

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ



Μεταπτυχιακή Εργασία

**ΤΙΤΛΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ
ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΥΛΙΚΟ
HALF-HEUSLER**

Όνοματεπώνυμο φοιτητή: Κυριάκος Στυλιανού

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗΣ**

Μάιος 2023

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗΣ

Ανάπτυξη και Χαρακτηρισμός Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας με βάση το
Υλικό half-Heusler

Κυριάκος Στυλιανού

Επιβλέποντες Καθηγητές
Θεοδώρα Κυράτση

Η Μεταπτυχιακή Εργασία υποβλήθηκε προς μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων
απόκτησης του (MSc) Μεταπτυχιακού Μηχανικών Μηχανολογίας και
Κατασκευαστικής του Τμήματος Μηχανικών Μηχανολογίας και Κατασκευαστικής

Μάϊος 2023

ΣΕΛΙΔΑ ΕΓΚΡΙΣΗΣ

Διατριβή Μεταπτυχιακού

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ

ΓΕΝΝΙΤΡΙΑΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΥΛΙΚΟ HALF-HEUSLER

Παρουσιάστηκε από

Κυριάκος Στυλιανού

Ερευνητικός Σύμβουλος

Θεοδώρα Κυράτση

Μέλος Επιτροπής

Ιωάννης Γιαπιτζάκης

Μέλος Επιτροπής

Λουκάς Λουκά

Πανεπιστήμιο Κύπρου

Μάϊος, 2023

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θέλω να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα Καθηγήτρια και Καθηγήτρια του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών και Κατασκευαστικής του Πανεπιστημίου Κύπρου, κα. Κυράτση Θεοδώρα για την συνεργασία μας, για την επιστημονική υποστήριξη που μου πρόσφερε και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε μέσω της ανάθεσης της παρούσης Μεταπτυχιακής Εργασίας.

Επιπρόσθετα, ευχαριστώ θερμά τον κ. Κύπρο Στυλιανού, όπου με την βοήθεια του κατασκευάστηκαν οι όλοι οι μηχανισμοί μείωσης ύψους, κοπής θερμοστοιχείων και βάσης για τον μηχανισμό επιμετάλλωσης magnetron sputtering. Επιπρόσθετα, τον ευχαριστώ για την βοήθεια που μου παρείχε σε όλη την πορεία του Μεταπτυχιακού προγράμματος. Ακόμη, ευχαριστώ την Δρ. Γιάννα Ιωάννου και τον Δρ. Γιώργο Μεσαρίτη, που μου παρείχαν τις συνταγές του θερμοστοιχείου p & n τύπου half-Heusler για την υλοποίηση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας. Επιπρόσθετα, ευχαριστώ τον Δρ. Παναγιώτη Ιωάννου που μας βοήθησε στην ανάπτυξη διάταξης μέτρησης αντίστασης επαφής και για την επιμετάλλωση των θερμοστοιχείων με το magnetron sputtering.

Ακολούθως, ευχαριστώ πολύ τον συμφοιτητή και προσωπικό μου φίλο Χριστόφορο Κυριάκου με τον οποίο εκτελέσαμε μαζί όλους τους σχεδιασμούς και πειραματικές διαδικασίες, όλες τις προσομοιώσεις και που ήταν δίπλα μου στις δύσκολες στιγμές του εργαστηρίου και όχι μόνο.

Κλείνοντας, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, τους κολλητούς μου φίλους, τους συμφοιτητές μου και την κοπέλα μου για την ψυχολογική υποστήριξη που μου παρείχαν κατά την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσης Μεταπτυχιακής Εργασίας.

Περίληψη

Ο τομέας της ενέργειας στη σημερινή κοινωνία αποτελεί ένα από τους πιο σημαντικούς τομείς ως προς την έρευνα. Η καθημερινά αυξανόμενη ανάγκη για παροχή ενέργειας και η κατανάλωση των ορυκτών καυσίμων ωθεί τον επιστημονικό κόσμο να ερευνήσει τεχνολογίες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας που να είναι φιλικές στο περιβάλλον. Η θερμοηλεκτρική τεχνολογία κατατάσσεται στις τεχνολογίες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, επειδή έχουν την ικανότητα να μετατρέπουν τη διαφεύγουσα θερμότητα που διαφεύγει στο περιβάλλον από διάφορες εφαρμογές σε χρήσιμη ηλεκτρική ισχύ.

Η μεταπτυχιακή εργασία έχει θέμα την ανάπτυξη και χαρακτηρισμό θερμοηλεκτρικών γεννητριών με χρήση υλικών half-Heusler. Το εύρος λειτουργίας των υλικών αυτών είναι από 500 – 800°C και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές όπως τους ηλεκτροπαραγωγικούς σταθμούς, όπου οι θερμοκρασίες των επιφανειών των καυστήρων συμπίπτουν μ' αυτές των υλικών half-Heusler. Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε μελέτη των σταδίων κατασκευής των θερμοηλεκτρικών γεννητριών που περιλαμβάνει την προετοιμασία των κυβικών θερμοστοιχείων, την εύρεση των βέλτιστων συνθηκών συγκόλλησης των θερμοστοιχείων και την ανάπτυξη θερμοηλεκτρικών γεννητριών για υλοποίηση του χαρακτηρισμού τους.

Για την ανάπτυξη μιας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας απαιτούνται να πραγματοποιηθούν μια σειρά από στάδια, τα οποία είναι η τοποθέτηση των θερμοστοιχείων p και n τύπου στα ηλεκτρόδια χαλκού της κεραμικής πλάκας αλουμίνας, την άσκηση πίεσης πάνω σ' αυτή, την εισαγωγή της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας στον φούρνο για την ανάπτυξη των ηλεκτρικών επαφών και τέλος τη συγκόλληση ηλεκτρικών καλωδίων στα άκρα της γεννήτριας. Συγκεκριμένα, αναπτύχθηκαν τέσσερις θερμοηλεκτρικές γεννήτριες από τις οποίες οι τρεις αποτελούνταν από δύο ζεύγη θερμοστοιχείων και η μία αποτελείτο από οκτώ ζεύγη θερμοστοιχείων. Συγχρόνως, αναπτύχθηκαν μοντέλα προσομοιώσεων θερμοηλεκτρικών γεννητριών half-Heusler με δύο και οκτώ ζευγών θερμοστοιχείων, με τη χρήση του υπολογιστικού λογισμικού COMSOL Multiphysics 5.2 για την λήψη αποτελεσμάτων των μεταβλητών ενδιαφέροντος. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των πειραματικών θερμοηλεκτρικών γεννητριών μ' αυτές του μοντέλου συζητείται στα πλαίσια της εργασίας και συστήνονται εισηγήσεις που απαιτούν περισσότερη έρευνα.

Περιεχόμενα

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1	ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ.....	1
1.2	ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ.....	3
1.3	ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΣΕΕΒΕΚ.....	3
1.4	ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ.....	6
1.5	ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΜΙΑ ΕΝΟΤΗΤΑ (MODULE) ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ.....	6
1.6	ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ – TEG.....	6
1.7	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ.....	8
1.8	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ TEGs.....	9
1.8.1	Πλεονεκτήματα.....	9
1.8.2	Μειονεκτήματα των θερμοηλεκτρικών γεννητριών.....	10
1.9	ΥΛΙΚΑ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ ΓΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ.....	11
1.10	ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ.....	11
1.10.1	Ημιαγωγοί Τύπου p.....	11
1.10.2	Ημιαγωγοί Τύπου n.....	12
1.11	ΤΡΟΠΟΙ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ.....	13
1.12	ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ.....	14
1.13	ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ.....	17
1.13.1	Αξιοπιστία της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας σε σχέση με τις Μηχανικές Τάσεις και τις Μεθόδους στερέωσης.....	17
1.13.2	Αξιοπιστία της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας σε σχέση με την έκθεση της σε ψηλές θερμοκρασίες.....	18
1.13.3	Αξιοπιστία της θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας σε σχέση με την θερμική κόπωση.....	18
1.13.4	Αξιοπιστία της θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας σε σχέση με την ύπαρξη υγρασίας.....	19
1.14	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ.....	19
1.15	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ.....	20
1.15.1	Θερμοηλεκτρική Γεννήτρια σε Combined Heat and Power – CHP.....	22
1.15.2	Θερμοηλεκτρική γεννήτρια στην Αυτοκινητοβιομηχανία.....	23
1.15.3	Χρήση θερμοηλεκτρικής γεννήτριας στην αεροναυπηγική.....	24
1.15.4	Χρήση θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας σε Ηλιακές Θερμικές (Solar Thermal).....	26
1.15.4.1	Υβριδικό Σύστημα CPV+TEG.....	27
1.16	ΣΤΟΧΟΣ ΤΗΣ ΈΡΕΥΝΑΣ.....	29
2	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	30
2.1	ΥΛΙΚΑ HALF-HEUSLER.....	30
2.1.1	Θερμική Αγωγιμότητα.....	31
2.1.2	Electrical Conductivity.....	32
2.1.3	Seebeck Coefficient.....	32
2.1.4	Thermoelectric figure of merit (ZT).....	33
2.2	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΕ ΥΛΙΚΑ HALF-HEUSLER.....	37
3	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ	44
3.1	ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΗΤΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ.....	44
3.2	ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ.....	45
3.2.1	Θερμοηλεκτρική Γεννήτρια με δύο Ζεύγη Θερμοστοιχείων.....	46
3.2.2	Αποτελέσματα Προσομοίωσης Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας με δυο ζεύγη θερμοστοιχείων.....	51
3.2.3	Θερμοηλεκτρική Γεννήτρια με οκτώ Ζεύγη Θερμοστοιχείων.....	57
3.2.4	Αποτελέσματα Προσομοίωσης Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας με οκτώ ζεύγη θερμοστοιχείων.....	58
3.3	ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΑΠΟ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	64
3.3.1	Μοντέλο Άρθρου.....	64
3.3.2	Μοντέλο Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας για την Πιστοποίηση.....	66
3.3.3	Αποτελέσματα Προσομοίωσης Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας Άρθρου.....	66

3.3.4	Σύγκριση Αποτελεσμάτων.....	71
4	ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΥΣΚΟΛΙΕΣ.....	73
4.1	ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ.....	73
4.1.1	Πλάκες.....	75
4.1.2	Μεταλλικά Ηλεκτρόδια.....	75
4.1.3	Συγκολλητικό Μετάλλων σε μορφή Πάστας.....	76
4.1.4	Θερμική Πάστα	77
4.2	ΑΓΟΡΑ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ ΠΛΑΚΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΑΣ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑ ΧΑΛΚΟΥ	77
4.3	ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΥΣΚΟΛΙΕΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΣΤΟΙΧΕΙΩΝ HALF-HEUSLER.....	79
4.3.1	Κόστος.....	79
4.3.2	Ελεγχόμενη Μείωση Ύψους Θερμοστοιχείων	79
4.3.3	Μέθοδος Επιμετάλλωσης	80
4.3.3.1	Magnetron Sputtering	81
4.3.4	Κόψιμο Θερμοστοιχείων σε Κύβους.....	84
4.3.5	Υψηλή Αντίσταση Επαφής/Επιμετάλλωση	84
4.3.6	Μέτρηση Αντίστασης Επαφής	85
5	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑΣ ΘΕΡΜΟΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	87
5.1	ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΔΙΣΚΙΟΥ	88
5.1.1	Σύνθεση Υλικών half-Heusler στο Glove Box	88
5.1.2	Διαδικασία Μηχανικής Άλεσης – Planetary Ball Milling Machine.....	89
5.1.3	Διαδικασία Παραγωγής Θερμοστοιχείων – Hot Pressing Sintering.....	90
5.2	ΈΛΕΓΧΟΣ ΎΨΟΥΣ ΔΙΣΚΙΩΝ ΘΕΡΜΟΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	91
5.2.1	Διαδικασία Μείωσης Ύψους Θερμοστοιχείων p & n τύπου	93
5.2.2	Αποτελέσματα Μείωσης Ύψους	96
5.2.3	Συμπεράσματα Διαδικασίας Μείωσης Ύψους.....	97
5.3	ΕΠΙΜΕΤΑΛΛΩΣΗ ΘΕΡΜΟΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	98
5.3.1	Διαδικασία Επιμετάλλωσης Θερμοστοιχείων.....	99
5.4	ΚΟΠΗ ΘΕΡΜΟΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΕ ΚΥΒΟΥΣ	101
5.4.1	Διαδικασία Κοπής Θερμοστοιχείων σε Κύβους.....	103
5.4.2	Κοπής Δισκίων p τύπου.....	105
5.4.3	Κοπής Δισκίων n τύπου.....	106
5.4.4	Συμπεράσματα Διαδικασίας Κοπής Θερμοστοιχείων.....	107
5.5	ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΕΠΑΦΩΝ	108
5.6	ΚΟΠΗ ΧΑΛΚΙΝΩΝ ΚΟΜΜΑΤΙΩΝ ΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	108
5.7	ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΘΕΡΜΟΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΥΒΟΥ	109
5.7.1	Διαδικασία Συγκόλληση Θερμοστοιχείων Κύβου	110
5.8	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ	111
5.8.1	Θερμοστοιχεία p – τύπου	111
5.8.2	Θερμοστοιχεία n – τύπου	115
5.9	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ p & n ΤΥΠΟΥ.....	117
5.10	ΜΕΤΡΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΕΠΑΦΗΣ.....	118
5.10.1	Διαδικασία Μέτρησης Ηλεκτρικής Αντίστασης Επαφής.....	119
5.11	ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΓΡΑΦΙΚΩΝ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΩΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ – ΘΕΣΗΣ	120
5.11.1	Αντίσταση Επαφής Θερμοστοιχείων p – τύπου	121
5.11.1.1	Συμπεράσματα αντίστασης επαφής για θερμοστοιχεία p - τύπου	124
5.11.2	Δείγματα με Θερμοστοιχεία n – τύπου.....	125
5.12	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΕΠΑΦΗΣ ΓΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΑ p & n ΤΥΠΟΥ	130
6	ΑΝΑΠΤΥΞΗ/ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ.....	131
6.1	ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ.....	131
6.2	ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ 1	133
6.2.1	Κατασκευή Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 1.....	133
6.3	ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ 2	136
6.4	ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ 3	138
6.5	ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ 4	140
6.5.1	Διαδικασία Κατασκευής Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 4.....	140

6.5.2	Σφάλματα Εκτέλεσης κατά τη κατασκευή της Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 4.....	142
6.5.3	Συμπεράσματα Κατασκευής Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 4	143
6.6	ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ 5	144
6.6.1	Διαδικασία Κατασκευής Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 5.....	144
6.6.2	Σφάλματα Εκτέλεσης κατά τη κατασκευή της Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 5.....	145
6.6.3	Συμπεράσματα Κατασκευής Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 5	145
6.7	ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ 6.....	146
6.7.1	Διαδικασία Κατασκευής Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 6.....	146
6.8	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΕ 2 ΖΕΥΓΗ ΘΕΡΜΟΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	146
6.9	ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ 7	147
6.9.1	Διαδικασία Κατασκευής Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 7.....	147
6.9.2	Σφάλματα Εκτέλεσης κατά τη κατασκευή της Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 7.....	150
6.9.3	Συμπεράσματα Κατασκευής Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 7	151
6.10	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ.....	152
6.11	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ	153
6.12	ΣΤΗΡΙΞΗ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΣΤΗ ΣΥΣΚΕΥΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ	154
6.13	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ 4.....	156
6.13.1	Διάταξη Χαρακτηρισμού	156
6.13.2	Διαδικασία Χαρακτηρισμού Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 4	157
6.13.3	Σύγκριση θερμοηλεκτρική γεννήτριας από COMSOL με Θερμοηλεκτρική γεννήτρια 4 162	
6.13.4	Σφάλματα Εκτέλεσης κατά το Χαρακτηρισμό της Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 4	164
6.13.5	Συμπεράσματα Χαρακτηρισμού Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 4.....	165
6.14	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ 5	166
6.14.1	Διαδικασία Χαρακτηρισμού Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 5	166
6.14.2	Σύγκριση θερμοηλεκτρική γεννήτριας από COMSOL με Θερμοηλεκτρική γεννήτρια 5 170	
6.14.3	Σφάλματα Εκτέλεσης κατά το Χαρακτηρισμό της Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 5	170
6.14.4	Συμπεράσματα Χαρακτηρισμού Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 5.....	170
6.15	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ 6	171
6.15.1	Διαδικασία Χαρακτηρισμού Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 6	171
6.15.2	Σύγκριση θερμοηλεκτρική γεννήτριας από COMSOL με Θερμοηλεκτρική γεννήτρια 6 174	
6.15.3	Σφάλματα Εκτέλεσης κατά το Χαρακτηρισμό της Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 6	174
6.15.4	Συμπεράσματα Χαρακτηρισμού Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 6.....	174
6.16	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ 7	175
6.16.1	Διαδικασία Χαρακτηρισμού Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 7	175
6.16.2	Σύγκριση θερμοηλεκτρική γεννήτριας από COMSOL με Θερμοηλεκτρική γεννήτρια 7 179	
6.16.3	Σφάλματα Εκτέλεσης κατά το Χαρακτηρισμό της Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 7	181
6.16.4	Συμπεράσματα Χαρακτηρισμού Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 7.....	182
6.17	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ	183
7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ / ΕΙΣΗΓΗΣΕΙΣ	184
7.1	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	184
7.1.1	Συμπεράσματα Προετοιμασίας των Θερμοστοιχείων half-Heusler.....	185
7.1.2	Συμπεράσματα κατά τη Διαδικασία Κατασκευής Θερμοηλεκτρικών Γεννητριών.....	185
7.1.3	Συμπεράσματα κατά τη Διαδικασία Χαρακτηρισμού Θερμοηλεκτρικών Γεννητριών.....	186
7.2	ΕΙΣΗΓΗΣΕΙΣ	187
8	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	188

Εικόνες

Εικόνα 1.1: Απεικόνιση του Γερμανού φυσικού Thomas Johann Seebeck.	4
Εικόνα 1.2: Απεικόνιση της απόκλισης βελόνας πυξίδας λόγω παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος. [15].....	4
Εικόνα 1.3: Απεικόνιση μια ολοκληρωμένης θερμοηλεκτρικής γεννήτριας.	7
Εικόνα 1.4: Απεικόνιση μιας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με τα μέρη που την απαρτίζουν.	7
Εικόνα 1.5: Απεικόνιση της κίνησης των φορέων φορτίου και της κίνησης του συνεχούς ρεύματος μέσω μιας εξωτερικής αντίστασης όταν εφαρμόζεται θερμότητα στην θερμή μεριά ενός θερμοστοιχείου. [15]	8
Εικόνα 1.6: Απεικόνιση της αντικατάστασης ενός ατόμου με αριθμό ηλεκτρονίων σθένους 4 ($4e^-$) με ένα άτομο με αριθμό ηλεκτρονίων σθένους 3 ($3e^-$), με αποτέλεσμα της δημιουργίας ημιαγωγού p – τύπου. [5]	12
Εικόνα 1.7: Απεικόνιση της αντικατάστασης ενός ατόμου με αριθμό ηλεκτρονίων σθένους 4 ($4e^-$) με ένα άτομο με αριθμό ηλεκτρονίων σθένους 5 ($5e^-$), με αποτέλεσμα της δημιουργίας ημιαγωγού n – τύπου. [5]	13
Εικόνα 1.8: Αναπαράσταση θερμοηλεκτρικών γεννητριών σε παράλληλη σύνδεση. [35].....	14
Εικόνα 1.9: Αναπαράσταση ηλεκτρικής καλωδίωσης θερμοζεύγων σε σειρά. [34].....	14
Εικόνα 1.10: Απεικόνιση της μεθόδου στερέωσης ανάμεσα από τις δύο πλάκες – clamping method. [4]	18
Εικόνα 1.11: Απεικόνιση συνδυασμού θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με σόμπα βιομάζας. [29]	22
Εικόνα 1.12: Απεικόνιση θερμοηλεκτρικών γεννητριών στις 2 πλευρές του επίπεδου εναλλάκτη θερμότητας και τα διάφορα μέρη που αποτελούν το σύστημα. [17].....	23
Εικόνα 1.13: Απεικόνιση θερμοηλεκτρικής γεννήτριας στο σύστημα εξάτμισης του οχήματος Lincoln MKT. [17]	24
Εικόνα 1.14: Απεικόνιση του δορυφόρου Voyager 1 στο διάστημα.[18].....	25
Εικόνα 1.15: Απεικόνιση μιας ηλιακής θερμοηλεκτρικής γεννήτριας και τα διάφορα μέρη της. [12].....	26
Εικόνα 1.16: Απεικόνιση πειραματικού σχεδιαγράμματος για σύστημα CPV+TEG.[37]	28
Εικόνα 2.1: Η κρυσταλλική δομή του θερμοηλεκτρικού υλικού half - Heusler. Οι μπλε, πράσινες και ροζ μπάλες αναφέρονται στα X, Y και Z άτομα του υλικού. [50].....	31

Εικόνα 2.2: Απεικόνιση του τρόπου κατασκευής της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας πάνω σε σωλήνα: Α) με συμπαγή γεωμετρία θερμοηλεκτρικής γεννήτριας και Β) με μεμονωμένα κομμάτια θερμοηλεκτρικών γεννητριών. [55].....	38
Εικόνα 3.1: Απεικόνιση των κεραμικών πλακών μαζί με τα ηλεκτρόδια χαλκού Α) της κάτω πλάκας και Β) της άνω πλάκας για τα δύο ζεύγη θερμοστοιχείων.	46
Εικόνα 3.2: Απεικόνιση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με τα δύο ζεύγη θερμοστοιχείων που αναπτύχθηκε με τη χρήση του COMSOL Multiphysics 5.2.	46
Εικόνα 3.3: Απεικόνιση του εσωτερικού της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με τα δύο ζεύγη θερμοστοιχείων.....	47
Εικόνα 3.4: Απεικόνιση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με τα δύο ζεύγη θερμοστοιχείων μετά τη δημιουργία πλέγματος ονομασίας <i>Finer</i>	49
Εικόνα 3.5: Απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας στον κάθετο άξονα της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με τα δύο ζεύγη θερμοστοιχείων.	55
Εικόνα 3.6: Απεικόνιση του ηλεκτρικού δυναμικού κατά μήκος των θερμοστοιχείων για εξωτερική αντίσταση φορτίου ίση με $0.06\Omega\text{hms}$ και θερμοκρασία θερμής και ψυχρής μεριάς ίση με 773K και 298K αντίστοιχα.	56
Εικόνα 3.7: Απεικόνιση του ηλεκτρικού ρεύματος που διαπερνά τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια για εξωτερική αντίσταση φορτίου ίση με $0.06\Omega\text{hms}$ και θερμοκρασία θερμής και ψυχρής μεριάς ίση με 773K και 298K αντίστοιχα.	56
Εικόνα 3.8: Απεικόνιση της παραγόμενης ισχύος από τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια για εξωτερική αντίσταση φορτίου ίση με $0.06\Omega\text{hms}$ και θερμοκρασία θερμής και ψυχρής μεριάς ίση με 773K και 298K αντίστοιχα.	56
Εικόνα 3.9: Απεικόνιση των κεραμικών πλακών μαζί με τα ηλεκτρόδια χαλκού Α) της κάτω πλάκας και Β) της άνω πλάκας για τα οκτώ ζεύγη θερμοστοιχείων.	57
Εικόνα 3.10: Απεικόνιση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με τα οκτώ ζεύγη θερμοστοιχείων που αναπτύχθηκε με τη χρήση του COMSOL Multiphysics 5.2.	57
Εικόνα 3.11: Απεικόνιση του εσωτερικού της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με τα οκτώ ζεύγη θερμοστοιχείων.....	58
Εικόνα 3.12: Απεικόνιση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με τα οκτώ ζεύγη θερμοστοιχείων μετά τη δημιουργία πλέγματος ονομασίας <i>Finer</i>	58
Εικόνα 3.13: Απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με τα οκτώ ζεύγη θερμοστοιχείων.	63
Εικόνα 3.14: Απεικόνιση του ηλεκτρικού δυναμικού κατά μήκος των θερμοστοιχείων για εξωτερική αντίσταση φορτίου ίση με $0.21\Omega\text{hms}$ και θερμοκρασία θερμής και ψυχρής μεριάς ίση με 773K και 298K αντίστοιχα.....	63
Εικόνα 3.15: Απεικόνιση του ηλεκτρικού ρεύματος που διαπερνά τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια για εξωτερική αντίσταση φορτίου ίση με $0.21\Omega\text{hms}$ και θερμοκρασία θερμής και ψυχρής μεριάς ίση με 773K και 298K αντίστοιχα.	64

Εικόνα 3.16: Απεικόνιση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας του άρθρου.....	65
Εικόνα 3.17: Απεικόνιση των αποτελεσμάτων της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας του άρθρου, όπου Α) η διαφορά δυναμικού, Β) η κατακόρυφη κατανομή της θερμοκρασίας, Γ) το γράφημα ηλεκτρικής ισχύος ως προς την εξωτερική αντίσταση για διάφορες τιμές θερμοκρασιών και Δ) το γράφημα της ηλεκτρικής ισχύος ως προς τη θερμοκρασία της θερμής επιφάνειας της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας.	65
Εικόνα 3.18: Απεικόνιση της γεωμετρίας της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας που αναπτύσσεται σύμφωνα με το άρθρο [53].	66
Εικόνα 3.19: Απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας στη θερμοηλεκτρική γεννήτρια του άρθρου στο κατακόρυφο άξονα με θερμοκρασιακή διαφορά ίση με 400°C.	70
Εικόνα 3.20: Απεικόνιση του ηλεκτρικού δυναμικού κατά μήκος των θερμοστοιχείων για εξωτερική αντίσταση φορτίου ίση με 65mΩhms και θερμοκρασία θερμής και ψυχρής μεριάς ίση με 450°C και 50°C αντίστοιχα.	70
Εικόνα 3.21: Απεικόνιση της παραγόμενης ισχύος από τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια για εξωτερική αντίσταση φορτίου ίση με 65mΩhms και θερμοκρασία θερμής και ψυχρής μεριάς ίση με 450°C και 50°C αντίστοιχα.	71
Εικόνα 4.1: Απεικόνιση των μερών μιας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας που απαιτούνται να αγοραστούν και τα σημεία εφαρμογής της συγκολλητικής πάστας και θερμικής πάστας.	74
Εικόνα 4.2: Απεικόνιση των κάτω κεραμικών πλακών αλουμίνας με τοποθετημένα τα ηλεκτρόδια χαλκού για διαφορετικό αριθμό ζευγών θερμοστοιχείων.	78
Εικόνα 4.3: Απεικόνιση των κάτω κεραμικών πλακών αλουμίνας με τοποθετημένα τα ηλεκτρόδια χαλκού για διαφορετικό αριθμό ζευγών θερμοστοιχείων.	78
Εικόνα 4.4: Απεικόνιση Α) της διαδικασίας κατασκευής θερμοστοιχείων με SPS μέχρι την κατασκευή θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με επιμετάλλωση από τεχνικές ανάπτυξης λεπτών υμενίων (PVD) και η αντίσταση επαφής που προσφέρεται, Β) της διαδικασίας κατασκευής θερμοστοιχείων και ταυτόχρονης ανάπτυξης μεταλλικού στρώματος με διαδικασία SPS μέχρι την κατασκευή θερμοηλεκτρικής γεννήτριας και η αντίσταση επαφής που προσφέρεται. [57]	81
Εικόνα 4.5: Απεικόνιση των διαφόρων στοιχείων του magnetron sputtering όπως, τη θέση των μαγνητών κάτω από το στόχο, το υλικό του στόχου, το μαγνητικό πεδίο, τη δημιουργία πλάσματος και την εναπόθεση υλικού στην επιφάνεια του υποστρώματος. [42].....	82
Εικόνα 4.6: Απεικόνιση (a): της διάταξης των μαγνητών στη βάση που τοποθετείται το υλικό του στόχου, της φοράς του μαγνητικού πεδίου και (b) της διαδρομής της δέσμης ηλεκτρονίων. [41]	83
Εικόνα 4.7: Απεικόνιση διάταξης μέτρησης αντίστασης επαφής με χρήση τεσσάρων μεταλλικών ακίδων. Από τις δύο εξωτερικές ακίδες εξαναγκάζεται το ρεύμα να περάσει το υλικό ενώ με τις δύο εσωτερικές ακίδες λαμβάνονται τιμές τάσης. [61]	86

Εικόνα 5.1: Η διαδικασία προετοιμασίας των θερμοστοιχείων μέχρι τη κατασκευή μιας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας. [57]	87
Εικόνα 5.2: Απεικόνιση του μηχανήματος κοπής και λείανσης Accutom – 100 από τη Struers.	92
Εικόνα 5.3: Απεικόνιση του εξαρτήματος μείωσης ύψους για χρήση στο μηχάνημα κοπής και λείανσης Accutom – 100.	92
Εικόνα 5.4: Απεικόνιση του εξαρτήματος μείωσης ύψους δισκίων μαζί με ένα δισκίο τοποθετημένο στην οπή.	94
Εικόνα 5.5: Απεικόνιση του εσωτερικού του μηχανήματος Accutom – 100. Συγκεκριμένα απεικονίζεται ο τροχός λείανσης, ο ηλεκτροκινητήρας μαζί με τον άξονα του και ο άξονας που στερεώνεται η δαγκάνα.	95
Εικόνα 5.6: Απεικόνιση του κύβου από αλουμίνιο μαζί με ένα στερεωμένο δισκίο με χρήση γόμμας ταχείας συγκόλλησης.	96
Εικόνα 5.7: Απεικόνιση της κυκλικής βάσης με τις οπές που χρησιμοποιείται για τη τοποθέτηση των θερμοστοιχείων μέσα στο θάλαμο του magnetron sputtering.	98
Εικόνα 5.8: Απεικόνιση του εσωτερικού του θαλάμου magnetron sputtering μαζί με τη μεταλλική βάση και δισκία τοποθετημένα στις οπές.	99
Εικόνα 5.9: Απεικόνιση της διαδικασίας pre-sputtering.	100
Εικόνα 5.10: Απεικόνιση της διαδικασίας magnetron sputtering.	101
Εικόνα 5.11: Απεικόνιση του εξαρτήματος κοπής για χρήση στο μηχάνημα κοπής και λείανσης Accutom – 100.	101
Εικόνα 5.12: Απεικόνιση του εξαρτήματος κοπής από αλουμίνιο όταν κατασκευάστηκε από το μηχανουργείο για χρήση στο μηχάνημα κοπής και λείανσης Accutom – 100.	102
Εικόνα 5.13: Απεικόνιση του μέγιστου αριθμού που είναι δυνατό να λαμβάνεται από τη κοπή ενός θερμοστοιχείου, σύμφωνα με την ιστοσελίδα της Silicon Edge. [59].....	103
Εικόνα 5.14: Απεικόνιση του εξαρτήματος κοπής μετά τη συγκόλληση των δύο κομματιών από γυαλί και θερμοστοιχείου.....	103
Εικόνα 5.15: Απεικόνιση του κομμένου θερμοστοιχείου σε κύβους πάνω στο εξάρτημα κοπής.....	104
Εικόνα 5.16: Απεικόνιση κυβικών θερμοστοιχείων που έχουν αποκόλληση μεγάλων κομματιών από την επιφάνεια λόγω ταλάντωσης του διαμαντοτροχού.....	106
Εικόνα 5.17: Απεικόνιση του φούρνου με τον οποίο θα πραγματοποιηθεί η συγκόλληση των θερμοστοιχείων.....	109
Εικόνα 5.18: Απεικόνιση της μεθόδου στήριξης των δειγμάτων για τη συγκόλληση τους στο φούρνο.....	110

Εικόνα 5.19: Απεικόνιση ενός θερμοστοιχείου, ανάμεσα από δύο κομμάτια χαλκού ακριβώς μετά τη συγκόλληση στο φούρνο, με τη χρήση στερεοσκοπίου.....	111
Εικόνα 5.20: Απεικόνιση ενός δείγματος μετά τη διαδικασία γυαλίσματος με στόχο τη παρατήρηση ύπαρξης ρωγμής.	111
Εικόνα 5.21: Απεικόνιση του εσωτερικού του φούρνου στον οποίο πραγματοποιείται η συγκόλληση των θερμοστοιχείων και του ακροφύσιου του αερίου αργού το οποίο βρίσκεται χαμηλά στο βάθος.	114
Εικόνα 5.22: Απεικόνιση δείγματος που παρουσιάζει περιφερειακή ρωγμή λόγω της θερμοκρασίας συγκόλλησης και θέσης του δείγματος στο φούρνο.	115
Εικόνα 5.23: Απεικόνιση δείγματος που παρουσιάζει ρωγμή στην γωνιά του κύβου λόγω της μεταλλικότητας του υλικού n – τύπου κατά τη διαδικασία συγκόλλησης στο φούρνο.	116
Εικόνα 5.24: Απεικόνιση του μηχανήματος λείανσης Laborol-30 από την Struers, στο οποίο λειάνονται τα δείγματα για να πραγματοποιηθεί η μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης επαφής.	118
Εικόνα 5.25: Απεικόνιση ενός θερμοστοιχείου p - τύπου αφότου πραγματοποιήθηκε διαδικασία γυαλίσματος, με τη χρήση στερεοσκοπίου.....	118
Εικόνα 5.26: Απεικόνιση του στερεωμένου δείγματος και της μεταλλικής ακίδας κατά τη μέτρηση της αντίστασης στη συγκεκριμένη θέση.	119
Εικόνα 5.27: Απεικόνιση σχεδιαγράμματος αρχής λειτουργίας μέτρησης αντίστασης επαφής σε ένα δείγμα που αποτελείται από δύο χάλκινα κομμάτια και ένα κυβικό θερμοστοιχείο.	120
Εικόνα 5.28: Απεικόνιση του δείγματος 8 (p-τύπου) ακριβώς μετά τη διαδικασία λείανσης.	122
Εικόνα 5.29: Απεικόνιση των συγκολλήσεων του δείγματος 5 (p – τύπου) κάτω από το στερεοσκόπιο με μεγέθυνση.	125
Εικόνα 5.30: Απεικόνιση του δείγματος 13 ακριβώς μετά τη διαδικασία λείανσης. ...	126
Εικόνα 6.1: Απεικόνιση της πλάκας που σχεδιάστηκε στο λογισμικό AutoCAD από Stainless Steel.	131
Εικόνα 6.2: Απεικόνιση Α) της βάσης από Stainless Steel και Β) της βάσης με τη μήτρα και Γ) της βάσης, της μήτρας και των εμβόλων γραφίτη.	132
Εικόνα 6.3: Απεικόνιση της συγκολλητικής πάστας αργύρου 1800PA brazing paste. [51].....	133
Εικόνα 6.4: Απεικόνιση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας πάνω στο έμβολο γραφίτη 20mm Α) πριν τη τοποθέτηση ελασμάτων χαλκού Β) μετά τη τοποθέτηση ελασμάτων χαλκού.....	134
Εικόνα 6.5: Απεικόνιση του εσωτερικού της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας μέσω στερεοσκοπίου. Παρατηρείται ότι οι συγκολλήσεις είναι καμένες, τα ελάσματα χαλκού	

έχουν αποχωρήσει και πως τοποθετήθηκε μεγάλο ποσό συγκολλητικής πάστας με αποτέλεσμα να καλυφτούν τα θερμοστοιχεία με πάστα.....	135
Εικόνα 6.6: Απεικόνιση της συγκολλητικής πάστας Easy Print SAC305.....	137
Εικόνα 6.7: Απεικόνιση του καλαί 99.3%Sn & 0.7%Cu (Lead free).....	138
Εικόνα 6.8: Απεικόνιση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 4 μετά τη συγκόλληση των θερμοστοιχείων στο φούρνο.	141
Εικόνα 6.9: Απεικόνιση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 4 κατά τη μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης πριν την συγκόλληση των ελασμάτων χαλκού και των καλωδίων. Η ηλεκτρική αντίσταση του κυκλώματος ανέρχεται στα 0.9Ωhms.	141
Εικόνα 6.10: Απεικόνιση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 4 μετά τη τοποθέτηση καλωδίων στα άκρα της και σιλικόνης Bison High Temperature περιμετρικά της γεννήτριας.	142
Εικόνα 6.11: Απεικόνιση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 5 κατά τη μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης πριν την συγκόλληση των ελασμάτων χαλκού και των καλωδίων. Η ηλεκτρική αντίσταση του κυκλώματος ανέρχεται στα 0.7Ωhms.	144
Εικόνα 6.12: Απεικόνιση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 6 κατά τη μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης πριν την συγκόλληση των ελασμάτων χαλκού και των καλωδίων. Η ηλεκτρική αντίσταση του κυκλώματος ανέρχεται στα 0.6Ωhms.	146
Εικόνα 6.13: Απεικόνιση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 7: Α) ακριβώς μετά τη τοποθέτηση των θερμοστοιχείων στις θέσεις τους και Β) μετά τη τοποθέτηση της συγκολλητικής πάστας αργύρου στην άνω επιφάνεια.....	148
Εικόνα 6.14: Απεικόνιση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 7, η οποία βρίσκεται ανάμεσα στη βάση από Stainless Steel και τη μήτρα γραφίτη με τα έμβολα, πριν τη τοποθέτηση του συμπαγές κυλίνδρου χαλκού και τη συγκόλληση των θερμοστοιχείων στον φούρνο.....	149
Εικόνα 6.15: Απεικόνιση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 7 κατά τη μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης πριν την συγκόλληση των ελασμάτων χαλκού και των καλωδίων. Η ηλεκτρική αντίσταση του κυκλώματος ανέρχεται στα 1.1Ωhms.	149
Εικόνα 6.16: Απεικόνιση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 7 μετά τη συγκόλληση των θερμοστοιχείων στο φούρνο.	150
Εικόνα 6.17: Απεικόνιση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 7 Α) μετά την συγκόλληση των μακρών ηλεκτρικών καλωδίων και Β) μετά την περιμετρική εφαρμογή της σιλικόνης Bison High Temperature.	150
Εικόνα 6.18: Απεικόνιση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 7, της οποίας η άνω πλάκα παρεκκλίνει από την κάτω πλάκα.....	151
Εικόνα 6.19: Απεικόνιση της διάταξης χαρακτηρισμού μιας γεννήτριας με τα μέρη που την αποτελούν.....	153
Εικόνα 6.20: Απεικόνιση της διαδικασίας κοπής των εμβόλων στο Accutom – 100.	155

Εικόνα 6.21: Απεικόνιση της διάταξης χαρακτηρισμού.....	156
Εικόνα 6.22: Απεικόνιση του συστήματος ψύξης νερού.....	158
Εικόνα 6.23: Απεικόνιση Α) του ψηφιακού θερμόμετρου και Β) της διάταξης των πλακών.....	166
Εικόνα 6.24: Απεικόνιση της θερμικής πάστας grizzly kryonaut.[47].....	171

Γραφήματα

Γράφημα 2.1: Η θερμική αγωγιμότητα ως προς τη θερμοκρασία (α) του Hf _{0.5} Zr _{0.5} CoSb _{0.8} Sn _{0.2} (κοίλα μαύρα τετράγωνα) και Hf _{0.5} Ti _{0.5} CoSb _{0.8} Sn _{0.2} (κοίλοι κόκκινοι κύκλοι) και (β) Hf _{0.75} Zr _{0.25} NiSn _{0.99} Sb _{0.01} (μαύρα τετράγωνα) και Hf _{0.5} Zr _{0.25} Ti _{0.25} NiSn _{0.99} Sb _{0.01} (κόκκινοι κύκλοι). [50].....	32
Γράφημα 2.2: Ο αδιάστατος αριθμός ZT ως προς τη θερμοκρασία για διαφορετικές συστάσεις (α) για την ένωση MNiSn και (β) για την ένωση MCoSb. [50]	33
Γράφημα 2.3: Οι θερμοηλεκτρικές ιδιότητες του ντοπαρισμένου υλικού Ti _{0.4} Zr _{0.6} NiSn ₁ – ySby. [52].....	34
Γράφημα 2.4: (α) Σταθερά Seebeck και (β) ηλεκτρική αγωγιμότητα των δειγμάτων Ti _{0.4} Zr _{0.6} NiSn _{0.985} Sb _{0.015} που μετρήθηκαν σε κύκλους θέρμανσης/ψύξης. [52] ..	34
Γράφημα 2.5: Οι θερμοηλεκτρικές ιδιότητες του υλικού HfxTi ₁ – xCoSb _{0.8} Sn _{0.2} συγκριτικά με το υλικό της βιβλιογραφίας. [66]	35
Γράφημα 2.6: Οι θερμοηλεκτρικές ιδιότητες του υλικού Hf _{0.6} Ti _{0.4} CoSb ₁ – ySny. [66]	36
Γράφημα 2.7: Α) πυκνότητα ισχύος και Β) μέγιστη απόδοση μετατροπής ως προς τη θερμοκρασία θερμής μεριάς και συγκεκριμένων τιμών γεωμετρικών παραμέτρων. [62]	40
Γράφημα 2.8: Α) Απεικόνιση θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με δύο ζεύγη θερμοστοιχείων, Β) τάση και ισχύς ως προς το ηλεκτρικό ρεύμα κάτω από διαφορετικές τιμές ΔΤ, Γ) πυκνότητα ισχύος ως προς τη θερμοκρασιακή διαφορά ΔΤ βάση του εμβαδού διατομής των θερμοστοιχείων και ολόκληρης της θερμοηλεκτρικής μονάδας και Δ) η τάση ανοικτού κυκλώματος και απόδοσης ως προς τη θερμοκρασιακή διαφορά ΔΤ. [54].....	41
Γράφημα 2.9: Απεικόνιση της μέγιστης απόδοσης μετατροπής και της μέγιστης ισχύος γεννήτριας από [65].	42
Γράφημα 3.1: Απεικόνιση της καμπύλης λειτουργίας έντασης ως προς τη τάση για τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια με τα δύο ζεύγη θερμοστοιχείων.	52
Γράφημα 3.2: Απεικόνιση της καμπύλης λειτουργίας ισχύος ως προς την ένταση για τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια με τα δύο ζεύγη θερμοστοιχείων.	53
Γράφημα 3.3: Απεικόνιση της καμπύλης λειτουργίας ισχύος ως προς την εξωτερική αντίσταση φορτίου της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με τα δύο ζεύγη θερμοστοιχείων.	53
Γράφημα 3.4: Απεικόνιση της καμπύλης λειτουργίας ισχύος ως προς τη θερμοκρασία της θερμής μεριάς της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με τα δύο ζεύγη θερμοστοιχείων.....	55
Γράφημα 3.5: Απεικόνιση της καμπύλης λειτουργίας έντασης ως προς τη τάση για τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια με τα οκτώ ζεύγη θερμοστοιχείων.....	60

Γράφημα 3.6: Απεικόνιση της καμπύλης λειτουργίας ισχύος ως προς την ένταση για τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια με τα οκτώ ζεύγη θερμοστοιχείων.....	60
Γράφημα 3.7: Απεικόνιση της καμπύλης λειτουργίας ισχύος ως προς την εξωτερική αντίσταση φορτίου της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με τα οκτώ ζεύγη θερμοστοιχείων.	61
Γράφημα 3.8: Απεικόνιση της καμπύλης λειτουργίας ισχύος ως προς τη θερμοκρασία της θερμής μεριάς της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με τα οκτώ ζεύγη θερμοστοιχείων.	62
Γράφημα 3.9: Απεικόνιση της καμπύλης λειτουργίας ισχύος ως προς την εξωτερική αντίσταση φορτίου της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας της προσομοίωσης του άρθρου. 67	
Γράφημα 3.10: Απεικόνιση των καμπυλών λειτουργίας ισχύος ως προς την εξωτερική αντίσταση φορτίου ανάλογα με τη θερμοκρασία της θερμής μεριάς της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας του άρθρου.....	68
Γράφημα 3.11: Απεικόνιση της καμπύλης λειτουργίας ισχύος ως προς τη θερμοκρασία της θερμής μεριάς της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας της προσομοίωσης του άρθρου...69	
Γράφημα 3.12: Απεικόνιση των καμπυλών λειτουργίας ισχύος ως προς την θερμής μεριάς της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας του άρθρου μέσω αναλυτικού και αριθμητικού μοντέλου.	69
Γράφημα 5.1: Απεικόνιση της θερμοκρασιακής διαφοράς ως προς τον χρόνο μεταξύ της θερμοκρασίας που ρυθμίζεται ο φούρνος και της θερμοκρασίας του θερμοζεύγους για 700°C πίσω από την πόρτα του φούρνου.	112
Γράφημα 5.2: Απεικόνιση της θερμοκρασιακής διαφοράς ως προς τον χρόνο μεταξύ της θερμοκρασίας που ρυθμίζεται ο φούρνος και της θερμοκρασίας του θερμοζεύγους για 700°C στη μέση του φούρνου.....	112
Γράφημα 5.3: Απεικόνιση της θερμοκρασιακής διαφοράς ως προς τον χρόνο μεταξύ της θερμοκρασίας που ρυθμίζεται ο φούρνος και της θερμοκρασίας του θερμοζεύγους για 700°C στο βάθος του φούρνου.	113
Γράφημα 5.4: Απεικόνιση της θερμοκρασιακής διαφοράς ως προς τον χρόνο μεταξύ της θερμοκρασίας που ρυθμίζεται ο φούρνος και της θερμοκρασίας του θερμοζεύγους για 730°C πίσω από την πόρτα του φούρνου.	114
Γράφημα 5.5: Απεικόνιση της αντίστασης επαφής στις δύο διεπιφάνειες και την μέση τιμή αντίστασης επαφής για το δείγμα 1, το οποίο έχει συγκολληθεί στους 700°C για 15 λεπτά στο βάθος του φούρνου.	122
Γράφημα 5.6: Απεικόνιση της αντίστασης επαφής στις δύο διεπιφάνειες και την μέση τιμή αντίστασης επαφής για το δείγμα 3, το οποίο έχει συγκολληθεί στους 700°C για 15 λεπτά στο βάθος του φούρνου.	122
Γράφημα 5.7: Απεικόνιση της αντίστασης επαφής στις δύο διεπιφάνειες και την μέση τιμή αντίστασης επαφής για το δείγμα 5, το οποίο έχει συγκολληθεί στους 730°C για 15 λεπτά πίσω από τη πόρτα του φούρνου.	123

Γράφημα 5.8: Απεικόνιση της αντίστασης επαφής στις δύο διεπιφάνειες και την μέση τιμή αντίστασης επαφής για το δείγμα 6, το οποίο έχει συγκολληθεί στους 700°C για 15 λεπτά στη μέση του φούρνου.	123
Γράφημα 5.9: Απεικόνιση της αντίστασης επαφής στις δύο διεπιφάνειες και την μέση τιμή αντίστασης επαφής για το δείγμα 8, το οποίο έχει συγκολληθεί στους 730°C για 15 λεπτά στη μέση του φούρνου.	124
Γράφημα 5.10: Απεικόνιση της αντίστασης επαφής στις δύο διεπιφάνειες και την μέση τιμή αντίστασης επαφής για το δείγμα 12, το οποίο έχει συγκολληθεί στους 720°C για 15 λεπτά πίσω από τη πόρτα του φούρνου.	126
Γράφημα 5.11: Απεικόνιση της αντίστασης επαφής στις δύο διεπιφάνειες και την μέση τιμή αντίστασης επαφής για το δείγμα 13, το οποίο έχει συγκολληθεί στους 710°C για 15 λεπτά πίσω από τη πόρτα του φούρνου.	127
Γράφημα 5.12: Απεικόνιση της αντίστασης επαφής στις δύο διεπιφάνειες και την μέση τιμή αντίστασης επαφής για το δείγμα 14, το οποίο έχει συγκολληθεί στους 730°C για 15 λεπτά πίσω από τη πόρτα του φούρνου.	127
Γράφημα 5.13: Απεικόνιση της αντίστασης επαφής στη μία διεπιφάνεια και την μέση τιμή αντίστασης επαφής για το δείγμα 15, το οποίο έχει συγκολληθεί στους 730°C για 15 λεπτά πίσω από τη πόρτα του φούρνου.	128
Γράφημα 5.14: Απεικόνιση της αντίστασης επαφής στις δύο διεπιφάνειες και την μέση τιμή αντίστασης επαφής για το δείγμα 16, το οποίο έχει συγκολληθεί στους 730°C για 15 λεπτά πίσω από τη πόρτα του φούρνου.	128
Γράφημα 6.1: Η ηλεκτρική ισχύς ως προς τη θερμοκρασία της θερμής πλάκας για τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια 4.	161
Γράφημα 6.2: Ηλεκτρικής ισχύος ως προς τη θερμοκρασία της θερμής πλάκας για τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια του μοντέλου στο COMSOL Multiphysics 5.2.	163
Γράφημα 6.3: Η ηλεκτρικής ισχύος ως προς τη θερμοκρασία της θερμής πλάκας για τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια 5.	169
Γράφημα 6.4: Η ηλεκτρική ισχύς ως προς τη θερμοκρασία της θερμής πλάκας για τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια 6.	173
Γράφημα 6.5: Η ηλεκτρική ισχύος ως προς τη θερμοκρασία της θερμής πλάκας για τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια 7.	178
Γράφημα 6.6: Απεικόνιση του γραφήματος ηλεκτρικής ισχύος ως προς τη θερμοκρασία της θερμής πλάκας για της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με οκτώ ζεύγη θερμοστοιχείων του μοντέλου στο COMSOL Multiphysics 5.2.	180

Πίνακες

Πίνακας 1.1: Παρουσιάζονται τα ποσοστά χρήσης των μεθόδων της παραγωγής ενέργειας. [14]	20
Πίνακας 2.1: Τάση ανοικτού κυκλώματος, πυκνότητα ισχύος και μέγιστη απόδοση μετατροπής γεννήτριας από [57].	37
Πίνακας 2.2: Μέγιστη ισχύς, πυκνότητα ισχύος και μέγιστη απόδοση μετατροπής γεννήτριας από [63].	39
Πίνακας 2.3: Πυκνότητα ισχύος και μέγιστη απόδοση μετατροπής γεννήτριας από [62].	40
Πίνακας 2.4: Ηλεκτρικό ρεύμα, τάση ανοικτού κυκλώματος, μέγιστη ισχύς, πυκνότητα ισχύος και μέγιστη απόδοση μετατροπής για θερμοκρασιακή διαφορά $\Delta T=476^{\circ}\text{C}$ γεννήτριας από [54].	41
Πίνακας 2.5: Μέγιστη ισχύς, πυκνότητα ισχύος και μέγιστη απόδοση μετατροπής γεννήτριας από [65].	42
Πίνακας 2.6: Παρουσιάζονται όλα τα χαρακτηριστικά και αποτελέσματα των θερμοηλεκτρικών γεννητριών της βιβλιογραφικής ανασκόπησης.	43
Πίνακας 3.1: Παρουσιάζονται οι γεωμετρικές τιμές των διαφόρων στοιχείων που απαρτίζουν τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια με τα δύο ζεύγη θερμοστοιχείων.	46
Πίνακας 3.2: Παρουσιάζονται οι τιμές της μέσης αντίστασης επαφής για κάθε τύπου ημιαγωγών p&n τύπου.....	48
Πίνακας 3.3: Παρουσιάζονται τα δεδομένα που αφορούν τις τιμές της εξωτερικής αντίστασης φορτίου, την ένταση του ρεύματος, τη τάση και το αποτέλεσμα που αντικατοπτρίζει την ηλεκτρική ισχύ για τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια με τα δύο ζεύγη θερμοστοιχείων.	52
Πίνακας 3.4: Παρουσιάζονται τα δεδομένα που αφορούν τις τιμές της θερμοκρασίας της θερμής μεριάς, της έντασης του ρεύματος, της τάσης και το αποτέλεσμα που αντικατοπτρίζει την ηλεκτρική ισχύ για τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια με τα δύο ζεύγη θερμοστοιχείων.	54
Πίνακας 3.5: Παρουσιάζονται οι γεωμετρικές τιμές των διαφόρων στοιχείων που απαρτίζουν τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια με τα οκτώ ζεύγη θερμοστοιχείων.....	57
Πίνακας 3.6: Παρουσιάζονται τα δεδομένα που αφορούν τις τιμές της εξωτερικής αντίστασης φορτίου, της έντασης του ρεύματος, της τάσης και το αποτέλεσμα που αντικατοπτρίζει την ηλεκτρική ισχύ για τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια με τα οκτώ ζεύγη θερμοστοιχείων.	59
Πίνακας 3.7: Παρουσιάζονται τα δεδομένα που αφορούν τις τιμές της θερμοκρασίας της θερμής μεριάς, την ένταση του ρεύματος, τη τάση και το αποτέλεσμα που αντικατοπτρίζει την ηλεκτρική ισχύ για τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια με τα οκτώ ζεύγη θερμοστοιχείων.	62

Πίνακας 3.8: Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ηλεκτρικής ισχύος για κάθε μια εξωτερική αντίσταση για τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια του άρθρου.....	67
Πίνακας 3.9: Παρουσιάζονται τα δεδομένα που αφορούν τις τιμές της θερμοκρασίας της θερμής μεριάς και το αποτέλεσμα που αντικατοπτρίζει την ηλεκτρική ισχύ για τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια του άρθρου.....	68
Πίνακας 3.10: Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της θερμοηλεκτρικής γεννήτρια του άρθρου [53] και της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας της παρούσας εργασίας για διαφορά θερμοκρασίας $\Delta T=400^{\circ}\text{C}$ και $R_{\text{extr}} = 65\text{m}\Omega$	71
Πίνακας 3.11: Παρουσιάζεται η τιμή της τυπικής απόκλισης μεταξύ της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας του άρθρου και της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας της παρούσας εργασίας προς πιστοποίηση.	72
Πίνακας 4.1: Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση [2] & [20], η ειδική θερμική αγωγιμότητα [2] & [6] και η θερμοκρασία τήξης του κεραμικού Alumina oxide [9] και Fiberglass [20].....	75
Πίνακας 4.2: Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση [7], πυκνότητα [8] και θερμοκρασία τήξης [10] του χαλκού, του χρυσού και του αργυρού.	76
Πίνακας 4.3: Η ειδική θερμική αγωγιμότητα, η θερμική αντίσταση, η πυκνότητας και το εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας της θερμικής πάστας grizzly kryonaut. [47]	77
Πίνακας 5.1: Λίστα με τις διαδικασίες που απαιτούνται να πραγματοποιηθούν για τη προετοιμασία θερμοστοιχείων.	87
Πίνακας 5.2: Οι μάζες των μεταλλικών σκονών που χρησιμοποιούνται για σύνθεση υλικού half-Heusler τύπου p.....	88
Πίνακας 5.3: Οι μάζες των μεταλλικών σκονών που χρησιμοποιούνται για σύνθεση υλικού half-Heusler τύπου n.....	88
Πίνακας 5.4: Οι τιμές των παραμέτρων γωνιακής ταχύτητας, χρόνου άλεσης, χρόνου παύσης, αριθμός επαναλήψεων και επιλογής αντίθετης κίνησης στον μηχανισμό planetary ball milling P6 για υλικά p και n τύπου.....	89
Πίνακας 5.5: Παρουσιάζονται οι τιμές της μάζας που τοποθετείται στις μήτρες γραφίτη για παραγωγής θερμοηλεκτρικού δισκίου και οι τιμές του συγκεκριμένου ύψους.....	90
Πίνακας 5.6: Παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που ορίζονται σε ηλεκτρονικό ρυθμιστή του φούρνου και επηρεάζουν τη λειτουργία στερεάς πυροσυσσωμάτωσης...	91
Πίνακας 5.7: Παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που ορίζονται στον ρυθμιστή του Accutom – 100, κατά τη διαδικασία μείωσης ύψους των δισκίων p και n τύπου. ..	94
Πίνακας 5.8: Τα αποτελέσματα μείωσης ύψους για τα δισκία half-Heusler p-τύπου με την ελάχιστη και μέγιστη διακύμανση πριν και μετά τη διαδικασία μείωσης ύψους. ...	96
Πίνακας 5.9: Τα αποτελέσματα μείωσης ύψους για τα δισκία half-Heusler n-τύπου με την ελάχιστη και μέγιστη διακύμανση πριν και μετά τη διαδικασία μείωσης ύψους. ...	97

Πίνακας 5.10: Παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που ορίζονται στον ρυθμιστή του Accutom – 100, κατά τη διαδικασία κοπής των δισκίων p και n τύπου σε σχήμα κύβου.	105
Πίνακας 5.11: Παρουσιάζονται οι αριθμοί των κύβων που έχει ληφθεί από κάθε δισκίο p – τύπου.....	105
Πίνακας 5.12: Παρουσιάζονται οι αριθμοί των κύβων που έχει ληφθεί από κάθε δισκίο n – τύπου.....	107
Πίνακας 5.13: Λίστα με τις διαδικασίες που απαιτούνται να πραγματοποιηθούν για τη μελέτη συγκόλλησης επαφών.	108
Πίνακας 5.14: Παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που ορίζονται στον controller του Accutom – 100, κατά τη διαδικασία κοπής των χάλκινων κομματιών.....	108
Πίνακας 5.15: Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μέσης αντίστασης επαφής για τα δοκίμια με θερμοστοιχεία p – τύπου.....	124
Πίνακας 5.16: Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μέσης αντίστασης επαφής για τα δοκίμια με θερμοστοιχεία n – τύπου.....	129
Πίνακας 5.17: Απεικόνιση των τιμών της μέσης αντίστασης επαφής για κάθε τύπου ημιαγωγών p&n τύπου.....	129
Πίνακας 6.1: Παρουσιάζονται οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες που κατασκευάστηκαν με τα διάφορα χαρακτηριστικά τους.	152
Πίνακας 6.2: Παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που ορίζονται στον ρυθμιστή του Accutom – 100, κατά τη διαδικασία κοπής των εμβόλων γραφίτη.	155
Πίνακας 6.3: Δεδομένα θερμοκρασιών θερμής/ψυχρής πλάκας, έντασης ρεύματος, τάσης και το αποτέλεσμα της ηλεκτρικής ισχύς για τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια 4.	160
Πίνακας 6.4: Η τιμή της μέγιστης πυκνότητας ισχύος που λαμβάνεται από τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια 4.	162
Πίνακας 6.5: Αποτελέσματα μοντέλου θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με 2 ζεύγη θερμοστοιχείων για θερμοκρασία ψυχρής πλάκας στους 321.15 K και εξωτερική αντίσταση 1Ωhm.....	163
Πίνακας 6.6: Η τιμή της τυπικής απόκλισης μεταξύ της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας του μοντέλου και της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 4.	164
Πίνακας 6.7: Δεδομένα θερμοκρασιών θερμής/ψυχρής πλάκας, έντασης ρεύματος, τάσης και το αποτέλεσμα της ηλεκτρικής ισχύς για τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια 5.	168
Πίνακας 6.8: Η τιμή της μέγιστης πυκνότητας ισχύος που λαμβάνεται από τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια 5.	169
Πίνακας 6.9: Η τιμή της τυπικής απόκλισης μεταξύ της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας του μοντέλου και της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 5.	170

Πίνακας 6.10: Δεδομένα θερμοκρασιών θερμής/ψυχρής πλάκας, έντασης ρεύματος, τάσης και το αποτέλεσμα της ηλεκτρικής ισχύς για τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια 6.	172
Πίνακας 6.11: Η τιμή της μέγιστης πυκνότητας ισχύος που λαμβάνεται από τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια 6.	173
Πίνακας 6.12: Η τιμή της τυπικής απόκλισης μεταξύ της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας του μοντέλου και της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 6.	174
Πίνακας 6.13: Δεδομένα θερμοκρασιών θερμής/ψυχρής πλάκας, έντασης ρεύματος, τάσης και το αποτέλεσμα της ηλεκτρικής ισχύς για τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια 7.	178
Πίνακας 6.14: Η τιμή της μέγιστης πυκνότητας ισχύος που λαμβάνεται από τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια 7.	179
Πίνακας 6.15: Αποτελέσματα μοντέλου θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με οκτώ ζεύγη θερμοστοιχείων για θερμοκρασία ψυχρής πλάκας στους 348K, μέγιστη τιμή θερμής πλάκας 573K και εξωτερική αντίσταση 9Ωhms.	180
Πίνακας 6.16: Η τιμή της τυπικής απόκλισης μεταξύ της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας του μοντέλου και της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 7.	181
Πίνακας 6.17: Οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες που χαρακτηρίστηκαν και τα διάφορα χαρακτηριστικά τους.	183

Κεφάλαιο 1

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο 1 παρουσιάζεται η ανασκόπηση της βιβλιογραφίας για τα θερμοηλεκτρικά φαινόμενα και τις θερμοηλεκτρικές γεννήτριες. Γίνεται αναφορά στο θεωρητικό υπόβαθρο των θερμοηλεκτρικών γεννητριών. Συγκεκριμένα, εξηγείται η λειτουργία μιας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας όπως επίσης και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της. Κατόπιν, γίνεται εις βάθος εξήγηση του φαινομένου Seebeck, αναφέρονται τα υλικά των ημιαγωγών με τα οποία μπορεί να κατασκευαστεί μια θερμοηλεκτρική γεννήτρια και από τι επηρεάζεται η αστοχία μιας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας. Τέλος, παρουσιάζονται μερικές από τις πρακτικές εφαρμογές των θερμοηλεκτρικών γεννητριών μέχρι σήμερα.

1.1 Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας

Το φαινόμενο Seebeck ανακαλύφθηκε επίσημα από τον Thomas Seebeck το 1821, μέσω πειράματος όπου με τη χρήση φλόγας θέρμανε μια από τις συνδέσεις δύο συνδεδεμένων ανόμοιων μετάλλων. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μαγνητικού πεδίου και την περιστροφή βελόνας πυξίδας που είχε τοποθετηθεί κοντά σε αυτά τα μέταλλα. Αρχικά, το φαινόμενο αυτό ονομάστηκε φαινόμενο ηλεκτρομαγνητισμού, ωστόσο μετέπειτα παρατηρήθηκε πως δημιουργείται διαφορά δυναμικού, άρα και ηλεκτρικό ρεύμα, από την θερμαινόμενη σύνδεση και έτσι το φαινόμενο έγινε γνωστό ως φαινόμενο Seebeck.

Μια θερμοηλεκτρική γεννήτρια λειτουργεί βάση του φαινομένου Seebeck. Συγκεκριμένα, είναι μια συσκευή που αποτελείται από στερεούς ημιαγωγούς/θερμοστοιχεία που περιβάλλονται από δύο πλάκες. Τα θερμοστοιχεία έχουν τη δυνατότητα να μετατρέπουν τη διαφορά θερμοκρασίας (ΔT) και την μη-ωφέλιμη ροή θερμότητας, σε συνεχές ρεύμα (DC), το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές. Το φαινόμενο που παρατηρείται στις γεννήτριες κατά τη λειτουργία όπου η θερμοκρασιακή διαφορά μετατρέπεται σε χρήσιμη ηλεκτρική ενέργεια είναι το φαινόμενο του Seebeck (Seebeck effect).

Αρκετοί επιστήμονες προσπάθησαν να χρησιμοποιήσουν την θερμοηλεκτρική τεχνολογία για παραγωγή χρήσιμης ηλεκτρικής ισχύος σε πολλά είδη εφαρμογών. Μερικά πεδία εφαρμογών είναι η αεροναυπηγική, η αυτοκινητοβιομηχανία και η υβριδική τεχνολογία φωτοβολταϊκών μονάδων με θερμοηλεκτρικές γεννήτριες. Με την χρήση της θερμοηλεκτρικής τεχνολογίας σ' αυτές τις εφαρμογές, η ανθρωπότητα πραγματοποίησε μεγάλα βήματα ως προς την εξέλιξη της τεχνολογίας, καθώς η θερμική ενέργεια που διέφευγε προς το περιβάλλον, τώρα λαμβάνεται και αξιοποιείται με τη παραγωγή χρήσιμης ηλεκτρικής ισχύος.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στις θερμοηλεκτρικές γεννήτριες είναι ημιαγωγοί και πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται στοιχεία του περιοδικού πίνακα, τα οποία παρουσιάζουν καλές θερμοηλεκτρικές ιδιότητες. Η ανάπτυξη των υλικών για κατασκευή των ημιαγωγών είναι μια αργή και σταθερή διαδικασία. Μέχρι τώρα πολλά είδη θερμοηλεκτρικών υλικών έχουν κατασκευαστεί με αξιοσημείωτη αναφορά στο Bismuth-Telluride - Bi_2Te_3 , στα Clathrates, στα Skutterudites και στα half-Heusler. Παρ' όλα αυτά, η απόδοση μιας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με τα πιο πάνω υλικά είναι πολύ μικρή γι' αυτό και η εντατική έρευνα συνεχίζεται με την χρήση dopants για βελτίωση των θερμοηλεκτρικών τους ιδιοτήτων. Η συγκεκριμένη μεταπτυχιακή εργασία ασχολείται με την ανάπτυξη θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με τα θερμοηλεκτρικά υλικά half-Heusler.

Οι παράγοντες που εμπλέκονται στην ανάπτυξη μιας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με βάση τα υλικά half-Heusler ποικίλουν. Κάποιοι απ' αυτούς τους παράγοντες είναι το ίδιο το υλικό με τις ιδιότητες που κατέχει, η διαδικασία μείωσης ύψους και κοπής των θερμοστοιχείων, το υλικό επιμετάλλωσης των θερμοστοιχείων, η μέθοδος επιμετάλλωσης, η αντίσταση επαφής που επιτυγχάνεται στα θερμοστοιχεία p & n τύπου κατά τις διαδικασίες συγκόλλησης και μέτρησης αντίστασης επαφής των θερμοστοιχείων, η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των δύο πλακών της, αλλά και η μεθοδολογία που ακολουθείται για την κατασκευή/χαρακτηρισμό της.

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή θερμοηλεκτρικών γεννητριών μπορεί να διαφέρουν, καθώς η δυσκολία κατασκευής μεταβάλλεται ανάλογα με το αν κατασκευάζονται από αυτοματοποιημένη μηχανή ή από ανθρώπινο χέρι. Συνήθως χρησιμοποιούνται συγκολλητικές πάστες και συγκολλητικό μετάλλων (καλάι). Κατά την εκτέλεση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας χρησιμοποιείται συγκολλητική πάστα αργύρου και συγκολλητικό μέταλλο κασσιτέρου-χαλκού (lead Free).

Η εγκατάσταση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας, παρουσιάζει διαφορετική αξιολογία ανάλογα με την εφαρμογή στην οποία αξιοποιείται. Αυτό οφείλεται στην παρουσία διαφορετικών φορτίων, θερμικών και μηχανικών, στην ύπαρξη υγρασίας στον χώρο λειτουργίας, αλλά και σε ποια θερμοκρασία προορίζεται να λειτουργεί η θερμοηλεκτρική γεννήτρια. Γι' αυτό καθίσταστε πολύ σημαντικός ο σχεδιασμός της γεννήτριας, ανάλογα με το περιβάλλον λειτουργίας της.

Λαμβάνοντας υπόψη το φαινόμενο Seebeck, αλλά και της εμπειρίας που αποκτήθηκε από τους επιστήμονες, η διατήρηση της θερμοκρασιακής διαφοράς ανάμεσα στις πλάκες της γεννήτριας είναι πολύ σημαντική, όσο αφορά το κομμάτι της κατασκευής και εφαρμογής της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι με τη μείωση της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ των πλακών επέρχεται ανάλογη μείωση και στην απόδοση της γεννήτριας. Αντίθετα, στην περίπτωση μη ύπαρξης θερμοκρασιακής διαφοράς, τότε η γεννήτρια δεν παράγει ηλεκτρική ισχύ. Γι' αυτό το λόγο, αναπτύχθηκαν μέθοδοι ψύξης με την χρήση νερού, αέρα και άλλων ψυκτικών μέσων, όπως επίσης και μέθοδοι που χρησιμοποιούν άλλους μηχανισμούς απόρριψης θερμότητας όπως θερμικές πάστες και πτερύγια.

1.2 Θερμοηλεκτρική τεχνολογία

Θερμοηλεκτρική τεχνολογία είναι μια τεχνολογία φιλική στο περιβάλλον με πολλά πλεονεκτήματα και εφαρμογές. Η τεχνολογία αυτή προσελκύει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας τα τελευταία χρόνια λόγω της ικανότητας της να μετατρέπει την χαμένη θερμική ενέργεια σε ηλεκτρική.

Στην θερμοηλεκτρική τεχνολογία χρησιμοποιούνται ημιαγωγοί. Ως εκ τούτου, η μελέτη των θερμοηλεκτρικών υλικών αποτελεί πλέον σύγχρονο αντικείμενο έρευνας καθώς σχετίζεται άμεσα με την παραγωγή ενέργειας. [26]

1.3 Φαινόμενο Seebeck

Το φαινόμενο Seebeck πήρε το όνομά του από τον Thomas Seebeck, ο οποίος φαίνεται να το ανακάλυψε και να το διέδωσε πρώτος. Ωστόσο, πλέον οι ερευνητές θεωρούν πως το φαινόμενο Seebeck, ανακαλύφθηκε προ πολλού από τον Alessandro Volta.

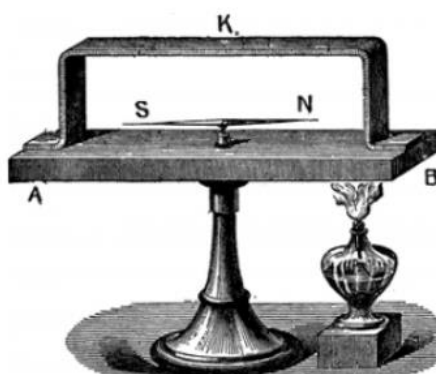
Ο Alessandro Volta μέσα από πειράματα που υλοποίησε, καλούπωσε μια σιδερένια δοκό σε σχήμα u (u-shape). Η διαδικασία του πειράματος ακολούθησε ως εξής. Αρχικά,

τοποθέτησε το ένα άκρο της δοκού σε ζεστό νερό με αποτέλεσμα να αυξηθεί η θερμοκρασία και να επικρατήσει ανισότητα θερμοκρασίας μεταξύ των δυο άκρων. Έπειτα ο Volta, σύνδεσε ηλεκτρικά τη δοκό με ένα πεθαμένο βατραχοπόδαρο. Ως αποτέλεσμα, το ηλεκτρικό ρεύμα κατάφερε να διαπεράσει μέσα από τον βατραχοπόδαρο, καθώς φάνηκε πως οι μύες του συσπάστηκαν. Το συγκεκριμένο πείραμα που υλοποιήθηκε το 1794, θεωρείται ως η πρώτη ένδειξη του φαινομένου Seebeck.

Είκοσι επτά χρόνια αργότερα, το 1821, ο Thomas Seebeck, ανακάλυψε πως όταν υπάρχουν δυο συνδεδεμένα ανόμοια μέταλλα, εκ των οποίων το ένα θερμαίνεται, έχουν την ικανότητα να περιστρέψουν μια βελόνα πυξίδας που βρίσκεται κοντά τους. Το φαινόμενο αυτό αρχικά ονομάστηκε, «φαινόμενο ηλεκτρομαγνητισμού». Έπειτα ανακαλύφθηκε πως η θερμή σύνδεση των μετάλλων ήταν αυτή που προκαλούσε την τάση [V], άρα και το ηλεκτρικό ρεύμα [A]. Το ρεύμα με τη σειρά του δημιουργούσε μαγνητικό πεδίο, μέσω του νόμου Ampere και γι' αυτό το λόγο περιστρεφόταν η βελόνα. Αυτό η παραγόμενη τάση λόγω της θέρμανσης της σύνδεσης έγινε γνωστό ως φαινόμενο Seebeck. [15]



Εικόνα 1.1: Απεικόνιση του Γερμανού φυσικού Thomas Johann Seebeck.



Εικόνα 1.2: Απεικόνιση της απόκλισης βελόνας πυξίδας λόγω παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος. [15]

Μέσω της τεχνικής του φαινομένου Seebeck είναι εφικτή η μέτρηση του ηλεκτρικού δυναμικού, το οποίο είναι άμεσα συνδεδεμένο με την μεταβολή της θερμοκρασιακής διαφοράς $-\Delta T$ [K] και το τύπο των μετάλλων που αποτελούν την ένωση. Κατά τη μέτρηση μικρών τιμών τάσης, παρουσιάζεται γραμμική απόκριση συναρτήσει της θερμοκρασίας

Με τη παροχή θερμότητας στη μεταλλική ένωση, τα δύο μέταλλα διεγείρονται και υπάρχει θερμοκρασιακή διαφορά. Λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας, οι φορείς φορτίου απομακρύνονται από θερμή μεριά λόγω υψηλής κινητικής ενέργειας και κατευθύνονται στην ψυχρή μεριά. Αυτό έχει ως συνέπεια την ανάπτυξη της τάσης Seebeck.

[1,11,13]

Εξίσωση Φαινομένου Seebeck:

$$\Delta V_{\text{seebeck}} = S_{\text{ab}} * \Delta T \quad \text{Εξ. 1.1}$$

Όπου:

$\Delta V_{\text{seebeck}}$: τάση Seebeck [V]

S_{ab} : συνδυασμένος συντελεστής Seebeck [V/K]

ΔT : θερμοκρασιακή διαφορά [K]

Ο συνδυασμένος συντελεστής Seebeck μπορεί να λάβει είτε θετικές είτε αρνητικές τιμές. Αναλυτικά, όταν υπάρχει θετική τιμή Seebeck, τότε η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος έχει την ίδια φορά μ' αυτή της θερμότητας, ενώ αν υπάρχει αρνητική τιμή το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει σε αντίθετη φορά με τη θερμότητα.

Ισχύει η εξίσωση:

$$S_{\text{ab}} = S_{\text{a}} - S_{\text{b}} \quad \text{Εξ. 1.2}$$

Όπου:

S_{ab} : συνδυασμένος συντελεστής Seebeck [V/K]

S_{a} : συντελεστής Seebeck για μέταλλο 'Α' [V/K]

S_{b} : συντελεστής Seebeck για μέταλλο 'Β' [V/K]

Ο συντελεστής Seebeck για κάθε μέταλλο είναι σταθερός και διαφορετικός.

1.4 Τι είναι θερμοηλεκτρικές διατάξεις

Θερμοηλεκτρικές διατάξεις χαρακτηρίζονται ως διατάξεις στερεάς κατάστασης, ενώ παράλληλα έχουν την ικανότητα να μετατρέπουν τη θερμική ενέργεια σε ηλεκτρική. Αυτός είναι ο κύριος λόγος για τον οποίο χρησιμοποιούνται σε εξειδικευμένες εφαρμογές ψύξης ή ως γεννήτριες ρεύματος. Τα τελευταία χρόνια, οι σύγχρονες ανάγκες επενδύουν σε εναλλακτικές μορφές ενέργειας. Οι θερμοηλεκτρικές διατάξεις παρέχουν τη δυνατότητα για σημαντικές εφαρμογές, καθώς θα μετατρέπουν την θερμική ενέργεια που εκλύεται στο περιβάλλον σε ηλεκτρική. [15]

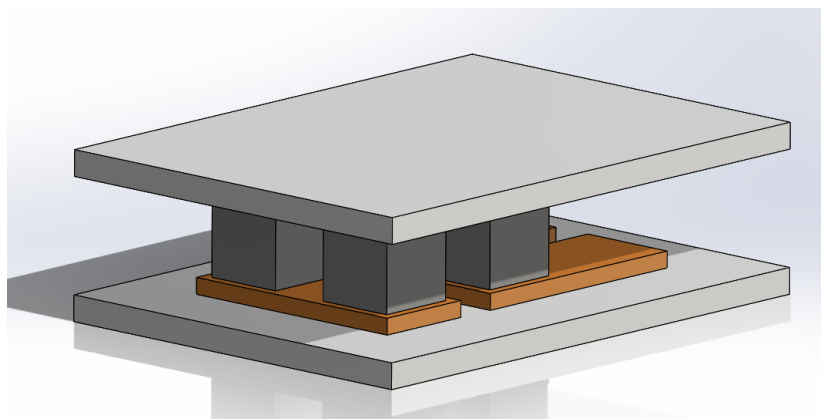
1.5 Τι είναι μια ενότητα (module) θερμοηλεκτρικής τεχνολογίας

Για τη δημιουργία μιας μονάδας (module) θερμοηλεκτρικής τεχνολογίας, απαιτείται η χρήση αρκετών p-τύπου και n-τύπου ζευγών θερμοστοιχείων, τα οποία συνδέονται ηλεκτρικά σε σειρά ή παράλληλα. Μέσω αυτής της σύνδεσης παράγεται η επιθυμητή ηλεκτρική ισχύος ή θερμοκρασιακή διαφορά. Τα θερμοστοιχεία τοποθετούνται μεταξύ δύο παράλληλων κεραμικών πλακών. Οι πλάκες αυτές απαρτίζονται από δομική ακαμψία, μια επίπεδη επιφάνεια για τοποθέτηση και ένα διηλεκτρικό στρώμα για την αποφυγή ηλεκτρικών βραχυκυκλωμάτων. [15]

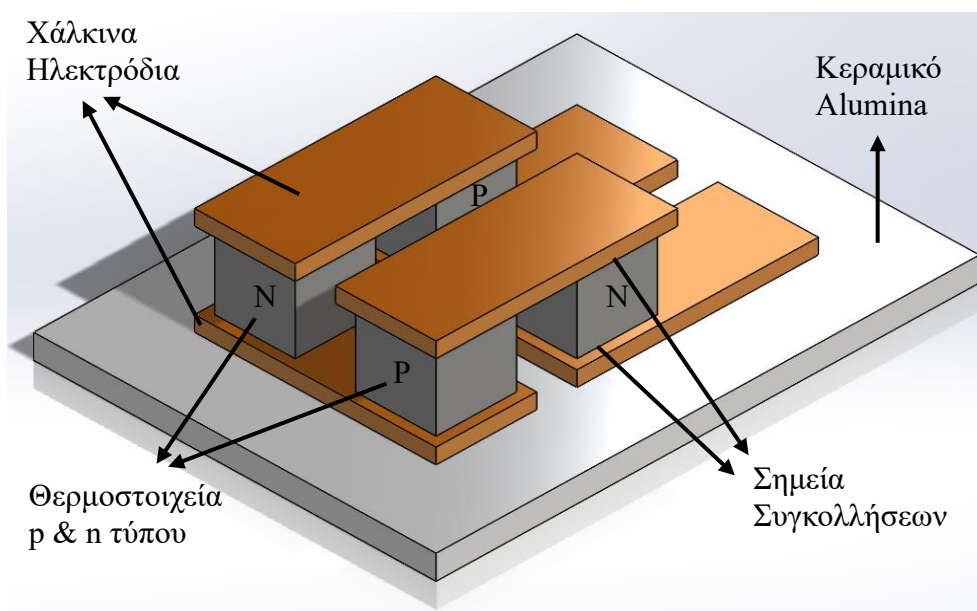
1.6 Θερμοηλεκτρική γεννήτρια – TEG

Μια θερμοηλεκτρική γεννήτρια είναι μια συσκευή που αποτελείται από στερεούς ημιαγωγούς που περιβάλλονται από δύο πλάκες κεραμικού αλουμίνας. Οι ημιαγωγοί έχουν τη δυνατότητα να μετατρέπουν τη διαφορά θερμοκρασίας (ΔT) και την μη-ωφέλιμη ροή θερμότητας, σε συνεχές ρεύμα (DC), το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές. Το φαινόμενο που παρατηρείται στις γεννήτριες κατά τη λειτουργία όπου η θερμοκρασιακή διαφορά μετατρέπεται σε χρήσιμη ηλεκτρική ενέργεια είναι το φαινόμενο του Seebeck (Seebeck effect). Το παραγόμενο δυναμικό (V) οδηγεί σε ροή ρεύματος, παράγοντας τελικά χρήσιμη ισχύ. Ωστόσο, η τεχνολογία των θερμοηλεκτρικών γεννητριών έχει πολύ χαμηλή απόδοση 4-6%, αλλά ταυτόχρονα είναι πολύ αξιόπιστη καθώς δεν έχει κινούμενα μέρη. Αυτό απευθύνεται σε εφαρμογές χαμηλής ισχύος, εφαρμογές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλές θερμοηλεκτρικές σε κάποια συστοιχία και σε εφαρμογές που απαιτείται παραγωγή χρήσιμης ισχύος για παρατεταμένες χρονικές περιόδους, όπου οι συμβατικές μπαταρίες δεν μπορούν.

