόρτισης, έως ότου οι φορείς που εμφανίζουν υψηλότερη ενέργεια να εκτονωθούν από τις περιοχές με υψηλότερη συγκέντρωση προς τις περιοχές με χαμηλότερη. Βέβαια οι συσκευές θερμοηλεκτρικής συγκομιδής ενέργειας για να πετύχουν την ροή ενέργειας και έπειτα την μετατροπή της συλλεγόμενης θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική αποτελούνται από θερμοστοιχεία σε ζεύγη με υλικά n-τύπου και p-τύπου συνδεδεμένα ηλεκτρικά στις υψηλής θερμοκρασίας ενώσεις, ενώ κατασκευάζονται με τέτοιον τρόπο ώστε να δημιουργούν διαφορά τάσης στα ηλεκτρόδια της βάσης. Για να επιτευχθεί στη συνέχεια η παράγωγή ικανοποιητικής τάσης και ενέργειας λειτουργίας η διαφορά θερμοκρασίας είναι ζωτικής σημασίας. Βέβαια σε ένα μικροσύστημα σπάνια επιτυγχάνονται θερμοκρασιακές διαφορές άνω των 10°C με αποτέλεσμα να παράγουν χαμηλά επίπεδα τάσης και ενέργειας.



Σχήμα 3. 11 Υλικά από τα οποία αποτελείται η θερμοηλεκτρογεννήτρια TEG(Wikipedia)[14]

Κατά τη μελέτη της θερμοηλεκτρικής συγκομιδής ενέργειας η θερμοηλεκτρική γεννήτρια TEG (Thermoelectric Generator) αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα επιτεύγματα. Το 1947 η Maria Telkes, Χημικός Βιοφυσικός και εφευρέτρια, κατασκεύασε θερμοηλεκτρική γεννήτρια η οποία εκμεταλλευόταν την ηλιακή ενέργεια, με σκοπό την μετατροπή αυτής σε ηλεκτρική και με βαθμό απόδοσης 3%. Στην συνέχεια το 1949 ο Φυσικός Abram Fedorovich Ioffe μελέτησε και ανέπτυξε μία θεωρία γύρω από τα θερμοστοιχεία η οποία χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα. Πιο συγκεκριμένα ερεύνησε σύνθετους ημιαγωγούς οι οποίοι οδήγησαν σε υλικά με βελτιωμένες θερμοηλεκτρικές ιδιότητες ενώ παράλληλα εισήγαγε την έννοια του συντελεστή κέρδους ZT στην θεωρία του θερμοηλεκτρισμού. Η έρευνά του το 1956 έδειξε πως ο λόγος της θερμικής προς την ηλεκτρική αγωγιμότητα ενός θερμοηλεκτρικού υλικού

μπορεί να μειωθεί, αρκεί να προστεθεί ένα ισόμορφο στοιχείο ή ένωση. Επιπλέον απέδειξε πως τα ημιαγώγιμα υλικά εμφανίζουν υψηλότερο θερμοηλεκτρικό συντελεστή κέρδους με πιο διάσημα υλικά το τελλουριούχο βισμούθιο (Bi_2Te_3) για θερμοκρασίες δωματίου (μέχρι 450K), ο τελλουριούχος μόλυβδος (PbTe) για θερμοκρασίες μέχρι 850K και το γερμάνιο του πυριτίου (SiGe) για θερμοκρασίες μέχρι 1300K.

Η θερμοηλεκτρογεννήτρια σαν κατασκευή αποτελείται από μια συνδεσμολογία θερμοζευγών n-τύπου και p-τύπου, που συνδέονται ηλεκτρικά σε σειρά και σε τέτοια διάταξη ώστε να γίνονται αντιληπτές οι μεταβολές θερμοκρασίας της τάξεως των 2°C . Τέτοιες θερμοκρασίες μπορούν να επιτευχθούν στο περιβάλλον μεταξύ εδάφους και αέρα, νερού και αέρα ή δέρματος και αέρα. Ένα στοιχείο p-n είναι ικανό να παράγει περίπου 0.2mV/K μεταξύ των δύο περιοχών (Θερμή και Ψυχρή). Για να παραχθούν ικανοποιητικά επίπεδα τάσης μια τυπική διάταξη θερμοηλεκτρογεννήτριας αποτελείται από πολλαπλά ζεύγη p-n τα οποία βρίσκονται προσκολλημένα μεταξύ τους σε υψηλή θερμική αγωγιμότητα. Εκτός από το γεγονός ότι συνδέονται σε σειρά εναλλάσσουν και τις επαφές που βρίσκονται στο πάνω και στο κάτω μέρος με σκοπό τη δημιουργία μίας θερμοστοίβας.

Με την παραπάνω συνδεσμολογία μία ποσότητα θερμότητας αντλείται από την μία πλευρά του ζεύγους ενώ αποβάλλεται από την άλλη, πιο ειδικά στην περίπτωση των θερμοηλεκτρογεννητριών από τη θερμή περιοχή προς την ψυχρή περιοχή. Κατά τη ροή της θερμότητας και λόγω του φαινομένου Seebeck τα υλικά n-τύπου δημιουργούν μία περίσσεια ηλεκτρονίων τα οποία κινούνται μεταξύ των δύο περιοχών με αποτέλεσμα να δημιουργούν ηλεκτρικό πεδίο. Παράλληλα με την διαδικασία αυτήν στα υλικά p-τύπου οι σπές μετακινούνται προς την ψυχρή περιοχή με αποτέλεσμα την ροή ρεύματος ίδιας διεύθυνσης με αυτήν των υλικών n-τύπου. Έτσι το ηλεκτρικό ρεύμα που δημιουργείται είναι ανάλογο της θερμικής ροής, ανάμεσα θερμών και ψυχρών επαφών. Επίσης εμφανίζουν μεγάλη αξιοπιστία ως προς την εξωτερική κατασκευή καθώς αποτελείται από σταθερά εξαρτήματα που δεν απαιτούν συντήρηση ενώ παράλληλα προσφέρουν συνεχή ροή ενέργειας κατά τη συνολική διάρκεια λειτουργίας του συστήματος. Υπάρχουν ποικίλες θερμοηλεκτρογεννήτριες με διαφορετικά χαρακτηριστικά στο εμπόριο που ανάλογα με το θερμοκρασιακό του εύρος μπορούν να παράγουν τάση από μερικά μW έως και μερικές εκατοντάδες mW ανάλογα με τις απαιτήσεις και τις προδιαγραφές του εκάστοτε κυκλώματος.



Σχήμα 3. 12 Θερμοηλεκτρογεννήτρια TEG[16]

4.2 Ανθρώπινη ενέργεια

Είτε η ενεργητική είτε η παθητική ανθρώπινη ενέργεια, όπως ο χαιρετισμός, το τράβηγμα, η πίεση και η περιστροφή είναι ικανή να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το τηλεχειριστήριο για τις τηλεοράσεις Zenith το οποίο κατασκευάστηκε από τον Robert Adler το 1956. Πρόκειται για μία κατασκευή η οποία ονομάστηκε Space Commander και αποτελούνταν από ένα πλήθος κουμπιών τα οποία βρίσκονταν τοποθετημένα σε υλικό αλουμινίου έτσι ώστε όταν χτυπούν να παράγεται ένας υπέρηχος. Οι υπέρηχοι αυτοί είχαν ως αποτέλεσμα την παραγωγή ενέργειας η οποία μάλιστα αποκωδικοποιούνταν από την τηλεόραση με αποτέλεσμα να ανοίξει/κλείσει, την αλλαγή των καναλιών όπως και την αυξομείωση του ήχου. Η κατασκευή αυτή στην συνέχεια αντικαταστάθηκε από το ενεργό τηλεχειριστήριο υπερήχων το οποίο χρησιμοποιείται σε διάφορα συστήματα ασύρματου χειρισμού.

Αν αναλογιστεί κανείς πως ένα μέσο σώμα καταναλώνει ημερησίως (κατά μέσο όρο) 10.5MJ θα συμπεράνει πως η ενέργεια που χάνεται αναλογεί περίπου σε 121W. Η ενέργεια αυτή εμφανίζεται βέβαια σε περίσσεια από τις καθημερινές, αβίαστες ανθρώπινες κινήσεις κάνοντας έτσι το ανθρώπινο σώμα μία ελκυστική πηγή ενέργειας. Έχουν διεξαχθεί διάφορες έρευνες κατά τις οποίες μελετήθηκε η αξιοποίηση της ενέργειας από το ανθρώπινο σώμα. Για παράδειγμα ερευνητές του MIT, μετά από μελέτες, κατέληξαν ότι η πιο εκμεταλλεύσιμη μορφή ενέργειας από το ανθρώπινο σώμα είναι η κινητική και πιο συγκεκριμένα αυτή που παράγεται από τα πόδια κατά τη διάρκεια του βαδίσματος ή του τρεξίματος. Σε συνδυασμό βέβαια με την ενέργεια που παράγεται υπό πίεση όπως για παράδειγμα κατά τον χτύπο του πέλματος στο έδαφος ή ακόμη και από τα χτυπήματα των τακουριών, οδήγησαν στην ανάπτυξη πιεζοηλεκτρικών εμφυτευμάτων τα οποία τοποθετούνται στο παπούτσι. Τα εμφυτεύματα αυτά είναι ικανά να παράγουν μέση ενέργεια $330\mu\text{W}/\text{cm}^2$ κατά τη διάρκεια του βαδίσματος ενός μέσου ανθρώπου. Η πρώτη εφαρμογή σύμφωνα με την παραπάνω λογική χρησιμοποιήθηκε για την τροφοδότηση ενός χαμηλής ισχύος ασύρματου αναμεταδότη ο οποίος τοποθετήθηκε στη σόλα ενός παπουτσιού.

Η παραπάνω πηγή ενέργειας θεωρείται παθητική καθώς ο άνθρωπος δεν χρειάζεται να καταβάλει προσπάθεια για την παραγωγή της ενέργειας αυτής. Πηγάει από τις καθημερινές του αναπόφευκτες δραστηριότητες όπως για παράδειγμα το βάδισμα. Ως ενεργητικές πηγές ενέργειας από το ανθρώπινο σώμα αντιθέτως, θεωρούνται εκείνες κατά τις οποίες ο άνθρωπος χρειάζεται να εκτελέσει ενέργειες οι οποίες δεν περιλαμβάνονται στις καθημερινές του ασχολίες ενώ παράλληλα απαιτούν προσπάθεια. (Αρθρογράφος: Σιώπης Ιωάννης 2014)
[15]

4.3 Απώλεια θερμότητας από το σώμα

Καθώς η παρούσα διπλωματική πραγματεύεται την συγκομιδή θερμικής ενέργειας από το σώμα, στο παρόν κεφάλαιο θα διερευνηθεί η φυσική του ανθρώπινου σώματος όσο αφορά την ενέργεια σε μορφή θερμότητας μέσω της θερμοκρασίας.

