



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ ΣΥΓΚΟΜΙΔΗΣ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΥΣΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ENERGY HARVESTING)**

Καρέλης Αθανάσιος

Επιβλέπων: Δουμένης Γρηγόριος

Επίκουρος Καθηγητής

Άρτα, Σεπτέμβριος, 2025

**PERFORMANCE METRICS IN ENERGY HARVESTING
CIRCUITS THROUGH ENVIRONMENTAL SOURCES
(ENERGY HARVESTING)**

Εγκρίθηκε από τριμελή εξεταστική επιτροπή

Άρτα, 3 Σεπτεμβρίου 2025

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

1. Επιβλέπων καθηγητής

Δουμένης Γρηγόριος

2. Μέλος επιτροπής

Τζάλλας Αλέξανδρος

3. Μέλος επιτροπής

Γιαννακέας Νικόλαος

© Καρέλης, Αθανάσιος, 2025.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Δήλωση μη λογοκλοπής

Δηλώνω υπεύθυνα και γνωρίζοντας τις κυρώσεις του Ν. 2121/1993 περί Πνευματικής Ιδιοκτησίας, ότι η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία είναι εξ ολοκλήρου αποτέλεσμα δικής μου ερευνητικής εργασίας, δεν αποτελεί προϊόν αντιγραφής ούτε προέρχεται από ανάθεση σε τρίτους. Όλες οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν (κάθε είδους, μορφής και προέλευσης) για τη συγγραφή της περιλαμβάνονται στη βιβλιογραφία.

Καρέλης, Αθανάσιος

Υπογραφή

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Γρηγόριο Δουμένη, για την καθοδήγηση που μου προσέφερε και το χρόνο που διέθεσε δίνοντάς μου χρήσιμες συμβουλές και οδηγίες για την ολοκλήρωση της πτυχιακής μου εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους συναδέλφους μου τόσο από το εργαστήριο ASL όσο και από τα άλλα εργαστήρια της σχολής, για την συνεργασία που είχαμε, η οποία συνέβαλε καθοριστικά στην ολοκλήρωση του project μας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω από τα βάθη της καρδιάς μου, την οικογένειά μου για την ανεκτίμητη στήριξή τους, την υπομονή τους τόσο στην παρούσα εργασία, όσο και στην ολοκλήρωση των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματεύεται την αξιολόγηση τριών κυκλωμάτων συγκομιδής περιβάλλουσας ενέργειας αλλά και του συνολικού κυκλώματος βάση μετρήσεων που πραγματοποιήσαμε στο εργαστήριο Αυτόνομων Συστημάτων του τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων. Η εργασία εντάσσεται στα ευρύτερα πλαίσια των ερευνητικών στόχων του τμήματος. Στην πτυχιακή θα αναφερθούμε στο τι ονομάζεται περιβάλλουσα ενέργεια και πως επιτυγχάνεται η μετατροπή από την εκάστοτε πηγή σε ηλεκτρική ενέργεια. Γίνεται αναφορά σε εφαρμογές και λοιπές χρήσεις, καθώς και στην σπουδαιότητα που έχει. Παρουσιάζονται τόσο το συνολικό σύστημα όσο και τα κυκλώματα μεμονωμένα. Ακολούθως παραθέτονται το πως λάβαμε τις μετρήσεις και πως αυτές μας οδήγησαν στην τελική αξιολόγηση της απόδοσης τους.

Πιο συγκεκριμένα, στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάζεται η έννοια της περιβάλλουσας ενέργειας, η σημασία και οι εφαρμογές της, καθώς και οι στόχοι της έρευνας. Στο Κεφάλαιο 2 αναλύονται οι βασικές πηγές περιβάλλουσας ενέργειας – μηχανική, ακτινοβολούμενη και θερμική – μαζί με τις υποκατηγορίες τους, τα χαρακτηριστικά απόδοσης και τις μεθόδους μετατροπής και αποθήκευσης. Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται τα κυκλώματα συγκομιδής ενέργειας, οι αρχές λειτουργίας, η ιστορική εξέλιξη, οι τεχνολογίες αποθήκευσης, οι βασικές κατηγορίες κυκλωμάτων (φωτοβολταϊκά, πιεζοηλεκτρικά, θερμοηλεκτρικά, RF) και οι εφαρμογές τους, καθώς και η υβριδική συγκομιδή. Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφεται η μεθοδολογία των μετρήσεων απόδοσης, ο σχεδιασμός και η υλοποίηση της πειραματικής διαδικασίας, οι προδιαγραφές και τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και η ανάλυση των δεδομένων για κάθε κύκλωμα. Τέλος, στο Κεφάλαιο 5 παρατίθενται τα συμπεράσματα της έρευνας και προτάσεις για μελλοντικές βελτιώσεις, όπως η χρήση μεγαλύτερου board, περισσότερων harvesters και επιπλέον μονάδων ελέγχου και επικοινωνίας

Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι η απόδοση των επιμέρους κυκλωμάτων βρίσκεται κοντά στις τιμές που παρέχονται από τους κατασκευαστές, με τη συνολική απόδοση του υβριδικού συστήματος να φθάνει το 66%, ποσοστό που θεωρείται αποδεκτό για την κατηγορία του.

Λέξεις-κλειδιά: Συλλογή περιβάλλουσας ενέργειας, energy harvesting, μετατροπή ενέργειας, απόδοση συστήματος.

ABSTRACT

This undergraduate thesis focuses on the evaluation of three ambient energy harvesting circuits, as well as the overall circuit, based on measurements carried out in the Autonomous Systems Laboratory of the Department of Informatics and Telecommunications Engineering at the University of Ioannina. The work is part of the department's broader research objectives. The thesis discusses the concept of ambient energy and how it is converted from each source into electrical energy. Reference is made to applications and other uses, as well as to its significance. Both the complete system and the individual circuits are presented. The methodology used to obtain the measurements is described, along with how these results led to the final performance evaluation.

More specifically, Chapter 1 presents the concept of ambient energy, its importance and applications, as well as the research objectives. Chapter 2 analyzes the main sources of ambient energy – mechanical, radiative, and thermal – along with their subcategories, performance characteristics, and methods of conversion and storage. Chapter 3 presents energy harvesting circuits, their operating principles, historical background, storage technologies, main circuit categories (photovoltaic, piezoelectric, thermoelectric, RF), and their applications, as well as hybrid energy harvesting. Chapter 4 describes the performance measurement methodology, the design and implementation of the experimental procedure, the specifications and tools used, and the analysis of the data for each circuit. Finally, Chapter 5 presents the research conclusions and proposals for future improvements, such as the use of a larger board, additional harvesters, and extra control and communication units.

The experimental results indicate that the performance of the individual circuits is close to the values provided by the manufacturers, with the overall efficiency of the hybrid system reaching 66%, a percentage considered acceptable for its category.

Keywords: Efficiency, energy harvesting, conversion progress, performance evaluation.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	6
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	7
ABSTRACT	9
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	11
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	14
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	15
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	16
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ.....	17
ΑΠΟΔΟΣΗ ΟΡΩΝ / ΓΛΩΣΣΑΡΙΟ.....	18
1 Εισαγωγή	19
1.1 Σημασία και εφαρμογές της συγκομιδής ενέργειας στον τομέα της περιβαλλοντικής ενέργειας	19
1.2 Σκοπός και στόχοι της εργασίας	19
2 Πηγές περιβάλλουσας ενέργειας	20
2.1 Μηχανική ενέργεια	21
2.1.1 Δονήσεις	23
2.1.2 Αιολική ενέργεια	23
2.1.3 Τριβή.....	24
2.1.4 Κυματική ενέργεια	24
2.1.5 Ανθρωπογενής	24
2.2 Ακτινοβολούμενη ενέργεια.....	25
2.2.1 Φωτονική ενέργεια	25
2.2.2 Ραδιοσυχνότητα (RF)	26
2.3 Θερμική ενέργεια.....	26
2.3.1 Θερμική ενέργεια από βιομηχανικές διεργασίες	27
2.3.2 Θερμική ενέργεια από το περιβάλλον	28

2.3.3	Αξιοποίηση θερμικής ενέργειας του ανθρώπινου σώματος.....	28
2.4	Συγκριτική αποτίμηση απόδοσης διαφορετικών πηγών ενέργειας.....	29
2.5	Μετατροπή και αποθήκευση ενέργειας	30
3	Κυκλώματα συγκομιδής ενέργειας.....	35
3.1	Αρχές λειτουργίας κυκλωμάτων συγκομιδής	35
3.2	Ιστορική αναδρομή	35
3.3	Τεχνολογία πυκνωτών και μπαταριών.....	37
3.4	Κατηγορίες κυκλωμάτων συγκομιδής ενέργειας.....	39
3.4.1	Φωτοβολταϊκά κυκλώματα.....	40
3.4.2	Πιεζοηλεκτρικά κυκλώματα.....	42
3.4.3	Ασύρματη μεταφορά ενέργειας	42
3.4.4	Θερμικά κυκλώματα συγκομιδής	44
3.5	Τεχνολογίες και συσκευές χρησιμοποιούμενες στη συγκομιδή ενέργειας.....	45
3.6	Υβριδική συγκομιδή ενέργειας	46
3.7	Εφαρμογές της συγκομιδής ενέργειας	46
3.7.1	IoT (Internet of the Things)	47
3.7.2	Εφαρμογές στην ιατρική.....	48
3.7.3	Εφαρμογές στις μεταφορές.....	49
3.7.4	Εφαρμογές στις επικοινωνίες	49
3.7.5	Εφαρμογές στις υποδομές	50
3.8	Διαχωρισμός έρευνας και πειράματος	50
4	Μετρήσεις απόδοσης κυκλωμάτων συγκομιδής ενέργειας	51
4.1	Κύριες κατηγορίες μετρικών	51
4.2	Αποδοτικότητα συγκομιδής.....	52
4.3	Μεθοδολογία έρευνας.....	53
4.4	Σχεδιασμός και υλοποίηση πειραματικής διαδικασίας.....	57
4.5	Προδιαγραφές συστήματος (Electrical characteristics and ratings)	58

4.6	Εργαστηριακό περιβάλλον και εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν.....	58
4.6.1	Όργανα μετρήσεων.....	59
4.6.2	Πυκνωτές.....	59
4.6.3	Μαθηματικοί τύποι.....	61
4.7	Συλλογή και ανάλυση δεδομένων.....	61
4.7.1	Φωτοβολταϊκό κύκλωμα (PV).....	61
4.7.2	Πιεζοηλεκτρικό κύκλωμα (PZ)	72
4.7.3	Θερμοηλεκτρικό κύκλωμα (TEG).....	75
4.7.4	Φορτιστής (Battery charger).....	77
5	Συμπεράσματα και μελλοντικές βελτιώσεις.....	80
5.1	Κύρια ευρήματα της έρευνας.....	80
5.2	Συστάσεις για μελλοντικές εργασίες και βελτιώσεις.....	81
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ		82
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		90

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 Απόδοση πηγών ενέργειας.	30
Πίνακας 2 System electrical ratings.	58
Πίνακας 3 Χαρακτηριστικά πυκνωτών.	60
Πίνακας 4 PV module using the 470uF storage capacitor.	64
Πίνακας 5 PV module using the 820uF storage capacitor.	66
Πίνακας 6 PV module using the 1000uF storage capacitor.	68
Πίνακας 7 PV module using the 1200uF storage capacitor.	70
Πίνακας 8 PZ module using the 1000uF storage capacitor.	73
Πίνακας 9 TEG module using the 1000uF storage capacitor.	76
Πίνακας 10 Best case efficiency scenario for each module.	80

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Γράφημα 1 PV module efficiency graph using the 470uF storage capacitor.	65
Γράφημα 2 PV module efficiency graph using the 820uF storage capacitor.	67
Γράφημα 3 PV module efficiency graph using the 1000uF storage capacitor.	69
Γράφημα 4 PV module efficiency graph using the 1200uF storage capacitor.	71
Γράφημα 5 PZ module efficiency graph using the 1000uF storage capacitor.	74
Γράφημα 6 TEG module efficiency graph using the 1000uF storage capacitor.	77
Γράφημα 7 Charger module efficiency graph.	79

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1 Πηγές περιβάλλουσας ενέργειας.....	21
Εικόνα 2.2 Απεικόνιση φαινομένου Seebeck(αριστερά) - Σχηματικό κυκλώματος(δεξιά).....	27
Εικόνα 2.3 Διάταξη τυπικού φωτοβολταϊκού συστήματος.....	31
Εικόνα 2.4 PMIC MCP16502, used in wearable devices.....	33
Εικόνα 2.5 Μπαταρία φωτοβολταϊκού βαθείας εκφόρτισης 12V.....	34
Εικόνα 3.1 Energy-Power Density graph.....	39
Εικόνα 3.2 Διάγραμμα κυκλώματος συλλογής φωτοβολταϊκής ενέργειας.....	41
Εικόνα 3.3 Block διάγραμμα κυκλώματος συλλογής ηλιακής ενέργειας.....	41
Εικόνα 3.4 Διάγραμμα κυκλώματος συγκομιδής ενέργειας από RF σήματα.....	43
Εικόνα 3.5 Μοντέλο κυκλώματος του θερμοηλεκτρικού συλλέκτη ενέργειας.....	44
Εικόνα 3.6 IoT connected devices forecast.....	48
Εικόνα 4.1 PV energy harvesting modules.....	54
Εικόνα 4.2 TEM harvesting module.....	54
Εικόνα 4.3 TB harvesting module.....	54
Εικόνα 4.4 Charger module.....	55
Εικόνα 4.5 Σχηματικό του φωτοβολταϊκού κυκλώματος.....	55
Εικόνα 4.6 Σχηματικό του θερμοηλεκτρικού κυκλώματος.....	56
Εικόνα 4.7 Σχηματικό του πιεζοηλεκτρικού κυκλώματος.....	56
Εικόνα 4.8 Σχηματικό του κυκλώματος του φορτιστή.....	57
Εικόνα 4.9 Otii Arc Pro 1.0.....	59
Εικόνα 4.10 Keysight InfiniiVision MSO-X 3024T.....	59
Εικόνα 4.11 Used capacitors.....	60
Εικόνα 4.12 PV module using the 1000uF storage capacitor.....	62
Εικόνα 4.13 Piezo module using the 1000uF storage capacitor.....	72
Εικόνα 4.14 TEG module using the 1000uF storage capacitor.....	75

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

TEI-H.....	Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Ηπείρου
TEGs.....	Thermoelectric Generators
TPV Systems.....	Thermal Photovoltaic Systems
OTEC.....	Ocean Thermal Energy Conversion
AVR.....	Automatic Voltage Regulator
PMIC.....	Power Management Integrated Circuits
EDLC.....	Electric Double Layer Capacitor
MPPT.....	Maximum Power Point Tracking
DC.....	Direct Current
IoT.....	Internet of the Things

ΑΠΟΔΟΣΗ ΟΡΩΝ / ΓΛΩΣΣΑΡΙΟ

Thermoelectric Generators (TEGs): Θερμοηλεκτρικές γεννήτριες.

Thermal Photovoltaic Systems (TPV Systems): Θερμοφωτοβολταϊκά συστήματα.

Organic Rankine Cycle (ORC): Οργανικός κύκλος Rankine.

Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC): Μετατροπή θερμική ενέργειας ωκεανού.

Automatic Voltage Regulator (AVR): Αυτόματοι μετασχηματιστές ρεύματος.

Power Management Integrated Circuits (PMIC): Ολοκληρωμένα κυκλώματα διαχείρισης ισχύος.

Radial Lead Aluminum Electrolytic Capacitor: Ακτινωτοί ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές αλουμινίου.

1 Εισαγωγή

1.1 Σημασία και εφαρμογές της συγκομιδής ενέργειας στον τομέα της περιβαλλοντικής ενέργειας

Στην παρούσα εργασία θα αναφερθούμε και θα ορίσουμε την έννοια της συγκομιδής περιβάλλουσας ενέργειας, γνωστής και ως energy harvesting ή energy scavenging. Πρόκειται για την τεχνολογία μέσω της οποίας μπορεί να συλλεχθεί ενέργεια από διάφορες πηγές ενέργεια από περιβάλλον, να μετατραπεί σε χρήσιμη ηλεκτρική ενέργεια και να αξιοποιηθεί ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες.

Σε μια εποχή που μαστίζεται από τις επιπτώσεις που επιφέρει η περιβαλλοντική κρίση, οι ενεργειακές απαιτήσεις διαρκώς αυξάνονται. Επομένως, καθίσταται επιτακτική η αξιοποίηση ολοένα και περισσότερων πηγών ενέργειας, πέρα από την αλόγιστη χρήση των ήδη γνωστών μη ανανεώσιμων πηγών. Οι τεχνολογίες συλλογής ενέργειας είναι ιδιαίτερα χρήσιμες σε εφαρμογές όπου είναι ανέφικτη η τακτική αντικατάσταση μπαταριών, όπως σε απομακρυσμένους αισθητήρες, φορέσιμους βιοαισθητήρες και φορητές συσκευές.

Επιπλέον, η εξάπλωση του Internet of Things (IoT) και η συνεχώς αυξανόμενη χρήση «έξυπνων» συσκευών καθιστούν τη συγκομιδή ενέργειας ακόμη πιο σημαντική. Η αξιοποίηση ενέργειας από το περιβάλλον επιτρέπει σε αυτά τα συστήματα να λειτουργούν αποδοτικά και βιώσιμα, χωρίς να απαιτείται συνεχής φόρτιση ή αντικατάσταση μπαταριών.

Η μείωση της χρήσης μπαταριών συμβάλλει επίσης στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος, καθώς περιορίζεται η ανάγκη για εκμετάλλευση ορυκτών μετάλλων – μια δραστηριότητα που ενέχει τον κίνδυνο εξάντλησης των διαθέσιμων κοιτασμάτων – προκειμένου να παραχθούν οι απαιτούμενες ποσότητες μπαταριών.

1.2 Σκοπός και στόχοι της εργασίας

Η παρούσα εργασία αποτελεί μέρος των ερευνητικών στόχων του τμήματος, και πιο συγκεκριμένα του Εργαστηρίου Αυτόνομων Συστημάτων (Autonomous Systems Laboratory – A.S.L.), όπου συνεργάστηκα με τους διδακτορικούς και με τους μεταπτυχιακούς φοιτητές του εργαστηρίου προκειμένου να ολοκληρωθεί η ερευνητική εργασία. Έχοντας ο καθένας ξεχωριστό ρόλο αλλά εξίσου σημαντικό προκειμένου να ολοκληρωθεί αυτό το εγχείρημα. Στόχος της εργασίας μου είναι η παρουσίαση μετρήσεων

και η αξιολόγηση της απόδοσης κυκλωμάτων συλλογής περιβάλλουσας ενέργειας. Αναλυτικότερα θα δούμε πως συμπεριφέρονται με διαφορετικές παραμέτρους σε συνθήκες εργαστηρίου, φωτοβολταϊκά, θερμοηλεκτρικά, και πιεζοηλεκτρικά κυκλώματα αλλά και θα πραγματοποιήσουμε μια συνολική αξιολόγηση του κυκλώματος βάση των μετρήσεων που λάβαμε.

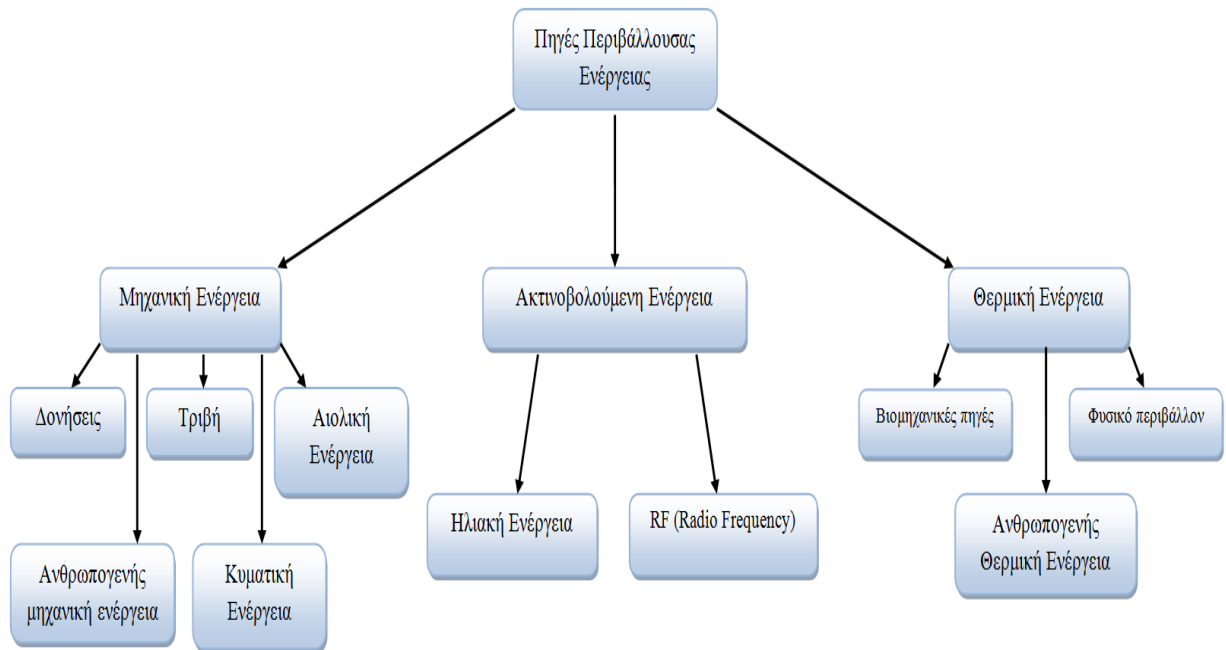
2 Πηγές περιβάλλουσας ενέργειας

Η περιβάλλουσα ενέργεια αποτελεί ένα σημαντικό και σύνθετο κομμάτι του περιβάλλοντος μας που περιλαμβάνει την ενέργεια που προέρχεται από φυσικές πηγές, όπως ο ήλιος, ο άνεμος, τα κύματα, η βροχή και η θερμότητα του εδάφους. Αυτές οι μορφές ενέργειας περιβάλλουν τον πλανήτη μας και αποτελούν πολύτιμους φυσικούς πόρους που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή βιώσιμης ενέργειας. Αυτή η ενέργεια επηρεάζει το θερμικό περιβάλλον, την κυκλοφορία του αέρα, το νερό, και τις βιολογικές διεργασίες, με σημαντικές επιπτώσεις στη βιοποικιλότητα, στην υγεία και στη γεωφυσική ισορροπία. Η περιβάλλουσα ενέργεια αποτελεί το θεμέλιο της αειφορίας, καθώς η χρήση της δεν οδηγεί σε εκπόνηση φυσικών πόρων ή στην εκπομπή επιβλαβών αερίων θερμοκηπίου. Παρά το γεγονός ότι δεν είναι δόκιμος ο όρος της περιβάλλουσας ενέργειας καθώς δεν υπάρχει ενέργεια διασκορπισμένη στο περιβάλλον, έχει καθιερωθεί προκειμένου να μπορούμε να προσδιορίζουμε ότι αναφερόμαστε σε πηγές ενέργειας όπου μπορούν να βρεθούν διαθέσιμες στο περιβάλλον.

Οι πηγές της περιβάλλουσας ενέργειας προέρχονται από φυσικά φαινόμενα ή διαδικασίες που δεν εκπέμπουν αέρια θερμοκηπίου ή άλλους ρυπογόνους παράγοντες κατά την παραγωγή ενέργειας. Αυτές οι πηγές είναι συνήθως ανανεώσιμες και επιλέγονται για την παραγωγή καθαρής και βιώσιμης ενέργειας. Ορισμένες από αυτές τις πηγές περιλαμβάνουν την ηλιακή, αιολική, υδροηλεκτρική, γεωθερμική και βιομηχανική ενέργεια, καθώς και την ενέργεια που παράγεται από τις παλίρροιες. Η χρήση αυτών των πηγών συνεισφέρει στη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου και στη διατήρηση του φυσικού περιβάλλοντος.

Οι πηγές περιβάλλουσας ενέργειας χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- Μηχανική ενέργεια
- Ακτινοβολούμενη ενέργεια
- Θερμική ενέργεια



Εικόνα 2.1 Πηγές περιβάλλουσας ενέργειας.

2.1 Μηχανική ενέργεια

Η μηχανική ενέργεια είναι η δύναμη που έχει ένα αντικείμενο επειδή κινείται ή βρίσκεται σε μια συγκεκριμένη θέση. Χωρίζεται σε δύο τύπους. Στην μηχανική ενέργεια, η οποία είναι η ενέργεια που έχει ένα αντικείμενο επειδή κινείται, και στην δυναμική ενέργεια, η οποία είναι η ενέργεια που έχει ένα αντικείμενο λόγω της θέσης ή της διάταξής του.

Συνήθως η ενέργεια αυτή μεταφράζεται ως:

- Δονήσεις,
- Τριβή,
- Αιολική,
- Ανθρώπινη δραστηριότητα

Στις περιπτώσεις αυτές χρησιμοποιούνται πιεζοηλεκτρικοί, ηλεκτροστατικοί ή ηλεκτρομαγνητικοί μετατροπείς προκειμένου να ολοκληρωθεί η μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια δηλαδή σε ρεύμα.

2.1.1 Δονήσεις

Η συλλογή περιβάλλουσας ενέργειας από δονήσεις είναι η διαδικασία μετατροπής ενέργειας από τους μηχανικούς κραδασμούς σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιείται κυρίως για την τροφοδοσία μικρών συσκευών χωρίς μπαταρίες. Για την μετατροπή χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι συλλεκτών. Οι κυριότεροι είναι οι πιεζοηλεκτρικοί συλλέκτες, οι ηλεκτρομαγνητικοί συλλέκτες, οι οποίοι λειτουργούν βάση των θεμελιωδών αρχών του ηλεκτρομαγνητισμού, και τέλος οι ηλεκτροστατικοί συλλέκτες, οι οποίοι στηρίζονται στον νόμο του Coulomb για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στο δικό μας εγχείρημα έχουμε χρησιμοποιήσει πιεζοηλεκτρικό συλλέκτη, ο οποίος μετατρέπει την μηχανική καταπόνηση σε ηλεκτρική ενέργεια. Το πρόβλημα που παρουσιάζεται με τους συλλέκτες ενέργειας από τις δονήσεις, είναι ότι η ενέργεια που μπορεί να αντληθεί από μεμονωμένους δεν επαρκεί, απόρροια αυτού είναι η ανάγκη για την χρησιμοποίηση ενός συνόλου από συλλέκτες για την άντληση επαρκούς ενέργειας για την τροφοδοσία των αντίστοιχων κυκλωμάτων. Αυτή είναι και η μεγαλύτερη πρόκληση των επιστημών, για το πως θα μπορούν να αυξηθεί η αποδοτικότητα και η αποτελεσματικότητα των συλλεκτών ενέργειας μέσω των δονήσεων (Priyanka, 2022).

2.1.2 Αιολική ενέργεια

Η συλλογή ενέργειας μέσω της αξιοποίησης του ανέμου είναι από τις πιο διαδεδομένες τεχνικές για την αξιοποίηση εναλλακτικών πηγών ενέργειας. Με την πάροδο των ετών για την περισυλλογή αιολικής ενέργειας χρησιμοποιούμε τις ανεμογεννήτριες, όπου είναι και το μοναδικό αποτελεσματικό μέσο για την επίτευξη αυτού του σκοπού. Ο τρόπος λειτουργίας τους για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας προκύπτει τμηματικά. Στο πρώτο στάδιο μετατρέπεται η κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανική ενέργεια μέσω της κίνησης των φτερωτών από τις ριπές του αέρα. Η μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης γεννητριών. Ανάλογα με το μέγεθος της εγκατάστασης φορτίζονται από μικροί πυκνωτές ή μπαταρίες, έως ολόκληροι σταθμοί όπου αποθηκεύεται ή διοχετεύεται η μετατρεμμένη ηλεκτρική ενέργεια. Λόγω του χαρακτηρισμού της αιολικής ενέργειας ως μια πρακτικά ανεξάντλητη πηγή ενέργειας και των γεωγραφικών και μορφολογικών ιδιοτεροτήτων της χώρας παρατηρούμε διαρκώς αναβαθμίσεις και αυξήσεις των αιολικών πάρκων προκειμένου να καλυφθούν οι ενεργειακές απαιτήσεις (Υπουργείο περιβάλλοντος και ενέργειας).

2.1.3 Τριβή

Η συγκομιδή ενέργειας μέσω της τριβής είναι μια τεχνολογία όπου παράγεται ηλεκτρική ενέργεια μέσω της επαφής και της απομάκρυνσης δύο αντικειμένων. Βασική προϋπόθεση, για να μπορέσουμε να αντλήσουμε ενέργεια, είναι τα δύο σώματα να έχουν διαφορετική ηλεκτρικότητα. Δηλαδή το ένα να είναι θετικό και το άλλο αρνητικό προκειμένου να μπορεί να μεταφερθούν ηλεκτρόνια από το ένα στο άλλο. Με την επαφή και την τριβή των δύο σωμάτων δημιουργείται η διαφορά δυναμικού και με την μεταφορά των ηλεκτρονίων καταφέρνουμε να παράγουμε την ηλεκτρική ενέργεια σε πυκνωτές ή μπαταρίες για να την χρησιμοποιήσουμε όταν παρουσιαστεί ανάγκη. Η βασική αρχή, για να μπορέσουμε να μετατρέψουμε και να αξιοποιήσουμε την μηχανική ενέργεια που θα παραχθεί σε ηλεκτρική ενέργεια, είναι αυτή του τριβοηλεκτρισμού. Όπου χάρις σε αυτό την τεχνολογία γίνεται εφικτή η συλλογή περιβάλλουσας ενέργειας μέσω της τριβής (Priyanka, 2022).

2.1.4 Κυματική ενέργεια

Με τον όρο κυματική ενέργεια αναφερόμαστε στην ενέργεια η οποία προκύπτει από την κινητική ενέργεια των κυμάτων και των ρευμάτων θαλασσών και των ωκεανών. Η θαλάσσια επιφάνεια συλλέγει τεράστιες ενέργειες από τον ήλιο και από τον άνεμο, γεγονός που δημιουργεί κύματα και ρεύματα μεγάλης έντασης. Τα συγκεκριμένα φαινόμενα μεταφέρονται και η κινητική ενέργεια συλλέγεται και μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Όπως και η αιολική ενέργεια θεωρείται πρακτικά ανεξάντλητη πηγή ενέργειας. Αυτό το χαρακτηριστικό οδηγεί στην έρευνα σε πρώτο στάδιο για την κατασκευή κατάλληλων συσκευών μετατροπής ενέργειας. Όμως το θαλάσσιο περιβάλλον είναι από τα δυσκολότερα για να αξιοποιηθεί αποτελεσματικά. Είναι διαρκείς οι έρευνες για την κατασκευή κατάλληλων συσκευών αλλά ακόμα τα περισσότερα πρότυπα βρίσκονται σε στάδιο δοκιμών. Οι εγκαταστάσεις για την εκμετάλλευση των κυμάτων ευνοούνται σε πολλές τοποθεσίες αλλά προτιμώνται περιοχές όπου συναντιούνται ισχυροί άνεμοι ώστε να δημιουργούνται μεγάλα κύματα με σκοπό την μεγαλύτερη απόδοση των συσκευών συλλογής (Foley, 2024).

