

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΗΧΑΝΗΣ STIRLING



ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ: ΣΚΑΝΔΑΛΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΓΑΡΑΦΑΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΚΑΛΟΓΗΡΟΥ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΠΑΤΡΑ 2012

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολογίας του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πάτρας και αναφέρεται στην κατασκευή και μελέτη της αρχής λειτουργίας των μηχανών Stirling. Οι εργοπαραγωγές Stirling έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιούν πολλαπλά καύσιμα όπως στερεά, υγρά ή αέρια καθώς και βιομάζα. Από τις ήπιες ή ανανεώσιμες πηγές ενέργειας κυρίως την ηλιακή με υπολογίσιμη ισχύ και δευτερευόντως την γεωθερμία από τις μηχανές Χαμηλής Διαφοράς Θερμοκρασίας (LTD). Οι μηχανές αυτές προκαλούν λιγότερη χημική ρύπανση αλλά και ηχορύπανση συγκριτικά με τους κλασσικούς κινητήρες πετρελαίου (Diesel) και βενζίνης (Otto) της ίδιας ισχύος εξόδου.

Στην αρχή γίνεται μια αναδρομή στο παρελθόν των μηχανών Stirling και στην εξέλιξη τους, ενώ στην συνέχεια προσπαθούμε να αναλύσουμε την αρχή λειτουργίας τους αλλά κάνουμε και μια εισαγωγή στις ηλιακές μηχανές Stirling. Τέλος, παρουσιάζουμε την προσπάθεια μας να κατασκευάσουμε μία μηχανή Stirling για πειραματικούς σκοπούς αλλά και για την παρουσίαση της παρούσης πτυχιακής εργασίας.

Ευχαριστούμε θερμά τον Επιβλέποντα Καθηγητή μας κ. Καλογήρου Ιωάννη Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Μηχανολογίας, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μας πρόσφερε για την πραγματοποίηση της Εργασίας, Επίσης, ευχαριστούμε θερμά τον Υπεύθυνο Μηχανουργείου κ. Μεντζελόπουλο Δημήτριο Εργαστηριακό Συνεργάτη του Τμήματος Μηχανολογίας για την πολύτιμη βοήθεια του κατά την διάρκεια της κατασκευής της μηχανής στο μηχανουργείο της σχολής.

Σκανδάλης Δημήτριος

Γαράφας Αντώνιος

Ιούλιος 2012

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Πτυχιακή Εργασία αναφέρεται στην κατασκευή και μελέτη της αρχής λειτουργίας της μηχανής Stirling, οι οποίες έχουν αρκετές πρακτικές εφαρμογές με χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας αλλά και Ήπιων Μορφών Ενέργειας. Κάποιες από τις εφαρμογές είναι η χρήση της σε αγροτικές εγκαταστάσεις, σε καταφύγια, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, σε, κάποιες περιπτώσεις, κινητήρας για οχήματα ή πλεούμενα.

Η ανάπτυξη του θέματος γίνεται σε έξι Κεφάλαια. Στο πρώτο Κεφάλαιο αναφέρονται οι δύο βασικές κατηγορίες των μηχανών Stirling η υψηλής θερμοκρασίας και η χαμηλής διαφοράς θερμοκρασίας. Αναφέρονται, επίσης τα πλεονεκτήματα της κάθε μίας κατηγορίας αλλά και ποιες απαιτήσεις μπορεί η κάθε κατηγορία να καλύψει. Παρουσιάζουμε τις τρεις βασικές διαμορφώσεις των υψηλής θερμοκρασίας μηχανών και τις φάσεις των χαμηλής διαφοράς θερμοκρασίας μηχανών.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζουμε την αρχή λειτουργίας των μηχανών αυτών μέσα από διαγράμματα και επεξηγήσεις. Συγκρίνουμε τον κύκλο Stirling με τον κύκλο Carnot και σχολιάζουμε τις διαφοροποιήσεις του ιδανικού κύκλου Stirling έναντι των άλλων θερμικών μηχανών. Παρουσιάζουμε την αρχή λειτουργίας των μηχανών Stirling και αναλύουμε όλες τις φάσεις κατά την διάρκεια της λειτουργίας τους. Αναφέρουμε τους τύπους απόδοσης, ιδανικής μηχανικής ισχύος κατά Schmidt και κατά West. Επίσης, παρουσιάζουμε την εξίσωση Beale και τον τύπο μέσης ισχύος πίεσης για τον υπολογισμό της παραγωγής μηχανικής ισχύος.

Στο τρίτο κεφάλαιο, έπειτα από μια παρουσίαση της λειτουργίας και των πλεονεκτημάτων των μηχανών Stirling κάνουμε μια πιο αναλυτική αναφορά στην εξέλιξη αυτών καθώς και τι πρακτικές εφαρμογές τους στην βιομηχανία αλλά και σε άλλους τομείς. Στο τέλος αυτού του κεφαλαίου παρουσιάζουμε αναλυτικά τα πειράματα αλλά και τις κατασκευές κάποιων επιστημόνων τα οποία συνετέλεσαν καθοριστικά στην βελτιστοποίηση των μηχανών Stirling.

Το τέταρτο κεφάλαιο αναφέρεται σε ένα πάρα πολύ σημαντικό κομμάτι των μηχανών Stirling αυτό της παραγωγής ενέργειας από τον ήλιο. Αυτή η εφαρμογή αποδεικνύεται μεγάλο ατού των μηχανών αυτών καθώς μετατρέπει άμεσα την ηλιακή ενέργεια σε μηχανική ενέργεια. Επίσης, αναφέρονται οι εξελίξεις που έγιναν σε αυτό τον τομέα και παρουσιάζονται κάποιες διαφορετικές διαμορφώσεις με βασική την τεχνολογία ηλιακού πιάτου/μηχανής η οποία έχει αναπτυχθεί από την δεκαετία του '70 από διάφορες εταιρίες αλλά και από την NASA.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται μια μικρή αναφορά στην εξέλιξη των LTD μηχανών Stirling (χαμηλής διαφοράς θερμοκρασίας - Low Temperature Difference). Ο Haneman, ο White και ο Kollin είναι μερικούς από αυτούς που ασχολήθηκαν με αυτές τις μηχανές και την διάταξη Ringbom.

Στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζουμε την δικιά μας προσπάθεια κατασκευής μίας μηχανής Stirling υψηλής θερμοκρασίας άλφα τύπου. Παρουσιάζουμε ένα-ένα τα κομμάτια τα οποία κατασκευάσαμε, τον τρόπο με τον οποίο τα κατασκευάσαμε, τις διαστάσεις τους αλλά και φωτογραφίες από την φάση κατασκευής τους.

Τα σπουδαιότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από την Εργασία είναι πως για να έχουμε καλή απόδοση σε μια μηχανή Stirling χρειάζεται νέα υλικά και καλή μεταφορά θερμότητας στο ρευστό πλήρωσης. Οι ηλιακές LTD μηχανές δείχνουν πολλά υποσχόμενες για το μέλλον καθώς η επένδυση στον ήλιο και το πλεονέκτημά τους να μετατρέπουν άμεσα την ηλιακή ενέργεια σε μηχανική συμβάλλουν στο χρησιμοποιηθούν ευρέως στο μέλλον. Καταλήξαμε στο συμπέρασμα πως αυτοματοποιημένες εργαλειομηχανές χρειάζονται για την κατασκευή μίας μηχανής Stirling και κάποια υλικά που δεν βρίσκονται εύκολα στο λιανικό εμπόριο οπότε και η κατασκευή μίας μηχανής Stirling για Πτυχιακή Εργασία θα ανέβασε το κόστος δραματικά.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

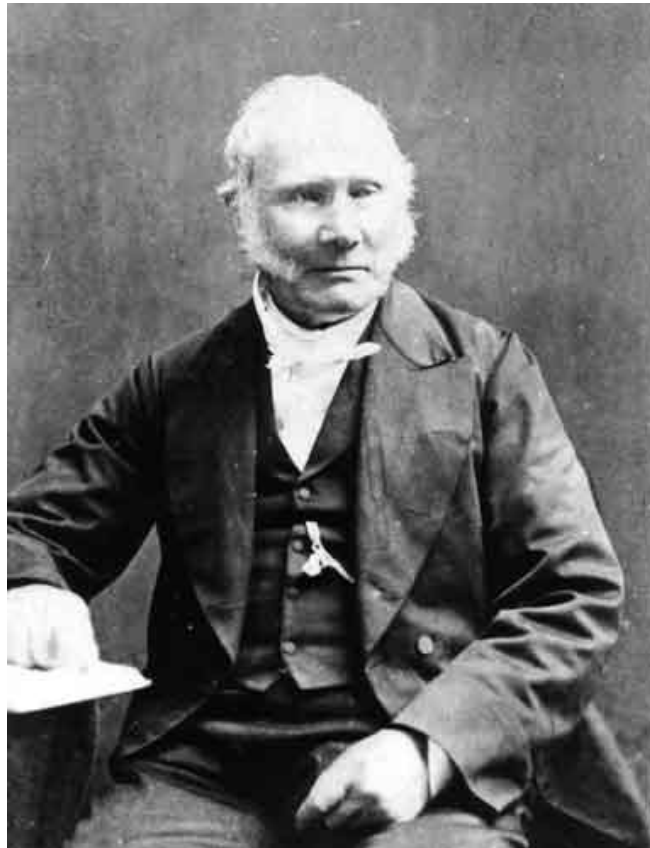
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1. ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	1
1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ	5
1.1 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΜΗΧΑΝΩΝ ΥΨΗΛΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ	5
1.2 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΧΑΜΗΛΗΣ ΔΙΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΜΗΧΑΝΩΝ (LTD)	8
2. ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	13
2.1 Ο ΚΥΚΛΟΣ STIRLING	13
2.2 ΧΕΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ STIRLING.....	14
2.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΚΙΝΗΣΗΣ.....	17
2.4 ΑΠΟΔΟΣΗ ΚΥΚΛΟΥ STIRLING.....	18
2.4.1 Ιδανική μηχανική ισχύς.....	19
2.4.1.1 Ο τύπος του Schmidt.....	19
2.4.1.2 Η εξίσωση West.....	21
2.4.2 Παραγωγή μηχανικής ισχύος.....	21
2.4.2.1 Εξίσωση Beale	21
2.4.2.2 Τύπος μέσης ισχύς πίεσης.....	23
3. Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ STIRLING	25
3.1 ΜΗΧΑΝΕΣ STIRLING ΠΡΩΤΗΣ ΓΕΝΙΑΣ.....	25

3.2 ΜΗΧΑΝΕΣ STIRLING ΔΕΥΤΕΡΗΣ ΓΕΝΙΑΣ	25
3.3 ΟΙ ΜΗΧΑΝΕΣ STIRLING ΣΤΗΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ.....	26
3.4 ΟΙ ΜΗΧΑΝΕΣ STIRLING ΚΑΙ Η ΧΡΗΣΗ ΤΟΥΣ ΣΕ ΑΓΡΟΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΜΑΚΡΥΣΜΕΝΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ.....	27
3.5 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ STIRLING	28
4. Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ STIRLING.....	33
4.1 ΗΛΙΑΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ STIRLING ΠΡΩΤΗΣ ΓΕΝΙΑΣ.....	34
4.2 ΗΛΙΑΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ STIRLING ΔΕΥΤΕΡΗΣ ΓΕΝΙΑΣ	34
4.2.1 Μηχανές Stirling με διάφανο παραθυράκι χαλαζία.....	35
4.2.2 Μηχανές Stirling με εστιακό συλλέκτη	35
4.2.3 Ηλιακό πιάτο/μηχανή τεχνολογία.....	36
4.3 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΗΛΙΑΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ STIRLING	39
5. ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ LTD ΜΗΧΑΝΩΝ STIRLING	41
6. ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΑΚΕΤΑΣ	43
6.1 ΚΥΛΙΝΔΡΟΙ.....	43
6.2 ΕΜΒΟΛΑ.....	44
6.3 ΩΣΤΗΡΙΑ.....	45
6.4 ΣΤΡΟΦΑΛΟΟΡΟΣ	47
6.5 ΒΑΣΕΙΣ ΣΤΗΡΙΞΗΣ	48
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	51
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	53
ΧΡΗΣΙΜΕΣ ΔΙΕΥΘΥΝΣΕΙΣ ΣΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ.....	60
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	61

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η μηχανή «αέρος» Stirling δημιουργήθηκε από τον Rev Dr Robert Stirling (εικόνα 1) ο οποίος γεννήθηκε στο Cloag της Σκωτίας στις 25 Οκτωβρίου του 1790. Σπούδασε στο Πανεπιστήμιο της Γλασκόβης και του Εδιμβούργου (1805-1808), μαθηματικά, μεταφυσική, ρητορική, Λατινικά και Ελληνικά σε προχωρημένο επίπεδο.



Εικόνα 1: Dr. Robert Stirling (1790-1878)

Χειροτονήθηκε πάστορας στις 19 Σεπτεμβρίου 1816 και δύο μήνες αργότερα κατοχύρωσε και εφάρμοσε την ευρεσιτεχνία του (UK Patent 4081) πάνω στη μηχανή Stirling και στον θερμικό αναγεννητή (regenerator) τον οποίο ο ίδιος ονόμαζε οικονομητήρα (economizer).

Η μηχανή Stirling είναι μια διάταξη κλειστού αναγεννητικού θερμοδυναμικού κύκλου με περιοδική συμπίεση και εκτόνωση του εργαζόμενου αερίου (αέρας) σε

διαφορετικά θερμοκρασιακά επίπεδα. Η ροή του εργαζόμενου μέσου ελέγχεται από αλλαγές στους όγκους στο ζεστό και κρύο χώρο χωρίς χρήση βαλβίδων. Έτσι υπάρχει μια καθαρή παραγωγή ή απορρόφηση θερμότητας, αφού ο κύκλος είναι και αντιστρέψιμος.

Άλλοι, όπως ο Sir George Caley είχαν κατασκευάσει μηχανή αέρος από πριν (1806) και άλλες μηχανές με την επωνυμία «μηχανές αέρος» έχουν αναφερθεί από το 1699.

Πολλοί ιστορικοί θεωρούν ότι η ενασχόληση του Rev. Stirling με αυτές τις μηχανές ήταν το αποτέλεσμα του ενδιαφέροντός του για τους εργαζόμενους της ενορίας του καθώς οι ατμομηχανές που είχαν ευρεία εφαρμογή εκείνη την εποχή παρουσίαζαν προβλήματα. Το σημαντικότερο πρόβλημα με τις ατμομηχανές ήταν το γεγονός ότι το μέταλλο που χρησιμοποιούσαν για την κατασκευή του boiler δεν είχε την απαιτούμενη αντοχή (το ασάλι ή ο χάλυβας Bessemer δεν είχαν ακόμα ανακαλυφθεί) και έτσι οι εκρήξεις των boiler και οι θάνατοι ήταν πολύ συχνοί. Η μηχανή Stirling δεν μπορούσε να εκραγεί γιατί οι πιέσεις ήταν πολύ χαμηλές. Η μηχανές απλώς σταματούσαν όταν για κάποιο λόγο ανέβαινε η θερμοκρασία και η πίεση του εργαζόμενου αερίου.