Ο άνθρωπος ανήκει στην κατηγορία των ομοιοθερμων (θερμόαιμων). Διατηρεί έτσι μία σταθερή θερμοκρασία μέσω σταθερού μεταβολισμού και μηχανισμών θερμορύθμισης, όπως επίσης και σύμφωνα με το υπάρχον κλίμα.

Η φυσιολογικές τιμές στις οποίες κινείται η θερμοκρασία του ανθρώπου κυμαίνονται σε θερμοκρασία πυρήνα 37°C (+0.5°C). Εξαρτάται βέβαια άμεσα από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, το φύλο, την ηλικία, την φυσική κατάσταση, τον ρουχισμό και τη σωματική δραστηριότητα. Για παράδειγμα μετά από έντονη σωματική άσκηση μπορεί να φτάσει και έως 40°C. Επιπλέον η θερμοκρασία του σώματος εμφανίζεται μικρότερη κατά τις πρωινές ώρες και μεγαλύτερη κατά τις απογευματινές.

Λόγω της φυσικής θερμοκρασίας αυτής, ενέργεια σε μορφή θερμότητας μπορεί να απομακρυνθεί από το ανθρώπινο σύστημα μέσω μηχανισμών όπως η εκπομπή ακτινοβολίας, η αγωγή θερμότητας, μέσω της εξάτμισης (εφίδρωση) και μέσω της αναπνοής ή της τροφής. (Αρθρογράφος: Θεόδωρος Σαμαράς 2019)[17]

4.3.1 Εκπομπή ακτινοβολίας

Κατά τη μεταφορά θερμότητας μέσω θερμικής ακτινοβολίας εννοείται πως σε κάθε επιφάνεια με πεπερασμένη θερμοκρασία είναι ικανή η εκπομπή ενέργειας υπό την μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Η διαδικασία αυτή συμβαίνει με την απουσία διαμέσου (κενό) συνθήως, με αποτέλεσμα την καθαρή μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία μεταξύ δύο επιφανειών, οι οποίες βέβαια βρίσκονται σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Επιπλέον η θερμική ακτινοβολία μπορεί να επιτευχθεί όχι μόνο από στερεά σώματα αλλά και από υγρά και αέρια. Ανεξάρτητα από την κατάσταση στην οποία βρίσκεται η ύλη, η ύπαρξη της εκπομπής ακτινοβολίας συμβαίνει λόγω αλλαγών στις τροχιές ηλεκτρονίων των ατόμων ή μορίων από τα οποία αποτελείται το υλικό. Η ενέργεια λοιπόν η οποία ακτινοβολείται μεταφέρεται μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (ή φωτονίων) και εμφανίζει μεγαλύτερη αποδοτικότητα στο κενό.[18]

$$E_r = \epsilon * A * \sigma * T^4 \quad (4.1)$$

Όπου με ϵ συμβολίζεται η σταθερά εκπομπής και κυμαίνεται ανάμεσα στις τιμές 0-1 ($0 \leq \epsilon \leq 1$), με σ συμβολίζεται η σταθερά Stefan-Boltzmann με τιμή $\sigma = 5.56 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$.



Σχήμα 3. 13 Θερμογράφημα σώματος στο οποίο φαίνεται εκπομπή ακτινοβολίας[19]

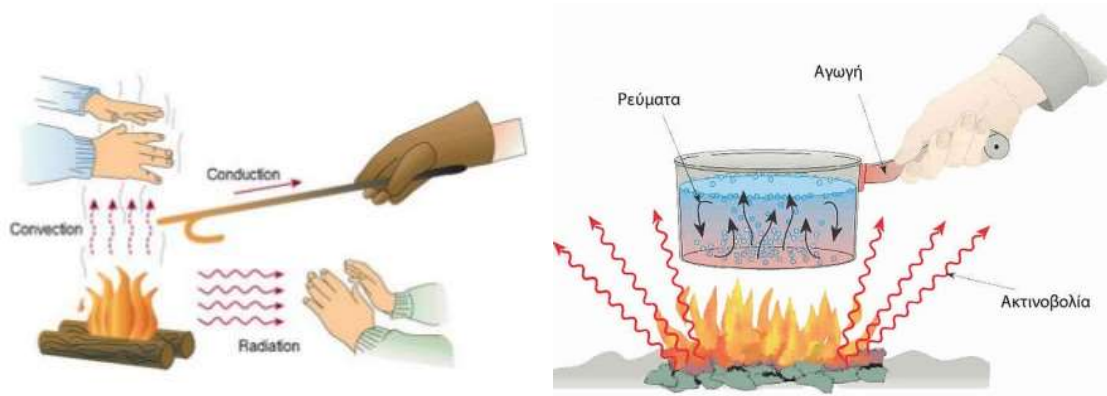
4.3.2 Αγωγή θερμότητας

Με τον όρο αγωγή εννοείται η μεταφορά θερμότητας σε ένα στάσιμο μέσον στερεό ή υγρό, στο οποίο μάλιστα υφίσταται διαφορά θερμοκρασίας. Αντιθέτως, με τον όρο επαφή ή συναγωγή εννοείται η μεταφορά θερμότητας ανάμεσα σε μία επιφάνεια και ένα κινούμενο ρευστό τα οποία βρίσκονται σε διαφορετικές θερμοκρασίες.

Κύριο χαρακτηριστικό της μετάδοσης της θερμότητας δι' αγωγής, αποτελεί η μεταφορά της ενέργειας από την περιοχή στην οποία υφίσταται υψηλή θερμοκρασία προς την περιοχή χαμηλής θερμοκρασίας. Η διαδικασία αυτή συμβαίνει μέσω της μάζας των σωμάτων και πιο συγκεκριμένα από τα μόρια και τα άτομα από τα οποία αποτελούνται. Η μεταφορά θερμότητας δι' αγωγής θεωρείται λοιπόν ως μεταφορά ενέργειας από περισσότερο ενεργητικά σε λιγότερο ενεργητικά σωματίδια ενός υλικού κατά τη διάρκεια που αλληλοεπιδρούνε μεταξύ τους. Το πόσο εύκολα θα μεταφερθεί η θερμότητα αυτή εξαρτάται κυρίως από την θερμική αγωγιμότητα του σώματος, δηλαδή εννοείται στους καλούς αγωγούς της θερμότητας όπως τα μέταλλα ενώ εμφανίζει μεγαλύτερες δυσκολίες σε υλικά όπως το πλαστικό, ο αέρας ή το ξύλο.[18]

$$H_c = K_c A_c (T_s - T_a) \quad (4.2)$$

Όπου K_c η σταθερά η οποία είναι εξαρτώμενη από την σχετική ταχύτητα του αέρα ως προς το σώμα ($K_c = 2.3 \text{ kcal/m}^2/\text{hr}/^\circ\text{C}$ σε πλήρη νηνεμία, $K_c = 10.45 - u + 10u \text{ kcal/m}^2/\text{hr}/^\circ\text{C}$ για $2 \leq u \leq 20 \text{ m/s}$ με u την ταχύτητα του ανέμου.

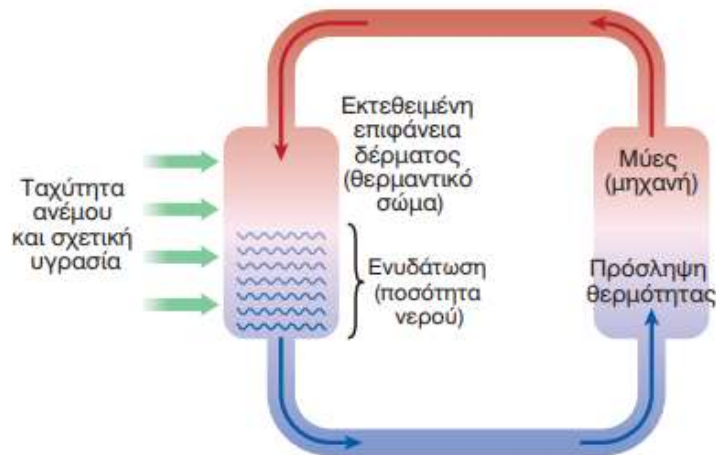


Σχήμα 3. 14-3.15 α) Αγωγή θερμότητας, β) Ακτινοβολία, γ) Ρεύματα (Σαμαράς Θεόδωρος 2019)[18]

4.3.3 Εξάτμιση (εφίδρωση)

Η εφίδρωση του ανθρώπινου οργανισμού πρόκειται για μία φυσική διεργασία την οποία βιώνει σε υψηλές θερμοκρασίες, κατά την καταπόνηση του σώματος (έντονη άσκηση) ή ακόμη και σε καταστάσεις έντονου άγχους. Η εξάτμιση όμως του ιδρώτα από την επιφάνεια του δέρματος έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια θερμότητας από την επιφάνεια του υγρού και αυτό οφείλεται στην εξαέρωση κάποιων μορίων. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την εξάτμιση του ιδρώτα, άρα κατά συνέπεια και την απώλεια θερμότητας, είναι:

- Η επιφάνεια (εμβαδόν) του δέρματος που εκτίθεται στον αέρα.
- Η σχετική υγρασία καθώς σε υψηλά επίπεδα υγρασίας συσσωρεύεται ο ιδρώτας στην επιφάνεια του δέρματος, με αποτέλεσμα να υπάρχει χαμηλή ικανότητα εξάτμισης.
- Ο ρυθμός ροής του αέρα στην επιφάνεια του σώματος.
- Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος: σε θερμές, υγρές συνθήκες η εξάτμιση αποτελεί >80% της αποβολής θερμότητας ενώ σε πολύ θερμές, ξηρές συνθήκες η εξάτμιση αποτελεί το 98%.
- Η ένταση της άσκησης.[20]



