



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ  
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Συγκομιδή και Διαμοιρασμός Ενέργειας σε IoT Περιβάλλοντα**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αγγελική Καραβλίδη

Επιβλέπουσα : Ελένη Στάη, Επίκουρη Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2025



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ  
ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

## Συγκομιδή και Διαμοιρασμός Ενέργειας σε IoT Περιβάλλοντα

Διπλωματική Εργασία

Αγγελική Καραβλίδη

Επιβλέπουσα : Ελένη Στάη, Επίκουρη Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή στις 4 Νοεμβρίου 2025

|                        |                      |                               |
|------------------------|----------------------|-------------------------------|
| .....                  | .....                | .....                         |
| Ελένη Στάη             | Συμεών Παπαβασιλείου | Βασίλειος Καρύωτης            |
| Επ. Καθηγήτρια, Ε.Μ.Π. | Καθηγητής, Ε.Μ.Π.    | Καθηγητής, Ιόνιο Πανεπιστήμιο |

Αθήνα, Νοέμβριος 2025



.....  
Αγγελική Καραβλίδη

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Αγγελική Καραβλίδη, 2025. Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved. Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στη χρήση των συστημάτων συγκομιδής ενέργειας σε συσκευές και ασύρματα δίκτυα που ανήκουν στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων και απαιτούν ενεργειακή αυτονομία για την αξιόπιστη λειτουργία τους. Σκοπός της μελέτης είναι η ανάλυση διαφορετικών κατανομών για τη συγκομιδή, όπως ομοιόμορφη, εκθετική, Weibull και Rayleigh, και χωρητικότητας μπαταρίας στη διαδικασία συλλογή ενέργειας και η επίδραση τους στην απόδοση του συστήματος.

Για τον σκοπό αυτό, επιλέχθηκε ένα μαθηματικό μοντέλο βελτιστοποίησης ισχύος, δρομολόγησης και ελέγχου συμφόρησης, το οποίο επιτρέπει στους κόμβους του δικτύου να ανταλλάσσουν πληροφορία, να μεταφέρουν ασύρματα ενέργεια αλλά και να συλλέγουν ενέργεια από το περιβάλλον. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η επιλογή κατάλληλης στατιστικής κατανομής και μεγέθους αποθήκευσης μπορεί να βελτιώσει την απόδοση των IoT κόμβων και να ενισχύσει τη βιωσιμότητα των ασύρματων δικτύων επόμενης γενιάς.

Η εργασία συμβάλλει στην καλύτερη κατανόηση της δυναμικής διαχείρισης ενέργειας σε ασύρματα δίκτυα ενεργειακής συγκομιδής και παρέχει χρήσιμες κατευθύνσεις για τον σχεδιασμό αυτοδύναμων και αποδοτικών IoT συστημάτων στο πλαίσιο των τεχνολογιών 6G.

## ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Ενεργειακή συγκομιδή, ασύρματα δίκτυα, IoT, SWIPT, στατιστικές κατανομές, χωρητικότητα μπαταρίας, ρυθμός παραγωγής δεδομένων

# **ABSTRACT**

This thesis focuses on the use of energy harvesting systems in devices and wireless networks that belong to the Internet of Things and require energy autonomy for reliable operation. The aim of the study is to analyze different distributions for harvesting, such as uniform, exponential, Weibull and Rayleigh, as well as battery capacities in the energy harvesting process, and to examine their impact on system performance.

For this purpose, a mathematical model for power optimization, routing and congestion control was selected, which enables network nodes to exchange information, wirelessly transfer energy and harvest energy from the environment. The results show that the choice of appropriate statistical distribution and storage capacity can improve the performance of IoT nodes and enhance the sustainability of next-generation wireless networks.

This work contributes to a better understanding of dynamic energy management in energy-harvesting wireless networks and provides useful guidelines for the design of self-powered and efficient IoT systems within the context of 6G technologies.

## **KEY WORDS:**

Energy harvesting, wireless networks, IoT, SWIPT, statistical distributions, battery capacity, source rate



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2024-2025 υπό την επίβλεψη της κα. Ελένη Στάη, Καθηγήτρια της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π., στην οποία θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες για την εμπιστοσύνη, την υπομονή και την καθοδήγησή της καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας. Ευχαριστώ επίσης τον κ. Βασίλη Καρύωτη, ο οποίος μου παρείχε πολύτιμη καθοδήγηση σε κάθε στάδιο της έρευνας. Θα ήθελα επιπλέον να ευχαριστήσω τον Γιώργο Καλλίτση, για την παροχή της αρχικής μελέτης και την συμβολή του στην κατανόηση του θέματος. Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου, που με στήριξε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου και χωρίς εκείνη δεν θα είχα καταφέρει να φτάσω ως εδώ. Ευχαριστώ επίσης, τους φίλους μου που ήταν πάντα δίπλα μου.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|                                                                 |           |
|-----------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....</b>                                            | <b>5</b>  |
| <b>ABSTRACT.....</b>                                            | <b>6</b>  |
| <b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....</b>                                        | <b>8</b>  |
| <b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....</b>                                         | <b>9</b>  |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>                                | <b>14</b> |
| 1.1. Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας .....                    | 14        |
| 1.2. Δομή διπλωματικής εργασίας .....                           | 15        |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΥΓΚΟΜΙΔΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....</b>            | <b>16</b> |
| 2.1 Γενικά.....                                                 | 16        |
| 2.2 Ηλιακή συγκομιδή ενέργειας .....                            | 17        |
| 2.3 Αιολική συγκομιδή ενέργειας .....                           | 21        |
| 2.3.1. Στάδιο Ανόρθωσης.....                                    | 21        |
| 2.3.2. Στάδιο Μετατροπής.....                                   | 23        |
| 2.3.3. Αξιοποίηση .....                                         | 24        |
| 2.4 Συγκομιδή ενέργειας από ραδιοσυχνότητες.....                | 25        |
| 2.4.1 Κεραία Λήψης .....                                        | 26        |
| 2.4.2. Δίκτυο αντιστοίχισης εμπέδησης.....                      | 27        |
| 2.4.3. Κύκλωμα ανορθωτή .....                                   | 28        |
| 2.4.4. Αποθήκευση ενέργειας .....                               | 28        |
| 2.5 Θερμική συγκομιδή ενέργειας .....                           | 28        |
| 2.5.1 Θερμοηλεκτρική συγκομιδή ενέργειας.....                   | 29        |
| 2.5.2 Πυροηλεκτρική συγκομιδή ενέργειας.....                    | 31        |
| 2.6 Μηχανική συγκομιδή ενέργειας.....                           | 33        |
| 2.6.1. Ηλεκτροστατική συγκομιδή ενέργειας .....                 | 34        |
| 2.6.2. Ηλεκτρομαγνητική συγκομιδή ενέργειας .....               | 35        |
| 2.6.3. Πιεζοηλεκτρική συγκομιδή ενέργειας .....                 | 36        |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....</b>                    | <b>37</b> |
| 3.1. Γενικά.....                                                | 37        |
| 3.2. Μπαταρίες .....                                            | 37        |
| 3.2.1. Ιστορική αναδρομή.....                                   | 37        |
| 3.2.2. Είδη μπαταριών .....                                     | 38        |
| 3.2.3. Αρχή λειτουργίας.....                                    | 39        |
| 3.2.4. Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των μπαταριών..... | 40        |
| 3.2.5. Μπαταρίες σε IoT περιβάλλοντα.....                       | 42        |

|                                                                 |           |
|-----------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.2.6. Εφαρμογές .....                                          | 45        |
| 3.3. Υπερπυκνωτές .....                                         | 46        |
| 3.3.1. Ηλεκτροχημικοί Πυκνωτές Διπλού Στρώματος.....            | 47        |
| 3.3.2. Ψευδοπυκνωτές.....                                       | 49        |
| 3.3.3. Υβριδικοί υπερπυκνωτές .....                             | 50        |
| 3.3.4. Ηλεκτρολύτες .....                                       | 51        |
| 3.3.5. Ηλεκτρόδια.....                                          | 52        |
| 3.3.6. Εφαρμογές.....                                           | 54        |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ</b>       |           |
| <b>ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΕΛΕΓΧΟ ΙΣΧΥΟΣ .....</b> | <b>55</b> |
| 4.1. Προτεινόμενο μοντέλο συστήματος.....                       | 55        |
| 4.2. Ενεργειακή Συγκομιδή και Κατανομές Ενέργειας .....         | 57        |
| 4.2.1. Ομοιόμορφη Κατανομή.....                                 | 57        |
| 4.2.2. Εκθετική κατανομή .....                                  | 57        |
| 4.2.3. Λογαριθμοκανονική Κατανομή .....                         | 58        |
| 4.2.4. Κατανομή Weibull.....                                    | 58        |
| 4.2.5 Κατανομή Rayleigh .....                                   | 59        |
| 4.3. Μαθηματική διατύπωση προβλήματος .....                     | 60        |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....</b>                | <b>65</b> |
| 5.1. Παράμετροι Προσομοίωσης.....                               | 65        |
| 5.2. Αξιολόγηση κατανομών συγκομιδής ενέργειας .....            | 66        |
| 5.3. Αξιολόγηση χωρητικότητας μπαταρίας.....                    | 73        |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....</b>                                | <b>77</b> |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>                           | <b>78</b> |

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

|                                                                                                                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Σχήμα 1:</b> Δομή συστήματος ηλιακής συγκομιδής ενέργειας [1].....                                                                                                                                            | 17 |
| <b>Σχήμα 2:</b> Δομή και ταξινόμηση ρότορα [7] .....                                                                                                                                                             | 22 |
| <b>Σχήμα 3:</b> (α) RF σύστημα συγκομιδής ενέργειας (β) WPT σύστημα .....                                                                                                                                        | 26 |
| <b>Σχήμα 4:</b> Σχηματική διάταξη κυκλώματος δικτύου προσαρμογής σχήματος L [14] .....                                                                                                                           | 27 |
| <b>Σχήμα 5:</b> Σχηματική διάταξη κυκλώματος δικτύου προσαρμογής σχήματος Pi [14].....                                                                                                                           | 27 |
| <b>Σχήμα 6:</b> PN ένωση [21] .....                                                                                                                                                                              | 29 |
| <b>Σχήμα 7:</b> Θερμοηλεκτρική γεννήτρια [21] .....                                                                                                                                                              | 30 |
| <b>Σχήμα 8:</b> Μοντέλο πυροηλεκτρικού συστήματος [17] .....                                                                                                                                                     | 31 |
| <b>Σχήμα 9:</b> Θερμοδυναμικοί κύκλοι (α) Κύκλος Carnot (β) Κύκλος Ericsson [17].....                                                                                                                            | 32 |
| <b>Σχήμα 10:</b> (α) Ηλεκτροστατικό (β) Ηλεκτρομαγνητικό (γ) Πιεζοηλεκτρικό σύστημα<br>συγκομιδής ενέργειας. [11] .....                                                                                          | 34 |
| <b>Σχήμα 11:</b> Τρεις διατάξεις για ηλεκτροστατικούς συλλέκτες [24] .....                                                                                                                                       | 35 |
| <b>Σχήμα 12:</b> (α) Ηλεκτρομηχανική λειτουργία κελιού κατά την εκφόρτιση (β)<br>Ηλεκτρομηχανική λειτουργία κελιού κατά την φόρτιση [28] .....                                                                   | 40 |
| <b>Σχήμα 13:</b> Δομή κελίου μπαταρία μολύβδου-οξέος [29].....                                                                                                                                                   | 42 |
| <b>Σχήμα 14:</b> Δομή κελίου μπαταρίας NiMH [29].....                                                                                                                                                            | 43 |
| <b>Σχήμα 15:</b> Δομή κελίου μπαταρίας Li-ion [29] .....                                                                                                                                                         | 44 |
| <b>Σχήμα 16:</b> Δομή EDLC υπερπυκνωτή [33] .....                                                                                                                                                                | 48 |
| <b>Σχήμα 17:</b> Διάγραμμα Μοντέλων του Ηλεκτρικού Διπλού Στρώματος (α) το<br>Μοντέλο Helmholtz, (β) το Μοντέλο Gouy-Chapman και (γ) το Μοντέλο Stern [34]<br>.....                                              | 48 |
| <b>Σχήμα 18:</b> Δομή ψευδοπυκνωτή [33] .....                                                                                                                                                                    | 50 |
| <b>Σχήμα 19:</b> Δομή υβριδικού υπερπυκνωτή [33].....                                                                                                                                                            | 51 |
| <b>Σχήμα 20:</b> Ενέργεια Συγκομιδής κατανομών στην Περίπτωση I .....                                                                                                                                            | 67 |
| <b>Σχήμα 21:</b> Τοπολογίες Δικτύου (α) Τοπολογία 1 (β) Τοπολογία 2 .....                                                                                                                                        | 67 |
| <b>Σχήμα 22:</b> Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων για την Περίπτωση I (α) ρυθμός<br>μετάδοσης για την Τοπολογία 1 (β) ρυθμός μετάδοσης για την Τοπολογία 2 .....                                                       | 68 |
| <b>Σχήμα 23:</b> Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων για την Περίπτωση II (α) ρυθμός<br>μετάδοσης για την Τοπολογία 1 (β) ρυθμός μετάδοσης για την Τοπολογία 2 .....                                                      | 69 |
| <b>Σχήμα 24:</b> Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων για την Περίπτωση III (α) ρυθμός<br>μετάδοσης για την Τοπολογία 1 (β) ρυθμός μετάδοσης για την Τοπολογία 2 .....                                                     | 70 |
| <b>Σχήμα 25:</b> Τοπολογία δικτύου με μεταβαλλόμενη πυκνότητα (α) 4 κεντρικοί – 6<br>περιφερειακοί κόμβοι (β) 5 κεντρικοί – 5 περιφερειακοί κόμβοι (γ) 7 κεντρικοί – 3<br>περιφερειακοί κόμβοι.....              | 71 |
| <b>Σχήμα 26:</b> Ρυθμός παραγωγής δεδομένων με μεταβαλλόμενη πυκνότητα για (α) 4<br>κεντρικοί – 6 περιφερειακοί κόμβοι (β) 5 κεντρικοί – 5 περιφερειακοί κόμβοι (γ) 7<br>κεντρικοί – 3 περιφερειακοί κόμβοι..... | 73 |
| <b>Σχήμα 27:</b> Πολλαπλασιαστής Lagrange $\nu_i$ .....                                                                                                                                                          | 74 |
| <b>Σχήμα 28:</b> Ρυθμός παραγωγής δεδομένων – Χωρητικότητα μπαταρίας .....                                                                                                                                       | 74 |
| <b>Σχήμα 29:</b> Πολλαπλασιαστής Lagrange $\nu_i$ κατόπιν περιορισμού .....                                                                                                                                      | 75 |
| <b>Σχήμα 30:</b> Ρυθμός παραγωγής δεδομένων – Χωρητικότητα μπαταρίας .....                                                                                                                                       | 76 |

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Πίνακας 1:</b> Σύγκριση των χαρακτηριστικών των μετατροπών ..... | 19 |
| <b>Πίνακας 2:</b> Συγκριτικός πίνακας για μικρά κύτταρα .....       | 45 |
| <b>Πίνακας 3:</b> Σύγκριση μπαταρίας – υπερπυκνωτή .....            | 46 |
| <b>Πίνακας 4:</b> Περιγραφή παραμέτρων .....                        | 56 |
| <b>Πίνακας 5:</b> Παράμετροι Προσομοίωσης.....                      | 65 |



---

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

## 1.1. Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας

Τα τελευταία χρόνια, το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things, IoT) έχει εξελιχθεί σε έναν από τους ταχύτερα αναπτυσσόμενους τομείς της ψηφιακής τεχνολογίας, με τον αριθμό των συνδεδεμένων συσκευών να αναμένεται να ανέλθει σε δισεκατομμύρια παγκοσμίως [16]. Το IoT αναφέρεται στη διασύνδεση έξυπνων συσκευών και αισθητήρων μέσω ασύρματων δικτύων, επιτρέποντας τη συλλογή και μετάδοση δεδομένων με στόχο τη λήψη αυτόνομων αποφάσεων και τη βελτίωση της αποδοτικότητας διαφόρων συστημάτων. Η εφαρμογή του εκτείνεται σε ένα ευρύ φάσμα τομέων, όπως η βιομηχανία, η υγειονομική περίθαλψη, οι έξυπνες πόλεις και η γεωργία ακριβείας, δημιουργώντας αυξημένες απαιτήσεις για αυτόνομες, αποδοτικές και ενεργειακά βιώσιμες ασύρματες συσκευές.

Στο πλαίσιο αυτό, τα ασύρματα δίκτυα συγκομιδής ενέργειας αναδεικνύονται ως μια πολλά υποσχόμενη λύση. Η ικανότητα των συσκευών να αντλούν ενέργεια από το περιβάλλον έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της εξάρτησης τους από μπαταρίες περιορισμένης διάρκειας ζωής. Το πεδίο αυτό αποκτά ιδιαίτερη σημασία με την εμφάνιση των δικτύων 6G, τα οποία απαιτούν τεράστια πυκνότητα συσκευών, εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και συνεχή λειτουργία.

Τα δίκτυα που μελετώνται στη συγκεκριμένη εργασία αντιστοιχούν σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων με δυνατότητα συγκομιδής ενέργειας, στα οποία κάθε κόμβος διαθέτει περιορισμένης χωρητικότητας μπαταρία και μπορεί να συλλέγει περιβαλλοντική ενέργεια, όπως ηλιακή ή RF. Η συνεχής λειτουργία τέτοιων δικτύων αποτελεί σημαντική πρόκληση, καθώς η ασταθής φύση της συγκομιζόμενης ενέργειας και οι περιορισμοί αποθήκευσης ενδέχεται να οδηγήσουν σε απώλειες δεδομένων και μειωμένη απόδοση.

Πλήθος πρόσφατων εργασιών έχει επικεντρωθεί στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας τέτοιων δικτύων μέσω τεχνικών βελτιστοποίησης μετάδοσης δεδομένων και ενέργειας. Συγκεκριμένα, έχουν προταθεί μέθοδοι δρομολόγησης και ελέγχου συμφόρησης βασισμένες σε πολιτικές τύπου backpressure για την αύξηση του ρυθμού και της αξιοπιστίας των IoT συσκευών [44], [46]. Αντίστοιχα, προσεγγίσεις που ενσωματώνουν ασύρματη μεταφορά ενέργειας και έλεγχο ισχύος έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικές στην ενίσχυση της ενεργειακής αυτάρκειας και της συνεχούς λειτουργίας των κόμβων του δικτύου [45], [47]. Ωστόσο, η επίδραση διαφορετικών στατιστικών κατανομών της συγκομιζόμενης ενέργειας στον ρυθμό παραγωγής δεδομένων, καθώς και η επίδραση της χωρητικότητας της μπαταρίας στη συνολική επίδοση του δικτύου, δεν έχει μελετηθεί επαρκώς.

Η παρούσα διπλωματική εργασία δεν ασχολείται με τον φυσικό μηχανισμό συλλογής ενέργειας, αλλά με τη στοχαστική μοντελοποίηση της διαθέσιμης ενέργειας που συγκομίζεται από τους κόμβους. Για τον σκοπό αυτό εξετάζονται διαφορετικές στατιστικές κατανομές της συγκομιζόμενης ενέργειας, ως απλουστευμένα μοντέλα της

τυχαίας φύσης των περιβαλλοντικών πηγών. Συγκεκριμένα, μελετώνται οι ομοιόμορφη, εκθετική, λογαριθμοκανονική, Weibull και Rayleigh κατανομή, και αναλύεται η επίδρασή τους στον ρυθμό παραγωγής δεδομένων. Πρέπει να σημειωθεί ότι η επιλογή των κατανομών δεν αποσκοπεί στο να αναδειχθεί ποια περιγράφει καλύτερα την πραγματικότητα, αλλά στο να διερευνηθεί πώς η στοχαστικότητα της ενέργειας επηρεάζει τη δικτυακή απόδοση.

Παράλληλα, εξετάζεται η μεταβλητότητα του μεγέθους της μπαταρίας κάθε κόμβου. Η ανάλυση επικεντρώνεται στην σχέση μεταξύ χωρητικότητας μπαταρίας και ρυθμού παραγωγής δεδομένων, αναδεικνύοντας τη σημασία της επιλογής κατάλληλου μεγέθους αποθήκευσης για τη βελτιστοποίηση της συνολικής απόδοσης του δικτύου.

## **1.2. Δομή διπλωματικής εργασίας**

Η παρούσα διπλωματική εργασία οργανώνεται σε 7 κεφάλαια. Συγκεκριμένα,

- Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται οι μέθοδοι μέσω των οποίων μπορεί να επιτευχθεί συγκομιδή ενέργειας από το περιβάλλον. Αναλύονται εκτενώς οι τεχνολογίες ηλιακής, αιολικής, ραδιοσυχνотικής, θερμικής και μηχανικής συγκομιδής ενέργειας, καθώς και τα επιμέρους στάδια και δομικά στοιχεία κάθε συστήματος.
- Στο κεφάλαιο 3 περιγράφονται οι μηχανισμοί αποθήκευσης ενέργειας. Αναλύονται οι κατηγορίες των μπαταριών και των υπερπυκνωτών, η αρχή λειτουργίας τους, οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοσή τους, καθώς και οι εφαρμογές τους σε περιβάλλοντα IoT.
- Στο κεφάλαιο 4 περιλαμβάνεται το πρόβλημα βελτιστοποίησης ισχύος, δρομολόγησης και ελέγχου συμφόρησης σε δίκτυα ενεργειακής συγκομιδής. Στη συνέχεια, αναπτύσσεται η μεθοδολογία επίλυσης του.
- Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν και καταγράφονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν για κάθε σενάριο.
- Στο Κεφάλαιο 6 γίνεται η σύνοψη της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καταγράφονται τα συνολικά συμπεράσματα της, και προτείνονται ορισμένες πιθανές επεκτάσεις της.
- Στο Κεφάλαιο 7 περιλαμβάνεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΥΓΚΟΜΙΔΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

---

### 2.1 Γενικά

Η αξιοποίηση φυσικών πηγών ενέργειας για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ξεκίνησε να θεμελιώνεται από τον 19<sup>ο</sup> αιώνα με ανακαλύψεις που αργότερα χρησιμοποιήθηκαν στις σύγχρονες τεχνολογίες. Το 1826 ο Thomas Johann Seebeck παρατήρησε ότι όταν δύο διαφορετικά μέταλλα σχηματίσουν ένα κλειστό κύκλωμα και διατηρηθούν σε διαφορετικές θερμοκρασίες παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα. Το φαινόμενο αυτό ονομάστηκε φαινόμενο Seebeck και αποτέλεσε την απαρχή των θερμοηλεκτρικών εφαρμογών. Αντίστοιχα, το 1831 οι Joseph Henry και Michael Faraday ανακάλυψαν ανεξάρτητα την αρχή παραγωγής ηλεκτρισμού μέσω μαγνητικών πεδίων. Ενώ, το 1839 ο Edmund Becquerel παρατήρησε ότι το φως μπορεί να διεγείρει ένα ηλεκτρολυτικό κύτταρο, προκαλώντας ροή ηλεκτρικού φορτίου, θέτοντας την βάση για την ανάπτυξη του πρώτου φωτοβολταϊκού στοιχείου. Τέλος, το 1880 οι Pierre και Jacques Curie απέδειξαν ότι ορισμένοι κρύσταλλοι αποκτούν ηλεκτρισμό όταν συμπιέζονται ή υφίστανται μηχανική παραμόρφωση δίνοντας βήμα στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. [20]

Σήμερα, οι τεχνολογίες αυτές βρίσκουν εφαρμογή λόγω της ραγδαίας εξάπλωσης των συσκευών IoT οι οποίες αποτελούν διασυνδεδεμένες έξυπνες μονάδες ικανές να συλλέγουν, να επεξεργάζονται και να ανταλλάσσουν δεδομένα με το περιβάλλον ή άλλες συσκευές, συχνά χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση. Παραδείγματα τέτοιων συσκευών αποτελούν αισθητήρες περιβάλλοντος, βιοϊατρικές φορητές συσκευές, έξυπνες οικιακές συσκευές και βιομηχανικοί ελεγκτές, που έχουν εγκατασταθεί τόσο σε μονάδες υγειονομικής περίθαλψης όσο και σε έξυπνες πόλεις και σπίτια. Μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις αυτής της ανάπτυξης αφορά την αξιόπιστη και βιώσιμη τροφοδοσία αυτών των συσκευών. Η παραδοσιακή χρήση μπαταριών όχι μόνο αυξάνει το κόστος και την πολυπλοκότητα της συντήρησης αυτών των πολυπληθών συσκευών, αλλά δημιουργεί και ανησυχίες σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Αυτές οι προκλήσεις έχουν οδηγήσει στην αναζήτηση εναλλακτικών λύσεων για την δημιουργία ενεργειακά αυτόνομων συστημάτων.

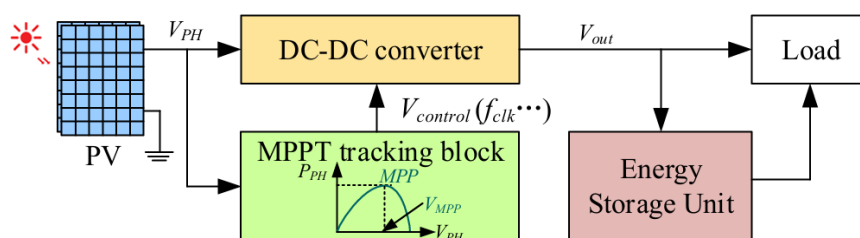
Η συγκομιδή ενέργειας αναφέρεται στη διαδικασία συλλογής της ενέργειας που υπάρχει στο περιβάλλον και στη μετατροπή της σε αξιοποιήσιμη ηλεκτρική ισχύ. Πολλές πηγές περιβαλλοντικής ενέργειας έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα υποσχόμενες για εφαρμογές IoT. Η ηλιακή ενέργεια παραμένει μία από τις πιο αποτελεσματικές μεθόδους, ειδικά σε εξωτερικές εγκαταστάσεις, ενώ η αιολική ενέργεια προσφέρει δυνατότητες κλιμάκωσης σε κατάλληλα περιβάλλοντα. Η θερμική συγκομιδή ενέργειας αξιοποιεί διαφορές θερμοκρασίας, όπως αυτές που εμφανίζονται σε βιομηχανικά μηχανήματα ή στο ανθρώπινο σώμα, ενώ η συγκομιδή μέσω ραδιοσυχνοτήτων εκμεταλλεύεται την ηλεκτρομαγνητική ενέργεια από σήματα επικοινωνίας.

Η ενσωμάτωση της συγκομιδής ενέργειας σε συσκευές IoT ανοίγει τον δρόμο για καινοτόμες εφαρμογές. Οι φορητές ηλεκτρονικές συσκευές, τα βιοϊατρικά εμφυτεύματα, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και τα συστήματα απομακρυσμένης παρακολούθησης μπορούν να επωφεληθούν σημαντικά από αυτοσυντηρούμενες πηγές ενέργειας, οι οποίες παρατείνουν τη διάρκεια λειτουργίας και μειώνουν την ανάγκη ανθρώπινης παρέμβασης. Καθώς η πρόοδος στα υλικά, στην αποθήκευση ενέργειας και στα ηλεκτρονικά χαμηλής κατανάλωσης συνεχίζεται, η συγκομιδή ενέργειας αναμένεται να αποτελέσει κεντρικό ρόλο στις μελλοντικές υποδομές IoT.

## 2.2 Ηλιακή συγκομιδή ενέργειας

Η συγκομιδή ηλιακής ενέργειας αποτελεί μια από τις πιο καθιερωμένες και ευρέως εφαρμοζόμενες μεθόδους μετατροπής της φυσικής ενέργειας σε ηλεκτρική ισχύ. Η ηλιακή ακτινοβολία είναι μια ανανεώσιμη, προβλέψιμη και ανεξάντλητη πηγή ενέργειας, γεγονός που την καθιστά ιδιαίτερα ελκυστική για την τροφοδοσία ηλεκτρονικών συσκευών. Εκτός από την ευρεία διαθεσιμότητα της, παρέχει υψηλή πυκνότητα ισχύος, της τάξεως των  $100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ . Οι εξελίξεις στις φωτοβολταϊκές (PV) τεχνολογίες έχουν βελτιώσει σημαντικά την αποδοτικότητα και την οικονομική προστιμότητα των ηλιακών κυττάρων, επιτρέποντας την ενσωμάτωσή τους σε ποικίλες εφαρμογές. Ωστόσο, η απόδοση της εξαρτάται από τις κλιματικές και γεωγραφικές συνθήκες και αντιμετωπίζει προκλήσεις που σχετίζονται με τη βέλτιστη κατεύθυνση και γωνία πρόσπτωσης του φωτός.

Ένα τυπικό σύστημα συγκομιδής ηλιακής ενέργειας αποτελείται από τέσσερα βασικά στοιχεία που συνεργάζονται για τη συλλογή, μετατροπή και αποθήκευση της ηλιακής ακτινοβολίας για μελλοντική χρήση. Μια διάταξη ενός τέτοιου συστήματος παρουσιάζεται στην εικόνα 1.



Σχήμα 1: Δομή συστήματος ηλιακής συγκομιδής ενέργειας [1]

Το πρώτο και πιο σημαντικό στοιχείο είναι το φωτοβολταϊκό πλαίσιο, το οποίο μετατρέπει την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια συνεχούς τάσης μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Σύμφωνα με το φαινόμενο αυτό, όταν τα φωτόνια προσπίπτουν στην ειδική ημιαγώγιμη επιφάνεια του φωτοβολταϊκού ελευθερώνουν ηλεκτρόνια. Η διατεταγμένη κίνηση αυτών των ηλεκτρονίων, υπό την επίδραση εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου, δημιουργεί το ηλεκτρικό ρεύμα. Τα PV πλαίσια κατασκευάζονται συνήθως από πυρίτιο και η απόδοσή τους εξαρτάται από τον τύπο του χρησιμοποιούμενου υλικού: μονοκρυσταλλικό, πολυκρυσταλλικό ή άμορφο πυρίτιο. Τα κρυσταλλικά κύτταρα, είτε

μονοκρυσταλλικά είτε πολυκρυσταλλικά, είναι κατάλληλα για υπαίθριες εφαρμογές και προσφέρουν υψηλή απόδοση, με μεγαλύτερο κόστος. Αντίθετα, τα άμορφα κύτταρα πυριτίου είναι φθηνότερα, χρησιμοποιούνται ευρέως σε εσωτερικούς χώρους, αλλά η απόδοσή τους φτάνει περίπου το 10%.

Στη συνέχεια, χρησιμοποιείται ένα κύκλωμα διαχείρισης ισχύος για τη ρύθμιση της ασταθούς τάσης και του ρεύματος εισόδου από το PV πλαίσιο, διασφαλίζοντας τη σταθερή και ασφαλή λειτουργία των συνδεδεμένων συσκευών. Το κύκλωμα αυτό αποτελείται από DC – DC μετατροπείς που χρησιμοποιούν διάφορες τεχνικές ρύθμισης και μετατροπής τάσης, καθεμία με τα δικά της πλεονεκτήματα και περιορισμούς. Αναλυτικότερα βάση των [1] και [5],

- Μετατροπείς διακοπτικής λειτουργίας βασισμένοι σε επαγωγό ( inductor based switching converter)

Πρόκειται για τους πιο κοινούς μετατροπείς που χρησιμοποιούνται στα συστήματα συγκομιδής ενέργειας. Αποτελείται κυρίως από τους buck, boost και buck-boost. Οι πρώτοι είναι υπεύθυνοι για την μείωση της τάσης εισόδου σε ένα χαμηλότερο και σταθερό επίπεδο, κατάλληλο για συσκευές χαμηλής τάσης. Αντίθετα, οι boost μετατροπείς αυξάνουν την τάση εισόδου όταν είναι χαμηλότερη από την απαιτούμενη τάση του φορτίου. Τέλος, οι buck-boost αυξομειώνουν την τάση προσφέροντας ευελιξία σε συστήματα που η είσοδος κυμαίνεται σημαντικά. Αυτή η κατηγορία μετατροπέων χαρακτηρίζεται από υψηλή απόδοση, περίπου 90% αλλά δεν μπορεί να ενσωματωθεί εύκολα εξαιτίας του μεγάλου εξωτερικού επαγωγέα.

- Ρυθμιστές Τάσης Low Dropout (LDO)

Οι LDO ρυθμιστές τάσης είναι γραμμικοί ρυθμιστές που παρέχουν σταθερή και χαμηλού θορύβου έξοδο. Ξεχωρίζουν για το μικρό τους μέγεθος και την απλή υλοποίηση τους. Η αποδοτικότητα τους είναι περιορισμένη, ιδιαίτερα όταν η τάση εισόδου είναι σημαντικά υψηλότερη από την επιθυμητή τάση εξόδου, όπου και η απόδοση μειώνεται.

- Αντλίες Φορτίου (Charge Pumps, CP)

Οι αντλίες φορτίου είναι μετατροπείς τάσης βασισμένες σε πυκνωτές που δεν χρησιμοποιούν επαγωγούς. Επιτυγχάνουν αύξηση, μείωση ή αναστροφή τάσης μέσω εναλλασσόμενης σύνδεσης πυκνωτών σε διαφορετικές διατάξεις. Προσφέρουν υψηλή αποδοτικότητα σε χαμηλά επίπεδα ρεύματος.

Σε συστήματα συγκομιδής ενέργειας με πολύ χαμηλή κατανάλωση, η τάση εισόδου μπορεί να είναι ανεπαρκής για να ενεργοποιήσει απευθείας έναν μετατροπέα διακοπτικής λειτουργίας. Σε αυτές τις περιπτώσεις, γίνεται πρώτα χρήση της CP ώστε να αυξηθεί η τάση σε κατάλληλη τάση λειτουργίας και ύστερα ενεργοποιείται ο μετατροπέας διακοπτικής λειτουργίας βασισμένος σε επαγωγό. Αυτός ο συνδυασμός, αν και πολύπλοκος, οδηγεί στον σχεδιασμό της αντλίας φορτίου σαν ενιαίο DC-DC μετατροπέα.

Για να αποτυπωθούν συγκριτικά τα χαρακτηριστικά των παραπάνω μετατροπέων, ο Πίνακας 2.1 συνοψίζει τα βασικά κριτήρια αξιολόγησης.

