



# **ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

## **ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

### **ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

#### **Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών**

#### **Επιστήμη και Τεχνολογία της Πληροφορικής και των Υπολογιστών**

#### **Ειδίκευση Δικτύων Επικοινωνιών και Κατανεμημένων Συστημάτων**

#### **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

#### **Αρχές Λειτουργίας και Εφαρμογές της Συγκομιδής Ενέργειας (Energy Harvesting)**

**Γεώργιος Κ. Μπούγας  
Α.Μ. 20011**

**Εισηγητής: Κωνσταντίνος Ι. Μαυρομμάτης, Καθηγητής**

**(Κενό φύλλο)**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Αρχές Λειτουργίας και Εφαρμογές της Συγκομιδής Ενέργειας  
(Energy Harvesting)**

**Γεώργιος Κ. Μπούγας  
Α.Μ. 20011**

**Εισηγητής:**

**Κωνσταντίνος Ι. Μαυρομάτης**

**Εξεταστική Επιτροπή:**

**Αντώνιος Μπόγρης**

**Νικόλαος Μυριδάκης**

**Ημερομηνία εξέτασης 25/1/2022**

**(Κενό φύλλο)**

## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Γεώργιος Μπούγας του Κωνσταντίνου, με αριθμό μητρώου 20011, φοιτητής του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών Επιστήμη και Τεχνολογία της Πληροφορικής και των Υπολογιστών του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής και Υπολογιστών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι ..... και έπειτα από αίτηση μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντα καθηγητή.

Ο Δηλών

Γεώργιος Μπούγας

**(Κενό φύλλο)**

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Κωνσταντίνο Μαυρομάτη ο οποίος υποστήριξε την προσπάθειά μου στην συγγραφή αυτής εδώ της διπλωματικής εργασίας, το καθηγητή μου κ. Αντώνη Μπόγρη που ήταν πάντα παρών καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου στο συγκεκριμένο μεταπτυχιακό πρόγραμμα καθώς και όλους τους καθηγητές του προγράμματος, τον καθένα ξεχωριστά, για ότι μου έχουν προσφέρει αλλά και για όλες τις προσπάθειες που έκαναν, παρά τις αντίξοες συνθήκες των εποχών, ώστε όλοι οι φοιτητές του προγράμματος μας να λάβουμε τα απαραίτητα εφόδια.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καλύτερη μου φίλη που χωρίς αυτήν δεν θα είχα κάνει καν αίτηση στο πρόγραμμα και ήταν συνέχεια δίπλα μου, πίστεψε σε εμένα και με έκανε να πιστέψω και εγώ στον εαυτό μου.

Στην καλύτερή μου φίλη.  
(You are the Alice to my Bob)  
–Γιώργος

**(Κενό φύλλο)**



## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Τις τελευταίες δεκαετίες η αυξανόμενη ανάγκη για ενέργεια έχει οδηγήσει τους ερευνητές στην αναζήτηση νέων φτηνών τρόπων παραγωγής. Σε συνδυασμό με την εξάπλωση της ευαισθητοποίησης για την παγκόσμια κλιματική αλλαγή, τα πράσινα ηλεκτρονικά γίνονται όλο και πιο δημοφιλής ως εναλλακτική λύση για τη μείωση της ρύπανσης και η ενεργειακή αποδοτικότητα είναι πλέον ένα πρωταρχικό χαρακτηριστικό για την επίτευξη ενός τέτοιου στόχου.

Με τις παρούσες υπολογιστικές απαιτήσεις στα πεδία ενσωματωμένων συστημάτων, ασύρματων δικτύων αισθητήρων και ηλεκτρονικών χαμηλής ισχύος, απαιτείται μια εναλλακτική λύση στην εξεύρεση πηγών ενέργειας καθώς οι μπαταρίες που διαχρονικά επιτελούν αυτό το έργο, θεωρούνται σαν πηγή πεπερασμένης χωρητικότητας που δεν καλύπτει την ανάγκη παροχής ενέργειας για ολόκληρη την διάρκεια ζωής ενός συστήματος.

Η συλλογή ενέργειας (Energy Harvesting) η οποία παράγεται από ανθρώπινες δραστηριότητες και παγκόσμια φυσικά φαινόμενα και η μετατροπή της σε διαφορετική, πιο χρήσιμη μορφή, ενέργεια είναι μια εναλλακτική λύση στα προβλήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω και μια επιστήμη στην οποία στρέφονται όλο και περισσότεροι.

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει σαν στόχο να παρουσιάσει τις βασικές γνώσεις στο σχεδιασμό και κατασκευή συστημάτων συλλογής ενέργειας, τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται και τελικά να παρέχει μια ολοκληρωμένη επισκόπηση των θεμελιωδών μεγεθών και των εξελίξεων στο συγκεκριμένο τομέα.

**ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ:** Συγκομιδή Ενέργειας

**ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:** Ενεργειακή κατανάλωση, Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, Συγκομιδή ενέργειας, Πιεζοηλεκτρισμός, Ηλεκτρομαγνητική μετατροπή ενέργειας, Ισχύς, Ηλεκτρεγερτική Δύναμη, Κινητική Ενέργεια

## **ABSTRACT**

The growing need for energy has led researchers to look for new cheap energy sources in recent decades. Combined with the growing awareness of global climate change, green electronics are becoming increasingly popular as an alternative to reducing pollution, and energy efficiency is now a key feature in achieving such a goal.

With the current computational requirements in the fields of embedded systems, wireless sensor networks, and low power electronics, an alternative to finding power sources is required as batteries that have been performing this task over time are considered to be a finite capacity source that does not meet the power supply requirement during the lifetime of a system.

Energy Harvesting produced by human activities and global physical phenomena and its conversion into a different more useful form of energy is an alternative to the problems mentioned above and a science to which more and more people turn.

This dissertation aims to present the basic knowledge in the design and construction of energy collection systems, the materials used, and finally to provide a comprehensive overview of the fundamental sizes and developments in this field.

**KEYWORDS:** Energy Consumption, Wireless Sensor Networks, Energy Harvesting Piezoelectricity, Electromagnetic energy conversion, Power, Electromotive force, Kinetic energy.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</b> .....	<b>1</b>
1. Εισαγωγή.....	1
1.1. Αντικείμενο της Εργασίας .....	2
1.2. Εισαγωγή στις Μεθόδους Συγκομιδής Ενέργειας.....	3
1.3. Δομή της Εργασίας .....	4
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</b> .....	<b>6</b>
2. Συστήματα Συγκομιδής Ενέργειας και Αρχιτεκτονικές .....	6
2.1. Πηγές Ενέργειας .....	7
2.2. Μηχανισμοί Μετατροπής Ενέργειας .....	10
2.3. Τεχνολογίες Αποθήκευσης .....	12
2.4. Μικρομπαταρίες.....	14
2.4.1. Πώς λειτουργούν οι μπαταρίες λεπτής μεμβράνης .....	16
2.4.2. Πλεονεκτήματα των μπαταριών λεπτής μεμβράνης.....	16
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3</b> .....	<b>18</b>
3. Συγκομιδή Κινητικής Ενέργειας.....	18
3.1. Πιεζοηλεκτρική Συγκομιδή Ενέργειας.....	19
3.1.1. Πιεζοηλεκτρικά Υλικά.....	23
3.2. Συγκομιδή Ηλεκτρομαγνητικής Ενέργειας.....	24
3.2.1. Γεννήτρια ΣΕ Ηλεκτρομαγνητικών Δονήσεων .....	25
3.3. Συγκομιδή Ηλεκτροστατικής Ενέργειας .....	27
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4</b> .....	<b>28</b>
4. Συγκομιδή Ενέργειας από Ραδιοσυχνότητες (RF) .....	28
4.1. Συσκευές Συγκομιδής Ενέργειας από Ραδιοσυχνότητες .....	30
4.2. Αποδοτικότητα της Ασύρματης Μετάδοσης Ισχύος.....	32

4.3.	Εφαρμογές συστημάτων RF-EHWC.....	32
4.3.1.	Υγειονομική περίθαλψη των Ζώων .....	33
4.3.2.	Φορητά Ηλεκτρονικά (Wearable Devices).....	34
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5</b>	<b>.....</b>	<b>35</b>
5.	Άλλες Τεχνολογίες Συγκομιδής Ενέργειας .....	35
5.1.	Θερμοηλεκτρική Συγκομιδή Ενέργειας.....	35
5.1.1.	Θερμοηλεκτρική Γεννήτρια (TEG).....	36
5.1.2.	Πυροηλεκτρική Γεννήτρια PEG .....	37
5.2.	Εφαρμογές της θερμοηλεκτρικής Συγκομιδής Ενέργειας .....	38
5.3.	Φωτοβολταϊκές Συσκευές .....	40
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6</b>	<b>.....</b>	<b>42</b>
6.	Επιλεγμένες Εφαρμογές Συστημάτων Συγκομιδής Ενέργειας.....	42
6.1.	Συγκομιδή Ενέργειας από το Ανθρώπινο Σώματο για Έξυπνο βιοηλεκτρονικό σύστημα.....	42
6.1.1.	Συγκομιδή θερμικής ενέργειας του ανθρώπινου σώματος .....	43
6.1.2.	Συγκομιδή χημικής ενέργειας του ανθρώπινου σώματος .....	45
6.1.3.	Μηχανική συλλογή ενέργειας του ανθρώπινου σώματος.....	47
6.1.4.	Στρατηγικές για την αλληλεπίδραση μεταξύ των συσκευών συλλογής ενέργειας και του ανθρώπινου σώματος.....	48
6.1.5.	Αυτοτροφοδοτούμενο βιοηλεκτρονικό σύστημα κλειστού βρόχου (SCBS) 49	
6.2.	Συγκομιδή ενέργειας από τους μίαντες ενός σακιδίου με χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών .....	51
6.3.	Συγκομιδή Ενέργειας μέσω Δικτύωσης Οριζόμενης από Λογισμικό (SD-EHN) για “Πράσινες” Επικοινωνίες 5G.....	55
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7</b>	<b>.....</b>	<b>61</b>
7.1.	Συμπεράσματα .....	61
7.2.	Μελλοντική Έρευνα.....	63
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	<b>.....</b>	<b>66</b>

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Τεχνολογίες Συγκομιδής Ενέργειας. (a) Φωτοβολταϊκή, (b) Πιεζοηλεκτρική, (c) Ηλεκτρομαγνητική, (d) Ηλεκτροστατική, (e) Πυροηλεκτρική, (f) Θερμοηλεκτρική, (g) Μαγνητική. (h) RF, (i) Αιολική, (j) Υδροηλεκτρική, (k) Ακουστική (Pozo et al., 2019).....	4
Εικόνα 2: Αρχιτεκτονικές Συγκομιδής Ενέργειας με και χωρίς αποθηκευτική ικανότητα...	6
Εικόνα 3: Ιεραρχία των κύριων τεχνολογιών συλλογής ενέργειας .....	8
Εικόνα 4: Μπαταρίες λεπτής μεμβράνης (TFB) .....	14
Εικόνα 5: Σχηματική διατομή TFB (Priya & Inman, 2009).....	15
Εικόνα 6: Μονοκρύσταλλος .....	20
Εικόνα 7: Πολυκρύσταλλος .....	20
Εικόνα 8: Αναδιάταξη πολυκρυστάλλου με πόλωση .....	21
Εικόνα 9: Πιεζοηλεκτρικό Πρόβολο (Chen, 2016) .....	21
Εικόνα 10: Πιεζοηλεκτρικές Γεννήτριες (a) Λειτουργία 33, (b) Λειτουργία 31 (Kazmierski & Beeby, 2011).....	23
Εικόνα 11: Κυκλωματική αναπαράσταση ενός πιεζοηλεκτρικού μετατροπέα.....	24
Εικόνα 12: Αναπαράσταση της ηλεκτρομαγνητικής γεννήτριας (Priya & Inman, 2009) ...	26
Εικόνα 13: Ηλεκτροστατική Μηχανή ΣΕ (Pozo et al., 2019) .....	27
Εικόνα 14: Βασικά στοιχεία μιας ασύρματης μετάδοσης ισχύος. ....	29
Εικόνα 15: Μηχανή ΣΕ Ραδιοσυχνοτήτων (RF) .....	30
Εικόνα 16: Ένα σύστημα RF-EHWC, όπου οι κόκκινες γραμμές υποδεικνύουν τη ροή ενέργειας του συλλέκτη ενέργειας που φορτίζει τα εξαρτήματα της μονάδας επικοινωνίας.(Luo et al., 2019) .....	31
Εικόνα 17: Παράγοντες απόδοσης για ένα σύστημα μεταφοράς.....	32
Εικόνα 18: Μια αρχιτεκτονική 3 επιπέδων ενός δικτύου RF-EHWC για την υγειονομική περίθαλψη των ζώων. (Luo et al., 2018).....	33
Εικόνα 19: Μηχανή Συγκομιδής Θερμοηλεκτρικής Ενέργειας.....	36
Εικόνα 20: Θερμοηλεκτρική Γεννήτρια (TEG).....	36
Εικόνα 21: Αρχή Λειτουργίας PEG .....	38
Εικόνα 22: Ένα ελαστικό και προσαρμοζόμενο στο σχήμα TEG ενσωματωμένο με αισθητήρα δύναμης.....	39

Εικόνα 23: Υβριδική πιεζο-πυροηλεκτρική γεννήτρια για τη συλλογή ενέργειας και τη παρακολούθηση των λειτουργιών του ανθρώπινου σώματος.....	40
Εικόνα 24: Πηγές και διανομή ενέργειας στο ανθρώπινο σώμα και εφαρμοστές τεχνολογίες συλλογής ενέργειας.....	43
Εικόνα 25: Ο αυτοτροφοδοτούμενος αισθητήρας ιδρώτα ενσωματωμένος σε κάλτσα...	47
Εικόνα 26: Συλλογή εμβιο-μηχανικής ενέργειας από την καρδιά ενός χοίρου από μια βιοσυμβατή πιεζοηλεκτρική μηχανή συγκομιδής ενέργειας.....	48
Εικόνα 27: Συσκευές Συλλογής Ενέργειας και το Ανθρώπινο Σώμα.....	49
Εικόνα 28: Αυτοτροφοδοτούμενο βιοηλεκτρονικό σύστημα κλειστού βρόχου (Zou et al., 2021) .....	51
Εικόνα 29: Σακίδιο πλάτης συλλογής ενέργειας που αναπτύχθηκε από τους Rome et al. (2005) .....	52
Εικόνα 30: Σακίδιο Πλάτης με Πιεζοηλεκτρικούς Ιμάντες.....	54
Εικόνα 31: Εκτιμώμενη ισχύς εξόδου σακιδίου πλάτης με Πιεζοηλεκτρικούς Ιμάντες (Sodano, 2009). .....	55
Εικόνα 32: Αρχιτεκτονική του SD-EHN.....	57
Εικόνα 33: Μπλοκ λειτουργιών στην αρχιτεκτονική SD-EHN (Huang et al., 2017).....	58
Εικόνα 34: Σενάριο συλλογής δεδομένων κινητής τηλεφωνίας και αμφίδρομης μεταφοράς ενέργειας στο SD-EHN .....	59

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Πηγές συγκομιδής ενέργειας.....	3
Πίνακας 2: Κατανομή και Χαρακτηρισμός Πηγών Ενέργειας (Sudevalayam & Kulkarni, 2011) .....	10
Πίνακας 3: Σύγκριση Τεχνολογιών επαναφορτιζόμενων Μπαταριών (Taneja et al., 2008) .....	12
Πίνακας 4: Τεχνολογίες Συγκομιδής Κινητικής Ενέργειας (Rozo et al., 2019) .....	18
Πίνακας 5: Θερμική αντίσταση του ανθρώπινου σώματος και πιθανή ροή θερμότητας .	44

## ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

Οι ορισμοί που ακολουθούν με τις μεταφράσεις και τα ακρωνύμια τους, είναι προσαρμοσμένοι προκειμένου να διευκολύνουν την ανάγνωση του συγκεκριμένου τόμου και προέρχονται από διάφορα λεξιλόγια και πηγές, στα οποία γίνεται αναφορά όπου αυτό κρίνεται απαραίτητο.

**EH** Energy Harvesting

**IoT** Internet of Things

**BMA** Block Matching Algorithm

**ΣΕ** Συγκομιδή Ενέργειας

**EMF** Electromotive Force - Ηλεκτροκινητική Δύναμη

**MEMS** micro-electro-mechanical structure

**TEG** Thermoelectrical Generator – Θερμοηλεκτρική Γεννήτρια

**PEG** Pyroelectric Generator – Πυροηλεκτρική Γεννήτρια

**RF-EHWC** RF energy harvesting wireless communication - συγκομιδής ενέργειας ασύρματης επικοινωνίας RF

**TFB** Thin Film Batteries – Μπαταριές λεπτού φιλμ

**BFC** biofuel cell – Κυψέλες Βιοκαυσίμου

**HEG** Hydrovoltaic Effect Generator - Γεννήτρια Υδροβολταϊκών Φαινομένων

**SCBS** Self-powered closed-loop bioelectronic system - Αυτοτροφοδοτούμενο βιοηλεκτρονικό σύστημα κλειστού βρόχου





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### 1. Εισαγωγή

Με τη πρόσφατη πρόοδο στην κατασκευή ασύρματων αυτόνομων, και σε πολλές περιπτώσεις αυτό-τροφοδοτούμενων συσκευών, η ανάγκη τροφοδοσίας τους με ενέργεια αποδείχτηκε μείζον ζήτημα. Οι ηλεκτρονικές συσκευές χωρίς καλώδια ή τα συστήματα με ασύρματες δυνατότητες είναι ολοένα και πιο δημοφιλή επειδή δεν απαιτούν σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο. Κατά συνέπεια, πολλές συσκευές σε βιομηχανικό και οικιακό περιβάλλον τροφοδοτούνται αποκλειστικά από μπαταρίες και τα καλώδια σύνδεσης προορίζονται κυρίως για σκοπούς επαναφόρτισης μπαταριών. Οι κατασκευαστές μπαταριών έχουν βελτιώσει σημαντικά τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας ωστόσο αυτές απαιτούν περιοδική συντήρηση και χιλιάδες ώρες εργασίας θα πρέπει να προστεθούν στα έξοδα των μπαταριών. Επιπλέον, οι «εξαντλημένες» μπαταρίες παράγουν απόβλητα που πρέπει να ανακυκλωθούν. Ως εκ τούτου, η αυξανόμενη ζήτηση για ηλεκτρονικά χωρίς καλώδια, που είναι «πράσινα» και ενεργειακά αποδοτικά αντιμετωπίζει πολλές τεχνικές και οικολογικές προκλήσεις, όπως η απόδοση ισχύος, οι χρόνοι φόρτισης της μπαταρίας, η αυτονομία του συστήματος και η διάρκεια ζωής των ίδιων των μπαταριών, η οποία είναι συνάρτηση των πρότυπων φορτίου και τους κύκλους φόρτισης και εκφόρτισης. Σε αυτό το πλαίσιο, οι μηχανές συγκομιδής ενέργειας έχουν γίνει μια αποτελεσματική και πράσινη εναλλακτική λύση για τη συλλογή ενέργειας από το περιβάλλον και προσφέρουν μια απάντηση σε ορισμένες από τις προαναφερθείσες προκλήσεις.

Με την χρήση αυτής της τεχνολογίας, η ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται θα μπορεί να ληφθεί εκμεταλλευόμενοι άλλα είδη ενέργειας διαθέσιμα στο περιβάλλον. Αυτή η διαδικασία θα είναι σε θέση να παρέχει απεριόριστη ενέργεια για τη διάρκεια ζωής της ηλεκτρονικής συσκευής.

Οι συσκευές συγκομιδής ενέργειας, είναι ουσιαστικά μετατροπείς που επινοήθηκαν για να εξαγάγουν, όχι μόνο ένα δείγμα ενέργειας από φυσικά φαινόμενα, αλλά τη μέγιστη δυνατή ποσότητα ενέργειας (Poza et al., 2019). Τα συστήματα συλλογής ενέργειας μπορούν να συλλέξουν ενέργεια από πηγές διαθέσιμες σε βιομηχανικά ή άλλα περιβάλλοντα, όπως μηχανικούς κραδασμούς, αυξομειώσεις θερμοκρασίας, φυσικό ή

τεχνητό φως, υψηλά επίπεδα θορύβου, αιολική ενέργεια καθώς και ενέργεια που παράγεται από τα κύματα (Srvanathi Chalasani & Conrad, 2008). Στη συνέχεια, αυτή η ενέργεια διαχειρίζεται και αποθηκεύεται για να χρησιμοποιηθεί για την τροφοδοσία μιας ηλεκτρονικής συσκευής. Πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι ο κύριος στόχος της συλλογής ενέργειας δεν είναι η παραγωγή ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα, αλλά η εξοικονόμηση ενέργειας που συλλέγεται σε μια συσκευή αποθήκευσης και η χρήση της αργότερα στην καθημερινή λειτουργία ενός ηλεκτρονικού συστήματος.

Συνοπτικά, οι κύριοι στόχοι της τεχνολογίας συλλογής ενέργειας περιλαμβάνουν:

- Εξάλειψη των καλωδίων παροχής ρεύματος
- Εξάλειψη ή μείωση της εξάρτησης από τις μπαταρίες
- Αύξηση της διάρκειας ζωής
- Διατήρηση ή/και αύξηση της λειτουργικότητας
- Ευκολία εγκατάστασης
- Μείωση κόστους
- Μείωση των αποβλήτων

Το φάσμα εφαρμογών στο οποίο στοχεύει η συγκεκριμένη τεχνολογία είναι τεράστιο και συμπεριλαμβάνονται συστήματα κατανεμημένων ασύρματων κόμβων αισθητήρων για την παρακολούθηση της υγείας, συστήματα ενσωματωμένων κόμβων αισθητήρων για ιατρικές εφαρμογές, επαναφόρτισης μπαταριών μεγάλων συστημάτων, μηχανισμούς για την παρακολούθηση της πίεσης των ελαστικών στα αυτοκίνητα, την τροφοδοσία σε μη επανδρωμένα οχήματα και λειτουργία συστημάτων ασφαλείας σε οικιακό επίπεδο (Priya & Inman, 2009).

### **1.1. Αντικείμενο της Εργασίας**

Η συγκεκριμένη εργασία είναι μια προσπάθεια προσέγγισης μιας τεχνολογίας στην οποία στρέφεται όλο και περισσότερο η επιστημονική κοινότητα καθώς ασχολείται με ένα ιδιαίτερος κρίσιμο τομέα όπως είναι η ενέργεια. Μετά την εισαγωγή στις τεχνολογίες ΣΕ και τις αρχιτεκτονικές που ακολουθούν τα συστήματα ΣΕ θα γίνει ανάλυση σε συγκεκριμένες επιλεγμένες λύσεις ΣΕ, με τις εφαρμογές τους, καθώς οι τεχνολογίες είναι πάρα πολλές και θα απαιτούσε μεγάλο εύρος το οποίο δεν γίνεται να καλυφθεί από το μέγεθος μιας διπλωματικής.

Για αυτό τον λόγο αποφασίστηκε να ασχοληθούμε περισσότερο με τον «μικρόκοσμο» και να παρουσιάσουμε συστήματα και εφαρμογές που έχουν χρησιμότητα στην καθημερινότητα του κάθε ανθρώπου και όχι σε μεγάλες εφαρμογές που ασχολούνται με την συγκομιδή ενέργειας όπως αιολικά και ηλιακά πάρκα.

## 1.2. Εισαγωγή στις Μεθόδους Συγκομιδής Ενέργειας

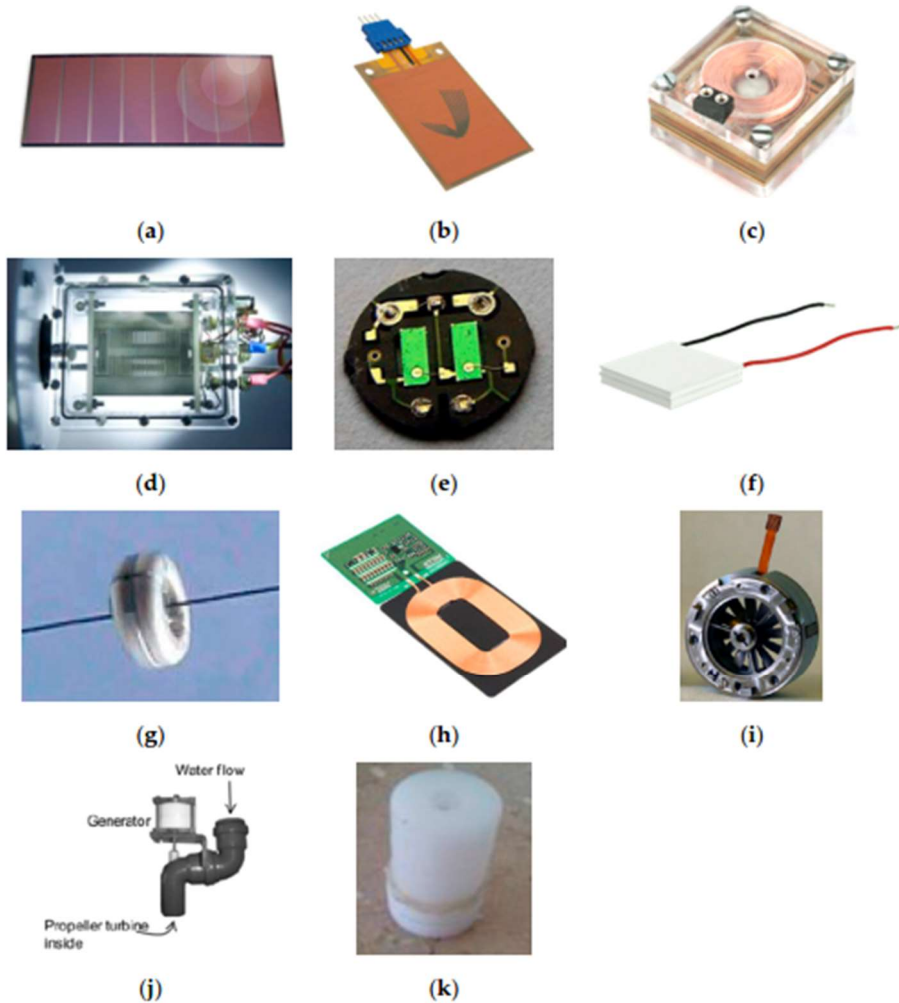
Οι μέθοδοι ΣΕ μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση τη μορφή ενέργειας που χρησιμοποιούν για την συγκομιδή. Για παράδειγμα, οι πιεζοηλεκτρικές συσκευές συλλογής συλλέγουν τη μηχανική ενέργεια και τη μετατρέπουν σε χρησιμοποιήσιμη ηλεκτρική ενέργεια. Ενδεικτικά, πηγές που χρησιμοποιούνται για τη συλλογή ενέργειας είναι οι ανεμογεννήτριες, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες και οι μηχανικές συσκευές δόνησης όπως οι πιεζοηλεκτρικές συσκευές, οι ηλεκτρομαγνητικές συσκευές (Park et al., 2008).

Στον Πίνακα 1 που ακολουθεί αναφέρονται μερικές από τις μεθόδους συγκομιδής με τη δυνατότητα τους σε ικανότητα παραγωγής ενώ η Εικόνα 1 συνοψίζει την εξέλιξη της τεχνολογίας ΣΕ ταξινομώντας τις ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους.

Μέθοδος συγκομιδής	Ισχύς
Ηλιακή Ενέργεια	15mW/cm <sup>3</sup>
Πιεζοηλεκτρικά Φαινόμενα	330μW/cm <sup>3</sup>
Δονήσεις	116μW/cm <sup>3</sup>
Θερμοηλεκτρική	40μW/cm <sup>3</sup>

Πίνακας 1: Πηγές συγκομιδής ενέργειας<sup>1</sup>

<sup>1</sup> <https://www.ukessays.com/essays/sciences/survey-energy-harvesting-methods-5462.php>



Εικόνα 1: Τεχνολογίες Συγκομιδής Ενέργειας. (a) Φωτοβολταϊκή, (b) Πιεζοηλεκτρική, (c) Ηλεκτρομαγνητική, (d) Ηλεκτροστατική, (e) Πυροηλεκτρική, (f) Θερμοηλεκτρική, (g) Μαγνητική. (h) RF, (i) Αιολική, (j) Υδροηλεκτρική, (k) Ακουστική (Poza et al., 2019)

### 1.3. Δομή της Εργασίας

Το πρώτο κεφάλαιο θα προσπαθήσει να εισάγει τον αναγνώστη στην γενική έννοια της Συγκομιδής Ενέργειας καθώς και το αντικείμενο της εργασίας που δεν είναι τίποτα άλλο από το να την περιγράψει όσο μπορεί αναλυτικότερα στους τομείς που επιλέχθηκαν σε αυτή την εργασία. Γίνεται επίσης μια πολύ γρήγορη αναφορά στις μεθόδους και στην ενέργεια που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε κάθε φορά ανάλογα με τις ανάγκες μας.

Αναλυτικότερα, πέρα από αυτό το εισαγωγικό κεφάλαιο ο τόμος της εργασίας είναι οργανωμένος σε ακόμα 6 βασικά κεφάλαια.

Στο Κεφάλαιο 2 που πλέον αναλύουμε περαιτέρω την ΣΕ με βάση τις αρχιτεκτονικές αρχικά και κατόπιν τις πηγές που εκμεταλλεύεται η κάθε τεχνολογία. Για κάθε πηγή

γίνεται μια πρώτη αναφορά σε συστήματα ΣΕ και παρουσιάζονται αναλυτικά και τα μέσα αποθήκευσης, οι μπαταρίες, με ειδικότερη έμφαση στην τεχνολογία των μικρομπαταριών.

