



Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής
Σχολή Μηχανικών
Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Υπολογιστών

Διπλωματική Εργασία
με θέμα

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

Χριστίνα Φιλίππουπολίτη

Επιβλέπων Καθηγητής
Κωνσταντίνος Μαυρομαμάτης
Λέκτορας Πανεπιστημίου

Αιγάλεω, Μάρτιος 2022

Η Διπλωματική Εργασία εγκρίθηκε και βαθμολογήθηκε από την κάτωθι τριμελή επιτροπή:

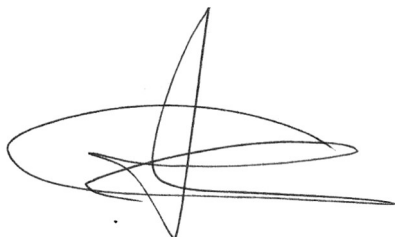
Κωνσταντίνος Μαυρομμάτης Επιβλέπων Καθηγητής	Παναγιώτης Γιαννακόπουλος Καθηγητής	Νικόλαος Μυριδάκης Επίκουρος Καθηγητής
---	--	---

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Φιλιππουπολίτη Χριστίνα του Νικολάου, με αριθμό μητρώου 711151040, φοιτήτριας του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Πληροφορικής και Υπολογιστών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής 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»

Ο/Η Δηλών/ούσα



Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα άτομα που με βοήθησαν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης αυτής της διπλωματικής. Τον κύριο Κωνσταντίνο Μαυρομμάτη, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, το ενδιαφέρον του και την προθυμία του να μου αναθέσει αυτό το θέμα, καθώς και για την πολύτιμη καθοδήγηση του όταν την χρειαζόμουν. Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές του ιδρύματος που με ενέπνευσαν να αγαπήσω αυτό το αντικείμενο, την οικογένεια μου για την υποστήριξη τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών και τέλος τους φίλους μου για την παρέα τους και την αγάπη τους, και ειδικά εκείνους που γνώρισα στη σχολή και έκαναν τα χρόνια αυτά πιο ευχάριστα.

Περίληψη

Ζούμε στην εποχή των ασύρματων συσκευών και της αδιάκοπης ασύρματης ανταλλαγής πληροφοριών. Τις επόμενες δεκαετίες θα εμφανίζονται όλο και περισσότερες ασύρματες, ευφυείς συσκευές και δίκτυα αισθητήρων, καθιστώντας τη χρήση μπαταριών ως πηγή ενέργειας πρακτικά αδύνατη. Η συγκομιδή ενέργειας είναι μια τεχνολογία που μπορεί να αποτελέσει την πιο αποτελεσματική λύση σε αυτό το πρόβλημα. Η συλλογή ενέργειας από το περιβάλλον για την τροφοδοσία μικρών συσκευών θα αποδειχθεί επωφελής, καθώς είναι οικονομικά αποδοτική και βιώσιμη. Ως αποτέλεσμα, οι ασύρματες συσκευές θα γίνουν πιο αυτόνομες ή ακόμη και εντελώς αυτοτροφοδοτούμενες.

Στην παρούσα εργασία συζητούνται οι διάφορες μέθοδοι συγκομιδής ενέργειας, εστιάζοντας περισσότερο στην αιολική, θερμική, δονητική και υβριδική συγκομιδή ενέργειας. Εξετάζονται και αναλύονται οι αρχές λειτουργίας και οι τοπολογίες των συσκευών συγκομιδής ενέργειας, καθώς και οι προκλήσεις που ενδέχεται να αντιμετωπίσουν. Ομοίως, η ασύρματη μεταφορά ενέργειας, μια άλλη πρωτοποριακή τεχνολογία, συζητείται επίσης μαζί με τις αρχές της συγκομιδής ενέργειας RF. Τέλος, αναφέρονται οι εφαρμογές των προαναφερόμενων τεχνολογιών, συμπεριλαμβανομένων, μεταξύ άλλων, ιατρικών εφαρμογών, εφαρμογών υποδομής και μεταφορών.

Η συγκομιδή ενέργειας είναι μια πολλά υποσχόμενη αναδυόμενη τεχνολογία που θα έχει πολλές εξελίξεις στο μέλλον και θα διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στον τρόπο με τον οποίο θα σχεδιάζονται και θα αναπτύσσονται οι ασύρματες συσκευές από εδώ και πέρα.

Λέξεις-κλειδιά: συγκομιδή ενέργειας, συγκομιδή αιολικής ενέργειας, συγκομιδή θερμικής ενέργειας, υβριδική συγκομιδή ενέργειας, πιεζοηλεκτρική, τριβοηλεκτρική, πυροηλεκτρική, ασύρματη συγκομιδή ενέργειας

Abstract

We live in the age of wireless devices and seamless wireless information exchange. In the decades to come, more and more wireless, intelligent devices and sensor networks will emerge, making the use of batteries as a power supply an impossible task. Energy harvesting is a technology that may be the most efficient solution to that problem. Collecting ambient energy in order to power small devices will prove beneficial since it is cost effective and sustainable. As a result, wireless devices will become more autonomous, or even completely self-powered.

In this work, the various methods of energy harvesting are discussed, focusing more on wind, thermal, vibrational and hybrid energy harvesting. The energy harvesters' operating principles and topologies are reviewed and analyzed, as well as the challenges that they may pose. Similarly, wireless power transfer, another breakthrough technology, is also discussed along with RF energy harvesting principles. Finally, applications of the aforementioned technologies are then reported, including but not limited to medical, infrastructural and transportation applications.

Energy harvesting is a promising emerging technology that will have many developments in the future and will play an important role in the way wireless devices will be designed and deployed from now on.

Keywords: energy harvesting/scavenging, wind energy harvesting, thermal energy harvesting, hybrid energy harvesting, piezoelectric, triboelectric, pyroelectric, wireless energy harvesting

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	4
Περίληψη	5
Abstract	6
Περιεχόμενα	7
Πίνακας εικόνων	9
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	12
1.1 Τρέχουσα Τεχνολογία Μπαταριών	13
1.2 Τρέχουσα Τεχνολογία Πυκνωτών	13
1.3 Σύγκριση συσκευών αποθήκευσης ενέργειας	14
1.4 Τύποι συγκομιδής ενέργειας	15
1.5 Ιστορική Αναδρομή	15
1.6 Βασική τεχνολογία	16
Κεφάλαιο 2: Συγκομιδή Αιολικής Ενέργειας	18
2.1 Υπάρχουσες Τοπολογίες	18
2.2 Ηλεκτρομαγνητική Συγκομιδή Ενέργειας	20
2.3 Πιεζοηλεκτρική Συγκομιδή Ενέργειας	22
2.4 Ηλεκτροστατική Συγκομιδή Ενέργειας	26
2.4.1 Μηχανισμοί συγκομιδής ηλεκτροστατικής ενέργειας χωρίς electret	26
2.4.1.1. Κύκλος περιορισμένου φορτίου	27
2.4.1.2. Κύκλος περιορισμένης τάσης	27
2.4.2 Μηχανισμοί συγκομιδής ηλεκτροστατικής ενέργειας που βασίζονται σε electret	27
2.4.2.1 Electret	28
2.4.2.2 Αρχή μετατροπής	28
2.5 Τριβοηλεκτρική Συγκομιδή Ενέργειας	30
2.5.1 Η βασική αρχή και οι τρόποι λειτουργίας	30
Κεφάλαιο 3: Συγκομιδή Θερμικής Ενέργειας	34
3.1 Θερμοηλεκτρική Συγκομιδή Ενέργειας	35
3.1.1 Φαινόμενο Seebeck	35
3.1.2 Φαινόμενο Peltier	36
3.1.3 Φαινόμενο Thomson	36
3.1.4 Αρχή λειτουργίας	37
3.1.5 Θερμοηλεκτρικές Γεννήτριες	38
3.2 Πυροηλεκτρική Συγκομιδή Ενέργειας	40
3.2.1 Αρχή λειτουργίας	41
3.2.2 Πυροηλεκτρικές γεννήτριες	43
3.3 Θερμομαγνητική Συγκομιδή Ενέργειας	45
3.3.1 Αρχή λειτουργίας	46
3.3.2 Θερμομαγνητικά υλικά	47

3.3.3	Θερμομαγνητικές Γεννήτριες	47
3.4	Θερμοελαστική Συγκομιδή Ενέργειας	49
3.4.1	Αρχή λειτουργίας	49
3.4.2	Θερμοελαστικές μηχανές (SMA Heat Engines)	50
Κεφάλαιο 4: Συγκομιδή Ενέργειας Δόνησης		54
4.1	Γραμμικές γεννήτριες	54
4.1.1	Πιεζοηλεκτρική Μετατροπή	56
4.1.2	Ηλεκτρομαγνητική μετατροπή	58
4.1.3	Ηλεκτροστατική μετατροπή	62
4.1.3.1	Ηλεκτροστατικές συσκευές συγκομιδής ενέργειας δονήσεων χωρίς electret (eVEH)	63
4.1.3.2	Ηλεκτροστατικές συσκευές συγκομιδής ενέργειας δονήσεων με electret (VEH)	64
a.	Συσκευές που χρησιμοποιούν electret πλήρους φύλλου	64
b.	Συσκευές που χρησιμοποιούν ειδικά διαμορφωμένα electret	65
4.2	Μη Γραμμικές γεννήτριες	65
Κεφάλαιο 5: Υβριδική Συγκομιδή Ενέργειας		68
5.1	Ενσωμάτωση μηχανικών και φωτοβολταϊκών συσκευών συγκομιδής ενέργειας	69
5.2	Ενσωμάτωση μηχανικών και θερμικών συσκευών συγκομιδής ενέργειας	72
5.3	Ενσωμάτωση θερμικών και φωτοβολταϊκών συσκευών συγκομιδής ενέργειας	73
5.4	Ενσωμάτωση μηχανικών και ηλεκτρομαγνητικών συσκευών συγκομιδής ενέργειας	74
Κεφάλαιο 6: Ασύρματη Μεταφορά Ενέργειας		78
6.1	Ιστορική αναδρομή	80
6.2	Γενική τοπολογία ενός συστήματος WPT	81
6.3	Close Mobile Power Transfer	81
6.3.1	Επαγωγική Μεταφορά Ενέργειας (IPT)	81
6.3.1.1	Εφαρμογές επαγωγικού συστήματος WPT	82
6.3.2	Χωρητική μεταφορά ενέργειας (CPT)	84
6.4	Remote Mobile Power Transfer	86
6.4.1	RF Μεταφορά Ενέργειας (RF PT)	86
6.4.1.1	Αρχές συλλογής ενέργειας RF	87
6.4.1.2	Συσκευές RF WPT	87
6.4.2	Οπτική μεταφορά ενέργειας (Optical PT)	89
Κεφάλαιο 7: Εφαρμογές της Συγκομιδής Ενέργειας		91
5.1	Εφαρμογές στην Ιατρική	91
5.2	Εφαρμογές στις Υποδομές	95
5.3	Εφαρμογές στις Μεταφορές	98
5.4	Εφαρμογές στις Επικοινωνίες	103
Κεφάλαιο 8: Επίλογος		105
8.1	Συμπεράσματα	105
8.2	Μελλοντικοί Σχεδιασμοί	106
Αναφορές		107

Πίνακας εικόνων

Σχήμα 1	19
Σχήμα 2	21
Σχήμα 3	22
Σχήμα 4	23
Σχήμα 5	23
Σχήμα 6	24
Σχήμα 7	25
Σχήμα 8	25
Σχήμα 9	26
Σχήμα 10	27
Σχήμα 11	27
Σχήμα 12	28
Σχήμα 13	29
Σχήμα 14	29
Σχήμα 15	30
Σχήμα 16	31
Σχήμα 17	32
Σχήμα 18	32
Σχήμα 19	33
Σχήμα 20	35
Σχήμα 21	36
Σχήμα 22	36
Σχήμα 23	37
Σχήμα 24	37
Σχήμα 25	39
Σχήμα 26	39
Σχήμα 27	40
Σχήμα 28	41
Σχήμα 29	41
Σχήμα 30	42
Σχήμα 31	43
Σχήμα 32	44
Σχήμα 33	45
Σχήμα 34	45
Σχήμα 35	47
Σχήμα 36	48
Σχήμα 37	49
Σχήμα 38	49
Σχήμα 39	50
Σχήμα 40	51
Σχήμα 41	53
Σχήμα 42	55
Σχήμα 43	56
Σχήμα 44	57

Σχήμα 45	58
Σχήμα 46	59
Σχήμα 47	59
Σχήμα 48	60
Σχήμα 49	61
Σχήμα 50	62
Σχήμα 51	63
Σχήμα 52	64
Σχήμα 53	65
Σχήμα 54	65
Σχήμα 55	66
Σχήμα 56	69
Σχήμα 57	70
Σχήμα 58	71
Σχήμα 59	71
Σχήμα 60	72
Σχήμα 61	73
Σχήμα 62	74
Σχήμα 63	75
Σχήμα 64	76
Σχήμα 65	77
Σχήμα 66	78
Σχήμα 67	78
Σχήμα 68	80
Σχήμα 69	81
Σχήμα 70	82
Σχήμα 71	84
Σχήμα 72	85
Σχήμα 73	85
Σχήμα 74	86
Σχήμα 75	86
Σχήμα 76	88
Σχήμα 77	88
Σχήμα 78	89
Σχήμα 79	90
Σχήμα 80	94
Σχήμα 81	94
Σχήμα 82	96
Σχήμα 83	96
Σχήμα 84	97
Σχήμα 85	98
Σχήμα 86	98
Σχήμα 87	99
Σχήμα 88	100
Σχήμα 89	102
Σχήμα 90	103
Σχήμα 91	104
Σχήμα 92	105

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Οι συσκευές του Διαδικτύου των πραγμάτων βρίσκουν όλο και μεγαλύτερη χρήση στην καθημερινή μας ζωή. Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) αναφέρεται σε ένα σύστημα αλληλένδετων, συνδεδεμένων στο διαδίκτυο αντικειμένων που είναι σε θέση να συλλέγουν και να μεταφέρουν δεδομένα μέσω ενός ασύρματου δικτύου χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση. Με την εγκατάσταση αισθητήρων και πομπών σε διάφορα καθημερινά αντικείμενα, μπορούμε να συλλέξουμε και να αναλύσουμε τύπους δεδομένων όπως ποτέ άλλοτε.

Οι δυνατότητες που προσφέρονται σε απλούς χρήστες και σε επιχειρήσεις είναι αμέτρητες. Ένα αντικείμενο μπορεί να αναφέρεται σε μια συνδεδεμένη ιατρική συσκευή, ένα ηλιακό πάνελ, ένα συνδεδεμένο αυτοκίνητο με αισθητήρες που ειδοποιούν τον οδηγό για πιθανά προβλήματα (καύσιμα, πίεση ελαστικών, απαιτούμενη συντήρηση και άλλα) ή οποιοδήποτε αντικείμενο, εξοπλισμένο με αισθητήρες, που έχει τη δυνατότητα συλλογής και μεταφοράς δεδομένων μέσω δικτύου. Ωστόσο, αυτή η αύξηση των ηλεκτρονικών συσκευών στην καθημερινή μας ζωή έχει επιφέρει μια νέα πρόκληση: την παροχή ρεύματος σε αυτές τις αμέτρητες συσκευές. Η αναγκαιότητα για τη μείωση της παραγωγής ενέργειας από τις παραδοσιακές, μη ανανεώσιμες μορφές ενέργειας, καθώς και για την ελάττωση των χημικών αποβλήτων που παράγονται από την αντικατάσταση μπαταριών, έχει προκαλέσει αυξανόμενο ενδιαφέρον για φθηνές, μη ρυπογόνες εναλλακτικές πηγές ενέργειας. Έτσι, έχουν πραγματοποιηθεί έρευνες για την ανάπτυξη τεχνολογιών συγκομιδής ενέργειας ή αλλιώς energy harvesting (EH).

Τι είναι όμως το energy harvesting; Η συγκομιδή ενέργειας αναφέρεται στη διαδικασία συλλογής και μετατροπής της ενέργειας από το περιβάλλον σε ηλεκτρική ενέργεια. Η ενέργεια μπορεί είτε να χρησιμοποιηθεί άμεσα είτε να αποθηκευτεί για μελλοντική χρήση. Η συλλογή ενέργειας λειτουργεί με την αξιοποίηση μικρών ποσοτήτων της περιβάλλουσας ενέργειας (ambient energy), η οποία διαφορετικά διαχέεται στον χώρο ή σπαταλάται [1].

Στο περιβάλλον μας υπάρχει πολλή αχρησιμοποίητη περιβάλλουσα ενέργεια. Αυτή μπορεί να είναι με τη μορφή φωτός, είτε φυσικού είτε τεχνητού, δονήσεων, θερμότητας, κίνησης, ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων κλπ [2]. Αυτές οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι άφθονες και άμεσα διαθέσιμες στο περιβάλλον και επομένως δεν είναι απαραίτητο να καταβληθούν σκόπιμα προσπάθειες για τη δημιουργία τους, όπως το παράδειγμα της καύσης των μη ανανεώσιμων ορυκτών καυσίμων για τη δημιουργία ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα που είναι εξαντλημένα, η πλειονότητα των πηγών της ambient ενέργειας είναι ανανεώσιμες και βιώσιμες για σχεδόν άπειρο χρονικό διάστημα.

Με την κατάλληλη εφαρμογή της συγκομιδής ενέργειας, τα καλώδια τροφοδοσίας, η αλλαγή μπαταριών, η φόρτιση μπαταριών και η ανάγκη για καύσιμα, θα περιοριστούν ή θα γίνουν περιττά. Οι συσκευές θα γίνουν πραγματικά ασύρματες και ανεξάρτητες από φυσικές παρεμβάσεις. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για συσκευές που είναι εγκατεστημένες σε δύσκολα προσβάσιμα μέρη. Επιπλέον, υπάρχουν ήδη πολλές συσκευές IoT σε χρήση και ο αριθμός αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά στο μέλλον. Η σύνδεση κάθε συσκευής με την ηλεκτρική ενέργεια ή η τακτική αντικατάσταση των μπαταριών θα γίνεται όλο και πιο δύσκολη. Η συγκομιδή ενέργειας έχει τη δυνατότητα να εξαλείψει αυτές τις ανάγκες.

Στη συνέχεια, αναφέρονται οι συσκευές αποθήκευσης που είναι διαθέσιμες για τη συγκομιδή ενέργειας. Οι κυριότερες είναι οι μπαταρίες που γνωρίζουμε όλοι, και οι πυκνωτές.

1.1 Τρέχουσα Τεχνολογία Μπαταριών

Μια μπαταρία αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια, μια θετική κάθοδο και μια αρνητική άνοδο, με ένα πορώδες υλικό ανάμεσα τους έτσι ώστε να τα διαχωρίζει. Στη μεγάλη πλειοψηφία των σημερινών φορητών συσκευών, η ενέργεια που απαιτείται για τη λειτουργία τους παρέχεται από μπαταρίες. Οι μπαταρίες αποτελούν σημαντικό μέρος του συνολικού μεγέθους και βάρους του συστήματος. Καθώς η τεχνολογία εξελίσσεται και οι συσκευές μικραίνουν σε διαστάσεις, ο χώρος που καταλαμβάνουν οι μπαταρίες αναμένεται να αυξηθεί παραπάνω. Εξίσου σημαντική είναι και η απαίτηση για σωστή συντήρηση των μπαταριών, με την ανάγκη είτε αντικατάστασης είτε επαναφόρτισής τους. Αυτός είναι ένας σοβαρός περιορισμός σε κλάδους όπως τη πανταχού παρούσα υπολογιστική ή τα δίκτυα αισθητήρων, στα οποία υπάρχουν δεκάδες ή εκατοντάδες μικρά συστήματα με μπαταρίες προς συντήρηση.

Παρά τις ραγδαίες εξελίξεις στην επιστήμη των υπολογιστών και των φορητών συσκευών τα τελευταία χρόνια, η τεχνολογία της μπαταρίας έχει εξελιχθεί πολύ αργά σε σύγκριση με τεχνολογίες όπως των επεξεργαστών, της μνήμης κλπ. [3]. Για παράδειγμα, ενώ η πυκνότητα αποθήκευσης δίσκου έχει αυξηθεί πάνω από 1.200 φορές από το 1990, η ενεργειακή πυκνότητα της μπαταρίας έχει αυξηθεί μόνο περίπου 3 φορές.

Νέες προσεγγίσεις είναι καθ' οδόν για φορητές μπαταρίες πολύ μικρού μεγέθους που ενδέχεται να επιτρέπουν το μέγεθος και μείωση βάρους φορητών συστημάτων και δικτύων αισθητήρων. Βασίζονται σε νέες τεχνολογίες, με την πιο αξιοσημείωτη να είναι οι κυψέλες καυσίμου, οι οποίες προβλέπεται ότι η ενεργειακή τους πυκνότητα ως προς το βάρος τους θα να είναι τρεις έως πέντε φορές μεγαλύτερη από τις κυψέλες ιόντων λιθίου και περισσότερο από δέκα φορές καλύτερη από τις μπαταρίες Ni-Cd ή Ni-MH, ενώ η πυκνότητα ενέργειας ως προς τον όγκο τους θα είναι έξι έως επτά φορές μεγαλύτερη από τις μπαταρίες Li- ion [4]. Ωστόσο, το πρόβλημα συντήρησης παραμένει. Αυτές οι κυψέλες πρέπει να ανεφοδιαστούν με καύσιμα ή εναλλακτικά πρέπει να κατασκευαστούν έχοντας διαθέσιμο αρκετό καύσιμο για να διατηρήσουν τη λειτουργία της μπαταρίας καθ' όλη την αναμενόμενη διάρκεια ζωής της [5]. Οι δευτερεύουσες μπαταρίες είναι καλύτερη επιλογή για πανταχού παρόντα συστήματα ή wearables, επειδή μπορούν να επαναφορτιστούν με διάφορους τρόπους, σε πολλές περιπτώσεις χωρίς να αφαιρεθεί η μπαταρία από το σύστημα. Στην πραγματικότητα, μία από τις δυνατότητες επαναφόρτισης τέτοιων μπαταριών είναι η χρήση ενέργειας που συλλέγεται από το περιβάλλον [6]. Υπό αυτή την έννοια, η πλήρης κατάργηση της μπαταρίας δεν αποτελεί επιλογή σε πολλές περιπτώσεις. Η συγκομιδή ενέργειας όμως θα μπορούσε να μειώσει ορισμένα από τα μειονεκτήματά τους, ειδικά σε σχέση με το ζήτημα της συντήρησης.

1.2 Τρέχουσα Τεχνολογία Πυκνωτών

Ένας ηλεκτρικός πυκνωτής αποτελείται από τρία βασικά μέρη, δύο από τα οποία είναι μεταλλικές πλάκες που χωρίζονται και μονώνονται από το τρίτο μέρος, το διηλεκτρικό υλικό. Το διηλεκτρικό υλικό μπορεί να είναι σε στερεή, υγρή ή αέρια μορφή ή πιθανώς συνδυασμό αυτών των μορφών [7].

Ένας τυπικός ηλεκτρολυτικός πυκνωτής κυμαίνεται από ένα έως πολλές χιλιάδες ή δέκα χιλιάδες microfarads. Για τις περισσότερες μικρές ηλεκτρονικές εφαρμογές που χρησιμοποιούν τη συγκομιδή ενέργειας, αυτή είναι πολύ μικρή χωρητικότητα για να αποθηκεύσει αρκετή ενέργεια. Πολλοί πυκνωτές θα μπορούσαν θεωρητικά να συνδεθούν παράλληλα για να αυξηθεί η χωρητικότητα, αλλά το μέγεθος μιας τέτοιας συσκευής δεν θα

ήταν πρακτικό. Επομένως, οι υπερπυκνωτές προτιμώνται συχνά αντί των ηλεκτρολυτικών πυκνωτών.

Οι υπερπυκνωτές, που αναφέρονται επίσης ως ηλεκτροχημικοί πυκνωτές διπλής στρώσης, είναι διαφορετικοί από τους συμβατικούς ηλεκτροστατικούς και ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές επειδή περιέχουν έναν ηλεκτρολύτη που επιτρέπει στο ηλεκτροστατικό φορτίο να αποθηκεύεται επίσης με τη μορφή ιόντων [6]. Διέπονται από τις ίδιες θεμελιώδεις εξισώσεις με τους συμβατικούς πυκνωτές, αλλά χρησιμοποιούν ηλεκτρόδια μεγαλύτερης επιφάνειας και λεπτότερα διηλεκτρικά για να επιτύχουν μεγαλύτερες χωρητικότητες [8]. Δεδομένου ότι αυτές οι συσκευές αποθηκεύουν ενέργεια χρησιμοποιώντας ιοντική χωρητικότητα καθώς και με επιφανειακές αντιδράσεις οξειδοαναγωγής, η ταξινόμησή τους βρίσκεται πιο κοντά σε μια συμβατική μπαταρία από τους συμβατικούς συγγενείς τους, τους πυκνωτές.

Ένα μοντέλο πραγματικού πυκνωτή πρέπει να περιλαμβάνει ισοδύναμη αντίσταση σειράς (ESR) για να λαμβάνει υπόψη τις εσωτερικές απώλειες. Διατηρώντας το ESR μικρό, οι υπερπυκνωτές είναι σε θέση να επιτύχουν σχετικά υψηλές πυκνότητες ισχύος. Ωστόσο, παρά τις μεγαλύτερες χωρητικότητες από τους συμβατικούς πυκνωτές, οι υπερπυκνωτές δεν μπορούν ακόμη να ταιριάξουν με την ενεργειακή πυκνότητα των μπαταριών μεσαίας έως υψηλής ποιότητας [8].

1.3 Σύγκριση συσκευών αποθήκευσης ενέργειας

Για να συγκριθούν οι διάφορες συσκευές αποθήκευσης ενέργειας, πρέπει να χρησιμοποιούνται οι όροι πυκνότητα ενέργειας και πυκνότητα ισχύος. Οι μπαταρίες έχουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα αλλά χαμηλή πυκνότητα ισχύος. Αντίθετα, οι υπερπυκνωτές έχουν σχετικά υψηλή πυκνότητα ισχύος, αλλά χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα σε σύγκριση με τις μπαταρίες. Αυτό σημαίνει ότι οι πυκνωτές δεν μπορούν να αποθηκεύσουν τόση ενέργεια, αλλά ο ρυθμός μεταφοράς ενέργειας από τους πυκνωτές είναι πολύ μεγαλύτερος από αυτόν μιας μπαταρίας.

Η πιο πρόσφατη εξέλιξη στους υπερπυκνωτές είναι η χρήση ηλεκτροχημικής αποθήκευσης ενέργειας παρόμοια με τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται στις μπαταρίες. Ένας από τους πιο συνηθισμένους τύπους υπερπυκνωτών είναι γνωστός ως ηλεκτροχημικός πυκνωτής διπλής στρώσης ή EDLC. Επειδή δεν πραγματοποιείται μεταφορά φορτίου μεταξύ του ηλεκτρολύτη και του ηλεκτροδίου, η αποθήκευση φορτίου στα EDLC είναι εξαιρετικά αναστρέψιμη, λαμβάνοντας υπόψη τα σταθερά χαρακτηριστικά απόδοσης για έως και 10⁶ κύκλους. Αντίθετα, η διάρκεια ζωής του κύκλου των ηλεκτροχημικών μπαταριών περιορίζεται γενικά, με μέγιστη τους 10³ κύκλους [8].

Για όλα τα ηλεκτροχημικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων των μπαταριών καθώς και των πυκνωτών, η αυτοεκφόρτιση είναι μια εγγενής ιδιότητα, η οποία εμφανίζεται με υψηλότερο ρυθμό για τους υπερπυκνωτές [8]. Επομένως, εάν η ενέργεια του περιβάλλοντος είναι διαθέσιμη μόνο για ένα μικρό μέρος της ημέρας, ένας υπερπυκνωτής μπορεί να έχει πολύ υψηλό ρυθμό αυτοεκφόρτισης για να είναι χρήσιμος σε ασύρματες εφαρμογές. Από την άλλη πλευρά, εάν συλλέγεται ενέργεια από πολλαπλές πηγές στο περιβάλλον, οι υπερπυκνωτές μπορεί να είναι πιο επιθυμητοί για αποθήκευση ενέργειας [9].

1.4 Τύποι συγκομιδής ενέργειας

Σε αντίθεση με τις μεγάλης κλίμακας ηλιακές και αιολικές εγκαταστάσεις που παράγουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας, οι συσκευές συγκομιδής ενέργειας συλλέγουν μικρές ποσότητες ενέργειας από το άμεσο περιβάλλον τους [10]. Η πρόοδος στην εξαιρετικά χαμηλής κατανάλωσης τεχνολογία της μικροηλεκτρονικής, σε συνδυασμό με την πρόοδο στη συγκομιδή ενέργειας μικρής κλίμακας, έχει συμβάλει στην εμφάνιση πολλών διαφορετικών πηγών συγκομιδής ενέργειας. Παρουσιάζεται μια γενική επισκόπηση των πηγών ενέργειας του περιβάλλοντος και συνοψίζονται οι πόροι σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά τους:

- **Ανθρώπινο Σώμα:** Η μηχανική και θερμική (μεταβολές θερμοκρασίας) ενέργεια μπορεί να παραχθεί από ένα σώμα ανθρώπου ή ζώου με ενέργειες όπως το περπάτημα και το τρέξιμο.
- **Φυσική Ενέργεια:** Ο άνεμος, η ροή του νερού, τα κύματα των ωκεανών και η ηλιακή ενέργεια μπορούν να παρέχουν απεριόριστη διαθεσιμότητα ενέργειας από το περιβάλλον.
- **Μηχανική Ενέργεια:** Δονήσεις από μηχανές, μηχανικό στρες, καταπόνηση από κινητήρες υψηλής πίεσης
- **Θερμική ενέργεια:** Διακυμάνσεις θερμικής ενέργειας που διαχέεται από φούρνους, θερμάστρες και σημεία τριβής.
- **Φωτονική ενέργεια:** Αυτή η πηγή μπορεί να χωριστεί σε δύο κατηγορίες ενέργειας: φως εσωτερικού χώρου και ηλιακή ενέργεια εξωτερικού χώρου. Η φωτονική ενέργεια μπορεί να συλλεχθεί μέσω αισθητήρων φωτός, διόδων φωτός και ηλιακών φωτοβολταϊκών (PV) πάνελ.
- **Ηλεκτρομαγνητική ενέργεια:** Τα πηνία και οι μετασχηματιστές μπορούν να θεωρηθούν ως πηγές περιβάλλουσας ενέργειας, ανάλογα με το πόση ενέργεια απαιτείται για την εφαρμογή. Στην συνέχεια θα δούμε περιληπτικά τις επιστημονικές ανακαλύψεις, που οδήγησαν στο να δημιουργηθούν οι βάσεις για την σύγχρονη τεχνολογία της συγκομιδής ενέργειας.

1.5 Ιστορική Αναδρομή

Το 1880, ο Pierre και ο Jacques Curie πρόβλεψαν και απέδειξαν με επιτυχία μέσω πειραμάτων ότι ορισμένοι κρύσταλλοι, κυρίως το άλας Rochelle και ο χαλαζίας, παρουσιάζουν ένα επιφανειακό φορτίο όταν υπόκειται σε μηχανική τάση/πίεση ή ταλάντωση. Σε αυτό το φαινόμενο δόθηκε το όνομα *πιεζοηλεκτρισμός* [9]. Οι πρώτες κατασκευές πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων εμφανίστηκαν μετά το 1940 σε Ευρώπη και ΗΠΑ και μετά το 1970 σε Κίνα και Ιαπωνία, και η αρχή του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου κέρδισε γρήγορα δημοτικότητα σε πρακτικές εφαρμογές παγκοσμίως [11]. Οι τελευταίες εξελίξεις της πιεζοηλεκτρικής θεωρίας τα τελευταία χρόνια σχετίζονται άμεσα με τη συγκομιδή ενέργειας και θα παρουσιαστούν παρακάτω.

Το 1826, ο Thomas Johann Seebeck παρατήρησε για πρώτη φορά το φαινόμενο του *θερμοηλεκτρισμού*. Βρήκε ότι το ρεύμα ρέει σε ένα κλειστό κύκλωμα κατασκευασμένο από δύο ανόμοια μέταλλα όταν αυτά διατηρούνται σε διαφορετικές θερμοκρασίες [12]. Για τις επόμενες τρεις δεκαετίες, τα βασικά θερμοηλεκτρικά φαινόμενα διερευνήθηκαν και κατανοήθηκαν μακροσκοπικά, και αναγνωρίστηκε η δυνατότητα εφαρμογής τους στη θερμομετρία, την παραγωγή ενέργειας και την ψύξη [11]. Στη δεκαετία του 1930 και τις επόμενες δεκαετίες, υπήρξε εξέλιξη και στην μικροσκοπική κατανόηση της θερμοηλεκτρικής ενέργειας, κάτι οδήγησε στην ανάπτυξη πιο εξελιγμένων υλικών, πολλά από τα οποία χρησιμοποιούνται ακόμη και σήμερα [9].

Τα μετέπειτα χρόνια, δημιουργήθηκε η ανάγκη για μια μπαταρία χαμηλής ισχύος και μεγάλης διάρκειας, γεγονός που πυροδότησε το ενδιαφέρον για τα θερμοηλεκτρικά υλικά για τη

συγκομιδή ενέργειας στον εμπορικό τομέα. Χρησιμοποιήθηκαν ραδιενεργά υλικά ως πηγή θερμότητας και αναπτύχθηκαν γεννήτριες μέσω της διάταξης των θερμοστοιχείων σε μια μονολιθική δομή, με αποτέλεσμα μια πιο χρηστική μορφή παραγωγής ενέργειας [13]. Το πιο αξιοσημείωτο είναι ότι αυτή η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή ενέργειας σε εφαρμογές στο απομακρυσμένο διάστημα. Η έρευνα πλέον έχει επικεντρωθεί στην κατασκευή μικρότερων, πιο αποδοτικών και ισχυρότερων θερμοηλεκτρικών γεννητριών.

Το 1839, καθώς πειραματιζόταν με ένα ηλεκτρολυτικό στοιχείο αποτελούμενο από δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια, ο Edmund Becquerel ανακάλυψε το *φωτοβολταϊκό* φαινόμενο [14]. Δύο δεκαετίες αργότερα, ο William Adams και ο Richard Day ανακάλυψαν ότι ένα δείγμα σεληνίου που έρχεται σε επαφή με δύο θερμαινόμενες επαφές πλατίνας θα μπορούσε να παράγει φωτορεύμα. Το πρώτο φωτοβολταϊκό στοιχείο μεγάλης κλίμακας κατασκευάστηκε από τον Charles Fritts το 1894, ο οποίος επικάλυψε ένα στρώμα σεληνίου με ένα λεπτό στρώμα χρυσού [15]. Ενώ το φωτοβολταϊκό φαινόμενο παρατηρήθηκε για πρώτη φορά από τον Edmund Becquerel, έγινε πλήρως κατανοητό μετά την ανάπτυξη της κβαντικής θεωρίας του φωτός και της φυσικής στερεάς κατάστασης στις αρχές του 1900 [14]. Κατά τη δεκαετία του '50 αναπτύχθηκαν πιο αποδοτικές συσκευές φωτοβολταϊκών στοιχείων, με το πυρίτιο να καταλήγει να είναι το πιο διαδεδομένο υλικό για τη κατασκευή τους. Το πυρίτιο εξακολουθεί να παραμένει το κορυφαίο φωτοβολταϊκό υλικό, επωφελούμενο από τις προόδους των τεχνολογιών πυριτίου.

Το 1931, ο Joseph Henry και ο Michael Faraday ανακάλυψαν, ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο, την αρχή της *ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής*, η οποία προβλέπει πώς ένα μαγνητικό πεδίο θα αλληλεπιδράσει με ένα ηλεκτρικό κύκλωμα, παράγοντας ηλεκτρισμό [16]. Τον Αύγουστο του 1831, ο Faraday ανακάλυψε πειραματικά ότι ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο μπορεί να προκαλέσει την εμφάνιση ενός ηλεκτρικού πεδίου. Τον Οκτώβριο του ίδιου έτους, εφηύρε την πρώτη γεννήτρια συνεχούς ρεύματος που αποτελείται από μια χάλκινη πλάκα που περιστρέφεται μεταξύ των μαγνητικών πόλων [17].

Μεταξύ 1864 και 1873, επηρεασμένος σε μεγάλο βαθμό από το έργο του Faraday, ο James Clerk Maxwell βασίστηκε στα ευρήματα του Faraday και εξήγαγε μια σειρά μαθηματικών εξισώσεων για να εξηγήσει τη φυσική συμπεριφορά των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων. Το 1888, ο Heinrich Hertz επαλήθευσε πειραματικά το έργο του Maxwell και έθεσε τις βάσεις για τη μετάδοση ραδιοκυμάτων [16]. Τα βασικά αυτά θεμέλια παρέχουν μια κατανόηση των ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων και των διαθέσιμων μεθόδων για την αξιοποίησή τους για σκοπούς συγκομιδής ενέργειας.

1.6 Βασική τεχνολογία

Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι τεχνολογιών συγκομιδής ενέργειας με βάση τον τύπο της πηγής ενέργειας. Ωστόσο, όλα τα συστήματα συλλογής ενέργειας, στην απλούστερη μορφή τους, αποτελούνται από τρία κύρια στοιχεία, εκτός από μια πηγή ενέργειας:

Μορφοτροπέας/Συγκομιστής: Αυτό είναι το μέρος του συστήματος που μετατρέπει την ενέργεια του περιβάλλοντος σε ηλεκτρική ενέργεια.

Κύκλωμα διασύνδεσης: Το κύκλωμα διασύνδεσης εξάγει τη μέγιστη δυνατή ποσότητα ενέργειας από τον μορφοτροπέα και την καθιστά κατάλληλη για χρήση. Επεξεργάζεται και ρυθμίζει την ενέργεια που έχει συλλεχθεί (μέσω ανόρθωσης τάσης, ρύθμισης τάσης κ.λπ.), φέρνοντας τη στην κατάλληλη μορφή, ανάλογα με την εφαρμογή στην οποία θα χρησιμοποιηθεί.

Φορτίο: Το φορτίο είναι το μέρος του συστήματος που θα μπορούσε είτε να περιλαμβάνει ηλεκτρονικές συσκευές που καταναλώνουν την ενέργεια που συλλέγεται (όπως τσιπ, κυκλώματα, ενεργοποιητές, αισθητήρες κ.λπ.) είτε εξαρτήματα αποθήκευσης ενέργειας όπως πυκνωτές, υπερπυκνωτές κ.λπ.

Στα επόμενα κεφάλαια, θα μελετηθούν μηχανισμοί για την συγκομιδή αιολικής, θερμικής, δονητικής και υβριδικής ενέργειας. Η τεχνολογία και οι αρχές λειτουργίας κάθε μηχανισμού θα περιγραφούν αναλυτικότερα και θα παρουσιαστούν και πειραματικές δοκιμές των συσκευών αυτών. Στη συνέχεια, αναφέρεται η τεχνολογία ασύρματης μεταφοράς ενέργειας και αναλύονται τα διαφορετικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται. Τέλος, παρουσιάζονται εφαρμογές της συγκομιδής ενέργειας στον καθημερινό μας κόσμο, καθώς και σχεδιασμοί οι οποίοι θα μπορούσαν να γίνουν εφικτοί στο μέλλον.

Κεφάλαιο 2: Συγκομιδή Αιολικής Ενέργειας

Ο άνεμος είναι μια από τις πιο διαδεδομένες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για γενικές εφαρμογές λόγω της διαθεσιμότητάς του. Υπάρχουν πολλές μελέτες που χρησιμοποιούν αιολική ενέργεια σε συστήματα μικρής κλίμακας, ωστόσο η συνήθης προσέγγιση αρκείται στην εφαρμογή ενός συμβατικού στροβίλου, ή στην προσαρμογή ενός από άλλο σύστημα σε μια συμβατική γεννήτρια, παρέχοντας χαμηλή απόδοση σύστημα [18]. Σε αυτό το κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με τους διάφορους μηχανισμούς που έχουν αναπτυχθεί για την συγκομιδή αιολικής ενέργειας σε μικρή κλίμακα, καθώς και ποιοι από αυτούς καταλήγουν να έχουν και την καλύτερη απόδοση σε ένα σύστημα.

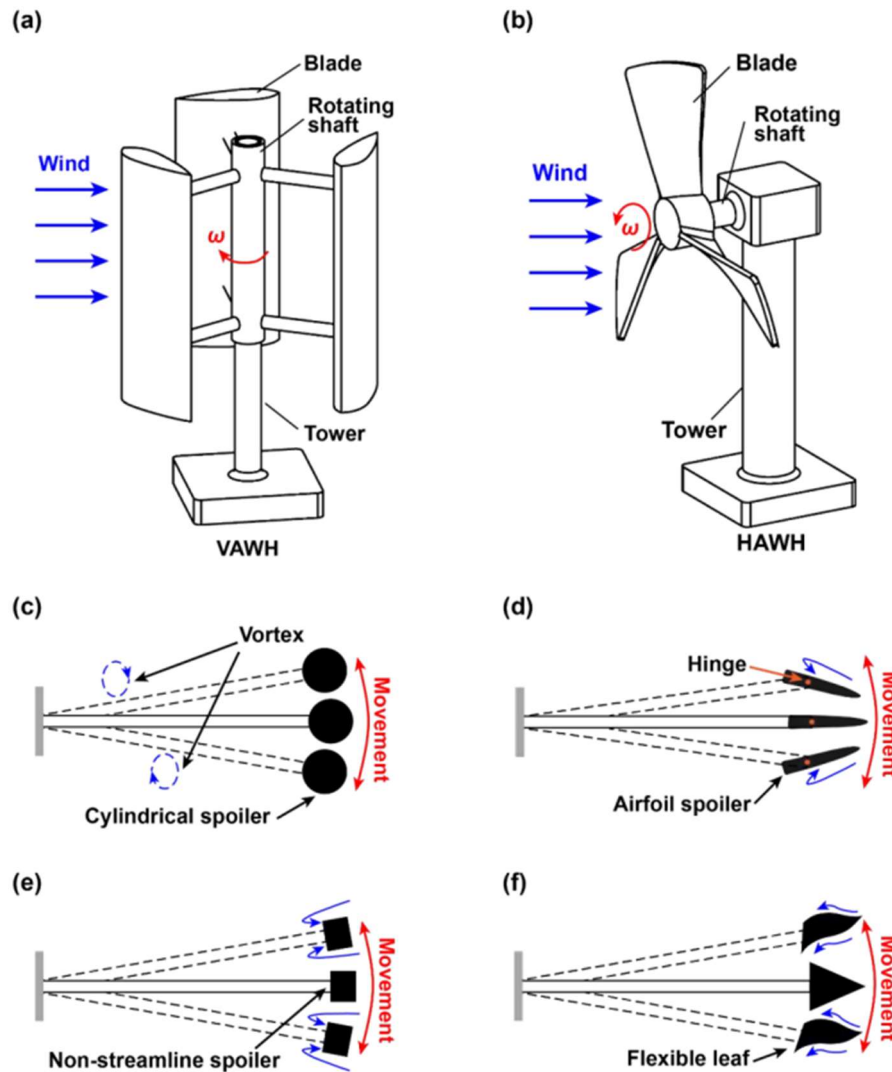
2.1 Υπάρχουσες Τοπολογίες

Οι μικρο/νανο μηχανές αιολικής ενέργειας αποτελούνται συνήθως από σταθερά μέρη και κινητά εξαρτήματα. Στη διαδικασία αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας, τα κινητά εξαρτήματα χρησιμοποιούνται ως ο μηχανικός μετατροπέας για τη μεταφορά της ροής του ανέμου σε μηχανική περιστροφή ή δόνηση. Όλες οι μηχανές συγκομιδής αιολικής ενέργειας μπορούν να ταξινομηθούν σε ανεμογεννήτριες τύπου ανεμόμυλου και αεροελαστικές μηχανές συγκομιδής ενέργειας σύμφωνα με διαφορετικές αρχές για την παγίδευση των ρευμάτων του ανέμου [19].

Το Σχήμα 1 δείχνει τη βασική δομή και αρχή λειτουργίας των δύο διαφορετικών συσκευών συγκομιδής ενέργειας. Οι συλλέκτες ενέργειας τύπου ανεμόμυλου, χρησιμοποιούν λεπίδες για να μετατραπεί η ροή του ανέμου σε περιστρεφόμενη μηχανική ενέργεια και στη συνέχεια παράγουν ηλεκτρική ενέργεια μέσω των ομοαξονικά συνδεδεμένων εξαρτημάτων συγκομιδής ενέργειας. Με βάση τη διαφορετική κατεύθυνση του περιστρεφόμενου άξονα, μπορούμε να διαχωρίσουμε τους συλλέκτες ενέργειας σε κατακόρυφου άξονα (VAWH) [20] και οριζόντιου άξονα (HAWH) [21], [22], όπως φαίνεται στο Σχήμα 1(a-b).

Σε σύγκριση με τα VAWH, μπορεί να συλλεχθεί μεγαλύτερο ποσοστό αιολικής ενέργειας από τα HAWH, λόγω του ότι τα πτερύγια των HAWH είναι πάντα στραμμένα προς τη ροή του ανέμου κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους [22]. Οι ανεμογεννήτριες μεγάλης κλίμακας που βασίζονται σε ανεμόμυλους εγκαθίστανται συνήθως σε οροπέδια ή υπεράκτιες περιοχές για τη μετατροπή της αιολικής ενέργειας. Με την ανάπτυξη νέων υλικών και τεχνολογιών μικρο/νανο κατασκευής, αυτή η αρχή έχει εφαρμοστεί ευρέως και στις μικρής κλίμακας ανεμογεννήτριες.

Οι αεροελαστικές ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν την αλληλεπίδραση του ανέμου με κινητά στοιχεία για τη μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια [23].



Σχήμα 1. Η βασική δομή και η αρχή της μετατροπής της αιολικής ενέργειας σε μηχανική ενέργεια. (a-b) Μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε περιστρεφόμενη μηχανική ενέργεια με μηχανές συγκομιδής που βασίζονται σε ανεμόμυλους: (a) Συγκομιδή αιολικής ενέργειας κάθετου άξονα, (b) Συγκομιδή αιολικής ενέργειας οριζώντιου άξονα [20],[22] – (c-f) Μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε μηχανική ενέργεια δόνησης με αεροελαστικούς συλλέκτες: (c) Δόνηση που προκαλείται από δίνη, (d) φτερούγισμα, (e) καλπασμός, (f) flapping [19].

Διαφορετικοί τύποι αεροδυναμικών δονήσεων διεγείρονται πάνω ή γύρω από τα κινητά εξαρτήματα όταν ο άνεμος ρέει πάνω στην αεροελαστική μηχανή συγκομιδής ενέργειας, οι οποίοι περιλαμβάνουν τη δόνηση που προκαλείται από τυρβώδη ροή, το φτερούγισμα, τον καλπασμό και άλλους [19], [23], [24]. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1(c), μια κυλινδρική αεροτομή είναι εγκατεστημένη στο ελεύθερο άκρο του προβόλου στην αεροελαστική μηχανή συγκομιδής ενέργειας. Όταν ο άνεμος φυσά πάνω στην αεροελαστική ανεμογεννήτρια, σχηματίζονται περιοδικά δίνες με αντίθετη φορά περιστροφής και περνούν από τις δύο πλευρές της αεροτομής, προκαλώντας τυρβώδη ροή. Η μέγιστη απόδοση εξόδου μπορεί να επιτευχθεί όταν η συχνότητα ροής των στροβιλισμών που δημιουργούνται είναι σύμφωνη με τη φυσική συχνότητα της αεροελαστικής μηχανής συγκομιδής.

Το Σχήμα 1(d) δείχνει τον συλλέκτη αιολικής ενέργειας που βασίζεται στο κίνηση του φτερουγίσματος (flutter). Μια αεροτομή τοποθετείται στο άκρο του προβόλου. Όταν η σχετική ταχύτητα ανέμου υπερβαίνει την κρίσιμη ταχύτητα, παρατηρείται το λεγόμενο φτερούγισμα, λόγω του ότι η ενέργεια που απορροφάται από τον πρόβολο είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια που διαχέεται κατά την απόσβεση. Το πλάτος της κίνησης αυξάνεται με την αύξηση της καθαρής ενέργειας (Net Energy).

Το Σχήμα 1(e) δείχνει τον μηχανισμό συγκομιδής αιολικής ενέργειας που βασίζεται στον καλπασμό (galloring). Ένα αντικείμενο με μη αεροδυναμική διατομή στερεώνεται στο ελεύθερο άκρο του προβόλου. Όταν η καμπύλη σταθερής αεροδυναμικής άντωσης έχει αρνητική κλίση, διεγείρεται η καλπάζουσα δόνηση.

Η ανεμογεννήτρια που βασίζεται στην κίνηση flapping αποτελείται από έναν πρόβολο και μια εύκαμπτη αεροτομή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1(f). Το κινητό εξάρτημα της ανεμογεννήτριας διεγείρεται και δονείται προς τα πάνω και προς τα κάτω όταν ο άνεμος ρέει προς την εύκαμπτη αεροτομή. Για να μεγαλώσει το πλάτος της flapping κίνησης, χρειάζεται και μεγαλύτερο μέγεθος στην αεροτομή, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα του συλλέκτη αιολικής ενέργειας.

Σε σύγκριση με τις ανεμογεννήτριες τύπου ανεμόμυλου, οι αεροελαστικές ανεμογεννήτριες είναι μικρότερων διαστάσεων επειδή ο απαιτούμενος χώρος για δόνηση είναι μικρότερος από αυτόν που απαιτείται για την περιστροφή. Επιπλέον, οι αεροελαστικές ανεμογεννήτριες προσφέρουν χαμηλότερο κόστος και πολυπλοκότητα στην ανάπτυξη τους σε σύγκριση με τις τύπου ανεμόμυλου. Ωστόσο, η αεροελαστική ανεμογεννήτρια μπορεί να συλλέξει αιολική ενέργεια από μια κατεύθυνση ανέμου μόνο, και οι κατευθύνσεις που παίρνει ο άνεμος είναι τυχαίες. Αντίθετα, οι ανεμογεννήτριες τύπου ανεμόμυλου διατηρούν βέλτιστη απόδοση ανεξάρτητα από την κατεύθυνση που έχει ο άνεμος κάθε φορά [25].

Στην συνέχεια, θα μελετήσουμε τους πιο διαδεδομένους μηχανισμούς μετατροπής κινητικής ενέργειας σε ηλεκτρική που χρησιμοποιούν οι μηχανισμοί συγκομιδής αιολικής ενέργειας. Αυτοί είναι οι ηλεκτρομαγνητικοί, οι πιεζοηλεκτρικοί, οι ηλεκτροστατικοί και οι τριβοηλεκτρικοί [26].

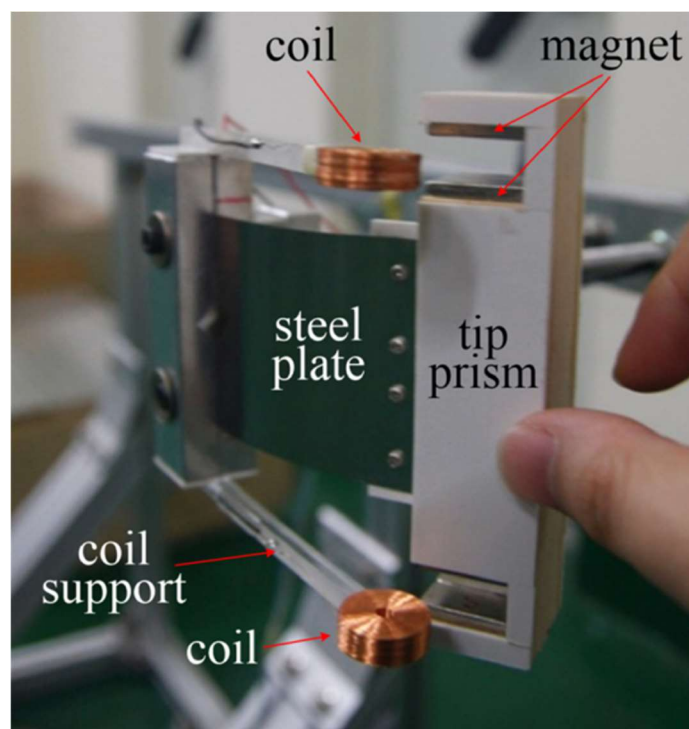
2.2 Ηλεκτρομαγνητική Συγκομιδή Ενέργειας

Ο μηχανισμός συγκομιδής ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας (Electromagnetic Energy Harvesters - EMEH) βασίζεται στην ηλεκτρομαγνητική επαγωγή, η οποία θεωρείται και η κύρια μέθοδος συλλογής αιολικής ενέργειας μεγάλης κλίμακας [27].

Οι παραδοσιακές γεννήτριες κάνουν χρήση της περιστροφής των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας που υπόκεινται σε ροές αέρα. Δυστυχώς, η απόδοση των γεννητριών περιστροφικού τύπου μειώνεται σημαντικά καθώς μειώνεται το μέγεθός τους. Η μείωση του συντελεστή ισχύος αποδόθηκε στην υψηλότερη αντίσταση (viscous drag) στα πτερύγια σε χαμηλότερους αριθμούς Reynolds, καθώς και στην αύξηση των θερμικών απωλειών και των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών που τείνουν να αυξάνονται καθώς μειώνεται το μέγεθος. Εκτός από τη μείωση της απόδοσης, η κατασκευή περιστροφικών γεννητριών που απαιτούν ρότορα, στάτορα και πτερύγια είναι μια πολύ περίπλοκη και δαπανηρή διαδικασία σε μηχανισμούς μικρότερης κλίμακας [28]. Ως εκ τούτου, το υψηλό κόστος και η πολυπλοκότητα των συμβατικών στροβίλων, περιορίζουν τη δυνατότητα εφαρμογής τους για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας μικρής κλίμακας και για χαμηλές ταχύτητες ανέμου.

Αλλά ευτυχώς, με βάση τον μηχανισμό αεροελαστικής αστάθειας, μπορεί να πραγματοποιηθεί αποτελεσματικά συγκομιδή ενέργειας με μικρής κλίμακας μηχανισμούς και σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου [29].

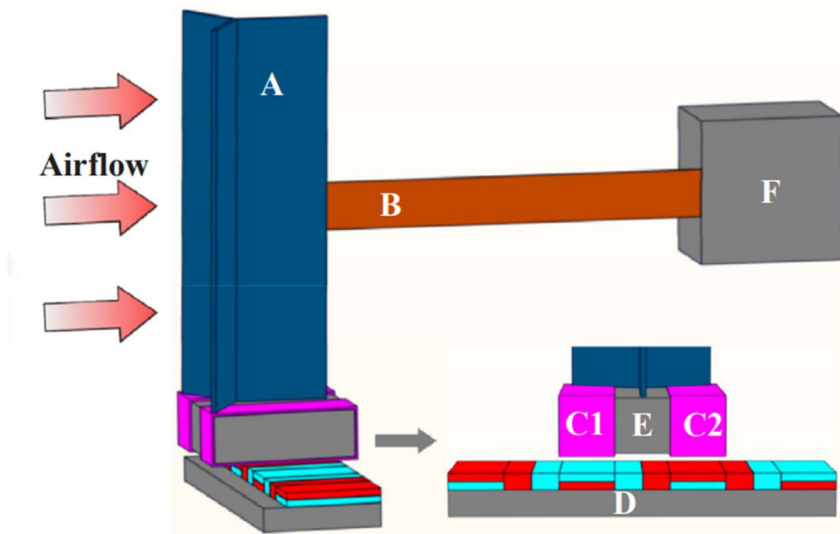
Το 2019, οι Le και Kwan ανέφεραν ένα καλπάζον ΕΜΕΗ [30]. Ο μηχανισμός αποτελείται από μια πρισματική αεροτομή, έναν μεταλλικό πρόβολο, πηνία και μαγνήτες. Οι μαγνήτες και η πρισματική αεροτομή είναι στερεωμένα στο άκρο του μεταλλικού προβόλου. Ο οριζόντιος καλπασμός θα προκληθεί όταν ο αέρας περάσει μέσα από την πρισματική αεροτομή. Η αιολική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια από τη σχετική καλπάζουσα δόνηση μεταξύ μαγνητών και πηνίων. Η διάταξη των πόλων των πάνω και κάτω μαγνητών είναι αντίθετη για τη βελτίωση της μαγνητικής ροής μέσω των πηνίων. Η ισχύς της εξόδου της συσκευής αυξάνεται από 0 σε 1,41 mW όταν η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται από 1,5 σε 4 m/s.



Σχήμα 2. Ο προτεινόμενος ηλεκτρομαγνητικός συλλέκτης ενέργειας με διπλό μαγνήτη [30].

Για να ενισχυθεί η αποτελεσματικότητα συλλογής της ροής του ανέμου, το σχήμα της αεροτομής βελτιστοποιήθηκε. Οι Zhang κ.α. [27] ανέφεραν ένα ΕΜΕΗ που βασίζεται σε καλπασμό με αεροτομή τύπου Y. Ο μηχανισμός συγκομιδής ενέργειας που φαίνεται στο Σχήμα 3 αποτελείται από ένα σώμα τριών λεπίδων τύπου Y (A) με μισή γωνία 60° που υπόκειται σε ροές ανέμου. Το σώμα συνδέεται στο ελεύθερο άκρο μιας εύκαμπτης δοκού (B) και στα πηνία (C1 και C2 για το αριστερό και το δεξί πηνίο αντίστοιχα). Οι μαγνήτες τοποθετούνται σε διάταξη Halbach και στερεώνονται στο κάτω μέρος (D). Θα πρέπει να αναφέρουμε ότι μια πλάκα (E) χρησιμοποιείται ως στήριγμα για τα πηνία και είναι προσαρτημένη στο κάτω μέρος του σώματος. Λαμβάνοντας υπόψιν αυτό το σχέδιο, όταν η ταχύτητα των ροών του αέρα είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα αποκοπής της αστάθειας, παρατηρείται η εγκάρσια απόκριση καλπασμού, που οδηγεί στο να “κόψει” το πηνίο τις γραμμές της μαγνητικής επαγωγής. Με αυτόν τον τρόπο, το ηλεκτρικό ρεύμα παράγεται στο πηνίο κατά μήκος της εξωτερικής αντίστασης φορτίου. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων έδειξαν ότι η μέση ισχύς εξόδου

μπορεί να φτάσει τα 2,5 mW όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι 4 m/s. Επιπλέον, η ρεαλιστική περιβαλλοντική δοκιμή επαλήθευσε την προσαρμοστικότητα του μηχανισμού συγκομιδής ενέργειας.



Σχήμα 3. Σχηματική αναπαράσταση του ηλεκτρομαγνητικού αεροελαστικού συλλέκτη ενέργειας [27].

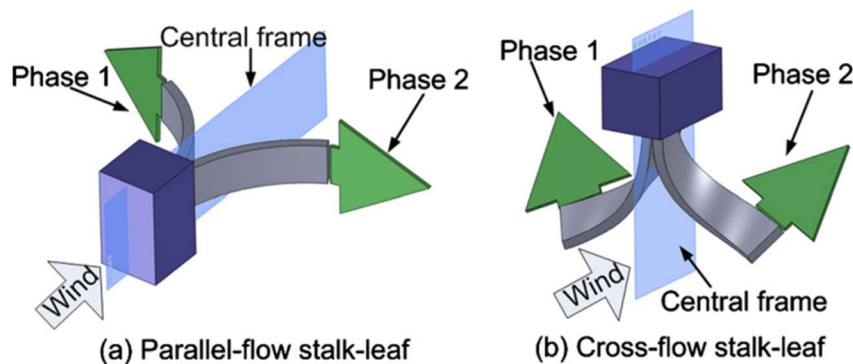
2.3 Πιεζοηλεκτρική Συγκομιδή Ενέργειας

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο είναι ένα φαινόμενο ηλεκτρομηχανικής αλληλεπίδρασης, το οποίο μπορεί να χωριστεί σε θετικό και ανάστροφο [31], [32]. Το θετικό πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο είναι η διαδικασία μετατροπής της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια, η οποία είναι ο μηχανισμός λειτουργίας των πιεζοηλεκτρικών μηχανισμών συγκομιδής ενέργειας (Piezoelectric Energy Harvesters - PEH). Η πυκνότητα του φορτίου είναι ανάλογη με την εξωτερική μηχανική δύναμη που ασκείται. Το ανάστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο είναι η διαδικασία μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική, η οποία είναι και η βασική λειτουργία του μηχανισμού του πιεζοηλεκτρικού ενεργοποιητή (piezoelectric actuator). Όταν τα πιεζοηλεκτρικά υλικά ηλεκτρίζονται από εξωτερική δύναμη, η παραμόρφωση που τους προκαλείται έχει ως αποτέλεσμα να φορτίζονται με αντίθετη πολικότητα οι δύο επιφάνειες του πιεζοηλεκτρικού υλικού. Η παραμόρφωση του πιεζοηλεκτρικού υλικού είναι θετικά ανάλογη με το μέγεθος του εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου. Ο PEH έχει το πλεονέκτημα της καλής απόκρισης στη συγκομιδή αιολικής ενέργειας χαμηλής συχνότητας και χαμηλής ταχύτητας.

Οι πιεζοηλεκτρικές μηχανές συγκομιδής αιολικής ενέργειας ταξινομούνται κυρίως σε τοπολογίες stalk-leaf/vortex και ανεμόμυλων. Η τοπολογία stalk-leaf/vortex λειτουργεί με βάση το φαινόμενο φτερουγίσματος μιας πλάκας που είναι στερεωμένη σε έναν πρόβολο και έχει μια απλή και φθηνή δομή σε σύγκριση με τις τοπολογίες ανεμόμυλων [33], [34], [35], [36].

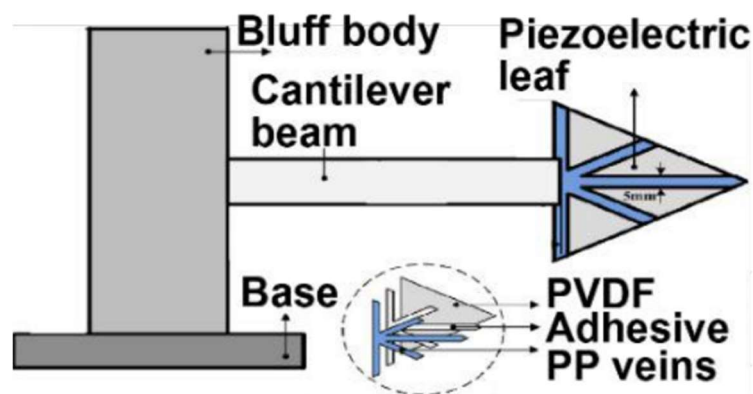
Το Σχήμα 4, δείχνει δύο τοπολογίες για stalk-leaf συλλέκτη αιολικής ενέργειας. Πρώτη είναι η τοπολογία παράλληλης ροής (parallel-flow) στην οποία ένα εύκαμπτο πιεζοηλεκτρικό υλικό (stalk) συνδέεται με μια πλάκα που είναι στερεωμένη σε έναν πρόβολο (leaf) και έχει τον ίδιο προσανατολισμό με την ροή του ανέμου. Ύστερα έχουμε την τοπολογία εγκάρσιας ροής

(cross-flow) στην οποία το μήκος του stalk είναι κάθετο προς την κατεύθυνση του leaf και της ροής του ανέμου.



