



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ**



ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
**ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ  
& ΔΙΚΤΥΩΝ**

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ  
ΣΧΟΛΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ  
ΠΜΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΩΝ**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΗΓΩΝ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ  
ΑΥΤΟΝΟΜΩΝ ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ**

Ιωάννης Μασκλαβάνος

Επιβλέπων: Δουμένης Γρηγόριος  
Επίκουρος καθηγητής

Άρτα, Σεπτέμβριος, 2019

**ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΗΓΩΝ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ  
ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ ΑΥΤΟΝΟΜΩΝ ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΩΝ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ**

**EVALUATION OF SOURCES AND METHODS FOR  
ENERGY HARVESTING AND SUPPLYING AUTONOMOUS  
EMBEDDED SYSTEMS**

## **Εγκρίθηκε από τριμελή εξεταστική επιτροπή**

Άρτα, 9 Σεπτεμβρίου 2019

### **ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ**

1. Επιβλέπων καθηγητής

Γρηγόριος Δουμένης,

επίκουρος καθηγητής

2. Μέλος επιτροπής

Βαρτζιώτης Φώτιος,

επίκουρος καθηγητής

3. Μέλος επιτροπής

Γλαβάς Ευριπίδης,

Καθηγητής

Ο/Η Διευθυντής/τρια του ΠΙΜΣ

Χρυσόστομος Στύλιος,

Καθηγητής

Υπογραφή

© Μασκλαβάνος, Ιωάννης, 2019.  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

## Δήλωση μη λογοκλοπής

Δηλώνω υπεύθυνα και γνωρίζοντας τις κυρώσεις του Ν. 2121/1993 περί Πνευματικής Ιδιοκτησίας, ότι η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία είναι εξ ολοκλήρου αποτέλεσμα δικής μου ερευνητικής εργασίας, δεν αποτελεί προϊόν αντιγραφής ούτε προέρχεται από ανάθεση σε τρίτους. Όλες οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν (κάθε είδους, μορφής και προέλευσης) για τη συγγραφή της περιλαμβάνονται στη βιβλιογραφία.

Επίθετο, Όνομα

Υπογραφή

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη της οικογένειας μου για την ακατάπαυστη υποστήριξη τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου και όχι μόνο. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω του φίλους μου τόσο στην Άρτα όσο και την Αθήνα για υποστήριξη τους, την υπομονή και την βοήθεια στην προσπάθεια μου για την πραγματοποίηση αυτής της εργασίας, διότι μέσα από συζητήσεις μπόρεσα να λύσω αρκετούς προβληματισμούς μου τόσο στο σχεδιασμό όσο και στην υλοποίηση της εργασίας. Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω το φίλο και συνάδελφο Ναπολέον Παπαστράτο για την βοήθεια του στην υλοποίηση του προγράμματος χειρισμού με το λογισμικό LabView. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή, μέντορα μου και εισηγητή της εργασίας dr. Γρηγόριο Δουμένη για την εισαγωγή στον χώρο των αισθητήρων και ενεργοποιητών μέσω των μαθημάτων του στη σχολή και για την πολύτιμη καθοδήγηση του καθ' όλη τη διάρκεια υλοποίησης της διπλωματικής όχι μόνο σε θέματα αυτής αλλά και σε θέματα επαγγελματικού προσανατολισμού.

## Περίληψη

Η παγκόσμια ανάπτυξη και εξάπλωση του internet σε όλο σχεδόν τον πλανήτη, σε συνδυασμό με την μείωση του κόστους του πυριτίου έχουν φέρει μεγάλη αύξηση στο πλήθος των ενσωματωμένων συστημάτων γύρω μας. Το διαρκώς αυξανόμενο πλήθος αυτών έχει δημιουργήσει νέες ανάγκες σχετικά με την τροφοδοσία και την επέκταση ζωής τους. Διαρκείς έρευνες πραγματοποιούνται για την εύρεση νέων τρόπων συγκομιδής ενέργειας από το περιβάλλον αλλά και νέων τρόπων για την αποθήκευση της ενέργειας αυτής. Η ηλιακή ενέργεια, τα πιεζοηλεκτρικά, τα τριβοηλεκτρικά, η ακτινοβολούμενη και η θερμική ενέργεια παίζουν πρωταγωνιστικό ρόλο στις έρευνες αυτές. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των διάχυτων μορφών ενέργειας (ambient energy) και αναλύονται τυπικοί συλλέκτες/μετατροπείς (energy harvesters). Μεγαλύτερη έμφαση δίνεται συλλογή θερμικής ενέργειας. Κατασκευάζεται πειραματική διάταξη για την αξιολόγηση θερμοηλεκτρικής πηγής και γίνονται μετρήσεις με τη χρήση οργάνων συνδεδεμένα σε υπολογιστή. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων και γίνεται αξιολόγηση αυτών. Αποδεικνύεται ότι είναι δυνατή η συλλογή ενέργειας με ισχύ mWs ακόμη και από διαφορές θερμοκρασίας 2°C. Η μελέτη υποδεικνύει ότι είναι δυνατή η τροφοδοσία μικροσυσκευών από μικρά (και φθηνά) θερμοηλεκτρικά στοιχεία, προσθέτοντας έτσι μια ακόμη εναλλακτική επιλογή για την ενεργειακή αυτονομία φορητών συσκευών, όπως ιατρικοί αισθητήρες, αναλυτές φυσικής κατάστασης κ.α.



## Abstract

Nowadays worldwide development and the deployment of the internet-of-things around the globe, combined with the reduction in silicon costs, have brought a large increase in the number of embedded systems around us. This ever-increasing number of devices has created new needs in terms of their power supply and the extension of their life. Ongoing research seeks new ways for perpetual operation, harvesting energy from the environment. Solar energy, vibrations, radiative and thermal energy play a leading role in these studies. This thesis presents characteristics of various types of ambient energy and corresponding typical transducers (energy harvesters).

The focal point of the thesis is the analysis of the prospects for enabling perpetual operation of wearable devices by collecting ambient thermal energy. Given the lack of efficiency data for Silicon-based thermoelectric converters at low temperature differences, the thesis proposes the development of an experimental apparatus for the measurement of the output of low cost TEGs at environment temperatures. The experimental device for the evaluation of thermoelectric generator was developed and automated measurements were carried-out using computer-connected instruments. The evaluation of the results indicates that mWs of power can be harvested with as low as 2°C temperature differences. Such efficiency can enable the perpetual operation of micro-power wearable devices such as medical sensors, fitness trackers etc.

## Πίνακας περιεχομένων

|  |           |
|--|-----------|
| Ευχαριστίες.....                                 | iv        |
| Περίληψη .....                                   | v         |
| Abstract.....                                    | vi        |
| <b>1. ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ .....</b>  | <b>1</b>  |
| <b>1.1 Ορισμός .....</b>                         | <b>1</b>  |
| <b>1.2 Τυπικά συστήματα .....</b>                | <b>1</b>  |
| <b>1.3 Εφαρμογές.....</b>                        | <b>4</b>  |
| • Εμπορικά ηλεκτρονικά συστήματα .....           | 4         |
| • Αυτοκίνηση .....                               | 4         |
| • Ηλεκτρονικά αεροκατασκευών .....               | 5         |
| • “Εξυπνα” κτήρια .....                          | 6         |
| • Ιατρικά Συστήματα.....                         | 7         |
| • Στρατιωτικά συστήματα .....                    | 7         |
| <b>1.4 Ενεργειακή αυτονομία.....</b>             | <b>8</b>  |
| <b>1.5 Internet of Things .....</b>              | <b>8</b>  |
| <b>2. ΔΟΜΗ ΚΟΜΒΩΝ INTERNET OF THINGS .....</b>   | <b>12</b> |
| <b>2.1 Υποσύστημα επεξεργασίας.....</b>          | <b>12</b> |
| ○ 2.1.1 Υλικό.....                               | 12        |
| ○ 2.1.2 Λογισμικό .....                          | 14        |
| <b>2.2 Υποσύστημα αισθητήρων .....</b>           | <b>16</b> |
| <b>2.3 Υποσύστημα επικοινωνίας.....</b>          | <b>17</b> |
| ○ Συγκριτικός πίνακας εμπορικών συστημάτων ..... | 20        |
| <b>2.4 Υποσύστημα τροφοδοσίας .....</b>          | <b>21</b> |
| ○ Ρολόγια και εξοικονόμηση ενέργειας .....       | 22        |
| <b>3. ENERGY HARVESTING/SCAVENGING .....</b>     | <b>24</b> |
| ○ <b>Μηχανική Ενέργεια .....</b>                 | <b>24</b> |
| ○ <b>Ακτινοβολούμενη ενέργεια.....</b>           | <b>25</b> |
| ○ <b>Θερμική ενέργεια.....</b>                   | <b>25</b> |
| ○ Συγκεντρωτικοί πίνακες .....                   | 26        |
| <b>3.1 Ηλιακή ενέργεια.....</b>                  | <b>28</b> |
| <b>3.2 Μηχανική (Τριβή/Δονήσεις) .....</b>       | <b>32</b> |
| 3.2.1 Τριβή .....                                | 32        |
| 3.2.2 Δονήσεις.....                              | 34        |

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 3.3 | Θερμότητα .....                             | 35 |
| 3.4 | RF Harvesting.....                          | 37 |
| 4.  | ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....                   | 40 |
| 4.1 | Περιστασιακή .....                          | 40 |
| 4.2 | Μακροχρόνια .....                           | 42 |
| 5.  | ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ..... | 46 |
| 5.1 | Υλικά κατασκευής/Τυπικές επιδόσεις.....     | 46 |
| 5.2 | Πειραματική μέθοδος αξιολόγησης.....        | 48 |
| 5.3 | Υλοποίηση μετρήσεων .....                   | 53 |
| 5.4 | Ανάλυση μετρήσεων .....                     | 63 |
| 5.5 | Συμπεράσματα και μελλοντικές εργασίες ..... | 66 |
|     | References .....                            | 67 |
|     | Appendix.....                               | 72 |

# 1. ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

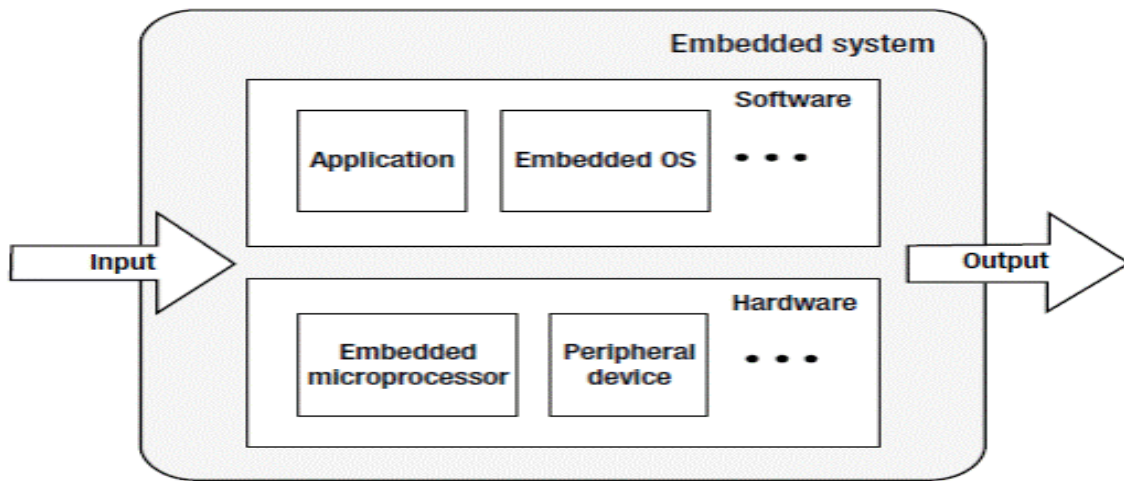
Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει εισαγωγή στον όρο ενσωματωμένα συστήματα και στις τυπικές εφαρμογές. Θα οριστεί επίσης η ενεργειακή αυτονομία σε ένα αυτόνομο σύστημα. Τέλος, θα γίνει αναφορά στο Internet of Things και πως τα ενσωματωμένα συστήματα έχουν βοηθήσει στην εξάπλωση του.

## 1.1 Ορισμός

Τα τελευταία χρόνια ο άνθρωπος περιτριγυρίζεται με όλο και περισσότερα υπολογιστικά συστήματα. Η ραγδαία αύξηση της γεωγραφικής κάλυψης του διαδικτύου σε όλο σχεδόν τον πλανήτη έχει ευνοήσει την εξάπλωση των συστημάτων αυτών. Τα συστήματα αυτά πολλές φορές είναι ορατά στο ανθρώπινο μάτι και άλλες όχι. Στα συστήματα αυτά περιλαμβάνονται οι προσωπικοί υπολογιστές, τα κινητά, τα tablets, οι servers, οι υπερυπολογιστές κτλ. Υπάρχει μια μικρή κατηγορία που ονομάζεται «Ενσωματωμένα Συστήματα». Σε αντίθεση με τα υπόλοιπα, τα συστήματα αυτά είναι συνήθως αόρατα στο ανθρώπινο μάτι, κυρίως κρυμμένα μέσα σε ένα μεγαλύτερο σύστημα εξυπηρετώντας ένα συγκεκριμένο σκοπό. Άρα ένα ενσωματωμένο σύστημα μπορεί να ορισθεί ως ένα σύστημα ειδικού σκοπού που ενσωματώνεται σε ένα μεγαλύτερο μηχανικό ή ηλεκτρικό σύστημα.

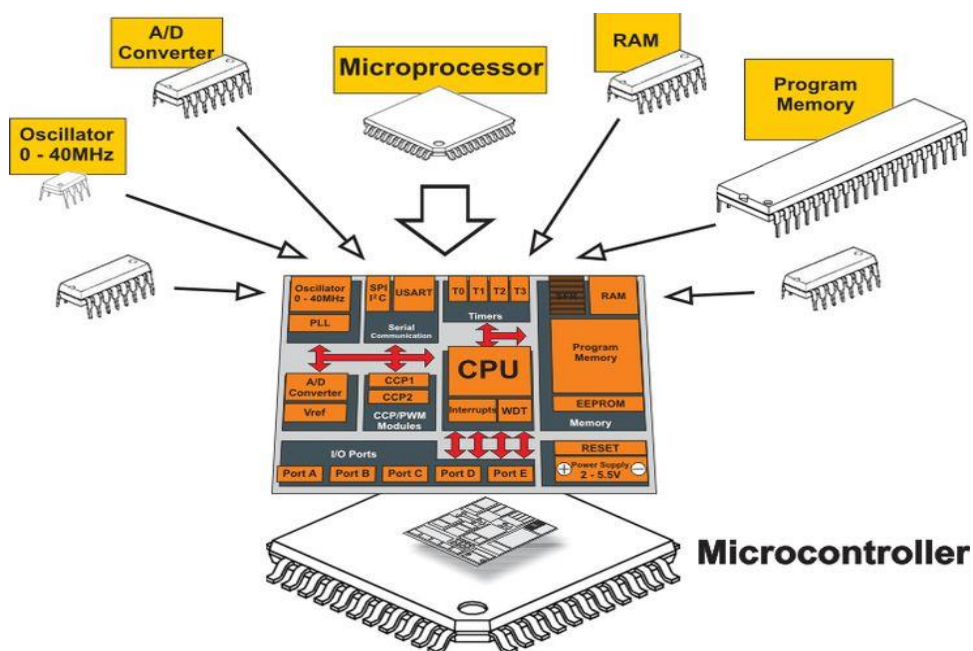
## 1.2 Τυπικά συστήματα

Ένα ενσωματωμένο σύστημα όπως όλα σχεδόν τα συστήματα αποτελείται από δύο μέρη, υλικό και λογισμικό. Ανάλογα με την εφαρμογή τα χαρακτηριστικά αυτά μπορεί να διαφέρουν λίγο έως αρκετά.



Εικόνα 1.1 Βασική αρχιτεκτονική ενσωματωμένου συστήματος [1]

Κάποια θεμελιώδη χαρακτηριστικά από άποψη υλικού όμως είναι ίδια σε όλα τα συστήματα. Όλα τα συστήματα περιέχουν έναν επεξεργαστή, μνήμη, ένα δίαυλο επικοινωνίας και πόρτες εισόδου/εξόδου για την σύνδεση περιφερειακών υποσυστημάτων. Το υποσύστημα αυτά συνήθως περιλαμβάνονται σε ένα μεγαλύτερο το οποίο ονομάζεται μικροελεγκτής. Ο μικροελεγκτής είναι ένα ενσωματωμένο κύκλωμα που μπορεί να λειτουργήσει με ελάχιστα περιφερειακά υποσυστήματα καθώς όπως προαναφέρθηκε τα περισσότερα είναι ενσωματωμένα σε αυτόν. Στην εικόνα που ακολουθεί απεικονίζεται η αρχιτεκτονική ενός τέτοιου συστήματος. [1,2]

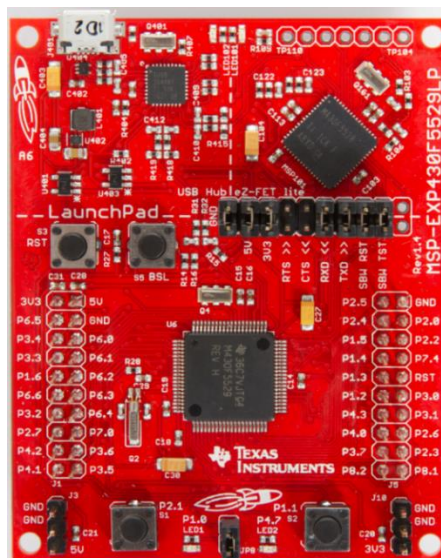


Εικόνα 1.2 Αρχιτεκτονική μικροελεγκτή [3]

Τα τελευταία χρόνια έχουν αρχίσει να γίνονται ιδιαίτερα γνωστά, εμπορικά συστήματα μικροελεγκτών για “do it yourself” εφαρμογές. Τα πιο γνωστά εμπορικά συστήματα αυτή τη στιγμή είναι τα Arduino, τα οποία ενσωματώνουν επεξεργαστές Atmega, και οι μικροελεγκτές Raspberry PI με επεξεργαστές ARM. Για βιομηχανικές εφαρμογές χρησιμοποιούνται κυρίως μικροελεγκτές της Texas Instruments με επεξεργαστές MSP430 για λόγους αξιοπιστίας και ενεργειακής κατανάλωσης.



Εικόνα 1.3 Arduino Uno[4]



Εικόνα 1.4 Texas Instruments MSP430F5529 [5]

### 1.3 Εφαρμογές

Όπως προαναφέρθηκε, ένα ενσωματωμένο σύστημα είναι συνήθως άρατο στο ανθρώπινο μάτι και ενσωματώνεται σε ένα μεγαλύτερο σύστημα. Συχνά, ο χρήστης αγνοεί για την ύπαρξη του. Τέτοια συστήματα μπορεί να βρεθούν σε[6]:

- Εμπορικά ηλεκτρονικά συστήματα

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν όλες σχεδόν οι συσκευές που υπάρχουν σε ένα σπίτι. Από μια smart TV και ένα σύστημα οικιακού κινηματογράφου, μέχρι το ηλεκτρικό θερμοσίφωνο και την ηλεκτρική κουζίνα. Στην ίδια κατηγορία ανήκουν και τα “έξυπνα” ρολόγια και οι παιχνιδομηχανές. Η κατηγορία αυτή διαρκώς επεκτείνεται καθώς νέα “έξυπνα” προϊόντα κατακλύζουν την αγορά καθημερινά.[]

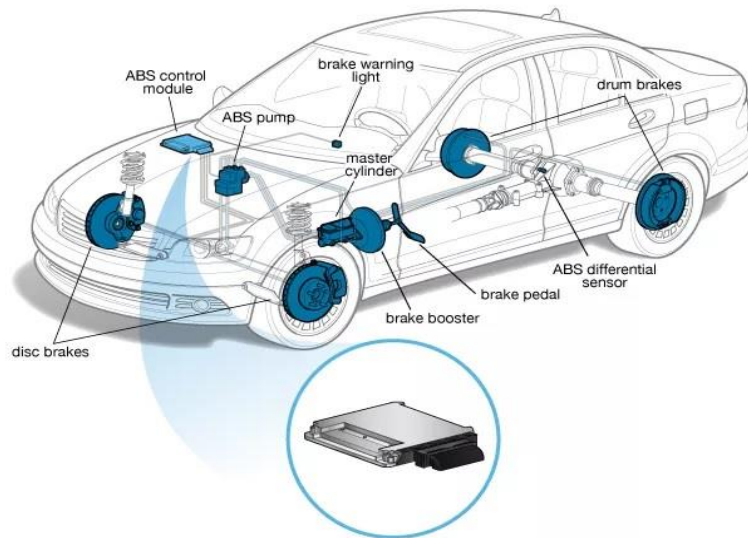


Εικόνα 1.5 Rheem Smart Water Heater[7]

- Αυτοκίνηση

Μια από τις κατηγορίες στις οποίες τα ενσωματωμένα συστήματα έχουν κυρίαρχη θέση είναι η αυτοκίνηση. Όλα τα σύγχρονα αυτοκίνητα περιέχουν εκατοντάδες ενσωματωμένα υποσυστήματα που υποβοηθούν τον οδηγό ή τον αποτρέπουν από την δημιουργία κάποιου ατυχήματος. Πιο γνωστά από αυτά είναι το σύστημα αποφυγής μπλοκαρίσματος των τροχών ή ABS, το σύστημα αερόσακων και το σύστημα παρακολούθησης κατάστασης της μηχανής. Κάθε χρόνο οι αυτοκινητοβιομηχανίες

εισάγουν νέα συστήματα στα νεότερα μοντέλα τους με αποτέλεσμα το πλήθος αυτών διαρκώς να αυξάνεται. Το σύστημα αυτόματου παρκαρίσματος και οι αισθητήρες πίεσης των ελαστικών είναι δύο από τα πιο γνωστά σύγχρονα συστήματα που ενσωματώνονται σιγά σιγά σε όλα τα μοντέλα της αγοράς.[8]



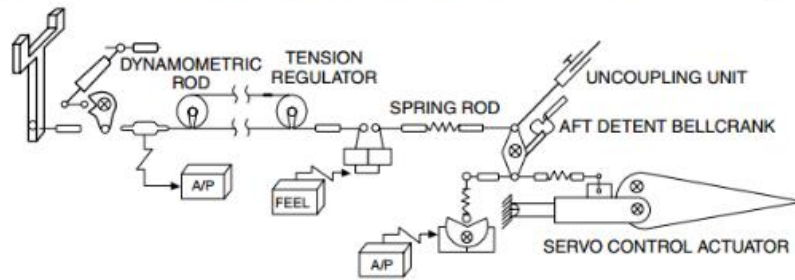
Εικόνα 1.6 Car ABS System [8]

- Ηλεκτρονικά αεροκατασκευών

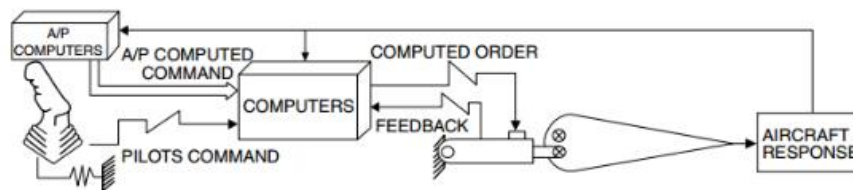
Ένα από τα πρώτα ενσωματωμένα συστήματα που δημιουργήθηκαν είναι το fly-by-wire. Το σύστημα αυτό δημιουργήθηκε για αντικαταστήσει τον παραδοσιακό χειροκίνητο μηχανισμό ελέγχου του αεροσκάφους από τον πιλότο. Σε αντίθεση με το συμβατικό χειροκίνητο μηχανισμό, τα σήματα από τα σημεία ελέγχου του αεροσκάφους περνούν μέσω καλωδίων και συγκεντρώνονται σε ένα κεντρικό υπολογιστή ο οποίος αποφασίζει την κίνηση των ενεργοποιητών στα σημεία αυτά. Άλλα επίσης σημαντικά συστήματα είναι αυτά της αποφυγής σύγκρουσης και αυτά που ειδοποιούν τον πιλότο για την κατάσταση του αεροσκάφους και την ακριβή θέση του αεροσκάφους με τη χρήση GPS.[9]



## MECHANICAL FLIGHT CONTROLS



## ELECTRICAL FLIGHT CONTROLS (FLY BY WIRE)



Εικόνα 1.7 Μηχανικό σύστημα πτήσης vs Fly-by-wire [9]

- “Έξυπνα” κτήρια

Ένας από τους πλέον ακμάζοντες τομείς τα τελευταία χρόνια είναι τα έξυπνα κτήρια. Ολοένα και περισσότερα ενσωματωμένα συστήματα τοποθετούνται στα σύγχρονα κτήρια για να αυξηθεί η ασφάλεια και προστασία του κτηρίου, να μειωθεί η ενεργειακή κατανάλωση και να βελτιστοποιηθούν τα επίπεδα άνεσης των ανθρώπων μέσα σε αυτό. Κάποια από αυτά τα συστήματα είναι ο έλεγχος φωτισμού, ο έλεγχος του συστήματος περιβαλλοντολογικών συνθηκών, συστήματα πυρασφάλειας κτλ. [10]



Εικόνα 1.8 Έξυπνο κτήριο [10]

- Ιατρικά Συστήματα

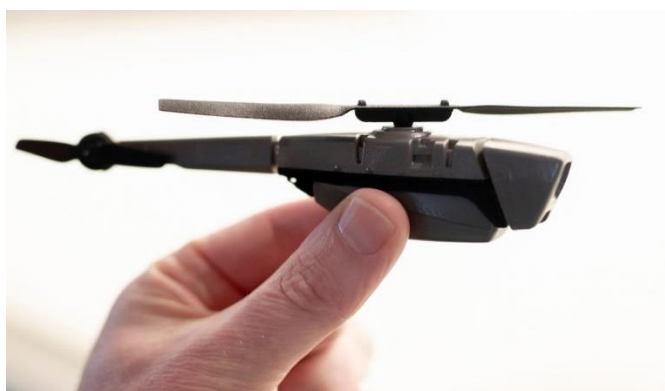
Ένας ακόμη τομέας στον οποίο τα ενσωματωμένα συστήματα παρουσιάζουν ραγδαία αύξηση είναι αυτός της υγείας. Ενσωματωμένα συστήματα βρίσκονται σε όλες σχεδόν τις ιατρικές συσκευές, από μαγνητικούς τομογράφους μέχρι ηλεκτρονικά πιεσόμετρα. Ένας τομέας ο οποίος έχει συλλέξει αρκετό ενδιαφέρον είναι αυτός της παρακολούθησης των ασθενών με τη χρήση δικτύων αισθητήρων σε ένα οικιακό περιβάλλον. Αισθητήρες καρδιακών παλμών, επιταχυνσιόμετρα κ.α τοποθετούνται στους ασθενείς με τη μορφή ενός βραχιολιού και μεταδίδουν σε ένα κεντρικό σύστημα την κατάσταση του ασθενή οποιαδήποτε χρονική στιγμή.[11]



Εικόνα 1.9 Έξυπνος βηματοδότης [11]

- Στρατιωτικά συστήματα

Τέλος, ο σημαντικότερος τομέας ανάπτυξης τέτοιων συστημάτων είναι αυτός των στρατιωτικών εφαρμογών. Τέτοια συστήματα χρησιμοποιούνται σε όλο τον ψηφιακό εξοπλισμό ενός άρματος μάχης ή ενός αεροσκάφους επανδρωμένου ή μη. Άλλα συστήματα χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της ακριβής θέσης ενός στρατιώτη.[12]



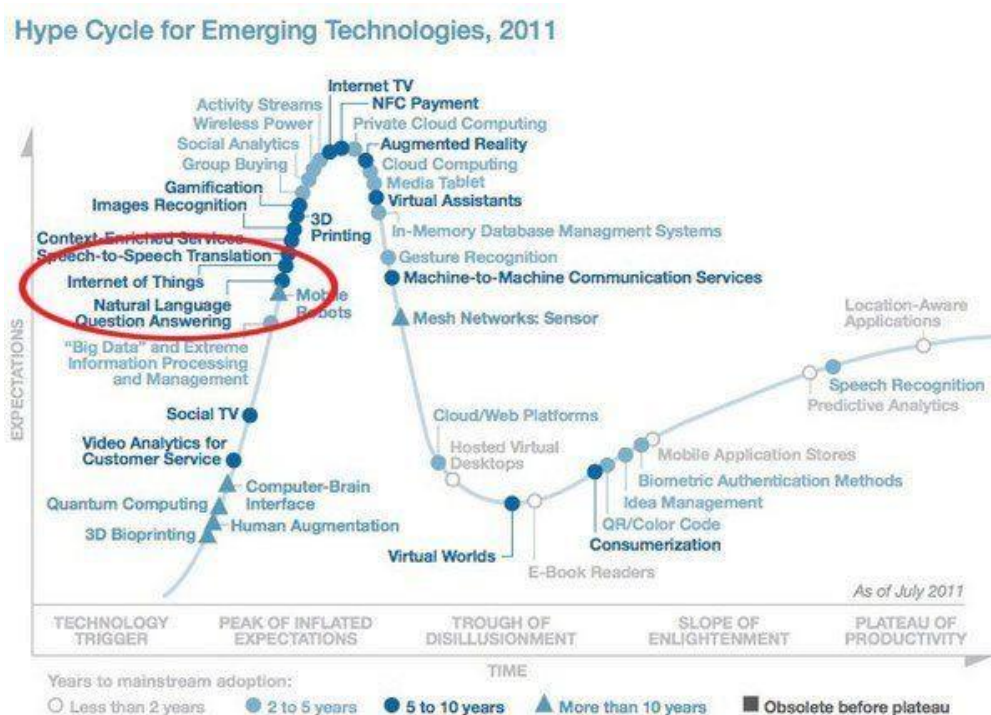
Εικόνα 1.10 Στρατιωτικό μη επανδρωμένο αεροσκάφος [12]



Το Internet of Things σαν ιδέα υπάρχει από την αρχή του 20<sup>ου</sup> αιώνα. Πρώτος έκανε αναφορά σε αυτό ο Nikola Tesla σε μια συνέντευξη στο περιοδικό Colliers όπου ανέφερε ότι “όταν όλος ο πλανήτης καλυφθεί από ασύρματα δίκτυα, τότε θα λειτουργεί ως ένας τεράστιος εγκέφαλος όπως είναι στην πραγματικότητα”. Παρόλα αυτά πέρασαν πολλά χρόνια ώστε να πρωτοεμφανιστεί η πρώτη εφαρμογή. Αυτή εμφανίστηκε το 1982 στο Carnegie Mellon University. Ήταν μια μηχανή της Coca Cola η οποία ενημέρωνε μέσω διαδικτύου τους χρήστες σχετικά με το περιεχόμενο της και τη θερμοκρασία του.