Η θερμοηλεκτρική γεννήτρια έχει αρκετά ζεύγη θερμοστοιχείων ως βασική δομή της. Κάθε ζεύγος θερμοστοιχείων αποτελείται από έναν ημιαγωγό τύπου p και έναν ημιαγωγό τύπου n. Αυτοί οι δύο ημιαγωγοί συνδέονται σε σειρά με ένα αγώγιμο μεταλλικό ηλεκτρόδιο, συνήθως από χαλκό. Κάθε ζεύγος θερμοστοιχείων συνδέεται ηλεκτρικά σε σειρά με το παρακείμενο θερμοστοιχείο, ενώ κάθε ζεύγος θερμοστοιχείων συνδέεται θερμικά παράλληλα με το παρακείμενο θερμοστοιχείο (Βλέπε εικόνα 1.4). Οι περισσότερες θερμοηλεκτρικές γεννήτριες έχουν τον ίδιο αριθμό ημιαγωγών τύπου p και n. [15,19,16]



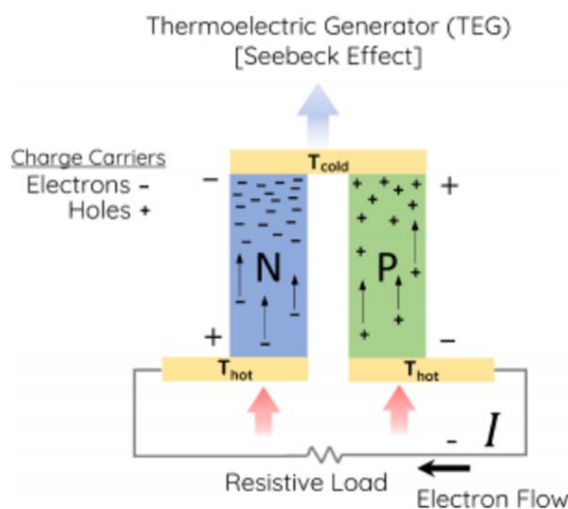
Εικόνα 1.3: Απεικόνιση μια ολοκληρωμένης θερμοηλεκτρικής γεννήτριας.



Εικόνα 1.4: Απεικόνιση μιας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με τα μέρη που την απαρτίζουν.

1.7 Λειτουργία θερμοηλεκτρικής γεννήτριας

Με την ύπαρξη διαφοράς θερμοκρασίας, οι φορείς φορτίου διαχέονται από την θερμή μεριά στην ψυχρή. Πιο αναλυτικά, αυτό εκφράζεται ως η έντονη κίνηση των φορέων φορτίου εσωτερικά των ημιαγωγών, αφού πρώτα φορτίστηκαν λόγω της θερμοκρασιακής διαφοράς. Οι φορείς φορτίου συνεχίζουν να διαχέονται έως ότου η ηλεκτροστατική απόθεση και διάχυση φτάσει σε ισορροπία. Αυτή η ισορροπία έχει ως αποτέλεσμα τη συσσώρευση φορέων φορτίου σε μία από τις δύο πλάκες της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας. Συγκεκριμένα, οι φορείς φορτίου διαχέονται από τη θερμή μεριά της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας στην ψυχρή μεριά, δημιουργώντας μια διαφορά δυναμικού (ΔV) στα άκρα της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας. Το συμπέρασμα που πρέπει να γίνει κατανοητό είναι ότι, η ισχύς που παράγεται από τη γεννήτρια είναι ανάλογη με τη διαφορά θερμοκρασίας.



Εικόνα 1.5: Απεικόνιση της κίνησης των φορέων φορτίου και της κίνησης του συνεχούς ρεύματος μέσω μιας εξωτερικής αντίστασης όταν εφαρμόζεται θερμότητα στην θερμή μεριά ενός θερμοστοιχείου. [15]

Η θερμοκρασία λειτουργίας μιας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας καθορίζεται από το υλικό του ημιαγωγού, ειδικά τη θερμοκρασία τήξης του υλικού. Ωστόσο, ένας άλλος ρόλος που καθορίζει τη θερμοκρασία λειτουργίας είναι η θερμοκρασία τήξης των υλικών που περιβάλλουν τους ημιαγωγούς και των υλικών που συνδέουν τους ημιαγωγούς με τις πλάκες και τα διάφορα άλλα εξαρτήματα που αποτελούν τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια. [15,19,16]

1.8 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα TEGs

1.8.1 Πλεονεκτήματα

Αξιοπιστία:

Οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες είναι συσκευές στερεάς κατάστασης χωρίς κινούμενα μέρη. Αυτό τις καθιστά εξαιρετικά ανθεκτικές στη φθορά και αυξάνει την αξιοπιστία της συσκευής.

Θόρυβος:

Ο έξυπνος σχεδιασμός καθιστά τη λειτουργία της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας εντελώς αθόρυβη.

Αέρια θερμοκηπίου:

Σε αντίθεση με άλλες τεχνολογίες μετατροπής ισχύος, οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες δεν απαιτούν αέρια θερμοκηπίου για να λειτουργήσουν αφού δεν περιορίζονται σε καύση συγκεκριμένου καύσιμου για να λάβουν την «χαμένη» θερμότητα και να τη χρησιμοποιήσουν για την παραγωγή της χρήσιμης ισχύος, σε αντίθεση με άλλες τεχνολογίες.

Επεκτασιμότητα:

Οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες μπορούν να σχεδιαστούν για να έχουν παραγόμενη χρήσιμη ισχύ μικρότερη από microwatt ή μεγαλύτερη από kilowatt. Το γεγονός αυτό τις καθιστά ιδανικές για μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών.

Κατεύθυνση λειτουργίας:

Η θερμοηλεκτρική γεννήτρια μπορεί να λειτουργήσει προς οποιαδήποτε κατεύθυνση. Αντίθετα, ορισμένες τεχνολογίες μετατροπής ενέργειας είναι ευαίσθητες στην κατεύθυνση της κίνησης σε σχέση με τη βαρύτητα.

Δυνάμεις επιτάχυνσης (G-forces):

Σε αντίθεση με άλλες τεχνολογίες μετατροπής ενέργειας, οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες λειτουργούν χωρίς ή με υψηλές δυνάμεις επιτάχυνσης. Το γεγονός αυτό τις καθιστά λειτουργήσιμες ακόμα και σε διαστημικές εφαρμογές.

Μετατροπή ενέργειας:

Οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες μετατρέπουν τη θερμότητα απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια. Πολλές τεχνολογίες μετατροπής ενέργειας απαιτούν ένα ενδιάμεσο βήμα για να επιτρέψουν τη μετατροπή της θερμότητας σε ηλεκτρική ενέργεια. Κάθε στάδιο μετατροπής ενέργειας συνοδεύεται από απώλειες. Με την άμεση μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια, η τεχνολογία αυτή καθίσταται λιγότερο μηχανική από άλλες τεχνολογίες μετατροπής ενέργειας και επομένως πιο αξιόπιστη.

Μέγεθος:

Η θερμοηλεκτρική γεννήτρια μπορεί να κατασκευαστεί με πολύ συμπαγές μέγεθος. Αυτό τη καθιστά ιδανική επιλογή για μια ποικιλία εφαρμογών, καθώς προσφέρει μεγάλη ευελιξία σχεδιασμού.

[15]

1.8.2 Μειονεκτήματα των θερμοηλεκτρικών γεννητριώνΑπόδοση:

Οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες είναι λιγότερο αποδοτικές από άλλες τεχνολογίες μετατροπής ενέργειας. Αυτό σημαίνει ότι για την ίδια παροχή θερμική ενέργειας, οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες παράγουν λιγότερη ενέργεια από άλλες τεχνολογίες μετατροπής ενέργειας. Για αυτό τον λόγο οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές για να μετατρέπουν την «χαμένη» θερμότητα, δηλαδή αυτή που εκλύεται στο περιβάλλον, σε ηλεκτρική ισχύ.

Κόστος:

Οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες έχουν υψηλότερο αρχικό κόστος ανά Watt ηλεκτρικής εξόδου από άλλες τεχνολογίες μετατροπής ισχύος, ανάλογα με την εφαρμογή. Αλλά το συνολικό κόστος ζωής ανά ισχύ μπορεί να είναι χαμηλότερο. Επειδή το αρχικό κόστος μιας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας αποσβένεται από τη μεγάλη διάρκεια ζωής και την έλλειψη συντήρησης. Ως εκ τούτου, το συνολικό κόστος ζωής ανά Watt ισχύος για θερμοηλεκτρικές γεννήτριες είναι συνήθως χαμηλότερο για πολλές εφαρμογές σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες μετατροπής ισχύος.

Τεχνογνωσία:

Η σωστή χρήση των θερμοηλεκτρικών γεννητριών στην εφαρμογή απαιτεί τεχνογνωσία σχεδιασμού και μηχανικής. Λόγω της έλλειψης τεχνογνωσίας σχεδιασμού και μηχανικής από πολλούς ανθρώπους, αυτές οι γεννήτριες αξιοποιούνται λανθασμένα σε πολλές εφαρμογές. Εάν χρησιμοποιηθούν εσφαλμένα, οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες γίνονται ακόμη λιγότερο αποδοτικές και αυτό εμποδίζει την ευρεία χρήση τους.

[15]

1.9 Υλικά Ημιαγωγών για Κατασκευή Θερμοηλεκτρικών Γεννητριών

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή θερμοηλεκτρικών γεννητριών είναι ημιαγωγοί τύπου p και n. Συγκεκριμένα ονομάζονται θερμοηλεκτρικά υλικά γιατί έχουν καλές θερμοηλεκτρικές ιδιότητες και η τεχνολογία των υλικών των θερμοηλεκτρικών γεννητριών εξελίσσεται πολύ αργά αλλά σταθερά. Τα υλικά που παρουσιάζουν καλές θερμοηλεκτρικές ιδιότητες κραματοποιούνται μεταξύ τους με στόχο την βελτιστοποίηση των ιδιοτήτων τους, την αύξηση της απόδοσης τους και την βελτίωση της θερμοηλεκτρικής λειτουργίας τους – zT. [5]

Στο εμπόριο, τα δημοφιλέστερα θερμοηλεκτρικά υλικά είναι το Bismuth Telluride - Bi_2Te_3 με τιμή zT γύρω στο 1 για θερμοκρασίες κατώτερες των 500K, τα Lead Telluride – PbTe που χρησιμοποιούνται σε συνθήκες όπου οι θερμοκρασίες λειτουργίας κυμαίνονται από 600 μέχρι 800 βαθμούς Κέλβιν και παρουσιάζουν τιμή zT γύρω στο 1 και τέλος το κράμα Silicon Germanium – SiGe για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 900 βαθμών Κέλβιν. [5, 24]

Άλλη οικογένεια θερμοηλεκτρικών υλικών είναι τα phonon-glass electron crystals – PGECs. Τα υλικά αυτά παρουσιάζουν χαμηλή θερμική αγωγιμότητα σαν αυτή του πλέγματος γυαλιού και ψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα σαν αυτή των κρυστάλλων. Δυο αντιπροσωπευτικές κλάσεις αυτή της οικογένειας είναι τα θερμοηλεκτρικά υλικά skutterudites και clathrates. Όσο αφορά τα skutterudites, πραγματοποιείται έρευνα όσο αφορά το δυναμικό παραγωγής ισχύος σε θερμοκρασίες από 500 – 900K. Για τα clathrates, παρουσιάζουν χαμηλή θερμική αγωγιμότητα σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος. [5]

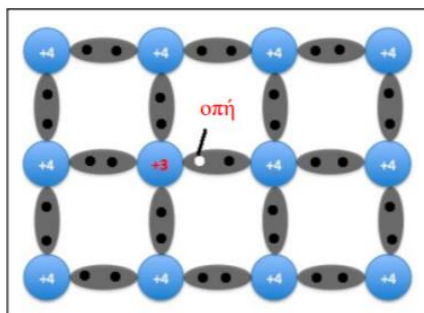
1.10 Ημιαγωγοί

1.10.1 Ημιαγωγοί Τύπου p

Σε ένα καθαρό ημιαγωγό πυριτίου – Si ή γερμανίου – Ge, το κάθε άτομο χρησιμοποιεί τα 4 ηλεκτρόνια σθένους για τον σχηματισμό ομοιοπολικών δεσμών με άλλα γειτονικά άτομα. Πιο συγκεκριμένα, ο κάθε πυρήνας μαζί με τα ηλεκτρόνια του είναι περικυκλωμένος από 4 ηλεκτρόνια σθένους και έχει συνολικό φορτίο +4. Σε περίπτωση αντικατάστασης του πλέγματος ενός ατόμου από πυρίτιο ή από γερμάνιο με ένα άλλο άτομο όπως αυτά του βορίου – B ή του γάλλιου – Ga, τα οποία έχουν τρία

ηλεκτρόνια σθένους, τότε επέρχεται αλλαγή στην ισορροπία των ηλεκτρονίων και των οπών. Αυτή η διατάραξη μπορεί να συμβάλει τρία ηλεκτρόνια σθένους αφήνοντας μια οπή, την οποία θα καλύψει ένα άλλο ηλεκτρόνιο του πλέγματος. Το άτομο που προστίθεται και αντικαθιστά ένα άλλο άτομο κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, ονομάζεται αποδέκτης.

Ο ημιαγωγός στον οποίο γίνεται η πρόσμιξη από ένα αποδέκτη, δηλαδή υλικό το οποίο έχει περίσσεια οπών ονομάζεται ημιαγωγός τύπου $-p$. Συγκεκριμένα ο ημιαγωγός είναι θετικός, μιας και οι οπές φέρουν θετικό φορτίο. Σε ένα ημιαγωγό τύπου p , το ηλεκτρικό ρεύμα μεταφέρεται κυρίως από τις οπές, οι οποίες υπερτερούν σε αριθμό από τα ηλεκτρόνια. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι, το συνολικό φορτίο του ημιαγωγού δεν αλλάζει, δηλαδή παραμένει ουδέτερο. [5]



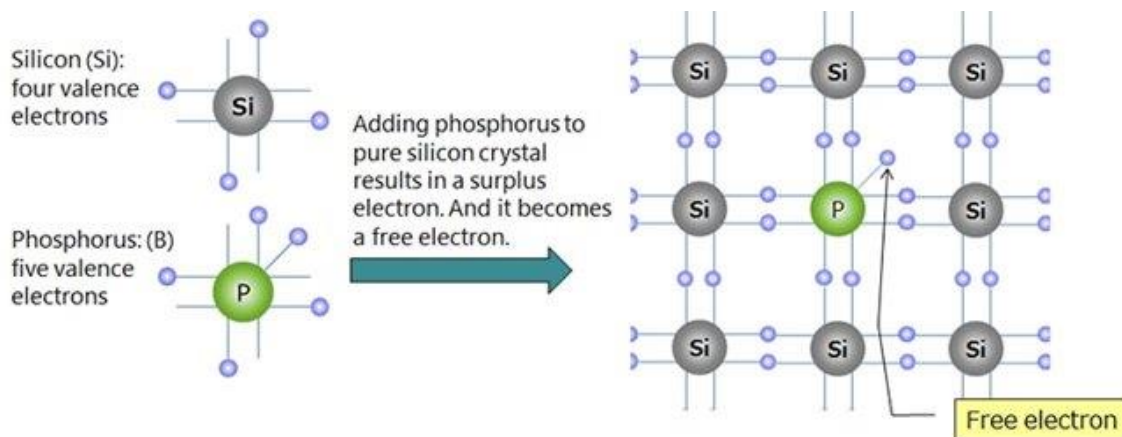
Εικόνα 1.6: Απεικόνιση της αντικατάστασης ενός ατόμου με αριθμό ηλεκτρονίων σθένους 4 ($4e^-$) με ένα άτομο με αριθμό ηλεκτρονίων σθένους 3 ($3e^-$), με αποτέλεσμα της δημιουργίας ημιαγωγού p – τύπου. [5]

1.10.2 Ημιαγωγοί Τύπου n

Σε ένα καθαρό ημιαγωγό πυριτίου – Si ή γερμανίου – Ge, του οποίου τα άτομα έχουν τέσσερα ηλεκτρόνια σθένους, γίνεται αντικατάσταση στα άτομα του πλέγματος του από άτομα τα οποία έχουν πέντε ηλεκτρόνια σθένους. Αυτά τα άτομα προέρχονται από αρσενικό – As ή από φώσφορο – P. Με την αντικατάσταση αυτή διαταράσσεται η ισορροπία μεταξύ ηλεκτρονίων και οπών. Ως εκ τούτου, επέρχεται η ύπαρξη ενός πλεονάζων ηλεκτρονίου, το οποίο βρίσκεται αδέσμευτο στο πλέγμα. Το άτομο που προστίθεται και αντικαθιστά ένα άλλο άτομο κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, ονομάζεται δότης.

Ο ημιαγωγός στον οποίο γίνεται η πρόσμιξη από ένα δότη, δηλαδή υλικό το οποίο έχει περίσσεια ηλεκτρονίων αποκαλείται ημιαγωγός τύπου $-n$. Συγκεκριμένα ο ημιαγωγός είναι αρνητικός, μιας και τα ηλεκτρόνια φέρουν αρνητικό φορτίο. Σε ένα

ημιαγωγό τύπου n, το ηλεκτρικό ρεύμα μεταφέρεται κυρίως από τα ηλεκτρόνια, τα οποία υπερτερούν σε αριθμό από τις οπές. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι, το συνολικό φορτίο του ημιαγωγού δεν αλλάζει, δηλαδή παραμένει ουδέτερο. [5]



Εικόνα 1.7: Απεικόνιση της αντικατάστασης ενός ατόμου με αριθμό ηλεκτρονίων σθένους 4 ($4e^-$) με ένα άτομο με αριθμό ηλεκτρονίων σθένους 5 ($5e^-$), με αποτέλεσμα της δημιουργίας ημιαγωγού n – τύπου. [5]

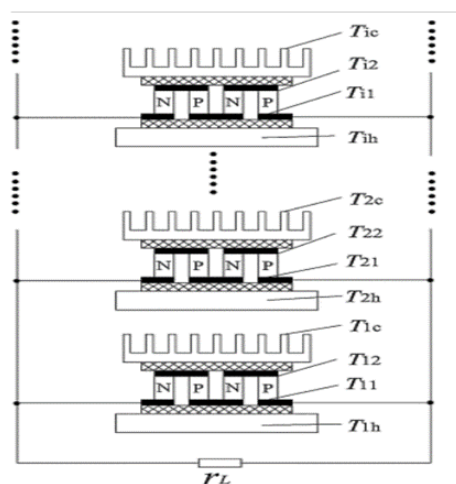
1.11 Τρόποι Διάταξης Κατασκευής Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας

Η θερμοηλεκτρική γεννήτρια αποτελείται από έναν αριθμό ζευγών θερμοηλεκτρικών στοιχείων τύπου P και N καθώς και αγωγή μεταλλικά ηλεκτρόδια, τα οποία ενώνουν τα θερμοζεύγη και επιπλέον δυο ηλεκτρικά μονωτικές κεραμικές πλάκες. Το συγκολλητικό υλικό που χρησιμοποιείται για την ένωση των θερμοστοιχείων πάνω στα αγωγή ηλεκτρόδια είναι απαραίτητο να αντέχει σε υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας, ώστε να μην χάνεται η επαφή μεταξύ ζευγών και αγωγίων ταινιών. Τα συνήθεις αγωγή ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται είναι κατασκευασμένα από χαλκό.

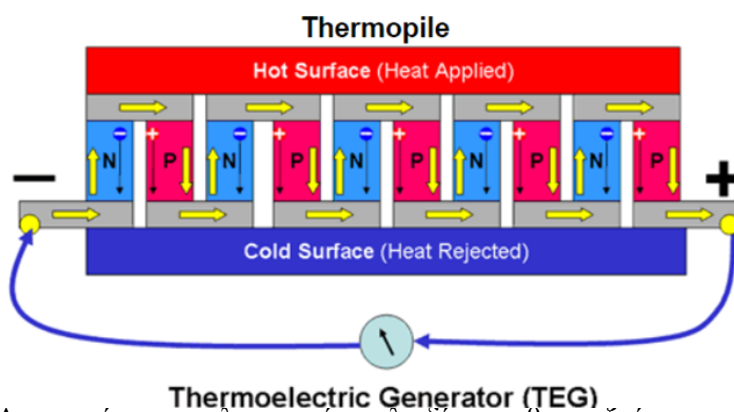
Οι κεραμικές πλάκες, μεταξύ των οποίων τοποθετούνται τα ζεύγη θερμοστοιχείων, προσδίδουν ηλεκτρική μόνωση στο σύστημα. Ωστόσο, δεν πρέπει να προσφέρουν θερμική μόνωση στο σύστημα, ώστε να πραγματοποιείται η βέλτιστη μεταφορά θερμότητας διαμέσου των θερμοστοιχείων. Για το λόγο αυτό, οι κεραμικές πλάκες που χρησιμοποιούνται πρέπει να έχουν μικρό πάχος γύρω στο 1mm.

Τα θερμοστοιχεία τοποθετούνται σε μια παράλληλη θερμική σύνδεση μεταξύ των δύο κεραμικών πλακών. Τα θερμοστοιχεία μπορούν να συνδεθούν ηλεκτρικά σε σειρά ή παράλληλα. Η σύνδεση των θερμοστοιχείων σε σειρά αυξάνει τη μέγιστη τάση εξόδου και η παράλληλη σύνδεση τους αυξάνει το μέγιστο ρεύμα εξόδου.

[33]



Εικόνα 1.8: Αναπαράσταση θερμοηλεκτρικών γεννητριών σε παράλληλη σύνδεση. [35]



Εικόνα 1.9: Αναπαράσταση ηλεκτρικής καλωδίωσης θερμοζεύγων σε σειρά. [34]

1.12 Βασικές Εξισώσεις Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας

Η δυνατότητα υπολογισμού διαφόρων μεταβλητών ενδιαφέροντος μιας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας πραγματοποιείται μέσω του υπολογισμού βασικών εξισώσεων. Αυτές οι εξισώσεις αφορούν μια θερμοηλεκτρική γεννήτρια σε ιδανικές συνθήκες, δηλαδή δεν υπάρχει επιρροή από το περιβάλλον, η θερμική ενέργεια μεταφέρεται μόνο από τη θερμή προς την ψυχρή μεριά και η εσωτερική αντίσταση της γεννήτριας ισούται με την εξωτερική αντίσταση φορτίου.

Οι βασικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται είναι οι ακόλουθες:

$$zT = \frac{s_{pn}^2 \cdot T_{ave}}{k_{pn} \cdot r_{pn}} \quad \text{Εξ. 1.3}$$

Όπου:

zT : αδιάστατος αριθμός θερμοηλεκτρικής λειτουργίας []

s_{pn} : συντελεστής Seebeck ημιαγωγών $\left[\frac{V}{K} \right]$

T_{ave} : μέση τιμή θερμοκρασίας θερμής και ψυχρής επιφάνειας [K]

r_{pn} : ειδική ηλεκτρική αντίσταση [$\Omega m * m$]

k_{pn} : ειδική θερμική αγωγιμότητα $\left[\frac{Watt}{m \cdot K} \right]$

$$R_I = R_L = \frac{r_{pn} \cdot H}{A} \quad \text{Εξ. 1.4}$$

Όπου:

R_I : εσωτερική αντίσταση γεννήτριας [Ωm]

R_L : αντίσταση φορτίου ή εξωτερική αντίσταση [Ωm]

r_{pn} : ειδική ηλεκτρική αντίσταση [$\Omega m * m$]

H : ύψος ενός θερμοστοιχείου [m]

A : εμβαδό διατομής ενός θερμοστοιχείου [m^2]

$$I = \frac{s_{pn} \cdot \Delta T}{R_L + R_I} \quad \text{Εξ. 1.5}$$

Όπου:

I : ένταση ηλεκτρικού ρεύματος [A]

s_{pn} : συντελεστής Seebeck ημιαγωγών $\left[\frac{V}{K} \right]$

ΔT : διαφορά θερμοκρασίας [K]

R_I : εσωτερική αντίσταση γεννήτριας [Ωm]

R_L : αντίσταση φορτίου ή εξωτερική αντίσταση [Ωm]

$$V_n = \frac{n \cdot s_{pn} \cdot \Delta T}{\left(\frac{R_I}{R_L}\right) + 1} * \frac{R_L}{R_I} \quad \text{Εξ. 1.6}$$

Όπου:

V_n : τάση στα άκρα της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας [V]

n : αριθμός ζευγών θερμοστοιχείων []

s_{pn} : συντελεστής Seebeck ημιαγωγών $\left[\frac{V}{K}\right]$

ΔT : διαφορά θερμοκρασίας [K]

R_I : εσωτερική αντίσταση γεννήτριας [Ωm]

R_L : αντίσταση φορτίου ή εξωτερική αντίσταση [Ωm]

$$\dot{W}_n = \frac{n \cdot s_{pn}^2 \cdot \Delta T^2}{R_I} * \frac{\frac{R_L}{R_I}}{1 + \left(\frac{R_L}{R_I}\right)} \quad \text{Εξ. 1.7}$$

Όπου:

\dot{W}_n : μέγιστη ισχύς εξόδου [Watts]

n : αριθμός ζευγών θερμοστοιχείων []

s_{pn} : συντελεστής Seebeck ημιαγωγών $\left[\frac{V}{K}\right]$

ΔT : διαφορά θερμοκρασίας [K]

R_I : εσωτερική αντίσταση γεννήτριας [Ωm]

R_L : αντίσταση φορτίου ή εξωτερική αντίσταση [Ωm]

$$n_{\max} = \left(1 - \frac{T_c}{T_h}\right) * \left(\frac{\sqrt{1+zT} - 1}{\sqrt{1+zT} + \frac{T_c}{T_h}}\right) * 100 \quad \text{Εξ. 1.8}$$

Όπου:

n_{\max} : απόδοση μέγιστης μετατροπής [%]

T_c : θερμοκρασία ψυχρής επιφάνειας της πλάκας [K]

T_h : θερμοκρασία θερμής επιφάνειας της πλάκας [K]

zT : αδιάστατος αριθμός θερμοηλεκτρικής λειτουργίας []

1.13 Αξιοπιστία Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας

Οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες, με βάση την θεωρία και την εμπειρία μέσα από την χρήση τους σε πολλές εφαρμογές, έδειξαν ότι είναι πολύ αξιόπιστες, καθώς αποτελούνται από μη – κινούμενα μέρη. Λόγω αυτού του χαρακτηριστικού έχουν την ικανότητα να παρέχουν τις υπηρεσίες τους για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα. Ο μέσος χρόνος λειτουργίας τους είναι γύρω στα 20 χρόνια. [16,25]

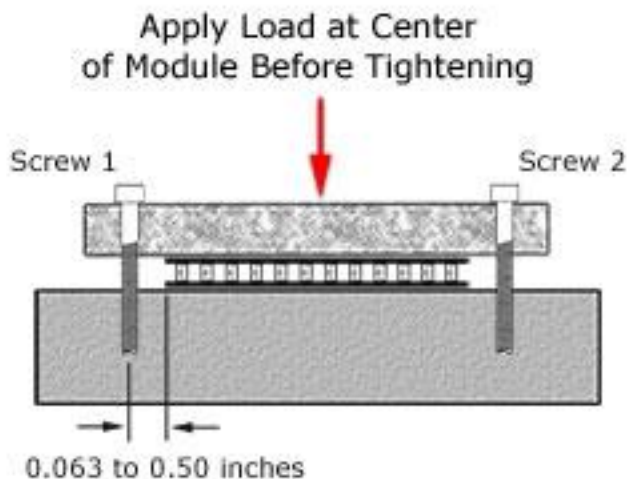
Ο χρόνος ζωής μιας θερμοηλεκτρικής μονάδας, συσχετίζεται με τον χρόνο ζωής των εξαρτημάτων που την αποτελούν. Παρ' όλα αυτά, η ακριβής τιμή της αξιοπιστίας είναι δύσκολο να εκτιμηθεί, καθώς εξαρτάται από το είδος της εφαρμογής αλλά και από τις συνθήκες περιβάλλοντος που απαιτείται μια θερμοηλεκτρική γεννήτρια να λειτουργήσει.

Κάποιοι εξωτερικοί παράγοντες που καθορίζουν την αστοχία μιας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας είναι η ύπαρξη υγρασίας στον χώρο λειτουργίας της, οι μηχανικές τάσεις που ασκούνται σ' αυτήν, ο τρόπος κατασκευής και στερέωσής της, η θερμοκρασία λειτουργίας, αλλά και ο ρυθμός θερμότητας που δίνεται στην γεννήτρια. [25]

1.13.1 Αξιοπιστία της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας σε σχέση με τις Μηχανικές Τάσεις και τις Μεθόδους στερέωσης

Σύμφωνα με την γεωμετρία μιας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας, είναι ικανή να λειτουργήσει σε μεγάλες τιμές θλιπτικών τάσεων, ενώ αντίθετα δεν μπορεί να ανταπεξέλθει σε διατμητικές τάσεις, αφού τα μέρη που την αποτελούν θα αποσυναρμολογηθούν. Έτσι, η θερμοηλεκτρική γεννήτρια δεν πρέπει ποτέ να ενσωματωθεί σε κατασκευή, έχοντας το ρόλο του βασικού εξαρτήματος υποστήριξης. Επιπρόσθετα, σε περίπτωση δονήσεων κατά την λειτουργία ενός μηχανήματος που περιέχει θερμοηλεκτρική γεννήτρια, αυτή χρειάζεται καλή στερέωση ανάμεσα σε δύο πλάκες, οι οποίες θα ασκούν θλιπτικές τάσεις. Ως εκ τούτου, υπάρχει ένα εύρος τιμής θλιπτικής φόρτισης που μπορεί να ασκηθεί σε μια γεννήτρια και αυτό ανέρχεται στα 75 κιλά ανά τετραγωνικό εκατοστό.

[25]



Εικόνα 1.10: Απεικόνιση της μεθόδου στερέωσης ανάμεσα από τις δύο πλάκες – clamping method. [4]

1.13.2 Αξιοπιστία της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας σε σχέση με την έκθεση της σε ψηλές θερμοκρασίες

Η έκθεση της γεννήτριας σε ψηλά ποσά θερμότητας είναι αναγκαία, λόγω της ανάγκης για υψηλή θερμοκρασιακή διαφορά. Ωστόσο, η έκθεση μιας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας κάτω από υψηλές θερμοκρασίες, μπορεί να προκαλέσει υποβάθμιση ως προς τη λειτουργία της. Η υποβάθμιση της λειτουργίας της αποτελεί και αυτή ένα είδος αστοχίας (μερική αστοχία) και συνήθως επέρχεται με την μακροχρόνια χρήση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας. Μέσα από τη μακροχρόνια χρήση, μεταβάλλονται οι παράμετροι των ημιαγωγών ακόμα και η τιμή της ηλεκτρικής αντίστασης επαφών. Όλες οι αλλαγές που μπορούν να προκληθούν λόγω της υψηλής θερμοκρασίας, συμβάλλουν στην μείωση της αποδοτικότητας μιας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας.

[25]

1.13.3 Αξιοπιστία της θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας σε σχέση με την θερμική κόπωση

Η συνεχής θερμική κόπωση μιας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας σε σχέση με τη μεταβολή της θερμοκρασίας σε ένα ευρύ φάσμα τιμών της μιας από τις δύο κεραμικές πλάκες, μπορεί να προκαλέσει αστοχία στη λειτουργία. Πιο συγκεκριμένα, αυτή η μεταβαλλόμενη φόρτιση κατέχει το υψηλότερο ποσοστό πρόκλησης αστοχίας μιας

θερμοηλεκτρικής γεννήτριας. Κύριος λόγος της αστοχίας είναι η διαφορά στην τιμή της σταθεράς της θερμικής διαστολής ανάμεσα στα μέρη που την αποτελούν και των υλικών συγκόλλησης. Γι' αυτό το λόγο προτείνεται η στήριξη της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με πλάκες και με την χρήση ελαστικού σταθεροποιητικού υλικού όπως θερμική πάστα ή φύλλο από γραφίτη ή ινίδιο. Προτείνεται επίσης, η αποφυγή χρήσης συγκολλητικού, όπου η συγκόλληση χαρακτηρίζεται ως στερεή, αλλά και αποφυγή χρήσης γόμας epoxy, όπου τα μέρη θα κολληθούν πολύ στιβαρά.

[25]

1.13.4 Αξιοπιστία της θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας σε σχέση με την ύπαρξη υγρασίας

Τα ηλεκτρικά κυκλώματα ανεξαιρέτως έχουν «εχθρό» τους την υγρασία. Καθώς, η θερμοηλεκτρική γεννήτρια είναι κι αυτή ένα ηλεκτρικό κύκλωμα, η ύπαρξη της υγρασίας στο εσωτερικό της είναι ανεπιθύμητη. Σε περίπτωση, εισχώρησης της υγρασίας εσωτερικά της προκαλείται η μόνιμη αστοχία. Συγκεκριμένα, το πιθανότερο αίτιο αστοχίας είναι η βραχυκύκλωση του συστήματος. Επίσης, τα υλικά θα διαβρωθούν μέσω ηλεκτροχημικών αντιδράσεων ή ηλεκτρόλυσης. Στο απίθανο ενδεχόμενο που δεν βραχυκυκλωθεί η γεννήτρια, το επόμενο στάδιο είναι η εμπόδιση της λειτουργίας ψύξης της γεννήτριας με αποτέλεσμα την σταδιακή μείωση αξιοπιστίας.

Κατά τον σχεδιασμό μιας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας, ο κατασκευαστής πρέπει να συμπεριλάβει την πιθανότητα λειτουργίας της γεννήτριας κάτω από το σημείο δρόσου, έτσι ώστε να παρέχεται κάποιο είδος στεγανοποίησης. Συνήθως για στεγανοποίηση χρησιμοποιείται σιλικόνη περιμετρικά της γεννήτριας, η οποία αντέχει σε ψηλές θερμοκρασίες.

[25]

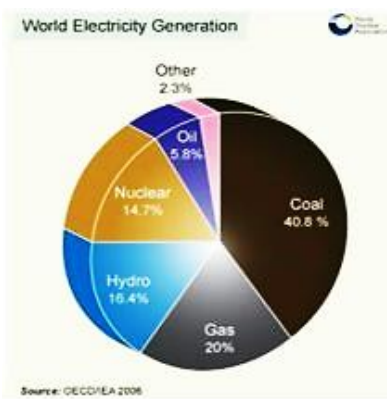
1.14 Συμπέρασμα

Καταλήγοντας, η αξιοπιστία της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας σε διάφορους τομείς της, καθορίζει κατά πόσο η χρήση της σε διάφορες εφαρμογές είναι ικανή, ενώ παράλληλα οι εφαρμογές μπορούν να μεταβάλλουν την αξιοπιστία της μέσα από διάφορες παραμέτρους. Μέσω της ανάγκης για συνεχή προσπάθεια των ερευνητών και απόκτηση γνώσεων στον τομέα των θερμοηλεκτρικών γεννητριών, είναι εφικτή η βελτιστοποίηση της αξιοπιστίας ανάλογα με τις εφαρμογές που προκύπτουν.

1.15 Εφαρμογές Θερμοηλεκτρικών Γεννητριών

Η αναζήτηση εναλλακτικών πηγών ενέργειας κρίνεται καίριας σημασίας, λόγω των ζητημάτων κλιματικής κρίσης που υπάρχει στο προσκήνιο και καταβάλλει τεράστιες διαστάσεις. Ο επιστημονικός κόσμος, δείχνει μεγάλο ενδιαφέρον ως προς τα προβλήματα τα οποία αφορούν την υπερθέρμανση του πλανήτη από το φαινόμενο του θερμοκηπίου, το λιώσιμο των πάγων στις αρκτικές περιοχές, τις μολύνσεις από τα εργοστάσια παραγωγής, τη τρύπα του όζοντος, τη μείωση της βιοποικιλότητας στην θάλασσα και στην στεριά και τέλος την εξάλειψη των φυσικών μη – συμβατικών πηγών ενέργειας. [17,23]

Από την έναρξη της βιομηχανικής επανάστασης μέχρι και σήμερα, η κύρια μέθοδος παραγωγής θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας αφορά κυρίως την καύση υδρογονανθράκων. Η μέθοδος αυτή κατέχει το 83% από την βιομηχανική επανάσταση μέχρι και σήμερα. Η κύρια αιτία του σταθερού ποσοστού, αποτελεί το γεγονός της αύξησης του παγκόσμιου πληθυσμού, η οποία ενισχύει τις ανάγκες για καύση των υδρογονανθράκων. Ωστόσο, παρατηρούνται αυξημένες προσπάθειες και εφαρμογές χρήσης τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την παραγωγή της αναγκαίας ενέργειας. [17,23]



Πίνακας 1.1: Παρουσιάζονται τα ποσοστά χρήσης των μεθόδων της παραγωγής ενέργειας. [14]

Σύμφωνα με τη θεωρία και την εμπειρία των επιστημόνων, κατά την καύση των υδρογονανθράκων διαφεύγουν στο περιβάλλον μεγάλα ποσά μη αξιοποιήσιμης ενέργειας υπο τη μορφή της θερμότητας. Άρα, προκύπτει η ανάγκη για ανάπτυξη και ωρίμανση τεχνολογιών που να λαμβάνουν την «χαμένη» θερμότητα και να τη μετατρέπουν σε άλλη πιο χρήσιμη ενέργεια όπως την ηλεκτρική ενέργεια. Για παράδειγμα, τα 2/3 της ενέργειας που παράγονται από την καύση πετρελαίου ή βενζίνης μιας μηχανής εσωτερικής καύσης, μετατρέπονται σε θερμότητα και χάνονται μέσω των καυσαερίων και στο κύκλωμα ψύξης της μηχανής. [23]

Οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα σε πολλές εφαρμογές για την λήψη και μετατροπή της χαμένης θερμότητας σε χρήσιμη ηλεκτρική ενέργεια. Αρκετές βιομηχανίες ενσωμάτωσαν τις θερμοηλεκτρικές γεννήτριες στα μηχανήματα τους και στα προϊόντα που παράγουν αλλά υπάρχουν κάποιες εφαρμογές που βρίσκονται ακόμα στο ερευνητικό στάδιο. Κάποια σημαντικά παραδείγματα είναι η αυτοκινητοβιομηχανία, σε εφαρμογές συνδυασμένης παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας – CHP, σε συστήματα παρακολούθησης στην αεροναυπηγική, σε συστήματα της ηλεκτροπαραγωγής αλλά και σε συστήματα παραγωγής ενέργειας με την χρήση του ηλίου – STEG & CPV+TEG. Οι προαναφερόμενες εφαρμογές των βιομηχανιών απαιτούν χρήσιμη ηλεκτρική ισχύ στη τάξη των Watt μέχρι και μερικές εκατοντάδες Watt. Αξιοσημείωτο είναι ότι ανάλογα με την εφαρμογή των θερμοηλεκτρικών γεννητριών χρησιμοποιούνται διαφορετικά θερμοηλεκτρικά υλικά ανάλογα με τις θερμοκρασίες λειτουργίας τους. [17,23]

Με τον όρο ‘χαμένη’ θερμική ενέργεια εννοείται η θερμότητα που διοχετεύεται στο περιβάλλον και δεν μπορεί κανείς να την χρησιμοποιήσει. Η ενέργεια, σύμφωνα με τον 1^ο Νόμο της Θερμοδυναμικής, δεν μπορεί να δημιουργηθεί αλλά ούτε και να καταστραφεί. Γι’ αυτό η χρήση του όρου ‘χαμένη ενέργεια’ πρέπει να χρησιμοποιείται πολύ προσεκτικά απ’ όλους.

Γενικότερα, σε πολλές εφαρμογές η θερμότητα αποτελεί προϊόν, το οποίο προέρχεται μέσω της μετατροπής κάποιου άλλου είδους ενεργειακής διεργασίας. Κάποια παραδείγματα μετατροπής ενέργειας είναι η καύση ξύλου και η λειτουργία ενός αυτοκινήτου, όπου η χημική ενέργεια των καυσίμων μετατρέπεται σε θερμότητα και με την σειρά της αυτή μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια που καταλήγει στους τροχούς. Όσο περισσότερες μετατροπές ενέργειας λαμβάνουν μέρος σε ένα μηχάνημα, τόσο μεγαλύτερες απώλειες θερμότητας υπάρχουν.

Με την χρήση θερμοηλεκτρικών γεννητριών αξιοποιείται κομμάτι των απωλειών θερμικής ενέργειας, ενώ παράλληλα η κάθε λειτουργία μετατροπής ενέργειας γίνεται πιο αποδοτική, αφού μετατρέπεται η θερμότητα σε χρήσιμη ηλεκτρική ισχύ. Αυτό έχει ως επακόλουθο τη χρήση λιγότερων ορυκτών καυσίμων για την λειτουργία των μηχανών για την ίδια παραγόμενη ισχύ. [23]

1.15.1 Θερμοηλεκτρική Γεννήτρια σε Combined Heat and Power – CHP

Η CHP είναι μια αποτελεσματική διαδικασία ταυτόχρονης παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας. Η συνολική απόδοση τέτοιων συστημάτων ξεπερνά το 80%, καθιστώντας την διαδικασία αυτή μια από τις πιο ενεργειακά αποδοτικές μεθόδους παραγωγής ενέργειας.

Ανά το παγκόσμιο, οι άνθρωποι συνεχίζουν να χρησιμοποιούν σε μεγάλο βαθμό τις παραδοσιακές οικιακές σόμπες και τζάκια. Σε περιοχές κρύου κλίματος οι σόμπες κηροζίνης αποτελούν την κύρια εφαρμογή για θέρμανση χώρου και μαγειρέματος. Μια ενδιαφέρουσα λύση για ανάκτηση χαμένης θερμικής ενέργειας και παραγωγή χρήσιμης ηλεκτρικής ισχύος για το σπίτι είναι η εγκατάσταση μιας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας σε μια τέτοια σόμπα.

Μια άλλη εφαρμογή είναι ο συνδυασμός σόμπας βιομάζας και θερμοηλεκτρικής γεννήτριας. Μέσω αυτής της σύζευξης, η βιομάζα αξιοποιείται για μαγείρεμα και παράλληλα η «χαμένη» θερμική ενέργεια μετατρέπεται σε πηγή ενέργειας για παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, μέσω της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας.

Ο ηλεκτρισμός ο οποίος παράγεται μέσω της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για φωτισμό του χώρου με λάμπες χαμηλής κατανάλωσης ισχύος ή για έναρξη λειτουργίας ενός μικρού ανεμιστήρα ή για παροχή ισχύος σε κάποιου είδους αισθητήρα προστασίας, όπως αισθητήρας καπνού, φωτιάς και κίνησης. Πιο κάτω παρουσιάζεται μια σόμπα βιομάζας μαζί με μια θερμοηλεκτρική γεννήτρια.

[27,28,29,30]



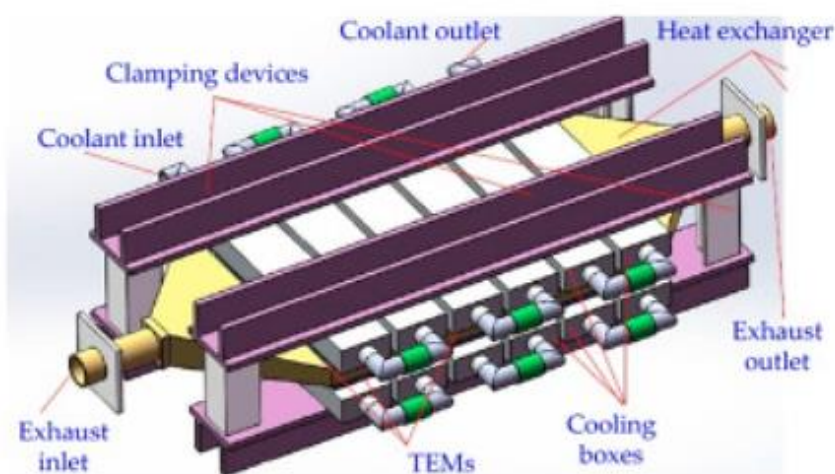
Εικόνα 1.11: Απεικόνιση συνδυασμού θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με σόμπα βιομάζας.

[29]

1.15.2 Θερμοηλεκτρική γεννήτρια στην Αυτοκινητοβιομηχανία

Όπως έχει προαναφερθεί στο υποκεφάλαιο 1.15, η καύση υδρογονανθράκων σε μηχανές εσωτερικής καύσης έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια των 2/3 του ποσού ενέργειας σε μορφή θερμότητας. Η απώλεια αυτή καθόρισε την πορεία των θερμοηλεκτρικών γεννητριών στην αυτοκινητοβιομηχανία και έκανε την παρουσία τους έντονα αισθητή. Οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες συναρμολογούνται σε σειρά στον σωλήνα καυσαερίων και συγκεκριμένα κοντά στον καταλύτη. Ο λόγος που πραγματοποιείται εκεί η εγκατάσταση τους είναι οι ψηλές τιμές των θερμοκρασιών στις επιφάνειες του καταλύτη, στις οποίες έρχονται σε επαφή με τη μια μεριά των θερμοηλεκτρικών γεννητριών. Η ψυχρή μεριά των θερμοηλεκτρικών γεννητριών βρίσκονται σε επαφή με σύστημα υδρόψυξης κατασκευασμένο από σωλήνες χαλκού. Επιπρόσθετα, είναι εφικτή η ψύξη των γεννητριών από την ροή κρύου αέρα κατά την κίνηση του αυτοκινήτου.

Γενικότερα, χάνονται ψηλά ποσά ισχύος στο περιβάλλον από το σύστημα καυσαερίων του αυτοκινήτου. Οι θερμοκρασίες που λαμβάνουν χώρα στο χώρο ανέρχονται στο εύρος των 100-800 °C με θερμική ισχύ 10 KW. Αυτό που επηρεάζει την τιμή της θερμικής ισχύος είναι το είδος καυσίμου που χρησιμοποιείται και από την ταχύτητα που κινείται το αυτοκίνητο. Με την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μπορούν να λειτουργήσουν τα συστήματα πλοήγησης, τα ηλεκτρονικά φρένα, το σύστημα ελέγχου ευστάθειας και το σύστημα αποφυγής πρόσκρουσης. [3, 17, 21, 22]



Εικόνα 1.12: Απεικόνιση θερμοηλεκτρικών γεννητριών στις 2 πλευρές του επίπεδου εναλλάκτη θερμότητας και τα διάφορα μέρη που αποτελούν το σύστημα. [17]



Εικόνα 1.13: Απεικόνιση θερμοηλεκτρικής γεννήτριας στο σύστημα εξάτμισης του οχήματος Lincoln MKT. [17]

1.15.3 Χρήση θερμοηλεκτρικής γεννήτριας στην αεροναυπηγική

Οι δορυφόροι και άλλα μηχανήματα στο διάστημα έχουν την ανάγκη για την παροχή ενέργειας χωρίς την χρήση μπαταριών και γι' αυτό ήρθαν στο προσκήνιο οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται οι ραδιοϊσοτοπικές θερμοηλεκτρικές γεννήτριες – RTGs (Radioisotope Thermoelectric Generator) στην αεροναυπηγική. Οι RTGs χρησιμοποιούνται για μετατροπή της θερμότητας που απελευθερώνεται από την φυσική αποσύνθεση ραδιενεργών υλικών σε χρήσιμη ηλεκτρική ισχύ.

Τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν τα υλικά και καθορίζουν τις RTGs είναι η χαμηλή εκπομπή ακτινοβολίας, έχουν αποδεκτό όριο ζωής καυσίμου ανάλογα με τα πόσα χρόνια θα διαρκέσουν οι αποστολές, έχουν ψηλό σημείο τήξης και ψηλή πυκνότητα ισχύος και είναι ασφαλές σε όλες τις συνθήκες και χρήσεις.

Ο αριθμός των υλικών ισοτόπων που αναπτύχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για καύσιμα είναι πέντε. Αυτά είναι το Cerium – 144 (Ce-144), το Polonium – 210 (Po-210), το Strontium – 90 (Sr-90), το Promethium – 147 (Pm-147) και το Plutonium – 238 (Pu-238). Απ' όλα τα υλικά, μόνο το Plutonium – 238 είναι πλέον αποδεκτό ως καύσιμο, αφού παρουσιάζει ψηλό σημείο τήξης, χαμηλή εκπομπή ακτινών Γ και έχει όριο ζωής 89.6 χρόνια, χρόνος που θα αρκεί για αποστολές μεγάλης διάρκειας. Τα υπόλοιπα υλικά ισοτόπων απορρίφθηκαν λόγω χαμηλής διάρκειας ζωής και υψηλής εκπομπής ραδιενέργειας.

Με το Plutonium – 238 και τις ιδιότητες, στάλθηκε ο πρώτος δορυφόρος πλοήγησης – Transit 4A spacecraft, τον Ιούνιο του 1961 με σύστημα παραγωγής ισχύος SNAP-3 RTG. Μετά την αποστολή του συγκεκριμένου δορυφόρου ακολούθησαν ακόμη 27 αποστολές, με στόχο την εξερεύνηση της τροχιά της γης. Οι αποστολές που στάλθηκαν για υλοποίηση της εξερεύνησης είναι η Snapshot, Nimbus και Apollo. Αξιοσημείωτη είναι επίσης η εκτόξευση του Galileo Spacecraft από την NASA το 1989 με σύστημα παραγωγής ισχύος GPHs – RTG, το οποίο περιείχε Plutonium – 238 και αρχικά πρόσφερε 285W θερμικής ισχύος. Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν στα μηχανήματα: Pioneer-10 και Viking με την χρήση SNAP-19. Τέλος, χρησιμοποιήθηκαν RTGs σε δορυφόρους και μηχανήματα εξερεύνησης όπως Apollo-12, Voyager 1 και Voyager 2.

[17]



Εικόνα 1.14: Απεικόνιση του δορυφόρου Voyager 1 στο διάστημα.[18]

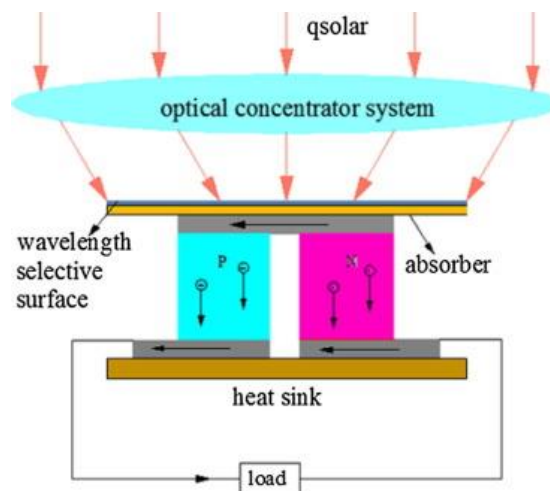
Η επόμενη γενιά RTG είναι η MMRTG (Multi-Missions Radioisotope Thermoelectric Generator), η οποία αναπτύχθηκε τον Ιούνιο του 2003, με στόχο τη μέγιστη βελτιστοποίηση και παράλληλα την εξάλειψη των ελαττωμάτων που παρουσίαζαν οι RTGs. Προορίζονται για αποστολές στον πλανήτη Άρη και ο σχεδιασμός τους προβλέπει όριο ζωής 14 χρόνων, με παραγωγή ελάχιστης ισχύς 110W στα 28V DC.

[17]

1.15.4 Χρήση θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας σε Ηλιακές Θερμικές (Solar Thermal)

Οι σύγχρονες έρευνες στρέφουν την προσοχή τους για τη βελτίωση της απόδοσης των θερμοηλεκτρικών γεννητριών για μετατροπή θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια με χρήση του ήλιου. Ο ήλιος αποτελεί μια αποτελεσματική οδό για την παραγωγή χρήσιμης ηλεκτρικής ισχύος μέσω της ενέργειας σε μορφή ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης. Από την εισερχόμενη ενέργεια, επέρχεται η αύξηση της θερμοκρασίας στην θερμή μεριά μιας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας, ενώ παράλληλα πραγματοποιείται εκμετάλλευση της ροής του ατμοσφαιρικού αέρα για την ψύξη της ψυχρής μεριάς.

Όταν χρησιμοποιείται ηλιακή ακτινοβολία ως πηγή ενέργειας για θέρμανση της θερμής μεριάς μιας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με την χρήση ηλιακών συλλεκτών, τότε αναφερόμαστε σε ηλιακές θερμοηλεκτρικές γεννήτριες – STEGs. Η βελτιστοποίηση των θερμοηλεκτρικών υλικών, των υλικών που απαρτίζουν την γεννήτρια και της γεωμετρίας της γεννήτριας υπόσχεται την αύξηση της απόδοσης λειτουργίας μιας STEG. Παράλληλα, θα μειωθεί το κόστος κατασκευής της συγκεκριμένης διάταξης. [23]



Εικόνα 1.15: Απεικόνιση μιας ηλιακής θερμοηλεκτρικής γεννήτριας και τα διάφορα μέρη της. [12]

Με την ανάπτυξη υλικών για την κατασκευή θερμοηλεκτρικών γεννητριών, οι οποίες θα αντέχουν σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες λειτουργίας, η απόδοση ενός τέτοιου συστήματος μπορεί να είναι συγκρίσιμη και με άλλες τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. [31,32]

1.15.4.1 Υβριδικό Σύστημα CPV+TEG

Το υβριδικό σύστημα CPV+TEG είναι τεχνολογία που χρησιμοποιεί συγκέντρωση φωτός σε φωτοβολταϊκές μονάδες μαζί με θερμοηλεκτρικές γεννήτριες.

Σύμφωνα με την θεωρία, οι φωτοβολταϊκές μονάδες μπορούν να απορροφήσουν το μέγιστο 80% της εισερχόμενης ακτινοβολίας, αλλά το ποσοστό που μπορούν να μετατρέψουν σε ηλεκτρική ενέργεια εξαρτάται από την απόδοση μετατροπής ενέργειας του PV και είναι συνήθως κοντά στα 17-18%. Η υπόλοιπη ενέργεια διαχέεται ως θερμότητα και προκαλεί αύξηση στην θερμοκρασία, αφού η φωτοβολταϊκή μονάδα δεν μπορεί να ανταποκριθεί σε όλο το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας. Η αύξηση της θερμοκρασίας λόγω της μη-αξιοποιήσιμης θερμότητας μπορεί να ληφθεί από μια θερμοηλεκτρική γεννήτρια για παραγωγή χρήσιμης ηλεκτρικής ισχύος. [36]

Τα συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά (concentrator photovoltaics CPV) είναι μια τεχνολογία PV που συνήθως συνοδεύεται με sun-tracking σύστημα και λειτουργεί υπό υψηλές συγκεντρώσεις ηλιακής ενέργειας. Το εισερχόμενο φως από τον ήλιο συγκεντρώνεται με σύστημα οπτικής εστίασης ώστε η συγκεντρωμένη δέσμη φωτός να οδηγείται σε ένα μικρό δέκτη που περιλαμβάνει το CPV. Σε αυτά τα συστήματα η συγκέντρωση C του φωτός καθορίζεται από την αναλογία ηλιακής συγκέντρωσης σε μονάδες ήλιων (C [#suns]). Ο λόγος αυτός επίσης καθορίζει πόσο ενισχύεται η προσπίπτουσα ροή ηλιακής ακτινοβολίας στο δέκτη. Έτσι η συγκέντρωση ορίζεται και ως ο γεωμετρικός λόγος συγκέντρωσης C που είναι ουσιαστικά ο λόγος του εμβαδού του διαφράγματος A_a και του εμβαδού του δέκτη A_r . [36]

$$C = \frac{A_a}{A_r} \quad \text{Εξ 1.9}$$

Όπου:

C : γεωμετρικός λόγος συγκέντρωσης [#suns]

A_a : εμβαδό διαφράγματος [m^2]

A_r : εμβαδό δέκτη [m^2]

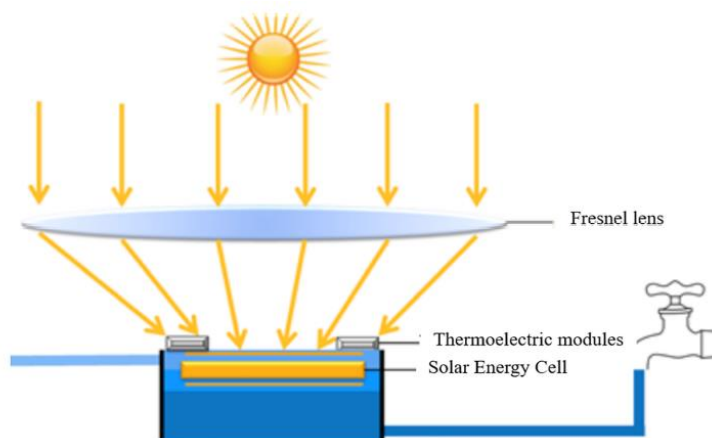
Συγκεντρώνοντας την ηλιακή ακτινοβολία αυξάνει την απόδοση μετατροπής ενέργειας αλλά και την θερμοκρασία στα ηλιακά κύτταρα και το συνολικό PV. Η υπερβολική αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να αντιμετωπιστεί με διάφορες μεθόδους, όπως για παράδειγμα χρήση ψυκτικού υγρού και με διάσπαση φασματικών ακτίνων. Επιπρόσθετα, μπορεί να χρησιμοποιηθούν θερμοηλεκτρικές γεννήτριες ως μέσο ψύξης του συστήματος λαμβάνοντας την θερμότητα από την θερμή και αποβάλλοντας την από την ψυχρή μεριά. Ωστόσο, είναι αναγκαία η διαχείριση των περισεσιών ψηλών ποσών

θερμικής ενέργειας γιατί έχει αρνητικές επιπτώσεις στα φωτοβολταϊκά κύτταρα, αφού μειώνεται η απόδοση μετατροπής ισχύος κατά 0.2%-0.5% για κάθε 1°C. [36]

Στην περίπτωση χρήσης θερμοηλεκτρικών γεννητριών σε σύστημα CPV, η ύπαρξη υψηλής θερμοκρασίας είναι αναγκαία έτσι ώστε να υπάρχει υψηλή θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ της θερμής και της ψυχρής μεριάς. Η θερμοκρασιακή διαφορά μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας σύστημα ψύξης υγρού στην ψυχρή μεριά της γεννήτριας.

Το υβριδικό σύστημα CPV+TEG με τεχνολογία ψύξης υγρού, χρησιμοποιείται για παροχή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας. Όσο αφορά την θερμική ενέργεια αυτή μπορεί να δίνεται μέσω του κυκλώματος ψύξης νερού, αφού κατά την έξοδο το νερό έχει υψηλή θερμοκρασία και μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο σύστημα θέρμανσης οικίας ή για θέρμανση του ζεστού νερού χρήσης (ZNX) ή για αποθήκευση θερμικής ενέργειας σε αποθήκες θερμικής ενέργειας. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται μέσω της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για φωτισμό του χώρου με λάμπες χαμηλής κατανάλωσης ισχύος (LED) ή για παροχή ισχύος σε κάποιου είδους αισθητήρα προστασίας, όπως αισθητήρας καπνού, φωτιάς και κίνησης.

Έτσι τα υβριδικά συστήματα CPV+TEG είναι πιο εύχρηστά από τα συμβατικά συστήματα STEG και CPV για την βελτιστοποίηση της συνολικής απόδοσης, αφού μπορεί να χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερο μέρος της ηλιακής ενέργειας.[36]



Εικόνα 1.16: Απεικόνιση πειραματικού σχεδιαγράμματος για σύστημα CPV+TEG.[37]

1.16 Στόχος της Έρευνας

Μέχρι τώρα πραγματοποιήθηκαν προσπάθειες για αύξηση των τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Μια απ' αυτές τις προσπάθειες κατατάσσονται και οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες, οι οποίες αξιοποιούν την θερμότητα που διαφεύγει στο περιβάλλον και την μετατρέπουν σε χρήσιμη ηλεκτρική ισχύ. Η ευκαιρία για αξιοποίηση της ενέργειας που διαφεύγει στο περιβάλλον είναι σημαντική γιατί οτιδήποτε χρειάζεται ενέργεια έχει απώλειες, οι οποίες προέρχονται από την μετατροπή από την μια μορφή της ενέργειας σε μια άλλη.

Αν όλο το ποσό ή μέρος της θερμικής ενέργειας που διοχετεύεται στο περιβάλλον ήταν αξιοποιήσιμο και οι πράσινες τεχνολογίες ήταν πιο τεχνολογικά ώριμες, τότε το πρόβλημα της κλιματικής κρίσης που συμβαίνει τώρα θα είχε μικρότερη διάσταση μιας και θα μειωνόταν το διοξείδιο του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Επιπρόσθετα, το περιβάλλον που θα ζούσε ο άνθρωπος θα ήταν πιο υγιεινό και η βιοποικιλότητα τόσο στο ζωικό όσο και στο φυτικό βασίλειο θα ήταν αυξημένη.

Οι στόχοι που τέθηκαν στη μεταπτυχιακή έρευνα είναι ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη θερμοηλεκτρικής γεννήτριας βασισμένη σε υλικά half-Heusler. Πραγματοποιήθηκε μελέτη για όλα τα στάδια της κατασκευής της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας ξεκινώντας από προσομοιώσεις για την πρόβλεψη της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος, ενώ στη συνέχεια, αναπτύχθηκε μεθοδολογία για την ανάπτυξη των κυβικών θερμοστοιχείων, των ηλεκτρικών επαφών, της συναρμολόγησης των θερμοστοιχείων για την ανάπτυξη θερμοηλεκτρικής γεννήτριας και τέλος για τον χαρακτηρισμό τους. Η κινητήριος δύναμη για εκτέλεση των στόχων είναι η καθημερινά αυξανόμενη ανάγκη για γιγαντιαία ποσά ενέργειας και η κατανάλωση των φυσικών πόρων της γης.

Κεφάλαιο 2

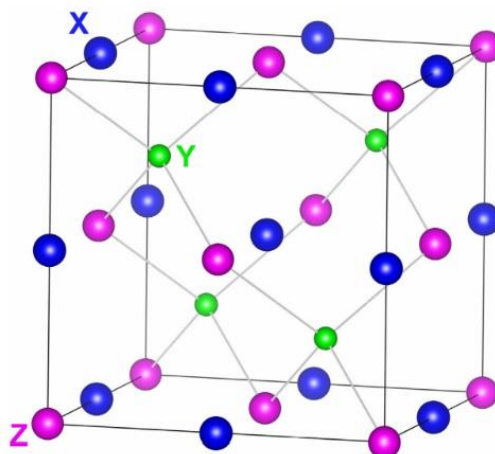
2 BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Σ' αυτό το κεφάλαιο, πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση για το θερμοηλεκτρικό υλικό στο οποίο στηρίζεται η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία και συγκεκριμένα το υλικό half-Heusler. Στη συνέχεια, αναλύονται από τη βιβλιογραφία διάφορα πειράματα θερμοηλεκτρικών γεννητριών με διαφορετικές συστάσεις του υλικού half-Heusler και διάφορα γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Ακολούθως, παρουσιάζονται σε μορφή πινάκων τα αποτελέσματα ενδιαφέροντος κάθε άρθρου, όπως τη μέγιστη ηλεκτρική ισχύ, την πυκνότητα ισχύος και την μέγιστη απόδοση μετατροπής.

2.1 Υλικά Half-Heusler

Τα θερμοηλεκτρικά υλικά half-Heusler προσέλκυσαν το ενδιαφέρον των ερευνητών τις τελευταίες δύο δεκαετίες λόγω των μηχανικών και ηλεκτρικών ιδιοτήτων τους, τη θερμική σταθερότητα τους, της χαμηλής τους τοξικότητας καθώς και της προόδου βελτίωσης της θερμοηλεκτρικής τους απόδοσης που παρουσιάζουν στο μέσο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας (500-800°C). Ωστόσο, η θερμική αγωγιμότητα πλέγματος είναι ψηλή και αυτό αποτελεί εμπόδιο για τη περαιτέρω βελτίωση της θερμοηλεκτρικής τους απόδοσης. Γι' αυτό οι έρευνες για βελτίωση της. [50,66,67,68]

Το υλικό αυτό ανήκει σε μια ευρύτερη οικογένεια των ενώσεων Heusler, οι οποίες είναι διαμεταλλικές ενώσεις με συγκεκριμένη κρυσταλλική δομή. Ο όρος "Half-Heusler" αναφέρεται στο γεγονός ότι οι ενώσεις αυτές έχουν δομή παρόμοια με τις ενώσεις full-Heusler, αλλά αποτελούνται μόνο από το μισό αριθμό ατόμων. Συγκεκριμένα, η δομή ενός υλικού half-Heusler βασίζεται σε ένα κυβικό πλέγμα FCC (Face Centered Cubic). Αποτελείται από τρία αλληλοδιδυτικά υποπλέγματα που χαρακτηρίζονται ως X, Y και Z. Κάθε υπόπλεγμα καταλαμβάνεται από διαφορετικό τύπο ατόμων. Τα άτομα X και Y είναι συνήθως μέταλλα μετάπτωσης, ενώ το άτομο Z είναι συνήθως ένα στοιχείο της κύριας ομάδας. Αξιοσημείωτο είναι ότι, το υλικό μετάπτωσης Y καταλαμβάνει τέσσερις από τις οκτώ κενές θέσεις μέσα στο πλέγμα. Η επιλογή των συγκεκριμένων στοιχείων στην ένωση καθορίζει τις θερμοηλεκτρικές ιδιότητες και τη συμπεριφορά του υλικού. [50,67,68]



Εικόνα 2.1: Η κρυσταλλική δομή του θερμοηλεκτρικού υλικού half - Heusler. Οι μπλε, πράσινες και ροζ μπάλες αναφέρονται στα X, Y και Z άτομα του υλικού. [50]

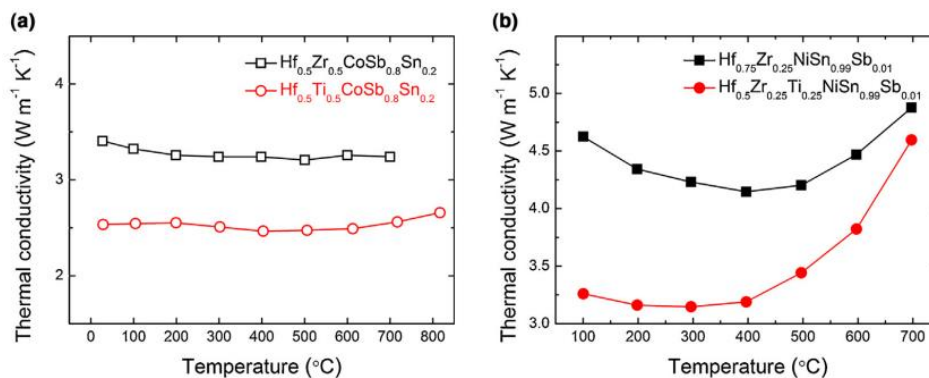
Οι συνήθεις ενώσεις του υλικού half - Heusler που έχουν μελετηθεί περισσότερο είναι $MCoSb$ για ημιαγωγό p - τύπου και $MNiSn$ για ημιαγωγό n - τύπου. Το γράμμα M μπορεί να λάβει τον συνδυασμό των υλικών Hf (άφνιο), Zr (ζιρκόνιο) και Ti (τιτάνιο). [50,66]

Οι μεγαλύτερες προκλήσεις στα υλικά half - Heusler είναι η μείωση της θερμικής αγωγιμότητας και η αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας τους, ώστε να αυξηθεί ο αδιάστατος όρος απόδοσης ZT. Για τη μείωση της θερμικής αγωγιμότητας μπορεί να γίνει αντικατάσταση των στοιχείων X και Y που θα προκαλέσει διακυμάνσεις στη μάζα ενώ για την αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, δηλαδή την αύξηση της συγκέντρωσης των φορέων φορτίου, γίνεται η αντικατάσταση της θέσης Z από άλλο στοιχείο της κύριας ομάδας. [50,66]

2.1.1 Θερμική Αγωγιμότητα

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, για τη μείωση της θερμικής αγωγιμότητας υπάρχουν δύο μέθοδοι. Η πρώτη μέθοδος είναι η χρήση δυαδικού συνδυασμού Hf, Zr και Ti στη θέση M για τον p και n - τύπου ημιαγωγό ($MNiSn$ & $MCoSb$) αντίστοιχα. Η μέθοδος αυτή μπορεί να μειώσει τη θερμική αγωγιμότητα στο 50% σε θερμοκρασίες δωματίου συγκριτικά με half-Heusler υλικό που αποτελείται από ένα μόνο στοιχείο της ομάδας Ti. Η μεγάλη διακύμανση στη μάζα, δηλαδή η συνένωση του Hf-Ti και η κραματοποίηση των Hf, Zr και Ti στο $MCoSb$ και $MNiSn$ αντίστοιχα, προκαλεί καταστολή της θερμικής αγωγιμότητας. Επιπρόσθετα, η μείωση της θερμικής αγωγιμότητας μπορεί να προκληθεί μέσω της αύξησης της πυκνότητας των ορίων των κόκκων μέσω της μείωσης του μεγέθους των κόκκων στην νανοκλίμακα. Αυτό μπορεί

να επιτευχθεί μέσω του μεγάλου χρόνου άλεσης στο ball milling και του μικρού χρόνου πυροσυσσώματωσης. [50,67,68]



Γράφημα 2.1: Η θερμική αγωγιμότητα ως προς τη θερμοκρασία (a) του Hf_{0.5}Zr_{0.5}CoSb_{0.8}Sn_{0.2} (κοίλα μαύρα τετράγωνα) και Hf_{0.5}Ti_{0.5}CoSb_{0.8}Sn_{0.2} (κοίλοι κόκκινοι κύκλοι) και (b) Hf_{0.75}Zr_{0.25}NiSn_{0.99}Sb_{0.01} (μαύρα τετράγωνα) και Hf_{0.5}Zr_{0.25}Ti_{0.25}NiSn_{0.99}Sb_{0.01} (κόκκινοι κύκλοι). [50]

Σύμφωνα με το πιο πάνω γράφημα, παρατηρείται ότι με την αλλαγή της ποσότητας των προσμίξεων μεταβάλλεται η θερμική αγωγιμότητα για τον p και n τύπου ημιαγωγό.

2.1.2 Electrical Conductivity

Για τη βελτίωση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας γίνεται με την ενίσχυση των φορέων φορτίου μέσω προσμίξεων στο πλέγμα. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, για το ημιαγωγό MNiSn, η πιο κοινή και συμφέρουσα πρόσμιξη είναι η προσθήκη Sb (αντιμονίου) για αντικατάσταση του Sn (κασσιτέρου), ενώ για τον ημιαγωγό MCoSb είναι η προσθήκη Sn για την αντικατάσταση του Sb. Μέσω της επιτυχούς πρόσμιξης, η ειδική αντίσταση των δύο ημιαγωγών half-Heusler μπορεί να μειωθεί στο $10^{-3} - 10^{-4} \Omega * cm$ σε θερμοκρασίες δωματίου. [50]

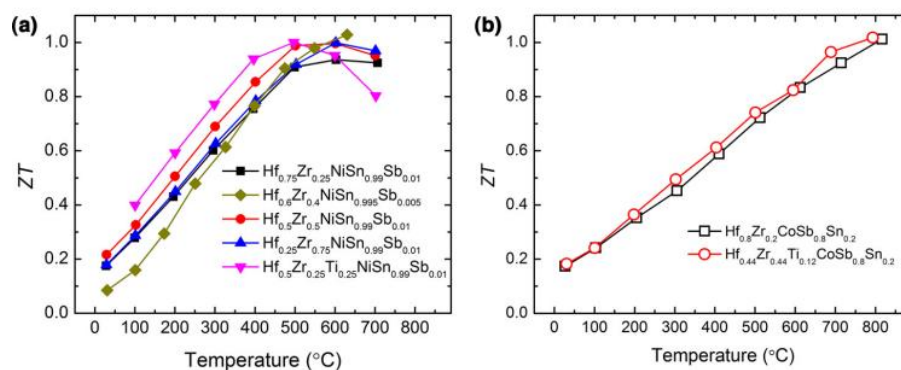
2.1.3 Seebeck Coefficient

Μέσω της προσθήκης προσμίξεων για την ενίσχυση των φορέων φορτίου, η σταθερά Seebeck του υλικού half-Heusler μειώνεται. Γι' αυτό πρέπει να γίνεται με έλεγχο η προσθήκη των προσμίξεων για να παραμείνει ψηλή η σταθερά Seebeck και ταυτόχρονα να μην μειωθεί η ηλεκτρική αγωγιμότητα. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, τα βελτιστοποιημένα επίπεδα προσμίξεων για τα half-Heusler τύπου n και p είναι 0.5-2.5 at% αντικατάσταση του Sn από Sb στο MNiSn και ~20 at% αντικατάσταση του Sb από Sn στο MCoSb, αντίστοιχα. [50]

2.1.4 Thermoelectric figure of merit (ZT)

Ο αδιάστατος αριθμός ZT καθορίζεται μέσω της θερμικής αγωγιμότητας, της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και της σταθεράς Seebeck και γι' αυτό απαιτούνται εντατικές προσπάθειες για τη εύρεση των βέλτιστων ιδιοτήτων των τριών παραμέτρων μέσω της σύστασης και των συνθηκών της σύνθεσης. [50]

Πιο κάτω παρουσιάζονται γραφήματα αντιπροσωπευτικών αποτελεσμάτων του αδιάστατου αριθμού ZT για τα υλικά half-Heusler τύπου n και p. Σύμφωνα με το πιο κάτω γράφημα, το μέγιστο ZT για τα δείγματα MNiSn και MCoSb είναι 1 και λαμβάνεται στους 500-600°C και στους 800°C, αντίστοιχα.

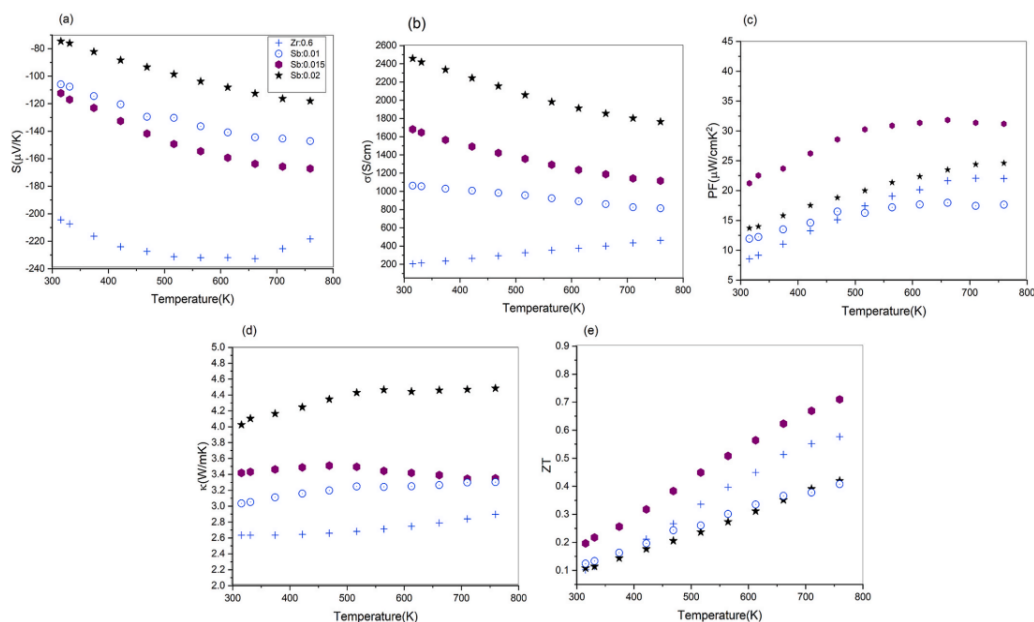


Γράφημα 2.2: Ο αδιάστατος αριθμός ZT ως προς τη θερμοκρασία για διαφορετικές συστάσεις (a) για την ένωση MNiSn και (b) για την ένωση MCoSb. [50]

Στη συνέχεια, πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση των θερμοηλεκτρικών υλικών που χρησιμοποιούνται στη παρούσα μεταπτυχιακή έρευνα και αναφέρεται η σύνθεση τους στο Κεφάλαιο 5.

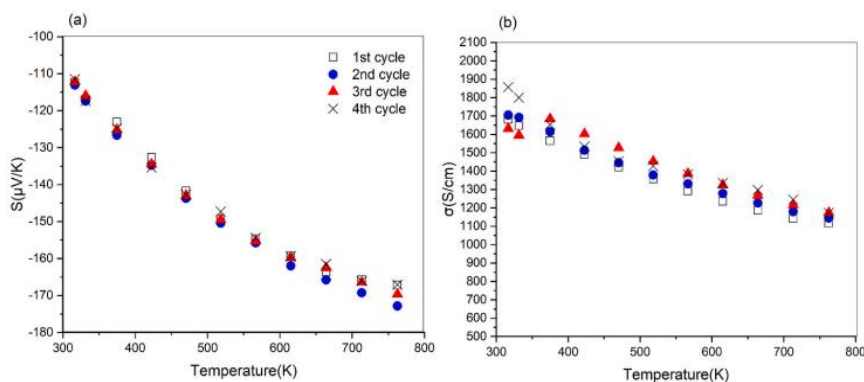
Ο Mesaritis και λοιποί [52], μελέτησαν τον ημιαγωγό n – τύπου με σύνθεση του υλικού μέσω μηχανικής άλεσης. Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν οι συνθέσεις $Ti_{1-x}Zr_xNiSn$ ($x = 0, 0.40, 0.50, 0.60, 0.70$ και 0.80) και $Ti_{0.4}Zr_{0.6}NiSn_{1-y}Sb_y$ ($y = 0.01, 0.015$ και 0.02). Αρχικά, μέσω των προσπαθειών βρέθηκε ότι η μικρότερη θερμική αγωγιμότητα και μέγιστο ZT είχε η σύνθεση $Ti_{0.4}Zr_{0.6}NiSn$ και γι' αυτό προχώρησαν σε περαιτέρω έρευνα προσμίξεων για βελτίωση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας με τη χημική σύσταση $Ti_{0.4}Zr_{0.6}NiSn_{1-y}Sb_y$. Μέσω της αντικατάστασης του Sn από Sb με $y = 0.02$ υπήρξε αύξηση των φορέων φορτίου άρα και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, αλλά μείωση της σταθεράς Seebeck από $-240\mu V/K$ (μη-ντοπαρισμένο δείγμα) στο $-75\mu V/K$. Επιπρόσθετα, βρέθηκε η τιμή του συντελεστή ισχύος (power factor) ίση με $25\mu W/cmK^2$. Στη συνέχεια, προχώρησαν στη πρόσμειξης $y = 0.015$ και η τιμή του συντελεστή ισχύος ισούται με 32

$\mu\text{W}/\text{cmK}^2$. Η αύξηση του συντελεστή ισχύος δηλώνει ότι η πρόσμιξη Sb πάνω από $y = 0.015$ ξεπερνά την βέλτιστη συγκέντρωση φορέων φορτίου. Ταυτόχρονα, η θερμική αγωγιμότητα αυξήθηκε με τη συγκέντρωση του προσθετικού υλικού κυρίως λόγω της υψηλότερης ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Ωστόσο, επιτεύχθηκε τιμή του αδιάστατου αριθμού ZT ίσο με 0.71 στους 800K. Σύμφωνα με το πιο κάτω γράφημα και τα όσα προαναφέρονται, η καλύτερη σύνθεση είναι η ακόλουθη: $\text{Ti}_{0.4}\text{Zr}_{0.6}\text{NiSn}_{0.985}\text{Sb}_{0.015}$.