Ο «οικονομητήρας» ή «αναγεννητής» έχει αναγνωριστεί ως το πιο σημαντικό μέρος της πατέντας του Rev. Stirling. Αυτή η καινοτομία έκανε την κατασκευή πολύ πιο ελαφριά σε σχέση με τα δεδομένα της εποχής. Το 1908 η μηχανή Stirling είχε ήδη αναπτυχθεί αρκετά, αφού τόσο ο αναγεννητής όσο και η μηχανή διπλών εμβόλων ήταν αρκετά γνωστά και στις δύο ακτές του Ατλαντικού. Συζητήσεις για την χρησιμότητα και τις πιθανές μελλοντικές εφαρμογές της, γίνονταν από το Institution of Mechanical Engineers της μεγάλης Βρετανίας.

Από τα μέσα του 19ου αιώνα μέχρι την έναρξη του 1ου παγκόσμιου πολέμου, τόσο μηχανές ανοικτού κύκλου λειτουργίας όσο και μηχανές κλειστού κύκλου λειτουργίας είχαν μελετηθεί, αναπτυχθεί και εφαρμοστεί σε διάφορες περιπτώσεις, από την τοποθέτησή τους σε πλοία μέχρι και την χρήση τους σε εκκλησιαστικά όργανα για την άντληση του απαραίτητου αέρα για τη λειτουργία τους. Είναι εκπληκτικό το γεγονός ότι πολλές από εκείνες τις μηχανές λειτουργούν ακόμα και μάλιστα ικανοποιητικά.

Το 1908 εμφανίσθηκε για πρώτη φορά η μηχανή Stirling που έπαιρνε ενέργεια από τον ήλιο. Η ηλιακή ενέργεια είναι μια από τις πιο ελκυστικές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πηγή ενέργειας εισόδου για τις θερμικές μηχανές. Στην ουσία, οποιαδήποτε πηγή θερμικής ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί με την μηχανή Stirling. Η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να συγκεντρωθεί επάνω στην καυτή άκρη του εκτοπιστή δημιουργώντας έτσι έναν κινητήρα κινούμενος με ηλιακή ενέργεια. Η άμεση μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε μηχανική ενέργεια μειώνει το κόστος και την πολυπλοκότητα του κινητήρα. Θεωρητικά, τα πλεονεκτήματα της αρχής λειτουργίας των μηχανών Stirling είναι η χρήση εξωτερικής πηγής ενέργειας και η μεγάλη τους απόδοση. Οι μηχανές Stirling μπορούν να χρησιμοποιήσουν την ηλιακή ενέργεια η οποία είναι φθηνή πηγή ενέργειας. Από την στιγμή όμως που, ειδικά τους χειμερινούς μήνες, η διάρκεια της αξιοποιήσιμης ηλιακής ενέργειας είναι το 1/3 της ημέρας, χρειάζονται υβρίδια ηλιακής και καύσιμης ενέργειας.

1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ

1.1 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΜΗΧΑΝΩΝ ΥΨΗΛΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

Οι μηχανές Stirling είναι συσκευές που θεωρητικά δουλεύουν στον κύκλο Stirling και τις τροποποιήσεις αυτού, όπου συμπιέσιμα αέρια, όπως ο αέρας, το υδρογόνο, το ήλιο, το άζωτο ή ακόμα και ατμοί χρησιμοποιούνται ως εργαζόμενο μέσο. Η μηχανή Stirling προσφέρει τη δυνατότητα υψηλής απόδοσης με λιγότερες εκπομπές σε σχέση με την μηχανή εσωτερικής καύσης. Οι πρώτες μηχανές Stirling ήταν τεράστιες σε μέγεθος και μη αποδοτικές, ενώ με την πάροδο των χρόνων καινούργια μοντέλα της μηχανής δημιουργήθηκαν με σκοπό να βελτιωθούν τα μειονεκτήματά τους.

Η μοντέρνα μηχανή Stirling είναι πολύ πιο αποδοτική από τις αντίστοιχες παλαιότερες και μπορεί να χρησιμοποιήσει οποιαδήποτε πηγή θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας. Εφόσον πρόκειται για μια μηχανή εξωτερικής καύσης, οι περισσότερες πηγές θέρμανσης μπορούν να την κινήσουν, συμπεριλαμβανομένης της καύσης οποιουδήποτε εύκαυστου υλικού όπως απόβλητα χρωαφιών για παράδειγμα ο φλοιός του ρυζιού ή ότι παρόμοιο, η βιομάζα του μεθανίου και η ηλιακή ενέργεια. Γενικά, η μηχανή Stirling είναι απλή στο σχεδιασμό και την κατασκευή της καθώς και στον χειρισμό της.

Οι άμεσα κινούμενες από την ηλιακή ενέργεια μηχανές Stirling αποκτούν μεγάλο ενδιαφέρον όταν πρόκειται για χώρες όπου η ηλιακή ενέργεια είναι διαθέσιμη σε απεριόριστη ποσότητα. Προκειμένου να χρησιμοποιηθεί απευθείας η ηλιακή ενέργεια, ενός ηλιακός συγκεντρωτής και ένας απορροφητής θα πρέπει να ενσωματωθούν στο μηχανικό σύστημα.

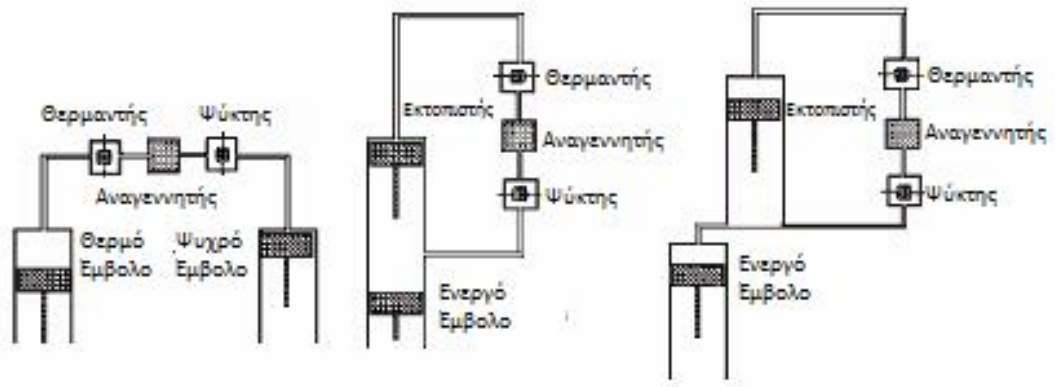
Η μηχανή Stirling μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές και είναι κατάλληλη όταν :

- Απαιτείται χρήση πολλαπλών καυσίμων
- Υπάρχει διαθέσιμη μια καλή ψυκτική συσκευή
- Απαιτείται χαμηλής έντασης λειτουργία
- Επιτρέπεται η σχετικά χαμηλής ταχύτητας λειτουργία

- Επιτρέπεται η λειτουργία συνεχούς παραγωγής ενέργειας
- Επιτρέπεται η αργή μεταβολή παραγωγής ενέργειας της μηχανής
- Επιτρέπεται μεγάλο διάστημα προθέρμανσης
- Διαμόρφωση των μηχανών Stirling
- Μηχανικές διαμορφώσεις των μηχανών Stirling

Διάφορα τμήματα μηχανών έχουν συνδυαστεί προκειμένου να δώσουν τον κύκλο Stirling. Ο κύκλος παρέχει μια διαδικασία σταθερού-όγκου κατά την μεταφορά του ρευστού μεταξύ του θερμού και του ψυχρού θαλάμου της μηχανής, παρέχοντας έτσι μια διαδικασία σταθερής θερμοκρασίας θέρμανσης και ψύξης κατά την συμπίεση και την εκτόνωση. Η συμπίεση και η εκτόνωση του κύκλου λαμβάνουν χώρα σε έναν κύλινδρο (ονομαζόμενο κινούμενο κύλινδρο) με πιστόνι (καλούμενο κινούμενο πιστόνι). Ένα πιστόνι εκτοπιστή (απλά καλούμενο εκτοπιστής) κινεί το ρευστό μπρος πίσω δια μέσου του θερμαντή, αναγεννητή και ψύκτη σε σταθερό όγκο. Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.1, ένας εκτοπιστής που κινείται στον ψυχρό θάλαμο, μετατοπίζει το ρευστό από τον ψυχρό θάλαμο προκαλώντας τη ροή του προς τον θερμό θάλαμο και αντίστροφα. Τρεις διαφορετικές διαμορφώσεις, οι επονομαζόμενες άλφα-, βήτα- και γάμα-διαμορφώσεις είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες. Κάθε μια από τις διαμορφώσεις αυτές έχει τον ίδιο θερμοδυναμικό κύκλο, αλλά διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά.

Στην άλφα-διαμόρφωση δεν χρησιμοποιείται εκτοπιστή. Δυο πιστόνια, τα καλούμενα ψυχρό και θερμό χρησιμοποιούνται εκατέρωθεν των θερμαντή, αναγεννητή και ψύκτη. Αυτά τα πιστόνια μετατοπίζονται ομοιόμορφα και προς την ίδια κατεύθυνση για να παρέχουν μια διαδικασία θέρμανσης ή ψύξης σταθερού όγκου του ρευστού. Όταν όλη η ποσότητα του ρευστού μεταφερθεί μέσα στον ένα κύλινδρο, το ένα από τα πιστόνια θα σταθεροποιηθεί ενώ το άλλο θα κινηθεί για να συμπίεσει ή να εκτονώσει το ρευστό. Η εκτόνωση διεκπεραιώνεται από το θερμό πιστόνι ενώ η συμπίεση από το ψυχρό.



άλφα-διαμόρφωση

βήτα-διαμόρφωση

γάμα-διαμόρφωση

Σχήμα 1.1 : Οι Τρεις βασικές μηχανικές διαμορφώσεις των μηχανών Stirling.

Στην βήτα-διαμόρφωση, ένας εκτοπιστής και ένα πιστόνι βρίσκονται ενσωματωμένα στον ίδιο κύλινδρο. Ο εκτοπιστής κινεί το ρευστό μεταξύ του θερμού και του ψυχρού θαλάμου του κυλίνδρου δια μέσου του θερμαντή, αναγεννητή και ψύκτη. Το πιστόνι του ψυχρού θαλάμου του κυλίνδρου συμπιέζει το ρευστό όταν αυτό βρίσκεται στον ψυχρό θάλαμο και το εκτονώνει όταν αυτό μετακινηθεί στον θερμό θάλαμο.

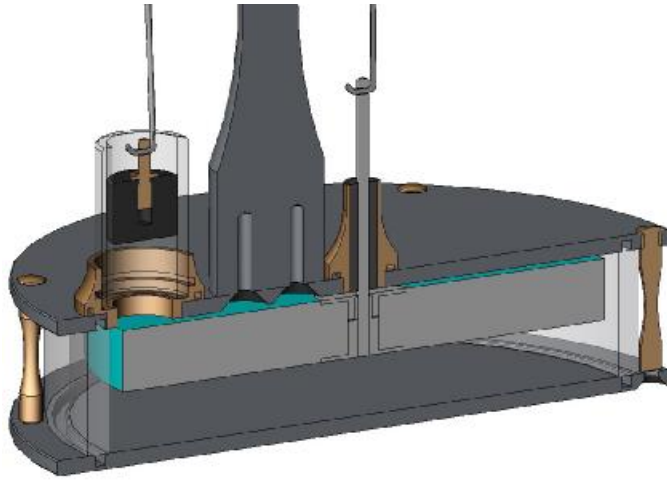
Η γάμα-διαμόρφωση χρησιμοποιεί ξεχωριστούς κυλίνδρους για τον εκτοπιστή και τα πιστόνια, ενώ ο κινούμενος κύλινδρος είναι συνδεδεμένος με τον κύλινδρο του εκτοπιστή. Ο εκτοπιστής κινεί το ρευστό μεταξύ του θερμού και του ψυχρού θαλάμου του κυλίνδρου του εκτοπιστή δια μέσου του θερμαντή, αναγεννητή και ψύκτη. Σε αυτή τη διαμόρφωση το πιστόνι συμπιέζει και εκτονώνει το ρευστό. Η γάμα-διαμόρφωση με διάταξη διπλών πιστονιών έχει θεωρητικά την μεγαλύτερη μηχανική απόδοση. Αυτή η διαμόρφωση παρουσιάζει και διατήρηση σταθερής ατμοσφαιρικής πίεσης στο εσωτερικό της. Παρόλαυτα ο κύλινδρος της μηχανής θα πρέπει να είναι σχεδιασμένος σε κάθετη διάταξη αντί για οριζόντια προκειμένου να μειωθεί η τριβή λόγω των επαπτόμενων μερών του κυλίνδρου.

1.2 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΧΑΜΗΛΗΣ ΔΙΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΜΗΧΑΝΩΝ (LTD)

Μια χαμηλής διαφοράς θερμοκρασίας μηχανή Stirling (LTD) μπορεί να λειτουργήσει με μικρή διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των ψυχρών και θερμών άκρων του εκτοπιστή κυλίνδρου. Είναι διαφορετική από τους άλλους τύπους μηχανών κύκλου-Stirling, οι οποίοι έχουν μεγαλύτερη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δυο άκρων και επομένως οι ενέργεια που παράγεται από την μηχανή μπορεί να είναι μεγαλύτερη.

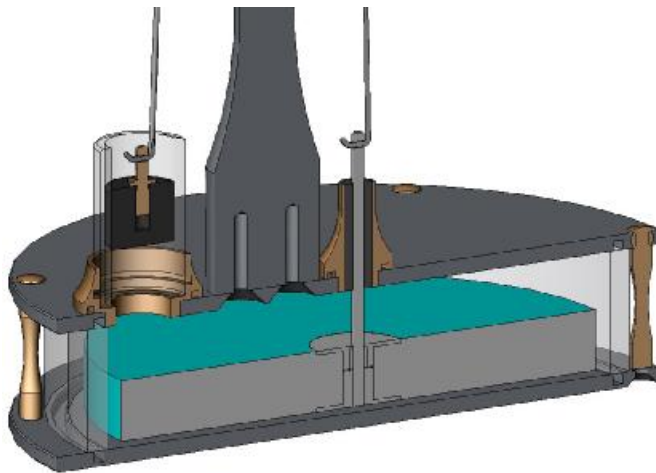
Όλες οι μηχανές Stirling, κινούνται μέσω μιας διαφοράς στην θερμοκρασία. Σε αυτή την LTD μηχανή, αυτή η διαφορά επιτυγχάνεται θερμαίνοντας την κάτω πλάκα πάνω από την θερμοκρασία δωματίου και αφήνοντας την επάνω πλάκα σε θερμοκρασία δωματίου. Η μηχανή σε λειτουργία θερμαίνει και ψύχει τον αέρα εσωτερικά,κυκλικά. Αυτή η διαδικασία παρουσιάζεται στην τομή παρακάτω (Εικόνες 1.1.1-1.1.2). Είναι σημαντικό να θυμόμαστε πως ο μεγάλος μπλέ δίσκος απλά κινεί τον αέρα από την κορυφή στον πάτο συνέχεια και ότι το μικρό μαύρο έμβολο κινεί τον στρόφαλο.