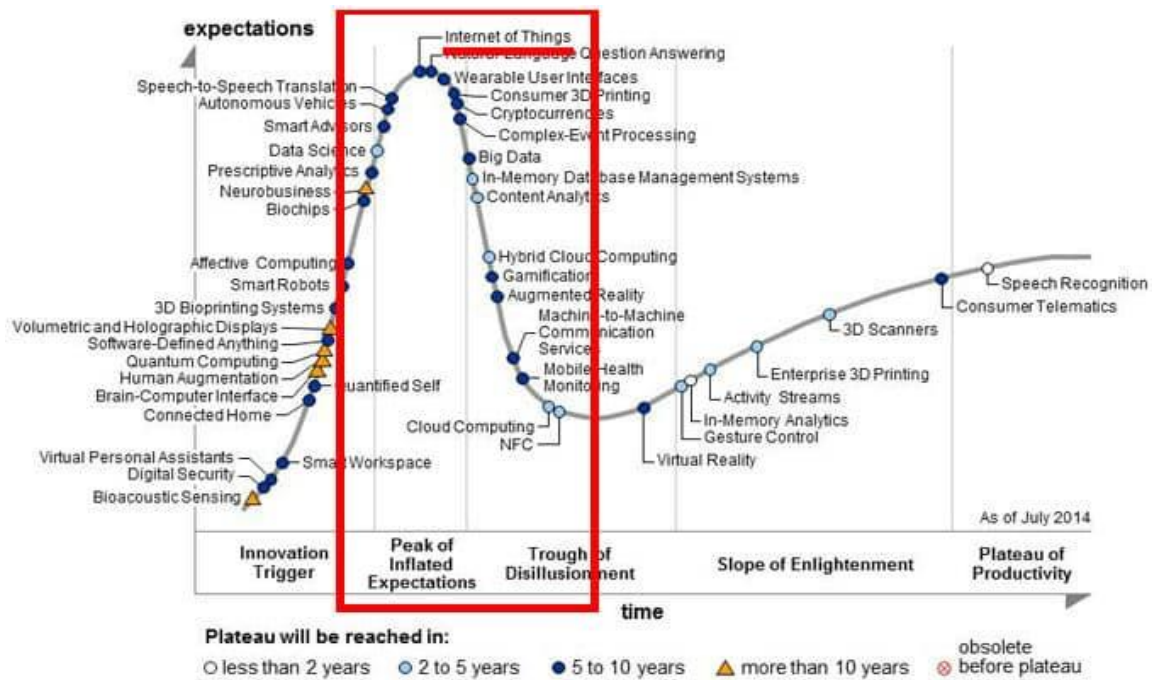
Η ραγδαία ανάπτυξη του Internet of Things ήρθε με την εξάπλωση του διαδικτύου σε όλο τον πλανήτη. Για την διασύνδεση των συσκευών χρησιμοποιούμε IP διευθύνσεις. Μέχρι το 2010, κάποιος μπορούσε να χρησιμοποιήσει μόνο IPv4 διευθύνσεις. Το 2011 απελευθερώθηκε η χρήση IPv6 διευθύνσεων. Με τη χρήση αυτών δεν υπάρχει όριο στο αριθμό των συσκευών που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε. Το νέο πρωτόκολλο μας επιτρέπει την σύνδεση  $2^{128}$  ή περίπου 340 undecillion συσκευών με μοναδική διεύθυνση. Με τον αριθμό αυτό μπορούμε να δώσουμε μια διεύθυνση IP σε κάθε άτομο στον πλανήτη και σε άλλους 100+ πλανήτες όπως αναφέρει ο κ. Steven Leibson.

Την ίδια χρονιά πρωτοεμφανίστηκε στο “hype cycle” της ιστοσελίδας Gartner το οποίο παρακολουθεί τον κύκλο ζωής των αναδυόμενων τεχνολογιών.[14]



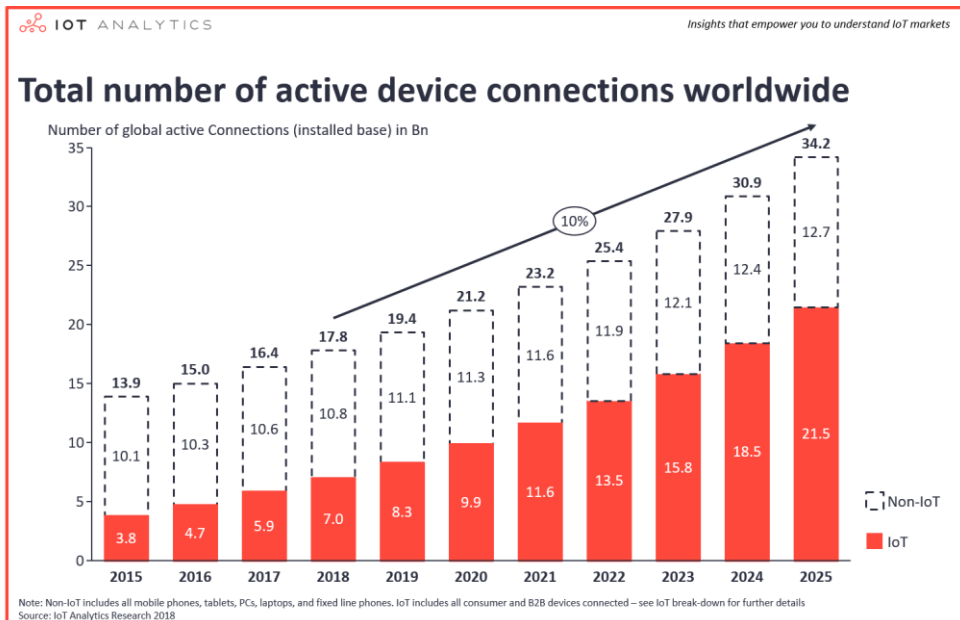
Εικόνα 1.12 Gartner Hype Cycle 2011 [15]

Από τη χρονιά εκείνη και ύστερα όλες οι τεχνολογικές κοινότητες παγκοσμίως υιοθετήσανε τον όρο και το 2014 η τεχνολογία του Internet of Things κατέκτησε την κορυφή του hype cycle της ίδιας εταιρίας. Το 2015 ονομάστηκε “Η χρονιά του Internet of Things”.



Εικόνα 1.13 Gartner Hype Cycle 2014[16]

Αυτή τη στιγμή περίπου 20 δις συσκευές είναι συνδεδεμένες στο διαδίκτυο. Από αυτές περίπου 8.3 δις είναι συσκευές IoT. Ο συνολικός αριθμός αναμένεται να φτάσει τα 35 δις συσκευές περίπου μέχρι το 2025 με 63% αυτών να είναι IoT συσκευές.

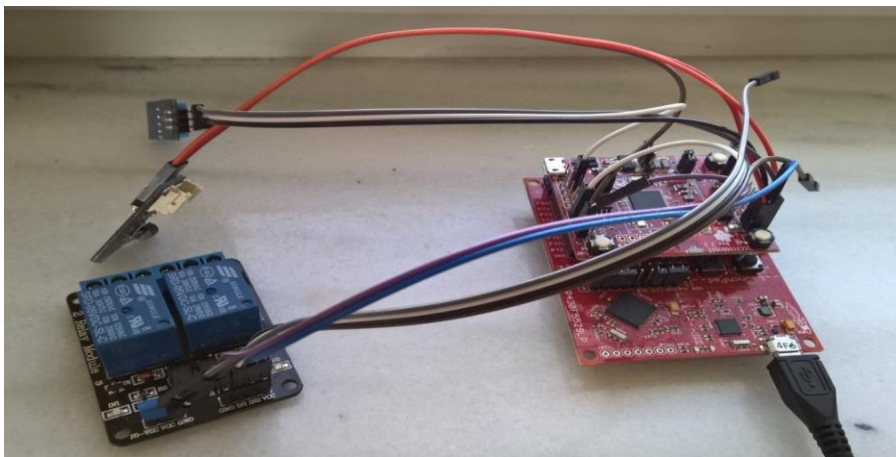


Εικόνα 1.14 Αριθμός συνδεδεμένων συσκευών [17]

Εκτός από τον αριθμό των συσκευών, αυξάνεται και η αξία της τεχνολογίας στην παγκόσμια αγορά. Για το έτος 2018 η αξία του IoT φτάνει τα 151 δις δολάρια και αναμένεται να φτάσει τα 1.6 τρις δολάρια μέχρι το έτος 2025. Από αυτά περίπου 3 δις ευρώ είναι η αξία της τεχνολογίας Energy Harvesting που θα δούμε σε παρακάτω κεφάλαιο.

## 2. ΔΟΜΗ ΚΟΜΒΩΝ INTERNET OF THINGS

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθεί η δομή ενός κόμβου IoT τόσο σε επίπεδο υλικού αλλά και λογισμικού. Θα αναλυθούν τα υποσυστήματα επεξεργασίας, επικοινωνίας και τροφοδοσίας ενός τέτοιου συστήματος. Επίσης θα γίνει αναφορά στους διάφορους αισθητήρες που υπάρχουν διαθέσιμοι στην αγορά και χρησιμοποιούνται σε τέτοιου είδους συστήματα. Και τέλος, θα γίνει προσπάθεια να υπολογιστούν οι ενεργειακές ανάγκες ενός τέτοιου συστήματος.



Εικόνα 2.1 Κόμβος HVAC Συστήματος του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων

### 2.1 Υποσύστημα επεξεργασίας

Το υποσύστημα επεξεργασίας για να κατανοηθεί καλύτερα θα χωριστεί σε δύο υποκεφάλαια. Το υλικό, στο οποίο θα αναλυθεί η αρχιτεκτονική του μικροεπεξεργαστή που εμπεριέχεται σε ένα τέτοιο σύστημα και το λογισμικό, που αφορά τον κώδικα ή το λειτουργικό.

#### ο 2.1.1 Υλικό

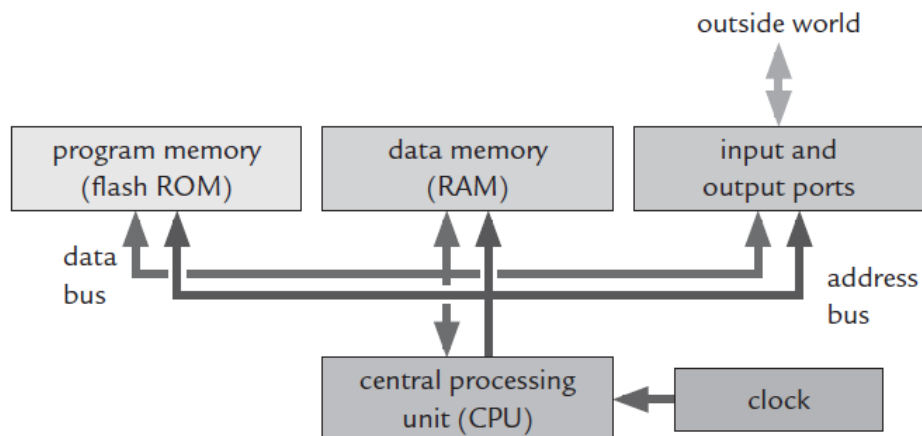
Με τον όρο υποσύστημα επεξεργασίας από άποψη υλικού σε ένα ενσωματωμένο σύστημα, γίνεται αναφορά στον μικροεπεξεργαστή και τα περιφερειακά υποσυστήματα που εμπεριέχονται σε αυτόν. Ο μικροεπεξεργαστής είναι μια ειδική κατηγορία επεξεργαστή. Σε αντίθεση με έναν επεξεργαστή γενικού σκοπού, αυτός περιέχει σχεδόν όλες τις δυνατότητες του προηγούμενου σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα. Οι μικροεπεξεργαστές αυτοί έχουν

αρχιτεκτονική RISC (Reduced Instruction Set Computer). Στην αρχιτεκτονική αυτή χρησιμοποιούνται απλές εντολές σε επίπεδο επεξεργαστή σε αντίθεση με ένα επεξεργαστή αρχιτεκτονικής CISC (Complex Instruction Set Computer). Η βασική διαφορά των δύο αρχιτεκτονικών είναι ο χρόνος που χρειάζεται για την εκτέλεση μια εντολής. Στην αρχιτεκτονική RISC ο χρόνος αυτός είναι πάντα ένας κύκλος ρολογιού. Αντίθετα στην αρχιτεκτονική CISC η πολυπλοκότητα των εντολών αυξάνουν το χρόνο εκτέλεσης μια εντολής, ο οποίος μπορεί να υπερβαίνει τον ένα κύκλο μηχανής.

Ο μικροεπεξεργαστής όπως αναφέρθηκε προηγουμένως είναι μια κατηγορία επεξεργαστή οπότε πολλά από τα εσωτερικά του κυκλώματα είναι ίδια με αυτά ενός επεξεργαστή γενικού σκοπού που υπάρχει σε έναν υπολογιστή γενικής χρήσης. Αρχικά, υπάρχει μια Αριθμητική Λογική Μονάδα ή ALU, η οποία είναι υπεύθυνη για την εκτέλεση των υπολογισμών. Έπειτα, υπάρχει ένα σύνολο καταχωρητών που χρησιμοποιούνται για τόσο για την εκτέλεση εντολών, όσο και για την προσωρινή αποθήκευση των δεδομένων πριν την αποθήκευση τους στην μνήμη. Τέλος, υπάρχει ένας αποκωδικοποιητής εντολών και άλλες λογικές μονάδες που ελέγχουν τις διακοπές και τις υπόλοιπες λειτουργίες της CPU.

Στην εικόνα 2.2 φαίνεται η αρχιτεκτονική ενός μικροελεγκτή. Απαραίτητα συστατικά εκτός από τον κεντρικό επεξεργαστή είναι η μνήμη τυχαίας προσπέλασης ή προσωρινή μνήμη. Η μνήμη αυτή είναι πτητική. Χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του προγράμματος και όταν το σύστημα απενεργοποιηθεί ή χάσει την τάση τροφοδοσίας τα δεδομένα της χάνονται. Υπάρχει όμως και μη πτητική μνήμη. Η μνήμη αυτή είναι στις μέρες μας τεχνολογίας flash ROM. Στην μνήμη αυτή είναι αποθηκευμένος ο κώδικας του προγράμματος. Τέλος, για την διεπαφή με τον έξω κόσμο υπάρχουν πόρτες εισόδου/εξόδου στις οποίες συνδέονται οι εξωτερικές συσκευές. Για την σωστή λειτουργία του συνολικού συστήματος απαιτείται ένα ακόμη πολύ σημαντικό κύκλωμα. Αυτό δεν είναι άλλο από το ρολόι του συστήματος. Το ρολόι χρησιμοποιείται σε ένα ενσωματωμένο σύστημα για να κρατάει συγχρονισμένα τα επιμέρους υποσυστήματα. Για το κύκλωμα του ρολογιού θα αναφερθούμε περισσότερο στο υποσύστημα τροφοδοσίας όπου θα γίνει σύγκριση των διάφορων ρολογιών ενός τυπικού ενσωματωμένου συστήματος και πως μπορούμε να εξοικονομήσουμε ενέργεια απενεργοποιώντας τα.[6,18-22]





Εικόνα 2.2 Αρχιτεκτονική μικροεπεξεργαστή[20]

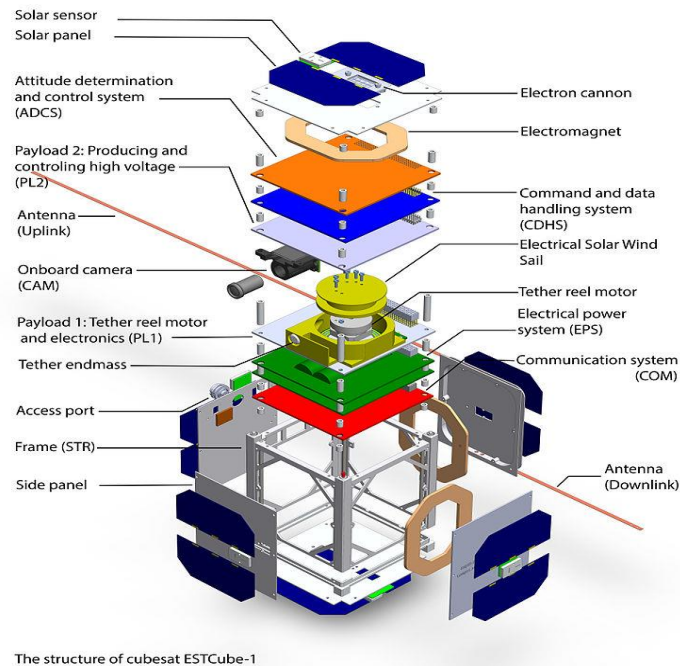
### ο 2.1.2 Λογισμικό

Ένας σύγχρονος υπολογιστής γενικής χρήσης έχει άπειρη ενέργεια τροφοδοσίας και σχετικά άφθονη επεξεργαστική ισχύ χάρη στους πανίσχυρους πολυπύρηνους σύγχρονους επεξεργαστές αλλά και την άφθονη μνήμη και αποθηκευτικό χώρο. Σε αντίθεση με αυτόν ένα ενσωματωμένο σύστημα έχει πολύ περιορισμένη επεξεργαστική ισχύ και ακόμα πιο περιορισμένη μνήμη και αποθηκευτικό χώρο. Λογικό είναι και το λογισμικό ενός τέτοιου συστήματος να έχει πολύ μικρότερες απαιτήσεις. Σε αντίθεση με έναν υπολογιστή ο οποίος χρησιμοποιεί Windows, GNU/Linux ή MacOS, ένα ενσωματωμένο σύστημα χρησιμοποιεί είτε κάποιο mini λειτουργικό όπως το TinyOS ή τρέχει βρόγχο λειτουργίας σε συνδυασμό με έναν χρονιστή. Ο κώδικας στη περίπτωση του βρόγχου είναι γραμμένος σε γλώσσα υψηλού επιπέδου όπως C/C++ ή JavaScript και η Python.[23,24]

#### ο TinyOS

Το TinyOS είναι ένα από τα πιο γνωστά λειτουργικά συστήματα για ενσωματωμένα συστήματα. Το TinyOS είναι αποτέλεσμα συνεργασίας του Πανεπιστημίου της Καλιφόρνια, του Berkeley, της εταιρίας Intel και της Crossbow Technology. Είναι γραμμένο σε γλώσσα nesC, μια παραλλαγή της C και είναι βελτιστοποιημένο για εφαρμογές σε δίκτυο αισθητήρων που υπάρχει όριο στη μνήμη του συστήματος. Όταν κυκλοφόρησε ήταν δωρεάν και ανοιχτού κώδικα αλλά κατείχε άδεια τύπου BSD. Από τη πρώτη ημέρα κυκλοφορίας του έγινε ιδιαίτερα γνωστό και από τότε έχει εξελιχθεί αρκετά και έχει δημιουργήσει μια

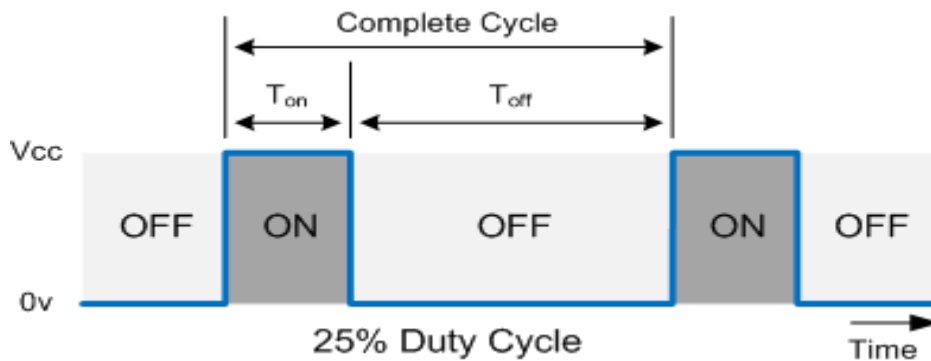
διεθνή κοινοπραξία, την TinyOS Alliance. Ένα από τα πιο γνωστά συστήματα στα οποία χρησιμοποιείται TinyOS είναι ο δορυφόρος ESTCube-1 της Εσθονίας.[25,26]



Εικόνα 2.3 ESTCube-1[26]

ο Εφαρμογή βρόγχου

Ένα μεγάλο ποσοστό των εφαρμογών με ενσωματωμένα συστήματα, κυρίως για Ultra Low Power εφαρμογές, δεν έχουν λειτουργικό σύστημα. Τα συστήματα αυτά “τρέχουν” ένα βρόγχο κώδικα και χρησιμοποιούν ένα χρονιστή για να ελαχιστοποιούν την ενεργειακή κατανάλωση τους. Ο χρόνος στον οποίο ο μικροεπεξεργαστής λειτουργεί και πραγματοποιεί κάποια ενέργεια ονομάζεται Duty Cycle.



Εικόνα 2.4 Duty Cycle[27]

Για παράδειγμα, όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα, ο χρόνος στον οποίο το σύστημα είναι ενεργό και πραγματοποιεί κάποια ενέργεια είναι 25% του συνολικού χρόνου. Στο υπόλοιπο χρονικό διάστημα, το σύστημα μπαίνει σε κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης και ο επεξεργαστής κοιμάται. Σε πραγματικές συνθήκες ο χρόνος αυτός φτάνει να είναι μικρότερος του 1% του συνολικού. Δεδομένου ότι μια εντολή απαιτεί μερικά milliseconds για να εκτελεστεί, ο χρόνος που το σύστημα πραγματικά είναι ενεργό είναι πολύ μικρός.

## 2.2 Υποσύστημα αισθητήρων

Οι αισθητήρες είναι ένα από τα βασικότερα υποσυστήματα σε ένα ενσωματωμένο σύστημα. Αισθητήρας είναι το σύστημα εκείνο το οποίο ανιχνεύει μια φυσική ή χημική ποσότητα και την μετατρέπει σε ηλεκτρικό σήμα. Όλα τα σήματα εισόδου ή μετρήσιμες ποσότητες, όπως αλλιώς ονομάζονται, σε ένα σύστημα προέρχονται από τον πραγματικό κόσμο και είναι σε αναλογική μορφή. Για να μπορέσει να τα επεξεργαστεί ένα ενσωματωμένο σύστημα θα πρέπει να τα μετατρέψει πρώτα σε ψηφιακή μορφή. Γι' αυτό το λόγο όλοι οι μικροελεγκτές έχουν ενσωματωμένους αναλογικό/ψηφιακούς μετατροπείς. Οι αισθητήρες στις περισσότερες των περιπτώσεων είναι ξεχωριστά κυκλώματα, τα οποία συνδέονται πάνω στον μικροεπεξεργαστή μέσω των θυρών I/O. [28-31]

Τα χαρακτηριστικά ενός αισθητήρα είναι:

- Το εύρος
- Η ακρίβεια
- Η ευαισθησία
- Η γραμμικότητα
- Η υστέρηση
- Η ανάλυση
- Η αναπαραγωγικότητα
- Η επαναληψιμότητα
- Ο χρόνος απόκρισης
- Η βαθμονόμηση
- Το Σφάλμα

Οι αισθητήρες μπορούν να χωριστούν με πολλούς διαφορετικούς τρόπους. Ένας τρόπος είναι ανάλογα με τη φυσική αρχή στην οποία βασίζεται ο τρόπος λειτουργίας τους. Ένας άλλος είναι με την ίδια τη λειτουργία τους. Από τους πιο διαδεδομένους τρόπους είναι η ταξινόμηση με βάση την κύρια μορφή ενέργειας που μεταφέρει το σήμα τους. Ακολουθώντας αυτόν τον τρόπο ταξινόμησης λοιπόν χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

- Θερμική

Θερμοκρασία, θερμότητα, ροή θερμότητας, εντροπία, θερμοχωρητικότητα κ.ά.

- Ακτινοβολία

Υπεριώδες, ορατό φως, υπέρυθρη, μικροκύματα, ραδιοκύματα κ.ά.

- Μηχανική

Μετατόπιση, ταχύτητα, επιτάχυνση, δύναμη, ροπή, πίεση, μάζα κ.ά.

- Μαγνητική

Μαγνητικό πεδίο, μαγνητική ροή, μαγνητική διαπερατότητα κ.ά.

- Χημική

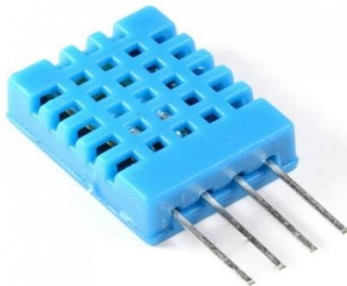
Υγρασία, pH, συγκέντρωση αερίων και ατμών, τοξικά αέρια και υλικά κ.ά.

- Βιολογική

Σάκχαρα, πρωτεΐνες, ορμόνες κ.ά.

- Ηλεκτρική

Φορτίο, ένταση, τάση, αντίσταση, αγωγιμότητα, χωρητικότητα, επαγωγή, διηλεκτρική σταθερά, συχνότητα κ.ά.



Εικόνα 2.5 Ψηφιακός αισθητήρας θερμοκρασίας/υγρασίας DHT11[32]

## 2.3 Υποσύστημα επικοινωνίας

Τα περισσότερα από τα ενσωματωμένα συστήματα τριγύρω μας είτε είναι συστήματα αίσθησης είτε ελέγχου, έχουν ένα υποσύστημα επικοινωνίας. Μέσω του υποσυστήματος αυτού επικοινωνούν είτε με άλλα συστήματα ή με τον χειριστή τους απευθείας. Η επικοινωνία γίνεται όπως σε όλα τα συστήματα, ή ενσύρματα ή ασύρματα. Για την ενσύρματη επικοινωνία χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο Ethernet όπως και σε έναν υπολογιστή καθημερινής χρήσης. Από την άλλη πλευρά για την ασύρματη επικοινωνία τα

πράγματα γίνονται λίγο πιο περίπλοκα καθώς οι επιλογή του κατάλληλου πρωτοκόλλου εξαρτάται από την ίδια την εφαρμογή. [33-35]

Τα διαθέσιμα πρωτόκολλα για ασύρματη επικοινωνία είναι:

- Wi-Fi ή 802.11xx

Το Wi-Fi είναι από τα πιο γνωστά ασύρματα πρωτοκόλλα. Λειτουργεί στις συχνότητες των 2.4 και 5 GHz. Οι πιο πρόσφατες εκδόσεις φτάνουν ταχύτητες έως 54Mbps στα 2.4GHz ενώ στα 5GHz αυτές αγγίζουν τα 3.46Gbps. Χρησιμοποιείται κυρίως για την δημιουργία Wireless Local Area Networks (WLAN) και η μόνη τοπολογία δικτύου που υποστηρίζει είναι αυτή του αστέρα (star) (Εικόνα 2.6)[36]

Θετικά: Μεγάλη εμβέλεια, συμβατότητα με όλες σχεδόν τις έξυπνες συσκευές, προσιτή τιμή, ασφάλεια

Αρνητικά: Μεγάλη κατανάλωση ενέργειας, παρεμβολές από άλλα δίκτυα

- Bluetooth

Ένα ακόμη πολύ γνωστό πρωτόκολλο είναι το Bluetooth. Το Bluetooth επιτρέπει την γρήγορη και εύκολη επικοινωνία μεταξύ δύο συσκευών και την αποστολή δεδομένων μεγάλου μεγέθους με αρκετά γρήγορες ταχύτητες αλλά σε πολύ μικρή εμβέλεια. Όπως και το Wi-Fi, λειτουργεί και αυτό στα 2.4GHz. Οι πρώτες εκδόσεις του Bluetooth είχαν πρόβλημα με την κατανάλωση ενέργειας. Το πρόβλημα αυτό έχει βελτιωθεί πολύ με τις νεότερες εκδόσεις καθιστώντας το BLE το βασικό πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται σε wearable συσκευές. Χρησιμοποιείται κυρίως σε δίκτυα PAN.