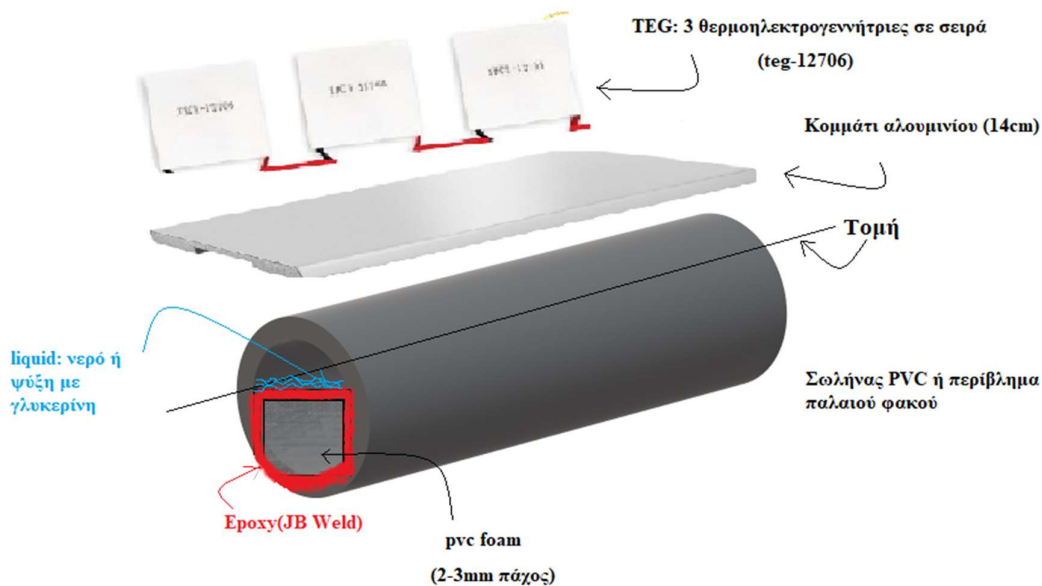
Σχήμα 3. 16 Μοντέλο αποβολής της θερμότητας μέσω της εξάτμισης του ιδρώτα (Βασίλειος Σπ. Τράνακας)[20]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5°

5.1 Σχεδιασμός (Θεωρητική κατασκευή φακού)

Αρχικός σχεδιασμός:

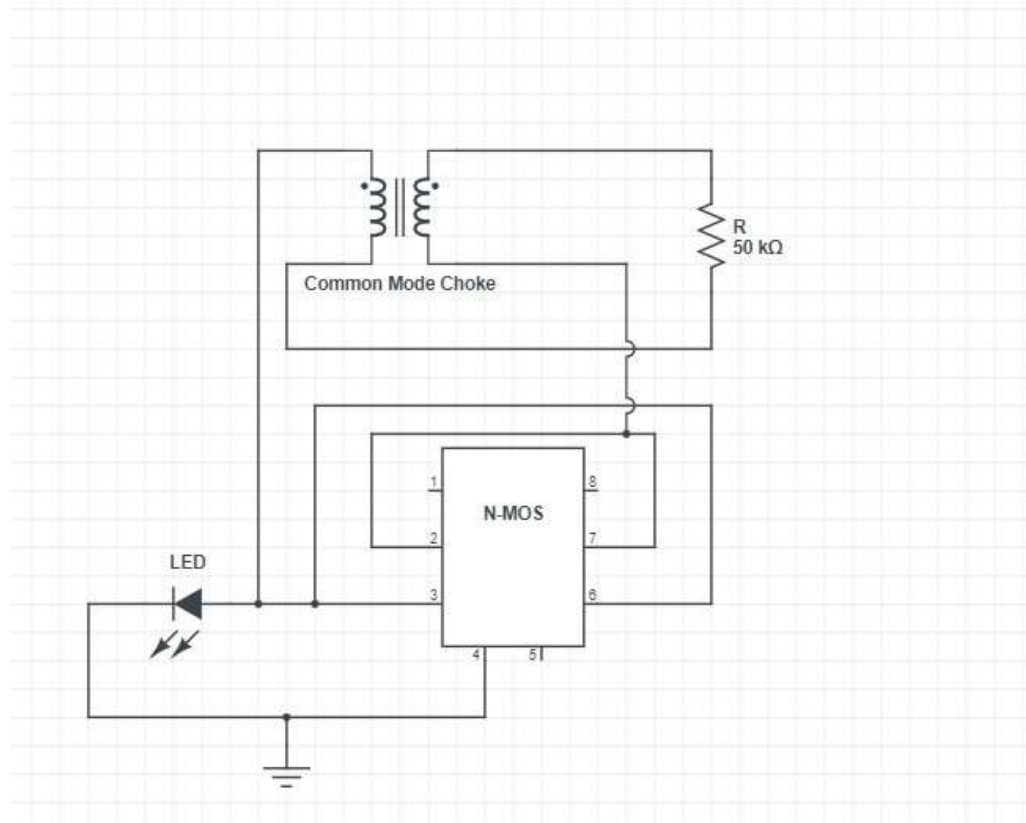
Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ο σχεδιασμός ενός φακού ο οποίος λειτουργεί απορροφώντας την θερμότητα της ανθρώπινης παλάμης. Κατά τον αρχικό σχεδιασμό το περίβλημα της κατασκευής απαρτίζεται από έναν σωλήνα PVC ή από το περίβλημα ενός παλιού φακού. Πάνω στο υλικό τοποθετείται μία πλάκα αλουμινίου όπου μπορούν να κολληθούν τρεις θερμοηλεκτρογεννήτριες (TEG) σε σειρά. Στο εσωτερικό του φακού μπορεί να τοποθετηθεί νερό για την διατήρηση της χαμηλής θερμοκρασίας της ψυχρής πλευράς της θερμοηλεκτρογεννήτριας. Στο μπροστινό μέρος τοποθετείται το κύκλωμα ενίσχυσης τάσεως με το LED, το οποίο αναλύεται παρακάτω, όπως επίσης τοποθετείται ένα κομμάτι PVC foam το οποίο μπορεί να κολληθεί με Epoxy (JB Weld) για την αποφυγή εκχώρησης του νερού στο κύκλωμα.



Σχήμα 5.1 Αρχικός σχεδιασμός θεωρητικής κατασκευής

Η αρχική ιδέα του κυκλώματος είναι απλή και απαρτίζεται από τα εξής υλικά: μία αντίσταση 50kΩ, ένα πηνίο (common mode choke), ένα τρανζίστορ τύπου N (N-MOS) και έναν λαμπτήρα (led). Το κύκλωμα βασίζεται στην αρχή λειτουργίας ενός απλού κυκλώματος Joule Thief, δηλαδή ενός αυτοταλαντωτή ενίσχυσης τάσης. Η επιλογή του κυκλώματος συμβαίνει καθώς στην παρούσα περίπτωση πρέπει να επιτευχθεί οδήγηση μικρών φορτίων.

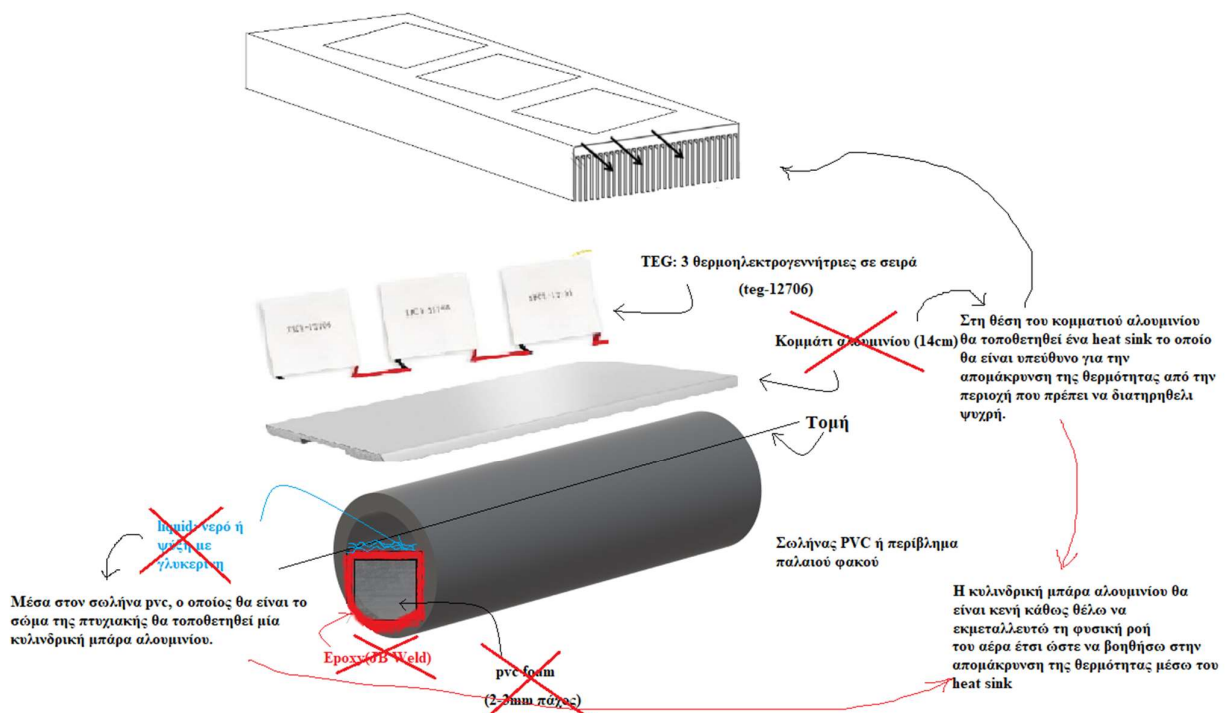
Κύκλωμα:



Εικόνα 5. 1 Κύκλωμα αρχικής θεωρητικής κατασκευής

Κατά τη βελτιωμένη σχεδίαση (σχήμα 5.3) έναντι της πλάκας αλουμινίου μπορούν να τοποθετηθούν ψήκτρες (heat sink) οι οποίες θα είναι υπεύθυνες για την απομάκρυνση της θερμότητας από την περιοχή που πρέπει να μείνει ψυχρή για την λειτουργικότητα του συστήματος. Με τον τρόπο αυτό θα αποφευχθεί και η χρήση του υγρού και κατά συνέπεια και ο κίνδυνος που θα διέτρεχε το κύκλωμα σε περίπτωση διαρροής. Συνεπώς ο κύλινδρος παραμένει κενός με αποτέλεσμα τη βοήθεια της φυσικής ροής του αέρα να βοηθά την απομάκρυνση της θερμότητας μέσω των heat sink.