Σχήμα 4. Σχέδιο που αναπαριστά την κίνηση των δύο τοπολογιών: (a) parallel-flow stalk-leaf, (b) cross-flow stalk-leaf [33].

Και στις δύο τοπολογίες, η δόνηση που προκαλεί ο άνεμος στην λεπτή πλάκα (leaf) συμβαίνει λόγω της δίνης στο πρόσθιο άκρο και της αεροδυναμικής αστάθειας του οπισθίου άκρου της πλάκας. Ωστόσο, σε μια ομοιόμορφη ροή ανέμου, η ενέργεια δόνησης της τοπολογίας εγκάρσιας ροής είναι μεγαλύτερη από αυτή της παράλληλης ροής. Το πιεζοηλεκτρικό υλικό που χρησιμοποιείται στο stalk θα πρέπει να είναι επαρκώς εύκαμπτο για να επιτρέψει στην πλάκα να δονείται [33]. Ως εκ τούτου, ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό τύπου πολυμερούς όπως το φθοριούχο πολυβινυλιδένιο (PVDF) χρησιμοποιείται συχνά στην τοπολογία stalk-leaf/vortex. Η χρήση PVDF μειώνει την απόδοση του συλλέκτη ενέργειας λόγω του χαμηλού συντελεστή σύζευξης σε σύγκριση με άλλα πιεζοηλεκτρικά υλικά, όπως μια άκαμπτη πιεζοηλεκτρική διμορφή δοκός. Ωστόσο, η χρήση μιας άκαμπτης πιεζοηλεκτρικής δοκού αυξάνει την ταχύτητα του ανέμου που αντιστοιχεί στην έναρξη λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, γεγονός που υποβαθμίζει τη συλλογή ενέργειας σε ροές αέρα χαμηλής ταχύτητας [34], [35]. Ένα παράδειγμα τοπολογίας stalk-leaf/vortex παράλληλης ροής προτάθηκε το 2018 από

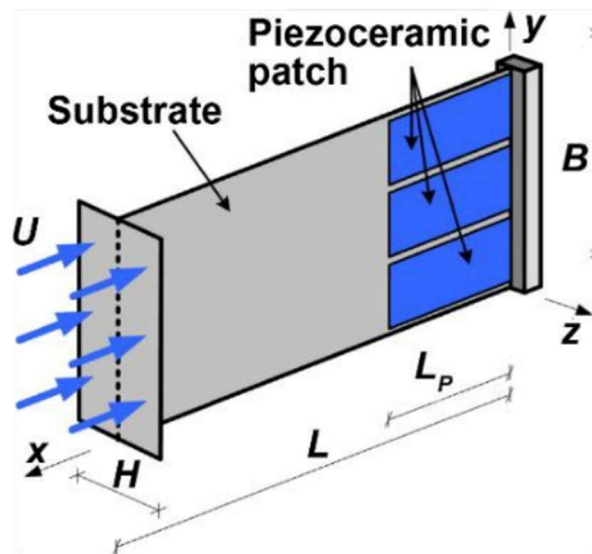


Σχήμα 5. Οι δομή του συλλέκτη αιολικής ενέργειας που για την υλοποίησή του αποτέλεσε έμπνευση η δομή των φύλλων [37].

τους Wang κ.α. Πρόκειται για έναν βιομιμητικό PEH, εμπνευσμένο από τις νευρώσεις των φύλλων [37]. Ένα ισοσκελές τριγωνικό φιλμ φθοριούχου πολυβινυλιδενίου (PVDF) αποτελεί το πιεζοηλεκτρικό φύλλο και καλύπτεται από νευρώσεις κατασκευασμένες από πολυπροπυλένιο (PP). Το πιεζοηλεκτρικό φύλλο στερεώνεται στο ελεύθερο άκρο του προβόλου, ο οποίος είναι προσαρτημένος σε ένα μη αεροδυναμικό σώμα στο άλλο άκρο. Όταν

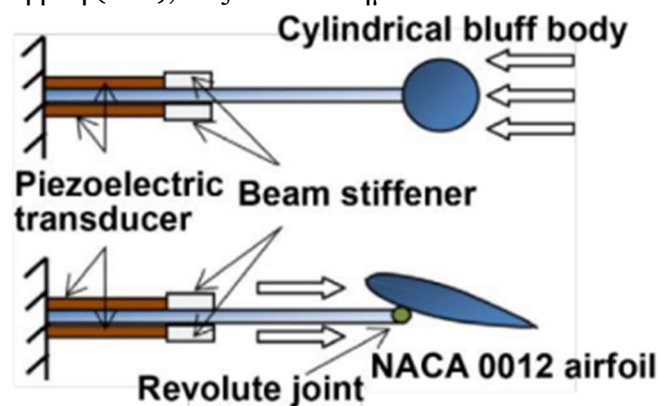
ο αέρας φυσάει πάνω στο σώμα, δημιουργείται τυρβώδης ροή στις ακμές του σώματος, διεγείροντας το πιεζοηλεκτρικό φύλλο για να μετατρέψει την αιολική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Στο Σχήμα 5 φαίνεται η δομή της συσκευής συγκομιδής αιολικής ενέργειας.

Ο Kwon (2010) πρότεινε την σχεδίαση ενός PEH σε σχήμα T για τη συγκομιδή αιολικής ενέργειας [35]. Το PEH αποτελείται από ένα διμορφο πρόβολο και έξι πιεζοκεραμικά κομμάτια και στις δύο πλευρές του υποστρώματος. Το PEH που διεγείρεται από τη δόνηση που προκαλεί το φαινόμενο του φτερουγίσματος, μπορεί να παράξει ηλεκτρική ενέργεια με ταχύτητα ανέμου έως 4 m/s και με μέγιστη ισχύ εξόδου τα 4,0 mW. Η σχηματική απόδοση αυτού του μηχανισμού συγκομιδής ενέργειας φαίνεται στο Σχήμα 6.



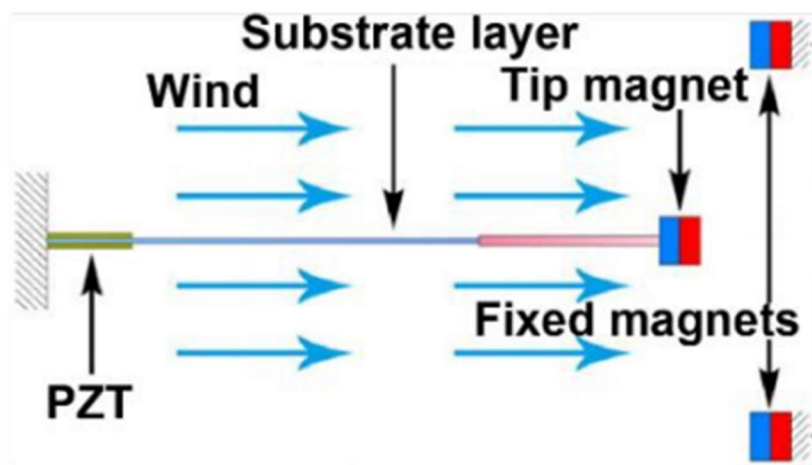
Σχήμα 6. Πιεζοηλεκτρικός μηχανισμός συγκομιδής ενέργειας σε σχήμα T [35].

Μια αποτελεσματική στρατηγική για τη βελτιστοποίηση της ηλεκτρικής απόδοσης του PEH, παρατηρήθηκε με την προσάρτηση μιας ενίσχυσης στο υπόστρωμα του πιεζοηλεκτρικού προβόλου, με αποτέλεσμα η δοκός να είναι πιο δύσκαμπτη [38]. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7, το ενισχυτικό της δοκού στερεώνεται στο υπόστρωμα στα δεξιά των πιεζοηλεκτρικών υλικών. Πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι αυτή η μέθοδος είναι αποτελεσματική για τα διαφορετικά είδη αεροελαστικών PEH. Οι επιδόσεις παραγωγής ενέργειας των PEH που βασίζονται στον καλασμό και το φτερούγισμα καθώς και οι PEH που βασίζονται στις δονήσεις από τυρβώδη ροή (VIV), αυξάνονται σημαντικά.



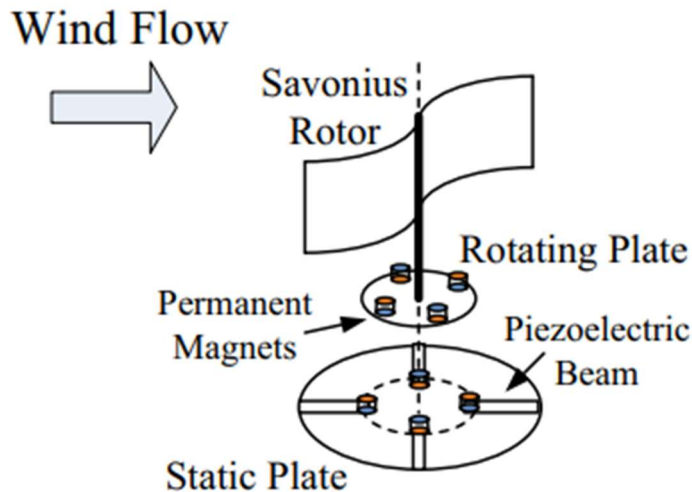
Σχήμα 7. Αεροελαστική μηχανή συγκομιδής ενέργειας με ενισχυμένη δυσκαμψία στη δοκό [38]

Γενικά, το πλάτος και η ισχύς εξόδου ενός PEH με πρόβολο, μεγιστοποιούνται στο σημείο συχνότητας συντονισμού. Ωστόσο, η φυσική συχνότητα είναι αμετάβλητη για έναν μηχανισμό συγκομιδής ενέργειας, κάτι που δεν συμβάλλει στην αποτελεσματική συλλογή αιολικής ενέργειας, σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων. Οι Zhou κ.α. ανέφεραν ένα δυναμικά ευσταθές PEH με βάση τη κίνηση του φτερουγίσματος, για την συγκομιδή της αιολικής ενέργειας σε ένα ευρύ φάσμα ταχυτήτων ανέμου [39]. Ο μηχανισμός αποτελείται από ένα πιεζοηλεκτρικό φύλλο, ένα ορθογώνιο σπόιλερ, έναν μαγνήτη στην άκρη και δύο εξωτερικούς σταθερούς μαγνήτες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8. Η δόνηση πραγματοποιείται με την αλληλεπίδραση μεταξύ του μαγνήτη που βρίσκεται στην άκρη και των δύο σταθερών μαγνητών και πραγματοποιεί δόνηση με πολλαπλά σημεία ισορροπίας. Αυτός ο PEH μπορεί να διατηρήσει υψηλή απόδοση ισχύος με εύρος από 1,5 έως 7,5 m/s. Μια παρατήρηση που μπορούμε να κάνουμε είναι ότι η αύξηση του πλάτους της κίνησης και η διεύρυνση των συχνοτήτων είναι οι δύο αξιοσημείωτες στρατηγικές για την βελτίωση της απόδοσης εξόδου των αεροελαστικών πιεζοηλεκτρικών συλλεκτών αιολικής ενέργειας.



Σχήμα 8. Δυναμικά ευσταθές PEH με βάση τη κίνηση του φτερουγίσματος [39].

Διάφορες τοπολογίες ανεμόμυλων, συμπεριλαμβανομένου ενός ανεμόμυλου με ενεργά πιεζοηλεκτρικά πτερύγια [40], του ανεμόμυλου με εκκεντροφόρο [41] ή στροφαλοφόρου άξονα [42] και ανέπαφων ανεμόμυλων Savonius με μαγνητική σύζευξη [44], έχουν διερευνηθεί πρόσφατα για τη συγκομιδή πιεζοηλεκτρικής αιολικής ενέργειας. Μια μέθοδος για τη μείωση της ταχύτητας του ανέμου με την οποία οι ανέπαφοι ανεμόμυλοι αρχίζουν να παράγουν ισχύ εξόδου, είναι με τη χρήση ενός επιπλέον πιεζοηλεκτρικού δίμορφου ως ενεργοποιητή. Ο ενεργοποιητής χρησιμοποιώντας μια επιπλέον πηγή τάσης AC παράγει μια εναλλασσόμενη απόκλιση που βοηθά την ανεμογεννήτρια να ξεπεράσει τη στατική τριβή σε χαμηλή ταχύτητα ανέμου [45].



Σχήμα 9. Τοπολογία ενός ανέπαφου ανεμόμυλου Savonius με μαγνητική σύζευξη [43].

2.4 Ηλεκτροστατική Συγκομιδή Ενέργειας

Ο μηχανισμός ηλεκτροστατικής συγκομιδής ενέργειας (Electrostatic Energy Harvesting - EEH) είναι ένα είδος ηλεκτροστατικής συσκευής υψηλής τάσης που παράγει ηλεκτρική ενέργεια με ένα ήδη πολωμένο electret ή αλλιώς με ένα προ-εφαρμοσμένο ηλεκτρικό πεδίο υψηλής τάσης [46]. Ο EEH είναι μια χωρητική δομή που αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια. Το κενό μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων συνήθως περιέχει κάποιο διηλεκτρικό υλικό για να βελτιωθεί η απόδοση της εξόδου και να αποφευχθεί το ενδεχόμενο βραχυκυκλώματος από σπινθήρισμα κατά τη διάρκεια υψηλών τάσεων. Μια σχετική κίνηση μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων δημιουργεί μια διακύμανση στη χωρητικότητα, και στη συνέχεια ηλεκτρικά φορτία. Ανάλογα με διαφορετικά υλικά από τα οποία κατασκευάζονται, οι EEH μπορούν να χωριστούν σε δύο τύπους: χωρίς electret και με βάση τα electret.

Οι μηχανισμοί συγκομιδής ηλεκτροστατικής ενέργειας χωρίς electret, χρησιμοποιούν κύκλους μετατροπής από τις φορτίσεις και εκφορτίσεις του πυκνωτή (απαιτείται τότε ένα ενεργό ηλεκτρονικό κύκλωμα για την εφαρμογή του κύκλου φόρτισης στη δομή και πρέπει να συγχρονιστεί με τη διακύμανση της χωρητικότητας).

Οι μηχανισμοί συγκομιδής ηλεκτροστατικής ενέργειας που βασίζονται σε electret, έχουν τη δυνατότητα να μετατρέπουν απευθείας τη μηχανική ισχύ σε ηλεκτρική ενέργεια [47].

Αυτοί οι μηχανισμοί συγκομιδής ενέργειας είναι προσαρμοσμένοι για τη μείωση του μεγέθους και την αύξηση των ηλεκτρικών πεδίων και της χωρητικότητας, αυξάνοντας έτσι και την πυκνότητα ισχύος των μετατροπέων. Προσφέρουν επίσης τη δυνατότητα αποσύνδεσης της μηχανικής δομής από τον μετατροπέα, κάτι που δεν είναι δυνατό με πιεζοηλεκτρικές συσκευές. Τέλος, μπορούν να αποτελέσουν μια λύση στην αύξηση της αγοράς των ασύρματων δικτύων αισθητήρων που τροφοδοτούνται με ΕΗ δίνοντας τη δυνατότητα ανάπτυξης συσκευών χαμηλότερου κόστους, καθώς δεν χρειάζονται μαγνήτες ή πιεζοηλεκτρικά υλικά, που μπορεί να αποδειχθούν αρκετά κοστοβόρα [47].

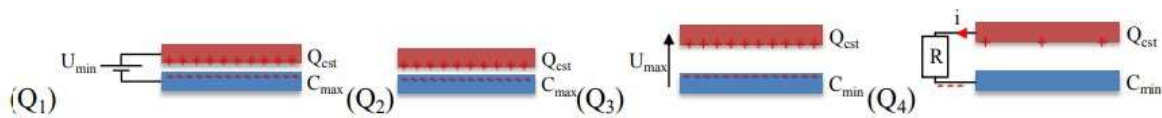
2.4.1 Μηχανισμοί συγκομιδής ηλεκτροστατικής ενέργειας χωρίς electret

Αυτές οι ηλεκτροστατικές συσκευές είναι παθητικές δομές που απαιτούν έναν ενεργειακό κύκλο για τη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Πολλοί ενεργειακοί κύκλοι επιτρέπουν μια τέτοια μετατροπή, αλλά αυτοί που χρησιμοποιούνται πιο συχνά, είναι οι

κύκλοι περιορισμένης φόρτισης και οι κύκλοι περιορισμένης τάσης. Και οι δύο ξεκινούν όταν η χωρητικότητα του μετατροπέα είναι μέγιστη. Σε αυτό το σημείο, ένα φορτίο εγχέεται στον πυκνωτή χάρη σε μια εξωτερική πηγή, για να τον πολώσει. Στην συνέχεια, παρουσιάζονται οι κύκλοι περιορισμένης φόρτισης και περιορισμένης τάσης.

2.4.1.1. Κύκλος περιορισμένου φορτίου

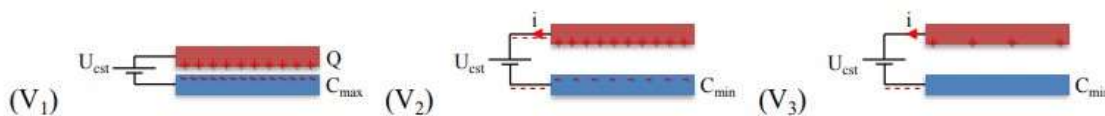
Ο κύκλος περιορισμού φορτίου είναι ο πιο εύκολος στην εφαρμογή σε ηλεκτροστατικές συσκευές. Ο κύκλος ξεκινά όταν η δομή φτάσει στη μέγιστη χωρητικότητα C_{max} (Q1). Σε αυτή τη θέση, η δομή φορτίζεται χάρη σε μια εξωτερική πηγή πόλωσης: ένα ηλεκτρικό φορτίο Q_{est} αποθηκεύεται στον πυκνωτή υπό μια δεδομένη τάση U_{min} . Στη συνέχεια, η συσκευή αφήνεται σε ανοιχτό κύκλωμα (Q2). Η κατασκευή κινείται μηχανικά σε μια θέση όπου η χωρητικότητά της είναι ελάχιστη (Q3). Όσο το φορτίο Q_{est} διατηρείται σταθερό ενώ η χωρητικότητα C μειώνεται, η τάση στον πυκνωτή U αυξάνεται. Όταν η χωρητικότητα φτάσει στο ελάχιστο (C_{min}) (ή η τάση στο μέγιστο (U_{max})), τα ηλεκτρικά φορτία αφαιρούνται από τη δομή (Q4).



Σχήμα 10. Κύκλος μετατροπής ενέργειας περιορισμένου φορτίου (Charge-constrained cycle) [47].

2.4.1.2. Κύκλος περιορισμένης τάσης

Ο κύκλος περιορισμένης τάσης ξεκινά κι αυτός όταν η χωρητικότητα του ηλεκτροστατικού μετατροπέα είναι μέγιστη. Ο πυκνωτής πολώνεται σε τάση U_{est} χρησιμοποιώντας μια εξωτερική πηγή τροφοδοσίας (μπαταρία, φορτισμένος πυκνωτής...) (V1). Αυτή η τάση θα διατηρηθεί σε όλο τον κύκλο μετατροπής χάρη σε ένα κύκλωμα. Δεδομένου ότι η τάση είναι σταθερή και η χωρητικότητα μειώνεται, το φορτίο του πυκνωτή αυξάνεται, δημιουργώντας ένα ρεύμα που συλλέγεται και αποθηκεύεται (V2). Όταν η χωρητικότητα φτάσει στην ελάχιστη τιμή της, το φορτίο Q που εξακολουθεί να υπάρχει στον πυκνωτή συλλέγεται και αποθηκεύεται πλήρως (V3).



Σχήμα 11. Κύκλος μετατροπής ενέργειας περιορισμένης τάσης (Voltage-constrained cycle) [47].

2.4.2 Μηχανισμοί συγκομιδής ηλεκτροστατικής ενέργειας που βασίζονται σε electret

Οι ΕΕΗ που βασίζονται στα electret (electret-based ΕΕΗ) είναι αρκετά παρόμοιοι με τους ΕΕΗ χωρίς electret. Η κύρια διαφορά βασίζεται στα στρώματα electret που προστίθενται σε μία (ή δύο) πλάκες του μεταβλητού πυκνωτή, πολώνοντάς τον.

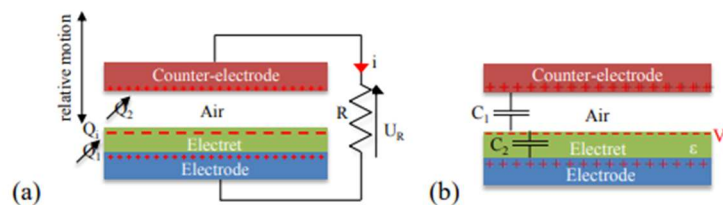
2.4.2.1 Electret

Τα electret είναι διηλεκτρικά υλικά που βρίσκονται σε κατάσταση σχεδόν μόνιμης ηλεκτρικής πόλωσης (ηλεκτρικά φορτία ή διπολική πόλωση). Είναι ηλεκτροστατικά δίπολα, ισοδύναμα με μόνιμους μαγνήτες που μπορούν να κρατήσουν φορτία για χρόνια. Η λέξη electret προέρχεται από την φράση «**electricity magnet**» και επιλέχθηκε από τον Oliver Heaviside το 1885 [47]. Το τεφλόν [48-51], το SiO₂ [52-53] και το CYTOP [54-58], είναι ξεκάθαρα τα πιο γνωστά και τα πιο διαδεδομένα electrets στους ηλεκτροστατικούς μετατροπείς.

2.4.2.2 Αρχή μετατροπής

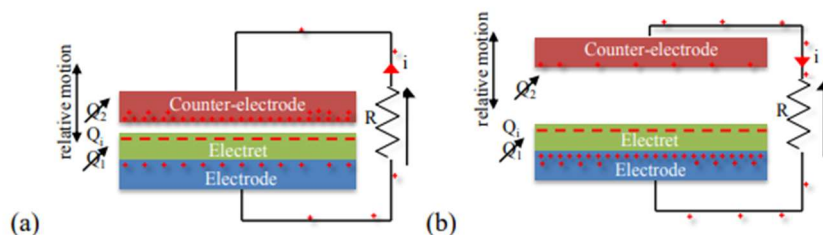
Η αρχή μετατροπής των electret-based ΕΕΗ μοιάζει με εκείνη των electret-free ΕΕΗ και συνδέεται στενά με τις διακυμάνσεις της χωρητικότητας. Αλλά αντίθετα με εκείνους, η μετατροπή που βασίζεται σε electret δεν χρειάζεται καμία αρχική ηλεκτρική ενέργεια για να λειτουργήσει. Η παραμόρφωση της δομής παράγει άμεσα μια τάση εξόδου, ακριβώς όπως ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό.

Οι ΕΕΗ με electret, βασίζονται σε μια χωρητική δομή που αποτελείται από δύο πλάκες (ηλεκτρόδιο και αντίθετο ηλεκτρόδιο όπως φαίνεται στο Σχήμα 12). Το electret προκαλεί φορτία στα ηλεκτρόδια και στα αντίθετα ηλεκτρόδια, σύμφωνα με τον νόμο του Gauss. Επομένως, το φορτίο Q_i στο ηλεκτρόδιο είναι ίσο με το άθροισμα των Q_1 και Q_2 , όπου Q_1 είναι η συνολική ποσότητα φορτίων στο ηλεκτρόδιο και Q_2 η συνολική ποσότητα φορτίων στο αντίθετο ηλεκτρόδιο ($Q_i = Q_1 + Q_2$).



Σχήμα 12. Ηλεκτροστατική μετατροπή με βάση το Electret - Βασική ιδέα [47].

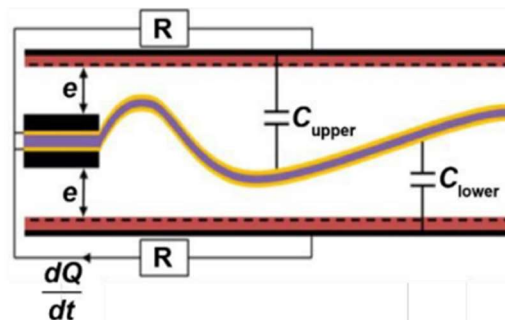
Μια σχετική κίνηση του αντίθετου ηλεκτροδίου σε σχέση με το ηλεκτρόδιο και το electret προκαλεί μια αλλαγή στη γεωμετρία του πυκνωτή (π.χ. το αντίθετο ηλεκτρόδιο απομακρύνεται από το electret, αλλάζοντας το διάκενο αέρα και στη συνέχεια την επίδραση του electret στο αντίθετο ηλεκτρόδιο) και οδηγεί σε αναδιοργάνωση των φορτίων μεταξύ του ηλεκτροδίου και του αντίθετου ηλεκτροδίου μέσω του φορτίου R (Σχήμα 13). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια κυκλοφορία ρεύματος μέσω του R και ένα μέρος της μηχανικής ενέργειας (σχετική κίνηση) μετατρέπεται στη συνέχεια σε ηλεκτρική ενέργεια [47]. Αυτή η σχετική κίνηση μπορεί να εμφανιστεί με τη μορφή μιας ροής ανέμου.



Σχήμα 13. Ηλεκτροστατική μετατροπή με βάση το Electret - Κυκλοφορία φορτίου [47].

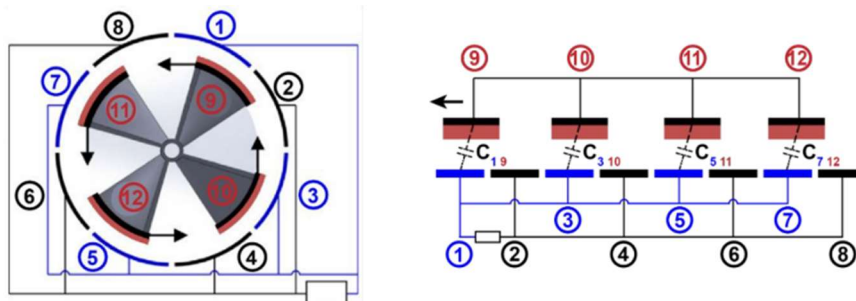
Το 2015, οι Perez κ.α. ανέπτυξαν έναν ΕΕΗ που χρησιμοποιεί electret και μετατρέπει την αιολική ενέργεια σε ηλεκτρική μέσω της κίνησης του φτερουγίσματος. Μια εύκαμπτη σημαία

από PVDF βρισκόταν στερεωμένη σε ένα μη αεροδυναμικό σώμα που είναι στερεωμένο στην είσοδο του ΕΕΗ για να προκαλέσει τυρβώδη ροή. Όταν ο άνεμος ρέει πάνω στον μηχανισμό συγκομιδής ενέργειας, η χωρητικότητα αλλάζει μεταξύ των ηλεκτροδίων χρυσού και χαλκού λόγω της δόνησης από το φτερούγισμα της εύκαμπτης σημαίας PVDF. Τα επαγόμενα φορτία ρέουν μεταξύ του ηλεκτροδίου χαλκού και του ηλεκτροδίου χρυσού μέσω της εξωτερικής αντίστασης που προκαλείται από την αλλαγή της χωρητικότητας. Η συσκευή είναι ισοδύναμη με δύο βασικούς ΕΕΗ που είναι συνδεδεμένοι παράλληλα. Η ισχύς εξόδου μπορεί να φτάσει τα 481 μW στα 15 m/s και τα 2,1 mW στα 30 m/s, που είναι στο ίδιο επίπεδο με τον πιεζοηλεκτρικό και ηλεκτρομαγνητικό μηχανισμό συγκομιδής ενέργειας με βάση το φτερούγισμα. Αν και η συσκευή είναι συμπαγής και εύχρηστη, η ελάχιστη ταχύτητα του ανέμου που απαιτείται για να λειτουργήσει, είναι πολύ υψηλή.



Σχήμα 14. Ένας electret-based ΕΕΗ με εύκαμπτη σημαία από PVDF για κίνηση φτερούγισματος [59].

Πολλές στρατηγικές μπορούν να εφαρμοστούν για τη μείωση της λειτουργικής ταχύτητας του ανέμου για τη συγκομιδή αιολικής ενέργειας μικρής κλίμακας [59]. Ένας μικρής κλίμακας ΕΕΗ με electret για τη συγκομιδή αιολικής ενέργειας χαμηλής ταχύτητας αναπτύχθηκε το 2016 [60]. Το electret είναι προσαρτημένο μπροστά από το κινητό ηλεκτρόδιο ώστε να σχηματίσει μια χωρητική δομή με άλλα αντίθετα ηλεκτρόδια. Όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι αρκετά υψηλή, ο ρότορας αρχίζει να περιστρέφεται και δημιουργεί μια περιοδική αλλαγή της χωρητικότητας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι η ισχύς εξόδου μπορεί να φτάσει τα 1,8 mW στα 10 m/s. Αυτή η συσκευή συγκομιδής αιολικής ενέργειας έχει τη χαμηλότερη απαίτηση ταχύτητας για να λειτουργήσει, η οποία είναι πιο πρακτική για τη συγκομιδή αιολικής ενέργειας χαμηλής ταχύτητας [25].



Σχήμα 15. Μικρής κλίμακας ΕΕΗ για αιολική συγκομιδή ενέργειας με ρότορα [60].

2.5 Τριβηλεκτρική Συγκομιδή Ενέργειας

Από το 2012, η ιδέα της τριβηλεκτρικής νανογεννήτριας (Triboelectric Nanogenerator - TENG) που προτάθηκε από την ομάδα του Z. L. Wang έχει αναγνωριστεί ως η πιο πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για τη συλλογή μηχανικής ενέργειας σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων [61-63]. Τα τελευταία χρόνια, οι μελέτες πάνω στις TENG έχουν επεκταθεί σε διαφορετικά πεδία και έχουν αναδειχθεί πολλά πρωτοφανή πλεονεκτήματα, όπως το χαμηλό κόστος, το μικρό βάρος, η εύκολη κατασκευή και η υψηλής πυκνότητας ισχύς [61]. Οι Triboelectric Energy Harvesters (TEHs) είναι μια νέα ενεργειακή τεχνολογία που βασίζεται στις TENG [64].

Τα αιολικά πάρκα, συνήθως κατασκευάζονται γενικά με βάση τον ηλεκτρομαγνητισμό και τη δομή του στροβίλου, που μπορεί να προκαλέσει πιθανή ζημιά και ηχορύπανση στο τοπικό οικοσύστημα. Εξάλλου, λόγω των χαρακτηριστικών του εξοπλισμού όπως ο μεγάλος όγκος και η μάζα, καθώς και το υψηλό κόστος εγκατάστασης, το αιολικό πάρκο πρέπει να λειτουργεί υπό συνθήκες υψηλής ταχύτητας ανέμου [65, 66]. Αντίθετα, το TENG μπορεί να λύσει αυτά τα προβλήματα λειτουργώντας καλά έχοντας μικρό βάρος και σε ασθενείς κραδασμούς, που του επιτρέπουν να εφαρμόζεται σε πυκνές πόλεις [67].

2.5.1 Η βασική αρχή και οι τρόποι λειτουργίας

Η θεωρητική βάση του TENG είναι το ρεύμα μετατόπισης του Maxwell που εισήχθη από τον Maxwell στην εξίσωση του:

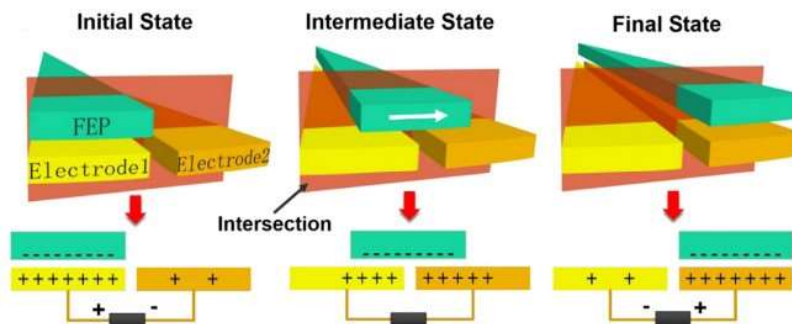
$$J_D = \frac{\partial D}{\partial t} = \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial t}$$

Όπου E είναι το ηλεκτρικό πεδίο, D είναι το πεδίο ηλεκτρικής μετατόπισης, P είναι η πυκνότητα του πεδίου πόλωσης και το ϵ_0 είναι η διαπερατότητα του υλικού. Ως μια νέα τεχνική στον τομέα συλλογής ενέργειας, η αρχή λειτουργίας της TENG έχει εμπνευστεί από τον τριβηλεκτρισμό στη καθημερινότητα.

Τέσσερις απλές αλλά αξιόπιστες και εφικτές λειτουργίες των TENG έχουν προταθεί από τον Wang, οι οποίες είναι η λειτουργία κάθετων επαφών-διαχωρισμού [68, 69], η λειτουργία πλευρικής ολίσθησης [70-72], η λειτουργία μονού ηλεκτροδίου [73, 74] και η λειτουργία ελεύθερου τριβηλεκτρικού στρώματος [75]. Με την εμβάθυνση και την ανάπτυξη της έρευνας για τις TENG, οι τρόποι λειτουργίας περιορίζονται όλο και λιγότερο σε έναν από τους τέσσερις. Σταδιακά, τα όρια μεταξύ των τεσσάρων τρόπων εργασίας γίνονται ασαφή, αλλά η αρχική λειτουργία μπορεί πάντα να βρεθεί στα σημερινά σχέδια [67].

Σε αντίθεση με τους EEH, που είναι απαραίτητη η διαδικασία συσσώρευσης στατικού φορτίου από προ-πολωμένο electret ή προ-εφαρμοσμένο υψηλό ηλεκτρικό πεδίο τάσης, μια TENG δημιουργεί επιφανειακό στατικό φορτίο μέσω της ηλεκτροδότησης από επαφή [76]. Όταν δύο διαφορετικά υλικά έρχονται σε επαφή με μια εξωτερική δύναμη, τα νέφη ηλεκτρονίων που ανήκουν στα δύο άτομα πλησιάζουν και επικαλύπτονται για να σχηματίσουν έναν ιοντικό ή ομοιοπολικό δεσμό. Η επικάλυψη των νεφών ηλεκτρονίων μειώνει το φράγμα δυναμικού στην επικαλυπτόμενη περιοχή και τα ηλεκτρόνια μπορούν να μεταφερθούν από το ένα άτομο στο άλλο. Όταν χωρίζονται δύο υλικά, τα ηλεκτρόνια που μεταφέρθηκαν παραμένουν ως στατικά φορτία στην επιφάνεια των υλικών. Μπορούν να μεταφερθούν περισσότερα φορτία κατά τη

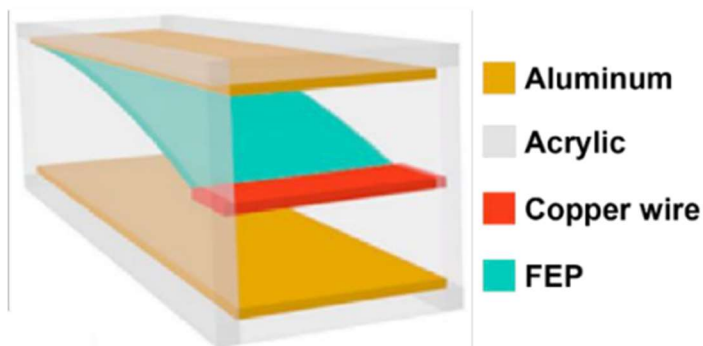
κίνηση της ολίσθησης από ότι με την επαφή, καθώς σε ατομική κλίμακα, η περιοχή επαφής είναι πολύ μικρή. Το Σχήμα 16 δείχνει το διάγραμμα μεταφοράς φορτίου ενός συρόμενου freestanding TENG [77].



Σχήμα 16. Ο μηχανισμός λειτουργίας της αιολικής τριβοηλεκτρικής συσκευής συγκομιδής ενέργειας με περιστροφική δομή.

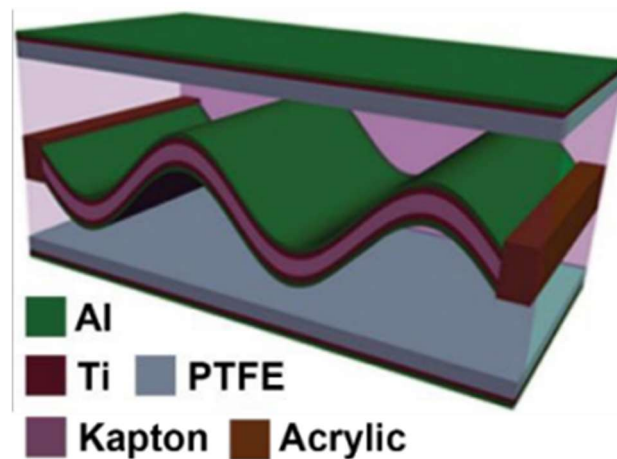
Μετά τη σχετική ολίσθηση, ίσα αντίθετα στατικά φορτία δημιουργούνται στις επιφάνειες των δύο διαφορετικών υλικών. Όταν το ελεύθερο στρώμα ολισθαίνει από το αριστερό ηλεκτρόδιο προς τα δεξιά, η διαφορά δυναμικού θα οδηγήσει στη μεταφορά ηλεκτρονίων από το δεξί ηλεκτρόδιο προς τα αριστερό μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος. Αντίθετα, τα ηλεκτρόνια θα ρέουν πίσω όταν το ελεύθερο στρώμα αντιστραφεί. Καθώς το ελεύθερο στρώμα ολισθαίνει μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων, ένα εναλλασσόμενο ρεύμα θα δημιουργηθεί στο εξωτερικό κύκλωμα για να πραγματοποιηθεί ο μετασχηματισμός της ηλεκτρικής ενέργειας. Η διαδικασία διαχωρισμού-επαφής και η λειτουργία του freestanding στρώματος είναι οι δύο κοινές δομές για τη συλλογή της αιολικής ενέργειας [25].

Με στόχο τη συγκομιδή της αιολικής ενέργειας, η δομή αεροελαστικής αστάθειας και η περιστροφική δομή είναι η πιο αντιπροσωπευτικές μέθοδοι για τον σχεδιασμό ενός αιολικού ΤΕΗ. Ο ΤΕΗ που βασίζεται στο φτερούγισμα απλοποιεί τη δομή του ηλεκτροδίου και μειώνει το κόστος. Οι Yang κ.α. ανέφεραν για πρώτη φορά έναν ΤΕΗ με βάση το φτερούγισμα [64], όπως φαίνεται και στο Σχήμα 17. Μεμβράνες αλουμινίου στερεώνονται στην επάνω και στην κάτω πλάκα για να χρησιμεύουν ως τριβοηλεκτρικό στρώμα και ως ηλεκτρόδια. Η μεμβράνη φθοριούχου αιθυλενίου προπυλενίου (FEP) στερεώνεται στο σπόιλερ που τοποθετείται στην είσοδο του ΤΕΗ. Όταν ο άνεμος ρέει μέσα από το σπόιλερ, η μεμβράνη FEP θα κυματίζει με δόνηση για να έρθει σε επαφή με τα πάνω και κάτω ηλεκτρόδια, προκαλώντας ηλεκτρισμό σε όλο το εξωτερικό κύκλωμα. Το ρεύμα βραχυκυκλώματος της εξόδου και η τάση ανοιχτού κυκλώματος μπορούν να φτάσουν τα 1,6 μA και 100 V και με μέγιστη στιγμιαία ισχύ τα 0,16 mW στα 100 M Ω . Αν και το ΤΕΗ που βασίζεται σε φτερούγισμα έχει πολλά πλεονεκτήματα, η απόδοση εξόδου είναι ασταθής



Σχήμα 17. Αεροελαστικός TEH που βασίζεται στην κίνηση φτερουγίσματος, με μονή είσοδο [64].

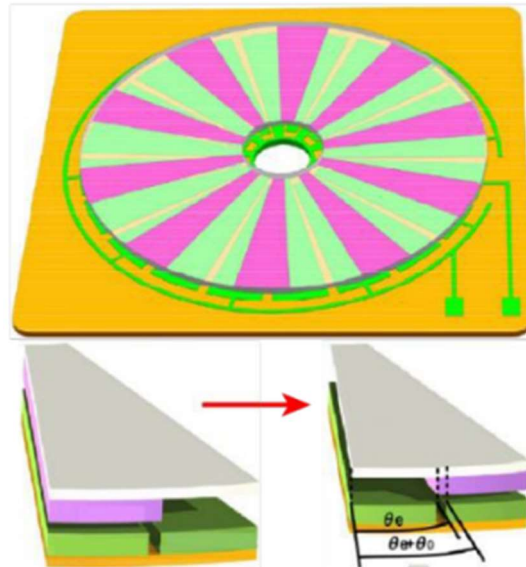
λόγω της τυχαίας κίνησης του φιλμ από FEP. Επιπλέον, ο μηχανισμός συγκομιδής ενέργειας μπορεί να συλλέξει αιολική ενέργεια μόνο από μία κατεύθυνση επειδή το φιλμ FEP είναι στερεωμένο στη μία πλευρά. Αυτό το μειονέκτημα μπορεί να ξεπεραστεί τοποθετώντας το φιλμ και από τις δύο πλευρές του μηχανισμού. Αυτό μπορεί να επιτύχει ρεύμα βραχυκυκλώματος εξόδου και η τάση ανοιχτού κυκλώματος 66 μA και 342 V στα 18.4 m/s. Στο Σχήμα 18 φαίνεται η σχηματική αναπαράσταση αυτού του TEH διπλής εισόδου (double inlet TEH - DTEH) [78].



Σχήμα 18. Αεροελαστικός TEH που βασίζεται στην κίνηση φτερουγίσματος, με διπλή είσοδο [78].

Σε σύγκριση με τα αεροελαστικά TEH, η απόδοση εξόδου του περιστροφικού TEH προσφέρει μεγαλύτερη σταθερότητα για τη συλλογή αιολικής ενέργειας από τυχαίες κατευθύνσεις. Ένας TEH εξαιρετικά χαμηλής τριβής έχει σχεδιαστεί για τη μετατροπή της αιολικής ενέργειας [79]. Η συσκευή αποτελείται από έναν κυλινδρικό στάτορα και έναν στροφέα που αποτελείται από έναν άξονα περιστροφής και τέσσερα εύκαμπτα πολυμερή φιλμ ως ελαστικές λεπίδες. Τα ηλεκτρόδια χαλκού στερεώνονται στην εσωτερική επιφάνεια του κυλινδρικού στάτορα. Η πολύ μαλακή επαφή μεταξύ του εύκαμπτου πολυμερούς φιλμ και των ηλεκτροδίων χαλκού χρησιμοποιείται για τη μείωση της δύναμης της τριβής όταν ο στροφέας περιστρέφεται από τη ροή του ανέμου. Τα αποτελέσματα της δοκιμής δείχνουν ότι η μέγιστη πυκνότητα ισχύος είναι 438,9 mW/kg. Η χαμηλότερη ταχύτητα του ανέμου εκκίνησης του TEH μπορεί να μειωθεί στα 3,5 m/s λόγω της εξαιρετικά χαμηλής τριβής. Ωστόσο, η ελάχιστη αρχική ταχύτητα ανέμου του TEH θα πρέπει να μειωθεί περαιτέρω για να καλύψει τη ζήτηση μετατροπής αιολικής ενέργειας σε μικροκλίμακα.

Στο Σχήμα 19 παρουσιάζεται ένα freestanding TEH που βασίζεται σε electret [80]. Ο TEH αποτελείται από έναν στροφέα και έναν στάτορα σε σχήμα ανεμιστήρα, οι οποίοι είναι ομοιόμορφα διατεταγμένα κατά μήκος του άξονα. Τα επαγόμενα φορτία μεταφέρονται μεταξύ δύο ηλεκτροδίων όταν ο στροφέας κινείται από τη ροή του ανέμου. Η ταχύτητα ανέμου για την εκκίνηση του TEH μπορεί να μειωθεί στα 0,8 m/s λόγω της απουσίας επαφής του στροφέα και του στάτορα. Η μέγιστη μέση ισχύς εξόδου του TEH μπορεί να φτάσει τα 9,1 mW στα 2,7 m/s, υποδεικνύοντας την πιθανή εφαρμογή για τη συγκομιδή αιολικής ενέργειας χαμηλής ταχύτητας.



Σχήμα 19. Ένας περιστροφικός freestanding TEH με electret [80].

Κεφάλαιο 3: Συγκομιδή Θερμικής Ενέργειας

Η συλλογή θερμικής ενέργειας είναι μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος για τη σύλληψη της ελεύθερα διαθέσιμης θερμότητας και τη μετατροπή της σε μια πιο χρησιμοποιήσιμη μορφή, όπως η μηχανική ή η ηλεκτρική ενέργεια. Η “ελεύθερη” θερμότητα είναι διαθέσιμη σε εμάς κυρίως με δύο μορφές: θερμότητα που αποβάλλεται και θερμότητα της φύσης. Έχει αναφερθεί ότι περισσότερο από το ήμισυ της ενέργειας που παράγεται από διάφορες ανανεώσιμες και μη πηγές ενέργειας παγκοσμίως διαχέεται στο περιβάλλον, κυρίως με τη μορφή θερμότητας που αποβάλλεται. Επιπλέον, οι φυσικοί πόροι όπως η γεωθερμική θερμότητα, η ηφαιστειακή θερμότητα και η ηλιακή θερμότητα είναι οι τεράστιοι ενεργειακοί πόροι που παραμένουν αναξιοποίητοι. Υπάρχουν πολλά τέτοια αποθέματα θερμικής ενέργειας σε όλο τον κόσμο, τα οποία απελευθερώνουν χιλιάδες joules ενέργειας κάθε δευτερόλεπτο στην περιβάλλουσα ατμόσφαιρα. Αναμφισβήτητα, μια οικονομικά αποδοτική μέθοδος για την ανάκτηση της απορριπτόμενης θερμότητας και τη χρήση της φυσικής θερμότητας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να φέρει επανάσταση στην παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας [81].

Με βάση τη θερμοκρασία, η θερμότητα ταξινομείται συνήθως σε τρεις κατηγορίες: υψηλού βαθμού (1200 °F/649 °C και άνω), μεσαίου βαθμού (450 °F/232 °C έως 1200 °F/649 °C) και χαμηλού βαθμού (450 °F/232 °C και χαμηλότερη) [82]. Η θερμότητα υψηλού και μεσαίου βαθμού κανονικά ανακτάται εύκολα. Αντιθέτως, απορριπτόμενη θερμότητα χαμηλού βαθμού, η οποία αποτελεί περισσότερο από το 50% της συνολικής απορριπτόμενης θερμότητας, είναι δυστυχώς η πιο δύσκολη στην ανάκτηση [82].

Τις τελευταίες δεκαετίες, έχουν γίνει τεράστιες προσπάθειες για τη διερεύνηση και την ανάπτυξη εναλλακτικών τεχνολογιών για την συγκομιδή θερμότητας χαμηλού βαθμού. Οι τεχνολογίες συγκομιδής θερμικής ενέργειας χαμηλού βαθμού βασίζονται επί του παρόντος στο θερμοηλεκτρικό, πυροηλεκτρικό, θερμομαγνητικό και θερμοελαστικό φαινόμενο. Μεταξύ αυτών, η συγκομιδή θερμοηλεκτρικής ενέργειας είναι η πιο δημοφιλής και μελετημένη τεχνολογία. Οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες (TEG) βασίζονται στο φαινόμενο Seebeck και παράγουν συνεχές ρεύμα ως απόκριση στις θερμικές διαβαθμίσεις. Οι μέθοδοι συλλογής πυροηλεκτρικής, θερμομαγνητικής και θερμοελαστικής ενέργειας είναι επίσης παλιές έννοιες, αλλά οι πρακτικές εξελίξεις σε αυτούς τους τομείς ήταν αρκετά αργές σε σύγκριση με τις θερμοηλεκτρικές συσκευές, κυρίως λόγω της απαίτησής τους για διακύμανση θερμοκρασίας. Οι ηλεκτρικές, μαγνητικές ή ελαστικές ιδιότητες ορισμένων υλικών αλλάζουν λόγω διακυμάνσεων της θερμοκρασίας και αυτό το φαινόμενο χρησιμοποιείται για την παραγωγή μηχανικού ή ηλεκτρικού έργου.

Υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα στη χρήση συσκευών συγκομιδής θερμικής ενέργειας έναντι των παραδοσιακών θερμικών μηχανών. Οι μηχανές συγκομιδής θερμικής ενέργειας επιβαρύνονται με ελάχιστο λειτουργικό κόστος, καθώς χρησιμοποιούν ελεύθερα διαθέσιμη θερμική ενέργεια, όπως την απορριπτόμενη θερμότητα και την φυσική θερμότητα και τη μετατρέπουν σε χρήσιμο έργο. Σε σύγκριση με τις παραδοσιακές θερμικές μηχανές, οι μηχανές συγκομιδής θερμικής ενέργειας λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες και επομένως είναι καταλληλότερες για εφαρμογές όπως η τροφοδοσία κόμβων αισθητήρων. Οι μηχανές συγκομιδής θερμικής ενέργειας είναι συσκευές στερεάς κατάστασης, δεν παράγουν επιβλαβή εκφορτίσεις και έχουν πολύ χαμηλό κόστος συντήρησης. Διαθέτουν χαμηλή απόδοση μετατροπής ενέργειας, συνήθως 1-10%, αλλά είναι αυτοσυντηρούμενες, γεγονός που τις

καθιστά κατάλληλα για την παροχή ενέργειας σε απομακρυσμένες ή δυσπρόσιτες περιοχές [81].

3.1 Θερμοηλεκτρική Συγκομιδή Ενέργειας

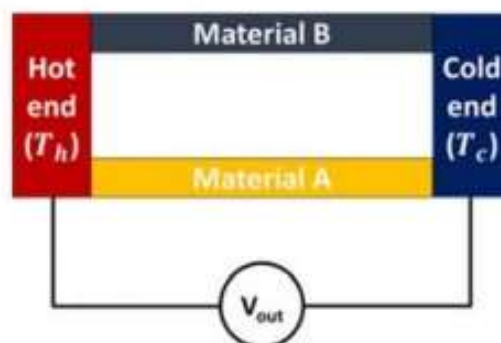
Το θερμοηλεκτρικό (Thermoelectric - TE) φαινόμενο είναι το αποτέλεσμα τεσσάρων διαφορετικών φαινομένων: το φαινόμενο Joule, το φαινόμενο Seebeck, το φαινόμενο Peltier και το φαινόμενο Thomson [81]. Το φαινόμενο Joule, που ονομάζεται επίσης ωμική θέρμανση, εμφανίζεται όταν ένας αντιστάτης διαρρέεται από ρεύμα, με αποτέλεσμα να θερμαίνεται. Η θέρμανση είναι αποτέλεσμα των συγκρούσεων των ηλεκτρονίων με τα ιόντα του μεταλλικού αγωγού. Λόγω των συγκρούσεων μειώνεται η κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων και μετατρέπεται σε θερμότητα που διαχέεται στο περιβάλλον. Το φαινόμενο Joule είναι ευθέως ανάλογο με το τετράγωνο του ρεύματος και την ηλεκτρική αντίσταση του αγωγού.

3.1.1 Φαινόμενο Seebeck

Όταν δύο ανόμοιοι ηλεκτρικοί αγωγοί ή ημιαγωγοί ενώνονται μεταξύ τους, δημιουργούν ένα θερμοστοιχείο και εάν η διαφορά θερμοκρασίας διατηρείται μεταξύ των δύο ενώσεων, αναπτύσσεται μια ηλεκτροκινητική δύναμη (electromotive force - EMF) όπως φαίνεται στο Σχήμα 20. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται φαινόμενο Seebeck και παρατηρήθηκε για πρώτη φορά από τον Thomas Johann Seebeck το 1821. Αυτή η επαγόμενη τάση ονομάζεται Seebeck EMF και είναι ευθέως ανάλογη με τη διαφορά θερμοκρασίας. Εάν το V_{out} είναι η διαφορά τάσης που προκύπτει, ΔT είναι η διαφορά θερμοκρασίας, τότε ο συντελεστής Seebeck, a (γνωστός και ως θερμοισχύς, θερμοηλεκτρική ισχύς και θερμοηλεκτρική ευαισθησία) δίνεται ως [83, 84]

$$a_{ab} = \frac{V_{out}}{\Delta T}$$

όπου ο δείκτης ab συμβολίζει τους δύο αγωγούς, A και B, του θερμοστοιχείου. Ο συντελεστής Seebeck είναι μια παράμετρος που εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία και η τιμή του ποικίλλει μη γραμμικά ανάλογα με τη θερμοκρασία. Τα περισσότερα μέταλλα εμφανίζουν συντελεστές Seebeck 10 $\mu V/^\circ C$ ή λιγότερο. Ωστόσο, οι ημιαγωγοί έχουν συντελεστές Seebeck υψηλότερους από 100 $\mu V/^\circ C$. Ως εκ τούτου, χρησιμοποιούνται συνήθως σε θερμοηλεκτρικές μονάδες.



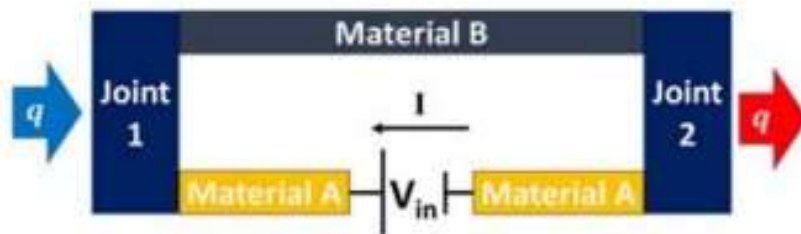
Σχήμα 20. Φαινόμενο Seebeck: Δυο θερμοηλεκτρικά υλικά έρχονται σε επαφή με μια θερμή και μια ψυχρή ένωση, που η καθεμία βρίσκεται σταθερά σε θερμοκρασία T_h και T_c αντίστοιχα [81].

3.1.2 Φαινόμενο Peltier

Το φαινόμενο Peltier είναι το αντίστροφο του φαινομένου Seebeck και παρατηρήθηκε για πρώτη φορά από τον Jean Charles Athanase Peltier το 1834. Συνεπώς, το φαινόμενο Peltier έχει ως αποτέλεσμα την ψύξη ή θέρμανση στη διασταύρωση δύο ανόμοιων θερμοηλεκτρικών υλικών (TE), όταν διέρχεται ηλεκτρικό ρεύμα μέσω της διασταύρωσης όπως φαίνεται στο Σχήμα 21. Το μέγεθος της θερμότητας Peltier είναι ευθέως ανάλογο του ρεύματος, αλλά το πρόσημό του (φαινόμενο ψύξης ή θέρμανσης) εξαρτάται από την κατεύθυνση του ηλεκτρικού ρεύματος. Ο ρυθμός της απορροφούμενης θερμότητας q , είναι ευθέως ανάλογος με το ηλεκτρικό ρεύμα στο κύκλωμα και δίνεται ως [85]:

$$q = (\pi_{\alpha} - \pi_{\beta})I$$

όπου το I δηλώνει το ηλεκτρικό ρεύμα από τον αγωγό A στον B και τα π_{α} και π_{β} είναι η σταθερά αναλογικότητας που είναι γνωστή ως συντελεστής Peltier για τους αγωγούς A και B.



Σχήμα 21. Φαινόμενο Peltier: Δύο θερμοηλεκτρικά υλικά είναι ενωμένα στα δύο άκρα. Το κύκλωμα διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα I και η θερμότητα q αναπτύσσεται στο ένα άκρο και απορροφάται στο άλλο άκρο [81].

3.1.3 Φαινόμενο Thomson

Το φαινόμενο Thomson εμφανίζεται σε ένα μη ομοιόμορφα θερμαινόμενο TE υλικό. Για τα περισσότερα TE υλικά, ο συντελεστής Seebeck ποικίλλει ανάλογα με τη θερμοκρασία. Επομένως, όταν υπάρχει μια διαβάθμιση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια ενός TE υλικού και το ρεύμα διέρχεται μέσω αυτού, εμφανίζεται μια συνεχής διαδοχή των φαινομένων Seebeck και Peltier, με αποτέλεσμα τη θερμότητα Thomson, όπως φαίνεται στο Σχήμα 22. Η θερμότητα Thomson απορροφάται ή απελευθερώνεται ανάλογα με την κατεύθυνση του ρεύματος, αλλά το μέγεθός της είναι ανάλογο με την ένταση του ρεύματος. Ο ρυθμός θέρμανσης ανά μονάδα μήκους του αγωγού είναι ευθέως ανάλογος με το ηλεκτρικό ρεύμα και τη διαβάθμιση της θερμοκρασίας [84]:

$$\frac{dq}{ds} = \tau I \frac{dT}{ds}$$

όπου το τ ορίζεται ως ο συντελεστής Thomson και το s είναι μια συντεταγμένη χώρου.

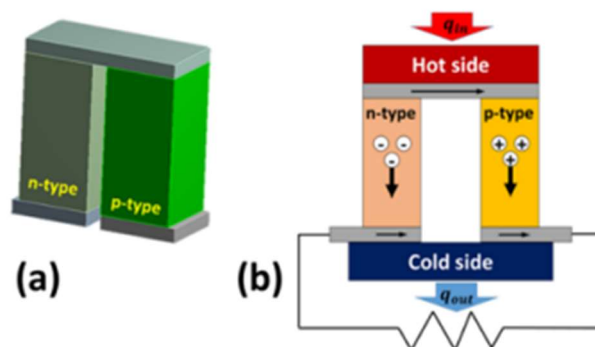


Σχήμα 22. Φαινόμενο Thomson: Λόγω της διαβάθμισης της θερμοκρασίας στον χώρο και στην ύπαρξη ρεύματος, μια συνεχής διαδοχή των φαινομένων Seebeck και Peltier, με αποτέλεσμα τη θερμότητα Thomson [81].

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα φαινόμενα Seebeck και Peltier εμφανίζονται με ένα θερμοστοιχείο, ενώ το φαινόμενο Thomson υπάρχει για έναν μόνο αγωγό.

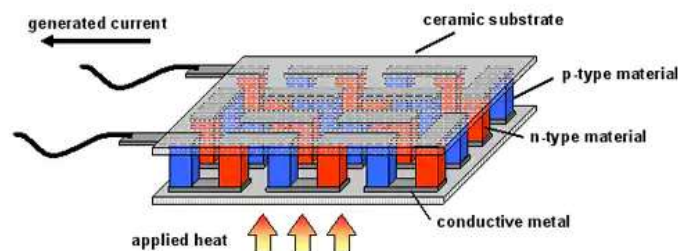
3.1.4 Αρχή λειτουργίας

Ένας συνδυασμός ενός ημιαγωγικού υλικού τύπου p και ενός τύπου n σε άκαμπτη μορφή, συνδεδεμένα ηλεκτρικά σε σειρά και θερμικά παράλληλα, σχηματίζει ένα θερμοστοιχείο. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 23(a), τα θερμοστοιχεία έχουν συνήθως σχήμα π. Οι δύο ημιαγωγοί που δημιουργούν το θερμοστοιχείο ονομάζονται πόδια του θερμοστοιχείου. Το Σχήμα 23(b) δείχνει τη λειτουργία του θερμοστοιχείου σε λειτουργία παραγωγής ενέργειας.



Σχήμα 23. (a) Ένα θερμοστοιχείο που αποτελείται από ένα pellet ημιαγωγού τύπου p και ένα pellet ημιαγωγού τύπου n. Το σκέλος τύπου p περιέχει πλεονάζουσες σπές, ενώ το σκέλος τύπου n περιέχει πλεονάζοντα ηλεκτρόνια, (b) Μηχανισμός παραγωγής θερμοηλεκτρικής ενέργειας. Ροή θετικού φορτίου από το πόδι τύπου p στο πόδι τύπου n στο εξωτερικό κύκλωμα με αποτέλεσμα τη δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος [81].

Το θερμοστοιχείο συνδέεται με ένα εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα και εφαρμόζεται θερμική διαβάθμιση και στις δύο πλευρές. Το ημιαγωγίμο σκέλος τύπου p κυριαρχείται από σπές ως φορέας φορτίου, ενώ το ημιαγωγίμο σκέλος τύπου n έχει ηλεκτρόνια ως πλειοψηφικός φορέας. Όπως υποδεικνύεται στο Σχήμα 23(b), οι σπές και τα ηλεκτρόνια ταξιδεύουν από τη θερμή πλευρά στην ψυχρή πλευρά σε σκέλη τύπου p και n, αντίστοιχα, με αποτέλεσμα ένα ηλεκτρικό ρεύμα να ρέει στο εξωτερικό κύκλωμα από το σκέλος τύπου p στο σκέλος τύπου n. Το Σχήμα 24 απεικονίζει τα βασικά εξαρτήματα μιας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας (TEG). Μια TEG αποτελείται από πολλά θερμοστοιχεία συνδεδεμένα μεταξύ τους χρησιμοποιώντας αγωγίμα μεταλλικά ηλεκτρόδια. Προκειμένου να αποφευχθεί η ενδοδιάχυση μεταξύ των TE υλικών και των υλικών των ηλεκτροδίων και για να μειωθεί η αντίσταση επαφής, χρησιμοποιούνται συνήθως στρώματα φραγμού διάχυσης από Ti [86], Mo [87], CrSi ή Ni [88] στη διεπαφή [89].



Σχήμα 24. Τα βασικά εξαρτήματα μιας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας (TEG) [90].

Στη συνέχεια, οι συστοιχίες θερμοστοιχείων τοποθετούνται ανάμεσα σε λεπτά κεραμικά υποστρώματα, όπως το Al_2O_3 (Αλουμίνα) και το AlN (Νιτρίδιο Αλουμινίου), για να μονώσουν ηλεκτρικά το σύστημα.

