



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Διπλωματική Εργασία

ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΠΑΘΗΤΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Μανωλιάς Ν. Δημήτριος

A.M.: 47082

Επιβλέπων Καθηγητής: Παπακίτσος Ευάγγελος

Αθήνα, Οκτώβριος 2022



UNIVERSITY OF WEST ATTICA

SCHOOL OF ENGINEERING

**DEPARTMENT OF INDUSTRIAL DESIGN AND PRODUCTION
ENGINEERING**

Diploma Thesis

**A survey of passive electromagnetic systems for the collection and
production of energy with applications**

Student name and surname: Manolias Dimitrios

Registration Number:

47082

Supervisor name and surname: Evangelos C. Papakitsos

Athens, October 2022



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ
ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ**

Τίτλος εργασίας

**Επισκόπηση των παθητικών ηλεκτρομαγνητικών συστημάτων συλλογής και
παραγωγής ενέργειας με εφαρμογές**

Η πτυχιακή/διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική
Επιτροπή:

A/α	ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΔΑ/ ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1	Ε.Χ. ΠΑΠΑΚΙΤΣΟΣ	ΕΔΙΠ Α΄ ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ	
2	Θ. ΓΚΑΝΕΤΣΟΣ	ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Α΄ ΒΑΘΜΙΔΑΣ	
3	Ν. ΛΑΣΚΑΡΗΣ	ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Μανωλιάς Δημήτριος του Νικολάου, με αριθμό μητρώου 47082, φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής, 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 Δηλών



Περίληψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η επισκόπηση των παθητικών ηλεκτρομαγνητικών συστημάτων συλλογής και παραγωγής ενέργειας με εφαρμογές σε διάφορους τομείς. Αρχικά, μελετάται η πηγή και κατανομή της ενέργειας του ανθρωπίνου σώματος με τις πρόσφατες εξελίξεις της τεχνολογίας. Επιπλέον, συζητούνται οι διάφοροι τρόποι συγκομιδής ενέργειας από το ανθρώπινο σώμα, όπως η θερμοηλεκτρική, πυροηλεκτρική γεννήτρια και της σύγκρισης μεταξύ τους. Σε επόμενο κεφάλαιο θίγεται ο τομέας των οικοδομικών έργων και για τους διάφορους τρόπους συλλογής ενέργειας με ένα ευρύ πλήθος τρόπων, όπως τη συλλογή της ηλιακής ενέργειας, της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας και τη συλλογή της πιεζοηλεκτρικής, καθώς και της ηλεκτρομαγνητικής τεχνολογίας, η οποία αποτελεί ένα από τα σύγχρονα εργαλεία για την συλλογή ενέργειας.

Επίσης, σε επόμενη ενότητα αναφέρονται οι μέθοδοι για κτήρια καθαρής μηδενικής ενέργειας. Δηλαδή, μελετώνται στρατηγικές αναζήτησης και κριτήρια ελέγχου. Ακόμη, αναφέρονται και στρατηγικές μείωσης της χρήσης ενέργειας σχεδιασμού κτηρίου (παθητικός σχεδιασμός). Ακόμη, γίνεται αναφορά και σε περαιτέρω μέτρα ενεργειακής απόδοσης.

Επιπρόσθετα, μελετάται ο χώρος των αισθητήρων και συστήματα παθητικής ετικέτας RFID που βασίζονται σε κεραία για εφαρμογές παρακολούθησης δομικής υγείας, όπως επίσης και σύγχρονα συστήματα διαχείρισης ενέργειας με τις πιθανές αναδυόμενες τάσεις.

Τέλος, εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα επί της διεθνούς βιβλιογραφίας, καθώς και πιθανά μελλοντικά βήματα επί του κάθε τομέα που μελετήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

Λέξεις-κλειδιά: παθητικά ηλεκτρομαγνητικά συστήματα, συλλογή ενέργειας, παραγωγή ενέργειας.

Abstract

The purpose of this work is to review passive electromagnetic energy collection and production systems with applications in various fields. Initially, the source and distribution of the energy of the human body is studied with recent technological developments. In addition, the various ways of harvesting energy from the human body, such as the thermoelectric, pyroelectric generator, and the comparison between them are discussed. In the next chapter, the field of building projects is touched upon and the various ways of collecting energy with a multitude of ways, such as the collection of solar energy, the thermoelectric generator and the collection of piezoelectric, as well as electromagnetic technology, which is one of the modern tools for energy harvesting.

Also, the methods for net zero energy buildings are mentioned in the next section. That is, search strategies and control criteria are studied. Furthermore, building design energy reduction strategies (passive design) are also mentioned. Further, energy efficiency measures are also mentioned.

In addition, the sensor space and passive antenna-based RFID tag systems for structural health monitoring applications are studied, as well as modern energy management systems with possible emerging trends.

Finally, useful conclusions are drawn on the international literature, as well as possible future steps on each field studied in the context of this work.

Keywords: passive electromagnetic systems, energy harvesting, energy production.

Πίνακας περιεχομένων

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	3
Περίληψη.....	4
Abstract	5
Περιεχόμενα Εικόνων.....	8
Περιεχόμενα Πινάκων	9
Πρόλογος	10
Εισαγωγή	12
1. Πηγή και κατανομή της ενέργειας του ανθρώπινου σώματος.....	14
1.1. Πρόσφατη πρόοδος της τεχνολογίας συλλογής ενέργειας του ανθρώπινου σώματος.....	16
1.2. Συγκομιδή θερμικής ενέργειας του ανθρώπινου σώματος.....	16
1.2.1. Θερμοηλεκτρική γεννήτρια	16
1.2.2. Πυροηλεκτρική γεννήτρια	19
1.2.3. Εφαρμογές συγκομιδής θερμικής ενέργειας.....	20
1.2.4. Σύγκριση TEG και PEG	23
2. Συγκομιδή ενέργειας για εφαρμογές οδοποιίας και γεφυρών.....	26
2.1. Συγκομιδή ενέργειας για εφαρμογές οδοποιίας.....	28
2.1.1. Συγκομιδή ηλιακής ενέργειας.....	28
2.1.2. Θερμοηλεκτρική γεννήτρια (TEG)	33
2.1.3. Συγκομιδή γεωθερμικής ενέργειας.....	36
2.1.4. Πιεζοηλεκτρική (PE) συλλογή ενέργειας	38
2.2. Συγκομιδή ενέργειας για εφαρμογές αισθητήρων σε γέφυρες.....	41
2.2.1. Ηλεκτρομαγνητική τεχνολογία.....	41
2.2.2. Προηγούμενες έρευνες για τη συλλογή πιεζοηλεκτρικής ενέργειας για αισθητήρες.....	43
3. Μέθοδοι για κτήρια καθαρής μηδενικής ενέργειας	45
3.1. Στρατηγική αναζήτησης και κριτήρια ελέγχου.....	47
3.2. Πλαίσιο βιβλιογραφικής ανασκόπησης.....	49
3.2.1. Στρατηγικές μείωσης της χρήσης ενέργειας σχεδιασμού κτηρίου (παθητικός σχεδιασμός)	50
3.2.2. Μέτρα Ενεργειακής Απόδοσης (EEMs) Ενσωματωμένα με συστήματα ελέγχου και παρακολούθησης ενέργειας	53
4. Εξορθολογισμός για τη συγκομιδή ενέργειας περιβάλλοντος	55

4.1. Χαρακτηρισμός υποστηρικτικών μεθόδων συλλογής ενέργειας και τεχνολογιών υποστήριξης	58
4.1.1. Μετατροπή θερμικής ενέργειας και συναφείς τεχνολογίες	60
4.1.2. Συγκομιδή ενέργειας με TEC	61
4.1.3. Συγκομιδή θερμότητας ανθρώπινου σώματος με TEGs	62
4.1.4. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανάκτηση θερμότητας απορριμμάτων διεργασίας.....	64
4.1.5. Συγκομιδή θερμικής ενέργειας με πυροηλεκτρικά υλικά.....	65
4.1.6. Συγκομιδή ενέργειας με χρήση μαγνητοσυσπαστικών υλικών.....	66
4.1.7. Συγκομιδή ενέργειας με χρήση ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής	67
4.1.8. Συγκομιδή ενέργειας από δόνηση που προκαλείται από τη ροή	68
4.1.9. Συγκομιδή ενέργειας από δονήσεις περιβάλλοντος χαμηλής συχνότητας	69
4.1.10. Αυτορυθμιζόμενος συλλέκτης ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας	69
5. Αισθητήρες και συστήματα παθητικής ετικέτας RFID που βασίζονται σε κεραία για εφαρμογές παρακολούθησης δομικής υγείας	71
6. Σύγχρονα συστήματα διαχείρισης ενέργειας.....	76
Συμπεράσματα.....	78
Μελλοντικές Επεκτάσεις	81
Βιβλιογραφία.....	82

Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 1: Ενέργεια ανθρώπινου σώματος.....	14
Εικόνα 2: Συγκομιδή θερμικής ενέργειας του ανθρώπινου σώματος, από την αρχή έως τις επιδείξεις των TEG και PEG	18
Εικόνα 3: Εφαρμογές τεχνολογίας συλλογής θερμικής ενέργειας	21
Εικόνα 4: Διαθέσιμες πηγές συλλογής ενέργειας στους δρόμους	27
Εικόνα 5: Αρχή λειτουργίας φωτοβολταϊκών ηλιακών κυψελών.....	28
Εικόνα 6: Μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας σε ασφαλτικούς ηλιακούς συλλέκτες.....	30
Εικόνα 7: Αρχή λειτουργίας της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας.....	33
Εικόνα 8: Έννοια συστήματος σωλήνων-οδοστρώματος-θερμοηλεκτρικής γεννήτριας (PP-TEG)	34
Εικόνα 9: Αρχή λειτουργίας της συλλογής γεωθερμικής ενέργειας.....	37
Εικόνα 10: Αρχή λειτουργίας του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου υπό (α) μηδενική τάση. (β) ένταση και (γ) συμπίεση	39
Εικόνα 11: Αναλύθηκε το όριο στέγασης πουλερικών (οι δραστηριότητες στα διακεκομμένα κουτιά εξαιρέθηκαν)	50
Εικόνα 12: Συγκομιδή ενέργειας και τεχνολογίες συσχέτισης, συμπεριλαμβανομένης της μικρογεννήτριας δόνησης, της ηλιακής φωτοβολταϊκής κυψέλης	59
Εικόνα 13: Θερμοηλεκτρικό ζεύγος που μετατρέπει τη ροή θερμότητας που υπάρχει μεταξύ θερμής και ψυχρής διασταύρωσης σε ηλεκτρική ενέργεια.	62
Εικόνα 14: Ο χάρτης θερμοκρασίας δέρματος σε διαφορετικές θερμοκρασίες δωματίου...	63
Εικόνα 15: Συσκευή για τη συγκομιδή ενέργειας από την ανθρώπινη κίνηση	68
Εικόνα 16: Πρωτότυπο θεριστικής μηχανής ενέργειας	69
Εικόνα 17: Παθητικά δίκτυα αισθητήρων RFID για SHM.....	75
Εικόνα 18: IoT συσκευές	76

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1: Διατύπωση ερωτήσεων μελέτης.....	48
Πίνακας 2: Στρατηγικές μείωσης της χρήσης ενέργειας σχεδιασμού κτιρίων	52
Πίνακας 3: Άμεσες βελτιώσεις στην απόδοση της χρήσης ενέργειας.....	54
Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά κοινών μετατροπέων συλλογής ενέργειας.....	57
Πίνακας 5: Τυπική πυκνότητα ισχύος των πηγών ενέργειας περιβάλλοντος	57
Πίνακας 6: Ισχύς που διαχέεται ως θερμότητα από το ανθρώπινο σώμα κατά τη διάρκεια διαφορετικών δραστηριοτήτων.....	62
Πίνακας 7: Σύγκριση μεταξύ έξυπνων υλικών	67

Πρόλογος

Από κάθε χτύπο της καρδιάς μέχρι κάθε βήμα, τα ανθρώπινα όντα διαχέουν ενέργεια όλη την ώρα. Οι ερευνητές προσπαθούν να συλλέξουν ενέργεια από το ανθρώπινο σώμα και να τη μετατρέψουν σε ηλεκτρική ενέργεια, η οποία μπορεί να παρέχεται σε ηλεκτρονικές ιατρικές συσκευές που σχετίζονται στενά με την ανθρώπινη υγεία. Μια τέτοια μορφή ανακύκλωσης ενέργειας είναι επί του παρόντος ένα hotspot έρευνας στους τομείς της συλλογής ενέργειας και βιοηλεκτρονικής. Στη συνέχεια, εισάγονται οι ισχύουσες τεχνολογίες συλλογής ενέργειας και οι αντίστοιχοι μηχανισμοί λειτουργίας για διαφορετικές πηγές ενέργειας. Παρουσιάζονται επίσης ορισμένες τυπικές επιδείξεις και πρακτικές εφαρμογές κάθε τύπου τεχνολογίας συλλογής ενέργειας από το ανθρώπινο σώμα. Συγκεκριμένα, συνοψίζονται τα πλεονεκτήματα και τα κρίσιμα ζητήματα των διαφορετικών τεχνολογιών συλλογής ενέργειας και παρέχονται επίσης αντίστοιχες υποσχόμενες λύσεις. Επιπλέον, οι στρατηγικές αλληλεπίδρασης μεταξύ των διαφόρων συσκευών συλλογής ενέργειας και του ανθρώπινου σώματος συνοψίζονται από τις πτυχές των φορητών και εμφυτεύσιμων εφαρμογών.

Επιπλέον, η συγκομιδή ενέργειας είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνική που μπορεί να βοηθήσει στην παραγωγή ανανεώσιμων πηγών και καθαρής ενέργειας και να βελτιώσει τη βιωσιμότητα των υποδομών. Ο στόχος αυτής της εργασίας είναι η ανασκόπηση των διαθέσιμων τεχνικών συλλογής ενέργειας που χρησιμοποιούνται για δρόμους και γέφυρες για διαφορετικές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων των φωτοβολταϊκών κυττάρων, των ηλιακών συλλεκτών, των γεωθερμικών, θερμοηλεκτρικών, ηλεκτρομαγνητικών και πιεζοηλεκτρικών συστημάτων. Η ενέργεια που συλλέγεται μπορεί να παράγει ηλεκτρική ενέργεια, να παρέχει θέρμανση ή ψύξη, τήξη πάγου, να τροφοδοτεί ασύρματους αισθητήρες και να παρακολουθεί τις συνθήκες της δομής. Κάθε τεχνολογία συλλογής ενέργειας εξετάζεται σε βάθος, συμπεριλαμβανομένων των αρχών λειτουργίας, των παραδειγμάτων εφαρμογής, των εξελίξεων πρωτοτύπων και των σημαντικών ευρημάτων που αναφέρονται στη βιβλιογραφία.

Ακόμη, ένας άλλος τομέας επί της ενέργειας που καλύπτεται είναι ο κάτωθι. Ο κτηνοτροφικός τομέας είναι βασική πηγή εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και άλλων επιπτώσεων. Τα πουλερικά (κρέας και αυγά) είναι ο ταχύτερα αναπτυσσόμενος κλάδος της κτηνοτροφίας παγκοσμίως. Η στέγαση πουλερικών, συμπεριλαμβανομένων τόσο των υποδομών όσο και της ενέργειας λειτουργίας, μπορεί να αντιπροσωπεύει έως και το 50% της συνολικής χρήσης μη ανανεώσιμης ενέργειας (μη ΑΠΕ) και έως και 20%-35% ορισμένων επιπτώσεων στον κύκλο ζωής

της παραγωγής πουλερικών. Η εφαρμογή κτηριακών τεχνολογιών καθαρής μηδενικής ενέργειας (NZE) (δηλαδή που επιτρέπουν την καθαρή μηδενική κατανάλωση μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας επί τόπου) για στέγαση πουλερικών αντιπροσωπεύει μια πολλά υποσχόμενη αλλά μη μελετημένη στρατηγική μετριασμού, η οποία θα μπορούσε να βοηθήσει στη μείωση της εξάρτησης από ορυκτά καύσιμα και στη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου (GHG) εκπομπές.

Συνεπώς, τα τελευταία χρόνια, οι κοινότητες κεραιών και αισθητήρων έχουν γίνει μάρτυρες μιας σημαντικής ενσωμάτωσης κεραιών και αισθητήρων αναγνώρισης ραδιοσυχνότητας (RFID) λόγω της ώθησης που παρέχεται από το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) και τα κυβερνοφυσικά συστήματα (CPS). Τέτοιοι τύποι αισθητήρων μπορούν να βρουν πιθανές εφαρμογές στην παρακολούθηση της δομικής υγείας (SHM) λόγω του παθητικού, ασύρματου, απλού, συμπαγούς μεγέθους και πολυτροπικής φύσης τους, ιδιαίτερα σε υποδομές μεγάλης κλίμακας κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους. Τα μεγάλα δεδομένα από αυτούς τους πανταχού παρόντες αισθητήρες αναμένεται να δημιουργήσουν μεγάλο αντίκτυπο για την έξυπνη παρακολούθηση. Συμπερασματικά, το ηλεκτρικό δίκτυο εξελίσσεται ριζικά και μετατρέπεται σε έξυπνο δίκτυο, το οποίο χαρακτηρίζεται από βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση και διαχειρισσιμότητα των διαθέσιμων πόρων. Τα συστήματα διαχείρισης ενέργειας (EM), συχνά ενσωματωμένα με συστήματα οικιακού αυτοματισμού, διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στον έλεγχο της κατανάλωσης ενέργειας στο σπίτι και επιτρέπουν την αυξημένη συμμετοχή των καταναλωτών. Αυτά τα συστήματα παρέχουν στους καταναλωτές πληροφορίες σχετικά με τα πρότυπα κατανάλωσης ενέργειας και τους βοηθούν να υιοθετήσουν ενεργειακά αποδοτική συμπεριφορά.

Εισαγωγή

Η ενέργεια είναι ο ακρογωνιαίος λίθος της ανάπτυξης του ανθρώπινου πολιτισμού. Η αντίφαση μεταξύ της συνεχώς αυξανόμενης ζήτησης για ενέργεια και της μείωσης των υπαρχόντων ενεργειακών πόρων είναι ένα σοβαρό πρόβλημα που αντιμετωπίζει ο κόσμος σήμερα. Επιπλέον, η περιβαλλοντική ρύπανση που προκαλείται από την υπερβολική χρήση ορυκτών ενέργειας αυξάνεται επίσης. Ως εκ τούτου, είναι επείγον να βρεθούν και να αναπτυχθούν νέες πηγές ενέργειας που να είναι βιώσιμες και φιλικές προς το περιβάλλον.

Η ανακάλυψη και η χρήση νέων πηγών ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της ενέργειας του νερού, της αιολικής ενέργειας, της ηλιακής ενέργειας, της ενέργειας των ωκεανών και της βιολογικής ενέργειας, έχουν προωθήσει σε μεγάλο βαθμό την ανάπτυξη της ανθρώπινης κοινωνίας. Εκτός από τις παραπάνω βιώσιμες νέες πηγές ενέργειας που προέρχονται από το φυσικό περιβάλλον, η ενέργεια από το ανθρώπινο σώμα έχει πρόσφατα αποδειχθεί μια δυνητικά καθαρή ενέργεια για αειφόρο χρήση. Το ανθρώπινο σώμα βασίζεται στην πρόσληψη τροφής για να αποκτήσει ενέργεια, η οποία χρησιμοποιείται κυρίως για τη διατήρηση της θερμοκρασίας του σώματος και τη λειτουργία των οργάνων του σώματος, εκτός από κάποια άχρηστη ενέργεια που διαχέεται στο περιβάλλον [1]. Εάν η ανθρώπινη ενέργεια μπορούσε να αξιοποιηθεί σωστά, τα οφέλη θα ήταν ανυπολόγιστα όσον αφορά την τρέχουσα παγκόσμια πληθυσμιακή βάση.

Η ανακάλυψη πράσινων ενεργειακών πόρων που είναι ανανεώσιμες είναι μια από τις κρίσιμες προκλήσεις που αντιμετωπίζει ο κόσμος για την αειφόρο ανάπτυξη. Το πετρέλαιο, ο άνθρακας, η υδραυλική, το φυσικό αέριο και η πυρηνική ενέργεια είναι επί του παρόντος οι πιο συνηθισμένοι ενεργειακοί πόροι που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ενέργειας. Η συγκομιδή ενέργειας είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνική που μπορεί να παράγει ανανεώσιμες και καθαρές πηγές ενέργειας και να βελτιώσει τη βιωσιμότητα των υποδομών. Οι τεχνολογίες συλλογής ενέργειας συλλαμβάνουν την αχρησιμοποίητη και/από σπατάλη ενέργεια και τη μετατρέπουν σε μια πιο χρησιμοποιήσιμη μορφή [2]. Ηλιακή, αιολική, υδροηλεκτρική, θερμική, και κινητική ενέργεια είναι οι κοινές πηγές ενέργειας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη συλλογή ενέργειας γενικά. Τα τελευταία χρόνια, οι ερευνητές έχουν αρχίσει να συλλέγουν ηλεκτρική ενέργεια από το περιβάλλον χρησιμοποιώντας διαφορετικές τεχνικές, όπως η πιεζοηλεκτρική, η θερμοηλεκτρική, η ηλεκτρομαγνητική και η φωτοβολταϊκή συλλογή ενέργειας.

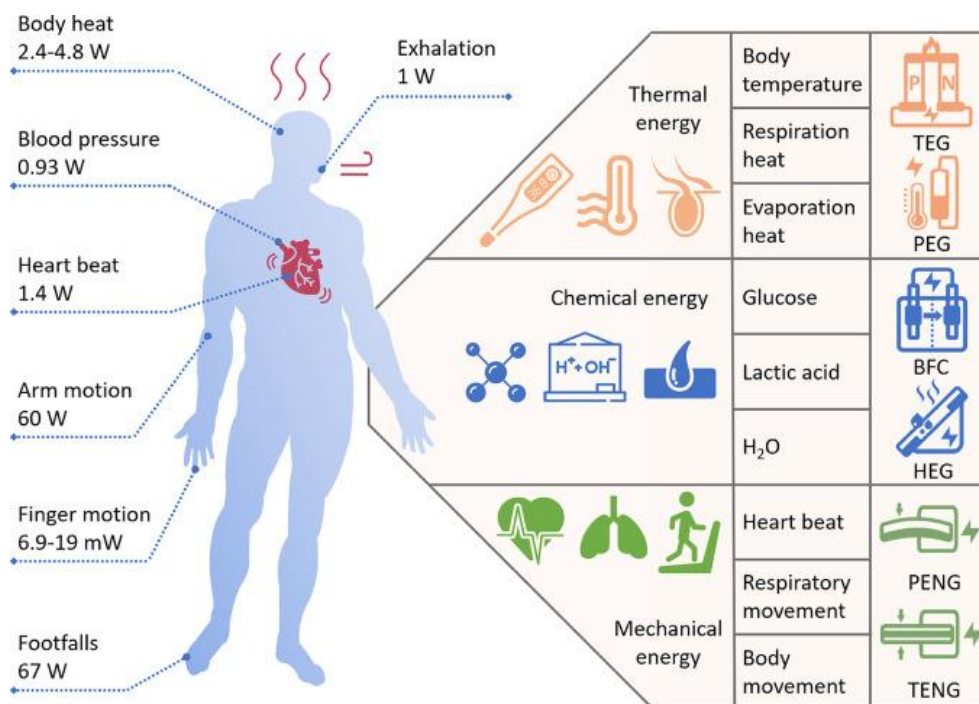
Επίσης, η εφαρμογή κτηριακών τεχνολογιών καθαρής μηδενικής ενέργειας (NZE) (δηλαδή που επιτρέπουν την καθαρή μηδενική κατανάλωση μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας επί τόπου) για στέγαση πουλερικών αντιπροσωπεύει μια πολλά υποσχόμενη αλλά μη μελετημένη στρατηγική μετριασμού, η οποία θα μπορούσε να βοηθήσει στη μείωση της εξάρτησης από ορυκτά καύσιμα και στη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου (GHG) εκπομπές. Η πληροφορία από εμπορικά και οικιστικά κτήρια καθαρής ενέργειας μηδενικής ενέργειας μπορεί, σε περιορισμένο βαθμό, να ενημερώσει σχετικά με το σχεδιασμό για τη στέγαση πουλερικών NZE, αλλά πρέπει να ληφθούν υπόψη μια ποικιλία μοναδικών σχεδιαστικών ζητημάτων και προκλήσεων που είναι εγγενείς στην περιορισμένη, εντατική κτηνοτροφία.

Οι προηγμένες τεχνολογικές τάσεις υπογραμμίζουν την εμφάνιση και την αυξανόμενη σημασία του χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και του φορητού/μικροσκοπικού ηλεκτρονικού εξοπλισμού, όπως φορητές ιατρικές και αυτόνομες συσκευές υποβοήθησης τεχνολογίας [3]. Σε πολλές περιπτώσεις, η ισχύς είναι ο περιοριστικός παράγοντας για τέτοιες συσκευές. Ως εκ τούτου, λειτουργούν με ενσύρματες ή ασύρματες διαμορφώσεις αισθητήρα-μορφοτροπέα-ενεργοποιητή που τροφοδοτούνται από μπαταρίες. Ωστόσο, σε τέτοιες εφαρμογές, οι μπαταρίες έχουν αρκετά μειονεκτήματα: την ανάγκη είτε να αντικαθίστανται είτε να επαναφορτίζονται περιοδικά από σταθερές πηγές ενέργειας και το σχετικά μεγάλο μέγεθος και βάρος τους [4]. Αυτοί οι περιορισμοί μπορεί να θεωρηθούν ως αρνητικός συμβιβασμός στην πιο κρίσιμη λειτουργική προσαρμοστικότητα ή φορητότητα. Μια ολοένα και πιο πρακτική δυνατότητα για την υπέρβαση των περιορισμών των μπαταριών ως πηγής ενέργειας είναι η εξαγωγή/συλλογή ενέργειας του περιβάλλοντος, είτε για την επαναφόρτισή τους είτε ακόμη και για την άμεση τροφοδοσία των συγκεκριμένων ηλεκτρικών φορτίων. Η συλλογή ενέργειας έχει γίνει επομένως μια ελκυστική πρόταση για την τροφοδοσία μιας μεγάλης ποικιλίας αυτόνομων μικροσυστημάτων, όπως οι ασύρματοι αισθητήρες.

Συμπερασματικά, αυτή η εργασία πρόκειται να συνοψίσει και να τονίσει με σαφήνεια τις προκλήσεις και τις σύγχρονες μεθόδους των παθητικών αισθητήρων και συστημάτων κεραίας RFID, όσον αφορά την ανίχνευση και την επικοινωνία από την άποψη του συστήματος [5]. Τα συστήματα EM νέας γενιάς αξιοποιούν προηγμένες τεχνολογίες ανάλυσης κι επικοινωνίας για να προσφέρουν στους καταναλωτές λειτουργικές πληροφορίες και λειτουργίες ελέγχου, διασφαλίζοντας ταυτόχρονα ευκολία στη χρήση, διαθεσιμότητα, ασφάλεια και απόρρητο.

1. Πηγή και κατανομή της ενέργειας του ανθρώπινου σώματος

Το ανθρώπινο σώμα είναι ένα φυσικό εργοστάσιο μετατροπής ενέργειας. Μέσω της πρόσληψης τροφής, οι υδατάνθρακες, τα λίπη, οι πρωτεΐνες και άλλα θρεπτικά συστατικά της τροφής θα απορροφηθούν. Ορισμένα από τα θρεπτικά συστατικά θα μετατραπούν σε γλυκογόνο, λιπίδια, αμινοξέα και άλλες ενεργειακές ουσίες που αποθηκεύονται στο ανθρώπινο σώμα, ενώ το άλλο μέρος θα μετατραπεί σε τριφωσφορική αδενοσίνη (ATP) [6], την ελάχιστη μονάδα ενεργειακών ουσιών που χρησιμοποιεί άμεσα το ανθρώπινο σώμα. Επίσης, γίνεται χρήση μέσω διαφόρων μεταβολικών οδών. Η συνολική ποσότητα ATP στο ανθρώπινο σώμα είναι περίπου 0,2 mol, που ισοδυναμεί με την ενέργεια μιας μπαταρίας AA. Ένας ενήλικας συνήθως καταναλώνει ενέργεια ATP (ίση με περίπου 100–150 mol) που ισοδυναμεί με το σωματικό του βάρος σε μία ημέρα για να διατηρήσει τις φυσιολογικές λειτουργίες και τις κύριες δραστηριότητες της ζωής [7]. Αυτές οι ενέργειες θα καταναλωθούν και θα απελευθερωθούν από το ανθρώπινο σώμα μέσω διαφορετικών μορφών ροής ενέργειας. Συγκεκριμένα, συνοψίζονται κυρίως τρεις μορφές ροής ενέργειας στο ανθρώπινο σώμα ως θερμική ενέργεια, χημική ενέργεια και μηχανική ενέργεια (μέση δεξιά πλευρά της παρακάτω εικόνας). Από κάθε αναπνοή και χτύπο της καρδιάς σε κάθε κίνηση, η ενέργεια θα απελευθερώνεται όλη την ώρα. Αυτές οι ροές ενέργειας αποτελούν την πρωταρχική βάση του ανθρώπινου σώματος ως δυνητικής πηγής ενέργειας [8].



Εικόνα 1: Ενέργεια ανθρώπινου σώματος

Όσον αφορά τη ροή θερμικής ενέργειας, το ανθρώπινο σώμα καταναλώνει μεγάλη ποσότητα ενέργειας κάθε μέρα για να διατηρήσει μια σταθερή θερμοκρασία σώματος [9]. Το μεγαλύτερο μέρος της θερμικής ενέργειας απελευθερώνεται στο περιβάλλον με τη μορφή ανταλλαγής θερμότητας μεταξύ του σώματος και του περιβάλλοντος, ενώ η άλλη ενέργεια διαχέεται μέσω της αναπνοής ή της εξάτμισης του ιδρώτα στο δέρμα. Όσον αφορά τη ροή χημικής ενέργειας, μετά την πέψη και την απορρόφηση, η τροφή θα μετατραπεί σε γλυκόζη και θα παραδοθεί σε διάφορα μέρη του σώματος με τη μορφή γλυκόζης στο αίμα για περαιτέρω χρήση και παραγωγή ενέργειας [10]. Επιπλέον, μετά από έντονη άσκηση, το ανθρώπινο σώμα θα παράγει υπερβολικό γαλακτικό οξύ στους μύες, μέρος του οποίου θα καταναλωθεί αργά και θα αποσυντεθεί στους μύες, ενώ το άλλο μέρος θα απεκκριθεί με νερό και ηλεκτρολύτες με τη μορφή ιδρώτα. Όσον αφορά τη ροή της μηχανικής ενέργειας, οι κινήσεις των άκρων συμπεριλαμβανομένης της ανύψωσης ποδιών, του βηματισμού, της ανύψωσης των χεριών, του χτυπήματος κ.λπ. [11], της αναπνευστικής κίνησης, του καρδιακού παλμού, ακόμη και της συστολής και χαλάρωσης των αιμοφόρων αγγείων, συνοδεύονται από την κατανάλωση και απελευθέρωση ενέργειας. Η μηχανική ενέργεια εξαρτάται κυρίως από τη σύσπαση και τη χαλάρωση των μυών σε αντίστοιχα μέρη του ανθρώπινου σώματος για την εκτέλεση εξωτερικών εργασιών για τη μετάδοση της ροής ενέργειας.

Ορισμένοι ερευνητές έχουν υπολογίσει θεωρητικά την ισχύ των διαφορετικών ενεργειακών ροών κατά τη διάρκεια της διαδικασίας μετάδοσης, για περαιτέρω αξιολόγηση των δυνατοτήτων τους ως ανθρώπινων πηγών ενέργειας (αριστερή πλευρά της παραπάνω εικόνας). Αξίζει να σημειωθεί ότι η πραγματική ενέργεια του ανθρώπινου σώματος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη συλλογή και τη μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια πρέπει να είναι πολύ μικρότερη από τη συνολική ενέργεια που καταναλώνεται από τη ροή ενέργειας κάθε μέρους του ανθρώπινου σώματος, για να αποφευχθούν πιθανές αρνητικές επιπτώσεις στο ανθρώπινο σώμα [12]. Αυτή είναι η θεμελιώδης προϋπόθεση με την οποία πρέπει να συμμορφώνονται όλες οι τεχνολογίες συλλογής ενέργειας του ανθρώπινου σώματος που συζητούνται παρακάτω. Συνοψίζονται, επίσης οι σχετικές αναδυόμενες τεχνολογίες συλλογής ενέργειας, σύμφωνα με διαφορετικές πηγές ενέργειας του ανθρώπινου σώματος (άκρα δεξιά πλευρά της παραπάνω εικόνας), τα οποία παρουσιάζονται κυρίως στις επόμενες ενότητες. Η θερμοηλεκτρική γεννήτρια (TEG) και η πυροηλεκτρική γεννήτρια (PEG) ισχύουν για τη συλλογή θερμικής ενέργειας. Η κυψέλη βιοκαυσίμου (BFC) και η γεννήτρια υδροβολταϊκών φαινομένων (HEG) ισχύουν για τη συλλογή χημικής

ενέργειας. Η πιεζοηλεκτρική νανογεννήτρια (PENG) και η τριβοηλεκτρική νανογεννήτρια (TENG) ισχύουν για τη συλλογή μηχανικής ενέργειας [13].

1.1. Πρόσφατη πρόοδος της τεχνολογίας συλλογής ενέργειας του ανθρώπινου σώματος

Αυτή η ενότητα εισάγει διαδοχικά την πρόσφατη ερευνητική πρόοδο της τεχνολογίας συλλογής ενέργειας που σχετίζεται με τρεις μορφές ανθρώπινης ροής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της θερμικής ενέργειας, της χημικής ενέργειας και της μηχανικής ενέργειας [14]. Συγκεκριμένα, για κάθε τεχνολογία συλλογής ενέργειας, γίνεται επεξεργασία στον μηχανισμό λειτουργίας και εισάγονται αντιπροσωπευτικές ερευνητικές εργασίες από demo έως πρακτικές εφαρμογές [15]. Επιπλέον, τα πλεονεκτήματα, τα κρίσιμα ζητήματα και οι υποσχόμενες λύσεις για διαφορετικές τεχνολογίες συλλογής ενέργειας συνοψίζονται επίσης σε αυτή την ενότητα.

1.2. Συγκομιδή θερμικής ενέργειας του ανθρώπινου σώματος

Προς το παρόν, η συλλογή θερμικής ενέργειας από το ανθρώπινο σώμα εξαρτάται κυρίως από το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο και το πυροηλεκτρικό φαινόμενο, που αναλογούν αντίστοιχα σε δύο τύπους συλλέκτη ενέργειας ως θερμοηλεκτρική γεννήτρια (TEG) και πυροηλεκτρική γεννήτρια (PEG) [16]. Παρόλο που και οι δύο τύποι συλλέκτη θερμικής ενέργειας μπορούν να συλλέξουν τη θερμότητα από το ανθρώπινο σώμα και να τη μετατρέψουν σε ηλεκτρική ενέργεια, λειτουργούν με διαφορετικούς τρόπους. Τα TEG εξαρτώνται από τη διαφορά χωρικής θερμοκρασίας για τη μετατροπή ενέργειας, ενώ τα PEG εξαρτώνται από τη χρονική διαφορά θερμοκρασίας [17]. Επομένως, αυτοί οι δύο τύποι συγκομιδών θερμικής ενέργειας έχουν τις ισχύουσες καταστάσεις και τις συγκεκριμένες μορφές τους κατά τη συλλογή θερμικής ενέργειας από το ανθρώπινο σώμα. Στη συνέχεια αναφέρονται, αντίστοιχα τα TEG και PEG παρακάτω από τις πτυχές των αρχών εργασίας και των τυπικών εργασιών.

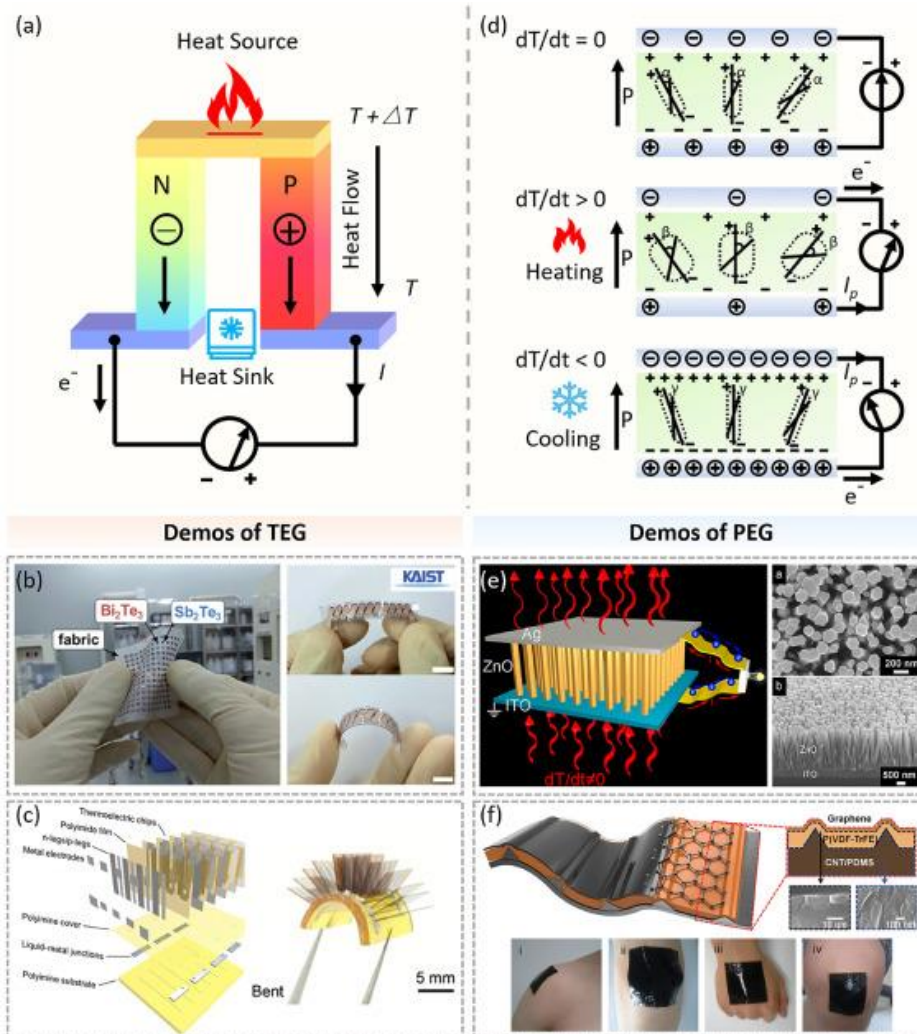
1.2.1. Θερμοηλεκτρική γεννήτρια

Η θερμοηλεκτρική γεννήτρια είναι ένας τύπος συλλέκτη θερμικής ενέργειας που βασίζεται στο θερμοηλεκτρικό φαινόμενο, ο οποίος μπορεί να μετατρέψει απευθείας τη θερμική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια [18]. Το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο που παρουσιάζεται εδώ αναφέρεται στο πρώτο θερμοηλεκτρικό φαινόμενο, γνωστό και ως φαινόμενο Seebeck [19]. Το φαινόμενο Seebeck προκαλείται κυρίως από τη

διάχυση των φορέων από το θερμό άκρο στο ψυχρό άκρο. Τόσο οι μεταλλικοί αγωγοί όσο και οι ημιαγωγοί μπορούν να παράγουν το φαινόμενο Seebeck, ενώ το φαινόμενο Seebeck των μετάλλων είναι πολύ μικρότερο από αυτό των ημιαγωγών, αφού η συγκέντρωση του φορέα και η θέση του ενεργειακού επιπέδου Fermi των μετάλλων βασικά δεν αλλάζουν με τη θερμοκρασία [20].