2.1.5 Ανθρωπογενής

Κλείνοντας την κατηγορία συλλογής περιβάλλουσας ενέργειας μέσω μηχανικής ενέργειας συναντάμε την συλλογή ενέργειας μέσω του ανθρώπου. Ως ανθρωπογενής πηγές ενέργειας χαρακτηρίζουμε την ενέργεια η οποία μπορεί να αντληθεί αξιοποιώντας έμμεσα ή άμεσα

την λειτουργία του ανθρωπίνου σώματος. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι μέσω των δονήσεων που προξενεί η κίνηση του ανθρώπου όταν περπατάει ή τρέχει, όπου η ένταση καθορίζει και την ισχύ όπου μπορεί να αντληθεί. Αλλά δεν είναι μόνο όταν ο άνθρωπος επιλέγει να κινηθεί. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας έχουμε φτάσει στο σημείο όπου μπορεί να αξιοποιηθεί και η παθητική ενέργεια από το ανθρώπινο σώμα όπου είναι πάντα διαθέσιμη, όπως είναι η εκμετάλλευση της κυκλοφορίας του αίματος ή και της αναπνοής. Δηλαδή λειτουργιών του ανθρωπίνου σώματος που δεν σταματάνε ούτε στιγμή καθώς είναι απαραίτητες για την διατήρηση της ζωής. Οι συγκεκριμένες τεχνολογίες χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία φορέσιμων βιοαισθητήρων οι οποίοι συλλέγουν δεδομένα για μεταβολές στον ανθρώπινο οργανισμό (Priya, 2009).

2.2 Ακτινοβολούμενη ενέργεια

Η ακτινοβολούμενη ενέργεια είναι η ενέργεια που προέρχεται από τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα γύρω μας. Μερικά παραδείγματα αυτών των κυμάτων είναι το φως που βλέπουμε, είτε το φυσικό μέσω του ηλίου είτε το φως από τις λάμπες, οι υπέρυθρες ακτινοβολίες ή ακόμα και τα ραδιοκύματα που χρησιμοποιούνται στον κλάδο των τηλεπικοινωνιών. Για την συλλογή ακτινοβολούμενης ενέργειας χρησιμοποιούνται εξαιρετικά επικίνδυνα υλικά καθώς και ραδιενεργά, λόγω της ακτινοβολίας που εκπέμπουν. Οι κύριες πηγές ακτινοβολούμενης ενέργειας είναι η φωτονική ενέργεια - κυρίως μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας- αλλά και η συλλογή ραδιοσυχνοτήτων (RF) όπου με τους ανάλογους συλλέκτες μετατρέπουν την ακτινοβολία ή τα σήματα από το περιβάλλον σε ηλεκτρική ενέργεια. Ο βασικότερος τρόπος μετατροπής της ακτινοβολούμενης ενέργειας σε ηλεκτρική είναι τα φωτοβολταϊκά πάνελ που χρησιμοποιούνται για την συλλογή ενέργειας από το φως.

2.2.1 Φωτονική ενέργεια

Η βασικότερη κατηγορία ενέργειας στην αναζήτηση εναλλακτικών πηγών ενέργειας είναι η φωτονική ενέργεια. Οι μορφές από τις οποίες μπορεί να ληφθεί ενέργεια είναι ή με την ηλιακή ενέργεια όπου είναι η βασικότερη και κυρία μορφή αλλά και την ενέργεια που μπορεί να ληφθεί από τις λάμπες το τεχνικό φως δηλαδή. Χαρακτηριστικές είναι οι μελέτες που δημοσιεύονται τον τελευταίο καιρό όπου παρουσιάζουν στοιχεία που δείχνουν ότι στις επόμενες δεκαετίες η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας θα μπορεί να καλύψει επαρκώς της ηλεκτρικές απαιτήσεις. Για την συλλογή φωτονικής ενέργειας, χρησιμοποιούνται τα φωτοβολταϊκά πάνελ για την συλλογή ηλιακής ενέργειας, είτε μικροί

αισθητήρες όπου απορροφούν την ενέργεια από λάμπες εσωτερικού χώρου. Αυτές οι συσκευές λειτουργούν βάση του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Ενδεικτικές είναι οι μετρήσεις απόδοσης των πάνελ που δείχνουν ότι μπορεί να φτάσει 100 mW/cm^2 για τα εξωτερικά ενώ στα εσωτερικά είναι μόλις 100 μW/cm^2 . Ενδεικτικές χρήσεις είναι από την φόρτιση μικρών απομακρυσμένων συσκευών, φορητές συσκευές όπως αριθμομηχανές, ή και μεγάλες εγκαταστάσεις όπως οικίες και εργοστάσια (Parvenda Kumar,2020).

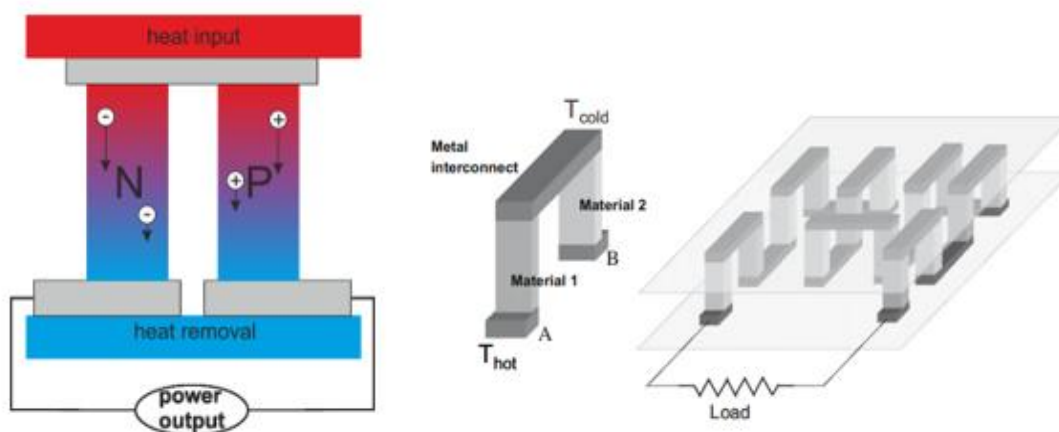
2.2.2 Ραδιοσυχνότητα (RF)

Για την συλλογή ραδιοσυχνοτήτων χρησιμοποιούνται μέθοδοι μετατροπής ραδιοκυμάτων σε χρήσιμη ηλεκτρική ενέργεια. Η ενέργεια αυτή δεν συλλέγεται από φυσικές πηγές αλλά από πηγές όπως είναι η τηλεόραση, και πύργοι εκπομπής σημάτων, Wi-Fi και από τηλεπικοινωνιακά δίκτυα. Η ενέργεια που συλλέγεται από αυτές τις πηγές χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία χαμηλής ισχύος μικρές συσκευές και συσκευές IoT. Η ενέργεια συλλέγεται από ειδικές κεραίες οι οποίες συλλέγουν τα κύματα, στην συνέχεια μέσω ανορθωτή τάσεως μετατρέπεται σε ηλεκτρικό ρεύμα και αποθηκεύεται είτε σε πυκνωτές είτε σε μπαταρίες. Το πλεονέκτημα που παρουσιάζουν είναι ότι μπορούν να αποτελούν την κύρια πηγή τροφοδοσίας σε αυτοτροφοδοτούμεθα συστήματα, καθώς όπως θα στέλνουν ή θα λαμβάνουν σήματα θα μπορεί να φορτίσει και να συνεχίσει την λειτουργία του το σύστημα χωρίς την παραμικρή συνεισφορά του ανθρώπου. Παρέχοντας μια οικολογική και βιώσιμη λύση η οποία είναι προσιτή και κερδίζει έδαφος σταδιακά στην καθιέρωση της σε τέτοιας μορφής χρήσεις. Με την εξέλιξη της αναμένεται να επέλθει και σημαντική αύξηση της απόδοσής της κάνοντας την ικανοποιητική και για την κάλυψη μεγαλύτερων ενεργειακών απαιτήσεων (Husam Hamid Ibrahim, 2022).

2.3 Θερμική ενέργεια

Η θερμική συγκομιδή ενέργειας, αναφέρεται στην διαδικασία μετατροπής της θερμότητας ή της διαφοράς θερμοκρασίας σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση θερμοηλεκτρικών συσκευών. Αυτές οι συσκευές είναι κατάλληλες για κυκλώματα που απαιτούν χαμηλή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας όπως αισθητήρες σε δύσβατες περιοχές ή φορέσιμοι βιοαισθητήρες. Αξιοποιώντας τους για την συλλογή θερμικής ενέργειας είτε την φυσική διαφορά θερμοκρασίας από το ίδιο το περιβάλλον, την θερμότητα που ελκύει το ανθρώπινο σώμα είτε αξιοποιώντας την τεχνολογία μέσα από

βιομηχανικές πηγές. Η βασική αρχή για την μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική εξαρτάται στην διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στις επιφάνειες της συσκευής, στην ψυχρή και στην ζεστή πλευρά. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται φαινόμενο Seebeck, και οι συσκευές όπου χρησιμοποιούνται ονομάζονται γεννήτριες Seebeck. Οι συσκευές αυτές κατασκευάζονται με ημιαγωγούς P (Positive) και N (Negative) συνδεδεμένους σε σειρά μεταξύ τους. (R.J.M. Vullers R. v., 2009).



Εικόνα 2.2 Απεικόνιση φαινομένου Seebeck(αριστερά)¹ - Σχηματικό κυκλώματος(δεξιά)².

2.3.1 Θερμική ενέργεια από βιομηχανικές διεργασίες

Οι βιομηχανικές πηγές συλλογής θερμικής ενέργειας περιλαμβάνουν διάφορες μεθόδους και τεχνολογίες που αξιοποιούνται για την παραγωγή, αποθήκευση και επαναχρησιμοποίηση θερμότητας στις βιομηχανικές διαδικασίες. Ένα παράδειγμα είναι η θερμότητα που παράγεται από τη διαδικασία καύσης καυσίμων, η οποία χρησιμοποιείται εκτενώς για την παραγωγή ατμού, την τήξη μετάλλων και τη θέρμανση υλικών σε βαριές βιομηχανίες όπως η μεταλλουργία και τα διυλιστήρια. Η ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας από καυσαέρια, καμινάδες και συστήματα συμπίεσης, αποτελεί επίσης μια βασική πηγή βιομηχανικής θερμικής ενέργειας. Μέσα από εξειδικευμένους εναλλάκτες θερμότητας, αυτή η απορριπτόμενη θερμότητα μπορεί να ανακτηθεί και να χρησιμοποιηθεί για τη θέρμανση νερού, την παραγωγή ατμού ή την τροφοδοσία άλλων διεργασιών, βελτιώνοντας την ενεργειακή αποδοτικότητα και μειώνοντας το ενεργειακό κόστος. Οι ηλιακοί συλλέκτες και τα γεωθερμικά συστήματα μπορούν επίσης να

¹Wiegand,S.,2015(https://www.researchgate.net/publication/283322686_Introduction_to_thermal_gradient_related_effects_in_Functional_Soft_Matter)

² Vullers, R.J.M. et al. (2009) (https://www.researchgate.net/publication/220670281_Ultra-Low_Power_Sensor_Design_for_Wireless_Body_Area_Networks_-_Challenges_Potential_Solutions_and_Applications)

ενταχθούν στις βιομηχανικές πηγές θερμότητας, παρέχοντας ενέργεια χαμηλού κόστους και μειώνοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη χρήση συμβατικών καυσίμων. Έρευνες έχουν δείξει ότι οι βιομηχανικές πηγές μπορούν να παράγουν 100 mW/cm^2 , όπου η συλλογή της ενέργειας κυμαίνεται από $1\text{-}10 \text{ mW/cm}^2$. (Jouhara et al., 2018)

2.3.2 Θερμική ενέργεια από το περιβάλλον

Το φυσικό περιβάλλον αποτελεί και το ίδιο πηγή συλλογής ενέργειας. Η ιδιαιτερότητα της συγκεκριμένης ενέργειας είναι ότι είναι άπλετη και άφθονη στην γη. Αφορά την ενέργεια την οποία μπορούμε να αντλήσουμε αξιοποιώντας την διαφορά θερμοκρασίας που υπάρχει στην φύση. Ανάλογα με τις γεωγραφικές συνθήκες της εκάστοτε περιοχής και λαμβάνοντας υπόψη το σύστημα που θέλουμε να τροφοδοτήσουμε χρησιμοποιούμε τους εξής τρόπους για να το πετύχουμε. Αρχικά αξιοποιούμε την ηλιακή θερμική ενέργεια, με ενδεικτικότερο παράδειγμα να αποτελούν οι ηλιακοί θερμοσίφωνες που χάρις στα πάνελς που έχουν απορροφούν την θερμότητα για την θέρμανση του νερού στα σπίτια. Για την τροφοδοσία μικρότερων κυκλωμάτων όπως αισθητήρες χρησιμοποιούμε θερμοηλεκτρικές γεννήτριες γνωστές και ως Thermoelectric Generators (TEGs harvesters) οι οποίοι λειτουργούν βάση του φαινομένου Seebeck που είδαμε προηγουμένως. Επιπλέον τρόποι είναι η γεωθερμία όπου αξιοποιεί την θερμότητα από κατώτερα στρώματα του εδάφους. Επιπλέον τρόποι συλλογής ενέργειας είναι οι αντλίες θερμότητας και η μετατροπή θερμότητας από τους ωκεανούς (OTEC) (Avery and Wu, 1994; Duffie and Beckman, 2013).

2.3.3 Αξιοποίηση θερμικής ενέργειας του ανθρώπινου σώματος

Η συγκομιδή θερμικής ενέργειας από τον άνθρωπο είναι μια καινοτόμος τεχνολογία που στοχεύει στην αξιοποίηση της θερμότητας που παράγεται από το ανθρώπινο σώμα και τις δραστηριότητές του. Αυτή η θερμότητα μπορεί να συλλέγεται και να χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία μικρών ηλεκτρονικών συσκευών ή για την παραγωγή ενέργειας σε διάφορα περιβάλλοντα, όπως σε ρούχα, αισθητήρες υγείας και αθλητικούς εξοπλισμούς. Ένας τρόπος για τη συλλογή αυτής της ενέργειας είναι μέσω θερμοηλεκτρικών γεννητριών (TEG), που χρησιμοποιούν τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του ανθρώπινου σώματος και του περιβάλλοντος για να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Οι μέχρι στιγμής μετρήσεις έχουν δείξει ότι μπορεί να παραχθεί ενέργεια της τάξεως των 20 mW/cm^2 , αλλά ελάχιστη ενέργεια μπορεί να συλλεχθεί ίση με 30 μW/cm^2 . Η ανθρώπινη θερμότητα μπορεί να αξιοποιηθεί σε εφαρμογές όπως οι φορητές συσκευές, οι βιοϊατρικοί αισθητήρες και τα

wearables, τα οποία συχνά απαιτούν μικρή αλλά συνεχή παροχή ενέργειας. Τέτοιες τεχνολογίες συγκομιδής θερμικής ενέργειας μπορούν να συνδυαστούν με άλλες μορφές συγκομιδής ενέργειας, όπως η μηχανική ενέργεια από την κίνηση, για να αυξήσουν την ενεργειακή απόδοση και να μειώσουν την εξάρτηση από μπαταρίες. Στις σύγχρονες εφαρμογές, οι λύσεις αυτές προσφέρουν νέες δυνατότητες στη βιομηχανία των wearables και στη φροντίδα υγείας, επιτρέποντας τη συνεχή παρακολούθηση της υγείας και τη διατήρηση της ενέργειας από φυσικές πηγές (Vullers et al., 2010).

2.4 Συγκριτική αποτίμηση απόδοσης διαφορετικών πηγών ενέργειας

Στον παρακάτω πίνακα βλέπουμε για διάφορες πηγές τα ποσά ενέργειας τα οποία μπορεί να μας δώσει η κάθε πηγή (Στήλη 2), την ενέργεια την οποία μπορούμε να συλλέξουμε (Στήλη 3) και τέλος την απόδοση η οποία μεταφράζει την διαθέσιμη ενέργεια προς την ενέργεια η οποία μπορεί να αντληθεί. Για κάθε σύστημα το ποσοστό εξαρτάται από την δομή του και τις ηλεκτρονικές συσκευές που το αποτελούν.

Πηγή Ενέργειας	Διαθέσιμη Ενέργεια	Ενέργεια που αντλήθηκε	Απόδοση
PV Outdoor	100-4000 mW/cm ²	10-400 mW/cm ²	10-25%
PV Indoor	0.01 - 0.1 mW/cm ²	0.001 - 0.01 mW/cm ²	1-5%
Wind	177 mW/cm ²	1200mWh/day	30-50%
Thermoelectric (Human Body)	0.02 - 0.1 mW	~0.002 - 0.01	1-5%
Thermoelectric (Cold Environment)	0.5 - 5 mW	~0.05 - 0.5	5-8%
Vibration (Piezoelectric)	0.1 - 10 mW	~0.01 - 1	5-10%
Running (Piezoelectric)	5 - 50 mW	~0.5 - 5	5-15%
Walking (Piezoelectric)	67 W	~0.1 - 1	10-15%
Hand Gestures (Triboelectric)	0.1 - 5 mW	~0.01 - 0.5	1-5%
Breathing (Piezoelectric)	0.1 - 0.5 mW	~0.01 - 0.05	2-8%

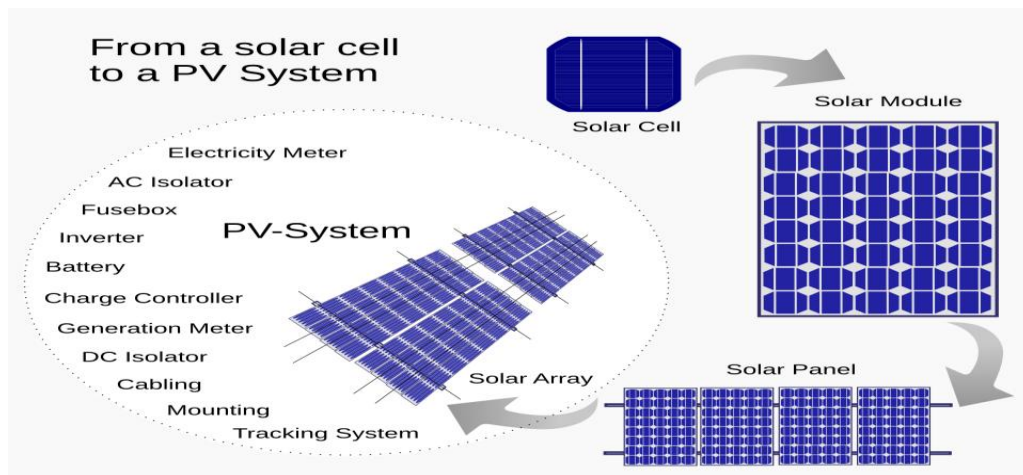
Wave Energy (Small Buoy)	1000 - 10,000 mW	Highly variable	20-40%
Tidal Currents (Small Turbine)	10,000 - 100,000 mW	Highly variable	30-50%
RF Harvesting	0.001 - 0.1 mW	<0.001	<1%
RF (GSM)		0.3mw/cm ²	
RF (Wi-Fi)		0.15 mw/cm ²	
RF (AM)		2 mw/cm ²	
Finger's Movement (Piezoelectric)	19 mW	2.1 mW	11%
Window-Focused Solar (Lens)	1 - 5 mW (per cm ²)	0.1 - 0.5	8-15%
Machinery Vibrations	10 - 50 mW	~1 - 5	10-30%
Body Movement (Electromagnetic)	0.01 - 2 mW	~0.001 - 0.2	5-10%

Πίνακας 1 Απόδοση πηγών ενέργειας.

2.5 Μετατροπή και αποθήκευση ενέργειας

Όπως είδαμε στα προηγούμενα κεφάλαια υπάρχουν στο περιβάλλον γύρω μας διάσπαρτες διάφορες πηγές, όπως ο ήλιος, ο άνεμος, το νερό, ακόμα και η θερμότητα και τα ραδιοκύματα, από τις οποίες συλλέγουμε ενέργεια και μέσω των αντίστοιχων μεθόδων επιτυγχάνουμε την μετατροπή σε χρήσιμη ηλεκτρική ενέργεια προκειμένου να τεθεί στην διάθεση μας για την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων.

Η πιο διαδεδομένη μέθοδος συλλογής περιβάλλουσας ενέργειας είναι η ηλιακή ενέργεια αξιοποιώντας τα φωτοβολταϊκά πάνελς. Τα συστήματα αυτά απορροφούν τα φωτόνια (σωματίδια φωτός) χάρη στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο και με την χρήση των κατάλληλων υλικών(πυρίτιο) απελευθερώνουν ηλεκτρόνια και έτσι γίνεται η μετατροπή από φωτονική ενέργεια σε ηλεκτρική (εικόνα 2.3).



Εικόνα 2.3 Διάταξη τυπικού φωτοβολταϊκού συστήματος.³

Κάποιες τεχνολογίες για να λειτουργήσουν βασίζονται στην κίνηση της ύλης. Τέτοιοι τρόποι συλλογής περιβάλλουσας ενέργειας είναι αξιοποίηση της αιολικής και της υδάτινης ενέργειας αλλά και η συλλογή ενέργειας από τα ραδιοκύματα (Radiofrequency Harvesting). Αυτές οι τεχνολογίες ξεκινούν με ένα ζητούμενο. Πως θα να μπορέσουμε να μεταφέρουμε την δυναμική ενέργεια των σωμάτων από την φύση σε κινητική ενέργεια σε πρώτο στάδιο ώστε έπειτα να μπορέσουμε να την μετατρέψουμε ξανά σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτό το πρόβλημα λύνεται με την χρησιμοποίηση ελίκων ή κεραιών όπου κινούνται όταν λαμβάνουν κίνηση από την αντίστοιχη πηγή. Η κίνηση τους αυτή μεταφέρεται μέσω αξόνων μετάδοσης κίνησης, σε μονάδες όπου αυξάνουν την ταχύτητα περιστροφής και καταλήγουν σε μια γεννήτρια. Η οποία μέσω ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής μετατρέπει την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Παραδείγματα αυτής της τεχνικής αποτελούν οι ανεμογεννήτριες, τα υδροηλεκτρικά φράγματα, οι κινήσεις υποθαλάσσιων ρευμάτων και κυμάτων, και κεραίες για την συλλογή ραδιοκυμάτων.

Το παραγόμενο ρεύμα στην συνέχεια μετατρέπεται μέσω εξομοιωτών (rectifier) από εναλλασσόμενο (AC) σε σταθερό ρεύμα (DC). Η ηλεκτρική ενέργεια αυτή καθώς είναι μικρής τάσης είναι κατάλληλη για την κάλυψη των ηλεκτρικών απαιτήσεων μικρών κυκλωμάτων. Για να μπορέσουμε να την αποθηκεύσουμε για μελλοντική χρήση ή για να την διοχετεύσουμε απευθείας στο κεντρικό δίκτυο απαιτείται η χρήση πολλαπλασιαστών ισχύος για να μπορέσει να καταστεί κατάλληλη για την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων.

³Ayaz,A.etal.(2020)(https://www.researchgate.net/publication/343919103_Self-cleaning_of_glass_surface_to_maximize_the_PV_cell_efficiency)

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από θερμική ενέργεια μέσω των θερμοηλεκτρικών γεννητριών (TEGs) βασίζεται σε έναν μηχανισμό μετατροπής θερμότητας σε ηλεκτρική ενέργεια εκμεταλλευόμενο το φαινόμενο Seebeck. Δημιουργούν ισχύ όταν ένα μέλος είναι ζεστό και ένα άλλο μέλος είναι δροσερό. Το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγουν ονομάζεται τάση συνεχούς ρεύματος και το πόση ισχύς δημιουργούν εξαρτάται από το πόσο μεγάλη είναι η διαφορά θερμοκρασίας. Στις περισσότερες φορές η παραγόμενη ενέργεια δεν είναι ιδιαίτερη ισχυρή.

Το εναλλασσόμενο ρεύμα, παρουσιάζεται ως μια ημιτονοειδής συνάρτηση, ενώ το σταθερό ρεύμα είναι μια ευθεία γραμμή. Οπότε η μετατροπή αυτή το κάνει ομαλότερο και διευκολύνει την μετέπειτα χρήση. Η ηλεκτρονική συσκευή η οποία μετατρέπει το ρεύμα ονομάζεται ανορθωτής τάσης. Στην αντίθετη περίπτωση η μετατροπή εκτελείται από έναν μετατροπέα, γνωστό και ως inverter.

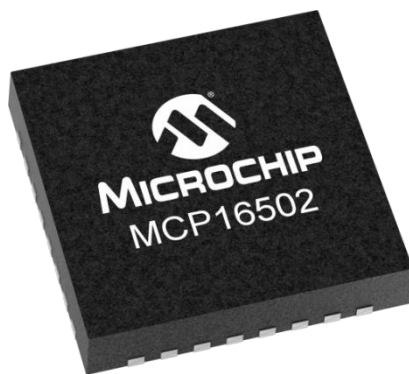
Για τη διασφάλιση σταθερής τάσης εξόδου από τις απότομες μεταβολές στην τάση εισόδου καθώς και ότι η ενέργεια είναι αξιοποιήσιμη (πέρα από τους ανορθωτές που μόλις αναφερθήκαμε) χρησιμοποιούμε ρυθμιστές τάσης. Σε περιπτώσεις όπως τα ραδιοκύματα χρησιμοποιούνται κατάλληλα φίλτρα ώστε να προσλαμβάνεται χωρίς παρεμβολές. Αναλυτικότερα, σχετικά με τους ρυθμιστές τάσης υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι, όπως ο απορροφητής υπέρτασης (Surge Protector), ο οποίος προστατεύει τις συσκευές από τις απότομες αυξήσεις της τάσης ανεξάρτητα από που προέρχονται. Ακολουθώντας και ο μετασχηματιστής μείωσης τάσης ο οποίος μειώνει την τάση. Χρησιμοποιείται συνδυαστικά με έναν ανορθωτή.

Επιπροσθέτως, χρησιμοποιούμε άλλη μια κατηγορία μετασχηματιστών που είναι οι αυτόματοι μετασχηματιστές ρεύματος (Automatic Voltage Regulator). Αυτές οι συσκευές βοηθούν στην διατήρηση της ηλεκτρικής ενέργειας στο ίδιο επίπεδο τάσης παρά τις όποιες διακυμάνσεις της τάσης εισόδου.

Ορισμένοι ρυθμιστές οι οποίοι ονομάζονται LDO (Low Dropout) και στηρίζονται στην τεχνολογία transistor PNP βοηθούν σε μικρές αλλαγές στην ισχύ. Υπάρχουν μετατροπείς ενίσχυσης οι οποίοι τραβούνε λίγη ισχύ και την μετατρέπουν σε περισσότερη.

Στις μέρες μας, υπάρχουν ειδικά microchips γνωστά και ως PMICs. Τα συγκεκριμένα ολοκληρωμένα χρησιμοποιούνται για να καλύψουν λειτουργίες που σχετίζονται με τις απαιτήσεις ισχύος μιας ηλεκτρονικής συσκευής η οποία τροφοδοτείται τουλάχιστον από

μια μπαταρία ανεξάρτητα από την ύπαρξη άλλων τρόπων τροφοδοσίας. Βοηθούν στον τρόπο αποθήκευσης και στην κατανομή ενέργειας. Ανάλογα την δομή του κυκλώματος μπορεί να φέρει εις πέρας λειτουργίες όπως τη μετατροπή ρεύματος DC σε DC, την κλιμάκωση της τάσης, την αλληλουχία ισχύος και την εναλλαγή πηγών ενέργειας, καθώς και την φόρτιση της μπαταρίας στην περίπτωση που η τροφοδοσία προέρχεται από τουλάχιστον δύο πηγές ενέργειας. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να χρησιμοποιούμε επαναφορτιζόμενη μπαταρία για την αποθήκευση ενέργειας. Για παράδειγμα, τα ηλιακά πάνελ συλλέγουν ενέργεια για να γεμίσουν αυτές τις μπαταρίες. Με αυτόν τον τρόπο, σε περιπτώσεις όπου η τροφοδοσία από τα πάνελ σταματήσει (βλάβη, συννεφιά, νύχτα) οι μπαταρίες έχουν αποθηκεύσει αρκετά ποσά ενέργειας για να τροφοδοτήσουν το σύστημα.



Εικόνα 2.4 PMIC MCP16502, used in wearable devices⁴

Για την αποθήκευση της συλλέγουσας ενέργειας χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνολογίες. Δύο όμως είναι οι βασικές κατηγορίες. Μπαταρίες και ηλεκτροχημικοί υπερπυκνωτές. Για ποιον τύπο θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται ανάλογα από τα χαρακτηριστικά της εγκατάστασης, την ευκολία παραγωγής ενέργειας και από την ενεργειακή κατανάλωση του συστήματος. Για να μπορέσουμε να αναλύσουμε περαιτέρω θα βασιστούμε στους εξής δύο όρους. Πυκνότητα ενέργειας και πυκνότητα ισχύος. Με τον όρο πυκνότητα ενέργειας εννοούμε το πόση ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί, και με τον όρο πυκνότητα ισχύος εννοούμε την ταχύτητα κατά την οποία μπορεί να μεταφερθεί ενέργεια. Οι μπαταρίες ανεξάρτητα από ποια υλικά κατασκευάζονται (Li-ion, Ni-MH κτλ.) έχουν την ιδιότητα να μπορούν να προσφέρουν υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα από τους πυκνωτές. Στην αντίστροφη περίπτωση οι πυκνωτές μπορούν να προσφέρουν υψηλότερη πυκνότητα ισχύος. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι οι μπαταρίες μπορούν να αποθηκεύσουν περισσότερη ενέργεια από τους πυκνωτές αλλά με χαμηλή μεταφορά ενέργειας. Αμφιδρόμως οι

⁴ Microchip.com(<https://www.microchip.com/en-us/product/MCP16502>)

πυκνωτές δεν μπορούν να αποθηκεύσουν τόση ενέργεια αλλά ο ρυθμός μεταφοράς ενέργειας είναι υψηλότερος από των μπαταριών. Τέλος μια κοινή ιδιότητα όλων των ηλεκτροχημικών κυκλωμάτων όπως είναι τόσο οι μπαταρίες όσο και οι πυκνωτές είναι η αυτοεκφόρτιση, ανεξάρτητα αν είναι συνδεδεμένοι, ή αν τροφοδοτούνται ή τροφοδοτούν. Δεδομένου ότι οι πυκνωτές δεν αποθηκεύουν ενέργεια στα πρότυπα των μπαταριών και με τον αυξημένο ρυθμό μεταφοράς ενέργειας, αυτοεκφορτίζονται ακόμα πιο γρήγορα από ότι οι μπαταρίες. Επομένως για την καλύτερη αποθήκευση ενέργειας από ένα μόνο σύστημα, ή από συστήματα τα οποία δεν συλλέγουν συνεχόμενα ενέργεια, και με σκοπό να είναι διαθέσιμη για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα συνίσταται η χρήση μπαταριών. Ενώ αντίθετα σε συστήματα τα οποία μπορούν να συλλέγουν ενέργεια κατά την διάρκεια όλης της ημέρας και χρειάζονται να παρέχουν συνεχόμενα ενέργεια για τροφοδοσία συνδεδεμένων συσκευών η λύση ενός υπερπυκνωτή θεωρείται ιδανική. (Lu, 2014; Φιλιππουπολίτη, 2022)



3 Κυκλώματα συγκομιδής ενέργειας

Τα κυκλώματα συγκομιδής ενέργειας είναι ειδικά ηλεκτρονικά συστήματα που συγκεντρώνουν και μετατρέπουν ενέργεια από διάφορες περιβάλλουσες πηγές, όπως η φωτονική, η θερμική, η μηχανική, η κινητική αλλά και από τις ραδιοσυχνότητες σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτά τα κυκλώματα μπορούν είτε να τροφοδοτούν κατευθείαν είτε να αποθηκεύσουν την ηλεκτρική ενέργεια για μετέπειτα χρήση. Ο σκοπός αυτών των κυκλωμάτων είναι να χρησιμοποιούν μικρές ποσότητες ενέργειας για την τροφοδοσία μικρών ηλεκτρικών συσκευών, όπου δεν απαιτείται πολλή ισχύς για την λειτουργία τους. Στόχος των κυκλωμάτων συγκομιδής ενέργειας είναι να βοηθήσουν στην βιώσιμη αυτονομία μικροσυσκευών, καταργώντας ουσιαστικά τις συμβατικές μπαταρίες και την ανθρώπινη παρέμβαση.