Πίνακας 1: Σύγκριση των χαρακτηριστικών των μετατροπέων

|                                     | <b>Μετατροπείς<br/>διακοπτικής<br/>λειτουργίας βασισμένοι<br/>σε επαγωγό</b> | <b>LDO</b>         | <b>Αντλίες φορτίου</b>                     |
|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------------------------------|
| <b>Τάση</b>                         | $V_{in} < V_{out}$ ή $V_{in} > V_{out}$                                      | $V_{in} > V_{out}$ | $V_{in} < V_{out}$ ή<br>$V_{in} > V_{out}$ |
| <b>Απόδοση</b>                      | Μεσαία                                                                       | Πολύ<br>υψηλή      | Υψηλή                                      |
| <b><math>\Delta V_{out}</math></b>  | Χαμηλό                                                                       | Πολύ<br>χαμηλό     | Μεσαίο - Υψηλό                             |
| <b>Πολυπλοκότητα<br/>σχεδιασμού</b> | Μεσαίο - Υψηλό                                                               | Χαμηλό             | Μεσαίο - Υψηλό                             |
| <b>Κόστος</b>                       | Μεσαίο                                                                       | Χαμηλό             | Χαμηλό - Μεσαίο                            |
| <b>Ικανότητα<br/>φόρτωσης</b>       | Υψηλή                                                                        | Μεσαία             | Μεσαία                                     |

Η έξοδος ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου εξαρτάται έντονα από περιβαλλοντικές συνθήκες όπως η ηλιακή ακτινοβολία και η θερμοκρασία. Για κάθε συνθήκη, το PV διαθέτει ένα μοναδικό σημείο λειτουργίας, γνωστό ως Σημείο Μέγιστης Ισχύος (Maximum Power Point, MPP), στο οποίο το γινόμενο ρεύματος και τάσης μεγιστοποιείται. Αν το PV λειτουργεί μακριά από αυτό το σημείο, χάνονται σημαντικές ποσότητες παραγόμενης ενέργειας. Για να διασφαλιστεί η βέλτιστη συγκομιδή ενέργειας, χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι Maximum Power Point Tracking (MPPT) στο κύκλωμα διαχείρισης ισχύος, οι οποίοι προσαρμόζουν συνεχώς την τάση και το ρεύμα λειτουργίας του PV προς το MPP. Έχουν αναπτυχθεί πολυάριθμες τεχνικές MPPT με τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες να είναι οι ακόλουθες:

- Perturb and Observe (P&O)

Είναι η απλούστερη και πιο διαδεδομένη μέθοδος λόγω των χαμηλών υπολογιστικών απαιτήσεων. Διαταράσσει ελαφρά την τάση λειτουργίας του PV και παρατηρεί την μεταβολή της ισχύος εξόδου. Ωστόσο, παρουσιάζει ταλαντώσεις γύρω από το MPP οδηγώντας σε απώλειες ισχύος. Εισάγοντας χρονικές καθυστερήσεις μειώνονται οι ταλαντώσεις αλλά επιβραδύνεται η απόκριση σε μεταβαλλόμενες συνθήκες. Επιπλέον, σε μερική σκία με πολλαπλά τοπικά μέγιστα, οδηγεί σε λανθασμένη παρακολούθηση. [3]

- Hill Climbing

Η τεχνική προσαρμόζει τον κύκλο λειτουργίας του μετατροπέα DC-DC ώστε να ακολουθεί το MPP, συγκρίνοντας την ισχύ εξόδου σε διαδοχικές δειγματοληψίες. Αν η μεταβολή ισχύος είναι θετική, ο κύκλος λειτουργίας αυξάνεται, ενώ αν είναι αρνητική, μειώνεται. Όπως και η P&O είναι εύκολη στην υλοποίηση, ωστόσο παρουσιάζει συμβιβασμό μεταξύ σταθερότητας και ταχύτητας απόκρισης. Δηλαδή για μικρά

βήματα μειώνονται οι ταλαντώσεις, αλλά καθυστερεί η απόκριση σε μεταβαλλόμενες συνθήκες, ενώ για μεγάλα βήματα έχει το αντίθετο αποτέλεσμα. [3]

- Incremental Conductance (IncCond)

Η μέθοδος χρησιμοποιείται ευρέως λόγω της υψηλής ακρίβειας παρακολούθησης σε κατάσταση σταθερής λειτουργίας και της καλής προσαρμοστικότητας σε ταχέως μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες. Λειτουργεί συγκρίνοντας την στιγμιαία αγωγιμότητα του PV πλαισίου με τη διαφορική αγωγιμότητα για τον εντοπισμό του MPP. Η κλίση της καμπύλης ισχύος του PV είναι μηδενική στο MPP, θετική όταν το σημείο λειτουργίας είναι κάτω από το MPP και αρνητική όταν βρίσκεται πάνω από αυτό. [3]

- Fractional Open-Circuit Voltage (FOCV)

Χρησιμοποιείται λόγω της χαμηλής υπολογιστικής πολυπλοκότητας, της απλότητας υλοποίησης και της οικονομικής αποτελεσματικότητας. Παρακολουθεί το MPP έμμεσα, παρέχοντας γρήγορη απόκριση με ελάχιστες απαιτήσεις αισθητήρων και ικανοποιητική ακρίβεια σε πολλές συνθήκες. Ωστόσο, η FOCV απαιτεί προσωρινή αποσύνδεση του PV πλαισίου από το φορτίο για τη μέτρηση της τάσης ανοικτού κυκλώματος, προκαλώντας σύντομες διακοπές ισχύος και μείωση της ακρίβειας παρακολούθησης. [4]

Για εφαρμογές IoT, η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής MPPT είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς παρουσιάζονται περισσότεροι περιορισμοί. Εκτός από τις κλασικές μεθόδους MPPT, έχουν αναπτυχθεί και πιο προηγμένες τεχνικές όπως οι Fuzzy Logic και Neural Network. Αυτές οι μέθοδοι μπορούν να προσαρμόζονται καλύτερα σε δυναμικές και μη γραμμικές συνθήκες λειτουργίας, όπως γρήγορες μεταβολές ακτινοβολίας ή μερική σκίαση, προσφέροντας υψηλότερη ακρίβεια παρακολούθησης του MPP. Ωστόσο, η υλοποίησή τους απαιτεί αυξημένους υπολογιστικούς πόρους, γεγονός που τις καθιστά πιο κατάλληλες για εφαρμογές με μεγαλύτερη ενεργειακή διαθεσιμότητα.

Η πλεονάζουσα ενέργεια που συλλέγεται αποθηκεύεται σε επαναφορτιζόμενες μπαταρίες ή υπερπυκνωτές, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Οι μπαταρίες προσφέρουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και συνεχή παροχή ισχύος, αλλά έχουν περιορισμένο κύκλο ζωής και απαιτούν προστασία από υπερφόρτιση ή εκφόρτιση. Οι υπερπυκνωτές, αντίθετα, έχουν υψηλή ισχύ και πολύ μεγαλύτερη αντοχή σε κύκλους φόρτισης/εκφόρτισης, καθιστώντας τους ιδανικούς για εφαρμογές όπου απαιτούνται σύντομες εκρήξεις ενέργειας ή ταχείες μεταβολές φορτίου. Συνολικά, αυτά τα στοιχεία σχηματίζουν ένα ολοκληρωμένο σύστημα ικανό να παρέχει αξιόπιστη πηγή ενέργειας, αντιμετωπίζοντας παράλληλα την διαλείπουσα φύση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Ως πρακτικό παράδειγμα, οι Dondi et al. (2008) ανέπτυξαν ένα σύστημα συγκομιδής ηλιακής ενέργειας για αυτοτροφοδοτούμενα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSNs). Το σύστημα ενσωματώνει ένα στάδιο εισόδου DC-DC τύπου buck για τη ρύθμιση της μεταβλητής εξόδου του PV, μια MPPT μονάδα χαμηλής ισχύος βασισμένη στη μέθοδο Fractional Open-Circuit Voltage (FOCV) για τη συνεχή λειτουργία του PV στο σημείο

μέγιστης ισχύος, και ένα μετατροπέα DC–DC εξόδου προσαρμοσμένο στις ενεργειακές απαιτήσεις του κόμβου αισθητήρα. Οι συγγραφείς παρέχουν λεπτομερείς οδηγίες σχεδιασμού σχετικά με την επιλογή στοιχείων, με έμφαση στη μείωση των παράσιτων απωλειών και στη βελτίωση της συνολικής αποδοτικότητας. Η εργασία αυτή καταδεικνύει πώς ο προσεκτικός συνδυασμός μοντελοποίησης PV, βελτιστοποιημένης μετατροπής DC–DC, ελέγχου MPPT και διαχείρισης αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να ενισχύσει σημαντικά την ενεργειακή αυτονομία και την αξιοπιστία λειτουργίας συσκευών χαμηλής κατανάλωσης και ενσωματωμένων συστημάτων IoT. [5]

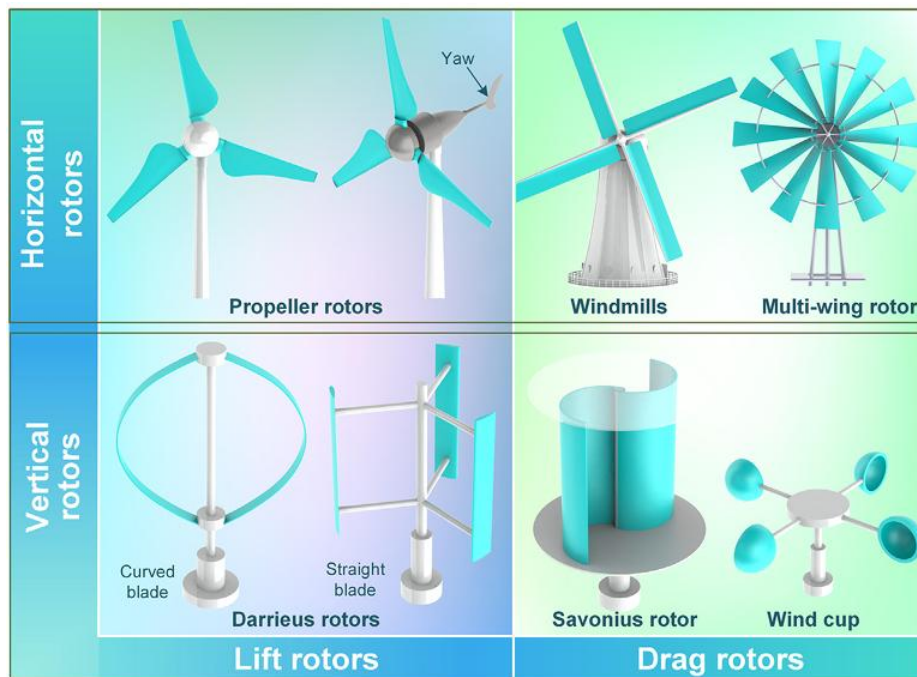
## **2.3 Αιολική συγκομιδή ενέργειας**

Η συγκομιδή αιολικής ενέργειας αποτελεί μια σημαντική εναλλακτική ή συμπληρωματική πηγή στην ηλιακή ενέργεια, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα με περιορισμένη ηλιοφάνεια. Βασίζεται στην μετατροπή της κινητικής ενέργειας του αέρα σε ηλεκτρική ενέργεια. Παρόλο που οι τεχνολογίες μεγάλης κλίμακας παραγωγής αιολικής ενέργειας έχουν αναπτυχθεί πλήρως, η ανάγκη για συστήματα μικρής κλίμακας (όπως small wind turbines, SWTs ) οδηγεί στην μελέτη τους, με στόχο την τροφοδοσία αυτόνομων συσκευών IoT και ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Η ποσότητα του αέρα που μπορεί να συγκομιστεί εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου, την πυκνότητα ισχύος του, αγγίζει τα  $177 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ , και τα χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας. Ωστόσο, παρουσιάζονται και συγκεκριμένες προκλήσεις όπως οι μεταβλητές ταχύτητες ανέμου, η μηχανική φθορά της ανεμογεννήτριας και ο ακουστικός θόρυβος.

Βασισμένο στη μελέτη [7] ένα σύστημα συγκομιδής αιολικής ενέργειας με χρήση SWTs μπορεί να αναλυθεί σε τρία κύρια στάδια, την ανόρθωση, τη μετατροπή της ενέργειας μέσω διαφόρων μηχανισμών όπως ηλεκτρομαγνητικές, πιεζοηλεκτρικές ή τριβηλεκτρικές τεχνικές καθώς και την αξιοποίηση ή αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας σε μπαταρίες ή υπερπυκνωτές, διασφαλίζοντας σταθερή παροχή ισχύος για τις συσκευές IoT ακόμη και σε περιόδους χαμηλής έντασης ανέμου.

### **2.3.1. Στάδιο Ανόρθωσης**

Αναλυτικότερα, το στάδιο της ανόρθωσης είναι υπεύθυνο για την σύλληψη της κινητικής ενέργειας και την μετατροπή της σε αξιοποιήσιμη μηχανική ενέργεια. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω αεροδυναμικών δομών ειδικά σχεδιασμένων για την μεγιστοποίηση της συλλεγόμενης ποσότητας ενέργειας. Μια τέτοια δομή είναι ο ρότορας, η απόδοση του οποίου εξαρτάται από παράγοντες όπως ο σχεδιασμός και η διαμόρφωση του περυγίου και του άξονα του. Για τον λόγο αυτό, μελετώνται δύο κύριες κατηγορίες διαχωρισμού, βάση προσανατολισμού του περιστροφικού τους άξονα και βάση των αεροδυναμικών αρχών, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.



Σχήμα 2: Δομή και ταξινόμηση ρότορα [7]

Οι ρότορες οριζόντιου άξονα (HAWTs) έχουν τον άξονα περιστροφής παράλληλο με τον άνεμο και συνήθως διαθέτουν απλή κατασκευή με υψηλή δυνατότητα εκκίνησης. Ωστόσο, απαιτούν μηχανισμό περιστροφής για να ευθυγραμμιστούν με τις μεταβαλλόμενες διευθύνσεις του ανέμου. Περιλαμβάνουν παραδοσιακούς ανεμόμυλους, αμερικανικούς ρότορες πολλαπλών φτερών και ρότορες τύπου έλικας. Αντίθετα, οι ρότορες κατακόρυφου άξονα (VAWTs), με άξονα περιστροφής κάθετο στη ροή του αέρα, προσφέρουν πανκατευθυντική και συμπαγή δομή, χωρίς να απαιτείται ευθυγράμμιση με τον άνεμο. Περιλαμβάνουν τους ρότορες Darrieus, Savonius και τους ρότορες τύπου “wind cup”. Ο ρότορας Darrieus μπορεί να διαθέτει καμπυλωτές λεπίδες, οι οποίες λειτουργούν κυρίως υπό τάση, ή ευθείες λεπίδες, οι οποίες είναι φθηνότερες στην κατασκευή αλλά απαιτούν ανθεκτική στήριξη για την αντιμετώπιση καμπτικών δυνάμεων. Ο ρότορας Savonius χρησιμοποιεί δύο έως τρεις S-καμπυλωτές λεπίδες για την παραγωγή ροπής μέσω διαφοροποιημένης αντίστασης του ανέμου, προσφέροντας υψηλή ροπή εκκίνησης, λειτουργία σε χαμηλές ταχύτητες και απλή κατασκευή. Τέλος, ο ρότορας τύπου “wind cup”, μια παραλλαγή του Savonius, χρησιμοποιείται συχνά σε ανεμόμετρα και έχει πρόσφατα προσαρμοστεί για μικρές συσκευές συγκομιδής αιολικής ενέργειας λόγω του συμπαγούς μεγέθους και της καλής απόδοσης σε χαμηλές ταχύτητες.

Οι ρότορες μπορούν επίσης να κατηγοριοποιηθούν με βάση των αεροδυναμικών αρχών, συγκεκριμένα σε ρότορες που βασίζονται σε ανύψωση (lift) και σε αντίσταση (drag). Οι ρότορες με βάση την ανύψωση, όπως οι HAWTs και οι Darrieus VAWTs, χρησιμοποιούν λεπίδες σε σχήμα πτερυγίου αεροπλάνου για την παραγωγή ανύψωσης κάθετης προς τη σχετική ταχύτητα του ανέμου. Για την ανάλυση τους εφαρμόζεται συνήθως η θεωρία των στοιχείων λεπίδας: η λεπίδα χωρίζεται σε μικρά στοιχεία, το καθένα από τα οποία συμβάλλει στη συνολική ροπή βάση της τοπικής σχετικής ταχύτητας του ανέμου, του μήκους χορδής της λεπίδας και της αναλογίας ταχύτητας άκρου. Οι δυνάμεις ανύψωσης και αντίστασης σε κάθε στοιχείο διασπώνται σε κάθετες

και εφαπτομενικές συνιστώσες, με την εφαπτομενική συνιστώσα να παράγει τη ροπή που κινεί τον ρότορα.

Αντίθετα, οι ρότορες που βασίζονται σε αντίσταση, όπως ο ρότορας Savonius, λειτουργούν μέσω διαφοροποιημένων δυνάμεων αντίστασης στις καμπυλωτές επιφάνειες των λεπίδων. Οι κυρτές και κοίλες πλευρές των λεπίδων αλληλεπιδρούν διαφορετικά με τον άνεμο, δημιουργώντας καθαρή εφαπτομενική δύναμη που παράγει περιστροφή. Οι ρότορες με βάση την αντίσταση είναι μηχανικά απλούστεροι, παρέχουν υψηλή ροπή εκκίνησης και αποδίδουν καλά σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου, αν και γενικά είναι λιγότερο αποδοτικοί σε σχέση με τους ρότορες ανύψωσης.

Η επιλογή τύπου ρότορα, προσανατολισμού άξονα και αεροδυναμικής αρχής εξαρτάται από την προοριζόμενη εφαρμογή, τις αναμενόμενες συνθήκες ανέμου και τους φυσικούς περιορισμούς. Οι ρότορες ανύψωσης υπερέχουν στην αποτελεσματική εξαγωγή ενέργειας σε μέτριες έως υψηλές ταχύτητες ανέμου, ενώ οι ρότορες αντίστασης είναι πιο κατάλληλοι για συμπαγείς, χαμηλής ταχύτητας και πανκατευθυντικά περιβάλλοντα, καθιστώντας τους ιδιαίτερα κατάλληλους για μικρής κλίμακας συσκευές συγκομιδής ενέργειας για IoT και συσκευές χαμηλής κατανάλωσης.

### 2.3.2. Στάδιο Μετατροπής

Το στάδιο μετατροπής σε ένα σύστημα συγκομιδής αιολικής ενέργειας μετατρέπει την μηχανική ενέργεια που συλλέγεται από τον ρότορα σε ηλεκτρική ενέργεια κατάλληλη για αποθήκευση ή άμεση χρήση. Διαφορετικοί μηχανισμοί μετατροπής χρησιμοποιούνται ανάλογα με την κλίμακα του συστήματος, την απαιτούμενη ισχύ και τους περιορισμούς της συσκευής. Οι τρεις κύριες μέθοδοι είναι η ηλεκτρομαγνητική, η πιεζοηλεκτρική και η τριβοηλεκτρική μετατροπή.

Η ηλεκτρομαγνητική μετατροπή βασίζεται στον νόμο του Faraday για την ηλεκτρομαγνητική επαγωγή. Οι μικρές ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν συνήθως ηλεκτρομαγνητικές γεννήτριες (EMGs), που αποτελούνται από έναν ρότορα εξοπλισμένο με μόνιμους μαγνήτες και έναν στάτορα με πηνία. Οι διατάξεις με ακτινική ή αξονική ροή επιτρέπουν τη σχετική κίνηση μεταξύ του μαγνητικού πεδίου και των πηνίων, επάγοντας ηλεκτρικό ρεύμα κατά την περιστροφή του ρότορα. Η έξοδος των EMGs εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ταχύτητα περιστροφής του ρότορα, το μέγεθος της γεννήτριας και τον σχεδιασμό των πηνίων. Οι μικρές EMGs συχνά παράγουν χαμηλή τάση και απαιτούν προσεκτική επεξεργασία ισχύος, αλλά παραμένουν μια αξιόπιστη και ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος μετατροπής μηχανικής σε ηλεκτρική ενέργεια.

Η πιεζοηλεκτρική μετατροπή βασίζεται στο άμεσο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, όπου η μηχανική παραμόρφωση κρυσταλλικών υλικών παράγει ηλεκτρικό δυναμικό. Κοινά υλικά περιλαμβάνουν  $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$  (PZT), PVDF, χαλαζία ( $\text{SiO}_2$ ) και διάφορα σύνθετα υλικά. Ο σχεδιασμός της δομής παίζει κρίσιμο ρόλο στην παραγωγή ενέργειας. Οι πιεζοηλεκτρικές γεννήτριες (PEGs) πρέπει να λειτουργούν κοντά στη συντονιστική τους συχνότητα για μέγιστη απόδοση, απαιτώντας προσεκτική επιλογή υλικών, γεωμετρίας και διαστάσεων. Η πιεζοηλεκτρική μετατροπή είναι κατάλληλη για

εφαρμογές υπερ-χαμηλής ισχύος, όπως αυτόνομοι αισθητήρες και μικρές IoT συσκευές.

Τέλος, οι τριβοηλεκτρικές νανογεννήτριες (TENGs) εκμεταλλεύονται το φαινόμενο ηλεκτροποίησης μέσω επαφής, όπου δύο υλικά φορτίζονται μετά από επαναλαμβανόμενη επαφή και απομάκρυνση. Οι TENGs μετατρέπουν την μηχανική κίνηση σε ροή ηλεκτρονίων. Σε κάθε διάταξη, η σχετική κίνηση ή παραμόρφωση των στρωμάτων παράγει εναλλασσόμενο ρεύμα, το οποίο μπορεί να προσαρμοστεί για αποθήκευση ή άμεση χρήση. Οι TENGs είναι ελαφριές, ευέλικτες και μπορούν να λειτουργούν σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου, καθιστώντας τις ιδανικές για μικρής κλίμακας συστήματα και περιβάλλοντα με ακανόνιστη ροή αέρα, όπως μικρές συσκευές IoT.

Η επιλογή του μηχανισμού μετατροπής εξαρτάται από τις απαιτήσεις ισχύος, τον σχεδιασμό του ρότορα, τις συνθήκες ανέμου και τους περιορισμούς της συσκευής. Η ηλεκτρομαγνητική μετατροπή προτιμάται σε εφαρμογές με συνεχή και υψηλότερη ισχύ, ενώ οι πιεζοηλεκτρικές και τριβοηλεκτρικές προσεγγίσεις είναι πιο κατάλληλες για συμπαγή, χαμηλής ισχύος συστήματα. Μετά τη μετατροπή, η ηλεκτρική ενέργεια συνήθως περνά μέσα από μετατροπέα DC–DC, ώστε η τάση και το ρεύμα να είναι συμβατά με το σύστημα αποθήκευσης ή το φορτίο, όπως ακριβώς σε συστήματα συγκομιδής ηλιακής ενέργειας.

### 2.3.3. Αξιοποίηση

Η συγκομιδή αιολικής ενέργειας με χρήση μικρών ανεμογεννητριών έχει βρει πρακτικές εφαρμογές προσφέροντας βιώσιμες και αυτόνομες λύσεις τροφοδοσίας. Η ευελιξία στο σχεδιασμό τους επιτρέπει στις SWTs να προσαρμόζονται σε συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες και ενεργειακές απαιτήσεις.

Μία σημαντική εφαρμογή είναι στην παρακολούθηση υποδομών, όπου οι SWTs παρέχουν αυτόνομη ενέργεια για αισθητήρες σε απομακρυσμένες ή δύσκολα προσβάσιμες τοποθεσίες. Οι Tan et al. (2022) [8] ανέπτυξαν έναν αυτό-προσαρμοζόμενο VAWT συνδεδεμένο με μια ηλεκτρομαγνητική γεννήτρια για παρακολούθηση της κατάστασης γεφυρών σε φαράγγια. Το σύστημα εκμεταλλεύεται τόσο τους φυσικούς ανέμους του φαραγγιού όσο και τη ροή που προκαλεί η κίνηση οχημάτων, χρησιμοποιώντας έναν προσαρμοστικό μηχανισμό που εναλλάσσει χαμηλή απόσβεση και υψηλή ισχύ, εξασφαλίζοντας αξιόπιστη εκκίνηση σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου ενώ μεγιστοποιεί την έξοδο σε ισχυρότερους ριπές. Πειράματα σε αεροσήραγγα επιβεβαίωσαν μέγιστη έξοδο 471,56 mW σε ταχύτητα 14 m/s, ενώ η εγκατάσταση στη Γέφυρα Baling River απέδειξε ότι το σύστημα μπορεί να υπερκαλύψει τις ενεργειακές απαιτήσεις του εξοπλισμού παρακολούθησης.

Μία ακόμα εφαρμογή των SWTs είναι στη «έξυπνη γεωργία», όπου έχουν αναπτυχθεί υβριδικές συσκευές συγκομιδής ενέργειας για την μεγιστοποίηση της εκμετάλλευσης τόσο της αιολικής όσο και της ηλιακής ενέργειας. Για παράδειγμα, οι Wang et al. [9] πρότειναν ένα σύστημα που ενσωματώνει δύο TENGs, δύο EMGs και ηλιακά κύτταρα, επιτρέποντας ταυτόχρονη συγκομιδή αιολικής και ηλιακής ενέργειας. Ένας ειδικά σχεδιασμένος εγκάρσιος συνδετήρας μετατρέπει την περιστροφή μιας “wind-cup” σε οριζόντια κίνηση, μειώνοντας την τριβή και αυξάνοντας την αντοχή, ενώ επιτρέπει την

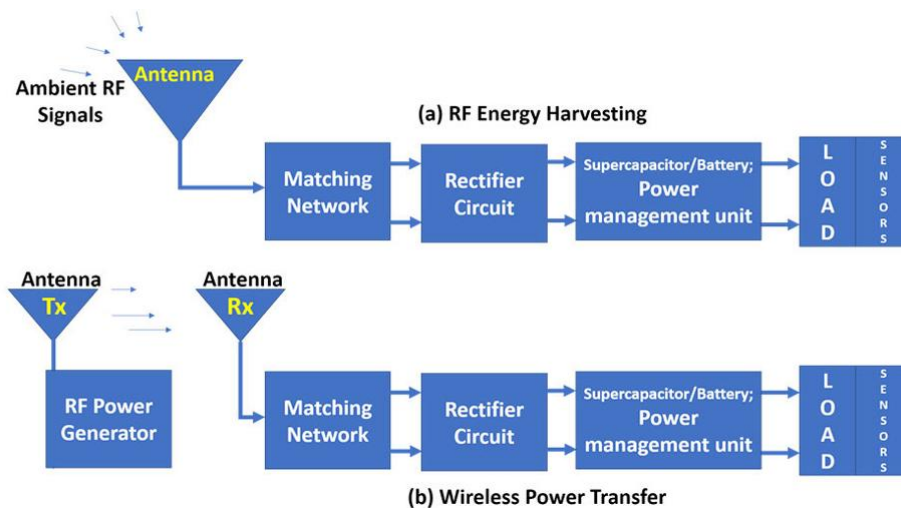
αποδοτική λειτουργία τόσο των TENGs όσο και των EMGs. Με μέση ταχύτητα ανέμου 7 m/s, οι TENGs πέτυχαν τάση ανοιχτού κυκλώματος 570 V και ρεύμα βραχυκυκλώματος 40  $\mu$ A, ενώ οι EMGs παρήγαγαν 0,8 V και 1,85 mA. Το σύστημα τροφοδότησε αισθητήρες παρακολούθησης θερμοκρασίας και υγρασίας, συστήματα ασφαλείας αγροκτημάτων και συσκευές IoT χαμηλής κατανάλωσης, αποδεικνύοντας τη δυνατότητα συνδυασμού υψηλής τάσης και χαμηλού ρεύματος TENG με υψηλό ρεύμα EMG σε πρακτικά συστήματα συγκομιδής ενέργειας.

Τα παραπάνω παραδείγματα δείχνουν την ευελιξία των SWTs σε διαφορετικές κλίμακες ισχύος και περιβαλλοντικές συνθήκες, από χαμηλής ισχύος IoT συσκευές στη γεωργία έως συστήματα παρακολούθησης υψηλότερης ισχύος σε υποδομές.

## 2.4 Συγκομιδή ενέργειας από ραδιοσυχνότητες

Η συγκομιδή ενέργειας από ραδιοσυχνότητες (radio frequency, RF) αποτελεί μια καινοτόμο μέθοδο παραγωγής ισχύος, επιτρέποντας την συλλογή ενέργειας από ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων, από 300 Hz έως 300 GHz, όπου εκπέμπουν τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, οι τηλεοπτικοί και ραδιοφωνικοί σταθμοί και το Wi-Fi. Σε αντίθεση με την ηλιακή και την αιολική ενέργεια, η RF είναι συνεχώς διαθέσιμη ανεξαρτήτως καιρικών συνθηκών καθιστώντας την ελκυστική για την τροφοδοσία συσκευών IoT χαμηλής ισχύος σε αστικά ή εσωτερικά περιβάλλοντα. Ωστόσο, βασικό μειονέκτημα της είναι η εξασθένηση της πυκνότητας ισχύος κατά την απομάκρυνση της από τον πομπό εκπομπής H/M κυμάτων. Στη σχετική βιβλιογραφία γίνεται ένας διαχωρισμός μεταξύ περιβαλλοντικής RF ενέργειας και στοχευμένης RF συγκομιδής ενέργειας, γνωστή και ως ασύρματη μεταφορά ισχύος (Wireless Power Transfer, WPT), όπου ένας πομπός εγκαθίσταται σκόπιμα για να εκπέμψει ισχύ σε μια συσκευή. Οι συχνότητες ενδιαφέροντος για ακτινοβολούμενη WPT είναι τα 900 MHz, 2.4 GHz και 5.8 GHz.

Η αρχιτεκτονική από πλευράς λήψης τόσο ενός RF συστήματος συγκομιδής ενέργειας (RFEH) όσο και ενός WPT αποτελείται από την κεραία, το δίκτυο αντιστοίχισης εμπέδησης (matching network), το κύκλωμα ανόρθωσης και την μονάδα διαχείρισης ισχύος. Η απόδοση του RFEH ή του WPT εξαρτάται σημαντικά από την απόδοση της κεραίας λήψης. Η κεραία λήψης και το κύκλωμα ανορθωτή αποτελούν τη λεγόμενη 'rectenna'. Στο σχήμα 3 αποτυπώνεται η αρχιτεκτονική των παραπάνω.



Σχήμα 3: (α) RF σύστημα συγκομιδής ενέργειας (β) WPT σύστημα

### 2.4.1 Κεραία Λήψης

Η κεραία αποτελεί το πρώτο τμήμα του συστήματος με βασικό ρόλο την συλλογή των H/M κυμάτων και την μετατροπή τους σε εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα (AC). Σε αντίθεση με το WPT, όπου οι παράμετροι της κεραίας εκπομπής είναι γνωστοί, οι κεραίες των RFEH συστημάτων λειτουργούν κάτω από απρόβλεπτες συνθήκες με μεταβαλλόμενη ισχύ σήματος και συχνότητας. Αυτή η αβεβαιότητα επιβάλλει ιδιαίτερα κριτήρια σχεδίασης:

- **Εύρος Ζώνης & Συχνότητα:** Για τη συγκομιδή από πολλαπλές περιβαλλοντικές πηγές, προτιμώνται πολυζωνικές ή ευρυζωνικές κεραίες. Επιπλέον, οι χαμηλότερες συχνότητες προτιμώνται καθώς υφίστανται μικρότερες απώλειες διάδοσης.
- **Πόλωση:** Η ασυμβατότητα πόλωσης μεταξύ πομπού και κεραίας λήψης μειώνει δραστικά την παραγόμενη ισχύ. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος σε περιβαλλοντικές συνθήκες, όπου η πόλωση είναι άγνωστη, χρησιμοποιούνται κεραίες κυκλικής πόλωσης ή διπλής γραμμικής πόλωσης.
- **Κατευθυντικότητα & Κέρδος:** Το αδιευκρίνιστο πλαίσιο διάδοσης οδηγεί στην προτίμηση πανκατευθυντικών κεραιών έναντι των κατευθυντικών. Αντίστοιχα, το κέρδος της κεραίας πρέπει να είναι μέτριο, καθώς η υψηλή κατευθυντικότητα (που σχετίζεται με υψηλό κέρδος) δεν βελτιώνει σημαντικά την απόδοση ενός RFEH, σε αντίθεση με ένα σύστημα WPT όπου οι κεραίες υψηλού κέρδους είναι απαραίτητες.
- **Απόδοση, Μέγεθος & Ευαισθησία:** Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι άρρηκτα συνδεδεμένα. Οι μικρότερες κεραίες τείνουν να έχουν χαμηλότερη απόδοση, ενώ η κεραία πρέπει να είναι αρκετά ευαίσθητη ώστε να ανιχνεύει και να συλλέγει σήματα εξαιρετικά χαμηλής ισχύος.

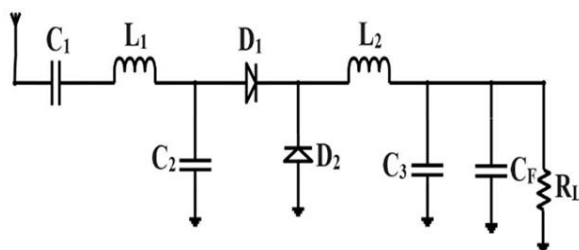
Η πρακτική εφαρμογή των αρχών σχεδίασης RFEH φαίνεται σε διάφορα παραδείγματα βιβλιογραφίας. Ένα αξιολογικό παράδειγμα είναι ο συμπαγής, διπλοζωνικός σχεδιασμός που προτάθηκε από τους Alam και Moury [12]. Η μικροταινιακή τους κεραία, βελτιστοποιημένη για τις ζώνες ISM των 2,4 GHz και 5,8 GHz, και ενσωματωμένη με ανορθωτή, αποτέλεσε μια ολοκληρωμένη λύση για συγκομιδή από κοινά δίκτυα WiFi.

Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν παραγωγή ισχύος έως 359  $\mu\text{W}$ , αποδεικνύοντας τη σκοπιμότητά της για πραγματικές εφαρμογές WSN.