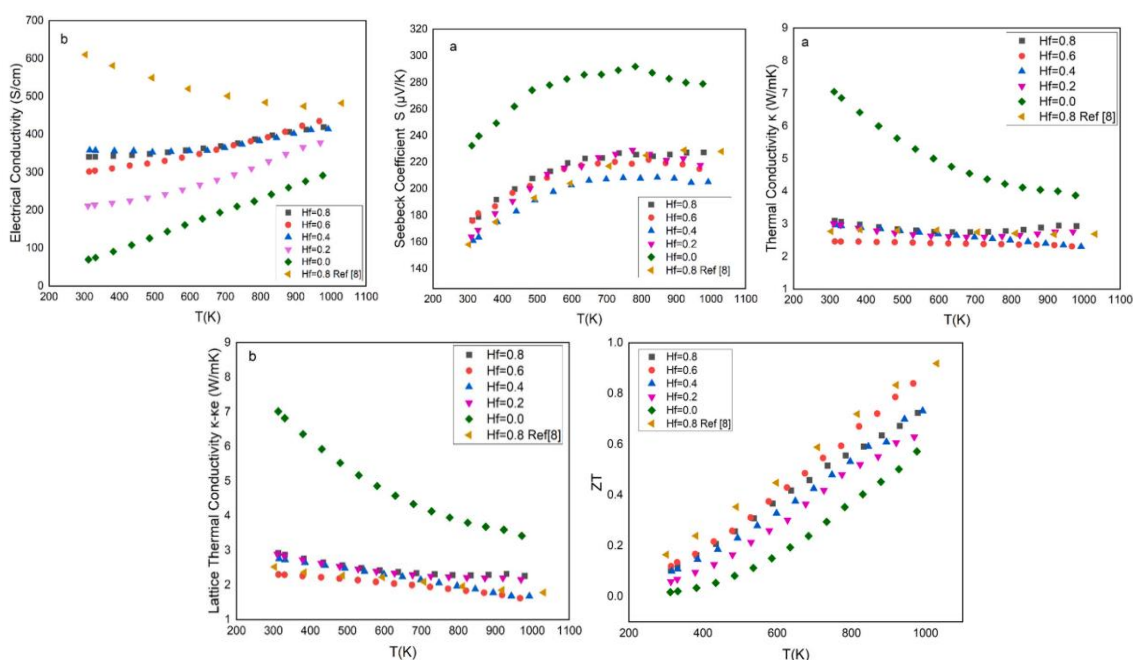
Γράφημα 2.3: Οι θερμοηλεκτρικές ιδιότητες του ντοπαρισμένου υλικού $\text{Ti}_{0.4}\text{Zr}_{0.6}\text{NiSn}_{1-y}\text{Sb}_y$. [52]

Στη συνέχεια, προχώρησαν στην αξιολόγηση της σταθερότητας του υλικού με σύσταση $\text{Ti}_{0.4}\text{Zr}_{0.6}\text{NiSn}_{0.985}\text{Sb}_{0.015}$ με τη μέτρηση της σταθεράς Seebeck και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας κατά τη διάρκεια κύκλων θέρμανσης και σύμφωνα με το πιο κάτω γράφημα φαίνεται ότι οι ιδιότητες παραμένουν σταθερές σε όλους τους κύκλους.



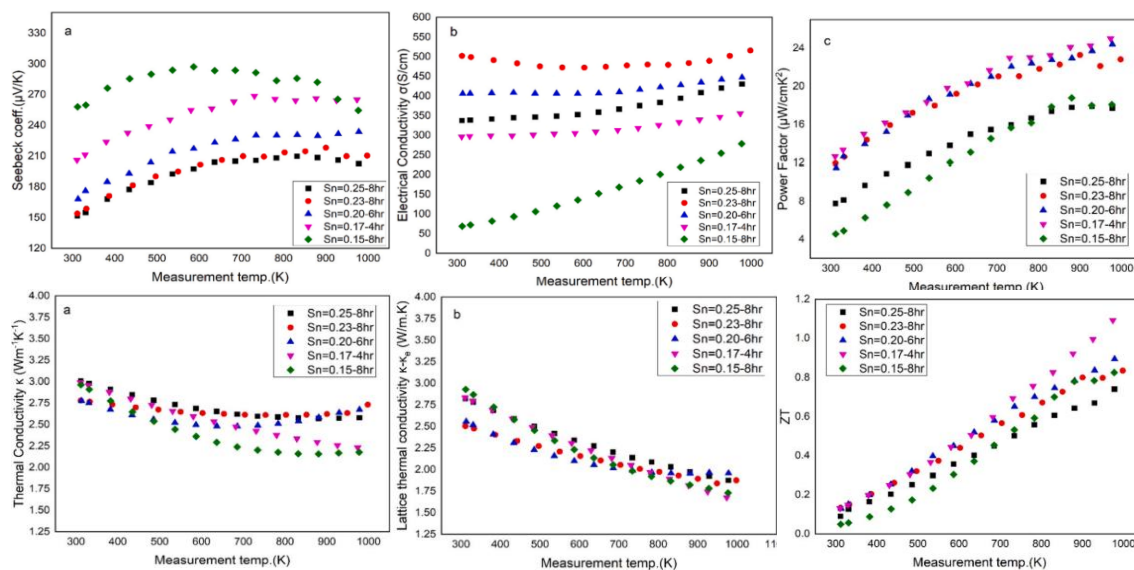
Γράφημα 2.4: (a) Σταθερά Seebeck και (b) ηλεκτρική αγωγιμότητα των δειγμάτων $\text{Ti}_{0.4}\text{Zr}_{0.6}\text{NiSn}_{0.985}\text{Sb}_{0.015}$ που μετρήθηκαν σε κύκλους θέρμανσης/ψύξης. [52]

Η Ιοαννου και λοιποί [66], μελέτησαν τον ημιαγωγό p – τύπου με σύνθεση του υλικού μέσω μηχανικής άλεσης. Συγκεκριμένα, ξεκίνησαν με την σύνθεσης $\text{Hf}_x\text{Ti}_{1-x}\text{CoSb}_{0.8}\text{Sn}_{0.2}$ ($x = 0, 0.2, 0.4, 0.6$ και 0.80) για την μελέτη των θερμοηλεκτρικών ιδιοτήτων και συγκεκριμένα της θερμικής αγωγιμότητας. Σύμφωνα με το πιο κάτω γράφημα, η ελάχιστη θερμική αγωγιμότητα βρέθηκε στο δείγμα $\text{Hf}_{0.6}\text{Ti}_{0.4}\text{CoSb}_{0.8}\text{Sn}_{0.2}$ και ισούται με 2.29W/mK στους 971K . Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι, η τιμή της θερμικής αγωγιμότητας πλέγματος ($\kappa_{\text{lattice}} = 1.6\text{W/mK}$) είναι 65% μικρότερη από τη τιμή της σύνθεσης $\text{TiCoSb}_{0.8}\text{Sn}_{0.2}$, έχοντας παράλληλα υψηλή τιμή ZT. Γι' αυτό η σύνθεση $\text{Hf}_{0.6}\text{Ti}_{0.4}\text{CoSb}_{0.8}\text{Sn}_{0.2}$ προτείνεται για χρήση της για βελτίωση των θερμοηλεκτρικών ιδιοτήτων και του αδιάστατου αριθμού ZT.



Γράφημα 2.5: Οι θερμοηλεκτρικές ιδιότητες του υλικού $\text{Hf}_x\text{Ti}_{1-x}\text{CoSb}_{0.8}\text{Sn}_{0.2}$ συγκριτικά με το υλικό της βιβλιογραφίας. [66]

Στη συνέχεια προχώρησαν στην έρευνα της ενίσχυσης των θερμοηλεκτρικών ιδιοτήτων του υλικού μέσω της βελτιστοποίησης των φορέων φορτίου στο δείγμα. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε το ποσό του ντοπαρίσματος από τη μερική αντικατάσταση του Sb από το Sn στη σύνθεση $\text{Hf}_{0.6}\text{Ti}_{0.4}\text{CoSb}_{1-y}\text{Sn}_y$ ($y = 0.15, 0.17, 0.20, 0.23, 0.25$). Η ηλεκτρική αγωγιμότητα, η σταθερά Seebeck και η θερμική αγωγιμότητα μετρήθηκαν προκειμένου να εκτιμηθεί η θερμοηλεκτρική απόδοση της πιο πάνω χημικής σύστασης υλικού.



Γράφημα 2.6: Οι θερμοηλεκτρικές ιδιότητες του υλικού $\text{Hf}_{0.6}\text{Ti}_{0.4}\text{CoSb}_{1-y}\text{Sn}_y$. [66]

Σύμφωνα με το πιο πάνω γράφημα, η υποκατάσταση του Sb με το Sn εισάγει οπές στο σύστημα του υλικού, οπότε η συγκέντρωση φορέων αυξάνεται. Βάση του γραφήματος (a) η σταθερά Seebeck είναι πιο ψηλή για $\text{Sn}=0.15$ και μειώνεται με την προσθήκη του Sn μέχρι για $\text{Sn}=0.23$. Επιπρόσθετα, παρατηρείται ότι η σταθερά Seebeck για τα δείγματα με $\text{Sn}=0.23$ & 0.25 είναι παρόμοια αλλά υπάρχει διαφορά στην κινητικότητα των φορέων φορτίου σύμφωνα με τις μετρήσεις της ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Από το γράφημα (b) η ηλεκτρική αγωγιμότητα αυξάνεται με τη προσθήκη Sn με τη μέγιστη τιμή να ισούται για $\text{Sn}=0.23$ και μέσω του γραφήματος (c) που αντικατοπτρίζει το συντελεστή ισχύος συμπεραίνεται ότι, η συγκέντρωση του Sn από 0.17-0.23 είναι η βέλτιστη με τη μέγιστη τιμή να λαμβάνεται για $\text{Sn}=0.23$ στους 975K. Από τα γραφήματα της θερμικής αγωγιμότητας και θερμικής αγωγιμότητας πλέγματος παρατηρείται ότι, την μικρότερη θερμική αγωγιμότητα πλέγματος έχει η σύσταση με $\text{Sn}=0.17$ με τιμή ίση $\kappa_{\text{lattice}} = 1.68\text{W/mK}$. Τέλος, από το γράφημα του αδιάστατου αριθμού ZT, αποκαλύπτεται ότι τις καλύτερες θερμοηλεκτρικές ιδιότητες έχει το υλικό με την σύσταση $\text{Hf}_{0.6}\text{Ti}_{0.4}\text{CoSb}_{0.83}\text{Sn}_{0.17}$ με μέγιστο $ZT=1.1$ στους 975K. Η τιμή $ZT=1.1$ αντιστοιχεί σε βελτίωση κατά 22% συγκριτικά με τη σύσταση $\text{Hf}_{0.6}\text{Ti}_{0.4}\text{CoSb}_{0.8}\text{Sn}_{0.2}$.

2.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση Θερμοηλεκτρικών Γεννητριών με υλικά half-Heusler

Ο Amin και λοιποί [57] κατασκεύασαν θερμοηλεκτρική γεννήτρια με ένα ζεύγος θερμοστοιχείων με υλικό half-Heusler. Οι συστάσεις υλικών για το θερμοστοιχείο p – τύπου και n – τύπου είναι ZrCoSb και ZrNiSn αντίστοιχα. Τα θερμοστοιχεία σε μορφή δισκίων κατασκευάστηκαν σε μήτρες γραφίτη με εσωτερική διάμετρο 12.7mm με τη χρήση του Spark Plasma Sintering (SPS). Η τελική μορφή των δισκίων που παράχθηκαν έχουν διάμετρο 12.7mm και ύψος 2mm. Στη συνέχεια, τα δισκία p – τύπου και n - τύπου κόπηκαν σε κύβους με μέγεθος 2.3x2.3x2 mm³ και 2.2x2.2x2 mm³ αντίστοιχα. Τα κυβικά θερμοστοιχεία ενώθηκαν με τεχνική Direct Bonding (Direct Bonding Technique) στα ηλεκτρόδια χαλκού με χρήση συγκολλητικού υλικού από κράμα χαλκού και άργυρου. Αξίζει να σημειωθεί ότι, τα ηλεκτρόδια χαλκού είναι ενωμένα με κεραμικό από AlN. Ακολούθως μετρήθηκε η αντίσταση επαφής με χρήση διάταξης τεσσάρων ακίδων και βρέθηκε ότι η αντίσταση επαφής για τα θερμοστοιχεία p – τύπου και n – τύπου < 1μΩ.cm². Έπειτα, η θερμοηλεκτρική γεννήτρια τέθηκε σε θερμοκρασιακή διαφορά ΔT=670°C για να πραγματοποιηθεί ο χαρακτηρισμός. Τα αποτελέσματα που έχουν ληφθεί από τους ερευνητές ακολουθούν σε μορφή πίνακα.

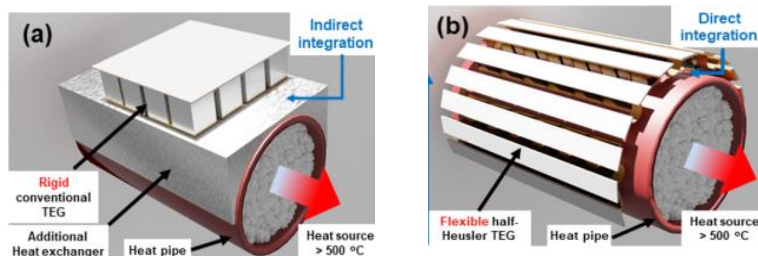
Μεταβλητές Ενδιαφέροντος	V _{oc} [mV]	P _d [W.cm ⁻²]	η _{max} [%]
Αποτέλεσμα	231.4	11.5	9.5

Πίνακας 2.1: Τάση ανοικτού κυκλώματος, πυκνότητα ισχύος και μέγιστη απόδοση μετατροπής γεννήτριας από [57].

Σύμφωνα με τον πίνακα 2.1, η πυκνότητα ισχύος είναι η μεγαλύτερη από όλες τις όμοιες θερμοηλεκτρικές γεννήτριες με όμοια θερμοηλεκτρικά υλικά και σε ίδια θερμοκρασιακή διαφορά.

Ο Wenjie και λοιποί [55] κατασκεύασαν, με το υπολογιστικό εργαλείο COMSOL, μοντέλο θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με 72 ζεύγη θερμοστοιχείων με υλικό half-Heusler πάνω σε κοίλο σωλήνα, ο οποίος έχει διαφορά θερμοκρασίας. Μ' αυτό θέλουν να αποδείξουν την εφαρμογή των θερμοηλεκτρικών γεννητριών σε μη επίπεδες επιφάνειες. Οι συστάσεις υλικών για το θερμοστοιχείο p – τύπου και n – τύπου είναι $Nb_{0.95}Ti_{0.05}FeSb$ και $(Hf_{0.6}Zr_{0.4})NiSn_{0.99}Sb_{0.1}$ αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε σύγκριση άκαμπτης θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με θερμοηλεκτρική γεννήτρια που λαμβάνει το σχήμα του κυλίνδρου.

Η συμπαγής θερμοηλεκτρική γεννήτρια εφαρμόστηκε στον κυλινδρικό σωλήνα μέσω διάταξης που «αγκαλιάζει» τη σωλήνα και έχει επίπεδη επιφάνεια όπου και εφαρμόζεται. Από την άλλη, η θερμοηλεκτρική γεννήτρια που λαμβάνει το σχήμα του κυλινδρικού σωλήνα κατασκευάζεται σε μεμονωμένες θερμοηλεκτρικές γεννήτριες των 6 ζευγών θερμοστοιχείων και γεφυρώνονται ηλεκτρικά σε σειρά μέσω ευλύγιστων κομματιών χαλκού. Συνολικά ενώθηκαν δώδεκα γεννήτριες για να δημιουργήσουν τη γεννήτρια με τα 72 ζεύγη θερμοστοιχείων. Μέσω της προσομοίωσης, η θερμοηλεκτρική γεννήτρια που «αγκαλιάζει» τον κύλινδρο παράγει ηλεκτρική ισχύ 56.6W και η πυκνότητα ισχύος της μονάδας $3.13 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ σε θερμοκρασιακή διαφορά 570°C .



Εικόνα 2.2: Απεικόνιση του τρόπου κατασκευής της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας πάνω σε σωλήνα: Α) με συμπαγή γεωμετρία θερμοηλεκτρικής γεννήτριας και Β) με μεμονωμένα κομμάτια θερμοηλεκτρικών γεννητριών. [55]

Στη συνέχεια, προχώρησαν σε κατασκευή της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με τα μεμονωμένα κομμάτια μικρότερων θερμοηλεκτρικών γεννητριών. Συγκεκριμένα, έλαβαν δισκία με αρχικό ύψος 2mm και μείωσαν το ύψος τους στο $1.93\text{mm} \pm 5\mu\text{m}$. Έπειτα, κόπηκαν τα δισκία p & n τύπου σε κύβους των $1.8 \times 1.8 \text{ mm}^2$ και $2.2 \times 2.2 \text{ mm}^2$ και τα κατασκεύασαν τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια όπως επεξηγήθηκε προηγουμένως. Το ολικό μέγεθος της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας είναι $4.2 \times 4.3 \times 4.4 \text{ cm}^3$

Ο Junjie και λοιποί [63] κατασκεύασαν θερμοηλεκτρική γεννήτρια με οκτώ ζεύγη θερμοστοιχείων με υλικό half-Heusler. Οι συστάσεις υλικών για το θερμοστοιχείο p – τύπου και n – τύπου είναι $(\text{Nb}_{0.8}\text{Ta}_{0.2})_{0.8}\text{Ti}_{0.2}\text{FeSb}$ και $\text{Hf}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{NiSn}_{0.98}\text{Sb}_{0.02}$ αντίστοιχα. Τα δισκία p και n τύπου κόπηκαν σε κύβους με μέγεθος $4 \times 4 \times 11.8 \text{mm}^3$. Ακολούθως, τα θερμοστοιχεία έχουν συγκολληθεί στη θερμή μεριά της γεννήτριας σε κενό με χρήση κράματος Ag-Cu-Zn και από την ψυχρή μεριά έχουν συγκολληθεί με συγκολλητικό βάσης κασσιτέρου. Η ολική διάσταση της γεννήτριας είναι $20 \times 20 \times 14.3 \text{mm}^3$. Αξίζει να αναφερθεί ότι, η αντίσταση επαφής βρέθηκε να ανέρχεται στη τιμή $20 \mu\Omega \cdot \text{cm}^2$. Έπειτα, η θερμοηλεκτρική γεννήτρια τέθηκε σε θερμοκρασιακή διαφορά $\Delta T = 655 \text{K}$ για να πραγματοποιηθεί ο χαρακτηρισμός. Τα αποτελέσματα που έχουν ληφθεί από τους ερευνητές ακολουθούν σε μορφή πίνακα.

Μεταβλητές Ενδιαφέροντος	P_{max} [W]	P_d [$\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$]	n_{max} [%]
Αποτέλεσμα	8.5	2.11	8.3

Πίνακας 2.2: Μέγιστη ισχύς, πυκνότητα ισχύος και μέγιστη απόδοση μετατροπής γεννήτριας από [63].

Σύμφωνα με τον Junjie, η απόδοση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω με τη θερμική μόνωση και τη βελτιστοποίηση της συγκόλλησης της διεπιφάνειας.

Ο Yunfei και λοιποί [62] έκανα προσομοιώσεις θερμοηλεκτρικών γεννητριών μέσω του προγράμματος ANSYS-Workbench και κατασκεύασαν τις θερμοηλεκτρικές γεννήτριες βάση των προσομοιώσεων. Συγκεκριμένα, όλες οι γεννήτριες αποτελούνταν από οκτώ ζεύγη θερμοστοιχείων και οι συστάσεις υλικών για το θερμοστοιχείο p – τύπου και n – τύπου είναι $\text{Zr}_{0.5}\text{Hf}_{0.5}\text{CoSb}_{0.8}\text{Sn}_{0.2}$ και $\text{Zr}_{0.5}\text{Hf}_{0.5}\text{NiSn}_{0.985}\text{Sb}_{0.015}$ αντίστοιχα. Η κύρια μελέτη του Yunfei τόσο στις προσομοιώσεις όσο και πειραματικά είναι η επίδραση δύο παραμέτρων στη πυκνότητα ισχύος και στη μέγιστη απόδοση μετατροπής. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε ο λόγος του εμβαδού επιφάνειας των δύο θερμοστοιχείων και ο λόγος του ύψους των θερμοστοιχείων ως προς τη πρόσθεση των εμβαδών των θερμοστοιχείων.

Κατά τη προσομοίωση και την κατασκευή, η θερμοκρασία της θερμής μεριάς ισούται με $T_{heater} = 1023 \text{K}$ και η θερμοκρασία της ψυχρής μεριάς ισούται με $T_{cooler} = 298 \text{K}$. Με το τέλος των προσομοιώσεων, βρέθηκε η κατάλληλη περίπτωση να είναι αυτή

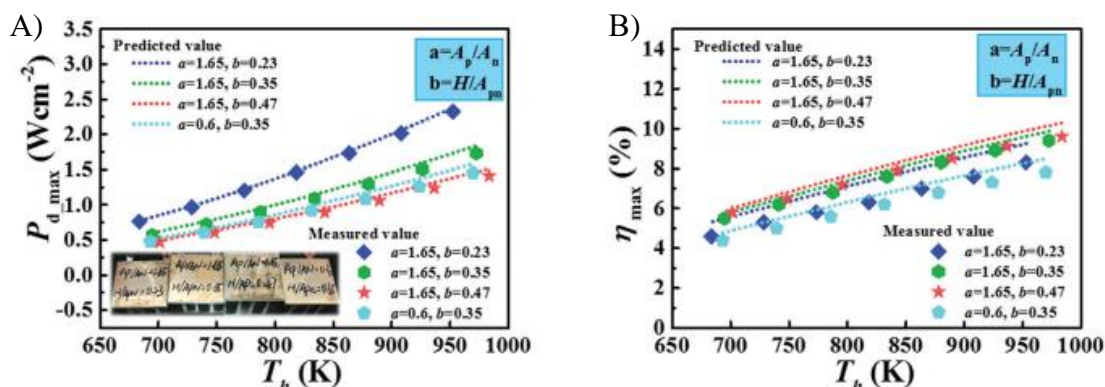
όπου $A_p/A_n = 1.65$ και $H/A_{pn} = 0.23 \text{ mm}^{-1}$. Τα αποτελέσματα που έχουν ληφθεί από τους ερευνητές ακολουθούν σε μορφή πίνακα για $T_{\text{heater}} = 953\text{K}$.

Μεταβλητές Ενδιαφέροντος	P_d [W. cm^{-2}]	η_{max} [%]
Αποτέλεσμα	2.33	8.3

Πίνακας 2.3: Πυκνότητα ισχύος και μέγιστη απόδοση μετατροπής γεννήτριας από [62].

Κατά τη κατασκευή των θερμοηλεκτρικών γεννητριών τα θερμοστοιχεία κόπηκαν στις επιθυμητές για τους ερευνητές διαστάσεις και ενώθηκαν με CCL (Copper Clad Plate) στη θερμή μεριά. Στη ψυχρή μεριά τα θερμοστοιχεία έχουν συγκολληθεί με συγκολλητικό βάσης κασσιτέρου πάνω σε χαλκό (DBC). Κατόπιν, πραγματοποιήθηκε ο χαρακτηρισμός των διαφόρων θερμοηλεκτρικών γεννητριών και όλες οι επιδόσεις εξόδου συμφωνούν σε μεγάλο βαθμό με τις προβλεπόμενες τιμές.

Πιο κάτω ακολουθούν δύο πίνακες που λαμβάνονται από τη συγκεκριμένη έρευνα και αφορούν τη πυκνότητα ισχύος και μέγιστη απόδοση μετατροπής ως προς τη θερμοκρασία θερμής μεριάς και συγκεκριμένων τιμών γεωμετρικών παραμέτρων.



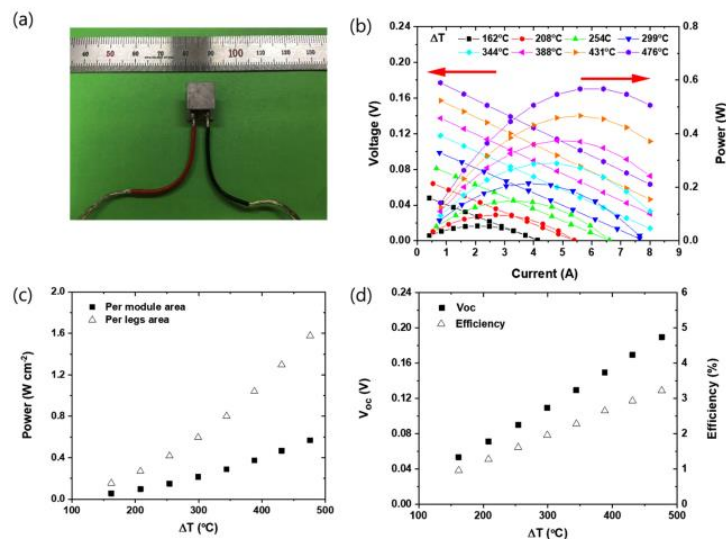
Γράφημα 2.7: Α) πυκνότητα ισχύος και Β) μέγιστη απόδοση μετατροπής ως προς τη θερμοκρασία θερμής μεριάς και συγκεκριμένων τιμών γεωμετρικών παραμέτρων. [62]

Ο Sung-Jae και λοιποί [54] κατασκεύασαν θερμοηλεκτρική γεννήτρια με δύο ζεύγη θερμοστοιχείων με υλικό half-Heusler. Οι συστάσεις υλικών για το θερμοστοιχείο p - τύπου και n - τύπου είναι $\text{Nb}_{0.8}\text{Hf}_{0.2}\text{FeSb}_{0.98}\text{Sn}_{0.02}$ και $\text{Hf}_{0.25}\text{Zr}_{0.25}\text{Ti}_{0.5}\text{NiSn}_{0.98}\text{Sb}_{0.02}$ αντίστοιχα. Το μέγεθος των θερμοστοιχείων κατά την κοπή είναι $3 \times 3 \times 5 \text{ mm}^3$ και συνδέθηκαν απευθείας σε χαλκό και μήτρα ((DBC)/ Al_2O_3) με χρήση κράματος ζirkονίου (Zr), νικελίου (Ni), τιτανίου (Ti) και χαλκού (Cu). Η θερμοκρασία και χρόνος θέρμανσης των θερμοστοιχείων για τη συγκόλληση τους είναι 830°C για 2 λεπτά. Αξίζει να σημειωθεί ότι, δεν χρησιμοποιήθηκε επιμετάλλωση των θερμοστοιχείων πριν τη συγκόλληση τους.

Ακολουθώς, υπολογίζεται μέσω γραφικών και εξισώσεων η αντίσταση επαφής των θερμοστοιχείων p και n τύπου και ισούται με $6.63 \times 10^{-9} \Omega m^2$ για θερμοκρασία θερμής επιφάνειας $T_h = 190^\circ C$. Κατόπιν, κατά το χαρακτηρισμό της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας υπήρχε θερμοκρασιακή διαφορά ίση με $\Delta T = 476^\circ C$. Τα αποτελέσματα του χαρακτηρισμού για τις θερμοηλεκτρικές γεννήτριες παρουσιάζονται σε μορφή πίνακα.

Μεταβλητές Ενδιαφέροντος	I [A]	V _{oc} [V]	P _{max} [W]	P _d [W · cm ⁻²]	n _{max} [%]
Αποτέλεσμα	6.4	0.19	0.57	1.58	3.22

Πίνακας 2.4: Ηλεκτρικό ρεύμα, τάση ανοικτού κυκλώματος, μέγιστη ισχύς, πυκνότητα ισχύος και μέγιστη απόδοση μετατροπής για θερμοκρασιακή διαφορά $\Delta T = 476^\circ C$ γεννήτριας από [54].

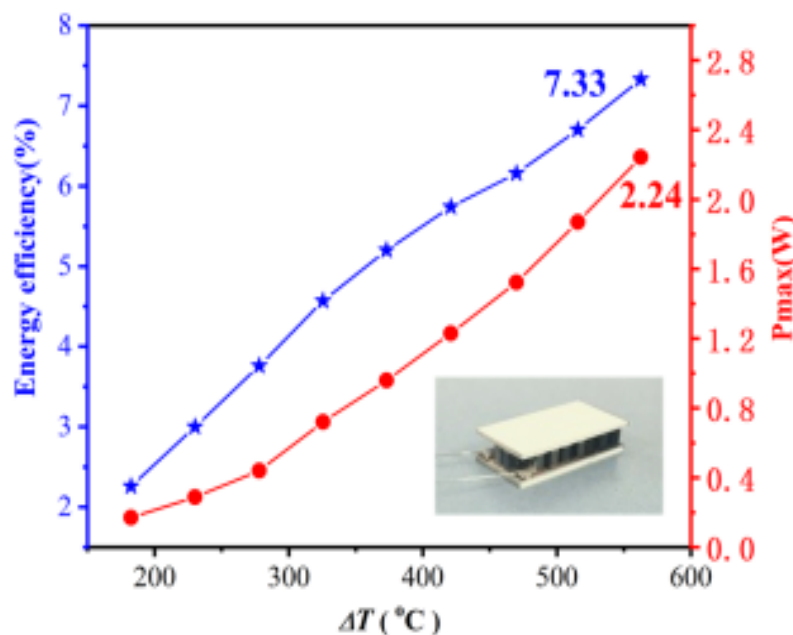


Γράφημα 2.8: Α) Απεικόνιση θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με δύο ζεύγη θερμοστοιχείων, Β) τάση και ισχύς ως προς το ηλεκτρικό ρεύμα κάτω από διαφορετικές τιμές ΔT , Γ) πυκνότητα ισχύος ως προς τη θερμοκρασιακή διαφορά ΔT βάση του εμβαδού διατομής των θερμοστοιχείων και ολόκληρης της θερμοηλεκτρικής μονάδας και Δ) η τάση ανοικτού κυκλώματος και απόδοσης ως προς τη θερμοκρασιακή διαφορά ΔT . [54]

Ο Jiaxu και λοιποί [65] κατασκεύασαν θερμοηλεκτρική γεννήτρια με 15 ζεύγη θερμοστοιχείων με υλικό half-Heusler. Οι συστάσεις υλικών για το θερμοστοιχείο p – τύπου και n – τύπου είναι $FeNb_{0.88}Hf_{0.12}Sb$ και $Hf_{0.25}Zr_{0.75}NiSn_{0.99}Sb_{0.01}$ αντίστοιχα. Το υλικό που χρησιμεύει ως φράγμα διάχυσης για το θερμοστοιχείο p – τύπου μετά από μελέτη είναι το $Ag_{0.9}Ni_{0.1}$ και εφαρμόζεται με τεχνική SPS. Στη συνέχεια, υπολογίστηκε η αντίσταση επαφής μέσω scanning probe method και υπολογίστηκε να ισούται με $0.4 \mu\Omega \cdot cm^2$. Το μέγεθος των θερμοστοιχείων κατά την κοπή είναι $1.2 \times 1.2 \times 2 mm^3$ και συνδέθηκαν ηλεκτρικά σε σειρά με χαλκό και θερμικά παράλληλα. Κατά το χαρακτηρισμό της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας η θερμοκρασία της θερμής μεριάς ανερχόταν στους $600^\circ C$. Τα αποτελέσματα του χαρακτηρισμού για τις θερμοηλεκτρικές γεννήτριες παρουσιάζονται σε μορφή πίνακα.

Μεταβλητές Ενδιαφέροντος	P_{max} [W]	P_d [$W \cdot cm^{-2}$]	η_{max} [%]
Αποτέλεσμα	2.24	1.12	7.33

Πίνακας 2.5: Μέγιστη ισχύς, πυκνότητα ισχύος και μέγιστη απόδοση μετατροπής γεννήτριας από [65].



Γράφημα 2.9: Απεικόνιση της μέγιστης απόδοσης μετατροπής και της μέγιστης ισχύς γεννήτριας από [65].

Πιο κάτω παρουσιάζονται πίνακες με όλα τα χαρακτηριστικά των θερμοηλεκτρικών γεννητριών της βιβλιογραφίας και τα αποτελέσματα των γεννητριών.

Αρθρο	Χημ. Σύσταση	Σχήμα Κύβου	Αριθμός Ζευγών	ΔT [K]	
[57]	ZrCoSb / ZrNiSn	2.3x2.3x2 / 2.2x2.2x2mm ³	1	943	
[55]	Nb _{0.95} Ti _{0.05} FeSb / (Hf _{0.6} Zr _{0.4})NiSn _{0.99} Sb _{0.1}	1.8x1.8x1.9 / 2.2x2.2x1.9 mm ³	72	843	
[63]	(Nb _{0.8} Ta _{0.2}) _{0.8} Ti _{0.2} FeSb / Hf _{0.5} Zr _{0.5} NiSn _{0.98} Sb _{0.02}	4x4x11.8 mm ³	8	655	
[62]	Zr _{0.5} Hf _{0.5} CoSb _{0.8} Sn _{0.2} / Zr _{0.5} Hf _{0.5} NiSn _{0.985} Sb _{0.015}	-	8	725	
[54]	Nb _{0.8} Hf _{0.2} FeSb _{0.98} Sn _{0.02} / Hf _{0.25} Zr _{0.25} Ti _{0.5} NiSn _{0.98} Sb _{0.02}	3x3x5 mm ³	2	749	
[65]	FeNb _{0.88} Hf _{0.12} Sb / Hf _{0.25} Zr _{0.75} NiSn _{0.99} Sb _{0.01}	1.2x1.2x2 mm ³	15	833	
Αρθρο	I [A]	V _{oc} [V]	P _{max} [W]	P _d [W.cm ⁻²]	n _{max} [%]
[57]	-	0.231	-	11.5	9.5
[55]	-	-	56.6	3.13	-
[63]	-	-	8.5	2.11	8.3
[62]	-	-	-	2.33	8.3
[54]	6.4	0.19	0.57	1.58	3.22
[65]	-	-	2.24	1.12	7.33

Πίνακας 2.6: Παρουσιάζονται όλα τα χαρακτηριστικά και αποτελέσματα των θερμοηλεκτρικών γεννητριών της βιβλιογραφικής ανασκόπησης.

Κεφάλαιο 3

3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Στο τρέχον κεφάλαιο, παρουσιάζεται η προσομοίωση θερμοηλεκτρικών γεννητριών. Συγκεκριμένα, πραγματοποιείται αναφορά για σημαντικότητα ανάπτυξης μοντέλου θερμοηλεκτρικής γεννήτριας και αναλύεται η διαδικασία ανάπτυξης θερμοηλεκτρικών γεννητριών στο υπολογιστικό εργαλείο COMSOL Multiphysics 5.2. Για κάθε προσομοίωση μοντέλου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε μορφή πινάκων και γραφημάτων. Τέλος, πραγματοποιείται ανάπτυξη μοντέλου θερμοηλεκτρικής γεννήτριας από τη βιβλιογραφία με σκοπό να προκύψουν τα ίδια αποτελέσματα, έτσι ώστε να γίνει πιστοποίηση ότι τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν είναι ορθά και έμπιστα.

3.1 Σημαντικότητα Ανάπτυξης Μοντέλου Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας

Βάση του θεωρητικού υποβάθρου, όταν δοθεί θερμοκρασιακή διαφορά σε μια ενότητα θερμοηλεκτρικής γεννήτριας, μέσω του φαινομένου Seebeck, εμφανίζεται στα άκρα της διαφορά δυναμικού. Για να είναι εφικτή η πληροφορία της συμπεριφοράς της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας κάτω από θερμοκρασιακή διαφορά, πρέπει να πραγματοποιήσει είτε πείραμα, είτε προσομοίωση μέσω προγράμματος προσομοίωσης με τη χρήση ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή. Αξίζει να αναφερθεί ότι, η προσομοίωση αντικατοπτρίζει πολύ καλά τη λειτουργία της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας, αλλά δεν υπάρχουν σ' αυτή διάφορα φαινόμενα του περιβάλλοντος που επηρεάζουν τη λειτουργία της γεννήτριας κατά τη διάρκεια του πειράματος, όπως τη ροή αέρα στο χώρο.

Με τη χρήση ενός υπολογιστικού προγράμματος που εκτελεί προσομοιώσεις, ο χρήστης είναι σε θέση να δημιουργήσει ένα μοντέλο θερμοηλεκτρικής γεννήτριας βάση των δικών του αναγκών και να μελετήσει το πως συμπεριφέρεται με αλλαγή παραμέτρων που αφορούν τη γεωμετρία και τις συνοριακές συνθήκες. Για παράδειγμα, είναι δυνατό να ορίσει μια παράμετρο που λαμβάνει μέρος σε μια διάσταση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας και με βάση τιμών που θα ορίσει να έχει διαφορετικό αποτέλεσμα. Βάση των αποτελεσμάτων που θα υπάρχουν στη διάθεση του, θα πρέπει να είναι σε θέση να βρει τη βέλτιστη λύση. Αξίζει να σημειωθεί ότι, είναι δυνατό να οριστούν όσες παραμέτρους απαιτούνται και να βρεθεί το σεντ παραμέτρων που να είναι οι βέλτιστες και να ικανοποιούν το πρόβλημα. Μια άλλη χρήση του υπολογιστικού μοντέλου μιας ενότητας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας είναι να πραγματοποιηθεί η πρόβλεψη με βάση γνωστών

παραμέτρων και συνοριακών συνθηκών. Σ' αυτή τη περίπτωση το πρόβλημα απλοποιείται γιατί αν δημιουργηθεί σωστά ένα μοντέλο, τότε δίνεται στο χρήστη η πληροφορία που θα πρέπει να περιμένει σε περίπτωση εκτέλεσης του συγκεκριμένου πειράματος.

Στα πλαίσια της μεταπτυχιακής εργασίας, πραγματοποιείται μελέτη για τη λήψη αποτελεσμάτων βάση συγκεκριμένων παραμέτρων, που αφορούν τη γεωμετρία και τις συνοριακές συνθήκες της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας. Η ανάπτυξη του μοντέλου πραγματοποιείται με τη χρήση του προγράμματος προσομοίωσης COMSOL Multiphysics 5.2. Παρ' όλα αυτά, θα πραγματοποιηθεί παραμετρική ανάλυση ως προς την εξωτερική αντίσταση και θερμοκρασία θερμής μεριάς για να κατασκευαστούν οι καμπύλες λειτουργίας των θερμοηλεκτρικών γεννητριών.

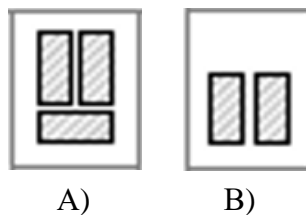
3.2 Ανάπτυξη Μοντέλων Θερμοηλεκτρικών Γεννητριών

Σύμφωνα με τις ανάγκες μελέτης, απαιτείται η ανάπτυξη δύο μοντέλων θερμοηλεκτρικής γεννήτριας στο πρόγραμμα προσομοίωσης COMSOL Multiphysics 5.2, των οποίων αυτό που αλλάζει είναι ο αριθμός των ζευγών θερμοστοιχείων και το μέγεθος των κεραμικών πλακών αλουμίνας. Συγκεκριμένα, η πρώτη ανάπτυξη θερμοηλεκτρική γεννήτρια που μελετιέται περιέχει δύο ζεύγη θερμοστοιχείων half-Heusler και η δεύτερη θερμοηλεκτρική γεννήτρια περιέχει οκτώ ζεύγη θερμοστοιχείων half-Heusler. Ο λόγος που αρχικά αναπτύσσεται το μοντέλο της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με τα δύο ζεύγη θερμοστοιχείων και όχι των οκτώ είναι για να υπάρχουν λιγότερα περιθώρια λάθους κατά την ανάπτυξη και σε περίπτωση προβλήματος να υπάρχουν λιγότερα μέρη της γεννήτριας που θα πρέπει να ελεγχθούν και να διορθωθούν. Έτσι, η ανάπτυξη της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με οκτώ ζεύγη θερμοστοιχείων θα πραγματοποιηθεί ορθά και σε μικρό χρόνο.

Οι μελέτες που απαιτούνται να χρησιμοποιηθούν στην ανάπτυξη των δύο θερμοηλεκτρικών γεννητριών είναι το πακέτο του θερμοηλεκτρικού φαινομένου (Thermoelectric effect) και του ηλεκτρικού κυκλώματος (Electrical Circuit). Άξιο αναφοράς είναι ότι, με τη προσθήκη του πακέτου του θερμοηλεκτρικού φαινομένου κατατάσσεται ο τομέας των ηλεκτρικών ρευμάτων (Electric Currents), ο τομέας της μεταφοράς θερμότητας και ο τομέας Multiphysics. Τέλος, λόγω της ανάγκης για μελέτη της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας σε κατάσταση ισορροπίας, χρησιμοποιείται η επιλογή της σταθερής κατάστασης

3.2.1 Θερμοηλεκτρική Γεννήτρια με δύο Ζεύγη Θερμοστοιχείων

Με τη χρήση του προγράμματος προσομοίωσης COMSOL Multiphysics 5.2, αναπτύσσεται θερμοηλεκτρική γεννήτρια με δύο ζεύγη θερμοστοιχείων. Τα γεωμετρικά μεγέθη αυτής της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας, όσο αφορά τις κεραμικές πλάκες αλουμίνιας, είναι τα ίδια με αυτά που προαναφέρονται στο Κεφάλαιο 3 ‘Έρευνας Αγοράς Υλικών’.

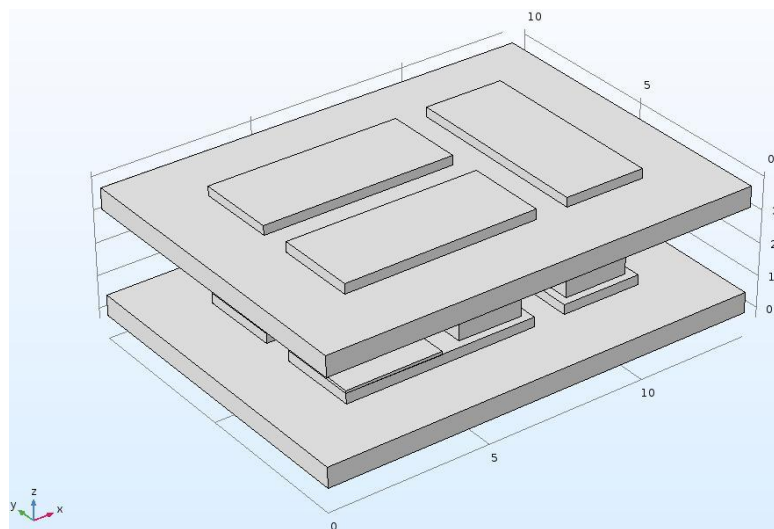


Εικόνα 3.1: Απεικόνιση των κεραμικών πλακών μαζί με τα ηλεκτρόδια χαλκού A) της κάτω πλάκας και B) της άνω πλάκας για τα δύο ζεύγη θερμοστοιχείων.

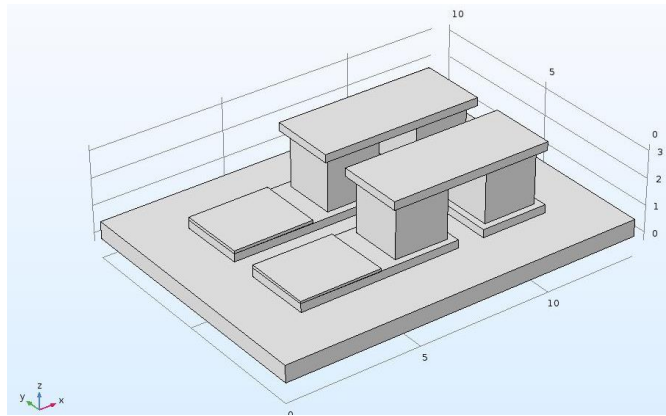
Πιο κάτω ακολουθεί πίνακας με τις τιμές των μεγεθών των διαφόρων στοιχείων που απαρτίζουν τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια.

Θερμοστοιχεία	Ηλεκτρόδια Χαλκού	Πλάκες Αλουμίνιας
2 * 2 * 2 mm	6 * 2.5 * 0.3 mm	13.5 * 10 * 0.63 mm

Πίνακας 3.1: Παρουσιάζονται οι γεωμετρικές τιμές των διαφόρων στοιχείων που απαρτίζουν τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια με τα δύο ζεύγη θερμοστοιχείων.



Εικόνα 3.2: Απεικόνιση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με τα δύο ζεύγη θερμοστοιχείων που αναπτύχθηκε με τη χρήση του COMSOL Multiphysics 5.2.



Εικόνα 3.3: Απεικόνιση του εσωτερικού της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με τα δύο ζεύγη θερμοστοιχείων.

Materials

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για να οριστούν τα διάφορα στοιχεία της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας είναι τα εξής:

1. Δύο πλάκες κεραμικού Alumina
2. Χαλκός για τα ηλεκτρόδια που συνδέουν ηλεκτρικά σε σειρά τα θερμοστοιχεία
3. Half-Heusler ημιαγωγός p-τύπου – $Ti_{0.4}Hf_{0.6}CoSb_{0.83}Sn_{0.17}$
4. Half-Heusler ημιαγωγός n-τύπου – $Ti_{0.4}Zr_{0.6}NiSb_{0.015}Sn_{0.985}$

Οι ιδιότητες που τοποθετούνται στα υλικά half-Heusler p – τύπου και n – τύπου αντίστοιχα, δίνονται από τους μεταδιδακτορικούς ερευνητές της ομάδας των θερμοηλεκτρικών υλικών.

Heat Transfer in Solids

Στο τομέα του Heat Transfer in Solids, ορίζονται οι θερμοκρασίες της θερμής και ψυχρής μεριάς της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας πάνω στα ηλεκτρόδια χαλκού της εξωτερικής πλευράς των κεραμικών πλακών. Συγκεκριμένα, η τιμή της ψυχρής μεριάς της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας ανέρχεται στους 298[K], ενώ στη θερμή μεριά ορίζεται παράμετρος με όνομα « T_{hot} » για να τοποθετηθούν διάφορες τιμές θερμοκρασιών για να κατασκευαστεί η καμπύλη λειτουργίας που παρουσιάζεται κατόπιν. Τέλος, ορίζουμε ότι η μεταφορά θερμότητας λαμβάνει μέρος σε όλα τα στοιχεία που απαρτίζουν τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια και πως υπάρχει θερμική μόνωση στις περιοχές των στοιχείων όπου δεν υπάρχει επαφή. Έτσι εξασφαλίζεται ότι η θερμότητα μεταφέρεται στον κατακόρυφο άξονα.

Electric Currents

Σ' αυτό το τομέα, αρχικά καθορίζεται ότι ροή ρεύματος υπάρχει μόνο στους ημιαγωγούς p & n τύπου και στις λωρίδες χαλκού και όχι στις κεραμικές πλάκες από Alumina. Στη συνέχεια, ορίζεται μια γείωση στο άκρο της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας που υπάρχει ο ημιαγωγός n – τύπου, για να μηδενίζεται η τάση στο συγκεκριμένο σημείο. Τέλος, ορίζονται οι δύο ηλεκτρικές ενώσεις (terminals), στις οποίες θα υπάρξει ένωση μιας εξωτερικής αντίστασης (Load Resistance) για να πραγματοποιηθεί ορθά ο χαρακτηρισμός της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας. Σ' αυτές τις δύο ηλεκτρικές ενώσεις ορίζεται ότι θα υπάρξει σύζευξη του θερμοηλεκτρικού και ηλεκτρικού κυκλώματος, το οποίο θα περιέχει την εξωτερική αντίσταση. Τέλος, ορίζονται οι αντιστάσεις επαφής (Contact Impedance) σε κάθε επιφάνεια κάθε θερμοστοιχείου p – τύπου και n – τύπου ξεχωριστά. Η τιμή της αντίστασης επαφής για κάθε θερμοστοιχείο αναφέρεται στο επόμενο κεφάλαιο, υπο-υποκεφάλαιο 5.11.2, αλλά για σκοπούς αναφοράς θα παρουσιαστούν και σ' αυτό το σημείο.

Contact Resistance	HH – p τύπου	HH – n τύπου
$R \cdot C_{avg} [\Omega cm^2]$	4.78×10^{-5}	1.84×10^{-5}

Πίνακας 3.2: Παρουσιάζονται οι τιμές της μέσης αντίστασης επαφής για κάθε τύπου ημιαγωγών p&n τύπου.

Electrical Circuit

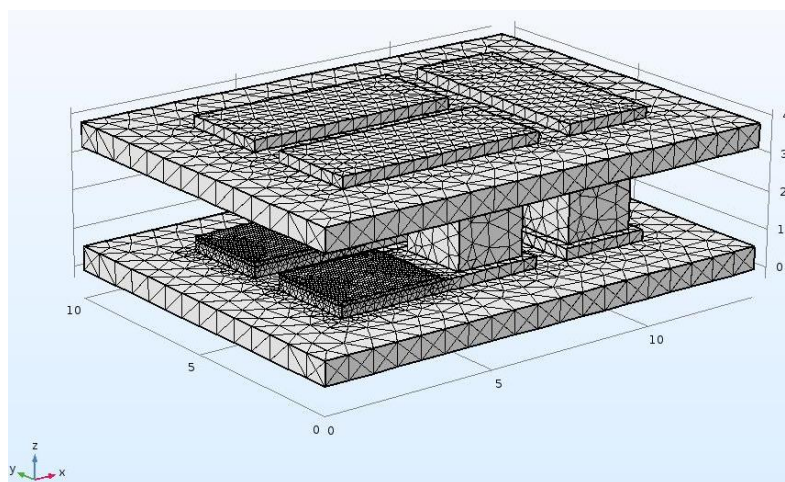
Η απαίτηση της προσθήκης του τομέα του ηλεκτρικού κυκλώματος για τη χρήση του, οφείλεται στο γεγονός ότι δίνει την δυνατότητα να ορίσει ο χρήστης μια εξωτερική αντίσταση φορτίου στη γεννήτρια. Συγκεκριμένα, ορίζεται μια εξωτερική αντίσταση και λαμβάνει όνομα παραμέτρου « R_{exte} » με τα άκρα της να ονομάζονται 1 και 2 στις ονομασίες των κόμβων. Ο λόγος που χρειάζεται να ονομαστούν τα άκρα της αντίστασης φορτίου είναι για να πραγματοποιηθεί ύστερα η ηλεκτρική σύνδεση με τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια. Ακολούθως, ορίζεται η γείωση του κυκλώματος με ονομασία στον κόμβο της να είναι το 0. Έπειτα, δημιουργούνται δύο εξωτερικές συζεύξεις – External I Vs U, στις οποίες ορίζονται οι ονομασίες του κόμβου της γείωσης και των κόμβων των άκρων της εξωτερικής αντίστασης. Με τις εξωτερικές συζεύξεις γίνεται εφικτή η λήψη της τιμής του ηλεκτρικού δυναμικού και ηλεκτρικού ρεύματος σε κάθε ηλεκτρική ένωση (terminal).

Multiphysics

Στο τομέα Multiphysics, αρχικά ορίζονται τα στοιχεία της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας που παρουσιάζουν θερμοηλεκτρικό φαινόμενο, τα οποία είναι μόνο τα θερμοστοιχεία p&n τύπου. Έπειτα, ορίζονται τα στοιχεία που παράγουν θερμότητα λόγω του φαινομένου Joule, τα οποία είναι τα θερμοστοιχεία p&n τύπου και τα ηλεκτρόδια χαλκού.

Mesh

Στο συγκεκριμένο μέρος της διαδικασίας της προσομοίωσης της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας απαιτείται η δημιουργία πλέγματος (mesh). Στο συγκεκριμένο πρόβλημα ένα πολύ καλό πλέγμα πρέπει να είναι αρκετά πυκνό, γιατί η γεννήτρια περιέχει στοιχεία τα οποία η ελάχιστη διάσταση είναι κάτω από 1mm. Γι' αυτό το λόγο ορίζεται πλέγμα ονομασίας Finer. Παρ' όλα αυτά, η διαδικασία για την επιλογή του τύπου του πλέγματος που θα χρησιμοποιηθεί, πραγματοποιείται βάση δοκιμών. Συγκεκριμένα, στην αρχή τοποθετείται το πιο αραιό πλέγμα για να τρέξει η προσομοίωση. Λόγω όμως των μικρών μεγεθών που έχουν τα στοιχεία της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας, το COMSOL προειδοποιεί ότι απαιτείται ένα πιο πυκνό πλέγμα. Ακολουθώντας, τοποθετούνται με τη σειρά από το αραιό στο πιο πυκνό πλέγμα και σ' αυτό που δεν παρατηρείται αλλαγή στις τιμές των αποτελεσμάτων, τότε αυτό είναι και το προτιμότερο πλέγμα γιατί δίνει τις λύσεις στο γρηγορότερο χρόνο. Όμως δεν είναι απαγορευτική η χρήση πιο πυκνού πλέγματος, αφού θα δώσει λύσεις με μεγαλύτερη ακρίβεια αλλά θα διαρκέσει περισσότερο η προσομοίωση.



Εικόνα 3.4: Απεικόνιση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με τα δύο ζεύγη θερμοστοιχείων μετά τη δημιουργία πλέγματος ονομασίας Finer.

Study

Ο τομέας της μελέτης της γεωμετρίας με όλα τα χαρακτηριστικά είναι το τελευταίο μέρος που απαιτείται για να τελειώσει η προσομοίωση της θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας με τα δύο ζεύγη θερμοστοιχείων.

Όπως προαναφέρθηκε πιο πάνω ορίστηκαν δύο παράμετροι με το όνομα « R_{exte} » και « T_{hot} ». Με τη χρήση των δύο παραμέτρων εκτελούνται δύο παραμετρικές αναλύσεις και συγκεκριμένα η R_{exte} αφορά την εσωτερική αντίσταση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας και η T_{hot} αφορά την κατανόηση της παραγωγής ισχύος με την αύξηση της θερμοκρασίας. Επίσης, θα είναι δυνατό να κατασκευαστούν οι καμπύλες λειτουργίας της ηλεκτρικής ισχύος ως προς τις τιμές της εξωτερικής αντίστασης και της ηλεκτρικής ισχύος ως προς τις τιμές της θερμοκρασίας της θερμής μεριάς της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας. Αξίζει να αναφερθεί ότι, οι δύο παραμετρικές αναλύσεις πραγματοποιούνται ξεχωριστά, δηλαδή σε διαφορετικές προσομοιώσεις.

Αρχικά, εφαρμόζεται η παραμετρική ανάλυση ως προς την εξωτερική αντίσταση φορτίου, για να βρεθεί η εσωτερική αντίσταση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας. Ο λόγος που χρειάζεται να βρεθεί η εσωτερική αντίσταση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας μέσω της παραμετρικής ανάλυσης είναι γιατί σύμφωνα με τη θεωρία η μέγιστη παραγόμενη ισχύς λαμβάνεται όταν ο λόγος της εσωτερικής αντίστασης ως προς τη εξωτερική αντίσταση φορτίου ισούται με 1.

Κατόπιν, εφαρμόζεται η παραμετρική ανάλυση ως προς τη θερμοκρασία της θερμής μεριάς της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας, για να κατασκευαστεί η καμπύλη λειτουργίας της ηλεκτρικής ισχύος ως προς τη θερμοκρασία της θερμής μεριάς της γεννήτριας.

Στις δύο παραμετρικές αναλύσεις χρησιμοποιείται ο επιλύτης (solver) με ονομασία PARDISO.

Με τη εφαρμογή διαφόρων τιμών της εξωτερικής αντίστασης φορτίου και της θερμοκρασίας της θερμής μεριάς της γεννήτριας, ξεκινάει ο υπολογισμός των προσομοιώσεων του μοντέλου. Με το πέρας των δύο προσομοιώσεων λαμβάνονται διάφορες πληροφορίες ενδιαφέροντος, όπως το ηλεκτρικό δυναμικό στα άκρα της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας, η ένταση στις ηλεκτρικές ενώσεις, τη κατανομή της θερμοκρασίας κατά μήκος του κατακόρυφου άξονα και την παραγόμενη ισχύ.

3.2.2 Αποτελέσματα Προσομοίωσης Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας με δυο ζεύγη θερμοστοιχείων

Παραμετρική Ανάλυση Εξωτερικής Αντίστασης - R_{exte}

Με τη λήψη των δεδομένων/αποτελεσμάτων από το εργαλείο προσομοίωσης COMSOL Multiphysics 5.2, χρησιμοποιείται αρχείο της Excel για την επεξεργασία τους, δηλαδή τον γρήγορο υπολογισμό της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος για κάθε μέτρηση. Η εξίσωση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ισχύος είναι η εξής:

$$P = V * I [W] \quad \text{Εξ 3.1}$$

Όπου:

P: η χρήσιμη παραγόμενη ισχύς [Watts]

V: η ηλεκτρική τάση [V]

I: η ένταση ρεύματος [A]

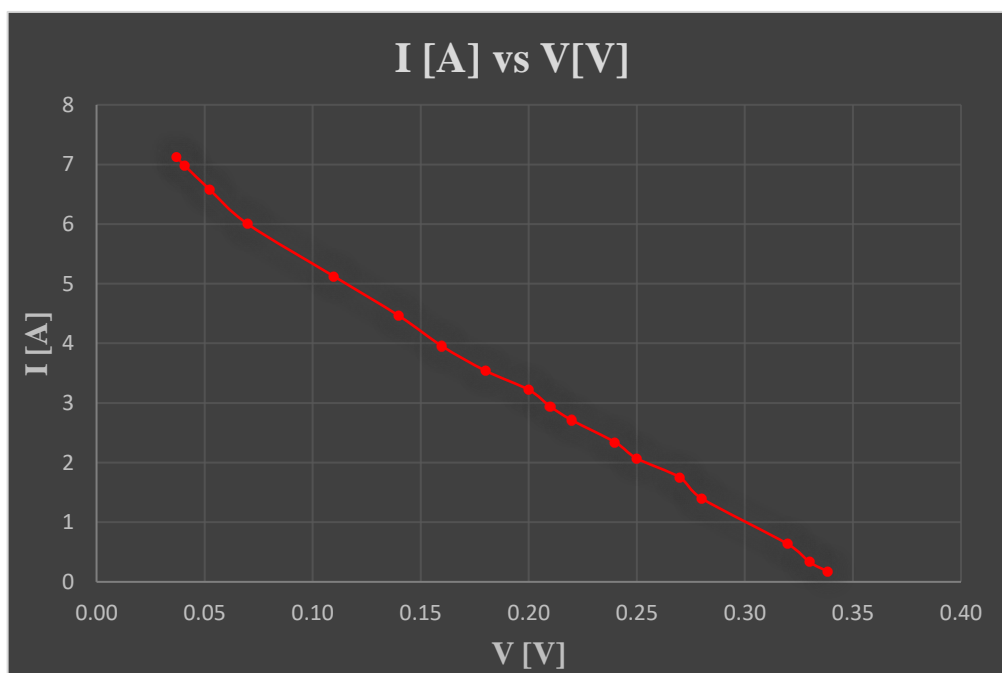
Πιο κάτω παρουσιάζονται τα δεδομένα/αποτελέσματα που λαμβάνονται από τη προσομοίωση με τη παραμετρική ανάλυση R_{exte} σε μορφή πίνακα για θερμοκρασία θερμής και ψυχρής μεριάς ίση με 773K και 298K αντίστοιχα για κάθε τιμή αντίστασης.

R_{exte} [Ω hms]	V [V]	I [A]	P [Watts]
0.001	3.71E-02	7.12	2.64E-01
0.002	4.11E-02	6.97	2.86E-01
0.005	5.23E-02	6.58	3.44E-01
0.01	7.00E-02	6	4.20E-01
0.02	1.10E-01	5.12	5.63E-01
0.03	1.40E-01	4.46	6.24E-01
0.04	1.60E-01	3.95	6.32E-01
0.05	1.80E-01	3.54	6.37E-01
0.06	2.00E-01	3.22	6.44E-01
0.07	2.10E-01	2.94	6.17E-01
0.08	2.20E-01	2.71	5.96E-01
0.1	2.40E-01	2.34	5.62E-01
0.12	2.50E-01	2.07	5.18E-01
0.15	2.70E-01	1.75	4.73E-01
0.2	2.80E-01	1.4	3.92E-01
0.5	3.20E-01	0.63	2.02E-01

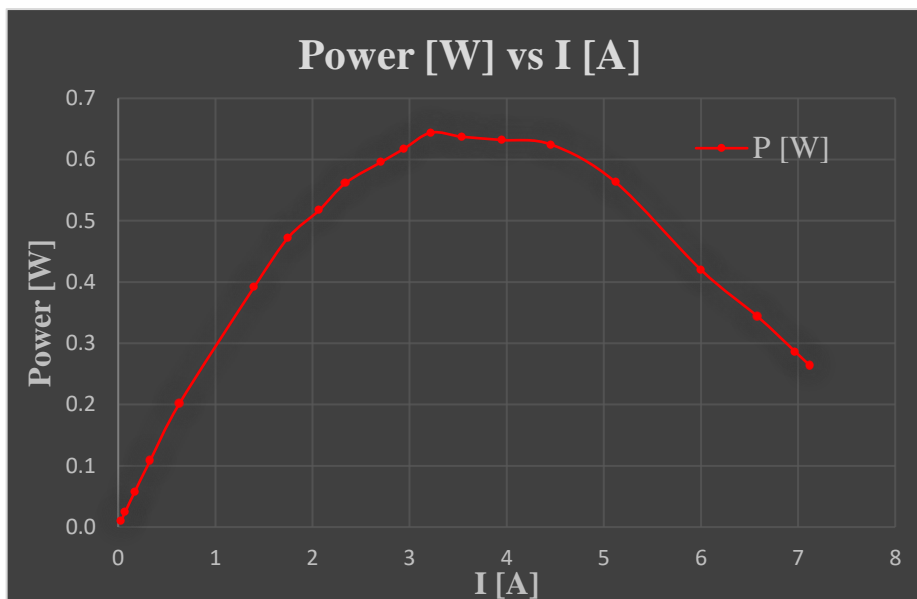
1	3.30E-01	0.33	1.09E-01
2	3.39E-01	0.17	5.76E-02
5	3.43E-01	0.07	2.40E-02
10	3.45E-01	0.03	1.03E-02

Πίνακας 3.3: Παρουσιάζονται τα δεδομένα που αφορούν τις τιμές της εξωτερικής αντίστασης φορτίου, την ένταση του ρεύματος, τη τάση και το αποτέλεσμα που αντικατοπτρίζει την ηλεκτρική ισχύ για τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια με τα δύο ζεύγη θερμοστοιχείων.

Με τη χρήση του υπολογιστικού προγράμματος Excel, δημιουργούνται οι καμπύλες λειτουργίας της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας. Συγκεκριμένα, είναι δυνατόν να αναπαραχθούν η καμπύλη έντασης ως προς τάσης και της χρήσιμης ισχύος ως προς την ένταση.

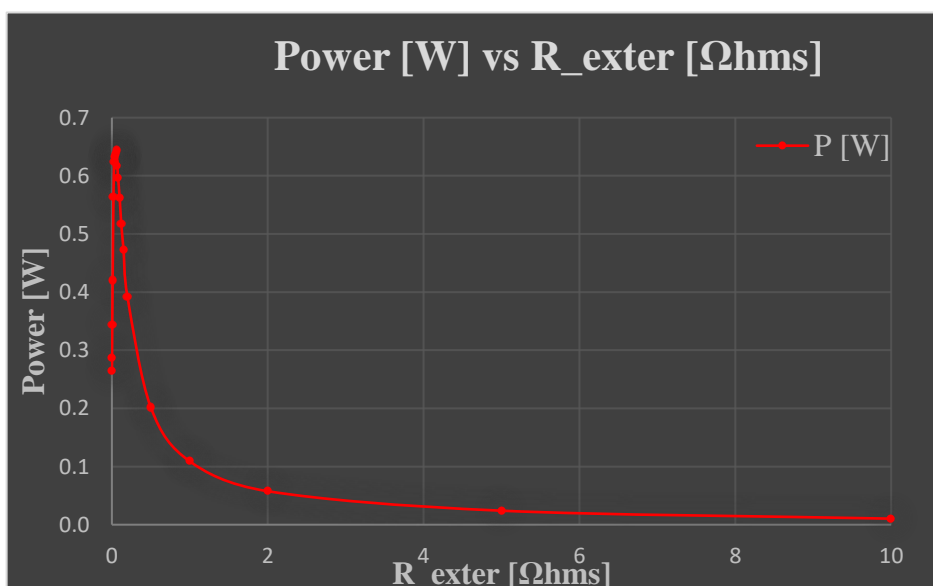


Γράφημα 3.1: Απεικόνιση της καμπύλης λειτουργίας έντασης ως προς τη τάση για τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια με τα δύο ζεύγη θερμοστοιχείων.



Γράφημα 3.2: Απεικόνιση της καμπύλης λειτουργίας ισχύος ως προς την ένταση για τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια με τα δύο ζεύγη θερμοστοιχείων.

Τέλος, παρουσιάζεται η καμπύλη λειτουργίας ηλεκτρικής ισχύος ως προς την εξωτερική αντίσταση φορτίου. Η συγκεκριμένη καμπύλη είναι πολύ σημαντική διότι βάση αυτής μπορεί να γίνει υπολογισμός της τιμής της εσωτερικής αντίστασης της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας, καθώς όπως προαναφέρθηκε μέγιστη ισχύ παρουσιάζεται όταν ο λόγος της εσωτερικής αντίστασης ως προς την εξωτερική αντίσταση ισούται με 1. Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι για τιμή εξωτερικής αντίστασης ίση με 0.06Ω ms παράγεται η μέγιστη χρήσιμη ισχύς που ισοδυναμεί με 644 mWatts.



Γράφημα 3.3: Απεικόνιση της καμπύλης λειτουργίας ισχύος ως προς την εξωτερική αντίσταση φορτίου της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με τα δύο ζεύγη θερμοστοιχείων.

Παραμετρική Ανάλυση Θερμοκρασίας Θερμής Μεριάς - T_{hot}

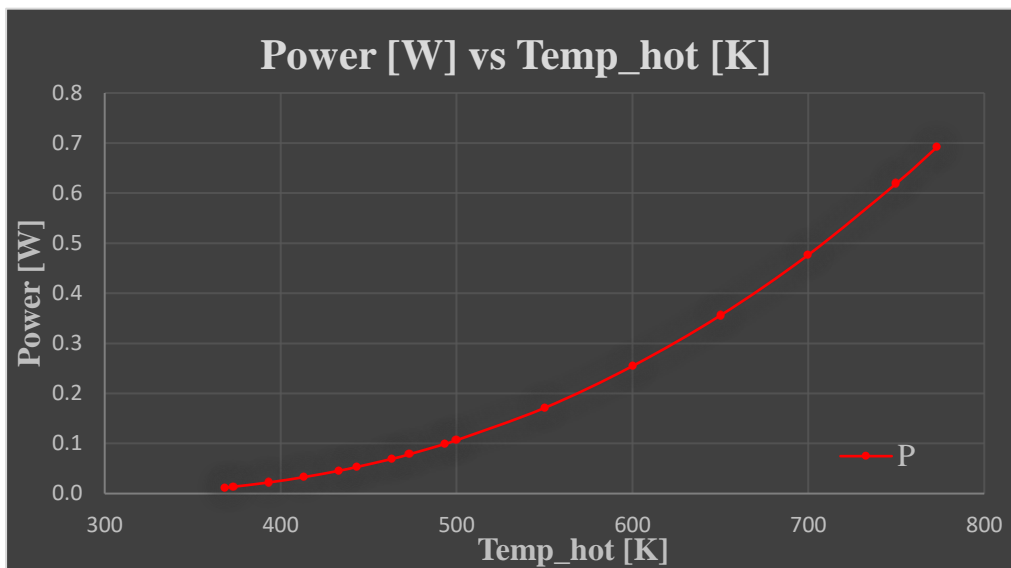
Με το πέρας της εύρεσης της εσωτερικής αντίστασης της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας, πραγματοποιείται η παραμετρική ανάλυση της θερμοκρασίας της θερμής μεριάς της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας. Αξίζει να αναφερθεί ότι, στη τιμή της εξωτερικής αντίστασης τοποθετείται αυτή στην οποία παράγεται η μέγιστη ισχύς, δηλαδή 0.06Ωhms.

Πιο κάτω παρουσιάζονται τα δεδομένα/αποτελέσματα που λαμβάνονται από τη προσομοίωση με τη παραμετρική ανάλυση T_{hot} σε μορφή πίνακα για εξωτερική αντίσταση ίση με 0.06Ωhms και θερμοκρασία ψυχρής μεριάς ίση με 298K για κάθε τιμή θερμοκρασίας θερμής μεριάς.

T_{hot} [K]	V [V]	I [A]	P [Watts]
368.15	2.71E-02	0.44	1.19E-02
373.15	2.91E-02	0.47	1.37E-02
393.15	3.70E-02	0.6	2.22E-02
413.15	4.49E-02	0.73	3.28E-02
433.15	5.30E-02	0.86	4.56E-02
443.15	5.70E-02	0.93	5.30E-02
463.15	6.52E-02	1.06	6.92E-02
473.15	6.94E-02	1.13	7.84E-02
493.15	7.78E-02	1.27	9.88E-02
500	8.07E-02	1.32	1.07E-01
550	1.02E-01	1.67	1.71E-01
600	1.25E-01	2.04	2.55E-01
650	1.48E-01	2.41	3.56E-01
700	1.71E-01	2.79	4.77E-01
750	1.95E-01	3.18	6.19E-01
773	2.06E-01	3.36	6.92E-01

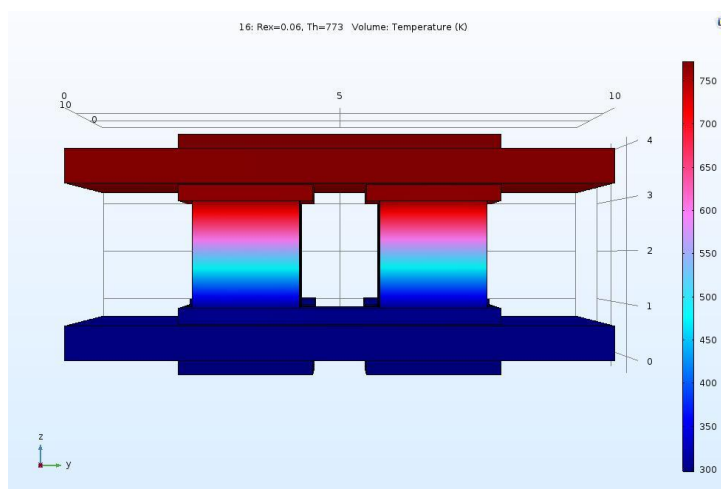
Πίνακας 3.4: Παρουσιάζονται τα δεδομένα που αφορούν τις τιμές της θερμοκρασίας της θερμής μεριάς, της έντασης του ρεύματος, της τάσης και το αποτέλεσμα που αντικατοπτρίζει την ηλεκτρική ισχύ για τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια με τα δύο ζεύγη θερμοστοιχείων.

Με τη χρήση του υπολογιστικού προγράμματος Excel, δημιουργείται καμπύλη λειτουργίας της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας. Συγκεκριμένα, η καμπύλη της χρήσιμης ισχύος ως προς τη θερμοκρασία της θερμής μεριάς, η οποία δίνει τη πληροφορία σε ποια θερμοκρασία πρέπει να εκτελεστεί ένα πείραμα για να υπάρχει η επιθυμητή ισχύς.

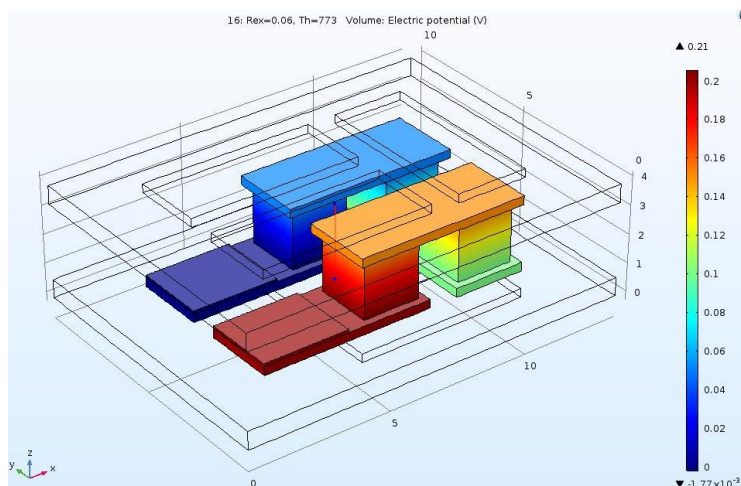


Γράφημα 3.4: Απεικόνιση της καμπύλης λειτουργίας ισχύος ως προς τη θερμοκρασία της θερμής μεριάς της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με τα δύο ζεύγη θερμοστοιχείων.

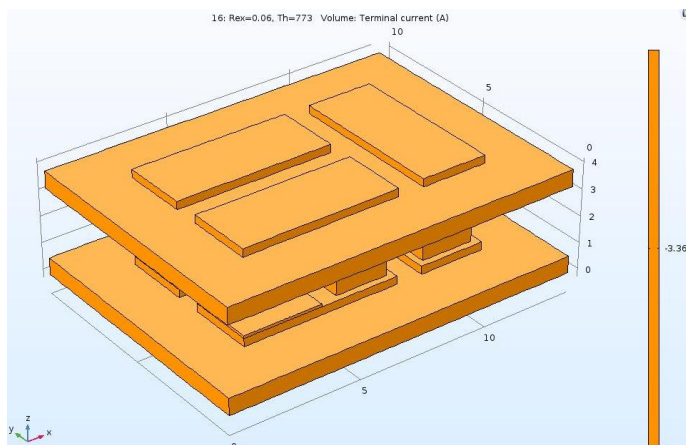
Πιο κάτω ακολουθούν μερικές τρισδιάστατες εικόνες που λαμβάνονται από το COMSOL Multiphysics 5.2. Συγκεκριμένα αφορούν την κατανομή της θερμοκρασίας της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας στον κατακόρυφο άξονα, το ηλεκτρικό δυναμικό κατά μήκος των θερμοστοιχείων, το ρεύμα που ρέει από τη γεννήτρια και την παραγόμενη ισχύ της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με τα δύο ζεύγη θερμοστοιχείων.



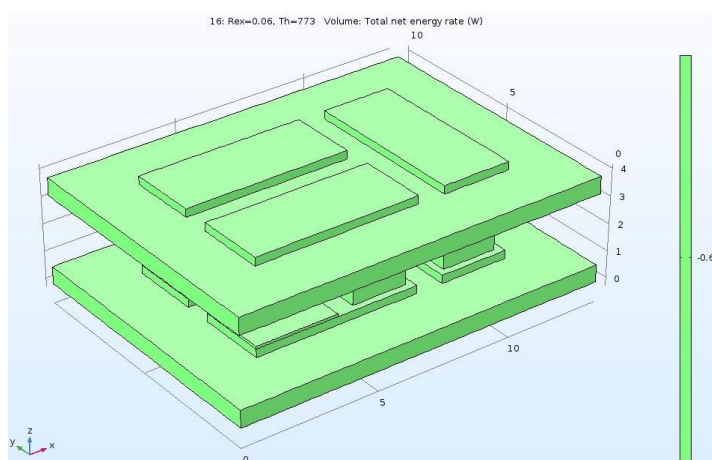
Εικόνα 3.5: Απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας στον κάθετο άξονα της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με τα δύο ζεύγη θερμοστοιχείων.



Εικόνα 3.6: Απεικόνιση του ηλεκτρικού δυναμικού κατά μήκος των θερμοστοιχείων για εξωτερική αντίσταση φορτίου ίση με 0.06Ω και θερμοκρασία θερμής και ψυχρής μεριάς ίση με 773K και 298K αντίστοιχα.



Εικόνα 3.7: Απεικόνιση του ηλεκτρικού ρεύματος που διαπερνά τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια για εξωτερική αντίσταση φορτίου ίση με 0.06Ω και θερμοκρασία θερμής και ψυχρής μεριάς ίση με 773K και 298K αντίστοιχα.

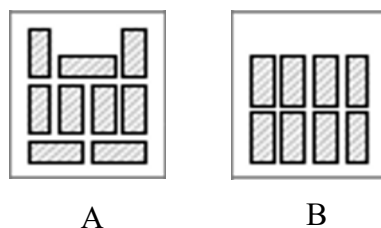


Εικόνα 3.8: Απεικόνιση της παραγόμενης ισχύος από τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια για εξωτερική αντίσταση φορτίου ίση με 0.06Ω και θερμοκρασία θερμής και ψυχρής μεριάς ίση με 773K και 298K αντίστοιχα.

3.2.3 Θερμοηλεκτρική Γεννήτρια με οκτώ Ζεύγη Θερμοστοιχείων

Η διαδικασία σχεδιασμού, ορισμού των παραμέτρων/συνοριακών συνθηκών και προσομοίωσης της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με τα οκτώ ζεύγη θερμοστοιχείων είναι η ίδια με αυτή που παρουσιάζεται στο υπο-υποκεφάλαιο 3.2.1.

Τα γεωμετρικά μεγέθη αυτής της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας, όσο αφορά τις κεραμικές πλάκες αλουμίνας, είναι τα ίδια με αυτά που θα αναφερθούν στο Κεφάλαιο 4 ‘Υλικά και Τεχνικές Δυσκολίες.

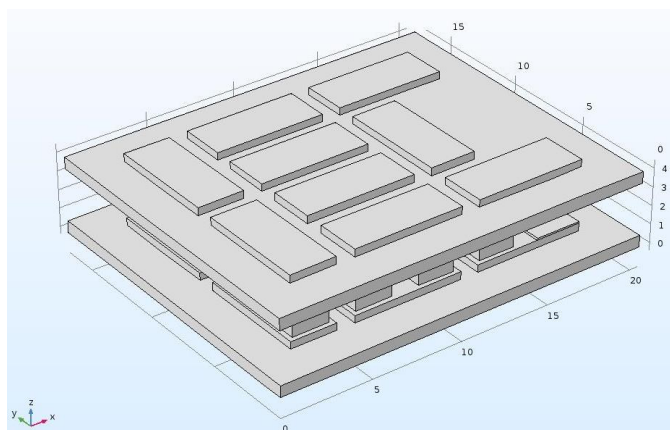


Εικόνα 3.9: Απεικόνιση των κεραμικών πλακών μαζί με τα ηλεκτρόδια χαλκού A) της κάτω πλάκας και B) της άνω πλάκας για τα οκτώ ζεύγη θερμοστοιχείων.

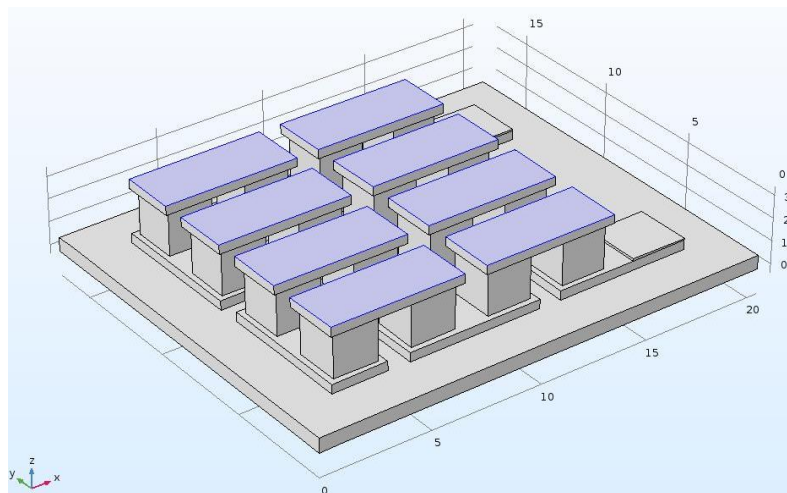
Πιο κάτω ακολουθεί πίνακας με τις τιμές των μεγεθών των διαφόρων στοιχείων που απαρτίζουν τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια.