Θετικά: Φθηνό, εύκολο στην εγκατάσταση, γρήγορη μεταφορά δεδομένων

Αρνητικά: Μικρή εμβέλεια, σύνδεση μόνο δύο συσκευών τη φορά, παρεμβολές από άλλα δίκτυα

- LoRa™ (Long Range)

Το LoRa™ είναι ένα πρωτόκολλο αρκετά νεότερο από τα προαναφερθέντα. Πρωτοεμφανίστηκε το 2008 και είναι πατέντα η οποία ανήκει στην εταιρία Semtech.

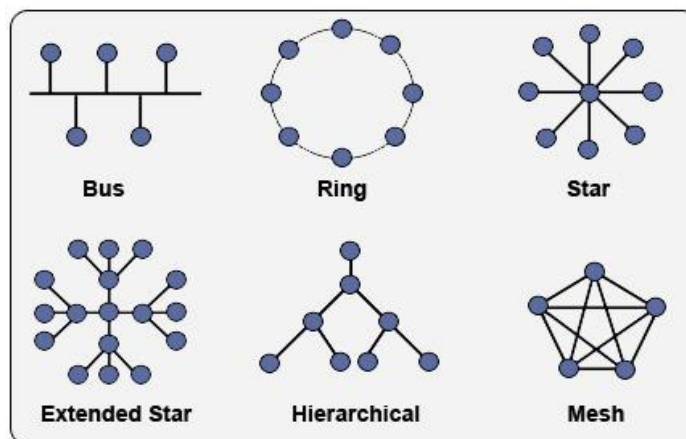
Χρησιμοποιείται κυρίως για βιομηχανικές εφαρμογές. Λειτουργεί στις ελεύθερες μπάντες συχνοτήτων κάτω από το 1GHz όπως στα 169, 433, 868, 915MHz. Το βασικό χαρακτηριστικό του είναι η μεγάλη εμβέλεια, η οποία ξεπερνάει τα 10km ακόμα και σε αστικό περιβάλλον.[37,77]

Θετικά: Αξιοπιστία, χαμηλή κατανάλωση, εμβέλεια

Αρνητικά: Χαμηλή ταχύτητα, κόστος

- Zigbee-802.15.4

Το Zigbee είναι ένα στάνταρτ πολύ χαμηλής κατανάλωσης το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως σε machine to machine (m2m) δίκτυα. Χρησιμοποιείται κυρίως σε δίκτυα που δεν απαιτούνται μεγάλες ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων. Είναι σχεδιασμένο ώστε να είναι πιο απλό και πιο αξιόπιστο από το Bluetooth. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του είναι ότι χρησιμοποιεί την τοπολογία πλέγματος (mesh).[38-40]



Εικόνα 2.6 Τοπολογίες δικτύων[41]

Πίσω από το Zigbee κρύβονται μεγάλοι τεχνολογικοί κολοσσοί όπως η Philips, η Motorola, η Intel και η HP. Η κατανάλωση ενέργειας κατά τη διάρκεια εκπομπής δεδομένων είναι πολύ χαμηλή. Αυτός είναι ένας από τους λόγους που χρησιμοποιείται κυρίως σε συστήματα όπου η διάρκεια ζωής της μπαταρίας είναι σημαντικός παράγοντας.

Θετικά: πολύ χαμηλή κατανάλωση, τοπολογία πλέγματος, αξιοπιστία, παραμετροποίηση

Αρνητικά: μικρή εμβέλεια, χαμηλή ταχύτητα, ακριβή υλοποίηση

- Κυψελωτό δίκτυο

Στις αρχές της δεκαετίας του 80' εμφανίστηκε ένα πρότυπο δικτύωσης που άλλαξε για πάντα την καθημερινότητα των ανθρώπων. Αυτό ήταν η πρώτη γενιά δικτύων κυψέλης που επέτρεπαν την ύπαρξη των κινητών τηλεφώνων. Το πρότυπο αυτό τείνει να αναβαθμίζεται κάθε 10 χρόνια δημιουργώντας μια νέα γενιά κάθε φορά. Στις μέρες μας, όλες οι κινητές συσκευές χρησιμοποιούν το δίκτυο 4<sup>ης</sup> γενιάς. Εκτός από τα κινητά όμως το δίκτυο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί και από ενσωματωμένα συστήματα. Λόγω της μεγάλης γεωγραφικής κάλυψης είναι ιδιαίτερα δημοφιλή σε περιοχές που δεν υπάρχει Wi-Fi. Η χρήση του δικτύου αυτού ενδείκνυται κυρίως για περιπτώσεις στις οποίες απαιτείται μεγάλη ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων ή ο όγκος αυτών είναι πολύ μεγάλος και το Zigbee ή LoRa δεν έχουν αρκετό εύρος. Χρησιμοποιείται κυρίως σε δίκτυα πλέγματος στον κεντρικό κόμβο για την αποστολή των δεδομένων προς τον server. Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του είναι η μεγάλη κατανάλωση ενέργειας, γι' αυτό και προτιμάται η χρήση του σε κόμβους που έχουν συνεχή τροφοδοσία ενέργειας.

Θετικά: μεγάλη ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων, αξιοπιστία, μεγάλη γεωγραφική κάλυψη

Αρνητικά: μεγάλη κατανάλωση ενέργειας, ακριβή υλοποίηση, μεγάλο κόστος

- Συγκριτικός πίνακας εμπορικών συστημάτων

| Όνομα συστήματος | Πρωτόκολλο Επικοινωνίας | Ρεύμα κατά την αποστολή δεδομένων (Tx) | Ρεύμα κατά την λήψη δεδομένων (Rx) |
|------------------|-------------------------|--|------------------------------------|
| Xbee [3]         | Zigbee                  | 45mA                                   | 50mA                               |
| Ti CC3100        | Wifi                    | 223mA                                  | 53mA                               |
| ESP8266          | Wifi 802.11b            | 170mA                                  | 50mA                               |
| Ti CC2640        | Bluetooth               | 9.1mA                                  | 5.9mA                              |
| SAM-R34          | LoRa                    | 33-95mA                                | 16mA                               |

Πίνακας 2.1 Συγκριτικός πίνακας εμπορικών συστημάτων Appendix[A-E]



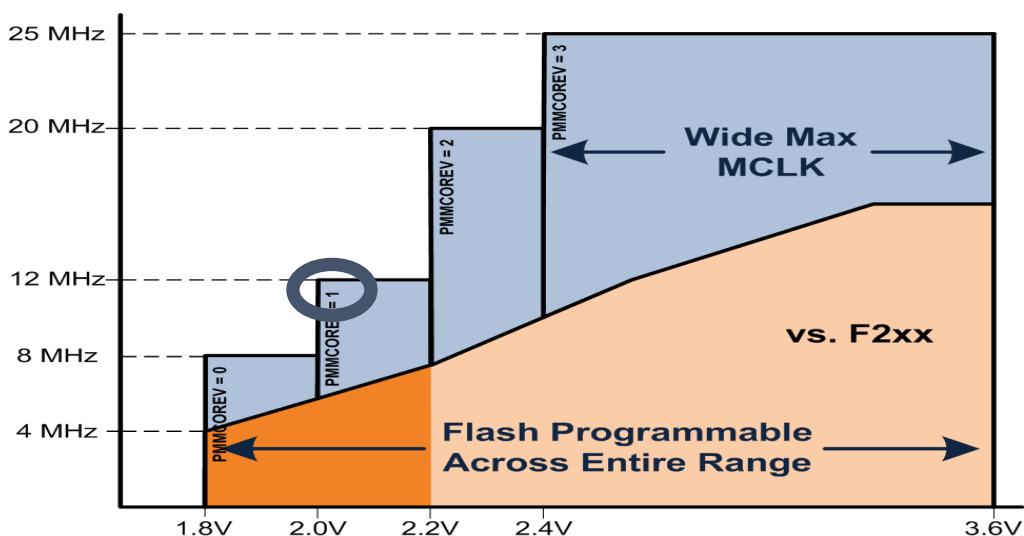


- ο Ρολόγια και εξοικονόμηση ενέργειας

Όπως αναφέρθηκε στο υποσύστημα επεξεργασίας, ένας μικροελεγκτής περιέχει ένα ρολόι το οποίο είναι υπεύθυνο να συγχρονίζει όλο το σύστημα. Στην πραγματικότητα, πριν το ρολόι υπάρχει ένας ταλαντωτής σε μορφή κρύσταλλου ο οποίος όταν τροφοδοτείται με ρεύμα παράγει παλμό συγκεκριμένης συχνότητας. Ο παλμός αυτός οδηγείται σε έναν διαιρέτη ο οποίος τροφοδοτεί στη συνέχεια το ρολόι. Το ρολόι στη συνέχεια τροφοδοτεί τα επιμέρους συστήματα. Σε πολλά συστήματα υπάρχουν περισσότερα του ενός ρολόγια, το καθένα έχει τη δική του λειτουργία.

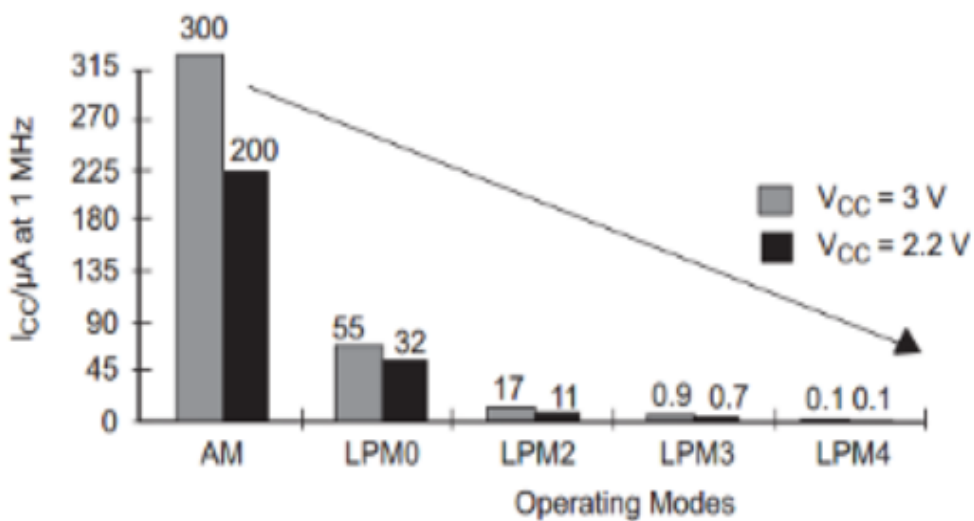
Ένα από τα βασικότερα βήματα για την εξοικονόμηση ενέργειας σε ένα ενσωματωμένο σύστημα είναι η σωστή ρύθμιση των ρολογιών του και η σωστή ρύθμιση του μικροεπεξεργαστή. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η μέγιστη δυνατή συχνότητα του μικροεπεξεργαστή MSP430F5529 ανάλογα με την τάση τροφοδοσίας του. Ανάλογα με τις ανάγκες του προγράμματος λοιπόν μπορεί να αυξηθεί και να μειωθεί η τάση τροφοδοσίας του συστήματος, αυξάνοντας και μειώνοντας αντίστοιχα την ενέργεια που καταναλώνει το σύστημα. Υπολογίζοντας πάντα ότι το πιο ενεργοβόρο υποσύστημα είναι ο μικροεπεξεργαστής.

Η πιο συνηθισμένη τακτική για την μείωση της κατανάλωσης του συστήματος είναι η απενεργοποίηση του επεξεργαστή όταν δεν χρειάζεται. Όπως είδαμε και στις εφαρμογές βρόγχου, ο επεξεργαστής λειτουργεί για πολύ μικρό χρονικό διάστημα στη συνέχεια “κοιμάται”.



Εικόνα 2.7 Διάγραμμα τάσης/συχνότητας MSP430F5529[78]

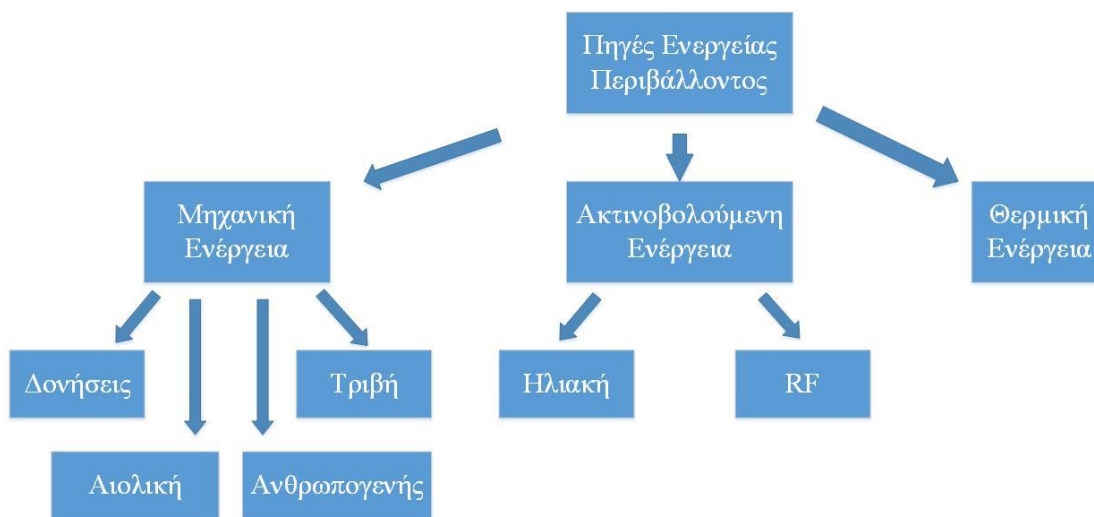
Αυτό που συμβαίνει στην πραγματικότητα είναι ότι ο ταλαντωτής που δημιουργεί τον παλμό για το κεντρικό ρολόι του επεξεργαστή σταματάει να λειτουργεί. Σε αυτό το σημείο ενεργοποιείται ένας ταλαντωτής πολύ μικρότερης κατανάλωσης ο οποίος ταλαντώνει έναν χρονιστή πολύ χαμηλότερης συχνότητας. Ο χρονιστής αυτός κρατάει το σύστημα ενεργό για το υπόλοιπο χρονικό διάστημα μέχρις ότου χρειαστεί ξανά να εκτελεστεί κάποια εντολή από τον επεξεργαστή. Με την τεχνική αυτή το σύστημα μας καταναλώνει έως και 3000 φορές λιγότερη ενέργεια. Στην εικόνα 2.8 βλέπουμε την κατανάλωση ρεύματος για τον μικροεπεξεργαστή MSP430F5529 για κάθε διαφορετική κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης.



Εικόνα 2.8 Διάγραμμα κατανάλωσης MSP430F5529 σε διάφορα mode λειτουργίας[78]

### 3. ENERGY HARVESTING/SCAVENGING

Ένα από τα βασικά προβλήματα στο IoT είναι η διάρκεια ζωής του συστήματος. Ορισμένα ενεργοβόρα συστήματα έχουν διάρκεια ζωής μερικές μέρες ή ώρες λόγω της μικρής χωρητικότητας της μπαταρίας ή της έλλειψης συνεχούς τροφοδοσίας από πρίζα. Τέτοια συστήματα είναι συνήθως αυτά που χρησιμοποιούν κάποιο υποσύστημα μετάδοσης των δεδομένων μέσω RF. Πολλές φορές όμως δεν είναι εφικτή η χρήση μπαταρίας μεγαλύτερης χωρητικότητας λόγω μεγέθους, οπότε πρέπει να βρεθεί ένας άλλος τρόπος για την επιμήκυνση της διάρκειας ζωής του συστήματος. Το πρόβλημα αυτό έρχεται να λύσει το energy harvesting. Το energy harvesting είναι τεχνολογία αυτή που μας επιτρέπει την εξόρυξη/συγκομιδή ενέργειας από τον περιβάλλον χώρο. Πριν αναλυθεί καθεμία από τις διαφορετικές ενεργειακές πηγές, θα τις ομαδοποιηθούν ανάλογα με τη μορφή τους.[43-50]



Εικόνα 3.1 Περιβάλλουσα ενέργεια

#### ο Μηχανική Ενέργεια

Η μηχανική ενέργεια βασίζεται στην κινητική ενέργεια ή την κίνηση ενός αντικειμένου. Η ενέργεια αυτή μπορεί να μεταφράζεται σε δονήσεις, τριβή, αέρα ή ακόμα

και ανθρώπινη δραστηριότητα. Στις περιπτώσεις αυτές χρησιμοποιείται πιεζοηλεκτρικός, ηλεκτροστατικός ή ηλεκτρομαγνητικός μετατροπέας για την μετατροπή της κινητικής ενέργειας σε ρεύμα.

#### ο **Ακτινοβολούμενη ενέργεια**

Η ακτινοβολούμενη ενέργεια είναι αυτή που προέρχεται από τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα τριγύρω μας. Κάποια από αυτά είναι το ορατό φάσμα φωτός, οι υπέρυθρες ακτινοβολίες ή ακόμη και τα ραδιοσήματα που χρησιμοποιούμε για τις τηλεπικοινωνίες. Στην ακτινοβολούμενη ενέργεια μπορούν να συμπεριληφθούν και τα ραδιενεργά υλικά που εκπέμπουν μια ακτινοβολία. Τα υλικά αυτά παρουσιάζουν πολύ μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα αλλά είναι εξαιρετικά επικίνδυνα.

Η πιο γνωστή μέθοδος για την συγκομιδή ακτινοβολούμενης ενέργειας είναι αυτή της μετατροπής του ηλιακού φωτός σε ρεύμα με τη χρήση φωτοβολταϊκών πάνελ. Η ηλιακή ενέργεια κερδίζει συνεχώς έδαφος απέναντι σε άλλες συμβατικές μορφές παραγωγής ενέργειας και αναμένεται ότι ως το 2050 οι ενεργειακές ανάγκες του ανθρώπου θα καλύπτονται μόνο από τα φωτοβολταϊκά.

Μία ακόμη γνωστή τεχνολογία συγκομιδής ενέργειας είναι αυτή του RF Harvesting. Τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί πολύ η χρήση μικροκυματικών ζεύξεων, τόσο με τη διαρκή ανάπτυξη της κινητής τηλεφωνίας, αλλά και του Wifi. Ένας RF harvester μετατρέπει το περιβάλλον σήμα σε ρεύμα.

#### ο **Θερμική ενέργεια**

Για την μετατροπή ενέργεια με τη χρήση της θερμικής ενέργειας σε ρεύμα χρησιμοποιούνται κάποιες συσκευές που ονομάζονται γεννήτριες Seebeck. Οι συσκευές αυτές εκμεταλλεύονται το φαινόμενο Seebeck. Οι συσκευές αυτές είναι κατασκευασμένες με ημιαγωγούς τύπου P και N συνδεδεμένοι σε σειρά μεταξύ τους. Η ενέργεια που

παράγεται από αυτές εξαρτάται από τη διαφορά θερμοκρασίας στις δύο επιφάνειες της συσκευής (ζεστή και ψυχρή πλευρά.)

- ο Συγκεντρωτικοί πίνακες

Στους παρακάτω πίνακες γίνεται αναφορά σε όλες τις πηγές ενέργειας και τα χαρακτηριστικά τους.

| <b>Πηγή ενέργειας</b>                | <b>Διαθέσιμη ενέργεια</b> | <b>Ενέργεια που εξορύχθηκε</b> | <b>Απόδοση</b> |
|--------------------------------------|---------------------------|--------------------------------|----------------|
| Ηλιακό φως<br>(εξωτερικός χώρος)     | 100mW/cm <sup>2</sup>     | 15mW/cm <sup>2</sup>           | 15%            |
| Ηλιακό φως<br>(εσωτερικός χώρος)     | 0.1mW/cm <sup>2</sup>     | 10μW/cm <sup>2</sup>           | 10%            |
| Άνεμος                               | 177mW/cm <sup>2</sup>     | 1200mWh/day                    |                |
| Θερμική<br>(ανθρώπινο δέρμα)         | 20mW/cm <sup>2</sup>      | 30μW/cm <sup>2</sup>           | 0.6%           |
| Θερμική<br>(βιομηχανικό περιβάλλον)  | 100mW/cm <sup>2</sup>     | 1-10mW/cm <sup>2</sup>         | <10%           |
| Δονήσεις<br>(ανθρωπογενής)           |                           | 4μW/cm <sup>2</sup>            |                |
| Δονήσεις<br>(Βιομηχανικό περιβάλλον) |                           | 100mW/cm <sup>2</sup>          |                |
| RF (GSM)                             |                           | 0.3mW/cm <sup>2</sup>          |                |
| RF (Wi-Fi)                           |                           | 0.15mW/cm <sup>2</sup>         |                |
| RF(AM)                               |                           | 2mW/cm <sup>2</sup>            |                |
| Κίνηση δακτύλου                      | 19mW                      | 2.1mW                          | 11%            |
| Περπάτημα                            | 67W                       | 5W                             | 7.5%           |

|                        |       |       |     |
|------------------------|-------|-------|-----|
| Αναπνοή                | 0.83W | 0.42W | 50% |
| Κυκλοφορία του αίματος | 0.93W | 0.37W | 40% |

Πίνακας 3.1 Απόδοση πηγών μικροενέργειας [43-50]

| <b>Πηγή ενέργειας</b>             | <b>Χαρακτηριστικά</b>  | <b>Πλεονεκτήματα</b>  | <b>Μειονεκτήματα</b>                                    |
|-----------------------------------|--|---|---|
| Ηλιακή                            | Άφθονο, μη ελεγχόμενο, προβλέψιμο                            | Διαθέσιμο καθ' όλη τη διάρκεια της μέρας, Υψηλή τάση εξόδου     | Μη διαθέσιμο τη νύχτα, χαμηλή απόδοση όταν έχει σύννεφα |
| Αιολική                           | Μη ελεγχόμενη, προβλέψιμη                                    | Διαθέσιμη σε ανοιχτό χώρο                                       | Μη διαθέσιμη σε κλειστό χώρο                            |
| Δονήσεις (ανθρωπογενής)           | Πλήρως ελεγχόμενη  | Διαθέσιμη όταν χρειάζεται                                       | Διαθέσιμη μόνο όταν ο άνθρωπος κινείται                 |
| Δονήσεις (Βιομηχανικό περιβάλλον) | Άφθονες, μη ελεγχόμενες, απρόβλεπτες                         | Δεν χρειάζεται ρεύμα εισόδου                                    | Εύθραυστα υλικά   |
| RF                                | Μερικώς ελεγχόμενη, μερικώς προβλέψιμη                       | Πολύ αποδοτική σε αστικές περιοχές, μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα | Μικρή απόδοση σε μη αστικές περιοχές, ραδιενεργά υλικά  |
| Περπάτημα                         | Πλήρως ελεγχόμενη, μερικώς προβλέψιμη                        |   | Μεταβλητή έξοδος  |
| Αναπνοή                           | Παθητική ενέργεια του ανθρώπου, μη ελεγχόμενη, μη προβλέψιμη | Διαθέσιμη πάντα   |   |
| Κυκλοφορία του αίματος            | Παθητική ενέργεια του ανθρώπου,                              | Διαθέσιμη πάντα   |   |

|  |               |  |  |
|--|---------------|--|--|
|  | Μη ελεγχόμενη |  |  |
|--|---------------|--|--|

Πίνακας 3.2 Χαρακτηριστικά διαφόρων πηγών μικροενέργειας [43-50]

Από όλες τις μορφές που αναφέρθηκαν μέχρι στιγμής θα αναλυθούν περισσότερο οι μορφές αυτές οι οποίες χρησιμοποιούνται πιο συχνά. Αυτές είναι η ηλιακή, οι δονήσεις/τριβή, η θερμότητα και οι ραδιοσυχνότητες.

### 3.1 Ηλιακή ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια είναι η πιο ευρέως γνωστή από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η άφθονη ενέργεια του ήλιου που φτάνει καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας στη γη, την καθιστά πρωτοπόρο ανάμεσα στις υπόλοιπες πηγές. Χρησιμοποιεί το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο για την απευθείας μετατροπή του ηλιακού φωτός σε ρεύμα. Για την μετατροπή αυτή χρησιμοποιούνται τα φωτοβολταϊκά συστήματα ή ηλιακά πάνελ. Τα ηλιακά πάνελ είναι κατασκευασμένα από υλικά τα οποία απορροφούν τα φωτόνια από το ηλιακό φως και απελευθερώνουν ηλεκτρικό φορτίο.[51]

#### ο Ιστορία

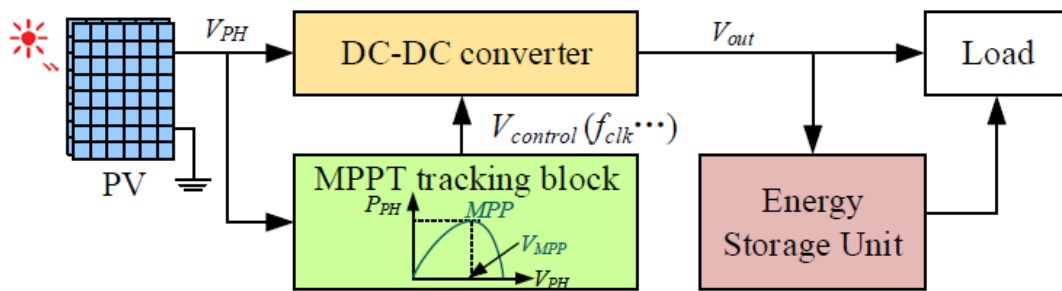
Ο πρώτος που ανακάλυψε το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο ήταν ο Γάλλος φυσικός Alexandre-Edmond Becquerel. Σε ηλικία μόλις 19 ετών έφτιαξε το πρώτο φωτοβολταϊκό μέσα στο εργαστήριο του πάτερα του. Τοποθέτησε χλωριούχο άργυρο μέσα σε ένα όξινο διάλυμα. Όταν έπεσε φως πάνω στο πείραμα, ο A.E Becquerel παρατήρησε ότι διαφορά δυναμικού στα πλατινένια ηλεκτρόδια που ήταν συνδεδεμένα. Αργότερα ο Willoughby Smith, ηλεκτρολόγος μηχανικός από την Αγγλία παρατήρησε την ευαισθησία που παρουσιάζει το σελήνιο στο ηλιακό φως. Το 1883 ο Αμερικανός Charles Fritts δημιούργησε φωτοβολταϊκό πάνελ το οποίο είχε απόδοση μικρότερη του 1% παρόλα αυτά ήταν το έναυσμα για την ανάπτυξη των σημερινών. Για την δημιουργία του έβαλε μια πλάκα σεληνίου ανάμεσα σε μία πλάκα σιδήρου και μιας ημιδιαφανής πλάκας χρυσού. Το 1922, απονεμήθηκε στον Albert Einstein το Νόμπελ Φυσικής για την προσφορά του στη Θεωρητική Φυσική και την ανακάλυψη του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Το 1954, τρεις Αμερικανοί φυσικοί που εργαζόταν στα Bell Labs δημιούργησαν ένα φωτοβολταϊκό

στοιχείο το οποίο είχε αρκετά μεγάλη απόδοση ώστε να μπορεί να τροφοδοτήσει ένα ηλεκτρικό κύκλωμα. Το στοιχείο που προτεινόταν βασιζόταν σε μια διάχυτη σύνδεση P-N στοιχείων πυριτίου η οποία είχε απόδοση 6%. Μέχρι το τέλος του 1960 υπήρχαν κυψέλες με απόδοση ως και 14%, παρόλα αυτά η τιμή τους ήταν απαγορευτική καθώς έφτανε και τα 1000 USD/W. Η ραγδαία ανάπτυξη στον τομέα των ημιαγωγών πυριτίου έφερε μεγάλη πτώση στην τιμή των ηλιακών κυψελών. Στις μέρες μας μπορεί κανείς να αγοράσει ένα ηλιακό πάνελ με μερικά Ευρώ και να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες ενός μικρού ενσωματωμένου συστήματος.

- Σύγχρονα ηλιακά πάνελ

Ένα σύγχρονο ηλιακό πάνελ είναι κατασκευασμένο από διάφορα υλικά κάνοντας τον υπολογισμό της απόδοσης του περίπλοκη υπόθεση. Βάση της θεωρίας, ένα ηλιακό πάνελ είναι κατασκευασμένο από υλικά τα οποία απορροφώντας τα φωτόνια από το ηλιακό φως διεγείρουν τα ηλεκτρόνια του υλικού αυτού. Τα ηλεκτρόνια αυτά είτε μετατρέπουν την ενέργεια αυτή σε ρεύμα είτε σε θερμότητα. Για να αποφευχθεί το δεύτερο φαινόμενο, τα ηλιακά πάνελ είναι κατασκευασμένα με τέτοιο τρόπο ώστε να κατευθύνουν τα ελεύθερα ηλεκτρόνια στις άκρες του πάνελ όπου είναι συνδεδεμένα τα ηλεκτρόδια. Το πυρίτιο που χρησιμοποιείται κυρίως για την κατασκευή αυτών, ντοπάρεται σε δύο επίπεδα. Στο ένα επίπεδο ντοπάρεται με βόριο και στο άλλο με φώσφορο. Το ρεύμα που παράγεται είναι συνεχές και για την μεταφορά του μέσω του δικτύου ηλεκτροδότησης πρέπει το μετατρέπουμε με τη βοήθεια ενός μετατροπέα σε εναλλασσόμενο. Στην περίπτωση που απαιτείται η τροφοδοσία ενός ενσωματωμένου συστήματος ή η αποθήκευση της ενέργειας που παράγεται, χρησιμοποιείται ένας μετατροπέας ρεύματος DC/DC και συνδέεται στην έξοδο του το φορτίο ή η μονάδα αποθήκευσης. Στην εικόνα 3.1 απεικονίζεται ένα πλήρες σύστημα συγκομιδής και αποθήκευσης ηλιακής ενέργειας.[52-55]





Εικόνα 3.2 Φωτοβολταϊκό σύστημα[56]

Ανάλογα με τα υλικά και τον τρόπο κατασκευής, τα φωτοβολταϊκά χωρίζονται σε τρεις γενιές. Συνήθως παίρνουν την ονομασία τους από τα υλικά κατασκευής τους.