Η θερμοηλεκτρική απόδοση ενός υλικού μετριέται κανονικά χρησιμοποιώντας ένα αδιάστατο Figure of Merit (ZT), το οποίο ορίζεται ως [91]:

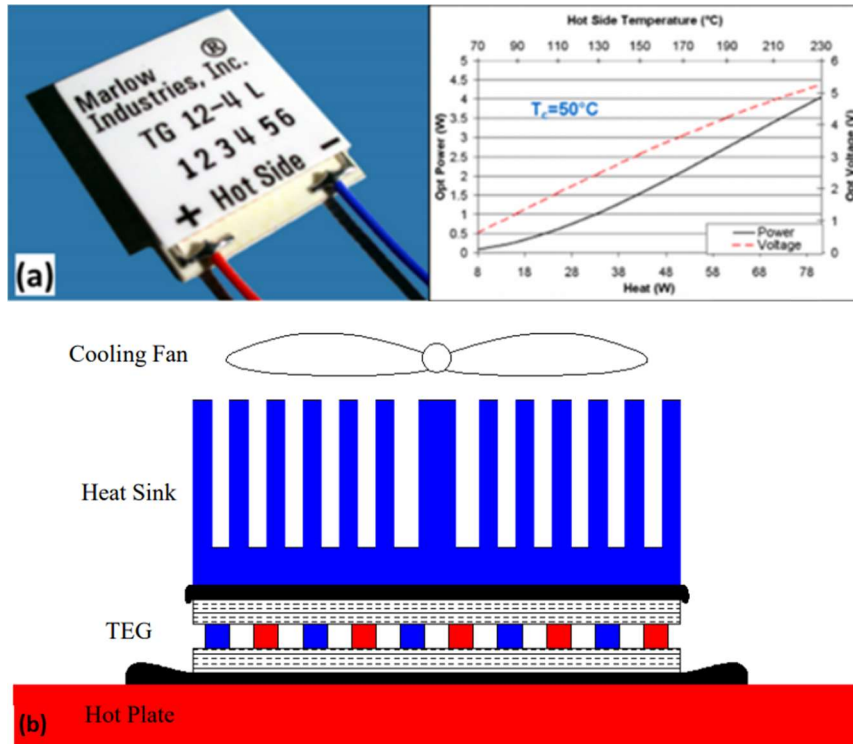
$$ZT = \frac{\alpha^2 \sigma}{k} T$$

όπου α είναι ο συντελεστής Seebeck, σ είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα, k είναι η θερμική αγωγιμότητα και T η θερμοκρασία σε Kelvin. Μια υψηλότερη τιμή ZT ενός TE υλικού συνεπάγεται σε υψηλότερο θερμοηλεκτρικό αποτέλεσμα, το οποίο συνήθως οδηγεί σε καλύτερη απόδοση από μια TE συσκευή. Κανονικά, αναμένεται ότι ένα TE υλικό θα πρέπει να έχει μεγάλο συντελεστή Seebeck α , υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα σ και χαμηλή θερμική αγωγιμότητα k . Ωστόσο, οι τρεις παράμετροι μεταφοράς: α , σ και k δεν είναι ανεξάρτητες και εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες όπως η δομή της μπάντας και η πυκνότητα του φορέα. Ο συντελεστής Seebeck α , αυξάνεται αντίθετα σε σύγκριση με τα σ και k . Αυτό υποδηλώνει ότι η τιμή του Figure of Merit ZT , δεν μπορεί να βελτιωθεί με τη συνεχή αύξηση της πυκνότητας του φορέα, αλλά απαιτεί τη βελτιστοποίηση των α , σ και k ταυτόχρονα [81].

3.1.5 Θερμοηλεκτρικές Γεννήτριες

Οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες (TEG) είναι η πιο δημοφιλής τεχνολογία συγκομιδής θερμικής ενέργειας. Οι TEG είναι συσκευές στερεάς κατάστασης χωρίς κινούμενα μέρη. Δεν παράγουν τοξικές εκκρίσεις και παρέχουν αξιόπιστη λειτουργία.

Το Σχήμα 25(a) δείχνει το TG12-4 TEG από την Marlow Industries, Inc. Εξετάζοντας τα διαγράμματα ισχύος και απόδοσης, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι αυτό το TEG μεγέθους $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ παράγει $4,0 \text{ W}$ ηλεκτρικής ισχύος σε διαφορά θερμοκρασίας $\sim 180 \text{ }^\circ\text{C}$. Πρακτικά όταν χρησιμοποιείται, η πειραματική διάταξη αποτελείται από μια εστία ελεγχόμενης θερμοκρασίας υψηλής ακρίβειας, η οποία λειτουργεί ως πηγή θερμότητας [92]. Η καυτή πλευρά της TG12-4 TEG τοποθετείται πάνω από τη θερμή πλάκα χρησιμοποιώντας θερμική πάστα για να μεγιστοποιηθεί η μεταφορά θερμότητας και ένα θερμοστοιχείο τύπου K τοποθετείται μεταξύ της TEG και της εστίας για τη μέτρηση της θερμοκρασίας της θερμής πλευράς. Στην άλλη πλευρά της TEG χρησιμοποιείται μια ψύκτρα για τη διασκόρπιση της θερμότητας και ένας ηλεκτρικός ανεμιστήρας προσαρτάται στην ψύκτρα, για να εξασφαλιστεί η ψύξη μέσω εξαναγκασμένης μεταφοράς. Ένα άλλο θερμοστοιχείο τύπου K τοποθετείται μεταξύ της TEG και της ψύκτρας για τη μέτρηση της θερμοκρασίας της ψυχρής πλευράς. Το σχηματικό διάγραμμα μιας τέτοιας διάταξης φαίνεται στο Σχήμα 25(b).



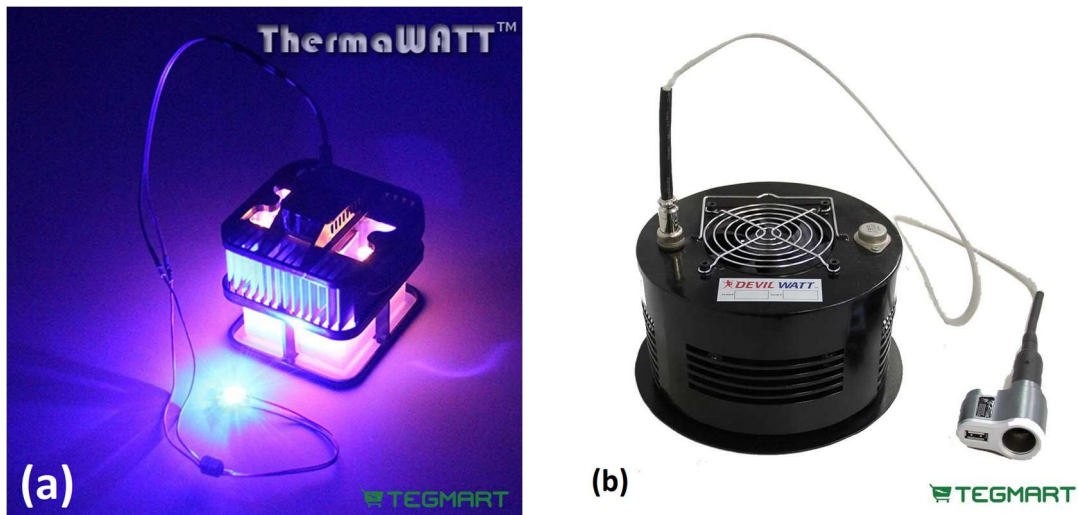
Σχήμα 25. (a) TG12-4 TEG από την Marlow Industries, με μέγεθος $30\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ και παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος $4,0\text{ W}$ σε διαφορά θερμοκρασίας $\sim 180^\circ\text{C}$ (b) Σχηματική απόδοση της πειραματικής διάταξης [92].

Το Σχήμα 26 δείχνει τις TEG που χρησιμοποιούνται σε αυτοκίνητα BMW για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την απορριπτόμενη θερμότητα για τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης του κινητήρα. Το όχημα θα περιέχει δύο εναλλακτικά συστήματα—η μία μονάδα σχεδιάζεται για το σύστημα εξάτμισης, ενώ η άλλη προορίζεται για το σύστημα ανακύκλωσης καυσαερίων [93].



Σχήμα 26. TEG που χρησιμοποιούνται σε αμάξια BMW, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την θερμότητα που παράγεται κατά την κίνηση του αυτοκινήτου [93].

Το Σχήμα 27(a) δείχνει το ThermaWatt, ένα TEG με κερί που μετατρέπει τη θερμότητα ενός κεριού σε ηλεκτρική ενέργεια [81]. Ένα ThermaWatt $89\text{ mm} \times 95\text{ mm} \times 95\text{ mm}$ έχει αναφερθεί ότι έχει ισχύ εξόδου $500\text{--}800\text{ mW}$ κοντά σε θερμοκρασία δωματίου. Το Σχήμα 27(b) απεικονίζει μια TEG DW-DF-10W, σόμπα εξωτερικού χώρου. Αυτή η TEG μπορεί να τοποθετηθεί πάνω από μια αναμμένη φλόγα, όπως μια σόμπα προπανίου για να φορτίσει μια μπαταρία, να τροφοδοτήσει μια συσκευή 12 V DC ή να φορτίσει ένα κινητό τηλέφωνο.



Σχήμα 27. (a) ThermaWatt, ένα TEG με κεριό που μετατρέπει τη θερμότητα ενός κεριού σε ηλεκτρική ενέργεια, (b) DW-DF-10W, μια TEG σόμπα εξωτερικού χώρου που μετατρέπει την θερμότητα από μια αναμμένη φλόγα σε ηλεκτρική ενέργεια.

3.2 Πυροηλεκτρική Συγκομιδή Ενέργειας

Το πυροηλεκτρικό φαινόμενο είχε προβλεφθεί πριν από περισσότερα από 2400 χρόνια, όταν ο Έλληνας φιλόσοφος Θεόφραστος περιέγραψε μια πέτρα, που ονομάζεται λυγκούριον, που είχε την ιδιότητα να έλκει ελαφριά αντικείμενα όπως σκόνη, άχυρα και κομμάτια ξύλου [94]. Το πυροηλεκτρικό φαινόμενο προέρχεται από την αλληλεπίδραση μεταξύ της πόλωσης και της αλλαγής θερμοκρασίας σε ορισμένα διηλεκτρικά υλικά. Ορισμένοι κρύσταλλοι, όπως η τουρμαλίνη [95, 96] και το νιτρίδιο του γαλλίου (GaN) [97, 98], είναι φυσικά ηλεκτρικά πολωμένοι και έχουν μη μηδενική αυθόρμητη πόλωση σε θερμοκρασία δωματίου. Η αλλαγή της θερμοκρασίας του υλικού προκαλεί αλλαγή στην πόλωση, η οποία χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

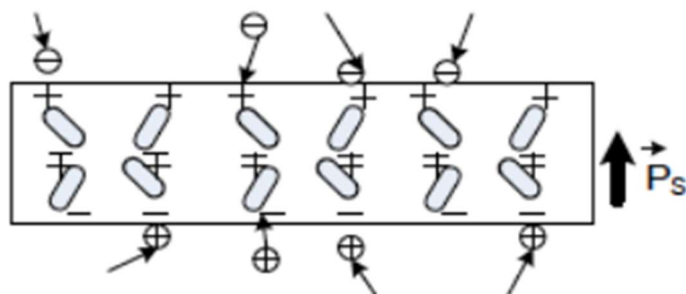
Αυτά τα υλικά ανακαλύφθηκαν ξανά τον Μεσαίωνα με τις πρώτες αληθινές επιστημονικές έρευνες των φαινομένων να διεξάγονται το 1700. Αυτές οι έρευνες συνεχίστηκαν κατά το 1800 και τις αρχές του 1900, έως ότου το 1938 δημοσιεύθηκε μια έρευνα που πρότεινε τη χρήση κρυστάλλων τουρμαλίνης ως υπέρυθρων (IR) αισθητήρων που παράγουν ρεύμα σε εφαρμογές φασματοσκοπίας, οδηγώντας στο νέο επιστημονικό πεδίο της ανίχνευσης υπέρυθρων που συνεχίζεται μέχρι σήμερα [94].

Τα πυροηλεκτρικά υλικά πρέπει να είναι πολικά και να παρουσιάζουν αυθόρμητη πόλωση. Το αν ένα στερεό υλικό παρουσιάζει το πυροηλεκτρικό αποτέλεσμα ή όχι καθορίζεται από την κρυσταλλική του δομή.

Η συγκομιδή ηλεκτρικής ενέργειας από πηγές θερμικής ενέργειας με τη χρήση τεχνικών πυροηλεκτρικής μετατροπής βρίσκεται υπό διερεύνηση για περισσότερα από 50 χρόνια, αλλά δεν έχει λάβει την προσοχή που έχουν οι τεχνικές συλλογής θερμοηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια αυτής της χρονικής περιόδου. Αυτή η έλλειψη ενδιαφέροντος πηγάζει από πρώιμες μελέτες που διαπίστωσαν ότι οι αποδόσεις ενεργειακής μετατροπής που μπορούν να επιτευχθούν με χρήση πυροηλεκτρικών υλικών, ήταν αρκετές φορές μικρότερες από αυτές που δυνητικά μπορούσαν να επιτευχθούν με τα θερμοηλεκτρικά. Πιο πρόσφατες μοντελοποιήσεις και πειραματικές μελέτες έχουν δείξει ότι οι πυροηλεκτρικές τεχνικές μπορούν να είναι ανταγωνιστικές έναντι των θερμοηλεκτρικών και, χρησιμοποιώντας νέες τεχνικές κύκλου θερμοκρασίας, έχουν τη δυνατότητα να είναι αρκετές φορές πιο αποτελεσματικές από τις θερμοηλεκτρικές, υπό συγκρίσιμες συνθήκες λειτουργίας [99].

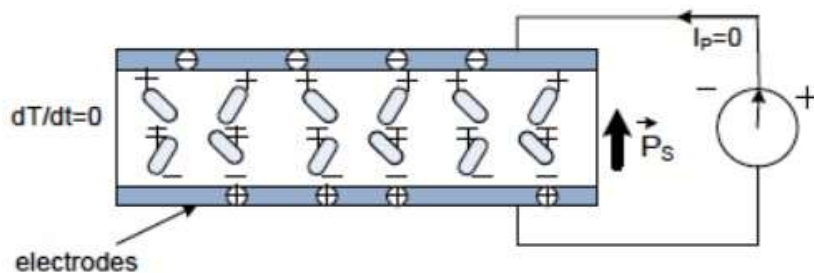
3.2.1 Αρχή λειτουργίας

Όπως περιγράφεται στο Σχήμα 28, θεωρήστε ένα κομμάτι πυροηλεκτρικού υλικού, όπως κρύσταλλο τουρμαλίνης ή τιτανικό βάριο, που έχει άξονα κρυσταλλογραφικής συμμετρίας κάθετο προς τις επίπεδες επιφάνειες. Τα πυροηλεκτρικά υλικά έχουν διπολικές ροπές που αθροίζονται στην κατεύθυνση κάθετη προς τις επίπεδες επιφάνειες για να παρέχουν αυθόρμητη πόλωση. Η αυθόρμητη πόλωση (P_s) ορίζεται ως η καθαρή διπολική ροπή ανά μονάδα όγκου του υλικού σε θερμοκρασία δωματίου, εν απουσία του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου. Η αυθόρμητη πόλωση του πυροηλεκτρικού υλικού, όταν βρίσκεται σε θερμοκρασία δωματίου, του επιτρέπει να προσελκύει κοντινά σωματίδια που περιέχουν ελεύθερα φορτία όπως ηλεκτρόνια ή ιόντα.



Σχήμα 28. Τα πυροηλεκτρικά υλικά έχουν διπολικές ροπές που αθροίζονται στην κατεύθυνση κάθετη προς τις επίπεδες επιφάνειες για να παρέχουν αυθόρμητη πόλωση [94].

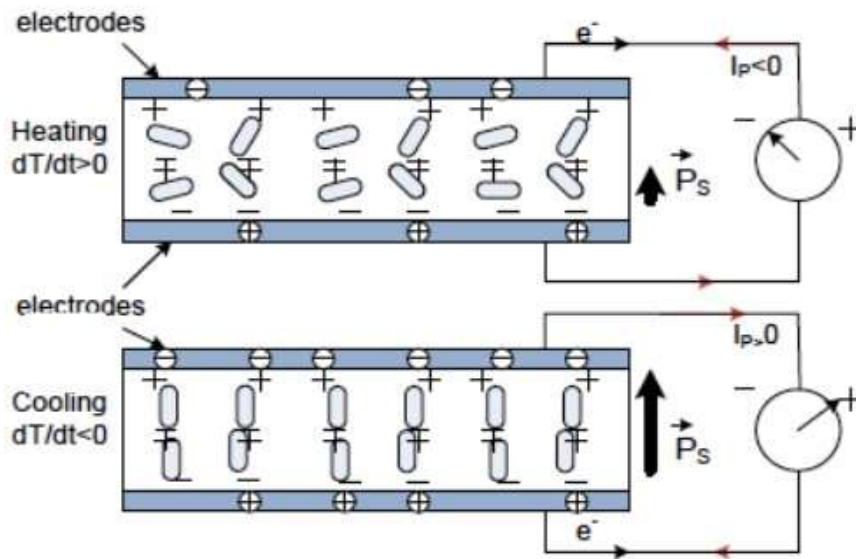
Στο Σχήμα 29, το πυροηλεκτρικό υλικό διατηρείται μεταξύ των δύο αγωγίμων ηλεκτροδίων ενός πυκνωτή. Ο πυκνωτής φορτίζεται μέχρι να εξουδετερωθεί το επιφανειακό φορτίο στο πυροηλεκτρικό υλικό. Εάν ο πυκνωτής είναι τώρα συνδεδεμένος σε εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα, αποφορτίζεται. Ωστόσο, δεν υπάρχει ρεύμα στο κύκλωμα από τη στιγμή που το σύστημα θα φτάσει σε σταθερή κατάσταση, δεδομένου ότι η θερμοκρασία του υλικού διατηρείται σταθερή.



Σχήμα 29. Το πυροηλεκτρικό υλικό ανάμεσα στα δύο αγωγίμα ηλεκτρόδια ενός πυκνωτή. Η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή και δεν υπάρχει ρεύμα όταν το σύστημα βρίσκεται σε σταθερή κατάσταση [94].

Για τα πυροηλεκτρικά υλικά, μια αύξηση της θερμοκρασίας του υλικού προκαλεί μείωση της καθαρής διπολικής ροπής και επομένως της αυθόρμητης πόλωσης και αντίστροφα. Κατά συνέπεια, όπως φαίνεται στο Σχήμα 30, η αλλαγή στη θερμοκρασία του υλικού μεταβάλλει την ποσότητα των δεσμευμένων φορτίων. Η ανακατανομή των ελεύθερων φορτίων για την αντιστάθμιση της αλλαγής στο δεσμευμένο φορτίο έχει ως αποτέλεσμα μια ροή ρεύματος, που ονομάζεται πυροηλεκτρικό ρεύμα, στο κύκλωμα [94]. Επομένως, εναλλάσσοντας τη

θερμοκρασία των πυροηλεκτρικών υλικών, μπορούμε να δημιουργήσουμε εναλλασσόμενο ρεύμα.



Σχήμα 30. Η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί μείωση της αυθόρμητης πόλωσης (επάνω), ενώ η μείωση της θερμοκρασίας προκαλεί αύξηση της αυθόρμητης πόλωσης (κάτω). Η κυκλική εναλλαγή της θερμοκρασία των πυροηλεκτρικών υλικών παράγει εναλλασσόμενο ρεύμα [94].

Μπορούμε πλέον να παρατηρήσουμε τη θεμελιώδη διαφορά μεταξύ θερμοηλεκτρικών και πυροηλεκτρικών φαινομένων. Ο θερμοηλεκτρισμός εμφανίζεται λόγω της χωρικής αλλαγής της θερμοκρασίας, δηλ. λόγω του ρυθμού μεταβολής της θερμοκρασίας με μετατόπιση προς μια δεδομένη κατεύθυνση ($\frac{dT}{dx} \neq 0$), ενώ ο πυροηλεκτρισμός εμφανίζεται λόγω μιας χρονικής αλλαγής στη θερμοκρασία; δηλ. λόγω διακύμανσης της θερμοκρασίας ($\frac{dT}{dt} \neq 0$) [100,101].

Η απόδοση της διαδικασίας μετατροπής θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική σε έναν πυροηλεκτρικό συλλέκτη ενέργειας (και σε όλες τις θερμικές μηχανές) περιορίζεται θερμοδυναμικά από την απόδοση Carnot, η_{Carnot} :

$$\eta_{Carnot} = 1 - T_L / T_H$$

όπου T_H είναι η θερμοκρασία της πηγής θερμότητας και T_L είναι η θερμοκρασία της ψύκτρας. Κατά συνέπεια, μια διαβάθμιση θερμοκρασίας 1° C σε θερμοκρασίες δωματίου οδηγεί σε μέγιστη απόδοση Carnot 0,33%, ενώ μια διαβάθμιση θερμοκρασίας 1000 °C δίνει απόδοση Carnot 25%. Οι μεγάλοι ρυθμοί μεταβολής θερμοκρασίας όχι μόνο οδηγούν σε μεγαλύτερη ικανότητα παραγωγής ενέργειας, αλλά οδηγούν επίσης σε υψηλότερη απόδοση μετατροπής ισχύος του συστήματος.

Ο πυροηλεκτρικός συντελεστής ενός υλικού, υπό σταθερή πίεση και ηλεκτρικό πεδίο, ορίζεται ως [102]:

$$p = \left(\frac{dP_s}{dT} \right)_{\sigma, E}$$

όπου τα σ και E υποδηλώνουν την πίεση και το ηλεκτρικό πεδίο, αντίστοιχα, και τα γράμματα σε δείκτες αντιστοιχούν σε σταθερές συνθήκες. Το πυροηλεκτρικό φαινόμενο έχει χρησιμοποιηθεί για διάφορες εφαρμογές, όπως θερμική απεικόνιση, ανιχνευτές λέιζερ, ραδιόμετρα, αισθητήρες υπερύθρων, ανάλυση αερίων, συναγερμοί πυρκαγιάς και συναγερμοί

εισβολών [103, 104]. Λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις ηλεκτρικές όσο και τις θερμικές ιδιότητες και ανάλογα με τον τύπο των ηλεκτρονικών που χρησιμοποιούνται, στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί τρία διαφορετικά Figure of Merit (FOM) [105, 106].

Για το current-sensitive Figure of Merit, FOM_i , δίνεται ως [107]:

$$FOM_i = \frac{p}{c} = \frac{p}{\rho c_p}$$

όπου c είναι η ειδική θερμότητα όγκου, ρ είναι η πυκνότητα του υλικού και c_p είναι η ειδική θερμότητα. Για το voltage-sensitive Figure of Merit, FOM_v , δίνεται ως [107]:

$$FOM_v = \frac{p}{c \varepsilon_{33}^\sigma}$$

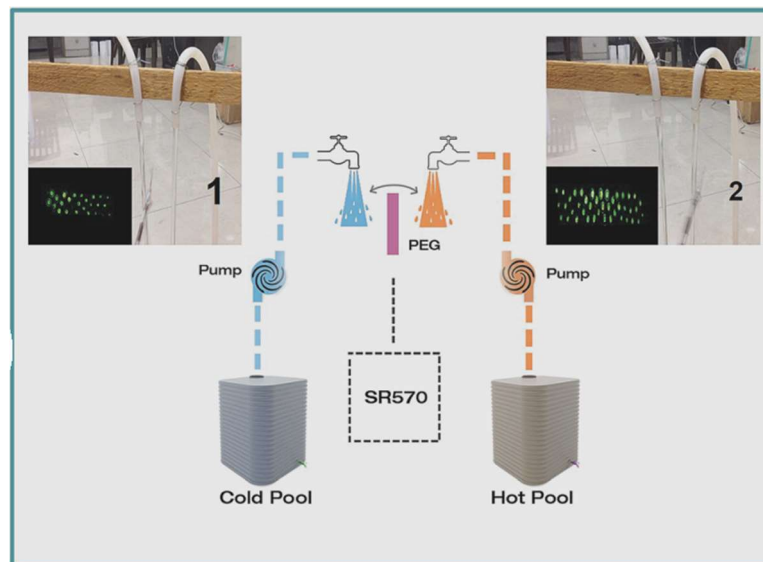
όπου ε_{33}^σ είναι η διηλεκτρική σταθερά (διαπερατότητα) του υλικού στην κατεύθυνση πόλωσης σε σταθερή πίεση. Τέλος, για τους ανιχνευτές, όπου ο λόγος σήματος προς θόρυβο είναι μια σημαντική παράμετρος, το Figure of Merit FOM_D , δίνεται ως [107]:

$$FOM_D = \frac{p}{c \sqrt{\varepsilon_{33}^\sigma \tan \delta}}$$

όπου $\tan \delta$ είναι η διηλεκτρική απώλεια.

3.2.2 Πυροηλεκτρικές γεννήτριες

Οι πυροηλεκτρικές γεννήτριες (PEG) απαιτούν κυκλική διακύμανση της θερμοκρασίας για να λειτουργήσουν. Στις περισσότερες περιπτώσεις, αυτό επιτυγχάνεται με την ταλάντωση της PEG μεταξύ ζεστών και κρύων ρευστών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 31 [108].



Σχήμα 31. Πειραματική διάταξη μιας πυροηλεκτρικής γεννήτριας (PEG) η οποία ερχόταν σε επαφή με κρύο και θερμό νερό διαδοχικά [108].

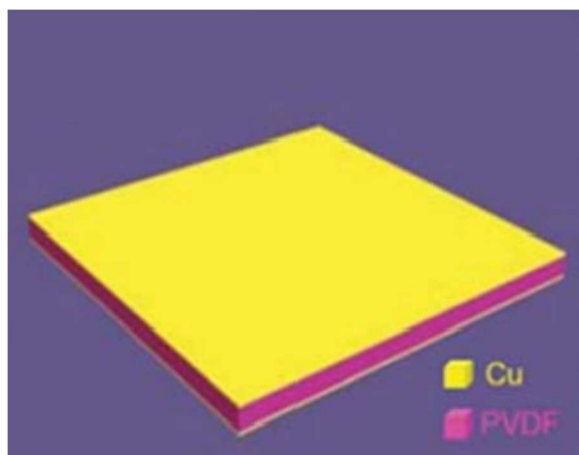
Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας μεταξύ της συσκευής και του ρευστού συχνά περιορίζει τη συχνότητα λειτουργίας (~ 1 Hz), καθιστώντας τις PEG συσκευές χαμηλής πυκνότητας ισχύος. Υπάρχουν περιορισμένες πειραματικές μελέτες που αναφέρονται στη βιβλιογραφία για τις PEG. Ο Olsen και οι συνεργάτες του παρουσίασαν πρωτότυπες PEG με ισχύ εξόδου 1 mW και 40 mW με απόδοση περίπου 0,4% [109-111]. Έδειξαν επίσης [112] μια κλιμακωτή πυροηλεκτρική γεννήτρια που κατασκευάστηκε χρησιμοποιώντας διαφορετικές ποιότητες

τιτανικού κασσιτερικού ζirkονικού μολύβδου (PZST), παρέχοντας μέγιστη ισχύ εξόδου 33 Watt ανά λίτρο πυροηλεκτρικών υλικών στα 0,26 Hz. Η μέγιστη θερμοδυναμική απόδοση έφτασε το 1,05%, το οποίο επιτεύχθηκε στα 0,14 Hz, που ήταν το 12% της απόδοσης Carnot [112].

Πιο πρόσφατα, το 2010, οι Nguyen κ.α. [113] κατέδειξαν πειραματικές μελέτες σε μια πρωτότυπη PEG που κατασκευάστηκε με τη χρήση co-Polymer 60/40 P(VDF-TrFE). Αυτή η μελέτη ανέφερε μέγιστη πυκνότητα ισχύος 10,7 W/L πυροηλεκτρικού υλικού σε συχνότητα 0,12 Hz με θερμοκρασία που κυμαίνεται μεταξύ 70,5 °C και 85,3 °C.

Προκειμένου να βελτιωθεί ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας και έτσι να αυξηθεί η συχνότητα ταλάντωσης, μερικές πρόσφατες μελέτες έχουν προτείνει πυροηλεκτρικές γεννήτριες με βάση το λεπτό φιλμ. Οι Yang κ.α. [114] ανέφεραν μια πυροηλεκτρική γεννήτρια λεπτής μεμβράνης PZT, η οποία παρουσίαζε πυροηλεκτρικό συντελεστή περίπου $-800 \text{ mC/m}^2\cdot\text{K}$ με μέγιστη πυκνότητα ισχύος $0,215 \text{ mW/cm}^3$.

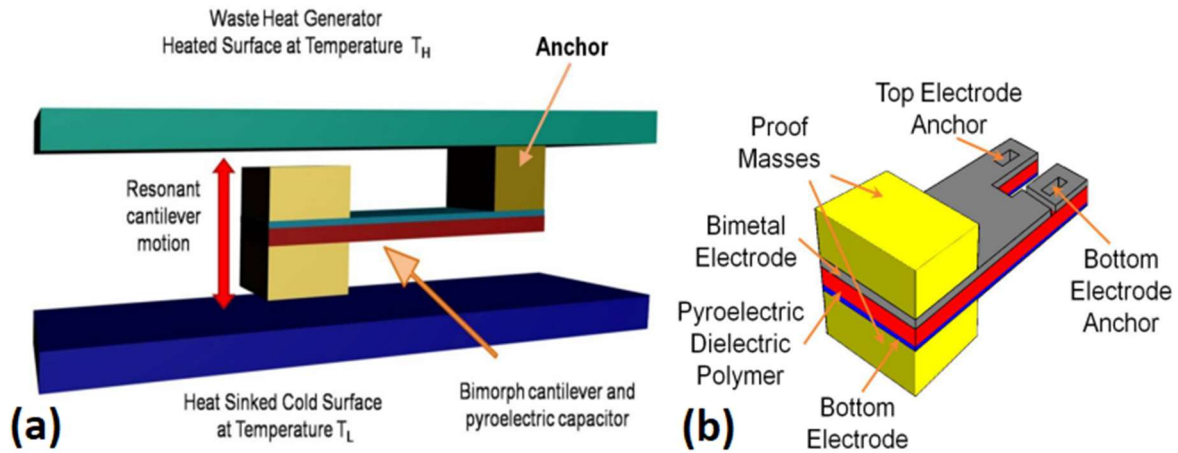
Οι Leng κ.α. [108] ανέφεραν μια PEG με βάση το φιλμ φθοριούχου πολυβινυλιδενίου για τη συλλογή της θερμικής ενέργειας από ζεστό/κρύο νερό. Ανέφεραν μέγιστη τάση ανοιχτού κυκλώματος εξόδου 192 V και ρεύμα βραχυκυκλώματος 12 mA σε αλλαγή θερμοκρασίας 80 °C. Η υψηλότερη πυκνότητα ισχύος εξόδου βρέθηκε να είναι $14 \mu\text{W/cm}^2$ ή $1,08 \text{ W/cm}^3$. Το Σχήμα 32 δείχνει την πυροηλεκτρική γεννήτρια των Leng κ.α. βασισμένη στο φιλμ PVDF [108].



Σχήμα 32. Σχηματική αναπαράσταση της πυροηλεκτρικής TEG των Leng κ.α. που κατασκευάστηκε βάση ένα PVDF film [108].

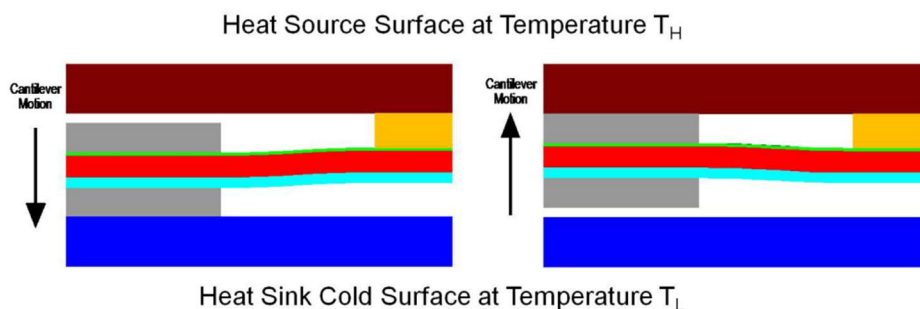
Το 2011 οι Hunter κ.α. ανέπτυξαν έναν πυροηλεκτρικό μετατροπέα θερμικής ενέργειας που θα αξιοποιούσε την απορριπτόμενη θερμική ενέργεια του περιβάλλοντος με υψηλές αποδόσεις. Στο Σχήμα 33(a) παρουσιάζεται η δομή του μετατροπέα θερμικής ενέργειας με συντονιζόμενο πυροηλεκτρικό πυκνωτή. Κάθε δομή μετατροπέα ενέργειας έχει μήκος και πλάτος από μερικές εκατοντάδες μm έως αρκετά mm . Η δομή του πρόβολου του πυροηλεκτρικού πυκνωτή φαίνεται λεπτομερώς στο Σχήμα 33(b) και είναι κατασκευασμένος από δύο μεταλλικά φιλμ, τα οποία λειτουργούν ως ηλεκτρόδια του πυκνωτή, και ένα πυροηλεκτρικό υλικό (π.χ. συμπολυμερές φθοριούχου πολυβινυλιδενίου P(VDF-TrFE)) το οποίο δρα ως το διηλεκτρικό υλικό μεταξύ των μεταλλικών ηλεκτροδίων. Δύο πρόσθετες μικρές στεγανωτικές μάζες μπορούν να τοποθετηθούν στα άκρα του προβόλου για να αυξηθεί η θερμική μάζα της κατασκευής και να γίνουν καλές θερμικές επαφές με τις θερμές και κρύες επιφάνειες. Ο πρόβολος μπορεί να στερεωθεί είτε στις ζεστές είτε στις κρύες επιφάνειες. Μια

διχασμένη άγκυρα παρέχει επίσης στον πυκνωτή τις ηλεκτρικές επαφές με το εξωτερικό κύκλωμα (Σχήμα 33(b)).



Σχήμα 33. α) Σχηματική αναπαράσταση του μηχανισμού πυροηλεκτρικής συγκομιδής ενέργειας, ο οποίος διαθέτει μια δομή προβόλου που έρχεται σε επαφή διαδοχικά με θερμές και ψυχρές επιφάνειες, παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα στον πυροηλεκτρικό πυκνωτή. (β) Λεπτομέρειες της κατασκευής του χωρητικού προβόλου που είναι υπεύθυνος για την μετατροπή της θερμικής ενέργειας [99].

Η λειτουργία της μηχανής συγκομιδής ενέργειας φαίνεται σχηματικά στο Σχήμα 34. Η δομή του προβόλου αρχικά θερμαίνεται μέσω της άγκυρας, αναγκάζοντας τον πρόβολο να κάμπτεται προς την κάτω επιφάνεια που ψύχεται. Όταν έρχεται σε επαφή με την ψυχρή επιφάνεια, η δομή χάνει γρήγορα θερμότητα και κάμπτεται προς την επάνω θερμαινόμενη επιφάνεια. Όταν έρχεται σε επαφή με την επάνω επιφάνεια, θερμαίνεται γρήγορα και κάμπτεται μακριά από την επάνω επιφάνεια και έρχεται ξανά σε επαφή με την κάτω επιφάνεια και ο κύκλος επαναλαμβάνεται. Η καλή θερμική επαφή με τις ζεστές και κρύες επιφάνειες είναι απαραίτητη για τη μεγιστοποίηση της μεταφοράς θερμικής ενέργειας (και επομένως για την ουσιαστική αύξηση της θερμοκρασίας του προβόλου) στον πυροηλεκτρικό πυκνωτή. Ο χρόνος θερμικής απόκρισης εξαρτάται από την αντίσταση θερμικής επαφής μεταξύ των στεγανωτικών μαζών και των θερμών και ψυχρών επιφανειών, και τη θερμική ικανότητα των δομών προβόλου και πυκνωτών.



Σχήμα 34. Σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας ενός πυροηλεκτρικού πυκνωτή στο άκρο ενός διμορφικού προβόλου, που έρχεται σε επαφή εναλλάξ με τη θερμή και τη ψυχρή επιφάνεια [99].

3.3 Θερμομαγνητική Συγκομιδή Ενέργειας

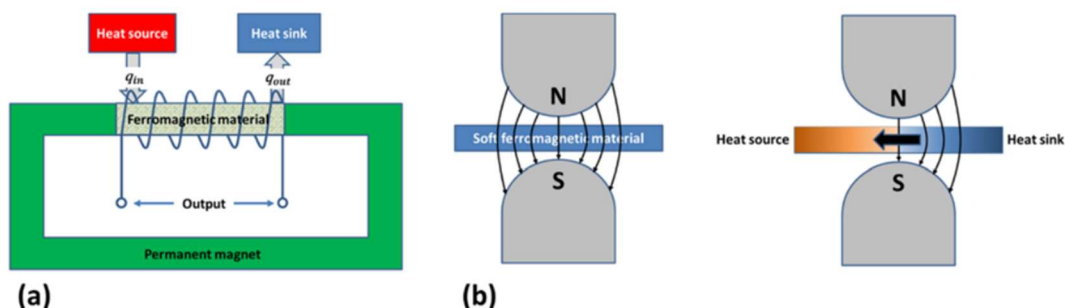
Η συγκομιδή θερμομαγνητικής ενέργειας βασίζεται στην επίδραση της θερμότητας στις μαγνητικές ιδιότητες. Η αύξηση της θερμοκρασίας ενός μαγνητοθερμιδικού υλικού, όπως το

γαδολίνιο (Gd), το Gd₅ (Si₂Ge₂) κλπ., προκαλεί αποπροσανατολισμό των μαγνητικών διπολικών ροπών λόγω θερμικής αναταραχής, με αποτέλεσμα τη μείωση της μαγνήτισης του υλικού. Από την άλλη πλευρά, η μείωση της θερμοκρασίας του υλικού επιτρέπει στα μαγνητικά δίπολα να επαναπροσανατολιστούν και επομένως αυξάνει τη μαγνήτιση στο υλικό. Το φαινόμενο είναι πιο εμφανές στα σιδηρομαγνητικά υλικά, τα οποία υφίστανται μια αλλαγή φάσης κοντά στη θερμοκρασία μετάβασης. Η θερμοκρασία μετάβασης, που ονομάζεται επίσης θερμοκρασία Curie ή σημείο Curie, των σιδηρομαγνητικών υλικών αναφέρεται στην κατάσταση όπου η μαγνήτιση εξαφανίζεται και το υλικό εισέρχεται σε παραμαγνητική κατάσταση.

3.3.1 Αρχή λειτουργίας

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από θερμότητα μέσω θερμομαγνητικής επίδρασης μπορεί να επιτευχθεί με δύο διαφορετικούς τρόπους. Η πρώτη μέθοδος είναι η άμεση μετατροπή ενέργειας, όπου η θερμική ενέργεια μετατρέπεται άμεσα σε ηλεκτρική ενέργεια. Τέτοια συστήματα αναφέρονται ως ενεργές θερμομαγνητικές συσκευές ή θερμομαγνητικές γεννήτριες. Η δεύτερη μέθοδος μετατροπής είναι μέσω ενός ενδιάμεσου μηχανικού σταδίου και τέτοια συστήματα ονομάζονται παθητικές θερμομαγνητικές συσκευές ή θερμομαγνητικοί κινητήρες. Το Σχήμα 35 δείχνει τον μηχανισμό λειτουργίας των συσκευών ενεργητικής και παθητικής μετατροπής θερμομαγνητικής ενέργειας [115]. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 35(a), ένα ενεργό θερμομαγνητικό σύστημα αποτελείται από έναν μόνιμο μαγνήτη ή έναν ηλεκτρομαγνήτη σε σχήμα C, ένα σιδηρομαγνητικό υλικό που τοποθετείται ως διακλάδωση μεταξύ των πόλων του μόνιμου μαγνήτη και μια περιέλιξη γύρω από το υλικό διακλάδωσης. Το στοιχείο διακλάδωσης θερμαίνεται και ψύχεται, εναλλάξ, γύρω από τη θερμοκρασία Curie του υλικού. Η αύξηση της θερμοκρασίας της διακλάδωσης μειώνει τη μαγνήτιση και τη μαγνητική ροή της. Η μείωση της θερμοκρασίας παράγει το αντίστροφο αποτέλεσμα, δηλαδή αυξάνεται η μαγνήτιση και η μαγνητική ροή. Η κυκλική θέρμανση και ψύξη του υλικού διακλάδωσης έχει ως αποτέλεσμα τη συνεχή μεταβολή της μαγνητικής ροής, η οποία προκαλεί μια τάση στα δύο άκρα της περιέλιξης σύμφωνα με τον νόμο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής του Faraday. Όταν η περιέλιξη συνδέεται με μια εξωτερική αντίσταση, παράγεται ηλεκτρική ισχύς.

Οι παθητικές θερμομαγνητικές συσκευές, που ονομάζονται και θερμομαγνητικοί κινητήρες ή κινητήρες Curie, μετατρέπουν τη θερμική ενέργεια σε μηχανική ενέργεια με τη μορφή περιστροφικής ή γραμμικής κίνησης. Επομένως, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρειάζεται μια ηλεκτρομηχανική γεννήτρια. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 35(b), ένας θερμομαγνητικός κινητήρας, στην απλούστερη μορφή, αποτελείται από ένα μαγνητικό κύκλωμα με έναν κινητό οπλισμό που αποτελείται από μαλακό σιδηρομαγνητικό υλικό. Όταν ολόκληρος ο οπλισμός βρίσκεται στην ίδια θερμοκρασία, η μαγνητική διαπερατότητα είναι ομοιόμορφη και οι μαγνητικές δυνάμεις από τις αντίθετες κατευθύνσεις εξισορροπούνται. Εάν ένα τμήμα του οπλισμού αρχίσει θερμαίνεται πάνω από τη θερμοκρασία Curie χρησιμοποιώντας μια πηγή θερμότητας, ενώ το άλλο τμήμα διατηρείται κάτω από το σημείο Curie χρησιμοποιώντας μια ψύκτρα, προκαλείται διαφορά διαπερατότητας μεταξύ θερμών και ψυχρών σημείων. Αυτό ασκεί μια καθαρή μη ισορροπημένη δύναμη στον οπλισμό, η οποία οδηγεί σε γραμμική ή περιστροφική κίνηση. Απαιτείται ένας μηχανισμός επαναφοράς, όπως το μηχανικό ελατήριο, για την αποκατάσταση της αρχικής κατάστασης.



Σχήμα 35. Ο μηχανισμός λειτουργίας της ενεργής (a) και παθητικής (b) συσκευής μετατροπής θερμοδυναμικής ενέργειας [115].

3.3.2 Θερμομαγνητικά υλικά

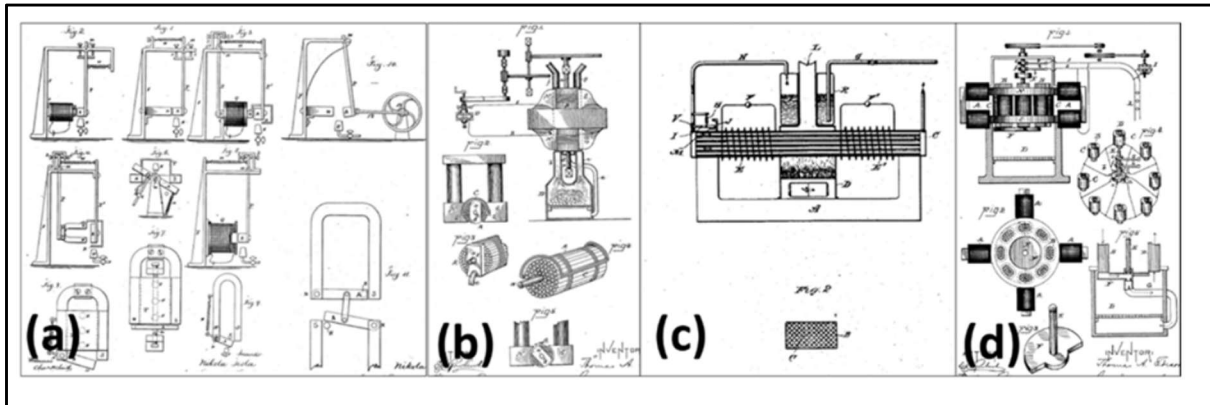
Η θερμομαγνητική επίδραση σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό είναι υψηλότερη κοντά στη θερμοκρασία Curie. Στη θερμοκρασία Curie, τα σιδηρομαγνητικά υλικά υφίστανται μετάβαση φάσης από μαγνητικές σε μη μαγνητικές καταστάσεις. Η μετάβαση φάσης ταξινομείται συνήθως ως πρώτης τάξης ή δεύτερης τάξης. Η μετάβαση φάσης δεύτερης τάξης είναι σταδιακή και συμβαίνει χωρίς τη συνύπαρξη πολλαπλών φάσεων. Από την άλλη πλευρά, η μετάβαση φάσης πρώτης τάξης περιλαμβάνει την εμφάνιση δύο φάσεων σε ισορροπία στη ζώνη μετάβασης. Όταν ένα υλικό με μετάπτωση πρώτης τάξης θερμαίνεται, παρουσιάζει μια απότομη αλλαγή φάσης που το μετατρέπει από μια έντονα μαγνητική σε μια ασθενώς μαγνητική φάση. Τα υλικά μετάπτωσης πρώτης τάξης συνήθως παρουσιάζουν υψηλότερη θερμομαγνητική επίδραση από τα υλικά μετάπτωσης δεύτερης τάξης. Ωστόσο, συνήθως συνοδεύονται από θερμική και μαγνητική υστέρηση, η οποία μειώνει τη συνολική απόδοση εργασίας [81].

Το γαδολίνιο (Gd) είναι μακράν το πιο συνιστώμενο θερμομαγνητικό υλικό [116-118] για τη συλλογή θερμικής ενέργειας για δύο κύριους λόγους. Πρώτον, το Gd έχει θερμοκρασία Curie ~ 293 K [119], επομένως, μπορεί να χρησιμοποιηθεί κοντά σε θερμοκρασία δωματίου. Δεύτερον, το Gd υφίσταται μετάβαση φάσης δεύτερης τάξης από τη σιδηρομαγνητική και παραμαγνητική κατάσταση και δεν έχει θερμική ή μαγνητική υστέρηση. Ωστόσο, δεδομένου ότι το Gd είναι παραμαγνητικό σε θερμοκρασία δωματίου, απαιτεί συνήθως μια ψύκτρα (ή ένα ψυγείο). Γενικά, οι πηγές θερμότητας είναι πιο βολικά διαθέσιμες (για παράδειγμα, με τη μορφή απορριπτόμενης θερμότητας), από ότι μια ψύκτρα. Ως εκ τούτου, είναι επιθυμητά θερμομαγνητικά υλικά με θερμοκρασία Curie ελαφρώς υψηλότερη από τη θερμοκρασία δωματίου. Οι Srivastava κ.α. [120] πρότειναν πρόσφατα το πολυσιδηρούχο κράμα Heusler, $\text{Ni}_{44}\text{Co}_5\text{Mn}_{40}\text{Sn}_{10}$ ως εναλλακτική του Gd. Το κράμα Heusler υφίσταται μετάβαση πρώτης τάξης από μια έντονα σιδηρομαγνητική φάση ωστενίτη σε μια ασθενώς σιδηρομαγνητική φάση μαρτενσίτη σε κρίσιμη θερμοκρασία 408 K [121, 122].

3.3.3 Θερμομαγνητικές Γεννήτριες

Το γεγονός ότι η θερμοκρασία μεταβάλλει τις μαγνητικές ιδιότητες των σιδηρομαγνητικών υλικών είναι γνωστό εδώ και πολύ καιρό. Το Σχήμα 36 απεικονίζει λίγα σχέδια [123-126] που εκδόθηκαν στα τέλη του 19ου αιώνα που περιγράφουν έννοιες για τη μετατροπή της θερμότητας σε μηχανική ή ηλεκτρική ενέργεια, χρησιμοποιώντας το θερμομαγνητικό φαινόμενο. Όπως φαίνεται, οι περισσότερες από αυτές τις συσκευές είχαν πολύπλοκα σχέδια και χρησιμοποιούσαν τον σίδηρο ως κύριο σιδηρομαγνητικό υλικό. Ο σίδηρος έχει πολύ υψηλή

θερμοκρασία Curie, περίπου 1000 K. Η επίτευξη τόσο υψηλής θερμοκρασίας απαιτεί πολύ καύσιμο και μπορεί να προκαλέσει θερμική υποβάθμιση των μόνιμων μαγνητών που χρησιμοποιούνται στη συσκευή. Επιπλέον, δεδομένου ότι η θερμοδυναμική απόδοση της θερμικής μηχανής είναι ανάλογη με $\frac{\Delta T}{T}$, όπου το T υποδηλώνει τη θερμοκρασία, καθώς η θερμοκρασία μετάβασης αυξάνεται, η απόδοση της θερμομαγνητικής συσκευής μειώνεται, γεγονός που καθιστά τα συμβατικά σιδηρομαγνητικά υλικά όπως ο σίδηρος, το κοβάλτιο και το νικέλιο ακατάλληλα για θερμομαγνητικές συσκευές [115].

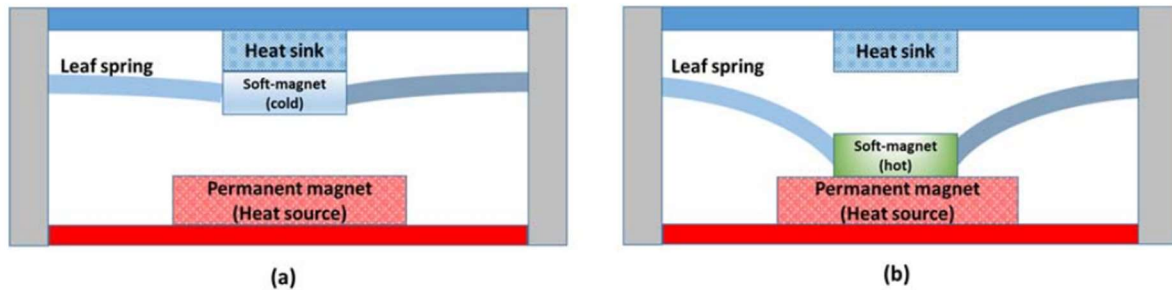


Σχήμα 36. Μερικά από τα πρωτότυπα σχέδια (a) Θερμομαγνητικός κινητήρας από τον Nikola Tesla, US Patent 396121 [124] (b) Πυρομαγνητικός κινητήρας από τον Thomas Edison, US Patent 380100 [126] (c) Πυρομαγνητική ηλεκτρική γεννήτρια από τον Nikola Tesla, US Patent 428057 [123] (d) Πυρομαγνητική γεννήτρια από τον Thomas Edison, US Patent 476983 [125].

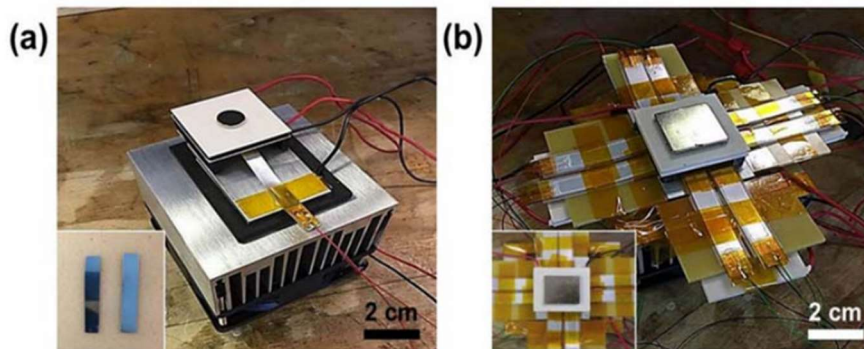
Οι ενεργές θερμομαγνητικές συσκευές δεν έχουν μελετηθεί πολύ στη βιβλιογραφία, πιθανώς λόγω της απαιτήσής τους για κυκλική διακύμανση της θερμοκρασίας. Οι παθητικές μηχανές συγκομιδής θερμομαγνητικής ενέργειας, ωστόσο, μπορούν να κατασκευαστούν για να λειτουργούν με πηγές θερμότητας σε σταθερή θερμοκρασία. Μερικοί από τους θερμομαγνητικούς κινητήρες που αναφέρονται στη βιβλιογραφία είναι ο κινητήρας σημείου Curie των Van Der Mass και Purvis [127], ο περιστροφικός θερμομαγνητικός κινητήρας των Murakami και Nemoto [128], ο θερμομαγνητικός κινητήρας του Takahashi [129, 130] και ο πλωτός τροχός του Palmy [131, 132].

Το Σχήμα 37 δείχνει το μοντέλο ενός θερμομηχανικού ενεργοποιητή που παρουσιάζεται από τους Ujihara κ.α. [133]. Η συσκευή αποτελείται από ένα μικρό κομμάτι γαδολίνιου που αιωρείται σε ένα φυλλωτό ελατήριο κοντά σε έναν σχετικά μεγάλο μόνιμο μαγνήτη νεοδυμίου. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 37, ο μόνιμος μαγνήτης βρίσκεται σε επαφή με την πηγή θερμότητας, ενώ το γαδολίνιο είναι αρχικά σε επαφή με μια ψύκτρα. Όταν το γαδολίνιο είναι κάτω από τη θερμοκρασία Curie του, είναι μαγνητικό και έλκεται από τον μόνιμο μαγνήτη. Αφού έρθει σε επαφή με την πηγή θερμότητας, η θερμοκρασία του ανεβαίνει πάνω από τη θερμοκρασία Curie και γίνεται παραμαγνητικό. Στη συνέχεια, το Gd απομακρύνεται από το φυλλωτό ελατήριο, φέρνοντάς το ξανά σε επαφή με την ψύκτρα. Τελικά, η θερμοκρασία του πέφτει κάτω από τη θερμοκρασία Curie και αρχίζει να ανακτά τον μαγνητισμό του. Όταν η μαγνητική δύναμη είναι μεγαλύτερη από τη δύναμη του ελατηρίου, ο μόνιμος μαγνήτης έλκει το Gd προς την πηγή θερμότητας και ο κύκλος συνεχίζεται. Μια παρόμοια θερμομαγνητική συσκευή αναφέρθηκε πρόσφατα από τους Chun κ.α. [134] για τη συγκομιδή θερμικής ενέργειας και για την ενίσχυση του ρυθμού ψύξης των ηλιακών πάνελ που χρησιμοποιούνται σε μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα. Η συσκευή που φαίνεται στο Σχήμα 38(a) αποτελείται

από έναν μόνο δίμορφο πρόβολο και βρέθηκε ότι ενισχύει τον ρυθμό ψύξης ενός αντικειμένου κατά $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ανά λεπτό. Η συσκευή που φαίνεται στο Σχήμα 38(b) αποτελείται από συστοιχίες δίμορφων προβόλων και βρέθηκε ότι παράγουν ισχύ εξόδου $158\text{ }\mu\text{W}$ σε διαφορά θερμοκρασίας $80\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Σχήμα 37. Θερμομηχανικός ενεργοποιητής που παρουσιάστηκε από τους Ujihara κ.α. [133] (a) ο μαλακός μαγνήτης είναι σιδηρομαγνητικός, (b) ο μαλακός μαγνήτης είναι παραμαγνητικός.



Σχήμα 38. Η θερμο-μαγνητο-ηλεκτρική γεννήτρια (TMEG) των Chun κ.α. (a) TMEG με μονό δίμορφο πρόβολο και (b) TMEG με συστοιχίες από δίμορφους προβόλους [134].

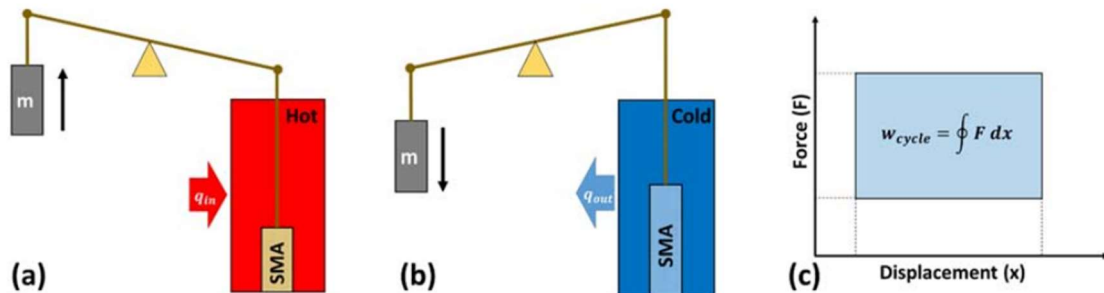
3.4 Θερμοελαστική Συγκομιδή Ενέργειας

Η έννοια της θερμικής καταπόνησης είναι γνωστή. Η θέρμανση ή η ψύξη ενός υλικού συνήθως προκαλεί αλλαγή διαστάσεων, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή έργου. Μια ειδική κατηγορία υλικών, που ονομάζονται κράματα μνήμης σχήματος (SMAs), παράγουν σημαντική πίεση όταν θερμαίνονται και επομένως είναι τα πλέον κατάλληλα για τέτοιες εφαρμογές. Σε μια ορισμένη κρίσιμη θερμοκρασία, τα SMAs όπως το NiTi και το Cu-Zn-Al, υφίστανται μαρτενσιτικό μετασχηματισμό, ο οποίος είναι ένας μετατοπιστικός μετασχηματισμός που κυριαρχείται από διατμητικές παραμορφώσεις του κρυσταλλικού πλέγματος [134]. Ο μετασχηματισμός συμβαίνει από τη φάση μαρτενσίτη (σταθερή σε χαμηλή θερμοκρασία) στη φάση ωστενίτη (σταθερή σε υψηλή θερμοκρασία), η οποία έχει καθοριστικά διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες, οδηγώντας σε μεγάλη παραμόρφωση, έως και 10%, στο αντικείμενο που εφαρμόζεται [81].

3.4.1 Αρχή λειτουργίας

Το Σχήμα 39(a),(b) δείχνει ένα απλοϊκό μοντέλο μιας θερμοελαστικής μηχανής. Η μηχανή περιέχει ένα κράμα μνήμης σχήματος (SMA) ως στοιχείο εργασίας, το οποίο υφίσταται συστολή και επιμήκυνση κατά τη διαδικασία θέρμανσης και ψύξης, αντίστοιχα. Όταν το SMA

συστέλλεται κατά τη θέρμανση, ασκεί δύναμη στην προσκολλημένη μάζα. Η δύναμη που εφαρμόζεται από το στοιχείο SMA κατά τη συστολή υπερβαίνει σημαντικά τη δύναμη που εφαρμόζεται στο στοιχείο SMA κατά την επιμήκυνση, με αποτέλεσμα την παραγωγή καθαρού έργου ανά κύκλο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 39(c).



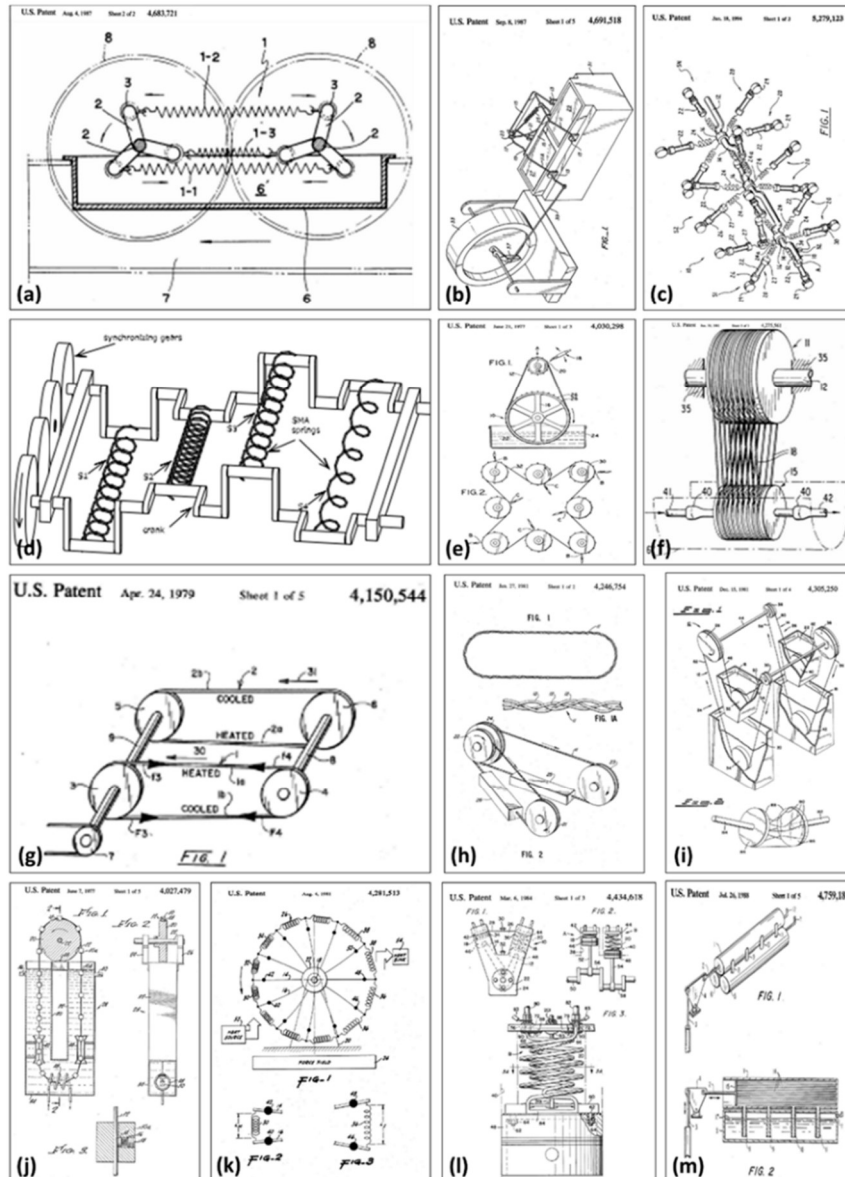
Σχήμα 39. Απλοϊκό μοντέλο μιας θερμοελαστικής μηχανής: (a) διαδικασία απορρόφησης θερμότητας, (b) διαδικασία αποβολής θερμότητας, (c) κύκλος δύναμης-μετατόπισης [81].

3.4.2 Θερμοελαστικές μηχανές (SMA Heat Engines)

Οι θερμοελαστικές μηχανές μετατροπής ενέργειας έγιναν δημοφιλείς τη δεκαετία του 1970–1980. Πάνω από 100 πρωτότυπα σχέδια κατατέθηκαν κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου. Μερικά από αυτά φαίνονται στο Σχήμα 40. Ιστορικά, οι θερμικές μηχανές SMA έχουν χωριστεί σε τέσσερις κατηγορίες: κινητήρες με στρόφαλο offset, κινητήρες στροβίλου, κινητήρες πεδίου και διάφορους κινητήρες [135, 136].

Το Σχήμα 40(a)-(d) δείχνει μερικούς κινητήρες στρόφαλου που βασίζονται σε SMA [135, 137-139]. Περιέχουν ενεργοποιητές SMA συνδεδεμένους έκκεντρα στον άξονα εξόδου. Αυτός ο μηχανισμός μετατρέπει μια παλινδρομική γραμμική κίνηση ενός ενεργοποιητή SMA σε συνεχή περιστροφική κίνηση. Οι ενεργοποιητές SMA είναι σχεδιασμένοι να σχηματίζουν ελατήρια επέκτασης. Μια ηλεκτρική γεννήτρια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από μια μηχανική περιστροφή.

