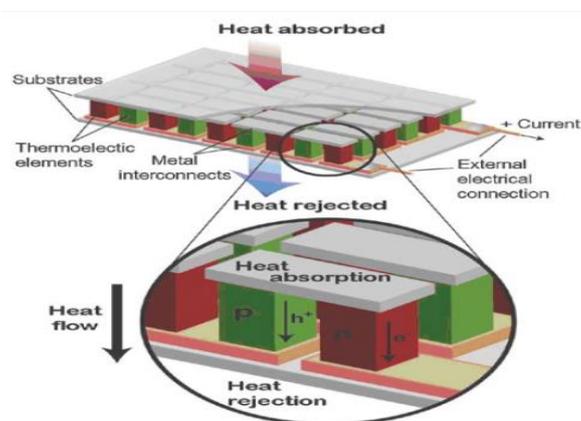




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ.

Θερμοηλεκτρικές Γεννήτριες και Εφαρμογές στα Φωτοβολταϊκά και την Αυτοκινητοβιομηχανία



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ντίνος Θ. Χρυσανθόπουλος – Δάλλας

Επιβλέπων: Ιωάννης Αβαριτσιώτης

Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2015



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

Θερμοηλεκτρικές Γεννήτριες και Εφαρμογές στα Φωτοβολταϊκά και την
Αυτοκινητοβιομηχανία

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ντίνος Θ. Χρυσανθόπουλος – Δάλλας Α.Μ.: 03103789

Επιβλέπων: Ιωάννης Αβαριτσιώτης

Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 14^η του μήνα Ιουλίου 2015

Ιωάννης Αβαριτσιώτης

Καθηγητής ΕΜΠ

Κωνσταντίνος Δέρβος

Καθηγητής ΕΜΠ

Ιωάννης Παπανάνος

Καθηγητής ΕΜΠ

Ντίνος Θ. Χρυσανθόπουλος – Δάλλας

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

Copyright © Ντίνος Θ. Χρυσανθόπουλος – Δάλλας.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

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

Ευχαριστίες

Θερμές ευχαριστίες στον Δρ. Ιωάννη Αβαριτσιώτη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και την έμπρακτη βοήθεια του προς την ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής.

Στους φίλους μου, τους συγγάτοικους και την κοπέλα μου για την υπομονή και την στήριξη τους.

Στην μητέρα μου, στην οποία και αφιερώνω αυτήν την διπλωματική, για την δύναμη και την αγάπη της.

Περίληψη

Η κλιματική αλλαγή και η ενεργειακή κρίση είναι δύο από τα σημαντικά προβλήματα τα οποία πρέπει να αντιμετωπίσει η κοινωνία τον 21ο αιώνα. Η στροφή της ενεργειακής παραγωγής από τα ορυκτά καύσιμα στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και στην ανάκτηση της χαμένης θερμότητας από τις μηχανές εσωτερικής καύσης αποτελεί μονόδρομο. Μια τεχνολογία η οποία μπορεί να εξυπηρετήσει τον σκοπό αυτό είναι οι Θερμοηλεκτρικές Γεννήτριες. Το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο ανακαλύφθηκε το 1822 από τον Γερμανό φυσικό Thomas Seebeck και μέχρι το 1950 είχε λάβει μικρή προσοχή από την επιστημονική κοινότητα. Τις τελευταίες δεκαετίες, και με την σύνθεση νέων υλικών, έχει επανέλθει δυναμικά στο προσκήνιο. Τα θερμοηλεκτρικά στοιχεία είναι σε θέση να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια όταν βρεθούν σε θερμοκρασιακή διαφορά γεγονός που μπορεί να βρει εφαρμογές σε διάφορους τομείς. Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η εφαρμογή των θερμοηλεκτρικών γεννητριών στα φωτοβολταϊκά με την χρήση φακών εστίασης Fresnel, καθώς και στην αυτοκινητοβιομηχανία σαν συστήματα ανάκτησης θερμικών απωλειών του κινητήρα. Οι υπάρχουσες θερμοηλεκτρικές γεννήτριες προσφέρουν αποδόσεις έως και 15 % της τάξεως των μερικών εκατοντάδων Watt. Όπως διαπιστώνεται είναι απαραίτητη η χρήση συστημάτων MPPT για την μέγιστη απομάστευση ισχύος από τις θερμοηλεκτρικές γεννήτριες. Η επιστημονική έρευνα στον τομέα των υλικών και η τεχνολογική πρόοδος καθώς και η χρήση θερμοηλεκτρικών γεννητριών σε άλλους τομείς (NASA, γεωθερμία) καθιστούν το μέλλον τους ελπιδοφόρο.

Λέξεις Κλειδιά: Θερμοηλεκτρικό Φαινόμενο, Seebeck effect, Peltier effect, Θερμοηλεκτρικές γεννήτριες, Φωτοβολταϊκά, φακοί εστίασης Fresnel, Ανάκτηση θερμότητας, Αυτοκινητοβιομηχανία, MPPT.

Abstract

The climate change and the energy crisis are two major problems of the 21st century that society must overcome. A possible solution is the turn of the global energy consumption to renewable energy sources and waste heat recovery technology. Thermoelectric generators seems the suitable technology for these purposes. The thermoelectric effect was discovered in 1822 by the German physicist Thomas Seebeck and since 1950 a few attention has been given. Thermoelectric modules have the ability to transform thermal current to electricity. That effect is suitable for concentrated photovoltaic systems (Fresnel lenses) and waste heat recovery from exhaust engine applications. Currently the performance of the thermoelectric generators approaches 15%, and a power output of few hundred Watts, thus the usage of a maximum power point tracker is considered necessary. The scientific research in the field of thermoelectric materials promises the improvement of the TEG performance and a brighter future of the thermoelectric applications.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	5
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	6
ABSTRACT	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ	12
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	12
1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ	16
1.3 ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ SEEBECK	18
1.4 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ PELTIER.....	21
1.5 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ THOMSON.....	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	25
2.1 ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	25
2.2 ΑΝΤΛΙΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ - TEC'S.....	27
2.2.1 Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας TEC.....	30
2.3 ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ TEG'S	32
2.3.1 Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας TEG.....	33
2.4 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΖΤ.....	35
2.4.1 Χαρακτηριστικά καλών θερμοηλεκτρικών υλικών.....	37
2.4.2 Θερμοηλεκτρικά υλικά νέας τεχνολογίας.....	38
2.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΕΜΠΟΡΙΟΥ	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΣΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ (CPV-FRESNEL LENSES)	44
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	44
3.2 ΗΛΙΑΚΕΣ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ.....	45

3.3 ΟΙ ΦΑΚΟΙ FRESNEL.....	47
3.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ TEG ΜΕ FRESNEL	51
3.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΣΤΗΝ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ	57
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	57
4.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΣΤΗΝ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ	59
4.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΣΕ ΟΧΗΜΑ BMW	64
4.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΣΕ ΟΧΗΜΑ FORD.....	70
4.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	73
4.5.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά και εμπόδια	73
4.5.2 Οικονομικά χαρακτηριστικά και εμπόδια.....	74
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ. (MAXIMUM POWER POINT TRACKING - MPPT)	77
5.1 ΑΝΑΓΚΗ ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗ MPPT	77
5.2 ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΟΙ ΜΕΘΟΔΟΙ MPPT	78
5.2.1 Μέθοδος σταθερής τάσης	78
5.2.2 Μέθοδος με πίνακα αντιστοίχισης	79
5.2.3 Μέθοδος τάσης ανοιχτοκυκλώματος	80
5.2.4 Μέθοδος ρεύματος βραχυκύκλωσης	81
5.2.5 Μέθοδος διαταραχής και παρατήρησης - <i>Perturb & Observe (P&O)</i>	82
5.2.6 Μέθοδος αυξανόμενης αγωγιμότητας - <i>Incremental Conductance</i>	85
5.2.7 Μέθοδος παρασιτικής χωρητικότητας	87
5.2.8 Μέθοδος ασαφούς ελέγχου - νευρωνικών δικτύων.....	89
5.2.9 Μέθοδος ελέγχου στο χώρο κατάστασης.....	89

5.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΠΡΟΣ ΣΥΓΚΡΙΣΗ	90
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	94
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.	96
ΣΥΝΔΕΣΜΟΙ.....	99

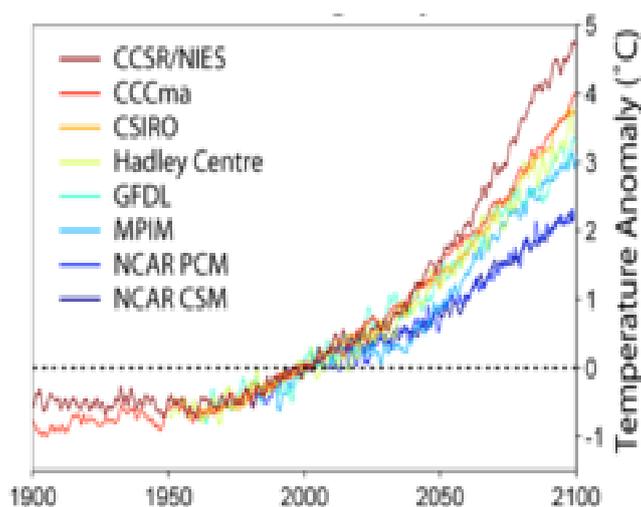
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Θερμοηλεκτρικό Φαινόμενο

1.1 Εισαγωγή

Το παγκόσμιο σύστημα ενεργειακού εφοδιασμού της κοινωνίας των ανθρώπων αντιμετωπίζει στις μέρες μας 3 βασικά προβλήματα:

- Την κλιματική αλλαγή από τις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα.
- Τον περιορισμό των ορυκτών καυσίμων.
- Την ανασφάλεια που δημιουργείται από την χρήση των πυρηνικών (ατυχήματα, απόβλητα κλπ.)

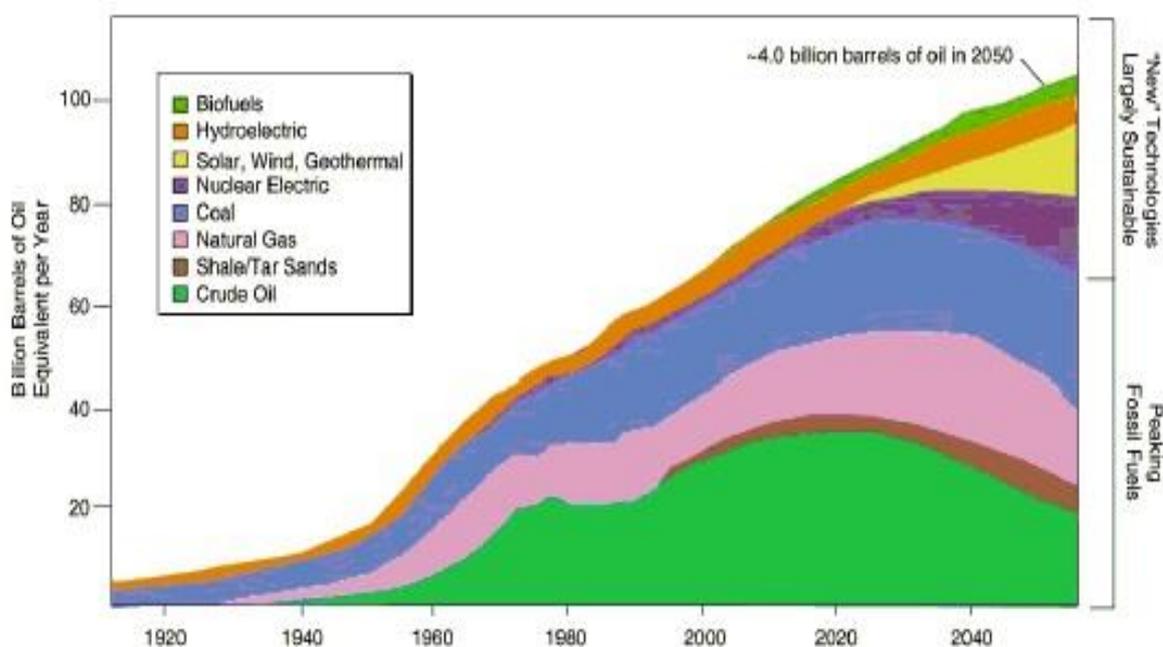
Η κλιματική αλλαγή αποτελεί πλέον μια αυξανόμενη κρίση με αντίκτυπο στην υγεία των ανθρώπων και του παγκόσμιου οικοσυστήματος, την οικονομία και την παραγωγή τροφίμων. Από το 1850 έχει υπάρξει μια μέση αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη κατά περίπου 1 °C. Αρχικά θεωρήθηκε ότι η αύξηση αυτή θα μπορούσε απλώς να είναι μέρος μιας φυσικής διακύμανσης. Όμως διακυμάνσεις αυτές έχουν καταγραφεί για δεκάδες χιλιάδες χρόνια και δεν συντελούνται σε τόσο σύντομο χρονικό διάστημα αλλά σε μακροπρόθεσμους χρονικούς κύκλους.



Σχήμα 1: Προβλέψεις για την μέση αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη μέχρι το 2100.

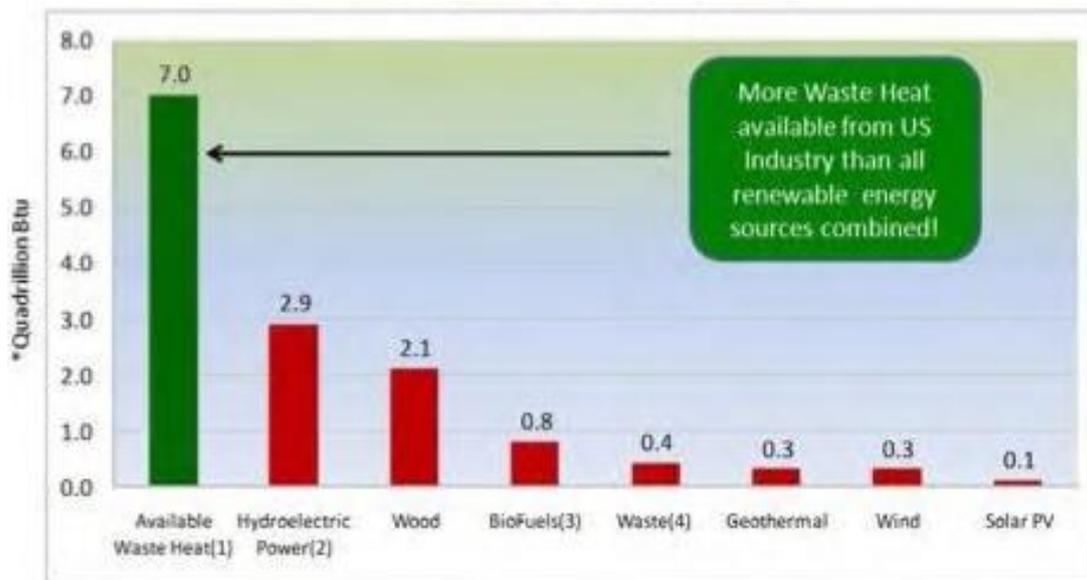
Το 1995 ήταν η θερμότερη χρονιά που έχει καταγραφεί, σύμφωνα με τη Βρετανική Μετεωρολογική Υπηρεσία. Μια επιτροπή των Ηνωμένων Εθνών για τους επιστήμονες απέδωσαν την αύξηση της θερμοκρασίας ανθρώπινης επιρροής και προέβλεψε ότι εάν οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (διοξείδιο του άνθρακα, το μεθάνιο, υποξείδιο του αζώτου, και χλωροφθοράνθρακες) δεν μειωθούν, η μέση παγκόσμια θερμοκρασία θα αυξηθεί κατά 1 °C έως 3,5 °C με μια καλύτερη εκτίμηση των 2 °C μέχρι το 2100, προκαλώντας αύξηση στη στάθμη της θάλασσας κατά 60 εκατοστά.

Ένα ακόμη από τα σημαντικότερα προβλήματα παγκοσμίως, που μέρα με τη μέρα γίνεται εντονότερο, είναι το ενεργειακό. Οι παγκόσμιες ενεργειακές ανάγκες συνεχώς αυξάνονται ενώ παράλληλα τα ενεργειακά αποθέματα των συμβατικών μορφών ενέργειας όλο και λιγοστεύουν. Παρόλα αυτά, η μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων δεν θεωρείται λύση, διότι η κατά κεφαλήν κατανάλωση ενέργειας σχετίζεται άμεσα με το βιοτικό επίπεδο των ανθρώπων, που ζητούμενο είναι συνεχώς να αυξάνει.



Σχήμα 2: Προβλέψεις για την παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας μέχρι το 2050.

Έχει δημιουργηθεί λοιπόν η ανάγκη για εξεύρεση εναλλακτικών μορφών, καθώς και για χρήση τεχνολογιών εξοικονόμησης ενέργειας. Λέγοντας εξοικονόμηση ενέργειας, εννοούμε την ελαχιστοποίηση της ενέργειας που απαιτείται για την πραγματοποίηση ενός έργου, ή αλλιώς την ελαχιστοποίηση των απωλειών σε κάθε διαδικασία. Απώλειες οι οποίες ως επί το πλείστον εμφανίζονται με τη μορφή θερμότητας, μια μορφή ενέργειας που δύσκολα χρησιμοποιείται, μετατρέπεται ή αποθηκεύεται. Το μεγαλύτερο κομμάτι της έρευνας, έχει στραφεί στην εύρεση τρόπων να εκμεταλλευτούμε νέες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ώστε να μειώσουμε την ανάγκη μας για χρήση συμβατικών, ή ακόμη και να απαλλαγούμε οριστικά από αυτές. Μέχρι όμως να συμβεί κάτι τέτοιο, η ελαχιστοποίηση των απωλειών παίζει πολύ σημαντικό ρόλο.



Σχήμα 3: Απώλειες θερμότητας και κατανάλωση Α.Π.Ε. στην Αμερική.

Από το σύνολο των απωλειών, το σημαντικότερο μέρος αποτελούν οι θερμικές. Θερμικές απώλειες έχουμε σε όλων των ειδών τις διαδικασίες παραγωγής ή μετατροπής ενέργειας. Από τις πιο μικρές, όπως οι τριβές που εμφανίζονται στα κινούμενα μέρη οποιασδήποτε διάταξης, έως τις πιο μεγάλες που συναντώνται σε μηχανές καύσης. Τέτοιες μηχανές καύσης κατακλύζουν τον κόσμο γύρω μας. Οι μηχανές εσωτερικής καύσης όλων των συμβατικών οχημάτων που χρησιμοποιούμε καθημερινά, (αυτοκίνητα, μηχανές, αεροσκάφη, πλοία), τα λεβητοστάσια που

χρησιμοποιούμε σε κτηριακές εγκαταστάσεις για τη θέρμανση των χώρων τους, τα συμβατικά εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνίτη, πετρέλαιο ή πυρηνικά, είναι κάποιες από αυτές. Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις οι θερμικές απώλειες αποτελούν ένα σημαντικό ποσοστό, απώλειες που ίσως είναι περισσότερες από την ενέργεια που λαμβάνεται από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3**. Τις περισσότερες φορές μάλιστα, οι θερμικές απώλειες, είναι αρκετά μεγαλύτερες από το ίδιο το αποδιδόμενο ποσό ενέργειας, όπως παραδείγματος χάριν στις μηχανές εσωτερικής καύσης των οχημάτων, όπου παρατηρείται ότι η ενέργεια του καυσίμου που γίνεται κίνηση στο όχημα αποτελεί μόλις το 12,6%, ενώ το 62% είναι κυρίως θερμικές απώλειες. Αυτό φαίνεται λογικό αν αναλογιστούμε μια ιδανική θερμική μηχανή κύκλου Carnot, που έχει το μεγαλύτερο συντελεστή απόδοσης από όλες τις θερμικές μηχανές. Η απόδοση της μηχανής Carnot, δίνεται από τη σχέση:

$$n = 1 - \frac{T_c}{T_h}$$

όπου T_c (T_{Cold}) η θερμοκρασία της ψυχρής δεξαμενής και T_h (T_{Hot}) αυτή της θερμής. Να σημειωθεί ότι οι θερμοκρασίες είναι σε βαθμούς Kelvin. Επομένως η θερμοκρασία T_c στην καλύτερη περίπτωση είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος δηλαδή περίπου 300 K. Άρα με θερμοκρασία $T_h = 1000\text{K} = 728\text{ }^\circ\text{C}$ φτάνουμε σε απόδοση έως 70%. Μπορούμε λοιπόν εύκολα να καταλάβουμε πόσο δύσκολο είναι να επιτευχθεί μια μεγάλη απόδοση από πραγματικές μηχανές. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι οι περισσότερες μηχανές δεν ξεπερνάνε το 50%.

Προκύπτει λοιπόν η ανάγκη για εκμετάλλευση αυτών των θερμικών απωλειών. Η ανάγκη χρησιμοποίησης τεχνολογιών κατάλληλων για τη μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε μορφές ευκολότερες στη χρήση ή την αποθήκευση. Έως τώρα, η εκλύομενη θερμότητα χρησιμοποιούνταν κυρίως για τη θέρμανση νερού ή κάποιου άλλου ρευστού, είτε για άμεση χρήση του, είτε για θέρμανση κάποιου χώρου από αυτό, όπως γίνεται σε πολλά μέρη κοντά σε συμβατικά εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η θέρμανση όμως αυτή δεν είναι παντού απαραίτητη. Γι' αυτό σε πολλές περιπτώσεις, όπως στα οχήματα, απαιτείται άλλου είδους προσέγγιση. Τα θερμοηλεκτρικά στοιχεία, ή ακριβέστερα η χρήση τους για παραγωγή ηλεκτρικής

ενέργειας από θερμική (θερμοηλεκτρικές γεννήτριες, αποτελούν μια τέτοια τεχνολογία, που ενώ ήταν εφαρμόσιμη από το 1950, είχε παραγκωνιστεί λόγω της περιορισμένης απόδοσης των τότε υπαρχόντων θερμοστοιχείων (περίπου 5%).

1.2 Ιστορική αναδρομή θερμοηλεκτρικού φαινομένου

Η αρχή της μελέτης των θερμοηλεκτρικών φαινομένων έγινε το 1822 με τον Γερμανό φυσικό Thomas Johann Seebeck (1770-1831). Στο άρθρο του «The Magnetic Polarization of Metals and Ores Produced by Temperature Difference (Magnetische Plarisation der Matalle und Erze durch Temperatur-Differenz)», που δημοσιεύθηκε στα πρακτικά της Πρωσικής Ακαδημίας Επιστημών, παρατήρησε ότι ένα ηλεκτρικό κύκλωμα κατασκευασμένο από δύο διαφορετικά μέταλλα, εφ' όσον οι επαφές τους διατηρούνται σε διαφορετικές θερμοκρασίες, προκαλεί μια απόκλιση στην βελόνα της μαγνητικής πυξίδας. Παρατήρησε ακόμη, ότι η απόκλιση της βελόνας είναι ανάλογη της διαφοράς θερμοκρασίας ανάμεσα στα δύο μέταλλα και ότι η ένταση του μαγνητικού πεδίου μεταβάλλεται για διαφορετικά ζεύγη μετάλλων στην ίδια θερμοκρασιακή διαφορά. Πειραματίστηκε με πλήθος υλικών, ανάμεσα στα οποία υπήρχαν και κάποιοι ημιαγωγοί, και τα κατέταξε με βάση το γινόμενο $\alpha \cdot \sigma$, όπου σ η ηλεκτρική τους αγωγιμότητα. Η σταθερά αναλογίας α_s είναι σήμερα γνωστή, ως συντελεστής Seebeck. Ο Seebeck πίστευε ότι η θερμοκρασιακή διαφορά προκαλεί μαγνητικό πεδίο, αρνούμενος την ηλεκτρική φύση του φαινομένου, σύντομα όμως διευκρινίστηκε από τον Hans Oersted, ότι η θερμοκρασιακή διαφορά προκαλεί ηλεκτρική τάση, η οποία σε ένα κλειστό κύκλωμα παράγει ρεύμα ανάλογο της θερμοκρασιακής διαφοράς. Το ρεύμα αυτό δημιουργεί από επαγωγή το μαγνητικό πεδίο. Ο Oersted ονόμασε το φαινόμενο θερμοηλεκτρικό, ενώ ο Seebeck επέμενε στον όρο θερμομαγνητισμός.

Το 1834 ο Γάλλος ωρολογοποιός και μετέπειτα φυσικός Jean Charles Athanase Peltier (1785-1845), παρατήρησε ότι το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο μπορεί να λειτουργήσει και προς την αντίθετη κατεύθυνση, δηλαδή η εφαρμογή μιας τάσης, δημιουργεί μια θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στα δύο διαφορετικά μέταλλα. Όπως και ο Seebeck, ο Peltier δεν είχε αντιληφθεί πλήρως την φύση του φαινομένου,

ισχυριζόμενος ότι δεν ισχύει για χαμηλές εντάσεις ο νόμος των Joule – Lenz, που προβλέπει ότι η διέλευση ρεύματος προκαλεί εκπομπή θερμότητας. Τέσσερα χρόνια αργότερα, ο Ρώσος ακαδημαϊκός Emily Lenz, έδειξε ότι πρόκειται για αυτόνομο φυσικό φαινόμενο, που συνίσταται στην απορρόφηση ή απελευθέρωση πρόσθετης θερμότητας (πέραν της θερμότητας Joule) και η ψύξη ή θέρμανση της επαφής, εξαρτάται από την φορά του ρεύματος που διέρχεται απ' αυτή.

Η θερμοδυναμική θεώρηση των δύο φαινομένων από τον φυσικομαθηματικό και μηχανικό William Thomson γνωστό και ως λόρδο Kelvin (1824-1907) το 1851, έδωσε μια επαρκή εξήγησή τους, έδειξε την συσχέτιση μεταξύ τους και τον οδήγησε στην πρόβλεψη ενός τρίτου φαινομένου, που σήμερα είναι γνωστό ως φαινόμενο Thomson. Στο φαινόμενο αυτό, κατά την διέλευση ρεύματος μέσα από ένα ομογενές αγώγιμο υλικό με σταθερή θερμοκρασιακή διαβάθμιση, παράγεται ή απορροφάται θερμότητα, ανάλογη με την ένταση του ρεύματος και με την θερμοκρασιακή διαβάθμιση. Σε δυο εργασίες του το 1905 και 1911 ο Γερμανός Edmund Altenkirch έδειξε ότι τα υλικά που είναι κατάλληλα για αποδοτική εφαρμογή των θερμοηλεκτρικών φαινομένων, θα πρέπει να παρουσιάζουν μεγάλη τιμή του συντελεστή Seebeck, με ταυτόχρονα χαμηλή θερμική αγωγιμότητα λ και υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Τα χαρακτηριστικά αυτά ενσωματώθηκαν στην τιμή $Z = \alpha^2 \sigma / \lambda$ που σήμερα είναι γνωστή ως δείκτης της ποιότητας του υλικού.

Στα τέλη της δεκαετίας του '30, η ανάπτυξη των συνθετικών ημιαγωγών έδωσε θερμοηλεκτρικά υλικά με συντελεστή Seebeck μεγαλύτερο κατά μια τάξη μεγέθους, σε σχέση με τα μέταλλα και κράματά τους που είχαν μελετηθεί ως τότε και το επιστημονικό ενδιαφέρον για τα θερμοηλεκτρικά φαινόμενα ανανεώθηκε. Το 1947 στα εργαστήρια της Westinghouse η Maria Telkes κατασκεύασε θερμοηλεκτρική γεννήτρια που χρησιμοποιούσε την ηλιακή θερμότητα, με βαθμό απόδοσης γύρω στο 3%. Το 1949 ο Abram Fedorovich Ioffe ανέπτυξε μια θεωρία για τα ημιαγωγά θερμοστοιχεία, η οποία χρησιμοποιείται έως σήμερα. Η έρευνα σε σύνθετους ημιαγωγούς (κυρίως για πιθανές εφαρμογές τρανζίστορ), οδήγησε σε νέα υλικά με βελτιωμένες θερμοηλεκτρικές ιδιότητες.

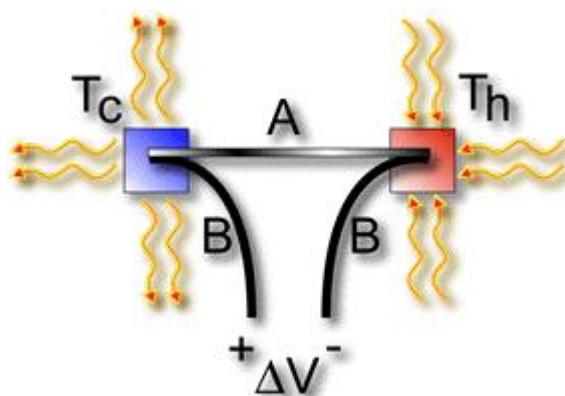
Το 1956 ο Ioffe έδειξε ότι ο λόγος της θερμικής προς την ηλεκτρική αγωγιμότητα ενός θερμοηλεκτρικού υλικού, μπορεί να μειωθεί με την προσθήκη ενός ισόμορφου

στοιχείου ή ένωσης. Την εποχή αυτή, κυρίως λόγω των πιθανών στρατιωτικών εφαρμογών της θερμοηλεκτρικής τεχνολογίας, άρχισε μια εντατική έρευνα πάνω στα υλικά, που με την σειρά της οδήγησε στην ανακάλυψη ημιαγωγών με αδιάστατο ZT (θερμοηλεκτρική απόδοση) που προσεγγίζει την τιμή 1,5.

Στις μέρες μας το ενδιαφέρον έχει αναζωπυρωθεί. Αυτό συμβαίνει και λόγω των αυξημένων ενεργειακών αναγκών που ολοένα και μεγαλώνουν και λόγω των μεγαλύτερων δυνατοτήτων που έχουμε για κατασκευή και επεξεργασία υλικών. Δυνατότητες που ήδη μας έχουνε δώσει θερμοστοιχεία με μεγαλύτερες αποδόσεις, της τάξης του 10-12% και υπόσχονται ακόμη μεγαλύτερες. Η τεχνολογία αυτή μπορεί να βρει εφαρμογές σε οχήματα, τα οποία έχουν κινητήρες εσωτερικής καύσης που αποβάλλουν μεγάλα ποσά ενέργειας με τη μορφή θερμότητας, καθώς και σε πλήθος εγκαταστάσεων που αποβάλλουν μεγάλα ποσά θερμότητας, με κυριότερα τα συμβατικά εργοστάσια παραγωγής ενέργειας.

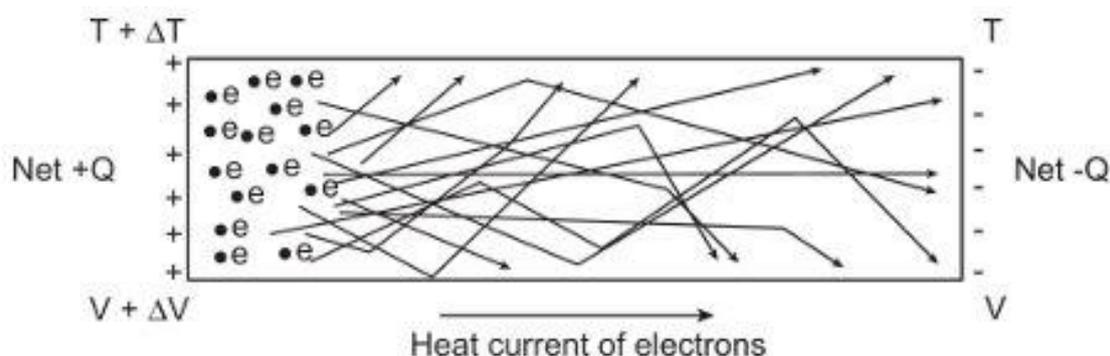
1.3 Φαινόμενο Seebeck

Η ανακάλυψη του θερμοηλεκτρικού φαινομένου έγινε από τον Thomas Johann Seebeck το 1822, όπου παρατηρήθηκε ότι όταν στο σημείο ένωσης δυο μετάλλων υπάρχει θερμότητα τότε η μαγνητική βελόνα εκτρέπεται από τη θέση της. Αυτό το γεγονός οδήγησε στο συμπέρασμα ότι οι αγωγοί διαρρέονται από ηλεκτρικό ρεύμα όταν στα άκρα τους υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας όπως φαίνεται στο *Σχήμα 1.1*.



Σχήμα 1.1: Το φαινόμενο Seebeck σε κλειστό κύκλωμα.

Πρακτικά αυτό που συμβαίνει είναι πως τα ηλεκτρόνια από τη θερμή περιοχή του μετάλλου έχουν περισσότερη ενέργεια, άρα και μεγαλύτερες ταχύτητες, συγκριτικά με αυτά στην ψυχρή. Άρα θα παρατηρηθεί διάχυση ηλεκτρονίων από τη θερμή περιοχή στην ψυχρή, άρα θα έχω συσσώρευση ηλεκτρονίων στην ψυχρή περιοχή και δημιουργία απογυμνωμένων θετικών μεταλλικών ιόντων στην θερμή. Η διαδικασία αυτή έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία δυναμικού το οποίο τελικά θα πάρει τιμή ικανή να εμποδίσει οποιαδήποτε περαιτέρω μετατόπιση ηλεκτρονίων (**Σχήμα 1.2**).



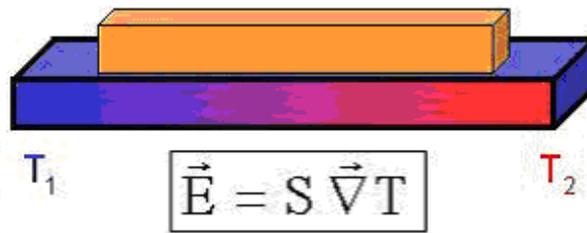
Σχήμα 1.2: Ροή ηλεκτρονίων κατά το φαινόμενο Seebeck.