3.1 Αρχές λειτουργίας κυκλωμάτων συγκομιδής

Τα κυκλώματα συγκομιδής περιβάλλουσας ενέργειας λειτουργούν συλλέγοντας ενέργεια από το περιβάλλον γύρω μας. Υπάρχουν διάφορες πηγές από τις οποίες μπορεί να συλλέξει ενέργεια, όπως η φωτονική ακτινοβολία, τις θερμικές διαφορές τις ραδιοσυχνότητες και την μηχανική ενέργεια. Η συλλέγουσα ενέργεια μετατρέπεται από την εκάστοτε πηγή σε χρήσιμη ηλεκτρική. Η ενέργεια στην πρώτη φάση της συλλογής εμφανίζεται σε χαμηλή τάση ή ένταση ρεύματος και απαιτείται η διαχείριση με κατάλληλα εργαλεία για να πετύχουμε το καλύτερο αποτέλεσμα. Στην συνέχεια γίνεται η αποθήκευση με την χρήση είτε πυκνωτών ή υπερπυκνωτών είτε επαναφορτιζόμενων μπαταριών ώστε να είναι διαθέσιμη για μελλοντική χρήση. Αυτή η τεχνολογία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε περιπτώσεις όπως οι απομακρυσμένοι αισθητήρες όπου είναι δύσκολη η πρόσβαση ή σε περιπτώσεις όπου απαιτείται συχνά αντικατάσταση των συμβατικών μπαταριών. Παράλληλα επιτυγχάνεται μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος.

3.2 Ιστορική αναδρομή

Το energy harvesting ή όπως μεταφράζεται στα ελληνικά «συλλογή περιβάλλουσας ενέργειας», είναι μια τεχνολογία η οποία αυξάνεται τα τελευταία χρόνια, όπου αντιληφθήκαμε ότι οι παραδοσιακές πηγές ενέργειας δεν καλύπτουν τις ενεργειακές απαιτήσεις και στρέψαμε την προσοχή μας στην εκμετάλλευση εναλλακτικών πηγών ενέργειας.

Παρότι η έννοια αυτή στηρίζεται σε φυσικά φαινόμενα που είναι γνωστά εδώ και αιώνες, η ιστορία του ξεκινάει από τον 18ο αιώνα και γνώρισε ιδιαίτερη τεχνολογική πρόοδο κατά το δεύτερο ήμισυ του 20ού αιώνα, κυρίως λόγω της ανάγκης για ενεργειακή αυτονομία σε απομακρυσμένες εφαρμογές και της προόδου στη μικροηλεκτρονική.

Το 1831 οι Joseph Henry και Michael Faraday ανακαλύπτουν ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο την αρχή της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, αποδεικνύοντας ότι ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο μπορεί να προκαλέσει ηλεκτρικό ρεύμα σε ένα αγωγίμο κύκλωμα. Η θεμελιώδης αυτή ανακάλυψη γεννήσε όχι μόνο τις κλασικές γεννήτριες αλλά και τα σύγχρονα ηλεκτρομαγνητικά κυκλώματα συγκομιδής ενέργειας, όπως αυτά που βρίσκουμε σε δονητικά harvesters και πιεζοηλεκτρικές εφαρμογές.

Ωστόσο, η πρώτη ιστορικά τεκμηριωμένη ανακάλυψη με άμεση σχέση στη συγκομιδή ενέργειας είναι το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο, που μελετήθηκε από τον Alessandro Volta και κατ' όνομα αποδόθηκε στον Thomas Seebeck. Χρειάστηκε να περάσουν τρεις δεκαετίες όπου διερευνήθηκαν τα βασικά θερμοηλεκτρικά φαινόμενα και κατανοήθηκαν μακροσκοπικά ώστε να αναγνωριστεί η δυνατότητα εφαρμογής τους στην θερμομετρία, στην ψύξη αλλά σημαντικότερα στην παραγωγή ενέργειας. Κατά τις δεκαετίες του 1960–1970, θερμοηλεκτρικές γεννήτριες (TEGs) χρησιμοποιήθηκαν εκτενώς σε διαστημικές αποστολές, όπως στα συστήματα RTG (Radioisotope Thermoelectric Generators) της NASA, αξιοποιώντας ραδιενεργά υλικά για μακροχρόνια, αξιόπιστη παραγωγή ενέργειας στο διάστημα. Την ίδια περίοδο, οι τεχνολογίες μικροηλεκτρονικών και αισθητήρων άρχισαν να αναπτύσσονται ραγδαία, δημιουργώντας τις πρώτες ανάγκες για miniaturized ενεργειακές λύσεις.

Στα χρόνια που ακολούθησαν προέκυψε η ανάγκη για τον κατάλληλο τρόπο αποθήκευσης της συλλεγόμενης ενέργειας. Για μια χαμηλής τάσης και μεγάλης διάρκειας ζωής μπαταρία. Αυτό έκανε τους επιστήμονες να ενδιαφέρονται για ειδικά υλικά ώστε να μπορέσουν να κατασκευάσουν ένα προϊόν ευρείας κατανάλωσης. Χρησιμοποίησαν ραδιενεργά υλικά προκειμένου να αντλήσουν θερμότητα ώστε να κατασκευαστούν οι κατάλληλες γεννήτριες αξιοποιώντας τις διατάξεις από μικροσκοπικά μέρη, τα θερμοστοιχεία σε μονολιθική δομή. Η συγκεκριμένη μέθοδος αξιοποιήθηκε για την τροφοδοσία σε επιχειρήσεις τροφοδοσίας συσκευών στο διάστημα. Με τους ερευνητές να στρέφουν το ενδιαφέρον τους στην κατασκευή αντίστοιχων μικρότερων και πιο αποδοτικών γεννητριών.

Σήμερα, το energy harvesting δεν αποτελεί μόνο λύση για εξειδικευμένες εφαρμογές αλλά μία θεμελιώδη τεχνολογία για το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) και τα έξυπνα συστήματα πόλεων, ενέργειας και υγείας (Φιλιππουπολίτη, 2022).

3.3 Τεχνολογία πυκνωτών και μπαταριών

Η αποθήκευση ενέργειας αποτελεί κρίσιμο υποσύστημα στα κυκλώματα συλλογής ενέργειας (energy harvesting), καθώς οι πηγές περιβαλλοντικής ενέργειας (όπως φως, δονήσεις, θερμότητα ή RF ακτινοβολία) δεν παρέχουν σταθερή ή συνεχόμενη ισχύ. Οι μπαταρίες και οι πυκνωτές ή υπερπυκνωτές που χρησιμοποιούνται σε energy harvesting κυκλώματα είναι πολύ σημαντικά μέρη καθώς λαμβάνουν, αποθηκεύουν και διοχετεύουν την μετατρεπόμενη ενέργεια. Σχεδόν όλες οι φορητές ηλεκτρικές συσκευές χρησιμοποιούν μπαταρίες ώστε να λαμβάνουν την ανάλογη ηλεκτρική ενέργεια για να λειτουργήσουν.

Με την πάροδο του χρόνου έχουμε δει μεγάλη αύξηση στην χωρητικότητα αποθήκευσης τους και όσο η τεχνολογία συνεχίζει και εξελίσσεται με αντίστοιχο ρυθμό η αύξηση της χωρητικότητας των μπαταριών θα λάβει ακόμα μεγαλύτερη εξέλιξη. Μειονέκτημα στις μέχρι τώρα εξελίξεις αποτελεί η μη επιτυχής μείωση του μεγέθους των μπαταριών. Δηλαδή να επιτευχθεί μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα. Ενδεικτικά από το 1990 η πυκνότητα αποθήκευσης έχει αυξηθεί σχεδόν 1.500 φορές, ενώ η ενεργειακή πυκνότητα μόλις 3 φορές. Αποτελώντας βασικό πρόβλημα για την κατασκευή των ηλεκτρονικών συσκευών, επηρεάζοντας το βάρος και το μέγεθος τους, ώστε να τοποθετηθεί η κατάλληλη μπαταρία που θα κάλυπτε τις ενεργειακές απαιτήσεις. Βάση πρόσφατων ερευνών εξετάζεται η αντικατάσταση των περισσότερων συμβατικών τύπων μπαταριών όπως ιόντων λιθίου (Li-ion), νικελίου καδμίου (Ni-Cd) ή νικελίου υβριδίου (Ni-MH), επιλέγοντας κυψέλες καυσίμου οι οποίες θα προσφέρουν σε σύγκριση με τις μπαταρίες τουλάχιστον 3 φορές μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα.

Στην περίπτωση των πυκνωτών και των υπερπυκνωτών, δεν υπάρχει κάποια εξωτερική διαφορά. Οι διαφορές τους βρίσκεται στον τρόπο με τον οποίο γίνεται η αποθήκευση της ενέργειας, στην ενεργειακή πυκνότητα και στην ισχύ που προσφέρουν (εικόνα 3.1). Τέλος οι απλοί πυκνωτές συγκριτικά με τους υπερπυκνωτές φορτίζουν και εκφορτίζουν πιο γρήγορα και έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.

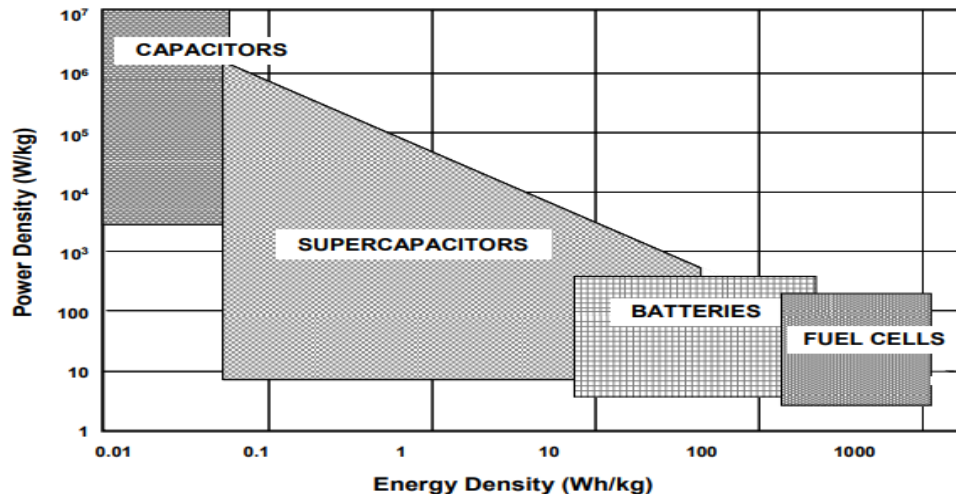
Ο πιο συνηθισμένος τύπος πυκνωτών που χρησιμοποιείται είναι ο ηλεκτρολυτικός πυκνωτής (RLAC). Το εύρος της χωρητικότητας κυμαίνεται από pF έως λίγα Farad. Οι

πυκνωτές αυτοί προσφέρουν γρήγορη απόδοση ενέργειας, χρησιμοποιούνται τόσο για εξομάλυνση όσο και για σταθεροποίηση τάσης. Δεδομένου ότι δεν έχουν μεγάλη ενεργειακή χωρητικότητα, δεν επαρκεί για τις περισσότερες εφαρμογές σε κυκλώματα συλλογής ενέργειας, ώστε να εξασφαλίσει την βιωσιμότητα ενός μεγάλου κυκλώματος μακροχρόνια, και για αυτό επιλέγονται για χρήση σε μικρά κυκλώματα.

Θα μπορούσε να συνδεθούν σε σειρά πολλοί πυκνωτές αλλά θα μεγάλωνε σημαντικά το μέγεθος του κυκλώματος, και για αυτό τον λόγο δεν έχει εφαρμοστεί στην πράξη.

Η λύση έρχεται με την χρησιμοποίηση των υπερπυκνωτών. Οι υπερπυκνωτές γνωστοί και ως supercapacitors ή ηλεκτροχημικοί πυκνωτές διπλής στρώσης (EDLC) αποτελούνται από δύο ηλεκτρόδια, έναν ηλεκτρολύτη και έναν διαχωριστή. Σε αντίθεση με τους συμβατικούς πυκνωτές οι οποίοι λειτουργούν δημιουργώντας ηλεκτροστατικό πεδίο, οι υπερπυκνωτές χρησιμοποιούν ηλεκτροχημικές αντιδράσεις σε επίπεδο επιφάνειας (διπλή ηλεκτρική στοιβάδα) ή μέσω ψευδοχωρητικότητας. Επιτυγχάνουν την αποθήκευση πολύ μεγαλύτερης ποσότητας από έναν συμβατικό πυκνωτή αλλά χαμηλότερη τάση από μια μπαταρία.

Στο γράφημα που ακολουθεί φαίνονται συγκριτικά οι συμβατικοί πυκνωτές, οι υπερπυκνωτές, οι μπαταρίες και οι κυψέλες καυσίμου. Παρατηρούμε ότι οι συμβατικοί πυκνωτές έχουν την υψηλότερη ισχύ αλλά την λιγότερη ενεργειακή πυκνότητα. Αντιστρόφως ανάλογα οι κυψέλες καυσίμου έχουν την υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα με την χαμηλότερη τάση. Οι υπερπυκνωτές όπως βλέπουμε είναι ανάμεσα στο εύρος των πυκνωτών και των μπαταριών, προσφέροντας υψηλή τάση και χωρητικότητα.



Εικόνα 3.1 Energy-Power Density graph.⁵

3.4 Κατηγορίες κυκλωμάτων συγκομιδής ενέργειας

Τα κυκλώματα συγκομιδής περιβάλλουσας ενέργειας όπως έχουμε δει δεν βασίζονται αποκλειστικά σε μια μόνο πηγή ενέργειας, ή σε έναν μόνο τρόπο μετατροπής της σε ηλεκτρική. Ακολουθώντας κάθε κύκλωμα προσδιορίζεται βάση ποιας θα είναι η διαχείριση ισχύος του και ποιος είναι ο σκοπός του κυκλώματος. Αναλυτικότερα:

- **Βάση της πηγής ενέργειας:** Ένα κύκλωμα μπορεί να χρησιμοποιεί σαν πηγή ενέργειας, είτε ακτινοβολούμενη ενέργεια, είτε θερμική ενέργεια, είτε μηχανική ενέργεια.
- **Βάση του τύπου του συλλέκτη:** Υπάρχουν διάφοροι τύποι συλλεκτών, αυτά μπορεί να είναι φωτοβολταϊκά, θερμοηλεκτρικές γεννήτριες, ή πιεζοηλεκτρικές γεννήτριες και μετατρέποντας ενέργεια από ραδιοσυχνότητες.
- **Βάση της διαχείρισης ισχύος:** Το εκάστοτε κύκλωμα μπορεί να σχεδιαστεί στο να τροφοδοτεί συνεχώς χωρίς να γίνεται αποθήκευση ενέργειας, στο να λειτουργεί αποκλειστικά για αποθήκευση ενέργειας ή συνδυαστικά διαθέτοντας πολλαπλούς συλλέκτες και αποθηκευτικά μέσα για καλύτερη απόδοση και αξιοπιστία.
- **Βάση του σκοπού:** Ολοκληρώνοντας μας ενδιαφέρει ο σκοπός τους. Όπου μπορεί να είναι σε εξωτερική χρήση για τροφοδοσία κάποιου απομακρυσμένου αισθητήρα, σε κάποιον φορέσιμο βιοαισθητήρα ή σε IoT συσκευή.

⁵ Halper, M.S. (2006) (https://www.mitre.org/sites/default/files/pdf/06_0667.pdf)

Αυτές είναι οι κύριες κατηγορίες για τα κυκλώματα συγκομιδής ενέργειας και αποτελούν τα κύρια κριτήρια στα οποία βασιζόμαστε για τον σχεδιασμό ενός κυκλώματος. Τα ίδια κριτήρια χρησιμοποιούνται και για την επιλογή της πηγής από την οποία θα αντληθεί η ενέργεια, τον τρόπο συλλογής της, τον προορισμό της μετατρεπόμενης ενέργειας, καθώς και την εκτίμηση του αν αυτή επαρκεί για τον επιθυμητό σκοπό ή αν απαιτούνται περαιτέρω παραμετροποιήσεις.

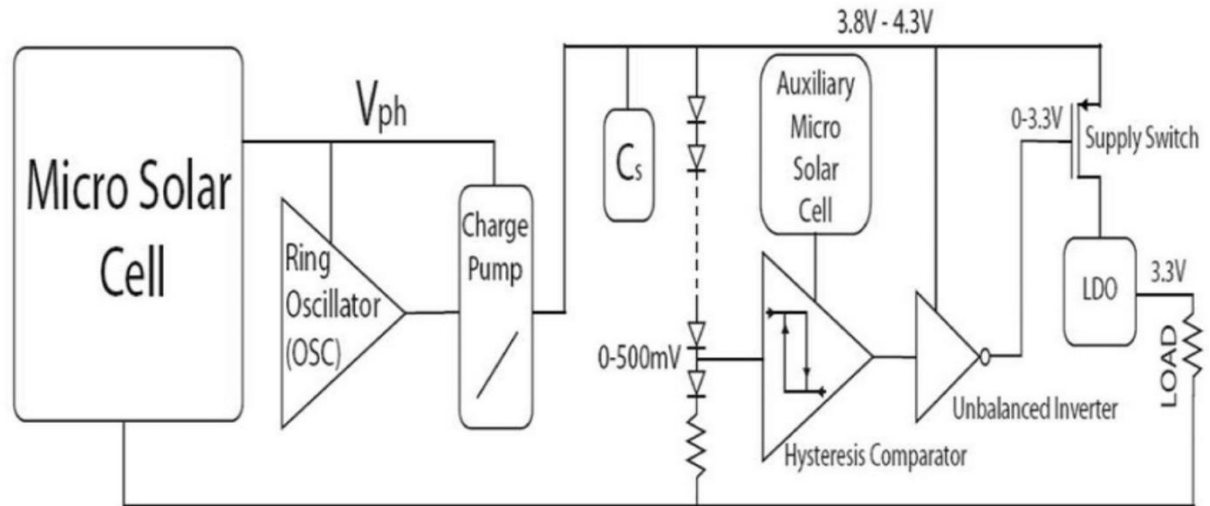
3.4.1 Φωτοβολταϊκά κυκλώματα

Τα φωτοβολταϊκά κυκλώματα θεωρούνται πλέον μία από τις πιο καθιερωμένες λύσεις για την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας, καθώς βασίζονται στη άμεση μετατροπή της ενέργειας από τα φωτόνια του περιβάλλοντος σε ηλεκτρισμό. Τα φωτοβολταϊκά πάνελ είναι σχεδιασμένα να εκμεταλλεύονται την εκπομπή φωτονίων από το ηλιακό φως ή το φως εσωτερικών χώρων και να τα μετατρέπουν σε ρεύμα. Ένα βασικό στοιχείο που χρησιμοποιείται στην κατασκευή των πάνελ είναι το πυρίτιο, το οποίο επιλέγεται επειδή είναι ημιαγωγός. Στο πλαίσιο των συστημάτων εκμετάλλευσης ενέργειας, τα ηλιακά κύτταρα (ή πάνελ) ενσωματώνονται σε συσκευές αποθήκευσης (για παράδειγμα: πυκνωτές ή επαναφορτιζόμενες μπαταρίες) και με στοιχεία ελέγχου ισχύος όπως διόδους και ρυθμιστές τάσης.

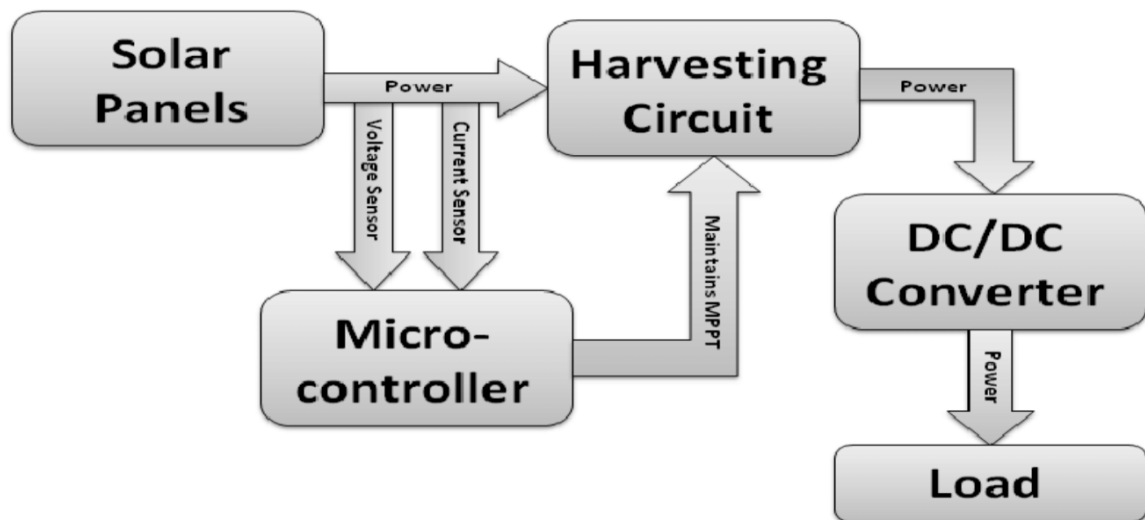
Η ηλιακή ενέργεια που συλλέγεται μέσω φωτοβολταϊκών συστημάτων μπορεί να αποθηκευτεί για μελλοντική χρήση ή να χρησιμοποιηθεί απευθείας για την τροφοδότηση μικροελεγκτών, αισθητήρων και πομπών. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε εφαρμογές όπως τα συστήματα απομακρυσμένης παρακολούθησης ή οι φορητοί αισθητήρες για αγροτικές ή περιβαλλοντικές μετρήσεις. Η συνολική τους αποτελεσματικότητα προσδιορίζεται από τις συνθήκες φωτισμού, τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή (π.χ.: μονοκρυσταλλικός πυρίτιος) και την τεχνική διασύνδεσης κυκλωμάτων με άλλα στοιχεία εντός του κυκλώματος.

Ένα πλήρες κύκλωμα συγκομιδής ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκού περιλαμβάνει τη φωτοβολταϊκή μονάδα η οποία είναι συνδεδεμένη με πυκνωτές ή μπαταρίες για αποθήκευση ενέργειας, έναν MPPT ελεγκτή (Maximum Power Point Tracking) για μεγιστοποίηση της ισχύος, έναν DC-DC (Direct Current) μετατροπέα για την εξομάλυνση κάποιων μεταβολών στη τάση, και τελικά αποθηκευτικά στοιχεία όπως πυκνωτές ή επαναφορτιζόμενες μπαταρίες. Στην εικόνα 3.2 παρουσιάζεται ένα τυπικό κύκλωμα συγκομιδής ενέργειας βασισμένο σε φωτοβολταϊκή πηγή, το οποίο περιλαμβάνει

PV πάνελ, μετατροπείς, MPPT ελεγκτή και σύστημα αποθήκευσης. Η εικόνα απεικονίζει τον πλήρη κύκλο της ενέργειας, από τη συλλογή έως την τελική τροφοδοσία μικροελεγκτών ή αισθητήρων (H Sharma, 2019). Επιπλέον, στην εικόνα 3.3 παρουσιάζεται ένα πιο απλουστευμένο διαγραμμα ροής ενός κυκλώματος συλλογής ηλιακής ενέργειας για την καλύτερη κατανόηση της εικόνας 3.2 (G. Honan, 2015).



Εικόνα 3.2 Διάγραμμα κυκλώματος συλλογής φωτοβολταϊκής ενέργειας.⁶



Εικόνα 3.3 Block διάγραμμα κυκλώματος συλλογής ηλιακής ενέργειας.⁷

⁶Sharma,Himanshu.(2019).(https://www.researchgate.net/publication/337486805_A_Survey_of_Energy_Harvesting_Technologies_for_Wireless_Sensor_Networks)

⁷ Grayson Honan, Nicholas Gekakis, Moeen Hassanali, Andrew Nadeau, Gaurav Sharma, Tolga Soyata, (https://www.researchgate.net/publication/280924380_Energy_Harvesting_and_Buffering_for_Cyber_Physical_Systems_A_Review)

Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα έχουν χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές που χρειάζονται αξιόπιστη αυτόνομη αδιάλειπτη λειτουργία κατά τη διάρκεια της ημέρας, όπως οι εξωτερικές συσκευές IoT (Internet of Things), οι φορητοί αισθητήρες ή οι συσκευές περιβαλλοντικής μέτρησης. Η απόδοσή τους εξαρτάται από την ένταση του φωτισμού, τη γωνία πρόσπτωσης, τη θερμοκρασία και την ποιότητα των ηλιακών κυττάρων. Στον εξωτερικό χώρο, μπορούν να επιτύχουν 20-25% αποδοτικότητα, αλλά σε εσωτερικό χώρο γίνεται πολύ χειρότερα (1-5%).

3.4.2 Πιεζοηλεκτρικά κυκλώματα

Τα πιεζοηλεκτρικά κυκλώματα αξιοποιούν πιεζοηλεκτρικά υλικά που ηλεκτρίζονται όταν τους ασκηθεί μηχανική πίεση ή δόνηση. Η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική χάρη στη δρομολόγηση της ενέργειας σε περιβάλλοντα με συνεχή κίνηση, η ενέργεια αυτή εφαρμόζεται δραστικά σε κυκλώματα energy harvesting.

Σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα συγκομιδής ενέργειας, το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο λειτουργεί ως πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος (AC). Το ρεύμα αυτό επεξεργάζεται μέσω διόδων Schottky (λόγω της χαμηλής πτώσης προωθητικής τάσης τους) και κατευθύνεται σε μια μονάδα αποθήκευσης, η οποία μπορεί είτε να είναι ένας πυκνωτής είτε μια μπαταρία. Λόγω της ασθενούς και διαλείπουσας ενέργειας που παράγεται, υπάρχει ανάγκη για έναν άλλο μετατροπέα DC-DC ενίσχυσης που μετατρέπει χαμηλότερες τάσεις σε χρήσιμα επίπεδα τάσεως για μικροελεγκτές ή αισθητήρες (S. R. Anton, 2007).

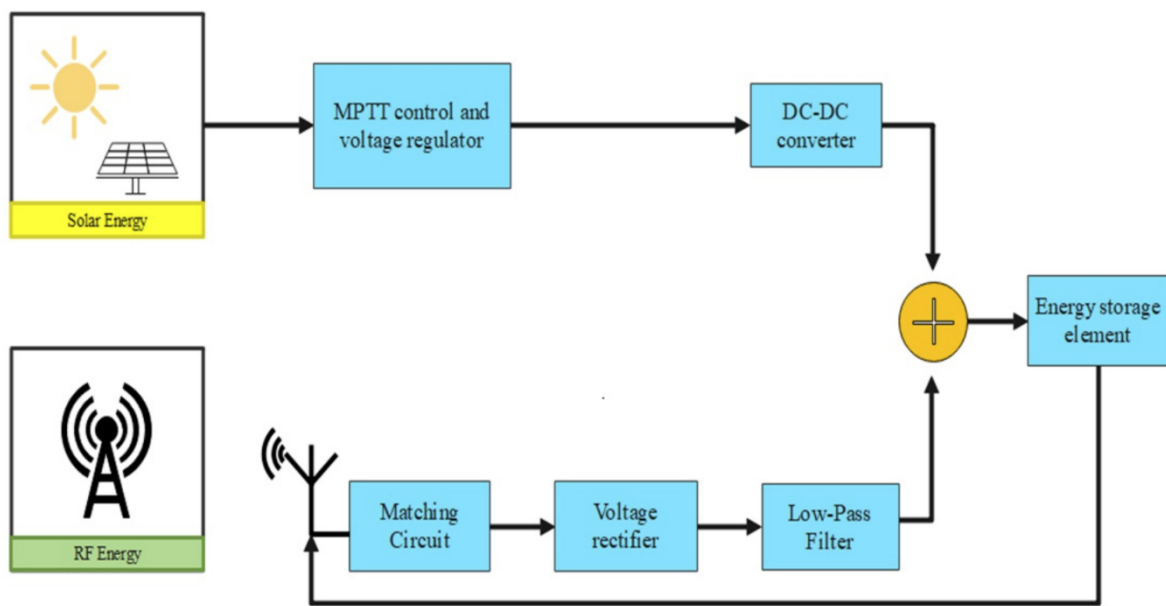
Επειδή η παραγόμενη ενέργεια είναι περιοδική και μικρής έντασης (μερικά mW), η συμβολή που μπορούν να κάνουν τα πιεζοηλεκτρικά κυκλώματα στη συγκομιδή ενέργειας έγκειται στη λειτουργική αυτονομία αυτοτροφοδοτούμενων συστημάτων σε περιβάλλοντα με διαλείπουσα μηχανική διέγερση. Πιο συγκεκριμένα, οι πιεζοηλεκτρικές πηγές ενσωματώνονται κυρίως σε υβριδικά κυκλώματα συγκομιδής ή σε συστήματα που χρειάζονται μόνο περιστασιακή παροχή ενέργειας (π.χ. αποστολή πακέτου δεδομένων σε ασύρματο δίκτυο).

3.4.3 Ασύρματη μεταφορά ενέργειας

Η ασύρματη μεταφορά ενέργειας (Wireless Power Transfer – WPT) αναφέρεται στη χρήση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ή μαγνητικής επαγωγής για ασύρματη παροχή ενέργειας. Επιπλέον, αυτού του είδους η ενέργεια συσχετίζεται με τα συστήματα συγκομιδής ενέργειας είτε για μεταφορά ενέργειας μικρών αποστάσεων μέσω επαγωγικής

σύνδεσης είτε μέσω συγκομιδής περιβαλλοντικής ακτινοβολίας όπως στη συγκομιδή RF. Τα συστήματα ασύρματης μεταφοράς ενέργειας λειτουργούν βάση της αρχής της εκπομπής και της λήψης ραδιοφωνικών συχνοτήτων και μαγνητικών πεδίων για να τροφοδοτούν συσκευές ηλεκτρονικών χαμηλής ισχύος μεταφέροντας ενέργεια σε αυτές.

Στην εικόνα 3.4 φαίνεται η βασική αρχιτεκτονική ενός κυκλώματος συγκομιδής ενέργειας από RF σήματα. Περιλαμβάνει κεραία συλλογής, κύκλωμα αντιστοίχισης, ανορθωτή, αποθηκευτικό μέσο και σταθεροποιητή. Αυτό το κύκλωμα εφαρμόζεται σε RFID tags, παθητικούς αισθητήρες, ακόμα και σε smart wearables (S.G Veloo, 2023).



Εικόνα 3.4 Διάγραμμα κυκλώματος συγκομιδής ενέργειας από RF σήματα.⁸

Το RF harvesting έχει το πλεονέκτημα της καθολικής πρόσβασης σε πηγή ενέργειας (όπου υπάρχει σήμα), αλλά μειονέκτημα τη χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα. Για να χρησιμοποιηθεί λειτουργικά, το harvested κύκλωμα πρέπει να έχει εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ή να διαθέτει μονάδα αποθήκευσης για παλμική λειτουργία. Επίσης, Η σύνδεση με τη συγκομιδή ενέργειας έγκειται στην ικανότητά του να τροφοδοτεί ασύρματους αισθητήρες, ειδικά εκεί όπου δεν υπάρχουν άλλες φυσικές πηγές, όπως σε αποθηκευτικούς χώρους ή βιομηχανικές εγκαταστάσεις.