Ο ημιαγωγός τύπου P λαμβάνεται ως παράδειγμα για περιγραφή. Οι σπές θα διαχέονται από το άκρο υψηλής θερμοκρασίας στο άκρο χαμηλής θερμοκρασίας, λόγω της υψηλής συγκέντρωσης σπών στο θερμό άκρο [21]. Έτσι θα σχηματιστούν χωρικά φορτία και στα δύο άκρα του ημιαγωγού τύπου p σε ένα ανοιχτό κύκλωμα (αρνητικά φορτία συσσωρευμένα στο θερμό άκρο και θετικά φορτία συσσωρευμένα στο ψυχρό άκρο), το οποίο οδηγεί σε ένα ηλεκτρικό πεδίο που εμφανίζεται μέσα στον ημιαγωγό [22]. Όταν η μετατόπιση του ηλεκτρικού πεδίου εξουδετερώνει τη δράση διάχυσης και έχει επιτευχθεί μια σταθερή κατάσταση, εμφανίζεται μια ηλεκτροκινητική δύναμη που προκαλείται από τη βαθμίδα θερμοκρασίας στα δύο άκρα του ημιαγωγού, η οποία ονομάζεται θερμοηλεκτρική δύναμη.

Το TEG είναι μια συσκευή παραγωγής ηλεκτρισμού συνεχούς ρεύματος που κατασκευάζεται από σει θερμοστοιχείων ημιαγωγών, συνδεδεμένων σε σειρά ή παράλληλα. Η δομή και η αρχή λειτουργίας ενός TEG παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα (α). Κάθε θερμοστοιχείο αποτελείται από έναν ημιαγωγό τύπου n και έναν ημιαγωγό τύπου p σε σειρά [23]. Το συνδεδεμένο άκρο των δύο ημιαγωγών είναι σε επαφή με την πηγή θερμότητας και τα άκρα που δεν συνδέονται με την ψύκτρα μέσω καλωδίων. Λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του θερμού και του ψυχρού άκρου, υπάρχει συσσώρευση θετικών φορτίων στο ψυχρό άκρο του ημιαγωγού τύπου p και συσσώρευση αρνητικών φορτίων στο ψυχρό άκρο του ημιαγωγού τύπου n, σχηματίζοντας έτσι μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα ψυχρά άκρα δύο ημιαγωγών [24]. Εάν οι δύο ημιαγωγοί συνδέονται σε ένα εξωτερικό κύκλωμα μέσω καλωδίων, θα υπάρχει ρεύμα που θα ρέει μέσω του εξωτερικού κυκλώματος. Προκειμένου να επιτευχθεί υψηλή ισχύς εξόδου, πολλά ζεύγη θερμοστοιχείων συνδέονται συνήθως σε σειρά ή παράλληλα για να σχηματίσουν ένα θερμοστοιχείο [25].



Εικόνα 2: Συγκομιδή θερμικής ενέργειας του ανθρώπινου σώματος, από την αρχή έως τις επιδείξεις των TEG και PEG

Demos του TEG

Οι Kim Sun Jin et al. [17] ανέφεραν ένα λεπτό, ελαφρύ, εύκαμπτο και φορητό TEG που βασίζεται σε γυάλινο ύφασμα και αυτοσυντηρούμενη δομή (Άνωθεν εικόνα (β)), η πυκνότητα ισχύος της συσκευής μπορεί να φτάσει τα $3,8 \text{ mW cm}^{-2}$ και τα 28 mW g^{-1} διαφορά θερμοκρασίας 50K. Αν και αυτή η απόδοση εξόδου είναι καλή για εύκαμπτα TEG, εξακολουθεί να είναι δύσκολο για το ανθρώπινο σώμα να φτάσει σε διαφορά θερμοκρασίας 50 K, εκτός εάν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι τουλάχιστον μείον δέκα βαθμούς [26].

Οι Kim Min-Ki et al. [18] παρουσίασαν ένα υφασμάτινο TEG που μπορεί να ενσωματωθεί με ρούχα. Δύο τύποι θερμοηλεκτρικών υλικών ενσωματώνονται στο πολυμερές ύφασμα με εκτύπωση διανομέα για την κατασκευή θερμοστοιχείων. Όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι $5 \text{ }^\circ\text{C}$, το TEG που αποτελείται από 12 σετ θερμοστοιχείων στο στήθος του χρήστη μπορεί να παράγει ισχύ εξόδου $146,8 \text{ nW}$ [27].

Οι Ren et al. [19] σχεδίασαν ένα φορητό TEG με δυνατότητα τεντώματος, αυτο-θεραπευσιμότητας, ανακύκλωσης και επαναδιαμόρφωσης (Άνωθεν εικόνα (γ)), το οποίο κατασκευάζεται με αρθρωτά θερμοηλεκτρικά τσιπ, δυναμική ομοιοπολική πολυιμίνη και υγρό μέταλλο, χρησιμοποιώντας μια «μαλακή μητρική πλακέτα» άκαμπτη μονάδα πρόσθετης αρχιτεκτονικής [28]. Επιπλέον, ένα φιλμ μεταυλικού με ψύξη ακτινοβολίας είναι ενσωματωμένο στην ψυχρή πλευρά του TEG, για να βελτιώσει την απόδοση της συσκευής κάτω από το φως του ήλιου. Κάτω από διαφορά θερμοκρασίας 95 K, η συσκευή πέτυχε τάση ανοιχτού κυκλώματος ρεκόρ έως και 1 V/cm² μεταξύ των εύκαμπτων TEG.

1.2.2. Πυροηλεκτρική γεννήτρια

Η πυροηλεκτρική γεννήτρια (PEG) είναι ένας άλλος τύπος συλλέκτη θερμικής ενέργειας, ο οποίος βασίζεται στο πυροηλεκτρικό φαινόμενο. Για έναν κρύσταλλο με ιδιότητα αυθόρμητης πόλωσης, όταν ο κρύσταλλος θερμαίνεται ή ψύχεται, η ένταση της αυθόρμητης πόλωσης αλλάζει λόγω της αλλαγής της θερμοκρασίας, η οποία οδηγεί στη δημιουργία φορτίων επιφανειακής πόλωσης σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση του κρυστάλλου. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται πυροηλεκτρικό φαινόμενο [29]. Οι κρύσταλλοι που μπορούν να παράγουν πυροηλεκτρικά αποτελέσματα ονομάζονται πυροηλεκτρικοί. Τα πυροηλεκτρικά συστήματα γενικά έχουν πυροηλεκτρικά φαινόμενα πρώτης και δεύτερης τάξης.

Το πυροηλεκτρικό φαινόμενο πρώτης τάξης περιγράφει τα φορτία που δημιουργούνται απουσία καταπόνησης, η οποία συνήθως υπάρχει σε σιδηροηλεκτρικά υλικά όπως τον κεραμικό τιτανικό ζirkονικό μόλυβδο (PZT) και το κεραμικό τιτανικό βάριο (BTO). Ο αντίστοιχος μηχανισμός λειτουργίας φαίνεται στην παραπάνω εικόνα (δ), το οποίο βασίζεται στην τυχαία ταλάντωση του θερμικά επαγόμενου ηλεκτρικού διπόλου κοντά στους άξονες ευθυγράμμισης [30]. Η γωνία ταλάντωσης θα αυξάνεται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία. Σε θερμοκρασία δωματίου (RT), τα ηλεκτρικά δίπολα θα ταλαντωθούν τυχαία στους αντίστοιχους άξονες ευθυγράμμισης σε κάποιο βαθμό. Σε σταθερή θερμοκρασία, η συνολική μέση ένταση της αυθόρμητης πόλωσης του ηλεκτρικού διπόλου είναι σταθερή και δεν υπάρχει ροή ηλεκτρονίων [31].

Συνεπώς, όταν η θερμοκρασία αυξάνεται, τα ηλεκτρικά δίπολα ταλαντώνονται πιο βίαια γύρω από τους άξονες και η συνολική μέση αυθόρμητη πόλωση μειώνεται με την αύξηση της γωνίας ταλάντωσης [32]. Ως αποτέλεσμα, η ποσότητα του επαγόμενου φορτίου στο ηλεκτρόδιο μειώνεται, οδηγώντας στη ροή ηλεκτρονίων. Όταν η θερμοκρασία μειώνεται, το ηλεκτρικό δίπολο ταλαντώνεται σε μικρότερο εύρος γωνίας

λόγω της χαμηλότερης ενέργειας θερμικής ενεργοποίησης, οδηγώντας στην αυξανόμενη αυθόρμητη πόλωση. Ως αποτέλεσμα, η ποσότητα του επαγόμενου φορτίου στο αντίστοιχο ηλεκτρόδιο αυξάνεται και αναγκάζει τα ηλεκτρόνια να ρέουν προς την αντίθετη κατεύθυνση.

Το πυροηλεκτρικό φαινόμενο δεύτερης τάξης περιγράφει το φορτίο που προκαλείται από την καταπόνηση που προκαλείται από τη θερμική διαστολή, η οποία υπάρχει σε ZnO, CdS και άλλα υλικά δομής wurtzite με πιεζοηλεκτρικό αποτέλεσμα [33]. Η αλλαγή της θερμοκρασίας προκαλεί την παραμόρφωση του υλικού αρχικά και στη συνέχεια δημιουργείται ένα πιεζοηλεκτρικό δυναμικό λόγω του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου, οδηγώντας τη ροή των ηλεκτρονίων στο εξωτερικό κύκλωμα [34]. Η αντίστοιχη έξοδος σχετίζεται με τον πιεζοηλεκτρικό συντελεστή και τη θερμική παραμόρφωση του υλικού. Εάν ο ρυθμός αλλαγής θερμοκρασίας παραμένει αμετάβλητος, το PEG συνήθως δημιουργεί πυροηλεκτρικά φορτία με την ίδια ποσότητα και την αντίθετη πολικότητα όταν η θερμοκρασία ανεβαίνει και πέφτει [35].

Demos της PEG

Οι Yang et al. [23, 27] παρουσίασαν την πρώτη πυροηλεκτρική νανογεννήτρια (PyNG) που βασίζεται σε συστοιχίες νανοσυρμάτων ZnO (Άνωθεν εικόνα (ε)). Το κάτω ηλεκτρόδιο οξειδίου του κασσιτέρου του ινδίου (ITO) χρησιμεύει ως το υπόστρωμα ανάπτυξης των συστοιχιών νανοσυρμάτων ZnO και το φιλμ αργύρου ως το επάνω ηλεκτρόδιο. Η κατασκευασμένη πυροηλεκτρική νανογεννήτρια μπορεί να παράγει παλμό τάσης/ρεύματος 5,8 mV και 120,4 pA όταν η θερμοκρασία αυξάνεται γρήγορα από τη θερμοκρασία δωματίου 295 σε 304 K [36].

Οι Lee et al. [24, 30] παρουσίασαν μια εύκαμπτη και εξαιρετικά ελαστική πυροηλεκτρική νανογεννήτρια κατασκευασμένη από πολυμερές P(VDF-TrFE), σύνθετους νανοσωλήνες άνθρακα πολυδιμεθυλοσιλοξάνης (PDMS) και νανοφύλλα γραφενίου (Άνωθεν εικόνα (στ)). Αυτό το εξαιρετικά ελαστικό PyNG μπορεί να συνδεθεί απευθείας στο ανθρώπινο δέρμα και να δημιουργήσει παλμό τάσης έως και 400 mV όταν η θερμοκρασία αλλάζει γρήγορα μεταξύ υψηλών και χαμηλών θέσεων [37].

1.2.3. Εφαρμογές συγκομιδής θερμικής ενέργειας

Μετά τη συλλογή της θερμικής ενέργειας του ανθρώπινου σώματος και τη μετατροπή της σε ηλεκτρική ενέργεια, οι συσκευές συλλογής θερμικής ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως τροφοδοτικό για ορισμένα ηλεκτρονικά χαμηλής κατανάλωσης [38]. Ταυτόχρονα, αυτές οι συσκευές συλλογής θερμικής ενέργειας μπορούν επίσης

να χρησιμοποιηθούν ως αυτοτροφοδοτούμενοι αισθητήρες θερμοκρασίας λόγω της συγκεκριμένης σχέσης μεταξύ της εξόδου και της διαφοράς θερμοκρασίας. Εδώ παρουσιάζονται ορισμένα αντιπροσωπευτικά έργα των συσκευών συλλογής θερμικής ενέργειας όσον αφορά τις εφαρμογές των TEG και PEG [39].

Οι Sun et al. [25, 31] παρουσίασαν ένα εκτατό εξολοκλήρου υφάσματος TEG που βασίζεται σε υφαντές θερμοηλεκτρικές ίνες (Παρακάτω εικόνα (α)). Οι θερμοηλεκτρικές μονάδες τύπου πτ υφαινόνται μέσω ινών νανοσωληνών άνθρακα με πρόσμιξη, τυλιγμένες με ακρυλικές ίνες εναλλάξ [40]. Το τρισδιάστατο ύφασμα TEG χωρίς υπόστρωμα είναι εκτατό και πλήρως ευθυγραμμισμένο με την κατεύθυνση της ροής θερμότητας, επωφελούμενο από την ελαστικότητα των αλληλοσυνδεδεμένων θερμοηλεκτρικών μονάδων [41]. Όταν η διαφορά θερμοκρασίας είναι 44 K, η μέγιστη πυκνότητα ισχύος του υφάσματος TEG μπορεί να φτάσει τα 70 mWm^{-2} , που είναι αρκετό για την οδήγηση ορισμένων ηλεκτρονικών χαμηλής ισχύος.



Εικόνα 3: Εφαρμογές τεχνολογίας συλλογής θερμικής ενέργειας

Οι Li et al. [14, 26] χρησιμοποίησαν το οργανικό θερμοηλεκτρικό πολυμερές PEDOT:PSS και το ύφασμα 3D διαχωριστή για την κατασκευή ενός συλλέκτη θερμικής ενέργειας (Άνωθεν εικόνα (β)). Η συσκευή αποτελείται από 100 θερμοηλεκτρικές μονάδες ενσωματωμένες με ένα μπλουζάκι που μπορεί να αποκτήσει τάση εξόδου 203 mV όταν η διαφορά θερμοκρασίας είναι 40 K [42]. Παρουσιάστηκε ένας

θερμοηλεκτρικός ιμάντας καρπού για τη συλλογή ενέργειας από τη θερμότητα του σώματος, που μπορεί να ανάψει ένα LED σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 25 °C [43]. Έδειξαν επίσης μια φορητή, αυτοτροφοδοτούμενη συστοιχία αισθητήρων πίεσης θερμοκρασίας που μπορεί να παρασκευαστεί σε μεγάλη κλίμακα. Η ανάλυση ανίχνευσης θερμοκρασίας και ο χρόνος απόκρισης του αισθητήρα είναι 0,1 K και 1 s αντίστοιχα.

Οι Yang et al. [23, 27, 29] παρουσίασαν ένα ελαστικό και προσαρμοζόμενο στο σχήμα TEG (S-TEG) για τη συλλογή θερμότητας του ανθρώπινου σώματος [44], το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί σε πολύπλοκες και δυναμικές επιφάνειες πηγών θερμότητας (Ανωθεν εικόνα (γ)). Τα θερμοηλεκτρικά στοιχεία τύπου p (Sb_2Te_3) και n-type (Bi_2Te_3) κατασκευάζονται κυβοειδή μέσω θερμής συμπίεσης και συνδέονται με μια κυματιστή οφιοειδή δομή για να σχηματίσουν θερμοζεύγη. Το S-TEG αποτελείται από 10×Συστοιχία 10 θερμοζευγών που μπορούν να παράγουν ισχύ εξόδου 0,15 mW/cm² όταν η διαφορά θερμοκρασίας είναι 19 K [45]. Το S-TEG που είναι προσαρτημένο στον καρπό μπορεί να συλλέξει τη θερμότητα του σώματος και να παρέχει τάση για κίνηση αισθητήρα δύναμης για την ανίχνευση κίνησης των δακτύλων [46].

Οι Zhang et al. [11, 28, 40] κατασκεύασαν έναν αυτοτροφοδοτούμενο αισθητήρα διπλών παραμέτρων θερμοκρασίας-πίεσης που βασίζεται σε ανεξάρτητα θερμοηλεκτρικά και πιεζοηλεκτρικά αποτελέσματα (Ανωθεν εικόνα (d)). Η συσκευή που κατασκευάζεται από οργανικά θερμοηλεκτρικά υλικά που υποστηρίζονται από πλαίσιο μικροδομής μπορεί να λειτουργήσει κάτω από μια φυσική κλίση θερμοκρασίας, χωρίς εξωτερική παροχή ρεύματος. Η ανάλυση θερμοκρασίας και η ευαισθησία πίεσης του αισθητήρα μπορούν να φτάσουν τα 0,1 K και 28,9 kPa⁻¹ αντίστοιχα [47]. Έδειξαν επίσης μια ενσωματωμένη σειρά αισθητήρων 1350 εικονοστοιχείων με ηλεκτρονικό δάχτυλο σε υφασμάτινο πλαίσιο με εμβαδόν 2×3 cm².

Demos PEG

Οι Yang et al. [23] παρουσίασαν μια πυροηλεκτρική νανογεννήτρια αποτελούμενη από ένα μικρο/νανοσύρμα τιτανικού ζirkονικού μολύβδου (PZT) (Ανωθεν εικόνα (e)). Όταν η θερμοκρασία αυξάνεται από 296 σε 333 K [48], η συσκευή μπορεί να παράγει έξοδο 60 mV και 0,6 nA. Μια οθόνη υγρών κρυστάλλων ανάβει από τη συσκευή υπό μια μεγάλη αλλαγή θερμοκρασίας (~180 K) [49]. Προφανώς, μια τόσο μεγάλη διαφορά θερμοκρασίας δεν είναι κατάλληλη για τη συλλογή ανθρώπινης θερμικής ενέργειας, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αυτοτροφοδοτούμενος αισθητήρας για την ανίχνευση της θερμοκρασίας των άκρων των δακτύλων [50].

Οι Lee et al. [24, 30] κατασκεύασαν ένα εξαιρετικά ελαστικό PyNG, το οποίο αποτελείται από πυροηλεκτρικό υλικό P(VDF-TrFE), ελαστομερές PDMS και ηλεκτρόδιο Ag/AgNWs (Ανωθεν εικόνα (στ)). Χρησιμοποιώντας αρχιτεκτονικές με μικρομοτίβα και διαφορετικούς συντελεστές θερμικής διαστολής υλικών, η απόδοση εξόδου του PyNG έχει βελτιωθεί σημαντικά. Όταν η διαφορά θερμοκρασίας είναι 22 K και ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας είναι 105 K s^{-1} , το εκτατό PyNG μπορεί να παράγει τάση εξόδου 2,5 V και πυκνότητα ρεύματος 570 nA cm^{-2} . Αποθηκεύοντας την ενέργεια από το PyNG σε έναν πυκνωτή, τα LED και οι οθόνες LCD μπορούν να λειτουργήσουν [51].

Οι Sun et al. [24, 30] παρουσίασαν μια εύκαμπτη διαφανή τριβο-πιεζο-πυροηλεκτρική υβριδική γεννήτρια για τη συλλογή ενέργειας από το ανθρώπινο σώμα και τη φυσιολογική παρακολούθηση (Ανωθεν εικόνα (g)). Ένα δίκτυο νανοσυρμάτων αργύρου που μοιάζει με οπή φύλλων παρασκευάζεται ως διαφανή ηλεκτρόδια υψηλής απόδοσης (TEs) για την κατασκευή της υβριδικής γεννήτριας [52]. Παρουσιάζεται επίσης ένα οπτικό θερμόμετρο με την ενσωμάτωση της διαφανούς υβριδικής γεννήτριας με ένα θερμοχρωμικό φιλμ υγρών κρυστάλλων. Όταν ο χρήστης αναπνέει αδύναμα και κανονικά σε θερμοκρασία περιβάλλοντος $15 \text{ }^\circ\text{C}$, η συσκευή μπορεί να παράγει τάση εξόδου 25 V και 35 V αντίστοιχα, ενώ στο μεταξύ γίνεται κόκκινο και πράσινο ανάλογα [53].

Οι Xue et al. [32, 46] παρουσίασαν έναν αυτοτροφοδοτούμενο αισθητήρα αναπνοής που βασίζεται σε ένα φορητό PyNG, το οποίο κατασκευάζεται από ηλεκτρόδια καλυμμένα με φιλμ PVDF και στις δύο πλευρές κι έναν αναπνευστήρα N95 (Ανωθεν εικόνα (h)). Το φιλμ PVDF είναι ενσωματωμένο στη μέση του αναπνευστήρα για να ανιχνεύει τη ροή αέρα που εκπνέει ένας χρήστης [54]. Όταν ο χρήστης αναπνέει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος $5 \text{ }^\circ\text{C}$, το PyNG μπορεί να παράγει σήματα εξόδου 42 V/2,5 μA λόγω της διακύμανσης της θερμοκρασίας [55]. Η υψηλή απόδοση εξόδου PyNG μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της κατάστασης της ανθρώπινης αναπνοής και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

1.2.4. Σύγκριση TEG και PEG

Το ανθρώπινο σώμα είναι μια φυσική σταθερή πηγή θερμότητας. Το ανθρώπινο σώμα καταναλώνει μεγάλη ποσότητα ενέργειας κάθε μέρα για να διατηρεί σταθερή τη θερμοκρασία του σώματος και εκπέμπει θερμότητα στο περιβάλλον συνεχώς [56]. Ως εκ τούτου, η θερμική ενέργεια από το ανθρώπινο σώμα μπορεί να ανακυκλωθεί και να χρησιμοποιηθεί ως συνεχής πηγή ενέργειας.

Το πιο σημαντικό, αυτή η μορφή συλλογής ενέργειας δεν προκαλεί αρνητικές επιπτώσεις στο ίδιο το ανθρώπινο σώμα, επομένως η ανθρώπινη θερμότητα είναι μια ιδανική πηγή ενέργειας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί συνεχώς ανά πάσα στιγμή [57]. Ωστόσο, εξακολουθούν να υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί στην πραγματική χρήση της ανθρώπινης θερμότητας. Πρώτα απ' όλα, η απόδοση μετατροπής ενέργειας των TEG και PEG περιορίζεται από τον δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής (Αποτελεσματικότητα Carnot). Μια υψηλή απόδοση μετατροπής ενέργειας απαιτεί μεγάλη διαφορά θερμοκρασίας [58]. Δεδομένου ότι η κανονική θερμοκρασία του ανθρώπινου σώματος είναι σταθερή στους 36–37 °C, η διαφορά θερμοκρασίας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη συλλογή ενέργειας προέρχεται κυρίως από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του ανθρώπινου σώματος και του εξωτερικού περιβάλλοντος [59]. Ως εκ τούτου, είναι συνήθως αδύνατο να επιτευχθεί μεγάλη διαφορά θερμοκρασίας, εκτός από ένα εξαιρετικά ψυχρό περιβάλλον. Επιπλέον, αν και η θερμοκρασία μέσα στο ανθρώπινο σώμα είναι πιο σταθερή, είναι δύσκολο να δημιουργηθεί άμεσα η διαφορά θερμοκρασίας με το εξωτερικό, έτσι ώστε τα TEG και τα PEG να χρησιμοποιούνται ελάχιστα *in vivo*.

Τα TEG είναι επί του παρόντος ο κύριος τρόπος συλλογής θερμικής ενέργειας από το ανθρώπινο σώμα. Τα TEG υιοθετούν μια μέθοδο μετατροπής ενέργειας σε στερεά κατάσταση χωρίς χημική αντίδραση ή ρευστό μέσο, η οποία έχει τα πλεονεκτήματα του χωρίς θόρυβο, χωρίς κραδασμούς, χωρίς φθορά, χωρίς μέση διαρροή, μικρό μέγεθος, μικρό βάρος και μεγάλη διάρκεια ζωής κατά τη διαδικασία παραγωγής. Παρά αυτά τα πλεονεκτήματα, εξακολουθούν να υπάρχουν ορισμένα κρίσιμα ζητήματα για τα TEG. Τα TEG βασίζονται σε μια χωρικά διαβαθμισμένη κατανομή της θερμοκρασίας [60]. Σε σύγκριση με τα PEG, τα TEG εξαρτώνται περισσότερο από την ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ του ανθρώπινου σώματος και του εξωτερικού περιβάλλοντος. Επιπλέον, τα TEG αποτελούνται γενικά από πολλαπλά σετ θερμοστοιχείων ημιαγωγών σε σειρά και παράλληλα, γεγονός που οδηγεί σε πολύπλοκη δομή και υψηλό κόστος [61].

Τα PEG μπορούν να συλλέξουν μόνο θερμική ενέργεια που αλλάζει στη θερμοκρασία με την πάροδο του χρόνου, επομένως υπάρχουν σχετικά λίγα εφαρμόσιμα σενάρια για τη συλλογή θερμικής ενέργειας του ανθρώπινου σώματος, όπως η μη συνεχής αναπνοή θερμότητας από το στόμα και τη μύτη. Ωστόσο, τα PEG μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ιδανικοί αυτοτροφοδοτούμενοι αισθητήρες, ιδιαίτερα κατάλληλοι για την ανίχνευση ανθρώπινων δραστηριοτήτων και μεταβολών θερμοκρασίας [62]. Σε σύγκριση με το TEG, το PEG έχει γενικά μια απλή δομή συσκευής και σχετικά υψηλή τάση εξόδου, αλλά δεν είναι τόσο σταθερό όσο το προηγούμενο. Όταν η θερμοκρασία

είναι υψηλότερη από τη θερμοκρασία Curie, τότε η αυθόρμητη πόλωση των πυροηλεκτρικών υλικών θα εξαφανιστεί. Επιπλέον, η ατμόσφαιρα εξαιρετικά υψηλής υγρασίας μειώνει επίσης την απόδοσή του.

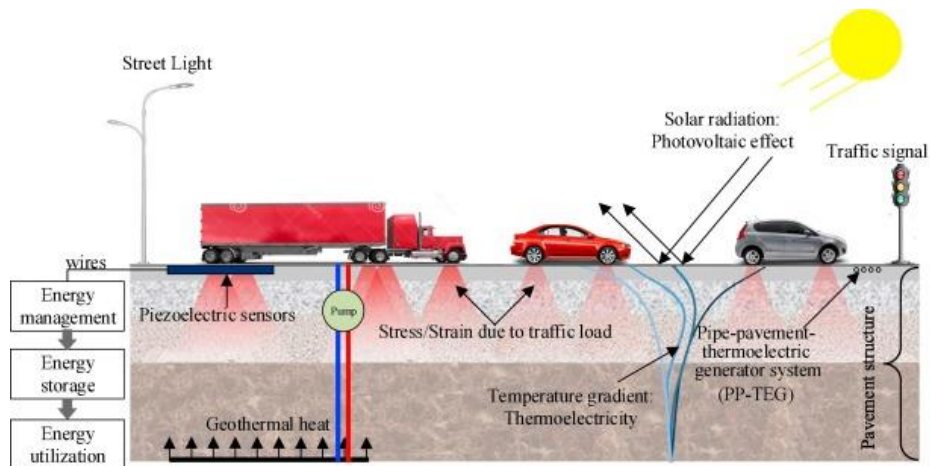
Συνοπτικά, τα TEG και τα PEG που εφαρμόζονται επί του παρόντος στη συλλογή θερμικής ενέργειας του ανθρώπινου σώματος μπορούν να παρέχουν μόνο σχετικά χαμηλή ισχύ εξόδου με χαμηλή απόδοση μετατροπής ενέργειας [63]. Η αύξηση της επιφάνειας θερμικής επαφής και η χρήση ενός αποδοτικού συστήματος διαχείρισης ισχύος μπορεί να βελτιώσει κατάλληλα την απόδοση εξόδου και μετατροπής. Για τα TEG, το βασικό περιεχόμενο της τρέχουσας έρευνας είναι η συνέχιση της εις βάθος μελέτης των υλικών θερμοηλεκτρικής μετατροπής, η ανάπτυξη θερμοηλεκτρικών υλικών υψηλής θερμοηλεκτρικής αξίας (ZT) με υψηλό συντελεστή Seebeck, υψηλή αγωγιμότητα και χαμηλή θερμική αγωγιμότητα.

Επιπλέον, η αύξηση του αριθμού των σειρών και των παράλληλων θερμοστοιχείων για την κατασκευή ενός πιο αποτελεσματικού θερμοστοιχείου για τη χρήση του χώρου, η δημιουργία μιας κατάλληλης δομής που να ταιριάζει με την κατεύθυνση ροής θερμότητας και η χρήση μιας βοηθητικής μονάδας απαγωγής θερμότητας για τη βελτίωση της απόδοσης συλλογής θερμότητας μπορεί επίσης να βελτιώσει εν μέρει την απόδοση εξόδου των TEGs [64]. Για τα PEG, η ανάπτυξη πυροηλεκτρικών υλικών με υψηλό πυροηλεκτρικό συντελεστή, η περαιτέρω βελτιστοποίηση της δομής της συσκευής και η χρήση προηγμένης τεχνολογίας συσκευασίας είναι πολλά υποσχόμενες μέθοδοι [65].

2. Συγκομιδή ενέργειας για εφαρμογές οδοποιίας και γεφυρών

Η ανακάλυψη πράσινων ενεργειακών πόρων που είναι ανανεώσιμες είναι μια από τις κρίσιμες προκλήσεις που αντιμετωπίζει ο κόσμος για την αειφόρο ανάπτυξη. Το πετρέλαιο, ο άνθρακας, η υδραυλική, η πυρηνική ενέργεια και το φυσικό αέριο είναι επί του παρόντος οι πιο συνηθισμένοι ενεργειακοί πόροι που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ενέργειας. Η συγκομιδή ενέργειας είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνική που μπορεί να παράγει ανανεώσιμες και καθαρές πηγές ενέργειας και να βελτιώσει τη βιωσιμότητα των υποδομών [66]. Οι τεχνολογίες συλλογής ενέργειας συλλαμβάνουν την αχρησιμοποίητη ενέργεια και τη μετατρέπουν σε μια πιο χρησιμοποιήσιμη μορφή. Ηλιακή, αιολική, υδροηλεκτρική, θερμική και κινητική ενέργεια είναι οι κοινές πηγές ενέργειας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη συλλογή ενέργειας γενικά [67]. Τα τελευταία χρόνια, οι ερευνητές έχουν αρχίσει να συλλέγουν ηλεκτρική ενέργεια από το περιβάλλον χρησιμοποιώντας διαφορετικές τεχνικές, όπως η πιεζοηλεκτρική, η θερμοηλεκτρική, η ηλεκτρομαγνητική και η φωτοβολταϊκή συλλογή ενέργειας [68].

Οι δρόμοι είναι μία από τις σημαντικότερες αστικές υποδομές που διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη σύνδεση των κοινοτήτων και στη μετακίνηση των ανθρώπων. Παραδοσιακά, ο δρόμος θεωρείται ως η πλατφόρμα κατασκευής για τη μεταφορά φόρτου κυκλοφορίας. Οι επιφάνειες των δρόμων και τα καταστρώματα γεφυρών εκτίθενται συνεχώς σε φόρτωση οχημάτων και ηλιακή ακτινοβολία, η οποία προκαλεί μηχανικούς κραδασμούς και θερμικές κλίσεις στα στρώματα του οδοστρώματος. Η μηχανική ενέργεια μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω μαγνητικού πεδίου για ηλεκτρομαγνητικό υλικό ή πεδίο καταπόνησης για πιεζοηλεκτρικό υλικό [69]. Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να συλλεχθεί μέσω φωτοβολταϊκών στοιχείων, ροής θερμότητας ή θερμοηλεκτρικού πεδίου. Επομένως, η σπατάλη ενέργειας στο οδόστρωμα μπορεί να συλλεχθεί και να μετατραπεί σε χρησιμοποιήσιμη ενέργεια που έχει διαφορετικές εφαρμογές. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζονται όλες τις διαθέσιμες τεχνολογίες συλλογής ενέργειας που μπορούν να εφαρμοστούν σε δρόμους [70].



Εικόνα 4: Διαθέσιμες πηγές συλλογής ενέργειας στους δρόμους

Το σύστημα συλλογής ενέργειας αποτελείται συνήθως από τρία κύρια εξαρτήματα: γεννήτρια ενέργειας, ηλεκτρικό κύκλωμα και συσκευή αποθήκευσης. Αφού μετατραπεί η ηλεκτρική ενέργεια από άλλες ενέργειες στο περιβάλλον, το ηλεκτρικό κύκλωμα χρησιμοποιείται για την αύξηση και τη ρύθμιση της παραγόμενης τάσης [71]. Η συλλεγόμενη ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί σε επαναφορτιζόμενη μπαταρία ή υπερπυκνωτή. Ανάλογα με την αρχή κάθε τεχνολογίας συγκομιδής, η ποσότητα της ενεργειακής παραγωγής ποικίλλει σημαντικά. Η μεγάλη ποσότητα ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας για την ηλεκτρική ενέργεια και το δίκτυο [72]. Από την άλλη πλευρά, η σχετικά μικρή ποσότητα ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη θέρμανση της επιφάνειας του δρόμου ή του καταστρώματος της γέφυρας για αντιπάγωση, φωτισμό ή τροφοδοσία συσκευών κυκλοφορίας.

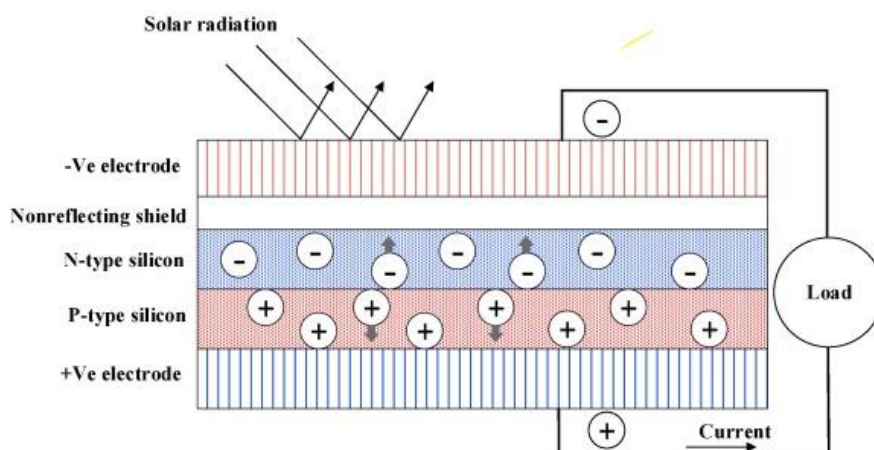
Από την άλλη πλευρά, η συγκομιδή ενέργειας θα μπορούσε να παρέχει συνεχή υποστήριξη ισχύος για in-site αισθητήρες παρακολούθησης που τοποθετούνται σε δρόμους και καταστρώματα γεφυρών [73]. Οι παραδοσιακοί αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της επιτόπιας κατάστασης πολιτικών κατασκευών περιλαμβάνουν επιταχυνσιόμετρο, αισθητήρα μετατόπισης, αισθητήρα δύναμης, μετρητή τάσης αντίστασης και οπτική ίνα. Πρόσφατα, το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για την παρακολούθηση της δομικής υγείας (SHM). Ωστόσο, ένας από τους κύριους περιορισμούς του ασύρματου αισθητήρα είναι η παροχή ρεύματος για μακροχρόνια εφαρμογή. Ο πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας με σωστό σχεδιασμό συσκευασίας μπορεί να συμπεριφέρεται ως έξυπνα υλικά για SHM [74]. Για παράδειγμα, γέφυρες αυτοκινητοδρόμων δονούνται συνεχώς λόγω των κινούμενων οχημάτων και των ανέμων. Η δυναμική απόκριση των γεφυρών προκαλεί καταπονήσεις στους ηλεκτρομαγνητικούς ή πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες

που είναι προσαρτημένοι στα μέλη της γέφυρας, οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παροχή ρεύματος στους αισθητήρες [75].

2.1. Συγκομιδή ενέργειας για εφαρμογές οδοποιίας

2.1.1. Συγκομιδή ηλιακής ενέργειας

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο (PV) χρησιμοποιείται για τη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια. Το ηλιακό στοιχείο αποτελείται από έναν ημιαγωγό τύπου P και έναν ημιαγωγό τύπου N. Όταν το ηλιακό φως φτάνει στα υλικά ημιαγωγών των Φ/Β κυψελών, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια αναγκάζονται να ρέουν προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση [76]. Τα αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια κινούνται προς τον ημιαγωγό τύπου N, ενώ τα θετικά φορτισμένα ηλεκτρόνια κινούνται προς τον ημιαγωγό τύπου P. Η αρχή λειτουργίας του Φ/Β στοιχείου φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Η ροή των κινούμενων ηλεκτρονίων δημιουργεί ηλεκτρικό ρεύμα όταν συνδέεται με ηλεκτρικό φορτίο.