Οι κινητήρες στροβίλου ή τροχαλίας χρησιμοποιούν συνεχείς ιμάντες από σύρμα SMA και μεταλλικές τροχαλίες ως μηχανισμό κίνησης. Ένα τμήμα του σύρματος SMA σε μια τροχαλία θερμαίνεται, το οποίο παράγει τάση στο σύρμα, προκαλώντας την περιστροφή της τροχαλίας. Το Σχήμα 40(e)-(i) δείχνει μερικούς κινητήρες τροχαλίας που βασίζονται σε SMA [140-142]. Οι μηχανές πεδίου που βασίζονται σε SMA λειτουργούν ενάντια σε μια δύναμη ανάκτησης, όπως ένα βαρυτικό ή μαγνητικό πεδίο. Συνήθως περιέχουν μια σειρά από ενεργά στοιχεία που αλληλεπιδρούν με το πεδίο δύναμης, βάρη για το βαρυτικό πεδίο και μαγνήτες για το μαγνητικό πεδίο. Αυτά τα ενεργά στοιχεία συνδέονται κατά μήκος ενός βρόχου από καλώδιο SMA. Ένα τμήμα του βρόχου θερμαίνεται προκαλώντας συστολή, και αυξάνει την πυκνότητα του στοιχείου σε αυτήν την περιοχή. Το πυκνότερο τμήμα επηρεάζεται περισσότερο από το πεδίο δύναμης, οδηγώντας σε μια μη ισορροπημένη δύναμη που προκαλεί περιστροφή. Το Σχήμα 40(j),(k) δείχνει μερικές μηχανές πεδίου που βασίζονται σε SMA [143, 144]. Το Σχήμα 40(l),(m) δείχνει μερικούς παλινδρομικούς κινητήρες που βασίζονται σε SMA [145,146]. Έχουν σχετικά απλούστερο σχεδιασμό καθώς η γραμμική κίνηση παράγεται με κυκλική θέρμανση στοιχείων SMA.



Σχήμα 40. Μερικές από τις πρώτες SMA θερμικές μηχανές [137-146].

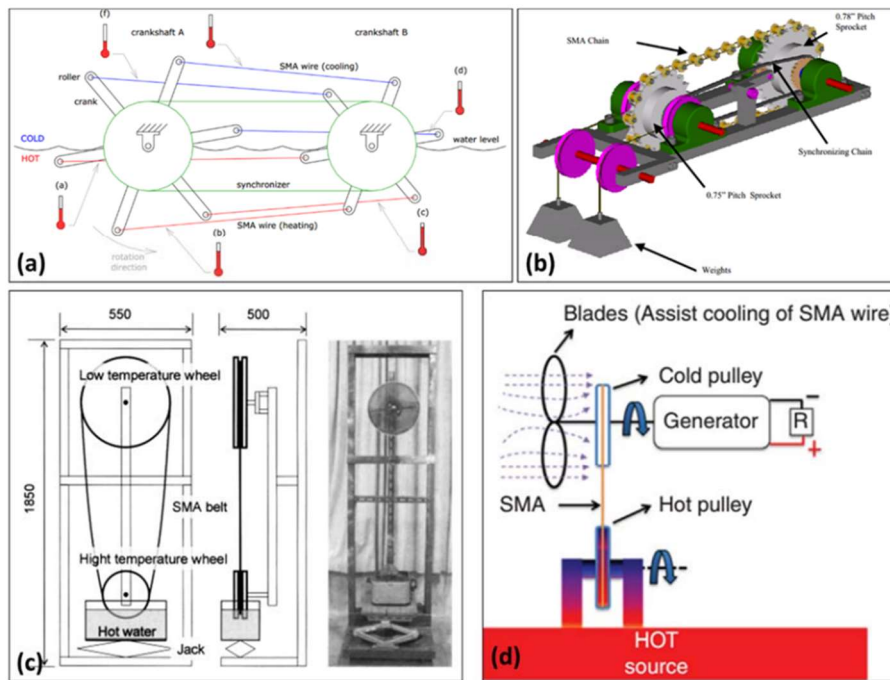
Οι πρώτες συσκευές δεν κέρδισαν μεγάλη δημοτικότητα, πιθανώς λόγω του ογκώδους σχεδιασμού και της χαμηλής απόδοσης μετατροπής ενέργειας. Πολυάριθμες θεωρητικές μελέτες διερεύνησαν την τεχνική σκοπιμότητα των θερμοελαστικών συσκευών σε ότι αφορά την απόδοση και την αποτελεσματικότητά τους [81].

Η απόδοση μετατροπής θερμικής ενέργειας σε μηχανική που κυμαίνονταν μεταξύ του 2% και του 9%, προβλέφθηκε χρησιμοποιώντας μια ποικιλία θεωρητικών μοντέλων που βασίζονται στη θερμική μεταφορά και στις μηχανικές μετρήσεις [147].

Η θερμοελαστική τεχνική συγκομιδής ενέργειας παρέμεινε αδρανής για αρκετό καιρό στα τέλη του 20ού αιώνα. Το χαμηλό ενδιαφέρον για αυτήν την τεχνολογία μπορεί να είναι αποτέλεσμα ανησυχιών επεκτασιμότητας που σχετίζονται με τις συσκευές SMA. Μικρά πρωτότυπα συσκευών που αναπτύχθηκαν στα ερευνητικά εργαστήρια, έδειξαν πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα, αλλά οι μεγαλύτερης κλίμακας εκδόσεις δεν παρήγαγαν σημαντική ισχύ για να δικαιολογήσουν το κόστος ανάπτυξής τους. Το 2001, ερευνητές στο Virginia Tech των ΗΠΑ προσπάθησαν να αναβιώσουν αυτή την τεχνολογία και πρότειναν έναν εκλεπτυσμένο σχεδιασμό κινητήρα [148] μαζί με έναν ειδικό μηχανισμό για την

λειτουργία του [149] για τη μείωση των απωλειών λόγω της τριβής και της ολίσθησης. Το Σχήμα 41(a) δείχνει τη θερμική μηχανή SMA που προτάθηκε από τον Schiller [148]. Ο κινητήρας SMA του Schiller αποτελείται από δύο παράλληλους στροφαλοφόρους άξονες, καθένας από τους οποίους υποστηρίζει πολλαπλούς στρόφαλους σε ίση απόσταση. Οι στρόφαλοι του πρώτου άξονα είναι ευθυγραμμισμένοι με τους στρόφαλους στον δεύτερο άξονα, οι οποίοι είναι ίδια προσανατολισμένοι αλλά πιο κοντοί, όπως φαίνεται στο Σχήμα 41(a). Ένας συγχρονιστής, με τη μορφή ενός ιμάντα χρονισμού και δύο πανομοιότυπων τροχαλιών, χρησιμοποιείται για την αποτροπή της σχετικής περιστροφής μεταξύ των δύο αξόνων. Τα καλώδια SMA τεντώνονται μεταξύ των κυλίνδρων που βρίσκονται στο άκρο κάθε στροφάλου. Κατά τη λειτουργία, τα μισά καλώδια του κινητήρα βυθίζονται στη θερμή περιοχή ενώ τα άλλα μισά παραμένουν κρύα. Τα καλώδια που βρίσκονται στη θερμή πλευρά συστέλλονται, ενώ τα καλώδια στην ψυχρή πλευρά επιμηκύνονται. Εφόσον η δύναμη που δημιουργείται λόγω της ανάκτησης της θερμότητας υπερβαίνει τη δύναμη που απαιτείται για την ψυχρή παραμόρφωση, η διαδικασία ανάκτησης δημιουργεί καταπόνηση στα ψυχρά σύρματα, προκαλώντας κίνηση στον κινητήρα. Το Σχήμα 41(b) δείχνει έναν άλλο σχεδιασμό θερμικής μηχανής SMA που προτάθηκε από τον Wakjira [149]. Ο κινητήρας του Wakjira αποτελείται από μια αλυσίδα κυλίνδρων κίνησης SMA, δύο κινούμενα πλαστικά γρανάζια, των οποίων τα δόντια εμπλέκονται με τους κυλίνδρους της αλυσίδας SMA, μια αλυσίδα συγχρονιστή και άλλα εξαρτήματα που φαίνονται στο Σχήμα 41(b).

Ορισμένες έρευνες προσπάθησαν να αναπτύξουν έναν θερμομηχανικό ενεργοποιητή βασισμένο σε SMA [148, 149]. Αυτά τα συστήματα σχεδιάστηκαν για να μετατρέπουν τη θερμική ενέργεια σε μηχανική ενέργεια με τη μορφή γραμμικής ή περιστροφικής κίνησης. Αργότερα, έγιναν λίγες προσπάθειες για την κατασκευή υβριδικών θερμικών μηχανών όπου τα συστήματα SMA ήταν ενσωματωμένα σε ένα πιεζοηλεκτρικό σύστημα [150]. Στις περισσότερες από αυτές τις συσκευές, τα στοιχεία SMA καταναλώνουν θερμότητα για να παράξουν μηχανικό έργο, το οποίο τελικά μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιώντας ορισμένους ηλεκτρομηχανικούς μετατροπείς, όπως μια ηλεκτρική γεννήτρια ή ένα πιεζοηλεκτρικό δίμορφο. Πιο πρόσφατα, οι Sato κ.α. [151] ανέπτυξαν έναν θερμικό μηχανισμό SMA με τροχαλία που απεικονίζεται στο Σχήμα 41(c). Ο μηχανισμός SMA που αποτελείται από έναν ιμάντα SMA, βρέθηκε να παράγει μέγιστη ισχύ εξόδου 300 mW. Η μέγιστη ισχύς εξόδου αυξήθηκε στα 1,16 W με πέντε παράλληλους ιμάντες SMA [151]. Οι Anironik κ.α. [152] παρουσίασαν μια πειραματική μελέτη σε έναν μικροσκοπικό μηχανισμό SMA (Σχήμα 41(d)). Ο κινητήρας SMA αναφέρθηκε ότι λειτουργούσε κοντά σε θερμοκρασία δωματίου με θερμοκρασία θερμής πλευράς να κυμαίνεται στους 60–80 °C, ενώ βρέθηκε και ότι τα 0,12 g σύρματος SMA παρήγαγαν 2,6 mW μηχανική ισχύ και 1,7 mW ηλεκτρική ισχύ.



Σχήμα 41. (a) Η SMA μηχανή Schiller [148], (b) Η μηχανή SMA του Wakjira με αλυσίδα κυλίνδρων κίνησης [149], (c) Η μηχανή SMA των Sato κ.α. μεγάλης κλίμακας [151], (d) Η μινιατούρα μηχανή SMA των Avirovik κ.α. [152].

Κεφάλαιο 4: Συγκομιδή Ενέργειας Δόνησης

Οι τεχνολογίες συγκομιδής ενέργειας από δονήσεις έχουν προσελκύσει πολύ την προσοχή την τελευταία δεκαετία. Πηγές δόνησης όπως τα ωκεάνια κύματα και η ανθρώπινη κίνηση αποτελούν δυνατότητες παροχής μηχανικής ενέργειας που μπορεί να συλλεχθεί για τη φόρτιση αυτοτροφοδοτούμενων ασύρματων συσκευών, ή την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Πολλοί ερευνητές έχουν προσπαθήσει να σχεδιάσουν ορισμένες συσκευές μετατροπής μηχανικής σε ηλεκτρική ενέργεια με βάση διαφορετικούς μηχανισμούς μετατροπής [153-156]. Ωστόσο, ορισμένες από τις συσκευές συγκομιδής ενέργειας δεν μπορούν να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις των αρχικών στόχων των σχεδιαστών, καθώς συνήθως αναμένεται υψηλή απόδοση μετατροπής από μηχανικές δονήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτή η μη ικανοποιητική κατάσταση οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι η συχνότητα συντονισμού της γεννήτριας συχνά δεν ταιριάζει με τη συχνότητα των δονήσεων του περιβάλλοντος, ή το εύρος ζώνης συχνοτήτων της γεννήτριας περιορίζεται συνήθως σε ένα συγκεκριμένο εύρος που δεν μπορεί να καλύψει την τυχαίες συχνότητες δόνησης των εξωτερικών πηγών. Εάν η συχνότητα των περιβάλλοντων δονήσεων αποκλίνει ελαφρώς από τη συχνότητα συντονισμού της συσκευής συγκομιδής ενέργειας, η προκύπτουσα ισχύς εξόδου της συσκευής αναμένεται να μειωθεί δραστικά [157].

Με βάση το γεγονός ότι η απόδοση παραγωγής ισχύος μιας συσκευής συγκομιδής ενέργειας περιορίζεται στη διέγερση συντονισμού, έχουν αξιοποιηθεί νέες μέθοδοι σχεδιασμού. Οι σημαντικότερες μέθοδοι μετατροπής των δονήσεων του περιβάλλοντος είναι οι ηλεκτρομαγνητικές, οι ηλεκτροστατικές και οι πιεζοηλεκτρικές. Συνήθως, οι πιεζοηλεκτρικοί συλλέκτες ενέργειας τύπου προβόλου σχεδιάζονται με μια μάζα δοκιμής που βρισκόταν στο ελεύθερο άκρο της δοκού. Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να παραχθεί από δονήσεις στη βάση της δοκού που προκαλούν την κάμψη της.

Σε πολλές εφαρμογές, οι περιβαλλοντικές δονήσεις είναι συχνά τυχαίες και ευρυζωνικές και ο σχεδιασμός των συσκευών συγκομιδής ενέργειας πρέπει να λαμβάνει υπόψη αυτή τη μορφή διεγέρσεων. Πρόσφατα, οι ερευνητές επικεντρώθηκαν στην έννοια της ευρυζωνικής συγκομιδής ενέργειας και εξετάστηκαν διάφοροι μη γραμμικοί ταλαντωτές και μη γραμμικές γεννήτριες ισχύος [158].

Η ευρυζωνική συγκομιδή ενέργειας μπορεί να χωριστεί σε δύο διαφορετικές κατηγορίες. Η πρώτη είναι η χρήση γραμμικών γεννητριών. Αυτή χαρακτηρίζεται από μια γεωμετρική διάταξη μεμονωμένων μετατροπέων. Οι γραμμικές γεννήτριες είναι ενεργειακοί συλλέκτες με συμπεριφορά παρόμοια με γραμμικού συστήματος. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τις μη γραμμικές γεννήτριες. Σε αυτή την περίπτωση, τα μη γραμμικά φαινόμενα είναι απαραίτητα για την αύξηση του εύρους ζώνης λειτουργίας [159].

4.1 Γραμμικές γεννήτριες

Η συγκομιδή ενέργειας δονήσεων απαιτεί έναν μηχανισμό για τη μετατροπή των μηχανικών δονήσεων σε ηλεκτρική ενέργεια. Πηγές δονήσεων συναντάμε σε διάφορα περιβάλλοντα, από γέφυρες, κτίρια, βιομηχανικό εξοπλισμό, οικιακές συσκευές και σιδηροδρόμους μέχρι και αυτοκίνητα [160]. Τυπικά, ένα σύστημα συγκομιδής ενέργειας από δονήσεις μπορεί να σχεδιαστεί ως ένα απλό μοντέλο ελατηρίου-μάζας μιας γραμμικής γεννήτριας με βάση την αδρανειακή ενέργεια, το οποίο αναπτύχθηκε από τους Williams και Yates [161]. Το βασικό αυτό μοντέλο χρησιμοποιείται για την κατανόηση της μετατροπής της μηχανικής δόνησης σε

ηλεκτρική ενέργεια και ισχύει μόνο για συσκευές συγκομιδής ενέργειας όπου οι όροι απόσβεσης και δυσκαμψίας είναι γραμμικοί, στους οποίους η μηχανική απόσβεση είναι ανάλογη της ταχύτητας και η δυσκαμψία είναι ανάλογη της της μετατόπισης [158].

Οι γραμμικές γεννήτριες μπορούν να μοντελοποιηθούν ως συστήματα ενός βαθμού ελευθερίας (SDOF). Η εξίσωση κίνησης για αυτή τη θεμελιώδη μοντελοποίηση δίνεται από τους Williams και Yates για ένα γενικό σύστημα συγκομιδής ενέργειας από δονήσεις:

$$m\ddot{z}(t) + (d_m + d_e)\dot{z}(t) + cz(t) = -m\ddot{y}(t)$$

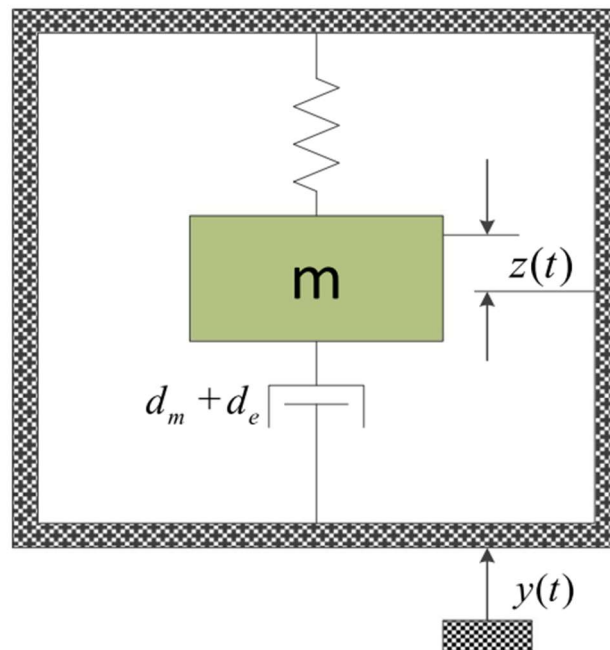
όπου m είναι η μάζα, c είναι η δυσκαμψία, d_m είναι η μηχανική απόσβεση και d_e ο συντελεστής απόσβεσης της ηλεκτρικής επαγωγής, και τα $z(t)$ και $y(t)$ αντιπροσωπεύουν την παραμόρφωση του ελατηρίου και τη μετατόπιση της εισόδου, αντίστοιχα [159].

Υπάρχουν διαφορετικές μέθοδοι μετατροπής ενέργειας για μια γραμμική γεννήτρια, τις οποίες τις συναντήσαμε και στο Κεφάλαιο 2, στις μεθόδους συγκομιδής αιολικής ενέργειας. Οι τρεις πιθανές μέθοδοι μετατροπής είναι οι εξής:

Πιεζοηλεκτρική μετατροπή. Το πιεζοηλεκτρικό υλικό μετατρέπει την καταπόνηση του μηχανικού συστήματος σε ηλεκτρική ενέργεια.

Ηλεκτρομαγνητική μετατροπή. Η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιώντας έναν μαγνήτη που κινείται σε σχέση με ένα πηνίο.

Ηλεκτροστατική μετατροπή. Οι πλάκες ενός χωρητικού μετατροπέα ταλαντώνονται και προκαλούν τάση στις πλάκες του [159]. Στην συνέχεια θα μελετήσουμε ξανά αυτές τις μεθόδους, αλλά σε μια πιο γενική έννοια, καθώς θα μιλήσουμε για όλων των ειδών τις δονήσεις και όχι μόνο εκείνες που οφείλονται σε ροές ανέμου.

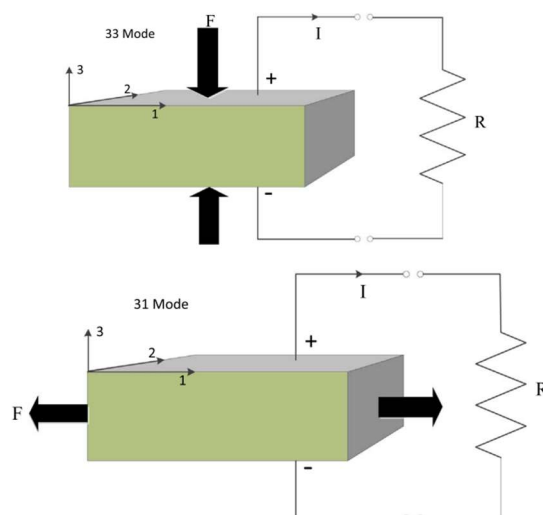


Σχήμα 42. Σχηματική αναπαράσταση της γραμμικής γεννήτριας με βάση την αδρανειακή ενέργεια [158].

4.1.1 Πιεζοηλεκτρική Μετατροπή

Ως μία από τις πιο σημαντικές μεθόδους συγκομιδής ενέργειας με βάση τη δόνηση, η πιεζοηλεκτρική μετατροπή έχει λάβει μεγάλη προσοχή λόγω της απλής δομής της πιεζοηλεκτρικής γεννήτριας και της ευκολίας εφαρμογής που χαρακτηρίζει τα πιεζοηλεκτρικά υλικά. Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο που αφορά την συγκομιδή αιολικής ενέργειας, ένας πιεζοηλεκτρικός μετατροπέας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μετατροπή της μηχανικής καταπόνησης σε ηλεκτρικό φορτίο, το οποίο ονομάζεται άμεσο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Συνήθως, η μηχανική καταπόνηση προκαλείται από τις περιβαλλοντικές δονήσεις γύρω από τη συσκευή συγκομιδής ενέργειας. Από την άλλη πλευρά, ο πιεζοηλεκτρικός μετατροπέας είναι επίσης ικανός να μετατρέψει την ηλεκτρική ενέργεια σε ενέργεια μηχανικού στρες, η οποία ορίζεται ως αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ενεργοποιητής.

Το Σχήμα 43 απεικονίζει τους δύο συνήθεις τρόπους σύζευξης για τους πιεζοηλεκτρικούς μετατροπείς. Το πιεζοηλεκτρικό υλικό πολώνεται με ηλεκτρικό πεδίο στην κατεύθυνση "3". Στον τρόπο λειτουργίας '33', τα φορτία συλλέγονται στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου όταν η εφελκυστική ή η συμπιεστική δύναμη εφαρμόζεται κατά μήκος της κατεύθυνσης πόλωσης. Στη λειτουργία "31", τα φορτία συλλέγονται στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου όταν το υλικό τεντώνεται κάθετα προς τη κατεύθυνση πόλωσης. Συνήθως, ο συντελεστής μηχανικής/ηλεκτρικής σύζευξης για τον τρόπο "33" είναι υψηλότερος από αυτόν του τρόπου "31" [162]. Ωστόσο, με βάση τη σύγκριση και την ανάλυση μεταξύ των δύο τρόπων, οι Ramsay και Clark διαπίστωσαν ότι η μετατροπή του τρόπου '31' μπορεί να έχει μεγαλύτερο πλεονέκτημα στη μετατροπή ενέργειας για πηγές πολύ χαμηλής πίεσης, και ο τρόπος '33' μπορεί να είναι βιώσιμος για μεγαλύτερο όγκο πιεζοηλεκτρικών υλικών [163].



Σχήμα 43. Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας '33' και της λειτουργίας '31' για τα πιεζοηλεκτρικά υλικά [164].

Αν και η ηλεκτρική/μηχανική σύζευξη για τη λειτουργία '31' είναι χαμηλότερη από ό,τι για τη λειτουργία '33', υπάρχει ένα βασικό πλεονέκτημα για τη λειτουργία στη λειτουργία '31'. Το σύστημα είναι πολύ πιο εύκαμπτο, επομένως μπορούν να παραχθούν μεγαλύτερες παραμορφώσεις με μικρότερες δυνάμεις εισόδου. Επίσης, η συχνότητα συντονισμού είναι πολύ χαμηλότερη. Θα χρειαζόταν μια τεράστια μάζα προκειμένου να σχεδιαστεί ένας πιεζοηλεκτρικός μετατροπέας που να λειτουργεί στον τρόπο λειτουργίας '33' με συχνότητα

συντονισμού στα 120 Hz. Επομένως, η χρήση καμπτικών στοιχείων που λειτουργούν στη λειτουργία '31' είναι απαραίτητη σε αυτή την περίπτωση. Με βάση τη βασική θεωρία της δοκού, οι Roundy κ.ά. [164] ανέπτυξαν ένα αναλυτικό μοντέλο για την υλοποίηση ενός προβόλου με πιεζοηλεκτρικό δίμορφο. Με τον μηχανισμό μετατροπής τύπου "33", ο DuToit [165-167] ανέπτυξε ένα ηλεκτρομηχανικό μοντέλο με σύζευξη κλειστής μορφής, το οποίο μπορεί να προβλέψει τις βασικές αποκρίσεις (μετατόπιση και τάση) των πιεζοηλεκτρικών συσκευών συγκομιδής δονητικής ενέργειας [158].

Η χρήση πιεζοπολυμερών για τη συγκομιδή ενέργειας από δονήσεις είναι αποδοτικότερη από των πιεζοκεραμικών που χρησιμοποιούνται στις υλοποιήσεις που είδαμε προηγουμένως, καθώς τα πιεζοπολυμερή είναι όλκιμα, ανθεκτικά σε κρούσεις, παραμορφώσιμα και ελαφριά. Οι Mateu και Moll [168] ανέλυσαν διάφορες υλοποιήσεις προβόλων κάμψης, με χρήση πιεζομεμβρανών κατάλληλων για ένθετα παπουτσιών και διέγερση από το βάδισμα. Η λειτουργία αυτού του μηχανισμού είναι η ακόλουθη. Καθώς το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο καταπονείται επαναλαμβανόμενα, η τάση στον πυκνωτή αποθήκευσης αυξάνεται. Κάθε φορά που η τάση αυτή φτάνει σε ένα ορισμένο όριο (V_{off}), ο πυκνωτής συνδέεται στην είσοδο του ρυθμιστή και εκφορτίζεται σε μια χαμηλότερη τάση, V_{off} , παρέχοντας την ενέργεια E_{req} (συμπεριλαμβανομένης της ενέργειας που χρειάζεται ο ρυθμιστής). Στη συνέχεια, ο πυκνωτής αποσυνδέεται και πάλι από το φορτίο, επιτρέποντάς του να επαναφορτιστεί.



Σχήμα 44. Πρωτότυπη συσκευή με πιεζοηλεκτρικό φιλμ που τοποθετείται σε παπούτσι [169].

Η επιλογή του πυκνωτή αποθήκευσης και οι τιμές της τάσης κατά την οποία πρέπει να συνδεθεί δεν είναι αυθαίρετα, αλλά εξαρτώνται από τις ενεργειακές απαιτήσεις του φορτίου και τα πιεζοηλεκτρικά χαρακτηριστικά. Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι αν επιλεγεί υψηλότερη τάση V_{off} , το βέλτιστο V_{on} είναι πιο κοντά στο V_{off} και επομένως, ο αριθμός των απαιτούμενων κύκλων για την επαναφόρτιση να είναι κάπως μικρότερος. Αυτό συμβαίνει με κόστος έναν υψηλότερου αρχικό αριθμό κύκλων, λόγω της μεγαλύτερης χωρητικότητας που απαιτείται [169].

Οι Farinholt κ.α. [170] ανέπτυξαν ένα σακίδιο συγκομιδής ενέργειας που μπορεί να παράγει ηλεκτρική ενέργεια από τις ανομοιογενείς βαρυτικές δυνάμεις μεταξύ του χρήστη και του σακιδίου πλάτης με τη χρήση PVDF. Προκειμένου να παραχθεί το υψηλότερο επίπεδο ενέργειας, το μήκος του ιμάντα πρέπει να μεγιστοποιηθεί. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός συνεχούς ιμάντα που διατρέχει το πλαίσιο του σακιδίου και σχηματίζει έναν πλήρη

βρόχο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 45. Σε προσομοίωση που το σακίδιο μετέφερε φορτίο 444 N, η μέγιστη στιγμιαία ισχύς ήταν 0,345 W και η μέση ισχύς 45,6 mW.

Η ισχύς εξόδου που προέκυψε, θα μπορούσε σίγουρα να χρησιμοποιηθεί για την τροφοδοσία ορισμένων μικρών, χαμηλής ισχύος ηλεκτρονικών, ή θα μπορούσε να συσσωρευτεί κατά τη διάρκεια μιας εξόρμησης, κάτι που θα οδηγούσε στην ύπαρξη συμπληρωματικής ενέργειας και άρα στην ανάγκη για μικρότερο αριθμό μπαταριών. Αυτός ο σχεδιασμός σακιδίου θα οδηγήσει σε ελάχιστες παρασιτικές επιδράσεις που θα μπορούσαν να διαταράξουν το βάδισμα ή την αντοχή του χρήστη, καθιστώντας το έτσι μια εφικτή μέθοδο συγκομιδής ενέργειας από δονήσεις που παράγονται κατά την ανθρώπινη κίνηση.

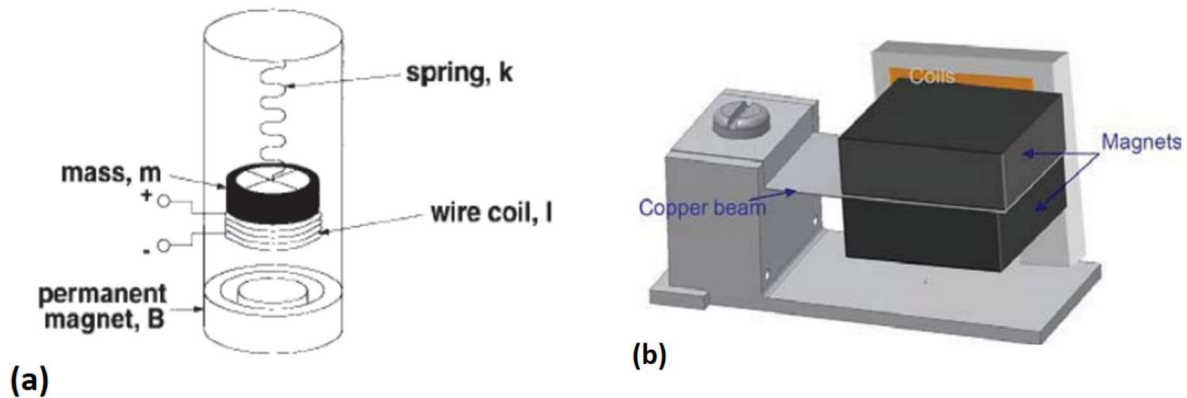


Σχήμα 45. Σχηματική αναπαράσταση ενός backpack με πιεζοηλεκτρικούς ιμάντες [170].

4.1.2 Ηλεκτρομαγνητική μετατροπή

Με τον όρο ηλεκτρομαγνητική μετατροπή όπως αναφέραμε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, εννοούμε την μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική, που συμβαίνει από τη σχετική κίνηση ενός μαγνήτη μέσα σε ένα πηνίο. Αυτές οι γεννήτριες μπορούν να υλοποιηθούν με διάφορους τρόπους. Ένα πρώτο παράδειγμα είναι μια γεννήτρια που κινεί έναν κινητό μαγνήτη με ένα ελατήριο, όπως στο Σχήμα 46(a) [171].

Ένα δεύτερο παράδειγμα δείχνει μια γεννήτρια που κινεί έναν κινητό μαγνήτη μέσω μιας κονσόλας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 46(b) [172]. Μια ακόμα γνωστή μέθοδος για την κατασκευή επαγωγικών γεννητριών είναι η χρήση σταθερών μαγνητών, προσανατολισμένων με τον ίδιο πόλο προς τον κινούμενο μαγνήτη. Το κύριο πλεονέκτημα αυτών των γεννητριών είναι ότι σχεδιάζονται και κατασκευάζονται εύκολα, καθώς τα μέρη τους δεν βρίσκονται σε επαφή μεταξύ τους, γεγονός που βελτιώνει την αξιοπιστία του συστήματος.

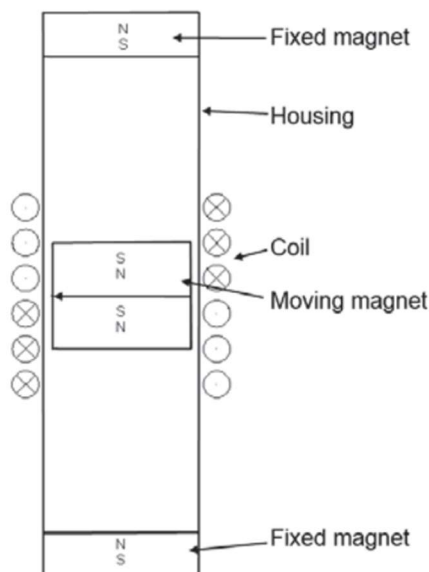


Σχήμα 46. (a) Σχηματική αναπαράσταση ηλεκτρομαγνητικής γεννήτριας με ελατήριο [171], (b) Σχηματική αναπαράσταση ηλεκτρομαγνητικής γεννήτριας με κονσόλα [172].

Στο Σχήμα 47 παρουσιάζεται το σχηματικό διάγραμμα μιας συσκευής συγκομιδής ενέργειας με ηλεκτρομαγνητική μετατροπή που εκμεταλλεύεται τις δονήσεις που υπάρχουν στο περιβάλλον. Από λειτουργική άποψη, είναι παρόμοια με ένα shaker, αλλά η διαδικασία μετατροπής είναι αντίστροφη. Το ηλεκτρικό σύστημα που παρουσιάζεται είναι ένα απλό πρώτης τάξης L-R κύκλωμα με τη σύνθετη αντίσταση του πηνίου σε σειρά με την αντίσταση φορτίου. Η αρχή λειτουργίας της συσκευής έχει ως εξής: όταν το περίβλημα δονείται από μια δυναμική μηχανική δύναμη από το εξωτερικό προκαλεί μια σχετική κίνηση του κινητού μαγνήτη σε σχέση με το περίβλημα. Αυτή η σχετική ταλαντευόμενη κίνηση προκαλεί μεταβολή της μαγνητικής ροής στο εσωτερικό του πηνίου. Χρησιμοποιώντας το νόμο του Faraday η τάση που προκαλείται στο πηνίο περιγράφεται από τη σχέση:

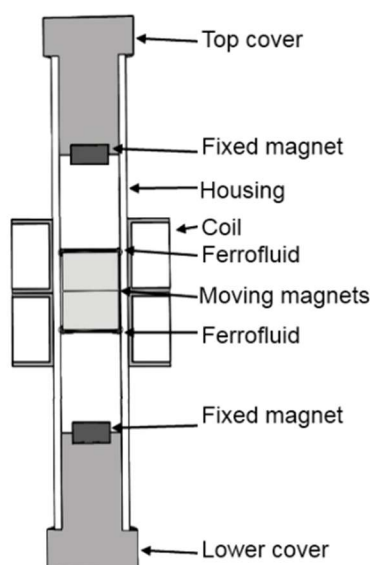
$$\varepsilon = -\frac{d\phi_B}{dt},$$

όπου: ε είναι η επαγόμενη τάση και $d\phi_B$ είναι η μαγνητική ροή. Το πλάτος αυτής της τάσης είναι ανάλογο της ταχύτητας μετατόπισης των κινητών μαγνητών σε σχέση με το πηνίο [173].



Σχήμα 47. Συγκομιδή ενέργειας ηλεκτρομαγνητικής μετατροπής με μαγνητική αιώρηση [173].

Στο Σχήμα 48 παρουσιάζεται η τομή της γεννήτριας που μελετήσαμε προηγουμένως. Αποτελείται από δύο σταθερούς μαγνήτες στο άκρο του περιβλήματος και δύο κινητούς μαγνήτες στο εσωτερικό, με τον ίδιο πόλο προσανατολισμένο στους σταθερούς μαγνήτες. Στο εξωτερικό του περιβλήματος τοποθετείται ένα πηνίο με δύο περιελίξεις συνδεδεμένες σε αντίθετες φάσεις. Το περίβλημα της γεννήτριας είναι κατασκευασμένο από πλεξιγκλάς, ενώ τα καπάκια μπορούν να μετακινηθούν προς τα έξω, ώστε να επιτρέπουν στους κινητούς μαγνήτες να εκτελούν μεγαλύτερες κινήσεις σε περίπτωση μεγάλου πλάτους δονήσεων. Επίσης, οι περιελίξεις των πηνίων είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους και η απόστασή τους μπορεί να τροποποιηθεί εάν οι μαγνήτες κάνουν μεγαλύτερη διαδρομή. Τέλος, οι μόνιμοι μαγνήτες που χρησιμοποιούνται είναι κατασκευασμένοι από σπάνιες γαίες, πιο συγκεκριμένα από νεοδύμιο, και είναι γνωστοί ως NdFeB ή Neo.



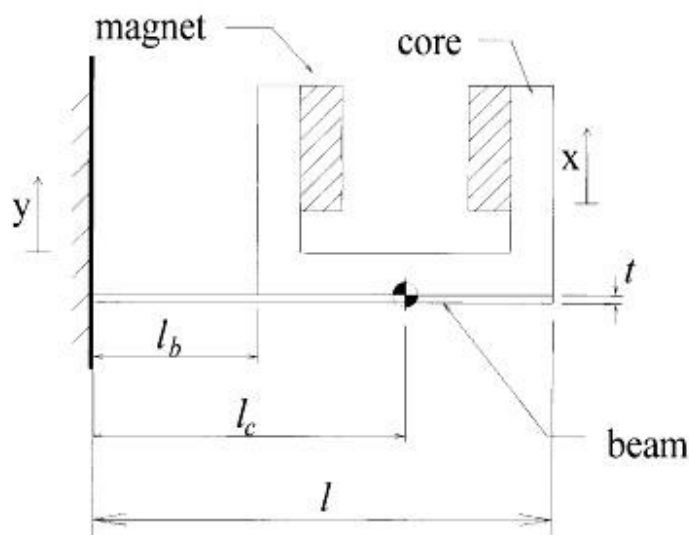
Σχήμα 48. Τομή της γεννήτριας ηλεκτρομαγνητικής μετατροπής με μαγνητική αιώρηση [173].

Λειτουργεί τόσο σε οριζόντια όσο και σε κατακόρυφη θέση. Όταν χρησιμοποιείται σε οριζόντια θέση, λόγω του βάρους του, οι κινητοί μαγνήτες υποστηρίζονται από το περίβλημα της γεννήτριας και κατά τη στιγμή της δόνησης έχουν μεγάλη τριβή με τα τοιχώματα του κυλίνδρου, με αποτέλεσμα η απόδοση του συστήματος να μειώνεται και να μην προτιμάται προς το παρόν αυτή η μέθοδος. Στην περίπτωση που η γεννήτρια χρησιμοποιείται σε κατακόρυφη θέση, οι κινητοί μαγνήτες αιωρούνται πάντα και οι τριβές με τα τοιχώματα του κυλίνδρου είναι πολύ μικρότερες από την περίπτωση που η γεννήτρια λειτουργεί σε οριζόντια θέση. Οι πειραματικές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν για χαμηλή συχνότητα δόνησης, οπότε η γεννήτρια είναι ικανή να παράγει ωφέλιμη ισχύ 1,44 mW σε συχνότητα 5 Hz για αντίσταση φορτίου 1 kΩ. Το πλεονέκτημα αυτής της συσκευής είναι ότι έχει χαμηλό κόστος παραγωγής, δεν απαιτείται συντήρηση και είναι σε θέση να συλλέγει ενέργεια σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων [173].

Οι ηλεκτρομαγνητικές γεννήτριες έχουν αποδειχθεί ότι παράγουν επίπεδα ισχύος που μπορούν να αγγίξουν μέχρι και τα 800 μW, από συχνότητες δόνησης αρκετών εκατοντάδων hertz. Για παράδειγμα, οι El-hami κ.α. [174] έδειξαν ότι 0,53 mW μπορούν να παραχθούν από δονήσεις πλάτους 25 μm και συχνότητας 322 Hz, χρησιμοποιώντας μια κινούμενη μάζα 510 mg. Ένα σχηματικό διάγραμμα της προτεινόμενης γεννήτριας ισχύος, το οποίο απεικονίζει τα

διαστασιολογημένα και επισημασμένα σχέδια της διάταξης δοκού/μαγνήτη, παρουσιάζεται στο Σχήμα 49. Το σύστημα αποτελείται από έναν πρόβολο που υποστηρίζεται από το περίβλημα. Η μάζα στη δοκό αποτελείται από δύο μαγνήτες (ένας πόλος) τοποθετημένους σε πυρήνα σχήματος C. Η διάταξη των μαγνητών με αυτόν τον τρόπο παρέχει ομοιόμορφο μαγνητικό πεδίο στο διάκενο αέρα. Ο κύριος σκοπός του πυρήνα είναι να παρέχει μια διαδρομή και να οδηγεί τη μαγνητική ροή μέσω αυτού με ελάχιστη διαρροή ροής. Το πηνίο τοποθετείται στο διάκενο αέρα μεταξύ των μαγνητών κάθετα προς την κατεύθυνση κίνησης της μάζας.

Η αρχή λειτουργίας της συσκευής έχει ως εξής: καθώς το περίβλημα δονείται, μια μηχανική δύναμη εισόδου τροφοδοτεί ένα μηχανικό σύστημα δεύτερης τάξης, η μάζα κινείται σε σχέση με το περίβλημα και η ενέργεια αποθηκεύεται στο σύστημα μάζας-δοκού. Αυτή η σχετική μετατόπιση, η οποία έχει ημιτονοειδές πλάτος, προκαλεί την αποκοπή της μαγνητικής ροής από το πηνίο. Αυτό με τη σειρά του προκαλεί μια ηλεκτροκινητική δύναμη στο πηνίο κινώντας το, λόγω του νόμου του Faraday. Το μέγεθος αυτής της τάσης είναι ανάλογο του ρυθμού μεταβολής της θέσης του πηνίου. Το εμπλεκόμενο ηλεκτρικό σύστημα είναι, όπως και προηγουμένως, ένα απλό κύκλωμα LR πρώτης τάξης με την αυτεπαγωγή του πηνίου σε σειρά με την αντίσταση του φορτίου και την αντίσταση του πηνίου.

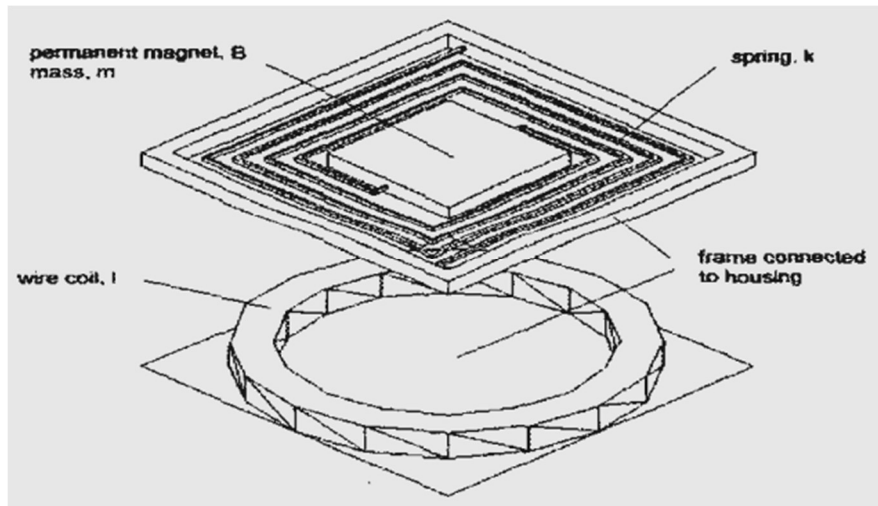


Σχήμα 49. Σχηματικό διάγραμμα της διάταξης δοκού-μαγνήτη [174].

Οι Glynn-Jones κ.ά. [175] παρουσίασαν μια ηλεκτρομαγνητική γεννήτρια η οποία ήταν ικανή να παράγει 157 μW , όταν τοποθετήθηκε στο χώρο του κινητήρα ενός αυτοκινήτου. Οι Williams κ.α. [176] περιέγραψαν ένα ηλεκτρομηχανικό μοντέλο για ηλεκτρομαγνητικές γεννήτριες και κατέληξαν στις βέλτιστες συνθήκες απόσβεσης, ωστόσο, λόγω της χαμηλής ηλεκτρομαγνητικής απόσβεσης, η βέλτιστη κατάσταση δεν μπορούσε να επαληθευτεί στην πράξη.

Το 2000 οι Li κ.ά. παρουσίασαν μια ηλεκτρομαγνητική γεννήτρια που με συνολικό όγκο $\sim 1\text{cm}^3$ η οποία χρησιμοποιεί ελατήρια που κατασκευάζονται με λέιζερ για τη μετατροπή των δονήσεων σε χρήσιμη ηλεκτρική ενέργεια. Ο στόχος ήταν να δημιουργηθεί μια γεννήτρια ηλεκτρικής ενέργειας πολύ μικρού μεγέθους, ικανή να παράγει αρκετή τάση για να τροφοδοτήσει ολοκληρωμένα κυκλώματα χαμηλής ισχύος ή/και μικροαισθητήρες για εφαρμογές όπου υπάρχουν μηχανικές δονήσεις [177].

Ένα εννοιολογικό σχέδιο της μικροηλεκτρομαγνητικής γεννήτριας παρουσιάζεται στο Σχήμα 50. Η συσκευή αποτελείται από έναν μόνιμο μαγνήτη μάζας m με ένταση μαγνητικού πεδίου B , ελατήρια με συνολική σταθερά ελατηρίου k και ένα πηνίο μήκους l . Τα άκρα κάθε ελατηρίου είναι προσαρτημένα στον μόνιμο μαγνήτη και σε ένα στερεό πλαίσιο, το οποίο συνδέεται με το άκαμπτο περίβλημα της συσκευής, σχηματίζοντας μια δομή συντονισμού μάζας-ελατηρίου. Το ηλεκτρικό πηνίο είναι στερεωμένο στο άκαμπτο περίβλημα της συσκευής. Όταν το άκαμπτο περίβλημα δονείται, ο μαγνήτης θα μετακινηθεί σχετικά με το περίβλημα και το πηνίο. Αυτή η σχετική μετακίνηση του μαγνήτη ως προς το πηνίο έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή της μαγνητικής ροής που διέρχεται από το πηνίο.



Σχήμα 50. Σχηματική απεικόνιση της οριζόντιας κίνησης της μικροηλεκτρομαγνητικής γεννήτριας λόγω της κάθετης διέγερσης που δέχεται σαν είσοδο [177].

4.1.3 Ηλεκτροστατική μετατροπή

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο που αναφέρεται στην συγκομιδή αιολικής ενέργειας, οι ηλεκτροστατικοί μετατροπείς είναι χωρητικές κατασκευές που αποτελούνται από δύο πλάκες που χωρίζονται από αέρα, κενό ή διηλεκτρικά υλικά. Μια σχετική κίνηση μεταξύ των δύο πλακών δημιουργεί ένα μεταβολή της χωρητικότητας και στη συνέχεια ηλεκτρικά φορτία. Οι διατάξεις αυτές διακρίνονται σε συσκευές που βασίζονται σε electret και σε συσκευές χωρίς electret.

Είτε πρόκειται για μετατροπή χωρίς electret είτε για μετατροπή με electret, οι ηλεκτροστατικοί μετατροπείς βασίζονται σε σε μια μεταβλητή χωρητική δομή.

Τα περισσότερα σχήματα των ηλεκτροστατικών μετατροπέων προέρχονται από επιταχυνσιόμετρα. Στην πραγματικότητα, είναι είναι δυνατόν να καταμετρηθούν τέσσερα κύρια σχήματα πυκνωτών για ηλεκτροστατικούς μετατροπείς (Σχήμα 51).

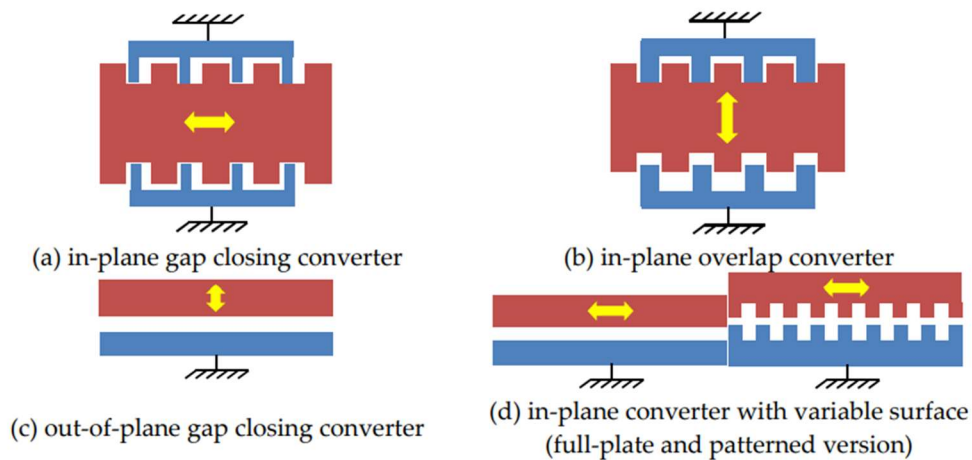
(a) μετατροπέας με κλείσιμο διάκενου εντός επιπέδου: δομή σε σχήμα χτένας με μεταβλητό διάκενο αέρα μεταξύ των δακτύλων και κίνηση στο επίπεδο.

(b) μετατροπέας εντός επιπέδου με επικάλυψη: δομή χτένας με μεταβλητή επικάλυψη των δακτύλων και κίνηση στο επίπεδο.

(c) μετατροπέας με κλείσιμο διάκενου εκτός επιπέδου: επίπεδη δομή με μεταβλητό διάκενο αέρα μεταξύ των πλακών και κάθετη κίνηση στο επίπεδο.

(d) μετατροπέας εντός επιπέδου με μεταβλητές επιφανειακές δομές: επίπεδη δομή με μεταβλητή επικάλυψη των πλακών και κίνηση στο επίπεδο.

Τα βασικά αυτά σχήματα μπορούν να προσαρμοστούν σε ηλεκτροστατικές συσκευές συγκομιδής ενέργειας δονήσεων χωρίς electret και με electret [47].



Σχήμα 51. Τα βασικά σχήματα των πυκνωτών στους ηλεκτροστατικούς μετατροπείς [47].

4.1.3.1 Ηλεκτροστατικές συσκευές συγκομιδής ενέργειας δονήσεων χωρίς electret (eVEH)

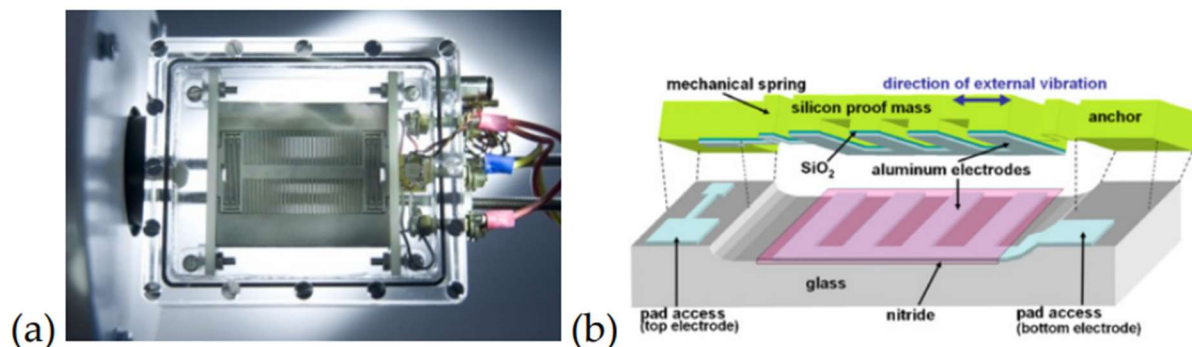
Ο πρώτος μικροηλεκτρομηχανικός (MEMS) ηλεκτροστατικός μηχανισμός συγκομιδής ενέργειας δονήσεων (VEH) σε σχήμα χτένας αναπτύχθηκε στο MIT από τους Meninger κ.α. το 2001 [178]. Αυτή η συσκευή χρησιμοποίησε έναν ηλεκτροστατικό μετατροπέα εντός επιπέδου με επικάλυψη. Μελετώντας τους κύκλους λειτουργίας αποδεικνύεται ότι ο κύκλος περιορισμένης τάσης επιτρέπει τη μεγιστοποίηση της ισχύος εξόδου (εάν το ηλεκτρονικό σύστημα διαχείρισης ισχύος είναι περιορισμένο σε τάση). Ωστόσο, για το πρωτότυπο, υιοθετήθηκε ένας κύκλος περιορισμένης φόρτισης για την απλούστευση του κυκλώματος διαχείρισης ισχύος, ακόμη και αν οδηγεί σε χαμηλότερη ισχύ εξόδου.

Οι ηλεκτροστατικές διατάξεις μπορούν να είναι ιδιαίτερα κατάλληλες για τη συγκομιδή ενέργειας από δονήσεις σε χαμηλές συχνότητες (<100Hz). Το 2002, οι Tashiro κ.ά. [179] ανέπτυξαν έναν βηματοδότη ικανό να συλλέγει ενέργεια από τους καρδιακούς παλμούς. Αναπτύχθηκε με σκοπό τη μόνιμη κίνηση ενός καρδιακού βηματοδότη χωρίς μπαταρία. Το μοντέλο της ηλεκτροστατικής γεννήτριας που αναπτύχθηκε ήταν χειροποίητο, αλλά ήταν πολύ μεγάλο για να εμφυτευτεί στη θωρακική κοιλότητα ενός πειραματόζωου. Για το λόγο αυτό, για να αποδειχθεί η εφικτότητά της, χρησιμοποιήθηκε μια κάπως περίπλοκη μέθοδος που μετρούσε την κίνηση του τοιχώματος της αριστερής κοιλίας της καρδιάς μέσω ενός επιταχυνσιόμετρου που τοποθετήθηκε στο ελεύθερο τοίχωμα, και αναπαρήγαγε την κίνηση σε πραγματικό χρόνο με έναν προσομοιωτή λειτουργίας δόνησης. Η γεννήτρια δονήθηκε στον προσομοιωτή και η παραγόμενη ισχύς της τροφοδοτούσε τον καρδιακό βηματοδότη, ο οποίος στη συνέχεια διέγειρε την καρδιά. Η μέση παραγόμενη ισχύς ήταν περίπου 36μW, η οποία ήταν αρκετή για να τροφοδοτήσει τον καρδιακό βηματοδότη. Η συνεχής ηλεκτρική παραγωγή και ο καρδιακός βηματοδότης λειτουργούσαν με επιτυχία για περισσότερες από 2 ώρες σε πείραμα με ζώα.

Το 2003, ο Roundy [180] απέδειξε ότι η καλύτερη δομή για ηλεκτροστατικές διατάξεις ήταν με κλείσιμο διάκενου εντός επιπέδου, δηλαδή η δομή χτένας με μεταβλητό διάκενο αέρα μεταξύ των δακτύλων και κίνηση στο επίπεδο, και μπορούσε να συλλέξει έως και 100μW/cm³

με δονήσεις περιβάλλοντος ($2,25\text{m/s}^2$ στα 120Hz). Στη συνέχεια ανέπτυξαν μια τέτοια δομή ικανή να συλλέγει $1,4\text{nJ}$ /κύκλο.

Το 2005, οι Despesse κ.α. ανέπτυξαν μια μακροσκοπική διάταξη (Σχήμα 52(a)) ικανή να λειτουργεί σε χαμηλές συχνότητες δόνησης και ικανή να συλλέξει 1mW για δόνηση $0,2\text{G}$ στα 50Hz [181]. Αυτό το πρωτότυπο eVEH έχει την υψηλότερη πυκνότητα ισχύος που έχει επιτευχθεί ποτέ. Ορισμένες άλλες συσκευές MEMS αναπτύχθηκαν στη συνέχεια από τους Basset κ.α. [182] (Σχήμα 52(b)) και Hoffmann κ.α. [183].



Σχήμα 52. Ηλεκτροστατικοί VEHs (a) Despesse κ.α. [181], (b) Basset κ.α. [182].

4.1.3.2 Ηλεκτροστατικές συσκευές συγκομιδής ενέργειας δονήσεων με electret (VEH)

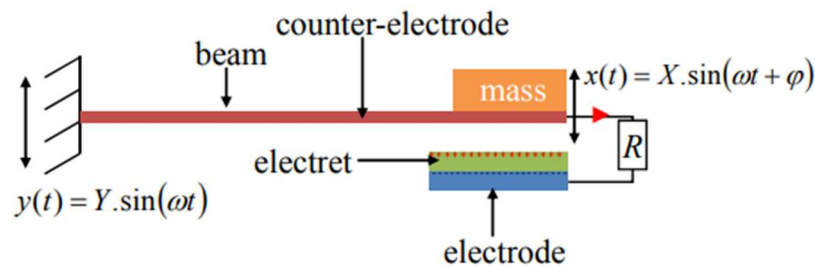
Αναπτύχθηκαν συσκευές με βάση τα electret για να καταστεί δυνατή η άμεση μετατροπή της δόνησης σε ηλεκτρική ενέργεια (χωρίς κύκλους φόρτισης και εκφόρτισης) και για την απλούστευση των κυκλωμάτων διαχείρισης ισχύος. Με την ανάπτυξη της συγκομιδής ενέργειας και την ανάγκη σχεδιασμού αυτόνομων αισθητήρων για τη βιομηχανία, οι ερευνητές και οι μηχανικοί αποφάσισαν να αξιοποιήσουν τα electrets στις ηλεκτροστατικές συσκευές συγκομιδής ενέργειας από δονήσεις, ως μόνιμη πηγή πόλωσης.

Προηγουμένως, αναφέρθηκαν τα κύρια σχήματα πυκνωτών που χρησιμοποιούνται στους ηλεκτροστατικούς μετατροπείς και στα μοντέλα τους. Ακόμη και αν και τα τέσσερα σχήματα πυκνωτών είναι κατάλληλα για την ανάπτυξη μιας συσκευής συγκομιδής ενέργειας δόνησης με electret, μόνο δύο αρχιτεκτονικές έχουν αξιοποιηθεί πραγματικά: το κλείσιμο διάκενου εκτός επιπέδου και η διαμόρφωση εντός επιπέδου με μεταβλητές επιφανειακές δομές.

Μερικές από τις συσκευές συγκομιδής ενέργειας δόνησης με βάση τα electret που αποτελούν την τελευταία λέξη της τεχνολογίας αναφέρονται στη συνέχεια. Αυτά τα πρωτότυπα μπορούν να ομαδοποιηθούν σε 2 κατηγορίες: συσκευές που χρησιμοποιούν electrets πλήρους φύλλου (διαστάσεις electret μεγαλύτερες από 5mm) και συσκευές που χρησιμοποιούν ειδικά διαμορφωμένα electrets (διαστάσεις electret μικρότερες από 5mm).

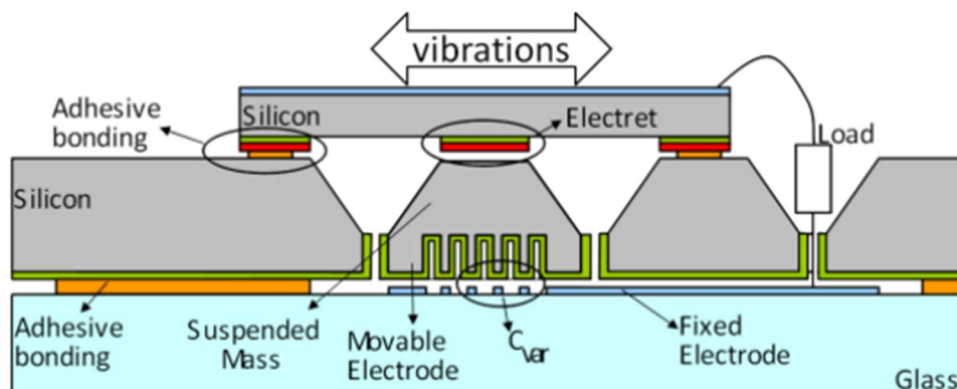
a. Συσκευές που χρησιμοποιούν electret πλήρους φύλλου

Οι διατάξεις με electret πλήρους φύλλου μπορούν να εκμεταλλευτούν μια επιφανειακή μεταβολή ή μια μεταβολή διάκενου. Το 2003, ο Mizuno [184] ανέπτυξε μια δομή κλεισίματος του χάσματος εκτός επιπέδου χρησιμοποιώντας μια δοκό που κινείται πάνω από ένα electret. Αυτή η δομή μελετήθηκε επίσης από τους Boisseau κ.α. [185] το 2011. Αυτή η απλή δομή είναι αρκετή για να επιδείξει γρήγορα την αρχή λειτουργίας της συγκομιδής ενέργειας δόνησης με electrets. Μεγάλη ποσότητα ενέργειας μπορεί να συγκομιστεί ακόμη και με χαμηλά επίπεδα κραδασμών μόλις η συχνότητα συντονισμού του συλλέκτη συντονιστεί με τη συχνότητα των περιβαλλοντικών κραδασμών.



Σχήμα 53. Σχηματική αναπαράσταση VEH με electret που βασίζεται στη δομή της δοκού [185].

Η πρώτη ολοκληρωμένη δομή που χρησιμοποιεί electrets πλήρους φύλλου αναπτύχθηκε από τους Sterken κ.α. από το IMEC [186] το 2007. Ένα διάγραμμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 54: ένα πλήρες φύλλο χρησιμοποιείται ως πηγή πόλωσης. Το στρώμα electret πολώνει το κινούμενο ηλεκτρόδιο της μεταβλητής χωρητικότητας (C_{var}). Το κύριο μειονέκτημα αυτού του πρωτοτύπου είναι η προσθήκη μιας παρασιτικής χωρητικότητας σε σειρά με την συσκευή συγκομιδής ενέργειας, περιορίζοντας έτσι τη μεταβολή της χωρητικότητας και την απόδοση του μετατροπέα. Σήμερα, οι περισσότερες συσκευές συγκομιδής ενέργειας δόνησης που βασίζονται σε electret χρησιμοποιούν ειδικά διαμορφωμένα electret και εκμεταλλεύονται τη μεταβολή της επιφάνειας.



Σχήμα 54. Το πρώτο electret-based VEH του IMEC [186].

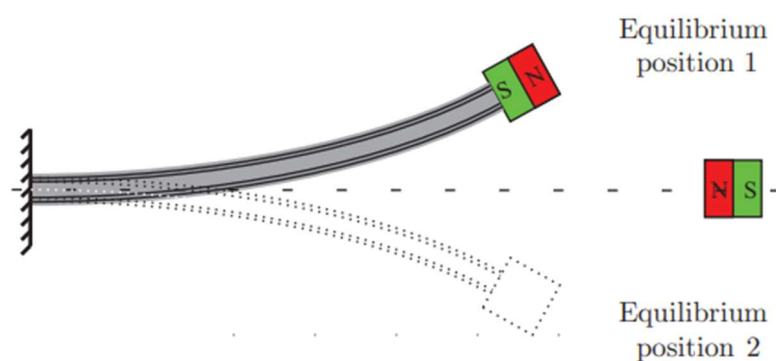
b. Συσκευές που χρησιμοποιούν ειδικά διαμορφωμένα electret

Η πρώτη δομή που χρησιμοποιεί διαμορφωμένα electrets αναπτύχθηκε από το πανεπιστήμιο του Τόκιο το 2006 [187]. Ακολούθησαν πολλές άλλες διατάξεις, καθεμία από τις οποίες, βελτίωσε την πρώτη αρχιτεκτονική [54, 188-191].

4.2 Μη Γραμμικές γεννήτριες

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ένα σημαντικό καθήκον στην ανάπτυξη των μη γραμμικών συσκευών συγκομιδής ενέργειας είναι η διεύρυνση του εύρους ζώνης συχνοτήτων της συγκομιδής ενέργειας. Για τον σκοπό αυτό, έχουν μελετηθεί τα πλεονεκτήματα των επιδόσεων των μη γραμμικών συστημάτων συγκομιδής ενέργειας έναντι των παραδοσιακών γραμμικών γεννητριών [193, 194].