Στο φαινόμενο *Seebeck* η αναπτυσσόμενη διαφορά δυναμικού εξαρτάται απευθείας από τη διαφορά θερμοκρασίας των δυο επαφών και όχι από την κατανομή θερμοκρασίας κατά μήκος του μετάλλου μεταξύ των δυο επαφών. Ακόμη εξαρτάται και από το είδος των υλικών. Σε ένα σύστημα όπου και οι δυο επαφές διατηρούνται σε σταθερή διαφορά θερμοκρασίας υπάρχει σταθερή διάχυση φορέων από το ένα άκρο στο άλλο. Εάν ο ρυθμός διάχυσης των θερμών και ψυχρών φορέων ήταν ίδιος, τότε δε θα υπήρχαν καθαρές αλλαγές φορτίου. Παρόλα αυτά οι διαχεόμενοι φορείς σκεδάζονται από προσμίξεις, ατέλειες και από τις δονήσεις του πλέγματος (φωνόνια). Εάν η σκέδαση είναι ενεργειακά εξαρτώμενη, οι θερμοί και οι ψυχροί φορείς θα διαχέονται σε διαφορετικούς ρυθμούς. Αυτό δημιουργεί υψηλότερη πυκνότητα φορτίου στο ένα άκρο και η απόσταση μεταξύ θετικών και αρνητικών φορτίων δημιουργεί μια διαφορά δυναμικού. Το ηλεκτρικό πεδίο παρόλα αυτά αντιτίθεται στη σκέδαση των φορέων και υπεισέρχεται ισορροπία όταν ο καθαρός

αριθμός φορέων που διαχέονται προς τη μια πλευρά αναιρείται από τον καθαρό αριθμό φορέων που κινούνται σε κατεύθυνση αντίθετη από αυτή του ηλεκτροστατικού πεδίου. Αυτό σημαίνει ότι η θερμοδύναμη ενός υλικού εξαρτάται ισχυρά από προσμειξίσεις, ατέλειες και δομικές αλλαγές (οι οποίες συχνά ποικίλουν με τη θερμοκρασία και το ηλεκτροστατικό πεδίο), και ότι η θερμοδύναμη ενός υλικού είναι μια συλλογή πολλών διαφορετικών φαινομένων. Η τάση που αναπτύσσεται υπολογίζεται από τη σχέση:

$$V = \int_{T_1}^{T_2} (S_B(T) - S_A(T)) dT$$

όπου S_A και S_B οι συντελεστές Seebeck (θερμοηλεκτρική ισχύς ή θερμοδύναμη) των μετάλλων A και B, T_1 και T_2 οι θερμοκρασίες των δυο επαφών. Οι συντελεστές είναι μη γραμμικοί και εξαρτώνται από την απόλυτη θερμοκρασία, τη μοριακή δομή και το υλικό των αγωγών. Μονάδα μέτρησης των συντελεστών είναι Volt/Kelvin.



Σχήμα 1.3: Φαινόμενο Seebeck.

Αν οι συντελεστές είναι σταθεροί για ένα εύρος θερμοκρασιών, τότε ο παραπάνω τύπος γίνεται προσεγγιστικά ίσος με:

$$V = (S_B - S_A) \cdot (T_2 - T_1)$$

Η θερμοηλεκτρική δύναμη ορίζεται ως η τάση ανοιχτού κυκλώματος μεταξύ δυο σημείων ενός αγωγού όπου η διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσά τους είναι 1K.

Εάν η διαφορά θερμοκρασίας των δυο επαφών είναι μικρή της μορφής $T_2 = T_1 + \Delta T$, η θερμοδύναμη του θερμοζεύγους ορίζεται ως:

$$S_{AB} = S_A - S_B = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta T}$$

Γίνεται επομένως σαφές ότι η τάση που παράγεται στα άκρα ενός θερμοστοιχείου εξαρτάται άμεσα από τον συντελεστή Seebeck S ή a_s των υλικών του καθώς και από την διαφορά θερμοκρασίας ΔT που εφαρμόζεται σε αυτά.

1.4 Το φαινόμενο Peltier

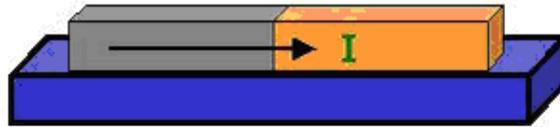
Το φαινόμενο αυτό είναι το αντίστροφο του φαινομένου Seebeck, δηλαδή η δημιουργία διαφοράς θερμοκρασίας από ηλεκτρική τάση. Ενώ στο φαινόμενο Seebeck απαιτείται ένα αγώγιμο υλικό, το φαινόμενο Peltier παρατηρείται όταν δυο διαφορετικοί αγωγοί ενώνονται σε μια επαφή. Επειδή οι στάθμες Fermi των δυο υλικών είναι συνήθως διαφορετικές, μερικά ηλεκτρόνια θα περάσουν μέσα από την επαφή μέχρι να παραχθεί ένα ηλεκτρικό πεδίο σαφώς μεγάλο ώστε να εμποδίζει την περαιτέρω ροή ηλεκτρονίων κατά μήκος της επαφής. Το μέγεθος της διαφοράς δυναμικού που δημιουργείται κατά μήκος της επαφής Peltier εξαρτάται τόσο από το είδος των μετάλλων, όσο και από τη θερμοκρασία της επαφής. Στην πραγματικότητα υπάρχει μια μείωση της θερμοκρασίας στην επαφή εξαιτίας του γεγονότος ότι τα ηλεκτρόνια πρέπει να χρησιμοποιήσουν ένα μέρος της ενέργειας των υλικών για να περάσουν μέσα από την επαφή.

Το φαινόμενο Peltier εμφανίζεται λόγω του ότι ένα ηλεκτρικό ρεύμα συνοδεύεται από ένα θερμικό ρεύμα σε έναν ομοιογενή αγωγό ευρισκόμενος ακόμα και υπό σταθερή θερμοκρασία. Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας (φορτίο ή θερμικό ρεύμα) δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{Q} = \Pi_{AB} I = (\Pi_B - \Pi_A) I$$

Όπου Π_{AB} η σταθερά Peltier του κυκλώματος και Π_A Π_B οι σταθερές Peltier του κάθε

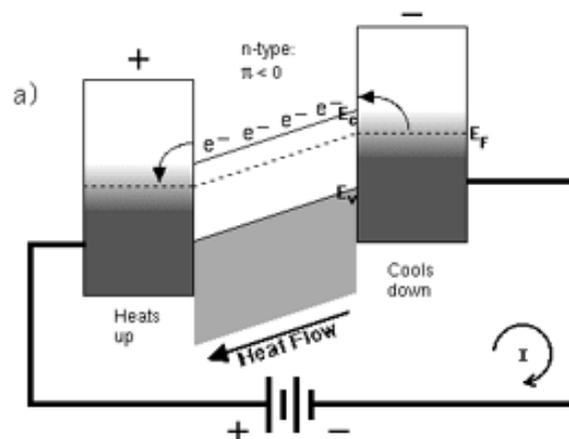
υλικού, και εκφράζει το ισοζύγιο θερμότητας από και προς τη διεπιφάνεια A-B των αγωγών όπως φαίνεται στο *Σχήμα 1.4* για π.χ. σίδηρο (γκρι υλικό) και χαλκό (πορτοκαλί υλικό).



$$\Pi_{12} I \equiv \text{ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΗ ΕΤΕΡΟΕΠΙΛΕΞΗΣ}$$

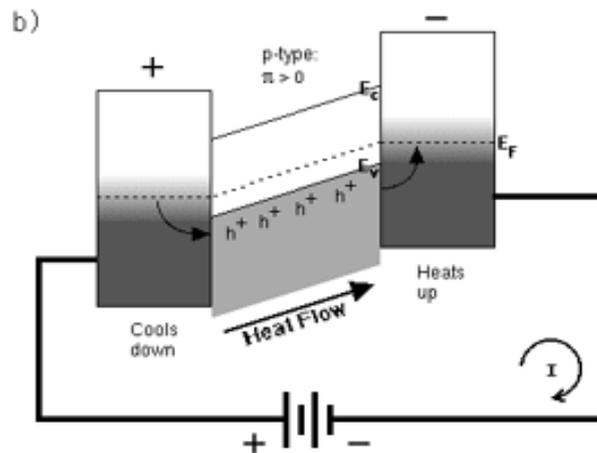
Σχήμα 1.4: Φαινόμενο Peltier.

- Στην περίπτωση που η σταθερά $\Pi < 0$ η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος είναι προς την αντίθετη κατεύθυνση από αυτήν του θερμικού φορτίου και υπάρχει μετάπτωση ηλεκτρονίων από την υψηλή ενεργειακή στάθμη προς στην χαμηλή για ημιαγωγούς τύπου n όπως φαίνεται στο *Σχήμα 1.5*.



Σχήμα 1.5: Αντίθετη κίνηση ηλεκτρικού-θερμικού φορτίου για $\Pi < 0$

- Στην περίπτωση που η σταθερά $\Pi > 0$ η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος είναι προς την ίδια κατεύθυνση με αυτήν του θερμικού φορτίου και υπάρχει μετακίνηση οπών από την χαμηλή ενεργειακή στάθμη προς την υψηλή για ημιαγωγούς τύπου p όπως φαίνεται στο *Σχήμα 1.6*.



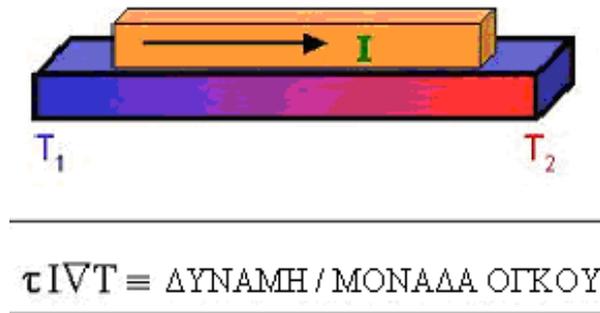
Σχήμα 1.6: Ίδια κίνηση ηλεκτρικού-θερμικού φορτίου για $\Pi > 0$

1.5 Το φαινόμενο Thomson

Την μελέτη των θερμοηλεκτρικών φαινομένων ολοκλήρωσε ο William Thomson το 1851 θεμελιώνοντας το τρίτο θερμοηλεκτρικό φαινόμενο που αφορούσε την έκλυση ή την απορρόφηση θερμότητας από ένα υλικό όταν αυτό διαρρέεται από ρεύμα. Ο Thomson προσπάθησε να επιλύσει τις διαφορές ανάμεσα στις τάσεις Seebeck ενός θερμοηλεκτρικού κυκλώματος τις οποίες μέτρησε και τις τάσεις τις οποίες ανέμενε να ανιχνεύσει σε ένα αντιστρέψιμο σύστημα που υπάκουε στους νόμους της θερμοδυναμικής. Το φαινόμενο Thomson έχει μικρή επίδραση στα θερμοηλεκτρικά συστήματα, ωστόσο πρέπει να το λάβουμε υπ' όψιν μας, ώστε να κάνουμε ακριβείς υπολογισμούς. Η εξίσωση που περιγράφει το φαινόμενο Thomson είναι:

$$\frac{dQ}{dt} = \tau \cdot \Delta T$$

Όπου τ ο συντελεστής Thomson .



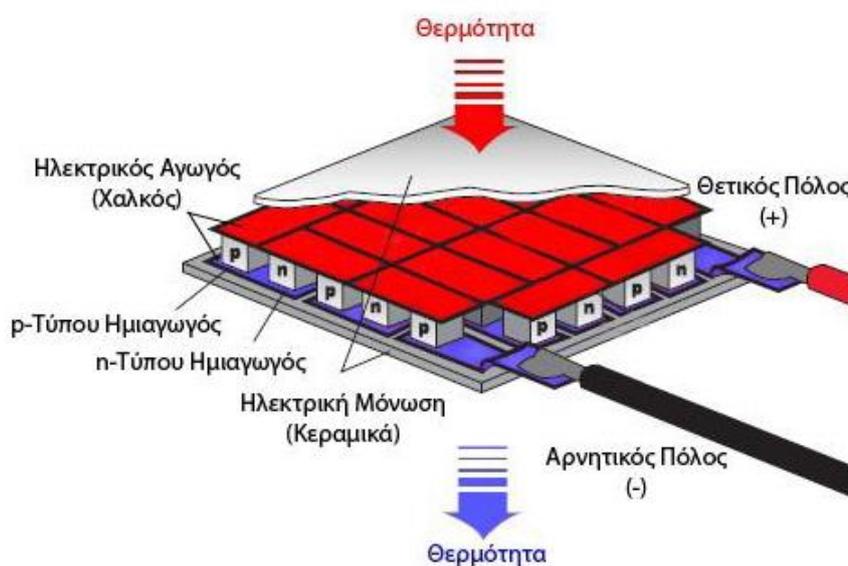
Σχήμα 1.7: Φαινόμενο Thomson.

Πρέπει να ξεκαθαριστεί ότι η αποβολή (ή έκλυση) θερμότητας σε ένα υλικό όταν αυτό διαρρέεται από ρεύμα που μελέτησε ο Thomson, δεν έχει σχέση με την θερμότητα που αναπτύσσεται σε έναν αγωγό αντίστασης R όταν αυτός διαρρέεται από ρεύμα για κάποιο χρονικό διάστημα (φαινομένου Joule $Q = I^2 R t$) η οποία πάντα αποβάλλεται.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Θερμοηλεκτρικά Στοιχεία

2.1 Θερμοηλεκτρικά Στοιχεία

Τα Θερμοηλεκτρικά στοιχεία, ή αλλιώς Θερμοστοιχεία, είναι δομές που αποτελούνται από ζεύγη νοθευμένων θερμοηλεκτρικών ημιαγωγικών υλικών n και p τύπου. Παλιότερα ήταν διμεταλλικές επαφές, ενώ τώρα συνήθως είναι επαφές βισμούθιου-τελλουρίου (Bi_2Te_3), που ονομάζονται θερμοζεύγη. Τα θερμοζεύγη είναι συνδεδεμένα διαδοχικά σε σειρά με κράματα αντιμονίου-κασσίτερου (Sb-Sn) ή μόλυβδου-κασσίτερου (Pb-Sn) που εξασφαλίζουν υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα και θερμική αντοχή λόγω του υψηλού σημείου τήξεωσ τους. Η όλη διάταξη είναι τοποθετημένη ανάμεσα σε δύο κεραμικές πλάκες οι οποίες λόγω των καλών μηχανικών ιδιοτήτων τους, της υψηλής θερμικής αγωγιμότητας και της μηδενικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας τους εξασφαλίζουν την σωστή λειτουργία του θερμοστοιχείου και την προστασία του. Οι δύο αυτές πλάκες αποτελούν τη θερμή και την ψυχρή πλευρά του θερμοστοιχείου (Σχήμα 2.1).



Σχήμα 2.1: Το θερμοηλεκτρικό στοιχείο Peltier.

Τα θερμοστοιχεία έχουν τα πλεονεκτήματα ότι είναι στοιχεία:

- στερεάς κατάστασης (solid-state)
- χωρίς κινούμενα μέρη
- με μεγάλο χρόνο ζωής (100.000-200.000 ώρες λειτουργίας)
- μικρό κόστος συντήρησης
- έχουν εφαρμογή σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών
- έχουν μηδενική ρύπανση
- με αθόρυβη και χωρίς δονήσεις λειτουργία

Το κύριο μειονέκτημα τους είναι η μικρή τους απόδοση, το οποίο με την εξέλιξη της τεχνολογίας των υλικών και την εφαρμογή νέων κραμάτων και μεθόδων στις θερμοηλεκτρικές διατάξεις γίνεται προσπάθεια να εξαλειφθεί.

Η αρχή λειτουργίας των θερμοστοιχείων βασίζεται στα τρία θερμοηλεκτρικά φαινόμενα που συναντήσαμε παραπάνω. Το φαινόμενο Peltier, βάσει του οποίου το θερμοστοιχείο λειτουργεί σαν μία αντλία που μεταφέρει θερμότητα από τη μία πλάκα στην άλλη όταν διέρχεται ηλεκτρικό ρεύμα από αυτό, βρίσκει εφαρμογή σε εφαρμογές ψύξης – θέρμανσης. Οι διατάξεις αυτές ονομάζονται θερμοηλεκτρικές ψυκτικές διατάξεις ή αλλιώς αντλίες θερμότητας, Thermoelectric Coolers – TEC's.

Βάσει του φαινομένου Seebeck το θερμοστοιχείο λειτουργεί αντίστροφα. Οπότε φέρνοντας σε επαφή τη μία πλάκα του με μία θερμή δεξαμενή ενώ την άλλη με μία ψυχρή, επιτυγχάνει κατά την αγωγή θερμότητας από τη μία πλευρά του στην άλλη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, τάσης και συνεπώς ρεύματος σε ένα κύκλωμα. Οι διατάξεις που εκμεταλλεύονται το φαινόμενο Seebeck για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι γνωστές ως Θερμοηλεκτρικές γεννήτριες ή Thermoelectric Generators – TEG's. Τέλος, σύμφωνα με το φαινόμενο Thomson όταν ένας αγωγός που παρουσιάζει θερμική ανισοτροπία διαρρέεται από ρεύμα τότε ανάλογα με τη φορά του ρεύματος ο αγωγός αυτός είτε θα απορροφήσει είτε θα προσδώσει θερμότητα στο περιβάλλον. Παρόλο όμως που το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται και στους δύο τρόπους λειτουργίας του θερμοστοιχείου, είναι αμελητέο σε σχέση με τα άλλα δύο.

Με τη χρήση των θερμοστοιχείων, σχεδόν κάθε πηγή θερμότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η έλλειψη μάλιστα κινούμενων μαζών καθώς και το μικρό μέγεθος και βάρος των θερμοστοιχείων τα κάνει ιδανικά για εξειδικευμένες εφαρμογές: στρατιωτικές, βιομηχανικές και εργαστηριακές. Από τη γεωθερμία και την ηλιακή θερμότητα ως τη θερμότητα του ανθρώπινου σώματος και την ανάκτηση ενέργειας σε μηχανές καύσης, εφαρμογές που θα μελετηθούν αναλυτικά στα επόμενα κεφάλαια.

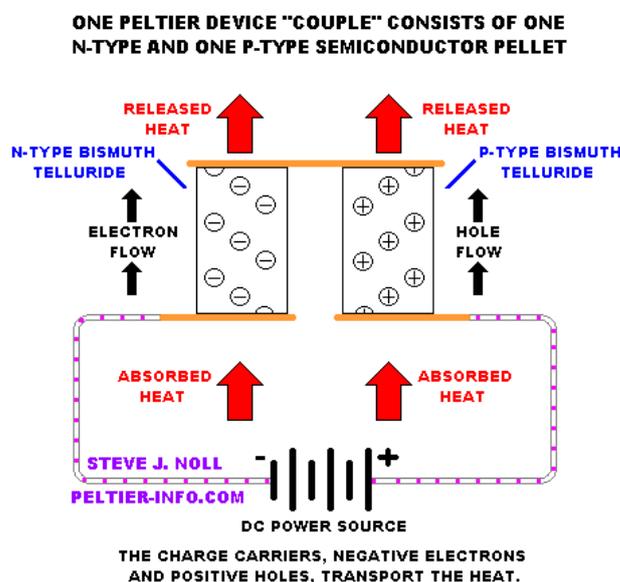
2.2 Αντλίες θερμότητας - TEC's

Μια θερμοηλεκτρική ψυκτική διάταξη ή μια αντλία θερμότητας (*TEC*) είναι μια διάταξη στερεάς κατάστασης που εκμεταλλεύεται το φαινόμενο *Peltier* και δουλεύει σε σύνδεση με έναν απαγωγό θερμότητας για την απομάκρυνση της θερμότητας από το σύστημα. Εάν ηλεκτρικό ρεύμα εφαρμόζεται σε ένα θερμοζεύγος, η θερμότητα αντλείται από την μια επαφή στην άλλη. Η θερμοκρασία της ψυχρής επαφής θα πέσει ραγδαία κάτω από την περιβάλλουσα θερμοκρασία συντηρώντας τη θερμότητα που μετακινείται από τη θερμή πλευρά. Η βαθμίδα θερμοκρασίας θα μεταβάλλεται ανάλογα με το μέγεθος του εφαρμοζόμενου ρεύματος. Το κριτήριο επιλογής μιας καλής ψυκτικής διάταξης είναι ο συντελεστής θερμοηλεκτρικής απόδοσης ZT ο οποίος πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερος της μονάδας. Η πρώτη απαίτηση για το συντελεστή ικανοποιείται όταν το υλικό έχει υψηλή συγκέντρωση φορέων και υψηλή ευκινησία, δηλαδή υψηλή αγωγιμότητα και συντελεστή *Seebeck*, ενώ η δεύτερη όταν το υλικό έχει μικρή θερμική αγωγιμότητα. Ο συντελεστής ZT της θερμοηλεκτρικής απόδοσης ορίζεται από τη σχέση:

$$ZT = \frac{(\Delta T)_{max}}{T} = \frac{\sigma \cdot S^2}{k} \cdot T$$

όπου $(\Delta T)_{max}$ είναι η μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά που μπορεί να επιτευχθεί στα άκρα ενός στοιχείου *Peltier*, T η απόλυτη θερμοκρασία, σ η ειδική αγωγιμότητα, S ο συντελεστής *Seebeck* και k ο συντελεστής της θερμικής αγωγιμότητας κάθε υλικού. Η βελτιστοποίηση του ZT είναι δύσκολη υπόθεση διότι η θερμοισχύς, η ηλεκτρική αγωγιμότητα και η θερμική αγωγιμότητα εξαρτώνται από συγκεκριμένες

ηλεκτρονικές δομές του κάθε υλικού. Είναι αδύνατο να αλλάξουμε μια παράμετρο χωρίς να επηρεαστούν οι άλλες.



Σχήμα 2.2 : Συστοιχία TEC για ψύξη.

Στο **Σχήμα 2.3** αυτό που συμβαίνει με την διάταξη είναι ότι τα θετικά φορτία (οπές) του *p*-τύπου υλικού κινούνται από την επαφή A προς την επαφή B. Αντίστοιχα, τα αρνητικά φορτία (ηλεκτρόνια) του *n*-τύπου υλικού κινούνται και αυτά από την επαφή A προς την επαφή B. Λόγω της χρήσης δυο διαφορετικών τύπων υλικών, η θερμότητα έχει την ίδια κατεύθυνση μέσα από αυτά (συντελεστής *Peltier* $\Pi > 0$). Ένα μείζονος σημασίας χαρακτηριστικό που έχει η διάταξη αυτή είναι ότι τα συζυγή ζεύγη θα πρέπει να έχουν παραπλήσιες ηλεκτρικές, θερμικές και μηχανικές ιδιότητες. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι τα ζεύγη πρέπει να προέρχονται από τον ίδιο ημιαγωγό με διαφορετικές προσμεϊξεις. Στις διατάξεις *Peltier* που πωλούνται στο εμπόριο το υλικό που χρησιμοποιείται περισσότερο είναι το Bi_2Te_3 το οποίο παρασκευάζεται και ως *p* και ως *n* τύπου ανάλογα με το ποσοστό Te πριν την ανάπτυξη του κρυστάλλου (π.χ. με τη διαδικασία της παρένθεσης). Γενικά τα υλικά που ανήκουν στην οικογένεια M_2X_3 , όπου M: Bi ή Sb και X: Te ή Se είναι κατάλληλα υλικά για θερμοηλεκτρικές εφαρμογές. Σε πραγματικές εφαρμογές χρησιμοποιούνται συστοιχίες *n* και *p* υλικών, στηριζόμενα στην προηγούμενη διάταξη, αυξάνοντας έτσι

με τον τρόπο αυτό την απόδοση του στοιχείου *Peltier*. Τέτοιου είδους συσκευές έχουν την ικανότητα μεταφοράς σημαντικών ποσοτήτων θερμότητας όταν έχουν συνδεθεί με κοινές πηγές συνεχούς ρεύματος. Οι περισσότερες από αυτές αποτελούνται από 254 στοιχεία n και p τύπου που εναλλάσσονται διαδοχικά και μπορούν να λειτουργήσουν από 12 ως 16V.

Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι οι περισσότερες εφαρμογές που απαιτούν ψύξη δεν κάνουν χρήση των θερμοηλεκτρικών υλικών εξαιτίας των χαμηλών τιμών της απόδοσης που συναντώνται στα (TECs). Ένα TEC απαιτεί μεγάλα ποσά ηλεκτρικής δύναμης για το φαινόμενο ψύξης σε αντίθεση με τα περισσότερα συμβατικά συστήματα όπως το vapor compression refrigeration cycles που έχουν την τριπλάσια απόδοση από τα αντίστοιχα θερμοηλεκτρικά. Παρόλα αυτά, τα TECs μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολύ αποτελεσματικά σε συγκεκριμένες εφαρμογές. Όντας διατάξεις στερεάς κατάστασης, δεν παράγουν θόρυβο και δεν απαιτούν σχεδόν καθόλου συντήρηση. Οι διαστάσεις τους είναι μικρές σχετικά με άλλα συστήματα και άρα προτιμώνται όπου υπάρχει περιορισμένος χώρος για εξοπλισμό. Στην εικόνα που ακολουθεί δίνονται ενδεικτικά κάποια TECs.



Εικόνα 2.3 : Peltier εμπορίου.

Παρά το μικρό τους μέγεθος, αυτές οι συσκευές μπορούν να δημιουργήσουν θερμοκρασιακές διαφορές μέχρι και περίπου 65°C. Είναι δυνατόν επίσης να τοποθετηθούν κατακόρυφα, όπως φαίνεται παραστατικά στην εικόνα που ακολουθεί, προς δημιουργία ακόμα μεγαλύτερων διαφορών θερμοκρασίας.



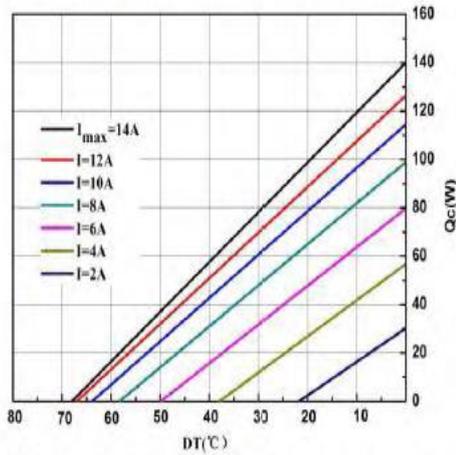
Εικόνα 2.4 : Κατακόρυφη διάταξη TEC.

Χρησιμοποιούνται επίσης για τοπική ψύξη, όπου μόνο ένα μικρό τμήμα του συστήματος πρέπει να ψυχθεί. Οι θερμοηλεκτρικές αυτές διατάξεις είναι τέλος χρήσιμες ως ενεργές συσκευές ελέγχου θερμοκρασίας. Μια απλή διαδικασία ανατροφοδότησης χρησιμοποιείται για να τροφοδοτήσει το TEC σε ένα σύστημα όπου απαιτείται μια συγκεκριμένη τιμή θερμοκρασίας, καθώς η θερμοκρασία στη μια πλευρά της συσκευής είναι ευθέως ανάλογη προς το φορτίο εισόδου. Η ψυχρή πλευρά της συσκευής μπορεί είτε να ψυχθεί είτε να ζεσταθεί στην κατάλληλη θερμοκρασία, εξαρτώμενη πάντα από την πολικότητα του εφαρμοζόμενου ρεύματος. Όσο η θερμοκρασία παραμένει μέσα στα όρια των προδιαγραφών της συσκευής και γίνεται χρήση ενός κατάλληλου απαγωγού θερμότητας ή πηγής θερμότητας στη μια πλευρά, η θερμοκρασία ελέγχεται με αρκετή ακρίβεια.

2.2.1 Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας TEC

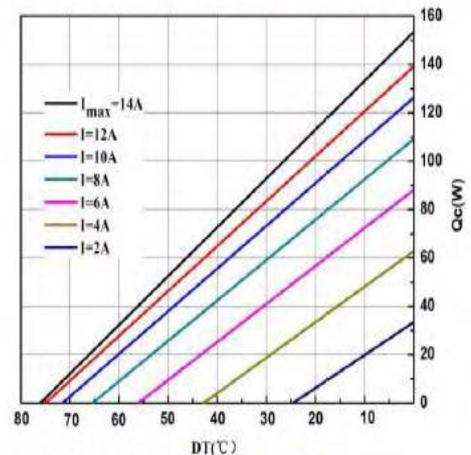
Παρακάτω παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας ενός TEC εμπορίου με 127 ζεύγη n-p. Στο **Σχήμα 2.5** φαίνεται ότι όσο μεγαλύτερο είναι το ρεύμα που περνάει μέσα από το θερμοστοιχείο τόσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασιακή διαφορά (DT) που εμφανίζεται στα άκρα του. Παρόλα αυτά όπως παρατηρείται η σχέση μεταξύ των δύο αυτών μεγεθών δεν είναι απόλυτα γραμμική. Όσο το ρεύμα μεγαλώνει, τόσο μικρότερες είναι οι θερμοκρασιακές διαφορές που πετυχαίνουμε. Τέλος, παρατηρείται ένα σημείο κορεσμού στα 14 A.

Performance Curves at $T_h=27^\circ\text{C}$



The chart for Q_c Vs DT under various currents

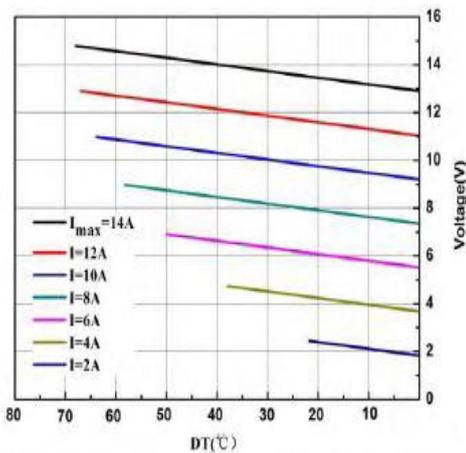
Performance Curves at $T_h=50^\circ\text{C}$



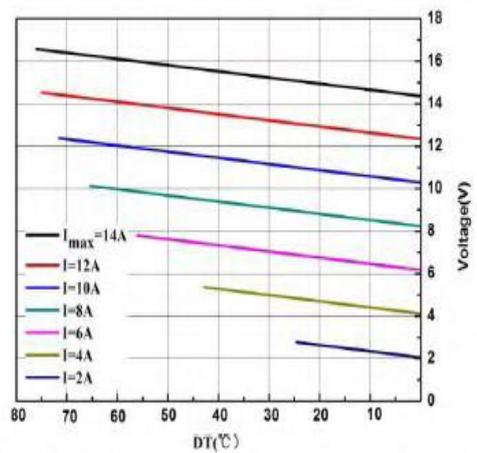
The chart for Q_c Vs DT under various currents

Σχήμα 2.5: Διαγράμματα Ηλεκτρικής ισχύος - διαφοράς θερμοκρασίας.

Στο **Σχήμα 2.6** παρατηρείται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασιακή διαφορά στα άκρα του θερμοστοιχείου τόσο μεγαλύτερη τάση απαιτείται στους ακροδέκτες του για το ίδιο ρεύμα. Συνεπώς όσο μεγαλώνει η διαφορά θερμοκρασίας τόσο αυξάνεται και η ηλεκτρική αντίσταση του στοιχείου και μάλιστα η μεταξύ τους σχέση δείχνει να είναι γραμμική.



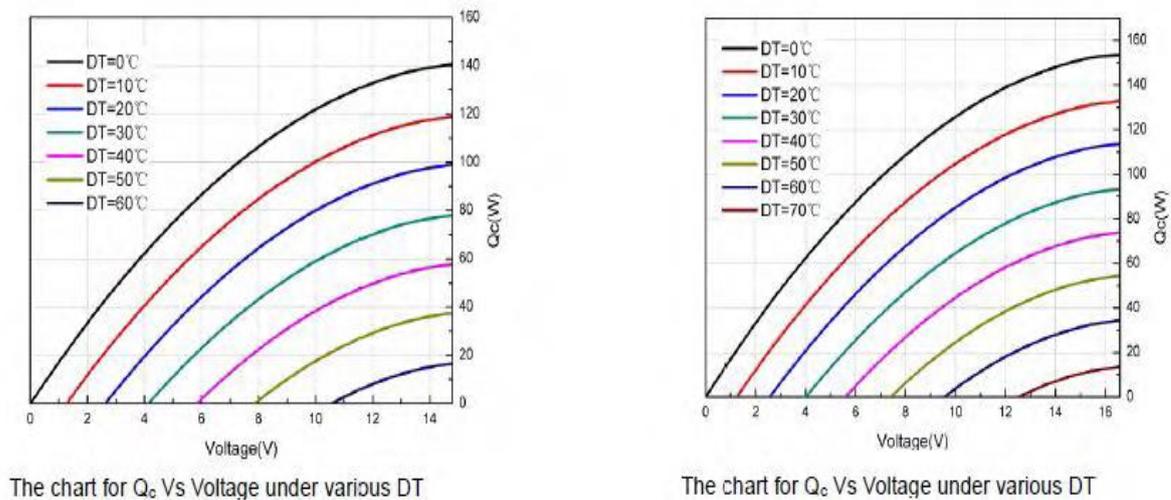
The chart for Voltage Vs DT under various currents



The chart for Voltage Vs DT under various currents

Σχήμα 2.6: Διαγράμματα τάσης ακροδεκτών - μεταφοράς θερμοκρασίας.