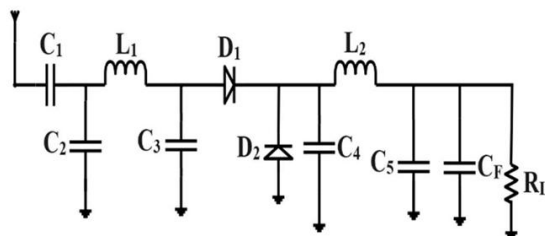
Σε ένα διαφορετικό πλαίσιο απαιτήσεων, οι Nadali, McEnoy και Ammann (2022) [13] ανέπτυξαν μια ευρυζωνική και κυκλικά πολωμένη (CP) σχισμοειδής κεραία. Ο κύριος στόχος αυτού του σχεδιασμού ήταν να αντιμετωπίσει την αβεβαιότητα ως προς την πόλωση και τη συχνότητα του περιβαλλοντικού σήματος. Η κεραία τους, με εύρος λειτουργίας 1,45–3,38 GHz και απόδοση άνω του 91%, είναι ιδανική για συγκομιδή από ένα ευρύ φάσμα πηγών (GSM, LTE, Wi-Fi) χωρίς την ανάγκη για φυσικό προσανατολισμό, προωθώντας έτσι την ανάπτυξη πραγματικά αυτόνομων συσκευών IoT. Αυτές οι δύο διαφορετικές προσεγγίσεις αναδεικνύουν πώς οι σχεδιαστικές προτεραιότητες αλλάζουν ανάλογα με το επιθυμητό σενάριο εφαρμογής.

#### 2.4.2. Δίκτυο αντιστοίχισης εμπέδησης

Το δεύτερο στάδιο στην διαδικασία συγκομιδής ενέργειας μέσω ραδιοσυχνοτήτων αποτελείται από το δίκτυο αντιστοίχισης εμπέδησης. Ο σκοπός του είναι να εξασφαλίζει τη μέγιστη μεταφορά ισχύος μεταξύ της κεραίας και του κυκλώματος ανορθωτή. Αυτό επιτυγχάνεται με την προσαρμογή της αντίστασης εξόδου της κεραίας ώστε να ταιριάζει με την είσοδο του ανορθωτή σε μια συγκεκριμένη συχνότητα ή ζώνη συχνοτήτων. Υπάρχουν τρεις διαδεδομένες διατάξεις: L, T και Pi τοπολογίες που χρησιμοποιούν διάφορους συνδυασμούς πηνίων και πυκνωτών, και οι οποίες αποτυπώνονται στα σχήματα 4 και 5. Η επιλογή της τοπολογίας του δικτύου αντιστοίχισης επηρεάζει άμεσα βασικές μετρικές απόδοσης, όπως το εύρος ζώνης αντιστοίχισης και την απόδοση μετατροπής ισχύος (PCE).



Σχήμα 4: Σχηματική διάταξη κυκλώματος δικτύου προσαρμογής σχήματος L [14]



Σχήμα 5: Σχηματική διάταξη κυκλώματος δικτύου προσαρμογής σχήματος Pi [14]

### 2.4.3. Κύκλωμα ανορθωτή

Ο ανορθωτής είναι υπεύθυνος για την μετατροπή του εναλλασσόμενου που συλλέγεται από την κεραία σε συνεχές, κατάλληλο για την τροφοδότηση συσκευών IoT ή την αποθήκευση ενέργειας. Υπάρχουν διαφορετικές τοπολογίες ανορθωτών. Ξεκινώντας με τους πιο απλούς ανορθωτές μίας διόδου (half-wave), παρατηρείται μικρή πολυπλοκότητα και περιορισμένο μέγεθος, όμως εμφανίζουν χαμηλή απόδοση σε χαμηλές τιμές ισχύος, οι οποίες είναι και οι πιο συνηθισμένες στις εφαρμογές περιβαλλοντικής συγκομιδής RF. Ο κύριος λόγος είναι ότι η τάση εισόδου συχνά δεν ξεπερνά την τάση κατωφλίου της διόδου, με αποτέλεσμα μεγάλο μέρος της ήδη ασθενούς ενέργειας να μην αξιοποιείται. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος χρησιμοποιούνται κυκλώματα πολλαπλασιασμού τάσης, όπως τα Dickson και Villard, τα οποία συνδυάζουν διόδους και πυκνωτές ώστε να αυξήσουν την έξοδο και να επιτρέψουν τη λειτουργία του συστήματος ακόμα και σε εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα ισχύος. Σε πολλές περιπτώσεις, οι διόδοι Schottky είναι η προτιμώμενη επιλογή, εξαιτίας του χαμηλού ορίου τάσης αγωγιμότητας και της ταχείας απόκρισης.

### 2.4.4. Αποθήκευση ενέργειας

Όπως στα ηλιακά και αιολικά συστήματα συλλογής ενέργειας και στην περίπτωση του συστήματος συγκομιδής ενέργειας μέσω ραδιοσυχνοτήτων τα πιο συνηθισμένα μέσα αποθήκευσης είναι οι υπερπυκνωτές και οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες. Η σχεδίαση του τμήματος αποθήκευσης θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τα υπερβολικά χαμηλά επίπεδα τάσης και ρεύματος που παράγουν οι ανορθωτές σε περιβαλλοντικές συνθήκες RF. Για την αντιμετώπιση αυτής της κατάστασης, ενσωματώνονται κυκλώματα διαχείρισης ισχύος (Power Management Circuits, PMCs), όπως ανυψωτές τάσης, σταθεροποιητές τάσης ή ακόμα και μονάδες παρακολούθησης σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT). Τα κυκλώματα αυτά μειώνουν τις απώλειες διαρροής, αυξάνουν την αποδοτικότητα φόρτισης και εξασφαλίζουν ότι ακόμα και επίπεδα ισχύος της τάξης των microwatts μπορούν να αποθηκευτούν σταδιακά και να αποδοθούν στο φορτίο με ελεγχόμενο τρόπο.

## 2.5 Θερμική συγκομιδή ενέργειας

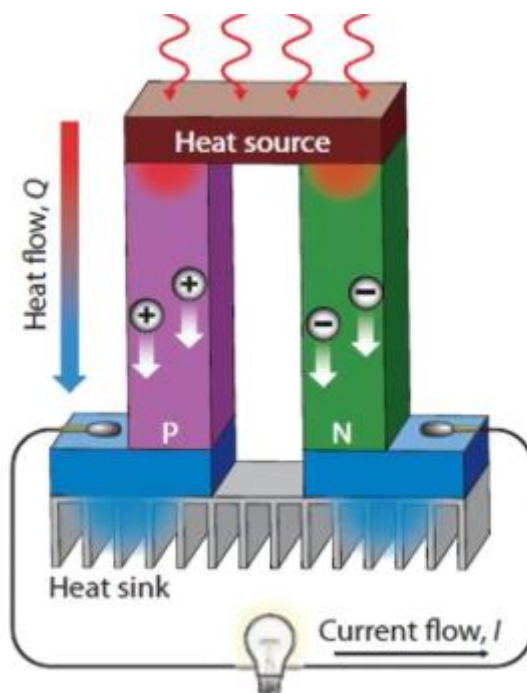
Η θερμότητα αποτελεί μία από τις πιο διάχυτες μορφές ενέργειας, καθώς παράγεται τόσο από φυσικές διεργασίες όσο και από ανθρώπινες δραστηριότητες. Μεγάλο μέρος αυτής της ενέργειας εντοπίζεται σε μορφή απωλειών, προερχόμενες είτε από την εκπομπή θερμότητας από το ανθρώπινο σώμα είτε από θερμοκρασιακές διαβαθμίσεις σε ηλεκτρονικά συστήματα. Η θερμική συγκομιδή ενέργειας έχει σαν στόχο την μετατροπή αυτών των απωλειών σε αξιοποιήσιμη ηλεκτρική ενέργεια. Σε αντίθεση με άλλες ανανεώσιμες πηγές, οι διακυμάνσεις θερμοκρασίας είναι μια διαρκώς παρούσα πηγή ενέργειας, καθιστώντας την ελκυστική για εφαρμογές που απαιτούν σταθερή

τροφοδοσία. Ωστόσο, η απόδοση της παραμένει περιορισμένη σε περιβάλλοντα με μικρές θερμοκρασιακές διαφορές

Ένα σύστημα θερμικής συγκομιδής ενέργειας απαρτίζεται από τον θερμικό μετατροπέα, ο οποίος συλλέγει την θερμότητα από την αρχική πηγή ενέργειας και μέσω θερμοηλεκτρικών ή πυροηλεκτρικών φαινομένων την μετατρέπει σε ηλεκτρική ενέργεια, καθώς και από το κύκλωμα διαχείρισης ισχύος, που έχει στόχο την μετατροπή του παραγόμενου ρεύματος σε συνεχές και την αποθήκευση ενέργειας για την τροφοδοσία του φορτίου. Στο πλαίσιο του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT), η θερμική συγκομιδή εμφανίζει σημαντικές προοπτικές, ειδικά σε βιομηχανικά περιβάλλοντα με συνεχή παραγωγή θερμότητας, καθώς και σε συσκευές όπου η ενέργεια μπορεί να συλλέγεται απευθείας από το ανθρώπινο σώμα.

### 2.5.1 Θερμοηλεκτρική συγκομιδή ενέργειας

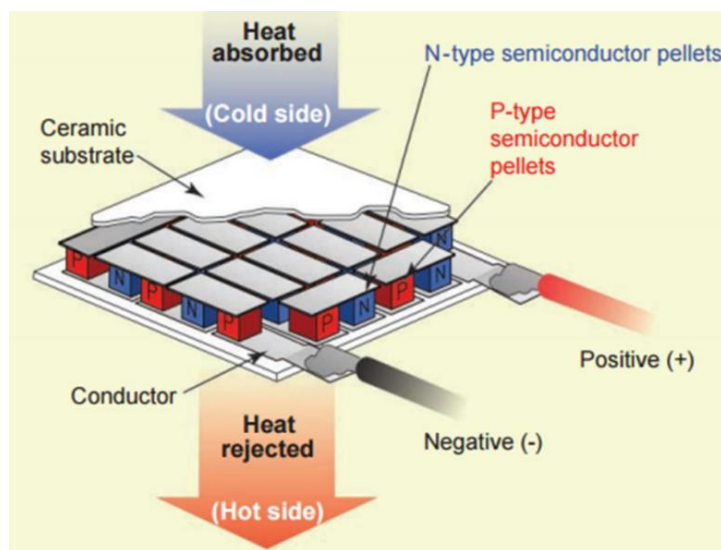
Η θερμοηλεκτρική συγκομιδή ενέργειας μετατρέπει την διαφορά θερμοκρασίας απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια αξιοποιώντας το φαινόμενο Seebeck. Βασικό στοιχείο λειτουργίας είναι το θερμοηλεκτρικό ζεύγος που αποτελείται από δύο διαφορετικούς αγωγούς ή ημιαγωγούς, τύπου p και τύπου n, που έχουν σαν κύριους φορείς οπές και ηλεκτρόνια αντίστοιχα. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 6, το ένα άκρο αυτής της διάταξης βρίσκεται σε υψηλή θερμοκρασία, ενώ το άλλο σε χαμηλή. Λόγω της θερμικής διέγερσης, η συγκέντρωση των οπών και των ηλεκτρονίων είναι υψηλότερη στην θερμή πλευρά και κατά την επίδραση της θερμοβαθμίδας, οι οπές και τα ηλεκτρόνια αρχίζουν να διαχέονται προς την ψυχρή πλευρά, παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα.



Σχήμα 6: PN ένωση [21]

Η απόδοση της θερμοηλεκτρικής συλλογής ενέργειας εξαρτάται από τον αδιάστατο συντελεστή απόδοσης των υλικών (ZT). Για την επίτευξη αποδοτικού ZT συνίσταται ο συνδυασμός υψηλού συντελεστή Seebeck, χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας και υψηλής ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Τα περισσότερα θερμοηλεκτρικά υλικά κατάλληλα για πρακτικές εφαρμογές έχουν συντελεστή απόδοσης μεγαλύτερο της μονάδας, αν και παράγοντες όπως η πολυπλοκότητα κατασκευής και το κόστος συχνά περιορίζουν την πραγματική τους απόδοση. Ανάλογα με τα θερμοκρασιακά εύρη των θερμοηλεκτρικών εφαρμογών, έχουν αναπτυχθεί ορισμένες ομάδες υλικών. Για θερμοκρασίες που κυμαίνονται έως τους 227 °C, το δισμουθιούχο τελλούριο ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) και τα κράματα του ενδείκνυνται για συσκευές IoT και φορητές εφαρμογές χάρη στον υψηλό συντελεστή Seebeck. Για μεγαλύτερες θερμοκρασίες, οι σκεττουριδίτες (π.χ.  $\text{CoSb}_3$ ) και το ευρέως χρησιμοποιούμενο τελλούριο μολύβδου ( $\text{PbTe}$ ), με συντελεστή 0,8 έως 1,8, προσφέρουν υψηλότερη απόδοση. Υλικά με βάση τα οξείδια, όπως  $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$  και  $\text{ZnO}$ , προσφέρουν καλή θερμική σταθερότητα και χαμηλό κόστος, αν και η χαμηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα περιορίζει την απόδοσή τους.

Η χρήση ενός μόνο θερμοηλεκτρικού ζεύγους δεν είναι επαρκής για την τροφοδοσία μιας συσκευής IoT. Η παραγωγή της απαιτούμενης τάσης επιτυγχάνεται με την σύνδεση σε σειρά πολλών θερμοηλεκτρικών ζευγών, σχηματίζοντας μια θερμοηλεκτρική γεννήτρια (Thermoelectric generator, TEG), όπως φαίνεται στο σχήμα 7.



Σχήμα 7: Θερμοηλεκτρική γεννήτρια [21]

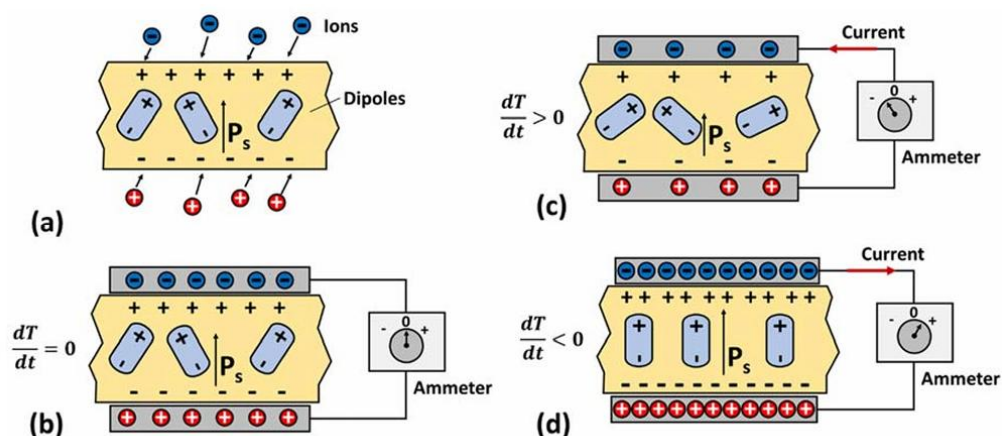
Τα TEGs δεν παράγουν τοξικά απόβλητα και προσφέρουν αξιόπιστη λειτουργία, ο δε σχεδιασμός τους βασίζεται στις εφαρμογές που προορίζονται. Στη μελέτη των Gabriel et al. [22] παρουσιάζεται ένα σύστημα θερμοηλεκτρικής συγκομιδής ενέργειας για έξυπνα ρολόγια που αξιοποιεί την θερμότητα του ανθρώπινου σώματος. Χρησιμοποιώντας εύκαμπτα TEGs από  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  και μια βελτιστοποιημένη εύκαμπτη ψύκτρα το σύστημα παρήγαγε έξοδο έως 3.55 V και 1 A υπό θερμική διαφορά 8.5°C. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η τεχνολογία αυτή μπορεί να επεκτείνει

σημαντικά τη λειτουργική διάρκεια των συσκευών, μειώνοντας τη συχνότητα φόρτισης και προσφέροντας μια βιώσιμη εναλλακτική λύση στην ενεργειακή τροφοδοσία των συσκευών που βρίσκονται στην ένδυση.

## 2.5.2 Πυροηλεκτρική συγκομιδή ενέργειας

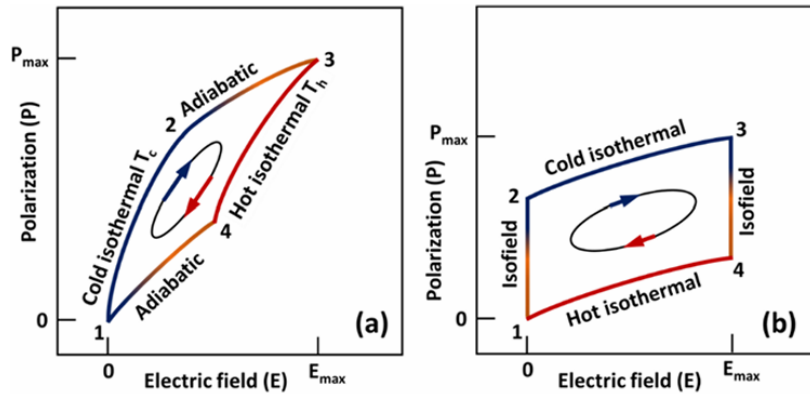
Το πυροηλεκτρικό φαινόμενο βασίζεται στη μεταβολή της θερμοκρασίας που δημιουργείται κατά την θέρμανση ή ψύξη ορισμένων διηλεκτρικών υλικών. Τα πυροηλεκτρικά υλικά πρέπει να εμφανίζουν αυθόρμητη πόλωση, δηλαδή να έχουν καθαρή ροπή διπόλου ανά μονάδα όγκου ακόμη και χωρίς εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο. Για να χαρακτηριστεί ένα υλικό πυροηλεκτρικό πρέπει η κρυσταλλική του δομή να μην έχει κέντρο συμμετρίας, να έχει μη μηδενική διπολική ροπή και να διαθέτει έναν μοναδικό ή κανέναν άξονα περιστροφής που να μην περιλαμβάνεται σε άξονα αναστροφής.

Οι πιο γνωστοί κρύσταλλοι είναι η τουρμαλίνη, το τιτανικό βάριο ( $\text{BaTiO}_3$ ) και το νιτρίδιο του γαλλίου ( $\text{GaN}$ ). Η αλλαγή θερμοκρασίας αυτών των κρυστάλλων προκαλεί αλλαγή στην πόλωση, η οποία οδηγεί στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, η αυθόρμητη πόλωση τους τους επιτρέπει να προσελκύσουν ηλεκτρόνια ή ιόντα. Στη συνέχεια, το πυροηλεκτρικό υλικό, τοποθετείται μεταξύ δύο αγώγιμων ηλεκτροδίων ενός πυκνωτή που φορτίζεται μέχρι να μηδενιστεί το επιφανειακό φορτίο του κρυστάλλου. Η αύξηση θερμοκρασίας οδηγεί στην μείωση της αυθόρμητης πόλωσης, ενώ η μείωση της οδηγεί αντίστοιχα στην αύξηση της της αυθόρμητης πόλωσης. Στο σχήμα 8 απεικονίζεται ένα πυροηλεκτρικό σύστημα.



Σχήμα 8: Μοντέλο πυροηλεκτρικού συστήματος [17]

Για την μεγιστοποίηση της απόδοσης των πυροηλεκτρικών συστημάτων συγκομιδής ενέργειας, χρησιμοποιούνται θερμοδυναμικοί κύκλοι όπως ο κύκλος Carnot και ο κύκλος Ericsson, οι οποίοι εκμεταλλεύονται την επαναλαμβανόμενη αλλαγή θερμοκρασίας για παραγωγή εναλλασσόμενου ρεύματος.



Σχήμα 9: Θερμοδυναμικοί κύκλοι (a) Κύκλος Carnot (b) Κύκλος Ericsson [17]

Ο κύκλος Carnot είναι ιδανικός καθώς παρέχει το μέγιστο θεωρητικό όριο απόδοσης για μια θερμική μηχανή. Αποτελείται από δύο ισοθερμικές και δύο αδιαβατικές διεργασίες. Βάση του σχήματος 9(a), στην πρώτη ισοθερμική διεργασία (  $1 \rightarrow 2$  ), το ηλεκτρικό πεδίο αυξάνεται σταθερά ενώ η θερμοκρασία παραμένει σταθερή. Στην κατάσταση  $2 \rightarrow 3$ , πραγματοποιείται η πρώτη αδιαβατική διεργασία όπου το πεδίο αυξάνεται, χωρίς ανταλλαγή θερμότητας με το περιβάλλον, φτάνοντας στο μέγιστο ηλεκτρικό πεδίο σύμφωνα με την διηλεκτρική αντοχή του υλικού. Η δεύτερη ισοθερμική διεργασία συμβαίνει στο στάδιο  $3 \rightarrow 4$ , όπου το ηλεκτρικό πεδίο μειώνεται, και τέλος συμβαίνει η δεύτερη αδιαβατική διεργασία (  $4 \rightarrow 1$  ), στην οποία το πεδίο επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση. Η πρακτική εφαρμογή του κύκλου Carnot είναι δύσκολη εξαιτίας των ισοθερμικών και αδιαβατικών απαιτήσεων ωστόσο συχνά χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της απόδοσης άλλων θερμικών κύκλων.

Ο κύκλος Ericsson εισήχθη για εφαρμογές πυροηλεκτρικής μετατροπής ενέργειας από τον Olsen το 1980. Σε αντίθεση με τον κύκλο Carnot, ο Ericsson είναι πιο πρακτικός, καθώς χρησιμοποιεί διεργασίες με σταθερό ηλεκτρικό πεδίο αντί για αδιαβατικές. Σύμφωνα με το σχήμα 9 (b), το υλικό ψύχεται, χωρίς να του εφαρμοστεί ηλεκτρικό πεδίο, έως ότου να φτάσει στη χαμηλή θερμοκρασία ( κατάσταση 2 ). Προκειμένου να φτάσει στην κατάσταση 3 του εφαρμόζεται ηλεκτρικό πεδίο και αυξάνεται ισοθερμικά μέχρι τη μέγιστη ενέργεια. Ακολουθεί θέρμανση υπό σταθερό ηλεκτρικό πεδίο ( κατάσταση  $3 \rightarrow 4$  ), όπου η θερμοκρασία επανέρχεται στην αρχική τιμή της και τέλος το πεδίο μειώνεται σταθερά μέχρι μηδενισμού ( κατάσταση 4 ). Ο κύκλος Ericsson αξιοποιεί καλύτερα τις πρακτικές συνθήκες λειτουργίας, καθώς επιτρέπει συνεχή παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος από επαναλαμβανόμενες θερμοκρασιακές αλλαγές.

Σε σύγκριση με άλλες μορφές συγκομιδής ενέργειας, η χρήση της πυροηλεκτρικής συλλογής ενέργειας για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από διακυμάνσεις θερμοκρασίας έχει μελετηθεί σε μικρότερο βαθμό. Η αδυναμία πρόκλησης υψηλής συχνότητας περιορίζει επί του παρόντος την ποσότητα ενέργειας που μπορεί να συλλεχθεί. Για την αύξηση της συχνότητας και της απόδοσης, διάφορες μελέτες επικεντρώθηκαν σε πυροηλεκτρικά συστήματα βασισμένα σε λεπτές μεμβράνες. Η ανάλυση των Zabek et al. [19] αναφέρει ότι υλικά με χαμηλό συντελεστή θερμικής διάχυσης ( $\alpha$ ), όπως το PVDF (  $\alpha = 0,071 \text{ m}^2/\text{s}$  ), εμφανίζουν ελλειπτικές θερμοκρασίες σε υψηλές συχνότητες, μειώνοντας το ρυθμό μεταβολής της θερμοκρασίας και κατά επέκταση το παραγόμενο ρεύμα. Η ανάπτυξη λεπτών μεμβρανών είναι κρίσιμη για την

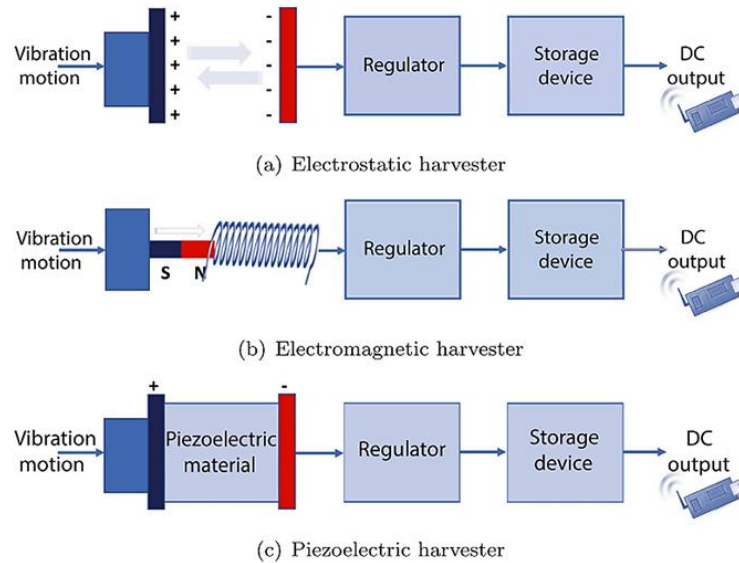
ταχύτερη διάχυση της θερμότητας σε όλο το πάχος τους σε υψηλότερες θερμοκρασίες, με αποτέλεσμα τη βελτίωση της απόδοσης.

Ταυτόχρονα, εξετάζονται διάφορα υποσχόμενα υβριδικά συστήματα. Η πειραματική μελέτη των Ravindran et al. [18], έδειξε ότι μια βελτιστοποιημένη συσκευή με πυροηλεκτρικό στοιχείο πέτυχε 0,42 Hz και ισχύ 3,03  $\mu$ W για θερμοκρασιακή διαφορά 79,5 K. Με τη μείωση των θερμικών αντιστάσεων, η συχνότητα θα μπορούσε να αυξηθεί δέκα φορές περισσότερο, επομένως η ανάπτυξη υβριδικής θερμικής γεννήτριας που συνδυάζει το πυροηλεκτρικό στοιχείο και τις θερμοηλεκτρικές γεννήτριες θα αξιοποιούσε πλήρως το θερμικό δυναμικό.

Η παραγόμενη ενέργεια από θερμοηλεκτρικά ή πυροηλεκτρικά συστήματα απαιτεί την ενσωμάτωση ενός κυκλώματος διαχείρισης ισχύος. Το κύκλωμα αυτό αναλαμβάνει τη μετατροπή του παραγόμενου σήματος σε σταθερή τάση συνεχούς ρεύματος (DC), την αποθήκευση της ενέργειας σε μπαταρίες ή υπερπυκνωτές, καθώς και τη διανομή της στον αισθητήρα ή το φορτίο ανάλογα με τις απαιτήσεις του συστήματος. Επιπλέον, σύγχρονα PMCs επιτρέπουν τη βελτιστοποίηση της συλλογής ενέργειας μέσω έξυπνων αλγορίθμων, ελέγχοντας τη φόρτιση και εκφόρτιση ώστε να μεγιστοποιείται η απόδοση, ακόμη και σε περιβάλλοντα με περιορισμένες θερμοκρασιακές διαφορές ή χαμηλές συχνότητες θερμικών μεταβολών. Με αυτόν τον τρόπο, η θερμική συγκομιδή ενέργειας μετατρέπεται σε μια αξιόπιστη πηγή τροφοδοσίας για συστήματα IoT, προσφέροντας μακροχρόνια αυτονομία και μειωμένη εξάρτηση από συμβατικές μπαταρίες.

## 2.6 Μηχανική συγκομιδή ενέργειας

Η μηχανική συγκομιδή ενέργειας βασίζεται στην αξιοποίηση της κινητικής ή δυναμικής ενέργειας που προκύπτει από δονήσεις, παραμορφώσεις ή τριβές, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι μηχανικές τεχνικές μπορούν να λειτουργήσουν σε εφαρμογές όπου υπάρχει συνεχής ή μηχανική δραστηριότητα και είναι ελκυστικές για συστήματα αισθητήρων IoT που εγκαθίστανται σε βιομηχανικά μηχανήματα, οχήματα αλλά και σε συσκευές που βρίσκονται πάνω στο ανθρώπινο σώμα. Οι πιο διαδεδομένες πρακτικές μηχανικής συγκομιδής περιλαμβάνουν την πιεζοηλεκτρική, την ηλεκτρομαγνητική και την ηλεκτροστατική μέθοδο. Κάθε μια αξιοποιεί διαφορετικό φυσικό φαινόμενο για να μετατρέψει τις μηχανικές δονήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια, παρουσιάζοντας πλεονεκτήματα και περιορισμούς ανάλογα με το περιβάλλον λειτουργίας. Στο σχήμα 10 παρουσιάζονται τα συστήματα των τριών κατηγοριών μηχανικής συγκομιδής ενέργειας.

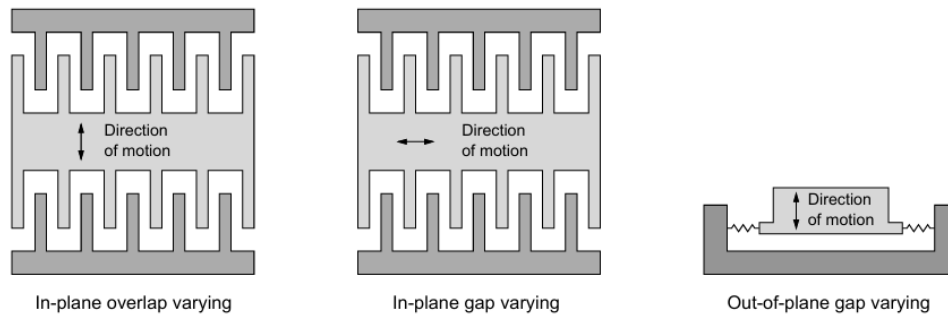


Σχήμα 10: (α) Ηλεκτροστατικό (β) Ηλεκτρομαγνητικό (γ) Πιεζοηλεκτρικό σύστημα συγκομιδής ενέργειας. [11]

### 2.6.1. Ηλεκτροστατική συγκομιδή ενέργειας

Η ηλεκτροστατική συγκομιδή ενέργειας είναι λιγότερο διαδεδομένη από τις υπόλοιπες πρακτικές μηχανικές συγκομιδής ενέργειας. Βασίζεται στην μεταβολή της χωρητικότητας του πυκνωτή για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Με την άσκηση εξωτερικής δύναμης, όπως δονήσεις, οι αγωγίμες πλάκες του πυκνωτή μετακινούνται, μεταβάλλοντας την απόσταση ή την επιφάνεια επαφής τους και συνεπώς, την χωρητικότητα του συστήματος. Αυτή η μεταβολή οδηγεί σε ροή ηλεκτρικού φορτίου και άρα παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και μπορεί να επιτευχθεί μέσω δύο συνθηκών. Είτε με σταθερό φορτίο, δηλαδή ο πυκνωτής είναι ήδη φορτισμένος και κατά την μηχανική διέγερση αυξάνεται η τάση, είτε με σταθερή τάση, όπου η μεταβολή της χωρητικότητας προκαλεί ροή φορτίου. Και στις δυο περιπτώσεις μετά την παραγωγή ενέργειας ο πυκνωτής επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση.

Οι ηλεκτροστατικοί συλλέκτες μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες: 'in-plane overlap varying', 'in-plane gap closing' και 'out-of-plane gap closing', και απεικονίζονται στο σχήμα 11. Στην πρώτη κατηγορία η μεταβολή της χωρητικότητας προκαλείται από την αλλαγή της επιφάνειας επικάλυψης των πλακών, στην δεύτερη, μεταβάλλεται με την αλλαγή της απόστασης μεταξύ παράλληλων πλακών, ενώ στην 'out-of-plane gap closing', οι πλάκες κινούνται κάθετα μεταξύ τους, μεταβάλλοντας την απόσταση. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [24], η διαμόρφωση 'in-plane gap closing' προσφέρει την υψηλότερη απόδοση, με βέλτιστα σχεδιασμένες διατάξεις να φθάνουν έως και  $100 \text{ W/cm}^3$ . Ακολουθεί η διαμόρφωση 'out-of-plane gap closing', ενώ η 'in-plane overlap' εμφανίζει τη χαμηλότερη απόδοση μεταξύ των τριών.



Σχήμα 11: Τρείς διατάξεις για ηλεκτροστατικούς συλλέκτες [24]

Ανάλογα με το υλικό που υπάρχει μεταξύ των πλακών του πυκνωτή, οι ηλεκτροστατικοί συλλέκτες μπορούν να ταξινομηθούν επίσης σε άλλες τρεις κατηγορίες. Η πρώτη αφορά ‘electret-free’ συστήματα, που απαιτούν μια εξωτερική πηγή τάσης για την αρχική φόρτιση του πυκνωτή, γεγονός που προσθέτει πολυπλοκότητα στο σύστημα. Η δεύτερη και πιο πρακτική κατηγορία είναι οι συσκευές ‘electret-based’, οι οποίες χρησιμοποιούν ένα μόνιμο πολωμένο διηλεκτρικό υλικό για να δημιουργήσουν το ηλεκτροστατικό πεδίο, εξαλείφοντας την ανάγκη για εξωτερική πηγή και απλοποιώντας σημαντικά το σχεδιασμό. Η τρίτη κατηγορία είναι οι τριβοηλεκτρικές συσκευές, όπου η τάση δημιουργείται από την τριβή μεταξύ δύο διαφορετικών υλικών που αλλάζουν θέση.

Η ηλεκτροστατική συγκομιδή ενέργειας παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως η συμβατότητα με MEMS/CMOS τεχνολογίες, που επιτρέπει απλή κατασκευή και εύκολη ενσωμάτωση σε μικροηλεκτρονικά συστήματα, καθώς και το μικρό τους μέγεθος, καθιστώντας τις κατάλληλες για εμφυτεύσιμες και φορητές συσκευές. Επιπλέον, είναι αξιόπιστες, καθώς δεν απαιτούν μαγνήτες ή πολύπλοκα υλικά, μειώνοντας το κόστος, και μπορούν να λειτουργούν σε χαμηλές συχνότητες δονήσεων. Ωστόσο, παρουσιάζουν ορισμένα μειονεκτήματα, η χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα σε σύγκριση με πιεζοηλεκτρικές ή ηλεκτρομαγνητικές τεχνικές, η ευαισθησία σε περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως η υγρασία και η φθορά, καθώς και η περιορισμένη ισχύς, καθιστώντας τις κατάλληλες κυρίως για εφαρμογές  $\mu\text{W}$ – $\text{mW}$ .

### 2.6.2. Ηλεκτρομαγνητική συγκομιδή ενέργειας

Η ηλεκτρομαγνητική συγκομιδή ενέργειας βασίζεται στον νόμο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής του Faraday. Σύμφωνα με αυτόν τον νόμο, η μεταβολή του μαγνητικού πεδίου που διέρχεται μέσα από έναν αγωγικό αγωγό προκαλεί την επαγωγή ηλεκτρικής τάσης. Ένας ηλεκτρομαγνητικός μετατροπέας αποτελείται από τον μόνιμο μαγνήτη και το πηνίο, σχεδιασμένο από ένα αγωγικό υλικό, όπως ο χαλκός. Η σχετική τους κίνηση, που προκύπτει από εξωτερικές δονήσεις, οδηγεί σε μεταβολή της μαγνητικής ροής στο εσωτερικό του πηνίου, δημιουργώντας τάση στα άκρα του, ικανή να τροφοδοτήσει ένα εξωτερικό κύκλωμα. Η επαγόμενη τάση εξαρτάται από το μέγεθος και την ένταση του μαγνητικού πεδίου, τον αριθμό των σπειρών του πηνίου, αλλά και από την ταχύτητα και το εύρος της κίνησης.