Θερμοστοιχεία	Ηλεκτρόδια Χαλκού	Πλάκες Αλουμίνας
2 * 2 * 2 mm	6 * 2.5 * 0.3 mm	20.5 * 17 * 0.63 mm

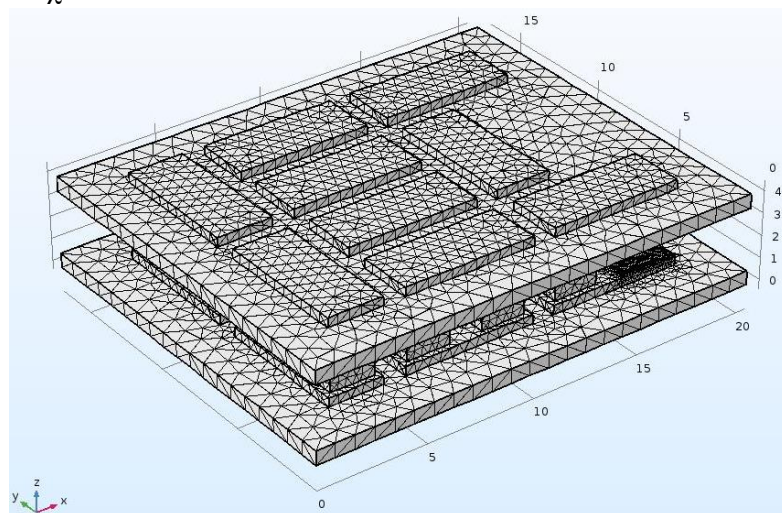
Πίνακας 3.5: Παρουσιάζονται οι γεωμετρικές τιμές των διαφόρων στοιχείων που απαρτίζουν τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια με τα οκτώ ζεύγη θερμοστοιχείων.



Εικόνα 3.10: Απεικόνιση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με τα οκτώ ζεύγη θερμοστοιχείων που αναπτύχθηκε με τη χρήση του COMSOL Multiphysics 5.2.



Εικόνα 3.11: Απεικόνιση του εσωτερικού της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με τα οκτώ ζεύγη θερμοστοιχείων.



Εικόνα 3.12: Απεικόνιση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με τα οκτώ ζεύγη θερμοστοιχείων μετά τη δημιουργία πλέγματος ονομασίας *Finer*.

3.2.4 Αποτελέσματα Προσομοίωσης Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας με οκτώ ζεύγη θερμοστοιχείων

Παραμετρική Ανάλυση Εξωτερικής Αντίστασης - R_{exte}

Με τη λήψη των δεδομένων/αποτελεσμάτων από το εργαλείο προσομοίωσης COMSOL Multiphysics 5.2, χρησιμοποιείται αρχείο της Excel για την επεξεργασία τους, δηλαδή τον γρήγορο υπολογισμό της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος για κάθε μέτρηση. Για τον υπολογισμό της ισχύος χρησιμοποιείται η εξίσωση 3.1.

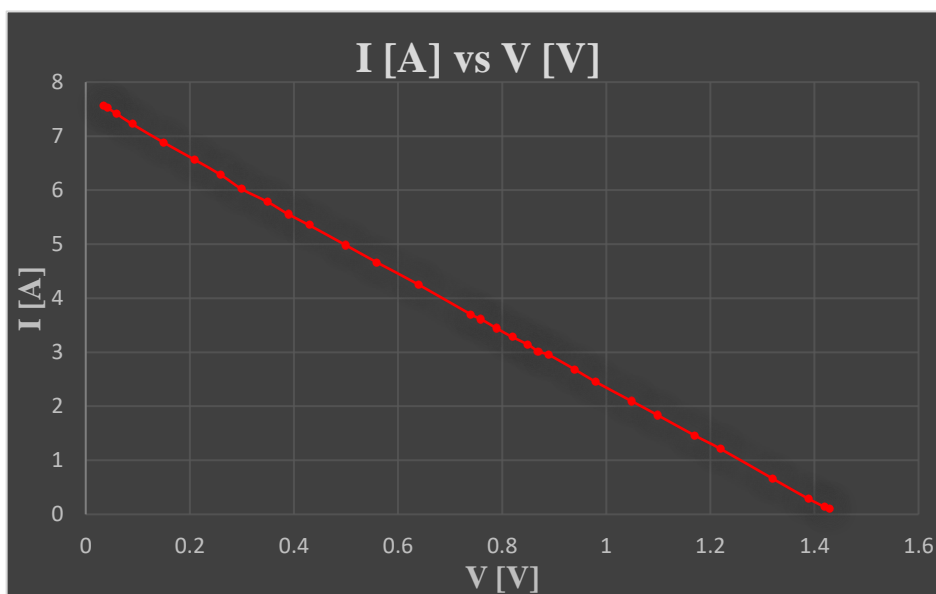
Πιο κάτω παρουσιάζονται τα δεδομένα/αποτελέσματα που λαμβάνονται από τη προσομοίωση με τη παραμετρική ανάλυση R_{exte} σε μορφή πίνακα για θερμοκρασία θερμής και ψυχρής μεριάς ίση με 773K και 298K αντίστοιχα για κάθε τιμή αντίστασης.

R_{exte} [Ωhms]	V [V]	I [A]	P [Watts]
0.001	0.035	7.56	0.268
0.002	0.04	7.52	0.317
0.005	0.06	7.41	0.444
0.01	0.09	7.22	0.650
0.02	0.15	6.88	1.032
0.03	0.21	6.56	1.378
0.04	0.26	6.28	1.633
0.05	0.30	6.02	1.806
0.06	0.35	5.78	2.023
0.07	0.39	5.55	2.165
0.08	0.43	5.35	2.301
0.1	0.50	4.98	2.490
0.12	0.56	4.66	2.610
0.15	0.64	4.25	2.720
0.2	0.74	3.70	2.738
0.21	0.76	3.61	2.744
0.23	0.79	3.44	2.718
0.25	0.82	3.28	2.690
0.27	0.85	3.14	2.669
0.29	0.87	3.01	2.619
0.3	0.89	2.95	2.626
0.35	0.94	2.68	2.519
0.4	0.98	2.45	2.401
0.5	1.05	2.09	2.195
0.6	1.10	1.83	2.013
0.8	1.17	1.46	1.708
1	1.22	1.21	1.476
2	1.32	0.66	0.871
5	1.39	0.28	0.389
10	1.42	0.14	0.199
15	1.43	0.1	0.143

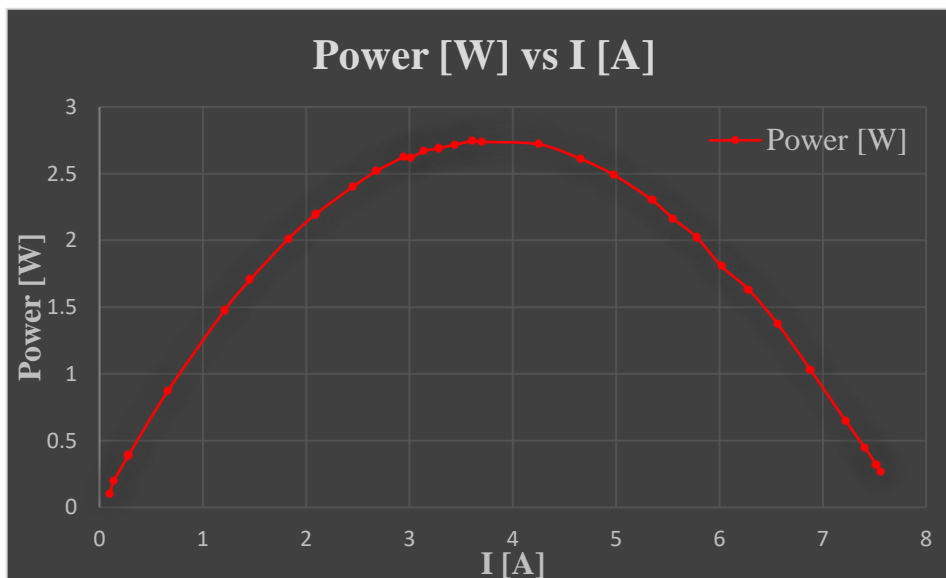
Πίνακας 3.6: Παρουσιάζονται τα δεδομένα που αφορούν τις τιμές της εξωτερικής αντίστασης φορτίου, της έντασης του ρεύματος, της τάσης και το αποτέλεσμα που αντικατοπτρίζει την ηλεκτρική ισχύ για τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια με τα οκτώ ζεύγη θερμοστοιχείων.

Με τη χρήση του υπολογιστικού προγράμματος Excel, δημιουργούνται οι καμπύλες λειτουργίας της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας. Συγκεκριμένα, είναι δυνατόν να αναπαραχθούν η καμπύλη έντασης ως προς τάσης, της χρήσιμης ισχύος ως προς την

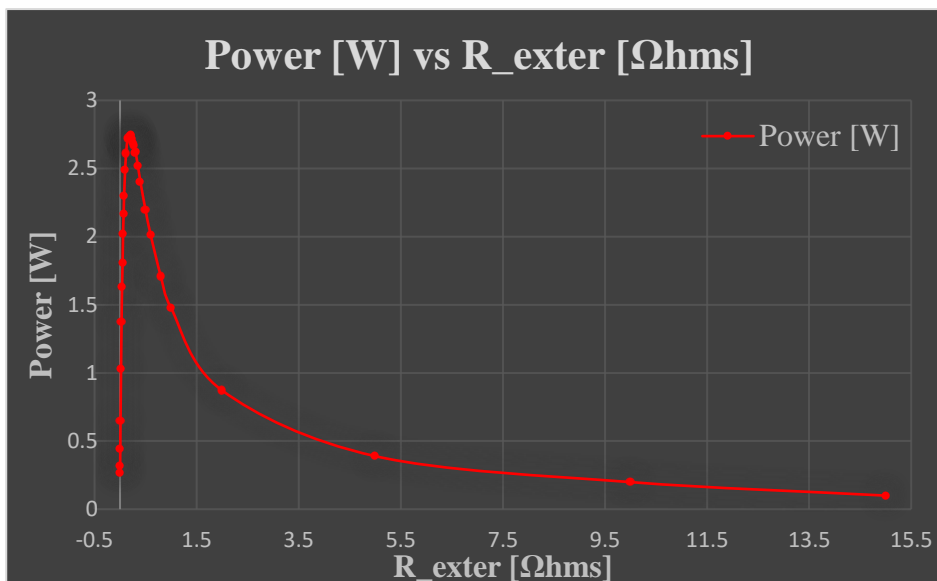
ένταση και η καμπύλη λειτουργίας ηλεκτρικής ισχύος ως προς την εξωτερική αντίσταση φορτίου. Όπως προαναφέρεται, η συγκεκριμένη καμπύλη είναι πολύ σημαντική διότι, βάση αυτής μπορεί να γίνει υπολογισμός της τιμής της εσωτερικής αντίστασης της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας. Συγκεκριμένα, παρατηρείται από το γράφημα 3.7 ότι για τιμή εξωτερικής αντίστασης ίση με 0.21Ω ms, παράγεται η μέγιστη χρήσιμη ισχύς που ισοδυναμεί με 2.75Watts .



Γράφημα 3.5: Απεικόνιση της καμπύλης λειτουργίας έντασης ως προς τη τάση για τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια με τα οκτώ ζεύγη θερμοστοιχείων.



Γράφημα 3.6: Απεικόνιση της καμπύλης λειτουργίας ισχύος ως προς την ένταση για τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια με τα οκτώ ζεύγη θερμοστοιχείων



Γράφημα 3.7: Απεικόνιση της καμπύλης λειτουργίας ισχύος ως προς την εξωτερική αντίσταση φορτίου της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με τα οκτώ ζεύγη θερμοστοιχείων.

Παραμετρική Ανάλυση Θερμοκρασίας Θερμής Μεριάς - T_{hot}

Με το πέρας της εύρεσης της εσωτερικής αντίστασης της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας, πραγματοποιείται η παραμετρική ανάλυση της θερμοκρασίας της θερμής μεριάς της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας. Αξίζει να αναφερθεί ότι, στη τιμή της εξωτερικής αντίστασης τοποθετείται αυτή στην οποία παράγεται η μέγιστη ισχύς, δηλαδή 0.21Ωhms.

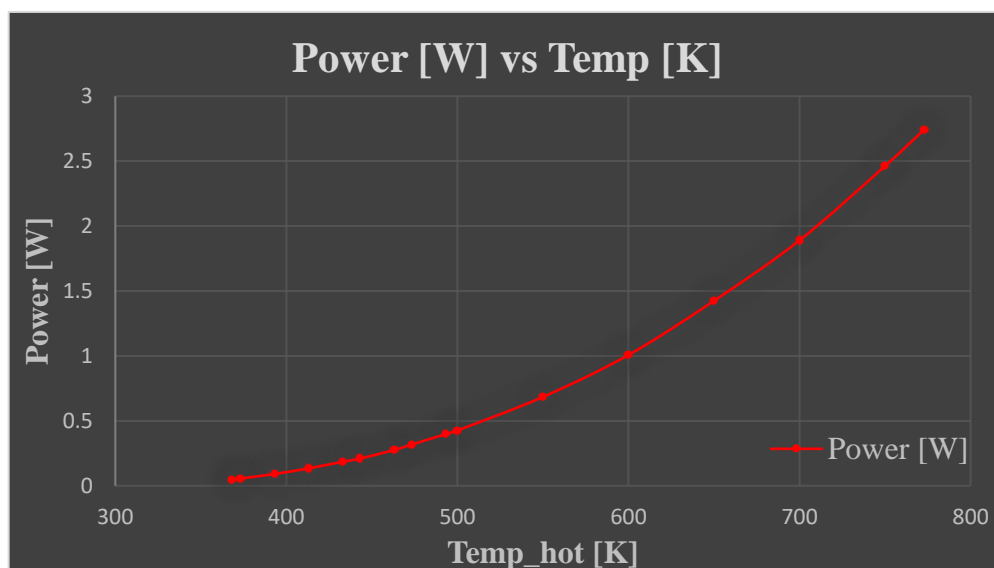
Πιο κάτω παρουσιάζονται τα δεδομένα/αποτελέσματα που λαμβάνονται από τη προσομοίωση με τη παραμετρική ανάλυση T_{hot} σε μορφή πίνακα για εξωτερική αντίσταση ίση με 0.21Ωhms και θερμοκρασία ψυχρής μεριάς ίση με 298K για κάθε τιμή θερμοκρασίας θερμής μεριάς.

T_{hot} [K]	V [V]	I [A]	P [Watts]
368.15	0.10	0.48	0.048
373.15	0.11	0.51	0.056
393.15	0.14	0.65	0.091
413.15	0.17	0.79	0.134
433.15	0.20	0.93	0.186
443.15	0.21	1.00	0.210
463.15	0.24	1.15	0.276
473.15	0.26	1.22	0.317
493.15	0.29	1.37	0.397

500	0.30	1.42	0.426
550	0.38	1.80	0.684
600	0.46	2.19	1.007
650	0.55	2.59	1.425
700	0.63	3.00	1.890
750	0.72	3.42	2.462
773	0.76	3.61	2.744

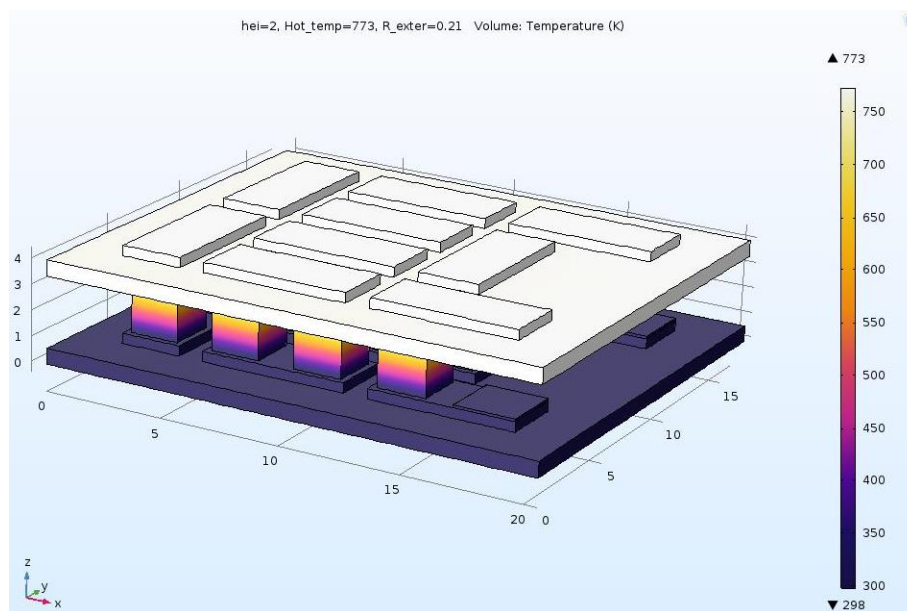
Πίνακας 3.7: Παρουσιάζονται τα δεδομένα που αφορούν τις τιμές της θερμοκρασίας της θερμής μεριάς, την ένταση του ρεύματος, τη τάση και το αποτέλεσμα που αντικατοπτρίζει την ηλεκτρική ισχύ για τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια με τα οκτώ ζεύγη θερμοστοιχείων.

Με τη χρήση του υπολογιστικού προγράμματος Excel, δημιουργείται καμπύλη λειτουργίας της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας. Συγκεκριμένα, η καμπύλη της χρήσιμης ισχύος ως προς τη θερμοκρασία της θερμής μεριάς, η οποία δίνει τη πληροφορία σε ποια θερμοκρασία πρέπει να εκτελεστεί ένα πείραμα για να υπάρχει η επιθυμητή ισχύς.

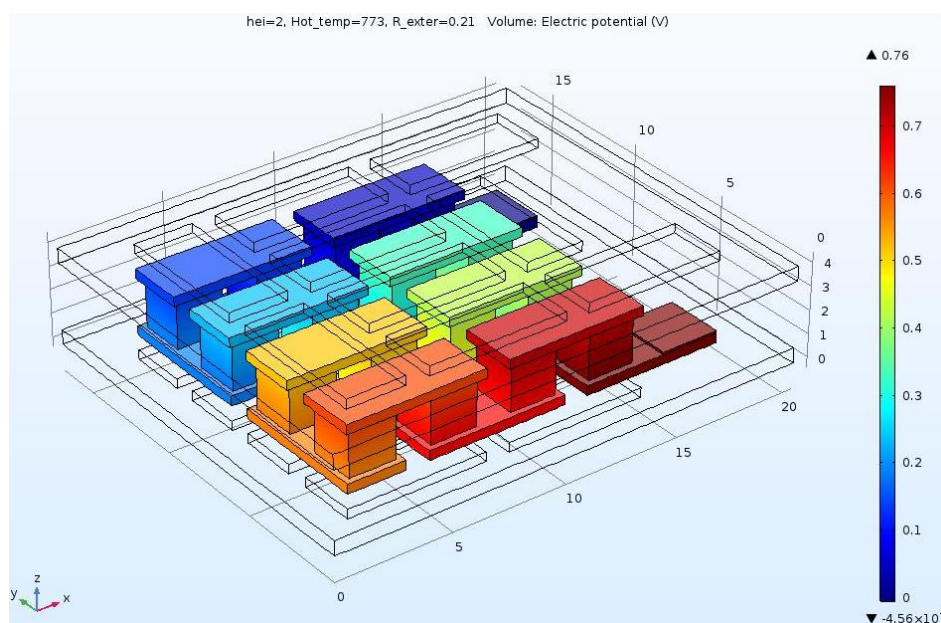


Γράφημα 3.8: Απεικόνιση της καμπύλης λειτουργίας ισχύος ως προς τη θερμοκρασία της θερμής μεριάς της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με τα οκτώ ζεύγη θερμοστοιχείων.

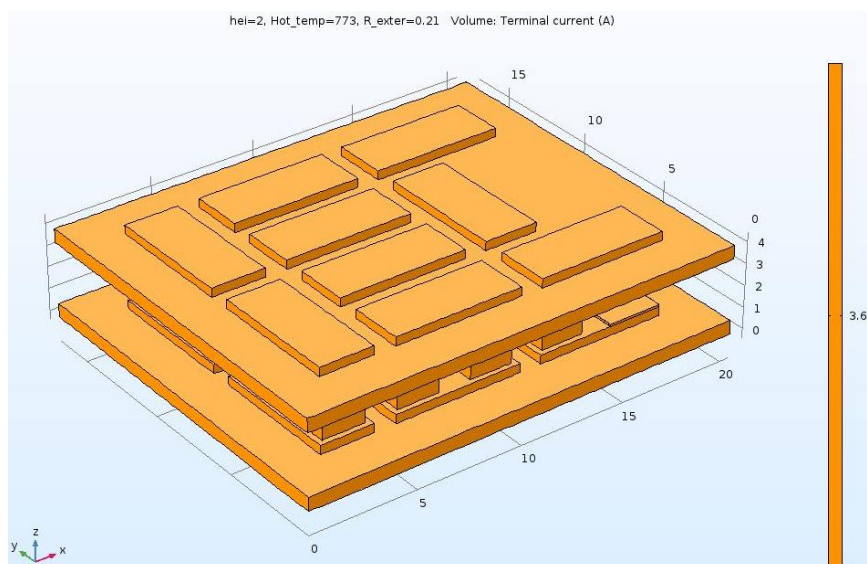
Πιο κάτω ακολουθούν μερικές τρισδιάστατες εικόνες που λαμβάνονται από το COMSOL Multiphysics 5.2. Συγκεκριμένα αφορούν την κατανομή της θερμοκρασίας της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας στον κατακόρυφο άξονα, το ηλεκτρικό δυναμικό κατά μήκος των θερμοστοιχείων και το ρεύμα που ρέει από τη γεννήτρια και με τα οκτώ ζεύγη θερμοστοιχείων.



Εικόνα 3.13: Απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με τα οκτώ ζεύγη θερμοστοιχείων.



Εικόνα 3.14: Απεικόνιση του ηλεκτρικού δυναμικού κατά μήκος των θερμοστοιχείων για εξωτερική αντίσταση φορτίου ίση με 0.21Ω και θερμοκρασία θερμής και ψυχρής μεριάς ίση με 773K και 298K αντίστοιχα.



Εικόνα 3.15: Απεικόνιση του ηλεκτρικού ρεύματος που διαπερνά τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια για εξωτερική αντίσταση φορτίου ίση με 0.21Ω και θερμοκρασία θερμής και ψυχρής μεριάς ίση με 773K και 298K αντίστοιχα.

3.3 Πιστοποίηση Μοντέλου από Βιβλιογραφία

Για να είναι βέβαιο ότι η μέθοδος που ακολουθείται για την προσομοίωση των θερμοηλεκτρικών γεννητριών είναι ορθή και έγκυρη, απαιτείται η πιστοποίηση ενός μοντέλου, του οποίου είναι γνωστά τα αποτελέσματα του. Γι' αυτό το λόγο, λαμβάνεται άρθρο από τη βιβλιογραφία και αναπτύσσεται η γεωμετρία με τα καθορισμένα υλικά, τις συγκεκριμένες συνοριακές συνθήκες και παραμετρικές αναλύσεις. [53]

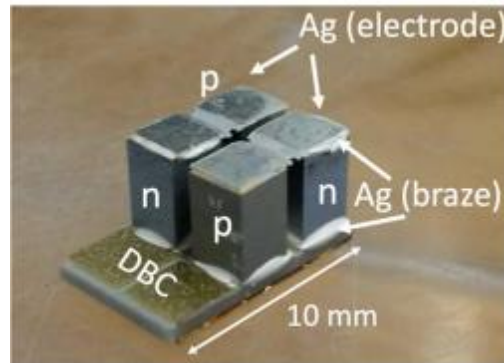
3.3.1 Μοντέλο Άρθρου

Σύμφωνα με το άρθρο [53], η θερμοηλεκτρική γεννήτρια που αναπτύσσεται αποτελείται από θερμοστοιχεία Silicide Based. Οι διαστάσεις των θερμοστοιχείων ανέρχονται στα $3 \times 3 \times 4.6 \text{ mm}^3$.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για να οριστούν τα διάφορα στοιχεία της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας του άρθρου είναι τα εξής:

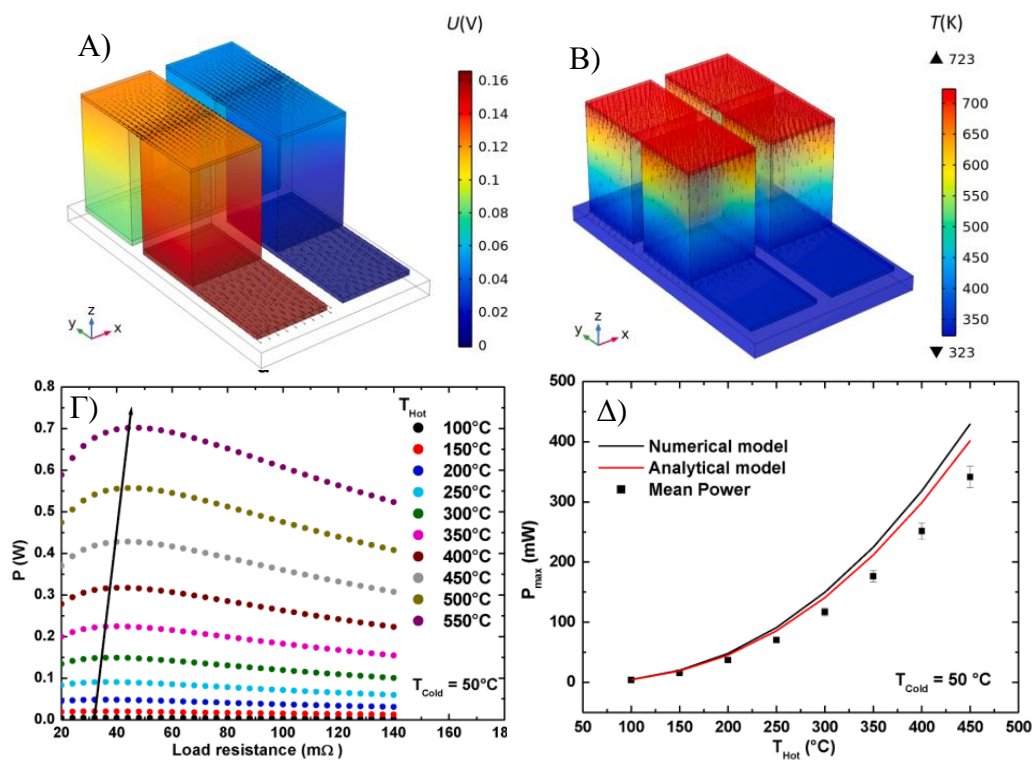
1. Μία πλάκα κεραμικού Alumina ως βάση
2. Χάλκινα ηλεκτρόδια τα οποία βρίσκονται στο κεραμικό αλουμίνας και συνδέουν τα θερμοστοιχεία στην πάνω μεριά της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας
3. Ασημένια ηλεκτρόδια τα οποία συνδέουν τα θερμοστοιχεία στην πάνω μεριά της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας
4. HMS ημιαγωγός p-τύπου
5. MSS ημιαγωγός n-τύπου

Οι ιδιότητες που τοποθετούνται στα υλικά HMS και MSS, λαμβάνονται από γραφήματα τα οποία βρίσκονται στο άρθρο. [53]



Εικόνα 3.16: Απεικόνιση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας του άρθρου.

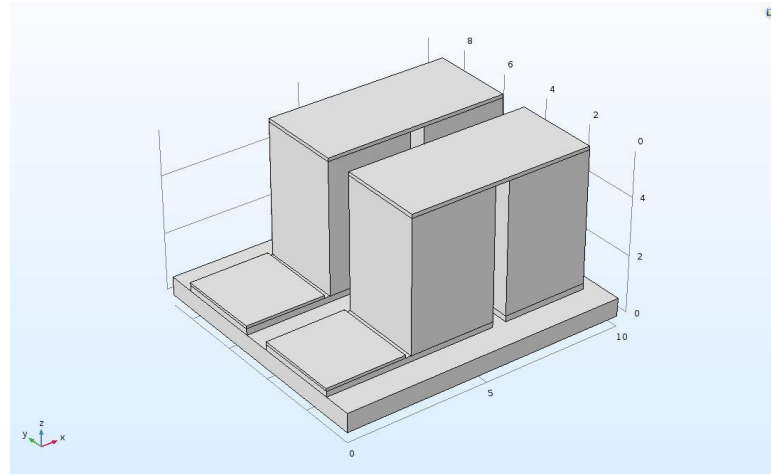
Σύμφωνα με το άρθρο [53], βρέθηκε η τιμή της μέγιστης ισχύος να ανέρχεται στα 0.43W για θερμοκρασιακή διαφορά ίση με 400°C, για R_{exter} ίση με 65mΩhms και διαφορά δυναμικού ίση με 0.16V.



Εικόνα 3.17: Απεικόνιση των αποτελεσμάτων της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας του άρθρου, όπου A) η διαφορά δυναμικού, B) η κατακόρυφη κατανομή της θερμοκρασίας, Γ) το γράφημα ηλεκτρικής ισχύος ως προς την εξωτερική αντίσταση για διάφορες τιμές θερμοκρασιών και Δ) το γράφημα της ηλεκτρικής ισχύος ως προς τη θερμοκρασία της θερμής επιφάνειας της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας.

3.3.2 Μοντέλο Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας για την Πιστοποίηση

Η διαδικασία σχεδιασμού, ορισμού των παραμέτρων/συνοριακών συνθηκών και προσομοίωσης της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας του άρθρου είναι η ίδια με αυτή που παρουσιάζεται στο υπο-υποκεφάλαιο 4.2.1.



Εικόνα 3.18: Απεικόνιση της γεωμετρίας της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας που αναπτύσσεται σύμφωνα με το άρθρο [53].

3.3.3 Αποτελέσματα Προσομοίωσης Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας Άρθρου

Παραμετρική Ανάλυση Εξωτερικής Αντίστασης - R_{exte}

Με τη λήψη των αποτελεσμάτων της ηλεκτρικής ισχύς από το εργαλείο προσομοίωσης COMSOL Multiphysics 5.2, χρησιμοποιείται αρχείο της Excel για την επεξεργασία τους, δηλαδή τη κατασκευή της χαρακτηριστικής καμπύλης ηλεκτρικής ισχύος ως προς την εξωτερική αντίσταση. Αξίζει να αναφερθεί ότι, στη τιμή της θερμοκρασίας της θερμής μεριάς ανέρχεται στους 450°C.

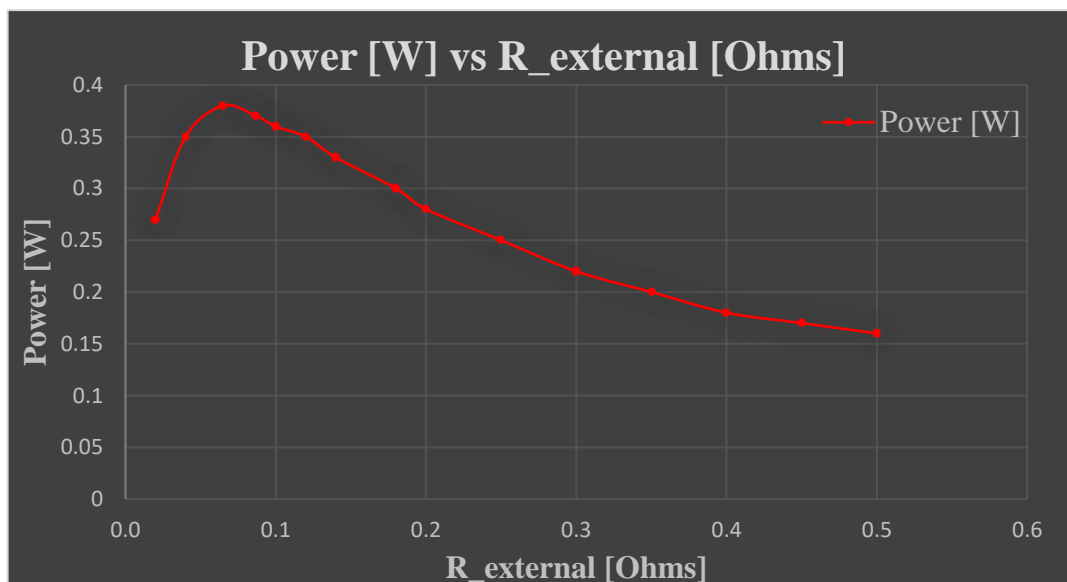
Πιο κάτω παρουσιάζονται τα δεδομένα/αποτελέσματα σε μορφή πίνακα.

R_{etxr} [Ω hms]	Power [W]
2.00E-02	0.27
4.00E-02	0.35
6.50E-02	0.38
8.70E-02	0.37
1.00E-01	0.36
1.20E-01	0.35

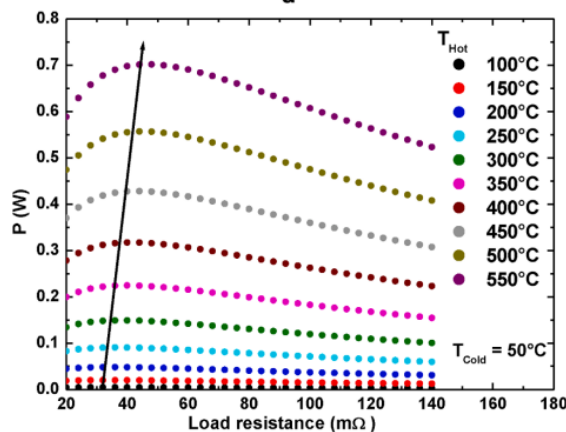
1.40E-01	0.33
1.80E-01	0.3
2.00E-01	0.28
2.50E-01	0.25
3.00E-01	0.22
3.50E-01	0.2
4.00E-01	0.18
4.50E-01	0.17
5.00E-01	0.16

Πίνακας 3.8: Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ηλεκτρικής ισχύος για κάθε μια εξωτερική αντίσταση για τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια του άρθρου.

Με τη χρήση του υπολογιστικού προγράμματος Excel, δημιουργείται η καμπύλη λειτουργίας της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας. Συγκεκριμένα, αναπαράγεται η καμπύλη λειτουργίας ηλεκτρικής ισχύος ως προς την εξωτερική αντίσταση φορτίου. Παρατηρείται ότι για τιμή εξωτερικής αντίστασης ίση με 65mΩhms, παράγεται η μέγιστη χρήσιμη ισχύς που ισοδυναμεί με 0.38Watts.



Γράφημα 3.9: Απεικόνιση της καμπύλης λειτουργίας ισχύος ως προς την εξωτερική αντίσταση φορτίου της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας της προσομοίωσης του άρθρου.



Γράφημα 3.10: Απεικόνιση των καμπυλών λειτουργίας ισχύος ως προς την εξωτερική αντίσταση φορτίου ανάλογα με τη θερμοκρασία της θερμής μεριάς της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας του άρθρου.

Παραμετρική Ανάλυση Θερμοκρασίας Θερμής Μεριάς - T_{hot}

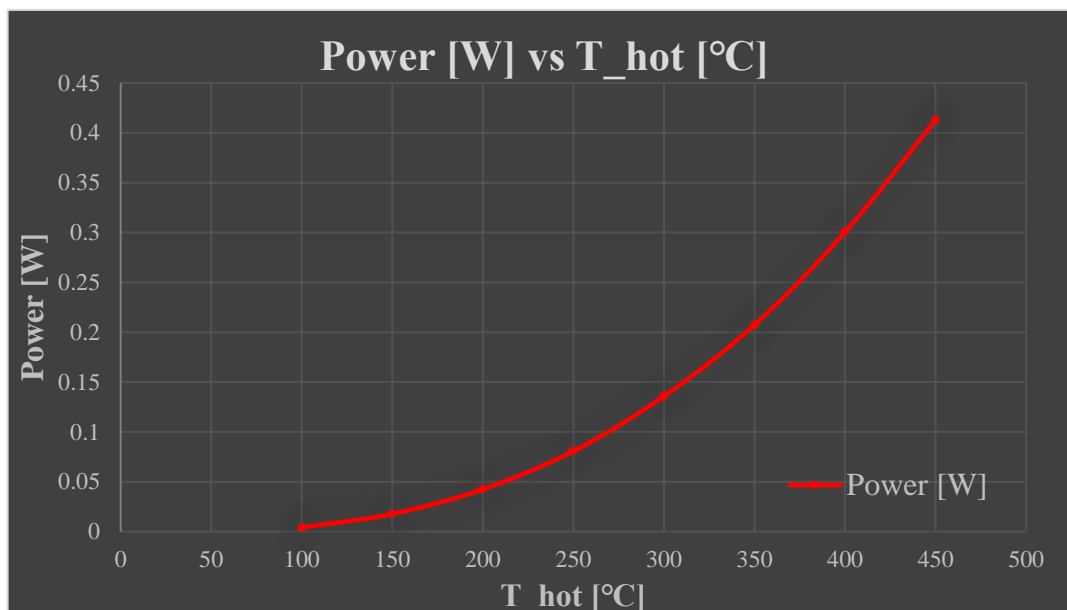
Με το πέρας της εύρεσης της εσωτερικής αντίστασης της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας, πραγματοποιείται η παραμετρική ανάλυση της θερμοκρασίας της θερμής μεριάς της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας. Αξίζει να αναφερθεί ότι, στη τιμή της εξωτερικής αντίστασης τοποθετείται αυτή στην οποία παράγεται η μέγιστη ισχύς, δηλαδή 65mΩhms.

Πιο κάτω παρουσιάζονται τα δεδομένα/αποτελέσματα που λαμβάνονται από τη προσομοίωση με τη παραμετρική ανάλυση T_{hot} σε μορφή πίνακα για εξωτερική αντίσταση ίση με 65mΩhms και θερμοκρασία ψυχρής μεριάς ίση με 50°C για κάθε τιμή θερμοκρασίας θερμής μεριάς.

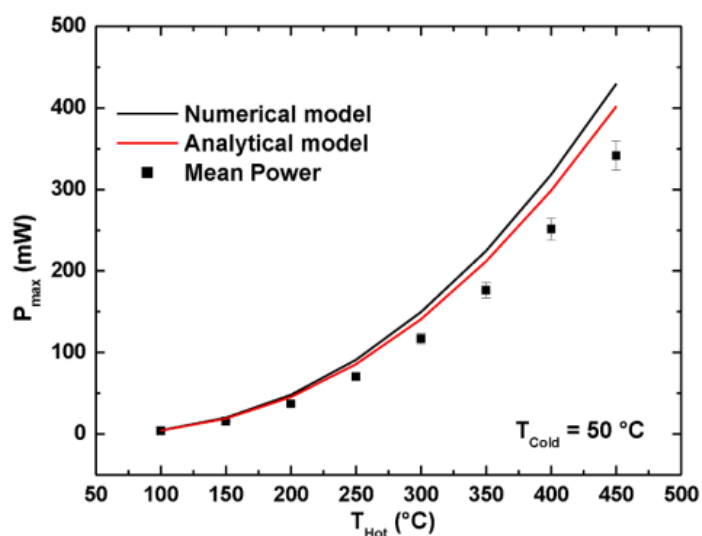
T_{hot} [°C]	Power [W]
100	0.0038
150	0.020
200	0.040
250	0.090
300	0.120
350	0.190
400	0.270
450	0.380

Πίνακας 3.9: Παρουσιάζονται τα δεδομένα που αφορούν τις τιμές της θερμοκρασίας της θερμής μεριάς και το αποτέλεσμα που αντικατοπτρίζει την ηλεκτρική ισχύ για τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια του άρθρου.

Με τη χρήση του υπολογιστικού προγράμματος Excel, δημιουργείται καμπύλη λειτουργίας της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας και συγκεκριμένα η καμπύλη της χρήσιμης ισχύος ως προς τη θερμοκρασία της θερμής μεριάς.

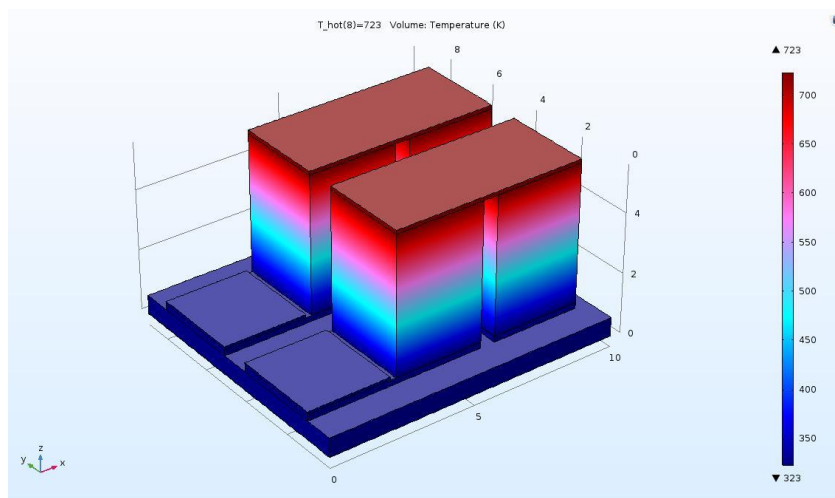


Γράφημα 3.11: Απεικόνιση της καμπύλης λειτουργίας ισχύος ως προς τη θερμοκρασία της θερμής μεριάς της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας της προσομοίωσης του άρθρου.

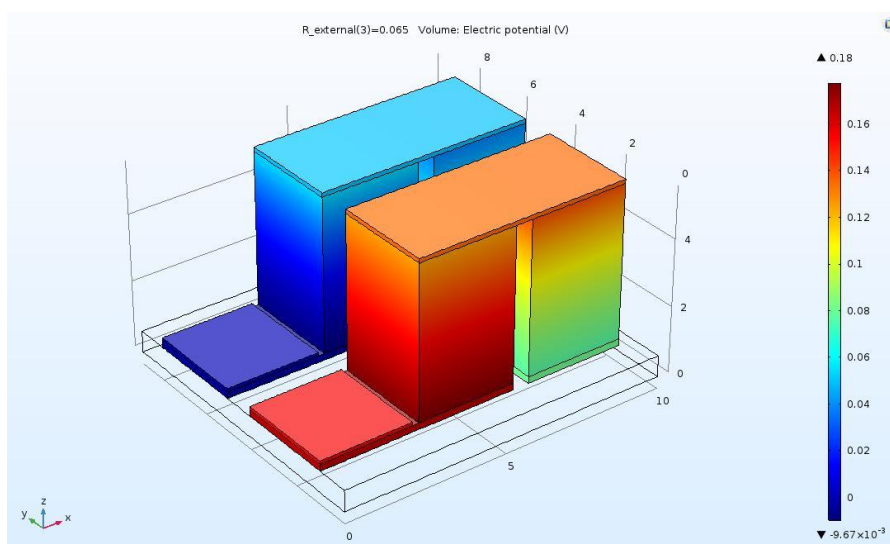


Γράφημα 3.12: Απεικόνιση των καμπυλών λειτουργίας ισχύος ως προς την θερμής μεριάς της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας του άρθρου μέσω αναλυτικού και αριθμητικού μοντέλου.

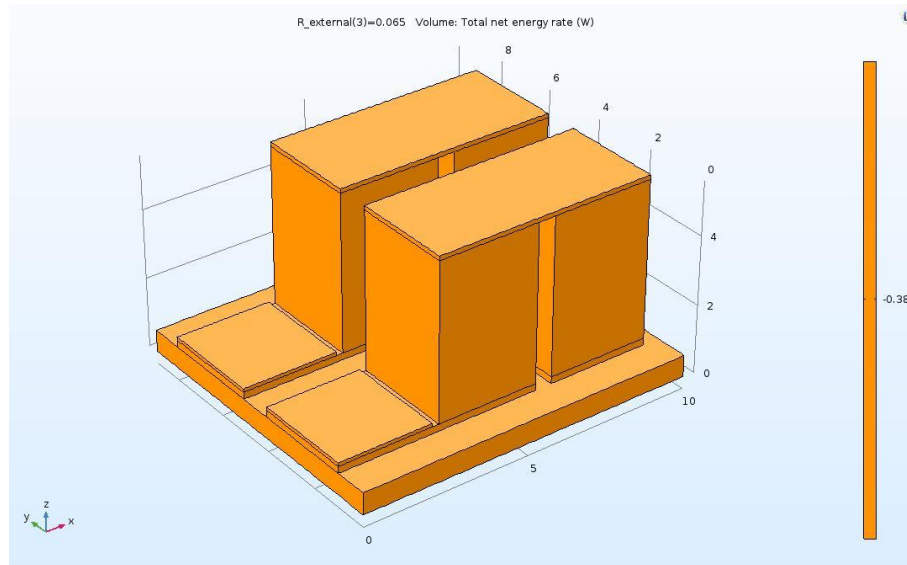
Πιο κάτω ακολουθούν μερικές τρισδιάστατες εικόνες λαμβάνονται από το COMSOL Multiphysics 5.2. Συγκεκριμένα αφορούν την κατανομή της θερμοκρασίας της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας στον κατακόρυφο άξονα, το ηλεκτρικό δυναμικό κατά μήκος των θερμοστοιχείων και την παραγόμενη ισχύ της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας του άρθρου.



Εικόνα 3.19: Απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας στη θερμοηλεκτρική γεννήτρια του άρθρου στο κατακόρυφο άξονα με θερμοκρασιακή διαφορά ίση με 400°C .



Εικόνα 3.20: Απεικόνιση του ηλεκτρικού δυναμικού κατά μήκος των θερμοστοιχείων για εξωτερική αντίσταση φορτίου ίση με $65\text{m}\Omega$ και θερμοκρασία θερμής και ψυχρής μεριάς ίση με 450°C και 50°C αντίστοιχα.



Εικόνα 3.21: Απεικόνιση της παραγόμενης ισχύος από τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια για εξωτερική αντίσταση φορτίου ίση με $65\text{m}\Omega\text{hms}$ και θερμοκρασία θερμής και ψυχρής μεριάς ίση με 450°C και 50°C αντίστοιχα.

3.3.4 Σύγκριση Αποτελεσμάτων

Με το πέρας των υπολογισμών του μοντέλου, απαιτείται η σύγκριση των αποτελεσμάτων. Αυτό που εξετάζεται είναι το κατά πόσο οι τιμές είναι κοντινές για να είναι δυνατό να αποφασιστεί το αν οι προσομοιώσεις είναι ορθές και έμπιστες.

Πιο κάτω ακολουθεί πίνακας με τα αποτελέσματα τόσο της γεννήτριας του άρθρου [53], όσο και της γεννήτριας του μοντέλου που αναπτύχθηκε στη παρούσα εργασία για διαφορά θερμοκρασίας $\Delta T=400^\circ\text{C}$ και $R_{\text{extr}} = 65\text{m}\Omega\text{hms}$.

	Βιβλιογραφία	Παρούσα Εργασία
Διαφορά Δυναμικού [V]	0.16	0.18
Ηλεκτρικό Ρεύμα [A]	2.69	2.11
Ηλεκτρική Ισχύς [W]	0.43	0.38

Πίνακας 3.10: Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας του άρθρου [53] και της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας της παρούσας εργασίας για διαφορά θερμοκρασίας $\Delta T=400^\circ\text{C}$ και $R_{\text{extr}} = 65\text{m}\Omega\text{hms}$.

Για να πραγματοποιηθεί η σύγκριση, απαιτείται ο υπολογισμός της τυπικής απόκλισης. Μέσω αυτής της εξίσωσης, παρατηρείται πόσο απέχει η τιμή της παραγόμενης ισχύς της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας της παρούσας εργασίας συγκριτικά με τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια του άρθρου [53]. Η εξίσωση της τυπικής απόκλισης είναι η ακόλουθη:

$$\tau. \alpha. = \left\| \frac{(X_{\theta\epsilon\omega} - X_{\pi\epsilon\iota\rho})}{X_{\theta\epsilon\omega}} \right\| * 100$$

Εξ 3.2

Όπου:

$\tau. \alpha.$: η τυπική απόκλιση [%]

$X_{\theta\epsilon\omega}$: θεωρητική τιμή

$X_{\pi\epsilon\iota\rho}$: η τιμή από το πείραμα που εκτελείται

Με βάση την εξίσωση 3.2, η θεωρητική τιμή αντιστοιχεί με την τιμή της παραγόμενης ισχύς του μοντέλου θερμοηλεκτρικής γεννήτριας του άρθρου, ενώ η πειραματική τιμή αντιστοιχεί με την τιμή της παραγόμενης ισχύς της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας που αναπτύχθηκε στη παρούσα εργασία.

Πιο κάτω παρουσιάζεται ο πίνακας με τη τιμή της τυπικής απόκλισης ισχύος μεταξύ της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας του άρθρου [53] και της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας που αναπτύχθηκε στο υπολογιστικό εργαλείο COMSOL Multiphysics 5.2 στη παρούσα εργασία για πιστοποίηση.

Τυπική Απόκλιση	Αποτέλεσμα
$\tau. \alpha.$ [%]	11.6

Πίνακας 3.11: Παρουσιάζεται η τιμή της τυπικής απόκλισης μεταξύ της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας του άρθρου και της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας της παρούσας εργασίας προς πιστοποίηση.

Συμπεράσματα Σύγκρισης

Από τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια που αναπτύχθηκε στο υπολογιστικό εργαλείο COMSOL Multiphysics 5.2 στη παρούσα εργασία συγκριτικά με τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια του άρθρου [53], είναι δυνατό να αποφασιστεί ότι τα μοντέλα που αναπτύσσονται για τη Μεταπτυχιακή Εργασία είναι έμπιστα και ορθά. Η μικρή διαφορά στις τιμές και η τιμή της τυπικής απόκλισης οφείλονται στο γεγονός ότι, κατά την ανάπτυξη της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας δεν δίνονται όλα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, όπως για παράδειγμα την απόσταση μεταξύ των θερμοστοιχείων. Παρ' όλα αυτά, η προσομοίωση του μοντέλου προβλέπει τα αποτελέσματα με αρκετά καλή ακρίβεια.

Κεφάλαιο 4

4 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΥΣΚΟΛΙΕΣ

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται τα υλικά που αποτελούν μια θερμοηλεκτρική γεννήτρια καθώς και η έρευνα αγοράς των υλικών αυτών. Επιπρόσθετα, παρουσιάζονται οι τεχνικές δυσκολίες που προκύπτουν για τη προετοιμασία των θερμοστοιχείων.

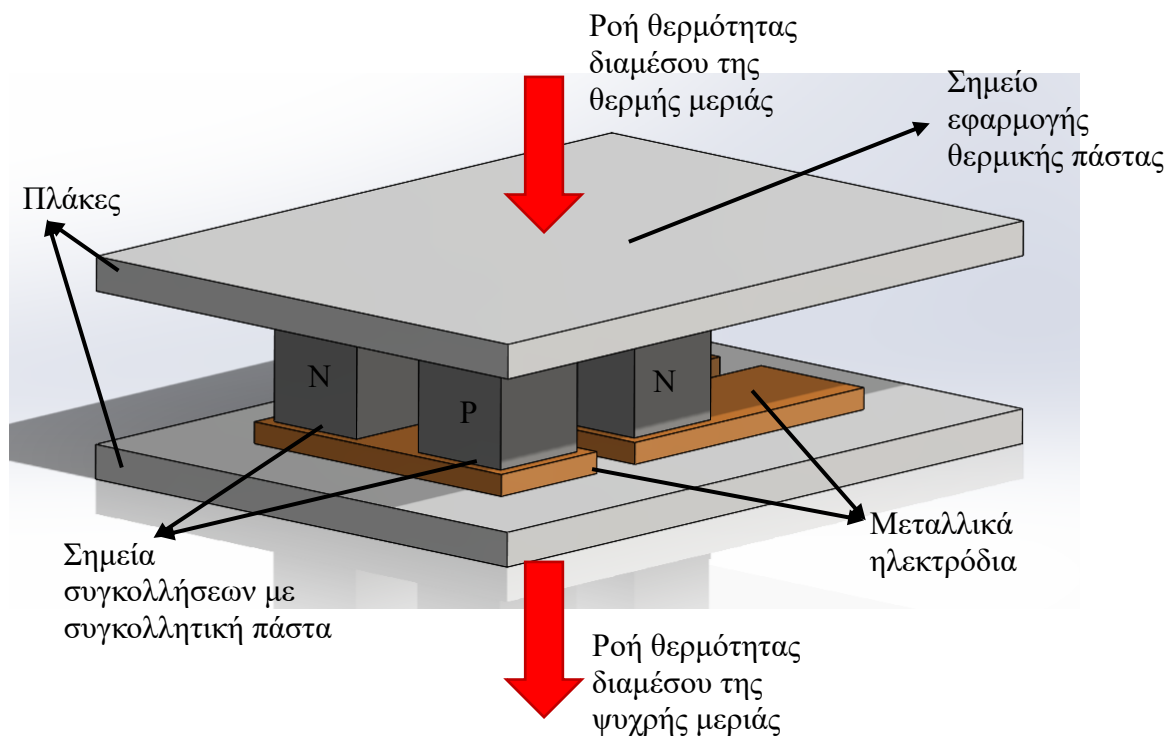
4.1 Υλικά Κατασκευής Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας

Γενικότερα, μια θερμοηλεκτρική γεννήτρια αποτελείται από θερμοστοιχεία στερεάς κατάστασης, οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι σε σειρά με τη χρήση ηλεκτρικά αγωγίμων ηλεκτροδίων. Η συχνή μέθοδος συγκόλλησης των θερμοστοιχείων είναι με τη χρήση συγκολλητικής πάστας μετάλλων, αλλά και σε κάποιες περιπτώσεις συναντιέται και συγκολλητικό μέταλλων – καλάι. Όλη η ηλεκτρική διάταξη που έχει προαναφερθεί, πρέπει να είναι στερεωμένη και να περικλείεται σε μια διάταξη πλακών. Τέλος, απαιτείται η τοποθέτηση ηλεκτρικών καλωδίων στα άκρα της γεννήτριας για να είναι εφικτή η σύνδεση της σε άλλο κύκλωμα ή για τον χαρακτηρισμό της.

Μια θερμοηλεκτρική γεννήτρια για να είναι λειτουργικά χρήσιμη, χρειάζεται να έχει όσο το δυνατό μεγαλύτερη απόδοση, μιας και η συνολική της απόδοση είναι αρκετά χαμηλή. Για να είναι αποδοτική απαιτούνται δύο χαρακτηριστικά: ψηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα. Όσο αφορά τη ηλεκτρική αγωγιμότητα απαιτείται να είναι ψηλή, έτσι ώστε η εσωτερική αντίσταση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας να είναι όσο το δυνατό πιο χαμηλή. Ταυτόχρονα, η ψηλή θερμική αγωγιμότητα χρειάζεται, αφού απαιτείται η βέλτιστη ροή θερμότητας διαμέσου της γεννήτριας.

Τα μέρη που απαιτούν τη έρευνα υλικών είναι οι πλάκες, τα μεταλλικά ηλεκτρόδια, το συγκολλητικό μέταλλων σε μορφή πάστας και η θερμική πάστα. Το υλικό των θερμοστοιχείων είναι το half-Heusler, του οποίου η σύνθεση και κατασκευή περιγράφεται μεταγενέστερα στο Κεφάλαιο 5. Όσο αφορά τα ηλεκτρικά καλώδια, παρέχονται από το εργαστήριο των θερμοηλεκτρικών υλικών.

Πιο κάτω παρουσιάζεται μια θερμοηλεκτρική γεννήτρια με όλα τα μέρη που απαιτούνται να αγοραστούν για την ανάπτυξη της.



Εικόνα 4.1: Απεικόνιση των μερών μιας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας που απαιτούνται να αγοραστούν και τα σημεία εφαρμογής της συγκολλητικής πάστας και θερμικής πάστας.

Σύμφωνα με τη πιο πάνω εικόνα απεικονίζονται τα σημεία τα οποία θα τοποθετηθεί η συγκολλητική πάστα για την ανάπτυξη ηλεκτρικών επαφών με τα θερμοστοιχεία half-Heusler. Επιπρόσθετα, απεικονίζεται το σημείο της άνω πλάκας που θα εφαρμοστεί η θερμική πάστα για την βέλτιστη ροή θερμότητας διαμέσου της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας.

4.1.1 Πλάκες

Η θερμοηλεκτρική γεννήτρια για να είναι ασφαλής και λειτουργικά αποδοτική απαιτεί τρία χαρακτηριστικά από το υλικό που χρησιμοποιείται για να κατασκευαστούν οι πλάκες. Αρχικά, πρέπει να έχει υψηλή ειδική ηλεκτρική αντίσταση με σκοπό να είναι ηλεκτρικά μονωμένη για λόγους ασφάλειας, να έχει υψηλή ειδική θερμική αγωγιμότητα για να ρέει η θερμότητα εύκολα διαμέσου της γεννήτριας και τέλος να έχει υψηλό σημείο τήξης, έτσι ώστε να αντέχει κάτω από υψηλές τιμές θερμοκρασίας λειτουργίας.

Τα υλικά που προτείνονται γι' αυτές τις προδιαγραφές είναι το Fiberglass και το κεραμικό Αλουμίνας.

Πίνακας προδιαγραφών υλικών

Ιδιότητες	<i>Alumina Oxide</i>	<i>Fiberglass</i>
Electrical resistivity [$\Omega \cdot \text{cm}$]	$10^{14} - 10^{15}$	$4.02e^{12}$
Thermal conductivity [$\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$]	20-30	0.04
Melting Point [$^{\circ}\text{C}$]	2052	1725

Πίνακας 4.1: Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση [2] & [20], η ειδική θερμική αγωγιμότητα [2] & [6] και η θερμοκρασία τήξης του κεραμικού Alumina oxide [9] και Fiberglass [20].

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές, το υλικό που διαλέγεται είναι το κεραμικό αλουμίνας, λόγω της υψηλότερης ειδικής θερμικής αγωγιμότητας. Οι θερμοκρασίες τήξης των υλικών δεν επηρεάζουν την επιλογή, όπως επίσης ούτε η ειδική ηλεκτρική αντίσταση, αφού είναι ασφαλής η χρήση και των δύο υλικών. Επιπλέον, η επιλογή αυτή γίνεται για να υπάρχει συμβατότητα με το υλικό των κεραμικών πλακών των θερμοηλεκτρικών γεννητριών των προσομοιώσεων στο Κεφάλαιο 3.

4.1.2 Μεταλλικά Ηλεκτρόδια

Τα χαρακτηριστικά που απαιτούνται από τα μεταλλικά ηλεκτρόδια είναι η υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, έτσι ώστε να συνεισφέρουν όσο το δυνατό λιγότερο στην εσωτερική ηλεκτρική αντίσταση και η θερμοκρασία τήξης του υλικού να είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία λειτουργίας της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας.

Τα υλικά κατασκευής των μεταλλικών ηλεκτροδίων που προτείνονται γι' αυτές τις προδιαγραφές είναι ο χαλκός, το ασήμι και ο χρυσός.

Πίνακας προδιαγραφών υλικών

Ιδιότητες	Copper	Gold	Silver
Electrical conductivity [$\frac{1}{\Omega \cdot m}$]	5.96e7	4.52e7	6.30e7
Density [$\frac{Kg}{m^3}$]	8940	19320	10490
Melting Point [°C]	1083	1063	960

Πίνακας 4.2: Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση [7], πυκνότητα [8] και θερμοκρασία τήξης [10] του χαλκού, του χρυσού και του αργυρού.

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές, το υλικό που διαλέγεται είναι ο χαλκός επειδή είναι πιο φθηνός και εύκολα εμπορεύσιμος στην αγορά απ' ό,τι ο χρυσός και το ασήμι. Οι θερμοκρασίες τήξης των υλικών δεν επηρεάζουν την επιλογή, μιας και οι θερμοκρασίες των τριών υλικών είναι πολύ πιο πάνω από τις θερμοκρασίες λειτουργίας της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας. Επιπλέον, η επιλογή αυτή γίνεται για να υπάρχει συμβατότητα με το υλικό των μεταλλικών ηλεκτροδίων χαλκού των θερμοηλεκτρικών γεννητριών των προσομοιώσεων στο Κεφάλαιο 3.

4.1.3 Συγκολλητικό Μετάλλων σε μορφή Πάστας

Το συγκολλητικό μετάλλων σε μορφή πάστας είναι μια μέθοδος συγκόλλησης που χρησιμοποιεί ρευστή πάστα με μεταλλικά σωματίδια μέσα σε υγρό – flux. Καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία, τα μεταλλικά σωματίδια ξεκινούν να λιώνουν και πραγματοποιείται μεταλλική ένωση. Το flux κατά τη διάρκεια ψύξης της συγκολλητικής πάστας στερεοποιείται. Τα χαρακτηριστικά που απαιτούνται από τη πάστα είναι να έχει υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα για να ρέει το ρεύμα με ευκολία διαμέσου της συγκόλλησης, υψηλή θερμική αγωγιμότητα για να μην αντιστέκεται στη ροή της θερμότητας και η θερμοκρασία τήξης να είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία τήξης.

Η συγκολλητική πάστα που επιλέγεται ονομάζεται 1800 PA brazing paste και αποτελείται από υψηλής περιεκτικότητας σωματιδίων αργύρου – 57% με μέγεθος μικρότερο των 70μm. Η θερμοκρασία solidus της πάστας ανέρχεται στους 620°C και η θερμοκρασία liquidus ανέρχεται στους 660°C. [51]

4.1.4 Θερμική Πάστα

Η θερμοηλεκτρική γεννήτρια κατά τη διαδικασία χαρακτηρισμού, απαιτεί τη χρήση της θερμικής πάστας στις επιφάνειες της θερμής και ψυχρής μεριάς για να υπάρχει όσο το δυνατό μεγαλύτερη ροή θερμότητας διαμέσου της.

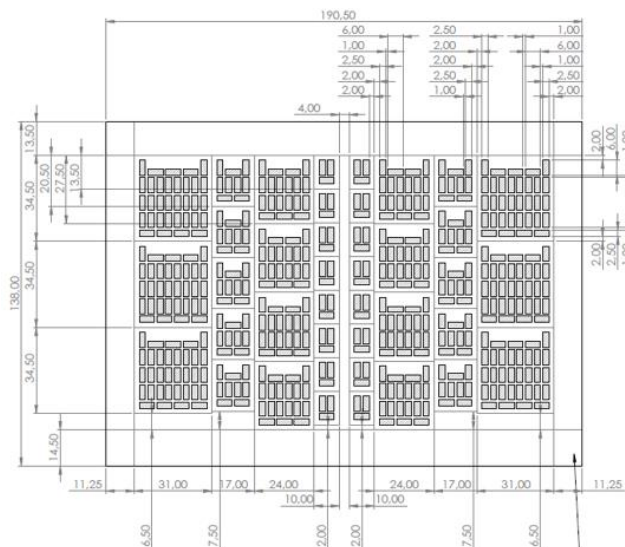
Επιλέγεται η θερμική πάστα grizzly kryonaut, όπου οι ιδιότητες της παρουσιάζονται σε μορφή πίνακα.

Ιδιότητες	Τιμή
Specific Thermal Conductivity $\left[\frac{W}{mK}\right]$	12.5
Thermal Resistance $\left[\frac{K}{W}\right]$	$3.2 \cdot 10^{-3}$
Density $\left[\frac{gr}{cm^3}\right]$	3.7
Temperature [°C]	-250°C/+350°C

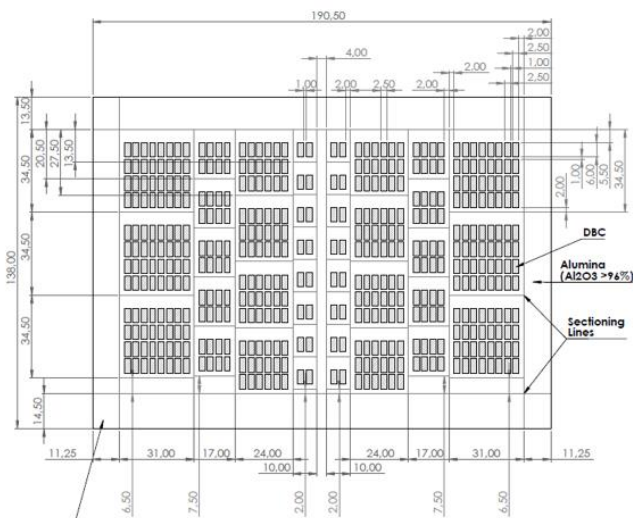
Πίνακας 4.3: Η ειδική θερμική αγωγιμότητα, η θερμική αντίσταση, η πυκνότητας και το εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας της θερμικής πάστας grizzly kryonaut. [47]

4.2 Αγορά Κεραμικών Πλακών Αλουμίνας με Ηλεκτρόδια Χαλκού

Κατά την αγορά των κεραμικών πλακών αλουμίνας, δίνεται η ευκαιρία από τον παραγωγό να υπάρχουν σ' αυτές ήδη τοποθετημένα ηλεκτρόδια χαλκού. Γι' αυτό το λόγο, σχεδιάστηκαν μέσω του σχεδιαστικού προγράμματος AutoCAD, κεραμικές πλάκες αλουμίνας με χάλκινα ηλεκτρόδια σε διάφορα μεγέθη, έτσι ώστε να μπορούν να συγκολληθούν σ' αυτές διαφορετικός αριθμός ζευγών θερμοστοιχείων. Ακόμη σχεδιάστηκαν με τέτοια γεωμετρία που να είναι πανομοιότυπες μ' αυτές των γεννητριών των προσομοιώσεων του Κεφαλαίου 3.



Εικόνα 4.2: Απεικόνιση των κάτω κεραμικών πλακών αλουμίνας με τοποθετημένα τα ηλεκτρόδια χαλκού για διαφορετικό αριθμό ζευγών θερμοστοιχείων.



Εικόνα 4.3: Απεικόνιση των κάτω κεραμικών πλακών αλουμίνας με τοποθετημένα τα ηλεκτρόδια χαλκού για διαφορετικό αριθμό ζευγών θερμοστοιχείων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, οι κεραμικές πλάκες αλουμίνας έχουν και από τις δύο πλευρές χάλκινα ηλεκτρόδια, έτσι ώστε σε περίπτωση δοκιμών να χρησιμοποιούνται και οι δύο επιφάνειες. Άρα, θα υπάρχουν αρκετά περιθώρια λάθους κατά τη διαδικασία κατασκευής χωρίς να καταναλώνονται πολλές πλάκες.

4.3 Τεχνικές Δυσκολίες κατά τη Προετοιμασία των Θερμοστοιχείων half-Heusler

Πριν τις διαδικασίες κατασκευής των θερμοστοιχείων συναντιούνται πολλές τεχνικές δυσκολίες στον ερευνητή, τις οποίες καλείται να λάβει υπόψη για να μπορεί να κατασκευάσει μια θερμοηλεκτρική γεννήτρια με το υλικό half-Heusler. Ο στόχος του ερευνητή είναι να σκεφτεί μεθόδους και διάφορες διαδικασίες που θα τον βοηθήσουν να προσπεράσει αυτές τις δυσκολίες. Αρχικά, η πρώτη δυσκολία που υπάρχει είναι το μεγάλο κόστος κατασκευής του θερμοστοιχείου, η ελεγχόμενη διαδικασία μείωσης του ύψους του θερμοστοιχείου σε ένα επιθυμητό ύψος, ενώ ταυτόχρονα να μην υπερβεί μια μέγιστη διακύμανση ύψους του δισκίου. Ακολούθως, παρουσιάζεται η τεχνική δυσκολία της κοπής των θερμοστοιχείων σε σχήμα κύβου. Επιπρόσθετα, μια τεχνική δυσκολία των υλικών half-Heusler είναι η μεγάλη αντίσταση επαφής που παρουσιάζεται και επιδιορθώνεται με κατάλληλο υλικό επιμετάλλωσης και τέλος η μέτρηση της αντίστασης επαφής των θερμοστοιχείων με τα μεταλλικά ηλεκτρόδια.

4.3.1 Κόστος

Ο κύριος λόγος που το κόστος είναι εμπόδιο για την κατασκευή των θερμοστοιχείων και ταυτόχρονα στην κατασκευή θερμοηλεκτρικών γεννητριών είναι γιατί το υλικό half-Heusler συνήθως περιέχει ένα πολύ ακριβό και σπάνιο στοιχείο, το άφνιο – Hf. Ο λόγος που το υλικό αυτό είναι τόσο ακριβό οφείλεται στην δύσκολη κατεργασία διαχωρισμού του από ένα όμοιο υλικό, το ζirkόνιο – Zr. Η τιμή του άφνιου σήμερα ανέρχεται στα \$4,916.80 ανά κιλό. [56,58]

4.3.2 Ελεγχόμενη Μείωση Ύψους Θερμοστοιχείων

Η ελεγχόμενη μείωση ύψους των θερμοστοιχείων σε μορφή δισκίων είναι μια μεγάλη τεχνική δυσκολία επειδή ταυτόχρονα η διακύμανση του ύψους δεν πρέπει να ξεπερνά τα 100μm. Ο έλεγχος της μείωσης του ύψους των δισκίων τύπου p & n σε μια καθορισμένη τιμή και με διακύμανση μικρότερη της προαναφερόμενης προκύπτει μέσω της ανάγκη της μη-ύπαρξης υψομετρικής διαφοράς των κυβικών θερμοστοιχείων μέσα σε μια θερμοηλεκτρική γεννήτρια. Επιπρόσθετα, ο λόγος που δεν πρέπει να υπάρχει πιο μεγάλη διακύμανση απ' αυτή που προαναφέρεται είναι επειδή οι συγκολλητικές πάστες μετάλλων αναγράφουν στα τεχνικά χαρακτηριστικά τους ότι μπορούν να καλύψουν διακύμανση επιφανειών μέχρι τα 100μm κατά την συγκόλληση. Αν υπάρχει μεγαλύτερη διακύμανση, τότε η συγκολλητική πάστα δεν θα μπορεί να καλύψει αυτό το κενό με αποτέλεσμα να μην υπάρχει ηλεκτρική επαφή του θερμοστοιχείου με το ηλεκτρόδιο

χαλκού και η γεννήτρια θα είναι ένα ανοικτό κύκλωμα. Αυτό έχει ως συνεπακόλουθο την μη-ύπαρξη διαφοράς δυναμικού στα άκρα της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας.

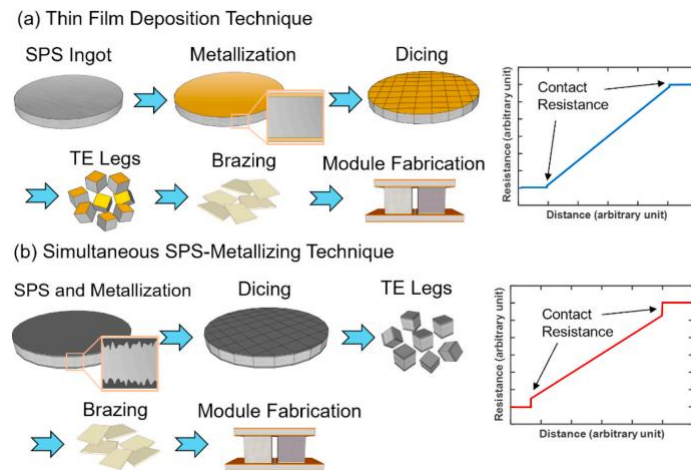
Σύμφωνα με τις πιο πάνω αιτιολογήσεις, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί γυαλόχαρτο για τη μείωση του ύψους των δισκίων με την παρέμβαση του ανθρώπινου χεριού. Αν επιτευχθεί αυτή η προσπάθεια όχι μόνο δεν θα επιτευχθεί το επιθυμητό ύψος αλλά ούτε η μέγιστη διακύμανση. Ταυτόχρονα, δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί μηχανήμα λείανσης (polisher) γιατί παρόλο που θα επιτευχθεί το επιθυμητό ύψος δεν θα είναι κατορθωτή η επίτευξή της διακύμανσης.

Για να ξεπεραστεί μια τέτοια τεχνική δυσκολία απαιτείται ένα μηχανήμα στο οποίο να τοποθετείται το δισκίο και να εκτελεί ελεγχόμενη μείωση ύψους αυτόματα. Επιπρόσθετα, πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα κίνησης των αξόνων του σε πολύ μικρές αποστάσεις στην κλίμακα των μικρομέτρων, περίπου <math><10\mu\text{m}</math>.

4.3.3 Μέθοδος Επιμετάλλωσης

Η μέθοδος επιμετάλλωσης/εναπόθεσης μεταλλικού στρώματος είναι ένα τεχνικό εμπόδιο στην προετοιμασία των θερμοστοιχείων και συγκεκριμένα λόγω της διαθεσιμότητας κάποιας μεθόδου. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η επιμετάλλωση είναι εφικτή να εκτελεστεί με φυσικές μεθόδους εναπόθεσης (PVD), όπως για παράδειγμα το magnetron sputtering, η ηλεκτροεναπόθεση (electroplating), με θερμική εξάτμιση (thermal evaporation) και εξάτμιση με δέσμη ηλεκτρονίων (electron beam evaporation). Άλλη μέθοδος ανάπτυξης μεταλλικού στρώματος στις επιφάνειες του θερμοστοιχείου είναι η πυροσυσσωμάτωση με πλάσμα σπινθήρων (SPS). [57]

Αξίζει να σημειωθεί ότι, οι φυσικές μέθοδοι εναπόθεσης προσφέρουν χαμηλή αντίσταση επαφής και μεγάλη θερμική σταθερότητα αλλά αυξάνεται το κόστος και ο χρόνος που χρειάζεται για να εκτελεστεί η διαδικασία. Όσο αφορά τη τεχνική ανάπτυξη στρώματος SPS, είναι πιο εύκολη και βολική αλλά δημιουργεί επιπλέον αντίσταση επαφής. [57]



Εικόνα 4.4: Απεικόνιση Α) της διαδικασίας κατασκευής θερμοστοιχείων με SPS μέχρι την κατασκευή θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με επιμετάλλωση από τεχνικές ανάπτυξης λεπτών υμενίων (PVD) και η αντίσταση επαφής που προσφέρεται, Β) της διαδικασίας κατασκευής θερμοστοιχείων και ταυτόχρονης ανάπτυξης μεταλλικού στρώματος με διαδικασία SPS μέχρι την κατασκευή θερμοηλεκτρικής γεννήτριας και η αντίσταση επαφής που προσφέρεται. [57]

4.3.3.1 Magnetron Sputtering

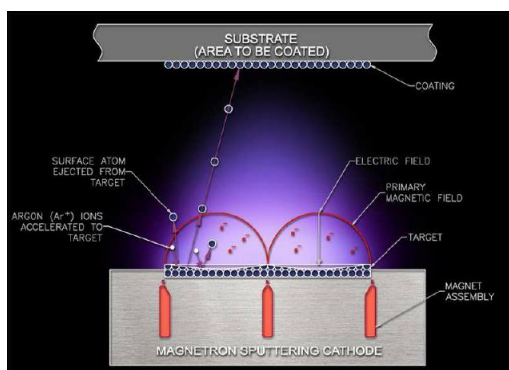
Το magnetron sputtering είναι μια φυσική μέθοδος εναπόθεσης (PVD) λεπτών αγωγίμων υλικών σε μια επιφάνεια υποστρώματος από ένα υλικό που είναι ο στόχος. Αρχικά, απαιτείται ο θάλαμος να βρίσκεται υπό υψηλό κενό (10^{-5} mbar), με σκοπό να αφαιρεθούν οποιαδήποτε αέρια, τα οποία θα επηρεάσουν την εναπόθεση. Το κενό αυτό πραγματοποιείται αρχικά με μια περιστροφική αντλία και ακολούθως από μια τουρμπομοριακή αντλία. Ακολούθως, πραγματοποιείται προσθήκη αερίου που περιέχει πλάσμα και ρυθμίζεται η πίεση με αυτοματοποιημένο σύστημα ελέγχου πίεσης (10^{-3} mbar). Συνήθως, το αέριο που επιλέγεται απαιτείται να έχει ψηλό μοριακό βάρος και γι' αυτό επιλέγεται το Αργό που έχει και χαμηλή τιμή αγοράς.

Η αρχή λειτουργίας του magnetron sputtering, βασίζεται στη δύναμη Lorentz που ασκείται στα ηλεκτρόνια και στα ιόντα του πλάσματος. Η δύναμη Lorentz περιορίζει τα ηλεκτρόνια και τα ιόντα του πλάσματος σε ελλειπτικές τροχιές κοντά στην επιφάνεια του στόχου λόγω της ροής του μαγνητικού πεδίου.

Για να εκκινήσει η δημιουργία πλάσματος στο θάλαμο, εφαρμόζεται ψηλή διαφορά δυναμικού στη κάθοδο (-), η οποία βρίσκεται ακριβώς πίσω από το υλικό του στόχου και στην άνοδο (+), η οποία είναι ενωμένη με το εσωτερικό τοίχωμα του θαλάμου ως ηλεκτρική γείωση. Μετέπειτα, τα ηλεκτρόνια που εμπεριέχονται στο αέριο συγκρούονται με τα κοντινά άτομα του αερίου που έγινε προσθήκη. Το αποτέλεσμα

αυτού είναι ο ιονισμός του αερίου - Ar^+ , αφού θα προκληθεί ηλεκτροστατική απόθεση, με την οποία αφαιρείται ένα ηλεκτρόνιο από το κάθε άτομο αερίου. Στη συνέχεια, τα θετικά άτομα αργού επιταχύνονται προς τον στόχο και λόγω της υψηλής ενέργειας σύγκρουσης τους προκαλείται εκτίναξη ατόμων του στόχου προς την επιφάνεια του υποστρώματος με υψηλή κινητική ενέργεια. Έτσι, δημιουργείται το λεπτό στρώμα στην επιφάνεια του υποστρώματος.

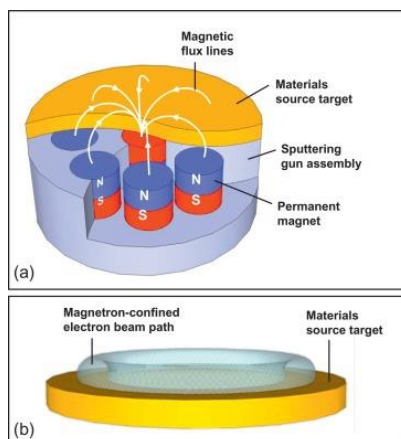
Η ανάπτυξη του μαγνητικού πεδίου λόγω της δύναμης Lorenz περιορίζει τη κίνηση των δευτερογενών ηλεκτρονίων κοντά στη περιοχή του στόχου, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η πιθανότητα σύγκρουσης ηλεκτρονίου με άτομο του αερίου και να δημιουργηθεί πλάσμα μεγαλύτερης πυκνότητας. Επιπρόσθετα, αυξάνεται ο ρυθμός εναπόθεσης των ατόμων του στόχου προς την επιφάνεια του υποστρώματος και διατηρείται χαμηλά η πίεση λειτουργίας και η διαφορά δυναμικού, παρέχοντας ασφάλεια στην επιφάνεια του υποστρώματος ή στο αναπτυσσόμενο φιλμ από ζημιά που θα προκαλούσε η άμεση σύγκρουση των ηλεκτρονίων. Παρ' όλα αυτά, λειτουργεί καταλυτικά προς το υλικό του στόχου, αφού ο στόχος οξειδώνεται ανομοιόμορφα δημιουργώντας έτσι περιμετρική κοιλότητα που ονομάζεται race track. [38,39,40]



Εικόνα 4.5: Απεικόνιση των διαφόρων στοιχείων του magnetron sputtering όπως, τη θέση των μαγνητών κάτω από το στόχο, το υλικό του στόχου, το μαγνητικό πεδίο, τη δημιουργία πλάσματος και την εναπόθεση υλικού στην επιφάνεια του υποστρώματος. [42]

Όσο για τους μαγνήτες πίσω από τον στόχο, είναι με τέτοιο τρόπο ευθυγραμμισμένοι, έτσι ώστε ο ένας πόλος να βρίσκεται στο κέντρο του στόχου και ο δεύτερος πόλος να δημιουργείται από ένα δακτύλιο μαγνητών γύρω από την εξωτερική επιφάνεια του στόχου. Το αποτέλεσμα της συγκεκριμένης διάταξης είναι να δημιουργείται ένα παράλληλο προς την επιφάνεια μαγνητικό πεδίο που κατευθύνεται από εξωτερική επιφάνεια του στόχου προς το κέντρο του στόχου. (Βλέπε εικόνα 4.6).