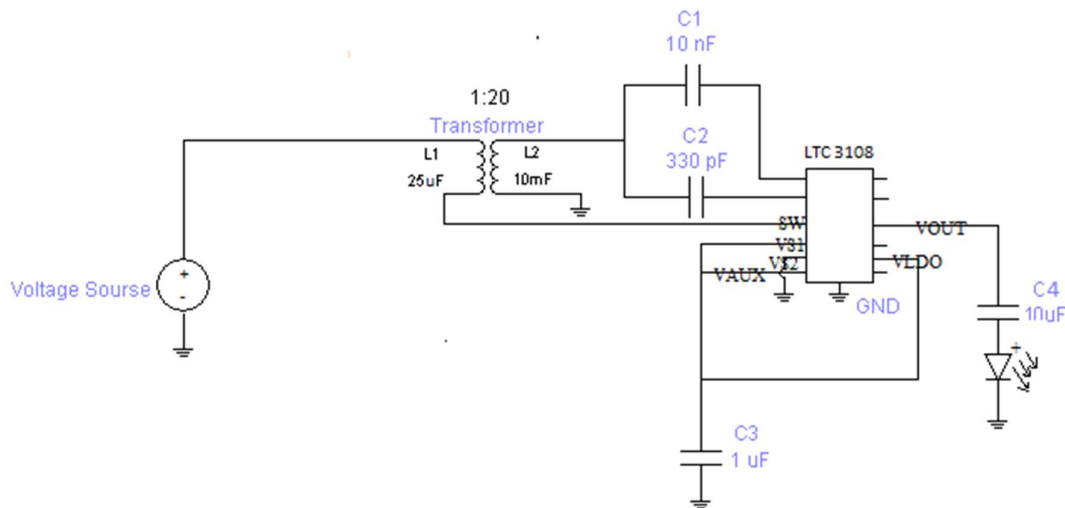
Βελτιωμένη σχεδίαση:



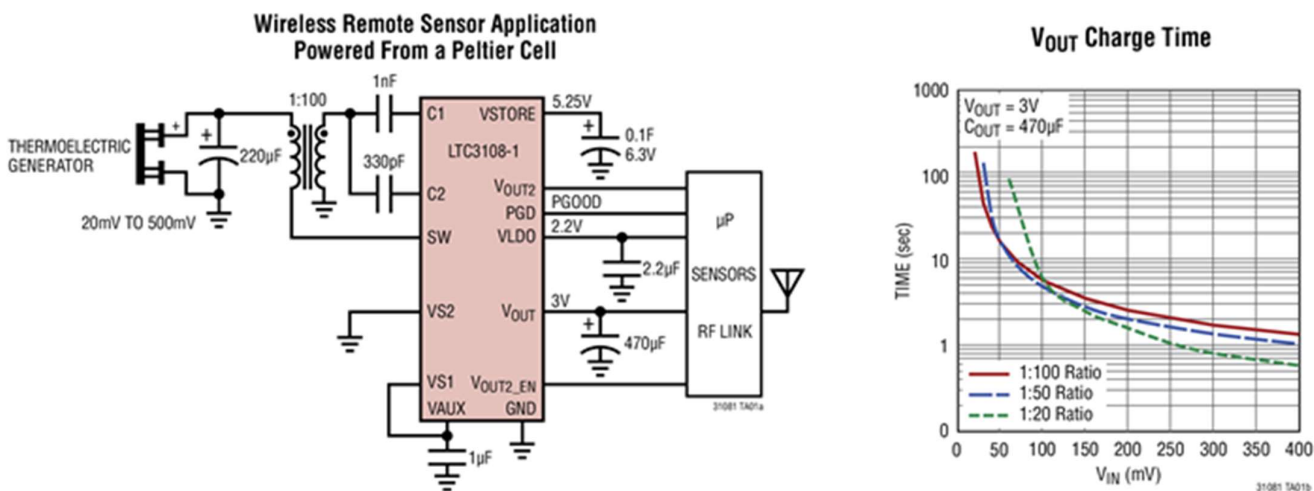
Σχήμα 5.3 Βελτιωμένη σχεδίαση θεωρητικής κατασκευής

Στο κύκλωμα της βελτιωμένης σχεδίασης (σχήμα 5.4) επιλέχθηκε το ολοκληρωμένο LTC3108ENG-1PBF, το οποίο πρόκειται για έναν μετατροπέα τάσης DC-DC, και σε συνδυασμό με ένα μετασχηματιστή 1:20 και τεσσάρων πυκνωτών είναι ικανό να προσφέρει την κατάλληλη τάση για τη λειτουργία ενός led. Το κύκλωμα αυτό είναι ικανό να δεχτεί εισόδους της τάξεως των 20mV και να παραγάγει έως και 5V. Περαιτέρω πληροφορίες για το ολοκληρωμένο LTC3108ENG-1PBF υπάρχουν στο data sheet. [22]

Νέο κύκλωμα (ενίσχυσης τάσης) :



Σχήμα 5.4 Κύκλωμα βελτιωμένης θεωρητικής κατασκευής

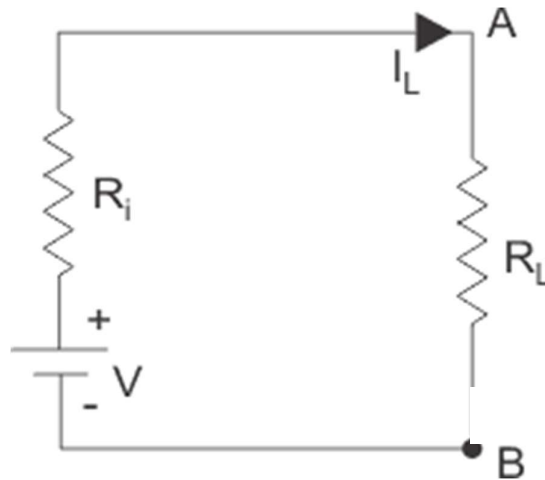


Σχήμα 5.5/6 Μπλοκ διάγραμμα LTC3108ENG-1PBF από το data sheet/
Διάγραμμα απόδοσης ολοκληρωμένου[22]

Ο σχεδιασμός της κατασκευής είναι θεωρητικός. Παρακάτω εξετάζεται πειραματικά η πραγματική ενέργεια που μπορούμε να αντλήσουμε από τη παλάμη χωρίς τη συμμετοχή κάποιου κυκλώματος, αλλά με την κατασκευή μόνο τριών θερμοηλεκτρογεννητριών σε σειρά.

5.2 Μέγιστο Θεώρημα Μεταφοράς Ισχύος

Η παρούσα θεωρητική ανάλυση θα χρησιμεύσει για την κατανόηση του πειράματος Νο3 που αναλύεται παρακάτω.



Σχήμα 5.7 Κλειστό κύκλωμα με προσθήκη εξωτερικής αντίστασης[23]

Στο σχήμα 5.7 παρουσιάζεται μια πηγή τάσης της οποίας η εσωτερική αντίσταση συμβολίζεται με R_i . Στο κύκλωμα έχει προστεθεί και μία εξωτερική αντίσταση φορτίου R_L , ενώ διαρρέεται από ρεύμα I_L . Σύμφωνα με το μέγιστο θεώρημα μεταφοράς ισχύος καθορίζεται η τιμή που θα έχει η αντίσταση R_L έτσι ώστε να μεταφέρεται η μέγιστη δυνατή ισχύς από την πηγή στην αντίσταση.

Μέγιστη μεταφορά ενέργειας (Ισχύς):

$$P = I^2 * R_L \quad (5.1)$$

$$\text{όπου } I = V / (R_i + R_L) \quad (5.2)$$

Συνεπώς από τους τύπους (13) και (14) προκύπτει:

$$[P = V^2 / (R_i + R_L)^2] * R_L \quad (5.3)$$

P: Ισχύς η οποία παρέχεται στην αντίσταση φορτίου

I: Ρεύμα

Για την διαπίστωση της μέγιστης τιμής της ισχύος αρκεί η διαφοροποίηση της έκφρασης (5.3) με μεταβλητή την αντίσταση R:

$$dP/dR_L = [V^2(R_i + R_L)^2 - 2R_L(R_i + R_L)V^2] / (R_i + R_L)^4 \quad (5.4)$$

Στην συνέχεια εξισώνοντας με το μηδέν προκύπτει η τιμή της εξωτερικής αντίστασης η οποία θα πρέπει να είναι ίση με αυτήν της εσωτερικής:

$$R_i = R_L \quad (5.5)$$

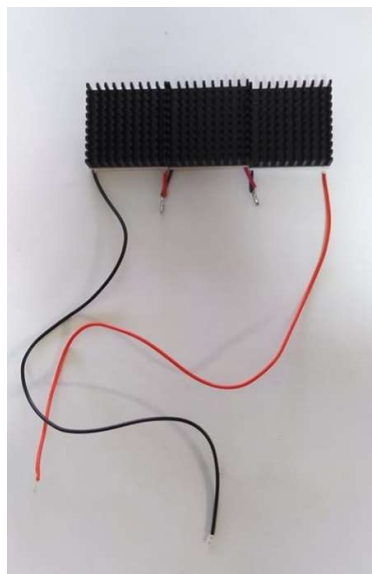
[23]

[37]

5.3 Κατασκευή με θερμοηλεκτρογεννήτριες/ Υλικά



Σχήμα 5.8 Πρόσωση κατασκευής



Σχήμα 5.9 Κάτωψη κατασκευής

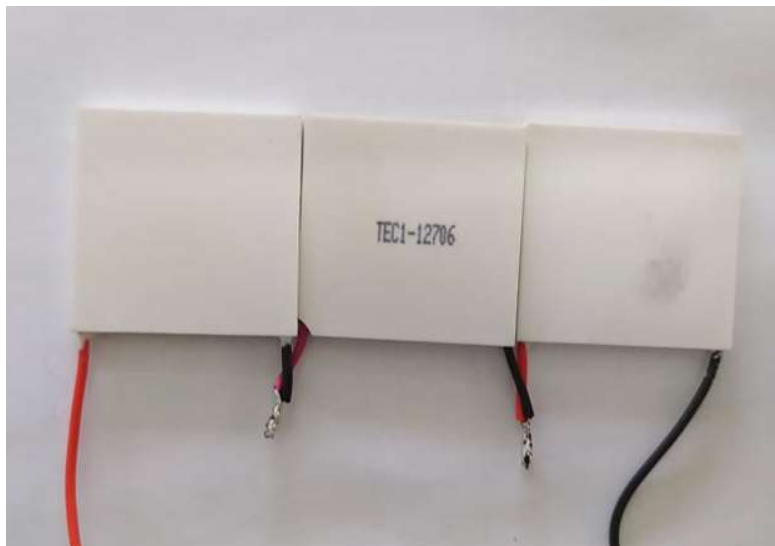
Για την παραπάνω κατασκευή συγκομιδής θερμικής ενέργειας από την ανθρώπινη παλάμη, χρησιμοποιήθηκαν τα εξής υλικά: τρεις θερμοηλεκτρογεννήτριες (TEG's), καλάνι και κολλητήρι, τρεις ψήκτρες (heat sink) διαστάσεων 40x40x10mm, θερμική πάστα, κόλλα στιγμής, θερμοσυστελόμενα.