Εικόνα 1.1.1 : Με τον μεγάλο μπλέ δίσκο (εκτοπιστή) στην κορυφή, όλος ο αέρας μέσα βρίσκεται στον πάτο, όπου θερμαίνεται από την μεταλλική πλάκα. Καθώς θερμαίνεται, διαστέλλεται, πιέζοντας το μικρό μαύρο πιστόνι προς τα επάνω ο οποίος οδηγεί τον στρόφαλο κυκλικά.



Εικόνα 1.1.1

Εικόνα 1.1.2 : Καθώς ο στρόφαλος γυρίζει, ο εκτοπιστής κινείται από πάνω προς το κάτω μέρος του θαλάμου. Με τον εκτοπιστή στον πάτο, όλος ο αέρας βρίσκεται στην κορυφή, όπου και ψύχεται από την ψυχρή πλάκα. Καθώς ψύχεται, συστέλεται, με αποτέλεσμα να «τραβάει» το μικρό μαύρο έμβολο προς τα κάτω κινώντας τον στρόφαλο λίγο ακόμα.



Εικόνα 1.1.2

Οι LTD μηχανές μπορεί να είναι δυο σχεδίων. Το πρώτο χρησιμοποιεί λειτουργία μονού στρόφαλου, όπου μόνο το πιστόνι συνδέεται με το γρανάζι και ονομάζεται μηχανή Ringbom. Αυτού του τύπου η μηχανή η λειτουργία της οποίας

βασίζεται στην αρχή του Ringbom είναι και η πιο συχνά απαντούμενη. Ένας κοντός, μεγάλης διαμέτρου μοχλός εκτοπιστή, ενσωματωμένος με μηχανική ακρίβεια σε έναν οδηγό, έχει χρησιμοποιηθεί για να αντικαταστήσει τον συνδετικό μοχλό του εκτοπιστή. Το άλλο σχέδιο ονομάζεται κινηματική μηχανή, όπου τόσο ο εκτοπιστής όσο και το πιστόνι είναι συνδεδεμένα σε ένα γρανάζι. Η κινηματική μηχανή με μια κανονική 90° γωνία αποτελεί μηχανή γάμα-σχεδιασμού.

Κάποια χαρακτηριστικά της LTD μηχανής Stirling είναι τα ακόλουθα :

- Η αναλογία εναλλαγής του όγκου εκτοπιστή πιστονιού είναι μεγάλη
- Η διάμετρος του κυλίνδρου του εκτοπιστή και του εκτοπιστή είναι μεγάλη
- Ο εκτοπιστής είναι κοντός
- Οι επιφάνειες για αποτελεσματική μεταφορά θερμότητας στα δυο άκρα του κυλίνδρου του εκτοπιστή είναι μεγάλες
- Η παλινδρόμηση του εκτοπιστή είναι μικρή
- Η περίοδος παραμονής κατά το τέλος της παλινδρόμησης του εκτοπιστή είναι μεγαλύτερη από εκείνη της κλασσικής μηχανής Stirling
- Η ταχύτητα λειτουργίας είναι χαμηλή

Οι χαμηλής διαφοράς διαφορικές μηχανές Stirling έχουν αξία σαν μονάδες επίδειξης, αλλά αποκτούν άμεσα ενδιαφέρον όταν κανείς σκεφτεί τη δυνατότητα παραγωγής ενέργειας από θερμικές πηγές χαμηλής θερμοκρασίας με θερμοκρασίες χαμηλότερες των 100°C . Ένας υπολογισμός με χρήση της εξίσωσης του κύκλου Carnot μας δείχνει μηχανή που λειτουργεί με μια πηγή θερμοκρασίας 100°C και μια δεξαμενή θερμοκρασίας 35°C μας δίνει μέγιστη θερμική απόδοση 17.42%. Αν μια μηχανή μπορούσε να κατασκευαστεί έτσι ώστε να επιτυγχάνει το 50% της μέγιστης θερμικής απόδοσης, θα είχε περίπου 8.71% συνολική απόδοση Carnot. Ακόμα και αν η υπολογιζόμενη θερμική απόδοση φαίνεται να είναι αρκετά χαμηλή, η χαμηλής θερμοκρασίας διαφορικές μηχανές Stirling θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν με φθηνές ή και χωρίς κόστος πηγές χαμηλής θερμοκρασίας. Όταν τίθεται θέμα για μηχανές χαμηλού κόστους αυτού του είδους οι μηχανές θα πρέπει να επιλεγούν. Παρόλο που η ειδική ενέργεια που παράγεται από τις μηχανές Stirling είναι χαμηλή,

ελαφριά και φθηνά υλικά , όπως για παράδειγμα πλαστικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν τμήματα της μηχανής.

2. ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Η μηχανή Stirling θερμού αέρα είναι ένας απλός τύπος μηχανής ο οποίος χρησιμοποιεί ένα συμπιέσιμο ρευστό. Επειδή το ρευστό βρίσκεται σε κλειστό σύστημα δεν τίθεται θέμα επιμόλυνσης μια και τα ρευστά αυτά κοστίζουν αρκετά. Η μεταφορά θερμότητας στο ρευστό είναι πολύ σημαντική. Υψηλή ροή μάζας απαιτείται για καλή μεταφορά θερμότητας. Το χρησιμοποιούμενο ρευστό θα πρέπει να είναι χαμηλής πυκνότητας έτσι ώστε να αποφεύγονται απώλειες κατά την άντληση. Χρησιμοποιώντας υψηλότερη πίεση, ή χαμηλότερη πυκνότητα, ή συνδυασμούς αυτών, θα μπορούσε να μειωθεί η υψηλή ροή μάζας που απαιτείται.

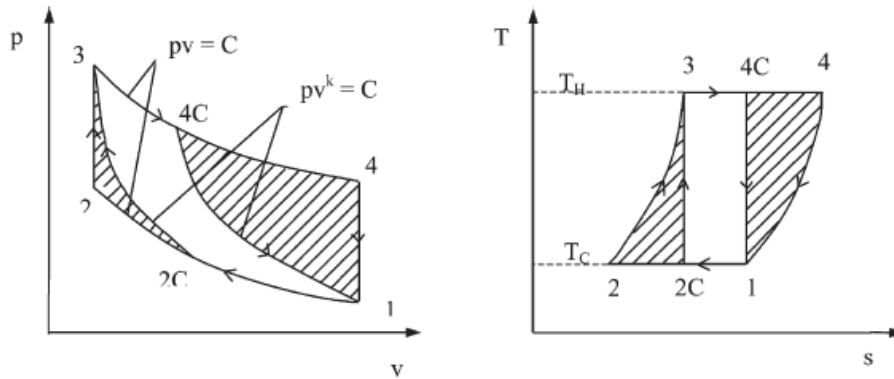
Η μηχανή Stirling θα μπορούσε θεωρητικά να είναι μια πολύ αποδοτική μηχανή για την μετατροπή θερμότητας σε μηχανικό έργο με την απόδοση Carnot. Το θερμικό όριο λειτουργίας της μηχανής αυτής εξαρτάται από το υλικό κατασκευής της. Η απόδοση της μηχανής κυμαίνεται στο 30 με 40 % σαν αποτέλεσμα ενός εύρους θερμοκρασίας από 923-1073 K και μια φυσιολογική ταχύτητα λειτουργίας με εύρος από 2000 έως 4000 rpm.

2.1 Ο ΚΥΚΛΟΣ STIRLING

Ο ιδανικός κύκλος Stirling έχει τρία θεωρητικά πλεονεκτήματα. Πρώτον, η θερμική απόδοση του κύκλου με ιδανική αναγέννηση είναι ίση με αυτή του κύκλου Carnot. Κατά την διάρκεια των παλινδρομικών κινήσεων, ο αναγεννητής, που αποτελεί μια τυπική προσωρινή αποθήκη ενέργειας, γρήγορα απορροφά και εκλύει θερμότητα στο ρευστό που τον διαπερνά. Συνεπώς, η ποσότητα ενέργειας που απορροφάται από την εξωτερική πηγή θέρμανσης μειώνεται κάτι που έχει σαν αποτέλεσμα τη βελτίωση της θερμικής απόδοσης (Σχήμα 2.1.1).

Το δεύτερο πλεονέκτημα σε σχέση με τον κύκλο Carnot επιτυγχάνεται με την αντικατάσταση δυο ισεντροπικών διεργασιών με δυο διεργασίες σταθερού όγκου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της επιφάνειας ενός διαγράμματος p-v. Επομένως, ένα σημαντικό ποσοστό μηχανικού έργου παράγεται από τον κύκλο Stirling χωρίς να είναι αναγκαία η εφαρμογή υψηλών πιέσεων και εναλλαγής

μεγάλων όγκων, όπως γίνεται στον κύκλο Carnot. Ο κύκλος Stirling συγκρινόμενος με τον κύκλο Carnot μεταξύ ίδιων δεδομένων ορίων πίεσης, όγκου και θερμοκρασίας απεικονίζεται στο Σχήμα 3.



Σχήμα 2.1.1 : Οι κύκλοι Stirling και Carnot.

Οι σκιασμένες περιοχές 2C-2-3 και 1-4C-4 υποδεικνύουν το επιπλέον παραγόμενο μηχανικό έργο που προκύπτει μετά από αντικατάσταση δυο ισεντροπικών διεργασιών με δυο διεργασίες σταθερού όγκου. Οι ισοθερμικές διεργασίες του κύκλου Carnot (1-2C και 3-4C) αντιστοίχως επεκτείνονται στις διεργασίες 1-2 και 3-4. Το ποσό του ωφέλιμου μηχανικού έργου αυξάνεται με την ίδια αναλογία αύξησης της θέρμανσης που απορροφάται- και αποβάλλεται- από τον κύκλο Stirling.

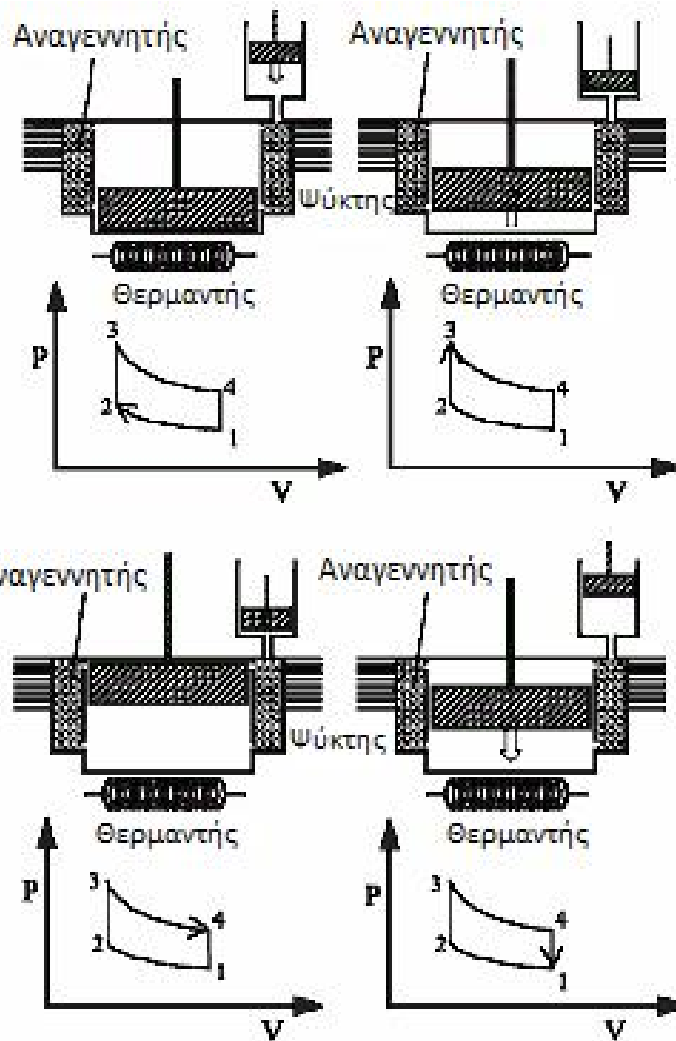
Το τρίτο πλεονέκτημα έχει ανακαλυφθεί πρόσφατα. Συγκρινόμενη με άλλες θερμικές μηχανές παλινδρομικής κίνησης πιστονιού δουλεύοντας στα ίδια όρια θερμοκρασίας, τις ίδιες αναλογίες όγκων, την ίδια μάζα ιδανικού ρευστού, την ίδια εξωτερική πίεση και μηχανισμό της ίδιας συνολικής απόδοσης, η ιδανική μηχανή Stirling έχει τη μέγιστη δυνατή μηχανική απόδοση. Αυτά τα τρία πλεονεκτήματα αποκαλύπτουν ότι η μηχανή Stirling είναι ένα θεωρητικό αντίστοιχο όλων των θερμικών μηχανών.

2.2 ΧΕΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ STIRLING

Η διεργασία ισοθερμικής συμπίεσης 1-2 (μεταφορά θερμότητας από ρευστό χαμηλής θερμοκρασίας σε μια εξωτερική δεξαμενή): Αφού ο εκτοπιστής έχει

σπρώξει το ρευστό στον ψυχρό θάλαμο του κυλίνδρου, όπου και ψυχραίνεται, και κατόπιν διατηρείται στάσιμο στο άνω νεκρό σημείο. Αυτό υποδηλώνει την κατάσταση 1 και η πίεση σε αυτή τη φάση είναι p_1 . Το πιστόνι εν συνεχεία πιέζεται από τον πάτο του νεκρού σημείου στην κορυφή του νεκρού σημείου από την ορμή του γρاناζιού βοηθούμενο από το μερικό κενό που δημιουργείται από το ψυχρό ρευστό. Το ρευστό είναι στον ψυχρό θάλαμο και είναι υπό συμπίεση από το πιστόνι, το οποίο πλησιάζει την κορυφή του νεκρού σημείου και συμπιέζει το ρευστό από την κατάσταση 1 στην 2 υπό σταθερή θερμοκρασία. Το έργο που παράγεται από το ρευστό υποδηλώνεται από την περιοχή κάτω από τη διεργασία 1-2.

Η διεργασία θέρμανσης σταθερού όγκου 2-3 (μεταφορά θερμότητας από τον αναγεννητή στο ρευστό): Ο εκτοπιστής κινείται από την κορυφή του νεκρού σημείου στον πάτο και μεταφέρει ρευστό από τον ψυχρό στον θερμό θάλαμο, ενόσω το πιστόνι παραμένει στάσιμο στην κορυφή του νεκρού σημείου, αναμένοντας αύξηση της πίεσης σαν αποτέλεσμα της διαστολής του ρευστού. Ο εκτοπιστής σπρώχνει το ρευστό στον θερμό θάλαμο, περνώντας το μέσα από τον αναγεννητή που έχει αποθηκευμένη θερμότητα, ενώ ήδη ένα συγκεκριμένο ποσοστό θερμαίνεται. Θερμότητα που προσφέρεται από τον αναγεννητή αυξάνει τη θερμοκρασία και την πίεση του ρευστού από το 2 στο 3 υπό σταθερό όγκο. Η αποθηκευμένη στον αναγεννητή ενέργεια μεταφέρεται στο ρευστό.