- Πρώτη γενιά

Πρόκειται για την πιο παλιά και πιο κοινή κατηγορία φωτοβολταϊκών. Η κατηγορία αυτή χωρίζεται σε δύο μικρότερες, τις μονοκρυσταλλικές και πολυκρυσταλλικές κυψέλες. Οι κυψέλες αυτές παράγονται σε σχήμα γκοφρέτας. Οι διαφορές μεταξύ τους εκτός από οπτικές έχουν να κάνουν και με την απόδοσή τους. Μια μονοκρυσταλλική κυψέλης έχει μεγαλύτερη απόδοση από μια πολυκρυσταλλική, αλλά η δεύτερη είναι πιο απλή και πιο φθηνή στην κατασκευή της.

- Δεύτερη γενιά

Στη γενιά αυτή ανήκουν οι κυψέλες που έχουν τη μορφή λεπτού φιλμ. Η απόδοση τους είναι αρκετά μικρότερη από αυτή των κυψελών της πρώτης γενιάς, αλλά η φυσική τους υπόσταση τα καθιστά ικανά να τοποθετηθούν σε εφαρμογές που τα προηγούμενα δεν μπορούσαν. Επειδή η κατασκευή τους αποτελείται κυρίως από πυρίτιο, είναι αρκετά πιο φθηνά και πιο απλά. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι κυψέλες που κατασκευάζονται με Τελλουρίδιο του Καδμίου ή Σουλφίδιο του Καδμίου (CdTe/CdS) και Χαλκού Ινδίου Γαλλίου Σεληνιδίου (CIGS)

- Τρίτη γενιά

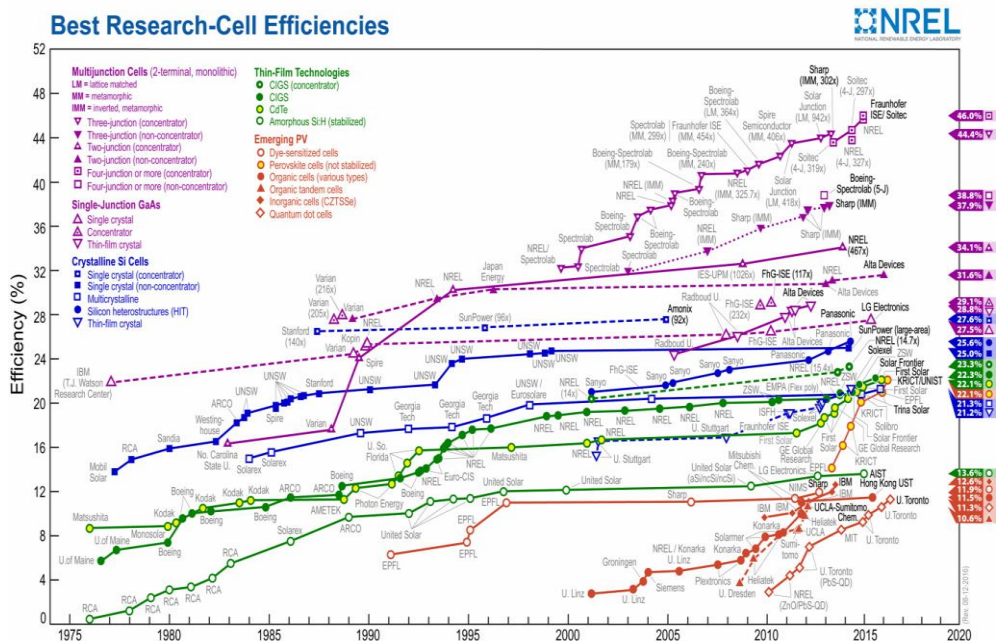
Στη γενιά αυτή ανήκουν κυψέλες που έχουν κατασκευαστεί με νανοκρυστάλλους, με πολυμερή, με φωτοευαίσθητα υλικά και οι συμπυκνωμένες. Η Τρίτη γενιά παρουσιάζει μεγαλύτερη απόδοση από την πρώτη αλλά δεν υπάρχουν εμπορικές εφαρμογές ακόμη.

ο Απόδοση ηλιακών κυψελών

Όπως προαναφέρθηκε η απόδοση ενός ηλιακού πάνελ εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Η απόδοση ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου ορίζεται από το ποσοστό της προσπίπτουσας ενέργειας που μετατρέπεται σε ρεύμα. Η πρώτη γενιά έχει αποδόσεις της τάξης του 22,7%. Η δεύτερη γενιά φτάνει στα 18,4% σε πειραματικές εφαρμογές ενώ μόλις το 13,4% σε εμπορικές εφαρμογές. Τέλος, η Τρίτη γενιά έχει αποδόσεις που ξεπερνούν το 30% αλλά δεν υπάρχουν ακόμη εμπορικές εφαρμογές. Στον παρακάτω πίνακα απεικονίζονται οι αποδόσεις για κάποια από τα πιο γνωστά πάνελ που κυκλοφορούν.

| Solar cell type      | Efficiency | Laboratory/Institution                      |
|----------------------|------------|---|
| Crystalline Si       | 24.7       | University of New south Wales               |
| Multi Crystalline Si | 20.3       | Fraunhofer institute of solar energy system |
| Amorphous Si         | 10.1       | Kaneka                                      |
| HT cell              | 23         | Sanyo Corporation                           |
| GaAs cell            | 26.1       | Radboud University Nijmegen                 |
| InP Cell             | 21.9       | Spire Corporation                           |
| Multi junction cell  | 40.8       | National Renewable Energy Laboratory        |
| CdTe                 | 16.5       | National Renewable Energy Laboratory        |
| CIGS                 | 19.9       | National Renewable Energy Laboratory        |
| CuInS <sub>2</sub>   | 12.5       | Hahn Meitner Institute                      |
| DSSC                 | 11.1       | Sharp                                       |
| Organic solar cell   | 6.1        | Guangxi Institute of Science and Technology |

Εικόνα 3.3 Σύγκριση αποδόσεων ηλιακών κυψελών[57]



Εικόνα 3.4 Ιστορικό απόδοσης ηλιακών κυψελών[51]

- ο Ηλιακή ενέργεια στο μέλλον

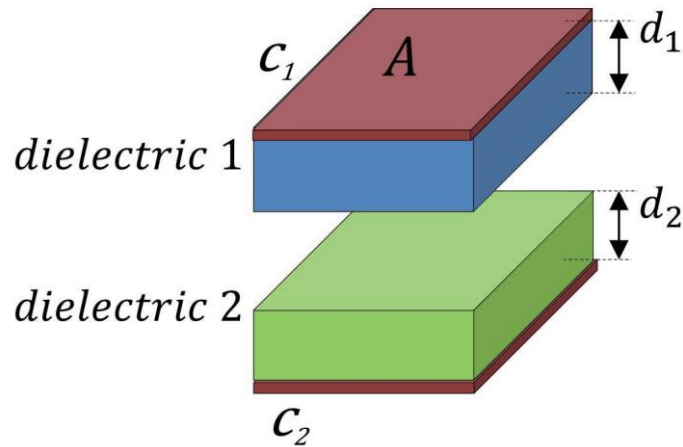
Τον Οκτώβριο του 2014 στο Ευρωπαϊκό συμβούλιο τέθηκε ένας στόχος σχετικά με την ενεργειακή κατανάλωση των κατοίκων της Ευρώπης. Σύμφωνα με την οδηγία αυτή θα πρέπει το 27% της ενέργειας που καταναλώνεται, να παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ο στόχος αυτός έχει τεθεί μέχρι τα τέλη του 2030. Τα επόμενα χρόνια λοιπόν αναμένεται να υπάρξει μεγάλη αύξηση στην χρήση των φωτοβολταϊκών καθώς είναι η μορφή εξόρυξης ενέργειας με το μικρότερο περιβαλλοντολογικό κόστος. Επίσης η εγκατάσταση ενός φωτοβολταϊκού πάρκου είναι αρκετά πιο εύκολη και λιγότερο κοστοβόρα διαδικασία σε σχέση με τις υπόλοιπες μορφές. Όλα αυτά την καθιστούν ιδανική λύση. Στις μέρες μας, ολοένα και περισσότερες σκεπές σπιτιών καλύπτονται με ηλιακά πάνελ, φαινόμενο το οποίο εμφανίζεται κυρίως στις μεσογειακές χώρες λόγω του αυξημένου ποσοστού ηλιοφάνειας κατά τη διάρκεια του χρόνου.[58]

## 3.2 Μηχανική (Τριβή/Δονήσεις)

Τα τελευταία χρόνια, ιδιαίτερη ανάπτυξη έχουν λάβει οι μικρογεννήτριες οι οποίες μετατρέπουν τις δονήσεις και την τριβή μεταξύ δύο διαφορετικών υλικών σε ηλεκτρικό ρεύμα. Τόσο στην κατηγορία των δονήσεων όσο και αυτή της τριβής γίνονται διαρκώς έρευνες και όλο και περισσότεροι ερευνητές ασχολούνται για την βελτίωση της απόδοσης των μικρογεννητριών αυτών. Αξίζει να σημειωθεί ότι η τάση που παράγεται από μια τέτοια μικρογεννήτρια έχει μεγαλύτερη τιμή σε σχέση με κάποια άλλη μορφή ενέργειας, αλλά το ρεύμα είναι πολύ μικρό.

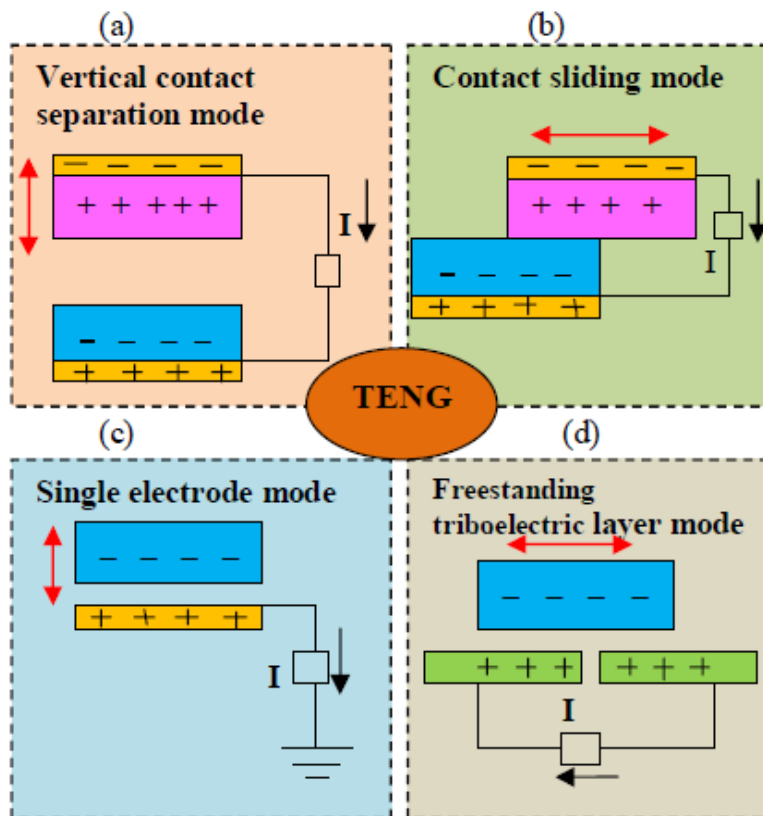
### 3.2.1 Τριβή

Τριβοηλεκτρικό ονομάζεται το φαινόμενο που μελετά την μελετάει την παραγωγή ρεύματος από την τριβή δύο ανόμοιων υλικών. Η τριβή μεταξύ των υλικών αυτών δημιουργεί ένα χημικό δεσμό ο οποίος ονομάζεται προσκόλληση. Κατά τη διάρκεια του φαινομένου αυτού τα ηλεκτρόνια αρχίζουν να κινούνται από το ένα υλικό προς το άλλο δημιουργώντας έτσι ηλεκτρικό φορτίο. [59,60]



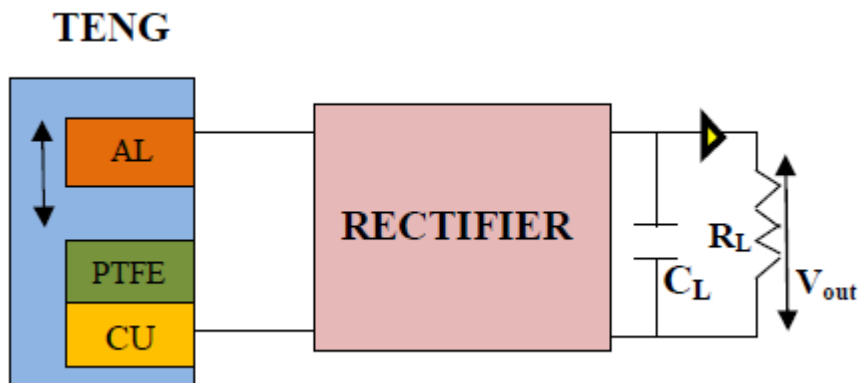
Εικόνα 3.5 Διηλεκτρικά υλικά[59]

Ορισμένα υλικά όπως το μαλλί, ο άργυρος και το αλουμίνιο έχουν θετικό φορτίο και έχουν την τάση να χάνουν ηλεκτρόνια όταν τριβονται με κάποιο άλλο υλικό. Από την άλλη, υλικά όπως το Teflon (PTFE), PVC, Πολυαιθυλένιο έχουν αρνητικό φορτίο και έχουν την τάση να λαμβάνουν ηλεκτρόνια. Η τριβή μεταξύ των δύο υλικών μπορεί να γίνει με τέσσερις διαφορετικούς τρόπους. Οι τρόποι αυτοί φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 3.6 Τρόποι παραγωγής ενέργειας μέσω τριβής[60]

- Στην πάνω αριστερά εικόνα φαίνεται η πιο απλή από τις μεθόδους. Τοποθετώντας δύο υλικά από τα προαναφερθέντα, ένα με θετικό και ένα με αρνητικό φορτίο, το ένα πάνω από το άλλο αφήνοντας ένα μικρό κενό αέρα αναμεσά τους. Όταν στο σύστημα εφαρμοστεί εξωτερική μηχανική ενέργεια τότε δημιουργείται στην επιφάνεια ηλεκτροστατικό φορτίο. Όταν η κίνηση είναι συνεχόμενη έχουμε την παραγωγή συνεχούς φορτίου.
- Στην πάνω δεξιά εικόνα φαίνεται ένας από τους πιο γνωστούς τρόπους παραγωγής ηλεκτροστατικού φορτίου. Η παράλληλη τριβή δύο ανόμοιων υλικών μεταξύ τους. Όταν τα δύο υλικά τρίβονται μεταξύ τους, τότε υπάρχει ροή ρεύματος στο κύκλωμα.
- Στην κάτω δεξιά εικόνα φαίνεται η μέθοδος κατά την οποία το ένα από τα δύο υλικά παραμένει σταθερό ενώ το άλλο μετακινείται παράλληλα δημιουργώντας ηλεκτρικό φορτίο.
- Στην μέθοδο της κάτω δεξιά εικόνας το διηλεκτρικό υλικό είναι ελεύθερο χωρίς να ακουμπάει τα ηλεκτρόδια. Η κίνηση του δημιουργεί ασύμμετρο φορτίο το οποίο ρέει στο κύκλωμα.



Εικόνα 3.7 Σχηματικό κυκλώματος τριβοηλεκτρικής γεννήτριας [60]

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται το σχηματικό μια τριβογεννητριάς. Πάνω στη γεννήτρια συνδέουμε έναν ανορθωτή για να μετατρέψουμε και να εξομαλύνουμε το ρεύμα πριν αυτό ρεύσει στο κύκλωμα μας. Η αντίσταση  $R_L$  προσομοιώνει το φορτίο.

### 3.2.2 Δονήσεις

Εκτός από τη τριβή, μηχανική ενέργεια σε μορφή κίνησης, δονήσεων ακόμα και ήχου μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρικό φορτίο. Τα πιεζοηλεκτρικά συστήματα εκμεταλλεύονται το

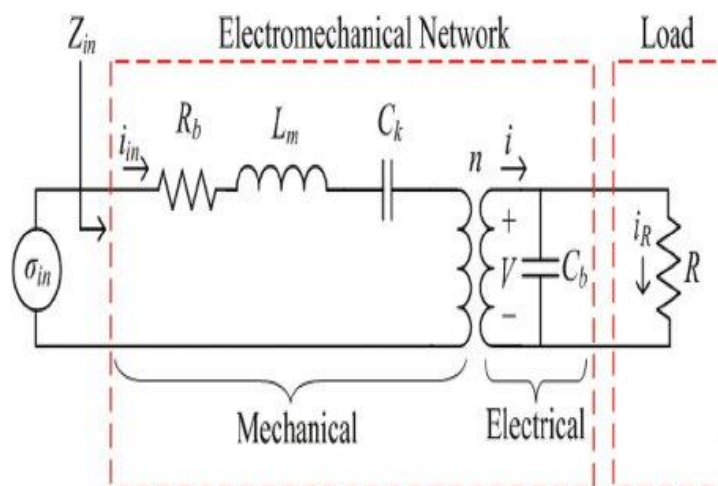
νόμο το Faraday ο οποίος αναφέρει ότι “όταν μεταβάλλεται το μαγνητικό πεδίο γύρω από ένα πηνίο ή καλώδιο, τότε δημιουργείται ηλεκτρικό φορτίο”.

Όπως και στην περίπτωση της τριβής, η γεννήτρια αποτελείται από δύο υλικά τα οποία έχουν συγκεκριμένες ιδιότητες. Τα υλικά αυτά ανήκουν κυρίως στην κατηγορία των κρυσταλλικών υλικών και μερικά σε αυτή των κεραμικών. Τα υλικά αυτά όταν είναι σε κατάσταση ηρεμίας, τα ηλεκτρόνια τους είναι οργανωμένα. Όταν εφαρμοστεί εξωτερική δύναμη στα υλικά αυτά τα ηλεκτρόνια τους αναδιατάσσονται στο χώρο δημιουργώντας ηλεκτρικό φορτίο.

Σε ένα τέτοιο σύστημα η ενέργεια που συγκομιδείται μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο

$$E = \frac{1}{2 * Q * V} = \frac{Q^2}{2 * C}$$

Όπου Q είναι το φορτίο στα άκρα των υλικών, V είναι η τάση και C η χωρητικότητα.[61-63]



Εικόνα 3.8 Σχηματικό τυπική πιεζοηλεκτρικής γεννήτριας[62]

Όπως και στην τριβογεννήτρια, είναι απαραίτητη η χρήση ανορθωτή για την μετατροπή του σήματος πριν το συνδέσουμε στην κύκλωμα .

### 3.3 Θερμότητα

Για την μετατροπή της θερμότητας σε ρεύμα υπάρχουν δύο διαδικασίες.

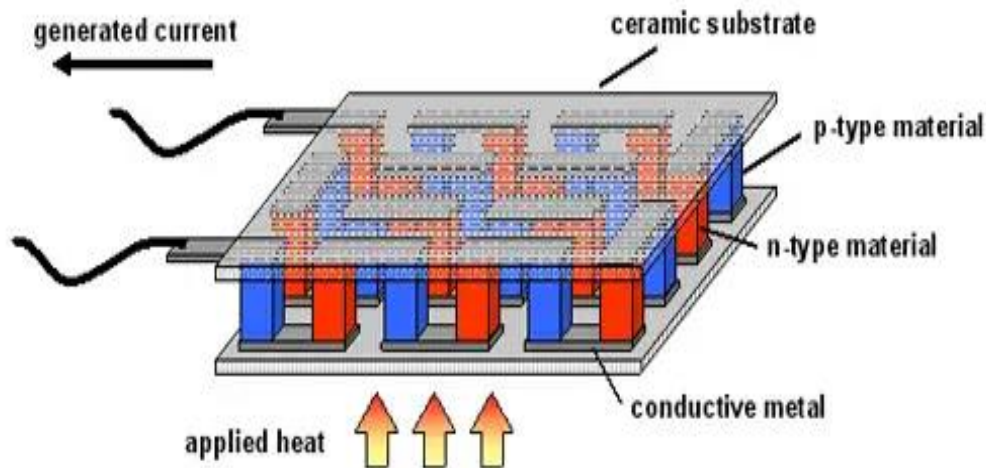
- Θερμοϊονική

Η Thermotunneling όπως είναι αλλιώς γνωστή αυτή η διαδικασία, στην οποία ηλεκτρόνια εκτοξεύονται από ένα ζεστό ηλεκτρόδιο προς ένα κρύο.

- ο Θερμοηλεκτρική

Η θερμοηλεκτρική ιδιότητα είναι μια ιδιότητα κάποιων υλικών, η οποία τους επιτρέπει να μετατρέπουν την ροή θερμότητας σε ηλεκτρικό ρεύμα. Η μετατροπή αυτή γίνεται εκμεταλλεύοντας το φαινόμενο Seebeck.

Το φαινόμενο αυτό παρατηρήθηκε από τον Γερμανό φυσικό Thomas Johann Seebeck το 1821, από όπου πήρε και την ονομασία του. Ο Γερμανός φυσικός παρατήρησε ότι όταν υπάρχει ροή θερμότητας από τη θερμή περιοχή προς την ψυχρή μεταξύ δύο ανόμοιων ηλεκτρικών ημιαγωγών, δημιουργείται διαφορά δυναμικού.[65-66]



Εικόνα 3.9 Αρχιτεκτονική θερμοηλεκτρικής γεννήτριας

Το 1834 ο Γάλλος φυσικός Jean Charles Athanase Peltier ανακάλυψε το αντίστροφο φαινόμενο. Τροφοδοτώντας με ρεύμα μια θερμοηλεκτρική γεννήτρια, δημιουργεί διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο επιφανειών της.

Η θερμοηλεκτρική γεννήτρια κατασκευάζεται από ζευγάρια p και n ημιαγωγών τοποθετημένα σε σειρά. Το ρεύμα που παράγεται εξαρτάται από τη διαφορά θερμοκρασίας στα δύο επίπεδα της γεννήτριας. Ορίζοντας ως  $T_h$  τη θερμοκρασία στην ζεστή πλευρά του TEG και  $T_c$  τη θερμοκρασία στην αντίστοιχη κρύα και  $a_p(T)$  και  $a_n(T)$  τους συντελεστές Seebeck των στοιχείων p και n του θερμοστοιχείου, το ρεύμα που παράγεται ορίζεται από τις εξισώσεις 1-3:

$$I = \frac{U_0}{Rl + Rg} \quad (1)^1$$

Όπου  $U_0$  η τάση (ανοιχτοκύκλωσης) στα άκρα του θερμοηλεκτρικού στοιχείου,  $Rl$  η αντίσταση του φορτίου και  $Rg$  η αντίσταση του θερμοηλεκτρικού στοιχείου. Η τάση στα άκρα του TEG ορίζεται από τον τύπο

$$U_0 = \int_{T_c}^{T_h} a(T) dT \quad (2)$$

$$a(T) = \alpha p(T) - \alpha n(T) \quad (3)$$

Από τους παραπάνω τύπους προκύπτει η ισχύς εξόδου ως

$$P_{out} = \frac{U_0^2}{Rl} \quad (4)$$

Η τάση που παράγεται από ένα θερμοηλεκτρικό στοιχείο είναι αρκετά μικρή γι' αυτό πολλές φορές τοποθετούνται περισσότερα του ενός σε σειρά. Η διάρκεια ζωής ενός τέτοιου στοιχείου είναι πολύ μεγάλη ξεπερνώντας τις 100.000 ώρες. Το πρόβλημα ωστόσο είναι η εύρεση περιβάλλοντος με συνεχή θερμοκρασιακή διαφορά, ώστε να δημιουργείται ροή θερμότητας προκειμένου να παραχθεί ενέργεια. Αξίζει να σημειωθεί ότι όλες οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες είναι συσκευές με πολύ χαμηλή θερμική αντίσταση, συνεπώς λειτουργούν ως «γέφυρες θερμότητας» ανάμεσα στην ζεστή και την κρύα πλευρά. Βασικό πρόβλημα των θερμοηλεκτρικών στοιχείων είναι η πολύ χαμηλή απόδοση μετατροπής (της τάξης του 1-5%).

### 3.4 RF Harvesting

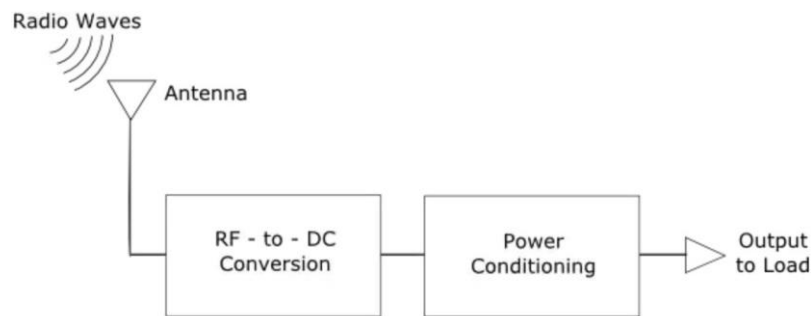
Τα τελευταία χρόνια τα ασύρματα δίκτυα γύρω μας αυξάνονται συνεχώς. Μετά τα τέλη της δεκαετίας του 1990 όταν εμφανιστήκαν τα κινητά 2<sup>ης</sup> γενιάς αυξήθηκε δραματικά η πληθυσμιακή κάλυψη καθώς τα κινητά άρχισαν να γίνονται ολοένα και πιο δημοφιλή. Το Wifi και τα υπόλοιπα πρωτόκολλα επικοινωνίας βοήθησαν στην κάλυψη σχεδόν όλου του πλανήτη με ραδιοσυχνότητες.

---

<sup>1</sup> <https://www.intechopen.com/books/thermoelectrics-for-power-generation-a-look-at-trends-in-the-technology/calculation-methods-for-thermoelectric-generator-performance>



Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ένα τυπικό σύστημα μετατροπής ραδιοσυχνοτήτων σε ενέργεια. [66]



Εικόνα 3.10 (RF Harvester circuit)[66]

Η πυκνότητα ισχύος για μια ζεύξη στον ελεύθερο χώρο χωρίς απώλειες ορίζεται από την εξίσωση:

$$S = \frac{PTX}{4\pi d^2} DTX = \frac{PEIRP}{4\pi d^2} \quad (1)$$

Όπου  $PTX$  η ισχύς εκπομπής,  $DTX$  η κατευθυντικότητα της κεραίας εκπομπής και  $d$  η απόσταση από τον πομπό. Ως  $PEIRP$  ορίζεται η ισοδύναμη ιστροπική ακτινοβολούμενη ισχύς η οποία ορίζεται από τον τύπο

$$PEIRP = PTX * DTX \quad (2)$$

Για τον υπολογισμό της μέγιστης διαθέσιμης ενέργειας πρέπει να ορίσουμε την ενεργό επιφάνεια της κεραίας. Η ενεργός επιφάνεια ορίζεται από την εξίσωση:

$$Aeff = \frac{\lambda^2}{4\pi} DRX \quad (3)$$

Όπου  $DRX$  η κατευθυντικότητα της κεραίας του δέκτη. Η μέγιστη διαθέσιμη ισχύς λοιπόν ορίζεται από την εξίσωση

$$Pav = Aeff * S = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 * DRX * PEIRP \quad (4)$$

Οι προκλήσεις στον χώρο των γεννητριών μετατροπής ραδιοσυχνοτήτων σε ηλεκτρικό ρεύμα είναι πολύ μεγάλες καθώς η γεννήτρια πρέπει να είναι αρκετά κοντά στον πομπό ώστε να μπορεί να μετατρέψει ικανοποιητικό ποσοστό της εκπεμπόμενης ισχύος σε ηλεκτρική ενέργεια. Η εκπεμπόμενη ενέργεια ραδιοσυχνοτήτων μπορεί να είναι αρκετή,

αλλά στην παρούσα τεχνολογική στάθμη, η συνολική απόδοση είναι πολύ χαμηλότερη από οποιαδήποτε άλλη πηγή. Επίσης, ένα από τα προβλήματα που εμφανίζονται κατά τη σχεδίαση της εφαρμογής είναι η επιλογή της μπάντας συχνοτήτων που θα χρησιμοποιηθεί. Σε εφαρμογές εκτός αστικού περιβάλλοντος, το ενεργειακό περιεχόμενο από τις ραδιοσυχνότητες είναι πολύ μικρό. Στο μέλλον, όταν η κατανάλωση ενός τυπικού κόμβου IoT μειωθεί περαιτέρω, τότε πιθανότατα ο τομέας αυτός να γνωρίσει μεγαλύτερη άνθηση.

## 4. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ένα από τα βασικότερα προβλήματα μετά την μετατροπή ενέργειας σε ρεύμα, είναι η αποθήκευση της. Η αποθήκευση της ενέργειας μπορεί να χωριστεί σε δύο επιμέρους υποκατηγορίες. Την περιστασιακή και την μακροχρόνια. Πριν αποφασιστεί όμως η κατάλληλη μορφή, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη πολλοί παράγοντες. Ένας από τους βασικότερους είναι το μέγεθος του ίδιου του συστήματος. Ένας άλλος είναι η δυσκολία πρόσβασης που θα έχει ο χρήστης στο σύστημα ώστε να μπορεί να αντικαταστήσει την μπαταρία και πόσο συχνά θα χρειάζεται αυτό.