Σχήμα 5.10 Θερμοηλεκτρογεννήτρια (TEG)

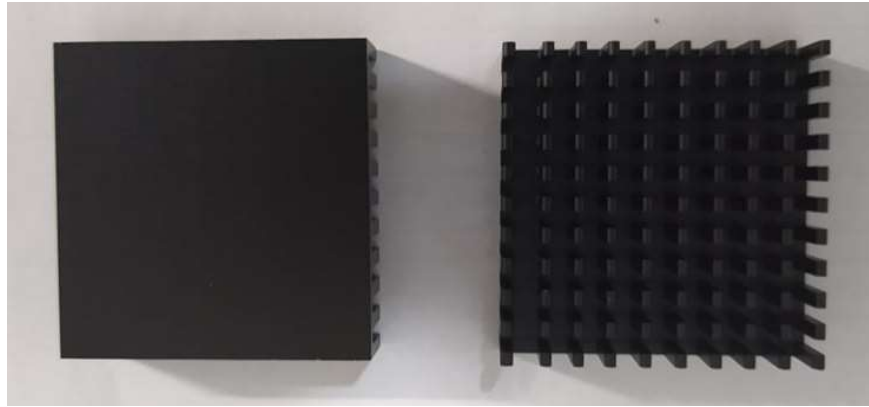


Σχήμα 5.11 Κολητήρι και καλάι



Σχήμα 5.12 Σύνδεση τριών θερμοηλεκτρογεννητριών σε σειρά

Στα παραπάνω σχήματα παρουσιάζονται οι θερμοηλεκτρογεννήτριες οι οποίες συνδέθηκαν σε σειρά με καλάι. Χρησιμοποιήθηκαν τρεις για την επίτευξη μεγαλύτερης τάσης η οποία προκύπτει από τη θερμότητα που απορροφούν από τη παλάμη.

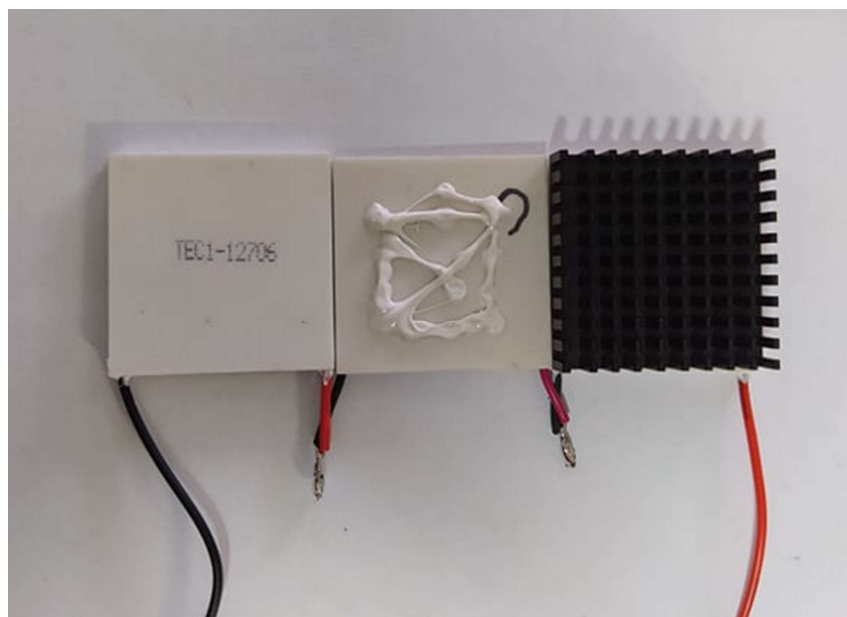


Σχήμα 5.13 Ψήκτρες (heat sink)

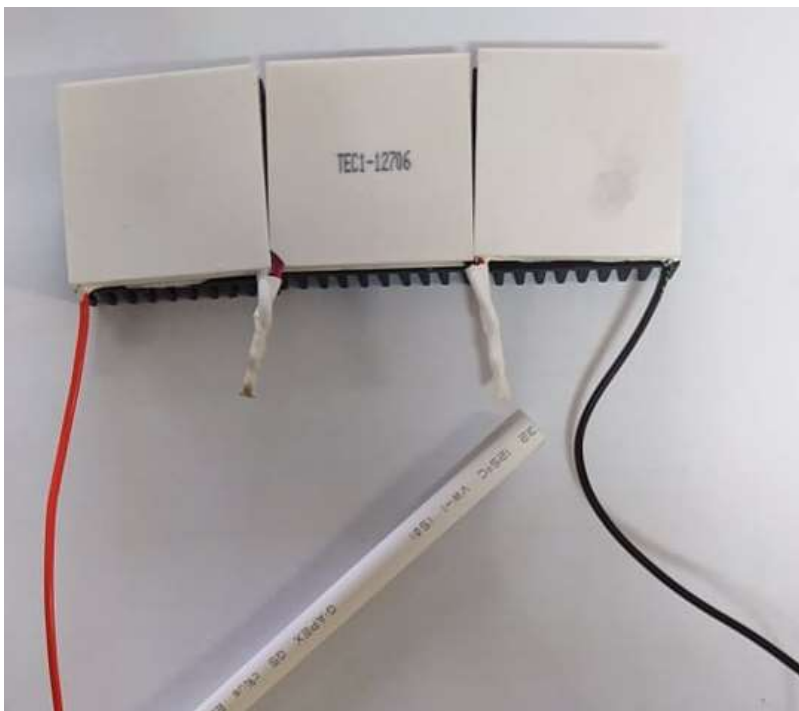


Σχήμα 5.14 Θερμική πάστα

Στην συνέχεια κάτω από κάθε TEG τοποθετήθηκε μία ψύκτρα(heat sink), διαστάσεων 40*40mm, με τη βοήθεια θερμικής πάστας ώστε να επιτευχθεί καλύτερη αγωγιμότητα μεταξύ των ψυκτρών και των θερμοηλεκτρογεννητριών. Ανάμεσα στις ψύκτρες προστέθηκε κόλλα στιγμής για τη σταθεροποίηση του συστήματος.



Σχήμα 5.15 Κόλληση θερμοηλεκτρογεννητριών με ψήκτρες με τη βοήθεια της θερμικής πάστας



Σχήμα 5.16 Τοποθέτηση θερμοσυστελλόμενων για την προστασία των καλωδίων

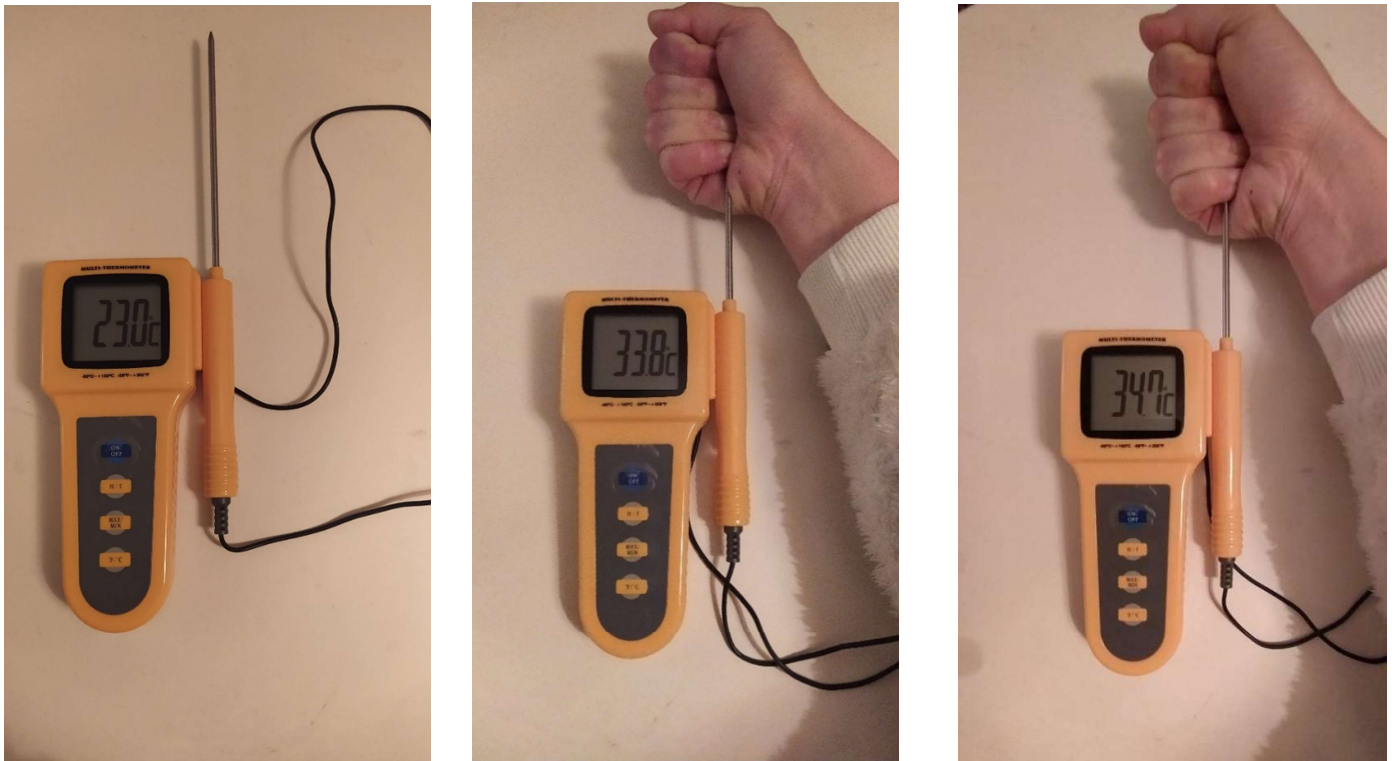
Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.16 τα καλώδια ασφαλίστηκαν με θερμοσυστελλόμενα για την αποφυγή φθορών.

5.4 Αποτελέσματα μετρήσεων σε ψηφιακό παλμογράφο

Η κατασκευή συνδέθηκε με τον ψηφιακό παλμογράφο SIGLENT SDS 1102CML+ [24], από όπου αντλήθηκαν τα διαγράμματα των παρακάτω πειραμάτων:

- Μέτρηση τάσεως ανοικτού κυκλώματος.
- Μέτρηση τάσεως ανοικτού κυκλώματος έπειτα από τριβή των χεριών.
- Μέτρηση τάσεως κλειστού κυκλώματος με την τοποθέτηση δύο αντιστάσεων παράλληλα.
- Μέτρηση τάσεως κλειστού κυκλώματος με την τοποθέτηση δύο αντιστάσεων παράλληλα έπειτα από τριβή των χεριών.