Ένας καλά μελετημένος μη γραμμικός ταλαντωτής για τη συγκομιδή ενέργειας από δονήσεις παρουσιάζεται στο Σχήμα 55, όπου ένα πιεζοκεραμικό στρώμα είναι προσαρτημένο στη ρίζα του προβόλου και συνδέεται με ένα ωμικό φορτίο [195, 196]. Λόγω της διέγερσης της βάσης στη ρίζα του προβόλου, το πιεζοκεραμικό στρώμα κάμπτεται μαζί με τη δοκό και επομένως προκύπτει έξοδος τάσης στο φορτίο. Το μαγνητικό φαινόμενο εφαρμόζεται στη δομή για τη δημιουργία της δισταθερότητας με την τοποθέτηση δύο μόνιμων μαγνητών με αντίθετες πολικότητες. Ο ένας μαγνήτης βρίσκεται στην άκρη του προβόλου και ο άλλος είναι προσαρτημένος σε ένα σταθερό στήριγμα κοντά στο ελεύθερο άκρο της δοκού με απόσταση d κατά μήκος του άξονα της. Οι Firoozy κ.ά. [197] διαπίστωσαν ότι η γεωμετρική μη γραμμικότητα, τόσο για την απουσία όσο και για την παρουσία των εξωτερικών μαγνητών και η απόσταση διάκενου μεταξύ των δοκών μπορεί να επηρεάσει σημαντικά το εύρος συχνοτήτων.



Σχήμα 55. Μη γραμμικό σύστημα συγκομιδής ενέργειας με δισταθερή ιδιότητα [195, 196].

Μια δισταθερή ή πολυσταθερή γεννήτρια είναι μια γεννήτρια συλλογής ενέργειας με περισσότερες από μία θέσεις ισορροπίας. Ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να μοντελοποιηθεί με μη γραμμική δυσκαμψία. Οι Ramlan et al. (2009) περιγράφουν μια γενική μη γραμμική συσκευή συγκομιδής ενέργειας ως ένα σύστημα SDOF με την εξίσωση κίνησης

$$m\ddot{z} + d\dot{z} + f(z) = -m\ddot{y}$$

όπου $f(z)$ είναι μια συντηρητική μη γραμμική δύναμη ελατηρίου.

Οι πολυσταθερές γεννήτριες παρουσιάζουν ακόμη περισσότερες θέσεις ισορροπίας. Σε αυτές τις γεννήτριες, το σύστημα μεταπηδά από τη μία θέση ισορροπίας στην άλλη και σταθεροποιείται στη φυσική του συχνότητα. Λόγω της περιβάλλουσας διέγερσης, το σύστημα μεταπηδά εμπρός και πίσω μεταξύ των θέσεων ισορροπίας.

Οι δισταθερές/πολυσταθερές γεννήτριες παρουσιάζουν καλή απόδοση ειδικά για μικρές συχνότητες και έχουν μεγάλο εύρος συχνοτήτων λειτουργίας με μικρό μέγεθος της συσκευής. Το μειονέκτημα είναι ότι ο μετατροπέας χρειάζεται συνήθως μια βοηθητική δομή για το σχεδιασμό της μη γραμμικής δυσκαμψίας. Ένα άλλο πρόβλημα είναι η αναγκαιότητα ακριβούς σχεδιασμού όσον αφορά τις χαμηλές ανοχές για την επίτευξη μιας ευρυζωνικής συσκευής συγκομιδής ενέργειας.

Μια άλλη δυνατότητα για την επίτευξη ευρυζωνικής συγκομιδής ενέργειας είναι η ενεργή ρύθμιση συντονισμού. Σε πραγματικές εφαρμογές, η συχνότητα διέγερσης δεν είναι ούτε σταθερή ούτε γνωστή. Επομένως, είναι χρήσιμος ο συντονισμός της συχνότητας της συσκευής συγκομιδής ενέργειας. Η ιδέα τώρα είναι να αλλάξει αυτή η ιδιότητα του harvester κατά τη διάρκεια του χρόνου λειτουργίας του, ώστε να ταιριάζει με τη συχνότητα διέγερσης. Δύο

τεχνικές συντονισμού είναι κοινές: πρώτον, ο μηχανισμός συνεχούς συντονισμού. Εδώ, οι παράμετροι της γεννήτριας συντονίζονται συνεχώς ώστε να ταιριάζουν με τη συχνότητα διέγερσης. Επομένως, το σύστημα συντονισμού πρέπει να τροφοδοτείται συνεχώς και θα καταναλώνει υψηλό ποσοστό της συλλεγόμενης ενέργειας. Η δεύτερη προσέγγιση είναι η προσέγγιση περιοδικού συντονισμού. Εδώ, το σύστημα είτε ελέγχεται χρονικά κάθε μερικά λεπτά, είτε παρακολουθείται η συχνότητα διέγερσης και ο συντονισμός ενεργοποιείται σε ένα ορισμένο όριο. Ο διακεκομμένος συντονισμός είναι προτιμότερος για συστήματα με αργές ή σπάνιες μετατοπίσεις στις συχνότητες διέγερσης. Η τεχνική ενεργής ρύθμισης συντονισμού εξασφαλίζει ότι η γεννήτρια λειτουργεί πάντα στη συχνότητα συντονισμού με υψηλή ισχύ εξόδου. Το μειονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι η παροχή ισχύος για τον ενεργό συντονισμό. Ένα δεύτερο μειονέκτημα είναι η ανάγκη για μια μάλλον πολύπλοκη βοηθητική δομή για την προσαρμογή των παραμέτρων της μάζας και της δυσκαμψίας των γεννητριών [159].

Κεφάλαιο 5: Υβριδική Συγκομιδή Ενέργειας

Υπάρχουν πολλές πιθανές εναλλακτικές πηγές για τη συγκομιδή ενέργειας, αλλά η διαθεσιμότητά τους εξαρτάται από τις περιβαλλοντικές μεταβλητές και παραμέτρους ή άλλους χρονικά μεταβαλλόμενους και εξαιρετικά τυχαίους εξωτερικούς παράγοντες. Η υβριδική συγκομιδή περιλαμβάνει όχι μόνο την συλλογή ενέργειας από πολλαπλές πηγές, αλλά και τη μετατροπή της ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια με πολλαπλούς τύπους μηχανισμών μετατροπής. Μια πηγή τροφοδοσίας που βασίζεται σε πολλαπλές διαθέσιμες πηγές ενέργειας, θα βελτιώσει τελικά τη συνολική λειτουργικότητα, αξιοπιστία και αποδοτικότητα του συστήματος [198-200].

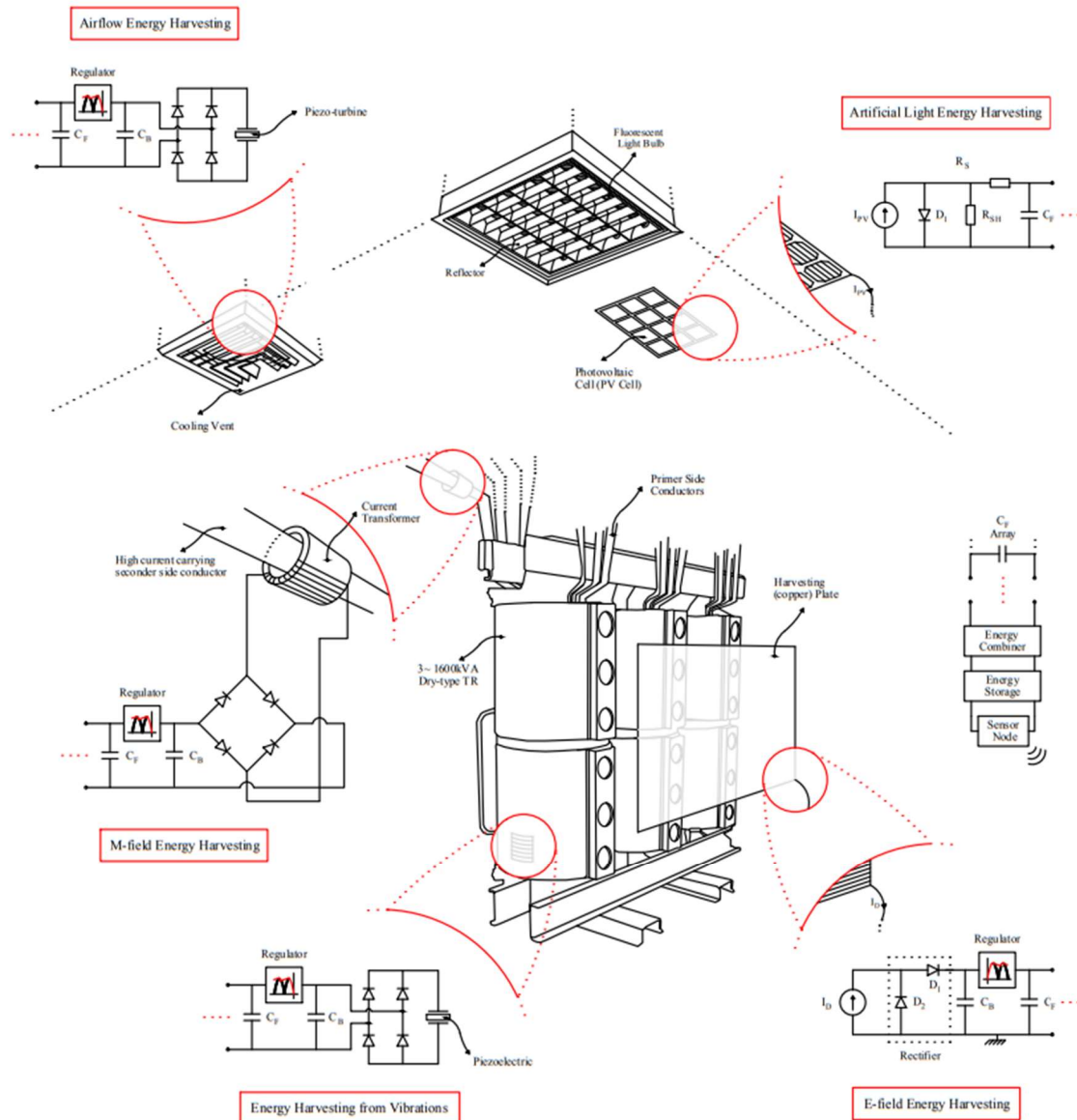
Η υβριδική συγκομιδή ενέργειας αντιμετωπίζει την τυχαιότητα των συγκομισίμων πόρων χρησιμοποιώντας διαφορετικές μεθόδους ΕΗ μαζί. Όλες οι μέθοδοι ΕΗ που συζητήθηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια χρησιμοποιούνται σε τέτοιες εφαρμογές όπως η ασύρματη δικτύωση και η απομακρυσμένη παρακολούθηση. Ωστόσο, η διαθεσιμότητα των φυσικών πηγών επηρεάζει δραματικά τη διάρκεια λειτουργίας αυτών των εφαρμογών. Καθώς όλες οι διαθέσιμες τεχνικές ΕΗ εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, τις μεταβλητές που βασίζονται στο δίκτυο ή από οποιεσδήποτε άλλες ανεξέλεγκτες παραμέτρους, οι υβριδικές λύσεις καθίστανται ακόμη πιο σημαντικές για τη διατήρηση των πληροφοριών ή/και των κρίσιμων στο χρόνο επικοινωνιών [198-200]. Προκειμένου να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή απόδοση, συνιστάται μια διαδικασία μεγιστοποίησης της απόδοσης η οποία χωρίζεται σε δύο στάδια για τα υβριδικά συστήματα ΕΗ [201].

Στο πρώτο στάδιο, οι συσκευές συγκομιδής ενέργειας χρειάζεται να συνεχίσουν τη λειτουργία τους συλλέγοντας τη μέγιστη δυνατή ενέργεια από τις διαθέσιμες πηγές. Για τον σκοπό αυτό, αναπτύσσονται τέτοιες προσεγγίσεις όπως η παρακολούθηση σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT) για την αντιστάθμιση των απωλειών και τη μεγιστοποίηση της απόδοσης συγκομιδής αντίστοιχα. Καθώς κάθε μέθοδος συγκομιδής έχει ένα βέλτιστο σημείο λειτουργίας που ποικίλλει ανάλογα με την ποσότητα της συγκομιζόμενης ενέργειας, οι διαδικασίες MPPT πρέπει να είναι ικανές για παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο και να ανταποκρίνονται σε μεγάλο βαθμό σε οποιαδήποτε αλλαγή στις συνθήκες των πηγών. Εκτός από αυτή την προσέγγιση που σχετίζεται με την άντληση ενέργειας, περαιτέρω προσπάθειες θα πρέπει να επικεντρωθούν στον τρόπο μετατροπής και μεταφοράς της συλλεγόμενης ενέργειας ώστε να είναι όσο το δυνατόν πιο αποτελεσματικός, εφόσον η απορριπτόμενη ενέργεια εξακολουθεί να είναι αρκετά χαμηλή και να μεταβάλλεται έντονα στο χρόνο.

Το δεύτερο στάδιο περιλαμβάνει τον αποτελεσματικό συνδυασμό και τη διαχείριση των αξιοποιημένων πηγών. Καθώς η ενέργεια αποκτάται ταυτόχρονα από διαφορετικούς συλλέκτες, ένας συνδυαστής ενέργειας απαιτείται για τη συσσώρευση των επιμέρους συνεισφορών κάθε συστήματος σε έναν αποθηκευτικό χώρο, με τον οποίο η συνολική ενέργεια παραδίδεται σε μια συσκευή, όπως έναν κόμβο αισθητήρα, αυτόνομα. Ο συνδυαστής χρειάζεται αρθρωτή σχεδίαση που να υποστηρίζει ποικιλία συσκευών συγκομιδής ενέργειας και των αντίστοιχων κυκλωμάτων τους για να συνδεθούν ως υποσυστήματα. Για μια τέτοια αρχιτεκτονική, χρειάζεται ένας προσαρμοστικός μηχανισμός σύνδεσης για την απομόνωση των harvester μεταξύ τους, έτσι ώστε αποτρέπονται οι ανεπιθύμητες παρεμβολές [201, 202].

Το Σχήμα 56 απεικονίζει το φυσικό μοντέλο που πρότειναν οι Akan κ.α., ενός αντιπροσωπευτικού σεναρίου IoT για έναν μετασηματιστή, πυλώνα της υποδομής του έξυπνου δικτύου, που τροφοδοτείται από υβριδικό ΕΗ. Ο υβριδικός κόμβος ΕΗ, εξοπλισμένος με εξειδικευμένους αισθητήρες όπως για φως, θερμοκρασία, υγρασία και παρουσία,

προβλέπεται να παρατηρεί τις παραμέτρους τόσο του χώρου όσο και του μετασχηματιστή, να επεξεργάζεται τα εξαγόμενα δεδομένα και να ειδοποιεί τους διαχειριστές μέσω του Διαδικτύου για διαδικασίες λήψης αποφάσεων. Με τη συνδεσιμότητα στο Διαδίκτυο, μπορούν να πραγματοποιηθούν ταυτόχρονα προληπτικές ενέργειες κατά οποιοδήποτε εισβολέα ή/και απροσδόκητες μεταβολές στις παραμέτρους του μέσου [203].

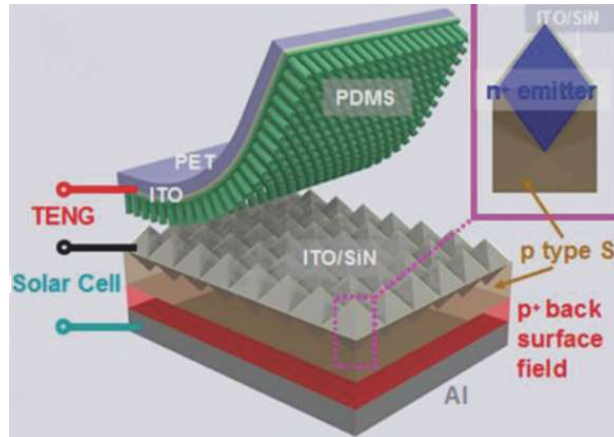


Σχήμα 56. Σχηματική αναπαράσταση της αρχιτεκτονικής του προτεινόμενου ΕΗ για το IoT [203].

5.1 Ενσωμάτωση μηχανικών και φωτοβολταϊκών συσκευών συγκομιδής ενέργειας

Από όταν οι Xu κ.α. ανέφεραν τις μηχανικές και φωτοβολταϊκές υβριδικές γεννήτριες το 2009 [204], έχουν αναπτυχθεί υβριδικές συσκευές συγκομιδής ενέργειας με γοργούς ρυθμούς, οι οποίες βασίζονται σε πιεζοηλεκτρικά, τριβηλεκτρικά και φωτοβολταϊκά φαινόμενα. Οι Yang κ.α. ανέφεραν μια TENG, με βάση ένα διαφανές εύκαμπτο πολυμερές σε συνδυασμό με μια διάταξη ηλιακών πάνελ πυριτίου (Si) σε σχήμα πυραμίδας για ταυτόχρονη συγκομιδή

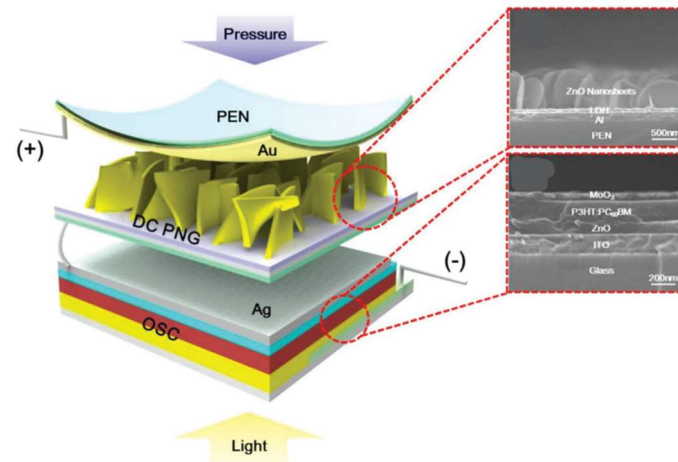
ενέργειας [205]. Χρησιμοποιώντας το διαφανές πολυμερές, τη διάταξη νανοσυρμάτων πολυδιμεθυσιλοξάνης (PDMS) ως τριβηλεκτρικό υλικό, και το διαμορφωμένο Si, μια TENG διπλής ηλεκτροδιακής λειτουργίας ήταν σε θέση να συγκεντρώνει μηχανική ενέργεια (βλ. Σχήμα 57).



Σχήμα 57. Σχηματική απεικόνιση της υβριδικής νανογεννήτριας από διαφανές εύκαμπτο πολυμερές σε συνδυασμό με μια διάταξη ηλιακών πάνελ πυριτίου (Si) σε σχήμα πυραμίδας [205].

Το ηλιακό πάνελ από πυρίτιο, χωρίς τη συσκευή TENG, παρήγαγε 0,6 V, 35 mA/cm² και είχε απόδοση μετατροπής ενέργειας 16%, η οποία ήταν πολύ μεγαλύτερη από προηγούμενες προσπάθειες ανάπτυξης τέτοιου υβριδικού μηχανισμού [206]. Ωστόσο, όταν η συσκευή TENG τοποθετήθηκε στο ηλιακό πάνελ, η απόδοση μετατροπής ενέργειας μειώθηκε από 16% σε 14% λόγω της παρεμπόδισης του ηλιακού φωτός από την TENG. Έτσι, μια μεμονωμένη διάταξη ηλιακών πάνελ παρήγαγε περίπου 0,6 V υπό τον φωτισμό του ηλιακού φωτός και η TENG παρήγαγε ≈2,5 V υπό περιοδική μηχανική ενέργεια εισόδου. Όταν εφαρμόστηκαν ταυτόχρονα τόσο ο φωτισμός από το ηλιακό φως όσο και η μηχανική κίνηση, η τάση εξόδου της υβριδικής συσκευής ήταν ≈2,7 V. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε ως μονάδα αποθήκευσης ενέργειας φόρτισης, μια μπαταρία ιόντων λιθίου (Li) για την αποθήκευση της συλλεγόμενης ενέργειας, η οποία είναι απαραίτητη για συσκευές μεγαλύτερης κατανάλωσης ενέργειας.

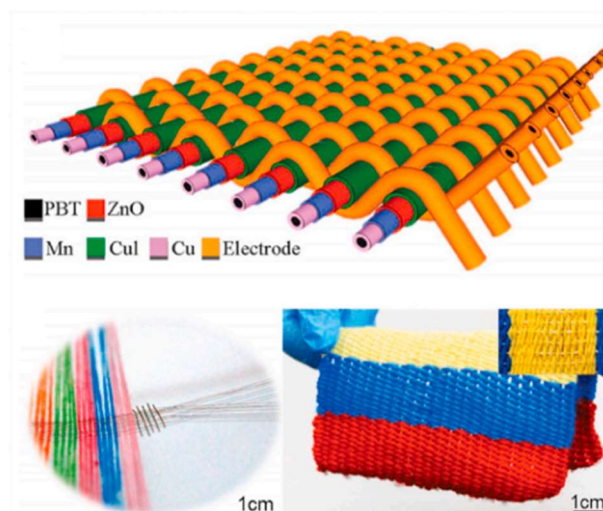
Μια άλλη συσκευή υβριδικής συγκομιδής ενέργειας που μπορεί να εκμεταλλεύεται την ηλιακή και μηχανική ενέργεια του περιβάλλοντος, αναφέρθηκε από τους Yoon κ.α. [207] Χρησιμοποιούσε σειριακά ενσωματωμένες υβριδικές συσκευές και αποτελούνταν από μια DC πιεζοηλεκτρική νανογεννήτρια με 2D νανοφύλλα από ZnO (DC-PNG), και από ένα ηλιακό πάνελ από πολυμερές υλικό (OSC). Έτσι, κάθε μέρος της πιεζοηλεκτρικής και φωτοβολταϊκής υβριδικής γεννήτριας θα μπορούσε να λειτουργεί μεμονωμένα ή να λειτουργεί ταυτόχρονα με τα υπόλοιπα. Στο Σχήμα 58 παρουσιάζεται μια σχηματική εικόνα της εύκαμπτης υβριδικής γεννήτριας, η οποία χρησιμοποιεί κάθετη σε εκείνη μηχανική ενέργεια και ενέργεια του ηλιακού φωτός.



Σχήμα 58. Σχηματική απεικόνιση της υβριδικής ναογεννήτριας από μια πιεζοηλεκτρική ναογεννήτρια με 2D ναοφύλλα από ZnO (DC-PNG), και από ένα ηλιακό πάνελ από πολυμερές υλικό (OSC) [207].

Το ηλιακό πάνελ παρήγαγε 0,6 Voc και 10,2 mA/cm² υπό ηλιακό φως, και η DC-PNG παρήγαγε 0,4 V και 22 μA/cm² υπό περιοδική κατακόρυφη πίεση με ή χωρίς φως, ενώ όταν εφαρμόστηκε μηχανική δύναμη σε συνδυασμό με το φως, η τάση εξόδου της υβριδικής διάταξης αυξήθηκε στα 0,7 V. Όταν δεν εφαρμόζονταν ούτε το φως ούτε και η μηχανική ενέργεια, η τάση εξόδου της υβριδικής γεννήτριας μειωνόταν γρήγορα στα 0 V, ενώ όταν εφαρμόζονταν μόνο μηχανική πίεση στη συσκευή, αυτή παρήγαγε τάση ακόμη και όταν το ηλιακό πάνελ δεν λειτουργούσε. Το ρεύμα εξόδου της υβριδικής διάταξης παρουσίασε συμπεριφορά παρόμοια με την απόδοση εξόδου τάσης [208].

Μια άλλη μηχανική και ηλιακή υβριδική συσκευή συγκομιδής ενέργειας αναφέρθηκε από τους Chen κ.α. η οποία αποτελούνταν από ένα ηλιακό πάνελ τύπου ίνας και μια TENG με τη μορφή υφάσματος για τη ταυτόχρονη συγκομιδή ενέργειας [209]. Για την κατασκευή των υφασμάτων συγκομιδής ενέργειας, χρησιμοποιήθηκαν ηλιακά κύτταρα βασισμένα σε πολυμερικές ίνες ως το βασικό μέρος στην κατασκευή των TENG, έτσι ώστε οι ίνες να συγκεντρώνουν ταυτόχρονα τόσο μηχανική ενέργεια όσο και ηλιακή ενέργεια.

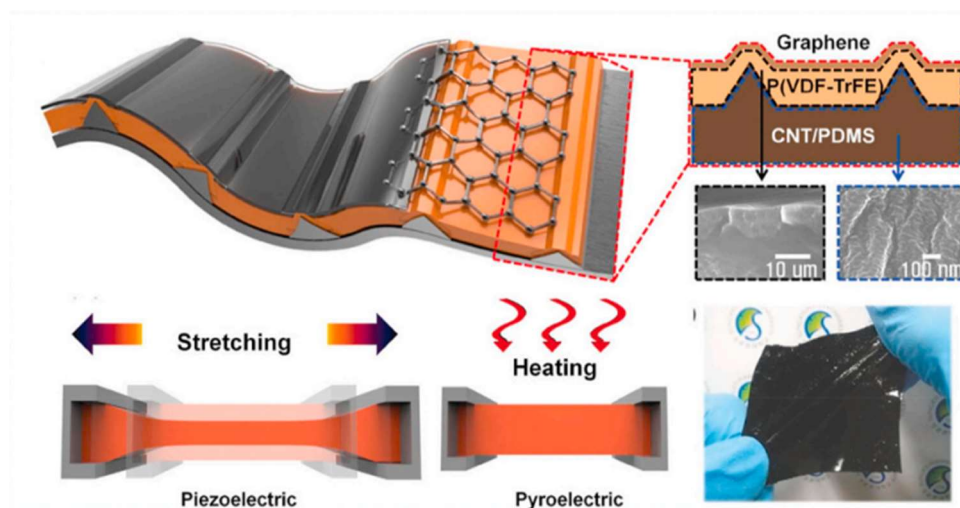


Σχήμα 59. Σχηματική απεικόνιση της υβριδικής ναογεννήτριας από ηλιακό πάνελ τύπου ίνας και μια TENG με τη μορφή υφάσματος [209].

Στο Σχήμα 59 φαίνεται η δομή του υφάσματος και ο τρόπος με τον οποίο πλέκονται τα ηλιακά κύτταρα σε μορφή ίνας με την TENG. Το πλεκτό υβριδικό ενεργειακό ύφασμα, ενισχυμένο με πρόσθετες συμβατικές ίνες, είχε πάχος 0,32 mm, καθιστώντας το εύκαμπτο, αισθητικά ωραίο και ικανό να φορεθεί. Κατά την έκθεση του υφάσματος στον ήλιο, το φωτοβολταϊκό τμήμα ήταν ικανό να συλλέγει ενέργεια μετατρέποντας την ηλιακή ακτινοβολία, ενώ το τμήμα TENG λειτουργούσε επίσης υπό μηχανική διέγερση. Μια πιθανή εφαρμογή θα ήταν να φορεθεί κατά την διάρκεια της ημέρας από κάποιο άτομο που κινείται ή ασκείται, έτσι ώστε να μπορέσει να συλλέξει ενέργεια και από το ηλιακό φως κι από την μηχανική κίνηση του ατόμου που θα το φοράει. Σε μια τέτοια εφαρμογή το υβριδικό ύφασμα θα μπορούσε να παράξει σταθερά μια μέση ισχύ εξόδου 0,5 mW κάτω από ένα ευρύ φάσμα αντιστάσεων φορτίου (από 10 kΩ έως 10 MΩ).

5.2 Ενσωμάτωση μηχανικών και θερμικών συσκευών συγκομιδής ενέργειας

Οι Lee κ.α. ανέφεραν έναν εξαιρετικά ελαστικό, πιεζοηλεκτρικό και πυροηλεκτρικό υβριδικό συλλέκτη ενέργειας που βασίζεται σε σιδηροηλεκτρικά και ελαστικά πολυμερή, καθώς και σε ηλεκτρόδια με βάση τον άνθρακα για ταυτόχρονη και ισχυρή συγκομιδή ενέργειας [210]. Το Σχήμα 60 παρουσιάζει μια σχηματική εικόνα του μηχανισμού συγκομιδής ενέργειας, ο οποίος αποτελείται από τρία στρώματα: το μικροδιαμορφωμένο πολυμερές P(VDF-TrFE), ως πιεζοηλεκτρικό και πυροηλεκτρικό στρώμα παραγωγής ενέργειας, το μικροδιαμορφωμένο σύνθετο πολυμερές PDMS-νανοσωλήνων άνθρακα (CNTs), ως υπόστρωμα και κάτω ηλεκτρόδιο, και το γραφένιο ως άνω ηλεκτρόδιο.



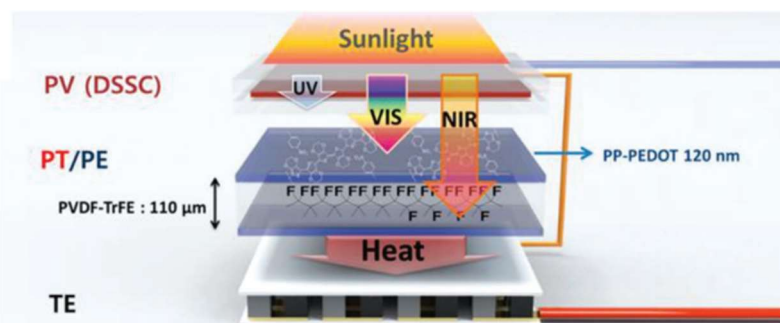
Σχήμα 60. Σχηματική απεικόνιση του υβριδικού συλλέκτη ενέργειας, με πιεζοηλεκτρική και πυροηλεκτρική μετατροπή [210].

Για να αξιολογηθεί η ενεργειακή απόδοση των μερών του συλλέκτη ενέργειας μεμονωμένα, μετρήθηκαν ξεχωριστά η πιεζοηλεκτρική και η πυροηλεκτρική απόδοση εξόδου υπό διαφορετικές πιέσεις και σε διαφορετικές θερμικές μεταβολές. Επειδή τόσο το πιεζοηλεκτρικό όσο και το πυροηλεκτρικό φαινόμενο βασίζονται στην εσωτερική εναλλαγή πόλωσης, ο ακριβής έλεγχος της μηχανικής και θερμικής ενέργειας θα μπορούσε να ενισχύσει την απόδοση εξόδου. Οι Lee κ.α. ανέλυσαν τις συμπεριφορές πόλωσης της υβριδικής νανογεννήτριας όσον αφορά την επιμήκυνση, τη συμπίεση, την απελευθέρωση, τη θέρμανση και την ψύξη.

Η πιεζοηλεκτρική τάση εξόδου ήταν $-0,7\text{ V}$ υπό δράσεις επιμήκυνσης και απελευθέρωσης και η πυροηλεκτρική τάση εξόδου ήταν $-0,4\text{ V}$ υπό θερμική θέρμανση και ψύξη. Όταν ο υβριδικός μηχανισμός απελευθερωνόταν και θερμαινόταν ταυτόχρονα, η τάση εξόδου ενισχύθηκε έως και $-1,1\text{ V}$, η οποία ήταν το άθροισμα της πιεζοηλεκτρικής και της πυροηλεκτρικής τάσης εξόδου. Από την άλλη πλευρά, η πιεζοηλεκτρική έξοδος ήταν πάνω από -1 V υπό συμπίεση και η πυροηλεκτρική τάση εξόδου ήταν $-0,4\text{ V}$ υπό θέρμανση. Ως εκ τούτου, η υβριδική νανογεννήτρια με μοτίβο μικρογραμμών θεωρήθηκε ότι είναι ένα μηχανικά ανθεκτικό, ελαστικό, βιώσιμο, αποτελεσματικό σύστημα συγκομιδής ενέργειας που συλλέγει θερμική και μηχανική ενέργεια [208].

5.3 Ενσωμάτωση θερμικών και φωτοβολταϊκών συσκευών συγκομιδής ενέργειας

Οι Park κ.α. ανέφεραν μια υβριδική νανογεννήτρια που χρησιμοποιεί ένα σιδηροηλεκτρικό φιλμ και το αγώγιμο πολυμερικό PEDOT, και βασίζεται σε πυροηλεκτρικά, θερμοηλεκτρικά και φωτοβολταϊκά φαινόμενα [211]. Για την υβριδοποίηση ενός φωτοβολταϊκού κύτταρου με άλλους συλλέκτες, οι συλλέκτες θερμικής ενέργειας αποτελούν τους πιο ισχυρούς υποψήφιους, επειδή η ακτινοβολία του ηλιακού φωτός συνοδεύεται από θερμική ενέργεια. Για αυτό το σύστημα συγκομιδής θερμικής ενέργειας, οι Park κ.α. χρησιμοποίησαν το φωτοθερμικό φαινόμενο των PEDOTs για τον πυροηλεκτρικό συλλέκτη ενέργειας και το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο. Το Σχήμα 61 είναι μια σχηματική απεικόνιση της υβριδικής νανογεννήτριας, η οποία συνδυάζει τη φωτοβολταϊκή, φωτοθερμική, πυροηλεκτρική και θερμοηλεκτρική συγκομιδή ενέργειας.



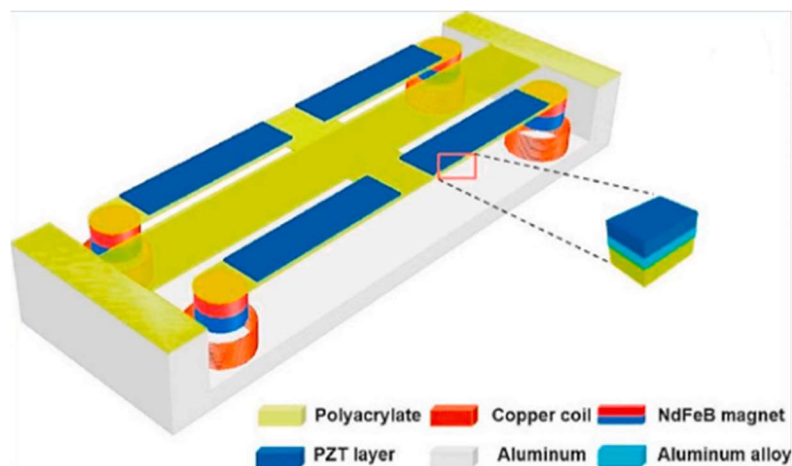
Σχήμα 61. Σχηματική απεικόνιση της υβριδικής νανογεννήτριας, η οποία συνδυάζει τη φωτοβολταϊκή, φωτοθερμική, πυροηλεκτρική και θερμοηλεκτρική συγκομιδή ενέργειας [211].

Ειδικά σχεδιασμένα φωτοθερμικά υλικά που απορροφούν και μετατρέπουν το ευρύ ηλιακό φάσμα ήταν απαραίτητα για τη συγκομιδή της θερμότητας από τον ήλιο. Τα λεπτά φιλμ αγώγιμων πολυμερών (CPs) ήταν κατάλληλοι υποψήφιοι για τις υβριδικές γεννήτριες λόγω του εύρους απορρόφησης φωτός που παρουσιάζουν [212, 213]. Στα PEDOTs ειδικά, τα οποία δρουν ως συλλέκτες πολλαπλών μορφών ενέργειας, βελτιστοποιήθηκε εύκολα η διαφάνεια και η ιδιότητα της φωτοθερμικής μετατροπής τους, ελέγχοντας τις καταστάσεις πρόσμιξης τους. Έτσι, η θερμότητα που προκαλείται από την ηλιακή ακτινοβολία μετατράπηκε σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω πυροηλεκτρικών και θερμοηλεκτρικών γεννητριών που λειτουργούσαν ταυτόχρονα. Επιπλέον, ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο συνδυάστηκε με τις θερμοηλεκτρικές και πυροηλεκτρικές γεννήτριες, για την ενίσχυση της απόδοσης εξόδου του συστήματος παραγωγής ενέργειας με βάση το ηλιακό φως. Η υβριδική γεννήτρια έδειξε ενισχυμένη και σταθερή απόδοση με τις δύο γεννήτριες να αλληλοσυμπληρώνονται. Αυτό αποδεικνύει ότι η

υβριδική γεννήτρια χρησιμοποιεί αποτελεσματικά το πλήρες φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας, με υψηλή απόδοση μετατροπής ενέργειας. Η σειρά συνδεδεμένων φωτοβολταϊκών-θερμοηλεκτρικών γεννητριών παρουσίασε 20% ενισχυμένη απόδοση ισχύος, και η ισχύς εξόδου της πυροηλεκτρικής ήταν επιπλέον συγκομιζόμενη ενέργεια [208].

5.4 Ενσωμάτωση μηχανικών και ηλεκτρομαγνητικών συσκευών συγκομιδής ενέργειας

Ο συνδυασμός των μηχανισμών πιεζοηλεκτρικής και ηλεκτρομαγνητικής μετατροπής αποτέλεσε την πρώτη προσπάθεια στην υβριδική συγκομιδή ενέργειας, με σκοπό την ενίσχυση της ικανότητας παραγωγής ενέργειας και της πυκνότητας ισχύος του συστήματος [214]. Οι Toyabur κ.α. ανέπτυξαν μια multimodal πιεζοηλεκτρική-ηλεκτρομαγνητική (PE-EM) υβριδική συσκευή συγκομιδής ενέργειας, για την αξιοποίηση ευρυζωνικών πηγών ενέργειας από δονήσεις [215]. Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τη μηχανική διέγερση εισόδου,



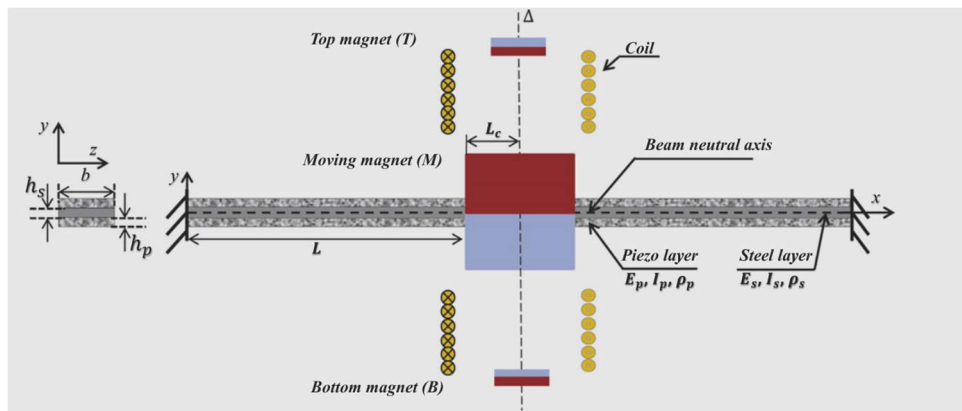
Σχήμα 62. Σχηματική απεικόνιση του PE-EM υβριδικού συστήματος συγκομιδής ενέργειας με διάταξη δοκού [215].

ο προτεινόμενος συλλέκτης ενέργειας εφαρμόζει έναν υβριδικό μηχανισμό μετατροπής σε ένα σύστημα MDOF (Multi-Degree-Of-Freedom). Το σύστημα MDOF αποτελείται από πολλαπλά SDOF συστήματα ελατηρίου-μάζας. Το σχηματικό διάγραμμα του υβριδικού συλλέκτη ενέργειας παρουσιάζεται στο Σχήμα 62, όπου το σύστημα MDOF αποτελείται από μια πρωταρχική δοκό στερεωμένη και στις δύο πλευρές του περιβλήματος του συλλέκτη και οι τέσσερις πλευρικές συμμετρικές δοκοί αποτελούν τα δευτερεύοντα συστήματα. Οι δευτερεύουσες δοκοί συνδέονται με την πρωτεύουσα δοκό. Τα πιεζοκεραμικά στοιχεία τοποθετούνται στις δευτερεύουσες δοκούς για να χρησιμοποιούν τη ροπή κάμψης τους. Στο ελεύθερο άκρο της κάθε δοκού προσαρτάται μια μάζα δοκιμής, ενώ το άλλο άκρο τους προσαρτάται στο μέσο της πρωτεύουσας δοκού. Καθώς οι δευτερεύουσες δοκοί είναι συμμετρικές, το συνολικό βάρος των τεσσάρων δοκιμαστικών μαζών συγκεντρώνεται στο μέσο της πρωτεύουσας δοκού. Η βάση της δευτερεύουσας δοκού λειτουργεί ως δυναμικός μεγεθυντήρας, ο οποίος έχει το πλεονέκτημα ότι μεγεθύνει την εκτροπή των δευτερευουσών δοκών σε σχέση με την πρωτεύουσα δοκό [216]. Η μεγάλη εκτροπή συμβάλλει στην πρόκληση υψηλότερου μηχανικού στρες στα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία προκειμένου να ενισχυθεί η έξοδος της συσκευής συγκομιδής ενέργειας, παίρνοντας σαν είσοδο μικρές εξωτερικές δονήσεις.

Ο πιεζοηλεκτρικός μετατροπέας παρήγαγε ισχύ $250,23 \mu\text{W}$ ενώ ο ηλεκτρομαγνητικός παρήγαγε ισχύ $244,17 \mu\text{W}$, επομένως μπορούμε να πούμε ότι παρήγαγε αρκετή ισχύ για την τροφοδότηση μικροηλεκτρονικών συσκευών ή αισθητήρων χαμηλής ισχύος, σε ορισμένες ειδικές δονήσεις χαμηλής συχνότητας.

Προκειμένου να ενισχυθεί το λειτουργικό εύρος ζώνης, οι Mahmoudi κ.ά. εισήγαγαν μη γραμμική δυναμική σε έναν υβριδικό harvester εφαρμόζοντας απωστικές μαγνητικές δυνάμεις σε έναν μαγνήτη στο κέντρο μιας σταθερής δοκού [217]. Η ιδέα του προτεινόμενου σχεδιασμού είναι εμπνευσμένη από τους συλλέκτες ενέργειας που βασίζονται στη μαγνητική αιώρηση [218, 219], όπου οι μαγνήτες εισάγονται σε ένα σωλήνα που χρησιμοποιείται για να εξασφαλίσει τη σταθερότητα του κινούμενου μαγνήτη κατά τη διάρκεια της ταλάντωσής του. Για να ξεπεραστούν τα ζητήματα αυτού του σχεδιασμού, όπως η μεγάλη μηχανική απόσβεση που προκαλείται από την άμεση επαφή του κινούμενου μαγνήτη με την εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα, προτάθηκε η σχεδίαση που απεικονίζεται στο Σχήμα 63.

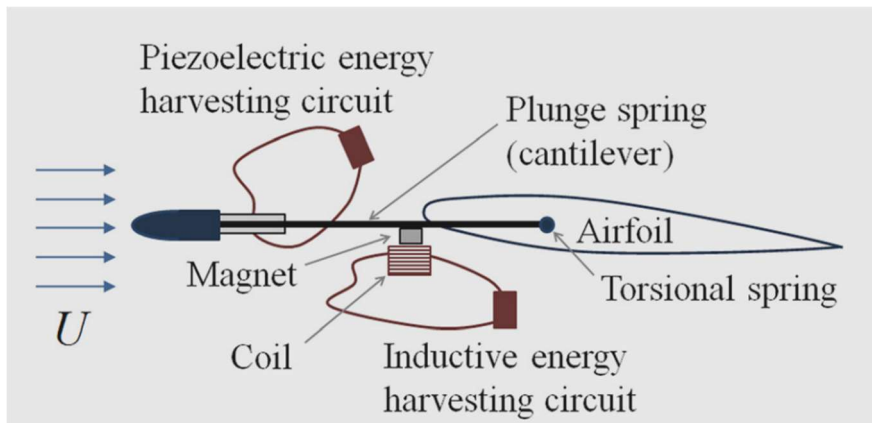
Περιλαμβάνει δύο πιεζοηλεκτρικά στρώματα τα οποία συνδέονται παράλληλα με ένα στρώμα χάλυβα ενδιάμεσα, για την ενίσχυση της ακαμψίας της δοκού. Ένας κεντρικός μαγνήτης, (M), συνδέεται στο μέσο της δοκού και τοποθετείται μεταξύ των δύο σταθερών μαγνητών, (T) και (B), αντίστοιχα στην κορυφή και στο κάτω μέρος. Οι μαγνητικοί πόλοι είναι προσανατολισμένοι με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργούνται απωστικές δυνάμεις από τους δύο σταθερούς μαγνήτες στον κινούμενο. Ένα χάλκινο πηνίο τυλιγμένο με σύρμα τυλίγεται οριζόντια γύρω από την απόσταση που χωρίζει τον μαγνήτη (M) από τους άλλους δύο μαγνήτες, (T) και (B).



Σχήμα 63. Σχέδιο του προτεινόμενου υβριδικού συλλέκτη ενέργειας δονήσεων, από τους Mahmoudi κ.ά. [217].

Ο κινούμενος μαγνήτης ταλαντώνεται κατακόρυφα γύρω από τη θέση ισορροπίας του στην πρώτη φάση κάμψης των δύο δοκών, παρέχοντας ελαστική καθοδήγηση για να εξασφαλίσει τη σταθερότητά του. Τα κύρια πλεονεκτήματα αυτού του σχεδιασμού είναι η σημαντική μείωση της απόσβεσης για την ενίσχυση της συλλεγόμενης ισχύος και η εκμετάλλευση των μη γραμμικών δονήσεων της δοκού για τη σημαντική διεύρυνση του εύρους ζώνης του harvester. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι, στην περίπτωση της ηλεκτρομαγνητικής μετατροπής, η πυκνότητα ισχύος και το εύρος ζώνης συχνοτήτων μπορούν να αυξηθούν έως και 60% και 29% αντίστοιχα σε σύγκριση με εκείνες της περίπτωση ενός VEH με καθαρή μαγνητική αιώρηση, κι αυτό χάρη στη μη γραμμική ελαστική καθοδήγηση. Επιπλέον, η υβριδική συγκομιδή ενέργειας επιτρέπει την ενίσχυση της πυκνότητας ισχύος έως και 84%, όπου η συνολική ισχύς εξόδου συλλέγεται κατά 61% πιεζοηλεκτρικά και 39% μαγνητικά.

Εκτός από την ενέργεια δόνησης, έχουν γίνει προσπάθειες για τη μετατροπή και άλλων πηγών κινητικής ενέργειας με τη χρήση υβριδικών συσκευών συγκομιδής ενέργειας, όπως ο αέρας ή ο ήχος. Οι Dias κ.α. υιοθέτησαν έναν υβριδικό συλλέκτη ενέργειας με βάση έναν πρόβολο, για τη σύλληψη της ενέργειας της ροής του αέρα, χρησιμοποιώντας μια αεροτομή στο ελεύθερο άκρο της δοκού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 64 [220].



Σχήμα 64. Σχηματική απεικόνιση υβριδικού συλλέκτη ενέργειας με βάση έναν πρόβολο για τη σύλληψη της ενέργειας της ροής του αέρα [220].

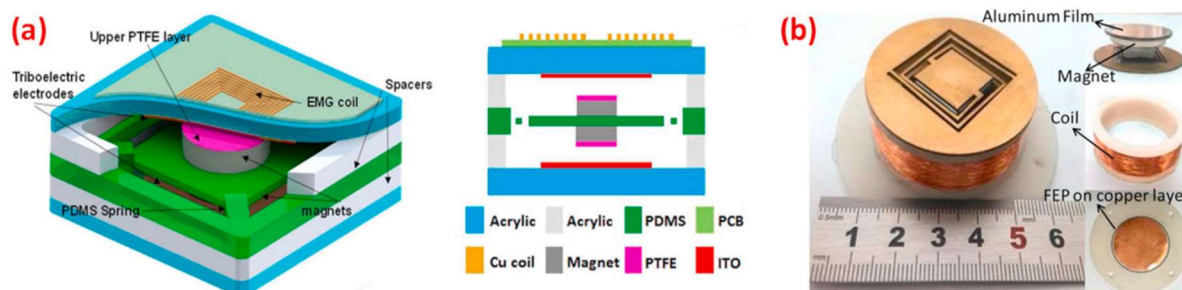
Οι υβριδικοί συλλέκτες ενέργειας πιεζοηλεκτρισμού και ηλεκτρομαγνητισμού έχουν διερευνηθεί εκτενώς όσον αφορά τον δομικό σχεδιασμό, αλλά η έλλειψη συνέργειας για την ενίσχυση των πλεονεκτημάτων τόσο της πιεζοηλεκτρικής όσο και της ηλεκτρομαγνητικής μετατροπής σε έναν υβριδικό σχεδιασμό είναι ένα πρόβλημα. Τα κυκλώματα διαχείρισης ισχύος είναι το δεύτερο βασικό ζήτημα λόγω της σημαντικής διαφοράς μεταξύ των PEH και των EMEH. Αποτελεσματικότερες λύσεις για τη διαχείριση των δύο πηγών ισχύος έχουν μεγάλη σημασία για να καταστούν οι πιεζοηλεκτρικές-ηλεκτρομαγνητικές υβριδικές συσκευές συγκομιδής ενέργειας πιο αποδοτικές και συμφέρουσες [214].

Συνήθως, η σχετική κίνηση του μαγνήτη και του πηνίου σε ένα EMEH μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορες δομές, οι οποίες διακρίνονται σε τρεις κύριες κατηγορίες, τις δομές συντονισμού, τις μη συντονισμού και τις περιστροφικές δομές. Κατά τη διάρκεια της κίνησης των δομών, μια TENG μπορεί να ενσωματωθεί και να ενεργοποιηθεί για την συγκομιδή ενέργειας από την τριβή επαφής-διαχωρισμού και την τριβή ολίσθησης μεταξύ δύο τριβοηλεκτρικών υλικών.

Συνδυάζοντας αυτά τα δύο ενεργειακά σχήματα συγκομιδής ενέργειας, μπορεί δυνητικά να παραχθεί περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια από μία μηχανική κίνηση. Σημειώνεται επίσης ότι η διαφορά των χαρακτηριστικών εξόδου τους επηρεάζει τα χαρακτηριστικά της ηλεκτρικής φόρτισης. Στις περιπτώσεις όπου οι harvesters χρησιμοποιούνται για τη φόρτιση ενός πυκνωτή ως αποθήκη ενέργειας, η τάση εξόδου του harvester καθορίζει το μέγιστο επίπεδο φόρτισης ενός πυκνωτή, ενώ η ταχύτητα φόρτισης καθορίζεται από το παραγόμενο ρεύμα. Λόγω της υψηλής τάσης και του χαμηλού ρεύματος εξόδου του TENG, ένας πυκνωτής μπορεί να φορτιστεί απευθείας σε δεκάδες ή εκατοντάδες βολτ, αν και συνήθως με κόστος μεγάλο χρόνο φόρτισης. Από την άλλη πλευρά, ο EMEH παράγει χαμηλή τάση (συνήθως μερικά βολτ) αλλά υψηλά επίπεδα ρεύματος, και έτσι ένας πυκνωτής μπορεί να φορτιστεί γρήγορα, αλλά φτάνει σε κορεσμό μέσα σε ένα σύντομο χρόνο φόρτισης [221, 222]. Ως εκ τούτου, ορισμένοι ερευνητές προσπάθησαν να συνδυάσουν τον TENG και τον EMEH σε μια υβριδική διάταξη,

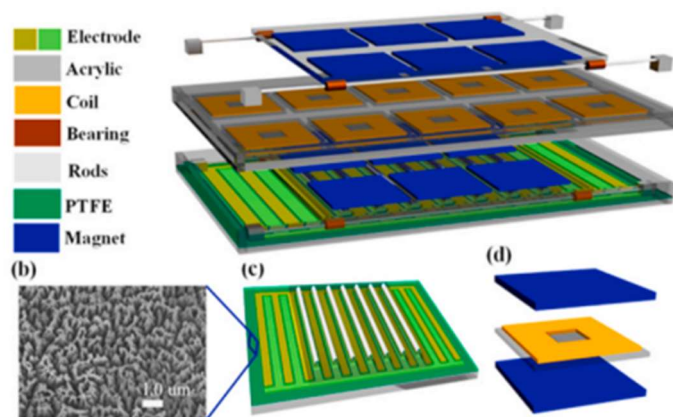
για να κερδίσουν τα πλεονεκτήματα και των δύο. Ωστόσο, σε ορισμένα σενάρια εφαρμογών, ο EMEH και ο TENG δεν μπορούν εύκολα να μοιραστούν κυκλώματα επεξεργασίας ισχύος. Τα άλλα σημαντικά ζητήματα που πρέπει να εξεταστούν είναι η αποτελεσματικότητα της ανόρθωσης των εξόδων των συσκευών συγκομιδής ενέργειας που τυπικά είναι εναλλασσόμενου ρεύματος, σε συνεχές ρεύμα που απαιτείται για τη φόρτιση των πυκνωτών ή των μπαταριών, η αντιστοίχιση της σύνθετης αντίστασης μεταξύ του φορτίου του κυκλώματος και του EMEH ή του TENG, καθώς και οι επιδράσεις των παρασιτικών χωρητικότητας. Όλα αυτά καθιστούν τον συνδυασμό των εξόδων πιο πολύπλοκο.

Για τις δομές που βασίζονται στον συντονισμό, υπάρχουν διάφοροι μηχανισμοί υλοποίησης για τη δημιουργία του υβριδικού συστήματος EM-TE, όπως δομές με ελατήριο-μάζα, μεμβράνη με εκτροπή και μαγνητικές-πλωτές δομές. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 65(a) και (b), έχουν αναφερθεί δύο παρόμοιες ευρυζωνικές υβριδικές διατάξεις συγκομιδής EM-TE με τη χρήση μαγνητικής μάζας δοκιμής που συνδέεται με ένα πολυμερές ελατήριο και ένα χάλκινο ελατήριο [214], ξεχωριστά. Τα ηλεκτρομαγνητικά πηνία βρίσκονται στην κορυφή ή γύρω από τον κινητό μαγνήτη. Τα δύο τριβηλεκτρικά αντίθετα υλικά (PTFE/Indium-Tin-Oxide - ITO) και Fluorinated ethylene propylene (FEP/Cu) ενσωματώνονται με τον κινητό μαγνήτη και με το πάνω ή το κάτω υπόστρωμα βάσης, αντίστοιχα. Καθώς η δομή του ελατηρίου μαζί με τη μαγνητική μάζα ταλαντώνεται, εμφανίζεται η αλλαγή της μαγνητικής ροής στο πηνίο. Εν τω μεταξύ, η τριβηλεκτρική μεμβράνη που καλύπτεται στην επιφάνεια του μαγνήτη θα συγκρούεται περιοδικά με το κάτω τριβηλεκτρικό στρώμα. Επομένως, σε μία πλήρη ταλάντωση, η συσκευή παράγει ηλεκτρομαγνητικές και τριβηλεκτρικές εξόδους, ταυτόχρονα, η οποία αποκτά όχι μόνο υψηλότερη απόδοση μετατροπής ενέργειας αλλά και διεύρυνση του εύρους ζώνης λειτουργίας.



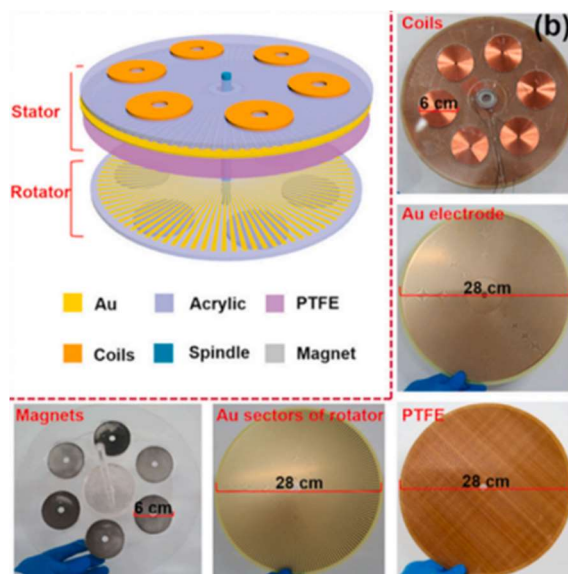
Σχήμα 65. Σχηματική απεικόνιση δύο ευρυζωνικών υβριδικών διατάξεων συγκομιδής EM-TE ενέργειας με τη χρήση μαγνητικής μάζας δοκιμής που συνδέεται με ένα πολυμερές ελατήριο στο (a) και ένα χάλκινο ελατήριο στο (b).

Οι προαναφερθείσες δομές συντονισμού τείνουν να είναι αναποτελεσματικές για τη συλλογή χαμηλών συχνοτήτων και τυχαίων δονήσεων, όπως η ανθρώπινη κίνηση ή τα κύματα του νερού. Ως εκ τούτου, οι κύλινδροι κύλισης ή οι σφαίρες κύλισης έχουν υιοθετηθεί ευρέως για τον σχηματισμό των μη συντονιστικών δομών [214]. Στο Σχήμα 66, οι Wang κ.ά. [223] πρότειναν μια διάταξη συγκομιδής ενέργειας από κύματα νερού που ενσωματώνει στοιχεία TENG και EMEH. Το στοιχείο TENG αποτελείται από ένα σύνολο ράβδων κύλισης Al και μεμβράνη PTFE επικαλυμμένη με χάλκινα ενδοδιαμετρικά ηλεκτρόδια. Στο εξάρτημα EMEH, η κίνηση των χάλκινων πηνίων καθοδηγείται από τέσσερις χαλύβδινες ράβδους μεταξύ του άνω και του κάτω μέρους συστοιχίας μαγνητών. Η υβριδική γεννήτρια μπορεί να μεγιστοποιήσει την απόδοση της μετατροπής της ενέργειας σε αρκετά χαμηλές συχνότητες, μικρότερες από 1,8 Hz και να διευρύνει την συχνότητα λειτουργίας, ταυτόχρονα [214].



Σχήμα 66. Μη συντονιστικών δομών για τη συγκομιδή ενέργειας από κύματα νερού που ενσωματώνει στοιχεία TENG και EMEH [223].

Είναι αξιοσημείωτο επίσης, το ότι υπάρχει ένας σημαντικός αριθμός υβριδικών συλλεκτών ενέργειας που λειτουργούν σε περιστροφική λειτουργία. Οι Chen κ.α. [222] και Zhang κ.α. [224] έχουν παρουσιάσει υβριδικές γεννήτριες EM-TE με βάση περιστρεφόμενους δίσκους για την απορρόφηση περιστροφικής ενέργειας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 67. Η περιστρεφόμενη δομή αποτελείται από έναν ρότορα και έναν στάτορα, έτσι ώστε να προκαλείται σχετική κίνηση μεταξύ των θετικών και αρνητικών τριβοηλεκτρικών υλικών, όπως καθώς και των μαγνητών και των πηνίων.



Σχήμα 67. Σχηματική αναπαράσταση και φωτογραφίες ενός υβριδικού συλλέκτη EM-TE ενέργειας που λειτουργεί με περιστροφή [222, 224].

Κεφάλαιο 6: Ασύρματη Μεταφορά Ενέργειας

Οι περιορισμοί στην παροχή ενέργειας των ασύρματων συσκευών οδήγησε σε μια νέα αρκετά υποσχόμενη τεχνολογία: την ασύρματη μεταφορά ενέργειας [225, 226]. Αυτός ο ασυνήθιστος τρόπος τροφοδοσίας ηλεκτρικών συσκευών μπορεί να επιλύσει το πρόβλημα της χρήσης μπαταριών σε φορητές ασύρματες συσκευές, όπως επίσης και να καταστήσει την χρήση καλωδίων ξεπερασμένη τεχνολογία. Εφαρμογές όπως οι φορητές ηλεκτρονικές συσκευές, οι

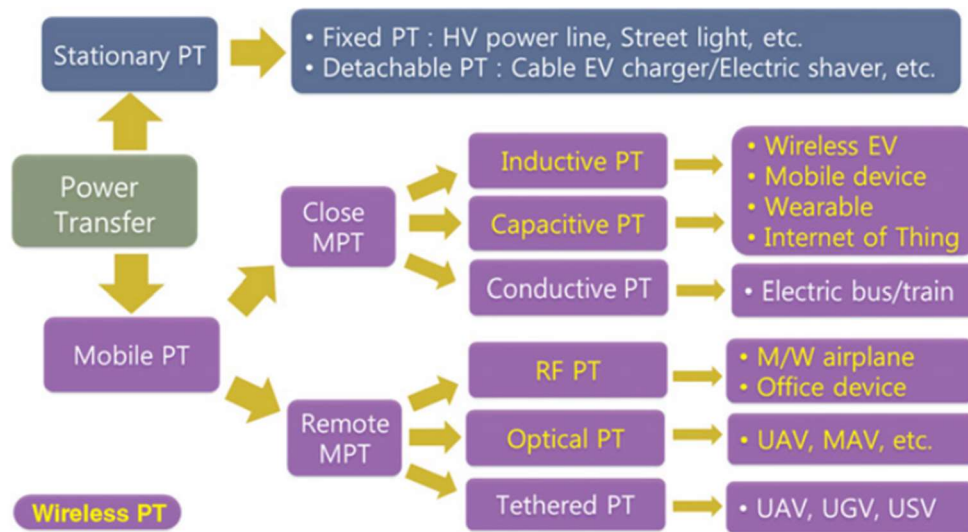
εμφυτευμένες ιατρικές συσκευές, τα ολοκληρωμένα κυκλώματα, οι δορυφόροι, τα ηλεκτρικά οχήματα (EV) και τα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAV) γίνονται ασύρματες λόγω της ευκολίας, της ασφάλειας και της ανταγωνιστικής απόδοσης ισχύος και τιμής τους. Εν τέλει, οι περισσότερες συσκευές, συμπεριλαμβανομένων των wearable συσκευών, των ubiquitous αισθητήρων και των έξυπνων αυτοκινήτων, θα συγχωνευθούν στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) και η WPT θα παίξει σημαντικό ρόλο στην υλοποίηση του IoT, το οποίο περιλαμβάνει compact συσκευές επικοινωνίας, αισθητήρες και πηγές ενέργειας [225].

Ο λόγος για τον οποίο οι τεχνολογίες WPT είναι τόσο καίριας σημασίας αφορά δύο θεμελιώδη προβλήματα των συσκευών με μπαταρία που περιορίζουν τη διάδοσή τους - τη μικρή διάρκεια ζωής της μπαταρίας και το υψηλό αρχικό κόστος. Λαμβάνοντας ως παράδειγμα τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα [227], παρόλο που πολλοί κατασκευαστές αυτοκινήτων ισχυρίζονται ότι τα προϊόντα τους μπορούν να διανύσουν πάνω από 120 χιλιόμετρα ανά φόρτιση, όταν λαμβάνεται υπόψη το άγχος για την αυτονομία, οι περισσότεροι οδηγοί ηλεκτρικών αυτοκινήτων τολμούν να διανύσουν μόνο περίπου 100 χιλιόμετρα. Από την άλλη πλευρά, με τη σημαντική αύξηση του αριθμού των μπαταριών που είναι εγκατεστημένες στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, η αυτονομία μπορεί να επεκταθεί σε πάνω από 400 km, αλλά το αντίστοιχο αρχικό κόστος γίνεται απλησίαστο για το ευρύ κοινό. Αντί να περιμένουμε την ανακάλυψη της τεχνολογίας αποθήκευσης ενέργειας, ένας νέος τρόπος ενεργειακής τροφοδοσίας, δηλαδή η τεχνολογία WPT, προσελκύει όλο και μεγαλύτερη προσοχή για να παρακάμψει τα τρέχοντα τεχνικά bottlenecks των μπαταριών. Χρησιμοποιώντας την τεχνολογία WPT, οι συσκευές που λειτουργούν με μπαταρίες μπορούν να αξιοποιήσουν ενέργεια από το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο στον αέρα, και στη συνέχεια να φορτίζουν τις μπαταρίες τους ασύρματα ακόμη και σε κατάσταση κίνησης. Αυτή η νέα τεχνολογία φόρτισης μπορεί να λύσει ριζικά τα προβλήματά, όπως η μικρή διάρκεια ζωής των μπαταριών ή το υψηλό αρχικό κόστος λόγω της εγκατάστασης μεγάλου αριθμού μπαταριών [228].

