



ΧΡΗΣΗ ΜΙΚΡΟΣΥΣΚΕΥΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΑΣΤΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΣΤΡΑΤΟΓΙΑΝΝΑΚΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

Επ. Καθηγητής: ΣΤΑΥΡΟΥΛΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ευκαιρία της ολοκλήρωσης της εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Σταυρουλάκη Γεώργιο για την πολύτιμη καθοδήγησή του και για τις χρήσιμες και ενδιαφέρουσες συζητήσεις που είχαμε.

Επίσης, ευχαριστώ θερμά την οικογένεια και την κοπέλα μου, που βοήθησαν με τον τρόπο τους όλο αυτόν τον καιρό της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας, αλλά και των σπουδών μας γενικότερα.

Περιεχόμενα

Περίληψη-σκοπός διπλωματικής εργασίας	5
Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή	6
1.1 Λειτουργία	6
1.1.1 Συσσώρευση ενέργειας	7
1.1.2 Αποθήκευση της ενέργειας	8
1.1.3 Η χρήση της ενέργειας	8
1.2 Κίνητρο	9
1.3 Συσκευές	9
1.3.1 Εξωτερικές πηγές ακτινοβολίας	10
1.3.2 Φωτοβολταϊκά	11
1.3.3 Πιεζοηλεκτρικά υλικά	13
1.3.4 Πυροηλεκτρικό φαινόμενο	15
1.3.5 Θερμοηλεκτρικό φαινόμενο	16
1.3.6 Ηλεκτροστατική (χωρητική)	18
1.3.7 Μαγνητική επαγωγή	19
1.3.8 Ισχύς από τα πεντάλ	20
Κεφάλαιο 2. Μάστευση ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκών τεχνολογιών	21
2.1 Φωτοβολταϊκά – Περιγραφή τεχνολογίας	21
2.1.1 Φωτοβολταϊκά Πλαίσια	21
2.2 Φωτοβολταϊκές τεχνολογίες	22
2.2.1 Φωτοβολταϊκά πρώτης γενιάς	23
2.2.2 Φωτοβολταϊκά δεύτερης γενιάς	25
2.2.3 Φωτοβολταϊκά τρίτης γενιάς	28
2.3 Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά του Φ/Β στοιχείου	32
2.4 Εφαρμογές Φ/Β τεχνολογίας σε μικροσυσκευές	34
2.5 Μάστευση ηλιακής ενέργειας για την τροφοδότηση ασύρματων αισθητήρων	38
Κεφάλαιο 3. Πιεζοηλεκτρικές συσκευές για την μάστευση ενέργειας	42
3.1 Μικρής κλίμακας μάστευση ενέργειας από τον άνεμο	43

3.2 Μικρής κλίμακας μάστευση ενέργειας από τη βροχή	49
3.3 Ενέργεια από “έξυπνους δρόμους”	51
Κεφάλαιο 4. Μάστευση ενέργειας μέσω της ανθρώπινης και μηχανικής κίνησης ..	55
4.1 Εφαρμογή των συσκευών που βασίζονται στην κίνηση.....	57
4.1.1 Δίκτυα ασύρματων αισθητήρων	57
4.2 Βιοενέργεια.....	60
4.3 Αρχή λειτουργίας των συσκευών που βασίζονται στην κίνηση	62
Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα	66
Βιβλιογραφία	70

Περίληψη-σκοπός διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αναφέρεται στην μαστευση ενέργειας καθώς και πως επιτυγχάνεται αυτή μέσω της χρήσης συσκευών-μικροσυσκευών. Οι συσκευές αυτές, χρησιμοποιούν ό,τι μορφή ενέργειας συναντούν στο περιβάλλον τους και την μετατρέπουν σε ηλεκτρική ενέργεια, τροφοδοτώντας κατά αυτόν τον τρόπο άλλες συσκευές όπως για παράδειγμα αισθητήρες οι οποίοι δεν έχουν ή δεν μπορούν να συνδεθούν με άλλη πηγή ενέργειας. Η μαστευση επομένως μαζί με αυτές τις συσκευές, δίνουν την δυνατότητα για ύπαρξη ασυρμάτων συστημάτων σε ιδιαίτερα και δυσπρόσιτα περιβάλλοντα όπως το διάστημα , κάποια απομακρυσμένη κορυφή ενός βουνού ή και στον ίδιο τον ανθρώπινο οργανισμό. Επίσης εργασία αναφέρεται εν συντομία στα φαινόμενα μαστευσης ενέργειας όπως αυτά έχουν αναπτυχθεί έως τώρα, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στο φωτοβολταϊκό και στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Καθώς αυτά τα φαινόμενα αναλύονται, δίνονται ταυτόχρονα οι βασικές αρχές λειτουργίας τους και μερικές εφαρμογές τους που όμως αναδεικνύουν απολυτά την χρησιμότητα τους. Τέλος, αναφέρεται πως η μεσίτευση μπορεί να χρησιμοποιηθεί με απόλυτη επιτυχία στον ιατρικό τομέα, ενώ στο τελευταίο κεφάλαιο και στα συμπεράσματα γίνεται μια σύντομη σύγκριση απόδοσης των συσκευών που έχουν αναφερθεί στα προηγούμενα κεφάλαια.

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

Η μάζευση ενέργειας (επίσης γνωστή ως μάζευση ισχύος ή σάρωση ενέργειας) είναι η διαδικασία με την οποία η ενέργεια που προέρχεται από εξωτερικές πηγές (π.χ. ηλιακή ενέργεια, θερμική ενέργεια, αιολική ενέργεια, κλίσεις και κινητική ενέργεια), συλλαμβάνεται και αποθηκεύεται σε μικρές, ασύρματες αυτόνομες συσκευές, όπως αυτές που χρησιμοποιούνται σε wearable ηλεκτρονικά και ασύρματα δίκτυα αισθητήρων¹.

Οι συσκευές μάζευσης ενέργειας παρέχουν μια πολύ μικρή ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας για την χαμηλή κατανάλωση ενέργειας των ηλεκτρονικών. Ενώ τα συμβατικά καύσιμα σε μεγάλης κλίμακας εφαρμογές έχουν μεγάλο κόστος (πετρέλαιο, άνθρακας, κλπ), η πηγή ενέργειας για τις συσκευές μάζευσης ενέργειας είναι ήδη παρούσα στο περιβάλλον και είναι δωρεάν. Για παράδειγμα, οι βαθμίδες θερμοκρασίας που προϋπάρχουν από τη λειτουργία του κινητήρα εσωτερικής καύσης ή, σε αστικές περιοχές, η ύπαρξη ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας στο περιβάλλον, λόγω των ραδιοφωνικών και τηλεοπτικών εκπομπών, μπορούν να αποτελέσουν πηγές ενέργειας για συσκευές χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης.

1.1 Λειτουργία

Οι συσκευές μάζευσης ενέργειας μετατρέπουν την ενέργεια του περιβάλλοντος σε ηλεκτρική ενέργεια και έχουν προσελκύσει μεγάλο ενδιαφέρον τόσο στον στρατιωτικό όσο και στον εμπορικό τομέα. Μερικά συστήματα μετατρέπουν την κίνηση, όπως αυτή των κυμάτων του ωκεανού, σε ηλεκτρική ενέργεια για να χρησιμοποιηθεί από ωκεανογραφικούς αισθητήρες παρακολούθησης με αυτόνομη λειτουργία². Οι μελλοντικές εφαρμογές μπορεί να

1 Percy, Steven; Chris Knight, Francis Cooray and Ken Smart (2012). "Supplying the Power Requirements to a Sensor Network Using Radio Frequency Power Transfer". *Sensors* 12 (7): 8571–8585.

2 What is energy harvesting? Institute of physics. Διαθέσιμο:

περιλαμβάνουν συσκευές υψηλής ισχύος εξόδου (ή συστοιχίες των συσκευών αυτών) που έχουν αναπτυχθεί σε απομακρυσμένες περιοχές και χρησιμεύσουν ως αξιόπιστοι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για μεγάλα συστήματα. Μια άλλη εφαρμογή είναι σε wearable ηλεκτρονικά, όπου οι συσκευές μάστευσης ενέργειας μπορεί να τροφοδοτήσουν ή να επαναφορτίσουν κινητά τηλέφωνα, φορητούς υπολογιστές, συσκευές ασύρματης επικοινωνίας, κλπ. Όλες αυτές οι συσκευές πρέπει να είναι αρκετά ισχυρές ώστε να αντέξουν τη μακροχρόνια έκθεση σε εχθρικά περιβάλλοντα και να έχουν ένα ευρύ φάσμα δυναμικής ευαισθησίας για να εκμεταλλευτούν όλο το φάσμα των κινήσεων κύματος.

1.1.1 Συσσώρευση ενέργειας

Η ενέργεια μπορεί επίσης να συλλέγεται για να τροφοδοτήσει μικρούς αυτόνομους αισθητήρες, όπως αυτοί που αναπτύσσονται με τη χρήση της τεχνολογίας MEMS³. Τα συστήματα αυτά είναι συχνά πολύ μικρά και απαιτούν λίγη ενέργεια, αλλά οι εφαρμογές τους περιορίζονται λόγω της εξάρτησής τους από τις μπαταρίες. Η μάστευση ενέργειας από τις δονήσεις του περιβάλλοντος, τον άνεμο, τη θερμότητα ή το φως θα μπορούσε να επιτρέψει σε έξυπνους αισθητήρες να είναι λειτουργικοί επ' αόριστον. Πολλές ακαδημαϊκές και εμπορικές ερευνητικές ομάδες συμμετείχαν στην ανάλυση και την ανάπτυξη των κραδασμών από την κίνηση, συμπεριλαμβανομένων των ομάδων Control and Power και Optical and Semiconductor Devices στο Imperial College του Λονδίνου, IMEC και το συνεταιρισμό Holst Centr, AdaptivEnergy, LLC, ARVENI, MIT Boston, Victoria University of Wellington, Georgia Tech, UC Berkeley, Πανεπιστήμιο του Southampton, University of Bristol, Micro Energy System Lab στο Πανεπιστήμιο του Τόκιο, το Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Nanyang, PMG Perpetuum, Vestfold University College, Εθνικό Πανεπιστήμιο της Σιγκαπούρης, Εργαστήριο NIPS στο Πανεπιστήμιο της Περούτζια, Columbia University, Universidad Autónoma de

<http://www.iop.org/resources/energy/>

3 Jim Drew, Design Note 483: Energy Harvester Produces Power from Local Environment, Eliminating Batteries in Wireless Sensors, Διαθέσιμο: <http://cds.linear.com/docs/en/design-note/DN483.pdf>

Barcelona και το Εργαστήριο USN & Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας του Πανεπιστημίου της Ουλσάν (Ουλσάν, Νότια Κορέα). Το Εθνικό Ίδρυμα Επιστημών υποστηρίζει επίσης μία συνεργασία Βιομηχανίας και Πανεπιστημίου ως Κέντρο Ερευνών με επικεφαλής το Virginia Tech και το Πανεπιστήμιο του Τέξας στο Ντάλας που ονομάζεται Κέντρο Υλικών και Συστημάτων για τη Μάστευση Ενέργειας.

Οι τυπικές πυκνότητες ισχύος που διατίθεται από τις συσκευές μάστευσης ενέργειας εξαρτώνται από την εφαρμογή (που επηρεάζει το μέγεθος της γεννήτριας), και τον ίδιο το σχεδιασμό της γεννήτριας. Σε γενικές γραμμές, για συσκευές που βασίζονται στην κίνηση, τυπικές τιμές είναι μερικά $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ για εφαρμογές που τροφοδοτούνται από το ανθρώπινο σώμα και εκατοντάδες $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ για τις γεννήτριες που κινούνται από τα μηχανήματα⁴. Οι περισσότερες συσκευές ενεργειακής μάστευσης για wearable ηλεκτρονικά παράγουν πολύ λίγη ενέργεια.

1.1.2 Αποθήκευση της ενέργειας

Σε γενικές γραμμές, η ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί σε ένα πυκνωτή, σούπερ πυκνωτή, ή μπαταρία. Πυκνωτές χρησιμοποιούνται όταν η ζήτηση απαιτεί μεγάλες αιχμές ενέργειας. Οι μπαταρίες παρουσιάζουν λιγότερη διαρροή ενέργειας και ως εκ τούτου χρησιμοποιούνται όταν η συσκευή πρέπει να παρέχει μια σταθερή ροή ενέργειας.

1.1.3 Η χρήση της ενέργειας

Το σημερινό ενδιαφέρον για τη μάστευση χαμηλής ενεργειακής ισχύος οφείλεται στα αυτόνομα δίκτυα αισθητήρων. Σε αυτές τις εφαρμογές ένα σύστημα μάστευσης ενέργειας παράγει ενέργεια που αποθηκεύεται σε έναν πυκνωτή και στη συνέχεια ενισχύεται και ρυθμίζεται με στόχο την αποθήκευση σε ένα δεύτερο πυκνωτή ή μπαταρία για τη χρήση στον μικροεπεξεργαστή. Η ισχύς

4 Erick Vermeulen, January 2008, NatuurWetenschap & Techniek.

χρησιμοποιείται συνήθως σε έναν αισθητήρα και τα δεδομένα αποθηκεύονται ή μεταδίδονται ενδεχομένως μέσω ενός ασύρματου δικτύου.

1.2 Κίνητρο

Η ιστορία της μάστευσης ενέργειας χρονολογείται από τον ανεμόμυλο και την φτερωτή. Οι άνθρωποι έχουν ψάξει τρόπους για να αξιοποιούν την ενέργεια από τη θερμότητα και τις δονήσεις επί πολλές δεκαετίες. Η κινητήρια δύναμη πίσω από την αναζήτηση για νέες συσκευές μάστευσης ενέργειας είναι η επιθυμία αυτόνομης λειτουργίας στα δίκτυα αισθητήρων και τις φορητές συσκευές. Η μάστευση ενέργειας επίσης ενισχύεται από την επιθυμία να αντιμετωπιστεί το ζήτημα της κλιματικής αλλαγής και της υπερθέρμανσης του πλανήτη.

1.3 Συσκευές

Υπάρχουν πολλές πηγές ενέργειας μικρής κλίμακας που γενικά δεν μπορούν να κλιμακωθούν σε βιομηχανική κλίμακα:

Ρολόγια χειρός που τροφοδοτούνται με κινητική ενέργεια (που ονομάζονται αυτόματα ρολόγια). Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται η κίνηση του βραχίονα. Ένας νεότερος σχεδιασμός που εισήγαγε η Seiko ("Kinetic") χρησιμοποιεί την κίνηση ενός μαγνήτη σε ηλεκτρομαγνητική γεννήτρια. Η κίνηση παρέχει ένα ρυθμό μεταβολής της ηλεκτρομαγνητικής ροής, η οποία οδηγεί σε κάποια επαγόμενη EMF στα πηνία. Η ιδέα βασίζεται στον Νόμο του Faraday.

Η φωτοβολταϊκή τεχνολογία παρέχει μια μέθοδο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε συνεχές ρεύμα με τη χρήση ημιαγωγών που παρουσιάζουν το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Η φωτοβολταϊκή παραγωγή ενέργειας με ηλιακά πάνελ περιλαμβάνει έναν αριθμό στοιχείων που περιέχουν φωτοβολταϊκό υλικό.

Οι Θερμοηλεκτρικές γεννήτριες (TEGs) αποτελούνται από την ένωση δύο ανόμοιων υλικών και την παρουσία διαφοράς θερμοκρασίας. Είναι δυνατό να

ληφθούν τάσεις εξόδου μεγάλης τιμής συνδέοντας ηλεκτρικά πολλές ενώσεις σε σειρά (παράλληλη θερμική σύνδεση). Η τυπική απόδοση είναι στο εύρος 100-200 $\mu\text{V} / \text{K}$. Οι γεννήτριες αυτές βρίσκουν εφαρμογή στη μάστευση ενέργειας της τάξης των mW.s από βιομηχανικό εξοπλισμό, κατασκευές, ακόμη και το ανθρώπινο σώμα. Συνδυάζονται συνήθως με καταβόθρες θερμότητας για να βελτιωθεί η διαφορά θερμοκρασίας.

Οι μικρές ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούνται για τη μάστευση της αιολικής ενέργειας, η οποία είναι άμεσα διαθέσιμη στο περιβάλλον με τη μορφή της κινητικής ενέργειας. Όταν ο αέρας ρέει κατά μήκος των πτερυγίων του στροβίλου, μια διαφορά πίεσως αναπτύσσεται μεταξύ των ταχυτήτων του ανέμου πάνω και κάτω από τις λεπίδες. Αυτό θα οδηγήσει στην δημιουργία μίας δύναμης ανύψωσης, η οποία με τη σειρά της κάνει τα πτερύγια να περιστρέφονται.

Τα πιεζοηλεκτρικά κρύσταλλα δημιουργούν μια μικρή τάση κάθε φορά που παραμορφώνονται μηχανικά. Διάφορες μηχανικές παραμορφώσεις όπως οι κραδασμοί από τις μηχανές, η πίεση στο τακούνι του παπουτσιού, ή το σπρώξιμο ενός κουμπιού, μπορούν να τροφοδοτήσουν τις πιεζοηλεκτρικές γεννήτριες.

Η ενέργεια των ραδιοκυμάτων μπορεί να συλληφθεί από ειδικές κεραίες όπως η rectenna και, θεωρητικά σε ακόμη υψηλότερη συχνότητα ακτινοβολίας EM, η Nantenna .

1.3.1 Εξωτερικές πηγές ακτινοβολίας

Μια πιθανή πηγή ενέργειας προέρχεται από τους υπάρχοντες ραδιοπομπούς. Απαιτείται όμως μεγάλος χώρος συλλογής ή εγγύτητα στην ακτινοβολούσα ασύρματη ενέργεια, για να πάρει κανείς χρήσιμα επίπεδα ισχύος από την πηγή αυτή. Η nantenna είναι μια προτεινόμενη ανάπτυξη, η οποία θα ξεπεράσει αυτό το όριο, κάνοντας χρήση των άφθονων φυσικών πηγών ακτινοβολίας (όπως η ηλιακή ακτινοβολία).

Η σκόπιμη μετάδοση RF ενέργειας για την τροφοδοσία απομακρυσμένων συσκευών εφαρμόζεται σε παθητικά συστήματα Radio Frequency Identification (RFID), αλλά και σε συστήματα ασφαλείας επικοινωνιών. Αυτή η μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί για να τροφοδοτήσει μεμονωμένους κόμβους σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων.

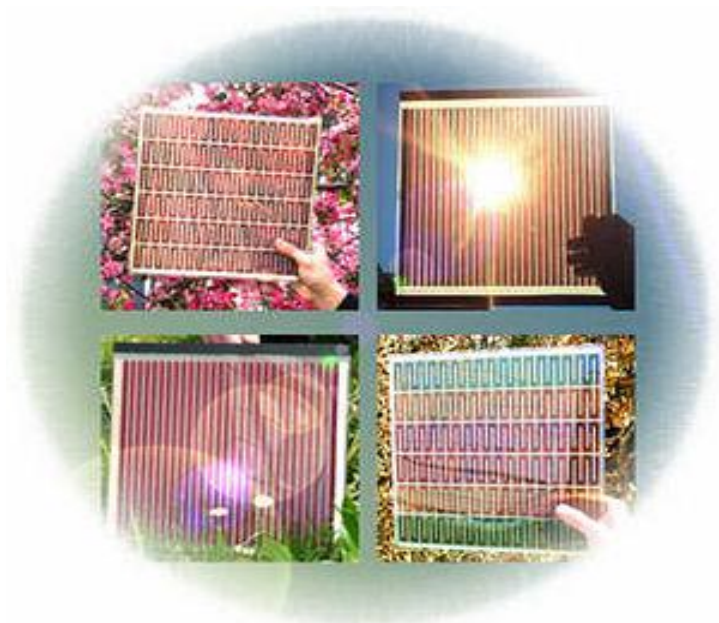
1.3.2 Φωτοβολταϊκά

Η μάζευση ενέργειας με τεχνολογία Φωτοβολταϊκών (PV) προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με την ενσύρματη ή μέσω μπαταρίας: τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι πρακτικά ανεξάντλητες πηγές ενέργειας με μικρές ή καθόλου αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Οι διάφορες μορφές φωτοβολταϊκών λύσεων μάζευσης ενέργειας μέχρι σήμερα τροφοδοτούνται από ειδικά ρυθμισμένο υλικό άμορφου πυριτίου (ASI), μια τεχνολογία που χρησιμοποιείται περισσότερο στους ηλιακούς Υπολογιστές. Το πυρίτιο (Si) είναι η βάση για το 90% περίπου της παγκόσμιας παραγωγής Φ/Β, λόγω της υφιστάμενης υποδομής για το συγκεκριμένο υλικό αυτό την τελευταία πεντηκοταετία. Η τεχνογνωσία πάνω στο πυρίτιο οφείλεται στις πολλαπλές εφαρμογές του στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές και στα Φ/Β πλαίσια που τροφοδοτούν δορυφόρους και υποστηρίχθηκε από μεγάλες κυβερνητικές και βιομηχανικές επενδύσεις. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκε κατάλληλος εξοπλισμός για την επεξεργασία του πυριτίου ώστε να έχει την απαιτούμενη καθαρότητα και κρυσταλλική δομή.

Σε συνδυασμό με την αφθονία του στη γη και τα ηλεκτρικά του χαρακτηριστικά, το πυρίτιο είναι ικανό και συμφέρον μέσο για την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας. Το μόνο μειονέκτημα του πυριτίου είναι ότι είναι εύθραυστο και ως εκ τούτου απαιτεί τον σχηματισμό στοιχείων μεγάλου πάχους.

Τα Φ/Β πλαίσια λεπτού υμενίου κατασκευάστηκαν με στόχο να μειωθεί το κόστος και να βελτιωθεί η απόδοση των Φ/Β πλαισίων σε μη ιδανικές συνθήκες. Το χαμηλότερο κόστος οφείλεται στην ευκολότερη κατασκευή και το λιγότερο ενεργό υλικό που χρησιμοποιείται. Παρόλα αυτά η απόδοση είναι χαμηλότερη και

περιορίζεται στο 5-10%, ανάλογα με το υλικό. Η τεχνολογία thin film βρίσκεται σε αναπτυσσόμενο στάδιο αφού με διάφορες μεθόδους επεξεργασίας και χρήση διαφορετικών υλικών αναμένεται αύξηση της απόδοσης, σταθεροποίηση των χαρακτηριστικών τους και αύξηση της διείσδυσης στην αγορά. Σήμερα πάντως αποτελούν την πιο φθηνή επιλογή Φ/Β πλαισίων.