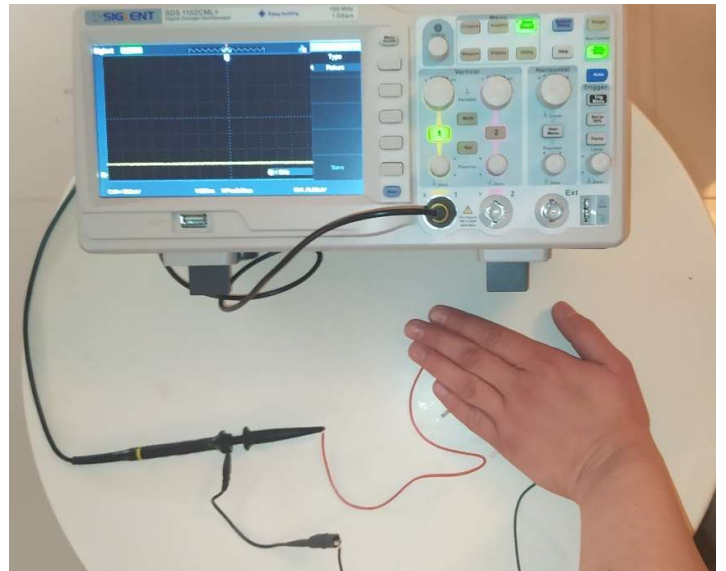
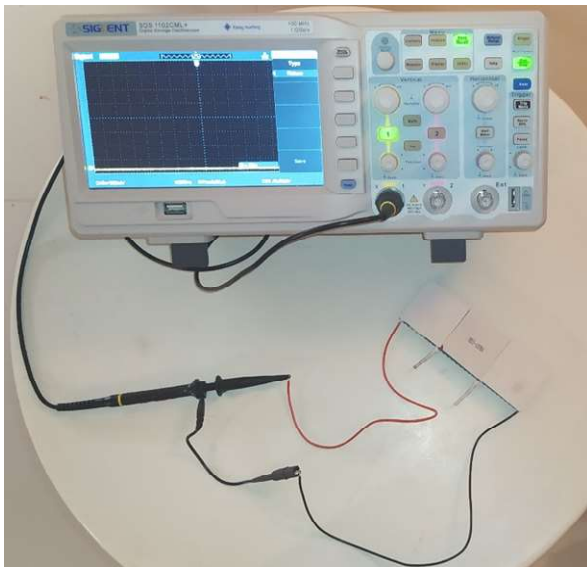
Κατά τη διάρκεια διεξαγωγής των πειραμάτων η θερμοκρασία περιβάλλοντος μετρήθηκε με το ψηφιακό θερμόμετρο ScichemTech [25], σταθερή στους 23°C. Η θερμοκρασία της παλάμης, η οποία ερχόταν σε επαφή με το σύστημα, μετρήθηκε στους 33,8°C ενώ έπειτα από την τριβή στους 34,7°C. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν με ψηφιακό θερμόμετρο όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα.



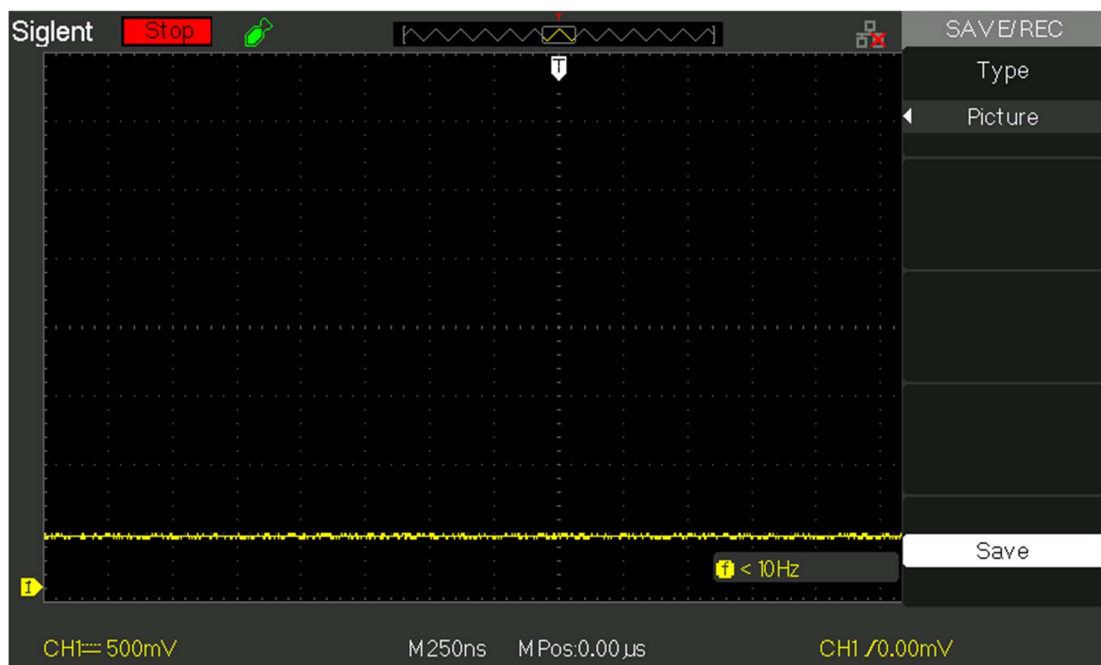
Σχήμα 5.17/18/ 19 Θερμοκρασία περιβάλλοντος/ Θερμοκρασία χειρός/ Θερμοκρασία χειρός έπειτα από τριβή

Πείραμα Νο 1: Μετρήσεις Ανοικτού Κυκλώματος

Κατά τη διεξαγωγή του πειράματος του ανοικτού κυκλώματος η παλάμη τοποθετήθηκε στο σύστημα το οποίο ξεκίνησε να συλλέγει την θερμότητα και να φορτίζεται. Ο παλμογράφος ρυθμίστηκε στα 500mV σε χρόνο 250ns ώστε να φανεί στατικά η μέγιστη τιμή της τάσης ανοικτού κυκλώματος. Μετά από χρόνο 8 sec παρατηρήθηκε η τιμή της τάσεως ίση με 500mV (0,5V) όπου και έμεινε σταθερή όπως φαίνεται στο σχήμα 5.22, όσο η παλάμη βρισκόταν σε επαφή με το σύστημα. Με την απομάκρυνση της παλάμης το σύστημα ξεκίνησε να αποφορτίζεται.



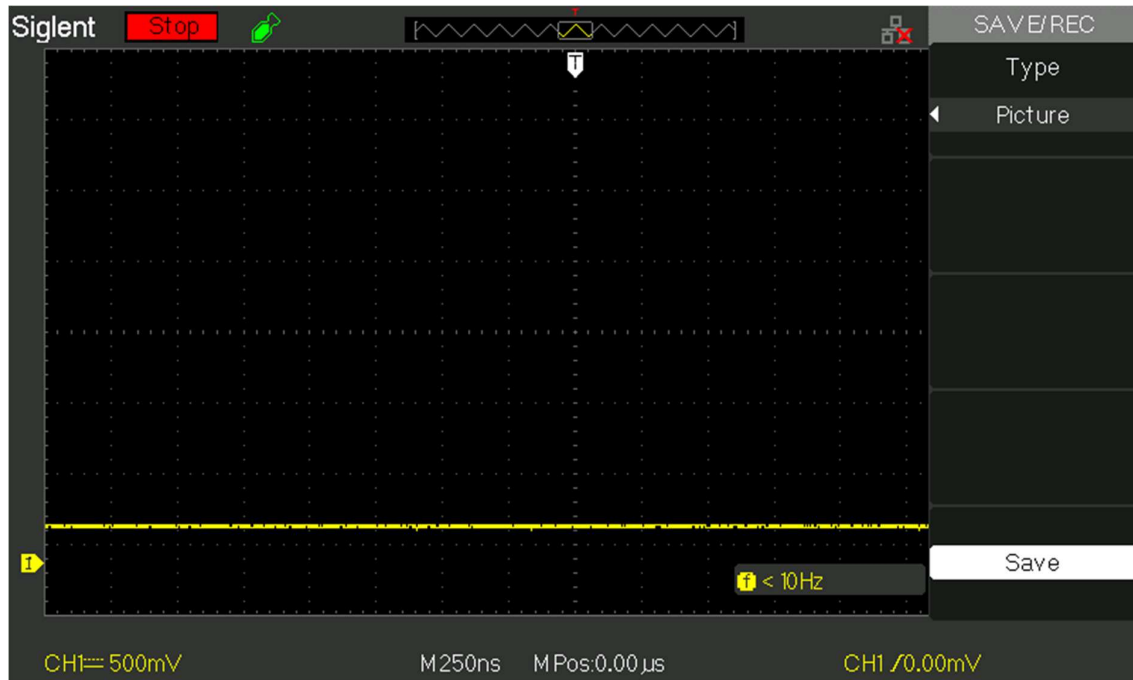
Σχήμα 5.20/21 Συνδεσμολογία ανοικτού κυκλώματος



Σχήμα 5.22 Διάγραμμα ανοικτού κυκλώματος από ψηφιακό παλμογράφο

Πείραμα Νο 2: Μετρήσεις Ανοικτού Κυκλώματος μετά από τριβή

Το πείραμα αυτό, πραγματοποιήθηκε με την ίδια συνδεσμολογία του πρώτου και με τα ίδια δεδομένα στον ψηφιακό παλμογράφο. Πριν τοποθετηθεί η παλάμη στο σύστημα, μέσω της τριβής για 10sec, επιτεύχθηκε η θερμοκρασία των $34,7^{\circ}\text{C}$, δηλαδή περίπου έναν βαθμό παραπάνω. Η αύξηση της θερμοκρασίας επέτρεψε στη συσκευή να μετατρέψει την ενέργεια αυτή σε 600mV ($0,6\text{V}$) με σταθερή φόρτιση και έπειτα από τον ίδιο χρόνο 8sec. Συνεπώς έχουμε καλύτερη απόδοση κατά 100mV με απορρόφηση θερμότητας κατά 1°C παραπάνω.