Γενικά, η μεταφορά ισχύος (PT) μπορεί να ταξινομηθεί σε σταθερή και κινητή ανάλογα με την κίνηση των φορτίων λήψης ισχύος (Rx), όπως φαίνεται στο Σχήμα 68. Η σταθερή PT (Stationery PT) έχει χρησιμοποιηθεί παραδοσιακά στην κύρια μορφή χρήσης της ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία περιλαμβάνει την fixed SPT μιας σταθερά αμετάβλητης τοπολογίας ενός συστήματος ισχύος, και την detachable STP μιας μεταβλητής διάταξης ενός συστήματος ισχύος. Η πλειονότητα της χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας εξακολουθεί να είναι fixed SPT, όπως οι γραμμές υψηλής τάσης, τα φώτα του δρόμου και οι οικιακές συσκευές. Σήμερα, η detachable STP χρησιμοποιείται ευρύτερα για τη φόρτιση κινητών αντικειμένων, όπως τα ηλεκτρικά οχήματα με καλώδιο (EV) και οι ηλεκτρικές ξυριστικές μηχανές, όπου χρησιμοποιείται ένα ηλεκτρικό καλώδιο με γυμνή επαφή. Αυτοί οι τύποι plugged-in φορτιστών εκθέτουν τον χρήστη σε πιθανό κίνδυνο ηλεκτροπληξίας και πυρκαγιάς [225].

Για να αντιμετωπιστεί η έντονη ζήτηση για την κινητικότητα των φορτίων Rx, έχουν μελετηθεί διάφορες τεχνολογίες κινητής PT (Mobile PT), οι οποίες μπορούν να ταξινομηθούν σε close MPT και remote MPT ανάλογα με την απόσταση μεταξύ της πηγής εκπομπής ισχύος (Tx) και των φορτίων Rx. Για την close MPT, η εμβέλεια της WPT είναι συνήθως από μερικά cm έως μερικά m. Είναι αξιοσημείωτο ότι η επαγωγική, χωρητική και αγωγική PT αντιστοιχούν σε στοιχεία κυκλώματος L, C και R, αντίστοιχα. Κάθε close PT χρησιμοποιεί επαγωγική σύζευξη, χωρητική σύζευξη και αγωγική σύζευξη μεταξύ των Tx και Rx. Μεταξύ των close MPT, η επαγωγική PT (IPT) έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως λόγω της υψηλής ικανότητας μεταφοράς ισχύος σε σχετικά χαμηλή συχνότητα, ενώ η χωρητική PT (CPT) δεν χρησιμοποιείται τόσο

συχνά λόγω της υψηλής συχνότητας λειτουργίας και της μικρής απόστασης μεταφοράς ισχύος [229,230].



Σχήμα 68. Μια γενική ταξινόμηση της μεταφοράς ενέργειας σε ότι αφορά της φορητότητα, την απόσταση και το μέσο τροφοδοσίας [225].

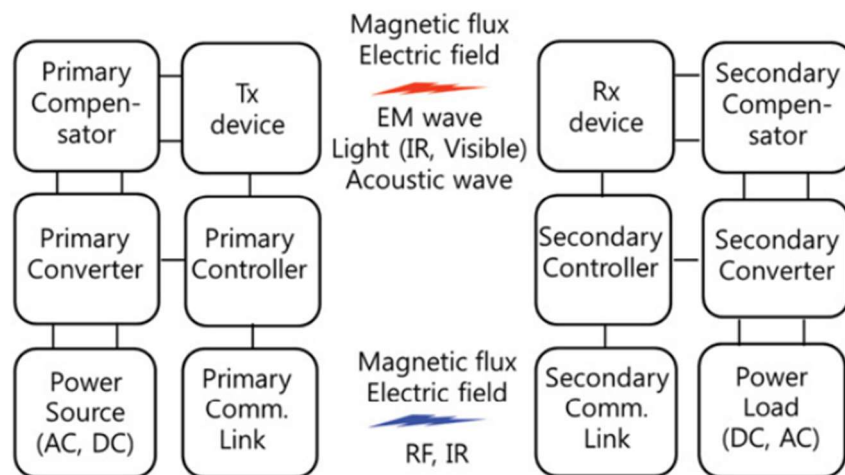
Μεταξύ των στρατηγικών remote MPT, η PT ραδιοσυχνοτήτων (RF) και η οπτική PT έχουν ερευνηθεί για την επέκταση του ορίου εμβέλειας άλλων τεχνικών PT [231,232]. Η RF PT χρησιμοποιεί ηλεκτρομαγνητικά κύματα των συχνοτήτων που κυμαίνονται από MHz έως GHz.

6.1 Ιστορική αναδρομή

Το όραμα της ασύρματης μεταφοράς ενέργειας χρονολογείται από τις αρχές του 20ού αιώνα (νωρίτερα από τα ηλεκτρικά δίκτυα). Μετά την αποστολή του πρώτου ηλεκτρικού σήματος μέσω του Ατλαντικού, ο Νίκολα Τεσλα, ένας πρωτοπόρος ηλεκτρολόγος μηχανικός, πειραματίστηκε με την ασύρματη διανομή ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα, κατασκευάζοντας τον πρώτο σταθμό ηλεκτροπαραγωγής στον κόσμο στο Long Island της Νέας Υόρκης [233]. Σχεδίαζε να χρησιμοποιήσει τον σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για τη μετάδοση όχι μόνο σημάτων αλλά και ασύρματης ηλεκτρικής ενέργειας. Δυστυχώς, λόγω των μεγάλων ηλεκτρικών πεδίων του, τα οποία μείωναν σημαντικά την απόδοση της μεταφοράς ενέργειας, η εφεύρεση του Tesla δεν ήταν επιτυχής και δεν τέθηκε ποτέ σε πρακτική χρήση. Στα τέλη του 20ού αιώνα, η ανάγκη για WPT επανεμφανίστηκε όταν έγιναν δημοφιλείς οι κινητές ηλεκτρονικές συσκευές (π.χ. φορητοί υπολογιστές, κινητά τηλέφωνα, PDA, ταμπλέτες). Περαιτέρω, η ταχεία ανάπτυξη των ηλεκτρικών και υβριδικών οχημάτων στην αυτοκινητοβιομηχανία συνέβαλε επίσης στην ανάγκη για WPT. Λόγω αυτών των απαιτήσεων, υπήρξαν πολλές ενεργές προσπάθειες για την ανάπτυξη αποτελεσματικών τεχνολογιών για WPT. Πρόσφατα, ιδρύθηκε η κοινοπραξία Wireless Power Consortium για τον καθορισμό των διεθνών προτύπων για διαλειτουργική ασύρματη φόρτιση. Εταιρείες μέλη στην κοινοπραξία περιλαμβάνουν κατασκευαστές ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, κατασκευαστές κινητών τηλεφώνων και φορείς εκμετάλλευσης κινητών τηλεπικοινωνιών. Αυτές οι προσπάθειες τυποποίησης θα βοηθήσουν επιταχύνουν το ρυθμό εισαγωγής τεχνολογιών WPT στην αγορά.

6.2 Γενική τοπολογία ενός συστήματος WPT

Ας παρουσιάσουμε τώρα το WPT γενικά. Ένα WPT αποτελείται από τμήματα εκπομπής (transmitting - Tx) και λήψης (receiving - Rx), όπως φαίνεται στο Σχήμα 69. Το Tx τμήμα αποτελείται από μια πηγή ισχύος AC ή DC, έναν πρωτεύοντα μετατροπέα, έναν πρωτεύοντα αντισταθμιστή, μια πρωτεύουσα ζεύξη επικοινωνίας, έναν πρωτεύοντα ελεγκτή και μια συσκευή Tx, όπως ένα πηνίο, μια μεταλλική πλάκα, μια κεραία ή μια πηγή φωτός. Το τμήμα Rx αποτελείται από μια συσκευή Rx (πηνίο, μεταλλική πλάκα, ορθή κεραία ή ηλιακό πάνελ), έναν δευτερεύοντα αντισταθμιστή, έναν δευτερεύοντα ελεγκτή, έναν δευτερεύοντα μετατροπέα, μια δευτερεύουσα ζεύξη επικοινωνίας και ένα φορτίο συνεχούς ρεύματος ή εναλλασσόμενου [225].

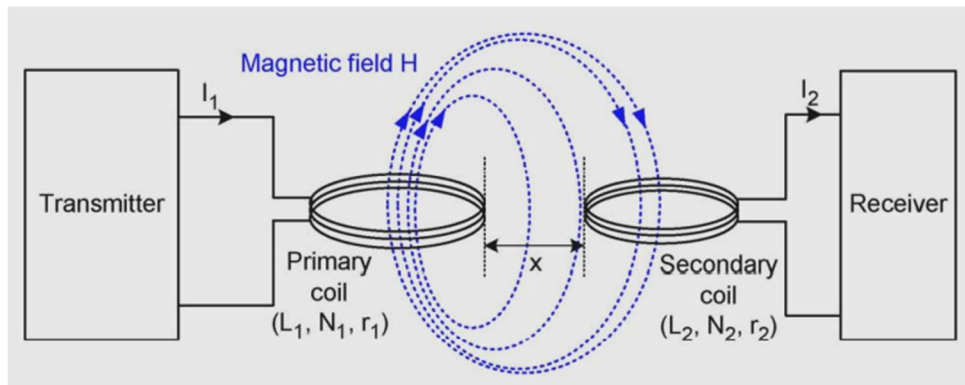


Σχήμα 69. Γενική τοπολογία ενός συστήματος WPT [225].

6.3 Close Mobile Power Transfer

6.3.1 Επαγωγική Μεταφορά Ενέργειας (IPT)

Λόγω της απλότητας, της ευκολίας και της ασφάλειάς της, η επαγωγική σύζευξη υπήρξε μια σημαντική και δημοφιλής τεχνολογία για τη μεταφορά ισχύος χωρίς καλώδια. Έχει εμπορευματοποιηθεί με επιτυχία σε διάφορα προϊόντα, όπως ηλεκτρική οδοντόβουρτσα, pad φόρτισης για κινητό τηλέφωνο ή φορητό υπολογιστή και ιατρικά εμφυτεύματα [235]. Η επαγωγική σύζευξη μεταξύ δύο πηνίων είναι γνωστή στην μορφή μετασχηματιστών. Συνήθως χρησιμοποιούνται μέσα σε συσκευές παροχής ενέργειας για τον μετασχηματισμό της εναλλασσόμενης τάσης 220V του δικτύου παροχής ενέργειας σε χαμηλότερες τάσεις κατάλληλες για για ηλεκτρονικά είδη ευρείας κατανάλωσης ή επίσης ως μετατροπείς σύνθετης αντίστασης σε κυκλώματα ήχου και ραδιοσυχνοτήτων (RF). Η WPT μέσω επαγωγικής σύζευξης είναι πολύ παρόμοια με την επαγωγική σύζευξη μέσω μετασχηματιστών, αλλά χρησιμοποιεί ασθενή συζευγμένα πηνία, τα οποία σχηματίζουν έναν μετασχηματιστή με κενό αέρα μεταξύ ενός πρωτεύοντος κυκλώματος (πομπού) και ενός δευτερεύοντος κυκλώματος (δέκτη) κυκλώματος.



Σχήμα 70. Τυπική διάταξη ενός συστήματος επαγωγικής σύζευξης [235].

Ένα βασικό σύστημα επαγωγικής σύζευξης απεικονίζεται στο Σχήμα 70. Η ενέργεια μεταδίδεται με εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο από το πρωτεύον πηνίο στο δευτερεύον πηνίο. Λόγω της ασθενούς σύζευξης μέσω του αέρα μεταξύ του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος πηνίου η απόδοση της μετάδοσης εξαρτάται έντονα, μεταξύ άλλων, από το σχήμα, την απόσταση μεταξύ των πηνίων και των υλικών που περιβάλλουν και τα δύο [235]. Η εξίσωση (1) ορίζει την ένταση του μαγνητικού πεδίου σε ορισμένη απόσταση x

$$H(x) = \frac{INr^2}{2\sqrt{(r^2 + x^2)^3}} \quad (1)$$

Είναι σαφές ότι το μαγνητικό πεδίο του πομπού μπορεί να μεγιστοποιηθεί αυξάνοντας το πρωτεύον ρεύμα I_1 , τον αριθμό στροφών N_1 του πηνίου εκπομπής ή την ακτίνα r_1 . Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένα όρια: πρέπει να ληφθούν υπόψη οι αντιστάσεις συνεχούς ρεύματος (DC) και εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) τόσο των κεραιών εκπομπής όσο και των κεραιών λήψης, καθώς και η εξάρτηση από τη συχνότητα. Κατά συνέπεια, το μέγεθος του πηνίου και ο αριθμός των στροφών δεν μπορούν να αυξηθούν αυθαίρετα και πρέπει να βελτιστοποιηθούν σύμφωνα με την επιλεγμένη συχνότητα μετάδοσης. Μπορούμε επίσης να χρησιμοποιήσουμε την (1) για να υπολογίσουμε τη βέλτιστη ακτίνα για κάθε εύρος μετάδοσης, η οποία καταλήγει σε $r = \sqrt{2x}$ [235].

Για να αυξηθεί η απόδοση ενός επαγωγικού WPT, χρησιμοποιούνται συνήθως μετασχηματιστές με σύζευξη συντονισμού. Ένας σειριακός πυκνωτής συντονισμού για το πρωτεύον κύκλωμα και ένας παράλληλος πυκνωτής για το δευτερεύον κύκλωμα προστίθεται συνήθως στα πηνία, ρυθμίζοντας έτσι τα κυκλώματα ώστε να συντονίζονται στην επιθυμητή συχνότητα. Άλλες τοπολογίες εκτός από τη σειριακή παράλληλη είναι επίσης δυνατές, και η επιλογή εξαρτάται, για παράδειγμα, από το είδος της χρησιμοποιούμενης πηγής ισχύος καθώς και από την τη συχνότητα λειτουργίας, την αυτεπαγωγή του πηνίου και το φορτίο στο του δέκτη [237]. Το 2010, η Wireless Power Consortium ενέκρινε το πρώτο παγκοσμίως πρότυπο ασύρματης φόρτισης (Qi) για επαγωγική φόρτιση χαμηλής ισχύος ($< 5W$). Σήμερα, η επαγωγική σύζευξη θεωρείται ώριμη τεχνολογία και θεωρείται εφιαλτήριο για νέες εξελίξεις στην WPT, όπως η μαγνητική σύζευξη συντονισμού [238].

6.3.1.1 Εφαρμογές επαγωγικού συστήματος WPT

Τα επαγωγικά συστήματα WPT γίνονται όλο και πιο δημοφιλή σε εφαρμογές όπου α) η ευελιξία της σχετικής κίνησης μεταξύ πηγής και φορτίου αποτελεί πλεονέκτημα, β) υπάρχει περιορισμένος χώρος για στοιχεία αποθήκευσης ενέργειας στο φορτίο, γ) υπάρχει

περιορισμένη πρόσβαση στην πλευρά του φορτίου και δ) η ασύρματη σύνδεση βελτιώνει την ασφάλεια. Ορισμένες εφαρμογές που χρησιμοποιούν επαγωγικό WPT περιλαμβάνουν τα εξής:

a. Καταναλωτικά ηλεκτρονικά είδη.

Καθώς η πυκνότητα ισχύος και η χρήση καταναλωτικών ηλεκτρονικών συσκευών, όπως φορητών υπολογιστών, smartphone και wearables, αυξάνονται συνεχώς, η ασύρματη σύνδεση ισχύος στη συσκευή αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα. Η WPT στα καταναλωτικά ηλεκτρονικά είναι μια βιομηχανία με γρήγορους ρυθμούς και με αρκετά πρότυπα που έχουν ήδη τεθεί σε εφαρμογή, και σαν αποτέλεσμα, ο χρόνος από την ανάπτυξη του προϊόντος έως την αγορά είναι λιγότερος σε σύγκριση με τους τομείς της υγείας και της αυτοκινητοβιομηχανίας.

b. Υγειονομική περίθαλψη.

Καθώς οι ιατρικές θεραπείες εξαρτώνται όλο και περισσότερο από τις εμφυτεύσιμες ηλεκτρονικές συσκευές, η WPT γίνεται μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία στις συσκευές υγειονομικής περίθαλψης [239]. Μια τέτοια εφαρμογή είναι η συσκευή υποβοήθησης αριστερής κοιλίας (ΣΥΑΚ) βοηθά την καρδιά να αντλήσει αίμα. Η χρήση της επαγωγικής WPT εξαλείφει την σύνδεση καλωδίων μεταξύ της πηγής ισχύος (εκτός του σώματος) και της ΣΥΑΚ (εντός του σώματος) [140], γεγονός που είναι επωφελές για τον ασθενή από πολλές απόψεις. Ένα άλλο πλεονέκτημα της WPT στα ηλεκτρονικά εμφυτεύματα είναι η πιθανή μείωση ή εξάλειψη του στοιχείου αποθήκευσης ενέργειας στο εμφύτευμα. Αυτό οδηγεί σε μικρότερο μέγεθος και μικρότερο βάρος των ηλεκτρονικών που προσφέρει άνεση στον ασθενή. Επίσης, μειώνει το κόστος και τους κινδύνους που συνδέονται με την αντικατάσταση της συσκευής αποθήκευσης ενέργειας στο εσωτερικό του σώματος. Μια τέτοια εφαρμογή είναι στα εμφυτεύματα αμφιβληστροειδούς, με μια συσκευή WPT να τροφοδοτεί ένα τσιπ που εμφυτεύεται στο μάτι το οποίο αποκαθιστά (εν μέρει) την όραση σε ασθενείς με συγκεκριμένες παθήσεις του αμφιβληστροειδούς.

c. Ηλεκτρικά οχήματα.

Η ασύρματη επαγωγική φόρτιση για τα ηλεκτρικά οχήματα (EVs) είναι μια εξέλιξη που οδηγεί στην επικράτηση των EVs ως τα κύρια συστήματα μεταφοράς. Τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν να λαμβάνουν ασύρματη ενέργεια εν κινήσει (δυναμική φόρτιση) [141] ή σε σταθμευμένη θέση (σταθερή φόρτιση). Η δυναμική φόρτιση μπορεί να εφαρμοστεί με την χρήση πολυάριθμων πηνίων πομπού κατά μήκος της διαδρομής, συνδεδεμένα όλα παράλληλα μεταξύ τους και τροφοδοτούμενα από μια ενιαία πηγή [142]. Αυτό εφαρμόζεται επί του παρόντος περισσότερο για EVs με προκαθορισμένη διαδρομή οδήγησης, όπως τα ηλεκτρικά λεωφορεία. Στη σταθερή φόρτιση, το EV λαμβάνει την ασύρματη ενέργεια έχοντας τα πηνία του δέκτη και του πομπού ευθυγραμμισμένα και ακίνητα. Δεδομένου ότι μια μικρή εσφαλμένη ευθυγράμμιση των πηνίων θα μειώνει την απόδοση, το ειδικά ή πολλαπλά πηνία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να γίνει η WPT πιο ανεκτική στην κακή ευθυγράμμιση [143].



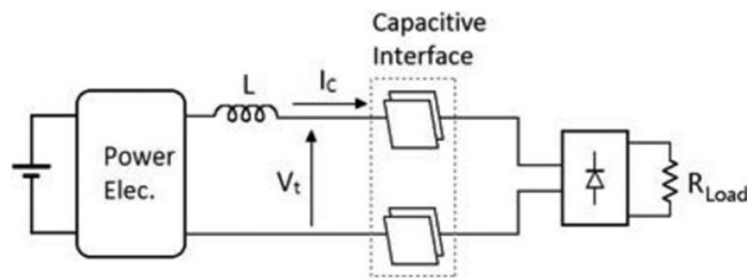
Σχήμα 71. Ηλεκτρικά οχήματα (αριστερά) και φορτιστής κινητού (δεξιά) που λειτουργούν με επαγωγική ασύρματη μεταφορά ενέργειας.

6.3.2 Χωρητική μεταφορά ενέργειας (CPT)

Η μεταφορά ισχύος μέσω χωρητικότητας (CPT) είναι μια δυναμικά βολική μέθοδος παροχής ισχύος χωρίς καλώδια, με τη χρήση χωρητικών πλακών. Ο μικρός όγκος του συστήματος και το προφίλ του, ιδίως στην πλευρά της λήψης ισχύος, σημαίνει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές μικρού μεγέθους, όπως βιοϊατρικά εμφυτεύματα, ιατρικές εφαρμογές ή στη φόρτιση συστημάτων περιορισμένου χώρου, όπως ρομπότ ή κινητές συσκευές κ.λπ. Η ευελιξία του σχεδιασμού και το χαμηλό κόστος το καθιστούν ιδανικό για την παροχή ενέργειας σε αναδιαμορφώσιμα και κινούμενα συστήματα, όπως τα catoms, ρομποτικούς βραχίονες και μάνδαλους και συστήματα που κινούνται εντός τροχιάς. Η επαγωγική μεταφορά ισχύος (IPT) που μελετήσαμε προηγουμένως, φαίνεται να προσφέρει υψηλότερη μεταφορά ισχύος από την CPT. Ωστόσο, τα συστήματα IPT απαιτούν έναν μαγνητικό πυρήνα προκειμένου να παρέχουν καλή σύζευξη και σε ορισμένες περιπτώσεις, θωράκιση για την αποφυγή ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών [244].

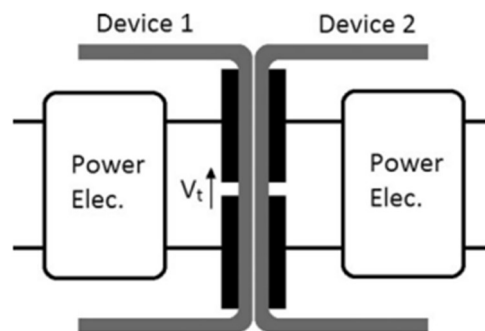
Με την αύξηση της συχνότητας λειτουργίας, η CPT μπορεί να ανταγωνιστεί την IPT, καθώς η πρώτη μπορεί να προσφέρει εξίσου καλή γαλβανική απομόνωση και δεν απαιτεί έναν δαπανηρό μαγνητικό πυρήνα υψηλής συχνότητας. Παρόλα αυτά, η CPT δεν έχει χρησιμοποιηθεί σε συστήματα υψηλής ισχύος, καθώς πάσχει από περιορισμένη παροχή ισχύος και/ή χαμηλή απόδοση.

Η τοπολογία ενός συμβατικού CPT συστήματος φαίνεται στο Σχήμα 72. Αποτελείται από έναν αντιστροφέα, σκοπός του οποίου είναι η παραγωγή εναλλασσόμενης τάσης και η τροφοδοσία του ρεύματος στο φορτίο μέσω της χωρητικής διεπαφής. Τυπικά, η χωρητικότητα των διεπαφών είναι της τάξης των μερικών εκατοντάδων picofarads, και προκειμένου να παρέχει αρκετό ρεύμα μέσω της διεπαφής, η υψηλή της άεργη αντίδραση αντισταθμίζεται είτε με ένα παθητικό (επαγωγικό) στοιχείο είτε, πιο σπάνια, με ένα ενεργό (αρνητικός πυκνωτής) στοιχείο [244].



Σχήμα 72. Μια συνήθης τοπολογία ενός CPT συστήματος [244].

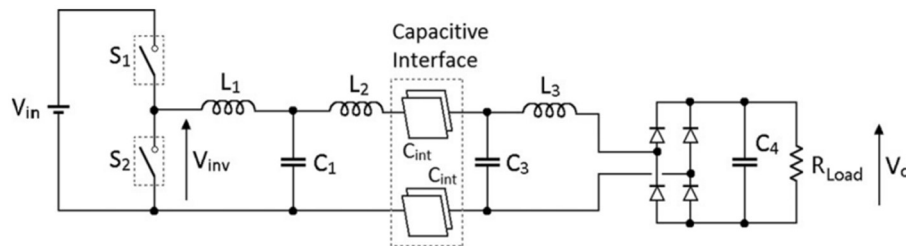
Σε εφαρμογές που αναπτύσσονται σε περιορισμένο χώρο (βλέπε Σχήμα 73), προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η μεταφορά ενέργειας, η επιφάνεια χρησιμοποιείται στο μέγιστο δυνατό βαθμό, ώστε να επιτευχθούν υψηλές τιμές χωρητικότητας. Ως εκ τούτου, η επιτρεπόμενη απόσταση μεταξύ των χωρητικών ακροδεκτών είναι πολύ μικρή και η μέγιστη τάση που αναπτύσσεται μεταξύ των ακροδεκτών περιορίζεται. Επιπλέον, με τις συχνότητες λειτουργίας συχνά να υπερβαίνουν το 1 MHz και με την τάση των ακροδεκτών να φτάνει συνήθως σε κλάσματα ή ακόμη και το 1 kV υπάρχει σοβαρό ζήτημα ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών (EMI). Ακόμη και το υλικό του περιβλήματος μεταξύ των πλακών των ακροδεκτών άγει ρεύματα υψηλών συχνοτήτων και με αποτέλεσμα το CPT σύστημα να υφίσταται απώλειες. Επομένως, η τάση των ακροδεκτών πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στη συντριπτική πλειονότητα των εφαρμογών.



Σχήμα 73. Τυπική διεπαφή μεταξύ των συσκευών. Η τάση μεταξύ των πλακών των ακροδεκτών V_t είναι επίσης μια κρίσιμη παράμετρος [244].

Το 2012, ο Theodoridis πρότεινε ένα σύστημα που ξεπέρασε τους προαναφερθέντες περιορισμούς επιτυγχάνοντας υψηλότερες τιμές ισχύος και μειώνοντας το ρεύμα που διαρρέει τη διεπαφή σε σχέση με το ρεύμα φορτίου. Το προτεινόμενο σύστημα αυξάνει δραστικά τον συντελεστή ισχύος στη διεπαφή και επιτυγχάνει πολλαπλασιασμό του ρεύματος φορτίου σε σχέση με το ρεύμα της διεπαφής, μειώνοντας έτσι σημαντικά τις πιέσεις τάσης στην διεπαφή και τις απώλειες αγωγής/μαγνητισμού του επαγωγέα αντιστάθμισης. Επιτυγχάνεται πολλαπλασιασμός ισχύος εξόδου χωρίς την ανάγκη αύξησης της συχνότητας λειτουργίας. Αυτό γίνεται εις βάρος της υψηλότερης πολυπλοκότητας του κυκλώματος. Στο Σχήμα 74 παρουσιάζεται το προτεινόμενο σύστημα. Αποτελείται από έναν αντιστροφέα ημιγέφυρας (ή εναλλακτικά πλήρους γέφυρας), τρία πηνία συντονισμού, δύο πυκνωτές συντονισμού, τη χωρητική διεπαφή και έναν ανορθωτή τροφοδοτούμενο με ρεύμα. Το πειραματικό σύστημα CPT που κατασκευάστηκε με τη προτεινόμενη τοπολογία παράγαγε περισσότερα από 25 W

μέσω μιας χωρητικής διεπαφής των μόλις 100 pF, σε συχνότητα μόλις 1 MHz και με απόδοση 80% [244].

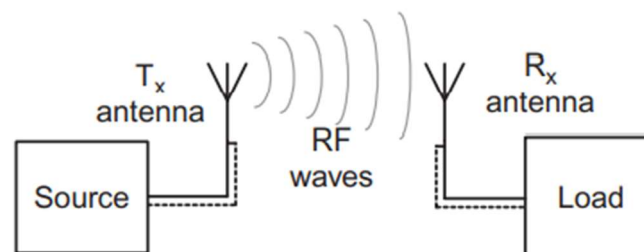


Σχήμα 74. Προτεινόμενο CPT σύστημα [244].

6.4 Remote Mobile Power Transfer

6.4.1 RF Μεταφορά Ενέργειας (RF PT)

Τα συστήματα WPT ραδιοκυμάτων(RF)/μικροκυμάτων έχουν διάφορα βασικά στοιχεία που επιτρέπουν τη ροή ενέργειας μεταξύ δύο σημείων στο χώρο. Πρώτον, η ισχύς των RF/μικροκυμάτων πρέπει να παράγεται στο σταθμό βάσης συνήθως μέσω ενός magnetron ή μιας πηγής στερεάς κατάστασης. Η επιλογή αυτή συνήθως καθορίζεται από την αποδοτικότητα, το κόστος και την επιθυμητή ισχύ μετάδοσης. Η κατευθυντικότητα και η πόλωση της κεραίας υπαγορεύονται συνήθως από την εφαρμογή, αλλά η συνολική μεταδιδόμενη ισχύς πρέπει να υπακούει στα κανονιστικά πρότυπα και τα πρότυπα ασφαλείας [245].



Σχήμα 75. Σύστημα WPT ραδιοκυμάτων (RF) [246].

Αφού η ενέργεια που εκπέμπει ο σταθμός βάσης διαδοθεί μέσω του καναλιού μεταξύ των δύο θέσεων, ο κόμβος συγκομιδής ενέργειας πρέπει να τη συλλέξει. Ο κόμβος συγκομιδής ενέργειας διαθέτει ένα κύκλωμα μετατροπής ενέργειας που αποτελείται από κεραία(ες) λήψης, ένα δίκτυο combination matching ή ένα φίλτρο διέλευσης ζώνης συχνοτήτων, ένα ανορθωτικό κύκλωμα και ένα χαμηλοπερατό φίλτρο. Το ζωνοπερατό φίλτρο βοηθάει να εξασφαλιστεί ότι η κεραία έχει ταιριάζει σωστά με το ανορθωτικό κύκλωμα και ότι οι αρμονικές που παράγονται από το ανορθωτικό στοιχείο δεν επανεκπέμπονται στο περιβάλλον. Το ανορθωτικό κύκλωμα μπορεί να υπάρχει σε ποικιλία τοπολογιών, αλλά συνήθως περιλαμβάνει κάποιο αριθμό διόδων και πυκνωτών. Τέλος, ένα χαμηλοπερατό φίλτρο εξόδου αφαιρεί τις θεμελιώδεις και αρμονικές συχνότητες από την έξοδο, ορίζει την σύνθετη αντίσταση εξόδου και αποθηκεύει φορτίο για κατανάλωση.

6.4.1.1 Αρχές συλλογής ενέργειας RF

Σχεδόν όλα τα σύγχρονα κυκλώματα συλλογής ενέργειας χρησιμοποιούν στοιχεία ανόρθωσης με βάση ημιαγωγούς σε μια ποικιλία τοπολογιών για τη μετατροπή της ενέργειας RF σε συνεχές ρεύμα. Πρώιμες μέθοδοι μετατροπής της ενέργειας RF σε DC, χρησιμοποιούσαν τις αρχές λειτουργίας θέρμανσης μέσω μικροκυμάτων, μαζί με θερμοϊονικές διόδους κλειστού διαστήματος [247]. Ενώ οι ημιαγωγοί είναι σε θέση να χειριστούν μεμονωμένα σχετικά μικρές ποσότητες ενέργειας, το χαμηλό κόστος και το μικρό τους μέγεθος τους καθιστά ιδανικούς για ποικίλες εφαρμογές.

Στα συστήματα τύπου solar powered satellite (SPS), επιλέγονται οι διόδοι Schottky λόγω του χαμηλού κατώφλιού τάσης και της χαμηλότερης χωρητικότητας σύνδεσης από τις συνήθεις PN διόδους [248]. Αυτό το χαμηλό κατώφλι επιτρέπει πιο αποδοτική λειτουργία σε χαμηλές τιμές ισχύος, ενώ η χαμηλή χωρητικότητα σύνδεσης αυξάνει τη μέγιστη συχνότητα στην οποία η διόδος μπορεί να λειτουργήσει.

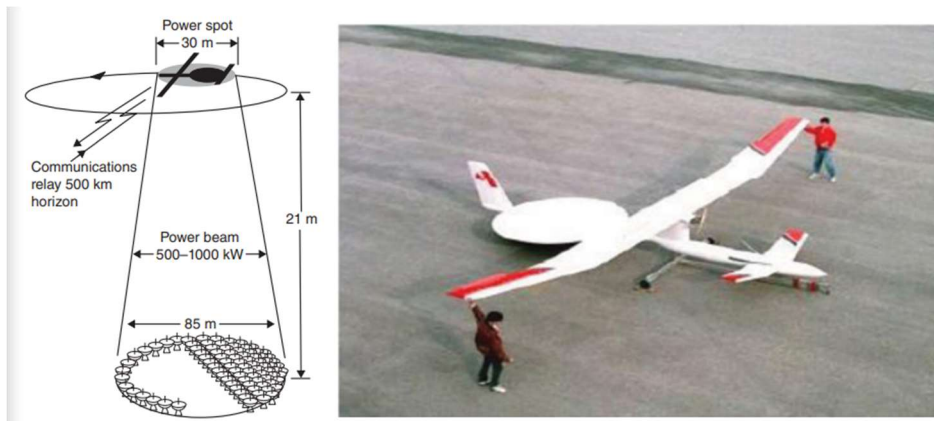
Για την παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας στα συστήματα SPS, χρησιμοποιούνται μεγάλες συστοιχίες RF ανορθωτών. Οι συνήθεις διεργασίες των τρανζίστορ CMOS δεν υποστηρίζουν την κατασκευή των διόδων Schottky, οπότε χρησιμοποιούνται συνήθως διακριτά στοιχεία σε συστοιχίες συγκομιδής SPS.

Από την άλλη πλευρά, οι εφαρμογές RF identification (RFID) αξιοποιούν την τεχνολογία των CMOS, με τρανζίστορ που συνδέονται με διόδους, κάτι που αυξάνει σημαντικά την απόδοση του ΕΗ σε χαμηλότερες τιμές ισχύος, λόγω των χαμηλότερων παρασιτικών τιμών και των προσαρμόσιμων ανορθωτών. Επιπλέον, μπορούν να ενσωματωθούν στο ίδιο πλαίσιο και κυκλώματα ψηφιακής λογικής. Τα εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα ισχύος που απαιτούνται από αυτά τα ηλεκτρονικά συστήματα, μαζί με με την εξοικονόμηση κόστους με την ενσωμάτωση ολόκληρης της συσκευής σε ένα ενιαίο ολοκληρωμένο κύκλωμα (IC), καθιστούν τις διεργασίες CMOS την κυρίαρχη τεχνολογία για τους συλλέκτες ενέργειας RFID.

6.4.1.2 Συσκευές RF WPT

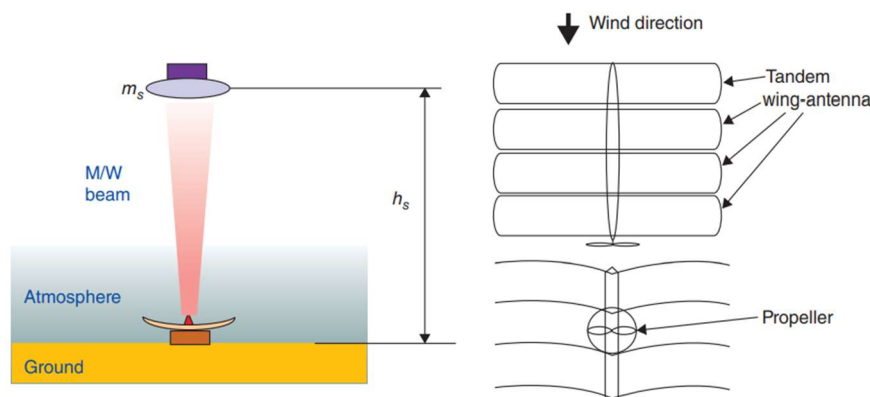
Η ενέργεια RF έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως σε ραντάρ, φούρνους μικροκυμάτων, ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς (EMP) πέρα από την WPT. Μία από τις πιθανές εφαρμογές του RF PT είναι η ασύρματη τροφοδοσία αεροπλάνων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 76.

Σύμφωνα με το πρόγραμμα SHARP (Stationary High Altitude Relay Platform) του Καναδά, μελετάται ένα ηλεκτροκίνητο αεροπλάνο σε συχνότητα 2,45 ή 5,8 GHz, χρησιμοποιώντας μια ορθή κεραία (rectenna) της οποίας η απόδοση μετατροπής ισχύος από RF σε DC είναι 80%. Η rectenna είναι μια συσκευή για τη μετατροπή της λαμβανόμενης ενέργειας RF σε DC ισχύ. Η συνολική απόδοση ισχύος είναι 10% στα 150 m από το έδαφος για μετάδοση 10 kW. Το αεροπλάνο στοχεύει να λειτουργήσει σε υψόμετρο στρατόσφαιρας περίπου 20-30 km, το οποίο είναι ένα πολλά υποσχόμενο υψόμετρο όπου δεν υπάρχουν σχεδόν ποτέ ισχυρά ρεύματα ανέμου, και παρέχει την δυνατότητα παρακολούθησης σε μεγάλες αποστάσεις, παρόμοια με ενός δορυφόρου χαμηλού υψόμετρου που βρίσκεται σε τροχιά γύρω από τη Γη [225].



Σχήμα 76. Ένα αεροπλάνο που τροφοδοτείται από ενέργεια RF από το πρότζεκτ SHARP του Καναδά [225].

Το 2017 οι Chun T. Rim και Chul Park του KAIST, μελέτησαν τη δυνατότητα δημιουργίας ενός αεροπλάνου στρατόσφαιρας που τροφοδοτείται με ενέργεια RF, το οποίο θα διαθέτει μια δομή κεραίας με πτέρυγα τύπου tandem για τη λήψη RF ενέργειας από μια επίγειο κεραία Tx, και για την απόκτηση δύναμης ανύψωσης θα χρησιμοποιεί μια έλικα που λειτουργεί με ηλεκτρισμό [249]. Η απαιτούμενη ταχύτητα και ισχύς βρέθηκαν να είναι 22 m/s και 8,5 kW, αντίστοιχα, για άνοιγμα φτερών 30m και βάρος 200 kg, το οποίο είναι ένα λογικό σύστημα αεροπλάνου. Όπως υπολογίστηκε, η διάμετρος για έναν επίγειο σταθμό για την RF συχνότητα L-band (2.45 GHz) και C-band (10.0 GHz) είναι 122m και 30m, αντίστοιχα, οι οποίες είναι αρκετά λογικές διαστάσεις για κατασκευή. Η συχνότητα μπορεί να επιλεγεί λαμβάνοντας υπόψη το μέγεθος του επίγειου σταθμού και τη συνολική απόδοση ισχύος. Λαμβάνοντας υπόψη τα τρέχοντα διαθέσιμα εξαρτήματα RF και τις απώλειες διάδοσης, η απαίτηση ισχύος ενός επίγειου σταθμού βρέθηκε ότι είναι περίπου 200 kW [249]. Επομένως, η κατασκευή ενός τέτοιου αεροπλάνου είναι δυνατή να γίνει, εάν γίνει χρήση των κατάλληλων RF εξαρτημάτων και το αεροπλάνο σχεδιαστεί κατάλληλα.



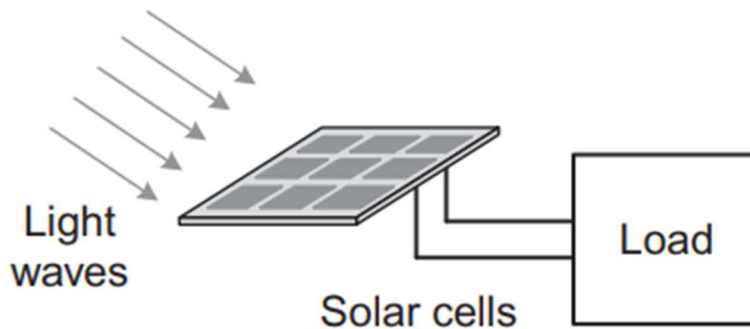
Σχήμα 77. Ένα αεροπλάνο που τροφοδοτείται από ενέργεια RF σχεδιασμένο από το KAIST [225].

Πρόσφατα, οι εφαρμογές χαμηλής ισχύος της RF PT έχουν διερευνηθεί ευρέως ως πηγή ενέργειας για κατανομημένα δίκτυα αισθητήρων και το IoT. Η συγκομιδή ενέργειας RF [250] είναι επί του παρόντος ένα φλέγον ζήτημα, στο οποίο επιδιώκονται πολύ χαμηλές τιμές ισχύος, μικρότερες από 1 mW ή πολύ μικρές ποσότητες ενέργειας, μικρότερες από 1 mJ. Η παροχή ενέργειας RF σε φορητές συσκευές ενός γραφείου ή ενός δωματίου είναι επίσης μια ενδιαφέρουσα εφαρμογή, όπου όμως η δυναμική κατεύθυνση της κεραίας Tx και η στενή γωνία λήψης της κεραίας Rx των αυθαίρετα τοποθετημένων κινητών συσκευών αποτελούν

σημαντικά προβλήματα. Η αποφυγή της επιβλαβούς έκθεσης του ανθρώπινου σώματος και του ηλεκτρονικού εξοπλισμού στην ενέργεια RF είναι επίσης ένα πολύ δύσκολο ζήτημα, όπως επίσης και το υψηλό κόστος των συσκευών Tx και Rx και οι αυστηροί κανονισμοί για τις RF παρεμβολές [225].

6.4.2 Οπτική μεταφορά ενέργειας (Optical PT)

Η οπτική μεταφορά ισχύος χρησιμοποιεί το φως -στην υπεριώδη, ορατή και υπέρυθη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος συχνοτήτων- για τη μεταφορά ενέργειας μεταξύ πηγής και δέκτη σε μεγάλες αποστάσεις (Σχήμα 78). Η πηγή εκπομπής φωτός μπορεί να είναι ηλιακή ή δίοδοι λέιζερ για την παροχή υψηλής ισχύος και LED για τη μετάδοση δεδομένων [251]. Η μονάδα δέκτη είναι μια φωτοευαίσθητη συσκευή, όπως ο φωτοβολταϊκός μετατροπέας, το ηλιακό κύτταρο ή η φωτοδίοδος. Η οπτική σύνδεση μπορεί να είναι ο ελεύθερος χώρος, ο αέρας, οι οπτικές ίνες (μπορεί να θεωρηθεί ασύρματη σύνδεση λόγω της απουσίας αγώγιμων υλικών) κ.λπ. Αν και οι οπτικές συνδέσεις έχουν χρησιμοποιηθεί κυρίως για τη μετάδοση δεδομένων, μπορεί επίσης να μεταδοθεί υψηλότερη ισχύς με τη μορφή ηλιακής ενέργειας και λέιζερ [252]. Μια εφαρμογή είναι η μεταφορά ενέργειας λέιζερ μέσω οπτικής ίνας, που έχει το πλεονέκτημα της ηλεκτρικής απομόνωσης μεταξύ της πηγής και του δέκτη [246].



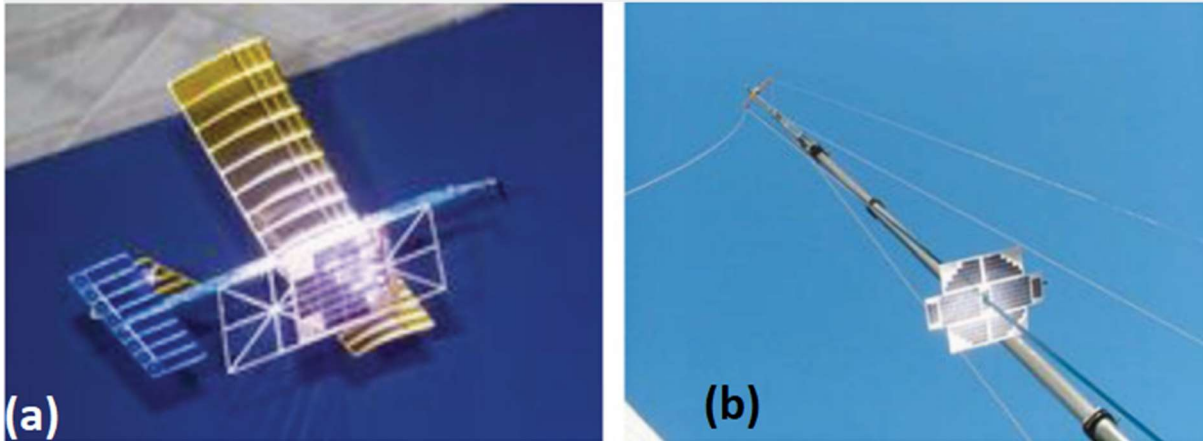
Σχήμα 78. Οπτική μεταφορά ενέργειας μεταξύ πηγής και δέκτη σε μεγάλες αποστάσεις με ηλιακή ακτινοβολία [246].

Η οπτική ισχύς είναι ένας καλός υποψήφιος για ασύρματη ισχύ, εάν διατηρείται καλή απόσταση μεταξύ Tx και Rx. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 79(a), το Κέντρο Διαστημικών Πτήσεων Marshall της NASA έχει αναπτύξει ένα drone που τροφοδοτείται με λέιζερ και του οποίου η συνολική απόδοση ισχύος από την ισχύ εισόδου ενός λέιζερ Tx έως την ισχύ εξόδου του ηλιακού κυττάρου είναι 6,8%.

Παρόλο που η απόδοση ισχύος 6,8% είναι πολύ χαμηλότερη από εκείνη μιας σύγχρονης συσκευής IPT, το οπτικό drone δείχνει ότι υπάρχει η δυνατότητα για ασύρματη μεταφορά ενέργειας χαμηλής ισχύος σε κινητές συσκευές εσωτερικού χώρου χωρίς προβλήματα ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής (EMI). Εάν το μήκος κύματος του λέιζερ είναι υπέρυθρο (IR), είναι αρκετά ασφαλές για το ανθρώπινο σώμα, εκτός εάν το επίπεδο ισχύος είναι πολύ υψηλό. Όπως και στην RF PT, η οπτική PT έχει το πρόβλημα της δυναμικής κατεύθυνσης του Tx και της στενής γωνίας λήψης του Rx όταν πρόκειται για αυθαίρετα τοποθετημένες κινητές συσκευές.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 79(b), μια συσκευή αναρριχητής που κατασκευάστηκε από το Πανεπιστήμιο του Saskatchewan Space Design Team, έφτασε τα 40 ft. σε μια κορδέλα

αναρρίχησης 200 ft. στη δοκιμή Beam Power Challenge της NASA το 2005. Το φως του ήλιου είναι δωρεάν και άφθονο, αλλά δεν είναι διαθέσιμο σε συνεφιασμένο καιρό και τη νύχτα, επομένως ένα τεχνητό φως LED ή ένα λέιζερ είναι ζωτικής σημασίας για την optical PT προκειμένου να υπάρχει μια αξιόπιστη πηγή ενέργειας. Ένα από τα θεμελιώδη μειονεκτήματα της optical PT είναι ότι η ισχύς μπορεί να παρέχεται μόνο σε συσκευές μέσα στο line of sight, και δεν μπορεί να προσπεράσει εμπόδια ή αδιαφανή υλικά, γεγονός που μπορεί εύκολα να ξεπεραστεί, για παράδειγμα, με την IPT [225].



Σχήμα 79. (a) Drone που τροφοδοτείται με λέιζερ της NASA και (b) συσκευή αναρριχητής στη δοκιμή Beam Power Challenge της NASA [225].

Κεφάλαιο 7: Εφαρμογές της Συγκομιδής Ενέργειας

5.1 Εφαρμογές στην Ιατρική

Η έννοια της ενέργειας έχει θεμελιώδη σημασία στη φυσική του ανθρώπινου σώματος. Όλες οι δραστηριότητες, συμπεριλαμβανομένης της σκέψης, περιλαμβάνουν ανταλλαγές ενέργειας. Η μετατροπή της ενέργειας σε κίνηση αντιπροσωπεύει μόνο ένα μικρό κλάσμα της συνολικής ενέργειας που δαπανάται από το σώμα. Ακόμη και σε κατάσταση ηρεμίας, το σώμα συνεχίζει να δαπανά περίπου 100 W για να διατηρήσει τη λειτουργία των εσωτερικών οργάνων, των ιστών και των κυττάρων. Περίπου το 25% αυτής της ενέργειας χρησιμοποιείται από τον σκελετό και την καρδιά, το 19% από τον εγκέφαλο, το 10% από τα νεφρά και το 27% από το ήπαρ και τον σπλήνα [253].

Το ανθρώπινο σώμα κατά τη διάρκεια διαφόρων δραστηριοτήτων παράγει ενέργεια που κυμαίνεται μεταξύ 81 (ύπνος) και 1630 W (έντονο τρέξιμο). Είναι ένα σύστημα ικανό να διατηρεί τη θερμοκρασία του ακόμη και όταν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος μεταβάλλεται. Αυτό επιτρέπει τη διατήρηση των μεταβολικών διεργασιών παραγωγής ενέργειας ακόμη και σε ψυχρά κλίματα. Έχουν διεξαχθεί πολλές έρευνες με σκοπό την ανάπτυξη μηχανισμών που να μπορούν να εκμεταλλευτούν την ενέργεια που παράγει το σώμα. Τέτοιοι μηχανισμοί είναι εξαιρετικά χρήσιμοι για ιατρικά εμφυτεύματα και αισθητήρες παρακολούθησης ασθενών.

Η ανάπτυξη φορετών (wearable) και εμφυτεύσιμων ηλεκτρονικών συσκευών δίνουν τη δυνατότητα σε επαγγελματίες υγείας να παρακολουθούν απομακρυσμένα και σε πραγματικό χρόνο την λειτουργία των ζωτικών οργάνων των ασθενών. Αυτές οι πρωτοποριακές ηλεκτρονικές συσκευές επιτρέπουν την πρόληψη σοβαρών παθήσεων καθώς και την παρακολούθηση χρόνιων νοσημάτων, την ανίχνευση συμπτωμάτων και άλλα πολλά που θα ευνοήσουν την υγεία των ασθενών με τρόπους που δεν ήταν εφικτοί μέχρι τώρα.

Προκειμένου να χρησιμοποιηθούν οι τύποι ενέργειας που προέρχονται από το ανθρώπινο σώμα, έχει αναπτυχθεί μια ποικιλία σχεδιασμών συσκευών συγκομιδής ενέργειας με σκοπό την επαναφόρτιση των μπαταριών και τελικά την υλοποίηση αυτοτροφοδοτούμενων φορετών ή εμφυτεύσιμων ηλεκτρονικών συσκευών [214].

Καθένας από τους μηχανισμούς που χρησιμοποιούν οι διαφορετικοί τύποι συσκευών συγκομιδής ενέργειας έχουν τα πλεονεκτήματά τους σε διαφορετικές περιοχές ή πηγές του ανθρώπινου σώματος. Για παράδειγμα, η μηχανική ενέργεια που είναι διαθέσιμη από τα βήματα, θα μπορούσε να είναι ιδανική για την για πιεζοηλεκτρικές και τριβοηλεκτρικές συσκευές συγκομιδής ενέργειας [254-256], ενώ η φωτοβολταϊκές και θερμοηλεκτρικές μηχανές θα ήταν καλές επιλογές για εφαρμογές που σχετίζονται με το άνω μέρος του σώματος και το δέρμα [209]. Ωστόσο, σε σύγκριση με άλλες εφαρμογές, η ενέργεια που μπορεί να συλλεχθεί από το ανθρώπινο σώμα εμφανίζεται σε χαμηλές συχνότητες και με τυχαίο τρόπο, επομένως είναι πιο δύσκολο να σχεδιαστούν αποτελεσματικές λύσεις για την παραγωγή επαρκούς ενέργειας για την τροφοδοσία των αισθητήρων και μάλιστα σε περιορισμένο χώρο. Τα υβριδικά συστήματα που χρησιμοποιούν είτε πολλαπλούς μηχανισμούς μετατροπής είτε πολλαπλές πηγές ενέργειας θα μπορούσαν να δώσουν λύσεις για την αντιμετώπιση αυτής της πρόκλησης [214].

Από την εισαγωγή του πρώτου καρδιακού βηματοδότη το 1958, οι μπαταρίες αποτελούν τη συμβατική λύση για την τροφοδοσία των εμφυτεύσιμων συστημάτων. Εκτός από τις

συμβατικές μπαταρίες, οι λύσεις τροφοδοσίας εμφυτεύσιμων συστημάτων χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες, δηλαδή την ασύρματη τροφοδοσία (WPT) και τη self-powered συγκομιδή ενέργειας.

Ο ηλεκτρομαγνητισμός (EM) και οι υπέρηχοι χρησιμοποιούνται συνήθως για την ασύρματη μεταφορά ενέργειας [257]. Αν και η ηλεκτρομαγνητική μεταφορά ενέργειας χρησιμοποιείται ευρέως για την τροφοδοσία εμφυτευμένων συσκευών, παρουσιάζει δυσκολίες στην τροφοδοσία συσκευών που βρίσκονται βαθιά μέσα στο σώμα, καθώς το ηλεκτρικό ή μαγνητικό πεδίο (για τη κοντινή μεταφορά) και η ηλεκτρομαγνητική δέσμη (για τη μακρινή μεταφορά) υστερούν καθώς αποσυντίθενται στους βιολογικούς ιστούς. Ένα άλλο ζήτημα με τη μεταφορά ενέργειας μέσω EM έγκειται στις υψηλές απαιτήσεις των πηνίων, καθώς μια μικρή παραμόρφωση του πηνίου μειώνει την αποδοτικότητα της μεταφοράς ενέργειας.

Εκτός από τη μεταφορά EM ενέργειας, η πρόσφατα αναφερθείσα μεταφορά ενέργειας με υπερήχους ανοίγει μια άλλη δυνατότητα ασύρματης παροχής ενέργειας [258]. Σε σύγκριση με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, η υπερηχητική ενέργεια εξασθενεί λιγότερο στους βιολογικούς ιστούς και συνεπώς μπορεί να επιτύχει μεγαλύτερη διείσδυση. Αν και οι τεχνολογίες υπερήχων χρησιμοποιούνται εδώ και καιρό για άλλους διαγνωστικούς και θεραπευτικούς σκοπούς, η διερεύνηση της παροχής ενέργειας υπερήχων για εμφυτευμένες συσκευές έχει μόλις αρχίσει [259].

Παρόλο που η ασύρματη μεταφορά ενέργειας αποφεύγει τα προβλήματα των μπαταριών με την περιορισμένη διάρκεια ζωής τους και την ανάγκη για αντικατάσταση, η μεταφορά EM ενέργειας και υπερήχων εξακολουθεί να απαιτεί μια εξωτερική πηγή για την παροχή ενέργειας στην εμφυτευμένη συσκευή. Επομένως η συγκομιδή ενέργειας από τους βιολογικούς ιστούς αποτελεί μια πιο επιθυμητή λύση. Η ενέργεια αυτή μπορεί να προέρχεται είτε από την κίνηση του σώματος/οργάνου είτε από ηλεκτροχημική ενέργεια, και έχει ως αποτέλεσμα την εξάλειψη της απαίτησης εξωτερικής πηγής τροφοδοσίας. Η αυτοτροφοδοτούμενη συγκομιδή ενέργειας εμπίπτει σε τρεις κατηγορίες, και συγκεκριμένα στη συγκομιδή ενέργειας από βιοκαύσιμα, στην πιεζοηλεκτρική συγκομιδή ενέργειας και τριβοηλεκτρική συγκομιδή ενέργειας [260-262]

Αναφέρεται ότι ένα εμφυτεύσιμο κύτταρο βιοκαυσίμου γλυκόζης με βάση ηλεκτρόδια ενζύμων ή νανοσωλήνων άνθρακα, παράγει επαρκή ενέργεια από τα σωματικά υγρά ενός θηλαστικού για να λειτουργήσει ως μοναδική πηγή ενέργειας για ηλεκτρονικές συσκευές, χρησιμοποιώντας την οξειδάση της γλυκόζης για οξείδωση της, και τη λακκάση για την αναγωγή του διοξυγόνου [263]. Με τη συγκομιδή μηχανικής ενέργειας παραμόρφωσης από τη συστολή της καρδιάς, επιδεικνύεται διέγερση του εγκεφάλου και του πνευμονογαστρικού νεύρου από πιεζοηλεκτρικούς και τριβοηλεκτρικούς συλλέκτες ενέργειας, αντίστοιχα [264, 265]. Τα τελευταία χρόνια, αναδύονται και πλήρως εμφυτεύσιμοι τριβοηλεκτρικοί συλλέκτες ενέργειας [266,267].

Οι πιεζοηλεκτρικοί και τριβοηλεκτρικοί συλλέκτες ενέργειας μπορούν να συλλέξουν μηχανική ενέργεια που παράγεται από τη συστολή των οργάνων και των σκελετικών μυών και είναι δυνατόν να εφαρμοστεί η συλλεγόμενη ενέργεια για θεραπευτικούς σκοπούς. Με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να δημιουργηθεί ένα αυτοσυντηρούμενο σύστημα ως θεραπεία για ορισμένες ασθένειες. Υπάρχει τεράστια πρόοδος στην ανάπτυξη πιεζοηλεκτρικών και τριβοηλεκτρικών συσκευών συλλογής ενέργειας προς την κατεύθυνση ενός αυτοσυντηρούμενου συστήματος. Για τους πιεζοηλεκτρικούς συλλέκτες ενέργειας, το 2014, η ομάδα του John A. Rogers παρουσίασε για πρώτη φορά ένα πλήρως εμφυτεύσιμο σύστημα με πιεζοηλεκτρική συγκομιδή

και αποθήκευση ενέργειας από τις κινήσεις της καρδιάς, του πνεύμονα και του διαφράγματος για την τροφοδοσία συμβατικών καρδιακών βηματοδοτών [268]. Αργότερα, το 2015, η ομάδα του Keon Jae Lee ανέφερε άμεση διέγερση του φλοιού του εγκεφάλου με την έξοδο ηλεκτρικού ρεύματος από πιεζοηλεκτρικό συλλέκτη ενέργειας, γεγονός που ανοίγει μια νέα δυνατότητα για την αποφυγή χρήσης περίπλοκων κυκλωμάτων και για την επίτευξη της άμεσης διέγερσης του εγκεφαλικού φλοιού με τους συλλέκτες ενέργειας [269]. Επιπλέον, το 2019, η ομάδα του Hao Zhang βελτίωσε περαιτέρω την απόδοση της πιεζοηλεκτρικής συγκομιδής ενέργειας από τις κινήσεις της καρδιάς [270].

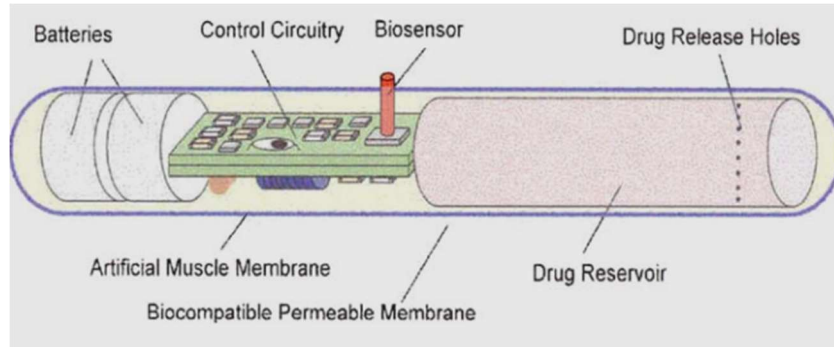
Σε αντίθεση με το αυτοτροφοδοτούμενο σύστημα με βάση το πιεζοηλεκτρισμό, το οποίο πρωτοεμφανίστηκε και αναπτύχθηκε ως πλήρως εμφυτεύσιμο σύστημα το 2014 [268], μόνο πρόσφατα, το 2019, η ομάδα του Zhou Li έδειξε για πρώτη φορά με επιτυχία πλήρως εμφυτεύσιμο αυτοσυντηρούμενο σύστημα με βάση τον τριβοηλεκτρισμό, το οποίο συλλέγει μηχανική ενέργεια από την κίνηση των καρδιακών παλμών και τροφοδοτεί συμβατικούς βηματοδότες [271]. Παρά το γεγονός ότι άργησε να εμφανιστεί πλήρως εμφυτεύσιμο αυτοτροφοδοτούμενο σύστημα με βάση το τριβοηλεκτρισμό, υπήρξαν τεράστια ερευνητικά επιτεύγματα για τη διερεύνηση των θεμελιωδών αρχών και των διαφόρων εφαρμογών των τριβοηλεκτρικών συγκομιστών ενέργειας.

Το 2013, η ομάδα του Haixia Zhang κατέδειξε για πρώτη φορά την άμεση διέγερση του ισχιακού νεύρου ενός βατράχου για την πρόκληση μυϊκής συστολής, χρησιμοποιώντας έναν τριβοηλεκτρικό συλλέκτη ενέργειας [272]. Στη συνέχεια, η ομάδα του Chengkuo Lee και η ομάδα του Xudong Wang κατέδειξαν την άμεση διέγερση του ισχιακού νεύρου, του πνευμονογαστρικού νεύρου με τη χρήση τριβοηλεκτρικής συσκευής συγκομιδής ενέργειας, παρέχοντας τις θεμελιώδεις γνώσεις για την τριβοηλεκτρική διέγερση, και άνοιξαν ευκαιρίες για τη ευρεία εφαρμογή της στη νευροδιαμόρφωση των περιφερικών νεύρων [264, 273-275].

Εκτός από τα περιφερικά νεύρα, οι τριβοηλεκτρικοί συλλέκτες ενέργειας έχουν εφαρμοστεί σε κύτταρα [276], στον εγκεφαλικό φλοιό [277, 278], στην ενίσχυση της επούλωσης των πληγών [279] με τη δημιουργία ηλεκτρικού πεδίου.

Σε αντίθεση με το κεντρικό νευρικό σύστημα (ΚΝΣ) και το περιφερικό νευρικό σύστημα (ΠΝΣ) που διαθέτουν άφθονους νευρώνες, οι σκελετικοί μύες έχουν πολύ λιγότερους, οι οποίοι νευρώνουν τις μυϊκές ίνες. Ως αποτέλεσμα, οι σκελετικοί μύες είναι πολύ πιο απαιτητικοί σε ηλεκτρική έξοδο ώστε να μπορέσουν να διεγερθούν σε σύγκριση με το ΚΝΣ και το ΠΝΣ. Το 2019, εμφανίστηκε η πρώτη δημοσίευση αναφέρει την επιτυχή άμεση σκελετική μυϊκή διέγερση με τη χρήση TENGs, οι οποίες κατάφεραν έξοδο επιπέδου μA [280] και αναφέρθηκαν επίσης και διαφορετικές προσεγγίσεις για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας της μυϊκής διέγερσης [281, 282], αποτελώντας μια εξέλιξη στη διερεύνηση των θεμελιωδών γνώσεων σχετικά με την αποτελεσματικότητα της τριβοηλεκτρικής διέγερσης.