### 4.1 Περιστασιακή

Για την περιστασιακή αποθήκευση ενέργειας χρησιμοποιούνται οι υπερπυκνωτές. Οι υπερπυκνωτές είναι παθητικά στοιχεία όπως οι κανονικοί πυκνωτές με αρκετά μεγαλύτερη χωρητικότητα. Ένα βασικό τους χαρακτηριστικό είναι η πολύ μεγάλη πυκνότητα ισχύος. Οι υπερπυκνωτές χωρίζονται σε τρεις επιμέρους κατηγορίες.[67-70]

- Ηλεκτροστατικοί πυκνωτές διπλής στρώσης (EDLC)

Οι ηλεκτροστατικοί πυκνωτές διπλής στρώσης λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο που λειτουργούν και οι κανονικοί πυκνωτές. Η αποθήκευση της ενέργειας γίνεται με χημική αντίδραση, διαχωρίζοντας το φορτίο. Μπορούμε να υπολογίσουμε το φορτίο του λοιπόν με τη χρήση του τύπου  $C = \frac{Q}{V}$ , όπου C είναι η χωρητικότητα του πυκνωτή, Q είναι το φορτίο και V η τάση.

- Ηλεκτροχημικοί ψευδοπυκνωτές

Οι πυκνωτές της κατηγορίας αυτής παρουσιάζουν μεγαλύτερη πυκνότητα από τους προηγούμενους. Αυτό οφείλεται στη χρήση ηλεκτροδίων μεταλλικού οξειδίου ή άλλου αγωγίμου πολυμερούς με μεγάλη ψευδοχωρητικότητα επιπλέον της χωρητικότητας του διπλού στρώματος. Η ψευδοχωρητικότητα επιτυγχάνεται με την μεταφορά ηλεκτρονίων Faradaic με αντιδράσεις οξειδοαναγωγής, παρεμβολών ή ηλεκτροδιάτρησης.

- Υβριδικοί πυκνωτές

Τα τελευταία χρόνια έχουν εμφανιστεί πυκνωτές που παρουσιάζουν υβριδικές ιδιότητες. Ο πυκνωτής ιόντων για παράδειγμα, χρησιμοποιεί ηλεκτρόδια με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Το ένα εμφανίζει ηλεκτροστατική χωρητικότητα και το άλλο ηλεκτροχημικό δυναμικό.

Μερικά από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά ενός υπερπυκνωτή είναι:

- Χωρητικότητα

Η χωρητικότητα ενός υπερπυκνωτή είναι ίσως και το βασικό από τα χαρακτηριστικά του. Ισοδυναμεί με την αναλογία του ηλεκτρικού φορτίου ως προς τη διαφορά δυναμικού.

- Τάση λειτουργίας

Ένα άλλο βασικό χαρακτηριστικό είναι η τάση λειτουργίας. Η τιμή αυτή ισοδυναμεί με το εύρος τάσεων που μπορεί να λειτουργήσει σωστά ένας πυκνωτής.

- Εσωτερική Αντίσταση

Η εσωτερική αντίσταση δείχνει το χρόνο που χρειάζεται ένας ηλεκτρολυτικός πυκνωτής για να φορτίσει. Όσο μικρότερη τόσο το καλύτερο.

- Ρεύμα φορτίου

Το ρεύμα φορτίου σε έναν υπερπυκνωτή είναι η τιμή του μέγιστου στιγμιαίου φορτίου που μπορεί να εκφορτιστεί από αυτόν. Το ρεύμα αυτό μπορεί να είναι αρκετά μεγαλύτερο από αυτό της μπαταρίας.

- Ενεργειακή χωρητικότητα

Οι υπερπυκνωτές δημιουργήθηκαν με σκοπό να γεφυρώσουν το κενό μεταξύ πυκνωτών και μπαταριών. Η ενεργειακή χωρητικότητα μας δείχνει την ενέργεια που μπορεί να αποθηκευτεί μέσα σε αυτόν.

- Διάρκεια ζωής

Ένα επίσης βασικό χαρακτηριστικό των πυκνωτών έναντι των μπαταριών είναι η διάρκεια ζωής. Ένας υπερπυκνωτής μπορεί να αντέξει έως και 15 χρόνια λειτουργώντας σε θερμοκρασία δωματίου.

- Ρεύμα διάρροής

Το ρεύμα διαρροής ισοδυναμεί με τη διαρροή ενέργειας ενός υπερπυκνωτή όταν αυτός είναι σε κατάσταση αποθήκευσης.

## 4.2 Μακροχρόνια

Για την πιο αποθήκευση ηλεκτρικού ρεύματος για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα χρησιμοποιούμε τους ηλεκτρικούς συσσωρευτές ή μπαταρίες. Οι μπαταρίες είναι συσκευές οι οποίες αποθηκεύουν την ενέργεια σε χημική μορφή και την αποδεσμεύουν σε ηλεκτρικό ρεύμα. Υπάρχουν πολλά και διαφορετικά είδη μπαταριών, αυτές δύο όμως βασικές κατηγορίες, πρωτεύοντες και δευτερεύοντες.[71-73]

- Πρωτεύοντες

Πρωτεύοντες ή μη επαναφορτιζόμενες είναι οι μπαταρίες οι οποίες χρησιμοποιούνται καθημερινά στις περισσότερες συσκευές γύρω μας. Τα τελευταία χρόνια η αγορά των μπαταριών έχει επισκιάσει τις μη επαναφορτιζόμενες λόγω της μεγάλης και διαρκούς αύξησης της δημοτικότητας των δευτερευόντων. Οι μπαταρίες αυτές είναι κατασκευασμένες συνήθως από αλκαλικά υλικά. Παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα σε σχέση με τις επαναφορτιζόμενες. Η διάρκεια ζωής τους στο ράφι μπορεί να φτάσει και τα 10 χρόνια. Είναι κατάλληλες για εφαρμογές όπου η πρόσβαση στο σύστημα δεν είναι εύκολη ώστε να μπορούν να αντικατασταθούν και για εφαρμογές όπου η φόρτιση της μπαταρίας δεν είναι εφικτή.

- Δευτερεύοντες

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες. Καθημερινά τέτοιου είδους μπαταρίες χρησιμοποιούνται στα κινητά τηλέφωνα και σε πολλές άλλες συσκευές. Η μη ύπαρξη τέτοιων μπαταριών θα έκανε αρκετά πιο δύσκολη και πιο κοστοβόρα την καθημερινότητα του ανθρώπου. Οι πιο γνωστές από αυτές είναι οι:

-Οξέος μόλυβδου: οι μπαταρίες αυτού του τύπου είναι ιδιαίτερα φθηνές και έχουν περιορισμένους κύκλους ζωής. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε UPS, συστήματα συναγερμών κτλ. Είναι τοξικές για το περιβάλλον.

-Νικελίου-Καδμίου: οι μπαταρίες αυτές είναι φτιαγμένες για πιο heavy duty εφαρμογές. Έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και υψηλό ρεύμα αποφόρτισης. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε εργαλεία, ιατρικές εφαρμογές κτλ. Επίσης τοξικές για το περιβάλλον

-Νικελίου μετάλλου υδριδίου: οι μπαταρίες αυτές δημιουργήθηκαν με σκοπό να αντικαταστήσουν τις μπαταρίες Νικελίου-καδμίου. Έχουν μικρότερο περιβαλλοντολογικό αντίκτυπο καθώς είναι λιγότερο τοξικές από τις προηγούμενες. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε ιατρικές εφαρμογές και υβριδικά αυτοκίνητα.

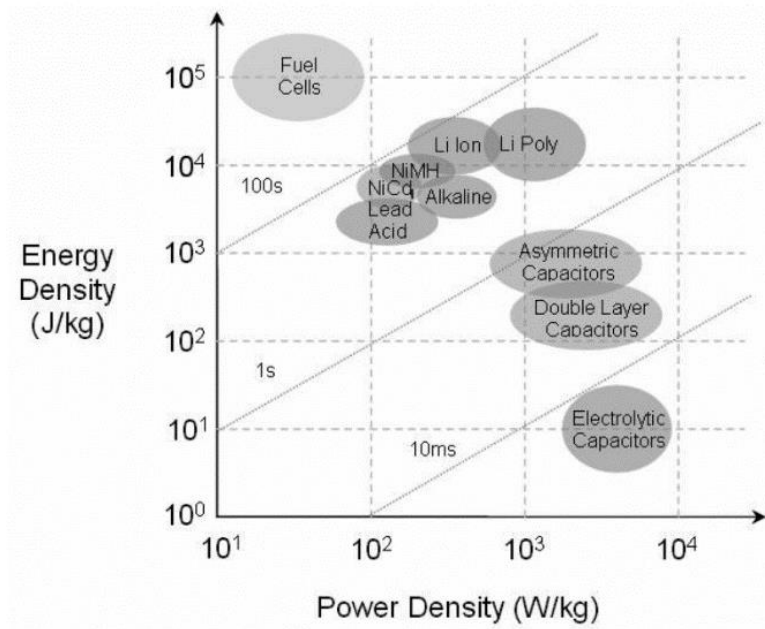
-Ιόντων λιθίου: οι μπαταρίες αυτές καλύπτουν κάθε μέρα όλο και περισσότερες ανάγκες που καλυπτόταν στο παρελθόν από τις προηγούμενες κατηγορίες. Είναι πιο ακριβές αλλά έχουν πολλούς κύκλους ζωής και χαμηλό κόστος συντήρησης.

-Πολυμερές λιθίου: είναι μια σχετικά νέα κατηγορία μπαταριών η οποία παρουσιάζει παρόμοια χαρακτηριστικά με αυτές των ιόντων λιθίου. Παρουσιάζουν όμως μεγαλύτερη ασφάλεια από τις τελευταίες. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε κινητά, tablet και drone.

Στην εικόνα 4.1 γίνεται ανάλυση των χαρακτηριστικών των κύριων τύπων επαναφορτιζόμενων μπαταριών. Στην εικόνα 4.2, διακρίνονται οι διαφορές μεταξύ μπαταριών και υπερπυκνωτών διαφόρων τύπων όσων αφορά την ενεργειακή πυκνότητα και την πυκνότητα ισχύος που προσφέρουν.

| Specifications                        | Lead Acid                                 | NiCd  | NiMH                 | Li-ion <sup>1</sup>                         |                   |              |
|---------------------------------------|---|---|----------------------|---|-------------------|--------------|
|                                       |   |   |                      | Cobalt                                      | Manganese         | Phosphate    |
| Specific energy (Wh/kg)               | 30–50                                     | 45–80   | 60–120               | 150–250                                     | 100–150           | 90–120       |
| Internal resistance                   | Very Low                                  | Very low                                      | Low                  | Moderate                                    | Low               | Very low     |
| Cycle life <sup>2</sup> (80% DoD)     | 200–300                                   | 1,000 <sup>3</sup>                            | 300–500 <sup>3</sup> | 500–1,000                                   | 500–1,000         | 1,000–2,000  |
| Charge time <sup>4</sup>              | 8–16h                                     | 1–2h  | 2–4h                 | 2–4h  | 1–2h              | 1–2h         |
| Overcharge tolerance                  | High                                      | Moderate                                      | Low                  | Low. No trickle charge                      |                   |              |
| Self-discharge/month (room temp)      | 5%  | 20% <sup>5</sup>                              | 30% <sup>5</sup>     | <5%<br>Protection circuit consumes 3%/month |                   |              |
| Cell voltage (nominal)                | 2V  | 1.2V <sup>6</sup>                             | 1.2V <sup>6</sup>    | 3.6V <sup>7</sup>                           | 3.7V <sup>7</sup> | 3.2–3.3V     |
| Charge cutoff voltage (V/cell)        | 2.40<br>Float 2.25                        | Full charge detection by voltage signature    |                      | 4.20 typical<br>Some go to higher V         |                   | 3.60         |
| Discharge cutoff voltage (V/cell, 1C) | 1.75V                                     | 1.00V   |                      | 2.50–3.00V                                  |                   | 2.50V        |
| Peak load current Best result         | 5C <sup>8</sup><br>0.2C                   | 20C<br>1C                                     | 5C<br>0.5C           | 2C<br><1C                                   | >30C<br><10C      | >30C<br><10C |
| Charge temperature                    | –20 to 50°C<br>(–4 to 122°F)              | 0 to 45°C<br>(32 to 113°F)                    |                      | 0 to 45°C <sup>9</sup><br>(32 to 113°F)     |                   |              |
| Discharge temperature                 | –20 to 50°C<br>(–4 to 122°F)              | –20 to 65°C<br>(–4 to 149°F)                  |                      | –20 to 60°C<br>(–4 to 140°F)                |                   |              |
| Maintenance requirement               | 3–6 months <sup>10</sup><br>(toping chg.) | Full discharge every 90 days when in full use |                      | Maintenance-free                            |                   |              |
| Safety requirements                   | Thermally stable                          | Thermally stable, fuse protection             |                      | Protection circuit mandatory <sup>11</sup>  |                   |              |
| In use since                          | Late 1800s                                | 1950  | 1990                 | 1991  | 1996              | 1999         |
| Toxicity                              | Very high                                 | Very high                                     | Low                  | Low   |                   |              |
| Coulombic efficiency <sup>12</sup>    | ~90%                                      | ~70% slow charge<br>~90% fast charge          |                      | 99%   |                   |              |
| Cost                                  | Low                                       | Moderate                                      |                      | High <sup>13</sup>                          |                   |              |

Εικόνα 4.1 Χαρακτηριστικά επαναφορτιζόμενων μπαταριών[71]



Εικόνα 4.2 Ενεργειακή πυκνότητα/πυκνότητα ισχύος μπαταριών και υπερπυκνωτών[72]



## 5.ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει περαιτέρω ανάλυση στις θερμοηλεκτρικές γεννήτριες, τα υλικά κατασκευής τους και τις επιδόσεις τους. Όπως φαίνεται στις εικόνες 3.3 και 3.5, τόσο για τα φωτοβολταϊκά όσο και για τα πιεζόηλεκτρικά έχει γίνει αρκετή έρευνα και τείνουν να κορεστούν. Για την αξιολόγηση ενός RF Harvester απαιτείται ειδικός εξοπλισμός ο οποίος δεν ήταν διαθέσιμος. Ο κύριος λόγος λοιπόν για την επιλογή της συγκεκριμένης μορφής ενέργειας ήταν η ύπαρξη υλικοτεχνικού εξοπλισμού. Παρατηρήθηκε επίσης η έλλειψη έρευνας σε συνθήκες χαμηλής θερμοκρασιακής διαφοράς και το μεγάλο περιθώριο αυτής. Θα κατασκευαστεί λοιπόν πειραματική μέθοδος αξιολόγησης μια γεννήτριας του εμπορίου. Θα υλοποιηθούν μετρήσεις και θα γίνει ανάλυση των αποτελεσμάτων.

### 5.1 Υλικά κατασκευής/Τυπικές επιδόσεις

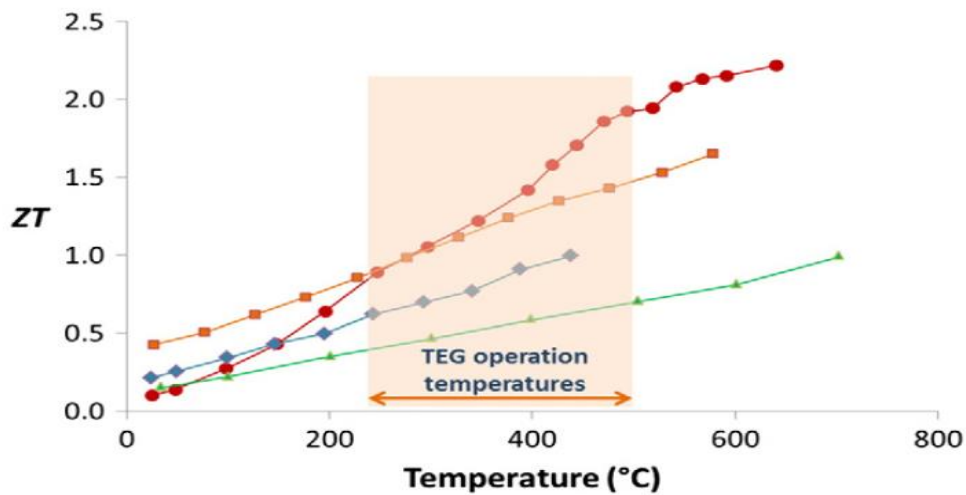
Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο μια θερμοηλεκτρική γεννήτρια εκμεταλλεύεται το φαινόμενο Seebeck για την απευθείας μετατροπή της θερμότητας σε ηλεκτρικό ρεύμα. Για να επιτευχθεί αυτό, μια γεννήτρια κατασκευάζεται από p και n στοιχεία διαφόρων υλικών με αντίστοιχες αποδόσεις. Για την κατασκευή χρησιμοποιούνται διάφορα χημικά στοιχεία όπως το βισμούθιο, το τελούριο το αντιμόνιο, το σελίνιο και το λανθάνιο. Κάθε ένα από τα συνδυασμούς των στοιχείων αυτών λειτουργεί υπό συγκεκριμένες θερμοκρασίες.[65]

| Operating Temperature, °C | Type | Materials                                   | Maximum ZT |
|---------------------------|------|---|------------|
| < 150                     | p    | $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ | 1.4        |
|                           | n    | $\text{Bi}_2\text{Se}_{0.3}\text{Te}_{2.7}$ | 1.0        |
|                           | p,n  | $\text{Bi}_2\text{Te}_3$                    | 0.8        |
| 150-500                   | p    | $\text{Zn}_4\text{Sb}_3$                    | -          |
|                           | p,n  | PbTe  | 0.7-0.8    |
|                           | p    | TeAgGeSb                                    | 1.2        |
| 500-700                   | p    | $\text{CeFe}_4\text{Sb}_2$                  | 1.1        |
|                           | n    | CoSb <sub>3</sub>                           | 0.8        |
| 700-900                   | p,n  | SiGe  | 0.6-1.0    |
|                           | p    | LaTe  | 0.4        |

Εικόνα 5.1 Χημικοί συνδυασμοί για την κατασκευή TEG[65]

Στην παραπάνω εικόνα φαίνονται κάποιοι από τους συνδυασμούς των προαναφερθέντων στοιχείων μαζί με τις θερμοκρασίες λειτουργίας και τον αριθμό αξιών. Ο αριθμός αυτός ορίζεται ως  $ZT = \frac{S^2}{\rho \cdot \kappa}$

Όπου S είναι ο συντελεστής Seebeck, T είναι η απόλυτη θερμοκρασία, ρ ορίζεται η ηλεκτρική αντίσταση και κ η θερμική αγωγιμότητα.[74-76,79]



Διάγραμμα 5.1 Μεταβολή ZT προς θερμοκρασία<sup>2</sup>

Όπως απεικονίζεται και στο παραπάνω διάγραμμα η τιμή του ZT δεν μεταβάλλεται σε χαμηλές θερμοκρασίες.

Στις μετρήσεις μας θα χρησιμοποιήσουμε το SP1848-27145 .



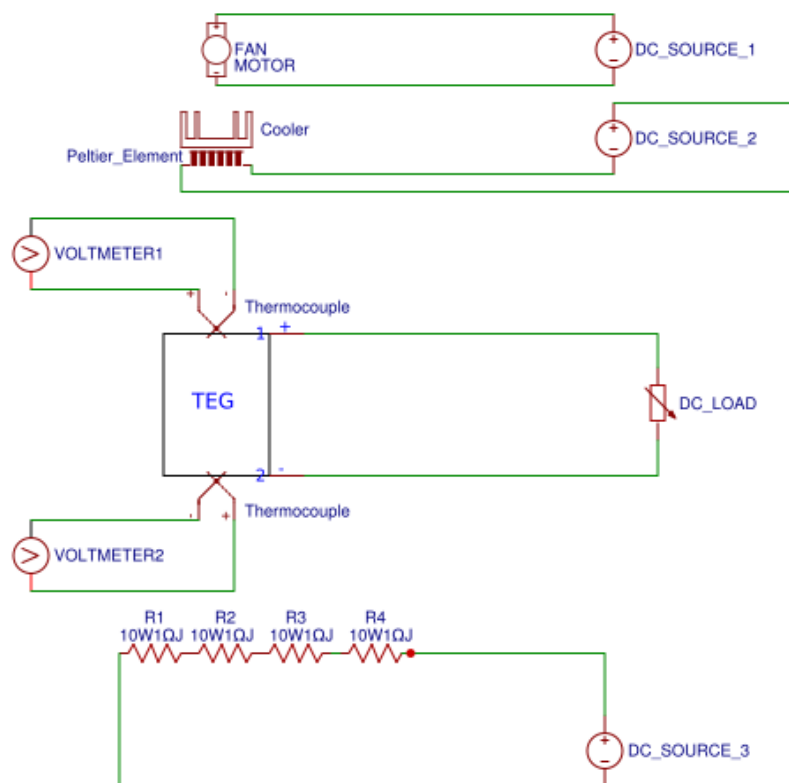
Εικόνα 5.2 SP1848-27145 TEG Appendix[F]

Είναι κατασκευασμένο από τελλουρίο και βισμούθιο και έχει κεραμική επικάλυψη για την γρήγορη και χωρίς απώλειες ροή θερμότητας αναμεσά του. Οι τυπικές επιδόσεις σύμφωνα με το datasheet είναι οι ακόλουθες:

- Temperature difference of 20 degrees: open circuit voltage 0.97V, power current: 225MA
- Temperature difference of 40 degrees: open circuit voltage 1.8V, power current: 368MA
- Temperature difference of 60 degrees: open circuit voltage 2.4V, power current: 469MA
- Temperature difference of 80 degrees: open circuit voltage 3.6V, power current: 558MA
- Temperature difference of 100 degrees: open circuit voltage 4.8V, power current: 669MA

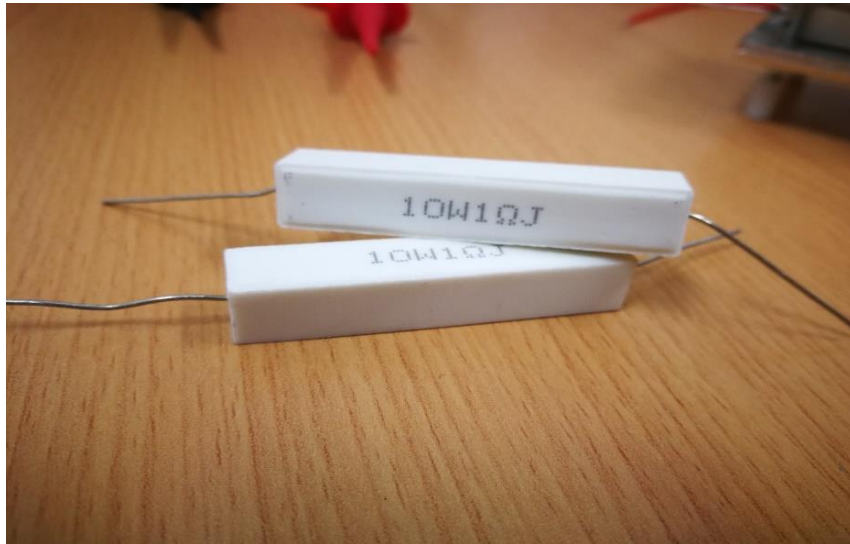
## 5.2 Πειραματική μέθοδος αξιολόγησης

Για την αξιολόγηση της γεννήτριας κατασκευάστηκε πειραματική διάταξη για την διατήρηση ή μεταβολή της θερμοκρασίας σε οποιαδήποτε από τις δύο επιφάνειες του TEG ξεχωριστά. Για τη σωστή αξιολόγηση, μετράται η θερμοκρασία πάνω στις επιφάνειες του TEG για να υπολογίζεται με ακρίβεια η συνολική διαφορά θερμοκρασίας. Η συνολική διάταξη μαζί με τα όργανα απεικονίζεται στην ακόλουθη εικόνα.



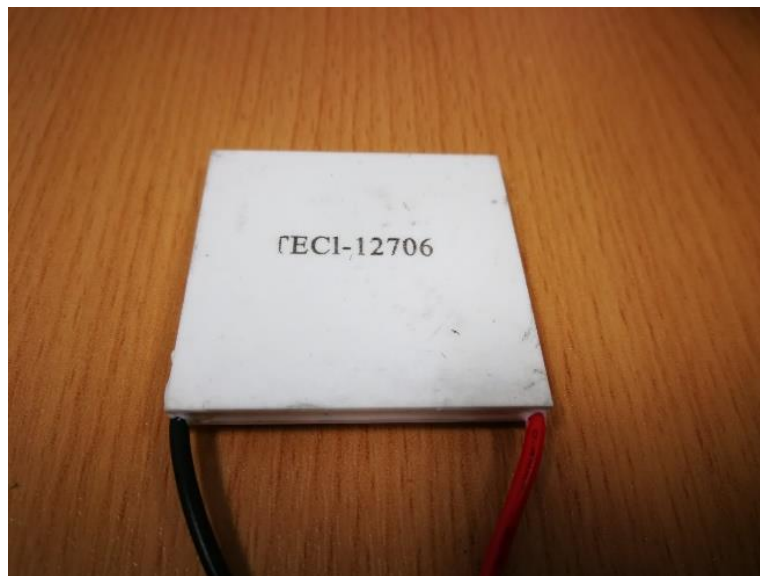
Εικόνα 5.3 Κύκλωμα αξιολόγησης

Για την ζεστή πλευρά χρησιμοποιήθηκαν αντιστάσεις τύπου MICA ισχύος 10W.



Εικόνα 5.4 Κεραμικές αντιστάσεις

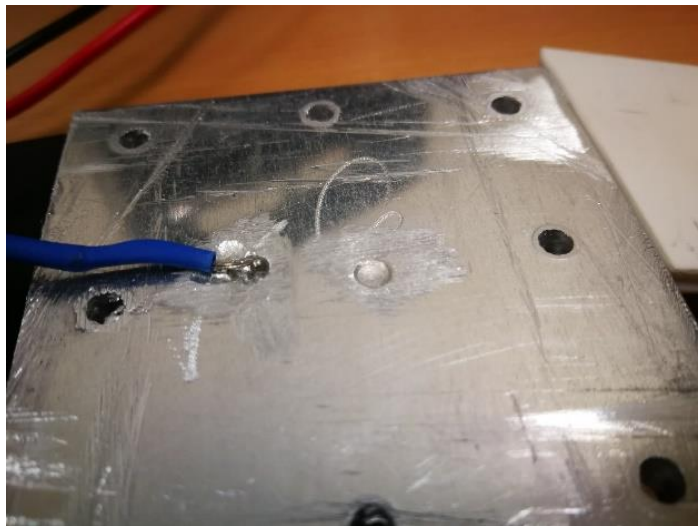
Για την κρύα πλευρά του TEG χρησιμοποιήθηκε συσκευή Peltier ή Thermoelectric cooler, και συγκεκριμένα το μοντέλο TEC-12706.



Εικόνα 5.5 Thermoelectric cooler

Οι συσκευές αυτές έχουν τη δυνατότητα να δημιουργούν διαφορές θερμοκρασίας ανάλογα με την τάση και το ρεύμα τροφοδοσίας τους. Η συγκεκριμένη έχει μέγιστη τάση τα 12V και μέγιστο ρεύμα τα 6A. Η διαφορά που δημιουργείται δεν μπορεί να υπερβαίνει τους 20 βαθμούς Celsius. Για να μειώσουμε λοιπόν τη θερμοκρασία στη κρύα πλευρά, τοποθετήσαμε πάνω στη ζεστή πλευρά μια ψύκτρα.

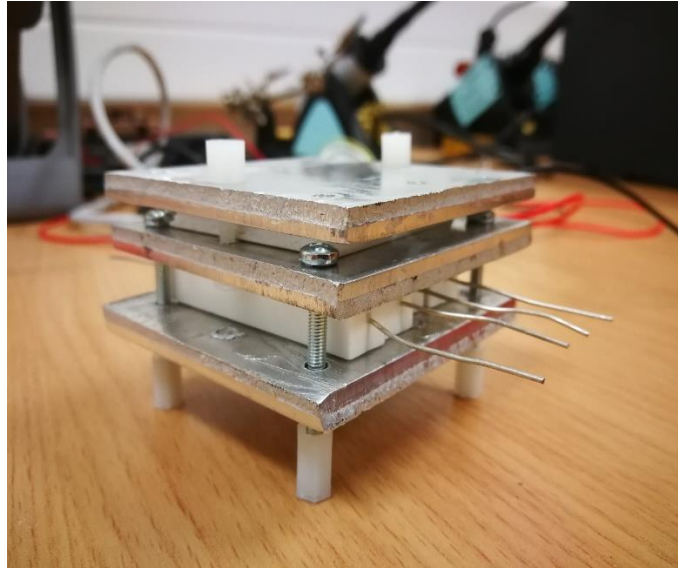
Αφού ήταν δυνατός ο έλεγχος της θερμοκρασία στις δύο πλευρές, αποφασίσαμε να τοποθετήσουμε ανάμεσα τους μια πλάκα αλουμινίου πάχους 0.5cm ώστε να μπορεί να κατανεμηθεί ομοιόμορφα η θερμότητα. Για να μπορέσουμε όμως να μετρήσουμε με ακρίβεια την θερμοκρασία στα άκρα του TEG έπρεπε να προσαρμόσουμε πάνω σε αυτές ένα θερμοηλεκτρικό στοιχείο. Σκαλίσαμε λοιπόν τα δυο κομμάτια του αλουμινίου που θα ακουμπάει η γεννήτρια και στη συνέχεια τοποθετήσαμε το θερμοηλεκτρικό στοιχείο και καλύψαμε το κενό με θερμοαγώγιμη πάστα.