Το 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο εστιάζει στην Συγκομιδή Κινητικής Ενέργειας αναλύοντας όσο γίνεται καλύτερα αλλά και απλούστερα τους τρεις συνηθέστερους μηχανισμούς μεταγωγής της ενέργειας, την πιεζοηλεκτρική, την ηλεκτρομαγνητική και την ηλεκτροστατική.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η Συγκομιδή Ενέργειας από Ραδιοσυχνότητες (RF), και συγκεκριμένα η αρχές λειτουργίας της, οι παράγοντες απόδοσης της, οι συσκευές με τις οποίες επιτυγχάνεται ενώ επιπρόσθετα υπάρχουν παραδείγματα εφαρμογών συγκομιδής ενέργειας ασύρματης επικοινωνίας RF.

Το Κεφάλαιο 5 εμβαθύνει στις τεχνολογίες Θερμοηλεκτρικής ΣΕ παρουσιάζοντας αναλυτικά τις δύο γεννήτριες με τις οποίες επιτυγχάνεται αυτό, την Θερμοηλεκτρική και την πυροηλεκτρική, και προς το τέλος του κεφαλαίου γίνεται μια παρουσίαση δύο εφαρμογών με βάση την συγκεκριμένη τεχνολογία. Το κεφάλαιο θα κλείσει με μια εισαγωγή στο μηχανισμό συγκομιδής ενέργειας από τον ήλιο καθώς και τα πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας.

Το Κεφάλαιο 6 είναι ίσως το σημαντικότερο της μεταπτυχιακής αυτής εργασίας καθώς μας παρουσιάζει τρεις πολύ χαρακτηριστικές εφαρμογές προκειμένου να εμπεδώσουμε και την χρησιμότητα αλλά και την σημαντικότητα που εμπεριέχεται στην τεχνολογία ΣΕ. Η ενέργεια που μπορεί να ληφθεί από τον άνθρωπο, συγκεκριμένα μέσω φυσιολογικών δραστηριοτήτων, η ενέργεια που μπορεί να ληφθεί από ένα απλό καθημερινό μηχανισμό όπως τα λουράκια ενός σακιδίου πλάτης και η ενέργεια που μπορεί μέσω δικτύωσης ελεγχόμενης από λογισμικό να τροφοδοτήσει κόμβους και συσκευές που βρίσκονται γύρω μας και ίσως μέσα μας, καταδεικνύει με τον πιο εμφατικό τρόπο τον λόγο που η τεχνολογία ΣΕ απασχολεί τόσο έντονα την επιστημονική κοινότητα.

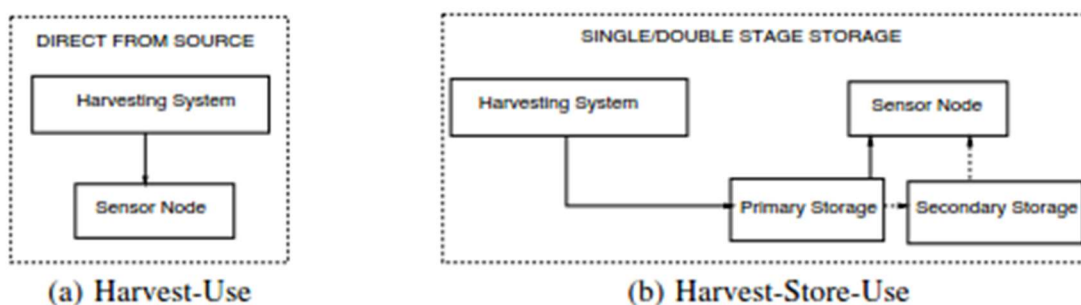
Η εργασία θα κλείσει ουσιαστικά με το 7<sup>ο</sup> κεφάλαιο, όπου γίνεται προσπάθεια εξαγωγής συμπερασμάτων και πως θα μας επηρεάσει η συγκεκριμένη τεχνολογία στο μέλλον, και τυπικά με το 8<sup>ο</sup> κεφάλαιο όπου βρίσκονται οι βιβλιογραφικές αναφορές.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### 2. Συστήματα Συγκομιδής Ενέργειας και Αρχιτεκτονικές

Όπως είναι αντιληπτό για να γίνει συγκομιδή ενέργειας χρειάζεται ένα σύστημα ΣΕ, καθώς η ενέργεια στην έξοδο του μετατροπέα δεν είναι πάντα κατάλληλη ώστε να εφαρμοστεί απευθείας στο φορτίο. Στόχος του συστήματος αυτού είναι να εκμεταλλεύεται την ενέργεια από τις διάφορες πηγές γύρω του και να την μετατρέπει σε ηλεκτρική μέσω του μετατροπέα. Στη συνέχεια η ενέργεια αυτή θα πρέπει να μετατραπεί σε αξιοποιήσιμη ενέργεια από την μονάδα διαχείρισης ενέργειας (power management) και έπειτα είναι κατάλληλη για να καταναλωθεί από το εκάστοτε φορτίο.

Τα συστήματα ΣΕ μπορούν να χωριστούν σε δύο κύριες αρχιτεκτονικές: (i) Συγκομιδή-Χρήση: Η ενέργεια συλλέγεται έγκαιρα για χρήση και (ii) Συγκομιδή-Αποθήκευση-Χρήση: Η ενέργεια συλλέγεται όποτε είναι δυνατόν και αποθηκεύεται για μελλοντική χρήση (Sudevalayam & Kulkarni, 2011).



Εικόνα 2: Αρχιτεκτονικές Συγκομιδής Ενέργειας με και χωρίς αποθηκευτική ικανότητα

Στην εικόνα 2.a παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική Συγκομιδή-Χρήση κατά την οποία συλλέγεται ενέργεια από το σύστημα συγκομιδής και είναι άμεσα διαθέσιμη προς χρήση από το φορτίο. Στην περίπτωση αυτή για να λειτουργεί συνεχώς το εκάστοτε φορτίο θα πρέπει η ισχύς εξόδου από το σύστημα συγκομιδής να είναι πάντα μεγαλύτερη από το ελάχιστο σημείο λειτουργίας του φορτίου. Τέτοια συστήματα έχουν κατασκευαστεί με τη χρήση μηχανικών πηγών ενέργειας, δηλαδή πατώντας ένα κουμπί, να παραμορφώνεται ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό και να παράγεται ενέργεια έτσι ώστε να σταλεί ένα σύντομο ασύρματο μήνυμα. Ομοίως, πιεζοηλεκτρικά υλικά τοποθετημένα στρατηγικά μέσα σε ένα παπούτσι μπορεί να παραμορφωθούν σε διαφορετικούς βαθμούς κατά το περπάτημα και

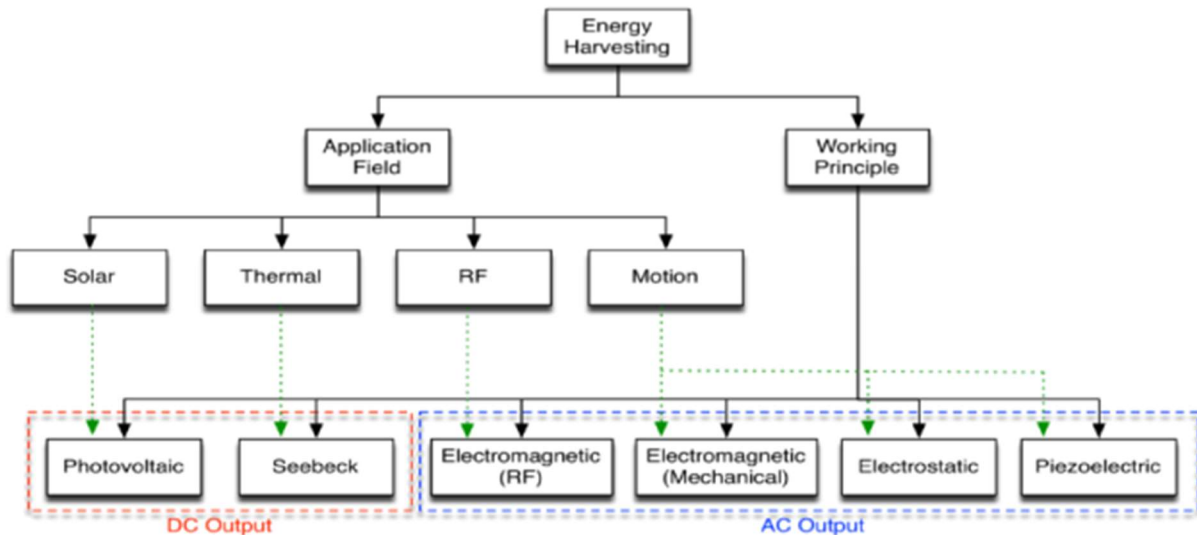
το τρέξιμο και η συλλεγόμενη ενέργεια θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μετάδοση σημάτων RFID, που χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση του χρήστη που φοράει τα παπούτσια.

Στην Εικόνα 2.b παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική Συγκομιδή-Αποθήκευση-Χρήση κατά την οποία η συλλεγόμενη ενέργεια από το σύστημα αποθηκεύεται για να είναι διαθέσιμη για μελλοντική χρήση. Η αρχιτεκτονική αποτελείται από ένα στοιχείο αποθήκευσης που αποθηκεύει τη συλλεγόμενη ενέργεια και επίσης τροφοδοτεί τον κόμβο αισθητήρα. Η αποθήκευση ενέργειας είναι χρήσιμη όταν η συλλεγόμενη διαθέσιμη ενέργεια είναι μεγαλύτερη από την τρέχουσα χρήση της. Εναλλακτικά, η ενέργεια μπορεί επίσης να αποθηκευτεί έως ότου συγκεντρωθεί αρκετή ποσότητα για τη λειτουργία του συστήματος. Η ενέργεια αποθηκεύεται για να χρησιμοποιηθεί αργότερα όταν είτε δεν υπάρχει ευκαιρία συγκομιδής είτε όταν η χρήση ενέργειας του εκάστοτε φορτίου, για παράδειγμα κόμβου αισθητήρα, πρέπει να αυξηθεί για να βελτιωθούν οι παράμετροι ικανότητας και απόδοσης. Ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να είναι ένα σύστημα συγκομιδής ηλιακής ενέργειας όπου την ημέρα, όπου υπάρχει άφθονη ηλιακή ενέργεια, αποθηκεύει ενέργεια για να χρησιμοποιήσει κατά τη διάρκεια της νύχτας όπου δεν μπορεί να συλλεχθεί ενέργεια.

## **2.1. Πηγές Ενέργειας**

Αν και οι διαθέσιμες πηγές ενέργειας στο περιβάλλον που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για τη ΣΕ είναι πάρα πολλές, ουσιαστικά είναι τεσσάρων μορφών: φως, ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ραδιοσυχνοτήτων (RF), θερμικές διαβαθμίσεις και κίνηση, συμπεριλαμβανομένης της ροής υγρών (Mitcheson et al., 2008). Στην Εικόνα 3 (Bera, n.d.) όπου φαίνεται η ταξινόμηση των σημαντικότερων τεχνολογιών ΣΕ εμφανίζονται και τα φαινόμενα ακριβώς που εκμεταλλεύεται η κάθε μια από αυτές όπως επίσης και το είδος της ενέργειας που μπορεί να εξαχθεί (AC-DC).





Εικόνα 3: Ιεραρχία των κύριων τεχνολογιών συλλογής ενέργειας

Η εφαρμογή του συστήματος συλλογής ενέργειας καθορίζει ποιες διαθέσιμες πηγές ενέργειας στο περιβάλλον θα χρησιμοποιηθούν για την τροφοδοσία του. Για παράδειγμα οι κύριες περιβαλλοντικές πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται για την παροχή ενέργειας στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSN) είναι ηλιακή, κινητική, και θερμική ενέργεια. Αναλυτικότερα οι κύριες πηγές ενέργειας είναι:

- Κινητική Ενέργεια

Η ποικιλία των πηγών αυτών είναι τεράστια, καθώς βασίζεται σε οτιδήποτε δονείται όπως οι κινήσεις του ανθρώπου, οι χτύποι της καρδιάς, μία γέφυρα που τη διασχίζουν αυτοκίνητα, οι δονήσεις στην επιφάνεια μίας μηχανής, τα ηχητικά κύματα, η ροή των ποταμών κ.α..

Η αρχή πίσω από τη συλλογή κινητικής ενέργειας είναι η μετατόπιση ενός κινούμενου τμήματος ή η μηχανική παραμόρφωση μιας δομής μέσα στη συσκευή συλλογής ενέργειας. Αυτή η μετατόπιση ή παραμόρφωση μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια με τρεις διαφορετικούς μεθόδους: επαγωγική, ηλεκτροστατική και πιεζοηλεκτρική μετατροπή (Spies, 2015).

- Ηλιακή Ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια είναι από τις πιο συνηθισμένες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η ενέργεια που προέρχεται από το φως του ήλιου είναι άφθονη σε εξωτερικούς χώρους κατά την διάρκεια της ημέρας και μόνο γεγονός που μας δεσμεύει ως προς τον χρόνο που μπορούμε να παράξουμε ενέργεια καθώς

αυτή η πηγή ενέργειας δεν μπορεί να αξιοποιηθεί κατά την διάρκεια της νύχτας.

Οι συλλέκτες ενέργειας σε αυτή την περίπτωση είναι τα φωτοβολταϊκά στοιχεία και η ποσότητα ενέργειας που συγκεντρώνονται είναι ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες και τις περιόδους φωτός/σκότους καθώς και το μέγεθος της επιφάνειας του ηλιακού πάνελ.

- **Μεταβολές θερμοκρασίας - Θερμική Ενέργεια**

Οι μεταβολές της θερμοκρασίας στο χώρο αποτελούν άλλη μια πηγή ενέργειας κατά την οποία μπορεί να αντληθεί ηλεκτρική ενέργεια από το περιβάλλον. Τέτοιες μεταβολές μπορούν να βρεθούν όταν κάποιο αντικείμενο διατηρεί τη θερμοκρασία του διαφορετική από το περιβάλλον του. Τέτοιες περιπτώσεις είναι το ανθρώπινο σώμα, κάποια μηχανή, το έδαφος σε σχέση με την ατμόσφαιρα κλπ.

Για τη μετατροπή της σε ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιούνται θερμοηλεκτρικές γεννήτριες (TEGs, ThermoElectric Generators), οι οποίες χρησιμοποιούν το φαινόμενο Seebeck. Τα TEGs παράγουν ηλεκτρική ενέργεια συνεχούς τάσης (DC) αλλά χαμηλής τάσης εξόδου.

- **Ηλεκτρομαγνητική Ακτινοβολία Ραδιοσυχνοτήτων (RF)**

Η ενέργεια από τις ραδιοσυχνότητες είναι ένας διαρκής πόρος που υπάρχει ευρέως τόσο σε εσωτερικούς χώρους (π.χ. σήμα Wi-Fi από ασύρματο δρομολογητή) και σε εξωτερικούς χώρους (π.χ. σήμα κινητής τηλεφωνίας και DTV). Η τεχνική ασύρματης επικοινωνίας συγκομιδής ενέργειας RF (RF-EHWC) εισάγει αρκετά ελκυστικά χαρακτηριστικά στην επικοινωνία και στα δίκτυα αισθητήρων. Για παράδειγμα, παρέχει στις ασύρματες συσκευές χαμηλής κατανάλωσης την αυτό-τροφοδότηση, η οποία επιτρέπει αυτές οι συσκευές να λειτουργούν για πάρα πολύ μεγάλα χρονικά διαστήματα.

Αυτές οι συσκευές ΣΕ έχουν συνήθως ελαφριές δομές σε σύγκριση με τις συμβατικές εγκαταστάσεις που συλλέγουν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για παράδειγμα ενέργεια από τον άνεμο, την παλίρροια και τη βιομάζα. Ως εκ τούτου, μπορεί να είναι μικρού μεγέθους, γεγονός που τους επιτρέπει να λειτουργούν σε εφαρμογές όπου ο χώρος και το κόστος είναι κρίσιμα (Luo et al., 2019).

## 2.2. Μηχανισμοί Μετατροπής Ενέργειας

Η επιλογή του μηχανισμού μετατροπής ενέργειας είναι στενά συνδεδεμένη με την επιλογή της πηγής ενέργειας. Στην περίπτωση της ηλιακής ενέργειας, ο μηχανισμός μετατροπής είναι η χρήση ηλιακών συλλεκτών. Ένα ηλιακό πάνελ λειτουργεί σαν πηγή ρεύματος και η ποσότητα του ρεύματος που παράγεται είναι ευθέως ανάλογη με το μέγεθος/εμβαδόν και την ένταση του προσπίπτοντος φωτός. Ως εκ τούτου, ανάλογα με τις απαιτήσεις, χρησιμοποιούνται μεγαλύτερα πάνελ με μεγαλύτερη επιφάνεια ή περισσότερο αριθμό ηλιακών συλλεκτών. Σε περίπτωση μηχανικών πηγών ενέργειας όπως περπάτημα, κωπηλασία, πάτημα κουμπιών/πλήκτρων, η μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια γίνεται με χρήση πιεζοηλεκτρικών στοιχείων. Οι πιεζοηλεκτρικές μεμβράνες και τα κεραμικά παραμορφώνονται κατά την εφαρμογή δύναμης και παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος της μεμβράνης, τόσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα της ενέργειας που συλλέγεται. Η αιολική ενέργεια συλλέγεται χρησιμοποιώντας ρότορες και τουρμπίνες που μετατρέπουν την κυκλική κίνηση σε ηλεκτρική ενέργεια με την αρχή της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Στα επόμενα κεφάλαια αναλύονται περισσότερο οι συγκριμένοι μηχανισμοί.

Πηγή Ενέργειας	Χαρακτηριστικά	Ποσότητα Διαθέσιμης Ενέργειας	Τεχνολογία ΣΕ	Αποδοτικότητα Μετατροπής	Ποσότητα Ενέργειας που συλλέχθηκε
Ηλιακή	Περιβάλλον, Ανεξέλεγκτο, Προβλέψιμο	100mW/cm <sup>2</sup>	Ηλιακές κυψέλες	15%	15mW/cm <sup>2</sup>
Αιολική	Περιβάλλον, Ανεξέλεγκτο, Προβλέψιμο	-	Ανεμογεννήτριες	-	1200mWh/day
Κίνηση Δακτύλου	Ενεργή ανθρώπινη δύναμη, πλήρως ελεγχόμενο	19mW	Πιεζοηλεκτρικό	11%	2.1mW
Πεζοπορία	Ενεργή ανθρώπινη δύναμη, πλήρως ελεγχόμενο	67W	Πιεζοηλεκτρικό	7.5%	5W
Δονήσεις σε εσωτερικά περιβάλλοντα	Περιβάλλον, Ανεξέλεγκτο, Απρόβλεπτο	-	Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή	-	0.2mW/cm <sup>2</sup>
Εκπνοή	Παθητική ανθρώπινη δύναμη, Ανεξέλεγκτο, Απρόβλεπτο	1W	Μάσκες αναπνοής	40%	0.4W
Αναπνοή	Παθητική ανθρώπινη δύναμη, Ανεξέλεγκτο, Απρόβλεπτο	0.83W	Ratchet-flywheel	50%	0.42W
Πίεση Αίματος	Παθητική ανθρώπινη δύναμη, Ανεξέλεγκτο, Απρόβλεπτο	0.93W	Μικρο-γεννήτρια	40%	0.37W

Πίνακας 2: Κατανομή και Χαρακτηρισμός Πηγών Ενέργειας (Sudevalayam & Kulkarni, 2011)

Ο Πίνακας 2 καταγράφει χαρακτηριστικά διαφορετικών πηγών ενέργειας ως πλήρως ελεγχόμενες, μερικώς ελεγχόμενες, μη ελεγχόμενες αλλά προβλέψιμες και μη ελεγχόμενες και απρόβλεπτες. Απαριθμεί επίσης, για κάθε πηγή ενέργειας, την ποσότητα της διαθέσιμης ενέργειας, την τεχνολογία μετατροπής/συγκομιδής, την απόδοση μετατροπής και την ποσότητα ενέργειας που μπορεί να συλλεχθεί έτσι. Η ηλιακή ενέργεια είναι η πιο εύκολα προσβάσιμη/διαθέσιμη πηγή ενέργειας και μπορεί να παρέχει 15 mW/cm<sup>2</sup>. Είναι ανεξέλεγκτη αλλά ημερησίως και εποχικά προβλέψιμη, η ανατολή και η δύση του ηλίου μπορούν να εκτιμηθούν με αρκετή ακρίβεια. Η ηλιακή ενέργεια είναι ελεύθερα διαθέσιμη και τα ηλιακά πάνελ είναι αρκετά μικρά ώστε να ταιριάζουν με τον παράγοντα μορφής των φορτίων που θα καταναλώνουν την ενέργεια. Αυτό καθιστά την ηλιακή ενέργεια την πιο ελπιδοφόρα μεταξύ των συλλεγόμενων πηγών ενέργειας. Η αιολική ενέργεια είναι ένα άλλο παράδειγμα μιας μη ελεγχόμενης αλλά προβλέψιμης πηγής ενέργειας. Αν και η αιολική ενέργεια είναι επίσης ελεύθερα διαθέσιμη και υπόσχεται πολλά ως εναλλακτική ενέργεια πηγή (1200 mW h/ημέρα), οι ανεμογεννήτριες και οι ανεμογεννήτριες είναι πιο ογκώδεις από το επιθυμητό. Το πάτημα ενός κουμπιού για να προκαλέσει δόνηση πιεζοηλεκτρικού υλικού, και έτσι να παράγει ενέργεια είναι ένα παράδειγμα ελεγχόμενης πηγής. Εδώ, το κουμπί μπορεί να πατηθεί κατά βούληση, για να παραχθεί ενέργεια. Τέτοιες ενεργές πηγές ανθρώπινης ενέργειας, όπως η κίνηση των δακτύλων και τα πόδια, είναι χρήσιμες για την τροφοδοσία μικρών ηλεκτρονικών συσκευών, αλλά η χρήση τους θα περιορίζεται σε οικιακές/τοπικές χρήσεις και ενδέχεται να μην ισχύει για απομακρυσμένες αναπτύξεις ασύρματου δικτύου αισθητήρων. Ομοίως, οι παθητικές πηγές ανθρώπινης ενέργειας όπως η θερμότητα του σώματος, η εκπνοή, η αναπνοή και η αρτηριακή πίεση δίνουν σημαντικά ποσά ισχύος της τάξης των μερικών εκατοντάδων mW, αλλά μπορεί να είναι ενοχλητικές και επιβαρυντικές για το ανθρώπινο σώμα.

Καμία πηγή ενέργειας δεν είναι ιδανική για όλες τις εφαρμογές. Η επιλογή εξαρτάται από τις απαιτήσεις και τους περιορισμούς κάθε εφαρμογής.

## 2.3. Τεχνολογίες Αποθήκευσης

Η τεχνολογία αποθήκευσης παίζει σημαντικό ρόλο στα συστήματα συλλογής ενέργειας και, κατά συνέπεια, η επιλογή του στοιχείου αποθήκευσης και της τεχνολογίας επαναφόρτισης είναι πρωταρχικής σημασίας. Επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, μια κοινή επιλογή αποθήκευσης ενέργειας, που αποτελούνται από οποιαδήποτε από τις διάφορες τεχνολογίες (χημικές συνθέσεις). Μια επαναφορτιζόμενη μπαταρία είναι μια κυψέλη αποθήκευσης που μπορεί να φορτιστεί αντιστρέφοντας την εσωτερική χημική αντίδραση. Μερικές δημοφιλείς επαναφορτιζόμενες τεχνολογίες είναι το Sealed Lead Acid (SLA), το Nickel Cadmium (NiCd), το Nickel Metal Hydride (NiMH) και το Lithium Ion (Li-ion). Αυτές οι τεχνολογίες μπαταριών μπορούν να χαρακτηριστούν σε διάφορους άξονες - πυκνότητα ενέργειας, πυκνότητα ισχύος, απόδοση φόρτισης-εκφόρτισης<sup>2</sup>, ρυθμός αυτοεκφόρτισης και αριθμός κύκλων βαθιάς επαναφόρτισης<sup>3</sup>.

Battery Type	Nominal Voltage (V)	Capacity (mAh)	Weight Energy Density (Wh/kg)	Power Density (W/kg)	Efficiency (%)	Self Discharge (%/month)	Memory Effect?	Charging Method	Recharge Cycles
SLA	6	1300	26	180	70-92	20	No	Trickle	500-800
NiCd	1.2	1100	42	150	70-90	10	Yes	Trickle	1500
NiMH	1.2	2500	100	250-1000	66	20	No	Trickle	1000
Li-ion	3.7	740	165	1800	99.9	<10	No	Pulse	1200
Li-polymer	3.7	930	156	3000	99.8	<10	No	Pulse	500-1000

Πίνακας 3: Σύγκριση Τεχνολογιών επαναφορτιζόμενων Μπαταριών (Taneja et al., 2008)

Ο Πίνακας 3 δείχνει τυπικές τιμές των παραπάνω παραμέτρων σε διαφορετικές τεχνολογίες μπαταρίας. Οι ονομαστικές τάσεις για τις μπαταρίες SLA, NiCd, NiMH και ιόντων λιθίου είναι 6 βολτ, 1,2 βολτ, 1,2 βολτ και 3,7 βολτ, αντίστοιχα. Επίσης δείχνει ότι οι μπαταρίες ιόντων λιθίου έχουν την υψηλότερη τάση εξόδου, πυκνότητα ενέργειας, πυκνότητα ισχύος και απόδοση φόρτισης-εκφόρτισης. Έχουν επίσης χαμηλό ρυθμό αυτοεκφόρτισης<sup>4</sup>. Αν και οι μπαταρίες NiMH έχουν καλύτερη ενεργειακή πυκνότητα και πυκνότητα ισχύος από τις μπαταρίες NiCd, οι μπαταρίες NiCd έχουν μεγαλύτερο αριθμό κύκλων βαθιάς επαναφόρτισης. Οι σφραγισμένες μπαταρίες μολύβδου οξέος έχουν τις

<sup>2</sup> Η απόδοση φόρτισης-εκφόρτισης είναι ο λόγος της ενέργειας που αποθηκεύεται στην μπαταρία προς την ενέργεια που παρέχεται στην μπαταρία

<sup>3</sup> Ο κύκλος βαθιάς επαναφόρτισης αναφέρεται στον κύκλο επαναφόρτισης της μπαταρίας μετά από πλήρη αποστράγγιση

<sup>4</sup> Η αυτοεκφόρτιση είναι η απώλεια χωρητικότητας της μπαταρίας χωρίς να έχει συνδεθεί κάπου.

χαμηλότερες τιμές για την ενεργειακή πυκνότητα, την ισχύ και τον αριθμό των κύκλων και ως εκ τούτου είναι η λιγότερο αποτελεσματική τεχνολογία αποθήκευσης.

Δύο τεχνολογίες αποθήκευσης, NiMH και Li-based, αναδεικνύονται ως καλές επιλογές για κόμβους συλλογής ενέργειας. Οι μπαταρίες λιθίου έχουν υψηλή τάση εξόδου, ενεργειακή πυκνότητα, απόδοση και μέτρια χαμηλό ρυθμό αυτοεκφόρτισης. Δεν υποφέρουν από το φαινόμενο μνήμης δηλαδή την απώλεια ενεργειακής χωρητικότητας λόγω επαναλαμβανόμενης ρηχής επαναφόρτισης<sup>5</sup>. Ωστόσο, οι μπαταρίες λιθίου απαιτούν παλμική\φόρτιση για επαναφόρτιση (ένα υψηλό παλμικό ρεύμα φόρτισης). Συνήθως απαιτείται μια βοηθητική μπαταρία ή ένα κύκλωμα φόρτισης για το σκοπό αυτό.

Από την άλλη πλευρά, οι μπαταρίες NiMH μπορούν να φορτιστούν σταδιακά, δηλαδή να συνδεθούν απευθείας σε μια πηγή ενέργειας για φόρτιση και δεν χρειάζονται πολύπλοκα κυκλώματα φόρτισης παλμών. Έχουν αρκετά υψηλή ενέργεια, πυκνότητα ισχύος και αριθμό κύκλων επαναφόρτισης. Αν και οι μπαταρίες NiMH όντως υποφέρουν από το φαινόμενο μνήμης, το αποτέλεσμα είναι αναστρέψιμο αποφορτίζοντας υπό συνθήκες, πλήρως την μπαταρία μετά τη φόρτισή της. Επιπλέον, η απόδοση φόρτισης-εκφόρτισης των μπαταριών NiMH είναι χαμηλότερη από τις μπαταρίες λιθίου. Όπως μπορεί να φανεί, και οι δύο τεχνολογίες αποθήκευσης έχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και η επιλογή εξαρτάται από την ανταλλαγή που υπαγορεύεται από τις απαιτήσεις και τους περιορισμούς της εφαρμογής (Sudevalayam & Kulkarni, 2011).

Εναλλακτικά, οι υπερ-πυκνωτές (super-capacitors) μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως συσκευές αποθήκευσης αντί ή μαζί με επαναφορτιζόμενες μπαταρίες. Όπως οι μπαταρίες, οι υπερ-πυκνωτές αποθηκεύουν επίσης φόρτιση, αλλά αυτοεκφορτίζονται με πολύ υψηλότερο ρυθμό από τις μπαταρίες, έως και 5,9% ανά ημέρα.