Μία από τις πιθανές βιοϊατρικές εφαρμογές του πιεζοηλεκτρικών γεννητριών είναι τα συστήματα για εμφυτεύσιμη χορήγηση φαρμάκων, όπως τα βιο-μικρο-ηλεκτρο-μηχανικά συστήματα (BioMEMS) που εξηγούνται από τον Madou [283]. Αν και μια τέτοια συσκευή έχει προταθεί ως σύστημα που μπορεί να χορηγεί φάρμακα τοπικά σε άρρωστα κύτταρα και όργανα, η τροφοδοσία τέτοιων συσκευών θέτει ορισμένες σημαντικές τεχνολογικές προκλήσεις. Μία προσέγγιση είναι η χρήση συμβατικών μπαταριών σε μορφή λεπτών φίλμ και πυκνωτών. Αυτά είναι ευρέως διαθέσιμα και είναι γνωστό ότι παράγουν επαρκή ισχύ για bioMEMS. Όμως, επειδή έχουμε ήδη αναφέρει πως η χρήση μπαταριών δεν είναι βιώσιμη

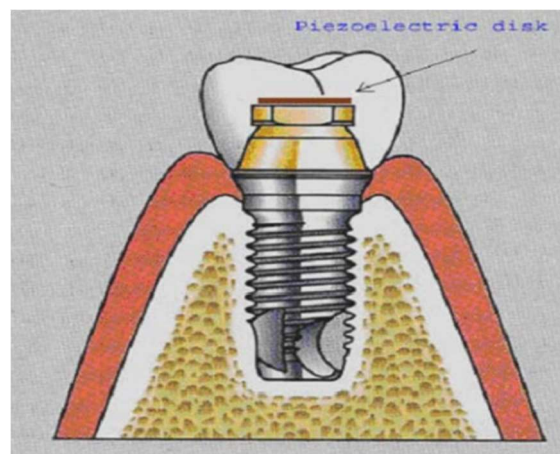


Σχήμα 80. Σχηματική αναπαράσταση ενός συστήματος χορήγησης φαρμάκων [284]

ούτε για το περιβάλλον, αλλά ούτε και για την εξέλιξη της τεχνολογίας, μια εναλλακτική λύση είναι η χρήση ενός πιεζοηλεκτρικού energy harvester, όπως φαίνεται στο Σχήμα 80. Η χρήση της πιεζοηλεκτρικής γεννήτριας για την επαναφόρτιση και/ή την τροφοδοσία συστημάτων χορήγησης φαρμάκων θα ήταν πολύ αποτελεσματική, καθώς θα μπορούσε να συλλέξει μηχανική ενέργεια από την κίνηση ρευστών ή στερεών μέσα στο σώμα [284].

Ένας άλλος πιθανός υποψήφιος για τη συγκομιδή μηχανικής ενέργειας είναι η σύγκλιση των δοντιών. Έχει παρατηρηθεί ότι όταν τα δόντια έρχονται σε επαφή μπορεί να σημειωθούν δυνάμεις έως και 100-200N. Εάν εκμεταλλευτεί μια πιεζοηλεκτρική γεννήτρια αυτή τη μορφή μηχανικής ενέργειας, θα είναι σε θέση να παράγει αρκετή ισχύ για τη τροφοδοσία μικροηλεκτρονικών συστημάτων και BioMems.

Με επαρκή ηλεκτρική απομόνωση, οι πιεζοηλεκτρικές γεννήτριες μπορούν να εισαχθούν μεταξύ του καλύμματος μιας οδοντικής θήκης και ενός μεταλλικού εμφυτεύματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 81. Υπολογίζεται πως τα δόντια μας έρχονται σε επαφή περίπου 1 εκατομμύριο φορές ετησίως, παράγοντας μηχανική ενέργεια που θα μπορούσε να αξιοποιηθεί από ένα τέτοιο σύστημα, όπως επίσης θα μπορούσε να αξιοποιεί ενέργεια κι από το τρίξιμο των δοντιών [284].



Σχήμα 81. Πιθανή θέση ενός πιεζοηλεκτρικού στρώματος, μεταξύ του περιβλήματος μιας οδοντικής θήκης και ενός μεταλλικού εμφυτεύματος [284].

5.2 Εφαρμογές στις Υποδομές

Η ταχεία ανάπτυξη των συστημάτων παρακολούθησης της δομικής λειτουργικότητας οδήγησε στην εφεύρεση διαφόρων τεχνολογιών αισθητήρων. Ωστόσο, οι δυσκολίες στην ανάπτυξη και συντήρηση των παραδοσιακών ενσύρματων αισθητήρων και η διαχείριση του τεράστιου όγκου δεδομένων που συγκεντρώνονται από μια πυκνή διάταξη ενσύρματων αισθητήρων ήταν τα θεμελιώδη μειονεκτήματα της χρήσης τέτοιων συστημάτων. Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSN) αναπτύχθηκαν έτσι για να ξεπεραστούν οι προαναφερθείσες αδυναμίες. Ωστόσο, η απαιτούμενη ενέργεια για την τροφοδοσία των WSN έχει καταστεί σημαντικό πρόβλημα λόγω των περιορισμών των μπαταριών. Έχουν αναπτυχθεί τεχνολογίες συγκομιδής ενέργειας για την επέκταση της διάρκειας ζωής των WSNs για την αντιμετώπιση του προβλήματος του ενεργειακού περιορισμού.

Πρόσφατα, μια νέα γενιά WSNs που βασίζονται σε αυτοτροφοδοτούμενους αισθητήρες έχουν γίνει πραγματικότητα γεφυρώνοντας το χάσμα μεταξύ της συλλεγόμενης ενέργειας και της ενέργειας που απαιτείται για την ανίχνευση, τον υπολογισμό, την αποθήκευση και την επικοινωνία. Οι αυτοτροφοδοτούμενοι αισθητήρες χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο και καθιερώνονται ως πολλά υποσχόμενες λύσεις για τα συμβατικά WSN στις πολιτικές υποδομές [285].

Είναι ευρέως γνωστό το πόσο υψηλής σημασίας είναι η παρακολούθηση και η διαχείριση της ευρωστίας των συστημάτων αστικής υποδομής, όπως οι εγκαταστάσεις υδροδότησης, ηλεκτροδότησης και επικοινωνιών, οδοποιίας, σιδηροδρόμων, γεφυρών, σηράγγων, κτιρίων, γεωργικών εγκαταστάσεων και συστημάτων περιβαλλοντικής παρακολούθησης [286]. Η διάταξη μεγάλου πλήθους ασύρματων κόμβων αισθητήρων για την παρακολούθηση της υγείας των υποδομών, επιτρέπει τη συνεχή ανίχνευση ή την επείγουσα ανταπόκριση σε μακροχρόνια φθορά και αστάθεια, ατυχήματα, λειτουργικά συμβάντα και φυσικούς κινδύνους, γεγονός που μπορεί τελικά να σώσει ζωές και να μειώσει τον χρόνο διακοπής λειτουργίας και τις οικονομικές απώλειες.

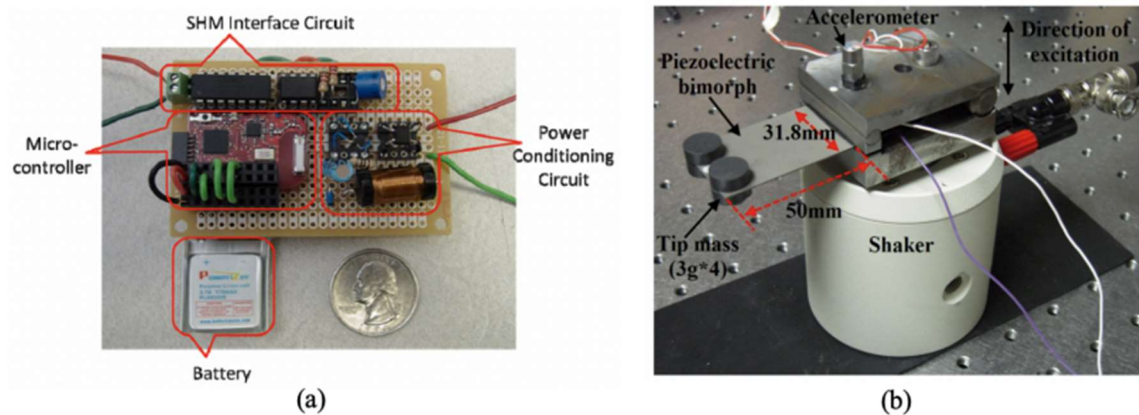
Δεδομένου ότι τα συστήματα υποδομής βρίσκονται συνήθως σε εξωτερικό περιβάλλον, υπάρχουν άφθονες διαθέσιμες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας εκτός από τις παραδοσιακές μπαταρίες ή τις ενσύρματες πηγές τροφοδοσίας, όπως η ηλιακή ενέργεια, η ροή του ανέμου, οι σταγόνες της βροχής και η ενέργεια RF [214].

Οι Qian και Jing [287] ανέφεραν μια υβριδική ηλεκτρομαγνητική-τριβηλεκτρική συσκευή συγκομιδής ενέργειας με κίνηση από τον άνεμο και ένα ηλιακό κύτταρο για την αυτοτροφοδοτούμενη παρακολούθηση της κατάστασης φυσικών καταστροφών. Ένας αισθητήρας θερμοκρασίας και ένας αισθητήρας δόνησης υιοθετήθηκαν για την ανίχνευση πυρκαγιάς και την παρακολούθηση σεισμών, αντίστοιχα.

Οι Liu κ.ά. [288] ανέπτυξαν έναν υβριδικό θερμοηλεκτρικό και ηλεκτρομαγνητικό μηχανισμό συγκομιδής ενέργειας από την κίνηση του ρευστού και τη μεταβολή της θερμοκρασίας σε ένα σύστημα άρδευσης. Σε ένα ευφυές σύστημα γεωργικής άρδευσης, διάφοροι κόμβοι αισθητήρων ή monitors, π.χ. αισθητήρες θερμοκρασίας και μετρητές ροής, μπορούν να ενσωματωθούν με την παροχή ενέργειας από συγκομιστές ανανεώσιμης ενέργειας.

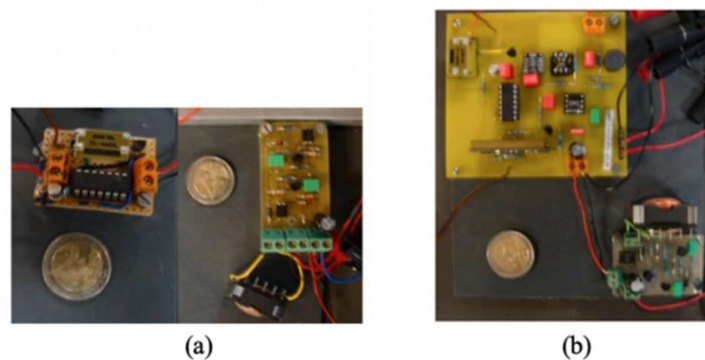
Οι Zhou κ.ά. [289] πρότειναν έναν αυτοτροφοδοτούμενο ασύρματο κόμβο αισθητήρων για τον εντοπισμό δομικών βλαβών. Ο κόμβος αισθητήρων χρησιμοποίησε πιεζοηλεκτρικά πλακίδια PZT (Lead Zirconate Titanate) για τη συγκομιδή της ενέργειας (βλ. Σχήμα 82 (a)). Η δυνατότητα κατασκευής του αυτοτροφοδοτούμενου συστήματος αισθητήρων για structural

health monitoring (SHM) αποδείχθηκε μέσω πειραματικών δοκιμών με τη χρήση μιας διμορφικής γεννήτριας σε πρόβολο με μια μάζα στο άκρο, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 82 (b).



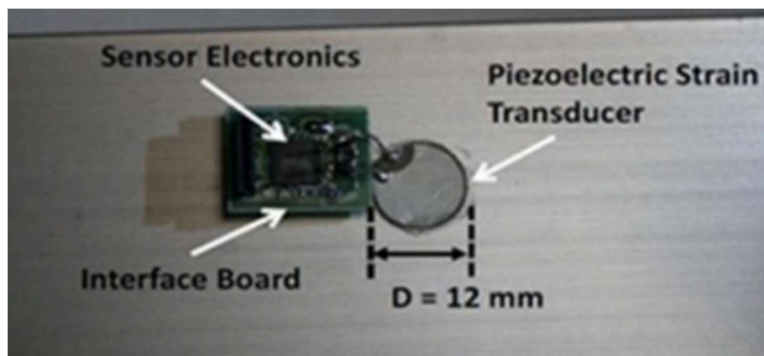
Σχήμα 82. (a) Αυτοτροφοδοτούμενος αισθητήρας, (b) Πειραματική διάταξη με μια διμορφικής γεννήτριας σε πρόβολο και πιεζοηλεκτρικά στοιχεία [289].

Ένα αυτοτροφοδοτούμενο ενσωματωμένο σύστημα ανίχνευσης που χρησιμοποιεί κύματα Lamb, γνωστά και ως κύματα πλάκας τα οποία διαδίδονται σε πλάκες με πάχος μόνο μερικά μήκη κύματος και αποτελούνται από μια σύνθετη ταλάντωση που λαμβάνει χώρα σε ολόκληρο το πάχος του υλικού, αναπτύχθηκε για το SHM [290], για το οποίο η μονάδα συγκομιδής ενέργειας με πιεζοηλεκτρικά στοιχεία συνδέθηκε με την παρακολουθούμενη δομή. Ένας αυτόνομος ασύρματος πομπός (βλ. Σχήμα 83 (a)) και ένας αυτόνομος ασύρματος δέκτης (βλ. Σχήμα 83 (b)) χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή κυμάτων Lamb και την αποστολή του αποτελέσματος στον καταγραφέα δεδομένων, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα της πειραματικής δοκιμής έδειξαν την εφαρμοσιμότητα του προτεινόμενου συστήματος αισθητήρων για την ανίχνευση δομικών βλαβών.



Σχήμα 83. (a) Αυτόνομος ασύρματος πομπός, (b) Αυτόνομος ασύρματος δέκτης [290].

Ένας αισθητήρας PFG που παρουσιάζεται στο Σχήμα 84 είναι σε θέση να λειτουργεί χωρίς μπαταρία χρησιμοποιώντας ενέργεια που συλλέγεται από τη δόνηση μιας κατασκευής, και καταγράφει στατιστικά στοιχεία που σχετίζονται με τις μηχανικές τάσεις και το στρες που υφίσταται μια κατασκευή. Αυτό καθιστά τον αισθητήρα κατάλληλη επιλογή για τη δομική παρακολούθηση γεφυρών μεγάλης κλίμακας [291-293].



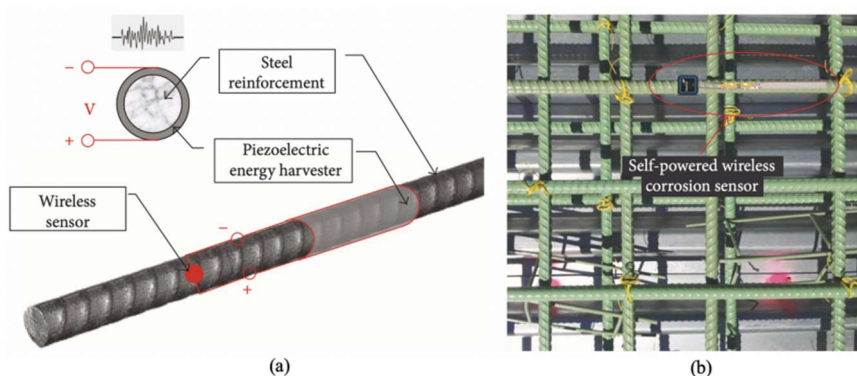
Σχήμα 84. Αυτοτροφοδοτούμενος αισθητήρας PFG [293]

Πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές δοκιμές στον αισθητήρα PFG για να χαρακτηριστεί η απόδοσή του πριν από την ανάπτυξή του σε πραγματικές εφαρμογές. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το προτεινόμενο PFG σύστημα αισθητήρων θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για μια σχεδόν αυτοτροφοδοτούμενη SHM πλατφόρμα. Επιπλέον, αποδείχθηκε ότι με τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων του συστήματος, ο αισθητήρας αναμένεται να λειτουργεί συνεχώς για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα (π.χ. για περισσότερα από είκοσι χρόνια) [292].

Οι Yu κ.ά. [294] ανέπτυξαν έναν αυτοτροφοδοτούμενο αισθητήρα για την ανίχνευση διάβρωσης σε κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα, για τον οποίο ο ηλεκτρομηχανικός θόρυβος (EN) που παράγεται από τη διάβρωση χρησιμοποιήθηκε ως σήμα ανίχνευσης, καθώς και ως σήμα τροφοδοσίας. Για την αυτοτροφοδοτούμενη προσέγγιση ανίχνευσης, κάθε μονάδα ανίχνευσης συνέλεγε ενέργεια και EN. Μόλις η ενέργεια έφτανε στο απαιτούμενο επίπεδο, ενεργοποιούνταν άλλες μονάδες ανίχνευσης. Αποδείχθηκε ότι η αυτοτροφοδοτούμενη ανίχνευση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της διάβρωσης στον τομέα SHM.

Ένα αυτοτροφοδοτούμενο δίκτυο αισθητήρων για την αυτοματοποιημένη πρόβλεψη της διάβρωσης του χαλύβδινου οπλισμού προτάθηκε από τους Su κ.α. [295]. Οι συγγραφείς εισήγαγαν έναν αισθητήρα διάβρωσης χωρίς μπαταρία σε συνδυασμό με ασύρματες μονάδες, οι οποίες περιελάμβαναν ένα gateway και ένα σταθμό βάσης, επιτρέποντας έτσι τη συνεχή συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Για την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας λόγω της επικοινωνίας, σχεδιάστηκε η μετάδοση δεδομένων και η δρομολόγηση. Για τους σκοπούς της συγκομιδής ενέργειας, ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό τοποθετήθηκε στην επιφάνεια του χαλύβδινου οπλισμού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 85(a).

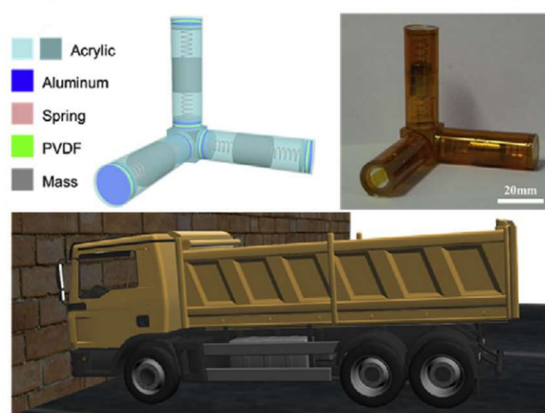
Μέσω της δόνησης του χαλύβδινου οπλισμού, προκαλείται παραμόρφωση του πιεζοηλεκτρικού υλικού με αποτέλεσμα την εμφάνιση τάσης. Ο πρωτότυπος αυτοτροφοδοτούμενος αισθητήρας τοποθετήθηκε σε επιφάνεια οπλισμένου σκυροδέματος, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 85(b). Αποδείχτηκε ότι η προτεινόμενη αυτοτροφοδοτούμενη τεχνολογία αισθητήρων, θα μπορούσε να παρακολουθεί και να προβλέπει τη διάβρωση που προκαλείται από τη πάροδο των χρόνων στον χάλυβα που βρίσκεται ενσωματωμένος στο σκυρόδεμα, βελτιώνοντας τη διάρκεια ζωής των υποδομών από τσιμέντο.



Σχήμα 85. (α) Σχηματική αναπαράσταση της προσέγγισης αυτοτροφοδοτούμενου αισθητήρα, (β) Πρωτότυπο αυτοτροφοδοτούμενου αισθητήρα διάβρωσης εγκατεστημένου σε επιφάνεια από οπλισμένο σκυρόδεμα [295].

5.3 Εφαρμογές στις Μεταφορές

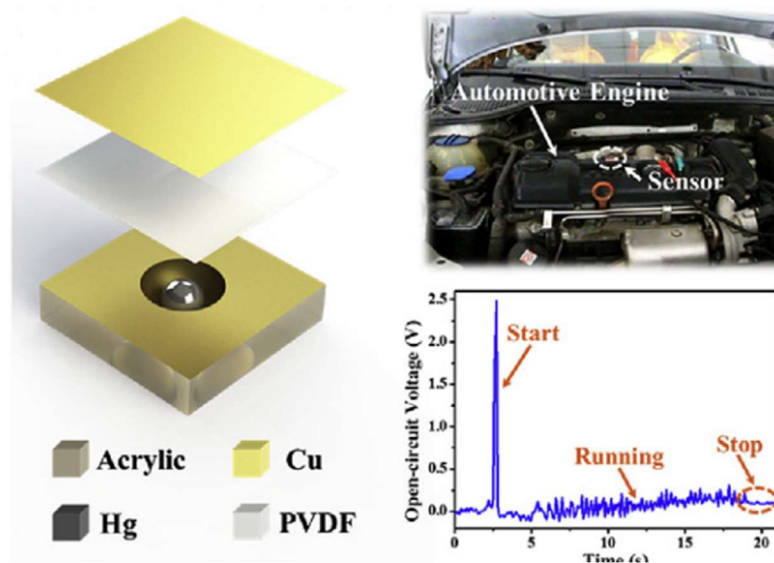
Τα αυτοκίνητα, ως ένα από τα πιο δημοφιλή μέσα μεταφοράς, χρησιμοποιούνται ευρέως σε όλο τον κόσμο. Με την ανάπτυξη των έξυπνων αυτοκινήτων, η συλλογή πληροφοριών γίνεται όλο και πιο σημαντική. Τα ευφυή οχήματα είναι ικανά να λαμβάνουν πληροφορίες σχετικά με την κατάστασή τους ή/και το περιβάλλον, να τις επεξεργάζονται και να λαμβάνουν αποφάσεις, να παρέχουν πληροφορίες ή/και να ενεργούν βάσει αυτών, και για όλες αυτές τις διαδικασίες χρειάζονται ένα δίκτυο αισθητήρων. Ωστόσο, οι αισθητήρες, χρειάζονται αδιάλειπτη ηλεκτρική ενέργεια για να λειτουργήσουν και υψηλή ακρίβεια ώστε τα σφάλματα να είναι όσο το δυνατόν μικρότερα. Για το λόγο αυτό, οι συσκευές συγκομιδής ενέργειας μπορούν να παίξουν και τους δύο ρόλους, της πηγής ενέργειας και του αισθητήρα υψηλής ευαισθησίας. Στο Σχήμα 86 παρουσιάζεται ο σχεδιασμός της δομής ενός PENG ως αυτοτροφοδοτούμενου αισθητήρα 3D επιτάχυνσης [296]. Αυτός ο σχεδιασμός κατέστησε δυνατή τη μέτρηση της διανυσματικής επιτάχυνσης σε οποιαδήποτε κατεύθυνση. Επιπλέον, ο μεμονωμένος αισθητήρας είχε υψηλή ευαισθησία $2,405 \text{ nA s}^2/\text{m}$ και εξαιρετική σταθερότητα 97%, που παρέμεινε σταθερή μετά από 10000 κύκλους, χάρη στο μοναδικό πιεζοηλεκτρικό υλικό PVDF. Ως εφαρμογή, προσομοιώθηκε μια σύγκρουση για τη δοκιμή της επίβλεψης σύγκρουσης σε πραγματικό χρόνο, και της μετάδοσης του σήματος συναγερμού.



Σχήμα 86. Σχεδιασμός δομής και φωτογραφία του κατασκευασμένου αισθητήρα για ειδοποίηση σύγκρουσης οχημάτων [296].

Τα ελαστικά των αυτοκινήτων, ως αναλώσιμα, προσελκύουν και αυτά αρκετή προσοχή στην επίβλεψη της ασφάλειας [297-299]. Ωστόσο, οι αισθητήρες ελαστικών τροφοδοτούνται από μπαταρίες περιορισμένης διάρκειας ζωής, γεγονός που εμποδίζει την έξυπνη ανάπτυξη. Για το πρόβλημα αυτό, οι Qian κ.ά. πρότειναν ένα τριβοηλεκτρικό μηχανισμό για τη συγκομιδή της ενέργειας περιστροφής [300]. Η περιοδική μαγνητική δύναμη έκανε τα δύο μέρη του TENG να έρθουν σε επαφή και να διαχωριστούν. Έτσι, η συσκευή είχε υψηλή μέγιστη ισχύ στα 22,3 mW.

Εκτός από τα ελαστικά, οι κινητήρες είναι ζωτικής σημασίας, καθώς αποτελούν το βασικό εξάρτημα των αυτοκινήτων. Οι Zhang κ.α. παρουσίασαν έναν εξαιρετικά ευαίσθητο αισθητήρα επιτάχυνσης που βασίζεται σε ένα TENG [301]. Με το εξάρτημα της σταγόνας υγρού μετάλλου και της δικτυωμένης με νανοϊνες μεμβράνης PVDF με ηλεκτροστατική περιστροφή Σχήμα 87, η συσκευή είχε μικρό μέγεθος αλλά υψηλή τάση ανοιχτού κυκλώματος και ρεύμα βραχυκυκλώματος, φτάνοντας έως και 15,5 V και 300 nA στα 60 m/s². Αξίζει να αναφερθεί ότι οι νανοϊνες PVDF με ηλεκτροστατική περιστροφή αποδεικνύονται εξαιρετικές σε επιδόσεις τόσο με πιεζοηλεκτρισμό [302] όσο και με τριβοηλεκτρισμό [303]. Όταν εφαρμόστηκε στον κινητήρα αυτοκινήτου, ο αισθητήρας παρουσίασε εξαιρετική ευαισθησία με διαφορετικές καταστάσεις εκκίνησης, λειτουργίας και διακοπής. Επιπλέον, η δόνηση είναι πολύ συχνή σε πολλά εξαρτήματα των αυτοκινήτων. Οι Xu κ.ά. σχεδίασαν ένα TENG με δομή ελατηρίου για τη συλλογή των κραδασμών στο αυτοκίνητο [304]. Ταυτόχρονα, η συσκευή θα μπορούσε επίσης να χρησιμοποιηθεί ως αισθητήρας κραδασμών.

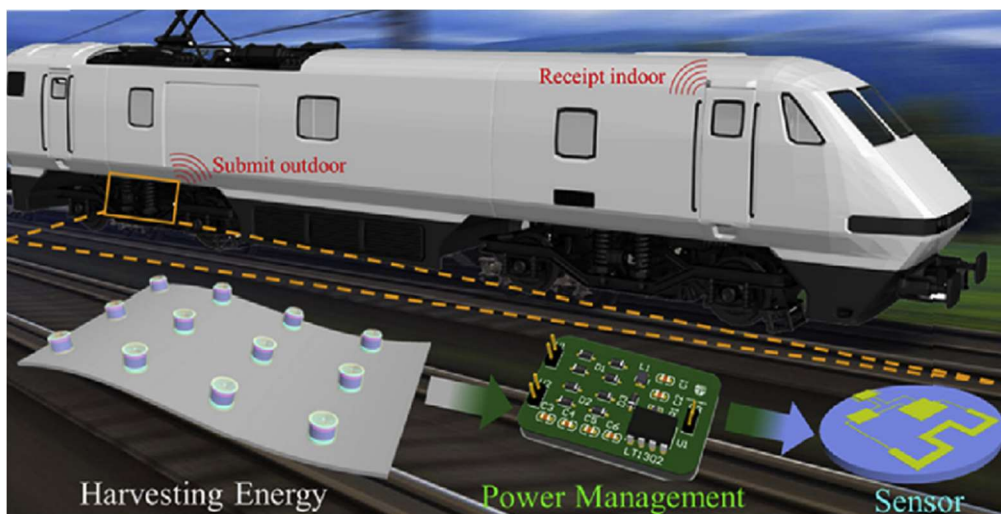


Σχήμα 87. Ο αυτοτροφοδοτούμενος αισθητήρας επιτάχυνσης χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση της διαδικασίας εκκίνησης, λειτουργίας και διακοπής του κινητήρα [301].

Ως το πιο κρίσιμο υποστηρικτικό μέρος των αυτοκινήτων, τα τακάκια φρένων παίζουν σημαντικό ρόλο στο σύστημα ασφαλείας των αυτοκινήτων. Ταυτόχρονα, η ενέργεια πέδησης είναι άφθονη ως συμπληρωματική της ενέργειας του αυτοκινήτου [305]. Οι Wen κ.α. παρουσίασαν έναν TENG το οποίο είναι ανθεκτικό στις σκληρές συνθήκες του περιβάλλοντος, το οποίο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί άμεσα ως τακάκι φρένων [306]. Κατασκευάστηκε με υβριδοποίηση μικρο-νανοσύνθετων υλικών με καλή αντοχή στη φθορά και μέσο δυναμικό συντελεστή τριβής στα ~0,69 μm με δύναμη χαμηλής τριβής, περίπου 8,1 N και θερμοκρασία δωματίου. Επίσης, η ανοχή σε υψηλές θερμοκρασίες ήταν εξαιρετική (εύρος θερμοκρασιών από -30 έως 550 °C) στην περίπτωση της εμφάνισης θερμότητας κατά την πέδηση. Όπως γίνεται αντιληπτό, οι εφαρμογές των συσκευών συγκομιδής ενέργειας για

τα αυτοκίνητα δεν περιορίζονται μόνο στα μέρη του αυτοκινήτου, αλλά αρχίζουν να δίνεται έμφαση στα παράγωγα μέρη (για παράδειγμα, στη συμπεριφορά του οδηγού). Αυτή η τάση μπορεί να επιταχύνει την έξυπνη ανάπτυξη των αυτοκινήτων.

Μια άλλη πολύ συνηθισμένη και και ζωτικής σημασίας μορφή μεταφορών είναι τα τρένα. Τα τρένα κινούνται πάνω στις ράγες, συνήθως ταχύτερα από τα αυτοκίνητα, και ως εκ τούτου, οι δονήσεις είναι πιο βίαιες και γενικές στα [307-310]. Οι Jin κ.ά. ανέφεραν μια πορώδη maglev (magnetic levitation) ναογεννήτρια (MPNG) για τη συγκομιδή της ενέργειας δόνησης της αμαξοστοιχίας για έναν ασύρματο έξυπνο αισθητήρα [311]. Η μαγνητική αιώρηση maglev, είναι ένα σύστημα μεταφοράς τρένων που χρησιμοποιεί δύο σύνολα μαγνητών: ένα σύνολο για να απωθεί και να βγάλει το τρένο εκτός τροχιάς, και ένα άλλο σύνολο για να κινεί το υπερυψωμένο τρένο μπροστά, εκμεταλλευόμενο την έλλειψη τριβής. Η σχηματική απεικόνιση φαίνεται στο Σχήμα 88. Το MPNG αποτελούνταν από μια τριβοηλεκτρική (TENG) και μια ηλεκτρομαγνητική γεννήτρια (EMG), οι οποίες μπορούσαν να αποδώσουν μέγιστη πυκνότητα ισχύος 0,34 mW/g στα 50 MΩ και 0,12 mW/g στα 700 Ω, αντίστοιχα. Η ηλεκτρική ενέργεια μπορούσε να αποθηκευτεί σε υπερπυκνωτές ή μπαταρίες ιόντων λιθίου μέσω του συστήματος διαχείρισης ισχύος. Τέλος, το MPNG αποδείχθηκε ότι λειτουργεί καλά όταν συνδέεται με έναν ασύρματο αισθητήρα θερμοκρασίας και υγρασίας. Επιπλέον, το MPNG έχοντας μικρό μέγεθος και βάρος, θα μπορούσε να τοποθετηθεί σε συστοιχίες για περισσότερη συγκομιδή ενέργειας και διαφορετικές εφαρμογές.



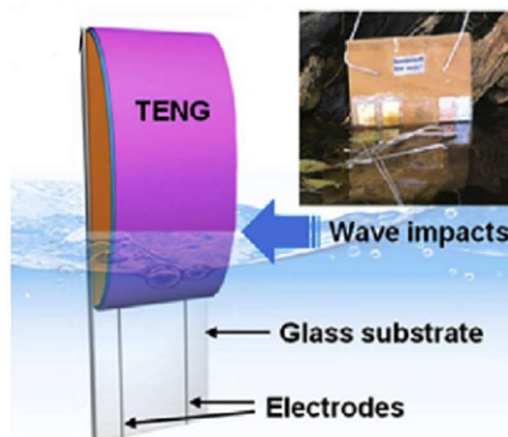
Σχήμα 88. Αυτοτροφοδοτούμενο σύστημα που περιλαμβάνει TENG, διαχείριση ισχύος και αισθητήρα για την παρακολούθηση αμαξοστοιχιών [311].

Τα ποδήλατα είναι πολύ δημοφιλή και φιλικά προς το περιβάλλον για μικρές αποστάσεις. Αλλά η έξυπνη ανάπτυξη εξακολουθεί να είναι αργή λόγω των περιορισμένων πηγών ενέργειας για τα ηλεκτρονικά των ποδηλάτων. Ευτυχώς, όταν οι άνθρωποι οδηγούν ποδήλατα, υπάρχει ενέργεια δόνησης, ενέργεια περιστροφής και αιολική ενέργεια, οι οποίες μπορούν να συλλεχθούν από ναογεννήτριες. Οι εύκαμπτες ναογεννήτριες έχουν συνήθως προσαρμοστικότητα στο σχήμα και ταιριάζουν στην καμπυλότητα των ελαστικών. Οι Ma κ.ά. παρουσίασαν μια εύκαμπτη πορώδη ναογεννήτρια (FPNG) που συνδυάζει τον σιδηροηλεκτρισμό και τον πιεζοηλεκτρισμό [312]. Με πολύ μικρές διαστάσεις, $2 \times 2 \times 0,3$ cm³, η FPNG είχε τάση ανοιχτού κυκλώματος 29 V και ρεύμα βραχυκυκλώματος 116 nA, αντίστοιχα. Όπως αποδείχτηκε, το FPNG ταίριαζε καλά στο ελαστικό του ποδηλάτου, δείχνοντας την ισχυρή προσαρμοστικότητα στο σχήμα. Όταν κυλούσε, μπορούσε να παραχθεί

ηλεκτρική ενέργεια λόγω της παραμόρφωσης του FPNG. Η μέθοδος συγκομιδής ενέργειας είναι παρόμοια με αυτήν των ελαστικών των αυτοκινήτων. Με βάση τις μελέτες, τα ποδήλατα με νανογεννήτριες έχουν μεγάλες δυνατότητες να επιβλέπουν τις δικές τους καταστάσεις και να μεταδίδουν σήματα, κάτι που αποτελεί τη βάση για την έξυπνη ανάπτυξη.

Παρόμοια με τα αυτοκίνητα και τα τρένα, τα σκάφη μεγάλη ποσότητα ενέργειας, ενώ οι μικροί κατανεμημένοι αισθητήρες τους χρειάζονται συνεχή αλλά λίγη ενέργεια. Επιπλέον, τα πλοία είναι ιδιαίτερα, επειδή το υδάτινο περιβάλλον είναι τρομερά καταστροφικό για την παροχή ενέργειας μέσω καλωδίων, αλλά ταυτόχρονα παρέχει πολλή ενέργεια. Οι Zhao κ.ά. παρουσίασαν ένα TENG για τη μετατροπή της τυχαίας ενέργειας των υδάτινων κυμάτων σε ηλεκτρική ενέργεια [313]. Τα ηλεκτρόδια συνδέθηκαν με την άνοδο και την κάθοδο μέσω επαφών p-n. Έτσι, η έξοδος ήταν συνεχές ρεύμα (DC) και όχι εναλλασσόμενο ρεύμα (AC), γεγονός που καθιστούσε περιττό τον ανορθωτή. Η επιφάνεια $100 \times 70 \text{ mm}^2$ μπορούσε να παράγει ρεύμα βραχυκυκλώματος της τάξης των $13,5 \mu\text{A}$ καθώς και μέγιστη ισχύ $1,03 \text{ mW}$ σε ύψος υδάτινου κύματος 12 cm . Διερευνώντας τη σχέση μεταξύ της εξόδου και του τύπου του υδάτινου κύματος, οι συγγραφείς διαπίστωσαν ότι το TENG μπορούσε να συλλέξει την ενέργεια από τυχαίο και δυναμικό υδάτινο κύμα με ανώμαλη στάθμη νερού πολύ αποδοτικά, και το ίδιο συνέβαινε και για τα ομαλά υδάτινα κύματα με σχεδόν επίπεδη στάθμη νερού. Τέλος, ένας πυκνωτής των $22 \mu\text{F}$ φορτίστηκε στα $5,8 \text{ V}$ μέσα σε 67 δευτερόλεπτα. Μετά την ενεργοποίηση ενός ασύρματου πομπού, η τάση έπεσε στα $1,4 \text{ V}$, και στη συνέχεια φορτίστηκε για μια άλλη εκπομπή για μόλις 53s . Το TENG αυτό μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως ένας ισχυρός και ευαίσθητος δείκτης για την ανίχνευση της στάθμης του νερού [314], ο οποίος είναι αυτοτροφοδοτούμενος, ισχυρός και ακριβής για πληθώρα εφαρμογών της θαλάσσιας βιομηχανίας.

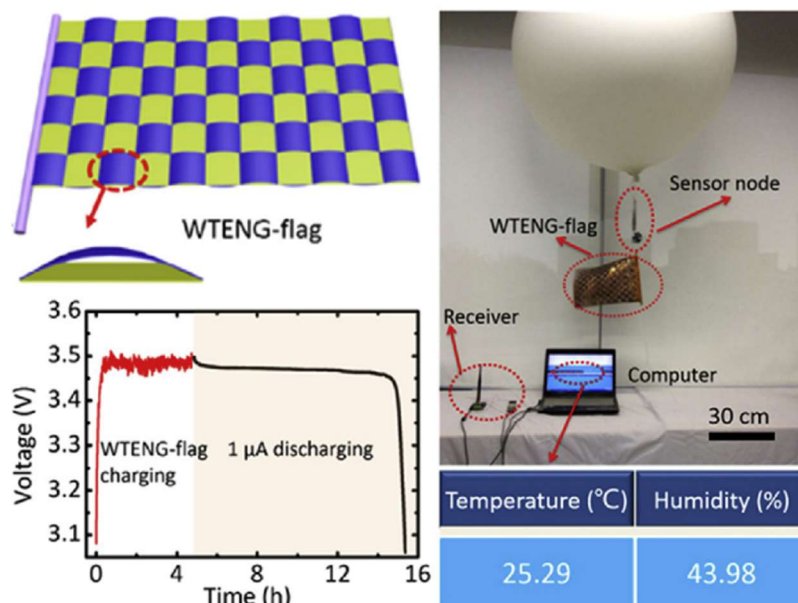
Το πολύπλοκο περιβάλλον του νερού δεν παρέχει μόνο ενέργεια, αλλά και πολλά μικρόβια. Είναι επιβλαβή για τα μέρη των σκαφών που βρίσκονται υποβρύχια, καθώς μπορούν να μπλοκάρουν τους σωλήνες και ενισχύουν ακόμη και την καταπόνηση του κινητήρα. Αντί για υλικά μόνωσης αυτών των επιφανειών για προστασία, οι Long κ.α. χρησιμοποίησαν επιφανειακή ηλεκτρική διαταραχή με TENG για να επιτύχουν το φαινόμενο του anti-biofouling [315], δηλαδή την αποφυγή της συσσώρευσης μικροοργανισμών, φυτών, φυκών ή μικρών ζώων όπου δεν είναι επιθυμητό (Σχήμα 89). Πέρα από τα μικρόβια, το νερό μπορεί εύκολα να διαβρώσει τους χάλυβες, οι οποίοι είναι τα θεμελιώδη υλικά για τα σκάφη. Οι Feng κ.α. παρουσίασαν ένα TENG με βάση το χαρτί για αυτοτροφοδοτούμενη αντιδιαβρωτική προστασία. Σε αυτόν τον μηχανισμό, το χαρτί και το PVDF λειτούργησαν ως τριβηλεκτρικά υλικά [316].



Σχήμα 89. Το υδροκίνητο σύστημα anti-biofouling με TENG στην ακτή μιας λίμνης [315].

Τα πλοία σαν οχήματα, είναι αρκετά ξεχωριστά από τα υπόλοιπα. Καθώς λειτουργούν στο υδάτινο περιβάλλον είναι τα πλέον καταλληλότερα για την αυτοτροφοδοτούμενη τεχνολογία. Η ενέργεια του νερού είναι άφθονη και μπορεί εύκολα να αξιοποιηθεί από τα TENG, τα οποία πέρα από τη συγκομιδή ενέργειας, έχουν την ικανότητα να παράγουν υψηλή τάση, παρέχοντας εξαιρετική anti-biofouling και αντιδιαβρωτική δράση συγχρόνως. Πρόκειται για μια αυτοτροφοδοτούμενη τεχνολογία με υψηλή απόδοση και χωρίς κίνδυνο, ανοίγοντας το δρόμο για την έξυπνη προστασία των οχημάτων μεταφοράς στα υδάτινα περιβάλλοντα.

Τα αεροσκάφη συνήθως κινούνται στα ανώτερα στρώματα του αέρα, όπου ο άνεμος έχει γρήγορη ταχύτητα και υψηλή σταθερότητα [317]. Η συμβατική ανεμογεννήτρια δεν είναι κατάλληλη για τη συγκομιδή αιολικής ενέργειας σε μεγάλα υψόμετρα, λόγω του μεγάλου όγκου και βάρους της και του υψηλού κόστους κατασκευής και εγκατάστασης. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος, οι Zhao κ.ά. ανέπτυξαν μια freestanding TENG τύπου σημαίας για τη συγκομιδή αιολικής ενέργειας [318]. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 90, μια μεμβράνη Kapton τοποθετείται μεταξύ δύο λωρίδων Cu και Ni με κενά μεταξύ τους, σχηματίζοντας έτσι ένα TENG διαχωρισμού-επαφής. Σε ταχύτητα ανέμου 22 m/s, η τάση ανοιχτού κυκλώματος και το ρεύμα βραχυκυκλώματος μπορούν να φτάσουν τα ~40 V και ~30 μ A, αντίστοιχα. Η πυκνότητα μέγιστης ισχύος εξόδου 135 mW/kg δοκιμάστηκε σε 6,5 M Ω και αυξήθηκε με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου. Για την τροφοδοσία των ηλεκτρονικών συσκευών, ένας πυκνωτής των 4,7 μ F φορτίστηκε στα 8,1 V από τρία TENGs παράλληλα συνδεδεμένα μεταξύ τους μέσα σε περίπου 10s, επιδεικνύοντας την ικανότητα φόρτισης.



Σχήμα 90. Το κατασκευασμένο TENG που περιλαμβάνει νικέλιο και Kapton χρησιμοποιείται για τη συγκομιδή ενέργειας σε ασύρματους κόμβους αισθητήρων [318].

Λόγω του freestanding 2D σχεδιασμού του, θα μπορεί να συλλέγει αιολική ενέργεια από οποιαδήποτε κατεύθυνση, χωρίς εμφανή διαφορά στο ρεύμα εξόδου. Τέλος, οι συγγραφείς σχεδίασαν ένα πρωτότυπο για τη συγκομιδή αιολικής ενέργειας σε μεγάλο υψόμετρο για την τροφοδοσία ενός ασύρματου κόμβου αισθητήρων. Ο ασύρματος αισθητήρας τροφοδοτήθηκε με ρεύμα και μετέδωσε σήματα στον υπολογιστή και ήταν επίσης σε θέση να μετρήσει την κατάσταση της θερμοκρασίας και της υγρασίας.

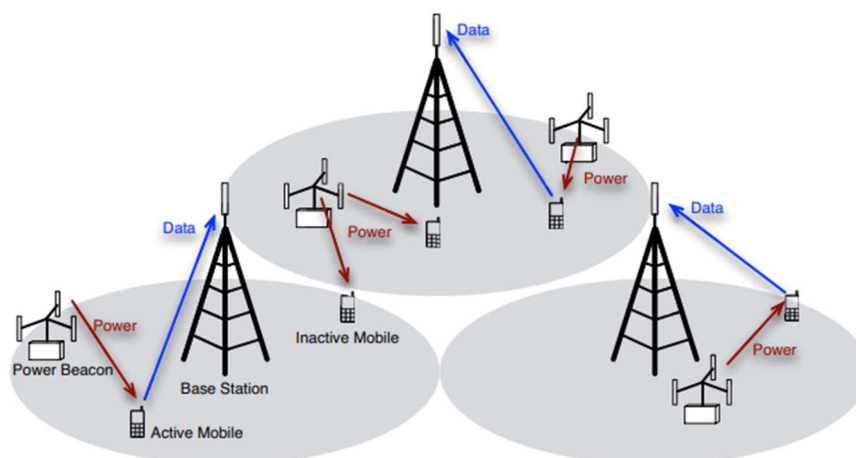
5.4 Εφαρμογές στις Επικοινωνίες

Ο τομέας της τεχνολογίας πληροφοριών και επικοινωνιών (ICT) είναι υπεύθυνος για το 2% του ανθρώπινου αποτυλώματος CO₂, με τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών μόνο, να καταναλώνουν περίπου το 0,5% του παγκόσμιου ενεργειακού αποθέματος [319]. Σε μια προσπάθεια να μειωθεί και να βελτιστοποιηθεί η κατανάλωση της ενέργειας στη βιομηχανία κυψελοειδών επικοινωνιών, το ενδιαφέρον έχει στραφεί σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως το energy harvesting.

Με βάση την ανάλυση της DOCOMO [320], το 75-80% της κατανάλωσης ενέργειας γίνεται στο επίπεδο του σταθμού βάσης (BS) στα δίκτυα 3G και LTE. Συνεπώς, η μείωση της ισχύος σε αυτό το επίπεδο είναι απαραίτητη για την ενεργειακή απόδοση του κυψελοειδούς BS.

Υπάρχουν πολλά οφέλη από τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την τροφοδοσία των κυψελοειδών BS πέρα από το ότι είναι μια πιο “πράσινη” επιλογή που δεν επιβαρύνει το περιβάλλον. Ένα από αυτά για παράδειγμα [321], είναι η χρήση των ΑΠΕ ως λύση σε περιοχές όπου δεν υπάρχει δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, όπως τα νησιά και οι έρημοι. Επιλύει επίσης το πρόβλημα για μέρη όπου είναι δύσκολο ή αδύνατο η σύνδεση με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

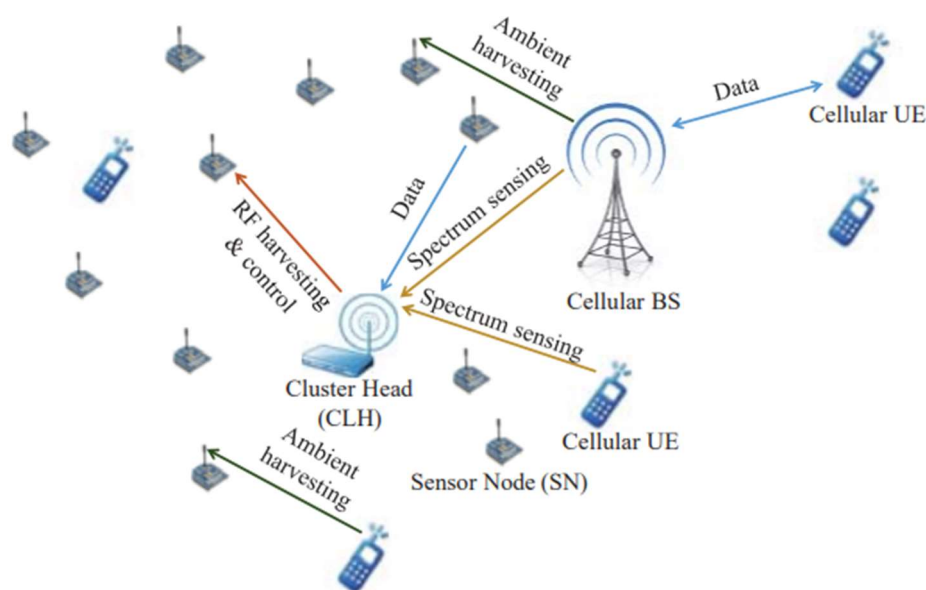
Το 2014 οι Huang κ.α. πρότειναν τη σχεδίαση ενός υβριδικού δικτύου επικοινωνιών, μέσω του οποίου οι χρήστες του θα μπορούσαν να επαναφορτίσουν τις κινητές συσκευές τους, εξαλείφοντας την ανάγκη για καλώδια ρεύματος και φορτιστές. Για την υλοποίηση αυτού του έργου, προτείνουν μια νέα αρχιτεκτονική δικτύου όπως φαίνεται στο Σχήμα 91 όπου σταθμοί που ονομάζονται power beacons (PBs) αναπτύσσονται σε ένα υπάρχον κυψελωτό δίκτυο για την επαναφόρτιση κινητών συσκευών και αισθητήρων μέσω ακτινοβολίας μικροκυμάτων γνωστής ως microwave power transfer (MPT). Οι προκλήσεις για την υλοποίηση της ασύρματης επαναφόρτισης μέσω MPT όμως είναι σημαντικές, καθώς η πρώτη αφορά τη δημιουργία συνδέσεων line of sight (LOS) από τα PBs προς τα κινητά για να καταστεί δυνατή η μεταφορά ισχύος στον ελεύθερο χώρο, η δεύτερη είναι η δημιουργία ισχυρών ενεργειακών ακτίνων στα PBs για την αντιμετώπιση των απωλειών διάδοσης και τρίτη, η μείωση της κατανάλωσης ισχύος των κινητών. Αυτές οι προκλήσεις όμως, μπορούν να αντιμετωπιστούν με την πρόοδο των τριών τεχνολογιών, αντίστοιχα [322].



Σχήμα 91. Υβριδικό δίκτυο που επικαλύπτει ένα κυψελωτό δίκτυο με τυχαία τοποθετημένα power beacons που φορτίζουν ασύρματα τα κινητά τηλέφωνα μέσω ακτινοβολίας μικροκυμάτων [322].

Μια άλλη εφαρμογή της συγκομιδής ενέργειας στα κυψελωτά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας

παρουσιάστηκε από τους Ergen κ.α. Οι συγγραφείς προτείνουν ένα ενεργειακά και φασματικά αποδοτικό δίκτυο IoT για συστήματα 5G, όπου το φάσμα μοιράζεται με το κυψελωτό σύστημα για αποδοτικότητα φάσματος, και γίνεται χρήση της συγκομιδής ενέργειας και της μεταφοράς ενέργειας για ενεργειακή αποδοτικότητα. Το δίκτυο IoT, το οποίο αποτελείται από κόμβους αισθητήρων, και από έναν cluster head με μια σταθερή πηγή ενέργειας, επαναχρησιμοποιεί μέρος της κυψελωτής μπάντας κάθε φορά που το κυψελωτό δίκτυο δεν τη χρησιμοποιεί. Το cluster head εκτελεί ανίχνευση φάσματος, τυχαίο προγραμματισμό των κόμβων αισθητήρων και προγραμματίζει κάποιο χρόνο αδράνειας για τη μεταφορά ενέργειας. Οι κόμβοι αισθητήρων συλλέγουν ενέργεια RF από την κυκλοφορία του κυψελωτού δικτύου τηλεφωνίας και από τη μεταφερόμενη ενέργεια από τον cluster head. Εφόσον οι κόμβοι αισθητήρων διαθέτουν επαρκή ενέργεια, μεταδίδουν τα συλλεχθέντα αισθητηριακά δεδομένα την χρονική στιγμή που έχει ορίσει ο cluster head. Η αλληλεπίδραση μεταξύ του κυψελωτού δικτύου και του δικτύου IoT εισάγει συμβιβασμούς μεταξύ της διαθεσιμότητας φάσματος, της διαθεσιμότητας ενέργειας, των πληροφοριών και της μεταφοράς ενέργειας. Η εργασία αυτή έδειξε ότι για το ίδιο επίπεδο κυψελωτής κίνησης, όσο αυξάνεται ο αριθμός των κόμβων αισθητήρων στο δίκτυο, το utilization του IoT δικτύου αυξάνεται με αποτέλεσμα να προκύπτει multi-user gain, χάρη στην broadcasting φύση της μεταφοράς ενέργειας. Τα αποτελέσματα προσφέρουν πληροφορίες σχετικά με διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας και αποκαλύπτουν τα είδη των εφαρμογών IoT που μπορεί να είναι εφικτά με τέτοια δίκτυα [323].



Σχήμα 92. Προτεινόμενος σχεδιασμός Δικτύου IoT με διαμοιρασμό φάσματος, συγκομιδή και ασύρματη μεταφορά ενέργειας [323].

Κεφάλαιο 8: Επίλογος

8.1 Συμπεράσματα

Μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις που θα πρέπει να αντιμετωπίσουμε στο σύντομο μέλλον, είναι η βιωσιμότητα. Οι ασύρματες συσκευές που χρησιμοποιούμε στην καθημερινότητα μας πληθαίνουν κάνοντας πιο περίπλοκη την παροχή ενέργειας σε αυτές. Έχοντας πλέον εισέλθει στην εποχή του IoT, οι ασύρματοι αισθητήρες και οι συσκευές που θα χρησιμοποιούμε θα είναι τόσοι πολλοί που θα είναι αδύνατον να τροφοδοτούνται μόνο με μπαταρίες. Οι μπαταρίες δεν αποτελούν βιώσιμη ενεργειακή λύση για τις ασύρματες συσκευές καθώς είτε χρειάζονται συχνά αντικατάσταση είτε επαναφόρτιση και το μέγεθος τους συχνά είναι πολύ μεγάλο, συγκριτικά με τις συσκευές στις οποίες χρησιμοποιούνται.

Η τελευταία δεκαετία, για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, η προσοχή στράφηκε στην συγκομιδή ενέργειας και σαν αποτέλεσμα υπήρξαν ραγδαίες εξελίξεις σε αυτή την τεχνολογία, και αναπτύχθηκαν πολλές συσκευές που χρησιμοποιούσαν το energy harvesting είτε για να επαναφορτίζουν τις μπαταρίες τους, είτε για να είναι εντελώς αυτόνομες και αυτοτροφοδοτούμενες.

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία, μελετήθηκαν αναλυτικά οι διάφοροι τρόποι με τους οποίους επιτυγχάνεται η συγκομιδή της ενέργειας. Αναφέρθηκαν διάφορες τοπολογίες καθώς και οι αρχές λειτουργίας των μηχανισμών αυτών. Μελετήσαμε μηχανισμούς που αξιοποιούν την ενέργεια του ανέμου, και πως μπορούμε να ξεφύγουμε από την κλασική εικόνα την ανεμογεννήτριας με του έλικες, και να αντλήσουμε ενέργεια με αεροελαστικές γεννήτριες που αποτελούν πιο χρηστική και οικονομική λύση όταν μιλάμε για μικρής κλίμακας ισχύ.

Μελετήσαμε για το πως μπορούμε να αξιοποιήσουμε ιδιότητες υλικών που έχουν ανακαλυφθεί εδώ και χιλιάδες χρόνια, όπως ο πυροηλεκτρισμός, και να αντλήσουμε ενέργεια από τη θερμότητα του περιβάλλοντος ή των σωμάτων.

Αναλύθηκαν επίσης μηχανισμοί για τη συγκομιδή ενέργειας από δονήσεις και κίνηση, όπου διευρύνθηκαν οι μέθοδοι που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο της αιολικής ενέργειας, και μελετήσαμε παραπάνω το φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού, του ηλεκτροστατισμού και του ηλεκτρομαγνητισμού.

Παρουσιάστηκαν τοπολογίες που συνδυάζουν τις μεθόδους που μελετήθηκαν προηγουμένως και απέδειξαν ότι οι υβριδική συγκομιδή ενέργειας ίσως είναι απαραίτητη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι μορφές ενέργειας που βρίσκονται στο περιβάλλον, δεν είναι διαθέσιμες κάθε ώρα της ημέρας (π.χ. ηλιακό φως). Έτσι συνδυάζοντας δύο ή παραπάνω μηχανισμούς συγκομιδής ενέργειας για την τροφοδοσία ενός συστήματος, επιτυγχάνεται και μεγαλύτερη απόδοση αλλά και μεγαλύτερη αξιοπιστία στο σύστημα.

Δεν θα μπορούσαμε να μιλήσουμε για αυτονομία ασύρματων συσκευών μέσω της συγκομιδής ενέργειας, χωρίς να μιλήσουμε και για την ασύρματη μεταφορά ενέργειας. Αυτή η τεχνολογία έχει κερδίσει πολύ το ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια, και είναι αδιαμφισβήτητο γεγονός ότι αποτελεί το μέλλον για τη φόρτιση συσκευών και όχι μόνο. Μπορεί να συνδυαστεί και με τη συγκομιδή RF ενέργειας, έτσι ώστε τα συστήματα μεταφοράς RF ενέργειας να μπορούν να τροφοδοτούνται κιόλας. Είναι μια εξαιρετικά χρήσιμη τεχνολογία και σε τομείς όπως η ιατρική καθώς αλλάζει τα δεδομένα στην τεχνολογία των εμφυτευμάτων, που μέχρι στιγμής χρειάζονταν αντικατάσταση των μπαταριών τους ανά κάποια χρόνια.

Οι εφαρμογές της συγκομιδής ενέργειας έχουν αρχίσει να αυξάνονται καθώς αναπτύσσεται σαν τεχνολογία ολοένα και παραπάνω. Είναι πολύτιμη σε τομείς όπως η υγεία που αναφέραμε

παραπάνω, αλλά εξίσου σημαντική είναι και σε τομείς όπως οι υποδομές, οι μεταφορές και οι επικοινωνίες.

8.2 Μελλοντικοί Σχεδιασμοί

Κλείνοντας, στο κομμάτι αυτό παρατίθενται κάποιες πληροφορίες και σκέψεις σχετικά με τις μελλοντικές προοπτικές για την συγκομιδή ενέργειας και τις αναδυόμενες εφαρμογές στην πολιτική και δομική μηχανική, την ιατρική και όχι μόνο.

Η περιβάλλουσα ενέργεια αποτελείται από σημαντικές πληροφορίες που περιγράφουν το περιβάλλον. Συλλέγοντας αυτές τις πληροφορίες και αναλύοντας τις, οι συσκευές συγκομιδής ενέργειας, σε συνδυασμό με τη μηχανική μάθηση θα μπορούσαν να αυτά τα δεδομένα για να προβλέψουν το μέλλον ενός περιβάλλοντος.

Σε παρόμοια ιδέα βασίζεται και το μοντέλο των Smart Cities. Αισθητήρες που τροφοδοτούνται μέσω της συγκομιδής ενέργειας χρησιμοποιούνται στις υποδομές των πόλεων για την αύξηση της βιωσιμότητας της, καθώς και της ασφάλειας και της αποδοτικότητας της. Οι πληροφορίες που συλλέγουν αυτοί οι ασύρματοι αισθητήρες μέσω της συγκομιδής ενέργειας, μεταφέρονται μέσω του δικτύου IoT και έτσι παρακολουθούνται όλες οι λειτουργίες της πόλης, και βελτιώνεται ή επιδιορθώνεται όποιο πρόβλημα προκύψει.

Η εξέλιξη στην τεχνολογία της συγκομιδής ενέργειας θα επηρεάσει και τον τομέα της ιατρικής καθώς, σε συνδυασμό με την τεχνολογία της τεχνητής νοημοσύνης, θα μπορούσε να αναπτυχθεί μια εμφυτεύσιμη συσκευή που παρακολουθεί τις λειτουργίες του οργανισμού και επεμβαίνει όταν χρειάζεται σε ορισμένα γεγονότα. Μια τέτοια συσκευή θα μπορούσε να χορηγηθεί σε ασθενείς με χρόνιες ασθένειες με σκοπό να μειώσει τα ιατρικά έξοδα που θα είχε κανονικά η συστηματική παρακολούθηση από γιατρούς. Θα μπορούσε ακόμα και να χορηγηθεί και προληπτικά σε υγιή άτομα, έτσι ώστε να καταγράφονται τυχόν συμπτώματα που μπορεί να εμφανιστούν και να διαγνωστεί εάν πάσχει από κάτι πιο γρήγορα και έχοντας στην διάθεση του ο ιατρός περισσότερα δεδομένα για τον ασθενή.

Πέρα από τις εφαρμογές που αναφέρθηκαν, είναι σίγουρο πως στο μέλλον η συγκομιδή ενέργειας θα εξαπλωθεί σε περισσότερους τομείς, καθώς θα ωριμάζει σαν τεχνολογία. Είναι σημαντικό να οικειοποιηθούμε σε αυτή την τεχνολογία καθώς δύναται να δώσει λύσεις σε πολλά προβλήματα που αφορούν την παροχή ενέργειας, και θα κάνει πιο προσβάσιμο και οικονομικό σε όλους έναν πιο βιώσιμο τρόπο ζωής.