Η ασύρματη μεταφορά είναι ιδανική για παθητικά ή ημι-παθητικά κυκλώματα, καθώς και για τροφοδοσία σε απομακρυσμένους αισθητήρες χαμηλής ισχύος. Η κύρια πρόκληση

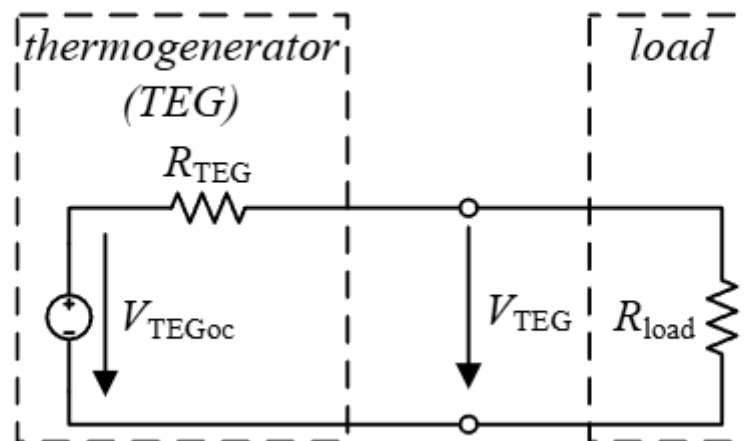
⁸Veloo, S. G., Tiang, J. J., Muhammad, S., & Wong, S. K. (2023) (<https://www.mdpi.com/2079-9292/12/19/4045>)

είναι η χαμηλή ενεργειακή απόδοση (συνήθως <1%), γεγονός που περιορίζει τη χρήση της σε εξαιρετικά ενεργειακά αποδοτικά κυκλώματα.

3.4.4 Θερμικά κυκλώματα συγκομιδής

Τα θερμικά κυκλώματα συγκομιδής ενέργειας βασίζονται στη μετατροπή θερμικής διαφοράς μεταξύ δύο υλικών σε ηλεκτρική τάση μέσω του στο φαινόμενο Seebeck. Η τεχνολογία αυτή καθιστά εφικτή την παροχή ισχύος σε κυκλώματα που λειτουργούν κοντά σε πηγές θερμότητας, όπως ο ανθρώπινος οργανισμός, κινητήρες ή ακόμα και τα ηλεκτρονικά ίδια. Οι πιο κοινές συσκευές που αξιοποιούν αυτή την αρχή είναι οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες (Thermoelectric Generators – TEGs), οι οποίες αποτελούνται από σειρά ημιαγωγών τύπου P και N. Αυτά τα στοιχεία ενσωματώνονται σε energy harvesting κυκλώματα για να αξιοποιήσουν τη θερμότητα από το ανθρώπινο σώμα, το περιβάλλον ή βιομηχανικές διεργασίες.

Στην Εικόνα 3.5 παρουσιάζεται το μοντέλο κυκλώματος ενός θερμοηλεκτρικού συλλέκτη ενέργειας. Ο συλλέκτης ενέργειας TEG μπορεί να μοντελοποιηθεί από μια πηγή τάσης DC σε σειρά με την εσωτερική αντίσταση R_{TEG} . Η τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{TEGoc} παράγεται λόγω του φαινομένου Seebeck και το R_{TEG} είναι η συνολική αντίσταση σειράς των θερμοηλεκτρικών ποδιών (J. Leicht, 2013).



Εικόνα 3.5 Μοντέλο κυκλώματος του θερμοηλεκτρικού συλλέκτη ενέργειας.⁹

⁹ Joachim Leicht *et al* 2013(<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/476/1/012022>)

Τα κυκλώματα TEG βρίσκουν εφαρμογή βιοϊατρικούς αισθητήρες, καθώς και σε σενάρια όπου υπάρχει σημαντική διαφορά θερμοκρασίας (δηλαδή, θερμικοί σύνδεσμοι και μεταλλικές επιφάνειες). Η χαμηλή ισχύς εξόδου τους (που κυμαίνεται από μW έως μερικά mW) περιορίζει τη χρησιμότητά τους σε κυκλώματα κατανάλωσης υπερβολικά χαμηλής ισχύος.

3.5 Τεχνολογίες και συσκευές χρησιμοποιούμενες στη συγκομιδή ενέργειας

Με την διαρκή εξέλιξη των υπαρχόντων και την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών συνεχίζεται η βελτίωση των αντίστοιχων κυκλωμάτων και των συσκευών που χρησιμοποιούνται σε αυτά. Ανεξάρτητα από την πηγή ενέργειας που χρησιμοποιείται στο εκάστοτε κύκλωμα συγκομιδής ενέργειας, όλα στην βάση τους χρειάζονται τρία κοινά μέρη προκειμένου να λειτουργήσουν. Αυτά είναι τα εξής:

- **Ο συλλέκτης ενέργειας:** Αυτό είναι το μέρος το οποίο μετατρέπει την περιβάλλουσα ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Ανάλογα με την δομή του κυκλώματος μπορεί για παράδειγμα να είναι είτε φωτοβολταϊκό, πιεζοηλεκτρικό ή ότι έχει επιλεγεί βάση των αναγκών.
- **Οι ρυθμιστές του κυκλώματος:** Κάθε κύκλωμα λόγω του γεγονότος ότι η συλλεγόμενη ενέργεια δεν είναι σταθερή και πολλές φορές δεν είναι υψηλής τάσης ή έντασης, απαιτείται να υπάρχουν οι κατάλληλοι ρυθμιστές όπως είναι οι boost converters, οι ανορθωτές και ρυθμιστές τάσης ώστε η συλλεγόμενη ενέργεια να είναι κατάλληλη για χρήση ώστε τα κυκλώματα να λειτουργούν με τον βέλτιστο τρόπο.
- **Ρυθμιστές φορτίου:** Σε πολλά κυκλώματα χρησιμοποιούνται συσκευές οι οποίες σαν σκοπό έχουν να ελέγχουν το φορτίο το οποίο ζητείται και αναλόγως να καθορίζουν
- **Αποδέκτες ενέργειας:** Η μετατρέψιμη ενέργεια μπορεί είτε να διοχετευτεί κατευθείαν και να τροφοδοτήσει τις ηλεκτρονικές συσκευές που είναι συνδεδεμένες, όπως είναι για παράδειγμα οι αισθητήρες. Είτε να αποθηκευτεί σε πυκνωτές, υπερπυκνωτές ή μπαταρίες και να είναι διαθέσιμη για όποτε χρειαστεί.

Στην συνέχεια θα μελετήσουμε κυκλώματα τα οποία αποτελούνται από συνδυαστικά κυκλώματα συγκομιδής ενέργειας και υβριδική συγκομιδή ενέργειας. Θα αναφερθούμε με

παραδείγματα σε εφαρμογές που έχουν στην ζωή μας, καθώς και σε σχεδιασμούς που προορίζονται για μελλοντική χρήση.

3.6 Υβριδική συγκομιδή ενέργειας

Η τεχνοτροπία κατά την οποία συλλέγεται ενέργεια αξιοποιώντας πολλαπλές πηγές ενέργειας όπως η ηλιακή, η κινητική, η θερμική, η ηλεκτρομαγνητική ή η αιολική, ταυτόχρονα ή συνδυαστικά ονομάζεται υβριδική συγκομιδή ενέργειας (hybrid energy harvesting). Τα υβριδικά κυκλώματα χρησιμοποιώντας πολλαπλούς συλλέκτες όπως τα φωτοβολταϊκά πάνελ, οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες ή πιεζοηλεκτρικούς μετατροπείς έχουν ως κύριο στόχο να παρέχουν συνεχή και ικανοποιητική ενέργεια στις συνδεδεμένες ηλεκτρονικές συσκευές, χωρίς να υπάρχουν ενεργειακά κενά και πτώσεις τάσης. Αξιοποιώντας πολλαπλές πηγές επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή απόδοση του συστήματος, διασφαλίζοντας την αξιοπιστία λειτουργίας, την ενεργειακή αυτονομία και την βιωσιμότητα του συστήματος χωρίς να χρειάζεται η ανθρώπινη παρέμβαση ή η χρήση εξωτερικών φορτιστών.

Στην πλειοψηφία τους τα υβριδικά κυκλώματα συλλογής ενέργειας εμφανίζουν την εξής ομοιότητα στους συλλέκτες από τους οποίους τροφοδοτούνται. Σαν βασική πηγή τροφοδοσίας χρησιμοποιούν την ηλιακή ενέργεια με την χρησιμοποίηση των φωτοβολταϊκών πάνελ. Στην συνέχεια το πλήθος και ο τύπος των απαιτούμενων πρόσθετων πηγών που θα χρησιμοποιηθούν εξαρτάται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή όπου θα τοποθετηθεί το κύκλωμα υβριδικής συγκομιδής. Όπως έχουμε αναλύσει και σε προηγούμενα κεφάλαια ο σκοπός και η χρησιμοποίηση του κυκλώματος επηρεάζει την τοπολογία η οποία θα αξιοποιηθεί για την κατασκευή του. Το πείραμα το οποίο υλοποιήσαμε στην παρούσα πτυχιακή εργασία έχει κατασκευαστεί ώστε να λειτουργεί λαμβάνοντας ενέργεια από τρεις διάφορες πηγές, κάνοντας το ένα παράδειγμα κυκλώματος υβριδικής συλλογής ενέργειας.

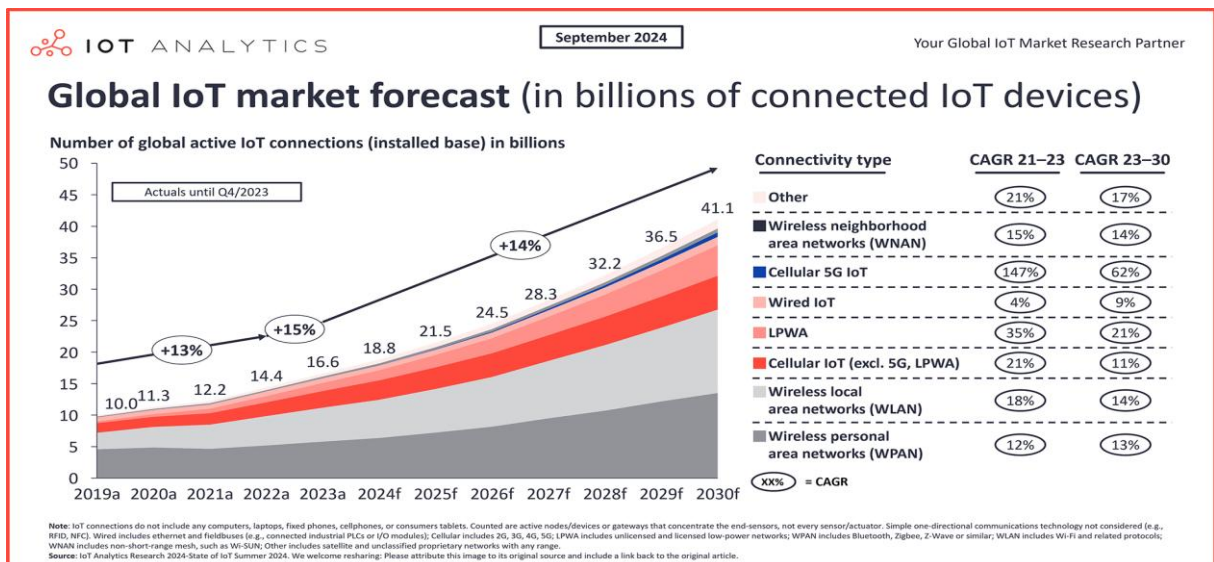
3.7 Εφαρμογές της συγκομιδής ενέργειας

Η συγκομιδή περιβάλλοντος ενέργειας (energy harvesting) είναι η διαδικασία συλλογής ενέργειας από φαινόμενα που υπάρχουν γύρω μας, όπως είναι η ηλιακή ενέργεια, και η μετατροπή τους σε ηλεκτρική ενέργεια. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την μετατρέψιμη ενέργεια για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών. Έχοντας εφαρμογή στην ιατρική, στις επικοινωνίες, οι υποδομές και οι μεταφορές. Επιπροσθέτως τροφοδοτώντας συσκευές IoT, απομακρυσμένους αισθητήρες, μικρές ηλεκτρονικές συσκευές ακόμα και gadgets.

Παρακάτω ακολουθούν ενδεικτικά παραδείγματα τα οποία αξιοποιούν την συλλογή περιβάλλοντος ενέργειας για την τροφοδοσία τους.

3.7.1 IoT (Internet of the Things)

Με τον όρο διαδίκτυο των αντικειμένων ή όπως ακούμε καθημερινά Internet of Things αναφέρεται στο πλήθος των φυσικών αντικειμένων τα οποία είναι συνδεδεμένα σε ένα κοινό δίκτυο και μέσα από το ενσωματωμένο σύστημα που διαθέτουν, τους επιτρέπεται η κοινή χρήση, η συλλογή, η αποστολή και η επεξεργασία δεδομένων. Αυτές οι συσκευές μπορεί να είναι οτιδήποτε. Από το αμάξι που οδηγούμε, το κινητό που χρησιμοποιούμε, μέχρι και το ψυγείο ή διάφοροι τύποι αισθητήρων. Όλα αυτά επιτυγχάνονται χωρίς την αλληλεπίδραση με τον άνθρωπο. Η φυσική παρέμβαση προέκυπτε για την τροφοδοσία της εκάστοτε συσκευής. Μέσω του energy harvesting αυτή η συνθήκη περιορίζεται σχεδόν ολοκληρωτικά καθώς πλέον τα συστήματα εξελίσσονται και γίνονται ενεργειακά αυτόνομα. Αξιοποιώντας στην κάθε περίπτωση με τον καλύτερο τρόπο την διαθέσιμη ενέργεια από το περιβάλλον για την εξασφάλιση της βιωσιμότητας τους. Η εξέλιξη της συγκεκριμένης τεχνολογίας σημειώνει ραγδαία αύξηση που μονοπωλεί το ενδιαφέρον. Στο τέλος του 2024 υπήρχαν πάνω από 18 δισεκατομμύρια συνδεδεμένες συσκευές, αύξηση 13% σε σύγκριση με το προηγούμενο έτος. Σύμφωνα με τις πιο πρόσφατες εκτιμήσεις στο τέλος της τρέχουσας χρονιάς θεωρούν πως θα ξεπεράσουν τις 27 δισεκατομμύρια συνδεδεμένες συσκευές ενώ το 2030 θα έχουν φτάσει πάνω από 50 δισεκατομμύρια συσκευές. Στόχος η επέκταση της τεχνολογίας αυτής στην κάλυψη των αναγκών σε ακόμα περισσότερους κλάδους. (IoT-analytics, 2024)



Εικόνα 3.6 IoT connected devices forecast.¹⁰

3.7.2 Εφαρμογές στην ιατρική

Με την εξέλιξη της τεχνολογίας παράλληλα εξελίσσεται και η ιατρική. Αποτέλεσμα να βελτιώνεται διαρκώς το επίπεδο φροντίδας των ασθενών. Μια από τις πιο πρόσφατες αλληλεπιδράσεις μεταξύ των δύο κλάδων ήταν η κατασκευή φορέσιμων βιοαισθητήρων για την διαρκή παρακολούθηση της πορείας της υγείας του ασθενή. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι φορέσιμοι βιοαισθητήρες γλυκόζης, τα οποία είναι εμφυτεύματα τα οποία τοποθετούνται και μένουν για πολύ μεγάλα χρονικά διαστήματα στο σώμα του ασθενή. Η συλλογή ενέργειας από το ανθρώπινο σώμα επιτυγχάνεται αξιοποιώντας θερμοηλεκτρικά ή πιεζοηλεκτρικά κυκλώματα, τα οποία αντλούν ενέργεια είτε από την κίνηση του σώματος ή από την διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ σώματος και περιβάλλοντος. Πιο πρόσφατες έρευνες ανέδειξαν σαν πηγή τροφοδοσίας την κίνηση των κυττάρων γλυκόζης στο αίμα και μετατρέποντας μέσω ενζυμικών αντιδράσεων την χημική ενέργεια των κυττάρων σε ηλεκτρική για την αυτονομία των αισθητήρων αυτών. Ως αποτέλεσμα παράγεται ηλεκτρική ενέργεια από 10μW έως 1mW προκειμένου να τροφοδοτηθούν οι βιοαισθητήρες. Η τεχνολογία αυτή αποτελεί μια καινοτόμο λύση για την ενέργεια σε ιατρικές εφαρμογές, προσφέροντας αυτονομία σε συσκευές όπως οι συνεχείς μετρητές γλυκόζης, μειώνοντας έτσι την ανάγκη για αντικατάσταση ή επαναφόρτιση μπαταριών. (Shuno,2022)

¹⁰ Sinha, S. (2024) - (<https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices/>)

3.7.3 Εφαρμογές στις μεταφορές

Με την αύξηση των συστημάτων ασφαλείας στα μέσα μεταφοράς, είτε αυτά είναι μαζικής μεταφοράς είτε όχι, συνεπάγεται και αύξηση του αριθμού των αυτοτροφοδοτούμενων αισθητήρων που χρησιμοποιούνται για την συλλογή πληροφοριών. Κύριο ζητούμενο η πηγή τροφοδοσίας τους. Κριτήρια αποτελούν η χρήση του αισθητήρα και το περιβάλλον στο οποίο θα λειτουργεί. Στα οχήματα τείνει να καθιερωθεί η τοποθέτηση αισθητήρων για την παρακολούθηση της πίεσης των ελαστικών. Αυτό επιτυγχάνεται με την αξιοποίηση πιεζοηλεκτρικών γεννητριών οι οποίες μπορεί να αντλήσουν έως και 200μW, ανάλογα με τις συνθήκες όπως είναι η ομαλότητα του δρόμου και η ταχύτητα. Ενέργεια μπορεί να συλλεχτεί και από την θερμότητα που ελκύεται η οποία μπορεί να προέρχεται είτε από την μηχανή του οχήματος ή από τα καυσαέρια που παράγει. Οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες που χρησιμοποιούνται σε τέτοιου είδους εφαρμογές μπορούν να παράγουν έως 100mW, η οποία είναι επαρκή ώστε να τροφοδοτήσει μικρά κυκλώματα. Ακόμα ένα παράδειγμα αποτελεί και η χρήση πολλαπλών πηγών ενέργειας ώστε να καλυφθεί το ενεργειακό κενό. Στα πλοία για την τροφοδοσία συστημάτων συλλογής, πρόβλεψης και ανάλυσης καιρικών συνθηκών έχει σχεδιαστεί και υλοποιηθεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα το οποίο είναι ικανό να μπορεί να συλλέγει ενέργεια συγχρόνως από τρεις διαφορετικές πηγές έχοντας προδιαγραφές για την συλλογική κάλυψη αναγκών έως 5 Volts, καλύπτοντας τις ζητούμενες ανάγκες. Οι ερευνητικοί στόχοι του εργαστηρίου που οδήγησαν στην συγγραφή της παρούσας πτυχιακής εργασίας στηρίχθηκαν στο προαναφερθέν πείραμα. (Koutsos,2023)

3.7.4 Εφαρμογές στις επικοινωνίες

Στις επικοινωνίες και ειδικότερα στις τηλεπικοινωνίες για την τροφοδοσία και την ενεργειακή αυτονομία μικρών απομακρυσμένων αισθητήρων και κυκλωμάτων επιλέγεται η χρησιμοποίηση συστημάτων τα οποία συλλέγουν ενέργεια από το περιβάλλον. Αν αναλογιστούμε ότι κατανάλωση ενέργειας από τα δίκτυα επικοινωνιών, σταθμοί, πάροχοι, υπηρεσίες τηλεπικοινωνιών, αντιστοιχεί στο 2% της παγκόσμια κατανάλωσης ενέργειας, περίπου 350 TWh, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν εναλλακτικές πηγές ενέργειας. Ειδικότερα σε απομακρυσμένους αισθητήρες και στους σταθμούς εδάφους έχουν ξεκινήσει να τοποθετούνται ολοκληρωμένα συστήματα συλλογής και μετατροπής ενέργειας. Στους μεγάλους σταθμούς επιλέγονται μετατροπείς που μπορούν να παράγουν καθημερινά μεγάλες ποσότητες ενέργειας, όπως είναι τα φωτοβολταϊκά πανελς που μπορούν να φτάσουν έως 10kWh ανάλογα με το μέγεθος της εγκατάστασης και τις

περιβαλλοντικές συνθήκες. Σε περιοχές όπως η Αφρική και η Ασία έχουν ήδη τοποθετηθεί και χρησιμοποιούνται. Για μικρούς αισθητήρες, απομακρυσμένους πομπούς ή δέκτες επιλέγεται και η συλλογή ενέργειας από τα ραδιοκύματα (Radio Frequency energy harvesting) καθώς μπορεί να συλλέγει διαρκώς ενέργεια, αλλά πολύ λιγότερη σε σύγκριση με αυτήν που μπορεί να παραχθεί από ηλιακή ή αιολική ενέργεια. (Lambert et. al., 2012)

3.7.5 Εφαρμογές στις υποδομές

Πρόσφατες δημοσιεύσεις από την Ιαπωνία δείχνουν να έχουν τοποθετήσει ειδικά πλακάκια, τα οποία από κάτω τους έχουν τοποθετημένους πιεζοηλεκτρικούς μετατροπείς σε πολλά σημεία των πόλεων για την αξιοποίηση εναλλακτικών πηγών ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα η τοποθέτηση τους έχει γίνει στα σημεία των πόλεων όπου συνωστίζονται οι περισσότεροι κάτοικοι, τέτοια σημεία είναι εμπορικά κέντρα, σταθμοί μέσων μαζικής μεταφοράς, στα πεζοδρόμια κοντά στα σημεία αυτά. Επιπλέον έχει γίνει τοποθέτηση σε τμήματα από τους αυτοκινητόδρομους. Σκοπός τους είναι εκμεταλλευόμενοι την αυξημένη κίνηση σε αυτά τα πολυσύχναστα σημεία να καλύψουν μέρος των ενεργειακών απαιτήσεων της χώρας. Μέχρι στιγμής τα δεδομένα για την ποσότητα ενέργειας που μπορούν να συλλέξουν δεν μπορούν να επιβεβαιωθούν και για αυτό δεν αναγράφονται. (Munthali, 2024).

3.8 Διαχωρισμός έρευνας και πειράματος

Η έρευνα και το πείραμα είναι οι βασικές μέθοδοι της επιστημονικής διαδικασίας. Διαφέρουν όμως ως προς την δομή και τον σκοπό τους. Η έρευνα στηρίζεται στην ανάλυση, στην παρατήρηση και στην κατανόηση δεδομένων βιβλιογραφίας με σκοπό την δημιουργία συμπερασμάτων. Το πείραμα είναι η διαδικασία κατά την οποία μεταβάλλονται συγκεκριμένες μεταβλητές σε συγκεκριμένες συνθήκες. Η έρευνα μπορεί να είναι θεωρητική ή να προκύπτει εμπειρικά ενώ το πείραμα βασίζεται στην εξαγωγή αντικειμενικών συμπερασμάτων. Είναι σημαντικό να προσδιορίσουμε την φύση της εργασίας. Η παρούσα πτυχιακή εργασία δεν είναι ερευνητική, αποτελεί μέρος πειραματικής διαδικασίας. Παρότι υπάρχουν ερευνητικά χαρακτηριστικά σε κάποια κεφάλαια όπου χρησιμοποιήθηκαν βιβλιογραφικές αναφορές και στατιστικά στοιχεία για την ανάλυση και την τεκμηρίωση των δεδομένων που αναγράφονται δεν θεωρείται ερευνητική εργασία. Ο κύριος σκοπός της εργασίας περιλαμβάνει την ελεγχόμενη αλλαγή τιμών σε ανεξάρτητες μεταβλητές με το αποτέλεσμα να είναι ο χαρακτηρισμός των κυκλωμάτων που κατασκευάσαμε χάρης στις μετρήσεις που πραγματοποιήσαμε ώστε να

αξιολογήσουμε την απόδοση τους σε συνάρτηση με το φορτίο που θέσαμε σε κάθε περίπτωση.

4 Μετρήσεις απόδοσης κυκλωμάτων συγκομιδής ενέργειας.

Στο παρών κεφάλαιο θα αναφερθούμε στις κατηγορίες μετρήσεων όπου χρησιμοποιούνται για τον ακριβή χαρακτηρισμό και την αξιολόγηση κυκλωμάτων συγκομιδής περιβάλλουσας ενέργειας. Παρακάτω παρουσιάζεται αναλυτικά το πείραμα το οποίο υλοποιήθηκε. Παρατίθενται όλα τα στάδια που χρειάστηκαν για την ολοκλήρωση του από τον αρχικό σχεδιασμό, τα εργαλεία που χρησιμοποιήσαμε για να φέρουμε εις πέρας και τέλος τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις που πραγματοποιήσαμε και τα συμπεράσματα για τον χαρακτηρισμό και την απόδοση των κυκλωμάτων.

4.1 Κύριες κατηγορίες μετρικών

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι με τους οποίους μπορούμε να χαρακτηρίσουμε ένα κύκλωμα συλλογής περιβάλλουσας ενέργειας. Οι κατηγορίες μετρικών είναι κρίσιμες για την αξιολόγηση κυκλωμάτων τα οποία πρόκειται να χρησιμοποιηθούν είτε σε εφαρμογές IoT, είτε σε φορητές συσκευές, είτε ακόμα και σε αυτόνομα συστήματα χαμηλής ισχύος. Στο πείραμα που θα μελετήσουμε στα επόμενα κεφάλαια το χαρακτηρίσαμε βάση της απόδοσης συλλογής ενέργειας.

Οι κύριες κατηγορίες μετρικών αξιολόγησης είναι οι εξής:

- **Απόδοση συλλογής ενέργειας (Energy harvesting efficiency):** Η πιο διαδεδομένη μέθοδος που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση συστημάτων συλλογής περιβάλλουσας ενέργειας είναι ο υπολογισμός της απόδοσης συστήματος, υπολογίζοντας την εξαγωγή τάση του συστήματος προς την εισαγόμενη. Αυτή η μέθοδος επιφέρει τα πιο ασφαλή αποτελέσματα καθώς μπορούμε να βγάλουμε συμπεράσματα σχετικά με την διαδικασία μετατροπής ενέργειας και να αντιληφθούμε άμεσα αν υπάρξει κάποιου είδους αστοχία.

- **Ελάχιστη τάση εκκίνησης:** Αξιοποιώντας την συγκεκριμένη μέθοδο υπολογίζουμε την ελάχιστη τάση που απαιτείται προκειμένου το σύστημα να ξεκινήσει να λειτουργεί από μηδενική κατάσταση.
- **Εύρος τάσης:** Η συγκεκριμένη μονάδα αναφέρεται στο εύρος της παραγόμενης τάσης στο οποίο μπορεί να τροφοδοτήσει το κύκλωμα τις συνδεδεμένες συσκευές φορτίου.
- **Ισχύς εξόδου:** Η εν λόγω τιμή αφορά στην ισχύ που μπορεί να παρέχει το κύκλωμα στις συνδεδεμένες συσκευές ή ευρύτερα στο φορτίο. Αν η ισχύς εξόδου δεν είναι επαρκής ενδέχεται να μην μπορεί να υπερκεράσει τις απαιτήσεις του συστήματος για να ξεκινήσει από την μηδενική κατάσταση.
- **Πυκνότητα ισχύος (Power Density):** Η συγκεκριμένη τιμή αναφέρεται στην ποσότητα ισχύος που μπορεί να συλλεχθεί ή να παραχθεί ανά μονάδα όγκου ή επιφάνειας. Συνήθως εκφράζεται σε mW/cm^2 ή σε $\mu\text{W}/\text{cm}^2$. Χρησιμοποιείται για να συγκρίνουμε διαφορετικούς τύπους συλλεκτών ή τεχνολογιών.
- **Χωρητικότητα αποθηκευόμενης ενέργειας:** Με τον υπολογισμό της ποσότητας ενέργειας η οποία μπορεί να αποθηκευτεί είτε σε μπαταρίες είτε σε υπερπυκνωτές, αποσκοπούμε στο να γνωρίζουμε την μέγιστη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος χωρίς αυτό να χρειαστεί να συλλέξει και να μετατρέψει ενέργεια από το περιβάλλον.
- **Ισχύς ιδιοκατανάλωσης:** Ως ισχύς ιδιοκατανάλωσης αναφερόμαστε στην ενέργεια που καταναλώνει το ίδιο το κύκλωμα προκειμένου να λειτουργεί. Η συγκεκριμένη μονάδα μας ενδιαφέρει ιδιαίτερα σε χαμηλής ενέργειας εφαρμογές, καθώς η ιδιοκατανάλωση μπορεί να είναι το σημαντικότερο εμπόδιο στην αξιοπιστία.

4.2 Αποδοτικότητα συγκομιδής

Η αποδοτικότητα αποτελεί βασικότατο δείκτη αξιολόγησης της λειτουργίας κυκλωμάτων συγκομιδής ενέργειας. Αυτό συμβαίνει διότι περιγράφει το ποσοστό της εισερχόμενης ενέργειας από το περιβάλλον που μετατρέπεται, σε ηλεκτρική ισχύ την οποία μπορούμε να αξιοποιήσουμε. Η σημασία της αποδοτικότητας είναι ιδιαίτερος εμφανής σε εφαρμογές χαμηλής ισχύος, όπως οι συσκευές IoT, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και εμφυτεύσιμες συσκευές, στις οποίες η διαθέσιμη ενέργεια είναι περιορισμένη. Σε περιπτώσεις όπως αυτές ακόμη και ελάχιστες βελτιώσεις ενισχύουν σημαντικά την διάρκεια ζωής και την αυτονομία του συστήματος (Vullers et al., 2010).

Επιπλέον, η αποδοτικότητα δεν αφορά αποκλειστικά τη διαδικασία μετατροπής της ενέργειας, αλλά περιλαμβάνει και άλλους κρίσιμους παράγοντες, όπως η απόδοση της αποθηκευόμενης ενέργειας, η κατανάλωση σε κατάσταση ηρεμίας, καθώς και η ικανότητα εκκίνησης σε χαμηλές τάσεις. Συνεπώς, η αξιολόγηση της απόδοσης ενός κυκλώματος συγκομιδής απαιτεί πολυδιάστατη προσέγγιση και δεν μπορεί να περιοριστεί σε μία μόνο μετρική (Mitcheson et al., 2008).

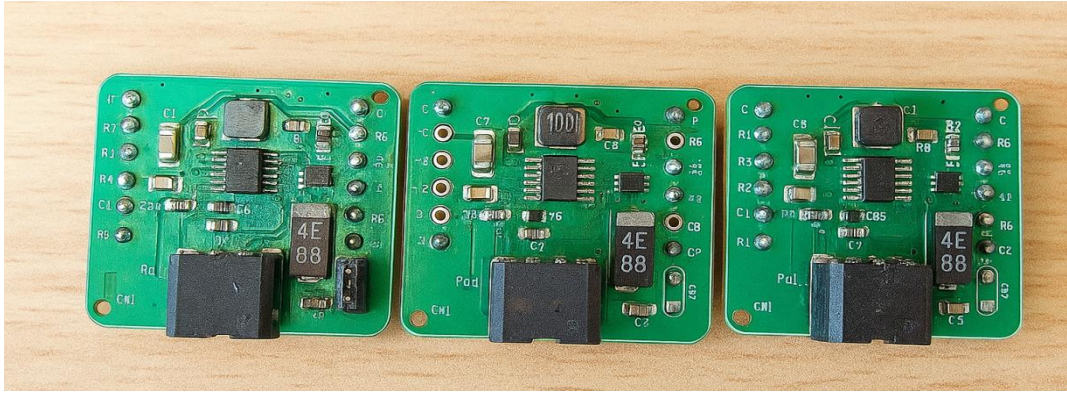
Τέλος, η χρήση των τεχνικών βελτιστοποίησης όπως, για παράδειγμα, η προσαρμογή της αντίστασης εισόδου, η χρήση κυκλωμάτων εξαιρετικά χαμηλής κατανάλωσης και η δυναμική παρακολούθηση του σημείου μέγιστης ισχύος, έστω και σε συνθήκες χαμηλής ενέργειας. (Ramadass & Chandrakasan, 2010)

Συμπερασματικά, η αποδοτικότητα αποτελεί βασικό κριτήριο σχεδιασμού για κυκλώματα συγκομιδής ενέργειας και συνδέεται άμεσα με την αυτονομία της λειτουργίας των συστημάτων, δίχως να απαιτείται εξωτερική παροχή ισχύος ή συχνή αντικατάσταση της μπαταρίας.