Εικόνα 5: Αρχή λειτουργίας φωτοβολταϊκών ηλιακών κυψελών

Αρκετές μελέτες έχουν διερευνήσει εφαρμογές φωτοβολταϊκών κυψελών στον δρόμο για τη συλλογή ηλιακής ενέργειας [77]. Οι Kang-Won et al. [67] ερεύνησαν τη σκοπιμότητα της συλλογής ηλιακής ενέργειας χρησιμοποιώντας τεχνολογίες φωτοβολταϊκών στο δρόμο. Οι συγγραφείς ανέφεραν ότι η εφαρμογή φωτοβολταϊκών κυψελών λεπτής μεμβράνης στο οδόστρωμα παρουσιάζει προκλήσεις λόγω δυσκολιών στη διατήρηση της ανθεκτικότητας κάτω από διάφορα φορτία κυκλοφορίας και καιρικές συνθήκες. Επομένως, χρειάζονται νέα σχέδια ηλιακών κυψελών λεπτής μεμβράνης με κατάλληλα χαρακτηριστικά επιφάνειας για χρήση ως επιφάνεια οδοστρώματος [78].

Η πρώτη εφαρμογή πεδίου φωτοβολταϊκών κυψελών στο πεζοδρόμιο στις ΗΠΑ είναι ένα πρωτότυπο ηλιακού χώρου στάθμευσης που χρηματοδοτήθηκε από την

Ομοσπονδιακή Διοίκηση Αυτοκινητοδρόμων (FHWA) το 2009. Το 2014, η εταιρεία, SolaRoad, κατασκεύασε έναν ποδηλατόδρομο 100 μέτρων με ηλιακούς συλλέκτες με ανώτερη στρώση γυαλιού 1 cm στην Ολλανδία [79]. Ο ποδηλατόδρομος παρήγαγε 350 kWh ηλεκτρικής ενέργειας σε έναν χρόνο. Η SolaRoad έδειξε ότι η επίπεδη γωνία του ηλιακού πάνελ θα απέδιδε μόνο το ένα τρίτο της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τα συμβατικά φωτοβολταϊκά πάνελ ταράτσας.

Το 2015, η εταιρεία Colas, σε συνεργασία με το Γαλλικό Εθνικό Ινστιτούτο Ηλιακής Ενέργειας, ισχυρίστηκε ότι είχε αναπτύξει έναν νέο τύπο φωτοβολταϊκών οδοστρωμάτων με το όνομα Wattway [80], κατάλληλο για βιομηχανική χρήση. Τα ηλιακά κύτταρα αναφέρθηκε ότι είναι ανθεκτικά στην κυκλοφορία και στην ολίσθηση και έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε όλους τους τύπους οδικών υποδομών στο μέλλον.

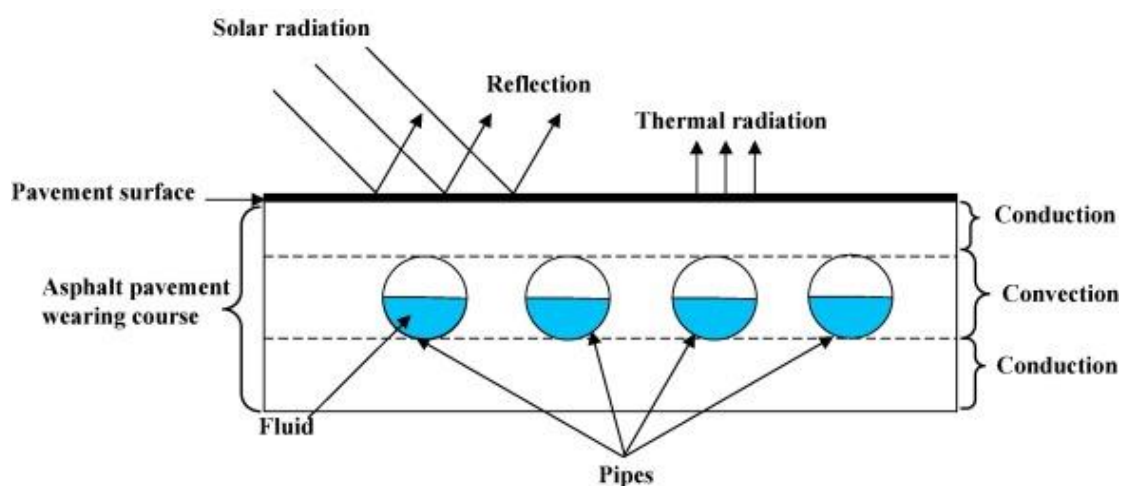
Μελέτες διαπίστωσαν επίσης ότι οι επιφάνειες οδοστρώματος ΦΒ παρέχουν μια άλλη αποτελεσματική λύση για τον μετριασμό του φαινομένου UHI. Οι Efthimiou et. al. τόνισαν τη συμβολή που είχε το Φ/Β οδόστρωμα στο φαινόμενο UHI, χρησιμοποιώντας αριθμητικές προβλέψεις και ένα πείραμα πεδίου μικρής κλίμακας [81]. Τα αποτελέσματα έδειξαν χαμηλότερες θερμοκρασίες επιφάνειας και περιβάλλοντος που σχετίζονται με το φωτοβολταϊκό οδόστρωμα από εκείνες που σχετίζονται με το παραδοσιακό ασφαλτικό οδόστρωμα. Οι Golden et al. διεξήγαγαν μια συγκριτική μελέτη για τη διερεύνηση των θερμικών επιπτώσεων τριών διαφορετικών επιφανειών οδοστρωμάτων [82]. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η επιφανειακή κάλυψη με Φ/Β πάνελ παρείχε τη μεγαλύτερη θερμική μείωση σε σύγκριση με την πλήρως εκτεθειμένη επιφάνεια του ασφαλτικού οδοστρώματος και την επιφάνεια του ασφαλτικού οδοστρώματος που σκιάζεται από τη δασοκομία.

Εκτός από τη χρήση της τεχνολογίας φωτοβολταϊκών για την σύλληψη ενέργειας από το οδόστρωμα, υπάρχουν και άλλες εφαρμογές όπως τα ηχοφράγματα. Η εφαρμογή φωτοβολταϊκών φραγμών θορύβου (PVNB) αυξάνεται σε μίλια αυτοκινητοδρόμων και σιδηροδρομικών γραμμών στον κόσμο. Αυτή η τεχνολογία είναι μια από τις πιο αποτελεσματικές εφαρμογές της τεχνολογίας φωτοβολταϊκών και παρέχει προστασία από τον θόρυβο στις γύρω περιοχές [83]. Οι Nordmann et al. μελέτησαν τις δυνατότητες του PVNB για έξι ευρωπαϊκές χώρες. Οι συγγραφείς παρατήρησαν ότι αυτές οι τεχνολογίες παρήγαγαν 800 MWh ηλεκτρικής ενέργειας με δυνατότητα επέκτασης σε 680 GWh ηλεκτρικής ενέργειας ετησίως [84].

Σημειώνεται ότι η συλλογή ηλιακής ενέργειας μπορεί να μεγιστοποιηθεί μόνο κάτω από το άμεσο ηλιακό φως κατά τη διάρκεια μιας συγκεκριμένης περιόδου της ημέρας. Η

παραγωγικότητα είναι περιορισμένη σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού, όπως κατά τη διάρκεια μιας συνεφιασμένης ημέρας ή σε τούνελ. Παρόλο που το Φ/Β οδόστρωμα είναι περιβαλλοντικά προτιμότερο από τα συμβατικά οδοστρώματα, απαιτούνται περαιτέρω προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης για να καταστεί εφικτή επιλογή για καθημερινή χρήση λόγω του υψηλού κόστους και της αντοχής του σε μεταβλητές καιρικές συνθήκες και συνθήκες κυκλοφορίας [85].

Ένα σύστημα ηλιακών συλλεκτών αποτελείται από ένα δίκτυο σωλήνων κάτω από το οδόστρωμα με το κυκλοφορούν υγρό μέσα. Καθώς το οδόστρωμα απορροφά την ακτινοβολία από τον ήλιο και την ατμόσφαιρα, η θερμοκρασία του οδοστρώματος αυξάνεται και η θερμότητα μεταφέρεται στο ρευστό μέσα στο σύστημα σωληνώσεων λόγω των κλίσεων θερμοκρασίας [86]. Υπάρχουν τρεις βασικές διαδικασίες εξισορρόπησης θερμότητας που εμπλέκονται στο σύστημα ηλιακών συλλεκτών οδοστρώματος: αγωγιμότητα, μεταφορά και ακτινοβολία, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα. Η αγωγή συμβαίνει μεταξύ του οδοστρώματος και των τοιχωμάτων του σωλήνα. Η μεταφορά ενέργειας συμβαίνει όταν υπάρχουν διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ του αέρα περιβάλλοντος, του οδοστρώματος, των τοιχωμάτων των σωλήνων και του ρευστού που κυκλοφορεί στους σωλήνες [87]. Η ακτινοβολία μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μπορεί να συμβεί χωρίς οποιοδήποτε υλικό μέσο, συμπεριλαμβανομένης της μεταφοράς ηλιακής ακτινοβολίας στο πεζοδρόμιο και θερμική ακτινοβολία μεταξύ της ατμόσφαιρας του περιβάλλοντος και του οδοστρώματος.



Εικόνα 6: Μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας σε ασφαλτικούς ηλιακούς συλλέκτες

Η θερμότητα που δεσμεύεται από το σύστημα σωληνώσεων μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε θερμοηλεκτρικές γεννήτριες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή να αποθηκευτεί σε δεξαμενές ενέργειας [88]. Κατά τη διάρκεια του χειμώνα,

η αποθηκευμένη θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το λιώσιμο του χιονιού στους δρόμους, την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και τη θέρμανση των κοντινών κτηρίων. Ένα άλλο πλεονέκτημα που σχετίζεται με το σύστημα ηλιακών συλλεκτών πεζοδρομίου είναι η ικανότητά του να μειώνει τις επιπτώσεις των αστικών θερμικών νησίδων (UHI) στις μητροπολιτικές περιοχές, μειώνοντας τη θερμοκρασία του οδοστρώματος [89]. Το αποτέλεσμα ψύξης βοηθά επίσης στην επιβράδυνση της φθοράς του οδοστρώματος και στη διατήρηση της απόδοσης του οδοστρώματος κάτω από καιρικές συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας.

Μία από τις πρωτοπόρες εφαρμογές των ηλιακών συλλεκτών πεζοδρομίου είναι το σύστημα τήξης χιονιού που ονομάζεται SERSO στην Ελβετία και ξεκίνησε τη λειτουργία του το 1994 [90]. Το σύστημα SERSO έχει αποδείξει τη σκοπιμότητα αποθήκευσης εποχιακής ηλιακής ενέργειας σε υπόγεια συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Το σύστημα SERSO αποτελείται από 91 εναλλάκτες θερμότητας γεωτρήσεων (βάθους 65 m) που διατηρούν τη θερμοκρασία πάνω από 3°C στην επιφάνεια του καταστρώματος της γέφυρας το χειμώνα. Η ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιήθηκε μόνο για την κυκλοφορία του νερού εντός των σωλήνων χωρίς τη χρήση αντλιών θερμότητας [91].

Δεδομένου ότι η τεχνολογία του ηλιακού συλλέκτη οδοστρώματος είναι εφικτή για εφαρμογές θέρμανσης νερού, πρόσφατες μελέτες έχουν στόχο να βελτιστοποιήσουν τις διαμορφώσεις των συστημάτων. Οι ερευνητές πρότειναν την αλλαγή των θερμικών ιδιοτήτων του οδοστρώματος και των συστημάτων συλλογής ηλιακής ενέργειας, προκειμένου να αυξηθεί η απόδοση των ηλιακών συλλεκτών. Είτε σκόνες από ανθρακονήματα είτε γραφίτης χρησιμοποιήθηκαν για την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας του ασφατικού σκυροδέματος και τη βελτίωση της απόδοσης του ηλιακού συλλέκτη [92]. Αν και οι μεταλλικοί σωλήνες έχουν υψηλή θερμική αγωγιμότητα, οι πλαστικοί σωλήνες χρησιμοποιούνται συνήθως για την αποφυγή διάβρωσης και δομικής αστοχίας. Νερό και μείγματα νερού-αντιψυκτικού χρησιμοποιούνται συνήθως ως ρευστά ανταλλαγής θερμότητας σε συστήματα ηλιακών συλλεκτών [93]. Μια μελέτη έδειξε ότι η αύξηση του ρυθμού ροής θα μπορούσε να επιταχύνει τη διαδικασία μεταφοράς θερμότητας. Ωστόσο, η μελέτη που διεξήχθη από τους Chen et al. έδειξε ότι η απόδοση μεταφοράς θερμότητας δεν βελτιώνεται απαραίτητα με τον αυξημένο ρυθμό ροής.

Η απόδοση των ηλιακών συλλεκτών οδοστρώματος επηρεάζεται από γεωμετρικές και λειτουργικές παραμέτρους, όπως η απόσταση των σωλήνων, το βάθος και ο ρυθμός ροής του ρευστού [94]. Οι Matrawy και Farkas διεξήγαγαν μια μελέτη

σύγκρισης των διατάξεων σωλήνων και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι δύο παράλληλοι συλλέκτες πλακών παρείχαν την υψηλότερη απόδοση μεταξύ τριών επιλογών που περιελάμβαναν παράλληλες και σερπεντινικές διατάξεις. Οι Chen et al. συνέκριναν διαφορετικές αποστάσεις σωλήνων και διαπίστωσαν ότι η θερμοκρασία του οδοστρώματος μειώθηκε ταχύτερα με την κοντινότερη απόσταση των σωλήνων. Οι Chen et al. διεξήγαγαν μια μελέτη για να αναλύσει τις επιδόσεις λιώσιμου του χιονιού του ηλιακού συλλέκτη ασφάλτου. Τα καλύτερα αποτελέσματα, όσον αφορά τον χρόνο τήξης και το κόστος λειτουργίας, επιτεύχθηκαν όταν οι σωλήνες τοποθετήθηκαν σε βάθος 4 cm ή 10 cm με απόσταση από 0,18 m έως 0,4 m [95].

Ωστόσο, το σύστημα σωληνώσεων με υγρό έχει αρκετούς αναπόφευκτους περιορισμούς. Πρώτον, το πεζοδρόμιο μπορεί να υποστεί ζημιά λόγω της τοποθέτησης του συστήματος σωληνώσεων στο εσωτερικό του. Δεύτερον, οι ακανόνιστες διαρροές των σωλήνων μπορεί να συμβούν με μεταλλικό και πλαστικό υλικό. Τρίτον, το σύστημα σωληνώσεων αυξάνει τη δυσκολία συντήρησης και αποκατάστασης του οδοστρώματος [96]. Για να αποφευχθεί το ζήτημα της διαρροής υγρού, οι Garcia και Partl πρότειναν τους παράλληλους αγωγούς αέρα αντί να γεμίζουν σωλήνες με υγρό. Η μελέτη καταλήγει στο συμπέρασμα ότι ο ρυθμός ροής του αέρα που δημιουργείται από τη διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας του αέρα και της θερμοκρασίας του οδοστρώματος είναι ένας σημαντικός παράγοντας για τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης του συστήματος [97]. Παράλληλα, με στόχο την υπέρβαση των περιορισμών του συστήματος σωληνώσεων ηλιακού συλλέκτη, οι Muñoz et al. προτείνουν τη χρήση ενός πολύ πορώδους μεσαίου στρώματος κάτω από την επιφάνεια του οδοστρώματος αντί του συστήματος σωληνώσεων. Οι συγγραφείς ανέφεραν ότι η απόδοση του συστήματος θα μπορούσε να περιοριστεί με τη χαμηλή ταχύτητα ροής αέρα, αν και απαιτούνται περαιτέρω μελέτες για πρακτικές εφαρμογές [98].

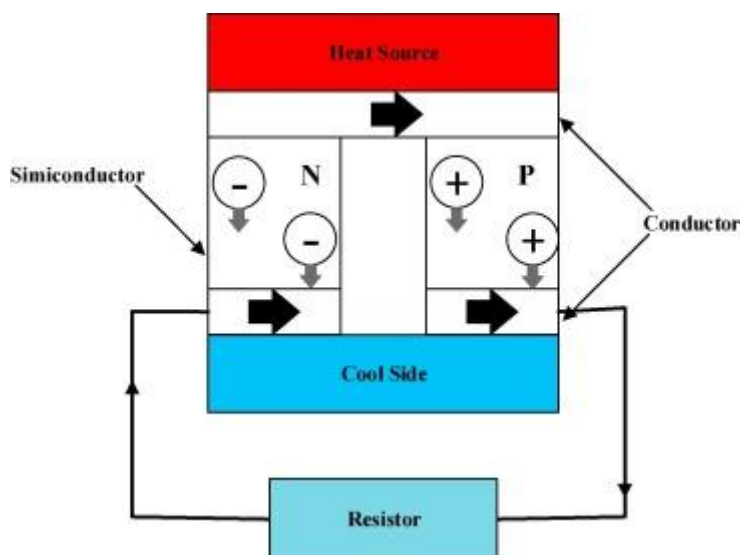
Πρόσφατα, αριθμητικές προσομοιώσεις για τη βελτιστοποίηση συστημάτων ηλιακών συλλεκτών εξέτασαν την αλληλεπίδραση γεωμετρίας κτηρίου και αστικών περιβαλλόντων [99]. Οι Nasir et al. διεξήγαγαν υπολογιστική ρευστοδυναμική ανάλυση (CFD) για να προσδιορίσουν την επίδραση της διαμόρφωσης του κτιρίου στη θερμική απόδοση των ηλιακών συλλεκτών στο οδόστρωμα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι ηλιακοί συλλέκτες πεζοδρομίου ήταν πιο αποτελεσματικοί σε αστικό περιβάλλον από ότι σε αγροτικό περιβάλλον. Αργότερα, οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν το CFD για να βελτιστοποιήσουν τις παραμέτρους σχεδιασμού των ηλιακών συλλεκτών οδοστρώματος σε αστικούς και αγροτικούς-αστικούς τομείς. Οι αριθμητικές προσομοιώσεις που συνδυάστηκαν με πειραματικές

επικυρώσεις είναι αποτελεσματικές μέθοδοι για τη βελτιστοποίηση των συστημάτων ηλιακών συλλεκτών [100].

2.1.2. Θερμοηλεκτρική γεννήτρια (TEG)

Η θερμοηλεκτρική γεννήτρια (TEG) συλλέγει ενέργεια από τη θερμική αλλαγή του περιβάλλοντος. Το TEG μπορεί να χρησιμοποιήσει τις διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ των στρωμάτων του οδοστρώματος για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με βάση τις θερμοηλεκτρικές αρχές [101].

Η άμεση μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια καθιστά τη θερμοηλεκτρική παραγωγή μία από τις πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες για την αποτελεσματική συλλογή θερμικής ενέργειας. Ανακαλύφθηκε από τον T.J. Seebeck το 1821, το φαινόμενο Seebeck, κι έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στις περισσότερες τεχνολογίες θερμοηλεκτρικής παραγωγής [102]. Το φαινόμενο Seebeck ορίζεται ως η δημιουργία ηλεκτρικού πεδίου όταν υπάρχει μια διαβάθμιση θερμοκρασίας στα δύο άκρα μιας συσκευής θερμοηλεκτρικής γεννήτριας. Η κλίση θερμοκρασίας του αγωγού και η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος είναι αναστρέψιμα. Η μονάδα TE αποτελείται συνήθως από δύο παράλληλους ημιαγωγούς τύπου N και τύπου P με πηγή θερμότητας και ψύκτρα σε κάθε πλευρά, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

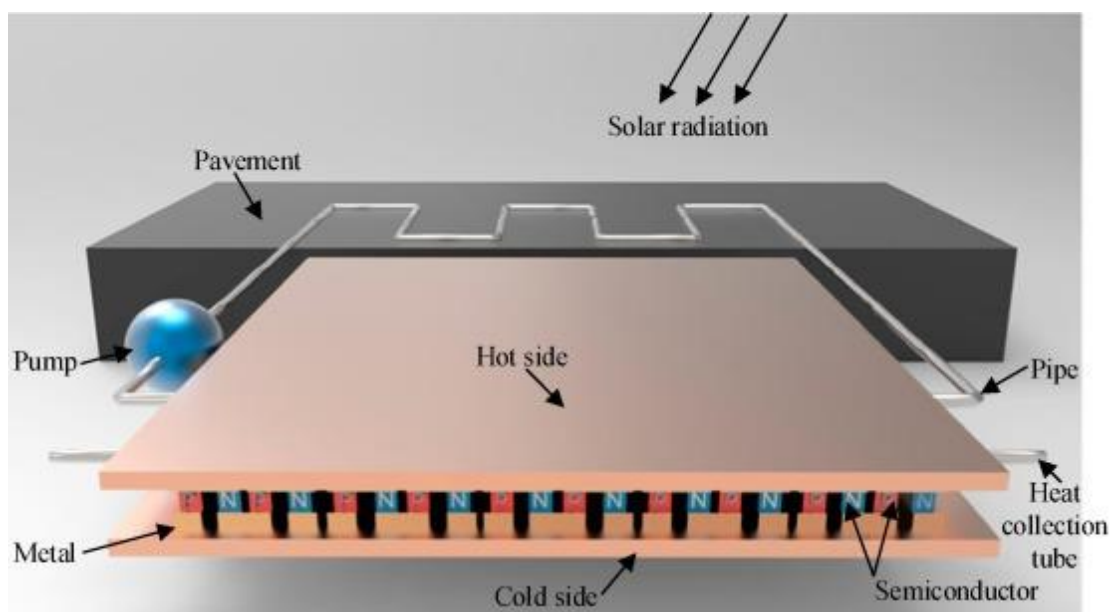


Εικόνα 7: Αρχή λειτουργίας της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας

Σύμφωνα με το φαινόμενο Seebeck, ο υψηλός συντελεστής Seebeck, η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και η χαμηλή ηλεκτρική ειδική αντίσταση απαιτούνται για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης μετατροπής της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας. Η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και η ηλεκτρική ειδική αντίσταση εξασφαλίζουν την ελάχιστη απώλεια ενέργειας που προκαλείται από την αγωγιμότητα της θερμότητας

και την απαγωγή Joule [103]. Οι θερμοηλεκτρικοί ημιαγωγοί χρησιμοποιούνται συμβατικά για να ξεπεραστεί ο περιορισμός των ιστροπικών μετάλλων των οποίων η βελτίωση περιορίζεται από τον νόμο Wiedemann-Franz. Το κύριο μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι η χαμηλή απόδοση, αλλά η χρήση νέων υλικών για τον κατασκευαστή TEG θα μπορούσε να βελτιώσει την απόδοση.

Οι Hasebe et al. πρότειναν θερμοηλεκτρικές γεννήτριες που χρησιμοποιούν ηλιακή θερμική ενέργεια που συλλέγεται από το σύστημα σωληνώσεων κάτω από το πεζοδρόμιο. Η θερμική ενέργεια του θερμού άκρου της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας (TEG) προέρχεται από το νερό που κυκλοφορούσε στον σωλήνα θέρμανσης και ο σωλήνας ψύξης μετέφερε δροσερό νερό από μια είσοδο [104]. Στην εικόνα παρακάτω γίνεται απεικόνιση της έννοιας του συστήματος σωληνών-οδοστρώματος-θερμοηλεκτρικής γεννήτριας. Τα αποτελέσματα από εργαστηριακά πειράματα έδειξαν ότι η ισχύς εξόδου ήταν στην τιμή μέγιστης αντίστασης των 30 Ohm και αυξανόταν με τον ρυθμό ροής. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μέγιστη θερμοκρασία της επιφάνειας του οδοστρώματος με το σύστημα ήταν 30°C, σε σύγκριση με τη συμβατική θερμοκρασία οδοστρώματος των 60 °C [105].



Εικόνα 8: Έννοια συστήματος σωληνών-οδοστρώματος-θερμοηλεκτρικής γεννήτριας (PP-TEG)

Οι Wu & Yu ανέπτυξαν σύστημα συλλογής θερμοηλεκτρικής ενέργειας για παροχή ρεύματος σε αισθητήρες παρακολούθησης οδοστρώματος. Διαφορετικό από το σύστημα σωληνώσεων που προτείνουν οι Hasebe et al. [106], το σύστημα αποτελούνταν από την εμπορική θερμοηλεκτρική μονάδα συνδεδεμένη με πλάκες και ράβδους αλουμινίου και στα δύο άκρα για να μεταφέρει θερμότητα μεταξύ της επιφάνειας του οδοστρώματος και του εδάφους του υποστρώματος. Οι συγγραφείς

διεξήγαγαν εργαστηριακά πειράματα χρησιμοποιώντας φως LED για να προσομοιώσουν το φορτίο του αισθητήρα με διαβάθμιση θερμοκρασίας 20 K σε όλη τη θερμοηλεκτρική μονάδα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ισχύς εξόδου ήταν περίπου 0,05 mW και με συνολική απόδοση συστήματος 2,05% **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.** Αργότερα, οι Wu & Yu χρησιμοποίησαν υπολογιστική προσομοίωση για να μελετήσουν την εφαρμογή της θερμοηλεκτρικής παραγωγής στο οδόστρωμα για τη βελτιστοποίηση του συστήματος. Το σύστημα εκτιμήθηκε ότι παρέχει 0,02 W και 1000 J την ημέρα, τα οποία ήταν επαρκή για την παρακολούθηση του οδοστρώματος με μια συσκευή αισθητήρα ολοκληρωμένου κυκλώματος (IC) [108].

Οι Park et al. πραγματοποίησαν πειράματα για να διερευνήσουν τους παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος. Το θερμοηλεκτρικό σύστημα ήταν παρόμοιο με αυτό των Wu & Yu. Έτσι, συγκρίθηκαν τέσσερις τύποι TEG με διαφορετικές ιδιότητες [109]. Οι συγγραφείς πρότειναν την αντιστοίχιση ηλεκτρικής και θερμικής σύνθετης αντίστασης για την επιλογή ενός αποδοτικού TEG και αξιολόγησαν τον εναλλάκτη θερμότητας με διαφορετικές συνθήκες θερμικής αντίστασης και μόνωσης. Ο βέλτιστος συνδυασμός συσκευής TEG παράγαγε πάνω από 40 mW σε ηλεκτρική ισχύ. Η μελέτη υποστήριξε ότι το TEG είχε απόδοση ισχύος περίπου 800 φορές υψηλότερη από εκείνη στην πιο πρόσφατη μελέτη που χρησιμοποιούσε θερμοηλεκτρική παραγωγή στη συλλογή ενέργειας στο πεζοδρόμιο [110].

Οι Liang και Li διεξήγαγαν εργαστηριακά πειράματα χρησιμοποιώντας δείγματα ασφάλτου που θερμάνθηκαν από έναν υπέρυθρο λαμπτήρα θερμότητας για να δημιουργήσουν κλίσεις θερμοκρασίας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το βέλτιστο βάθος του TEG ήταν στα 20 mm–30 mm κάτω από την επιφάνεια, λαμβάνοντας υπόψη την απόδοση του συστήματος και τις διαφορετικές διαβαθμίσεις θερμοκρασίας. Το υπαίθριο πείραμα με χρήση τεσσάρων TEG έδειξε ότι η ηλεκτρική ενέργεια που παρήχθη για μία ημέρα ήταν 2592 J [111]. Οι συγγραφείς διεξήγαγαν επίσης εργαστηριακά πειράματα σχετικά με τη δυναμική σταθερότητα της θεριζοαλωνιστικής μηχανής μέσα στο πεζοδρόμιο και βρήκαν ότι το TEG σε βάθος 20 mm έχει καλή αντοχή.

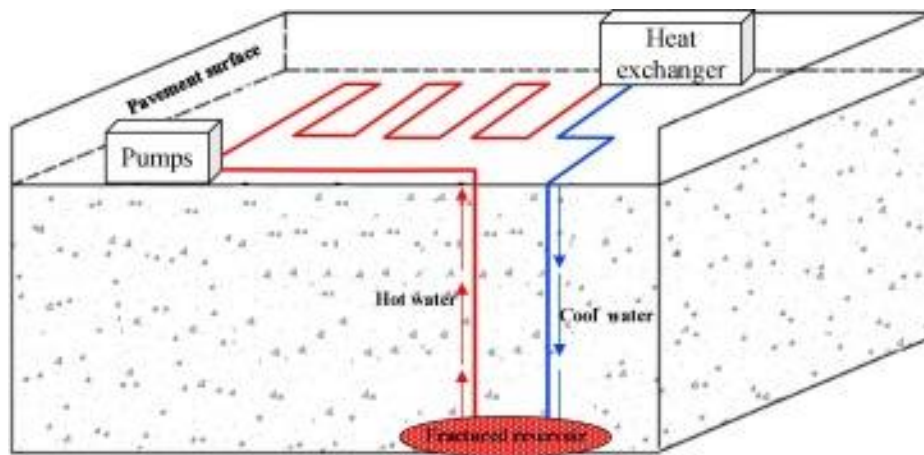
Οι Datta et al. αξιολόγησαν το πρωτότυπο του συστήματος συλλογής θερμοηλεκτρικής ενέργειας μέσω ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, εργαστηριακών δοκιμών και πειραμάτων πεδίου [112]. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η πλάκα χαλκού μπορούσε να φτάσει τη μεγαλύτερη κλίση θερμοκρασίας των 16 °C με το βέλτιστο βάθος σχεδιασμού του TEG στα 180 mm. Οι εργαστηριακές δοκιμές έδειξαν ότι η μέση ενεργειακή

απόδοση των δύο επιλεγμένων πρωτοτύπων ήταν 1,67 mW/C. Οι δοκιμές πεδίου έδειξαν ότι το εύρος της ισχύος εξόδου ήταν από 4 mW έως 6,5 mW. Οι συγγραφείς παρείχαν επίσης αποτελέσματα πρωτογενούς ανάλυσης κόστους. Το κόστος υλικού ήταν 190 \$ και 94 \$ για τα πρωτότυπα με δύο και τέσσερα TEG, αντίστοιχα [113].

Αν και η τεχνολογία του TEG που εφαρμόζεται στο οδόστρωμα είναι θεωρητικά εφικτή, μελλοντική μελέτη μπορεί να επικεντρωθεί στη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος μέσω του βελτιωμένου σχεδιασμού της δομής και των ιδιοτήτων του υλικού του TEG. Άλλοι σημαντικοί παράγοντες είναι η θέση του συστήματος θερμοηλεκτρικής συγκομιδής στο πεζοδρόμιο και η έκθεση των θερμοηλεκτρικών στοιχείων σε κινδύνους κυκλοφορίας.

2.1.3. Συγκομιδή γεωθερμικής ενέργειας

Η γεωθερμική ενέργεια είναι η θερμική ενέργεια που προέρχεται από το βάθος της γης, δηλαδή η ενέργεια που είναι φυσικά αποθηκευμένη στον πλανήτη. Οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας και η υπόγεια αποθήκευση θερμικής ενέργειας παίζουν σημαντικό ρόλο στην εφαρμογή της γεωθερμικής ενέργειας. Οι αντλίες θερμότητας είναι συσκευές μεταφοράς θερμότητας που μπορούν να ενισχύσουν την παραγωγή θερμότητας του ρευστού όταν λαμβάνουν τη γεωθερμική εισροή θερμότητας σχετικά χαμηλής θερμοκρασίας. Στην εικόνα που ακολουθεί απεικονίζεται η κύρια έννοια της γεωθερμικής ενέργειας κάτω από την επιφάνεια του οδοστρώματος, χρησιμοποιώντας ενσωματωμένους σωλήνες [114]. Η βασική αρχή των πιο κοινών αντλιών θερμότητας είναι η συμπίεση ατμών με τη χρήση συμπιεστή, η θερμοκρασία του αερίου αυξάνεται όταν συμπιέζεται χωρίς απώλεια θερμότητας. Για την υπόγεια αποθήκευση θερμικής ενέργειας, το κλειδί είναι η ελαχιστοποίηση της απώλειας ενέργειας που επηρεάζεται από τον χρόνο αποθήκευσης, τη θερμοκρασία, τον όγκο και τις θερμικές ιδιότητες του αποθηκευτικού μέσου.



Εικόνα 9: Αρχή λειτουργίας της συλλογής γεωθερμικής ενέργειας

Το γεωθερμικό νερό ή ατμός χρησιμοποιείται ως πηγή θερμότητας για την τήξη του χιονιού στις ΗΠΑ από το 1948 [115]. Το πρώτο σύστημα κατασκευάστηκε στο Klamath Falls του Όρεγκον, το οποίο αποτελούνταν από σύστημα σωληνώσεων σιδήρου με 50% διάλυμα αιθυλενογλυκόλης που κυκλοφορούσε μέσα. Ωστόσο, μετά από σχεδόν 50 χρόνια λειτουργίας, η εξωτερική διάβρωση και η σοβαρή διαρροή οδήγησαν σε αστοχία του συστήματος. Αυτές τις μέρες, οι μεταλλικοί σωλήνες του συστήματος τήξης χιονιού αντικαθίστανται από πλαστικούς σωλήνες για την αποφυγή διάβρωσης [116]. Ο Griffin διεξήγαγε μια μελέτη για την αποπάγωση γεφυρών με διαφορετικές πηγές θερμότητας, συμπεριλαμβανομένης της ηλιακής ενέργειας και της γεωθερμικής θερμότητας. Το κόστος θέρμανσης με βαθιά υπόγεια νερά ήταν 37 \$/τετρ. ενώ το κόστος θέρμανσης με ηλιακούς συλλέκτες ήταν 26\$/τετρ. Ωστόσο, το σημαντικότερο κόστος ενδέχεται να αλλάξει σήμερα λόγω του πληθωρισμού και των επιτοκίων προεξόφλησης και της βελτιωμένης τεχνολογίας [117].

Οι Ziegler et al. σχεδίασαν ένα σύστημα θέρμανσης ποδιών αεροδρομίου στο αεροδρόμιο Greater Binghamton στο Johnson City της Νέας Υόρκης. Το έργο υιοθέτησε το σύστημα υδρονικής ακτινοβολίας και η πηγή θερμότητας ήταν από γεωθερμικές αντλίες θερμότητας. Η έκθεση ασχολήθηκε με τεχνικές πτυχές για το σύστημα γεωθερμικής θέρμανσης και τις προβλεπόμενες επιπτώσεις, χρησιμοποιώντας ανάλυση κόστους κύκλου ζωής (LCCA). Το κόστος εγκατάστασης και χρησιμότητας το πρώτο έτος ήταν 1.590.502 \$ και το κόστος συντήρησης από το δεύτερο έτος ήταν 31.741 \$. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το κόστος του συστήματος γεωθερμικής θέρμανσης ήταν ελαφρώς υψηλότερο από τις παραδοσιακές μεθόδους αφαίρεσης χιονιού, αλλά απέφερε οφέλη για την ασφάλεια και το περιβάλλον. Ο συνδυασμός ηλιακών συλλεκτών οδοστρώματος με γεωθερμική αποθήκευση θερμότητας είναι μια αποτελεσματική τεχνολογία συλλογής ενέργειας [118]. Στην

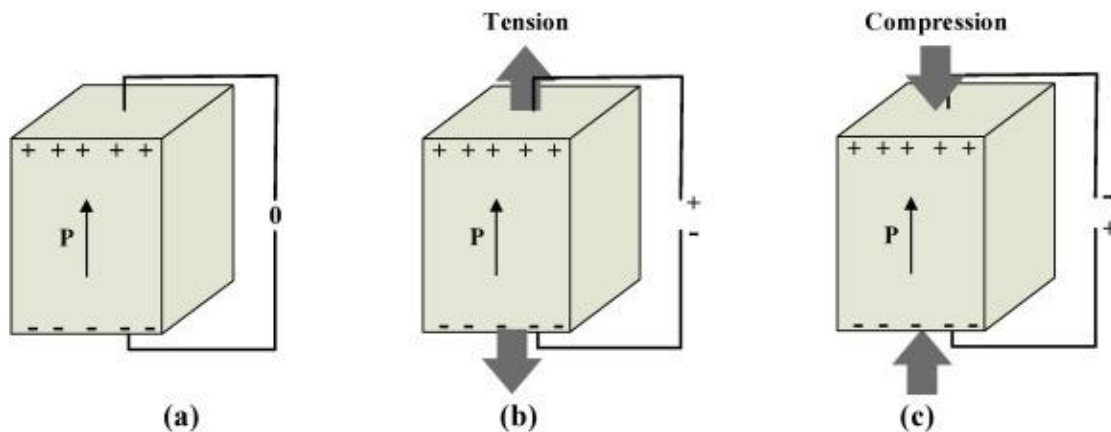
Ιαπωνία, το σύστημα τήξης χιονιού χρησιμοποιούσε υπόγεια γεωθερμία ως πηγές θερμότητας το χειμώνα και είχε θερμότητα δεξαμενή αποθήκευσης ηλιακής θερμότητας που συλλέγεται το καλοκαίρι.

Πρόσφατα, οι ερευνητές ανακάλυψαν ότι η χρήση γεωθερμικών αντλιών θερμότητας σε συνδυασμό με διαπερατό οδόστρωμα είχε το όφελος της βελτίωσης της ποιότητας των ομβρίων υδάτων [119]. Οι Maharaj και Paul ερεύνησαν την ποιότητα των ομβρίων υδάτων με γεωθερμική πηγή θερμότητας, ενσωματωμένη κάτω από διαπερατή δομή οδοστρώματος για σκοπούς ψύξης και θέρμανσης με 12 συστήματα οδοστρώματος σε κλίμακα [120]. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι σημαντικές αλλαγές της θερμοκρασίας του οδοστρώματος λόγω των διεργασιών ψύξης και θέρμανσης της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας μείωσαν τον οικολογικό κίνδυνο εκροών όμβριων υδάτων και την ανάπτυξη παθογόνου παράγοντα.