Επιπλέον, η πυκνότητα βάρους προς ενέργεια ενός υπερ-πυκνωτή είναι πολύ χαμηλή, μόνο 5 Wh/kg σε σύγκριση με 100 Wh/kg μπαταριών NiMH. Ωστόσο, οι υπερ-πυκνωτές έχουν υψηλή απόδοση φόρτισης-εκφόρτισης (97 – 98%) και επίσης δεν πάσχουν από φαινόμενο μνήμης. Οι υπερ-πυκνωτές μπορούν επίσης να φορτιστούν όπως οι μπαταρίες NiMH και ως εκ τούτου δεν χρειάζονται πολύπλοκα κυκλώματα φόρτισης. Θεωρητικά, οι υπερ-πυκνωτές έχουν άπειρους κύκλους επαναφόρτισης και επομένως δεν έχουν όριο

---

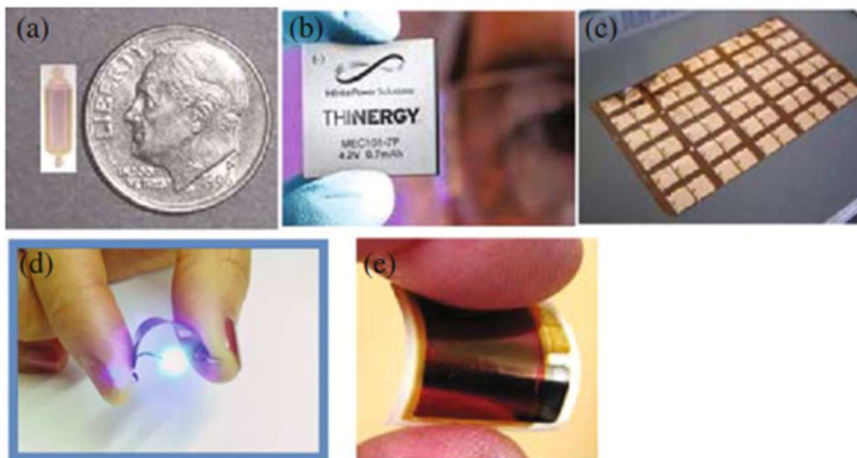
<sup>5</sup> Η ρηχή επαναφόρτιση αναφέρεται στην επαναφόρτιση μιας μερικώς αποφορτισμένης μπαταρίας.

στον αριθμό των φορών που μπορούν να υποστούν βαθιά επαναφόρτιση. Έτσι, οι υπερ-πυκνωτές είναι χρήσιμα στοιχεία αποθήκευσης σε τοποθεσίες όπου υπάρχει άφθονη ενέργεια σε τακτά χρονικά διαστήματα. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την προσωρινή αποθήκευση της διαθέσιμης ενέργειας εάν η πηγή ενέργειας δεν είναι συνεχής, δηλαδή ο υπερ-πυκνωτής φορτίζεται σταδιακά και μια σταθερή εκφόρτιση από τον πυκνωτή φορτίζει την μπαταρία (Sudevalayam & Kulkarni, 2011).

## 2.4. Μικρομπαταρίες

Είδαμε παραπάνω τις πλέον συνηθισμένες λύσεις για τη συσσώρευση φορτίου και την αποθήκευση ενέργειας από συσκευές ΣΕ, δηλαδή τις τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, κοινώς τις μπαταρίες. Επειδή όμως πολλές συσκευές συγκομιδής συλλέγουν ενέργεια από το περιβάλλον που συνήθως είναι σε χαμηλά επίπεδα, απαιτούνται μόνο πολύ μικρές μπαταρίες για αποθήκευση ενέργειας και διακοπτόμενη χρήση.

Ειδικές εφαρμογές περιλαμβάνουν αυτοτροφοδοτούμενους ασύρματους αισθητήρες ή φορητές ηλεκτρονικές συσκευές. Οι πολύ μικρές μπαταρίες αναφέρονται συνήθως ως μικρομπαταρίες, αν και οι κοινές μονάδες ισχύος, ενέργειας και χωρητικότητας βρίσκονται στην περιοχή των milliwatt (mW), milliwatt-hour (mWh) και milliamp-hour (mAh) (Priya & Inman, 2009). Στην συνέχεια θα δούμε την τεχνολογία για την κατασκευή τέτοιων μικρομπαταριών και συγκεκριμένα των μπαταριών λεπτής μεμβράνης – Thin Film Batteries (TFB) (Εικόνα 4).

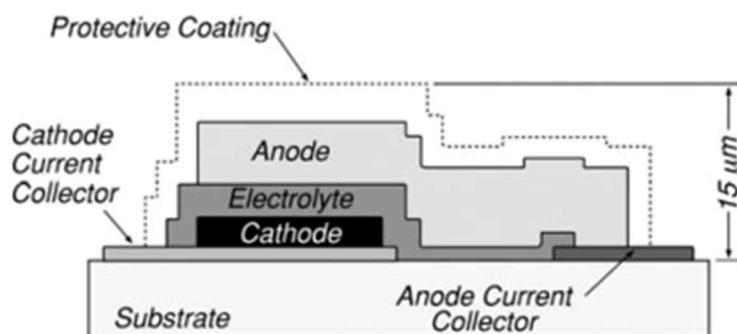


Εικόνα 4: Μπαταρίες λεπτής μεμβράνης (TFB)

Οι μπαταρίες λεπτής μεμβράνης είναι ένας τύπος μπαταρίας στερεάς κατάστασης, δηλαδή μια μπαταρία που χρησιμοποιεί τόσο στερεά ηλεκτρόδια όσο και στερεό ηλεκτρολύτη. Ωστόσο, σε αντίθεση με πολλές άλλες μπαταρίες, είναι της τάξης των μερικών εκατοντάδων νανομέτρων. Όπως με όλες τις μπαταρίες, οι μπαταρίες λεπτής μεμβράνης διαθέτουν και άνοδο και κάθοδο, καθώς και ηλεκτρολύτη και διαχωριστικό υλικό μεταξύ των δύο.

Στις περισσότερες μπαταρίες λεπτής μεμβράνης, η κάθοδος συνήθως κατασκευάζεται από σύμπλεγμα οξειδίου λιθίου όπως  $\text{LiCoO}_2$ ,  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  και  $\text{LiFePO}_4$ . Το υλικό ανόδου κατασκευάζεται συνήθως από υλικό με βάση τον άνθρακα όπως ο γραφίτης, αν και μπορεί να χρησιμοποιηθεί λίθιο και άλλα μέταλλα.

Το βασικό χαρακτηριστικό των υλικών που χρησιμοποιούνται και στα δύο ηλεκτρόδια είναι ότι είναι υλικά με στρώματα. και αυτό επιτρέπει τη δημιουργία ενός μικρού αριθμού στρώσεων κατά την κατασκευή της μπαταρίας, καθιστώντας έτσι την μπαταρία πολύ λεπτή. Επιπρόσθετα, χρησιμοποιούνται στρωματοποιημένα υλικά έτσι ώστε τα ιόντα λιθίου στο στοιχείο να μπορούν εύκολα να παρεμβάλλονται και να αποσυμπιέζονται, χωρίς να προκαλείται καμία βλάβη στη δομή των ηλεκτροδίων. Για να δημιουργηθεί το επιθυμητό πάχος, τα υλικά συχνά εναποτίθενται χρησιμοποιώντας τεχνικές φυσικής εναπόθεσης ατμών (PVD), όπως η ψεκασμός και η θερμική εξάτμιση (Εικόνα 5).



Εικόνα 5: Σχηματική διατομή TFB (Priya & Inman, 2009)

Όπως αναφέρθηκε, ο ηλεκτρολύτης σε αυτές τις μπαταρίες κατασκευάζεται παραδοσιακά από στερεά ανόργανα υλικά. Ο πιο συνηθισμένος στερεός ηλεκτρολύτης



που χρησιμοποιείται είναι το οξυνιτρίδιο του φωσφόρου λιθίου (LiPON), αν και πρόσφατη έρευνα έχει δει μια έκρηξη στη χρήση κεραμικών ηλεκτρολυτών όπως οξείδιο ψευδαργύρου λιθίου λανθανίου (LLZO) και οξείδιο του λανθανίου τιτανίου λιθίου (LLTO). Ανεξάρτητα από τη δομή, οι ηλεκτρολύτες που χρησιμοποιούνται πρέπει να είναι ένας αποτελεσματικός αγωγός ιόντων και ένας καλός ηλεκτρικός μονωτήρας.

#### **2.4.1. Πώς λειτουργούν οι μπαταρίες λεπτής μεμβράνης**

Η εσωτερική δομή των μπαταριών λεπτής μεμβράνης μοιάζει με τη δομή πολλών επαναφορτιζόμενων μπαταριών, μόνο πολύ μικρότερων, επομένως οι μηχανισμοί μετανάστευσης ιόντων είναι ουσιαστικά οι ίδιοι. Έτσι, όταν η μπαταρία φορτίζεται, τα ιόντα λιθίου μεταναστεύουν από την πλούσια σε λίθιο κάθοδο και μετακινούνται στην άνοδο. Όταν η μπαταρία βρίσκεται σε αυτή την κατάσταση, θα απορροφήσει ενέργεια που μπορεί στη συνέχεια να αποθηκευτεί. Εάν η μπαταρία είναι ενεργοποιημένη κατά τη φόρτιση, τα ιόντα λιθίου θα μετακινηθούν πίσω στην κάθοδο και τα ηλεκτρόνια θα μετακινηθούν από την κάθοδο στην άνοδο (αν και όχι μέσω του ηλεκτρολύτη) και δημιουργείται ρεύμα μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων.

Όταν η μπαταρία δεν φορτίζεται, βρίσκεται σε κατάσταση που είναι γνωστή ως αποφόρτιση. Τα ιόντα λιθίου μετακινούνται από την άνοδο στην κάθοδο (δηλαδή εκκένωση) και τα ηλεκτρόνια θα ταξιδέψουν από την κάθοδο στην άνοδο. Ο χρόνος που χρειάζεται για να αποφορτιστούν πλήρως τα ιόντα είναι η τρέχουσα διάρκεια ζωής της μπαταρίας και όταν όλα τα ιόντα λιθίου επιστρέψουν στην κάθοδο, η μπαταρία θα εξαντληθεί επειδή τα ηλεκτρόνια δεν θα μεταναστεύσουν εάν δεν υπάρχει κίνηση ιόντων λιθίου. Έτσι, η μπαταρία θα χρειαστεί να φορτιστεί ξανά. Εάν η μπαταρία βρίσκεται σε προϊόν που μπορεί να απενεργοποιηθεί, θα εξακολουθεί να αποφορτίζεται όσο η συσκευή είναι απενεργοποιημένη, αλλά με πολύ πιο αργό ρυθμό (*How Thin Film Batteries Work*, 2018).

#### **2.4.2. Πλεονεκτήματα των μπαταριών λεπτής μεμβράνης**

Οι μπαταρίες λεπτής μεμβράνης προσφέρουν ορισμένα πλεονεκτήματα σε σχέση με τις παραδοσιακές επαναφορτιζόμενες μπαταρίες στερεάς κατάστασης. Το πρώτο και πιο προφανές πλεονέκτημα είναι ότι είναι πολύ μικρότερες σε μέγεθος, επομένως μπορούν

να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία μικρότερων ηλεκτρονικών συσκευών. Επιπλέον, οι μπαταρίες λεπτής μεμβράνης έχουν συχνά μεγαλύτερη απόδοση, υψηλότερη μέση τάση εξόδου, μικρότερο βάρος, μεγαλύτερη ευελιξία, υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα, μικρότερη πιθανότητα διαρροής ηλεκτρολυτών, πιο σφιχτή συσκευασία και μεγαλύτερο κύκλο ζωής από τις ογκώδεις μπαταρίες στερεάς κατάστασης . Όπως πολλές επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, αυτές οι μπαταρίες λεπτής μεμβράνης διαθέτουν επίσης έναν αποτελεσματικό αναστρέψιμο μηχανισμό εισαγωγής λιθίου μεταξύ των ηλεκτροδίων. Οι μπαταρίες λεπτής μεμβράνης διατίθενται στο εμπόριο και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για πολλές εφαρμογές, όπως σε συσκευές αποθήκευσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, έξυπνες κάρτες, ετικέτες αναγνώρισης ραδιοσυχνοτήτων (RFID), φορητές ηλεκτρονικές συσκευές, απινιδωτές, νευρικούς διεγέρτες, βηματοδότες και ασύρματους αισθητήρες.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### 3. Συγκομιδή Κινητικής Ενέργειας

Οι συσκευές συγκομιδής κινητικής ενέργειας μετατρέπουν τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική μέσω ηλεκτρομηχανικών μετατροπών. Οι πιο συνηθισμένοι μηχανισμοί μεταγωγής είναι η πιεζοηλεκτρική, η ηλεκτρομαγνητική και η ηλεκτροστατική μετατροπή.

	Piezoelectric devices	Electromagnetic devices	Electrostatic devices
Advantages	<ul style="list-style-type: none"> <li>- high output voltages</li> <li>- high capacitances</li> <li>- no need to control</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- high output currents</li> <li>- long lifetime</li> <li>- robustness</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-high output voltages</li> <li>-low-cost systems</li> <li>-coupling coefficient easily adjustable</li> <li>-high coupling coefficients</li> <li>-size reduction increases capacitances</li> </ul>
Disadvantages	<ul style="list-style-type: none"> <li>- expensive materials</li> <li>- coupling coefficient linked to material properties</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- low output voltages</li> <li>- expensive material</li> <li>- low efficiency in low frequencies and small sizes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-low capacitances</li> <li>-high impact of parasitic capacitances</li> <li>-no direct mechanical-to-electrical conversion for electret-free converters</li> </ul>

Πίνακας 4: Τεχνολογίες Συγκομιδής Κινητικής Ενέργειας (Poza et al., 2019)

Στον παραπάνω πίνακα αναφέρονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των συγκεκριμένων συσκευών, των οποίων τις τεχνολογίες στις οποίες βασίζονται θα αναλύσουμε στην συνέχεια του κεφαλαίου.

Μαζί με την ΣΕ από το φως η ΣΕ από την ανθρώπινη, κυρίως, κίνηση έχουν αναγνωρισθεί σαν τις περισσότερο υποσχόμενες τεχνολογίες ειδικά στα wearables και στις συσκευές IoT. Ακόμη και μικρές κινήσεις κατά τις καθημερινές δραστηριότητες του ανθρώπου παράγουν σημαντική ποσότητα ενέργειας η οποία θα μπορούσε να συλλεχθεί. Τα τελευταία χρόνια, πολλές προσεγγίσεις προσπάθησαν να εισαγάγουν γεννήτριες στις σόλες των παπουτσιών για την παραγωγή ενέργειας κατά το περπάτημα. Άλλες προσεγγίσεις επικεντρώθηκαν στην ενσωμάτωση γεννητριών σε σακίδια για φόρτιση smartphone ή κάποιας άλλης φορητής συσκευής, Ωστόσο, είναι βέβαιο ότι απαιτούνται μικρότερου μεγέθους συσκευές ΣΕ οι οποίες και χρειάζονται σε εφαρμογές IoT και ειδικά σε φορητές συσκευές. Για την επίτευξη αυτού του στόχου ολόκληρη η μηχανή ΣΕ συμπεριλαμβανομένης της ηλεκτρομηχανικής γεννήτριας θα πρέπει να ικανοποιεί τις απαιτήσεις σε βάρος και μέγεθος (δηλαδή κάτω από λίγα γραμμάρια και 40 mm x 40 mm

έτσι ώστε να μπορεί να υπόκειται σε ένα έξυπνο ρολόι) και θα πρέπει να δημιουργήσει τουλάχιστον μερικές εκατοντάδες micro-Watts, που θα μπορούσαν να επαρκούν πολλές εφαρμογές (Magno et al., 2016).

Δεδομένου ότι οι μικρές γεννήτριες συλλέγουν περιορισμένη ποσότητα ενέργειας, είναι σημαντικό να μεταφερθεί αυτή η ενέργεια από τη γεννήτρια σε ένα ενεργειακό buffer (π.χ. πυκνωτές ή μπαταρίες) όσο το δυνατόν πιο αποτελεσματικά. Η συλλογή σημαντικών ποσοτήτων ενέργειας από τέτοιες, περιορισμένης δυνατότητας, μηχανές είναι μια πρόκληση που απαιτεί σημαντικό όγκο έρευνας και προσπάθεια ανάπτυξης .

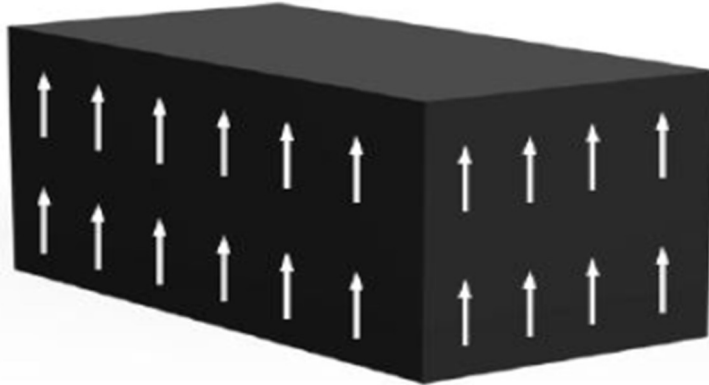
### **3.1. Πιεζοηλεκτρική Συγκομιδή Ενέργειας**

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο είναι μια μοναδική ιδιότητα ορισμένων κρυστάλλων οι οποίοι θα δημιουργήσουν ηλεκτρικό πεδίο ή ρεύμα εάν υποβληθούν σε φυσική πίεση. Το άμεσο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο ανακαλύφθηκε από τους αδελφούς Pierre Curie και Jacques Curie το 1880. Μετά από αυτό, το ίδιο φαινόμενο παρατηρήθηκε αντίστροφα , όπου ένα επιβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο στον κρύσταλλο θα ασκήσει πίεση στη δομή του.

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο βασίζεται στη θεμελιώδη δομή ενός κρυσταλλικού πλέγματος. Ορισμένες κρυσταλλικές δομές έχουν ισοζύγιο φορτίου με αρνητική και θετική πόλωση, οι οποίες εξουδετερώνονται κατά μήκος του νοητού πολικού άξονα. Όταν αυτή η ισορροπία φορτίου διαταράσσεται με εξωτερική πίεση στο κρυσταλλικό πλέγμα, η ενέργεια μεταφέρεται από φορείς ηλεκτρικού φορτίου δημιουργώντας ένα ρεύμα στον κρύσταλλο. Αντίθετα, με το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο μια είσοδος εξωτερικού φορτίου θα δημιουργήσει μια ανισορροπία στην ουδέτερη κατάσταση φορτίου προκαλώντας μηχανική καταπόνηση. Η σύνδεση μεταξύ πιεζοηλεκτρισμού και κρυσταλλικής συμμετρίας είναι στενά εδραιωμένη. Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο παρατηρείται σε κρυστάλλους χωρίς κέντρο συμμετρίας και η σχέση μπορεί να εξηγηθεί με μονοκρυσταλλικές και πολυκρυσταλλικές δομές.

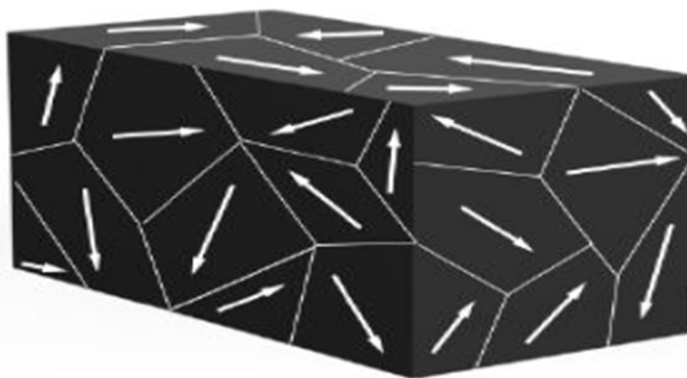
Σε ένα μονοκρύσταλλο (Εικόνα 6) οι πολικοί άξονες όλων των φορέων φορτίου παρουσιάζουν μονόδρομα κατευθυντικά χαρακτηριστικά. Αυτοί οι κρύσταλλοι

επιδεικνύουν συμμετρία, όπου οι πολικοί άξονες σε όλο τον κρύσταλλο θα είχαν ίδια κατεύθυνση ακόμα κι αν χωριζόταν σε κομμάτια (Bera, n.d.).

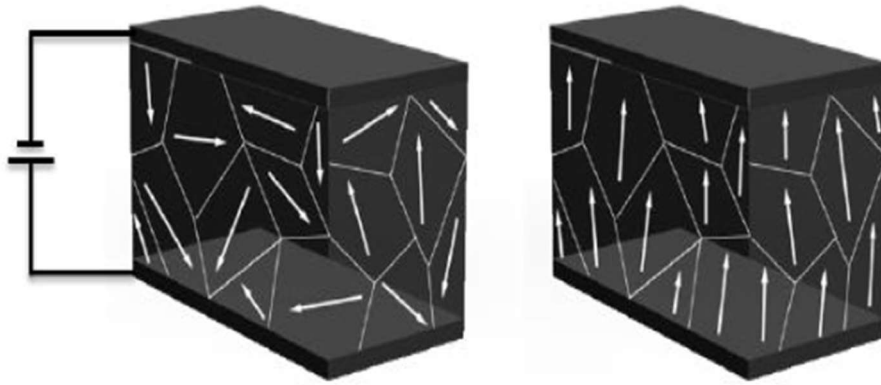


**Εικόνα 6: Μονοκρύσταλλος**

Αντίθετα, ένας πολυκρύσταλλος (Εικόνα 7) χαρακτηρίζεται από διαφορετικές περιοχές εντός του υλικού με διαφορετικούς πολικούς άξονες. Είναι ασύμμετρο γιατί δεν υπάρχει σημείο στο οποίο θα μπορούσε να κοπεί ο κρύσταλλος που να αφήνει τα δύο εναπομείναντα κομμάτια με τους ίδιους προκύπτοντες πολικούς άξονες. Προκειμένου να επιτευχθεί το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, ο πολυκρύσταλλος θερμαίνεται στο σημείο Curie μαζί με ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο. Η θερμότητα επιτρέπει στα μόρια να κινούνται πιο ελεύθερα και το ηλεκτρικό πεδίο αναγκάζει τα δίπολα να αναδιατάσσονται σύμφωνα με το εξωτερικό πεδίο (Εικόνα 8).



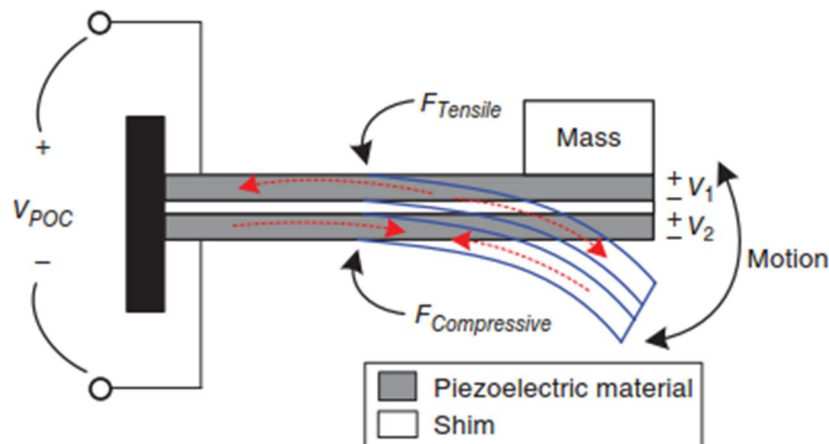
**Εικόνα 7: Πολυκρύσταλλος**



Εικόνα 8: Αναδιάταξη πολυκρυστάλλου με πόλωση

Ως αποτέλεσμα, στο υλικό εμφανίζεται το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο: μια τάση της ίδιας πολικότητας με την τάση πόλωσης εμφανίζεται μεταξύ των ηλεκτροδίων όταν το υλικό συμπιέζεται, και αντίθετη πολικότητα εμφανίζεται όταν τεντώνεται. Η παραμόρφωση του υλικού λαμβάνει χώρα όταν εφαρμόζεται διαφορά τάσης και εάν εφαρμόζεται σήμα AC το υλικό θα δονείται με την ίδια συχνότητα με το σήμα.

Γενικά, το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο μπορεί να οριστεί ως η μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια (άμεσο αποτέλεσμα) ή η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική ενέργεια (αντίστροφο φαινόμενο). Ορισμένα υλικά όταν υποβάλλονται σε μηχανική καταπόνηση πολώνονται ηλεκτρικά, ανάλογη με την εφαρμοζόμενη καταπόνηση. Η Εικόνα 9 απεικονίζει σχηματικά ένα πιεζοηλεκτρικό πρόβλο.



Εικόνα 9: Πιεζοηλεκτρικό Πρόβλο (Chen, 2016)

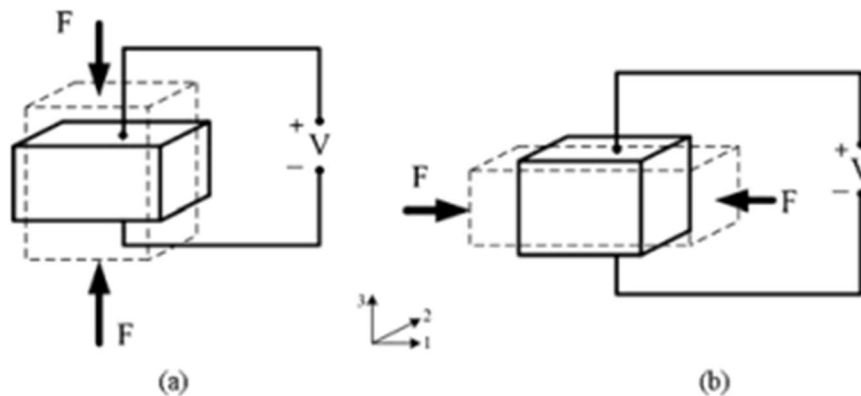
Αυτό το φορτίο μπορεί να αποθηκευτεί μέσω ενός ηλεκτρικού κυκλώματος. Επιπλέον, τα πιεζοηλεκτρικά υλικά για ΣΕ είναι φθηνά και εύκολα διαχειρίσιμα. Από την άλλη το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο είναι ένας από τους πιο μελετημένους τομείς από τους ερευνητές που ασχολούνται με την τεχνολογία ΣΕ. Ένας από τους κύριους στόχους των ερευνητών είναι η χρήση του φαινομένου στο σχεδιασμό μιας μηχανής συγκομιδής αιολικής ενέργειας, κατασκευασμένη από πιεζοηλεκτρικό υλικό, με σκοπό να βελτιώσει την ηλεκτρική του απόδοση μειώνοντας το κόστος.

Οι πιεζοηλεκτρικές συσκευές συνήθως θεωρείται ότι παρέχουν υψηλές τάσεις και χαμηλά ρεύματα. Ωστόσο, τα επίπεδα τάσης και ρεύματος εξαρτώνται από τη φυσική υλοποίηση και το συγκεκριμένο κύκλωμα ηλεκτρικού φορτίου που χρησιμοποιείται. Στην πραγματικότητα, ο σχεδιασμός ενός συστήματος που παράγει τάσεις και ρεύματα σε χρήσιμο εύρος είναι αρκετά εύκολος. Πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι μια τάση μετατροπής στην περιοχή πολλών βολτ και ένα ρεύμα μετατροπής της τάξης των δεκάδων έως εκατοντάδων μικροαμπέρ είναι εφικτά. Το πλεονέκτημα της πιεζοηλεκτρικής μετατροπής είναι η άμεση παραγωγή κατάλληλων τάσεων. Λόγω της υψηλής ενεργειακής πυκνότητας, οι πιεζοηλεκτρικές γεννήτριες θεωρούνται μια σχετικά καλή επιλογή για τη συλλογή ενέργειας δόνησης σε σύγκριση με τις ηλεκτρομαγνητικές και ηλεκτροστατικές γεννήτριες ενέργειας (Chen, 2016).

Οι περισσότερες πιεζοηλεκτρικές μηχανές συγκομιδής ενέργειας έχουν τη μορφή δοκών προβόλου, με ένα ή δύο πιεζοκεραμικά στρώματα, λόγω της απλότητας αυτού του είδους δομής. Η δέσμη συγκομιδής βρίσκεται σε μια δονούμενη δομή και η δυναμική καταπόνηση που προκαλείται στις πιεζοκεραμικές οπές μετατρέπεται σε έξοδο εναλλασσόμενης τάσης. Κανονικά οι πρόβολοι πιεζοηλεκτρικής μηχανής ΣΕ λειτουργούν με τον λεγόμενο τρόπο λειτουργίας 31, στον οποίο η τάση κάμψης που αναπτύσσεται στη διαμήκη κατεύθυνση (1-κατεύθυνση) δημιουργεί μια διαφορά δυναμικού σε όλο το πάχος του πιεζοηλεκτρικό στρώμα (3 κατευθύνσεων) (Mak et al., 2011).