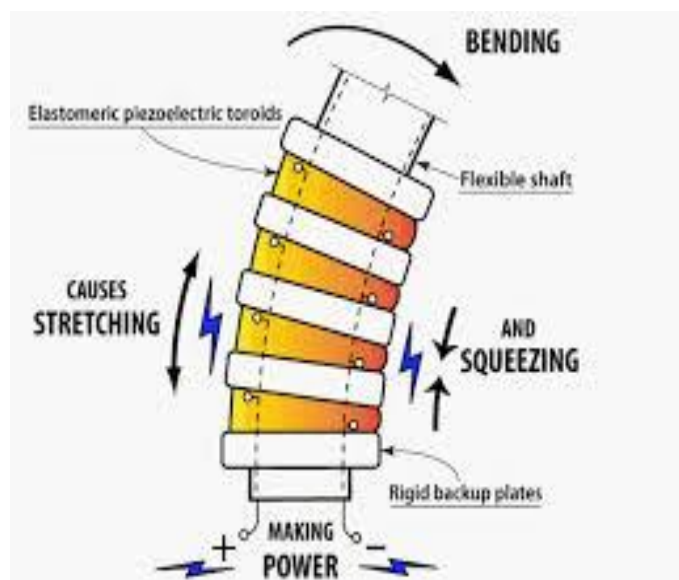


Τα τελευταία χρόνια, νέες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών έχουν έρθει στο προσκήνιο της μάζευσης ενέργειας όπως οι βαφές με ευαισθητοποιημένα ηλιακά κύτταρα (DSSC). Οι βαφές αυτές απορροφούν το φως όπως η χλωροφύλλη στα φυτά. Τα ηλεκτρόνια που απελευθερώνονται κατά την πρόσκρουση, διαφεύγουν προς το στρώμα του TiO_2 και από εκεί διαχέονται, μέσω του ηλεκτρολύτη. Καθώς η χρωστική ουσία μπορεί να συντονίζεται με το ορατό φάσμα, μπορεί να παραχθεί πολύ υψηλότερη ισχύς. Στα 200 lux, μια DSSC μπορεί να παραγάγει πάνω από 15 μW ανά cm^2 .

1.3.3 Πιεζοηλεκτρικά υλικά ⁵

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο μετατρέπει τη μηχανική καταπόνηση σε ηλεκτρικό ρεύμα ή τάση. Μηχανικές καταπονήσεις μπορεί να προέρχονται από πολλές διαφορετικές πηγές. Η ανθρώπινη κίνηση, οι χαμηλής συχνότητας σεισμικές δονήσεις, και ο ακουστικός θόρυβος, είναι καθημερινά παραδείγματα. Εκτός από σπάνιες περιπτώσεις το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο λειτουργεί στο AC και απαιτεί χρονικά μεταβαλλόμενες εισόδους σε μηχανικό συντονισμό για να είναι αποτελεσματικό.

Οι περισσότερες πιεζοηλεκτρικές πηγές ηλεκτρικής ενέργειας παράγουν ενέργεια της τάξης των milliwatts, η οποία είναι αρκετή για φορητές συσκευές, όπως ορισμένα εμπορικά διαθέσιμα ρολόγια χειρός. Μια πρόταση είναι η χρήση τους σε συσκευές μικρο-κλίμακας, όπως σε μια συσκευή μάστευσης μικρο-υδραυλικής ενέργειας. Σε αυτή τη συσκευή, η ροή του πεπιεσμένου υδραυλικού ρευστού κινεί έναν παλινδρομικό έμβολο που υποστηρίζεται από τρία πιεζοηλεκτρικά στοιχεία τα οποία μετατρέπουν τις διακυμάνσεις πίεσης σε εναλλασσόμενο ρεύμα.



5 White, N.M., Glynn-Jones, P. and Beeby, S.P. (2001) A novel thick-film piezoelectric micro-generator. *Smart Materials and Structures*, 10, (4), 850-852.

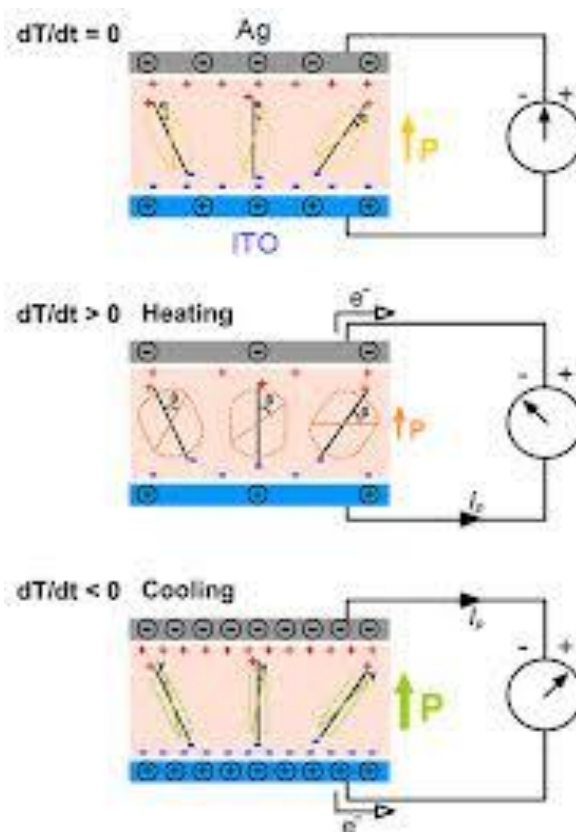
Καθώς τα πιεζοηλεκτρικά συστήματα μάστευσης ενέργειας έχουν ερευνηθεί μόνο μετά τα τέλη της δεκαετίας του 1990, παραμένουν μια εξελισσόμενη τεχνολογία. Παρ' όλα αυτά μερικές ενδιαφέρουσες βελτιώσεις έγιναν με τον αυτοτροφοδοτούμενο ηλεκτρονικό διακόπτη στη σχολή INSA. Άλλες βιομηχανικές εφαρμογές εμφανίστηκαν μεταξύ του 2000 και του 2005, για τη μάστευση ενέργειας από κραδασμούς με στόχο την τροφοδότηση αισθητήρων.

Τα πιεζοηλεκτρικά συστήματα μπορούν να μετατρέψουν την κίνηση από το ανθρώπινο σώμα σε ηλεκτρική ενέργεια. Η DARPA έχει χρηματοδοτήσει προσπάθειες για την αξιοποίηση της ενέργειας από την κίνηση του ποδιού και τη κίνηση του βραχίονα, τα παπούτσια, και την αρτηριακή πίεση για εμφυτεύσιμους ή wearable αισθητήρες χαμηλού επίπεδου ισχύος. Οι nanobrushes είναι ένα άλλο παράδειγμα ενός πιεζοηλεκτρικού συστήματος μάστευσης ενέργειας. Μπορούν να ενσωματωθούν σε είδη ένδυσης. Απαιτείται προσεκτικός σχεδιασμός για να ελαχιστοποιηθεί η δυσφορία του χρήστη. Αυτές οι πηγές ενέργειας έχουν αντίκτυπο στο σώμα. Η μάστευση ενέργειας από τη δόνηση παράγει ηλεκτρική ενέργεια από περιβαλλοντικές δονήσεις και κινήσεις. Το Microbelt μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παράγει ηλεκτρική ενέργεια από την αναπνοή.

Η χρήση των πιεζοηλεκτρικών υλικών για τη συλλογή ενέργειας έχει ήδη γίνει δημοφιλής. Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά έχουν την ικανότητα να μετατρέπουν την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρικό φορτίο. Τα στοιχεία Piezo είναι ενσωματωμένα σε διαβάσεις πεζών για να ανακτήσουν την ενέργεια του ανθρώπινου βήματος. Μπορούν επίσης να είναι ενσωματωμένα στα παπούτσια. Ερευνητές στο MIT ανέπτυξαν το πρώτο πιεζοηλεκτρικό σύστημα μάστευσης ενέργειας σε μικρο-κλίμακα με τη χρήση λεπτής μεμβράνης το 2005.

1.3.4 Πυροηλεκτρικό φαινόμενο⁶

Το πυροηλεκτρικό φαινόμενο μετατρέπει την αλλαγή της θερμοκρασίας σε ηλεκτρικό ρεύμα ή τάση. Είναι ανάλογο προς το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Ο πυροηλεκτρισμός απαιτεί εισόδους χρονικά μεταβαλλόμενες και υποφέρει από μικρές ιπποδυνάμεις σε ενεργειακές εφαρμογές μάστευσης εξαιτίας των χαμηλών συχνοτήτων λειτουργίας. Ωστόσο, ένα βασικό πλεονέκτημα των pyroelectrics σε σχέση με τα thermoelectrics είναι ότι πολλά πυροηλεκτρικά υλικά έχουν σταθερή συμπεριφορά έως και τους 1200 °C ή και σε υψηλότερη θερμοκρασία, επιτρέποντας τη μάστευση ενέργειας από πηγές υψηλής θερμοκρασίας και ως εκ τούτου την αύξηση της θερμοδυναμικής απόδοσης.



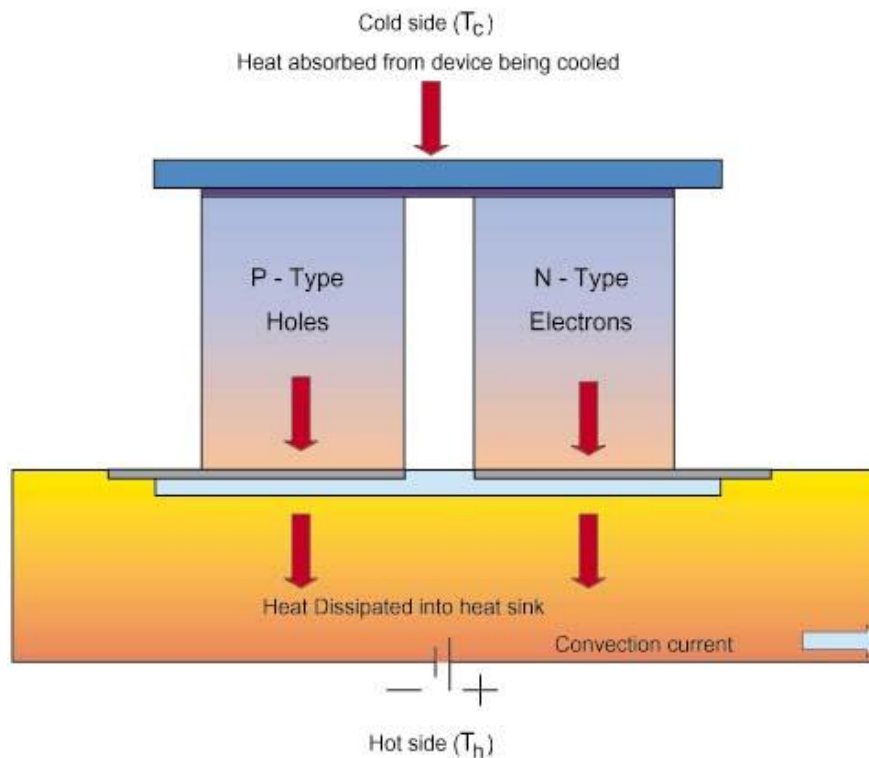
6 A. Navid and L. Pilon (2011), "Pyroelectric energy harvesting using Olsen cycles in purified and porous poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene) thin films", Smart Materials and Structures, vol. 20, no. 2, pp. 025012.

Ένας τρόπος για να μετατραπεί η θερμότητα των αποβλήτων άμεσα σε ηλεκτρική ενέργεια είναι από την εκτέλεση του κύκλου Olsen στα πυροηλεκτρικά υλικά. Ο κύκλος Olsen αποτελείται από δύο διεργασίες ισόθερμες και δύο ισοηλεκτρικού πεδίου στο διάγραμμα ηλεκτρικής μετατόπισης-ηλεκτρικού πεδίου (DE). Η αρχή του κύκλου Olsen είναι να φορτίζει ένα πυκνωτή μέσω ψύξης υπό χαμηλό ηλεκτρικό πεδίο και να εκφορτίσει τον πυκνωτή υπό θέρμανση σε υψηλότερο ηλεκτρικό πεδίο. Αρκετοί πυροηλεκτρικοί μετατροπείς έχουν αναπτυχθεί για την εφαρμογή του κύκλου Olsen χρησιμοποιώντας αγωγιμότητα, συναγωγή, ή ακτινοβολία. Έχει επίσης αποδειχθεί θεωρητικά ότι στους πυροηλεκτρικούς μετατροπείς με ταλαντούμενο ρευστό εργασίας, ο κύκλος Olsen μπορεί να φτάσει την απόδοση Carnot μεταξύ μίας θερμής και μία ψυχρής θερμικής δεξαμενής. Επιπλέον, πρόσφατες μελέτες έχουν καθιερώσει κάποια πολυμερή και κεραμικά ως πολλά υποσχόμενα πυροηλεκτρικά υλικά για χρήση σε μετατροπείς ενέργειας, λόγω της μεγάλης ενεργειακής τους πυκνότητας που δημιουργείται σε χαμηλές θερμοκρασίες. Επιπλέον, παρουσιάστηκε πρόσφατα μια συσκευή πυροηλεκτρικής μάστευσης που δεν απαιτεί χρονικά μεταβαλλόμενες εισόδους. Η συσκευή συλλογής ενέργειας χρησιμοποιεί το ηλεκτρικό πεδίο ενός θερμαινόμενου πυροηλεκτρικού υλικού ώστε να μετατρέψει τη θερμική ενέργεια σε μηχανική ενέργεια.

1.3.5 Θερμοηλεκτρικό φαινόμενο

Το 1821, ο Thomas Johann Seebeck ανακάλυψε ότι μια θερμική κλίση που σχηματίζεται μεταξύ δύο ανόμοιων αγωγών παράγει τάση. Στο επίκεντρο της θερμοηλεκτρικής ισχύος είναι το γεγονός ότι μία διαβάθμιση θερμοκρασίας σε ένα αγωγίμο υλικό καταλήγει σε ροή θερμότητας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη διάχυση των φορέων φορτίου. Η ροή των φορέων φορτίου μεταξύ των θερμών και κρύων περιοχών με τη σειρά τους δημιουργεί μια διαφορά τάσης. Το 1834, ο Jean Charles Athanase Peltier ανακάλυψε ότι η ροή ενός ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από τη ένωση των δύο ανόμοιων αγωγών μπορεί, ανάλογα με την κατεύθυνση του ρεύματος, να λειτουργήσει ως θέρμανση και ψύξη. Η θερμότητα που απορροφάται ή παράγεται είναι ανάλογη με το ρεύμα, και η σταθερά της αναλογικότητας είναι γνωστή ως συντελεστής Peltier. Σήμερα, λόγω της γνώσης των Seebeck και

Peltier, τα θερμοηλεκτρικά υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως συσκευές θέρμανσης ή ψύξης και γεννήτριες (TEGs).



Τα ιδανικά θερμοηλεκτρικά υλικά έχουν υψηλό συντελεστή Seebeck, υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, και χαμηλή θερμική αγωγιμότητα. Η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα είναι απαραίτητη ώστε να διατηρηθεί μια υψηλή θερμική κλίση στην ένωση. Τυπικές θερμοηλεκτρικές συσκευές που κατασκευάζονται σήμερα αποτελούνται από P-και N-ημιαγωγούς τελλουριούχου βισμούθιου που τοποθετούνται ανάμεσα σε δύο επιμεταλλωμένες κεραμικές πλάκες. Οι κεραμικές πλάκες προσθέτουν ακαμψία και ηλεκτρική μόνωση στο σύστημα. Οι ημιαγωγοί συνδέονται ηλεκτρικά σε σειρά και θερμικά παράλληλα.

Έχουν αναπτυχθεί επίσης μικροσκοπικά θερμοστοιχεία που μετατρέπουν τη θερμότητα του σώματος σε ηλεκτρική ενέργεια και παράγουν 40μW στα 3V με θερμοκρασία κλίσης 5 μοιρών, ενώ στο άλλο άκρο της κλίμακας, τα μεγάλα θερμοστοιχεία χρησιμοποιούνται στις πυρηνικές RTG μπαταρίες.

Πρακτικά παραδείγματα είναι το finger-heart rate meter από το Κέντρο Holst και οι

thermogenerators από την Fraunhofer Gesellschaft.

Πλεονεκτήματα των θερμοηλεκτρικών:

Δεν υπάρχουν κινούμενα μέρη, επιτρέπουν τη συνεχή λειτουργία για πολλά χρόνια. Η *Tellurex Corporation* (εταιρεία παραγωγής θερμοηλεκτρικών) ισχυρίζεται ότι τα thermoelectrics έχουν πάνω από 100.000 ώρες λειτουργίας σταθερής κατάστασης.

Τα θερμοηλεκτρικά δεν περιέχουν υλικά τα οποία πρέπει να αναπληρώνονται.

Η λειτουργία θέρμανσης και ψύξης μπορεί να αντιστραφεί.

Ένα μειονέκτημα της θερμοηλεκτρικής μετατροπής ενέργειας είναι η χαμηλή απόδοση (επί του παρόντος λιγότερο από 10%). Η ανάπτυξη των υλικών που είναι σε θέση να λειτουργούν σε υψηλότερες διαβαθμίσεις θερμοκρασίας, και μπορούν να άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα χωρίς την αγωγή θερμότητας (κάτι που μέχρι πρόσφατα είναι αδύνατο), θα οδηγήσει σε αύξηση της απόδοσης.

Μελλοντικές εξελίξεις στα θερμοηλεκτρικά μπορεί να περιλαμβάνουν την μετατροπή των απωλειών θερμότητας, όπως στην καύση του κινητήρα του αυτοκινήτου, σε ηλεκτρική ενέργεια.

1.3.6 Ηλεκτροστατική (χωρητική)

Αυτό το είδος της μάζευσης βασίζεται στην μεταβαλλόμενη χωρητικότητα των κραδασμών που εξαρτώνται από πυκνωτές. Οι μηχανικές δονήσεις διαχωρίζουν τις πλάκες ενός φορτισμένου μεταβλητού πυκνωτή, και η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι μηχανές ηλεκτροστατικής ενέργειας χρειάζονται μια πηγή πόλωσης για την μετατροπή της μηχανικής ενέργειας από τις δονήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια. Η πηγή πόλωσης θα πρέπει να είναι της τάξης των μερικών εκατοντάδων βολτ. Αυτό περιπλέκει σημαντικά την κύκλωση διαχείρισης ισχύος. Μια άλλη λύση συνίσταται στη χρήση electrets, που είναι ηλεκτρικά φορτισμένα διηλεκτρικά σε θέση να κρατήσουν την πόλωση στον

πυκνωτή για χρόνια. Οι προκύπτουσες συσκευές είναι αυτο-πολωμένες και μπορεί να φορτίσουν τις μπαταρίες άμεσα, ή μπορεί να παράγουν εκθετικά αυξανόμενες τάσεις στους πυκνωτές αποθήκευσης, από την ενέργεια που μπορεί να εξαχθεί περιοδικά από DC / DC μετατροπείς⁷.

1.3.7 Μαγνητική επαγωγή⁸

Η μετακίνηση των μαγνητών παλινδρομικά μπορεί να δημιουργήσει μικρορεύματα σε αγωγούς ακόμα και με μικρές δονήσεις, λόγω του νόμου του Faraday (νόμος της επαγωγής). Με την ανάπτυξη μιας μικροσκοπικής συσκευής αυτού του είδους το 2007, μια ομάδα από το Πανεπιστήμιο του Σαουθάμπτον κατέστησε δυνατή την ενσωμάτωση μιας τέτοιας συσκευής σε περιβάλλοντα που απέκλειαν οποιαδήποτε άλλη ηλεκτρική σύνδεση. Αισθητήρες σε δυσπρόσιτα μέρη μπορούν τώρα να δημιουργήσουν τη δική τους ισχύ με στόχο τη μετάδοση δεδομένων σε εξωτερικούς δέκτες.

Ένας από τους μείζονες περιορισμούς της μαγνητικής ενέργειας μηχανής δόνησης που αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο του Southampton είναι το μέγεθος της γεννήτριας, στην περίπτωση αυτή περίπου ένα κυβικό εκατοστό, το οποίο είναι πάρα πολύ μεγάλο για να ενταχθεί σε κινητά με τις σημερινές τεχνολογίες. Η πλήρης γεννήτρια έχει μέγεθος 4 επί 4 cm. Περαιτέρω μείωση των διαστάσεων είναι εφικτή μέσω της ενοποίησης νέων και πιο εύκαμπτων υλικών. Το 2012 μια ομάδα στο Πανεπιστήμιο Northwestern ανέπτυξε μια γεννήτρια δόνησης από πολυμερές στην μορφή ενός ελατηρίου. Αυτή η συσκευή ήταν σε θέση να πετύχει τις ίδιες συχνότητες όπως η συσκευή στο Πανεπιστήμιο του Southampton με βάση το πυρίτιο, αλλά με το ένα τρίτο του μεγέθους.

7 IEEE Xplore - The Doubler of Electricity Used as Battery Charger. Ieeexplore.ieee.org. Retrieved on 2013-12-09.

8 Yi Yang; Divan, D.; Harley, R. G.; Habetler, T. G. (2006). "Power line sensornet - a new concept for power grid monitoring". 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting. pp. 8 pp

1.3.8 Ισχύς από τα πεντάλ⁹¹⁰¹¹

Η μάζευση ενέργειας από τα πεντάλ είναι απλή, αποτελεσματική και πρακτική . Υπάρχουν ουσιαστικά δύο μέθοδοι, το παλινδρομικό πετάλι και η περιστροφή δισκοβραχίονα .

Σταθερά μηχανήματα όπως οι τόρνοι bodger έχουν χρησιμοποιηθεί για πολλές χιλιάδες χρόνια (τουλάχιστον από την εποχή του χαλκού) και ακριβώς ο ίδιος μηχανισμός χρησιμοποιείται στα πεντάλ παλινδρόμησης, με πιο προηγμένη μηχανική.

9 James P. Gagne (1999-05-08). "Pedal operated power generating system US 6229224 B1". US patents/Google. Retrieved 2013.

10 Alexander Wier (1980). THE DYNAPOD: A PEDAL POWER UNIT. USAID/VITA. ISBN 0-86619-072-4.

11 <http://www.gizmag.com/r2b2-flywheel-powered-kitchen-appliance-concept/17063/>

Κεφάλαιο 2. Μάστευση ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκών τεχνολογιών

2.1 Φωτοβολταϊκά – Περιγραφή τεχνολογίας

Ο όρος φωτοβολταϊκά προέρχεται από το φως, δηλαδή την ηλιακή ακτινοβολία, και τα βολτ τάσης, που υποδεικνύουν την δημιουργία ηλεκτρικής ενέργειας. Ο όρος φωτοβολταϊκό φαινόμενο, περιγράφει την διαδικασία μετατροπής της ενέργειας του ήλιου σε ηλεκτρική ενέργεια, η οποία είναι άμεσα εκμεταλλεύσιμη από τον άνθρωπο. Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο ανακαλύφθηκε το 1839 από τον γάλλο φυσικό E. Becquerel. Η διαδικασία εν συντομία έχει ως εξής: τα ηλεκτρόνια των ατόμων του Φ/Β στοιχείου απορροφούν φωτόνια και στην συνέχεια απελευθερώνονται από τις κανονικές τους θέσεις και δημιουργείται ηλεκτρικό ρεύμα, το οποίο οδηγείται από το ηλεκτρικό πεδίο που προϋπάρχει στο Φ/Β στοιχείο.