Εικόνα 5.6 Προσθήκη thermocouple

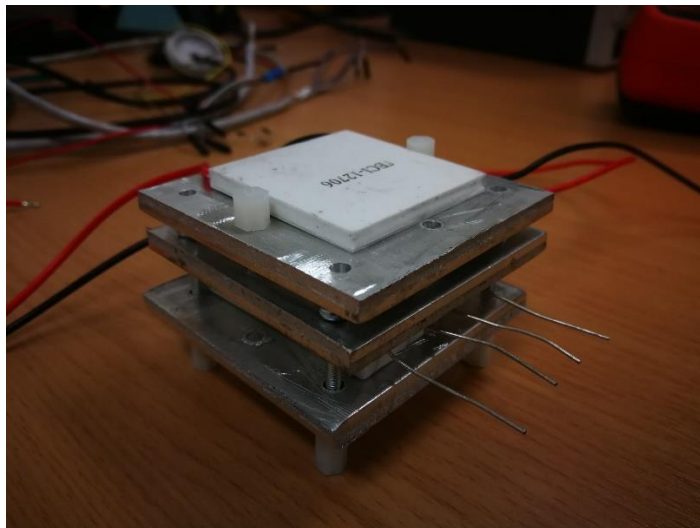
Αφού συλλέξαμε όλα τα υλικά που χρειαζόμαστε και τοποθετήσαμε τους αισθητήρες, ήρθε η ώρα για την τελικά συναρμολόγηση. Για να αποφευχθεί η διαρροή θερμότητας από τις αντιστάσεις προς την κρύα πλευρά μέσω των βιδών που συγκρατούν τη διάταξη, χρησιμοποιήσαμε πλαστικές βίδες για να συγκρατήσουμε το TEG με τις πλάκες αλουμινίου.

Η διάταξη μετά τη συναρμολόγηση έχει την εξής εικόνα.



Εικόνα 5.7 Διάταξη μετά τη συναρμολόγηση

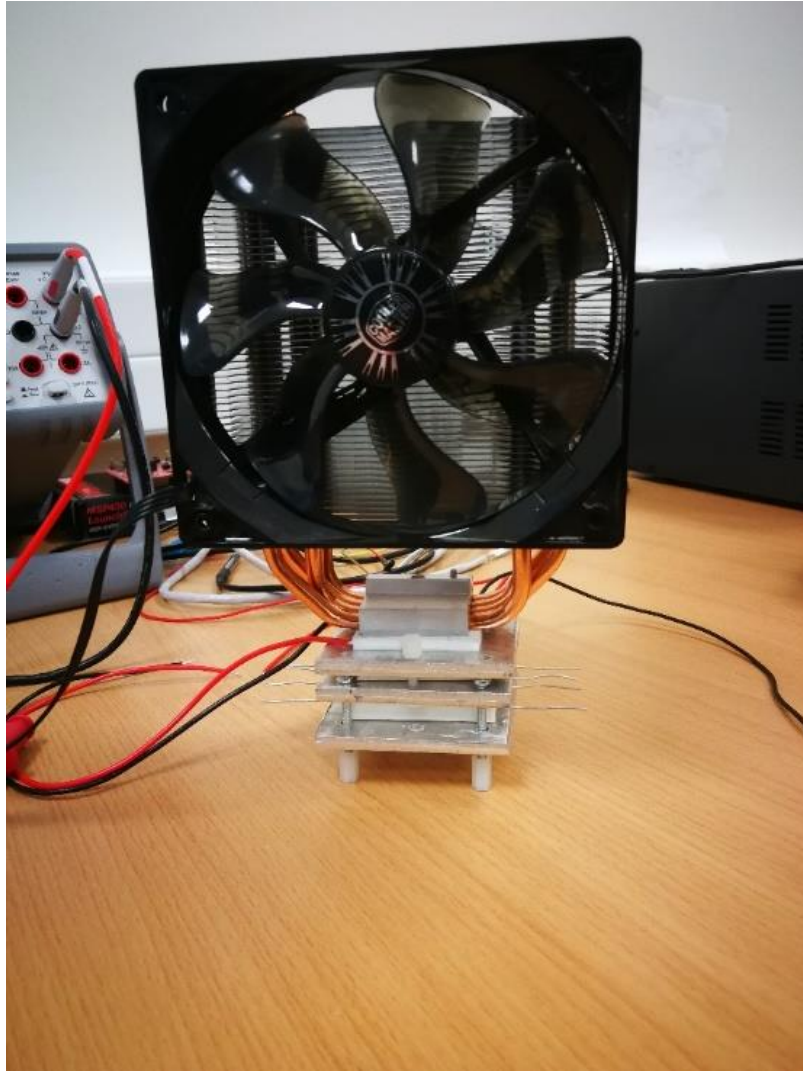
Στις βίδες που ενώνουν τις πλάκες αλουμινίου που συγκρατούν τις αντιστάσεις, προσθέσαμε πλαστικά ποδαράκια για να αποφευχθεί οποιοσδήποτε κίνδυνος φωτιάς. Αφού λοιπόν ετοιμάστηκε η ζεστή πλευρά της γεννήτριας, ακουμπήσαμε τη συσκευή Peltier πάνω στο αλουμίνιο που ακουμπάει την κρύα πλευρά.



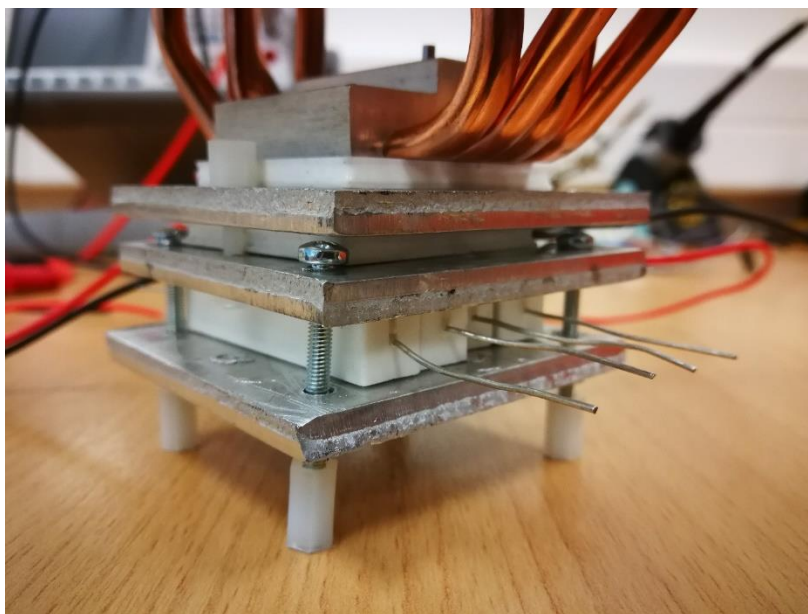
Εικόνα 5.8 Τοποθέτηση Peltier module

Τέλος, προσθέσαμε την ψύκτρα πάνω από τη συσκευή Peltier ώστε να μπορούμε να ψύχουμε τη ζεστή πλευρά του.

Η τελική διάταξη έχει την εξής μορφή



Εικόνα 5.9 Πλήρης διάταξη



Εικόνα 5.10 Πλήρης διάταξη

### 5.3 Υλοποίηση μετρήσεων

Για την υλοποίηση των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε όργανα και εξοπλισμός του Εργαστηρίου Αυτόνομων Υπολογιστικών Συστημάτων του Πανεπιστημίου.

Χρησιμοποιήθηκαν:

- Πολύμετρο της Keysight (Model 34465A) για μέτρηση θερμοκρασίας στην θερμή πλευρά του TEG. Το πολύμετρο αυτό καταγράφει θερμοκρασίες με τη χρήση θερμοζεύγους με ακρίβεια δύο δεκαδικά ψηφία.



Εικόνα 5.11 Keysight 34465A Multimeter

- Πολύμετρο της Keithley (Model 2110) για μέτρηση θερμοκρασίας στην θερμή πλευρά του TEG. Το πολύμετρο αυτό καταγράφει θερμοκρασίες με τη χρήση θερμοζεύγους με ακρίβεια δύο δεκαδικά ψηφία.



Εικόνα 5.12 Keithley 2110 Multimeter



- Τροφοδοτικό DC της Keysight (Model E3632A) για την τροφοδοσία των αντιστάσεων που χρησιμοποιούνται για τη αύξηση της θερμοκρασίας της θερμής πλευράς.



Εικόνα 5.13 Keysight E3632A Power Supply

- Ένα τροφοδοτικό της Rigol DP832A τριών καναλιών για την τροφοδοσία του Peltier Cooler και των ανεμιστήρων που χρησιμοποιούνται στην κρύα πλευρά της γεννήτριας. (V+A)



Εικόνα 5.14 Rigol DP832A Power Supply

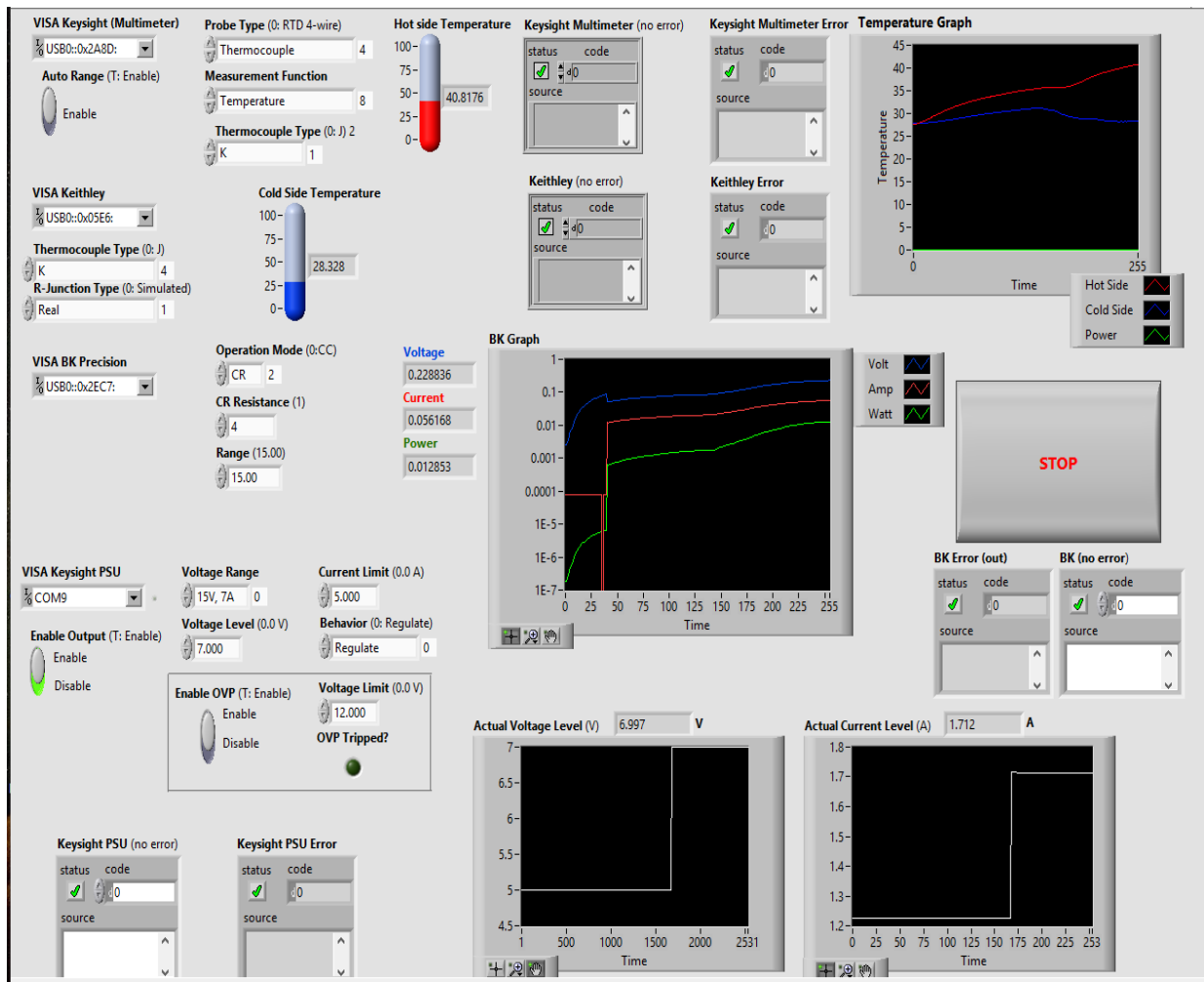
- Ένα ηλεκτρονικό φορτίο της BK Precision (Model 8601) το οποίο προσομοιώνει το φορτίο στην έξοδο του TEG. Το φορτίο ιδανικά πρέπει να εξασφαλίζει MPPT. Στην περίπτωση των θερμοηλεκτρικών γεννητριών τα φορτία αυτά είναι ωμικά με τέτοιες τιμές ώστε να ορίζουν την τάση λειτουργίας στο 50% της τάσης ανοιχτού κύκλου. Στην περίπτωση του SP1848, εμπειρικά ευρέθη ότι το ιδανικό φορτίο είναι σε συνεχή αντίσταση 4Ω.



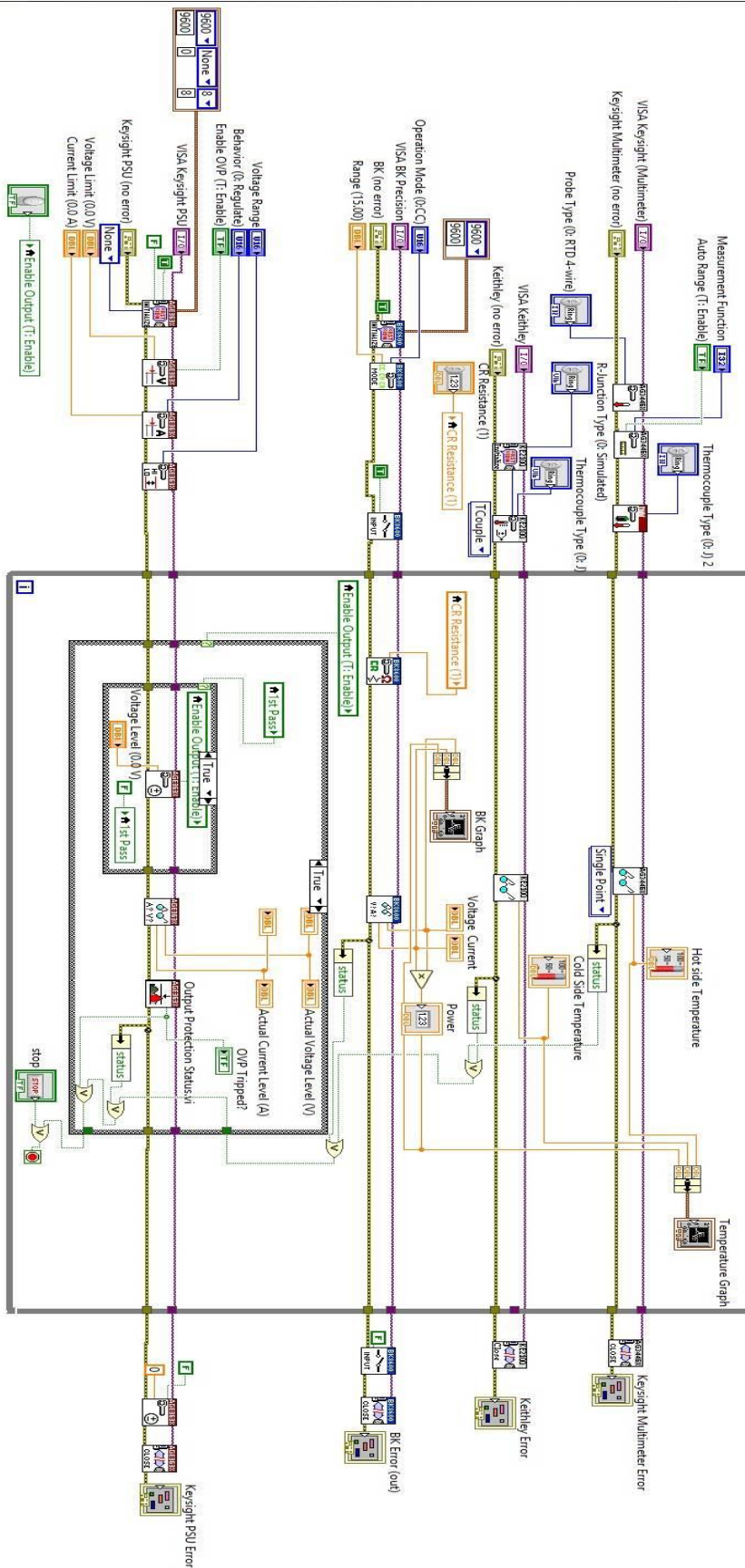
Εικόνα 5.15 BK Precision 8601 DC Electronic Load

Το όργανο του φορτίου ωστόσο εμφανίζει τιμές με ακρίβεια δύο δεκαδικών στοιχείων στην οθόνη του. Για την πιο ακριβή καταγραφή των μετρήσεων του τελευταίου, πρέπει αυτές να γίνονται μέσω υπολογιστή όπου η ακρίβεια φτάνει τα έξι δεκαδικά στοιχεία. Χρειάστηκε λοιπόν η χρήση ενός λογισμικού για την ταυτόχρονη λήψη μετρήσεων από όλα τα όργανα. Το πρόγραμμα που επιλέχθηκε ήταν το LabView της National Instruments. Επιλέχθηκε κυρίως για την μεγάλη υποστήριξη και την πλούσια σε drivers βάση δεδομένων που έχει η εταιρία. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι δεν ήταν εφικτή η σύνδεση του τροφοδοτικού της Rigol λόγω ασυμβατότητας των drivers. Για τα υπόλοιπα όργανα δημιουργήθηκε block διάγραμμα που υλοποιούσε την σύνδεση, αρχικοποίηση και λήψη μετρήσεων από το όργανο. Η σύνδεση όλων των οργάνων έγινε με USB εκτός του τροφοδοτικού της Keysight που έγινε με RS232. Μέσω του LabView η σύνδεση των οργάνων γίνεται με το πρωτόκολλο NI-Visa της ίδιας εταιρίας.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το συνολικό κύκλωμα που κατασκευάστηκε και το front panel μέσω του οποίου ο χρήστης διαχειρίζεται τα δεδομένα. Τα δεδομένα αποθηκεύονται προσωρινά στη μνήμη του προγράμματος και εμφανίζονται στα διαγράμματα που φαίνονται στην εικόνα 5.15. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να τα αποθηκεύσει με τη μορφή αρχείου excel μορφής .xlsx πατώντας πάνω στο κάθε διάγραμμα με τη επιλογή export.

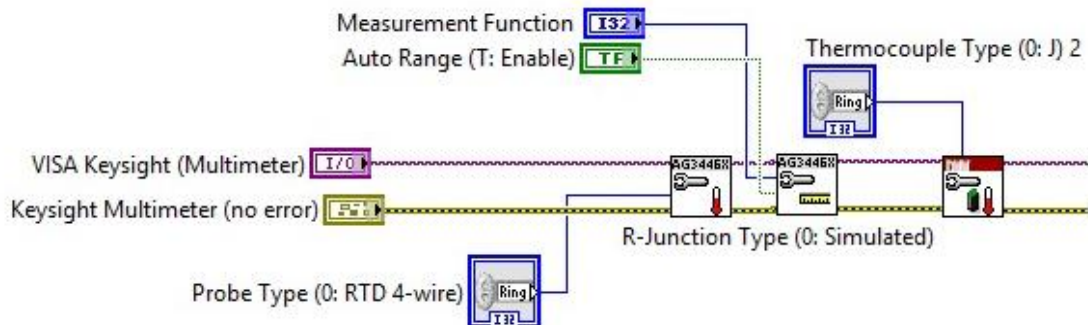


Εικόνα 5.16 Front panel κυκλώματος μετρήσεων



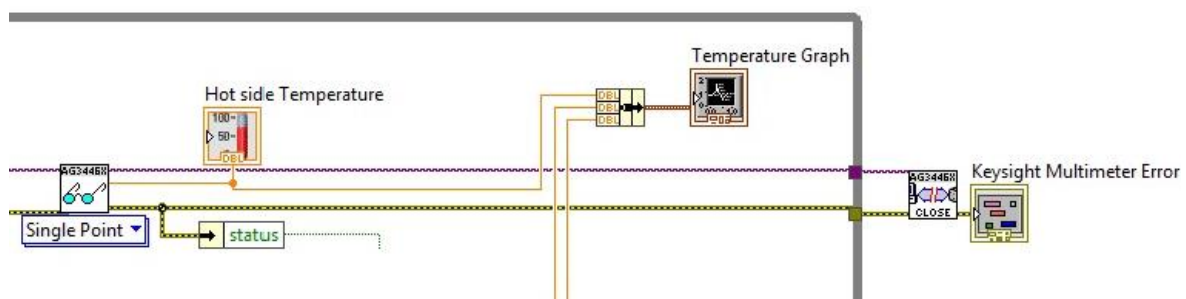
Εικόνα 5.17 Εσωτερικό κύκλωμα

## Keysight Multimeter



Εικόνα 5.18 Keysight Multimeter Initialization

Στην εικόνα 5.18 φαίνεται το block διάγραμμα σύνδεσης και αρχικοποίησης του πολύμετρου της Keysight. Με χρώμα μπλε εμφανίζονται τα block εκείνα τα οποία ορίζουν μια παράμετρο αρχικοποίησης την οποία επιλέγει ο χρήστης. Ο χρήστης επιλέγει την μέτρηση που θα κάνει το όργανο, στην περίπτωση αυτή, επιλέγεται η θερμοκρασία. Έπειτα επιλέγεται ο τύπος του ανιχνευτή που θα χρησιμοποιηθεί, στη περίπτωση αυτή επιλέγεται το Thermocouple. Και τέλος, το είδος του thermocouple, στην περίπτωση αυτή το “K type”. Με χρώμα μωβ εμφανίζεται η σύνδεση του block που ορίζει το πρωτόκολλο NI-Visa της National Instruments. Και με κίτρινο χρώμα εμφανίζονται τα block σφαλμάτων. Αξίζει να σημειωθεί ότι η σύνδεση τόσο του πρωτοκόλλου Visa όσο και των block σφαλμάτων γίνεται σε όλα τα block (από το block σύνδεσης μέχρι το block τερματισμού).

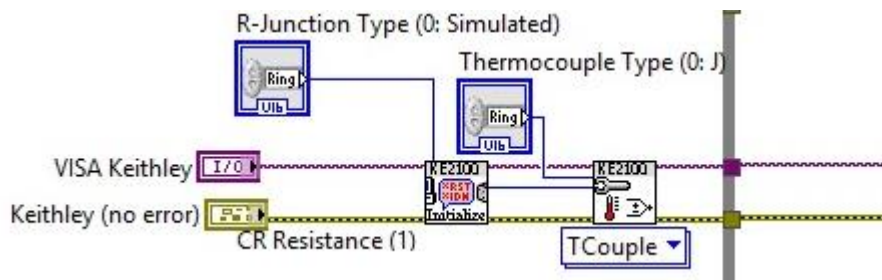


Εικόνα 5.19 Keysight multimeter read

Στην εικόνα 5.19 απεικονίζεται το block διάγραμμα που δείχνει την διαδικασία της ανάγνωσης τιμών από το όργανο. Αυτό πραγματοποιείται με τη χρήση του block “Single Point” που φαίνεται στα αριστερά. Ύστερα η τιμή που διαβάζεται αποθηκεύεται στο block

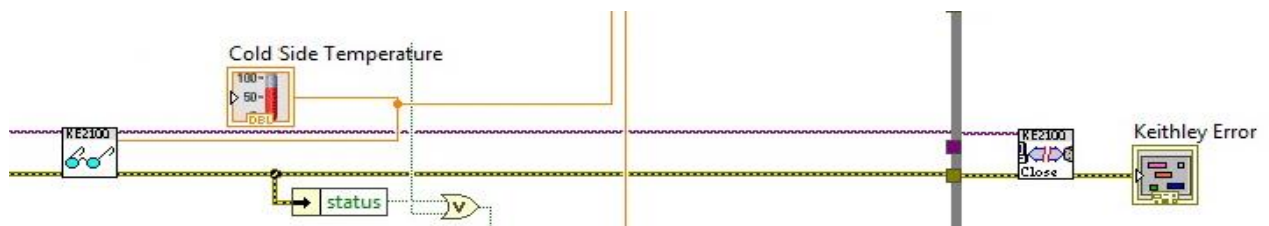
“Hot Side Temperature” και στη συνέχεια εμφανίζεται στο γράφημα των θερμοκρασιών. Το ορθογώνιο που εμφανίζεται εξωτερικά των block με χρώμα γκρι υποδηλώνει τα block εκείνα που βρίσκονται στο βρόγχο. Ο βρόγχος αυτός εκτελείται κάθε ένα δευτερόλεπτο. Τέλος, μετά το βρόγχο υπάρχουν τα block εκείνα που τερματίζουν τη σύνδεση του οργάνου.

## Keithley Multimeter



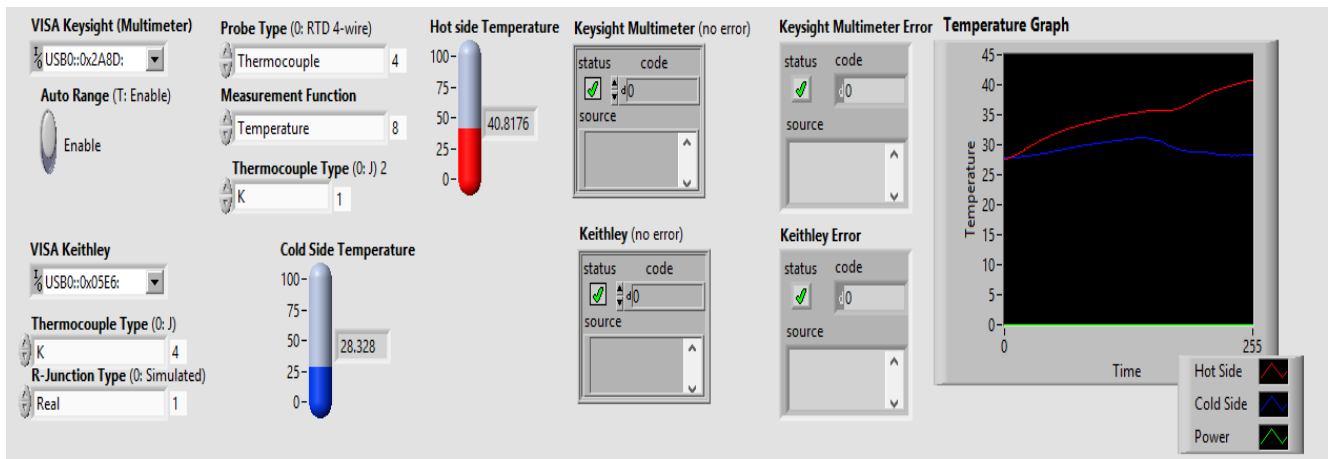
Εικόνα 5.20 Keithley Multimeter Initialization

Η διαδικασία αρχικοποίησης του πολύμετρου της Keithley είναι αντίστοιχη με αυτή του προηγούμενου. Αρχικά εισάγονται τα block για το πρωτόκολλο Visa και το block σφαλμάτων. Έπειτα εισάγεται το block επιλογής του thermocouple και των μετρήσεων που θα λαμβάνει αυτό. Κάθε όργανο διαφορετικό τρόπο αρχικοποίησης κάποιων μεταβλητών. Στην περίπτωση του Keithley, η επιλογή για την ανάγνωση θερμοκρασίας γίνεται απευθείας με τη χρήση του αντίστοιχου block οπότε ο χρήστης πρέπει απλά να επιλέξει τον τύπο του thermocouple. Το block R-Junction Type, προστέθηκε διότι υπήρχε πρόβλημα κατά την ανάγνωση της θερμοκρασίας. Το πολύμετρο μετά τη σύνδεση λειτουργούσε σε simulation mode με αποτέλεσμα η τιμή που εμφάνιζε να είναι διαφορετική της πραγματικής. Με τη χρήση του block αυτού, επιλέγεται να λειτουργεί σε real mode.



Εικόνα 5.21 Keithley multimeter Read

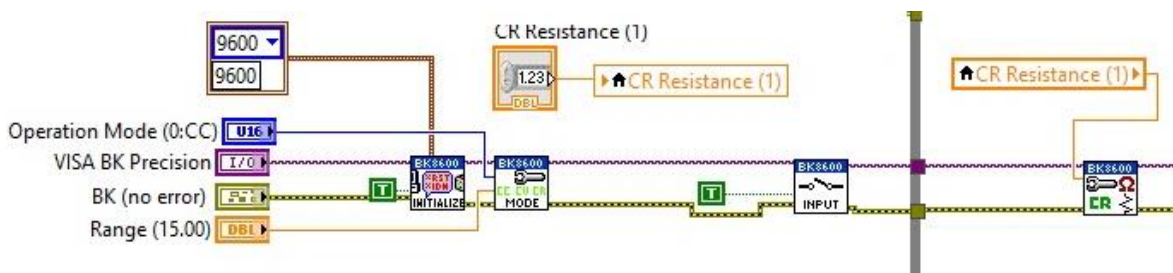
Η διαδικασία της ανάγνωσης είναι ακριβώς ίδια. Με τη χρήση του block Read διαβάζεται η τιμή από το όργανο και αποθηκεύεται στο block “Cold Side Temperature” και από εκεί εμφανίζεται στο block του γραφήματος.