Αναφορές

- [1] “What is energy harvesting?,” Onio.com. [Online]. Available: <https://www.onio.com/article/what-is-energy-harvesting.html>. [Accessed: 04-Feb-2022].
- [2] J. Colomer-Farrarons, P. Miribel-Catala, A. Saiz-Vela, and J. Samitier, “A multiharvested self-powered system in a low-voltage low-power technology,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 9, pp. 4250–4263, 2011.
- [3] T. E. Starner, “Powerful change. 1. Batteries and possible alternatives for the mobile market,” *IEEE Pervasive Comput.*, vol. 2, no. 4, pp. 86–88, 2003.
- [4] A. Jansen and S. Van Leeuwen, “Design of a fuel cell powered radio, a feasibility study into alternative power sources for portable products,” in *Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment (Cat. No.00CH37082)*, 2002.
- [5] L. Mateu and F. Moll, “Review of energy harvesting techniques and applications for microelectronics (Keynote Address),” in *VLSI Circuits and Systems II*, 2005.
- [6] T. Starner, “Human-powered wearable computing,” *IBM Syst. J.*, vol. 35, no. 3.4, pp. 618–629, 1996.
- [7] P. M. Deely, *Electrolytic capacitors*. South Plainfield, New Jersey: The Cornell-Dubilier Electric Corp, 1938.
- [8] M. S. Halper and J. C. Ellenbogen, “Supercapacitors: A Brief Overview,” 2013.
- [9] J. R. Farmer, “A comparison of power harvesting techniques and related energy storage issues,” Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 2007.
- [10] ad-na, “What is Energy Harvesting? What is Energy Harvesting Challenges?,” *ADNA Magazine*, 17-Jun-2021. [Online]. Available: https://www.ad-na.com/magazine_en/archives/437. [Accessed: 05-Feb-2022].
- [11] G. Gautschi, *Piezoelectric Sensorics*. New York, NY: Springer, 2014.
- [12] F. J. Blatt, P. A. Schroeder, C. L. Foiles, and D. Greig, *Thermoelectric Power of Metals*. Boston, MA: Springer US, 1976.
- [13] D. M. Rowe, Ed., *CRC Handbook of Thermoelectrics*. Boca Raton, FL: CRC Press, 1995.
- [14] O. Mah, “Fundamentals of Photovoltaic Materials,” *Silo.tips*, 1998. [Online]. Available: <https://silo.tips/download/fundamentals-of-photovoltaic-materials>. [Accessed: 05-Feb-2022].
- [15] J. M. Damaschke, “Design of a low-input-voltage converter for thermoelectric generator,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 33, no. 5, pp. 1203–1207, 1997.
- [16] R. L. Myers, *The basics of physics*. Westport, CT: Greenwood Press, 2005.
- [17] R. S. Elliott, *Electromagnetics: History, Theory, and Applications*. Piscataway, NJ: IEEE Publications, 1999.
- [18] F. Mendonca and J. Azevedo, “Design and power production of small-scale wind turbines,” in *2017 International Conference in Energy and Sustainability in Small Developing Economies (ES2DE)*, 2017, pp. 1–6.
- [19] S. Nabavi and L. Zhang, “Portable wind energy harvesters for low-power applications: A survey,” *Sensors (Basel)*, vol. 16, no. 7, p. 1101, 2016.
- [20] D. H. Didane, N. Rosly, M. F. Zulkafli, and S. S. Shamsudin, “Performance evaluation of a novel vertical axis wind turbine with coaxial contra-rotating concept,” *Renew. Energy*, vol. 115, pp. 353–361, 2018.
- [21] Y. Zhang, J. Zhao, B. Grabrick, B. Jacobson, A. Nelson, and J. Otte, “Dynamic response of three floaters supporting vertical axis wind turbines due to wind excitation,” *J. Fluids Struct.*, vol. 80, pp. 316–331, 2018.
- [22] C.-J. Bai and W.-C. Wang, “Review of computational and experimental approaches to analysis of aerodynamic performance in horizontal-axis wind turbines (HAWTs),” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 63, pp. 506–519, 2016.
- [23] A. Abdelkefi, “Aeroelastic energy harvesting: A review,” *Int. J. Eng. Sci.*, vol. 100, pp. 112–135, 2016.
- [24] A. Deivasigamani, J. M. McCarthy, S. John, S. Watkins, P. Trivailo, and F. Coman, “Flutter of cantilevered interconnected beams with variable hinge positions,” *J. Fluids Struct.*, vol. 38, pp. 223–237, 2013.
- [25] X. Fu, T. Bu, C. Li, G. Liu, and C. Zhang, “Overview of micro/nano-wind energy harvesters and sensors,” *Nanoscale*, vol. 12, no. 47, pp. 23929–23944, 2020.
- [26] D. Zhu and S. Beeby, “Kinetic energy harvesting,” in *Energy Harvesting Systems*, New York, NY: Springer New York, 2011, pp. 1–77.
- [27] L. B. Zhang, H. L. Dai, A. Abdelkefi, S. X. Lin, and L. Wang, “Theoretical modeling, wind tunnel measurements, and realistic environment testing of galloping-based electromagnetic energy harvesters,” *Appl. Energy*, vol. 254, no. 113737, p. 113737, 2019.
- [28] M. F. Daqaq et al., “Micropower generation using cross-flow instabilities: A review of the literature and its implications,” *J. Vib. Acoust.*, vol. 141, no. 3, p. 030801, 2019.
- [29] U. Javed and A. Abdelkefi, “Characteristics and comparative analysis of piezoelectric-electromagnetic energy harvesters from vortex-induced oscillations,” *Nonlinear Dyn.*, vol. 95, no. 4, pp. 3309–3333, 2019.
- [30] H. D. Le and S.-D. Kwon, “An electromagnetic galloping energy harvester with double magnet design,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 115, no. 13, p. 133901, 2019.
- [31] Z. Yang, S. Zhou, J. Zu, and D. Inman, “High-performance piezoelectric energy harvesters and their applications,” *Joule*, vol. 2, no. 4, pp. 642–697, 2018.
- [32] H. S. Kim, J.-H. Kim, and J. Kim, “A review of piezoelectric energy harvesting based on vibration,” *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 12, no. 6, pp. 1129–1141, 2011.
- [33] S. Li, J. Yuan, and H. Lipson, “Ambient wind energy harvesting using cross-flow fluttering,” *J. Appl. Phys.*, vol. 109, no. 2, p. 026104, 2011.
- [34] X. Gao, W.-H. Shih, and W. Y. Shih, “Flow energy harvesting using piezoelectric cantilevers with cylindrical extension,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 3, pp. 1116–1118, 2013.
- [35] S.-D. Kwon, “A T-shaped piezoelectric cantilever for fluid energy harvesting,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 97, no. 16, p. 164102, 2010.
- [36] L. Tang and M. P. Pai, “On the instability and the post-critical behaviour of two-dimensional cantilevered flexible plates in axial flow,” *J. Sound Vib.*, vol. 305, no. 1–2, pp. 97–115, 2007.
- [37] W. Wang, X. He, X. Wang, M. Wang, and K. Xue, “A bioinspired structure modification of piezoelectric wind energy harvester based on the prototype of leaf veins,” *Sens. Actuators A Phys.*, vol. 279, pp. 467–473, 2018.
- [38] L. Zhao, L. Tang, and Y. Yang, “Comparison of modeling methods and parametric study for a piezoelectric wind energy harvester,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 22, no. 12, p. 125003, 2013.
- [39] Z. Zhou, W. Qin, P. Zhu, W. Du, W. Deng, and J. Pan, “Scavenging wind energy by a dynamic-stable flutter energy harvester with rectangular wing,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 114, no. 24, p. 243902, 2019.
- [40] S. Priya, “Modeling of electric energy harvesting using piezoelectric windmill,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 87, no. 18, p. 184101, 2005.
- [41] C.-T. Chen, R. A. Islam, and S. Priya, “Electric energy generator,” *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 53, no. 3, pp. 656–661, 2006.
- [42] R. Myers, M. Vickers, H. Kim, and S. Priya, “Small scale windmill,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 90, no. 5, p. 054106, 2007.

- [43] N. Rezaei, A. Tabesh, R. Dehghani, and A. Aghili, "An efficient piezoelectric windmill topology for energy harvesting from low speed air flows," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, pp. 1–1, 2014.
- [44] S. Bressers, D. Avirovik, M. Lallart, D. J. Inman, and S. Priya, "Contact-less wind turbine utilizing piezoelectric bimorphs with magnetic actuation," in *Structural Dynamics, Volume 3*, New York, NY: Springer New York, 2011, pp. 233–243.
- [45] R. A. Kishore, D. Vučković, and S. Priya, "Ultra-low wind speed piezoelectric windmill," *Ferroelectrics*, vol. 460, no. 1, pp. 98–107, 2014.
- [46] F. Wang and O. Hansen, "Electrostatic energy harvesting device with out-of-the-plane gap closing scheme," *Sens. Actuators A Phys.*, vol. 211, pp. 131–137, 2014.
- [47] S. Boisseau, G. Despesse, and B. Ahmed, "Electrostatic conversion for vibration energy harvesting," in *Small-Scale Energy Harvesting, InTech*, 2012.
- [48] P. Kotrappa, "Long term stability of electrets used in electret ion chambers," *J. Electrostat.*, vol. 66, no. 7–8, pp. 407–409, 2008.
- [49] R. Kressmann, G. M. Sessler, and P. Gunther, "Space-charge electrets," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 3, no. 5, pp. 607–623, 1996.
- [50] P. Gunther, H. Ding, and R. Gerhard-Mulhaupt, "Electret properties of spin-coated Teflon-AF films," in *Proceedings of IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena - (CEIDP '93)*, 2002.
- [51] Sessler, G. M. Sessler, and S. S. G. M. *Electrets 3rd Ed. Vol 1. Electrostatic Applications*, 2000.
- [52] P. Gunther, "Charging, long-term stability and TSD measurements of SiO₂ electrets," *Transactions on Electrical Insulation*, vol. 24, no. 3, pp. 439–442, 1989.
- [53] V. Eonov, P. Fiorini, and C. Van Hoof, "Stabilization of positive charge in SiO₂/Si₃N₄ electrets," *IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation*, vol. 13, no. 5, pp. 1049–1056, 2006.
- [54] Y. Sakane, Y. Suzuki, and N. Kasagi, "The development of a high-performance perfluorinated polymer electret and its application to micro power generation," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 18, no. 10, p. 104011, 2008.
- [55] D. Rychkov and R. Gerhard, "Stabilization of positive charge on polytetrafluoroethylene electret films treated with titanium-tetrachloride vapor," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 98, no. 12, p. 122901, 2011.
- [56] R. Schwödiauer, G. S. Neugschwandtner, S. Bauer-Gogonea, S. Bauer, and T. Rosenmayer, "Dielectric and electret properties of nanoemulsion spin-on polytetrafluoroethylene films," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 76, no. 18, pp. 2612–2614, 2000.
- [57] K. Ashiwagi, K. Okano, Y. Morizawa, and Y. Suzuki, "Nano-cluster-enhanced Highperformance Perfluoro-polymer Electrets for Micro Power Generation," *Proc. PowerMEMS*, vol. 2010, pp. 169–172.
- [58] K. Ashiwagi et al., "Nano-cluster-enhanced high-performance perfluoro-polymer electrets for energy harvesting," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 21, no. 12, p. 125016, 2011.
- [59] M. Perez, S. Boisseau, P. Gasnier, J. Willemin, and J. L. Reboud, "An electret-based aeroelastic flutter energy harvester," *Smart Mater. Struct.*, vol. 24, no. 3, p. 035004, 2015.
- [60] M. Perez, S. Boisseau, P. Gasnier, J. Willemin, M. Geisler, and J. L. Reboud, "A cm scale electret-based electrostatic wind turbine for low-speed energy harvesting applications," *Smart Mater. Struct.*, vol. 25, no. 4, p. 045015, 2016.
- [61] F.-R. Fan, Z.-Q. Tian, and Z. Lin Wang, "Flexible triboelectric generator," *Nano Energy*, vol. 1, no. 2, pp. 328–334, 2012.
- [62] Z. L. Wang, "Triboelectric nanogenerators as new energy technology for self-powered systems and as active mechanical and chemical sensors," *ACS Nano*, vol. 7, no. 11, pp. 9533–9557, 2013.
- [63] Z. L. Wang, J. Chen, and L. Lin, "Progress in triboelectric nanogenerators as a new energy technology and self-powered sensors," *Energy Environ. Sci.*, vol. 8, no. 8, pp. 2250–2282, 2015.
- [64] Y. Yang et al., "Triboelectric nanogenerator for harvesting wind energy and as self-powered wind vector sensor system," *ACS Nano*, vol. 7, no. 10, pp. 9461–9468, 2013.
- [65] T. Ackermann, "Wind energy technology and current status: a review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 4, no. 4, pp. 315–374, 2000.
- [66] S. Wang, X. Wang, Z. L. Wang, and Y. Yang, "Efficient scavenging of solar and wind energies in a smart city," *ACS Nano*, vol. 10, no. 6, pp. 5696–5700, 2016.
- [67] J. Tian, X. Chen, and Z. L. Wang, "Environmental energy harvesting based on triboelectric nanogenerators," *Nanotechnology*, vol. 31, no. 24, p. 242001, 2020.
- [68] G. Zhu et al., "Triboelectric-generator-driven pulse electrodeposition for micropatterning," *Nano Lett.*, vol. 12, no. 9, pp. 4960–4965, 2012.
- [69] S. Wang, L. Lin, and Z. L. Wang, "Nanoscale triboelectric-effect-enabled energy conversion for sustainably powering portable electronics," *Nano Lett.*, vol. 12, no. 12, pp. 6339–6346, 2012.
- [70] S. Wang, L. Lin, Y. Xie, Q. Jing, S. Niu, and Z. L. Wang, "Sliding-triboelectric nanogenerators based on in-plane charge-separation mechanism," *Nano Lett.*, vol. 13, no. 5, pp. 2226–2233, 2013.
- [71] G. Zhu et al., "Linear-grating triboelectric generator based on sliding electrification," *Nano Lett.*, vol. 13, no. 5, pp. 2282–2289, 2013.
- [72] Y. Yang, H. Zhang, and Z. L. Wang, "Direct-current triboelectric generator," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 24, no. 24, pp. 3745–3750, 2014.
- [73] Y. Yang et al., "Single-electrode-based sliding triboelectric nanogenerator for self-powered displacement vector sensor system," *ACS Nano*, vol. 7, no. 8, pp. 7342–7351, 2013.
- [74] S. Niu et al., "Theoretical investigation and structural optimization of single-electrode triboelectric nanogenerators," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 24, no. 22, pp. 3332–3340, 2014.
- [75] T. Jiang, X. Chen, C. B. Han, W. Tang, and Z. L. Wang, "Theoretical study of rotary freestanding triboelectric nanogenerators," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 25, no. 19, pp. 2928–2938, 2015.
- [76] Z. L. Wang and A. C. Wang, "On the origin of contact-electrification," *Mater. Today (Kidlington)*, vol. 30, pp. 34–51, 2019.
- [77] Z. Wen et al., "Blow-driven triboelectric nanogenerator as an active alcohol breath analyzer," *Nano Energy*, vol. 16, pp. 38–46, 2015.
- [78] Z. Qian, C. B. Han, T. Jiang, and Z. L. Wang, "Robust thin films-based triboelectric nanogenerator arrays for harvesting bidirectional wind energy," *Adv. Energy Mater.*, vol. 6, no. 5, p. 1501799, 2016.
- [79] P. Wang et al., "An ultra-low-friction triboelectric-electromagnetic hybrid nanogenerator for rotation energy harvesting and self-powered wind speed sensor," *ACS Nano*, vol. 12, no. 9, pp. 9433–9440, 2018.
- [80] M. Bi et al., "Optimization of structural parameters for rotary freestanding-electret generators and wind energy harvesting," *Nano Energy*, vol. 75, no. 104968, p. 104968, 2020.
- [81] R. A. Kishore and S. Priya, "A review on low-grade thermal energy harvesting: Materials, methods and devices," *Materials (Basel)*, vol. 11, no. 8, p. 1433, 2018.
- [82] I. Johnson, W. T. Choate, and A. Davidson, "Waste heat recovery. Technology and opportunities in U.s. industry," *Office of Scientific and Technical Information (OSTI)*, 2008.
- [83] C.-T. Hsu, G.-Y. Huang, H.-S. Chu, B. Yu, and D.-J. Yao, "An effective Seebeck coefficient obtained by experimental results of a thermoelectric generator module," *Appl. Energy*, vol. 88, no. 12, pp. 5173–5179, 2011.
- [84] J. Goldsmid, *The physics of thermoelectric energy conversion*. San Rafael, CA: Morgan & Claypool, 2017.
- [85] G. S. Nolas, J. Sharp, and J. Goldsmid, *Thermoelectrics: Basic principles and new materials developments*. Berlin, Germany: Springer, 2010.

- [86] S.-M. Choi et al., "A resistance ratio analysis for CoSb₃-based thermoelectric unicouples," *J. Electron. Mater.*, vol. 41, no. 6, pp. 1004–1010, 2012.
- [87] K. T. Wojciechowski, R. Zybala, and R. Mania, "High temperature CoSb₃-Cu junctions," *Microelectron. Reliab.*, vol. 51, no. 7, pp. 1198–1202, 2011.
- [88] S.-M. Choi, J.-K. Lee, W.-S. Seo, H.-L. Lee, and I.-H. Kim, "Thermoelectric Properties of the Co-doped n-type CoSb₃ Compound," *J. Korean Phys. Soc.*, vol. 57, no. 4(1), pp. 1010–1014, 2010.
- [89] B. Song et al., "The effects of diffusion barrier layers on the microstructural and electrical properties in CoSb₃ thermoelectric modules," *J. Alloys Compd.*, vol. 617, pp. 160–162, 2014.
- [90] "Thermoelectric Energy Generation Takes Flight for Aircraft and Spacecraft Monitoring," *Digikey.co.nz*, 23-Apr-2014. [Online]. Available: <https://www.digikey.co.nz/en/articles/thermoelectric-energy-generation-takes-flight-for-aircraft-and-spacecraft-monitoring>. [Accessed: 07-Feb-2022].
- [91] R. Anant Kishore, P. Kumar, M. Sanghadasa, and S. Priya, "Taguchi optimization of bismuth-telluride based thermoelectric cooler," *J. Appl. Phys.*, vol. 122, no. 2, p. 025109, 2017.
- [92] M. Al Musleh, E. Topriska, and D. Jenkins, "Thermoelectric Modules Testing for Sustainable Buildings Applications," in *Proceedings of SWC2017/SHC2017*, 2017.
- [93] "BMW provides an update on waste heat recovery projects; Turbosteamer and the Thermoelectric Generator," *Green Car Congress*. [Online]. Available: <https://www.greencarcongress.com/2011/08/bmwthermal-20110830.html>. [Accessed: 07-Feb-2022].
- [94] S. Lang, "Pyroelectricity: From ancient curiosity to modern imaging tool," *Phys. Today*, vol. 58, pp. 31–36, 2005.
- [95] G. Donnay, "Structural mechanism of pyroelectricity in tourmaline," *Acta Crystallogr. A*, vol. 33, no. 6, pp. 927–932, 1977.
- [96] K. D. Hawkins, I. D. R. Mackinnon, and H. Schneeberger, "Influence of chemistry on the pyroelectric effect in tourmaline," *Am. Mineral.*, vol. 80, no. 5–6, pp. 491–501, 1995.
- [97] M. S. Shur, A. D. Bykhovski, and R. Gaska, "Pyroelectric and piezoelectric properties of GaN-based materials," *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, vol. 537, no. G1.6, 1998.
- [98] J. Zhang and C. Wang, "Size-dependent pyroelectric properties of gallium nitride nanowires," *J. Appl. Phys.*, vol. 119, no. 14, p. 145102, 2016.
- [99] S. R. Hunter, N. V. Lavrik, S. Mostafa, S. Rajic, and P. G. Datskos, "Review of pyroelectric thermal energy harvesting and new MEMS-based resonant energy conversion techniques," in *Energy Harvesting and Storage: Materials, Devices, and Applications III*, 2012.
- [100] D. Guyomar and G. Sebald, "Pyroelectric/electrocaloric energy scavenging and cooling capabilities in ferroelectric materials," *Int. j. appl. electromagn. mech.*, vol. 31, no. 1, pp. 41–46, 2009.
- [101] C. R. Bowen, J. Taylor, E. LeBoulbar, D. Zabeck, A. Chauhan, and R. Vaish, "Pyroelectric materials and devices for energy harvesting applications," *Energy Environ. Sci.*, vol. 7, no. 12, pp. 3836–3856, 2014.
- [102] A. Cuadras, M. Gasulla, and V. Ferrari, "Thermal energy harvesting through pyroelectricity," *Sens. Actuators A Phys.*, vol. 158, no. 1, pp. 132–139, 2010.
- [103] R. W. Whatmore, "Pyroelectric devices and materials," *Rep. Prog. Phys.*, vol. 49, no. 12, pp. 1335–1386, 1986.
- [104] P. Capper and C. T. Elliott, Eds., *Infrared detectors and emitters: Materials and devices*. Boston, MA: Springer US, 2001.
- [105] X. Li, S.-G. Lu, X.-Z. Chen, H. Gu, X.-S. Qian, and Q. M. Zhang, "Pyroelectric and electrocaloric materials," *J. Mater. Chem. C Mater. Opt. Electron. Devices*, vol. 1, no. 1, pp. 23–37, 2012.
- [106] J. Cooper, "A fast-response pyroelectric thermal detector," *J. Sci. Instrum.*, vol. 39, no. 9, pp. 467–472, 1962.
- [107] M. Ivill, E. Ngo, and M. W. Cole, "Method and characterization of pyroelectric coefficients for determining material figures of merit for infrared (IR) detectors," *Defense Technical Information Center, Fort Belvoir, VA*, 2013.
- [108] Q. Leng et al., "Harvesting heat energy from hot/cold water with a pyroelectric generator," *J. Mater. Chem. A Mater. Energy Sustain.*, vol. 2, no. 30, pp. 11940–11947, 2014.
- [109] R. B. Olsen and D. D. Brown, "High efficiency direct conversion of heat to electrical energy-related pyroelectric measurements," *Ferroelectrics*, vol. 40, no. 1, pp. 17–27, 1982.
- [110] R. B. Olsen, J. M. Briscoe, D. A. Bruno, and W. F. Butler, "A pyroelectric energy converter which employs regeneration," *Ferroelectrics*, vol. 38, no. 1, pp. 975–978, 1981.
- [111] R. B. Olsen, "Ferroelectric conversion of heat to electrical EnergyA demonstration," *J. Energy*, vol. 6, no. 2, pp. 91–95, 1982.
- [112] R. B. Olsen, D. A. Bruno, J. M. Briscoe, and J. Dullea, "Cascaded pyroelectric energy converter," *Ferroelectrics*, vol. 59, no. 1, pp. 205–219, 1984.
- [113] H. Nguyen, A. Navid, and L. Pilon, "Pyroelectric energy converter using co-polymer P(VDF-TrFE) and Olsen cycle for waste heat energy harvesting," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 30, no. 14–15, pp. 2127–2137, 2010.
- [114] Y. Yang, S. Wang, Y. Zhang, and Z. L. Wang, "Pyroelectric nanogenerators for driving wireless sensors," *Nano Lett.*, vol. 12, no. 12, pp. 6408–6413, 2012.
- [115] R. A. Kishore and S. Priya, "A review on design and performance of thermomagnetic devices," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, pp. 33–44, 2018.
- [116] D. Solomon, "Improving the performance of a thermomagnetic generator by cycling the magnetic field," *J. Appl. Phys.*, vol. 63, no. 3, pp. 915–921, 1988.
- [117] R. A. Kishore and S. Priya, "Low-grade waste heat recovery using the reverse magnetocaloric effect," *Sustain. Energy Fuels*, vol. 1, no. 9, pp. 1899–1908, 2017.
- [118] L. D. Kirol and J. I. Mills, "Numerical analysis of thermomagnetic generators," *J. Appl. Phys.*, vol. 56, no. 3, pp. 824–828, 1984.
- [119] M.-H. Phan, H.-X. Peng, S.-C. Yu, N. D. Tho, H. N. Nhat, and N. Chau, "Manganese perovskites for room temperature magnetic refrigeration applications," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 316, no. 2, pp. e562–e565, 2007.
- [120] V. Srivastava, Y. Song, K. Bhatti, and R. D. James, "The direct conversion of heat to electricity using multiferroic alloys," *Adv. Energy Mater.*, vol. 1, no. 1, pp. 97–104, 2011.
- [121] Y. Song, K. P. Bhatti, V. Srivastava, C. Leighton, and R. D. James, "Thermodynamics of energy conversion via first order phase transformation in low hysteresis magnetic materials," *Energy Environ. Sci.*, vol. 6, no. 4, p. 1315, 2013.
- [122] Y. Song, "Performance analysis of energy conversion via caloric effects in first-order ferroic phase transformations," *Phys. Chem. Chem. Phys.*, vol. 16, no. 25, pp. 12750–12763, 2014.
- [123] N. Tesla, "Pyromagneto-Electric Generator," 428057, 13-May-1890.
- [124] N. Tesla, "Thermo-Magnetic Motor," 396121, 15-Jan-1889.
- [125] T. A. Edison, "Pyromagnetic generator," 476983, 14-Jun-1892.
- [126] T. A. Edison, "Pyromagnetic Motor," 380100, 27-Mar-1888.
- [127] G. J. V. der Maas and W. J. Purvis, "'Curie Point' Motor," *Am. J. Phys.*, vol. 24, no. 3, pp. 176–177, 1956.
- [128] K. Murakami and M. Nemoto, "Some experiments and considerations on the behavior of thermomagnetic motors," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 8, no. 3, pp. 387–389, 1972.

- [129] Y. Takahashi, T. Matsuzawa, and M. Nishikawa, "Fundamental performance of the disc-type thermomagnetic engine," *Electr. Eng. Japan*, vol. 148, no. 4, pp. 26–33, 2004.
- [130] Y. Takahashi, K. Yamamoto, and M. Nishikawa, "Fundamental performance of triple magnetic circuit type cylindrical thermomagnetic engine," *Electr. Eng. Japan*, vol. 154, no. 4, pp. 68–74, 2006.
- [131] C. Palmy, "A new thermo-magnetic wheel," *Eur. J. Phys.*, vol. 27, no. 6, pp. 1289–1297, 2006.
- [132] C. Palmy, "A thermo-magnetic wheel," *Europhys. News*, vol. 38, no. 3, pp. 32–34, 2007.
- [133] M. Ujihara, G. P. Carman, and D. G. Lee, "Thermal energy harvesting device using ferromagnetic materials," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 91, no. 9, p. 093508, 2007.
- [134] J. E. Massad and R. C. Smith, "A homogenized free energy model for hysteresis in thin-film shape memory alloys," *Thin Solid Films*, vol. 489, no. 1–2, pp. 266–290, 2005.
- [135] J. J. Zhu, N. G. Liang, K. M. Liew, and W. M. Huang, "Energy conversion in shape Memory Alloy heat engine part I: Theory," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 12, no. 2, pp. 127–132, 2001.
- [136] Funakubo, *Shape memory alloys*. London, England: Taylor & Francis, 1987.
- [137] M. C. Shin, C. S. Kim, Y. H. Chung, and K. K. Jee, "Twin-crank type heat engine," 4683721, 04-Aug-1987.
- [138] R. Banks, "Vertically oscillating heat engine," 4691518, 08-Sep-1987.
- [139] M. S. Wechsler and J. H. Van Gerpen, "Apparatus for recovery and use of waste thermal energy," 5279123, 18-Jan-1994.
- [140] H. Iwanaga, H. Tobushi, and H. Ito, "Basic research on output power characteristics of a shape memory alloy heat engine : (twin crank heat engine)," *JSME int. j., Ser. 1 Solid mech. strength mater.*, vol. 31, no. 3, pp. 634–637, 1988.
- [141] F. E. Wang, "Energy conversion system," 4275561, 30-Jun-1981.
- [142] J. J. Pachter, "Engine," 4150544, 24-Apr-1979.
- [143] J. S. Cory, "Variable density heat engine," 4027479, 07-Jun-1977.
- [144] A. D. Johnson and P. F. Kirkpatrick, "Field effect memory alloy heat engine," 4281513, 04-Aug-1981.
- [145] C. L. Dillon, "Engine construction," 4434618, 06-Mar-1984.
- [146] L. O'Hare, "Wire engine for water pumps," 4646523, 03-Mar-1987.
- [147] R. Salzbrenner, "Shape memory heat engines," *J. Mater. Sci.*, vol. 19, no. 6, pp. 1827–1835, 1984.
- [148] E. H. Schiller, "Heat Engine Driven by Shape Memory Alloys: Prototyping and Design," Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, 2002.
- [149] J. F. Wakjira, "The VT1 Shape Memory Alloy Heat Engine Design," Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 2001.
- [150] D. Avirovik, A. Kumar, R. J. Bodnar, and S. Priya, "Remote light energy harvesting and actuation using shape memory alloy–piezoelectric hybrid transducer," *Smart Mater. Struct.*, vol. 22, no. 5, p. 052001, 2013.
- [151] Y. Sato, N. Yoshida, Y. Tanabe, H. Fujita, and N. Ooiwa, "Characteristics of a new power generation system with application of a Shape Memory Alloy Engine," *Electr. Eng. Japan*, vol. 165, no. 3, pp. 8–15, 2008.
- [152] D. Avirovik, R. A. Kishore, D. Vuckovic, and S. Priya, "Miniature shape memory alloy heat engine for powering wireless sensor nodes," *Energy Harvest. Syst.*, vol. 1, no. 1–2, pp. 13–18, 2014.
- [153] J. M. Donelan, Q. Li, V. Naing, J. A. Hoffer, D. J. Weber, and A. D. Kuo, "Biomechanical energy harvesting: generating electricity during walking with minimal user effort," *Science*, vol. 319, no. 5864, pp. 807–810, 2008.
- [154] S.-B. Choi, M.-S. Seong, and K.-S. Kim, "Vibration control of an electrorheological fluid-based suspension system with an energy regenerative mechanism," *Proc. Inst. Mech. Eng. Pt. D: J. Automobile Eng.*, vol. 223, no. 4, pp. 459–469, 2009.
- [155] I. L. Cassidy, J. T. Scruggs, and S. Behrens, "Design of electromagnetic energy harvesters for large-scale structural vibration applications," in *Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2011*, 2011.
- [156] L. C. Rome, L. Flynn, E. M. Goldman, and T. D. Yoo, "Generating electricity while walking with loads," *Science*, vol. 309, no. 5741, pp. 1725–1728, 2005.
- [157] A. Erturk and D. J. Inman, "Broadband piezoelectric power generation on high-energy orbits of the bistable Duffing oscillator with electromechanical coupling," *J. Sound Vib.*, vol. 330, no. 10, pp. 2339–2353, 2011.
- [158] C. Wei and X. Jing, "A comprehensive review on vibration energy harvesting: Modelling and realization," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 74, pp. 1–18, 2017.
- [159] J. Twiefel and H. Westermann, "Survey on broadband techniques for vibration energy harvesting," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 24, no. 11, pp. 1291–1302, 2013.
- [160] S. P. Beeby, M. J. Tudor, N. M. White, "Energy harvesting vibration sources for microsystems applications," *Measurement Science and Technology*, vol. 17, no. 12, Oct. 2006.
- [161] C. B. Williams and R. B. Yates, "Analysis of a micro-electric generator for microsystems," *Sens. Actuators A Phys.*, vol. 52, no. 1–3, pp. 8–11, 1996.
- [162] F. Lu, H. P. Lee, and S. P. Lim, "Modeling and analysis of micro piezoelectric power generators for micro-electromechanical-systems applications," *Smart Mater. Struct.*, vol. 13, no. 1, pp. 57–63, 2004.
- [163] M. J. Ramsay and W. W. Clark, "Piezoelectric energy harvesting for bio-MEMS applications," in *Smart Structures and Materials 2001: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies*, 2001.
- [164] S. Roundy, P. K. Wright, and J. Rabaey, "A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes," *Comput. Commun.*, vol. 26, no. 11, pp. 1131–1144, 2003.
- [165] N. E. Du Toit, "Modeling and Design of a MEMS Piezoelectric Vibration Energy Harvester," Massachusetts Institute of Technology, 2005.
- [166] N. E. duToit and B. L. Wardle, "Experimental verification of models for microfabricated piezoelectric vibration energy harvesters," *AIAA J.*, vol. 45, no. 5, pp. 1126–1137, 2007.
- [167] N. E. Dutoit, B. L. Wardle, and S.-G. Kim, "Design considerations for mems-scale piezoelectric mechanical vibration energy harvesters," *Integr. Ferroelectr.*, vol. 71, no. 1, pp. 121–160, 2005.
- [168] L. Mateu and F. Moll, "Optimum piezoelectric bending beam structures for energy harvesting using shoe inserts," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 16, no. 10, pp. 835–845, 2005.
- [169] L. Mateu and F. Moll, "Appropriate charge control of the storage capacitor in a piezoelectric energy harvesting device for discontinuous load operation," *Sens. Actuators A Phys.*, vol. 132, no. 1, pp. 302–310, 2006.
- [170] J. Granstrom, J. Feenstra, H. A. Sodano, and K. Farinholt, "Energy harvesting from a backpack instrumented with piezoelectric shoulder straps," *Smart Mater. Struct.*, vol. 16, no. 5, pp. 1810–1820, 2007.
- [171] R. Amirtharajah and A. P. Chandrakasan, "Self-powered signal processing using vibration-based power generation," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 33, no. 5, pp. 687–695, 1998.
- [172] S. Kulkarni et al., "Design, fabrication and test of integrated micro-scale vibration-based electromagnetic generator," *Sens. Actuators A Phys.*, vol. 145–146, pp. 336–342, 2008.

- [173] R. Gherca and R. Olaru, "HARVESTING VIBRATION ENERGY BY ELECTROMAGNETIC INDUCTION," *Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering series*, no. 35, 2011.
- [174] M. El-hami et al., "Design and fabrication of a new vibration-based electromechanical power generator," *Sens. Actuators A Phys.*, vol. 92, no. 1–3, pp. 335–342, 2001.
- [175] P. Glynne-Jones, M. J. Tudor, S. P. Beeby, and N. M. White, "An electromagnetic, vibration-powered generator for intelligent sensor systems," *Sens. Actuators A Phys.*, vol. 110, no. 1–3, pp. 344–349, 2004.
- [176] C. B. Williams, C. Shearwood, M. A. Harradine, P. H. Mellor, T. S. Birch, and R. B. Yates, "Development of an electromagnetic micro-generator," *IEE Proc. - Circuits Devices Syst.*, vol. 148, no. 6, p. 337, 2001.
- [177] L. W. J. H. T. C. H. C. G. M. H. L. P. H. W. and W. Hiu Yung, "Infrared signal transmission by a laser-micromachined, vibration-induced power generator," in *Proceedings of the 43rd IEEE Midwest Symposium on Circuits and Systems (Cat.No.CH37144)*, 2002.
- [178] S. Meninger, J. O. Mur-Miranda, R. Amirtharajah, A. Chandrakasan, and J. H. Lang, "Vibration-to-electric energy conversion," *IEEE Trans. Very Large Scale Integr. VLSI Syst.*, vol. 9, no. 1, pp. 64–76, 2001.
- [179] R. Tashiro, N. Kabei, K. Katayama, E. Tsuboi, and K. Tsuchiya, "Development of an electrostatic generator for a cardiac pacemaker that harnesses the ventricular wall motion," *J. Artif. Organs*, vol. 5, no. 4, pp. 239–245, 2002.
- [180] S. Roundy, "Energy Scavenging for Wireless Sensor Nodes with a Focus on Vibration to Electricity Conversion." 2003.
- [181] G. Despesse et al., "High damping electrostatic system for vibration energy scavenging," in *Proceedings of the 2005 joint conference on Smart objects and ambient intelligence innovative context-aware services: usages and technologies - sOc-EUSAI '05*, 2005.
- [182] P. Basset, D. Galayko, A. M. Paracha, F. Marty, A. Dudka, and T. Bourouina, "A batch-fabricated and electret-free silicon electrostatic vibration energy harvester," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 19, no. 11, p. 115025, 2009.
- [183] D. Hoffmann, B. Folkmer, and Y. Manoli, "Fabrication, characterization and modelling of electrostatic micro-generators," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 19, no. 9, p. 094001, 2009.
- [184] M. Mizuno and D. G. Chetwynd, "Investigation of a resonance microgenerator," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 13, no. 2, pp. 209–216, 2003.
- [185] S. Boisseau, G. Despesse, T. Ricart, E. Defay, and A. Sylvestre, "Cantilever-based electret energy harvesters," *Smart Mater. Struct.*, vol. 20, no. 10, p. 105013, 2011.
- [186] T. Sterken, P. Fiorini, G. Altena, C. Van Hoof, and R. Puers, "Harvesting energy from vibrations by a micromachined electret generator," in *TRANSDUCERS 2007 - 2007 International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference*, 2007.
- [187] T. Tsutsumino, Y. Suzuki, N. Kasagi, and Y. Sakane, "Seismic Power Generator Using HighPerformance Polymer Electret," in *Proc. MEMS*, 2006, pp. 98–101.
- [188] H.-W. Lo and Y.-C. Tai, "Parylene-based electret power generators," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 18, no. 10, p. 104006, 2008.
- [189] X. Zhang and G. M. Sessler, "Charge dynamics in silicon nitride/silicon oxide double layers," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 78, no. 18, pp. 2757–2759, 2001.
- [190] M. Edamoto et al., "Low-resonant-frequency micro electret generator for energy harvesting application," in *2009 IEEE 22nd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, 2009.
- [191] Y. Suzuki, D. Miki, M. Edamoto, and M. Honzumi, "A MEMS Electret Generator with Electrostatic Levitation for Vibration-Driven Energy Harvesting Applications," *IOP J. Micromech. Microeng.*, 2010.
- [192] D. Miki, M. Honzumi, Y. Suzuki, and N. Kasagi, "Large-amplitude MEMS electret generator with nonlinear spring," in *2010 IEEE 23rd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, 2010.
- [193] D. D. Quinn, A. L. Triplett, L. A. Bergman, and A. F. Vakakis, "Comparing linear and essentially nonlinear vibration-based energy harvesting," *J. Vib. Acoust.*, vol. 133, no. 1, p. 011001, 2011.
- [194] R. Ramlan, M. J. Brennan, B. R. Mace, and I. Kovacic, "Potential benefits of a non-linear stiffness in an energy harvesting device," *Nonlinear Dyn.*, vol. 59, no. 4, pp. 545–558, 2010.
- [195] M. Ferrari, V. Ferrari, M. Guizzetti, B. Andò, S. Baglio, and C. Trigona, "Improved energy harvesting from wideband vibrations by nonlinear piezoelectric converters," *Sens. Actuators A Phys.*, vol. 162, no. 2, pp. 425–431, 2010.
- [196] S. C. Stanton, C. C. McGehee, and B. P. Mann, "Nonlinear dynamics for broadband energy harvesting: Investigation of a bistable piezoelectric inertial generator," *Physica D*, vol. 239, no. 10, pp. 640–653, 2010.
- [197] P. Firoozy, S. E. Khadem, and S. M. Pourkiaee, "Broadband energy harvesting using nonlinear vibrations of a magnetopiezoelectric cantilever beam," *Int. J. Eng. Sci.*, vol. 111, pp. 113–133, 2017.
- [198] J. C. Farrarons, "A multiharvested self-powered system in a lowvoltage low-power technology," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 9, pp. 4250–4263, 2011.
- [199] D. Carli, D. Brunelli, L. Benini, and M. Ruggeri, "An effective multi-source energy harvester for low power applications," in *2011 Design, Automation & Test in Europe*, 2011.
- [200] H. Li, G. Zhang, R. Ma, and Z. You, "Design and experimental evaluation on an advanced multisource energy harvesting system for wireless sensor nodes," *ScientificWorldJournal*, vol. 2014, p. 671280, 2014.
- [201] T. Kang, S. Kim, C. Hyoung, S. Kang, and K. Park, "An energy combiner for a multi-input energy-harvesting system," *IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs*, vol. 62, no. 9, pp. 911–915, 2015.
- [202] J. Jessen, "Design considerations for a universal smart energy module for energy harvesting in wireless sensor networks," in *Proceedings of the 9th Workshop for Intelligent Solutions in Embedded Systems (WISES)*, 2011, pp. 35–40.
- [203] O. B. Akan, O. Cetinkaya, C. Koca, and M. Ozger, "Internet of hybrid energy harvesting things," *IEEE Internet Things J.*, vol. 5, no. 2, pp. 736–746, 2018.
- [204] C. Xu, X. Wang, and Z. L. Wang, "Nanowire structured hybrid cell for concurrently scavenging solar and mechanical energies," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 131, no. 16, pp. 5866–5872, 2009.
- [205] Y. Yang et al., "Silicon-based hybrid energy cell for self-powered electrodegradation and personal electronics," *ACS Nano*, vol. 7, no. 3, pp. 2808–2813, 2013.
- [206] C. Pan et al., "Wafer-scale high-throughput ordered arrays of Si and coaxial Si/Si(1-x)Ge(x) wires: fabrication, characterization, and photovoltaic application," *ACS Nano*, vol. 5, no. 8, pp. 6629–6636, 2011.
- [207] G. C. Yoon et al., "High-performance hybrid cell based on an organic photovoltaic device and a direct current piezoelectric nanogenerator," *Nano Energy*, vol. 12, pp. 547–555, 2015.
- [208] H. Ryu, H.-J. Yoon, and S.-W. Kim, "Hybrid energy harvesters: Toward sustainable energy harvesting," *Adv. Mater.*, vol. 31, no. 34, p. e1802898, 2019.
- [209] J. Chen et al., "Micro-cable structured textile for simultaneously harvesting solar and mechanical energy," *Nat. Energy*, vol. 1, no. 10, p. 16138, 2016.
- [210] J.-H. Lee et al., "Highly stretchable piezoelectric-pyroelectric hybrid nanogenerator," *Adv. Mater.*, vol. 26, no. 5, pp. 765–769, 2014.
- [211] T. Park, J. Na, B. Kim, Y. Kim, H. Shin, and E. Kim, "Photothermally activated pyroelectric polymer films for harvesting of solar heat with a hybrid energy cell structure," *ACS Nano*, vol. 9, no. 12, pp. 11830–11839, 2015.

- [212] O. Bubnova et al., "Optimization of the thermoelectric figure of merit in the conducting polymer poly(3,4-ethylenedioxythiophene)," *Nat. Mater.*, vol. 10, no. 6, pp. 429–433, 2011.
- [213] B. Kim, H. Shin, T. Park, H. Lim, and E. Kim, "NIR-sensitive poly(3,4-ethylenedioxy-selenophene) derivatives for transparent photo-thermo-electric converters," *Adv. Mater.*, vol. 25, no. 38, pp. 5483–5489, 2013.
- [214] H. Liu, H. Fu, L. Sun, C. Lee, and E. M. Yeatman, "Hybrid energy harvesting technology: From materials, structural design, system integration to applications," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 137, no. 110473, p. 110473, 2021.
- [215] R. M. Toyabur, M. Salauddin, H. Cho, and J. Y. Park, "A multimodal hybrid energy harvester based on piezoelectric-electromagnetic mechanisms for low-frequency ambient vibrations," *Energy Convers. Manag.*, vol. 168, pp. 454–466, 2018.
- [216] O. Aldraihem and A. Baz, "Energy harvester with a dynamic magnifier," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 22, no. 6, pp. 521–530, 2011.
- [217] S. Mahmoudi, N. Kacem, and N. Bouhaddi, "Enhancement of the performance of a hybrid nonlinear vibration energy harvester based on piezoelectric and electromagnetic transductions," *Smart Mater. Struct.*, vol. 23, no. 7, p. 075024, 2014.
- [218] A. R. M. Faisal, G. Hong, and G.-S. Chung, "Multi-frequency electromagnetic energy harvester using a magnetic spring cantilever," *Sens. Actuators A Phys.*, vol. 182, pp. 106–113, 2012.
- [219] B. P. Mann and N. D. Sims, "Energy harvesting from the nonlinear oscillations of magnetic levitation," *J. Sound Vib.*, vol. 319, no. 1–2, pp. 515–530, 2009.
- [220] J. A. C. Dias, C. De Marqui Jr, and A. Erturk, "Hybrid piezoelectric-inductive flow energy harvesting and dimensionless electroaeroelastic analysis for scaling," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 102, no. 4, p. 044101, 2013.
- [221] C. Hou et al., "A rotational pendulum based electromagnetic/triboelectric hybrid-generator for ultra-low-frequency vibrations aiming at human motion and blue energy applications," *Nano Energy*, vol. 63, no. 103871, p. 103871, 2019.
- [222] Y. Chen, Y. Cheng, Y. Jie, X. Cao, N. Wang, and Z. L. Wang, "Energy harvesting and wireless power transmission by a hybridized electromagnetic-triboelectric nanogenerator," *Energy Environ. Sci.*, vol. 12, no. 9, pp. 2678–2684, 2019.
- [223] X. Wang et al., "Fully packaged blue energy harvester by hybridizing a rolling triboelectric nanogenerator and an electromagnetic generator," *ACS Nano*, vol. 10, no. 12, pp. 11369–11376, 2016.
- [224] B. Zhang et al., "Rotating-disk-based hybridized electromagnetic-triboelectric nanogenerator for sustainably powering wireless traffic volume sensors," *ACS Nano*, vol. 10, no. 6, pp. 6241–6247, 2016.
- [225] C. T. Rim and C. Mi, *Wireless power transfer for electric vehicles and mobile devices*. Nashville, TN: John Wiley & Sons, 2017.
- [226] S. Y. R. Hui, W. Zhong, and C. K. Lee, "A critical review of recent progress in mid-range wireless power transfer," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 9, pp. 4500–4511, 2014.
- [227] K. Chau, *Electric vehicle machines and drives design, analysis and application*. John Wiley & Sons, 2015.
- [228] Z. Zhang, H. Pang, A. Georgiadis, and C. Cecati, "Wireless Power Transfer—An Overview," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 2, pp. 1044–1058, 2019.
- [229] M. Kline, I. Izyumin, B. Boser, and S. Sanders, "Capacitive power transfer for contactless charging," in 2011 Twenty-Sixth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2011.
- [230] B. H. Choi, D. T. Nguyen, S. J. Yoo, J. H. Kim, and C. T. Rim, "A novel source-side monitored capacitive power transfer system for contactless mobile charger using class-E converter," in 2014 IEEE 79th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2014.
- [231] E. Y. Chow, C.-L. Yang, Y. Ouyang, A. L. Chlebowski, P. P. Irazoqui, and W. J. Chappell, "Wireless powering and the study of RF propagation through ocular tissue for development of implantable sensors," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 59, no. 6, pp. 2379–2387, 2011.
- [232] N. Wang et al., "One-to-multipoint laser remote power supply system for wireless sensor networks," *IEEE Sens. J.*, vol. 12, no. 2, pp. 389–396, 2012.
- [233] N. Tesla, "Apparatus for transmitting electrical energy," 1119732, 01-Dec-1914.
- [234] G. Wang, W. Liu, M. Sivaprakasam, M. S. Humayun, and J. D. Weiland, "Power supply topologies for biphasic stimulation in inductively powered implants," in 2005 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 2005.
- [235] I. Mayordomo, T. Drager, P. Spies, J. Bernhard, and A. Pflaum, "An overview of technical challenges and advances of inductive wireless power transmission," *Proc. IEEE Inst. Electr. Electron. Eng.*, vol. 101, no. 6, pp. 1302–1311, 2013.
- [236] K. Finken-zeller, *RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and Near-Field Communication*. New York, NY, USA: Wiley, 2010.
- [237] E. Waffenschmidt and T. Staring, "Limitation of inductive power transfer for consumer applications," in Proc. 13th Eur. Conf. Power Electron. Appl. 2009, pp. 1–10.
- [238] L. Xie, Y. Shi, Y. T. Hou, and A. Lou, "Wireless power transfer and applications to sensor networks," *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 20, no. 4, pp. 140–145, 2013.
- [239] A. K. Ramrakhiani and G. Lazzi, "On the design of efficient multi-coil telemetry system for biomedical implants," *IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst.*, vol. 7, no. 1, pp. 11–23, 2013.
- [240] T. Campi, S. Cruciani, F. Palandrani, V. De Santis, A. Hirata, and M. Feliziani, "Wireless power transfer charging system for AIMDs and pacemakers," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 64, no. 2, pp. 633–642, 2016.
- [241] J. Huh, S. W. Lee, W. Y. Lee, G. H. Cho, and C. T. Rim, "Narrow-width inductive power transfer system for online electrical vehicles," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 12, pp. 3666–3679, 2011.
- [242] K. Lee, Z. Pantic, and S. M. Lukic, "Reflexive field containment in dynamic inductive power transfer systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 9, pp. 4592–4602, 2014.
- [243] M. Budiha, J. T. Boys, G. A. Covic, and C. Y. Huang, "Development of a single-sided flux magnetic coupler for electric vehicle IPT charging systems," *IEEE Trans. Industr. Inform.*, vol. 60, pp. 318–328, 2013.
- [244] M. P. Theodoridis, "Effective Capacitive Power Transfer," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 12, pp. 4906–4913, 2012.
- [245] "Harvesting wireless power: Survey of energy-harvester conversion efficiency in far-field, wireless power transfer systems," *IEEE Microw. Mag.*, vol. 15, no. 4, pp. 108–120, 2014.
- [246] M. Etemadrezaei, "Wireless Power Transfer," in *Power Electronics Handbook*, Elsevier, 2018, pp. 711–722.
- [247] W. Brown, "Experiments in the transportation of energy by microwave beam," in *IRE International Convention Record*, 2005.
- [248] J. K. Finken-zeller, *RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification*. New York: Wiley, 2003.
- [249] C. T. Rim, "Feasibility study on pseudo anti-gravity spaceship and flying saucer," in *Korea Aerospace Spring Conference*, 2008, pp. 809–812.
- [250] U. Olgun, C.-C. Chen, and J. L. Volakis, "Investigation of rectenna array configurations for enhanced RF power harvesting," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 10, pp. 262–265, 2011.
- [251] H. P. Kimmich, "Bio-telemetry, based on optical transmission," *Biotelem Patient Monit*, vol. 9, pp. 129–143, 1982.
- [252] S. Jarvis, J. Mukherjee, M. Perren, and S. J. Sweeney, "On the fundamental efficiency limits of photovoltaic converters for optical power transfer applications," in 2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2013.
- [253] J. Paulo and P. D. Gaspar, "Review and Future Trend of Energy Harvesting Methods for Portable Medical Devices," in *Proceedings of the World Congress on Engineering WCE 2010*, London, 2010.

- [254] L. Xie and M. Cai, "Increased piezoelectric energy harvesting from human footstep motion by using an amplification mechanism," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 105, no. 14, p. 143901, 2014.
- [255] H. Fu et al., "Footstep energy harvesting using heel strike-induced airflow for human activity sensing," in 2016 IEEE 13th International Conference on Wearable and Implantable Body Sensor Networks (BSN), 2016.
- [256] C. He et al., "Smart floor with integrated triboelectric nanogenerator as energy harvester and motion sensor," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 9, no. 31, pp. 26126–26133, 2017.
- [257] R. Hinchet et al., "Transcutaneous ultrasound energy harvesting using capacitive triboelectric technology," *Science*, vol. 365, no. 6452, pp. 491–494, 2019.
- [258] D. Seo et al., "Wireless recording in the peripheral nervous system with ultrasonic neural dust," *Neuron*, vol. 91, no. 3, pp. 529–539, 2016.
- [259] J. Wang, T. He, and C. Lee, "Development of neural interfaces and energy harvesters towards self-powered implantable systems for healthcare monitoring and rehabilitation purposes," *Nano Energy*, vol. 65, no. 104039, p. 104039, 2019.
- [260] T. He et al., "Beyond energy harvesting - multi-functional triboelectric nanosensors on a textile," *Nano Energy*, vol. 57, pp. 338–352, 2019.
- [261] Q. Shi, H. Wang, T. Wang, and C. Lee, "Self-powered liquid triboelectric microfluidic sensor for pressure sensing and finger motion monitoring applications," *Nano Energy*, vol. 30, pp. 450–459, 2016.
- [262] T. Chen et al., "Intuitive-augmented human-machine multidimensional nano-manipulation terminal using triboelectric stretchable strip sensors based on minimalist design," *Nano Energy*, vol. 60, pp. 440–448, 2019.
- [263] S. Zebda et al., "Single glucose biofuel cells implanted in rats power electronic devices," *Sci. Rep.*, vol. 3, 2013.
- [264] G. Yao et al., "Effective weight control via an implanted self-powered vagus nerve stimulation device," *Nat. Commun.*, vol. 9, no. 1, p. 5349, 2018.
- [265] G.-T. Hwang et al., "Self-powered deep brain stimulation via a flexible PIMNT energy harvester," *Energy Environ. Sci.*, vol. 8, pp. 2677–2684, 2015.
- [266] Z. Liu, H. Li, B. Shi, Y. Fan, Z. L. Wang, and Z. Li, "Wearable and implantable triboelectric nanogenerators," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 29, 2019.
- [267] Y. Ma et al., "Self-powered, onestop, and multifunctional implantable triboelectric active sensor for real-time biomedical monitoring," *Nano Lett.*, vol. 16, pp. 6042–6051, 2016.
- [268] C. Dagdeviren et al., "Conformal piezoelectric energy harvesting and storage from motions of the heart, lung, and diaphragm," *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 111, no. 5, pp. 1927–1932, 2014.
- [269] G.-T. Hwang et al., "Self-powered deep brain stimulation via a flexible PIMNT energy harvester," *Energy Environ. Sci.*, vol. 8, no. 9, pp. 2677–2684, 2015.
- [270] N. Li et al., "Direct powering a real cardiac pacemaker by natural energy of a heartbeat," *ACS Nano*, vol. 13, no. 3, pp. 2822–2830, 2019.
- [271] H. Ouyang et al., "Symbiotic cardiac pacemaker," *Nat. Commun.*, vol. 10, no. 1, p. 1821, 2019.
- [272] X.-S. Zhang et al., "High-performance triboelectric nanogenerator with enhanced energy density based on single-step fluorocarbon plasma treatment," *Nano Energy*, vol. 4, pp. 123–131, 2014.
- [273] S. Lee et al., "Development of battery-free neural interface and modulated control of tibialis anterior muscle via common peroneal nerve based on triboelectric nanogenerators (TENGS)," *Nano Energy*, vol. 33, pp. 1–11, 2017.
- [274] S. Lee et al., "Battery-free neuromodulator for peripheral nerve direct stimulation," *Nano Energy*, vol. 50, pp. 148–158, 2018.
- [275] S. Lee et al., "Mechano-neuromodulation of autonomic pelvic nerve for underactive bladder: A triboelectric neurostimulator integrated with flexible neural clip interface," *Nano Energy*, vol. 60, pp. 449–456, 2019.
- [276] W. Guo et al., "Self-powered electrical stimulation for enhancing neural differentiation of mesenchymal stem cells on graphene-poly(3,4-ethylenedioxythiophene) hybrid microfibers," *ACS Nano*, vol. 10, no. 5, pp. 5086–5095, 2016.
- [277] Y. Fu et al., "A self-powered brain multi-perception receptor for sensory-substitution application," *Nano Energy*, vol. 44, pp. 43–52, 2018.
- [278] Y. Dai et al., "A self-powered brain-linked vision electronic-skin based on triboelectric-photodetecting pixel-addressable matrix for visual-image recognition and behavior intervention," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 28, no. 20, p. 1800275, 2018.
- [279] Y. Long et al., "Effective wound healing enabled by discrete alternative electric fields from wearable nanogenerators," *ACS Nano*, vol. 12, no. 12, pp. 12533–12540, 2018.
- [280] J. Wang, H. Wang, N. V. Thakor, and C. Lee, "Self-powered direct muscle stimulation using a triboelectric nanogenerator (TENG) integrated with a flexible multiple-channel intramuscular electrode," *ACS Nano*, vol. 13, no. 3, pp. 3589–3599, 2019.
- [281] J. Wang, H. Wang, T. He, B. He, N. V. Thakor, and C. Lee, "Investigation of low-current direct stimulation for rehabilitation treatment related to muscle function loss using self-powered TENG system," *Adv. Sci. (Weinh.)*, vol. 6, no. 14, p. 1900149, 2019.
- [282] H. Wang, J. Wang, T. He, Z. Li, and C. Lee, "Direct muscle stimulation using diode-amplified triboelectric nanogenerators (TENGS)," *Nano Energy*, vol. 63, no. 103844, p. 103844, 2019.
- [283] M. J. Madou, *Fundamentals of Micro fabrication: The Science of Miniaturization*. CRC Press, 2004.
- [284] S. M. Allameh, O. Akogwu, M. Collinson, J. Thomas, and W. O. Soboyejo, "Piezoelectric generators for biomedical and dental applications: effects of cyclic loading," *J. Mater. Sci. Mater. Med.*, vol. 18, no. 1, pp. 39–45, 2007.
- [285] H. Salehi, R. Burgueño, S. Chakrabarty, N. Lajnef, and A. H. Alavi, "A comprehensive review of self-powered sensors in civil infrastructure: State-of-the-art and future research trends," *Eng. Struct.*, vol. 234, no. 111963, p. 111963, 2021.
- [286] H. Wang, A. Jasim, and X. Chen, "Energy harvesting technologies in roadway and bridge for different applications – A comprehensive review," *Appl. Energy*, vol. 212, pp. 1083–1094, 2018.
- [287] J. Qian and X. Jing, "Wind-driven hybridized triboelectric-electromagnetic nanogenerator and solar cell as a sustainable power unit for self-powered natural disaster monitoring sensor networks," *Nano Energy*, vol. 52, pp. 78–87, 2018.
- [288] H. Liu et al., "Development of a thermoelectric and electromagnetic hybrid energy harvester from water flow in an irrigation system," *Micromachines (Basel)*, vol. 9, no. 8, 2018.
- [289] D. Zhou, N. Kong, D. S. Ha, and D. J. Inman, "A self-powered wireless sensor node for structural health monitoring," in *Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2010*, 2010.
- [290] M. Lallart and D. Guyomar, "Low-power computation methods and self-powered systems for structural health monitoring techniques using lamb waves for embedded sensing," *Shock Vib.*, vol. 19, no. 5, pp. 867–877, 2012.
- [291] S. Aono, "Self-powered sensors to facilitate infrastructural internet-of-things for smart structures," in *The 13th International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology*, 2017.
- [292] K. Aono, H. Hasni, O. Pochettino, N. Lajnef, and S. Chakrabarty, "Quasi-self-powered infrastructural internet of things: The mackinac bridge case study," in *Proceedings of the 2018 on Great Lakes Symposium on VLSI*, 2018, pp. 335–340.
- [293] K. Aono, H. Hasni, O. Pochettino, N. Lajnef, and S. Chakrabarty, "Quasi-self-powered piezo-floating-gate sensing technology for continuous monitoring of large-scale bridges," *Front. Built Environ.*, vol. 5, 2019.

- [294] Y. Yu, G. Qiao, and J. Ou, "Self-powered wireless corrosion monitoring sensors and networks," *IEEE Sens. J.*, vol. 10, no. 12, pp. 1901–1902, 2010.
- [295] D. Su, Y. Xia, and R. Yuan, "Self-powered wireless sensor network for automated corrosion prediction of steel reinforcement," *J. Sens.*, vol. 2018, pp. 1–10, 2018.
- [296] L. Jin et al., "Polarization-free high-crystallization β -PVDF piezoelectric nanogenerator toward self-powered 3D acceleration sensor," *Nano Energy*, vol. 50, pp. 632–638, 2018.
- [297] C. R. Bowen and M. H. Arafa, "Energy harvesting technologies for tire pressure monitoring systems, Adv," *Adv. Energy Mater.*, vol. 5, no. 7, 2015.
- [298] H. Askari, E. Hashemi, A. Khajepour, M. B. Khamesee, and Z. L. Wang, "Tire condition monitoring and intelligent tires using nanogenerators based on piezoelectric, electromagnetic, and triboelectric effects, Adv," *Adv. Mater. Technol.*, vol. 4, no. 1, 2019.
- [299] H. Askari, Z. Saadatnia, A. Khajepour, M. B. Khamesee, and J. Zu, "A triboelectric selfpowered sensor for tire condition monitoring: concept, design, fabrication, and experiments, Adv," *Adv. Eng. Mater.*, vol. 19, no. 12, 2017.
- [300] J. Qian, D. S. Kim, and D. W. Lee, "On-vehicle triboelectric nanogenerator enabled selfpowered sensor for tire pressure monitoring," *Nano Energy*, vol. 49, pp. 126–136, 2018.
- [301] B. Zhang et al., "Self-powered acceleration sensor based on liquid metal triboelectric nanogenerator for vibration monitoring," *ACS Nano*, vol. 11, no. 7, pp. 7440–7446, 2017.
- [302] J. Chang, M. Dommer, C. Chang, and L. Lin, "Piezoelectric nanofibers for energy scavenging applications," *Nano Energy*, vol. 1, no. 3, pp. 356–371, 2012.
- [303] T. Huang, C. Wang, H. Yu, H. Wang, Q. Zhang, and M. Zhu, "Human walking-driven wearable all-fiber triboelectric nanogenerator containing electrospun polyvinylidene fluoride piezoelectric nanofibers," *Nano Energy*, vol. 14, pp. 226–235, 2015.
- [304] M. Xu et al., "A soft and robust spring based triboelectric nanogenerator for harvesting arbitrary directional vibration energy and self-powered vibration sensing," *Adv. Energy Mater.*, vol. 8, no. 9, p. 1702432, 2018.
- [305] L. Jin, B. Zhang, L. Zhang, and W. Yang, "Nanogenerator as new energy technology for self-powered intelligent transportation system," *Nano Energy*, vol. 66, no. 104086, p. 104086, 2019.
- [306] J. Wen et al., "Harsh-environmental-resistant triboelectric nanogenerator and its applications in autodrive safety warning, Adv," *Adv. Energy Mater.*, vol. 8, no. 29, 2018.
- [307] N. A. Atanasov, J. L. Sargent, J. P. Parmigiani, R. Palme, and H. E. Diggs, "Characterization of train-induced vibration and its effect on fecal corticosterone metabolites in mice," *J. Am. Assoc. Lab. Anim. Sci.*, vol. 54, no. 6, pp. 737–744, 2015.
- [308] X. Bian, H. Jiang, C. Chang, J. Hu, and Y. Chen, "Track and ground vibrations generated by high-speed train running on ballastless railway with excitation of vertical track irregularities, Soil Dyn," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 76, pp. 29–43, 2015.
- [309] A. Petriaev, "The vibration impact of heavy freight train on the roadbed, Adv," *Adv. Transport. Geotech. Iii*, vol. 143, pp. 1136–1143, 2016.
- [310] W. M. Zhai, K. Wei, X. L. Song, and M. H. Shao, "Experimental investigation into ground vibrations induced by very high speed trains on a non-ballasted track, Soil Dyn," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 72, pp. 24–36, 2015.
- [311] L. Jin et al., "Self-powered wireless smart sensor based on maglev porous nanogenerator for train monitoring system," *Nano Energy*, vol. 38, pp. 185–192, 2017.
- [312] S. W. Ma, Y. J. Fan, H. Y. Li, L. Su, Z. L. Wang, and G. Zhu, "Flexible porous polydimethylsiloxane/lead zirconate titanate-based nanogenerator enabled by the dual effect of ferroelectricity and piezoelectricity," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 10, no. 39, pp. 33105–33111, 2018.
- [313] X. J. Zhao, S. Y. Kuang, Z. L. Wang, and G. Zhu, "Highly adaptive solid-liquid interfacing triboelectric nanogenerator for harvesting diverse water wave energy," *ACS Nano*, vol. 12, no. 5, pp. 4280–4285, 2018.
- [314] X. Zhang et al., "Self-powered distributed water level sensors based on liquid–solid triboelectric nanogenerators for ship draft detecting," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 29, no. 41, p. 1900327, 2019.
- [315] Y. Long et al., "Effective antibiofouling enabled by surface electric disturbance from water wave-driven nanogenerator," *Nano Energy*, vol. 57, pp. 558–565, 2019.
- [316] Y. Feng, Y. Zheng, Z. U. Rahman, D. Wang, F. Zhou, and W. Liu, "Paper-based triboelectric nanogenerators and their application in self-powered anticorrosion and antifouling," *J. Mater. Chem. A Mater. Energy Sustain.*, vol. 4, no. 46, pp. 18022–18030, 2016.
- [317] C. Archer and K. Caldeira, "Global assessment of high-altitude wind power," *Energies*, vol. 2, no. 2, pp. 307–319, 2009.
- [318] Z. Zhao et al., "Freestanding flag-type triboelectric nanogenerator for harvesting high-altitude wind energy from arbitrary directions," *ACS Nano*, vol. 10, no. 2, pp. 1780–1787, 2016.
- [319] S. Tombaz, A. Vastberg, and J. Zander, "Energy- and cost-efficient ultrahigh-capacity wireless access," *IEEE wireless communications*, 2011.
- [320] M. Etoh, T. Ohya, and Y. Nakayama, "Energy consumption issues on mobile network systems," in *2008 International Symposium on Applications and the Internet*, 2008.
- [321] A. Fehske, G. Fettweis, J. Malmudin, and G. Biczok, "The global footprint of mobile communications: The ecological and economic perspective," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 49, no. 8, pp. 55–62, 2011.
- [322] K. Huang and V. K. N. Lau, "Enabling wireless power transfer in cellular networks: Architecture, modeling and deployment," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 13, no. 2, pp. 902–912, 2014.
- [323] A. O. Ercan, M. O. Sunay, and I. F. Akyildiz, "RF energy harvesting and transfer for spectrum sharing cellular IoT communications in 5G systems," *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 17, no. 7, pp. 1680–1694, 2018.