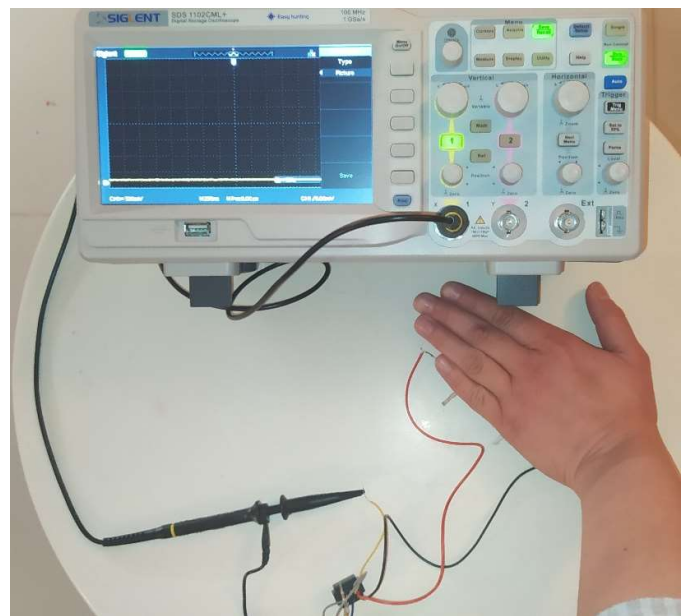
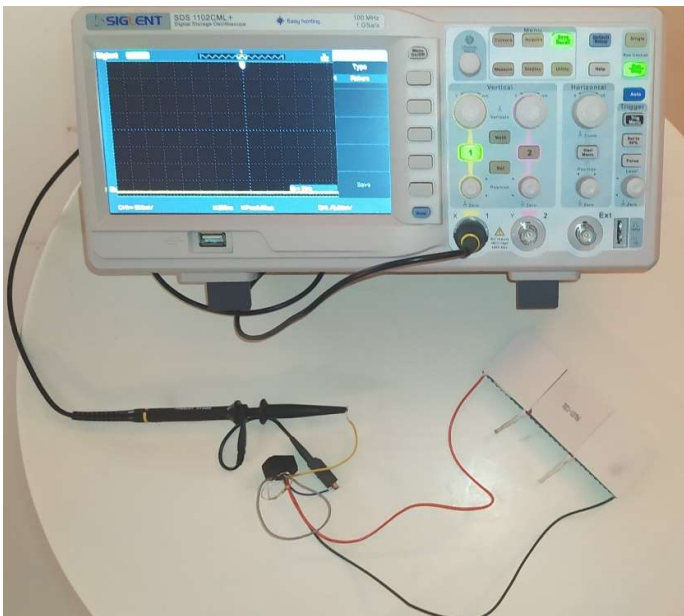


Σχήμα 5.23 Διάγραμμα ανοικτού κυκλώματος έπειτα από τριβή της παλάμης

Πείραμα Νο 3: Μετρήσεις Κλειστού Κυκλώματος – Μέγιστη Μεταφορά Ισχύος

Το παρόν πείραμα πραγματοποιήθηκε για να αποδειχτεί η μέγιστη μεταφορά ισχύος του συστήματος. Με την σύνδεση ενός φορτίου στο κύκλωμά μας, το οποίο αφού φορτιστεί με την θερμότητα της ανθρώπινης παλάμης, παράγει μία τάση στην έξοδο με αποτέλεσμα να μεταφέρεται ισχύς από το κύκλωμα στο φορτίο. Η ισχύς αυτή εξαρτάται από την εσωτερική αντίσταση των τριών θερμοηλεκτρογεννητριών σε σειρά, όπως και από την αντίσταση φορτίου που προστέθηκε εξωτερικά.

Πιο συγκεκριμένα δοκιμάστηκαν διάφορες τιμές αντιστάσεων ώστε να πραγματοποιηθεί η μέγιστη μεταφορά ισχύος, όπου πρέπει η τιμή της εσωτερικής αντίστασης του συστήματος να ισούται με αυτήν που τοποθετήθηκε εξωτερικά ($R=r$). Μετά από πειραματικό προσδιορισμό της εσωτερικής αντίστασης, δοκιμάζοντας ένα εύρος τιμών αντίστασης φορτίου και εντοπίζοντας την τιμή για την οποία η τάση εξόδου είναι ίση με την μισή τάση ανοικτού κυκλώματος, χρησιμοποιήθηκαν δύο αντιστάσεις 10Ω παράλληλα ώστε να επιτευχθεί η τιμή των 5Ω και να ικανοποιείται η παραπάνω προϋπόθεση.

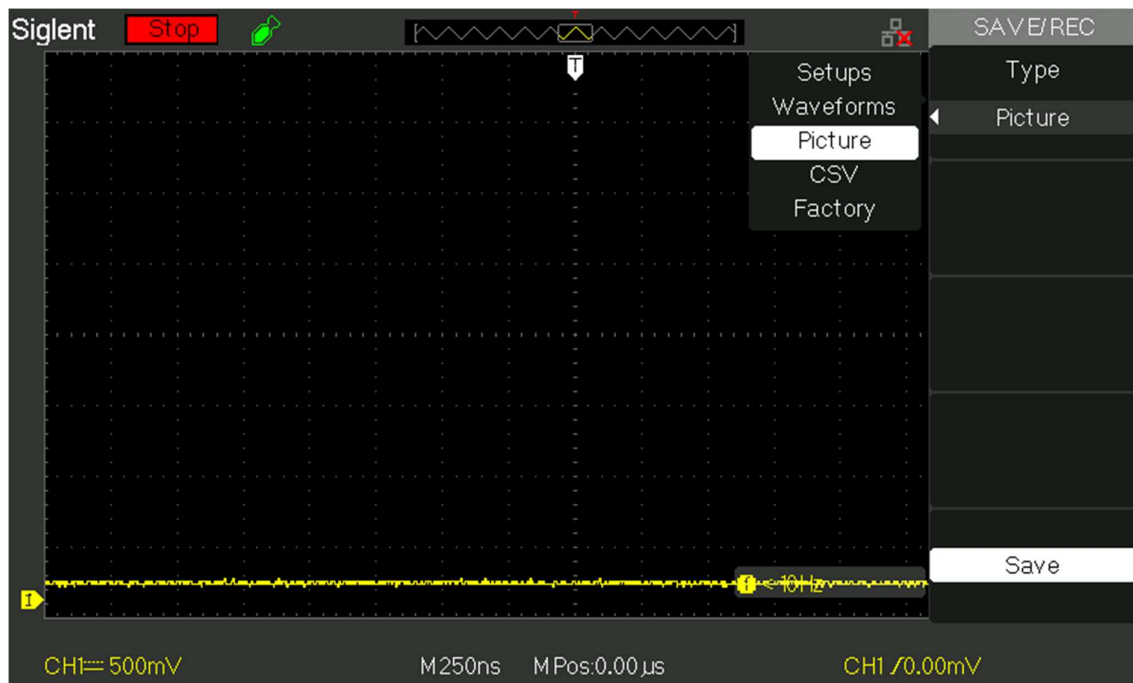


Σχήμα 5.24/ 25 Συνδεσμολογία κλειστού κυκλώματος

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων στον ψηφιακό παλμογράφο φαίνονται στο σχήμα 5.22. Πιο συγκεκριμένα τοποθετήθηκε σε σειρά με τη κατασκευή των θερμοηλεκτρογεννητριών δύο αντιστάσεις των 10Ω, παράλληλα μεταξύ τους για να επιτευχθεί τιμή αντίστασης 5Ω και να επιτευχθεί η μέγιστη μεταφορά ισχύος του συστήματος. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα η τιμή της τάσης έχει υποδιπλασιαστεί από τα 500mV(0,5V) του ανοικτού κυκλώματος σε 250mV(0,25V) κλειστού κυκλώματος. Συνεπώς η ισχύς μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο:

$$P = V_{cc}^2 / 2 \quad (5.6)$$

Η τιμή της ισχύς του κλειστού κυκλώματος ισούται με 31.250mW(0,03125W).

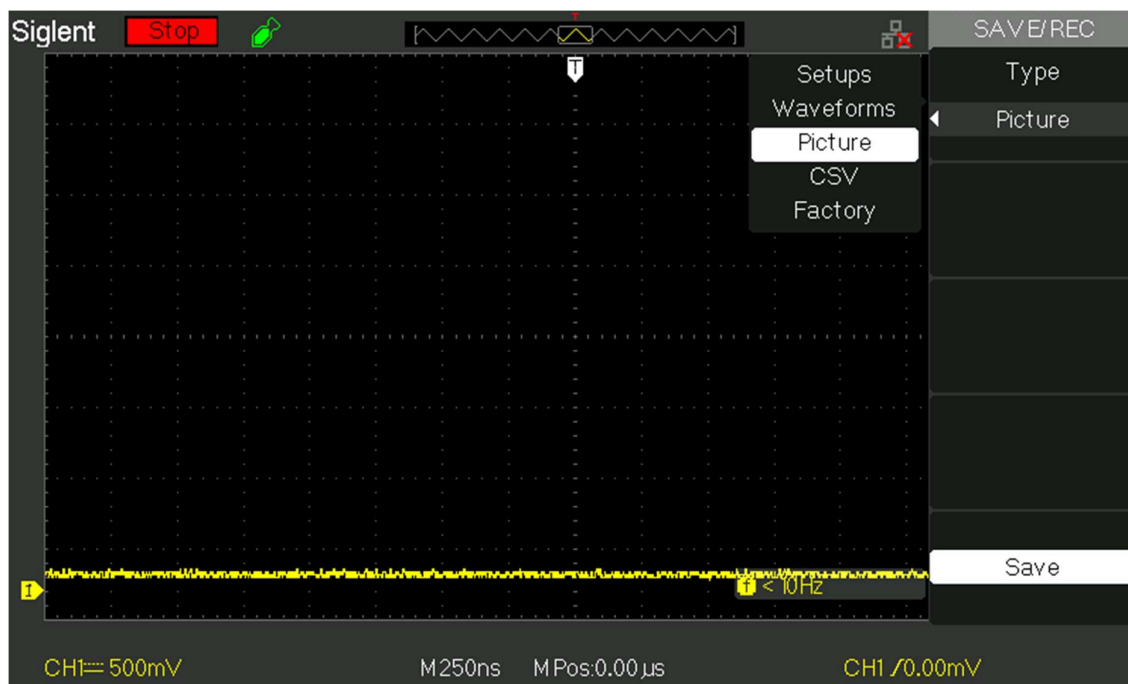


Σχήμα 5.22 Διάγραμμα κλειστού κυκλώματος

Τα αποτελέσματα αυτά ήταν αναμενόμενα όπως φαίνεται και στην θεωρητική ανάλυση της μέγιστης μεταφοράς ισχύος η οποία προηγήθηκε στο κεφάλαιο 5.2.