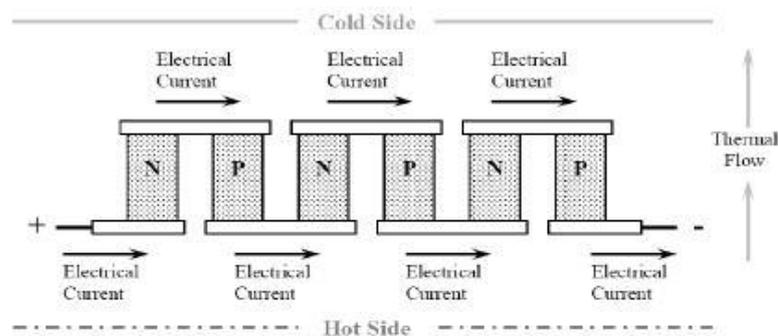
Τέλος στα **Σχήμα 2.7** παρατηρείται ότι για ίδιες διαφορές θερμοκρασίας, η αύξηση στην τάση σημαίνει και αύξηση της ενέργειας στην ψυχρή πλευρά.



Σχήμα 2.7: Διαγράμματα ηλεκτρικής ισχύος - τάσης ακροδεκτών.

2.3 Θερμοηλεκτρικές Γεννήτριες TEG's

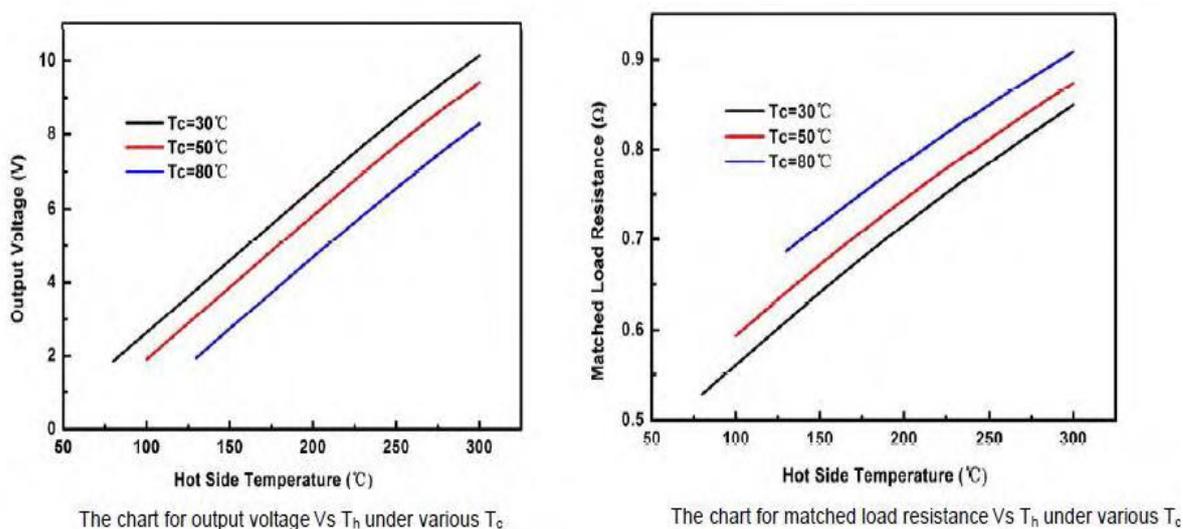
Η απλούστερη θερμοηλεκτρική γεννήτρια (*TEG*) προϋποθέτει ένα ζεύγος, το οποίο περιλαμβάνει ένα *p*-τύπου και ένα *n*-τύπου θερμοστοιχεία τα οποία είναι συνδεδεμένα ηλεκτρικά σε σειρά και θερμικά παράλληλα. Μέρος της θερμότητας αντλείται στη μια πλευρά του ζεύγους και αποβάλλεται από την άλλη. Έτσι παράγεται ένα ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο μπορεί να μετρηθεί, ανάλογο της βαθμίδας θερμοκρασίας (ή αλλιώς ανάλογο της θερμικής ροής) μεταξύ των θερμών και ψυχρών επαφών.



Σχήμα 2.8 : Συστοιχία TEG για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

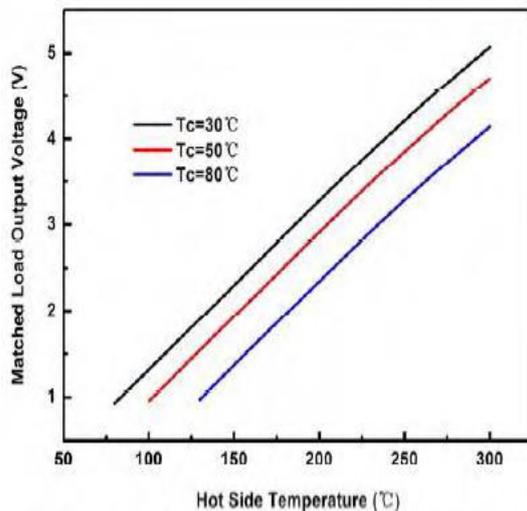
2.3.1 Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας TEG

Παρακάτω παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας ενός TEG. Στο πρώτο διάγραμμα στο *Σχήμα 2.9* φαίνεται ότι η τάση στους ακροδέκτες του θερμοστοιχείου αυξάνεται ανάλογα με την αύξηση της θερμοκρασίας της θερμής πλάκας (T_H) και με τη μείωση της θερμοκρασίας της ψυχρής πλάκας (T_C). Στο δεύτερο φαίνεται ότι η αντίσταση που απαιτείται για να γίνει προσαρμογή φορτίου αυξάνεται όσο αυξάνονται οι θερμοκρασίες T_H και T_C . Συμπεραίνεται λοιπόν ότι η εσωτερική αντίσταση του θερμοστοιχείου αυξάνεται ομοίως.

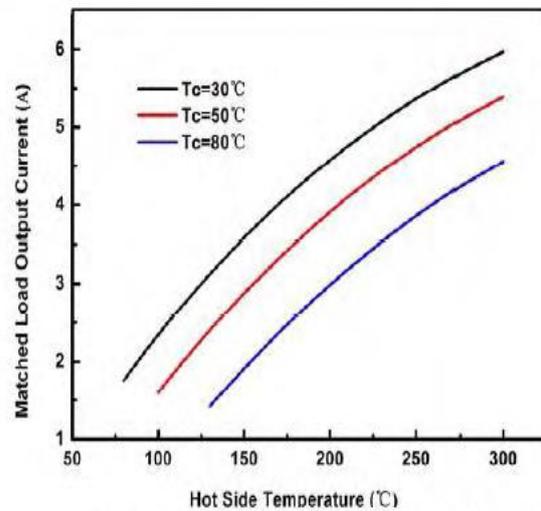


Σχήμα 2.9: Διάγραμμα Τάσης / T_{HOT} - Διάγραμμα προσαρμοσμένης αντίστασης / T_{HOT} .

Στο *Σχήμα 2.10* φαίνεται ότι ενώ η τάση αυξάνει γραμμικά με την αύξηση της θερμοκρασίας της T_H , το ρεύμα αυξάνεται με διαφορετικό τρόπο. Αυτό είναι αναμενόμενο, αφού όπως έγινε φανερό και από το προηγούμενο διάγραμμα με την αύξηση της θερμοκρασίας μεγαλώνει η εσωτερική αντίσταση του θερμοστοιχείου. Οπότε έχοντας προσαρμοσμένο φορτίο, για γραμμικά αυξανόμενη εσωτερική τάση παρατηρείται μικρότερη αύξηση του ρεύματος.



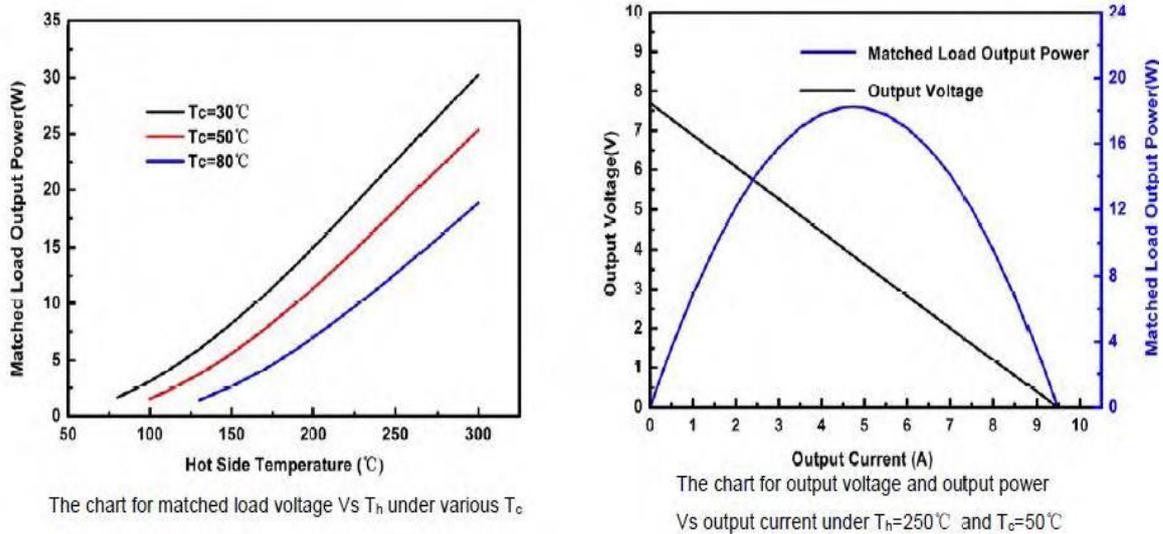
The chart for matched load voltage Vs T_h under various T_c .



The chart for matched load current Vs T_h under various T_c .

Σχήμα 210: Διάγραμμα τάσης με προσαρμοσμένο φορτίο / T_{HOT} – Διάγραμμα ρεύματος με προσαρμοσμένο φορτίο / T_{HOT} .

Στο πρώτο διάγραμμα στο **Σχήμα 2.11** φαίνεται ο τρόπος μεταβολής της ισχύος. Το σχήμα 1.10 β είναι αυτό που περιλαμβάνει τα περισσότερα στοιχεία για το θερμοστοιχείο. Βλέπουμε τη χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος V-I καθώς και αυτήν της ισχύος συναρτήσει του ρεύματος P-I. Η πρώτη μάλιστα, με τη μορφή της υποδεικνύει το μοντέλο που αναφέρθηκε παραπάνω, δηλαδή μία πηγή τάσης σε σειρά με μια αντίσταση. Έτσι όσο περισσότερο ρεύμα διέρχεται από το θερμοστοιχείο τόσο περισσότερο πέφτει η τάση στα άκρα του. Τέλος η καμπύλη P-I μας κάνει φανερό ότι υπάρχει ένα μέγιστο ισχύος. Αυτό δε το μέγιστο όπως φαίνεται από τα υπόλοιπα διαγράμματα είναι διαφορετικό για κάθε ζεύγος T_H και T_C .

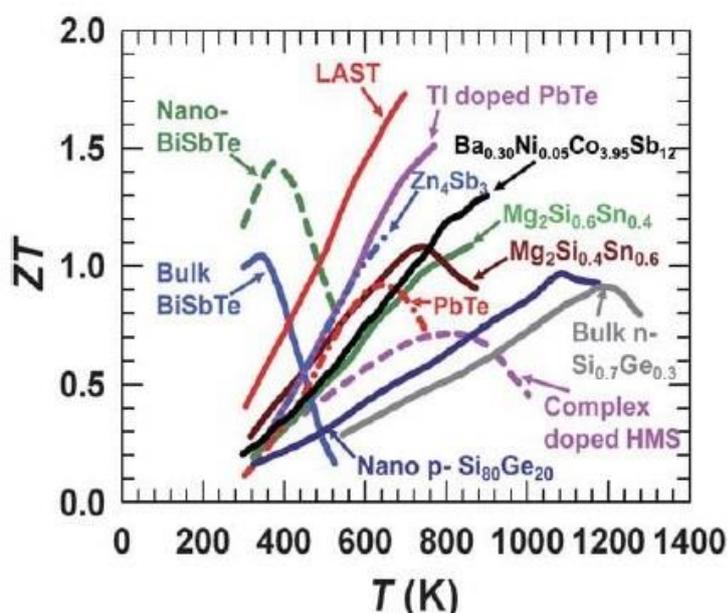


Σχήμα 2.11: Διάγραμμα ισχύος με προσαρμοσμένο φορτίο / T_{HOT} - Διάγραμμα τάσης / ρεύματος, ισχύος / Ρεύματος.

2.4 Υλικά και συντελεστής απόδοσης ZT

Η μελέτη των θερμοηλεκτρικών υλικών αποτελεί σύγχρονο αντικείμενο σε θέματα έρευνας και τεχνολογίας προηγμένων υλικών σε παγκόσμιο επίπεδο επειδή ακριβώς σχετίζεται άμεσα με τα συστήματα ενέργειας. Όπως θα δούμε στα επόμενα κεφάλαια, πέρα από την εφαρμογή τους να αξιοποιούν την χαμένη-διαφεύγουσα θερμότητα που εκλύεται ως παραπροϊόν από διάφορες διεργασίες και να τη μετατρέπουν σε χρήσιμη ηλεκτρική ενέργεια, τελευταία ιδιαίτερο ενδιαφέρον ελκύει και η απευθείας μετατροπή ηλιακής θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική μέσω της θερμοηλεκτρικής τεχνολογίας. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στις θερμοηλεκτρικές διατάξεις είναι κυρίως ημιαγωγοί. Οι αυξημένες απαιτήσεις των εφαρμογών έχουν οδηγήσει στη συνεχή αναζήτηση βελτιωμένων υλικών με στόχο την ενίσχυση της θερμοηλεκτρικής απόδοσης. Τα υποψήφια υλικά για τις θερμοηλεκτρικές εφαρμογές πρέπει να έχουν υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, υψηλό συντελεστή *Seebeck* και χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, έτσι ώστε ο θερμοηλεκτρικός δείκτης ZT να υπερβεί καταρχήν την μονάδα. Για υψηλές θερμοκρασίες χρησιμοποιούνται σήμερα κατά κύριο λόγο υλικά που είναι βασισμένα σε διαφορετικά συστήματα όπως PbTe και Si-Ge ενώ ερευνώνται και άλλα όπως πυριτίδια, Skutterudites καθώς και διάφορα οξειδία για

θερμοκρασίες μέχρι 1300K. Οι ενώσεις του πυριτίου αποτελούν πλεονεκτικότερη επιλογή λόγω της άφθονης παροχής της πρώτης ύλης στη φύση καθώς επίσης και την μη-τοξικότητα που συνάδει με την προτεραιότητα για φιλική στο περιβάλλον και στον άνθρωπο τεχνολογία. Όπως είδαμε, η χρησιμότητα ενός υλικού για θερμοηλεκτρικές εφαρμογές καθορίζεται από τον συντελεστή της θερμοηλεκτρικής απόδοσης ή αλλιώς ZT. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται σήμερα ευρέως για τις θερμοηλεκτρικές εφαρμογές είναι κυρίως τα BiSb, Bi₂Te₃, PbTe, SiGe καθώς επίσης και τα κράματά τους. Στο **Σχήμα 2.12** βλέπουμε το διάγραμμα κάποιων εκ των παραδοσιακών θερμοηλεκτρικών υλικών συναρτήσει της θερμοκρασίας.



Σχήμα 2.12: Διάγραμμα θερμοηλεκτρικών υλικών συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Το Bi₂Te₃ και οι σχετικές ενώσεις του αναφέρονται ως υλικά χαμηλής θερμοκρασίας και χρησιμοποιούνται σε θερμοκρασίες μέχρι περίπου 450K καθώς και σε όλες τις παρούσες συσκευές ψύξης (TEC). Επίσης το Bi₂Te₃ συνήθως δημιουργεί στερεό διάλυμα με το Sb₂Te₃ για την μείωση της θερμικής αγωγιμότητας. Τα υλικά αυτά όπως παρατηρούμε από το διάγραμμα εμφανίζουν μέγιστο ZT από 0.8 έως 1.1 . Υλικά που βασίζονται σε ομάδα N τελλουριδίων, όπως PbTe, GeTe και SnTe έχουν

υψηλότερες θερμοκρασίες τήξης από εκείνη των κραμάτων Bi_2Te_3 , επομένως χρησιμοποιούνται περίπου μέχρι 850K και παρουσιάζουν ZT γύρω στο 0.8. Θερμοηλεκτρικές γεννήτριες οι οποίες λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες χρησιμοποιούν κράματα πυριτίου -γερμάνιου και για τα n- και p-τύπου πόδια και λειτουργούν μέχρι τους 1300K. Το ZT αυτών των υλικών είναι αρκετά χαμηλό, λόγω της σχετικά υψηλής Θερμικής αγωγιμότητας της δομής διαμαντιού που έχουν. Για ψύξη κάτω των 200K το καλύτερο θερμοηλεκτρικό υλικό είναι το κράμα τον αντιμονίου στο βισμούθιο ($\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$), το οποίο εμφανίζει $ZT=1.39$ στους 390K. Θερμοηλεκτρικά υλικά με ZT μεγαλύτερο ή ίσο του 4 θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να επιτευχθεί το 30% της απόδοσης τον κύκλου Carnot.

2.4.1 Χαρακτηριστικά καλών θερμοηλεκτρικών υλικών

Ένα καλό θερμοηλεκτρικό υλικό θα πρέπει να έχει υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα για την ελαχιστοποίηση θερμότητας Joule, χαμηλή θερμική αγωγιμότητα έτσι ώστε να υφίσταται η επιθυμητή θερμοκρασιακή διαφορά και υψηλό συντελεστή Seebeck για να μεγιστοποιήσει τη μετατροπή της θερμότητας σε ηλεκτρική ενέργεια. Ως εκ τούτου, ο στόχος της επιστήμης των υλικών είναι να βρεθούν υλικά με τη μεγαλύτερη δυνατή τιμή τον ZT ή σύμφωνα με τον Slack «να βρεθεί ένα ασυνήθιστο υλικό που να έχει θερμικές ιδιότητες αντίστοιχες με αυτές τον γυαλιού και ηλεκτρικές ιδιότητες αντίστοιχες ενός κρυσταλλικού υλικού»

Από μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί πάνω στις μοριακές ιδιότητες των 19 θερμοηλεκτρικών υλικών προκύπτει ότι τα χαρακτηριστικά των καλών υλικών για θερμοηλεκτρικές εφαρμογές θα πρέπει να είναι τα εξής:

- Ο συντελεστής Seebeck θα πρέπει να έχει αρκετά μεγάλη τιμή. Οι ημιαγωγοί συνήθως έχουν μεγαλύτερο συντελεστή Seebeck από τα μέταλλα.
- Το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού πρέπει να κυμαίνεται σε ένα λογικό εύρος τιμών για να έχουμε μεγάλο παράγοντα ισχύος. Κατά συνέπεια για ένα καλό θερμοηλεκτρικό υλικό το ενεργειακό χάσμα θα πρέπει να κυμαίνεται στην περιοχή $5k_B T < E_g < 10 k_B T$. Όπως φαίνεται και από το εύρος του

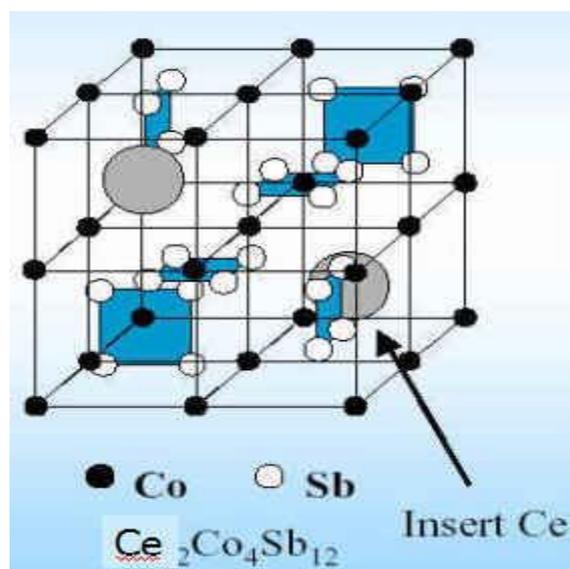
ενεργειακού χάσματος μπορεί να καθοριστεί και η κατάλληλη θερμοκρασία λειτουργίας.

- Η συγκέντρωση των ελεύθερων φορέων πρέπει να είναι αρκετά υψηλή. Η μέγιστη τιμή του ZT αντιστοιχεί σε μια συγκέντρωση φορέων της τάξης του 10^{18} - 10^{19} cm^{-3} . Ένα άλλο χαρακτηριστικό των θερμοστοιχείων είναι ότι τα συζυγή ζεύγη πρέπει να προέρχονται από τον ίδιο ημιαγωγό με διαφορετικές προσμίξεις. Αυτός είναι ένας πρακτικός τρόπος παρασκευής συζυγών ζευγών με παρόμοιες θερμικές, ηλεκτρικές και μηχανικές ιδιότητες.
- Ο συντελεστής της θερμικής αγωγιμότητας θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερος. Επειδή όμως στον συντελεστή της θερμικής αγωγιμότητας συνεισφέρουν τόσο οι φορείς όσο και το πλέγμα, μπορούμε να ελαχιστοποιήσουμε μόνο την συνεισφορά του πλέγματος χωρίς να επηρεαστεί η ηλεκτρονική συνεισφορά.

2.4.2 Θερμοηλεκτρικά υλικά νέας τεχνολογίας

Στις αρχές της δεκαετίας του 1990 η ερευνητική κοινότητα παρακινήθηκε να βρει νέες κατευθύνσεις που θα οδηγήσουν σε θερμοηλεκτρικά υλικά με καλύτερη απόδοση. Ως αποτέλεσμα ήταν να ληφθούν δύο διαφορετικές ερευνητικές προσεγγίσεις για την ανάπτυξη της επόμενης γενιάς των νέων θερμοηλεκτρικών υλικών, είτε με τη χρήση νέων οικογενειών των bulk υλικών ή με τη χρήση χαμηλοδιάστατων συστημάτων την ήδη γνωστών υλικών. Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1990, αυτές οι δύο προσεγγίσεις αναπτύχθηκαν ανεξάρτητα και κυρίως κατά μήκος διαφορετικών κατευθύνσεων. Πιο πρόσφατα οι δύο προσεγγίσεις φαίνεται να έρχονται και πάλι μαζί, καθώς το θερμοηλεκτρικό πεδίο αναπτύσσει και προσελκύει μεγαλύτερη προσοχή από τη βιομηχανία. Νέα συστήματα θερμοηλεκτρικών μιγμάτων και κραμάτων που βρίσκονται ακόμη υπό εξέταση όσον αφορά στις ιδιότητες τους είναι οι σύνθετες ενώσεις των χαλκογονιδίων με επιπλέον φύλλα ενδόθετων ατόμων, τα Skutterudites που είναι δομές με τις ιδιότητες να μεταφέρουν θερμότητα όπως το γυαλί και ηλεκτρισμό όπως ο κρύσταλλος (phonon glass electronic crystal), τα clathrates που είναι υπερδομές με πολύ καλές θερμοηλεκτρικές ιδιότητες στη θερμοκρασία δωματίου και τα κράματα half-Heusler

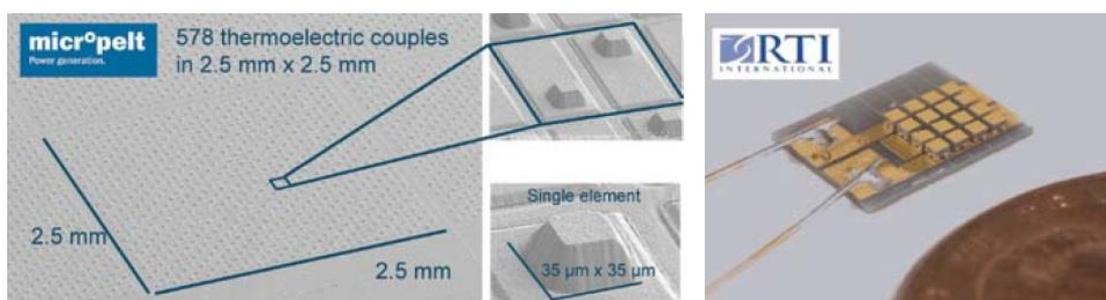
που προσφέρουν την επιλογή μείωσης της αγωγιμότητας πλέγματος χωρίς να επηρεαστεί ο αριθμός των φορέων.



Σχήμα 2.13: Κρυσταλλικό ημιαγωγικό πλέγμα Skutterudites.

Πρόσφατα πολλές έρευνες οδηγούν τα θερμοηλεκτρικά υλικά προς το μονόδρομο των νανο-υλικών. Μερικά από αυτά τα νέα συστήματα που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή νέων θερμοηλεκτρικών υλικών είναι τα νανοδομημένα θερμοηλεκτρικά υλικά (ημιαγωγία κβαντικά πηγάδια, διάφορες δομές υπερπλέγματος, νανοσύρματα και κβαντικές τελείες με δομικές μονάδες χαρακτηριστικού μεγέθους μικρότερου από 100nm), τα νανοσύνθετα θερμοηλεκτρικά υλικά, θερμοηλεκτρικά υλικά βασισμένα στο Mg_2Si (ημιαγωγοί με μεγάλο συντελεστή Seebeck, υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, μεγάλο εύρος θερμοκρασιακής λειτουργίας 400-900 K, χαμηλό κόστος παραγωγής, φιλικό προς το περιβάλλον), καθώς και αντίστοιχα υλικά βασισμένα στο $CoSi$. Οι δομές με νανο-χαρακτηριστικά έχουν ήδη προβλεφθεί από τη θεωρία να παρουσιάζουν σημαντικά αυξημένο συντελεστή ZT και έχουν επιβεβαιωθεί αρχικά και πειραματικά όπως στην περίπτωση των υπερδομών Bi_2Te_3/Sb_2Te_3 με ZT μέχρι και 2.4 και των $PbTe$ κβαντικών τελειών με $ZT=2$ στους 300K. Φυσικά η εφαρμογή τέτοιων τεχνολογιών σε εμπορικό επίπεδο δεν είναι ρεαλιστική, αλλά διαφαίνεται η νέα προοπτική. Τα νανοσύνθετα υλικά

μπορούν να συνδυάζουν τις βελτιωμένες ιδιότητες αλλά και το χαμηλό κόστος καθιστώντας με αυτόν τον τρόπο την τεχνολογία προσιτή σε επίπεδο εφαρμογών. Η ανάπτυξη τους γίνεται με διάφορες τεχνικές όπως τεχνικές κόνεως που προτιμώνται από τη βιομηχανία λόγω της δυνατότητας μαζικής παραγωγής, την εφαρμογή σε βιομηχανική κλίμακα, την εύκολη διαμόρφωση σε διάφορα σχήματα και πάνω από όλα το χαμηλό κόστος συγκριτικά με τις συνήθεις τεχνικές ανάπτυξης νανοδομών.

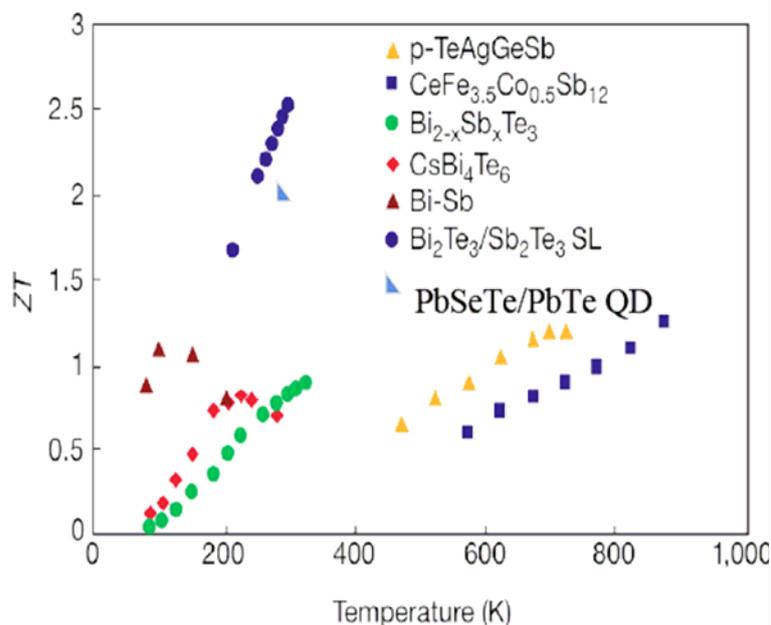


Εικόνα 2.14: Νανοδομές θερμοηλεκτρικού στοιχείου και η σύγκριση του με κέρμα του 1 cent.

Η τελευταία τάση στην έρευνα των θερμοηλεκτρικών υλικών είναι η ασχολία με μικροσκοπικές δομές κβαντικών διαστάσεων (quantum dots, quantum wires, quantum superlattices). Η θερμική αγωγιμότητα στις μικρές διαστάσεις διαφέρει από την αντίστοιχη του στερεού λόγω της μειωμένης διάστασης και της ύπαρξης 20 διεπιφανειών.

Αυτό που προτάθηκε είναι ότι το φάσμα των φωνονίων βελτιώνεται λόγω της υπέρθεσης στις διεπιφάνειες. Πολλές μελέτες έδειξαν ότι σημαντική ελάττωση στην θερμική αγωγιμότητα σε σχέση με τα στερεά υλικά είναι εφικτή με τις υπερδομές. Στο παρακάτω **Σχήμα 2.15** φαίνεται ένα διάγραμμα που απεικονίζει τον συντελεστή θερμοηλεκτρικής απόδοσης διάφορων ενώσεων συναρτήσει της θερμοκρασίας. Παρατηρούμε ότι στη θερμοκρασία δωματίου, που είναι και ο στόχος στην έρευνα των θερμοηλεκτρικών υλικών, ο συντελεστής ZT των bulk ενώσεων Bi-Te-Sb,

παρουσιάζει την τιμή $ZT \sim 1$, ενώ για να επιτευχθεί η τιμή $ZT \sim 2-2.5$ προχωράμε στην κατασκευή κβαντικών τελειών ή υπερδομών.



Σχήμα 2.15: Συγκριτικό διάγραμμα παραδοσιακών θερμοηλεκτρικών υλικών με κβαντικά.

2.5 Σύγκριση θερμοηλεκτρικών γεννητριών εμπορίου

Υπάρχουν δεκάδες εταιρείες ανά τον κόσμο που παράγουν θερμοηλεκτρικές γεννήτριες και ψήκτρες. Στον παρακάτω πίνακα γίνεται μια σύγκριση βασικών χαρακτηριστικών από διάφορα μοντέλα διαφόρων κατασκευαστών. Τα μοντέλα αυτά είναι θερμοηλεκτρικές ψήκτρες και χρησιμοποιούνται ως θερμοηλεκτρικές γεννήτριες. Αρχικά, υπάρχουν θερμοηλεκτρικά στοιχεία με επιφάνειες είτε παραλληλόγραμμα είτε κυκλικές. Δίνεται λοιπόν, για τα κάθε μοντέλο το μήκος και το πλάτος ή η διάμετρος των δύο επιφανειών καθώς επίσης και το συνολικό ύψος των στοιχείων. Παρατηρείται ότι κυκλοφορούν πλέον θερμοηλεκτρικά στοιχεία με εμβαδόν επιφανειών μόλις 7 τετραγωνικά χιλιοστών ενώ φτάνουν μέχρι και περίπου τα 4000. Εν συνεχεία, παρατίθενται οι αντίστοιχες θερμικές και ηλεκτρικές αντιστάσεις των διατάξεων. Η θερμική αντίσταση είναι σχεδόν σταθερή και

ανεξάρτητη από τις θερμοκρασίες λειτουργίας των θερμοηλεκτρικών γεννητριών. Για τα θερμοηλεκτρικά στοιχεία που οι κατασκευαστές παραθέτουν το χαρακτηριστικό αυτό, οι τιμές κυμαίνονται από περίπου 0,1 K/W και μπορεί να ξεπεράσει και τα 40 K/W. Από την άλλη πλευρά, η ηλεκτρική αντίσταση μεταβάλλεται συναρτήσει της θερμοκρασίας λειτουργίας. Οι περισσότεροι κατασκευαστές παραθέτουν την ηλεκτρική αντίσταση σε θερμοκρασίες μεταξύ 22 και 27 °C. Οι συνήθεις τιμές σε αυτές τις θερμοκρασίες λειτουργίας ξεκινούν από 0,2 Ω και φτάνουν έως και περίπου τα 10 Ω, ενώ στις μικροθερμοηλεκτρικές γεννήτριες η ηλεκτρική αντίσταση μπορεί να φτάσει ακόμη και τα 300 Ω. Τέλος, παρατίθεται και η ονομαστική παραγόμενη ισχύος σε θερμοκρασιακές διαφορές 10 και 100 °C η οποία προκύπτει με γραμμική παρεμβολή από τα αντίστοιχα διαγράμματα των επίσημων datasheet των προϊόντων.

Πίνακας 2.16: Σύγκριση θερμοηλεκτρικών γεννητριών εμπορίου.