Οι πιεζοηλεκτρικές γεννήτριες συνήθως λειτουργούν είτε σε λειτουργία 33 (Εικόνα 10a) είτε σε λειτουργία 31 (Εικόνα 10b). Στη λειτουργία 33, εφαρμόζεται μια δύναμη στην ίδια κατεύθυνση με την κατεύθυνση πόλωσης, όπως η συμπίεση ενός πιεζοηλεκτρικού

μπλοκ που έχει ηλεκτρόδια στην επάνω και στην κάτω επιφάνειά του. Στον τρόπο λειτουργίας 31, εφαρμόζεται μια πλευρική δύναμη στην κατεύθυνση κάθετη προς την κατεύθυνση πόλωσης, ένα παράδειγμα της οποίας είναι μια δοκός κάμψης που έχει ηλεκτρόδια στην επάνω και στην κάτω επιφάνειά της. Γενικά, η λειτουργία 31 ήταν η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη λειτουργία σύζευξης, αν και η λειτουργία 31 έχει χαμηλότερο συντελεστή σύζευξης από τη λειτουργία 33. Οι κοινές δομές συλλογής ενέργειας όπως οι πρόβολοι ή η δοκός διπλής σύσφιξης λειτουργούν τυπικά στον τρόπο λειτουργίας 31 επειδή η πλευρική τάση στην επιφάνεια της δοκού συνδέεται εύκολα με πιεζοηλεκτρικά υλικά που εναποτίθενται στη δοκό (Kazmierski & Beeby, 2011).



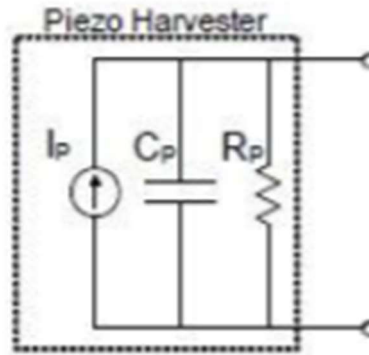
Εικόνα 10: Πιεζοηλεκτρικές Γεννήτριες (α) Λειτουργία 33, (β) Λειτουργία 31 (Kazmierski & Beeby, 2011)

### 3.1.1. Πιεζοηλεκτρικά Υλικά

Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά είναι υλικά στα οποία όταν τους εφαρμόζεται κάποια μηχανική τάση, παραμορφώνονται μηχανικά και παράγουν ηλεκτρικό φορτίο, ή αντιστρόφως, με την παρουσία ενός ηλεκτρικού πεδίου μπορούν να παραμορφώνονται. Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά είτε βρίσκονται στη φύση είτε δημιουργούνται τεχνητά σε εργαστήρια, ωστόσο τα τεχνητά έχουν καλύτερες ιδιότητες. Το πιο γνωστό φυσικό πιεζοηλεκτρικό υλικό είναι ο χαλαζίας ( $\text{SiO}_2$ ). Άλλα πιεζοηλεκτρικά υλικά είναι ο τουρμαλίνης, το συνθετικό πολυμερές PVDF (poly(vinylidene fluoride)), το οξείδιο του ψευδαργύρου ZnO (zinc oxide), οι περοβσκίτες όπως ο ζirkονιοτιτανιούχος μόλυβδος PZT (lead zirconate titanate) και το οξείδιο του τιτανιούχου βαρίου  $\text{BaTiO}_3$  (barium Titanate), κ.α..



Η κυκλωματική αναπαράσταση ενός πιεζοηλεκτρικού μετατροπέα φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 11: Κυκλωματική αναπαράσταση ενός πιεζοηλεκτρικού μετατροπέα

### 3.2. Συγκομιδή Ηλεκτρομαγνητικής Ενέργειας

Ο ηλεκτρομαγνητισμός έχει χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τις αρχές της δεκαετίας του 1930, λίγο μετά τη θεμελιώδη ανακάλυψη του Faraday στην ηλεκτρομαγνητική επαγωγή. Η πλειονότητα των γεννητριών που χρησιμοποιούνται σήμερα βασίζονται στην περιστροφή και χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές, από τη μεγάλης κλίμακας παραγωγή ενέργειας έως εφαρμογές μικρότερης κλίμακας στα αυτοκίνητα για την επαναφόρτιση της μπαταρίας. Οι ηλεκτρομαγνητικές γεννήτριες μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη συλλογή επιπέδων ισχύος micro έως milli Watt χρησιμοποιώντας τόσο περιστροφικές όσο και γραμμικές συσκευές.

Με την προϋπόθεση ότι μια γεννήτρια έχει σχεδιαστεί σωστά και δεν έχει περιορισμένο μέγεθος, μπορεί να είναι εξαιρετικά αποτελεσματικοί μετατροπείς της κινητικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Ωστόσο, οι προσπάθειες μικρογραφίας της τεχνικής, χρησιμοποιώντας τεχνολογία μικρο-μηχανικής για την κατασκευή μιας γεννήτριας, μειώνουν σταθερά σημαντικά τα επίπεδα απόδοσης.

Η βασική αρχή στην οποία βασίζονται σχεδόν όλες οι ηλεκτρομαγνητικές γεννήτριες είναι ο νόμος του Faraday για την ηλεκτρομαγνητική επαγωγή. Το 1831, ο Michael Faraday ανακάλυψε ότι όταν ένας ηλεκτρικός αγωγός κινείται μέσα από ένα μαγνητικό πεδίο,

προκαλείται διαφορά δυναμικού μεταξύ των άκρων του αγωγού. Η αρχή του νόμου του Faraday είναι ότι η τάση, ή η ηλεκτροκινητική δύναμη (emf), που προκαλείται σε ένα κύκλωμα είναι ανάλογη με τον χρόνο μεταβολής της σύνδεσης μαγνητικής ροής αυτού του κυκλώματος.

Στις περισσότερες εφαρμογές γεννήτριας, το κύκλωμα αποτελείται από ένα πηνίο σύρματος πολλαπλών στροφών και το μαγνητικό πεδίο δημιουργείται από μόνιμους μαγνήτες. Στις περισσότερες γεννήτριες γραμμικών κραδασμών, η κίνηση μεταξύ του πηνίου και του μαγνήτη σε μία μόνο κατεύθυνση, π.χ., ως υποθέσουμε την κατεύθυνση  $x$ , και το μαγνητικό πεδίο,  $B$ , παράγεται από έναν μόνιμο μαγνήτη και δεν έχει χρονική διακύμανση.

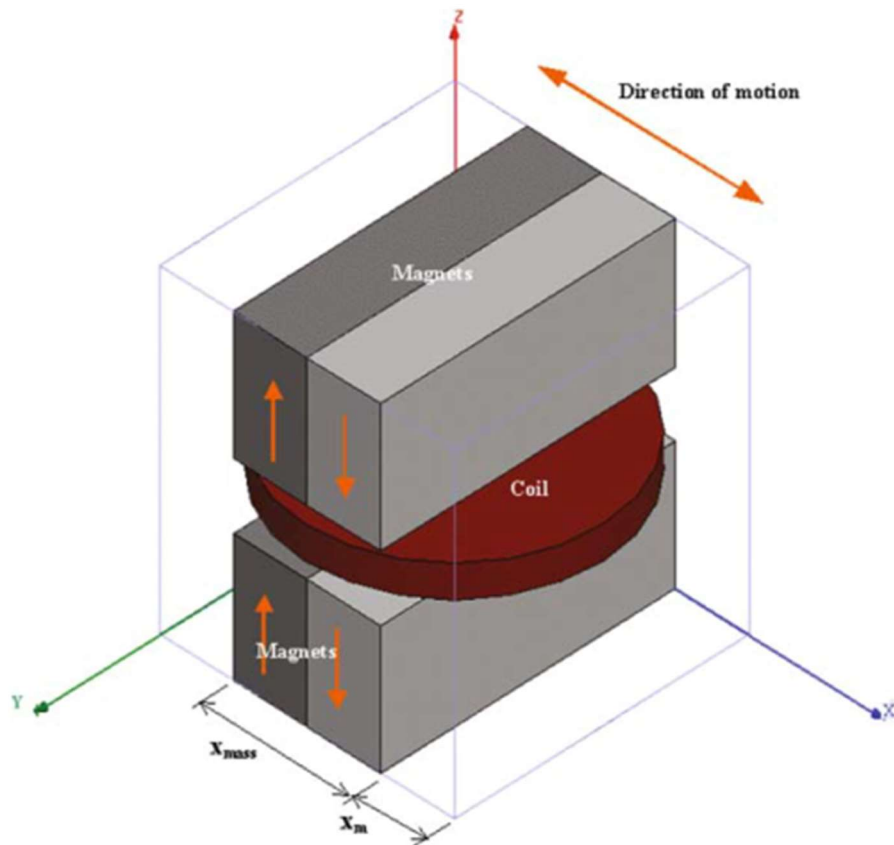
Η ισχύς εξάγεται από τη γεννήτρια συνδέοντας τους ακροδέκτες του πηνίου σε μια αντίσταση φορτίου, και αφήνοντας ένα ρεύμα να ρέει στο πηνίο. Αυτό το ρεύμα δημιουργεί το δικό του μαγνητικό πεδίο που ενεργεί για να εναντιωθεί στο πεδίο που το δημιουργεί. Η αλληλεπίδραση μεταξύ του πεδίου που προκαλείται από το επαγόμενο ρεύμα και του πεδίου από τους μαγνήτες δημιουργεί μια δύναμη που αντιτίθεται στην κίνηση. Έτσι δρώντας ενάντια σε αυτήν την ηλεκτρομαγνητική δύναμη, η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Η ηλεκτρομαγνητική δύναμη είναι ανάλογη του ρεύματος και επομένως της ταχύτητας (Priya & Inman, 2009).

### **3.2.1. Γεννήτρια ΣΕ Ηλεκτρομαγνητικών Δονήσεων**

Για τις γεννήτριες δονήσεων, είναι ενδιαφέρον να κατανοήσουμε πώς η παραγόμενη ισχύς σχετίζεται με το μέγεθος της γεννήτριας, και συγκεκριμένα στην περίπτωση της ηλεκτρομαγνητικής γεννήτριας, πώς η ισχύς περιορίζεται από τις αλληλεπιδράσεις των πηνίων και των μαγνητών όσο μειώνεται το μέγεθος. Σε μια γεννήτρια που λειτουργεί με δονήσεις, η διαθέσιμη μηχανική ενέργεια σχετίζεται με την κίνηση μιας μάζας σε μια ορισμένη απόσταση, που λειτουργεί ενάντια σε μια δύναμη απόσβεσης. Σαφώς, αυτό θα μειωθεί με τις διαστάσεις καθώς μειώνεται τόσο η μάζα του κινούμενου αντικειμένου όσο και η απόσταση που μετακινείται. Γενικά, η δύναμη απόσβεσης που ελέγχει την κίνηση θα αποτελείται από παρασιτική απόσβεση και ηλεκτρομαγνητική απόσβεση. Η ηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να εξαχθεί ωφέλιμα από μια γεννήτρια εξαρτάται από την

ηλεκτρομαγνητική απόσβεση, η οποία εξαρτάται από την κλίση της σύνδεσης ροής, τον αριθμό των στροφών του πηνίου, την αντίσταση του πηνίου και την αντίσταση φορτίου. Αυτοί οι παράγοντες εξαρτώνται επίσης από την κλίμακα, έτσι ώστε συνήθως καθώς μειώνεται η διάσταση, το μέγεθος των μαγνητικών πεδίων μειώνεται και η ποιότητα των πηνίων μειώνεται και ως εκ τούτου η ικανότητα εξαγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να μειωθεί.

Στην Εικόνα 12 βλέπουμε μια αναπαράσταση του τύπου ηλεκτρομαγνητικής γεννήτριας που έχει αναφερθεί στους (Beeby et al., 2007) να έχει πυκνότητα υψηλής ισχύος. Αυτή η δομή αποτελείται από ένα πηνίο τοποθετημένο ανάμεσα σε μαγνήτες, όπου ο άνω και ο κάτω μαγνήτης αποτελούνται από δύο ζεύγη, αντίθετα πολωμένα. Αυτή η αντίθετη πολικότητα δημιουργεί μια κλίση ροής για το πηνίο προς την κατεύθυνση κίνησης, η οποία στην περίπτωση αυτή είναι στην κατεύθυνση  $x$ .



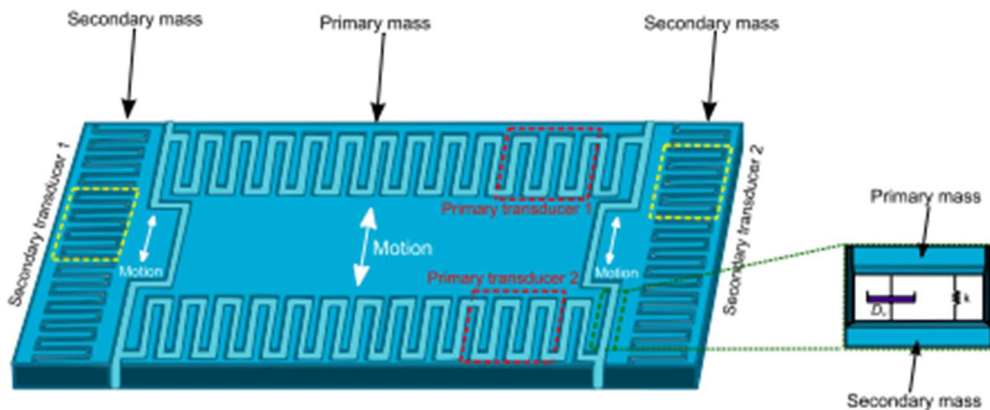
Εικόνα 12: Αναπαράσταση της ηλεκτρομαγνητικής γεννήτριας (Priya & Inman, 2009)

### 3.3. Συγκομιδή Ηλεκτροστατικής Ενέργειας

Η ιδέα της μετατροπής ηλεκτροστατικής ενέργειας ανάγεται στο 1976 όταν ο O. P. Breaux κατέθεσε ένα δίπλωμα ευρεσιτεχνίας σχετικά με ένα περιστροφικό σύστημα μετατροπής χωρίς συντονισμό. Το 1995, οι Williams et al. Δημοσίευσε για πρώτη φορά την ιδέα της μεθόδου μετατροπής ηλεκτροστατικής ενέργειας, μαζί με την πιεζοηλεκτρική και ηλεκτρομαγνητική μέθοδο μετατροπής, που θα χρησιμοποιηθεί ως τεχνολογία μεταγωγής στον τομέα της συλλογής αδρανειακής ενέργειας. Έκτοτε, μια σειρά από ερευνητικές ομάδες εργάζονται στον τομέα των συστημάτων ηλεκτροστατικής μετατροπής ενέργειας για εφαρμογές συλλογής κινητικής ενέργειας (Spies, 2015).

Ο μηχανισμός μετατροπής ενέργειας ενός ηλεκτροστατικού μετατροπέα βασίζεται στη φυσική σύζευξη της ηλεκτρικής και της μηχανικής περιοχής με ηλεκτροστατική δύναμη. Η ηλεκτροστατική δύναμη προκαλείται μεταξύ αντίθετων φορτίων που είναι αποθηκευμένα σε δύο αντίθετα ηλεκτρόδια.

Οι ηλεκτροστατικές μηχανές συγκομιδής κατασκευάζονται από έναν μεταβλητό πυκνωτή του οποίου οι πλάκες είναι ηλεκτρικά απομονωμένες μεταξύ τους με αέρα, κενό ή μονωτή, Εικόνα 13. Οι εξωτερικοί μηχανικοί κραδασμοί προκαλούν το διάκενο μεταξύ των πλακών να ποικίλλει, αλλαγή της χωρητικότητας. Για τη συλλογή ενέργειας, οι πλάκες πρέπει να φορτιστούν. Σε αυτές τις συνθήκες, οι μηχανικοί κραδασμοί αντιτίθενται στις ηλεκτροστατικές δυνάμεις που υπάρχουν στη συσκευή. Επομένως, εάν μια τάση πολώνει τον πυκνωτή και εάν το κύκλωμα φορτίου είναι γραμμικό, η κίνηση του κινητού ηλεκτροδίου παράγει ηλεκτρική ισχύ.



Εικόνα 13: Ηλεκτροστατική Μηχανή ΣΕ (Pozo et al., 2019)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### 4. Συγκομιδή Ενέργειας από Ραδιοσυχνότητες (RF)

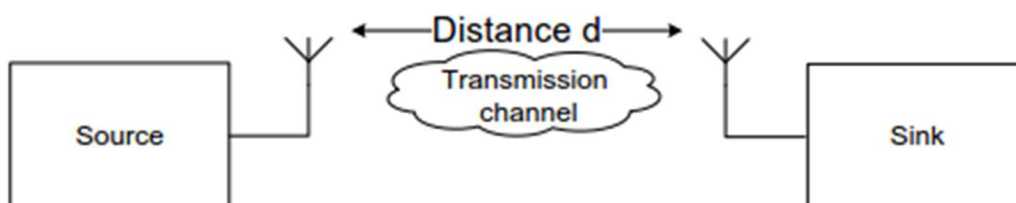
Η ασύρματη μεταφορά ισχύος με βάση τη ραδιοσυχνότητα (RF) παρέχει μια ελκυστική λύση για την παράταση της διάρκειας ζωής των ασύρματων δικτύων αισθητήρων με περιορισμένη ενέργεια. Μέσω της συλλογής ενέργειας ραδιοσυχνοτήτων από το περιβάλλον ή αποκλειστικές πηγές ενέργειας, οι ασύρματες συσκευές χαμηλής κατανάλωσης μπορούν να είναι αυτοσυντηρούμενες και φιλικές προς το περιβάλλον.

Η συγκεκριμένη τεχνολογία είναι σήμερα ένα από τα κύρια θέματα έρευνας μεταξύ των κατασκευαστών κινητών συσκευών, καθώς αναμένεται να εξαλειφθούν τυχόν καλώδια και υποδοχές για τροφοδοσία ή φόρτιση συσκευών όπως κινητά τηλέφωνα και φορητοί υπολογιστές. Στην πραγματικότητα, η ΣΕ ραδιοσυχνοτήτων προσφέρει την υψηλότερη ανάκτηση ενέργειας μεταξύ όλων των τεχνολογιών συλλογής ενέργειας.

Δεδομένου ότι εκτός από τον ήλιο δεν υπάρχουν φυσικές πηγές ηλεκτρομαγνητικών πεδίων με επαρκή ενέργεια, είναι απαραίτητες πηγές παραγωγής και ακτινοβολίας ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων με αρκετή ενέργεια για την ενεργοποίηση μιας ηλεκτρονικής συσκευής σε μια ορισμένη απόσταση. Οι πηγές συνήθως προορίζονται για χρήση μόνο για μετάδοση ισχύος αλλά μπορεί επίσης να είναι πηγές συστημάτων μετάδοσης δεδομένων ραδιοσυχνοτήτων που προσφέρουν αρκετή ισχύ. Το τελευταίο γίνεται όλο και πιο ελκυστικό, καθώς αυξάνεται η διαθεσιμότητα των ασύρματων συστημάτων μετάδοσης δεδομένων. Σε κάθε περίπτωση, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι κανονιστικοί περιορισμοί σχετικά με τη χρήση ζωνών συχνοτήτων και τη μέγιστη ακτινοβολούμενη ραδιοισχύ. Εν κατακλείδι εκτός από τον ρόλο που έχουν ως φορέας πληροφοριών, τα κύματα ραδιοσυχνοτήτων στα ασύρματα συστήματα, λειτουργούν επίσης ως ενεργειακό μέσο για την τροφοδοσία συσκευών για την ανίχνευση περιβάλλοντος, τις ασύρματες επικοινωνίες και την επεξεργασία σήματος.

Τα βασικά στοιχεία (Εικόνα 14) ενός ασύρματου συστήματος μετάδοσης ισχύος είναι μια πηγή, που δημιουργεί ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και ένας δέκτης, που δέχεται το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και το μετατρέπει σε ισχύ συνεχούς ρεύματος. Μεταξύ της πηγής και του δέκτη το ηλεκτρομαγνητικό κύμα διέρχεται το κανάλι μετάδοσης. Είναι ένα μέσο,

συνήθως αέρας, αλλά θα μπορούσαν επίσης να υπάρχουν στερεά υλικά όπως εμπόδια ενδιάμεσα ανάλογα με την απόσταση  $d$  της πηγής και του δέκτη. Θα πρέπει να ληφθούν υπόψη όχι μόνο η απόσταση πηγής και νεροχύτη, αλλά και η συχνότητα εργασίας, τα φυσικά χαρακτηριστικά (μέταλλο, διηλεκτρικά, διαπερατά υλικά) του μέσου, ο θόρυβος ή τα ανεπιθύμητα ηλεκτρομαγνητικά πεδία (Spies, 2015).



**Εικόνα 14:** Βασικά στοιχεία μιας ασύρματης μετάδοσης ισχύος.

Η ενέργεια ραδιοσυχνοτήτων είναι ένας διαρκής πόρος που υπάρχει ευρέως τόσο σε εσωτερικούς χώρους (π.χ. σήμα Wi-Fi από ασύρματο δρομολογητή) όσο και σε εξωτερικούς χώρους (π.χ. σήμα κινητής τηλεφωνίας και σήμα DTV). Η τεχνική συγκομιδής ενέργειας ασύρματης επικοινωνίας RF (RF-EHWC) εισάγει αρκετά ελκυστικά χαρακτηριστικά στα δίκτυα επικοινωνίας και ανίχνευσης. Για παράδειγμα, παρέχει στις ασύρματες συσκευές χαμηλής κατανάλωσης την αυτό-βιωσιμότητα, η οποία επιτρέπει σε αυτές οι συσκευές να λειτουργούν θεωρητικά αιώνια. Επιπλέον, με τη δέσμευση ενέργειας στον αέρα, μια συσκευή RF-EHWC μπορεί να λειτουργήσει χωρίς χημική μπαταρία για την επίτευξη πράσινων επικοινωνιών. Ακόμα, οι συσκευές RF-EHWC έχουν συνήθως ελαφριές δομές σε σύγκριση με τις συμβατικές εγκαταστάσεις που συλλέγουν ανανεώσιμη ενέργεια από τον άνεμο, την παλίρροια και τη βιομάζα. Επομένως, μπορεί να είναι μικρού μεγέθους, γεγονός που τους επιτρέπει να χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου ο χώρος και το κόστος είναι κρίσιμα.

Τα πράσινα, μικρού μεγέθους και βιώσιμα χαρακτηριστικά καθιστούν την τεχνική RF-EHWC κατάλληλη για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπως το Internet of Things (IoT), τα Body Area Networks (BANs) και τις έξυπνες υποδομές. Αυτές οι εφαρμογές συνήθως χρειάζονται τη βοήθεια πολλών ασύρματων κόμβων αισθητήρων και συσκευών χαμηλής κατανάλωσης που έχουν ισχυρές απαιτήσεις βιωσιμότητας και αποτελεσματικότητας. Για παράδειγμα, οι ασύρματοι κόμβοι που αναπτύσσονται στις περιοχές άγριας φύσης για την παρακολούθηση του περιβάλλοντος και την προειδοποίηση καταστροφών θα πρέπει

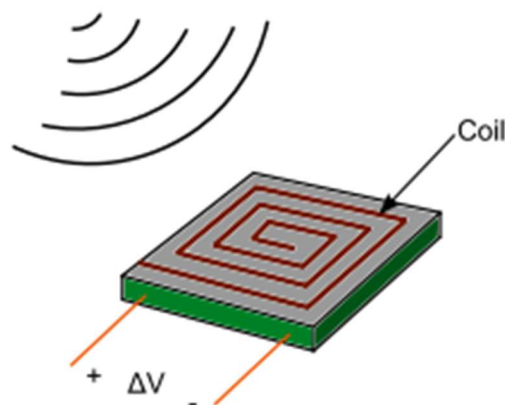
να είναι πράσινοι και ανθεκτικοί. Προφανώς, το RF-EHWC είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνική για την κάλυψη των καθαρών και αυτό-βιώσιμων απαιτήσεων αυτών των αναδυόμενων εφαρμογών.

Αυτά τα χαρακτηριστικά καθιστούν την τεχνική συγκομιδής ενέργειας ασύρματης επικοινωνίας RF (RF-EHWC) ελκυστική σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών (Luo et al., 2019).

#### 4.1. Συσκευές Συγκομιδής Ενέργειας από Ραδιοσυχνότητες

Οι μηχανές ΣΕ ραδιοσυχνοτήτων (RF) λαμβάνουν ενέργεια από ραδιοσυχνότητες και ασύρματη ισχύ μικροκυμάτων. Η ακτινοβολία ραδιοσυχνοτήτων υποβάθρου που εκπέμπεται από πομπούς, πύργους κινητής τηλεφωνίας, δίκτυα Wi-Fi ή ασύρματα δίκτυα χαμηλής ισχύος, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθούν ως πηγές συλλογής ενέργειας. Σε αυτό το πλαίσιο, τα κύματα ραδιοσυχνοτήτων περιλαμβάνουν συχνότητες από 3 kHz έως 300 GHz. Η συλλεγόμενη ισχύς εξαρτάται από την πυκνότητα προσπίπτουσας ισχύος, την απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη, την απόδοση μετατροπής ισχύος και το μέγεθος της κεραίας της συγκομιδής. Έτσι, η αναχαιτισμένη ισχύς είναι άμεσα ανάλογο με το μέγεθος του ανοίγματος της κεραίας.

Ένα πηνίο και ένας διαχωριστής συνθέτουν μια τέτοια απλή μηχανή ΣΕ, Εικόνα 15. Το πηνίο είναι κατασκευασμένο από αγώγιμα υλικά και ο διαχωριστής είναι κατασκευασμένος από μη αγώγιμα υλικά, για την αποφυγή καταστάσεων βραχυκυκλώματος και τη διατήρηση της ακεραιότητας του πηνίου (Pozo et al., 2019).



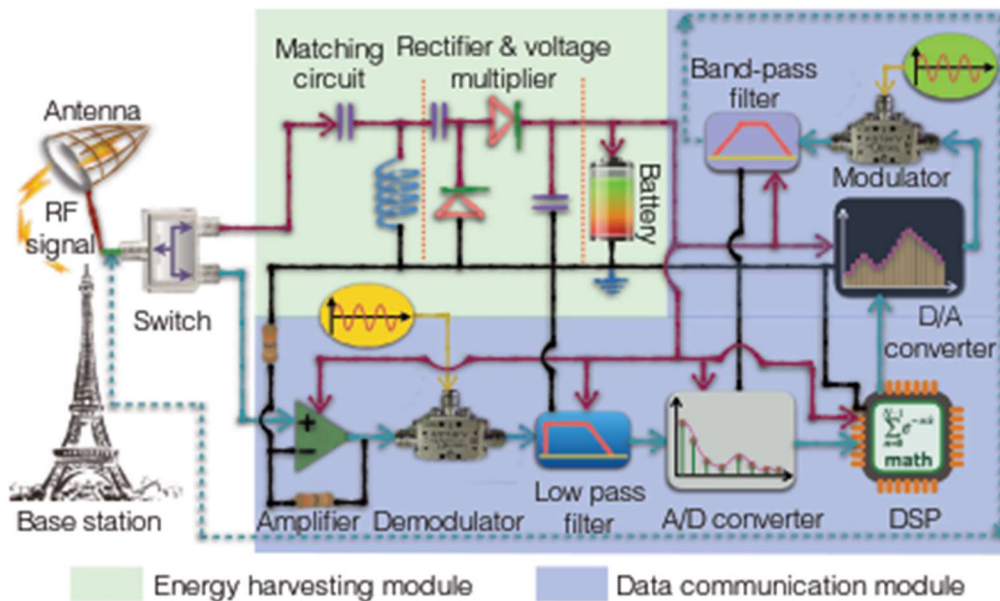
Εικόνα 15: Μηχανή ΣΕ Ραδιοσυχνοτήτων (RF)

Αναλυτικότερα, μια συσκευή RF-EHWC συνδυάζει τις τεχνικές συλλογής ενέργειας RF και ασύρματης μετάδοσης πληροφοριών. Για να κατανοήσουμε καλύτερα την αρχή λειτουργίας της συσκευής RF-EHWC, παρουσιάζουμε εν συντομία τις αρχιτεκτονικές υλικού των συσκευών RF-EHWC.

Υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες συσκευών, ανάλογα με το αν το κύκλωμα συλλογής ενέργειας και η μονάδα επικοινωνίας μοιράζονται την κεραία, όπου τα συστήματα RF-EHWC μπορούν να αποτελούνται από ξεχωριστά ή να βρίσκονται σε ενιαία συστήματα.

Σε ένα χωριστό σύστημα, ο συλλέκτης ενέργειας έχει μια ξεχωριστή κεραία και επομένως μπορεί να θεωρηθεί ως μπαταρία, η οποία αναπληρώνει ενέργεια αυτόματα και παρέχει ρεύμα στη μονάδα ασύρματης επικοινωνίας.

Σε ένα ενιαίο σύστημα, ο συλλέκτης ενέργειας και η μονάδα επικοινωνίας μοιράζονται την ίδια κεραία, όπως φαίνεται στην Εικόνα 16. Εναλλάσσει μεταξύ των τρόπων συλλογής ενέργειας και επικοινωνίας πληροφοριών με τρόπο κατανομής χρόνου. Η κοινή χρήση μιας κεραίας μεταξύ του συλλέκτη ενέργειας και της μονάδας επικοινωνίας μπορεί να μειώσει το μέγεθος του συστήματος ενός συστεγαζόμενου συστήματος. Ωστόσο, συνήθως απαιτεί η ροή ενέργειας και η ροή πληροφοριών να έχουν την ίδια ζώνη συχνοτήτων.