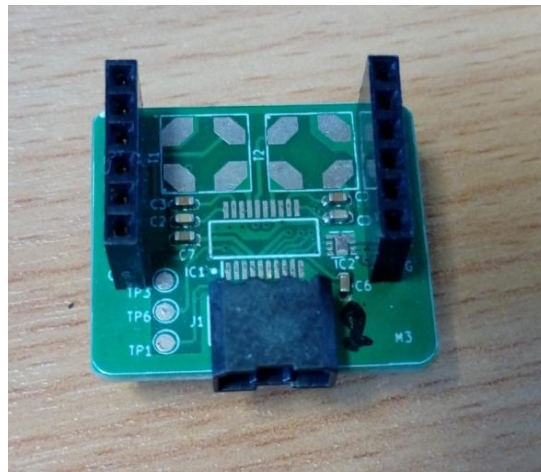
4.3 Μεθοδολογία έρευνας

Η έρευνα που απαιτήθηκε για την υλοποίηση του πειραματικού μέρους της εργασίας εντάσσεται στο πλαίσιο των ερευνητικών στόχων της σχολής και ειδικότερα του Εργαστηρίου Αυτόνομων Συστημάτων με υπεύθυνο εργαστηρίου τον κ. Γρηγόριο Δουμένη. Σε συνεργασία με τον κ. Χρήστο Κούτσο ο οποίος στο ίδιο ερευνητικό πλαίσιο ολοκλήρωσε την διπλωματική εργασία του και ήμασταν υπό την κοινή επίβλεψη του κ. Γρηγορίου Δουμένη ως επιβλέποντα καθηγητή στις δύο εργασίες. Ο κ. Κούτσος ήταν ο υπεύθυνος για το πείραμα, καθώς επιμελήθηκε πρωταρχικά με την επιλογή των κατάλληλων chips για ολόκληρο το κύκλωμα συμπεριλαμβανομένων των harvesters, του φορτιστή, των ελεγκτών. Στην συνέχεια ολοκλήρωσε την 3D σχεδίαση και εκτύπωση των εν λόγω chips προκειμένου να γίνει ο χαρακτηρισμός τους βάση των μετρήσεων που πραγματοποιήσα. Κατά την διάρκεια του σχεδιασμού του πειράματος λάβαμε υπόψη μας τον περιορισμό εργαστηριακό εξοπλισμό, παράγοντας που καθόρισε και τον τρόπο με τον οποίο υλοποιήσαμε τα κυκλώματα. (Koutsos, 2023),

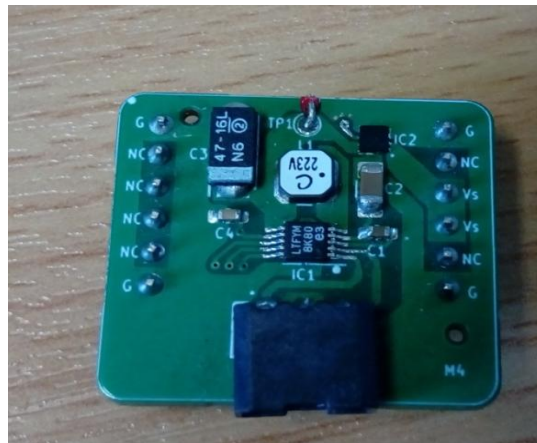
Στις εικόνες που ακολουθούν (εικόνα 4.1-2-3-4) βλέπουμε τα modules τα οποία εκτυπώθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για την λήψη των μετρήσεων.



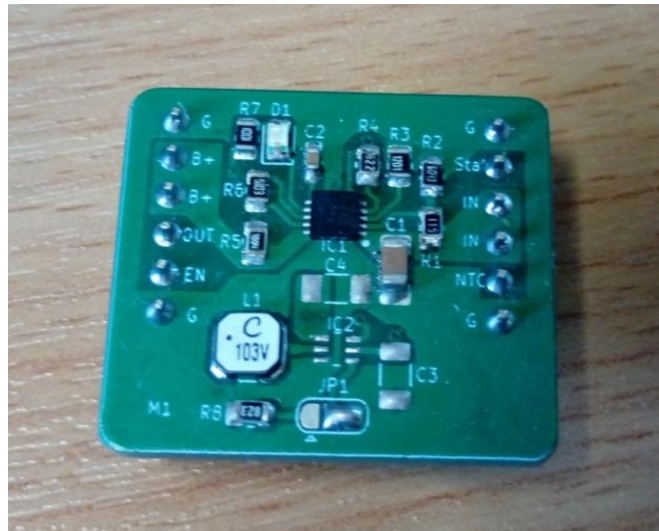
Εικόνα 4.1 PV energy harvesting modules



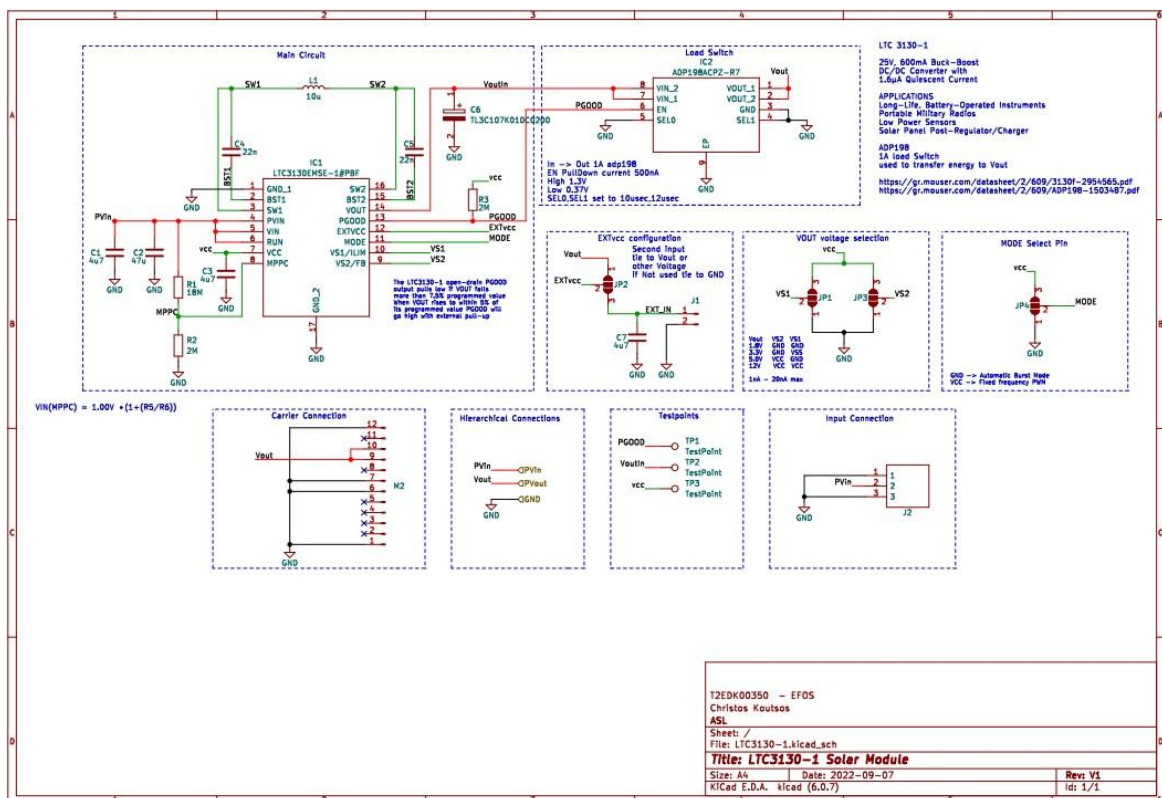
Εικόνα 4.2 TEM harvesting module



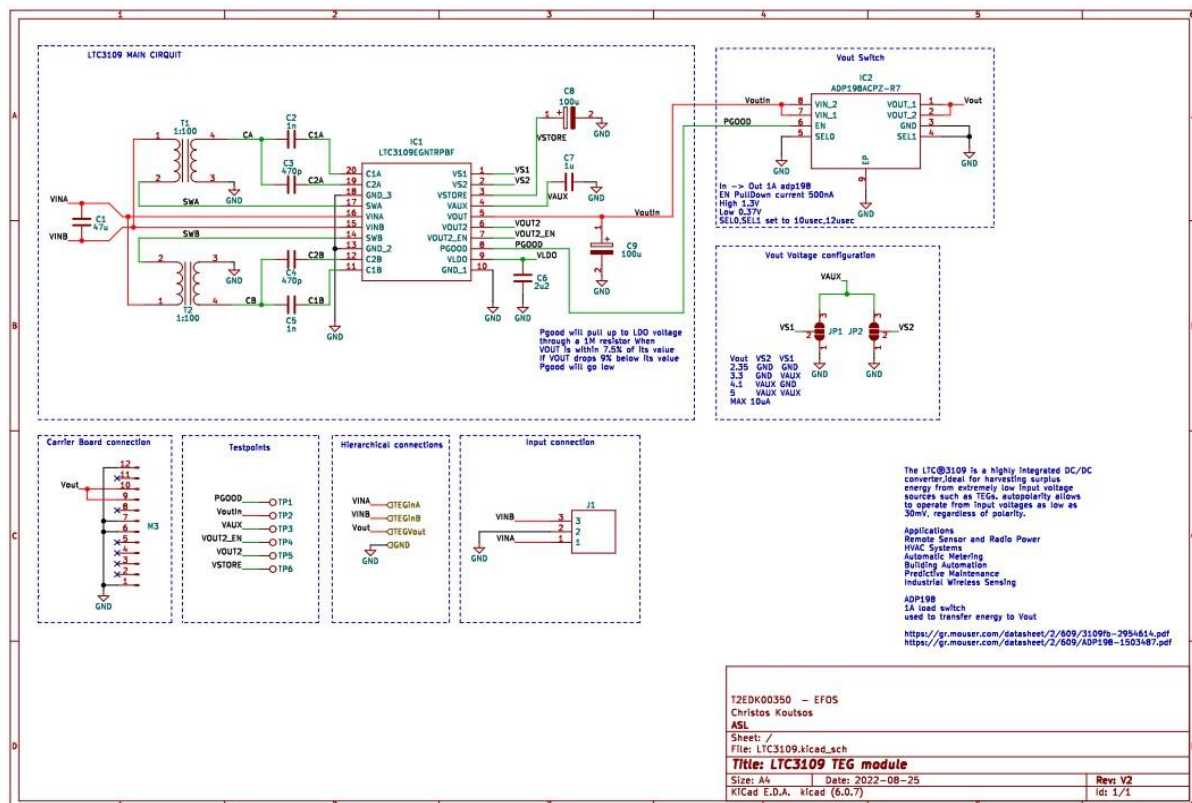
Εικόνα 4.3 TB harvesting module



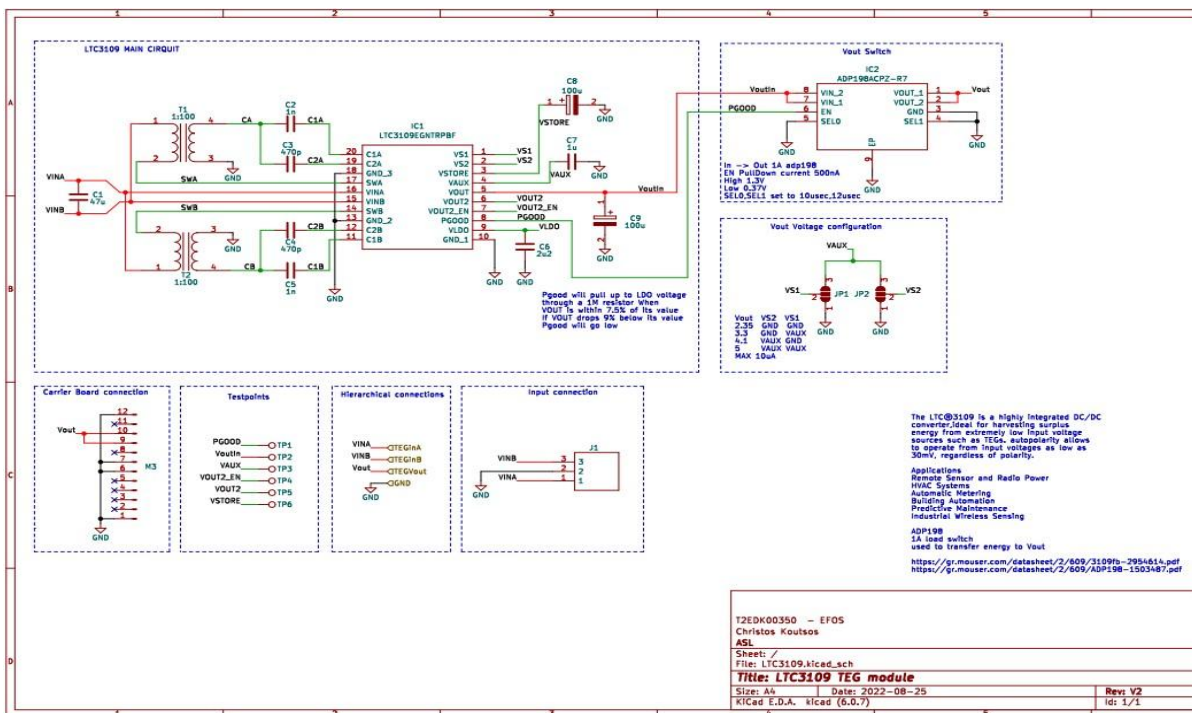
Εικόνα 4.4 Charger module



Εικόνα 4.5 Σχηματικό του φωτοβολταϊκού κυκλώματος



Εικόνα 4.6 Σχηματικό του θερμοηλεκτρικού κυκλώματος



Εικόνα 4.7 Σχηματικό του πιεζοηλεκτρικού κυκλώματος

Για την υλοποίηση των μετρήσεων η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν κοινή και για τα τέσσερα κυκλώματα. Ξεκινάμε κάνοντας τις συνδέσεις χρησιμοποιώντας απλό board. Συνδέοντας το chip με το Otii, την S.M.U. και το πολύμετρο για παροχή και παρακολούθηση των τιμών και τέλος με τον εξωτερικό πυκνωτή φορτίου. Για το φωτοβολταϊκό κύκλωμα το οποίο ήταν το βασικό κύκλωμα του πειράματος για να έχουμε καλύτερη αξιοπιστία στα ληφθέντα αποτελέσματα αλλά και για να αντιληφθούμε την λειτουργία του χρησιμοποιήσαμε τέσσερεις πυκνωτές διαφορετικής χωρητικότητας. Οι τιμές που λάβαμε για το κάθε κύκλωμα παρατίθενται παρακάτω στα αντίστοιχα υποκεφάλαια με τα σχετικά γραφήματα για την απόδοση των κυκλωμάτων.

4.5 Προδιαγραφές συστήματος (Electrical characteristics and ratings)

Στο παρόν κεφάλαιο θα παραθέσουμε τις αντίστοιχες τιμές λειτουργίας για το κάθε κύκλωμα αλλά και το εύρος των προδιαγραφών που δίνει ο κατασκευαστής. Παράλληλα θα αναφερθούμε στις τιμές που χρησιμοποιήσαμε για τον σχεδιασμό και την ολοκλήρωση της πειραματικής διαδικασίας.

	PV	TEG	PZ
Chip	LTC 3130-1	LTC 3109	LTC 3588-2
Vin	2.4V to 25V	-500mV to +500mV	14V to 20V
Iin	300 mA	1.3 mA	50 mA
Vout	5V	5V	5V
Iout	Up to 1A	Up to 1A	Up to 1A

Πίνακας 2 System electrical ratings.

4.6 Εργαστηριακό περιβάλλον και εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν

Ο σχεδιασμός της πειραματικής διαδικασίας, η κατασκευή των διατάξεων καθώς και όλες οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά την διάρκεια εκπόνησης της πτυχιακής εργασίας υλοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Αυτόνομων Συστημάτων (Autonomous Systems Laboratory) του τμήματος Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων με έδρα στην Άρτα. Αξιοποιήθηκαν τα όργανα και ο εξοπλισμός του εργαστηρίου. Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν εντός του χώρου του εργαστηρίου σε θερμοκρασία δωματίου.

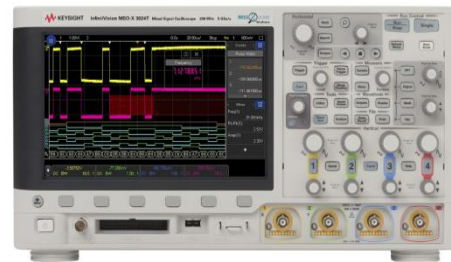
4.6.1 Όργανα μετρήσεων

Αναλυτικότερα χρησιμοποιήθηκαν τα εξής όργανα:

1. **Otii Arc Pro 1.0:** Το Otii Arc Pro είναι φορητό τροφοδοτικό. Είναι ένα όργανο το οποίο μπορεί να τροφοδοτήσει με ακρίβεια είτε τάση είτε ρεύμα και ταυτόχρονα να μετράει με ακρίβεια τάση ή ρεύμα. Παρέχει ακριβή υπολογισμό ισχύος και ενέργειας και δίνει την δυνατότητα μέσω του λογισμικού που παρέχεται στους προγραμματιστές που το χειρίζονται για να έχουν πλήρη έλεγχο για την κατανάλωση του συστήματος και για τις επιδόσεις των συσκευών.
2. Ένα τροφοδοτικό **Rigol DP832A Programmable DC Power Supply (LXI)** τριών καναλιών για την τροφοδοσία των κυκλωμάτων (V+A).
3. Ένα πολύμετρο **Keysight 34465A 6 ½ Digital Multimeter Truevolt.** Για την παρακολούθηση της τάσης στην είσοδο των κυκλωμάτων.
4. Έναν παλμογράφο **Keysight InfiniiVision MSO-X 3024T Mixed Signal Oscilloscope 200MHz**, με δυνατότητα 4 αναλογικών και 16 ψηφιακών καναλιών. 4 Mpts μνήμη και κάλυψη 1,000,000 waveforms/sec.



Εικόνα 4.9 Otii Arc Pro 1.0.¹¹



Εικόνα 4.10 Keysight InfiniiVision MSO-X 3024T.¹²

4.6.2 Πυκνωτές

Για να μπορέσουμε να έχουμε ένα εύρος στις εργαστηριακές δοκιμές μας και για να υλοποιήσουμε όλα τα κυκλώματα χρησιμοποιήσαμε τέσσερεις (4) διαφορετικούς

¹¹ Qoitech.com (<https://www.qoitech.com/otii-arc-pro/>)

¹² Keysight.com (<https://www.keysight.com/zz/en/support/key-35068/infiniivision-3000t-x-series-oscilloscopes.html>)

ακτινωτούς ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές αλουμινίου της Rubycon χωρητικότητας 470 μ F, 820 μ F, 1000 μ F και 1200 μ F.

- Αναλυτικότερα για τον πυκνωτή χωρητικότητας των 470 μ F χρησιμοποιήθηκε ο πυκνωτής 6.3ZLH470MEFC6.3X11.
- Για τον πυκνωτή χωρητικότητας 820 μ F χρησιμοποιήθηκε ο πυκνωτής 6.3ZLJ820M8X11.5.
- Για τον πυκνωτή χωρητικότητας 1000 μ F χρησιμοποιήθηκε ο πυκνωτής 6.3ZLJ1000M8X16.
- Για τον πυκνωτή χωρητικότητας 1200 μ F χρησιμοποιήθηκε ο πυκνωτής 6.3ZLJ1200M10X12.5.

Η επιλογή των τύπων πυκνωτών έγινε καθώς τα τεχνικά χαρακτηριστικά των δύο τύπων πυκνωτών είναι παρόμοια με τις διαφορές ανάμεσα στους τύπους ZLH και ZLJ να μην επηρεάζουν την απόδοση για τον ασφαλή χαρακτηρισμό των κυκλωμάτων. Τα βασικά χαρακτηριστικά τους παρατίθενται στον πίνακα παρακάτω [10][11].

	ZLH	ZLJ
Rated Voltage Range (Volts DC)	6.3 up to 100	6.3Up to 120
Operating Temperature Range (°C)	-40 to +105	-40 to +105
Load Life (Hours at 105°C)	5.000 up to 10.000	6.000 up to 10.000
ESR (Equivalent Series Resistance)	Ultra low	Low

Πίνακας 3 Χαρακτηριστικά πυκνωτών.



Εικόνα 4.11 Used capacitors.

4.6.3 Μαθηματικοί τύποι

Η αξιολόγηση των μετρικών απόδοσης βασίστηκε σε βασικούς μαθηματικούς τύπους, προκειμένου να υπολογιστεί η απόδοση και η ηλεκτρική ισχύς. Για την ηλεκτρική ισχύ εφαρμόζουμε την θεμελιώδη σχέση $P = V * I$. Όπου V είναι η διαφορά δυναμικού και I το ηλεκτρικό ρεύμα. Σε κάθε περίπτωση λαμβάνουμε τις τιμές της ηλεκτρικής ισχύς και στην είσοδο και στην έξοδο. Για τον υπολογισμό της απόδοσης των κυκλωμάτων εφαρμόζουμε την σχέση: $Efficiency = P_{out}/P_{in}$. Ο υπολογισμός του ποσοστού της απόδοσης προκύπτει από τον τύπο $Efficiency\% = Efficiency * 100$.

Για τον υπολογισμό των αντιστάσεων που χρειαζόμαστε χρησιμοποιήσαμε τον νόμο του Ωμ και τον τύπο για τον υπολογισμό ισχύς. Όπου συνδυάζοντας τους δύο τύπους $R = V/I$ και $P = V * I$ προκύπτει ο τύπος $R = V^2/P$ όπου R η αντίσταση που πρέπει να χρησιμοποιήσουμε, $V = 5V$, είναι η τάση του πυκνωτή αποθήκευσης και P είναι η ισχύς φορτίου.

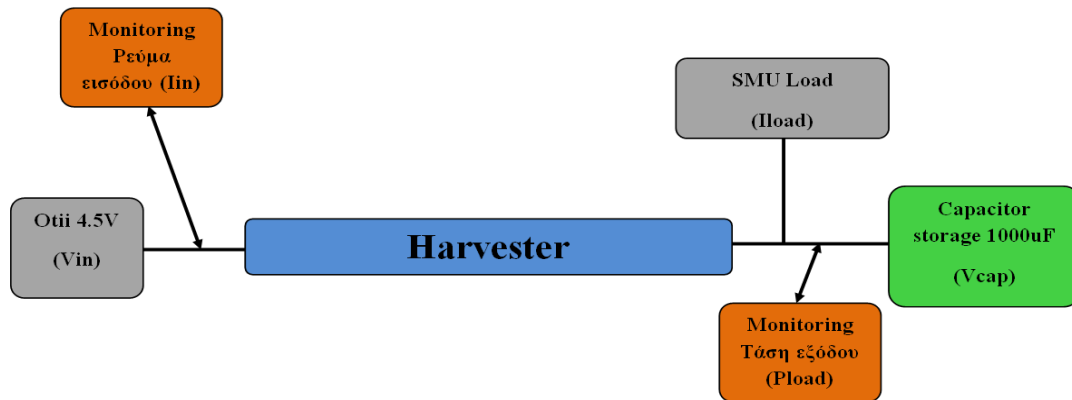
4.7 Συλλογή και ανάλυση δεδομένων

Για το θερμοηλεκτρικό και το τριβηλεκτρικό κύκλωμα όπου και χρησιμοποιήσαμε απλές αντιστάσεις για την προσομοίωση του φορτίου. Θέσαμε τα φορτία που θέλουμε να τραβήξουμε από το σύστημα και σύμφωνα με την τάση η οποία είναι 5V και διακριτές τιμές φορτίου από 10mA έως 100mA, υπολογίζαμε την αντίσταση που θα χρησιμοποιήσουμε αξιοποιώντας τον νόμο του Ωμ.

4.7.1 Φωτοβολταϊκό κύκλωμα (PV)

Για να χαρακτηρίσουμε το φωτοβολταϊκό κύκλωμα χρησιμοποιήθηκε διάταξη με τροφοδοτικό και με SMU (Source meter unit) στην λειτουργία φορτίου (load current). Για την λειτουργία του κυκλώματος ρυθμίσαμε το τροφοδοτικό μας (Otti Arc Pro) να μας δίνει σταθερή τιμή ρεύματος στην είσοδο ίση με 4.5V και με ανώτατο όριο ρεύματος (I_{lim}) στα 350mA. Θέτουμε την SMU να λειτουργεί δίνοντας παλμό κάθε 5sec στις διακριτές τιμές φορτίου (I_{load}) που επιλέξαμε από 10mA έως 250 mA, ώστε να λάβουμε ασφαλείς μετρήσεις και να παρατηρήσουμε την συμπεριφορά των πυκνωτών σε διαφορετικές τιμές φορτίου. Τέλος παρατηρούμε (monitoring) την τάση του πυκνωτή. Στην περίπτωση του φωτοβολταϊκού κυκλώματος η διαδικασία επαναλήφθηκε τέσσερις φορές μια για κάθε

πυκνωτή αποθήκευσης που χρησιμοποιήσαμε χωρητικότητας 470μF – 820 μF – 1000 μF – 1200 μF με τα χαρακτηριστικά τους που είδαμε προηγουμένως.



Εικόνα 4.12 PV module using the 1000uF storage capacitor.

Για κάθε διακριτή τιμή φορτίου που θέταμε γίνονταν καταγραφή του ρεύματος εισόδου και της τάσης του πυκνωτή. Με αυτές τις δύο μετρήσεις υπολογίζαμε την ισχύ εισόδου. Αναλυτικότερα:

$$\text{Τάση εισόδου (Vin)} * \text{Μετρούμενο ρεύμα εισόδου (Iin)} = \text{Ισχύς εισόδου(Pin)}.$$

Αντίστοιχα από την έξοδο έχουμε:

$$\begin{aligned} \text{Μετρούμενη τάση πυκνωτή φορτίου(Vcap)} * \text{Ισχύς φορτίου(Iload)} \\ = \text{Ισχύς φορτίο(Pload)}. \end{aligned}$$

Η απόδοση του συστήματος υπολογίζεται από το αποτέλεσμα της διαίρεσης:

$$Pload/Pin * 100 \text{ απλούστερα } \text{τάση εξόδου/ τάση εισόδου} * 100.$$

Ακολουθούν τα συνολικά αποτελέσματα των μετρήσεων για κάθε πυκνωτή. Όλες οι μετρήσεις έγιναν αφού οι πυκνωτές είχαν φορτίσει πλήρως για κάθε τιμή φορτίου.

Για τους πίνακες η πρώτη στήλη (Vin) απεικονίζει την τάση εισόδου σε Volts. Η δεύτερη το ρεύμα εισόδου (Iin) σε mA. Η τρίτη στήλη μας δείχνει την ισχύ εισόδου (Pin) σε mW. Η τέταρτη απεικονίζει την τάση του πυκνωτή (Vcap) σε Volts. Η πέμπτη στήλη είναι οι διακριτές τιμές φορτίου που θέσαμε (Iload) σε mA. Η έκτη είναι η ισχύς εξόδου (Pload) σε mW. Η έβδομη στήλη είναι η απόδοση του συστήματος σε ποσοστό %.

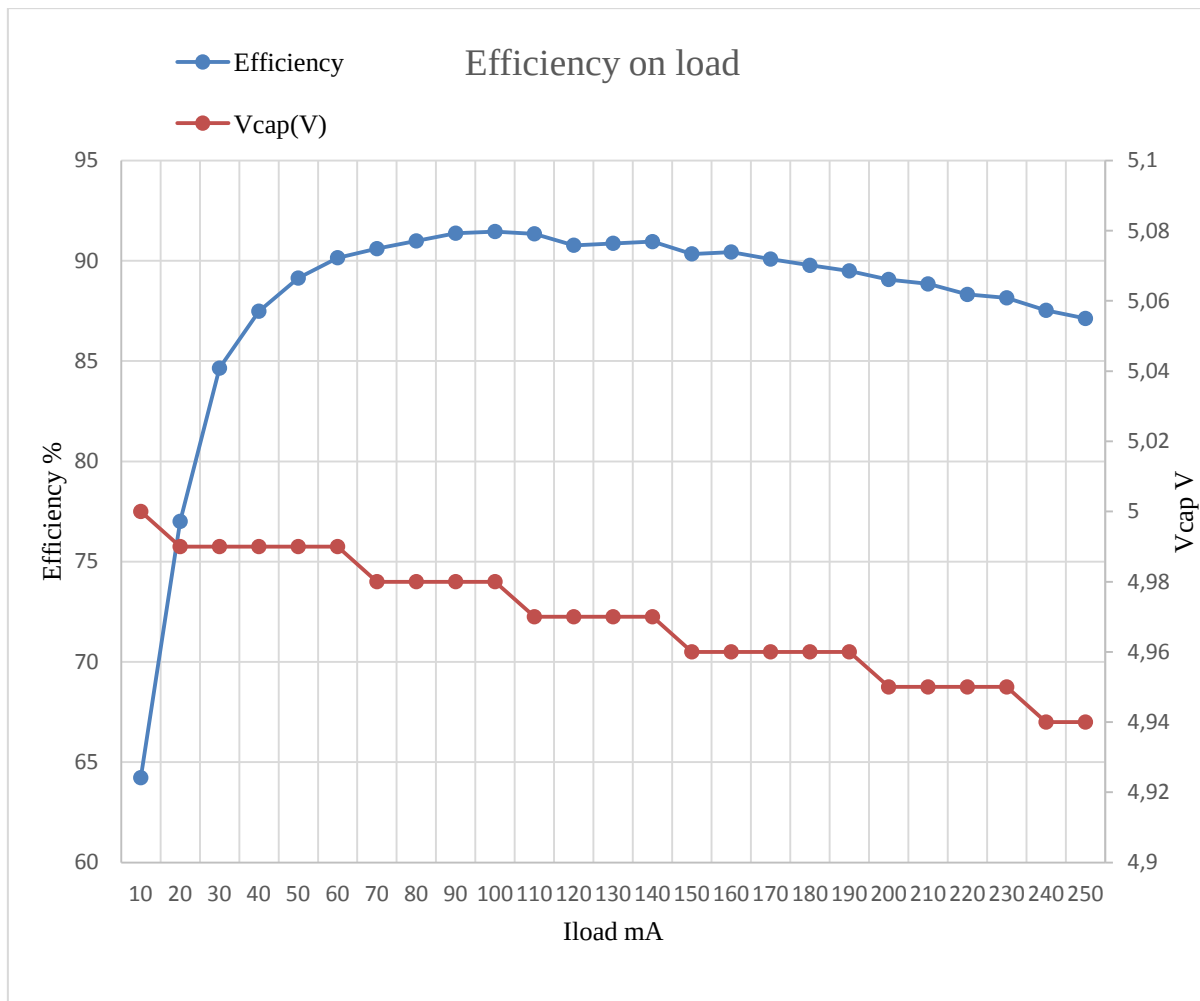
Στα γραφήματα παρουσιάζεται η απόδοση του συστήματος προς το φορτίο που θέσαμε.