[38,39,40]



Εικόνα 4.6: Απεικόνιση (a): της διάταξης των μαγνητών στη βάση που τοποθετείται το υλικό του στόχου, της φοράς του μαγνητικού πεδίου και (b) της διαδρομής της δέσμης ηλεκτρονίων. [41]

Πλεονεκτήματα μεθόδου magnetron sputtering

Ένα πλεονέκτημα της φυσικής μεθόδου εναπόθεσης magnetron sputtering είναι ότι δεν χρειάζεται να τηχθεί ή να εξατμιστεί ο στόχος για να πραγματοποιηθεί η εναπόθεση λεπτών στρωμάτων. Επιπρόσθετα, μπορεί να γίνει εναπόθεση από σχεδόν όλα τα υλικά μιας και δεν επηρεάζει η θερμοκρασία τήξης. Επιπλέον, το υλικό που εναποτίθεται στην επιφάνεια του υποστρώματος είναι πανομοιότυπο με το υλικό του στόχου, συγκριτικά με άλλες μεθόδους φυσικής εναπόθεσης. Ακόμη, οι στόχοι μέσα στο θάλαμο μπορούν να τοποθετηθούν σε οποιοδήποτε σημείο απαιτείται από την επίστρωση ή το υπόστρωμα.

[38,39,40]

Μειονεκτήματα μεθόδου magnetron sputtering

Όπως όλες οι διαδικασίες, έτσι και η τεχνική magnetron sputtering παρουσιάζει μειονεκτήματα. Πρώτον, είναι μια μέθοδος με χαμηλούς ρυθμούς εναπόθεσης και κατά συνέπεια θα απαιτείται μεγάλος χρόνος, αν ο χρήστης χρειάζεται ένα χονδρό πάχος επίστρωσης της τάξης του 1-5 μm πάνω στο υπόστρωμα. Επιπρόσθετα, για την ανάπτυξη πλάσματος είναι απαραίτητο να υπάρχει υψηλή πίεση του αερίου (Ar) που εισάγεται στο θάλαμο (περίπου 50-100 mTorr). Τέλος όπως προαναφέρθηκε στο υπο-υπο-υποκεφάλαιο 4.3.3.1 η μέθοδος αυτή δεν καταναλώνει ομοιόμορφα τον στόχο, αφού το υλικό διαβρώνεται περιμετρικά λόγω της αναπτυσσόμενης δύναμης Lorenz. Το αποτέλεσμα του συγκεκριμένου μειονεκτήματος είναι η ανάγκη για τοποθέτηση καινούργιου στόχου, ενώ από τον προηγούμενο στόχο καταναλώθηκε λιγότερο από το 50% του υλικού του.

[38,39,40]

4.3.4 Κόψιμο Θερμοστοιχείων σε Κύβους

Το κόψιμο των θερμοστοιχείων σε σχήμα κύβου για την κατασκευή μιας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας αποτελεί ένα τροχοπέδη. Συγκεκριμένα, κατά την κοπή τους τα θερμοστοιχεία πρέπει έχουν συγκεκριμένο εμβαδό διατομής. Άρα δεν είναι εφικτή η κοπή τους με σιγατσάκι χειρός ή με ηλεκτρικό δίσκο κοπής αφού δεν θα υπάρξει ακρίβεια στις διαστάσεις και ταυτόχρονα κατά την προσπάθεια κοπής θα υπάρχουν στην ατμόσφαιρα σωματίδια του θερμοηλεκτρικού υλικού.

Γι' αυτό απαιτείται μηχανήμα το οποίο να εκτελεί τη διαδικασία κοπής αποφεύγοντας την ανάγκη για στήριξη και κοπή από τον χρήστη, αλλά να κινείται και να κόβει το θερμοστοιχείο αυτόματα με ψηλή ακρίβεια, δηλαδή ο δίσκος να περιστρέφεται σε ψηλές γωνιακές ταχύτητες ενώ η γραμμική ταχύτητα κοπής να είναι πολύ αργή.

4.3.5 Υψηλή Αντίσταση Επαφής/Επιμετάλλωση

Μια άλλη τεχνική δυσκολία που συναντιέται κατά την προετοιμασία των θερμοστοιχείων και επηρεάζει πολύ την αξιοπιστία και την απόδοση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας είναι η ψηλή αντίσταση επαφής που παρουσιάζει το θερμοηλεκτρικό υλικό half-Heusler, ανάμεσα του μεταλλικού ηλεκτροδίου και των θερμοστοιχείων (interconnect). Η κύρια πρόκληση για την κατασκευή μιας αξιόπιστης γεννήτριας είναι ο εντοπισμός κατάλληλων υλικών επιμετάλλωσης, έτσι ώστε να επιτευχθεί χαμηλή αντίσταση επαφής τόσο κατά τη συγκόλληση, όσο και σε εφαρμογές με εύρος θερμοκρασίας 200-800°C. Η πρόκληση προκύπτει από τη δημιουργία ψηλών θερμικών τάσεων στις συγκολλήσεις από τη διαφορά θερμοκρασίας στις δύο επιφάνειες της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας και στις διαφορετικές φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των υλικών που απαρτίζουν την γεννήτρια. [57,58]

Η επιμετάλλωση των θερμοστοιχείων έχει σκοπό να μειώσει την αντίσταση επαφής αλλά και να προσφέρει την ικανότητα συγκόλλησης του θερμοστοιχείου με την συγκολλητική πάστα στον χαλκό. Επιπρόσθετα, η επιμετάλλωση θα δημιουργήσει φράγμα διάχυσης (diffusion barrier) για να μην υπάρχει περίπτωση διάχυσης του υλικού των θερμοστοιχείων στην συγκολλητική πάστα και το χαλκό και αντίθετα. Ανάλογα με το υλικό που πραγματοποιείται η επιμετάλλωση προσφέρονται διαφορετικά πλεονεκτήματα, όπως παρόμοιο συντελεστή θερμικής διαστολής ή ένα στρώμα που έχει καλύτερη πρόσφυση στο θερμοστοιχείο. [48,49,57,58]

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, τα υλικά που χρησιμοποιούνται για επιμετάλλωση του θερμοηλεκτρικού υλικού half-Heusler είναι το νικέλιο (Ni), το τιτάνιο (Ti), χρήση

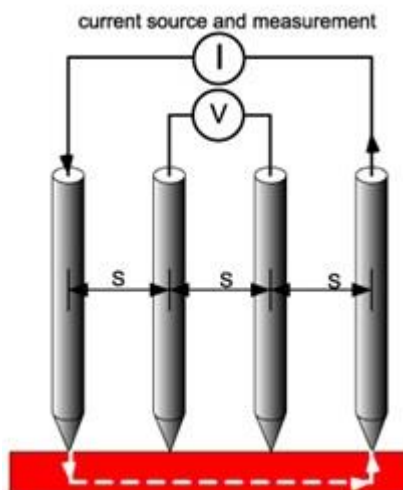
τιτανίου ως συγκολλητικό στρώμα (adhesive layer) και πάνω στρώμα νικελίου και χρήση σιδήρου (Fe) και τιτανίου. Το πάχος της επιμετάλλωσης συνήθως ανέρχεται κοντά στο 1μm. [48,49,57,58]

4.3.6 Μέτρηση Αντίστασης Επαφής

Το τελευταίο τεχνικό εμπόδιο προετοιμασίας μιας θερμοηλεκτρικής γεννήτρια αλλά και του χαρακτηρισμού της είναι μέτρηση της αντίστασης επαφής. Η αντίσταση επαφής ορίζεται ως η αντίσταση μεταξύ του θερμοστοιχείου και του υλικού επιμετάλλωσης μαζί με την αντίσταση επαφής συγκόλλησης του θερμοηλεκτρικού υλικού με τα μεταλλικά ηλεκτρόδια. Είναι πολύ σημαντικό το να γνωρίζει ο ερευνητής την αντίσταση επαφής γιατί είναι αυτή που ευθύνεται για την ανάπτυξη θερμότητας μέσω του φαινομένου Joule. Η συγκεκριμένη θερμότητα λειτουργεί κατά της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας γιατί μειώνει την απόδοση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας και την ικανότητα θέρμανσης, δηλαδή το ποσό θερμικής ενέργειας που μπορεί να δοθεί από το χρήστη. Άρα, αν η αντίσταση επαφής είναι ψηλή για παράδειγμα στο εύρος $x10^{-2} - x10^{-3} \Omega cm^2$, τότε θα είναι σημαντική η μείωση της απόδοσης της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας. Η ιδανική τιμή της αντίστασης επαφής, κατά την οποία η θερμοηλεκτρική γεννήτρια θα έχει την μέγιστη απόδοση, κατατάσσεται στην περιοχή $x10^{-6} \Omega cm^2$, ενώ μια αποδεκτή τιμή κατατάσσεται στην περιοχή $x10^{-5} \Omega cm^2$.

Για την μέτρηση της αντίστασης επαφής απαιτείται η ανάπτυξη διάταξης και προγράμματος για μέτρηση της αντίστασης ως προς τη θέση. Συνήθως για την μέτρηση της αντίστασης ως προς τη θέση χρησιμοποιείται διάταξη με τέσσερις ή δύο ή μία μεταλλική ακίδα. Στη περίπτωση χρήσης τεσσάρων μεταλλικών ακίδων, ηλεκτρικό ρεύμα εξαναγκάζεται να περάσει από το υλικό μέσω δύο εξωτερικών ακίδων και διαβάζοντας τη τάση από τις δύο εσωτερικές ακίδες. Στο ενδεχόμενο χρήσης δύο μεταλλικών ακίδων, δύο ηλεκτρόδια χρησιμεύουν τόσο ως αισθητήρες ρεύματος και τάσης. Τέλος, στην περίπτωση χρήσης μίας μεταλλικής ακίδας, αυτή λαμβάνει τιμές τάσης στο σημείο που βρίσκεται, δίνοντας ρεύμα στο υλικό από καλώδια.

[61,64]



Εικόνα 4.7: Απεικόνιση διάταξης μέτρησης αντίστασης επαφής με χρήση τεσσάρων μεταλλικών ακίδων. Από τις δύο εξωτερικές ακίδες εξαναγκάζεται το ρεύμα να περάσει το υλικό ενώ με τις δύο εσωτερικές ακίδες λαμβάνονται τιμές τάσης. [61]

Κεφάλαιο 5

5 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑΣ ΘΕΡΜΟΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

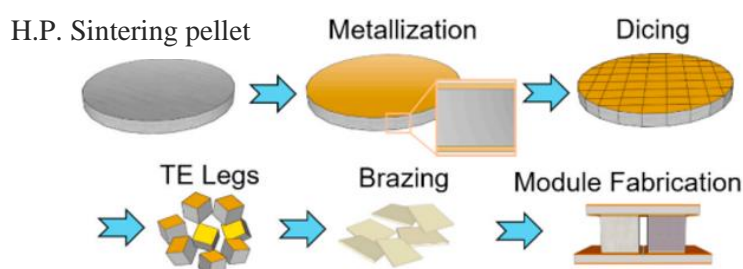
Στο κεφάλαιο 5, αναλύονται όλες οι διαδικασίες που αφορούν την προετοιμασία των θερμοστοιχείων σε σχήμα κύβου λύνοντας τις τεχνικές δυσκολίες του Κεφαλαίου 4, δηλαδή τη παραγωγή θερμοστοιχείων από την σύνθεση μέχρι την διαδικασία της πρέσας, τη μείωση του ύψους των θερμοστοιχείων σε μορφή δισκίου, την επιμετάλλωση των θερμοστοιχείων, τη διαδικασία κοπής των θερμοστοιχείων σε σχήμα κύβου, τη διαδικασία συγκόλλησης των και τη μέτρηση αντίστασης επαφής στη διεπιφάνεια των δειγμάτων. Τέλος, παρουσιάζονται τα σφάλματα και συμπεράσματα που υπάρχουν στις διαδικασίες κατασκευής και προετοιμασίας των θερμοστοιχείων.

Πιο κάτω παρουσιάζεται μια λίστα με όλες της διαδικασίες προετοιμασίας των θερμοστοιχείων για να είναι εφικτή η κατασκευή μιας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας. Αξίζει να αναφερθεί ότι, η λίστα αυτή συσχετίζεται με τις τεχνικές δυσκολίες που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4. Όλες οι διαδικασίες της λίστας επεξηγούνται με σειρά στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου

Λίστα Διαδικασιών Προετοιμασίας Θερμοστοιχείων

1.	Κατασκευή θερμοστοιχείων τύπου p και n σε μορφή δισκίου
2.	Έλεγχος ύψους των δισκίων
3.	Επιμετάλλωση Θερμοστοιχείων
4.	Κοπή θερμοστοιχείων σε κύβους
5.	Εύρεση βέλτιστων συνθηκών συγκόλλησης θερμοστοιχείων
6.	Μέτρηση αντίσταση επαφής θερμοστοιχείων

Πίνακας 5.1: Λίστα με τις διαδικασίες που απαιτούνται να πραγματοποιηθούν για τη προετοιμασία θερμοστοιχείων.



Εικόνα 5.1: Η διαδικασία προετοιμασίας των θερμοστοιχείων μέχρι τη κατασκευή μιας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας. [57]

5.1 Κατασκευή των Θερμοστοιχείων Δισκίου

5.1.1 Σύνθεση Υλικών half-Heusler στο Glove Box

Για την παραγωγή θερμοστοιχείων p & n τύπου σε μορφή δισκίου, πρέπει να ακολουθηθεί μια συγκεκριμένη διαδικασία.

Αρχικά, με την βοήθεια των μεταδιδακτορικών ερευνητών πραγματοποιείται η σύνθεση για κάθε υλικό σε προστατευμένο περιβάλλον υπό την ροή αργού στο glove box.

Οι σκόνες ζυγίζονται σε ζυγαριά ακριβείας με σκοπό να επιτευχθούν οι μάζες και να λαμβάνονται οι βέλτιστες θερμοηλεκτρικές ιδιότητες σύμφωνα με τους πιο κάτω πίνακες.

Ti_{0.4}Hf_{0.6}CoSb_{0.83}Sn_{0.17} – p τύπου	Μάζα Σκόνης [gr]
Ti	0.834
Hf	0.467
Co	2.568
Sb	4.403
Sn	0.879

Πίνακας 5.2: Οι μάζες των μεταλλικών σκονών που χρησιμοποιούνται για σύνθεση υλικού half-Heusler τύπου p.

Ti_{0.4}Zr_{0.6}NiSb_{0.015}Sn_{0.985} – n τύπου	Μάζα Σκόνης [gr]
Ti	1.752
Zr	5.008
Ni	5.370
Sb	10.700
Sn	0.167

Πίνακας 5.3: Οι μάζες των μεταλλικών σκονών που χρησιμοποιούνται για σύνθεση υλικού half-Heusler τύπου n.

Αφού τελειώσει η διαδικασία ζυγίσματος, τοποθετείται το μίγμα σκόνης στο δοχείο άλεσης, το οποίο περιέχει συγκεκριμένο αριθμό μεταλλικών σφαιρών.

5.1.2 Διαδικασία Μηχανικής Άλεσης – Planetary Ball Milling Machine

Το δοχείο άλεσης τοποθετείται στον μηχανισμό planetary ball milling με κωδικό ονόματος εργαστηρίου P6, για να πραγματοποιηθεί η διαδικασία μηχανικής άλεσης (mechanical alloying) των διάφορων μεταλλικών σκονών.

Ονομάζεται πλανητική άλεση με μπάλες γιατί το δοχείο άλεσης τοποθετείται σε περιστρεφόμενο δίσκο στήριξης και μέσω ενός μηχανισμού περιστροφής το δοχείο άλεσης μπορεί να περιστρέφεται γύρω από τον δικό του άξονα περιστροφής. Οι φυγόκεντρες δυνάμεις που δημιουργούνται από την περιστροφή του δοχείου άλεσης γύρω από το δικό του άξονα και από τον περιστρεφόμενο δίσκο στήριξης, δρουν στο περιεχόμενο του δοχείου άλεσης, δηλαδή στις μεταλλικές σφαίρες και στις μεταλλικές σκόνες. Αξίζει να αναφερθεί ότι, ο περιστρεφόμενος δίσκος στήριξης του δοχείου άλεσης και το δοχείο άλεσης περιστρέφονται σε αντίθετες κατευθύνσεις και γι' αυτό οι φυγόκεντρες δυνάμεις δρουν εναλλάξ σε όμοιες και αντίθετες κατευθύνσεις. Το αποτέλεσμα αυτού είναι η καθοδική κίνηση των μεταλλικών σφαιρών και της μεταλλικής σκόνης στα τοιχώματα μέσα στο δοχείο άλεσης λόγω του φαινομένου τριβής και μετά η ανοδική κίνηση και κρούση τους στα τοιχώματα του δοχείου άλεσης. [60]

Πιο κάτω ακολουθεί ο πίνακας με τις παραμέτρους που ορίζονται μέσω του ρυθμιστή στον μηχανισμό planetary ball milling P6, για κάθε τύπου ημιαγωγό half-Heusler.

	HH – p τύπου	HH – n τύπου
ω [rpm]	450	600
$t_{milling}$ [min]	15	30
t_{pause} [min]	15	20
repetitions [#]	16	12
reverse	off	On

Πίνακας 5.4: Οι τιμές των παραμέτρων γωνιακής ταχύτητας, χρόνου άλεσης, χρόνου παύσης, αριθμός επαναλήψεων και επιλογής αντίθετης κίνησης στον μηχανισμό planetary ball milling P6 για υλικά p και n τύπου.

5.1.3 Διαδικασία Παραγωγής Θερμοστοιχείων – Hot Pressing Sintering

Η πυροσυσσωμάτωση των μεταλλικών σκονών πραγματοποιείται σε μήτρα από γραφίτη με οπή εσωτερικής διαμέτρου 15mm και δύο έμβολα από γραφίτη διαμέτρου 15mm. Συγκεκριμένα, ζυγίζεται και τοποθετείται η μάζα των μεταλλικών σκονών που απαιτείται μέσα στη μήτρα γραφίτη, έχοντας υπόψη το επιθυμητό ύψος των θερμοστοιχείων σε μορφή δισκίου.

Πιο κάτω παρουσιάζονται οι τιμές των μαζών που τοποθετούνται στις μήτρες και του επιθυμητού ύψους για σκόνες p και n τύπου.

	HH – p τύπου	HH – n τύπου
Ύψος δισκίων [mm]	3.5	3.5
Μάζας σκόνης [gr]	5.82	4.61

Πίνακας 5.5: Παρουσιάζονται οι τιμές της μάζας που τοποθετείται στις μήτρες γραφίτη για παραγωγή θερμοηλεκτρικού δισκίου και οι τιμές του συγκεκριμένου ύψους.

Εφόσον υπάρχει υλικό σε μορφή σκόνης στη μήτρα, είναι δυνατόν να ξεκινήσει η παραγωγή των θερμοστοιχείων σε κυλινδρικό σχήμα με χρήση της πρέσας του εργαστηρίου της οποίας η λειτουργία είναι η πυροσυσσωμάτωση στερεάς κατάστασης με συμπίεση. Συγκεκριμένα, η πυροσυσσωμάτωση στερεάς κατάστασης εμπεριέχει τη θέρμανση της σκόνης, που τοποθετείται στη μήτρα, σε θερμοκρασία χαμηλότερης του σημείου τήξης για να επιτευχθεί η στερεά-κατάσταση διάχυσης και τη δημιουργία δεσμών στα σωματίδια. Το αποτέλεσμα της θέρμανσης μαζί με τη ψηλή συμπίεση που προσφέρει η πρέσα είναι η δημιουργία δεσμών, η οποία ξεκινάει από το σημείο επαφής των σωματιδίων της σκόνης. Οι παράμετροι που επηρεάζουν τη διαδικασία της στερεάς πυροσυσσωμάτωση με συμπίεση είναι ο χρόνος διάρκειας, η τιμή της θερμοκρασίας, η τιμή της συμπίεσης και η ατμόσφαιρα του φούρνου.

Αρχικά, για να είναι ασφαλές το άνοιγμα του θαλάμου του φούρνου της πρέσας είναι αναγκαίο να πραγματοποιηθούν μια σειρά από καθαρίσματα του θαλάμου μέσω παροχής και αναρρόφηση αερίου αργού. Στη συνέχεια, απαιτείται έλεγχος της ροής νερού και ροής αερίου αργού ότι είναι ικανοποιητικές. Εφόσον πραγματοποιηθεί ο έλεγχος για τα πιο πάνω και η ατμόσφαιρα έχει καθαριστεί, τότε ανοίγεται ο θάλαμος και τοποθετείται η μήτρα στο εσωτερικό. Ακολούθως, καθαρίζεται ξανά ο θάλαμος όπως πριν, ρυθμίζεται η ροή του αργού μέσα στο θάλαμο, ανοίγεται το vent, τίθεται σε έναρξη η λειτουργία του φούρνου και ξεκινάει το πρόγραμμα.

Πιο κάτω παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που ορίζονται από τον ηλεκτρονικό ρυθμιστή του φούρνου και επηρεάζουν τη λειτουργία στερεάς

πυροσυσσωμάτωσης, όπως είναι η θερμοκρασία, ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας, ο χρόνος θέρμανσης, τα κιλά, ο ρυθμός αύξησης κιλών και ο χρόνος εφαρμογής των κιλών.

Παράμετροι	ΗΗ – ρ τύπου	ΗΗ – η τύπου
Θερμοκρασία [°C]	850	650
Ρυθμός αύξησης θερμοκρασίας [°C/min]	10	10
Χρόνος θέρμανσης [min]	60	60
Κιλά [kg]	900	900
Ρυθμός αύξησης κιλών [kg/min]	9	14
Χρόνος εφαρμογής κιλών [min]	70	70

Πίνακας 5.6: Παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που ορίζονται σε ηλεκτρονικό ρυθμιστή του φούρνου και επηρεάζουν τη λειτουργία στερεάς πυροσυσσωμάτωσης.

Με το πέρας της διαδικασίας στερεάς πυροσυσσωμάτωσης στη πρέσα, επαναλαμβάνεται ο καθαρισμός του θαλάμου, σηκώνεται ο θάλαμος του φούρνου και λαμβάνεται το δισκίο. Η διαδικασία πυροσυσσωμάτωσης στη πρέσα διεκπεραιώνεται για τη παραγωγή εφτά δισκία ΗΗ ρ – τύπου και έξι δισκία ΗΗ η – τύπου με διάμετρο 15mm.

5.2 Έλεγχος Ύψους Δισκίων Θερμοστοιχείων

Εφόσον τερματίστηκε η διαδικασία κατασκευής θερμοστοιχείων και έχουν κατασκευαστεί ο επιθυμητός αριθμός δισκίων ρ και η τύπου, τότε είναι αναγκαίο να πραγματοποιηθεί διαδικασία ελεγχόμενης μείωσης ύψους των δισκίων, έχοντας υπόψη τις ανάγκες που προαναφέρονται στο υπο-υποκεφάλαιο 4.3.2.

Αξίζει να αναφερθεί ότι, τα δείγματα που λαμβάνονται από τις μήτρες γραφίτη έχουν αρκετή διακύμανση ύψους έως και 400μm. Αυτό συμβαίνει κυρίως στη συχνή χρήση των μητρών γραφίτη μιας και κάθε φορά που χρησιμοποιούνται καθαρίζονται με χρήση γυαλόχαρτων.

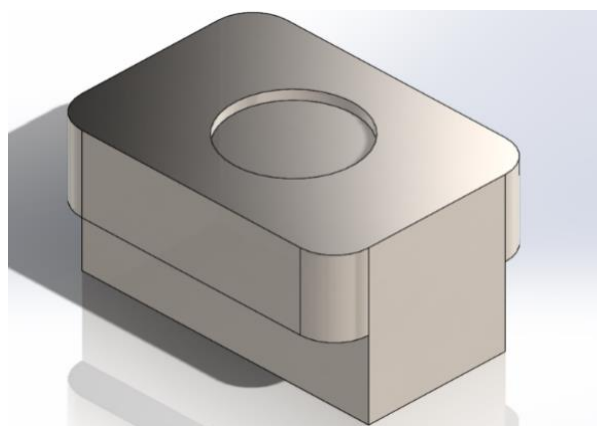
Στο εργαστήριο των θερμοηλεκτρικών υλικών του Πανεπιστημίου Κύπρου δίνεται η δυνατότητα μείωσης ύψους των δισκίων μέσω μηχανήματος κοπής και λείανσης που διαθέτει και συγκεκριμένα το μηχάνημα Accutom – 100 από την εταιρία Struers.



Εικόνα 5.2: Απεικόνιση του μηχανήματος κοπής και λείανσης Accutom – 100 από τη Struers.

Το μηχάνημα της Struers αποτελείται από μια δαγκάνα, η οποία στηρίζεται σε κινούμενο άξονα και κινείται προς τη κατεύθυνση κάθετα με το ρυθμιστή παραμέτρων (controller) και από το δίσκο λείανσης, ο οποίος στηρίζεται στο ηλεκτρικό κινητήρα και κινείται κάθετα ως τη δαγκάνα. Το γεγονός ότι υπάρχει μέσο στήριξης – δαγκάνα, δίνεται η δυνατότητα στερέωσης κάποιου μηχανισμού για να πραγματοποιηθεί η διαδικασία μείωσης ύψους των δισκίων.

Με τη χρήση του λογισμικού SolidWorks, πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός ενός εξαρτήματος, στον οποίο θα στηρίζεται το δισκίο στην οπή και στη συνέχεια το εξάρτημα θα στερεώνεται στο μέσο στήριξης του Accutom 100.



Εικόνα 5.3: Απεικόνιση του εξαρτήματος μείωσης ύψους για χρήση στο μηχάνημα κοπής και λείανσης Accutom – 100.

Η βασική ιδέα του συγκεκριμένου εξαρτήματος είναι να συγκολληθεί το δισκίο στην οπή με χρήση γόμμας ταχείας συγκόλλησης (super glue) και να στερεώνεται στη δαγκάνα του Accutom – 100 μέσω της εξοχής που υπάρχει στη βάση. Το συγκεκριμένο εξάρτημα μείωσης ύψους των δισκίων κατασκευάστηκε από ανοξείδωτο χάλυβα μέσω της CNC φρέζας του Πανεπιστήμιου Κύπρου.

5.2.1 Διαδικασία Μείωσης Ύψους Θερμοστοιχείων p & n τύπου

Αρχικά, στερεώνεται το δισκίο με χρήση γόμμας ταχείας συγκόλλησης μέσα στην οπή του μηχανισμού και στερεώνεται το εξάρτημα στη δαγκάνα του Accutom – 100. Στη συνέχεια, η δαγκάνα στερεώνεται στον άξονα που κινείται κάθετα του controller και τοποθετείται ο τροχός λείανσης που είναι υπεύθυνος για τη μείωση ύψους των δισκίων στον άξονα του ηλεκτροκινητήρα. Ακολούθως, πραγματοποιείται μια προσεκτική διαδικασία ευθυγράμμισης του τροχού λείανσης και του δισκίου που βρίσκεται στο εξάρτημα. Συγκεκριμένα, κινείται ο τροχός λείανσης μέχρι το επιθυμητό σημείο το οποίο είναι 1mm μετά την αρχή του δισκίου. Μετά κινείται η δαγκάνα μέχρι να έρθει και αυτή σε πολύ κοντινή απόσταση από τον τροχό λείανσης. Έπειτα, πολύ προσεκτικά κινείται η δαγκάνα κατά 15μm προς τον τροχό και ο τροχός περιστρέφεται χειροκίνητα έως ότου ακουστεί η επαφή των επιφανειών του δισκίου και του τροχού λείανσης. Μόλις ακουστεί ο χαρακτηριστικός ήχος που ενημερώνει την επαφή, τότε μέσω του ηλεκτρονικού ρυθμιστή ορίζεται το σημείο της δαγκάνας ως θέση αναφοράς. Έπειτα, κινείται ο τροχός λείανσης στην αρχή του δισκίου και ορίζεται και αυτό το σημείο ως θέση αναφοράς. Μετέπειτα, ορίζονται οι τιμές των παραμέτρων μέσω του ρυθμιστή του Accutom – 100, οι οποίες είναι η απόσταση που θα καλύπτει ο τροχός λείανσης σε κάθε επανάληψη – x_{cw} , η γωνιακή ταχύτητα του τροχού – ω_{cw} , η ταχύτητα του τροχού που αντικατοπτρίζει το πόσο γρήγορα θα καλύψει την επιφάνεια του δισκίου – \dot{x}_{cw} , η απόσταση ύψους που χρειάζεται να μειωθεί το δισκίο – x_{grind} και το ύψος που απαιτείται να αφαιρεθεί σε κάθε επανάληψη – x_{rep} . Αξίζει να σημειωθεί ότι, οι επαναλήψεις που θα εκτελέσει ο τροχός λείανσης προκύπτει από μέσω του λόγου απόστασης που θα αφαιρεθεί από το δισκίο ως προς το ύψος που αφαιρείται σε κάθε επανάληψη. Ακολούθως, ελέγχεται η ροή του ψυκτικού ότι έρχεται σε επαφή με τον τροχό λείανσης για να αποφευχθεί η αύξηση θερμοκρασίας στο δισκίο και στο τροχό λείανσης. Τέλος, ξεκινά η διαδικασία μείωσης ύψους των δισκίων.



Εικόνα 5.4: Απεικόνιση του εξαρτήματος μείωσης ύψους δισκίων μαζί με ένα δισκίο τοποθετημένο στην οπή.

Πιο κάτω ακολουθεί ο πίνακας στον οποίο αναγράφονται οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στο Accutom – 100 για μείωση ύψους των δισκίων p και n τύπου.

Παράμετρος	x_{cw} [mm]	ω_{cw} [rpm]	\dot{x}_{cw} [$\frac{mm}{s}$]	x_{grind} [mm]	x_{rep} [$\frac{mm}{rep}$]
Τιμή	19	4000	0.5	-	0.025

Πίνακας 5.7: Παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που ορίζονται στον ρυθμιστή του Accutom – 100, κατά τη διαδικασία μείωσης ύψους των δισκίων p και n τύπου.

Στον πιο πάνω πίνακα αξίζει να σημειωθεί ότι, η παράμετρος x_{grind} δεν λαμβάνει κάποια συγκεκριμένη τιμή αλλά λαμβάνει τιμές ανάλογα με το πόσο υλικό απαιτείται να αφαιρεθεί κάθε φορά.

Με το πέρας της διαδικασίας μείωσης σε συγκεκριμένο ύψος του δισκίου, αφαιρείται η δαγκάνα από τον άξονα του και λαμβάνεται το εξάρτημα μείωσης ύψους μαζί με το δισκίο. Στη συνέχεια, τοποθετείται το εξάρτημα μαζί με το συγκολλημένο δισκίο σε δοχείο με διάλυμα ακετόνης. Ακολούθως, το δοχείο τοποθετείται στο μηχανισμό ultrasonic για να επιτευχθεί η γρήγορη αποκόλληση του δισκίου από το εξάρτημα. Έπειτα, λαμβάνεται το δισκίο και με τη χρήση μικρομέτρου μετριέται το ύψος του δισκίου σε διάφορα σημεία του. Οι τιμές του ύψους καταγράφονται και ταυτόχρονα αναγνωρίζεται η διακύμανση ύψους που έχει το δισκίο. Μετέπειτα, το δείγμα συγκολλείται ξανά για να συνεχιστεί η διαδικασία μείωσης ύψους ακολουθώντας τα ίδια βήματα που έχουν αναφερθεί μέχρι το ύψος του δισκίου να φτάσει στο επιθυμητό ύψος. Αξίζει να σημειωθεί ότι, το επιθυμητό ύψος των δισκίων θερμοστοιχείων ανέρχεται στα 2mm.



Εικόνα 5.5: Απεικόνιση του εσωτερικού του μηχανήματος Accutom – 100. Συγκεκριμένα απεικονίζεται ο τροχός λείανσης, ο ηλεκτροκινητήρας μαζί με τον άξονα του και ο άξονας που στερεώνεται η δαγκάνα.

Για τη μείωση του ύψους των δισκίων το σημαντικότερο κριτήριο είναι η ελάχιστη διακύμανση που μπορεί να επιτευχθεί. Παρατηρήθηκε ότι, με τη συχνή χρήση του εξαρτήματος μείωσης ύψους, η επιφάνεια της οπής που συγκολλιέται το δισκίο άρχισε να φθείρεται και να υπάρχουν εξογκώματα και μικρές οπές. Η δημιουργία των συγκεκριμένων φθορών οφείλεται κυρίως στις εναπομείναντες γόμμες και στην χρήση λεπίδων κατά τη διαδικασία αφαίρεσης. Το αποτέλεσμα των εξογκωμάτων και των μικρών οπών είναι να μην μειώνεται η διακύμανση αλλά να αυξάνεται στα δισκία πάνω από 100μm κατά τη διαδικασία μείωσης ύψους, γεγονός που δεν είναι επιτρεπτό. Άρα, είναι αναγκαίο να βρεθεί ένα άλλο εξάρτημα για να πραγματοποιείται η διαδικασία μείωσης ύψους.

Μετά από εκτενής έρευνα γεωμετριών και υλικών έχει αποφασιστεί ότι θα χρησιμοποιηθεί κύβος αλουμινίου, ο οποίος παράγεται από διαδικασία εξώθησης (extrusion) με σκοπό οι τέσσερις από τις έξι έδρες να είναι όσο το δυνατό παράλληλες και να υπάρχει μικρή διακύμανση στις επιφάνειες του. Μόνο σε αυτές τις έδρες θα στερεώνεται το δισκίο με γόμμα ταχείας συγκόλλησης. Ένα άλλο συμπέρασμα που έχει αποφασιστεί είναι να μην χρησιμοποιούνται λεπίδες για την αφαίρεση των δισκίων από τον κύβο μετά τη διαδικασία μείωσης ύψους, παρά μόνο ακετόνη και ο μηχανισμός ultrasonic. Έτσι, εξασφαλίζεται ότι η επιφάνεια δεν θα φθείρεται από μικρές οπές και σε περίπτωση που παραμένουν υπολείμματα γόμματος, να τοποθετείται ο κύβος σε ακετόνη και στο μηχανισμό ultrasonic για αρκετό χρονικό διάστημα.

Η διαδικασία μείωσης ύψους των δισκίων με τη χρήση κύβου είναι ακριβός η ίδια που επεξηγήθηκε πιο πάνω όσο αφορά την στερέωση με χρήση γόμματος super glue, την

εφαρμογή του κύβου στη δαγκάνα και στον άξονα του Accutom – 100, την ευθυγράμμιση με τον τροχό λείανσης και τελικά την έναρξη μείωσης ύψους.



Εικόνα 5.6: Απεικόνιση του κύβου από αλουμίνιο μαζί με ένα στερεωμένο δισκίο με χρήση γόμμιας ταχείας συγκόλλησης.

5.2.2 Αποτελέσματα Μείωσης Ύψους

Η μέθοδος με την οποία πραγματοποιείται η μείωση ύψους των δισκίων είναι πολύ ικανοποιητική, αφού επιτεύχθηκε διακύμανση σε όλα τα δισκία μικρότερη από 100μm. Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι όσο πιο πολύ εμπειρία αποκτά ο χρήστης στη διαδικασία μείωσης ύψους, τόσο πιο μικρή διακύμανση μπορεί να επιτευχθεί.

Πιο κάτω παρουσιάζεται πίνακας με τους κωδικούς των δισκίων p – τύπου, το αρχικό ύψος με την διακύμανση που παρουσίαζαν και το τελικό ύψος με την διακύμανση που είχαν στο τέλος.

Κωδικός Δισκίου	Αρχικό Πάχος	Τελικό Πάχος
KSP07	2.630mm \pm 0.035mm	1.896mm \pm 0.016mm
KSP08	3.571mm \pm 0.036mm	2.022mm \pm 0.020mm
KSP09	2.368mm \pm 0.026mm	1.850mm \pm 0.020mm
KSP10	3.866mm \pm 0.080mm	1.910mm \pm 0.020mm
KSP11	3.940mm \pm 0.053mm	2.025mm \pm 0.015mm
KSP12	3.905mm \pm 0.030mm	2.080mm \pm 0.040mm
KSP13	3.790mm \pm 0.360mm	1.982mm \pm 0.050mm

Πίνακας 5.8: Τα αποτελέσματα μείωσης ύψους για τα δισκία half-Heusler p-τύπου με την ελάχιστη και μέγιστη διακύμανση πριν και μετά τη διαδικασία μείωσης ύψους.

Πιο κάτω παρουσιάζεται πίνακας με τους κωδικούς των δισκίων n – τύπου, το αρχικό ύψος με την διακύμανση που παρουσίαζαν και το τελικό ύψος με την διακύμανση που είχαν στο τέλος.

Κωδικός Δισκίου	Αρχικό Πάχος	Τελικό Πάχος
KSN01	3.633mm \pm 0.164mm	1.990mm \pm 0.007mm
KSN02	3.524mm \pm 0.269mm	1.984mm \pm 0.008mm
KSN03	3.580mm \pm 0.158mm	2.047mm \pm 0.004mm
KSN04	3.485mm \pm 0.355mm	1.990mm \pm 0.018mm
KSN05	3.501mm \pm 0.248mm	2.030mm \pm 0.009mm
KSN06	3.463mm \pm 0.429mm	2.070mm \pm 0.004mm

Πίνακας 5.9: Τα αποτελέσματα μείωσης ύψους για τα δισκία half-Heusler n-τύπου με την ελάχιστη και μέγιστη διακύμανση πριν και μετά τη διαδικασία μείωσης ύψους.

5.2.3 Συμπεράσματα Διαδικασίας Μείωσης Ύψους

Τα συμπεράσματα που λαμβάνονται με το πέρας της ελεγχόμενης διαδικασίας μείωσης ύψους των θερμοστοιχείων είναι ότι το μηχάνημα λείανσης/κοπής Accutom – 100 από την εταιρία Struers είναι ικανό να πετύχει τη μείωση των δισκίων με διακύμανση ύψους μικρότερη απ’ αυτή που προαναφέρεται στο υπο-υποκεφάλαιο 4.3.2, είναι κατορθωτή η μείωση των δισκίων στο ύψος που τίθεται ο στόχος και ο τροχός λείανσης προσφέρει στο δισκίο μια καλή επιφάνεια φινιρίσματος. Επιπλέον, εξαιτίας του κλειστού περιβάλλοντος που πραγματοποιείται η μείωση ύψους, δεν υπάρχει διαρροή των σωματιδίων του υλικού στην ατμόσφαιρα, γεγονός που κάνει αυτό το μηχάνημα πολύ ασφαλή για τον χρήστη. Επιπρόσθετα, η χρήση του κύβου από αλουμίνιο για συγκόλληση των δισκίων με γόμμα ταχείας συγκόλλησης βοηθάει στην πραγματοποίηση της διαδικασίας μείωσης με την ελάχιστη διακύμανση αφού οι τέσσερις από τις έξι έδρες του είναι παράλληλες. Τέλος, η χρήση του μηχανισμού ultrasonic για την αποκόλληση των θερμοστοιχείων από τον κύβο αλουμινίου προσφέρει τη δυνατότητα γρήγορης αποκόλλησης με αποτέλεσμα να εκτελούνται οι εργασίες πιο γρήγορα.

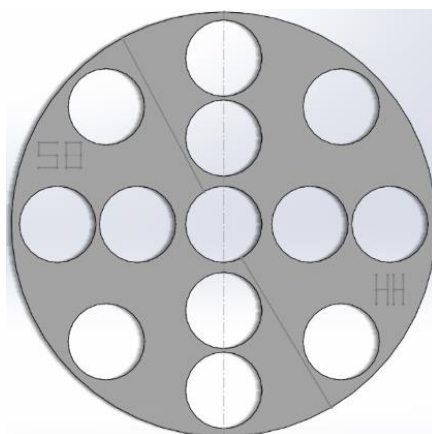
Σύμφωνα με τα πιο πάνω συμπεράσματα είναι κατανοητό ότι η τεχνική δυσκολία της μείωσης του ύψους των δισκίων που αναφέρεται στο υπο-υποκεφάλαιο 4.3.2 έχει ξεπεραστεί.

5.3 Επιμετάλλωση Θερμοστοιχείων

Η επιμετάλλωση των δισκίων πραγματοποιείται με στόχο νικελίου, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία και ο στόχος αυτός παρέχεται από το εργαστήριο.

Για να πραγματοποιηθεί η επιμετάλλωση των θερμοστοιχείων και το λεπτό φιλμ που θα αναπτυχθεί να είναι εξαιρετικής ποιότητας, απαιτείται όπως οι επιφάνειες των δισκίων να είναι καθαρές εις βάθος. Δηλαδή, δεν πρέπει να υπάρχουν στην επιφάνεια ίχνη από σκόνη, γραφίτη, ακαθαρσίες από τη διαδικασία μείωσης ύψους στο Accutom – 100 όπως τα ψυκτικά υγρά και να μην έρθουν σε επαφή με το ανθρώπινο δέρμα. Όλα τα πιο πάνω σε περίπτωση που βρίσκονται στην επιφάνεια των θερμοστοιχείων, θα εμποδίσουν την εναπόθεση των λεπτού αγωγίμου φιλμ με αποτέλεσμα να ξεκολλήσει.

Για την εύκολη τοποθέτηση των δισκίων μέσα στο θάλαμο του magnetron sputtering σχεδιάστηκε με τη χρήση του λογισμικού SolidWorks μια κυκλική βάση μικρότερου πάχους από τα δισκία, η οποία περιέχει οπές στις οποίες θα τοποθετούνται τα καθαρά δισκία. Συγκεκριμένα, η βάση χωρίστηκε στη μέση έτσι ώστε να τοποθετούνται ταυτόχρονα δισκία half-Heusler και Silicide Based και να μην υπάρχει η οποιαδήποτε σύγχυση (Βλέπε Εικόνα 5.7). Η κυκλική βάση κατασκευάστηκε από ανοξείδωτο χάλυβα μέσω του laser cutter του Πανεπιστήμιο Κύπρου.



Εικόνα 5.7: Απεικόνιση της κυκλικής βάσης με τις οπές που χρησιμοποιείται για τη τοποθέτηση των θερμοστοιχείων μέσα στο θάλαμο του magnetron sputtering.

5.3.1 Διαδικασία Επιμετάλλωσης Θερμοστοιχείων

Αρχικά, οι επιφάνειες των δισκίων καθαρίζονται προσεκτικά με χρήση ακετόνης και ισοπροπανόλης μαζί με βαμβάκι έως ότου να μην λερώνεται το βαμβάκι. Στη συνέχεια, τοποθετούνται τα δισκία σε δοχείο με ισοπροπανόλη και το δοχείο τοποθετείται στον μηχανισμό καθαρισμού ultrasonic. Ρυθμίζεται ο μηχανισμός ultrasonic να λειτουργεί για 40 λεπτά. Ακολούθως, καθαρίζεται η κυκλική βάση με παρόμοια μέθοδο για να είναι επιτρεπτό να τοποθετηθεί στο θάλαμο του magnetron sputtering. Είναι απαραίτητο να καθαριστεί η βάση γιατί αν έχει πάνω της ακαθαρσίες θα είναι δύσκολη η διαδικασία δημιουργίας ψηλού κενού και εναπόθεσης.

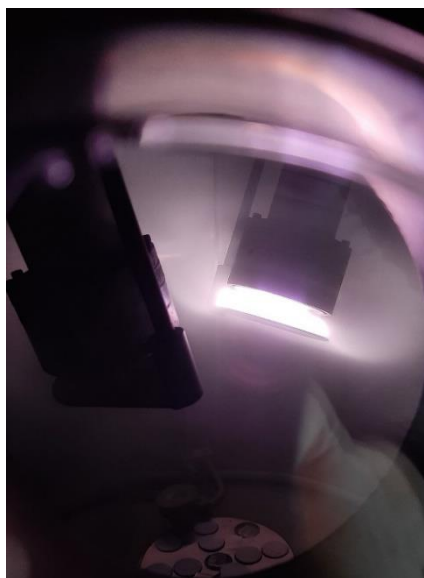
Με το τέλος της διαδικασίας καθαρισμού των θερμοστοιχείων, ανοίγεται ο θάλαμος του magnetron sputtering και τοποθετείται η βάση μαζί με τα δισκία, τα οποία βρίσκονται σε συγκεκριμένες θέσεις.



Εικόνα 5.8: Απεικόνιση του εσωτερικού του θαλάμου magnetron sputtering μαζί με τη μεταλλική βάση και δισκία τοποθετημένα στις οπές.

Αφού τοποθετηθεί προσεκτικά η μεταλλική βάση στο magnetron sputtering σφραγίζεται ο θάλαμος και ξεκινάει η διαδικασία εκκίνησης του μηχανήματος. Συγκεκριμένα, τίθεται σε λειτουργία η ψυκτική αντλία και η πηγή ρεύματος του magnetron sputtering. Ακολούθως, ανοίγονται οι ροές αερίων Αργού και Αζώτου και ξεκινάει η περιστροφική αντλία να απορροφάει προσπαθώντας να δημιουργήσει μια τιμή κενού. Έπειτα, τίθεται η τουρμπομοριακή αντλία με αποτέλεσμα να λειτουργούν και οι δύο αντλίες ταυτοχρόνως και να επιτευχθεί το υψηλό κενό που απαιτείται (10^{-5} mbar). Αφήνονται και οι δύο αντλίες να απορροφούν για μια ολόκληρη ημέρα με σκοπό να επιτευχθεί το κενό και να μην υπάρχουν μολυσματικές ουσίες μέσα στο θάλαμο που θα μειώσουν τη ποιότητα εναπόθεσης.

Κατόπιν, παρατηρείται η τιμή της πίεσης από το ψηφιακό ρολόι μέτρησης της πίεσης ότι έφτασε στην επιθυμητή τιμή. Στη συνέχεια, εισάγεται ρυθμιζόμενη ροή αερίου Αργού μέσω βαλβίδα βελόνας (needle valve) και βαλβίδα διακοπής (shutoff valve). Η επιθυμητή τιμή πίεσης για εναπόθεση νικελίου είναι 7.5 Torr ή 10 mbar. Ακολούθως, ξεκινάει η περιστροφή της βάσης του magnetron sputtering και ελέγχεται ότι το προστατευτικό κάλυμμα του στόχου από νικέλιο είναι κλειστό. Μετέπειτα, μηδενίζεται η προηγούμενη τιμή που φαίνεται στο ρολόι του κρύσταλλου χαλαζία, ο οποίος καταγράφει το πάχος μεταλλικού υλικού που έχει εναποτεθεί σε προηγούμενη εναπόθεση υλικού. Μετά, ενεργοποιείται ο διακόπτης της ενεργοποίησης του στόχου και πραγματοποιείται ο καθαρισμός του στόχου από οξειδία. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται pre-sputtering και διαρκεί 30 λεπτά. Τέλος, ανοίγεται το προστατευτικό κάλυμμα και ξεκινάει η διαδικασία εναπόθεσης magnetron sputtering. Για εναπόθεση νικελίου με πάχος 1μm πάνω στα θερμοστοιχεία, ο χρόνος που απαιτείται είναι 4 ώρες.



Εικόνα 5.9: Απεικόνιση της διαδικασίας pre-sputtering.

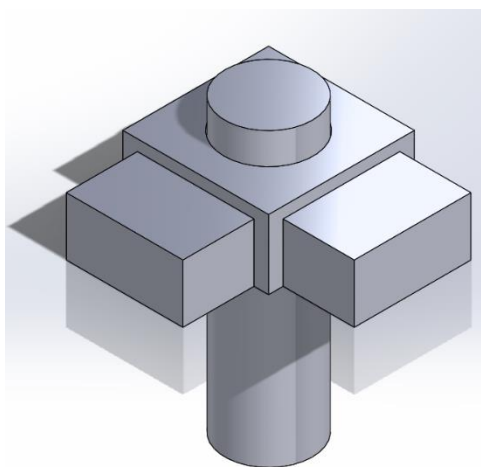
Με το πέρας της εναπόθεσης νικελίου στη μια πλευρά των δισκίων, απαιτείται η εναπόθεση και στην άλλη μεριά. Γι' αυτό, ανοίγεται ο θάλαμος και γυρίζονται τα δισκία. Στη συνέχεια, ακολουθεί η ίδια διαδικασία μέχρι την έναρξη εναπόθεσης στην άλλη μεριά, δηλαδή να λειτουργήσουν οι δύο αντλίες για μια μέρα, να εισαχθεί ροή Αργού στο θάλαμο, να πραγματοποιηθεί pre-sputtering και τελικά να ξεκινήσει η διαδικασία sputtering στα δοκίμια.



Εικόνα 5.10: Απεικόνιση της διαδικασίας magnetron sputtering.

5.4 Κοπή Θερμοστοιχείων σε Κύβους

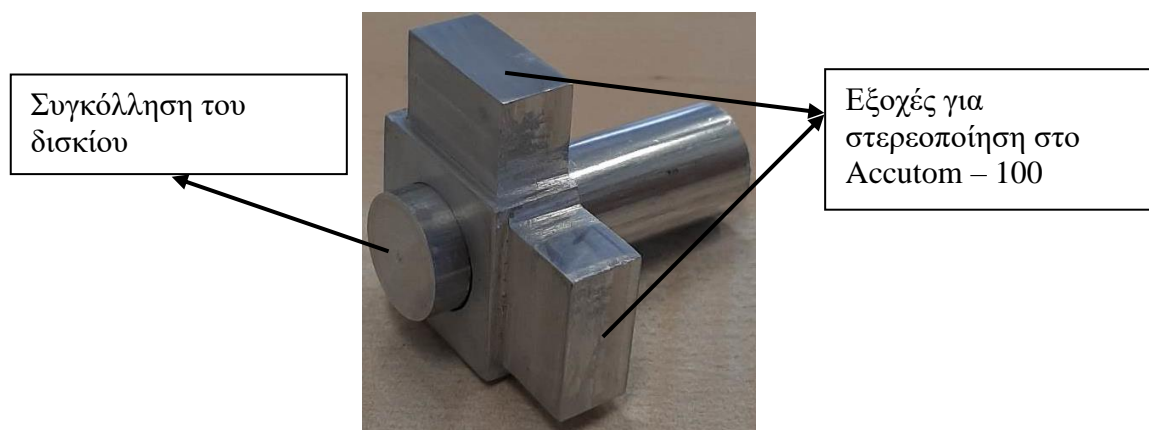
Για την κατεργασία κοπής των θερμοστοιχείων σε κύβους χρησιμοποιείται το μηχάνημα Accutom – 100 από την εταιρία Struers που χρησιμοποιείται και στη κατεργασία μείωσης ύψους. Επιπρόσθετα, απαιτείται ο σχεδιασμός ενός άλλου εξαρτήματος που να βοηθά στην κοπή των επιμεταλλωμένων θερμοστοιχείων σε κύβους. Με τη χρήση του λογισμικού SolidWorks, πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός ενός εξαρτήματος, στον οποίο θα στηρίζεται το δισκίο και αυτό θα στερεώνεται στη δαγκάνα του Accutom 100.



Εικόνα 5.11: Απεικόνιση του εξαρτήματος κοπής για χρήση στο μηχάνημα κοπής και λείανσης Accutom – 100.

Η βασική ιδέα του εξαρτήματος κοπής είναι να συγκολλείται το δισκίο στην άκρη του κυλίνδρου και ο κύλινδρος να στερεώνεται μέσα στη βάση με χρήση γόμμας ταχείας συγκόλλησης. Το εξάρτημα θα στερεώνεται στη δαγκάνα του Accutom 100 από τη μια εξοχή της βάσης για τη κοπή του δισκίου σε λωρίδες και μετά τη περιστροφή του εξαρτήματος κατά 90 μοίρες, δηλαδή τη στήριξη στην άλλη εξοχή της βάσης, για τη κάθετη κοπή των λωρίδων σε κύβους.

Το συγκεκριμένο εξάρτημα κοπής των δισκίων σε κύβους κατασκευάστηκε από αλουμίνιο μέσω της CNC φρέζας του Πανεπιστημίου Κύπρου.



Εικόνα 5.12: Απεικόνιση του εξαρτήματος κοπής από αλουμίνιο όταν κατασκευάστηκε από το μηχανουργείο για χρήση στο μηχάνημα κοπής και λείανσης Accutom – 100.

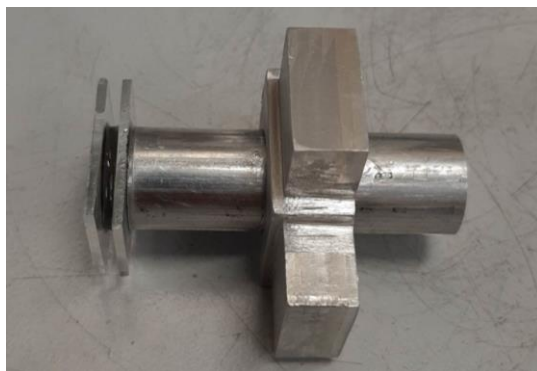
Αξίζει να σημειωθεί ότι, μετά από μελέτη του εγχειριδίου του μηχανήματος Accutom – 100, ο διαμαντοτροχός δεν πρέπει να έρχεται σε επαφή με οποιοδήποτε μέταλλο γιατί μειώνεται η απόδοση κοπής του με αποτέλεσμα να χρειάζεται συνεχώς ακόνισμα και στην χειρότερη περίπτωση να αστοχήσει. Γι' αυτό αποφασίστηκε να μην έρθει σε επαφή ο τροχός με το αλουμίνιο για τη προστασία του. Αυτό θα επιτευχθεί με την συγκόλληση κομματιών από γυαλί στον κύλινδρο πριν τη συγκόλληση του δισκίων σ' αυτόν.

Εφόσον έχει σχεδιαστεί και κατασκευαστεί ο μηχανισμός κοπής, έρχεται στο προσκήνιο η εξής ερώτηση: το πόσους κύβους θερμοστοιχείων έχει τη δυνατότητα να δώσει ένα δισκίο. Η απάντηση στο ερώτημα αυτό δίνεται από ιστοσελίδα από την Silicon Edge, στην οποία μπορεί να βρεθεί ο αριθμός των κύβων για κάθε δισκίο. Συγκεκριμένα, για δισκίο διαμέτρου 15mm ο μέγιστος αριθμός κύβων είναι 21. Μέσω υπολογισμών που διεκπεραιώθηκαν για να είναι δυνατό η λήψη 21 κύβων, πρέπει κατά τη περιστροφή 90 μοιρών του μηχανισμού ο διαμαντοτροχός να κόβει το δισκίο 1mm μέσα. [59]

Εικόνα 5.13: Απεικόνιση του μέγιστου αριθμού που είναι δυνατό να λαμβάνεται από τη κοπή ενός θερμοστοιχείου, σύμφωνα με την ιστοσελίδα της Silicon Edge. [59]

5.4.1 Διαδικασία Κοπής Θερμοστοιχείων σε Κύβους

Αρχικά, στερεώνεται ο κύλινδρος μέσα στη βάση του με γόμμα super glue. Ακολούθως, συγκολλείται ένα κομμάτι από γυαλί στην άκρη του κυλίνδρου και μετά το δισκίο. Για να αποφευχθεί η ταλάντωση του διαμαντοτροχού κατά τη διάρκεια επαφής με το δισκίο όταν αυτός έχει ψηλή γωνιακή ταχύτητα, συγκολλείται ακόμα ένα κομμάτι από γυαλί στην επιφάνεια του δισκίου.



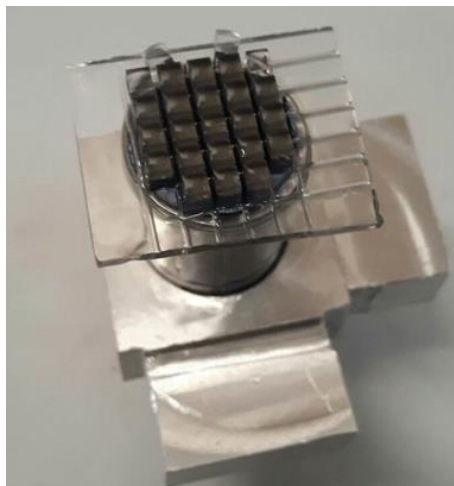
Εικόνα 5.14: Απεικόνιση του εξαρτήματος κοπής μετά τη συγκόλληση των δύο κομματιών από γυαλί και θερμοστοιχείου.

Στη συνέχεια, στερεώνεται το εξάρτημα στην δαγκάνα του Accutom – 100 από την μια εξοχή που έχει η βάση. Έπειτα, η δαγκάνα στερεώνεται στον άξονα που κινείται κάθετα του ηλεκτρονικού ρυθμιστή και τοποθετείται ο διαμαντοτροχός που είναι υπεύθυνος για τη κοπή των δισκίων στον άξονα του ηλεκτροκινητήρα. Μετέπειτα, πραγματοποιείται μια προσεκτική διαδικασία ευθυγράμμισης του διαμαντοτροχού και του δισκίου που βρίσκεται στο εξάρτημα. Συγκεκριμένα, ο τροχός τοποθετείται προσεκτικά πολύ κοντά στην επιφάνεια του γυαλιού χωρίς όμως να το ακουμπήσει.

Μέσω του ρυθμιστή του ορίζεται η θέση αυτή ως θέση αναφοράς του διαμαντοτροχού. Ακολούθως, κινείται ο άξονας που βρίσκεται η δαγκάνα με το εξάρτημα και το δισκίο έως ότου ο διαμαντοτροχός να βρεθεί στη άκρη του θερμοστοιχείου. Η θέση αυτή ορίζεται ως θέση αναφοράς και μετακινείται ξανά ο άξονας κατά 1mm στην εσωτερική μεριά του δισκίου. Η καινούργια θέση ορίζεται ως η καινούργια θέση αναφοράς.

Κατόπιν, ορίζονται οι παράμετροι οι οποίοι είναι η απόσταση που θα καλύπτει ο διαμαντοτροχός – x_w , η γωνιακή ταχύτητα του τροχού – ω_w , η ταχύτητα του τροχού που αντικατοπτρίζει το πόσο γρήγορα θα καλύψει το πάχος του δισκίου – \dot{x}_w , η δύναμη που θα ασκεί ο διαμαντοτροχός κατά την κοπή – F_w , ο αριθμός των επαναλήψεων που κόψει ο τροχός – rep και την διάστημα που αφήνεται σε κάθε κοπή – y_{rep} . Ακολούθως, ελέγχεται η ροή του ψυκτικού ότι έρχεται σε επαφή με τον τροχό κοπής για να αποφευχθεί η αύξηση θερμοκρασίας στο δισκίο και τον διαμαντοτροχό. Τέλος, ξεκινά η διαδικασία κοπής του δισκίου.

Εφόσον τελειώσει η πρώτη κοπή και υπάρχουν λωρίδες του θερμοστοιχείου, τότε περιστρέφεται το εξάρτημα κατά 90 μοίρες και στερεώνεται στην δαγκάνα από την άλλη εξοχή της βάσης. Ακολούθως, πραγματοποιείται η ίδια διαδικασία ευθυγράμμισης που αναφέρθηκε πιο πάνω και έχοντας σταθερές τις παραμέτρους ξεκινάει λειτουργία κοπής. Το αποτέλεσμα των δύο κοπών είναι η δημιουργία κύβων στην επιφάνεια του κυλίνδρου.



Εικόνα 5.15: Απεικόνιση του κομμένου θερμοστοιχείου σε κύβους πάνω στο εξάρτημα κοπής.

Πιο κάτω παρουσιάζονται οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την κοπή των δισκίων σε κύβους.

Παράμετρος	x_w [mm]	ω_w [rpm]	\dot{x}_w [$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$]	F_w [N]	rep[#]	y_{rep} [mm]
Τιμή	5	4000	0.020	low	6	2.2

Πίνακας 5.10: Παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που ορίζονται στον ρυθμιστή του Accutom – 100, κατά τη διαδικασία κοπής των δισκίων p και n τύπου σε σχήμα κύβου.

Με το πέρας της διαδικασίας κοπής των θερμοστοιχείων σε κύβους, το εξάρτημα κοπής μαζί με τα κομμάτια γυαλιού και τους κύβους τοποθετούνται σε δοχείο με διάλυμα ακετόνης. Ακολούθως, το δοχείο τοποθετείται στο μηχανισμό ultrasonic για να επιτευχθεί η γρήγορη αποκόλληση των κύβων από τα γυαλιά και το εξάρτημα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, εφόσον το επιθυμητό ύψος των θερμοστοιχείων δισκίων ανέρχεται στα 2mm, τότε οι κύβοι που θα δημιουργηθούν έχουν τιμή ακμής ίση με 2mm.

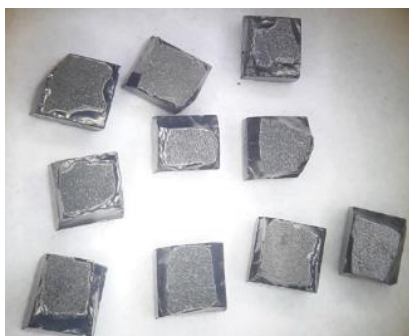
5.4.2 Κοπή Δισκίων p τύπου

Η διαδικασία κοπής θερμοστοιχείων p – τύπου σε κύβους, έχει εκτελεστεί συνολικά σε 7 θερμοστοιχεία. Κατά την κοπή μόνο ένα από αυτά έχει καταστραφεί λόγω λανθασμένων παραμέτρων στο Accutom – 100. Τα υπόλοιπα δισκία έχουν κοπεί με επιτυχία με τη πιο πάνω διαδικασία. Παρ’ όλα αυτά, ο αριθμός που λαμβάνεται από την κοπή για κάθε δισκίο είναι διαφορετικός και αυτό οφείλεται στο ότι μετρίονται μόνο οι κύβοι που έχουν καλό σχήμα και δεν έχουν καταστραφεί. Στη συνέχεια, ακολουθεί πίνακας με τον αριθμό των κύβων που έχει ληφθεί από κάθε δισκίο.

Κωδικός Δισκίου	Αριθμός Κύβων
KSP07	15
KSP08	18
KSP09	broke
KSP10	16
KSP11	12
KSP12	13
KSP13	14

Πίνακας 5.11: Παρουσιάζονται οι αριθμοί των κύβων που έχει ληφθεί από κάθε δισκίο p – τύπου.

Αυτό που παρατηρείται με το πέρας της κοπής των δισκίων p – τύπου είναι πως ο αριθμός των κύβων που λαμβάνεται δεν είναι σταθερός. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι ο διαμαντοτροχός που χρησιμοποιείται έχει μεγάλη διάμετρο, άρα απαιτείται η περιστροφή του σε χαμηλές γωνιακές ταχύτητες για να μένει σταθερός. Παρ' όλα αυτά, σύμφωνα με το εγχειρίδιο χρήσης το υλικό half-Heusler χρειάζεται ψηλές ταχύτητες περιστροφές με αποτέλεσμα ο τροχός να ταλαντώνεται κατά την έναρξη κοπής. Η ταλάντωση του τροχού στην επιφάνεια του δισκίου έχει ως συνέπεια το κτύπημα του διαμαντοτροχού με το δισκίο και την αποκόλληση μεγάλων κομματιών από την επιφάνεια. Οι κύβοι που παρουσιάζουν μεγάλη αποκόλληση κομματιών από την επιφάνεια τους ή από την ακμή καθίστανται μη – αξιοποιήσιμοι. Αξίζει να σημειωθεί ότι, το φαινόμενο αυτό μειώνεται με την εφαρμογή γυαλιού με γόμμα ταχείας συγκόλλησης μπροστά από το δισκίο, χωρίς όμως να εξαφανίζεται.



Εικόνα 5.16: Απεικόνιση κυβικών θερμοστοιχείων που έχουν αποκόλληση μεγάλων κομματιών από την επιφάνεια λόγω ταλάντωσης του διαμαντοτροχού.

5.4.3 Κοπής Δισκίων n τύπου

Η διαδικασία κοπής θερμοστοιχείων n – τύπου σε κύβους, έχει εκτελεστεί συνολικά σε 6 θερμοστοιχεία. Τα δισκία έχουν κοπεί με επιτυχία με τη πιο πάνω διαδικασία. Παρ' όλα αυτά, ο αριθμός που λαμβάνεται από την κοπή για κάθε δισκίο είναι διαφορετικός και αυτό οφείλεται στο ότι μετρίονται μόνο οι κύβοι που έχουν καλό σχήμα και δεν έχουν καταστραφεί. Στη συνέχεια ακολουθεί πίνακας με τον αριθμό των κύβων που έχει ληφθεί από κάθε δισκίο.

Κωδικός Δισκίου	Αριθμός Κύβων
KSN01	15
KSN02	16
KSN03	13
KSN04	8
KSN05	17
KSN06	15

Πίνακας 5.12: Παρουσιάζονται οι αριθμοί των κύβων που έχει ληφθεί από κάθε δισκίο n – τύπου.

Όπως παρατηρείται από τον πίνακα 5.12 το δισκίο με κωδικό όνομα KSN04 παρουσιάζει μικρό αριθμό κύβων και αυτό οφείλεται στο ότι δεν τοποθετήθηκε γυαλί μπροστά του. Η ενέργεια αυτή είχε ως στόχο τη μελέτη του τι θα συμβεί αν δεν τοποθετηθεί κομμάτι από γυαλί μπροστά στο δισκίο.

Κατά τη διαδικασία κοπής των δισκίων n τύπου, παρατηρείται ότι το υλικό αυτό είναι περισσότερο ψαθυρό από το υλικό τον p-τύπου. Ο λόγος που παρουσιάζεται αυτή η ψαθυρότητα στο υλικό πιθανόν να οφείλεται στη μεταλλική φάση (Ni_3Sn_4). Συγκεκριμένα, η ψαθυρή συμπεριφορά μαζί με τη ταλάντωση που παρουσιάζεται στο διαμαντοτροχό δικαιολογούν το γεγονός ότι μερικοί κύβοι που λαμβάνονται παρουσιάζουν μικρορωγμές στις γωνίες και αποκόλληση υλικού στις ακμές και στις έδρες του κύβου. Άρα, εξηγούν και το γεγονός γιατί λαμβάνεται διαφορετικός αριθμός κύβων από κάθε δισκίο, αφού καταγράφονται μόνο αυτοί που έχουν το σωστό σχήμα και δεν έχουν καταστραφεί.[52]

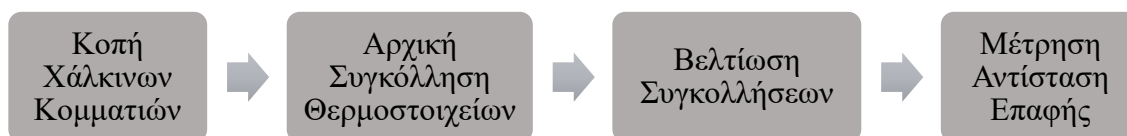
5.4.4 Συμπεράσματα Διαδικασίας Κοπής Θερμοστοιχείων

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την εκτέλεση της κοπής των θερμοστοιχείων half-Heusler είναι ότι το εξάρτημα που σχεδιάστηκε αλλά και η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι σωστή αφού προσφέρει ικανοποιητικό αριθμό θερμοστοιχείων από κάθε δισκίο με διάμετρο 15mm. Επιπρόσθετα, το μηχάνημα Accutom – 100, είναι ικανό να εκτελέσει κοπή των δισκίων με πολύ καλή ακρίβεια και το κλειστό του περιβάλλον προσφέρει ασφάλεια στο χρήστη αφού αποτρέπει τη διαρροή σωματιδίων του υλικού στην ατμόσφαιρα.

Σύμφωνα με τα πιο πάνω συμπεράσματα είναι κατανοητό ότι η τεχνική δυσκολία της κοπής των θερμοστοιχείων που αναφέρεται στο υπο-υποκεφάλαιο 4.3.4 έχει ξεπεραστεί.

5.5 Μελέτη Συγκόλλησης Επαφών

Για τη μελέτη των επαφών δηλαδή την εύρεση των βέλτιστων συνθηκών συγκόλλησης για κάθε τύπο θερμοστοιχείου, σύμφωνα με τη ποιότητα της συγκόλλησης αλλά και τη τιμή της αντίστασης επαφής, απαιτείται να εκτελεστεί μια λίστα από διαδικασίες που παρουσιάζεται στη συνέχεια σε μορφή σχεδιαγράμματος.



Πίνακας 5.13: Λίστα με τις διαδικασίες που απαιτούνται να πραγματοποιηθούν για τη μελέτη συγκόλλησης επαφών.

5.6 Κοπή Χάλκινων Κομματιών για Μέτρηση Αντίστασης Επαφής

Για την επιτυχή μέτρηση αντίστασης επαφής, απαιτείται η συγκόλληση των θερμοστοιχείων σε χάλκινα κομμάτια χαλκού ίδιου μεγέθους εμβαδού διατομής. Για να υπάρξουν όμως κομμάτια χαλκού με το ίδιο εμβαδό διατομής πρέπει να κοπούν στο μηχάνημα Accutom – 100. Συγκεκριμένα, λαμβάνονται κομμάτια χαλκού σε σχήμα νομίσματος με πάχος 4mm και συγκολλούνται στο εξάρτημα κοπής με τον ίδιο τρόπο που συγκολλούνται τα θερμοστοιχεία. Ακολούθως, στερεώνεται το εξάρτημα στον άξονα με τη δαγκάνα και διεκπεραιώνεται η ίδια διαδικασία ευθυγράμμισης και κοπής που επεξηγήθηκε στο υπο-υποκεφάλαιο 5.4.1.

Πιο κάτω παρουσιάζονται οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την κοπή των χάλκινων κομματιών.

Παράμετρος	x_w [mm]	ω_w [rpm]	\dot{x}_w [$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$]	F_w [N]	rep[#]	y_{rep} [mm]
Τιμή	5	3000	0.040	low	6	2.2

Πίνακας 5.14: Παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που ορίζονται στον controller του Accutom – 100, κατά τη διαδικασία κοπής των χάλκινων κομματιών.

Με το πέρας της κοπής των χάλκινων κομματιών, τοποθετούνται το εξάρτημα κοπής μαζί με τα κομμάτια γυαλιού και τα χάλκινα κομμάτια σε δοχείο με διάλυμα ακετόνης. Ακολούθως, το δοχείο τοποθετείται στο μηχανισμό ultrasonic για να επιτευχθεί η γρήγορη αποκόλληση των χάλκινων κομματιών από τα γυαλιά και το εξάρτημα.

5.7 Συγκόλληση Θερμοστοιχείων Κύβου

Η διαδικασία συγκόλλησης των κυβικών θερμοστοιχείων είναι ένα σημαντικό στάδιο τόσο για να βρεθούν οι συνθήκες συγκόλλησης των θερμοστοιχείων με τα χάλκινα ηλεκτρόδια με χρήση συγκολλητικής πάστας με απώτερο στόχο την ανάπτυξη μιας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας, όσο και για να βρεθεί και η τιμή της ηλεκτρικής αντίστασης επαφής για κάθε τύπο ημιαγωγού p & n. Άρα, οι συνθήκες με τις οποίες θα συγκολλούνται τα δείγματα θα καθοριστεί τόσο από την συμπεριφορά που θα παρουσιάζουν τα δείγματα κατά την συγκόλληση, όσο και από τις τιμές της ηλεκτρικής αντίστασης επαφής που θα ληφθούν. Έτσι, λαμβάνεται η απόφαση ότι μερικά θερμοστοιχεία σε σχήμα κύβου θα ληφθούν για να βρεθούν συνθήκες συγκόλλησης. Το μέσο με το οποίο θα πραγματοποιηθεί η συγκόλληση είναι με χρήση φούρνου που βρίσκεται στο εργαστήριο.



Εικόνα 5.17: Απεικόνιση του φούρνου με τον οποίο θα πραγματοποιηθεί η συγκόλληση των θερμοστοιχείων.

Ο λόγος για τον οποίο πρέπει να πραγματοποιηθούν συγκολλήσεις και για τους δύο τύπους ημιαγωγού είναι επειδή πιστεύεται ότι κατά τη συγκόλληση θα συμπεριφερθούν διαφορετικά τόσο ως προς την ποιότητα της συγκόλλησης αλλά και στα διάφορα προβλήματα τα οποία μπορεί να εμφανιστούν.

Για τη συγκόλληση των κυβικών θερμοστοιχείων με τα χάλκινα κομμάτια χρησιμοποιείται συγκολλητική πάστα αργύρου περιεκτικότητας 57% με ψηλή θερμοκρασία λειτουργίας και τήξης. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές της συγκολλητικής πάστας, βρέθηκε ότι η θερμοκρασία τήξης (liquidus) της πάστας ισούται με 660°C και ότι η θερμοκρασία λειτουργίας της είναι μέχρι 500°C. [51]

5.7.1 Διαδικασία Συγκόλληση Θερμοστοιχείων Κύβου

Αρχικά, ανοίγεται η πόρτα του φούρνου και τοποθετείται πλάκα κεραμικής αλούμινας στο ακροφύσιο αερίου αργού, με σκοπό την εύκολη διάχυση του αερίου στον θάλαμο. Έπειτα, τίθεται σε λειτουργία ο φούρνος του εργαστηρίου και προγραμματίζεται για να αποκτήσει θερμοκρασία ίση με 700°C. Ακολούθως, καθαρίζονται οι επιμεταλλωμένες επιφάνειες των θερμοστοιχείων και των χάλκινων κομματιών με ακετόνη και ακολούθως με ισοπροπανόλη. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η τοποθέτηση ενός θερμοστοιχείου ανάμεσα από δύο κομμάτια χαλκού και ανάμεσα από τις επιφάνειες που υπάρχει επαφή τοποθετείται η συγκολλητική πάστα. Η τοποθέτηση του θερμοστοιχείου ανάμεσα στα χάλκινα κομμάτια πραγματοποιείται με τη βοήθεια μια μεταλλικής βάσης από Stainless Steel, η οποία στηρίζει την πάνω επιφάνεια του χαλκού με ένα ποδαράκι.



Εικόνα 5.18: Απεικόνιση της μεθόδου στήριξης των δειγμάτων για τη συγκόλληση τους στο φούρνο.

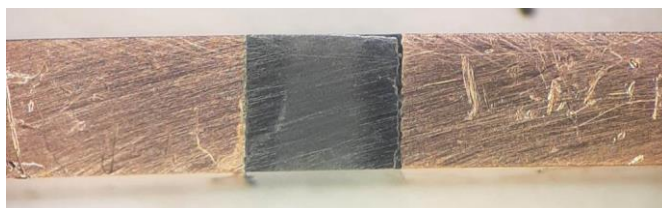
Στην συνέχεια, μόλις ο φούρνος αποκτήσει τιμή θερμοκρασίας ίση με 700°C, ρυθμίζεται ροή αερίου αργού μέσα στον φούρνο και το δείγμα χαλκού-θερμοστοιχείου-χαλκού με τη βάση τοποθετείται στον φούρνο και συγκεκριμένα πίσω από την πόρτα για 15 λεπτά. Όταν τελειώσει ο χρόνος, το δείγμα βγαίνει έξω και αφήνεται να ψυχθεί σε θερμοκρασία δωματίου. Για να μειωθεί ο χρόνος ψύξης του δείγματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί αέριο αζώτου με χαμηλή ταχύτητα ροής. Με το πέρας της ψύξης, το δείγμα λαμβάνεται και πραγματοποιείται προσεκτική παρατήρηση με χρήση στερεοσκοπίου. Ο λόγος για τον οποίο είναι απαραίτητη η χρήση στερεοσκοπίου είναι για να αξιολογηθεί η ποιότητα της συγκόλλησης και η παρατήρηση δημιουργίας καταστροφικής ρωγμής που μπορεί να αναπτυχθεί κατά τη θέρμανση.



Εικόνα 5.19: Απεικόνιση ενός θερμοστοιχείου, ανάμεσα από δύο κομμάτια χαλκού ακριβώς μετά τη συγκόλληση στο φούρνο, με τη χρήση στερεοσκοπίου.

5.8 Παρατηρήσεις Συγκόλλησης και Παραμετρικές Αναλύσεις

Για να είναι εφικτή η παρατήρηση των δειγμάτων με τη χρήση στερεοσκοπίου είναι απαραίτητη η διαδικασία γυαλίσματος της επιφάνειας σε όλα τα δείγματα, έτσι ώστε να υπάρχει μια ξεκάθαρη εικόνα και να επιβεβαιώνεται με σιγουριά η ύπαρξη ρωγμής στο δείγμα. Για την διαδικασία αυτή χρησιμοποιείται το μηχάνημα polisher στο οποίο τοποθετούνται κομμάτια από γυαλόχαρτο με δείκτη τραχύτητας ίσο με 2400, το οποίο είναι αρκετά λείο και δεν θα προκαλέσει ψηλές τάσεις στο δείγμα κατά το γυάλισμα, όπως επίσης ροή ισοπροπανόλης για να μην αναπτύσσεται θερμοκρασία και να μειώνεται η τριβή.



Εικόνα 5.20: Απεικόνιση ενός δείγματος μετά τη διαδικασία γυαλίσματος με στόχο τη παρατήρηση ύπαρξης ρωγμής.

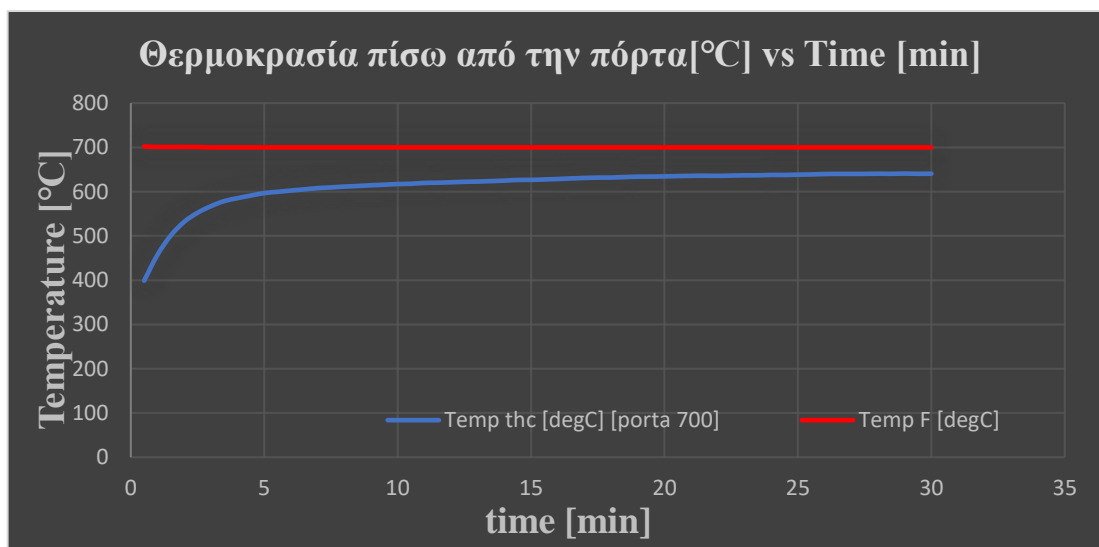
5.8.1 Θερμοστοιχεία p – τύπου

Κατά την επίβλεψη των μερικών δειγμάτων με θερμοστοιχεία p – τύπου στο στερεοσκόπιο παρατηρείται ότι η συγκόλληση είναι μέτρια και η συγκολλητική πάστα δεν έλιωσε τελείως μιας και είναι διακριτά τα μεταλλικά σωματίδια της πάστας. Επίσης, δεν παρουσιάζεται η οποιαδήποτε ρωγμή πάνω στις επιφάνειες των θερμοστοιχείων. Σύμφωνα με τις πιο πάνω παρατηρήσεις, λαμβάνεται η απόφαση να πραγματοποιηθούν παραμετρικές αναλύσεις που αφορούν την θέση του δείγματος στον φούρνο και τη τιμή της θερμοκρασίας του φούρνου.

