

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ  
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Μελέτη και ανάπτυξη συστήματος συμπαραγωγής  
θερμότητας και ηλεκτρισμού για οικιακή χρήση»



Του φοιτητή  
Κωνσταντίνου Σφενδώνη  
Αρ. Μητρώου: 52216Μ

Επιβλέπων  
Ιορδάνης Κιοσκερίδης  
Βαθμίδα .....

Ημερομηνία 01/09/2024

Τίτλος Δ.Ε. Μελέτη και ανάπτυξη συστήματος συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού για οικιακή χρήση

Κωδικός Δ.Ε. 23237

Όνοματεπώνυμο φοιτητή Κωνσταντίνος Σφενδώνης

Όνοματεπώνυμο εισηγητή Ιορδάνης Κιοσκερίδης

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. 31/08/23

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 01/09/24

*Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.*

*Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Σφενδώνη Κωνσταντίνου που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.*

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

*«Αφιερωμένη στην οικογένεια μου, στην θεία μου την Δάφνη και τον θείο μου τον Διονύση.»*

## Πρόλογος

Ολοκληρώνοντας αυτή τη διπλωματική εργασία, αισθάνομαι την ανάγκη να αναφέρω τους λόγους που με οδήγησαν στην επιλογή του θέματος. Η μελέτη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και των τεχνολογιών όπως τα συστήματα Micro-CHP ήταν κάτι που μου κέντρισε πολύ το ενδιαφέρον. Η χρήση του κινητήρα Stirling σε συνδυασμό με τη μετατροπή ενέργειας μέσω ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, όπως οι DC/DC Converters, τράβηξε την προσοχή μου λόγω των δυνατοτήτων που προσφέρει στη διαχείριση της ενέργειας. Η ενασχόληση με τα ηλεκτρονικά ισχύος και η μελέτη μετατροπής ενέργειας μέσω ηλεκτρονικών κυκλωμάτων αύξησε το ενδιαφέρον μου για το αντικείμενο. Η δυνατότητα να ελέγγω την παροχή ενέργειας με ακρίβεια και αποτελεσματικότητα ήταν ένας από τους βασικούς λόγους που επέλεξα αυτό το θέμα. Η εργασία αυτή μου έδωσε την ευκαιρία να συνδυάσω θεωρητικές γνώσεις και πρακτική εμπειρία, επεκτείνοντας τις γνώσεις μου στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, στη μετατροπή ενέργειας και τα ηλεκτρονικά ισχύος.

## Περίληψη

Στο πλαίσιο της αναζήτησης βιώσιμων μορφών ενέργειας, η έμφαση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές έχει αποκτήσει ιδιαίτερη σημασία για την αντιμετώπιση της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής. Μεταξύ των διαφόρων τεχνολογιών που συμβάλλουν σε αυτή την προσπάθεια, τα συστήματα συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού (Micro combined heat and power ή Micro-CHP) αποτελούν κάποιες από τις πολλά υποσχόμενες προοπτικές για αποκεντρωμένη και αποδοτική παραγωγή ενέργειας. Ως εκ τούτου, η παρούσα διπλωματική εργασία εμβαθύνει στην πρακτική εφαρμογή ενός τετρακύλινδρου κινητήρα Stirling σε συνδυασμό με μια γεννήτρια για τον φωτισμό μιας λάμπας και την τροφοδοσία ενός μετατροπέα DC-DC για τη φόρτιση ηλεκτρονικών συσκευών τύπου κινητού τηλεφώνου. Ειδικότερα, στόχος της παρούσας μελέτης είναι η διερεύνηση της σκοπιμότητας, της αποδοτικότητας και των πλεονεκτημάτων της χρήσης ενός κινητήρα Stirling σε ένα σύστημα συμπαραγωγής θερμικής/ηλεκτρικής ενέργειας σε μικρή κλίμακα, αλλά και η αξιολόγηση της ικανότητας ενός συστήματος Micro-CHP με κινητήρα Stirling προκειμένου να παράγει ηλεκτρική και θερμική ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές για πρακτικές εφαρμογές. Κατανοεί κανείς, επομένως, ότι η εν λόγω μελέτη αποσκοπεί στην επίδειξη της βιωσιμότητας αυτής της τεχνολογίας για την τροφοδοσία οικιακών συσκευών -που στην παρούσα περίπτωση αντιπροσωπεύεται από μια λάμπα- αλλά και στην παροχή μιας εύχρηστης πηγής για τη φόρτιση ηλεκτρονικών συσκευών, όπως τα κινητά τηλέφωνα ή άλλες οικιακές μικροσυσκευές, με την ενσωμάτωση ενός κινητήρα Stirling με μια γεννήτρια και έναν μετατροπέα DC-DC. Επιπλέον, η παρούσα μελέτη επιχειρεί να προστεθεί στον αυξανόμενο όγκο γνώσεων σχετικά με τα συστήματα Micro-CHP εστιάζοντας στην απόδοση του κινητήρα Stirling σε σενάρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μικρής κλίμακας. Επομένως, επισημαίνονται λεπτομερώς οι τεχνικές πτυχές, οι προκλήσεις και οι ευκαιρίες που σχετίζονται με την εφαρμογή κινητήρων Stirling, σε διατάξεις ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μέσω πρακτικών πειραμάτων και αναλύσεων.

# «Design and development of a combined heat and power system for residential use»

«Konstantinos Sfendonis»

## **Abstract**

In the search for viable energy sources, the focus on the production of electrical energy using renewable sources has become quite significant in order to compensate for the current climate crisis. Among various technologies that contribute toward this direction, micro combined heat and power (Micro-CHP) systems constitute a much promising technology for decentralized and efficient energy production. Therefore, this Thesis focuses on the practical application of a four-cylinder Stirling engine, combined with an electrical generator to light a lamp and to feed a DC-DC converter as a configuration that can be used for mobile phone charging. More specifically, main target of this Thesis is to study the feasibility, the efficiency, and the advantages of a Stirling engine in a small-scale heat and power generator system, as well as to evaluate the ability of a Micro-CHP system with a Stirling engine to produce electrical and thermal energy using renewable sources for practical applications. It is, hence, understood that the current study targets on demonstrating the viability of this technology for providing with energy home-oriented loads -specifically in this Thesis a lamp- and also the demonstration of a useful energy source for charging electrical appliances, such as mobile phones or other small home-gadgets, with the introduction of a Stirling engine in a power generator and with a DC-DC converter. Furthermore, this Thesis tries to contribute to the study of Micro-CHP systems, focusing on the efficiency of the Stirling engine, examining scenarios of small-scale electrical energy production. Consequently, technical details, challenges, and opportunities on the application of Stirling engines are highlighted in-detail, with a special focus on renewable energy sources, highlighted through practical experimentation and analysis.

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη συνεχή στήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Χωρίς την υποστήριξη τους, η ολοκλήρωση αυτής της εργασίας δεν θα ήταν εφικτή. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Ιορδάνη Κιοσκερίδη, για την καθοδήγησή του και τη βοήθειά του καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας. Τέλος, ευχαριστώ όλους τους φίλους και συμφοιτητές μου για την υποστήριξή τους.

# Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	iv
Περίληψη .....	v
Abstract.....	vi
Ευχαριστίες .....	vii
Περιεχόμενα .....	viii
Κατάλογος Σχημάτων .....	x
Κεφάλαιο 1ο: Η Μηχανή Stirling.....	12
1.1 Εισαγωγή .....	12
1.2 Η ιστορία των μηχανών Stirling.....	12
1.3 Εφαρμογές των μηχανών Stirling.....	3
1.4 Θερμοδυναμική των μηχανών Stirling .....	5
1.5 Κύκλος Stirling .....	5
1.6 Ταξινόμηση μηχανών Stirling.....	7
1.7 Τύποι μηχανών Stirling.....	8
1.8 Μηχανισμοί μετάδοσης κίνησης .....	11
1.8.1 Ρομβικός μηχανισμός.....	12
1.8.2 Μηχανισμός Wobble Plate .....	12
1.8.3 Μηχανισμός Slider Crank .....	13
1.8.4 Μηχανισμός Swash Plate .....	13
1.8.5 Μηχανισμός Ross-Yoke.....	14
1.8.6 Μηχανισμός Scotch-Yoke.....	15
1.9 Επίλογος.....	15
Κεφάλαιο 2ο: Σύστημα Micro-CHP .....	17
2.1 Εισαγωγή .....	17
2.2 Τεχνολογία του συστήματος Micro-CHP .....	18
2.3 Τύποι συστημάτων Micro-CHP .....	21
2.3.1 Κινητήρας Stirling για συστήματα Micro-CHP.....	21
2.3.2 Κινητήρας εσωτερικής καύσης για συστήματα Micro-CHP .....	23
2.3.3 Micro-CHP συστήματα με κυψέλες καυσίμου .....	25
2.4 Αποτελέσματα και απόδοση .....	26
2.5 Οικονομική ανάλυση .....	27
2.6 Προκλήσεις και εμπόδια .....	28

2.7	Επίλογος.....	30
Κεφάλαιο 3ο:	Πρακτικό Μέρος.....	31
3.1	Εισαγωγή .....	31
3.2	Η Μηχανή Stirling.....	32
3.2.1	DC Γεννήτρια .....	34
3.3	Διάγραμμα Block .....	36
3.4	DC/DC Buck Converter.....	36
3.4.1	DC/DC Buck Converter XL4015.....	37
3.4.2	Υλικά - Κοστολόγιο PCB.....	40
3.4.3	Schematic Diagram – PCB Layout .....	40
3.4.4	Δοκιμές DC/DC Converter.....	42
3.5	Δοκιμή μηχανής Stirling με λαμπτήρα .....	55
3.5.1	Προετοιμασία μηχανής Stirling .....	56
3.5.2	Δοκιμή μηχανής Stirling με λαμπτήρα.....	56
3.6	Αποτελέσματα πειράματος με DC/DC Converter και μηχανή Stirling .....	58
3.7	Συμπεράσματα .....	60
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	.....	61

## Κατάλογος Σχημάτων

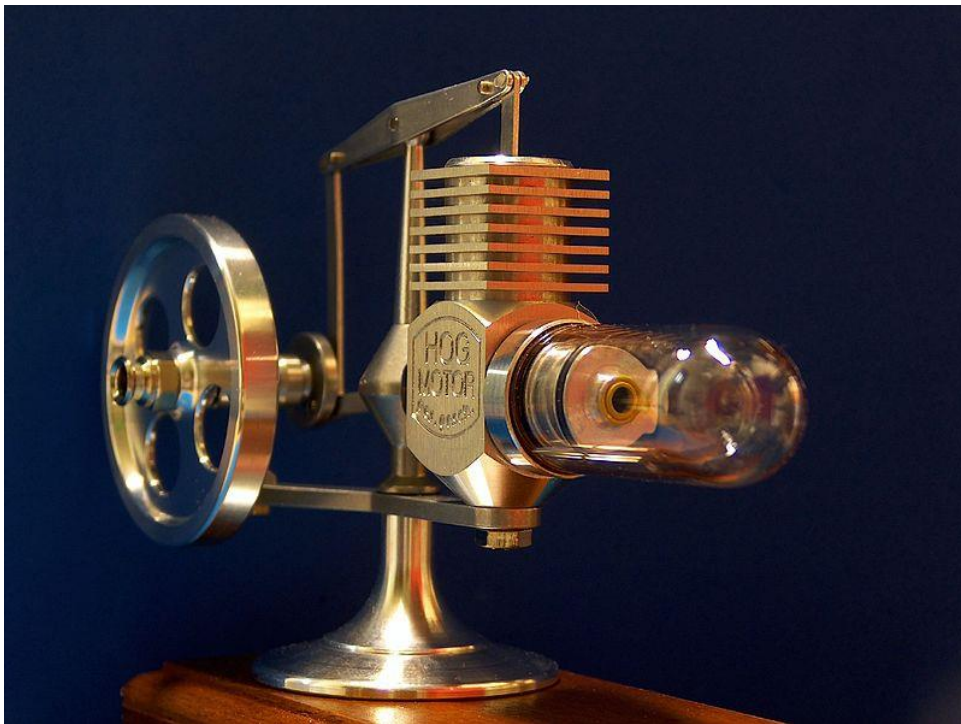
Σχήμα 1.1. Μηχανή Stirling ως έκθεμα μουσείου. ....	12
Σχήμα 1.2. Αυθεντικός κινητήρας ατμού του Robert Stirling.....	2
Σχήμα 1.3. NatGas-Dish CSP. Ηλιακός συλλέκτης της NASA εγκατεστημένος στην έρημο της Νεβάδα. .....	4
Σχήμα 1.4. Αριστερά: Διάγραμμα P-V του κύκλου Stirling. Δεξιά: Διάγραμμα T-S του κύκλου Stirling. Στα διαγράμματα σημειώνονται και οι εναλλαγές ενέργειας .....	6
Σχήμα 1.5. Διεργασίες λειτουργίας μιας μηχανής Stirling. ....	7
Σχήμα 1.6. Τύποι μηχανών Stirling (alpha, beta και gamma). ....	8
Σχήμα 1.7. Τύποι μηχανών Stirling (alpha, beta και gamma). ....	9
Σχήμα 1.8. Μηχανή Stirling τύπου Gamma. ....	10
Σχήμα 1.9. Μηχανή Stirling τύπου Alpha.....	10
Σχήμα 1.10. Μηχανή Stirling τύπου Beta. ....	11
Σχήμα 1.11. Ρομβικός μηχανισμός κίνησης κινητήρα Stirling. ....	12
Σχήμα 1.12. Μηχανισμός κίνησης Wooble Plate κινητήρα Stirling. ....	13
Σχήμα 1.13. Μηχανισμός κίνησης Slider Crank κινητήρα Stirling. ....	13
Σχήμα 1.14. Μηχανισμός κίνησης Swash Plate κινητήρα Stirling. ....	14
Σχήμα 1.15. Μηχανισμός κίνησης Ross-Yoke κινητήρα Stirling.....	14
Σχήμα 1.16. Μηχανισμός κίνησης Scotch-Yoke κινητήρα Stirling .....	15
Σχήμα 2.1. Σύστημα συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού μικρής κλίμακας (Micro-CHP). ...	18
Σχήμα 2.2. Σύστημα Micro-CHP με κινητήρα Stirling.....	19
Σχήμα 2.3. Σύστημα Micro-CHP με κινητήρα εσωτερικής καύσης. ....	19
Σχήμα 2.4. Συστοιχία κυψελών καυσίμου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα Micro-CHP σύστημα. .....	20
Σχήμα 2.5. Σύστημα Micro-CHP με κινητήρα Stirling όπου διακρίνονται όλα τα βασικά μέρη και εξαρτήματα που το απαρτίζουν (κινητήρας, εναλλάκτης, σύστημα ελέγχου, κλπ.) .....	22
Σχήμα 2.6. Σύστημα Micro-CHP με προσαρμοσμένο έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης για βιομηχανική εφαρμογή μικρής κλίμακας.....	24
Σχήμα 2.7. Κυψέλη υδρογόνου που μπορεί να προσαρμοστεί σε ένα Micro-CHP σύστημα. ....	25
Σχήμα 3.1. Φωτογραφία του συστήματος .....	31
Σχήμα 3.2. Πλάγια όψη μηχανής Stirling .....	32
Σχήμα 3.3. Επάνω όψη μηχανής Stirling .....	32
Σχήμα 3.4. Πίσω όψη μηχανής Stirling .....	33
Σχήμα 3.5. Μπροστινή όψη μηχανής Stirling .....	33
Σχήμα 3.6. DC Γεννήτρια .....	34
Σχήμα 3.7. Μέτρηση αυτεπαγωγής γεννήτριας με πηνίομετρο.....	35
Σχήμα 3.8. Μέτρηση αντίστασης γεννήτριας.....	35
Σχήμα 3.9. Διάγραμμα Block κατασκευαστικού μέρους .....	36
Σχήμα 3.10. Βασικό κύκλωμα μετατροπέα υποβιβασμού τάσης .....	36
Σχήμα 3.11. Πλακέτα PCB.....	38
Σχήμα 3.12. Πλακέτα PCB συναρμολογημένη .....	38
Σχήμα 3.13. Διάγραμμα απόδοσης - ρεύματος με βάση το datasheet.....	39

Σχήμα 3.14. Σχηματικό DC/DC Converter .....	40
Σχήμα 3.15. 2D View.....	41
Σχήμα 3.16. 3D Top View .....	41
Σχήμα 3.17 3D Bottom View .....	41
Σχήμα 3.18. Μετρήσεις με παλμογράφο στα 8V.....	42
Σχήμα 3.19. Μετρήσεις με παλμογράφο στα 10V.....	42
Σχήμα 3.20. Μετρήσεις με παλμογράφο στα 12V.....	43
Σχήμα 3.21. Μετρήσεις με παλμογράφο στα 15V.....	43
Σχήμα 3.22. Μετρήσεις με παλμογράφο στα 18V.....	44
Σχήμα 3.23. Μετρήσεις με παλμογράφο στα 20V.....	44
Σχήμα 3.24. Μετρήσεις με παλμογράφο στα 24V.....	45
Σχήμα 3.25. Μέτρηση τάσης εξόδου με παλμογράφο χωρίς φορτίο .....	45
Σχήμα 3.26. Μέτρηση ρεύματος εξόδου στα 8V.....	46
Σχήμα 3.27. Μέτρηση ρεύματος εξόδου στα 12V.....	47
Σχήμα 3.28. Μέτρηση ρεύματος εξόδου στα 15V.....	48
Σχήμα 3.29. Μέτρηση ρεύματος εξόδου στα 20V.....	49
Σχήμα 3.30. Αποτελέσματα δοκιμών με μεταβαλλόμενο τροφοδοτικό.....	50
Σχήμα 3.31. Διάγραμμα τάσης – ρεύματος.....	50
Σχήμα 3.32. Διάγραμμα τάσης – συχνότητας.....	51
Σχήμα 3.33. Διάγραμμα συχνότητας - Duty Cycle.....	51
Σχήμα 3.34. Διάγραμμα ρεύματος - Duty Cycle .....	52
Σχήμα 3.35. Δοκιμή Buck Converter με μπαταρία χωρίς φορτίο.....	52
Σχήμα 3.36. Δοκιμή Buck Converter με μπαταρία και φορτίο κινητό τηλέφωνο .....	53
Σχήμα 3.37. Ένδειξη USB Tester με μπαταρία και φορτίο.....	53
Σχήμα 3.38. Φωτογραφία θερμοκάμερας κατά την έναρξη τροφοδότησης του Buck Converter .....	54
Σχήμα 3.39. Φωτογραφία θερμοκάμερας μετά από περίπου 1 λεπτό τροφοδότησης του Buck Converter .....	54
Σχήμα 3.40. Φωτογραφία θερμοκάμερας μετά απο 3 λεπτά τροφοδότησης του Buck Converter .....	55
Σχήμα 3.41. Έναρξη λειτουργίας μηχανής Stirling.....	56
Σχήμα 3.42. Φωτογραφία συστήματος με λαμπτήρα.....	57
Σχήμα 3.43. Φωτογραφία της τάσης εξόδου της γεννήτριας με φορτίο λαμπτήρα .....	57
Σχήμα 3.44. Φλεγόμενη μηχανή Stirling .....	58
Σχήμα 3.45. Μετρήσεις εξόδου γεννήτριας εν κενό.....	58
Σχήμα 3.46. Μετρήσεις εξόδου γεννήτριας με φορτίο κινητό τηλέφωνο .....	59

# Κεφάλαιο 1ο: Η Μηχανή Stirling

## 1.1 Εισαγωγή

Θα ξεκινήσουμε την εργασία μιλώντας για τον *κινητήρα Stirling* ή την *μηχανή Stirling* (θα αναφερόμαστε σε αυτόν σε όλη την έκταση της εργασίας αδιακρίτως με οποιονδήποτε από τους δύο παραπάνω ορισμούς). Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι ο εφευρέτης του κινητήρα Stirling ήταν ο Robert Stirling (1790-1878), μια εφεύρεση που έγινε ύστερα από την ενασχόλησή του με τις ατμομηχανές και με στόχο τη βελτίωση στην απόδοσή τους. Ωστόσο, με την ανάπτυξη της μηχανής εσωτερικής καύσης και την εμφάνιση των ηλεκτρικών κινητήρων στα τέλη του 19ου αιώνα, η μηχανή Stirling έμεινε στο περιθώριο. Όμως και καθώς σήμερα υφίστανται πλέον πολύ χρήσιμες εφαρμογές, η τεχνολογία που προέρχεται από την εφεύρεση του Robert Stirling αναπτύσσεται ολοένα και περισσότερο [1]. Στο Σχήμα 1.1 βλέπουμε έναν κινητήρα Stirling.



Σχήμα 1.1. Μηχανή Stirling ως έκθεμα μουσείου.

## 1.2 Η ιστορία των μηχανών Stirling

Η μηχανή Stirling αποτελεί μια μηχανή θερμού αέρα η οποία, όπως προαναφέρθηκε, εφευρέθηκε από τον Robert Stirling (1790-1878). Ο Robert Stirling, το 1816 και σε ηλικία 26 ετών χειροτονήθηκε ιερέας της Εκκλησίας της Σκωτίας. Παρότι ιερέας, είχε συστηματική ενασχόληση και με τη μηχανική. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, και καθώς ανακάλυψε ότι οι ατμομηχανές ήταν επικίνδυνες για

τους εργάτες, πήρε την απόφαση να προσπαθήσει να αναβαθμίσει έναν υπάρχον ατμοκινητήρα. Ήλπιζε ότι θα μπορούσε να εφεύρει έναν νέο κινητήρα που θα αποτελούσε μια ασφαλέστερη και εναλλακτική επιλογή.

Ύστερα από ένα χρόνο εφηύρε έναν εναλλάκτη (regenerator). Τον ονόμασε “*Economiser*” και με τη χρήση του ο ατμοκινητήρας αύξησε αρκετά την απόδοση του. Αυτός ήταν ο πρώτος κινητήρας Stirling και είχε εύρος ισχύος από 100 W έως 4 kW. Ωστόσο, την ίδια χρονική περίοδο αναπτύσσονταν και ο κινητήρας εσωτερικής καύσης και δυστυχώς ο τελευταίος κυριάρχησε και πήρε γρήγορα τη θέση της μηχανής Stirling.

Παρόλα αυτά, το 1817 ο Robert Stirling λαμβάνει δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για τον Economizer. Η απειλή έκρηξης που είχαν οι ως τότε ατμομηχανές εξαλείφεται επειδή ο κινητήρας Stirling λειτουργούσε σε χαμηλότερη πίεση και δεν μπορούσε να δημιουργήσει καύσεις των ατμών. Το 1818, δημιουργεί την πρώτη πρακτική χρήση του κινητήρα του, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την άντληση νερού από ένα λατομείο. Στο Σχήμα 1.2 παρακάτω, φαίνεται ένας αυθεντικός κινητήρας ατμού του Robert Stirling. Όπως ήδη αναφέραμε, οι ατμομηχανές της εποχής συχνά ανατινάσσονταν λόγω της υπερβολικής πίεσης του ατμού και των ανεπαρκών υλικών με μεγάλη μηχανική αντοχή που ήταν διαθέσιμα.



Σχήμα 1.2. Αυθεντικός κινητήρας ατμού του Robert Stirling.

Λόγω του παραπάνω κινδύνου, πολλοί εφευρέτες προσπάθησαν να δημιουργήσουν μια ασφαλέστερη μηχανή. Ένας από αυτούς ήταν και ο Stirling, το αρχικό δίπλωμα ευρεσιτεχνίας του οποίου ονομαζόταν “*Economizer*”, λόγω της βελτίωσης στην κατανάλωση καυσίμου. Το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας ανέφερε επίσης τη δυνατότητα χρήσης της μηχανής Stirling σε κινητήρα. Αρκετές πατέντες κατοχυρώθηκαν αργότερα για διάφορες παραλλαγές του κινητήρα, συμπεριλαμβανομένων των εκδόσεων που λειτουργούσαν με πίεση. Αυτό το εξάρτημα αναφέρεται σήμερα συνήθως ως εναλλάκτης (regenerator) και αποτελεί προϋπόθεση για όλες τις μηχανές Stirling υψηλής ισχύος.

Η δεύτερη γενιά του κινητήρα Stirling παρουσιάστηκε πολύ αργότερα, το 1937. Η ολλανδική εταιρία Philips χρησιμοποίησε νέα υλικά και νέα τεχνολογία για να φτάσει την απόδοση του κινητήρα σε υψηλότερα επίπεδα. Οι γνώσεις που αποκτήθηκαν κατά το πέρασμα ενός αιώνα στη μεταφοράς θερμότητας και τη μηχανικής των ρευστών κατείχαν σημαντικό ρόλο για τη βελτίωση της δομής και την αύξηση της σταθερότητάς της μηχανής. Κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου και μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 1940, η θυγατρική της Philips, Johan de Witt, ανέλαβε το έργο της περαιτέρω βελτίωσης. Ο Τύπο 10 της μηχανής Stirling ολοκληρώθηκε, όπως είχε προγραμματιστεί, και ενσωματώθηκε σε μια γεννήτρια. Το σετ πέρασε από τρία πρωτότυπα (102A, B και C), με την έκδοση παραγωγής MP1002CA να αποδίδει ηλεκτρική ισχύ 200 Watt. Παρόλα αυτά, ο κινητήρας Stirling ήταν πολύ ακριβός για τις ανάγκες της αγοράς τη δεκαετία του 1950. Αν και ο MP1002CA ήταν τελικά ασύμφορος ως προς τη χρήση του, αντιπροσωπεύει το αποκορύφωμα της ανάπτυξης του κινητήρα Stirling στη σύγχρονη εποχή [2].

### 1.3 Εφαρμογές των μηχανών Stirling

Οι μηχανές Stirling έχουν λάβει μεγάλη προσοχή λόγω της ικανότητάς τους να χρησιμοποιούν μια ποικιλία εναλλακτικών πηγών ενέργειας, τοποθετώντας τους ως βιώσιμη λύση στις προκλήσεις που τίθενται για τον περιορισμό της χρήσης ορυκτών καυσίμων. Συγκεκριμένα, αυτοί οι κινητήρες αναγνωρίζονται για την υψηλή τους απόδοση και την ικανότητά τους να ανακτούν την απορριπτόμενη θερμότητα σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες. Η συνεχής ανάπτυξη των κινητήρων Stirling ακόμη και στις μέρες μας περιλαμβάνει εκτεταμένη έρευνα που επικεντρώνεται στη βελτιστοποίηση διαφόρων πτυχών όπως ο μηχανισμός κίνησης, το υγρό εργασίας, το υλικό αναγέννησης και οι διαστάσεις του κινητήρα. Αυτή η συνεχής πρόοδος αναμένεται να διευκολύνει την οικονομική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ελαχιστοποιώντας παράλληλα τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των κινητήρων Stirling, λοιπόν, είναι η ικανότητά τους για εξωτερικά ελεγχόμενη παραγωγή θερμότητας. Αυτό το χαρακτηριστικό τους τους επιτρέπει να αξιοποιούν διάφορες πηγές ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της ηλιακής ενέργειας, των ραδιοϊσοτόπων (πυρηνική ενέργεια), της βιομάζας και της γεωθερμικής ενέργειας. Πλην των πυρηνικών, όλες οι άλλες πηγές ενέργεια κατατάσσονται στις ανανεώσιμες πηγές που είναι φιλικές προς το περιβάλλον και εκ των πραγμάτων ανεξάντλητες.