- Στον οριζόντιο άξονα απεικονίζονται οι τιμές φορτίου σε mA.
- Στον δεξιά κατακόρυφο άξονα απεικονίζεται η τιμή τάσης του πυκνωτή σε V.
- Στον αριστερά κατακόρυφο άξονα βρίσκονται οι τιμές απόδοσης σε ποσοστό %.
- Η μπλε καμπύλη είναι η απόδοση του συστήματος.
- Η κόκκινη καμπύλη είναι η τάση του πυκνωτή.

Module 470 μ F capacitor

Vin (V)	Iin(mA)	Pin(mW)	Vcap(V)	Iload(mA)	Pload(mW)	Efficiency
4,5	17,3	77,85	5	10	50	64,22607579
4,5	28,8	129,6	4,99	20	99,8	77,00617284
4,5	39,3	176,85	4,99	30	149,7	84,64800679
4,5	50,7	228,15	4,99	40	199,6	87,48630287
4,5	62,2	279,9	4,99	50	249,5	89,13897821
4,5	73,8	332,1	4,99	60	299,4	90,1535682
4,5	85,5	384,75	4,98	70	348,6	90,6042885
4,5	97,3	437,85	4,98	80	398,4	90,99006509
4,5	109	490,5	4,98	90	448,2	91,37614679
4,5	121	544,5	4,98	100	498	91,4600551
4,5	133	598,5	4,97	110	546,7	91,34502924
4,5	146	657	4,97	120	596,4	90,77625571
4,5	158	711	4,97	130	646,1	90,87201125
4,5	170	765	4,97	140	695,8	90,95424837
4,5	183	823,5	4,96	150	744	90,34608379
4,5	195	877,5	4,96	160	793,6	90,43874644
4,5	208	936	4,96	170	843,2	90,08547009
4,5	221	994,5	4,96	180	892,8	89,77375566
4,5	234	1053	4,96	190	942,4	89,49667616
4,5	247	1111,5	4,95	200	990	89,06882591
4,5	260	1170	4,95	210	1039,5	88,84615385
4,5	274	1233	4,95	220	1089	88,32116788
4,5	287	1291,5	4,95	230	1138,5	88,1533101
4,5	301	1354,5	4,94	240	1185,6	87,53045404
4,5	315	1417,5	4,94	250	1235	87,12522046

Πίνακας 4 PV module using the 470uF storage capacitor.

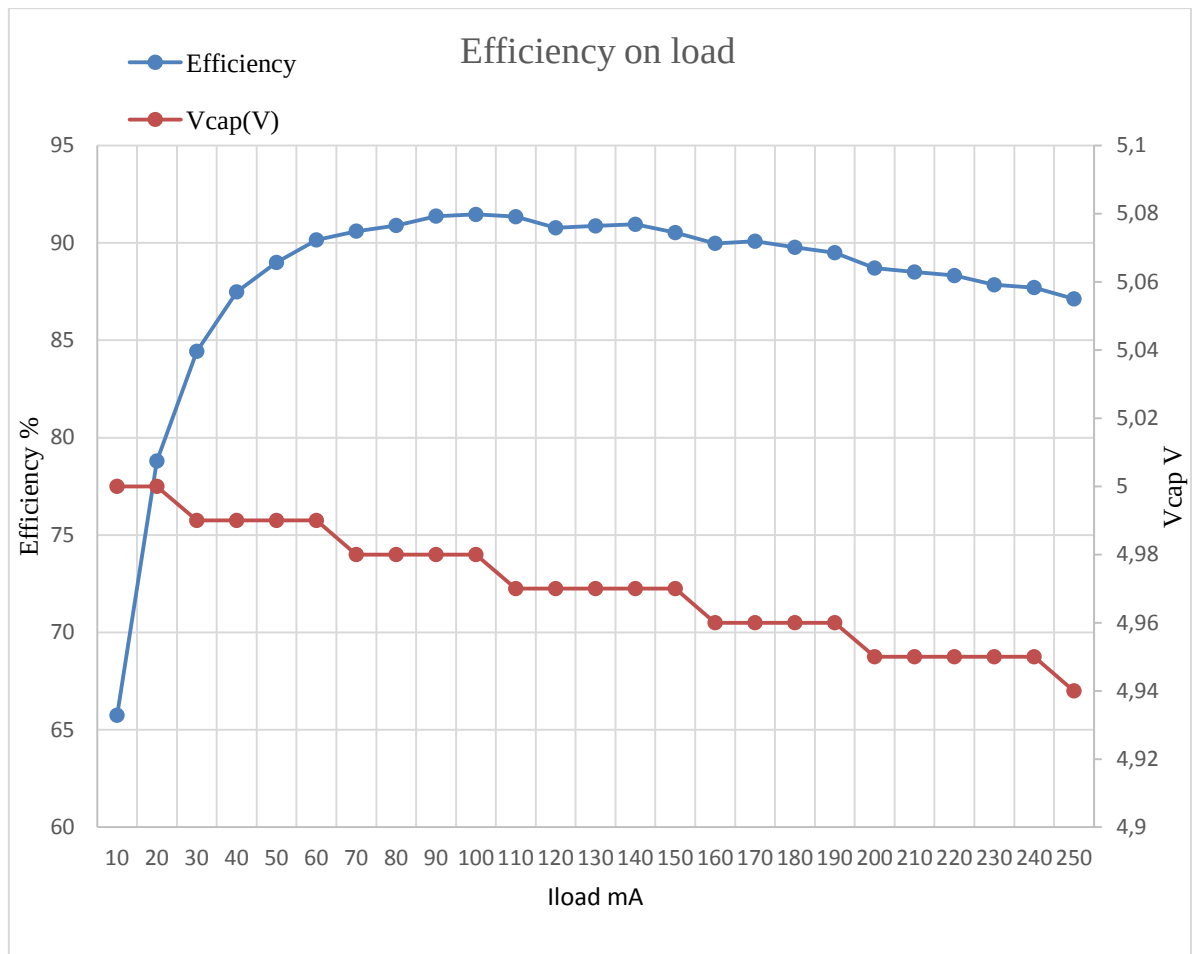


Γράφημα 1 PV module efficiency graph using the 470uF storage capacitor.

Module 820 μ F capacitor:

Vin (V)	Iin(mA)	Pin(mW)	Vcap(V)	Iload(mA)	Pload(mW)	Efficiency
4,5	16,9	76,05	5	10	50	65,74621959
4,5	28,2	126,9	5	20	100	78,80220646
4,5	39,4	177,3	4,99	30	149,7	84,43316413
4,5	50,7	228,15	4,99	40	199,6	87,48630287
4,5	62,3	280,35	4,99	50	249,5	88,99589798
4,5	73,8	332,1	4,99	60	299,4	90,1535682
4,5	85,5	384,75	4,98	70	348,6	90,6042885
4,5	97,4	438,3	4,98	80	398,4	90,89664613
4,5	109	490,5	4,98	90	448,2	91,37614679
4,5	121	544,5	4,98	100	498	91,4600551
4,5	133	598,5	4,97	110	546,7	91,34502924
4,5	146	657	4,97	120	596,4	90,77625571
4,5	158	711	4,97	130	646,1	90,87201125
4,5	170	765	4,97	140	695,8	90,95424837
4,5	183	823,5	4,97	150	745,5	90,52823315
4,5	196	882	4,96	160	793,6	89,97732426
4,5	208	936	4,96	170	843,2	90,08547009
4,5	221	994,5	4,96	180	892,8	89,77375566
4,5	234	1053	4,96	190	942,4	89,49667616
4,5	248	1116	4,95	200	990	88,70967742
4,5	261	1174,5	4,95	210	1039,5	88,50574713
4,5	274	1233	4,95	220	1089	88,32116788
4,5	288	1296	4,95	230	1138,5	87,84722222
4,5	301	1354,5	4,95	240	1188	87,7076412
4,5	315	1417,5	4,94	250	1235	87,12522046

Πίνακας 5 PV module using the 820 μ F storage capacitor.

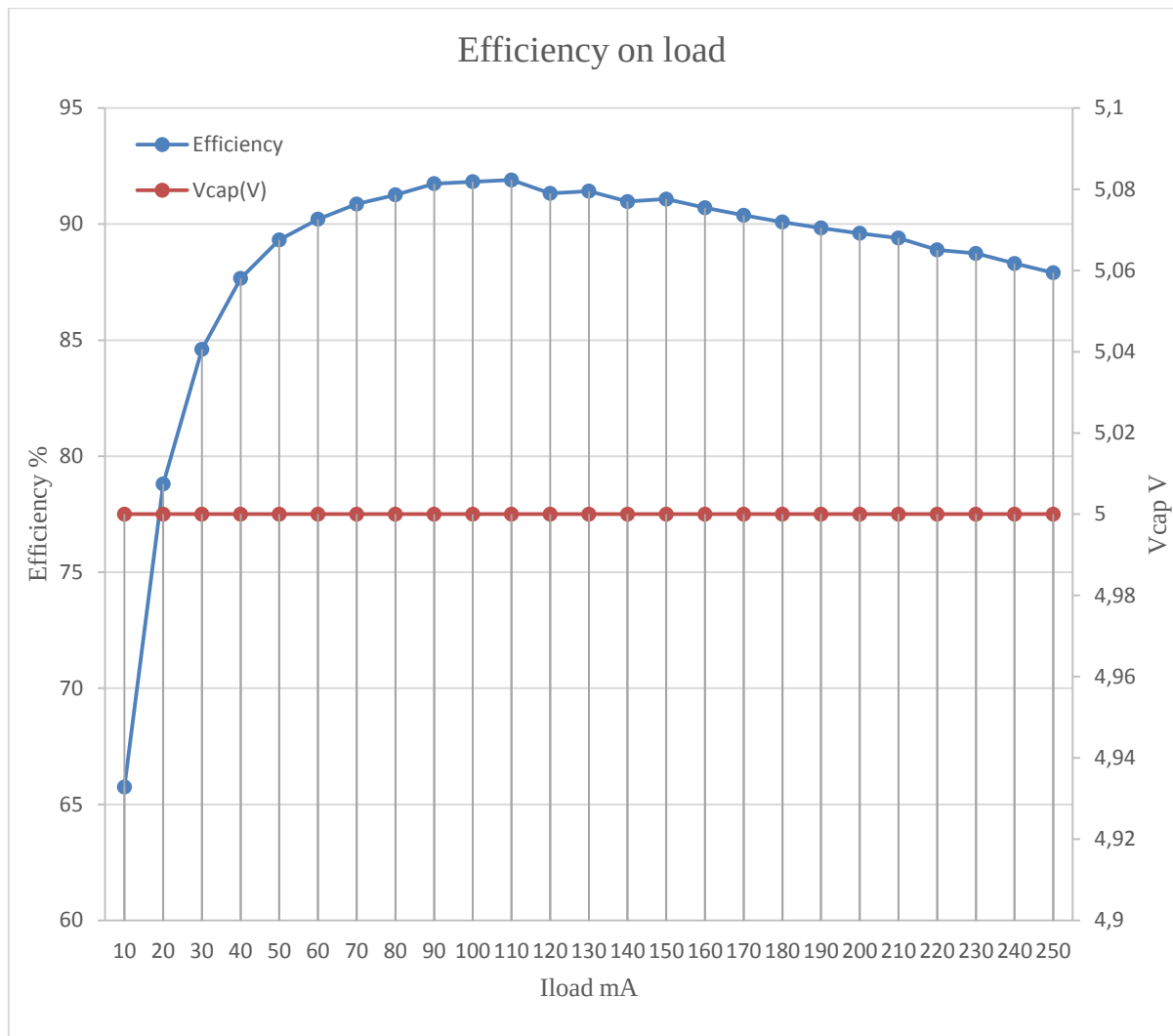


Γράφημα 2 PV module efficiency graph using the 820uF storage capacitor.

Module 1000 μ F capacitor:

Vin (V)	Iin(mA)	Pin(mW)	Vcap(V)	Iload(mA)	Pload(mW)	Efficiency
4,5	16,9	76,05	5	10	50	65,74621959
4,5	28,2	126,9	5	20	100	78,80220646
4,5	39,4	177,3	5	30	150	84,60236887
4,5	50,7	228,15	5	40	200	87,66162612
4,5	62,2	279,9	5	50	250	89,31761343
4,5	73,9	332,55	5	60	300	90,2119982
4,5	85,6	385,2	5	70	350	90,86188993
4,5	97,4	438,3	5	80	400	91,2616929
4,5	109	490,5	5	90	450	91,74311927
4,5	121	544,5	5	100	500	91,82736455
4,5	133	598,5	5	110	550	91,89640769
4,5	146	657	5	120	600	91,32420091
4,5	158	711	5	130	650	91,42053446
4,5	171	769,5	5	140	700	90,96816114
4,5	183	823,5	5	150	750	91,07468124
4,5	196	882	5	160	800	90,70294785
4,5	209	940,5	5	170	850	90,3774588
4,5	222	999	5	180	900	90,09009009
4,5	235	1057,5	5	190	950	89,83451537
4,5	248	1116	5	200	1000	89,60573477
4,5	261	1174,5	5	210	1050	89,39974457
4,5	275	1237,5	5	220	1100	88,88888889
4,5	288	1296	5	230	1150	88,7345679
4,5	302	1359	5	240	1200	88,30022075
4,5	316	1422	5	250	1250	87,90436006

Πίνακας 6 PV module using the 1000 μ F storage capacitor.

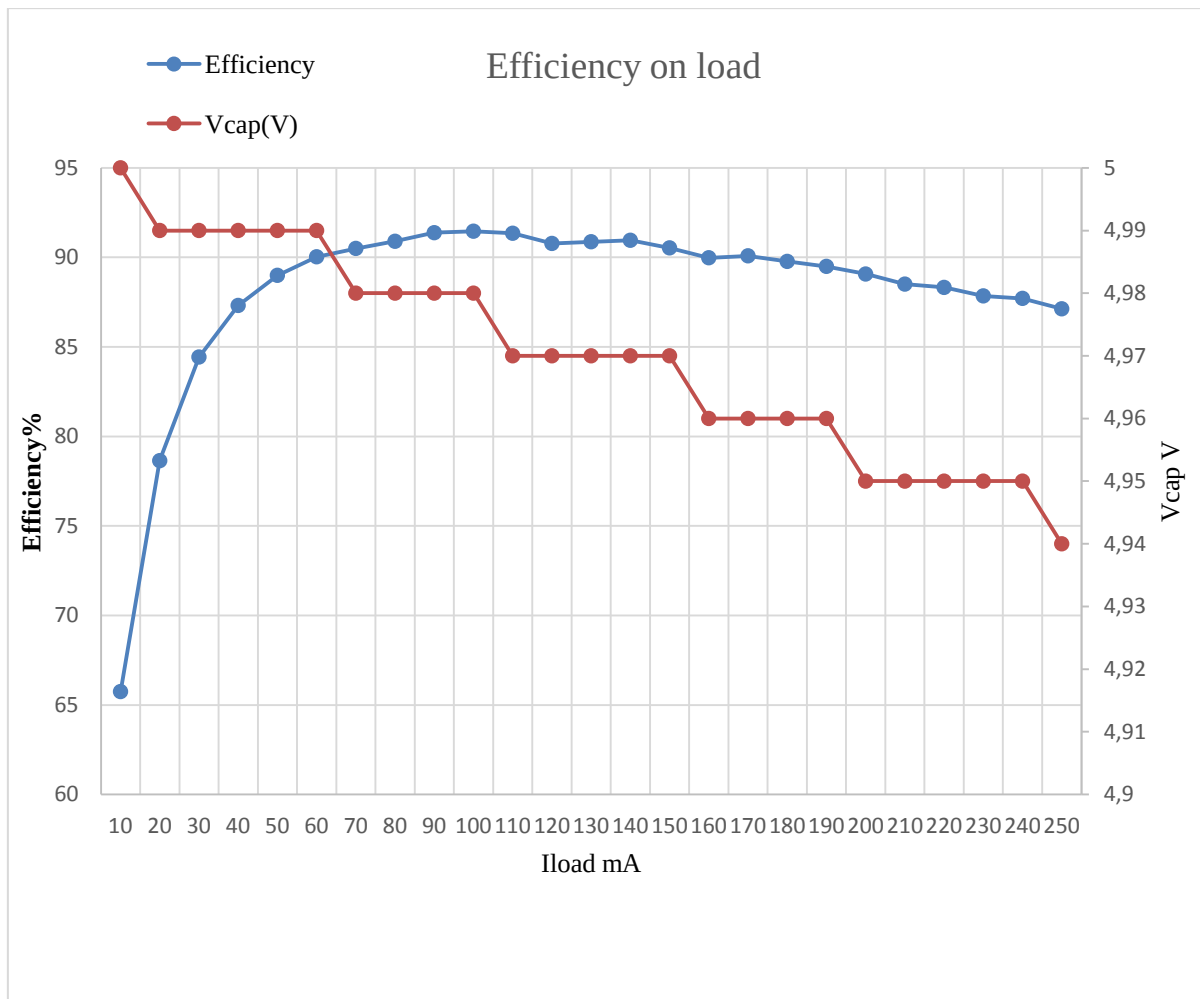


Γράφημα 3 PV module efficiency graph using the 1000uF storage capacitor.

Module 1200mF capacitor:

Vin (V)	Iin(mA)	Pin(mW)	Vcap(V)	Iload(mA)	Pload(mW)	Efficiency
4,5	16,9	76,05	5	10	50	65,74621959
4,5	28,2	126,9	4,99	20	99,8	78,64460205
4,5	39,4	177,3	4,99	30	149,7	84,43316413
4,5	50,8	228,6	4,99	40	199,6	87,31408574
4,5	62,3	280,35	4,99	50	249,5	88,99589798
4,5	73,9	332,55	4,99	60	299,4	90,0315742
4,5	85,6	385,2	4,98	70	348,6	90,49844237
4,5	97,4	438,3	4,98	80	398,4	90,89664613
4,5	109	490,5	4,98	90	448,2	91,37614679
4,5	121	544,5	4,98	100	498	91,4600551
4,5	133	598,5	4,97	110	546,7	91,34502924
4,5	146	657	4,97	120	596,4	90,77625571
4,5	158	711	4,97	130	646,1	90,87201125
4,5	170	765	4,97	140	695,8	90,95424837
4,5	183	823,5	4,97	150	745,5	90,52823315
4,5	196	882	4,96	160	793,6	89,97732426
4,5	208	936	4,96	170	843,2	90,08547009
4,5	221	994,5	4,96	180	892,8	89,77375566
4,5	234	1053	4,96	190	942,4	89,49667616
4,5	247	1111,5	4,95	200	990	89,06882591
4,5	261	1174,5	4,95	210	1039,5	88,50574713
4,5	274	1233	4,95	220	1089	88,32116788
4,5	288	1296	4,95	230	1138,5	87,84722222
4,5	301	1354,5	4,95	240	1188	87,7076412
4,5	315	1417,5	4,94	250	1235	87,12522046

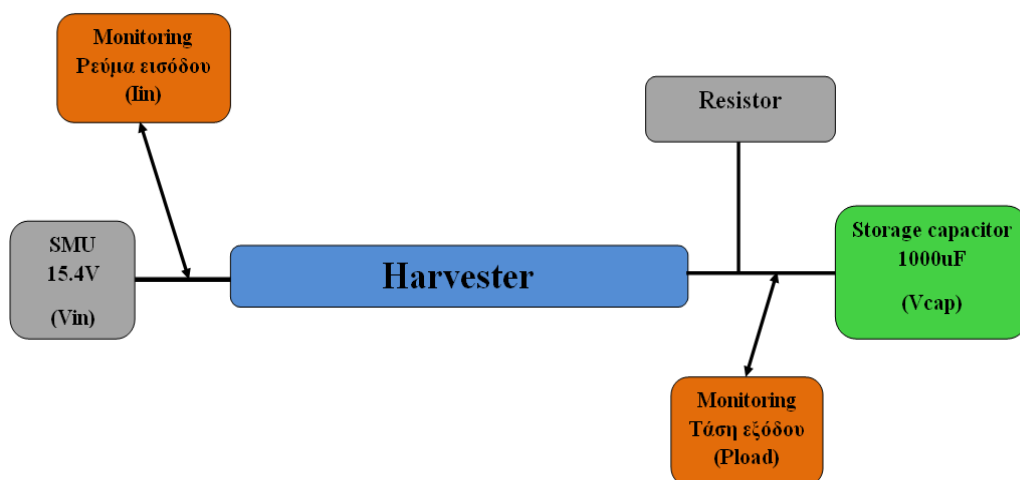
Πίνακας 7 PV module using the 1200uF storage capacitor.



Γράφημα 4 PV module efficiency graph using the 1200uF storage capacitor.

4.7.2 Πιεζοηλεκτρικό κύκλωμα (PZ)

Στο πιεζοηλεκτρικό ή τριβοηλεκτρικό κύκλωμα χρησιμοποιήθηκε η SMU σαν το τροφοδοτικό του συστήματος και λόγω έλλειψης δεύτερης SMU στο εργαστήριο, για να μπορέσουμε να προσομοιάσουμε το φορτίο χρησιμοποιήσαμε απλές αντιστάσεις. Η SMU προγραμματίστηκε να μας δίνει τετραγωνικό παλμό από -17V έως +17V για χρονικό διάστημα 10ms. Προκειμένου να έχουμε συνεχές ρεύμα κάναμε μια γέφυρα και αποτέλεσμα αυτού η τάση εισόδου να είναι στα 15.4V. Η διαδικασία ώστε να υπολογίζουμε την απόδοση του κυκλώματος είναι η ίδια η οποία ακολουθήθηκε και στο φωτοβολταϊκό κύκλωμα. Παρακολουθούσαμε το ρεύμα εισόδου (I_{in}) ώστε να υπολογίσουμε την τάση εισόδου. Αντίστοιχα παρακολουθούσαμε τις τιμές που εξωτερικού πυκνωτή ώστε να υπολογίσουμε την τάση εξόδου και να υπολογίσουμε την απόδοση του κυκλώματος. Με την χρήση των αντιστάσεων στηριζόμενοι στο νόμο του Ohm κρατούσαμε σταθερή την τάση στον εξωτερικό πυκνωτή στα 5V. Στο συγκεκριμένο κύκλωμα ολοκληρώσαμε την κατασκευή του κυκλώματος και λάβαμε τις μετρήσεις χρησιμοποιώντας έναν πυκνωτή χωρητικότητας 1000uF.



Εικόνα 4.13 Piezo module using the 1000uF storage capacitor.

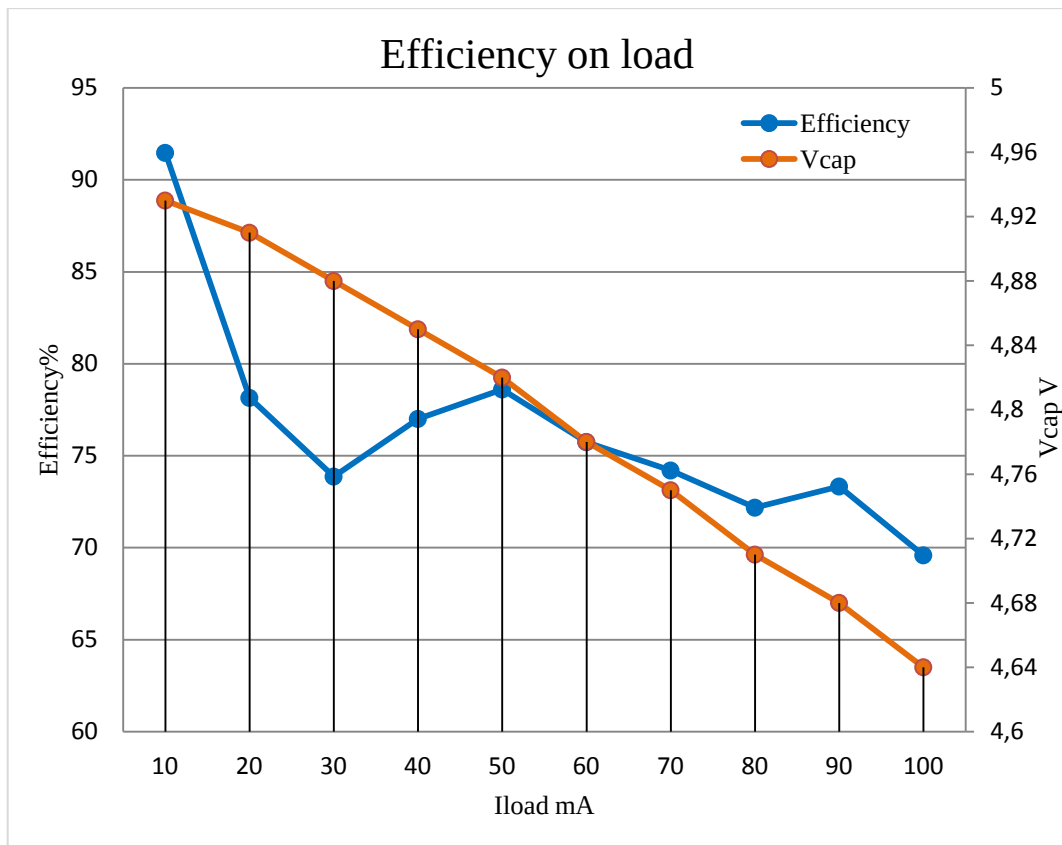
Στον πίνακα η πρώτη στήλη (V_{in}) απεικονίζει την τάση εισόδου σε Volts. Η δεύτερη το ρεύμα εισόδου (I_{in}) σε mA. Η τρίτη στήλη μας δείχνει την ισχύς εισόδου (P_{in}) σε mW. Η τέταρτη απεικονίζει την τάση του πυκνωτή (Storage Cap.) σε Volts. Η πέμπτη στήλη είναι οι διακριτές τιμές φορτίο που θέσαμε (I_{load}) σε mA. Η έκτη είναι η ισχύς εξόδου (P_{load}) σε mW. Η έβδομη στήλη είναι η απόδοση του συστήματος σε ποσοστό %.

Vin (V)	Iin(mA)	Pin(mW)	Vcap(V)	Iload(mA)	Pload(mW)	Efficiency
15,4	3,5	53,9	4,93	10	49,3	91,46568
15,4	8,16	125,664	4,91	20	98,2	78,14489
15,4	12,87	198,198	4,88	30	146,4	73,86553
15,4	16,36	251,944	4,85	40	194	77,00124
15,4	19,91	306,614	4,82	50	241	78,60046
15,4	24,59	378,686	4,78	60	286,8	75,73557
15,4	29,1	448,14	4,75	70	332,5	74,19556
15,4	33,9	522,06	4,71	80	376,8	72,17561
15,4	37,3	574,42	4,68	90	421,2	73,32614
15,4	43,3	666,82	4,64	100	464	69,584

Πίνακας 8 PZ module using the 1000uF storage capacitor.

Στα γράφημα παρουσιάζεται η απόδοση του συστήματος προς το φορτίο που θέσαμε.

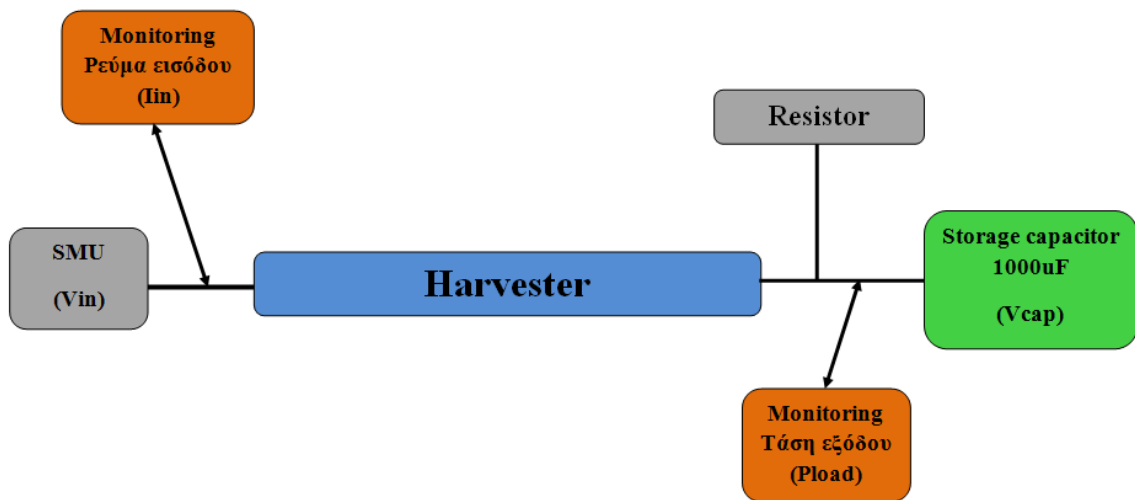
- Στον οριζόντιο άξονα απεικονίζονται οι τιμές που φορτίου που θέσαμε σε mA.
- Στον δεξιά κατακόρυφο άξονα απεικονίζεται η τιμή τάσης του πυκνωτή σε V.
- Στον αριστερά κατακόρυφο άξονα βρίσκονται οι τιμές απόδοσης σε ποσοστό %.
- Η μπλε καμπύλη είναι η απόδοση του συστήματος.
- Η πορτοκαλί καμπύλη είναι η τάση του πυκνωτή.



Γράφημα 5 PZ module efficiency graph using the 1000uF storage capacitor.

4.7.3 Θερμοηλεκτρικό κύκλωμα (TEG)

Χρησιμοποιούμε σαν είσοδο η SMU σε λειτουργία Source Current και με παράμετρο για το ανώτατο ρεύμα εισόδου, V_{lim} στα 300mV. Το συγκεκριμένο chip επιλέχθηκε καθώς μπορεί να μας δώσει αρνητικές τιμές τάσης λόγω του unipolarity της πλακέτας. Λόγω έλλειψης δεύτερης SMU στο εργαστήριο, χρησιμοποιήσαμε φυσικές αντιστάσεις στην θέση του φορτίου. Το TEG λόγω του unipolarity και της δυνατότητας να κάνει harvest από πολύ χαμηλές τιμές δεν μπορεί να αποδώσει όπως τα άλλα κυκλώματα. Θέλουμε να χαρακτηρίσουμε την πλακέτα ως προς τον χρόνο με παλμικό φορτίο. Θέτουμε μια σταθερή είσοδο στον TEG harvester και έχουμε έναν τελικό πυκνωτή χωρητικότητας 1000uF τάσης 5V. Σε αυτόν τον πυκνωτή βάζουμε διαφορετικά φορτία σε χρονικό διάστημα steady 10mA και pulse 10mA. Για χρόνους steady 20sec και pulse 100ms. Θέτουμε στο Otii σαν παραμέτρους 500mV και 60mA. Ωστόσο στην είσοδο παρατηρούμε 60mA και τάση 206mV.



Εικόνα 4.14 TEG module using the 1000uF storage capacitor.

Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων για το θερμοηλεκτρικό κύκλωμα.