Εταιρεία	Μοντέλο	Μέγεθος (L x W x H mm)	Αντίσταση		Παραγόμενη Ισχύς	
			Θερμική (K / W)	Ηλεκτρική (Ω @ °C)	@10K (mW)	@100K (mW)
Custom Therm.	1261G-7L31-04CL	30 x 30 x 3,75	-	3,5 @ 27	-	1040
Custom Therm.	1261G-7L31-05CQ	40 x 40 x 3,75	-	0,9 @ 27	-	1150
Custom Therm.	1261G-7L31-24CX1	56 x 56 x 5	-	0,38 @ 27	-	3540
Kryotherm	TGM-127-1,0-0,8	30 x 30 x 3,1	1,72	1,29 @ 22	-	1500
Kryotherm	TGM-127-1,0-2,5	30 x 30 x 4,8	5,2	4 @ 22	-	780
Kryotherm	TGM-199-1,4-0,8	40 x 40 x 3,2	0,58	1,03 @ 22	-	3100
Kryotherm	TGM-199-1,4-3,5	40 x 40 x 6	2,5	4,5 @ 22	-	1630
Marlow Σημ. 1	TG12-2.5-01L	34,01 x 30 x 3,94	3,58	4,47 - 5,69	-	1000
Marlow Σημ. 1	TG12-4-01LS	34,01 x 30 x 3,33	2,31	2,76 - 3,41	-	1480
Marlow Σημ. 1	TG12-6-01L	44,7 x 40,13 x 3,91	1,54	1,95 - 2,38	-	2250
Marlow Σημ. 1	TG12-8-01L	44,7 x 40,13 x 3,53	1,2	1,36 - 1,69	-	2910
Marlow Σημ. 2	NL1013T-01AC	13,208 x 13,208 x 2,413	16,4	7,42	-	-
Micropelt	MPG-D651	3,375 x 2,5 x 1,09	22	185 @ 23	0,977	96
Micropelt	MPG-D751	4,198 x 3,364 x 1,09	12,5	300 @ 23	1,529	151
Micropelt Σημ. 2	MPC-D701	4,248 x 3,364 x 1,05	7,3	7,7 @	2,501	246
Nextreme	eTEG HV37	2,1 x 3,4 x 0,6	21	-	1	90
Nextreme	eTEG HV56	3,1 x 3,3 x 0,6	13,1	-	1,5	130
Thermalforce	TEG 017-150-29	15 x 15 x 3,7	29,41	0,21 @ 27	-	151
Thermalforce	TEG 127-200-28	30 x 30 x 4,8	5,56	6,6 @ 27	-	941
Thermalforce	TEG 127-200-27	30 x 30 x 4,2	3,33	5,5 @ 27	-	1130
Thermalforce	TEG-071-200-22	30 x 30 x 4,8	4,35	1,94 @ 27	-	1046
Thermalforce	TEG 199-150-2	40 x 40 x 3,2	0,64	1,67 @ 27	-	7976
Thermalforce	TEG 127-250-38	62 x 62 x 4,8	0,345	0,35 @ 27	-	39952
Thermolife	Thermolife®	∅ 9,3 x 1,4	42,8	-	0,135	-

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Θερμοηλεκτρικές Γεννήτριες στα Φωτοβολταϊκά (CPV-Fresnel lenses)

Λόγω των όλο και αυξανόμενων αναγκών σε ενέργεια τις τελευταίες δεκαετίες η επιστημονική κοινότητα, καθώς και οι βιομηχανίες, έχουν στραφεί στην χρήση θερμοηλεκτρικών γεννητριών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι παραδοσιακές θερμοηλεκτρικές γεννήτριες (TEG's) που χρησιμοποιούνται παρότι την σχετικά μικρή απόδοσή τους, έχουν το βασικό πλεονέκτημα σε σχέση με τις υπάρχουσες μεθόδους ότι είναι φιλικές προς το περιβάλλον. Ήδη γίνεται ευρέως χρήση τους σε εφαρμογές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ειδικά στα φωτοβολταϊκά, σε εφαρμογές στην γεωθερμία, σε στρατιωτικές και διαστημικές εφαρμογές σαν μέσα ανάκτησης ενέργειας από το ανθρώπινο σώμα ή τον εξοπλισμό και το περιβάλλον. Ειδικά την τελευταία δεκαετία γίνεται προσπάθεια εμπορικής εκμετάλλευσης των δυνατοτήτων τους σε εφαρμογές ανάκτησης ενέργειας από την διαφυγούμενη θερμότητα των εξατμίσεων των αυτοκινήτων. Στα επόμενα κεφάλαια της διπλωματικής θα γίνει παρουσίαση και ανάλυση των εφαρμογών των θερμοηλεκτρικών γεννητριών στα φωτοβολταϊκά και στη αυτοκινητοβιομηχανία σαν μέσα παραγωγής ενέργειας, καθώς και στην ανάγκη ύπαρξης ενός συστήματος εντοπισμού της μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracker) ώστε να επιτευχθεί και η μεγαλύτερη δυνατή απόδοση αυτών των συστημάτων.

3.1 Εισαγωγή

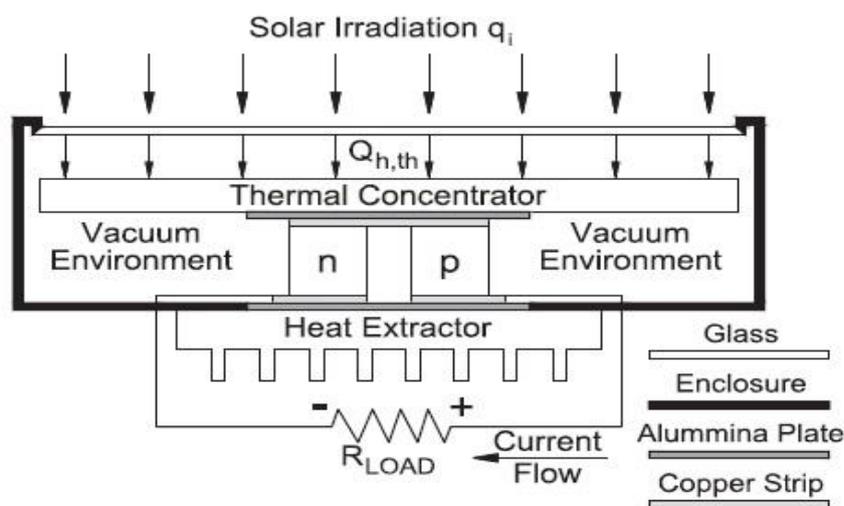
Η ηλιακή ενέργεια, η οποία έχει χαρακτηριστεί ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, είναι γνωστή ως αποδοτική καθώς και καθαρή πηγή ενέργειας. Στο εγγύς μέλλον, αυτή η πηγή ενέργειας θα αποτελεί το κύριο μέρος των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση στην κατανάλωση των ορυκτών καυσίμων. Λόγω της αύξησης του κόστους του πετρελαίου, καθώς και την διόγκωση του περιβαλλοντολογικού προβλήματος μεγάλο μέρος της έρευνας κατευθύνεται προς την συγκομιδή της ενέργειας του ήλιου. Υπάρχουν διάφορες στρατηγικές για την εφαρμογή της ηλιακής ενέργειας για την παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας, όπως ηλιακοί θερμοσίφωνες, φωτοβολταϊκά καθώς και ηλιακοί θερμικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Προς το παρόν η χρήση της ηλιακής

ενέργειας στην αγορά εστιάζεται κυρίως στα φωτοβολταϊκά, καθώς και στις ηλιακές εγκαταστάσεις θερμικού τύπου. Η Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία (PV), δηλαδή η απ'ευθείας μετατροπή του ηλιακού φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια, έχει θεωρηθεί για πολλά

χρόνια μία από τις πιο αξιόπιστες τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, από μερικά Watts ως και εκατοντάδες μεγαβάτ και μπορούν να λειτουργήσουν είτε ως αυτόνομες ή ως διασυνδεδεμένες διαμορφώσεις. Από την άλλη πλευρά, τα θερμικά συστήματα συναντώνται σε μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή σε συνδυαστικές εφαρμογές θερμότητας και ηλεκτρισμού (CHP).

3.2 Ηλιακές θερμοηλεκτρικές γεννήτριες

Μια τεχνολογία που είχε λάβει σποραδική προσοχή αλλά τα τελευταία χρόνια γνωρίζει σημαντική πρόοδο είναι αυτή των θερμοηλεκτρικών γεννητριών. Όταν οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες βρεθούν ανάμεσα από μια επιφάνεια απορρόφησης ηλιακής ενέργειας και μιας ψήκτρας τότε η διαφορά θερμοκρασίας τις οδηγεί στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, και ονομάζονται ηλιακές θερμοηλεκτρικές γεννήτριες (Solar TEGs-STEGs).



Σχήμα 3.1: Ηλιακή θερμοηλεκτρική γεννήτρια.

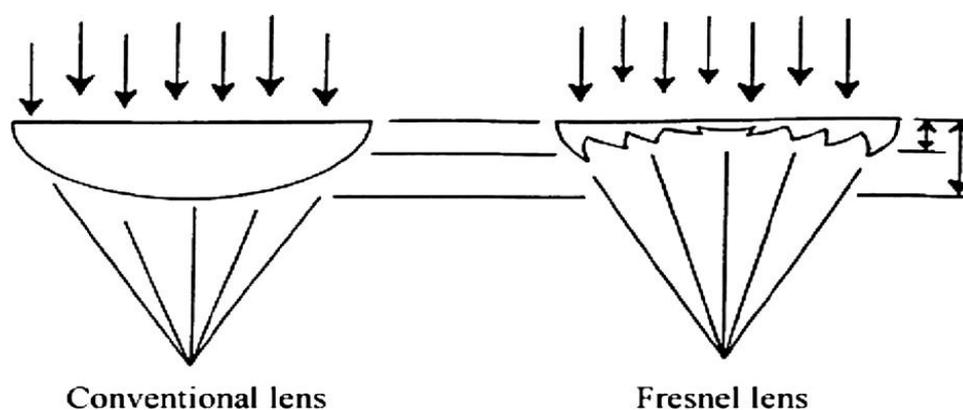
Όπως συμβαίνει και με τα φυτά, οι ηλιακές θερμοηλεκτρικές γεννήτριες έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να χρησιμοποιήσουν το σύνολο του ηλιακού φάσματος, όχι μόνο το τμήμα πάνω από το διάκενο ζώνης του ημιαγωγού. Όπως και τα φωτοβολταϊκά, οι ηλιακές θερμοηλεκτρικές γεννήτριες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μικρής κλίμακας εγκαταστάσεις, καθώς δεν απαιτούν την παραδοσιακή θερμομηχανική γεννήτρια όπως τα ηλιακά θερμικά συστήματα. Στα πλεονεκτήματά τους είναι η αθόρυβη λειτουργία τους, είναι στερεάς κατάστασης συσκευές, δεν έχουν κινούμενα εξαρτήματα και έχουν αυξημένη αξιοπιστία και μειωμένη συντήρηση. Ωστόσο, η σχετικά μικρή απόδοση μετατροπής των θερμοηλεκτρικών γεννητριών έχει περιορίσει για πολλά χρόνια την χρήση τους σε εφαρμογές όπου η αξιοπιστία και η διάρκεια ζωής είναι τα κύρια ζητήματα. Παρ'όλα αυτά, όταν σημαντικό ποσό της απορριπτόμενης θερμότητας είναι διαθέσιμο δεν υπάρχει καμία ανησυχία όσον αφορά το κόστος της θερμικής ενέργειας, η οποία καθιστά τις εφαρμογές θερμοηλεκτρικών συσκευών εξαιρετικούς υποψήφιους για την ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας. Από την άποψη αυτή, η ενσωμάτωση της θερμοηλεκτρικής τεχνολογίας σε ηλιακά συστήματα μετατροπής ενέργειας έχει προσελκύσει πολλή προσοχή κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών.

Η ιδέα για την χρήση θερμοηλεκτρικών υλικών δεν για να συλλάβουν την ηλιακή ενέργεια δεν είναι καινούρια. Το πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για μια γεννήτρια κατασκευασμένη από θερμοηλεκτρικά υλικά κατοχυρώθηκε το 1954 από τον Telkes. Στην εργασία του αναφέρει απόδοση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας της τάξεως του 0,63% υπό την ακτινοβολία ενός ήλιου ενώ με την αύξηση της ακτινοβολίας στους 50 ήλιους αυτή η απόδοση φτάνει το 3,3%. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό πως η εισερχόμενη ηλιακή ροή του περιβάλλοντος είναι πολύ χαμηλή για να δημιουργήσει σημαντική θερμοκρασιακή διαφορά ώστε να διασφαλιστεί τη αποτελεσματική λειτουργία των θερμοηλεκτρικών γεννητριών, οπότε στις περισσότερες περιπτώσεις είναι αναγκαία η θερμική ή οπτική συγκέντρωση προκειμένου να επιτευχθούν ικανοποιητικά επίπεδα ισχύος. Μια λύση αυτού του προβλήματος επιτυγχάνεται με την χρήση οπτικών φακών συμπύκνωσης της ηλιακής ακτινοβολίας Fresnel. Σε αντίθεση με άλλες συσκευές συγκέντρωσης, φακοί Fresnel έχουν σαφή με πλεονεκτήματα όπως ο μικρός τους όγκος, το μικρό βάρος, υψηλή οπτική ποιότητα καθώς και το χαμηλό

κόστος μαζικής κατασκευής του καθιστώντας τους έτσι μία από τις καλύτερες επιλογές.

3.3 Οι φακοί Fresnel

Οι φακοί Fresnel από γυαλί χρησιμοποιήθηκαν αμέσως μετά την πρακτική τους ανακάλυψη από τον Augustin Jean Fresnel το 1822 ως σκόπευτρα σε φάρους. Το γυαλί αποτελεί μια ελκυστική επιλογή όταν οι χρησιμοποιούνται σε υψηλές θερμοκρασίες ή σε εφαρμογές με υαλοπίνακες. Ωστόσο το πολυμεθυλομεθακρυλικό (PMMA), το οποίο είναι ένα ελαφρύ και σταθερό πολυμερές με οπτικά χαρακτηριστικά σχεδόν ίδια του γυαλιού, είναι το πιο κατάλληλο υλικό για την κατασκευή των φακών Fresnel. Σύγχρονα υλικά από πλαστικό, νέες τεχνικές χύτευσης, και τόννοι από διαμάντι οι οποίοι ελέγχονται από τον υπολογιστή, έχουν βελτιώσει την ποιότητα των φακών Fresnel και έχουν ανοίξει νέους ορίζοντες για την σχεδιασμό τους σε εφαρμογές συγκέντρωσης ηλιακής ενέργειας. Οι φακοί Fresnel μπορούν να διαμορφωθούν με πίεση ή με έγχυση από μία ποικιλία πλαστικών και το κόστος παραγωγής τους για μεγάλες ποσότητες είναι σημαντικά χαμηλό.



Σχήμα 3.2: Συμβατικός φακός και φακός Fresnel

Οι πρώτες απόπειρες για χρήση των φακών Fresnel για τη συλλογή της ηλιακής ενέργειας εμφανίστηκαν μαζί με την ανάπτυξη και την διάθεση του κατάλληλου πολυμεθυλομεθακρυλικού (PMMA) πλαστικού στη δεκαετία του 1950. Το PMMA είναι ανθεκτικό στο φως του ήλιου, παραμένει θερμικά σταθερό τουλάχιστον μέχρι

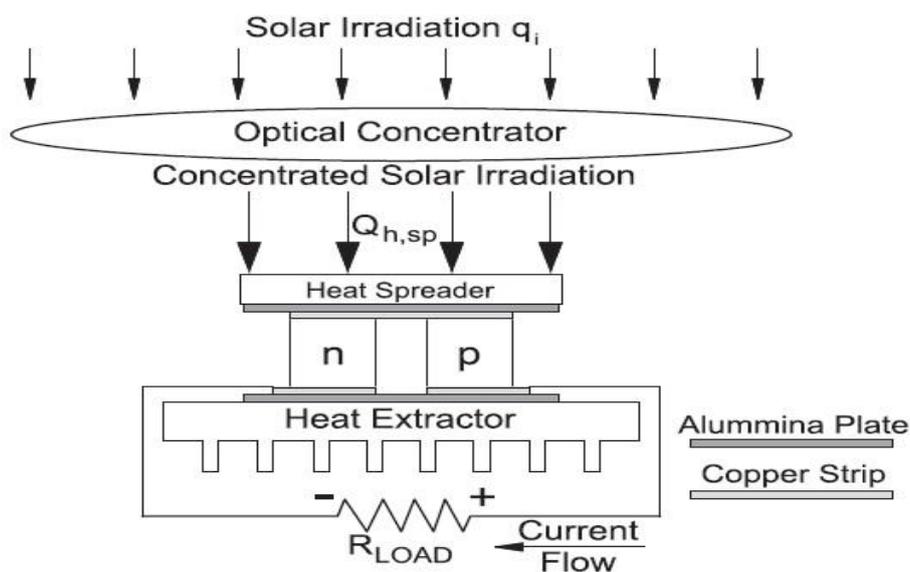
τους 80 °C, η μεταδοτικότητα του ταιριάζει με το ηλιακό φάσμα, και ο δείκτης διάθλασης του είναι 1.49 , δηλαδή πολύ κοντά σε εκείνο του γυαλιού. Κατά συνέπεια, οι περισσότεροι σχεδιαστές φακών Fresnel για εφαρμογές συμπύκνωσης της ηλιακής ενέργειας επέλεξαν PMMA για τους φακούς τους, λόγω της υψηλής οπτικής ποιότητας σε συνδυασμό με τη λιγότερο δαπανηρό κόστος κατασκευής τους. Ένας φακός Fresnel είναι ουσιαστικά μια αλυσίδα από πρίσματα. Κάθε πρίσμα αντιπροσωπεύει την κλίση της επιφάνειας του φακού. Στο **Σχήμα 3.2** φαίνονται οι διαφορές μεταξύ ενός συμβατικού φακού από έναν φακό Fresnel. Αρχικά οι περισσότεροι φακοί Fresnel που είχαν επιλεγεί για την εφαρμογή τους σαν συμπυκνωτές ηλιακής ενέργειας δεν είχαν σχεδιαστεί για τη συλλογή των ηλιακών ακτίνων αλλά ως συσκευές απεικόνισης. Για την χρήση τους σαν ηλιακοί συλλέκτες μελετήθηκαν πρώτη φορά το 1951 από τον Miller. Ο Miller κατασκεύασε το πρώτο πλαστικό υλικό στον κόσμο για φακούς Fresnel με υψηλή ακρίβεια και εξαιρετική ποιότητα επιφάνειας.

Οι Szulmayer και Nelson σχεδίασαν ένα πειραματικό σύστημα στο οποίο επιτυγχάνονται θερμοκρασίες από 60 έως 143 °C για την θέρμανση νερού και την δημιουργία ατμού για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η απόδοση του συστήματος τους για συλλογή ηλιακής ενέργειας ήταν 50%, με γεωμετρική αναλογία συγκέντρωσης.



Εικόνα 3.3: Εγκατάσταση ηλιακής συμπύκνωσης με φακούς Fresnel.

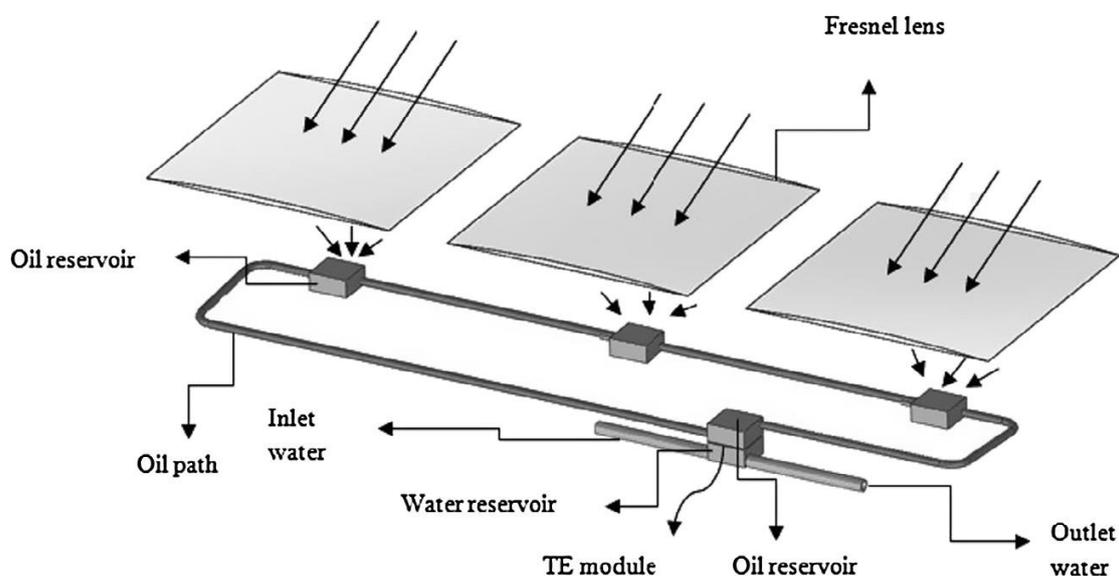
Αργότερα οι Hastings και Allums μελέτησαν την εστίαση του φακού Fresnel. Αυτοί μπόρεσαν να καταλήξουν σε θερμοκρασίες 200-370 °C. Οι Sierra και Vazquez σχεδίασαν ένα συγκεντρωτικό σύστημα το οποίο θα μπορούσε να φθάσει 1500-2000 °C μέσα σε λίγα λεπτά με τη χρήση του φακού Fresnel. Η θερμοκρασία που ανέπτυξε η εστιασμένη δέσμη φωτός ήταν τόσο υψηλή που προκάλεσε ανάφλεξη στο μίγμα νικελίου αλουμινίου. Τις τελευταίες δύο δεκαετίες χρησιμοποιούνται ευρέως οι θερμοηλεκτρικές μονάδες λόγω των πλεονεκτημάτων τους. Αυτές οι μικρές συσκευές χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική χωρίς περιστρεφόμενα μέρη, θόρυβο και οι δονήσεις. Οι θερμικές και ηλεκτρικές επιδόσεις του συμπυκνωτή, του δέκτη και μιας θερμοηλεκτρικής μονάδα μελετήθηκαν από Atik. Η επιφανειακή θερμοκρασία, η ηλεκτρική ενέργεια και αποδοτικότητα του συστήματος καθορίζεται από την διαφορετική ένταση της ακτινοβολίας και της συγκέντρωσης της πάνω στο θερμοηλεκτρικό στοιχείο.



Σχήμα 3.4: Ηλιακή θερμοηλεκτρική γεννήτρια με φακό Fresnel.

Η θεωρητική απόδοση των ηλιακών θερμοηλεκτρικών γεννητριών μελετήθηκε από τον Chen. Αυτός κατασκεύασε ένα μοντέλο που αξιοποιούσε μαζί την θερμική και οπτική συγκέντρωση. Κατέληξε στο συμπέρασμα ότι με αυτόν το συνδυασμό επιτυγχάνεται αύξηση της απόδοσης της συσκευής, αλλά η οπτικοθερμική αποτελεσματικότητα μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας στην θερμή πλευρά του θερμοηλεκτρικού στοιχείου. Επιπλέον τόνισε ότι η αποτελεσματικότητα των

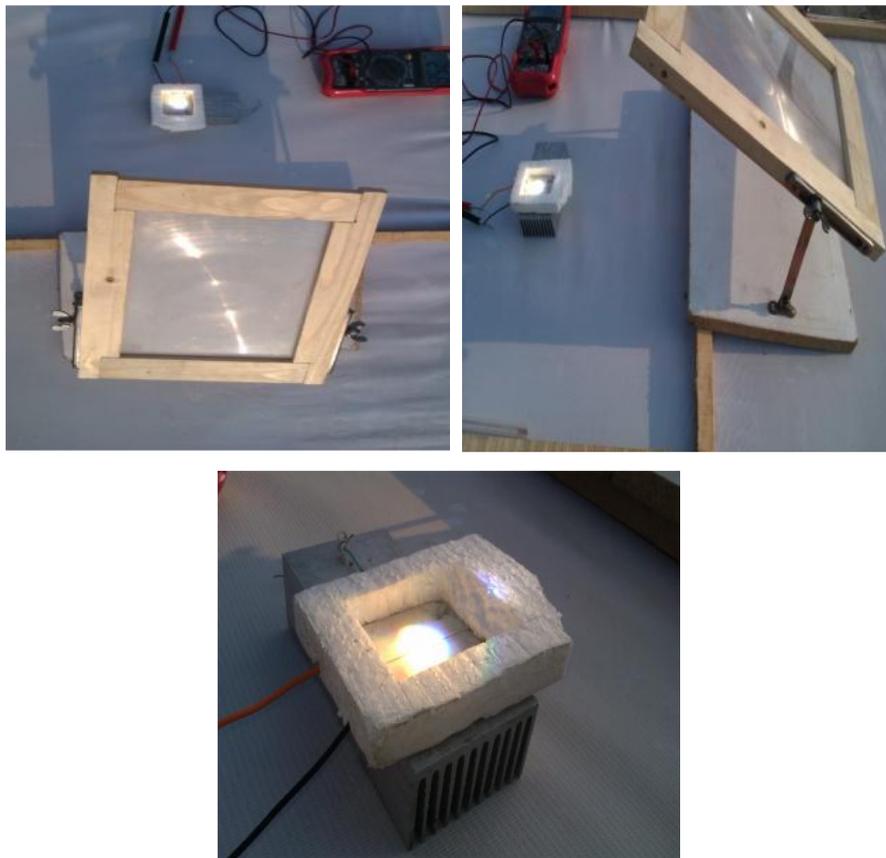
θερμοηλεκτρικών γεννητριών μπορεί να ενισχυθεί από τη λειτουργία τους σε περιβάλλον κενού. Ο Lesage διερεύνησε την θερμική ισχύ των εμπορικών θερμοηλεκτρικών μονάδων για την παραγωγή τόσο ηλεκτρικής όσο και θερμικής ενέργειας. Χρησιμοποίησε μια θερμοηλεκτρική γεννήτρια για την μετατροπή της ηλιακής ενέργειας προσομοιώνοντας μια τεχνητή πηγή φωτός που προβάλλεται επάνω σε ένα ηλιακό σωλήνα κενού. Σε αυτή την έρευνα, οι φακοί Fresnel χρησιμοποιήθηκαν για τη συγκέντρωση της ηλιακής δέσμη σε μία δεξαμενή ελαίου το οποίο χρησιμοποιείται ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας. Η θερμότητα που απορροφάται μεταφέρεται από το κρύο νερό σε ένα εναλλάκτη θερμότητας για την παραγωγή ζεστού νερού. Επίσης η θερμοηλεκτρική γεννήτρια (TEG) μεταξύ του φακού Fresnel και του κρύου νερού παρήγαγε ηλεκτρική ενέργεια. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν την ικανότητα του προτεινόμενου συστήματος στην συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας.



Σχήμα 3.5: Σύστημα συμπαραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας με φακούς Fresnel και TEGs.

3.4 Πειραματική διάταξη TEG με Fresnel

Παρακάτω γίνεται παρουσίαση μιας πειραματικής διάταξης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η μονάδα αποτελείται από μια θερμοηλεκτρική γεννήτρια και από ένα φακό Fresnel. Το φως του ηλίου εστιάζεται μέσω του φακού Fresnel πάνω στο θερμοηλεκτρικό στοιχείο. Καθώς το φως συμπυκνώνεται πάνω στο στοιχείο η θερμοκρασία αυξάνεται δραματικά δημιουργώντας έτσι μια σχέση αντιστρόφως ανάλογη μεταξύ θερμοκρασίας και επιφανείας εστίασης του φωτός.



Εικόνα 3.6: Η πειραματική διάταξη.

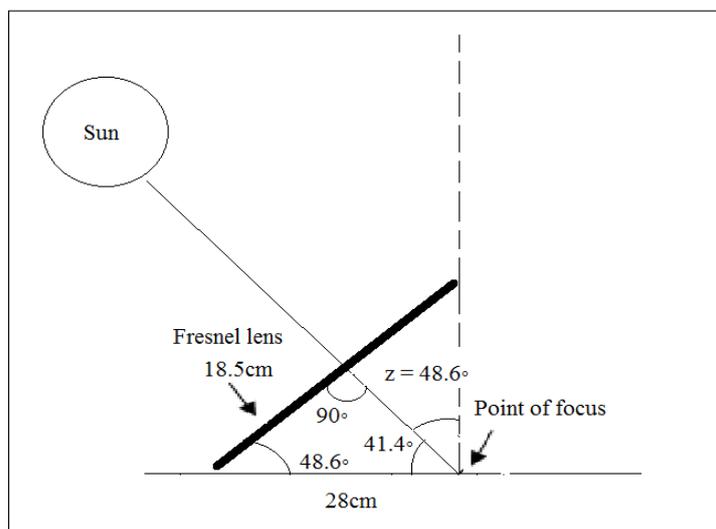
Ο φακός Fresnel τοποθετείται έτσι ώστε η μέγιστη θερμότητα να μπορεί να συγκεντρώνεται πάνω στο θερμοηλεκτρικό στοιχείο. Αυτό επιτυγχάνεται με την

βέλτιστη γωνία πρόσπτωσης του φωτός (ζενίθ) και από τον υπολογισμό της μάζας του αέρα.

Για το πείραμα χρησιμοποιήθηκαν:

- ένας φακός Fresnel διαστάσεων 28cm x 20cm
- ένα θερμοηλεκτρικό στοιχείο 147 ζευγών και 50 W απόδοσης διαστάσεων 40mm x 40mm
- και μία ψήκτρα διαστάσεων 14,2cm x 5cm x 3,5cm.

Ο φακός τοποθετήθηκε σε γωνία $Z = 48,6$ μοιρών όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.6**



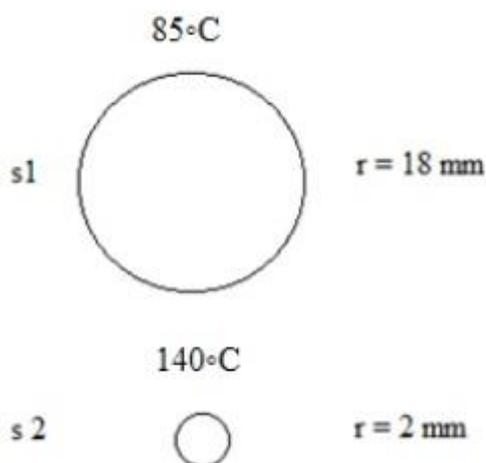
Σχήμα 3.7: Γωνία πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας.

οπότε η μάζα του αέρα υπολογίστηκε:

$$\frac{1}{\cos Z} = \frac{1}{\cos 48,6} = 1.51$$

Το θερμοηλεκτρικό στοιχείο τοποθετήθηκε στο μέγιστο σημείο εστίασης του ηλιακού φωτός πάνω σε μια ψήκτρα ώστε να επιτευχθεί διαφορά θερμοκρασίας άρα και

παραγωγή τάσης, η οποία μετρήθηκε από τους ακροδέκτες του με βολτόμετρο. Στο **Σχήμα 3.7** φαίνονται οι θερμοκρασίες στην κυκλική περιοχή που προκύπτει από το φακό Fresnel καθώς και η εστιασμένη περιοχή παίρνει διάμετρο 18 (s1) και 2 (s2) χιλιοστών αντίστοιχα.

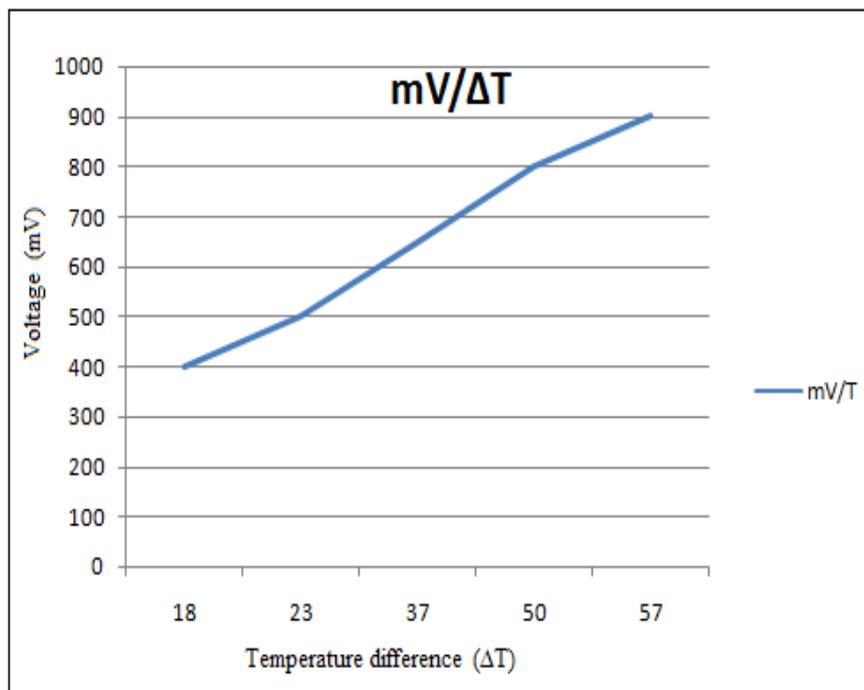


Σχήμα 3.8 : Θερμοκρασίες που αναπτύσσονται από διαφορετικές διαμέτρους εστίασης.

Το θερμοηλεκτρικό στοιχείο έχει εύρος λειτουργίας για θερμοκρασίες από 180K έως 550K. Για αυτό το λόγο στο πείραμα χρησιμοποιήθηκε η ακτίνα διαμέτρου 18 χιλιοστών και θερμοκρασίας 85 °C (358K) ενώ η πλευρά του στοιχείου που ήταν συνδεδεμένη με την ψήκτρα βρισκόταν σε θερμοκρασίες από 25 °C έως 28 °C. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος μετρήθηκε στους 20 °C με 25 °C. Έγιναν διάφορες μετρήσεις στην ζεστή και την κρύα πλευρά της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας και τα αποτελέσματα φαίνονται στον **Πίνακα 3.9** ενώ στο **Σχήμα 3.10** παρουσιάζεται το διάγραμμα τάσης-διαφοράς θερμοκρασίας ψυχρής με ζεστή πλευρά.

Πίνακας 3.9: Θερμοκρασίες T1 κρύας, T2 ζεστής πλευράς, διαφορά θερμοκρασίας ΔT και παραγόμενη τάση.

T1	T2	ΔT	Voc
°C	°C	°C	mV
22	45	18	400
25	51	23	500
28	65	37	650
25	75	50	780
28	85	57	910



Σχήμα 3.10: Διάγραμμα V-ΔT.