Σε σύγκριση με την ηλεκτροστατική συγκομιδή, αυτό το σύστημα συλλογής ενέργειας δεν απαιτεί εξωτερική πηγή πόλωσης και παρουσιάζει ικανοποιητική ανθεκτικότητα και χαμηλό κόστος κατασκευής. Παρόλα αυτά, το κύριο μειονέκτημα της εντοπίζεται στην δυσκολία παραγωγής ηλεκτρομαγνητικών μετατροπών σε μικρή κλίμακα. Η ανάγκη για πηνία πολλών στρωφών και ισχυρούς μαγνήτες για να παραχθεί αξιοποιήσιμη ισχύς, έχει ως αποτέλεσμα η τάση εξόδου να είναι συχνά πολύ χαμηλή, καθιστώντας την ακατάλληλη για εφαρμογές όπου το μέγεθος και το βάρος είναι κρίσιμα, όπως στα εμφυτεύσιμα ιατρικά διαθέσιμα ή οι μικροαισθητήρες.

### 2.6.3. Πιεζοηλεκτρική συγκομιδή ενέργειας

Η πιεζοηλεκτρική συγκομιδή ενέργειας βασίζεται στο άμεσο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, σύμφωνα με το οποίο ορισμένα υλικά παράγουν ηλεκτρικό φορτίο όταν υπόκεινται σε μηχανική καταπόνηση όπως πίεση, κάμψη, δόνηση ή τάση. Το φαινόμενο αυτό ανακαλύφθηκε από τους αδελφούς Curie το 1880 και η ηλεκτρική πόλωση που αναπτύσσεται στα υλικά είναι ανάλογη της εφαρμοζόμενης μηχανικής παραμόρφωσης. Αντίστροφα, η εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου προκαλεί μηχανική παραμόρφωση στο υλικό, φαινόμενο γνωστό ως έμμεση πιεζοηλεκτρικότητα.

Στη συγκομιδή ενέργειας αξιοποιείται η άμεση πιεζοηλεκτρική επίδραση, ώστε μηχανική ενέργεια από το περιβάλλον να μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια με υψηλή πυκνότητα ισχύος. Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά υπάρχουν σε διάφορες μορφές όπως μονοκρυσταλλοί, όπως ο χαλαζίας, κεραμικά υλικά, όπως το PZT, λεπτά και παχιά υμένα, για παράδειγμα το ZnO, και πολυμερή όπως το PVDF.

Η απόδοση των πιεζοηλεκτρικών μετατροπών εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού, τη γεωμετρία, τον τρόπο στήριξης και τη συχνότητα διέγερσης. Η μέγιστη παραγωγή ισχύος επιτυγχάνεται όταν ο μετατροπέας λειτουργεί στη φυσική συχνότητα ταλάντωσης του συστήματος, γεγονός που καθιστά κρίσιμη τη βέλτιστη σχεδίαση του μηχανικού συστήματος.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα πιεζοηλεκτρικής συγκομιδής ενέργειας σε εφαρμογές IoT παρουσιάζεται στο έργο των Cho et al. [26]. Οι ερευνητές ανέπτυξαν μια οδική πιεζοηλεκτρική διάταξη συγκομιδής ενέργειας, η οποία τοποθετήθηκε σε αυτοκινητόδρομο και αξιοποίησε την κατακόρυφη πίεση από τα διερχόμενα οχήματα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η παραγόμενη ισχύς, χρησιμοποιήθηκε για την τροφοδοσία LED φωτεινής σήμανσης οδηγών και για τη λειτουργία αισθητήρων που καταγράφουν σε πραγματικό χρόνο παραμέτρους όπως θερμοκρασία, καταπόνηση και διαρροές. Τα δεδομένα μεταφέρονταν ασύρματα σε σύστημα cloud, επιτρέποντας την αυτόνομη παρακολούθηση της κατάστασης του οδοστρώματος και την καταγραφή κυκλοφορίας για διάστημα πέντε μηνών. Το συγκεκριμένο σύστημα αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτόνομης IoT εφαρμογής βασισμένης αποκλειστικά στην πιεζοηλεκτρική συγκομιδή ενέργειας.

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

---

### 3.1. Γενικά

Η τροφοδοσία εκατοντάδων συσκευών IoT με μπαταρίες περιορισμένης διάρκειας ζωής είναι πρακτικά αδύνατη, οικονομικά ασύμφορη και βλαβερή για το περιβάλλον. Η συγκομιδή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, όπως παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, εμφανίζεται ως η πιο βιώσιμη και ελπιδοφόρα λύση, μετατρέποντας τις εφαρμογές IoT σε αυτόνομα συστήματα.

Ωστόσο, ορισμένες περιβαλλοντικές πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή, η αιολική ή η μηχανική, είναι διακοπτόμενες και συχνά απρόβλεπτες. Μια συσκευή IoT χρειάζεται να λειτουργεί συνεχώς και να μεταδίδει δεδομένα ακόμα και όταν η κύρια πηγή ενέργειας απουσιάζει. Αυτή η ανάγκη για συνεχή λειτουργία εν μέσω ασυνεχούς παραγωγής ενέργειας αποτελεί το κεντρικό πρόβλημα που απευθύνεται στο παρόν κεφάλαιο.

Στα συστήματα IoT, τα μέσα αποθήκευσης ενέργειας διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- Ηλεκτροχημικά μέσα, συγκεκριμένα οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, που προσφέρουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και είναι κατάλληλα για μακροχρόνια χρήση.
- Ηλεκτροστατικά μέσα, όπως οι υπερπυκνωτές, που χαρακτηρίζονται από την υψηλή πυκνότητα ισχύος και τη μεγάλη διάρκεια ζωής σε κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης.

Η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας εξαρτάται από τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής και τις λειτουργικές ανάγκες. Στο παρόν κεφάλαιο αναλύονται οι βασικές αρχές λειτουργίας, τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, καθώς και οι υβριδικές προσεγγίσεις που συνδυάζουν τα χαρακτηριστικά και των δύο τεχνολογιών για τη βέλτιστη αξιοποίηση της διαθέσιμης ενέργειας στα IoT περιβάλλοντα.

### 3.2. Μπαταρίες

#### 3.2.1. Ιστορική αναδρομή

Η εξέλιξη της μπαταρίας αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα τεχνολογικά επιτεύγματα της σύγχρονης επιστήμης. Το 1800 ο Alessandro Volta, παρουσίασε την πρώτη συσκευή ικανή να παράγει συνεχή ηλεκτρική τάση μέσω διαδοχικών δίσκων ψευδαργύρου και χαλκού διαχωρισμένων από ύφασμα εμποτισμένο σε αλατόνερο. Η ανακάλυψη αυτή σηματοδότησε την αρχή της ηλεκτροχημείας. Αργότερα, το 1836

εισήχθη το κελί Daniell (Daniell Cell), βελτιώνοντας τη σταθερότητα με τη χρήση δύο ηλεκτρολυτών. Το 1859, ο Gaston Planté εφηύρε την μπαταρία μόλυβδου-οξέος, την πρώτη επαναφορτιζόμενη μπαταρία. Ακολούθησε η ανάπτυξη του κελίου Leclanche, που αποτέλεσε τη βάση για τις πρώτες ξηρές μπαταρίες, καθιστώντας δυνατή τη φορητή ηλεκτρική ενέργεια.

Στα τέλη του 20ού αιώνα, εμφανίστηκαν οι μπαταρίες νικελίου-ιδριδίου μετάλλου (NiMH) και οι μπαταρίες ιόντων λιθίου (Li-ion), ενώ το 1899 αναπτύχθηκε η μπαταρία νικελίου-καδμίου (NiCd) από τον Waldemar Jungner, οι οποίες χρησιμοποιούνται μέχρι και σήμερα. Η αρχιτεκτονική των μπαταριών Li-ion χρησιμοποιεί γραφίτη ως άνοδο και  $\text{LiCoO}_2$  ως κάθοδο, καθιστώντας τις πιο αξιόπιστες και ασφαλείς.

Σήμερα, η έρευνα εστιάζει σε νέες τεχνολογίες, όπως οι μπαταρίες λιθίου-οξυγόνου ( $\text{LiO}_2$ ), οι λιθίου-θειού (Li-S) και οι νατρίου-ιόντων (Na-ion) οι οποίες υπόσχονται αυξημένη ασφάλεια, μεγαλύτερη χωρητικότητα και φιλικότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

### 3.2.2. Είδη μπαταριών

Η μπαταρία είναι μια συσκευή που μετατρέπει την χημική ενέργεια απευθείας σε ηλεκτρική μέσω μιας αντίδρασης οξειδοαναγωγής. Στην περίπτωση των επαναφορτιζόμενων συστημάτων, η μπαταρία επαναφορτίζεται μέσω της αντιστροφής της αντίδρασης αυτής. Επειδή η μετατροπή αυτή δεν είναι θερμική, οι μπαταρίες δεν περιορίζονται από τον κύκλο Carnot, προσφέροντας υψηλότερη απόδοση. Μια μπαταρία αποτελείται από ένα ή περισσότερα κελιά, συνδεδεμένα σε σειρά, παράλληλα ή σε συνδυασμό, ανάλογα με την επιθυμητή τάση και χωρητικότητα. Επομένως, κάθε κελί αποτελείται από τρία κύρια μέρη: την άνοδο, την κάθοδο και τον ηλεκτρολύτη.

Η άνοδος είναι το αρνητικό ηλεκτρόδιο, το οποίο απελευθερώνει ηλεκτρόνια στο κύκλωμα κατά την οξείδωση. Η κάθοδος, αντίθετα, είναι το θετικό ηλεκτρόδιο που δέχεται τα ηλεκτρόνια και μειώνεται κατά τη λειτουργία. Ο ηλεκτρολύτης συνδέει τα δύο αυτά ηλεκτρόδια, επιτρέποντας την μετακίνηση των ιόντων ώστε να ολοκληρωθεί η αντίδραση. Αν και συνήθως συναντάται σε υγρή μορφή, υπάρχουν ορισμένες μπαταρίες που χρησιμοποιούν στερεούς ηλεκτρολύτες που διατηρούν την ιοντική αγωγιμότητα.

Η επιλογή των υλικών της ανόδου και της καθόδου είναι καθοριστική για την απόδοση. Η άνοδος πρέπει να έχει καλή αγωγιμότητα, υψηλή απόδοση και χαμηλό κόστος. Τα επικρατέστερα υλικά ανόδου είναι ο ψευδάργυρος και το λίθιο, το οποίο εξαιτίας της ελαφριάς μάζας του και της υψηλής ενεργειακής πυκνότητάς του, έχει οδηγήσει στο σχεδιασμό ειδικών ηλεκτρολυτών και κελιών για τη ρύθμιση της δραστηριότητάς του. Η κάθοδος πρέπει να είναι ένα σταθερό και αποτελεσματικό οξειδωτικό μέσο. Συνήθως, χρησιμοποιούνται μεταλλικά οξείδια, αλλά σε ειδικά συστήματα μπορεί να γίνεται χρήση αλογόνου, θείου ή οξυγόνου. Τέλος, ο ηλεκτρολύτης πρέπει να διαθέτει υψηλή ιοντική αγωγιμότητα χωρίς να είναι ηλεκτρικά αγώγιμος, προς αποφυγή βραχυκυκλώματος και να μην αλληλοεπιδρά με τα ηλεκτρόδια. Στις περισσότερες μπαταρίες χρησιμοποιούνται υδατικά διαλύματα, ενώ σε κελιά λιθίου εντοπίζονται μη υδατικοί ηλεκτρολύτες.

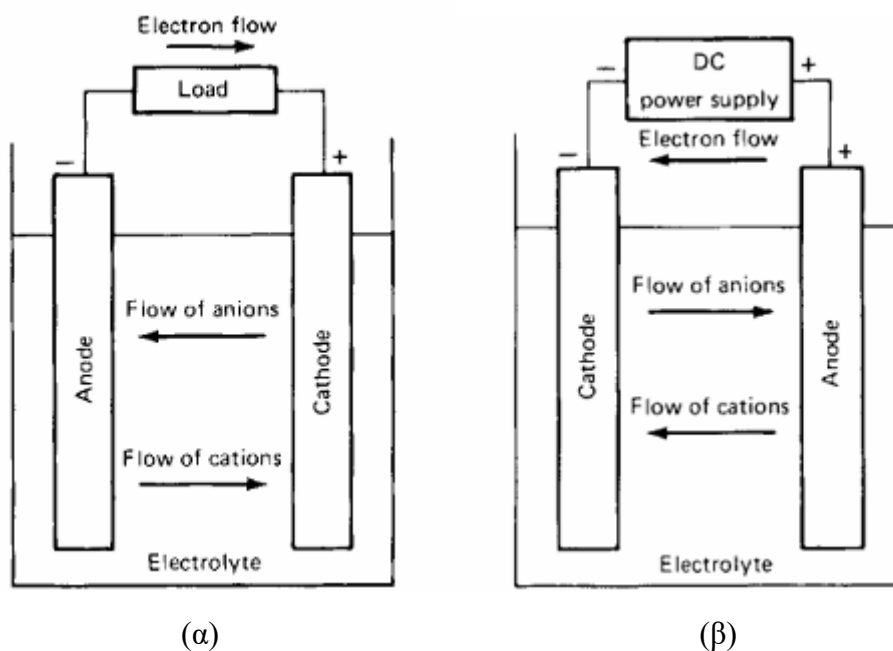
Τα κελία και κατά επέκταση οι μπαταρίες, διακρίνονται σε πρωτεύουσες και δευτερεύουσες (επαναφορτιζόμενες), ανάλογα με την ικανότητα τους να επαναφορτίζονται ηλεκτρικά. Οι πρωτεύουσες μπαταρίες αφού εκφορτιστούν μια φορά, τίθενται σε αχρηστία. Αυτού του είδους οι μπαταρίες, προσφέρουν μια χαμηλού κόστους και ‘ελαφριά’ πηγή ενέργειας. Το κύριο πλεονέκτημα τους είναι η μεγάλη διάρκεια ζωής κατά την αποθήκευση, η υψηλή πυκνότητα ενέργειας σε χαμηλές και μεσαίες τιμές εκφόρτισης, η ελάχιστη έως μηδαμινή ανάγκη συντήρησης και η ευκολία στη χρήση.

Αντίθετα, οι δευτερεύουσες μπαταρίες μπορούν να επαναφορτιστούν ηλεκτρικά μετά την εκφόρτιση τους, περνώντας ρεύμα αντίθετης φοράς από αυτό της εκφόρτισης. Οι εφαρμογές τους χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: σε συσκευές αποθήκευσης ενέργειας, όπου οι μπαταρίες φορτίζονται από μια πηγή ενέργειας και παρέχουν ηλεκτρική ισχύ σε φορτία, και σε άμεση χρήση όπως οι πρωτεύουσες μπαταρίες. Οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες έχουν υψηλή πυκνότητα ισχύος, δυνατότητα μεγάλου βαθμού εκφόρτισης και αποδοτική λειτουργία σε χαμηλές θερμοκρασίες. Η πυκνότητα ενέργειας τους αλλά και η διατήρηση του φορτίου κατά την αποθήκευση είναι μικρότερη των πρωτευουσών. Παρόλα αυτά, η χωρητικότητα τους, ανακτάται μέσω της επαναφόρτισής τους.

### **3.2.3. Αρχή λειτουργίας**

Κατά την εκφόρτιση, όταν ένα κελί συνδεθεί με εξωτερικό φορτίο, τα ηλεκτρόνια κινούνται από την άνοδο, η οποία οξειδώνεται, προς την κάθοδο, η οποία υφίσταται χημική αναγωγή. Το ηλεκτρικό κύκλωμα ολοκληρώνεται με τον ηλεκτρολύτη μέσω της ροής ανιόντων προς την άνοδο και κατιόντων προς την κάθοδο.

Αντίστοιχα, κατά την επαναφόρτιση ενός δευτερεύοντος κελιού, η φορά του ρεύματος αναστρέφεται και η οξείδωση πραγματοποιείται στο θετικό ηλεκτρόδιο, ενώ η αναγωγή στο αρνητικό ηλεκτρόδιο, όπως στο σχήμα 12. Καθώς η άνοδος ορίζεται ως το ηλεκτρόδιο όπου γίνεται η οξείδωση και η κάθοδος ως το ηλεκτρόδιο όπου γίνεται η αναγωγή, κατά τη φόρτιση το θετικό ηλεκτρόδιο λειτουργεί πλέον ως άνοδος και το αρνητικό ως κάθοδος.



Σχήμα 12: (α) Ηλεκτρομηχανική λειτουργία κελιού κατά την εκφόρτιση (β) Ηλεκτρομηχανική λειτουργία κελιού κατά την φόρτιση [28]

### 3.2.4. Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των μπαταριών

Η απόδοση μιας μπαταρίας εξαρτάται από πολλούς παράγοντες που επηρεάζουν την χωρητικότητα, την ενέργεια εξόδου και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της. Οι επιδράσεις αυτών των παραγόντων εξαρτώνται από τις συνθήκες λειτουργίας της κάθε μπαταρίας. Σύμφωνα με το [28], για τον ακριβή προσδιορισμό των χαρακτηριστικών μιας μπαταρίας, είναι απαραίτητη η μελέτη των τεχνικών δεδομένων του κατασκευαστή.

- Τάση Κελιού/Μπαταρίας

Κατά την εκφόρτιση, η τάση μειώνεται λόγω της εσωτερικής αντίστασης, της πόλωσης και των ωμικών αντιστάσεων. Αυτό σημαίνει ότι η ενέργεια μιας μπαταρίας είναι μικρότερη από την θεωρητική τιμή της, καθώς η μέση τάση είναι χαμηλότερη και η μπαταρία δεν εκφορτίζεται πλήρως.

- Κατανάλωση Ρεύματος

Η αύξηση του ρεύματος εκφόρτισης οδηγεί σε μεγαλύτερες ωμικές απώλειες και πόλωση, μειώνοντας την τάση εκφόρτισης, την διάρκεια ζωής και τη διαθέσιμη χωρητικότητα. Σε χαμηλά ρεύματα, η εκφόρτιση μπορεί να προσεγγίσει τη θεωρητική τάση και χωρητικότητα. Η ένδειξη εκφόρτισης συχνά εκφράζεται με τον βαθμό "C", όπου π.χ. 0.1C ή C/10 αντιστοιχεί σε 0.5A για μπαταρία 5Ah.

- Τρόπος Εκφόρτισης

Ο τρόπος υπό τον οποίο πραγματοποιείται η εκφόρτιση επηρεάζει την απόδοση και την διάρκεια ζωής μιας μπαταρίας και μπορεί να γίνει υπό τις ακόλουθες συνθήκες. Υπό

σταθερή αντίσταση, όπου το ρεύμα μειώνεται καθώς πέφτει η τάση της μπαταρίας αλλά και υπό σταθερό ρεύμα, όπου το ρεύμα παραμένει σταθερό καθ' όλη τη διάρκεια εκφόρτισης. Τέλος, μπορεί να πραγματοποιηθεί υπό σταθερή ισχύ, δηλαδή το ρεύμα αυξάνεται όσο η τάση μειώνεται.

- **Θερμοκρασία Εκφόρτισης**

Η θερμοκρασία στην οποία μια μπαταρία εκφορτίζεται επηρεάζει την χωρητικότητα και την χαρακτηριστική τάση της. Σε χαμηλές θερμοκρασίες, η ενεργειακή απόδοση μειώνεται λόγω αυξημένης εσωτερικής αντίστασης. Αντίθετα, σε υψηλές θερμοκρασίες σημειώνεται μείωση της εσωτερικής αντίστασης, η τάση εκφόρτισης αυξάνεται και επομένως η χωρητικότητα και η ενέργεια εξόδου αυξάνουν επίσης. Παρόλα αυτά, με την αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνεται και η χημική δραστηριότητα, προκαλώντας αυξημένη αυτό-εκφόρτιση. Η βέλτιστη απόδοση παρατηρείται συνήθως μεταξύ 20°C και 40°C.

- **Τύπος Εκφόρτισης**

Η εκφόρτιση μπορεί να είναι συνεχής ή διακοπτόμενη. Όταν μια μπαταρία αφήνεται σε κατάσταση ηρεμίας μετά από εκφόρτιση, ανακτά μέρος της τάσης της, δημιουργώντας πριονωτή καμπύλη εκφόρτισης και παρατείνοντας τη διάρκεια ζωής της.

- **Ρύθμιση Τάσης**

Η διατήρηση της μπαταρίας σε χαμηλότερα και σταθερά επίπεδα τάσης αυξάνει τη χωρητικότητα και παρατείνει τη διάρκεια ζωής. Οι επίπεδες καμπύλες εκφόρτισης είναι προτιμητέες σε εφαρμογές με περιορισμένο εύρος τάσεων, ενώ οι επικλινείς καμπύλες επιτρέπουν μεγαλύτερη συνολική διάρκεια ζωής όταν επιτρέπεται χαμηλότερη τάση αποκοπής.

- **Σχεδίαση Μπαταρίας**

Κατά την σχεδίαση μιας μπαταρίας, το σχήμα της επηρεάζει τη θερμική απόδοση και την εσωτερική αντίσταση. Κυλινδρικά, ψηλά και στενά κελιά συνήθως έχουν μικρότερη αντίσταση και καλύτερη διάχυση θερμότητας. Ταυτόχρονα, το μέγεθος της μπαταρίας επηρεάζει τις χαρακτηριστικές καμπύλες τάσης καθώς έχει επίδραση στην πυκνότητα ρεύματος.

- **Γήρανση και Αποθήκευση**

Οι χημικές αντιδράσεις κατά την αποθήκευση προκαλούν φθορά και απώλεια χωρητικότητας. Η θερμοκρασία, ο χρόνος αποθήκευσης και ο τύπος εκφόρτισης μετά την αποθήκευση επηρεάζουν τη διάρκεια ζωής και τη διατήρηση φόρτισης.

- **Σχεδιασμός Μπαταρίας Πολλών Κελιών**

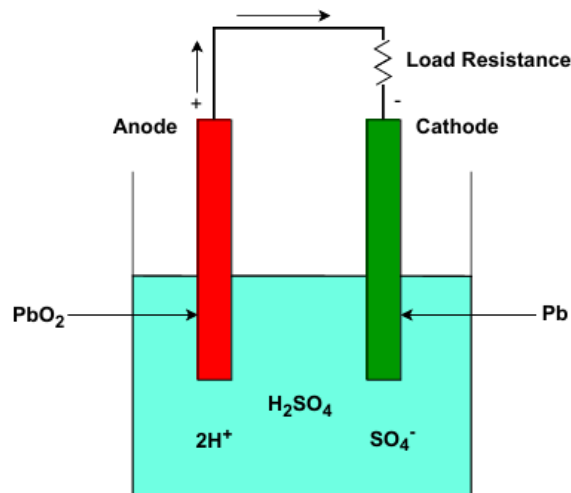
Οι μπαταρίες πολλών κελιών παρουσιάζουν διαφορές στις επιδόσεις λόγω ανομοιομορφίας των κελιών. Ο σχεδιασμός του 'πακέτου μπαταρίας', το περιβάλλον λειτουργίας και η θερμοκρασία επηρεάζουν την τάση, τη χωρητικότητα και άλλες παραμέτρους. Σε επαναφορτιζόμενα συστήματα, τα μη ισοσταθμισμένα κελιά μπορούν να οδηγήσουν σε ανομοιομορφία επιδόσεων εντός του ίδιου πακέτου.

### 3.2.5. Μπαταρίες σε IoT περιβάλλοντα

Η ενέργεια που συλλέγεται από τις ανανεώσιμες πηγές και μέσω των συστημάτων συγκομιδής μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια, αποθηκεύεται στις επαναφορτιζόμενες μπαταρίες με την μορφή χημικής ενέργειας. Όταν μια IoT συσκευή χρειάζεται ενέργεια, η μπαταρία εκφορτίζεται και παρέχει σταθερό ρεύμα, ενώ τα χαρακτηριστικά της, καθορίζουν πόσο αποτελεσματικά μπορεί να λειτουργεί το σύστημα. Οι πιο σύνηθες μπαταρίες που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση ενέργειας είναι οι ακόλουθες:

- Μπαταρίες Μόλυβδου-Οξέος (Lead-Acid)

Οι μπαταρίες μόλυβδου-οξέος αν και έχουν χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα σε σχέση με πολλές σύγχρονες τεχνολογίες μπαταριών, χρησιμοποιούνται ευρέως λόγω της αξιοπιστίας και του χαμηλού κόστους τους. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 13, η άνοδος της μπαταρίας αποτελείται από διοξείδιο του μόλυβδου ( $\text{PbO}_2$ ) και η κάθοδος από μόλυβδο ( $\text{Pb}$ ), οι οποίες βυθίζονται σε έναν υγρό ηλεκτρολύτη από θεικό οξύ ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) και νερό. Κατά την εκφόρτιση της μπαταρίας, πραγματοποιούνται ηλεκτροχημικές αντιδράσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων, παράγοντας θεικό μόλυβδο ( $\text{PbSO}_4$ ) και νερό. Αντίθετα, κατά τη διαδικασία φόρτισης, ο θεικός μόλυβδος και το νερό μετατρέπονται ξανά σε  $\text{PbO}_2$ ,  $\text{Pb}$  και θεικό οξύ. Ένα από τα κύρια προβλήματα αυτού του τύπου μπαταρίας είναι η θεικότητα, η οποία λαμβάνει χώρα όταν η μπαταρία παραμένει εκφορτισμένη για παρατεταμένο χρονικό διάστημα, οδηγώντας στη δημιουργία μεγαλύτερων και λιγότερο αναστρέψιμων κρυστάλλων θεικού μόλυβδου.

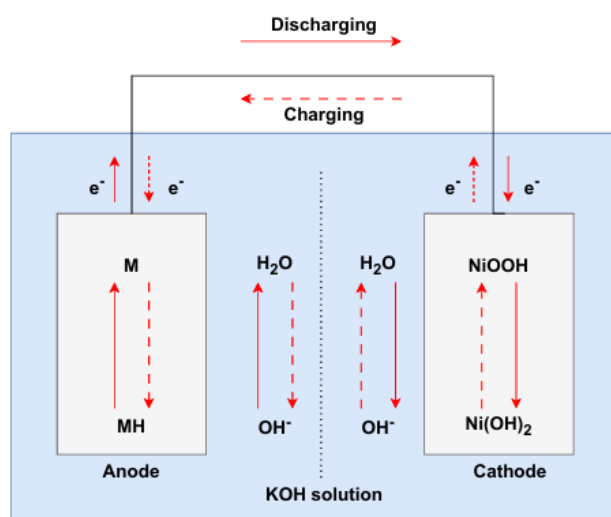


Σχήμα 13: Δομή κελίου μπαταρία μολύβδου-οξέος [29]

- Μπαταρίες Νικελίου–Μεταλλικού Υδριδίου (NiMH)

Οι μπαταρίες νικελίου–μεταλλικού υδριδίου (NiMH), αποτελούν αξιόπιστη τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας και χρησιμοποιούνται ευρέως σε ηλεκτρονικές συσκευές,

ηλεκτρικά εργαλεία και υβριδικά οχήματα. Η λειτουργία τους βασίζεται σε ηλεκτροχημικές αντιδράσεις μεταξύ του θετικού ηλεκτροδίου από υδροξείδιο του νικελίου ( $\text{Ni}(\text{OH})_2$ ) και του αρνητικού ηλεκτροδίου, το οποίο αποτελείται από κράμα μετάλλων ικανό να σχηματίζει υδρίδια. Κατά τη φόρτιση και εκφόρτιση, όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 14, οι αντιδράσεις αυτές αντιστρέφονται, επιτρέποντας την αποθήκευση και απελευθέρωση ηλεκτρικής ενέργειας με υψηλή απόδοση. Οι NiMH διαθέτουν μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα, χαμηλό φαινόμενο μνήμης, κατά το οποίο οι μπαταρίες χάνουν χωρητικότητα αν δεν εκφορτιστούν πλήρως, και περιβαλλοντικά ασφαλέστερη σύνθεση, καθώς δεν περιέχουν τοξικό κάδμιο. Ωστόσο, παρουσιάζουν υψηλότερο ρυθμό αυτοεκφόρτισης και μικρότερη ενεργειακή πυκνότητα σε σχέση με τις σύγχρονες μπαταρίες λιθίου. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε συστήματα αποθήκευσης μικρής κλίμακας ή σε συνδυασμό με φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις, όπου απαιτείται σταθερότητα και μέτρια ενεργειακή πυκνότητα.



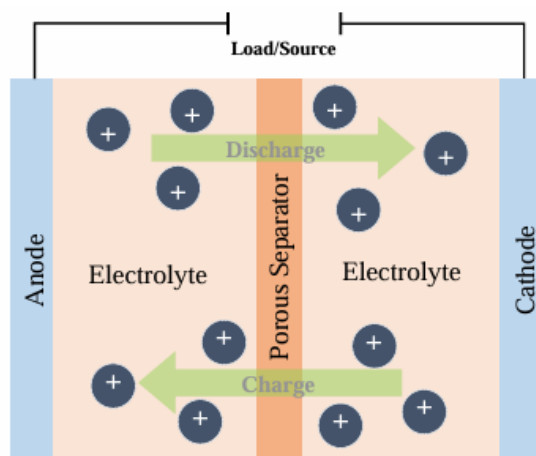
Σχήμα 14: Δομή κελίου μπαταρίας NiMH [29]

#### ▪ Μπαταρίες Ιόντων Λιθίου (Li-ion)

Το στοιχείο λίθιο (Li), λόγω του χαμηλότερου δυναμικού αναγωγής και της υψηλής ηλεκτροχημικής δυναμικότητας, αποτελεί εξαιρετική επιλογή για τη δημιουργία αποδοτικών μπαταριών. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου (Li-Ion) χρησιμοποιούνται ευρέως εξαιτίας της υψηλής ενεργειακής πυκνότητας, του χαμηλού ρυθμού αυτοεκφόρτισης και του ελάχιστου φαινομένου μνήμης. Οι Li-Ion μπαταρίες διακρίνονται σε επιμέρους τύπους ανάλογα με το υλικό της καόδου, όπως  $\text{LiCoO}_2$ ,  $\text{LiFePO}_4$ ,  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  και  $\text{LiNiMnCoO}_2$  (NMC). Κατά την εκφόρτιση, τα ιόντα λιθίου μετακινούνται από την άνοδο, που αποτελείται από γραφίτη, προς την κάθοδο μέσω του ηλεκτρολύτη, ενώ τα ηλεκτρόνια κινούνται στο εξωτερικό κύκλωμα, παρέχοντας ηλεκτρική ισχύ στο φορτίο. Κατά τη φόρτιση, η διαδικασία αντιστρέφεται.

Ένα βασικό πλεονέκτημα των Li-Ion μπαταριών είναι ότι η παραγωγή ενέργειας δεν απαιτεί τη διάλυση των ηλεκτροδίων μέσα στον ηλεκτρολύτη, μειώνοντας έτσι τη φθορά και αυξάνοντας τον αριθμό κύκλων φόρτισης–εκφόρτισης. Επιπλέον, η χημική σταθερότητα των υλικών τους επιτρέπει μεγάλη διάρκεια ζωής, υψηλή απόδοση και

σταθερή λειτουργία ακόμη και σε επαναλαμβανόμενους κύκλους φόρτισης. Για τους λόγους αυτούς, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου αποτελούν σήμερα την επικρατέστερη επιλογή αποθήκευσης ενέργειας σε συστήματα που αξιοποιούν ανανεώσιμες πηγές, όπως φωτοβολταϊκά και αιολικά πάρκα μικρής κλίμακας. Στο σχήμα 15 απεικονίζεται η δομή ενός κελίου αυτής της κατηγορίας μπαταριών.



Σχήμα 15: Δομή κελίου μπαταρίας Li-ion [29]

Αναλυτικότερα, βάση του υλικού καθόδου διακρίνονται οι μπαταρίες  $\text{LiCoO}_2$ , οι οποίες διαθέτουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και στρωματοποιημένη κρυσταλλική δομή. Ωστόσο, η σπανιότητα, το υψηλό κόστος του κοβαλτίου, η θερμική αστάθεια του υλικού και η περιορισμένη διάρκεια ζωής αποτελούν σημαντικά μειονεκτήματα. Οι μπαταρίες με  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  κάθοδο διαθέτουν δομή σπινέλου, που προσφέρει υψηλή θερμική σταθερότητα και καλή ιοντική αγωγιμότητα. Είναι οικονομικότερες και πιο ασφαλείς από τις  $\text{LiCoO}_2$ , αλλά το μαγγάνιο μπορεί να διαλυθεί στον ηλεκτρολύτη, μειώνοντας τη διάρκεια ζωής. Χάρη στο χαμηλό τους κόστος και την αξιοπιστία, χρησιμοποιούνται ευρέως σε συστήματα αποθήκευσης ενέργειας ανανεώσιμων πηγών, όπου η μακροχρόνια σταθερότητα είναι πιο σημαντική από την ενεργειακή πυκνότητα. Το NMC συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των προηγούμενων καθοδικών υλικών, επιτυγχάνοντας υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, καλή θερμική σταθερότητα και μέτριο κόστος. Οι  $\text{LiFePO}_4$  μπαταρίες χρησιμοποιούν φωσφορικό σίδηρο λιθίου ως καθοδικό υλικό με ολιβινική δομή. Η σταθερότητα αυτής της δομής παρέχει υψηλή ασφάλεια, ανθεκτικότητα σε θερμικές μεταβολές και μεγάλη διάρκεια ζωής. Αν και η ενεργειακή τους πυκνότητα είναι χαμηλότερη από άλλες τεχνολογίες, η απουσία βαρέων μετάλλων (κοβάλτιο, νικέλιο) τις καθιστά περιβαλλοντικά φιλικές και ιδανικές για συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, μικροδίκτυα και σταθμούς φόρτισης IoT συσκευών. Τέλος, οι  $\text{LiPo}$  μπαταρίες αναπτύχθηκαν με στόχο την εξάλειψη του υγρού ηλεκτρολύτη, ώστε να μειωθεί ο κίνδυνος διαρροών και θερμικών προβλημάτων. Αντί του υγρού ηλεκτρολύτη, χρησιμοποιούν πολυμερές υλικό, το οποίο επιτρέπει τη μετακίνηση των ιόντων λιθίου μεταξύ ανόδου και καθόδου. Αυτό προσφέρει ευελιξία στο σχήμα, μειωμένο βάρος και βελτιωμένη ασφάλεια.