Στον πίνακα η πρώτη στήλη (V_{in}) απεικονίζει την τάση εισόδου σε mV. Η δεύτερη το ρεύμα εισόδου (I_{in}) σε mA. Η τρίτη στήλη μας δείχνει την ισχύ εισόδου (P_{in}) σε uW. Η τέταρτη απεικονίζει την τάση του πυκνωτή (V_{cap}) σε Volts. Η πέμπτη στήλη είναι η ισχύς

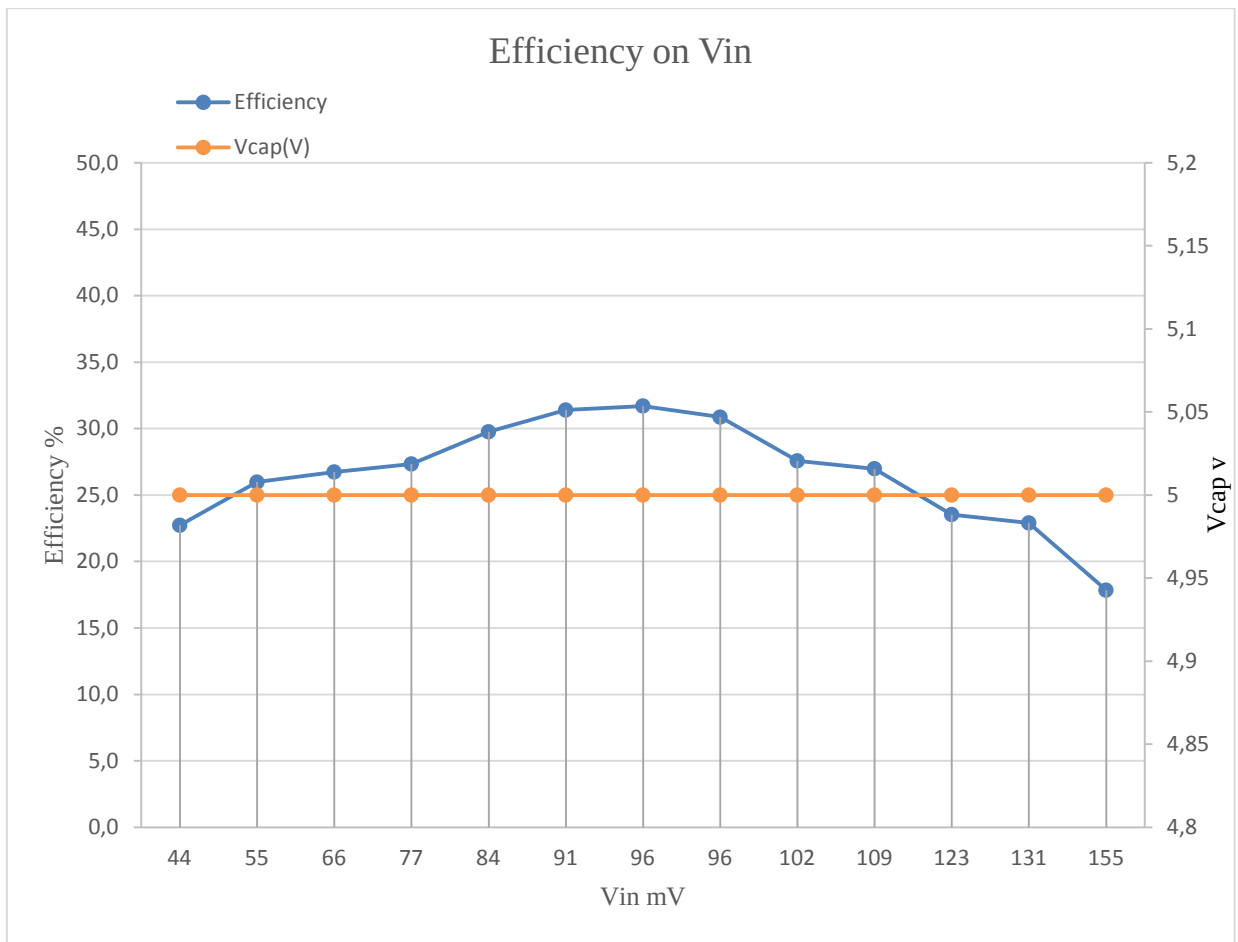
εξόδου (Pload) σε μW . Η έκτη είναι η ισχύς εξόδου (Pload) σε mW . Η έβδομη στήλη είναι η απόδοση του συστήματος σε ποσοστό %.

Vin (mV)	Iin(mA)	Pin(μW)	Vcap(V)	Pload(μW)	Pload(mW)	Efficiency
44	10	440	5	100	0,1	22,7
55	14	770	5	200	0,2	26,0
66	17	1122	5	300	0,3	26,7
77	19	1463	5	400	0,4	27,3
84	20	1680	5	500	0,5	29,8
91	21	1911	5	600	0,6	31,4
96	23	2208	5	700	0,7	31,7
96	27	2592	5	800	0,8	30,9
102	32	3264	5	900	0,9	27,6
109	34	3706	5	1000	1	27,0
123	38	4674	5	1100	1,1	23,5
131	40	5240	5	1200	1,2	22,9
155	47	7285	5	1300	1,3	17,8

Πίνακας 9 TEG module using the 1000 μF storage capacitor.

Στα γράφημα παρουσιάζεται η απόδοση του συστήματος προς την τάση εισόδου.

- Στον οριζόντιο άξονα απεικονίζονται οι τιμές της τάσης εισόδου σε mV .
- Στον αριστερά κατακόρυφο άξονα βρίσκονται οι τιμές απόδοσης σε ποσοστό %.
- Η μπλε καμπύλη είναι η απόδοση του συστήματος.
- Η κόκκινη καμπύλη είναι η τάση του πυκνωτή.



Γράφημα 6 TEG module efficiency graph using the 1000uF storage capacitor.

4.7.4 Φορτιστής (Battery charger)

Το κύκλωμα του φορτιστή αποτελείται από το chip LTC-4079. Ο συγκεκριμένος τύπος φορτιστή έχει την ιδιαιτερότητα να είναι χαμηλού ρεύματος και υψηλής τάσης, ο οποίος καλύπτει τους περισσότερους τύπους μπαταριών έως και 60V. Λειτουργεί σε δύο τρόπους. Πρώτον σε σταθερό ρεύμα (CC - Constant Current) και δεύτερον σε σταθερή τάση (CV - Constant Voltage). Η φόρτιση ξεκινάει με σταθερό ρεύμα και όταν η τάση στους ακροδέκτες της μπαταρίας φτάσει στο προγραμματισμένο επίπεδο στην περίπτωση μας στα 3,6V αλλάζει σε σταθερή τάση για την διατήρηση της υγείας της μπαταρίας.

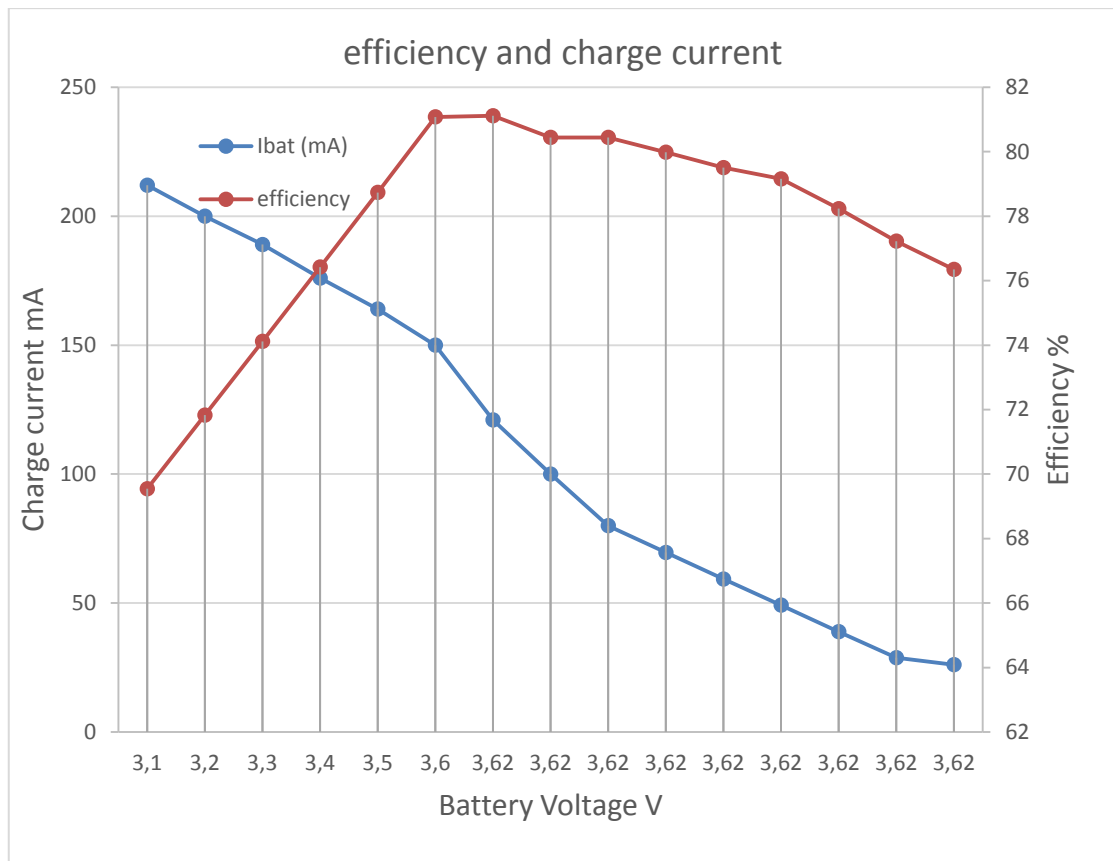
Ένα άλλο χαρακτηριστικό είναι η παρακολούθηση της θερμοκρασίας της μπαταρίας με ένα εξωτερικό θερμίστορ NTC. Επίσης, υπάρχει η ένδειξη λειτουργίας, για να παρατηρούμε αν η μπαταρία είναι σε κατάσταση φόρτισης ή όχι. Για τον χαρακτηρισμό και τη μέτρηση της απόδοσής του, το κύκλωμα τροφοδοτήθηκε με τάση εισόδου 5V και μέγιστο ρεύμα 300mA. Το μέγιστο ρεύμα φόρτισης της μπαταρίας προγραμματίστηκε στα 250mA. Η SMU συνδέθηκε στους ακροδέκτες της μπαταρίας για να προσομοιώσει το

στοιχείο της μπαταρίας. Το SMU προγραμματίστηκε ώστε να αυξάνεται σταδιακά η τάση, ώστε ο φορτιστής να αντιληφθεί ότι η μπαταρία φορτίζεται. Το ρεύμα που παρείχε ο φορτιστής αντλήθηκε από την SMU και καταγράφηκαν οι τιμές του ρεύματος φόρτισης για διαφορετικές τιμές τάσης. Η τάση της SMU, καθώς δείχνει σε ποια λειτουργία (CC ή CV) βρίσκεται ο φορτιστής. Επιπλέον, επηρεάζει την είσοδο, αφού καθώς η μπαταρία φορτίζεται, απαιτείται λιγότερη ισχύς από την πηγή.

Η απόδοση του συστήματος του φορτιστή προκύπτει από την διαίρεση της ισχύος φόρτισης προς την ισχύ εισόδου. Η ισχύς φόρτισης προσδιορίζεται από την τάση του SMU και το ρεύμα φόρτισης σε κάθε τιμή. Όσον αφορά την ισχύ εισόδου, αυτή αντιστοιχεί στην ισχύ που απορροφάται από την τροφοδοσία.

Στο γράφημα που ακολουθεί παρουσιάζεται η απόδοση του φορτιστή σε συνάρτηση με την τάση φόρτισης. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τον φορτιστή να έχει προγραμματιστεί για μπαταρίες τύπου Li-Fe-Po₄ και η τάση φόρτισης στους ακροδέκτες της μπαταρίας να έχει καθοριστεί στα 3,6V. Στο γράφημα απεικονίζονται τα εξής:

- Στον οριζόντιο άξονα απεικονίζονται οι τιμές τάσης σε Volts.
- Στον αριστερά κατακόρυφο άξονα απεικονίζονται οι τιμές του ρεύματος φόρτισης σε mA.
- Στον δεξιά κατακόρυφο άξονα απεικονίζονται οι τιμές της απόδοσης του φορτιστή σε ποσοστό %.
- Η μπλε καμπύλη είναι του ρεύματος φόρτισης.
- Η κόκκινη καμπύλη είναι η απόδοση του φορτιστή .



Γράφημα 7 Charger module efficiency graph.

5 Συμπεράσματα και μελλοντικές βελτιώσεις

Στον πίνακα που ακολουθεί αναφέρονται οι μέγιστες τιμές που λάβαμε από το κάθε σύστημα ξεχωριστά. Παρατηρείτε ότι η υψηλότερη τιμή επιτεύχθηκε από το φωτοβολταϊκό σύστημα και πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιώντας την τοπολογία με τον πυκνωτή αποθήκευσης χωρητικότητας 1000uF. Ακολούθως, η χαμηλότερη τιμή λήφθηκε από το θερμοηλεκτρικό κύκλωμα. Αν παρατηρήσουμε προσεκτικά στα γραφήματα που συνοδεύουν το κάθε σύστημα, βλέπουμε ότι το πιεζοηλεκτρικό κύκλωμα είναι αυτό που χάνει πιο απότομα την απόδοση του με την αύξηση του φορτίου, το θερμοηλεκτρικό έχει τις χαμηλότερες τιμές ενώ από τα φωτοβολταϊκά κυκλώματα έχουμε πιο ομαλές διακυμάνσεις.

Module	Best case efficiency scenario in each module
PV module using the 470uF capacitor.	91.4 %
PV module using the 820uF capacitor.	91.4 %
PV module using the 1000uF capacitor.	91.9 %
PV module using the 1200uF capacitor.	91.4 %
PZ/TB module using the 1000uF capacitor.	91.4 %
TEG module using the 1000uF capacitor.	31.7 %
Charger module	81.2 %

Πίνακας 10 Best case efficiency scenario for each module.

5.1 Κύρια ευρήματα της έρευνας

Συμπερασματικά, η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε με σκοπό τη μετρική αξιολόγηση ενός πειραματικού κυκλώματος, τροφοδοτούμενου από τρεις διαφορετικές πηγές και συνολικά πέντε harvester chips: τρία φωτοβολταϊκά, ένα πιεζοηλεκτρικό και ένα θερμοηλεκτρικό κύκλωμα. Με τη χρήση του διαθέσιμου λογισμικού και των εργαλείων του εργαστηρίου, επιτεύχθηκε η λειτουργία τους είτε μεμονωμένα είτε σε συνδυασμό, ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις. Τα πειραματικά αποτελέσματα βρίσκονται κοντά στις τιμές που παρέχονται από τους κατασκευαστές, ενώ η συνολική απόδοση που καταγράφηκε, 66%, θεωρείται αποδεκτή για το είδος του συστήματος που αναπτύχθηκε.

5.2 Συστάσεις για μελλοντικές εργασίες και βελτιώσεις

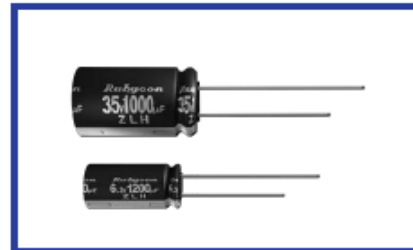
Η παρούσα εργασία θα μπορούσε να επεκταθεί με τη χρήση μεγαλύτερου board, ώστε να είναι δυνατή η τοποθέτηση περισσότερων harvesters, ενός ή και περισσότερων τύπων, καθώς και των κατάλληλων υλικών για την αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας. Επιπλέον, θα μπορούσε να αξιοποιηθεί από άλλους ερευνητές ως βάση για πειράματα, στα οποία θα χρησιμοποιούνται διαφορετικοί αριθμητικοί συνδυασμοί harvesters. Με την αλλαγή του board, θα ήταν δυνατή η τοποθέτηση περισσότερων pinouts, με σκοπό τη σύνδεση κατάλληλων μικροελεγκτών και συσκευών, ώστε η τάση και η ένταση του ρεύματος να ρυθμίζονται ανάλογα με τις απαιτήσεις κάθε συσκευής. Τέλος, η εργασία θα μπορούσε να ολοκληρωθεί με την προσθήκη μονάδας ασύρματης επικοινωνίας RF

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Rubycon	リード線形アルミニウム電解コンデンサ RADIAL LEAD ALUMINUM ELECTROLYTIC CAPACITORS	ZLH
----------------	---	------------

ZLH series

105°C 6000~10000時間品 小形化 長寿命 低インピーダンス品
105°C 6000~10000 hours, Miniaturized, Long Life, Low Impedance



◆規格表/SPECIFICATIONS

項目 Item	特性 Characteristics																														
カテゴリ温度範囲 Category Temperature Range	-40~+105℃																														
定格電圧範囲 Rated Voltage Range	6.3~100Vdc																														
静電容量許容差 Capacitance Tolerance	±20%(20℃, 120Hz)																														
漏れ電流 Leakage Current (MAX)	I=0.01CV又は3μAのいずれか大なる値以下 (定格電圧印加2分後) I=0.01CV or 3μA whichever is greater. (After 2 minutes) I=漏れ電流(μA) C=静電容量(μF) V=定格電圧(Vdc) Leakage Current Capacitance Rated Voltage																														
損失角の正接(tanδ) Dissipation Factor (MAX)	<table><tr><td>定格電圧(Vdc) Rated Voltage</td><td>6.3</td><td>10</td><td>16</td><td>25</td><td>35</td><td>50</td><td>63</td><td>80</td><td>100</td></tr><tr><td>tanδ</td><td>0.22</td><td>0.19</td><td>0.16</td><td>0.14</td><td>0.12</td><td>0.10</td><td>0.09</td><td>0.08</td><td>0.08</td></tr></table> 1000μFを超えるものは1000μF増す毎に上表の値に0.02を加えた値とする。 When capacitance is over 1000μF, tanδ shall be added 0.02 to the listed value with increase of every 1000μF.	定格電圧(Vdc) Rated Voltage	6.3	10	16	25	35	50	63	80	100	tanδ	0.22	0.19	0.16	0.14	0.12	0.10	0.09	0.08	0.08										
定格電圧(Vdc) Rated Voltage	6.3	10	16	25	35	50	63	80	100																						
tanδ	0.22	0.19	0.16	0.14	0.12	0.10	0.09	0.08	0.08																						
耐久性 Endurance	105℃中で右表の時間定格電圧(リップル重畳)印加後、下記項目を満足すること。 After applying rated voltage with rated ripple current for specified time at 105℃, the capacitors shall meet the following requirements. <table><tr><td>静電容量変化率 Capacitance Change</td><td>初期値の±25%以内 (6.3Vdc, 10Vdc: ±30%) Within ±25% of the initial value (6.3Vdc, 10Vdc: ±30%)</td><td>ケースサイズ Case Size</td><td>時間(hrs) Time(hrs)</td></tr><tr><td>損失角の正接 Dissipation Factor</td><td>規格値の 200% 以下 Not more than 200% of the specified value.</td><td>φD≤6.3</td><td>6000</td></tr><tr><td>漏れ電流 Leakage Current</td><td>規格値以下 Not more than the specified value.</td><td>φD=8</td><td>8000</td></tr><tr><td></td><td></td><td>φD≥10</td><td>10000</td></tr></table>	静電容量変化率 Capacitance Change	初期値の±25%以内 (6.3Vdc, 10Vdc: ±30%) Within ±25% of the initial value (6.3Vdc, 10Vdc: ±30%)	ケースサイズ Case Size	時間(hrs) Time(hrs)	損失角の正接 Dissipation Factor	規格値の 200% 以下 Not more than 200% of the specified value.	φD≤6.3	6000	漏れ電流 Leakage Current	規格値以下 Not more than the specified value.	φD=8	8000			φD≥10	10000														
静電容量変化率 Capacitance Change	初期値の±25%以内 (6.3Vdc, 10Vdc: ±30%) Within ±25% of the initial value (6.3Vdc, 10Vdc: ±30%)	ケースサイズ Case Size	時間(hrs) Time(hrs)																												
損失角の正接 Dissipation Factor	規格値の 200% 以下 Not more than 200% of the specified value.	φD≤6.3	6000																												
漏れ電流 Leakage Current	規格値以下 Not more than the specified value.	φD=8	8000																												
		φD≥10	10000																												
低温特性 Low Temperature Stability (インピーダンス比) Impedance Ratio (MAX)	<table><tr><td>定格電圧(Vdc) Rated Voltage</td><td>6.3</td><td>10</td><td>16</td><td>25</td><td>35</td><td>50</td><td>63</td><td>80</td><td>100</td></tr><tr><td>Z(-25℃)/Z(+20℃)</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr><tr><td>Z(-40℃)/Z(+20℃)</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td></tr></table> (120Hz)	定格電圧(Vdc) Rated Voltage	6.3	10	16	25	35	50	63	80	100	Z(-25℃)/Z(+20℃)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	Z(-40℃)/Z(+20℃)	3	3	3	3	3	3	3	3	3
定格電圧(Vdc) Rated Voltage	6.3	10	16	25	35	50	63	80	100																						
Z(-25℃)/Z(+20℃)	2	2	2	2	2	2	2	2	2																						
Z(-40℃)/Z(+20℃)	3	3	3	3	3	3	3	3	3																						

◆呼称方法/PART NUMBER

□□□	ZLH	□□□□□	M	□□□	□□	D x L
定格電圧 Rated Voltage	シリーズ名 Series	静電容量 Capacitance	静電容量許容差 Capacitance Tolerance	副記号 Option	リード加工記号 Lead Forming	ケースサイズ Case Size

◆リップル電流補正係数/

MULTIPLIER FOR RIPPLE CURRENT

周波数 (Hz) Frequency	120	1k	10k	100k ≤
係数 Coefficient				
8.2~33 µF	0.42	0.70	0.90	1.00
47~270 µF	0.50	0.73	0.92	1.00
330~680 µF	0.55	0.77	0.94	1.00
820~1800 µF	0.60	0.80	0.96	1.00
2200~8200 µF	0.70	0.85	0.98	1.00

◆副記号/OPTION

EFC : PETスリーブ PET Sleeve

ZLJ series

105°C 6000~10000時間品 高リプル 長寿命 低インピーダンス品
105°C 6000~10000 hours, High Ripple Current, Long Life, Low Impedance



◆規格表/SPECIFICATIONS

項目 Item	特性 Characteristics																																																																																														
カテゴリ温度範囲 Category Temperature Range	-40~+105°C																																																																																														
定格電圧範囲 Rated Voltage Range	6.3~120Vdc																																																																																														
静電容量許容差 Capacitance Tolerance	±20%(20°C, 120Hz)																																																																																														
漏れ電流 Leakage Current (MAX)	I=0.01CV又は3μAのいずれか大なる値以下 (定格電圧印加2分後) I=0.01CV or 3μA whichever is greater. (After 2 minutes) I=漏れ電流(μA) C=静電容量(μF) V=定格電圧(Vdc) Leakage Current Capacitance Rated Voltage																																																																																														
損失角の正接(tan δ) Dissipation Factor (MAX)	<table><tr><td>定格電圧 (Vdc) Rated Voltage</td><td>6.3</td><td>10</td><td>16</td><td>25</td><td>35</td><td>50</td><td>63</td><td>80</td><td>100</td><td>120</td></tr><tr><td>tan δ</td><td>0.22</td><td>0.19</td><td>0.16</td><td>0.14</td><td>0.12</td><td>0.10</td><td>0.09</td><td>0.08</td><td>0.08</td><td>0.08</td></tr></table> (20°C, 120Hz)											定格電圧 (Vdc) Rated Voltage	6.3	10	16	25	35	50	63	80	100	120	tan δ	0.22	0.19	0.16	0.14	0.12	0.10	0.09	0.08	0.08	0.08																																																														
定格電圧 (Vdc) Rated Voltage	6.3	10	16	25	35	50	63	80	100	120																																																																																					
tan δ	0.22	0.19	0.16	0.14	0.12	0.10	0.09	0.08	0.08	0.08																																																																																					
1000uFを超えるものは1000uF増す毎に上記の表に0.02を加えた値とする。																																																																																															
耐久性 Endurance	105°C中で右表の時間定格電圧(リプル重畳)印加後、下記規格を満足すること。 After applying rated voltage with rated ripple current for specified time at 105°C, the capacitors shall meet the following requirements. <table><tr><td rowspan="2">静電容量変化率 Capacitance Change</td><td rowspan="2">初期値の ±25%以内 (6.3Vdc, 10Vdc: ±30%) Within ±25% of the initial value.</td><td colspan="4">ケースサイズ Case Size</td><td colspan="4">時間(hrs) Life Time</td></tr><tr><td>6.3Vdc</td><td>10~50Vdc</td><td>63~100Vdc</td><td>120Vdc</td><td>6000</td><td>7000</td><td>8000</td><td>9000</td></tr><tr><td>損失角の正接 Dissipation Factor</td><td>規格値の200%以下 Not more than 200% of the specified value.</td><td>φD≤6.3</td><td>8000</td><td>9000</td><td>8000</td><td>9000</td><td>9000</td><td>9000</td><td>9000</td><td>9000</td></tr><tr><td>漏れ電流 Leakage Current</td><td>規格値以下 Not more than the specified value.</td><td>8X11.5</td><td>8000</td><td>9000</td><td>8000</td><td>9000</td><td>9000</td><td>9000</td><td>9000</td><td>9000</td></tr><tr><td></td><td></td><td>10X12.5</td><td>9000</td><td>9000</td><td>9000</td><td>9000</td><td>9000</td><td>9000</td><td>9000</td><td>9000</td></tr><tr><td></td><td></td><td>8X16, 8X20</td><td>9000</td><td>10000</td><td>9000</td><td>9000</td><td>9000</td><td>9000</td><td>9000</td><td>9000</td></tr><tr><td></td><td></td><td>10X16, 10X20, 10X25</td><td colspan="8">10000</td></tr><tr><td></td><td></td><td>φD≥12.5</td><td colspan="8">10000</td></tr></table>											静電容量変化率 Capacitance Change	初期値の ±25%以内 (6.3Vdc, 10Vdc: ±30%) Within ±25% of the initial value.	ケースサイズ Case Size				時間(hrs) Life Time				6.3Vdc	10~50Vdc	63~100Vdc	120Vdc	6000	7000	8000	9000	損失角の正接 Dissipation Factor	規格値の200%以下 Not more than 200% of the specified value.	φD≤6.3	8000	9000	8000	9000	9000	9000	9000	9000	漏れ電流 Leakage Current	規格値以下 Not more than the specified value.	8X11.5	8000	9000	8000	9000	9000	9000	9000	9000			10X12.5	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000			8X16, 8X20	9000	10000	9000	9000	9000	9000	9000	9000			10X16, 10X20, 10X25	10000										φD≥12.5	10000							
静電容量変化率 Capacitance Change	初期値の ±25%以内 (6.3Vdc, 10Vdc: ±30%) Within ±25% of the initial value.	ケースサイズ Case Size				時間(hrs) Life Time																																																																																									
		6.3Vdc	10~50Vdc	63~100Vdc	120Vdc	6000	7000	8000	9000																																																																																						
損失角の正接 Dissipation Factor	規格値の200%以下 Not more than 200% of the specified value.	φD≤6.3	8000	9000	8000	9000	9000	9000	9000	9000																																																																																					
漏れ電流 Leakage Current	規格値以下 Not more than the specified value.	8X11.5	8000	9000	8000	9000	9000	9000	9000	9000																																																																																					
		10X12.5	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000																																																																																					
		8X16, 8X20	9000	10000	9000	9000	9000	9000	9000	9000																																																																																					
		10X16, 10X20, 10X25	10000																																																																																												
		φD≥12.5	10000																																																																																												
低温特性 Low Temperature Stability (インピーダンス比) Impedance Ratio (MAX)	<table><tr><td>定格電圧 (Vdc) Rated Voltage</td><td>6.3</td><td>10</td><td>16</td><td>25</td><td>35</td><td>50</td><td>63</td><td>80</td><td>100</td><td>120</td></tr><tr><td>Z(-25°C)/Z(+20°C)</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>3</td></tr><tr><td>Z(-40°C)/Z(+20°C)</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td>4</td></tr></table> (120Hz)											定格電圧 (Vdc) Rated Voltage	6.3	10	16	25	35	50	63	80	100	120	Z(-25°C)/Z(+20°C)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	Z(-40°C)/Z(+20°C)	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4																																																			
定格電圧 (Vdc) Rated Voltage	6.3	10	16	25	35	50	63	80	100	120																																																																																					
Z(-25°C)/Z(+20°C)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3																																																																																					
Z(-40°C)/Z(+20°C)	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4																																																																																					

◆呼称方法/PART NUMBER

□□□	ZLJ	□□□□□	M	□□□	□□	D x L
定格電圧 Rated Voltage	シリーズ名 Series	静電容量 Capacitance	静電容量許容差 Capacitance Tolerance	副記号 Option	リード加工記号 Lead Forming	ケースサイズ Case Size

◆リプル電流補正係数/

MULTIPLIER FOR RIPPLE CURRENT

周波数 (Hz) Frequency	120	1k	10k	100k≤
8.2~33 μF	0.42	0.70	0.90	1.00
47~270 μF	0.50	0.73	0.92	1.00
330~680 μF	0.55	0.77	0.94	1.00
820~1800 μF	0.60	0.80	0.96	1.00
2200~6200 μF	0.70	0.85	0.98	1.00

◆副記号/OPTION

ブランク : 標準品
EFU : 低インピーダンス仕様品
Blank : Standard item
EFU : Low Impedance items

FEATURES

- Low $R_{DS(on)}$ of 50 m Ω @ 3.3 V (WLCSP only)
- Low input voltage range: 1.65 V to 6.5 V
- 1 A continuous operating current
- Built-in level shift for control logic that can be operated by 1.2 V logic
- Low 2.5 μ A quiescent current @ $V_{IN} = 2.8$ V
- Low 1.1 μ A shutdown current @ $V_{IN} = 2.8$ V
- Reverse current blocking
- Programmable start-up time
- Ultrasmall 1 mm $\times$ 1 mm, 4-ball, 0.5 mm pitch (WLCSP)
- Tiny 8-lead lead frame chip scale package (LFCSP)
- 2.0 mm $\times$ 2.0 mm $\times$ 0.55 mm, 0.5 mm pitch

APPLICATIONS

- Mobile phones
- Digital cameras and audio devices
- Portable and battery-powered equipment

GENERAL DESCRIPTION

The ADP198 is a high-side load switch designed for operation between 1.65 V and 6.5 V that is protected against reverse current flow from output to input. A load switch provides power domain isolation, thereby helping to keep subsystems isolated and powered independently and enabling reduced power consumption. The ADP198 contains a low on-resistance P-channel MOSFET that supports more than 1 A of continuous load current. The low 2.5 μ A quiescent current and ultralow shutdown current make the ADP198 ideal for battery-operated portable

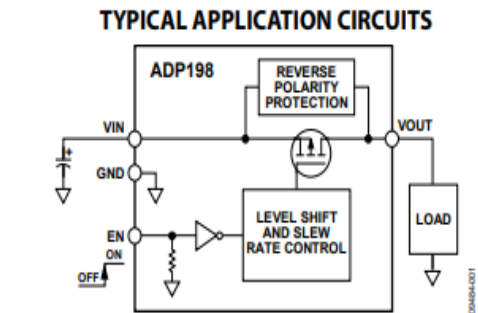


Figure 1. WLCSP

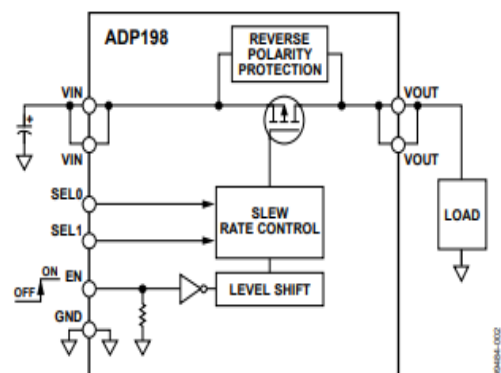


Figure 2. LFCSP

equipment. The built-in level shifter for enable logic makes the ADP198 compatible with modern processors and general-purpose input/output (GPIO) controllers. The LFCSP version also allows the user to program the start-up time to control the inrush current at turn on.

The ADP198 is available in an ultrasmall 1 mm $\times$ 1 mm, 4-ball, 0.5 mm pitch WLCSP. An 8-lead, 2 mm $\times$ 2 mm $\times$ 0.55 mm, 0.5 mm pitch LFCSP is also available.