Αν και η γεωθερμική θερμότητα είναι μια ελκυστική ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, υπάρχουν περιορισμένες μελέτες που επικεντρώνονται στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του συστήματος γεωθερμικής ενέργειας [121]. Οι Shen et al. αξιολόγησαν την εκπομπή αερίων θερμοκηπίου (GHG) του συστήματος γεωθερμικής θέρμανσης σε σύγκριση με την παραδοσιακή διαδικασία απομάκρυνσης χιονιού με χημικούς αποπαγωτές και μηχανικό όργανο. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η εκπομπή GHG είναι χαμηλότερη για το γεωθερμικό σύστημα για την αφαίρεση του χιονιού μιας ίντσας στον διάδρομο του αεροδρομίου [122].

2.1.4. Πιεζοηλεκτρική (PE) συλλογή ενέργειας

Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά δημιουργούν ηλεκτρικά φορτία όταν υποβάλλονται σε μηχανικές καταπονήσεις ή αλλάζουν γεωμετρικές διαστάσεις όταν εφαρμόζεται ηλεκτρικό πεδίο. Η αρχή λειτουργίας της συλλογής πιεζοηλεκτρικής ενέργειας φαίνεται στην κάτωθι εικόνα. Η τάση που παράγεται από πιεζοηλεκτρικό υλικό ποικίλλει με τον χρόνο και οδηγεί σε ένα σήμα εναλλασσόμενου ρεύματος (AC), το οποίο προκαλεί το άμεσο και το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, αντίστοιχα [123].



Εικόνα 10: Αρχή λειτουργίας του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου υπό (α) μηδενική τάση. (β) ένταση και (γ) συμπίεση

Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά μπορούν να ταξινομηθούν στις ακόλουθες κατηγορίες: μονοκρυσταλλικά υλικά (π.χ. χαλαζίας), πιεζοκεραμικά (π.χ. τιτανικό ζirkονικό μόλυβδο [PZT]) κ.ά. Αν και τα πιεζοηλεκτρικά υλικά έχουν διαφορετικές πιεζοηλεκτρικές και μηχανικές ιδιότητες, τα πιο κοινά είναι τα πολυμερή και τα κεραμικά. Τα πολυμερή υλικά είναι μαλακά και εύκαμπτα, ενώ τα κεραμικά είναι άκαμπτα. Τα πολυμερή υλικά παράγουν τη χαμηλότερη ενέργεια από τα κεραμικά λόγω των διαφορετικών διηλεκτρικών και πιεζοηλεκτρικών ιδιοτήτων [124].

Υπάρχουν δύο μέθοδοι με τις οποίες μπορείτε να αυξήσετε την ποσότητα της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Το πρώτο είναι να αυξηθεί η εφαρμοζόμενη πίεση ή καταπονήσεις. Η άλλη μέθοδος είναι να χρησιμοποιήσετε τη λειτουργία σύζευξης πιο αποτελεσματικά. Υπάρχουν δύο πιθανοί τρόποι σύζευξης, ο τρόπος d_{31} και ο τρόπος d_{33} , ανάλογα με την κατεύθυνση πόλωσης του πιεζοηλεκτρικού υλικού σε σχέση με την κατεύθυνση της ασκούμενης δύναμης [125]. Η λειτουργία ορίζεται ως λειτουργία d_{31} όταν το υλικό υπόκειται σε δύναμη κάθετη προς την κατεύθυνση πόλωσης, ενώ ως λειτουργία d_{33} όταν η δύναμη εφαρμόζεται στην ίδια κατεύθυνση με την πόλωση. Ο τρόπος λειτουργίας d_{33} παρέχει τη μεγαλύτερη ηλεκτρομηχανική σύζευξη από τον d_{31} τρόπο λειτουργίας, όπως βιώνουν τα περισσότερα πιεζοηλεκτρικά υλικά.

Έχουν προταθεί πολλά σχέδια πιεζοηλεκτρικών μορφοτροπέων, όπως το κύμβαλο, το πολυστρωματικό κ.ά [126]. Η απόδοση συλλογής ενέργειας του πιεζοηλεκτρικού μορφοτροπέα επηρεάζεται από το υλικό, τη γεωμετρία του μορφοτροπέα και την εξωτερική φόρτιση.

Τα ενδιαφέροντα έχουν αυξηθεί τα τελευταία χρόνια για την πιεζοηλεκτρική τεχνολογία που βασίζεται στη μηχανική ενέργεια λόγω της υψηλής απόδοσης μετατροπής της ενέργειας [127]. Παρόλο που τόσο οι δυνάμεις όσο και οι δονήσεις που

προκαλούνται στο οδόστρωμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ενεργοποίηση πιεζοηλεκτρικών μετατροπέων, η συγκομιδή ενέργειας βάσει καταπόνησης μελετάται περισσότερο στο οδόστρωμα, ενώ η συλλογή ενέργειας με βάση τους κραδασμούς περισσότερο στη γέφυρα.

Οι Chua et al. εξέτασαν τις δυνατότητες της συλλογής ενέργειας PZT τόσο σε μηχανικό όσο και σε ηλεκτρικό περιβάλλον, χρησιμοποιώντας ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA) [128]. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τα μεταλλικά ακραία καλύμματα κατασκευασμένα από διαφορετικά υλικά με διαφορετικά ηλεκτρικά φορτία αντίστασης είχαν σημαντικές επιπτώσεις στην παραγωγή ενέργειας. Διαπίστωσαν επίσης ότι η αύξηση του πάχους των ακραίων καλυμμάτων από χάλυβα και της λωρίδας PZT προκάλεσε την υψηλότερη απόδοση ισχύος. Ο εξεταζόμενος μοφοτροπέας κύμβαλου παρήγαγε περίπου 0,46 mW ισχύος υπό δύναμη 50-N και αντίσταση φορτίου 3 MΩ [129]. Από την άλλη, οι Xiang et al. πραγματοποίησαν θεωρητική ανάλυση και παραμετρική μελέτη των πιεζοηλεκτρικών μετατροπέων στο σύστημα οδοστρώματος. Αναλύθηκαν οι επιδράσεις της απόσβεσης και του συντελεστή του συστήματος οδοστρώματος και της ταχύτητας του οχήματος στην ισχύ εξόδου.

Οι Roshani et al. πραγματοποίησαν εργαστηριακές δοκιμές και ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων για προσομοίωση στατικής φόρτισης στο πρωτότυπο που περιείχε τέσσερις πιεζοηλεκτρικούς δίσκους. Κάθε δίσκος φορτώθηκε με πίεση 5-Mpa που παρήγαγε τάση περίπου 650 V [129]. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι όσο βαρύτερο είναι το φορτίο, τόσο μικρότερη είναι η διάρκεια φόρτωσης και η υψηλότερη ταχύτητα κυκλοφορίας μπορεί να αυξήσει σημαντικά την τάση εξόδου. Η επίδραση του πάχους του οδοστρώματος στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να αγνοηθεί σε σύγκριση με την επίδραση από τον κυκλοφοριακό φόρτο.

Έχουν διεξαχθεί δοκιμές πεδίου για την αξιολόγηση της απόδοσης της συλλογής πιεζοηλεκτρικής ενέργειας. Οι Xiong και Wang ανέπτυξαν πιεζοηλεκτρικό μηχανισμό συγκομιδής ενέργειας (PEH) και αξιολόγησαν την τάση εξόδου και το ρεύμα του PEH που παράγεται υπό πραγματική κίνηση επί τόπου [130]. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι περίπου το 15% της εφαρμοσμένης μηχανικής ενέργειας μεταδόθηκε σε πιεζοηλεκτρικά υλικά. Οι Moure et al. αξιολόγησαν τα πιεζοηλεκτρικά κύμβαλα σε ασφαλτόστρωτο για να βελτιστοποιήσει τη μετατροπή της ενέργειας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι κάθε πιεζοκεραμικό κύμβαλο ανακτούσε έως και 16 μW για ένα πέρασμα βαρέων οχημάτων. Ισχυρίστηκαν ότι ένας δρόμος 100 μέτρων με 30.000 κύμβαλα θα μπορούσε να παράγει περισσότερα από 65 MWh σε ένα χρόνο [131]. Ο

Παπαγιαννάκης κ.ά. ανέπτυξαν μονάδες ανίχνευσης και μετατροπής ενέργειας σε αυτοκινητόδρομο (HiSEC), χρησιμοποιώντας διάφορες διαμορφώσεις και διαφορετικούς αριθμούς στοιχείων ράβδου PZT. Εξετάστηκαν οι διαμορφώσεις των κουτιών που περιέχουν διάφορα σχήματα στοιχείων PZT. Η σκοπιμότητα του σχεδιασμού της θεριζοαλωνιστικής μηχανής δοκιμάστηκε στο εργαστήριο για τη μέτρηση της ηλεκτρικής ενέργειας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι μονάδες HiSEC μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την τροφοδοσία φαναριών LED και ασύρματων αισθητήρων [132]. Γενικά, το αναπτυγμένο σύστημα, τα πρωτότυπα I και IV, θα μπορούσε να παράγει περίπου 10 και 241 Watt-hours ανά έτος/μονάδα, αντίστοιχα, κάτω από 30.000 AADT.

Οι Jasim et al. ανέπτυξαν έναν νέο σχεδιασμό πιεζοηλεκτρικού μορφοτροπέα για τη συλλογή ενέργειας από το δρόμο με βελτιστοποιημένη γεωμετρία, λαμβάνοντας υπόψη την ισορροπία της συλλογής ενέργειας και τη συγκέντρωση μηχανικής καταπόνησης [133]. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο βελτιστοποιημένος σχεδιασμός του μορφοτροπέα Bridge παράγαγε ηλεκτρικό δυναμικό 556 V, το οποίο θα μπορούσε να οδηγήσει σε 0,743 mJ δυναμικής ενέργειας (συνθήκη ανοιχτού κυκλώματος) για έναν μόνο μορφοτροπέα υπό την εξωτερική τάση 0,7 MPa. Οι εργαστηριακές δοκιμές στη μονάδα συγκομιδής ενέργειας έδειξαν ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συμφωνούσαν καλά με τη μετρούμενη ισχύ.

2.2. Συγκομιδή ενέργειας για εφαρμογές αισθητήρων σε γέφυρες

2.2.1. Ηλεκτρομαγνητική τεχνολογία

Οι ηλεκτρομαγνητικές γεννήτριες λειτουργούν με βάση το νόμο του Faraday, όπου το ηλεκτρικό ρεύμα προκαλείται εάν ένας ηλεκτρικός αγωγός μετακινηθεί σε σχέση με ένα μαγνητικό πεδίο. Τυπικά, ένα πηνίο συνδέεται με μια ταλαντούμενη μάζα και διασχίζει μαγνητικό πεδίο, το οποίο προκαλεί ηλεκτρισμό λόγω της σχετικής κίνησης του μαγνητικού πεδίου και του πηνίου ή των αλλαγών του μαγνητικού πεδίου [134]. Ένας άλλος εναλλακτικός τρόπος είναι να μετακινήσετε τη σχετική μαζική μαγνητική δομή και να διατηρήσετε το πηνίο σταθερό, κάτι που μπορεί να αυξήσει την ισχύ εξόδου και να κάνει τις ηλεκτρικές συνδέσεις πιο αξιόπιστες. Η ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται εξαρτάται από την ένταση του μαγνητικού πεδίου, την ταχύτητα της σχετικής κίνησης και τον αριθμό των στρωφών του πηνίου.

Στις ηλεκτρομαγνητικές γεννήτριες, οι μονάδες συγκομιδής βασίζονται σε υδραυλικά ή πνευματικά συστήματα, ηλεκτρομηχανικά συστήματα ή μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα (MEMS) [135]. Οι μικρές ηλεκτρομαγνητικές (EM) γεννήτριες έχουν

αναπτυχθεί την τελευταία δεκαετία για να μετατρέπουν τις περιβαλλοντικές πηγές ενέργειας (κυρίως μηχανικούς κραδασμούς) σε ηλεκτρική ενέργεια. Ένας αριθμός ερευνών έχει γίνει σε κλίμακα μικροηλεκτρομηχανικών συστημάτων (MEMS) και σε μακροκλίμακα για τη βελτίωση της απόδοσης της συλλογής ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας [136].

Δεδομένου ότι ο ηλεκτροκινητήρας είναι ένας μορφοτροπέας επαγόμενος από την ταχύτητα, η εφαρμογή του προτιμάται σε καταστάσεις όπου εμφανίζονται κραδασμοί στη δομή, όπως οι γέφυρες. Οι γέφυρες είναι ιδιαίτερα επιρρεπείς σε ζημιές λόγω διαλείπουσας δυναμικής φόρτισης και ως εκ τούτου αποτελούν πρωταρχικούς στόχους για την εφαρμογή της παρακολούθησης της δομικής υγείας (SHM). Για μακροχρόνια ή συνεχή παρακολούθηση, οι συσκευές SHM πρέπει να τοποθετούνται πάνω, κάτω ή μέσα στη δομή. Αυτό καθιστά δύσκολη τη διατήρηση της ισχύος της μπαταρίας, επομένως οι συσκευές που μπορούν να λειτουργούν με ισχύ περιβάλλοντος είναι επιθυμητές [137]. Κατά συνέπεια, ορισμένες μελέτες έχουν επικεντρωθεί στην αξιοποίηση των ταλαντώσεων χαμηλής συχνότητας σε σκυρόδεμα και καλωδιωμένες γέφυρες, χρησιμοποιώντας γεννήτριες HM.

Οι Sazonon et al. [138] ανέφεραν μια δοκιμή πεδίου μιας συγκομιδής ενέργειας HM που είχε σχεδιαστεί με βασικό κριτήριο ότι η κανονική συχνότητα λειτουργίας της συσκευής HM θα πρέπει να ισούται με έναν από τους κανονικούς τρόπους δόνησης της γέφυρας. Αυτή η συσκευή παρήγαγε έως και 12,5 mW ισχύος που προέρχεται από ταλαντώσεις που προκαλούνται από την κυκλοφορία. Οι Jung et al. μελέτησαν τη σκοπιμότητα της συσκευής συλλογής ενέργειας HM για την τροφοδοσία ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων (WSN), στερεωμένο στο καλώδιο της γέφυρας. Η ιδέα υποβλήθηκε σε μαθηματική ανάλυση, εργαστηριακή δοκιμή και επιτόπια δοκιμή [139]. Το πρωτότυπο παρήγαγε έως και 15,46 mW ισχύος όταν στερεώθηκε στο καλώδιο στήριξης της γέφυρας. Ωστόσο, η συσκευή υπέφερε από την περιορισμένη ισχύ εξόδου, επειδή η επιφανειακή τριβή σε συνδυασμό με την αρκετά μεγάλη απόκλιση του στοιχείου του ελατηρίου περιόριζε την κίνηση της μάζας. Για να ξεπεραστεί αποτελεσματικά αυτός ο περιορισμός, οι ερευνητές πρότειναν περαιτέρω έναν εναλλακτικό σχεδιασμό ενός συστήματος περιστροφικής δόνησης αντί του μεταφορικού συστήματος. Οι Kim et al. ενσωμάτωσαν μια κινητή μάζα και μια περιστροφική γεννήτρια στη θέση των EM επαγωγικών στοιχείων, καθιστώντας δυνατό τον συντονισμό της συσκευής στη συχνότητα του καλωδίου στήριξης της γέφυρας [140]. Επιτεύχθηκε κανονικοποιημένη ισχύς 35,67 mW (ή υπερδιπλάσια από αυτή του αρχικού σχεδιασμού). Αυτό θα ήταν αρκετό για να διατηρήσει έναν ασύρματο

διανομέα αισθητήρα για μία ή δύο μετρήσεις ημερησίως, με την επιφύλαξη κανονικών έως μέτριων ταχυτήτων ανέμου.

Εκμεταλλεούμενοι την ηλεκτρομαγνητική επαγωγή, θα προκληθεί συνεχόμενο AC. Ωστόσο, η απόδοση της συλλογής ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας είναι χαμηλή και η συλλεγόμενη ενέργεια δεν είναι αρκετά υψηλή για να τροφοδοτήσει ηλεκτρονικά συστήματα [141].

2.2.2. Προηγούμενες έρευνες για τη συλλογή πιεζοηλεκτρικής ενέργειας για αισθητήρες

Τα περισσότερα συστήματα πιεζοηλεκτρικής ενέργειας για εφαρμογές γεφυρών βασίζονται σε δοκούς προβόλου, οι οποίες έχουν σχεδιαστεί ώστε οι συχνότητες συντονισμού των μηχανών συλλογής να ταιριάζουν με τις συχνότητες δόνησης περιβάλλοντος για μέγιστη απόδοση. Οι Ali et al. ερεύνησαν τη δυνατότητα συγκομιδής ενέργειας χρησιμοποιώντας τη ρύθμιση προβόλου και εστίασε στον προσδιορισμό των βέλτιστων θέσεων για τη μεγιστοποίηση της ενέργειας που σαρώνεται. Η δόνηση της δομής της γέφυρας λόγω του κινούμενου οχήματος είναι η κύρια πηγή παραγωγής ενέργειας [142]. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η παραγόμενη ισχύς επηρεαζόταν άμεσα από τη ροή της κυκλοφορίας που κυμάνθηκε με το χρόνο.

Οι Elvin et al. αξιολόγησαν τη διαμόρφωση της δίμορφης δέσμης για τη συλλογή ενέργειας στη γέφυρα [143]. Οι συγγραφείς κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι υπήρχε μέτρια σύζευξη μεταξύ της συχνότητας δόνησης της γέφυρας και της συχνότητας συντονισμού (7 Hz) της θεριστικής μηχανής συλλογής. Επιπλέον, το τρέχον σύστημα θα παράγει περίπου 14 mJ και 1,2 mJ όταν συνδεθεί και αποσυνδεθεί με μια ηλεκτρική γεννήτρια. Ο Erturk διατύπωσε το πρόβλημα της συλλογής πιεζοηλεκτρικής ενέργειας με βάση τους κραδασμούς, χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικές προσεγγίσεις. Διαπιστώθηκε ότι το πιεζοκεραμικό έμπλαστρο μπορούσε να παράγει ισχύ 1 mW στα 25 Hz. Οι Kim et al. το εξέτασαν με χρήση πιεζοηλεκτρικού τύπου unimorph για τη συλλογή ενέργειας, λόγω της δυναμικής συμπεριφοράς της γέφυρας. Ο ερευνητής κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η αναπτυγμένη πιεζοηλεκτρική μονάδα θα μπορούσε να παράγει περίπου 13,8 V υπό κυκλική φόρτιση 10-kN [144].

Οι Baldwin et al. διερεύνησαν την εφαρμογή της πιεζοηλεκτρικής τεχνολογίας σε γέφυρες αυτοκινητοδρόμων χρησιμοποιώντας δεκαέξι πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες (PZT-5A). Στο ενσωματωμένο πρωτότυπο εφαρμόστηκε κυκλική φόρτιση δύναμης (τετράγωνο κύμα) με διάφορα πλάτη και συχνότητες φόρτωσης. Στη μελέτη τους, η υψηλότερη ποσότητα ενέργειας $1,253 \times 10^{-6} \text{ W}\cdot\text{h}$ επιτεύχθηκε

χρησιμοποιώντας συχνότητα φορτίου 1,5 Hz με πλάτος 17,8 kN στη μέση τιμή φορτίου 44,48 kN. Οι Peigney και Siegerl επικεντρώνονται στη δυναμική ενέργεια που συλλέγεται από τους κραδασμούς μέσα στη δομή της γέφυρας [145]. Οι ερευνητές σχεδίασαν έναν πρόβολο τύπου πιεζοηλεκτρικής συγκομιδής. Αυτό το πρωτότυπο στόχευε συγκεκριμένα έναν από τους τρόπους εγκάρσιας κάμψης της γέφυρας σε συχνότητα 14,5 Hz και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μέγιστη ισχύς των 0,03 mW μπορεί να δημιουργηθεί από την ένταση αιχμής της κυκλοφορίας.

Οι Zhang et al. συζήτησαν την πρόκληση της συλλογής ενέργειας για γέφυρες που χρησιμοποιούν πιεζοηλεκτρικούς προβόλους υψηλής συχνότητας. Πρότειναν ένα καινοτόμο σύστημα ελατηρίου-μάζας και δύο πιεζοηλεκτρικούς προβόλους για τη χρήση των κρούσεων των κινούμενων μαζών στις γέφυρες και ως εκ τούτου την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [146]. Η προτεινόμενη συλλεκτική μηχανή έδειξε καλύτερη απόδοση από την παραδοσιακή, χρησιμοποιώντας μόνο κραδασμούς της γέφυρας χαμηλής συχνότητας. Οι Zhang et al. προσομοίωσαν συστήματα γέφυρας-οχήματος για τη μελέτη της απόδοσης συλλογής ενέργειας, χρησιμοποιώντας πιεζοηλεκτρικό σύστημα βασισμένο σε πρόβολο. Τα αποτελέσματα κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τα οχήματα με υψηλές ταχύτητες παράγουν ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων αλλά μειώνουν την ισχύ εξόδου. Η υψηλότερη ταχύτητα του οχήματος μπορεί να ενεργοποιήσει αρκετές υψηλότερες σειρές λειτουργιών δόνησης της γέφυρας [147]. Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι η κατάσταση του δρόμου είχε σημαντική επίδραση στη δυναμική φόρτωση των οχημάτων και στην ενέργεια εξόδου.

3. Μέθοδοι για κτήρια καθαρής μηδενικής ενέργειας

Ο παγκόσμιος πληθυσμός προβλέπεται να ξεπεράσει τα εννέα δισεκατομμύρια έως το 2050, μαζί με μια ανάλογη αύξηση της ζήτησης για τρόφιμα – ιδίως κτηνοτροφικά προϊόντα – λόγω της αυξανόμενης ευμάρειας και της σχετικής διατροφικής αλλαγής. Ο τομέας της κτηνοτροφίας αποτελεί βασική πηγή εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (GHG) και άλλων επιπτώσεων στους πόρους/περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η παραγωγή πουλερικών τόσο για το κρέας όσο και για τα αυγά θα συνεχίσει να είναι μεταξύ των ταχέως αναπτυσσόμενων τομέων παραγωγής τροφίμων [148]. Για τη βιώσιμη κάλυψη της αυξανόμενης ζήτησης για προϊόντα πουλερικών, είναι απαραίτητη η βελτίωση της αποδοτικότητας της χρήσης των πόρων και η μείωση των εκπομπών που σχετίζονται με την παραγωγή τους. Αυτό περιλαμβάνει την προσοχή στην ανάπτυξη βέλτιστων συστημάτων στέγασης για εντατική, περιορισμένη παραγωγή πουλερικών που πληρούν τις φυσιολογικές απαιτήσεις και υποστηρίζουν την αποδοτική παραγωγή, ενώ μειώνουν τη χρήση της μη ανανεώσιμης ενέργειας και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις [149].

Η διατήρηση των κατάλληλων συνθηκών σε εντατική, βιομηχανική στέγαση πουλερικών απαιτεί μη ασήμαντες εισροές, τόσο της ενσωματωμένης ενέργειας όσο και των πόρων πρωτογενούς ενέργειας. Η ενσωματωμένη ενέργεια αναφέρεται σε εισροές ενέργειας που σχετίζονται με την παροχή του πραγματικού συστήματος στέγασης (δηλαδή συμπεριλαμβανομένης της εξόρυξης πρώτων υλών, της κατασκευής και των διαδικασιών στο τέλος του κύκλου ζωής τους) [150]. Οι πόροι πρωτογενούς ενέργειας (δηλαδή ηλεκτρική ενέργεια και ορυκτά καύσιμα) χρησιμοποιούνται ως άμεσες εισροές για τις λειτουργίες του συστήματος στέγασης, συμπεριλαμβανομένων της παροχής/αφαίρεσης τροφοδοσίας, νερού και κοπριάς, θέρμανσης, ψύξης, αερισμού, φωτισμού και αποχέτευσης.

Για την κατανόηση του μεγέθους και της κατανομής της χρήσης ενεργειακών πόρων και των σχετικών εκπομπών στα συστήματα παραγωγής πουλερικών, η σκέψη του κύκλου ζωής και η αξιολόγηση του κύκλου ζωής (LCA) αποκτούν ολοένα και μεγαλύτερη σημασία [151]. Ο κύκλος ζωής είναι ένα τυποποιημένο μεθοδολογικό πλαίσιο για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με δραστηριότητες κατά μήκος των αλυσίδων εφοδιασμού βιομηχανικών προϊόντων. Επιτρέπει τη σύγκριση των καθαρών περιβαλλοντικών επιπτώσεων ή/και οφελών, καθώς και των πιθανών αντισταθμίσεων που σχετίζονται με παρεμβάσεις διαχείρισης ή τεχνολογίας. Με βάση μελέτες LCA, έχει αναφερθεί ότι η άμεση χρήση ενέργειας σε επίπεδο αγροκτήματος για την παραγωγή αυγών μπορεί να

αντιπροσωπεύει έως και 25%-35% της χρήσης ενέργειας από την πύλη από το λίκνο μέχρι το αγρόκτημα στον κύκλο ζωής και τις εκπομπές GHG στον Καναδά και τις ΗΠΑ στους τομείς αυγών [152]. Για να προσδιοριστεί η κατανομή της χρήσης άμεσης ενέργειας σε στέγαση πουλερικών, να διερευνηθούν στρατηγικές εξοικονόμησης ενέργειας και να μειωθεί το αποτύπωμα άνθρακα, χρησιμοποιούνται συνήθως καθιερωμένες προσεγγίσεις, όπως ενεργειακοί έλεγχοι ή προσομοιώσεις που βασίζονται σε υπολογιστές. Τα αποτελέσματα των ενεργειακών ελέγχων στα πτηνοτροφεία ποικίλλουν ανάλογα με τις διαφορές στις τοποθεσίες και τους σχετικούς τοπικούς κλιματικούς παράγοντες, το θερμικό περιβάλλον και τα εφαρμοσμένα τεχνολογικά στοιχεία [153].

Ο σχεδιασμός κατοικιών πουλερικών, συμπεριλαμβανομένου του θερμικού περιβάλλοντος, της διάταξης, των εσωτερικών κλιματικών παραγόντων, των συστημάτων θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού (HVAC) και αυτοματισμού επηρεάζουν την απόδοση της παραγωγής πουλερικών. Η καλά σχεδιασμένη στέγαση μπορεί να ωφελήσει την παραγωγικότητα των ζώων, ενώ μειώνει τη σπατάλη των ζωοτροφών, τον τραυματισμό των ζώων και τη συχνότητα εμφάνισης ασθενειών και παρασίτων. Ένα κατάλληλο θερμικό περιβάλλον μπορεί, ειδικότερα, να βελτιστοποιήσει την απόδοση της τροφοδοσίας. Αντίθετα, η στέγαση που δεν παρέχει τις κατάλληλες θερμικές συνθήκες, αναγκάζοντας τα ζώα να διαχέουν ή να παράγουν πρόσθετη θερμότητα προκειμένου να διατηρηθεί η κανονική θερμοκρασία του σώματος, θα διακυβεύσει την παραγωγικότητα, με αρνητικές επιπτώσεις στην περιβαλλοντική απόδοση του κύκλου ζωής [154].

Δεδομένης της σημασίας της χρήσης ενέργειας στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της παραγωγής πουλερικών, είναι σημαντικές οι στρατηγικές και οι τεχνολογίες σχεδιασμού που έχουν τη δυνατότητα να μειώσουν τη χρήση ενέργειας, ενώ παράλληλα μετριάζουν τις σχετικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και άλλες επιπτώσεις στο περιβάλλον και στη χρήση των πόρων [155]. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα τόσο σε περιοχές παραγωγής αυγών, όπως η Βόρεια Αμερική, που μεταβαίνουν σε εναλλακτικά συστήματα στέγασης στρώσης (δηλαδή χωρίς κλωβούς) (δηλαδή υπό το φως της σημαντικής ανανέωσης της υποδομής που απαιτείται), όσο και σε περιοχές όπου η παραγωγή αυγών επεκτείνεται γρήγορα.

Τα κτήρια καθαρής μηδενικής ενέργειας (NZEB) είναι κτήρια με ετήσια καθαρή μηδενική κατανάλωση μη ανανεώσιμης ενέργειας. Τέτοια κτήρια έχουν τη δυνατότητα να μειώσουν σημαντικά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, μέσω αλλαγών στο σχεδιασμό των κτηρίων, βελτιώσεων ενεργειακής απόδοσης, παραγωγής ενέργειας

από ανανεώσιμες πηγές, κ.λπ. [156]. Μια ποικιλία ειδικών στρατηγικών και τεχνολογιών για τον μετριασμό των επιπτώσεων της χρήσης ενέργειας στην παραγωγή πουλερικών έχουν ήδη εξεταστεί στη βιβλιογραφία. Ωστόσο, σε αντίθεση με τον μεγάλο όγκο έρευνας για τα εμπορικά και οικιστικά κτήρια καθαρής μηδενικής ενέργειας (NZE), η ιδέα και η εφαρμογή των NZEB (τα οποία συνδυάζουν μια ποικιλία σχετικών σχεδιαστικών χαρακτηριστικών) αντιπροσωπεύει έναν πολλά υποσχόμενο αλλά υποψιασμένο ερευνητικό τομέα στο πλαίσιο της κτηνοτροφικής παραγωγής [157]. Έτσι, αν κι έχουν ήδη επικεντρωθεί οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής σε όλο τον κόσμο για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των οικιστικών και εμπορικών κτηρίων, οι σχεδιαστικές εκτιμήσεις για το NZEBS για τον τομέα των πουλερικών, συγκεκριμένα, καθώς και για τον τομέα της περιορισμένης κτηνοτροφικής παραγωγής ευρύτερα, είναι σαφώς άξιες προσοχής.

Επιπλέον, ενώ ορισμένες γενικές γνώσεις από την εμπορική και οικιστική έρευνα NZEB μπορεί να είναι άμεσα σχετικές με τον σχεδιασμό στέγασης πουλερικών NZE [158], είναι επίσης πιθανό ότι θα χρειαστούν συγκεκριμένες σχεδιαστικές εκτιμήσεις για την υποστήριξη των μοναδικών χαρακτηριστικών και απαιτήσεων της εντατικής, περιορισμένης παραγωγής πουλερικών. Αυτά μπορεί να περιλαμβάνουν, για παράδειγμα:

- Τις φυσιολογικές απαιτήσεις των πουλερικών (όπως ειδικός φωτισμός, θερμοουδέτερο εύρος, σχετική υγρασία και απαιτήσεις ποιότητας αέρα),
- την ανάγκη για συστήματα παροχής και καθαρισμού ζωοτροφών και νερού και
- την απομάκρυνση της κοπριάς και των σχετικών εκπομπών.

Επομένως, δεν είναι σαφές ποιες από τις τεχνολογίες και τις στρατηγικές που χρησιμοποιούνται επί του παρόντος σε οικιακούς/εμπορικούς NZEB θα πρέπει να έχουν προτεραιότητα για να καταστεί δυνατή η καλύτερη στέγαση πουλερικών NZE.

3.1. Στρατηγική αναζήτησης και κριτήρια ελέγχου

Σε μια μεγάλη έρευνα χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος συστηματικής ανασκόπησης Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) [159]. Το PRISMA περιλαμβάνει μια στρατηγική αναζήτησης, κριτήρια ελέγχου και εξαγωγή και σύνθεση σταδίων δεδομένων (πλαίσιο αναθεώρησης), όπως περιγράφεται παρακάτω.

Η μηχανή αναζήτησης Web of Science και τα ερωτήματα λέξεων-κλειδιών χρησιμοποιήθηκαν για τον εντοπισμό σχετικών πηγών βιβλιογραφίας,

συμπεριλαμβανομένων άρθρων έρευνας με κριτές και άρθρων ανασκόπησης επίκαιρων για καθεμία από τις τρεις ερωτήσεις ανασκόπησης. Εξετάστηκαν επίσης σχετικά άρθρα στους καταλόγους αναφοράς των επιλεγμένων εργασιών. Το χρονικό πεδίο εφαρμογής περιελάμβανε εργασίες που δημοσιεύτηκαν από το 2000 έως το 2021, ενώ ελήφθησαν υπόψη και άλλες εργασίες εκτός του χρονικού πεδίου που περιλαμβάνονται στους προαναφερθέντες καταλόγους αναφοράς. Τα ερωτήματα αναζήτησης κατέληξαν στον εντοπισμό 1311 άρθρων. Με βάση τον έλεγχο του τίτλου και της περίληψης ως προς τη συνάφεια, επιλέχθηκαν συνολικά 243 εργασίες για λεπτομερή αξιολόγηση [160]. Συνεπώς, στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η περιγραφή των συνδυασμών λέξεων-κλειδιών που χρησιμοποιήθηκαν, μαζί με τον αριθμό των άρθρων στα οποία έγινε πρόσβαση/αναθώρηση για κάθε ερώτηση κριτικής και τους συγκεκριμένους στόχους αξιολόγησης.

Επιθεώρηση των ερωτήσεων	Λέξεις-κλειδιά που χρησιμοποιούνται για αναζήτηση	Αριθμός άρθρων που ελέγχθηκαν/προσπελάστηκαν	Σύνοψη των στόχων επανεξέτασης
ερώτηση 1	"σχεδιασμός/κατασκευή, βελτιστοποίηση/παθητικός σχεδιασμός/τεχνολογία ανανεώσιμων πηγών ενέργειας*/ενεργειακή απόδοση" Ή "ενσωματωμένα ενεργεια" Ή "περιπτώσιολογικές μελέτες" ΚΑΙ "κτήρια καθαρής ενέργειας μηδενικής ενέργειας"	126/308	Σύνθεση μελέτης περίπτωσης και περίληψη εμπορικών/οικιστικών στρατηγικών σχεδιασμού NZEB
Ερώτηση 2	«χρήση ενέργειας/έλεγχος/προσομοίωση/ανάλυση» ΚΑΙ πτηνοτροφείο/στέγαση/αγροκτήμα/εγκατάσταση*»	21/470	Προσδιορισμός του μεγέθους και της κατανομής της χρήσης ενέργειας σε στέγαση πουλερικών
Ερώτηση 3	«Στέγαση/σπίτια/κατασκευή» ΚΑΙ «πουλερικά», «χαρακτηριστικά σπιτιού» ΚΑΙ «πουλερικά», «ενεργειακή απόδοση/φωτισμός/αερισμός/καθαρισμός/θέρμανση/ψύξη/περιπτώσιολογικές μελέτες» ΚΑΙ «στέγαση/σπίτι/εγκατάσταση πουλερικών*»	96/533	Σύνθεση και συζήτηση των μοναδικών χαρακτηριστικών της στέγασης πουλερικών σε σχέση με στρατηγικές για τη μείωση της χρήσης ενέργειας, τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και την εφαρμογή συστημάτων παραγωγής ΑΠΕ

Πίνακας 1: Διατύπωση ερωτήσεων μελέτης

3.2. Πλαίσιο βιβλιογραφικής ανασκόπησης

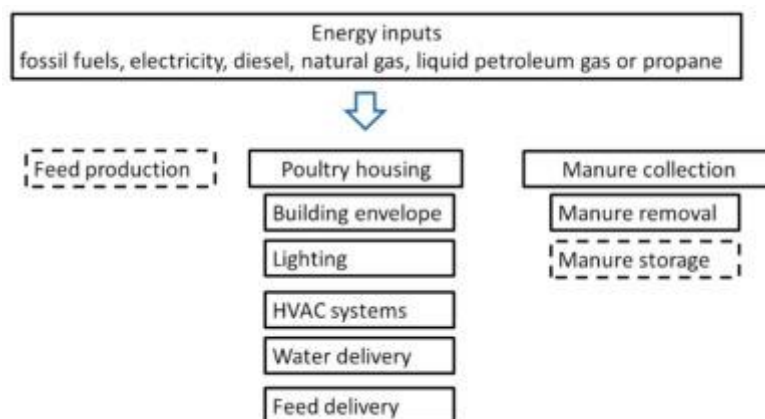
Η πρώτη ερώτηση ανασκόπησης στοχεύει στον εντοπισμό γνώσεων/στρατηγικών από την έρευνα των NZEB για εμπορικές και οικιακές εφαρμογές, σχετικά με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά σχεδιασμού, δομικά στοιχεία και τεχνολογίες για την επίτευξη της κατάστασης NZE. Προς το σκοπό αυτό, τα τρία κριτήρια που προτείνει η Ref. [161] (δηλαδή στρατηγικές μείωσης της χρήσης ενέργειας, ενεργειακά αποδοτικές συσκευές και συστήματα παραγωγής ΑΠΕ) χρησιμοποιήθηκαν ως βάση για την καταλογογράφηση και τη σύνθεση των αποτελεσμάτων από τις υπό εξέταση εργασίες για μετέπειτα εξέταση σε σχέση με το τρίτο ερευνητικό ερώτημα. Επιπλέον, τεκμηριώθηκαν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά κτιρίου όπου ήταν διαθέσιμα: τοποθεσίες κτηρίου και κλιματικοί παράγοντες, οικονομική σκοπιμότητα, χρόνος απόσβεσης ενέργειας, επιχειρησιακές απαιτήσεις, στρατηγικές ενεργειακής απόδοσης και εξοικονόμησης ενέργειας και συστήματα παραγωγής ΑΠΕ [162].

Η δεύτερη ερώτηση ανασκόπησης στοχεύει στον προσδιορισμό των βασικών ενεργοβόρων δραστηριοτήτων και της σχετικής σημασίας τους σε περιορισμένα, εντατικά συστήματα στέγασης πουλερικών. Εντοπίστηκαν και αναθεωρήθηκαν ενεργειακοί έλεγχοι αναφοράς βιβλιογραφίας και AKZ συστημάτων στέγασης πουλερικών για αυτόν τον στόχο. Οι εισροές ενέργειας, οι τύποι και οι χρήσεις τεκμηριώθηκαν από το σύστημα στέγασης και το στοιχείο του συστήματος τεχνολογίας [163]. Οι τύποι εισροής ενέργειας περιελάμβαναν τόσο μη ανανεώσιμες πηγές (π.χ. υγροποιημένο αέριο πετρελαίου και ηλεκτρική ενέργεια) όσο και ΑΠΕ (π.χ. ηλιακό φως, άνεμος και γεωθερμική θερμότητα).