Η ευελιξία των κινητήρων Stirling τους καθιστά κατάλληλους για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Οι κινητήρες Stirling χρησιμοποιούνται, για παράδειγμα, σε συστήματα παραγωγής ηλιακής ενέργειας. Οι ηλιακοί συλλέκτες χρησιμοποιούνται για την εστίαση του ηλιακού φωτός στον κινητήρα, ο οποίος στη συνέχεια μετατρέπει τη θερμική ενέργεια του ήλιου σε μηχανική και στη συνέχεια σε ηλεκτρική. Αυτή η εφαρμογή είναι ιδιαίτερα συμφέρουσα σε απομακρυσμένες περιοχές όπου τα παραδοσιακά δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας δεν είναι διαθέσιμα, ούτε μπορεί να γίνει διασύνδεση με αυτά. Σύμφωνα με έρευνα των Thombare & Verma [1], οι κινητήρες Stirling μπορούν να επιτύχουν απόδοση μετατροπής έως και 30% όταν συνδυάζονται με ηλιακούς συλλέκτες υψηλής απόδοσης. Σημειώνεται εδώ πως στα κλασικά ηλιακά πάνελ, η εν λόγω απόδοση είναι περί το 20% με 25% [3]. Επίσης, τα μοναδικά χαρακτηριστικά των κινητήρων Stirling τα καθιστούν κατάλληλα για χρήση ακόμη και σε διαστημόπλοια. Η NASA έχει ήδη εξετάσει τη χρήση τους σε αποστολές στο διάστημα λόγω της υψηλής απόδοσης και της αξιοπιστίας τους [4]. Στο Σχήμα 1.3 φαίνεται το NatGas-Dish CSP, ένας συλλέκτης ηλιακής ενέργειας που χρησιμοποιεί μηχανή Stirling για την παραγωγή ενέργειας.



Σχήμα 1.3. NatGas-Dish CSP. Ηλιακός συλλέκτης της NASA εγκατεστημένος στην έρημο της Νεβάδα.

Οι γεννήτριες ραδιοϊσοτόπων Stirling μπορούν να μετατρέψουν τη θερμότητα από ραδιενεργό υλικό σε αποσύνθεση σε ηλεκτρική ενέργεια, παρέχοντας μια σταθερή πηγή ενέργειας για αποστολές μεγάλης διάρκειας. Επιπλέον, οι μηχανές Stirling χρησιμοποιούνται σε θαλάσσια σκάφη και υποβρύχια (στρατιωτικές εφαρμογές), όπου η αθόρυβη λειτουργία και η υψηλή απόδοση τους είναι παραπάνω από απαραίτητες. Για παράδειγμα, τα υποβρύχια του Σουηδικού Ναυτικού χρησιμοποιούν κινητήρες Stirling για να επεκτείνουν σημαντικά την υποβρύχια αντοχή χρησιμοποιώντας υγρό οξυγόνο και καύσιμο ντίζελ για την παραγωγή ενέργειας, ενώ και στον αγροτικό τομέα, οι μηχανές Stirling χρησιμοποιούνται για αρδευτικούς σκοπούς, εφόσον μπορούν να τροφοδοτούνται από διάφορες πηγές θερμότητας που είναι διαθέσιμες στα αγροκτήματα, όπως η βιομάζα ή η ηλιακή ενέργεια, προσφέροντας μια βιώσιμη και οικονομικά αποδοτική λύση για την άντληση νερού από γεωτρήσεις ή από άλλες παρακείμενες πηγές (ποτάμια, λίμνες, κλπ.).

Δεν θα πρέπει να παραληφθεί, από την άλλη, πως οι κινητήρες Stirling χρησιμοποιούνται, επιπροσθέτως, σε συστήματα ψύξης, καθώς μπορούν να λειτουργήσουν ως αντλίες θερμότητας, παρέχοντας ψύξη. Μεταφέροντας, δηλαδή, τη θερμότητα από το ένα μέρος στο άλλο. Αυτή η εφαρμογή είναι ενεργειακά αποδοτική και μπορεί να τροφοδοτηθεί από απορριπτόμενη θερμότητα ή ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Τέλος, οι εν λόγω κινητήρες έχουν κι άλλες πιθανές εφαρμογές, όπως για παράδειγμα: α) Σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής πυρηνικών αντιδραστήρων, αφού μπορούν να μετατρέψουν τη θερμική ενέργεια από τις πυρηνικές αντιδράσεις σε ηλεκτρική ενέργεια με υψηλή απόδοση, συμβάλλοντας στη συνολική ενεργειακή παραγωγή του εργοστασίου, ενώ παράλληλα ενισχύουν την ασφάλεια και την αξιοπιστία των εν λόγω εγκαταστάσεων [5]. β) Στην αυτοκινητοβιομηχανία, παρέχοντας πρόσθετη ισχύ σε ηλεκτρικά ή υβριδικά οχήματα, βελτιώνοντας τη συνολική απόδοση του οχήματος και μειώνοντας την εξάρτηση από συμβατικούς κινητήρες εσωτερικής καύσης.

Η προσαρμοστικότητα και η αποτελεσματικότητα των κινητήρων Stirling τους καθιστούν μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για πολυδιάστατες εφαρμογές σε διαφορετικούς τομείς της μηχανικής.

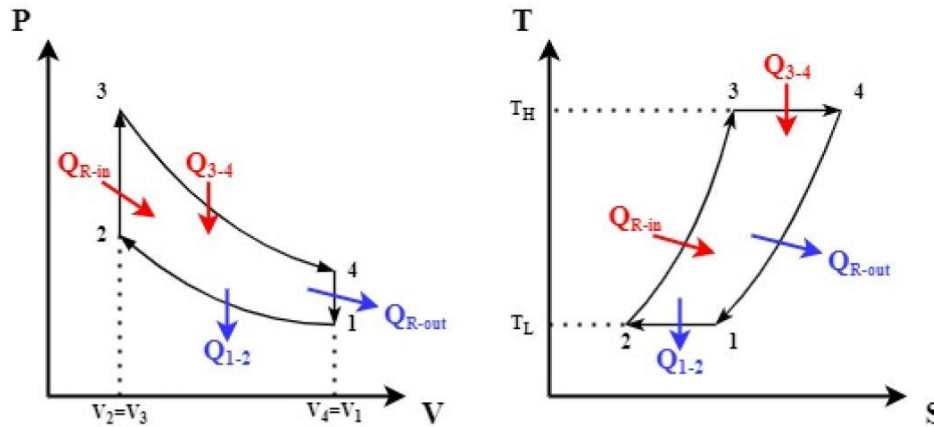
Η ικανότητά τους να χρησιμοποιούν πολλαπλές πηγές ενέργειας και να ανακτούν την απορριπτόμενη θερμότητα ευθυγραμμίζεται με την παγκόσμια στροφή προς λύσεις βιώσιμων και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας υψηλής αποδοτικότητας. Οπότε, καθώς η έρευνα και η ανάπτυξη συνεχίζονται, οι κινητήρες Stirling αναμένεται να διαδραματίσουν κρίσιμο ρόλο στη μετάβαση σε ένα πιο βιώσιμο ενεργειακό μέλλον.

#### 1.4 Θερμοδυναμική των μηχανών Stirling

Η βασική αρχή του κύκλου Stirling βασίζεται στη συμπίεση ενός ψυχρού ρευστού και τη διαστολή ενός θερμού ρευστού. Η θερμότητα μετατρέπεται σε έργο καθ' όλη τη διάρκεια αυτών των δύο διεργασιών, επειδή το ποσό του έργου που απαιτείται για τη συμπίεση είναι μικρότερο από το ποσό του έργου που προέρχεται από τη διαστολή. Ο κύκλος αποτελείται από δύο λειτουργίες σταθερής θερμοκρασίας (ισόθερμες μεταβολές) και δύο λειτουργίες σταθερού όγκου (ισόχωρες μεταβολές). Ένας θερμαντήρας παρέχει θερμότητα στο σύστημα και η θερμότητα αυτή απομακρύνεται από έναν άλλο εναλλάκτη θερμότητας, γνωστό ως ψύκτη. Η θερμότητα που απαιτείται για την παραγωγή έργου παρέχεται από μια εξωτερική πηγή θερμότητας, όπως ο άνθρακας ή το φυσικό αέριο μέσω καύσης, η ηλιακή ενέργεια ή η πυρηνική ενέργεια. Η εν λόγω εξωτερική πηγή θερμότητας βρίσκεται εκτός του κινητήρα και ο κύκλος είναι συνεχής. Για το λόγο αυτό, οι κινητήρες Stirling εντάσσονται στον και εξετάζονται από τον τομέα των κινητήρων εξωτερικής καύσης [6].

#### 1.5 Κύκλος Stirling

Χρησιμοποιώντας ως βάση τον κύκλο Carnot, σημειώνουμε πως οι ισεντροπικές διεργασίες συμπίεσης και διαστολής του εν λόγω κύκλου αντικαθίστανται από διεργασίες αναγέννησης σταθερού όγκου (ισόχωρες) στον κύκλο Stirling. Η μεταφορά θερμότητας πραγματοποιείται σε κάθε στάδιο του κύκλου Stirling με τις διεργασίες αναγέννησης. Η θερμότητα του ρευστού αποθηκεύεται στον αναγεννητή κατά τη διάρκεια των διεργασιών αναγέννησης και χρησιμοποιείται για τη θέρμανση του ψυχρού ρευστού ξανά στο επόμενο στάδιο του κύκλου. Ο αναγεννητής είναι επίσης γνωστός ως αντίστροφη συσκευή μεταφοράς θερμότητας. Οι αναγεννητές κατασκευάζονται συνήθως από κεραμικό πλέγμα, σύρμα ή πορώδες υλικό υψηλής θερμικής μάζας. Ο όγκος διαστολής (ζώνη υψηλής θερμοκρασίας) ορίζεται στη μία πλευρά του αναγεννητή και ο όγκος συμπίεσης (ζώνη χαμηλής θερμοκρασίας) ορίζεται στην άλλη πλευρά. Στο Σχήμα 1.4 απεικονίζονται τα διαγράμματα P-V (αριστερά) και T-S (δεξιά) του κύκλου Stirling. Η περιοχή κάτω από το διάγραμμα P-V αντιπροσωπεύει το καθαρό έργο που μπορεί να παραχθεί και η περιοχή κάτω από το διάγραμμα T-S αντιπροσωπεύει τη μεταφορά θερμότητας κατά τη διάρκεια ενός κύκλου [7].



Σχήμα 1.4. Αριστερά: Διάγραμμα P-V του κύκλου Stirling. Δεξιά: Διάγραμμα T-S του κύκλου Stirling. Στα διαγράμματα σημειώνονται και οι εναλλαγές ενέργειας.

Αναλυτικότερα, η διαδικασία του κύκλου Stirling αποτελείται από τα ακόλουθα τέσσερα βήματα, σύμφωνα με την εργασία [7]:

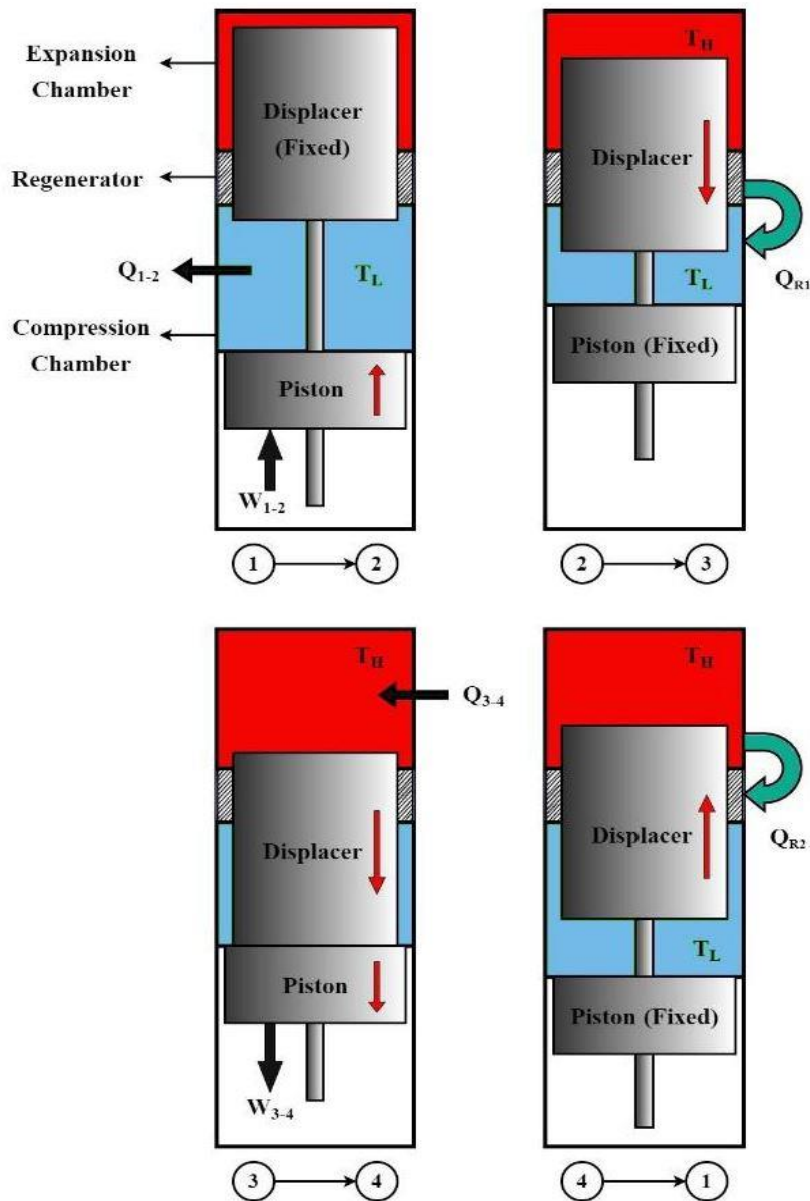
- **1-2 Ισόθερμη συμπίεση:** Η αύξηση της θερμοκρασίας που προκαλείται από τη συμπίεση διατηρείται με ψύξη του συστήματος.
- **2-3 Ισόχωρη αναγέννηση:** Η θερμότητα μεταφέρεται από τον αναγεννητή στο ρευστό σε χαμηλή θερμοκρασία.
- **3-4 Ισόθερμη διαστολή:** Η αυξημένη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της διαστολής διατηρείται σταθερή με την εισαγωγή θερμότητας από το εξωτερικό του συστήματος.
- **4-1 Ισόχωρη αναγέννηση:** Η θερμότητα μεταφέρεται από το εργαζόμενο ρευστό υψηλής θερμοκρασίας στον αναγεννητή.

Με αναφορά στο Σχήμα 1.5 που ακολουθεί [8] αλλά και στον κύκλο λειτουργίας του Σχήμα 1.4, το έμβολο του εκτονωτή παραμένει στο άνω νεκρό σημείο κατά τη διάρκεια της φάσης 1-2 της ισόθερμης συμπίεσης. Το μεγαλύτερο μέρος του ρευστού βρίσκεται σε χαμηλή θερμοκρασία στη ζώνη συμπίεσης,  $T_L$ . Το έμβολο ισχύος συμπιέζει το ρευστό στο κάτω νεκρό σημείο κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας και το σύστημα ψύχεται για να διατηρηθεί η  $T_L$ . Άλλωστε, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η περιοχή κάτω από το διάγραμμα P-V στο Σχήμα 1.4 αντιπροσωπεύει το έργο συμπίεσης  $W_{1-2}$ .

Το έμβολο ισχύος είναι ακίνητο στο άνω νεκρό σημείο του κυλίνδρου κατά τη διάρκεια της φάσης ισόχωρης αναγέννησης 2-3. Το ρευστό μετατοπίζεται από τη ζώνη συμπίεσης στη ζώνη διαστολής καθώς το έμβολο εκτόνωσης στο άνω νεκρό σημείο κατεβαίνει. Η θερμοκρασία στην περιοχή συμπίεσης είναι χαμηλή ( $T_L$ ), ενώ η θερμοκρασία στην περιοχή διαστολής είναι υψηλή ( $T_H$ ). Παρά το γεγονός ότι κατά τη διαδικασία αυτή δεν παράγεται έργο, μεταφέρεται θερμότητα από τον αναγεννητή στο ρευστό χαμηλής θερμοκρασίας.

Τόσο το έμβολο ισχύος όσο και το έμβολο εκτονωτή κινούνται ταυτόχρονα προς τα κάτω κατά τη διάρκεια της 3-4 ισόθερμης φάσης διαστολής. Το μεγαλύτερο μέρος του ρευστού στη ζώνη διαστολής είναι πολύ θερμό ( $T_H$ ). Για τη διατήρηση αυτής της υψηλής θερμοκρασίας παρέχεται θερμότητα από εξωτερική πηγή, όπως σημειώνεται στο Σχήμα 1.5. Το έργο διαστολής ( $W_{3-4}$ ) που προκύπτει είναι το άθροισμα του έργου συμπίεσης ( $W_{1-2}$ ) και του καθαρού έργου ( $W_{net}$ ).

Το έμβολο ισχύος παραμένει στο κάτω νεκρό σημείο του κυλίνδρου κατά τη διάρκεια του ισόχωρου βήματος αναγέννησης 4-1. Το ρευστό μετατοπίζεται από τη ζώνη διαστολής στη ζώνη συμπίεσης καθώς το έμβολο εκτόνωσης στο κάτω νεκρό σημείο ανεβαίνει. Η θερμοκρασία στην περιοχή συμπίεσης είναι χαμηλή ( $T_L$ ), ενώ η θερμοκρασία στην περιοχή διαστολής είναι υψηλή ( $T_H$ ). Σε αντίθεση με τη διαδικασία 2-3, εδώ δεν καταναλώνεται έργο, αλλά μεταφέρεται θερμότητα από το υψηλής θερμοκρασίας ρευστό στον αναγεννητή.



Σχήμα 1.5. Διαργασίες λειτουργίας μιας μηχανής Stirling.

## 1.6 Ταξινόμηση μηχανών Stirling

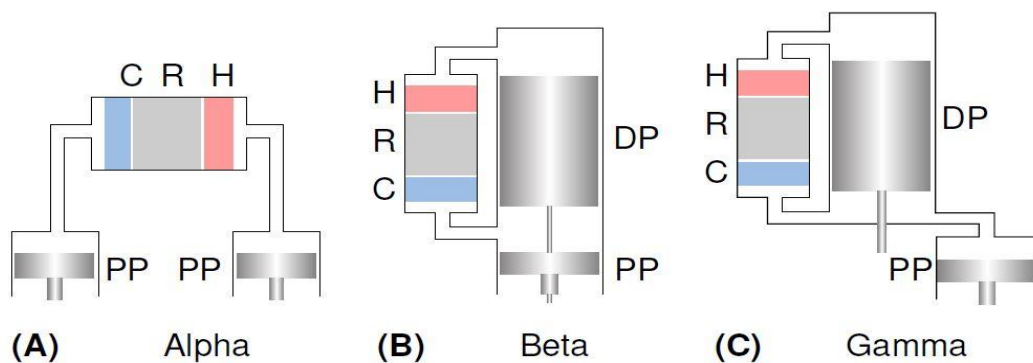
Οι μηχανές Stirling ταξινομούνται με βάση τις μηχανικές τους διαμορφώσεις ή τις αρχές λειτουργίας τους. Σε γενικές γραμμές, οι συνήθως χρησιμοποιούμενες κατηγορίες είναι τρεις και πιο

συγκεκριμένα: α) οι κινηματικές μηχανές Stirling (τύπος Alpha), β) οι μηχανές Stirling ελεύθερων εμβόλων (τύπος Beta) και γ) οι μηχανές Stirling διπλής δράσης (τύπος Gamma). Θα δούμε πιο αναλυτικά τον κάθε μηχανισμό στην επόμενη ενότητα αλλά εδώ γίνεται μια προκαταρκτική αναφορά.

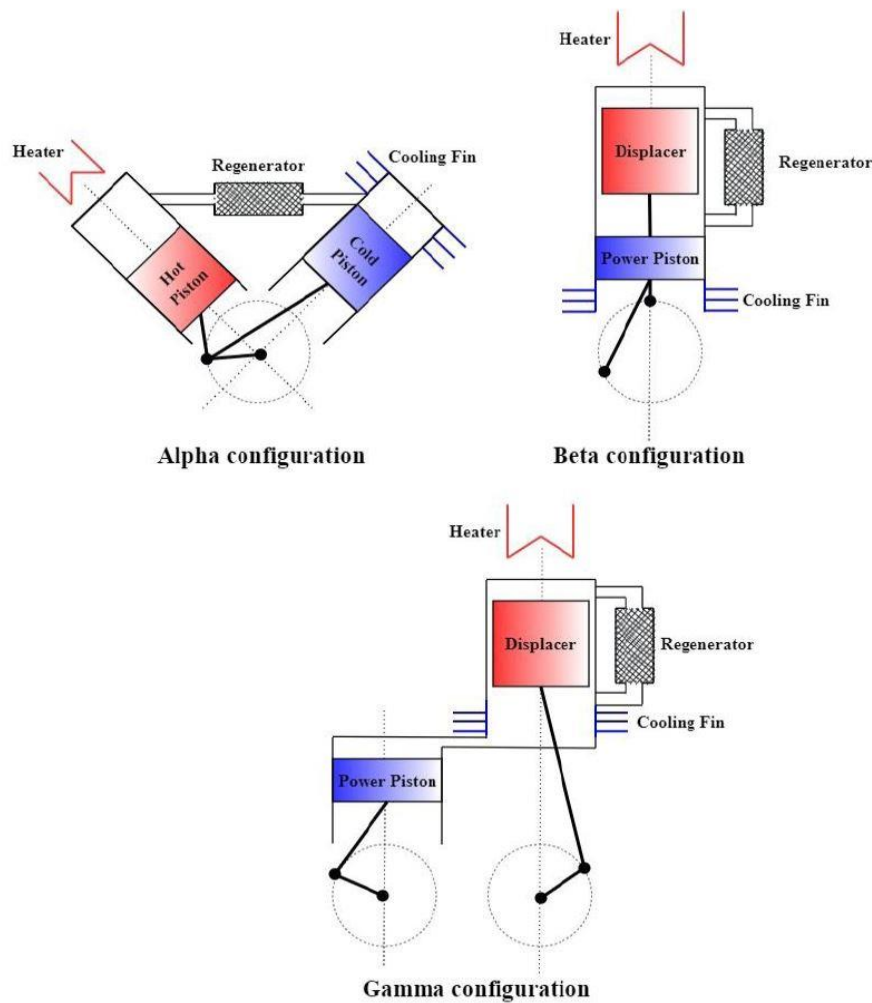
Στις κινηματικές μηχανές Stirling, μηχανικοί σύνδεσμοι συνδέουν τον στροφαλοφόρο άξονα, το έμβολο ισχύος και το έμβολο εκτόνωσης, περιορίζοντας έτσι την κίνησή τους. Διάφοροι μηχανισμοί μεταδίδουν τις κινήσεις των εμβόλων στον σφόνδυλο, όπως ο ολισθαίνων στρόφαλος, ο ρόμβος, η πλάκα Swash Plate ή ο μηχανισμός Ross-Yoke. Αντίθετα, στις μηχανές Stirling με ελεύθερο έμβολο, το έμβολο ισχύος και το έμβολο εκτόνωσης κινούνται στον ίδιο κύλινδρο με συγκεκριμένη διαφορά φάσης, χωρίς άμεση μηχανική σύνδεση. Η κίνηση που προκαλείται από τις μεταβολές της πίεσης μεταφέρεται συνήθως σε έναν γραμμικό εναλλάκτη από το έμβολο ισχύος στις εν λόγω μηχανές [9].

### 1.7 Τύποι μηχανών Stirling

Οι κινητήρες Stirling χωρίζονται σε τρεις τύπους με βάση την κινηματική τους διάταξη και πιο συγκεκριμένα στους τύπους: *Άλφα* (Alpha), *Βήτα* (Beta) και *Γάμμα* (Gamma) [10]. Οι τρεις τύποι φαίνονται στο Σχήμα 1.6 καθώς και στο Σχήμα 1.7. Θα αναφερόμαστε με τα αγγλικά τους ονόματα καθ' όλη την έκταση του κεφαλαίου. Σε γενικές γραμμές, η διάταξη Alpha είναι η πιο απλή και συμπαγής. Η διάταξη Beta αποτελείται από μια ομοαξονική διάταξη ενός εμβόλου και ενός εκτονωτή, η οποία, όμως, πολλές φορές παρουσιάζει προβλήματα στεγανοποίησης. Η διάταξη Gamma είναι η παλαιότερη και μεγαλύτερη σε όγκο, με δύο ξεχωριστούς χώρους εργασίας που εισάγουν νεκρό όγκο, επηρεάζοντας τη θερμοκρασία διαστολής και την απόδοση του κινητήρα. Θα αφιερώσουμε μία παράγραφο παρακάτω για να μιλήσουμε πιο ειδικά για κάθε τύπου μηχανής Stirling.



Σχήμα 1.6. Τύποι μηχανών Stirling (alpha, beta και gamma).



Σχήμα 1.7. Τύποι μηχανών Stirling (alpha, beta και gamma).

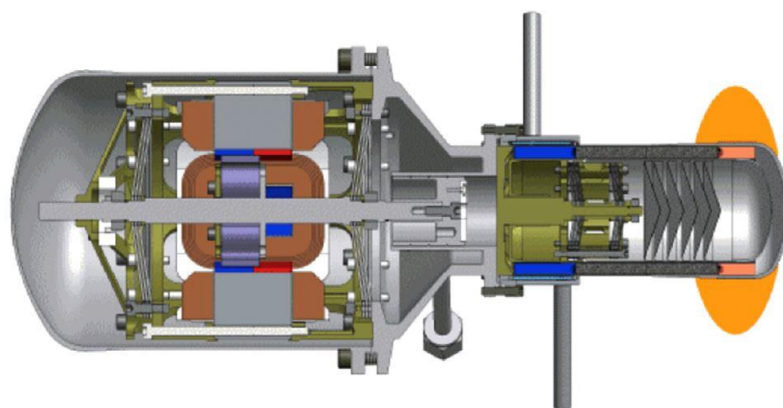
Ξεκινάμε την περιγραφή από τους κινητήρες τύπου Beta. Ένας τέτοιος κινητήρας είναι μια διάταξη με ένα ενιαίο σύστημα κυλίνδρων, έναν εκτονωτή και ένα έμβολο ισχύος συνδεδεμένα σε ένα σύστημα. Ο κινητήρας Beta είναι εν γένει η πιο δύσκολη διάταξη που μπορεί να κατασκευαστεί. Η ισχύς παράγεται από τη συνεργασία των δύο εμβόλων. Βέβαια, αυτή η διαμόρφωση έχει προβλήματα στεγανοποίησης, αλλά έχει τα πλεονεκτήματα της συμπαγούς κατασκευής, του λιγότερου νεκρού σημείου και της επικάλυψης του όγκου [10].

Ο κινητήρας Gamma μοιάζει πολύ με τον κινητήρα Beta, καθώς η ισχύς παράγεται με τον ίδιο τρόπο. Η μόνη διαφορά είναι ότι τα δύο έμβολα κινούνται σε διαφορετικούς κυλίνδρους. Αυτή η διάταξη έχει μεγάλο νεκρό όγκο και μικρότερο λόγο συμπίεσης, αλλά είναι συνήθως απλούστερη μηχανικά και χρησιμοποιείται σε πολυκύλινδρους κινητήρες Stirling [10].



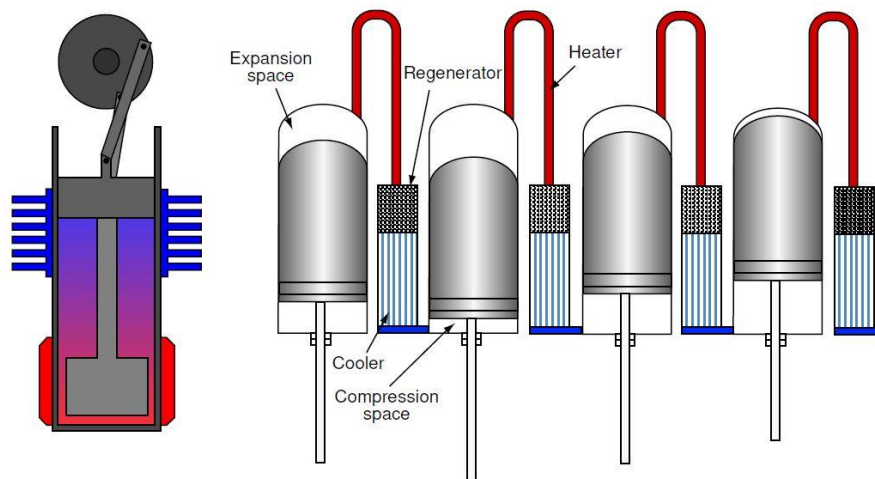
Σχήμα 1.8. Μηχανή Stirling τύπου Gamma.