LTC3130/LTC3130-1

25V, 600mA Buck-Boost DC/DC Converter with 1.6 μ A Quiescent Current

FEATURES

- Regulates V_{OUT} Above, Below or Equal to V_{IN}
- Wide V_{IN} Range: 2.4V to 25V, <1V to 25V (Using $EXTV_{CC}$ Input)
- V_{OUT} Range: 1V to 25V
- Adjustable Output Voltage (LTC[®]3130)
- Four Selectable Fixed Output Voltages (LTC3130-1)
- 1.2 μ A No-Load Input Current in Burst Mode[®] Operation ($V_{IN} = 12V$, $V_{OUT} = 5V$)
- 600mA Output Current in Buck Mode
- Pin-Selectable 850mA/450mA Current Limit (LTC3130)
- Up to 95% Efficiency
- Pin-Selectable Burst Mode Operation
- 1.2MHz Ultralow Noise PWM Frequency
- Accurate RUN Pin Threshold
- Power Good Indicator
- Programmable Maximum Power Point Control
- $I_Q = 500nA$ in Shutdown
- Thermally-Enhanced 20-Lead 3mm $\times$ 4mm QFN and 16-Lead MSOP Packages

APPLICATIONS

- Long-Life, Battery-Operated Instruments
- Portable Military Radios
- Low Power Sensors
- Solar Panel Post-Regulator/Charger

DESCRIPTION

The LTC3130/LTC3130-1 are high efficiency, low noise, 600mA buck-boost converters with wide V_{IN} and V_{OUT} ranges. For high efficiency operation at light loads, Burst Mode operation can be selected, reducing the quiescent current to just 1.6 μ A. Converter start-up is achieved from sources as low as 7.5 μ W.

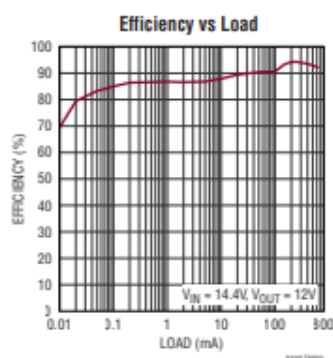
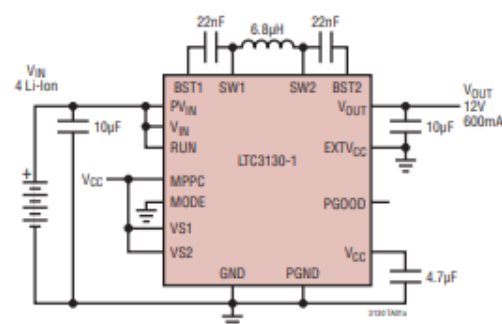
The LTC3130/LTC3130-1 employ an ultralow noise, 1.2MHz PWM architecture that minimizes solution footprint by allowing the use of tiny, low profile inductors and ceramic capacitors. Built-in loop compensation and soft-start reduces external parts count and simplifies the design. Features include an accurate RUN comparator threshold to allow predictable regulator turn-on and a maximum power point control (MPPC) capability that ensures maximum power extraction from non-ideal sources such as photovoltaic panels. The LTC3130-1 includes an internal voltage divider to provide four selectable fixed output voltages.

Additional features include a power good output, an external V_{CC} input and thermal shutdown.

The LTC3130 and LTC3130-1 are available in thermally-enhanced 20-lead 3mm $\times$ 4mm QFN and 16-lead MSOP packages.

LT, LTC, LTM, Linear Technology, the Linear logo and Burst Mode are registered trademarks and PowerPath is a trademark of Linear Technology Corporation. All other trademarks are the property of their respective owners.

TYPICAL APPLICATION



For more information www.linear.com/LTC3130

3130f

1

Dataset 4 PV LTC 3130-1

Auto-Polarity, Ultralow Voltage Step-Up Converter and Power Manager

FEATURES

- Operates from Inputs as Low as $\pm 30\text{mV}$
- Less Than $\pm 1^\circ\text{C}$ Needed Across TEG to Harvest Energy
- Proprietary Auto-Polarity Architecture
- Complete Energy Harvesting Power Management System
 - Selectable V_{OUT} of 2.35V, 3.3V, 4.1V or 5V
 - 2.2V, 5mA LDO
 - Logic-Controlled Output
 - Energy Storage Capability for Operation During Power Interruption
- Power Good Indicator
- Uses Compact Step-up Transformers
- Small, 20-lead (4mm $\times$ 4mm) QFN Package or 20-Lead SSOP

APPLICATIONS

- Remote Sensor and Radio Power
- HVAC Systems
- Automatic Metering
- Building Automation
- Predictive Maintenance
- Industrial Wireless Sensing

DESCRIPTION

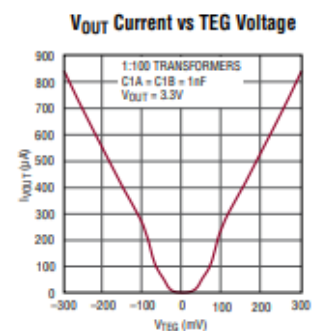
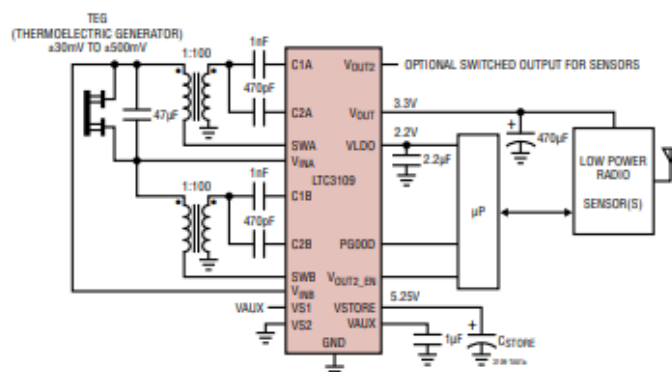
The **LTC3109** is a highly integrated DC/DC converter ideal for harvesting surplus energy from extremely low input voltage sources such as TEGs (thermoelectric generators) and thermopiles. Its unique, proprietary autopolarity topology* allows it to operate from input voltages as low as 30mV, regardless of polarity.

Using two compact step-up transformers and external energy storage elements, the LTC3109 provides a complete power management solution for wireless sensing and data acquisition. The 2.2V LDO can power an external microprocessor, while the main output can be programmed to one of four fixed voltages. The power good indicator signals that the main output is within regulation. A second output can be enabled by the host. A storage capacitor (or battery) can also be charged to provide power when the input voltage source is unavailable. Extremely low quiescent current and high efficiency maximizes the harvested energy available for the application.

The LTC3109 is available in a small, thermally enhanced 20-lead (4mm $\times$ 4mm) QFN package and a 20-lead SSOP package.

LT, LTC, LTM, Linear Technology and the Linear logo are registered trademarks of Linear Technology Corporation. All other trademarks are the property of their respective owners.
*Patent pending.

TYPICAL APPLICATION



Nanopower Energy Harvesting Power Supply with 14V Minimum V_{IN}

FEATURES

- 1500nA Input Quiescent Current (Output in Regulation – No Load, $V_{IN} = 18V$)
- 830nA Input Quiescent Current in UVLO, $V_{IN} = 12V$
- 14V to 20V Input Operating Range
- Integrated Low-Loss Full-Wave Bridge Rectifier
- 16V UVLO Improves Power Utilization from High Voltage Current Limited Inputs
- Up to 100mA of Output Current
- High Efficiency Integrated Hysteretic Buck DC/DC
- Selectable Output Voltages: 3.45V, 4.1V, 4.5V, 5.0V
- Input Protective Shunt – Up to 25mA Pull-Down at $V_{IN} \geq 20V$
- Available in 10-Lead MSE and 3mm $\times$ 3mm DFN Packages

APPLICATIONS

- Piezoelectric Energy Harvesting
- Electro-Mechanical Energy Harvesting
- Low Power Battery Charging
- Wireless HVAC Sensors
- Mobile Asset Tracking
- Tire Pressure Sensors
- Battery Replacement for Industrial Sensors

DESCRIPTION

The **LTC3588-2** integrates a low-loss full-wave bridge rectifier with a high efficiency buck converter to form a complete energy harvesting solution optimized for high output impedance energy sources such as piezoelectric, solar, or magnetic transducers.

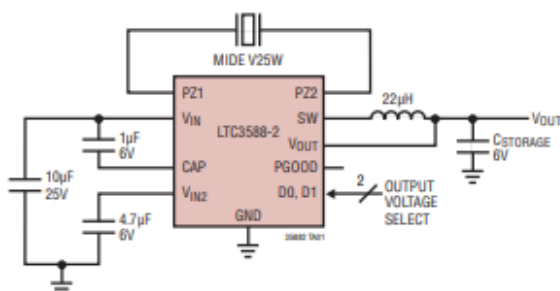
An ultralow quiescent current undervoltage lockout (UVLO) mode with a 16V rising threshold enables efficient energy extraction from sources with high open circuit voltages. This energy is transferred from the input capacitor to the output via a high efficiency synchronous buck regulator. The 16V UVLO threshold also allows for input to output current multiplication through the buck regulator. The buck features a sleep state that minimizes both input and output quiescent currents while in regulation.

Four output voltages of 3.45V, 4.1V, 4.5V and 5.0V are pin selectable with up to 100mA of continuous output current, and suit Li-Ion and LiFePO₄ batteries as well as supercapacitors. An input protective shunt set at 20V provides overvoltage protection.

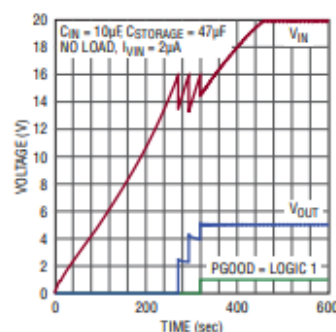
LT, LT, LTC, LTM, Linear Technology, the Linear logo and Burst Mode are registered trademarks of Linear Technology Corporation. All other trademarks are the property of their respective owners.

TYPICAL APPLICATION

High Voltage Piezoelectric Energy Harvesting Power Supply



LTC3588-2 5.0V Regulator Start-Up Profile



60V, 250mA Linear Charger with Low Quiescent Current

FEATURES

- Wide Input Voltage Range: 2.7V to 60V
- Adjustable Battery Voltage: 1.2V to 60V
- Adjustable Charge Current: 10mA to 250mA
- Low Quiescent Current While Charging: $I_{IN} = 4\mu A$
- Ultralow Battery Drain When Shutdown or Charged:
 - $I_{BAT} < 0.01\mu A$
- Auto Recharge
- Input Voltage Regulation for High Impedance Sources
- Thermal Regulation Maximizes Output Current without Overheating
- Constant Voltage Feedback with $\pm 0.5\%$ Accuracy
- NTC Thermistor Input for Temperature Qualified Charging
- Adjustable Safety Timer
- Charging Status Indication
- Thermally Enhanced 10-Lead (3mm $\times$ 3mm) DFN Package
- AEC-Q100 Qualified for Automotive Applications

APPLICATIONS

- Embedded Automotive and Industrial
- Backup Battery Charging from Another Battery
- Energy Harvesting Charger
- Thin Film Battery Products

DESCRIPTION

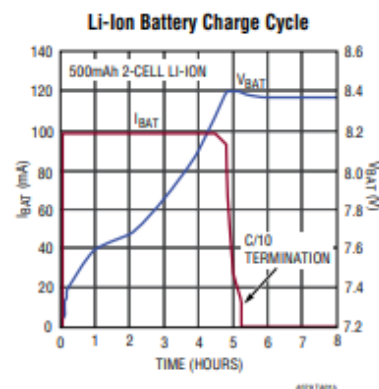
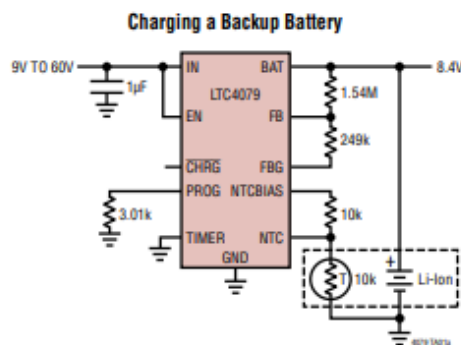
The LTC4079 is a low quiescent current, high voltage linear charger for most battery chemistry types including Li-Ion/Polymer, LiFePO₄, Lead-Acid or NiMH battery stacks up to 60V. The maximum charge current is adjustable from 10mA to 250mA with an external resistor. The battery charge voltage is set using an external resistor divider.

With an integrated power device, current sensing and reverse current protection, a complete charging solution using the LTC4079 requires very few external components. Thermal regulation ensures maximum charge current up to the specified limit without the risk of overheating. Charging can be terminated by either C/10 or adjustable timer.

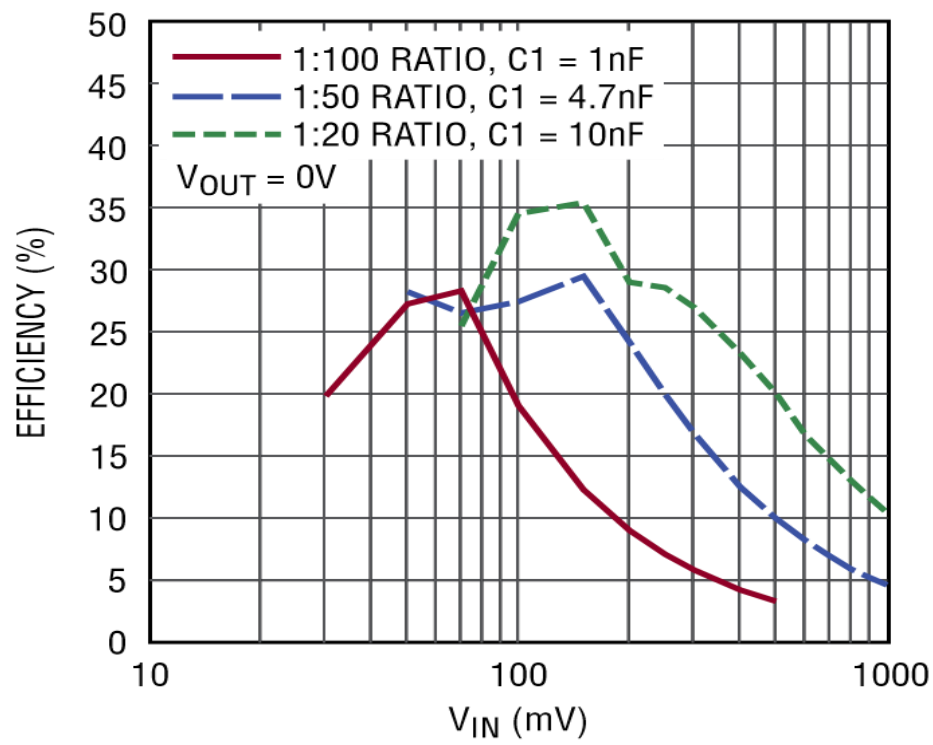
Input voltage regulation reduces charge current when the input voltage falls to an adjustable level or the battery voltage, making it well suited for energy harvesting applications. Other features include temperature qualified charging, bad battery detection, automatic recharge with sampled feedback in standby for negligible battery drain, and an open-drain $\overline{CHRG}$ status output. The device is offered in a compact, thermally enhanced 10-lead (3mm $\times$ 3mm) DFN package.

All registered trademarks and trademarks are the property of their respective owners.

TYPICAL APPLICATION



Efficiency vs V_{IN}



3109 G04

Dataset 8 PZ efficiency graphic given by manufacturer.

83%CE%B7-

%CE%A3%CF%84%CE%B1%CE%B8%CE%B5%CF%81%CE%BF%CF%80%CE%BF%CE%AF%CE%B7%CF%83%CE%B7%29 (Accessed: 28 November 2024).

Μελέτη Εγκατάστασης και Λειτουργίας Υβριδικού Συστήματος Παραγωγής και Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας στη Λήμνο - IKEE / Αριστοτελείο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης - Βιβλιοθήκη (2025). Available at: <http://ikee.lib.auth.gr/record/315050/files/?ln=el>

Παπαστράτος, Ν.-Γ. (2021) ‘Μέτρηση και χαρακτηρισμός πηγών ενέργειας και μετατροπών για ενσωματωμένα συστήματα.’ Available at: <https://olympias.lib.uoi.gr/jspui/handle/teiep/12388>

Φιλίππουπολίτη, Χ. (2022) ‘Αρχές λειτουργίας και εφαρμογές της συγκομιδής ενέργειας (energy harvesting)’. Available at: <https://doi.org/10.26265/polynoe-1837>.

Φωτοβολταικά στις ράγες - Η απίστευτη ανακάλυψη Ελβετικής startup για τον σιδηρόδρομο (2024) *Energymag*. Available at: https://www.energymag.gr/energeia/ape/100849_fotoboltaika-stis-rages-i-apisteyti-anakalypsi-elbetikis-startup-gia-ton (Accessed: 5 February 2025).

A Hybrid Solar-RF Energy Harvesting System Based on an EM4325-Embedded RFID Tag (2025). Available at: <https://www.mdpi.com/2079-9292/12/19/4045> (Accessed: 10 August 2025).

A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003–2006) - IOPscience (2025). Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/16/3/R01> (Accessed: 10 August 2025).

Adnan Khan, MD.S. *et al.* (2019) ‘Energy Harvesting—Technical Analysis of Evolution, Control Strategies, and Future Aspectsa’, *Journal of Electronic Science and Technology*, 17(2), pp. 116–125. Available at: <https://doi.org/10.11989/JEST.1674-862X.80314201>.

Avery, W.H. and Wu, C. (1994) *Renewable Energy from the Ocean: A Guide to OTEC*. Oxford University Press. Available at: <https://doi.org/10.1093/oso/9780195071993.001.0001>.

Blokland, B.T. (2019) ‘Testing Energy Harvesting Devices Realistic and Repeatable’. Available at: <https://repository.tudelft.nl/record/uuid:f9289d0a-bf2b-4883-83d0-f5881cc8f51f> (Accessed: 25 March 2025).

Bradley, S. (2024) ‘Groundbreaking solar railway project gets back on track’, *SWI swissinfo.ch*, 11 October. Available at: <https://www.swissinfo.ch/eng/science/swiss-solar-railway-project-gets-back-on-track/87707181> (Accessed: 15 November 2024).

Chandra, P. and Dong, A. (2022) ‘Valuation of energy harvesting technologies — Insights for technology managers’, *Energy Reports*, 8, pp. 6987–6998. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.05.032>.

Conway, B.E. (1999) *Electrochemical supercapacitors: scientific fundamentals and technological applications*. New York Boston Dordrecht London Moscow: Kluwer Academic / Plenum Publishers.

CORPORATIVA, I. (2024) *Photovoltaic cells: discover their evolution, their different types and the latest innovations*, Iberdrola. Available at: <https://www.iberdrola.com/innovation/photovoltaic-photoelectric-cells> (Accessed: 3 November 2024).

Definition of INTERDISCIPLINARY (2024). Available at: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/interdisciplinary> (Accessed: 9 November 2024).

Duffie, J.A. and Beckman, W.A. (2013) *Solar engineering of thermal processes*. 4th ed. Hoboken: Wiley. Available at: <https://doi.org/10.1002/9781118671603>.

Ellenbogen, J. (2006) ‘Supercapacitors: A Brief Overview’. Available at: <https://www.mitre.org/news-insights/publication/supercapacitors-brief-overview> (Accessed: 20 March 2025).

Erturk, A., Inman, D.J. and Inman, D.J. (2011) *Piezoelectric energy harvesting*. 1. publ. Chichester: Wiley.

Fagas, G. (ed.) (2014) *ICT - Energy - Concepts Towards Zero - Power Information and Communication Technology*. InTech. Available at: <https://doi.org/10.5772/55410>.

Farmer, J.R. (2007) *A comparison of power harvesting techniques and related energy storage issues*. Virginia Tech. Available at: <http://hdl.handle.net/10919/33072> (Accessed: 5 February 2025).

Fig. 2: Illustration of the Seebeck effect. When heat flows across the... (2024) *ResearchGate*. Available at: https://www.researchgate.net/figure/illustration-of-the-Seebeck-effect-When-heat-flows-across-the-junction-electrical_fig2_283322686 (Accessed: 5 November 2024).

Foley, E. (2024) *Wave energy tech could drive down solar costs in Australia*, *pV magazine International*. Available at: <https://www.pv-magazine.com/2024/11/08/wave-energy-tech-could-drive-down-solar-costs-in-australia/> (Accessed: 9 November 2024).

Grayson Honan, Nicholas Gekakis, Moeen Hassanali, Andrew Nadeau, Gaurav Sharma, Tolga Soyata, “Energy Harvesting and Buffering for Cyber Physical Systems: A Review”, *Cyber Physical Systems : A Computational Perspective*, Chapter: 7, Publisher: CRC

GWÉNAËLLE, D. (2024) *Switzerland authorizes removable PV plant on railway track*, *pV magazine International*. Available at: <https://www.pv-magazine.com/2024/10/04/switzerland-authorizes-removable-pv-plant-on-railway-track/> (Accessed: 9 November 2024).

H. Sharma, P. Agrawal, “A survey of energy harvesting technologies for wireless sensor networks”, *Akgec International Journal Of Technology*, Vol. 8, No. 1

Halper, M.S. (2006) ‘Supercapacitors: A Brief Overview’. Available at: https://www.mitre.org/sites/default/files/pdf/06_0667.pdf

Hone, F., Teeghe, N. and Andoshe, D. (2021) ‘Advanced Materials for Energy Storage Devices’, in, pp. 71–107. Available at: <https://doi.org/10.1201/9781003145585-5>.

Hosseini, T.A. (no date) ‘Synthesis, Transport, and Thermoelectric Studies of Topological Dirac Semimetal Cd₃As₂ for Room Temperature Waste Heat Recovery and Energy Conversion’.

Honan, Grayson & Gekakis, Nicholas & Hassanaliheragh, Moeen & Nadeau, Andrew & Sharma, Gaurav & Soyata, Tolga. (2015). Energy Harvesting and Buffering for Cyber Physical Systems: A Review. Available at: 10.1201/b19206-10.

How much energy do solar panels produce for your home | YES Energy Solutions (2024). Available at: <https://www.yesenergysolutions.co.uk/advice/how-much-energy-solar-panels-produce-home> (Accessed: 9 November 2024).

How Much Energy Does A Solar Panel Produce? (2024) *EnergySage*. Available at: <https://www.energysage.com/solar/solar-panel-output/> (Accessed: 3 November 2024).

Hybrid Solar System (2025) *indiamart.com*. Available at: <https://www.indiamart.com/proddetail/hybrid-solar-system-2849495790097.html> (Accessed: 18 February 2025).

Ibrahim, H.H. *et al.* (2022) ‘Radio Frequency Energy Harvesting Technologies: A Comprehensive Review on Designing, Methodologies, and Potential Applications’, *Sensors (Basel, Switzerland)*, 22(11), p. 4144. Available at: <https://doi.org/10.3390/s22114144>.

Joachim Leicht, Peter Heilmann, Thorsten Hehn, Xiaoming Li, Dominic Maurath, Christian Moranz, Marcell Thewes, Gerd Scholl and Yiannos Manoli, “Thermoelectric energy harvesting system for demonstrating autonomous operation of a wireless sensor node enabled by a multipurpose interface”, *Journal of Physics: Conference Series, Volume 476, The 13th International Conference on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (PowerMEMS 2013) 3–6 December 2013, London, UK*

Jouhara, H. *et al.* (2018) ‘Waste heat recovery technologies and applications’, *Thermal Science and Engineering Progress*, 6, pp. 268–289. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.04.017>.

Katsaprakakis, D. (2016) ‘Σύνθεση ενεργειακών συστημάτων’, p. 400. Available at: <https://doi.org/10.57713/KALLIPOS-651>.

Kaźmierski, T.J. and Beeby, S. (2011) *Energy Harvesting Systems: Principles, Modeling and Applications*. New York, NY: Springer New York (SpringerLink Bücher). Available at: <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7566-9>.

Khaligh, A. and Onar, O.C. (2010) *Energy harvesting: solar, wind, and ocean energy conversion systems*. Boca Raton: CRC press (Energy, power electronics, and machines).

Khan, S.A. *et al.* (no date) ‘Energy Harvesting—Technical Analysis of Evolution, Control Strategies, and Future Aspects’.

Koutsos, C. (2023) ‘Multi-Source energy harvesting power supplies for IoT systems’. University of Ioannina. Available at: <https://doi.org/10.26268/HEAL.UOI.12844>.

Kumar, P., Teshome, A. and Dawit, W. (2020) ‘ENERGY HARVESTING USING PIEZO-ELECTRIC MATERIALS FOR WIRELESS SENSORS 1’, in.

Lambert, S. *et al.* (2012) ‘Worldwide electricity consumption of communication networks’, *Optics Express*, 20(26), pp. B513–B524. Available at: <https://doi.org/10.1364/OE.20.00B513>.

Leicht, J. *et al.* (2013) ‘Thermoelectric energy harvesting system for demonstrating autonomous operation of a wireless sensor node enabled by a multipurpose interface’, *Journal of Physics: Conference Series*, 476(1), p. 012022. Available at: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/476/1/012022>.

Light as an Electrical Energy Source - Technical Articles (2025). Available at: <https://eepower.com/technical-articles/light-as-an-electrical-energy-source/> (Accessed: 10 August 2025).

Liu, C. *et al.* (2010) ‘Advanced Materials for Energy Storage’, *Advanced Materials*, 22(8). Available at: <https://doi.org/10.1002/adma.200903328>.

Lu, K. (2014) *Materials in energy conversion, harvesting, and storage*. Hoboken, New Jersey: Wiley. Available at: <https://doi.org/10.1002/9781118892374>.

Mitcheson, P.D. *et al.* (2008) ‘Energy Harvesting From Human and Machine Motion for Wireless Electronic Devices’, *Proceedings of the IEEE*, 96(9), pp. 1457–1486. Available at: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2008.927494>.

Munthali, B. (2024) ‘In Japan, walking and driving now generate electricity’, *The Maravi Post*, 3 October. Available at: <https://www.maravipost.com/in-japan-walking-and-driving-now-generate-electricity/> (Accessed: 15 November 2024).

‘Ocean thermal energy conversion’ (2024) *Wikipedia*. Available at: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Ocean_thermal_energy_conversion&oldid=1250251593 (Accessed: 18 November 2024).

Optics, G. (2021) *Theory of Solar Cell*, G2V Optics Inc. Available at: <https://g2voptics.com/photovoltaics-solar-cells/theory-of-solar-cells/> (Accessed: 20 November 2024).

Otii Arc Pro | Qoitech User Manual (2024a). Available at: <https://docs.qoitech.com/user-manual/otii/hardware/otii-arc-pro> (Accessed: 3 November 2024).

Otii Arc Pro | Qoitech User Manual (2024b). Available at: <https://docs.qoitech.com/user-manual/otii/hardware/otii-arc-pro> (Accessed: 25 May 2025).

Paul, D. (2014) ‘Thermoelectric Energy Harvesting’, in G. Fagas (ed.) *ICT - Energy - Concepts Towards Zero - Power Information and Communication Technology*. InTech. Available at: <https://doi.org/10.5772/57092>.

(PDF) *A Survey of Energy Harvesting Technologies for Wireless Sensor Networks* (2025). Available at: https://www.researchgate.net/publication/337486805_A_Survey_of_Energy_Harvesting_Technologies_for_Wireless_Sensor_Networks (Accessed: 10 August 2025).

‘(PDF) Energy Harvesting and Buffering for Cyber Physical Systems: A Review’ (2025) in *ResearchGate*. Available at: <https://doi.org/10.1201/b19206-10>.

(PDF) *Thermoelectric energy harvesting system for demonstrating autonomous operation of a wireless sensor node enabled by a multipurpose interface* (2025). Available at: https://www.researchgate.net/publication/261006546_Thermoelectric_energy_harvesting_system_for_demonstrating_autonomous_operation_of_a_wireless_sensor_node_enabled_by_a_multipurpose_interface (Accessed: 10 August 2025).

‘Power management integrated circuit’ (2024) *Wikipedia*. Available at: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Power_management_integrated_circuit&oldid=1237006963 (Accessed: 2 December 2024).

Priya, S. and Inman, D.J. (eds) (2009) *Energy harvesting technologies*. New York: Springer.

Ramadass, Y.K. and Chandrakasan, A.P. (2010a) ‘An Efficient Piezoelectric Energy Harvesting Interface Circuit Using a Bias-Flip Rectifier and Shared Inductor’, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 45(1), pp. 189–204. Available at: <https://doi.org/10.1109/JSSC.2009.2034442>.

Ramadass, Y.K. and Chandrakasan, A.P. (2010b) ‘An Efficient Piezoelectric Energy Harvesting Interface Circuit Using a Bias-Flip Rectifier and Shared Inductor’, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 45(1), pp. 189–204. Available at: <https://doi.org/10.1109/JSSC.2009.2034442>.

Rubycon ZLH Series Aluminium Electrolytic Capacitors - Radial Leaded – Mouser Greece (2024). Available at: <https://gr.mouser.com/c/passive-components/capacitors/aluminum-electrolytic-capacitors/aluminum-electrolytic-capacitors-radial-leaded/?m=Rubycon&series=ZLH>

Rubycon ZLJ Series Aluminium Electrolytic Capacitors - Radial Leaded – Mouser Greece (2024). Available at: <https://gr.mouser.com/c/passive-components/capacitors/aluminum-electrolytic-capacitors/aluminum-electrolytic-capacitors-radial-leaded/?m=Rubycon&series=ZLJ>

S. R. Anton and Henry A Sodano “A Review of Power Harvesting Using Piezoelectric Materials (2003-2006)” *Smart Materials and Structures*, 2017 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/16/3/R01>

Shuvo, M.M.H. *et al.* (2022) ‘Energy Harvesting in Implantable and Wearable Medical Devices for Enduring Precision Healthcare’, *Energies*, 15(20), p. 7495. Available at: <https://doi.org/10.3390/en15207495>.

Singla, P. and Sarangi, S.R. (2022) 'A survey and experimental analysis of checkpointing techniques for energy harvesting devices', *Journal of Systems Architecture*, 126, p. 102464. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2022.102464>.

Sinha, S. (2024) 'State of IoT 2024: Number of connected IoT devices growing 13% to 18.8 billion globally', IoT Analytics. Available at: <https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices/>

Stocker, T. (ed.) (2014) *Climate change 2013: the physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press. Available at: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>.

Storr, W. (2013) 'PNP Transistor Tutorial - The Bipolar PNP Transistor', *Basic Electronics Tutorials*, 3 September. Available at: https://www.electronicstutorials.ws/transistor/tran_3.html (Accessed: 2 December 2024).

Sudevalayam, S. and Kulkarni, P. (2011) 'Energy Harvesting Sensor Nodes: Survey and Implications', *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 13(3), pp. 443–461. Available at: <https://doi.org/10.1109/SURV.2011.060710.00094>.

SXelectronics series R/R (2024). Available at: <http://www.sxelectronics.gr/el/p3.html> (Accessed: 28 November 2024).

Thapa, A.K. *et al.* (2022) 'Mn-Rich NMC Cathode for Lithium-Ion Batteries at High-Voltage Operation', *Energies*, 15(22), p. 8357. Available at: <https://doi.org/10.3390/en15228357>.

Veloo, Samrithaa G., Jun Jiat Tiang, Surajo Muhammad, and Sew Kin Wong. 2023. "A Hybrid Solar-RF Energy Harvesting System Based on an EM4325-Embedded RFID Tag" *Electronics* 12, no. 19: 4045. <https://doi.org/10.3390/electronics12194045>

Vullers, R.J.M. *et al.* (2009) 'Micropower energy harvesting', *Solid-State Electronics*, 53(7), pp. 684–693. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.sse.2008.12.011>.

Wiegand, S. (2015) 'Introduction to thermal gradient related effects, in Functional Soft Matter', in.

Zhang, K. *et al.* (2022) 'Structural Evolution and Enhanced Piezoelectric Activity in Novel Lead-Free BaTiO₃-Ca(Sn_{1/2}Zr_{1/2})O₃ Solid Solutions', *Energies*, 15(20), p. 7795. Available at: <https://doi.org/10.3390/en15207795>.