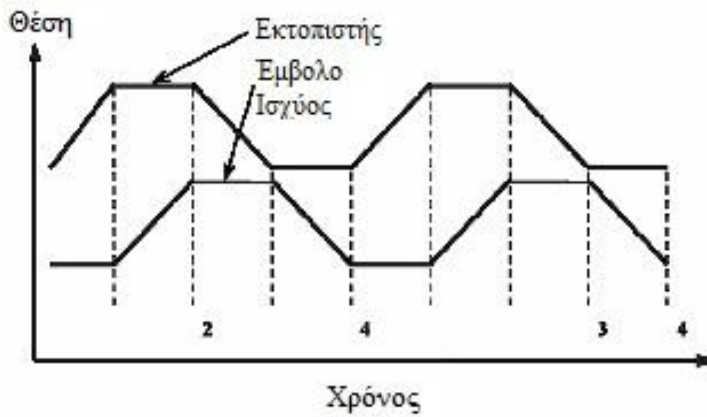
Σχήμα 2.2.1 : Λειτουργία της μηχανής Stirling.

Η διεργασία ισοθερμικής εκτόνωσης 3-4 (μεταφορά θερμότητας στο ρευστό υπό υψηλή θερμοκρασία που παρέχεται από εξωτερική πηγή): Αφού ο εκτοπιστής έχει σπρώξει όλο το ρευστό στο θερμό θάλαμο, με μια αντίστοιχη αύξηση της πίεσης στο μέγιστο, αυτό ηρεμεί στον πάτο του νεκρού σημείου. Το ρευστό είναι στον θερμό θάλαμο και εκτονώνεται σε πίεση p_4 , ενώ η διεργασία σταθερής θερμοκρασίας 3-4 διενεργείται στον θερμό θάλαμο. Το πιστόνι πιέζεται από την κορυφή του νεκρού σημείου στον πάτο από την αυξανόμενη πίεση και ασκεί πίεση στο γρανάζι, παράγοντας έτσι μηχανική ενέργεια. Αυτή η ενέργεια θα χρησιμοποιηθεί κατά την εναπομένουσα διεργασία του κύκλου. Το παραγόμενο από το ρευστό έργο υποδηλώνεται από την περιοχή κάτω από την διεργασία 3-4.

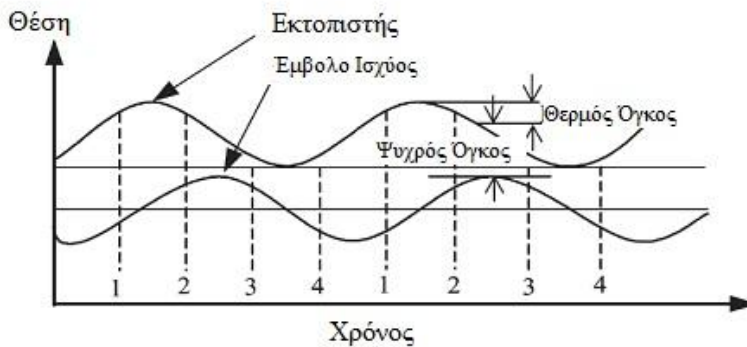
Διεργασία ψύξης υπό σταθερό όγκο 4-1 (μεταφορά θερμότητας από το ρευστό προς τον αναγεννητή): Αφού το πιστόνι έχει φτάσει στον πάτο του νεκρού σημείου και έχει μεταφέρει την ενέργεια του στο γρανάζι, παραμένει ακίνητο και είναι έτοιμο να γυρίσει στην κορυφή του νεκρού σημείου από την ορμή του γραναζιού και την αναρροφητική δράση του μερικού κενού που έχει δημιουργηθεί από την πτώση της πίεσης. Ο εκτοπιστής κινείται από τον πάτο του νεκρού σημείου στην κορυφή και μεταφέρει το ρευστό στον ψυχρό θάλαμο όπου η πίεση θα πέσει και θα δημιουργηθεί μερικό κενό, μέσω του αναγεννητή, προκαλώντας πτώση της θερμοκρασίας και της πίεσης του ρευστού από το 4 στο 1 υπό σταθερό όγκο. Θερμότητα μεταφέρεται από το ρευστό στον αναγεννητή.

2.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΚΙΝΗΣΗΣ

Η μετατόπιση του εκτοπιστή και του πιστονιού απαιτούν μια κίνηση εκτός φάσης. Υπάρχει ένα υπολογισμένο κενό τόσο σε χρόνο όσο και σε κίνηση- εξάλλου ο εκτοπιστής και το πιστόνι δεν κινούνται μπρος πίσω ταυτόχρονα. Για να επιτευχθεί αυτή η εκτός φάσης κίνηση, το κενό θα πρέπει να είναι μια γωνία 90° , με την κίνηση του εκτοπιστή πάντα να προηγείται αυτής του πιστονιού κατά περίπου 90° . Η λειτουργία του εκτοπιστή είναι να μεταφέρει το ρευστό από τον έναν κύλινδρο στον άλλον. Η λειτουργία του πιστονιού είναι να μετατρέψει την εκτόνωση του ρευστού σε υψηλή πίεση και την συμπίεση του ρευστού σε χαμηλή θερμοκρασία και να μεταφέρει αυτή την μετατροπή σε κίνηση δια μέσου του στροφαλοφόρου άξονα και του γραναζιού. Στο Σχήμα 2.3.1 απεικονίζονται οι ιδανικές κινήσεις μιας μηχανής Stirling γάμα-διαμόρφωσης και το Σχήμα 2.3.2 απεικονίζει πόσο καλά η ελικοειδής κίνηση μπορεί να ταιριάζει με την ιδανική κίνηση.



Σχήμα 2.3.1 : Διάγραμμα ιδανικής κίνησης μιας μηχανής Stirling γάμα-διαμόρφωσης.



Σχήμα 2.3.2 : Διάγραμμα ελικοειδούς κίνησης μηχανής Stirling γάμα-διαμόρφωσης με γωνία φάσης 90°.

2.4 ΑΠΟΔΟΣΗ ΚΥΚΛΟΥ STIRLING

Για έναν κύκλο Stirling με κοινό αέρα, οι ποσότητες θερμότητας που προσλαμβάνονται ή αποβάλλονται ανά μονάδα μάζας ρευστού υπολογίζονται ως

$$Q_{\text{added}} = x c_v (T_H - T_C) + R T_H \ln v_1 / v_2 \quad (1)$$

εξής: $Q_{\text{rejected}} = x c_v (T_C - T_H) + R T_C \ln v_2 / v_1 \quad (2)$

όπου x είναι η κλασματική απόκλιση (fractional deviation) από την ιδανική αναγέννηση (π.χ. $x=1$ για μη αναγέννηση και $x=0$ για ιδανική αναγέννηση, C_v η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο σε $J/(kg K)$, T_H η θερμοκρασία της πηγής στον κύκλο Stirling σε K , T_c η θερμοκρασία της δεξαμενής σε K , R η σταθερά του

αερίου σε J/(kg K), v_1 και v_2 είναι οι ειδικοί όγκοι της διαδικασίας αναγέννησης υπό σταθερό όγκο του κύκλου σε m^3/kg , και v_2/v_1 είναι η αναλογία συμπίεσης όγκου. Η απόδοση του κύκλου Stirling μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\eta_s = \frac{\Sigma Q}{Q_{\text{added}}} = \frac{(T_H - T_C)R \ln v_1/v_2}{x c_v(T_H - T_C) + R T_H \ln v_1/v_2}$$

έπειτα

$$\eta_s = \frac{1 - T_C/T_H}{1 + (x c_v/R \ln v_1/v_2)(1 - T_C/T_H)} \quad (3)$$

ή

$$\eta_s = \frac{1 - 1/\theta}{1 + C_s(1 - (1/\theta))} \quad (4)$$

όπου

$$\theta = T_H/T_C \quad (5)$$

και

$$C_s = x c_v/[R \ln v_1/v_2] \quad (6)$$

2.4.1 Ιδανική μηχανική ισχύς

2.4.1.1 Ο τύπος του Schmidt

Ο Schmidt βρήκε μια ακριβή μαθηματική έκφραση για τον προσδιορισμό του απαιτούμενου έργου σε κάθε κύκλο μιας μηχανής Stirling. Η εξίσωση του Schmidt μπορεί να διατυπωθεί με διάφορους τρόπους ανάλογα τα χρησιμοποιούμενα σύμβολα. Εξαιτίας της πολυπλοκότητάς της χρειάζεται χρόνος για την επαλήθευση

των υπολογισμών. Οι υπολογισμοί για τις μηχανές Stirling γάμα-διαμόρφωσης έχουν ως εξής:

$$W_{\text{Schmidt}} = \pi(1-\tau)p_{\text{max}}V_D \frac{k_P \sin \alpha}{Y + \sqrt{Y^2 - X^2}} \sqrt{\frac{Y-X}{Y+X}} \quad (7)$$

όπου

$$k_P = V_P / V_D \quad (8)$$

$$V_D = A_D L_D \quad (9)$$

$$V_P = A_P L_P \quad (10)$$

$$X = \sqrt{(1-\tau)^2 - 2(1-\tau)k_P \cos \alpha + k_P^2} \quad (11)$$

$$Y = 1 + \tau + \frac{4k_S \tau}{1 + \tau} + k_P \quad (12)$$

$$\tau = T_C / T_H \quad (13)$$

$$k_S = V_S / V_D \quad (14)$$

όπου W_{Schmidt} είναι το απαιτούμενο ανά κύκλο έργο σε Nm, p_{max} η μέγιστη πίεση που επιτυγχάνεται κατά τη διάρκεια του κύκλου σε N/m², k_P η αναλογία εναλλαγής του όγκου, k_S η αναλογία όγκου του νεκρού σημείου, V_D η εναλλαγή όγκου του εκτοπιστή σε m³, A_D η τομή του κυλίνδρου του εκτοπιστή σε m², A_P η τομή του κινούμενου κυλίνδρου σε m², L_D η παλινδρόμηση του εκτοπιστή σε m, L_P η παλινδρόμηση του πιστονιού σε m, α η γωνία φάσης που προηγείται ο μετατοπιστής του πιστονιού σε μοίρες και τ είναι η αναλογία θερμοκρασίας.

Επειδή είναι πιο βολικό να χρησιμοποιείται η μέση ή ο μέσος όρος της πίεσης κύκλου, p_m , αντί της μέγιστης πίεσης κύκλου, p_{max} , η μέγιστη πίεση στη σχέση του Schmidt σχετίζεται με τον μέσο όρο πίεσης κύκλου. Έχει λοιπόν ως ακολουθεί:

$$p_{\max} = p_m \sqrt{\frac{Y+X}{Y-X}} \quad (15)$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (15) στην (7) παίρνουμε μια πιο απλή μορφή του τύπου του Schmidt για τον υπολογισμό του απαιτούμενου ανά κύκλο έργου σε μια μηχανή Stirling γάμα-διαμόρφωσης:

$$W_{\text{Schmidt}} = \pi(1-\tau)p_m V_D \frac{k_p \sin \alpha}{Y + \sqrt{Y^2 - X^2}} \quad (16)$$

2.4.1.2 Η εξίσωση West

Ο West πρότεινε έναν απλούστερο τύπο για τον υπολογισμό του απαιτούμενου έργου που έχει ως εξής:

$$W_{\text{West}} = \frac{\pi p_m}{2} \frac{V_D V_P}{V_D + \frac{V_P}{2} + V_S} \frac{(T_H - T_C)}{(T_H + T_C)} \sin \alpha \quad (17)$$

Η εξίσωση (17) δίνει σφάλμα κατά τον υπολογισμό του απαιτούμενου έργου σε ελικοειδή κίνηση συγκρινόμενη με την ακριβέστερη λύση της εξίσωσης (16). Παρολ'αυτά είναι πιο δημοφιλής στη χρήση της λόγω της απλότητάς της.

2.4.2 Παραγωγή μηχανικής ισχύος

2.4.2.1 Εξίσωση Beale

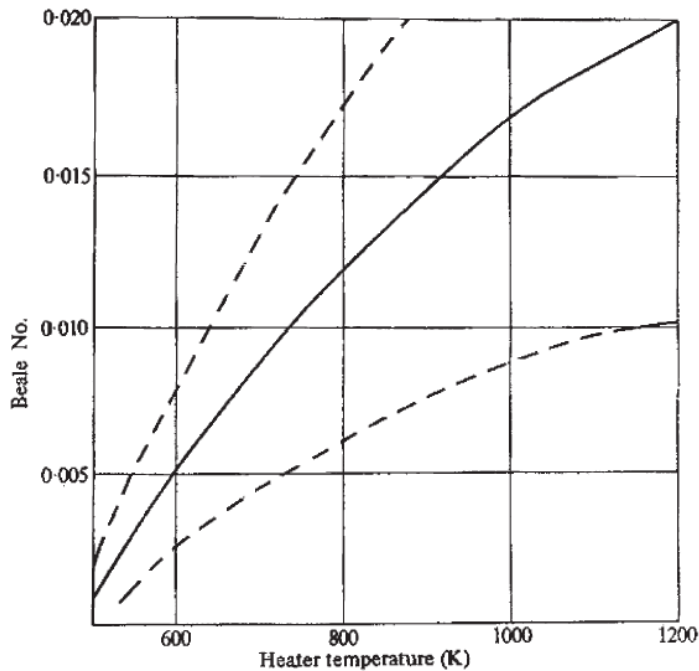
Ο Beale παρατήρησε ότι η παραγωγή ενέργειας από διάφορες μηχανές Stirling μπορεί να υπολογιστεί κατά προσέγγιση από την εξίσωση:

$$P = 0.015 p_m f V_p \quad (18)$$

όπου P είναι η ενέργεια που παράγεται από την μηχανή σε Watt, p_m η μέση πίεση κύκλου σε bar, f η συχνότητα του κύκλου σε Hertz και V_p η μετατόπιση του πιστονιού σε cm^3 . Ο τύπος αυτός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μηχανές Stirling διαφόρων διαμορφώσεων και μεγεθών. Η εξίσωση (18) μπορεί να γραφτεί σε μια πιο γενική μορφή ως εξής:

$$P / (p_m f V_p) = \text{constant} \quad (19)$$

Η προκύπτουσα χωρίς διαστάσεις παράμετρος $P/(p_m f V_p)$ καλείται αριθμός του Beale. Είναι ξεκάθαρο ότι ο αριθμός του Beale είναι λειτουργικός τόσο για θερμοκρασίες πηγών όσο και δεξαμενών. Η συνεχής γραμμή στο Σχήμα 3.4.2.α υποδηλώνει τη σχέση μεταξύ του αριθμού Beale και της θερμοκρασίας της πηγής. Το ανώτερο όριο, όπως ορίζεται από την στικτή γραμμή, αντιπροσωπεύει την υψηλή απόδοση σε καλά σχεδιασμένες μηχανές με χαμηλές θερμοκρασίες δεξαμενών. Αντίθετα, το κατώτερο όριο, όπως ορίζεται από την αντίστοιχη στικτή γραμμή, αντιπροσωπεύει την μέτρια απόδοση λιγότερο καλά σχεδιασμένων μηχανών με υψηλές θερμοκρασίες δεξαμενών.