2.1.1 Φωτοβολταϊκά Πλαίσια¹²¹³¹⁴

Τα Φ/Β στοιχεία είναι το βασικό μέρος του Φ/Β πλαισίου και είναι φτιαγμένα από ημιαγώγιμα υλικά τα οποία όταν βρεθούν σε συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα. Το Φ/Β πλαίσιο διαμορφώνεται στο εργοστάσιο και αποτελεί την μονάδα η οποία διατίθεται στο εμπόριο. Η Φ/Β γεννήτρια μπορεί να περιλαμβάνει ένα μόνο πλαίσιο έως περισσότερες της μιας συστοιχίες, οπότε μπορεί να αναφέρεται και ως το Φ/Β πάρκο του σταθμού.

12 A. Martí and A. Luque (Eds.), Next generation photovoltaics: high efficiency through full spectrum utilization, Series in Optics and Optoelectronics, Institute of Physics Publishing, Bristol (2003).

13 Torrey, Lee (Jul 10, 1980). "A trap to harness the sun". New Scientist 87 (1209): 124–127. ISSN 0262-4079. Retrieved 2012-03-30.

14 William Shockley and Hans J. Queisser, "Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells", Journal of Applied Physics, Volume 32 (March 1961), pp. 510-519

Το μέγεθος της συστοιχίας και άρα η παραγόμενη ενέργεια από το Φ/Β σύστημα, καθορίζεται από μελέτη μηχανικού, κατά την οποία λαμβάνονται υπόψη το φορτίο και το ηλιακό δυναμικό της περιοχής.

Όταν η ηλιακή ακτινοβολία εισέρχεται στην ατμόσφαιρα της γης, ένα μέρος της απορροφάται από τα μόρια του αέρα, τα σύννεφα κλπ., ένα άλλο διαχέεται εντός της ατμόσφαιρας και ένα τρίτο προσπίπτει απευθείας στην επιφάνεια του συλλέκτη (απευθείας ή ακτινική ακτινοβολία). Η συνολική ακτινοβολία (global radiation) που φθάνει στην επιφάνεια του συλλέκτη είναι το άθροισμα της ακτινικής ή άμεσης ακτινοβολίας (beam ή direct radiation), που προσπίπτει επί αυτού απευθείας και της διάχυτης ακτινοβολίας (diffuse radiation), που προέρχεται από τη διάχυση στην ατμόσφαιρα.

Ενώ όλα τα Φ/Β συστήματα έχουν παρόμοια δομή, όπως περιγράφηκε παραπάνω, υπάρχουν διάφορες κατηγορίες υλικών που σχηματίζουν το στοιχείο. Ανάλογα με το υλικό αλλάζει το κόστος αλλά και η απόδοση του Φ/Β στοιχείου και πλαισίου.

2.2 Φωτοβολταϊκές τεχνολογίες

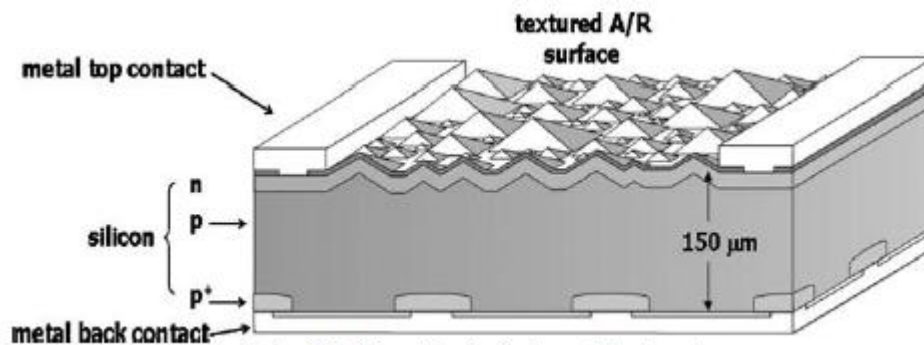
Η αγορά των φωτοβολταϊκών όπως έχει διαμορφωθεί σήμερα αποτελείται από ένα μεγάλο εύρος τεχνολογιών που περιλαμβάνουν διαφόρους τύπους φωτοβολταϊκών συστημάτων πυριτίου αλλά και υλικών λεπτών επιστρώσεων (thin film). Οι τεχνολογίες αυτές κατηγοριοποιούνται παρακάτω ξεκινώντας από αυτές της πρώτης γενιάς και φτάνοντας σε αυτές της τρίτης γενιάς που είναι και οι πιο εξελιγμένες.

2.2.1 Φωτοβολταϊκά πρώτης γενιάς

Το πυρίτιο (Α) είναι η βάση για το 90% περίπου της παγκόσμιας παραγωγής Φ/Β, λόγω της υφιστάμενης υποδομής για το συγκεκριμένο υλικό αυτό την τελευταία πενήκονταετία. Η τεχνογνωσία πάνω στο πυρίτιο οφείλεται στις πολλαπλές εφαρμογές του στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές και στα Φ/Β πλαίσια που τροφοδοτούν δορυφόρους και υποστηρίχθηκε από μεγάλες κυβερνητικές και βιομηχανικές επενδύσεις. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκε κατάλληλος εξοπλισμός για την επεξεργασία του πυριτίου ώστε να έχει την απαιτούμενη καθαρότητα και κρυσταλλική δομή. Το μόνο μειονέκτημα του πυριτίου είναι ότι είναι εύθραυστο και ως εκ τούτου απαιτεί τον σχηματισμό στοιχείων μεγάλου πάχους.

Τα κρυσταλλικά Φ/Β πλαίσια κατηγοριοποιούνται σε μονοκρυσταλλικά, πολυκρυσταλλικά ή άμορφα.

2.2.1.1 Φωτοβολταϊκα στοιχεία μονοκρυσταλλικου πυριτίου (single-crystalline silicon , sc-Si)



Σχήμα 2.4: Schematic of a single-crystal solar cell

Ο συγκεκριμένος τύπος ΦΒ στοιχείου είναι ο πιο συνηθισμένος και αποτελεί το 80% της σημερινής αγοράς. Αυτό οφείλεται στο ότι τα στοιχεία αυτά χαρακτηρίζονται από το πλεονέκτημα της καλύτερης σχέσης απόδοσης-επιφανειας ή ενεργειακής πυκνότητας. Βεβαία ένα άλλο χαρακτηριστικό τους είναι το υψηλό κόστος κατασκευής τους. Η μέγιστη απόδοση ενός στοιχείου μονοκρυσταλλικου πυριτίου, που έχει επιτευχτεί στο εργαστήριο είναι 24,7%. Βεβαία, λόγω της αντίστασης του στοιχείου, της ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας και της

επαφής με το μέταλλο υπάρχουν αρκετές απώλειες και έτσι οι πραγματικές αποδόσεις κυμαίνονται στην βιομηχανία από 12 έως 19%. Το πάχος τους είναι σχετικά μεγάλο (περίπου 0,3mm) και σχηματίζουν πυκνότητα ρεύματος περίπου 35mA/cm² με τάση 0.55V υπό σταθερή ακτινοβολία. Τέλος, όσον αφορά το κόστος της τεχνολογίας αυτής, παραμένει υψηλό.

2.2.1.2 Φωτοβολταϊκά στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου (MultiCrystalline Silicon , mc-Si)



Τα στοιχεία αυτά είναι τετραγωνικής μορφής και αποτελούνται από λεπτά επιστρώματα πάχους 10-50μm. Η θεωρητική απόδοσης τους φτάνει έως και 20% στο εργαστήριο, ενώ στο εμπόριο η απόδοση τους κυμαίνεται από 13-15%. Γενικά ισχύει ότι όσο μεγαλύτερες είναι σε έκταση οι μονοκρυσταλλικές περιοχές σε αυτό το ΦΒ στοιχείο, τόσο μεγαλύτερη είναι και η απόδοση τους. Το βασικό τους πλεονέκτημα όμως, είναι ότι η παραγωγική τους διαδικασία είναι φθηνότερη από αυτήν των μονοκρυσταλλικών και για αυτό στο εμπόριο η τιμή τους είναι συνήθως λίγο χαμηλότερη.

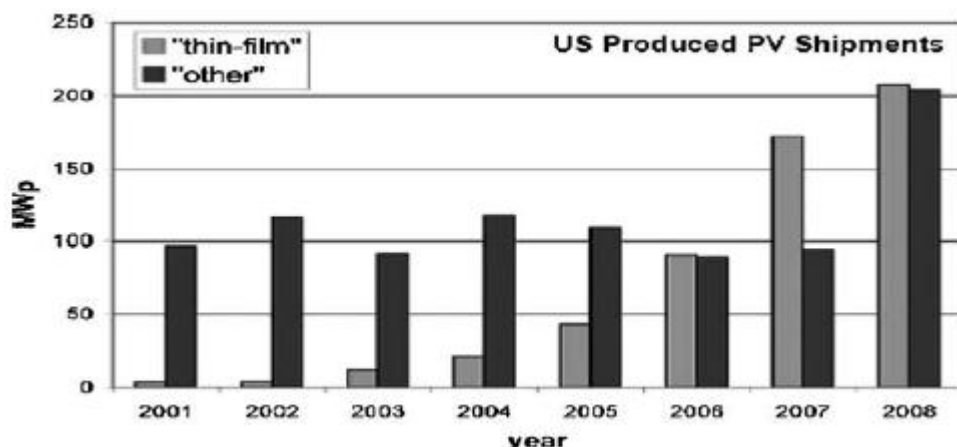
2.2.1.3 Φωτοβολταικα στοιχεία ταινίας πυριτίου (Ribbon Silicon)



Πρόκειται για μια σχετικά καινούργια τεχνολογία φωτοβολταικων στοιχείων, η οποία αναπτύχτηκε με στόχο να μειώσει το κόστος που πρόεκυπτε λόγω των διαδικασιών κοπής και των απωλειών καθαρού πυριτίου που συνεπάγεται. Αναπτύχτηκε από την Evergreen Solar και προσφέρει σχεδόν 50% μείωση στην χρήση πυριτίου συγκριτικά με τις άλλες μεθόδους παραγωγής μονοκρυσταλλικων ή πολυκρυσταλλικων ΦΒ στοιχείων. Είναι λεπτή ταινία πολυκρυσταλλικου πυριτίου, η οποία δημιουργείται από τηγμένο υλικό. Η θεωρητική απόδοση των συγκεκριμένων στοιχείων φθίνει το 18% αλλά στην βιομηχανία είναι 12-13%.

2.2.2 Φωτοβολταϊκά δεύτερης γενιάς

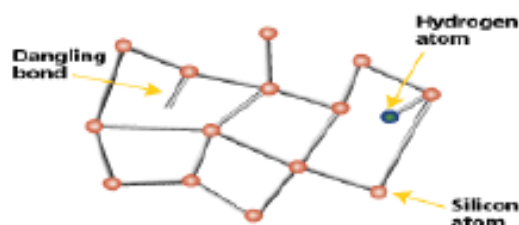
Το επόμενο βήμα στην εξέλιξη των φωτοβολταικων τεχνολογιών , πάντα με γνώμονα την μείωση του κόστους, έγινε με την ανάπτυξη των υλικών λεπτών επιστρώσεων. Η τεχνολογία αυτή , κρατώντας τις αποδόσεις των τεχνολογιών πρώτης γενιάς και μην επηρεάζοντας το χρόνο ζωής των ΦΒ στοιχείων, μείωσε το πάχος των υλικών σε μικρότερο από 10μm. Από τεχνική άποψη , το γεγονός ότι τα στρώματα είναι πολύ λεπτότερα , έχει ως αποτέλεσμα λιγότερο φωτοβολταικό υλικό να απορροφήσει την εισερχόμενη ηλιακή ενεργεία και ως εκ τούτου οι αποδόσεις να είναι μικρότερες. Όμως η ικανότητα επεξεργασίας πολλών διαφορετικών υλικών και κραμάτων επέτρεψε ικανοποιητική βελτίωση στις αποδόσεις. Τέλος το μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος των thin film φωτοβολταικων μονάδων επέτρεψε να καταλάβουν το 15-20% του μεριδίου της αγοράς στις αρχές του 2008, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.



2.2.2.1 Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός (CuInSe₂ ή CIS , με προσθήκη γάλλιου CIGS

Ο δισεληνοϊνδιούχος χαλκός χαρακτηρίζεται από εξαιρετική απορροφητικότητα στην προσπίπτουσα ακτινοβολία , αλλά η πραγματική του απόδοση κυμαίνεται στο 10-11%.Εργαστηριακά έχει επιτευχθεί η μεγαλύτερη απόδοση από όλες τις τεχνολογίες thin film (18,8%) και με την προσθήκη γάλλιου μπορεί να αυξηθεί ακόμα περισσότερο. Το μειονέκτημα όμως είναι το κόστος , αφού το ίνδιο υπάρχει σε περιορισμένες ποσότητες στην φύση.

2.2.2.2 Φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου (Amorphous ή Thin film Silicon , a-Si)

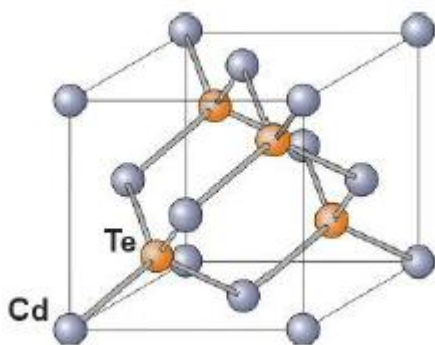


Η ονομασία αυτή προέρχεται από τον τυχαίο τρόπο με τον οποίο είναι διατεταγμένα τα άτομα του πυριτίου. Πρόκειται για ταινίες λεπτών επιστρώσεων (0,0001mm), οι οποίες παράγονται με την εναπόθεση ημιαγωγού υλικού πάνω σε ένα υπόστρωμα υποστήριξης πάχους 1-3mm όπως γυαλί , αλουμίνιο ή πλαστικό.

Έτσι, το χαμηλό κόστος του υποστρώματος όπως επίσης και η μικρή ποσότητα πυριτίου που χρησιμοποιείται κάνουν την τεχνολογία αυτή αρκετά φθηνότερη σε σχέση με τις προηγούμενες. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα όμως του άμορφου πυριτίου είναι το υψηλό επίπεδο απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας που του δίνει την δυνατότητα να έχει καλύτερη απόδοση από τα κρυσταλλικά φωτοβολήθηκαν, όταν υπάρχει διάχυτη ακτινοβολία. Ακμή η απόδοση του παραμένει ικανοποιητική σε υψηλές θερμοκρασίες.

Αντίθετα, το μεγάλο του μειονέκτημα είναι, ότι παρουσιάζει χαμηλότερες αποδόσεις σε σύγκριση με αυτές των κρυσταλλικών (6-8% στην βιομηχανία και έως 14% στο εργαστήριο), γεγονός το οποίο οφείλεται στην άμορφη κατασκευή του πυριτίου. Επίσης υπάρχουν αμφιβολίες όσον αφορά στην διάρκεια ζωής των άμορφων πλαισίων μιας και δεν υπάρχουν στοιχεία από παλιές εγκαταστάσεις, αφού η τεχνολογία είναι σχετικά καινούργια, καθώς και ότι μέσα σε μερικούς μήνες λειτουργιάς μπορεί η απόδοση να μειωθεί από 10% έως και 15%.

2.2.2.3 Τελεριούχο Κάδμιο (CdTe)



Το τελεριούχο κάδμιο έχει κοντά στο ιδανικό ενεργειακό διάκενο γεγονός το οποίο του επιτρέπει να απορροφά σχεδόν ολόκληρη την προσπίπτουσα ακτινοβολία. Η ιδιότητα αυτή του δίνει την δυνατότητα να έχει αποδόσεις πλαισίου από 6-9%, ενώ στο εργαστήριο τα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν φτάσει

έως και 16%. Από την άλλη πλευρά, το κάδμιο θεωρείται καρκινογόνο και για αυτό η χρήση του είναι περιορισμένη. Τέλος, η έλλειψη του τελλουρίου ανεβάζει το κόστος παρόλο που οι μέθοδοι παράγωγής του είναι συγκριτικά με τις προηγούμενες, φθηνότερες.

2.2.2.4 Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs)

Το αρσενικούχο γάλλιο είναι ένας ημιαγωγός με ενεργειακό διάκενο 1,43eV, το οποίο είναι ιδανικό για την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η θεωρητική απόδοση είναι η υψηλότερη και κυμαίνεται από 25% έως και 30%. Το γάλλιο είναι ένα πολύ σπάνιο στοιχείο σε αντίθεση με το Αρσένιο, το οποίο όμως είναι δηλητηριώδες. Έτσι, η τεχνολογία αυτή είναι εξαιρετικά ακριβή (περίπου πενταπλάσια από το κρυσταλλικό πυρίτιο). Όμως, παρουσιάζει εξαιρετική ανθεκτικότητα στις υψηλές θερμοκρασίες, γεγονός που του δίνει την δυνατότητα να χρησιμοποιείται σε εφαρμογές ηλιακών συγκεντρωτικών συστημάτων. Έτσι το υψηλό κόστος αντισταθμίζεται από τα υψηλή ποσά ενεργειακού παράγουν τα συστήματα αυτά. Τέλος, συναντάται συχνά και σε διαστημικές εφαρμογές.

2.2.3 Φωτοβολταϊκά τρίτης γενιάς

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία τρίτης γενιάς είναι τα φωτοβολταϊκά στοιχεία που είναι δυνητικά σε θέση να ξεπεράσουν το όριο απόδοσης Shockley-Queisser του 31-41% που ισχύει για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ενός διακενου ζώνης. Στην κατηγορία της τρίτης γενιάς περιλαμβάνονται μια σειρά από εναλλακτικές λύσεις για τα λεγόμενα "φωτοβολταϊκά στοιχεία πρώτης γενιάς" (που είναι τα φωτοβολταϊκά στοιχεία που δημιουργούνται από διόδους p-n) και τα "φωτοβολταϊκά στοιχεία δεύτερης γενιάς" (που δημιουργήθηκαν με βάση τη μείωση του κόστους των στοιχείων πρώτης γενιάς με χρήση τεχνολογιών λεπτής μεμβράνης – thin film). Τα συστήματα τρίτης γενιάς περιλαμβάνουν multi-layer («tandem») στοιχεία που κατασκευάζονται από άμορφο πυρίτιο ή γάλλιο, ενώ οι περισσότερες θεωρητικές εξελίξεις περιλαμβάνουν τη μετατροπή συχνότητας, φαινόμενα hot-carrier και άλλες εκτίναξης πολλαπλών φορέων.

Η τρίτη γένια φωτοβολταϊκών είναι πολύ διαφορετική από τις άλλες δυο. Είναι συσκευές που δεν στηρίζονται στην κλασσική αρχιτεκτονική της επαφής p-n που να διαχωρίζει τους Φώτο-παραγομενους φορείς φορτίων αλλά επιστρατεύει νέα υλικά και δομές για να μειώσει το κόστος και να αυξήσει την απόδοση. Αυτές οι νέες συσκευές περιλαμβάνουν φωτοβολταϊκά στοιχεία με χρωστικές ουσίες (dye sensitized cells), οργανικά ή πολυμερή (organic polymer solar cells) και ηλιακά στοιχεία κβαντικών τελείων (quantum dot solar cells).

Ένα οργανικό ηλιακό κύτταρο ή πλαστικό ηλιακό κύτταρο είναι ένας τύπος πολυμερών ηλιακών κυττάρων που χρησιμοποιεί οργανικά ηλεκτρονικά, ένας κλάδος της ηλεκτρονικής που ασχολείται με αγωγή οργανικά πολυμερή ή μικρά οργανικά μόρια, για την απορρόφηση του φωτός και τη μετακίνηση των φορέων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την ηλιακή ακτινοβολία με το φωτοβολταϊκό φαινόμενο.

Το πλαστικό που χρησιμοποιείται στις οργανικές ηλιακές κυψέλες έχει χαμηλό κόστος παραγωγής σε μεγάλες ποσότητες. Σε συνδυασμό με την ευελιξία των οργανικών μορίων, οι οργανικές ηλιακές κυψέλες είναι δυνητικά οικονομικά αποδοτικές για φωτοβολταϊκές εφαρμογές. Η μοριακή μηχανική (π.χ. αλλαγή του μήκους και λειτουργική ομάδα των πολυμερών) μπορεί να αλλάξει το ενεργειακό χάσμα, το οποίο επιτρέπει την χημική μεταβολή σε αυτά τα υλικά. Ο συντελεστής οπτικής απορρόφησης οργανικών μορίων είναι υψηλός, έτσι ώστε μία μεγάλη ποσότητα του φωτός μπορεί να απορροφηθεί με μια μικρή ποσότητα των υλικών. Τα κύρια μειονεκτήματα που σχετίζονται με τα οργανικά φωτοβολταϊκά κύτταρα είναι η χαμηλή απόδοση, η χαμηλή σταθερότητα και η χαμηλή αντοχή σε σύγκριση με ανόργανα φωτοβολταϊκά κύτταρα.

Η βιομηχανία των οργανικών ηλεκτρονικών και των οργανικών ηλιακών κυψελών, ιδίως, βρίσκονται στο στάδιο της μετάβασης προς την εμπορευματοποίηση. Οι εταιρείες και τα ιδρύματα R&D στον τομέα αυτό κινούνται πλέον από το στάδιο της έρευνας και ανάπτυξης στο μεταποιητικό τομέα. Οι μεγαλύτερες προκλήσεις είναι το πώς να αναβαθμίσουν από εργαστήριο σε πλήρη παραγωγή, πώς να επιλέξουν τα σωστά εργαλεία και διαδικασίες, και

πώς να χρησιμοποιούν δοκιμές και μετρήσεις για τη βελτίωση της απόδοσης και της ποιότητας. Το στάδιο από το εργαστήριο στην παραγωγή όγκου απαιτεί την προσαρμογή και τη βελτιστοποίηση του συστήματος σε πολλές πτυχές, όπως: α) τεχνικές εναπόθεσης και τις συνθήκες ξήρανσης, β) υποστρώματα, γ) συστήματα μελάνης και διαλύτη, δ) ηλεκτρόδια και ε) διάσταση των μεμονωμένων κυττάρων και πλαισίων. Κάθε παράμετρος έχει επίδραση στις επιδόσεις του τελικού προϊόντος. Σε αυτό το κεφάλαιο θα συζητήσουμε μια βάση γνώσεων σχετικά με την επίδραση των διαφόρων παραμέτρων και των συνθηκών της διαδικασίας σχετικά με την απόδοση, το κόστος και τη διάρκεια ζωής των πολυμερών ηλιακών κυψελών.

Η τρίτη γενιά είναι ασαφής ως προς τις τεχνολογίες που περιλαμβάνει, αν και γενικά τείνει να περιλαμβάνει, μεταξύ άλλων, τις μη-ημιαγώγιμες τεχνολογίες (συμπεριλαμβανομένων των πολυμερών στοιχείων και των βιομιμητικών), quantum dot, στοιχεία tandem/multi-junction, intermediate band φωτοβολταϊκά στοιχεία, στοιχεία hot-carrier, τεχνολογίες photon up conversion και down conversion, και ηλιακές θερμικές τεχνολογίες, όπως τα thermo photonics, η οποία είναι μια τεχνολογία που προσδιορίζεται από τον Green ως τρίτης γενιάς.