Εικόνα 5.22 Front panel πολύμετρων

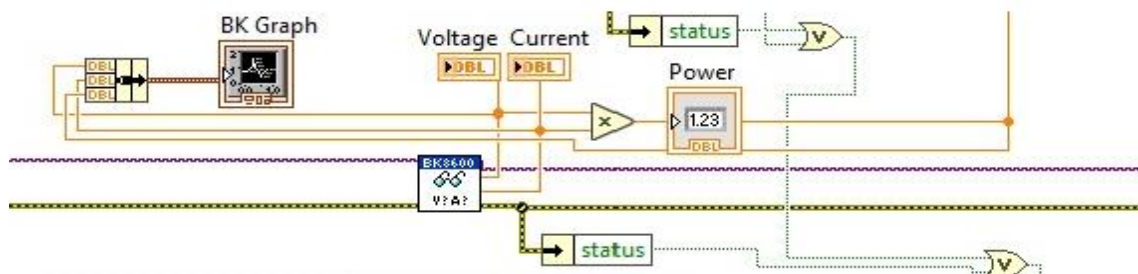
Στην εικόνα 5.22 φαίνεται η front panel των block διαγραμμάτων που έχουν δημιουργηθεί μέχρι αυτό το σημείο. Στο πάνω μέρος είναι οι επιλογές για το πολύμετρο της Keysight και στο κάτω οι επιλογές για το πολύμετρο της Keithley. Στα δεξιά της εικόνας φαίνεται το γράφημα των θερμοκρασιών όπου εμφανίζεται με κόκκινο η τιμή της θερμής πλευράς και μπλε η θερμοκρασία της κρύας.

### BK Precision Electronic Load



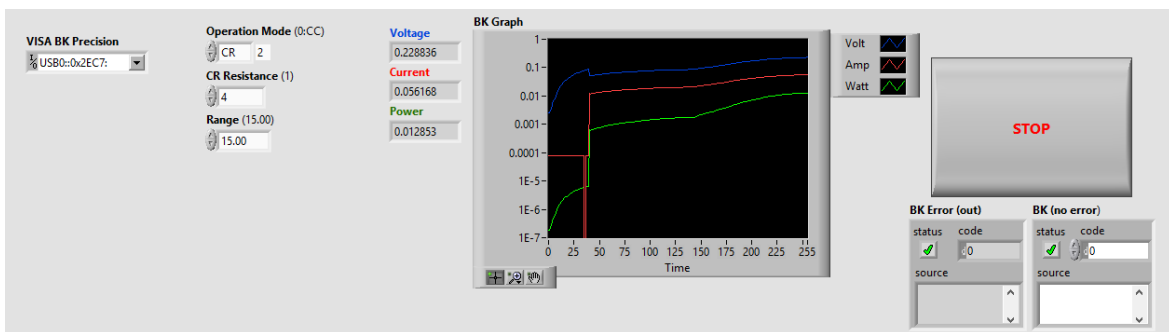
Εικόνα 5.23 BK Precision Electronic Load Initialization

Στην εικόνα 5.23 απεικονίζεται το block διάγραμμα αρχικοποίησης του οργάνου που προσομοιώνει το ηλεκτρονικό φορτίο στο πείραμα. Όπως και στα προηγούμενα όργανα χρειάζονται τα block για το πρωτόκολλο Visa και το block σφάλματος. Το όργανο αρχικοποιείται μέσω του “Operation Mode” να λειτουργεί σε Constant Resistance με τιμή  $R=4\Omega$ . Το block Range χρησιμοποιείται για τις λειτουργίες Constant Current και Constant Voltage. Ωστόσο για να λειτουργεί σωστά το κύκλωμα πρέπει να οριστεί στην τιμή 15.



Εικόνα 5.24 BK Precision Electronic Load Read

Στην εικόνα 5.24 απεικονίζεται το block διάγραμμα ανάγνωσης των τιμών τάσης και ρεύματος που παράγονται από τη γεννήτρια. Στη συνέχεια οι τιμές αυτές πολλαπλασιάζονται μεταξύ τους και απεικονίζονται σε γράφημα στο front panel.

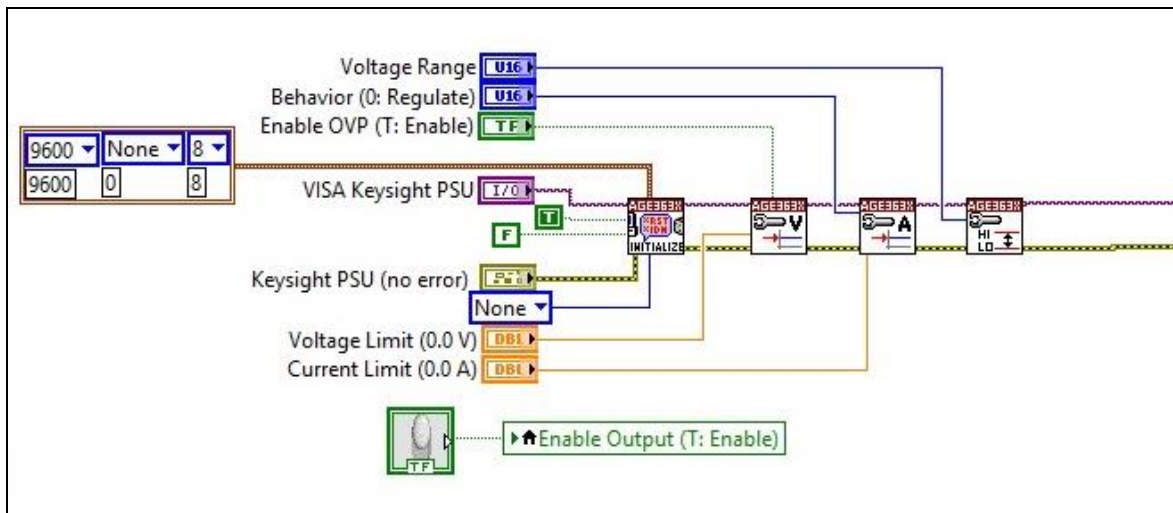


Εικόνα 5.25 BK Precision Electronic Load Front Panel

Στην εικόνα 5.25 απεικονίζεται το μέρος του front panel του χρήστη που αφορά το όργανο ηλεκτρονικού φορτίου. Στα αριστερά επιλέγουμε το όργανο από τη λίστα. Έπειτα επιλέγουμε τη λειτουργία του και τις υπόλοιπες ρυθμίσεις όπως προαναφέραμε. Το μεγάλο κουμπί στα δεξιά με όνομα STOP, χρησιμοποιείται για να τερματιστεί το πείραμα. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τιμές των μετρήσεων μπορούν να εξαχθούν απευθείας από τα γραφήματα σε αρχείο

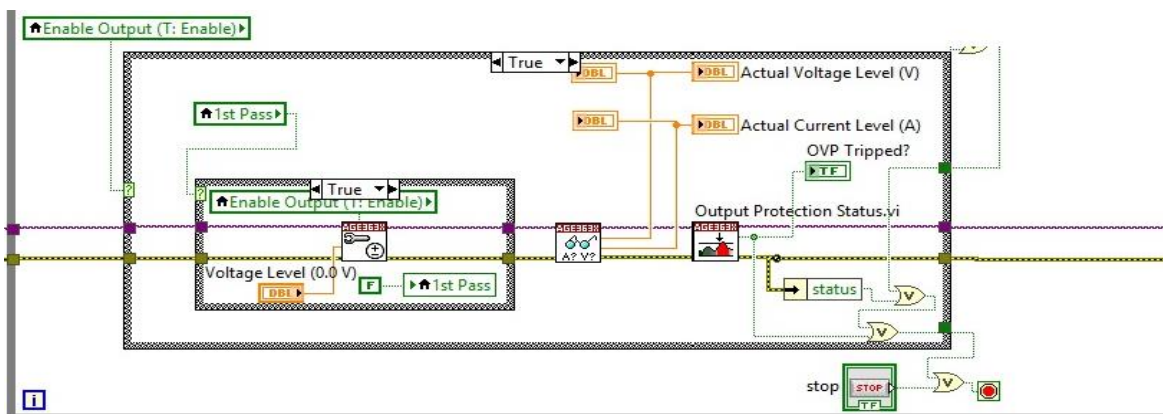


## Keysight DC Power Supply



Εικόνα 5.26 Keysight Power Supply Initialization

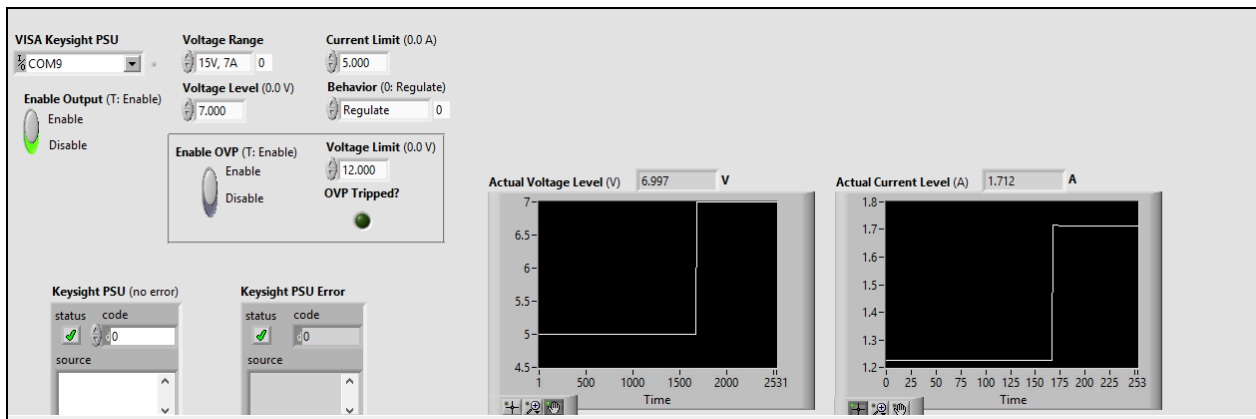
Τέλος δημιουργήθηκε το block διάγραμμα για το τροφοδοτικό της Keysight. Στην περίπτωση του τροφοδοτικού ρυθμίστηκε η αυτόματη επιλογή της λειτουργίας στα 15V, 7A και της συμπεριφοράς σε ρυθμιζόμενη. Έπειτα δημιουργήθηκαν τα block για την τάση, το ρεύμα, τη μέγιστη τάση, το μέγιστο ρεύμα και την λειτουργία προστασίας σε περίπτωση υπέρτασης. Προστέθηκε επίσης διακόπτης για την ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση της εξόδου του τροφοδοτικού κατά τη διάρκεια του πειράματος. Όλα αυτά τα block φαίνονται στην εικόνα 5.26.



Εικόνα 5.27 Keysight Power Supply Actuation

Στην εικόνα 5.27 φαίνεται το διάγραμμα λειτουργίας του τροφοδοτικού κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας. Πολλές από τις μεταβλητές ξαναδιαβάζονται από το

κύκλωμα κατά τη διάρκεια εκτέλεσης διότι μπορεί να έχουν αλλαχθεί από το χρήστη.



Εικόνα 5.28 Keysight Power Supply Front Panel

Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζεται το μέρος του front panel το οποίο αφορά το τροφοδοτικό. Πάνω αριστερά επιλέγεται το τροφοδοτικό από τη λίστα των οργάνων. Οι ρυθμίσεις Voltage Range και Behavior είναι προκαθορισμένες. Ο χρήστης επιλέγει τις τιμές των Voltage Level και Current Limit για την τροφοδοσία των αντιστάσεων. Έπειτα ρυθμίζει το Voltage Limit με τιμή μικρότερη του 15V και ενεργοποιεί το Over Voltage Protection. **Στο σημείο αυτό πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή να μην δοθεί μεγαλύτερη τάση και ρεύμα από αυτά που μπορούν να αντέξουν οι αντιστάσεις!** Υπάρχει επίσης στα αριστερά ο διακόπτης για την ενεργοποίηση και απενεργοποίηση της εξόδου. Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με οποιοδήποτε block που χρησιμοποιείται μπορεί κανείς να ανατρέξει στο Help Section του LabView ή να πιο απλά πατώντας δεξί κλικ πάνω στο εκάστοτε block και επιλέγοντας “Description &Tip”.

## 5.4 Ανάλυση μετρήσεων

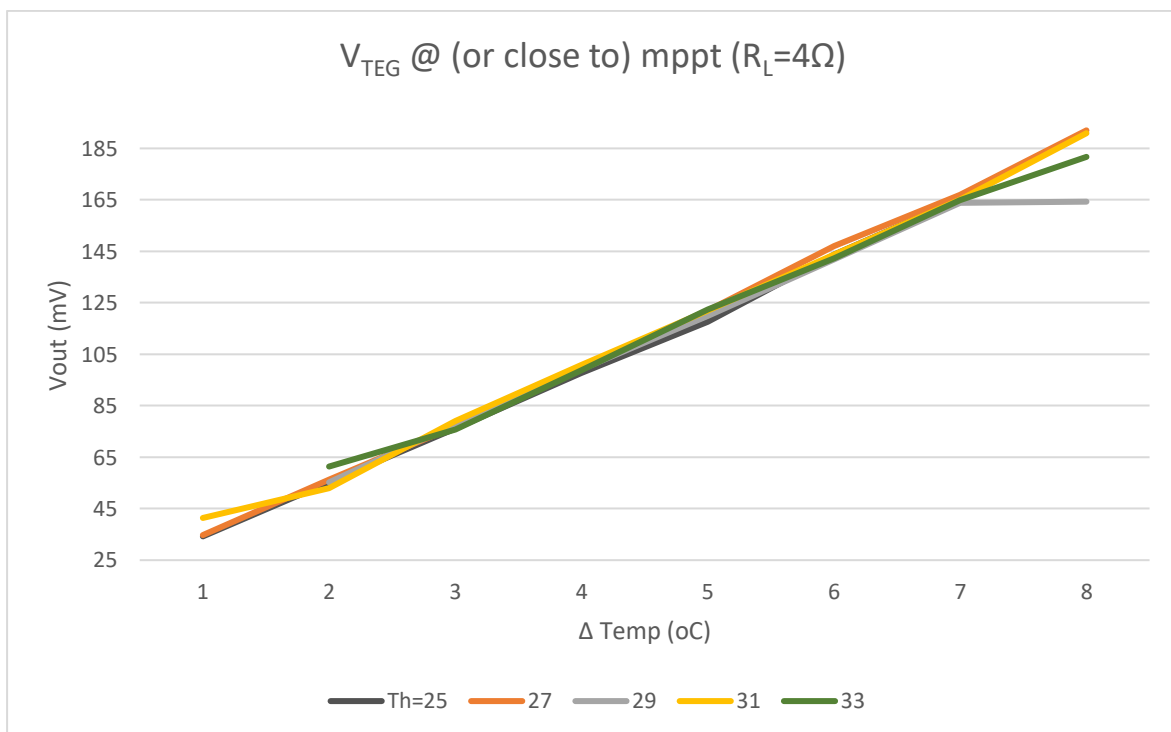
Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής της διάταξης μετρήσεων, πρέπει να οριστούν οι παράμετροι πριν αρχίσουν οι μετρήσεις.

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών παρατηρήθηκε ότι η σταθεροποίηση της κρύας πλευράς της γεννήτριας ήταν πιο γρήγορη από τη ζεστή. Αυτό συμβαίνει γιατί η συσκευή Peltier έχει πιο άμεση απόκριση σε σχέση με τις αντιστάσεις. Γι' αυτό αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί ως θερμοκρασία αναφοράς, η θερμοκρασία της θερμής πλευράς.

Στη συνέχεια μεταβάλαμε τη τάση της συσκευής Peltier και αφού σταθεροποιούσαμε τη θερμοκρασία και στις δύο πλευρές, κάναμε τις μετρήσεις. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων καταγράψαμε:

- Τη θερμοκρασία της θερμής πλευράς
- Τη θερμοκρασία της κρύας πλευράς
- Την τάση στα άκρα της γεννήτριας
- Την ισχύ που παράγει η γεννήτρια (ως αποτέλεσμα του πολλαπλασιασμού της τάσης επί το ρεύμα)

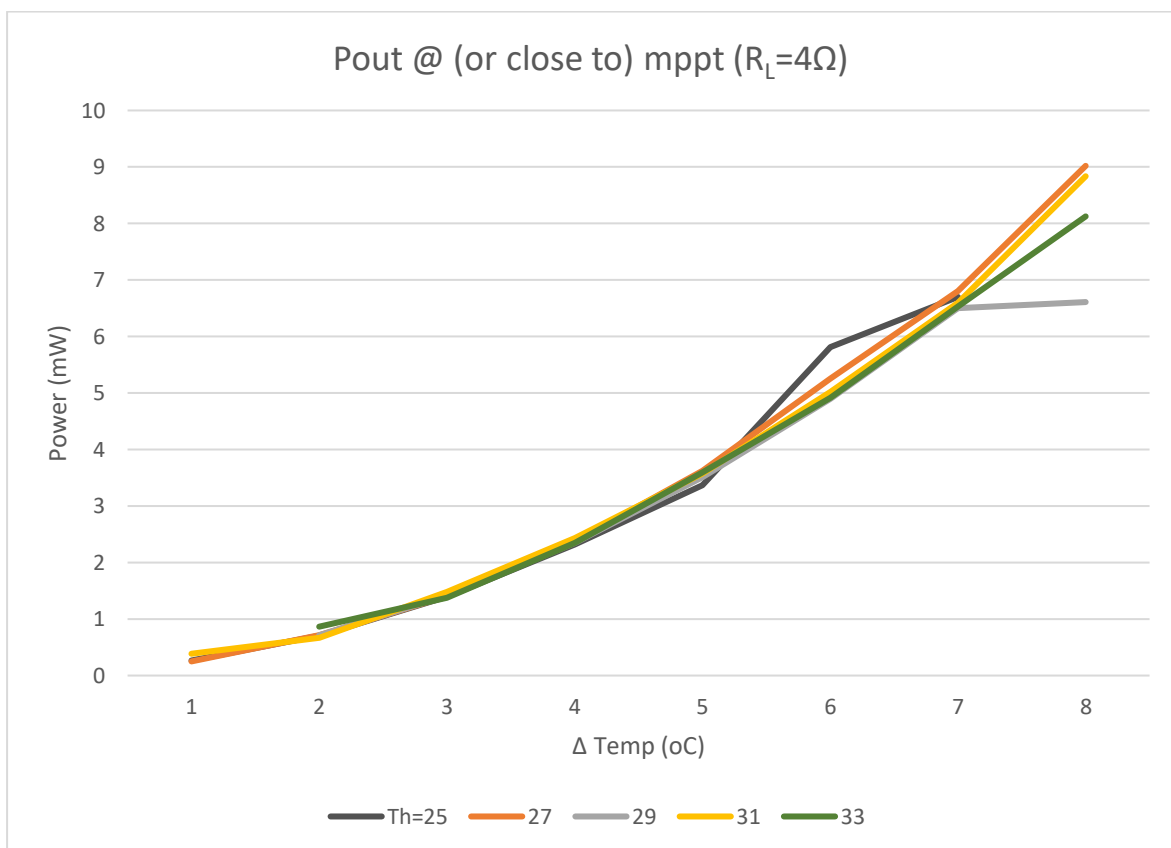
Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή του κεφαλαίου δόθηκε έμφαση στη μέτρηση της παραγόμενης ισχύος για χαμηλές θερμοκρασιακές διαφορές. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν για διαφορές  $1^{\circ}\text{C}$  έως  $9^{\circ}\text{C}$ . Τα αποτελέσματα των μετρήσεων απεικονίζονται στις παρακάτω γραφικές παραστάσεις. Τα αριθμητικά αποτελέσματα των μετρήσεων υπάρχουν στο Appendix G.



Διάγραμμα 1. Τάση εξόδου προς θερμοκρασιακή διαφορά

Στο διάγραμμα 1 παρατίθεται η τάση λειτουργίας του TEG με σταθερό ωμικό φορτίο, για διάφορες θερμοκρασίες και θερμοδιαφορές ( $\Delta$ )  $1^{\circ}\text{C}$  –  $8^{\circ}\text{C}$ . Προκύπτει ότι η έξοδος είναι ανεξάρτητη από την θερμοκρασία και αυξάνει γραμμικά στην περιοχή θερμοδιαφορών  $2^{\circ}\text{C}$  –  $7^{\circ}\text{C}$ . Οι μετρήσεις στην περιοχή θερμοδιαφορών  $2^{\circ}\text{C}$  –  $7^{\circ}\text{C}$  είναι σε συμφωνία με τα

θεωρητικώς αναμενόμενα και οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η τάση εξόδου εξαρτάται κυρίως από την διαφορά θερμοκρασίας και όχι από τις απόλυτες τιμές της. Συνεπώς, τα ηλεκτρονικά μετατροπής (DC/DC converters) μπορούν να σχεδιαστούν με παράμετρο την ελάχιστη τιμή τάσης για την εκκίνησή τους (και την προκύπτουσα ελάχιστη διαφορά θερμοκρασίας). Οι αποκλίσεις που παρατηρούνται για θερμοδιαφορά  $\Delta=8^{\circ}\text{C}$ , εικάζεται ότι οφείλονται σε αδυναμία του συστήματος μέτρησης και πρόκειται να ερευνηθούν περαιτέρω. Ως εκ τούτου πιθανολογείται ότι το μοντέλο εκτίμησης της τάσης εξόδου θα παραμείνει γραμμικό και για  $\Delta>8^{\circ}\text{C}$ .



Διάγραμμα 2. Ισχύς εξόδου προς θερμοκρασιακή διαφορά

Από τα παραπάνω διαγράμματα διακρίνουμε ότι η παραγόμενη ισχύς

Στο διάγραμμα 2 παρατίθεται η ισχύς εξόδου του TEG σε σταθερό ωμικό φορτίο, για διάφορες θερμοκρασίες και θερμοδιαφορές ( $\Delta$ )  $1^{\circ}\text{C} - 8^{\circ}\text{C}$ . Προκύπτει ότι η έξοδος είναι σχεδόν ανεξάρτητη από την θερμοκρασία με εξαίρεση την μέτρηση για θερμοκρασία  $T_h=25^{\circ}\text{C}$ . Οι μετρήσεις στην περιοχή θερμοδιαφορών  $3^{\circ}\text{C} - 7^{\circ}\text{C}$  είναι σχετικά χαμηλότερες από τις αναμενόμενες και υποδεικνύουν πιθανή αλλαγή της εσωτερικής αντίστασης του TEG

(με συνακόλουθη αναγκαιότητα υλοποίησης τεχνικής MPPT (maximum power point tracking) στον μετατροπέα DC/DC). Οι αποκλίσεις που παρατηρούνται για θερμοδιαφορά  $\Delta=8^{\circ}\text{C}$ , οφείλονται (τουλάχιστον εν μέρει) σε αδυναμία του συστήματος μέτρησης όπως διαπιστώθηκε στην μέτρηση τάσης εξόδου.

## 5.5 Συμπεράσματα και μελλοντικές εργασίες

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των διάχυτων μορφών ενέργειας (ambient energy) και αναλύονται τυπικοί συλλέκτες/μετατροπείς (energy harvesters). Μεγαλύτερη έμφαση δίνεται στην συλλογή θερμικής ενέργειας. Κατασκευάστηκε πειραματική διάταξη για την αξιολόγηση θερμοηλεκτρικής πηγής και έγιναν αυτοματοποιημένες μετρήσεις.

Αποδεικνύεται ότι είναι δυνατή η παραγωγή ισχύος στην περιοχή των mWs, ακόμη και από διαφορές θερμοκρασίας  $2^{\circ}\text{C}$ . Η μελέτη των μετρήσεων υποδεικνύει ότι είναι δυνατή η τροφοδοσία μικροσυσκευών από μικρά (και φθηνά) θερμοηλεκτρικά στοιχεία, προσθέτοντας έτσι μια ακόμη εναλλακτική επιλογή για την ενεργειακή αυτονομία φορητών συσκευών, όπως ιατρικοί αισθητήρες, αναλυτές φυσικής κατάστασης κ.α.

Συνολικά παρατηρήθηκε ότι η παραγόμενη ισχύς είναι μεγαλύτερη της (εμπειρικά) αναμενόμενης. Περαιτέρω, η συνεχής απόδοση ισχύος (εφόσον διατηρείται η θερμοδιαφορά) και η χρήση συσσωρευτών, επιτρέπει την λειτουργία συσκευών IoT με υπερπολλαπλάσια κατανάλωση (αλλά χαμηλό κύκλο φορτίου – duty cycle).

Συνεπώς, η χρήση της διάχυτης ροής θερμότητας ως πηγή για την αέναη τροφοδοσία μικροσυσκευών μπορεί να επεκταθεί πέραν του βιομηχανικού περιβάλλοντος, σε φορητές συσκευές και συσκευές IoT.

Χρειάζεται να καταβληθεί περαιτέρω προσπάθεια για την βελτίωση της ακρίβειας και του εύρους λειτουργίας της συσκευής μέτρησης και χαρακτηρισμού TEG χαμηλών θερμοδιαφορών. Βελτιώσεις μπορούν να επέλθουν με την εισαγωγή τεχνικών MPPT για τον υπολογισμό της βέλτιστης αντίστασης φορτίου για κάθε μέτρηση. Επίσης μπορεί να βελτιωθεί το εύρος επιτεύξιμων θερμοδιαφορών με καλύτερες συσκευές peltier, βελτιωμένους αλγόριθμους ελέγχου κ.ά.

## References

1. Agarwal, T., Agarwal, T.A.T., Agarwal, T., Saichand and Edgefx Technologies Pvt Ltd, 2014. *Home*. [online] Buy Electronics Electrical Projects in India. Available at: <<https://www.edgefx.in/embedded-systems-basics-with-applications/>> [Accessed 6 Jul. 2019].
2. 2019. *Typical Architecture of an Embedded System*. [online] Ebrary. Available at: <[https://ebrary.net/22041/computer\\_science/typical\\_architecture\\_embedded\\_system](https://ebrary.net/22041/computer_science/typical_architecture_embedded_system)> [Accessed 6 Jul. 2019].
3. 2019. *Difference between Microprocessor and Microcontroller*. [online] Electronics For You. Available at: <<https://electronicsforu.com/resources/difference-between-microprocessor-and-microcontroller>> [Accessed 6 Jul. 2019].
4. 2019. [online] Arduino Uno Rev3. Available at: <<https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>> [Accessed 6 Jul. 2019].
5. 2019. *MSP430F5529 USB LaunchPad Evaluation Kit MSP-EXP430F5529LP (ACTIVE)*. [online] MSP-EXP430F5529LP MSP430F5529 USB LaunchPad Evaluation Kit | TI.com. Available at: <<http://www.ti.com/tool/MSP-EXP430F5529LP>> [Accessed 6 Jul. 2019].
6. Marwedel, P., 2018. *Embedded System Design: Embedded Systems, Foundations of Cyber-Physical Systems, and the Internet of Things*. Cham: Springer International Publishing.
7. Ed, Bpat, Victor, Markmanson and Ferule, 2019. *Rheem Performance Platinum 65 gal. 10-Year Hybrid High Efficiency Smart Tank Electric Water Heater-XE65T10HD50U1*. [online] The Home Depot. Available at: <<https://www.homedepot.com/p/Rheem-Performance-Platinum-65-gal-10-Year-Hybrid-High-Efficiency-Smart-Tank-Electric-Water-Heater-XE65T10HD50U1/303419586>> [Accessed 13 Aug. 2019].
8. 2019. *ABS Control Module*. [online] Cars.com. Available at: <<https://www.cars.com/auto-repair/glossary/abs-control-module/>> [Accessed 13 Aug. 2019].
9. Iggydang, 2017. *A Guide to Fly-By-Wire*. [online] Infinite Flight Community. Available at: <<https://community.infiniteflight.com/t/a-guide-to-fly-by-wire/110427>> [Accessed 18 Jul. 2019].
10. 2019. *Smart Buildings*. [online] Exchange Communications. Available at: <<https://www.exchangecommunications.co.uk/products/smart-building-and-cities/smart-buildings.php>> [Accessed 13 Jul. 2019].
11. 2017. *Smart pacemakers recalled on cybersecurity concerns*. [online] Smart2.0. Available at: <<https://www.smart2zero.com/news/smart-pacemakers-recalled-cybersecurity-concerns>> [Accessed 7 Aug. 2019].
12. Nicholls, D., 2019. *Mini drones to be used by Army to spy on terrorists*. [online] The Telegraph. Available at: <<https://www.telegraph.co.uk/news/2019/03/05/mini-drones-will-used-army-spy-terrorists-inside-buildings-mod/>> [Accessed 7 Jul. 2019].
13. Fiona, 2017. *What is the impact of the Internet of Things (IoT)*. [online] Paxus Blog. Available at: <<https://www.paxus.com.au/blog/impact-internet-things-iot/>> [Accessed 7 Aug. 2019].
14. Μασκλαβάνος Ι, 2016. Σύστημα διαχείρισης και απομακρυσμένου ελέγχου αισθητήρων. TEI Ηπείρου.
15. 2019. *Gartner Hype Cycle: Internet of Things makes the list*. [online] Postscapes. Available at: <<https://www.postscapes.com/internet-of-things-added-to-the-2011-hype-cycle/>> [Accessed 7 Aug. 2019].
16. 2019. *Internet of Things (IoT) History*. [online] Postscapes. Available at: <<https://www.postscapes.com/internet-of-things-history/>> [Accessed 7 Aug. 2019].