Σχήμα 3.4.2.α : Ο αριθμός του Beale ως λειτουργία πηγής θερμοκρασίας.

2.4.2.2 Τύπος μέσης ισχύς πίεσης

Η συσχέτιση του αριθμού του Beale τροποποιήθηκε από τους Walker, West και Senft. Αυτή η συσχέτιση χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της παραγόμενης δύναμης του στροφαλοφόρου άξονα, όπως περιγράφεται ακολούθως:

$$P = F p_m f V_p \frac{T_H - T_C}{T_H + T_C} \quad (20)$$

Η εξίσωση (20) είναι ένα δυναμικό εργαλείο κατά το πρώτο βήμα σχεδιασμού. Ο Senft όρισε ότι ο παράγοντας F της εξίσωσης (20) παίρνει την τιμή 2 για τον ιδανικό κύκλο Stirling. Ωστόσο, σε έναν τέτοιο ιδανικό κύκλο, στον παράγοντα F δεν συνυπολογίζονται οι μηχανικές απώλειες, η τριβή κλπ. Οι West και Senft, έχουν περιγράψει ότι για τιμές του παράγοντα F 0.25-0.35 μπορούμε να έχουμε πρακτική εφαρμογή.

Ένας πιο ακριβής υπολογισμός της δύναμης του στροφαλοφόρου άξονα-από αυτόν που προσφέρει ο τύπος του Beale-και ο οποίος έχει χρησιμοποιηθεί στα προκαταρκτικά στάδια σχεδιασμού, μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας τους τύπους των Schmidt και West. Ο Martini πρότεινε ότι η ενέργεια που παράγεται από τον στροφαλοφόρο άξονα μπορεί να υπολογιστεί μειώνοντας την εξίσωση Schmidt κατά έναν «εμπειρικό παράγοντα» της τάξης του 35%.

3. Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ STIRLING

3.1 ΜΗΧΑΝΕΣ STIRLING ΠΡΩΤΗΣ ΓΕΝΙΑΣ

Η μηχανή Stirling αποτελεί την πρώτη ανακάλυψη θερμικής μηχανής αναγεννήσιμου κύκλου. Ο Robert Stirling πατένταρε την μηχανή το 1816 (αριθμός πατέντας 4081). Πολλές μηχανές που βασίστηκαν στην ανακάλυψή του κατασκευάστηκαν σε ποικίλες μορφές και μεγέθη μέχρι την αλλαγή του αιώνα. Εξαιτίας του ότι οι μηχανές Stirling είναι εύκολες και ασφαλείς στη χρήση, δουλεύουν σχεδόν αθόρυβα με οποιοδήποτε καύσιμη ύλη, ενώ επιπλέον είναι καθαρές και αποδοτικές συγκρινόμενες με τις ατμομηχανές, έγιναν αρκετά δημοφιλείς στη χρήση τους. Αυτές οι μηχανές Stirling ήταν μικρές και η παραγόμενη από τη μηχανή ενέργεια ήταν χαμηλή (100 W έως 4 Kw).

Το 1853, ο John Ericsson κατασκεύασε μια μεγάλη θαλάσσια μηχανή Stirling η οποία διέθετε τέσσερα πιστόνια διαμέτρου 4.2 m το καθένα που μπορούσαν να κινούνται παλινδρομικά καλύπτοντας 1.5 m και να παράγουν μηχανική ισχύς 220 kW σε 9 rpm. Η κατασκευή της πρώτης αυτής γενιάς μηχανών τερματίστηκε από την ραγδαία εξέλιξη των μηχανών εσωτερικής καύσης και του ηλεκτρικού κινητήρα.

3.2 ΜΗΧΑΝΕΣ STIRLING ΔΕΥΤΕΡΗΣ ΓΕΝΙΑΣ

Η δεύτερη γενιά μηχανών Stirling ξεκίνησε γύρω στα 1937, όταν αυτές προάχθηκαν σε υψηλά επίπεδα τεχνολογικής εξέλιξης από το ερευνητικό εργαστήριο του Philips στο Eindhoven (Αϊντχόβεν) της Ολλανδίας και έχουν συνεχόμενα εξέλιξη έκτοτε. Η αρχική δουλειά επικεντρώθηκε στην εξέλιξη μικρών θερμοκινούμενων ηλεκτρικών γεννητριών για ραδιόφωνα και παρόμοιο εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε σε απομακρυσμένες περιοχές.

Η χρήση νέων υλικών υπήρξε καθοριστικός παράγοντας για την επιτυχία των μηχανών Stirling. Η ερευνητική ομάδα του Philips έκανε χρήση νέων υλικών, όπως για παράδειγμα το ανοξείδωτο ασάλι. Άλλος ένας καταλυτικός παράγοντας για την επιτυχία τους ήταν και η συσσώρευση περισσότερης γνώσης στα θέματα της θερμοδυναμικής και της φυσικής των υλικών κατά το πέρασμα από την πρώτη στη

δεύτερη γενιά αυτών των μηχανών. Για παράδειγμα, η ισχύ της μικρής μηχανής μοντέλο '102C' του 1952 ήταν 30 φορές μεγαλύτερη εκείνης των παλαιών μηχανών Stirling.

Η πορεία της εξέλιξης που επιτεύχθηκε από τον Philips και πολλά άλλα βιομηχανικά εργαστήρια, μαζί με την πιεστική ανάγκη για την εύρεση περισσότερων πηγών ενέργειας, έχει διατηρήσει την ανάγκη εξέλιξης των μηχανών Stirling δεύτερης γενιάς έως τις μέρες μας.

3.3 ΟΙ ΜΗΧΑΝΕΣ STIRLING ΣΤΗΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

Η εντατική έρευνα του Philips και άλλων βιομηχανικών εργαστηρίων οδήγησε στην ανάπτυξη μικρών μηχανών Stirling με υψηλές αποδόσεις της τάξης του 30% ή και περισσότερο. Το 1954 ο Philips δημιούργησε μια μηχανή η οποία χρησιμοποιούσε υδρογόνο σαν ρευστό πλήρωσης. Αυτή η μηχανή παρήγαγε ενέργεια 30 kW για ένα μέγιστο θερμοκρασίας κύκλου 977 K σε 36% θερμική απόδοση. Αργότερα η απόδοση της ίδιας αυτής μηχανής βελτιώθηκε επιπλέον φτάνοντας το 38%. Έχουν διεξαχθεί πειραματικές μελέτες σε μηχανές διαφόρων μεγεθών που παρήγαγαν έως 336 kW.

Κατόπιν παραχώρησης αδείας από τον Philips, απόπειρες για βελτίωση των μηχανών Stirling, διεξήχθησαν και από την εταιρία General Motors κατά το χρονικό διάστημα από το 1958 έως το 1970. Άδεια παραχωρήθηκε επίσης από τον Philips στην εταιρία United Stirling AB στο Μάλμο της Σουηδίας το 1968, καθώς και στην κοινοπραξία των εταιριών MAN και MWM της δυτικής Γερμανίας το 1967. Το 1973, το πειραματικό αυτοκινούμενο μηχανής Stirling, Philips/Ford 4-125 πέτυχε την παραγωγή ειδικής ενέργειας 300 φορές περισσότερης σε σχέση με αυτές που επιτύγχαναν οι αρχικές μηχανές.

3.4 ΟΙ ΜΗΧΑΝΕΣ STIRLING ΚΑΙ Η ΧΡΗΣΗ ΤΟΥΣ ΣΕ ΑΓΡΟΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΜΑΚΡΥΣΜΕΝΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ

Οι Trayser και Eibling διεξήγαγαν μια σχεδιαστική μελέτη προκειμένου να προσδιορίσουν το κατά πόσο θα μπορούσε να είναι τεχνικά πραγματοποιήσιμος ο σχεδιασμός μια φορητής ηλιακής γεννήτριας ισχύος 50 W για χρήση σε απομακρυσμένες περιοχές. Τα αποτελέσματα της έρευνάς τους κατέδειξαν ότι είναι δυνατή η κατασκευή μιας ηλιακής, ελαφριάς κατά τη μεταφορά και αξιόπιστης μηχανής Stirling σε λογικό κόστος.

Ο Gupta και οι συνεργάτες του κατασκεύασαν ηλιακά κινούμενες παλίνδρομες μηχανές ισχύος 1 και 1.9 kW για αγροτικές εφαρμογές. Οι αποδόσεις των μηχανών αυτών ήταν μεταξύ 5.5 και 5.7% και η συνολική απόδοση βρέθηκε να είναι γύρω στο 2.02%. Ο Pearch και οι συνεργάτες του μελέτησαν και πρότειναν μια οικιακής χρήσης μηχανή ισχύος 1 kW η οποία συνδύαζε σύστημα θέρμανσης και ηλεκτρισμού (DCHP). Τα αποτελέσματά τους έδειξαν ότι το 30% της απαίτησης του σπιτιού σε ηλεκτρισμό μπορούσε να παραχθεί και τα αντίστοιχα έξοδα να μειωθούν κατά 25%.

Ο Podesser σχεδίασε, κατασκεύασε και λειτούργησε μια μηχανή Stirling θερμαινόμενη από αέριο παραγόμενο από καπναγωγό κλιβάνου καύσης βιομηχανικής βιομάζας για την παραγωγή ηλεκτρισμού σε αγροτικά χωριά. Με μια πίεση ρευστού 33 bar στα 600 rpm και ισχύ άξονα στα 3.2 kW, επιτεύχθηκε μια συνολική απόδοση 25%. Πρόθεση του ήταν να αυξήσει την ισχύ του άξονα στα 30 kW στο επόμενο του εγχείρημα.

Οι Dixit και Ghogke σχεδίασαν μικρά συστήματα παραγωγής ενέργειας χρησιμοποιώντας συνδυασμούς μιας μεγάλης ποικιλίας στερεών καυσίμων σαν πηγές ενέργειας. Επρόκειτο για μια μηχανή Stirling κινούμενη από βιομάζα και βασιζόμενη στο σύστημα θέρμανσης σωλήνα. Αναφέρθηκε η μακροσκοπική θερμική σχεδίαση της μηχανής, μαζί με τον υπολογισμό διαφόρων ενεργειακών απωλειών.

3.5 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ STIRLING

Συνήθως ο σχεδιαστικός σκοπός μιας μηχανής Stirling θα περιοριστεί κάπου μεταξύ των δυο ορίων : αυτού της μέγιστης απόδοσης και αυτού της μέγιστης παραγωγής ενέργειας. Ο Markman και οι συνεργάτες του διεξήγαγαν ένα πείραμα χρησιμοποιώντας τη βήτα-διαμόρφωση της μηχανής Stirling προκειμένου να προσδιορίσουν τις παραμέτρους μιας μηχανής ισχύος 200 W μετρώντας τη θερμική ροή και τις μηχανικές απώλειες ενέργειας. Στόχος της μελέτης ήταν η βελτιστοποίηση και η αύξηση της απόδοσης της μηχανής.

Ο Orunon και οι συνεργάτες του παρουσίασε μια μέθοδο υπολογισμού των βέλτιστων παραμέτρων μιας μονοκύλινδρης μηχανής Stirling. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τα χαρακτηριστικά μάζας και μεγέθους της μηχανής μπορούσαν να βελτιωθούν κάνοντας τη σωστή επιλογή μεταξύ των βέλτιστων παραμέτρων κάτι το οποίο θα οδηγούσε σε μεγαλύτερη απόδοση.

Οι Abdalla και Yacoub μελέτησαν τη δυνατότητα επίτευξης χρήσης της θερμότητας αποβλήτων, που παράγεται κατά την καύση τους σε από αποτεφρωτήρα, σε μηχανή Stirling. Η παραγόμενη από τον αποτεφρωτήρα ενέργεια χρησιμοποιήθηκε στη βιομηχανική μονάδα αφαλάτωσης και στη μηχανή Stirling. Χρησιμοποιώντας ακατέργαστο αλατούχο νερό σαν νερό ψύξης και υποθέτοντας κατά 50% θερμική ανάκτηση απόδοσης, ισχυρίστηκαν ότι η απόδοση της μηχανής μπορούσε να βελτιωθεί και να επιτευχθεί μια θερμική απόδοση 27%.

Ο Nikajima και οι συνεργάτες του κατασκεύασε μια μικρομηχανή Stirling 10 g με ένα πιστόνι εναλλαγής όγκου περίπου 0.05 cm³. Ανέφεραν μια παραγόμενη από τη μηχανή ενέργεια των 10 mW στα 10 Hz. Ανέλυσαν τα προβλήματα που προκύπτουν περνώντας σε μικρότερη κλίμακα.

Ο Aramtummarphon δοκίμασε μηχανές Stirling ανοιχτού κύκλου με χρήση ατμού θερμασμένου από παραγωγό αέριο. Η πρώτη τέτοια μηχανή παρήγαγε μια ωφέλιμη ισχύς της τάξης των 1.36 kW σε μια μέγιστη ταχύτητα 950 rpm, ενώ η δεύτερη μηχανή, μια βελτιωμένη έκδοση της πρώτης, παρήγαγε ωφέλιμη ισχύς 2.92 kW σε μια μέγιστη ταχύτητα 2200 rpm.

Ο Hirata και οι συνεργάτες του αξιολόγησε την απόδοση ενός μικρού εκτοπιστή τύπου Stirling ισχύος 100 W τον επωνομαζόμενο Ecoboy-SCM81. Ένα μοντέλο ανάλυσης της πρωτότυπης μηχανής χρησιμοποιώντας μια ισοθερμική μέθοδο λαμβάνοντας υπόψιν την απώλεια πίεσης στη γεννήτρια, απώλεια χώρου του μεσολαβητή και μηχανικές απώλειες αναπτύχθηκε για να βελτιώσει την λειτουργία της μηχανής. Αφού ελέγχθηκε η αποδοτικότητα του μοντέλου ανάλυσης, κάποιες βελτιώσεις στην πρωτότυπη μηχανή τέθηκαν υπό συζήτηση.

Οι Costea και Feidt μελέτησαν την επίδραση της διακύμανσης της σταθεράς συνολικής μεταφοράς θερμότητας στην βέλτιστη κατάσταση και στην βέλτιστη κατανομή της κατανομής θερμότητας στην αγωγήμη περιοχή ή στην περιοχή ανταλλαγής θερμότητας της μηχανής Stirling. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν είτε ένα βέλτιστο εύρος διακύμανσης των παραμέτρων του μοντέλου, ή σημαντικές διαφορές στην παραγόμενη ενέργεια, διαφορές στην θερμοκρασία της πηγής και της δεξαμενής, χαρακτηριστικές τιμές μεταφοράς θερμότητας αναφορικά με την κάθε περίπτωση που μελετάται.

Ο Wu και οι συνεργάτες του ανέλυσαν την βέλτιστη απόδοση της μηχανής Stirling. Αναλύονται οι επιρροές της μεταφοράς θερμότητας, του χρόνου αναγέννησης και της ατελούς αναγέννησης στην βέλτιστη απόδοση του μη αναστρέψιμου κύκλου μιας μηχανής Stirling. Τα αποτελέσματα της δουλειάς τους παρέχουν μια νέα θεωρητική βάση τόσο για την αξιολόγηση της απόδοσής τους, όσο και για την βελτίωση των μηχανών Stirling.