Στα φωτοβολταϊκά στοιχεία τρίτης γενιάς περιλαμβάνονται επίσης τα ακόλουθα:

Νανοδομές από πυρίτιο, τροποποίηση φάσματος πρόσπτωσης (συγκέντρωση), για να φτάσει 300-500 ήλιους και βελτίωση της απόδοσης του 32% (που έχει ήδη επιτευχθεί σε στοιχεία Sol3g) στο +50%. Χρήση περίσσειας θερμικής παραγωγής (που προκαλείται από το υπεριώδες φως) για να ενισχύσει τις τάσεις ή την συλλογή φορέων. Η χρήση του υπέρυθρου φάσματος για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας το βράδυ.

Υπολογίζεται ότι οι νέες τεχνολογίες θα μπορούσαν να ανταγωνιστούν όχι μόνο τα παραδοσιακά φωτοβολταϊκά στοιχεία, αλλά τα ορυκτά καύσιμα και την πυρηνική ενέργεια. Αυτό θα φέρει επανάσταση στην αγορά ενέργειας, όπως έχει ειπωθεί, για να συμβεί αυτό, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία τρίτης γενιάς θα πρέπει να

είναι πιο αποδοτικά και λιγότερο ακριβά. Υπάρχουν επίσης και άλλα θέματα, σχετικά με την αντοχή (ώστε τα φωτοβολταϊκά στοιχεία να είναι σε θέση να αξιοποιήσουν πλήρως τη διάρκεια της ζωής τους σε δυσμενείς εξωτερικές συνθήκες), την ασφάλεια (μερικές τεχνικές κατασκευής σχετιζόμενες με επικίνδυνες χημικές ουσίες) και αποθήκευσης ενέργειας (η ηλιακή ενέργεια είναι διαθέσιμη μόνο σε περιορισμένο χρόνο, και σχεδόν μη διαθέσιμη όλο το χειμώνα σε μη-τροπικά κλίματα).

Η δυνατότητα να συντονίσουμε τις χημικές και φυσικές ιδιότητες των nanosized υλικών έχει ισχυρό αντίκτυπο σε μια ποικιλία τεχνολογιών, συμπεριλαμβανομένων των φωτοβολταϊκών. Ένα από τα εξέχοντα ερευνητικά πεδία των νανοϋλικών για φωτοβολταϊκά περιλαμβάνει την φασματική μετατροπή. Τα συμβατικά φωτοβολταϊκά στοιχεία ημιαγωγών μονής ένωσης μετατρέπουν αποδοτικά μόνο τα φωτόνια της ενέργειας που βρίσκονται κοντά στο διάκενο ζώνης ημιαγωγών (E_g) ως αποτέλεσμα της αναντιστοιχίας μεταξύ της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και των φασματικών ιδιοτήτων απορρόφησης του υλικού (Green 1982 , Luque και Hegedus 2003). Φωτόνια με ενέργεια E_{ph} μικρότερη από το bandgap ζωνών δεν απορροφώνται και η ενέργειά τους δεν χρησιμοποιείται για την παραγωγή φορέων. Τα φωτόνια με ενέργεια E_{ph} μεγαλύτερη από το bandgap απορροφώνται, αλλά η πλεονάζουσα ενέργεια $E_{ph} - E_g$ χάνεται λόγω θερμοποίησης των παραγόμενων ηλεκτρονίων. Αυτές οι θεμελιώδεις φασματικές απώλειες σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο πυριτίου μονής ένωσης μπορεί να είναι τόσο μεγάλη όσο 50% (Wolf 1971), ενώ το λεπτομερές όριο ισορροπίας απόδοσης μετατροπής για ένα τέτοιο στοιχείο προσδιορίστηκε να είναι 31 % (Shockley και Queisser 1961).

2.3 Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά του Φ/Β στοιχείου¹⁵¹⁶¹⁷

Η τεχνική περιγραφή του πλαισίου περιλαμβάνει χρήσιμες πληροφορίες για τον σχεδιαστή και τον εγκαταστάτη του Φ/Β συστήματος. Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά που είναι διαθέσιμα στις περισσότερες περιπτώσεις είναι τα εξής:

P_{max} η μέγιστη ισχύς, η πραγματική τιμή της οποίας μπορεί να έχει απόκλιση που δίνεται σε ποσοστό ($\pm 3\%$ ή $\pm 5\%$).

I_{mpp} το ρεύμα στο σημείο μέγιστης ισχύος,

I_{sc} το ρεύμα βραχυκύκλωσης,

V_{mpp} η τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος,

V_{oc} η τάση στο ανοιχτοκύκλωμα,

α_{scT} , θερμοκρασιακός συντελεστής που περιγράφει την μεταβολή του I_{sc} σε σχέση με τη θερμοκρασία του πλαισίου,

β_{ocT} , θερμοκρασιακός συντελεστής που περιγράφει την μεταβολή του V_{oc} σε σχέση με τη θερμοκρασία του πλαισίου,

T_p , θερμοκρασιακός συντελεστής που περιγράφει την μεταβολή της ισχύος σε σχέση με τη θερμοκρασία του πλαισίου.

$V_{max,system}$ η μέγιστη τάση συστήματος,

$\eta\%$ η απόδοση του Φ/Β πλαισίου που υπολογίζεται από το λόγο της ισχύος στην ακτινοβολία αναφοράς (1000 W/m^2) προς την συνολική ακτινοβολία στην επιφάνεια του πλαισίου ($1000 \text{ W/m}^2 * \text{Εμβαδόν}$).

Οι παραπάνω τιμές ρεύματος, τάσης και ισχύος δίνονται για τις κανονικές συνθήκες δοκιμής (STC) που είναι:

AM1.5, $G=1\text{kW/m}^2$, $T_c=25 \text{ }^\circ\text{C}$ (θερμοκρασία πλαισίου)

15 Pulfrey, L.D. (1978). Photovoltaic Power Generation. New York: Van Nostrand Reinhold Co.

16 Rivers P. N. (2007). Leading edge research in solar energy. Nova Science Publishers

17 Halls J.J.M., Friend R.H. (2001). Archer M.D., Hill R.D., ed. Clean electricity from photovoltaics. London: Imperial College Press. pp. 377–445

Με τους θερμοκρασιακούς συντελεστές που είναι διαθέσιμοι μπορούν να υπολογιστούν οι τιμές αυτών των μεγεθών σε άλλες συνθήκες θερμοκρασίας. Μερικές περιγραφές δίνουν τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και στις κανονικές συνθήκες λειτουργίας (NOC) που διαφοροποιούνται από τις STC ως εξής:

$G=800\text{W/m}^2$, $T_a=20\text{ }^\circ\text{C}$ (θερμοκρασία περιβάλλοντος), Ταχύτητα ανέμου = 1m/s

Συνήθως όμως δίνεται μόνο η θερμοκρασία πλαισίου στις NOC. Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του πλαισίου είναι χρήσιμα για την διαστασιολόγηση του συστήματος όπου θα πρέπει να επιλεγούν ο αντιστροφέας και τα καλώδια, καθώς και για την επιλογή των μέσων προστασίας.

Η μέγιστη τάση υπολογίζεται ως το άθροισμα της τάσης ανοικτού κυκλώματος των πλαισίων που είναι συνδεδεμένα σε σειρά, ανηγμένο στην χαμηλότερη αναμενόμενη θερμοκρασία πλαισίου. Η ελάχιστη τάση λόγω θερμοκρασίας υπολογίζεται ανάγοντας το παραπάνω άθροισμα στη μέγιστη αναμενόμενη θερμοκρασία πλαισίου. Το μέγιστο ρεύμα της Φ/Β πηγής προκύπτει από το άθροισμα των ρευμάτων βραχυκύκλωσης κάθε στοιχειοσειράς πλαισίων, προσαρμοσμένο με κάποιον συντελεστή ώστε να ενσωματώνεται και η επίδραση της θερμοκρασίας.

Οι I-V και P-V χαρακτηριστικές για διαφορετικές τιμές της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας του Φ/Β πλαισίου, περιλαμβάνονται πολλές φορές στην τεχνική περιγραφή, δίνοντας την πληροφορία για την ηλεκτρική συμπεριφορά της Φ/Β πηγής σε διαφορετικές συνθήκες. Οι μεταβολές των καμπυλών αυτών ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες βοηθούν στην κατανόηση της λειτουργίας του Φ/Β πλαισίου.

Οι μεταβολές στην ηλιακή ακτινοβολία επηρεάζουν σημαντικότερα το ρεύμα

εξόδου της Φ/Β πηγής, ενώ μεταβάλλοντας την τιμή της θερμοκρασίας του πλαισίου προκύπτουν κυρίως διαφοροποιήσεις στην τάση.

Πολλοί κατασκευαστές αντιστροφών διαθέτουν δωρεάν στην ιστοσελίδα τους λογισμικά για τη διαστασιολόγηση του Φ/Β συστήματος. Ο σχεδιαστής μπορεί έτσι να συνδυάσει με τον βέλτιστο τρόπο τα Φ/Β πλαίσια με τους κατάλληλους αντιστροφείς και να υπολογίσει την αναμενόμενη παραγωγή, ανάλογα με την τοποθεσία εγκατάστασης της συστοιχίας. Τα λογισμικά αυτά είναι εύχρηστα και απλά, ενώ συνήθως περιλαμβάνουν αρκετές παραμέτρους που επηρεάζουν την Φ/Β παραγωγή.

2.4 Εφαρμογές Φ/Β τεχνολογίας σε μικροσυσκευές¹⁸¹⁹²⁰

Μερικοί βασικοί γενικοί κανόνες για τα Φ/Β στοιχεία λεπτού υμενίου είναι: έχουν καλύτερη απόδοση θερμοκρασίας από τις κυψέλες κρυσταλλικού πυριτίου παρουσιάζουν μια μικρή μείωση της απόδοσης σε χαμηλότερα επίπεδα ακτινοβολίας είναι πιο κατάλληλα για μη ιδανικές συνθήκες, δηλαδή πολύ μικρές κλίσεις και ανατολικό ή δυτικό προσανατολισμό μπορούν να συμμετέχουν σε εύκαμπτες δομές πλαισίων

Τα νέα υλικά με τα οποία η ηλιακή ενέργεια μπορεί να αξιοποιηθεί είναι ένα από τα πιο συναρπαστικά στοιχεία της νέας τεχνολογίας. Τα εύκαμπτα και ελαφριά φυσικά χαρακτηριστικά των διαφόρων τύπων φωτοβολταϊκών στοιχείων τρίτης γενιάς καθιστούν δυνατές πολλές νέες εφαρμογές.

Υπάρχει η πιθανότητα τα φωτοβολταϊκά στοιχεία να μπορέσουν να ενσωματωθούν σε είδη ένδυσης που θα μας επιτρέψει να έχουμε προσωπική

18 McGehee D.G., Topinka M.A. (2006). "Solar cells: Pictures from the blended zone". Nature Materials 5 (9): 675–676

19 F. C. Krebs, R. Søndergaard, M. Jørgensen, 2011 Printed metal back electrodes for R2R fabricated polymer solar cells studied using the LBIC technique. Solar Energy Materials and Solar Cells, 95 5 13481353

20 Περιοδικό Τεχνική Εκλογή, Pressline Αθήνα 2010

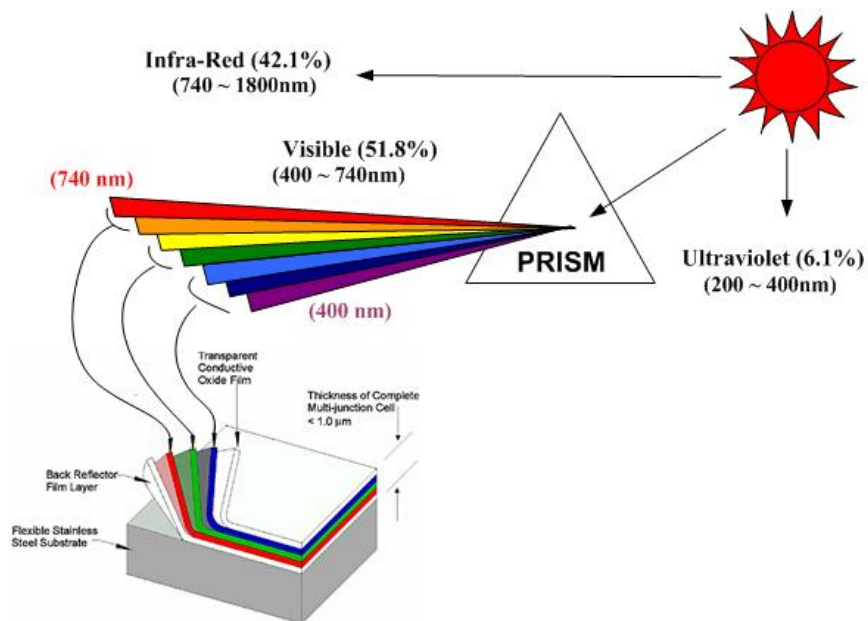
ασύρματη ενέργεια χωρίς μπαταρίες.

Μια άλλη εύλογη εφαρμογή θα μπορούσε να είναι ένα είδος βαφής αυτοκινήτων που είναι αναμεμειγμένη με πολυμερή φωτοβολταϊκά στοιχεία. Το υλικό αυτό θα μπορούσε να βοηθήσει στη διατήρηση χαμηλού βάρους ενός ηλιακού αυτοκινήτου, ενώ θα εξακολουθεί να παρέχει άφθονη ενέργεια για την τροφοδοσία του συστήματος.

Τα Φ/Β συστήματα για ενσωμάτωση σε κτήρια (Building Integrated PhotoVoltaics - BIPV) δεν είναι μια ιδιαίτερα διαδεδομένη εφαρμογή. Παρόλα αυτά κερδίζουν έδαφος μέρα με τη μέρα καθώς δίνουν τη δυνατότητα να εκμεταλλευτούμε ενεργειακά την επιφάνεια των δομικών στοιχείων του κτηρίου.



Τα BIPV πρώτης γενιάς αποτελούνται από συμπαγή ΦΒ πάνελ που στηρίζονται σε μεταλλικές βάσεις. Η δεύτερη γενιά περιλαμβάνει συστήματα που αντικαθιστούν στοιχεία του κτηρίου αναλαμβάνοντας μέρος των λειτουργιών των δομικών στοιχείων. Στη συνέχεια, η διαθεσιμότητα στην αγορά των εύκαμπτων ΦΒ στοιχείων σήμανε την δημιουργία των Φ/Β συστημάτων BIPV τρίτης γενιάς. Σε αυτά τα συστήματα, οι Φ/Β κυψέλες ενσωματώνονται στα στοιχεία του κτηρίου.



Το μεγάλο πλεονέκτημα των ενσωματωμένων σε κτήρια Φ/Β συστημάτων είναι η βελτιωμένη εμφάνιση του συστήματος καθώς και η ευελιξία τους αφού τοποθετούνται λόγω της ιδιαίτερης δομής τους σε σημεία που τα τυπικά Φ/Β πλαίσια θα ήταν αδύνατο να ενσωματωθούν.

UNISOLAR® photovoltaic laminates

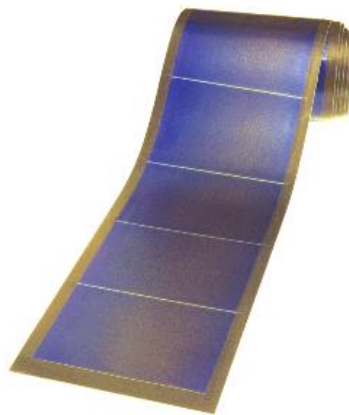


Photo courtesy of United Solar Ovonic, LLC

Το κυριότερο μειονέκτημα είναι το κόστος τους που αν συγκριθεί με μια τυπική ΦΒ εγκατάσταση σε υπάρχουσα στέγη μπορεί να είναι αυξημένο. Από την άλλη πλευρά, αν δούμε το BIPV σαν δομικό στοιχείο τότε είναι το μόνο που

μπορούμε να αποσβέσουμε σε βάθος χρόνου στο κτίριο. Ο αερισμός των πλαισίων για τη διατήρηση της θερμοκρασίας σε χαμηλά επίπεδα αποτελεί παράγοντα που χρίζει ιδιαίτερης προσοχής. Ο λόγος είναι ότι η απόδοση μειώνεται σχεδόν γραμμικά με την αύξηση της θερμοκρασίας του ΦΒ στοιχείου. Βέβαια, τα ΦΒ στοιχεία από άμορφο πυρίτιο παρουσιάζουν μειωμένους θερμοκρασιακούς συντελεστές απωλειών σε σχέση με τα κρυσταλλικά. Παρ' όλα αυτά θα πρέπει να ληφθούν μέτρα για τον κατάλληλο αερισμό των ΦΒ μεμβρανών.

Οι εύκαμπτες μεμβράνες ΦΒ με λειτουργία στεγανοποίησης μπορούν να εγκατασταθούν σε επιφάνειες στεγών που δεν προβλέπονται για διαρκή παραμονή ανθρώπων, χρήση λόγω κυκλοφορίας ή φυτοκάλυψης και δεν επιφορτίζονται π.χ. από χαλίκια. Οι πολυλειτουργικές μεμβράνες ΦΒ τοποθετούνται συνήθως σε στέγες με κλίση μεγαλύτερη των 3° , ώστε να επιτρέπεται η εκκένωση νερού. Στέγες με κλίση 30° και νότιο προσανατολισμό αποτελούν τη βέλτιστη θέση τοποθέτηση της ΦΒ μεμβράνης, προκειμένου για μέγιστη απόδοση για μέγιστη απόδοση της εγκατάστασης. Αυτές οι συνθήκες δεν αποτελούν προϋπόθεση, ενώ στα πλαίσια της πολυλειτουργικότητας και ευκαμψίας της συγκεκριμένου τύπου ΦΒ γεννήτριας η τοποθέτηση σε μη τυπικά σημεία αποτελεί πλεονέκτημα.

Η εγκατάσταση των ΦΒ μεμβρανών πραγματοποιείται όπως αυτή των συνήθων συνθετικών μεμβρανών στεγανοποίησης. Οι ηλιακές μεμβράνες τοποθετούνται χαλαρά και στερεώνονται μηχανικά. Πρέπει να αποφεύγονται σκιάσεις των ΦΒ πάνελ από ανοιγόμενα στοιχεία και άλλα εμπόδια. Τα καλώδια σύνδεσης των ΦΒ πάνελ τοποθετούνται καλυμμένα κάτω από τη μόνωση της στέγης και εισάγονται από κοινού μέσω της βάσης και των λοιπών λειτουργικών στρωμάτων έως κάτω από τη στέγη. Σε περίπτωση που οι κατανεμημένες διελεύσεις καλωδίων έχουν υψηλό κόστος κάτω από τη βάση μπορούν να τοποθετηθούν κιβώτια σύνδεσης.

Για την σύνδεση με το δίκτυο και την απόδοση σε αυτό της παραγόμενης ισχύος, οι ηλιακές μεμβράνες συνδέονται σε μετατροπέα DC/AC, όπως σε όλα τα ΦΒ συστήματα. Ένα πλεονέκτημα της χρήσης ΦΒ μεμβρανών είναι ότι η εγκατάστασή τους δεν απαιτεί πρόσθετη αντικεραυνική προστασία. Εάν όμως

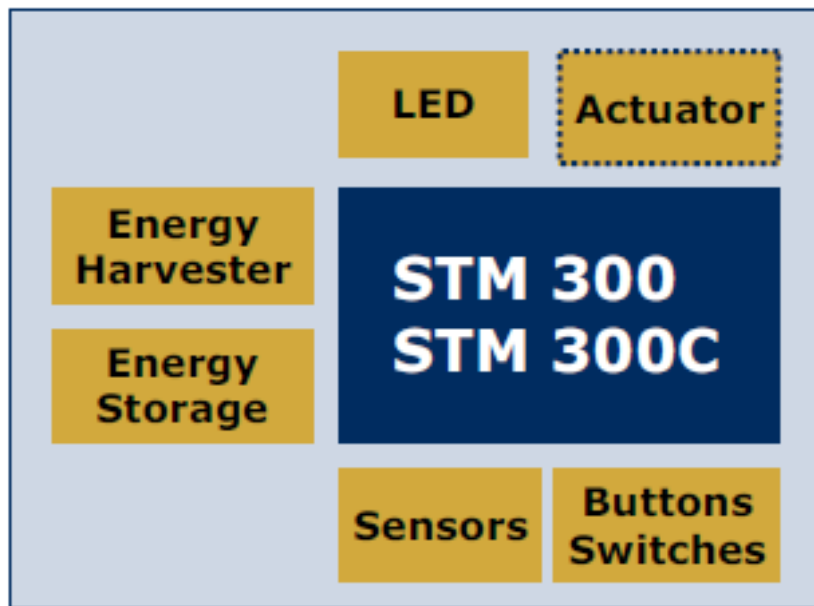
υφίσταται σύστημα αντικεραυνικής προστασίας στο κτήριο, θα πρέπει να διασφαλιστεί ότι μετά την ενσωμάτωση των ΦΒ μεμβρανών τηρούνται οι απαραίτητες προϋποθέσεις (αποστάσεις διαχωρισμού των αγωγών συλλογής και καθόδου από τα ΦΒ στοιχεία).

Ως παράδειγμα πολυλειτουργικής ΦΒ μεμβράνης παρουσιάζεται η συνθετική μεμβράνη με ΦΒ πάνελ για στεγανοποίηση στεγών της Evalon Solar. Τα ΦΒ πάνελ αποτελούνται από εύκαμπτες ΦΒ κυψελίδες της εταιρείας UNISOLAR, είναι επενδεδυμένα με διαφανή πολυμερή και περιλαμβάνουν διόδους παράκαμψης για την αποφυγή φαινομένων hot spot. Από τα τρία συστήματα στρώσεων πυριτίου χρησιμοποιούνται κάθε φορά διαφορετικά μήκη κύματος του ηλιακού φωτός. Το υλικό των μεμβρανών Evalon είναι ένα κράμα υψηλών πολυμερών από συμπολυμερές αιθυλένιο και οξικό βινύλιο και πολυβινυλοχλωρίδιο, ένα θερμοπλαστικό υλικό κατά παραγγελία. Τα συστατικά αυτά ανήκουν στην κατηγορία των στερεών χαρίζοντας σταθερές ιδιότητες και μέγιστη διάρκεια ζωής. Η μονωτική στρώση των μεμβρανών είναι ομοιογενής και επενδυμένη στην κάτω πλευρά με φλιν πολυεστέρα. Σκελετοί και βαριές κατασκευές δεν χρειάζονται, όπως στα συνήθη συμπαγή ΦΒ πάνελ.

2.5 Μάστευση ηλιακής ενέργειας για την τροφοδότηση ασύρματων αισθητήρων²¹

Η μονάδα RF πομπού STM 300 εξοικονόμησης ισχύος της εταιρείας EnOcean επιτρέπει την υλοποίηση ασύρματων και χωρίς συντήρηση αισθητήρων και ενεργοποιητών, όπως αισθητήρες κίνησης ή βαλβίδες ενεργοποιητών για τον έλεγχο της θέρμανσης. Υπάρχουν και άλλες αντίστοιχες συσκευές, οι οποίες παράγονται από άλλους κατασκευαστές, αλλά αναφερόμαστε στην εταιρεία EnOcean ως παράδειγμα.