Οι κινητήρες Stirling ελεύθερων εμβόλων (τύπου Alpha) είναι μηχανικά απλούστεροι από τους κινηματικούς κινητήρες Stirling, επειδή δεν υπάρχει άμεση σύνδεση μεταξύ του εμβόλου εκτόνωσης και του εμβόλου ισχύος. Ως προς τη δομή των κυλίνδρων, οι κινητήρες ελεύθερου εμβόλου είναι παρόμοιοι με τους κινητήρες Stirling τύπου Beta, με ένα ελεύθερα κινούμενο έμβολο εκτονωτή και ένα έμβολο ισχύος που συνδέεται με έναν γραμμικό εναλλάκτη. Η εξωτερική επιφάνεια του κυλίνδρου λειτουργεί ως θερμαντήρας, ψύκτης και αναγεννητής. Αυτός ο τύπος κινητήρα παρέχει παρατεταμένη λειτουργία με ελάχιστη μετακίνηση των εξαρτημάτων, με αποτέλεσμα χαμηλή φθορά και συντήρηση. Ο σχεδιασμός εξαλείφει τα ζητήματα που σχετίζονται με τη διαρροή του υγρού, επειδή ο όγκος εργασίας είναι μια ενιαία κλειστή μονάδα. Σε αυτούς τους κινητήρες, η χρήση εύκαμπτων δακτυλίων μειώνει την τριβή και τη φθορά, βελτιώνοντας παράλληλα τη στεγανοποίηση. Από την άλλη πλευρά, η γραμμική ισχύς εξόδου είναι λιγότερο κατάλληλη για εφαρμογές όπως οι αντλίες και οι συμπιεστές. Επιπλέον, οι ταλαντώσεις των κινούμενων μερών δεν μπορούν να ρυθμιστούν μηχανικά και καθορίζονται από τις αλληλεπιδράσεις του συστήματος [10].



Σχήμα 1.9. Μηχανή Stirling τύπου Alpha.

Τέλος, σημειώνουμε πως στους κινητήρες διπλής δράσης μόνο οι ράβδοι του εμβόλου συνδέονται με το εξωτερικό περιβάλλον, ελαχιστοποιώντας με αυτόν τον τρόπο τις διαρροές υγρών εργασίας. Το ολικό έργο σε αυτούς τους κινητήρες κατανέμεται θερμοδυναμικά μεταξύ των τεσσάρων κυλίνδρων, καθένας από τους οποίους λειτουργεί με διαφορά φάσης 90 μοιρών. Αυτό σημαίνει ότι οι διεργασίες συμπίεσης και διαστολής λαμβάνουν χώρα σε διαφορετικούς χρόνους στους τέσσερις κυλίνδρους σε κάθε κύκλο. Η διαμόρφωση τύπου Alpha, με τέσσερις κυλίνδρους, είναι η πιο συνηθισμένη μεταξύ των κινητήρων Stirling διπλής ενέργειας [10].



Σχήμα 1.10. Μηχανή Stirling τύπου Beta.

Στα Σχήματα 1.8-1.10 βλέπουμε διάφορους κινητήρες Stirling κάθε τύπου, σύμφωνα με όσα είπαμε στις προηγούμενες παραγράφους.

## 1.8 Μηχανισμοί μετάδοσης κίνησης

Για τον έλεγχο της κίνησης στις κινηματικές μηχανές Stirling χρησιμοποιούνται διάφοροι μηχανισμοί κίνησης, όπως οι ρομβικοί μηχανισμοί, οι μηχανισμοί Wobble Plate, Slider Crank, Swash Plate, Ross-Yoke και Scotch-Yoke. Τα πλάτη και οι φάσεις των κινήσεων του εμβόλου ισχύος και του εμβόλου εκτόνωσης καθορίζονται από αυτούς τους μηχανισμούς. Κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης του κινητήρα Stirling έχουν αναπτυχθεί διάφοροι μηχανισμοί κίνησης για την αντιμετώπιση ζητημάτων όπως το υψηλό κόστος, η φθορά, οι κραδασμοί, ο θόρυβος, η στεγανοποίηση, η λίπανση και η ανισορροπία. Ο στόχος είναι να βελτιωθεί η απόδοση ισχύος και η αποδοτικότητα με την αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων μέσω διαφόρων μηχανισμών [11]. Παρακάτω, περιγράφονται σύντομα οι μηχανισμοί κίνησης που αναφέρθηκαν καθώς έχουν αντίκτυπο στην πορεία της εργασίας. Η σειρά περιγραφής δεν αντιστοιχίζεται με ούτε με τα πλεονεκτήματα κάθε μηχανισμού, ούτε με την χρονολογία εμφάνισης παρά είναι τυχαία. Οι εν λόγω μηχανισμοί αναλύονται πιο αναλυτικά στην εργασία [11].

### 1.8.1 Ρομβικός μηχανισμός

Ο *Meijer* εφηύρε τον ρομβικό μηχανισμό κίνησης το 1953 και χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από την Philips το 1954 για τους κινητήρες Stirling. Ο μηχανισμός αυτός είναι εξοπλισμένος με δύο γρανάζια, έναν μηχανισμό ράβδου και έναν στροφαλοφόρο άξονα. Δημιουργείται διαφορά φάσης 90° με τη σύνδεση της ράβδου του εμβόλου ισχύος στον άνω σύνδεσμο και της ράβδου του εμβόλου εκτονωτή στον κάτω σύνδεσμο. Αυτός ο σχεδιασμός μειώνει τις πλευρικές δυνάμεις, τους κραδασμούς και τα προβλήματα στεγανοποίησης, ενώ παράλληλα συρρικνώνει τις διαστάσεις του κινητήρα. Επιτρέπει τη λειτουργία με υψηλότερη πίεση για αυξημένη παραγωγή ισχύος. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολυκύλινδρους κινητήρες καθώς και σε μονοκύλινδρους κινητήρες Stirling τύπου Beta. Στο Σχήμα 1.11 φαίνονται μερικοί ρομβικοί μηχανισμοί πρακτικών υλοποιήσεων σε κινητήρα Stirling.



Σχήμα 1.11. Ρομβικός μηχανισμός κίνησης κινητήρα Stirling.

### 1.8.2 Μηχανισμός Wobble Plate

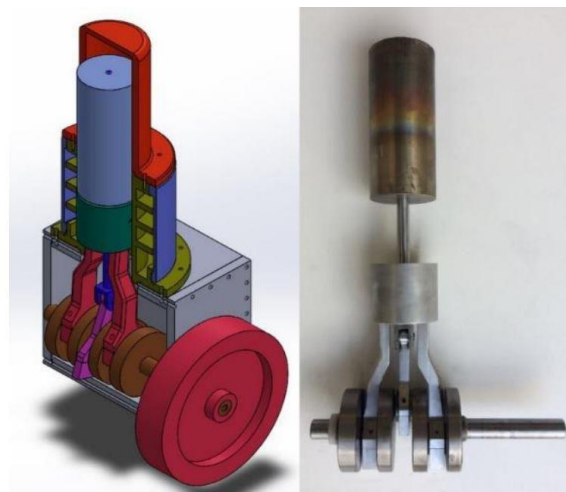
Ο μηχανισμός Wobble Plate χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από τη Siemens για τους κινητήρες Stirling το 1860 και αποτελείται από δύο έμβολα δίπλα-δίπλα που συνδέονται με έναν μηχανισμό ταλάντωσης. Οι ράβδοι σύνδεσης των εμβόλων και στα δύο άκρα κινούνται καθώς αυτός ο μηχανισμός ταλαντώνεται. Βρίσκεται σε κινητήρες διπλής ενέργειας Stirling, καθώς και σε συμπιεστές και κινητήρες εσωτερικής καύσης. Το κύριο πλεονέκτημα είναι το χαμηλό κόστος. Αντιθέτως, βασικό μειονέκτημα είναι η πιθανότητα υψηλών φθορών και τριβής λόγω προβλημάτων λίπανσης. Στο Σχήμα 1.12 φαίνεται ο μηχανισμός κίνησης Wobble Plate.



Σχήμα 1.12. Μηχανισμός κίνησης Wooble Plate κινητήρα Stirling.

### 1.8.3 Μηχανισμός Slider Crank

Ο μηχανισμός κίνησης με συρόμενο στρόφαλο (Slider Crank) χρησιμοποιείται σε κινητήρες εσωτερικής καύσης και σε κινητήρες Stirling. Ο μηχανισμός αυτός στηρίζει το έμβολο εκτονωτή μέσω της ράβδου του εμβόλου ισχύος, ελαχιστοποιώντας τις δυνάμεις αντιστάσεων. Παρόλα αυτά, η ταλαντευόμενη κίνηση του εμβόλου ισχύος που προκαλείται από τη ράβδο σύνδεσης αυξάνει τις πλευρικές δυνάμεις τριβής. Η σύνδεση των εμβόλων στον ίδιο άξονα της ράβδου απλοποιεί την κατασκευή, αλλά περιπλέκει την εξισορρόπηση στις μηχανές Stirling τύπου Alpha και Gamma με κυλίνδρους διατεταγμένους σε σχήμα V. Στο Σχήμα 1.13 φαίνεται ο μηχανισμός κίνησης Slider Crank.

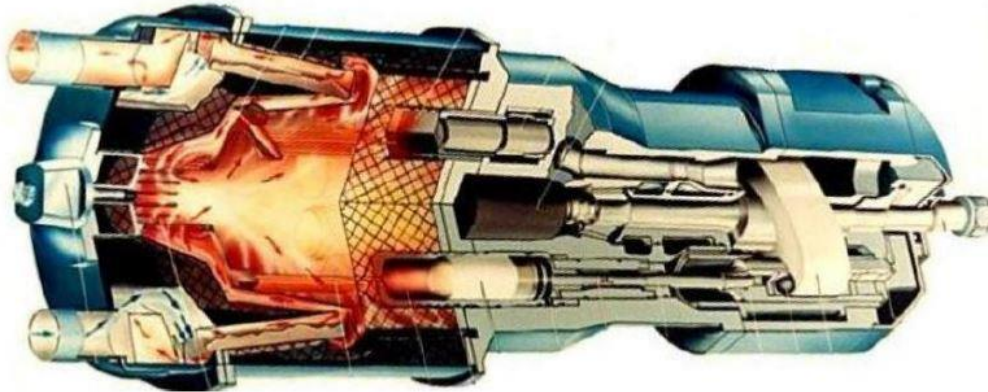


Σχήμα 1.13. Μηχανισμός κίνησης Slider Crank κινητήρα Stirling.

### 1.8.4 Μηχανισμός Swash Plate

Ο μηχανισμός Swash Plate, χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στους κινητήρες Stirling τη δεκαετία του 1970 με την παραχώρηση άδειας από τη Philips για εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία, ενώ εφαρμόστηκε επίσης και σε συστήματα υποβρύχιας ενέργειας από εταιρείες όπως η United Stirling, η Malmo και η MAN-MWM. Ο μηχανισμός αυτός χρησιμοποιείται σε κινητήρες πολλαπλών κυλίνδρων και προτιμάται στους κινητήρες Stirling λόγω της υψηλής

απόδοσης ισχύος. Έχει πλεονεκτήματα όπως η συμπαγής σχεδιασμός του κινητήρα, είναι κατάλληλος για μαζική παραγωγή, έχει πολύ καλή στεγανοποίηση και τα επιθυμητά χαρακτηριστικά ροπής. Ωστόσο, παρουσιάζει και κάποια μειονεκτήματα, όπως η πολύπλοκη κατασκευή, το υψηλό κόστος, η απαίτηση για υδροδυναμική λίπανση και τα προβλήματα τριβής σε χαμηλές ταχύτητες. Στο Σχήμα 1.14 φαίνεται ο εν λόγω μηχανισμός κίνησης Swash Plate.



Σχήμα 1.14. Μηχανισμός κίνησης Swash Plate κινητήρα Stirling.

### 1.8.5 Μηχανισμός Ross-Yoke

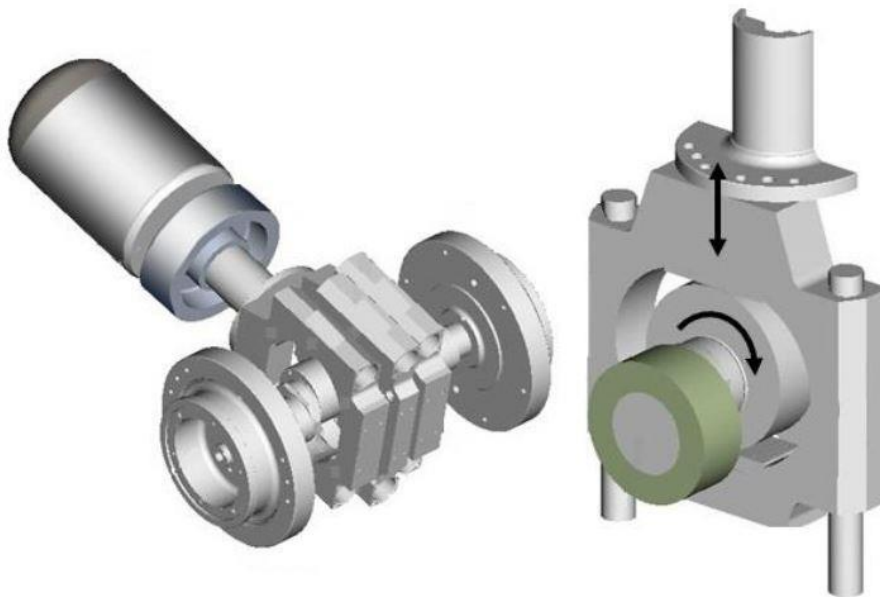
Οι μικροί κινητήρες Stirling χρησιμοποιούν μηχανισμό κίνησης Ross-Yoke, τον οποίο τον εφηύρε ο Ross το 1976 για τους κινητήρες Stirling. Δύο παράλληλα έμβολα συνδέονται με τον στροφαλοφόρο άξονα μέσω ενός τριγωνικού μηχανισμού, με αποτέλεσμα την αμοιβαία εξισορρόπηση των πλευρικών δυνάμεων και τη μείωση των τριβών, της φθοράς, των κραδασμών και του θορύβου. Ο σχεδιασμός του μηχανισμού είναι απλός και το κόστος κατασκευής του είναι ελάχιστο, καθιστώντας τον πολύ ελκυστικό. Ο εν λόγω μηχανισμός φαίνεται στο Σχήμα 1.15.



Σχήμα 1.15. Μηχανισμός κίνησης Ross-Yoke κινητήρα Stirling.

### 1.8.6 Μηχανισμός Scotch-Yoke

Τέλος, άξιος μνείας είναι και ο μηχανισμός κίνησης Scotch-Yoke, τον οποίο εφηύρε ο Parsons, και μετατρέπει την κίνηση του εμβόλου προς τα πίσω και προς τα εμπρός σε κυκλική κίνηση μέσω ενός άξονα. Αυτός ο μηχανισμός, έχει λιγότερα εξαρτήματα από τον ρομβοειδή κινητήρα που αναφέραμε στην αρχή της ενότητας, με αποτέλεσμα να μειώνει τη φθορά των εξαρτημάτων και την αντίσταση πλευρικής τριβής. Ο μηχανισμός Scotch-Yoke χρησιμοποιείται σε μικρές μηχανές Stirling, αντίστοιχα με τον μηχανισμό Ross-Yoke. Στο Σχήμα 1.16 φαίνεται μια υλοποίηση του μηχανισμού κίνησης Scotch-Yoke.



Σχήμα 1.16. Μηχανισμός κίνησης Scotch-Yoke κινητήρα Stirling

## 1.9 Επίλογος

Κλείνοντας το κεφάλαιο, ανακεφαλαιώνουμε τα όσα αναφέραμε σε αυτό. Στόχος του κεφαλαίου ήταν μια περιληπτική εισαγωγή στις μηχανές Stirling, στην ιστορική τους πορεία και τα πλεονεκτήματά τους σε εφαρμογές, είτε το προηγούμενο είτε και του τωρινού αιώνα. Περιεγράφηκαν τόσο ιστορικά στοιχεία για τις μηχανές και τον εφευρέτη τους, όσο και εφαρμογές αυτών που ξεκινήσουν από την πιθανή αντικατάσταση των επικίνδυνων ατμομηχανών του 19<sup>ου</sup> αιώνα και έφταναν μέχρι και καινοτόμες εφαρμογές στη σημερινή εποχή. Επιπλέον, έγινε αναφορά στον κύκλο λειτουργίας τους από θερμοδυναμική σκοπιά. Η κατανόηση του κύκλου είναι αρκετά σημαντική καθώς συνεπάγεται και της κατανόησης των διαφόρων τύπων των μηχανών Stirling που εν γένει χωρίζονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες. Έγινε αναφορά στις κατηγορίες αυτές αλλά και στα χαρακτηριστικά που κάνουν κάθε μια ξεχωριστή και ελκυστική.

Το κεφάλαιο κλείνει με μια αναλυτική περιγραφή των μηχανισμών μετάδοσης της κίνησης που χρησιμοποιούνται στις μηχανές Stirling. Οι εν λόγω μηχανισμοί είναι εξίσου σημαντική και αρκετές φορές είναι πολύ χρήσιμο να είναι κατανοητά τα πλεονεκτήματα που ο καθένας έχει. Μέσα από μια

σύνομη αναφορά στους βασικούς απ' αυτούς, στόχος ήταν ακριβώς αυτός, δηλαδή να υπάρξει μια γενική κατανόηση των εν λόγω μηχανισμών, χωρίς όμως εμβάθυνση σε πάρα πολύ τεχνικές λεπτομέρειες που είναι εκτός του σκοπού της εργασίας.

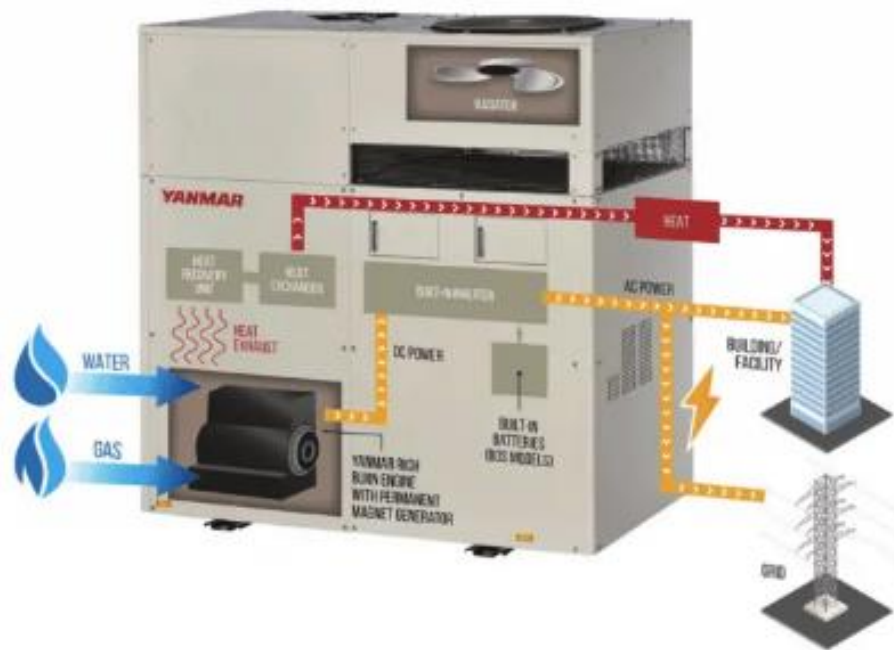
## Κεφάλαιο 2ο: Σύστημα Micro-CHP

### 2.1 Εισαγωγή

Τα συστήματα συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού μικρής κλίμακας (Micro Combined Heat and Power ή Micro-CHP) αντιπροσωπεύουν σήμερα τη σημαντική πρόοδο που έχει συντελεστεί στον τομέα της αποκεντρωμένης παραγωγής ενέργειας σήμερα, δηλαδή της παραγωγής μικρών ποσοτήτων ενέργειας από πολλούς μικρούς παραγωγούς που στη συνέχεια συνδέονται στο δίκτυο ή τροφοδοτούν αποκλειστικά μια κατανάλωση [13]. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά συστήματα παραγωγής ενέργειας που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια και σπαταλούν θερμότητα ξεχωριστά για τον σκοπό αυτό, τα συστήματα Micro-CHP παράγουν ταυτόχρονα ηλεκτρική και θερμική ενέργεια από μία μόνο πηγή καυσίμου και στη συνέχεια χρησιμοποιούνται αμφότερες. Αυτή η διαδικασία συμπαραγωγής καθιστά τα συστήματα Micro-CHP εξαιρετικά αποδοτικά με όρους εξοικονόμησης ενέργειας, καθώς χρησιμοποιούν και τη θερμότητα που διαφορετικά θα σπαταλιούνταν στις συμβατικές μεθόδους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Η σημασία των συστημάτων Micro-CHP έγκειται στην ικανότητά τους να παρέχουν μια αποκεντρωμένη και αποτελεσματική λύση στην παραγωγή ενέργειας, αυξάνοντας ταυτόχρονα και την απόδοση των εν λόγω συστημάτων. Αυτά τα συστήματα είναι ιδιαίτερα ωφέλιμα σε οικιακά και μικρά εμπορικά/βιομηχανικά περιβάλλοντα, όπου μπορούν να μειώσουν το ενεργειακό κόστος, να αυξήσουν την ενεργειακή ασφάλεια και να συμβάλουν στους στόχους της βιωσιμότητας και της βιώσιμης ανάπτυξης. Παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια τοπικά και χρησιμοποιώντας την επιπλέον θερμότητα που είναι απαραίτητη για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας για θέρμανση χώρων ή ζεστό νερό χρήσης, τα συστήματα Micro-CHP μπορούν να επιτύχουν συνολική απόδοση έως και 90%, σε σύγκριση με την απόδοση περίπου 30% των συμβατικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μεγάλης κλίμακας. Σημειώνουμε εδώ πως η ιδέα των Micro-CHP συστημάτων δεν είναι νέα αλλά η εφαρμογή της σε μεγάλη κλίμακα είναι πολλές φορές πολύ πιο δύσκολη. Χαρακτηριστικό παράδειγμα εκμετάλλευσης της επιπλέον θερμότητας από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι το σύστημα τηλεθέρμανσης σπιτικών και καταστημάτων στη Δυτική Μακεδονία (Κοζάνη, Πτολεμαΐδα, Αμύνταιο) και την Πελοπόννησο (Μεγαλόπολη).

Επιπρόσθετα, τα συστήματα Micro-CHP βρίσκουν εφαρμογές σε διάφορους άλλους τομείς, συμπεριλαμβανομένων κτιρίων κατοικιών, μικρών επιχειρήσεων ή βιομηχανικών, εγκαταστάσεων υγειονομικής περίθαλψης και εκπαιδευτικών ιδρυμάτων. Η ικανότητά τους να λειτουργούν με διαφορετικούς τύπους καυσίμων, συμπεριλαμβανομένου του φυσικού αερίου, της βιομάζας, ή ακόμη και της ηλιακής ενέργειας, προσθέτει στην ευελιξία και την ελκυστικότητά τους, συνδυάζοντάς τα με την απαίτηση για όλο και μεγαλύτερη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στις μέρες μας. Άλλωστε, οι μειωμένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από τα συστήματα Micro-CHP λόγω της χρήσης βιομάζας ή, ακόμη καλύτερα, ηλιακής ενέργειας, τα καθιστούν μια φιλική προς το περιβάλλον εναλλακτική λύση στην παραδοσιακή παραγωγή ενέργειας με βάση τα ορυκτά καύσιμα (λιγνίτη, πετρέλαιο diesel, κλπ.). Καθώς το ενδιαφέρον για βιώσιμες και αποδοτικές ενεργειακές λύσεις συνεχίζει να αυξάνεται, η ανάπτυξη και η εγκατάσταση συστημάτων Micro-CHP κερδίζουν όλο και περισσότερη δυναμική [13]. Στο Σχήμα 2.1 φαίνεται σχηματικά ένα σύστημα Micro-CHP όπου διακρίνονται τα βασικά χαρακτηριστικά του αλλά και, επίσης σχηματικά, οι χρήσεις της ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας που παράγει.



Σχήμα 2.1. Σύστημα συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού μικρής κλίμακας (Micro-CHP).

## 2.2 Τεχνολογία του συστήματος Micro-CHP

Όπως ήδη αναφέραμε, τα συστήματα Micro-CHP αποτελούν μια καινοτόμο και αποτελεσματική λύση για την αποκεντρωμένη παραγωγή ενέργειας καθώς παράγουν ταυτόχρονα ηλεκτρική και θερμική ενέργεια από μία μόνο πηγή, καθιστώντας τα εξαιρετικά αποδοτικά σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής ενέργειας. Η θεμελιώδης αρχή πίσω από τα συστήματα Micro-CHP είναι η συμπαραγωγή, η οποία περιλαμβάνει την ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας. Σε αντίθεση με τους παραδοσιακούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής που συχνά σπαταλούν σημαντικό μέρος της αναγκαίας θερμότητας, τα συστήματα Micro-CHP συλλαμβάνουν και χρησιμοποιούν αυτή τη θερμότητα για θέρμανση χώρου, θέρμανση νερού ή άλλες θερμικές εφαρμογές. Αυτή η διαδικασία ενισχύει σημαντικά τη συνολική ενεργειακή απόδοση, επιτυγχάνοντας συχνά απόδοση έως και 90%.

Σε ένα τυπικό σύστημα Micro-CHP, το καύσιμο καίγεται ή μετατρέπεται χημικά για να παράγει τελικά μηχανική ή ηλεκτρική ενέργεια. Η απορριπτόμενη θερμότητα που παράγεται κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας δεσμεύεται και χρησιμοποιείται για σκοπούς θέρμανσης. Η ενοποίηση αυτών των δύο διαδικασιών - παραγωγής ενέργειας και ανάκτησης θερμότητας - αποτελεί τον πυρήνα της τεχνολογίας Micro-CHP [14].

Ένα σύστημα Micro-CHP περιλαμβάνει πολλά βασικά στοιχεία που συνεργάζονται για την αποτελεσματική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας. Αυτά τα εξαρτήματα περιλαμβάνουν τον κύριο κινητήρα, τον εναλλάκτη θερμότητας και τα συστήματα ελέγχου. Ο κύριος κινητήρας είναι ο πυρήνας ενός συστήματος Micro-CHP, υπεύθυνος για τη μετατροπή του καυσίμου σε μηχανική ή ηλεκτρική ενέργεια.

Στα συστήματα Micro-CHP μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι τύποι ηλεκτροκινητήρων, ο καθένας με τα μοναδικά χαρακτηριστικά και τα πλεονεκτήματά του. Μια συνήθη επιλογή είναι οι

κινητήρες Stirling (κινητήρας εξωτερικής καύσης), οι οποίοι λειτουργούν με τον κύκλο Stirling που περιλαμβάνει κυκλική συμπίεση και διαστολή ενός ρευστού εργασίας (συνήθως ήλιο ή υδρογόνο) σε διαφορετικά επίπεδα θερμοκρασίας. Αυτοί οι κινητήρες είναι γνωστοί για την υψηλή τους απόδοση, το χαμηλό θόρυβο και την ικανότητά τους να λειτουργούν σε μια ποικιλία πηγών θερμότητας, συμπεριλαμβανομένης της βιομάζας, της ηλιακής ενέργειας και της σπατάλης θερμότητας. Αναφερθήκαμε αναλυτικά στους κινητήρες Stirling στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στο Σχήμα 2.2 παρακάτω βλέπουμε ένα Micro-CHP σύστημα με κινητήρα Stirling.



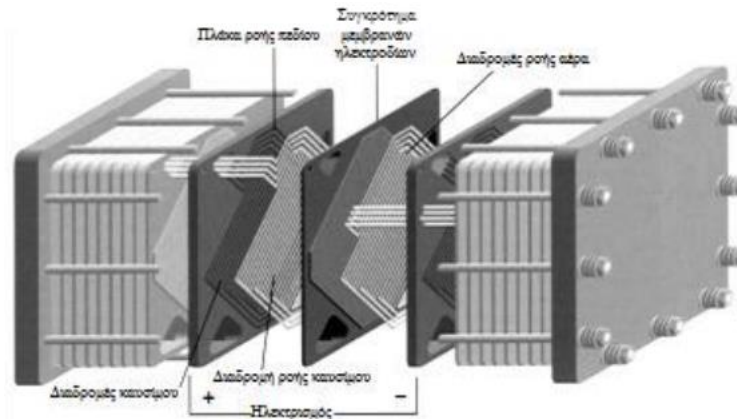
Σχήμα 2.2. Σύστημα Micro-CHP με κινητήρα Stirling.