Ο Wu και οι συνεργάτες του μελέτησαν την βέλτιστη απόδοση των κανονικών και αντιστρεπτών κβαντικών κύκλων Stirling. Το όριο πεπερασμένου χρόνου θερμοδυναμικής απόδοσης, τα κριτήρια βελτιστοποίησης και η ανάλυση της ευαισθησίας παρουσιάστηκαν εκτενώς. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν ότι ο κβαντικός κύκλος Stirling διαφέρει από τον κλασσικό θερμοδυναμικό. Αυτό αποδίδεται στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των πληρωτικών ρευστών.

Ο Wu και οι συνεργάτες του μελέτησαν την βέλτιστη εξεργοοικονομική απόδοση πεπερασμένου χρόνου μιας κβαντικής μηχανής Stirling. Το μέγιστο εξεργονομικό κέρδος, η βέλτιστη θερμική αποδοτικότητα και παραγωγή ενέργειας σε αντιστοιχία με τα όρια απόδοσης μιας ενδοαναστρέψιμης μηχανής Stirling

παρουσιάστηκαν αναλυτικά. Τα αποτελέσματα της δουλειάς τους υποδεικνύουν ένα όριο κέρδους κατά τον σχεδιασμό μιας πραγματικής μηχανής Stirling που δουλεύει με κβαντικό ρευστό.

Ο Gu και οι συνεργάτες του επιχείρησαν τον σχεδιασμό μιας υψηλής απόδοσης μηχανής Stirling με τη χρήση σύνθετου πληρωτικού ρευστού, για παράδειγμα ρευστό αποτελούμενο από δυο συστατικά: μεταφορέα αερίου και αλλαγής φάσης και συστατικό πολλαπλών φάσεων, συνδυάζοντας διαδικασία ανάκτησης με θέρμανση πάνω από το σημείο ζέσης του ρευστού. Τα αποτελέσματά τους συγκρίνονται με αυτά των απλών μηχανών Stirling. Αναλύονται τα κριτήρια επιλογής του πληρωτικού ρευστού. Υπολογισμοί με χρήση του εξα-φθόρο σουλφιδίου σαν πληρωτικού ρευστού δίνονται σαν παράδειγμα για να δείξουν τη θερμική απόδοση και τη βέλτιστη συμπίκνωση, πίεση και θερμοκρασία.

Οι Winkler και Lorenz περιέγραψαν την ενσωμάτωση λεπτών κυλινδρικών στερεών οξειδίων κυψέλες καυσίμου και ενός συστήματος θερμικής μηχανής. Οι θερμικές μηχανές που μελετήθηκαν ήταν μικροτουρμπίνες και μηχανές Stirling. Μια υψηλή απόδοση του συστήματος, μικροί ειδικοί όγκοι και μια μικρή διαθέσιμη μονάδα στερεών οξειδίων ορυκτών κυττάρων ήταν αναμενόμενα από το σύστημα της μηχανής Stirling. Προτάθηκε επιπλέον εξέλιξη αυτού του μοντέλου για εργοστασιακές διεργασίες/ εφαρμογές.

Ο Hsu και οι συνεργάτες του μελέτησαν το ενσωματωμένο σύστημα μιας μηχανής Stirling χωρίς πιστόνι και ενός αποτεφρωτήρα. Η απόδοση μιας μηχανής Stirling χωρίς πιστόνι μελετήθηκε χρησιμοποιώντας το μοντέλο της μέση μεταφοράς θερμότητας. Περιγράφηκαν αναλυτικά η αποδοτικότητα και το βέλτιστο της παραγωγής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης και της επίδρασης που προκαλείται από της εσωτερική και εξωτερική αναστρεψιμότητα.

Ο Petrescu και οι συνεργάτες του παρουσίασαν μια μέθοδο για τον υπολογισμό της αποδοτικότητας και της ενέργειας μιας μηχανής Stirling. Η μέθοδος βασίστηκε στον πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής για διαδικασίες πεπερασμένης ταχύτητας και την απευθείας μέθοδο για κλειστά συστήματα. Τα αποτελέσματα έδειξαν καλή συσχέτιση με την πραγματική απόδοση 12 διαφορετικών μηχανών

Stirling μέσα σε ένα εύρος διακύμανσης παραγόμενου έργου από επίπεδα οικονομίας μέχρι το μέγιστο.

4. Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ STIRLING

Η ηλιακή ενέργεια είναι μια από τις πιο ελκυστικές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πηγή ενέργειας εισόδου για τις θερμικές μηχανές. Στην ουσία, οποιαδήποτε πηγή θερμικής ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί με την μηχανή Stirling. Η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να συγκεντρωθεί επάνω στην καυτή άκρη του εκτοπιστή δημιουργώντας έτσι έναν κινητήρα κινούμενο με ηλιακή ενέργεια.

Η άμεση μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε μηχανική ενέργεια μειώνει το κόστος και την πολυπλοκότητα του κινητήρα. Θεωρητικά, τα πλεονεκτήματα της αρχής λειτουργίας των μηχανών Stirling είναι η χρήση εξωτερικής πηγής ενέργειας και η μεγάλη τους απόδοση. Οι μηχανές Stirling μπορούν να χρησιμοποιήσουν την ηλιακή ενέργεια η οποία είναι φθηνή πηγή ενέργειας. Από την στιγμή όμως που, ειδικά τους χειμερινούς μήνες, η διάρκεια της αξιοποιήσιμης ηλιακής ενέργειας είναι το 1/3 της ημέρας, χρειάζονται υβρίδια ηλιακής και καύσιμης ενέργειας. Καθώς, η καύση μιας μηχανής Stirling είναι μια συνεχής διαδικασία μπορεί να κάψει καύσιμα πληρέστερα και είναι σε θέση να χρησιμοποιήσει όλα τα είδη καυσίμων οποιασδήποτε ποιότητας.

Λόγω της απλής κατασκευής της και της ομοιότητας της βιομηχανικής της παραγωγής με την παλίνδρομη μηχανή εσωτερικής καύσης και λαμβάνοντας υπόψιν ότι όταν παραχθεί σε μεγάλο αριθμό μονάδων κάθε χρόνο, η μηχανή Stirling θα μπορούσε να επικρατήσει στην οικονομική κλίμακα και θα μπορούσε να παράγεται σαν φθηνή πηγή ενέργειας για τις αναπτυσσόμενες χώρες. Για ηλιακή παραγωγή ηλεκτρισμού εύρους 1-100 kWe, η μηχανή Stirling θεωρείται η φθηνότερη. Παρόλο που η απόδοσή της είναι χαμηλή, είναι πολύ αξιόπιστη και έχει χαμηλό κόστος. Επιπλέον, η αξιοπιστία και η απλότητα είναι παράγοντες κλειδιά για μια οικονομικά συμφέρουσα ηλιακή γεννήτρια Stirling.

4.1 ΗΛΙΑΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ STIRLING ΠΡΩΤΗΣ ΓΕΝΙΑΣ

Το 1864, ο Ericsson ανακάλυψε ηλιακές μηχανές θερμού αέρα, χρησιμοποιώντας έναν ανακλαστή για να θερμάνει το καυτό άκρο του κυλίνδρου του εκτοπιστή. Οι Jordan και Ibele αναφέρουν ότι στο διάστημα μεταξύ 1864 και 1870, ο Ericsson χρησιμοποιούσε παραβολικά κοίλους συλλέκτες προκειμένου να θερμάνει τον ατμό, τον οποίο εν συνεχεία χρησιμοποιούσε για να λειτουργήσει τη μηχανή του. Το 1870, η μηχανή Stirling προσαρμόστηκε από τον Ericsson στο να λειτουργεί με ηλιακή ενέργεια.

Ο Spencer αναφέρει ότι το 1872 ο Ericsson κατασκεύασε μηχανή θερμού αέρα ανοιχτού κύκλου χρησιμοποιώντας ως μέσο εστίασης έναν σφαιρικό καθρέφτη. Αυτή ήταν και η πρώτη ηλιακή μηχανή θερμού αέρα. Αναφερόταν επίσης ότι η μηχανή μπορούσε να δουλεύει με ταχύτητα 420 rpm μεσημέρι μιας μέρας με καθαρό ουρανό στην Νέα Υόρκη.

Οι Meinel και Meinel σχολίασαν τα συμπεράσματα του Ericsson, σχολιάζοντας ότι η ηλιακές μηχανές θα ήταν επικερδής μόνο σε απομακρυσμένες κι ηλιόλουστες περιοχές, τονίζοντας δε ότι το κόστος κατασκευής τους είναι 10 φορές μεγαλύτερο από εκείνο των συμβατικών μηχανών. Η ποσότητα των ηλιακών μηχανών πρώτης γενιάς που κατασκευάστηκαν είναι πολύ μικρή. Τέλος, οι Reader και Hooper αναφέρουν ότι το 1908 μια ηλιακή μηχανή Stirling προτάθηκε για χρήση σε σύστημα άντλησης νερού.

4.2 ΗΛΙΑΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ STIRLING ΔΕΥΤΕΡΗΣ ΓΕΝΙΑΣ

Στο διάστημα 1950-1955, οι Ghai και Khanna δούλεψαν πάνω σε μια ηλιακή μηχανή Stirling ανοιχτού κύκλου στην Ινδία, χρησιμοποιώντας έναν παραβολικό συλλέκτη. Η ηλιακή ενέργεια συγκεντρωνόταν σε μεταλλική κεφαλή της μηχανής, αλλά υπήρχε πρόβλημα με απώλειες θερμότητας. Οι Jordan και Ibele περιέγραψαν μια ηλιακή μηχανή Stirling ισχύος 100 W για άντληση νερού. Ο Ghai τόνισε την πλευρά της οικονομίας και της τεχνικής απλότητας μιας τέτοιας μηχανής, παρόλο που ο ανταγωνιστής της ήταν η μηχανή εσωτερικής καύσης.

Μεταγενέστερες εργασίες σχετιζόμενες με ηλιακές μηχανές Stirling και σωλήνες θέρμανσης, έχουν αναθεωρηθεί στο παρελθόν από τον Spencer. Άλλες εργασίες σχετιζόμενες με τις διαφορετικές ποικιλίες και διατάξεις του κυλίνδρου και του εκτοπιστή συμπεριλαμβανομένης της κατασκευής και της χρήσης των ηλιακών μηχανών Stirling, έχουν καταγραφεί από τον Daniels. Βέβαια οι περισσότερες λεπτομέρειες για τις ηλιακές μηχανές Stirling μπορούν να βρεθούν στις αναφορές των Jordan και Ibele και Jordan.

4.2.1 Μηχανές Stirling με διάφανο παραθυράκι χαλαζία

Οι Daniels και Spencer περιέγραψαν πολλές ερευνητικές δουλειές πάνω σε ηλιακές μηχανές Stirling με διάφανο παραθυράκι χαλαζία και σχετιζόμενες εργασίες. Τα προβλήματα με αυτές τις μηχανές εντοπίζονται στην μεταφορά θερμότητας και στις συνέπειες της δυσσομίας. Όμως ο Walpita πρότεινε ένα σχέδιο ηλιακού δέκτη κατασκευασμένου από σπειροειδή ασάλινο σωλήνα εξωτερικής διαμέτρου 3.175 mm για την κατασκευή ηλιακής μηχανής Stirling. Η μεταφορά θερμότητας της ηλιακής ακτινοβολίας στο πληρωτικό ρευστό αναλύθηκε και επετεύχθη μια περιοχή βέλτιστης μεταφοράς θερμότητας.

4.2.2 Μηχανές Stirling με εστιακό συλλέκτη

Η εργασία ανασκόπησης πάνω σε ηλιακές μηχανές Stirling ισχύος 15 W με εστιακό συλλέκτη περιγράφεται από τον Daniels. Άλλες εργασίες σε τέτοιες μηχανές αναλύονται διεξοδικά από τον Spencer. Ο Ahmed και οι συνεργάτες του αναφέρουν συνοπτικά την λειτουργία μιας ηλιακής μηχανής Stirling ισχύος 50 kW για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος χρησιμοποιώντας μονής μεμβράνης εστιακό πιάτο και υδρογόνο σαν πληρωτικό ρευστό. Αναφέρουν προβλήματα στο σύστημα παρακολούθησης λόγω σχεδιαστικών σφαλμάτων καθώς και δυσκολίες στο ξεκίνημα της μηχανής κατά τους χειμερινούς μήνες λόγω επιλογής ακατάλληλων εξαρτημάτων ελέγχου.

Ο Childs και οι συνεργάτες του παρουσίασαν μια καινοτόμο ιδέα για να προσδιορίσουν το κατά πόσον είναι οικονομικές νέες προσεγγίσεις στην ηλιακή τεχνολογία αφαλάτωσης. Τέτοιες τεχνικές συνδυάστηκαν με μοντέρνες τεχνολογίες μετατροπής της ηλιακής ενέργειας, υδραυλικά κινούμενες αντλίες και τεχνολογίες ανάκτησης ενέργειας για το τελικό αποτέλεσμα της ηλιακής αφαλάτωσης. Στην παρούσα εργασία περιγράφεται ένα ηλιακό πιάτο-συλλέκτης, εξάρτημα μιας ηλιακής μηχανής Stirling με συνολική απόδοση 22% για μέση παραγωγή 10 ωρών την ημέρα.

Ο Audy και οι συνεργάτες του, περιγράφουν ένα σύστημα δυναμικής παραγωγής ενέργειας με χρήση ηλιακής χρησιμοποιώντας μια μηχανή Stirling για εφαρμογές σε διαστημικούς σταθμούς. Αναπτύχθηκαν θεωρητικά μοντέλα για 4 διαφορετικές αντιπροσωπευτικές διατάξεις για τροχιά γύρω από την γή. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συγκρίθηκαν με αυτά ενός δυναμικού ηλιακού εξαρτήματος που χρησιμοποιούσε τουρμπίνα αερίου Brayton. Επιπλέον, απέδειξαν ότι η πολύπλοκη και ασταθής συμπεριφορά είτε με κύκλο Brayton είτε με κύκλο Stirling μπορεί να απλοποιηθεί με βάση τις παραμετροποιήσεις και τις ενεργειακές ισορροπίες.

4.2.3 Ηλιακό πιάτο/μηχανή τεχνολογία

Τα συστήματα μηχανών/ηλιακών πιάτων μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε μηχανική και εν συνεχεία σε ηλεκτρική ενέργεια. Για να διατηρούν την απαιτούμενη θερμοκρασία για επαρκή μετατροπή ενέργειας, τα συστήματα μηχανών/ηλιακών πιάτων χρησιμοποιούν μια διάταξη καθρεπτών για να εντοπίζουν τον ήλιο (Εικόνα 4.2.3.1). Τέτοιου είδους συστήματα χαρακτηρίζονται από αποδοτικότητα, εναλλαξιμότητα, αυτόνομη λειτουργία και τη δυνατότητα λειτουργίας είτε με τη χρήση ενός συμβατικού καύσιμου υλικού, είτε με τη χρήση ηλιακής ενέργειας. Μεταξύ πλήθους ηλιακών τεχνολογιών, αυτά τα συστήματα έχουν γίνει αποδεκτά σαν εκείνα με την υψηλότερη αποδοτικότητα μετατροπής ηλιακής σε ηλεκτρική ενέργεια.