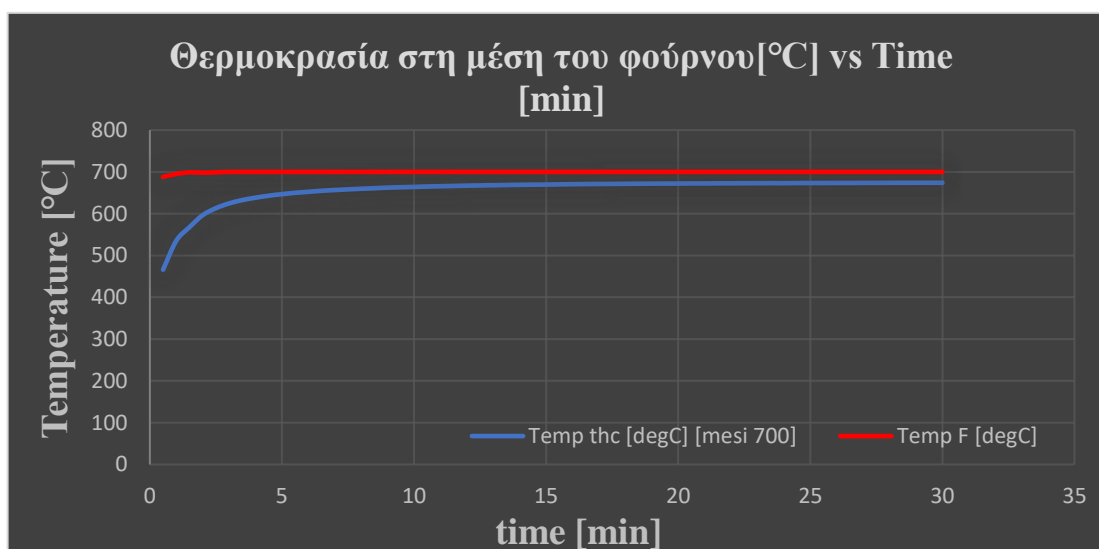
Αρχικά, αποφασίζεται να μελετηθεί η επίδραση της θέσης του δείγματος στον φούρνο. Παρ' όλα αυτά, για να μην γίνεται κατανάλωση των θερμοστοιχείων περιμένοντας να παρατηρηθεί η ποιότητα της συγκόλλησης, λαμβάνεται η απόφαση να

τοποθετηθεί θερμοζεύγος στον φούρνο σε διάφορες θέσεις για να καταγραφεί η συμπεριφορά της θερμοκρασίας του φούρνου σε πραγματικό χρόνο από θέση σε θέση. Έτσι, με την χρήση της μεταλλικής βάσης από stainless steel στερεοποιείται το θερμοζεύγος και λαμβάνονται τιμές για θερμοκρασία του φούρνου ίση με 700°C κοντά στην πόρτα, στην μέση του φούρνου και στο βάθος του φούρνου.

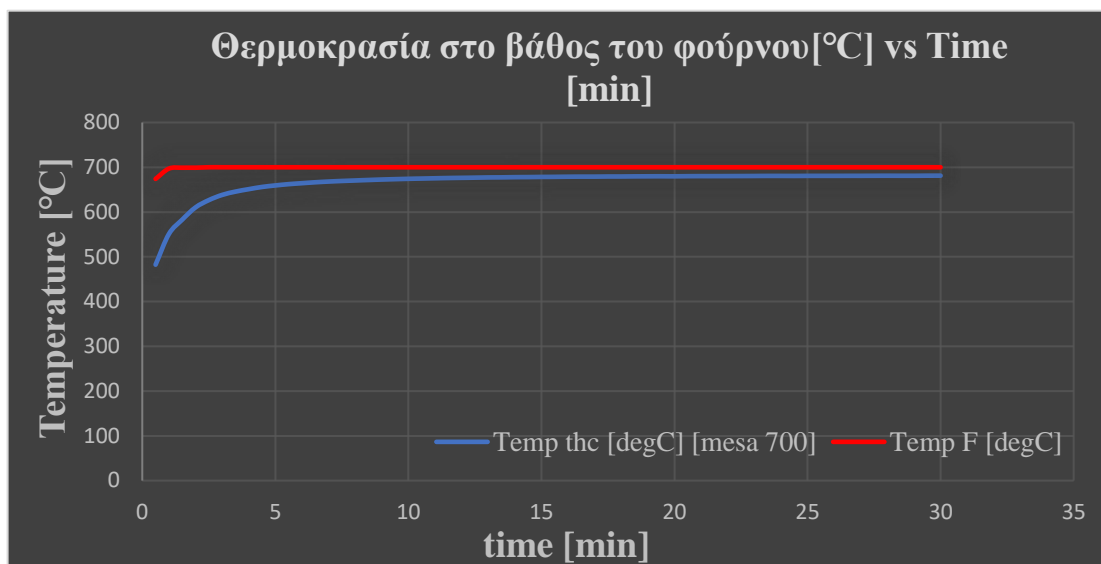
Πιο κάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από το θερμοζεύγος σε μορφή γραφικών παραστάσεων.



Γράφημα 5.1: Απεικόνιση της θερμοκρασιακής διαφοράς ως προς τον χρόνο μεταξύ της θερμοκρασίας που ρυθμίζεται ο φούρνος και της θερμοκρασίας του θερμοζεύγους για 700°C πίσω από την πόρτα του φούρνου.



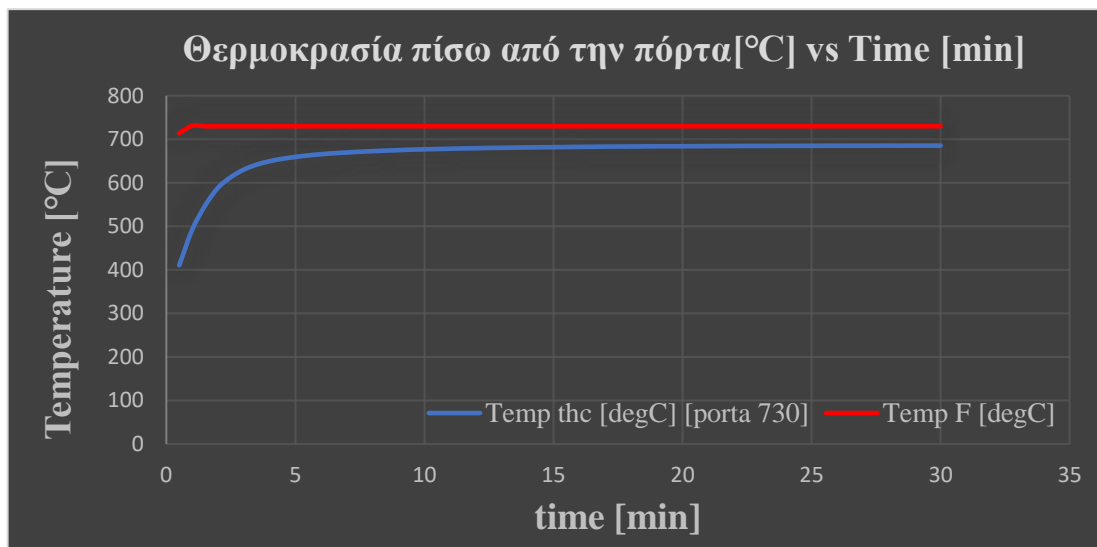
Γράφημα 5.2: Απεικόνιση της θερμοκρασιακής διαφοράς ως προς τον χρόνο μεταξύ της θερμοκρασίας που ρυθμίζεται ο φούρνος και της θερμοκρασίας του θερμοζεύγους για 700°C στη μέση του φούρνου.



Γράφημα 5.3: Απεικόνιση της θερμοκρασιακής διαφοράς ως προς τον χρόνο μεταξύ της θερμοκρασίας που ρυθμίζεται ο φούρνος και της θερμοκρασίας του θερμοζεύγους για 700°C στο βάθος του φούρνου.

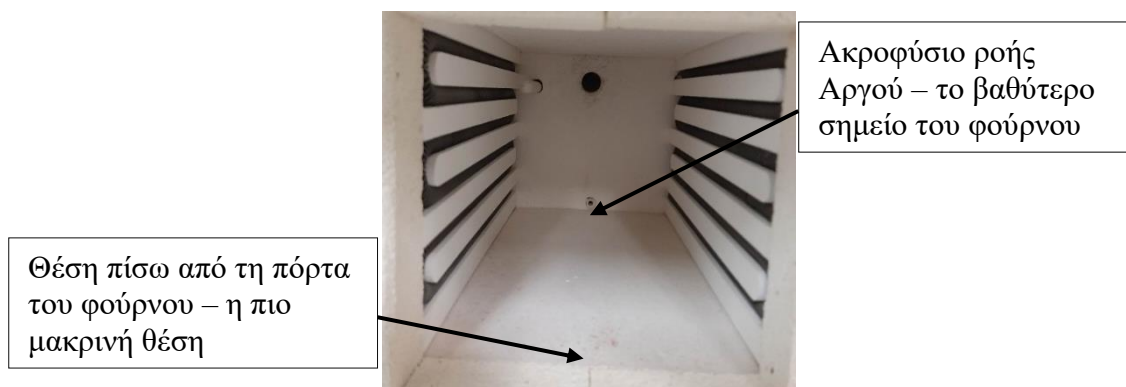
Αρχικά, αυτό που παρατηρείται από τις γραφικές παραστάσεις είναι ότι η θερμοκρασιακή διαφορά μειώνεται πολύ ανάλογα με την θέση του θερμοζεύγους στον φούρνο. Ταυτόχρονα, φαίνεται από το γράφημα 5.1 ότι πίσω από την πόρτα στα 15 λεπτά η θερμοκρασία που λαμβάνει το θερμοζεύγος είναι 626°C, τιμή στην οποία η πάστα δεν προλαβαίνει να λιώσει μιας και η θερμοκρασία συγκόλλησης ανέρχεται στους 660°C [51]. Γι' αυτό, η συγκόλληση δειγμάτων πίσω από την πόρτα στους 700°C δεν είναι ικανοποιητική. Παρ' όλα αυτά, η συγκόλληση πίσω από την πόρτα είναι η πιο ασφαλής όσο αφορά την αποφυγή δημιουργίας ρωγμής στο δοκίμιο. Γι' αυτό το λόγο αποφασίζεται να μελετηθεί η συμπεριφορά της θερμοκρασίας σε πραγματικό χρόνο πίσω από τη πόρτα αλλά για θερμοκρασία ρύθμισης του φούρνου στους 730°C.

Πιο κάτω παρουσιάζεται το αποτέλεσμα που λαμβάνεται από το θερμοζεύγος σε μορφή γραφικής παράστασης.



Γράφημα 5.4: Απεικόνιση της θερμοκρασιακής διαφοράς ως προς τον χρόνο μεταξύ της θερμοκρασίας που ρυθμίζεται ο φούρνος και της θερμοκρασίας του θερμοζεύγους για 730°C πίσω από την πόρτα του φούρνου.

Σύμφωνα με το γράφημα 5.4, παρατηρείται ότι στα 15 λεπτά θέρμανσης το θερμοζεύγος καταγράφει τιμή θερμοκρασίας ίση με 682°C. Η τιμή αυτή είναι πλήρως ικανοποιητική για την συγκόλληση των δειγμάτων στον φούρνο.



Εικόνα 5.21: Απεικόνιση του εσωτερικού του φούρνου στον οποίο πραγματοποιείται η συγκόλληση των θερμοστοιχείων και του ακροφύσιου του αερίου αργού το οποίο βρίσκεται χαμηλά στο βάθος.

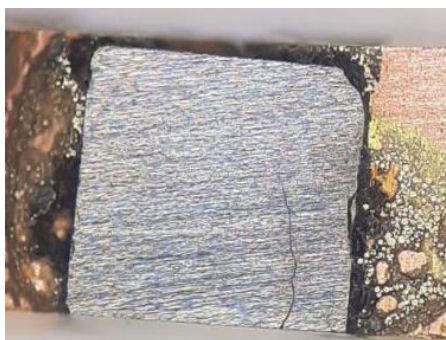
Με το πέρας των μετρήσεων στο εσωτερικό του φούρνου σε διαφορετικές θέσεις και θερμοκρασίες, με την χρήση θερμοζεύγους, πραγματοποιείται συγκόλληση αρκετών δειγμάτων στους 700°C και 730°C κοντά στην πόρτα και στην μέση του φούρνου. Αξίζει να σημειωθεί ότι, τα δείγματα που συγκολλούνται στον φούρνο στους 730°C πίσω από τη πόρτα και στη μέση του φούρνου παρουσιάζουν καλή ποιότητα συγκόλλησης, αφού η συγκολλητική πάστα λιώνει. Παράλληλα, πραγματοποιούνται και μερικές συγκολλήσεις στο βάθος του φούρνου στους 700°C, για τη μελέτη της πιθανότητας ανάπτυξης ρωγμής στο κυβικό θερμοστοιχείο.

Ο στόχος της συγκόλλησης αρκετών δειγμάτων σε διαφορετικές συνθήκες είναι για να υπάρχει και αρκετή πληροφορία για την τιμή της ηλεκτρικής αντίστασης επαφής και το πώς αυτή επηρεάζεται από τις παραμέτρους θέσης και θερμοκρασίας.

5.8.2 Θερμοστοιχεία p – τύπου

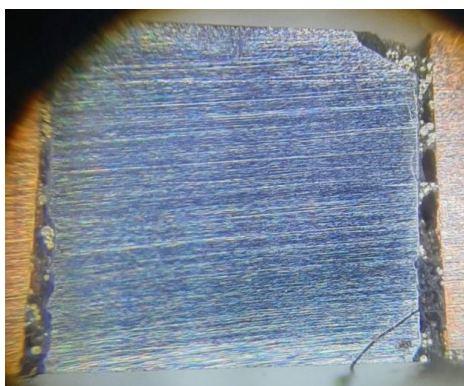
Εφόσον, από τη συγκόλληση των θερμοστοιχείων p – τύπου παρατηρείται ότι η τιμή της θερμοκρασίας και της θέσης επηρεάζουν πολύ την ποιότητα της συγκόλλησης αποφασίζεται να πραγματοποιηθεί πάλι μια παραμετρική ανάλυση ως προς τις δύο αυτές παραμέτρους.

Αρχικά, γίνεται συγκόλληση δειγμάτων στους 700°C στο βάθος και στη μέση του φούρνου. Μετά τη διαδικασία μερικού γυαλίσματος των δοκιμίων, κατά τη παρατήρηση κάτω από το στερεοσκόπιο, τα δείγματα αυτά παρουσιάζουν ρωγμές, οι οποίες κατευθύνονται περιμετρικά του κυβικού θερμοστοιχείου. Στη συνέχεια, συγκολλούνται δείγματα στους 700°C πίσω από την πόρτα και κατά την παρατήρηση στο στερεοσκόπιο δεν παρουσιάζουν περιμετρικές ρωγμές αλλά οι συγκολλήσεις όπως και στα δείγματα του ημιαγωγού p – τύπου δεν είναι ικανοποιητικές, με αποτέλεσμα κατά τη διαδικασία μερικού γυαλίσματος τα δοκίμια να ξεκολλούν από τα κομμάτια χαλκού.



Εικόνα 5.22: Απεικόνιση δείγματος που παρουσιάζει περιφερειακή ρωγμή λόγω της θερμοκρασίας συγκόλλησης και θέσης του δείγματος στο φούρνο.

Παρ' όλα αυτά, όπως έχει προαναφερθεί στο υπο-υποκεφάλαιο 5.9.1, ο ημιαγωγός n τύπου λόγω της μεταλλικής φάσης (Ni_3Sn_4) παρουσιάζει ψαθυρή συμπεριφορά και με ταυτόχρονη αύξηση της θερμοκρασίας αυτή η συμπεριφορά διογκώνεται με αποτέλεσμα να εμφανίζονται μικρορωγμές, σε μερικά από τα δείγματα, στις γωνιές του κύβου που πιθανόν να δημιουργούνται κατά τη διαδικασία της κοπής.[52] Αξίζει να σημειωθεί ότι οι μικρορωγμές στις γωνιές δεν είναι καταστροφικές λόγω του μεγέθους τους. Για τη δημιουργία αυτών του τύπου μικρορωγμών δεν είναι εφικτό να πραγματοποιηθεί κάποια παραμετρική ανάλυση γιατί αναγκαστικά το υλικό θα φτάσει σε ψηλές θερμοκρασίες για να πραγματοποιηθεί συγκόλληση.



Εικόνα 5.23: Απεικόνιση δείγματος που παρουσιάζει ρωγή στην γωνιά του κύβου λόγω της μεταλλικότητας του υλικού n – τύπου κατά τη διαδικασία συγκόλλησης στο φούρνο.

Στη συνέχεια, αφού παρατηρείται ότι δεν δημιουργούνται καταστροφικές ρωγμές στα δοκίμια όταν αυτά συγκολλούνται πίσω από τη πόρτα, ελέγχεται η παράμετρος της θερμοκρασίας. Συγκεκριμένα, πραγματοποιείται συγκόλληση δειγμάτων στους 710°C και 720°C πίσω από την πόρτα. Εφόσον γυαλιστούν μερικώς τα δείγματα, παρατηρείται ότι τα δείγματα παρουσιάζουν καλής ποιότητας συγκόλλησης και δεν εμφανίζονται καταστροφικές ρωγμές. Στη συνέχεια, συγκολλούνται μερικά δείγματα στους 730°C πίσω από την πόρτα του φούρνου. Όταν αυτά γυαλιστούν μερικώς παρατηρείται ότι υπάρχει εξαιρετική συγκόλληση και επιπλέον δεν παρουσιάζονται περιφερειακές καταστροφικές ρωγμές.

5.9 Συμπεράσματα Συγκόλλησης ημιαγωγών p & n τύπου

Από τις πιο πάνω πληροφορίες που λαμβάνονται για τη συγκόλληση των δειγμάτων p & n τύπου είναι δυνατόν να γίνουν αντιληπτά κάποια συμπεράσματα. Αρχικά, η θέση των δειγμάτων μέσα στο φούρνο που ικανοποιεί και τους δύο τύπους ημιαγωγών είναι αυτή που βρίσκεται πίσω από τη πόρτα του φούρνου και ο λόγος είναι για να μην παρουσιάζεται η οποιαδήποτε περιφερειακή ρωγμή στους ημιαγωγούς n – τύπου, που μπορεί να είναι καταστροφική, παρόλο που ο ημιαγωγός p – τύπου μένει άθικτος σε όλες τις θέσεις συγκόλλησης. Επιπρόσθετα, η τιμή της θερμοκρασίας στην οποία παρατηρείται καλύτερη συγκόλληση με τη χρήση του στερεοσκοπίου είναι αυτή των 730°C. Τέλος, όσο αφορά την επιμετάλλωση, η εναπόθεση Χρωμίου και Νικελίου στα p – τύπου και n – τύπου αντίστοιχα μέσω της φυσικής μεθόδου εναπόθεσης Magnetron Sputtering είναι πολύ καλής ποιότητας και πραγματοποιήθηκε σωστά γιατί προσφέρεται πολύ καλή συγκόλληση ανάμεσα στους ημιαγωγούς και στα κομμάτια χαλκού.

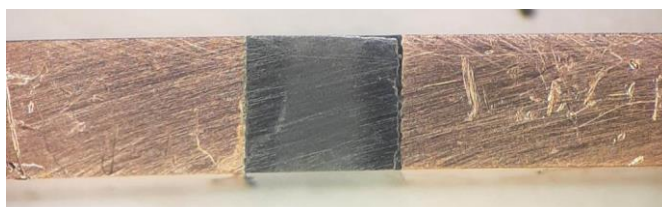
Αυτά τα συμπεράσματα και οι πληροφορίες που λαμβάνονται κατά τη διαδικασία συγκόλλησης δειγμάτων p & n τύπου είναι πολύ σημαντικά γιατί θα χρησιμοποιηθούν για τη διαδικασία συγκόλλησης των δειγμάτων κατά τη κατασκευή θερμοηλεκτρικής γεννήτριας.

5.10 Μέτρηση Ηλεκτρικής Αντίστασης Επαφής

Με το πέρας της προετοιμασίας διάφορων δειγμάτων και από τους δύο τύπους ημιαγωγών, εμφανίζεται η ανάγκη να πραγματοποιηθεί μέτρηση της αντίστασης επαφής. Η ικανότητα μέτρησης της ηλεκτρικής αντίστασης επαφής των δειγμάτων p&n τύπου είναι σημαντική γιατί μέσω αυτής γίνεται κατανοητή η ανάγκη να υπάρχουν συγκολλήσεις υψηλής ποιότητας. Όπως προαναφέρθηκε στο υπο-υποκεφάλαιο 4.3.6 αν σε μια θερμοηλεκτρική γεννήτρια υπάρχουν κακές συγκολλήσεις με τιμές αντίστασης επαφής στο εύρος $\times 10^{-2} - \times 10^{-3} \Omega \text{cm}^2$, τότε υπάρχει μεγάλη μείωση της απόδοσης της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας, ενώ αν υπάρχουν καλής ποιότητας συγκολλήσεις με τιμές αντίστασης επαφής στο εύρος $\times 10^{-5} - \times 10^{-6} \Omega \text{cm}^2$, υπάρχει σχεδόν η μέγιστη απόδοση. Γι' αυτό το λόγο απαιτείται να είναι γνωστή η αντίσταση επαφής των δειγμάτων που ετοιμάζονται σε διαφορετικές συνθήκες συγκόλλησης, έτσι ώστε να βρεθούν οι βέλτιστες συνθήκες συγκόλλησης που να ικανοποιούν και τους δύο τύπους ημιαγωγών.



Εικόνα 5.24: Απεικόνιση του μηχανήματος λείανσης Laborol-30 από την Struers, στο οποίο λειαινόνται τα δείγματα για να πραγματοποιηθεί η μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης επαφής.

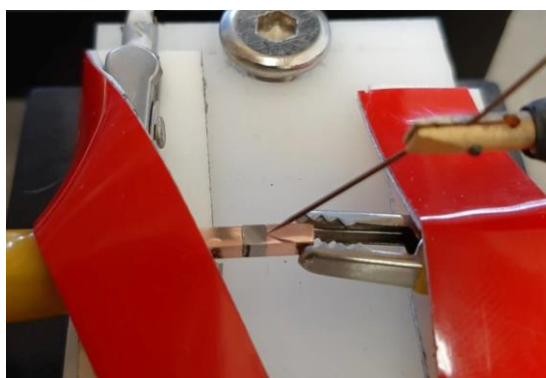


Εικόνα 5.25: Απεικόνιση ενός θερμοστοιχείου p - τύπου αφότου πραγματοποιήθηκε διαδικασία γυαλίσματος, με τη χρήση στερεοσκοπίου.

5.10.1 Διαδικασία Μέτρησης Ηλεκτρικής Αντίστασης Επαφής

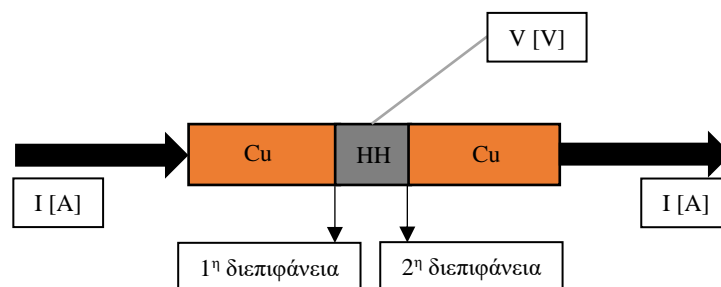
Για τη μέτρηση της αντίστασης επαφής των γυαλισμένων δειγμάτων που ετοιμάζονται, απαιτείται να στηθεί πειραματική διάταξη μέτρησης της αντίστασης κατά μήκος των δειγμάτων. Οι πειραματική διάταξη περιέχει μια μετακινούμενη βάση ως προς 1 άξονα με ακρίβεια 0.01mm, καλώδια στα οποία στερεώνεται το δείγμα, μια μεταλλική ακίδα, η οποία μετρά τη τάση σε ένα σημείο, τρία Keithley από τα οποία το πρώτο είναι υπεύθυνο για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, το δεύτερο για τον έλεγχο της τάσης και το τρίτο για τον έλεγχο της ηλεκτρικής έντασης. Τα τρία Keithley επικοινωνούν με πρόγραμμα στη LabView, το οποίο αναπτύχθηκε στο εργαστήριο των θερμοηλεκτρικών υλικών.

Αρχικά, στερεώνεται το δείγμα (βλέπε Εικόνα 5.26) στη βάση με τη χρήση καλωδίων που στην άκρη τους υπάρχουν δαγκάνες (κροκοδειλάκια). Μέσω των δύο καλωδίων δίνεται ηλεκτρικό ρεύμα στο δείγμα και με τη χρήση ενός probe μετριέται η τάση στο αρχικό σημείο. Μέσω της κλίσης από τη γραφική έντασης-τάσης υπολογίζεται η αντίσταση σ' αυτό το σημείο και καταγράφεται. Ακολούθως, μετακινείται η βάση με βήμα που αποφασίζει ο χρήστης και πραγματοποιείται ξανά η μέτρηση μέχρι να ληφθούν οι τιμές και για τις δύο διεπιφάνειες. Σημαντικό είναι να λαμβάνονται μετρήσεις με μικρό βήμα κοντά και πάνω στη διεπιφάνεια χαλκού και θερμοστοιχείου για να υπάρχει όσο το δυνατό μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα αντίστασης. Μόλις οι καταγραφές των μετρήσεων φτάσουν στο τέλος, τότε με τη χρήση μικρομέτρου υπολογίζεται το εμβαδό διατομής του δείγματος.



Εικόνα 5.26: Απεικόνιση του στερεωμένου δείγματος και της μεταλλικής ακίδας κατά τη μέτρηση της αντίστασης στη συγκεκριμένη θέση.

Σχεδιάγραμμα Αρχής Λειτουργίας Μέτρησης Αντίστασης Επαφής



Εικόνα 5.27: Απεικόνιση σχεδιαγράμματος αρχής λειτουργίας μέτρησης αντίστασης επαφής σε ένα δείγμα που αποτελείται από δύο χάλκινα κομμάτια και ένα κυβικό θερμοστοιχείο.

5.11 Ανάπτυξη Γραφικών Παραστάσεων Αντίστασης – Θέσης

Με το πέρας της αναπαράστασης των αποτελεσμάτων σε γραφικές παραστάσεις, ο χρήστης καλείται να υπολογίσει τη τιμή της διαφοράς της αντίστασης στο σημείο της διεπιφάνειας. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η ορθή μέθοδος για να βρεθεί η διαφορά αντίστασης είναι να ληφθούν οι τελευταίες 5 μετρήσεις σε κάθε πλευρά τις διεπιφάνειας και να υπολογιστεί αντίστοιχα μια μέση τιμή. Ακολούθως, να αφαιρεθεί η μεγάλη τιμή αντίστασης από τη μικρότερη. Τέλος, απαιτείται ο πολλαπλασιασμός της διαφοράς αντίστασης με το εμβαδό διατομής του δείγματος που μετρήθηκε με τη χρήση μικρομέτρου. Έτσι υπολογίζεται η αντίσταση επαφής σε κάθε διεπιφάνεια. Για να βρεθεί μια μέση τιμή αντίστασης επαφής, τότε υπολογίζεται η μέση τιμή αντίστασης επαφής για τις δύο διεπιφάνειες.

Πιο κάτω παρουσιάζονται οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της μέσης αντίστασης επαφής κάθε δείγματος.

$$\Delta R = R_h - R_l \quad \text{Εξ 4.1}$$

Όπου:

ΔR : διαφορά αντίστασης [Ωhms]

R_h : υψηλή τιμή αντίστασης [Ωhms]

R_l : χαμηλή τιμή αντίστασης [Ωhms]

$$RC = \Delta R * A_{\text{samp}}$$

Εξ 4.2

Όπου:

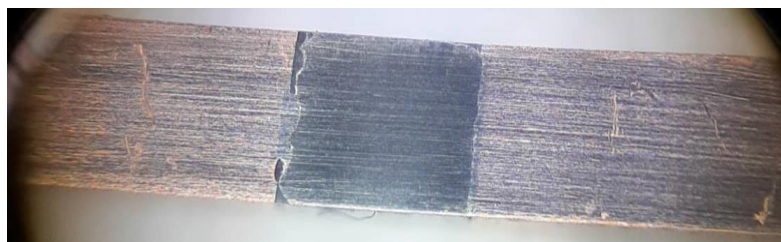
RC : αντίσταση επαφής στη διεπιφάνεια [Ω hms] ΔR : διαφορά αντίστασης [Ω hms] A_{samp} : εμβαδό διατομής δείγματος [cm^2]

5.11.1 Αντίσταση Επαφής Θερμοστοιχείων p – τύπου

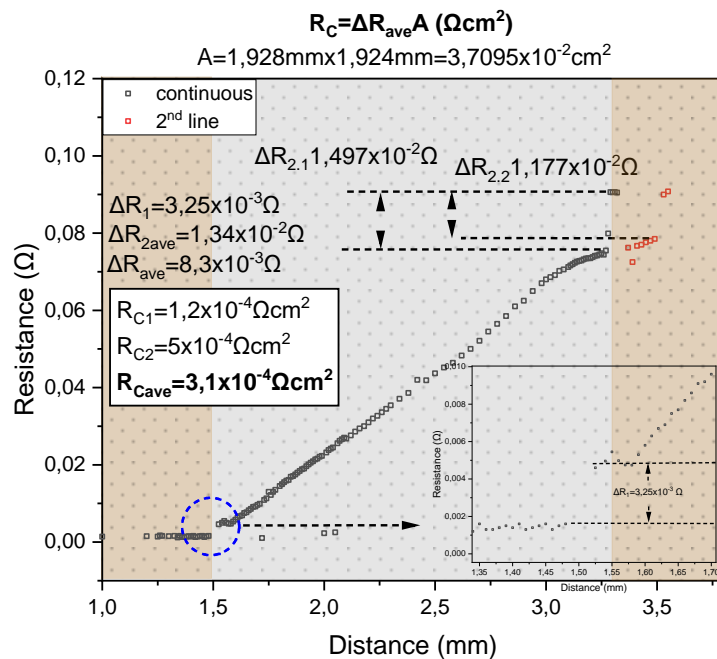
Πιο κάτω αναπαρίστανται οι γραφικές παραστάσεις των δειγμάτων 1,3,5,6,8. Το υλικό επιμετάλλωσης στα δείγματα αυτά, που προέρχονται από το δισκίο με κωδικό όνομα KSP08, είναι χρώμιο με πάχος 500nm, μιας και δεν ήταν διαθέσιμο ο στόχος του νικελίου κατά την εκτέλεση της εναπόθεσης με Magnetron Sputtering. Ο κατακόρυφος άξονας αναφέρεται στην αντίσταση [Ω] που λαμβάνεται σε κάθε σημείο και ο οριζόντιος άξονας αναφέρεται στη θέση που λαμβάνεται η τιμή της αντίστασης. Σε κάθε γραφική παράσταση απεικονίζονται οι τιμές της διαφοράς αντίστασης σε κάθε διεπιφάνεια και η αντίσταση επαφής σε κάθε μια από αυτές. Τέλος, απεικονίζεται και η μέση τιμή αντίστασης επαφής που αντικατοπτρίζει όλο το δείγμα.

Αξίζει να αναφερθεί ότι, μερικά από τα δείγματα που προετοιμάστηκαν με θερμοστοιχεία p – τύπου, ξεκόλλησαν κατά τη διαδικασία λείανσης της επιφάνειας λόγω ψηλών μηχανικών τάσεων ή επειδή δεν πραγματοποιήθηκε σωστά η συγκόλληση στο φούρνο κατά τη συγκόλληση. Γι' αυτό το λόγο δεν υπάρχουν αποτελέσματα ηλεκτρικής αντίστασης επαφής γι' αυτά τα δοκίμια.

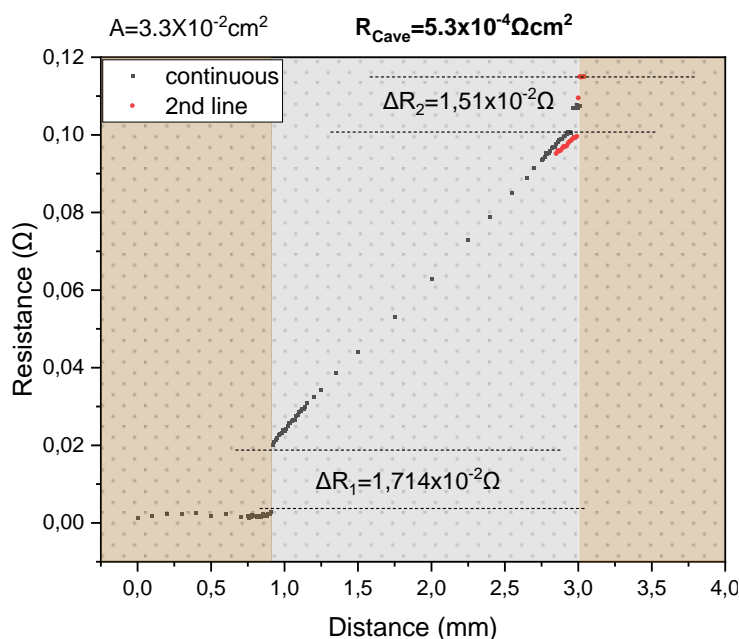
Συγκεκριμένα, τα δοκίμια 1 και 3 που αντικατοπτρίζονται από τα γραφήματα 5.5 και 5.6 αντίστοιχα, έχουν συγκολληθεί στους 700°C στο βάθος του φούρνου. Το δοκίμιο 5 με που απεικονίζεται από το γράφημα 5.7 έχει συγκολληθεί στους 730°C πίσω από την πόρτα του φούρνου. Το δοκίμιο 6 που αντικατοπτρίζεται από τη γράφημα 5.8 έχει συγκολληθεί στους 700°C στη μέση του φούρνου. Τέλος, το δοκίμιο 8 που αντικατοπτρίζεται από τη γράφημα 5.9 έχει συγκολληθεί στους 730°C στη μέση του φούρνου.



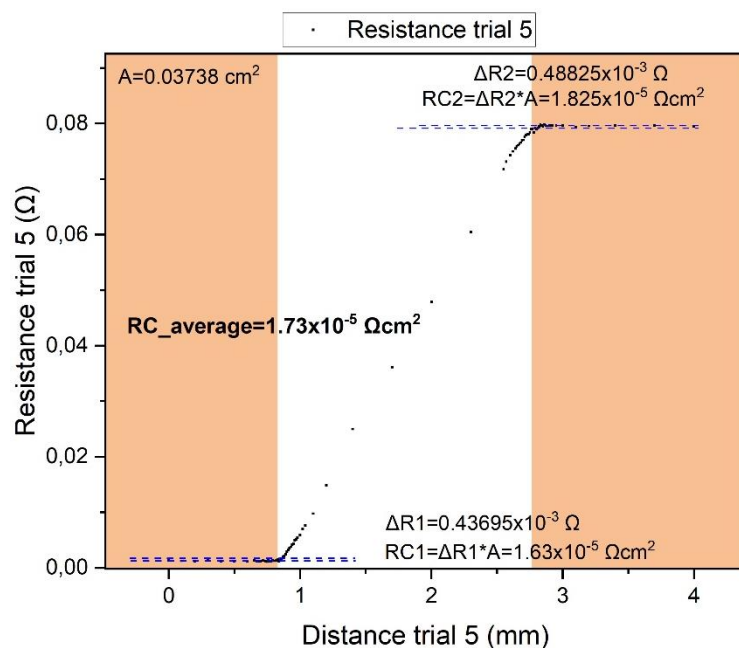
Εικόνα 5.28: Απεικόνιση του δείγματος 8 (ρ-τύπου) ακριβώς μετά τη διαδικασία λείανσης.



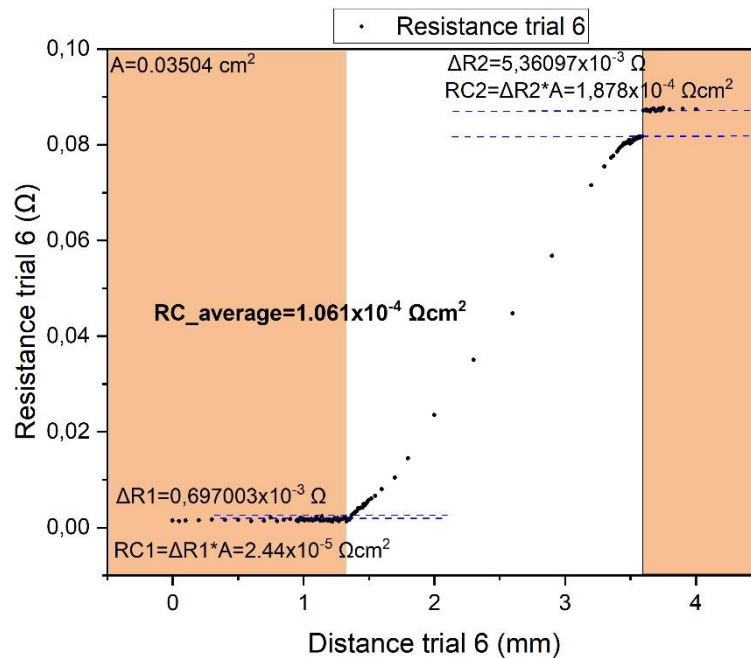
Γράφημα 5.5: Απεικόνιση της αντίστασης επαφής στις δύο διεπιφάνειες και την μέση τιμή αντίστασης επαφής για το δείγμα 1, το οποίο έχει συγκολληθεί στους 700°C για 15 λεπτά στο βάθος του φούρνου.



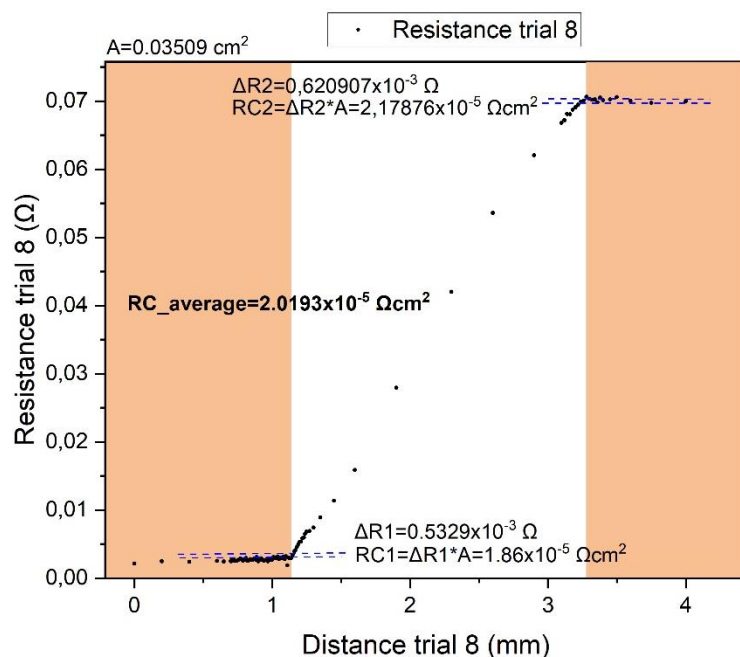
Γράφημα 5.6: Απεικόνιση της αντίστασης επαφής στις δύο διεπιφάνειες και την μέση τιμή αντίστασης επαφής για το δείγμα 3, το οποίο έχει συγκολληθεί στους 700°C για 15 λεπτά στο βάθος του φούρνου.



Γράφημα 5.7: Απεικόνιση της αντίστασης επαφής στις δύο διεπιφάνειες και την μέση τιμή αντίστασης επαφής για το δείγμα 5, το οποίο έχει συγκολληθεί στους 730°C για 15 λεπτά πίσω από τη πόρτα του φούρνου.



Γράφημα 5.8: Απεικόνιση της αντίστασης επαφής στις δύο διεπιφάνειες και την μέση τιμή αντίστασης επαφής για το δείγμα 6, το οποίο έχει συγκολληθεί στους 700°C για 15 λεπτά στη μέση του φούρνου.



Γράφημα 5.9: Απεικόνιση της αντίστασης επαφής στις δύο διεπιφάνειες και την μέση τιμή αντίστασης επαφής για το δείγμα 8, το οποίο έχει συγκολληθεί στους 730°C για 15 λεπτά στη μέση του φούρνου.

Πιο κάτω ακολουθεί ο πίνακας αποτελεσμάτων που λαμβάνονται κατά τη μέτρηση της αντίστασης επαφής για όλα τα δείγματα με θερμοστοιχεία p – τύπου. Η μέση αντίσταση επαφής για κάθε δείγμα βρίσκεται στη τελευταία σειρά.

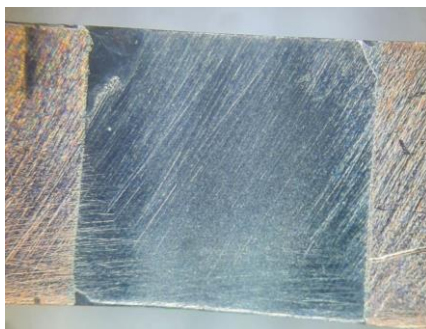
	Trial 1	Trial 3	Trial 5	Trial 6	Trial 8
A[cm²]	0.03709	0.0330	0.0374	0.03504	0.0351
ΔR1 [Ω]	3.25×10^{-3}	1.71×10^{-2}	0.44×10^{-3}	0.70×10^{-3}	0.53×10^{-3}
ΔR2 [Ω]	1.34×10^{-4}	1.51×10^{-2}	0.49×10^{-3}	5.36×10^{-3}	0.62×10^{-3}
RC1 [Ωcm²]	1.20×10^{-4}	5.65×10^{-4}	1.63×10^{-5}	2.44×10^{-5}	1.86×10^{-5}
RC2 [Ωcm²]	4.97×10^{-4}	4.98×10^{-4}	1.82×10^{-5}	1.88×10^{-4}	2.18×10^{-5}
RC_{avg} [Ωcm²]	3.09×10^{-4}	5.32×10^{-4}	1.73×10^{-5}	1.06×10^{-4}	2.02×10^{-5}

Πίνακας 5.15: Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μέσης αντίστασης επαφής για τα δοκίμια με θερμοστοιχεία p – τύπου.

5.11.1.1 Συμπεράσματα αντίστασης επαφής για θερμοστοιχεία p - τύπου

Σύμφωνα με τον πίνακα 5.15 στον οποίο αναγράφονται οι μέσες τιμές ηλεκτρικής αντίστασης επαφής, συμπεραίνεται ότι βέλτιστη θερμοκρασία για συγκόλληση των δειγμάτων με την καλύτερη τιμή αντίσταση επαφής ανέρχεται στους 730°C και οι θέσεις

στις οποίες υπάρχει η ελάχιστη αντίσταση επαφής είναι στη μέση και πίσω από τη πόρτα του φούρνου.



Εικόνα 5.29: Απεικόνιση των συγκολλήσεων του δείγματος 5 (p – τύπου) κάτω από το στερεοσκόπιο με μεγέθυνση.

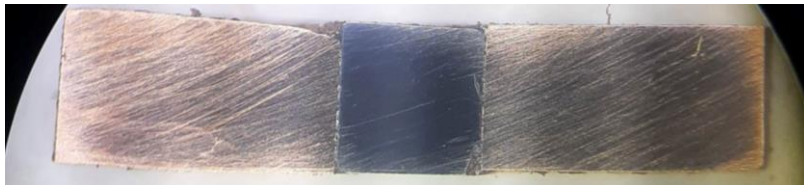
5.11.2 Δείγματα με Θερμοστοιχεία n – τύπου

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα ηλεκτρικής αντίστασης επαφής για τον ημιαγωγό p – τύπου, αποφασίζεται να πραγματοποιηθούν αρχικά οι μετρήσεις αντίστασης επαφής στα δείγματα n – τύπου που έχουν συγκολληθεί στους 730°C και μετέπειτα στους 720°C και 710°C πίσω από τη πόρτα. Ο λόγος που δεν πραγματοποιείται η μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης επαφής στους 700°C είναι γιατί τα καλύτερα αποτελέσματα για τον ημιαγωγό p – τύπου λήφθηκαν στους 730°C και όχι στους 700°C.

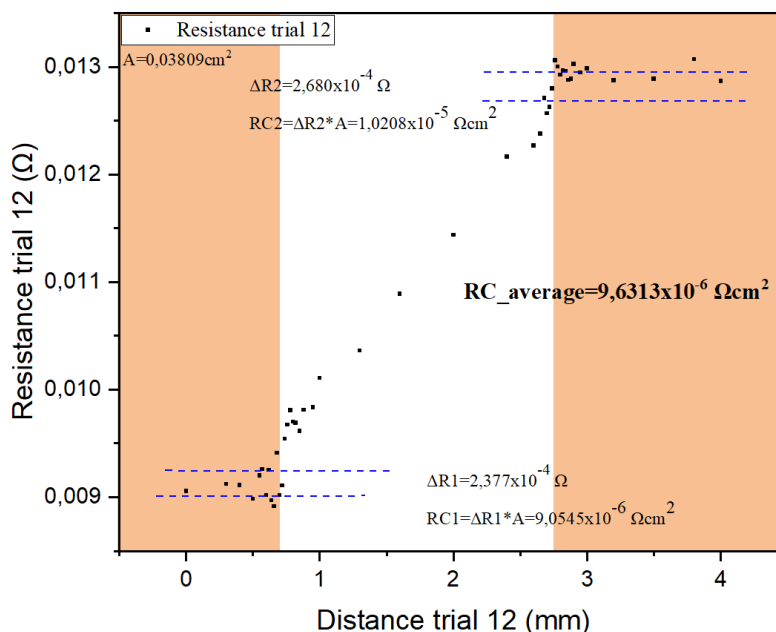
Πιο κάτω αναπαρίστανται οι γραφικές παραστάσεις των δειγμάτων με θερμοστοιχεία n - τύπου από δύο διαφορετικά δισκία. Συγκεκριμένα, έχουν χρησιμοποιηθεί κύβοι θερμοστοιχείων από τα δισκία με κωδικό όνομα KSN05 και KSN06. Το υλικό επιμετάλλωσης στα δείγματα αυτά είναι νικέλιο με πάχος 500nm, και όχι χρώμιο όπως πραγματοποιήθηκε στα δείγματα με θερμοστοιχεία p – τύπου από το δισκίο KSP08. Η εναπόθεση εκτελέστηκε με χρήση του Magnetron Sputtering. Ο κατακόρυφος άξονας αναφέρεται στην αντίσταση [Ω] που λαμβάνεται σε κάθε σημείο και ο οριζόντιος άξονας αναφέρεται στη θέση που λαμβάνεται η τιμή της αντίστασης. Σε κάθε γραφική παράσταση απεικονίζονται οι τιμές της διαφοράς αντίστασης σε κάθε διεπιφάνεια και η αντίσταση επαφής σε κάθε μια από αυτές. Τέλος, απεικονίζεται και η μέση τιμή αντίστασης επαφής που αντικατοπτρίζει όλο το δείγμα.

Όπως και στα δείγματα με θερμοστοιχεία p – τύπου, μερικά από τα δείγματα με n – τύπου θερμοστοιχεία που προετοιμάστηκαν, ξεκόλλησαν κατά τη διαδικασία λείανσης της επιφάνειας λόγω ψηλών μηχανικών τάσεων ή επειδή δεν πραγματοποιήθηκε σωστά η συγκόλληση στο φούρνο κατά τη συγκόλληση. Γι' αυτό το λόγο δεν υπάρχουν αποτελέσματα ηλεκτρικής αντίστασης επαφής γι' αυτά τα δοκίμια.

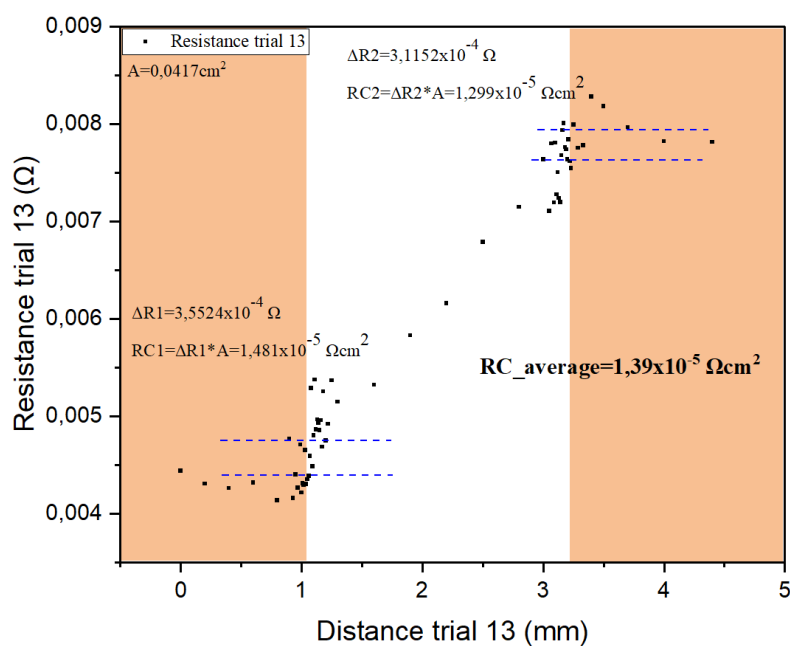
Συγκεκριμένα, τα δοκίμια 12 και 13 που αντικατοπτρίζονται από τα γραφήματα 5.10 και 5.11 αντίστοιχα, έχουν συγκολληθεί στους 720°C και 710°C πίσω από τη πόρτα του φούρνου. Τα δοκίμια 14, 15 και 16 με που αντικατοπτρίζονται από τα γραφήματα 5.12, 5.13 και 5.14, έχουν συγκολληθεί στους 730°C πίσω από τη πόρτα του φούρνου.



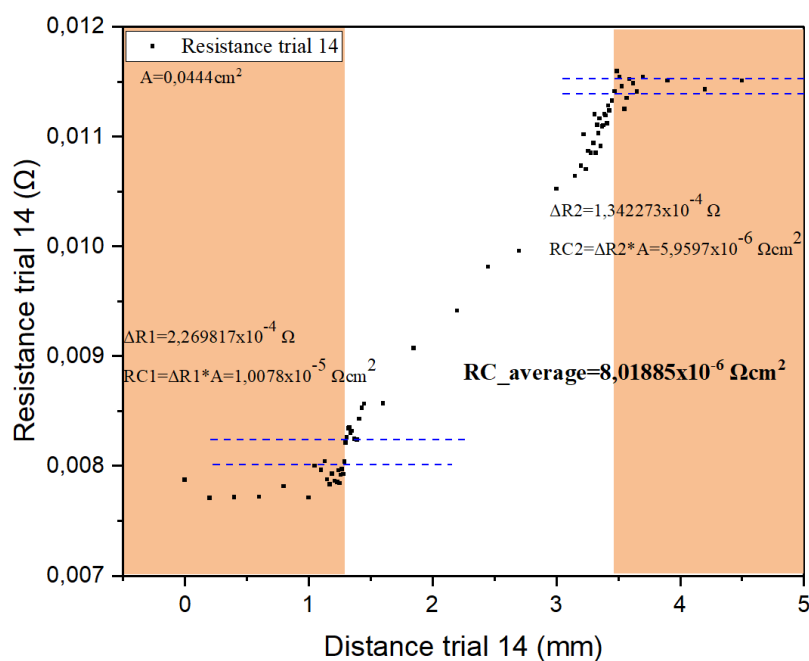
Εικόνα 5.30: Απεικόνιση του δείγματος 13 ακριβώς μετά τη διαδικασία λείανσης.



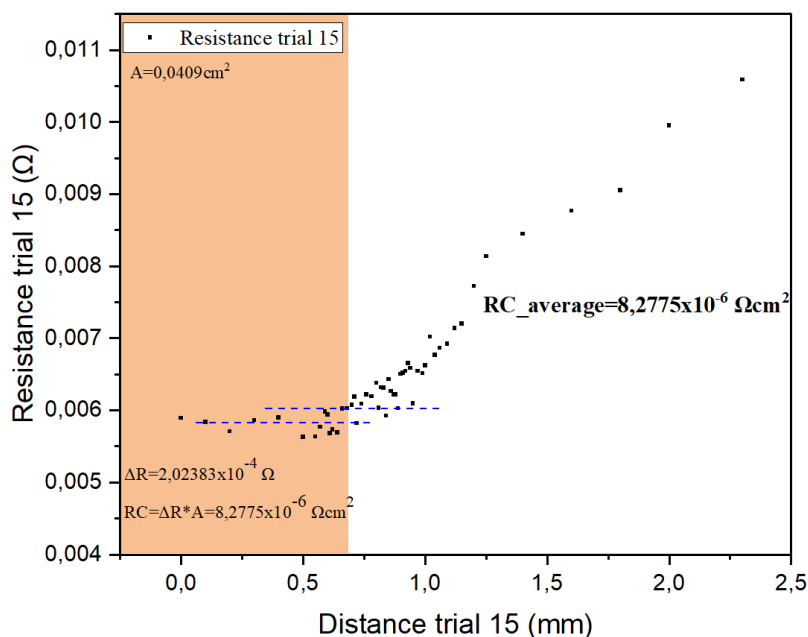
Γράφημα 5.10: Απεικόνιση της αντίστασης επαφής στις δύο διεπιφάνειες και την μέση τιμή αντίστασης επαφής για το δείγμα 12, το οποίο έχει συγκολληθεί στους 720°C για 15 λεπτά πίσω από τη πόρτα του φούρνου.



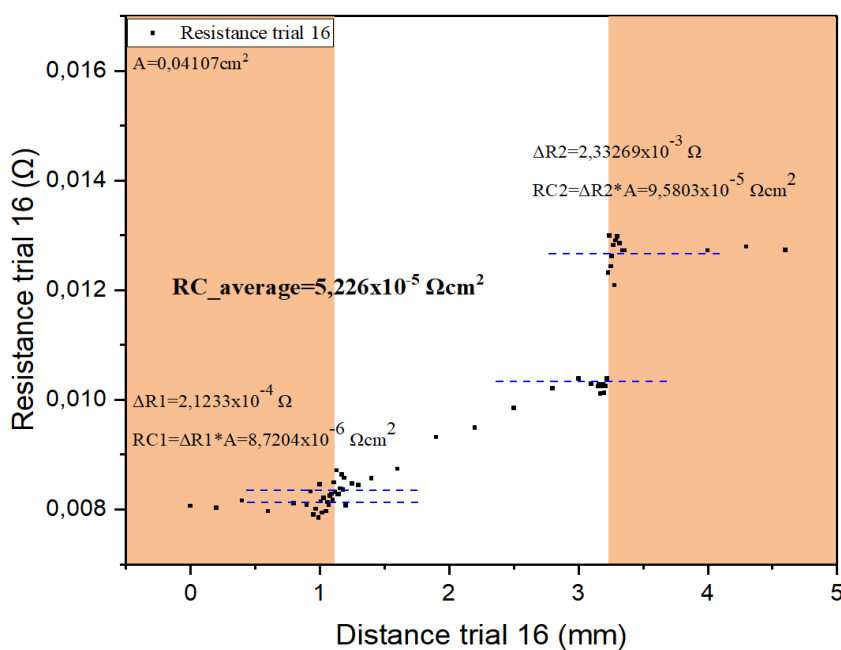
Γράφημα 5.11: Απεικόνιση της αντίστασης επαφής στις δύο διεπιφάνειες και την μέση τιμή αντίστασης επαφής για το δείγμα 13, το οποίο έχει συγκολληθεί στους 710°C για 15 λεπτά πίσω από τη πόρτα του φούρνου.



Γράφημα 5.12: Απεικόνιση της αντίστασης επαφής στις δύο διεπιφάνειες και την μέση τιμή αντίστασης επαφής για το δείγμα 14, το οποίο έχει συγκολληθεί στους 730°C για 15 λεπτά πίσω από τη πόρτα του φούρνου.



Γράφημα 5.13: Απεικόνιση της αντίστασης επαφής στη μία διεπιφάνεια και την μέση τιμή αντίστασης επαφής για το δείγμα 15, το οποίο έχει συγκολληθεί στους 730°C για 15 λεπτά πίσω από τη πόρτα του φούρνου.



Γράφημα 5.14: Απεικόνιση της αντίστασης επαφής στις δύο διεπιφάνειες και την μέση τιμή αντίστασης επαφής για το δείγμα 16, το οποίο έχει συγκολληθεί στους 730°C για 15 λεπτά πίσω από τη πόρτα του φούρνου.

Πιο κάτω ακολουθεί ο πίνακας αποτελεσμάτων που λαμβάνονται κατά τη μέτρηση της αντίστασης επαφής για όλα τα δείγματα με θερμοστοιχεία n – τύπου. Η μέση αντίσταση επαφής για κάθε δείγμα βρίσκεται στη τελευταία σειρά.

	Trial 12	Trial 13	Trial 14	Trial 15	Trial 16
A[cm²]	0.03809	0.0417	0.0444	0.0409	0.0410
ΔR1 [Ω]	2.38×10^{-4}	3.55×10^{-4}	2.27×10^{-4}	2.02×10^{-4}	2.12×10^{-4}
ΔR2 [Ω]	2.68×10^{-4}	3.11×10^{-4}	1.34×10^{-4}	-	2.33×10^{-3}
RC1 [Ωcm²]	9.05×10^{-6}	1.48×10^{-5}	1.01×10^{-5}	8.27×10^{-6}	8.72×10^{-6}
RC2 [Ωcm²]	1.02×10^{-5}	1.29×10^{-5}	5.96×10^{-6}	-	9.58×10^{-5}
RC_{avg}[Ωcm²]	9.63×10^{-6}	1.39×10^{-5}	8.02×10^{-6}	8.27×10^{-6}	5.23×10^{-5}

Πίνακας 5.16: Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μέσης αντίστασης επαφής για τα δοκίμια με θερμοστοιχεία n – τύπου.

Σύμφωνα με τους πίνακες 5.15 και 5.16, η μέση τιμή της ηλεκτρικής αντίστασης επαφής που αντικατοπτρίζει τα δείγματα με θερμοστοιχεία p & n τύπου με συγκόλληση στους 710°C, 720°C και 730°C αναγράφεται στο πιο κάτω πίνακα.

Contact Resistance	HH – p τύπου	HH – n τύπου
R. C._{avg} [Ωcm²]	4.78×10^{-5}	1.84×10^{-5}

Πίνακας 5.17: Απεικόνιση των τιμών της μέσης αντίστασης επαφής για κάθε τύπου ημιαγωγών p&n τύπου.

5.12 Συμπεράσματα Διαδικασίας Μέτρησης Αντίστασης Επαφής για δείγματα p & n τύπου

Από τα πιο πάνω αποτελέσματα – Πίνακας 5.17, που λαμβάνονται κατά τη μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης επαφής δειγμάτων p & n τύπου είναι δυνατόν να γίνουν αντιληπτά κάποια συμπεράσματα τα οποία θα χρησιμοποιηθούν κατά τη κατασκευή των θερμοηλεκτρικών γεννητριών. Αρχικά συμπεραίνεται ότι, η καταλληλότερη τιμή θερμοκρασίας για συγκόλληση των ημιαγωγών είναι στους 730°C αφού τα δείγματα p & n τύπου παρουσιάζουν αντιστάσεις επαφής στο εύρος $\times 10^{-5}$ και $\times 10^{-6} \Omega\text{cm}^2$ αντίστοιχα. Επιπλέον, η θέση που θα πραγματοποιείται συγκόλληση των δειγμάτων είναι πίσω από την πόρτα του φούρνου για να μην υπάρχει πιθανότητα ανάπτυξης περιφερειακών ρωγμών στους ημιαγωγούς n – τύπου. Επιπρόσθετα, η συγκόλληση των δειγμάτων n – τύπου στους 730°C αποτρέπει την αποκόλληση των δειγμάτων κατά τη διαδικασία λείανσης Laborol-30 από την Struers. Τέλος, όσο αφορά την επιμετάλλωση, η εναπόθεση Χρωμίου και Νικελίου στα p – τύπου και n – τύπου αντίστοιχα μέσω της φυσικής μεθόδου εναπόθεσης Magnetron Sputtering είναι πολύ καλής ποιότητας γιατί παρουσιάζεται χαμηλή αντίσταση επαφής.

Σύμφωνα με τα πιο πάνω συμπεράσματα είναι κατανοητό ότι η τεχνική δυσκολία της εύρεσης βέλτιστων συνθηκών συγκόλλησης σύμφωνα με την ποιότητα συγκόλλησης και την αντίσταση επαφής των θερμοστοιχείων που αναφέρονται στα υπο-υποκεφάλαια 4.3.5 και 4.3.6 έχει ξεπεραστεί.

Κεφάλαιο 6

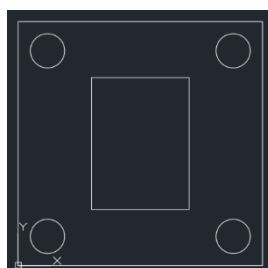
6 ΑΝΑΠΤΥΞΗ/ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Στο κεφάλαιο 6, αναλύεται η κατασκευή και ο χαρακτηρισμός των θερμοηλεκτρικών γεννητριών. Συγκεκριμένα, αναφέρονται τα υλικά που χρησιμοποιούνται και εξηγείται λεπτομερώς η διαδικασία κατασκευής των θερμοηλεκτρικών γεννητριών. Πραγματοποιείται επίσης ο χαρακτηρισμός των θερμοηλεκτρικών γεννητριών που ήταν σε θέση να λειτουργήσουν. Τέλος, παρουσιάζονται τα σφάλματα και συμπεράσματα που υπάρχουν στη διαδικασία κατασκευής και χαρακτηρισμού των θερμοηλεκτρικών γεννητριών.

6.1 Κατασκευή Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας

Η κατασκευή μιας λειτουργικής θερμοηλεκτρικής γεννήτριας είναι ένα από τα δυσκολότερα εμπόδια που συναντώνται γιατί ο στόχος είναι να κατασκευαστεί με μέθοδο που να λαμβάνει υπόψη τις πληροφορίες που συλλέχθηκαν στα προηγούμενα στάδια, όπως για παράδειγμα σε ποια θερμοκρασία είναι εφικτή η συγκόλληση των θερμοστοιχείων χωρίς να παρουσιαστεί μια καταστροφική περιμετρική ρωγμή και να επιλέγονται θερμοστοιχεία τα οποία μεταξύ τους να έχουν διακύμανση κάτω από 100μm.

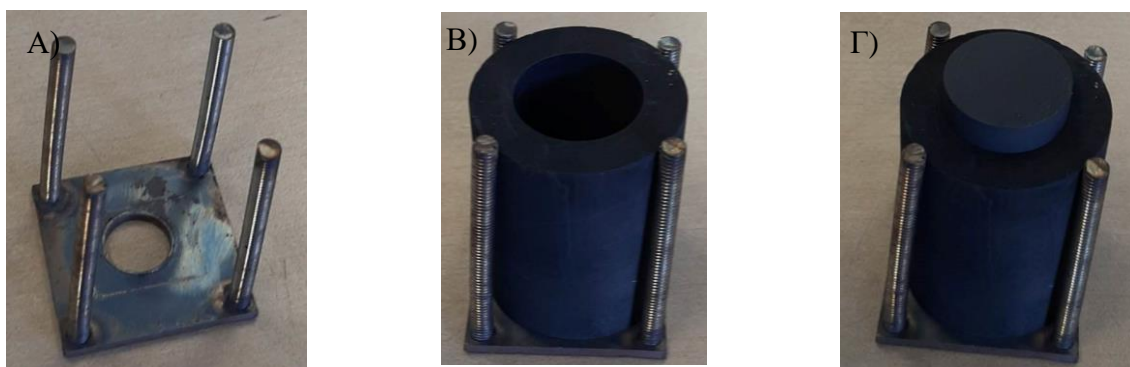
Για τη κατασκευή μιας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας απαιτείται ο απαραίτητος εξοπλισμός, όπως οι τσιμπίδες, η συγκολλητική πάστα, οι κεραμικές πλάκες με τα ηλεκτρόδια χαλκού και σημαντικότερο το εξάρτημα το οποίο θα βοηθήσει για να πραγματοποιηθεί η συγκόλληση των θερμοστοιχείων στο φούρνο. Συγκεκριμένα, με τη συνεργασία ενός άλλου μεταπτυχιακού φοιτητή και τη χρήση του λογισμικού AutoCAD, πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός πλάκας από Stainless Steel για να είναι ανθεκτική στις ψηλές θερμοκρασίες και για να τοποθετούνται οι κεραμικές πλάκες.



Εικόνα 6.1: Απεικόνιση της πλάκας που σχεδιάστηκε στο λογισμικό AutoCAD από Stainless Steel.

Η βασική ιδέα της πλάκας είναι η δημιουργία ενός εξαρτήματος στο οποίο θα τοποθετείται η γεννήτρια κατά την κατασκευή και τη συγκόλληση των επαφών. Συγκεκριμένα, θα τοποθετείται μια μήτρα από γραφίτη, με εσωτερική διάμετρο 20mm, στο κέντρο της πλάκας. Ακολούθως, θα τοποθετείται ένα έμβολο στο εσωτερικό της μήτρας, έπειτα η γεννήτρια και τέλος ακόμη ένα έμβολο γραφίτη το οποίο θα έρχεται σε επαφή με τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια και θα απομονώνει το περιβάλλον της γεννήτριας. Οι οπές που βρίσκονται στην πλάκα χρησιμεύουν στην εφαρμογή ολόπασου κοχλία ο οποίος θα στηρίζει την μήτρα γραφίτη. Οι συγκεκριμένες πλάκες δόθηκαν στον μηχανουργείο του Πανεπιστημίου Κύπρου και κατασκευάστηκαν μέσω του laser cutter μετάλλων.

Με το πέρας της κατασκευής των πλακών, στήνεται ο μηχανισμός με τη μήτρα, τα έμβολα και τα ολόπασα και παρατηρείται ότι δεν είναι εφικτή η κατασκευή της γεννήτριας μέσα σ' αυτή γιατί υπάρχει δύσκολη προσβασιμότητα λόγω βάθους. Έτσι, με χρήση ηλεκτρικού τράπανου ανοίγεται στο κέντρο μια οπή 12mm και τοποθετούνται ολόπασα διαμέτρου 4mm (βλέπε εικόνα 6.2). Η ιδέα για την οποία ανοίχτηκε η οπή είναι για να τοποθετείται αρχικά έμβολο 10mm στη βάση με τη μήτρα και ακολούθως θα τοποθετείται το πρώτο έμβολο των 20mm. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα το πρώτο έμβολο να εξέλθει από την μήτρα και θα κατασκευάζεται εύκολα η θερμοηλεκτρική γεννήτρια (βλέπε εικόνα 6.4). Με το τέλος της κατασκευής θα αφαιρείται προσεκτικά το έμβολο των 10mm από την κάτω μεριά της βάσης και το έμβολο με τη γεννήτρια θα κατεβαίνει. Τέλος θα τοποθετείται το δεύτερο έμβολο στην μήτρα.



Εικόνα 6.2: Απεικόνιση Α) της βάσης από Stainless Steel και Β) της βάσης με τη μήτρα και Γ) της βάσης, της μήτρας και των εμβόλων γραφίτη.

6.2 Θερμοηλεκτρική Γεννήτρια 1

Με το πέρας όλων των σταδίων που διεκπεραιώνονται για τη κατασκευή κυβικών θερμοστοιχείων τύπου p και n, είναι εφικτή η κατασκευή θερμοηλεκτρικής γεννήτριας. Ο αριθμός των ζευγών θερμοστοιχείων που απαρτίζουν μια γεννήτρια αποφασίζεται να ισούται με δύο, ίδιος με αυτό που περιέχει η μικρή γεννήτρια στο υπολογιστικό μοντέλο.

Τα υλικά και εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 1 είναι:

1. Δύο πλάκες αλουμίνας με τοποθετημένα τα ηλεκτρόδια χαλκού
2. Θερμοστοιχεία half-Heusler p & n τύπου
3. Συγκολλητική πάστα αργύρου (silver paste) – χρησιμοποιείται για τη συγκόλληση των θερμοστοιχείων κύβου στα χάλκινα ηλεκτρόδια.
4. Μήτρα γραφίτη με εσωτερική διάμετρο 20mm
5. Έμβολο γραφίτη με διάμετρο 20mm και 10mm
6. Βάση από ανοξείδωτο χάλυβα
7. Χάλκινα ελάσματα
8. Φούρνος Carbolite Gero (30-3000°C)
9. Στερεοσκόπιο
10. Πολύμετρο
11. Τσιμπίδες
12. Ηλεκτρικά Καλώδια



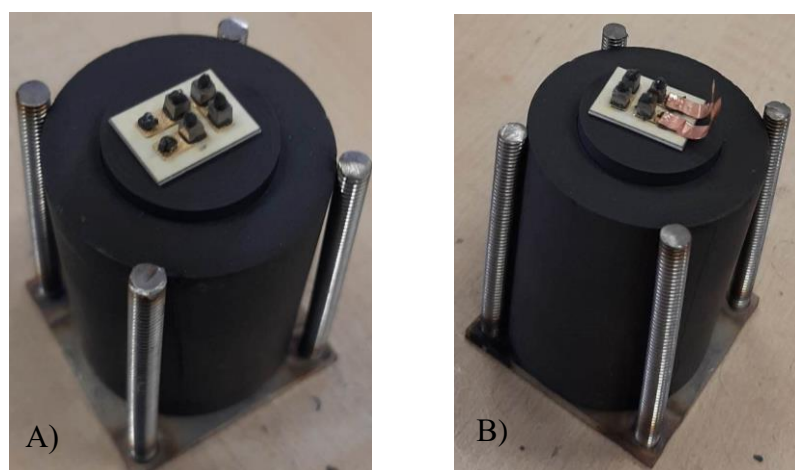
Εικόνα 6.3: Απεικόνιση της συγκολλητικής πάστας αργύρου 1800PA brazing paste. [51]

6.2.1 Κατασκευή Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 1

Αρχικά, καθαρίζονται οι επιφάνειες των κεραμικών πλακών αλουμίνας μέσω της τοποθέτησής τους στον μηχανισμό ultrasonic για 30 λεπτά. Παράλληλα, τοποθετείται η συγκολλητική πάστα αργύρου μέσα σε σακουλάκι και τοποθετείται και αυτή στον μηχανισμό ultrasonic με σκοπό την καλή ανάμειξη των σωματιδίων αργύρου της πάστας μαζί με το flux. Όσο λειτουργεί ο μηχανισμός ultrasonic, πραγματοποιείται η επιλογή θερμοστοιχείων με γνώμονα τα δύο είδη ημιαγωγών να έχουν ίδιο ύψος με διακύμανση

κάτω από 100mm και να περιέχουν όσο λιγότερη αποκόλληση υλικού. Για την επιλογή των θερμοστοιχείων χρησιμοποιείται το στερεοσκόπιο του εργαστηρίου.

Ακολούθως, εφόσον ολοκληρώθηκε η διαδικασία καθαρισμού των επιφανειών των κεραμικών πλακών και της ανάμειξης της συγκολλητικής πάστας αργύρου, τοποθετούνται πάνω στη βάση από stainless steel η μήτρα γραφίτη μαζί με ένα έμβολο 20mm. Έπειτα, τοποθετείται από την οπή που βρίσκεται στη βάση του stainless steel ένα έμβολο 10mm με στόχο η βάση του εμβόλου να είναι ψηλότερα από τη μήτρα γραφίτη και να είναι ευκολότερο να συναρμολογηθεί η θερμοηλεκτρική γεννήτρια. Μετά, τοποθετείται η 1^η κεραμική πλάκα αλουμίνιας πάνω στο έμβολο γραφίτη με την επιφάνεια που υπάρχουν τρία ηλεκτρόδια χαλκού. Μετέπειτα, πραγματοποιείται η προσεκτική τοποθέτηση της συγκολλητικής πάστας στα θερμοστοιχεία, συγκεκριμένα στη μια επιμεταλλωμένη επιφάνεια και με χρήση τσιμπίδας τοποθετούνται με ορθό προσανατολισμό στα ηλεκτρόδια χαλκού. Αξίζει να σημειωθεί ότι, τοποθετούνται πρώτα τα θερμοστοιχεία p – τύπου πάνω στα ηλεκτρόδια χαλκού και στη συνέχεια τα θερμοστοιχεία n – τύπου για να μην υπάρξει η οποιαδήποτε σύγκυση. Καθώς τοποθετείται ένα θερμοστοιχείο στη θέση του, ασκείται σ' αυτό μικρή πίεση με την τσιμπίδα για να υπάρξει καλή ηλεκτρική επαφή και με χρήση μυτερών τσιμπίδων πραγματοποιείται αφαίρεση της περίσσειας συγκολλητικής πάστας που βρίσκεται περιμετρικά του θερμοστοιχείου. Έπειτα, τοποθετείται συγκολλητική πάστα στην άνω επιφάνεια κάθε θερμοστοιχείου και στη θέση των ελασμάτων χαλκού. Με τη τοποθέτηση των ελασμάτων χαλκού εναποτίθεται πολύ προσεκτικά η άνω πλάκα κεραμικής αλουμίνιας με τα δύο ηλεκτρόδια χαλκού.

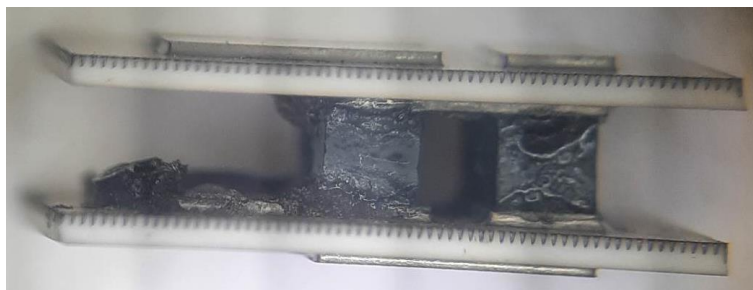


Εικόνα 6.4: Απεικόνιση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας πάνω στο έμβολο γραφίτη 20mm A) πριν τη τοποθέτηση ελασμάτων χαλκού B) μετά τη τοποθέτηση ελασμάτων χαλκού.

Στη συνέχεια, αφαιρείται πολύ προσεκτικά το έμβολο 10mm από την οπή της βάσης από stainless steel και να κατεβεί το έμβολο 20mm μέσα στη μήτρα γραφίτη. Ακολούθως, τοποθετείται 2^ο έμβολο γραφίτη 20mm μέσα στη μήτρα με σκοπό να συμπιέζει τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια και να την απομονώσει από το περιβάλλον. Μετά, ρυθμίζεται ο φούρνος Carbolite Gero στους 730°C και όταν η θερμοκρασία φτάσει σε αυτή τη τιμή, τοποθετείται με ασφάλεια και πολύ προσεκτικά η βάση μέσα στο φούρνο πίσω από τη πόρτα. Η συγκόλληση στο φούρνο διαρκεί 15 λεπτά.

Με το πέρας του χρόνου συγκόλλησης, πολύ προσεκτικά αφαιρείται η βάση από το φούρνο και αφήνεται να ψυχθεί σε θερμοκρασία δωματίου για μισή ώρα. Στη συνέχεια, σηκώνεται το πάνω έμβολο γραφίτη και λαμβάνεται η θερμοηλεκτρική γεννήτρια.

Εφόσον η γεννήτρια αφαιρείται από τη βάση stainless steel και τη μήτρα γραφίτη, με τη χρήση πολύμετρου ελέγχεται το κατά πόσο υπάρχουν καλές ηλεκτρικές συγκολλήσεις και να μπορεί να περάσει ρεύμα από τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια. Ο έλεγχος αυτός γίνεται με τη μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης που παρουσιάζεται σε ένα κύκλωμα. Παρ' όλα αυτά, το πολύμετρο δεν έδωσε κάποια τιμή ηλεκτρικής αντίστασης με αποτέλεσμα η θερμοηλεκτρική γεννήτρια 1 να μην είναι λειτουργήσιμη. Για να γίνει αντιληπτό γιατί μια θερμοηλεκτρική γεννήτρια είναι μη λειτουργήσιμη, γίνεται χρήση του στερεοσκοπίου. Αυτό που παρατηρήθηκε στο εσωτερικό της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 1 είναι πως οι συγκολλήσεις είναι καμένες, τα ελάσματα χαλκού έχουν αποχωρήσει και πως τοποθετήθηκε μεγάλο ποσό συγκολλητικής πάστας με αποτέλεσμα να καλυφτούν τα θερμοστοιχεία με πάστα. Παρ' όλα αυτά, παρατηρείται ότι ο προσανατολισμός των θερμοστοιχείων είναι πολύ καλός και πως τα θερμοστοιχεία βρίσκονται σε πολύ καλή κατάσταση όσο αφορά τη δημιουργία ρωγμών.



Εικόνα 6.5: Απεικόνιση του εσωτερικού της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας μέσω στερεοσκοπίου. Παρατηρείται ότι οι συγκολλήσεις είναι καμένες, τα ελάσματα χαλκού έχουν αποχωρήσει και πως τοποθετήθηκε μεγάλο ποσό συγκολλητικής πάστας με αποτέλεσμα να καλυφτούν τα θερμοστοιχεία με πάστα.

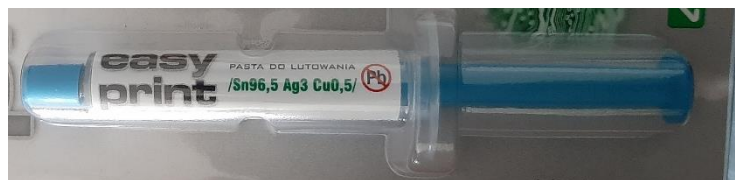
Συμπεράσματα από αυτή την μέθοδο κατασκευής της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 1 είναι ότι η θερμοηλεκτρική γεννήτρια πρέπει να θερμαίνεται στους 730°C για μικρότερο χρόνο με στόχο οι συγκολλήσεις να μην καίγονται και να τοποθετείται μικρότερο ποσό πάστας για να μην καλύπτονται τα θερμοστοιχεία. Ένα άλλο συμπέρασμα είναι μην τοποθετούνται τα ελάσματα χαλκού πριν τη συγκόλληση των θερμοστοιχείων στο φούρνο.

6.3 Κατασκευή Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 2

Με το πέρας κατασκευής της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 1, αποφασίζεται η εκκίνηση της κατασκευής της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 2, η οποία θα περιέχει τον ίδιο αριθμό ζευγών θερμοστοιχείων με τη μικρή γεννήτρια του υπολογιστικού μοντέλου.

Τα υλικά και εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 2 είναι:

1. Δύο πλάκες αλουμίνας με τοποθετημένα τα ηλεκτρόδια χαλκού
2. Θερμοστοιχεία half-Heusler p & n τύπου
3. Συγκολλητική πάστα αργύρου (silver paste) – χρησιμοποιείται για τη συγκόλληση των θερμοστοιχείων κύβου στα χάλκινα ηλεκτρόδια.
4. Συγκολλητική πάστα Easy Print SAC305 – χρησιμοποιείται για τη συγκόλληση χάλκινων ελασμάτων στα ηλεκτρόδια χαλκού για τη διευκόλυνση τοποθέτησης ηλεκτρικών καλωδίων.
5. Μήτρα γραφίτη με εσωτερική διάμετρο 20mm
6. Έμβολα γραφίτη με διάμετρο 20mm και 10mm
7. Βάση από Stainless Steel
8. Καλάι 99.3%Sn & 0.7%Cu (Lead free)
9. Χάλκινα ελάσματα
10. Φούρνος Carbolite Gero (30-3000°C)
11. Ηλεκτρικό Κολλητήρι
12. Στερεοσκόπιο
13. Πολύμετρο
14. Τσιμπίδες
15. Ηλεκτρικά Καλώδια



Εικόνα 6.6: Απεικόνιση της συγκολλητικής πάστας Easy Print SAC305.

Η διαδικασία εκτέλεσης της κατασκευής της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 2 είναι η ίδια με τη διαδικασία κατασκευής της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 1, που αναφέρεται στο υπο-υποκεφάλαιο 6.2.1, αλλά με μερικές τροποποιήσεις. Συγκεκριμένα, δεν έχουν τοποθετηθεί ελάσματα χαλκού στα σταθερά ηλεκτρόδια χαλκού που βρίσκονται στη κεραμική πλάκα αλουμίνιας και η θερμοηλεκτρική γεννήτρια 2 τοποθετείται στο φούρνο στους 730°C για 10 λεπτά πίσω από τη πόρτα του φούρνου. Αφού τελειώσει ο χρόνος συγκόλλησης και η γεννήτρια αφήνεται να ψυχθεί σε θερμοκρασία δωματίου. Με χρήση πολύμετρου μετριέται η εσωτερική αντίσταση και βρέθηκε να ισούται με 1.2 Ωhms, μέσω της επαφής των ακίδων του πολύμετρου στα σταθερά ηλεκτρόδια χαλκού της κεραμικής πλάκας.