Μια άλλη επιλογή, είναι οι κινητήρες εσωτερικής καύσης (Internal Combustion engines ή ICEs) που χρησιμοποιούνται συνήθως σε συστήματα Micro-CHP λόγω της στιβαρότητας και της πολύ μεγάλης ανάπτυξης και διεύθυνσης που έχουν στην καθημερινή ζωή. Μετατρέπουν τη χημική ενέργεια διαφόρων τύπων καυσίμου, όπως το φυσικό αέριο ή το πετρέλαιο, σε μηχανική ενέργεια, η οποία στη συνέχεια χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η απορριπτόμενη θερμότητα από τον κινητήρα δεσμεύεται και χρησιμοποιείται για σκοπούς θέρμανσης. Στο Σχήμα 2.3 βλέπουμε ένα Micro-CHP σύστημα με κινητήρα εσωτερικής καύσης.



Σχήμα 2.3. Σύστημα Micro-CHP με κινητήρα εσωτερικής καύσης.

Τέλος, οι κυψέλες καυσίμου παράγουν ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας ηλεκτροχημικής αντίδρασης μεταξύ υδρογόνου και οξυγόνου, παράγοντας νερό και θερμότητα ως υποπροϊόντα. Είναι εξαιρετικά αποδοτικά ως συστήματα ηλεκτροπαραγωγής και έχουν πολύ χαμηλές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, καθιστώντας τα ελκυστική επιλογή για συστήματα Micro-CHP. Αναφορικά με το είδος τους, οι κυψέλες καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEM) και οι κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFCs) χρησιμοποιούνται συνήθως σε οικιακές και εμπορικές εφαρμογές Micro-CHP, αντίστοιχα. Στο Σχήμα 2.4 παρακάτω Σχήμα 2.3 Σχήμα 2.2 βλέπουμε μια συστοιχία κυψελών καυσίμου.



Σχήμα 2.4. Συστοιχία κυψελών καυσίμου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα Micro-CHP σύστημα.

Ένα άλλο σημαντικό εξάρτημα στα Micro-CHP συστήματα είναι ο εναλλάκτης θερμότητας, που συλλαμβάνει την απορριπτόμενη θερμότητα από τον κύριο κινητήρα και τη μεταφέρει στο σύστημα θέρμανσης. Σε ένα σύστημα Micro-CHP, η κύρια λειτουργία του εναλλάκτη θερμότητας είναι η μεταφορά της θερμικής ενέργειας από τον κινητήρα ή την κυψέλη καυσίμου σε ένα ρευστό, συνήθως νερό, το οποίο στη συνέχεια χρησιμοποιείται για θέρμανση χώρων, θέρμανση νερού ή άλλες πιο ειδικές βιομηχανικές διαδικασίες και εφαρμογές. Ο σχεδιασμός και η αποδοτικότητα των εναλλακτών θερμότητας στα συστήματα Micro-CHP είναι ιδιαίτερα σημαντικά καθώς χαρακτηρίζουν τη συνολική απόδοση του συστήματος. Διάφοροι τύποι εναλλακτών θερμότητας, όπως πλάκες, κελύφοι και σωλήνες ή σωλήνες με περύγια, χρησιμοποιούνται ανάλογα με τις συγκεκριμένες απαιτήσεις του συστήματος αλλά και ανάλογα με τον κινητήρα που έχει επιλεγεί, όπως σύντομα αναφέρθηκε παραπάνω. Η αποτελεσματικότητα ενός εναλλάκτη θερμότητας εξαρτάται από παράγοντες όπως η επιφάνεια, η διαφορά θερμοκρασίας και οι ρυθμοί ροής των εμπλεκόμενων ρευστών. Οι σωστά σχεδιασμένοι και συντηρημένοι εναλλάκτες εξασφαλίζουν μέγιστη ανάκτηση θερμότητας, η οποία είναι απαραίτητη για την επίτευξη υψηλών συνολικών αποδόσεων του συστήματος.

Τέλος, τα συστήματα ελέγχου (κατά βάση μια ηλεκτρονική ή «έξυπνη» μονάδα ελέγχου) σε μια μονάδα Micro-CHP διασφαλίζουν τη βέλτιστη λειτουργία, εξισορροπώντας την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας με βάση τη ζήτηση. Αυτή η μονάδα παρακολουθεί συνεχώς διάφορες παραμέτρους, όπως η θερμοκρασία, η πίεση και το επίπεδο της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος, για να διατηρήσει την αποδοτική λειτουργία του συστήματος (θα δικαιολογηθεί παρακάτω αυτή η παρατήρηση). Συντονίζει την αλληλεπίδραση μεταξύ του κινητήρα ή της κυψέλης καυσίμου, του εναλλάκτη θερμότητας και των στοιχείων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, διασφαλίζοντας ότι το σύστημα ανταποκρίνεται δυναμικά στις αλλαγές της ζήτησης ενέργειας και των συνθηκών λειτουργίας.

Οι προηγμένες μονάδες ελέγχου είναι εξοπλισμένες με εξελιγμένους αλγορίθμους παρακολούθησης και ελέγχου που βελτιστοποιούν την παραγωγή ενέργειας, ελαχιστοποιούν παράλληλα την κατανάλωση καυσίμου. Μία από τις βασικές λειτουργίες της μονάδας είναι να ισορροπεί την παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας βάσει της ζήτησης σε πραγματικό χρόνο. Σε μια κατοικία, για παράδειγμα, η μονάδα ελέγχου προσαρμόζει τη λειτουργία του συστήματος Micro-CHP για να παρέχει επαρκή θέρμανση κατά τις ψυχρές περιόδους, ενώ παράλληλα παρέχει την απαραίτητη ηλεκτρική ενέργεια στο σπίτι. Αντίστοιχα, παρέχουν τη δυνατότητα ενσωμάτωσής με άλλα ενεργειακά συστήματα, όπως ηλιακούς συλλέκτες ή μπαταρίες για αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Όλα αυτά απαιτούν τον ακριβή έλεγχο της απόδοσης του κινητήρα ή της κυψέλης καυσίμου και διαχείριση της κατανομής της θερμότητας μέσω του εναλλάκτη θερμότητας. Εκτός από τη διαχείριση της παραγωγής και διανομής ενέργειας, η μονάδα ελέγχου παίζει επίσης κρίσιμο ρόλο στη διάγνωση και συντήρηση του συστήματος. Παρακολουθεί συνεχώς την απόδοση των διαφόρων εξαρτημάτων και μπορεί να ανιχνεύσει πιθανά προβλήματα πριν οδηγήσουν σε μεγάλες βλάβες ή διακοπή λειτουργίας του συστήματος. Οι σύγχρονες μονάδες ελέγχου μπορούν επίσης να συνδεθούν με συστήματα απομακρυσμένης παρακολούθησης, επιτρέποντας στους χρήστες και τους παρόχους υπηρεσιών ενέργειας να έχουν πρόσβαση σε δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και να διαχειρίζονται το σύστημα αποδοτικά και από απόσταση.

## 2.3 Τύποι συστημάτων Micro-CHP

Τα συστήματα Micro-CHP μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση τον τύπο του κύριου κινητήρα που χρησιμοποιείται, κατά βάση σε τρεις μεγάλες κατηγορίες [15]. Κάθε τύπος προσφέρει ξεχωριστά πλεονεκτήματα και είναι κατάλληλος για διαφορετικές εφαρμογές. Θα μιλήσουμε παρακάτω για αυτούς τους τρεις βασικούς τύπους κινητήρων και τα πλεονεκτήματά τους, όπως αυτοί εισήχθησαν σύντομα στην προηγούμενη ενότητα.

### 2.3.1 Κινητήρας Stirling για συστήματα Micro-CHP

Τα συστήματα Micro-CHP που βασίζονται σε κινητήρα Stirling προσφέρουν μια ελκυστική λύση για αποδοτική παραγωγή ενέργειας σε κατοικίες και μικρές εμπορικές επιχειρήσεις. Οι κινητήρες Stirling λειτουργούν με την αρχή της εξωτερικής καύσης, δηλαδή παράγουν θερμότητα μέσω μιας εξωτερικής πηγής για να κινήσουν τον κινητήρα. Αυτό το χαρακτηριστικό τους επιτρέπει να χρησιμοποιούν διάφορους τύπους καυσίμων, συμπεριλαμβανομένου του φυσικού αερίου, της βιομάζας, αλλά και της ηλιακής ενέργειας, καθιστώντας τους ιδιαίτερα ευέλικτους και φιλικούς προς το περιβάλλον. Η εξωτερική διαδικασία καύσης οδηγεί επίσης σε χαμηλότερες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου σε σύγκριση με τους κινητήρες εσωτερικής καύσης (επόμενη υποενότητα), συμβάλλοντας στη βελτίωση της ποιότητας του αέρα και στη προστασία του περιβάλλοντος.

Ένα από τα σημαντικά πλεονεκτήματα των συστημάτων micro-CHP με κινητήρες Stirling είναι η υψηλή συνολική αποδοτικότητά τους. Ενώ η ηλεκτρική απόδοση των κινητήρων Stirling κυμαίνεται τυπικά από 12% έως 25%, είναι δηλαδή σχετικά χαμηλή, η ικανότητά τους να συλλέγουν και να χρησιμοποιούν αποτελεσματικά τη απορρίπτουσα θερμότητα οδηγεί σε συνολική απόδοση του συστήματος κοντά στο 90%. Αυτό τα καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλα για εφαρμογές όπου υπάρχει σταθερή ζήτηση τόσο για ηλεκτρική ενέργεια όσο και για θερμότητα, όπως σε κατοικίες, μικρές επιχειρήσεις και συστήματα τηλεθέρμανσης μικρής κλίμακας. Η παραγόμενη θερμότητα μπορεί να

χρησιμοποιηθεί για θέρμανση χώρων, θέρμανση νερού ή ακόμη και βιομηχανικές διαδικασίες (αν πρόκειται για κάποια μικρή βιομηχανική μονάδα), μεγιστοποιώντας τη χρησιμότητα της παραγόμενης ενέργειας, τόσο ηλεκτρικής όσο και θερμικής.

Επιπλέον, τα συστήματα Micro-CHP με κινητήρες Stirling είναι γνωστά για την αξιοπιστία και την αθόρυβη λειτουργία τους. Η έλλειψη εσωτερικής καύσης σημαίνει λιγότερα κινούμενα μέρη και χαμηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας εν γένει, με αποτέλεσμα τη μειωμένη φθορά και τα μεγαλύτερα διαστήματα μεταξύ των κύκλων συντήρησης του συστήματος. Αυτή η ανθεκτικότητα, σε συνδυασμό με την ικανότητα λειτουργίας με χαμηλό θόρυβο, τα καθιστά ιδιαίτερα ελκυστικά για χρήση σε αστικά περιβάλλοντα όπου η ηχορύπανση και οι περιορισμοί χώρου είναι κρίσιμοι παράγοντες. Στο Σχήμα 2.5 παρακάτω φαίνεται ένα ολοκληρωμένο σύστημα Micro-CHP με κινητήρα Stirling. Διακρίνονται όχι μόνο ο κινητήρας αλλά και όλα τα υπόλοιπα μέρη του συστήματος συμπαγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας (εναλλάκτης, σύστημα ελέγχου, κλπ.).



Σχήμα 2.5. Σύστημα Micro-CHP με κινητήρα Stirling όπου διακρίνονται όλα τα βασικά μέρη και εξαρτήματα που το απαρτίζουν (κινητήρας, εναλλάκτης, σύστημα ελέγχου, κλπ.).

### 2.3.2 Κινητήρας εσωτερικής καύσης για συστήματα Micro-CHP

Τα συστήματα Micro-CHP που βασίζονται σε κινητήρες εσωτερικής καύσης χρησιμοποιούνται ευρέως τόσο σε οικιακές, όσο και σε εμπορικές/βιομηχανικές εφαρμογές. Σε αυτά τα συστήματα το καύσιμο καίγεται μέσα στον κινητήρα για να παράγει μηχανική ενέργεια, η οποία στη συνέχεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Άλλωστε, οι κινητήρες εσωτερικής καύσης αποτελούν τον πιο παραδοσιακό τρόπο παραγωγής μηχανικής ενέργειας. Η απορριπτόμενη θερμότητα που παράγεται κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας συλλέγεται και χρησιμοποιείται για θέρμανση. Τα συστήματα Micro-CHP με κινητήρες εσωτερικής καύσης είναι γενικά ευέλικτα και μπορούν να λειτουργήσουν με διάφορα καύσιμα, συμπεριλαμβανομένου του φυσικού αερίου, του πετρελαίου (diesel) και του βιοαερίου, προσφέροντας ευελιξία στην επιλογή και τη διαθεσιμότητα των εν λόγω καυσίμων.

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα των συστημάτων με κινητήρες εσωτερικής καύσης είναι η σχετικά υψηλή ηλεκτρική απόδοσή τους, που κυμαίνεται τυπικά στο 25% με 35%. Αυτό τα καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλα για εφαρμογές όπου η ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια είναι σημαντική. Η συνολική απόδοση του συστήματος, όμως, συμπεριλαμβανομένης της ανάκτησης θερμότητας, μπορεί να φτάσει έως και 80%, σημαντικά χαμηλότερη από τα αντίστοιχα συστήματα με κινητήρες Stirling για τα οποία μιλήσαμε παραπάνω. Τα συστήματα Micro-CHP με κινητήρες εσωτερικής καύσης χρησιμοποιούνται συνήθως σε κατοικίες, μικρές εμπορικές εγκαταστάσεις ή ακόμη και σε βιομηχανικούς χώρους όπου υπάρχει συνεχής ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα καθώς είναι κατάλληλα για εφαρμογές όπου απαιτείται σταθερή και αξιόπιστη παροχή ηλεκτρικής ισχύος. Ο ηλεκτροκινητήρας μπορεί να ρυθμιστεί σε σταθερές στροφές και να παράγει τότε σταθερή ισχύ. Βέβαια, αν απαιτείται μεταβαλλόμενη παροχή ηλεκτρικής ισχύος, και αυτό μπορεί να επιτευχθεί πολύ εύκολα με κατάλληλη ρύθμιση των στροφών του κινητήρα εσωτερικής καύσης, κάτι που είναι αρκετά ελκυστικό σε οικιακές εφαρμογές όπου η απαίτηση για ηλεκτρική ενέργεια δεν είναι σταθερή.

Όσον αφορά την αξιοπιστία και τη συντήρηση, η εν λόγω επιλογή πλεονεκτεί καθώς οι κινητήρες εσωτερικής καύσης είναι ευρέως διαδεδομένοι σήμερα και η τεχνολογία τους έχει εξελιχθεί και βελτιωθεί πάρα πολύ. Επιπλέον, είναι γνωστοί για την ανθεκτικότητά τους και μπορούν να παρέχουν σταθερή απόδοση για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Ωστόσο, απαιτούν τακτική συντήρηση για να διασφαλιστεί η βέλτιστη λειτουργία τους ενώ ως επιλογή είναι λιγότερο φιλική για το περιβάλλον, παρά την τεράστια πρόοδο που έχει συντελεστεί από την εφεύρεσή τους πριν από έναν και πλέον αιώνα. Παρά τις απαιτήσεις συντήρησης όμως, υπάρχει ευρεία διαθεσιμότητα ανταλλακτικών και εδραιωμένα δίκτυα υπηρεσιών συντήρησης με πολύ καλό τεχνικό υπόβαθρο. Στο Σχήμα 2.6 φαίνεται ένας κινητήρας εσωτερικής καύσης, προσαρμοσμένος σε ένα πραγματικό Micro-CHP σύστημα για βιομηχανική εφαρμογή μικρής κλίμακας.



Σχήμα 2.6. Σύστημα Micro-CHP με προσαρμοσμένο έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης για βιομηχανική εφαρμογή μικρής κλίμακας.

Εναλλακτικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν κινητήρες φυσικού αερίου που έχουν υψηλή απόδοση, μικρό μέγεθος και εν γένει μικρότερες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, ενώ είναι πιο αξιόπιστοι και έχουν χαμηλότερες απαιτήσεις συντήρησης. Αξίζει να σημειωθεί εδώ πως στους κινητήρες φυσικού αερίου είναι πιο εύκολη η συγκέντρωση της απορριπτόμενης θερμότητας καθώς αυτή συγκεντρώνεται κυρίως στην εξάτμιση του κινητήρα, σε αντίθεση με τους κινητήρες εσωτερικής καύσης ορυκτών καυσίμων στους οποίους εστιάζαμε έως τώρα, όπου εκτός από την εξάτμιση, μεγάλο ποσό απορριπτόμενης θερμότητας συλλέγεται από το σύστημα ψύξης, καθιστώντας των συνδυασμό των δύο πηγών πιο δύσκολο στην υλοποίηση. Αυτό εξηγεί την αναφορά που έγινε παραπάνω για συνολική απόδοση περί του 80% σε συστήματα με κινητήρα εσωτερικής καύσης ορυκτών καυσίμων, ενώ σε συστήματα με κινητήρες φυσικού αερίου, η εν λόγω συνολική απόδοση μπορεί να φτάσει μέχρι και το 90%, συγκρινόμενη με την απόδοση των συστημάτων με κινητήρες Stirling, χωρίς όμως άλλα πλεονεκτήματα των τελευταίων, όπως για παράδειγμα το μικρό ακουστικό τους αποτύπωμα.

### 2.3.3 Micro-CHP συστήματα με κυψέλες καυσίμου

Τα συστήματα Micro-CHP που βασίζονται σε κυψέλες καυσίμου προσφέρουν την υψηλότερη ηλεκτρική απόδοση και παράγουν πολύ χαμηλές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Οι κυψέλες καυσίμου λειτουργούν μετατρέποντας τη χημική ενέργεια ενός καυσίμου, όπως το υδρογόνο ή το φυσικό αέριο, απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας ηλεκτροχημικής διαδικασίας, αντί της καύσης που χρησιμοποιούν οι παραδοσιακοί ηλεκτροκινητήρες εσωτερικής ή εξωτερικής καύσης. Αυτή η μέθοδος οδηγεί σε υψηλότερες ηλεκτρικές αποδόσεις, συνήθως της τάξης του 50% ή και παραπάνω ενώ έχει και πολύ χαμηλές εκπομπές, καθιστώντας τα συστήματα micro-CHP με κυψέλες καυσίμου μια ιδιαίτερα φιλική λύση προς το περιβάλλον. Η θερμότητα που παράγεται κατά τη διάρκεια της ηλεκτροχημικής διαδικασίας μπορεί να συλλεγεί και να χρησιμοποιηθεί για διάφορες ανάγκες θέρμανσης, ενισχύοντας περαιτέρω τη συνολική αποδοτικότητα του συστήματος, η οποία και πάλι μπορεί να φτάσει στα επίπεδα το 90%. Το γεγονός, βέβαια, πως η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος είναι σταθερή θα μπορούσε να είναι ένα μειονέκτημα των εν λόγω συστημάτων, αλλά αυτό μπορεί να επιλυθεί μέσω της διασύνδεσης με το δίκτυο και την επιστροφή σε αυτό της πλεονάζουσας ηλεκτρικής ενέργειας. Αντίστοιχα, σε περιόδους υψηλής ζήτησης, η επιπλέον απαιτούμενη ισχύ θα μπορούσε να αντληθεί από το δίκτυο. Ως προς τον τύπο τους, οι κυψέλες καυσίμου PEM χρησιμοποιούνται συνήθως σε κατοικίες, παρέχοντας μια αθόρυβη και αποδοτική πηγή ενέργειας αλλά και θερμότητας, επιτρέποντας περίπου 40000 ώρες λειτουργίας (4,5 έτη συνεχούς λειτουργίας) πριν την αντικατάστασή τους. Τα SOFC, από την άλλη πλευρά, είναι πιο κατάλληλα για εμπορικές ή βιομηχανικές εφαρμογές λόγω των υψηλότερων θερμοκρασιών λειτουργίας (500 με 1000 °C, σε αντίθεση με τα PEM που λειτουργούν στους 50 με 100 °C) και της αποδοτικότητάς τους.

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των συστημάτων Micro-CHP με κυψέλες καυσίμου είναι η εξαιρετική αποδοτικότητα και ο χαμηλός περιβαλλοντικός αντίκτυπος που έχουν. Η υψηλή ηλεκτρική αποδοτικότητα αυτών των συστημάτων σημαίνει ότι μπορούν να παράγουν μεγάλη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας από μια δεδομένη ποσότητα καυσίμου, μειώνοντας τη συνολική κατανάλωση (χημικής) ενέργειας. Επιπλέον, η ηλεκτροχημική διαδικασία στις κυψέλες καυσίμου παράγει ελάχιστους ρύπους σε σύγκριση με τα παραδοσιακά συστήματα που βασίζονται στην καύση ορυκτών καυσίμων. Συνεπώς, είναι ιδανικά για εφαρμογές όπου ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος και η αποτελεσματικότητα είναι πρωταρχικής σημασίας, ενώ ένα άλλο μεγάλο πλεονέκτημά τους είναι η απουσία κινητών μερών για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας, κάτι που διευκολύνει πολύ τη συντήρησή τους αλλά παράλληλα μειώνει και τις πιθανές βλάβες. Μια μικρή κυψέλη καυσίμου φαίνεται στο Σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.7. Κυψέλη υδρογόνου που μπορεί να προσαρμοστεί σε ένα Micro-CHP σύστημα.

## 2.4 Αποτελέσματα και απόδοση

Η αποτελεσματικότητα ενός συστήματος Micro-CHP είναι κρίσιμος παράγοντας για τη συνολική απόδοση και την οικονομική βιωσιμότητά του. Η απόδοση του συστήματος εκφράζεται τυπικά σε όρους ηλεκτρικής απόδοσης (ο λόγος της ηλεκτρικής παραγωγής προς την είσοδο καυσίμου) και της θερμικής απόδοσης (ο λόγος της χρήσιμης θερμότητας προς την είσοδο καυσίμου). Ένα τυπικό εργοστάσιο ηλεκτροπαραγωγής με ορυκτά καύσιμα, για παράδειγμα, έχει ηλεκτρική απόδοση που μπορεί να φτάσει έως και το 45%, ενώ γενικά παρόμοιος είναι και ο βαθμός απόδοσης άλλου τύπου συστημάτων ηλεκτροπαραγωγής, όπως τα ηλιακά πάνελ ή οι πυρηνικοί σταθμοί. Αντίστοιχα, και η ηλεκτρική απόδοση ενός Micro-CHP συστήματος είναι ανάμεσα στο 20% και το 40%, εξαρτώμενη κυρίως από τον τύπο του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που εμπλέκεται. Όμως, στους τυπικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, η επιπλέον θερμότητα τυπικά απορρίπτεται στους πύργους ψύξης με αποτέλεσμα να μην αυξάνεται άλλο η συνολική απόδοση του συστήματος. Αντιθέτως, στα Micro-CHP συστήματα, μεγάλο μέρος της θερμότητας συλλέγεται στον εναλλάκτη, με την αντίστοιχη απόδοση να είναι πάλι στην τάξη του 40% με 50%. Έτσι, η συνολική απόδοση συνδυασμένης θερμότητας και ισχύος (CHP) λαμβάνει υπόψη τόσο τις ηλεκτρικές όσο και τις θερμικές εξόδους, παρέχοντας μια ολοκληρωμένη μέτρηση της απόδοσης του συστήματος που μπορεί να φτάσει τυπικά, όπως ήδη έχουμε αναφέρει, ακόμη και στο 90%. Διάφοροι παράγοντες επηρεάζουν την αποδοτικότητα και την απόδοση ενός συστήματος Micro-CHP, με τους βασικούς να σημειώνονται παρακάτω [16]:

- Τύπος καυσίμου:** Ο τύπος του καυσίμου που χρησιμοποιείται μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την απόδοση του συστήματος. Το φυσικό αέριο, για παράδειγμα, χρησιμοποιείται συνήθως λόγω της ευρείας διαθεσιμότητας και των ιδιοτήτων καθαρής καύσης του. Η βιομάζα και το βιοαέριο χρησιμοποιούνται επίσης, ειδικά σε συστήματα σχεδιασμένα για εφαρμογές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Σε κάθε περίπτωση, το φυσικό αέριο αλλά και εναλλακτικές του (όπως το προπάνιο) είναι τα πιο αποδοτικά καύσιμα, όμως αν κανείς θέλει να λάβει υπόψιν και το περιβαλλοντικό στοιχείο, τότε ενδεχομένως να έχει νόημα και η χρήση βιομάζας/βιοαερίων που έχουν ελαφρώς χαμηλότερη απόδοση.
- Τεχνολογία κύριου μηχανισμού κίνησης και καύσης:** Οι διαφορετικοί κύριοι μηχανισμοί κίνησης έχουν διαφορετικές αποδόσεις, όπως ήδη έχουμε αναφέρει στη σχετική ενότητα. Οι κυψέλες καυσίμου προσφέρουν γενικά την υψηλότερη ηλεκτρική απόδοση, κυρίως λόγω της απουσίας κινητών μερών. Όμως, σχετικά με τη συνολική απόδοση συνδυασμένης θερμότητας και ισχύος, κινητήρες Stirling και κυψέλες καυσίμου έχουν συγκρίσιμο βαθμό απόδοσης, ενώ οι κινητήρες εσωτερικής καύσης είναι σε λίγο χαμηλότερο επίπεδο, κυρίως γιατί είναι δυσκολότερη η συλλογή της απορρίπτουσας θερμότητας που βρίσκεται σε παραπάνω από ένα σημεία χωρικά. Πάντως, πέρα από τον βαθμό απόδοσης καθαυτό, έχει σημασία και η δυνατότητα ρύθμισης της παραγόμενης ισχύος σύμφωνα με τις ανάγκες της κατανάλωσης, κάτι που δεν είναι εξίσου εύκολο με όλες τις διαθέσιμες επιλογές μηχανισμών κίνησης (βλ. κυψέλες καυσίμων στην προηγούμενη ενότητα).
- Μέγεθος, φορτίο και στρατηγική λειτουργίας:** Τόσο το μέγεθος του Micro-CHP συστήματος όσο και το ηλεκτρικό φορτίο το οποίο τροφοδοτεί είναι κρίσιμες σχεδιαστικές παράμετροι που θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν. Σε γενικές γραμμές, το βέλτιστο σημείο λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος είναι δεδομένο και συνεπώς θα πρέπει να λειτουργεί συνέχεια κοντά σε αυτό, οπότε χρειάζεται συνεχή παρακολούθηση και ρύθμιση του τρόπου λειτουργίας του. Άλλωστε, είναι δεδομένο

πως μπορεί να θυσιαστεί μέρος της ηλεκτρικής ισχύος για την παραγωγή επιπλέον θερμότητας ή το αντίστροφο, καθώς ζητούμενο τελικά είναι η αύξηση της συνολικής απόδοσης συνδυασμένης θερμότητας και ισχύος.

- **Μηχανισμός εναλλάκτη θερμότητας:** Ήδη έχουμε αναφέρει πως ο τρόπος με τον οποίο θα συλλέγεται η απορρίπτουσα θερμότητα από τον του Micro-CHP σύστημα συμβάλει καθοριστικά στη συνολική του απόδοση. Όπως είπαμε, με τους κινητήρες Stirling, τους κινητήρες φυσικού αερίου ή τις κυψέλες καυσίμου, η συγκέντρωση είναι βέλτιστη, ενώ ελαφρώς χαμηλότερη απόδοση έχουν οι κινητήρες εσωτερικής καύσης.
- **Περιβαλλοντικοί παράγοντες:** Εξίσου σημαντικό με όλα τα παραπάνω είναι και περιβαλλοντικοί παράγοντες, οι οποίοι μπορεί να μειώσουν αισθητά την απόδοση ενός Micro-CHP συστήματος. Αναφερόμαστε αποκλειστικές σε καιρικούς παράγοντες όπως η θερμοκρασία και η υγρασία, οι οποίοι μετακινούν το βέλτιστο σημείο λειτουργίας του συστήματος εκτός από αυτό που έχει προβλεφθεί/σχεδιαστεί και περιορίζουν δυνητικά την απόδοσή του (τόσο την ηλεκτρική όσο και τη θερμική).