²¹ <http://www.enocean.com/en/solar-energy-harvesting/>



Η τροφοδοσία παρέχεται από μία εξωτερική συσκευή μάστευσης ενέργειας, π.χ. ένα μικρό ηλιακό κύτταρο ή μια θερμική μηχανή. Μια συσκευή αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να συνδεθεί εξωτερικά για να γεφυρώσει τις περιόδους χωρίς προμήθεια ηλιακής ενέργειας.

Technical Data

Antenna	External whip or 50 Ω antenna mountable
Frequency	STM 300: 868.300MHz (ASK) ¹⁾ STM 300C: 315.000MHz (ASK) ¹⁾ STM 300U: 902.875MHz (FSK)
Data rate	125 kbps
Receiver Sensitivity (at 25°C) only via API	typ. -96 dBm ²⁾ (868.300 MHz) typ. -98 dBm ²⁾ (315.000 MHz) typ. -98 dBm ²⁾ (902.875 MHz)
Conducted Output Power @50Ω min. / typ. / max.	STM 300: 3.0 dBm / 5.7 dBm / 7.0 dBm STM 300C: 5.5 dBm / 7.5 dBm / 9.5 dBm <i>Preliminary STM 300U: 5.5 dBm / 7.5 dBm / 9.5dBm</i>
Power Supply	2.1 V-4.5 V, 2.6 V needed for startup
Current Consumption	Deep Sleep Mode: 0.2 μ A Rx mode (API only): 33 mA / Tx mode: 24 mA
Dimensions of PCB	22x19x3 mm
Input Channels	4x digital input, 2x WAKE input , 3x analog input Resolution: 3x 8 bit or 1x 10 bit, 1x 8 bit, 1x 6 bit
Operating temperature	-25 up to +85°C
Radio Regulations	R&TTE EN 300 220 (STM 300) FCC CFR-47 Part 15 (STM 300C / STM 300U)

1) according to ISO/IEC 14543-3-10

2) @ 0.1% telegram error rate (based on transmitted sub-telegrams)

Ένας περιοριστής τάσης αποφεύγει επιζήμιες καταστάσεις της μονάδας όταν

η τάση από το ηλιακό κύτταρο παίρνει πάρα πολύ υψηλές τιμές. Η μονάδα αυτή παρέχει τη δυνατότητα ρύθμισης wake up από από το χρήστη (κάθε 1, 10 ή 100 sec.). Μετά το wake up, θα μεταδίδεται σε ραδιοφωνική συχνότητα ένα τηλεγράφημα (δεδομένα εισόδου, μοναδικό αναγνωριστικό αισθητήρα 32 bit, checksum) σε περίπτωση αλλαγής οποιασδήποτε ψηφιακής τιμής εισόδου σε σχέση με την τελευταία αποστολή ή σε περίπτωση σημαντικής αλλαγής των μετρούμενων αναλογικών τιμών (μπορεί να επιλεγεί διαφορετική ευαισθησία). Σε περίπτωση μη σχετικής αλλαγής εισόδου, αποστέλλεται ένα περιττό σήμα αναμετάδοσης μετά από έναν αριθμό wake-ups για να ανακοινώσει τις τρέχουσες τιμές. Επιπλέον, το wake up μπορεί να ενεργοποιηθεί εξωτερικά.



Το Εργαλείο Ανάπτυξης Texas Instruments eZ430-RF2500-SEH Solar Energy βοηθά τους σχεδιαστές να δημιουργήσουν ένα διαρκώς τροφοδοτούμενο ασύρματο δίκτυο αισθητήρων που βασίζεται στον μικροελεγκτή MSP430™ (MCU) χαμηλής ισχύος. Το κιτ eZ430-RF2500-SEH περιλαμβάνει μια μονάδα με υψηλής απόδοσης ηλιακά πάνελ που έχουν βελτιστοποιηθεί για λειτουργία σε εσωτερικούς χώρους κάτω από φωτισμό φθορισμού χαμηλής έντασης που παρέχουν αρκετή ενέργεια για να τροφοδοτήσουν έναν ασύρματο αισθητήρα χωρίς επιπλέον μπαταρίες. Αυτό το κιτ έχει επίσης εισόδους για εξωτερικές μηχανές ενέργειας και αποθηκεύει επιπλέον ενέργεια σε ένα ζευγάρι thin-film επαναφορτιζόμενων EnerChips. Η eZ430-RF2500 χρησιμοποιείται για να εκτελέσει την εφαρμογή μάστευσης ενέργειας και είναι ένα πλήρες ασύρματο εργαλείο ανάπτυξης MSP430 που βασίζεται σε USB. Το κιτ περιλαμβάνει ένα

περιβάλλον εντοπισμού σφαλμάτων που επιτρέπει τον εντοπισμό σε πραγματικό χρόνο, στο σύστημα εντοπισμού σφαλμάτων και προγραμματισμού για την MSP430 και γίνεται επίσης διασύνδεση για τη μεταφορά δεδομένων σε έναν υπολογιστή από ένα ασύρματο σύστημα.

Κεφάλαιο 3. Πιεζοηλεκτρικές συσκευές για την μάζτευση ενέργειας

Ο πολλαπλασιασμός των ελαφρών, φορητών ηλεκτρονικών συσκευών έχει θέσει το θέμα της εξασφάλισης της αξιόπιστης, μακροπρόθεσμης τροφοδοσίας για τα συστήματα αυτά. Επί του παρόντος, αυτή η ανησυχία έχει ξεπεραστεί με τη χρήση ηλεκτρικών μπαταριών, η οποία δημιουργεί προβλήματα συντήρησης, καθώς και περιβαλλοντικά ζητήματα, λόγω της σύνθετης διαδικασίας ανακύκλωσής τους.

Ως εκ τούτου, η χρήση των προϊόντων μάζτευσης ενέργειας που μετατρέπουν τις πηγές του περιβάλλοντος σε χρήσιμη ηλεκτρική ενέργεια, παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον κατά τα τελευταία χρόνια, προκειμένου να ξεπεραστούν τα μειονεκτήματα των πρωτογενών συστοιχιών μπαταριών. Η έρευνα σχετικά με την ενεργειακή μάζτευση έχει κυρίως επικεντρωθεί σε υψηλής πυκνότητας πηγές ενέργειας, όπως δονήσεις, ηλιακή ή θερμική. Τέτοιες πηγές, ωστόσο, δεν είναι πάντοτε διαθέσιμες, ή οι διαστάσεις του συστήματος μπορεί να περιορίσουν τη συνολική ισχύ εξόδου του συλλέκτη. Ως εκ τούτου, εναλλακτικές λύσεις πρέπει να βρεθούν όταν οι πηγές ενέργειας δεν είναι διαθέσιμες ή είναι ανεπαρκείς για ρεαλιστικές εφαρμογές.

Σε τέτοιες περιπτώσεις, οι πηγές χαμηλής ενεργειακής πυκνότητας, όπως ο άνεμος και η βροχή μπορεί να υποκαταστήσουν αποτελεσματικά την κλασική μάζτευση ενέργειας. Επιπλέον, παρόλο που οι δυνατότητες μάζτευσης σε ένα δεδομένο όγκο είναι περιορισμένες, αυτές οι τελευταίες πηγές είναι εν γένει διαθέσιμες σε μεγάλη έκταση. Ένας από τους περιορισμούς τέτοιων συστημάτων έγκειται στο γεγονός ότι θα πρέπει να λειτουργούν σχεδόν σε οποιοδήποτε περιβάλλον (δηλαδή, χαμηλή ταχύτητα του ανέμου ή πολύ ασθενής βροχή).

Σύμφωνα με αυτούς τους περιορισμούς, τα πιεζοηλεκτρικά υλικά είναι καλοί υποψήφιοι για τη μετατροπή της ενέργειας λόγω της υψηλής ενεργειακής τους πυκνότητας και το υψηλό δυναμικό ολοκλήρωσης.

3.1 Μικρής κλίμακας μάστευση ενέργειας από τον άνεμο ²²²³²⁴

Ο άνεμος είναι ένα υποπροϊόν της ηλιακής ενέργειας. Η επιφάνεια της γης θερμαίνεται και κρυσταλλώνει άνισα, δημιουργώντας ατμοσφαιρικές ζώνες πίεσης που κάνουν τη ροή του αέρα να κινείται από περιοχές υψηλής προς περιοχές χαμηλής πίεσης. Περίπου το 2% της ενέργειας του ήλιου που φτάνει στη γη μετατρέπεται σε αιολική ενέργεια.

Το γεγονός ότι η ταχύτητα του ανέμου δεν είναι σταθερή ούτε πάντα ικανή να καλύψει την απαίτηση του φορτίου, αποτελεί μια πρόκληση για την χρήση της αιολικής ενέργειας. Η αιολική ενέργεια δεν μπορεί να αποθηκευτεί χωρίς επιπλέον εξοπλισμό, και οι ανεμογεννήτριες έχουν συγκεκριμένο παράθυρο ταχυτήτων ανέμου στο οποίο μπορούν να λειτουργήσουν. Η επιφάνεια που απαιτείται για την εγκατάσταση και σωστή λειτουργία ενός σταθμού Α/Γ είναι αρκετά μεγάλη. Οχλήσεις μπορούν να θεωρηθούν ο θόρυβος και η επίδραση στην αισθητική ή το οπτικό περιβάλλον της περιοχής.

Η επιφάνεια που απαιτείται για την εγκατάσταση και σωστή λειτουργία ενός σταθμού Α/Γ είναι αρκετά μεγάλη. Ενοχλήσεις μπορούν να θεωρηθούν ο θόρυβος και η επίδραση στην αισθητική ή το οπτικό περιβάλλον της περιοχής.

Η ανεμογεννήτρια εκμεταλλεύεται την κινητική ενέργεια του ανέμου για να παράγει ηλεκτρισμό. Στις μέρες μας ο πιο γνωστός τύπος ανεμοκινητήρα, που έχει εφαρμοσθεί ευρύτατα στην πράξη είναι ο δρομέας οριζοντίου άξονα.

Οι ανεμογεννήτριες τοποθετούνται σε πύργο στήριξης ώστε να

22 Γ. Α. Γληνού, Δ. Α. Παπαχρήστου και Α. Μ. Παπαδόπουλος, 2005, Η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα: αναδρομή, παρούσα κατάσταση και προοπτικές,

23 Σοφινίδης Α., 2006, Εφαρμογές Α.Π.Ε

24 Goofrey Boyle «Renewable Energy: Power for a sustainable future»

μεγιστοποιείται η παραγωγή τους λόγω της μη στρωτής ροής ανέμου κοντά στο έδαφος. Σε μερικές περιοχές κάθε 10 μέτρα ύψος, η ταχύτητα ανέμου μπορεί να αυξάνεται κατά 20% και η παραγωγή ενέργειας κατά 34%. Ο βαθμός απόδοσης των ανεμογεννητριών ονομάζεται και συντελεστής ισχύος και δίνεται από τον παρακάτω τύπο.

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^3 \cdot A}$$

Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες, οριζοντίου και κατακόρυφου άξονα. Στην πρώτη κατηγορία, ο δρομέας είναι τύπου έλικας και είναι συνεχώς παράλληλος με την κατεύθυνση του ανέμου και του εδάφους. Ο δρομέας της δεύτερης κατηγορίας παραμένει σταθερός και είναι κάθετος προς την επιφάνεια του εδάφους

Η συγκομιδή αιολικής ενέργειας υπήρξε μία από τις πιο μελετημένες μεθόδους για μεγάλης κλίμακας μάζευση ενέργειας. Η βασική ιδέα αυτής της προσέγγισης συνίσταται στη μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε μηχανική ενέργεια μέσω λεπίδων και εργαλείων. Οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα είναι αποτελεσματικές για μικρής κλίμακας φορητές εφαρμογές, καθώς είναι λιγότερο ευαίσθητες στο *misalignment* και μπορούν να λειτουργήσουν σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου με επαρκή ροπή.

Γενικώς, η ισχύς (P_{wind}) που μπορεί να συγκομισθεί από μια ανεμογεννήτρια μπορεί να προέρχεται από την κινητική ενέργεια E μιας μάζας m του αέρα:

$$E = \frac{1}{2}mv^2,$$

Αν θεωρήσουμε το εμβαδόν της επιφάνειας της ανεμογεννήτριας A , η μάζα αέρα που διέρχεται από αυτή, δίνεται από τον τύπο.

$$\dot{m} = \rho A v,$$

Τέλος, η ισχύς που αποδίδεται από τον αέρα που ρέει διαμέσου των πτερυγίων ισούται με:

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

Ωστόσο, καθώς πολλοί μηχανισμοί μετατροπής παρεμβαίνουν στη ροή της ενέργειας, αυτή η ισχύς είναι το υψηλότερο όριο της πρακτικά διαθέσιμης τιμής. Οι βασικοί περιορισμοί προκύπτουν κατά το μηχανικό στάδιο (συμπεριλαμβανομένης της απόδοσης μετατροπής αιολικής-προς-μηχανική, η οποία θεωρητικά περιορίζεται στο 0,59 από το όριο Betz), καθώς και τις ηλεκτρικές διασυνδέσεις. Για μια συνολική απόδοση μετατροπής 5%, ταχύτητα ανέμου 3 ms⁻¹, και μία επιφάνεια 10 × 10 cm², η ισχύς που μπορεί να αναμένεται από μια μικρής κλίμακας ανεμογεννήτρια θα είναι περίπου της τάξης των 8 mW.

Το πρώτο βήμα για την κατασκευή της ανεμογεννήτριας αποτελείται από την μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε μηχανική. Το κύριο συστατικό αυτού του σταδίου είναι ο σχεδιασμός της λεπίδας. Στην περίπτωση της μεσαίας έως μεγάλης κλίμακας ανεμογεννητριών, οι λεπίδες έχουν συνήθως ένα σχήμα πτέρυγας, αλλά μια τέτοια διαμόρφωση δεν είναι βέλτιστη σχετικά με τις φορητές ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα. Μεταξύ των διαφόρων σχημάτων του σχεδιασμού λεπίδας, τα δύο πιο ενδιαφέροντα για συσκευές μικρής κλίμακας παραμένουν η Darrieus (lift-based) και η Savonius (drag-based). Το τελευταίο, αν και διαθέτει μια χαμηλότερη απόδοση, προσφέρει περισσότερη ροπή, η οποία οδηγεί σε μία χαμηλότερη ταχύτητα ανέμου εκκίνησης.

Μια άλλη κοινή μέθοδος για τον έλεγχο της αναλογίας μεταξύ της ταχύτητας περιστροφής της ατράκτου και της προκύπτουσας ροπής στηρίζεται στη χρήση ενός κιβωτίου ταχυτήτων. Παρ' όλα αυτά, η χρήση των πρόσθετων εξαρτημάτων

μπορεί να μειώσει σημαντικά την συνολική απόδοση της συσκευής.

Αφού η αιολική ενέργεια έχει μετατραπεί σε κυκλική μηχανική ενέργεια, το επόμενο βήμα συνίσταται στον μετασχηματισμό σε ηλεκτρική ενέργεια. Δύο ευρέως χρησιμοποιούμενες μέθοδοι μετατροπής σε ηλεκτρική ενέργεια συζητούνται κατωτέρω, αν και υπάρχουν επίσης και άλλες προσεγγίσεις (π.χ., ηλεκτροστατικές, ηλεκτρο ή magnetoelectric).

Ο κλασσικός τρόπος για τη μετατροπή της περιστροφικής κίνησης σε ηλεκτρική ενέργεια αποτελείται από τη χρήση μαγνητικών κινητήρων. Αυτός ο μηχανισμός μετατροπής βασίζεται στην μετατροπή μέσω της χρήσης μαγνητικής ζεύξης.

Στο πλαίσιο συσκευών μικρής κλίμακας συσκευές, οι κινητήρες με μόνιμους μαγνήτες προσφέρουν την καλύτερη επιλογή. Οι ηλεκτροκινητήρες μπορεί να προσφέρουν AC ή DC τάσεις εξόδου, η τελευταία είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για την τροφοδότηση σε ηλεκτρονικά είδη ευρείας κατανάλωσης.

Ωστόσο, η χρήση ενός μαγνητικού κινητήρα για τη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας που παράγεται από τον άνεμο σε ηλεκτρική ενέργεια πάσχει από αρκετά μειονεκτήματα. Πρώτον, οι ηλεκτρομαγνητικοί κινητήρες συνήθως απαιτούν μια μη αμελητέα ροπή εκκίνησης και κάποια RPM για να μεγιστοποιήσουν την αποτελεσματικότητά τους. Ως εκ τούτου, η χρήση ενός προσαρμοστικού κιβωτίου ταχυτήτων απαιτείται, το οποίο όχι μόνο αυξάνει το μέγεθος της συσκευής, αλλά επίσης μειώνει τη συνολική αποτελεσματικότητα του συστήματος. Επιπροσθέτως, μπορεί να αυξήσει την ελάχιστη απαιτούμενη ροπή για την εκκίνηση. Η τάση ανοικτού κυκλώματος της γεννήτριας με n ζεύγη μόνιμων μαγνητών και περιελίξεις σε μια ταχύτητα περιστροφής δίνεται ως

$$V_{mag} = K\Phi n\Omega,$$

$$P_{mag} = \frac{1}{4r_{mag}} (K\Phi n\Omega)^2$$

$$\Gamma_{mag} = (K\Phi n)^2 \frac{\Omega}{2r_{mag}},$$

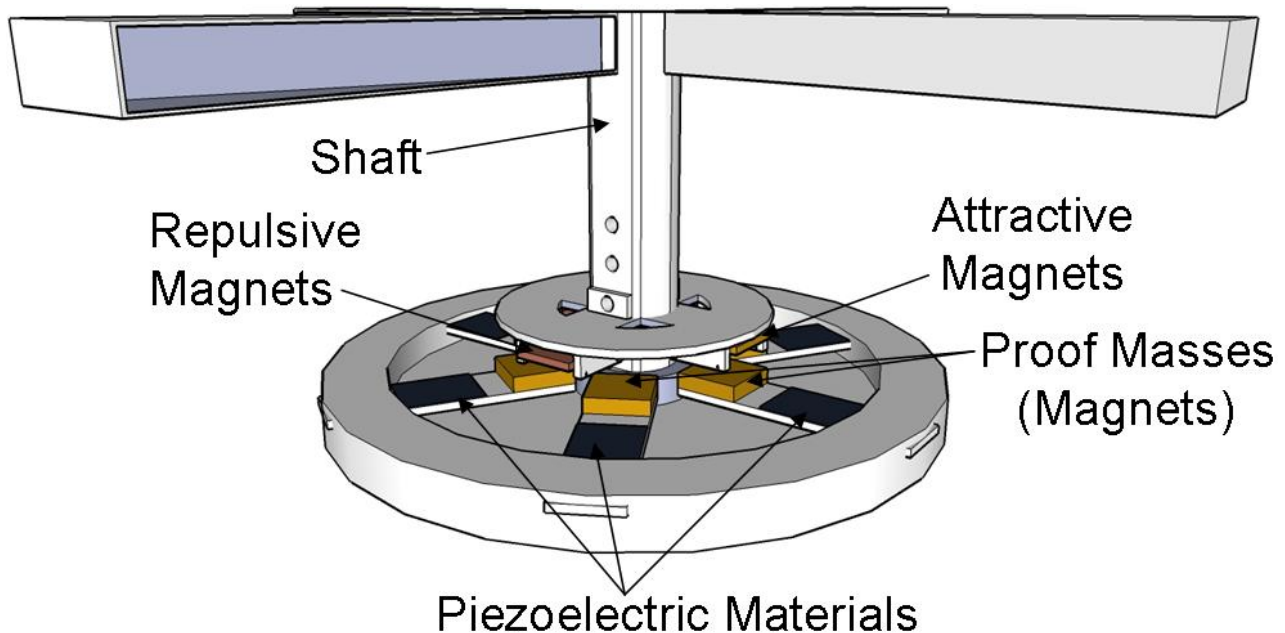
Για να αντισταθμιστεί η ελάχιστη ροπή και οι απώλειες που προκαλούνται από το σύστημα μετάδοσης, ο Priya πρότεινε τη χρήση πιεζοηλεκτρικών στοιχείων για τη μετατροπή από τον άνεμο σε ηλεκτρική (μέσω μηχανικής) ενέργεια. Οι αρχές της παρούσας έννοιας αποτελούνται από μηχανικά πώματα που συνδέονται με το περιστρεφόμενο άξονα που επηρεάζει τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία, ως εκ τούτου, την επαγωγή δονήσεων και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Μία τέτοια συσκευή επιτρέπει τη συγκομιδή έως 7,5 mW με δέκα bimorphs και διαθέτει cutin ταχύτητα του ανέμου (δηλαδή, ελάχιστη ταχύτητα του ανέμου για τη λειτουργία) της τάξης των 2.2 ms⁻¹. Επιπλέον, το μέγεθος της ανεμογεννήτριας μπορεί να μειωθεί σημαντικά με τη χρήση ενός μηχανισμού που μετατρέπει την περιστροφική κίνηση σε μετάθεσης, για παράδειγμα, με τη χρήση ενός σχεδιασμού στροφαλοφόρου άξονα, αν και ένα τέτοιο σύστημα περιλαμβάνει έναν πρόσθετο μηχανισμό μετατροπής που μπορεί να μειώσει τη συνολική αποτελεσματικότητα της συσκευής.

Ωστόσο, η χρήση μηχανικών στοπ ακόμα προκαλεί ορισμένα αποτελέσματα τριβής που πρέπει να ξεπεραστούν και μειώνει τη διάρκεια ζωής της συσκευής. Προκειμένου να ξεπεραστούν αυτά τα μειονεκτήματα, προτείνεται ένα άλλο είδος της διέγερσης μέσω ανέπαφης σύζευξης μεταξύ του άξονα και των πιεζοηλεκτρικών bimorphs. Οι αρχές της ανέπαφης ανεμογεννήτριας βασίζονται σε μαγνήτες για να προκαλέσουν δονήσεις στα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία. Ενώ οι μαγνήτες κατά το άκρο κάθε δίμορφου έχουν την ίδια πολικότητα, οι μαγνήτες επί της ατράκτου συνδέονται έτσι ώστε όταν ένας μαγνήτης εφαρμόζει μια ελκτική δύναμη, ο άλλος να εξασκεί μία απωστική δύναμη. Μια τέτοια προσέγγιση, ως εκ τούτου, επιτρέπει στις ροπές αντίστασης που δημιουργούνται από την μαγνητική σύζευξη να ακυρωθούν, ως εκ τούτου, μειώνοντας δραματικά την ταχύτητα εκκίνησης του ανέμου και την αύξηση των ικανοτήτων παραγωγής ηλεκτρικής

ενέργειας της συσκευής λόγω των υψηλότερων ταχυτήτων περιστροφής για μέτριους ανέμους. Ως εκ τούτου, μια τέτοια διαμόρφωση αποδίδει σε ταχύτητες εκκίνησης ανέμου από 1 ms⁻¹ και μέγιστη ισχύ εξόδου 3 mW ανά πιεζοηλεκτρικό στοιχείο (ως εκ τούτου, χρησιμοποιώντας 6 bimorphs θα οδηγούσε σε μια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας 18 mW).