Η μέση τιμή της τάσης ανοιχτοκυκλώματος που παράγαγε η θερμοηλεκτρική γεννήτρια ήταν 648mV ενώ η μέση διαφορά θερμοκρασίας ήταν 33 °C. Μπορούμε να υπολογίσουμε τον συντελεστή θερμοηλεκτρικής απόδοσης από τον τύπο

$$V_{oc} = a \cdot \Delta T$$

$$\text{δηλαδή } \alpha = \frac{V_{oc}}{\Delta T} = \frac{648}{33} = 19 \frac{mV}{C} = 71 \frac{mV}{K}$$

Αυτό σημαίνει πως για κάθε διαφορά θερμοκρασίας 1 °C παράγονται 19 mV ενώ οι ονομαστικές τιμές του συντελεστή απόδοσης κυμαίνονται μεταξύ 100-300 μV/K. Αντίστοιχα υπολογίστηκε η απόδοση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας σε σχέση με την επιφάνεια της. Το μέγεθος του στοιχείου είναι 4cm x 4cm = 16cm². Η μέγιστη τάση ανοιχτοκυκλώματος μετρήθηκε στα 0.91 V ενώ το μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης στα 160 mA. Οπότε η μέγιστη ισχύς που προκύπτει είναι:

$$P = 0,91 V \times 160 mA = 145,6 mW$$

Εφόσον η μια θερμοηλεκτρική μονάδα του πειράματος παράγει ισχύ της τάξεως των 145,6 mW με επιφάνεια 16cm² μπορεί αναλογικά να υπολογιστεί η παραγόμενη ανά τετραγωνικό εκατοστό και τετραγωνικό μέτρο αντίστοιχα:

- Ισχύς θερμοηλεκτρικής γεννήτριας ανά τετραγωνικό εκατοστό = 9,1 mW/cm²
- Ισχύς θερμοηλεκτρικής γεννήτριας ανά τετραγωνικό μέτρο = 91 W/m²

Επίσης για την παραγωγή ενός Watt ισχύος χρειάζονται 7 θερμοηλεκτρικά στοιχεία τα οποία, με μέσο κόστος 2,4 euro το καθένα, στοιχίζουν 16,8 euro. Οι φακοί Fresnel είναι ένα αποτελεσματικό εργαλείο για την παραγωγή θερμοηλεκτρικής ενέργειας από τον ήλιο. Βάσει του πειράματος γίνεται αντιληπτό πως ένας φακός Fresnel με επιφάνεια 560 cm² μπορεί να σε εστιάσει, μια ηλιόλουστη μέρα με 23 °C θερμοκρασία περιβάλλοντος, ηλιακή ακτινοβολία σε επιφάνεια 10,2 cm² και

θερμοκρασία 85 °C. Με μεγαλύτερη εστίαση μπορεί εύκολα να επιτευχθεί θερμοκρασία 100 °C.

3.5 Συμπεράσματα

Οι φακοί Fresnel μπορούν να εστιάσουν το φως του ήλιου σε θερμική ενέργεια υψηλής θερμοκρασίας η οποία σε συνδυασμό με μια θερμοηλεκτρική γεννήτρια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή τόσο ηλεκτρική ενέργειας όσο και θέρμανσης. Σε μια ηλιόλουστη μέρα παράγουν ενέργεια που είναι συγκρίσιμη με τα παραδοσιακά φωτοβολταϊκά. Όμως τα παραδοσιακά φωτοβολταϊκά πάνελ είναι σαφώς πιο οικονομική επιλογή προς το παρόν. Ένα παραδοσιακό πάνελ ισχύος 100W και μεγέθους 120cm x 54 cm έχει κόστος περί τα 135 euro. Αυτό σημαίνει πως η ισχύς που παράγεται ανά τετραγωνικό μέτρο είναι 154W/m² ενώ το κόστος αυτής ανέρχεται στα 200 euro/m². Είναι λοιπόν σαφές πως σε σχέση με τις θερμοηλεκτρικές γεννήτριες οι οποίες έχουν κόστος ανά τετραγωνικό τα 1500 euro τα παραδοσιακά πάνελ υπερτερούν. Σε αυτά τα κόστη δεν συμπεριλαμβάνονται το κόστος της εγκατάστασης, της συντήρησης και των παρελκόμενων κυκλωμάτων (DC-DC converter, MPPT module κ.λπ.). Επίσης τα παραδοσιακά φωτοβολταϊκά αγγίζουν αποδόσεις της τάξεως του 30% σε αντίθεση με τις θερμοηλεκτρικές γεννήτριες οι οποίες μόλις τα τελευταία χρόνια ξεπερνούν το 10%. Τέλος η διάρκεια ζωής των πάνελ είναι σαφώς μεγαλύτερη από αυτή των TEGs.

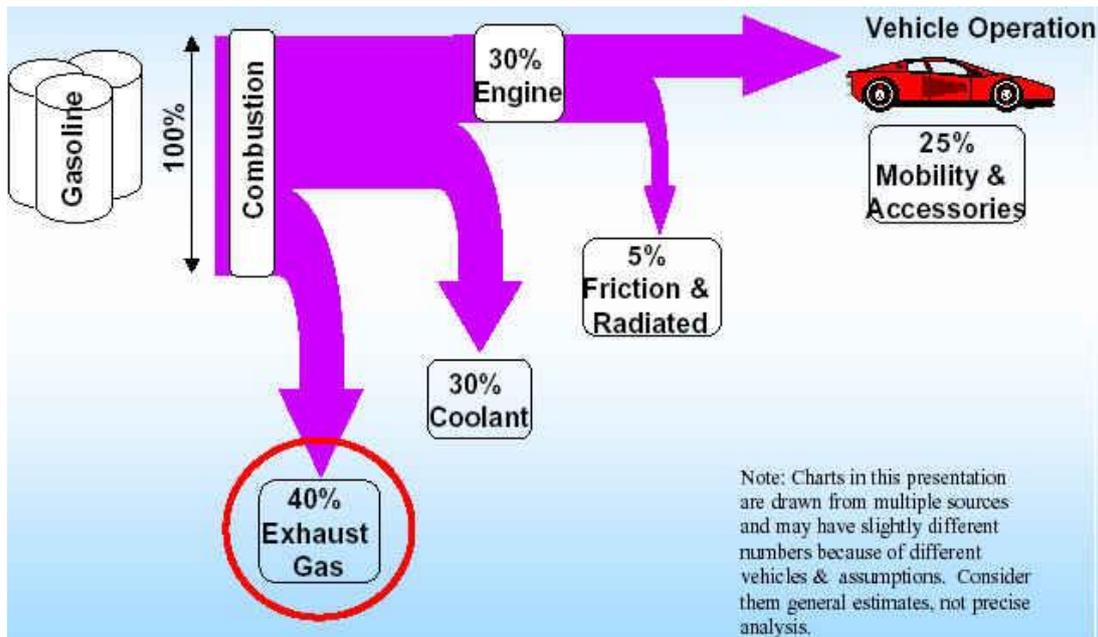
Γίνεται λοιπόν σαφές πως οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες σε συνδυασμό με φακούς Fresnel χρίζουν περαιτέρω βελτίωση ειδικά στο τομέα της απόδοσης και του κόστους. Βελτίωση που μπορεί να επέλθει με την εξέλιξη της τεχνολογίας των υλικών και την στροφή της αγοράς σε εναλλακτικές μορφές παραγωγής ενέργειας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Θερμοηλεκτρικές Γεννήτριες στην Αυτοκινητοβιομηχανία

4.1 Εισαγωγή

Η "Ενεργειακή Κρίση" έχει γίνει μια σημαντική πρόκληση για τους μηχανικούς σε όλο τον κόσμο λόγω των αυξανόμενων απαιτήσεων στην κατανάλωση ενέργειας. Για σχεδόν διακόσια χρόνια, η κύρια πηγή ενέργειας ήταν τα ορυκτά καύσιμα και θα συνεχίσει να αποτελεί ένα μεγάλο μέρος της παραγόμενης ενέργειας για τις επόμενες δεκαετίες. Η παγκόσμια κατανάλωση πετρελαίου αναμένεται να αυξηθεί από 80 εκατομμύρια βαρέλια ανά ημέρα που ήταν το 2003 και 98 εκατομμύρια βαρέλια που είναι σήμερα σε 118 εκατομμύρια βαρέλια την ημέρα μέχρι το 2030. Το μεγαλύτερο μέρος της παγκόσμιας αύξησης στην ζήτηση πετρελαίου θα προέρχονται από τον τομέα των μεταφορών. Ο τομέας των μεταφορών θα καλύπτει το 54% της παγκόσμιας κατανάλωσης πρωτογενούς πετρελαίου το 2030 σε σύγκριση με το 47% που καλύπτει σήμερα και 33% το 1971. Ένα σημαντικό ζήτημα που απασχολεί επίσης την παγκόσμια αυτοκινητοβιομηχανία είναι αυτό της κλιματικής αλλαγής. Καθώς η υπερθέρμανση του πλανήτη αυξάνεται δίνεται μεγάλη σημασία στην μείωση των εκπομπών CO₂. Το περιβαλλοντολογικό πρόβλημα, σε συνδυασμό με την απόδοση των καυσίμων λόγω των αυξημένων τιμών του πετρελαίου, έχει αναχθεί σε μείζον ζήτημα τα τελευταία χρόνια.

Είναι γνωστό ότι η θερμική απόδοση της μηχανής εσωτερικής καύσης την οποία χρησιμοποιούνται σήμερα στα αυτοκίνητα δεν μπορεί να υπερβεί το 30% και μόνο το ένα τρίτο της ενέργειας του καυσίμου ή της καύσης μετατρέπεται σε ισχύ, και το υπόλοιπο σπαταλιέται. Οι μεγαλύτερες απώλειες της μηχανής εσωτερικής καύσης συντελούνται στο σύστημα των καυσαερίων και του ψυκτικού υγρού, και ο πιο αξιόπιστος τρόπος για τη βελτίωση της αποδοτικότητας των καυσίμων είναι να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες αυτές. Για τη βελτίωση της αποδοτικότητας των καυσίμων καθώς και την απόδοση καύσης των μηχανών, οι μέχρι τώρα προσπάθειες είχαν γίνει στη βελτιστοποίηση της διαδικασίας ανάμιξης καυσίμου ή σύστημα καύσης.



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα απωλειών μηχανών εσωτερικής καύσης στα οχήματα.

Την τελευταία δεκαετία μια τεχνολογία που χρησιμοποιεί τις απώλειες θερμότητας από τα καυσαέρια και το σύστημα ψύξης των αυτοκινήτων έχει τραβήξει την προσοχή της επιστημονικής κοινότητας και των αυτοκινητοβιομηχανιών. Ένα σύστημα ανάκτησης των απωλειών της θερμότητας είναι η τεχνολογία που απαιτείται για την βελτίωση της αποδοτικότητας των καυσίμων και των λιπαντικών και τη μετατροπή πίσω σε χρησιμοποιήσιμη ισχύ. Η δυνατότητα για τη βελτίωση της αποδοτικότητας των καυσίμων μέσω ανάκτησης της απορριπτόμενης θερμότητας από τους κινητήρες των οχημάτων αποτελεί μείζονα ευκαιρία για τη μείωση των εκπομπών CO₂ καθώς και για την κάλυψη των όλο και αυξανόμενων αναγκών τους σε ηλεκτρικό φορτίο ένεκα της ασφάλειας, των ανέσεων και των επιδόσεων που θέλουν να προσφέρουν. Ως εκ τούτου, είναι αναγκαίο να αναπτυχθεί μια ανταγωνιστική και αξιόπιστη τεχνολογία-κλειδί για την ανάκτηση της θερμότητας που εκλύεται από τις μηχανές. Αυτό είναι δυνατό με τη χρήση θερμοηλεκτρική γεννήτρια. Μια θερμοηλεκτρική γεννήτρια μετατρέπει τη διαφορά θερμοκρασίας που προκύπτει από το σύστημα εξάτμισης σε ωφέλιμη τάση. Αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παροχή ισχύος στα βοηθητικά συστήματα του οχήματος, όπως το κλιματιστικό και άλλα μείζονος σημασίας ηλεκτρονικών κυκλωμάτων του.

Ακόμη μπορεί να μειώσει το μέγεθος του δυναμό που καταναλώνει ισχύ από τον άξονα κίνησης της μηχανής. Λόγω των αυξημένων απαιτήσεων σε ενέργεια τα σύγχρονα οχήματα χρησιμοποιούν όλο και μεγαλύτερα και πιο βαριά δυναμό. Αυτά τα δυναμό έχουν απόδοση της τάξεως του 55-65% ενώ καταναλώνουν περίπου το 5% της ονομαστικής ισχύς του άξονα κίνησης επηρεάζοντας τελικά στην συνολική οικονομία καυσίμου του οχήματος. Με την χρήση θερμοηλεκτρικών γεννητριών το μέγεθος τους θα μπορούσε να μειωθεί σημαντικά καθώς αυτές θα συνέβαλλαν στην ηλεκτρική ισχύ των κυκλωμάτων του οχήματος. Επίσης αν θα μπορούσε περίπου το 6% της θερμότητας των καυσαερίων να μετατραπεί σε ηλεκτρική ισχύ τότε θα εξοικονομούσε περίπου ίδια ποσότητα ενέργειας από την κίνηση του οχήματος και θα είναι δυνατή η μείωση της κατανάλωσης καυσίμων κατά περίπου 10%. Ως εκ τούτου οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες καθίστανται μια κερδοφόρα τεχνολογία στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας.

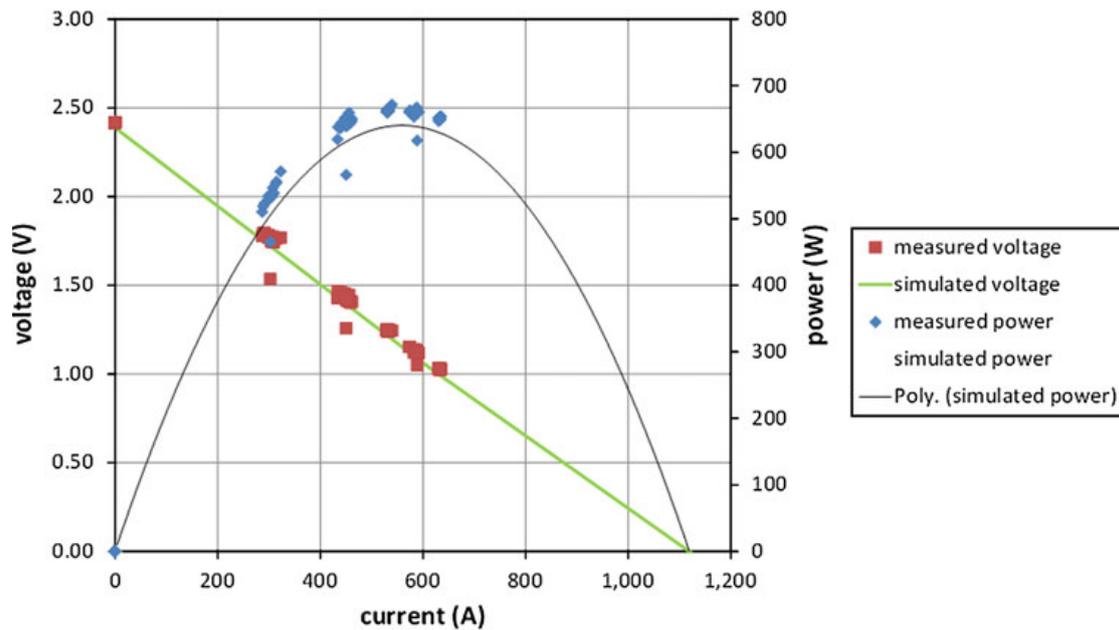
4.2 Εφαρμογές θερμοηλεκτρικών γεννητριών στην αυτοκινητοβιομηχανία

Την τελευταία δεκαετία λόγω της πρόβλεψης για αύξηση της τιμής των πετρελαϊκών καυσίμων και της επιβολής όλο και αυστηρότερων προδιαγραφών στις εκπομπές καυσαερίων (Euro 6) οι αυτοκινητοβιομηχανίες έχουν στραφεί στην χρήση των θερμοηλεκτρικών γεννητριών. Πρωτοπόρες τόσο στην πειραματική όσο και στην εμπορική εφαρμογή της θερμοηλεκτρικής τεχνολογίας έχουν στεφθεί οι βιομηχανίες της BMW και της Ford, ενώ πρόσφατα έστρεψε και η Fiat το ενδιαφέρον της προς αυτήν την κατεύθυνση. Στόχος τους είναι να αναπτύξουν ένα σύστημα εκμετάλλευσης των απωλειών θερμότητας των οχημάτων τους με την χρήση TEG με την μέγιστη δυνατή απόδοση και με ανταγωνιστικό κόστος.

Στην πρώτη φάση του προγράμματος τους αντιμετωπίστηκε το ζήτημα της αρχιτεκτονικής του συστήματος ανάκτησης των απωλειών θερμότητας. Κατασκευάστηκε μια μικρής κλίμακας θερμοηλεκτρική γεννήτρια για υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας με σκοπό να αποδείξει ότι ξεπερνά σε απόδοση το 10% ενώ αν συνδυαζόταν πολλαπλώς θα απέφερε ισχύ μεγαλύτερη των 20 W για θερμοκρασίες λειτουργίας $>400^{\circ}\text{C}$. Λόγω της περιορισμένης διαθεσιμότητας

θερμοηλεκτρικών στοιχείων με καλή απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες χρησιμοποιήθηκε το παραδοσιακό και άμεσα διαθέσιμο κράμα Bi_2Te_3 . Η πρώτη προσέγγιση έδειξε πως ήταν δυνατόν να επιτευχθεί παραγόμενη ισχύς άνω των 500W με μια θερμοηλεκτρική γεννήτρια λειτουργίας υγρού/υγρού στην θερμή και την ψυχρή της επιφάνεια αντίστοιχα. Στην συνέχεια του προγράμματος δόθηκε έμφαση στην κατασκευή μιας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με λειτουργία αερίου/υγρού η οποία θα μπορούσε να αντέξει θερμοκρασίες δυνητικά άνω των 600 °C. Η πειραματική διάταξη ανταποκρίθηκε στις προσδοκίες για απόδοση μεγαλύτερη των 100W αλλά υπήρξαν δυσκολίες με τον σχεδιασμό αφού η επίπεδη πλάκα η οποία συγκρατούσε τα 5 θερμοηλεκτρικά στοιχεία χώλαινε στην διατήρηση της καλής θερμοκρασιακής διαφοράς των στοιχείων και στην εφαρμογή τους σε μεγάλες επιφάνειες. Οι δοκιμές έδειξαν ότι κάποιες θερμοηλεκτρικές γεννήτριες ήταν σε καλή θερμική επαφή ενώ άλλες δεν ήταν. Επίσης ήταν δύσκολο να εφαρμοστεί επαρκής πίεση σε όλη την επιφάνεια των TEG ώστε να διατηρήσουν καλή θερμική επαφή χωρίς τη σύνθλιψη τους σε ορισμένα σημεία.

Στη επόμενη φάση έγινε μια ριζική τροποποίηση στον σχεδιασμό των θερμοηλεκτρικών γεννητριών. Ο σχεδιασμός άλλαξε από μια επίπεδη πλάκα σε ένα κυλινδρικό σχήμα. Ύστερα από τις απαραίτητες τροποποιήσεις του νέου κυλινδρικού σχεδιασμού στην θερμική ροή και στο σύστημα ψύξης του παρατηρήθηκε απόδοση μεγαλύτερη των 200W για τα αντίστοιχα στοιχεία που είχαν χρησιμοποιηθεί στην προηγούμενη επίπεδη σχεδίαση. Υπήρξε τότε η ανάγκη βελτιστοποίησης των κυλινδρικών TEGs και η εφαρμογή τους τόσο σε οχήματα της BMW όσο και της Ford. Το βελτιωμένο κυλινδρικό TEG υψηλών θερμοκρασιών που εφαρμόστηκε δοκιμαστικά έφερε σαφώς καλύτερα αποτελέσματα όπως φαίνονται στο **Σχήμα 4.2** αποδίδοντας μέγιστη ισχύ 712W για θερμοκρασία λειτουργίας της θερμής επιφάνειας στους 620 °C και της ψυχρής στους 20 °C. Αυτή η διαφορά με το πρώτο κυλινδρικό TEG οφείλεται στην μικρότερη διεπιφανειακή αντίσταση με τον κινητήρα.

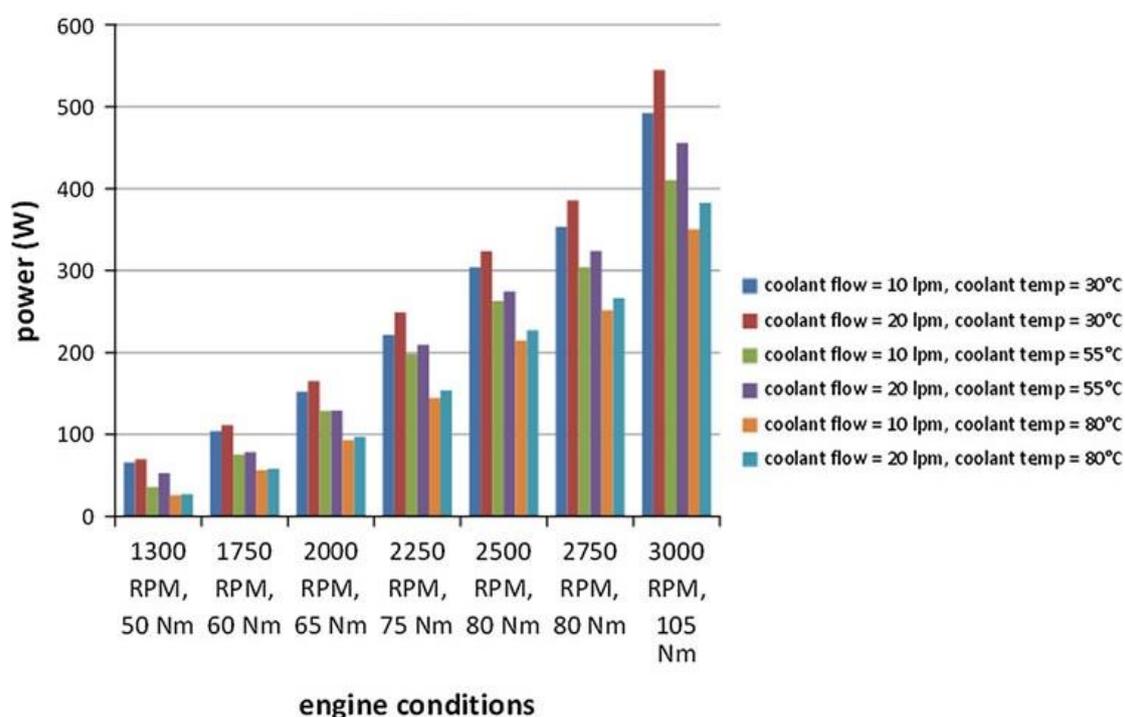


Σχήμα 4.2: Διάγραμμα τάσης-ισχύος για κυλινδρικό TEG δοκιμών.

Έπειτα από τις επιτυχημένες εργαστηριακές μετρήσεις στο κυλινδρικό TEG, έγιναν δοκιμές για τον έλεγχο της απόδοσης του σε μια μηχανή με δυναμόμετρο. Η διάταξη δοκιμής αποτελούταν από έναν εξακύλινδρο κινητήρα BMW συμπεριλαμβανομένης της συστοιχίας των καυσαερίων και του καταλυτικού μετατροπέα. Η θερμοηλεκτρική γεννήτρια τοποθετήθηκε κοντά στον καταλύτη στο ψυγείο του συστήματος ανακυκλοφορίας των καυσαερίων και δοκιμάστηκε σε μια σειρά από μόνιμες συνθήκες του κινητήρα σε διαφορετικές θερμοκρασίες του ψυκτικού και ρυθμούς ροής καθώς και σε κύκλο οδήγησης εκτός πόλεως. Τα αποτελέσματα από αυτές τις δοκιμές παρουσιάζονται στο *Σχήμα 4.3* και *4.4*.

Το *Σχήμα 4.3* δείχνει τα αποτελέσματα σε σταθερή κατάσταση δοκιμής για συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα που κυμαίνονταν από 1.300 RPM έως 3000 RPM και ισχύος του από 50 Nm έως 105 Nm. Οι θερμοκρασίες του ψυκτικού κυμαίνονταν από 30 °C έως 80 °C, και η ροή του κυμαίνονταν από 10 λίτρα ανά λεπτό έως 20 λίτρα ανά λεπτό. Η παραγόμενη τάση που παρατηρείται θεωρείται αναμενόμενη καθώς η ισχύς του TEG αυξήθηκε ανάλογα με τις στροφές και τη ροπή του κινητήρα. ΤEO ισχύς

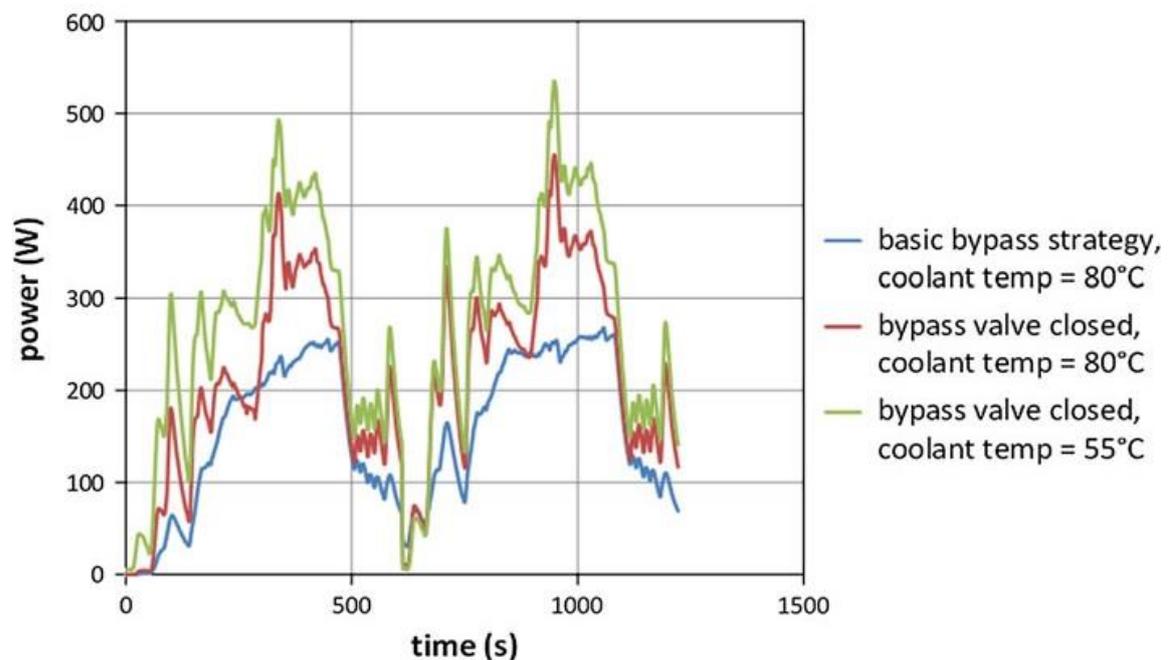
ήταν επίσης υψηλότερη σε χαμηλότερη ψυκτικού θερμοκρασίες και υψηλότερα ποσοστά ροής του ψυκτικού μέσου.



Σχήμα 4.3: Αποτελέσματα απόδοσης TEG σε σταθερή κατάσταση λειτουργίας του κινητήρα.

Το **Σχήμα 4.4** δείχνει τα αποτελέσματα της απόδοσης TEG κατά τη διάρκεια του κύκλου οδήγησης εκτός πόλεως. Αυτός ο κύκλος οδήγησης αποτελεί μια επιθετική οδήγηση που είναι αντιπροσωπευτική της οδήγηση στον αυτοκινητόδρομο, με επιταχύνσεις και μεγάλες στροφές λειτουργίας του κινητήρα. Το αποτέλεσμα των μετρήσεων στον πιο επιθετικό κύκλο οδήγησης δίνουν υψηλότερα φορτία στον κινητήρα άρα και μεγαλύτερη απορριπτόμενη θερμότητα μέσω του συστήματος εξάτμισης για να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω του TEG. Για αυτόν τον κύκλο οδήγησης έγιναν 2 σειρές μετρήσεων. Οι δύο μετρήσεις έτρεξαν εναλλάξ με ένα «διάλειμμα» 60-s στο ρελαντί μεταξύ τους. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν με θερμοκρασία ψυκτικού 80 °C και 55 °C για να μελετηθεί το πιθανό όφελος από τη

χρήση ενός χαμηλότερης θερμοκρασίας βοηθητικού καλοριφέρ. Υπήρξε βελτίωση σχεδόν 50 W έως 100 W στην ισχύ εξόδου για διάφορες θερμοκρασίες του ψυκτικού υγρού από τους 55°C σε σύγκριση με τους 80 °C. Το **Σχήμα 4.3** δείχνει την ισχύ εξόδου για τις δοκιμές αυτές, με την μέγιστη ισχύ να επιτυγχάνεται πάνω από τα 500 W. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η σύστημα ελέγχου της βαλβίδας παράκαμψης δεν θα μπορούσε να εφαρμοστεί για τις δοκιμές αυτές. Έτσι η βαλβίδα παράκαμψης μπορούσε να είναι είτε ανοικτή ή κλειστή. Το **Σχήμα 4.3** δείχνει επίσης την ισχύ της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με μια βασική βαλβίδα παράκαμψης πλήρως ανοικτή ή πλήρως κλειστή.



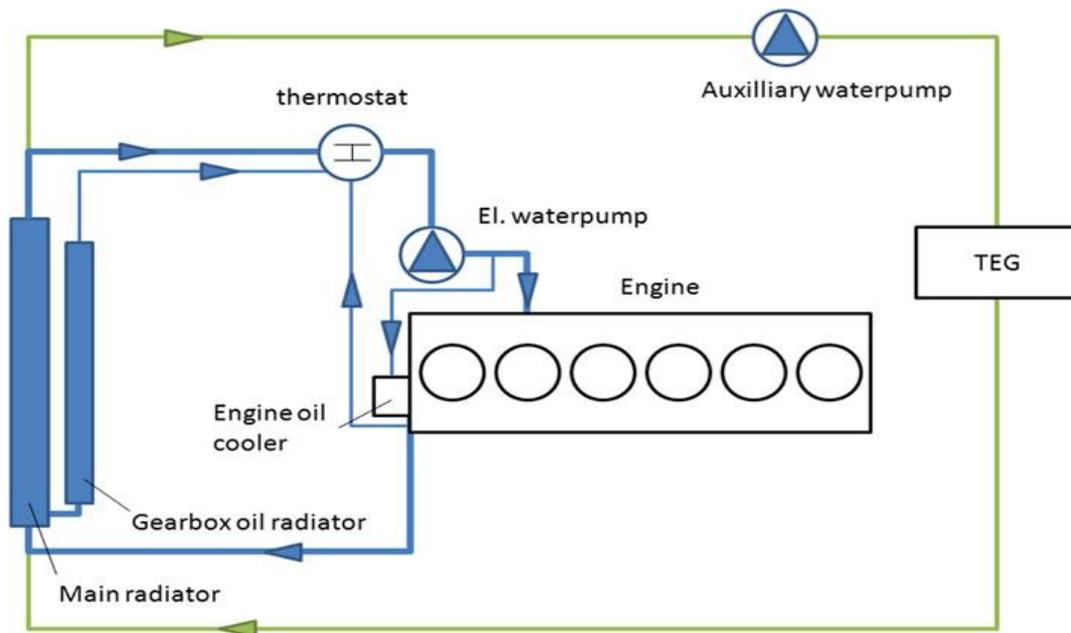
Σχήμα 4.4: Διάγραμμα απόδοσης ισχύος TEG για "επιθετικό" κύκλο οδήγησης.

4.3 Εφαρμογή θερμοηλεκτρικής γεννήτριας σε όχημα BMW

Μία από τις θερμοηλεκτρικές γεννήτριες εντάχθηκε σε μια BMW X6 35i xDrive για την τελική αξιολόγηση του συστήματος. Δόθηκε έμφαση στην ελαχιστοποίηση των αρνητικών επιπτώσεων στα υπόλοιπα μηχανικά μέρη του οχήματος (για παράδειγμα στο σύστημα ψύξης, την απόδοση του κινητήρα, κ.λπ.) και παράλληλα στην βελτιστοποίηση της απόδοσης της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας. Η θερμοηλεκτρική γεννήτρια έχει μια ποικιλία από διεπαφές και τις αλληλεπιδράσεις με το υπόλοιπο περιβάλλον του οχήματος. Για να αναλυθεί ο αντίκτυπος της TEG επί της συνολικής απόδοσης του συστήματος εγκαταστάθηκαν πολλοί αισθητήρες οι οποίοι λάμβαναν δεδομένα για την θερμοκρασία, την τάση, το ηλεκτρικό ρεύμα, τη διαφορική πίεση, και τον όγκο ροής των υγρών και των αερίων του συστήματος. Εγκαταστάθηκε ακόμη ένας μετατροπέας αναλογικού σε ψηφιακό σήμα ο οποίος συγχωνεύει όλα τα κανάλια δεδομένων σε ψηφιακή επικοινωνία CAN δικτύου. Μια συγκεκριμένη μονάδα ελέγχου του κινητήρα (ECU) παρείχε πρόσθετες πληροφορίες σχετικά με τιμές που σχετίζονται με τον κινητήρα, όπως η ταχύτητα του κινητήρα, το φορτίο, και κατανάλωση καυσίμου. Επιπλέον μια μονάδα ελέγχου του αυτοκινήτου είχε εγκατασταθεί για να συγκεντρώσει όλα τα δεδομένα των μετρήσεων και τιμές ECU για την επεξεργασία τους μέσω μιας ανεπτυγμένης στρατηγικής ελέγχου. Ειδικότερα η βαλβίδα εξαγωγής και η βοηθητική αντλία νερού ελέγχονται σε κλειστού κύκλου κύκλωμα για τη βέλτιστη αξιοποίηση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας κατά τη διάρκεια δυναμικών και σταθών συνθηκών οδήγησης. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από την TEG εξαρτάται από το επίπεδο θερμοκρασίας του ψυκτικού μέσου, όπως φάνηκε στις παραπάνω δοκιμές. Επιπλέον τα οχήματα της BMW έχουν μια συγκεκριμένη στρατηγική προθέρμανσης για τη μείωση της κατανάλωσης των καυσίμων και την αυξημένη άνεση των επιβατών.