## 2.5 Οικονομική ανάλυση

Η οικονομική βιωσιμότητα των συστημάτων Micro-CHP αποτελεί κρίσιμο ζήτημα για τους πιθανούς χρήστες τους, ιδιαίτερα καθώς απευθύνονται τόσο σε οικιακές εφαρμογές αλλά και σε εφαρμογές μικρών βιομηχανικών μονάδων. Σε αυτή την ενότητα εξετάζει το αρχικό κόστος και η συντήρηση, τα οικονομικά οφέλη και οι περίοδοι απόσβεσης μιας επένδυσης σε ένα τέτοιο σύστημα, καθώς και ο πιθανός ρόλος των κρατικών κινήτρων και επιδοτήσεων στην προώθηση της υιοθέτησης συστημάτων Micro-CHP [17].

Το αρχικό κόστος των συστημάτων Micro-CHP μπορεί να θεωρηθεί πως είναι σχετικά υψηλό σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα θέρμανσης (αφήνουμε κατά μέρους εδώ το ηλεκτρικό κομμάτι καθώς δεν είναι καθόλου συνηθισμένο κάποιος να παράγει ιδιωτικά την ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνει). Το εν λόγω κόστος περιλαμβάνει την αγορά και την εγκατάσταση του συστήματος, το οποίο με τη σειρά του περιλαμβάνει τον κύριο μηχανισμό κίνησης (όπως έναν κινητήρα Stirling ή έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης ή μια κυψέλη καυσίμου), τον εναλλάκτη θερμότητας, το σύστημα ελέγχου και την ενσωμάτωση αυτών στην υπάρχουσα κτιριακή υποδομή. Το κόστος μιας μονάδας Micro-CHP ποικίλλει σημαντικά ανάλογα και με τον τύπο του κύριου μηχανισμού κίνησης και τη χωρητικότητα του συστήματος. Οι κινητήρες Stirling και οι κινητήρες εσωτερικής καύσης έχουν γενικά χαμηλότερο αρχικό κόστος εγκατάστασης σε σύγκριση με τις κυψέλες καυσίμου, οι οποίες είναι πιο ακριβές λόγω των προηγμένων υλικών και τεχνολογιών που εμπλέκονται με τη λειτουργία τους.

Το κόστος εγκατάστασης περιλαμβάνει επιπλέον τα έξοδα για την εγκατάσταση του συστήματος συνολικά, τη σύνδεσή του με τα δίκτυα ηλεκτρισμού και θέρμανσης της εγκατάστασης και τη διασφάλιση της συμμόρφωσης με τους τοπικούς οικοδομικούς κώδικες και κανονισμούς. Αυτό το κόστος μπορεί να είναι ιδιαίτερα σημαντικό, ειδικά αν είναι απαραίτητες εκτεταμένες αλλαγές ή τροποποιήσεις στις υφιστάμενες κτιριακές υποδομές.

Η τακτική συντήρηση είναι επίσης απαραίτητη για την αποτελεσματική και αξιόπιστη λειτουργία των συστημάτων Micro-CHP. Το κόστος συντήρησης ποικίλλει ανάλογα με την τεχνολογία της κύριας κίνησης. Οι κινητήρες εσωτερικής καύσης απαιτούν πιο συχνή συντήρηση λόγω κινητών εξαρτημάτων και διεργασιών καύσης, ενώ οι κινητήρες Stirling και οι κυψέλες καυσίμου έχουν γενικά χαμηλότερες

απαιτήσεις συντήρησης, αλλά εξακολουθούν να χρειάζονται περιοδική συντήρηση. Το λειτουργικό κόστος των συστημάτων Micro-CHP περιλαμβάνει, τέλος, και το κόστος καυσίμων και τυχόν δαπάνες που σχετίζονται με την παρακολούθηση και τον έλεγχο του συστήματος. Αυτά τα κόστη επηρεάζονται από τον τύπο του καυσίμου που χρησιμοποιείται, με το φυσικό αέριο να είναι μια κοινή επιλογή λόγω της διαθεσιμότητας και της οικονομικής του αποδοτικότητας. Η βιομάζα και το βιοαέριο μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν, μειώνοντας δυνητικά το κόστος των καυσίμων, εάν όμως προέρχονται από τοπική πηγή.

Σε γενικές γραμμές καταλαβαίνει κανείς από την παραπάνω γενική περιγραφή πως η επιλογή ή όχι ενός συστήματος Micro-CHP δεν είναι μια εύκολη υπόθεση. Χρειάζεται συστηματική μελέτη όλων των πιθανών εναλλακτικών και καλό υπολογισμό του κόστους. Επιπλέον, διάφοροι παράγοντες μπορούν να επηρεάσουν αυτούς τους υπολογισμούς, όπως για παράδειγμα το κόστος των καυσίμων που μπορεί να αλλάξει δραματικά, όπως έχει φανεί τα τελευταία χρόνια, καθιστώντας ενδεχομένως πιο ελκυστικές εναλλακτικές που βασίζονται στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Τέλος, πολύ σημαντική είναι η οικονομική στήριξη από πολιτικούς και πολιτειακούς παράγοντες καθώς η ευρεία εγκατάσταση τέτοιων συστημάτων για όλα τα πλεονεκτήματα που αυτά παρέχουν, είναι μια πολιτική επιλογή. Μέσω επιδοτήσεων ή άλλων κινήτρων μπορεί να ενθαρρυνθεί η εγκατάσταση Micro-CHP συστημάτων, αλλά κάτι τέτοιο θα πρέπει να αποφασιστεί κεντρικά, είτε από μια κρατική οντότητα, είτε από άλλες μικρότερες δομές όπως ένας δήμος ή μια κοινότητα, οι οποίοι θα πρέπει να κινητροδοτίσουν τους χρήστες να προβούν στην εν λόγω επένδυση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα μιας τέτοιας ενέργειας είναι η Ιαπωνία, η οποία είναι και η πρωτοπόρα παγκοσμίως στον τομέα των Micro-CHP συστημάτων με πάνω από 350.000 εγκατεστημένα συστήματα ήδη από το 2020 [16], τα οποία για την εγκατάστασή τους ενισχύθηκαν από κρατικές πολιτικές. Ακολουθούν άλλες χώρες της Ευρώπης όπως η Γερμανία, το Ηνωμένο Βασίλειο και η Ολλανδία, με σαφώς μικρότερες διεισδύσεις, της τάξης των μερικών δεκάδων χιλιάδων συστημάτων για την ίδια χρονική περίοδο.

## 2.6 Προκλήσεις και εμπόδια

Παρά τα πλεονεκτήματά τους, τα συστήματα Micro-CHP αντιμετωπίζουν αρκετές προκλήσεις και εμπόδια στην ευρεία υιοθέτησή τους. Οι τεχνικές προκλήσεις περιλαμβάνουν τη περεταίρω βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος, τη μείωση των απαιτήσεων συντήρησης και τη βελτίωση της ενοποίησης με τις υπάρχουσες ενεργειακές υποδομές, οι οποίες θα πρέπει να σημειωθεί πως είναι αρκετά διαφορετικές σε κάθε χώρα ή ακόμη και εντός χώρας, από περιοχή σε περιοχή. Ρυθμιστικά και πολιτικά ζητήματα, όπως οι οικοδομικοί κώδικες και τα πρότυπα εκπομπών μπορούν επίσης να επηρεάσουν την ανάπτυξη των συστημάτων Micro-CHP. Η αποδοχή της αγοράς και η ευαισθητοποίηση των καταναλωτών είναι πρόσθετα εμπόδια που πρέπει να αντιμετωπιστούν μέσω προγραμμάτων εκπαίδευσης και κινήτρων για την εγκατάσταση. Κατ' επέκταση, το μέλλον της τεχνολογίας Micro-CHP είναι πολλά υποσχόμενο, με συνεχείς προόδους στις τεχνολογίες, τα υλικά και την ενοποίηση συστημάτων. Η ανάπτυξη πιο αποτελεσματικών και οικονομικά αποδοτικών κυψελών καυσίμου, βελτιωμένων κινητήρων Stirling και καινοτόμων συστημάτων ελέγχου θα βελτιώσουν την απόδοση και την ελκυστικότητα των συστημάτων Micro-CHP, ενώ η ενσωμάτωση με έξυπνα δίκτυα και το Διαδίκτυο των πραγμάτων (Internet of Things ή IoT) θα επιτρέψει την καλύτερη διαχείριση και βελτιστοποίηση της χρήσης ενέργειας, οδηγώντας περαιτέρω στην υιοθέτηση συστημάτων Micro-CHP σε οικιακούς και εμπορικούς τομείς.

Συμπερασματικά, τα συστήματα Micro-CHP αντιπροσωπεύουν μια εξαιρετικά αποδοτική και βιώσιμη λύση για αποκεντρωμένη παραγωγή ενέργειας. Η ικανότητά τους να παρέχουν τόσο ηλεκτρική ενέργεια, όσο και θερμότητα από μία μόνο φυσική πηγή ενέργειας, σε συνδυασμό με τη δυνατότητα ενσωμάτωσης ανανεώσιμων καυσίμων ή πηγών ενέργειας, τα καθιστά μια ιδιαίτερα πολύτιμη τεχνολογία στη μετάβαση προς ένα πιο βιώσιμο ενεργειακό μέλλον. Παρά το υψηλό αρχικό κόστος εγκατάστασης, τα συστήματα Micro-CHP προσφέρουν σημαντικά οικονομικά οφέλη κατά τη διάρκεια ζωής τους, κυρίως μέσω της εξοικονόμησης ενέργειας και της μεγάλης βελτιωμένης απόδοσής τους. Με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας επιτόπου, τα συστήματα Micro-CHP μειώνουν την ανάγκη της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο και μειώνουν παράλληλα το κόστος θέρμανσης. Η υψηλή απόδοση αυτών των συστημάτων, που συχνά φτάνει έως και το 90%, διασφαλίζει ότι μεγαλύτερο μέρος του ενεργειακού περιεχομένου του καυσίμου μετατρέπεται σε χρήσιμη ενέργεια, με αποτέλεσμα χαμηλότερους συνολικούς λογαριασμούς ενέργειας αλλά και προστασία του περιβάλλοντος.

Για τους εμπορικούς χρήστες, τα συστήματα Micro-CHP μπορούν να μειώσουν τις χρεώσεις αιχμής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, παρέχοντας επιτόπια παραγωγή κατά τις περιόδους αιχμής. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική εξοικονόμηση κόστους, ειδικά σε περιοχές με χρεώσεις υψηλής ζήτησης. Σε ορισμένες περιοχές, η πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από συστήματα Micro-CHP μπορεί επίσης να εξαχθεί στο δίκτυο, παρέχοντας μια πρόσθετη ροή εσόδων μέσω της εν λόγω πώλησης ενέργειας. Αυτό συχνά διευκολύνεται από συστήματα net metering ή τροφοδοσίας, τα οποία αποζημιώνουν τους χρήστες για την ηλεκτρική ενέργεια που παρέχουν στο δίκτυο.

Η περίοδος απόσβεσης για ένα σύστημα Micro-CHP είναι ο χρόνος που απαιτείται για την εξοικονόμηση ενέργειας και τα έσοδα για την αντιστάθμιση του αρχικού κόστους επένδυσης. Αυτή η περίοδος ποικίλλει ανάλογα με παράγοντες όπως το κόστος του συστήματος, οι τιμές των καυσίμων, τα τιμολόγια ηλεκτρικής ενέργειας και η διαθεσιμότητα κρατικών κινήτρων. Κατά μέσο όρο, οι περίοδοι απόσβεσης για συστήματα Micro-CHP κυμαίνονται από 5 έως 10 χρόνια, με τα συστήματα που βασίζονται σε κυψέλες καυσίμου να έχουν συχνά μεγαλύτερες περιόδους απόσβεσης λόγω υψηλότερου αρχικού κόστους της επένδυσης. Όμως, η εγκατάσταση ενός συστήματος Micro-CHP μπορεί να αυξήσει την αξία του ακινήτου βελτιώνοντας την ενεργειακή απόδοση και μειώνοντας το λειτουργικό του κόστος. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για εμπορικές ιδιοκτησίες και αγοραστές κατοικιών με γνώμονα την ενέργεια, την αποδοτικότητα και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα του κτιρίου, τάσεις που γίνονται όλο και πιο σημαντικές με την πάροδο των ετών.

Τα κρατικά κίνητρα και οι επιδοτήσεις διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο στο να καταστούν τα συστήματα Micro-CHP πιο ελκυστικά από οικονομική άποψη. Αυτά τα κίνητρα μπορούν να μειώσουν σημαντικά το αρχικό κόστος επένδυσης και να βελτιώσουν τη συνολική απόδοση της επένδυσης. Πολλές κυβερνήσεις προσφέρουν επιχορηγήσεις κεφαλαίου και εκπτώσεις για να αντισταθμίσουν το κόστος αγοράς και εγκατάστασης συστημάτων Micro-CHP. Αυτά τα οικονομικά κίνητρα μπορούν να καλύψουν ένα σημαντικό μέρος του αρχικού κόστους αγοράς και εγκατάστασης, καθιστώντας τα συστήματα πιο προσιτά σε ένα ευρύτερο φάσμα χρηστών. Επιπλέον, φορολογικά κίνητρα, όπως οι εκπτώσεις φόρου για επενδύσεις και οι επιταχυνόμενες αποσβέσεις, μπορούν να μειώσουν τη φορολογική υποχρέωση των επιχειρήσεων και των ιδιοκτητών κατοικιών που εγκαθιστούν συστήματα Micro-CHP. Αυτά τα κίνητρα μειώνουν αποτελεσματικά και το καθαρό κόστος του συστήματος κατά τη διάρκεια της ζωής του.

Τα προγράμματα τιμολογίων τροφοδοσίας εγγυώνται μια σταθερή πληρωμή για την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από συστήματα Micro-CHP και εξάγεται στο δίκτυο. Η τεχνική net metering

επιτρέπει στους χρήστες να αντισταθμίζουν την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας με την παραγωγή τους, μειώνοντας αποτελεσματικά τους λογαριασμούς ενέργειας. Αυτά τα προγράμματα παρέχουν συνεχή οικονομικά οφέλη και ενθαρρύνουν την υιοθέτηση της τεχνολογίας Micro-CHP συνολικότερα. Οι κυβερνήσεις και τα χρηματοπιστωτικά ιδρύματα μπορούν να προσφέρουν δάνεια χαμηλού επιτοκίου και ευνοϊκούς όρους χρηματοδότησης για την εγκατάσταση συστημάτων Micro-CHP. Αυτά τα προγράμματα βοηθούν να ξεπεραστεί το εμπόδιο του υψηλού αρχικού κόστους, κατανέμοντας την επένδυση σε μια πιο διαχειρίσιμη χρονική περίοδο.

Τέλος, η κρατική χρηματοδότηση για έρευνα και ανάπτυξη (E&A) υποστηρίζει την πρόοδο των τεχνολογιών Micro-CHP (όπως εν γένει και όλων των νέων τεχνολογιών). Επενδύοντας στην E&A, οι κυβερνήσεις συμβάλλουν στην προώθηση καινοτομιών που μπορούν να μειώσουν το κόστος, να βελτιώσουν την αποτελεσματικότητα και να ενισχύσουν την αξιοπιστία αυτών των συστημάτων. Σε ορισμένες περιοχές, τα συστήματα Micro-CHP που τροφοδοτούνται από ανανεώσιμα καύσιμα μπορούν να κερδίσουν REC, τα οποία μπορούν να πωληθούν σε επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας και σε άλλες οντότητες που απαιτούνται για την επίτευξη των στόχων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αυτό παρέχει μια πρόσθετη ροή εσόδων και υποστηρίζει την αγορά τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αξιοποιώντας αυτά τα οικονομικά πλεονεκτήματα και τους μηχανισμούς υποστήριξης, τα συστήματα Micro-CHP μπορούν να προσφέρουν συνολικά μια οικονομικά αποδοτική και βιώσιμη λύση για αποκεντρωμένη παραγωγή ενέργειας, συμβάλλοντας στην ενεργειακή απόδοση, στις μειωμένες εκπομπές και στη μεγαλύτερη ενεργειακή ασφάλεια [15].

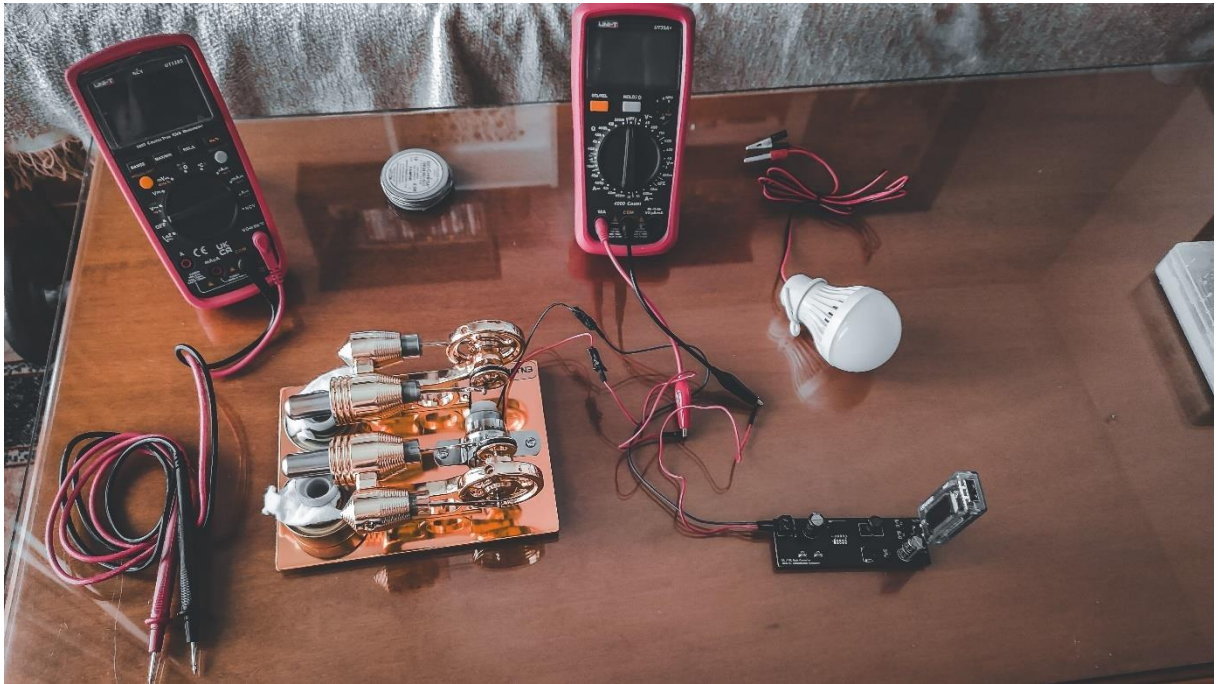
## 2.7 Επίλογος

Ανακεφαλαιώνοντας, στο παρόν κεφάλαιο μιλήσαμε για τα συστήματα συμπαραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας μικρής κλίμακας (Micro-CHP). Εισάγαμε την έννοια των εν λόγω συστημάτων και ύστερα μιλήσαμε για τους τύπους τους και τα μέρη που τα αποτελούν. Περιγράφηκαν αναλυτικά οι διάφορες εναλλακτικές επιλογές για τους κινητήρες των εν λόγω συστημάτων, όπως και για τους τύπους των καυσίμων που αυτά χρησιμοποιούν. Δόθηκε έμφαση όχι μόνο σε μια απλή περιγραφή τους, αλλά γενικά στον σχολιασμό των πλεονεκτημάτων που έχει κάθε επιλογή, ώστε ο αναγνώστης να αποκτήσει μια όσο το δυνατόν πιο πλήρη εικόνα της περιοχής. Τέλος, παρουσιάσαμε οικονομικά στοιχεία για την εγκατάσταση των εν λόγω συστημάτων σε οικιακές ή βιομηχανικές εφαρμογές μικρής κλίμακας, ενώ σχολιάστηκαν εκτενώς και οι προκλήσεις και τα εμπόδια που υπάρχουν σήμερα.

## Κεφάλαιο 3ο: Πρακτικό Μέρος

### 3.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, χρησιμοποιήθηκε ο τετρακύλινδρος κινητήρας Stirling Enjomer για την επίδειξη του πειράματος. Ο κινητήρας αυτός λειτουργεί με εξωτερική πηγή θερμότητας, η οποία προκαλεί διαστολή του αέρα στους κυλίνδρους, μετατρέποντας τη θερμική ενέργεια σε μηχανική κίνηση και στη συνέχεια σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω της γεννήτριας που διαθέτει. Επιπλέον, κατασκευάστηκε ένας μετατροπέας DC/DC με το ολοκληρωμένο XL4015E1, το οποίο σχεδιάστηκε σε PCB, προκειμένου να τροφοδοτούνται διάφορες συσκευές στα 5V μέσω USB, όπως κινητά τηλέφωνα, Power Banks και άλλες μικροσυσκευές. Ο μετατροπέας έχει ως είσοδο την τάση που δημιουργείται από την έξοδο της γεννήτριας και την μηχανή Stirling, σταθεροποιώντας την τάση εξόδου στα 5V και με δυνατότητα τροφοδότησης ρεύματος έως 5A.



Σχήμα 3.1. Φωτογραφία του συστήματος

### 3.2 Η Μηχανή Stirling

Η μηχανή Stirling Enjomor 4-cylinder Stirling Engine είναι ένα μοντέλο εξωτερικής καύσης που χρησιμοποιεί τη θερμική ενέργεια για την παραγωγή μηχανικής κίνησης, η οποία στη συνέχεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω της ενσωματωμένης γεννήτριας. Αποτελεί μια λειτουργική εφαρμογή των αρχών ενός κινητήρα Stirling και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πειραματικούς και εκπαιδευτικούς σκοπούς.



Σχήμα 3.2. Πλάγια όψη μηχανής Stirling



Σχήμα 3.3. Επάνω όψη μηχανής Stirling



Σχήμα 3.4. Πίσω όψη μηχανής Stirling



Σχήμα 3.5. Μπροστινή όψη μηχανής Stirling

Βασικά χαρακτηριστικά:

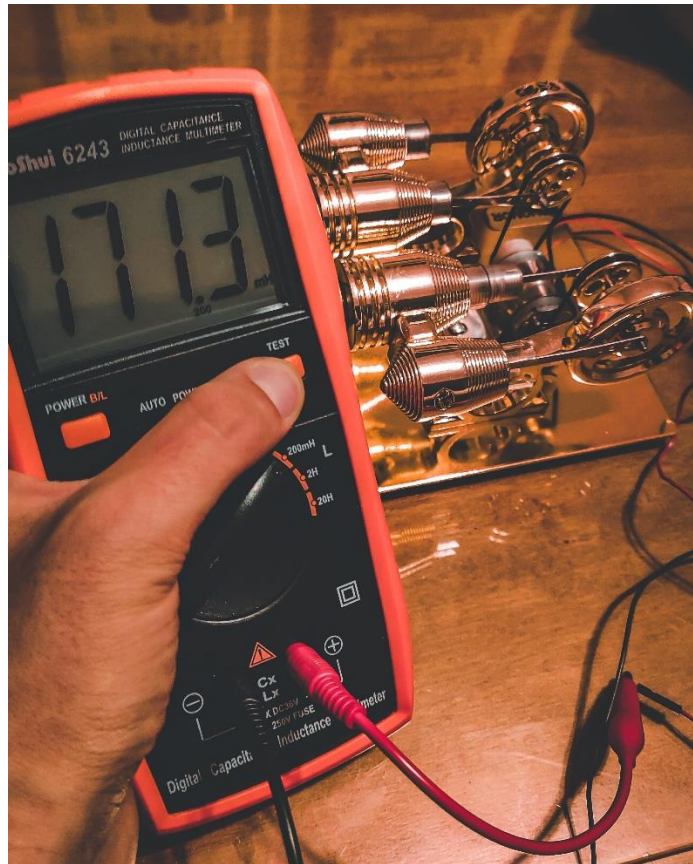
- Τύπος κινητήρα: Τετρακύλινδρος κινητήρας Stirling με εξωτερική πηγή θερμότητας (φωτιά).
- Υλικό κατασκευής: Μέταλλο
- Γεννήτρια: Μετατρέπει τη μηχανική κίνηση σε ηλεκτρική ενέργεια.
- Σύστημα ψύξης: Περιλαμβάνει ψύξη για την αποφυγή υπερθέρμανσης.
- Εύρος στροφών (RPM): Η μέγιστη ταχύτητα φτάνει περίπου τις 2000 στροφές ανά λεπτό (RPM).
- Τάση εξόδου: Παράγει τάση περίπου 14V DC.[18]

### 3.2.1 DC Γεννήτρια

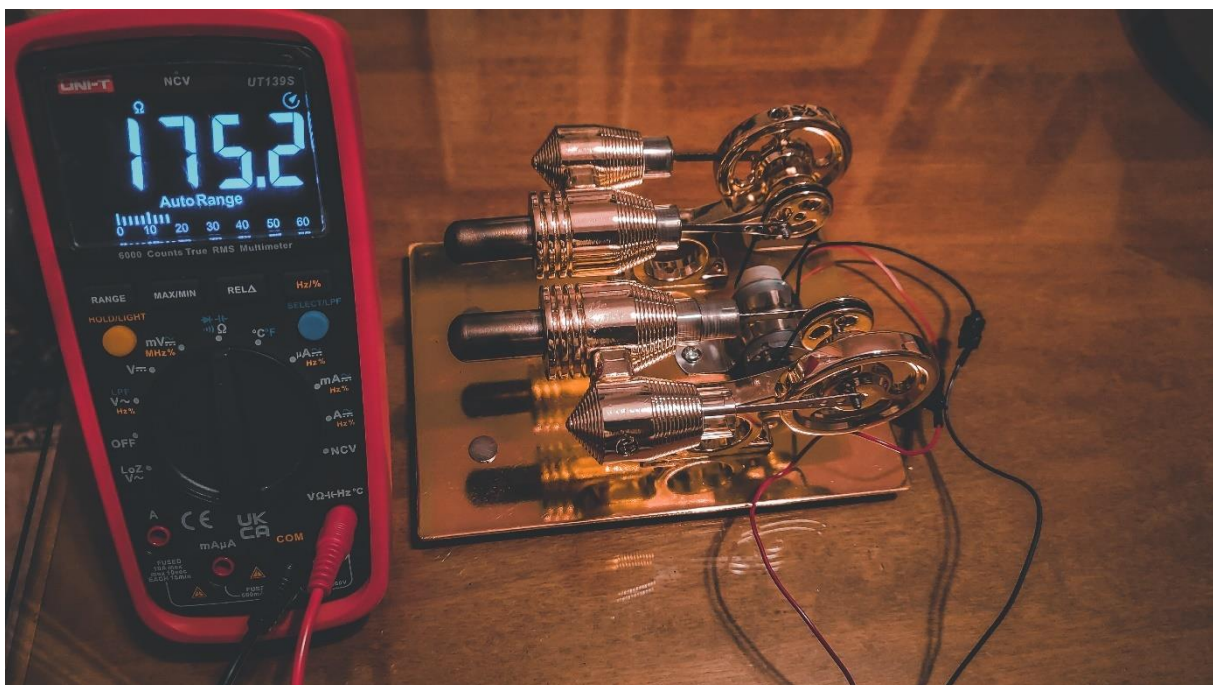
Για το πειραματικό μέρος θα χρησιμοποιηθεί μια μικρή DC ηλεκτρογεννήτρια τύπου μόνιμου μαγνήτη. Στις παρακάτω φωτογραφίες φαίνονται κάποια χαρακτηριστικά όπως η αυτεπαγωγή της γεννήτριας και η αντίσταση που παρουσιάζει στα άκρα της.