Μια σύγκριση των διάφορων μπαταριών αποτυπώνεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 2: Συγκριτικός πίνακας για μικρά κύτταρα

| Επαναφορτιζόμενη Μπαταρία | Ονομαστική Τάση (V) | Χωρητικότητα (mAh) | Ενέργεια (Wh) | Διάρκεια Ζωής (Κύκλοι) | Κόστος (USD) | Απόδοση (%) |
|---------------------------|---------------------|--------------------|---------------|------------------------|--------------|-------------|
| Lead Acid                 | 2.1                 | 1000+              | 3.0 – 4.0     | 50-500                 | 0.6975       | 75-80       |
| NiMH                      | 1.2                 | 2500               | 3.0           | 500-2000               | 0.8546       | 66          |
| Li-ion                    | 3.7                 | 730                | 2.7           | 400-1200               | 0.9361       | 99          |
| Li-Po                     | 3.7                 | 930                | 3.4           | 500-1000               | 2.3095       | 99          |

### 3.2.6. Εφαρμογές

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι μπαταρίες αποτελούν σημαντικό στοιχείο στα συστήματα συγκομιδής ενέργειας, καθώς λειτουργούν ως μέσω αποθήκευσης της ενέργειας που συλλέγεται από το περιβάλλον. Η ενέργεια που προέρχεται από ηλιακές, αιολικές ή θερμικές πηγές, είναι συνήθως ασυνεχής καθιστώντας αναγκαία την αποθήκευση της. Για αυτό τον λόγο, διάφορες μελέτες παρουσιάζουν εφαρμογές διαφορετικών τύπων μπαταριών σε συστήματα συγκομιδής ενέργειας, καθώς και τα κριτήρια επιλογής τους.

Σε σχετική μελέτη, οι Othman και Maga [30] σχεδίασαν ένα ηλιακό σύστημα συγκομιδής ενέργειας για εσωτερικούς χώρους, το οποίο αποθηκεύει την παραγόμενη ενέργεια σε μπαταρία NiMH. Η επιλογή αυτή βασίστηκε στην απλότητα, το χαμηλό κόστος και τη μεγάλη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Για τη διαχείριση της ενέργειας, οι ερευνητές αντικατέστησαν τα πολύπλοκα ηλεκτρονικά κυκλώματα με ένα απλό κύκλωμα διόδου Zener, που εξασφάλισε την αποτροπή αντίστροφης ροής ρεύματος και την προστασία από υπερτάσεις. Τα πειραματικά αποτελέσματα υπό συνθήκες εσωτερικού φωτισμού, έδειξαν ότι το φωτοβολταϊκό στοιχείο από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο παρείχε επαρκή ισχύ ώστε να φορτίσει πλήρως τη μπαταρία NiMH σε περίπου 16 ώρες, επιβεβαιώνοντας τη βιωσιμότητα της προτεινόμενης λύσης.

Στο ίδιο πλαίσιο, οι Abramovitz et al. [32] παρουσίασαν ένα παθητικό μαγνητικό σύστημα συγκομιδής ενέργειας που αξιοποιεί τα εναλλασσόμενα μαγνητικά πεδία αγωγών υψηλού ρεύματος για την τροφοδότηση και επαναφόρτιση μπαταριών Li-ion. Η μελέτη εστιάζει στην βέλτιστη προσαρμογή του συλλέκτη στη μεταβαλλόμενη τάση της μπαταρίας, με στόχο τη μεγιστοποίηση της μεταφερόμενης ενέργειας. Λόγω της χαμηλής ευαισθησίας του συλλέκτη γύρω από το σημείο μέγιστης ισχύος, η απόδοση παραμένει σχεδόν σταθερή (με απώλειες <1%) καθ' όλη τη διάρκεια της φόρτισης, παρέχοντας μια απλή, αξιόπιστη και αποδοτική λύση για βιομηχανικά περιβάλλοντα και ενεργειακά αυτόνομα δίκτυα αισθητήρων.

Τέλος, οι Gudan et al [31] ανέπτυξαν ένα πλήρως αυτόνομο σύστημα συλλογής ενέργειας RF. Στη μελέτη τους, εισήγαγαν έναν χειροκίνητο διακόπτη με βοηθητικό σύστημα ελέγχου, επιτρέποντας την αυτόματη μεταφορά της συλλεγμένης ενέργειας από έναν πυκνωτή σε μια μπαταρία NiMH. Το σύστημα τους υλοποιήθηκε με δύο διαφορετικές προσεγγίσεις κυκλωμάτων. Στο κύκλωμα A χρησιμοποιείται ενέργεια από την ίδια την μπαταρία για την τροφοδοσία του κυκλώματος ελέγχου, ενώ στο κύκλωμα B συλλέγεται επιπλέον RF ενέργεια, ελαχιστοποιώντας την εκφόρτιση της μπαταρίας. Αυτή η αρχιτεκτονική, αποδείχθηκε ικανή να συσσωρεύει αυτόνομα 241  $\mu\text{J}$  σε μπαταρία NiMH σε 30 λεπτά, με επαγόμενη ισχύ RF -21 dBm, παρέχοντας μια πρακτική λύση για την τροφοδοσία υπερ-χαμηλής κατανάλωσης εφαρμογών.

Συνολικά, οι παραπάνω προσεγγίσεις αναδεικνύουν τη σημασία της αποθήκευσης ενέργειας μέσω επαναφορτιζόμενων μπαταριών σε διαφορετικές τεχνολογίες συγκομιδής, επιβεβαιώνοντας ότι η σωστή επιλογή τύπου μπαταρίας αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τη βιωσιμότητα ενεργειακά αυτόνομων IoT συστημάτων.

### 3.3. Υπερπυκνωτές

Οι υπερπυκνωτές (supercapacitors) είναι πυκνωτές των οποίων η χωρητικότητα μετράται σε Farads και παρουσιάζουν υψηλή πυκνότητα ισχύος σε σχέση με τις μπαταρίες αλλά και μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα σε σύγκριση με τους συμβατικούς πυκνωτές. Στους υπερπυκνωτές η συσσώρευση φορτίου πραγματοποιείται μεταξύ δύο ηλεκτροδίων που διαχωρίζονται από ένα πολύ λεπτό ηλεκτρολυτικό διηλεκτρικό. Η διάταξη αυτή μειώνει την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων και αυξάνει τη χωρητικότητα και την ενεργειακή πυκνότητα του συστήματος. Με βάση τον τρόπο αποθήκευσης ενέργειας, οι υπερπυκνωτές διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες: ηλεκτροχημικοί πυκνωτές διπλού στρώματος, ψευδοπυκνωτές και υβριδικοί υπερπυκνωτές, οι οποίοι συνδυάζουν τα χαρακτηριστικά των δύο παραπάνω κατηγοριών.

Σε αντίθεση, με τους συμβατικούς πυκνωτές που χρησιμοποιούν στερεό υλικό, οι υπερπυκνωτές διαθέτουν έναν ηλεκτρολύτη, όπως KOH, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ή Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, ανάμεσα στα ηλεκτρόδια, γεγονός που συμβάλλει στην αύξηση της χωρητικότητας τους. Συνήθως, είναι ικανοί να αποθηκεύουν 10 έως 100 φορές περισσότερη ενέργεια ανά μονάδα μάζας ή όγκου σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς πυκνωτές και να λειτουργούν σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών, που κυμαίνεται από τους -40°C έως τους 70°C. Επιπλέον, χαρακτηρίζονται από τον μεγάλο αριθμό πλήρων κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης που μπορούν να υποστηρίξουν. Το γεγονός αυτό οφείλεται στον ηλεκτροχημικό μηχανισμό αποθήκευσης που χρησιμοποιούν, ο οποίος επιτρέπει ταχεία φόρτιση και υψηλή αποδοτικότητα, φθάνοντας ακόμη και το 98%. Λόγω των χαρακτηριστικών αυτών, οι υπερπυκνωτές αποτελούν ιδανική επιλογή για προσωρινή αποθήκευση ενέργειας σε εφαρμογές συγκομιδής, καθιστώντας δυνατή τη λειτουργία αισθητήρων σε δυσμενή περιβάλλοντα, όπου η διαθέσιμη ενέργεια εμφανίζεται περιοδικά.

Ωστόσο, εμφανίζουν μικρότερη ενεργειακή πυκνότητα, υψηλότερο ρυθμό αυτό-εκφόρτισης αλλά και περιορισμούς όσον αφορά τα επίπεδα λειτουργικής τάσης. Ένας υπερπυκνωτής, μπορεί να χάνει έως και 11% της αποθηκευμένης ενέργειάς του ημερησίως, με αποτέλεσμα η αποθηκευμένη ενέργεια να εξαντλείται σε περίπου δέκα ημέρες. Το γεγονός αυτό αντισταθμίζεται από την πολύ γρήγορη φόρτιση και τη διαθεσιμότητα περιοδικών πηγών ενέργειας στο περιβάλλον, καθιστώντας εφικτή τη λειτουργία ενός συστήματος συγκομιδής για διάστημα έως και 20 ετών χωρίς ανάγκη συντήρησης.

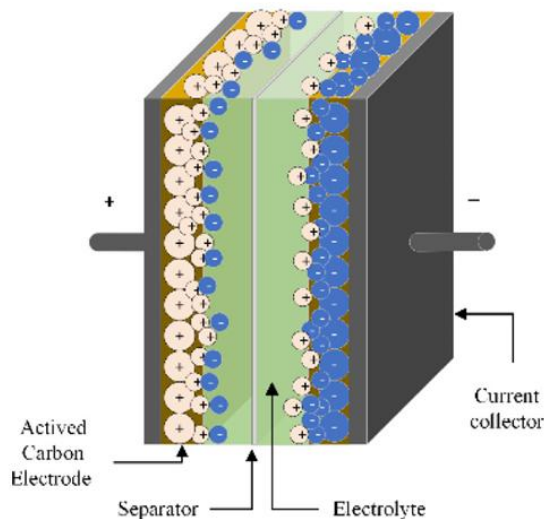
Στον πίνακα 3 παρέχεται μια συνοπτική σύγκριση μεταξύ μπαταρίας και υπερπυκνωτή.

| Τύπος               | Πλεονεκτήματα                                                                                                         | Μειονεκτήματα                                                                 |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Μπαταρία</b>     | Υψηλή χωρητικότητα και τάση, οικονομική, υψηλή ειδική ενέργεια, μικρός ρυθμός αυτό-εκφόρτισης, υψηλή απόδοση φόρτισης | Περιορισμένος κύκλος φόρτισης και διάρκεια ζωής, πολύπλοκο κύκλωμα φόρτισης   |
| <b>Υπερπυκνωτής</b> | Απεριόριστος κύκλος επαναφόρτισης, υψηλή απόδοση φόρτισης, ευρύ φάσμα τάσης και θερμοκρασίας, μεγάλη διάρκεια ζωής    | Υψηλός ρυθμός αυτό-εκφόρτισης, χαμηλή ειδική ενέργεια, ακριβός, κάπως ογκώδης |

### 3.3.1. Ηλεκτροχημικοί Πυκνωτές Διπλού Στρώματος

Οι ηλεκτροχημικοί πυκνωτές διπλού στρώματος (Electrochemical Double Layer Capacitors, EDLCs) αποτελούν μια καθαρά ηλεκτρική μέθοδο αποθήκευσης ενέργειας που βασίζεται στο διαχωρισμό φορτίων μέσω ηλεκτροστατικών δυνάμεων. Η δομή τους αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια, τα οποία είναι χωρισμένα από έναν ιοντικά αγωγίμο διαχωριστή, βυθισμένα μέσα σε έναν ηλεκτρολύτη, όπως φαίνεται στο σχήμα 16. Η αποθήκευση και η απελευθέρωση ενέργειας πραγματοποιείται μέσω της προσρόφησης και εκρόφησης ιόντων στις επιφάνειες των ηλεκτροδίων.

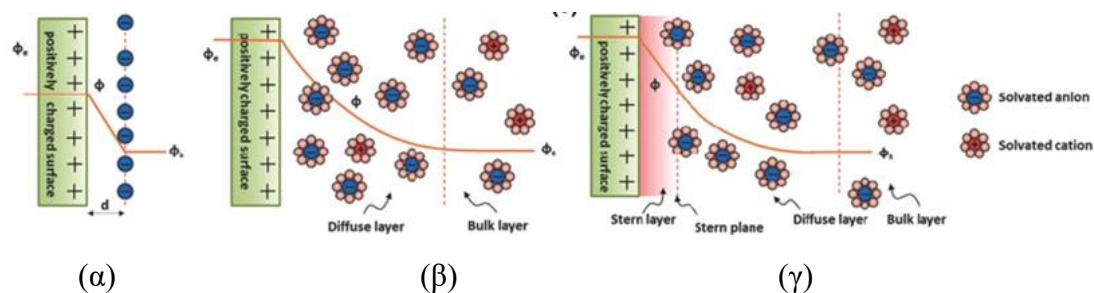
Στο εσωτερικό του EDLC, τα θετικά και αρνητικά φορτία του ηλεκτρολύτη κατανέμονται στις διεπιφάνειες ηλεκτροδίου/ηλεκτρολύτη, σχηματίζοντας ένα πολύ λεπτό διπλό στρώμα, με απόσταση ανάλογη με εκείνη ενός συμβατικού πυκνωτή δύο πλακών. Τα ηλεκτρόδια των υπερπυκνωτών κατασκευάζονται από πορώδη υλικά μεγάλης ειδικής επιφάνειας, συνήθως από ενεργό άνθρακα, ώστε να αποθηκεύουν μεγάλες ποσότητες φορτίων. Ο διαχωριστής, αν και επιτρέπει την κίνηση των ιόντων του ηλεκτρολύτη, εμποδίζει τη ροή ηλεκτρονίων μεταξύ των ηλεκτροδίων. Στους υπερπυκνωτές με οργανικό ηλεκτρολύτη, οι διαχωριστές κατασκευάζονται συνήθως από πολυμερικά υλικά ή χαρτοϊνες, ενώ σε συστήματα με υγρούς ηλεκτρολύτες χρησιμοποιούνται κεραμικά υλικά ή ίνες υάλου.



Σχήμα 16: Δομή EDLC υπερπυκνωτή [33]

Κατά την φόρτιση, σχηματίζονται δύο ηλεκτρικά διπλά στρώματα, ή αλλιώς Helmholtz στρώματα, στις διεπιφάνειες του ηλεκτρολύτη με τα δύο ηλεκτρόδια. Έτσι, η δομή του EDLC μπορεί να θεωρηθεί ισοδύναμη με την παράλληλη σύνδεση δύο συμβατικών πυκνωτών. Όταν ο πυκνωτής φορτίζεται, τα ηλεκτρόνια που συσσωρεύονται στην κάθοδο έλκουν τα κατιόντα του ηλεκτρολύτη, ενώ η έλλειψη ηλεκτρονίων στην άνοδο προσελκύει τα ανιόντα. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται ισορροπία φορτίου και σχηματίζονται δύο συμμετρικά διπλά στρώματα.

Ο μηχανισμός αποθήκευσης ενέργειας με τον οποίο λειτουργούν οι EDLCs και η εξέλιξη του οποίου αποτυπώνεται στο σχήμα 17, αναπτύχθηκε αρχικά το 19ο αιώνα από τον Helmholtz κατά την διάρκεια ερευνών για αντίθετα φορτία σε διεπιφάνειες κολλοειδών σωματιδίων. Σύμφωνα με το μοντέλο του Helmholtz, όταν ένας ηλεκτρικός αγωγός τοποθετείται εντός ενός διαλύματος ηλεκτρολύτη, τότε λόγω ηλεκτροστατικών δυνάμεων στην διεπιφάνεια αγωγού/ηλεκτρολύτη δημιουργείται ένα διπλό στρώμα φορτίων αντίθετης πολικότητας. Στις αρχές του 20ου αιώνα αυτό το μοντέλο, βελτιώθηκε από τους Gouy και Chapman οι οποίοι εισήγαγαν την έννοια του στρώματος διάχυσης (diffuse layer). Το στρώμα διάχυσης δημιουργείται λόγω της συσσώρευσης ιόντων κοντά στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου.



Σχήμα 17: Διάγραμμα Μοντέλων του Ηλεκτρικού Διπλού Στρώματος (α) το Μοντέλο Helmholtz, (β) το Μοντέλο Gouy-Chapman και (γ) το Μοντέλο Stern [34]

Αργότερα, ο Stern πρότεινε ένα συνδυαστικό μοντέλο, σύμφωνα με το οποίο η κατανομή των ιόντων χωρίζεται σε δύο ζώνες: την εσωτερική ζώνη ή στρώμα Stern και την εξωτερική ζώνη ή αλλιώς στρώμα διάχυσης. Τα δύο αυτά στρώματα μπορούν να παρομοιαστούν με δύο πυκνωτές συνδεδεμένους εν σειρά. Η συνολική ηλεκτροχημική απόδοση ενός υπερπυκνωτή EDLC εξαρτάται τόσο από τα ιοντικά χαρακτηριστικά του ηλεκτρολύτη και το είδος του διαλύτη, όσο και από το ηλεκτρικό πεδίο που αναπτύσσεται στο ενεργό υλικό και τη χημική αλληλεπίδραση των ιόντων με την επιφάνεια των ηλεκτροδίων.

Συνοψίζοντας, οι υπερπυκνωτές διπλού στρώματος παρουσιάζουν πολύ υψηλότερη χωρητικότητα σε σύγκριση με τους συμβατικούς πυκνωτές. Αυτό οφείλεται στην τεράστια ενεργό επιφάνεια των πορώδων ηλεκτροδίων και στη μικροσκοπική απόσταση μεταξύ των φορτίων στο διπλό στρώμα, η οποία κυμαίνεται σε ατομική κλίμακα (περίπου 0,3–0,8 nm). Επιπλέον, η απουσία στερεού διηλεκτρικού και χημικών αντιδράσεων επιτρέπει τη γρήγορη φόρτιση και εκφόρτιση χωρίς σημαντική φθορά, συμβάλλοντας έτσι στη μεγάλη διάρκεια ζωής των συσκευών αυτών. Παρόλα αυτά, το διπλό ηλεκτρικό στρώμα δεν αντέχει σε υψηλές τάσεις, γεγονός που καθιστά απαραίτητη τη σύνδεση πολλών υπερπυκνωτών σε σειρά όταν απαιτείται λειτουργία σε ανώτερα επίπεδα τάσης.

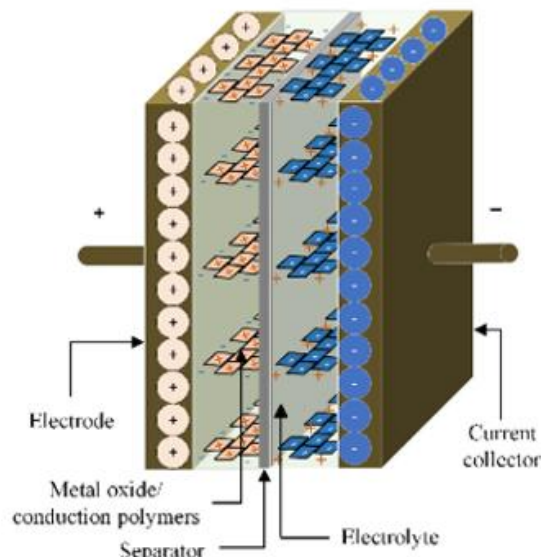
### 3.3.2. Ψευδοπυκνωτές

Οι ψευδοπυκνωτές (Pseudocapacitors) αποτελούν μία κατηγορία υπερπυκνωτών οι οποίοι αποθηκεύουν ενέργεια μέσω ηλεκτροχημικών φαρανταϊκών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων και η δομή των οποίων φαίνεται στο σχήμα 18. Σε αντίθεση με τους EDLCs, όπου η αποθήκευση ενέργειας πραγματοποιείται ηλεκτροστατικά, στους ψευδοπυκνωτές η αποθήκευση βασίζεται σε αντιδράσεις οξειδοαναγωγής, οι οποίες συνοδεύονται από μεταφορά ηλεκτρονίων διαμέσου της διεπιφάνειας του ηλεκτροδίου και του ηλεκτρολύτη. Οι αντιδράσεις αυτές μπορούν να είναι αναστρέψιμες ή μη αναστρέψιμες, ανάλογα με τη φύση του υλικού και του ηλεκτρολύτη.

Τα ηλεκτρόδια των ψευδοπυκνωτών κατασκευάζονται συνήθως από οξείδια μετάλλων μεταπτώσης, όπως MgO, NiO, Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, RuO<sub>2</sub> ή από αγωγίμα πολυμερή, τα οποία παρουσιάζουν υψηλή ηλεκτροχημική δραστηριότητα και ικανότητα ταχείας ανταλλαγής φορτίων. Ανάλογα με τον μηχανισμό αποθήκευσης, οι ψευδοπυκνωτές διακρίνονται σε ενδογενείς και εξωγενείς. Οι ενδογενείς βασίζονται σε μεταλλικά οξείδια και εμφανίζουν συμπεριφορά παρόμοια με εκείνη των EDLCs, ενώ οι εξωγενείς, που βασίζονται σε αγωγίμα πολυμερή, προσομοιάζουν περισσότερο τις μπαταρίες.

Η χωρητικότητα των ψευδοπυκνωτών είναι πολλαπλάσια εκείνης των EDLCs, καθώς συνδυάζει ηλεκτροστατική και φαρανταϊκή αποθήκευση φορτίου. Ωστόσο, η ταχύτητα απόκρισης τους είναι μικρότερη, καθώς οι φαρανταϊκές διεργασίες συνοδεύονται από διείσδυση ιόντων και δομικές μεταβολές στο ενεργό υλικό, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει τη μηχανική σταθερότητα και τη διάρκεια ζωής τους. Παρόλα αυτά, η ενεργειακή πυκνότητα τους είναι σημαντικά υψηλότερη από αυτή των υπερπυκνωτών διπλού στρώματος, ενώ παραμένει μικρότερη από αυτή των χημικών μπαταριών.

Επιπλέον, οι ψευδοπυκνωτές παρουσιάζουν ταχεία φόρτιση και εκφόρτιση, υψηλή απόδοση (έως και 98%) και μεγάλη διάρκεια ζωής σε σύγκριση με τις συμβατικές μπαταρίες, καθιστώντας τους κατάλληλους για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ισχύ και συχνές κύκλους φόρτισης και εκφόρτισης, όπως στην ανάκτηση ενέργειας, στα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα, και στα φορητά ηλεκτρονικά συστήματα.



Σχήμα 18: Δομή ψευδοπυκνωτή [33]

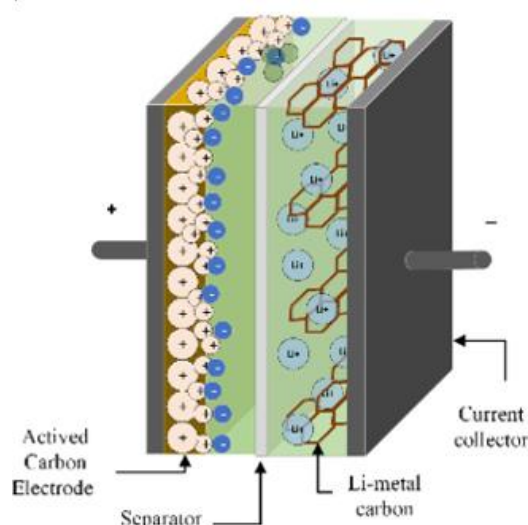
### 3.3.3. Υβριδικοί υπερπυκνωτές

Οι υβριδικοί υπερπυκνωτές (Hybrid Supercapacitors) συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα των υπερπυκνωτών διπλού στρώματος και των ψευδοπυκνωτών. Ο μηχανισμός λειτουργίας τους βασίζεται στην αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας μέσω δύο διαφορετικών διεργασιών: της ηλεκτροστατικής αποθήκευσης φορτίου στο διπλό ηλεκτρικό στρώμα και των φαρανταϊκών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων. Η δομή των υβριδικών υπερπυκνωτών αποτυπώνεται στο σχήμα 19.

Στους υβριδικούς υπερπυκνωτές χρησιμοποιούνται δύο ανόμοια ηλεκτρόδια, με το ένα να δρα ως ηλεκτρόδιο τύπου υπερπυκνωτή (EDLC) και το άλλο ως ηλεκτρόδιο τύπου ψευδοπυκνωτή. Το ηλεκτρόδιο EDLC αποθηκεύει φορτίο μέσω της δημιουργίας του διπλού στρώματος στο όριο ηλεκτροδίου και ηλεκτρολύτη, χωρίς τη συμμετοχή χημικών αντιδράσεων, ενώ το ηλεκτρόδιο του ψευδοπυκνωτή βασίζεται σε αναστρέψιμες οξειδοαναγωγικές διεργασίες, αυξάνοντας σημαντικά τη συνολική χωρητικότητα του συστήματος.

Η υβριδική αρχιτεκτονική αυτών των συστημάτων επιτρέπει τον συνδυασμό υψηλής ενεργειακής πυκνότητας, που πλησιάζει αυτήν των μπαταριών, με υψηλή πυκνότητα ισχύος και μεγάλο αριθμό κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης. Η απόδοσή τους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την επιλογή των υλικών ηλεκτροδίων και του ηλεκτρολύτη. Συνήθως χρησιμοποιούνται υλικά άνθρακα για το ηλεκτρόδιο EDLC και οξείδια μετάλλων μετάπτωσης ή αγώγιμοι πολυμερείς για το ηλεκτρόδιο του

ψευδοπυκνωτή, ώστε να επιτευχθεί ο βέλτιστος συνδυασμός χωρητικότητας και σταθερότητας.



Σχήμα 19: Δομή υβριδικού υπερπυκνωτή [33]

### 3.3.4. Ηλεκτρολύτες

Η ηλεκτροχημική απόδοση ενός υπερπυκνωτή εξαρτάται από την επιλογή του ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιείται. Η αντιστοιχία μεταξύ του μεγέθους των ιόντων και των πόρων των ηλεκτροδίων επηρεάζει τη χωρητικότητα, ενώ τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρολύτη καθορίζουν την θερμοκρασία λειτουργίας, την ενεργειακή πυκνότητα και ισχύ του υπερπυκνωτή. Ανάλογα με τη φυσική τους κατάσταση και τη χημική τους σύσταση, οι ηλεκτρολύτες ταξινομούνται σε υγρούς και στερεούς. Οι υγροί ηλεκτρολύτες μπορεί να διακριθούν περαιτέρω σε ιοντικούς, οργανικούς και υδατικούς, ενώ η κατηγορία των στερεών περιλαμβάνει ηλεκτρολύτες σε μορφή γέλης (hydrogel), ξηρούς πολυμερικούς ηλεκτρολύτες, στερεούς κεραμικούς ηλεκτρολύτες και οργανικούς ιοντικούς πλαστικούς κρυστάλλους.

#### ■ Υδατικοί ηλεκτρολύτες

Οι υδατικοί ηλεκτρολύτες χαρακτηρίζονται από την υψηλή ιοντική αγωγιμότητα, το χαμηλό κόστος και την φιλικότητα τους προς το περιβάλλον. Το βασικότερο μειονέκτημα τους είναι το χαμηλό δυναμικό λειτουργίας (περίπου 1,23V), εξαιτίας της ηλεκτρόλυσης του νερού, το οποίο περιορίζει την ενεργειακή πυκνότητα σε σύγκριση με άλλα είδη ηλεκτρολυτών. Παρόλα αυτά, προσφέρουν γρήγορη μεταφορά πρωτονίων, χάρη στη μικρή ακτίνα των ιόντων και την υψηλή συγκέντρωσή τους. Διακρίνονται σε όξιους, βασικούς και ουδέτερους, χαρακτηριστικά παραδείγματα των οποίων είναι το  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{KOH}$  και  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , αντίστοιχα. Τα παραπάνω καθιστούν τους υδατικούς ηλεκτρολύτες ιδανικούς για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή αγωγιμότητα και σταθερότητα κύκλων.

- Οργανικοί ηλεκτρολύτες

Οι οργανικοί ηλεκτρολύτες είναι καταλληλότεροι για υπερπυκνωτές που λειτουργούν σε υψηλές τάσης της τάξεως των 3,5V, επιτυγχάνοντας υψηλότερες ενεργειακές πυκνότητες. Παρόλα αυτά, εμφανίζουν ζητήματα τοξικότητας, αυξημένου κόστους και χαμηλής χωρητικότητας, ως εκ τούτου η χρήση τους περιορίζεται σε βιομηχανικά περιβάλλοντα. Η ακετονιτρίλη (CAN) και ο ανθρακικός προπυλένιος (PC), καθώς και άλατα όπως το τετρααιθυλαμμώνιο (TEABF<sub>4</sub>) αποτελούν παραδείγματα αυτής της κατηγορίας.

- Ιοντικοί Ηλεκτρολύτες

Οι ιοντικοί ηλεκτρολύτες αποτελούνται από οργανικά άλατα που βρίσκονται σε υγρή μορφή σε θερμοκρασία δωματίου και χαρακτηρίζονται από θερμική σταθερότητα, χαμηλή ευφλεκτότητα και μη πτητικότητα. Τα χαρακτηριστικά αυτά, τους καθιστούν ιδανικούς για υψηλά δυναμικά, φτάνοντας ακόμα και τα 6V, ωστόσο το υψηλό κόστος και η σχετικά χαμηλή αγωγιμότητα περιορίζουν την χρήση τους. Τυπικά παραδείγματα αποτελούν ιμιδαζόλιο και το πυριδίνιο.

- Στερεοί Ηλεκτρολύτες

Οι στερεοί ηλεκτρολύτες αποτελούν βασικό τμήμα των υπερπυκνωτών καθώς λειτουργούν ως ιοντικοί αγωγοί σε στερεή κατάσταση και ταξινομούνται σε τέσσερις κατηγορίες. Οι ηλεκτρολύτες σε μορφή γέλης διαθέτουν ευέλικτη κρυσταλλική δομή, με ιδιότητες παρόμοιες των υγρών ηλεκτρολυτών. Η αγωγιμότητα τους μπορεί να βελτιωθεί με κατάλληλες προσμίξεις. Οι ξηροί πολυμερικοί ηλεκτρολύτες προκύπτουν από την άμεση διάλυση αλάτων σε στερεά πολυμερή και συχνά αναμιγνύονται με κεραμικά υλικά για την βελτίωση των ιδιοτήτων τους. Αντίθετα, οι κεραμικοί στερεοί ηλεκτρολύτες αποτελούνται από υαλώδη ή κρυσταλλική κεραμική φάση, μέσα στην οποία τα ιόντα κινούνται μέσω κενών θέσεων ή ενδοπλεγματικών καναλιών. Χαρακτηρίζονται από υψηλή θερμική σταθερότητα και ικανοποιητική ιοντική αγωγιμότητα, ιδανικοί για μακροχρόνιες ενεργειακές εφαρμογές. Τέλος, οι οργανικοί ιοντικοί πλαστικοί κρύσταλλοι είναι οργανικά άλατα με μεσοφασικές δομές, όπου τα ιόντα διατηρούν σταθερές θέσεις στο πλέγμα, αλλά μπορούν να περιστρέφονται ελεύθερα. Αυτή η ιδιότητα προσδίδει στα υλικά πλαστικότητα, καλή μηχανική ευκαμψία και βελτιωμένη επαφή μεταξύ ηλεκτροδίου και ηλεκτρολύτη.

### 3.3.5. Ηλεκτρόδια

Τα ηλεκτρόδια αποτελούν κρίσιμο στοιχείο του υπερπυκνωτή, καθώς πέρα από την απόδοση επηρεάζουν την σταθερότητα και της διάρκειας ζωής της συσκευής. Για να είναι αποτελεσματικά, πρέπει να διαθέτουν υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, θερμική σταθερότητα, χημική ανθεκτικότητα και χαμηλό κόστος. Η μεγάλη επιφάνεια του ηλεκτροδίου μεγιστοποιεί την επαφή με τον ηλεκτρολύτη, οδηγώντας στην ανάπτυξη περισσότερων ηλεκτροχημικών διεργασιών και αντιδράσεων προσρόφησης, και κατά επέκταση σε αύξηση της χωρητικότητας. Ταυτόχρονα, η πορώδης δομή τους ενισχύει την μεταφορά ιόντων, βελτιώνοντας την αλληλεπίδραση του ηλεκτροδίου με τον

ηλεκτρολύτη και άρα τη συνολική απόδοση του υπερπυκνωτή. Τα επικρατέστερα υλικά για την κατασκευή των ηλεκτροδίων διακρίνονται σε υλικά με βάση τον άνθρακα, οξείδια μεταβατικών μετάλλων και αγωγίμα πολυμερή, των οποίων η περιγραφή τους παρουσιάζεται παρακάτω.

- Ηλεκτρόδια με βάση τον άνθρακα

Τα υλικά ηλεκτροδίων που προέρχονται από άνθρακα είναι ιδανικά για συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, χάρη στο χαμηλό κόστος τους, την υψηλή χημική και θερμική σταθερότητα αλλά και την υψηλή αγωγιμότητα. Αυτή η κατηγορία επιλέγεται συχνά για υπερπυκνωτές διπλού στρώματος εξαιτίας της αυξημένης χωρητικότητας που παρουσιάζουν. Τα πιο διαδεδομένα υλικά είναι ο ενεργός άνθρακας, οι νανοσωλήνες άνθρακα και το γραφένιο.

Ο ενεργός άνθρακας παράγεται από φυσικές πρώτες ύλες, όπως ξύλο, κάρβουνο ή απόβλητα, μέσω μιας διαδικασίας που περιλαμβάνει ανθρακοποίηση και ενεργοποίηση. Η ενεργοποίηση πραγματοποιείται είτε χημικά, σε χαμηλές θερμοκρασίες (400–700°C) με χρήση KOH ή ZnCl<sub>2</sub>, είτε θερμικά, σε υψηλότερες θερμοκρασίες (700–1200°C) υπό την παρουσία υδρατμών ή CO<sub>2</sub>. Η διαδικασία αυτή είναι υπεύθυνη για την πορώδη δομή, που περιλαμβάνει μικροπόρους, μεσοπόρους και μακροπόρους, βελτιώνοντας με αυτόν τον τρόπο τη χωρητικότητα και την ενεργειακή απόδοση του υπερπυκνωτή. Ωστόσο, ο ενεργός άνθρακας μπορεί να εμφανίσει χαμηλότερη ηλεκτρική αγωγιμότητα, γεγονός που αντιμετωπίζεται με την προσθήκη μαύρου άνθρακα.