17. 2018. *State of the IoT 2018: Number of IoT devices now at 7B – Market accelerating*. [online] IoT Analytics. Available at: <<https://iot-analytics.com/state-of-the-iot-update-q1-q2-2018-number-of-iot-devices-now-7b/>> [Accessed 8 Jul. 2019].
18. Bai, Y., 2016. *Practical microcontroller engineering with ARM technology*. Hoboken: John Wiley and Sons, Inc.
19. Ball, S.R., 2002. *Embedded microprocessor systems real world design*. Boston: Newnes.
20. Davies, J.H., 2013. *MSP430 microcontroller basics*. Oxford: Newnes.
21. 2018. *Difference Between RISC and CISC Architectures and its Applications*. [online] ElProCus. Available at: <<https://www.elprocus.com/difference-between-risc-and-cisc-architecture/>> [Accessed 8 Jul. 2019].
22. 2019. *RISC vs. CISC Architectures: Which one is better?* [online] Microcontroller Tips. Available at: <<https://www.microcontrollertips.com/risc-vs-cisc-architectures-one-better/>> [Accessed 8 Jul. 2019].
23. 2019. *What is Embedded Software? - Definition from Techopedia*. [online] Techopedia.com. Available at: <<https://www.techopedia.com/definition/29944/embedded-software>> [Accessed 8 Aug. 2019].
24. 2019. *What is embedded software? - Definition from WhatIs.com*. [online] IoT Agenda. Available at: <<https://internetofthingsagenda.techtarget.com/definition/embedded-software>> [Accessed 8 Aug. 2019].
25. 2019. *TinyOS Home Page*. [online] TinyOS Home Page. Available at: <<http://docs.tinyos.net/>> [Accessed 8 Aug. 2019].
26. 2019. *ESTCube-1*. [online] Wikipedia. Available at: <<https://en.wikipedia.org/wiki/ESTCube-1>> [Accessed 8 Aug. 2019].
27. OnionIoT, 2019. *OnionIoT/Onion-Docs*. [online] GitHub. Available at: <<https://github.com/OnionIoT/Onion-Docs/blob/master/Omega2/Kit-Guides/shared/pwm-details.md>> [Accessed 10 Aug. 2019].
28. Καλοβρέκτης, Κ. and Κατέβας, Ν., 2018. *ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ*. 3η Έκδοση ed. Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ.
29. 2018. *Αισθητήρας*. [online] Wikipedia. Available at: <<https://el.wikipedia.org/wiki/Αισθητήρας>> [Accessed 12 Aug. 2019].
30. Electrical4U, 2019. *Sensor: Types of Sensor*. [online] Electrical4U. Available at: <<https://www.electrical4u.com/sensor-types-of-sensor/>> [Accessed 13 Aug. 2019].
31. 2019. *Know about Different Types of Sensors with their Applications*. [online] WatElectronics.com. Available at: <<https://www.edgex.in/different-types-of-sensors-with-applications/>> [Accessed 13 Aug. 2019].
32. 2019. *DHT11 Humidity and Temperature Sensor*. [online] PotentialLabs. Available at: <<https://potentiallabs.com/cart/dht-11-humidity-and-temperature-sensor>> [Accessed 10 Aug. 2019].
33. 2019. *IoT Standards & Protocols Guide: 2019 Comparisons on Network, Wireless Comms, Security, Industrial*. [online] Postscapes. Available at: <<https://www.postscapes.com/internet-of-things-protocols/>> [Accessed 13 Aug. 2019].
34. Munjal, H., 2017. *Communication(Wireless) Protocols in IOT*. [online] Medium. Available at: <<https://medium.com/@hardy96tech/communication-wireless-protocols-in-iot-7da097ebbe96>> [Accessed 13 Aug. 2019].
35. Munjal, H., 2017. *Communication(Wireless) Protocols in IOT*. [online] Medium. Available at: <<https://medium.com/@hardy96tech/communication-wireless-protocols-in-iot-7da097ebbe96>> [Accessed 13 Aug. 2019].
36. Shaw, K., 2018. *802.11: Wi-Fi standards and speeds explained*. [online] Network World. Available at: <<https://www.networkworld.com/article/3238664/80211-wi-fi-standards-and-speeds-explained.html>> [Accessed 13 Aug. 2019].

37. 2019. *LoRa*. [online] Wikipedia. Available at: <<https://en.wikipedia.org/wiki/LoRa>> [Accessed 13 Aug. 2019].
38. 2019. *What is ZigBee? - Definition from Techopedia*. [online] Techopedia.com. Available at: <<https://www.techopedia.com/definition/4390/zigbee>> [Accessed 14 Aug. 2019].
39. 2019. *What is Zigbee? - Definition from WhatIs.com*. [online] IoT Agenda. Available at: <<https://internetofthingsagenda.techtarget.com/definition/ZigBee>> [Accessed 14 Aug. 2019].
40. 2019. *Zigbee*. [online] Wikipedia. Available at: <<https://en.wikipedia.org/wiki/Zigbee>> [Accessed 14 Aug. 2019].
41. Singh, M., 2018. *What are network Topology in Internet of Things (IoT)*. [online] Engineering. Available at: <<https://engineering.eckovation.com/what-are-network-topology-in-iot/>> [Accessed 14 Aug. 2019].
42. 2019. *MSP-EXP430F5529LP External power and USB question*. [online] E2E. Available at: <<https://e2e.ti.com/support/microcontrollers/msp430/f/166/t/300520?MSP-EXP430F5529LP-External-power-and-USB-question>> [Accessed 14 Aug. 2019].
43. Chalasani, S. and Conrad, J.M., 2008. A survey of energy harvesting sources for embedded systems. *IEEE SoutheastCon 2008*.
44. El-Sayed, A.-R., Tai, K., Biglarbegian, M. and Mahmud, S., 2016. A survey on recent energy harvesting mechanisms. *2016 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*.
45. Fan, P.M.-Y., Wong, O.-Y., Chung, M.-J., Su, T.-Y., Zhang, X. and Chen, P.-H., 2015. Energy harvesting techniques: Energy sources, power management and conversion. *2015 European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD)*.
46. Garg, N. and Garg, R., 2017. Energy harvesting in IoT devices: A survey. *2017 International Conference on Intelligent Sustainable Systems (ICISS)*.
47. Sharma, S., Panwar, V., Yadav, S., Sachin and Lokesh, 2017. Different sources of energy harvesting: A survey. *2017 International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA)*.
48. Singh, K. and Moh, S., 2016. A Comparative Survey of Energy Harvesting Techniques for Wireless Sensor Networks.
49. Singh, K. and Moh, S., 2016. A Comparative Survey of Energy Harvesting Techniques for Wireless Sensor Networks.
50. Yildiz, F., 2009. Potential Ambient Energy-Harvesting Sources and Techniques. *The Journal of Technology Studies*, 35(1).
51. Szabo, L., 2017. The history of using solar energy. *2017 International Conference on Modern Power Systems (MPS)*.
52. Richardson, L., 2018. *How Are Solar Panels Made? Parts of a Solar Panel: EnergySage*. [online] Solar News. Available at: <<https://news.energysage.com/what-are-solar-panels-made-of-list-of-solar-pv-materials/>> [Accessed 18 Aug. 2019].
53. 2019. [online] NASA. Available at: <<https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2002/solarcells>> [Accessed 18 Aug. 2019].
54. 2018. *Energy sources and power management in IoT sensors and edge devices*. [online] JAXenter. Available at: <<https://jaxenter.com/energy-sources-power-management-iot-sensors-edge-devices-145006.html>> [Accessed 18 Aug. 2019].
55. 2019. *Dye-sensitized solar cell*. [online] Wikipedia. Available at: <[https://en.wikipedia.org/wiki/Dye-sensitized\\_solar\\_cell](https://en.wikipedia.org/wiki/Dye-sensitized_solar_cell)> [Accessed 18 Aug. 2019].
56. Luo, P., Peng, D., Wang, Y. and Zheng, X., 2018. Review of Solar Energy Harvesting for IoT Applications. *2018 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems (APCCAS)*.
57. Kibria, Mohammad & Ahammed, Akil & Sonny, Saad & Sony, Faisal & Hossain, Shams-Ul-Islam. (2014). A Review: Comparative studies on different generation solar cells technology.



58. Jager-Waldau, A., Huld, T., Bodis, K. and Szabo, S., 2018. Photovoltaics in Europe after the Paris Agreement. *2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC) (A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC)*.
59. Bertacchini, A., Larcher, L., Lasagni, M. and Pavan, P., 2015. Ultra low cost triboelectric energy harvesting solutions for embedded sensor systems. *2015 IEEE 15th International Conference on Nanotechnology (IEEE-NANO)*.
60. Khushboo and Azad, P., 2017. Triboelectric nanogenerator based on vertical contact separation mode for energy harvesting. *2017 International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA)*.
61. Woodford, C., 2018. *Piezoelectricity - How does it work?: What is it used for?* [online] Explain that Stuff. Available at: <<https://www.explainthatstuff.com/piezoelectricity.html>> [Accessed 20 Aug. 2019].
62. Al Ahmad, Mahmoud & Elshurafa, Amro & Salama, Khaled & Alshareef, Husam. (2012). Determination of maximum power transfer conditions of bimorph piezoelectric energy harvesters. *Journal of Applied Physics*. 111. 10.1063/1.4714644.
63. Rafique, S., 2018. *Piezoelectric Vibration Energy Harvesting: Modeling & Experiments*. Cham: Springer International Publishing.
64. Cao, J., 2018. Optimization of TEG for Human Body Powered Mobile Devices. *2018 17th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm)*.
65. Ding, L., Akbarzadeh, A. and Tan, L., 2018. A review of power generation with thermoelectric system and its alternative with solar ponds. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, pp.799–812.
66. Hughes, M., 2018. *Wireless RF Energy Harvesting: RF-to-DC Conversion and a Look at Powercast Hardware*. [online] All About Circuits. Available at: <<https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/wireless-rf-energy-harvesting-rf-to-dc-conversion-powercast-hardware/>> [Accessed 21 Aug. 2019].
67. 2019. *Supercapacitor*. [online] Wikipedia. Available at: <[https://en.wikipedia.org/wiki/Supercapacitor#Electrical\\_parameters](https://en.wikipedia.org/wiki/Supercapacitor#Electrical_parameters)> [Accessed 20 Aug. 2019].
68. 2019. *Supercapacitors*. [online] Supercapacitors - an overview | ScienceDirect Topics. Available at: <<https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/supercapacitors>> [Accessed 20 Aug. 2019].
69. 2019. *Pseudocapacitors*. [online] Pseudocapacitors - an overview | ScienceDirect Topics. Available at: <<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/pseudocapacitors>> [Accessed 20 Aug. 2019].
70. 2019. *electrochemical double layer capacitor*. [online] electrochemical double layer capacitor - an overview | ScienceDirect Topics. Available at: <<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/electrochemical-double-layer-capacitor>> [Accessed 20 Aug. 2019].
71. 2019. *BU-106: Advantages of Primary Batteries*. [online] Primary (non-rechargeable) Batteries – Battery University. Available at: <[https://batteryuniversity.com/learn/article/primary\\_batteries](https://batteryuniversity.com/learn/article/primary_batteries)> [Accessed 21 Aug. 2019].
72. 2019. *BU-107: Comparison Table of Secondary Batteries*. [online] Secondary (Rechargeable) Batteries – Battery University. Available at: <[https://batteryuniversity.com/learn/article/secondary\\_batteries](https://batteryuniversity.com/learn/article/secondary_batteries)> [Accessed 21 Aug. 2019].
73. 2018. *Μπαταρία*. [online] Wikipedia. Available at: <<https://el.wikipedia.org/wiki/Μπαταρία>> [Accessed 21 Aug. 2019].
74. Snyder, G.J. and Snyder, A.H., 2017. *Figure of merit ZT of a thermoelectric device defined from materials properties*. [online] Energy & Environmental Science. Available at:

<<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2017/ee/c7ee02007d#!divAbstract>>  
[Accessed 21 Aug. 2019].

75. 2019. *Thermoelectric effect*. [online] Wikipedia. Available at:  
<[https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric\\_effect](https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric_effect)> [Accessed 21 Aug. 2019].
76. 2019. *Thermoelectric generator*. [online] Wikipedia. Available at:  
<[https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric\\_generator](https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric_generator)> [Accessed 21 Aug. 2019].
77. LoRa™ manual. Revision 2, May 2015 [www.semtech.com](http://www.semtech.com) c2015 Semtech Corporation
78. 2015 February. MSP430 Design Workshop, Texas Instruments, Rev4.01
79. Paraskevas, A. and Koutroulis, E., 2016. A simple maximum power point tracker for thermoelectric generators. *Energy Conversion and Management*, 108, pp.355–365.

# Appendix

## A. CC2640 Device Overview

<http://www.ti.com/product/CC2640>

### 1.1 Features

- Microcontroller
  - ARM® Cortex®-M3
  - EEMBC CoreMark® Score: 142
  - Up to 48-MHz Clock Speed
  - 128KB of In-System Programmable Flash
  - 8KB of SRAM for Cache
  - 20KB of Ultralow-Leakage SRAM
  - 2-Pin cJTAG and JTAG Debugging
  - Supports Over-The-Air Upgrade (OTA)
- Ultralow-Power Sensor Controller
  - Can Run Autonomous From the Rest of the System
  - 16-Bit Architecture
  - 2KB of Ultralow-Leakage SRAM for Code and Data
- Efficient Code Size Architecture, Placing Drivers, *Bluetooth*® Low Energy Controller, and Bootloader in ROM
- RoHS-Compliant Packages
  - 4-mm × 4-mm RSM VQFN32 (10 GPIOs)
  - 5-mm × 5-mm RHB VQFN32 (15 GPIOs)
  - 7-mm × 7-mm RGZ VQFN48 (31 GPIOs)
- Peripherals
  - All Digital Peripheral Pins Can Be Routed to any GPIO
  - Four General-Purpose Timer Modules (Eight 16-Bit or Four 32-Bit Timers, PWM Each)
  - 12-Bit ADC, 200-ksamples/s, 8-Channel Analog MUX
  - Continuous Time Comparator
  - Ultralow-Power Analog Comparator
  - Programmable Current Source
  - UART
  - 2× SSI (SPI, MICROWIRE, TI)
  - I2C
  - I2S
  - Real-Time Clock (RTC)
  - AES-128 Security Module
  - True Random Number Generator (TRNG)

- 10, 15, or 31 GPIOs, Depending on Package Option
- Support for Eight Capacitive-Sensing Buttons
- Integrated Temperature Sensor
- External System
  - On-Chip internal DC-DC Converter
  - Very Few External Components
  - Seamless Integration With the SimpleLink™ CC2590 and CC2592 Range Extenders
- Low Power
  - Wide Supply Voltage Range
- Normal Operation: 1.8 to 3.8 V
- External Regulator Mode: 1.7 to 1.95 V
  - Active-Mode RX: 5.9 mA
  - Active-Mode TX at 0 dBm: 6.1 mA
  - Active-Mode TX at +5 dBm: 9.1 mA
  - Active-Mode MCU: 61  $\mu$ A/MHz
  - Active-Mode MCU: 48.5 CoreMark/mA
  - Active-Mode Sensor Controller: 8.2  $\mu$ A/MHz
  - Standby: 1  $\mu$ A (RTC Running and RAM/CPU Retention)
  - Shutdown: 100 nA (Wake Up on External Events)
- RF Section
  - 2.4-GHz RF Transceiver Compatible With *Bluetooth* Low Energy (BLE) 4.2 Specification
  - Excellent Receiver Sensitivity (–97 dBm for BLE), Selectivity, and Blocking Performance
  - Link budget of 102 dB for BLE
  - Programmable Output Power up to +5 dBm
  - Single-Ended or Differential RF Interface
  - Suitable for Systems Targeting Compliance With Worldwide Radio Frequency Regulations
    - ETSI EN 300 328 (Europe)
    - EN 300 440 Class 2 (Europe)
    - FCC CFR47 Part 15 (US)
- ARIB STD-T66 (Japan)

## B. CC3100 Device Overview

<http://www.ti.com/product/CC3100>

### 1.1 Features

- CC3100 SimpleLink Wi-Fi Consists of Wi-Fi Network Processor and Power-Management Subsystems
- Wi-Fi CERTIFIED™ Chip
- Wi-Fi Network Processor Subsystem
  - Featuring Wi-Fi Internet-On-a-Chip™

- Dedicated ARM MCU
  - Completely Offloads Wi-Fi and Internet Protocols from the External Microcontroller
- Wi-Fi Driver and Multiple Internet Protocols in ROM
- 802.11 b/g/n Radio, Baseband, and Medium Access Control (MAC), Wi-Fi Driver, and Supplicant
- TCP/IP Stack
  - Industry-Standard BSD Socket Application Programming Interfaces (APIs)
  - 8 Simultaneous TCP or UDP Sockets
  - 2 Simultaneous TLS and SSL Sockets
- Powerful Crypto Engine for Fast, Secure Wi-Fi and Internet Connections with 256-Bit AES Encryption for TLS and SSL Connections
- Station, AP, and Wi-Fi Direct® Modes
- WPA2 Personal and Enterprise Security
- SimpleLink Connection Manager for Autonomous and Fast Wi-Fi Connections
- SmartConfig™ Technology, AP Mode, and WPS2 for Easy and Flexible Wi-Fi Provisioning
- TX Power
  - 18.0 dBm @ 1 DSSS
  - 14.5 dBm @ 54 OFDM
- RX Sensitivity
  - –95.7 dBm @ 1 DSSS
  - –74.0 dBm @ 54 OFDM
- Application Throughput
  - UDP: 16 Mbps
  - TCP: 13 Mbps
- Host Interface
  - Interfaces with 8-, 16-, and 32-Bit MCU or ASICs Over SPI or UART Interface
  - Low External Host Driver Footprint: Less Than 7KB of Code Memory and 700 B of RAM Memory Required for TCP Client Application
- Power-Management Subsystem
  - Integrated DC-DC Supports a Wide Range of Supply Voltage:
    - VBAT Wide-Voltage Mode: 2.1 to 3.6 V
    - Preregulated 1.85-V Mode
  - Advanced Low-Power Modes
    - Hibernate with RTC: 4  $\mu$ A
    - Low-Power Deep Sleep (LPDS): 115  $\mu$ A
    - RX Traffic (MCU Active): 53 mA @ 54 OFDM
    - TX Traffic (MCU Active): 223 mA @ 54 OFDM, Maximum Power
    - Idle Connected: 690  $\mu$ A @ DTIM = 1
- Clock Source
  - 40.0-MHz Crystal with Internal Oscillator

- 32.768-kHz Crystal or External RTC Clock
- Package and Operating Temperature
  - 0.5-mm Pitch, 64-Pin, 9-mm × 9-mm QFN
  - Ambient Temperature Range: –40°C to 85°C

### C. ESP8266 power consumption datasheet

<https://www.espressif.com/en/products/hardware/esp8266ex/overview>

#### 5.2. RF Power Consumption

Unless otherwise specified, the power consumption measurements are taken with a 3.0V supply at 25°C of ambient temperature. All transmitters' measurements are based on a 50% duty cycle.

Table 5-2. Power Consumption

| Parameters   | Min | Typical | Max | Unit |
|--|-----|---------|-----|------|
| TX 802.11b, CCK 11Mbps, P <sub>OUT</sub> =+17 dBm  | -   | 170     | -   | mA   |
| TX 802.11g, OFDM 54Mbps, P <sub>OUT</sub> =+15 dBm | -   | 140     | -   | mA   |
| TX 802.11n, MCS7, P <sub>OUT</sub> =+13dBm         | -   | 120     | -   | mA   |
| Rx 802.11b, 1024 bytes packet length, –80 dBm      | -   | 50      | -   | mA   |
| Rx 802.11g, 1024 bytes packet length, –70 dBm      | -   | 56      | -   | mA   |
| Rx 802.11n, 1024 bytes packet length, –65 dBm      | -   | 56      | -   | mA   |

### D. SAM LoRa™

<https://www.microchip.com/design-centers/wireless-connectivity/low-power-wide-area-networks/lora-technology/sam-r34-r35>

- Processor:
  - ARM Cortex -M0+ CPU running at up to 48 MHz (2.46CoreMark®/MHz)
  - Single-Cycle Hardware Multiplier
  - Micro Trace Buffer (MTB)
- Memory:
  - In-System Self-Programmable Flash Memory, with options for sizes - 256 KB, 128 KB or 64 KB
  - Static Random Access Memory (SRAM) with options for sizes - 32 KB, 16 KB or 8 KB
  - Low power SRAM Memory with option for sizes - 4 KB or 8 KB
- System:
  - Power-on Reset (POR) and Brown-out Reset
  - Internal and External Clock Options with 48 MHz Digital Frequency Locked Loop (DFLL48M) and 48 MHz to 96 MHz Fractional Digital Phase Locked Loop (FDPLL96M)
  - External Interrupt Controller (EIC)
  - Up to 16 External Interrupts
  - One Non-Maskable Interrupt
  - Two Pin Serial Wire Debug (SWD) Programming, Test and Debugging Interfaces
- Operating Voltage: 1.8V- 3.6V
- Low Power Consumption
- Transceiver:
  - RX = 16 mA (typical)
  - RFO\_HF = 33 mA (typical)
  - PA\_BOOST = 95 mA (typical)

### E. Xbee Key Features

<https://www.sparkfun.com/datasheets/Wireless/Zigbee/XBee-Datasheet.pdf>

#### **Long Range Data Integrity XBee**

- Indoor/Urban: up to 100' (30 m)
- Outdoor line-of-sight: up to 300' (90 m)
- Transmit Power: 1 mW (0 dBm)
- Receiver Sensitivity: -92 dBm

#### **XBee-PRO**

- Indoor/Urban: up to 300' (90 m), 200' (60 m) for International variant
- Outdoor line-of-sight: up to 1 mile (1600 m), 2500' (750 m) for International variant
- Transmit Power: 63mW (18dBm), 10mW (10dBm) for International variant
- Receiver Sensitivity: -100 dBm RF Data Rate: 250,000 bps

**Advanced Networking & Security** Retries and Acknowledgements DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) Each direct sequence channels has over 65,000 unique network addresses available Source/Destination Addressing Unicast & Broadcast Communications Point-to-point, point-to-multipoint and peer-to-peer topologies supported **Low Power XBee**

- TX Peak Current: 45 mA (@3.3 V)
- RX Current: 50 mA (@3.3 V)
- Power-down Current: < 10  $\mu$ A **XBee-PRO**
- TX Peak Current: 250mA (150mA for international variant) •TX Peak Current (RPSMA module only): 340mA (180mA for international variant)
- RX Current: 55 mA (@3.3 V)
- Power-down Current: < 10  $\mu$ A **ADC and I/O line support** Analog-to-digital conversion, Digital I/O Line Passing **Easy-to-Use** No configuration necessary for out-of box RF communications Free X-CTU Software (Testing and configuration software) AT and API Command Modes for configuring module parameters Extensive command set Small form factor

## **F. MSP430F5529 Key Features**

<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430f5529.pdf>

- Low Supply Voltage Range: 3.6 V Down to 1.8 V
- Ultra-Low Power Consumption
  - Active Mode (AM):
    - All System Clocks Active:
      - 290  $\mu$ A/MHz at 8 MHz, 3.0V,  
Flash Program Execution (Typical)
      - 150  $\mu$ A/MHz at 8 MHz, 3.0 V,  
RAM Program Execution (Typical)
    - Standby Mode (LPM3):
      - Real-Time Clock (RTC) With Crystal, Watchdog, and Supply Supervisor Operational, Full RAM Retention, Fast Wakeup:
        - 1.9  $\mu$ A at 2.2 V, 2.1  $\mu$ A at 3.0 V (Typical)

–Low-Power Oscillator(VLO),

General-Purpose Counter, Watchdog, and Supply Supervisor Operational, Full RAM Retention, Fast Wakeup:

–1.4  $\mu$ A at 3.0 V (Typical)

–Off Mode(LPM4):

– Full RAM Retention, Supply Supervisor Operational, Fast Wakeup:

–1.1  $\mu$ A at 3.0 V (Typical)

–Shutdown Mode(LPM4.5):

–0.18 $\mu$ A at 3.0 V (Typical)

- Wake up From Standby Mode in 3.5  $\mu$ s (Typical)

- 16-Bit RISC Architecture, Extended Memory, up to 25-MHz System Clock

- Flexible Power-Management System

–Fully Integrated LDO With Programmable Regulated Core Supply Voltage

–Supply Voltage Supervision, Monitoring, and Brownout

- Unified Clock System

–FLL Control Loop for Frequency Stabilization

–Low-Power Low-Frequency Internal Clock Source(VLO)

–Low-Frequency Trimmed Internal Reference Source (REFO)

– 32-kHz Watch Crystals (XT1)

–High-Frequency Crystals up to 32 MHz(XT2)

- 16-Bit Timer TA0, Timer\_A With Five Capture/Compare Registers

- 16-Bit Timer TA1, Timer\_A With Three Capture/Compare Registers

- 16-Bit Timer TA2, Timer\_A With Three Capture/Compare Registers

- 16-Bit Timer TB0, Timer\_B With Seven Capture/Compare Shadow Registers

- Two Universal Serial Communication Interfaces

–USCI\_A0 and USCI\_A1 Each Support:

- Enhanced UART Supports Automatic Baud-Rate Detection

- IrDA Encoder and Decoder

- Synchronous SPI

– USCI\_B0and USCI\_B1EachSupport:

- I2C

- Synchronous SPI



- Full-Speed Universal Serial Bus (USB)
  - Integrated USB-PHY
  - Integrated 3.3-V and 1.8
  - USB Power System
  - Integrated USB-PLL
  - Eight Input and Eight Output Endpoints
- 12-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) (MSP430F552x Only) With Internal Reference, Sample-and-Hold, and Autoscan Feature
- Comparator
- Hardware Multiplier Supports 32-Bit Operations
- Serial Onboard Programming, No External Programming Voltage Needed
- 3-Channel Internal DMA
- Basic Timer With RTC Feature

## F. SP1848-27145 Datasheet

### Introduction:

The side with word is the radiating surface (code side)  
 The other side with no word is the Endothermic surface (hot side)

### Parameter:

Lead Length: about 30CM  
 L \* W \* H: 40MM \* 40MM \* 3.4MM

- Temperature difference of 20 degrees: open circuit voltage 0.97V, power current: 225MA
- Temperature difference of 40 degrees: open circuit voltage 1.8V, power current: 368MA
- Temperature difference of 60 degrees: open circuit voltage 2.4V, power current: 469MA
- Temperature difference of 80 degrees: open circuit voltage 3.6V, power current: 558MA
- Temperature difference of 100 degrees: open circuit voltage 4.8V, power current: 669MA

## G. Μετρήσεις

| Tref | DT | Voltage | Power  |
|------|----|---------|--------|
| 33   | 1  | 61.39   | 0.865  |
| 33   | 2  | 75.73   | 1.378  |
| 33   | 3  | 98.77   | 2.345  |
| 33   | 4  | 122.3   | 3.597  |
| 33   | 5  | 142.3   | 4.92   |
| 33   | 6  | 164.8   | 6.526  |
| 33   | 7  | 181.7   | 8.125  |
| 33   | 8  | 205.3   | 10.264 |

| Tref | DT | Voltage | Power |
|------|----|---------|-------|
| 31   | 2  | 53      | 0.667 |
| 31   | 3  | 79      | 1.48  |
| 31   | 4  | 100.8   | 2.434 |
| 31   | 5  | 122     | 3.58  |
| 31   | 6  | 143.8   | 5.023 |
| 31   | 7  | 165     | 6.6   |
| 31   | 8  | 190.9   | 8.836 |

| Tref | DT | Voltage | Power |
|------|----|---------|-------|
| 29   | 2  | 55.24   | 0.714 |
| 29   | 3  | 77.77   | 1.417 |
| 29   | 4  | 99.27   | 2.345 |
| 29   | 5  | 120     | 3.507 |
| 29   | 6  | 141.8   | 4.9   |
| 29   | 7  | 163.8   | 6.505 |
| 29   | 8  | 164.3   | 6.609 |
| 29   | 9  | 187.9   | 8.62  |

| Tref | DT | Voltage | Power |
|------|----|---------|-------|
| 27   | 1  | 34.76   | 0.25  |
| 27   | 2  | 56.26   | 0.72  |
| 27   | 3  | 77      | 1.4   |
| 27   | 4  | 99.2    | 2.38  |
| 27   | 5  | 122     | 3.62  |
| 27   | 6  | 147     | 5.26  |
| 27   | 7  | 167     | 6.8   |
| 27   | 8  | 192     | 9.02  |

| Tref | DT | Voltage | Power |
|------|----|---------|-------|
| 25   | 1  | 34.25   | 0.266 |
| 25   | 2  | 55.24   | 0.708 |
| 25   | 3  | 76.23   | 1.398 |
| 25   | 4  | 97.75   | 2.321 |
| 25   | 5  | 117.7   | 3.372 |
| 25   | 6  | 143.8   | 5.81  |
| 25   | 7  | 165.3   | 6.7   |