Σχήμα 3.6. DC Γεννήτρια

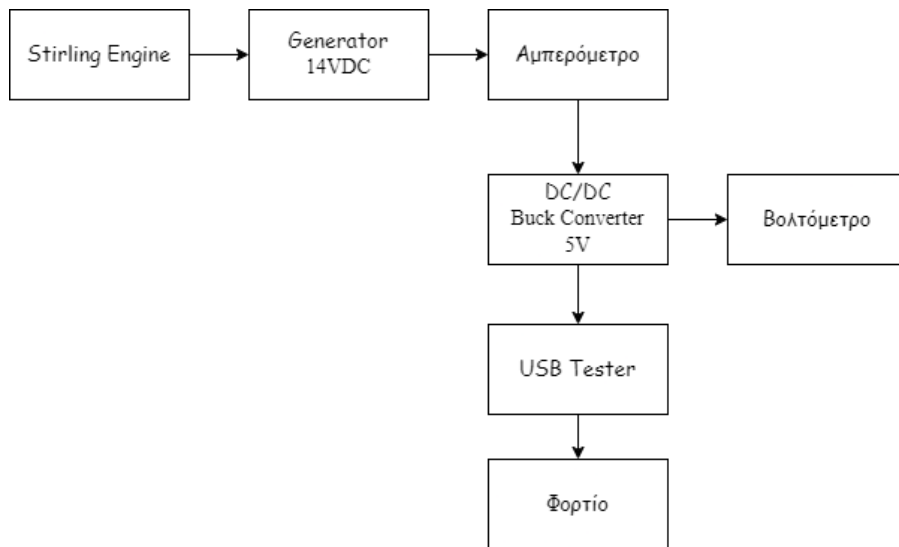


Σχήμα 3.7. Μέτρηση αυτεπαγωγής γεννήτριας με πηνίομετρο



Σχήμα 3.8. Μέτρηση αντίστασης γεννήτριας

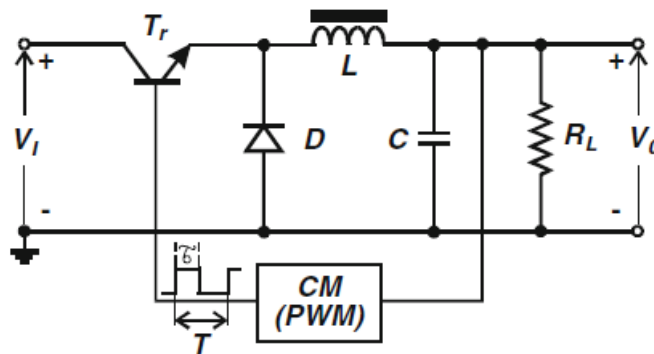
### 3.3 Διάγραμμα Block



Σχήμα 3.9. Διάγραμμα Block κατασκευαστικού μέρους

### 3.4 DC/DC Buck Converter

Ο DC/DC Buck Converter είναι ένας τύπος μετατροπέα ισχύος που υποβιβάζει μια τάση DC εισόδου σε μια χαμηλότερη DC τάση εξόδου. Χρησιμοποιείται ευρέως σε τροφοδοτικά, συστήματα φόρτισης μπαταριών και άλλα ηλεκτρονικά συστήματα για την παροχή σταθερής τάσης. Στο σχήμα 3.10. φαίνεται το βασικό κύκλωμα του μετατροπέα υποβιβασμού.



Σχήμα 3.10. Βασικό κύκλωμα μετατροπέα υποβιβασμού τάσης

#### Αρχή λειτουργίας

Ο μετατροπέας υποβιβασμού (Buck Converter) λειτουργεί σε δύο καταστάσεις: κατάσταση ON και κατάσταση OFF. Αυτές οι καταστάσεις εμφανίζονται επανειλημμένα σε έναν κύκλο μεταγωγής που ελέγχεται μέσω ενός σήματος PWM.

Κατάσταση ON:

- Όταν το διακοπτικό στοιχείο είναι ενεργοποιημένο, η τάση εισόδου εφαρμόζεται απευθείας στο πηνίο.
- Το πηνίο αποθηκεύει ενέργεια δημιουργώντας μαγνητικό πεδίο και το ρεύμα αρχίζει να αυξάνεται μέσω αυτού.
- Ο πυκνωτής εξόδου φορτίζεται και η ενέργεια παρέχεται στο φορτίο.
- Κατά την κατάσταση ON, η δίοδος είναι ανάστροφα πολωμένη και δεν άγει.

Κατάσταση OFF:

- Όταν ο διακόπτης είναι OFF, το ρεύμα μέσω του πηνίου δεν μπορεί να αλλάξει οπότε βρίσκεται μια διαδρομή μέσω της διόδου.
- Το πηνίο απελευθερώνει την αποθηκευμένη ενέργεια διατηρώντας τη ροή ρεύματος προς το φορτίο και τον πυκνωτή, ο οποίος συνεχίζει να παρέχει ενέργεια στο φορτίο.
- Ο πυκνωτής συμβάλλει στην εξομάλυνση της τάσης και στη μείωση του συντελεστή κυμάτωσης κατά τη διάρκεια της κατάστασης OFF.

Το βασικό στοιχείο για τον έλεγχο της τάσης εξόδου είναι η ρύθμιση του κύκλου λειτουργίας (Duty Cycle) του σήματος PWM. Ο κύκλος λειτουργίας είναι ο λόγος του χρόνου που ο διακόπτης είναι ενεργοποιημένος προς τη συνολική περίοδο. Αυτός ο λόγος καθορίζει τη μέση τάση στην έξοδο.

$$V_{out} = D \cdot V_{in}$$

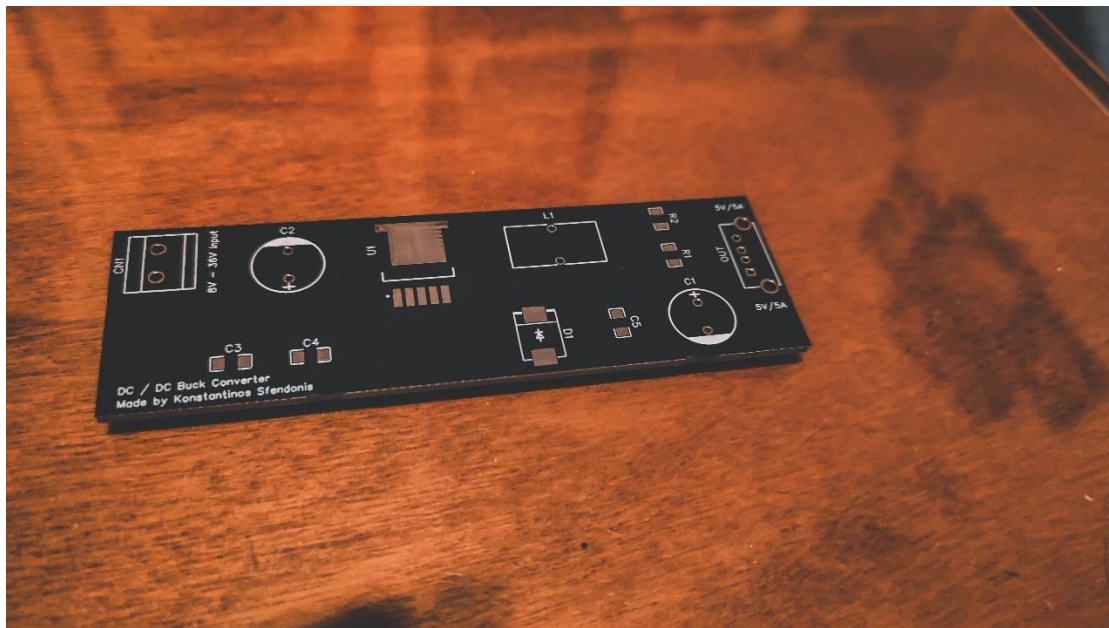
Εξίσωση 1.1.

### 3.4.1 DC/DC Buck Converter XL4015

Το XL4015 είναι ένας DC/DC PWM buck (step-down) μετατροπέας με σταθερή συχνότητα 180 KHz, και μπορεί να παρέχει έως και 5A εξόδου με υψηλή απόδοση, χαμηλή κυμάτωση και σταθεροποίηση. Το κύκλωμα ελέγχου PWM επιτρέπει τη γραμμική ρύθμιση του κύκλου λειτουργίας (Duty Cycle) από 0 έως 100%. Διαθέτει επίσης εσωτερική προστασία υπερέντασης, η οποία μειώνει τη συχνότητα λειτουργίας από 180 KHz σε 48 KHz σε περίπτωση που υπάρξει βραχυκύκλωμα.

Χαρακτηριστικά XL4015:

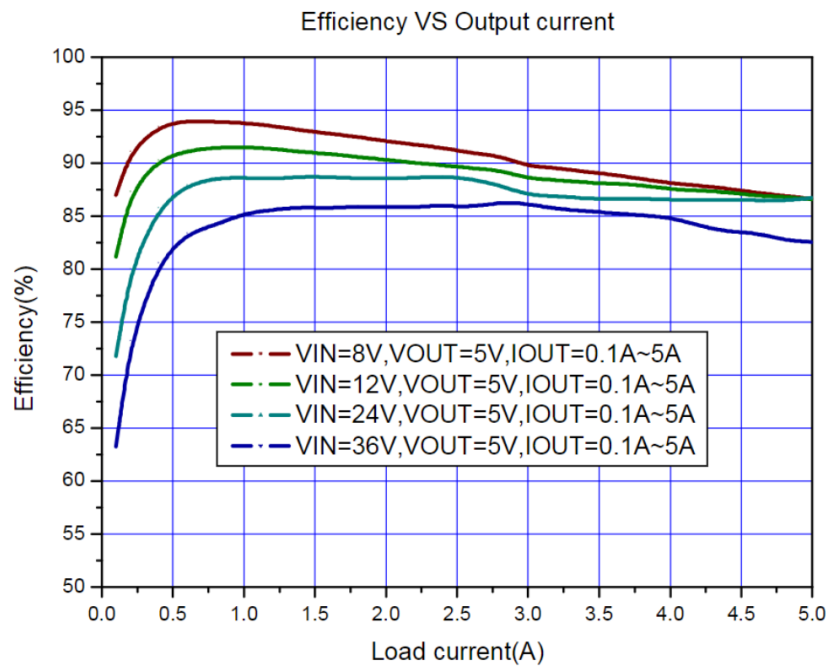
- Εύρος τάσης εισόδου 8V έως 36V
- Ρυθμιζόμενη έξοδος από 1,25V έως 32V
- Μέγιστος κύκλος λειτουργίας 100%
- Ελάχιστη πτώση 0,3V
- Σταθερή συχνότητα 180KHz
- Δυνατότητα σταθερού ρεύματος εξόδου 5A
- Υψηλή απόδοση έως 96%
- Ενσωματωμένη λειτουργία θερμικής διακοπής λειτουργίας
- Ενσωματωμένη λειτουργία περιορισμού ρεύματος
- Ενσωματωμένη λειτουργία προστασίας από βραχυκύκλωμα εξόδου[19].



Σχήμα 3.11. Πλακέτα PCB



Σχήμα 3.12. Πλακέτα PCB συναρμολογημένη



Σχήμα 3.13. Διάγραμμα απόδοσης - ρεύματος με βάση το datasheet

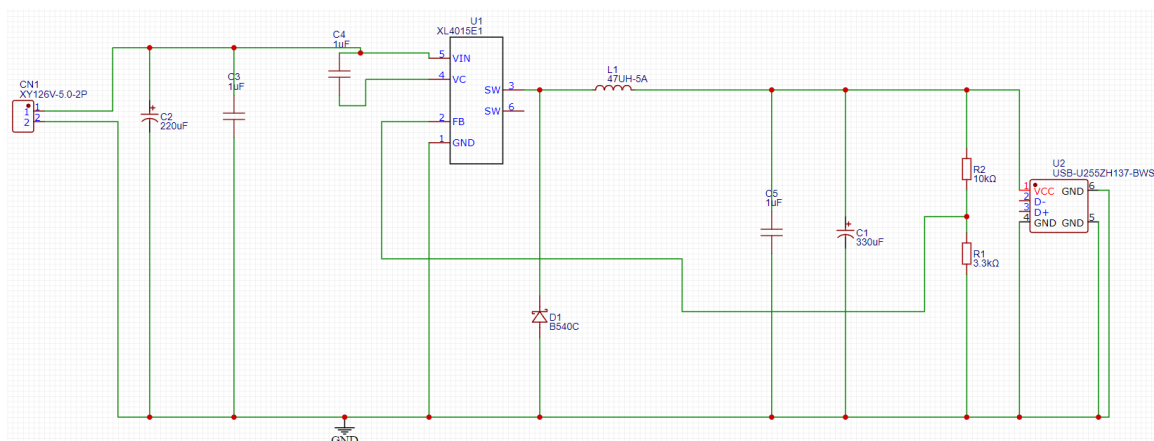
#### Σχολιασμός του διαγράμματος (Σχήμα 3.13.):

Παρατηρείτε ότι όταν η τάση εισόδου είναι 8V, η απόδοση του μετατροπέα είναι η υψηλότερη από όλες τις άλλες τάσεις, φτάνοντας πάνω από 95% για ρεύμα εξόδου περίπου 1-2A. Αυτό δείχνει ότι για αυτή την τιμή της τάσης εισόδου, ο μετατροπέας λειτουργεί με εξαιρετικά υψηλή αποδοτικότητα. Στα 12V και 24V, ο μετατροπέας παρουσιάζει ενδιάμεση απόδοση, με το  $V_{IN} = 12V$  να έχει καλύτερη αποδοτικότητα σε σχέση με το  $V_{IN} = 24V$ . Και στις δύο περιπτώσεις η αποδοτικότητα παραμένει σε υψηλά επίπεδα (85-92%), αλλά το  $V_{IN} = 12V$  διατηρεί υψηλότερη απόδοση για ρεύματα έως περίπου 3A.

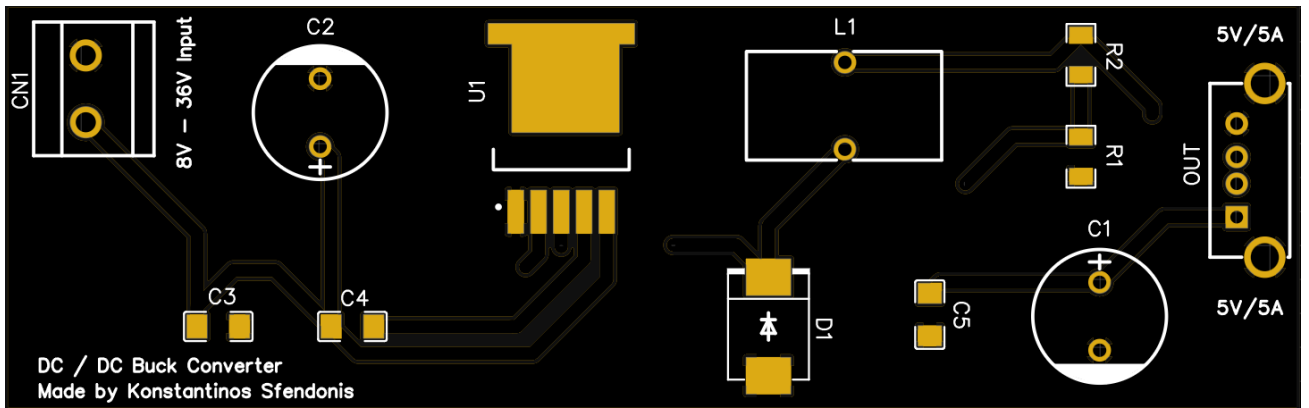
### 3.4.2 Υλικά - Κοστολόγιο PCB

Είδος	Ποσότητα	Τιμή
Screw Terminal	1	0.068€
220uF	1	0.217€
SMD 1uF	3	0.0329€
47uH	1	1.05€
B540C	1	0.167€
330uF	1	0.234€
XL4015E1	1	0.457€
USB Female	1	0.0158€
SMD 10kΩ	1	0.0148€
SMD 3.3kΩ	1	0.0139€

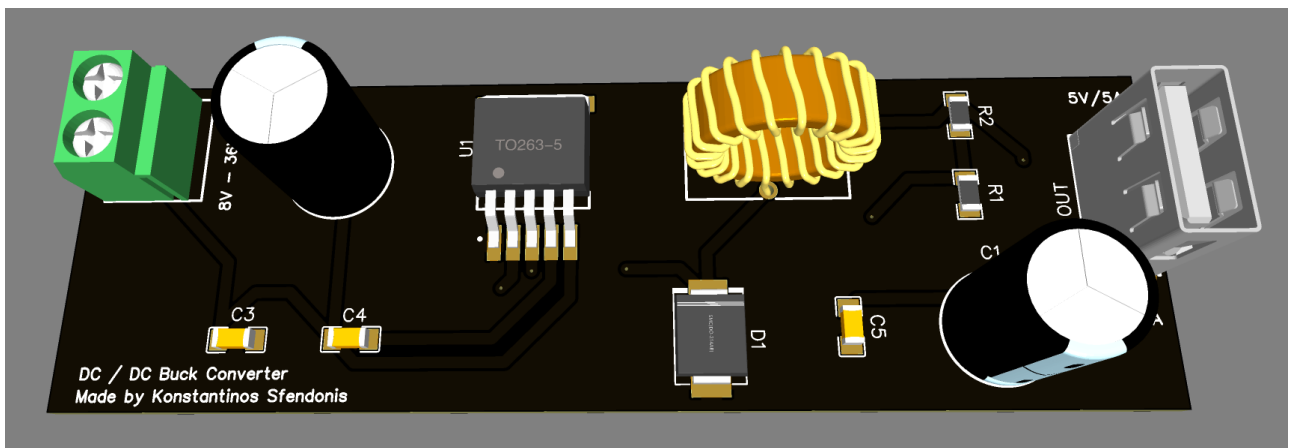
### 3.4.3 Schematic Diagram – PCB Layout



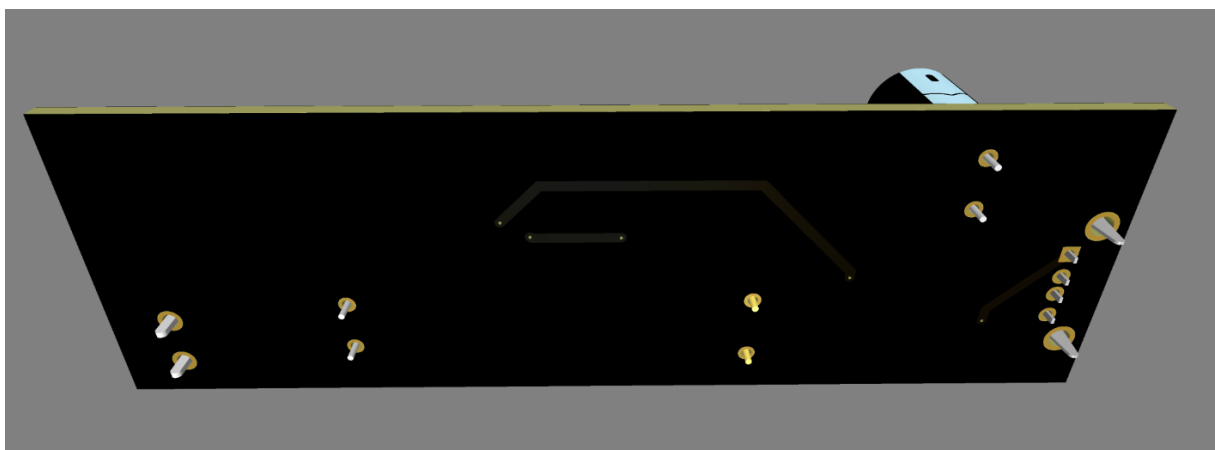
Σχήμα 3.14. Σχηματικό DC/DC Converter



Σχήμα 3.15. 2D View



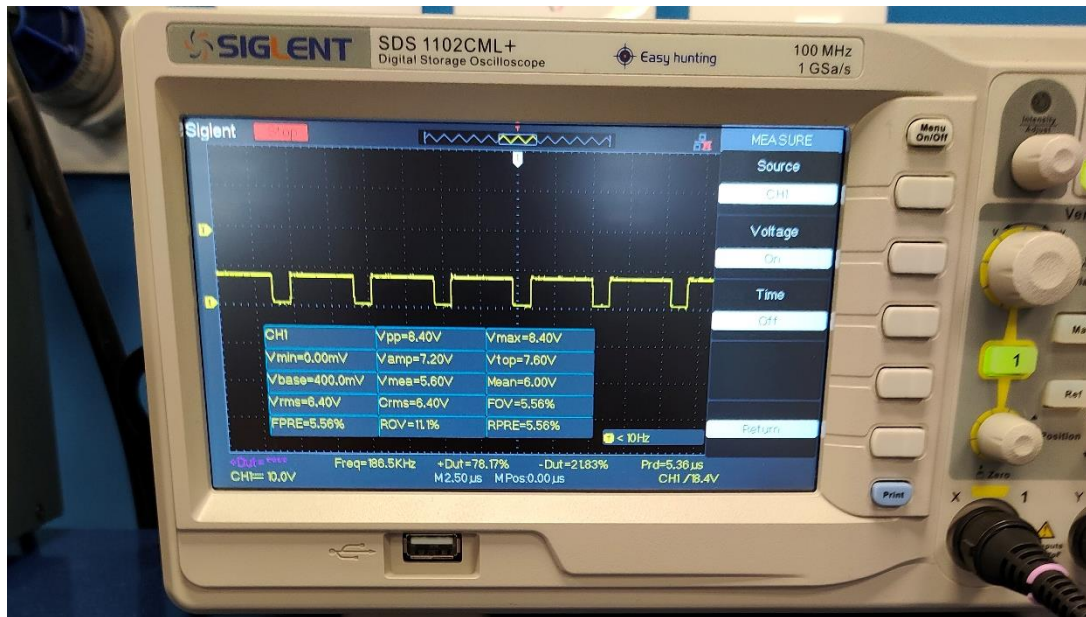
Σχήμα 3.16. 3D Top View



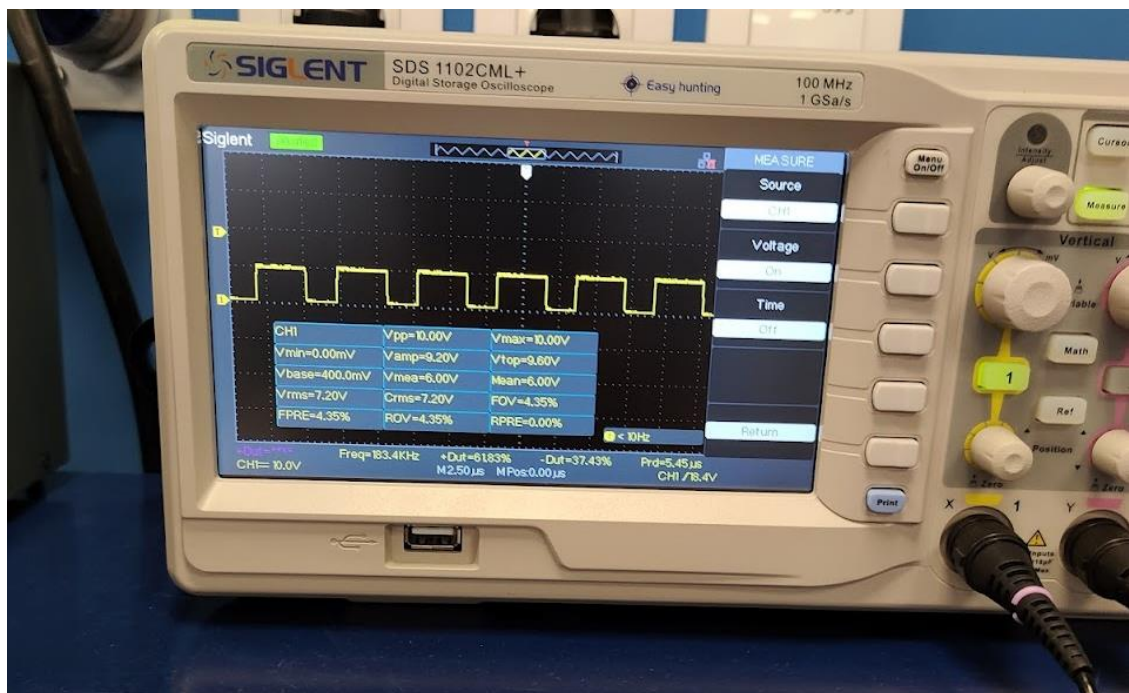
Σχήμα 3.17 3D Bottom View

### 3.4.4 Δοκιμές DC/DC Converter

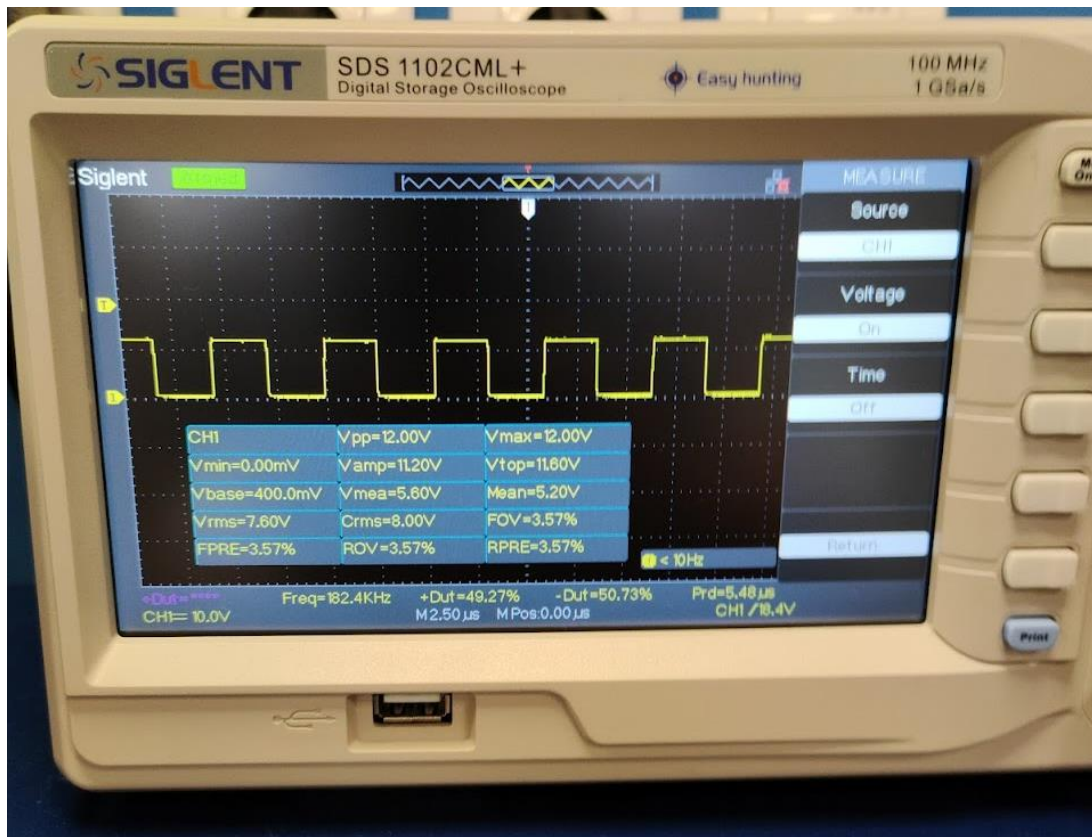
Στο πρώτο μέρος οι δοκιμές έγιναν με τη χρήση παλμογράφου SIGLENT SDS1102CML+ και ενός ρυθμιζόμενου DC τροφοδοτικού που μπορεί να παρέχει ρυθμιζόμενη έξοδο από 0V έως 30V με μέγιστο ρεύμα 3A. Για τη μέτρηση του ρεύματος εξόδου χρησιμοποιήθηκε ένα πολύμετρο FLUKE 179. Ο μετατροπέας DC-DC δοκιμάστηκε υπό διαφορετικές τάσεις εισόδου για να αναλυθεί η απόδοση του, η σταθερότητα και η αποδοτικότητά του. Στο δεύτερο μέρος οι δοκιμές έγιναν από μια μπαταρία 9V.