Στη συνέχεια, τοποθετείται συγκολλητική πάστα Easy Print SAC305 στην επιφάνεια των ελασμάτων και αυτά έρχονται σε επαφή με τα σταθερά ηλεκτρόδια χαλκού της πλάκας. Ακολούθως, ξαναμπαίνει η θερμοηλεκτρική γεννήτρια 2 στο φούρνο στους 200°C για 2 ώρες, δηλαδή σε θερμοκρασία και χρόνο όπου απαιτεί η συγκολλητική πάστα SAC305 για να λιώσει. Με το πέρασμα του χρόνου στερεοποίησης των ελασμάτων χαλκού με τη συγκολλητική πάστα Easy Print SAC305, αποφασίζεται να πραγματοποιηθεί συγκόλληση ηλεκτρικών καλωδίων στα ελάσματα χαλκού με χρήση Καλάι 99.3%Sn & 0.7%Cu (Lead free) και ηλεκτρικό κολλητήρι.

Κατά τη κατασκευή της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 2 διαπιστώνεται ότι υπάρχουν διάφορα σφάλματα τα οποία ακολουθούν:

- Με τη προσπάθεια συγκόλλησης των ηλεκτρικών καλωδίων πάνω στα ελάσματα χαλκού με χρήση καλάι και ηλεκτρικού κολλητηριού, η συγκολλητική πάστα Easy Print SAC305 ξεκίνησε να χαλαρώνει με αποτέλεσμα τα ελάσματα να ξεκολλούν από τα σταθερά ηλεκτρόδια της κεραμικής πλάκας.
- Τα ελάσματα χαλκού σε κάποια σημεία ήταν τσαλακωμένα και αυτό οφείλεται στη προσπάθεια τοποθέτησής τους στα ηλεκτρόδια χαλκού. Άρα η συγκολλητική

πάστα κατά τη στερεοποίηση της δεν ερχόταν σε επαφή με κάποια σημεία του ελάσματος.

- Η ποσότητα της συγκολλητικής πάστας Easy Print SAC305 δεν ήταν ίδια στα σημεία ένωσης των ελασμάτων χαλκού με τα ηλεκτρόδια χαλκού.

Συμπεράσματα από αυτή την μέθοδο κατασκευής της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 2 είναι ότι, τα ελάσματα χαλκού δεν πρέπει να συγκολλούνται με τη συγκολλητική πάστα Easy Print SAC305 αφού με τη θέρμανση μέσω του ηλεκτρικού κολλητηριού για εφαρμογή ηλεκτρικών καλωδίων με καλά η συγκολλητική πάστα λιώνει. Έτσι αποφασίζεται να συγκολλούνται τα ελάσματα χαλκού στα σταθερά ηλεκτρόδια χαλκού με χρήση καλά και ηλεκτρικού κολλητηριού.

6.4 Κατασκευή Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 3

Με το πέρας της αποτυχίας κατασκευής της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 2, αποφασίζεται η εκκίνηση της κατασκευής της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 3, η οποία θα περιέχει τον ίδιο αριθμό ζευγών θερμοστοιχείων με τη μικρή γεννήτρια του υπολογιστικού μοντέλου και θα χρησιμοποιηθεί η απόφαση που λήφθηκε για τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια 2.

Τα υλικά και εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 3 είναι τα ίδια με αυτά της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 2, με μόνη διαφορά ότι δεν χρησιμοποιείται η συγκολλητική πάστα SAC305.



Εικόνα 6.7: Απεικόνιση του καλάι 99.3%Sn & 0.7%Cu (Lead free).

Η διαδικασία εκτέλεσης της κατασκευής της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 3 είναι η ίδια με τη διαδικασία κατασκευής της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 2, που αναφέρεται στο υποκεφάλαιο 6.3. Η μόνη διαφορά σ' αυτή τη δοκιμή κατασκευής είναι πως γίνεται προσπάθεια συγκόλλησης των ελασμάτων χαλκού στα σταθερά ηλεκτρόδια με χρήση

ηλεκτρικού κολλητηριού και καλά (lead free). Αξίζει να σημειωθεί ότι, η εσωτερική αντίσταση βρέθηκε να ισούται με 1 Ω m.

Κατά τη κατασκευή της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 3 διαπιστώνεται ότι υπάρχουν διάφορα σφάλματα τα οποία ακολουθούν:

- Η ακίδα του ηλεκτρικού κολλητηριού δεν μπορεί να εισχωρήσει στο διάκενο των 2.6mm, ανάμεσα δηλαδή από τις πλάκες αλουμίνιας. Καθίσταται η συγκόλληση των χάλκινων ελασμάτων αδύνατη.
- Με τη προσπάθεια τοποθέτησης της ακίδας του ηλεκτρικού κολλητηριού κοντά στο ηλεκτρόδιο της πλάκας για τη συγκόλληση του ελάσματος, η γεννήτρια άνοιξε στα 2 με αποτέλεσμα να χαθούν οι ηλεκτρικές επαφές.

Συμπεράσματα από αυτή την μέθοδο κατασκευής της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 3 είναι ότι, τα ελάσματα χαλκού δεν μπορούν να συγκολλούνται απευθείας με τη χρήση ηλεκτρικού κολλητηριού γιατί υπάρχει μεγάλη πιθανότητα αστοχίας των συγκολλήσεων της γεννήτριας. Επίσης, δεν είναι εφικτή η συγκόλληση με ηλεκτρικό κολλητήρι σε τόσο μικρό διάκενο, μιας και η ακίδα είναι αρκετά χοντρή.

Άρα, είναι απαραίτητη η χρήση της συγκολλητικής πάστας SAC305 με μόνη διαφορά ότι θα γίνεται πρώτα η συγκόλληση ηλεκτρικών καλωδίων με καλά στα ελάσματα χαλκού και μετά θα πραγματοποιείται η τοποθέτηση των ελασμάτων χαλκού με συγκολλητική πάστα στα σταθερά ηλεκτρόδια χαλκού. Έτσι, κατά τη συγκόλληση των ελασμάτων στο φούρνο στους 200°C, τα καλώδια και το καλά δεν θα επηρεαστούν.

6.5 Κατασκευή Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 4

Με το πέρας της αποτυχίας κατασκευής της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 3, αποφασίζεται η εκκίνηση της κατασκευής της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 4, η οποία θα περιέχει τον ίδιο αριθμό ζευγών θερμοστοιχείων με τη μικρή γεννήτρια του υπολογιστικού μοντέλου και θα χρησιμοποιηθεί η απόφαση που βρίσκεται στα συμπεράσματα της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 3 του υποκεφαλαίου 6.4.

Τα υλικά και εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 4 είναι:

1. Δύο πλάκες alumina oxide με τοποθετημένα τα ηλεκτρόδια χαλκού
2. Θερμοστοιχεία half-Heusler p&n τύπου
3. Συγκολλητική πάστα αργύρου (silver paste) – χρησιμοποιείται για τη συγκόλληση των θερμοστοιχείων κύβου στα χάλκινα ηλεκτρόδια.
4. Συγκολλητική πάστα Easy Print SAC305 – χρησιμοποιείται για τη συγκόλληση χάλκινων ελασμάτων στα ηλεκτρόδια χαλκού για τη διευκόλυνση τοποθέτησης ηλεκτρικών καλωδίων.
5. Μήτρα γραφίτη με εσωτερική διάμετρο 20mm
6. Έμβολα γραφίτη με διάμετρο 20mm και 10mm
7. Βάση από Stainless Steel
8. Καλάι 99.3%Sn & 0.7%Cu (Lead free)
9. Χάλκινα ελάσματα
10. Φούρνος Carbolite Gero (30-3000°C)
11. Ηλεκτρικό Κολλητήρι
12. Στερεοσκόπιο
13. Πολύμετρο
14. Τσιμπίδες
15. Ηλεκτρικά Καλώδια
16. Σιλκόνη Bison High Temperature

6.5.1 Διαδικασία Κατασκευής Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 4

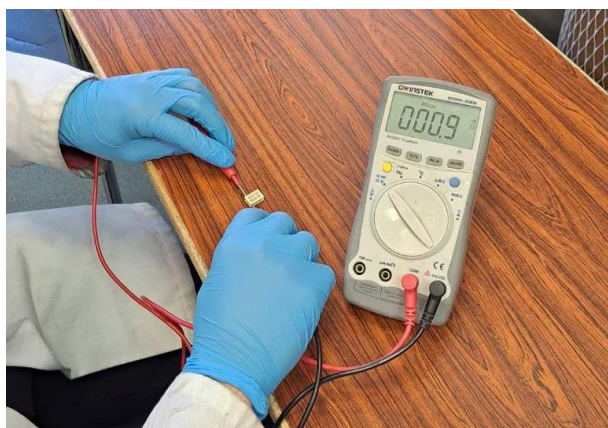
Η διαδικασία εκτέλεσης της κατασκευής της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 4 είναι η ίδια με τη διαδικασία κατασκευής της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 3, που αναφέρεται στο υποκεφάλαιο 6.4, μέχρι το σημείο όπου πραγματοποιείται η συγκόλληση των θερμοστοιχείων στα ηλεκτρόδια χαλκού στους 730°C για 10 λεπτά. Η εσωτερική αντίσταση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας βρέθηκε να ανέρχεται στα 0.9Ωhms.



Εικόνα 6.8: Απεικόνιση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 4 μετά τη συγκόλληση των θερμοστοιχείων στο φούρνο.

Ακολούθως, πραγματοποιείται συγκόλληση ηλεκτρικών καλωδίων στα ελάσματα χαλκού με χρήση του ηλεκτρικού κολλητηριού και καλάνι (Lead free). Στη συνέχεια, λαμβάνονται τα ελάσματα χαλκού με τα καλώδια και τοποθετείται στην κάτω μεριά των ελασμάτων συγκολλητική πάστα Easy Print SAC305. Έπειτα, τοποθετούνται πολύ προσεκτικά πάνω στα ηλεκτρόδια χαλκού και με μια τσιμπίδα πιέζεται το έλασμα να έρθει σε καλή επαφή με το ηλεκτρόδιο. Μετέπειτα, γίνεται αφαίρεση της περίσσειας πάστας περιμετρικά των χάλκινων ελασμάτων, έτσι ώστε να μην υπάρχει πιθανότητα βραχυκύκλωσης.

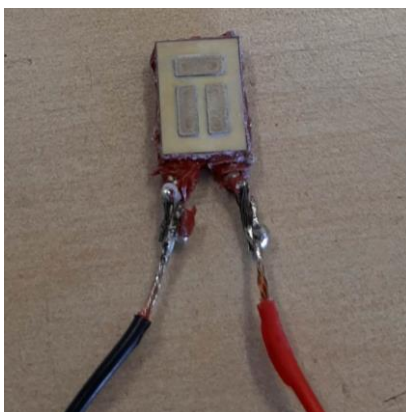
Στη συνέχεια, τοποθετείται η θερμοηλεκτρική γεννήτρια στον φούρνο στους 200°C για 2 ώρες για να στερεοποιηθεί η πάστα. Εφόσον τελειώσει ο χρόνος θέρμανσης της πάστας, η γεννήτρια αφήνεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος να ψυχθεί. Ακολούθως, μετριέται ξανά η ηλεκτρική αντίσταση της γεννήτριας και παρατηρείται ότι ανέρχεται στα 1.3Ωhms, δηλαδή η ηλεκτρική αντίσταση αυξάνεται κατά 0.4Ωhms.



Εικόνα 6.9: Απεικόνιση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 4 κατά τη μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης πριν την συγκόλληση των ελασμάτων χαλκού και των καλωδίων. Η ηλεκτρική αντίσταση του κυκλώματος ανέρχεται στα 0.9Ωhms.

Έπειτα, συγκολλούνται μακριά ηλεκτρικά καλώδια στα μικρά καλώδια τα οποία βρίσκονται στα ελάσματα χαλκού με χρήση ηλεκτρικού κολλητηριού και καλά. Μακρύτερα καλώδια απαιτούνται λόγω του ότι πρέπει να είναι εφικτή η ένωση με άλλα καλώδια κατά τη διαδικασία χαρακτηρισμού. Πραγματοποιείται ξανά η μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης με πολύμετρο και η τιμή ανέρχεται στα 1.4Ωhms.

Τέλος, εφαρμόζεται περιμετρικά σιλικόνη Bison High Temperature γύρω από την γεννήτρια για να αποφευχθεί αρχικά η σχετική κίνηση μεταξύ των πλακών, όπως επίσης και η εισροή υγρασίας στο εσωτερικό της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας κατά το χαρακτηρισμό.



Εικόνα 6.10: Απεικόνιση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 4 μετά τη τοποθέτηση καλωδίων στα άκρα της και σιλικόνης Bison High Temperature περιμετρικά της γεννήτριας.

6.5.2 Σφάλματα Εκτέλεσης κατά τη κατασκευή της Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 4

Τα σφάλματα που παρουσιάζονται κατά την εκτέλεση της κατασκευής της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 4 και πιστεύεται ότι θα επηρεάσουν τα αποτελέσματα κατά το χαρακτηρισμό είναι τα εξής:

- Η συγκόλληση των ηλεκτρικών καλωδίων με καλά μπορεί να μην είναι η βέλτιστη, αφού προσθέτει ηλεκτρική αντίσταση.
- Η συγκόλληση των ελασμάτων χαλκού στα σταθερά ηλεκτρόδια χαλκού δεν είναι η βέλτιστη, γιατί προσθέτει αρκετή ηλεκτρική αντίσταση.
- Η ποσότητα της συγκολλητικής πάστας easy print SAC305 στα ελάσματα χαλκού δεν ήταν ίδια.
- Η ποσότητα της συγκολλητικής πάστας αργύρου δεν ήταν ίδια σε όλα τα σημεία συγκόλλησης των θερμοστοιχείων.

- Η συγκολλητική πάστα αργύρου είχε λήξη 9 μήνες πριν με αποτέλεσμα να υπάρχει μάλλον μείωση στις ιδιότητες της.
- Τα ελάσματα χαλκού σε κάποια σημεία έχουν τσαλακωθεί με αποτέλεσμα να μην υπάρχει η βέλτιστη συγκόλληση.
- Κάποια θερμοστοιχεία παρουσιάζουν μερική αφαίρεση υλικού στις ακμές του κύβου με αποτέλεσμα να μην υπάρχει ακρίβεια στις διαστάσεις των ημιαγωγών και να υπάρχει μικρότερη επιφάνεια συγκόλλησης μαζί με τα σταθερά ηλεκτρόδια χαλκού.

6.5.3 Συμπεράσματα Κατασκευής Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 4

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν μέσω αυτής της διαδικασίας κατασκευής της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 4 είναι ότι η μέθοδος κατασκευής δίνει μια λειτουργική θερμοηλεκτρική γεννήτρια. Παρ' όλα αυτά, η εσωτερική αντίσταση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 4 είναι πολύ περισσότερη απ' αυτή του μοντέλου προσομοίωσης, υποκεφάλαιο 3.2.2, αφού το μοντέλο προβλέπει εσωτερική αντίσταση ίση με 0.06Ω ms και η γεννήτρια 4 έχει εσωτερική αντίσταση ίση με 1.4Ω ms. Άρα, πρέπει να πραγματοποιείται όσο καλύτερη συγκόλληση των ηλεκτρικών καλωδίων με το καλάι, έτσι ώστε να υπάρχει όσο το δυνατό καλύτερη ηλεκτρική επαφή, να τοποθετούνται τα ελάσματα χαλκού όσο καλύτερα γίνεται για να μην τσαλακώνονται και η ποσότητα της συγκολλητικής πάστας Easy Print SAC305 να είναι ίδια. Επιπρόσθετα, να γίνεται με μεγαλύτερο έλεγχο η εφαρμογή της συγκολλητικής πάστας αργύρου στα θερμοστοιχεία για να υπάρχει η ίδια ποσότητα σε όλες τις επιφάνειες των θερμοστοιχείων. Τέλος, να επιλέγονται τα θερμοστοιχεία που έχουν την λιγότερη αφαίρεση υλικού στις ακμές τους, για να υπάρχει όσο το δυνατό μεγαλύτερη επιφάνεια συγκόλλησης και μεγαλύτερο εμβαδό διατομής λειτουργίας του θερμοστοιχείου για να μην αυξάνεται περαιτέρω η ηλεκτρική αντίσταση της γεννήτριας.

6.6 Κατασκευή Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 5

6.6.1 Διαδικασία Κατασκευής Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 5

Με το πέρας της επιτυχής κατασκευής της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 4, αποφασίζεται να κατασκευαστεί η θερμοηλεκτρική γεννήτρια 5 για σκοπούς επαναληψιμότητας. Δηλαδή, να είναι βέβαιο ότι η διαδικασία με την οποία κατασκευάστηκε η θερμοηλεκτρική γεννήτρια είναι ορθή και αξιόπιστη. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται και η διαδικασία εκτέλεσης της κατασκευής της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 5 είναι ίδια με τη διαδικασία κατασκευής της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 4, που αναφέρεται στο υπο-υποκεφάλαιο 6.5.1, μιας και η θερμοηλεκτρική γεννήτρια 4 κατασκευάστηκε με επιτυχία.

Η θερμοηλεκτρική γεννήτρια 5 μετά τη συγκόλληση της στο φούρνο φέρει ηλεκτρική αντίσταση ίση με $0.7\Omega\text{hms}$. Μετά τη συγκόλληση μακριών καλωδίων πραγματοποιείται ξανά η μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης με πολύμετρο και η τιμή ανέρχεται στα $1.2\Omega\text{hms}$.



Εικόνα 6.11: Απεικόνιση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 5 κατά τη μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης πριν την συγκόλληση των ελασμάτων χαλκού και των καλωδίων. Η ηλεκτρική αντίσταση του κυκλώματος ανέρχεται στα $0.7\Omega\text{hms}$.

6.6.2 Σφάλματα Εκτέλεσης κατά τη κατασκευή της Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 5

- Η συγκόλληση των ηλεκτρικών καλωδίων με καλά δεν είναι η βέλτιστη, αφού προσθέτει ηλεκτρική αντίσταση.
- Η συγκόλληση των ελασμάτων χαλκού στα σταθερά ηλεκτρόδια χαλκού δεν είναι η βέλτιστη, γιατί προσθέτει ηλεκτρική αντίσταση.
- Η συγκολλητική πάστα αργύρου είχε λήξη 9 μήνες πριν με αποτέλεσμα να υπάρχει μάλλον μείωση στις ιδιότητες της.
- Κάποια θερμοστοιχεία παρουσιάζουν μερική αφαίρεση υλικού στις ακμές του κύβου με αποτέλεσμα να μην υπάρχει ακρίβεια στις διαστάσεις των ημιαγωγών και να υπάρχει μικρότερη επιφάνεια συγκόλλησης μαζί με τα σταθερά ηλεκτρόδια χαλκού.

6.6.3 Συμπεράσματα Κατασκευής Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 5

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν μέσω αυτής της διαδικασίας κατασκευής της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 5 είναι ότι, η ελεγχόμενη εφαρμογή της συγκολλητικής πάστας αργύρου πάνω στα θερμοστοιχεία υπόσχεται ότι δεν θα προκληθεί βραχυκύκλωμα και κάλυψη των θερμοστοιχείων με flux. Επίσης, η μικρή και ίση ποσότητα της συγκολλητικής πάστας Easy Print SAC305 στα ελάσματα χαλκού δίνει τη δυνατότητα να τοποθετούνται καλύτερα τα ελάσματα, χωρίς να τσαλακώνονται με αποτέλεσμα να μην υπάρχει βραχυκύκλωμα. Τέλος, λόγω της δυσκολίας συγκόλλησης των ελασμάτων χαλκού με την συγκολλητική πάστα SAC305 και την συγκόλληση με καλά των μακριών ηλεκτρικών καλωδίων, αυξάνεται η ηλεκτρική αντίσταση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι επηρεάζει πολύ η ποιότητα των συγκολλήσεων την αντίσταση της γεννήτριας.

6.7 Κατασκευή Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 6

6.7.1 Διαδικασία Κατασκευής Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 6

Εφόσον έχουν κατασκευαστεί με επιτυχία δύο θερμοηλεκτρικές γεννήτριες με δύο ζεύγη θερμοστοιχείων, υποκεφάλαιο 6.5 και υποκεφάλαιο 6.6, πραγματοποιείται η τελευταία δοκιμή κατασκευής θερμοηλεκτρικής γεννήτριας. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται και η διαδικασία εκτέλεσης της κατασκευής της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 6 είναι ίδια με τη διαδικασία κατασκευής της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 4, που αναφέρεται στο υπο-υποκεφάλαιο 6.5.1.

Η θερμοηλεκτρική γεννήτρια 6 μετά τη συγκόλληση της στο φούρνο φέρει ηλεκτρική αντίσταση ίση με 0.6Ω ms. Μετά τη συγκόλληση μακριών καλωδίων πραγματοποιείται ξανά η μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης με πολύμετρο και η τιμή ανέρχεται στα 1.3Ω ms



Εικόνα 6.12: Απεικόνιση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 6 κατά τη μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης πριν την συγκόλληση των ελασμάτων χαλκού και των καλωδίων. Η ηλεκτρική αντίσταση του κυκλώματος ανέρχεται στα 0.6Ω ms.

6.8 Συμπεράσματα θερμοηλεκτρικών γεννητριών με 2 ζεύγη θερμοστοιχείων

Η κατασκευή τριών επιτυχημένων θερμοηλεκτρικών γεννητριών δίνει το συμπέρασμα ότι η μέθοδος κατασκευής τους είναι αξιόπιστος και ορθός. Επίσης, η συγκολλητική πάστα άργυρου μπορεί να καλύψει τη μικρή διακύμανση που υπάρχει στα κυβικά θερμοστοιχεία, αφού είναι δυνατή η λήψη ηλεκτρικής αντίστασης με πολύμετρο. Επιπρόσθετα, οι συγκολλήσεις που προσφέρονται είναι καλές λόγω των χαμηλών ηλεκτρικών αντιστάσεων που λαμβάνονται. Ακόμη, η θερμοκρασία συγκόλλησης και η

θέση των θερμοηλεκτρικών γεννητριών κατά τη διάρκεια συγκόλλησης δεν επηρεάζει με περιμετρικές καταστροφικές ρωγμές τα θερμοστοιχεία n – τύπου. Τέλος, η συγκόλληση των ελασμάτων χαλκού με την συγκολλητική πάστα easy print SAC305, τα οποία έχουν συγκολλημένα με καλά ηλεκτρικά καλώδια, προσφέρουν τη δυνατότητα λήψης ηλεκτρικής αντίστασης έξω από τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια και τη σφράγιση τους με σιλικόνη Bison High Temperature. Ωστόσο, τείνουν στην αύξηση της τελικής εσωτερικής αντίστασης, αφού μέσω των προσπαθειών φαίνεται να επηρεάζεται πολύ από την ποιότητα των συγκολλήσεων.

6.9 Θερμοηλεκτρική Γεννήτρια 7

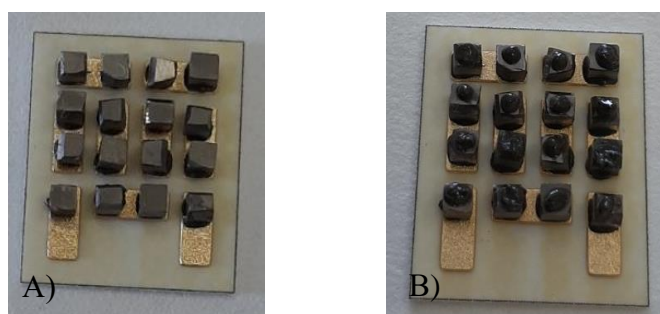
Με τη λήξη της κατασκευής θερμοηλεκτρικών γεννητριών με δύο ζεύγη θερμοστοιχείων, αποφασίζεται να κατασκευαστεί μια θερμοηλεκτρική γεννήτρια με οκτώ ζεύγη θερμοστοιχείων και ίδια δηλαδή με τη μεγάλη γεννήτρια του υπολογιστικού μοντέλου. Η ανάγκη για κατασκευή θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με οκτώ ζεύγη θερμοστοιχείων προκύπτει από το ερώτημα του κατά πόσο είναι εφικτή η κατασκευή και συγκεκριμένα, η δυσκολία που προκύπτει είναι η έλλειψη μήτρας και εμβόλων γραφίτη με μέγεθος που να είναι δυνατή η συναρμολόγηση και συγκόλληση της γεννήτριας. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται και η διαδικασία εκτέλεσης της κατασκευής της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 7 είναι ίδια με τη διαδικασία κατασκευής της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 4, που αναφέρεται στο υποκεφάλαιο 6.5, μέχρι το σημείο που τοποθετείται η άνω κεραμική πλάκα πάνω στα θερμοστοιχεία αλλά και η χρήση ενός συμπαγές κυλίνδρου από χαλκό που η προσφορά του επεξηγείται ακριβώς στην συνέχεια.

6.9.1 Διαδικασία Κατασκευής Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 7

Αρχικά, καθαρίζονται οι επιφάνειες των κεραμικών πλακών αλουμίνας για τα 8 ζεύγη θερμοστοιχείων μέσω της τοποθέτησης τους στον μηχανισμό ultrasonic. Ο λόγος που πραγματοποιείται ο καθαρισμός των επιφανειών είναι για να μην υπάρχουν σωματίδια τα οποία αποτρέπουν τη συγκόλληση των θερμοστοιχείων.

Όσο λειτουργεί ο μηχανισμός ultrasonic, πραγματοποιείται η επιλογή θερμοστοιχείων με γνώμονα τα δύο είδη ημιαγωγών να έχουν ίδιο ύψος με διακύμανση κάτω από 100mm και να περιέχουν όσο λιγότερη αποκόλληση υλικού. Για την επιλογή των θερμοστοιχείων χρησιμοποιείται το στερεοσκόπιο του εργαστηρίου.

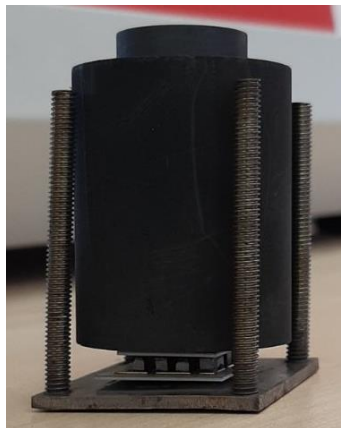
Ακολούθως, εφόσον ολοκληρώθηκε η διαδικασία καθαρισμού των επιφανειών των κεραμικών πλακών και της ανάμειξης της συγκολλητικής πάστας αργύρου, τοποθετείται η 1^η κεραμική πλάκα αλουμίνας πάνω στη βάση από Stainless Steel. Μετέπειτα, πραγματοποιείται η προσεκτική με έλεγχο τοποθέτηση της συγκολλητικής πάστας στην επιμεταλλωμένη επιφάνεια των θερμοστοιχείων και με χρήση τσιμπίδας τοποθετούνται με ορθό προσανατολισμό στα ηλεκτρόδια χαλκού. Όπως προαναφέρεται στο υπο-υποκεφάλαιο 6.2.1, τοποθετούνται πρώτα τα θερμοστοιχεία p – τύπου πάνω στα ηλεκτρόδια χαλκού και στη συνέχεια τα θερμοστοιχεία n – τύπου. Καθώς τοποθετείται ένα θερμοστοιχείο στη θέση του, ασκείται σ' αυτό μικρή πίεση με την τσιμπίδα για να υπάρξει καλή ηλεκτρική επαφή και με χρήση μυτερών τσιμπίδων πραγματοποιείται αφαίρεση της περίσσειας συγκολλητικής πάστας που βρίσκεται περιμετρικά του θερμοστοιχείου. Έπειτα, τοποθετείται συγκολλητική πάστα στην άνω επιφάνεια κάθε θερμοστοιχείου. Στη συνέχεια, με χρήση ενός cutter του εργαστηρίου κόβεται πολύ προσεκτικά η άνω κεραμική πλάκα στο σημείο που υπάρχουν τα σταθερά ηλεκτρόδια χαλκού στα άκρα της γεννήτριας, με σκοπό την απευθείας συγκόλληση των ηλεκτρικών καλωδίων με ηλεκτρικό κολλητήρι και συγκολλητικό μετάλλων καλά χωρίς να χρειάζεται η ανάγκη για χρήση της συγκολλητικής πάστας SAC305. Τέλος, εναποτίθεται πολύ προσεκτικά η άνω πλάκα κεραμικής αλουμίνας.



Εικόνα 6.13: Απεικόνιση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 7: Α) ακριβώς μετά τη τοποθέτηση των θερμοστοιχείων στις θέσεις τους και Β) μετά τη τοποθέτηση της συγκολλητικής πάστας αργύρου στην άνω επιφάνεια.

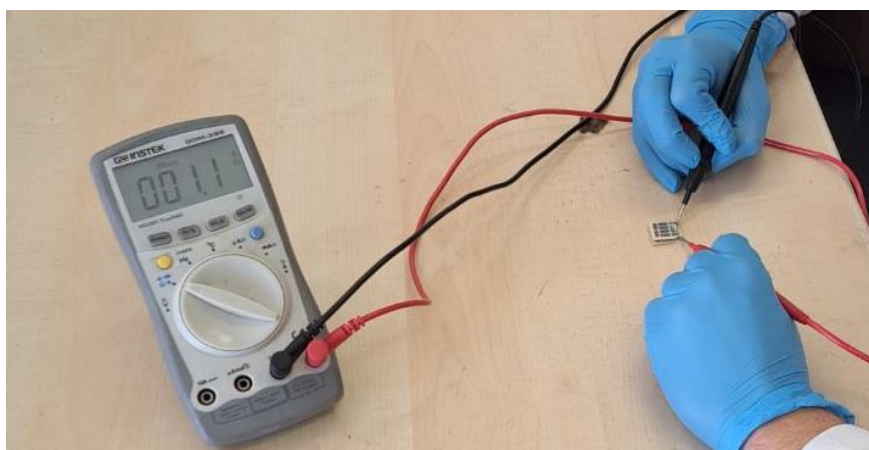
Μετέπειτα, τοποθετείται η μήτρα γραφίτη μαζί με τα έμβολα πάνω στη θερμοηλεκτρική γεννήτρια για να ασκείται μερική πίεση σ' αυτήν. Για άσκηση περισσότερης πίεσης κατά τη συγκόλληση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας, αποφασίζεται η τοποθέτηση ενός συμπαγούς κυλίνδρου από χαλκό πάνω από το έμβολο γραφίτη. Μετά, τοποθετείται η θερμοηλεκτρική γεννήτρια στο φούρνο στους 730°C πίσω από τη πόρτα του φούρνου για 15 λεπτά. Όταν τελειώσει ο χρόνος συγκόλλησης, αφαιρείται ο κύλινδρος χαλκού από το έμβολο για λόγους ασφάλειας και για να μην

καούν οι συγκολλήσεις, η γεννήτρια 7 βγαίνει έξω από τον φούρνο και αφήνεται να ψυχθεί σε θερμοκρασία δωματίου. Κατόπιν, με χρήση πολύμετρου μετριέται η εσωτερική αντίσταση και βρέθηκε να ισούται με $1.1\Omega\text{hms}$, μέσω της επαφής των ακίδων του πολύμετρου στα σταθερά ηλεκτρόδια χαλκού της κεραμικής πλάκας.

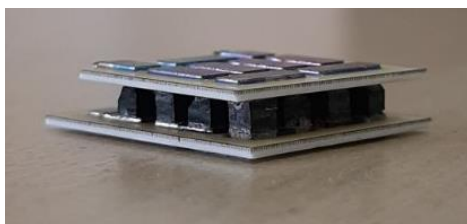


Εικόνα 6.14: Απεικόνιση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 7, η οποία βρίσκεται ανάμεσα στη βάση από Stainless Steel και τη μήτρα γραφίτη με τα έμβολα, πριν τη τοποθέτηση του συμπαγές κυλίνδρου χαλκού και τη συγκόλληση των θερμοστοιχείων στον φούρνο.

Ακολούθως, πραγματοποιείται συγκόλληση μακριών ηλεκτρικών καλωδίων στα σταθερά ηλεκτρόδια χαλκού με χρήση του ηλεκτρικού κολλητηριού και καλαί (Lead free). Ακολούθως, μετριέται ξανά η ηλεκτρική αντίσταση της γεννήτριας και παρατηρείται ότι ανέρχεται στα $3.9\Omega\text{hms}$, δηλαδή έχει αλλάξει η ηλεκτρική αντίσταση κατά $2.8\Omega\text{hms}$.

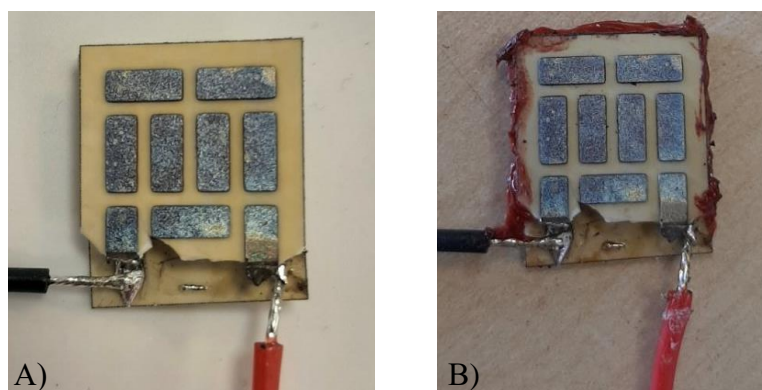


Εικόνα 6.15: Απεικόνιση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 7 κατά τη μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης πριν την συγκόλληση των ελασμάτων χαλκού και των καλωδίων. Η ηλεκτρική αντίσταση του κυκλώματος ανέρχεται στα $1.1\Omega\text{hms}$.



Εικόνα 6.16: Απεικόνιση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 7 μετά τη συγκόλληση των θερμοστοιχείων στο φούρνο.

Τέλος, εφαρμόζεται η σιλικόνη Bison High Temperature περιμετρικά της γεννήτριας εκτός της γραμμής που έχουν συγκολληθεί τα ηλεκτρικά καλώδια, για να περιοριστεί η σχετική κίνηση των πλακών και για να περιοριστεί η υγρασία έξω απ' αυτήν.



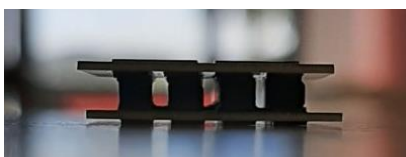
Εικόνα 6.17: Απεικόνιση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 7 A) μετά την συγκόλληση των μακριών ηλεκτρικών καλωδίων και B) μετά την περιμετρική εφαρμογή της σιλικόνης Bison High Temperature.

6.9.2 Σφάλματα Εκτέλεσης κατά τη κατασκευή της Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 7

Τα σφάλματα που παρουσιάζονται κατά την εκτέλεση της κατασκευής της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 7 και πιστεύεται ότι θα επηρεάσουν τα αποτελέσματα κατά το χαρακτηρισμό είναι τα εξής:

- Η απευθείας συγκόλληση των ηλεκτρικών καλωδίων με καλά κρίνεται κακιά λόγω της δυσκολίας εφαρμογής του ηλεκτρικού κολλητηριού στο σημείο συγκόλλησης και σταθερής εφαρμογής των μακριών ηλεκτρικών καλωδίων.
- Παρατηρείται ότι τα ηλεκτρόδια χαλκού που βρίσκονται μόνιμα στις κεραμικές πλάκες οξειδώνονται κατά την συγκόλληση στο φούρνο.
- Η συγκολλητική πάστα αργύρου είχε λήξη 9 μήνες πριν με αποτέλεσμα να υπάρχει μάλλον μείωση στις ιδιότητες της.

- Κάποια θερμοστοιχεία παρουσιάζουν μερική έως αρκετή αφαίρεση υλικού στις ακμές του κύβου με αποτέλεσμα να μην υπάρχει ακρίβεια στις διαστάσεις των ημιαγωγών και να υπάρχει μικρότερη επιφάνεια συγκόλλησης μαζί με τα σταθερά ηλεκτρόδια χαλκού.
- Κατά τη τοποθέτηση της μήτρας γραφίτη και του κυλίνδρου από χαλκό πάνω στην άνω πλάκα κεραμικού αλουμίνας, το κεραμικό μετακινήθηκε λίγο με αποτέλεσμα να συγκολληθεί λίγο λοξά και να μην υπάρχει η βέλτιστη ευθυγράμμιση και επιφάνεια συγκόλλησης.



Εικόνα 6.18: Απεικόνιση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 7, της οποίας η άνω πλάκα παρεκκλίνει από την κάτω πλάκα.

6.9.3 Συμπεράσματα Κατασκευής Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 7

Τα συμπεράσματα που αποκομίζονται μέσα από τη διαδικασία κατασκευής της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 7 είναι πως η μέθοδος κατασκευής είναι σωστή και ότι οι συγκολλήσεις πραγματοποιούνται χωρίς να υπάρχει αποκόλληση ή μη-ηλεκτρική επαφή κάποιου θερμοστοιχείου με τα ηλεκτρόδια χαλκού. Επιπρόσθετα, η εφαρμογή της μήτρας, των εμβόλων και του συμπαγές κυλίνδρου πάνω στην γεννήτρια δίνει αρκετή πίεση αφού παρατηρείται μείωση της αρχικής εσωτερικής αντίστασης. Ωστόσο, οι απευθείας συγκολλήσεις των ηλεκτρικών καλωδίων στα άκρα της γεννήτριας 7 κρίνονται κακές γιατί όχι μόνο δεν βοηθούν στην μείωση της ηλεκτρικής αντίστασης αλλά την αυξάνουν κατά πολύ. Αυτό οφείλεται γιατί υπάρχει αδυναμία στην εφαρμογή της ακίδας του ηλεκτρικού κολλητηριού στο ηλεκτρόδιο χαλκού σε τόσο μικρό διάκενο και της δυσκολίας σταθερής εφαρμογής των ηλεκτρικών καλωδίων. Ακόμη, η θερμοκρασία συγκόλλησης και η θέση των θερμοηλεκτρικών γεννητριών κατά τη διάρκεια συγκόλλησης δεν επηρεάζει με περιμετρικές καταστροφικές ρωγμές τα θερμοστοιχεία n – τύπου. Παρ’ όλα αυτά, λόγω του μεγέθους των κεραμικών πλακών αλλά και του μεγάλου αριθμού θερμοστοιχείων που χρησιμοποιείται απαιτείται εξάρτημα για να τοποθετείται η άνω πλάκα όσο το δυνατό πιο ευθυγραμμισμένη και να την κρατάει σταθερή. Επιπρόσθετα, απαιτείται συγκολλητική πάστα η οποία να μην έχει λήξη, έτσι ώστε να αποφευχθεί η υποψία για μείωση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων της.

6.10 Χαρακτηριστικά Πειραματικών Θερμοηλεκτρικών Γεννητριών

Πιο κάτω παρουσιάζεται πίνακας με τα χαρακτηριστικά όλων των θερμοηλεκτρικών γεννητριών που κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο. Συγκεκριμένα, πραγματοποιείται αναφορά στον κωδικό κάθε γεννήτριας, τον αριθμό ζευγών θερμοστοιχείων που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή τους, το υλικό επιμετάλλωσης των θερμοστοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν, στη λειτουργικότητα των συσκευών, στην τιμή των εσωτερικών αντιστάσεων που αναμενόταν να έχουν οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες σύμφωνα με το υπολογιστικά μοντέλα του Κεφαλαίου 3 και τη τιμή των εσωτερικών αντιστάσεων που μετρήθηκαν τελικά με τη χρήση πολύμετρου μετά τη συγκόλληση ηλεκτρικών καλωδίων.

Κωδικός TEG	Αριθμός Ζευγών	Υλικό Επιμετάλλωσης	Λειτουργική	$R_{int,exp}$ [Ωhms]	$R_{int,calc}$ [Ωhms]
TEG_1	2	Νικέλιο	OXI	0.06	-
TEG_2	2	Νικέλιο	OXI	0.06	-
TEG_3	2	Νικέλιο	OXI	0.06	-
TEG_4	2	Νικέλιο	NAI	0.06	1.3
TEG_5	2	Νικέλιο	NAI	0.06	1.2
TEG_6	2	Νικέλιο	NAI	0.06	1.3
TEG_7	8	Νικέλιο	NAI	0.21	3.9

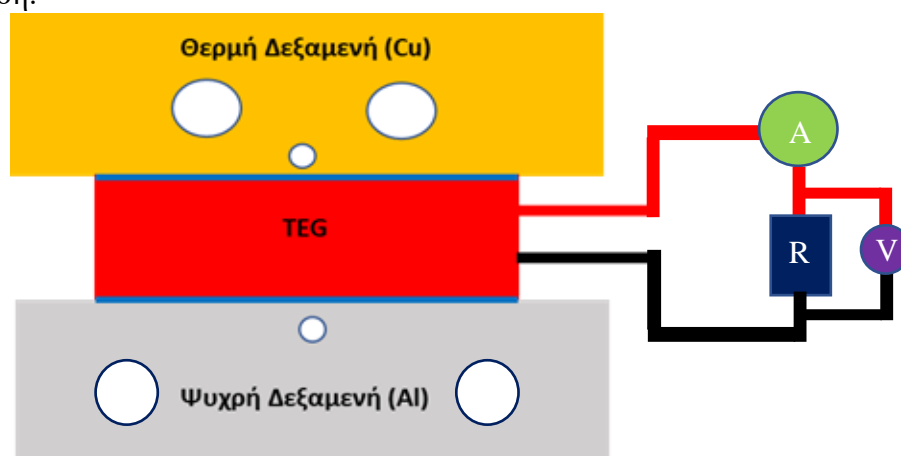
Πίνακας 6.1: Παρουσιάζονται οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες που κατασκευάστηκαν με τα διάφορα χαρακτηριστικά τους.

Σύμφωνα με τον πίνακα 6.1, γίνεται η παρατήρηση ότι η εσωτερική αντίσταση των θερμοηλεκτρικών γεννητριών που μετρήθηκαν με πολύμετρο είναι πολύ μεγαλύτερες απ' αυτές που αναμενόταν από τα υπολογιστικά μοντέλα του Κεφαλαίου 3. Η διαφορά των τιμών αποτελεί ένδειξη της ψηλής αντίστασης επαφής κατά την ανάπτυξη των ηλεκτρικών επαφών των θερμοηλεκτρικών γεννητριών.

6.11 Χαρακτηρισμός Θερμοηλεκτρικών Γεννητριών

Με το τέλος όλων των κατασκευαστικών δυσκολιών που συναντιόνται για τη κατασκευή μιας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας, ακολουθεί το στάδιο του χαρακτηρισμού, το οποίο είναι πολύ σημαντικό γιατί τίθεται η γεννήτρια σε κατάσταση λειτουργίας. Συγκεκριμένα, σ' αυτό το στάδιο εφαρμόζεται στις δύο επιφάνειες διαφορά θερμοκρασίας για να δημιουργηθεί διαφορά δυναμικού στα άκρα της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας και κατ' επέκταση χρήσιμη παραγόμενη ισχύς, μέσου του φαινομένου Seebeck όπως προαναφέρεται στα υποκεφάλαια 1.3.

Η διάταξη χαρακτηρισμού του εργαστηρίου αποτελείται αρχικά από δύο μεταλλικές πλάκες στις οποίες τοποθετείται η γεννήτρια ανάμεσα τους. Συγκεκριμένα, η θερμή μεταλλική πλάκα είναι κατασκευασμένη από χαλκό και η ψυχρή μεταλλική πλάκα είναι κατασκευασμένη από αλουμίνιο. Οι δύο μεταλλικές πλάκες έχουν οπές (Βλέπε εικόνα 6.19). Η θερμή πλάκα έχει τρεις οπές, απ' τις οποίες οι δύο είναι μεγαλύτερης διαμέτρου και χρησιμεύουν στην εφαρμογή των heaters που προσδίδουν τη θερμότητα στο σύστημα και η τρίτη χρησιμεύει στην εφαρμογή θερμοζεύγους για τη λήψη τιμών θερμοκρασίας της πλάκας. Παρομοίως η ψυχρή μεταλλική πλάκα έχει τρεις οπές, απ' τις οποίες οι δύο είναι μεγαλύτερης διαμέτρου και χρησιμεύουν στην εφαρμογή των λάστιχων της δεξαμενής ψύξης νερού. Αξίζει να αναφερθεί ότι, εσωτερικά της ψυχρής μεταλλικής πλάκας υπάρχει κανάλι στο οποίο ρέει νερό για να διατηρείται χαμηλά η θερμοκρασία. Η τρίτη οπή χρησιμεύει στην εφαρμογή θερμοζεύγους για τη λήψη τιμών θερμοκρασίας της πλάκας. Επιπρόσθετα, η διάταξη αποτελείται από μια αντίσταση, ένα αμπερόμετρο και ένα βολτόμετρο. Η αντίσταση και το αμπερόμετρο συνδέονται ηλεκτρικά σε σειρά με τη γεννήτρια και το βολτόμετρο συνδέεται παράλληλα με την αντίσταση.



Εικόνα 6.19: Απεικόνιση της διάταξης χαρακτηρισμού μιας γεννήτριας με τα μέρη που την αποτελούν.

6.12 Στήριξη Θερμοηλεκτρικών Γεννητριών στη συσκευή Χαρακτηρισμού

Λόγω του μικρού μεγέθους των θερμοηλεκτρικών γεννητριών με τα δύο ζεύγη θερμοστοιχείων είναι απαραίτητη η στήριξη τους μέσα στη συσκευή χαρακτηρισμού για να μην υπάρξει πιθανότητα διατμητικών τάσεων που θα επιφέρουν την αποκόλληση των θερμοστοιχείων με τα ηλεκτρόδια χαλκού μέσα στις θερμοηλεκτρικές γεννήτριες, άρα την ολοκληρωτική αστοχία. Στήριξη μπορεί να δοθεί και στη θερμοηλεκτρική γεννήτρια με τα οχτώ ζεύγη θερμοστοιχείων για λόγους πρόληψης. Η βασική ιδέα της είναι να τοποθετηθούν τέσσερις στήλες περιμετρικά της γεννήτριας για τη στήριξη του βάρους.

Απαραίτητη προϋπόθεση του αντικειμένου, το οποίο θα στηρίζει τις θερμοηλεκτρικές γεννήτριες είναι να έχει το ίδιο ύψος με τις γεννήτριες ή να είναι πιο ψηλό με μέγιστη τιμή τα 100μm. Η διακύμανση αυτή θα συμπληρωθεί με τη χρήση της θερμικής πάστας. Το μοναδικό μηχανήμα που μπορεί να δώσει τέτοια ακρίβεια είναι το μηχανήμα κοπής/λείανσης Accutom – 100 και το υλικό το οποίο μπορεί να κοπεί γρήγορα και εύκολα είναι ο γραφίτης.

Με το πέρας της απόφασης, μετριέται το ύψος όλων των θερμοηλεκτρικών γεννητριών με τη χρήση του μικρομέτρου και το ύψος τους ανέρχεται στα $4.5\text{mm} \pm 0.050\text{mm}$. Ακολούθως, λαμβάνονται δύο έμβολα γραφίτη με διάμετρο 15mm με στόχο να πραγματοποιηθεί η κοπή τους σε 4 στήλες. Για να είναι γνωστό το πόσες φορές είναι δυνατό να κοπούν τα έμβολα, στηρίζεται ένα έμβολο στη δαγκάνα του Accutom – 100 και υπολογίζεται για 2 κοπές. Έπειτα, στηρίζονται τα δύο έμβολα μέσα στη δαγκάνα και η δαγκάνα στερεώνεται στον άξονα που κινείται κάθετα του controller. Μετέπειτα, τοποθετείται ο τροχός κοπής κεραμικής αλουμίνας, που έχει δυνατότητα κοπής του γραφίτη, στον άξονα του ηλεκτροκινητήρα. Μετά, πραγματοποιείται διαδικασία ευθυγράμμισης του εμβόλου με τον τροχό. Συγκεκριμένα, η επιφάνεια του τροχού πρέπει να βρίσκεται στην ίδια ευθεία με την επιφάνεια του εμβόλου. Στη συνέχεια, μετακινείται ο τροχός κατά 4.6mm και ορίζεται η θέση αυτή ως σημείο αναφοράς κοπής.

Κατόπιν, ορίζονται οι ίδιοι παράμετροι που προαναφέρονται στο υποκεφάλαιο 5.4.1 κατά την εκτέλεση κοπής των δισκίων, ελέγχεται η ροή του ψυκτικού ότι έρχεται σε επαφή με τον τροχό κοπής για να αποφευχθεί η αύξηση θερμοκρασίας κατά την κοπή. Τέλος, ξεκινά η διαδικασία κοπής του εμβόλου γραφίτη σε κύλινδρους με ύψος 4.6mm.

Πιο κάτω παρουσιάζονται οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την κοπή του εμβόλου γραφίτη.

Παράμετρος	x_w [mm]	ω_w [rpm]	\dot{x}_w [$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$]	F_w [N]	rep[#]	y_{rep} [mm]
Τιμή	17	3000	0.060	low	1	4.6

Πίνακας 6.2: Παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που ορίζονται στον ρυθμιστή του Accutom – 100, κατά τη διαδικασία κοπής των εμβόλων γραφίτη.



Εικόνα 6.20: Απεικόνιση της διαδικασίας κοπής των εμβόλων στο Accutom – 100.

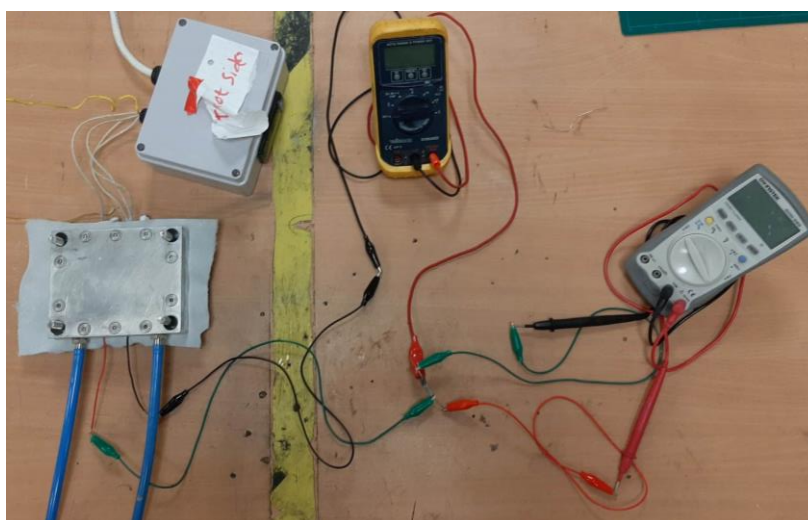
Με το πέρας της κοπής των εμβόλων γραφίτη, υπάρχουν διαθέσιμοι τέσσερις κύλινδροι γραφίτη με ύψος 4.6mm.

6.13 Χαρακτηρισμός Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 4

Για τη διαδικασία χαρακτηρισμού της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 4 χρησιμοποιούνται τα υλικά, εξαρτήματα και μηχανισμοί που παρουσιάζονται πιο κάτω:

1. Θερμοηλεκτρική γεννήτρια 4
2. Τέσσερις κύλινδροι γραφίτη
3. Διάταξη πλακών με κοχλίες και παξιμάδια
4. Δύο πολύμετρα
5. Ψηφιακό θερμόμετρο
6. Θερμική Πάστα grizzly kryonaut
7. Καλώδια
8. Συσκευή Θέρμανσης με Heaters Cartridge
9. Σύστημα ψύξης νερού
10. Πλαστικές σωλήνες για μεταφορά νερού
11. Απιονισμένο νερό
12. Ύφασμα με χαμηλή θερμική αγωγιμότητα
13. Κοπτικό εργαλείο
14. Σταθερή αντίσταση

6.13.1 Διάταξη Χαρακτηρισμού



Εικόνα 6.21: Απεικόνιση της διάταξης χαρακτηρισμού

6.13.2 Διαδικασία Χαρακτηρισμού Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 4

Αρχικά, λαμβάνεται μια σταθερή αντίσταση ίση με 1Ωhms, η οποία θα αντικατοπτρίζει την αντίσταση φορτίου. Έπειτα, τοποθετείται θερμική πάστα grizzly kryonaut στις οπές της μεταλλικής πλάκας χαλκού, η οποία θα θερμαίνεται και τοποθετούνται τα heaters σ' αυτές. Ακολούθως, τοποθετείται απιονισμένο νερό στη δεξαμενή του συστήματος ψύξης και με πλαστικές σωλήνες πραγματοποιείται η σύνδεση της δεξαμενής με τη πλάκα αλουμινίου, η οποία θα ψύχεται.

Έπειτα, συνδέονται ηλεκτρικά σε σειρά η θερμοηλεκτρική γεννήτρια 4 μαζί με το πρώτο πολύμετρο και τη σταθερή αντίσταση με χρήση καλωδίων. Ταυτόχρονα, συνδέεται ηλεκτρικά παράλληλα με τη σταθερή αντίσταση το δεύτερο πολύμετρο. Το πολύμετρο που βρίσκεται σε σειρά με το κύκλωμα ρυθμίζεται να λαμβάνει τιμή ρεύματος και το πολύμετρο που βρίσκεται παράλληλα με την αντίσταση ρυθμίζεται να λαμβάνει τιμές ηλεκτρικής τάσης.

Μετά, τίθεται σε λειτουργία το σύστημα ψύξης για να αρχίσει το νερό να ψύχεται στην θερμοκρασία των 25°C, όπως επίσης και η πλάκα. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται θερμική πάστα grizzly kryonaut στις δύο επιφάνειες της γεννήτριας 4 και τοποθετείται η θερμή πλάκα στο τραπέζι εργασίας. Η πλάκα η οποία θα θερμαίνεται θα παραμείνει σε επαφή με το τραπέζι καθ' όλη τη διάρκεια του χαρακτηρισμού για να αποφευχθεί ο οποιοσδήποτε τραυματισμός.

Κατόπιν, με την χρήση κοπτικού εργαλείου, πραγματοποιείται κοπή μιας τετραγωνικής οπής πάνω σε ύφασμα με χαμηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας. Η τετραγωνική οπή έχει διαστάσεις λίγο μεγαλύτερες από εκείνες της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 4. Στη συνέχεια, με το κοπτικό εργαλείο κόβονται ακόμα τέσσερις οπές για τους κύλινδρους γραφίτη περιμετρικά της οπής της γεννήτριας. Μετέπειτα, το ύφασμα εφαρμόζεται στη θερμή πλάκα και η γεννήτρια 4 τοποθετείται στην οπή του υφάσματος. Αυτό γίνεται γιατί είναι επιθυμητό η θερμότητα να μεταφέρεται διαμέσου της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας μόνο κάθετα, και όχι από τα πλάγια. Ταυτόχρονα τοποθετούνται οι τέσσερις κύλινδροι από γραφίτη στις οπές τους.

Έπειτα, τοποθετείται η ψυχρή πλάκα αλουμινίου η οποία είναι υπεύθυνη για την ψύξη πάνω στην θερμοηλεκτρική γεννήτρια και με την χρήση κοχλιών και παξιμαδιών πραγματοποιείται η μηχανική ένωση των δύο πλακών. Μετά, τοποθετούνται 3 σετ θερμοζεύγων στις μικρές οπές που βρίσκονται στις δύο μεταλλικές πλάκες μαζί με θερμική πάστα grizzly kryonaut. Τα δύο από τα τρία είναι συνδεδεμένα με το ψηφιακό θερμομέτρο στο οποίο αναγράφονται οι τιμές των θερμοκρασιών εσωτερικά της θερμής

και ψυχρής πλάκας. Το τρίτο θερμοζεύγος αποτελεί την αρνητική ανάδραση του συστήματος θέρμανσης και γι' αυτό τοποθετείται στην θερμή πλάκα. Τέλος, ορίζεται η τιμή της θερμοκρασίας του μηχανισμού θέρμανσης στους 200°C και τίθεται σε λειτουργία.

Καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία της θερμής πλάκας και υπάρχει θερμοκρασιακή διαφορά, λαμβάνονται τιμές των θερμοκρασιών, του ρεύματος και της τάσης από τα πολύμετρα ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Με την καταγραφή των μετρήσεων, έως ότου φτάσει η θερμοκρασία της θερμής πλάκας στους 200°C, θα είναι εφικτή η δημιουργία της καμπύλης ισχύος ως προς τη θερμοκρασία της θερμής πλάκας.



Εικόνα 6.22: Απεικόνιση του συστήματος ψύξης νερού.

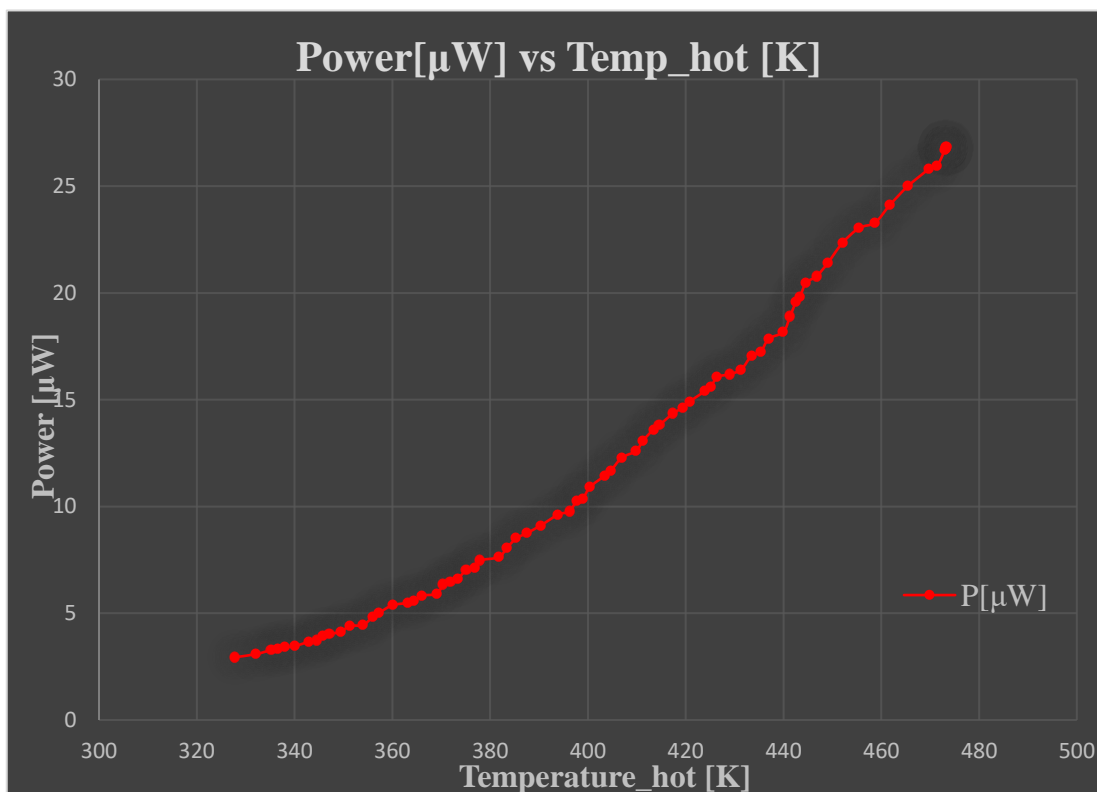
Πιο κάτω παρουσιάζονται οι πίνακες με τα δεδομένα που λαμβάνονται από τα δύο πολύμετρα και το ψηφιακό θερμόμετρο και στην τελευταία στήλη οι τιμές της ηλεκτρικής ισχύος που υπολογίζονται για τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια 4 μέσω της εξίσωσης 3.1.

T_{cold} [K]	T_{hot} [K]	V [mV]	I [mA]	P [μ W]
318.15	327.85	2.1	1.4	2.940
318.45	332.15	2.1	1.47	3.087
318.95	335.25	2.2	1.49	3.278
319.35	336.55	2.2	1.51	3.322
319.65	338.05	2.2	1.55	3.410
319.85	339.95	2.2	1.57	3.454
320.05	342.85	2.3	1.59	3.657
320.35	344.65	2.3	1.62	3.726
320.55	345.85	2.4	1.65	3.960
320.65	347.15	2.4	1.68	4.032
320.85	349.45	2.4	1.72	4.128
321.05	351.25	2.5	1.76	4.400
321.15	353.95	2.5	1.78	4.450
321.25	355.95	2.6	1.85	4.810
321.15	357.25	2.6	1.93	5.018
321.35	360.05	2.7	1.99	5.373
321.25	363.15	2.7	2.03	5.481
321.15	364.45	2.7	2.06	5.562
321.15	365.95	2.8	2.08	5.824
321.15	369.05	2.8	2.11	5.908
321.15	370.45	2.9	2.19	6.351
321.25	371.85	2.9	2.23	6.467
321.15	373.35	2.9	2.28	6.612
321.25	375.15	3.0	2.34	7.020
321.15	376.95	3.0	2.37	7.110
321.15	377.95	3.1	2.41	7.471
321.15	381.75	3.1	2.46	7.626
321.25	383.45	3.2	2.52	8.064
321.15	385.35	3.3	2.58	8.514
321.35	387.45	3.3	2.65	8.745
321.35	390.35	3.4	2.68	9.112
321.35	393.95	3.5	2.75	9.625
321.25	396.25	3.5	2.79	9.765
321.15	397.65	3.6	2.85	10.26
321.15	398.95	3.6	2.88	10.368
321.15	400.45	3.7	2.95	10.915
321.15	403.45	3.8	3.01	11.438
321.25	404.65	3.8	3.07	11.666
321.35	406.95	3.9	3.15	12.285
321.45	409.85	3.9	3.23	12.597
321.45	411.25	4.0	3.27	13.0800
321.35	413.45	4.1	3.32	13.612
321.25	414.65	4.1	3.37	13.817

321.25	417.45	4.2	3.42	14.364
321.25	419.35	4.2	3.48	14.616
321.35	420.75	4.2	3.55	14.91
321.35	423.95	4.3	3.58	15.394
321.35	425.15	4.3	3.63	15.609
321.45	426.45	4.4	3.65	16.060
321.35	428.95	4.4	3.68	16.192
321.25	431.35	4.4	3.73	16.412
321.25	433.45	4.5	3.79	17.055
321.15	435.35	4.5	3.83	17.235
321.15	436.95	4.6	3.88	17.848
321.15	439.95	4.6	3.95	18.170
321.15	441.35	4.7	4.02	18.894
321.15	442.55	4.8	4.08	19.584
321.25	443.35	4.8	4.13	19.824
321.35	444.65	4.9	4.18	20.482
321.35	446.75	4.9	4.24	20.776
321.25	449.05	5.0	4.28	21.40
321.25	452.05	5.1	4.38	22.338
321.35	455.45	5.2	4.43	23.036
321.35	458.75	5.2	4.48	23.296
321.45	461.75	5.3	4.55	24.115
321.55	465.45	5.4	4.63	25.002
321.45	469.75	5.5	4.69	25.795
321.45	471.45	5.5	4.72	25.960
321.35	473.15	5.6	4.78	26.768
321.35	473.35	5.6	4.79	26.824
321.35	473.25	5.6	4.79	26.824
321.25	473.25	5.6	4.78	26.768
321.15	473.15	5.6	4.78	26.768
321.15	473.05	5.6	4.77	26.712

Πίνακας 6.3: Δεδομένα θερμοκρασιών θερμής/ψυχρής πλάκας, έντασης ρεύματος, τάσης και το αποτέλεσμα της ηλεκτρικής ισχύς για τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια 4.

Πιο κάτω παρουσιάζεται το γράφημα της ηλεκτρικής ισχύος ως προς τη θερμοκρασία της θερμής πλάκας χαλκού για τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια 4.



Γράφημα 6.1: Η ηλεκτρική ισχύς ως προς τη θερμοκρασία της θερμής πλάκας για τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια 4.

Μέσω του γραφήματος 6.1, παρατηρείται ότι η καμπύλη λειτουργίας ηλεκτρικής ισχύος ως προς την θερμοκρασία της θερμής πλάκας χαλκού έχει την ίδια μορφή με την καμπύλη λειτουργίας που παρουσιάζεται στο γράφημα 3.4 της προσομοίωσης της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με δύο ζεύγη θερμοστοιχείων.

Για τον υπολογισμό της πυκνότητας ισχύος υπολογίζεται αρχικά το εμβαδό διατομής των θερμοστοιχείων που απαρτίζουν τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια 4. Ακολούθως, λαμβάνεται η μέγιστη τιμή της ισχύος της γεννήτριας και διαιρείται με το εμβαδό διατομής.

Το εμβαδό διατομής υπολογίζεται μέσω της πιο κάτω εξίσωσης:

$$A_{TEG} = q * (A_{cubes}) * 10000 \quad [cm^2] \quad \text{Εξ 6.1}$$

Όπου:

A_{TEG} : το εμβαδό διατομής της γεννήτριας [cm^2]

q : ο αριθμός των θερμοστοιχείων που έχει η γεννήτρια

A_{cubes} : το εμβαδό διατομής των θερμοστοιχείων [m^2]

Η πυκνότητα ισχύος υπολογίζεται μέσω πιο κάτω της εξίσωσης:

$$P_{\text{den}} = \frac{P}{A_{\text{TEG}}} \quad [W * \text{cm}^{-2}] \quad \text{Εξ 6.2}$$

Όπου:

P_{den} : η πυκνότητα ισχύος της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας [$W * \text{cm}^{-2}$]

P : η ηλεκτρική ισχύς της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας [W]

A_{TEG} : το εμβαδό διατομής της γεννήτριας [cm^2]

Πιο κάτω παρουσιάζεται ο πίνακας με τη τιμή της μέγιστης πυκνότητας ισχύος που λαμβάνεται από τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια 4.

Πυκνότητα Ισχύος	Αποτέλεσμα
$P_{\text{den}} [\text{mW} * \text{cm}^{-2}]$	0.168

Πίνακας 6.4: Η τιμή της μέγιστης πυκνότητας ισχύος που λαμβάνεται από τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια 4.

6.13.3 Σύγκριση θερμοηλεκτρική γεννήτριας από COMSOL με Θερμοηλεκτρική γεννήτρια 4

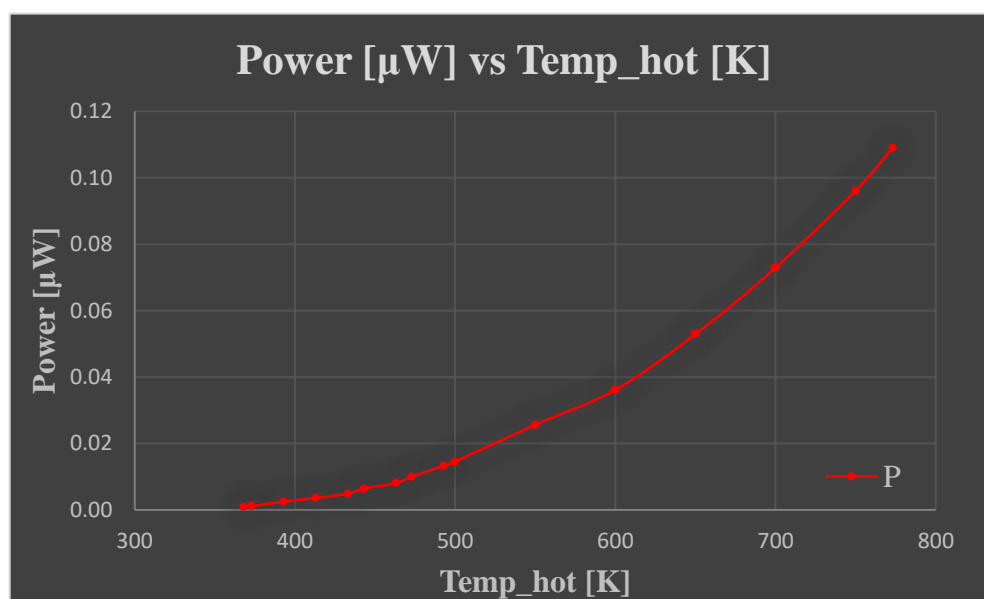
Με το πέρας του χαρακτηρισμού της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 4 αποφασίζεται να πραγματοποιηθεί η σύγκριση της με τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια του μοντέλου στο COMSOL Multiphysics 5.2. Ωστόσο για να είναι εφικτή η σύγκριση επαναλαμβάνεται η συλλογή αποτελεσμάτων από το COMSOL. Συγκεκριμένα, σ' αυτή τη προσομοίωση η θερμοκρασία της ψυχρής πλάκας να ανέρχεται στους 48°C ή 321.15 K και η εξωτερική αντίσταση να ισούται με $1\Omega\text{hm}$.

Η σύγκριση των δύο θερμοηλεκτρικών γεννητριών είναι απαραίτητη για να είναι εφικτή η παρατήρηση της διαφοράς στη παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος μέσω του τύπου της τυπικής απόκλισης που θα παρουσιαστείς τη συνέχεια. Έτσι θα είναι κατανοητό το κατά πόσο μια θερμοηλεκτρική γεννήτρια με υλικά half-Heusler που κατασκευάζεται με τη διαδικασία που έχει περιγραφή μπορεί να είναι λειτουργικά συγκρίσιμη.

Πιο κάτω παρουσιάζεται ο πίνακας αποτελεσμάτων και το γράφημα ισχύος ως προς τη θερμοκρασία της θερμής πλάκας που λαμβάνονται από το υπολογιστικό εργαλείο COMSOL Multiphysics 5.2 και Excel.

T_{hot} [K]	V [V]	I [A]	P [W]
368.15	0.030	0.030	0.0009
373.15	0.034	0.034	0.0011
393.15	0.050	0.050	0.0025
413.15	0.060	0.060	0.0036
433.15	0.070	0.070	0.0049
443.15	0.080	0.080	0.0064
463.15	0.090	0.090	0.0081
473.15	0.100	0.100	0.0100
493.15	0.116	0.115	0.0132
500	0.121	0.120	0.0145
550	0.160	0.160	0.0256
600	0.190	0.190	0.0361
650	0.230	0.230	0.0529
700	0.270	0.270	0.0729
750	0.310	0.310	0.0961
773	0.330	0.330	0.1089

Πίνακας 6.5: Αποτελέσματα μοντέλου θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με 2 ζεύγη θερμοστοιχείων για θερμοκρασία ψυχρής πλάκας στους 321.15 K και εξωτερική αντίσταση 1Ωm.



Γράφημα 6.2: Ηλεκτρικής ισχύος ως προς τη θερμοκρασία της θερμής πλάκας για τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια του μοντέλου στο COMSOL Multiphysics 5.2.

Μετά την εύρεση των αποτελεσμάτων της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας του μοντέλου στο COMSOL Multiphysics 5.2, απαιτείται ο υπολογισμός της τυπικής απόκλισης. Μέσω αυτής της εξίσωσης, παρατηρείται πόσο απέχει η τιμή της παραγόμενης ισχύς της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 4 συγκριτικά με τη γεννήτρια που αναπτύχθηκε στο υπολογιστικό εργαλείο COMSOL Multiphysics 5.2. Η εξίσωση της τυπικής απόκλισης είναι η εξίσωση 3.2, που προαναφέρεται στο Κεφάλαιο 3.

Με βάση την εξίσωση 3.2, η θεωρητική τιμή αντιστοιχεί με την τιμή της παραγόμενης ισχύς του μοντέλου θερμοηλεκτρικής γεννήτριας, ενώ η πειραματική τιμή αντιστοιχεί με την τιμή της παραγόμενης ισχύς της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 4.

Πιο κάτω παρουσιάζεται ο πίνακας με τη τιμή της τυπικής απόκλισης ισχύος μεταξύ της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας που αναπτύχθηκε στο υπολογιστικό εργαλείο COMSOL Multiphysics 5.2 και της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 4.

Τυπική Απόκλιση	Αποτέλεσμα
τ. α. [%]	99.7

Πίνακας 6.6: Η τιμή της τυπικής απόκλισης μεταξύ της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας του μοντέλου και της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 4.

6.13.4 Σφάλματα Εκτέλεσης κατά το Χαρακτηρισμό της Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 4

Τα σφάλματα που παρουσιάζονται κατά την εκτέλεση του χαρακτηρισμού της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 4 και επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα είναι τα εξής:

- Μη-ακριβής τοποθέτηση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 4 στο κέντρο της διάταξης θερμής και ψυχρής πλάκας.
- Η τοποθέτηση της ψυχρής πλάκας πάνω από τόσο μικρή γεννήτρια σε συνδυασμό την μη-ακριβή τοποθέτηση της γεννήτριας μέσα στην διάταξη, προκαλεί την δημιουργία διατμητικών τάσεων και εσωτερικών ρωγμών.
- Κατά την αύξηση της θερμοκρασίας της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας, η συγκολλητική πάστα SAC305 μπορεί να αδυνατούσε με αποτέλεσμα να χάνεται η επαφή των ελασμάτων χαλκού με τα σταθερά ηλεκτρόδια χαλκού.
- Η ποσότητα της θερμικής πάστας grizzly kryonaut που εφαρμόζεται στα Heaters Cartridge για την τοποθέτηση τους στις ειδικές οπές δεν είναι ίδια, όπως επίσης δεν είναι γνωστό ποια ποσότητα είναι η ιδανική.

- Η ποσότητα της θερμικής πάστας grizzly kryonaut στις επιφάνειες της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 4 δεν είναι ίδια, όπως επίσης δεν είναι γνωστό ποια ποσότητα είναι η ιδανική.
- Η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των μεταλλικών πλακών δεν είναι συνεχώς σταθερή λόγω απωλειών στο περιβάλλον και της ροής ψυχρού αέρα στο εργαστήριο.
- Η θερμοκρασία της ψυχρής πλάκας δεν είναι 25°C, όπως τη θερμοκρασία του συστήματος ψύξης αλλά στους 48°C, λόγω της τοποθέτησης κυλίνδρων γραφίτη. Αυτό μειώνει τη θερμοκρασιακή διαφορά που υπάρχει στη θερμοηλεκτρική γεννήτρια 4, άρα μειώνει και την ηλεκτρική ισχύ που παράγεται.
- Η θερμοκρασία του νερού στο σύστημα ψύξης αυξάνεται με το πέρας του χρόνου εκτέλεσης του πειράματος.
- Η συγκολλητική πάστα αργύρου είχε λήξη 9 μήνες πριν με αποτέλεσμα να υπάρχει μάλλον μείωση στις ηλεκτρικές ιδιότητες της κατά την αύξηση θερμοκρασίας και στις ιδιότητες συγκολλήσεις.
- Σφάλμα πολύμετρου.

6.13.5 Συμπεράσματα Χαρακτηρισμού Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 4

Μέσα από τη διαδικασία χαρακτηρισμού της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας προκύπτουν διάφορα συμπεράσματα. Αρχικά, αποδεικνύεται ότι τα υλικά half-Heusler έχουν τη δυνατότητα να παράγουν ηλεκτρική ισχύ όταν σ' αυτά δίνεται θερμοκρασιακή διαφορά, ωστόσο είναι πολύ μικρή λόγω σφαλμάτων κατά την διαδικασία κατασκευής και χαρακτηρισμού. Όσο αφορά τη διαδικασία χαρακτηρισμού, πρέπει να τοποθετείται ίση ποσότητα θερμικής πάστας grizzly kryonaut στα Heaters Cartridge και στις επιφάνειες των κεραμικών πλακών αλουμίνιας. Επιπρόσθετα, η προσθήκη των τεσσάρων κυλίνδρων γραφίτη για στήριξη της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 4, έχει ως συνέπεια τη αύξηση της θερμοκρασίας της ψυχρής πλάκας μιας και ο γραφίτης έχει ψηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας. Παρ' όλα αυτά, δεν πρέπει να αφαιρεθούν για να μην αστοχήσει η θερμοηλεκτρική γεννήτρια από αποκόλληση των επαφών της. Τέλος, η μεγάλη διαφορά στη τιμή της ισχύος των δύο γεννητριών μπορεί να οφείλεται στην δημιουργία βραχυκυκλώματος, στη αλλοίωση των συγκολλήσεων, στην μερική αποκόλληση των θερμοστοιχείων με τα ηλεκτρόδια χαλκού, στη δημιουργία ρωγμών και διατμητικών τάσεων αφού τοποθετείται η ψυχρή πλάκα που έχει μεγάλη μάζα σε τόσο μικρή γεννήτρια, στη ψηλή ηλεκτρική αντίσταση που έχει η θερμοηλεκτρική γεννήτρια 4 αφού

η θερμοηλεκτρική γεννήτρια του μοντέλου, υπο-υποκεφάλαιο 3.2.2, δείχνει ότι η εσωτερική αντίσταση πρέπει να ισούται με 0.06Ω και όχι με 1.4Ω . Τέλος, κατά τη παραγωγή των θερμοστοιχείων από σκόνη σε δίσκία, υπάρχει πιθανότητα κάποια διαδικασία να μην εκτελέστηκε σωστά με αποτέλεσμα να επηρεαστούν οι ιδιότητες του υλικού, όπως για παράδειγμα να χρειαζόταν βαθμονόμηση η πρέσα.

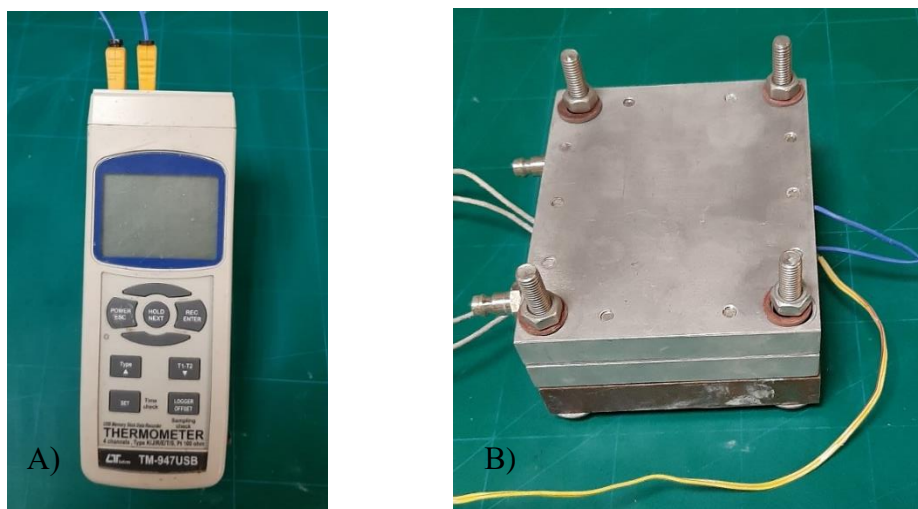
6.14 Χαρακτηρισμός της Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 5

Κατόπιν του χαρακτηρισμού της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 4, αποφασίζεται να λάβει μέρος ο χαρακτηρισμός της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 5. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι τα ίδια με αυτά που προαναφέρονται στο υποκεφάλαιο 6.13.

6.14.1 Διαδικασία Χαρακτηρισμού Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 5

Η διαδικασία που ακολουθείται για τον χαρακτηρισμό της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 5 είναι η ίδια με αυτή που προαναφέρεται στο υπο-υποκεφάλαιο 6.13.2.

Παρ' όλα αυτά, πραγματοποιούνται μερικές βελτιώσεις κατά το χαρακτηρισμό και αφορούν κυρίως τη ποσότητα της θερμικής πάστας grizzly kryonaut. Συγκεκριμένα, τοποθετείται περισσότερη ποσότητα θερμικής πάστας στις επιφάνειες των κεραμικών πλακών αλουμίνιας με σκοπό την επίτευξη της καλύτερης ροής θερμότητας από τη θερμή προς τη ψυχρή πλάκα. Επιπλέον, τοποθετείται περισσότερη ποσότητα θερμικής πάστας στις οπές των heaters Cartridge με σκοπό την επίτευξη της καλύτερης/μεγαλύτερης ροής θερμότητας από τα heaters προς την επιφάνεια της θερμής πλάκας χαλκού.



Εικόνα 6.23: Απεικόνιση A) του ψηφιακού θερμομέτρου και B) της διάταξης των πλακών.