Πείραμα Νο 4: Μετρήσεις Κλειστού Κυκλώματος μετά από τριβή

Στο πείραμα αυτό χρησιμοποιήθηκε η συνδεσμολογία του πειράματος Νο3 και με ίδια παραμετροποίηση στον ψηφιακό παλμογράφο. Η διαδικασία με την οποία διεξάχθηκε είναι η ίδια με αυτήν του πειράματος Νο2, δηλαδή πριν την επαφή με το σύστημα η παλάμη ήρθε σε τριβή(10sec) με αποτέλεσμα μιας μικρής αύξησης της τάσεως από 250mV(0,25V) σε 300mV(0,3V) όπως φαίνεται και στο διάγραμμα που ακολουθεί.



Σχήμα 5.23 Διάγραμμα κλειστού κυκλώματος έπειτα από τριβή της παλάμης

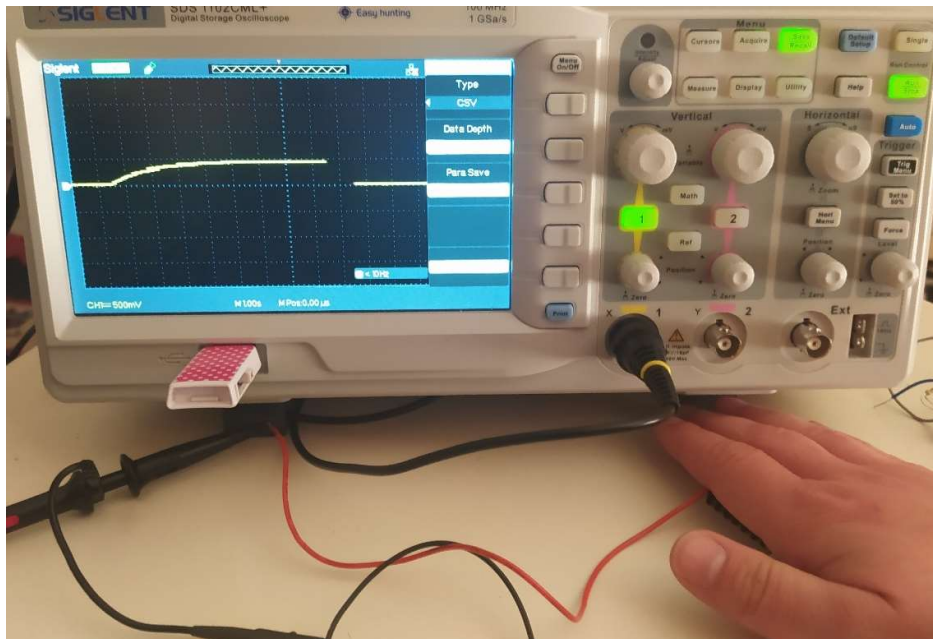
Η αύξηση της τάσης μπορεί να φαίνεται αμελητέα. Παρ'όλα αυτά γίνεται αντιληπτό πως οι θερμοηλεκτρογεννήτριες απορρόφησαν ακόμη και αυτό τη μικρή ποσότητα θερμότητας, ώστε να το μετατρέψουν σε ωφέλιμη τάση.

Θερμοκρασία παλάμης T(°C)	Αντίσταση $R_i=R_L(\Omega)$	Τάση (V)	Ισχύς (W)
33,8	5	0,25	0,03125
34,7	5	0,3	0,045

Σχήμα 5.24 Πίνακας αποτελεσμάτων τάσης/ισχύς πειραμάτων κλειστού κυκλώματος

Πείραμα Νο5: Διάγραμμα αύξησης τάσεως ανοικτού κυκλώματος

Στο παρακάτω πείραμα διεξάχθηκε η διαδικασία μέτρησης χρόνου 8sec, στο ανοικτό κύκλωμα του πειράματος Νο1, για την κατανόηση φόρτισης του συστήματος. Η θερμοκρασία της παλάμης μετρήθηκε με το ψηφιακό θερμόμετρο 32,3°C, με αποτέλεσμα η τάση του συστήματος να μειωθεί στα 400mV(0,4V) όπως φαίνεται και στο διάγραμμα του σχήματος 5.26. Πιο συγκεκριμένα τα δεδομένα αντλήθηκαν από τον ψηφιακό παλμογράφο σε μορφή αρχείου CSV (Comma Separated Values), δηλαδή σε μορφή πίνακα. Επίσης ο παλμογράφος ρυθμίστηκε στα 500mV σε χρόνο 1sec όπως φαίνεται στο σχήμα 5.25. Το χέρι ήρθε σε επαφή με το σύστημα μετά από 1sec από την έναρξη τις διαδικασίας της μέτρησης. Τότε το σύστημα άρχισε να απορροφά την θερμική ενέργεια της παλάμης και να την μετατρέπει σε τάση.



Σχήμα 5.25 Πειραματική διαδικασία φόρτισης ανοικτού κυκλώματος



Σχήμα 5.26 Διάγραμμα αύξησης τάσεως ανοικτού κυκλώματος

Παρατηρήσεις/Συμπεράσματα:

- Το σύστημα σε κάθε περίπτωση φορτιζόταν ταχύτερα από ότι αποφορτιζόταν.
- Η μέγιστη τάση που επιτεύχθηκε ήταν αυτή του πειράματος Νο1 500mV ανοικτού κυκλώματος.
- Η διάταξη όσο μεγαλύτερη θερμοκρασία δεχόταν τόσο καλύτερα απέδιδε.
- Η εσωτερική αντίσταση του συστήματος ισούται με 5Ω.
- Καμία από τις περιπτώσεις των πειραμάτων δεν μπορούσε να ικανοποιήσει την τροφοδότηση ενός LED αυτόνομα καθώς ένα απλό LED απαιτεί τουλάχιστον 0,8V τροφοδοσίας.
- Σε συνεργασία με τα κυκλώματα που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 5 θα μπορούσε να επιτευχθεί η τροφοδότηση ενός LED.

Βιβλιογραφία:

- [1] Παπαχρήστου Αλέξανδρος: Συγκομιδή θερμοηλεκτρικής ενέργειας
<http://ikee.lib.auth.gr/record/291359/files/PapachristouA.pdf>
- [2] Θεόδωρος Μ. Γιαννάκης: Ανάπτυξη και χαρακτηριστικά υλικών για θερμοηλεκτρικές εφαρμογές http://innoenergy.env.upatras.gr/wp-content/uploads/2020/03/thesis-thermoelectric_materials-giannakis.pdf
- [3] Raziel Riemer, Amir Shapiro: Biomechanical energy harvesting from human motion: theory, state of the art, design guidelines, and future directions
<https://jneuroengrehab.biomedcentral.com/articles/10.1186/1743-0003-8-22>
- [4] Qingguo Li, Veronica Naing, J Maxwell Donelan: Development of a biomechanical energy harvester <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19549313/>
- [5] Nathan S. Shenck & Joseph A. Paradiso: Energy Scavenging with Shoe-mounted Piezoelectrics <https://resenv.media.mit.edu/pubs/papers/2001-Shenck-Paradiso.pdf>
- [6] Δομή και τοπογραφία της καρδιάς. Όρια της καρδιάς. Ανατομία
<https://el.erch2014.com/zdorove/119444-stroenie-i-topografiya-serdca-granicy-serdca-anatomiya.html>
- [7] A. Zurbuchen, A. Pfenniger, A. Stahel, C. T. Stoeck, S. Vandenberghe, V. M. Koch, Rolf Vogel: Energy Harvesting from the Beating Heart by a Mass Imbalance Oscillation Generator
<https://core.ac.uk/download/pdf/33044265.pdf>
- [8] Alois Pfenniger, Magnus Jonsson, Adrian Zurbuchen, Volker M Koch, Rolf Vogel: Energy Harvesting From The Cardiovascular System, Or How To Get A Little Help From Yourself. Annals of Biomedical Engineering
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23949656/>
- [9] Ζησίμου Αριστοτέλης: Μαθήματα Φυσικής <https://zhsimoy.sites.sch.gr/>
- [10] Pfenniger, Jonsson, Zurbuchein, Koch, Artorg: Design and realization of an energy harvester using pulsating arterial pressure <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23414917/>
- [12] Kim, Hyung, Jin Cho: A wearable thermoelectric generator fabricated on a glass fabric
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2014/ee/c4ee00242c>
- [13] Γιώργος Βαρνάβα: Ενεργειακή κατανάλωση εμφυτεύσιμων ιατρικών διατάξεων και συγκομιδή ενέργειας από το καρδιαγγειακό σύστημα
<https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/43271/Varnava2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- [14] Wikipedia: Thermoelectric Generator
https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric_generator
- [15] Σιώπης Ιωάννης: Συγκομιδή θερμοηλεκτρικής ενέργειας από το περιβάλλον
http://ikee.lib.auth.gr/record/291796/files/siopis_ioannis_tegs.pdf
- [16] Θερμοηλεκτογεννήτρια <https://thermal.ferrotec.com/products/peltier-thermoelectric-cooler-modules/longlife/>
- [17] Σαμαράς Θεόδωρος: Physics of The Human Body
<https://www.scribd.com/document/402892122/Physics-of-the-Human-Body-pdf>
- [18] Χατζηαθανασίου Βασίλειος, Καδή Στυλιανή: Μετάδοση Θερμότητας με ακτινοβολία
<https://docplayer.gr/47809652-Metadosi-thermotitas-enotita-7.html>
- [19]Ellas-Cookies: Η θερμορύθμιση και ο μεταβολισμός <https://el.ellas-cookies.com/obrazovanie/82083-termoregulyaciya-eto-termoregulyaciya-i-obmen-veschestv.html>
- [20] Βασίλειος Σπ. Τράνακας: Θερμορύθμιση και άσκηση <https://docplayer.gr/50864863-Athlitiki-diatrofi-anaplirosi-ygron-thermorythmisi-vasileios-sp-tranakas-msc.html>
- [21] Στρατογιαννάκος Κωνσταντίνος: Χρήση μικροσυσκευών για την μάζευση ενέργειας
<https://docplayer.gr/31030381-Hrisi-mikrosyskeyon-gia-tin-masteysi-energeias.html>
- [22] Data sheet: Ολοκληρωμένο LTC3108ENG-1PBF
<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/LTC3108.pdf>
- [23] Θεώρημα μέγιστης μεταφοράς ισχύος
<https://riverglennapts.com/el/circuit-theorem/188-maximum-power-transfer-theorem.html>
- [24] Digital Oscilloscope SIGLENT SDS 1102CML+
<https://f00.psgsm.net/p/868901/Siglent-SDS1000DLplus-CMLplus-datasheet.pdf>
- [25] ScichemTech SCT-STAR LCD Digital Multi - Thermometer - SCT-108.002.60
<https://www.jjstech.com/sct-108-002-60.html>