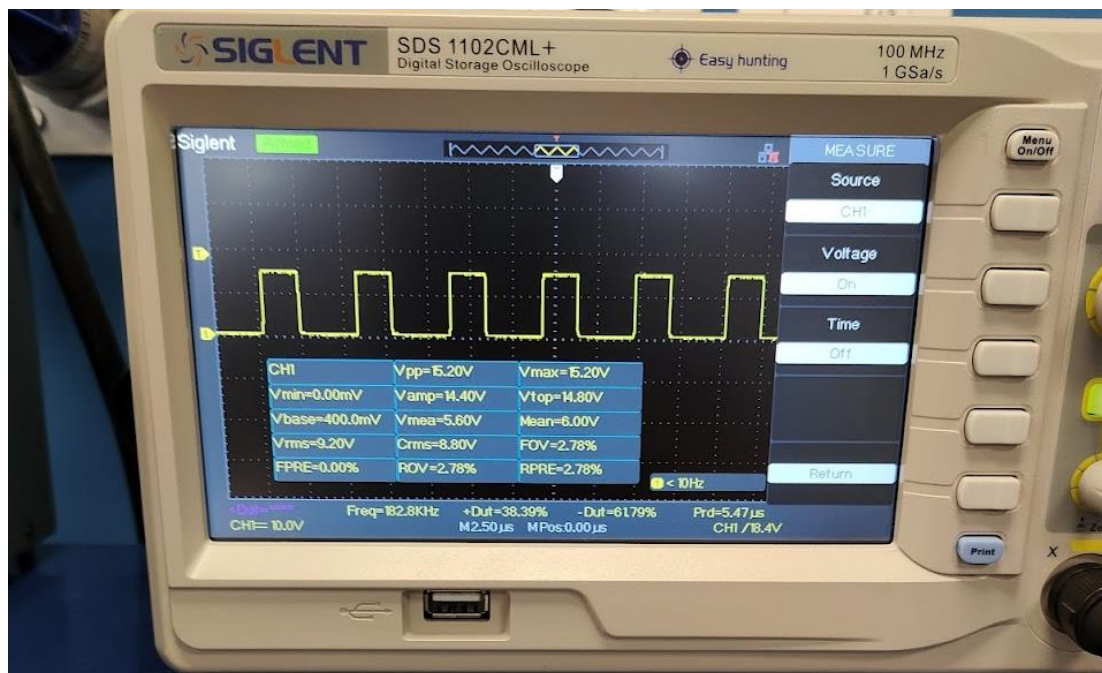
Σχήμα 3.18. Μετρήσεις με παλμογράφο στα 8V



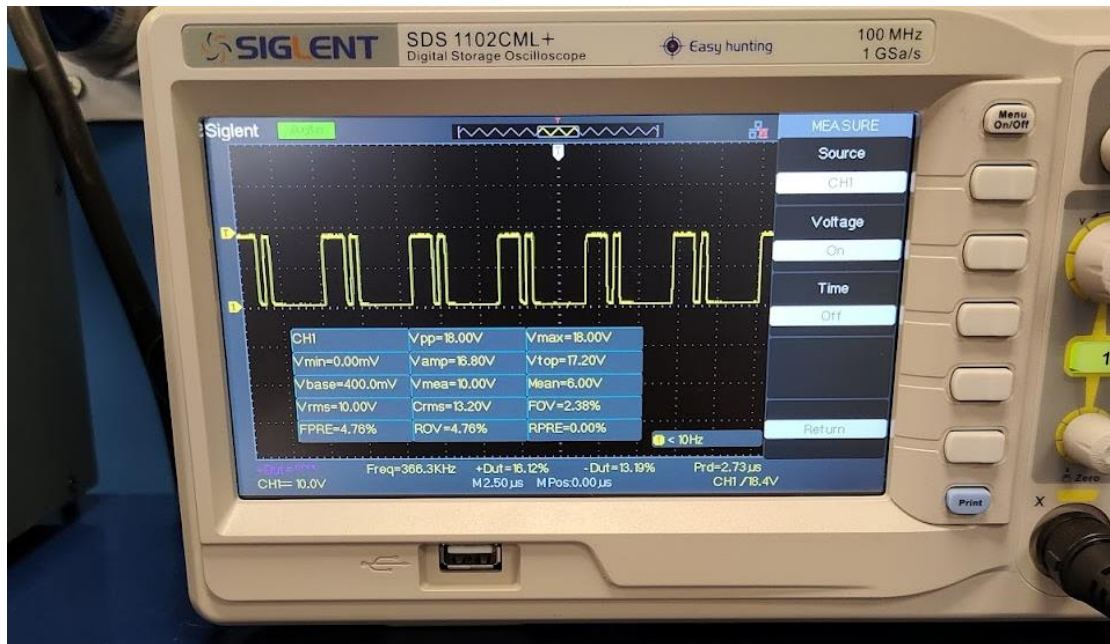
Σχήμα 3.19. Μετρήσεις με παλμογράφο στα 10V



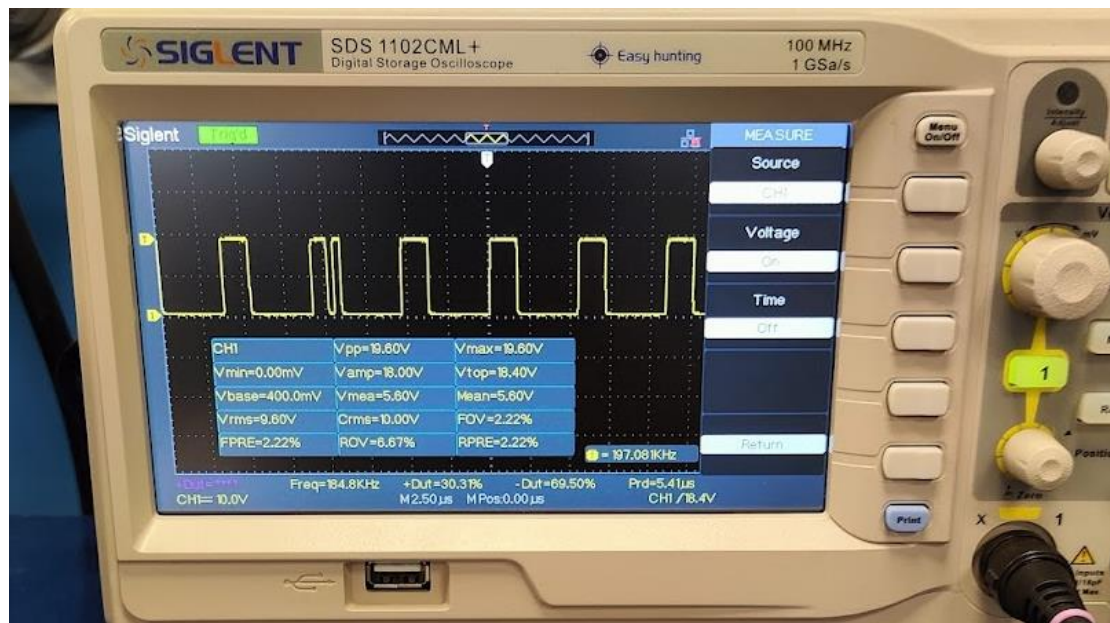
Σχήμα 3.20. Μετρήσεις με παλμογράφο στα 12V



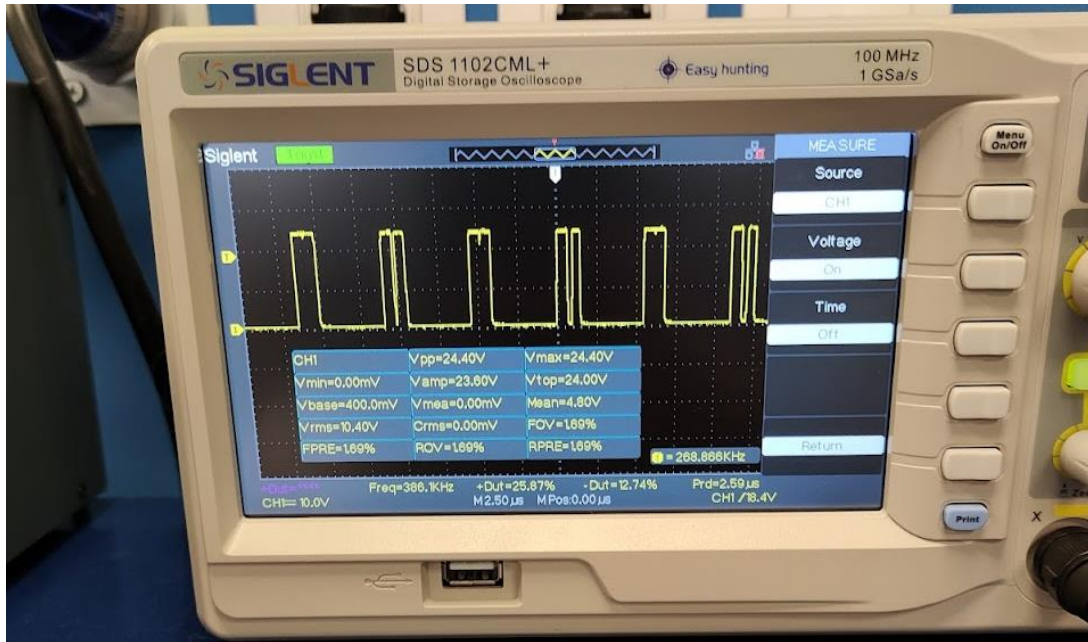
Σχήμα 3.21. Μετρήσεις με παλμογράφο στα 15V



Σχήμα 3.22. Μετρήσεις με παλμογράφο στα 18V



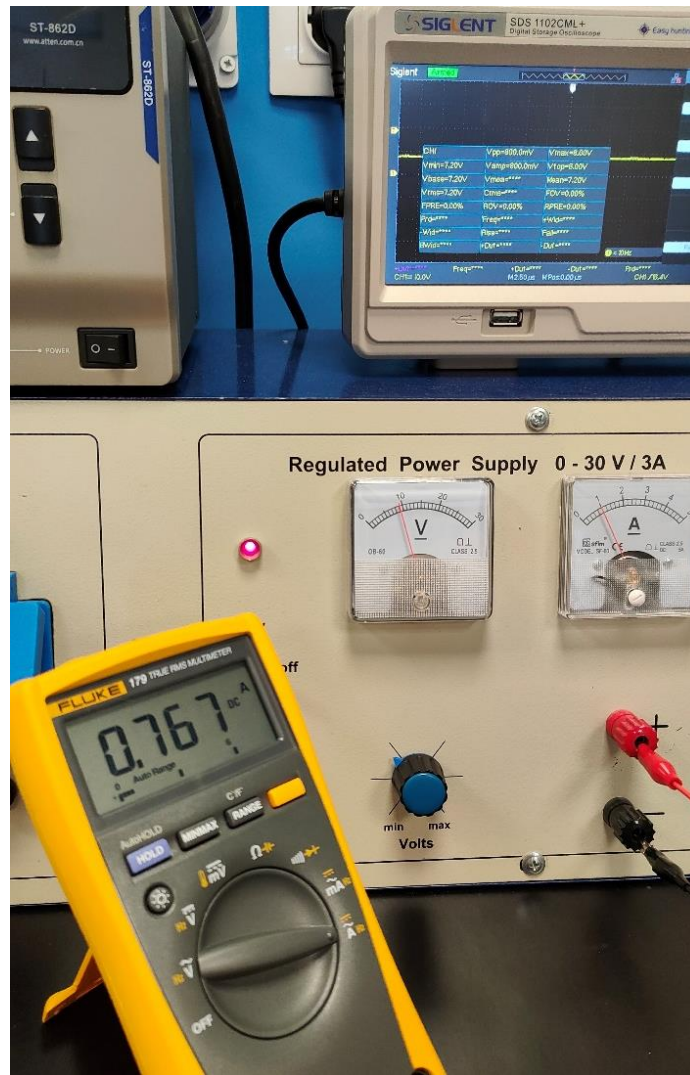
Σχήμα 3.23. Μετρήσεις με παλμογράφο στα 20V



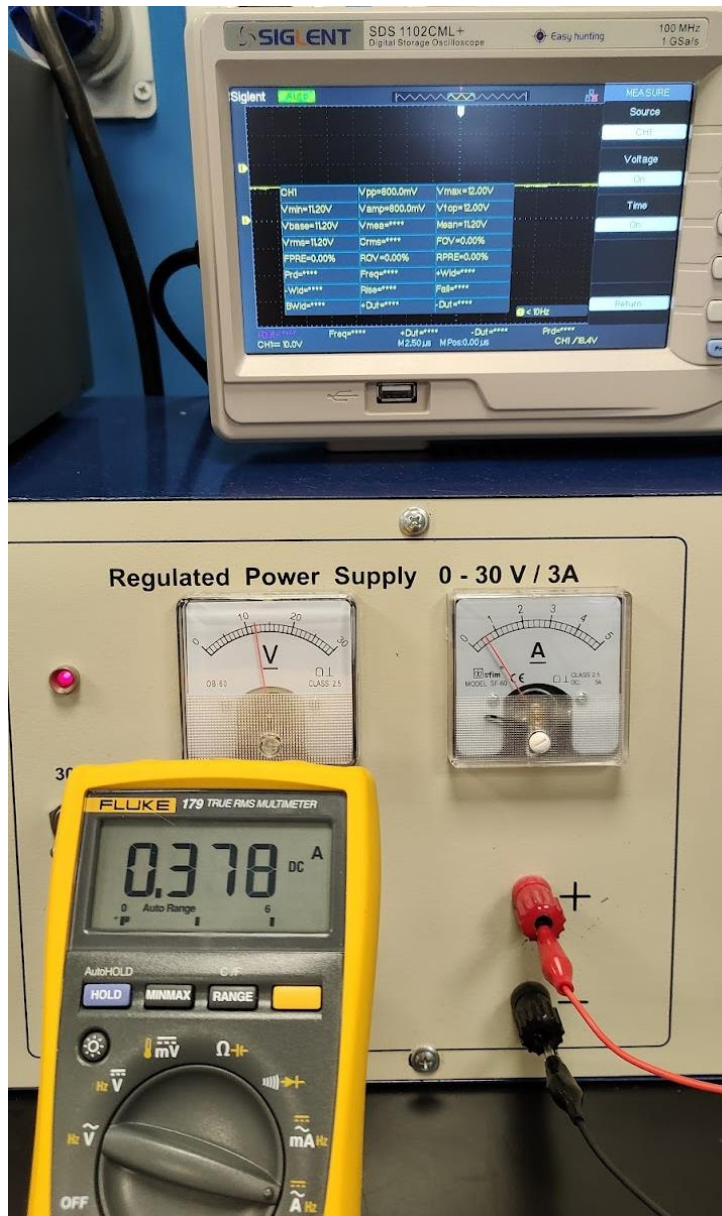
Σχήμα 3.24. Μετρήσεις με παλμογράφο στα 24V



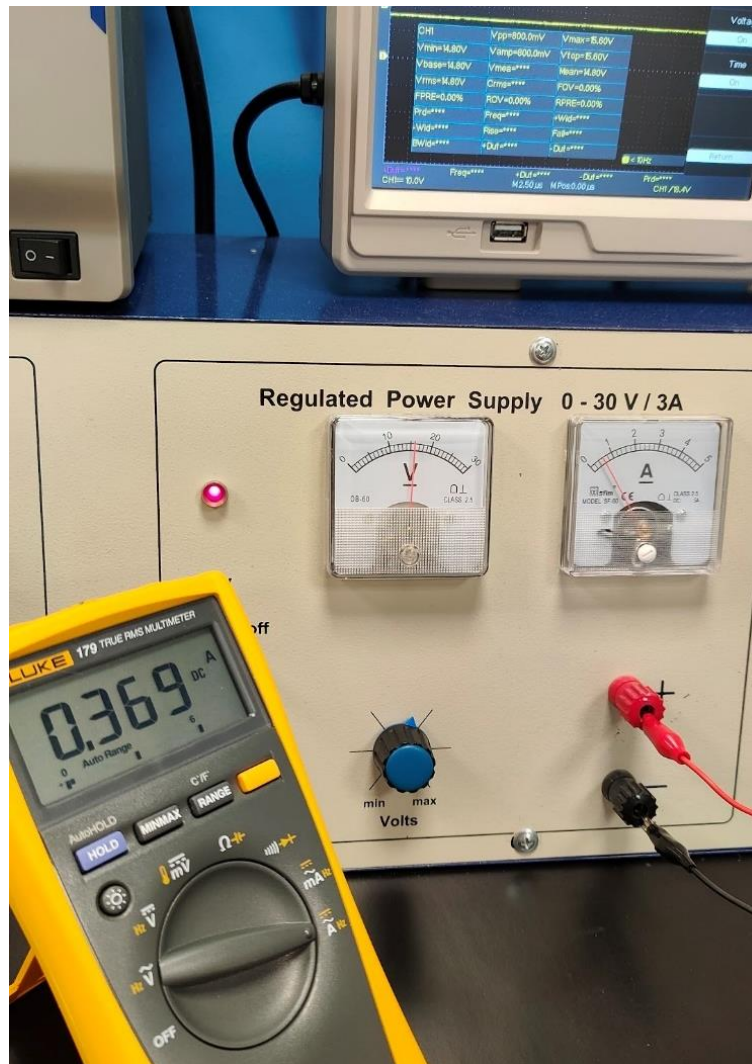
Σχήμα 3.25. Μέτρηση τάσης εξόδου με παλμογράφο χωρίς φορτίο



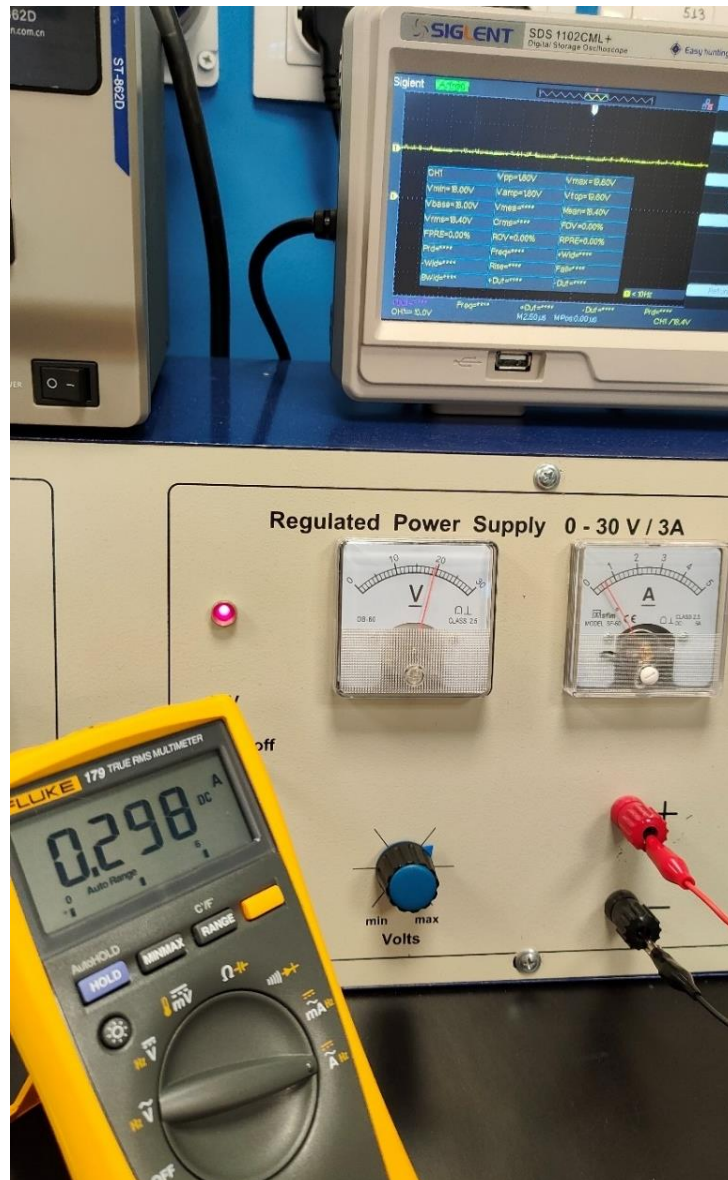
Σχήμα 3.26. Μέτρηση ρεύματος εξόδου στα 8V



Σχήμα 3.27. Μέτρηση ρεύματος εξόδου στα 12V



Σχήμα 3.28. Μέτρηση ρεύματος εξόδου στα 15V

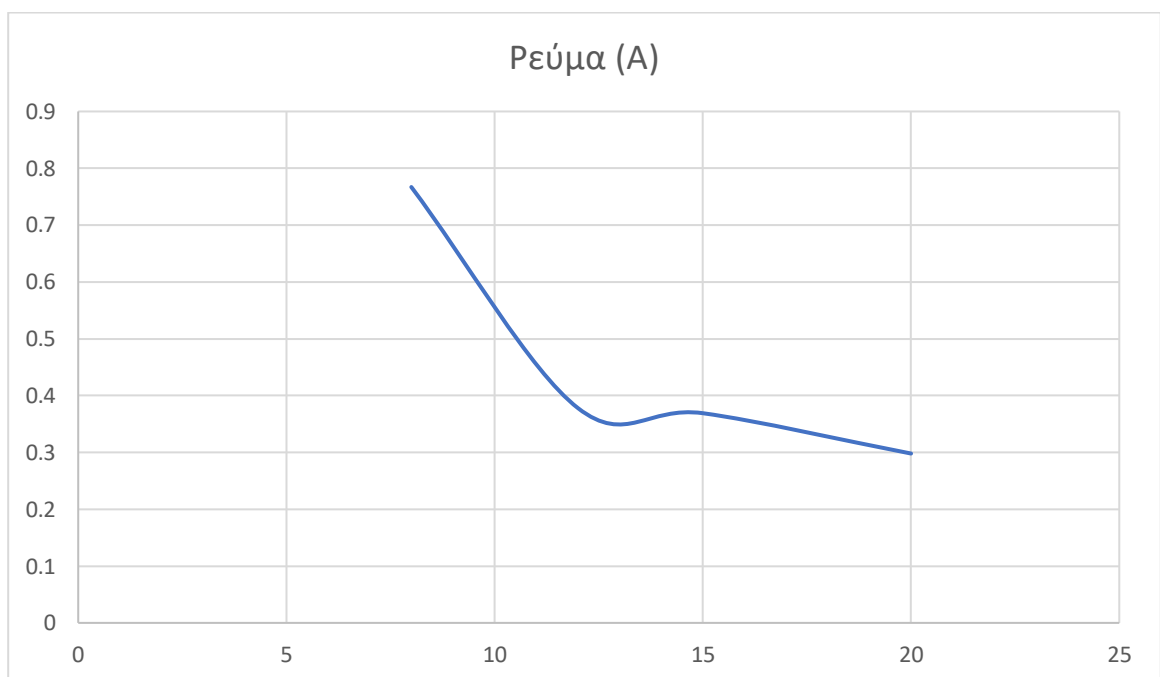


Σχήμα 3.29. Μέτρηση ρεύματος εξόδου στα 20V

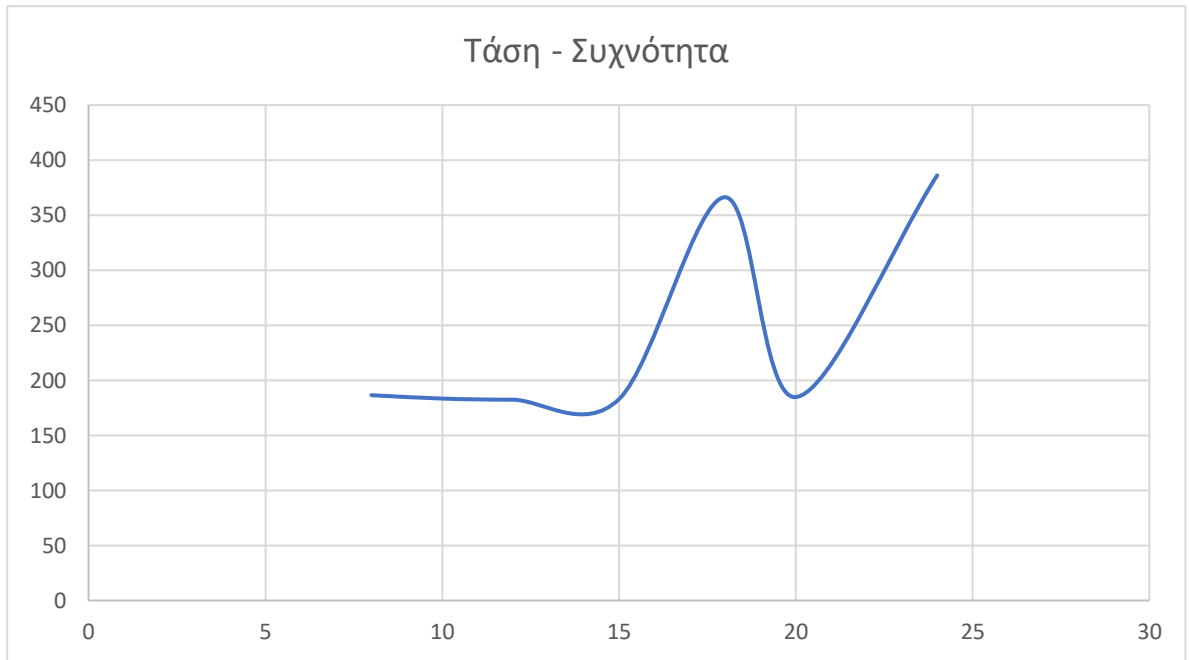
Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα παρατηρείτε ότι καθώς η τάση εισόδου στον μετατροπέα αυξάνεται μειώνεται το ρεύμα εξόδου. Παρακάτω φαίνονται αναλυτικά οι μετρήσεις.