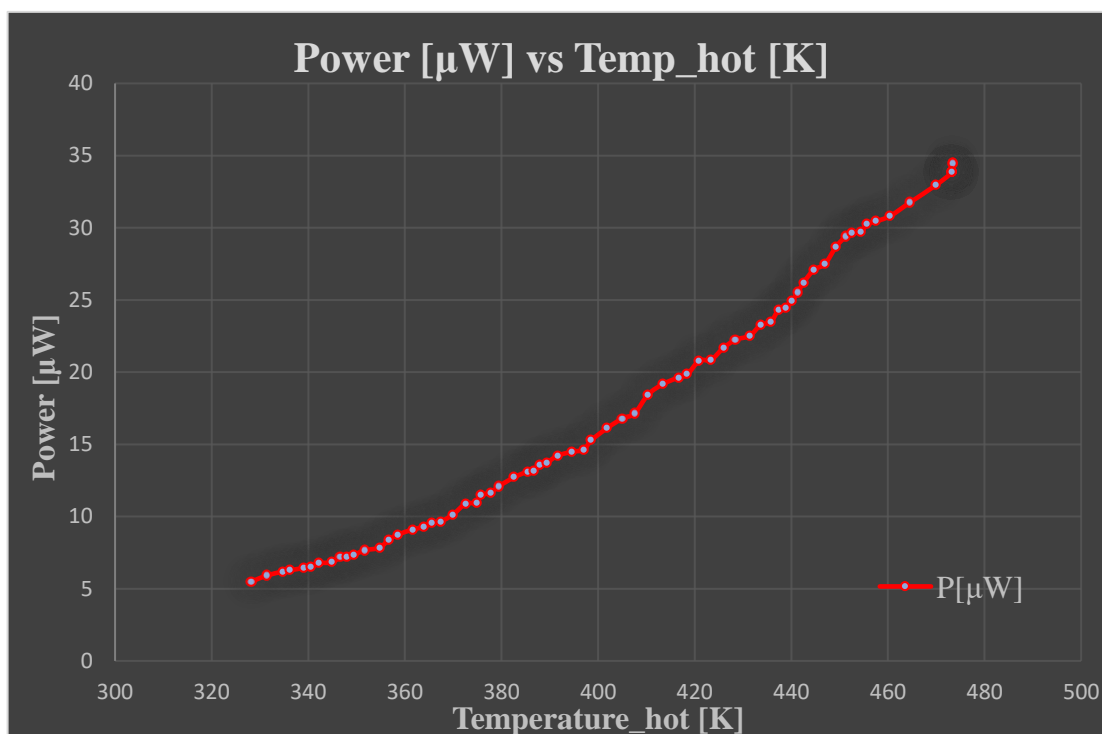
Πιο κάτω παρουσιάζονται οι πίνακες με τα δεδομένα που λαμβάνονται από τα δύο πολύμετρα και το ψηφιακό θερμόμετρο και στην τελευταία στήλη οι τιμές της ηλεκτρικής ισχύος που υπολογίζονται μέσω της εξίσωσης 3.1 για τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια 5.

T_{cold} [K]	T_{hot} [K]	V [mV]	I [mA]	P [μ W]
320.15	328.25	3.0	1.83	5.490
320.45	331.45	3.1	1.91	5.921
320.95	334.65	3.2	1.93	6.176
321.35	336.15	3.2	1.96	6.272
321.65	339.05	3.2	2.01	6.432
321.85	340.65	3.2	2.03	6.496
322.05	342.25	3.3	2.05	6.765
322.35	344.95	3.3	2.07	6.831
322.55	346.65	3.4	2.12	7.208
322.65	347.95	3.4	2.13	7.242
322.85	349.35	3.4	2.16	7.344
323.05	351.75	3.5	2.19	7.665
323.15	354.75	3.5	2.24	7.840
323.25	356.65	3.6	2.33	8.388
323.15	358.55	3.6	2.43	8.748
323.35	361.65	3.7	2.46	9.102
323.25	363.95	3.7	2.51	9.287
323.15	365.65	3.8	2.52	9.576
323.15	367.45	3.8	2.54	9.652
323.15	369.95	3.9	2.60	10.140
323.15	372.55	4.0	2.72	10.880
323.25	374.95	4.0	2.74	10.960
323.15	375.65	4.1	2.80	11.480
323.25	377.75	4.1	2.84	11.644
323.15	379.45	4.2	2.88	12.096
323.15	382.65	4.2	3.03	12.726
323.15	385.45	4.3	3.05	13.115
323.25	386.65	4.3	3.06	13.158
323.15	387.95	4.4	3.09	13.596
323.35	389.35	4.4	3.12	13.728
323.35	391.65	4.5	3.16	14.220
323.35	394.65	4.5	3.22	14.490
323.25	397.05	4.5	3.25	14.625
323.15	398.55	4.6	3.32	15.272
323.15	401.85	4.7	3.43	16.121
323.15	405.05	4.8	3.50	16.800
323.15	407.55	4.8	3.57	17.136
323.25	410.35	5.0	3.69	18.450
323.35	413.45	5.1	3.76	19.176
323.45	416.65	5.1	3.85	19.635
323.45	418.45	5.1	3.89	19.839
323.35	420.95	5.2	4.00	20.800
323.25	423.35	5.2	4.01	20.852

323.25	425.95	5.3	4.09	21.677
323.25	428.45	5.4	4.12	22.248
323.35	431.35	5.4	4.17	22.518
323.35	433.65	5.5	4.23	23.265
323.35	435.75	5.5	4.27	23.485
323.45	437.35	5.6	4.34	24.304
323.35	438.95	5.6	4.37	24.472
323.25	440.15	5.6	4.45	24.920
323.25	441.35	5.7	4.48	25.536
323.15	442.55	5.8	4.52	26.216
323.15	444.65	5.9	4.59	27.081
323.15	446.95	5.9	4.66	27.494
323.15	449.25	6.0	4.78	28.680
323.15	451.25	6.1	4.82	29.402
323.25	452.45	6.1	4.86	29.646
323.35	454.45	6.1	4.87	29.707
323.35	455.65	6.2	4.88	30.256
323.25	457.45	6.2	4.91	30.442
323.25	460.45	6.2	4.97	30.814
323.35	464.55	6.3	5.04	31.752
323.35	469.95	6.4	5.15	32.9600
323.45	473.25	6.5	5.21	33.865
323.55	473.35	6.6	5.22	34.452
323.45	473.35	6.6	5.22	34.452
323.45	473.25	6.5	5.21	33.865
323.35	473.25	6.5	5.21	33.865
323.35	473.15	6.5	5.21	33.865
323.35	473.15	6.5	5.21	33.865

Πίνακας 6.7: Δεδομένα θερμοκρασιών θερμής/ψυχρής πλάκας, έντασης ρεύματος, τάσης και το αποτέλεσμα της ηλεκτρικής ισχύς για τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια 5.

Πιο κάτω παρουσιάζεται το γράφημα της ηλεκτρικής ισχύος ως προς τη θερμοκρασία της θερμής πλάκας χαλκού για τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια 5.



Γράφημα 6.3: Η ηλεκτρικής ισχύος ως προς τη θερμοκρασία της θερμής πλάκας για τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια 5.

Μέσω του γραφήματος 6.3, παρατηρείται ότι η καμπύλη λειτουργίας ηλεκτρικής ισχύος ως προς την θερμοκρασία της θερμής πλάκας χαλκού έχει την ίδια μορφή με την καμπύλη λειτουργίας που παρουσιάζεται στο γράφημα 3.4 της προσομοίωσης της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με δύο ζεύγη θερμοστοιχείων.

Πιο κάτω παρουσιάζεται η μέγιστη πυκνότητα ισχύος της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 5 που υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης 6.2.

Πυκνότητα Ισχύος	Αποτέλεσμα
$P_{den} [mW * cm^{-2}]$	0.215

Πίνακας 6.8: Η τιμή της μέγιστης πυκνότητας ισχύος που λαμβάνεται από τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια 5.

6.14.2 Σύγκριση θερμοηλεκτρική γεννήτριας από COMSOL με Θερμοηλεκτρική γεννήτρια 5

Μετά την εύρεσης των αποτελεσμάτων της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας του μοντέλου στο COMSOL Multiphysics 5.2, που προαναφέρεται στο υπο-υποκεφάλαιο 6.13.3 και της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 5, απαιτείται ο υπολογισμός της τυπικής απόκλισης των παραγόμενων ισχύων μέσω της εξίσωσης 3.2.

Πιο κάτω παρουσιάζεται ο πίνακας με τη τιμή της τυπικής απόκλισης ισχύος μεταξύ της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας που αναπτύχθηκε στο υπολογιστικό εργαλείο COMSOL Multiphysics 5.2 και της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 5.

Τυπική Απόκλιση	Αποτέλεσμα
τ. α. [%]	99.65

Πίνακας 6.9: Η τιμή της τυπικής απόκλισης μεταξύ της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας του μοντέλου και της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 5.

6.14.3 Σφάλματα Εκτέλεσης κατά το Χαρακτηρισμό της Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 5

Τα σφάλματα που παρουσιάζονται κατά την εκτέλεση του χαρακτηρισμού της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 5 και επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα είναι τα ίδια μ' αυτά που προαναφέρονται στην θερμοηλεκτρική γεννήτρια 4 στο υπο-υποκεφάλαιο 6.13.4.

6.14.4 Συμπεράσματα Χαρακτηρισμού Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 5

Τα σφάλματα που προκύπτουν από την εκτέλεση του χαρακτηρισμού της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 5 είναι τα ίδια μ' αυτά που προαναφέρονται στην θερμοηλεκτρική γεννήτρια 4 στο υπο-υποκεφάλαιο 6.13.5.

6.15 Χαρακτηρισμός της Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 6

Κατόπιν του χαρακτηρισμού της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 5, αποφασίζεται να πραγματοποιηθεί ο χαρακτηρισμός της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 6. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι τα ίδια με αυτά που προαναφέρονται στο υποκεφάλαιο 6.13.

6.15.1 Διαδικασία Χαρακτηρισμού Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 6

Η διαδικασία που ακολουθείται για τον χαρακτηρισμό της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 6 είναι η ίδια με αυτή που προαναφέρεται στο υπο-υποκεφάλαιο 6.13.2 και της βελτιώσεις που χρησιμοποιήθηκαν κατά το χαρακτηρισμό της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 5, υπο-υποκεφάλαιο 6.14.1.

Παρ' όλα αυτά, δεν ήταν εφικτή η ολοκλήρωση του χαρακτηρισμού της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 6, γιατί υπήρξε βραχυκύκλωμα στα heaters Cartridges με αποτέλεσμα να εκραγούν κατά τη λειτουργία τους. Γι' αυτό το λόγο, υπάρχουν δεδομένα και αποτελέσματα μέχρι το σημείο που η θερμή πλάκα είχε θερμοκρασία 173.8°C.



Εικόνα 6.24: Απεικόνιση της θερμικής πάστας grizzly kryonaut.[47]

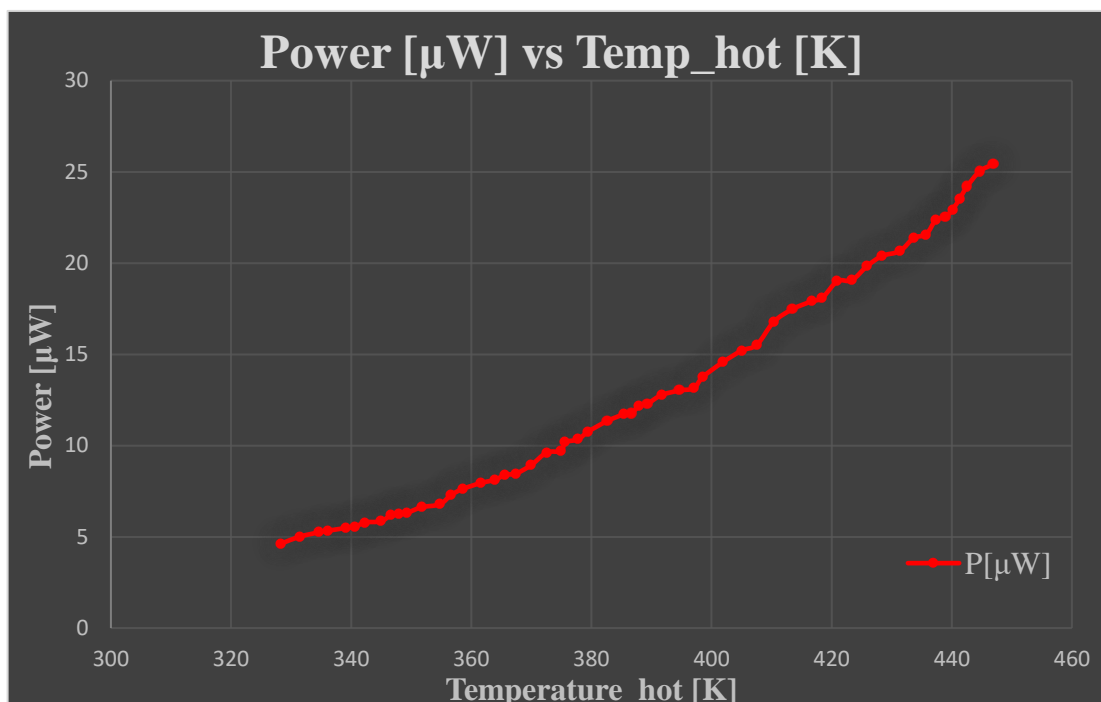
Πιο κάτω παρουσιάζονται οι πίνακες με τα δεδομένα που λαμβάνονται από τα δύο πολύμετρα και το ψηφιακό θερμόμετρο και στην τελευταία στήλη οι τιμές της ηλεκτρικής ισχύος που υπολογίζονται μέσω της εξίσωσης 3.1 για τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια 6.

T_{cold} [K]	T_{hot} [K]	V [mV]	I [mA]	P [μ W]
316.15	328.25	2.7	1.71	4.617
316.45	331.45	2.8	1.79	5.012
316.85	334.65	2.9	1.81	5.249
317.05	336.15	2.9	1.84	5.336
317.25	339.05	2.9	1.89	5.481
317.45	340.65	2.9	1.91	5.539
317.75	342.25	3.0	1.93	5.790
317.95	344.95	3.0	1.95	5.850
318.25	346.65	3.1	2.00	6.200
318.35	347.95	3.1	2.01	6.231
318.55	349.35	3.1	2.04	6.324
318.85	351.75	3.2	2.07	6.624
318.95	354.75	3.2	2.12	6.784

319.05	356.65	3.3	2.21	7.293
319.25	358.55	3.3	2.31	7.623
319.45	361.65	3.4	2.34	7.956
319.45	363.95	3.4	2.39	8.126
319.55	365.65	3.5	2.40	8.400
319.65	367.45	3.5	2.42	8.470
319.65	369.95	3.6	2.48	8.928
319.65	372.55	3.7	2.60	9.620
319.75	374.95	3.7	2.62	9.694
319.75	375.65	3.8	2.68	10.184
319.85	377.75	3.8	2.72	10.336
319.75	379.45	3.9	2.76	10.764
319.85	382.65	3.9	2.91	11.349
319.95	385.45	4.0	2.93	11.720
319.95	386.65	4.0	2.94	11.760
320.05	387.95	4.1	2.97	12.177
319.95	389.35	4.1	3.00	12.300
319.85	391.65	4.2	3.04	12.768
319.95	394.65	4.2	3.10	13.020
319.95	397.05	4.2	3.13	13.146
320.05	398.55	4.3	3.20	13.760
320.05	401.85	4.4	3.31	14.564
320.05	405.05	4.5	3.38	15.210
320.15	407.55	4.5	3.45	15.525
320.15	410.35	4.7	3.57	16.779
320.15	413.45	4.8	3.64	17.472
320.25	416.65	4.8	3.73	17.904
320.15	418.45	4.8	3.77	18.096
320.25	420.95	4.9	3.88	19.012
320.15	423.35	4.9	3.89	19.061
320.15	425.95	5.0	3.97	19.850
320.15	428.45	5.1	4.00	20.400
320.25	431.35	5.1	4.05	20.655
320.35	433.65	5.2	4.11	21.372
320.35	435.75	5.2	4.15	21.580
320.35	437.35	5.3	4.22	22.366
320.25	438.95	5.3	4.25	22.525
320.35	440.15	5.3	4.33	22.949
320.45	441.35	5.4	4.36	23.544
320.45	442.55	5.5	4.40	24.200
320.35	444.65	5.6	4.47	25.032
320.35	446.95	5.6	4.54	25.424

Πίνακας 6.10: Δεδομένα θερμοκρασιών θερμής/ψυχρής πλάκας, έντασης ρεύματος, τάσης και το αποτέλεσμα της ηλεκτρικής ισχύς για τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια 6.

Πιο κάτω παρουσιάζεται το γράφημα της ηλεκτρικής ισχύος ως προς τη θερμοκρασία της θερμής πλάκας χαλκού για τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια 6.



Γράφημα 6.4: Η ηλεκτρική ισχύς ως προς τη θερμοκρασία της θερμής πλάκας για τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια 6.

Μέσω του γραφήματος 6.4, παρατηρείται ότι η καμπύλη λειτουργίας ηλεκτρικής ισχύος ως προς την θερμοκρασία της θερμής πλάκας χαλκού έχει την ίδια μορφή με την καμπύλη λειτουργίας που παρουσιάζεται στο γράφημα 3.4 της προσομοίωσης της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με δύο ζεύγη θερμοστοιχείων.

Πιο κάτω παρουσιάζεται η μέγιστη πυκνότητα ισχύος της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 6 που υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης 6.2.

Πυκνότητα Ισχύος	Αποτέλεσμα
$P_{den} [mW * cm^{-2}]$	0.160

Πίνακας 6.11: Η τιμή της μέγιστης πυκνότητας ισχύος που λαμβάνεται από τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια 6.

6.15.2 Σύγκριση θερμοηλεκτρική γεννήτριας από COMSOL με Θερμοηλεκτρική γεννήτρια 6

Μετά την εύρεσης των αποτελεσμάτων της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας του μοντέλου στο COMSOL Multiphysics 5.2, που προαναφέρεται στο υπο-υποκεφάλαιο 6.13.3 και της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 6, απαιτείται ο υπολογισμός της τυπικής απόκλισης των παραγόμενων ισχύων μέσω της εξίσωσης 3.2. Παρ' όλα αυτά, πραγματοποιείται τυπική απόκλιση με τις αντίστοιχες τιμές ηλεκτρικής ισχύος για θερμοκρασία 173.8°C αντίστοιχα.

Πιο κάτω παρουσιάζεται ο πίνακας με τη τιμή της τυπικής απόκλισης ισχύος μεταξύ της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας που αναπτύχθηκε στο υπολογιστικό εργαλείο COMSOL Multiphysics 5.2 και της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 6.

Τυπική Απόκλιση	Αποτέλεσμα
τ. α. [%]	99.6

Πίνακας 6.12: Η τιμή της τυπικής απόκλισης μεταξύ της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας του μοντέλου και της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 6.

6.15.3 Σφάλματα Εκτέλεσης κατά το Χαρακτηρισμό της Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 6

Τα σφάλματα που παρουσιάζονται κατά την εκτέλεση του χαρακτηρισμού της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 6 και επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα είναι τα ίδια μ' αυτά που προαναφέρονται στην θερμοηλεκτρική γεννήτρια 4 στο υπο-υποκεφάλαιο 6.13.4.

6.15.4 Συμπεράσματα Χαρακτηρισμού Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 6

Τα σφάλματα που προκύπτουν από την εκτέλεση του χαρακτηρισμού της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 6 είναι τα ίδια μ' αυτά που προαναφέρονται στην θερμοηλεκτρική γεννήτρια 4 στο υπο-υποκεφάλαιο 6.13.5.

6.16 Χαρακτηρισμός της Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 7

Αρχικά, απαιτείται να σημειωθεί ότι, ο χαρακτηρισμός της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 7 με τα οκτώ ζεύγη θερμοστοιχείων που θα αναφερθεί ακριβώς στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε σε διαφορετικό χρόνο απ' τις προηγούμενες γεννήτριες με τα δύο ζεύγη θερμοστοιχείων, λόγω της έλλειψης των heaters Cartridge μετά από την βραχυκύκλωση και έκρηξης τους. Συγκεκριμένα, τα heaters έφτασαν και ήταν διαθέσιμα μετά από 3 εβδομάδες.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση της διαδικασίας χαρακτηρισμού της γεννήτριας 7 είναι τα ίδια μ' αυτά που αναφέρονται στη γεννήτρια 4, στο υποκεφάλαιο 6.13, εκτός από τους τέσσερις κύλινδρους από γραφίτη και την σταθερή αντίσταση $1\Omega m$. Στη θέση της σταθερής αντίστασης χρησιμοποιείται μεταβλητή αντίσταση που παρέχεται από το εργαστήριο.

6.16.1 Διαδικασία Χαρακτηρισμού Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 7

Με την πληροφόρηση της υπεύθυνης της Μεταπτυχιακής εργασίας ότι τα heaters Cartridge είναι διαθέσιμα, αποφασίζεται να πραγματοποιηθεί η εκτέλεση του χαρακτηρισμού της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 7. Ωστόσο, λόγω του μεγάλου διαστήματος (3 εβδομάδες) που έχει κατασκευαστεί η γεννήτρια, ήταν αναγκαίο να ελεγχθεί το αν η γεννήτρια παραμένει λειτουργικά χρήσιμη. Γι' αυτό το λόγο πραγματοποιείται μέτρηση ηλεκτρικής αντίστασης και παρατηρείται αύξηση της τιμής. Συγκεκριμένα, από $3.9\Omega m$ s που είχε με το πέρας της κατασκευής της, η νέα της τιμή ηλεκτρικής αντίστασης ανέρχεται στα $6.5\Omega m$ s, δηλαδή μια αύξηση $2.6\Omega m$ s. Παρ' όλο που έχει ψηλότερη αντίσταση επαφής από πριν, αποφασίζεται να χρησιμοποιηθεί για τον χαρακτηρισμό, αφού η προετοιμασία περαιτέρω θερμοστοιχείων απαιτεί αρκετό χρόνο.

Η διαδικασία που ακολουθείται για τον χαρακτηρισμό της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 7 είναι η ίδια με αυτή που προαναφέρεται στο υπο-υποκεφάλαιο 6.13.2.

Ωστόσο, πραγματοποιούνται μερικές βελτιώσεις και τροποποιήσεις κατά το χαρακτηρισμό και αφορούν κυρίως τη χρήση των κυλίνδρων γραφίτη, την εφαρμογή σημαδιών στην θερμή πλάκα για ευθυγράμμιση, την θερμοκρασία της θερμής πλάκας χαλκού και τέλος στη χρήση μεταβλητής αντίστασης για αντίσταση φορτίου.

Συγκεκριμένα, πριν την τοποθέτηση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας στην θερμή πλάκα χαλκού, γίνεται ευθυγράμμιση μέσω της τοποθέτησης σημαδιών στη χάλκινη πλάκα. Ο σκοπός για τον οποίο τοποθετούνται σημάδια είναι για να εφαρμοστεί η

γεννήτρια όσο το δυνατό πιο σωστά και κατά την τοποθέτηση της ψυχρής πλάκας να ασκούνται περισσότερο αξονικές τάσεις και λιγότερο διατμητικές τάσεις.

Όσο αφορά τους κυλίνδρους γραφίτη δεν χρησιμοποιούνται κατά τον χαρακτηρισμό για στήριξη για δύο λόγους. Ο πρώτος λόγος είναι γιατί πιστεύεται ότι επηρεάζουν την θερμοκρασία της ψυχρής πλάκας λόγω του ψηλού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας που έχει το υλικό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην διατηρείται σταθερή η θερμοκρασία της ψυχρής πλάκας και την αύξηση της θερμοκρασίας του νερού. Ο δεύτερος λόγος είναι ότι δεν χρειάζεται να τοποθετηθούν αφού η θερμοηλεκτρική γεννήτρια 7 έχει μεγαλύτερες κεραμικές πλάκες και περισσότερα θερμοστοιχεία. Έτσι, η δύναμη του βάρους και η πίεση κατανέμονται σε μεγαλύτερο εμβαδό από ότι πριν.

Εξαιτίας της υψηλής εσωτερικής αντίστασης που παρουσιάζει η θερμοηλεκτρική γεννήτρια 7, δεν είναι εφικτή η εφαρμογή σταθερής αντίστασης φορτίου αφού υπάρχουν σταθερές αντιστάσεις με τιμή $1\Omega\text{hm}$. Γι' αυτό λαμβάνεται η απόφαση να χρησιμοποιηθεί μεταβλητή αντίσταση για αντίσταση φορτίου. Η μεταβλητή αντίσταση παρέχεται από το εργαστήριο.

Τέλος, η θερμοκρασία του συστήματος θέρμανσης της πλάκας χαλκού αυξάνεται κατά 100°C , δηλαδή η τελική τιμή θερμοκρασίας να ανέρχεται στους 300°C .

Με το πέρας της ετοιμασίας της διάταξης γίνεται προσπάθεια τοποθέτησης της τιμής της μεταβλητής αντίστασης στην τιμή $6.5\Omega\text{hms}$, ώστε να είναι ίση με την τιμή της εσωτερικής αντίστασης της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 7. Μετά από αρκετή προσπάθεια τοποθετείται η μεταβλητή αντίσταση στα $6.7\Omega\text{hms}$, μιας και με μικρή μεταβολή της αντίστασης, αυτή αυξομειώνεται πολύ έντονα. Η μέτρηση της μεταβλητής αντίστασης πραγματοποιείται με χρήση πολύμετρου. Έπειτα, η μεταβλητή αντίσταση συνδέεται ηλεκτρικά σε σειρά με την θερμοηλεκτρική γεννήτρια και ένα πολύμετρο που έχει τον ρόλο του αμπερομέτρου, ενώ ταυτόχρονα συνδέεται ηλεκτρικά παράλληλα με το δεύτερο πολύμετρο που έχει τον του βολτομέτρου.

Τέλος, τίθενται σε λειτουργία το σύστημα ψύξης νερού και τα heaters Cartridge για να ξεκινήσει ο χαρακτηρισμός και να ληφθούν οι απαραίτητες μετρήσεις.

Καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία της θερμής πλάκας και υπάρχει θερμοκρασιακή διαφορά, λαμβάνονται τιμές των θερμοκρασιών, του ρεύματος και της τάσης από τα πολύμετρα ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Με την καταγραφή των μετρήσεων, έως ότου φτάσει η θερμοκρασία της θερμής πλάκας στους 300°C , θα είναι εφικτή η δημιουργία της καμπύλης ισχύος ως προς τη θερμοκρασία της θερμής πλάκας.

Κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης του χαρακτηρισμού της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 7, με την εξωτερική αντίσταση ίση με 6.7Ω ms, παρατηρείται ότι οι τιμές της ισχύος, μετά τον πολλαπλασιασμό του δυναμικού στα άκρα της αντίστασης και του ρεύματος, είναι χαμηλές και γι' αυτό μεταβαλλόταν η τιμή της μεταβλητής αντίστασης έως ότου να υπάρχει η μέγιστη παραγόμενη ισχύος. Εξαιτίας αυτής της αλλαγής λήφθηκαν ξανά τιμές τάσης και ρεύματος απ' την αρχή. Με το πέρας της διαδικασίας μετριέται ξανά η μεταβλητή αντίσταση με πολύμετρο και αναγράφεται η τιμή 9.1Ω ms.

Τα δεδομένα που λαμβάνονται καταχωρούνται σε αρχείο Microsoft Excel με στόχο να υπολογιστούν γρήγορα οι τιμές της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος για κάθε μέτρηση. Η εξίσωση που χρησιμοποιείται για να βρεθεί η τιμή της ισχύος είναι η εξίσωση 3.1.

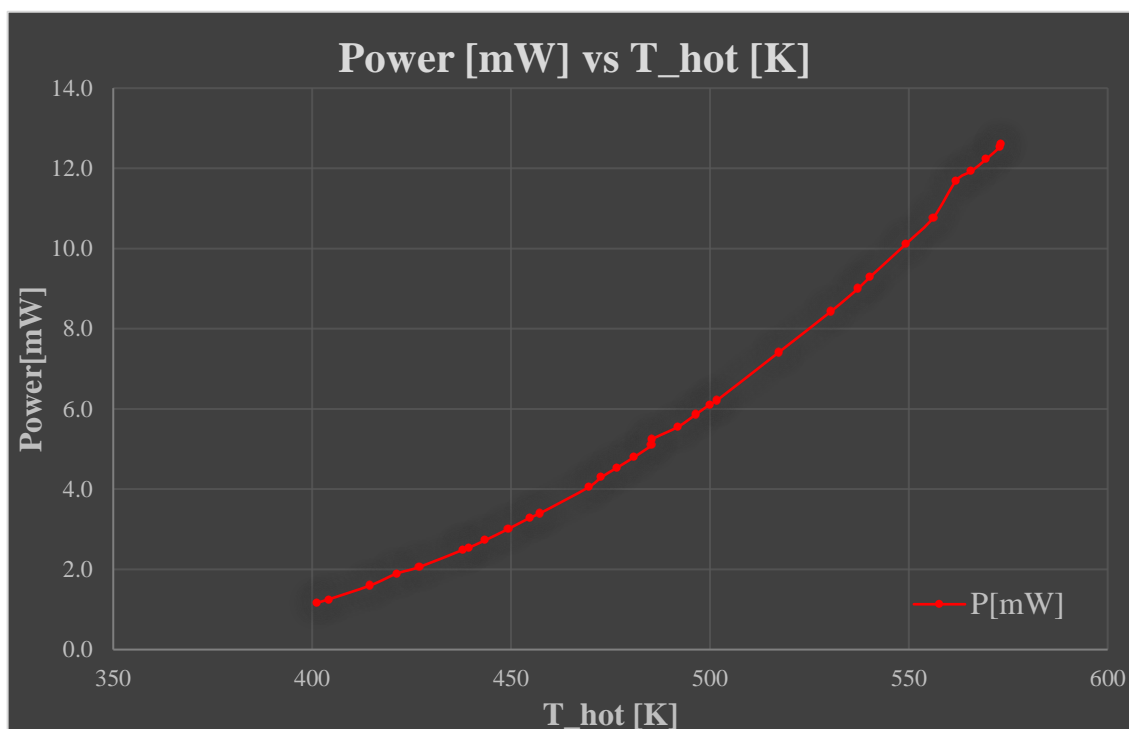
T_{cold} [K]	T_{hot} [K]	V [mV]	I [mA]	P [mW]
327.25	401.1	203.4	5.72	1.163
327.75	404.1	210.6	5.94	1.251
329.75	414.6	237.6	6.73	1.600
330.55	421.3	255.0	7.44	1.896
332.05	427	270.6	7.61	2.060
334.15	437.8	297.0	8.36	2.483
334.45	439.4	300.6	8.45	2.539
335.15	443.5	311.4	8.76	2.727
336.15	449.3	327.0	9.20	3.007
337.15	454.8	341.4	9.64	3.290
337.65	457.3	348.0	9.77	3.399
339.75	469.5	378.6	10.69	4.048
340.45	472.7	390.6	11.00	4.297
341.15	476.6	400.8	11.31	4.532
342.05	481	413.4	11.62	4.802
342.85	485.3	426.0	11.97	5.098
343.25	485.4	431.4	12.14	5.239
344.15	492	444.6	12.50	5.556
344.95	496.5	456.6	12.85	5.866
345.65	500	466.2	13.11	6.113
346.05	501.8	471.0	13.20	6.217
349.25	517.3	513.6	14.43	7.412
351.65	530.4	549.0	15.36	8.430
353.75	537.3	567.0	15.88	9.006
355.15	540.2	576.6	16.10	9.286
356.95	549.4	602.4	16.81	10.125
358.35	556.2	621.6	17.34	10.776

359.45	561.9	659.4	17.73	11.692
360.35	565.7	656.4	18.17	11.928
360.65	569.5	658.8	18.57	12.233
360.95	572.9	662.4	18.92	12.533
360.95	573.2	663.0	19.01	12.602

Πίνακας 6.13: Δεδομένα θερμοκρασιών θερμής/ψυχρής πλάκας, έντασης ρεύματος, τάσης και το αποτέλεσμα της ηλεκτρικής ισχύς για τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια 7.

Μέσω του πίνακα 6.13, φαίνεται ότι η θερμοκρασία της ψυχρής πλάκας δεν παραμένει καθόλου σταθερή. Συγκεκριμένα, αυξάνεται και λαμβάνει την μέγιστη τιμή 87.8°C, ενώ παράλληλα το σύστημα ψύξης νερού αναγράφει την τιμή 34°C. Γι' αυτή την παράξενη συμπεριφορά, καλέστηκε ο τεχνικός των εργαστηρίων για να ελέγξει το σύστημα ψύξης νερού και κατέληξε ότι το σύστημα χρειάζεται ψυκτικό αέριο. Έτσι, δικαιολογείται το γεγονός αύξησης της θερμοκρασίας της ψυχρής πλάκας σε όλες τις διαδικασίες χαρακτηρισμού των θερμοηλεκτρικών γεννητριών.

Πιο κάτω παρουσιάζεται το γράφημα της ηλεκτρικής ισχύος ως προς τη θερμοκρασία της θερμής πλάκας χαλκού για τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια 7.



Γράφημα 6.5: Η ηλεκτρική ισχύς ως προς τη θερμοκρασία της θερμής πλάκας για τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια 7.

Μέσω του γραφήματος 6.5, παρατηρείται ότι η καμπύλη λειτουργίας ηλεκτρικής ισχύος ως προς την θερμοκρασία της θερμής πλάκας χαλκού έχει την ίδια μορφή με την καμπύλη λειτουργίας που παρουσιάζεται στο γράφημα 3.8 της προσομοίωσης της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με οκτώ ζεύγη θερμοστοιχείων. Παρ' όλα αυτά, δεν είναι δυνατή η σύγκριση τους λόγω διαφορετικής εσωτερικής αντίστασης και διαφορετικές θερμοκρασίες στις δύο μεριές των θερμοηλεκτρικών γεννητριών.

Για τον υπολογισμό της μέγιστης πυκνότητας ισχύος της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 7, απαιτείται ο υπολογισμός του εμβαδού διατομής όλων των θερμοστοιχείων, μέσω της εξίσωσης 6.1. Η μοναδική μεταβλητή που αλλάζει σ' αυτήν τη περίπτωση είναι ο αριθμός των θερμοστοιχείων. Πιο κάτω παρουσιάζεται η μέγιστη πυκνότητα ισχύος της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 7 που υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης 6.2.

Πυκνότητα Ισχύος	Αποτέλεσμα
$P_{den} [mW * cm^{-2}]$	19.69

Πίνακας 6.14: Η τιμή της μέγιστης πυκνότητας ισχύος που λαμβάνεται από τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια 7.

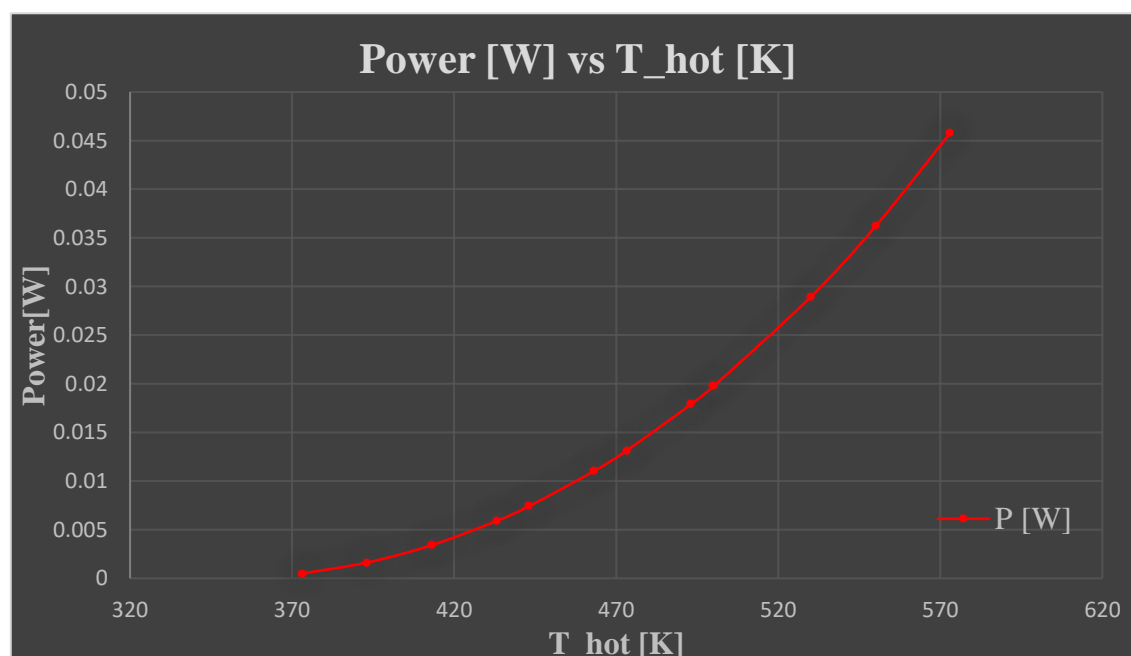
6.16.2 Σύγκριση θερμοηλεκτρική γεννήτριας από COMSOL με θερμοηλεκτρική γεννήτρια 7

Με το πέρας του χαρακτηρισμού της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 7 αποφασίζεται να πραγματοποιηθεί η σύγκριση της με τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια του μοντέλου στο COMSOL Multiphysics 5.2. Ωστόσο για να είναι εφικτή η σύγκριση επαναλαμβάνεται η συλλογή αποτελεσμάτων από το COMSOL. Συγκεκριμένα, σ' αυτή τη προσομοίωση η θερμοκρασία της ψυχρής και θερμής μεταλλικής πλάκας ανέρχεται στους 75°C (348K) και 300°C (573K) αντίστοιχα και η εξωτερική αντίσταση να ισούται με 9 Ωhms.

Πιο κάτω παρουσιάζεται ο πίνακας αποτελεσμάτων και το γράφημα ισχύος ως προς τη θερμοκρασία της θερμής πλάκας που λαμβάνονται από το υπολογιστικό εργαλείο COMSOL Multiphysics 5.2 και Excel.

T_{hot} [K]	V [V]	I [A]	P [W]
373.15	0.067	0.007	0.0005
393.15	0.121	0.013	0.0016
413.15	0.175	0.019	0.0034
433.15	0.231	0.026	0.0059
443.15	0.259	0.029	0.0074
463.15	0.315	0.035	0.0110
473.15	0.344	0.038	0.0131
493.15	0.402	0.045	0.0179
500	0.422	0.047	0.0197
530	0.510	0.057	0.0289
550	0.571	0.063	0.0362
573	0.642	0.071	0.0458

Πίνακας 6.15: Αποτελέσματα μοντέλου θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με οκτώ ζεύγη θερμοστοιχείων για θερμοκρασία ψυχρής πλάκας στους 348K, μέγιστη τιμή θερμής πλάκας 573K και εξωτερική αντίσταση 9Ωhms.



Γράφημα 6.6: Απεικόνιση του γραφήματος ηλεκτρικής ισχύος ως προς τη θερμοκρασία της θερμής πλάκας για της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με οκτώ ζεύγη θερμοστοιχείων του μοντέλου στο COMSOL Multiphysics 5.2.

Μετά την εύρεση των αποτελεσμάτων της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας του μοντέλου στο COMSOL Multiphysics 5.2, και της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 7, απαιτείται ο υπολογισμός της τυπικής απόκλισης των παραγόμενων ισχύων μέσω της εξίσωσης 4.2. Πιο κάτω παρουσιάζεται ο πίνακας με τη τιμή της τυπικής απόκλισης ισχύος των δύο θερμοηλεκτρικών γεννητριών

Τυπική Απόκλιση	Αποτέλεσμα
τ. α. [%]	72.5

Πίνακας 6.16: Η τιμή της τυπικής απόκλισης μεταξύ της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας του μοντέλου και της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 7.

6.16.3 Σφάλματα Εκτέλεσης κατά το Χαρακτηρισμό της Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 7

Τα σφάλματα που παρουσιάζονται κατά την εκτέλεση του χαρακτηρισμού της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 7 και επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα είναι τα εξής:

- Το γεγονός ότι η εκτέλεση της διαδικασίας χαρακτηρισμού της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 7 γίνεται μετά από 3 εβδομάδες, παρατηρείται αλλοίωση στα θερμοστοιχεία και στα σημεία συγκόλλησης από το flux. Η αλλοίωση φαίνεται να αύξησε την εσωτερική αντίσταση της γεννήτριας 7.
- Μη-ακριβής τοποθέτηση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 7 στο κέντρο της διάταξης θερμής και ψυχρής πλάκας με αποτέλεσμα να ασκούνται διατμητικές τάσεις στα θερμοστοιχεία και να αυξάνεται η εσωτερική αντίσταση της γεννήτριας.
- Η τοποθέτηση της ψυχρής πλάκας πάνω από τόσο μικρή γεννήτρια σε συνδυασμό την μη-ακριβή τοποθέτηση της γεννήτριας μέσα στην διάταξη, προκαλεί την δημιουργία διατμητικών τάσεων και εσωτερικών ρωγμών.
- Η θερμοκρασία της ψυχρής πλάκας είναι ασταθής με τη μέγιστη τιμή να ανέρχεται 87.8°C. Αυτό μειώνει τη θερμοκρασιακή διαφορά που υπάρχει στη θερμοηλεκτρική γεννήτρια 7, άρα μειώνει και την ηλεκτρική ισχύ που παράγεται.
- Η θερμοκρασία του νερού στο σύστημα ψύξης αυξάνεται με το πέρας του χρόνου εκτέλεσης του πειράματος λόγω της έλλειψης ψυκτικού αερίου.
- Η ποσότητα της θερμικής πάστας grizzly kryonaut που εφαρμόζεται στα Heaters Cartridge για την τοποθέτηση τους στις ειδικές οπές δεν είναι ίδια, όπως επίσης δεν είναι γνωστό ποια ποσότητα είναι η ιδανική.

- Η ποσότητα της θερμικής πάστας grizzly kryonaut στις επιφάνειες της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 7 δεν είναι ίδια, όπως επίσης δεν είναι γνωστό ποια ποσότητα είναι η ιδανική.
- Η συγκολλητική πάστα αργύρου έχει λήξη 9 μήνες πριν με αποτέλεσμα να υπάρχει μάλλον μείωση στις ηλεκτρικές ιδιότητες της κατά την αύξηση θερμοκρασίας και στις ιδιότητες συγκολλήσεις. Επιπρόσθετα, η χρήση ληγμένης πάστας μπορεί να ευθύνεται για την γρήγορη αλλοίωση των θερμοστοιχείων και συγκολλήσεων.
- Σφάλμα πολύμετρου.

6.16.4 Συμπεράσματα Χαρακτηρισμού Θερμοηλεκτρικής Γεννήτριας 7

Μέσα από τη διαδικασία χαρακτηρισμού της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 7 εκδίδονται διάφορα συμπεράσματα. Αρχικά, αποδεικνύεται ξανά ότι τα θερμοηλεκτρικά υλικά half-Heusler έχουν τη δυνατότητα να παράγουν ηλεκτρική ισχύ όταν σ' αυτά δίνεται θερμοκρασιακή διαφορά. Σ' αυτό τον χαρακτηρισμό η τιμή της ηλεκτρικής ισχύος συγκριτικά με την προσομοίωση του υπο-υποκεφαλαίου 6.16.2, φαίνεται να είναι αρκετά πιο κοντινή από τους προηγούμενους χαρακτηρισμούς των μικρότερων γεννητριών με την ανάλογη προσομοίωση. Συγκεκριμένα, η μέγιστη τιμή χαρακτηρισμού της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας 7 έχει την ίδια τάξη μεγέθους με τη τιμή της πρόβλεψης, γεγονός πολύ ενθαρρυντικό και ταυτόχρονα η τυπική απόκλιση δεν είναι πλέον πολύ μεγάλη αλλά ικανοποιητική. Ωστόσο, υπάρχουν πολλά περιθώρια προόδου.

Άλλο συμπέρασμα που προκύπτει από αυτό τον χαρακτηρισμό είναι ότι δεν πρέπει να χαρακτηρίζεται η θερμοηλεκτρική γεννήτρια αρκετό καιρό μετά την κατασκευή της, αφού η συγκεκριμένη συγκολλητική πάστα αργύρου διαβρώνει με το flux της τα θερμοστοιχεία και τις συγκολλήσεις. Ο καλύτερος χρόνος για χαρακτηρισμό των θερμοηλεκτρικών γεννητριών με αυτή την συγκολλητική πάστα είναι την ίδια ή την επόμενη μέρα. Ακόμη, για να μειωθεί το φαινόμενο της αλλοίωσης φαίνεται ότι πρέπει να χρησιμοποιείται συγκολλητική πάστα αργύρου με μικρότερη περιεκτικότητα σε flux.

Το επόμενο συμπέρασμα αφορά την θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των πλακών και συγκεκριμένα το σύστημα ψύξης. Σαφώς, το πρόβλημα μη-διατήρησης της θερμοκρασίας δεν είναι η χρήση κυλίνδρων γραφίτη αλλά η έλλειψη ψυκτικού αερίου στο σύστημα ψύξης. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι πρέπει να γίνεται τακτικός έλεγχος της δεξαμενής αποθήκευσης του αερίου, έτσι ώστε να διατηρείται η θερμοκρασία της ψυχρής πλάκας χαμηλά.

Επιπρόσθετα, είναι αναγκαία η χρήση μεταβλητής αντίστασης κατά την εκτέλεση των χαρακτηρισμών των θερμοηλεκτρικών γεννητριών, γιατί φαίνεται ότι με την προσθήκη πλάκας πάνω σε μια θερμοηλεκτρική γεννήτρια αυξάνεται η εσωτερική αντίσταση λόγω διατμητικών τάσεων που μπορεί να δημιουργηθούν. Έτσι, θα είναι δυνατή η μεταβολή της τιμής της αντίστασης έως ότου βρεθεί σε ποια αντίσταση υπάρχει η μέγιστη παραγόμενη ισχύς. Επιπλέον, η χρήση μεταβλητής αντίστασης προσδίδει την ικανότητα λήψης τιμών ισχύος ως προς την αντίσταση φορτίου και να δημιουργηθεί η σχετική καμπύλη λειτουργίας.

6.17 Χαρακτηριστικά Θερμοηλεκτρικών Γεννητριών Χαρακτηρισμού

Πιο κάτω παρουσιάζεται πίνακας με τα χαρακτηριστικά όλων των θερμοηλεκτρικών γεννητριών που χαρακτηρίστηκαν στο εργαστήριο. Συγκεκριμένα, πραγματοποιείται αναφορά στον κωδικό κάθε γεννήτριας, τον αριθμό ζευγών θερμοστοιχείων που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή τους, στη τιμή της εξωτερικής αντίστασης φορτίου που χρησιμοποιήθηκε, στη τιμή της μέγιστης παραγόμενης ισχύος και στη τιμή της μέγιστης πυκνότητας ισχύος.

Κωδικός TEG	Αριθμός Ζευγών	$R_{exter} [\Omega]$	$P_{max} [mW]$	$P_{d,max} [mW * cm^{-2}]$
TEG_4	2	1	0.027	0.168
TEG_5	2	1	0.034	0.215
TEG_6	2	1	0.025	0.160
TEG_7	8	9.1	12.60	19.690

Πίνακας 6.17: Οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες που χαρακτηρίστηκαν και τα διάφορα χαρακτηριστικά τους.

Σύμφωνα με τον πίνακα 6.17, γίνεται η παρατήρηση ότι η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς για τις θερμοηλεκτρικές γεννήτριες με δύο ζεύγη θερμοστοιχείων είναι πολύ μικρή στη τάξη του μW , γεγονός που τις καθιστά αναξιόπιστες.

Κεφάλαιο 7

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ / ΕΙΣΗΓΗΣΕΙΣ

Στην εργασία αυτή αναπτύχθηκαν λειτουργικές θερμοηλεκτρικές γεννήτριες που ήταν ικανές να χαρακτηριστούν και να παράγουν χρήσιμη ηλεκτρική ισχύ. Η μεθοδολογία μέχρι την ανάπτυξη και χαρακτηρισμό των γεννητριών συμπεριλάμβανε την ανάπτυξη μοντέλων προσομοίωσης θερμοηλεκτρικών γεννητριών, τη προετοιμασία των θερμοστοιχείων από την κατασκευή δισκίων μέχρι την κοπή τους και την εύρεση των βέλτιστων συνθηκών συγκόλλησης. Μέσα από όλες τις διαδικασίες και χαρακτηρισμούς προκύπτουν συμπεράσματα τα οποία αναλύονται στη συνέχεια. Τέλος προτείνεται μελλοντική έρευνα για βελτίωση των μεθόδων κατασκευής και χαρακτηρισμού των θερμοηλεκτρικών γεννητριών.

7.1 Συμπεράσματα Μεταπτυχιακής Εργασίας

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από το τέλος της μεταπτυχιακής εργασίας είναι ότι έχουν επιτευχθεί οι στόχοι που έχουν τεθεί αρχικά. Συγκεκριμένα, αναπτύχθηκαν χρήσιμα υπολογιστικά μοντέλα προσομοιώσεων που μπορούν να προβλέψουν με μεγάλη ακρίβεια τη παραγωγή χρήσιμης ηλεκτρικής ισχύος δεδομένης μιας θερμοκρασιακής διαφοράς και μιας εξωτερικής αντίστασης. Επιπλέον, αυτά τα μοντέλα είναι ικανά να δώσουν πληροφορία για το ρεύμα που διαπερνά τη συσκευή, την ανάπτυξη ηλεκτρικού δυναμικού στα άκρα της γεννήτρια και τέλος την κατανομή της θερμοκρασίας στον κατακόρυφο άξονα της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας. Επιπρόσθετα, ξεπεράστηκαν οι τεχνικές δυσκολίες που προαναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 4, μέσω της μελέτης των σταδίων ανάπτυξης μιας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας, όπως την ελεγχόμενη μείωση ύψους των δισκίων, την κοπή των θερμοστοιχείων σε κύβους και την εύρεση των βέλτιστων συνθηκών συγκόλλησης των επαφών. Τέλος, πραγματοποιήθηκε η κατασκευή τεσσάρων θερμοηλεκτρικών γεννητριών με δύο και οκτώ ζεύγη θερμοστοιχείων και τέλος ο χαρακτηρισμός αυτών των γεννητριών για τη παραγωγή χρήσιμης ηλεκτρικής ισχύος.

7.1.1 Συμπεράσματα Προετοιμασίας των Θερμοστοιχείων half-Heusler

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν μέσα από τις διαδικασίες της προετοιμασίας των θερμοστοιχείων half-Heusler είναι ότι πρέπει να γίνεται έλεγχος των ιδιοτήτων των θερμοστοιχείων πριν χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή θερμοηλεκτρικών γεννητριών. Συγκεκριμένα, μετά τη διαδικασία μείωσης ύψους να κόβεται ένα μικρό κομμάτι από κάθε δισκίο και να δίνεται στους μεταδιδακτορικούς ερευνητές για έλεγχο ιδιοτήτων. Έτσι, θα είναι γνωστό ότι κάθε δισκίο είναι κατάλληλο για χρήση.

Επιπρόσθετα, προκύπτει το συμπέρασμα ότι το μηχάνημα λείανσης και κοπής Accutom – 100 από τη Struers είναι πολύ χρήσιμο όσο αφορά τη μείωση ύψους και κοπής των θερμοστοιχείων. Ειδικότερα, η χρήση του τροχού λείανσης δίνει μια εξαιρετικά μικρή διακύμανση ύψους στα θερμοστοιχεία, γεγονός πολύ ενθαρρυντικό και ευχάριστο. Όσο αφορά τον διαμαντοτροχό, είναι εφικτό να πραγματοποιηθεί κοπή θερμοστοιχείων μ' αυτό, αλλά προτείνεται α=να παραγγελλθεί άλλος διαμαντοτροχός με μικρότερη διάμετρο με στόχο τη μείωση της ταλάντωσης κατά την κοπή και την δυνατότητα αύξησης της γωνιακής ταχύτητας.

7.1.2 Συμπεράσματα κατά τη Διαδικασία Κατασκευής Θερμοηλεκτρικών Γεννητριών

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν μέσα από τις διαδικασίες των κατασκευών των θερμοηλεκτρικών γεννητριών είναι αρχικά η παραγγελία καινούργιας συγκολλητικής πάστας αργύρου με στόχο να μην υπάρχει αμφιβολία για τις συγκολλητικές και ηλεκτρικές της ιδιότητες. Επιπρόσθετα, καλό είναι η καινούργια συγκολλητική πάστα να μην είναι ψηλής περιεκτικότητας σε flux για να μειωθεί το φαινόμενο της αλλοίωσης στα θερμοστοιχεία και στις συγκολλήσεις με στόχο την αποφυγή μείωσης θερμοηλεκτρικών ιδιοτήτων και αύξησης εσωτερικής αντίστασης. Επιπλέον, απαιτείται να πραγματοποιηθεί έρευνα για την βέλτιστη ποσότητα συγκολλητικής πάστας που κατά τη συγκόλληση των θερμοστοιχείων για να αποφευχθούν τυχόν βραχυκυκλώσεις αλλά ταυτόχρονα οι συγκολλήσεις να είναι καλής ποιότητας.

Επιπλέον, να πραγματοποιηθεί σχεδιασμός καινούργιων πλακών αλουμίνας όπου τα ηλεκτρόδια χαλκού της κάτω πλάκας, δηλαδή στα άκρα της γεννήτριας που πραγματοποιείται συγκόλληση ηλεκτρικών καλωδίων, να είναι μακρύτερα μέχρι το τέλος της κεραμικής πλάκας και αρκετό κεραμικό από την πάνω πλάκα να αφαιρεθεί, έτσι ώστε να φαίνονται τα ηλεκτρόδια στην κάτωψη. Έτσι, θα είναι δυνατό να πραγματοποιηθούν απευθείας και με μεγαλύτερο έλεγχο συγκολλήσεις ηλεκτρικών καλωδίων στα

ηλεκτρόδια με καλά και ηλεκτρικό κολλητήρι χωρίς να χρειάζεται η χρήση της συγκολλητικής πάστας SAC305.

Επιπρόσθετα, είναι ανάγκη να σχεδιαστεί και να κατασκευαστεί μια βάση για να εφαρμόζεται η κεραμική πλάκα των οκτώ ζευγών θερμοστοιχείων, η οποία να προσφέρει ένα ποσό πίεσης που θα βοηθήσει τις συγκολλήσεις κατά τη θέρμανση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας αλλά και την εσωτερική ηλεκτρική αντίσταση της γεννήτριας. Τέλος, καλή επιλογή σχεδιασμού βάσης είναι να μπορούν μήτρες γραφίτη με μεγαλύτερη εσωτερική διάμετρο να τοποθετηθούν σ' αυτή και να ασκείται η πίεση στο έμβολο και κατ' επέκταση στη θερμοηλεκτρική γεννήτρια. Διαφορετικά, να παραγγελθούν μήτρες και έμβολα γραφίτη μεγαλύτερης εσωτερικής διαμέτρου για να εφαρμόζεται η θερμοηλεκτρική γεννήτρια με τα οκτώ ζεύγη θερμοστοιχείων.

7.1.3 Συμπεράσματα κατά τη Διαδικασία Χαρακτηρισμού Θερμοηλεκτρικών Γεννητριών

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν μέσα από τις διαδικασίες των χαρακτηρισμών των θερμοηλεκτρικών γεννητριών είναι πρώτιστος ότι χρειάζεται μια καινούργια διάταξη χαρακτηρισμού, η οποία να λειτουργεί σε ψηλότερες θερμοκρασίες, θα τοποθετείται η θερμή πλάκα με έλεγχο και ακρίβεια πάνω στη θερμή μεριά της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας και να βρίσκεται σε προστατευμένο περιβάλλον, έτσι ώστε σε περίπτωση επιπλοκής του πειράματος να παρέχεται στον χρήστη ασφάλεια για αποφυγή ατυχήματος.

Όσο αφορά τη διάταξη χαρακτηρισμού που πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα, απαιτείται σχεδιασμός και κατασκευής εξαρτήματος που να λαμβάνει το βάρος της θερμής πλάκας, με σκοπό να μην δημιουργούνται μεγάλες θλιπτικές τάσεις ή διατμητικές τάσεις που θα προκαλέσουν τη αστοχία των θερμοηλεκτρικών γεννητριών λόγω εσωτερικών ρωγμών ή την αύξηση της εσωτερικής αντίστασης.

Ακολούθως, να γίνεται έλεγχος του εξοπλισμού της διαδικασίας χαρακτηρισμού, ειδικότερα της κατάστασης των heaters Cartridge και του συστήματος ψύξης νερού. Έτσι, ο χρήστης θα μπορεί να εκτελεί τα πειράματα με ασφάλεια, ξέροντας ότι υπάρχει η επιθυμητή θερμοκρασιακή διαφορά και ότι τα αποτελέσματα του είναι όσο το δυνατό πιο αξιόπιστα.

Τέλος, να πραγματοποιηθεί έρευνα για τη σωστή και βέλτιστη ποσότητα θερμικής πάστας που τοποθετείται στα Heaters Cartridge και στις δύο επιφάνειες των θερμοηλεκτρικών γεννητριών για να υπάρχει η καλύτερη ροή θερμότητας διαμέσου της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας.

7.2 Εισηγήσεις

Καθώς αυτή η Μεταπτυχιακή Έρευνα φτάνει το τέλος της, είναι σαφές ότι υπάρχουν πολλές ευκαιρίες για μελλοντική έρευνα. Τα πεδία τα οποία χρήζουν βελτίωση είναι αρχικά η ηλεκτρική αντίσταση επαφής των θερμοστοιχείων p & n τύπου. Συγκεκριμένα, απαιτείται αρχικά η αγορά μιας καινούργιας συγκολλητικής πάστας αργύρου, η οποία να έχει flux χαμηλότερης περιεκτικότητας και να επαναληφθούν τα πειράματα για εύρεση της βέλτιστης θερμοκρασίας συγκόλλησης με ταυτόχρονη βελτίωση των τιμών της αντίστασης επαφής.

Έπειτα, για καλύτερη κοπή των θερμοστοιχείων σε κύβους χρειάζεται η αγορά ενός διαμαντοτροχού – δίσκου κοπής, του οποίου η διάμετρος του να είναι μικρότερη από τον ήδη υπάρχον, έτσι ώστε να περιστρέφεται σε πιο ψηλές γωνιακές ταχύτητες και να μην ταλαντεύεται σε τόσο βαθμό.

Ακολούθως, χρειάζεται βελτίωση η διαδικασία κατασκευής της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας με τα δύο ζεύγη θερμοστοιχείων, με σκοπό να μειωθεί η ηλεκτρική αντίσταση της. Πιο αναλυτικά, να κατασκευαστεί μια βάση στην οποία να τοποθετείται η μήτρα γραφίτη και να ασκεί πίεση στο έμβολο που βρίσκεται πάνω από την γεννήτρια. Επιπρόσθετα, θα πρέπει η βάση που να μπορεί να χρησιμοποιηθεί και από την γεννήτρια με τα οκτώ ζεύγη θερμοστοιχείων. Όσο αφορά τον χρόνο συγκόλλησης των θερμοηλεκτρικών είναι δυνατό επιπλέον να μελετηθεί πως επηρεάζει ο χρόνος θέρμανσης της γεννήτριας την εσωτερική αντίσταση. Επιπλέον, απαιτείται ο σχεδιασμός καινούργιων κεραμικών πλακών και μ' αυτό εννοείται οι κάτω πλάκες να έχουν μακρύτερα ηλεκτρόδια στα άκρα και αρκετή κομμάτι από την άνω πλάκα να αφαιρεθεί. Έτσι θα γίνονται απευθείας και καλύτερης ποιότητας συγκολλήσεις με καλάι, χωρίς να εμποδίζεται η εφαρμογή του ηλεκτρικού κολλητηριού.

Όσο αφορά τον χαρακτηρισμό των θερμοηλεκτρικών γεννητριών, απαιτείται η επανάληψη των διαδικασιών στο καινούργιο μηχάνημα χαρακτηρισμού που αναμένεται να έρθει, γιατί σ' αυτό θα είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν οι κατάλληλες θερμοκρασίες λειτουργίας για το υλικό half-Heusler, θα εκτελούνται τα πειράματα υπο κενό, θα χρησιμοποιείται σύστημα ψύξης το οποίο θα είναι ικανό να διατηρεί την θερμοκρασία της ψυχρής πλάκας σταθερή και θα παρέχεται στον χρήστη ασφάλεια. Επιπλέον, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια μεταβλητή αντίσταση ακριβείας για να είναι γνωστή ανά πάσα στιγμή η τιμή της αντίστασης. Τελευταίο αλλά εξίσου σημαντικό είναι η μελέτη της ποσότητας της θερμικής πάστας που τοποθετείται στα διάφορα εξαρτήματα και στις κεραμικές πλάκες για την καλύτερη ροή θερμότητας διαμέσου της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας.

Βιβλιογραφία

8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Anna I. and Christian Müller, C. (2019). *Seebeck Effect - an overview / ScienceDirect Topics - 13.2 The Seebeck effect and the thermoelectric figure of merit.* [online] www.sciencedirect.com. Available at: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/seebeck-effect>.
- [2] CeramTec, T.C.E. (n.d.). *Oxide Ceramics – Aluminum Oxide (Al₂O₃).* [online] www.ceramtec.com. Available at: https://www.ceramtec.com/ceramic-materials/aluminum-oxide/?fbclid=IwAR3_I8JIAsDP4MbtSIVoEwtVYTuZITomQwqh613IDSSbmMQrDB2gtV661vk.
- [3] Costa, A., Costa, D., Morgado, J., Santos, H. and Ferreira, C. (2014). Autonomous Wireless Sensor with a Low Cost TEG for Application in Automobile Vehicles. *Procedia Engineering*, [online] 87, pp.1226–1229. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814025193>
- [4] Custom Thermoelectric, Y.T.P. (n.d.). *TXL TEG Installation | Install | Tech Info / Thermoelectric Cooling | Peltier Coolers | TEG Water Blocks TEC.* [online] customthermoelectric.com. Available at: <https://customthermoelectric.com/tech-info/install/txl-teg-installation.html>
- [5] Έλλη-Βαρβάρα, Σ. (n.d.). *Διπλωματική Εργασία “ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΓΙΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΚΑΙ ΨΥΞΗ ΚΤΗΡΙΩΝ.”* [online] . Available at: <https://dias.library.tuc.gr/view/manf/78687> σελ. 10-12 & 14-15.
- [6] Engineering ToolBox (n.d.). *Thermal Conductivity of some selected Materials and Gases.* [online] www.engineeringtoolbox.com. Available at: https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html?fbclid=IwAR259hwNUIiBOoSya6t995eWjDvtHNMf07UI_RnT2Hbr_w1tliM0Y76iQGk
- [7] Engineering Toolbox (n.d.). *Electrical Conductivity of Elements and other Materials.* [online] www.engineeringtoolbox.com. Available at: https://www.engineeringtoolbox.com/conductors-d_1381.html?fbclid=IwAR2INw14-19qq-7ImuokIfJGt942Eq1446E-FnO8WscXGv4Do2D2qy3MAIQp

- [8] Engineering Toolbox (2014). *Metals and Alloys - Densities*. [online] Engineeringtoolbox.com. Available at: https://www.engineeringtoolbox.com/metal-alloys-densities-d_50.html.
- [9] Engineering Toolbox (2017). *Melting and Boiling Points, Densities and Solubility for Inorganic Compounds in Water*. [online] Engineeringtoolbox.com. Available at: https://www.engineeringtoolbox.com/inorganic-salt-melting-boiling-point-water-solubility-density-liquid-d_1984.html.
- [10] Engineering Toolbox (n.d.). *Solids - Melting and Boiling Temperatures*. [online] www.engineeringtoolbox.com. Available at: https://www.engineeringtoolbox.com/melting-points-solids-d_148.html.
- [11] ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ - Chapter 2.1.2 Το φαινόμενο Seebeck. (n.d.). [online] . Available at: https://energy-matters.weebly.com/uploads/8/3/3/8/8338743/thesis-thermoelectric_materials-giannakis.pdf .
- [12] Ge, M., Wang, Z., Liu, L., Zhao, J. and Zhao, Y. (2018). Performance analysis of a solar thermoelectric generation (STEG) system with spray cooling. *Energy Conversion and Management*, [online] 177, pp.661–670. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890418311166#f0005>
- [13] Γρηγοριάδης, Δ. (2019a). *Πανεπιστήμιο Κύπρου - Τμήμα Μηχανικών Μηχανολογίας Και Κατασκευαστικής*. Σημειώσεις Μαθήματος : MMK417 Συστήματα Ενέργειας - Θερμοηλεκτρικά Διάλεξη 5.
- [14] Γρηγοριάδης, Δ. (2019b). *Πανεπιστήμιο Κύπρου - Τμήμα Μηχανικών Μηχανολογίας Και Κατασκευαστικής*. Σημειώσεις Μαθήματος : MMK417 Συστήματα Ενέργειας - Συμβατικές Πηγές Ενέργειας Ενεργειακό ισοζύγιο Διάλεξη 2.
- [15] <https://www.facebook.com/Applied-Thermoelectric-Solutions-LLC-305409493218531> (2018). *How Thermoelectric Generators Work | Applied Thermoelectric Solutions LLC*. [online] Applied Thermoelectric Solutions LLC. Available at: <https://thermoelectricsolutions.com/how-thermoelectric-generators-work/> .
- [16] Industries, P. (n.d.). *This Is How A Thermoelectric Module Works by ADVANCED THERMOELECTRIC (POLLOCK INDUSTRIES)*. [online]

- www.electracool.com. Available at:
<https://www.electracool.com/moduleworking.htm>
- [17] Jaziri, N., Boughamoura, A., Müller, J., Mezghani, B., Tounsi, F. and Ismail, M. (2019). A comprehensive review of Thermoelectric Generators: Technologies and common applications - Chapter 3. Common applications. *Energy Reports*. [online] Available at:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484719306997> .
- [18] Kosmann, W.J., Hansen, C.J. and Sagan, C. (2020). IAC-19-F4.1.8 The Family Portrait of the solar system: The last set of images taken by Voyager 1 and the fascinating story of how they came to be. *Acta Astronautica*, [online] 177, pp.425–437. Available at:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094576520303386#fig2> .
- [19] M. Weisse, J. (2010). *Thermoelectric Generators*. [online] large.stanford.edu. Available at:
<http://large.stanford.edu/courses/2010/ph240/weisse1/>.
- [20] Matweb (n.d.). *E-Glass Fiber, Generic - specifications*. [online] www.matweb.com. Available at:
http://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=d9c18047c49147a2a7c0b0bb1743e812.
- [21] Nour Eddine, A., Chalet, D., Faure, X., Aixala, L. and Chessé, P. (2018). Effect of engine exhaust gas pulsations on the performance of a thermoelectric generator for wasted heat recovery: An experimental and analytical investigation. *Energy*, [online] 162, pp.715–727. Available at:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544218315974>
- [22] Royale, A. and Simic, M. (2015). Research in Vehicles With Thermal Energy Recovery Systems. *Procedia Computer Science*, [online] 60, pp.1443–1452. Available at:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050915023480>
- [23] Shittu, S., Li, G., Xuan, Q., Xiao, X., Zhao, X., Ma, X. and Akhlaghi, Y.G. (2020). Transient and non-uniform heat flux effect on solar thermoelectric generator with phase change material. *Applied Thermal Engineering*, [online] 173, p.115206. Available at:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431119371364>

- [24] sites.google.com. (n.d.). *Thermoelectric materials - Smart Material*. [online] Available at: <https://sites.google.com/site/cl663lcj1/home/thermoelectric-materials> .
- [25] Thermoelectric. (2016). *Thermoelectric Module Reliability - Thermoelectric*. [online] Available at: <https://thermal.ferrotec.com/technology/thermoelectric-reference-guide/thermalref10/>.
- [26] *Powder Technology Techniques*. [online] Available at: <http://www.eng.ucy.ac.cy/kyratsi/thermoelectrics/index.html>.
- [27] Atta, R.M. (2018). Thermoelectric Cooling. *Bringing Thermoelectricity into Reality*. [online] Available at: <https://www.intechopen.com/books/bringing-thermoelectricity-into-reality/thermoelectric-cooling>.
- [28] Moser, W., Friedl, G., Aigenbauer, S., Heckmann, M. and Hofbauer, H. (n.d.). *A Biomass-Fuel based Micro-Scale CHP System with Thermoelectric Generators*. [online] . Available at: https://www.best-research.eu/files/publications/pdf/236_CP_I-1-21_Paper_Austrian_Bioenergy_Friedl_Moser.pdf.
- [29] Gao, H.B., Huang, G.H., Li, H.J., Qu, Z.G. and Zhang, Y.J. (2016). Development of stove-powered thermoelectric generators: A review. *Applied Thermal Engineering*, 96, pp.297–310
- [30] Champier, D., Bedecarrats, J.P., Rivaletto, M. and Strub, F. (2010). Thermoelectric power generation from biomass cook stoves. *Energy*, 35(2), pp.935–942.
- [31] Allouhi, A. (2019). Advances on solar thermal cogeneration processes based on thermoelectric devices: A review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 200, p.109954.
- [32] Baranowski, L.L., Snyder, G.J. and Toberer, E.S. (2012). Concentrated solar thermoelectric generators. *Energy & Environmental Science*, 5(10), p.9055
- [33] Wang, Y.T., Liu, W., Fan, A.W. and Li, P. (2013). Performance Comparison between Series-Connected and Parallel-Connected Thermoelectric Generator Systems. *Applied Mechanics and Materials*, 325-326, pp.327–331
- [34] Mpoweruk.com. (2005). *Thermoelectricity using Semiconductor Thermocouples*. [online] Available at: <https://www.mpoweruk.com/thermoelectricity.htm>.

- [35] Liang, G., Zhou, J. and Huang, X. (2011). Analytical model of parallel thermoelectric generator. *Applied Energy*, 88(12), pp.5193–5199.
- [36] Sridhar Sripadmanabhan Indira, Chockalingam Aravind Vaithilingam, Kok-Keong Chong, R. Saidur, M. Faizal, Shamsu Abubakar, Suriati Paiman, A review on various configurations of hybrid concentrator photovoltaic and thermoelectric generator system, *Solar Energy*, Volume 201, 2020, Pages 122-148, ISSN 0038-092X, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.090>.
- [37] Acar, B. and Baş, Ş., 2018. Investigation of energy generation at test system designed by use of concentrated photo-voltaic panel and thermoelectric modules. *Int. J. Renew. Energy Res*, 8, pp.1859-1867.
- [38] Angstrom Engineering (n.d.). *Magnetron Sputtering Overview*. [online] Angstrom Engineering. Available at: <https://angstromengineering.com/tech/magnetron-sputtering/#:~:text=Sputtering%20is%20a%20plasma%20based>.
- [39] Kelly, P.J. and Arnell, R.D. (2000). Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications. *Vacuum*, [online] 56(3), pp.159–172. doi:10.1016/s0042-207x(99)00189-x.
- [40] Mazumbar, D. (2007). Coherent magnetotunneling based on (001) magnesium oxide barrier. [online] Available at: https://www.researchgate.net/publication/252278154_Coherent_magnetotunneling_based_on_001_magnesium_oxide_barrier.
- [41] Adeyeye, A.O. and Shimon, G. (2015). *Chapter 1 - Growth and Characterization of Magnetic Thin Film and Nanostructures*. [online] ScienceDirect. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780444626349000011>.
- [42] Technology, R. (n.d.). *Magnetron Sputtering Deposition Technology by Royal TechnologyDirectIndustry*. [online] trends.directindustry.com. Available at: <https://trends.directindustry.com/shanghai-royal-technology-inc/project-207607-1112321.html>
- [43] Anselmi-Tamburini, U. (2021). *Spark Plasma Sintering*. [online] ScienceDirect. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128035818117308>
- [44] Chauhan, N.S., Bathula, S., Vishwakarma, A., Bhardwaj, R., Kumar Johari, K., Gahtori, B. and Dhar, A. (2018). Facile fabrication of p- and n-type

- half-Heusler alloys with enhanced thermoelectric performance and low specific contact resistance employing spark plasma sintering. *Materials Letters*, [online] 228, pp.250–253. doi:10.1016/j.matlet.2018.06.019.
- [45] Karimi-Jafari, M., Kowal, K., Ul-Haq, E. and Tofail, S.A.M. (2017). 3.22 *Spark Plasma Sintering of Lead-Free Ferroelectric Ceramic Layers*. [online] ScienceDirect. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128035818092031>
- [46] Zhu, J., Liu, F., Gong, B., Wang, X., Ao, W., Zhang, C., Li, Y., Hu, L., Xie, H., Gu, K. and Li, J. (2019). AgNi Alloy As a Suitable Barrier Layer Material for NbFeSb-Based Half-Heusler Thermoelectric Modules. *Journal of Electronic Materials*, 48(10), pp.6815–6822. doi:10.1007/s11664-019-07514-x.
- [47] Amazon (2023). *Amazon.com: Thermal Grizzly Kryonaut The High Performance Thermal Paste for Cooling All Processors, Graphics Cards and Heat Sinks in Computers and Consoles (1 Gram) : Electronics*. [online] www.amazon.com. Available at: <https://www.amazon.com/Thermal-Grizzly-Kryonaut-Grease%20Paste/dp/B011F7W3LU?th=1>.
- [48] Aswal, D.K., Basu, R. and Singh, A. (2016). Key issues in development of thermoelectric power generators: High figure-of-merit materials and their highly conducting interfaces with metallic interconnects. *Energy Conversion and Management*, [online] 114, pp.50–67. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.01.065>
- [49] Chauhan, N.S., Bathula, S., Vishwakarma, A., Bhardwaj, R., Kumar Johari, K., Gahtori, B. and Dhar, A. (2018). Facile fabrication of p- and n-type half-Heusler alloys with enhanced thermoelectric performance and low specific contact resistance employing spark plasma sintering. *Materials Letters*, [online] 228(228), pp.250–253. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.06.019> .
- [50] Chen, S. and Ren, Z. (2013). Recent progress of half-Heusler for moderate temperature thermoelectric applications. *Materials Today*, [online] 16(10), pp.387–395. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2013.09.015> .
- [51] Eutectic, C. (2023). *Features and benefits Automated dispensing Excellent wetting Ideal for automation Excellent corrosion resistance Easy flux residue removal Calm melting behavior Water soluble for easy clean-up | Castolin Eutectic*. [online] www.castolin.com. Available at: <https://www.castolin.com/product/1800-pa-brazing-paste> .

- [52] G. Mesaritis, Ioannou, I., Delimitis, A., Euripides Hatzikraniotis, Yaniv Gelbstein and Th. Kyratsi (2022). n-type (Zr,Ti)NiSn half Heusler materials via mechanical alloying: Structure, Sb-doping and thermoelectric properties. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, [online] 167, pp.110735–110735. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2022.110735> .
- [53] Ihou Mouko, H., Romanjek, K., Mejri, M., Oulfarsi, M., El Oualid, S., Malinconi, P., Thimont, Y., Malard, B., Estournès, C., David, N. and Dauscher, A. (2021). Manufacturing and performances of silicide-based thermoelectric modules. *Energy Conversion and Management*, [online] 242, p.114304. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114304> .
- [54] Joo, S.-J., Son, J.-H., Jang, J., Kim, B.-S. and Min, B.-K. (2021). Synthesis of Nb_{0.8}Hf_{0.2}FeSb_{0.98}Sn_{0.02} and Hf_{0.25}Zr_{0.25}Ti_{0.5}NiSn_{0.98}Sb_{0.02} Half-Heusler Materials and Fabrication of Thermoelectric Generators. *Korean Journal of Metals and Materials*, 59(12), pp.904–910. doi: <https://doi.org/10.3365/kjmm.2021.59.12.904>.
- [55] Li, W., Amin Nozariasbmarz, Hyun Cheol Song, Kang, H.-B., Dettor, C., Zhu, H., Bed Poudel and Shashank Priya (2021). Conformal High-Power-Density Half-Heusler Thermoelectric Modules: A Pathway toward Practical Power Generators. *OSTI OAI (U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information)*, [online] 13(45). doi: <https://doi.org/10.1021/acsami.1c16117>.
- [56] METAL INVEST, S. (2023). *Hafnium Price Today - Historical Charts & Forecast - Where to Buy*. [online] Strategic Metals Invest. Available at: <https://strategicmetalsinvest.com/hafnium-prices/>.
- [57] Nozariasbmarz, A., Saparamadu, U., Li, W., Kang, H.B., Dettor, C., Zhu, H., Poudel, B. and Priya, S. (2021). High-performance half-Heusler thermoelectric devices through direct bonding technique. *Journal of Power Sources*, [online] 493(493), p.229695. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.229695>.
- [58] Ren, Z., Lan, Y. and Zhang, Q. (2017). *Advanced Thermoelectrics*. CRC Press.
- [59] Silicon Edge (2023). *Die-Per-Wafer Estimator*. [online] www.silicon-edge.co.uk. Available at: <https://www.silicon-edge.co.uk/j/index.php/resources/die-per-wafer>.

- [60] Suryanarayana, C. (2001). Mechanical alloying and milling. *Progress in Materials Science*, [online] 46(1-2), pp.1–184. doi: [https://doi.org/10.1016/s0079-6425\(99\)00010-9](https://doi.org/10.1016/s0079-6425(99)00010-9).
- [61] University of Michigan (2020). *Four point probe - LNF Wiki*. [online] Umich.edu. Available at: https://inf-wiki.eecs.umich.edu/wiki/Four_point_probe#:~:text=A%20four%20point%20probe%20is.
- [62] Xing, Y., Liu, R., Liao, J., Zhang, Q., Xia, X., Wang, C., Huang, H., Chu, J., Gu, M., Zhu, T., Zhu, C., Xu, F., Yao, D., Zeng, Y., Bai, S., Uher, C. and Chen, L. (2019). High-efficiency half-Heusler thermoelectric modules enabled by self-propagating synthesis and topologic structure optimization. *Energy & Environmental Science*, [online] 12(11), pp.3390–3399. doi: <https://doi.org/10.1039/c9ee02228g>.
- [63] Yu, J., Xing, Y., Hu, C., Huang, Z., Qiu, Q., Wang, C., Xia, K., Wang, Z., Bai, S., Zhao, X., Chen, L. and Zhu, T. (2020). Half-Heusler Thermoelectric Module with High Conversion Efficiency and High Power Density. *Advanced Energy Materials*, [online] 10(25), pp.2000888–2000888. doi: <https://doi.org/10.1002/aenm.202000888>.
- [64] Zhang, J., Zhang, H., Wu, J. and Zhang, J. (2013). Membrane/Ionomer Proton Conductivity Measurements. *Elsevier eBooks*, [online] pp.143–170. doi: <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-53688-4.00005-x>.
- [65] Zhu, J., Liu, F., Gong, B., Wang, X., Ao, W., Zhang, C., Li, Y., Hu, L., Xie, H., Gu, K. and Li, J. (2019). AgNi Alloy As a Suitable Barrier Layer Material for NbFeSb-Based Half-Heusler Thermoelectric Modules. *Journal of Electronic Materials*, 48(10), pp.6815–6822. doi: <https://doi.org/10.1007/s11664-019-07514-x>.
- [66] Ioannou, I., Ioannou, P., Delimitis, A., Yaniv Gelbstein, Ioannis (John) Giapintzakis and Kyratsi, T. (2021). High thermoelectric performance of p-type half-Heusler (Hf,Ti)Co(Sb,Sn) solid solutions fabricated by mechanical alloying. *ALLOYS AND COMPOUNDS*, 858(858), pp.158330–158330. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.158330>.
- [67] Poon, S.J., Wu, D., Zhu, S., Xie, W., Tritt, T.M., Thomas, P. and Venkatasubramanian, R. (2011). Half-Heusler phases and nanocomposites as

emerging high-ZT thermoelectric materials. *Journal of Materials Research*, [online] 26(22), pp.2795–2802. doi: <https://doi.org/10.1557/jmr.2011.329>.

- [68] Xie, W., Weidenkaff, A., Tang, X., Zhang, Q., Poon, J. and Tritt, T. (2012). Recent Advances in Nanostructured Thermoelectric Half-Heusler Compounds. *Nanomaterials*, 2(4), pp.379–412. doi: <https://doi.org/10.3390/nano2040379>.