Εικόνα 4.2.3.1 : Μηχανή Stirling με συγκεντρωτικά κάτοπτρα

Μηχανές Stirling υψηλής πίεσης και υψηλής θερμοκρασίας που δουλεύουν με υδρογόνο ή ήλιο χρησιμοποιούνται συνήθως σε ηλιακού πιάτου συστήματα μηχανών Stirling. Οι μοντέρνες υψηλής αποδοτικότητας μηχανές Stirling συνήθως λειτουργούν σε θερμοκρασία πληρωτικού ρευστού υψηλότερη των 973 K και πίεση που ανέρχεται στα 200 bar. Οι αποδόσεις στη μετατροπή από θερμότητα σε ηλεκτρισμό των καλύτερων μηχανών Stirling είναι της τάξης του 40%. Επί του παρόντος οι κινηματικές μηχανές Stirling επονομαζόμενες ως: Kockums (United Stirling) 4-95 25-kWc, Stirling Thermal Motors STM 4-12 25-kWc και SOLO 161 11-kWc αποτελούν παραδείγματα μηχανών που χρησιμοποιούνται ως πιάτα συστημάτων Stirling.

Η τεχνολογία των μηχανών ηλιακού πιάτου είναι μια από τις παλαιότερες ηλιακές τεχνολογίες. Στα τέλη της δεκαετίας του '70 και αρχές δεκαετίας '80 μοντέρνα τεχνολογία μηχανών ηλιακού πιάτου αναπτύσσεται από τις επιχειρήσεις με επωνυμίες Advanco corporation, United Stirling AB, την επιχείρηση αεροδιαστημικής McDonnell Douglas, το υπουργείο ενέργειας των ΗΠΑ (US Department of Energy [DOE]) και το εργαστήριο προωθητικών αεριωθούμενων της NASA.

Έχει αναφερθεί ότι το σύστημα της Advanco Vanguard, κατηγορίας 25-kWe ονομαστικής ισχύος, με χρήση της διεθνούς μονάδας μετατροπής ενέργειας Stirling

[United Stirling Power Conversion Unit (PUC)], επιτυγχάνει μια απόδοση μετατροπής ηλιακής σε ηλεκτρική ενέργεια της τάξης του 29.4%. Η εταιρία MDA επιχείρησε την εμπορευματοποίηση ενός συστήματος που περιελάμβανε το δικό τους σχεδιασμού πιάτο και την διεθνή Stirling PUC. Πριν το πρόγραμμα ακυρωθεί το 1986, η εταιρία MDA παρήγαγε οχτώ τέτοια πρωτότυπα συστήματα. Τα δικαιώματα τεχνολογικού ηλεκτρονικού εξοπλισμού της MDA πωλήθηκαν αργότερα στην εταιρία Southern California Edison (SCE). Το 1988 μια ετήσια απόδοση ανώτερη του 23% αναμενόταν να έχει επιτευχθεί χωρίς διακοπές στην παροχή.

Το πρόγραμμα dish/Stirling Joint Venture (DSJVP) ξεκίνησε το 1991. Στόχος αυτού του προγράμματος υπήρξε η ανάπτυξη ενός συστήματος πιάτου/ Stirling των 5-10-kWc για εφαρμογές σε απομακρυσμένες περιοχές. Το πρόγραμμα DSJVP για ανάπτυξη ενός συστήματος πιάτου/μηχανής Stirling των 25-kWc ξεκίνησε στα τέλη του 1993. Τα παρομοίου κόστους συστήματα που αποκτήθηκαν από τα χαμηλότερου κόστους ελαστικής μεμβράνης σχέδια συστημάτων, με την βελτιωμένη ελαστικότητα στο χειρισμό τους προβλήθηκαν από την SAIC.

Το σχέδιο και η τεχνική προσέγγιση του σχεδίου Ανάπτυξης του Συστήματος Προηγμένου Πιάτου (Advanced Dish Development System [ADDS]) αναφέρονται από τον Diver και οι συνεργάτες του. Στόχοι αυτού του προγράμματος ήταν η ανάπτυξη και η επικύρωση της λειτουργίας μιας ηλιακής μηχανής πιάτου/Stirling ισχύος 9-kWe για απομακρυσμένες ενεργειακές αγορές. Το σύστημα αποτελούνταν από ηλιακό συλλέκτη και συστήματα ελέγχου της εταιρίας WGAssosiates και από την Stirling μονάδα μετατροπής ενέργειας SOLO 161. Τα κύρια εξαρτήματα του συστήματος, τα χαρακτηριστικά, αποτελέσματα δοκιμών και η πορεία του σχεδίου αναφέρονται επίσης στην ανωτέρω εργασία.

Ο Davenport και οι συνεργάτες του αναφέρουν τα αποτελέσματα χειρισμού και την εμπειρία τους από τη χρήση ενός πρωτότυπου SunDish συστήματος στα πλαίσια του προγράμματος Salt River Project (SRP). Το πρόγραμμα αυτό εκτελέστηκε με τη συνεργασία των SRP, SAIC, STM, και DOE. Μεθάνιο συλλέχτηκε από μια χωματερή και χρησιμοποιήθηκε σαν καύσιμο σε περιπτώσεις που η ηλιακή ενέργεια δεν ήταν διαθέσιμη. Αναλυτικά αναφέρουν επίσης τις αλλαγές στο σχέδιο και τις βελτιώσεις του συστήματος που απορρέουν από τη χρήση του πρωτοτύπου συστήματος SunDish.

Ο Davenport και οι συνεργάτες του αναφέρονται στη λειτουργία μιας δεύτερης γενιάς ενεργειακής μηχανής πιάτου/ Stirling (SAIC/STM SunDish systems). Πολλές βελτιώσεις τόσο στη μηχανή όσο και στα μέρη του πιάτου πραγματοποιήθηκαν με σκοπό να αυξηθεί η αξιοπιστία, η αποδοτικότητα του συστήματος, να απλοποιηθεί η διαδικασία εγκατάστασής του και να διορθωθούν οποιαδήποτε προβλήματα παρουσιάζονται κατά τη λειτουργία του συστήματος. Αναφέρουν ότι η παραγόμενη ενέργεια βελτιώθηκε από 20 kW που ήταν το 1998 σε 23 kW το 2002. Μια στιγμιαία/ άμεση κορύφωση της ενέργειας στα 23.3 kW και μια απόδοση της τάξης του 26% αναφέρεται ότι παρατηρήθηκαν.

4.3 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΗΛΙΑΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ STIRLING

Όταν σαν πηγή εισαγωγής θερμότητας για παραγωγή ενέργειας χρησιμοποιείται ένα σύστημα ηλιακού συλλέκτη, ο τύπος του συλλέκτη και οι συνθήκες κάτω από τις οποίες λαμβάνονται οι βέλτιστες τιμές κόστους του συστήματος καθώς και οι βέλτιστες συνθήκες παραγωγής ενέργειας θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν. Θεωρητική δουλειά για την βελτιστοποίηση μιας ηλιακής ενεργειακής μηχανής Stirling διεξήχθη από τον Umagon και οι συνεργάτες του, παρ'όλα αυτά εφαρμογές πάνω στη μηχανή δεν αναφέρονται στην επιστημονική τους εργασία.

Οι Howell και Bannerot προσδιόρισαν τη βέλτιστη τιμή της εξωτερικής θερμοκρασίας του ηλιακού συλλέκτη για τη μεγιστοποίηση του παραγόμενου έργου από μηχανές κύκλου Carnot, Stirling, Ericsson και Brayton κινούμενες από ηλιακό συλλέκτη. Ο Eldighidy και οι συνεργάτες του βελτιστοποίησαν τις συνθήκες για την μέγιστη απορρόφηση ηλιακής ενέργειας από επίπεδης εστίας συλλέκτη που χρησιμοποιείται με οριζοντίου επιπέδου αντανακλαστικό κάτοπτρο. Ένας απλός επίπεδης εστίας συλλέκτης/ επίπεδου φύλλου αντανακλαστικό κάτοπτρο μελετήθηκε εκτενώς. Αργότερα, ο Eldighidy διερεύνησε σε θεωρητική βάση την βέλτιστη εξωτερική θερμοκρασία του ηλιακού συλλέκτη για την μέγιστη παραγωγή έργου για μια μηχανή κύκλου αέρα Otto με ιδανική αναγέννηση. Αυτή η δουλειά μπορεί να εφαρμοστεί και σε μια μηχανή κύκλου αέρα Stirling.

Ο Gordon εξέτασε την ακρίβεια της ενεργειακής βελτιστοποίησης ηλιακών θερμικών μηχανών. Τα αποτελέσματα επιτεύχθηκαν σε δυο περιπτώσεις με τον περιορισμό της μέγιστης απόδοσης και τον περιορισμό της μέγιστης ισχύος. Ο Altfeld και οι συνεργάτες του ελαχιστοποίησαν το ποσό των απωλειών εξέργειας, συμπεριλαμβανομένων των εξεργονικών απωλειών από απορρόφηση ακτινοβολίας στο επίπεδο της απορροφούμενης θερμοκρασίας, με την μεγιστοποίηση της καθαρής εξεργονικής ροής. Παρουσίασαν τον βέλτιστο σχεδιασμό των απορροφητών και των αγωγών ροής. Ο Costea και οι συνεργάτες του μελέτησαν την επίδραση των απωλειών πίεσης και της πραγματικής μεταφοράς θερμότητας στην απόδοση μηχανής κύκλου Stirling. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι όταν η μηχανή λειτουργεί στην βέλτιστη θερμοκρασία, η πραγματική απόδοση ήταν περίπου η μισή της ιδανικής απόδοσης κύκλου.

Ο Chen και οι συνεργάτες του πρότειναν για χρήση σε ηλιακές μηχανές Stirling ένα αντικατοπτρικό εστιακό ηλιακό πάνελ αποτελούμενο από έναν αριθμό ομαδοποιημένων καθρεφτών. Αναφέρουν τη διεξαγωγή ενός πειράματος με χρήση χαμηλής ενέργειας μηχανής Stirling. Προτείνουν ότι μια ηλιακή μηχανή ισχύος 20-50 kW είναι πιο περιζήτητη και θα ήταν χαμηλότερου κόστους κάτω από στατικές συνθήκες.

5. ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ LTD ΜΗΧΑΝΩΝ STIRLING

Ο Haneman μελέτησε το ενδεχόμενο της χρήσης αέρα με πηγές χαμηλής θερμοκρασίας. Κατασκευάστηκε μια ασυνήθιστη μηχανή, στην οποία η θερμότητα εξάτμισης ήταν αρκετά υψηλή ώστε να χρησιμοποιηθεί για άλλους σκοπούς. Στην πράξη, μια τέτοια μηχανή θα παρήγαγε μόνο μικρό ωφέλιμο έργο σε σχέση με το μέγεθος του συλλέκτη, και θα είχε λίγο κέρδος σε σχέση με την απαιτούμενη συντήρηση.

Μια απλής κατασκευής χαμηλής θερμοκρασίας θερμική μηχανή με βάση το μοντέλο των διαμορφώσεων της μηχανής Stirling πατενταρίστηκε το 1983 από τον White. Ο White πρότεινε την βελτίωση της απόδοσης κατόπιν εφαρμογής πίεσης στο θάλαμο του εκτοπιστή. Οι αποδόσεις που αναφέρονται κυμαίνονται στο 30%, ποσοστό που μπορεί να θεωρηθεί υψηλό για μηχανές χαμηλής θερμοκρασίας. Το 1984, ο O' Hare πατεντάρισε μια συσκευή που διακινούσε ψυχρά και θερμά κύματα αέρα δια μέσου ενός εναλλάκτη θερμότητας για την αλλαγή της πίεσης του αέρα εντός της φυσούνας. Αντίθετα με τη δουλειά του Haneman, στην παρούσα δουλειά δεν αναλύεται η πρακτική εφαρμογή μιας της αναφερόμενης συσκευής.

Ο Kolin πειραματίστηκε με μεγάλο αριθμό LTD μηχανών Stirling σε βάθος αρκετών χρόνων. Το 1983 παρουσίασε ένα μοντέλο που δούλευε σε διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των θερμών και ψυχρών άκρων του κυλίνδρου του εκτοπιστή χαμηλό της τάξης των 15 °C. Μετά την δημοσίευση της δουλειάς του Kolin, ο Senft έκανε μια εις βάθος μελέτη των μηχανών Ringbom και των παράγωγων της, συμπεριλαμβανομένης και της LTD μηχανής. Η μελέτη του Senft πάνω στις LTD μηχανές Stirling οδήγησε στην πιο ενδιαφέρουσα μηχανή η οποία είχε μια πολύ χαμηλή διαφορά θερμοκρασίας των άκρων της τάξης των 0.5 °C. Υπήρξε πολύ δύσκολο να σημειωθεί οποιαδήποτε βελτίωση αυτού του αποτελέσματος. Η δουλειά του Senft ανέδειξε και το βασικό κίνητρο στην δημιουργία μηχανών τόσο Stirling όσο και γενικά μηχανών θέρμανσης, που ήταν η ανάπτυξη μιας μηχανής που να λειτουργεί σε διαφορά θερμοκρασίας των άκρων 2°C ή και μικρότερης.

Ο Senft περιέγραψε τον σχεδιασμό και την δοκιμή μιας μικρής LTD Ringbom μηχανής Stirling κινούμενη από έναν κωνικό αντανακλαστικό κάτοπτρο 60°. Στην εργασία του αναφέρεται ότι το δοκιμαστικό αντανακλαστικό κάτοπτρο των 60° που παρήγαγε μια θερμοκρασία θερμού άκρου της τάξης των 93 °C κάτω από συνθήκες λειτουργίας, δούλεψε πολύ ικανοποιητικά.

6. ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΑΚΕΤΑΣ

Αρχική σκέψη για την επιλογή του θέματος της παρούσης πτυχιακής εργασίας ήταν η κατασκευή μιας απλής και λειτουργικής Μηχανής Stirling. Για το λόγο αυτό επιλέξαμε την “Alpha διαμόρφωση” ως μηχανή που στην κατασκευή της δεν είχε ιδιαίτερες δυσκολίες, αποτελούμενη από δυο ισόχωρης κυλίνδρους και ένα απλό σύστημα χρονισμού στις 90°. Στην διάρκεια της κατασκευής αντιμετωπίσαμε προβλήματα όπως υψηλές πιέσεις και μεγάλες τριβές. Πραγματοποιήθηκαν βελτιώσεις, το κόστος των οποίων εκτίναξε την αξία και αύξησε το χρόνο κατασκευής. Έτσι η εργασία περιορίστηκε στην κατασκευή μακέτας για την παρουσίαση της βασικής αρχής λειτουργίας μιας μηχανής Stirling.