Οι νανοσωλήνες άνθρακα έχουν προσελκύσει ιδιαίτερο ενδιαφέρον χάρη στην κυλινδρική τους δομή αποτελούμενη από φύλλα γραφίτη τυλιγμένα σε σωληνοειδή μορφή. Διακρίνονται σε μονοστρωματικούς, διπλοστρωματικούς και πολυστρωματικούς νανοσωλήνες. Η δομή τους προσφέρει μεγάλη επιφάνεια και πορώδες δίκτυο, ευνοώντας τη γρήγορη μεταφορά ιόντων και ηλεκτρονίων, κάνοντας τους ιδανικούς για χρήση ως υλικά ηλεκτροδίων σε υπερπυκνωτές υψηλής απόδοσης. Εξαιτίας της ευκαμψίας, της ανθεκτικότητας και της υψηλής αγωγιμότητας που παρουσιάζουν, συμβάλουν στη βελτίωση της σταθερότητας των υπερπυκνωτών και στην εξασφάλιση γρήγορης φόρτισης και εκφόρτισης.

Τέλος, το γραφένιο είναι ένα δισδιάστατο υλικό που αποτελείται από ένα μονό στρώμα ατόμων άνθρακα, διατεταγμένων σε εξαγωνικό πλέγμα με δεσμούς τύπου sp<sup>2</sup>, που του προσδίδουν μοναδική μηχανική αντοχή, υψηλή θερμική αγωγιμότητα και εξαιρετική ηλεκτρική αγωγιμότητα. Η μεγάλη επιφάνεια του επιτρέπει την αποθήκευση μεγάλου αριθμού φορτίων, αυξάνοντας την χωρητικότητα της συσκευής, ενώ η υψηλή αγωγιμότητά του εξασφαλίζει ταχεία φόρτιση και εκφόρτιση.

- Ηλεκτρόδια από οξείδια μεταβατικών μετάλλων

Τα οξείδια μεταβατικών μετάλλων παρουσιάζουν ηλεκτροχημικές φαρανταϊκές αντιδράσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων και των ηλεκτρολυτών, καθιστώντας τα ιδανικά για χρήση στους ψευδοπυκνωτές και στους υβριδικούς υπερπυκνωτές. Αυτή η κατηγορία ηλεκτροδίων χαρακτηρίζεται από υψηλή ειδική χωρητικότητα, καλύτερη χημική σταθερότητα σε σχέση με τα αγωγίμα πολυμερή και μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα συγκριτικά με τα υλικά άνθρακα. Υλικά όπως το οξείδιο του νικελίου (NiO),

το οξείδιο του μαγγανίου ( $\text{MnO}_2$ ) και το διοξείδιο του ρουθηνίου ( $\text{RuO}_2$ ) είναι τα επικρατέστερα. Το  $\text{RuO}_2$  παραμένει το πιο διαδεδομένο οξείδιο για ενεργειακές εφαρμογές με ειδική χωρητικότητα έως 905 F/g, αλλά η υψηλή του τιμή περιορίζει τη χρήση του στην αγορά.

- Ηλεκτρόδια από αγωγή πολυμερή

Τα αγωγή πολυμερή αποτελούν μια υποσχόμενη τεχνολογία για τα ηλεκτρόδια των ψευδοπυκνωτών. Η λειτουργία τους βασίζεται σε χημικές αντιδράσεις οξειδοαναγωγής, κατά την διάρκεια των οποίων τα ιόντα του ηλεκτρολύτη μεταφέρονται στον κορμό του πολυμερούς και κατά την αναγωγή τα ιόντα απελευθερώνονται στον ηλεκτρολύτη. Τα πιο συχνά μελετημένα αγωγή πολυμερή για υπερπυκνωτές είναι το πολυπυρρόλιο (PPy), η πολυανιλίνη (PANI) και η πολυθειοφαίνη (PTh). Ωστόσο, κατά τη διαδικασία ενσωμάτωσης και απομάκρυνσης ιόντων, τα πολυμερή τείνουν να συσσωματώνονται και να συρρικνώνονται, προκαλώντας μηχανική φθορά του ηλεκτροδίου και μειωμένη ηλεκτροχημική απόδοση κατά τους κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης,

### 3.3.6. Εφαρμογές

Στις συσκευές IoT, οι υπερπυκνωτές μπορούν να παρέχουν γρήγορη ισχύ κατά τη διάρκεια στιγμιαίων ενεργειακών απαιτήσεων, όπως η μετάδοση δεδομένων ή η ενεργοποίηση αισθητήρων. Ο συνδυασμός τους με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας επιτρέπει την αποτελεσματική αποθήκευση και βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος.

Στο πλαίσιο αυτό, ο Othman [36] μοντελοποίησε ένα σύστημα συγκομιδής ενέργειας από πιεζοηλεκτρικά στοιχεία ενσωματωμένα σε στρατιωτική μπότα. Οι πιεζοηλεκτρικοί μετατροπείς παρήγαγαν εναλλασσόμενη τάση από τα βήματα του χρήστη, η οποία αποθηκευόταν σε υπερπυκνωτή. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η παραγόμενη ενέργεια (μέχρι 5,5 V μετά από μία ώρα βαδίσματος) είναι επαρκής για την τροφοδοσία φορητών συσκευών, αποδεικνύοντας την καταλληλότητα των υπερπυκνωτών για αυτοτροφοδοτούμενα συστήματα IoT. Παράλληλα, οι Noohi et al. [37] πρότειναν ένα σύστημα χαμηλού κόστους και μεγέθους για συγκομιδή ενέργειας από το πέλμα ελαστικών οχημάτων, χρησιμοποιώντας πιεζοηλεκτρικά στοιχεία και υπερπυκνωτές. Το σύστημα αυτό παράγει έξοδο περίπου 10,34 V, καθιστώντας το κατάλληλο για εφαρμογές όπως ασύρματοι αισθητήρες σε ελαστικά.

Επιπλέον, διεξάγονται έρευνες για υβριδικά συστήματα αποθήκευσης. Το έργο των Wang et al. [38] παρουσιάζει έναν υπερπυκνωτή σε συνδυασμό με μπαταρία για συστήματα συγκομιδής κινητικής ενέργειας σε έξυπνες συσκευές χαμηλής κατανάλωσης. Ο υπερπυκνωτής χρησιμοποιείται για την ταχεία αποθήκευση και απόδοση ενέργειας από έναν ηλεκτρομαγνητικό συλλέκτη δονήσεων, ενώ η μπαταρία μειώνει τις απώλειες λόγω διαρροής και αυξάνει τη διάρκεια ζωής του συστήματος. Ένα σύστημα διαχείρισης ισχύος ρυθμίζει τη φόρτιση και εκφόρτιση, εξασφαλίζοντας σταθερή τάση εξόδου και αποδοτική λειτουργία, με μέγιστη παραγόμενη ισχύ 4 mW σε χαμηλές συχνότητες.

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΕΛΕΓΧΟ ΙΣΧΥΟΣ

---

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαμόρφωση του προβλήματος, που έχει σαν στόχο την μελέτη της επίδρασης των διαφορετικών κατανομών της συγκομιδής ενέργειας στην απόδοση των ασυρμάτων δικτύων αλλά και τη μελέτη της μπαταρίας του δικτύου. Για την ανάλυση τους, η παρούσα διπλωματική βασίστηκε στο έργο των Kallitsis, Stai, Karyotis, Papavassiliou [44], όπου εισάγεται ένα νέο πλαίσιο βελτιστοποίησης ισχύος, δρομολόγησης και ελέγχου συμφόρησης σε δίκτυα, στα οποία οι συσκευές ανταλλάσσουν δεδομένα και ενέργεια μεταξύ τους ενώ ταυτόχρονα συλλέγουν και ενέργεια από το περιβάλλον. Η προτεινόμενη μέθοδος αξιοποιεί τεχνικές κυρτής βελτιστοποίησης, ώστε να επιτυγχάνεται μέγιστη αξιοποίηση της χωρητικότητας του δικτύου με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης.

### 4.1. Προτεινόμενο μοντέλο συστήματος

Το δίκτυο αποτελείται από ένα πεπερασμένο σύνολο ασύρματων κόμβων  $N = \{1, 2, \dots, n\}$ , οι οποίοι διαθέτουν δυνατότητα μετάδοσης δεδομένων, ασύρματης μεταφοράς ενέργειας προς γειτονικούς κόμβους και ενεργειακής συγκομιδής από το περιβάλλον. Ο κάθε κόμβος έχει περιορισμένη χωρητικότητα μπαταρίας και η φόρτιση του επιτυγχάνεται αποκλειστικά μέσω συγκομιδής ή ασύρματης λήψης ενέργειας από γειτονικούς κόμβους. Η λειτουργία αυτή βασίζεται στην αρχή της ταυτόχρονης ασύρματης μετάδοσης πληροφορίας και ενέργειας (Simultaneous Wireless Information and Power Transfer, SWIPT), όπου δεδομένα και ενέργεια μεταδίδονται ταυτόχρονα μέσω της ίδιας συχνότητας και καναλιού. Επιπλέον, οι κόμβοι διαχωρίζονται σε κεντρικούς και περιφερειακούς, με βάση την απόστασή τους από το κέντρο του δικτύου.

Το γράφημα του δικτύου διαμορφώνεται με την προσθήκη ζεύξεων μεταξύ των κόμβων που απέχουν απόσταση μικρότερη από ένα ανώτατο όριο, έτσι ώστε ο λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR) να βρίσκεται σε αποδεκτά επίπεδα. Οι κόμβοι του δικτύου μπορούν να παράγουν δεδομένα για ένα πεπερασμένο σύνολο  $K$  ροών, να επιλέγουν δυναμικά τον ρυθμό μετάδοσης και την ισχύ εκπομπής και να προγραμματίζουν ενεργειακές ανταλλαγές ώστε να διατηρούν ενεργειακή ισορροπία. Το μοντέλο ενσωματώνει παράγοντες απώλειας ενέργειας, με συντελεστή  $\gamma \in (0, 1)$ .

Ταυτόχρονα, ορίζεται ένα πεπερασμένο σύνολο  $I$  μεταξύ ζεύξεων που δεν παρεμβάλλονται μεταξύ τους, επιτρέποντας την ταυτόχρονη μετάδοση δεδομένων στις ζεύξεις που ανήκουν στο ίδιο ανεξάρτητο σύνολο. Η κατανομή του χρόνου μετάδοσης μεταξύ τους εκφράζεται μέσω μη αρνητικών συντελεστών  $\eta_I$ , που ικανοποιούν την σχέση  $0 \leq \sum_{I \in I} \eta_I \leq 1$ .

Κάθε ζεύξη  $(i, j)$  είναι ενεργή για ένα ποσοστό χρόνου ίσο με το άθροισμα των  $\eta_I$  στα οποία συμμετέχει. Η ενέργεια που δαπανά ο πομπός για μεταδόσεις δεδομένων ή ενέργειας υπολογίζεται ως το άθροισμα της αντίστοιχης ισχύος επί τον χρόνο λειτουργίας. Οι μεταδόσεις επηρεάζονται από τα χαρακτηριστικά του ασύρματου καναλιού, ενώ ο επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων περιορίζεται από τον τύπο του Shannon,

$$r_{ij}^k \leq \sum_{I: (i,j) \in I} \eta_I B_{ij} \log_2 \left( 1 + \frac{h_{ij} P_{T,ij}^k}{N_0} \right)$$

Αντίστοιχα, η ενέργεια που μεταφέρεται ασύρματα υπολογίζεται με βάση τα χαρακτηριστικά της κεραίας και του καναλιού,

$$e_{ij} \leq \sum_{I: (i,j) \in I} \eta_I \Delta T \frac{G_i G_j \lambda^2 P_{TE,ij}}{(4\pi R_{ij})^2}$$

Οι παράμετροι που σχετίζονται με την διατύπωση του προβλήματος παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4: Περιγραφή παραμέτρων

| Σύμβολο         | Περιγραφή                                                                                                                         |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\alpha_i^k(t)$ | Ρυθμός παραγωγής δεδομένων (bits/h) για τη ροή $k$ στον κόμβο $i$                                                                 |
| $r_{ij}^k(t)$   | Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων από τον κόμβο $i$ προς τον κόμβο $j$ για τη ροή $k$                                                    |
| $e_i(t)$        | Ποσότητα ενέργειας (Wh) που συλλέγεται από τον κόμβο $i$                                                                          |
| $e_{ij}(t)$     | Ποσότητα ενέργειας (Wh) που αποστέλλεται από τον κόμβο $i$ προς τον κόμβο $j$                                                     |
| $P_{T,ij}^k(t)$ | Ισχύς εκπομπής (W) για τη μετάδοση δεδομένων από τον κόμβο $i$ προς τον κόμβο $j$ για τη ροή $k$                                  |
| $P_{TE,ij}$     | Ισχύς εκπομπής (W) για τη μεταφορά ενέργειας από τον κόμβο $i$ προς τον κόμβο $j$                                                 |
| $B_{ij}$        | Εύρος ζώνης                                                                                                                       |
| $h_{ij}$        | Συντελεστής εξασθένησης καναλιού                                                                                                  |
| $N_0$           | Μέση ισχύ θορύβου (Watt)                                                                                                          |
| $G_i, G_j$      | Κέρδη κεραιών των $i$ και $j$                                                                                                     |
| $\lambda$       | Μήκος κύματος                                                                                                                     |
| $R_{ij}$        | Απόσταση μεταξύ των $i$ και $j$                                                                                                   |
| $E_{R,i}^k$     | Εργοδικό όριο της κατανάλωσης ενέργειας (Wh/bit) κατά τη λήψη δεδομένων, του κόμβου $i$ για τη ροή $k$ σε κάθε χρονική θυρίδα $t$ |

|             |                                                                                                                                       |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $E_{P,i}^k$ | Εργοδικό όριο της κατανάλωσης ενέργειας (Wh/bit) κατά τη παραγωγή δεδομένων, του κόμβου $i$ για τη ροή $k$ σε κάθε χρονική θυρίδα $t$ |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

## 4.2. Ενεργειακή Συγκομιδή και Κατανομές Ενέργειας

Σε κάθε χρονική στιγμή  $t$ , κάθε κόμβος  $i$  συλλέγει ενέργεια  $e_i(t)$  από το περιβάλλον. Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, η διαδικασία συγκομιδής ενέργειας μοντελοποιείται με την χρήση πέντε διαφορετικών στατιστικών κατανομών. Οι επιλεγμένες κατανομές είναι οι εξής,

### 4.2.1. Ομοιόμορφη Κατανομή

Η ομοιόμορφη κατανομή

$$e_i(t) \sim \mathcal{U}[E_{\min}, E_{\max}]$$

υποθέτει ότι η ενέργεια συγκομίζεται με σταθερή πιθανότητα σε ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών, χωρίς προτίμηση προς χαμηλές ή υψηλές τιμές. Η μέση τιμή και η διακύμανση δίνονται από τις σχέσεις:

$$\mathbb{E}[e_i(t)] = \frac{E_{\min} + E_{\max}}{2},$$

$$\text{Var}[e_i(t)] = \frac{(E_{\max} - E_{\min})^2}{12}$$

### 4.2.2. Εκθετική κατανομή

Η εκθετική κατανομή

$$e_i(t) \sim \text{Exp}(\lambda_i)$$

χαρκτηρίζεται από τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας

$$f_E(x) = \lambda_i e^{-\lambda_i x}, x \geq 0,$$

και περιγράφει περιπτώσεις όπου οι αφίξεις ενέργειας έχουν χαμηλές τιμές με σπάνιες μεγάλες αιχμές. Η μέση τιμή και η διακύμανση της δίνονται από τις σχέσεις:

$$\mathbb{E}[e_i(t)] = \frac{1}{\lambda_i}$$

$$\text{Var}[e_i(t)] = \frac{1}{\lambda_i^2}$$

#### 4.2.3. Λογαριθμοκανονική Κατανομή

Η λογαριθμοκανονική κατανομή

$$e_i(t) \sim \text{Lognormal}(\mu, \sigma^2)$$

προκύπτει όταν ο λογάριθμος της ενέργειας  $\ln(e_i)$  ακολουθεί κανονική κατανομή  $N(\mu, \sigma^2)$ . Η πυκνότητα πιθανότητας δίνεται από:

$$f_E(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right], x > 0.$$

Η λογαριθμοκανονική κατανομή έχει βαριές ουρές και ασύμμετρη μορφή, επιτρέποντας την εμφάνιση πολύ υψηλών τιμών ενέργειας με μικρή πιθανότητα. Η μέση τιμή και η διακύμανση της προκύπτουν,

$$\mathbb{E}[e_i(t)] = \exp\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right)$$

$$\text{Var}[e_i(t)] = [\exp(\sigma^2) - 1]\exp(2\mu + \sigma^2)$$

Σε σχέση με την εκθετική, παράγει πιο έντονες διακυμάνσεις, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε αστάθεια της διαθεσιμότητας ενέργειας.

#### 4.2.4. Κατανομή Weibull

Η κατανομή Weibull

$$e_i(t) \sim \text{Weibull}(k, \lambda)$$

είναι παραμετρική κατανομή με συνάρτηση πυκνότητας:

$$f_E(x) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-(x/\lambda)^k}, x \geq 0.$$

Παρέχει μεγάλη ευελιξία στη μοντελοποίηση ενεργειακών αφίξεων, καθώς η μορφή της εξαρτάται από την παράμετρο σχήματος  $k$ :

- Για  $k < 1$ , οι αφίξεις είναι σπάνιες αλλά έντονες.
- Για  $k = 1$ , ταυτίζεται με την εκθετική κατανομή.

- Για  $k > 1$ , το προφίλ γίνεται πιο συμμετρικό και σταθερό, με μειωμένη διακύμανση.

Η μέση τιμή και η διακύμανση της εξαρτώνται από τις σχέσεις:

$$\mathbb{E}[e_i(t)] = \lambda \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$$

$$\text{Var}[e_i(t)] = \lambda^2 \left[ \Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \left(\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)\right)^2 \right]$$

Η κατανομή Weibull χρησιμοποιείται ευρέως για την συγκομιδή αιολικής ενέργειας και ενέργειας παραγόμενης από ραδιοσυχνότητες, καθώς αποτυπώνει τυχαίες διακυμάνσεις που προκύπτουν σε πραγματικά σενάρια.

#### 4.2.5 Κατανομή Rayleigh

Η κατανομή Rayleigh

$$e_i(t) \sim \text{Rayleigh}(\sigma)$$

προκύπτει όταν η ενέργεια προέρχεται από το άθροισμα πολλών ανεξάρτητων συνιστωσών. Η συνάρτηση πυκνότητας είναι:

$$f_E(x) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-x^2/(2\sigma^2)}, x \geq 0,$$

με μέση τιμή και διακύμανση,

$$\mathbb{E}[e_i(t)] = \sigma \sqrt{\pi/2}$$

$$\text{Var}[e_i(t)] = \left(\frac{4 - \pi}{2}\right) \sigma^2$$

Η Rayleigh κατανομή εφαρμόζεται για την μελέτη ασύρματων καναλιών με σκίαση και πολλαπλές ανακλάσεις του σήματος, μπορεί να περιγράψει και τη συμπεριφορά της συγκομιζόμενης ενέργειας σε παρόμοια τυχαία περιβάλλοντα. Αντιπροσωπεύει καταστάσεις όπου η συλλογή ενέργειας εξαρτάται έντονα από τυχαίους παράγοντες διάδοσης, με μικρές αλλά συνεχείς διακυμάνσεις γύρω από μία μέση τιμή.

Πέραν τον παραπάνω, αναλύονται και δύο σύνθετα σενάρια, όπου το δίκτυο διαχωρίζεται σε κεντρικούς και περιφερειακούς κόμβους με διαφορετικά στατιστικά συγκομιδής ενέργειας.

- Σενάριο A: Οι κεντρικοί κόμβοι ακολουθούν ομοιόμορφη κατανομή, ενώ οι περιφερειακοί εκθετική, δημιουργώντας ένα περιβάλλον όπου οι κόμβοι κοντά στο κέντρο έχουν σταθερότερη πρόσβαση σε πηγές ενέργειας.

- Σενάριο B: Οι κεντρικοί κόμβοι ακολουθούν εκθετική κατανομή, ενώ οι περιφερειακοί κόμβοι ομοιόμορφη, ώστε να εξεταστεί η αντίστροφη επίδραση, δηλαδή πως επηρεάζεται η απόδοση όταν οι περιφερειακοί κόμβοι διαθέτουν πιο σταθερή ενεργειακή συμπεριφορά.

### 4.3. Μαθηματική διατύπωση προβλήματος

Σε συνέχεια των παραπάνω και σύμφωνα με το [44], διατυπώνεται ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με στόχο τη μεγιστοποίηση των ρυθμών πηγής δεδομένων, διασφαλίζοντας παράλληλα τη σταθερότητα του δικτύου και τη μέγιστη ενεργειακή αποδοτικότητα.

Οι μεταβλητές βελτιστοποίησης του συστήματος για κάθε χρονική στιγμή  $t$  δίνονται ως εξής:

$$x(t) = \{a_i^k(t), r_{ij}^k(t), e_{ij}(t), x_i^k(t), P_{T,ij}^k(t), P_{TE,ij}(t), \bar{p}_{T,ij}^k(t), \bar{p}_{TE,ij}(t), \eta_I(t)\},$$

για κάθε  $i \in N, (i, j) \in L, k \in K, I \in I$ .

Η ανάλυση επικεντρώνεται στη μακροχρόνια συμπεριφορά του συστήματος, επομένως οι μεταβλητές ορίζονται και αντικαθίστανται από τα εργοδικά τους όρια.

$$\begin{aligned} \alpha_i^k &= \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{l=1}^t \alpha_i^k(l), \quad r_{ij}^k = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{l=1}^t r_{ij}^k(l), \\ e_{ij} &= \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{l=1}^t e_{ij}(l), \quad e_i = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{l=1}^t e_i(l), \\ P_{T,ij}^k &= \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{l=1}^t P_{T,ij}^k(l), \quad P_{TE,ij}^k = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{l=1}^t P_{TE,ij}^k(l), \\ x_i^k &= \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{l=1}^t x_i^k(l), \quad \bar{p}_{T,ij}^k = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{l=1}^t P_{T,ij}^k(l), \\ \bar{p}_{TE,ij}^k &= \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{l=1}^t P_{TE,ij}^k(l), \quad \eta_I = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{l=1}^t \eta_I(l) \end{aligned}$$

όπου  $i \in N, (i, j) \in L, k \in K$ , και  $I \in I$ .

Και επομένως,  $x = \{a_i^k, r_{ij}^k, e_{ij}, x_i^k, P_{T,ij}^k, P_{TE,ij}^k, \bar{p}_{T,ij}^k, \bar{p}_{TE,ij}^k, \eta_I\}$ .

Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος δίνεται από την σχέση:

$$\begin{aligned} Obj(x) &= \sum_{i \in N} \sum_{k \in K} U_i^k(\alpha_i^k) + \sum_{(i,j) \in L} \sum_{k \in K} S_{ij}^k r_{ij}^k + \sum_{(i,j) \in L} L_{ij} e_{ij} - \sum_{i \in N} \sum_{k \in K} \Gamma_i^k x_i^k \\ &\quad - \sum_{(i,j) \in L} \sum_{k \in K} C_P(\bar{p}_{T,ij}^k) - \sum_{(i,j) \in L} C_{PE}(\bar{p}_{TE,ij}^k) \end{aligned}$$

Ο πρώτος όρος αναπαριστά τη χρησιμότητα της πηγής για τον ρυθμό παραγωγής δεδομένων και ο δεύτερος, με θετικό συντελεστή  $S_{ij}^k \geq 0$ , στοχεύει στη μέγιστη

αξιοποίηση των δυνατοτήτων μετάδοσης δεδομένων στο δίκτυο. Ο τρίτος όρος, με  $L_{ij} \geq 0$ , αποσκοπεί στην ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ κόμβων, ώστε η πλεονάζουσα ενέργεια ορισμένων κόμβων να αξιοποιείται από κόμβους με έλλειψη ενέργειας. Ο τέταρτος όρος, με  $\Gamma_i^k \geq 0$ , σχετίζεται με βοηθητικές μεταβλητές που διασφαλίζουν τη σταθερότητα των ουρών δεδομένων, ενώ οι δύο τελευταίοι όροι περιγράφουν το ενεργειακό κόστος που απαιτείται για τις μεταδόσεις δεδομένων και ενέργειας αντίστοιχα. Οι συναρτήσεις κόστους  $C_P(\bar{p}_{T,ij}^k)$  και  $C_{PE}(\bar{p}_{TE,ij})$  θεωρούνται αυστηρά κυρτές.

Το συνολικό πρόβλημα βελτιστοποίησης διατυπώνεται ως:

$$\begin{aligned}
& \max_x Obj(x) \text{ υπό τους περιορισμούς} \\
& \Delta_T \sum_{k \in K} \sum_{j \in N_i} \sum_{I \in I:(i,j) \in I} \eta_I P_{T,ij}^k + \Delta_T \sum_{k \in K} \sum_{j:i \in N_j} r_{ji}^k E_{R,i}^k + \Delta_T \sum_{k \in K} \alpha_i^k E_{P,i}^k \\
& \quad + \Delta_T \sum_{j \in N_i} \sum_{I \in I:(i,j) \in I} \eta_I P_{TE,ij} \leq e_i + \gamma \sum_{j:i \in N_j} e_{ji}, \forall i \in N, \\
& \alpha_i^k \leq \sum_{j \in N_i} r_{ij}^k - \sum_{j:i \in N_j} r_{ij}^k + x_i^k, \forall k \in K, \forall i \in N, \\
& r_{ij}^k \leq \sum_{I \in I:(i,j) \in I} \eta_I B_{ij} \log_2 \left( 1 + \frac{h_{ij} P_{T,ij}^k}{N_0} \right), \forall k \in K, \forall (i,j) \in L, \\
& e_{ij} \leq \sum_{I:(i,j) \in I} \eta_I \Delta T \frac{G_i G_j \lambda^2 P_{TE,ij}}{(4\pi R_{ij})^2}, \forall (i,j) \in L, \\
& \sum_{k \in K} \sum_{j \in N_i} \sum_{I \in I:(i,j) \in I} \eta_I P_{T,ij}^k \leq P_{T,i}^{max}, \forall i \in N, \\
& \sum_{j \in N_i} \sum_{I \in I:(i,j) \in I} \eta_I P_{TE,ij} \leq P_{TE,i}^{max}, \forall i \in N, \\
& \sum_{I \in I:(i,j) \in I} \eta_I P_{T,ij}^k \leq \bar{P}_{T,ij}^k, \forall k \in K, \forall (i,j) \in L, \\
& \sum_{I \in I:(i,j) \in I} \eta_I P_{TE,ij} \leq \bar{P}_{TE,ij}, \forall (i,j) \in L, \\
& 0 \leq P_{T,ij}^k, P_{TE,ij} \leq P_{max}, \forall (i,j) \in L, \forall k \in K \\
& x_i^k \leq \bar{x}_i^k, \forall i \in N, \forall k \in K
\end{aligned}$$

Δεδομένου ότι το πρόβλημα που έχει παρουσιαστεί είναι κυρτό, η λύση του μπορεί να προκύψει μέσω της επίλυσης του δυαδικού του προβλήματος. Λαμβάνοντας υπόψη τους παραπάνω περιορισμούς, διαμορφώνεται η “Lagrange dual function”  $u(\delta) = \max_x L(x, \delta)$ , με το  $\delta$  να αντιστοιχίζεται στους μη αρνητικούς πολλαπλασιαστές

Lagrange  $v_i, z_i^k, w_{ij}^k, y_{ij}, c_i, d_i, \pi_{ij}^k$  και  $\psi_{ij}$ . Το αντίστοιχο δυαδικό πρόβλημα ορίζεται ως  $\max_{\delta \geq 0} u(\delta)$ , η επίλυση του οποίου προκύπτει από την εφαρμογή στοχαστικής μεθόδου υποβαθμίδας.

Για κάθε χρονική χρονοθυρίδα  $t$ , υπολογίζονται οι βέλτιστες πρωτεύουσες μεταβλητές  $a_i^k, r_{ij}^k, e_{ij}, x_i^k, P_{T,ij}^k, P_{TE,ij}$ , θεωρώντας τις δυαδικές μεταβλητές  $\delta(t)$  σταθερές. Με βάση τις υπολογισμένες πρωτεύουσες μεταβλητές, ενημερώνονται οι δυαδικές μεταβλητές. Η διαδικασία αυτή είναι καταναμημένη, καθώς οι αποφάσεις σε κάθε χρονική στιγμή λαμβάνονται τοπικά, είτε σε επίπεδο κόμβου είτε σε επίπεδο ζεύξης, με το δίκτυο να προσαρμόζει δυναμικά τις παραμέτρους του. Αναλυτικότερα,

- Έλεγχος συμφοράσης

Για δεδομένες τιμές των δυαδικών μεταβλητών  $v_i(t), z_i^k(t)$ , όπου  $i \in N$  και  $k \in K$ , κάθε κόμβος  $i$  επιλύει ένα κυρτό υπο-πρόβλημα βελτιστοποίησης, που στοχεύει στον προσδιορισμό του βέλτιστου ρυθμού δημιουργίας δεδομένων  $a_i^k(t)$  για κάθε ροή  $k$ .

$$\{a_i^k(t)\}_{\forall k \in K} = \underset{0 \leq \sum_{k \in K} a_i^k \leq \alpha_{max}}{\operatorname{argmax}} \sum_{k \in K} U_i^k(a_i^k) + a_i^k(-z_i^k(t) - v_i(t)\Delta_T E_{P,i}^k)$$

Η λύση του εξαρτάται από τη μορφή της συνάρτησης χρησιμότητας. Αν θεωρηθεί ότι η χρησιμότητα είναι γραμμική ως προς την μεταβλητή ελέγχου συμφοράσης, δηλαδή  $U_i^k(a_i^k) = u_i^k(a_i^k)$ , τότε ο κάθε κόμβος  $i$  επιλέγει τη ροή  $k^*$  που μεγιστοποιεί την ποσότητα  $u_i^k - z_i^k(t) - v_i(t)\Delta_T E_{P,i}^k$ . Αν η τιμή είναι θετική, η ροή ενεργοποιείται στο μέγιστο επιτρεπτό ρυθμό  $a_i^{k^*}(t) = \alpha_{max}$ , ενώ οι υπόλοιπες ροές λαμβάνουν μηδενικό ρυθμό.

- Δρομολόγηση

Για δεδομένες μεταβλητές  $v_i(t), z_i^k(t), w_{ij}^k(t)$  για κάθε κόμβο  $i$  και σύνδεσμο  $(i, j)$ , το πρόβλημα δρομολόγησης διατυπώνεται ως ένα γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης.

$$\{r_{ij}^k(t)\}_{\forall k \in K} = \underset{0 \leq \sum_{k \in K} r_{ij}^k \leq R_{max}}{\operatorname{argmax}} \sum_{k \in K} r_{ij}^k(S_{ij}^k - w_{ij}^k(t) - v_j \Delta_T E_{R,j}^k + z_i^k(t) - z_j^k(t))$$

Η λύση προκύπτει επιλέγοντας για κάθε σύνδεσμο  $(i, j)$ , τη ροή  $k^*$  που μεγιστοποιεί την ποσότητα  $S_{ij}^k - w_{ij}^k(t) - v_j \Delta_T E_{R,j}^k + z_i^k(t) - z_j^k(t)$ . Αν αυτή η ποσότητα είναι θετική, ο αντίστοιχος ρυθμός μετάδοσης τίθεται στο μέγιστο, δηλαδή  $r_{ij}^{k^*}(t) = R_{max}$ , ενώ όλες οι υπόλοιπες ροές μηδενίζονται. Στην περίπτωση που η τιμή είναι μη θετική, καμία ροή δεν μεταδίδεται μέσω του συγκεκριμένου συνδέσμου στη χρονοθυρίδα  $t$ .

- Ενημέρωση βοηθητικών μεταβλητών

Για κάθε κόμβο  $i$  και ροή  $k$ , η βοηθητική μεταβλητή  $x_i^k(t)$  υπολογίζεται ως λύση του:

$$x_i^k(t) = \underset{0 \leq x_i^k \leq \bar{x}_i^k}{\operatorname{argmax}} x_i^k(z_i^k(t) - \Gamma_i^k)$$

Σε αυτή την περίπτωση, η λύση προκύπτει από την διαδικασία κατωφλίου αν  $z_i^k(t) \geq \Gamma_i^k$  και τότε  $x_i^k(t) = \bar{x}_i^k$ , αλλιώς  $x_i^k(t) = 0$ . Με αυτόν τον τρόπο, οι βοηθητικές μεταβλητές ενεργοποιούνται μόνο όταν το αντίστοιχο επίπεδο συμφόρησης υπερβαίνει ένα καθορισμένο όριο.

- Ανταλλαγή ενέργειας

Για κάθε σύνδεσμο  $(i, j)$  και δεδομένων μεταβλητών  $v_i(t)$  και  $y_{ij}(t)$ , το πρόβλημα βελτιστοποίησης διατυπώνεται ως εξής:

$$e_{ij}(t) = \underset{0 \leq e_{ij} \leq e_{max}}{\operatorname{argmax}} C_{E,ij}(e_{ij}) + e_{ij}(\gamma v_{ij}(t) - y_{ij}(t))$$

Και σε αυτή την περίπτωση, η λύση εξαρτάται από τη μορφή της συνάρτησης χρησιμότητας. Υποθέτοντας πως είναι γραμμική ως προς την μεταβλητή ενέργειας, δηλαδή  $C_{E,ij}(e_{ij}) = L_{ij}e_{ij}$ , με σταθερούς συντελεστές βαρύτητας  $L_{ij}$ , τότε η επιλογή της ποσότητας ενέργειας γίνεται με απλή διαδικασία κατωφλίου. Αν  $L_{ij} + \gamma v_{ij}(t) - y_{ij}(t) > 0$ , τότε η μεταβλητή ενέργειας τίθεται στο μέγιστο επιτρεπτό όριο  $e_{ij}(t) = e_{max}$ , διαφορετικά  $e_{ij}(t) = 0$ .