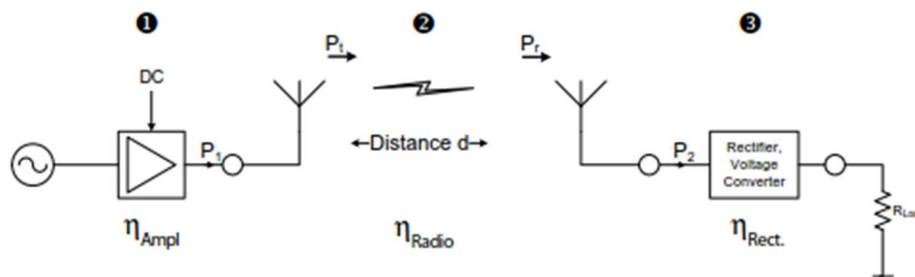
Εικόνα 16: Ένα σύστημα RF-EHWC, όπου οι κόκκινες γραμμές υποδεικνύουν τη ροή ενέργειας του συλλέκτη ενέργειας που φορτίζει τα εξαρτήματα της μονάδας επικοινωνίας. (Luo et al., 2019)



Ο συλλέκτης ενέργειας ενός συστήματος RF-EHWC αποτελείται από τρία βασικά στοιχεία: ένα κύκλωμα αντιστοίχισης αντίστασης, έναν ανορθωτή και έναν πολλαπλασιαστή τάσης, όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα.

#### 4.2. Αποδοτικότητα της Ασύρματης Μετάδοσης Ισχύος

Σε ένα ασύρματο σύστημα μετάδοσης ισχύος, τα τρία μέρη από τα οποία αποτελείται, παραγωγή σήματος ραδιοσυχνοτήτων, διεπαφή αέρα και ανορθωτή τάση (3) είναι οι κύριοι παράγοντες που συμβάλλουν στη συνολική απόδοση του συστήματος ασύρματης μετάδοσης (Εικόνα 17). Η επίδραση της παραγωγής σήματος (1) και της ανόρθωσης/μετατροπής τάσης (3) είναι προφανής και μια πρόκληση για τη σχεδίαση συστήματος και υλικού του συστήματος μετάδοσης.



Εικόνα 17: Παράγοντες απόδοσης για ένα σύστημα μεταφοράς.

Η απόδοση  $\eta_{radio}$  της ασύρματης ραδιοφωνικής μετάδοσης (2) μεταξύ (1) και (3) φυσικά επηρεάζεται από το σχεδιασμό και την αντιστοίχιση της κεραίας εξαρτάται κυρίως από την απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη. Τα θεωρητικά όρια για την απόδοση μετάδοσης ισχύος στον αέρα επηρεάζονται από την απόσταση, τη συχνότητα ή το μήκος κύματος και την αρχή μετάδοσης (σύζευξη κοντινού πεδίου, μετάδοση σε μακρινό πεδίο) (Spies, 2015).

#### 4.3. Εφαρμογές συστημάτων RF-EHWC

Η τεχνολογία συλλογής ενέργειας διεισδύει σε πολλές καινούριες περιοχές, όπως οι επικοινωνίες IoT, BAN και 5G, παρέχοντας ρεαλιστικές λύσεις για μεγάλης κλίμακας, βιώσιμη και χαμηλού κόστους παρακολούθηση περιβάλλοντος και ασύρματο σύστημα

ανταλλαγής πληροφοριών. Σε αυτή την ενότητα, παρουσιάζουμε αρκετές υπάρχουσες και πιθανές εφαρμογές ασύρματων επικοινωνιών συλλογής ενέργειας.

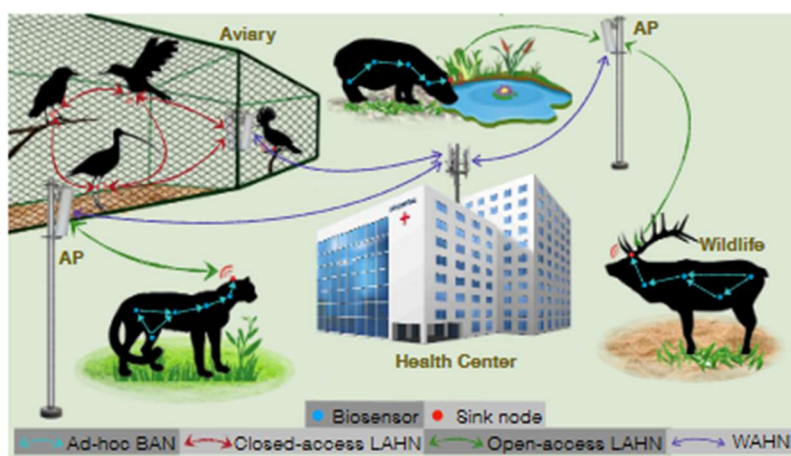
#### 4.3.1. Υγειονομική περίθαλψη των Ζώων

Μελέτες έχουν αποκαλύψει ότι τα ζώα συνήθως κρύβουν την ασθένειά τους και προσποιούνται ότι είναι καλά ακόμα και όταν είναι άρρωστα. Αυτό το χαρακτηριστικό καθιστά δύσκολο για τους κτηνιάτρους να σώσουν τη ζωή ενός ζώου μόλις εμφανιστούν ξεκάθαρα συμπτώματα ασθένειας. Ως εκ τούτου, ο τρόπος παρακολούθησης της κατάστασης της υγείας ενός μεγάλου αριθμού ζώων σε έναν ζωολογικό κήπο ή σε μια φάρμα γίνεται ένα σημαντικό ζήτημα και μία πρόκληση.

Το δίκτυο πολλαπλών επιπέδων RF-EHWC παρέχει μια οικονομικά αποδοτική λύση, όπως φαίνεται στην Εικόνα 18. Στο επίπεδο 1, οι βιοαισθητήρες συλλογής ενέργειας εμφυτεύονται στο σώμα ενός ζώου και σχηματίζουν ένα ad hoc BAN.

Στην επίπεδο 2, κάθε BAN συνδέεται με έναν κόμβο απορρόφησης για να σχηματίσει ένα τοπικό δίκτυο υγειονομικής περίθαλψης (LAHN).

Ο κάθε κόμβος (sink node) είναι ενσωματωμένος σε ένα κολάρο, μια ετικέτα στο αυτί ή μια ζώνη στα πόδια ενός ζώου. Είναι υπεύθυνος για την προώθηση των δεδομένων που συλλέγονται από τους βιοαισθητήρες στο πλησιέστερο AP. Στο επίπεδο 3, δημιουργείται ένα δίκτυο υγειονομικής περίθαλψης ευρείας περιοχής συνδέοντας όλα τα AP σε Ethernet για παρακολούθηση της υγείας σε πραγματικό χρόνο. (Luo et al., 2018)



Εικόνα 18: Μια αρχιτεκτονική 3 επιπέδων ενός δικτύου RF-EHWC για την υγειονομική περίθαλψη των ζώων. (Luo et al., 2018)

### 4.3.2. Φορητά Ηλεκτρονικά (Wearable Devices)

Τα τελευταία χρόνια, οι φορητές συσκευές, όπως το έξυπνο ρολόι και το έξυπνο βραχιόλι, έχουν γίνει πολύ δημοφιλείς για την παρακολούθηση της υγείας και την παρακολούθηση της φυσικής δραστηριότητας. Οι φορητές συσκευές του εμπορίου είναι συχνά σχεδιασμένο ως αυτόνομο οικοσύστημα που ενσωματώνει τη συλλογή πληροφοριών, την επεξεργασία δεδομένων, την ασύρματη επικοινωνία και την εμφάνιση μηνυμάτων σε μια ενιαία συσκευή. Η υψηλή κατανάλωση ενέργειας κάνει τα τρέχοντα φορητά ηλεκτρονικά να εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από μπαταρίες υψηλής χωρητικότητας. Οι Kim et al., 2014 στην προσπάθεια να τροφοδοτήσουν ένα έξυπνο ρολόι μόνο με ενέργεια από ραδιοσυχνότητες ανακάλυψαν ότι η μέγιστη παραγόμενη από αυτή την πηγή ενέργεια δεν είναι αρκετή και για να αποκτηθεί περισσότερη ενέργεια για αξιόπιστη λειτουργία, η φορητή συσκευή θα έπρεπε να χρησιμοποιηθεί ένας υβριδικό συλλέκτη ενέργειας. Οι Zhang et al., 2012 προτείνουν οι συνιστώμενες πηγές ενέργειας να είναι η θερμική ενέργεια και η ενέργεια ραδιοσυχνοτήτων σε μια τέτοια υβριδική λύση ΣΕ. Μια μικρή θερμοηλεκτρική γεννήτρια (TEG) που φοριέται στο σώμα συλλέγει θερμική ενέργεια από το ανθρώπινο σώμα και η ενέργεια που θα προέλθει από την ΣΕ ραδιοσυχνοτήτων θα παράσχει την απαιτούμενη τάση εκκίνησης που απαιτεί ένας πολλαπλασιαστής εξαιρετικά χαμηλής τάσης για την ενίσχυση της χαμηλής τάση εξόδου από < 100 mV έως 1,35 V της TEG.

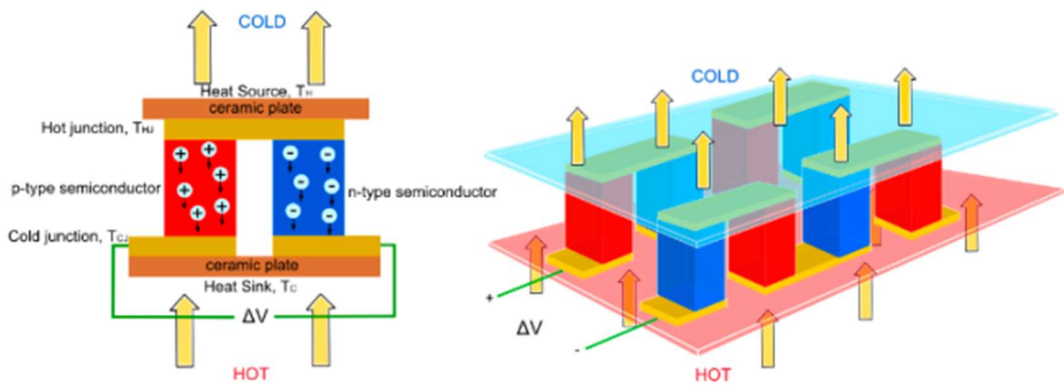
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### 5. Άλλες Τεχνολογίες Συγκομιδής Ενέργειας

#### 5.1. Θερμοηλεκτρική Συγκομιδή Ενέργειας

Οι θερμοηλεκτρικές μηχανές συγκομιδής είναι κατάλληλες για περιβάλλοντα με διαβαθμίσεις θερμοκρασίας. Αυτή η τεχνολογία συγκομιδής εκμεταλλεύεται το φαινόμενο Seebeck για να μετατρέψει τη θερμική ενέργεια σε ηλεκτρική.

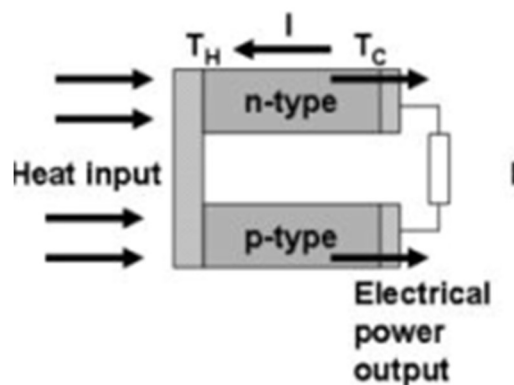
Η διαβάθμιση θερμοκρασίας μεταξύ των άκρων των υλικών παρέχει τη δυνατότητα για αποτελεσματική μετατροπή ενέργειας, ενώ η ροή θερμότητας παρέχει την ισχύ. Οι θερμοηλεκτρικές συσκευές, ακόμη και όταν η ροή θερμότητας είναι μεγάλη, δεν παρέχουν πολλή ενέργεια επειδή οι αποδόσεις των υλικών είναι χαμηλές και το θεώρημα Carnot. Ως εκ τούτου, οι ημιαγωγοί με μεγάλη πρόσμιξη αποτελούν τα καλύτερα θερμοηλεκτρικά υλικά. Έτσι, οι θερμοηλεκτρικές μηχανές συγκομιδής είναι συσκευές στερεάς κατάστασης χωρίς κινούμενα μέρη. Αυτός ο τύπος συσκευής είναι κατάλληλος για εφαρμογή συλλογής ενέργειας επειδή είναι αθόρυβος, αξιόπιστος, επεκτάσιμος και εγκαθίσταται εύκολα. Τα θερμοηλεκτρικά φαινόμενα εμφανίζονται επειδή οι φορείς φορτίου σε μέταλλα και ημιαγωγούς θα μπορούσαν να αλλάξουν τα ενεργειακά τους επίπεδα όταν εφαρμόζεται ενέργεια, παράγοντας έτσι μεταφορά θερμότητας ή ηλεκτρική ενέργεια με τη μορφή τάσης ή ρεύματος. Όταν ένα θερμοηλεκτρικό υλικό τοποθετείται κάτω από μια διαβάθμιση θερμοκρασίας, υπάρχει διάχυση φορέων φορτίου από το θερμό άκρο στο ψυχρό. Η συσσώρευση φορέων φορτίου συνεπάγεται ότι υπάρχει ένα καθαρό φορτίο (αρνητικό για τα ηλεκτρόνια,  $e^-$  και θετικό για οπές,  $h^+$ ) στο ψυχρό άκρο, το οποίο παράγει μια τάση μεταξύ των δύο ακροδεκτών. Η ηλεκτροστατική απώθηση λόγω της συσσώρευσης φορτίου και του χημικού δυναμικού για διάχυση φτάνουν σε μια ισορροπία. Αυτή η ιδιότητα είναι γνωστή ως φαινόμενο Seebeck και αποτελεί τη βάση της μέτρησης της θερμοκρασίας με θερμοστοιχεία και την παραγωγή θερμοηλεκτρικής ενέργειας. Η Εικόνα 19 δείχνει τον τρόπο λειτουργίας μιας θερμοηλεκτρικής συγκομιδής (Pozo et al., 2019).



Εικόνα 19: Μηχανή Συγκομιδής Θερμοηλεκτρικής Ενέργειας

### 5.1.1. Θερμοηλεκτρική Γεννήτρια (TEG)

Ένας θερμοηλεκτρικός μετατροπέας (TEG) είναι μια θερμική μηχανή και όπως όλες οι θερμικές μηχανές, υπακούει στους νόμους της θερμοδυναμικής. Εάν θεωρήσουμε πρώτα τον μετατροπέα που λειτουργεί ως ιδανική γεννήτρια στην οποία δεν υπάρχουν απώλειες θερμότητας, η απόδοση ορίζεται ως ο λόγος της ηλεκτρικής ισχύος που παρέχεται στο φορτίο προς τη θερμότητα που απορροφάται στη θερμή διασταύρωση. Οι εκφράσεις για τις σημαντικές παραμέτρους στη θερμοηλεκτρική παραγωγή μπορούν εύκολα να προκύψουν λαμβάνοντας υπόψη την απλούστερη γεννήτρια που αποτελείται από ένα θερμοζεύγος με θερμοστοιχεία κατασκευασμένα από ημιαγωγούς τύπου n και p όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Spies, 2015).



Εικόνα 20: Θερμοηλεκτρική Γεννήτρια (TEG)

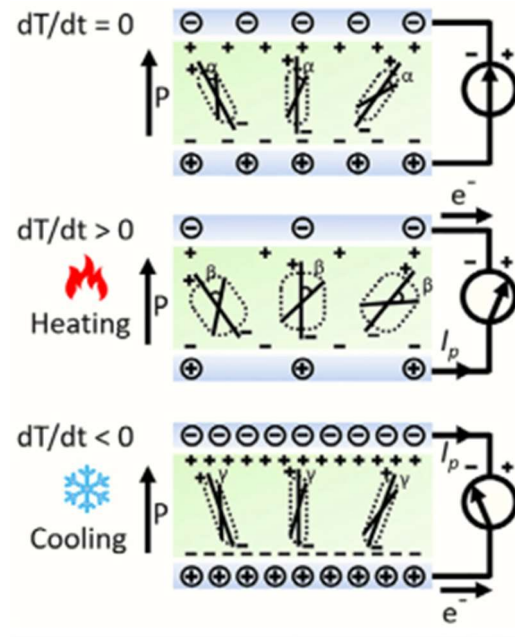
Το θερμοστοιχείο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος λόγω της τάσης Seebeck που προκαλείται από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ πηγής θερμότητας και αποστράγγιση. Η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς μπορεί να χρησιμοποιηθεί πάνω σε φορτίο.

### **5.1.2. Πυροηλεκτρική Γεννήτρια PEG**

Η πυροηλεκτρική γεννήτρια (PEG) είναι ένας άλλος τύπος συλλέκτη θερμικής ενέργειας, ο οποίος βασίζεται στο πυροηλεκτρικό φαινόμενο. Για έναν κρύσταλλο με ιδιότητα άμεσης πόλωσης, όταν ο κρύσταλλος θερμαίνεται ή ψύχεται, η ένταση της πόλωσης αλλάζει λόγω της αλλαγής της θερμοκρασίας, η οποία οδηγεί στη δημιουργία φορτίων επιφανειακής πόλωσης σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση του κρυστάλλου (Bowen et al., 2014). Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται πυροηλεκτρικό φαινόμενο. Οι κρύσταλλοι που μπορούν να παράγουν πυροηλεκτρικά αποτελέσματα ονομάζονται πυροηλεκτρικοί.

Το αποτέλεσμα περιγράφει τα φορτία που δημιουργούνται απουσία καταπόνησης, η οποία συνήθως υπάρχει σε σιδηροηλεκτρικά υλικά όπως ο κεραμικός ζirkonioτιτανιούχος μόλυβδος PZT (ceramic lead zirconate titanate) και το οξείδιο του τιτανιούχου βαρίου BTO (Barium Titanate ceramic). Ο αντίστοιχος μηχανισμός εργασίας φαίνεται στην Εικόνα 21, ο οποίος βασίζεται στην τυχαία ταλάντωση του θερμικά επαγόμενου ηλεκτρικού διπόλου κοντά στους άξονες ευθυγράμμισης. Η γωνία ταλάντωσης θα αυξάνεται όσο ανεβαίνει η θερμοκρασία. Σε θερμοκρασία δωματίου (RT), τα ηλεκτρικά δίπολα θα ταλαντωθούν τυχαία στους αντίστοιχους άξονες ευθυγράμμισης σε κάποιο βαθμό. Σε σταθερή θερμοκρασία, η συνολική μέση ένταση της αυθόρμητης πόλωσης του ηλεκτρικού διπόλου είναι σταθερή και δεν υπάρχει ροή ηλεκτρονίων. Όταν η θερμοκρασία αυξάνεται, τα ηλεκτρικά δίπολα ταλαντώνονται πιο βίαια γύρω από τους άξονες και η συνολική μέση πόλωση μειώνεται με την αύξηση της γωνίας ταλάντωσης. Ως αποτέλεσμα, η ποσότητα του επαγόμενου φορτίου στο ηλεκτρόδιο μειώνεται, οδηγώντας στη ροή των ηλεκτρονίων. Όταν η θερμοκρασία μειώνεται, το ηλεκτρικό δίπολο ταλαντώνεται σε μικρότερο εύρος γωνίας λόγω της χαμηλότερης ενέργειας θερμικής ενεργοποίησης, οδηγώντας στην αυξανόμενη πόλωση. Ως αποτέλεσμα, η ποσότητα του

επαγόμενου φορτίου στο αντίστοιχο ηλεκτρόδιο αυξάνεται και αναγκάζει τα ηλεκτρόνια να ρέουν προς την αντίθετη κατεύθυνση (Bowen et al., 2014).

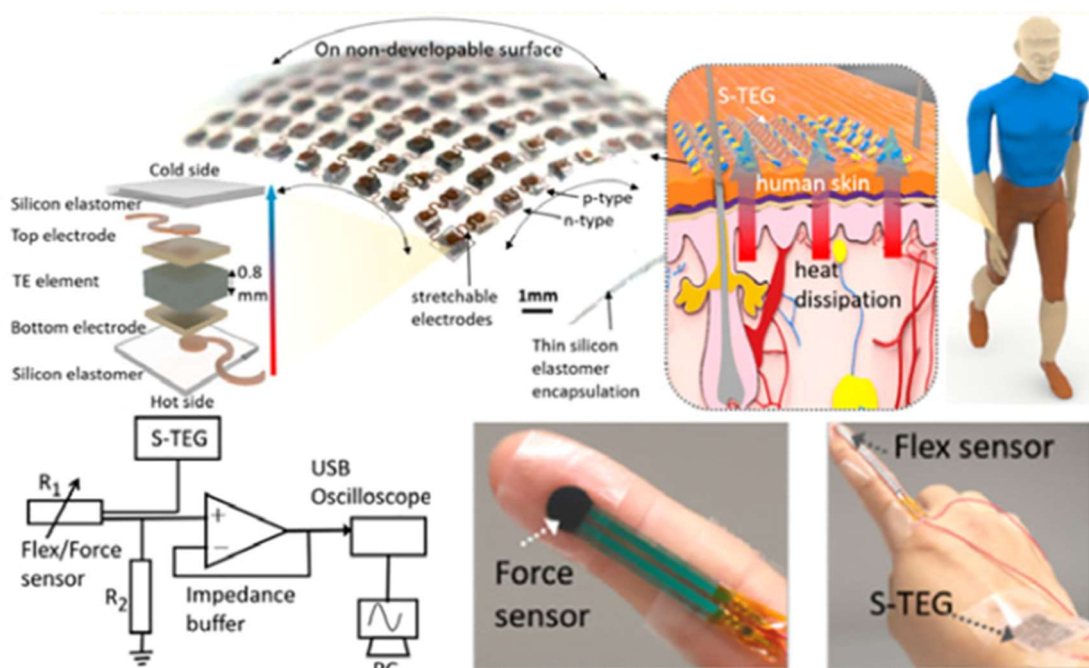


Εικόνα 21: Αρχή Λειτουργίας PEG

## 5.2. Εφαρμογές της Θερμοηλεκτρικής Συγκομιδής Ενέργειας

Μετά τη συλλογή της θερμικής ενέργειας του ανθρώπινου σώματος και τη μετατροπή της σε ηλεκτρική ενέργεια, οι συσκευές συλλογής θερμικής ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως τροφοδοτικό για ορισμένα ηλεκτρονικά χαμηλής κατανάλωσης. Ταυτόχρονα, αυτές οι συσκευές συλλογής θερμικής ενέργειας μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως αυτοτροφοδοτούμενοι αισθητήρες θερμοκρασίας λόγω της συγκεκριμένης σχέσης μεταξύ της εξόδου και της διαφοράς θερμοκρασίας.

Οι Yang et al. παρουσίασαν ένα ελαστικό και προσαρμοζόμενο στο σχήμα TEG (S-TEG) για τη συλλογή θερμότητας του ανθρώπινου σώματος, το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί σε πολύπλοκες και δυναμικές επιφάνειες πηγών θερμότητας (Yang et al., 2020) (Εικόνα 22). Τα θερμοηλεκτρικά στοιχεία τύπου p ( $Sb_2Te_3$ ) και τύπου n ( $Bi_2Te_3$ ) κατασκευάζονται σε σχήμα κύβου μέσω θερμής πίεσης και συνδέονται με μια κυματιστή οφιοειδή δομή για να σχηματίσουν θερμοζεύγη. Το S-TEG αποτελείται από συστοιχία  $10 \times 10$  θερμοζευγών που μπορεί να παράγει ισχύ εξόδου  $0,15 \text{ mW/cm}^2$  όταν η διαφορά θερμοκρασίας είναι  $19 \text{ K}$ . Το S-TEG που είναι συνδεδεμένο στον καρπό μπορεί να συλλέξει τη θερμότητα του σώματος και να παρέχει τάση για κίνηση έναν αισθητήρα δύναμης για την ανίχνευση κίνησης των δακτύλων.

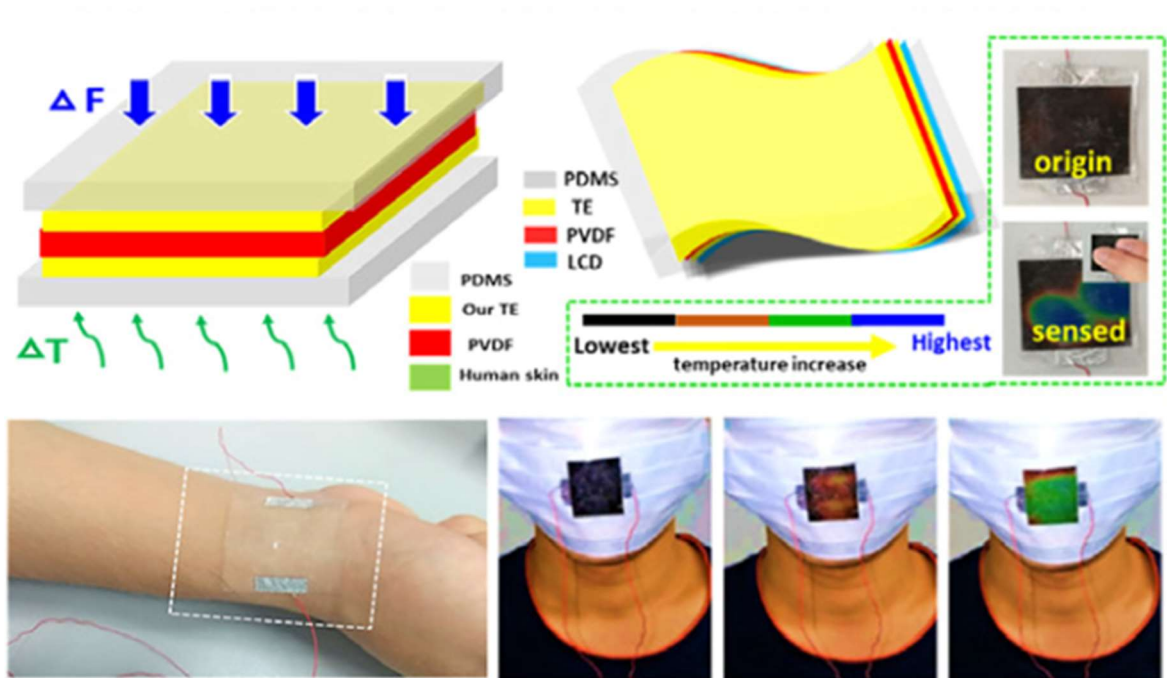


Εικόνα 22: Ένα ελαστικό και προσαρμοζόμενο στο σχήμα TEG ενσωματωμένο με αισθητήρα δύναμης.

Οι Sun et al. παρουσίασαν μια εύκαμπτη διαφανή υβριδική πιεζο-πυροηλεκτρική γεννήτρια για τη συλλογή ενέργειας και τη παρακολούθηση των λειτουργιών του ανθρώπινου σώματος (Sun et al., 2018). Ένα δίκτυο νανοσυρμάτων αργύρου που μοιάζει με οπή φύλλων παρασκευάζεται ως διαφανή ηλεκτρόδια υψηλής απόδοσης (TEs) για την κατασκευή της υβριδικής γεννήτριας. Παρουσιάζεται επίσης ένα οπτικό θερμόμετρο με την ενσωμάτωση της διαφανούς υβριδικής γεννήτριας με μια θερμοχρωμική μεμβράνη υγρών κρυστάλλων. Όταν ο χρήστης αναπνέει αδύναμα και κανονικά σε θερμοκρασία



περιβάλλοντος 15 °C, η συσκευή μπορεί να παράγει τάση εξόδου 25 V και 35 V αντίστοιχα, ενώ στο μεταξύ γίνεται κόκκινο και πράσινο ανάλογα.



Εικόνα 23: Υβριδική πιεζο-πυροηλεκτρική γεννήτρια για τη συλλογή ενέργειας και τη παρακολούθηση των λειτουργιών του ανθρώπινου σώματος.

### 5.3. Φωτοβολταϊκές Συσκευές

Οι φωτοβολταϊκές συσκευές μετατρέπουν το φως σε ηλεκτρική ενέργεια. Υπάρχουν τρεις θεμελιώδεις διαδικασίες που απαιτούνται για την επίτευξη αυτού του στόχου. Το πρώτο βήμα είναι η απορρόφηση ενός φωτονίου με το οποίο ένα ηλεκτρόνιο διεγείρεται από μια χαμηλότερη κατάσταση σε μια υψηλότερη (λιγότερο στενά δεσμευμένη) κατάσταση. Η εναπομείνασα μη κατειλημμένη κατώτερη κατάσταση από την οποία διεγέρθηκε το ηλεκτρόνιο ονομάζεται οπή. Στη συνέχεια, το ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής πρέπει να διαχωριστεί χωρικά και τελικά το ηλεκτρόνιο και η οπή πρέπει να μεταφερθούν και να συλληθούν στα αντίστοιχα ηλεκτρόδια τους. Στο πρώτο βήμα, δηλαδή στη δημιουργία ενός ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής μέσω της απορρόφησης ενός φωτονίου, η ενέργεια του φωτονίου μετατρέπεται σε χημική ενέργεια καθώς ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής είναι αφόρτιστο. Στη συνέχεια, η χημική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια με διαχωρισμό των φορέων φορτίου (Spies, 2015).

Οι φωτοβολταϊκές συσκευές κατασκευάζονται γενικά από υλικά που εμφανίζουν καταστάσεις για ηλεκτρόνια μόνο σε ορισμένα ενεργειακά επίπεδα. Σε ένα στερεό, αυτά τα επίπεδα διευρύνονται και σχηματίζουν ζώνες με κενά μεταξύ τους. Σε θερμοκρασία δωματίου, το υψηλότερο και σχεδόν εξ ολοκλήρου κατειλημμένο εύρος ενέργειας ονομάζεται ζώνη σθένους. Το επόμενο υψηλότερο, σε μεγάλο βαθμό μη κατειλημμένο εύρος ενέργειας ονομάζεται ζώνη αγωγιμότητας. Ανόργανα υλικά, αυτές οι καταστάσεις αναφέρονται ως HOMO (highest unoccupied molecular orbital) και LUMO (lowest unoccupied molecular orbital). Οι δύο ενεργειακές περιοχές χωρίζονται από το ενεργειακό κενό.