Ο στόχος ήταν να διατηρηθεί η ελάχιστη θερμοκρασία του ψυκτικού για την TEG διατηρώντας παράλληλα τη μηχανή ανεπηρέαστη από αυτό το πρόσθετο συστατικό στην ψύξη βρόχου. Ως εκ τούτου, η TEG εγκαταστάθηκε παράλληλα με τον κινητήρα με μια βοηθητική αντλία νερού για να δημιουργηθεί έτσι ένας επαρκής ρυθμός ροής του ψυκτικού μέσου όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.4** . Οι θερμοκρασίες του ψυκτικού υγρού μετρήθηκε στην εισόδου και στην θύρα εξόδου της TEG, σε συνδυασμό με τον

ρυθμός ροής όγκου του ψυκτικού υγρού. Με βάση αυτές τις τιμές, η τιμή ζήτησης της αντλίας βοηθητικού νερού είναι ελεγχόμενη με στόχο την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης της ισχύος εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα επαρκή ισχύ ψύξης. Μια βαλβίδα μη επιστροφής της ροής στο σωλήνα ψύξης της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας εμποδίζει την όποια μοιραία βλάβη του κινητήρα σε περίπτωση βλάβης των βοηθητικών συστημάτων στην αντλία νερού.



Σχήμα 4.4: Αλληλεπίδραση συστήματος ψύξης TEG με το σύστημα ψύξης του κινητήρα.

Η θερμοηλεκτρική γεννήτρια έχει ένα υψηλό αριθμό θερμοηλεκτρικών στοιχείων με παράλληλα συνδεδεμένες διαδρομές ρεύματος και ένα περιορισμένο αριθμό σε σειρά. Ως εκ τούτου, το επίπεδο της τάσης της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας είναι πολύ χαμηλό για να χρησιμοποιηθεί ένας μετατροπέας DC / DC για άμεση ένταξη στο κυρίως κύκλωμα του οχήματος, το οποίο έχει συνήθως τάση 14 V. Έτσι στο συγκεκριμένο πρωτότυπο όχημα η ηλεκτρική ενέργεια η οποία παράγεται από το TEG δεν είναι χρησιμοποιείται για να μειώσει το φορτίο στο δυναμό. Αντίθετα, μια σταθερή ηλεκτρική αντίσταση χρησιμοποιείται για την προσομοίωση του ηλεκτρικού φορτίο στην θερμοηλεκτρική γεννήτρια η οποία είναι εξοπλισμένη με αισθητήρες

τάσης και θερμοκρασίας για τον ακριβή υπολογισμό της παραγόμενης ισχύος. Η επίδραση στην κατανάλωση των καυσίμων καθορίζεται από την μετατόπιση στην χαρτογράφηση του κινητήρα από την παραγόμενη ισχύ του TEG διαιρούμενη με την πραγματική απόδοση του δυναμό.

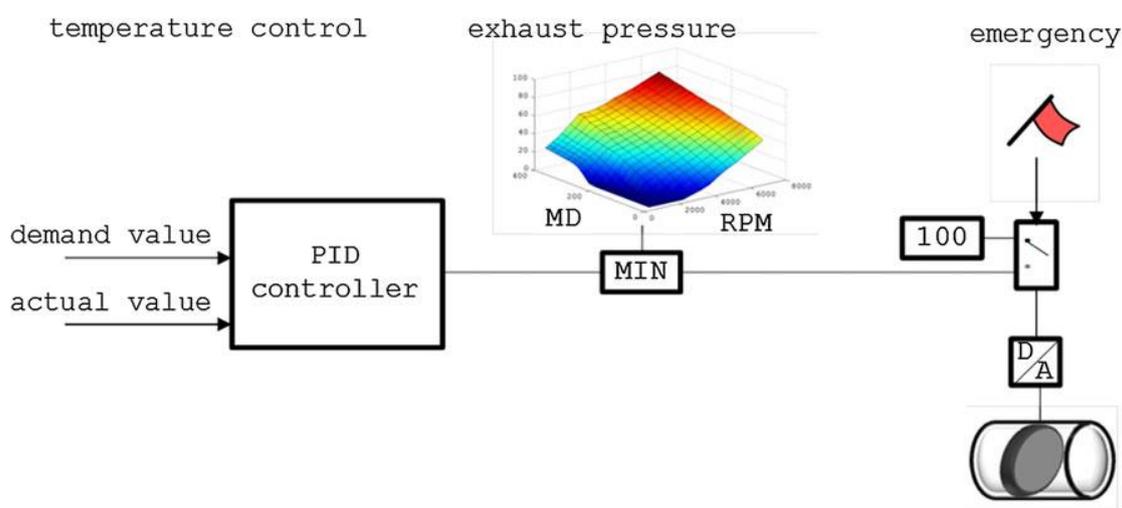
Η θερμοηλεκτρική γεννήτρια εγκαταστάθηκε περίπου 1 m πίσω από τον κύριο καταλύτη. Για τη διατήρηση της υψηλής θερμοκρασίας των καυσαερίων στην είσοδο του TEG, ο σωλήνας της εξάτμισης μεταξύ του καταλύτη και του TEG ήταν ενθυλακωμένος με έναν θερμικό μονωτή όπως φαίνεται στην **Εικόνα 4.5**.



Εικόνα 4.5: Εγκατάσταση TEG στο σύστημα εξάτμισης της BMW.

Μεγάλη σημασία δόθηκε στη βαλβίδα εξάτμισης στο πίσω άκρο της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας. Η βαλβίδα μπορεί να ανοίγει συνεχώς και να χωρίζει τη συνολική ρεύμα των καυσαερίων μεταξύ του εξωτερικού τμήματος του TEG και την εσωτερική διαδρομή παράκαμψης. Αυτή η κατανομή των καυσαερίων μεταξύ των δύο διαδρομών έχει μεγάλο αντίκτυπο στην εξάτμιση, στην θερμότητα απορρίπτεται στο σύστημα ψύξης και την θερμοκρασία των θερμοηλεκτρικών στοιχείων. Ο σκοπός του ελέγχου των βαλβίδων εξαγωγής κλειστού βρόχου είναι στο να διατηρηθεί τη μέγιστη δυνατή ισχύς από την TEG, κρατώντας ταυτόχρονα τις προαναφερθείσες τιμές του συστήματος κάτω από τα επιτρεπόμενα όρια. Αυτή η στρατηγική τριών επιπέδων εμφανίζονται στο **Σχήμα 4.6**. Το πρώτο επίπεδο καθορίζει τη βέλτιστη θέση της βαλβίδας εξαγωγής σε σχέση με τη θερμοκρασία του συστήματος. Η τιμή αυτή μεταβιβάζεται και περιορίζεται περαιτέρω από το δεύτερο επίπεδο, το οποία

λαμβάνει υπόψη το φορτίο του κινητήρα και την επιτάχυνση. Το τρίτο και τελευταίο επίπεδο εξασφαλίζει μια πλήρως ανοικτή βαλβίδα εξαγωγής σε περίπτωση που ανιχνευτεί κάποια κατάσταση έκτακτης ανάγκης (π.χ., όριο θερμοκρασίας, ανεπάρκεια της ροής στην αντλία, κ.λπ.).



Σχήμα 4.6: Στρατηγικά ελέγχου τριών επιπέδων στο σύστημα καυσαερίων.

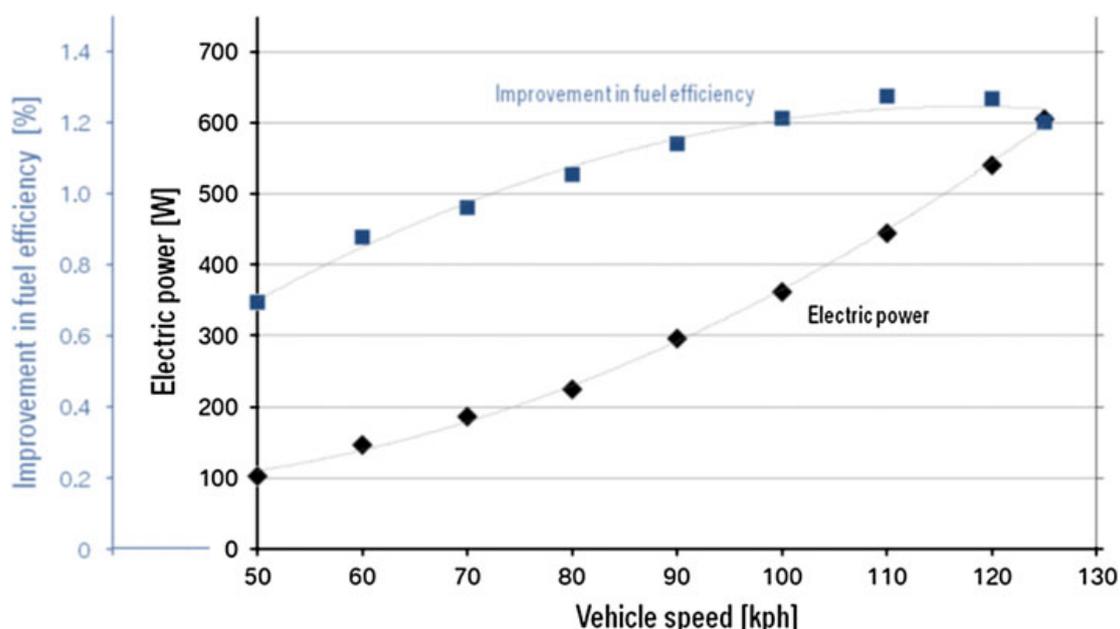
Με την αύξηση του φορτίου του κινητήρα αυξάνεται και η θερμοκρασία των καυσαερίων, καθώς και η μάζα ροής τους. Ως εκ τούτου, η ενθαλπία της εξάτμισης εξαρτάται έντονα από την ταχύτητα του οχήματος. Ωστόσο, η χρησιμοποιούμενη ροή των καυσαερίων πρέπει να περιορίζεται σε υψηλότερες ταχύτητες και αυτό οφείλεται σε δύο πρωτογενείς πτυχές:

- Τα όρια θερμοκρασίας του θερμοηλεκτρικού υλικού
- Η αντίθλιψη της εξάτμισης από το TEG μπορεί να έχει αρνητικές συνέπειες για την διαδικασία της καύσης.

Συνοπτικά, αυτό οδηγεί σε ένα μέγιστο σημείο στην παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, ο οποίος επιλέχθηκε να αποδίδεται για το συγκεκριμένο πρωτότυπο όχημα

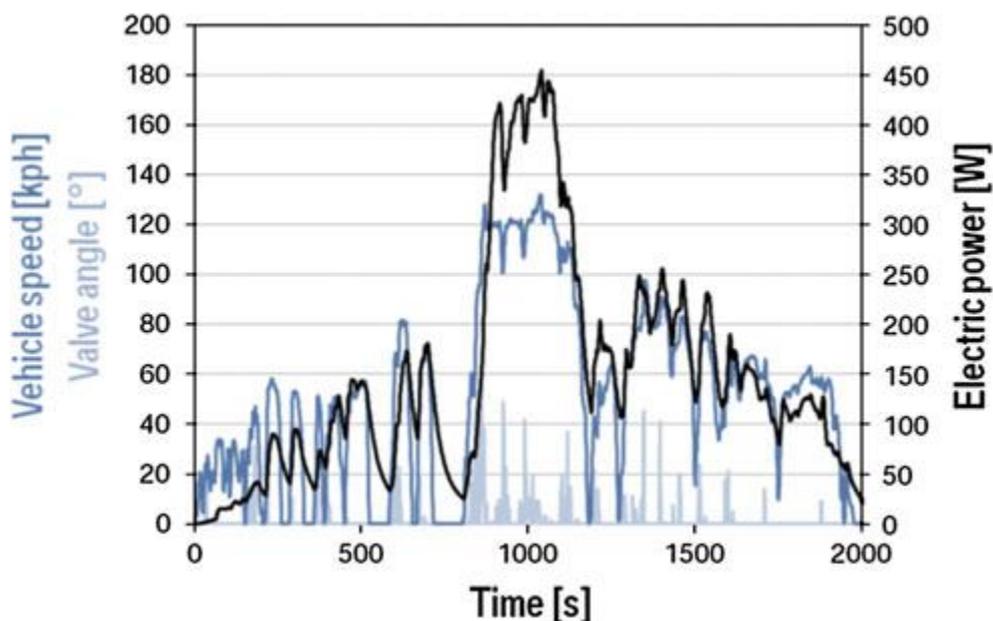
στα 125 χιλιόμετρα την ώρα. Επιπλέον, η υψηλότερη ισχύς εξόδου επιτεύχθηκε για σταθερές συνθήκες οδήγησης λόγω της θερμική αδράνεια του θερμοηλεκτρικών στοιχείων του TEG. Στο **Σχήμα 4.7** φαίνεται η μετρούμενη ισχύς και η υπολογισμένη μείωση της κατανάλωσης καυσίμων για διαφορετικές ταχύτητες λειτουργίας του οχήματος σε κλειστή πίστα. Κάθε σημείο των δεδομένων αντιπροσωπεύει την τελική τιμή μετά από αρκετά λεπτά οδήγησης με σταθερή ταχύτητα. Είναι προφανές ότι η ισχύς εξόδου αυξάνεται ανάλογα με την ταχύτητα οδήγησης λόγω της η αύξηση της ενθαλπίας εξάτμισης.

Στις μετρήσεις επιτεύχθηκε απόδοση ισχύος από της θερμοηλεκτρική γεννήτρια της τάξεως των **605 W**. Η σχετική αλλαγή στη βελτίωση της αποδοτικότητας των καυσίμων εξαρτάται από το πραγματική κατανάλωση καυσίμου, η οποία αυξάνει ανάλογα με την αύξηση της ταχύτητας του οχήματος. Ως εκ τούτου, οι δύο καμπύλες στο **Σχήμα 4.7** έχουν διαφορετικές κλίσεις και η σχετική βελτίωση της αποδοτικότητας των καυσίμων κορυφώνεται στα 110 χιλιόμετρα την ώρα με ποσοστό πάνω από 1,2%.



Σχήμα 4.7: Ισχύς TEG και βελτίωση στην κατανάλωση καυσίμου συναρτήσει της ταχύτητας του οχήματος.

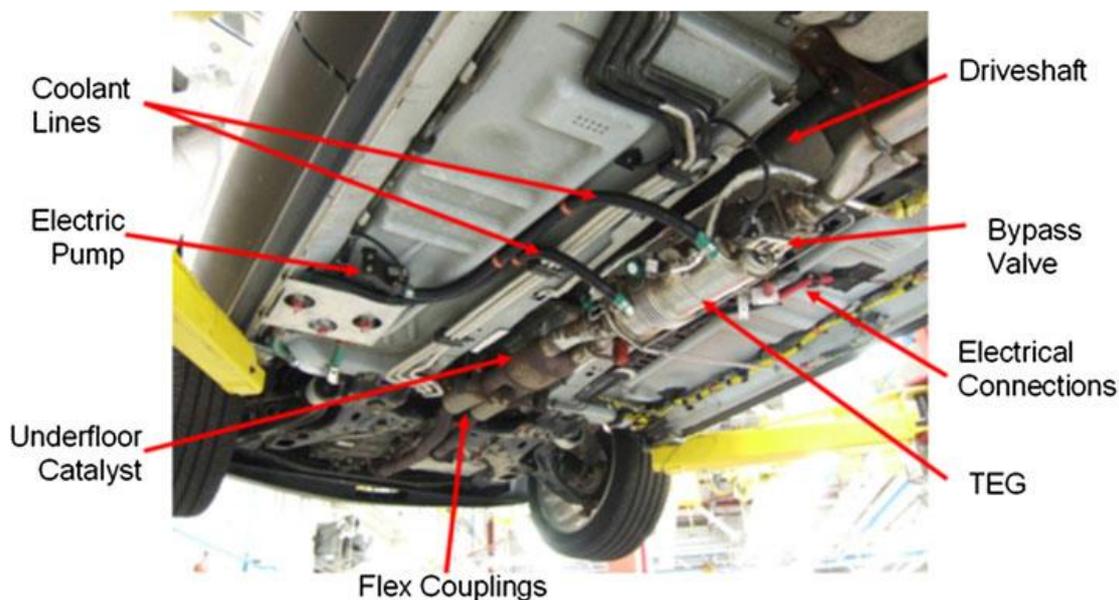
Η στρατηγική ελέγχου κλειστού βρόχου του συστήματος της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας επιτρέπει μια οδηγική συμπεριφορά του πειραματικού οχήματος πανομοιότυπη με ένα κανονικό αυτοκίνητο. Ένα εγκατεστημένο καταγραφικό αποθήκευσε τις τιμές των παραμέτρων κατά την διάρκεια συνηθισμένης και δυναμικής οδήγησης όπως φαίνονται στο *Σχήμα 4.8*. Παρατηρείται αντίστοιχη συμπεριφορά του συστήματος και για τις δύο συνθήκες οδήγησης, καθώς η ισχύς εξόδου αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας. Ένας περιοριστικός παράγοντας είναι η ανάγκη να ανοίξει η βαλβίδα εξαγωγής κατά τη διάρκεια της επιτάχυνσης (εξ' ου και η απώλεια των καυσαερίων ενθαλπίας για το σύστημα ανάκτησης θερμότητας) εκτός από την θερμική αδράνεια των θερμοηλεκτρικών στοιχείων. Ως εκ τούτου, η επιτευχθείσα απόδοση ισχύος είναι **450 W** για την ταχύτητα του οχήματος κοντά στο μέγιστο σημείο του σχεδιασμού του συστήματος, σε αντίθεση από τα >600 W με τις παρόμοιες σταθερές συνθήκες οδήγησης. Η επανάληψη των test drives τους πρώτους μήνες δεν έδειξε την μείωση της ισχύος που παράγει η θερμοηλεκτρική γεννήτρια.



Σχήμα 4.8: Ισχύς TEG, ταχύτητα οχήματος και γωνία βαλβίδας εξάτμισης κατά την διάρκεια δυναμικής οδήγησης.

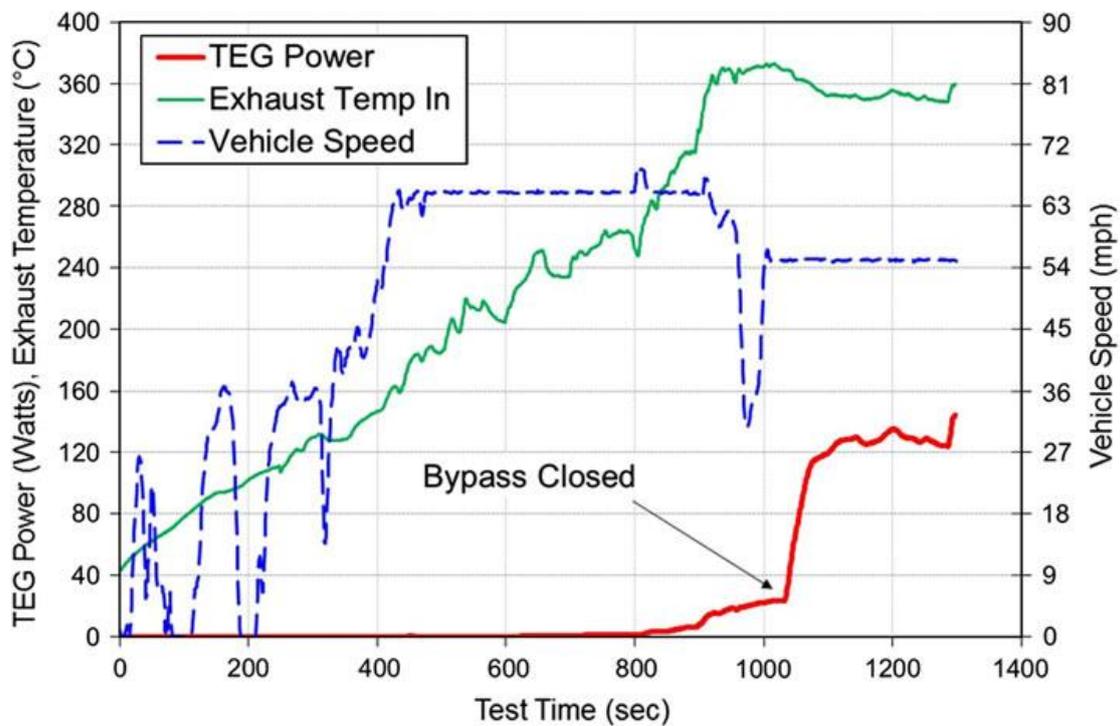
4.4 Εφαρμογή θερμοηλεκτρικής γεννήτριας σε όχημα Ford

Μια κυλινδρική θερμοηλεκτρική γεννήτρια ίδιας τεχνολογίας τοποθετήθηκε σε ένα όχημα της εταιρείας Ford Motor για δοκιμές στο δρόμο. Το όχημα που επιλέχθηκε για την δοκιμή ήταν ένα allwheel-drive Lincoln MKT με κινητήρα βενζίνης άμεσου ψεκασμού twin-turbo V-6 χωρητικότητας 3.5 λίτρων και αυτόματο κιβώτιο έξι ταχυτήτων. Η ονομαστική απόδοση του κινητήρα είναι 355 ίπποι στις 5700 στροφές ανά λεπτό και παρέχει 455 Nm ροπής από τις 1500 RPM έως τις 2500 RPM. Για να ελαχιστοποιηθούν οι παρεμβολές η θερμοηλεκτρική γεννήτρια τοποθετήθηκε στην μέση του αμαξώματος σχεδόν 2 μέτρα από την έξοδο του εξάτμισης όπως φαίνεται στο **Εικόνα 4.9**. Το κύκλωμα ψύξης ενσωματώθηκε απευθείας στο σύστημα πρωτογενούς ψύξης του οχήματος. Παρόμοια με την εγκατάσταση της BMW, ηλεκτρική ισχύς που παράγεται από την TEG ήταν ανάλογη με το φορτίο του κινητήρα.

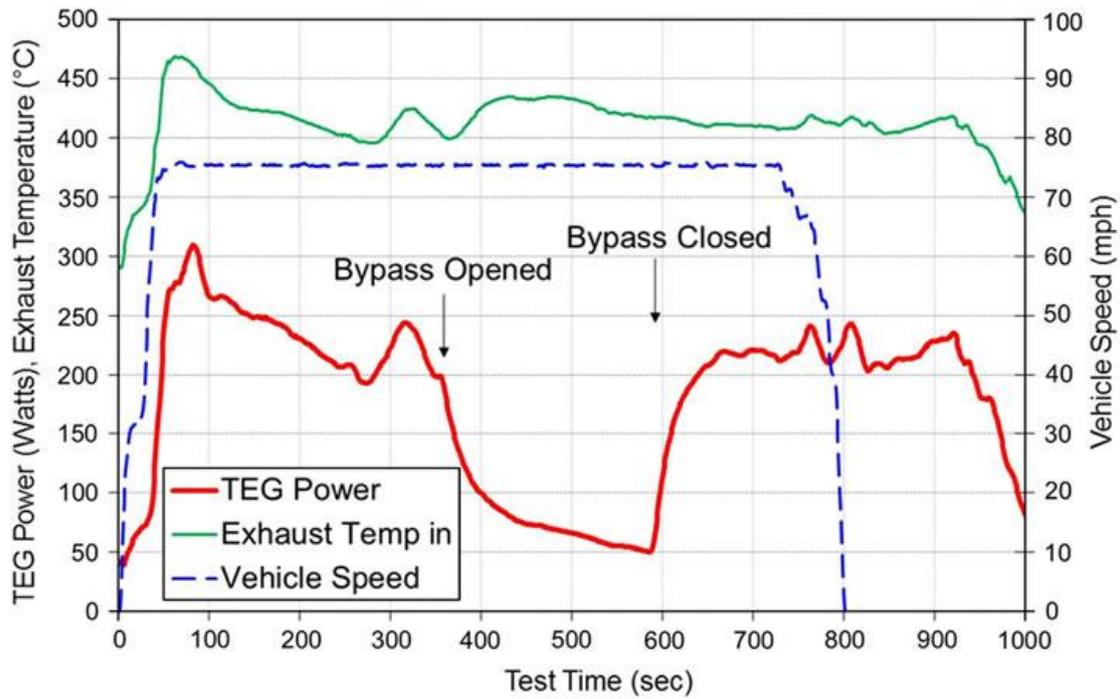


Εικόνα 4.9: Εγκατάσταση συστήματος TEG στο όχημα της Ford.

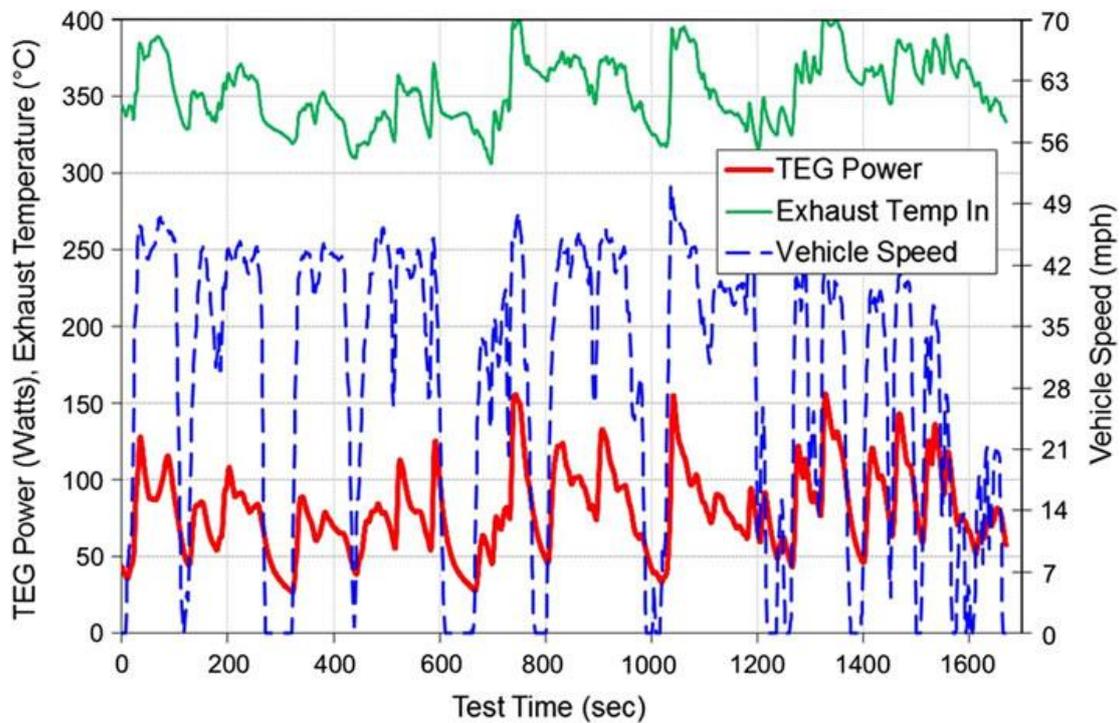
Το όχημα δοκιμάστηκε για περισσότερες από 50 ώρες στο δρόμο και αξιολογήσεις σε διάφορες παραμέτρους λειτουργίας. Αυτοί περιλαμβάνουν δοκιμές για κρύα εκκίνηση, οδήγηση σε αυτοκινητόδρομο με σταθερή ταχύτητα, και οδήγηση στην πόλη stop-and-go. Τα αποτελέσματα του κάθε κύκλου οδήγησης παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.10 -4.12** . Μετά την ολοκλήρωση των test-drive οι μετρήσεις επαναλήφθηκαν σε εργαστηριακό περιβάλλον και τα αποτελέσματα φαίνονται στο **Σχήμα 4.13**.



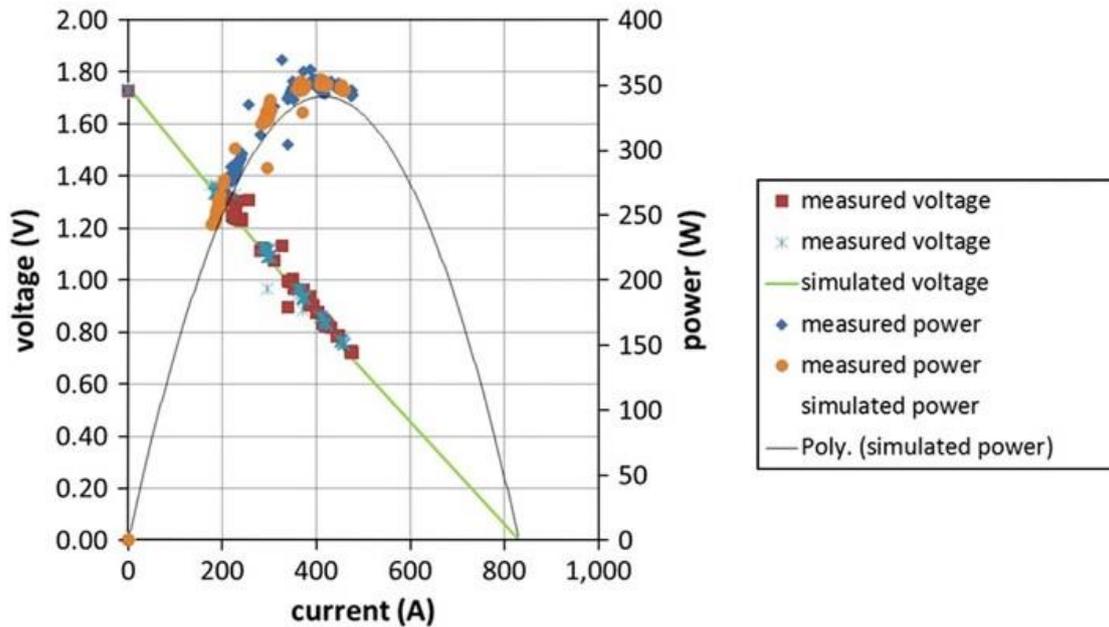
Σχήμα 4.10: Απόδοση TEG από εκκίνηση με σταθερή ταχύτητα 90 χλμ/ω (56mph).



Σχήμα 4.11: Απόδοση TEG με σταθερή ταχύτητα 120 χλμ./ω σε αυτοκινητόδρομο. Μέγιστο κοντά στα 225W.



Σχήμα 4.12: Απόδοση TEG για οδήγηση εντός πόλης. Μέση τιμή κοντά στα 80W.



Σχήμα 4.13: Διάγραμμα Τάσης-Ρεύματος-Ισχύος TEG για εργαστηριακές δοκιμές.

4.5 Συμπεράσματα

4.5.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά και εμπόδια

Με την ολοκλήρωση των μετρήσεων παρατηρήθηκαν πολλά τεχνικά ζητήματα η επίλυση των οποίων θα συμβάλει στην μαζική εμπορική χρήση των θερμοηλεκτρικών γεννητριών στην αυτοκινητοβιομηχανία. Από πλευράς θερμοηλεκτρικών υλικών υπάρχει πάντα η επιθυμία να βελτιωθεί η μέσος όρος της θερμοηλεκτρικής απόδοσης ZT του υλικού για το επιθυμητό φάσμα θερμοκρασιών λειτουργίας. Αυτό θα βελτιώσει την αποτελεσματικότητα των θερμοηλεκτρικών γεννητριών και έτσι θα επεκτείνει τις δυνατότητές της. Τα διαθέσιμα θερμοηλεκτρικά υλικά TE που είναι προσφέρουν επαρκή μέση τιμή θερμοηλεκτρικής απόδοσης ZT για να εισέλθουν στην αγορά. Άλλοι σημαντικοί παράγοντες στην βελτιστοποίηση των θερμοηλεκτρικών υλικών αποτελούν η μηχανική ευρωστία, η εξάχνωσης και η καταστολή της οξείδωσης. Χωρίς περαιτέρω ανάπτυξη σε αυτούς τους τομείς, οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες μπορεί να μην είναι σε θέση να επιτύχουν το επιθυμητό διάρκεια ζωής για εμπορικές εφαρμογές λειτουργίας.

Περαιτέρω ανάπτυξη απαιτείται επίσης στην επιμετάλλωση και την αντίσταση επαφής των TEG. Κατά την ανάπτυξη των TEG αποτελεί ζωτικής σημασίας η διαχείριση της συντελεστή θερμικής διαστολής, η αναντιστοιχία μεταξύ του θερμοηλεκτρικού υλικού και των συνδετήρων του, καθώς και η θερμική διαστολή μεταξύ της θερμής και ψυχρής επιφάνειας της θερμοηλεκτρικής συσκευής. Αυτό δεν είναι εύκολο έργο αφού η ανάγκη να διατηρηθούν οι αντιστάσεις επαφής/διεπιφανειακή όσο το δυνατόν μικρότερες δυσχεραίνεται από την ανάγκη για ηλεκτρική απομόνωση μεταξύ των εναλλακτών θερμότητας και των θερμοηλεκτρικών στοιχείων.

Τα βασικά τεχνικά ζητήματα που περιορίζουν σήμερα την απόδοση σε επίπεδο TEG περιλαμβάνουν την απώλεια θερμότητας μεταξύ των θερμών και κρύων επιφανειών της γεννήτριας και στο περιβάλλον. Άλλα θέματα αφορούν μείωση της πίεσης των καυσαερίων χωρίς την πτώση της θερμοκρασίας τους. Το βάρος είναι επίσης ένα ζήτημα, ιδιαίτερα στη μεταβατική λειτουργία του κινητήρα από εκκίνηση και το χρόνο προθέρμανσης του, καθώς και ο όγκος, η αντίθλιψη του κινητήρα, ο θόρυβος και ο καταλύτης.