Λαμβάνοντας υπόψη τα μοναδικά χαρακτηριστικά και τις απαιτήσεις της εντατικής, περιορισμένης παραγωγής πουλερικών, η τρίτη ερώτηση ανασκόπησης είχε στόχο να προωθήσει συστάσεις σχετικά με βασικά ζητήματα, στρατηγικές και τεχνολογίες για το σχεδιασμό στέγασης πουλερικών NZEB. Για το σκοπό αυτό, τεκμηριώθηκαν οι τύποι και τα χαρακτηριστικά της στέγασης πουλερικών, η παραγωγή θερμότητας και υγρασίας πουλερικών και οι φυσιολογικές απαιτήσεις των πουλερικών. Αυτά τα αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν παράλληλα με τα αποτελέσματα των ερωτήσεων ανασκόπησης (1) και (2) για να καθοριστεί ένα υποσύνολο προτάσεων προτεραιότητας για τον σχεδιασμό στέγασης πουλερικών NZE [164].

Για τις ερωτήσεις ανασκόπησης 2 και 3, ελήφθη υπόψη η βιβλιογραφία που σχετίζεται με εγκαταστάσεις παραγωγής πουλερικών (αποκλειστικά κοτόπουλα κρεατοπαραγωγής). Αυτό περιλαμβάνει όλες τις εισροές πρωτογενούς ενέργειας και υλικών για την παραγωγή, την κατασκευή και τη λειτουργία συστημάτων στέγασης

πουλερικών, συμπεριλαμβανομένων τεχνολογικών στοιχείων όπως HVAC και φωτισμού, παροχής τροφής και συστημάτων συλλογής κοπριάς (βλέπε παρακάτω εικόνα). Δεν συμπεριλήφθηκαν οι δραστηριότητες παραγωγής ζωοτροφών και αποθήκευσης κοπριάς και οι σχετικές υποδομές [165].



Εικόνα 11: Αναλύθηκε το όριο στέγασης πουλερικών (οι δραστηριότητες στα διακεκομμένα κουτιά εξαιρέθηκαν)

3.2.1. Στρατηγικές μείωσης της χρήσης ενέργειας σχεδιασμού κτηρίου (παθητικός σχεδιασμός)

Οι στρατηγικές παθητικού σχεδιασμού αξιοποιούν τη θέση του κτηρίου και τους διαθέσιμους φυσικούς πόρους (π.χ. ηλιακή ακτινοβολία, άνεμος, θερμική διαθεσιμότητα, φυσικό φως και θερμότητα εδάφους) για να μειώσουν την κατανάλωση μη ΑΠΕ για τη λειτουργία του κτηρίου (Πίνακας 2). Συγκεκριμένα, επηρεάζουν τα μηχανικά και ηλεκτρικά συστήματα θέρμανσης και ψύξης, την απώλεια ή κέρδος θερμικής οικοδόμησης και την ποσότητα ενέργειας που χρειάζεται να παραχθεί από τα συστήματα παραγωγής ΑΠΕ [166]. Οι βασικές στρατηγικές και τεχνολογίες παθητικού σχεδιασμού επικεντρώνονται στο θερμικό περίβλημα του κτηρίου, τη γεωμετρία και τον ηλιακό προσανατολισμό, τη θερμική ενέργεια σε συστήματα αποθήκευσης (TES), συστήματα παθητικής ψύξης και χρήση συγκεκριμένων δομικών χαρακτηριστικών, όπως ηλιακές καμινάδες και ανακλαστικές στέγες.

Στρατηγικές	Σκέψεις/τεχνολογίες σχεδιασμού	Τοποθεσία
Αποτελεσματικό θερμικό κέλυφος κτηρίου	Το θερμικό περίβλημα του κτηρίου μπορεί να βελτιωθεί χρησιμοποιώντας παράθυρα με διπλά/τριπλά τζάμια, βελτίωση της θερμομόνωσης (π.χ. μόνωση μαλακού αφρού ή ορυκτοβάμβακας, διογκωμένη πολυστερίνη (EPS), εξηλασμένη πολυστερίνη, πολυουρεθάνη, μόνωση με βάση το πυριτικό πήκτωμα, θερμικές	Αμερική, Κίνα, Ιαπωνία και Νότια Αφρική

	διόδους, αεριζόμενο ενεργό θερμοηλεκτρικό περίβλημα και βαφή με βάση το νερό) και αυξάνοντας τα στρώματα χρησιμοποιώντας κόντρα πλακέ, εξωτερική επένδυση (π.χ. τούβλα από πηλό) και φράγματα ατμών.	
	Η αύξηση της μόνωσης (χαμηλή U-value) μπορεί να μειώσει τις ενεργειακές απαιτήσεις κατά 64% και 37% αντίστοιχα κατά τη θερινή και χειμερινή ώρα, αλλά είναι λιγότερο αποτελεσματική σε κτήρια που κυριαρχούν στην ψύξη.	
Γεωμετρία κτηρίου (παράγοντες και αναλογίες)	Επιλογή κατάλληλων τύπων κτηρίων (π.χ. μικτής χρήσης, γραφείο ή διαμέρισμα), σχημάτων (π.χ. ορθογώνιο, L, T, σταυρός, U, H, τραπεζοειδές και σταυρόσχημα) και βελτιστοποίηση του ηλιακού προσανατολισμού, της ηλιακής απολαβής θερμότητας και του φυσικού φωτισμού κατά την τοποθεσία των τζαμιών	Αμερική, Κίνα, Ιαπωνία και Νότια Αφρική
	Η βέλτιστη γεωμετρία του κτηρίου εξαρτάται από τοπικούς κλιματικούς παράγοντες. Διαφορετικά σχήματα και προσανατολισμοί έχουν προσδιοριστεί ως βέλτιστα σε διαφορετικές περιοχές, συμπεριλαμβανομένων των ΗΠΑ, της Ευρώπης, της Τουρκίας, του Τέξας και της Ουάσιγκτον.	
Αποθήκευση θερμικής ενέργειας (TES)	Περιλαμβάνει το λογικό TES (π.χ. θερμική μάζα, τοίχος Trombe) και το λανθάνον TES (π.χ. Υλικά αλλαγής φάσης (PCM)) σε τοίχους, δάπεδα, οροφές κι έπιπλα και μονάδα αποθήκευσης/απόθεση PCM).	Αμερική, Κίνα, Ιαπωνία και Νότια Αφρική
	Η ενσωμάτωση της αποθήκευσης θερμικής ενέργειας μπορεί να μειώσει το φορτίο αιχμής μετάδοσης και επίσης να βοηθήσει στη μετατόπιση του χρόνου εμφάνισης του φορτίου αιχμής αργότερα μέσα στην ημέρα.	
	Η κατασκευή θερμικής μάζας εφαρμόζεται συνήθως μόνο σε κλίματα με υψηλές ημερήσιες θερμοκρασίες και χαμηλή σχετική υγρασία.	
Ψύξη	Η παθητική ψύξη μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση τοίχων ψύξης με εξάτμιση, τις στέγες και τις θέσεις καθοδικού ρεύματος και με τη χρήση	Αμερική, Κίνα, Ιαπωνία και Νότια Αφρική

	φυσικού αερισμού (π.χ. αερισμός που οδηγείται από τον άνεμο, αερισμός με άνωση).	
	Σε περιοχές μέτριας έως χαμηλής υγρασίας, η ψύξη με εξάτμιση χρησιμοποιείται ευρέως, κάνοντας χρήση της φυσικής κίνησης του αέρα για τη μείωση της θερμότητας κατά τη διάρκεια της ημέρας. Μπορεί να μειώσει σημαντικά την εσωτερική θερμοκρασία και έχει τη δυνατότητα να μειώσει τη χρήση DE κατά 75% σε σύγκριση με ένα συμβατικό κλιματιστικό.	
Ηλιακές καμινάδες	Μετατρέψτε τη θερμική ενέργεια σε κινητική ενέργεια δημιουργώντας κίνηση αέρα λόγω διαφορετικής πυκνότητας μεταξύ του αέρα εισροής και εκροής και παρέχετε αερισμό τόσο για εφαρμογές θέρμανσης όσο και για ψύξη.	Αμερική, Κίνα, Ιαπωνία και Νότια Αφρική
	Σε ψυχρά και μέτρια κλίματα, οι τοίχοι Trombe μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προθέρμανση του αέρα μέσω ηλιακών συλλεκτών.	
	Σε θερμά κλίματα, οι ηλιακές καμινάδες μπορούν να δημιουργήσουν δροσιστικά αποτελέσματα ακόμη και κατά τη διάρκεια συνεφιασμένων ημερών.	
Στέγες με ανακλαστικά υλικά (ψυχρά υλικά)	Τα ψυκτικά φορτία είναι έντονα σε επιφάνειες στέγης, όπου η έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία είναι υψηλή.	Αμερική, Κίνα, Ιαπωνία και Νότια Αφρική
	Τα ανακλαστικά υλικά αντανάκλουν την περισσότερη ηλιακή θερμότητα, μειώνουν το ηλιακό κέρδος θερμότητας και βελτιώνουν τη θερμική άνεση λόγω της υψηλής ηλιακής ανάκλασης και της θερμικής εκπομπής τους.	
	Σε θερμά και εύκρατα κλίματα, τα πλεονεκτήματα της καλοκαιρινής ψύξης που παρέχονται από τις ανακλαστικές στέγες μπορούν να αντισταθμίσουν τα μειονεκτήματα της χειμερινής θέρμανσης όλο το χρόνο, με αποτέλεσμα την καθαρή εξοικονόμηση ενέργειας.	

Πίνακας 2: Στρατηγικές μείωσης της χρήσης ενέργειας σχεδιασμού κτιρίων

3.2.2. Μέτρα Ενεργειακής Απόδοσης (EEMs) Ενσωματωμένα με συστήματα ελέγχου και παρακολούθησης ενέργειας

Για τη μείωση της κατανάλωσης DE στα κτήρια, τα μέτρα ενεργειακής απόδοσης (EEMs) που σχετίζονται με συστήματα φωτισμού, θέρμανσης, ψύξης, εξαερισμού και κλιματισμού, καθώς και τα σχετικά συστήματα παρακολούθησης ενεργειακού ελέγχου, εφαρμόζονται συνήθως στα NZEB (Πίνακας 3). Η βασική απαίτηση για EEM που είναι εγκατεστημένα σε NZEB είναι να είναι συμβατά με το τοπικό ενεργειακό δίκτυο και να μην προσθέτουν επιπλέον φορτία στην υπάρχουσα υποδομή παροχής ενέργειας [167].

Στρατηγικές	Σκέψεις/τεχνολογίες σχεδιασμού	Τοποθεσία
Ενεργειακά αποδοτικός φωτισμός	Χρησιμοποιήστε διόδους εκπομπής φωτός (LED).	Αμερική, Κίνα, Ιαπωνία και Νότια Αφρική
	Η διάρκεια ζωής των LED κυμαίνεται από πέντε έως επτά χρόνια, εξοικονομώντας 20–50% της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας σε σύγκριση με τη χρήση CFL.	
Προηγμένα χειριστήρια φωτισμού	Αυτόματη ενεργοποίηση και απενεργοποίηση του ηλεκτρικού φωτισμού με βάση τα συστήματα φωτισμού ημέρας (έλεγχος διακόπτη).	Αμερική, Κίνα, Ιαπωνία και Νότια Αφρική
	Έλεγχος μείωσης του φωτισμού ημέρας.	
Διαχείριση φορτίου, παρακολούθηση πληρότητας, ρύθμιση θερμοκρασίας χωρίς χρήση	Τα συστήματα διαχείρισης επιτρέπουν την ανίχνευση ετερογενών δυναμικών, όπως δυναμική τιμολόγηση, φορτία αιχμής ενέργειας κ.λπ. σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες για τη βελτιστοποίηση της ενσωμάτωσης διαφορετικών στοιχείων.	Αμερική, Κίνα, Ιαπωνία και Νότια Αφρική
Συστήματα ανάκτησης θερμότητας	Ανακτήστε τη θερμότητα από τον αέρα εξαγωγής, την απόβλητη θερμότητα και τα λύματα.	Αμερική, Κίνα, Ιαπωνία και Νότια Αφρική
	Ο οικονομικός χρόνος απόσβεσης των συστημάτων ανάκτησης θερμότητας μπορεί να είναι έως και 3 μήνες, ενώ η διάρκεια ζωής κυμαίνεται από 15 έως 25 χρόνια.	
Αντλίες θερμότητας με πηγή αέρα, αντλίες θερμότητας εδάφους	Οι αντλίες θερμότητας με πηγή αέρα είναι πιο οικονομικές σε κτήρια μικρού και μεσαίου μεγέθους, ειδικά σε εύκρατα κλίματα.	Αμερική, Κίνα, Ιαπωνία και Νότια Αφρική

	Οι αντλίες θερμότητας εδάφους είναι καλύτερες για μεγάλα κτήρια, ειδικά σε ψυχρά κλίματα.	
Αποτελεσματικά ψυκτικά συγκροτήματα	Περιλαμβάνει υδρόψυκτα φυγόκεντρα ψυκτικά συγκροτήματα και ψύκτες ηλιακής απορρόφησης.	Αμερική, Κίνα, Ιαπωνία και Νότια Αφρική
	Σε θερμά κλίματα, η χρήση ενεργειακά αποδοτικών ψυκτών μείωσε τη συνολική ενέργεια που καταναλώθηκε κατά 33,6%.	
Δάπεδο ακτινοβολίας, ενδοδαπέδια θέρμανση	Η μέση θερμοκρασία νερού, το μέγεθος και ο χώρος των σωληνώσεων, καθώς και το φινίρισμα του δαπέδου και η κατασκευή επηρεάζουν την απόδοση θερμότητας.	Αμερική, Κίνα, Ιαπωνία και Νότια Αφρική

Πίνακας 3: Άμεσες βελτιώσεις στην απόδοση της χρήσης ενέργειας

4. Εξορθολογισμός για τη συγκομιδή ενέργειας περιβάλλοντος

Πρόσφατα, η σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας κι επομένως η λογική για την εφαρμογή τεχνολογιών συλλογής ενέργειας για την τροφοδοσία ασύρματων συσκευών στο πλαίσιο της αυξημένης διάρκειας ζωής της μπαταρίας και της αυξανόμενης ενεργειακής πυκνότητας των σύγχρονων μπαταριών έχει εξεταστεί εκτενώς. Ωστόσο, οι μπαταρίες εξακολουθούν να έχουν δευτερεύοντες περιορισμούς όσον αφορά την αξιοπιστία, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις στη διάθεση και το κόστος λειτουργίας καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του σχετικού εξοπλισμού, συμπεριλαμβανομένου του κόστους φόρτισης [168]. Υπάρχουν τεράστιες ευκαιρίες για εξοικονόμηση ενέργειας και διαχείριση ενέργειας στις τρέχουσες συσκευές που τροφοδοτούνται από μπαταρία ή απευθείας ενσύρματα και στο σύστημα διαχείρισης ενέργειας. Για παράδειγμα, τα έξυπνα κτήρια με ενσωματωμένες τεχνολογίες συγκομιδής ενέργειας έχουν καταγράψει έως και 60% εξοικονόμηση στο μέσο ετήσιο κόστος ενέργειας, με το 40% του ενεργειακού κόστους του φωτισμού να επιτυγχάνεται με την αποφυγή χρήσης και αλλαγής μπαταριών και έως και 80% εξοικονόμηση κόστους [169]. Επίσης, σε εφαρμογές ειδικού σκοπού που απαιτούν την ανάπτυξη μπαταριών σε δυσπρόσιτες τοποθεσίες, για παράδειγμα, υπόγειοι αισθητήρες εδάφους, το κόστος συντήρησης για την αποκάλυψη και η αντικατάσταση των εξαντλημένων μπαταριών μπορεί να είναι απαγορευτικό.

Οι περιορισμοί που σχετίζονται με τη φόρτιση της μπαταρίας, που προκύπτουν από την πεπερασμένη διάρκεια ζωής των συνηθισμένων μπαταριών, είναι ιδιαίτερα έντονοι σε εφαρμογές που περιλαμβάνουν ασύρματους κόμβους αισθητήρων που αναπτύσσονται σε δυσπρόσιτες τοποθεσίες (π.χ. σε απομακρυσμένα ή επικίνδυνα βιομηχανικά περιβάλλοντα, ιατρικά εμφυτεύσιμες συσκευές κ.λπ.) [170], γεγονός που καθιστά την τακτική αλλαγή τόσο δαπανηρή όσο και άβολη. Πολλές μπαταρίες χαρακτηρίζονται για μια τυπική διάρκεια ζωής 3 έως 10 ετών, αλλά στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές διαρκούν πολύ λιγότερο, συχνά μήνες παρά χρόνια. Η μακροζωία εξαρτάται τόσο από τον κύκλο λειτουργίας των εργασιών που πρόκειται να τροφοδοτηθούν όσο και από τις συνθήκες περιβάλλοντος σέρβις, συμπεριλαμβανομένης της αυτοεκφόρτισης. Μόνο για την αυτοεκφόρτιση, έχει υπολογιστεί ότι οι νέες χημικές μπαταρίες μπορούν να χάσουν έως και 8–20% της αρχικής τους φόρτισης ετησίως σε θερμοκρασία λειτουργίας περίπου 20–30°C. Ένα άλλο σημαντικό μειονέκτημα είναι ότι μια μπαταρία περιέχει στοιχεία που μπορεί να είναι επιβλαβή για το περιβάλλον εάν δεν απορριφθεί σωστά. Για παράδειγμα, η περιεκτικότητα σε βαρέα μέταλλα σε φορητές επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, όπως οι

μπαταρίες NiMH και ιόντων λιθίου, υπερβαίνει κατά πολύ την οριακή συγκέντρωση κατωφλίου τοξικότητας των στερεών αποβλήτων έως και 40 φορές [170]. Κατά συνέπεια, οι χρησιμοποιημένες μπαταρίες πρέπει να αντιμετωπίζονται ως τοξικά και επικίνδυνα απόβλητα, γεγονός που συνεπάγεται υψηλό κόστος διάθεσης.

Η ενέργεια του περιβάλλοντος μπορεί να συλλεχθεί χρησιμοποιώντας μετατροπείς που μετατρέπουν μια σειρά από πρωτογενείς πηγές σε ηλεκτρική ενέργεια. Τα τυπικά χαρακτηριστικά ορισμένων κοινών μετατροπέων συλλογής ενέργειας συνοψίζονται στον πίνακα παρακάτω. Η τυπική πυκνότητα ισχύος των πηγών ενέργειας του περιβάλλοντος φαίνεται στον αμέσως επόμενο πίνακα. Ο συλλέκτης ενέργειας περιβάλλοντος, όπως ένα ηλιακό κύτταρο, μπορεί να παράγει 100 mW/cm^2 από το άμεσο ηλιακό φως και $100 \mu\text{W}$ από τεχνητό φωτισμό, ενώ η αξιοποίηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μέσω ενός ορθοπεδίου παράγει $1 \mu\text{W/cm}^2$ [171].

Ενεργειακή μορφή	Πυκνότητα ισχύος
Διακύμανση θερμοκρασίας	10 W/cm^3
Φως περιβάλλοντος	
Άμεσο ηλιακό φως	100 mW/cm^2
Τεχνητός φωτισμός	$100 \mu\text{W/cm}^2$
Θερμοηλεκτρικό	$60 \mu\text{W/cm}^2$
Δόνηση (μικρογεννήτρια)	$4 \mu\text{W/cm}^3$ (ανθρώπινη κίνηση – Hz)
	$800 \mu\text{W/cm}^3$ (μηχανές – kHz)
Δόνηση (πιεζοηλεκτρική)	$200 \mu\text{W/cm}^3$
Βήμα περπατήματος	7 W/cm^2
Ακουστικός θόρυβος	$0,003 \mu\text{W/cm}^2$ στα 75 dB
	$0,11 \mu\text{W/cm}^2$ στα 110 dB (Li et al. 64)
Ραδιοφωνική συχνότητα περιβάλλοντος	$180 \mu\text{W/cm}^2$ (Singh et al. 121)
Ροή του αίματος	$800 \mu\text{W}$ (122)
Ηλεκτροστατική ενέργεια	$160 \mu\text{W}$ (Renaud et al. 123)
Θερμότητα σώματος (διάχυση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 28°C)	6 mW/cm^2 (Sarpeshkar 124)
Energy Form	
Temperature variation	10 W/cm^3

Ambient light	
Direct sunlight	100 mW/cm ²
Artificial lighting	100 μW/cm ²
Thermoelectric	60 μW/cm ²
Vibration (microgenerator)	4 μW/cm ³ (human motion – Hz)
	800 μW/cm ³ (machines – kHz)
Vibration (piezoelectric)	200 μW/cm ³
Walking step	7 W/cm ²
Acoustic noise	0.003 μW/cm ² at 75 dB
	0.11 μW/cm ² at 110 dB
Ambient radio frequency	180 μW/cm ²
Blood flow	800 μW
Electrostatic energy	160 μW
Body heat (dissipation at ambient temperature 28°C)	6 mW/cm ²

Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά κοινών μετατροπέων συλλογής ενέργειας

ΠΗΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	Προκλήσεις για την ανάπτυξη	Τυπική ηλεκτρική αντίσταση	Τυπική τάση εξόδου	Τυπική ισχύς εξόδου
Φως	Συμμορφώνεται με μικρή επιφάνεια, ευρύ φάσμα τάσης εισόδου	Διαφέρει ανάλογα με την είσοδο φωτός Χαμηλά kΩ έως 10's kΩ	Το 0,5–5 V εξαρτάται από τον αριθμό των κελιών σε συστοιχίες	10–15 μW (εξωτερικός χώρος 0,15–15 mW, εσωτερικός <500 μW)
Δόνηση	Μεταβλητότητα συχνότητας κραδασμών	Σταθερή σύνθετη αντίσταση 10's kΩ έως 100 kΩ	AC: 10 βολτ	1 μW έως 20 mW
Θερμικός	Μικρές θερμικές κλίσεις, αποτελεσματική βύθιση θερμότητας	Σταθερή αντίσταση 1–100 Ω	DC: 10's mV έως 10 V	0,5–10 mW (βαθμίδα 20°C)
RF και επαγωγικό	Σύζευξη και διόρθωση	Σταθερή αντίσταση kΩ	AC: ποικίλλει ανάλογα με την απόσταση και την ισχύ. Η τάση που καταγράφηκε ως 0,5–5 V	Ευρύ φάσμα

Πίνακας 5: Τυπική πυκνότητα ισχύος των πηγών ενέργειας περιβάλλοντος

Από τα δεδομένα που συνοψίζονται στον πρώτο πίνακα παραπάνω, η ενέργεια από την παθητική ανθρώπινη δραστηριότητα φαίνεται να είναι η πιο υποχρησιμοποιούμενη πηγή ενέργειας περιβάλλοντος [172]. Έχει υπολογιστεί ότι οι άνθρωποι είναι ικανοί να χειρίζονται μηχανές για να παράγουν ισχύ στην περιοχή από λίγα milliwatts έως ή περισσότερο από 500 W, το άνω άκρο αυτής της περιοχής αντιστοιχεί σε αθλητικές επιδόσεις μικρής διάρκειας. Ωστόσο, άτομα μεσαίου μεγέθους και φυσικής κατάστασης θα μπορούσαν να παράγουν πολλά ηλεκτρικά watt με ουσιαστικά ασυνείδητη προσπάθεια, παραμορφώνοντας μικροσκοπικά ηλεκτρομηχανικά στοιχεία προσαρμοσμένα σε αντικείμενα που φοριούνται, όπως τα υποδήματα. Οι Reimer και Shapiro, θεωρητικά απέδειξαν ότι θα μπορούσαν να δημιουργηθούν έως και 4 W με συμπίεση 4 mm μιας σόλας παπουτσιού που επιτυγχάνεται εύκολα με φυσικό ρυθμό, δηλαδή δύο βήματα ανά δευτερόλεπτο (ή 1 Hz ανά ένθετο) από ένα άτομο 80 κιλών [173]. Η μέγιστη ενέργεια που μπορεί να παραχθεί, υποθέτοντας ότι το 50-80% της ενέργειας κατά το περπάτημα αποθηκεύεται ως ελαστική ενέργεια στο παπούτσι θα ήταν 2 W. Έχει υποστηριχθεί ότι το ανθρώπινο περπάτημα με κανονικό ρυθμό είναι μια πιθανή πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, που θα μπορούσε να λειτουργήσει ηλεκτρονικά χαμηλής κατανάλωσης ή να επαναφορτίσει μια μπαταρία [174].

Η δέσμευση και η μετατροπή της ενέργειας του περιβάλλοντος παρουσιάζουν κατά κύριο λόγο πρακτικές λύσεις για επαναφόρτιση αντί για εξ ολοκλήρου εξάλειψη των μπαταριών ως αυτόνομες πηγές ενέργειας. Οι περισσότερες εφαρμογές θα εξακολουθούν να απαιτούν ηλεκτρικές μπαταρίες αποθήκευσης για να παρέχουν ισχύ κατά παραγγελία όταν οι πόροι κυμαίνονται κι επίσης να επιτρέπουν τη βέλτιστη διαχείριση της ενέργειας που συλλαμβάνεται από πηγές περιβάλλοντος με μεταβλητή ή/και διακοπτόμενη ένταση, όπως ο ήλιος και ο άνεμος.

4.1. Χαρακτηρισμός υποστηρικτικών μεθόδων συλλογής ενέργειας και τεχνολογιών υποστήριξης

Υπάρχει ένα ευρύ φάσμα πηγών ενέργειας του περιβάλλοντος. Περιλαμβάνουν μηχανική και θερμική ενέργεια που εκπέμπεται από το σώμα ανθρώπου/ζώου, φυσικές πηγές ενέργειας (π.χ. άνεμος, υδροηλεκτρική, κυματική, ηλιακή), μηχανική διέγερση (π.χ. δονήσεις μηχανής, επαγόμενες μηχανικές καταπονήσεις), χαμηλής ποιότητας θερμική ενέργεια (π.χ. σπατάλη θερμικής ενέργειας από κλίβανο, λέβητες, θερμαντήρες, απώλειες τριβής κ.λπ.) [175], φως (τεχνητή και ηλιακή) και ηλεκτρομαγνητική ενέργεια (επαγωγείς, πηνία, μετασχηματιστές). Αυτή η ενότητα περιγράφει τις πρακτικές τεχνολογίες για τη συλλογή ενέργειας από τις αναφερόμενες πηγές. Η παρακάτω εικόνα απεικονίζει στοιχεία τέτοιων περιβαλλοντικών ενεργειακών

πόρων, συμπεριλαμβανομένων των κύριων τεχνολογιών μετατροπής (π.χ. μικρογεννήτρια, φωτοβολταϊκό στοιχείο, θερμοηλεκτρικό) με εγγενείς δυνατότητες για λειτουργία ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών [176].



Εικόνα 12: Συγκομιδή ενέργειας και τεχνολογίες συσχέτισης, συμπεριλαμβανομένης της μικρογεννήτριας δόνησης, της ηλιακής φωτοβολταϊκής κυψέλης

Θα μπορούσε να υποστηριχθεί ότι δεν υπάρχει μία μόνο πηγή ενέργειας που να είναι επαρκής για όλους τους τύπους εφαρμογών και ότι η επιλογή των πηγών ενέργειας πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά της εφαρμογής. Για παράδειγμα, λίγες έννοιες που αναπτύχθηκαν για τη συλλογή ενέργειας του περιβάλλοντος περιλαμβάνουν [177]:

- Ηλιακή θερμαινόμενη θερμική μπαταρία αποθήκευσης, όπου η ηλιακή θερμότητα συσσωρεύεται σε ένα θερμικό ηλεκτρικό μέσο αποθήκευσης (TES) και ακτινοβολείται εκ νέου σε οποιαδήποτε από τις διάφορες εναλλακτικές συσκευές μετατροπής ενέργειας από θερμότητα σε ηλεκτρική για να παρέχει ηλεκτρική έξοδο ανεξάρτητα από τη μεταβλητότητα της εισροής ηλιακής ενέργειας.
- Επαγωγική σύζευξη: Μια διαμόρφωση που έχει δοκιμαστεί αποτελούνταν από μονωμένα χάλκινα σύρματα που κινούνται για κάποια απόσταση παράλληλα και στις δύο πλευρές ενός συστήματος μετάδοσης στη δεξιά διαδρομή. Τα καλώδια συνδέονται σε κάθε άκρο με αγωγούς που διασχίζουν κάτω από τις γραμμές μεταφοράς σχηματίζοντας έναν βρόχο [178]. Η τάση επάγεται στον βρόχο με ηλεκτρομαγνητική επαγωγή ασύμμετρη προς τη γεωμετρία του τριφασικού συστήματος εναέριας κυκλοφορίας. Η ισχύς εξόδου εκτιμάται ότι

κυμαίνεται από περίπου 2 W έως 113 W που αντιστοιχεί σε ρεύματα φάσης rms στους εναέριους αγωγούς των 100 A και 800 A, αντίστοιχα.

- Απαιτείται αποτέλεσμα από την ανθρώπινη προσπάθεια για την επίτευξη του ανώτερου δυναμικού απόδοσης που ορίζεται από τα δεδομένα που εμφανίζονται στον τελευταία εικονιζόμενο πίνακα της προηγούμενης ενότητας. Σε όλες τις σωματικές δραστηριότητες, η ανθρώπινη αντοχή είναι μια αντίστροφη συνάρτηση της μηχανικής απόδοσης. Για παράδειγμα, ένας αθλητής που σηκώνει μια μπάρα βάρους μεταξύ 120 κιλών και 250 κιλών μπορεί να παράγει 3000 W για έως και 1 δευτερόλεπτο [178]. Ωστόσο, για μια τάξη μεγέθους μικρότερη, είναι δυνατή η διατηρούμενη ισχύς. Ενώ ένας ποδηλάτης παγκόσμιας κλάσης μπορεί να παράγει κορυφές άνω των 500 W, μια λογική προσδοκία για εκπαιδευμένο προσωπικό πεδίου μπορεί να είναι εύρη ισχύος μικρής διάρκειας σε 300–350 W. Συνήθως, ένας μη αθλητής που παράγει 200 W μηχανικής ισχύος με μεταβολική απόδοση 25% θεωρείται ότι εκτελεί εξαιρετικά βαριά εργασία που συνήθως απαιτεί συχνές περιόδους ανάπαυσης για την αντιμετώπιση της έλλειψης οξυγόνου. Επομένως, μια τέτοια απόδοση μπορεί να επιτευχθεί εύλογα μόνο για σύντομες διάρκειες, για παράδειγμα, 2 ώρες/ημέρα [178]. Υπολογίζεται ότι ένας σωματικά ικανός άνδρας 80 κιλών μπορεί να παράγει 125 W με μια συνεχή δραστηριότητα βαρέως τύπου σε μια βάρδια 8 ωρών. Διάφοροι μετατροπείς όπως ο πιεζοηλεκτρικός, τα θερμοηλεκτρικά, με βάση την ηλεκτρομαγνητική επαγωγή είναι διαθέσιμα για τη συλλογή αυτού του είδους παρατεταμένης ισχύος από διάφορες ανθρώπινες κινήσεις.

Η συλλογή ανθρώπινης ενέργειας είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει συστήματα που χρησιμοποιούν το ανθρώπινο σώμα ως πρωταρχική γεννήτρια. Συγκομιδή εμβιομηχανικής ενέργειας από την ανθρώπινη κίνηση, όπως το βήμα βάρδιας, κίνηση της άρθρωσης του αστραγάλου, του γόνατου, του ισχίου, του ώμου και του αγκώνα [179]. Ωστόσο, οι μηχανές συγκομιδής ανθρώπινης ενέργειας δεν είναι σε θέση να παράγουν επαρκή ενέργεια για την εκτέλεση μηχανικών εργασιών, αλλά θα μπορούσαν να τροφοδοτήσουν ηλεκτρονικά χαμηλής ενέργειας.

4.1.1. Μετατροπή θερμικής ενέργειας και συναφείς τεχνολογίες

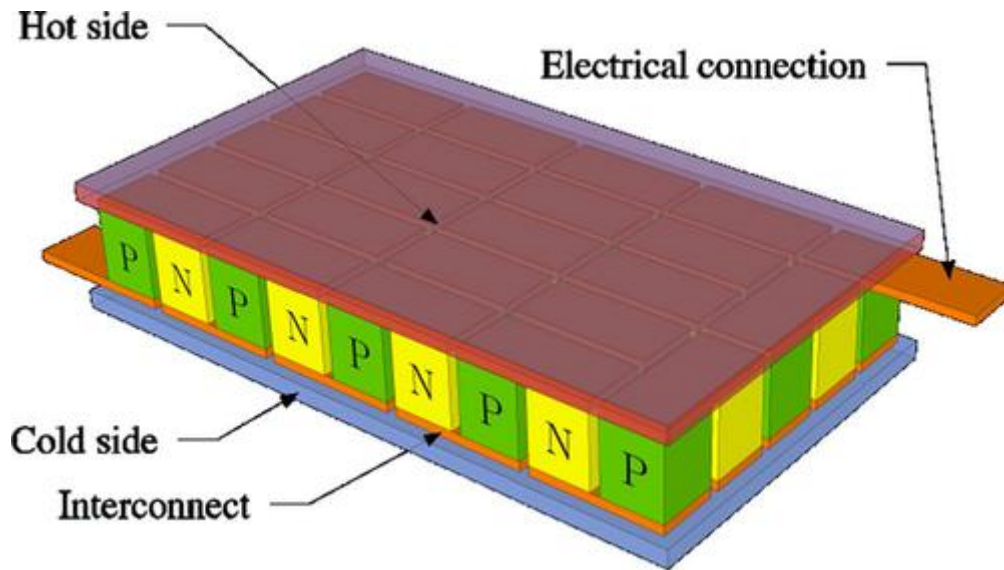
Το βασικό στοιχείο της θερμοηλεκτρικής ενέργειας είναι η παρουσία διαφοράς θερμοκρασίας και η ροή της θερμότητας από το θερμότερο άκρο στο ψυχρότερο άκρο. Είναι εύκολο να βρεθεί αυτή η διαφορά θερμοκρασίας που προκύπτει από

διάφορες πηγές θερμικής ενέργειας, για παράδειγμα, θερμότητα από τον ήλιο και διεργασίες απελευθέρωσης θερμικής ενέργειας, όπως η σπατάλη θερμότητας από αυτοκίνητα και διαδικασίες παραγωγής, συμπεριλαμβανομένης της θερμότητας που εκλύεται κατά τις ανθρώπινες δραστηριότητες [180]. Αυτή η θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιώντας διάφορους μετατροπείς όπως θερμοηλεκτρικά ζεύγη, υλικά αλλαγής φάσης (PCM) και φωτοβολταϊκά στοιχεία.

4.1.2. Συγκομιδή ενέργειας με TEC

Όταν δύο ανόμοια μέταλλα, ενωμένα μεταξύ τους στα άκρα τους, εκτίθενται σε διαφορετικές θερμοκρασίες (βλέπε παρακάτω εικόνα), υπάρχει μια διαφορά δυναμικού μεταξύ τους που οδηγεί σε ροή ηλεκτρονίων σε μια διαδικασία που ονομάζεται «φαινόμενο Seebeck» [181]. Το TEC αναφέρεται σε έναν μορφοτροπέα που μετατρέπει τη θερμική ενέργεια ή τη διαφορά θερμοκρασίας σε τάση με βάση το φαινόμενο Seebeck. Η εμπορική μικρογεννήτρια αποτελείται από 33 θερμοστοιχεία σε σειρά που κατασκευάζονται μέσω συμπληρωματικής διαδικασίας ημιαγωγού οξειδίου μετάλλου (CMOS). Τα υλικά θερμοζευγών είναι πολυπυρίτιο τύπου p και n επειδή έχουν μεγάλο συντελεστή Seebeck, ο οποίος είναι ευθέως ανάλογος με τη διαφορά θερμοκρασίας [182].

Επομένως, για να αυξηθεί αυτή η διαφορά, οι Yang et al. έχουν αναρτήσει το ζεστό μέρος για να μειώσουν τη βύθιση θερμότητας χρησιμοποιώντας τη διαδικασία CMOS, η οποία είχε ως αποτέλεσμα την ενισχυμένη ισχύ της συσκευής. Η τυπική ισχύς εξόδου της μικρογεννήτριας είναι 9,4 μ W σε διαφορά θερμοκρασίας 15 K.



Εικόνα 13: Θερμοηλεκτρικό ζεύγος που μετατρέπει τη ροή θερμότητας που υπάρχει μεταξύ θερμής και ψυχρής διασταύρωσης σε ηλεκτρική ενέργεια.

4.1.3. Συγκομιδή θερμότητας ανθρώπινου σώματος με TEGs

Η ανθρώπινη ενέργεια προέρχεται από τα τρόφιμα (υδατάνθρακες, λίπη και πρωτεΐνες). Η απόδοση της μετατροπής ενέργειας στο ανθρώπινο σώμα εκτιμάται ότι είναι 15–30%. Ως εκ τούτου, το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας χάνεται στο περιβάλλον ως θερμική ενέργεια.

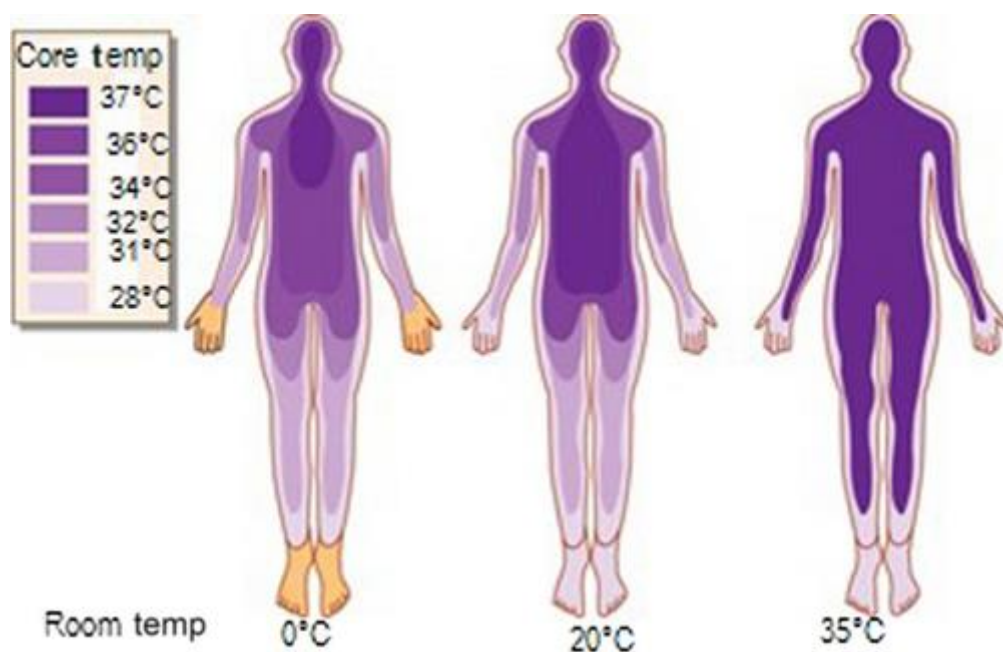
Το μέγεθος της ισχύος ανάλογο με την εκπομπή θερμότητας του σώματος που σχετίζεται με μια σειρά από ανθρώπινες δραστηριότητες και στάσεις φαίνεται στον παρακάτω πίνακα [183].