Συμπερασματικά η φωτοβολταϊκή ενέργεια είναι μια ισχυρή, αλλά αραιή και πολύ κυμαινόμενη (τάξεις μεγέθους) πηγή ενέργειας. Ακόμη μεγαλύτερη πολυπλοκότητα προστίθεται από το γεγονός ότι και η φασματική κατανομή αλλάζει με διαφορετικές πηγές φωτός και καιρικές συνθήκες, γεγονός που επηρεάζει ακόμη και την επιλογή του υλικού ημιαγωγού. Κάθε ηλιακό στοιχείο παράγει ηλεκτρική ενέργεια μόνο εάν εκτεθεί στο φως. Ως εκ τούτου, η τοποθέτηση αυτής της συγκομιδής ενέργειας είναι πολύ κρίσιμη για την πληρότητα χρήσης ενός τέτοιου συστήματος. Η άμεση ενσωμάτωση στο περίβλημα μιας ηλεκτρονικής συσκευής όπως ένα κινητό τηλέφωνο ή ένα mp3 player δεν είναι συχνά η καλύτερη επιλογή, καθώς τις περισσότερες φορές βρίσκονται σε τσέπες ή τσάντες και έχουν μικρή επιφάνεια. Για να υπάρχει ένα λειτουργικό σύστημα με προστιθέμενη αξία για τον πελάτη, πρέπει να απαντηθούν πολλές συγκεκριμένες ερωτήσεις και απαιτείται προσεκτική διαστασιολόγηση των εξαρτημάτων για να αποφευχθεί η απογοήτευση. Αλλά η αντιμετώπιση αυτής της πρόκλησης και η βελτιστοποίηση του συστήματος στις ανάγκες και τις συνήθειες των πελατών γνωρίζοντας τις σχετικές συνθήκες φωτισμού μπορεί να κάνει μια σημαντική διαφορά και να οδηγήσει σε μια άφθονη, αξιόπιστη και ισχυρή πηγή ενέργειας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### 6. Επιλεγμένες Εφαρμογές Συστημάτων Συγκομιδής Ενέργειας

Καθώς το πλαίσιο εφαρμογής συστημάτων ΣΕ είναι τεράστιο, θα ήταν χρήσιμο σε αυτό εδώ το κεφάλαιο να παρουσιάσουμε κάποια από αυτά που πιστεύουμε ότι είναι πιο σημαντικά και άπτονται στην καθημερινότητα μας. Δεν θα αναφέρουμε συστήματα μεγάλης κλίμακας τα οποία έχουν σίγουρα μελετηθεί πολύ περισσότερα, αλλά συστήματα που βρίσκονται στο επίκεντρο της τεχνολογικής εξέλιξης και πιθανότατα αφορούν τον μικρόκοσμο που μας περιβάλλει.

#### 6.1. Συγκομιδή Ενέργειας από το Ανθρώπινο Σώμα για Έξυπνο βιοηλεκτρονικό σύστημα

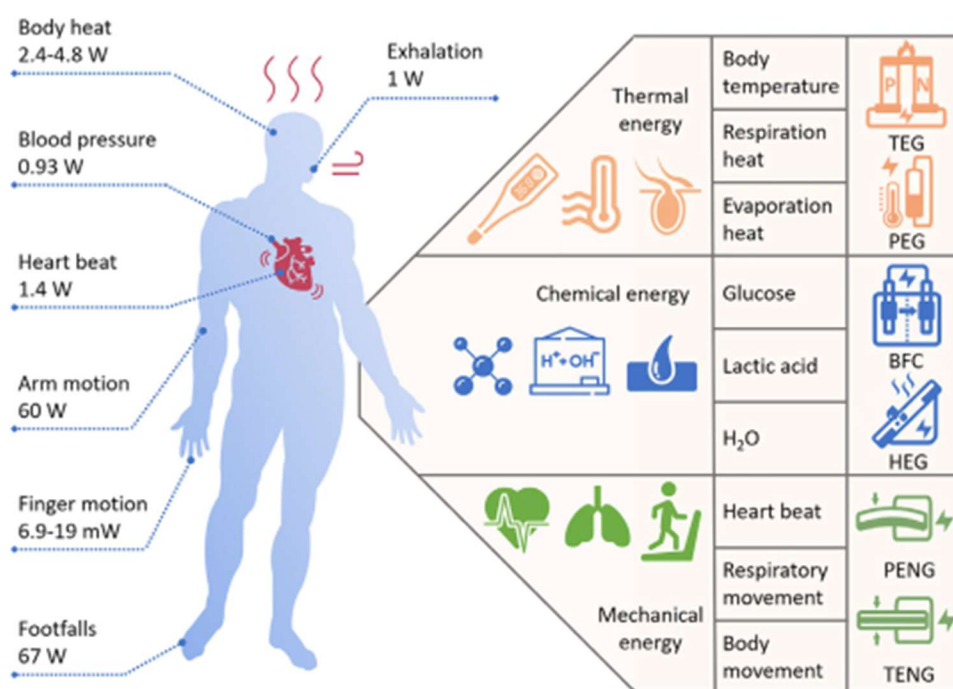
Από κάθε χτύπο της καρδιάς μέχρι κάθε βήμα, τα ανθρώπινα όντα διαχέουν ενέργεια όλη την ώρα. Οι ερευνητές προσπαθούν να συλλέξουν ενέργεια από το ανθρώπινο σώμα και να τη μετατρέψουν σε ηλεκτρική ενέργεια, η οποία μπορεί να παρέχεται σε ηλεκτρονικές ιατρικές συσκευές που σχετίζονται στενά με την ανθρώπινη υγεία. Μια τέτοια μορφή ανακύκλωσης ενέργειας είναι επί του παρόντος ένα από τα σημαντικότερα πεδία έρευνας στους τομείς της συλλογής ενέργειας και της βιοηλεκτρονικής.

Οι τρεις πρωτογενείς πηγές ενέργειας που περιέχονται στο ανθρώπινο σώμα, και θα μπορούσαμε να εκμεταλλευτούμε σύμφωνα με αυτά που αναφέραμε σε προηγούμενα κεφάλαια, συμπεριλαμβάνουν την θερμική, την χημική και της μηχανική ενέργεια.

Το ανθρώπινο σώμα είναι ένα φυσικό εργοστάσιο μετατροπής ενέργειας. Μέσω της πρόσληψης τροφής, οι υδατάνθρακες, τα λίπη, οι πρωτεΐνες και άλλα θρεπτικά συστατικά της τροφής θα απορροφηθούν. Κάποια από τα θρεπτικά συστατικά θα μετατραπούν σε γλυκογόνο, λιπίδια, αμινοξέα και άλλες ενεργειακές ουσίες που αποθηκεύονται στο ανθρώπινο σώμα, ενώ το άλλο μέρος θα μετατραπεί σε τριφωσφορική αδενοσίνη (ATP), την ελάχιστη μονάδα ενεργειακών ουσιών που μπορεί άμεσα το ανθρώπινο σώμα. χρήση μέσω διαφόρων μεταβολικών οδών. Η συνολική ποσότητα ATP στο ανθρώπινο σώμα είναι περίπου 0,2 mol, που ισοδυναμεί με την ενέργεια μιας μπαταρίας AA. Ένας ενήλικας συνήθως καταναλώνει ενέργεια ATP (~100–150 mol) που ισοδυναμεί με το σωματικό του

βάρος σε μία ημέρα για να διατηρήσει τις φυσιολογικές λειτουργίες και τις κύριες δραστηριότητες της ζωής (Rebel et al., 2015).

Αυτές οι ενέργειες θα καταναλωθούν και θα απελευθερωθούν από το ανθρώπινο σώμα μέσω διαφορετικών μορφών ροής ενέργειας. Συγκεκριμένα, συνοψίζουμε κυρίως τρεις μορφές ροής ενέργειας στο ανθρώπινο σώμα ως θερμική ενέργεια, χημική ενέργεια και μηχανική ενέργεια (Εικόνα 24). Από κάθε αναπνοή και χτύπο της καρδιάς σε κάθε κίνηση, η ενέργεια θα απελευθερώνεται όλη την ώρα. Αυτές οι ροές ενέργειας αποτελούν την πρωταρχική βάση του ανθρώπινου σώματος ως δυνητική πηγή ενέργειας.



Εικόνα 24: Πηγές και διανομή ενέργειας στο ανθρώπινο σώμα και εφαρμοστέες τεχνολογίες συλλογής ενέργειας.

### 6.1.1. Συγκομιδή θερμικής ενέργειας του ανθρώπινου σώματος

Προς το παρόν, η συλλογή θερμικής ενέργειας από το ανθρώπινο σώμα εξαρτάται κυρίως από το θερμοηλεκτρικό και το πυροηλεκτρικό αποτέλεσμα, που αντιστοιχούν αντίστοιχα σε δύο τύπους συλλέκτη ενέργειας, όπως η θερμοηλεκτρική γεννήτρια (TEG) και η πυροηλεκτρική γεννήτρια (PEG) τους οποίους και αναλύσαμε στο Κεφάλαιο 5.1. Όπως είδαμε, αν και οι δύο τύποι συλλέκτη θερμικής ενέργειας και οι δύο μπορούν να συλλέξουν τη θερμότητα από το ανθρώπινο σώμα και να τη μετατρέψουν σε ηλεκτρική ενέργεια, λειτουργούν με διαφορετικούς τρόπους. Τα TEG εξαρτώνται από τη διαφορά

της χωρικής θερμοκρασίας για τη μετατροπή ενέργειας, ενώ τα PEG εξαρτώνται από τη χρονική διαφορά θερμοκρασίας. Επομένως, αυτοί οι δύο τύποι συγκομιδών θερμικής ενέργειας έχουν τις ισχύουσες καταστάσεις και τις συγκεκριμένες μορφές τους όταν συλλέγουν θερμική ενέργεια από το ανθρώπινο σώμα.

Το ανθρώπινο σώμα αυτορρυθμίζει τη θερμοκρασία του σταθερά περίπου στους 37°C. Η αξιοποίηση αυτού σε σχέση με τη θερμοκρασία του αέρα περιβάλλοντος προσφέρει μια πηγή θερμικής συλλογής για κόμβους αισθητήρων που εφαρμόζονται στο ανθρώπινο σώμα. Ορισμένες εταιρείες που παράγουν προϊόντα που φοριούνται στο σώμα, για παράδειγμα ρολόγια, έχουν ήδη αναπτύξει συσκευές που αξιοποιούν τη μικρή διαφορά μεταξύ της θερμότητας του σώματος και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, παράγοντας ισχύ της τάξης των μικροβάτ αποδεικνύοντας ότι παρόμοιες τεχνικές μπορούν να εφαρμοστούν σε αισθητήρες.

Οι TEG είναι συνδεδεμένες σε σειρά θερμικά με το ανθρώπινο σώμα και το περιβάλλον. Λόγω της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας του ανθρώπινου δέρματος, δημιουργείται μεγάλη θερμική αντίσταση. Η θερμική αντίσταση του περιβάλλοντος είναι επίσης μεγάλη λόγω της κανονικά ανεπαρκούς απαγωγής θερμότητας υπό περιορισμένη διαφορά θερμοκρασίας. Ενδεικτικά ο πίνακας 5, (Spies, 2015) συνοψίζει ορισμένες θερμικές αντιστάσεις του σώματος και πιθανές ροές θερμότητας. Οι τιμές για τη ροή της θερμότητας αντιπροσωπεύουν μέγιστες τιμές που περιορίζονται από την αίσθηση του κρύου.

Location	Indoors		Outdoors (-4 to +2°C)	
	$K_{\text{body}}$ (cm <sup>2</sup> K/W)	$q$ (mW/cm <sup>2</sup> )	$K_{\text{body}}$ (cm <sup>2</sup> K/W)	$q$ (mW/cm <sup>2</sup> )
Forehead	200–400	10–20	—	<45
Leg	400–900	4–15	300–500	15–60
Wrist (watch location)	440	15	—	65
Wrist (radial artery)	160	20	—	120

Πίνακας 5: Θερμική αντίσταση του ανθρώπινου σώματος και πιθανή ροή θερμότητας

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται με την πτώση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος αλλά πέφτει στο μηδέν εάν η θερμοκρασία περιβάλλοντος πλησιάσει τους

37°C. Έτσι, έχουν προταθεί υβριδικά συστήματα που αποτελούνται από ένα TEG και ένα μικρό φωτοβολταϊκό σύστημα. Η συλλογή θερμικής ενέργειας δεν εφαρμόζεται μόνο στην εξωτερική επιφάνεια του ανθρώπινου σώματος, αλλά μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί εσωτερικά για την τροφοδοσία εμφυτεύσιμων ιατρικών συσκευών και αισθητήρων. Σε αυτήν την περίπτωση, οι διαφορές θερμοκρασίας είναι πάρα πολύ χαμηλές, αλλά καθώς το TEG βρίσκεται σε άμεση επαφή με τα σωματικά υγρά, ο συντελεστής θερμικής μεταφοράς είναι υψηλότερος σε σύγκριση με μια εξωτερική ψύκτρα αέρα. Αυτές οι ιδέες μπορούν να επεκταθούν σε περιπτώσεις που αφορούν άλλα θερμόαιμα ζώα.

### **6.1.2. Συγκομιδή χημικής ενέργειας του ανθρώπινου σώματος**

Η συλλογή και η μετατροπή της χημικής ενέργειας στο ανθρώπινο σώμα συνήθως συνοδεύεται από χημικές αντιδράσεις καθώς και από μεταφορά ηλεκτρονίων σε χημικές ουσίες. Υπάρχουν κυρίως δύο είδη τεχνολογίας συλλογής ανθρώπινης χημικής ενέργειας, οι κυψέλες βιοκαυσίμου (BFC) και η γεννήτρια υδροβολταϊκών φαινομένων (HEG). Η πρώτη τεχνολογία χρησιμοποιεί υγρά του ανθρώπινου σώματος όπως γλυκόζη και γαλακτικό ως ενεργειακές ουσίες για τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ η δεύτερη χρησιμοποιεί την αλληλεπίδραση μεταξύ νανοϋλικών και μορίων νερού για να μετατρέψει την ηλεκτρική ενέργεια μέσω της ενέργειας εξάτμισης και των αλλαγών υγρασίας.

Η κυψέλη βιοκαυσίμου είναι ένα είδος συσκευής συλλογής ενέργειας που χρησιμοποιεί την αντίδραση οξειδοαναγωγής ενεργειακών ουσιών σε ζωντανούς οργανισμούς για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι κυψέλες βιοκαυσίμου μπορούν να χωριστούν σε ενζυματικές κυψέλες καυσίμου (EFCs) και μικροβιακές κυψέλες καυσίμου (MFCs) ανάλογα με τους τύπους καταλύτη. (Zou et al., 2021)

Το υδροβολταϊκό φαινόμενο είναι μια πρόσφατα αναδυόμενη επιστημονική έννοια στον ενεργειακό τομέα. Είναι ένας γενικός όρος για το φαινόμενο ότι η ενέργεια του νερού μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια από την αλληλεπίδραση μεταξύ νανοϋλικών και μορίων νερού. Όταν υλικά χαμηλών διαστάσεων όπως οι νανοσωλήνες άνθρακα και το γραφένιο αλληλεπιδρούν με τα μόρια του νερού με διαφορετικούς τρόπους, μια σειρά από διάφορα φαινόμενα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας εμφανίζονται στη διεπαφή

στερεού-υγρού. Μεταξύ των επιδράσεων, τα ηλεκτροκινητικά φαινόμενα που έχουν προταθεί σε πρώιμο στάδιο βασίζονται στην εξωτερική είσοδο μηχανικής εργασίας, η οποία περιλαμβάνει το δυναμικό ροής, το δυναμικό έλξης, το δυναμικό κυματισμού και τα δυναμικά που προκαλούνται από τη ροή. Πρόσφατα, έχουν παρουσιαστεί φαινόμενα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που προκαλούνται από την εξάτμιση του νερού και την υγρασία. Δεδομένου ότι αυτά τα δύο φαινόμενα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να βασίζονται πλήρως στη φυσική εξάτμιση του νερού και την υγρασία του περιβάλλοντος για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς την ανάγκη πρόσθετης εισροής μηχανικής εργασίας, έχουν γίνει το επίκεντρο της τρέχουσας έρευνας για την παραγωγή υδροβολταϊκής ενέργειας. Η παραγωγή ενέργειας που προκαλείται από την εξάτμιση του νερού μπορεί να αποδοθεί στην αλληλεπίδραση μεταξύ μορίων νερού και νανοϋλικών. Στη διαδικασία εξάτμισης, η ροή των μορίων του νερού στο διάκενο των νανοϋλικών προκαλεί τη δημιουργία τάσης και ρεύματος, το οποίο είναι παρόμοιο με το παραδοσιακό δυναμικό ροής (Zou et al., 2021).

Οι Jeerapan et al. ανέφερε έναν φορητό αυτοτροφοδοτούμενο αισθητήρα για την ανίχνευση της περιεκτικότητας σε γλυκόζη ή γαλακτικό στον ανθρώπινο ιδρώτα με βάση ένα εκτάσιμο στοιχείο βιοκαυσίμου με βάση το ύφασμα χρησιμοποιώντας ελαστικό, κατασκευασμένο αγωγίμο μελάνι και τεχνολογία μεταξοτυπίας, το προκαθορισμένο ηλεκτρόδιο μπορεί να εκτυπωθεί σε ένα εξαιρετικά όγκιμο ύφασμα. Σε αυτή τη βάση, ένα κύτταρο βιοκαυσίμου χωρίς ένζυμα και μεμβράνη μπορεί να κατασκευαστεί σε μια κάλτσα (Εικόνα 25). Ο αυτοτροφοδοτούμενος αισθητήρας που είναι ενσωματωμένος στην κάλτσα μπορεί να ανιχνεύσει τη συγκέντρωση μεταβολιτών στον ιδρώτα με καλή ευαισθησία και σταθερότητα (Jeerapan et al., 2016).



Εικόνα 25: Ο αυτοτροφοδοτούμενος αισθητήρας ιδρώτα ενσωματωμένος σε κάλτσα.

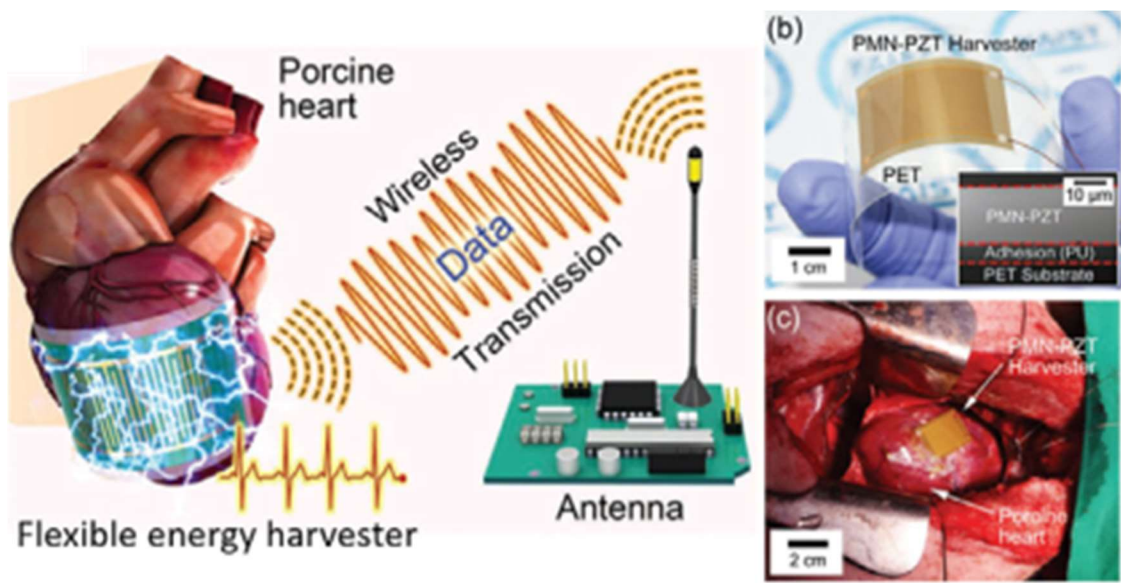
### 6.1.3. Μηχανική συλλογή ενέργειας του ανθρώπινου σώματος

Στο Κεφάλαιο 3 κάναμε μια εκτενή παρουσίαση στις συγκομιδή κινητικής ενέργειας και στις τεχνολογίες της ενώ εδώ θα συναντήσουμε την γεννήτρια PENG με την οποία μπορούμε να συλλέξουμε ενέργεια από το ανθρώπινο σώμα.

Η πιεζοηλεκτρική νανογεννήτρια (PENG) λειτουργεί με τις ίδιες αρχές του πιεζοηλεκτρισμού που είδαμε στο Κεφάλαιο 3.1. Αυτό που αλλάζει, όποιος κάποιος αντιλαμβάνεται από το όνομα, είναι το μέγεθος.

Οι Kim et al. παρουσίασε μια βιοσυμβατή εύκαμπτη συσκευή συγκομιδής ενέργειας βασισμένη σε μονό κρυσταλλικό υλικό PMN-PZT (D. H. Kim et al., 2017) (Εικόνα 26) και επαλήθευσε τη βιομηχανική συλλογή ενέργειας του πιεζοηλεκτρικού συλλέκτη ενέργειας υψηλής απόδοσης σε ένα μοντέλο μεγάλου ζώου (ένας χοίρος). Η εμφυτευμένη συσκευή μπορεί να δημιουργήσει τάση ανοιχτού κυκλώματος 17,8 V και ρεύμα βραχυκυκλώματος 1,75  $\mu\text{A}$  από τη συστολή και τη χαλάρωση της χοιρινής καρδιάς. Επιπλέον, μια ασύρματη μετάδοση σήματος πραγματοποιείται με επιτυχία από την ενέργεια που συλλέγεται in vivo.





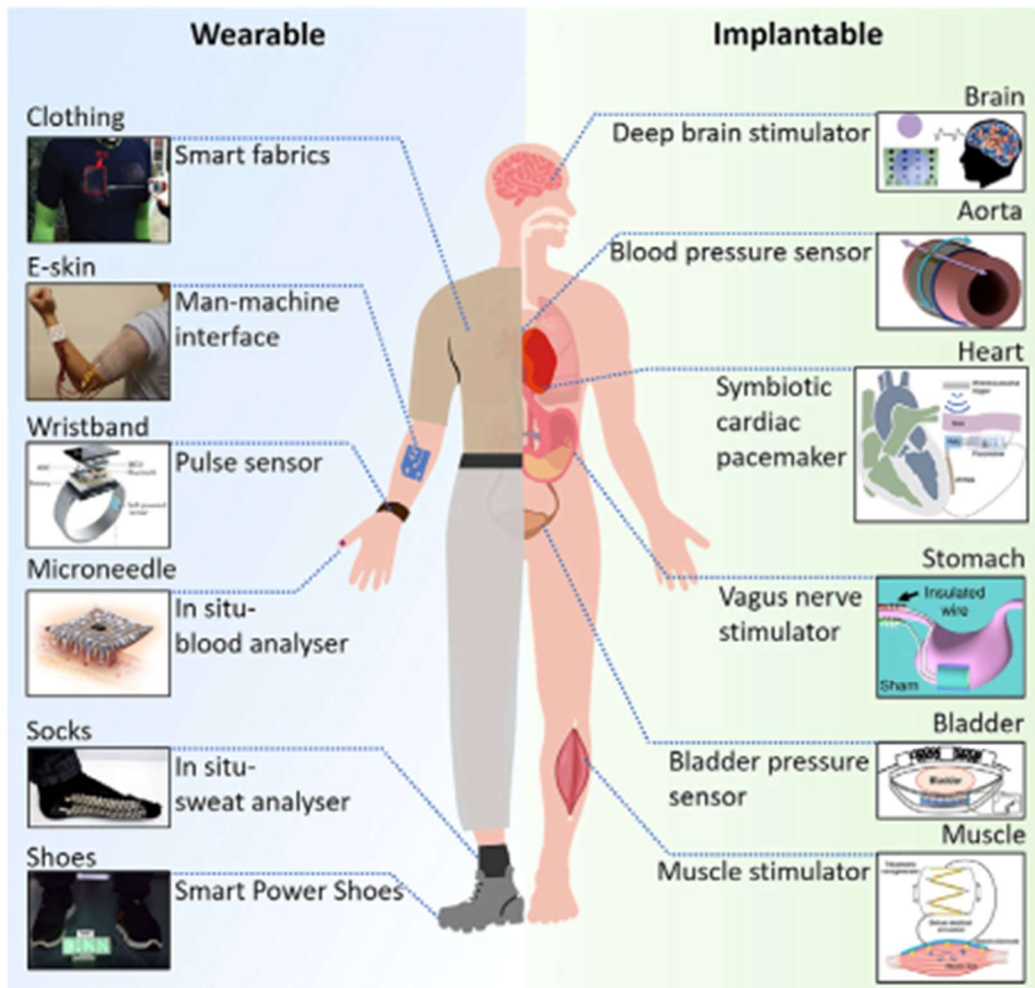
Εικόνα 26: Συλλογή εμβιο-μηχανικής ενέργειας από την καρδιά ενός χοίρου από μια βιοσυμβατή πιεζοηλεκτρική μηχανή συγκομιδής ενέργειας.

Οι Cheng et al. ανέφερε ένα αυτοτροφοδοτούμενο σύστημα παρακολούθησης της αρτηριακής πίεσης, το οποίο κατασκευάζεται κυρίως από μια πιεζοηλεκτρική λεπτή μεμβράνη πολωμένου PVDF (200  $\mu\text{m}$ ). Μετά από προσομοίωση και δοκιμές *in vitro*, η έξοδος της συσκευής συσχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με τις αλλαγές πίεσης του αίματος. Η πιεζοηλεκτρική λεπτή μεμβράνη με εύκαμπτη ενθυλάκωση εμφυτεύτηκε σε χοιρίδιο και τυλίχτηκε γύρω από την ανιούσα αορτή, επιτυγχάνοντας παρακολούθηση της αρτηριακής πίεσης σε πραγματικό χρόνο *in vivo*. Το σύστημα παρουσιάζει καλή γραμμικότητα ( $R^2 = 0,971$ ) και ευαισθησία 14,32 mV/mmHg, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της κατάστασης της φυσιολογικής πίεσης και της υπέρτασης (Cheng et al., 2016).

#### 6.1.4. Στρατηγικές για την αλληλεπίδραση μεταξύ των συσκευών συλλογής ενέργειας και του ανθρώπινου σώματος

Με την πρόοδο της σύγχρονης ιατρικής και της ηλεκτρονικής βιομηχανίας, έχουν αναπτυχθεί διάφορες εμφυτεύσιμες ηλεκτρονικές ιατρικές συσκευές για τη θεραπεία σχετικών ασθενειών και την παράταση της ζωής των ανθρώπων. Επομένως, εκτός από τις εφαρμογές φορητών συσκευών, η σχετική έρευνα και εξερεύνηση σε ζωντανούς οργανισμούς, είναι μια άλλη σημαντική ερευνητική κατεύθυνση της συσκευής συλλογής ενέργειας που αλληλεπιδρά με το ανθρώπινο σώμα. Λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις

για αυστηρή ιατρική αξιολόγηση και έγκριση για την εμφύτευση συσκευών στο ανθρώπινο σώμα, το μεγαλύτερο μέρος της τρέχουσας έρευνας βασίζεται σε πειράματα σε ζώα. Πολλές μελέτες έχουν διεξαχθεί σε μικρά ζώα. Για παράδειγμα, για παράδειγμα, το PENG που εμφυτεύεται στην ανιούσα αρτητή του χοίρου μπορεί να παρακολουθεί την αρτηριακή πίεση σε πραγματικό χρόνο όπως είδαμε λίγο παραπάνω (Zou et al., 2021).



Εικόνα 27: Συσκευές Συλλογής Ενέργειας και το Ανθρώπινο Σώμα.