- Έλεγχος ισχύος και επιλογή ανεξάρτητου συνόλου ζεύξεων

Για κάθε χρονική χρονοθυρίδα  $t$ , και με τους πολλαπλασιαστές Lagrange  $v_i, z_i^k, w_{ij}^k, y_{ij}, c_i, d_i, \pi_{ij}^k$  και  $\psi_{ij}$  καθώς και των στιγμιαίων συντελεστών απόσβεσης καναλιού  $h_{ij}(t)$  για κάθε σύνδεσμο  $(i, j)$ , επιλύεται ως εξής,

$$\begin{aligned} & \{P_{T,ij}^k(t), P_{TE,ij}(t)\}_{\forall k \in K, \forall (i,j) \in L} \\ &= \underset{0 \leq P_{T,ij}^k, P_{TE,ij} \leq P_{max}}{\operatorname{argmax}} \sum_{I \in I} \eta_I \sum_{(i,j) \in I} \sum_{k \in K} (-P_{T,ij}^k \cdot (\pi_{ij}^k(t) + v_i(t)\Delta_T \\ &+ c_i(t)) + w_{ij}^k(t)B_{ij} \log_2(1 + \frac{h_{ij}(t)P_{T,ij}^k}{N_0}) - P_{TE,ij} \cdot (\psi_{ij}(t) \\ &+ v_i(t)\Delta_T - y_{ij}(t)\Delta T \frac{G_i G_j \lambda^2}{(4\pi R_{ij})^2} + d_i(t))) \end{aligned}$$

Το πρόβλημα αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί ως ‘maximum weight matching’ στα ανεξάρτητα σύνολα ζεύξεων. Για κάθε σύνδεσμο  $(i, j)$ , η ισχύς μετάδοσης δεδομένων  $P_{T,ij}^k(t)$  υπολογίζεται από τη συνθήκη:

$$\frac{w_{ij}^k(t)B_{ij}h_{ij}(t)}{\ln(2)(h_{ij}(t)P_{T,ij}^k + N_0)} - c_i(t) - \pi_{ij}^k(t) - v_i(t)\Delta_T = 0$$

Με περιορισμό  $0 \leq P_{T,ij}^k \leq P_{max}$ . Η ισχύς μετάδοσης ενέργειας  $P_{TE,ij}(t)$  ορίζεται ως  $P_{TE,ij}(t) = P_{max}$  αν  $y_{ij}(t)\Delta T \frac{G_i G_j \lambda^2}{(4\pi R_{ij})^2} - d_i(t) - \psi_{ij}(t) - v_i(t)\Delta_T > 0$ , αλλιώς  $P_{TE,ij}(t) = 0$ .

Επίσης, κάθε ζεύξη  $(i, j)$  αντιστοιχίζεται στο ακόλουθο βάρος και έπειτα υπολογίζεται το άθροισμα των βαρών για όλα τα ανεξάρτητα σύνολα ζεύξεων  $I \in I$ .

$$\begin{aligned}
W_e(i, j, t) = & \sum_{k \in K} (-P_{T,ij}^k \cdot (\pi_{ij}^k(t) + v_i(t)\Delta_T + c_i(t)) + w_{ij}^k(t)B_{ij} \log_2(1 \\
& + \frac{h_{ij}(t)P_{T,ij}^k(t)}{N_0}) - P_{TE,ij} \cdot (\psi_{ij}(t) + v_i(t)\Delta_T - y_{ij}(t)\Delta T \frac{G_i G_j \lambda^2}{(4\pi R_{ij})^2} \\
& + d_i(t)))
\end{aligned}$$

Το σύνολο που  $I^*$  που μεγιστοποιεί αυτή την ποσότητα επιλέγεται ως ενεργό με  $\eta_{I^*} = 1$ .

- Ενημέρωση των πολλαπλασιαστών Lagrange

Μετά τον υπολογισμό των παραπάνω μεταβλητών, οι πολλαπλασιαστές Lagrange ενημερώνονται μέσω ενός βήματος στοχαστικής υποβαθμίδας. Οι πολλαπλασιαστές έχουν την παρακάτω μορφή ανά χρονοθυρίδα.

$$\begin{aligned}
v_i(t+1) = & \max\{v_i(t) + \Delta_T \sum_{k \in K} \sum_{j \in N_i} \sum_{I \in I:(i,j) \in I} \eta_I(t) P_{T,ij}^k + \Delta_T \sum_{k \in K} \sum_{j: i \in N_j} r_{ji}^k(t) E_{R,i}^k \\
& + \Delta_T \sum_{k \in K} \alpha_i^k(t) E_{P,i}^k + \Delta_T \sum_{j \in N_i} \sum_{I \in I:(i,j) \in I} \eta_I(t) P_{TE,ij} - e_i(t) \\
& - \gamma \sum_{j: i \in N_j} e_{ji}(t), 0\}
\end{aligned}$$

$$w_{ij}^k(t+1) = \max\{w_{ij}^k(t) + r_{ij}^k(t) - \sum_{I \in I:(i,j) \in I} \eta_I(t) B_{ij} \log_2(1 + \frac{h_{ij} P_{T,ij}^k(t)}{N_0}), 0\}$$

$$y_{ij}(t+1) = \max\{y_{ij}(t) + e_{ij}(t) - \sum_{I:(i,j) \in I} \eta_I(t) \Delta T \frac{G_i G_j \lambda^2 P_{TE,ij}(t)}{(4\pi R_{ij})^2}, 0\}$$

$$z_i^k(t+1) = \max\{z_i^k(t) + \alpha_i^k(t) + \sum_{j \in N_i} r_{ji}^k(t) - \sum_{j: i \in N_j} r_{ij}^k(t) - x_i^k(t), 0\}$$

$$c_i(t+1) = \max\{c_i(t) + \sum_{k \in K} \sum_{j \in N_i} \sum_{I \in I:(i,j) \in I} \eta_I(t) P_{T,ij}^k(t) - p_{T,i}^{max}, 0\}$$

$$d_i(t+1) = \max\{d_i(t) + \sum_{j \in N_i} \sum_{I \in I:(i,j) \in I} \eta_I(t) P_{TE,ij}(t) - p_{TE,i}^{max}, 0\}$$

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

---

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν με βάση την μεθοδολογία του Κεφαλαίου 4.

### 5.1. Παράμετροι Προσομοίωσης

Για την αξιολόγηση του προβλήματος πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές προσομοιώσεις σε τυχαία γεωμετρικά γραφήματα, η τοπολογία των οποίων αποτελείται από 9 κόμβους χωρισμένους σε κεντρικούς και περιφερειακούς. Η επικοινωνία στο δίκτυο πραγματοποιείται μέσω 3 ροών δεδομένων, οι οποίες αντιστοιχούν σε ανεξάρτητες επικοινωνίες μεταξύ περιφερειακών κόμβων. Για κάθε ροή επιλέγεται τυχαία μια πηγή και ένας προορισμός από το σύνολο των περιφερειακών κόμβων, υπό την προϋπόθεση ότι οι δυο κόμβοι είναι διαφορετικοί. Οι κεντρικοί κόμβοι δεν αποτελούν άμεσους προορισμούς των ροών, αλλά αναλαμβάνουν αποκλειστικά τη δρομολόγηση των πακέτων προς τον τελικό προορισμό.

Η προσομοίωση υλοποιήθηκε σε διακριτά χρονικά βήματα διάρκειας  $\Delta T = 0.1h$ , ενώ οι βασικές παράμετροι του συστήματος ορίζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5: Παράμετροι Προσομοίωσης

| Παράμετρος       | Τιμή        |
|------------------|-------------|
| $\alpha_{max}$   | 1 kbits/h   |
| $R_{max}$        | 1 kbits/h   |
| $\gamma$         | 0.7         |
| $E_{P,i}^k$      | 1 Wh/bit    |
| $E_{R,i}^k$      | 1.25 Wh/bit |
| $e_{max}$        | 1 kWh       |
| $P_{max}$        | 80 W        |
| $P_{T,i}^{max}$  | 300 W       |
| $P_{TE,i}^{max}$ | 300 W       |
| $G_i, G_j$       | 1           |
| $\lambda$        | 0.44 m      |
| $R_{ij}$         | 0.7 m       |
| $B_{ij}$         | 1 Mbits/h   |
| $N_0$            | 0.1 W       |

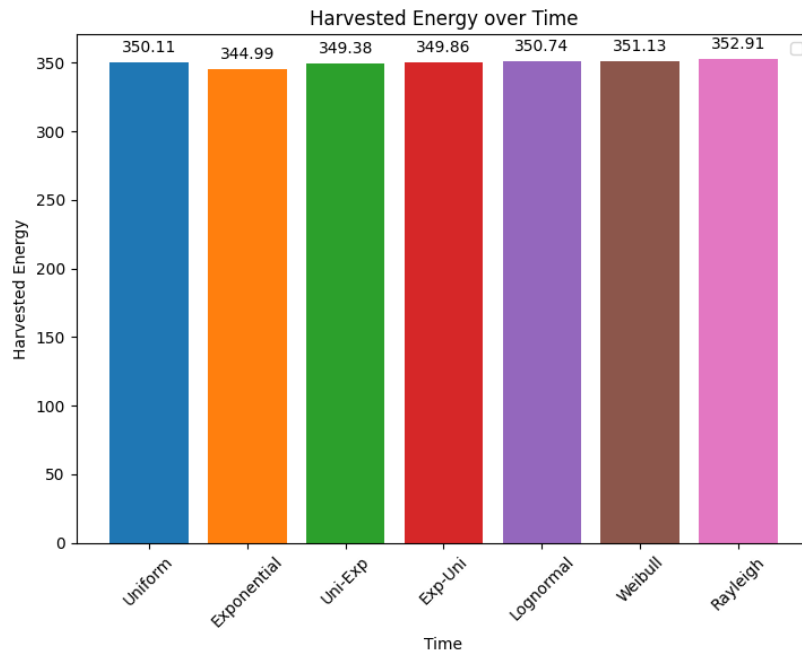
Οι συναρτήσεις χρησιμότητας θεωρήθηκαν γραμμικές, με συντελεστές που λαμβάνουν τυχαίες τιμές εντός του διαστήματος  $[500,600]$ , ενώ οι συναρτήσεις κόστους ισχύος έχουν τετραγωνική μορφή, με συντελεστές επιλεγμένους τυχαία εντός του διαστήματος  $[20,30]$ . Τα βάρη  $S_{ij}^k$  και  $L_{ij}$  λαμβάνονται επίσης τυχαία από το ίδιο διάστημα τιμών  $[500, 600]$ . Ο συντελεστής εξασθένησης του καναλιού ακολουθεί λογαριθμοκανονική κατανομή με μηδενική μέση τιμή και διασπορά ίση με 10. Η ενέργεια συγκομιδής για κάθε κατανομή και κόμβο επιλέγεται τυχαία στο διάστημα  $[300, 400]$  Wh, ενώ η τιμή της μπαταρίας μεταβάλλεται για διάφορες τιμές. Οι πολλαπλασιαστές Lagrange αρχικοποιήθηκαν στο μηδέν, ώστε να διασφαλιστεί ουδέτερη αρχική κατάσταση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης.

## 5.2. Αξιολόγηση κατανομών συγκομιδής ενέργειας

Κατά την διάρκεια των προσομοιώσεων πραγματοποιήθηκε συγκριτική αξιολόγηση των κατανομών συγκομιδής ενέργειας για την διερεύνηση της επίδρασης τους στο ρυθμό παραγωγής δεδομένων και στη συνολική κατανάλωση ενέργειας. Οι κατανομές που εξετάστηκαν είναι η ομοιόμορφη, η εκθετική, η λογαριθμοκανονική, η Weibull και η Rayleigh κατανομή. Επιπλέον, εξετάστηκαν και δύο σενάρια A,B όπως περιγράφονται στο Κεφάλαιο 4, κάθε ένα από τα οποία έχει τρεις περιπτώσεις τιμών ενέργειας. Στόχος των σεναρίων είναι η διερεύνηση της επίδρασης της ετερογένειας στη διαδικασία συλλογής ενέργειας στην παραγωγή δεδομένων.

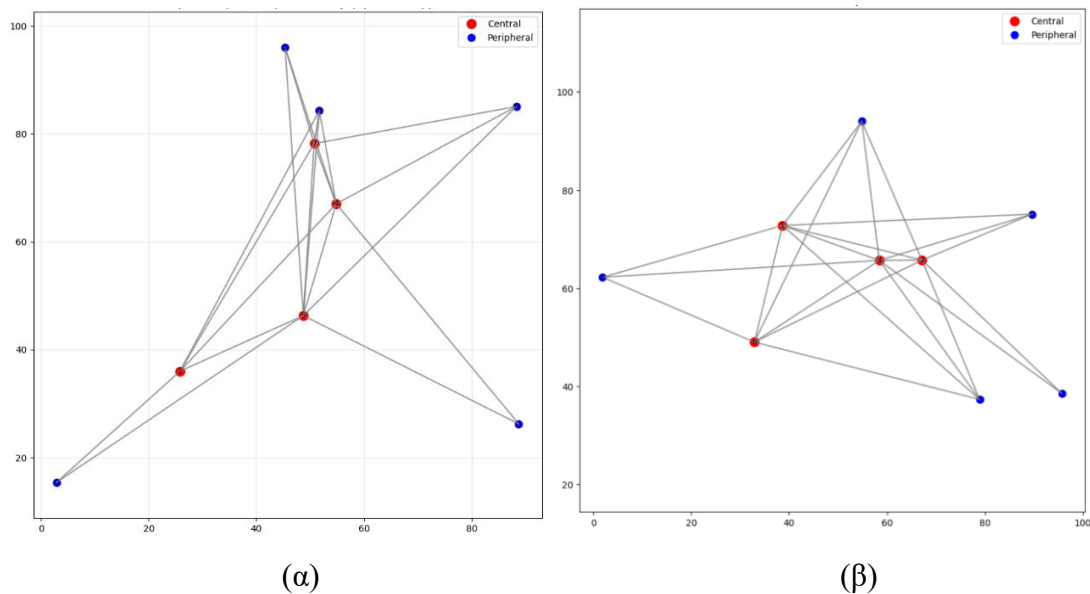
- Περίπτωση I: Στα σενάρια A, B η συνολική μέση ενέργεια συγκομιδής του δικτύου ισούται με 350 Wh, ωστόσο η ομοιόμορφη κατανομή παρουσιάζει υψηλότερη τιμή, κυμαίνεται στα  $[350, 450]$  Wh, σε σχέση με την εκθετική κατανομή, που εμφανίζει μικρότερη μέση ενέργεια.
- Περίπτωση II: Η μέση ενέργεια συγκομιδής των σεναρίων A, B ισούται με 350 Wh, αλλά υπερέρχει η μέση ενέργεια της εκθετικής κατανομής, ενώ η ομοιόμορφη λαμβάνει τιμές στο διάστημα  $[200, 250]$  Wh.
- Περίπτωση III: Τόσο η εκθετική όσο και η ομοιόμορφη κατανομή έχουν ίδια μέση τιμή ενέργειας συγκομιδής ίση με 350 Wh.

Ενδεικτικά, η ενέργεια συγκομιδής της περίπτωσης I αποτυπώνεται στο σχήμα 20. Η “Uniform” περίπτωση αντιστοιχεί σε ομοιόμορφη κατανομή, η “Exponential” σε εκθετική κατανομή, ενώ οι συνδυαστικές περιπτώσεις “Uni-Exp” και “Exp-Uni” αναφέρονται στα σενάρια A και B, αντίστοιχα. Επιπλέον, η λογαριθμοκανονική κατανομή αντιστοιχεί στη “Lognormal”, η Weibull κατανομή στη “Weibull” και η Rayleigh κατανομή στη “Rayleigh”.



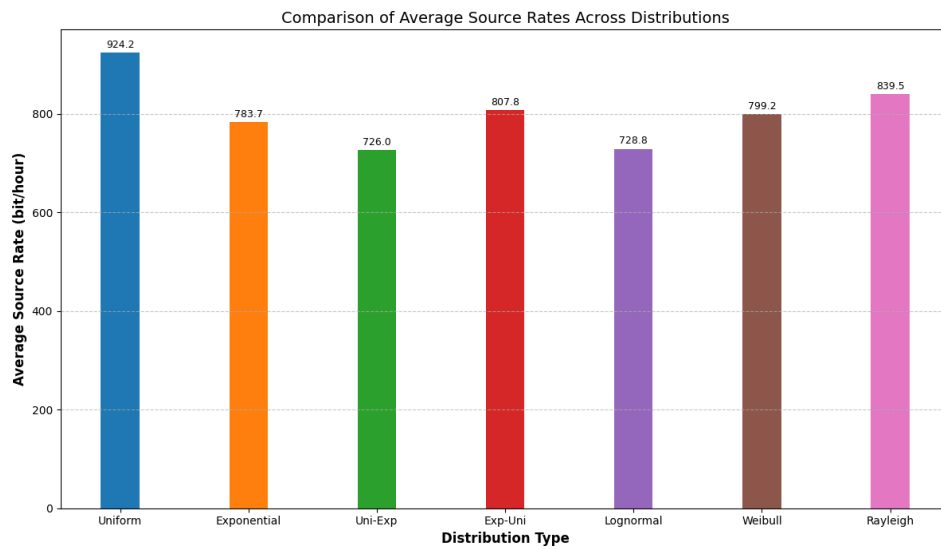
Σχήμα 20: Ενέργεια Συγκομιδής κατανομών στην Περίπτωση Ι

Εξετάστηκαν δύο τοπολογίες του δικτύου για τις 3 περιπτώσεις, οι οποίες απεικονίζονται στο σχήμα 21. Κοινό στοιχείο και των δύο τοπολογιών αποτελεί η ύπαρξη τεσσάρων κεντρικών κόμβων και πέντε περιφερειακών κόμβων, ωστόσο η χωρική τους διάταξη διαφέρει σημαντικά. Στην τοπολογία του σχήματος 21(α), οι περιφερειακοί κόμβοι τοποθετούνται σε μεγαλύτερη απόσταση από τους κεντρικούς κόμβους. Στη δεύτερη τοπολογία, σχήμα 21(β), οι περιφερειακοί κόμβοι είναι τοποθετημένοι πιο κοντά στους κεντρικούς, δημιουργώντας ένα πιο πυκνό δίκτυο. Η επιλογή των δύο συγκεκριμένων τοπολογιών επιτρέπει την εξέταση της επίδοσης του δικτύου σε διαφορετικές συνθήκες απόστασης.

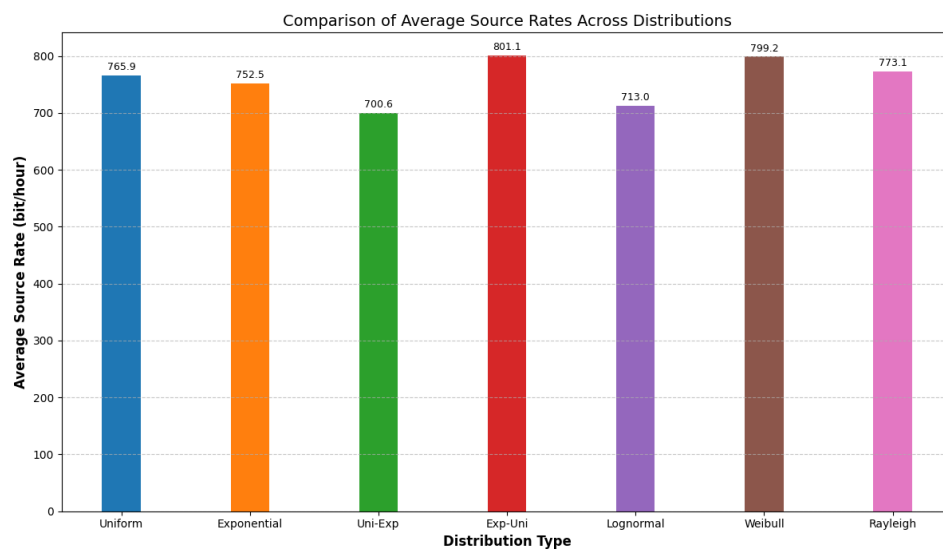


Σχήμα 21: Τοπολογίες Δικτύου (α) Τοπολογία 1 (β) Τοπολογία 2

Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται για την παραγωγή δεδομένων των δύο τοπολογιών (α) και (β), αντίστοιχα, φαίνονται στα σχήματα 22, 23 και 24:

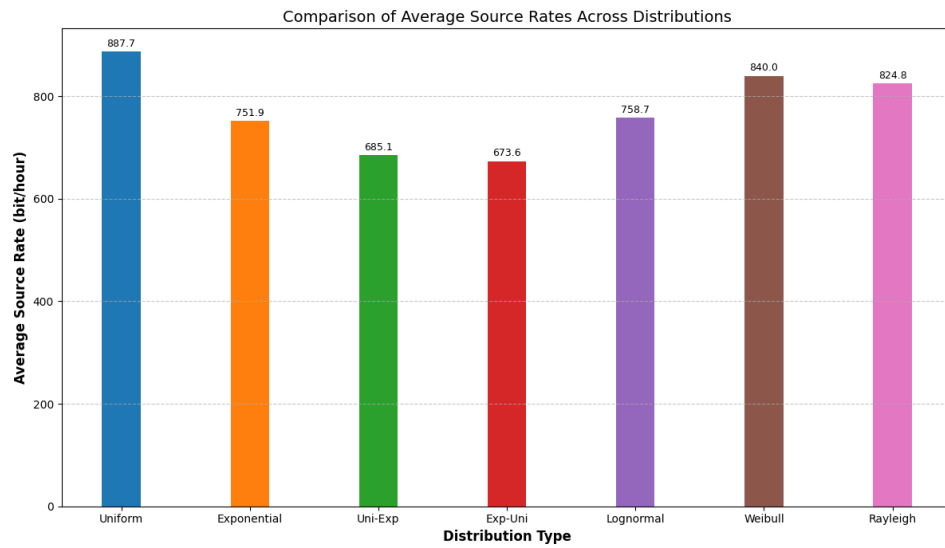


(α)

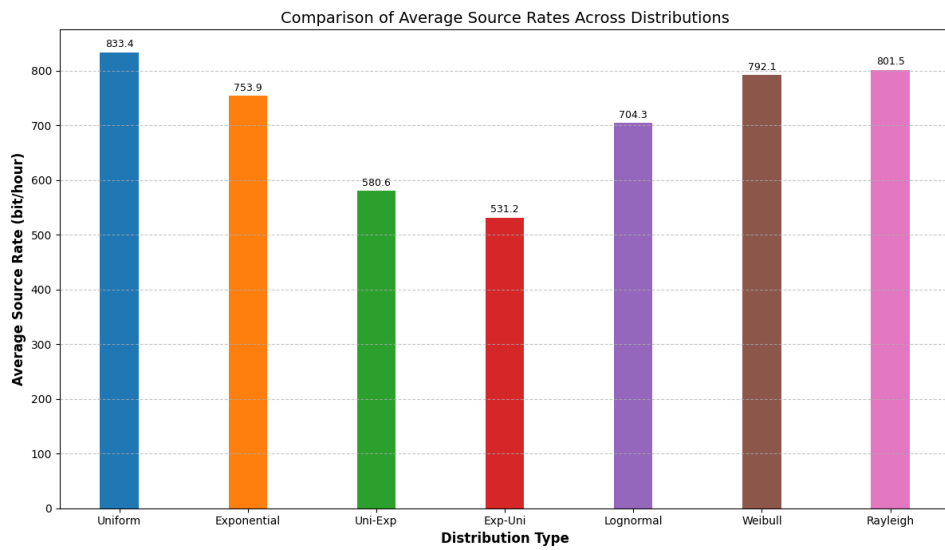


(β)

Σχήμα 22: Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων για την Περίπτωση I (α) ρυθμός μετάδοσης για την Τοπολογία 1 (β) ρυθμός μετάδοσης για την Τοπολογία 2

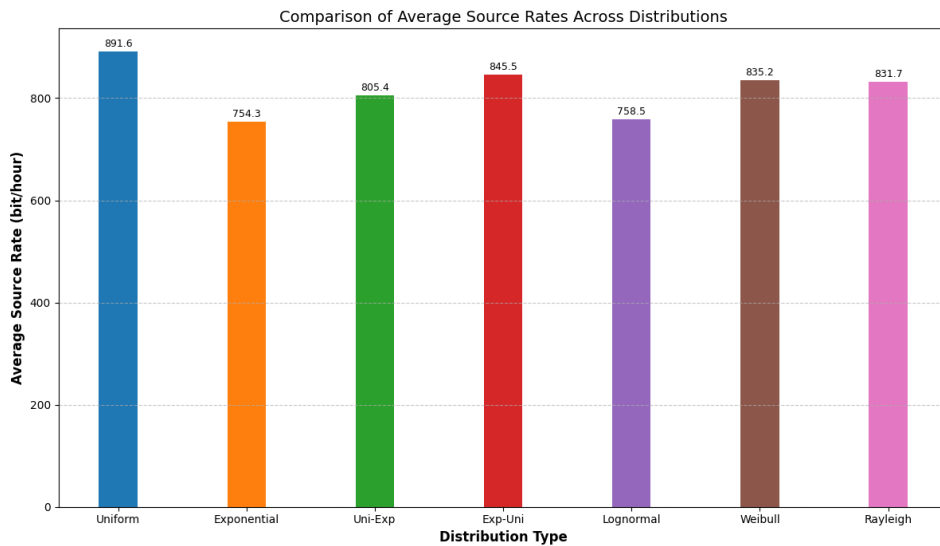


(α)

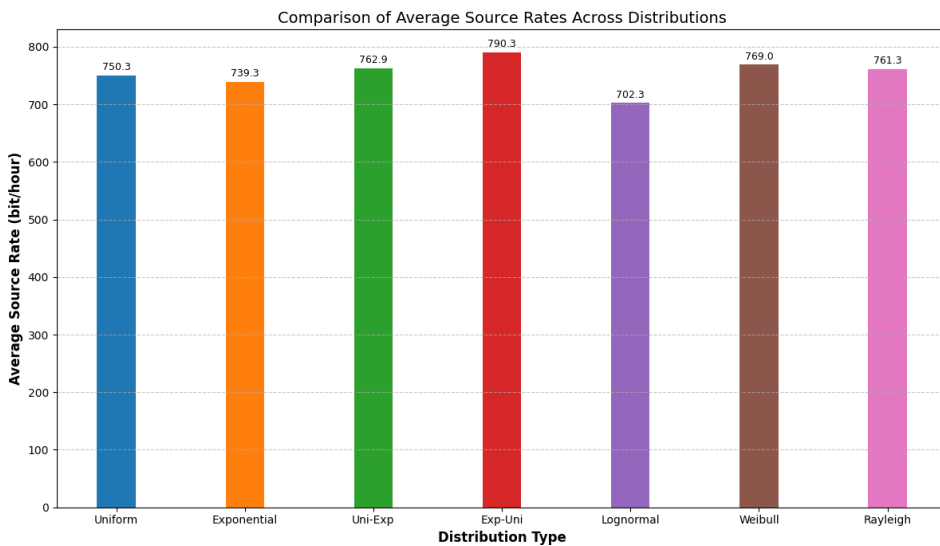


(β)

Σχήμα 23: Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων για την Περίπτωση II (α) ρυθμός μετάδοσης για την Τοπολογία 1 (β) ρυθμός μετάδοσης για την Τοπολογία 2



(α)



(β)

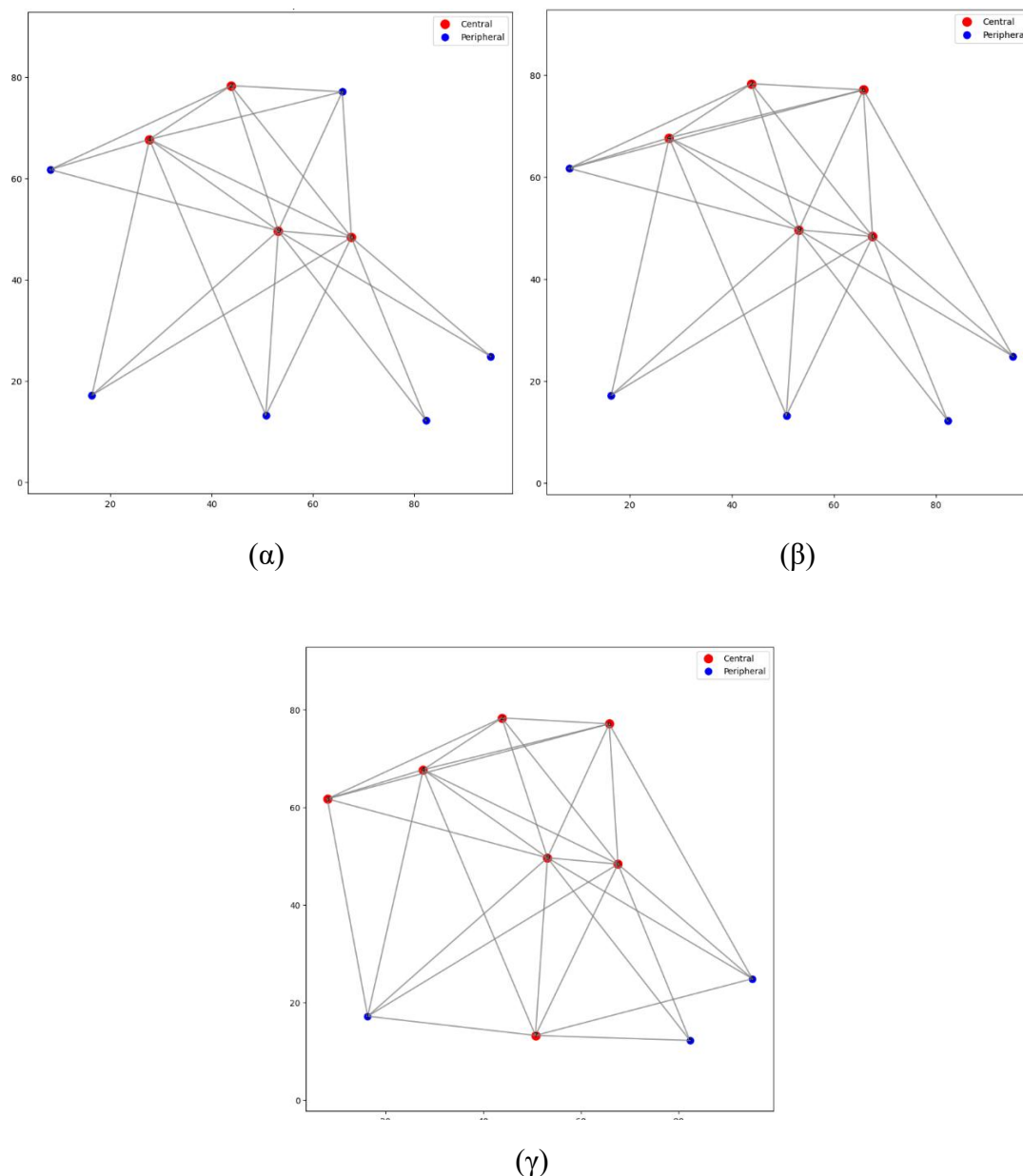
Σχήμα 24: Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων για την Περίπτωση III (α) ρυθμός μετάδοσης για την Τοπολογία 1 (β) ρυθμός μετάδοσης για την Τοπολογία 2

Από τις παραπάνω τοπολογίες συμπεραίνεται ότι ο ρυθμός παραγωγής δεδομένων εξαρτάται έντονα από την τοπολογία δικτύου. Τα σενάρια A, B είναι ανταγωνιστικά των υπόλοιπων κατανομών στις περιπτώσεις I και III. Αντίθετα στην περίπτωση II τείνουν να εμφανίζουν χαμηλότερη παραγωγή δεδομένων, γεγονός που υποδηλώνει ότι η ενεργειακή ανισορροπία μεταξύ κεντρικών και περιφερειακών κόμβων με χαμηλότερη την uniform κατανομή, επηρεάζει αρνητικά τη συνολική απόδοση του δικτύου. Επιπλέον, για τα σενάρια A και B, παρατηρείται ότι ο ρυθμός παραγωγής δεδομένων είναι υψηλότερος όταν η μεγαλύτερη κατανομή ενέργειας αντιστοιχεί στους περιφερειακούς κόμβους, καθώς αυτοί αποτελούν τις πηγές των ροών και επηρεάζουν άμεσα την κίνηση των δεδομένων στο δίκτυο.

Καθίσταται σαφές ότι η ομοιόμορφη κατανομή υπερσχύει έναντι των υπολοίπων, επιβεβαιώνοντας τη σταθερότητα που προσφέρει η ομοιόμορφη ενεργειακή διανομή

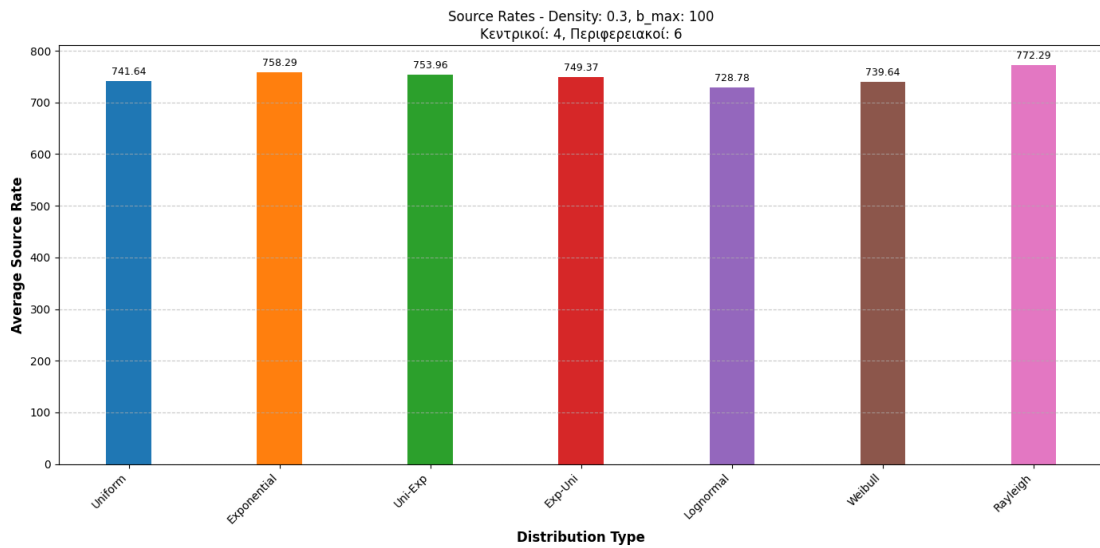
στο δίκτυο. Οι Weibull και Rayleigh εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά, με ελαφρώς μειωμένες επιδόσεις, γεγονός που αποδίδεται στη μεγαλύτερη μεταβλητότητα των τιμών συγκομιδής ενέργειας.

Ταυτόχρονα, για την αξιολόγηση του ρυθμού παραγωγής δεδομένων των κατανομών εξετάστηκε η επίδραση της συνδεσιμότητας του δικτύου. Συγκεκριμένα, δημιουργήθηκαν πολλαπλές τοπολογίες δικτύου, σχήμα 25, με σταθερή θέση κόμβων αλλά με μεταβαλλόμενο αριθμό συνδέσεων μεταξύ τους, επηρεάζοντας έτσι την συνδεσιμότητα του γράφου και την πολυπλοκότητα των ανεξάρτητων συνόλων.