Δραστηριότητα	Ισχύς		
	Σύνολο	Λογικός	Λανθάνων
Καθισμένος σε ανάπαυση	100	60	40
Καθιστή ελαφριά εργασία (γράψιμο)	120	65	55
Καθιστό φαγητό	170	75	95
Περπάτημα με 1,5 m/sec	305	100	205
Βαριά εργασία (ανύψωση)	465	165	300
Αθλητισμός	525	185	340

Πίνακας 6: Ισχύς που διαχέεται ως θερμότητα από το ανθρώπινο σώμα κατά τη διάρκεια διαφορετικών δραστηριοτήτων

Τα δεδομένα δείχνουν ότι αυτό αποτελεί σημαντικό πόρο/βάση για την ανάπτυξη τεχνολογιών συλλογής ενέργειας που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την

τροφοδοσία ηλεκτρονικών συσκευών. Σε όλες τις σωματικές δραστηριότητες, η ανθρώπινη αντοχή είναι μια αντίστροφη συνάρτηση της μηχανικής απόδοσης [184]. Η κάτωθι εικόνα απεικονίζει τη διακύμανση της θερμοκρασίας του ανθρώπινου δέρματος σε διαφορετικές θερμοκρασίες δωματίου. Η σχετική θερμοκρασία μεταξύ του ανθρώπινου σώματος και του περιβάλλοντος κυμαίνεται από 5–10°C. Έχει υποστηριχθεί ότι ένα TEC είναι ο καλύτερος τρόπος για τη συλλογή της θερμότητας του ανθρώπινου σώματος καθώς, λόγω του μικρού μεγέθους και του μικρού βάρους τους, αυτές οι μονάδες μπορούν εύκολα να κατασκευαστούν σε ρούχα.



Εικόνα 14: Ο χάρτης θερμοκρασίας δέρματος σε διαφορετικές θερμοκρασίες δωματίου

Μεταξύ όλων των περιοχών του ανθρώπινου σώματος, ο λαιμός είναι το πιο προσιπτό μέρος και μια καλή θέση για TEG. Η περιοχή του πυρήνα του σώματος πρέπει να είναι πάντα ζεστή. Επομένως, μια γεννήτρια μπορεί εύκολα να αφαιρεθεί από τον χρήστη χωρίς να δημιουργεί ενόχληση. Υπολογίζεται ότι περίπου μεταξύ 0,2 και 0,32 W θα μπορούσαν να ανακτηθούν με τη χρήση ενός νάρθηκα αυχένα [185].

Σε προσπάθειες ανάπτυξης τεχνικών για τη συλλογή ενέργειας από παθητική ανθρώπινη δύναμη, αναπτύχθηκε φορητό σύστημα TEG. Οι Xie et al. ανέπτυξαν μια γεννήτρια ισχύος που αποτελείται από ένα τσιπ 1 cm² κατασκευασμένο με περισσότερα από 30.000 θερμοστοιχεία και ικανό να παράγει 16,7 V και ισχύ εξόδου 1,3 μW σε διαφορά θερμοκρασίας 5 K. Αυτό ήταν ικανό να τροφοδοτήσει ιατρικά εμφυτεύματα εξαιρετικά χαμηλής ισχύος, όπως το σύστημα επικοινωνίας ιατρικών εμφυτευμάτων και ασύρματοι αισθητήρες.

4.1.4. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανάκτηση θερμότητας απορριμμάτων διεργασίας

Το αυξανόμενο κόστος της ενέργειας και οι αντιληπτές επιπτώσεις της υπερθέρμανσης του πλανήτη τα τελευταία χρόνια έχουν υπογραμμίσει την ανάγκη να ενισχυθεί η αποδοτικότητα στην παραγωγή και χρήση ενέργειας και να μειωθούν οι εκπομπές.

Η ανάκτηση θερμικής ενέργειας από διάφορες βιομηχανίες όπως χαλυβουργία, εργοστάσια επεξεργασίας τροφίμων και τσιμεντοβιομηχανία παρέχει χρήσιμα μέσα για τη μείωση της σπατάλης ενέργειας, την αύξηση της εξοικονόμησης πόρων και τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της χρήσης ενέργειας. Τα προηγμένα θερμοηλεκτρικά συστήματα για την ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας στα αυτοκίνητα έχουν συζητηθεί προηγουμένως [186]. Σε ένα τέτοιο σύστημα, μια θερμοηλεκτρική γεννήτρια εξάγει την απορριπτόμενη θερμότητα από την εξάτμιση και παρέχει τη μετασχηματισμένη ηλεκτρική ισχύ DC για να επαναφορτίσει τη μπαταρία του οχήματος. Αυτό θα μπορούσε να μειώσει ή ακόμα και να εξαλείψει την ανάγκη για εναλλάκτη και θα μπορούσε να βελτιώσει την απόδοση καυσίμου έως και 10%, μειώνοντας το φορτίο του κινητήρα. Οι Hsu et al. παρουσίασαν επίσης ένα σύστημα ανάκτησης απορριπτόμενης θερμότητας από τον σωλήνα εξάτμισης των αυτοκινήτων, με 24 μονάδες TEG συνδεδεμένες σε σειρά (θερμικά παράλληλες) και ικανές να παράγουν 12,41 W στην περιοχή θερμοκρασίας 5–30 K.

Άλλες εφαρμογές χαμηλής ισχύος, για παράδειγμα, ηλεκτρικό ανοιχτήρι παραθύρων, κλείδωμα θυρών, συστήματα ρύθμισης καθρέφτη και φωτός, η παρακολούθηση της πίεσης των ελαστικών μπορεί επίσης να τροφοδοτείται από θερμικές πηγές και πηγές κραδασμών. Ο Zao ανέπτυξε μια νέα τεχνική που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τη συλλογή θερμότητας από τη διεργασία για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [187]. Ο σωλήνας Rijke-Zhao βασίστηκε σε θερμοακουστικό σύστημα με συναγωγή, συμπεριλαμβανομένου ενός μικροφώνου για την παρακολούθηση των διακυμάνσεων της πίεσης και των θερμοστοιχείων για τη μέτρηση της θερμοκρασίας των ακουστικών πεδίων. Το ρεύμα μεταφοράς που παράγεται από το σύστημα ενεργοποίησε την ταλάντωση των πιεζοηλεκτρικών διαφραγμάτων PZT (τιτανικό μόλυβδο ζirkονικό άλας) για παραγωγή ισχύος έως 2,1 mW.

Τέτοιες και παρόμοιες τεχνικές παρέχουν σημαντικές δυνατότητες ανάκτησης θερμότητας που διαφορετικά θα απελευθερωνόταν στην ατμόσφαιρα, ελαχιστοποιώντας έτσι τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των βιομηχανικών διεργασιών που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα, σύμφωνα με τα παρακάτω ως (Ολική απορριπτόμενη θερμότητα σε θερμοκρασία αναφοράς ίση με) [188]:

- Κατασκευή γυαλιού
 - 43 (25°C TBtu/έτος)
 - 24.1 (75°C TBtu/έτος)
 - – (150°C TBtu/έτος)
- Τσιμεντοβιομηχανία
 - 82
 - –
 - 44.3
- Κατασκευή σιδήρου και χάλυβα
 - 79.1
 - –
 - 57.3
- Παραγωγή αλουμινίου
 - 9.5
 - –
 - 6.7
- Χύτευση μετάλλων
 - 32.8
 - –
 - 24
- Βιομηχανικοί λέβητες
 - 1170
 - –
 - 100

4.1.5. Συγκομιδή θερμικής ενέργειας με πυροηλεκτρικά υλικά

Μερικά υλικά πολώνονται ηλεκτρικά όταν η διακύμανση της θερμοκρασίας εφαρμόζεται ομοιόμορφα σε αυτά. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται πυροηλεκτρικό φαινόμενο.

Εμφανίζεται λόγω του ασύμμετρου δυναμικού αλληλεπίδρασης λόγω των ηλεκτρικά φορτισμένων ατόμων εντός της κρυσταλλικής δομής. Οι Cha και Ju [189] χρησιμοποίησαν αυτή την ιδέα στη συγκομιδή ενέργειας που χρησιμοποιεί υγρό για να μεταφέρει τη θερμική ενέργεια μεταξύ δύο συγκροτημάτων ηλεκτροδίων που περιέχει ένα πυροηλεκτρικό υλικό μεταξύ δύο υποστρωμάτων επικαλυμμένα με υδρόφοβο στρώμα που λειτουργεί ως πηγή θερμότητας ή ψύκτρα.

Μια εξωτερική δύναμη αναγκάζει τα σταγονίδια να συγχωνευθούν και σχηματίζει ένα συνεχές λεπτό υγρό στρώμα και όταν απελευθερωθεί η δύναμη, τα σταγονίδια έρχονται στο αρχικό τους σχήμα (λόγω της παρουσίας υδρόφοβου στρώματος), το οποίο επιτρέπει την ταχεία εναλλαγή της θερμικής αγωγιμότητας μεταξύ πυροηλεκτρικού υλικού και μια πηγή/καταβόθρα και δημιουργεί ηλεκτροστατικό φορτίο στα ηλεκτρόδια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα υψηλή πυκνότητα ισχύος ως έξοδο, δηλαδή 110 mW/cm^3 . Αυτή θα μπορούσε να είναι μια καλή μέθοδος για την αξιοποίηση της ενέργειας πίεσης [190].

Οι Yang et al. ανέπτυξαν μια νανοπυροηλεκτρική γεννήτρια για τη φόρτιση μιας μπαταρίας ιόντων λιθίου από τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Κατασκεύασαν στρώμα νικελίου πάχους 300 nm πάνω και κάτω από το φιλμ PZT, ως ηλεκτρόδια. Ως άνοδος και κάθοδος χρησιμοποιήθηκαν νανοσωλήνες TiO_2 και LiCoO_2 / αγωγίμο άνθρακα, αντίστοιχα, και φιλμ πολυαιθυλενίου ως διαχωριστικό. Η εγκατάσταση ήταν σε θέση να επαναφορτίσει μια μπαταρία Li-ion με πυκνότητα ρεύματος 171 nA/cm^2 σε 3 ώρες για διαφορά θερμοκρασίας 45 K [191].

Οι Zhang et al. συγκέντρωσαν ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιώντας ροή ανέμου με πυροηλεκτρικό υλικό, χρησιμοποιώντας ακτίνα 12 cm, μαύρο βαμμένο δίσκο PZT με πολυμεθακρυλικό υπόστρωμα, και τοποθετήθηκε σε ρεύμα αέρα 2 m/sec (πνέεται σε διαστήματα 30 δευτερολέπτων) και εκτίθεται σε πηγή φωτός 20 W . Αυτό μετέβαλλε τη θερμοκρασία γύρω από το PZT και παρήγαγε πυκνότητα ισχύος $4,2 \mu \text{ W/cm}^3$ στα 10 V σε έναν πυκνωτή 2,2 $\mu \text{ F}$. Μια τέτοια διάταξη παρέχει βιώσιμες προοπτικές για τη συλλογή ενέργειας με βάση τις κανονικές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

4.1.6. Συγκομιδή ενέργειας με χρήση μαγνητοσυσταστικών υλικών

Τα μαγνητοσυσταστικά υλικά (MsM) είναι μια κατηγορία υλικών που παραμορφώνονται όταν εκτίθενται σε μαγνητικά πεδία. Αυτό το φαινόμενο χρησιμοποιείται συχνά για τη δημιουργία σεισμικών κυμάτων, σε σόναρ και ηλεκτροϋδραυλικούς ενεργοποιητές. Μια ενδιαφέρουσα ιδιότητα των MsM είναι, όταν υποβάλλονται σε δύναμη, η σχετική παραμόρφωση σε αυτά παράγει ηλεκτρικό ρεύμα, μια ιδιότητα που χρησιμοποιείται συχνά σε μεθόδους συλλογής ενέργειας [192]. Για παράδειγμα, το MsM, Metglas 2605SC ($\text{Fe}_{81}\text{B}_{13,5}\text{Si}_{3,5}\text{C}_2$)₁₀ έχει επιδείξει ενθαρρυντικά χαρακτηριστικά ως συλλέκτης ενέργειας δόνησης. Συσκευή συλλογής ενέργειας από δονήσεις περιβάλλοντος περιλαμβάνει ένα γιγάντιο Metglas συνδεδεμένο σε ένα χάλκινο υπόστρωμα, τυλιγμένο με ένα πηνίο pickup. Η μέση ισχύς και πυκνότητα

ισχύος που καταγράφηκε κατά τη φόρτιση ενός υπερπυκνωτή 3 F ήταν $576 \mu W$ και $606 \mu W/cm^3$, αντίστοιχα [193].

Ένα όλκιμο MsM, η γαλφενόλη, η οποία είναι ένα κράμα σιδήρου και γαλλίου, έχει υψηλή πιεζομαγνητική σταθερά, καλή μηχανική ικανότητα και μεγάλο αντίστροφο μαγνητοσυστολικό αποτέλεσμα με το οποίο η μαγνήτιση μπορεί να μεταβληθεί λόγω μηχανικής καταπόνησης. Αυτές οι ιδιότητες το καθιστούν καλύτερο στην απόδοση για τη συλλογή ενέργειας από δονήσεις του περιβάλλοντος από τα πιεζοηλεκτρικά υλικά που έχουν περιορισμούς όσον αφορά τη μακροζωία τους, την απόδοση ισχύος και την απόδοση μετατροπής [194]. Οι Ueno και Yamada δοκίμασαν μια συσκευή αποτελούμενη από ένα MsM συνδεδεμένο σε ένα χάλκινο υπόστρωμα, τυλιγμένο από ένα πηνίο συλλογής που ήταν σε θέση να παράγει μέγιστη ισχύ $3,5 mW$ στα $395 Hz$ [194]. Ορισμένες εξέχουσες ιδιότητες του πιεζοηλεκτρικού και του MsM συγκρίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Υλικά	Μηχανισμός ενεργοποίησης	Μέγιστη ελεύθερη καταπόνηση ($\mu\epsilon$)	Συντελεστής (GP α)	Πυκνότητα (kg/m^3)	Εύρος ζώνης (Hz)
PZT-5H	Πιεζοηλεκτρικό (κεραμικό)	1×10^3	62	7500	10^2
PVDF	Πιεζοηλεκτρικό (πολυμερές)	7×10^2	3	1780	10^3
Terfenol	Μαγνητοσυσταλικό	2×10^3	40	9250	10^2
Nitinol	Κράμα μνήμης σχήματος	2×10^4	78	6450	10^0

Πίνακας 7: Σύγκριση μεταξύ έξυπνων υλικών

4.1.7. Συγκομιδή ενέργειας με χρήση ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής

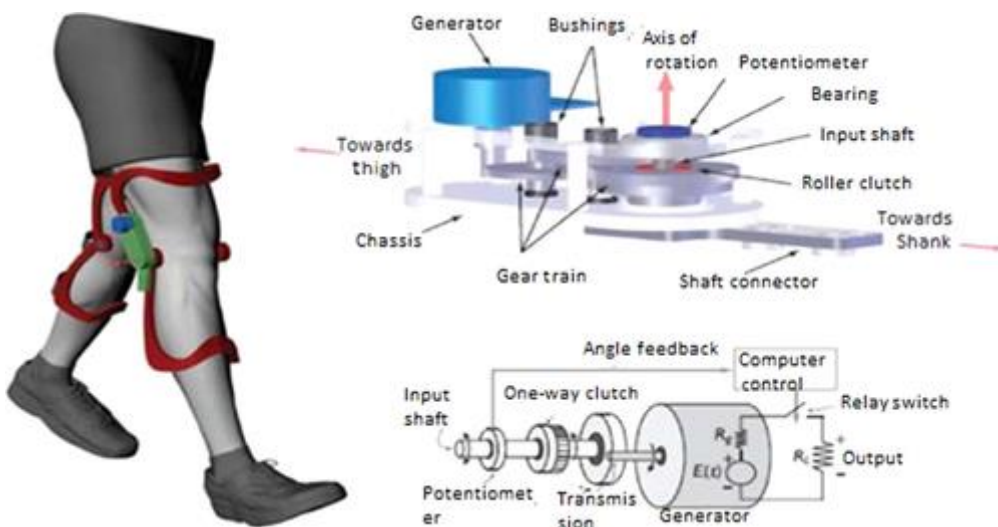
Το ηλεκτρικό πεδίο παράγει πάντα μαγνητικό πεδίο. Αντίθετα, ένα χρονικά μεταβλητό μαγνητικό πεδίο παράγει πάντα ηλεκτρικό πεδίο. Ο επαγωγικός νόμος του Faraday περιγράφει την τροποποίηση ότι ένα μαγνητικό πεδίο θα προκαλέσει ηλεκτρικό ρεύμα.

Η αρχή της μαγνητικής επαγωγής έχει χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη μιας προσαρμογής για τη συλλογή ενέργειας από την κίνηση στην άρθρωση του γόνατος που βασίζεται στην αρνητική εργασία των μυών [195]. Το σύστημα περιελάμβανε ένα ορθοπεδικό στήριγμα γόνατος που οδηγεί ένα σύστημα μετάδοσης μέσω μονόδρομου συμπλέκτη (παρακάτω εικόνα). Μόνο η κίνηση επέκτασης του γόνατος μεταδίδεται σε μια γεννήτρια DC χωρίς ψήκτρες. Αυτή η συσκευή ήταν ικανή να παράγει $2,5 W$ ανά γόνατο, με ταχύτητα βάρδισης $1,5 m/sec$. Το πρόσθετο μεταβολικό κόστος παραγωγής ενέργειας (χωρίς το κόστος μεταφοράς της συσκευής) υπολογίστηκε σε $4,8 W$, δηλαδή

12,5% του μεταβολικού κόστους που απαιτείται για τη συμβατική ανθρώπινη παραγωγή ενέργειας.

Σε μια σημαντική ανακάλυψη, ερευνητές από το Πανεπιστήμιο του Auckland ανέπτυξαν τεχνητούς μύες με διηλεκτρικά ελαστομερή, τα οποία είναι ικανά να παράγουν καλή δύναμη όταν τεντώνονται και συστέλλονται [196]. Σε πείραμα, διαπιστώθηκε ότι η γεννήτρια σε σχήμα εμβόλου πλάτους 110 mm ήταν ικανή να παράγει 10 mW ισχύος.

Όταν ενσωματώνεται σε ρούχα, η ελαστική φύση του επιτρέπει να συλλέγει παθητική ενέργεια από μεγάλες και αργές κινήσεις κι έτσι να είναι μια πιθανή επιλογή για την αντικατάσταση ογκωδών και βαρέων εξαρτημάτων από συμβατικές γεννήτριες συλλογής ενέργειας. Οι McKay et al. [197] ανέπτυξαν μια γεννήτρια με στρώματα διηλεκτρικού ελαστομερούς πάχους $42 \times 40 \mu\text{m}$, διαμέτρου 11 mm, τα οποία στοιβάζονταν σε παράλληλη ηλεκτρική σύνδεση και τοποθετήθηκαν ανάμεσα σε καπάκια σιλικόνης πάχους 3 mm και στα δύο άκρα. Κατάφεραν να παράγουν μέγιστη ισχύ $300 \mu\text{W}$ σε συμπίεση 3 mm, καθιστώντας έτσι ικανό να τροφοδοτεί ασύρματους κόμβους αισθητήρων.



Εικόνα 15: Συσκευή για τη συγκομιδή ενέργειας από την ανθρώπινη κίνηση

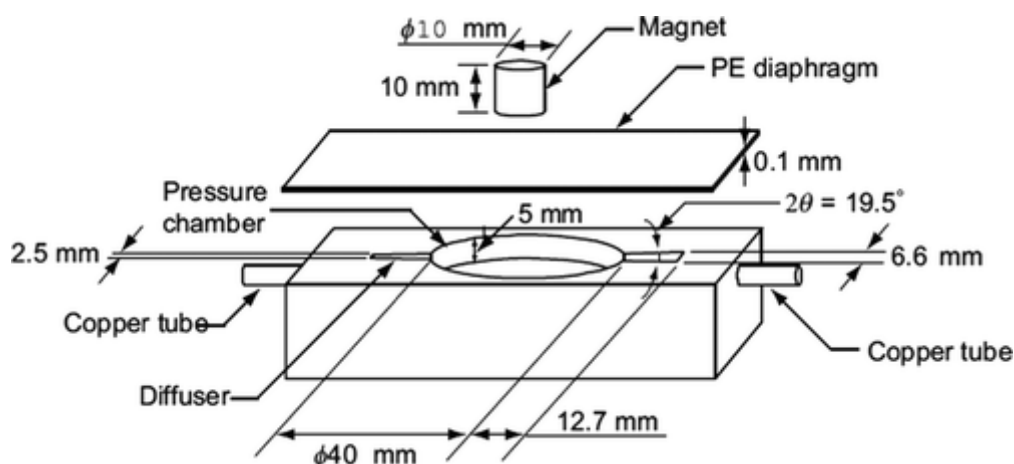
4.1.8. Συγκομιδή ενέργειας από δόνηση που προκαλείται από τη ροή

Ο Wang και ο Chang πρότειναν ένα πρωτότυπο βασισμένο στην αρχή της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής που συλλέγει τους κραδασμούς που προκαλούνται από τη ροή υγρού σε ένα κλειστό κανάλι.

Η ρύθμιση που απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα αποτελούνταν από ένα κανάλι ροής με δύο χάλκινους σωλήνες, ένα διάφραγμα πολυεστέρα (PE) συνδεδεμένο στο κανάλι και έναν μόνιμο μαγνήτη κολλημένο στο διάφραγμα PE [198]. Ένας μόνιμος

μαγνήτης περιβαλλόταν από ένα αγωγίμο πηνίο το οποίο οδηγούνταν γύρω από ένα εσωτερικό περίβλημα του πηνίου, στερεωμένο από ένα εξωτερικό περίβλημα. Η διακύμανση της πίεσης του υγρού στο κανάλι ροής χρησιμοποιήθηκε για τη δόνηση ενός πολυεστερικού διαφράγματος με ενσωματωμένο μόνιμο μαγνήτη που περιβάλλεται από ένα σταθερό πηνίο [199].

Η ενέργεια των κραδασμών στη συνέχεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια με επαγωγή. Η περιγραφόμενη διάταξη έχει δημιουργήσει μέγιστη τάση εξόδου περίπου 11 mV για ταλαντώσεις πίεσης σε συχνότητα 30 Hz.



Εικόνα 16: Πρωτότυπο θερμικής μηχανής ενέργειας

4.1.9. Συγκομιδή ενέργειας από δονήσεις περιβάλλοντος χαμηλής συχνότητας

Οι δονήσεις του περιβάλλοντος με μέγεθος κάτω από 18 Hz είναι δύσκολο να συγκομιστούν λόγω της χαμηλής συχνότητάς τους. Ωστόσο, υπάρχει δυνατότητα για την ενίσχυσή τους με τη χρήση συντονιστή συχνότητας, καθιστώντας τα διαθέσιμα για συγκομιδή. Οι Ashraf et al. [200] συγκέντρωσαν τέτοιους κραδασμούς χαμηλής συχνότητας χρησιμοποιώντας ένα πηνίο σε σχήμα δίσκου, τοποθετημένο σε μια δέσμη PVC (ως ταλαντωτή υψηλής συχνότητας) μεταξύ τεσσάρων μαγνητών N-45, σε μια διάταξη που υποστηρίζεται από δύο δέσμες PVC (ως αντηχείο χαμηλής συχνότητας). Κατέγραψαν μέγιστη ισχύ εξόδου και τάση 20,9 mW και 7,92 V, αντίστοιχα.

4.1.10. Αυτορυθμιζόμενος συλλέκτης ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας

Η ρύθμιση της συχνότητας είναι γνωστό ότι αποτελεί πρόβλημα για συσκευές συλλογής ενέργειας δόνησης, καθώς είναι σχεδιασμένες να αντηχούν σε φυσικές συχνότητες για αποτελεσματική απόδοση, αλλά λόγω πολλών παραγόντων [201], για

παράδειγμα, μικρής απόκλισης από τη λειτουργία σε συντονισμό, παραγόντων ποιότητας και κατασκευαστικών σφαλμάτων θα μπορούσε να οδηγήσει στη μείωση της παραγόμενης ισχύος εξόδου.

Σε αυτό το πλαίσιο, οι Aboilfotoh et al. σχεδίασαν έναν αυτορυθμιζόμενο συλλέκτη ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας, χρησιμοποιώντας μια δοκό προβόλου τοποθετημένη σε αναδευτήρα με μόνιμο μαγνήτη προσαρτημένο σε κινητό δίσκο και οδηγούμενο από βηματικό κινητήρα. Χρησιμοποιήθηκε ένας μικροελεγκτής για την ανίχνευση της συχνότητας για τη δημιουργία σήματος για τον βηματικό κινητήρα, προκειμένου η συσκευή να ταιριάζει με τη συχνότητα συντονισμού της.

Επίσης, κατά τη διάρκεια του πειράματος, κατάφεραν να διατηρήσουν τη φυσική συχνότητα της ρύθμισης, συντονισμένη από 4,7 Hz σε 9 Hz. Αυτή η τεχνική θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την αύξηση της απόδοσης των συσκευών συλλογής ενέργειας από δόνηση [202].

5. Αισθητήρες και συστήματα παθητικής ετικέτας RFID που βασίζονται σε κεραία για εφαρμογές παρακολούθησης δομικής υγείας

Το υψηλό κόστος και οι υποχρεώσεις που σχετίζονται με πιθανές αστοχίες έχουν καταστήσει την παρακολούθηση της δομικής υγείας (SHM) ένα αναπόσπαστο και απαραίτητο μέτρο ασφαλείας για τη διασφάλιση της ασφαλούς και αξιόπιστης λειτουργίας κατασκευών μεγάλης κλίμακας, π.χ. σιδηρόδρομοι, αγωγοί, φράγματα, γέφυρες και αεροσκάφη [203]. Ενώ αυτές οι κατασκευές έχουν σχεδιαστεί για να διασφαλίζουν ότι λειτουργούν με ασφάλεια σε αναμενόμενα σενάρια φόρτωσης, μπορεί να προκύψουν φθορές και ζημιές κατά τη διάρκεια της λειτουργικής τους ζωής.

Οι περιοδικές χειροκίνητες επιθεωρήσεις, οι οποίες είναι κυρίως οπτικές, είναι δύσκολες, αναξιόπιστες και σχεδόν αδύνατες σε καταστάσεις όπου οι κατασκευές είναι δύσκολο να προσπελαστούν, για παράδειγμα, σκληρά περιβάλλοντα εμποδίζουν τη χειροκίνητη παρακολούθηση κρίσιμων δεδομένων περιβάλλοντος ή παρουσιάζονται ελαττώματα κάτω από την επιφάνεια. Πολλές μη καταστρεπτικές τεχνικές δοκιμών και αξιολόγησης (NDT & E), όπως υπερήχων, παλμικού δινορευματικού ρεύματος (PEC) και παλμικής θερμογραφίας δινορευμάτων (ECPT) [204], αναπτύχθηκαν για την παρακολούθηση ελαττωμάτων στις κατασκευές με καλή ανάλυση, ευαισθησία και αξιοπιστία. Ωστόσο, αυτές οι τεχνικές είναι δαπανηρές στην εφαρμογή τους για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας λόγω του κόστους εργασίας και καλωδίωσης καθώς και λόγω περιορισμένης εμβέλειας λόγω των απαιτήσεων ισχύος και ανάλυσης [205]. Εκτός από το σημαντικό κόστος τόσο σε χρόνο όσο και σε πόρους λόγω των περιοδικών επιθεωρήσεων, αυτές οι τεχνικές μπορεί να είναι πολύ επαχθείς για τη συνεχή παρακολούθηση της δημιουργίας πυρήνων και της αύξησης πιθανών ελαττωμάτων για κατασκευές μεγαλύτερης κλίμακας εν λειτουργία.

Το SHM που βασίζεται σε κατανεμημένους αισθητήρες είναι μια ελκυστική επιλογή για την παρακολούθηση της δομικής υγείας αυτών των δομών, η οποία μπορεί να μετατρέψει τη συντήρηση βάσει χρόνου σε οικονομική συντήρηση βάσει συνθηκών. Οι προηγούμενες μέθοδοι για την ανάπτυξη δικτύων αισθητήρων μεγάλης κλίμακας περιελάμβαναν καλωδίωση μεγάλων μηκών που θα προμήθευαν ενέργεια και θα συλλέγουν δεδομένα από κάθε μεμονωμένο αισθητήρα [206]. Ωστόσο, ενώ αυτές οι μέθοδοι ήταν απαραίτητες για ορισμένες περιπτώσεις όπου απαιτούνταν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, το κόστος, η δυσκολία εγκατάστασης και η συντήρηση σπάνια δικαιολογούσαν τη χρήση τους σε σχέση με τη μη αυτόματη συλλογή δεδομένων. Με την εξάλειψη της ηλεκτρικής καλωδίωσης από τους συμβατικούς αισθητήρες, τα

ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSN) είναι φθηνά και ευκολότερα στην εγκατάσταση, δίνοντάς μας τη δυνατότητα να συγκεντρώνουμε τεράστιες ποσότητες δεδομένων που μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά τις γνώσεις μας για το περιβάλλον που μας περιβάλλει [207]. Αυτή η τεχνική κάνει πραγματικότητα τη διανομή αισθητήρων σε μεγάλη περιοχή και με υψηλή πυκνότητα.

Ωστόσο, για να επιτραπούν μεγάλης κλίμακας διάχυτα δίκτυα αισθητήρων που συλλέγουν μεγάλα δεδομένα, η πλατφόρμα ανίχνευσης πρέπει να είναι αξιόπιστη, ενεργειακά αποδοτική και με εξαιρετικά χαμηλό κόστος για να γίνει μια βιώσιμη μακροπρόθεσμη λύση.

Για πιθανές μελλοντικές εφαρμογές, η χωρική ευαισθησία είναι ένα βασικό ζήτημα. Οι τρέχουσες εφαρμογές ασύρματης ανίχνευσης χρησιμοποιούν αισθητήρες που τροφοδοτούνται από μπαταρία, αλλά αυτοί οι αισθητήρες είναι τουλάχιστον δύο τάξεις μεγέθους πιο ακριβοί από τους απλούστερους παθητικούς ομολόγους τους, γεγονός που περιορίζει την ευαισθησία της ανάπτυξής τους [208]. Επιπλέον, οι αισθητήρες που τροφοδοτούνται από μπαταρίες έχουν περιορισμένη διάρκεια ζωής της μπαταρίας και με τη σειρά τους ενέχουν μακροπρόθεσμους περιβαλλοντικούς κινδύνους με την απόρριψη δισεκατομμυρίων μπαταριών. Λόγω της μαζικής χρήσης για την οποία προορίζονται, οι αισθητήρες δεν χρειάζεται να είναι εξαιρετικά εξελιγμένοι ή ακριβείς. Ωστόσο, πρέπει να ικανοποιούν απαιτήσεις χαμηλού κόστους και αποδεκτής αξιοπιστίας, προκειμένου να αναπτυχθούν με μεγαλύτερη ευαισθησία από τους ενεργούς ακριβείς ασύρματους αισθητήρες. Ο απώτερος στόχος είναι ο σχεδιασμός «έξυπνων κηλίδων σκόνης» [209], δηλαδή αυτόνομης ανίχνευσης, πανταχού παρόντων υπολογιστών και συστημάτων επικοινωνίας αρκετά μικρά ώστε να «διασκορπίζονται εύκολα στο περιβάλλον». Αυτό δίνει κίνητρο για την ανάπτυξη χαμηλού κόστους, ασύρματων και παθητικών αισθητήρων για μεγάλης κλίμακας υποδομές και εφαρμογές μεγάλων δεδομένων.

Προκειμένου να επιτραπεί ένα τέτοιο όραμα, η τεχνολογία αναγνώρισης ραδιοσυχνότητας (RFID) μπορεί να διαδραματίσει στρατηγικό ρόλο, χάρη στις χαμηλού κόστους, ασύρματες και «φιλικές προς την αίσθηση» ικανότητές της. Οι τελευταίες δεκαετίες υπήρξαν μάρτυρας μιας ταχείας ανάπτυξης της τεχνολογίας RFID γι' αναγνώριση και παρακολούθηση λόγω της μοναδικής ταυτοποίησής της (UID) [210]. Εκτός από αυτήν την κοινή χρήση, μια αναλογική επεξεργασία των φυσικών σημάτων που σχετίζονται με την επικοινωνία αναγνώστη-ετικέτας, θα μπορούσε να επιτρέψει την επίτευξη πολύ περισσότερων πληροφοριών σχετικά με τον στόχο χωρίς την ανάγκη πρόσθετων ηλεκτρονικών ή αισθητήρων. Η ενεργοποίηση της ικανότητας

ανίχνευσης στην τεχνολογία RFID μπορεί να κάνει το σύστημα να γνωρίζει την κατάσταση των αντικειμένων του πραγματικού κόσμου και ενσωματώνονται απρόσκοπτα στα παγκόσμια κυβερνοφυσικά συστήματα (CPS) και στο Internet of Things (IoT) [211]. Οι δυνατότητες ανίχνευσης που παρέχονται από τις κεραίες ετικετών RFID στις ζώνες υπερυψηλών συχνοτήτων (UHF) είναι ίσως μια συναρπαστική ερευνητική τάση, με μεγάλη εφαρμογή στο αναδυόμενο παράδειγμα του IoT ως πράσινης τεχνολογίας. Το βασικό υπόβαθρο είναι ένα νέο παράδειγμα σχεδιασμού κεραίας που συνδυάζει τα συμβατικά ζητήματα επικοινωνίας με πιο συγκεκριμένες απαιτήσεις σχετικά με την ευαισθησία σε μεταβαλλόμενες χρονικά οριακές συνθήκες. Το σκεπτικό αυτής της ιδέας έγκειται στη σαφή εξάρτηση της σύνθετης αντίστασης εισόδου και της διατομής ραντάρ (RCS) της ετικέτας από τα φυσικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός πραγματικού στόχου [212].

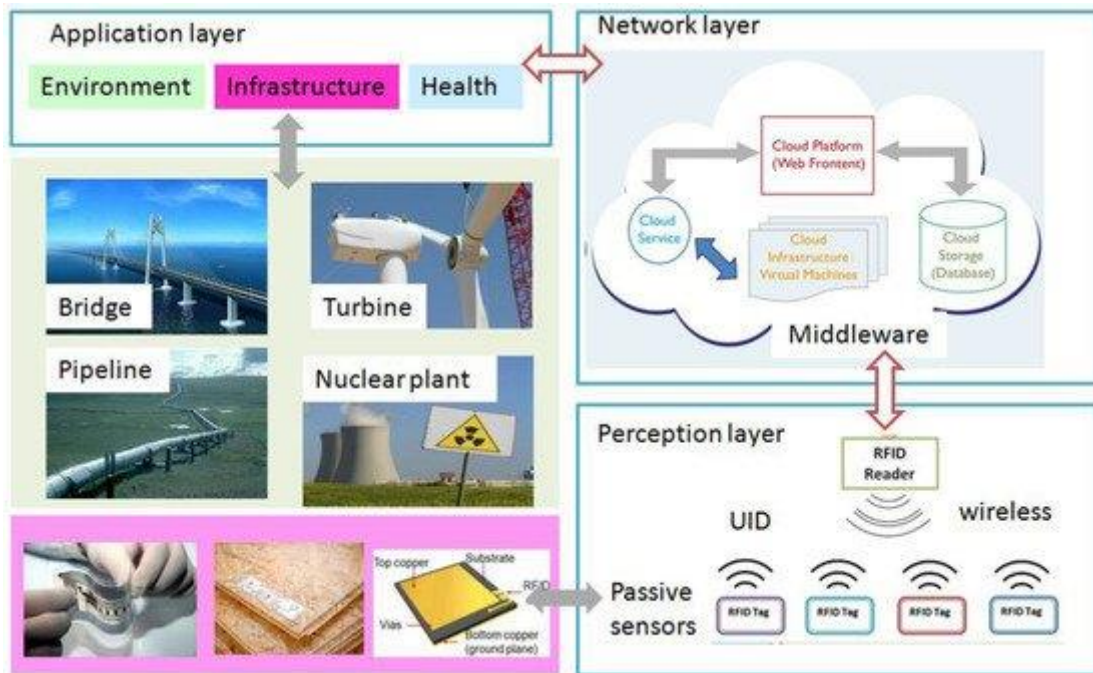
Η τεχνολογία RFID, η οποία αναπτύχθηκε αρχικά για την παρακολούθηση περιουσιακών στοιχείων μεγάλης κλίμακας, τυχάνει να είναι η ραχοκοκαλιά για την κατασκευή χαμηλού κόστους, παθητικού και μεγάλης κλίμακας WSN. Αυτό καθιστά δυνατή την ανάπτυξη τεράστιων ποσοτήτων αισθητήρων στην πραγματικότητα. Εν τω μεταξύ, καθώς η πλατφόρμα RFID είναι ευρέως αποδεκτή σε όλη τη βιομηχανία, τα WSN μεγάλης κλίμακας που βασίζονται στην τεχνολογία RFID μπορούν να ενσωματωθούν απρόσκοπτα σε τρέχοντα εμπορικά συστήματα RFID [213]. Για αυτόν τον λόγο, συνεπώς στην παρούσα εργασία ερευνάται η βελτίωση των συσκευών RFID συμβατών με το πρότυπο EPC Class 1 Generation 2 (C1G2) προς τον στόχο των αισθητήρων και της δικτύωσης που βασίζονται σε RFID. Χρησιμοποιούμε τον όρο αισθητήρας κεραίας εδώ για να αντιπροσωπεύσουμε έναν τύπο αισθητήρα που χρησιμοποιεί κεραίες για να «αισθανθεί» τα πράγματα.