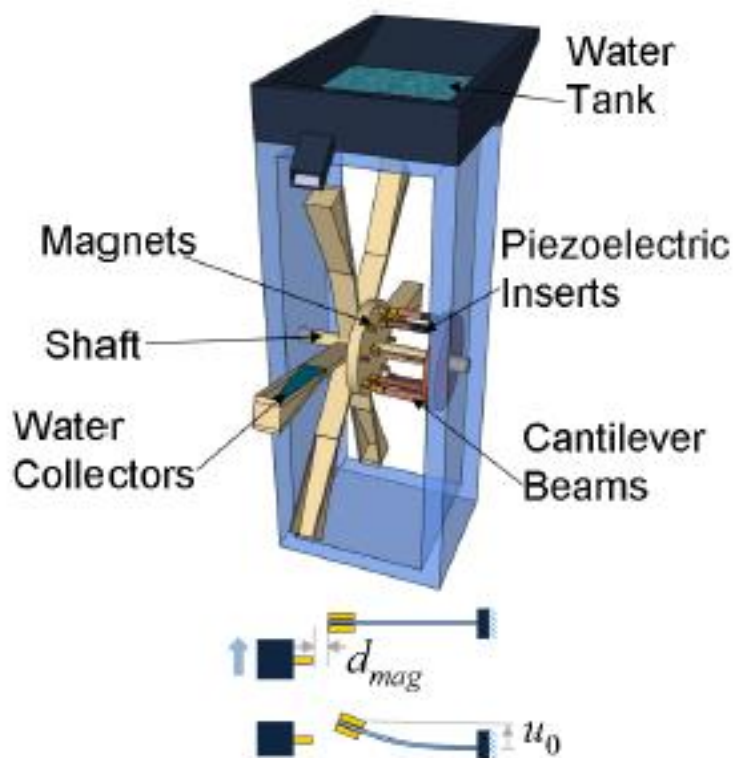
Η ανέπαφη πιεζοηλεκτρική ανεμογεννήτρια μπορεί επίσης να χρησιμοποιήσει μηχανισμό στροφαλοφόρου άξονα για συμπαγή διαμόρφωση. Υποθέτοντας συμπεριφορά σταθερής κατάστασης και ημιτονοειδείς ταλαντώσεις των bimorphs, η μέγιστη ισχύς ανά πιεζοηλεκτρικό στοιχείο μπορεί να ληφθεί από την κλασική παραγωγή στη περίπτωση της ενέργειας κραδασμών, αποδίδοντας

$$P_{piezo} = \frac{n\Omega}{2\pi} \frac{\alpha^2}{C_0} u_M^2,$$



3.2 Μικρής κλίμακας μάζστευση ενέργειας από τη βροχή²⁵

Η άλλη πηγή χαμηλής ενεργειακής πυκνότητας είναι η βροχή. Υπάρχουν λίγες έρευνες στη βιβλιογραφία σχετικά με τον τρόπο μετατροπής της ενέργειας της βροχής σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι Guigon et al. ανέλυσαν το μέγεθος της ενέργειας που θα μπορούσε να μαστευθεί από σταγόνες βροχής. Η χρήση ενός φίλμ PVDF (πολυβινυλιδενοφθοριδίου) περίπου 30 cm² που επηρεάστηκε από σταγόνες νερού της ελεγχόμενης μέγεθος, έδειξαν ότι ήταν δυνατή η συγκομιδή μέχρι 1 nJ από μια σταγόνα, που αντιστοιχεί σε 1 μW της στιγμιαίας ισχύος, και πρότειναν ότι μια τέτοια συσκευή θα μπορούσε να βελτιωθεί ώστε να επιτρέπει την ανάκτηση έως 25 μJ ενέργειας ανά σταγόνα.



25 https://faculty.washington.edu/wilkes/575/slides/575w12-12to15-presentations1/tues120214/HARVESTING_RAIN_FALL-Aksel_Bode_-presentation.pdf

Οι βασικές αρχές της συσκευής ενέργειας βροχής με πιεζοηλεκτρικά στοιχεία, είναι πολύ παρόμοια με εκείνες που συζητήθηκαν προηγουμένως, εκτός του ότι το rainmill διαθέτει ασυνεχείς λειτουργίες (δηλαδή, παλμικές). Το προτεινόμενο σύστημα απεικονίζεται στο παραπάνω σχήμα και αποτελείται από έναν άξονα που είναι εξοπλισμένος με άκρα που συνδέονται με συλλέκτες νερού.

Ο άξονας διαθέτει επίσης μηχανικά στοπ ή μαγνήτες που αλληλεπιδρούν με πιεζοηλεκτρικά που συνδέονται με προβόλους στη βάση της συσκευής. Καθώς η βροχή γεμίζει τους συλλέκτες στο άκρο του βραχίονα, μια ροπή επάγεται, η οποία αντισταθμίζεται από τα στοπ σε επαφή με το πιεζοηλεκτρικό υλικό ή με τη μαγνητική σύζευξη στο ανέπαφο στοιχείο, κάμπτοντας τα πιεζοηλεκτρικά bimorphs.

Όταν η ροπή που εξασκείται από το νερό είναι επαρκής ώστε δεν υπάρχει πλέον επαφή μεταξύ των στοπ και των παραμορφωμένων πιεζοηλεκτρικών προβόλων, ή όταν η δύναμη που ασκείται από τους μαγνήτες εξουδετερώνεται, η άτρακτος περιστρέφεται, και τα bimorphs απελευθερώνονται. Ως εκ τούτου, ο πιεζοηλεκτρικός πρόβολος δονείται και παράγει ηλεκτρική ενέργεια έως το επόμενο πώμα να έρθει σε επαφή ή ο επόμενος μαγνήτης να ευθυγραμμιστεί με το δίμορφο. Μια δεξαμενή νερού επίσης προστέθηκε στη κορυφή του rainmill, η οποία αυξάνει την ενεργό επιφάνεια συγκομιδής νερού. Η προσθήκη αυτής της δεξαμενής νερού, επίσης, επιτρέπει στο rainmill να λειτουργεί κατά συνεχή τρόπο σε πιο ήπια βροχή.

Μια τέτοια προσέγγιση επιτρέπει παραγωγή ενέργειας της τάξης των $10\text{-}100\ \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-3}$ (λαμβάνοντας υπόψη μόνο το ενεργό υλικό) σε συνεχή λειτουργία και $1\ \mu\text{J} \cdot \text{cm}^{-3}$ χρησιμοποιώντας PVDF ταινίες, οι οποίες είναι πολύ μεγαλύτερη από τη συσκευή. Μια τέτοια προσέγγιση μπορεί επίσης να βελτιωθεί σε μεγάλο βαθμό αντικαθιστώντας το φιλμ PVDF με piezoelement, το οποίο χαρακτηρίζει ένας υψηλότερος συντελεστής σύζευξης.

Στην ιδιαίτερη περίπτωση του ανέπαφου rainmill, η χρήση μαγνητών αντίθετης πολικότητας επιτρέπει επίσης στην κρίσιμη μάζα να μειωθεί, καθώς η

ροπή που προκαλείται από την μαγνητική σύζευξη ισοσταθμίζεται από τον άλλο μαγνήτη, το οποίο οδηγεί σε υψηλότερη απόδοση της συσκευής.

3.3 Ενέργεια από “έξυπνους δρόμους”²⁶²⁷²⁸²⁹³⁰

Τα αδέρφια Pierre Curie και Jacques Curie όρισαν την έννοια του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου το 1880. Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο μετατρέπει τη μηχανική καταπόνηση σε τάση ή ηλεκτρικό ρεύμα και παράγει ηλεκτρική ενέργεια από την κίνηση, το βάρος, τους κραδασμούς και τις αλλαγές θερμοκρασίας.

Ένας πιεζοηλεκτρικός δίσκος δημιουργεί τάση όταν παραμορφώνεται. Θεωρώντας το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο σε λεπτή μεμβράνη από ζirkοτιτανικό μόλυβδο Pb (Zr, Ti) O₃ PZT, έχει αναπτυχθεί η συσκευή MEMS παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Κατά την πρόσφατη βελτίωση στην πιεζοηλεκτρική τεχνολογία, ο Aqsa Abbas (ενεργό μέλος της IEEE Computer Society) διαφοροποίησε δύο τρόπους που ονομάζονται d_{31} και d_{33} στους μετατροπείς κραδασμών με στόχο τον εκ νέου σχεδιασμό για συντονισμό σε συγκεκριμένες συχνότητες από μια εξωτερική πηγή ενέργειας δόνησης, δημιουργώντας έτσι ηλεκτρική ενέργεια μέσω του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου χρησιμοποιώντας ηλεκτρομηχανική αποσβεννυμένη μάζα.

26 Jacques and Pierre Curie (1880) "Développement par compression de l'électricité polaire dans les cristaux hémièdres à faces inclinées" (Development, via compression, of electric polarization in hemihedral crystals with inclined faces), Bulletin de la Société minérologique de France, vol. 3, pages 90 - 93.

27 <http://emereo.net/success/energy-harvesting-energy-from-smart-roads/>

28 <http://portalgaruda.org/index.php?ref=browse&mod=viewarticle&article=89504>

29 <http://www.ripublication.com/Volume/aeeev4n3spl.htm>

30 <http://www.scientificamerican.com/article/pavement-pounders-at-paris-marathon-generate-power/>

Οι λεπτές ταινίες PZT έχουν προσελκύσει την προσοχή σε εφαρμογές όπως αισθητήρες δύναμης, επιταχυνσιόμετρα, γυροσκόπια, ενεργοποιητές, μεταβλητά οπτικά, αντλίες μικροηλεκτρονικής, σιδηροηλεκτρικές RAM, συστήματα απεικόνισης και έξυπνους δρόμους. Όταν οι πηγές ενέργειας είναι περιορισμένες, η μάζευση ενέργειας διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στο περιβάλλον. Οι έξυπνοι δρόμοι έχουν τη δυνατότητα να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η ενσωμάτωση του πιεζοηλεκτρικού υλικού στο δρόμο μπορεί να μετατρέψει την πίεση που ασκείται από τα κινούμενα οχήματα σε ρεύμα.

Δεδομένου ότι η ενεργειακή ζήτηση και η έντονη κυκλοφορία οχημάτων στους δρόμους συσχετίζονται, προκύπτει η ιδέα μιας συσκευής που θα συλλέξει την ενέργεια από τα οχήματα που κινούνται στην επιφάνεια του δρόμου και θα τη μετατρέψει σε ηλεκτρική. Για αυτό, η ενσωμάτωση συσκευής από πιεζοηλεκτρικό υλικό κάτω από την επιφάνεια των δρόμων μπορεί να παρέχει τη μετατροπή της πίεσης που ασκείται από τα κινούμενα οχήματα σε ηλεκτρικό ρεύμα. Η μέθοδος χρησιμοποιεί μία συσκευή παραγωγής ηλεκτρικής που εγκαθίσταται κάτω από το οδόστρωμα. Η συσκευή παραγωγής ηλεκτρικής περιλαμβάνει μία πλάκα πίεσεως που καλύπτεται με ένα ή περισσότερα στρώματα προστασίας που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια του δρόμου.

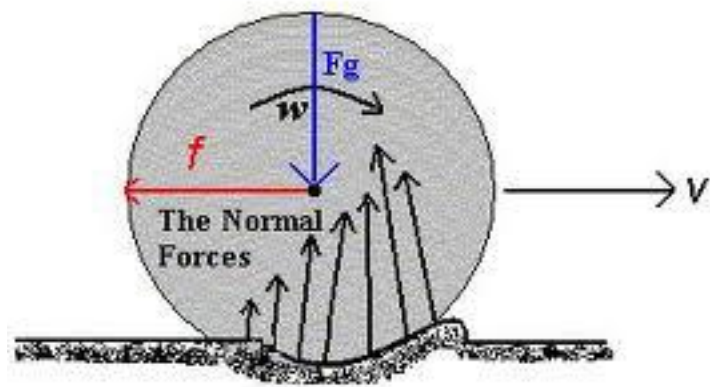
Σε αυτή τη διαδικασία, το πιεζοηλεκτρικό υλικό είναι ενσωματωμένο κάτω από το δρόμο με την ηλεκτρική συσκευή παραγωγής. Για ένα δρόμο με ενσωματωμένες πιεζοηλεκτρικές γεννήτριες, μέρος της ενέργειας που το όχημα εγγχεί στην παραμόρφωση του δρόμου μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια (μέσω άμεσων συσκευών που λειτουργούν με το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο) αντί να χάνεται ως θερμική ενέργεια (θερμότητα).



Αυτή η ηλεκτρική συσκευή παραγωγής περιλαμβάνει πλάκες πίεσεως που καλύπτονται με στρώμα προστασίας ή ασφαλτο όπως δείχνεται στο ακόλουθο σχήμα.



Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο μετατρέπει τη μηχανική καταπόνηση σε ηλεκτρικό ρεύμα ή τάση και το σύστημα αναμένεται να κλιμακωθεί μέχρι και σε 400 κιλοβάτ για 1 χιλιόμετρο διπλής κατεύθυνσης. Η μηχανική δύναμη παρέχεται από τον τροχό του οχήματος του αυτοκινήτου, όπου οι βαρυτικές δυνάμεις (βάρος) είναι κάθετες προς την επιφάνεια του δρόμου και προκαλούν συμπίεση, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα.



Κεφάλαιο 4. Μάστευση ενέργειας μέσω της ανθρώπινης και μηχανικής κίνησης

Οι ασύρματες συσκευές τροφοδοσίας έχουν τα ίδια πλεονεκτήματα για ηλεκτρονικές συσκευές, όπως οι ασύρματες επικοινωνίες: επιτρέπουν την φορητότητα, και σε μη-φορητές εφαρμογές μειώνουν το κόστος εγκατάστασης με την εξάλειψη των καλωδίων. Το τελευταίο χαρακτηριστικό είναι ιδιαίτερα σημαντικό όταν πηγές ενσύρματης εξουσίας δεν είναι διαθέσιμες σε τοπικό επίπεδο.

Για το λόγο αυτό, αυξάνεται η ζήτηση στα βελτιωμένα ασύρματα τροφοδοτικά καθώς πολλαπλασιάζονται τα ηλεκτρονικά συστήματα. Μέχρι στιγμής την κύρια λύση αποτελούν οι μπαταρίες στις διάφορες μορφές τους. Ωστόσο, συχνά κυριαρχούν ως προς το μέγεθος, και μερικές φορές το κόστος, των εν λόγω συστημάτων και εισάγουν ένα ανεπιθύμητο κόστος συντήρησης, αντικατάστασης ή επαναφόρτιση.

Οι εναλλακτικές πηγές ενέργειας που εξαλείφουν αυτούς τους περιορισμούς είναι επομένως άκρως επιθυμητές. Οι πιθανές προσεγγίσεις σε αυτή την πρόκληση είναι να χρησιμοποιούνται οι τοπικές προμήθειες ενέργειας με μεγαλύτερη χωρητικότητα, για να παρέχουν ισχύ ασύρματα από μια ενεργή πηγή που εισάγεται για το σκοπό αυτό, ή για την εξαγωγή ισχύος από πηγές του περιβάλλοντος με κάποιο τρόπο.

Η βελτίωση της πυκνότητας ενέργειας στις μπαταρίες (και άλλα χαρακτηριστικά όπως το κόστος, τον αριθμό των κύκλων φόρτισης, και η πυκνότητα ισχύος), συνεχίζει να είναι, ένας σημαντικός ερευνητικός τομέας. Η πυκνότητα αποθήκευσης της μπαταρίας έχει αυξηθεί σημαντικά κατά τις τελευταίες δεκαετίες, με τις μπαταρίες λιθίου-ιόντων, χωρητικότητας περίπου $160 \text{ W} \cdot \text{h} / \text{kg}$, δηλαδή, περίπου $1 \text{ kJ} / \text{cc}$. Τα καύσιμα υδρογονανθράκων, όμως, προσφέρουν πυκνότητες ενέργειας μεγαλύτερες κατά μία τάξη μεγέθους και οι θεωρητικές δυνατότητες των μπαταριών ιόντων λιθίου, για παράδειγμα, $8 \text{ kW} \cdot \text{h/kg}$ για τη μεθανόλη. Φυσικά για τη χρήση του καύσιμου απαιτείται ένας

μηχανισμός μετατροπής (ο οποίος θα έχει επίσης επίπτωση στον όγκο του συστήματος). Μετατροπείς μικρής κλίμακας που έχουν διερευνηθεί μέχρι σήμερα περιλαμβάνουν μικροσκοπικούς στροβιλοκινητήρες, και έναν μικρο-Stirling κινητήρα, αλλά ο πιο μελετημένος και πιο ελπιδοφόρος μέχρι σήμερα τρόπος είναι πολύ μικρές κυψέλες καυσίμου. Οι πηγές ενέργειας με βάση τα καύσιμα φυσικά δεν εξαλείφουν την απαίτηση των μπαταριών για επαναφόρτιση αλλά μάλλον την περιορίζουν.

Οι πυκνωτές είναι μια άλλη πιθανή πεπερασμένη αποθήκη ενέργειας. Ωστόσο, αν και παρουσιάζουν μερικά πλεονεκτήματα ειδικά σε πυκνωτές υψηλής πυκνότητας ισχύος σε σύγκριση με τις μπαταρίες, η ενέργεια των πυκνωτών παραμένει σχετικά μικρή με θεωρητικά όρια περίπου $10 \text{ W}\cdot\text{h} / \text{kg}$. Αντιστρόφως, τα ραδιενεργά υλικά παρέχουν μια πιθανή πηγή ενέργειας με χαμηλή πυκνότητας ισχύος, αλλά με μακρά διάρκεια ζωής, και μικροσκοπικά τροφοδοτικά με βάση αυτά έχουν επίσης κατασκευαστεί.

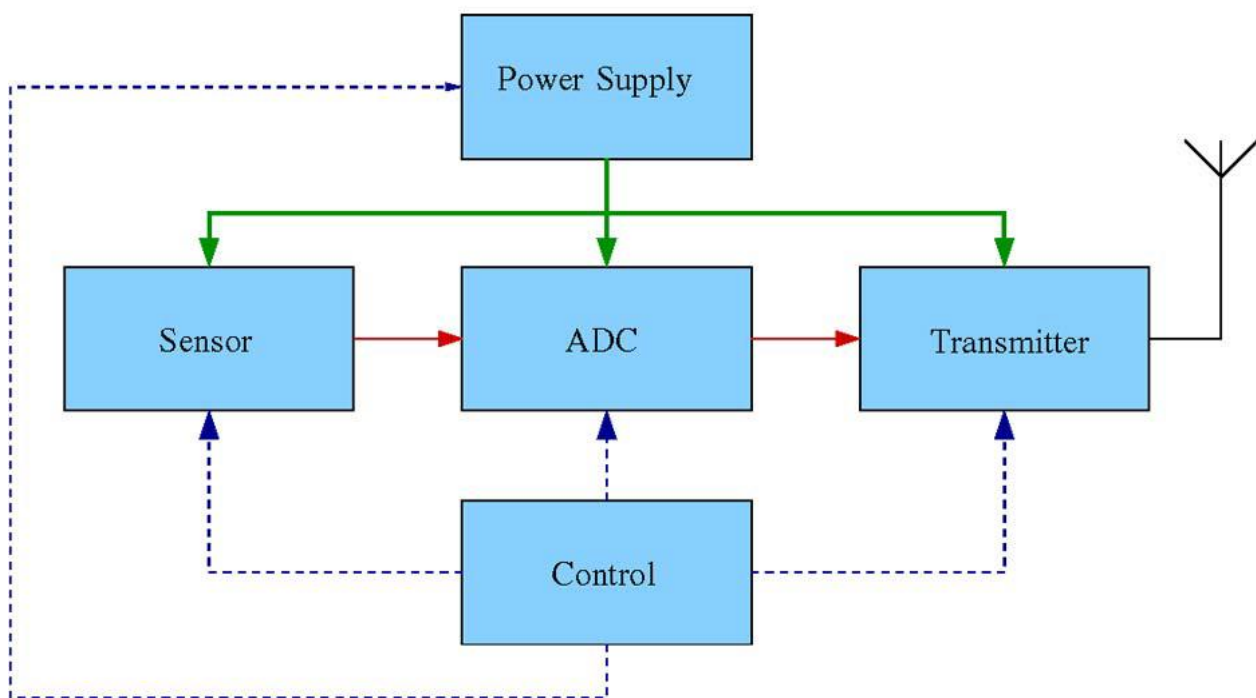
Η εξαγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από πηγές του περιβάλλοντος είναι γενικά γνωστή ως μάζευση ενέργειας, ή σάρωση ενέργειας. Αυτή η προσέγγιση έχει προσελκύσει πρόσφατα μεγάλο ενδιαφέρον τόσο εντός της ακαδημαϊκής κοινότητας όσο και της βιομηχανίας, ως δυνητική ανεξάντλητη πηγή για τις συσκευές χαμηλής ισχύος. Σε γενικές γραμμές η μάζευση ενέργειας πάσχει από χαμηλά, μεταβλητά, και απρόβλεπτα επίπεδα της διαθέσιμης ισχύος. Ωστόσο, οι μεγάλες μειώσεις στην κατανάλωση ενέργειας που επιτυγχάνονται στα ηλεκτρονικά, μαζί με την αύξηση του αριθμού των κινητών και άλλων αυτόνομων συσκευών, αυξάνουν συνεχώς την ελκυστικότητα των τεχνικών μάζευσης. Κατά συνέπεια, η έρευνα στον τομέα, και ο αριθμός των δημοσιεύσεων που εμφανίζονται, έχουν αυξηθεί σε μεγάλο βαθμό.

Οι πηγές ενέργειας που διατίθεται για τη μάζευση είναι ουσιαστικά από τέσσερις μορφές: το φως, ραδιοσυχνότητα (RF) ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, θερμικές κλίσεις, και κίνηση, συμπεριλαμβανομένης της ροής του ρευστού. Όλα τα είδη έχουν μελετηθεί, σε ποικίλους βαθμούς. Τα ηλιακά κύτταρα είναι η πιο ώριμη και εμπορικά καθιερωμένη λύση συλλογής ενέργειας, και έχουν αξιοποιηθεί

σε ένα ευρύ φάσμα κλιμάκων μεγέθους και επιπέδων ισχύος. Ενώ το κόστος είναι μια βασική παράμετρος για μεγάλης κλίμακας φωτοβολταϊκή παραγωγή ενέργειας, στη μικρή κλίμακα των φορητών ηλεκτρονικών συσκευών, το κόστος δεν αποτελεί περιοριστικό παράγοντα, ενώ η διαθεσιμότητα του φωτός είναι πιο κρίσιμο ζήτημα. Ένα ευρύ φάσμα μελετών έχει παρουσιαστεί σχετικά με μικρής κλίμακας θερμοηλεκτρικές συσκευές και επιτυχείς εφαρμογές περιλαμβάνουν το ρολόι Seiko Thermic.

4.1 Εφαρμογή των συσκευών που βασίζονται στην κίνηση

4.1.1 Δίκτυα ασύρματων αισθητήρων³¹³²



Εικόνα 4.1 Βασικό σχεδιάγραμμα ασύρματου αισθητήρα

31 G. Justin, M. Sun, Y. Zhang, X. Cui, and R. Sclabassi, B Serotonin (5-HT) released by activated white blood cells in a biological fuel cell provide a potential energy source for electricity generation, [in Proc. IEEE 28th Annu. Int. Conf. Eng. Med. Biol. Soc. (EMBS '06), Aug. 2006, pp. 4115–4118]

32 F. Moll and A. Rubio, B An approach to the analysis of wearable body-powered systems, in Proc. Mixed Design Integr. Circuits Syst. Conf., Gdynia, Poland, Jun. 2000.