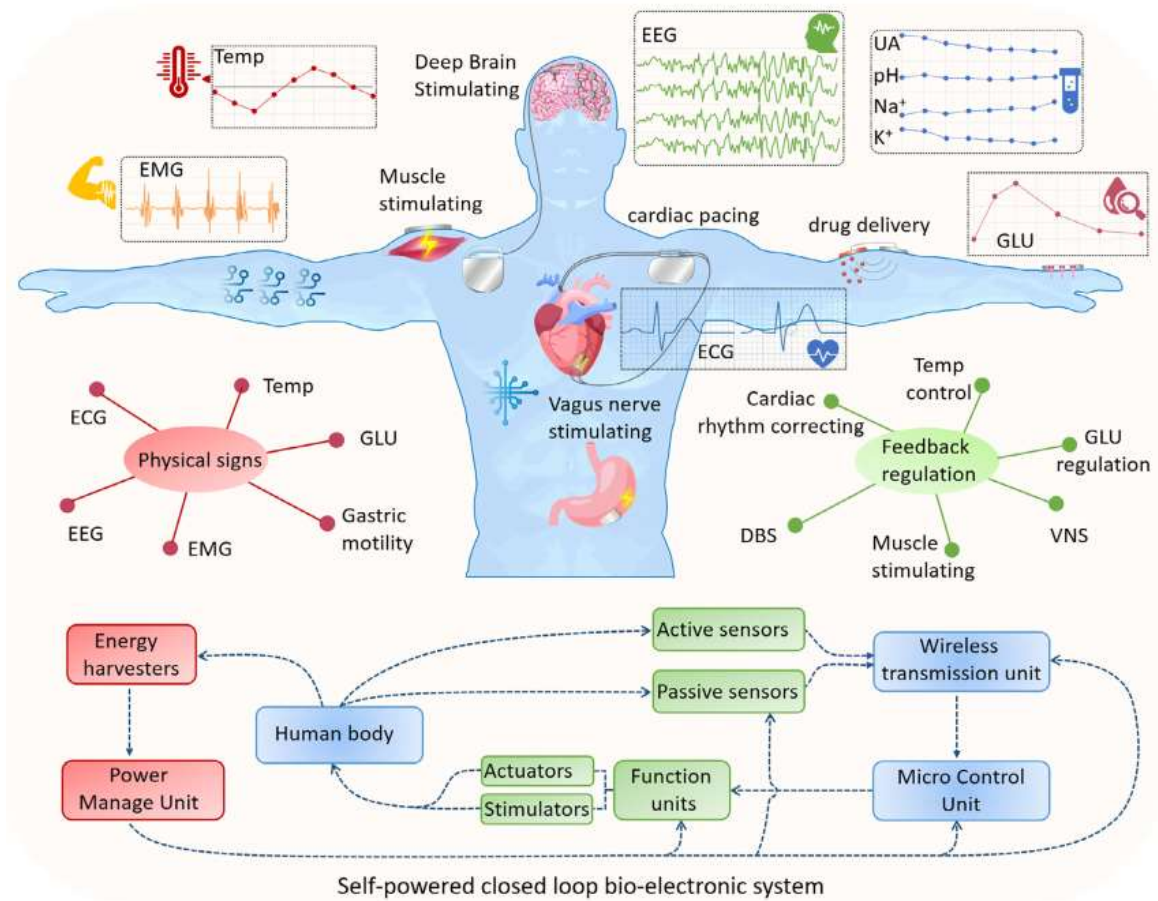
### 6.1.5. Αυτοτροφοδοτούμενο βιοηλεκτρονικό σύστημα κλειστού βρόχου (SCBS)

Ο κλειστός βρόχος είναι ο βασικός τρόπος όλων των διαδικασιών ζωής στη φύση. Σε ένα σύστημα κλειστού βρόχου, οι πληροφορίες ανατροφοδότησης λαμβάνονται από την κατάσταση του συστήματος και αποτελούν τη βάση για τη λήψη αποφάσεων. Η κατάσταση του συστήματος αλλάζει μέσω του ελέγχου λήψης αποφάσεων και η νέα

κατάσταση συστήματος επηρεάζει περαιτέρω μελλοντικές αποφάσεις, η διαδικασία των οποίων είναι συνεχής και κυκλική. Το ανθρώπινο σώμα είναι ένα φυσικό σύστημα κλειστού βρόχου. Το ανθρώπινο σώμα αντιλαμβάνεται το εξωτερικό περιβάλλον μέσω υποδοχέων που βρίσκονται σε διάφορα σημεία του σώματος. Οι πιο τυπικές αισθήσεις, συμπεριλαμβανομένης της όρασης, της ακοής, της όσφρησης, της γεύσης και της αφής, που είναι όλα μονοπάτια για να αποκτήσει το ανθρώπινο σώμα εξωτερικές πληροφορίες. Οι πληροφορίες από τους υποδοχείς ανατροφοδοτούν το νευρικό σύστημα του ανθρώπινου σώματος και ο εγκέφαλος στέλνει οδηγίες για περαιτέρω αντίστοιχες συμπεριφορές, σχηματίζοντας έτσι ένα σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου. Επιπροσθέτως το εσωτερικό σύστημα του ανθρώπινου σώματος αποτελείται από πολλούς κλειστούς βρόχους. Για παράδειγμα, όταν η γλυκόζη αίματος του ανθρώπινου σώματος αυξάνεται μετά από ένα γεύμα, η έκκριση ινσουλίνης στο σώμα θα αυξηθεί ταυτόχρονα για να μειωθεί κατάλληλα η γλυκόζη στο αίμα.

Με την χρήση λοιπόν ενός κλειστού βρόχου αυτοτροφοδοτούμενου βιοηλεκτρικού συστήματος και την συνδρομή φορητών και εμφυτεύσιμων συσκευών, η φυσιολογική κατάσταση του ανθρώπινου σώματος μπορεί να ρυθμιστεί αυτόματα στο βέλτιστο και ο οργανισμός θα μπορεί να επιδιορθωθεί ενεργά όταν εμφανίζονται διαταραχές.

Σε έναν SCBS, διάφορες ροές ενέργειας από το ανθρώπινο σώμα συλλέγονται από συσκευές συλλογής ενέργειας και μετατρέπονται σε ηλεκτρική ενέργεια. Μέσω της μονάδας διαχείρισης ενέργειας, η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί αποτελεσματικά και να παρέχεται στις μονάδες που καταναλώνουν ενέργεια ανά πάσα στιγμή. Ο αυτοτροφοδοτούμενος αισθητήρας χωρίς πρόσθετη παροχή ενέργειας μπορεί να παρακολουθεί τη φυσιολογική κατάσταση του ανθρώπινου σώματος σε πραγματικό χρόνο και να μεταδίδει τα φυσιολογικά σήματα στη μονάδα μικροελέγχου μέσω μιας μονάδας ασύρματης μετάδοσης. Μόλις η φυσιολογική κατάσταση εμφανίσει ανωμαλία, η μονάδα μικροελέγχου θα στείλει οδηγίες στις αντίστοιχες λειτουργικές μονάδες, ασκώντας έτσι ρύθμιση ανάδρασης στα σχετικά όργανα ή νεύρα του ανθρώπινου σώματος έως ότου η φυσιολογική κατάσταση επανέλθει στο φυσιολογικό (Zou et al., 2021).

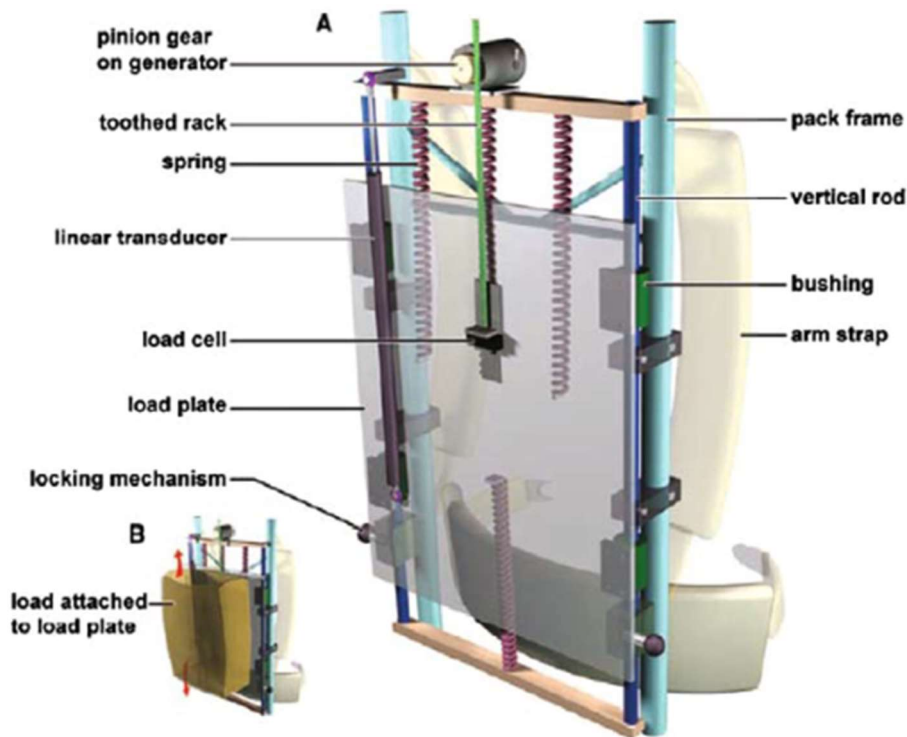


Εικόνα 28: Αυτοτροφοδοτούμενο βιοηλεκτρονικό σύστημα κλειστού βρόχου (Zou et al., 2021)

## 6.2. Συγκομιδή ενέργειας από τους ιμάντες ενός σακιδίου με χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών

Στην αναζήτηση για την εξεύρεση πηγής που θα συλλέγει ενέργεια από την ανθρώπινη κίνηση με την βοήθεια πιεζοηλεκτρικών υλικών, οι ερευνητές διαπίστωσαν ότι είναι δύσκολο να ληφθεί ηλεκτρική ενέργεια από ένα παπούτσι χωρίς να διαταραχθεί το βάδισμα ή η αντοχή του χρήστη. Για να αποφευχθούν αυτά τα ζητήματα, οι ερευνητές έχουν αρχίσει να εξετάζουν την απόκτηση ηλεκτρικής ενέργειας από άλλες πηγές, όπως τις διαφορικές δυνάμεις μεταξύ ενός ανθρώπου και του σακιδίου του που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια του περπατήματος. Οι Rome et al., (2005) ερεύνησαν τον σχεδιασμό ενός σακιδίου που θα μπορούσε να μετατρέψει τη μηχανική ενέργεια από την κατακόρυφη κίνηση των μεταφερόμενων φορτίων σε ηλεκτρική ενέργεια. Η ομάδα σχεδίασε το σακίδιο πλάτης έτσι ώστε ένα γραμμικό ρουλεμάν και ένα σύνολο ελατηρίων

ανέστειλαν το φορτίο σε σχέση με ένα πλαίσιο και μια ζώνη ώμου. Αυτή η διαμόρφωση επιτρέπει στο φορτίο να κινείται κάθετα σε σχέση με το πλαίσιο. Αυτή η σχετική κίνηση στη συνέχεια μετατράπηκε σε ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιώντας μια περιστροφική ηλεκτρική γεννήτρια, όπως φαίνεται στην Εικόνα 29. Αυτό το σύστημα αποδείχθηκε ότι παράγει μέγιστη ισχύ περίπου 7,37 W. Ωστόσο, οι συγγραφείς υποδεικνύουν μέσω ανάλυσης της πρόσληψης O<sub>2</sub> και του CO<sub>2</sub> που παράγεται από τον χρήστη ότι η κίνηση του πακέτου αύξησε την ενέργεια που δαπανήθηκε κατά 19,1 W ή περίπου αύξηση 3,2% πάνω από την ενέργεια που αποβάλλεται χωρίς τη συσκευή συγκομιδής (Kuo, 2005). Ενώ το σακίδιο πλάτης παράγει σημαντικά επίπεδα ισχύος, ο πρόσθετος βαθμός ελευθερίας που παρέχεται στο φορτίο θα μπορούσε να βλάψει την επιδεξιότητα του χρήστη και να οδηγήσει σε αυξημένη κόπωση.



Εικόνα 29: Σακίδιο πλάτης συλλογής ενέργειας που αναπτύχθηκε από τους Rome et al. (2005)

Ενώ πολλά από αυτά τα συστήματα είναι συμβατά με την ενέργεια που παράγεται από κάποιο διασώστη ή έναν στρατιώτη, συνήθως δεν παράγουν επαρκή ενέργεια, είναι δυσκίνητα ή παρεμβαίνουν στο βάδισμα του χρήστη. Έτσι, το επίκεντρο αυτής της έρευνας είναι να σχεδιάσει το σύστημα έτσι ώστε το σακίδιο πλάτης που συλλέγει ενέργεια να μην παρέχει πρόσθετη πίεση ή φορτίο στον χρήστη σε σχέση με αυτό ενός συμβατικού σακιδίου. Η ερευνητική προσπάθεια που παρουσιάζεται στην συνέχεια,



χρησιμοποίησε για τη συλλογή της δυναμικής ενέργειας από ένα σακίδιο, το πιεζοηλεκτρικό πολυμερές φθοριούχο πολυβινυλιδένιο (PVDF). Όπως είδαμε αναλυτικά παραπάνω, τα πιεζοηλεκτρικά υλικά λειτουργούν με τέτοιο τρόπο ώστε ένα εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό δυναμικό να σχηματίζει μια μηχανική τάση και μια εφαρμοζόμενη τάση έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό ηλεκτρικού φορτίου.

Προκειμένου το σακίδιο πλάτης να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά σε ένα τυπικό σχέδιο, οι υφασμάτινοι ιμάντες πρέπει να αντικατασταθούν με λουράκι πολυμερούς PVDF. Καθώς ο στρατιώτης περπατά με το σακίδιο, οι διαφορικές δυνάμεις μεταξύ χρήστη και σακιδίου πλάτης θα μεταφερθούν στους ιμάντες πολυμερούς που στη συνέχεια μετατρέπουν την εφαρμοζόμενη δύναμη σε ηλεκτρική ενέργεια. Το πολυμερές PVDF είναι ένα πολυμερές υψηλής πυκνότητας και έχει μέτρο ελαστικότητας περίπου ίσο με αυτό του νάιλον ή του PVC, γεγονός που το καθιστά κατάλληλο για αυτήν την εφαρμογή, επειδή ένα φορτίο 100 N σε έναν ιμάντα πάχους 100 m θα έχει ως αποτέλεσμα μόνο καταπόνηση 0,6% το λουρί. Αυτό δείχνει ότι ο ιμάντας θα είχε παρόμοια απόδοση με τον παραδοσιακό ιμάντα σε αυτήν την εφαρμογή. Αυτό το επίπεδο καταπόνησης δεν δημιουργεί πρόβλημα για το υλικό PVDF. Ωστόσο, τα τυπικά ηλεκτρόδια αποτελούνται από ένα συμπαγές μεταλλικό φιλμ που εφαρμόζεται στην επιφάνεια του πολυμερούς χρησιμοποιώντας επίστρωση διασκορπισμού και δεν μπορεί να αντέξει υψηλά επίπεδα κυκλικής καταπόνησης ή την υψηλή διατμητική τάση που σχετίζεται με τον προτεινόμενο σχεδιασμό. Επομένως, η χρήση ενός πολυμερούς ιμάντα PVDF απαιτεί την εφαρμογή ενός προηγμένου ηλεκτροδίου που μπορεί να αντέξει στο επιδιωκόμενο περιβάλλον. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, έχει κατασκευαστεί ένα νανοδομημένο ηλεκτρόδιο χρησιμοποιώντας την ιδιόκτητη διαδικασία αυτοσυναρμολόγησης της NanoSonic, Inc. Αυτός ο σχεδιασμός ηλεκτροδίων παρέχει την απαιτούμενη στιβαρότητα και ανθεκτικότητα, έτσι ώστε η λειτουργικότητα του πακέτου να μπορεί να είναι εγγυημένη στις σκληρές συνθήκες που αντιμετωπίζετε κατά τη διάρκεια εξωτερικών δραστηριοτήτων (Sodano, 2009).

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης μελέτης πράγματι κατασκευάστηκε ένα τέτοιο σακίδιο και τα αποτελέσματα ήταν πολύ ενθαρρυντικά. Πραγματοποιήθηκαν πειραματικές δοκιμές με έναν, δύο, τρεις και τέσσερις ιμάντες με παράλληλες και σειριακές διαμορφώσεις. Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από καθένα από τα σενάρια δοκιμής

χρησιμοποιήθηκαν για την επικύρωση της ακρίβειας του θεωρητικού μοντέλου έτσι ώστε να μπορεί να προσδιοριστεί μια πρόβλεψη της συνολικής ισχύος εξόδου από ένα πλήρες σακίδιο.

Το πρώτο σύνολο δοκιμών που εκτελέστηκε ήταν για τους ιμάντες συνδεδεμένους σε σειρά. Η σύνδεση των πιεζοηλεκτρικών ιμάντων με αυτόν τον τρόπο αυξάνει την έξοδο τάσης, μειώνει την χωρητικότητα και αυξάνει την αντίσταση. Ωστόσο, δεδομένου ότι η δοκιμή διεξήχθη χρησιμοποιώντας έλεγχο φορτίου, η τάση εξόδου παρέμεινε αρκετά σταθερή ακόμη και όταν άλλαζε ο αριθμός των ιμάντων. Αυτό οφείλεται σε μείωση της καταπόνησης ανά ιμάντα καθώς ο αριθμός των ιμάντων αυξήθηκε για το ίδιο φορτίο.

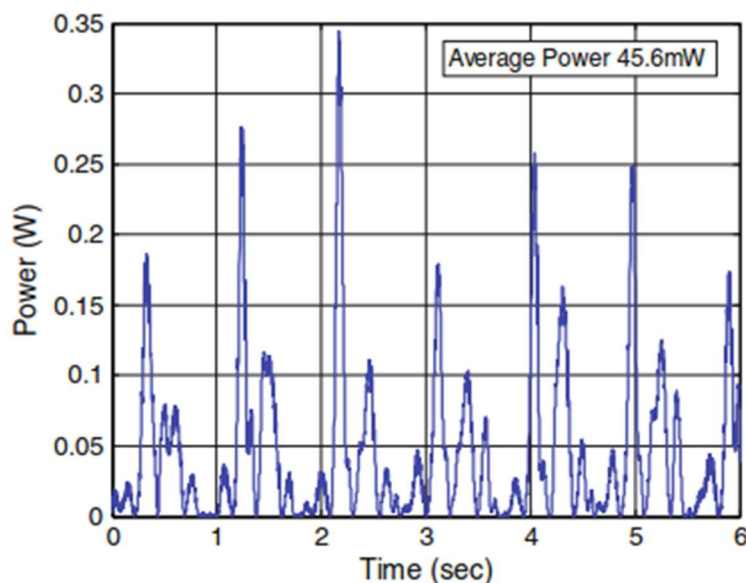
Η εξομοίωση έδειξε ότι για να παραχθεί το υψηλότερο δυνατό επίπεδο ισχύος, το μήκος του ιμάντα πρέπει να μεγιστοποιηθεί. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας έναν συνεχή ιμάντα που διατρέχει το πλαίσιο της συσκευασίας και δημιουργεί έναν πλήρη βρόχο όπως φαίνεται στην Εικόνα 30 (Sodano, 2009).



**Εικόνα 30: Σακίδιο Πλάτης με Πιεζοηλεκτρικούς Ιμάντες.**

. Η Εικόνα 31 δείχνει την εκτιμώμενη ισχύ εξόδου για ένα σακίδιο με δύο πιεζοηλεκτρικούς ιμάντες πάχους 52 m ανά ιμάντα ώμου σακιδίου (τέσσερις πιεζοηλεκτρικοί ιμάντες συνολικά 52 m) συνδεδεμένοι ηλεκτρικά παράλληλα. Από αυτή την προσομοίωση, η μέγιστη στιγμιαία ισχύς μπορεί να φανεί ότι είναι 0,345 W και μια μέση ισχύς 45,6 mW κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Αυτή η διαμόρφωση του

πάχους και του αριθμού του ιμάντα δεν παράγει την υψηλότερη ισχύ, αλλά βρέθηκε ότι παρέχει αρκετή αντοχή για τη μεταφορά του προσομοιωμένου φορτίου.



Εικόνα 31: Εκτιμώμενη ισχύς εξόδου σακιδίου πλάτης με Πιεζοηλεκτρικούς Ιμάντες (Sodano, 2009).

Η προκύπτουσα ισχύς θα μπορούσε σίγουρα να χρησιμοποιηθεί για την τροφοδοσία ορισμένων μικρών ηλεκτρονικών χαμηλής κατανάλωσης ή θα μπορούσε να συσσωρευτεί κατά τη διάρκεια της εκδρομής που οδηγεί σε συμπληρωματική ενέργεια και μικρότερο αριθμό μπαταριών που μεταφέρονται χωρίς να αυξηθεί η μάζα του πακέτου ή να προκληθούν προβλήματα στον χρήστη. Αυτός ο σχεδιασμός του σακιδίου πλάτης θα οδηγήσει σε πολύ καλά αποτελέσματα, καθιστώντας το ως μια εφικτή μέθοδο συλλογής ενέργειας από την ανθρώπινη κίνηση.

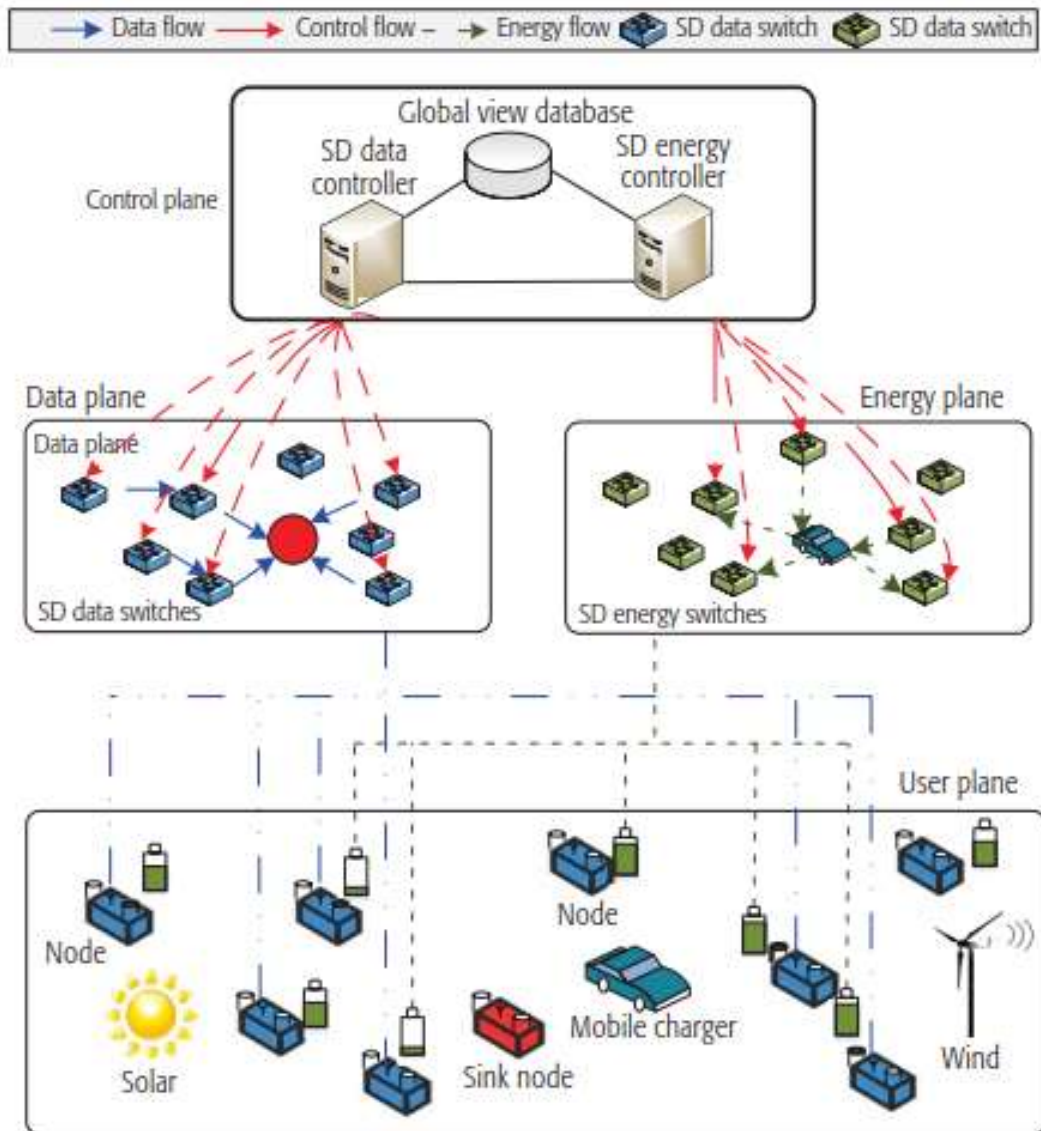
### 6.3. Συγκομιδή Ενέργειας μέσω Δικτύωσης Οριζόμενης από Λογισμικό (SD-EHN) για “Πράσινες” Επικοινωνίες 5G.

Οι πόροι ενέργειας και φάσματος διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στα συστήματα επικοινωνίας 5G. Καθώς στις βιομηχανικές εφαρμογές στην εποχή του 5G, οι πράσινες επικοινωνίες αποτελούν μεγάλη πρόκληση για τη βιώσιμη ανάπτυξη των δικτύων, η τεχνολογία συλλογής ενέργειας είναι μια πολλά υποσχόμενη προσέγγιση για την παράταση της διάρκειας ζωής του δικτύου.



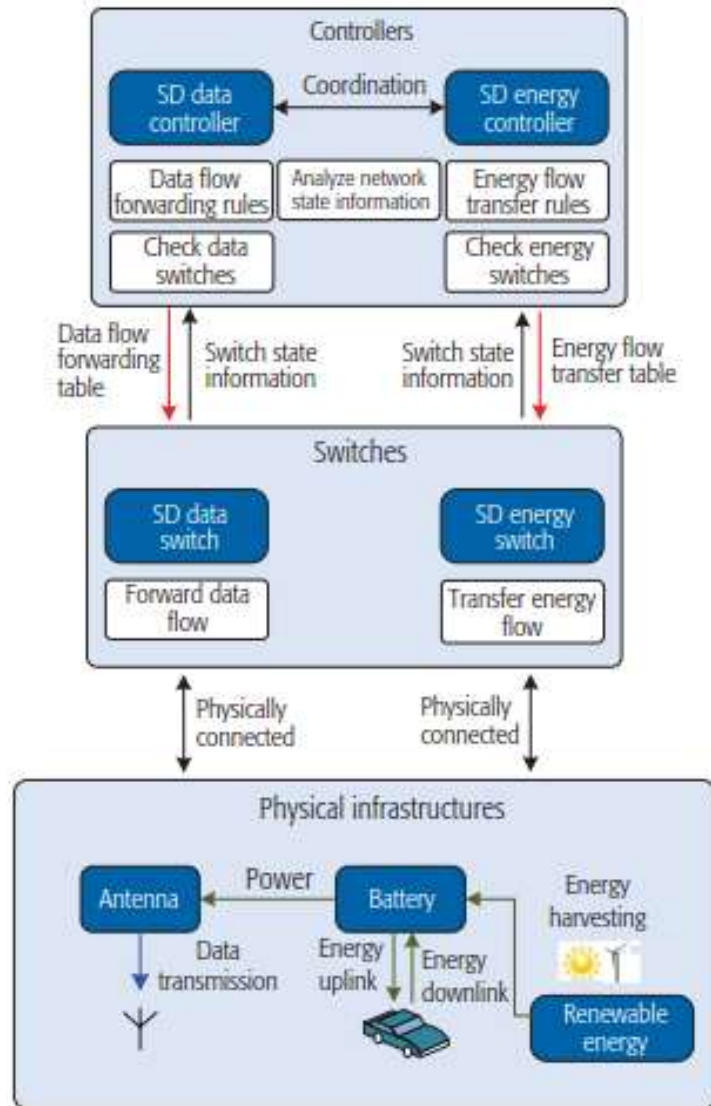
Στα δίκτυα συλλογής ενέργειας, οι κόμβοι μπορούν να αναπληρώσουν ενέργεια από έναν φορητό φορτιστή για να ξεπεράσουν τις εναλλακτικές λύσεις που είναι η ανανεώσιμη ενέργεια. Σε αυτό το παράδειγμα, οι πλούσιοι σε ενέργεια κόμβοι διεγείρονται για να φορτώσουν πλεονάζουσα ενέργεια στον φορτιστή κινητού τηλεφώνου, οδηγώντας σε αμφίδρομη ροή ενέργειας. Αυτό δημιουργεί μια νέα κατάσταση όπου οι ροές ενέργειας συνυπάρχουν με τις ροές δεδομένων, γεγονός που δημιουργεί νέα προβλήματα στον έλεγχο των ενεργειακών ροών και των ροών δεδομένων. Η δικτύωση που ορίζεται από λογισμικό επιτρέπει τον κεντρικό έλεγχο για τη βελτιστοποίηση του προγραμματισμού ροής.

Με βάση αυτά καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι μια αρχιτεκτονική SD-EHN για πράσινες επικοινωνίες 5G μπορεί να είναι λύση για το πρόβλημα της ορθής κατανομής ενέργειας και φάσματος. Στο SD-EHN, το επίπεδο δεδομένων, το επίπεδο ενέργειας και το επίπεδο ελέγχου αποσυνδέονται για να υποστηρίξουν τον ευέλικτο προγραμματισμό ενέργειας και να βελτιώσουν την ενεργειακή απόδοση, διευκολύνοντας έτσι τη βιωσιμότητα στα δίκτυα συλλογής ενέργειας καθώς επιπρόσθετα το SD-EHN παρέχει δυνατότητα προγραμματισμού για δρομολόγηση δεδομένων και ενέργειας (Εικόνα 32)(Huang et al., 2017).



Εικόνα 32: Αρχιτεκτονική του SD-EHN

Σύμφωνα με τους κανόνες ροής, οι κόμβοι αναλαμβάνουν «δράση» για τα εισερχόμενα δεδομένα και την ενέργεια. Για παράδειγμα, ένας κόμβος λειτουργεί ως πομπός για τη μετάδοση αισθητηριακών δεδομένων ή «ανεβάζει» ενέργεια προς τον φορτιστή ενός κινητού τηλεφώνου. Η αρχιτεκτονική SD-EHN περιλαμβάνει ένα επίπεδο ελέγχου, ένα επίπεδο δεδομένων και ένα επίπεδο ενέργειας. Δύο ελεγκτές SDN επικοινωνούν μεταξύ τους για να εξασφαλίσουν λογικά κεντρικό έλεγχο του δικτύου (Εικόνα 33).