Η αρχή λειτουργίας των αισθητήρων κεραίας που είναι τοποθετημένοι σε αγωγίμες επιφάνειες είναι παρόμοια με το παλμικό δινορευματικό NDT, του οποίου η απώλεια αγωγιμότητας και το βάθος διείσδυσης είναι ανάλογο με τη συχνότητα λειτουργίας. Με αυξημένη συχνότητα λειτουργίας, η χωρική ανάλυση μπορεί να βελτιώνεται συνεχώς με μια αντίστοιχη μείωση στο μήκος κύματος και ως εκ τούτου το μέγεθος του αισθητήρα κεραίας. Λόγω της σύζευξης μαγνητικού συντονισμού (MRC) στην ασύρματη μετάδοση ισχύος (WPT) [214], το εύρος ανάγνωσης μεταξύ της ετικέτας RFID και του αναγνώστη σε ζώνες χαμηλής συχνότητας (LF) ή υψηλής συχνότητας (HF) είναι αρκετά μικρό, π.χ. στην περιοχή πολλών εκατοστών. Αυτό οφείλεται στη σύζευξη παροδικής (λειτουργίας). Ως αποτέλεσμα ηλεκτρομαγνητικής (EM) ζεύξης (τρόπος διάδοσης), κεραίες UHF και υπερευρείας ζώνης (UWB) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αύξηση της απόστασης επικοινωνίας [215].

Ένα παράδειγμα παθητικών ασύρματων δικτύων μεγάλης κλίμακας βασισμένων σε RFID για SHM περιγράφεται στην ακόλουθη εικόνα. Αυτή η εργασία εστιάζει κυρίως στη ζώνη UHF. Ορισμένες ιδιότητες αυτών των παθητικών αισθητήρων κεραίας που βασίζονται στην τεχνολογία RFID μπορούν να συνοψιστούν ως εξής [216]:

- *Απλή διαμόρφωση:* Η ίδια η κεραία μπορεί να εξυπηρετήσει τη διπλή λειτουργία επικοινωνίας και αίσθησης. Επομένως, δεν απαιτείται εξωτερικός αισθητήρας. Για ετικέτες χωρίς τσιπ, δεν υπάρχει καν ηλεκτρονική συσκευή. Οι πληροφορίες ανίχνευσης κωδικοποιούνται απευθείας στη συμπεριφορά οπισθοσκέδασης της κεραίας. Για το λόγο αυτό, ο αισθητήρας μπορεί να λειτουργεί σε ακραίο περιβάλλον, π.χ. υψηλή θερμοκρασία.
- *Παθητική λειτουργία:* Το τσιπ ετικέτας έχει τη δική του μονάδα συλλογής ενέργειας, ως εκ τούτου, δεν απαιτείται ενσωματωμένη μπαταρία.
- *Εύρος μεσαίας ανάγνωσης:* Το εύρος ανάγνωσης για μια γενική παθητική ετικέτα μπορεί να είναι έως και 10 μέτρα, ωστόσο, το εύρος ανάγνωσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη συχνότητα, το κέρδος κεραίας και την ευαισθησία του τσιπ ετικέτας.
- *Χαμηλό κόστος:* Το κόστος για κάθε ετικέτα διπόλου είναι ~0,10–0,20\$ για μαζική παραγωγή. Οι αισθητήρες κεραίας μπορούν να κατασκευαστούν σε φθηνά υλικά υποστρώματος, όπως χαρτί, PVC, χρησιμοποιώντας τεχνικές κατασκευής χαμηλού κόστους, όπως η εκτύπωση inkjet.
- *Μοναδική αναγνώριση:* Κάθε ετικέτα έχει το δικό της UID, το οποίο χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό της θέσης του ελαττώματος καθώς και για τη σύνδεση των πραγμάτων στο διαδίκτυο. Αυτή η ικανότητα πολυπλεξίας αισθητήρα επιτρέπει πυκνά κατανεμημένα παθητικά WSN και παράλληλη ανάκριση πολλαπλών αισθητήρων με αλγόριθμους κατά της σύγκρουσης.
- *Πολυτροπικότητα:* Η κεραία μπορεί να σχεδιαστεί ώστε να είναι ευαίσθητη σε διάφορα φυσικά/μηχανικά/χημικά πράγματα σε πραγματικό χρόνο ή περιοδικά.
- *Επίπεδοι ή εύκαμπτοι:* Οι αισθητήρες κεραίας μπορούν να κατασκευαστούν σε εύκαμπτα υποστρώματα χαμηλού προφίλ που προσαρμόζονται πλήρως στην επιφάνεια στην οποία είναι προσαρτημένα.
- *Διείσδυση καλύμματος:* Η επιφάνεια του μετάλλου μπορεί να καλύπτεται με βαφή, επένδυση ή παρόμοια ένωση και το ελάττωμα μπορεί να εξακολουθήσει

να ανιχνεύεται επειδή τα μικροκύματα μπορούν να διεισδύσουν σε διηλεκτρικά υλικά.



Εικόνα 17: Παθητικά δίκτυα αισθητήρων RFID για SHM

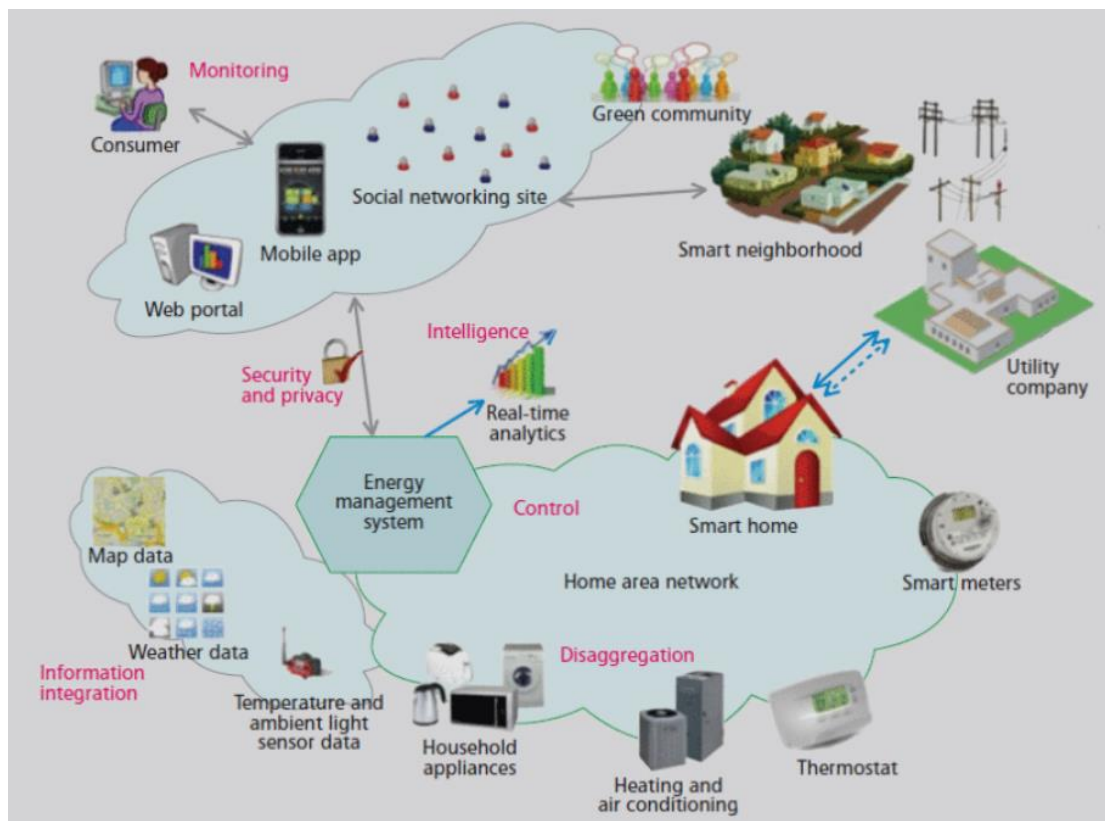
Το μελλοντικό IoT θα αποτελείται από ετερογενώς συνδεδεμένες συσκευές που επεκτείνουν περαιτέρω τα σύνορα του κόσμου με φυσικές οντότητες και εικονικά στοιχεία [217]. Το ενδιάμεσο λογισμικό έχει σχεδιαστεί για την πιθανή ενσωμάτωση ενός ετερογενούς δικτύου αισθητήρων IoT ενώ τα εσωτερικά δεδομένα είναι για απρόσκοπτη πρόσβαση σε ένα σύστημα Υπολογιστικού Νέφους.

Οι πρόσφατες αναδυόμενες εργασίες για τους αισθητήρες παθητικής κεραίας δείχνουν τις μεγάλες δυνατότητες για το μελλοντικό SHM όσον αφορά την ενσωμάτωση της παθητικής ανίχνευσης, της επικοινωνίας, της θέσης και της αναγνώρισης. Η μόνιμη εγκατάσταση εξαλείφει προβλήματα όπως η μεταβλητότητα του σήματος λόγω των αλλαγών της υφής και της γεωμετρίας με τη θέση και μπορεί να προσφέρει καλύτερη εκτίμηση του ρυθμού αύξησης της ζημίας με τη συχνότερη λήψη δεδομένων - με κόστος μειωμένης κάλυψης περιοχής [218]. Τα οφέλη, ωστόσο, μπορούν να πραγματοποιηθούν μόνο εάν τα συστήματα είναι αξιόπιστα για μεγάλες περιόδους, τα δεδομένα που λαμβάνονται μπορούν να συσχετιστούν αξιόπιστα με την υγεία της κατασκευής και τυχόν ελαττώματα ανιχνεύονται αξιόπιστα με χαμηλά ποσοστά ψευδών συναγερμών.

6. Σύγχρονα συστήματα διαχείρισης ενέργειας

Υπάρχει ένα αυξανόμενο παγκόσμιο ενδιαφέρον για την εξέλιξη του έξυπνου δικτύου, ενός σύγχρονου ηλεκτρικού δικτύου που υποστηρίζει αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ παρόχων ενέργειας και καταναλωτών για ακριβή μέτρηση, έλεγχο και ανάδραση. Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του έξυπνου δικτύου είναι η βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση και η διαχειρισσιμότητα των διαθέσιμων πόρων [160].

Τα συστήματα διαχείρισης ενέργειας (EM), συχνά ενσωματωμένα με συστήματα οικιακού αυτοματισμού, διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στον έλεγχο της κατανάλωσης ενέργειας στο σπίτι. Αυτά τα συστήματα παρέχουν μια υποδομή στους καταναλωτές για την κατανόηση, τον έλεγχο και τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας. Για παράδειγμα, τα συστήματα EM μπορούν να βοηθήσουν τους καταναλωτές να αποφύγουν την κατανάλωση κατά τις ώρες αιχμής και έτσι να επωφεληθούν από τα οικονομικά κίνητρα που προσφέρει η εταιρεία κοινής ωφέλειας [161]. Η ευρεία υιοθέτηση συστημάτων EM από τους καταναλωτές θα οδηγήσει τελικά σε πιο αποτελεσματική καταναλωτική συμπεριφορά και θα ωφελήσει επίσης το βοηθητικό πρόγραμμα. Ο ρόλος των συστημάτων EM σε ένα έξυπνο δίκτυο απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 18: IoT συσκευές

Τα συστήματα EM υπάρχουν εδώ και μερικές δεκαετίες, αλλά μέχρι πρόσφατα απαιτούσαν εξειδικευμένα όργανα και χειροκίνητη διαμόρφωση. Βασίστηκαν επίσης στην εκτεταμένη αλληλεπίδραση με τον πελάτη για να είναι χρήσιμα. Αυτοί οι παράγοντες αποτέλεσαν εμπόδιο εισόδου, το οποίο εμπόδιζε την υιοθέτησή τους σε μεγάλη κλίμακα. Αυτό το σενάριο αλλάζει ραγδαία λόγω πολλών τεχνολογικών προόδων [162]. Πρώτον, η ανάπτυξη των τεχνικών παρακολούθησης μη παρεμβατικού φορτίου (NILM) καθιστά πλέον δυνατή τη συλλογή δεδομένων κατανάλωσης ενέργειας μέχρι το επίπεδο των συσκευών. Τα συγκεντρωτικά ενεργειακά δεδομένα που συλλέγονται με αυτόν τον τρόπο είναι πιο σημαντικά για τους καταναλωτές. Δεύτερον, λόγω της διάχυτης διαθεσιμότητας αισθητήρων, έχει καταστεί ευκολότερη η συλλογή διαφορετικών διαστάσεων δεδομένων, συμπεριλαμβανομένης της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, της υγρασίας και του φωτισμού, που μπορούν να ενσωματωθούν από συστήματα EM για να παρέχουν περισσότερες πληροφορίες σχετικά με το περιβάλλον τους και να αυξάνουν έτσι την αποτελεσματικότητά τους [163]. Τρίτον, το cloud computing και οι κινητές πλατφόρμες κατέστησαν δυνατή την εκτέλεση αναλύσεων μεγάλης κλίμακας σε δεδομένα αισθητήρων και την προσφορά προηγμένης ανατροφοδότησης σε πραγματικό χρόνο στους καταναλωτές. Τέλος, η αυξανόμενη δημοτικότητα των κοινωνικών δικτύων, όπως το Facebook, έχει καταστήσει ευκολότερη την ενσωμάτωση συγκριτικών και πειστικών χαρακτηριστικών στα συστήματα EM για να παρακινηθούν αλλαγές συμπεριφοράς στους καταναλωτές.

Συμπεράσματα

Με την ανάπτυξη της ηλεκτρονικής βιομηχανίας, της κινητής υγειονομικής περίθαλψης και της τεχνολογίας Διαδικτύου των πραγμάτων, τα πάντα στον κόσμο μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους με πληροφοριακό τρόπο. Η ενεργειακή δομή του κόσμου υφίσταται τεράστιες αλλαγές σήμερα. Εκτός από τις παραδοσιακά μεγάλης κλίμακας συσσωρευμένες πηγές ενέργειας για την ανάπτυξη της ανθρώπινης κοινωνίας, απαιτούνται επίσης καταναλωμένες, κινητές και αποκλίνουσες μικρές πηγές ενέργειας σε αυτήν την εποχή του Διαδικτύου των Πραγμάτων, δηλαδή η ενέργεια της νέας εποχής [214]. Στην πραγματικότητα, όλα περιέχουν ανεξάντλητη ενέργεια και το ίδιο το ανθρώπινο σώμα είναι μια τυπική μορφή ενέργειας της νέας εποχής. Τα τελευταία χρόνια, η έρευνα για τη συλλογή ενέργειας από το ανθρώπινο σώμα έχει σημειώσει σημαντική πρόοδο, ορισμένες ηλεκτρονικές ιατρικές συσκευές χαμηλής κατανάλωσης και φορητές συσκευές τροφοδοτούνται με επιτυχία από ενέργεια από το ίδιο το ανθρώπινο σώμα.

Αυτή η ανασκόπηση συνοψίζει τρεις κύριες πηγές ροής ενέργειας που περιέχονται στο ανθρώπινο σώμα, οι οποίες είναι η θερμική ενέργεια, η χημική ενέργεια και η μηχανική ενέργεια. Λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά των τριών ενεργειακών ροών, εισάγονται διαδοχικά αντίστοιχες τεχνολογίες συλλογής ενέργειας: θερμοηλεκτρική γεννήτρια και πυροηλεκτρική γεννήτρια για τη συλλογή θερμικής ενέργειας, κυψέλη βιοκαυσίμου και υδροβολταϊκή γεννήτρια για τη συλλογή χημικής ενέργειας, πιεζοηλεκτρική νανογεννήτρια και τριβοηλεκτρική νανογεννήτρια ενέργειας [215].

Οι τεχνολογίες συλλογής ενέργειας παρέχουν πολλά υποσχόμενους τρόπους παραγωγής καθαρής και αναγεννητικής ενέργειας για διαφορετικές εφαρμογές. Οι νέες τεχνολογίες που έχουν αναδυθεί σε αυτόν τον τομέα βασίζονται σε δύο πηγές ενέργειας. Συγκεκριμένα η θερμική ενέργεια (από τον ήλιο ή τη γη) και η μηχανική ενέργεια (από τη φόρτωση οχημάτων ή τον άνεμο). Η προτιμώμενη τεχνολογία συλλογής ενέργειας μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με την αρχή λειτουργίας και την εστίαση της εφαρμογής.

Τα ακόλουθα κύρια ευρήματα προκύπτουν από τη βιβλιογραφία [216]:

(1) Παρόλο που το φωτοβολταϊκό σύστημα είναι το πιο ισχυρό όσον αφορά την ποσότητα ενέργειας που παράγεται, εξακολουθούν να υπάρχουν προκλήσεις όταν εφαρμόζεται στους δρόμους όσον αφορά τη λειτουργία του οχήματος και την αντίσταση στην ολίσθηση [217]. Επιπλέον, το τρέχον αρχικό κόστος κατασκευής του πρωτοτύπου είναι πολύ ακριβό για να επιτευχθεί αποτελεσματική εφαρμογή, αν και τα οφέλη που επιστρέφουν δεν μπορούν να παραβλεφθούν.

(2) Η συλλογή γεωθερμικής ενέργειας θεωρείται ότι βρίσκεται σε προχωρημένο στάδιο στη διαδικασία ανάπτυξης, αλλά είναι γεωλογικά και γεωγραφικά περιορισμένη. Από πλευράς ασφάλειας και οικονομίας, η χρήση του συστήματος σωληνώσεων γεωθερμικής ενέργειας σε κρίσιμες περιοχές όπως η γέφυρα, τα τμήματα πλαγιάς και το πεζοδρόμιο θα ήταν πιο επωφελής [218].

(3) Η βελτιστοποίηση των συλλεκτών ηλιακής ενέργειας σε ασφαλτικό οδόστρωμα επικεντρώθηκε στα υλικά του οδοστρώματος και των σωλήνων, το μέγεθος και τη διάταξη των σωλήνων, τον τύπο και τον ρυθμό ροής ρευστού. Η διαδικασία συλλογής ενέργειας, ταυτόχρονα, έχει πρόσθετα οφέλη από τη μείωση της θερμοκρασίας του οδοστρώματος και τον μετριασμό της επίδρασης της αστικής θερμικής νησίδας.

(4) Αν και η παραγωγή ενέργειας για τη θερμοηλεκτρική ενέργεια είναι σχετικά χαμηλή και το κόστος είναι υψηλό, το μέλλον της συλλογής θερμοηλεκτρισμού από το οδόστρωμα είναι πολλά υποσχόμενο με βελτίωση της απόδοσης του συστήματος λόγω του σχεδιασμού της δομής και των ιδιοτήτων του υλικού [219].

(5) Διαφορετικά σχέδια συγκομιδής ενέργειας από πιεζοηλεκτρικό υλικό μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη συγκομιδή ενέργειας με βάση την πίεση ή τους κραδασμούς και τις εφαρμογές αισθητήρων σε δρόμους και γέφυρες. Η παραγόμενη ενέργεια είναι συνήθως μικρή για μεμονωμένους πιεζοηλεκτρικούς μετατροπείς κάτω από ένα πέρασμα οχήματος. Προκειμένου να παραχθεί μεγαλύτερη ενέργεια, απαιτούνται πολλαπλές συστοιχίες αισθητήρων υπό επαναλαμβανόμενη φόρτωση κυκλοφορίας.

Επίσης, ο σκοπός αυτής της εργασίας ήταν να εντοπίσει και να συνθέσει γνώσεις από τη βιβλιογραφία που θα είναι σχετικές με το σχεδιασμό στέγασης NZE για εντατική, περιορισμένη παραγωγή πουλερικών, λαμβάνοντας υπόψη τα μοναδικά χαρακτηριστικά και τις απαιτήσεις των εγκαταστάσεων παραγωγής πουλερικών [220].

Η συγκομιδή ενέργειας παρέχει τη δυνατότητα αξιοποίησης των ενεργειακών πόρων του περιβάλλοντος ως μέσο ανάπτυξης αυτονομίας για ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές των οποίων οι εφαρμογές ενδέχεται να περιορίζονται επί του παρόντος από την περιορισμένη χωρητικότητα αποθήκευσης, ως εκ τούτου, την αξιοπιστία των τυπικών μπαταριών. Η σάρωση ενέργειας περιβάλλοντος θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να παρατείνει τη διάρκεια ζωής της συμβατικής μπαταρίας. Αυτή η μελέτη έχει συζητήσει διάφορες πρακτικές επιλογές για τη συλλογή ενέργειας από την περιβαλλοντική πηγή ενέργειας και την παθητική παραγωγή ενέργειας από το ανθρώπινο σώμα και άλλες πηγές περιβάλλοντος. Θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την τροφοδοσία διαφόρων φορητών ή ασύρματων ηλεκτρονικών συσκευών.

Επιπλέον, αυτή η εργασία παρουσίασε μια επισκόπηση της προόδου που έχει σημειωθεί στις εφαρμογές των παθητικών αισθητήρων κεραίας και των συστημάτων που βασίζονται στην τεχνολογία RFID, ιδιαίτερα για την ανίχνευση ελαττωμάτων σε μέταλλα για SHM. Τα σχετικά ζητήματα έχουν συνοψιστεί σε τέσσερις κύριες κατηγορίες: τύπος ελαττώματος, αισθητήρας κεραίας, στρατηγική μέτρησης και εξαγωγή χαρακτηριστικών [221]. Οι προκλήσεις, οι λόγοι και η πρόοδος αιχμής για κάθε μέρος έχουν παρουσιαστεί λεπτομερώς, γεγονός που προσφέρει μια ολοκληρωμένη κατανόηση των προβλημάτων και κατευθυντήριων γραμμών σε αυτόν τον τομέα.

Τέλος, υπάρχει υψηλό επίπεδο ετερογένειας στις σύγχρονες οικιακές υποδομές, γεγονός που θέτει αρκετές προκλήσεις στην ανάπτυξη προσεγγίσεων για έξυπνη διαχείριση ενέργειας στα σπίτια [222]. Τα τρέχοντα συστήματα διαφέρουν θεμελιωδώς ως προς τον σχεδιασμό και τη λειτουργία τους από πριν, παρόλο που μοιράζονται τον κοινό στόχο της βελτιστοποίησης της οικιακής χρήσης ενέργειας. Τα έξυπνα συστήματα EM είναι σε θέση να επικοινωνούν και να αλληλεπιδρούν τόσο με πελάτες όσο και με ενεργειακές συσκευές για να βοηθήσουν στην προσαρμογή της κατανάλωσης ενέργειας στο σπίτι στη διαθέσιμη παροχή ενέργειας.

Μελλοντικές Επεκτάσεις

Τα πλεονεκτήματα και τα κρίσιμα ζητήματα των διαφόρων τεχνολογιών συλλογής ενέργειας συνοψίζονται και προτείνονται υποσχόμενες λύσεις. Οι στρατηγικές αλληλεπίδρασης μεταξύ των διαφόρων συσκευών συλλογής ενέργειας και του ανθρώπινου σώματος συνοψίζονται από δύο πτυχές των φορητών και εμφυτεύσιμων εφαρμογών.

Συνολικά, το δυναμικό συλλογής παθητικής ενέργειας από την ανθρώπινη δραστηριότητα φαίνεται να είναι ο πιο υποχρησιμοποιούμενος πόρος ενέργειας του περιβάλλοντος. Αρκετές έννοιες που βασίζονται στη συλλογή παθητικής ανθρώπινης δύναμης, δηλαδή εκείνες με περιορισμένη ουσιαστική απόσπαση της προσοχής από τις κανονικές δραστηριότητες, θεωρούνται πρακτικά μέσα μετατροπής της ανθρώπινης ενέργειας σε χρησιμοποιήσιμη ηλεκτρική ενέργεια. Όσον αφορά τη ζήτηση ενέργειας σε υποστηρικτικές τεχνολογίες (π.χ. ενεργή πρόσθεση) [223], οι τεχνολογίες συλλογής ενέργειας προσφέρουν επέκταση της μπαταρίας και επίσης τη δυνατότητα απόλυτης εξάρτησης από την ενέργεια του περιβάλλοντος, αποφεύγοντας έτσι τους περιορισμούς που επιβάλλονται από την περιορισμένη διάρκεια ζωής και αξιοπιστία των συμβατικών μπαταριών και της εφοδιαστικής για παροχή ρεύματος.

Οι αισθητήρες παθητικής κεραίας προσφέρουν μια εξαιρετική πιθανή τεχνική λύση για μελλοντικές εφαρμογές SHM όσον αφορά την ανίχνευση, την επικοινωνία, τη θέση και την αναγνώριση. Πρέπει να επιλυθούν αρκετές προκλήσεις πριν γίνει πράξη αυτή η ιδέα. Φυσικά, αυτός ο τύπος αισθητήρων, μπορεί να επεκταθεί και σε άλλες εφαρμογές παρακολούθησης, π.χ. περιβαλλοντική παρακολούθηση, προσωπική υγειονομική περίθαλψη. Τα ζητήματα και οι εκτιμήσεις αυτής της ανασκόπησης μπορούν επίσης να εφαρμοστούν σε ευρύ φάσμα συστημάτων και εφαρμογών αισθητήρων RFID πέρα από το SHM [224].

Οι αναδυόμενες τάσεις δείχνουν ένα μέλλον πέρα από την απομονωμένη δέσμευση των καταναλωτών προς δυναμικές κοινότητες που διαχειρίζονται έξυπνα και συλλογικά την ενεργειακή τους κατανάλωση και μοιράζονται πληροφορίες μεταξύ τους για να επιτύχουν έναν αμοιβαίο στόχο ενεργειακής βιωσιμότητας [225]. Τα έξυπνα συστήματα EM που είναι ενσωματωμένα με συστήματα οικιακού αυτοματισμού αποτελούν βασικό συστατικό του έξυπνου δικτύου κυβερνο-φυσικού συστήματος και είναι απαραίτητα για την υλοποίηση της πληθώρας των πλεονεκτημάτων του.

Βιβλιογραφία

- [1] S. Khalid, I. Raouf, A. Khan, et al.; A review of human-powered energy harvesting for smart electronics: recent progress and challenges; *Int. J. Pr. Eng. Man-Gt.*, 6 (4) (2019), pp. 821-851.
- [2] A. Proto, M. Penhaker, S. Conforto, et al.; Nanogenerators for human body energy harvesting; *Trends Biotechnol.*, 35 (7) (2017), pp. 610-624.
- [3] M.A. Hannan, S. Mutashar, S.A. Samad, et al.; Energy harvesting for the implantable biomedical devices: issues and challenges; *Biomed. Eng. Online*, 13 (2014), Article 79.
- [4] H.X. Zhu, C.K. Wu, C.H. Koo, et al.; Smart healthcare in the era of internet-of-things; *IEEE Consum. Electr. M.*, 8 (5) (2019), pp. 26-30.
- [5] S.A. Shah, A.F. Ren, D. Fan, et al.; Internet of things for sensing: a case study in the healthcare system; *Appl. Sci.*, 8 (4) (2018), Article 508.
- [6] Q. Zheng, Q.Z. Tang, Z.L. Wang, et al.; Self-powered cardiovascular electronic devices and systems; *Nat. Rev. Cardiol.*, 18 (1) (2021), pp. 7-21.
- [7] M.A.P. Mahmud, N. Huda, S.H. Farjana, et al.; Recent advances in nanogenerator-driven self-powered implantable biomedical devices; *Adv. Energy Mater.*, 8 (2) (2018), Article 1701210.
- [8] H. Yu, N. Li, N. Zhao; How far are we from achieving self-powered flexible health monitoring systems: an energy perspective; *Adv. Energy Mater.*, 11 (9) (2021), Article 2002646.
- [9] D.J. Jiang, B.J. Shi, H. Ouyang, et al.; Emerging implantable energy harvesters and self-powered implantable medical electronics; *Acs Nano*, 14 (6) (2020), pp. 6436-6448.
- [10] G. Rebel, F. Estevez, P. Gloesekoetter, et al.; Energy harvesting on human bodies; *Smart Health*, Springer, Cham (2015), pp. 125-159.
- [11] Q.H. Zhang, X.Y. Huang, S.Q. Bai, et al.; Thermoelectric devices for power generation: recent progress and future challenges; *Adv. Eng. Mater.*, 18 (2) (2016), pp. 194-213.
- [12] A.R.M. Siddique, S. Mahmud, B. Van Heyst; A review of the state of the science on wearable thermoelectric power generators (TEGs) and their existing challenges; *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 73 (2017), pp. 730-744.
- [13] M.A. Zoui, S. Bentouba, J.G. Stocholm, et al.; A review on thermoelectric generators: progress and applications; *Energies*, 13 (14) (2020), Article 3606.
- [14] D.L. Li, Y.N. Gong, Y.X. Chen, et al.; Recent progress of two-dimensional thermoelectric materials; *Nano-Micro Lett.*, 12 (1) (2020), Article 36.
- [15] E.W. Zaia, M.P. Gordon, P.Y. Yuan, et al.; Progress and perspective: soft thermoelectric materials for wearable and internet-of-things applications *Adv. Electron. Mater.*, 5 (11) (2019), Article 1800823.
- [16] Y. Wang, L. Yang, X.L. Shi, et al.; Flexible thermoelectric materials and generators: challenges and innovations; *Adv. Mater.*, 31 (29) (2019), Article 1807916.
- [17] S.J. Kim, J.H. We, B.J. Cho; A wearable thermoelectric generator fabricated on a glass fabric; *Energ. Environ. Sci.*, 7 (6) (2014), pp. 1959-1965.

- [18] M.K. Kim, M.S. Kim, S. Lee, et al.; Wearable thermoelectric generator for harvesting human body heat energy; *Smart Mater. Struct.*, 23 (10) (2014), Article 105002.
- [19] W. Ren, Y. Sun, D.L. Zhao, et al.; High-performance wearable thermoelectric generator with self-healing, recycling, and Lego-like reconfiguring capabilities; *Sci. Adv.*, 7 (7) (2021), Article eabe0586.
- [20] H. Ryu, S.W. Kim; Emerging pyroelectric nanogenerators to convert thermal energy into electrical energy; *Small*, 17 (9) (2021), Article 1903469.
- [21] C.R. Bowen, J. Taylor, E. LeBoulbar, et al.; Pyroelectric materials and devices for energy harvesting applications; *Energ Environ. Sci.*, 7 (12) (2014), pp. 3836-3856.
- [22] H.Y. He, X. Lu, E. Hanc, et al.; Advances in lead-free pyroelectric materials: a comprehensive review; *J. Mater. Chem. C*, 8 (5) (2020), pp. 1494-1516.
- [23] Y. Yang, W.X. Guo, K.C. Pradel, et al.; Pyroelectric Nanogenerators for Harvesting Thermoelectric Energy; *Nano Lett.*, 12 (6) (2012), pp. 2833-2838.
- [24] J.H. Lee, K.Y. Lee, M.K. Gupta, et al.; Highly stretchable piezoelectric-pyroelectric hybrid nanogenerator; *Adv. Mater.*, 26 (5) (2014), pp. 765-769.
- [25] T.T. Sun, B.Y. Zhou, Q. Zheng, et al.; Stretchable fabric generates electric power from woven thermoelectric fibers; *Nat. Commun.*, 11 (1) (2020), Article 572.
- [26] M.F. Li, J.X. Chen, W.B. Zhong, et al.; Large-area, wearable, self-powered pressure-temperature sensor based on 3D thermoelectric spacer fabric; *Acs Sensors*, 5 (8) (2020), pp. 2545-2554.
- [27] Y. Yang, H.J. Hu, Z.Y. Chen, et al.; Stretchable nanolayered thermoelectric energy harvester on complex and dynamic surfaces; *Nano Lett.*, 20 (6) (2020), pp. 4445-4453.
- [28] F.J. Zhang, Y.P. Zang, D.Z. Huang, et al.; Flexible and self-powered temperature-pressure dual-parameter sensors using microstructure-frame-supported organic thermoelectric materials; *Nat. Commun.*, 6 (2015), Article 8356.
- [29] Y. Yang, Y.S. Zhou, J.M. Wu, et al.; Single micro/nanowire pyroelectric nanogenerators as self-powered temperature sensors; *Acs Nano*, 6 (9) (2012), pp. 8456-8461.
- [30] J.H. Lee, H. Ryu, T.Y. Kim, et al.; Thermally induced strain-coupled highly stretchable and sensitive pyroelectric nanogenerators; *Adv. Energy Mater.*, 5 (18) (2015), Article 1500704.
- [31] J.G. Sun, T.N. Yang, C.Y. Wang, et al.; A flexible transparent one-structure tribo-piezo-pyroelectric hybrid energy generator based on bio-inspired silver nanowires network for biomechanical energy harvesting and physiological monitoring; *Nano Energy*, 48 (2018), pp. 383-390.
- [32] H. Xue, Q. Yang, D.Y. Wang, et al.; A wearable pyroelectric nanogenerator and self-powered breathing sensor; *Nano Energy*, 38 (2017), pp. 147-154.
- [33] H. Wang, C. Yu; Organic thermoelectrics: materials preparation, performance optimization, and device integration; *Joule*, 3 (1) (2019), pp. 53-80.

- [34] Y. Du, J.Y. Xu, B. Paul, et al.; Flexible thermoelectric materials and devices; *Appl. Mater. Today*, 12 (2018), pp. 366-388.
- [35] I. Salhi, F. Belhora, A. Hajjaji, et al.; Flexible thermoelectric device to harvest waste heat from the laptop; *Eur. Phys. J.-Appl. Phys.*, 79 (1) (2017), Article 10901.
- [36] U. Schroder; From in vitro to in vivo-biofuel cells are maturing; *Angew. Chem. Int. Edit.*, 51 (30) (2012), pp. 7370-7372.
- [37] S. Cosnier, A. Le Goff, M. Holzinger; Towards glucose biofuel cells implanted in human body for powering artificial organs: review; *Electrochem. Commun.*, 38 (2014), pp. 19-23.
- [38] A.J. Bandodkar, J.M. You, N.H. Kim, et al.; Soft, stretchable, high power density electronic skin-based biofuel cells for scavenging energy from human sweat; *Energ. Environ. Sci.*, 10 (7) (2017), pp. 1581-1589.
- [39] D. Pankratov, L. Ohlsson, P. Gudmundsson, et al.; Ex vivo electric power generation in human blood using an enzymatic fuel cell in a vein replica; *RSC Adv.*, 6 (74) (2016), pp. 70215-70220.
- [40] Z.H. Zhang, X.M. Li, J. Yin, et al.; Emerging hydrovoltaic technology; *Nat. Nanotechnol.*, 13 (12) (2018), pp. 1109-1119.
- [41] J. Yin, J.X. Zhou, S.M. Fang, et al.; Hydrovoltaic energy on the way; *Joule*, 4 (9) (2020), pp. 1852-1855.
- [42] J. Xie, L. Wang, X. Chen, et al.; The emerging of hydrovoltaic materials as a future technology: a case study for China; *Green Energy and Environment, IntechOpen* (2019), pp. 45-66.
- [43] D. Shen, W.W. Duley, P. Peng, et al.; Moisture-enabled electricity generation: from physics and materials to self-powered applications; *Adv. Mater.*, 32 (52) (2020), Article 2003722.
- [44] Y. Wang, S.W. Gao, W.H. Xu, et al.; Nanogenerators with superwetting surfaces for harvesting water/liquid energy; *Adv. Funct. Mater.*, 30 (26) (2020), Article 1908252.
- [45] Y.Y. Han, Z.P. Zhang, L.T. Qu; Power generation from graphene-water interactions; *Flatchem*, 14 (2019), Article 100090.
- [46] G.B. Xue, Y. Xu, T.P. Ding, et al.; Water-evaporation-induced electricity with nanostructured carbon materials; *Nat. Nanotechnol.*, 12 (4) (2017), pp. 317-321.
- [47] L.H. Li, Z.G. Chen, M.M. Hao, et al.; Moisture-driven power generation for multifunctional flexible sensing systems; *Nano Lett.*, 19 (8) (2019), pp. 5544-5552.
- [48] C.X. Shao, J. Gao, T. Xu, et al.; Wearable fiberform hygroelectric generator; *Nano Energy*, 53 (2018), pp. 698-705.
- [49] Y. Yu, J. Nassar, C.H. Xu, et al.; Biofuel-powered soft electronic skin with multiplexed and wireless sensing for human-machine interfaces; *Sci. Robot.*, 5 (41) (2020), Article eaaz7946.
- [50] C. Wang, E. Shim, H.K. Chang, et al.; Sustainable and high-power wearable glucose biofuel cell using long-term and high-speed flow in sportswear fabrics; *Biosens. Bioelectron.*, 169 (2020), Article 112652.
- [51] I. Jeerapan, J.R. Sempionatto, A. Pavinatto, et al.; Stretchable biofuel cells as wearable textile-based self-powered sensors; *J. Mater. Chem. A*, 4 (47) (2016), pp. 18342-18353.