4.5.2 Οικονομικά χαρακτηριστικά και εμπόδια

Κατά τη διάρκεια του προγράμματος δοκιμάστηκαν διάφορες αρχιτεκτονικές θερμοηλεκτρικών γεννητριών ώστε να επιτευχθεί ισορροπία κόστους και απόδοσης. Στο αρχική φάση του προγράμματος, ένα δευτερεύον σύστημα βρόχου προτάθηκε ώστε να επιτευχθούν κάποια οφέλη:

- Μειωμένος όγκος TEG, ο οποίος θα βοηθούσε στην συμπαγή κατασκευή και στα θέματα ανακύκλωσης του καυσαερίου.
- Ένα μέσο για να ρυθμίζει την ενθαλπία των καυσαερίων του κινητήρα σε συνθήκες οδήγησης στην πόλη
- Η παροχή ενός κλειστού βρόχου θερμού υγρού ώστε να μειωθούν οι απώλειες θερμότητας προς την θερμοηλεκτρική γεννήτρια.

Παρά το γεγονός ότι η προτεινόμενη αρχιτεκτονική προσέφερε σημαντικά οφέλη, η ανάγκη για το υγρό της αντλίας του δευτερεύοντος κυκλώματος οδήγησε το κόστος του συστήματος σε απαράδεκτο υψηλό επίπεδο. Στην επόμενη φάση του προγράμματος προτάθηκε ένα ενσωματωμένο σύστημα TEG το οποίο περιλάμβανε εναλλασσόμενα θερμό (καυσαέριο) και κρύο υγρό επίπεδη θερμότητας, μεταξύ των οποίων στις επιφάνειες της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας. Αυτή η αρχιτεκτονική μείωσε το συνολικό κόστος του συστήματος, αλλά διαπιστώθηκε ότι η κατασκευή των επίπεδων πλακών απαιτούσε επιπλέον διαδικασίες ελέγχου γεγονός που και πάλι οδήγησε την συνολική κατασκευή σε κόστος υψηλότερο του επιθυμητού. Ως αποτέλεσμα αυτού, αναπτύχθηκε μια αρχιτεκτονική κυλινδρικής θερμοηλεκτρικής γεννήτριας, η οποία δεν είχε μόνο το πλεονέκτημα της απλοποίησης της κατασκευής, αλλά και την μείωση του όγκου του συστήματος με την εσωτερίκευση της παράκαμψης των καυσαερίων εντός της. Αυτό το σχέδιο δοκιμάστηκε σε οχήματα, επιβεβαιώνοντας την επιτυχή αρχιτεκτονική κυλινδρικού σχεδιασμού κυλινδρικό αρχιτεκτονική ως μια πρόταση εμπορικά υλοποιήσιμη. Παράλληλα με την εξέλιξη της TEG και των συστημάτων του οχήματος, η κυλινδρική σχεδίαση αξιολογήθηκε ως οικονομικά βιώσιμη.

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών εξήχθη το συμπέρασμα ότι υλικά με βάση το Τελλούριο αποτελούν μια οικονομικά απαγορευτική επιλογή για την μαζική εφαρμογή των θερμοηλεκτρικών γεννητριών στην αυτοκινητοβιομηχανία. Τα εναλλακτικά υλικά τα οποία αξιολογήθηκαν βασίζονται σε συνδυασμό χαρακτηριστικών τα οποία περιλαμβάνουν καλή θερμοηλεκτρική απόδοση, υψηλό τεχνολογικό επίπεδο, και βιώσιμο κόστος της μαζικής παραγωγής. Κανένα υλικό δεν ικανοποιεί όλες αυτές τις απαιτήσεις σήμερα, και κανένα υλικό δεν παράγεται μαζικά πέρα από τους συνδυασμούς αποτελούμενους από Βισμούθιο-Τελλούριο και Μόλυβδο-Τελλούριο. Ωστόσο, οι προκλήσεις προς την ανάγκη εμπορευματοποίησης των θερμοηλεκτρικών γεννητριών οδηγούν στην χρήση είναι διαφορετικών υλικών. Ως αποτέλεσμα αυτών των κριτηρίων αυτά οδηγούν την έρευνα προς την χρήση θερμοηλεκτρικών υλικών των συνδυασμών Αντιμονίου Κοβαλτίου [skutterudites (SKD)] για την επόμενη φάση των εργασιών. Αυτήν την στιγμή τα SKD υλικά και τα ωμικά συστήματα επικοινωνίας είναι σε κατάλληλο τεχνολογικό επίπεδο για να υποστηρίξουν την περαιτέρω ανάπτυξη των θερμοηλεκτρικών γεννητριών. Αυτά τα

υλικά, καθώς και άλλα θερμοηλεκτρικά υλικά παραγωγής ενέργειας που λειτουργούν με τη θερμοκρασία της θερμής επιφάνειας τους στους 500 °C, δεν είναι διαθέσιμα ευρέως στο εμπόριο. Όμως μπορεί με τη χρήση κατάλληλων βιομηχανικών διεργασιών να καταστούν μαζικά διαθέσιμα για την εμπορική χρήση τους στην αυτοκινητοβιομηχανία. Πρόσθετες εργασίες σε επίπεδο των θερμοηλεκτρικών υλικών πρέπει να γίνουν ώστε να επιτευχθεί μείωση της ποσότητας των υλικών υψηλής καθαρότητας των κραμάτων, καθώς και μείωση στα βήματα της διαδικασίας επεξεργασίας/μεταποίησης τους.

Στο κομμάτι των συστημάτων των θερμοηλεκτρικών γεννητριών για την αυτοκινητοβιομηχανία, υπάρχει ανάγκη για περαιτέρω μείωση του συνολικού αριθμού των επιμέρους τμημάτων τους και αριθμό των εξαρτημάτων που απαιτούνται. Περισσότερη δουλειά απαιτείται για την ανάπτυξη ενός κατάλληλου μετατροπέα της ενέργειας του θερμοηλεκτρικού σύστημα, συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων MPPT και των μετατροπέων DC / DC. Αυτό αποτελεί ένα απαραίτητο βήμα για την μαζική εφαρμογή της τεχνολογίας και πρέπει να αντιμετωπιστεί. Για να ανταποκριθεί το κόστος των TEG στις απαιτήσεις της αγοράς, εκτιμάται ότι τα θερμοηλεκτρικά στοιχεία τους θα πρέπει να παράγονται και να επιμεταλλώνονται σε ένα κλάσμα του σημερινού κόστους, ή κατά προσέγγιση μερικά σεντς ανά μήτρα.

Ο στόχος για την περαιτέρω ανάπτυξη των θερμοηλεκτρικών γεννητριών είναι παρέχουν μια βελτίωση της τάξεως του 5% στην οικονομία καυσίμου, για κύκλο οδήγησης εκτός πόλης και να μπορούν να εφαρμοστούν μαζικά σε υβριδικά και συμβατικά οχήματα με σκοπό να αγγίζουν τις 100.000 μονάδες / έτος. Εκτός από την ανάπτυξη των επιβατικών οχημάτων υπάρχει επίσης η δυνατότητα για ανάπτυξη TEG και σε άλλες εφαρμογές, όπως η ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας στην βιομηχανία (εργοστάσια), στα φορτηγά, στις αεροδιαστημικές εφαρμογές, και την πρωτογενή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η παράλληλη μελέτη αυτών των προγραμμάτων μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την εμπορευματοποίηση των θερμοηλεκτρικών γεννητριών και την εφαρμογή τους στην αυτοκινητοβιομηχανία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Μέθοδοι εντοπισμού του σημείου μέγιστης ισχύος. (Maximum Power Point Tracking - MPPT)

5.1 Ανάγκη για εφαρμογή MPPT

Σύμφωνα με τα όσα αναλύθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η λειτουργία των θερμοηλεκτρικών στοιχείων ως μετατροπείς θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Το μεγάλο μειονέκτημα της τεχνολογίας αυτής είναι η χαμηλή τους απόδοση. Διότι μπορεί να μην είναι πλέον 4-5% όπως τη δεκαετία του 50 και να αγγίζει ακόμη και το 15% σε ορισμένες περιπτώσεις, παρόλα αυτά δεν παύει να παραμένει χαμηλή. Ακόμα όμως και αυτές οι χαμηλές τιμές επιτυγχάνονται μόνο κατά τη λειτουργία τους στο σημείο μέγιστης απόδοσης, δηλαδή σε συγκεκριμένες θερμοκρασιακές διαφορές (τις ονομαστικές), αλλά κυρίως σε συγκεκριμένο προσαρμοσμένο φορτίο.

Όπως φάνηκε από τη μελέτη των χαρακτηριστικών καμπυλών λειτουργίας των TEG, τα μεγέθη τους μεταβάλλονται, εξαρτώμενα από τη διαφορά θερμοκρασίας στα άκρα τους. Η τάση στους ακροδέκτες τους όταν είναι ανοικτοκυκλωμένα και η εσωτερική τους αντίσταση εξαρτώνται άμεσα από τις θερμοκρασίες που υπάρχουν στη θερμή και στην ψυχρή επιφάνεια τους. Η παρατήρηση αυτή καθώς και οι καμπύλες ισχύος συναρτήσεως του ρεύματος (P-I), κάνουν εμφανές ότι για κάθε ζεύγος θερμοκρασιών υπάρχει και ένα διαφορετικό σημείο στο οποίο πρέπει να λειτουργήσει το θερμοστοιχείο ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη μεταφορά ισχύος. Με τη χρήση του μοντέλου του ισοδύναμου Thevenin, δηλαδή πηγή τάσης με αντίσταση σε σειρά, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι για να επιτευχθεί μέγιστη μεταφορά ισχύος, πρέπει να γίνει προσαρμογή αντίστασης, ή γενικότερα φορτίου, όπως είναι γνωστό και από το θεώρημα μέγιστης μεταφοράς ισχύος. Η διαδικασία της προσαρμογής αυτής, πρέπει να γίνεται κάθε φορά που αλλάζει μία από τις δύο θερμοκρασίες. Είναι κατανοητό ότι για να επιτευχθεί η προσαρμογή που προαναφέρθηκε πρέπει να είναι γνωστή ανά πάσα στιγμή, η εσωτερική αντίσταση του θερμοστοιχείου. Ουσιαστικά το επιθυμητό αποτέλεσμα, είναι η λειτουργία του θερμοστοιχείου στο σημείο απομάστευσης

μέγιστης ισχύος από αυτό, αφού έχει προηγηθεί ο εντοπισμός του και όλο αυτό με τρόπο αυτοματοποιημένο.

Οι μέθοδοι με τη χρήση των οποίων επιτυγχάνεται αυτό ονομάζονται ως μέθοδοι Maximum Power Point Tracking (MPPT). Τέτοιες μέθοδοι εφαρμόζονται εδώ και αρκετά χρόνια, κυρίως όμως σε συστήματα φωτοβολταϊκών γεννητριών και ανεμογεννητριών. Βασική τους ιδέα είναι η χρήση ενός μετατροπέα ισχύος μεταξύ της συσκευής παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος και του φορτίου, ώστε με κατάλληλη ρύθμιση της σχετικής διάρκειας αγωγής (Duty Cycle) του ημιαγωγικού στοιχείου να επιτυγχάνεται η προσαρμογή του φορτίου.

5.2 Εφαρμοσμένοι μέθοδοι MPPT

Όπως προαναφέρθηκε οι μέθοδοι MPPT εφαρμόζονται εδώ και χρόνια. Παρακάτω θα γίνει μια παρουσίαση τους συνοπτικά προτού γίνει η επιλογή των καταλληλότερων για εφαρμογές σε θερμοηλεκτρικές γεννήτριες.

5.2.1 Μέθοδος σταθερής τάσης

Η φιλοσοφία της μεθόδου σταθερής τάσης, ή (Constant Voltage) την απεντάσσει από τις μεθόδους MPPT διότι δεν εμπεριέχει ανίχνευση. Η βασική ιδέα στην οποία στηρίζεται είναι ότι η τάση στην οποία έχουμε μέγιστη ισχύ βρίσκεται πάντα πολύ κοντά στην ονομαστική τάση λειτουργίας του στοιχείου, από το οποίο αντλείται η ισχύς. Οπότε ο μόνος στόχος του συστήματος είναι να διατηρεί την τάση εξόδου του στοιχείου σταθερή κοντά σε μία τάση αναφοράς V_{ref} . Αυτό μπορεί να γίνει είτε εξ' αρχής από το σχεδιασμό του μετατροπέα -ρύθμιση με σταθερό συντελεστή κατάτμησης, duty cycle- είτε με χρήση ενός PI ελεγκτή με ανατροφοδότηση τάσης. Η δεύτερη μέθοδος είναι αρκετά καλύτερη, αφού αποτελεί μέθοδο κλειστού βρόχου ελέγχου και συνεπώς δεν επηρεάζεται από εξωτερικές μεταβολές. Παρόλα αυτά, απαιτεί έναν αισθητήρα τάσης. Χρησιμοποιείται κυρίως σε εγκαταστάσεις χαμηλής ισχύος, όπου το κόστος του ελεγκτή είναι σημαντικότερο από την ισχύ που θα

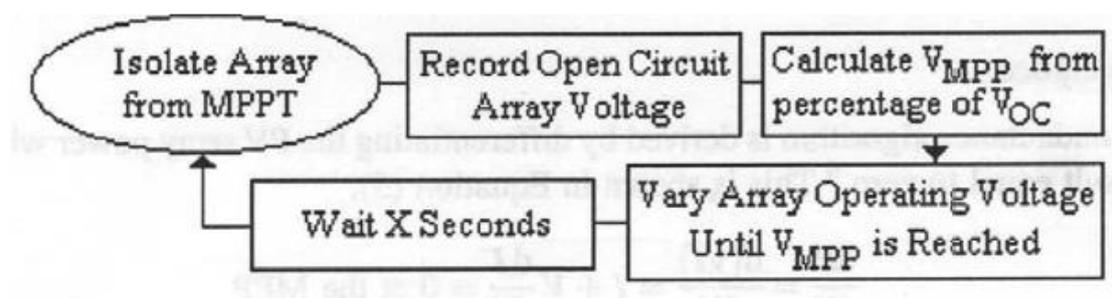
κερδηθεί. Με την χρήση αυτής της μεθόδου βρέθηκαν βαθμοί απόδοσης που φτάνουν ως και 80%, ενώ αναφέρεται ότι σε εφαρμογές χαμηλής ισχύος και σε περιόδους γρήγορων και απότομων μεταβολών, που συναντώνται κυρίως στις ταχύτητες ανέμου στις ανεμογεννήτριες, η απόδοσή της μπορεί να ξεπεράσει αυτή των μεθόδων P&O και Incremental Conductance (πιο εξεζητημένες, και συχνότερα χρησιμοποιούμενες μέθοδοι που θα αναλυθούν παρακάτω).

5.2.2 Μέθοδος με πίνακα αντιστοίχισης

Μία ακόμη μέθοδος ανοιχτού βρόχου είναι η μέθοδος με πίνακα αντιστοίχισης (Look-up table). Η μέθοδος αυτή είναι βασισμένη σε πίνακες (2 ή περισσότερων διαστάσεων) αντιστοίχισης φυσικών μεγεθών του συστήματος – όπως: ταχύτητα ανέμου, ηλιοφάνεια, θερμοκρασία – μετρούμενων από αισθητήρες, με το σημείο μέγιστης ισχύος π.χ. τάση λειτουργίας V_{MPP} ή λόγου κατάτμησης. Η δυσκολία που συναντάται σε αυτή τη μέθοδο έγκειται στην κατάρτιση των πινάκων αυτών για κάθε εφαρμογή. Αν αναλογιστούμε δε τις εγγενείς διαφορές που έχει κάθε κατασκευή από μια όμοιά της, γίνεται κατανοητό ότι θα είναι αναγκαία η κατάρτιση ενός διαφορετικού πίνακα για κάθε εγκατάσταση. Η κύρια χρήση της μεθόδου αυτής είναι σε ανεμογεννήτριες. Αυτό διότι στις περιπτώσεις αυτές, οι συχνές και απότομες αλλαγές των καιρικών συνθηκών καθιστούν άλλες μεθόδους, πιο ακριβείς αλλά και πιο χρονοβόρες στην εύρεση του επιθυμητού σημείου λειτουργίας, ασύμφωτες. Για τη χρήση της μεθόδου αυτής στην εφαρμογή θα χρειαζόταν δύο τουλάχιστον αισθητήρες θερμοκρασίας, αν και περισσότεροι θα απέδιδαν καλύτερα την κατανομή της θερμοκρασίας στο χώρο, και ένας αισθητήρας τάσης ώστε να καθίσταται δυνατή η επίτευξη της σωστής τάσης λειτουργίας. Θα μπορούσε ο πίνακας να αντιστοιχίζει το ζεύγος θερμοκρασιών απ' ευθείας με τον κατάλληλο λόγο κατάτμησης για την επίτευξη απομάστευσης μέγιστης ισχύος, πράγμα που θα μας απάλλασσε από τη χρήση αισθητήρα τάσης αλλά θα μετέτρεπε τη ρύθμιση της τάσης σε ρύθμιση ανοικτού βρόχου.

5.2.3 Μέθοδος τάσης ανοιχτοκυκλώματος

Η φιλοσοφία αυτής της μεθόδου MPPT είναι ότι η ιδανική τάση λειτουργίας (V_{MPP}) για απομάστευση μέγιστη ισχύος στην έξοδο του στοιχείου, είναι πάντα ένα ποσοστό της τάσης που εμφανίζεται στα άκρα του στοιχείου κατά τη λειτουργία του σε ανοιχτοκύκλωμα. Για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία το ποσοστό αυτό είναι περίπου (73-80%) της τάσης ανοικτού κυκλώματος του στοιχείου. Αυτό προκύπτει από τη φύση των φωτοβολταϊκών στοιχείων που φαίνεται στην ομοιομορφία που παρουσιάζουν οι χαρακτηριστικές τους καμπύλες P-I, V-I. Ίσως είναι η πιο απλή μέθοδος στην εφαρμογή της. Βασίζεται στον τύπο $V_{MPP}/V_{OC} = K$ (σταθερό) < 1 . Έτσι επιλέγοντας ένα K βέλτιστο, συνήθως για τα φωτοβολταϊκά αυτό είναι το 76%, ανοιχτοκυκλώνοντας ανά τακτά χρονικά διαστήματα και μετρώντας την τάση ανοικτού κυκλώματος, ορίζεται η V_{MPP} σαν τάση αναφοράς και μεταβάλλεται κατάλληλα ο λόγος κατάτμησης ώστε να επιτευχθεί η τάση αυτή στην έξοδο του στοιχείου. Στην περίπτωση των θερμοστοιχείων, η φυσική του στοιχείου είναι διαφορετική. Συνεπώς διαφορετικό είναι και το K βέλτιστο. Χρησιμοποιώντας το μοντέλο του ισοδυνάμου Thevenin, η βέλτιστη μεταφορά ισχύος επιτυγχάνεται, έχοντας κάνει προσαρμογή αντιστάσεων. Έτσι στην έξοδο του θερμοστοιχείου, αναμενόμενο είναι να έχουμε το 50% της τάσης ανοιχτοκυκλώματος.



Σχήμα 5.1: Διάγραμμα ροής της μεθόδου Τάσης Ανοιχτοκυκλώματος.

Και αυτή η μέθοδος απαιτεί έναν αισθητήρα τάσης και πιθανόν έναν PI ελεγκτή ώστε να επιτυγχάνεται γρήγορα η επιθυμητή τάση. Πρόβλημα εδώ αποτελεί η ανάγκη ανοιχτοκύκλωσης του κυκλώματος ισχύος, ανά τακτά χρονικά διαστήματα, που συνεπάγεται απώλεια ισχύος. Αυτό γίνεται λιγότερο αισθητό για σχετικά σταθερά συστήματα, διότι απαιτούν λιγότερο συχνούς ελέγχους. Παρόλα αυτά η επιλογή της

συχνότητας ανοιχτοκυκλώματος αποτελεί παράμετρο προς ρύθμιση. Μικρή συχνότητα σημαίνει λιγότερες απώλειες λόγω του ανοιχτοκυκλώματος, αλλά μεγαλύτερη πιθανότητα να βρεθεί το σύστημα εκτός βέλτιστου σημείου λειτουργίας για περισσότερο χρόνο, λόγω κάποιας μεταβολής στο περιβάλλον του. Μία άλλη προτεινόμενη λύση, είναι η χρήση ενός μικρότερου πιλοτικού στοιχείου, που υποβάλλεται στις ίδιες συνθήκες, ως αναφορά, ώστε να έχουμε μικρότερες απώλειες. Όσον αφορά την απόδοση της μεθόδου αυτής σύμφωνα με άρθρα, κυμαίνεται μεταξύ 88 - 93%.

5.2.4 Μέθοδος ρεύματος βραχυκύκλωσης

Μέθοδο με παρόμοια φιλοσοφία με την προηγούμενη αποτελεί η μέθοδος ρεύματος βραχυκύκλωσης. Η διαφορά αυτής της μεθόδου έγκειται στο ότι είναι βασισμένη στο ρεύμα βραχυκύκλωσης και όχι στην τάση ανοιχτοκυκλώματος. Έτσι γίνεται χρήση της σχέσης για το βέλτιστο ρεύμα με το ρεύμα βραχυκύκλωσης, $I_{\text{βέλτιστο}} = k \cdot I_{\text{βραχυκύκλωσης}}$. Πάλι βασίζεται σε παρατήρηση για τα φωτοβολταϊκά συστήματα ότι για θερμοκρασίες 0o C – 60o C το k παραμένει σχεδόν σταθερό κοντά στο 92%. Οπότε ομοίως, βραχυκυκλώνοντας το φωτοβολταϊκό (με απώλεια ισχύος) γίνεται μέτρηση του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Από αυτό ύστερα μπορεί να υπολογιστεί το $I_{\text{βέλτιστο}}$. Μετά ακολουθεί η ρύθμιση του λόγου κατάτμησης έτσι ώστε από το κύκλωμα να περνάει το ρεύμα αυτό. Το τελευταίο επιτυγχάνεται πάλι είτε με ρύθμιση βάσει της χαρακτηριστικής του μετατροπέα, είτε πολύ καλύτερα με χρήση PI ελεγκτή. Στην περίπτωση του θερμοηλεκτρικού στοιχείου, ξανά με τη χρήση ισοδύναμου μοντέλου, κατά τη λειτουργία με προσαρμοσμένο φορτίο, η συνολική αντίσταση είναι διπλάσια από αυτήν κατά τη λειτουργία βραχυκυκλωμένου στοιχείου. Συνεπώς το k και σε αυτήν τη μέθοδο θα είναι $k = 0,5$ για το θερμοστοιχείο. Για την υλοποίηση της διάταξης απαιτούνται ένας αισθητήρας ρεύματος, ένας ελεγκτής PI και ένας διακόπτης για τη βραχυκύκλωση της εκάστοτε συσκευής (φωτοβολταϊκού, θερμοστοιχείου). Σε σύγκριση με την προηγούμενη μέθοδο υπάρχει η δυσκολία ότι δεν μπορεί εύκολα να επιτευχθεί απόλυτο βραχυκύκλωμα και παράλληλα να μετριέται το ρεύμα και γι' αυτό προτιμάται η μέθοδος ανοιχτοκυκλώματος. Το παραπάνω φαίνεται και από τις αποδόσεις που αναφέρονται που κυμαίνονται στο 85

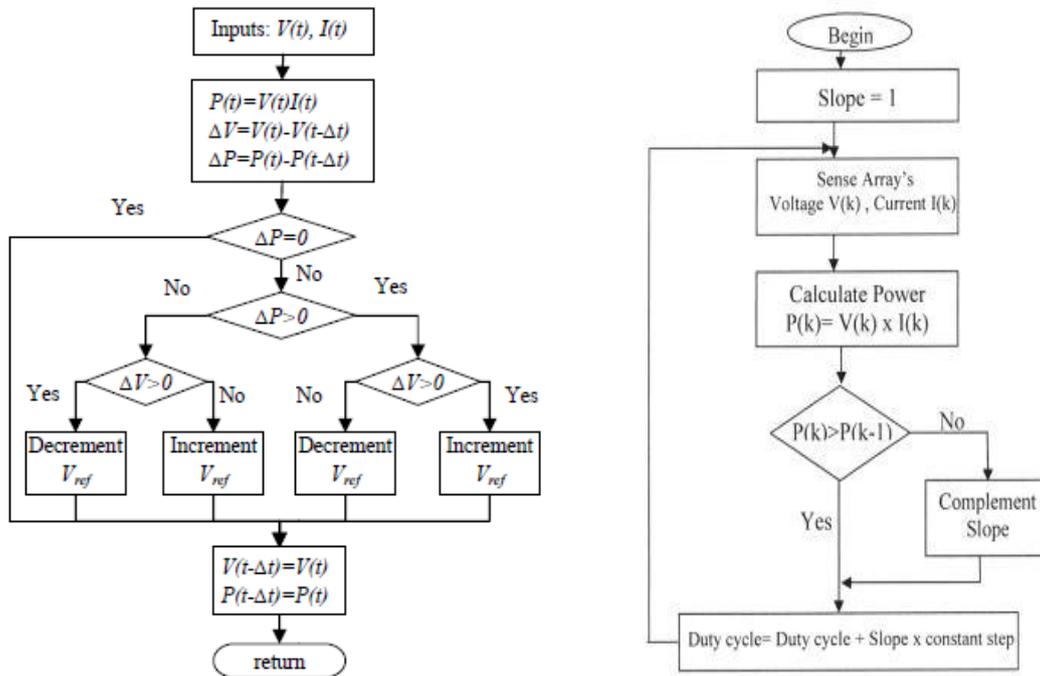
– 90%. Μια βελτίωση που έχει προταθεί για περιπτώσεις γρήγορων μεταβολών είναι η αντιμετώπιση του συντελεστή k ως παραμέτρου, η οποία αλλάζει ανάλογα με τις (καιρικές, εξωτερικές φυσικές) συνθήκες. Τέλος, να αναφερθεί ότι και σε αυτή τη μέθοδο μπορεί να χρησιμοποιηθεί πιλοτικό στοιχείο, όπως και στην προηγούμενη, για την αποφυγή των απωλειών που θα υπάρξουν κατά τη βραχυκύκλωση του κύριου θερμοστοιχείου.

5.2.5 Μέθοδος διαταραχής και παρατήρησης - Perturb & Observe (P&O)

Γενικώς ίσως η πιο διαδεδομένη μέθοδος λόγω της απλότητας της λογικής της. Η μέθοδος διαταραχής και παρατήρησης, Perturb & Observe (P&O), ή Hill climbing, είναι βασισμένη στον έλεγχο της συνθήκης:

$$\frac{dP}{dV} = 0$$

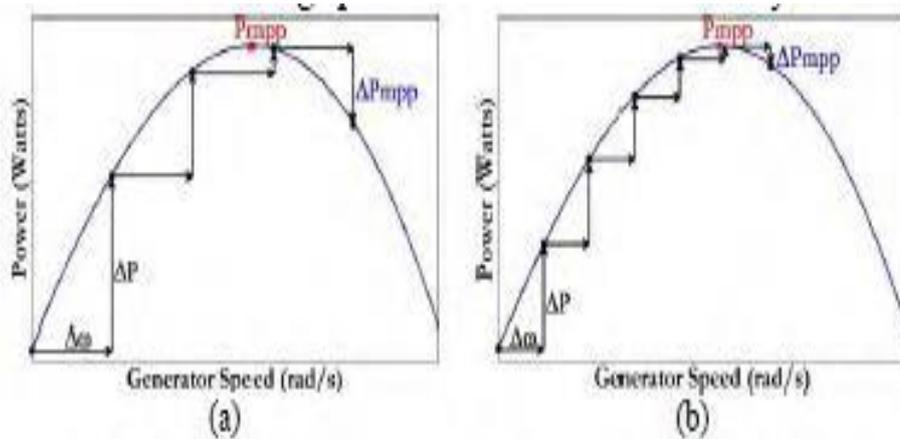
ως ένδειξη του ότι βρισκόμαστε στο μέγιστο της καμπύλης $P - V$. Δεν απαιτεί καμία γνώση του υπό έλεγχο συστήματος συνεπώς μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα ανεξαιρέτως αρκεί να μετράται η τάση και το ρεύμα της εξόδου του. Αποτελείται από έναν λογικό βρόγχο ελέγχου, η λειτουργία του οποίου βασίζεται στη σύγκριση της ισχύος (τάση επί ρεύμα) πριν και μετά από μία στοιχειώδη μεταβολή της τάσης. Αν η μεταβολή αυτή προκαλεί αύξηση της ισχύος, ακολουθεί μεταβολή της ίδιας κατεύθυνσης, αν προκαλεί μείωση ακολουθεί μεταβολή αντίστροφης κατεύθυνσης. Στο **Σχήμα 5.2** παρουσιάζονται δύο διαγράμματα ροής, τα οποία δίνουν μια καλύτερη εικόνα της λογικής λειτουργίας της μεθόδου όπως αυτή περιγράφηκε νωρίτερα.



Σχήμα 5.2: Διαγράμματα ροής της μεθόδου P&O.

Όπως γίνεται αντιληπτό, η κατεύθυνση της αλλαγής εξαρτάται μόνο από την αυξομείωση της ισχύος. Το γεγονός αυτό οδηγεί στα δύο βασικά προβλήματα της μεθόδου αυτής:

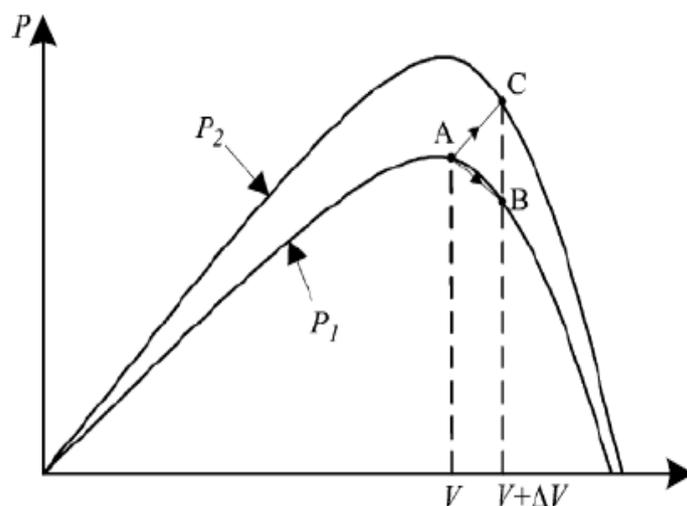
- Η ταλάντωση γύρω από το σημείο MPP. Η ταλάντωση αυτή είναι εγγενής της μεθόδου, διότι για να φτάσει στο επιθυμητό σημείο λειτουργίας θα έχει πραγματοποιήσει μια αύξηση ή μια μείωση της τάσης που θα επαναληφθεί και στον επόμενο κύκλο. Αυτό όμως θα απομακρύνει το σύστημα από το MPP και θα οδηγήσει σε αντιστροφή της κατεύθυνσης, κ.ο.κ. Στο **Σχήμα 5.3** φαίνεται και γραφικά το πρόβλημα της ταλάντωσης γύρω από το σημείο μέγιστης ισχύος MPP.



Σχήμα 5.3: Πρόβλημα ταλάντωσης γύρω από το σημείο μέγιστης ισχύος MPP

Το πρόβλημα της απώλειας ακρίβειας λόγω αυτής της ταλάντωσης μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με επιλογή μικρότερου βήματος. Αυτή η επιλογή καθιστά όμως πιο αργή τη μέθοδο, καθώς απαιτούνται περισσότερα μικρά βήματα για την προσέγγιση του MPP.

- Την απώλεια προσανατολισμού σε απότομες μεταβάσεις από μια χαρακτηριστική P-V σε μια άλλη. Κατά τη μετάβαση σε μία κατάσταση (χαρακτηριστική) μεγαλύτερης ισχύος, η ισχύς μπορεί να αυξάνεται ενώ το σύστημα απομακρύνεται από το σημείο βέλτιστης λειτουργίας. Αυτό διότι κατά τη μετάβαση σε μία χαρακτηριστική καμπύλη υψηλότερης ισχύος, η μέθοδος βλέποντας αύξηση της ισχύος, συνεχίζει διατηρώντας το βήμα που είχε προηγουμένως. Παρόλα αυτά, αυτό δεν σημαίνει απαραίτητα ότι κινείται και προς το σημείο όπου επιτυγχάνεται η απόδοση μέγιστης ισχύος, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 5.4** κατά τη μετάβαση από την καμπύλη P1 στην P2.



Σχήμα 5.4: Πρόβλημα απώλειας προσανατολισμού.

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι υβρίδια της P&O που στοχεύουν να ελαχιστοποιήσουν τα μειονεκτήματα. Για παράδειγμα σε συνδυασμό με ένα γρήγορο μικροελεγκτή (DSP) με χρήση του οποίου θα μπορούσαν να αυξηθούν σημαντικά οι ρυθμοί δειγματοληψίας, μπορεί με ένα μικρό βήμα η ακρίβεια προσέγγισης του βέλτιστου σημείου να αυξανόταν δραματικά. Η συχνότητα δειγματοληψίας βέβαια καθώς και η μεταβολή του λόγου κατάτμησης σε κάθε βήμα, αποτελούν βασικές παραμέτρους της μεθόδου.