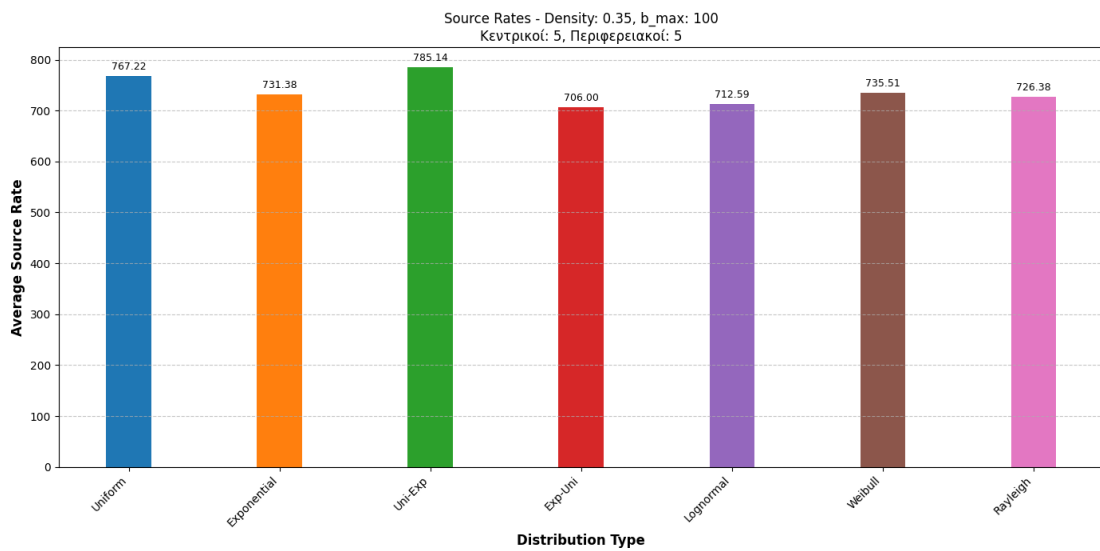


Σχήμα 25: Τοπολογία δικτύου με μεταβαλλόμενη πυκνότητα (α) 4 κεντρικοί – 6 περιφερειακοί κόμβοι (β) 5 κεντρικοί – 5 περιφερειακοί κόμβοι (γ) 7 κεντρικοί – 3 περιφερειακοί κόμβοι

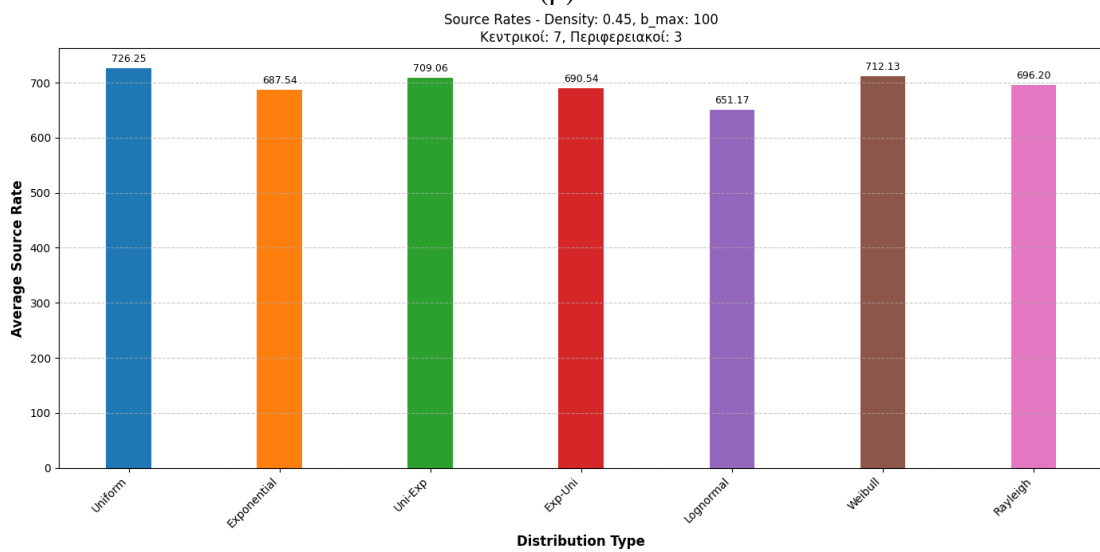
Ο ρυθμός παραγωγής δεδομένων αποτυπώνεται στο σχήμα 26.



( $\alpha$ )



( $\beta$ )



( $\gamma$ )

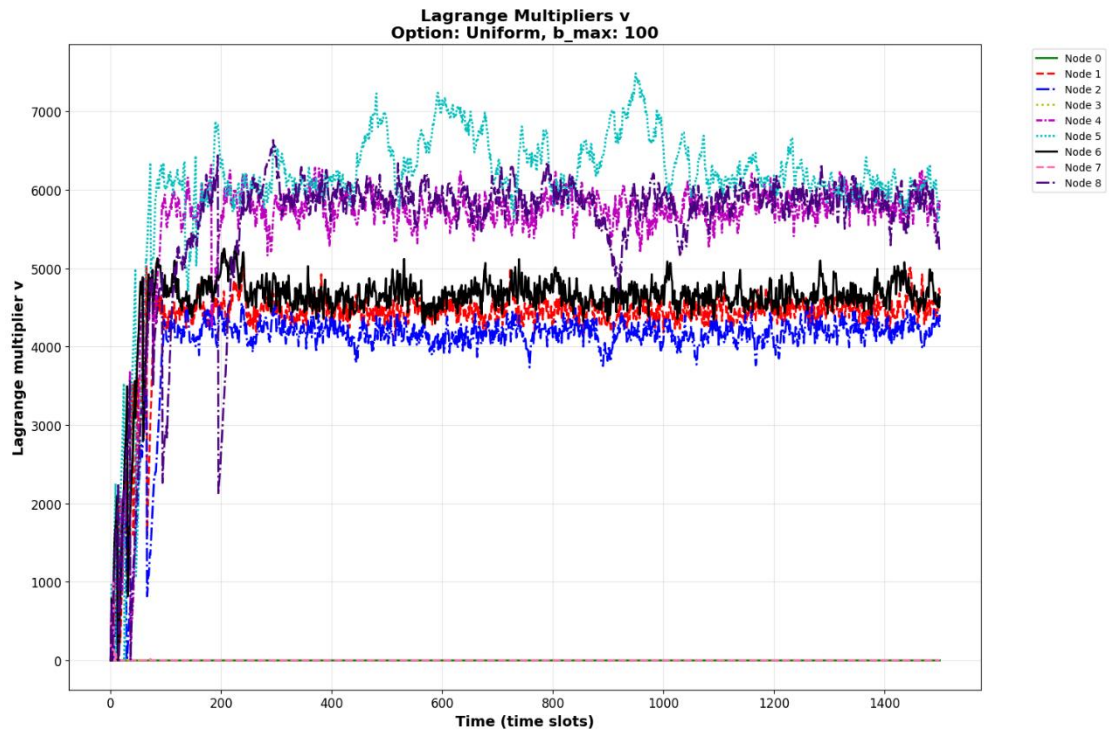
Σχήμα 26: Ρυθμός παραγωγής δεδομένων με μεταβαλλόμενη πυκνότητα για (α) 4 κεντρικοί – 6 περιφερειακοί κόμβοι (β) 5 κεντρικοί – 5 περιφερειακοί κόμβοι (γ) 7 κεντρικοί – 3 περιφερειακοί κόμβοι

Παρατηρείται ότι με τις αλλαγές στην τοπολογία μειώνεται σταδιακά ο μέσος ρυθμός παραγωγής δεδομένων στις περισσότερες κατανομές. Η μείωση των περιφερειακών κόμβων περιορίζει τον αριθμό των πηγών δεδομένων, γεγονός που επιδρά αρνητικά στη συνολική παραγωγή, ενώ η αυξημένη συνδεσιμότητα επιβαρύνει ενεργειακά τους κόμβους που λειτουργούν ως ενδιάμεσοι δρομολογητές. Ωστόσο, η συμπεριφορά αυτή δεν είναι ομοιόμορφη σε όλες τις τοπολογίες. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η αύξηση της πυκνότητας οδηγεί σε πιο ισορροπημένη κατανομή του ενεργειακού φόρτου και, συνεπώς, σε βελτιωμένο ρυθμό μετάδοσης. Συνεπώς, η χωρική πυκνότητα επηρεάζει την απόδοση με εξαρτώμενο τρόπο από την δομή του γράφου, τη θέση των πηγών και τη διαδρομή μεταφοράς δεδομένων.

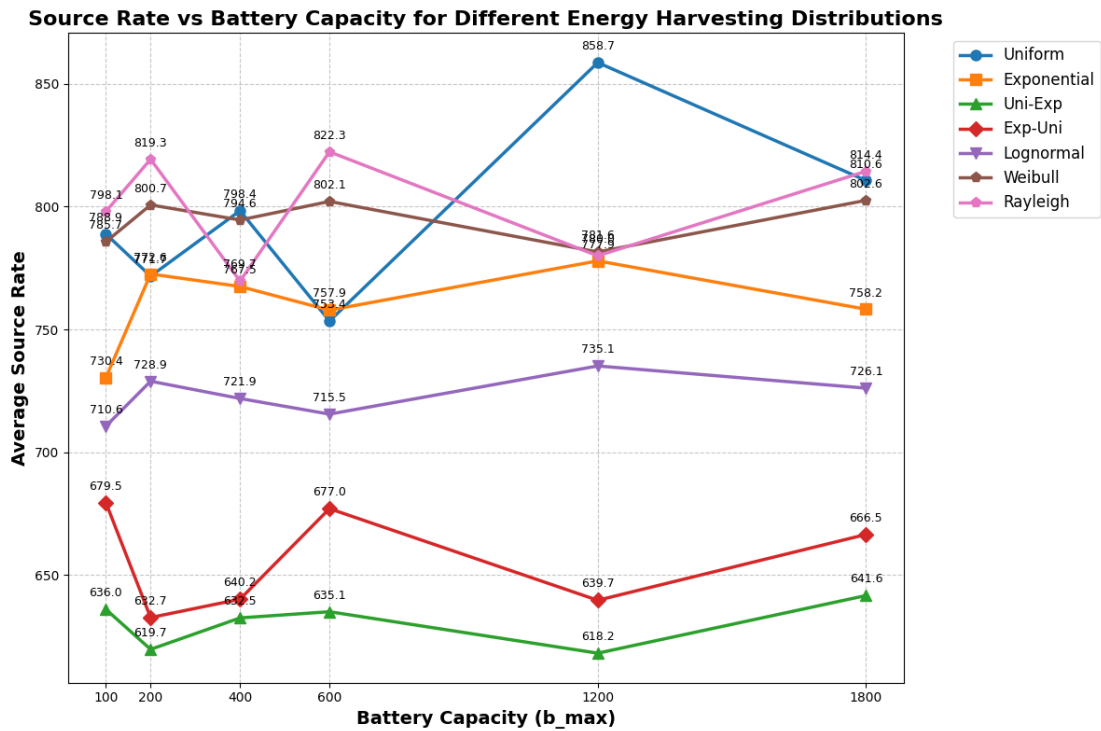
### 5.3. Αξιολόγηση χωρητικότητας μπαταρίας

Σύμφωνα με το μοντέλο που αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η μεταβλητή Lagrange  $v_i$  αποτελεί τον δυαδικό πολλαπλασιαστή που σχετίζεται με τον περιορισμό ενεργειακής αιτιότητας του κόμβου  $i$ . Η ενημέρωσή του πραγματοποιείται με τη μέθοδο της υποβαθμίδας, με τη μεταβλητή να εξισορροπεί την κατανάλωση και τη συγκομιδή ενέργειας σε κάθε χρονική περίοδο. Η τιμή του  $v_i$  αυξάνεται όταν η κατανάλωση ενέργειας υπερβαίνει τη διαθέσιμη συγκομιδή και συνεπώς περιορίζεται η δραστηριότητα των κόμβων προκειμένου να αποτραπεί η ενεργειακή εξάντληση, ενώ η τιμή του μειώνεται όταν υπάρχει επαρκής διαθέσιμη ενέργεια, αυξάνοντας τον ρυθμό παραγωγής δεδομένων. Αυτή η κατάσταση αποτυπώνεται στο σχήμα 28.

Για ένα τυχαίο δίκτυο, η τιμή του  $v_i$  για την ομοιόμορφη κατανομή αποτυπώνεται στο σχήμα 27.



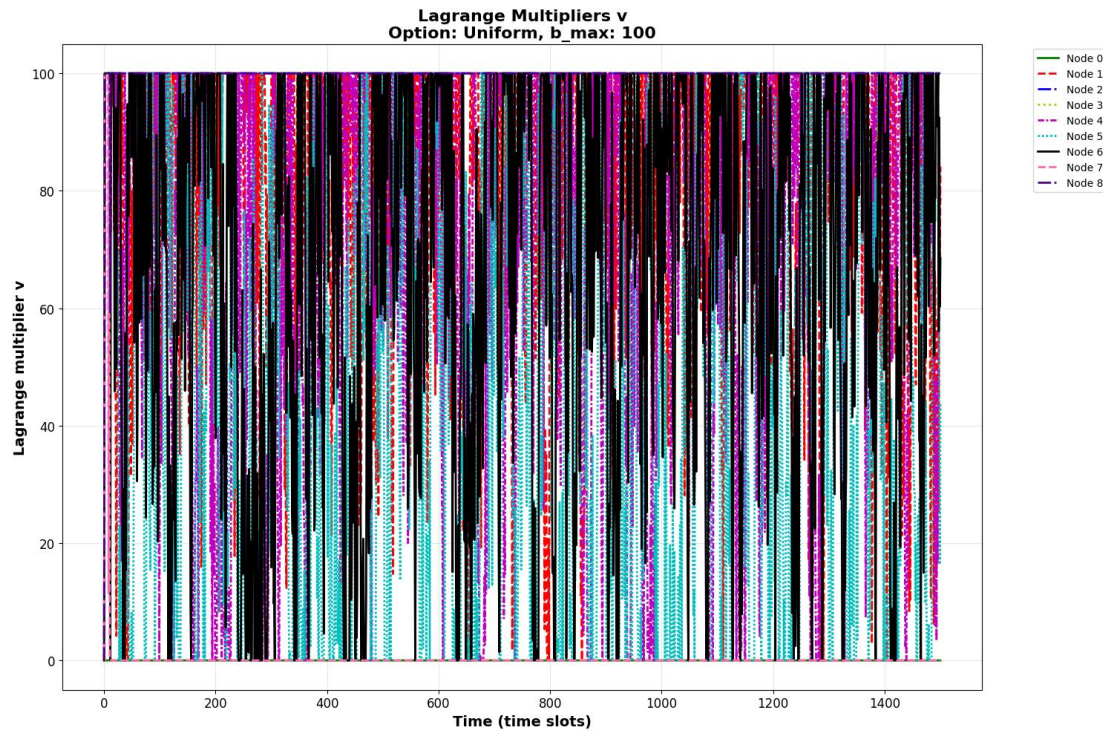
Σχήμα 27: Πολλαπλασιαστής Lagrange  $v_i$



Σχήμα 28: Ρυθμός παραγωγής δεδομένων – Χωρητικότητα μπαταρίας

Παρατηρείται ότι η πλειοψηφία των κόμβων του σχήματος 27 παρουσιάζει τιμές που κυμαίνονται στο διάστημα 4000 έως 6000, γεγονός που υποδηλώνει ότι καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια απ' όση συγκομίζουν. Φράζοντας την μεταβλητή  $v_i$  στο εύρος,

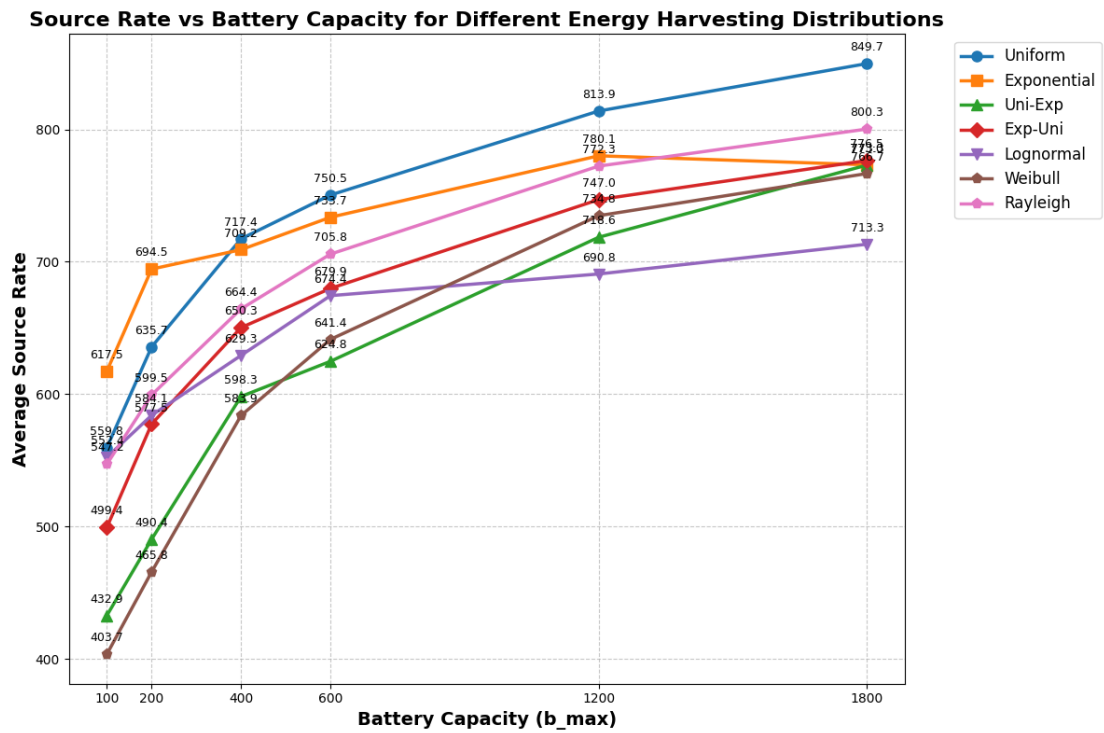
$0 \leq v_i \leq b_{max}$ , οι τιμές του παραμένουν εντός φυσικών ορίων, σχήμα 29, αποτρέποντας ακραίες διακυμάνσεις. Παρότι η συγκεκριμένη προσέγγιση οδηγεί σε μεγιστοποίηση του ρυθμού παραγωγής δεδομένων, το αποτέλεσμα αυτό δεν αντικατοπτρίζει μια πραγματική βελτιστοποίηση, αλλά μάλλον μια εξομάλυνση που προκύπτει από τον περιορισμό του  $v_i$ .



Σχήμα 29: Πολλαπλασιαστής Lagrange  $v_i$  κατόπιν περιορισμού

Μια εναλλακτική προσέγγιση είναι η υλοποίηση με ενεργειακούς περιορισμούς που εφαρμόζουν την ενεργειακή αιτιότητα σε κάθε χρονικό βήμα μέσω απλών ελέγχων στις πρωτεύουσες μεταβλητές. Πιο συγκεκριμένα, υπολογίζεται η τιμή της μπαταρίας κάθε χρονική στιγμή και ταυτόχρονα ελέγχεται αν κάθε κόμβος έχει επαρκή ενέργεια για παραγωγή δεδομένων. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει ενεργειακή επάρκεια, η αντίστοιχη ροή περιορίζεται, ώστε να αποφευχθεί υπερκατανάλωση. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζονται εφικτές και φυσικές καταστάσεις λειτουργίας, ενώ παράλληλα μειώνονται οι ταλαντώσεις των δυαδικών μεταβλητών.

Η συγκεκριμένη προσέγγιση, όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα του σχήματος 30, οδηγεί σε υψηλότερους και σταθερότερους ρυθμούς παραγωγής δεδομένων συναρτήσει του μεγέθους της μπαταρίας. Η αύξηση της μπαταρίας συνοδεύεται από σταδιακή βελτίωση του μέσου ρυθμού παραγωγής, καθώς οι κόμβοι αποκτούν μεγαλύτερη χωρητικότητα για αποθήκευση της ενέργειας.



Σχήμα 30: Ρυθμός παραγωγής δεδομένων – Χωρητικότητα μπαταρίας

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΕΠΙΛΟΓΟΣ

---

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε ένα ενεργειακά αυτόνομο ασύρματο δίκτυο, στο οποίο οι κόμβοι διαθέτουν μηχανισμό συγκομιδής ενέργειας και διαχείρισης των ροών δεδομένων μέσω ενός σχήματος βελτιστοποίησης με πολλαπλασιαστές Lagrange. Η αξιολόγηση του συστήματος πραγματοποιήθηκε μέσω πολλαπλών προσομοιώσεων, με στόχο την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο η στοχαστική φύση της διαθέσιμης ενέργειας, η τοπολογία του δικτύου και η χωρητικότητα των μπαταριών επηρεάζουν τον ρυθμό παραγωγής δεδομένων και τη σταθερότητα του συστήματος.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η τοπολογία του δικτύου επηρεάζει αισθητά τα αποτελέσματα. Η ομοιόμορφη κατανομή συγκομιδής ενέργειας υπερέχει έναντι των εκθετικών και άλλων κατανομών, προσφέροντας υψηλότερους και πιο σταθερούς ρυθμούς παραγωγής. Ταυτόχρονα, η αύξηση της χωρητικότητας των μπαταριών συντελεί σε βελτίωση του ρυθμού παραγωγής. Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι η απουσία ενεργειακών περιορισμών οδηγεί σε μη ρεαλιστικές καταστάσεις λειτουργίας, όπου η δυαδική μεταβλητή  $v_i$  λαμβάνει υπερβολικά υψηλές τιμές. Η επιβολή περιορισμών στη μπαταρία και στην κατανάλωση ενέργειας εξασφαλίζει εφικτές καταστάσεις λειτουργίας και σημαντική σταθεροποίηση της απόδοσης.

Η μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να επικεντρωθεί στην ενσωμάτωση πιο ρεαλιστικών ενεργειακών μοντέλων, λαμβάνοντας υπόψη τη φθορά και τις απώλειες αποθήκευσης, καθώς και στην ανάπτυξη μηχανισμών διαχείρισης ενέργειας με χρήση τεχνικών μηχανικής μάθησης για πρόβλεψη της συγκομιδής. Τέλος, η εφαρμογή του προτεινόμενου αλγορίθμου σε πραγματικά δίκτυα αισθητήρων και η πειραματική του αξιολόγηση σε υλικό με δυνατότητες συγκομιδής ενέργειας αποτελούν κρίσιμα επόμενα βήματα για τη μεταφορά της έρευνας από τη θεωρία στην πράξη.

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

- [1] P. Luo, D. Peng, Y. Wang, and X. Zheng, “Review of Solar Energy Harvesting for IoT Applications,” Oct. 2018, doi: <https://doi.org/10.1109/apccas.2018.8605651>.
- [2] Y. Chong, W. Ismail, K. Ko, and C. Lee, “Energy Harvesting For Wearable Devices: A Review,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 19, no. 20, pp. 9047–9062, Oct. 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2925638>.
- [3] “Performance of MPPT Techniques of Photovoltaic Systems Under Normal and Partial Shading Conditions,” *Advances in Renewable Energies and Power Technologies*, pp. 115–161, Jan. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812959-3.00004-6>.
- [4] Bu, L., Quan, S., Han, J., Li, F., Li, Q. and Wang, X. (2020). On-Site Traversal Fractional Open Circuit Voltage with Uninterrupted Output Power for Maximal Power Point Tracking of Photovoltaic Systems. *Electronics*, 9(11), p.1802. doi:<https://doi.org/10.3390/electronics9111802>.
- [5] D. Dondi, A. Bertacchini, D. Brunelli, L. Larcher, and L. Benini, “Modeling and Optimization of a Solar Energy Harvester System for Self-Powered Wireless Sensor Networks,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 7, pp. 2759–2766, Jul. 2008, doi: <https://doi.org/10.1109/tie.2008.924449>.
- [6] N. Garg and R. Garg, “Energy harvesting in IoT devices: A survey,” *2017 International Conference on Intelligent Sustainable Systems (ICISS)*, Dec. 2017, doi: <https://doi.org/10.1109/iss1.2017.8389371>.
- [7] H. Wang, B. Xiong, Z. Zhang, H. Zhang, and A. Azam, “Small wind turbines and their potential for internet of things applications,” *iScience*, vol. 26, no. 9, p. 107674, Sep. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.107674>.
- [8] X. Tan *et al.*, “A Self-Adapting Wind Energy Harvesting System for Application in Canyon Bridge,” *SSRN Electronic Journal*, 2022, doi: <https://doi.org/10.2139/ssrn.4193823>.
- [9] Z. Wang *et al.*, “Hybridized energy harvesting device based on high-performance triboelectric nanogenerator for smart agriculture applications,” *Nano Energy*, p. 107681, Aug. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2022.107681>.
- [10] Ullah, Md.A., Keshavarz, R., Abolhasan, M., Lipman, J., Esselle, K.P. and Shariati, N. (2022). A Review on Antenna Technologies for Ambient RF Energy Harvesting and Wireless Power Transfer: Designs, Challenges and Applications. *IEEE Access*, 10, pp.17231–17267. doi:<https://doi.org/10.1109/access.2022.3149276>.
- [11] A. Ali *et al.*, “Advancements in energy harvesting techniques for sustainable IoT devices,” *Results in Engineering*, vol. 26, p. 104820, Apr. 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104820>.

- [12] Md. Saad-Bin-Alam and S. Moury, "Multiple-band antenna coupled rectifier circuit for ambient RF energy harvesting for WSN," pp. 1–4, May 2014, doi: <https://doi.org/10.1109/iciev.2014.6850773>.
- [13] Khatereh Nadali, P. McEvoy, and M. J. Ammann, "A Broadband Circularly Polarised Slot Antenna for Ambient RF Energy Harvesting Applications," May 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/iwat54881.2022.9811092>.
- [14] A. Gupta, Mahesh Nimmakanti, Santosh Kumar Bairappaka, and A. Ghosh, "Comparison of the Performance of L and Pi Matching Networks for Design of a 2.4 GHz RF-DC Rectifier for RF Energy Harvesting," pp. 1–5, Jul. 2024, doi: <https://doi.org/10.1109/sefet61574.2024.10718093>.
- [15] Mamta Kurvey and Ashwini Kunte, "RF Energy Harvesting System," 2018 *International Conference on Smart City and Emerging Technology (ICSCET)*, pp. 1–4, Jan. 2018, doi: <https://doi.org/10.1109/icscet.2018.8537306>.
- [16] Ruchi Ruchi, A. Savant, A. Kalam, Y. Khurana, Prachi Prachi, and S. Kumar, "Energy Harvesting For IoT Applications," 2022 *3rd International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC)*, pp. 418–422, Aug. 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/icesc54411.2022.9885464>.
- [17] R. Kishore and S. Priya, "A Review on Low-Grade Thermal Energy Harvesting: Materials, Methods and Devices," *Materials*, vol. 11, no. 8, p. 1433, Aug. 2018, doi: <https://doi.org/10.3390/ma11081433>.
- [18] T. Ravindran, T. Huesgen, M. Kroener, and P. Woias, "A self-sustaining pyroelectric energy harvester utilizing spatial thermal gradients," pp. 657–660, Jun. 2011, doi: <https://doi.org/10.1109/transducers.2011.5969838>.
- [19] D. Zabek, J. Taylor, and C. R. Bowen, "Performance of thin film polyvinylidene fluoride (PVDF) for pyroelectric energy harvesting," Aug. 2014, doi: <https://doi.org/10.1109/icept.2014.6918771>.
- [20] A. Harb, "Energy harvesting: State-of-the-art," *Renewable Energy*, vol. 36, no. 10, pp. 2641–2654, Oct. 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.06.014>.
- [21] Longchang Chemical, "How thermoelectric power generation work - Longchang Chemical," *Longchang Chemical*, Aug. 24, 2020. <https://longchangchemical.com/how-thermoelectric-power-generation-work/>
- [22] C. Gabriel, M. Sridharan, S. B. Nivethitha, M. Balakarthikeyan, R. Bhat, and A. Talyshinskii, "Design and Development of a Thermoelectric Energy Harvesting System for Enhanced Smartwatch Functionality," pp. 1–5, Dec. 2024, doi: <https://doi.org/10.1109/ariia63345.2024.11051476>.
- [23] S. Koul, S. Ahmed, and V. Kakkar, "A comparative analysis of different vibration based energy harvesting techniques for implantables," May 2015, doi: <https://doi.org/10.1109/ccaa.2015.7148517>.
- [24] L. Wang, "Development of energy harvesting systems based on new electroactive materials and structures," Nov. 05, 2014. [https://www.researchgate.net/publication/278827608\\_Development\\_of\\_energy\\_harvesting\\_systems\\_based\\_on\\_new\\_electroactive\\_materials\\_and\\_structures](https://www.researchgate.net/publication/278827608_Development_of_energy_harvesting_systems_based_on_new_electroactive_materials_and_structures)

- [25] P. L. Diez, I. Gabilondo, E. Alarcon, and F. Moll, "A Comprehensive Method to Taxonomize Mechanical Energy Harvesting Technologies," *2018 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, 2018, doi: <https://doi.org/10.1109/iscas.2018.8350907>.
- [26] Jae Yong Cho *et al.*, "A multifunctional road-compatible piezoelectric energy harvester for autonomous driver-assist LED indicators with a self-monitoring system," *Applied Energy*, vol. 242, pp. 294–301, May 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.075>.
- [27] M. S. Whittingham, "History, Evolution, and Future Status of Energy Storage," *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, no. Special Centennial Issue, pp. 1518–1534, May 2012, doi: <https://doi.org/10.1109/jproc.2012.2190170>.
- [28] T. B. Reddy and D. Linden, Eds., *Linden's handbook of batteries*, 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2011. Available: <https://searchworks.stanford.edu/view/10496184>
- [29] K. Hasan, N. Tom, and M. R. Yuce, "Navigating Battery Choices in IoT: An Extensive Survey of Technologies and Their Applications," *Batteries*, vol. 9, no. 12, p. 580, Dec. 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/batteries9120580>.
- [30] "Indoor Photovoltaic Energy Harvester with Rechargeable Battery for Wireless Sensor Node," *Ieee.org*, 2018. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8624684>
- [31] K. Gudan, S. Shao, J. J. Hull, J. Ensworth, and M. S. Reynolds, "Ultra-low power 2.4GHz RF energy harvesting and storage system with  $-25\text{dBm}$  sensitivity," *2015 IEEE International Conference on RFID (RFID)*, Apr. 2015, doi: <https://doi.org/10.1109/rfid.2015.7113071>.
- [32] A. Abramovitz, M. Shvartsas, and A. Kuperman, "Matching of Passive Magnetic Energy Harvester Clamped on High-Currents-Carrying Conductor to Rechargeable Li-Ion Battery," *2024 6th Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM)*, pp. 483–486, Jun. 2024, doi: <https://doi.org/10.1109/gpecom61896.2024.10582774>.
- [33] K. Dissanayake and D. Kularatna-Abeywardana, "A review of supercapacitors: Materials, technology, challenges, and renewable energy applications," *Journal of Energy Storage*, vol. 96, p. 112563, Aug. 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112563>.
- [34] K. O. Oyedotun *et al.*, "Advances in Supercapacitor Development: Materials, Processes, and Applications," *Journal of Electronic Materials*, vol. 52, no. 1, pp. 96–129, Oct. 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/s11664-022-09987-9>.
- [35] W. Raza *et al.*, "Recent advancements in supercapacitor technology," *Nano Energy*, vol. 52, no. 2211–2855, pp. 441–473, Oct. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.08.013>.
- [36] A. Othman, "Modeling of piezoelectric energy harvesting system embedded in soldier's boot using Matlab/Simulink," May 2017, doi: <https://doi.org/10.1109/miltechs.2017.7988862>.
- [37] Mostafa Noohi and A. Mirvakili, "Supercapacitor Active Balancing and Control Circuit for Harvesting Energy from Vehicle's Tire," May 2021, doi: <https://doi.org/10.1109/icee52715.2021.9544231>.

- [38] Q. Wang, C. Shen, K. Zhang, and L. Zheng, “Super-capacitor and Li-polymer battery hybrid energy storage for kinetic energy harvesting applications,” pp. 73–77, Oct. 2017, doi: <https://doi.org/10.1109/cencon.2017.8262461>.
- [39] “Continuous uniform distribution,” *Wikipedia*, Nov. 15, 2021. [https://en.wikipedia.org/wiki/Continuous\\_uniform\\_distribution](https://en.wikipedia.org/wiki/Continuous_uniform_distribution)
- [40] Wikipedia, “Exponential distribution,” *Wikipedia*, Oct. 15, 2020. [https://en.wikipedia.org/wiki/Exponential\\_distribution](https://en.wikipedia.org/wiki/Exponential_distribution)
- [41] “Log-normal distribution,” *Wikipedia*, Oct. 13, 2020. [https://en.wikipedia.org/wiki/Log-normal\\_distribution](https://en.wikipedia.org/wiki/Log-normal_distribution)
- [42] “Weibull distribution,” *Wikipedia*, Oct. 19, 2020. [https://en.wikipedia.org/wiki/Weibull\\_distribution](https://en.wikipedia.org/wiki/Weibull_distribution)
- [43] Wikipedia, “Rayleigh distribution,” *Wikipedia*, Apr. 28, 2021. [https://en.wikipedia.org/wiki/Rayleigh\\_distribution](https://en.wikipedia.org/wiki/Rayleigh_distribution)
- [44] Georgios Kallitsis, E. Stai, Vasileios Karyotis, and Symeon Papavassiliou, “Optimal Power Control for Joint Wireless Information-Energy Transfers in Energy Harvesting Networks,” pp. 1–6, Oct. 2024, doi: <https://doi.org/10.1109/camad62243.2024.10942874>.
- [45] G. Kallitsis, V. Karyotis, and S. Papavassiliou, “An optimization framework for joint wireless data-power transmission in distributed energy harvesting networks,” *Computer Networks*, vol. 270, p. 111506, Jul. 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2025.111506>.
- [46] Georgios Kallitsis, Vasileios Karyotis, and Symeon Papavassiliou, “A Joint Wireless Data-Power Exchange Approach for Distributed Energy Harvesting Networks,” pp. 209–215, Nov. 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/cscn60443.2023.10453207>.
- [47] Georgios Kallitsis, E. Stai, Vasileios Karyotis, and Symeon Papavassiliou, “Enhancing the Cross-layer Operation in Wireless Energy-Harvesting Networks with Age-of-Information Features,” pp. 398–403, Oct. 2024, doi: <https://doi.org/10.1145/3641512.3690162>.