- [52] A.J. Bandodkar, P. Gutruf, J. Choi, et al.; Battery-free, skin-interfaced microfluidic/electronic systems for simultaneous electrochemical, colorimetric, and volumetric analysis of sweat; *Sci. Adv.*, 5 (1) (2019), Article eaav3294.
- [53] P. Cinquin, C. Gondran, F. Giroud, et al.; A glucose biofuel cell implanted in rats; *PLoS One*, 5 (5) (2010), Article e10476.
- [54] T. Miyake, K. Haneda, N. Nagai, et al.; Enzymatic biofuel cells designed for direct power generation from biofluids in living organisms; *Energ. Environ. Sci.*, 4 (12) (2011), pp. 5008-5012.
- [55] K. MacVittie, J. Halamek, L. Halamkova, et al.; From “cyborg” lobsters to a pacemaker powered by implantable biofuel cells; *Energ. Environ. Sci.*, 6 (1) (2013), pp. 81-86.
- [56] H. Zhao, Y. Tao, Y. Niu, J. Ling; Harvesting energy from asphalt pavement by piezoelectric generator; *J Wuhan Univ Technol Mater Sci Ed*, 29 (2014), p. 933.
- [57] H. Zhao, L. Qin, Y. Liang; Test and analysis of vibration characteristic for asphalt pavement energy harvesting. *Climatic Effects on Pavement and Geotechnical Infrastructure*; ASCE Publications (2014), pp. 10-96.
- [58] H.G. Chua, B.C. Kok, H.H. Goh; Modelling and design analyses of a piezoelectric cymbal transducer (PCT) structure for energy harvesting application; *WIT Trans Ecol Environ*, 186 (2014), pp. 103-114.
- [59] H.J. Xiang, J.J. Wang, Z.F. Shi, Z.W. Zhang; Theoretical analysis of piezoelectric energy harvesting from traffic induced deformation of pavements; *Smart Mater Struct*, 22 (2013), p. 095024.
- [60] H. Roshani, S. Dessouky, A. Montoya, A.T. Papagiannakis; Energy harvesting from asphalt pavement roadways vehicle-induced stresses: A feasibility study; *Appl Energy*, 182 (2016), pp. 210-218.
- [61] H. Roshani, et al.; Theoretical and experimental evaluation of two roadway piezoelectric-based energy harvesting prototypes; *J Mater Civ Eng*, 30 (2) (2018), p. 04017264.
- [62] H. Xiong, L. Wang; Piezoelectric energy harvester for public roadway: On-site installation and evaluation; *Appl Energy*, 174 (2016), pp. 101-107.
- [63] A. Papagiannakis, S. Dessouky, A. Montoya, H. Roshani; Energy harvesting from roadways; *Procedia Comput Sci*, 83 (2016), pp. 758-765.
- [64] G. Yesner, M. Kuciej, A. Safari, A. Jasim, H. Wang, A. Maher; Piezoelectric energy harvesting using a novel cymbal transducer design. *Applications of Ferroelectrics*; European conference on application of polar dielectrics, and piezoelectric force microscopy workshop (ISAF/ECAPD/PFM), 2016 joint IEEE international symposium on the, IEEE (2016), pp. 1-4.
- [65] G. Yesner, A. Safari, A. Jasim, H. Wang, B. Basily, A. Maher; Evaluation of a novel piezoelectric bridge transducer; *Applications of ferroelectric (ISAF)/international workshop on acoustic transduction materials and devices (IWATMD)/piezoresponse force microscopy (PFM)*, 2017 joint IEEE international symposium on the, IEEE (2017), pp. 113-115.
- [66] Y. Song, C.H. Yang, S.K. Hong, S.J. Hwang, J.H. Kim, J.Y. Choi, et al.; Road energy harvester designed as a macro-power source using the piezoelectric effect; *Int J Hydrogen Energy*, 41 (2016), pp. 12563-12568.

- [67] I. Jung, Y.-H. Shin, S. Kim, J.-y. Choi, C.-Y. Kang; Flexible piezoelectric polymer-based energy harvesting system for roadway applications; *Appl Energy*, 197 (2017), pp. 222-229.
- [68] L. Guo, Q. Lu; Modeling a new energy harvesting pavement system with experimental verification; *Appl Energy* (2017).
- [69] Y. Chen, H. Zhang, Y. Zhang, C. Li, Q. Yang, H. Zheng, et al.; Mechanical energy harvesting from road pavements under vehicular load using embedded piezoelectric elements; *J Appl Mech*, 83 (2016), p. 081001.
- [70] A. Jasim, H. Wang, G. Yesner, A. Safari, A. Maher; Optimized design of layered bridge transducer for piezoelectric energy harvesting from roadway; *Energy* (2017).
- [71] Y. Zhang, C. Cai, W. Zhang; Experimental study of a multi-impact energy harvester under low frequency excitations; *Smart Mater Struct*, 23 (2014), p. 055002.
- [72] S.P. Beeby, M.J. Tudor, N. White; Energy harvesting vibration sources for microsystems applications; *Meas Sci Technol*, 17 (2006), p. R175.
- [73] E. Arroyo, A. Badel; Electromagnetic vibration energy harvesting device optimization by synchronous energy extraction; *Sens Actuators, A*, 171 (2011), pp. 266-273.
- [74] S.P. Beeby, R. Torah, M. Tudor, P. Glynne-Jones, T. O'donnell, C. Saha, et al.; A micro electromagnetic generator for vibration energy harvesting; *J Micromech Microeng*, 17 (2007), p. 1257.
- [75] S.J. Elliott, M. Zilletti; Scaling of electromagnetic transducers for shunt damping and energy harvesting; *J Sound Vibration*, 333 (2014), pp. 2185-2195.
- [76] A. Munaz, B.-C. Lee, G.-S. Chung; A study of an electromagnetic energy harvester using multi-pole magnet; *Sens Actuators, A*, 201 (2013), pp. 134-140.
- [77] M. Peralta, J.L. Costa-Krämer, E. Medina, A. Donoso; Analysis and fabrication steps for a 3D-pyramidal high density coil electromagnetic micro-generator for energy harvesting applications; *Sens Actuators, A*, 205 (2014), pp. 103-110.
- [78] C.R. Saha; Modelling theory and applications of the electromagnetic vibrational generator. *Sustainable Energy Harvesting Technologies-Past InTech* (2011).
- [79] M. El-Hami, P. Glynne-Jones, N. White, M. Hill, S. Beeby, E. James, et al.; Design and fabrication of a new vibration-based electromechanical power generator; *Sens Actuators, A*, 92 (2001), pp. 335-342.
- [80] P.-H. Wang, X.-H. Dai, D.-M. Fang, X.-L. Zhao; Design, fabrication and performance of a new vibration-based electromagnetic micro power generator; *Microelectron J*, 38 (2007), pp. 1175-1180.
- [81] E. Sardini, M. Serpelloni; An efficient electromagnetic power harvesting device for low-frequency applications; *Sens Actuators, A*, 172 (2011), pp. 475-482.
- [82] L. Zuo, B. Scully, J. Shestani, Y. Zhou; Design and characterization of an electromagnetic energy harvester for vehicle suspensions; *Smart Mater Struct*, 19 (2010), p. 045003.

- [83] I.L. Cassidy, J.T. Scruggs, S. Behrens, H.P. Gavin; Design and experimental characterization of an electromagnetic transducer for large-scale vibratory energy harvesting applications; *J Intell Mater Syst Struct*, 22 (2011), pp. 2009-2024.
- [84] E. Sazonov, H. Li, D. Curry, P. Pillay; Self-powered sensors for monitoring of highway bridges; *IEEE Sens J*, 9 (2009), pp. 1422-1429.
- [85] C. Chen, W.-H. Liao; A self-powered, self-sensing magnetorheological damper; *Mechatronics and automation (ICMA)*, 2010 international conference on, IEEE (2010), pp. 1364-1369.
- [86] H.-J. Jung, J. Park, I.-H. Kim; Investigation of applicability of electromagnetic energy harvesting system to inclined stay cable under wind load; *IEEE Trans Magn*, 48 (2012), pp. 3478-3481.
- [87] H.-J. Jung, I.-H. Kim, J. Park; Experimental validation of energy harvesting device for civil engineering applications; *SPIE smart structures and materials+ nondestructive evaluation and health monitoring*, International Society for Optics and Photonics (2012) p. 83451C-C-4.
- [88] I.-H. Kim, S.-J. Jang, H.-J. Jung; Performance enhancement of a rotational energy harvester utilizing wind-induced vibration of an inclined stay cable; *Smart Mater Struct*, 22 (2013), p. 075004.
- [89] S.F. Ali, M. Friswell, S. Adhikari; Analysis of energy harvesters for highway bridges; *J Intell Mater Syst Struct*, 22 (2011), pp. 1929-1938.
- [90] N.G. Elvin, N. Lajnef, A.A. Elvin; Feasibility of structural monitoring with vibration powered sensors; *Smart Mater Struct*, 15 (2006), p. 977.
- [91] A. Erturk; Piezoelectric energy harvesting for civil infrastructure system applications: Moving loads and surface strain fluctuations; *J Intelligent Mater Syst Struct*, 22 (2011), pp. 1959-1973.
- [92] S.-H. Kim, J.-H. Ahn, H.-M. Chung, H.-W. Kang; Analysis of piezoelectric effects on various loading conditions for energy harvesting in a bridge system; *Sens Actuators, A*, 167 (2011), pp. 468-483.
- [93] Baldwin JD, Roswurm S, Nolan J, Holliday L.; Energy harvesting on highway bridges; 2011.
- [94] M. Peigney, D. Siegert; Piezoelectric energy harvesting from traffic-induced bridge vibrations; *Smart Mater Struct*, 22 (2013), p. 095019.
- [95] Y. Zhang, S.C. Cai, L. Deng; Piezoelectric-based energy harvesting in bridge systems; *J Intelligent Mater Syst Struct*, 25 (2014), pp. 1414-1428.
- [96] Mankins JC.; Technology readiness levels. White Paper, April. 1995; 6.
- [97] A. Parasuraman; Technology Readiness Index (TRI) a multiple-item scale to measure readiness to embrace new technologies; *J Service Res*, 2 (2000), pp. 307-320.
- [98] Winger S.; The photovoltaic highway; 2010.
- [99] Schwartz A.; Recharging roadway startup; Wins GE prize; 2010.
- [100] Minsk LD.; Heated bridge technology: report on ISTE A Sec. 6005 program; 1999.
- [101] J.W. Lund; Pavement snow melting; Geo-Heat Center, Oregon Institute of Technology, Klamath Falls, OR (2005).
- [102] Z. Zhang, H. Xiang, Z. Shi; Modeling on piezoelectric energy harvesting from pavements under traffic loads; *J Intell Mater Syst Struct*, 27 (2016), pp. 567-578.

- [103] T. Voigt, H. Ritter, J. Schiller; Utilizing solar power in wireless sensor networks; Local computer networks, 2003 LCN'03 proceedings 28th annual IEEE international conference on, IEEE (2003), pp. 416-422.
- [104] N.E. Dutoit, B.L. Wardle, S.-G. Kim; Design considerations for MEMS-scale piezoelectric mechanical vibration energy harvesters; *Integr Ferroelectr*, 71 (2005), pp. 121-160.
- [105] Transportation USDo.; New Pavement System. Supported by Solar Panels?; 2017.
- [106] Q.M. Zhang, J. Zhao; Electromechanical properties of lead zirconate titanate piezoceramics under the influence of mechanical stresses; *IEEE Trans Ultrason, Ferroelectr, Frequency Control*, 46 (1999), pp. 1518-1526.
- [107] M. Bhattacharyya, A. Arockiarajan; Electrical fatigue behaviour in lead zirconate titanate: an experimental and theoretical study; *Smart Mater Struct*, 22 (2013), p. 085032.
- [108] N. Jiang, J. Liu, T. Tao, L. Han; Fatigue evaluation of piezo impact drive mechanism *Micro-nanomechanics and human science*, 2007 MHS'07 international symposium, IEEE (2007), pp. 255-259.
- [109] Q. Jiang, W. Cao, L.E.; Cross Electric fatigue in lead zirconate titanate ceramics; *J Am Ceram Soc*, 77 (1994), pp. 211-215.
- [110] M.G. Cain, M. Stewart, M. Gee; Degradation of piezoelectric materials; National Physical Laboratory Teddington (1999).
- [111] S.N. Malave, S.P. Bhosale; Highway wind turbine (quite revolution turbine); *Int J Eng Res Technol*, 6 (2013), pp. 789-794.
- [112] V.V. Bidi, M.K. Devendrappa, S.P. Chandan, A.J. P, M.G. V; Highway power generation using low cost vertical axis wind turbine; *Int J Eng Sci Comput (IJESC)*, 7 (2017) 12008-12.
- [113] A.M. Paracha, P. Basset, D. Galayko, F. Marty, T. Bourouina; A silicon MEMS DC/DC converter for autonomous vibration-to-electrical-energy scavenger; *IEEE Electron Device Lett*, 30 (2009), pp. 481-483.
- [114] Y. Sakane, Y. Suzuki, N. Kasagi; The development of a high-performance perfluorinated polymer electret and its application to micro power generation; *J Micromech Microeng*, 18 (2008), p. 104011.
- [115] S. Boisseau, G. Despesse, T. Ricart, E. Defay, A. Sylvestre; Cantilever-based electret energy harvesters; *Smart Mater Struct*, 20 (2011), p. 105013.
- [116] T. Sterken, P. Fiorini, G. Altena, C. Van Hoof, R. Puers; Harvesting energy from vibrations by a micromachined electret generator; *Solid-state sensors, actuators and microsystems conference*, 2007 TRANSDUCERS 2007 international, IEEE (2007), pp. 129-132.
- [117] H.-w. Lo, Y.-C. Tai; Parylene-based electret power generators; *J Micromech Microeng*, 18 (2008), p. 104006.
- [118] Y. Naruse, N. Matsubara, K. Mabuchi, M. Izumi, S. Suzuki; Electrostatic micro power generation from low-frequency vibration such as human motion; *J Micromech Microeng*, 19 (2009), p. 094002.
- [119] A. Crovetto, F. Wang, O. Hansen; Modeling and optimization of an electrostatic energy harvesting device; *J Microelectromech Syst*, 23 (2014), pp. 1141-1155.

- [120] Boisseau S, Despesse G, Seddik BA.; Electrostatic conversion for vibration energy harvesting. arXiv preprint arXiv:12105191; 2012.
- [121] B. Roisin, M. Bodart, A. Deneyer, P. D'Herdt; Lighting energy savings in offices using different control systems and their real consumption; *Energy Build*, 40 (2008), pp. 514-523, 10.1016/j.enbuild.2007.04.006
- [122] D. Wang, C.C. Federspiel, F. Rubinstein; Modeling occupancy in single person offices; *Energy Build*, 37 (2005), pp. 121-126, 10.1016/j.enbuild.2004.06.015.
- [123] H.X. Li, M. Gul, H. Yu, H. Awad, M. Al-Hussein; An energy performance monitoring, analysis and modelling framework for NetZero Energy Homes (NZEHS); *Energy Build*, 126 (2016), pp. 353-364, 10.1016/j.enbuild.2016.05.041.
- [124] L.C. Ng, W.V. Payne; Energy use consequences of ventilating a net-zero energy house; *Appl Therm Eng*, 96 (2016), pp. 151-160, 10.1016/j.applthermaleng.2015.10.100
- [125] A. Dodoo, L. Gustavsson, R. Sathre; Primary energy implications of ventilation heat recovery in residential buildings; *Energy Build*, 43 (2011), pp. 1566-1572, 10.1016/j.enbuild.2011.02.019
- [126] A. Arabkoohsar, A. Behzadi, N. Nord; A highly innovative yet cost-effective multi-generation energy system for net-zero energy buildings; *Energy Convers Manag*, 237 (2021), p. 114120, 10.1016/J.ENCONMAN.2021.114120
- [127] L. Rominger, C. Wemhoener, S. Buesser; Investigations of speed-controlled heat pumps for NZEB; in IEA HPT Annex 49; *J Phys Conf Ser*, 1343 (2019), Article 012078, 10.1088/1742-6596/1343/1/012078.
- [128] P. Norton, C. Christensen; A cold-climate case study for affordable zero energy homes; *Am Sol Energy Soc - Sol 2006 35th ASES Annu Conf, 31st ASES Natl Passiv Sol Conf, 1st ASES Policy Mark Conf, ASME Sol Energy Div Int Sol Energy Conf*, 2 (2006), pp. 585-590.
- [129] F. AlFaris, A. Juaidi, F. Manzano-Agugliaro; Intelligent homes' technologies to optimize the energy performance for the net zero energy home; *Energy Build*, 153 (2017), pp. 262-274, 10.1016/j.enbuild.2017.07.089
- [130] P. Fonseca, P. Moura, H. Jorge, A. de Almeida; Sustainability in university campus: options for achieving nearly zero energy goals; *Int J Sustain High Educ*, 19 (2018), pp. 790-816, 10.1108/IJSHE-09-2017-0145
- [131] Y. Luo, L. Zhang, Z. Liu, J. Yu, X. Xu, X. Su; Towards net zero energy building: the application potential and adaptability of photovoltaic-thermoelectric-battery wall system; *Appl Energy*, 258 (2020), 10.1016/J.APENERGY.2019.114066
- [132] G.T. Costanzo, G. Zhu, M.F. Anjos, G. Savard; A system architecture for autonomous demand side load management in smart buildings; *IEEE Trans Smart Grid*, 3 (2012), pp. 2157-2165, 10.1109/TSG.2012.2217358
- [133] Y. Lu, S. Wang, K. Shan; Design optimization and optimal control of grid-connected and standalone nearly/net zero energy buildings; *Appl Energy*, 155 (2015), pp. 463-477, 10.1016/j.apenergy.2015.06.007
- [134] V.R.P. Madathil D, M.G. Nair, T. Jamsab, T. Thakur; Consumer-focused solar-grid net zero energy buildings: a multi-objective weighted sum

- optimization and application for India; *Sustain Prod Consum*, 27 (2021), pp. 2101-2111, 10.1016/J.SPC.2021.05.012
- [135] Y. Li, S. Hu, C. Hoare, J. O'Donnell, R. García-Castro, S. Vega-Sánchez, et al.; An information sharing strategy based on linked data for net zero energy buildings and clusters; *Autom Construct*, 124 (2021), p. 103592, 10.1016/J.AUTCON.2021.103592
- [136] K.K. Shah, D. George, L. Swan, J.M. Pearce; Performance and analysis of retail store-centered microgrids with solar photovoltaic parking lot, cogeneration, and battery-based hybrid systems (2021), 10.1002/ENG2.12418 *Eng Reports*.
- [137] G. Singh, R. Das; Comparative assessment of different air-conditioning systems for nearly/net zero-energy buildings; *Int J Energy Res*, 44 (2020), pp. 3526-3546, 10.1002/ER.5065
- [138] J.A. Shamim, W.L. Hsu, S. Paul, L. Yu, H. Daiguji; A review of solid desiccant dehumidifiers: current status and near-term development goals in the context of net zero energy buildings; *Renew Sustain Energy Rev*, 137 (2021), 10.1016/J.RSER.2020.110456
- [139] C. Cui, X. Zhang, W. Cai; An energy-saving oriented air balancing method for demand controlled ventilation systems with branch and black-box model; *Appl Energy*, 264 (2020), p. 114734, 10.1016/J.APENERGY.2020.114734
- [140] H. Sakakibara, T. Akimoto, H. Igarashi, S. Nakamura, M. Kimura; The evaluation of air blowing method of variable-air-conditioning-system using coanda effect by computational fluid dynamics; *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, 294 (2019), 10.1088/1755-1315/294/1/012058
- [141] A. Alajmi, A. Short, J. Ferguson, Poel K. Vander, C. Griffin; Detailed energy efficiency strategies for converting an existing office building to NZEB: a case study in the Pacific Northwest; *Energy Effic*, 13 (2020) 136 (2020), pp. 1089-1104, 10.1007/S12053-020-09861-9
- [142] S. Zhang, P. Huang, Y. Sun; A multi-criterion renewable energy system design optimization for net zero energy buildings under uncertainties; *Energy*, 94 (2016), pp. 654-665, 10.1016/j.energy.2015.11.044
- [143] L. Aelenei, D. Aelenei, H. Goncalves, R. Lollini, E. Musall, A. Scognamiglio, et al.; Design issues for net zero-energy buildings; *Open House Int*, 38 (2013), pp. 7-14.
- [144] A.J. Marszal, P. Heiselberg, R.L. Jensen, J. Norgaard; On-site or off-site renewable energy supply options? Life cycle cost analysis of a net zero energy building in Denmark; *Renew Energy*, 44 (2012), pp. 154-165, 10.1016/j.renene.2012.01.079
- [145] A.J. Marszal, P. Heiselberg; Life cycle cost analysis of a multi-storey residential net zero energy building in Denmark; *Energy*, 36 (2011), pp. 5600-5609, 10.1016/j.energy.2011.07.010
- [146] Andreas Athienitis, William O' Brien; Optimization of net-zero energy buildings related titles solar and heat pump systems for residential buildings (2015).
- [147] T. Yang, A.K. Athienitis; A review of research and developments of building-integrated photovoltaic/thermal (BIPV/T) systems; *Renew Sustain Energy Rev*, 66 (2016), pp. 886-912, 10.1016/j.rser.2016.07.011

- [148] E. Pyloudi, S. Papantoniou, D. Kolokotsa; Retrofitting an office building towards a net zero energy building; *Adv Build Energy Res*, 9 (2015), pp. 20-33, 10.1080/17512549.2014.917985
- [149] M.R. Elkinton, J.G. McGowan, J.F. Manwell; Wind power systems for zero net energy housing in the United States; *Renew Energy*, 34 (2009), pp. 1270-1278, 10.1016/j.renene.2008.10.007
- [150] A Ben Abdellah, K. Anoune, M. Mahdaoui, M. Bouya, A. Laknizi; Energy performance and environmental impact of an earth-air heat exchanger for heating and cooling a poultry house (2019), pp. 149-157, 10.1007/978-3-030-12065-8_15
- [151] B.E. Harris, M.F. Lightstone, S. Reitsma; A numerical investigation into the use of directionally drilled wells for the extraction of geothermal energy from abandoned oil and gas wells; *Geothermics*, 90 (2021), p. 101994, 10.1016/J.GEOTHERMICS.2020.101994
- [152] N. Bird, A. Cowie, F. Cherubini, G. Jungmeier; Using a life cycle assessment approach to estimate the net greenhouse gas emissions of bioenergy; *IEA Bioenergy* (2011), pp. 1-20, 10.1016/S0961-9534(06)00180-203
- [153] J.P. Chastain, A. Coloma-del Valle, K.P. Moore; Using broiler litter as an energy source: energy content and ash composition; *Appl Eng Agric*, 28 (2012), pp. 513-522.
- [154] D. Huang, T. Yu; Study on energy payback time of building integrated photovoltaic system; *Procedia Eng*, 205 (2017), pp. 1087-1092, 10.1016/j.proeng.2017.10.174
- [155] J.M. Gremmelspacher, R. Campamà Pizarro, M. van Jaarsveld, H. Davidsson, D. Johansson; Historical building renovation and PV optimisation towards NetZEB in Sweden; *Sol Energy*, 223 (2021), pp. 248-260, 10.1016/J.SOLENER.2021.02.067
- [156] E.M. Barber, H.L. Classen, P.A. Thacker; Energy use in the production and housing of poultry and swine - an overview; *Can J Anim Sci*, 69 (1989), pp. 7-21, 10.4141/cjas89-002
- [157] A. Costantino, E. Fabrizio, A. Biglia, P. Cornale, L. Battaglini; Energy use for climate control of animal houses: the state of the art in Europe; *Energy Procedia*, 101 (2016), pp. 184-191, 10.1016/j.egypro.2016.11.024
- [158] I. Kilic; Analysis of the energy efficiency of poultry houses in the Bursa region of Turkey; *J Appl Anim Res* (2016), pp. 1-8, 10.1080/09712119.2015.10218130
- [159] M.D. Heidari, M. Omid, A. Akram; Energy efficiency and econometric analysis of broiler production farms; *Energy*, 36 (2011), pp. 6536-6541, 10.1016/j.energy.2011.09.011
- [160] A.A.A. Qotbi, S. Najafi, O. Ahmadauli, E. Rahmatnejad, M. Abbasinezhad; Investigation of poultry housing capacity on energy efficiency of broiler chickens production in tropical areas; *African J Biotechnol*, 10 (2011), pp. 15662-15666, 10.5897/AJB10.2662
- [161] B.A. Stout; *Energy use and management in agriculture*; North Scituate, Mass Bret Publ (1984).
- [162] A. Atilgan, H. Koknaroglu; Cultural energy analysis on broilers reared in different capacity poultry houses; *Ital J Anim Sci*, 5 (2006), pp. 393-400.

- [163] B. Putman, G. Thoma, J. Burek, M. Matlock; A retrospective analysis of the United States poultry industry: 1965 compared with 2010; *Agric Syst*, 157 (2017), pp. 107-117, 10.1016/j.agsy.2017.07.008
- [164] M. Rajaniemi, J. Ahokas; A case study of energy consumption measurement system in broiler production (2012), pp. 195-204.
- [165] S.G. Khokhar, Q. Min, X. Chu; Electricity crisis and energy efficiency to poultry production in Pakistan; *World's Poult Sci J*, 71 (2015), pp. 539-546, 10.1017/S0043933915002123
- [166] C. Baxevanou, D. Fidaros, T. Bartzanas, C. Kittas; Energy consumption and energy saving measures in poultry; *Energy Environ Eng*, 5 (2017), pp. 29-36, 10.13189/eee.2017.050201
- [167] Y. Liang, G.T. Tabler, S.E. Watkins, H. Xin, I.L. Berry; Energy use analysis of open-curtain vs. totally enclosed broiler houses in Northwest Arkansas; *Appl Eng Agric*, 25 (2009), pp. 577-584, 10.13031/2013.24756
- [168] A. Arroyo-Pitacua, L. Márquez-Benavides, E.L. Moreno-Goytia; Energy requirements in a technified poultry farm in Central Mexico; *WIT Trans Ecol Environ*, 195 (2015), pp. 233-241, 10.2495/ESUS150201
- [169] B. Saltuk, A. Yucel, A. Atilgan; Determination of some environmental energy requirements in broiler poultry housing-Web of Science Core Collection; *Fresenius Environ Bull*, 29 (2020), pp. 1695-1702.
- [170] M.D. Hayes, T.A. Shepherd; Electricity and fuel use of aviary-laying hen houses in the midwestern United States; *Appl Eng Agric*, 30 (2) (2014), pp. 259-266, 10.13031/aea.30.10113
- [171] E.M. Barber HLC, PAT; Energy use in the production and housing of poultry and swine - an overview, vol. 21 (1989).
- [172] P. Sefeedpari, S. Rafiee, A. Akram; Identifying sustainable and efficient poultry farms in the light of energy use efficiency: a data envelopment analysis approach; <https://doi.org/10.18005/JAEB0101001> (2013) 1-1-8.
- [173] Alberta Agriculture; Forestry Space Heating in Poultry Production, 1-4 (2006).
- [174] report; Descriptive analysis of on-farm energy use in Canada; A report to natural resources, Canada; prepared for the Canadian agricultural energy end use data and analysis centre (CAEEDAC) by Mohammad Khakbazan final report february 2000.
- [175] M.L. Sit, A.A. Juravliov, A.V. Doroshenko, V.A. Goncharenko; Energy supply system for industrial poultry houses; *Probl Energ Reg* (2016), pp. 89-99.
- [176] L. Chai, J.-Q. Ni, C.A. Diehl, I. Kilic, A.J. Heber, Y. Chen, et al.; Ventilation rates in large commercial layer hen houses with two-year continuous monitoring; *Br Poultry Sci*, 53 (2012), pp. 19-31, 10.1080/00071668.2011.643766
- [177] FAO Rural structures in the tropics Design and development, Rome (2011).
- [178] A. Atilgan, H. Koknaroglu, A. Atilgan, H. Koknaroglu; Cultural energy analysis on broilers reared in different capacity poultry houses; Cultural energy analysis on broilers reared in different capacity poultry houses (2016), 10.4081/ijas.2006.393

- [179] O. Ecim-djuric, G. Topisirovic; Energy efficiency optimization of combined ventilation systems in livestock buildings; *Energy Build*, 42 (2010), pp. 1165-1171, 10.1016/j.enbuild.2009.10.035
- [180] A. Costantino, E. Fabrizio, A. Ghiggini, M. Bariani; Energy & Buildings Climate control in broiler houses : a thermal model for the calculation of the energy use and indoor environmental conditions; *Energy Build*, 169 (2018), pp. 110-126, 10.1016/j.enbuild.2018.03.056
- [181] X. Tao, H. Xin; Acute synergistic effects of air temperature, humidity, and velocity on homeostasis of market-size broilers; *Transactions of the ASAE*, 46 (2003), pp. 491-497.
- [182] X. Yan, M. Qing-shi, Jie GAO, T. Xiang-fang, Z. Hong-fu; Effects of relative humidity on animal health and welfare; *J Integr Agric*, 16 (2017), pp. 1653-1658, 10.1016/S2095-3119(16)61532-0
- [183] Riemer, R., and A. Shapiro. 2011. Biomechanical energy harvesting from human motion: theory, state of the art, design guidelines and future directions. *J. Neuroeng. Rehabil.* 8: 1– 13.
- [184] Mateu, M., and F. Moll. 2005. Optimum piezoelectric bending beam structures for energy harvesting using shoe insert. *J. Intel. Mat. Syst. Str.* 16: 835– 845.
- [185] Kymissis, J., C. Kendall, J. Paradiso, and N. Garshenfeld. 2013. Parasitic power harvesting in shoes. Available at <http://www.docstoc.com/> (accessed 15 December 2013).
- [186] Yang, R., Y. Qin, C. Li, G. Zhu, and Z. L. Wang. 2009. Converting biomechanical energy into electricity by a muscle-movement-driven nanogenerator. *Nano Lett.* 3: 1201– 1206.
- [187] Mallela, V. S., V. Ilankumaran, and N. S. Rao. 2004. Trends in cardiac pacemakers batteries. *Indian Pacing Electrophysiol. J.* 4: 201– 212.
- [188] Lanmuller, H., S. Sauermann, E. Unger, G. Schnetz, W. Mayr, and W. Girsch. 1999. Multifunctional implantable nerve stimulator for cardiac assistance by skeletal muscle. *Artif. Organs* 23: 352– 359.
- [189] Multilayer piezoelectric actuators. Vol. 7. Available at <http://www.nec-tokin.com/> (accessed 1 February 2014).
- [190] Pertsch, P., S. Richter, K. D. Kramer, J. Pogodzic, and E. Hennig. 2006. Reliability of piezoelectric multilayer actuators. ACTUATOR Conference, Bremen, Germany. Available at <http://www.pi-usa.us/> (accessed 1 February 2014).
- [191] Saez, M. L. M. 2004. Energy harvesting from passive human power. Ph.D. thesis, Polytechnic University of Catalonia, Barcelona, Spain.
- [192] Wasterlain, S., A. Guven, H. Gualous, J. F. Fauvarque, and R. Gallay. Hybrid power source with batteries and supercapacitor for vehicle applications. Available at <http://www.garmanage.com/> (accessed 1 January 2014).
- [193] Mitcheson, P. D., E. M. Yeatman, G. K. Rao, G. A. S. Holmes, and T. C. Green. 2008. Energy harvesting from human and machine motion for wireless electronic devices. *Proc. IEEE* 96: 1457– 1486.
- [194] Gilbert, J. M., and F. Balouchi. 2008. Comparison of energy harvesting system for wireless sensor networks. *Int. J. Autom. Comput.* 5: 334– 347.

- [195] Paulo, J., and P. D. Gaspar. 2012. Review of future trend of energy harvesting methods for portable medical devices. *Proc. World Congr. Eng.* 2: 1– 6.
- [196] Bilem, S. G., T. K. Mc Ternan, B. E. Gilchrist, I. C. Bell, N. R. Voronka, and R. P. Hoyt. 2011. Electrodynamic tethers for energy harvesting and propulsion on space platforms. *AIAA SPACE 2010 Conference & Exposition*, CA, March 2011.
- [197] Cremers, C., J. Tubke, and M. Krausa. 2009. Applications–portable military: batteries and fuel cells. *Encycl. Electrochem. Power Sources* 1: 13– 21.
- [198] Mascarenas, D. L., E. B. Flynn, M. D. Todd, T. G. Overly, K. M. Farinholt, G. Park, et al. 2010. Experimental studies of using wireless energy transmission for powering embedded sensor nodes. *J. Sound Vib.* 329: 2421– 2433.
- [199] Sharma, N., J. Gummeson, D. Irwin, and P. Shenoy. Cloudy computing: leveraging weather forecasts in energy harvesting sensor system. University of Massachusetts, Amherst, MA. Available at <http://lass.cs.umass.edu/> (accessed 2 February 2014).
- [200] Jeon, Y. B., R. Sood, J. H. Jeong, and S. G. Kim. 2006. MEMS power generator with transverse mode thin film PZT. *Sens. Actuators A* 122: 16– 22.
- [201] The Energy Harvesting Network. 2011. The energy harvesting website “Energy harvesting from human power – a roadmap to new research challenges.” Available at <http://www.eh-network.org> (accessed 2 February 2014).
- [202] Snyder, G. J. Small thermoelectric generators. Available at <http://www.electrochem.org> (accessed 2 February 2014).
- [203] Nechibvute, A., A. Chawanda, and P. Luhanga. 2012. Piezoelectric energy harvesting devices: an alternative energy source for wireless sensors. *Smart Mater. Res.* 2012: 1– 13.
- [204] Tan, Y. K., and S. K. Panda. 2010. Pp. 5– 43 in *Review of energy harvesting technologies for sustainable wireless sensor network. Sustainable wireless sensor networks.* National University of Singapore, Singapore.
- [205] Buchli, B., D. Aschwanden, and J. Beutel. Battery state-of-charge approximation for energy harvesting embedded system. *Computer Engineering and Networks Laboratory*, Zurich, Switzerland. Available at <http://www.tik.ee> (accessed 3 February 2014).
- [206] Aliwell, S.; Batteries not enough – a case for energy harvesting. Zartech Ltd. EH NetworkBlog. Available at <http://eh-network.org/> (accessed 3 February 2014).
- [207] Sim, Z. W., R. Shuttleworth, M. J. Alexander, and B. D. Grieve. 2010. Compact patch antenna design for outdoor RF energy harvesting in wireless sensor networks. *Prog. Electromagnet. Res.* 105: 273– 294.
- [208] Nnorom, I. C., and O. Osibanjo. 2009. Heavy metal characterization of waste portable rechargeable batteries used in mobile phones. *Environ. Sci. Technol.* 6: 641– 650.

- [209] Yildiz, F. 2009. Potential ambient energy-harvesting sources and techniques. *J. Technol. Studies.* 35: 40–48.
- [210] Siegel, J. A., R. M. Gilders, R. S. Staron, and F. C. Hagerman. 2012. Human muscle power output during upper and lower-body exercises. *J. Strength Cond. Res.* 16: 173– 178.
- [211] Mateu, L., C. Codrea, N. Lucas, M. Pollak, and P. Spies. 2006. Energy harvesting for wireless communication systems using thermogenerators. Available at <http://www.iis.fraunhofer.de> (accessed 5 February 2014).
- [212] De Steese, J. G., D. J. Hammerstrom, and L. A. Schienbein. 2000. Electric power from ambient energy sources. Pacific Northwest National Laboratory, Prepared for the US Department of Energy. Available at <http://www.pnl.gov> (accessed 5 February 2014).
- [213] Cymbet Corporation. Zero power wireless sensors using energy processing. Available at <http://www.cymbet.com/> (accessed 3 February 2014).
- [214] Soca Ciu, L. G. 2012. Thermal energy storage with phase change material. *Leonardo El. J. Pract. Technol.* 20: 75– 98.
- [215] Sharma, A., V. V. Tyagi, C. R. Chen, and D. Buddhi. 2009. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 13: 318– 345.
- [216] Gao, C., K. Kuklane, and I. Holmér. 2008. The heating effect of phase change material (PCM) vests on a thermal manikin in a subzero environment. Seventh International Thermal Manikin and Modelling Meeting, University of Coimbra, Coimbra, Portugal. Available at <http://www.adai.pt/> (accessed 6 February 2014).
- [217] Ravikumar, M., and P. S. S. Srinivasan. 2008. Phase change material as a thermal energy storage material for cooling of building. *J. Theor. Appl. Inf. Technol.* 4: 503– 511.
- [218] Zalba, B., M. J. Marin, L. F. Cabeza, and H. Mehling. 2002. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Appl. Thermal Energy* 23: 251– 283.
- [219] Erkan, G. 2004. Enhancing the thermal properties of textiles with phase change materials. *Res. J. Text. Apparel* 8: 57– 64.
- [220] Reinertsen, E. R., H. Færevik, K. Holbø, R. Nesbakken, J. Reitan, A. Røyset, et al. 2008. Optimizing the performance of phase-change materials in personal protective clothing systems. *Int. J. Occup. Saf. Ergon.* 14: 43– 53.
- [221] Agbossou, A., Q. Zhanq, G. Sebald, and D. Guyomar. 2010. Solar micro-energy harvesting based on thermoelectric and latent heat effects. Part I: Theoretical analysis. *Sens. Actuators A* 163: 284– 290.
- [222] Haussmann, T., P. Schossig, and L. Grosmann. Experiences with lowex PCM chilled ceilings in demonstration buildings. Available at <http://inraweb.stockton.edu/> (accessed 8 April 2014).
- [223] Yu, D., G. Zhu, S. Liu, B. Ge, and F. Huang. 2013. Photocurrent activity of light-harvesting complex II isolated from spinach and its pigments in dye-sensitized TiO₂ solar cell. *Int. J. Hydrogen Energy* 38: 16740– 16748.
- [224] Jones, J. A., and Y. Chao. 2006. Novel thermal powered technology for UUV persistent surveillance. Presentation to the ONR Joint Review of

- Unmanned Systems Technology Development NASA. Available at <http://trs-new.jpl.nasa> (accessed 8 April 2014).
- [225] Xie, J., C. Lee, and H. Feng. 2010. Design, fabrication, and characterization of CMOS MEMS-based thermoelectric power generators. *J. Microelectromech. Syst.* 19: 317– 324.
- [226] Yang, M. Z., C. C. Wu, C. L. Dai, and W. J. Tsai. 2013. Energy harvesting thermoelectric generators manufactured using the complementary metal oxide semiconductor process. *Sensors* 13: 2359– 2367.
- [227] Sue, C. H., and N. C. Tsai. 2011. Human powered MEMS-based energy harvest devices. *Appl. Energy* 93: 390– 403.
- [228] Leonov, V. 2011. Energy harvesting for self-powered wearable devices. Pp. 27– 49 in A. Bonfiglio and D. De Rossi, eds. *Wearable monitoring systems*. Springer, New York, NY. doi: 10.1007/978-1-4419-7384-9
- [229] Leonov, V. 2013. Thermoelectric energy harvesting of human body heat for wearable sensors. *IEEE Sens. J.* 13: 2284– 2291.
- [230] Bradley, P. D. 2006. An ultra low power, high performance Medical Implant Communication System (MICS) transceiver for implantable devices. *Biomed. Circ. Syst. Conf.* 2006: 158– 161. doi: 10.1109/BIOCAS.2006.4600332
- [231] Mehta, S. H.; Technology to reduce energy demand in steel plants. Center for Energy Environment & Education (CEEE), India. Available at <http://energy.sigmaxi.org/> (accessed 11 May 2014).
- [232] Aneke, M., B. Agnew, C. Underwood, H. Wu, and H. Masheiti. 2012. Power generation from waste heat in a food processing application. *Appl. Therm. Eng.* 36: 171– 180.