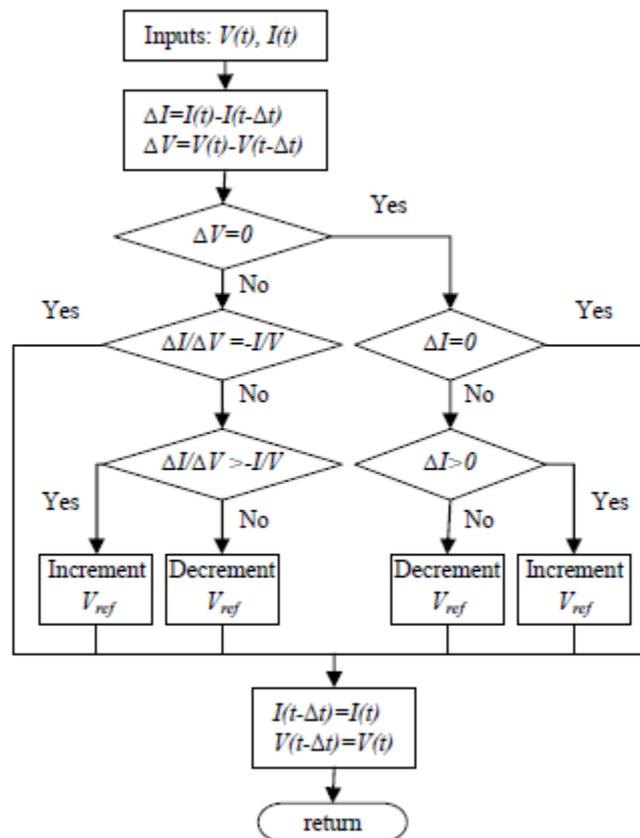
5.2.6 Μέθοδος αυξανόμενης αγωγιμότητας - Incremental Conductance

Η μέθοδος αυξανόμενης αγωγιμότητας ή (Incremental Conductance) είναι παρόμοια σε λογική με την P&O από την άποψη του ότι περιλαμβάνει μεταβολή τάσης και σύγκριση αποτελεσμάτων. Εδώ όμως το κριτήριο για την εύρεση του MPP αλλάζει. Βασίζεται στην εύρεση της κλίσης της καμπύλης P-V και στο ότι στο σημείο μέγιστης ισχύος θα ισχύει $\Delta P/\Delta V = 0$. Η συνθήκη αυτή για το MPP μπορεί να μετασχηματίζεται σε $\Delta I/\Delta V = - I/V$. Έτσι ο έλεγχος μεταφέρεται στις χαρακτηριστικές I-V του στοιχείου αντί για τις P-V στις οποίες γινόταν προηγουμένως.

$$\Delta P / \Delta V = 0 \Rightarrow \Delta(V \cdot I) / \Delta V = 0 \Rightarrow I + V \cdot \Delta I / \Delta V = 0 \Rightarrow \Delta I / \Delta V = -I / V$$

- $\Delta I / \Delta V = -I / V \Rightarrow \Delta P / \Delta V = 0$ άρα το σύστημα βρίσκεται στο σημείο MPP
- $\Delta I / \Delta V > -I / V \Rightarrow \Delta P / \Delta V > 0$ άρα βρίσκεται αριστερά του
- $\Delta I / \Delta V < -I / V \Rightarrow \Delta P / \Delta V < 0$ άρα βρίσκεται δεξιά του.

Κατά την υλοποίηση του ελέγχου (με αναλογικό έλεγχο) η συνθήκη συναντάται και ως $V \cdot \Delta I = -I \cdot \Delta V$ (πιο εύκολος ο πολλαπλασιασμός).



Σχήμα 5.5: Διάγραμμα ροής της μεθόδου *Incremental Conductance*.

Με τη μέθοδο αυτή θεωρητικά μπορούν να εξαλειφθούν τα προβλήματα της P&O, αφού για ικανοποίηση της συνθήκης ελέγχου αυτή σταματάει στο σημείο MPP (αποφυγή ταλάντωσης) και έχοντας γνώση της παραγωγού του ρεύματος προς την τάση, δεν χάνεται ο προσανατολισμός κατά τη διάρκεια γρήγορων μεταβολών. Βέβαια και σε αυτή τη μέθοδο η επιλογή του βήματος παίζει καθοριστικό ρόλο στην ταχύτητα εύρεσης του MPP όπως και σε πιθανές ταλαντώσεις, λόγο πολύ μεγάλου βήματος, αφού η απόλυτη ισότητα ικανοποιείται σε μια μικρή περιοχή - θεωρητικά μόνο ένα σημείο. Δύο βελτιώσεις που θα μπορούσαν να προταθούν είναι η αυξομείωση του βήματος ανάλογα με την κλίση dP/dV , βελτίωση που θα επιτραπεί ένα μικρό σφάλμα στην ικανοποίηση της ισότητας. Η μέθοδος αυτή υλοποιείται είτε αναλογικά είτε ψηφιακά. Απαιτείται και για αυτή όπως και για την προηγούμενη, μόνο ένας αισθητήρας ρεύματος και ένας αισθητήρας τάσης. Στην αναλογική υλοποίηση της απαιτούνται και δύο διαφοριστές, ενώ και η ψηφιακή της υλοποίηση είναι μεγαλύτερης πολυπλοκότητας από την P&O, γεγονός που θα μπορούσε να αποτελεί πρόβλημα στη συχνότητα δειγματοληψίας. Παρόλα αυτά, με τη χρήση ενός σχετικά γρήγορου μικροεπεξεργαστή, η συχνότητες δειγματοληψίας είναι περισσότερο από αρκετές. Τέλος ένας διαφορετικός τρόπος υλοποίησης είναι με έναν ελεγκτή PI και ορισμό σφάλματος

$$e = \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV}$$

το σφάλμα να οδηγείται στο μηδέν.

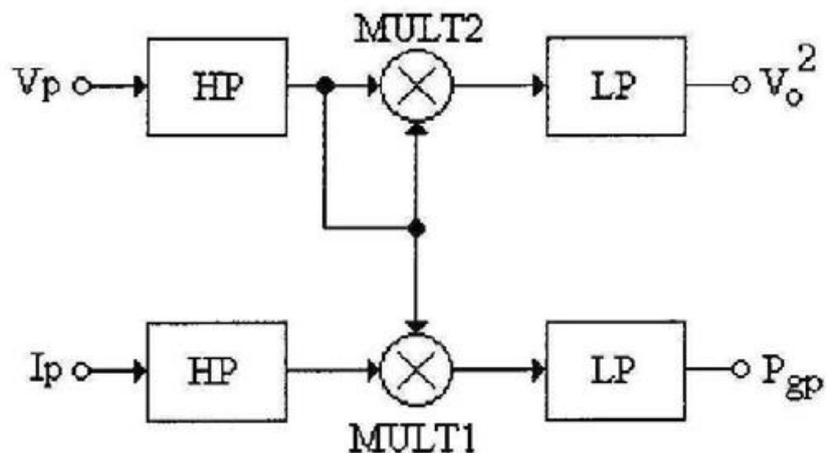
5.2.7 Μέθοδος παρασιτικής χωρητικότητας

Η μέθοδος αυτή (Parasitic Capacitance), ουσιαστικά αποτελεί μια βελτίωση της μεθόδου αυξανόμενης αγωγιμότητας διότι λαμβάνει επιπλέον υπ' όψιν και την παρασιτική χωρητικότητα του συστήματος. Η λογική της είναι ίδια με αυτή της παραπάνω μεθόδου, με τη διαφορά ότι η μέθοδος παρασιτικής χωρητικότητας είναι πιο εξευγενισμένη και πιο ακριβής, από τη μέθοδο παρασιτικής χωρητικότητας, αφού λαμβάνει υπ' όψιν και την παρασιτική χωρητικότητα των pn επαφών των φωτοβολταϊκών στοιχείων.

Έτσι η συνθήκη ισορροπίας γίνεται:

$$\frac{dF(v_p)}{dv_p} + C_p \left(\frac{\dot{V}}{V} + \frac{\ddot{V}}{\dot{V}} \right) + \frac{F(v_p)}{v_p} = 0$$

Επιβάλλοντας μια σειρά παλμών τάσης μέσω του μετατροπέα και παίρνοντας τη μέση ισχύ του παλμού προς τη μέση τάση στο τετράγωνο έχουμε τη διαφορική αγωγιμότητα που τη χρησιμοποιούμε για τον υπολογισμό του δεύτερου όρου της συνθήκης ισορροπίας. Γενικά αυτή η μέθοδος είναι πολύ πιο ακριβής στον εντοπισμό του MPP, αφού όπως αναφέρεται πετυχαίνει ακρίβεια που φτάνει το 99.8%. Μειονέκτημα της είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε συστήματα που παρουσιάζουν αρκετά μεγάλη χωρητικότητα. Δηλαδή χωρητικότητα πολλαπλάσια αυτής που παρουσιάζει ο μετατροπέας στην είσοδό του, ώστε να έχει νόημα η παραπάνω πολυπλοκότητα που εισάγει η μέθοδος αυτή. Ακόμη ένα μειονέκτημα αποτελεί το ότι οι ταλαντώσεις που επιβάλλονται στην τάση για την ανίχνευση της χωρητικότητας αυτής συνεπάγονται ταλαντώσεις και στην ισχύ. Για την υλοποίηση της χρειάζονται κι εδώ δύο αισθητήρες, ένας τάσης κι ένας ρεύματος, και ακόμα δύο υπερπαρατά και δύο κατωδιαβατά φίλτρα όπως φαίνεται και στο **Σχήμα5.6**.



Σχήμα5.6: Αναλογική υλοποίηση της μεθόδου *Parasitic Capacitance*.

5.2.8 Μέθοδος ασαφούς ελέγχου - νευρωνικών δικτύων

Η ασαφής λογική έχει εισαχθεί στο χώρο του ελέγχου τα τελευταία χρόνια, προσομοιώνοντας τον έλεγχο που θα ασκούσε ένας έμπειρος άνθρωπος. Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται ο έλεγχος πολύπλοκων συστημάτων που ενώ είναι δύσκολο να ληφθούν υπ' όψιν όλες οι δυνατές παράμετροι, ενώ μπορούν να εξαχθούν λογικοί κανόνες χειρισμού βάσει της ανθρώπινης εμπειρίας. Έτσι αποφεύγονται οι δυσκολίες και οι μη γραμμικότητες. Η προσέγγιση λοιπόν του σημείου MPP με ασαφή έλεγχο και νευρωνικά δίκτυα, είναι μια προσπάθεια να παρακαμφθούν οι μη γραμμικότητες των μοντέλων των φωτοβολταϊκών στοιχείων καθώς και αυτές που εισαγάγει στο κύκλωμα οι διάταξη του μετατροπέα. Το νευρωνικό δίκτυο χρησιμοποιείται μετά από την απαραίτητη εκπαίδευση, πρέπει να υπάρξει αντίστοιχη εκπαίδευση για κάθε εφαρμογή ώστε να αντιστοιχίζει τα μετρούμενα μεγέθη (τάση ανοικτού κυκλώματος, ρεύμα βραχυκύκλωσης, θερμοκρασία, ηλιοφάνεια) με την τάση V_{ref} για την οποία επιτυγχάνεται η μέγιστη ισχύς. Ο ασαφής ελεγκτής με τη σειρά του, μέσω της διαδικασίας ασαφοποίησης, (αντιστοίχισης φυσικών τιμών με λεκτικά σύνολα), επεξεργασία των συνόλων με λεκτικούς κανόνες και της από-ασαφοποίησης, προσπαθεί με εμπειρικούς κανόνες να πετύχει τον εντοπισμό του MPP όπως θα έκανε ένας άνθρωπος αν μπορούσε να χειριστεί χειροκίνητα και επαρκώς γρήγορα το μετατροπέα. Οι δύο αυτές μέθοδοι μπορούν να συνδυαστούν χρησιμοποιώντας τα νευρωνικά δίκτυα σαν εκτιμητή της τάσης αναφοράς V_{ref} και τον ασαφή ελεγκτή ώστε να επιτύχουμε τον κατάλληλο λόγο κατάτμησης του μετατροπέα. Επειδή αποδοτικότητα του συστήματος με τη χρήση ασαφούς ελέγχου, και νευρωνικών δικτύων έχει μεγάλες αποκλίσεις ανάλογα με την «εκπαίδευση» που έχει εφαρμοστεί και τους λεκτικούς κανόνες που έχουν τεθεί, δεν βρέθηκε κάποια χαρακτηριστική απόδοση για τον έλεγχο αυτό.

5.2.9 Μέθοδος ελέγχου στο χώρο κατάστασης

Ο έλεγχος με μεταφορά του συστήματος στο χώρο κατάστασης είναι ο κλασικός έλεγχος, βασισμένος στο μαθηματικό μοντέλο του εκάστοτε συστήματος. Αυτό είναι και το βασικότερό του μειονέκτημα. Για να χρησιμοποιηθεί τέτοιος έλεγχος σε ένα σύστημα, απαιτείται πλήρης γνώση του μαθηματικού μοντέλου του συστήματος και

των παραμέτρων του. Παράμετροι οι οποίες πιθανόν να μεταβάλλονται βάσει ορισμένων μεγεθών του περιβάλλοντος. Έτσι καθίστανται απαραίτητοι και οι αισθητήρες, οι οποίοι θα μετράνε τα αντίστοιχα μεγέθη. Κατά τα άλλα ο έλεγχος στο χώρο κατάστασης αποτελεί έναν από τους πιο ταχείς και ακριβείς ελέγχους, διότι λαμβάνει υπ' όψιν του όλες τις παραμέτρους του συστήματος.

5.3 Επιλογή Μεθόδων προς Σύγκριση

Οι μέθοδοι που παρουσιάστηκαν παραπάνω έχουν εφαρμοστεί σε μονάδες φωτοβολταϊκών συστημάτων και ανεμογεννητριών. Αυτό όμως δεν υποδεικνύει την καταλληλότητα τους και για τη χρήση τους σε μια διάταξη θερμοηλεκτρικών στοιχείων. Τα θερμοστοιχεία, σε αντίθεση με τα φωτοβολταϊκά και τις ανεμογεννήτριες, χρησιμοποιούν τη διαφορά θερμοκρασίας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ μιας θερμής δεξαμενής, που συνήθως θερμαίνεται από κάποια μηχανή εσωτερικής ή εξωτερικής καύσης και μιας ψυχρής, που συνήθως είναι το περιβάλλον. Οι θερμοκρασίες αυτές όμως, σε αντίθεση με την ταχύτητα του αέρα που μπορεί να αλλάξει ραγδαία ή την ηλιοφάνεια που μπορεί να μεταβληθεί σημαντικά από κάποιο διερχόμενο σύννεφο, έχουν πολύ μεγαλύτερες σταθερές χρόνου. Δηλαδή μεταβάλλονται πολύ πιο αργά. Στην πράξη αυτό σημαίνει, ότι μικρό ενδιαφέρον παρουσιάζει η ταχύτητα της μεθόδου, ενώ κυριότερο στόχο αποτελεί η ακρίβεια αυτής.

Επίσης, επειδή η θερμοκρασία μέσα σε έναν θάλαμο (θερμή δεξαμενή), όπως παραδείγματος χάρη σε μία εξάτμιση οχήματος, δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη, για την ακριβή μέτρηση της κατανομής της θερμοκρασίας στο θάλαμο αυτό θα απαιτούνταν αρκετοί αισθητήρες θερμοκρασίας. Αυτό όμως θα ανέβαζε σημαντικά το κόστος της κατασκευής, ενώ παράλληλα δεν θα σήμαινε σίγουρα και καλύτερη απόδοση της μεθόδου. Τέλος ας εξεταστεί η παρασιτική χωρητικότητα των θερμοστοιχείων. Τα θερμοηλεκτρικά στοιχεία, όπως και τα φωτοβολταϊκά, κατασκευαστικά αποτελούνται από pn επαφές συνδεδεμένες σε σειρά, με τη διαφορά ότι οι φορείς τους διεγείρονται από τη θερμότητα και όχι από την πτώση φωτονίων. Ενώ όμως είναι εγγενές χαρακτηριστικό των pn επαφών να παρουσιάζουν μια

χωρητικότητα, όπως είναι γνωστό και από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, τέτοια χωρητικότητα δεν γίνεται εμφανής, ούτε στα διαγράμματα των θερμοστοιχείων που μελετήσαμε ούτε συναντάται στα μοντέλα που εντοπίστηκαν.

Για την επιλογή των καταλληλότερων μεθόδων, χρησιμοποιήθηκαν τα τεχνικά, οικονομικά και πρακτικά κριτήρια που παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω. Σύμφωνα με τα παραπάνω, λόγω των αργών μεταβολών της θερμοκρασίας, δεν έχουμε μεγάλες απαιτήσεις στην ταχύτητα της μεθόδου. Μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η ακρίβεια της μεθόδου. Ζητούμενο είναι, ο ακριβέστερος εντοπισμός του MPP, και η ελαχιστοποίηση των αποκλίσεων ή ταλαντώσεων κατά τη μόνιμη κατάσταση. Προτιμότερες είναι οι μέθοδοι που απαιτούν μικρότερο αριθμό αισθητήρων, διότι έτσι επιτυγχάνεται η ελαχιστοποίηση του κόστους κατασκευής. Ακόμη, από τα σημαντικότερα κριτήρια, είναι ότι προτιμούνται οι μέθοδοι εκείνες που δεν έχουν ανάγκη συνεχών ρυθμίσεων και επανέλεγχου της διάταξης λόγω αλλαγής παραμέτρων από εξωτερικούς παράγοντες, (όπως η γήρανση των υλικών). Συνεπώς από τις μεθόδους της προηγούμενης ενότητας αποκλείονται οι εξής :

- Η μέθοδος σταθερής τάσης αποκλείεται επειδή ουσιαστικά δεν αποτελεί μέθοδο εύρεσης του σημείου απομάστευσης μέγιστης ισχύος. Ούτως ή άλλως χρησιμοποιείται μόνο για εφαρμογές πολύ χαμηλής ισχύος – μερικές δεκάδες Watt.
- Η μέθοδος με πίνακα αντιστοίχισης, απαιτεί την κατάρτιση πινάκων αντιστοίχισης ζεύγους θερμοκρασιών με την τάση αναφοράς, ή απ' ευθείας με τον λόγο κατάτμησης. Η μέθοδος αυτή δεν λαμβάνει υπ' όψιν της τις αλλαγές παραμέτρων από γήρανση.
- Η μέθοδος παρασιτικής χωρητικότητας, όπως αναφέρεται έχει νόημα όταν η χωρητικότητα της συσκευής από όπου αντλούμε ισχύ είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτήν στην είσοδο του μετατροπέα. Όμως, όπως έγινε φανερό από την μελέτη των χαρακτηριστικών του θερμοηλεκτρικού στοιχείου, αυτό δεν εμφανίζει καθόλου χωρητικό χαρακτήρα, ή ακόμα όμως κι αν εμφανίζει, αυτός είναι αμελητέος.

- Η εφαρμογή μιας μεθόδου ασαφούς λογικής, δεν θα έδινε αξιόλογα συγκριτικά αποτελέσματα, διότι η μέθοδος αυτή από τη φύση της παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις ανάλογα με την «εκπαίδευση» που έχει δεχτεί.

Μετά λοιπόν από την παραπάνω διαλογή οι μέθοδοι που παρέμειναν για την εφαρμογή τους σε θερμοηλεκτρικά στοιχεία είναι οι εξής:

- Η μέθοδος Τάσης ανοιχτοκυκλώματος.
- Η μέθοδος Ρεύματος βραχυκυκλώματος.
- Η μέθοδος Perturb & Observe.
- Και η μέθοδος Incremental Conductance.

Παρόλο που η βιβλιογραφία των μεθόδων απομάστευσης μέγιστης ισχύος που έχουν εφαρμοστεί σε θερμοηλεκτρικά στοιχεία δεν προσέφερε κάποια διαφορετική μέθοδο, εμπειρείχε γνώση και εμπειρία για τις μεθόδους αυτές. Από τα άρθρα αυτά λοιπόν, έγιναν ορισμένες παρατηρήσεις και εξάχθηκαν τα ακόλουθα συμπεράσματα. Από ότι φαίνεται από τη βιβλιογραφία, η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος MPPT σε θερμοηλεκτρικά στοιχεία, είναι η μέθοδος Τάσης ανοιχτοκυκλώματος (V_{oc}), όντως με συντελεστή $K = 0,5$ και σε συχνότητα περίπου 2Hz. Αυτό λόγω της απλότητας της στη λογική αλλά συγχρόνως και της ταχύτητας και της ακρίβειάς της. Κάτι απροσδόκητο που συναντήθηκε, ήταν ότι η P&O υστερεί σε ακρίβεια σε σχέση με τη μέθοδο V_{oc} . Από την εφαρμογή των μεθόδων σε θερμοηλεκτρικές διάταξεις παρατηρήθηκε ότι η εφαρμογή των μεθόδων V_{oc} και I_{sc} , είναι πολύ απλούστερη από την εφαρμογή των P&O και $In.C.$. Αυτό διότι οι δεύτερες απαιτούν μεγαλύτερη ακρίβεια στις μετρήσεις καθώς και αποκωδικοποίηση των μετρήσεων από δυαδική τιμή σε πραγματική τιμή τάσης και ρεύματος, ενώ απαιτούν και των πολλαπλασιασμό και την διαίρεση μεταξύ αυτών των τιμών. Έτσι οι μέθοδοι αυτοί καθίστανται πολύ πιο ευαίσθητες στον ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο, συνεπώς απαιτούν όργανα μεγαλύτερης ακρίβειας, ενώ από την φύση τους υπάρχει περίπτωση να εγκλωβιστούν, βρίσκοντας κάποιο τοπικό μέγιστο, κατά την αναζήτηση του ιδανικού σημείου.

Το κύριο μειονέκτημα της πρώτης ομάδας μεθόδων είναι ο περιοδικός έλεγχος του συστήματος, πράγμα που σημαίνει ότι οποιαδήποτε μεταβολή γίνεται στο σύστημα κατά την διάρκεια μιας περιόδου γίνεται αντιληπτή κατά την έναρξη της επόμενης περιόδου. Αυτό όμως δεν αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα για την εφαρμογή των μεθόδων σε θερμοηλεκτρικά στοιχεία μιας και οι θερμοκρασιακές αλλαγές συντελούνται αρκετά πιο αργά από έναν έλεγχο με περίοδο 2 – 3 δευτερολέπτων. Συνεπώς εύκολα συμπεραίνεται, ότι για συστήματα σχετικά απλά όπως είναι το θερμοηλεκτρικά στοιχεία, η χρήση της πρώτης ομάδας μεθόδων είναι σαφώς προτιμότερη από την χρήση κάποιας από την δεύτερη ομάδα καθώς τις διακρίνει η απλότητα, λειτουργούν επαρκώς καλά και σε περιπτώσεις θορύβου, ενώ απαιτούν μόνο ένα μετρητικό η κάθε μία. Σύμφωνα δε με όσα έχουν παρατηρηθεί η χρήση της μεθόδου

Voc είναι αρκετά καλύτερη αφού ως μετρητικό απαιτεί μόνο έναν διαίρετη τάσης σε αντίθεση με το μετρητικό ρεύματος που απαιτεί η Isc. Το παραπάνω ημιαγωγικό στοιχείο που απαιτεί η Voc είναι σημαντικά φθηνότερο από το μετρητικό ρεύματος ενώ οι απώλειες που παρουσιάζονται πάνω του είναι πάρα πολύ μικρές και η ακρίβεια τις μεθόδου Voc σημαντικά καλύτερη. Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης των μεθόδων με λεπτότερη ρύθμιση των παραμέτρων της κάθε μίας.

Συμπεράσματα

Η κλιματική αλλαγή και το ενεργειακό πρόβλημα ολοένα και εντείνονται, καθώς οι συμβατικοί πόροι συνεχώς ελαττώνονται ενώ οι παγκόσμιες ενεργειακές ανάγκες αυξάνονται μέρα με τη μέρα. Παρόλες τις προσπάθειες που γίνονται τις τελευταίες δεκαετίες για να στραφεί η παραγωγή ενέργειας στις ανανεώσιμες πηγές, όπως η ηλιακή και η αιολική, οι συμβατικές πηγές ενέργειας φαίνεται ότι θα παίζουν κυρίαρχο ρόλο για αρκετά χρόνια ακόμα. Ένας διαφορετικός τρόπος λοιπόν να μειωθεί η κατανάλωση των συμβατικών πόρων είναι η ελάττωση των απωλειών ενέργειας κατά τη μετατροπή της από μία μορφή σε μία άλλη. Πιο συγκεκριμένα, δεδομένου ότι τα μεγαλύτερα ποσοστά απωλειών εμφανίζονται υπό μορφή θερμότητας, η εκμετάλλευση της θερμότητας αυτής αποτελεί έναν πολύ αποδοτικό τρόπο εξοικονόμησης ενέργειας.

Η καταλληλότερη δε τεχνολογία για την επίτευξη αυτού του σκοπού είναι αυτή των θερμοηλεκτρικών ημιαγωγικών διατάξεων που μετατρέπουν άμεσα τη θερμική ενέργεια σε ηλεκτρική, λειτουργώντας ακόμα και σε πολύ χαμηλές διαφορές θερμοκρασίας. Μια θερμοηλεκτρική γεννήτρια κατασκευάζεται με τη χρήση διμεταλλικών υλικών, αλλά το αποτέλεσμα είναι συχνά ογκώδες και ακριβό. Η τρέχουσα έρευνα επικεντρώνεται σε συσκευές στερεάς κατάστασης που χρησιμοποιούν ημιαγωγούς κατασκευασμένους από βισμούθιο ή τελλουριούχος μόλυβδος, ή οξειδίο του μαγγανίου ασβεστίου. Το μειονέκτημα της τεχνολογίας αυτής είναι ο χαμηλός βαθμός απόδοσής της που φτάνει περίπου στο 10% στην ονομαστική τους λειτουργία, δηλαδή με κατάλληλα προσαρμοσμένο φορτίο. Όμως το κατάλληλο φορτίο είναι διαφορετικό για κάθε διαφορά θερμοκρασίας στα άκρα του θερμοστοιχείου, πράγμα που σημαίνει ότι απαιτείται συνεχής προσαρμογή φορτίου. Τέτοιου είδους προσαρμογή μπορεί να επιτευχθεί με την παρεμβολή ενός μετατροπέα ισχύος μεταξύ θερμοστοιχείου και φορτίου. Για τη ζητούμενη λειτουργία του μετατροπέα απαιτείται η εφαρμογή κατάλληλων μεθόδων για τον εντοπισμό και την προσέγγιση του σημείου απομάστευσης μέγιστης ισχύος (μεθόδων MPPT - Maximum Power Point Tracking), αντίστοιχες με αυτές που χρησιμοποιούνται

ευρέως και σε πιο διαδεδομένες τεχνολογίες όπως τα φωτοβολταϊκά συστήματα και οι ανεμογεννήτριες.

Η τεχνολογία των θερμοηλεκτρικών γεννητριών έχει ακόμη πολύ δρόμο να διανύσει. Αυτήν την στιγμή η έρευνα επικεντρώνεται στο σχεδιασμό υλικών με υψηλό συντελεστή θερμοηλεκτρικής απόδοσης, δηλαδή με υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα και χαμηλή θερμική αγωγιμότητα. Η διάρκεια ζωής των γεννητριών αποτελεί επίσης μια πρόκληση καθώς οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες υψηλής θερμοκρασίας έχουν διάρκεια ζωής μικρότερη από 20 χρόνια, σε σχέση με τις δεκαετίες συνεχούς λειτουργίας των παραδοσιακών φωτοβολταϊκών. Στον τομέα της ανάκτησης θερμότητας οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες μπορούν να προσφέρουν μοναδικές λύσεις. Ήδη έχουν βρει εφαρμογή στην αυτοκινητοβιομηχανία, την αεροναυπηγική, την στρατιωτική τεχνολογία, την βιομηχανία και την γεωθερμία. Παρά την μικρή απόδοση που προσφέρουν προς το παρόν η έρευνα δείχνει πως θα αποτελούν στο μέλλον αναπόσπαστο κομμάτι σε εφαρμογές ανάκτησης θερμότητας.

Βιβλιογραφία.

Baranowski LL, Snyder GJ, Toberer ES, Concentrated solar thermoelectric generators. Energy & Environmental Science 9055-9067. Heat Pipe-Assisted Thermoelectric Power Generation Technology for Waste Heat Recovery, Journal of ELECTRONIC MATERIALS, Vol. 44, No. 6, 2015.

Bell, L.E., J.W. LaGrandeur, and D.T. Crane. Progress Report on Vehicular Waste Heat Recovery using a Cylindrical Thermoelectric Generator. In Thermoelectrics Goes Automotive. Berlin, Germany, 2010.

Byung deok In a, Hyung ik Kim a, Jung wook Son a, Ki hyung Lee b, The study of a thermoelectric generator with various thermal conditions of exhaust gas from a diesel engine, International Journal of Heat and Mass Transfer 86, 2015 667–680.

Caillat T, et al., Progress status of the development of high-efficiency segmented thermoelectric couples. Nuclear and Emerging Technologies for Space, 2012.

Chuang Yu, K.T. Chau, Thermoelectric automotive waste heat energy recovery using maximum power point tracking, Energy Conversion and Management 50 (2009) 1506–1512.

D.N. Kossyvakis a, C.G. Vossou a, C.G. Provatidis b, E.V. Hristoforou, Computational analysis and performance optimization of a solar thermoelectric generator, Renewable Energy 81 (2015) 150e161.

D.T. Crane, J.W. LaGrandeur, and L.E. Bell, J. Electron. Mater. 39, 2142–2148 (2010).

DOUG CRANE, JOHN LAGRANDEUR, VLADIMIR JOVOVIC, MARCO RANALLI, MARTIN ADLDINGER, ERIC POLIQUIN, JOE DEAN, DMITRI KOSSAKOVSKI, BORIS MAZAR, CLAY MARANVILLE, TEG On-Vehicle Performance and Model Validation and What It Means for Further TEG Development, Journal of ELECTRONIC MATERIALS, Vol. 42, No. 7, 2013.

FRANCIS R. STABLER, Automotive Applications of Thermoelectric Materials, Journal of ELECTRONIC MATERIALS, Vol. 38, No. 7, 2009.

Introduction to Renewable Energy “World Renewable Energy Congress” WREN, United Kingdom, 2013.

Jihui Yang, Thermoelectrics for Vehicle Applications, 2014 APS/GERA ENERGY RESEARCH WORKSHOP ENERGY FOR TRANSPORTATION Denver, Colorado March 2, 2014.

Ko Ko Win, Souvik Dasgupta and Panda S.K “An Optimized MPPT Circuit for Thermoelectric Energy Harvester for Low Power Applications,” Power Electronics and ECCE Asia (ICPE & ECCE), 2011 IEEE 8th International Conference on , vol., no., pp.1579-1584, May 30 2011-June 3 2011.

Kraemer D, et al., High-performance flat-panel solar thermoelectric generators with high thermal concentration. Nat Mater 2011 10:532-538.

Liebl, J., et al., The Thermoelectric Generator from BMW is Making Use of Waste Heat. In MTZ (2009). pp. 4–11. Crane, D.T., V. Jovovic, and C.R. Koripella. Validating Steady-State and Transient Modeling Tools for High Power Density Thermoelectric Generators. in International Conference on Thermoelectrics. (Traverse City, Michigan, 2011).

M. Hasan Nia a, A. Abbas Nejad a, A.M. Goudarzi b, M. Valizadeh b, P. Samadian, Cogeneration solar system using thermoelectric module and fresnel lens, Energy Conversion and Management 84 (2014) 305–310.

Ma Y, et al., Enhanced thermoelectric figure-of-merit in p-type nanostructured bismuth antimony tellurium alloys made from elemental chunks. Nano Lett 2008 8:2580-2584.

Moomaw, W., F. Yamba, M. Kamimoto, L. Maurice, J. Nyboer, K. Urama, T. Weir, 2011: Introduction. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate

Change Mitigation [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C.von Stechow (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Rowe DM, Bhandari CM, Modern thermoelectrics. Reston: Reston Publishing Company 1983.

Sung-Eun Jo¹, Myoung-Soo Kim¹, Min-Ki Kim¹, Hong-Lae Kim¹, and Yong-Jun Kim¹” HUMAN BODY HEAT ENERGY HARVESTING USING FLEXIBLE THERMOELECTRIC GENERATOR FOR AUTONOMOUS MICROSYSTEMS” 16th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences October 28 - November 1, 2012, Okinawa.

Tehseen Ilahi, Muhammad Javaid Aslam, Energy Generation Using Reverse Peltier Effect By Fresnel Lens Concentration.

Telkes M, Solar thermoelectric generators. J Appl Phys 1954 25:765-777.

Thermoelectric Effects in Metals: Thermocouples, S.O. Kasap 1997 – 2001

W.T. Xiea, Y.J. Daia,* , R.Z. Wanga, K. Sumathyb, Concentrated solar energy applications using Fresnel lenses: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011) 2588– 2606.

X. Liu, Y.D.Deng,S.Chen, W.S.Wang, Y.Xu, C.Q.Su, A case study on compatibility of automotive exhaust thermoelectric generation system, catalytic converter and muffler, Case Studies in Thermal Engineering 2 (2014) 62–66.

Xiaodong Zhang *, K.T. Chau, An automotive thermoelectric–photovoltaic hybrid energy system using maximum power point tracking. Energy Conversion and Management 52 (2011) 641–647.

Κατσάνος Χρήστος, Τεχνολογίες Εκμετάλλευσης της Θερμότητας σε Κινητήρες Diesel, 2011 Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Μαρία Ιωάννου, ανάπτυξη και Χαρακτηρισμός Πυριτιδίων για Θερμοηλεκτρικές Εφαρμογές, 2014 Πανεπιστήμιο Κύπρου.

Παρασκευάς Αλέξανδρος, Development of a Microelectronic System for Maximizing the Energy Produced by Thermoelectric Generators, 2013 Πολυτεχνείο Κρήτης.

Χατζηδάκης Παναγιώτης, Ανάλυση Λειτουργίας Θερμοηλεκτρικών Στοιχείων-Απομάστευση Μέγιστης Ισχύος, 2012 Πολυτεχνείο Πατρών.

Σύνδεσμοι.

<http://www.eng.ucy.ac.cy/kyratsi/thermoelectrics/index.html>

http://www.fys.uio.no/bate/?page_id=206

<http://www.its.caltech.edu/~jsnyder/thermoelectrics/history.html>

<http://www.its.org/>

<http://www.thermoelectricity.eu/>

http://www.thermoelectrics.caltech.edu/science_page.htm