Τάση εισόδου (V)	Ρεύμα (A)	Frequency	Duty Cycle
8	0.767	186.5kHz	78.17%
10		183.4kHz	61.83%
12	0.378	182.4kHz	49.27%
15	0.369	182.8kHz	38.39%
18		366.3kHz	15.12%
20	0.298	184.8kHz	30.31%
24		386.1kHz	25.87%

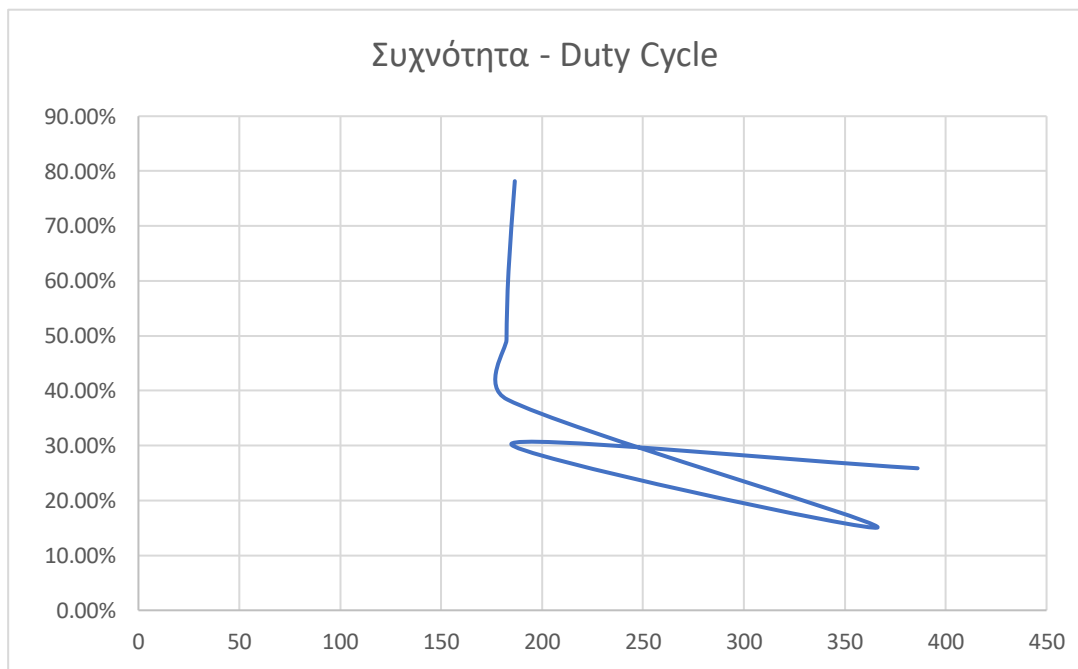
Σχήμα 3.30. Αποτελέσματα δοκιμών με μεταβαλλόμενο τροφοδοτικό



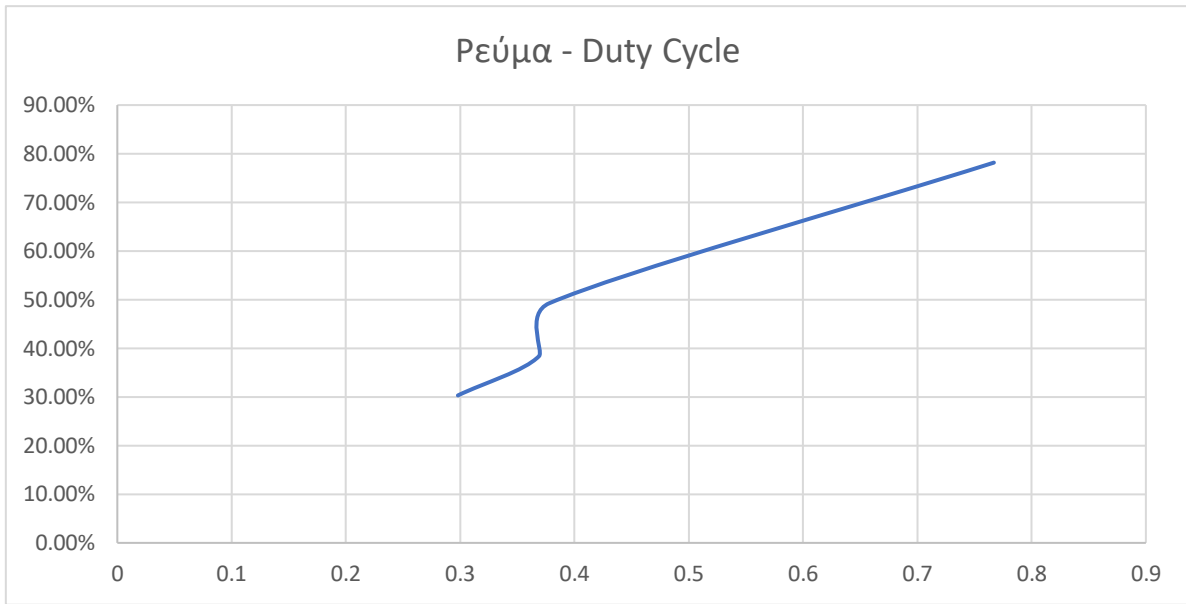
Σχήμα 3.31. Διάγραμμα τάσης - ρεύματος



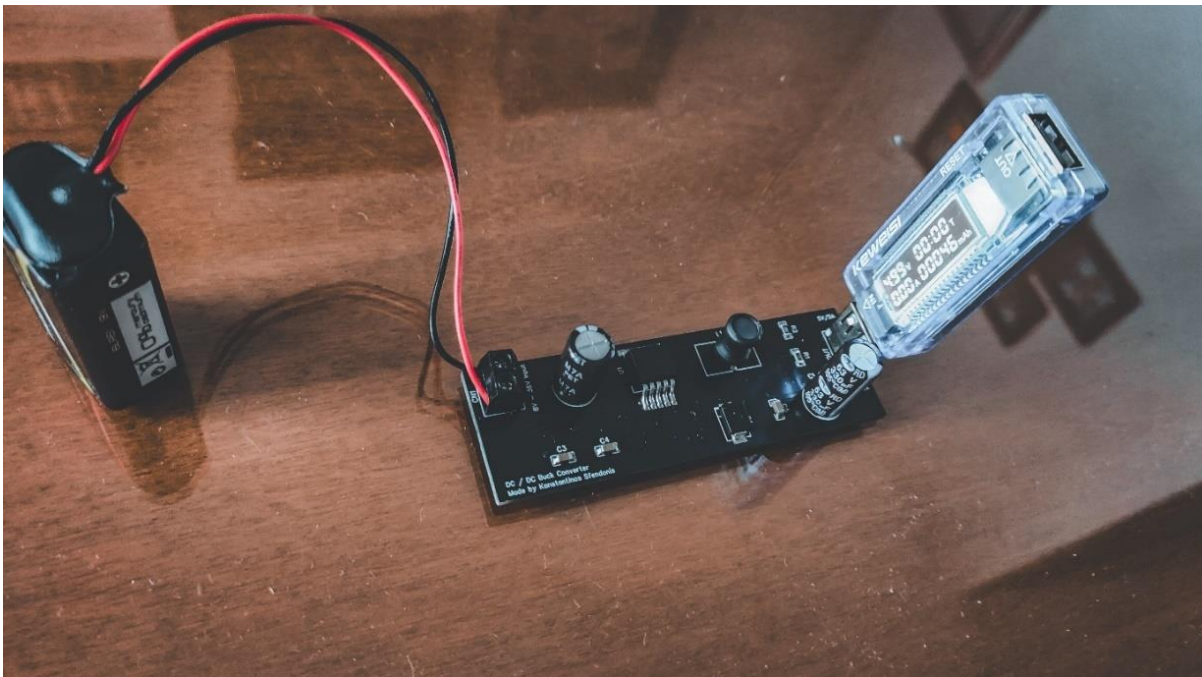
Σχήμα 3.32. Διάγραμμα τάσης - συχνότητας



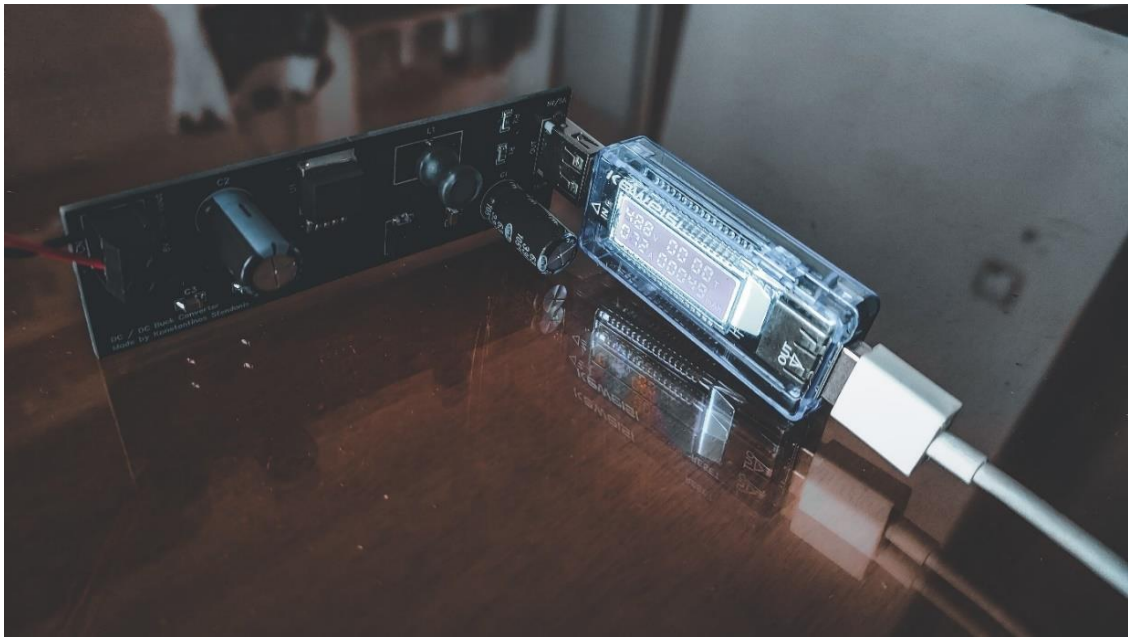
Σχήμα 3.33. Διάγραμμα συχνότητας - Duty Cycle



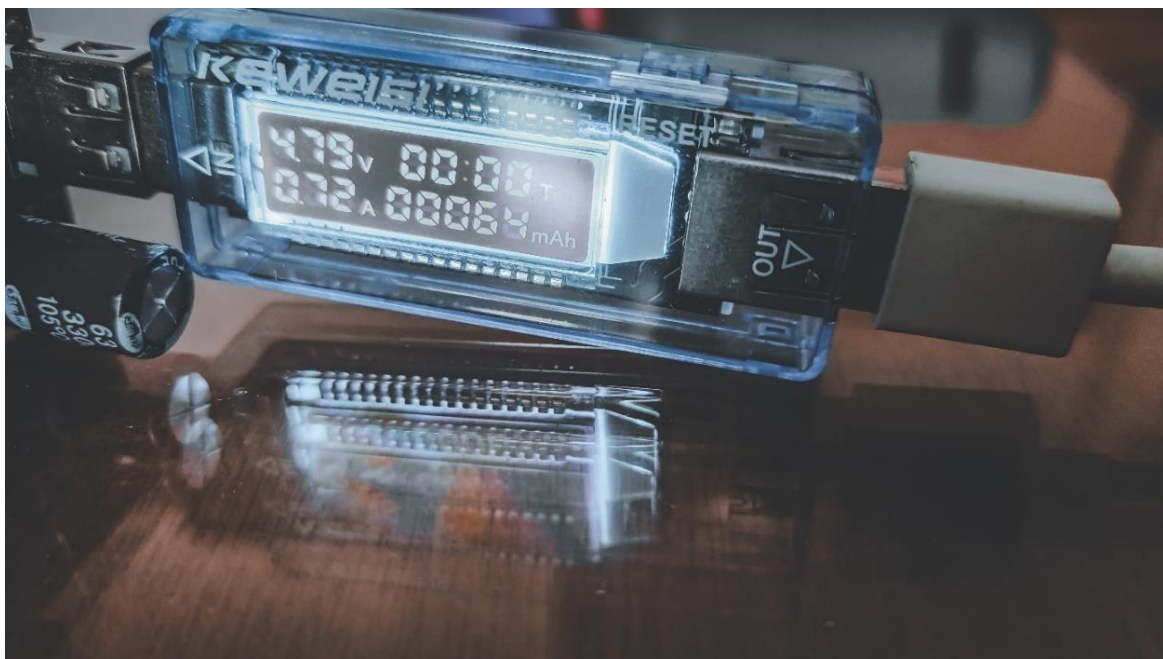
Σχήμα 3.34. Διάγραμμα ρεύματος - Duty Cycle



Σχήμα 3.35. Δοκιμή Buck Converter με μπαταρία χωρίς φορτίο



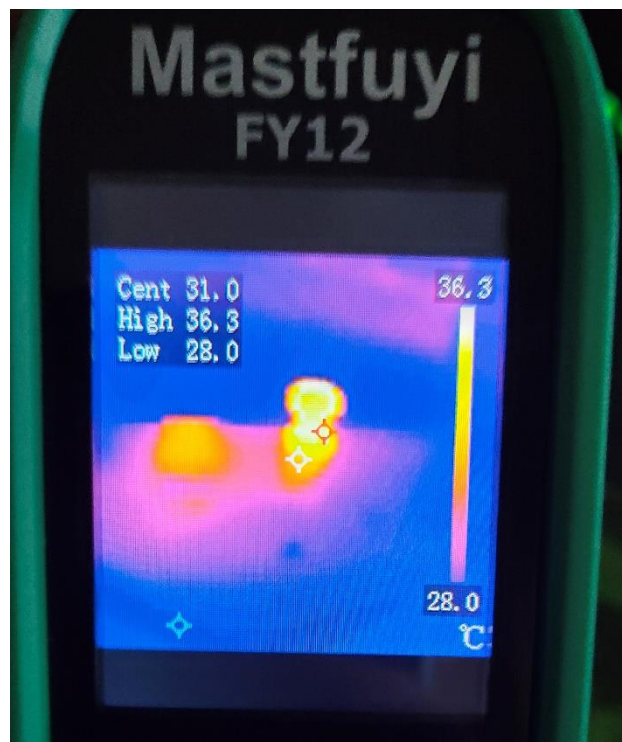
Σχήμα 3.36. Δοκιμή Buck Converter με μπαταρία και φορτίο κινητό τηλέφωνο



Σχήμα 3.37. Ένδειξη USB Tester με μπαταρία και φορτίο



Σχήμα 3.38. Φωτογραφία θερμοκάμερας κατά την έναρξη τροφοδότησης του Buck Converter



Σχήμα 3.39. Φωτογραφία θερμοκάμερας μετά από περίπου 1 λεπτό τροφοδότησης του Buck Converter



Σχήμα 3.40. Φωτογραφία θερμοκάμερας μετά απο 3 λεπτά τροφοδότησης του Buck Converter

Στις φωτογραφίες που πάρθηκαν από την θερμοκάμερα, κατά την διάρκεια δοκιμής του Buck Converter από την μπαταρία 9V ο βαθμός απόδοσης του μετατροπέα είναι αρκετά ικανοποιητικός, καθώς δίνει 720mA στο φορτίο. Παρατηρείτε επίσης ότι η θερμοκρασία του πηνίου ανεβαίνει αρκετά γρήγορα μέσα σε λίγα λεπτά λόγω του ρεύματος που τραβάει το φορτίο.

### 3.5 Δοκιμή μηχανής Stirling με λαμπτήρα

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα αναλυθούν οι δοκιμές της μηχανής Stirling με φορτίο έναν λαμπτήρα 12V. Στο πείραμά μου, επιχειρώ να τροφοδοτήσω έναν λαμπτήρα LED χρησιμοποιώντας την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από την μηχανή Stirling. Στόχος του πειράματος είναι να καταδειχθεί η δυνατότητα αυτής της τεχνολογίας να παράγει ηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να τροφοδοτήσει συσκευές χαμηλής κατανάλωσης. Η φλόγα θερμαίνει τον κάτω κύλινδρο της μηχανής. Αυτό είναι το σημείο όπου παράγεται η θερμική ενέργεια που θα θέσει σε λειτουργία τη μηχανή. Μόλις η θερμότητα αρχίζει να αυξάνεται, οι εσωτερικές αλλαγές πίεσης στον έμβολο της μηχανής ξεκινούν να προκαλούν την κίνηση του στροφαλοφόρου άξονα, δίνοντας ώθηση στη λειτουργία της.

### 3.5.1 Προετοιμασία μηχανής Stirling

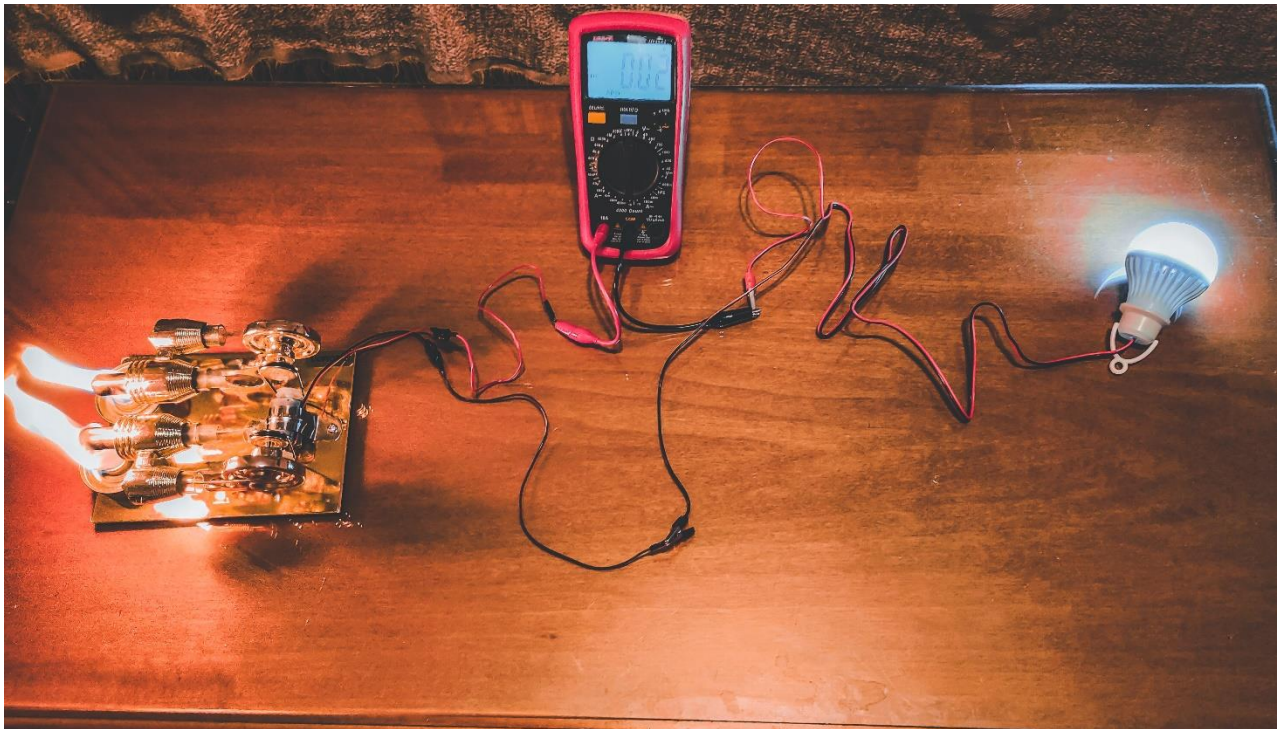
Για την εκκίνηση της μηχανής Stirling, χρησιμοποιήθηκε ισοπροπυλική αλκοόλη ως καύσιμο, βρέχοντας δύο βαμβάκια για να δημιουργηθεί η απαραίτητη φλόγα. Η ισοπροπυλική αλκοόλη είναι ιδανική επιλογή για τέτοιου είδους πειράματα, καθώς καίγεται αργά και σταθερά χωρίς να παράγει καπνό, διατηρώντας έτσι καθαρά τα εξαρτήματα της μηχανής.



Σχήμα 3.41. Έναρξη λειτουργίας μηχανής Stirling

### 3.5.2 Δοκιμή μηχανής Stirling με λαμπτήρα

Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται οι δοκιμές και οι μετρήσεις που γίνανε της μηχανής Stirling με φορτίο έναν λαμπτήρα. Στις δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν δύο ψηφιακά πολύμετρα για την μέτρηση του ρεύματος που διαρρέει τον λαμπτήρα και για την μέτρηση της τάσης εξόδου από την γεννήτρια καθώς τροφοδοτείτε ο λαμπτήρας.



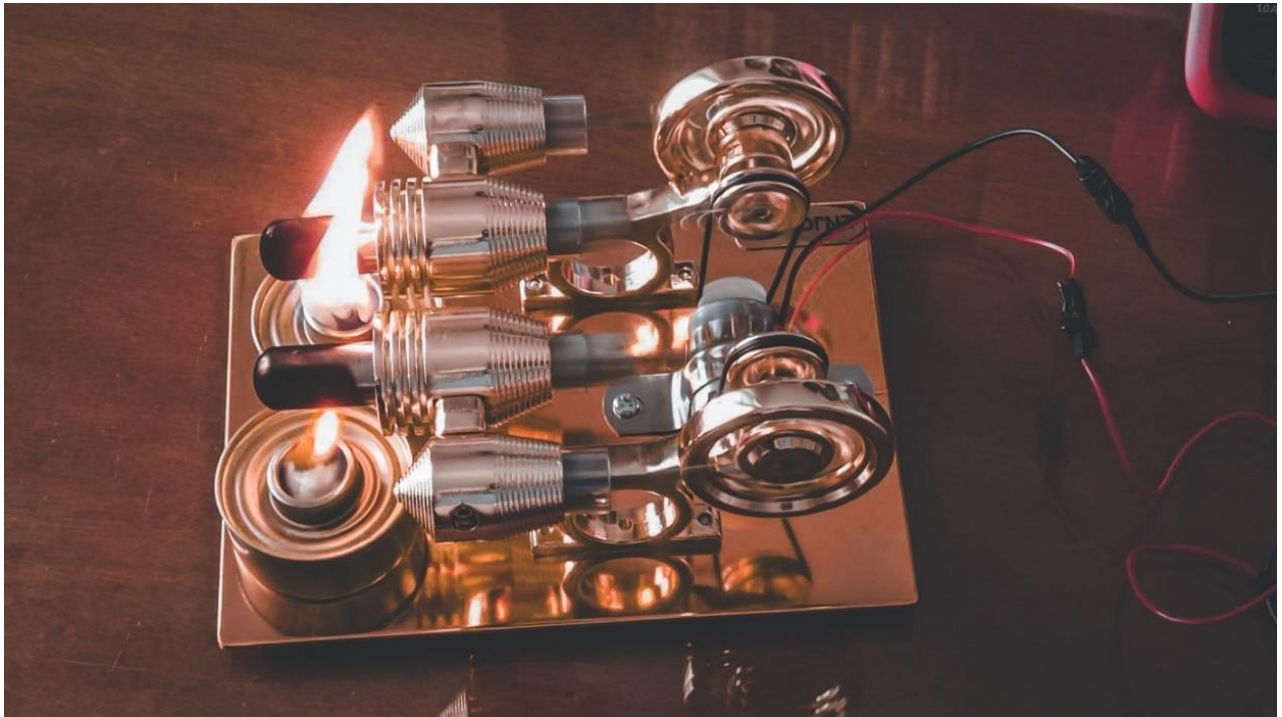
Σχήμα 3.42. Φωτογραφία συστήματος με λαμπτήρα



Σχήμα 3.43. Φωτογραφία της τάσης εξόδου της γεννήτριας με φορτίο λαμπτήρα

Στο Σχήμα 3.42. βλέπουμε ότι η μηχανή Stirling εν ώρα λειτουργίας τροφοδοτεί με επιτυχία τον λαμπτήρα και το ρεύμα εξόδου της γεννήτριας είναι περίπου 200mA. Η τάση εξόδου στα άκρα της γεννήτριας υπό φορτίο είναι 8.20V (Σχήμα 3.43).

### 3.6 Αποτελέσματα πειράματος με DC/DC Converter και μηχανή Stirling



Σχήμα 3.44. Φλεγόμενη μηχανή Stirling



Σχήμα 3.45. Μετρήσεις εξόδου γεννήτριας εν κενό



Σχήμα 3.46. Μετρήσεις εξόδου γεννήτριας με φορτίο κινητό τηλέφωνο

### 3.7 Συμπεράσματα

Η μηχανή Stirling που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα έδειξε ότι μπορεί να μετατρέψει με επιτυχία τη θερμική ενέργεια σε μηχανική και στη συνέχεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Η αποδοτικότητα της συγκεκριμένης μηχανής αποδεικνύει τη βιωσιμότητα των μηχανών Stirling σε συστήματα Micro-CHP (συστήματα συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού) για μικρές οικιακές εφαρμογές. Ο μετατροπέας υποβιβασμού DC/DC σταθεροποιεί την τάση στα 5V με επιτυχία, καθιστώντας δυνατή τη φόρτιση κινητών τηλεφώνων και άλλων μικροσυσκευών. Ο μετατροπέας είχε αποτελεσματική απόδοση τόσο σε συνθήκες με φορτίο όσο και χωρίς φορτίο. Οι μετρήσεις πάρθηκαν και με μπαταρία 9V αλλά και με την μηχανή Stirling και τα αποτελέσματα ήταν ικανοποιητικά βάση της απόδοσης της πηγής εισόδου. Η τροφοδοσία κινητών τηλεφώνων και άλλων μικροσυσκευών μέσω του συστήματος δείχνει ότι η χρήση της τεχνολογίας αυτής μπορεί να καλύψει τις μικρές καθημερινές ανάγκες. Το σύστημα Micro-CHP με μηχανή Stirling μπορεί να αποτελέσει μια βιώσιμη λύση για οικιακή χρήση, εξοικονομώντας ενέργεια και μειώνοντας το κόστος ηλεκτρισμού και θέρμανσης σε μεγαλύτερης κλίμακας πρότζεκτ. Η γεννήτρια παράγαγε περίπου 20V στην έξοδο όταν λειτουργούσε εν κενό, κάτι που είναι πολύ σημαντικό για τον μετατροπέα καθώς το εύρος της τάσης εισόδου για τον μετατροπέα είναι 8-36V. Αυτή η τιμή των 20V εισόδου επιτρέπει τη σταθεροποίηση της τάσης για την τροφοδοσία συσκευών μέσω του DC/DC Converter. Παρατηρήθηκε επίσης ότι όταν το κινητό τηλέφωνο συνδεόταν στον μετατροπέα, ο κινητήρας Stirling μείωνε τις στροφές του λόγω του αυξημένου φορτίου. Αυτό υποδεικνύει ότι ο κινητήρας πιεζόταν κατά τη λειτουργία του με φορτίο σε σχέση με την εν κενό λειτουργία, επηρεάζοντας την απόδοσή του. Τέλος, με μια γεννήτρια μεγαλύτερη και αποδοτικότερη η οποία θα μπορούσε να παρέχει ρεύμα πολύ μεγαλύτερο από 40mA η συγκεκριμένη εφαρμογή θα μπορούσε να παρέχει με πολύ μεγάλη αξιοπιστία και αποδοτικότητα ρεύμα για καθημερινές εφαρμογές οικιακής χρήσης.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. D. G. Thombare and S. K. Verma. “Technological development in the Stirling cycle engines.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, no. 1, pp. 1-38, 2008.
- [2]. D. Berchowitz. A personal history in the development of the modern Stirling engine Athens, OH, USA: Global Cooling Inc., 2018.
- [3]. A. Kumar, “Predicting efficiency of solar cells based on transparent conducting electrodes.” *Journal of Applied Physics*, vol. 121, no. 1, p. 014502, Jan. 2017.
- [4]. C. Toro and N. Lior, “Analysis and comparison of solar-heat driven Stirling, Brayton and Rankine cycles for space power generation.” *Energy*, vol. 120, pp. 549-564, 2017.
- [5]. L. G. Thieme, S. Qiu, and M. A. White, “Technology development for a Stirling radioisotope power system for deep space missions,” U. S. Patent E-12043, 2000.
- [6]. M. H. Ahmadi, M. A. Ahmadi, and F. Pourfayaz, “Thermal models for analysis of performance of Stirling engine: A review.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 68, pp. 168-184, 2017.
- [7]. D. G. Thombare, and S. K. Verma, S. K., “Technological development in the Stirling cycle engines.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, no. 1, pp. 1-38, 2008.
- [8]. D. M. Berchowitz, “Stirling cycle engine design and optimization.” Doctoral dissertation thesis, 1986.
- [9]. T. A. Arslan, and T. Kocakulak, “A Comprehensive Review on Stirling Engines.” *Engineering Perspective*, vol. 2, no. 3, pp. 42-56, 2023.
- [10]. J. Egas, and D. M. Clucas, D. M. “Stirling engine configuration selection.” *Energies*, vol. 11, no. 3, p. 584, 2018.
- [11]. D. Erol, H. Yaman, and B. Dogan, “A review development of rhombic drive mechanism used in the Stirling engines.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 78, pp. 1044-1067, 2017.
- [12]. I. Staffell, and R. Green, “The cost of domestic fuel cell micro-CHP systems.” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 2, pp. 1088-1102, 2013.
- [13]. M. M. Maghanki, B. Ghobadian, G. Najafi, and R. J. Galogah, “Micro combined heat and power (MCHP) technologies and applications.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 28, pp. 510-524, 2013.
- [14]. M. A. Khan, and H. Gohari Darabkhani, “Micro combined heat and power (micro-CHP) Systems for Household Applications: techno-economic and risk assessment of the Main prime movers.” *International Journal of Green Energy*, vol. 21, no. 7, pp. 1463-1475, 2024.
- [15]. M. De Paepe, P. D’Herdt, and D. Mertens, “Micro-CHP systems for residential applications.” *Energy conversion and management*, vol. 47 no. 18-19, pp. 3435-3446, 2006.
- [16]. H. Ren, and W. Gao, “Economic and environmental evaluation of micro CHP systems with different operating modes for residential buildings in Japan.” *Energy and Buildings*, vol. 42, no. 6, pp. 853-861, 2010.
- [17]. I. Staffell, and R. Green, “The cost of domestic fuel cell micro-CHP systems.” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 2, pp. 1088-1102, 2013.
- [18]. Enjomor Stirling Engine 4-Cylinder Hot Air Stirling Engine Generator External Combustion Engine Model. Available: [https://www.enginediyshop.com/products/enjomor-stirling-engine-4-cylinder-hot-air-stirling-engine-generator-external-combustion-engine-model?\\_pos=1&\\_sid=1769332ed&\\_ss=r](https://www.enginediyshop.com/products/enjomor-stirling-engine-4-cylinder-hot-air-stirling-engine-generator-external-combustion-engine-model?_pos=1&_sid=1769332ed&_ss=r). Accessed: [01/09/2024].
- [19]. XLSEMI. "XL4015 5A 180KHz 36V Buck DC to DC Converter." Available: <https://www.xlsemi.com/datasheet/XL4015-EN.pdf>. Accessed: [01/09/2024].