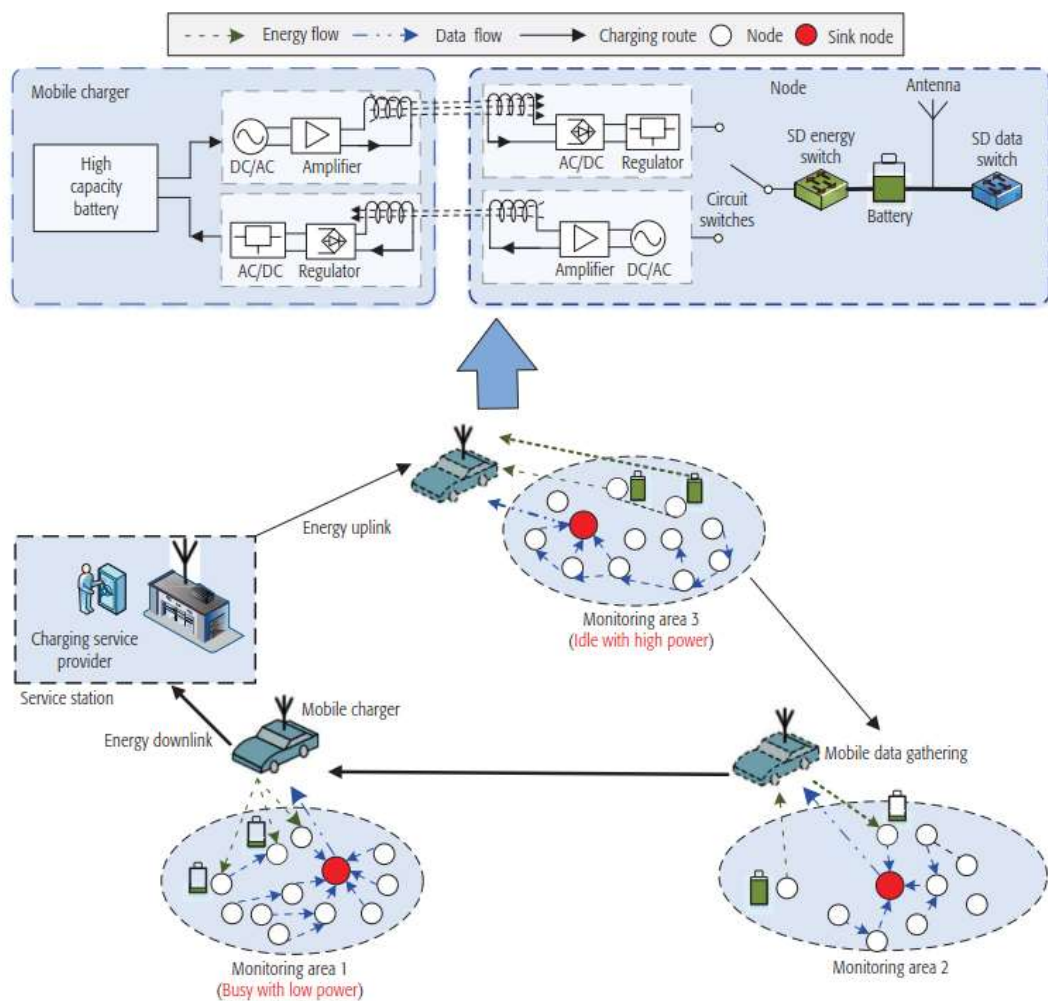


Εικόνα 33: Μπλοκ λειτουργιών στην αρχιτεκτονική SD-EHN (Huang et al., 2017).

Το SD-EHN αφαιρεί τις λειτουργίες του δικτύου και διαχειρίζεται το δίκτυο με κεντρικό τρόπο. Το λογισμικό αλλάζει ενέργεια μεταφοράς μεταξύ των κόμβων και του φορητού φορτιστή, ο οποίος αναπληρώνει ενέργεια στους κόμβους ή συλλέγει ενέργεια από τους κόμβους μέσω ασύρματης ενέργειας. Η κεραία τροφοδοτείται από την ενέργεια της μπαταρίας για να υποστηρίξει τη μετάδοση δεδομένων. Με τον βέλτιστο έλεγχο των ενεργειακών ροών και των ροών δεδομένων, το SD-EHN επιτρέπει τον ευέλικτο προγραμματισμό ενέργειας και την αποδοτική χρήση ενέργειας.

Θεωρούμε ότι ένας φορητός φορτιστής μπορεί επίσης να λειτουργήσει ως φορητής συλλογής δεδομένων για να συλλέγει περιοδικά δεδομένα από κόμβους (Guo et al., 2014). Συγκεκριμένα κυκλώματα για τη συλλογή ενέργειας περιλαμβάνονται εύκολα σε

έναν συμβατικό δέκτη, έτσι ώστε ο φορτιστής κινητού να μπορεί πρακτικά να αναλάβει εργασίες συλλογής δεδομένων. Στην Εικόνα 34 παρουσιάζεται ένα σενάριο συλλογής δεδομένων κινητής τηλεφωνίας και αμφίδρομης μεταφοράς ενέργειας στο SD-EHN, όπου δείχνει ότι υπάρχει ένας ταλαντωτής, ένας μετατροπέας AC/DC, δύο πηνία συντονισμού και ένα πηνίο λήψης για υποστήριξη αμφίδρομης μεταφοράς ενέργειας. Υπάρχουν πολλαπλές συναλλαγές ενέργειας μεταξύ των κόμβων και του παρόχου υπηρεσιών φόρτισης σε αυτό το σενάριο. Όταν ο φορτιστής κινητού φορτίζει έναν κόμβο μέσω μιας κατερχόμενης ζεύξης ενέργειας, ο ταλαντωτής μετατρέπει το DC από την μπαταρία του σε AC υψηλής συχνότητας (Huang et al., 2017).



**Εικόνα 34:** Σενάριο συλλογής δεδομένων κινητής τηλεφωνίας και αμφίδρομης μεταφοράς ενέργειας στο SD-EHN

Είναι φανερό ότι η Συλλογή Ενέργειας παίζει ένα τεράστιο ρόλο στα δίκτυα 5G αλλά και στα μεταγενέστερα και με την υποστήριξη ενός ευέλικτου ενεργειακού

προγραμματισμού μέσω δικτύων οριζόμενων από λογισμικό θα συμβάλλει τα μέγιστα στη βελτίωση της συνολικής ενεργειακής απόδοσης των δικτύων επικοινωνιών.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

### 7.1. Συμπεράσματα

Στα πλαίσια υλοποίησης της παρούσας εργασίας, παρουσιάσαμε τις πρόσφατες εξελίξεις στον τομέα των τεχνολογιών και τεχνικών συλλογής ενέργειας, όπως και τις αρχές λειτουργίας τους. Είναι γεγονός ότι έχουν καταβληθεί σημαντικές προσπάθειες από πολλούς ερευνητές σε αυτό το ενδιαφέρον και σημαντικό πεδίο. Δεδομένου των αναμενόμενων ενεργειακών ελλείψεων μαζί με την αυξανόμενη επιθυμία για πανταχού παρόντα ηλεκτρονικά συστήματα ανίχνευσης και επικοινωνίας, υπάρχει πολύ σημαντική ανάγκη για αποδοτικές και στιβαρές συσκευές συλλογής ενέργειας, καθώς και κυκλώματα μετατροπών και ρύθμισης ισχύος χαμηλής και αποδοτικής ισχύος. Η ενεργειακή δομή του κόσμου υφίσταται τεράστιες αλλαγές σήμερα και εκτός από τις παραδοσιακά μεγάλης κλίμακας συσσωρευμένες πηγές ενέργειας για την ανάπτυξη της ανθρώπινης κοινωνίας, απαιτούνται επίσης κατανεμημένες, κινητές και μικρές πηγές ενέργειας σε αυτήν την εποχή του Διαδικτύου των πραγμάτων, δηλαδή η ενέργεια της νέας εποχής. Στην πραγματικότητα, ο καθένας περιέχει ανεξάντλητη ενέργεια και το ίδιο το ανθρώπινο σώμα είναι μια τυπική μορφή ενέργειας της νέας εποχής.

Μέσα από την βιβλιογραφία είδαμε ότι η έρευνα για τη συλλογή ενέργειας από το ανθρώπινο σώμα έχει σημειώσει σημαντική πρόοδο και κάνοντας μια ανασκόπηση των πηγών ενέργειας που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε από το ίδιο το σώμα είδαμε ότι ορισμένες ηλεκτρονικές ιατρικές συσκευές χαμηλής κατανάλωσης και φορητές συσκευές τροφοδοτούνται με επιτυχία από ενέργεια από το ίδιο το ανθρώπινο σώμα. Καταλήξαμε στο γεγονός ότι η στρατηγική αλληλεπίδρασης μεταξύ των διαφόρων συσκευών συλλογής ενέργειας και του ανθρώπινου σώματος συνοψίζονται από δύο πτυχές: των φορητών (wearables) και εμφυτεύσιμων εφαρμογών. Ένα αυτοτροφοδοτούμενο βιοηλεκτρονικό σύστημα είναι ένας τρόπος αμοιβαίας συμβίωσης του ανθρώπινου σώματος με διάφορες φορητές και εμφυτεύσιμες ηλεκτρονικές συσκευές στο μέλλον καθώς λειτουργεί σαν βρόγχος ανακύκλωσης της ανθρώπινης ενέργειας (Zou et al., 2021). Οι άνθρωποι βασίζονται σε αυτές τις ηλεκτρονικές συσκευές για να βελτιώσουν τον εαυτό τους και να

χρησιμεύουν ως εγγύηση πηγής ενέργειας για τη λειτουργία αυτών των ηλεκτρονικών συσκευών.

Μια εξίσου σημαντική πτυχή των συστημάτων που τροφοδοτούνται από συστήματα συλλογής ενέργειας είναι οι προσπάθειες που στοχεύουν στην παροχή αποτελεσματικότερης χρήσης της συλλεγόμενης ενέργειας (δηλαδή, με χρήση κυκλωμάτων χαμηλής ισχύος, ή μέσω προσαρμοστικών πολιτικών δρομολόγησης SD-EHN). Για αυτό τον σκοπό μελετήθηκαν εργασίες που αφορούσαν το σχεδιασμό και την ανάπτυξη διαφόρων βελτιστοποιημένων συστημάτων συλλογής ενέργειας για τη τροφοδοσία συστημάτων ασύρματων κόμβων αισθητήρων που δουλεύουν αυτοδύναμα. Συνοπτικά, αυτοί οι μικροσκοπικοί, έξυπνοι και οικονομικοί κόμβοι αισθητήρων είναι συνδεδεμένοι σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων (WSN) και τροφοδοτούνται από αλκαλικές ή επαναφορτιζόμενες μπαταρίες. Συναντώνται διάσπαρτοι στο πεδίο ανάπτυξης για να διευκολύνουν την παρακολούθηση και τον έλεγχο φυσικών περιβαλλόντων από απομακρυσμένες τοποθεσίες που θεωρούνται δύσκολες ή επικίνδυνες. Οι ενσωματωμένες μπαταρίες των κόμβων αισθητήρων έχουν περιορισμένη ενεργειακή χωρητικότητα και έτσι μετά τη λειτουργία των αισθητήρων για ορισμένες φορές, οι μπαταρίες εξαντλούνται και οι κόμβοι αισθητήρων περνούν σε κατάσταση αδράνειας. Η συγκομιδή ενέργειας αναδεικνύεται ως μια εξαιρετικά πιθανή και ωφέλιμη λύση για να αποτελέσει μία αλλαγή πορείας από το συμβατικό ασύρματο δίκτυο αισθητήρων που λειτουργεί με μπαταρία σε ένα πραγματικά αυτόνομο και βιώσιμο ασύρματο δίκτυο αισθητήρων συλλογής ενέργειας (EH-WSN).

Τέλος από την βιβλιογραφία που μελετήθηκε, παρατηρείται ότι μια συγκεκριμένη τεχνολογία συλλογής ενέργειας έχει γενικά ελλείψεις στην έρευνα (συστήματα που βασίζονται σε φωτοβολταϊκά λόγω έλλειψης ηλιακού φωτός) που μπορούν να ξεπεραστούν μέσω ενός συνδυασμού με μια δεύτερη τεχνολογία, και αυτά τα υβριδικά συστήματα παρουσιάζουν συναρπαστικές ευκαιρίες για την ανάπτυξη ισχυρών συστημάτων συλλογής ενέργειας.

## 7.2. Μελλοντική Έρευνα

Πολλές ερευνητικές προσπάθειες έχουν αφιερωθεί στην συλλογή ενέργειας από τις επικοινωνίες, τα δίκτυα, τον άνθρωπο και όλες αυτές πηγές που βρίσκονται γύρω μας. Στις προηγούμενες ενότητες, δώσαμε μια ολοκληρωμένη επισκόπηση των προβλημάτων συλλογής ενέργειας και των σχετικών προσεγγίσεων αιχμής που προτείνονται από διάφορους ερευνητές. Σε αυτή την ενότητα, συζητάμε τις μελλοντικές κατευθύνσεις έρευνας στις οποίες απαιτείται να δώσει προσοχή η ερευνητική κοινότητα προκειμένου να σχεδιάσει πιο προηγμένα και αξιόπιστα συστήματα συλλογής ενέργειας.

Αρχικά όσον αφορά την συγκομιδή ενέργειας από τις επικοινωνίες που πλέον είναι παντού η έρευνα θα χρειαστεί να κινηθεί προς τους εξής άξονες:

- Συγκομιδή Ενέργειας στην Πλευρά του Δέκτη:  
Μέχρι στιγμής στη βιβλιογραφία, τα περισσότερα από τα προβλήματα προγραμματισμού ενέργειας έχουν μελετηθεί για πομπούς συλλογής ενέργειας και η επεξεργασία σήματος στους δέκτες θεωρείται ότι τροφοδοτείται από σταθερές μπαταρίες. Για την υλοποίηση πλήρως αυτοσυντηρούμενων συστημάτων επικοινωνίας, απαιτούνται νέα πλαίσια σχεδίασης για να συμπεριλάβουν περαιτέρω την κατανάλωση ενέργειας στις πλευρές του δέκτη, τα οποία εφαρμόζουν τη συλλογή ενέργειας για λήψη και αποκωδικοποίηση σήματος. Επιπλέον, οι επικοινωνίες μεταξύ οποιωνδήποτε δύο κόμβων είναι αμφίδρομες και όχι μονόδρομες στις περισσότερες ασύρματες εφαρμογές. Σε ένα τέτοιο σενάριο, κάθε κόμβος μπορεί να λειτουργήσει είτε ως πομπός είτε ως δέκτης, ανάλογα με τον εκχωρημένο πόρο, προκειμένου να ανταλλάσσουν μηνύματα μεταξύ τους στο ίδιο φυσικό μέσο. Για να μετριαστούν τα προβλήματα διακοπής ενέργειας, η χρήση ενέργειας για τους δύο κόμβους θα πρέπει να εξισορροπηθεί, για παράδειγμα, με μεταφορά ενέργειας από τον έναν κόμβο στον άλλο ή με τον κατάλληλο προγραμματισμό των περιόδων μετάδοσης και αδράνειας. Είναι ενδιαφέρον να μελετήσουμε τη συλλογή ενέργειας από την πλευρά του δέκτη και τον αντίκτυπό της στην απόδοση του δικτύου (Ku et al., 2016).



- Ασφάλεια στη συγκομιδή ενέργειας RF:  
Στα δίκτυα συλλογής ενέργειας ραδιοσυχνοτήτων, η ευαισθησία ισχύος λειτουργίας των δεκτών ενέργειας είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερη από αυτή των δεκτών πληροφοριών. Ως εκ τούτου, μόνο οι δέκτες που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση από τον πομπό έχουν προγραμματιστεί για συλλογή ενέργειας ραδιοσυχνοτήτων και μπορεί να υπάρξουν περιπτώσεις όπου οι δέκτες ενέργειας μπορούν να υποκλέψουν τα μηνύματα που αποστέλλονται στους δέκτες πληροφοριών. Αυτό το πρόβλημα δημιουργεί ένα σημαντικό ζήτημα ασφάλειας στο φυσικό επίπεδο και απαιτείται περαιτέρω έρευνα για να επιτευχθεί συμβιβασμός μεταξύ των μετρήσεων απόδοσης της απαίτησης συλλογής ενέργειας, του απορρήτου μετάδοσης και της QoS. Επιπλέον, τα υπάρχοντα πρωτόκολλα μετάδοσης, όπως η χρονική μεταγωγή και ο διαχωρισμός ισχύος έχουν σχεδιαστεί κυρίως για την αντιστάθμιση της εξαγωγής πληροφοριών και της συλλογής ενέργειας, χρειαζόμαστε περισσότερη διερεύνηση σχετικά με νέα πρωτόκολλα μετάδοσης για να ενσωματωθεί σωστά η ανησυχία για την ασφάλεια, για παράδειγμα, με την εισαγωγή τεχνητού θορύβου σε τα μεταδιδόμενα σήματα ή την αποστολή επιπλέον σημάτων εμπλοκής.
- Δίκτυα συγκομιδής ενέργειας με πολλαπλούς κόμβους:  
Εξακολουθούν να υπάρχουν ορισμένες προκλήσεις κατά την προσπάθεια βελτιστοποίησης της απόδοσης ενός ολόκληρου δικτύου που αποτελείται από πολλαπλούς κόμβους συλλογής ενέργειας. Τα ερευνητικά ζητήματα που χρειάζεται να διερευνηθούν περαιτέρω προς αυτή την κατεύθυνση περιλαμβάνουν (α) δρομολόγηση, (β) αναμετάδοση multi-hop, (γ) επιλογή αναμεταδότη, (δ) ανίχνευση και κοινή χρήση φάσματος, (ε) συνεργασία ενέργειας, φάσματος και πληροφοριών, (στ) μετριάσμος και διαχείριση παρεμβολών πολλών χρηστών, (ζ) προγραμματισμός κατανεμημένης ενέργειας, (η) επικοινωνίες από συσκευή σε συσκευή, (ι) επικοινωνίες από μηχανή με μηχανή, (ι) βελτιστοποίηση στα διάφορα επίπεδα επικοινωνίας, κ.λπ (Ku et al., 2016).

Εν κατακλείδι, ειδικότερα, για τα συστήματα συλλογής κινητικής ενέργειας και για τις θερμοηλεκτρικές μηχανές συγκομιδής ενέργειας, είναι απαραίτητο να αναπτυχθούν φιλικά προς το περιβάλλον και εξαιρετικά αξιόπιστα υλικά και να τυποποιηθούν οι τεχνικές για την αξιολόγηση των ιδιοτήτων τους.

Καθώς η τάση της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας συνεχίζεται περαιτέρω στην τεχνολογία που σχετίζεται με το IoT, θα χρειαστεί να αναπτυχθούν τεχνικές διαχείρισης ενέργειας και τρόποι αξιολόγησης για τη σύνδεση των μηχανών συγκομιδής ενέργειας με αυτήν την τεχνολογία.

Η τεχνολογία συλλογής ενέργειας αναμένεται να διαδραματίσει πρωταγωνιστικό ρόλο ως τεχνικός παράγοντας στην πρόοδο των έξυπνων πόλεων και κοινωνιών και σε διάφορους τομείς όπως η προηγμένη ιατρική.

Ως τελευταία παρατήρηση, θα μπορούσαμε να πούμε ότι η ενέργεια που συλλέγεται από ηλεκτρομαγνητικά κύματα, θερμότητα και δονήσεις χρησιμοποιείται για την αίσθηση του περιβάλλοντος και την επεξεργασία των πληροφοριών για επικοινωνία. Αυτή η περιβαλλοντική ενέργεια είναι η ίδια «πληροφορία» για το περιβάλλον. Επομένως, τα σήματα των συλλέκτη ενέργειας μπορούν να αναλυθούν για να βρεθούν λανθάνουσες κανονικότητες στο περιβάλλον μέσω μηχανικής μάθησης και αυτές οι κανονικότητες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δεδομένα για την πρόβλεψη του μέλλοντος του περιβάλλοντος (Akinaga, 2020).

Καταλήγοντας, φαίνεται ότι υπάρχει άφθονο περιθώριο για ανάπτυξη και εξέλιξη συστημάτων που τροφοδοτούνται από τη συγκομιδή ενέργειας μέσω των πολλαπλών πτυχών της. Η παραγωγή ενέργειας σε ποικίλλες περιβαλλοντικές συνθήκες, η αποδοτική και χαμηλής ισχύος μετατροπή και ο συνδυασμός διαφορετικών μηχανών συγκομιδής ενέργειας με προηγμένα ηλεκτρονικά που μπορεί επίσης να ανοίξει το δρόμο για την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών για τη διάγνωση, τη θεραπεία και την πρόληψη ασθενειών, αποτελούν όλα τα σημεία που είναι ανοιχτά προς βελτίωση.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Akinaga, H. (2020). Recent advances and future prospects in energy harvesting technologies. *Japanese Journal of Applied Physics*, 59(11), 110201. <https://doi.org/10.35848/1347-4065/abbfa0>

Beeby, S. P., Torah, R. N., Tudor, M. J., Glynne-Jones, P., O'Donnell, T., Saha, C. R., & Roy, S. (2007). A micro electromagnetic generator for vibration energy harvesting. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 17(7), 1257–1265. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/17/7/007>

Bera, B. (n.d.). *Recent Advances In Piezoelectric Nano generators In Energy Harvesting Applications*. Retrieved December 19, 2021, from [https://www.academia.edu/37600479/Recent\\_Advances\\_In\\_Piezoelectric\\_Nano\\_generators\\_In\\_Energy\\_Harvesting\\_Applications](https://www.academia.edu/37600479/Recent_Advances_In_Piezoelectric_Nano_generators_In_Energy_Harvesting_Applications)

Bowen, C. R., Taylor, J., LeBoulbar, E., Zabek, D., Chauhan, A., & Vaish, R. (2014). Pyroelectric materials and devices for energy harvesting applications. *Energy Environ. Sci.*, 7(12), 3836–3856. <https://doi.org/10.1039/C4EE01759E>

Chen, K.-H. (2016). *Power management for integrated chip design*. John Wiley & Sons.

Cheng, X., Xue, X., Ma, Y., Han, M., Zhang, W., Xu, Z., Zhang, H., & Zhang, H. (2016). Implantable and self-powered blood pressure monitoring based on a piezoelectric thinfilm: Simulated, in vitro and in vivo studies. *Nano Energy*, 22, 453–460. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2016.02.037>

Guo, S., Wang, C., & Yang, Y. (2014). Joint Mobile Data Gathering and Energy Provisioning in Wireless Rechargeable Sensor Networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 13(12), 2836–2852. <https://doi.org/10.1109/TMC.2014.2307332>

*How Thin Film Batteries Work*. (2018, May 7). AZoM.Com. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=15815>

Huang, X., Yu, R., Kang, J., Gao, Y., Maharjan, S., Gjessing, S., & Zhang, Y. (2017). Software Defined Energy Harvesting Networking for 5G Green Communications. *IEEE Wireless Communications*, 24(4), 38–45. <https://doi.org/10.1109/MWC.2017.1600360>

Jeerapan, I., Sempionatto, J. R., Pavinatto, A., You, J.-M., & Wang, J. (2016). Stretchable biofuel cells as wearable textile-based self-powered sensors. *Journal of Materials Chemistry A*, 4(47), 18342–18353. <https://doi.org/10.1039/C6TA08358G>

Kaźmierski, T. J., & Beeby, S. (Eds.). (2011). *Energy Harvesting Systems*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7566-9>

Kim, D. H., Shin, H. J., Lee, H., Jeong, C. K., Park, H., Hwang, G.-T., Lee, H.-Y., Joe, D. J., Han, J. H., Lee, S. H., Kim, J., Joung, B., & Lee, K. J. (2017). In Vivo Self-Powered Wireless Transmission Using Biocompatible Flexible Energy Harvesters. *Advanced Functional Materials*, 27(25), 1700341. <https://doi.org/10.1002/adfm.201700341>

Kim, S., Vyas, R., Bitto, J., Niotaki, K., Collado, A., Georgiadis, A., & Tentzeris, M. M. (2014). Ambient RF Energy-Harvesting Technologies for Self-Sustainable Standalone Wireless Sensor Platforms. *Proceedings of the IEEE*, 102(11), 1649–1666. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2014.2357031>

Ku, M.-L., Li, W., Chen, Y., & Ray Liu, K. J. (2016). Advances in Energy Harvesting Communications: Past, Present, and Future Challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(2), 1384–1412. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2497324>

Kuo, A. D. (2005). Harvesting Energy by Improving the Economy of Human Walking. *Science*, 309(5741), 1686–1687. <https://doi.org/10.1126/science.1118058>

Luo, Y., Pu, L., Wang, G., & Zhao, Y. (2019). RF Energy Harvesting Wireless Communications: RF Environment, Device Hardware and Practical Issues. *Sensors*, 19(13), 3010. <https://doi.org/10.3390/s19133010>

Luo, Y., Pu, L., & Zhao, Y. (2018). RF Energy Harvesting Sensor Networks for Healthcare of Animals: Opportunities and Challenges. *ArXiv:1803.00106 [Cs]*. <http://arxiv.org/abs/1803.00106>

Magno, M., Spadaro, L., Singh, J., & Benini, L. (2016). Kinetic energy harvesting: Toward autonomous wearable sensing for Internet of Things. *2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, 248–254. <https://doi.org/10.1109/SPEEDAM.2016.7525995>

Mak, K. H., McWilliam, S., Popov, A. A., & Fox, C. H. J. (2011). Performance of a cantilever piezoelectric energy harvester impacting a bump stop. *Journal of Sound and Vibration*, 330(25), 6184–6202. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2011.07.008>

Mitcheson, P. D., Yeatman, E. M., Rao, G. K., Holmes, A. S., & Green, T. C. (2008). Energy Harvesting From Human and Machine Motion for Wireless Electronic Devices. *Proceedings of the IEEE*, 96(9), 1457–1486. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2008.927494>

Park, G., Rosing, T., Todd, M. D., Farrar, C. R., & Hodgkiss, W. (2008). Energy Harvesting for Structural Health Monitoring Sensor Networks. *Journal of Infrastructure Systems*, 14(1), 64–79. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0342\(2008\)14:1\(64\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2008)14:1(64))

Pozo, Garate, Araujo, & Ferreiro. (2019). Energy Harvesting Technologies and Equivalent Electronic Structural Models—Review. *Electronics*, 8(5), 486. <https://doi.org/10.3390/electronics8050486>

Priya, S., & Inman, D. J. (Eds.). (2009). *Energy Harvesting Technologies*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-76464-1>

Rebel, G., Estevez, F., Gloesekoetter, P., & Castillo-Secilla, J. M. (2015). Energy Harvesting on Human Bodies. In A. Holzinger, C. Röcker, & M. Ziefle (Eds.), *Smart Health* (Vol. 8700, pp. 125–159). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-16226-3\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-16226-3_6)

Rome, L. C., Flynn, L., Goldman, E. M., & Yoo, T. D. (2005). Generating Electricity While Walking with Loads. *Science*, 309(5741), 1725–1728. <https://doi.org/10.1126/science.11111063>

Sodano, H. A. (2009). Harvesting Energy from the Straps of a Backpack Using Piezoelectric Materials. In S. Priya & D. J. Inman (Eds.), *Energy Harvesting Technologies* (pp. 431–458). Springer US. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-76464-1\\_17](https://doi.org/10.1007/978-0-387-76464-1_17)

Spies, P. (Ed.). (2015). *Handbook of energy harvesting power supplies and applications*. Pan Stanford.

Sravanthi Chalasani, & Conrad, J. M. (2008). A survey of energy harvesting sources for embedded systems. *IEEE SoutheastCon 2008*, 442–447. <https://doi.org/10.1109/SECON.2008.4494336>

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

Sun, J.-G., Yang, T.-N., Wang, C.-Y., & Chen, L.-J. (2018). A flexible transparent one-structure tribo-piezo-pyroelectric hybrid energy generator based on bio-inspired silver nanowires network for biomechanical energy harvesting and physiological monitoring. *Nano Energy*, 48, 383–390. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.03.071>

Taneja, J., Jeong, J., & Culler, D. (2008). Design, Modeling, and Capacity Planning for Micro-solar Power Sensor Networks. *2008 International Conference on Information Processing in Sensor Networks (Ipsn 2008)*, 407–418. <https://doi.org/10.1109/IPSN.2008.67>

Yang, Y., Hu, H., Chen, Z., Wang, Z., Jiang, L., Lu, G., Li, X., Chen, R., Jin, J., Kang, H., Chen, H., Lin, S., Xiao, S., Zhao, H., Xiong, R., Shi, J., Zhou, Q., Xu, S., & Chen, Y. (2020). Stretchable Nanolayered Thermoelectric Energy Harvester on Complex and Dynamic Surfaces. *Nano Letters*, 20(6), 4445–4453. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.0c01225>

Zhang, F., Zhang, Y., Silver, J., Shakhsher, Y., Nagaraju, M., Klinefelter, A., Pandey, J., Boley, J., Carlson, E., Shrivastava, A., Otis, B., & Calhoun, B. (2012). A batteryless 19&#x03BC;W MICS/ISM-band energy harvesting body area sensor node SoC. *2012 IEEE International Solid-State Circuits Conference*, 298–300. <https://doi.org/10.1109/ISSCC.2012.6177004>

Zou, Y., Bo, L., & Li, Z. (2021). Recent progress in human body energy harvesting for smart bioelectronic system. *Fundamental Research*, 1(3), 364–382. <https://doi.org/10.1016/j.fmre.2021.05.002>