Πολλοί ασθενείς με χρόνιες παθήσεις θα μπορούσαν να έχουν μια σημαντική αύξηση στην ποιότητα της ζωής και το προσδόκιμο ζωής αν ορισμένα βιολογικά συμπτώματα μπορούν να παρακολουθούνται συνεχώς και να ελέγχονται κατά την καθημερινή τους ζωή. Τρία παραδείγματα απεικονίζουν τις δυνατότητες αυτής της προσέγγισης: συνεχής παρακολούθηση της πίεσης του αίματος σε ασθενείς με υπέρταση μπορεί να αυξήσει σημαντικά τη συμμόρφωση στη φαρμακευτική αγωγή, επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο στο ηλεκτροκαρδιογράφημα μπορεί να είναι πολύ αποτελεσματική στην αποκάλυψη πρώτων σταδίων καρδιακής νόσου, ο έλεγχος της ινσουλίνης για τους διαβητικούς ασθενείς μειώνει σημαντικά τον κίνδυνο υπογλυκαιμίας. Η παρακολούθηση μπορεί επίσης να επιτρέπει την καλύτερη στόχευση των φαρμάκων, μειώνοντας το κόστος και ανεπιθύμητες παρενέργειες. Για να επιτευχθούν αυτά τα οφέλη, έχουν αναπτυχθεί πολλοί τύποι ιατρικών συσκευών που στερεώνονται στο σώμα ή εμφυτεύονται.

Εμφυτεύσιμα ή ασύρματα συστήματα θα μπορέσουν να αυξήσουν την ποιότητα της ζωής, αν είναι διακριτικά για τον ασθενή, όσον αφορά τόσο τη χρήση και τη συντήρηση. Είναι ιδιαίτερα σημαντική η αποφυγή της ανάγκης αντικατάστασης της πηγής τροφοδοσίας για την εξάλειψη συντήρησης στις εμφυτεύσιμες συσκευές. Ενώ μερικοί εμφυτεύσιμοι αισθητήρες μπορεί να είναι εντελώς παθητικοί και χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με ενεργό εξοπλισμό, όταν η μέτρηση απαιτείται, κάποιες ενεργές συσκευές θα μπορούσαν να τροφοδοτούνται περιστασιακά από την ασύρματη μεταφορά ενέργειας, και απαιτούν συνεχής πηγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ιδανικά, όλες οι εμφυτεύσιμες ιατρικές συσκευές θα έχουν διάρκεια προσφοράς ισχύος ίση με την απαιτούμενη λειτουργική διάρκεια ζωής, περιορίζοντας έτσι τη χειρουργική επέμβαση, και το κόστος, στο ελάχιστο. Αυτό το όραμα για διακριτική, αυτοματοποιημένη υγειονομική περίθαλψη χρησιμοποιώντας wearable και εμφυτεύσιμες ασύρματες ιατρικές συσκευές είναι η κύρια εστίαση της νέας και ταχέως αναπτυσσόμενης διεπιστημονικής έρευνας, εκείνης του δικτύου αισθητήρων σώματος (BSN). Σε γενικές γραμμές, το μικρό μέγεθος της επεξεργασίας πληροφοριών και RF ολοκληρωμένων κυκλώματα σημαίνει ότι οι μπαταρίες κυριαρχούν στο μέγεθος των συσκευών που απαιτούν μακρύ χρόνο λειτουργίας, όπως στους BSN κόμβους.

Ωστόσο, η συνεχής εξέλιξη των solidstate ηλεκτρονικών ειδών, σε συνδυασμό με το νέο σχεδιασμό κυκλωμάτων, έχει οδηγήσει σε τεράστιες μειώσεις στην κατανάλωση ενέργειας, καθώς και το μέγεθος, για τα κυκλώματα που απαιτούνται για την εκτέλεση δεδομένων λειτουργιών. Αυτός ο συνδυασμός των χαμηλών απαιτήσεων ισχύος, αυστηρών περιορισμών μεγέθους, και η ανάγκη για την εξάλειψη συντήρησης καθιστά τη BSN μια ιδιαίτερα ελκυστική εφαρμογή για τη μάστευση ενέργειας.

Η Εικόνα 4.1 δείχνει το μπλοκ διάγραμμα για τα στοιχεία λήψης και επεξεργασίας του σήματος ενός ασύρματου αισθητήρα ικανού να στείλει τα δεδομένα σε μια απομακρυσμένη τοποθεσία για επεξεργασία. Η ελάχιστη απαίτηση ισχύος μιας τέτοιας συσκευής μπορεί να εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας ένα μίγμα από την εμπορικά διαθέσιμη τεχνολογία, τις συσκευές που αποτελούν τελευταία εξέλιξη στην έρευνα. Ως παράδειγμα, παρουσιάζονται τα εξής τρία στοιχεία.³³³⁴³⁵

- 1) Αισθητήρας: Ο αισθητήρας θερμοκρασίας STLM20 από την ST Micro απαιτεί συνήθως ισχύ 12 μ W στα 2,4 V τάση τροφοδοσίας.
- 2) ADC: Ένας ADC (μετατροπέας αναλογικού σε ψηφιακό) παρουσιάζει κατανάλωση ενέργειας κάτω του 1 μ W για τη δειγματοληψία 8 bit σε 4 KS / s.
- 3) Πομπός: Η IMEC ανακοίνωσε πρόσφατα μια συσκευή πομπού συμβατή με το πρότυπο IEEE 802.15.4a υπερ-ευρείας ζώνης, με κατανάλωση ενέργειας μόνο 0,65 nJ ανά 16 chip σε χαμηλό κύκλο λειτουργίας.

33 S. Roundy, P. K. Wright, and J. M. Rabaey, BA study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes,[Comput. Commun., vol. 26, pp. 1131–1144, 2003.

34 T. Starner and J. A. Paradiso, BHuman generated power for mobile electronics,[in Low-Power Electronics Design,

C. Piquet, Ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2004, pp. 1–35. [31] T. Starner, BHuman powered wearable computing, IBM Syst. J., vol. 35, no. 3–4, pp. 618–629, 1996.

35 D. Wanless, BSecuring our future health: Taking a long term view,[HM Treasury, U.K., Apr. 2002, Tech. Rep. J. Sauerbrey, D. Schmitt-Landsiedel, and R. Thewes, BA 0.5 V 1 #W successive approximation ADC,[IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 38, pp. 1261–1265, 2003.

Τα απαιτούμενα ποσοστά δεδομένων για εφαρμογές βιοπαρακολούθησης τείνουν να είναι αρκετά χαμηλά, λόγω των σχετικά χαμηλών ρυθμών μεταβολής των μεταβλητών. Ένα από τα υψηλότερα ποσοστά που απαιτούνται είναι η παρακολούθηση του χτύπου της καρδιάς, σε περίπου 100 δείγματα / s. Αν αυτό γίνεται σε συνδυασμό με ανάλυση 10 bit, τότε ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων είναι 1 kbps, που απαιτεί μόνο 0.65 μ W, εάν η ισχύς του πομπού μπορεί να κλιμακωθεί σε τέτοια χαμηλά ποσοστά δεδομένων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μια συνολική κατανάλωση ρεύματος για τον κόμβο αισθητήρα 10-20 μ W, ή ακόμα και 1-2 μ W ή λιγότερο αν τα άλλα συστατικά λειτουργούν στον ίδιο κύκλο λειτουργίας. Θα υπάρχει κάποια επιπλέον επιβάρυνση για την υποδοχή τροφοδοσίας επεξεργασίας και το κύκλωμα χρονισμού, αλλά είναι λογικό να εκτιμήσει ότι η κατανάλωση θα μπορούσε τελικά να μειωθεί σε μερικά μ W, για αυτή την εφαρμογή βιοαισθητήρα. Αυτό είναι μέσα στα εφικτά επίπεδα για μηχανές ενέργειας μέτριου μεγέθους (κάτω του 1 cc) , ακόμη και κατά τη συγκομιδή της χαμηλής συχνότητας της κίνησης του σώματος. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, ενώ οι τιμές ισχύος που αναφέρονται παραπάνω είναι εφικτές, επί του παρόντος οι διαθέσιμοι κόμβοι έχουν σημαντικά υψηλότερα επίπεδα κατανάλωσης ενέργειας.

4.2 Βιοενέργεια³⁶³⁷³⁸³⁹⁴⁰

Ένας άλλος τρόπος μάστευσης ενέργειας είναι μέσω της οξείδωσης των σακχάρων στο αίμα. Αυτές οι μηχανές ενέργειας ονομάζονται στοιχεία

36 The power within, by Bob Holmes, New Scientist, 25 August 2007

37 K. MacVittie, J. Halamek, L. Halamakova, M. Southcott, W. Jemison, E. Katz, "From 'Cyborg' Lobsters to a Pacemaker Powered by Implantable Biofuel Cells", Energy & Environmental Sci

38 McGarry, Scott; Knight, Chris (28 September 2011). "The Potential for Harvesting Energy from the Movement of Trees". Sensors 11 (10): 9275–9299

39 <http://voltreepower.com/index.html>

40 <http://news.bbc.co.uk/2/hi/technology/6272752.stm>

βιοκαυσίμου. Θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε ηλεκτρονικές συσκευές που εμφυτεύονται στο σώμα (π.χ. βηματοδότες, εμφυτευμένους βιοαισθητήρες για διαβητικούς, εμφυτευμένες ενεργές συσκευές RFID, κλπ) . Επί του παρόντος, ο Όμιλος Minter του Saint Louis University έχει δημιουργήσει τα ένζυμα που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ενέργειας από τα σάκχαρα του αίματος.

Ωστόσο, θα πρέπει τα ένζυμα να αντικατασταθούν μετά από μερικά χρόνια. Το 2012 ένας βηματοδότης τροφοδοτήθηκε από εμφυτεύσιμα στοιχεία βιοκαυσίμων στο Πανεπιστήμιο Clarkson , υπό την ηγεσία του Δρ Evgeny Katz.

Η μάζευση δένδρικής μεταβολικής ενέργειας είναι ένα είδος βιο – ενεργειακής μάζευσης. Η εταιρεία Voltree έχει αναπτύξει μια μέθοδο για τη συλλογή ενέργειας από τα δέντρα. Αυτές οι μηχανές ενέργειας χρησιμοποιούνται για να τροφοδοτήσουν αισθητήρες εξ αποστάσεως ως βάση για ένα σύστημα ανάπτυξης μακροπρόθεσμης παρακολούθησης των δασικών πυρκαγιών και για τις καιρικές συνθήκες στο δάσος. Η ιστοσελίδα τους αναφέρει ότι η ωφέλιμη διάρκεια ζωής μιας τέτοιας συσκευής θα πρέπει να περιορίζεται μόνο από τη διάρκεια ζωής του δέντρου στο οποίο είναι προσαρτημένη. Θα αναπτυχθεί πρόσφατα ένα μικρό δίκτυο δοκιμών σε ένα Εθνικό Πάρκο των ΗΠΑ.

Άλλες πηγές ενέργειας από τα δέντρα περιλαμβάνουν την καταγραφή της φυσικής κίνησης του δέντρου σε μια γεννήτρια. Η θεωρητική ανάλυση αυτής της πηγής ενέργειας δείχνει κάποια ικανοποιητική συμβολή στην τροφοδοσία μικρών ηλεκτρονικών συσκευών. Μια πρακτική συσκευή που βασίζεται στην θεωρία αυτή έχει κατασκευαστεί και τροφοδοτεί με επιτυχία έναν αισθητήρα για ένα χρόνο.

Μια εφαρμογή των βιομηχανικών συσκευών μάζευσης ενέργειας είναι το μοντέλο του Max Donelan που διαθέτει ιμάντες γύρω από το γόνατο και επιτρέπει την παραγωγή 2,5 βατ ισχύος. Αυτό είναι αρκετό για να τροφοδοτήσει περίπου 5 κινητά τηλέφωνα. Υπάρχει επίσης μια επιγονατίδα μάζευσης ενέργειας που

αναπτύχθηκε από την Bionic Power. Η συσκευή Soccket μπορεί να δημιουργήσει και να αποθηκεύσει 6 watts.

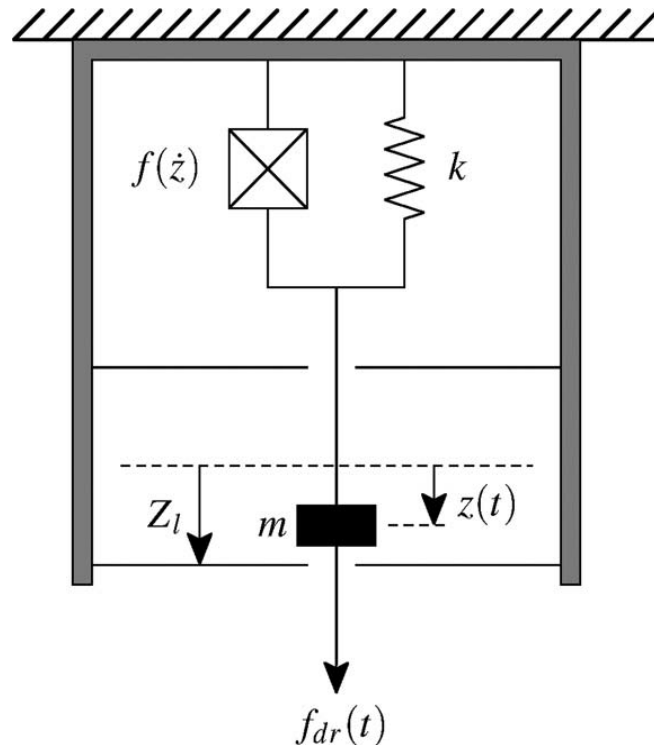
4.3 Αρχή λειτουργίας των συσκευών που βασίζονται στην κίνηση⁴¹⁴²⁴³

Οι μικρές γεννήτριες που βασίζονται στην κίνηση χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: εκείνες που χρησιμοποιούν άμεση εφαρμογή της δύναμης και εκείνες που κάνουν χρήση των αδρανειακών δυνάμεων που ενεργούν σε μία μάζα. Η αρχή λειτουργίας μιας γεννήτριας άμεσης δύναμης δεικνύεται στην Εικόνα 4.2. Στην περίπτωση αυτή, η κινητήρια δύναμη δρα στη μάζα m που στηρίζεται σε ένα αιώρημα με σταθερά ελατηρίου k , με ένα στοιχείο απόσβεσης παρόν που παρέχει μία δύναμη που αντιτίθενται στην κίνηση. Εάν ο αποσβεστήρας υλοποιείται χρησιμοποιώντας ένα κατάλληλο μηχανισμό μεταγωγής, τότε στην αντίθετη κίνηση, η ενέργεια μετατρέπεται από μηχανική σε ηλεκτρική μορφή. Υπάρχουν όρια επί της μετατόπισης της μάζας, που επιβάλλονται από το μέγεθος της συσκευής. Γεννήτριες συνεχούς ισχύος πρέπει να κάνουν μηχανική επαφή με δύο δομές που κινούνται και ως εκ τούτου μπορεί να εφαρμόσει μια δύναμη στο αμορτισέρ.

41 T. Von Bu \ddot{r} ren, P. Lukowicz, and G. Troster, BKinetic energy powered computing VAn experimental feasibility study,[in Proc. 7th IEEE Int. Symp. Wearable Comput., White Plains, New York, Oct. 2003, pp. 22–24.

42 E. M. Yeatman, P. D. Mitcheson, and A. S. Holmes, BMicro-engineered devices for motion energy harvesting, in IEEE Int. Electron Devices Meeting, Washington, DC, Dec. 2007, pp. 375–378.

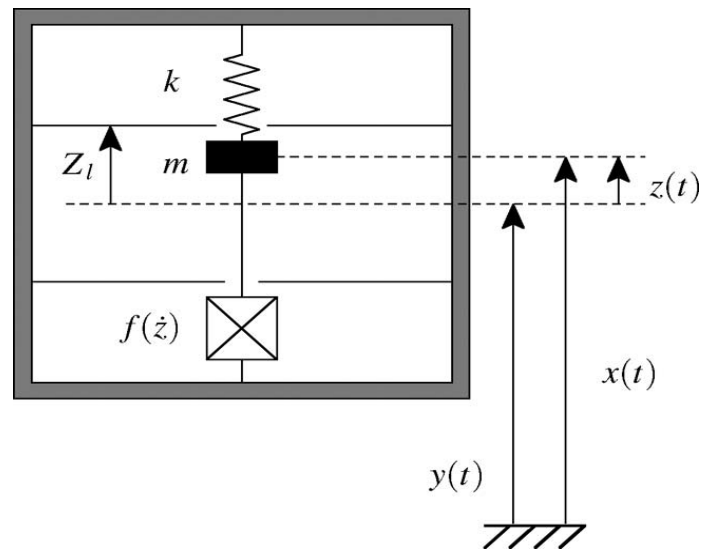
43 P. D. Mitcheson, T. C. Green, E. M. Yeatman, and A. S. Holmes, BArchitectures for vibration-driven micropower generators, J. Microelectromech. Syst., vol. 13, pp. 429–440, Jun. 2004.



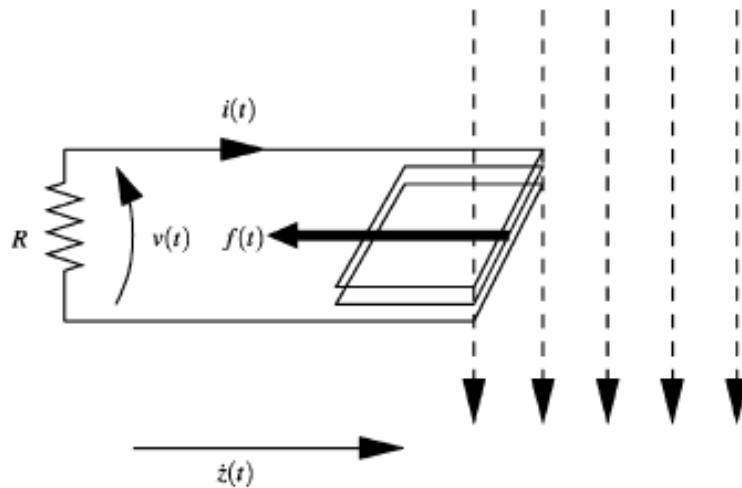
Εικόνα 4.2 Γενικό μοντέλο γεννήτριας άμεσης δύναμης

Η αρχή λειτουργίας των αδρανειακών γεννητριών παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.3. Πάλι μια μάζα στηρίζεται σε ένα ελατήριο, και η αδράνεια του οδηγεί σε μια σχετική μετατόπιση όταν το πλαίσιο, με απόλυτη μετατόπιση, έχει επιτάχυνση. Πάλι υπάρχουν όρια που συνδέονται με τα χαρακτηριστικά του συστήματος. Ενέργεια μετατρέπεται όταν το έργο γίνεται κατά τη δύναμη απόσβεσης, η οποία αντιτίθεται στην σχετική κίνηση. Οι Αδρανειακές γεννήτριες απαιτούν μόνο ένα σημείο σύνδεσης με μία κινούμενη δομή, η οποία δίνει πολύ μεγαλύτερη ευελιξία στην τοποθέτηση από συσκευές άμεσης ισχύος και επιτρέπει μεγαλύτερο βαθμό μικροτεχνίας.

Προκειμένου για την παραγωγή ενέργειας, ο αποσβεστήρας πρέπει να εφαρμοστεί με ένα κατάλληλο ηλεκτρομηχανικό μετατροπέα.



Εικόνα 4.3 Γενικό μοντέλο γεννήτριας αδράνειας



Εικόνα 4.4 Αρχή λειτουργίας συσκευής ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής

Στη μηχανική μικροκλίμακας, οι ηλεκτρικές γεννήτριες αναπτύσσονται συντριπτικά με βάση την ηλεκτρομαγνητική μεταγωγή. Στη μικρής κλίμακας μάζευση ενέργειας, υπάρχουν δύο κύριες πρόσθετες τεχνικές. Η ηλεκτροστατική μεταγωγή, το οποίο είναι όχι μόνο ανέφικτη και αναποτελεσματική για τις μεγάλες μηχανές, γίνεται πολύ πιο πρακτική σε μικρό μέγεθος και είναι πολύ κατάλληλη για μικροηλεκτρομηχανική (MEMS) εφαρμογή. Η πιεζοηλεκτρικά μεταγωγή είναι γενικά ανέφικτη για συστήματα εκ περιτροπής, αλλά είναι πολύ κατάλληλη στο παλινδρομικό χαρακτήρα των κινήσεων που χρησιμοποιούνται συνήθως για τη

μάστευση (π.χ. κραδασμοί).

Στρεφόμενες ηλεκτρομαγνητικές γεννήτριες είναι σε κοινή χρήση από τα επίπεδα ισχύος των λίγων βατ (brushless dc εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας) έως αρκετές εκατοντάδες μεγαβάτ (σύγχρονες μηχανές σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας). Είναι δυνατόν να εφαρμόσει τον αποσβεστήρα ενός microgenerator χρησιμοποιώντας την ίδια αρχή, δηλαδή, αυτή που περιγράφεται από το νόμο του Faraday της επαγωγής, όπως απεικονίζεται στο σχήμα. 4.4. Μία μεταβολή της μαγνητικής ροής με ένα πηνίο προκαλεί μια τάση στο πηνίο, που δημιουργεί ρεύμα στο κύκλωμα. Η συνδυασμένη δύναμη σχετικά με τα κινούμενα φορτία στο μαγνητικό πεδίο δρα για να αντισταθεί στην σχετική κίνηση, όπως περιγράφεται από το νόμο του Lenz. Το μηχανικό έργο κατά την αντίθετη δύναμη μετατρέπεται σε θερμότητα στην αντίσταση του κυκλώματος και η αποθηκευμένη ενέργεια στην μαγνητικό πεδίο σχετίζεται με την επαγωγή του κυκλώματος. Μερικά βασικά πρακτικά ζητήματα για τις μηχανές που βασίζονται στην ηλεκτρομαγνητική ενέργεια έχουν ως εξής: ισχυρές δυνάμεις απόσβεσης απαιτούν γρήγορες αλλαγές ροής, οι οποίες είναι δύσκολο να επιτευχθούν σε μικρές γεωμετρίες ή σε χαμηλή συχνότητα, ο αριθμός των σπειρών του σπειρώματος σε ένα MEMS ή άλλη μικροσκοπική συσκευή θα πρέπει να περιορίζεται, με αποτέλεσμα σε χαμηλές τάσεις εξόδου, και είναι πιθανό να απαιτούνται μόνιμοι μαγνήτες και σιδηρομαγνητικά υλικά για την διαδρομή ροής.

Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά διάφορες μικροσυσκευές για τη μάζευση ενέργειας που έχουν καταγραφεί στη βιβλιογραφία. Ο πίνακας 5.1 παρουσιάζει τις μικροσυσκευές που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 2 , 3 (συσκευές που βασίζονται στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας).

Ηλιακό κύτταρο που τροφοδοτείται από τον ήλιο	EnOcean STM 300	70μW
Ηλιακό κύτταρο που τροφοδοτείται από λαμπτήρες φθορισμού	TI MSP 430	350 μW
Μικρές Α/Γ με μηχανή μονίμων μαγνητών	3μm/s, 100 cm ²	8mW
Μικρές Α/Γ με πιεζοηλεκτρικό στοιχείο	2,2 m/s	7,5mW
Μετατροπέας ενέργειας βροχής	φίλμ PVDF 30 cm ²	25mW/σταγόνα

Πίνακας 5.1 Μικροσυσκευές Κεφαλαίου 2

Ο πίνακας 5.2 περιλαμβάνει συσκευές των κεφαλαίων 3 και 4, δηλαδή τις διατάξεις που έχουν παρουσιαστεί ερευνητικά και εκμεταλλεύονται κάποιου είδους προϋπάρχουσα ανθρώπινη ή μηχανική κίνηση όπως:

Χτύπημα του τακουνιού κατά το περπάτημα.

Περπάτημα – τρέξιμο.

Δονήσεις τις μηχανής αυτοκινήτου.

Πίεση διακύμανσης αιμοσφαιρίου.

Λύγισμα γονάτου.

Αρχή λειτουργίας	Ισχύς (μW)	Πυκνότητα ισχύος (μW/cm ³)	Αναφορά
Ηλεκτρομαγνητική κίνηση	100	100	51
	100	100	51
	1,5	1,5	52
	5	5	52
	10	8,06	53
	0,33	22	54
	530	2208,3	55
	680	680	56
	680	680	56
	830	830	57
	830	830	57
	0	0	58
	830	114	59
	37	44	60
	0,02	0,21	61
	2,85	47,5	62
	0,12	1,79	62
	0,05	0,07	63
	1,44	40	64
	800	6,1	65
	3500	27	65
	40000	306	65
	800	6	66
	3100	23	66
	10800	81	66
Ηλεκτροστατική κίνηση	58	58	67
	36	2,42	68
	0,21	0,21	69
	6	15	70
	1000	56	71
	1,8	1,8	72
	2,4	4	73
Πιεζοηλεκτρική κίνηση	80	80	74
	90	90	74
	180	180	74
	700	145	75
	1000	88	76
	300000	2650	76
	180	15000	77
	2,16	20	78
	0,25	3510	79
	0,17	2,47	80
	16,3	82	81
	8000	198	82
	1800	45	82

Πίνακας 5.2 Μικροσυσκευές κεφαλαίων 3 και 4.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία και οι ανεμογεννήτριες μπορούν να τροφοδοτήσουν επαρκώς μικρές συσκευές, δεδομένου ότι δεν απαιτείται συνεχής λειτουργία. Σε περίπτωση που απαιτηθεί συνεχής λειτουργία θα πρέπει να εγκατασταθεί και διάταξη αποθήκευσης (μπαταρία, υπερπυκνωτής) ώστε να αποθηκεύει την περίσσεια ενέργειας και να τροφοδοτεί το σύστημα τις ώρες που οι πηγές (ηλιακή ακτινοβολία, άνεμος) απουσιάζουν. Κάτι τέτοιο αυξάνει το μέγεθος και το κόστος μιας συσκευής.

Η ενέργεια από την πτώση των σταγόνων βροχής μπορεί να αξιοποιηθεί με τη χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών, αλλά πάλι εξαρτάται από την βροχόπτωση και δεν μπορεί να θεωρηθεί αδιάλειπτη.

Στον πίνακα 5.2 παρουσιάζονται οι συσκευές που έχουν καταγραφεί σχετικά με την αξιοποίηση της ανθρώπινης και μηχανικής κίνησης και παρατίθεται τόσο η ισχύς εξόδου κάθε διάταξης, όσο και η πυκνότητα ισχύος, δηλαδή τα μW ανά μονάδα όγκου της συσκευής. Κάτι τέτοιο είναι σημαντικό, καθώς οι μικροσυσκευές έχουν σαν σκοπό της ενσωμάτωση σε άλλες διατάξεις ή ακόμα και μέρη του σώματος, όπου το μέγεθος και το βάρος δεν είναι επιθυμητές ιδιότητες.

Παρατηρούμε ότι, η πυκνότητα ισχύος των συσκευών που στηρίζονται στην ηλεκτρομαγνητική κίνηση κυμαίνεται από 0,07 ως 2208,3 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$, για την ηλεκτροστατική κίνηση από 0,21 ως 58 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ και για την πιεζοηλεκτρική κίνηση από 2,47 ως 15000 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$. Η μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος στην ηλεκτρομαγνητική κίνηση αφορά μία ηλεκτρομηχανική γεννήτρια που στηρίζεται στις δονήσεις, στην ηλεκτροστατική κίνηση σε γεννήτρια που αξιοποιεί την κίνηση του ανθρώπινου σώματος, και στην πιεζοηλεκτρική κίνηση σε βελτιστοποιημένη γεννήτρια που αξιοποιεί την ενέργεια τυχαίων δονήσεων.

Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο μπορεί να αποφέρει σημαντικές αποδόσεις σε επίπεδο μικροσυσκευών, τόσο στην εφαρμογή του όσον αφορά δονήσεις που μπορεί να συμβαίνουν στην μηχανή ενός αυτοκινήτου κατά την οδήγηση, σε ένα πλοίο, στην ανθρώπινη κίνηση, στην πίεση στα ανθρώπινα υποδήματα ή σε δρόμους από το βάρος των διερχόμενων

αυτοκινήτων. Δευτερευόντως, ηλεκτρομαγνητική επαγωγή μπορεί να αξιοποιήσει παλινδρομικές κίνησης, από το τακούνι υποδήματος κατά το ανθρώπινο περπάτημα και διάφορες δονήσεις όπως περιγράφηκαν προηγουμένως. Η κίνηση του ανθρώπινου σώματος θα μπορούσε επίσης να τροφοδοτήσει ηλεκτροστατικές γεννήτριες με μικρότερη απόδοση.

Όσον αφορά την τροφοδοσία από μικροσυσκευές που στηρίζονται σε ανανεώσιμες πηγές όπως ο άνεμος, ο ήλιος και η βροχή, έχουν ήδη αποδείξει την αξιοπιστία τους σε μεγαλύτερα συστήματα. Η ηλιακή ακτινοβολία είναι πιο αξιόπιστη σε σχέση με τον άνεμο, ο οποίος στη μικροκλίμακα των συσκευών αυτών επιφέρει αποδόσεις μέχρι 5%. Αντιθέτως τα φωτοβολταϊκά στοιχεία που χρησιμοποιούνται σε μικροσυσκευές φτάνουν σε τιμές απόδοσης ως και 15%. Ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα είναι η περίπτωση της τροφοδοσίας των ηλιακών στοιχείων μέσω του φωτός λαμπτήρων φθορισμού, στην περίπτωση όμως που το σύστημα ήδη διαθέτει αυτούς τους λαμπτήρες για τη λειτουργία του.

Βιβλιογραφία

Percy, Steven; Chris Knight, Francis Cooray and Ken Smart (2012). "Supplying the Power Requirements to a Sensor Network Using Radio Frequency Power Transfer". *Sensors* 12 (7): 8571–8585.

What is energy harvesting? Institute of physics. Διαθέσιμο: <http://www.iop.org/resources/energy/>

Jim Drew, Design Note 483: Energy Harvester Produces Power from Local Environment, Eliminating Batteries in Wireless Sensors, Διαθέσιμο: <http://cds.linear.com/docs/en/design-note/DN483.pdf>

Erick Vermeulen, January 2008, NatuurWetenschap & Techniek.

White, N.M., Glynne-Jones, P. and Beeby, S.P. (2001) A novel thick-film piezoelectric micro-generator. *Smart Materials and Structures*, 10, (4), 850-852.

Navid and L. Pilon (2011), "Pyroelectric energy harvesting using Olsen cycles in purified and porous poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene) thin films", *Smart Materials and Structures*, vol. 20, no. 2, pp. 025012.

IEEE Xplore - The Doubler of Electricity Used as Battery Charger. [Ieeexplore.ieee.org](http://ieeexplore.ieee.org). Retrieved on 2013-12-09.

Yi Yang; Divan, D.; Harley, R. G.; Habetler, T. G. (2006). "Power line sensor net - a new concept for power grid monitoring". 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting. pp. 8 pp

Jacques and Pierre Curie (1880) "Développement par compression de l'électricité polaire dans les cristaux hémihédres à faces inclinées" (Development, via compression, of electric polarization in hemihedral crystals with inclined faces), *Bulletin de la Société minérologique de France*, vol. 3, pages 90 – 93.

<http://emereo.net/success/energy-harvesting-energy-from-smart-roads/>

<http://portalgaruda.org/index.php?ref=browse&mod=viewarticle&article=89504>

<http://www.ripublication.com/Volume/aeeev4n3spl.htm>

13<http://www.scientificamerican.com/article/pavement-pounders-at-paris-marathon-generate-power/>

The power within, by Bob Holmes, *New Scientist*, 25 August 2007

MacVittie, J. Halamek, L. Halamakova, M. Southcott, W. Jemison, E. Katz, "From 'Cyborg' Lobsters to a Pacemaker Powered by Implantable Biofuel Cells", *Energy & Environmental Sci*

McGarry, Scott; Knight, Chris (28 September 2011). "The Potential for Harvesting Energy from the Movement of Trees". *Sensors* 11 (10): 9275–9299

<http://voltreepower.com/index.html>

<http://news.bbc.co.uk/2/hi/technology/6272752.stm>

James P. Gagne (1999-05-08). "Pedal operated power generating system US 6229224 B1". US patents/Google. Retrieved 2013.

Alexander Wier (1980). *THE DYNAPOD: A PEDAL POWER UNIT*. USAID/VITA. ISBN 0-86619-072-4.

<http://www.gizmag.com/r2b2-flywheel-powered-kitchen-appliance-concept/17063/>
A. Martí and A. Luque (Eds.), *Next generation photovoltaics: high efficiency through full spectrum utilization*, Series in Optics and Optoelectronics, Institute of Physics Publishing, Bristol (2003).

Torrey, Lee (Jul 10, 1980). "A trap to harness the sun". *New Scientist* 87 (1209): 124–127. ISSN 0262-4079. Retrieved 2012-03-30.

William Shockley and Hans J. Queisser, "Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells", *Journal of Applied Physics*, Volume 32 (March 1961), pp. 510-519

Electroepistimi.blogspot.gr

David Biello, "New solar-cell efficiency record set", *Scientific American*, 27 August 2009

A. De Vos, "Detailed balance limit of the efficiency of tandem solar cells", *Journal of Physics D: Applied Physics* Volume 13, Issue 5 (14 May 1980), page 839-846

Weiming Wang, Albert S. Lin, Jamie D. Phillips (2009). "Intermediate band photovoltaic solar cell based on ZnTe:O". *Appl. Phys. Lett.* 95: 011103.

Green, Martin (2003). *Third Generation Photovoltaics: Advanced Solar Energy Conversion*. Springer Science+Business Media

Pulfrey, L.D. (1978). *Photovoltaic Power Generation*. New York: Van Nostrand Reinhold Co.

Rivers P. N. (2007). Leading edge research in solar energy. Nova Science Publishers

Halls J.J.M., Friend R.H. (2001). Archer M.D., Hill R.D., ed. Clean electricity from photovoltaics. London: Imperial College Press. pp. 377–445

McGehee D.G., Topinka M.A. (2006). "Solar cells: Pictures from the blended zone". Nature Materials 5 (9): 675–676

F. C. Krebs, R. Søndergaard, M. Jørgensen, 2011 Printed metal back electrodes for R2R fabricated polymer solar cells studied using the LBIC technique. Solar Energy Materials and Solar Cells, 95 5 13481353

Περιοδικό Τεχνική Εκλογή, Pressline Αθήνα 2010

<http://www.enocean.com/en/solar-energy-harvesting/>

<http://www.ti.com/lit/sl/slyy027/slyy027.pdf>

Γ. Α. Γληνού, Δ. Α. Παπαχρήστου και Α. Μ. Παπαδόπουλος, 2005, Η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα: αναδρομή, παρούσα κατάσταση και προοπτικές,

Σοφιανίδης Α., 2006, Εφαρμογές Α.Π.Ε

Goofrey Boyle «Renewable Energy: Power for a sustainable future»

https://faculty.washington.edu/wilkes/575/slides/575w12-12to15-presentations1/tues120214/HARVESTING_RAIN_FALL-Aksel_Bode_-presentation.pdf

G. Justin, M. Sun, Y. Zhang, X. Cui, and R. Sclabassi, B Serotonin (5-ht) released by activated white blood cells in a biological fuel cell provide a potential energy source for electricity generation,[in Proc. IEEE 28th Annu. Int. Conf. Eng. Med. Biol. Soc. (EMBS '06), Aug. 2006, pp. 4115–4118

F. Moll and A. Rubio, B An approach to the analysis of wearable body-powered systems, in Proc. Mixed Design Integr. Circuits Syst. Conf., Gdynia, Poland, Jun. 2000.

S. Roundy, P. K. Wright, and J. M. Rabaey, B A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes,[Comput. Commun., vol. 26, pp. 1131–1144, 2003.

T. Starner and J. A. Paradiso, B Human generated power for mobile electronics,[in Low-Power Electronics Design,

Piquet, Ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2004, pp. 1–35. [31] T. Starner, BHuman powered wearable computing, *IBM Syst. J.*, vol. 35, no. 3–4, pp. 618–629, 1996.

D. Wanless, BSecuring our future health: Taking a long term view,[HM Treasury, U.K., Apr. 2002, Tech. Rep. J. Sauerbrey, D. Schmitt-Landsiedel, and R. Thewes, BA 0.5 V 1 #W successive approximation ADC,[*IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 38, pp. 1261–1265, 2003.

T. Von Buren, P. Lukowicz, and G. Troster, BKinetic energy powered computing VAn experimental feasibility study,[in *Proc. 7th IEEE Int. Symp. Wearable Comput.*, White Plains, New York, Oct. 2003, pp. 22–24.

E. M. Yeatman, P. D. Mitcheson, and A. S. Holmes, BMicro-engineered devices for motion energy harvesting, in *IEEE Int. Electron Devices Meeting*, Washington, DC, Dec. 2007, pp. 375–378.

P. D. Mitcheson, T. C. Green, E. M. Yeatman, and A. S. Holmes, BArchitectures for vibration-driven micropower generators, *J. Microelectromech. Syst.*, vol. 13, pp. 429–440, Jun. 2004.

W. J. Li, T. C. H. Ho, G. M. H. Chan, P. H. W. Leong, and H. Y. Wong, BInfrared signal transmission by a laser-micromachined vibration-induced power generator,[in *Proc. 43rd IEEE Midwest Symp. Circuits Syst.* 2000, Aug. 2000, vol. 1, pp. 236–239.

W. J. Li, Z. Wen, P. K. Wong, G. M. H. Chan, and P. H. W. Leong, BA micromachined vibration-induced power generator for low power sensors of robotic systems,[in *Proc. World Automat. Congr. 8th Int. Symp. Robot. Applicat.*, Maui, HI, Jun. 2000.

N. N. H. Ching, G. M. H. Chan, W. J. Li, H. Y. Wong, and P. H. W. Leong, BPCB integrated micro-generator for wireless systems,[in *Proc. Int. Symp. Smart Struct.*, Hong Kong SAR, Oct. 2000

C. B. Williams, S. Shearwood, M. A. Harradine, P. H. Mellor, T. S. Birch, and R. B. Yates, Bdevelopment of an electromagnetic micro-generator, *Proc. Inst. Elect. Eng. Circuits, Devices Syst.*, vol. 148, no. 6, pp. 337–342, Dec. 2001.

N. N. H. Ching, H. Y. Wong, W. J. Li, P. H. W. Leong, and Z. Wen, BA laser-micromachined vibrational to electrical power transducer for wireless sensing systems, in *Proc. 11th Int. Conf. Solid-State Sensors Actuators*, Munich, Germany,

Jun. 2001

M. El-hami, P. Glynn-Jones, N. M. White, N. Hill, S. Beeby, E. James, A. D. Brown, and J. N. Ross, BDesign and fabrication of a new vibration-based electromechanical power generator, *Sensors Actuators A, Phys.*, vol. 92, pp. 335–342, Aug. 2001.

N. N. H. Ching, H. Y. Wong, W. J. Li, P. H. W. Leong, and Z. Wen, BA laser-micromachined multi-modal resonating power transducer for wireless sensing systems, *Sensors Actuators A, Phys.*, vol. 97–98, pp. 685–690, Apr. 2002.

M. Mizuno and D. G. Chetwynd, B Investigation of a resonance microgenerator, [*J. Micromech. Microeng.*, vol. 13, pp. 209–216, 2003.

J. M. H. Lee, S. C. Yuen, W. J. Li, and P. H. W. Leong, BDevelopment of an AA size energy transducer with micro resonators, [in *Proc. Int. Symp. Circuits Syst.*, Bangkok, Thailand, May 2003, vol. 4, pp. 876–879.

P. Glynn-Jones, M. J. Tudor, S. P. Beeby, and N. M. White, BAn electromagnetic, vibration-powered generator for intelligent sensor systems, *Sensors Actuators A, Phys.*, vol. 110, pp. 344–349, Feb. 2004.

S. Beeby, M. Tudor, E. Koukharenko, N. White, T. O'Donnell, C. Saha, S. Kulkarni, and S. Roy, BDesign and performance of a microelectromagnetic vibration powered generator, in *13th Int. Conf. Solid-State Sensors, Actuators Microsyst. Dig. Tech. Papers (TRANSDUCERS '05)*, 2005, vol. 1, pp. 780–783.

S. P. Beeby, M. J. Tudor, R. N. Torah, E. Koukharenko, S. Roberts, T. O'Donnell, and S. Roy, BMacro and micro scale electromagnetic kinetic energy harvesting generators, in *DTIP MEMS MOEMS*, Stresa, Italy, 2006.

C. Serre, A. Prez-Rodriguez, N. Fondevilla, J. Morante, J. Montserrat, and J. Esteve, BVibrational energy scavenging with si technology electromagnetic inertial microgenerators, [in *DTIP MEMS MOEMS*, Stresa, Italy, 2006.

W.-S. Huang, K.-E. Tzeng, M.-C. Cheng, and R.-S. Huang, BA silicon MEMS micro power generator for wearable micro devices, [*J. Chin. Inst. Eng.*, vol. 30, no. 1, pp. 133–140, 2007.

Perpetuum Limited, PMG17 datasheet, Jan. 7, 2008. [Online]. Available: http://www.perpetuum.co.uk/resource/PMG17-100_dsheets.pdf

Ferro Solutions, VEH360 datasheet, Jan. 7, 2008. [Online]. Available:

http://www.ferrosi.com/files/VEH360_datasheet.pdf

R. Tashiro, N. Kabei, K. Katayama, Y. Ishizuka, F. Tsuboi, and K. Tsuchiya, Development of an electrostatic generator that harnesses the motion of a living body, *JSME Int. J.*, ser. C, vol. 43, no. 4, pp. 916–922, 2000.

R. Tashiro, N. Kabei, K. Katayama, Y. Ishizuka, F. Tsuboi, and K. Tsuchiya, Development of an electrostatic generator that harnesses the ventricular wall motion, *Jpn. Soc. Artif. Organs*, vol. 5, pp. 239–245, 2002

M. Mizuno and D. G. Chetwynd, BInvestigation of a resonance microgenerator,[*J. Micromech. Microeng.*, vol. 13, pp. 209–216, 2003.

M. Miyazaki, H. Tanaka, G. Ono, T. Nagano, N. Ohkubo, T. Kawahara, and K. Yano, BElectric-energy generation using variable-capacitive resonator for power-free LSI: Efficiency analysis and fundamental experiment,[in *Proc. Int. Symp. Low Power Electron. Design*, Seoul, Korea, Aug. 2003, pp. 193–198.

Y. Arakawa, Y. Suzuki, and N. Kasagi, BMicro seismic electret generator using electret polymer film,[in *Proc. 4th Int. Workshop Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applicat. Power MEMS*, Kyoto, Japan, Nov. 2004, pp. 187–190.

G. Despesse, J. Chaillout, T. Jager, J. M. Le´ger, A. Vassilev, S. Basrour, and B. Charlot, BHigh damping electrostatic system for vibration energy scavenging,[in *Proc. 2005 Joint Conf. Smart Objects Ambient Intell.VInnov. Context-Aware Services: Usages Technol.*, Grenoble, France, 2005, pp. 283–286.

B. C. Yen and J. H. Lang, BA variable-capacitance vibration-to-electric energy harvester,[*IEEE Trans. Circuits Syst. I, Regular Papers*, vol. 53, no. 2, pp. 288–295, 2006.

P. Miao, P. D. Mitcheson, A. S. Holmes, E. Yeatman, T. Green, and B. Stark, BMEMS inertial power generators for biomedical applications,[*Microsyst. Technol.*, vol. 12, no. 10–11, pp. 1079–1083, Sep. 2006.

S. Roundy, P. K. Wright, and J. M. Rabaey, *Energy Scavenging for Wireless Sensor Networks*, 1st ed. Boston, MA: Kluwer Academic, 2003.

K. Hammond, E. Lai, E. Leland, S. Mellers, D. Steingart, E. Carleton, B. Reilly, J. Baker, B. Otis, J. Rabaey, D. Culler, and P. Wright, in integrated node for energy-scavenging, sensing, and data-transmission: Applications in medical diagnostics,[

in Proc. 2nd Int. Workshop Wearable Implantable Body Sensor Netw., Imperial College London, Apr. 2005

E. Lefeuvre, A. Badel, C. Richard, L. Petit, and D. Guyomar, BA comparison between several vibration-powered piezoelectric generators for standalone systems,[Sensors Actuators A, Phys., vol. 126, no. 2, pp. 405–416, 2006.

E. Lefeuvre, A. Badel, C. Richard, L. Petit, and D. Guyomar, Boptimization of piezoelectric electrical generators powered by random vibrations,[in DTIP MEMS MOEMS, Stresa, Italy, 2006, pp. 338–343.

H. Tanaka, G. Ono, T. Nagano, and N. Ohkubo, BElectric power generation using piezoelectric resonator for power-free sensor node,[in Proc. IEEE Custom Integr. Circuits Conf., 2005, 2005, pp. 97–100.

H.-B. Fang, J.-q. Liu, Z.-Y. Xu, L. Dong, L. Wang, D. Chen, C. Bing-Chu, and Y. Liu, BFabrication and performance of MEMS-based piezoelectric power generator for vibration energy harvesting, Microelectron. J., vol. 37, no. 11, pp. 1280–1284, 2006.

N. G. Elvin, N. Lajnef, and A. A. Elvin, BFeasibility of structural monitoring with vibration powered sensors, Smart Mater. Struct., vol. 15, no. 4, pp. 977–986, 2006.

T. H. Ng and W. H. Liao, Bsensitivity analysis and energy harvesting for a self-powered piezoelectric sensor,[J. Intell. Mater. Syst. Struct., vol. 16, no. 10, pp. 785–797, 2005

Mide. (2008, Jan. 7). PEH20W Datasheet. [Online]. Available: <http://www.mide.com/products/volture/peh20w/peh20w.php>