6.1 ΚΥΛΙΝΔΡΟΙ

Η πρώτη φάση κατασκευής της μηχανής Stirling περιλαμβάνει την κατασκευή των κυλίνδρων. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή τους είναι ράβδος φωσφορούχου ορείχαλκου διαμέτρου $\Phi 45$. Με την χρήση τόννου αφαιρέθηκε εξωτερικά ένα μέρος του υλικού προκειμένου η εξωτερική επιφάνεια να γίνει $\Phi 42$ σε όλο το μήκος του. Τοποθετούμε στην κουκουβάγια το τσοκ και ανοίγουμε τρύπα $\Phi 20$ κατά μήκος, στο κέντρο, προκειμένου να το επεξεργαστούμε με μεγαλύτερη ευκολία. Με την χρήση μανέλας για εσωτερική κατεργασία διανοίγουμε το εσωτερικό του κυλίνδρου αρχικά σε $\Phi 29,5$ για μήκος 60mm λόγω χρήσης εμβόλου μικρής διαμέτρου. Υπολογίζουμε συνολικό μήκος κυλίνδρου 80mm και κόβουμε τον ορείχαλκο. Στην εξωτερική επιφάνεια κόβουμε μια πατούρα 10mm μήκους, μετατρέποντας της εξωτερική διάμετρο σε $\Phi 40$ και από τις δύο πλευρές. Στο τμήμα των 20mm που η εσωτερική διάμετρο είναι $\Phi 20$ συγκολλούμε με χαλκοκόλληση αρχικά συστολή χαλκού με σκοπό να κολλήσουμε στην συνέχεια χάλκινο εύκαμπτο σωλήνα. Βελτιώνοντας την κατασκευή λόγω υψηλών τριβών και πιέσεων, αλλάζουμε έμβολα και διανοίγουμε το εσωτερικό του κυλίνδρου σε $\Phi 36$ για το μήκος των 60mm. Με την βοήθεια μιας μηχανής λειάνσεως (ρεκτιφιέ) μετατρέψαμε την εσωτερική διάμετρο σε $\Phi 36,75$ φροντίζοντας η τραχύτητα του εσωτερικού του κυλίνδρου να

μειωθεί ώστε να κινείται με ευκολία το έμβολο. Στο τμήμα των 20mm που η εσωτερική διάμετρο είναι $\Phi 20$ τοποθετούμε τάπα κατασκευασμένη από χαλκό αρχικής διατομής $\Phi 25$. Το μήκος της τάπας είναι 25mm και με την βοήθεια τόννου στα 20 πρώτα χιλιοστά αφαιρούμε υλικό προκειμένου να φτάσουμε την διάμετρο σε $\Phi 20$. Στο κέντρο του χαλκού ανοίγουμε τρύπα $\Phi 13,5$ κατά μήκος του υλικού και με την βοήθεια κολαούζου ανοίγουμε σπείρωμα M14. Τοποθετούμε από εξωτερικά την τάπα και την κολλούμε χρησιμοποιώντας ασημοκόλληση. Στο σπείρωμα τοποθετείται μούφα από M14 σε $\frac{3}{4}$ ψυκτικό. Οι δύο κύλινδροι ενώνονται με χάλκινο εύκαμπτο σωλήνα στον οποίο πρώτα έχουν περαστεί τα θηλυκά $\frac{3}{4}$ ψυκτικά παξιμάδια και μετά έχουν εκχειλωθεί τα άκρα για να ταιριάζουν στην μούφα.



Εικόνα 6.1.1 : Φάσεις κατασκευής Κυλίνδρων



Εικόνα 6.1.2 : Φάσεις κατασκευής Κυλίνδρων

6.2 ΕΜΒΟΛΑ

Τα έμβολα αρχικά είχαν διάμετρο $\Phi 29,5$ και αποτελούντο από ελατήρια τεφλόν στη εξωτερική επιφάνεια. Λόγο των ελατηρίων τεφλόν αναπτύσσονταν υψηλές τριβές και βελτιώθηκαν. Τα νέα έμβολα έχουν κατασκευαστεί από ράβδο αλουμινίου,

αρχικής διατομής $\Phi 40$ και μήκους 30mm. Με την βοήθεια τόνου η εξωτερική διάμετρος του εμβόλου γίνεται $\Phi 37$ για 20mm, ενώ για τα 10 επόμενα χιλιοστά η διάμετρος γίνεται $\Phi 20$. Στο κέντρο, από την πλευρά της διαμέτρου $\Phi 20$ ανοίγουμε τρύπα $\Phi 10,5$ για βάθος 10mm. Χρησιμοποιώντας μηχανή λειάνσεως (ρεκτιφιέ) μετατρέπουμε την μεγάλη διατομή από $\Phi 37$ σε $\Phi 36,65$ φροντίζοντας η τραχύτητα του εμβόλου να μηδενιστεί και να μπορεί να κινείται μέσα στο κύλινδρο με ευκολία. Μετρώντας από την άκρη της μικρής διατομής 4mm βάθος, ανοίγουμε τρύπα 2mm που ακολουθεί την διάμετρο του κύκλου με σκοπό να συνδεθεί σε αυτό το σημείο το ωστήριο.



Εικόνα 6.2.1 : Φάσεις κατασκευής Εμβόλων

6.3 ΩΣΤΗΡΙΑ

Αρχικά τα ωστήρια αποτελούντο από μια ντίζα με σπείρωμα, ένα σωλήνα σιδήρου. Από την μια πλευρά του σωλήνα συνδέεται η ντίζα και από την άλλη το έμβολο με το τεφλόν. Βελτιώνοντας τα ωστήρια ο σωλήνας σιδήρου αντικαταστάθηκε με σωλήνα μαλακού αλουμινίου και δυο ντίζες με σπείρωμα. Η μία στην μία πλευρά

και η άλλη στην άλλη μαζί με μπίλια ορειχάλκινη. Και στις δυο προαναφερθείσες παραλλαγές η σύνδεση με το στροφαλοφόρο γίνεται με ένα άκρο σύνδεσης (φωλιά). Τα ωστήρια τελικά έχουν κατασκευαστεί από πλάκα αλουμινίου με διαστάσεις 137X15X10. Στην επιφάνεια πλάτους 15mm και μήκους 137mm, από την μια άκρη μετράμε 10mm κατά μήκος και 7,5mm κατά πλάτος. Στο σημείο αυτό ανοίγουμε τρύπα διαμέτρου 9mm για να συνδεθεί το ωστήριο με τον στροφαλοφόρο. Στην επιφάνεια που βρίσκεται αντιδιαμετρικά με την προαναφερόμενη οπή, με διαστάσεις πλάτους 10mm και μήκους 15mm ανοίγουμε τρύπα Φ4 για βάθος 20mm στο κέντρο της. Με την βοήθεια κολαούζου M4 ανοίγουμε σπείρωμα κατά μήκος της τρύπας. Στην τρύπα αυτή τοποθετούμε ντίζα με σπείρωμα M4 μήκους 33mm η οποία φέρει παξιμάδι και στην άλλη άκρη σφαίρα από ορείχαλκο διαμέτρου 10mm. Το παξιμάδι χρειάζεται για να κοντράρει στο αλουμίνιο και την ντίζα για να μην λύνεται από την λειτουργία. Η σφαίρα φέρει διάτρηση 2mm διαμπερής που διέρχεται από το κέντρο της για να γίνει η σύνδεση της με το έμβολο.

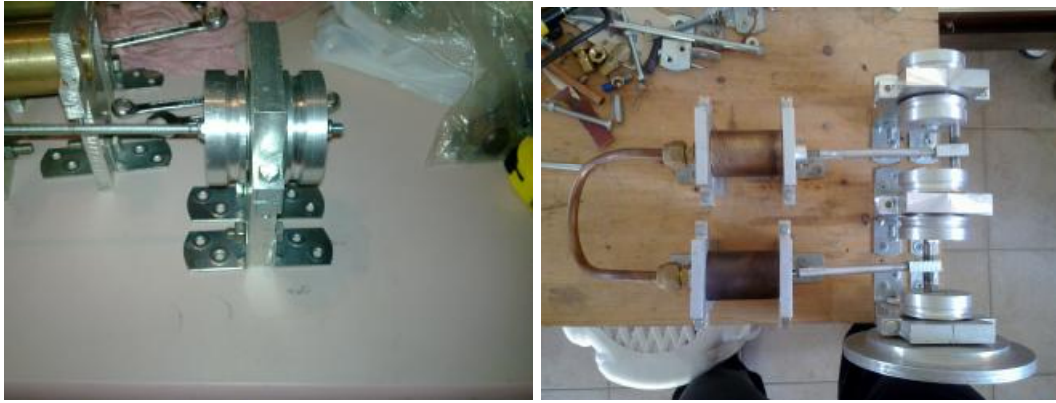


Εικόνα 6.3.1 : Φάσεις κατασκευής Ωστηρίων

6.4 ΣΤΡΟΦΑΛΟΟΡΟΣ

Ο στροφαλοφόρος αρχικά αποτελείται από δύο μικρά κυλινδρικά τμήματα που εφαρμόζονται σε ένα ρουλεμάν. Για να προστεθεί μεγαλύτερη ροπή κατασκευάστηκε ένα σύστημα από πέντε μικρά κυλινδρικά τμήματα και ένα μεγαλύτερο (βολάν), που εφαρμόζουν πάνω σε τρία ρουλεμάν και συνδέονται μεταξύ τους με πείρους 9mm. Τα μικρά είναι κατασκευασμένα από αλουμίνιο Φ60 μήκους 29mm. Με την χρήση του τόρνου αφαιρούμε για 8mm υλικό φτάνοντας την διατομή σε Φ30, για τα επόμενα 2mm αφαιρούμε υλικό μέχρι να φτάσει η διατομή σε Φ45. Με την βοήθεια της κουκουβάγιας ανοίγουμε στο κέντρο διαμετρική τρύπα Φ6. Από την εξωτερική επιφάνεια αφαιρούμε 1mm για Φ20 από το κέντρο προς τα έξω δημιουργώντας μια πατούρα για να τοποθετηθεί ροδέλα. Σε ακτίνα 20mm από το κέντρο, στην εξωτερική πλευρά, με την βοήθεια κάθετου δράπανου ανοίγουμε τρύπα Φ8 βάθους 15mm. Το μεγάλο τμήμα είναι και αυτό κατασκευασμένο από αλουμίνιο αρχικής διατομής Φ200 και μήκους 27mm. Με την χρήση τόρνου αφαιρούμε για 8mm υλικό φτάνοντας την διατομή σε Φ30, για τα επόμενα 2mm αφαιρούμε υλικό μέχρι να φτάσει η διατομή σε Φ45, Φ120 για 8mm και Φ160 για 9mm. Με την βοήθεια της κουκουβάγιας ανοίγουμε στο κέντρο διαμετρική τρύπα Φ6. Από την εξωτερική επιφάνεια αφαιρούμε 5mm για Φ20 από το κέντρο προς τα έξω δημιουργώντας μια πατούρα για να τοποθετηθεί ροδέλα. Ανά δυο τα κυλινδρικά τμήματα τοποθετούνται στα ρουλεμάν και συσφίγγονται με βίδες M6.





Εικόνα 6.4.1 : Κατασκευή και τοποθέτηση στροφαλοφόρου στην μηχανή

6.5 ΒΑΣΕΙΣ ΣΤΗΡΙΞΗΣ

Οι βάσεις στήριξης των κυλίνδρων είναι κατασκευασμένες από πλάκα αλουμινίου διαστάσεων 90X120X10, από την οποία έχουν αφαιρεθεί με την βοήθεια πριονοκορδέλας τα τμήματα διαστάσεων 25X15 και 76X15 όπως απεικονίζονται στην φωτογραφία 6.5.1. Υπολογίζοντας το κέντρο των προεξεχουσών διαστάσεων φέρουμε τις νοητές ευθείες και στο σημείο που τέμνονται ανοίγουμε τρύπα με την βοήθεια φρέζας διαμέτρου $\Phi 40$. Στα δυο προεξέχοντα τμήματα εντοπίζουμε, από την επάνω επιφάνεια, το κέντρο και ανοίγουμε κατακόρυφα τρύπα διαμέτρου $\Phi 4$ για να περαστούν στην συνέχεια οι βίδες σύσφιξης των δυο τμημάτων. Στη συνέχεια με την χρήση πριονοκορδέλας κόβουμε την ευθεία που δημιουργούν τα κέντρα των δυο προεξεχουσών πλαϊνών τμημάτων για να δημιουργηθούν τα δύο τμήματα που συσφίγγουν και συγκρατούν τον κάθε κύλινδρο. Στο κέντρο της βάσης και σε ύψος 17mm από το πάτο της ανοίγουμε τρύπα $\Phi 8$ όπως φαίνεται στην φωτογραφία 6.5.1, για να συνδεθεί η βάση με τις γωνιές συγκράτησης με το ξύλο. Αρχικά ήταν συνδεδεμένες ανά δυο, αλλά λόγω φαινομένου μετάδοσης θερμότητας από τον ένα κύλινδρο στον άλλο, μέσω των βάσεων, διαχωρίστηκαν.



Εικόνα 6.5.1 : Βάσεις στήριξης κυλίνδρων

Οι βάσεις στήριξης των ρουλεμάν είναι κατασκευασμένες από πλάκα αλουμινίου διαστάσεων 100X132X16, από την οποία έχουν αφαιρεθεί με την βοήθεια πριονοκορδέλας τα τμήματα διαστάσεων 32X15 και 73X15 όπως απεικονίζονται στην φωτογραφία 7.5.2. Υπολογίζοντας το κέντρο των προεξοχουσών διαστάσεων φέρουμε τις νοητές ευθείες και στο σημείο που τέμνονται ανοίγουμε τρύπα με την βοήθεια φρέζας διαμέτρου $\Phi 61,5$. Στα δυο προεξέχοντα τμήματα εντοπίζουμε, από την επάνω επιφάνεια, το κέντρο και ανοίγουμε κατακόρυφα τρύπα διαμέτρου $\Phi 6$ για να περαστούν στην συνέχεια οι βίδες σύσφιξης των δυο τμημάτων. Στη συνέχεια με την χρήση πριονοκορδέλας κόβουμε την ευθεία που δημιουργούν τα κέντρα των δυο προεξοχουσών πλαϊνών τμημάτων για να δημιουργηθούν τα δύο τμήματα που συσφίγγουν και συγκρατούν τον κάθε κύλινδρο, στην μία από τις τρεις βάσεις. Στις άλλες δύο το ρουλεμάν τελικά έχει τοποθετηθεί σφηνωτά στις βάσεις. Μετρούμε αποστάσεις 15mm αμφίπλευρα από τις άκρες του πάτου και σε ύψος 17mm από το πάτο της ανοίγουμε τρύπες $\Phi 8$ όπως φαίνεται στην φωτογραφία 6.5.2, για να συνδεθεί η βάση με τις γωνιές συγκράτησης με το ξύλο.



Εικόνα 6.5.2 : Βάσεις στήριξης στροφαλοφόρου.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν άρθρο περιγράφεται ένας αριθμός ερευνητικών εργασιών πάνω στην τεχνολογία των μηχανών Stirling, μηχανών Stirling ηλιακής ενέργειας και LTD μηχανών Stirling. Τα κλειδιά της επιτυχίας της μηχανής Stirling είναι η χρήση νέων υλικών και η καλή μεταφορά θερμότητας στο ρευστό πλήρωσης. Η καλή μεταφορά θερμότητας απαιτεί μεγάλη ροή μάζας, και εν συνεχεία ένα ρευστό χαμηλού ιξώδους χρησιμοποιείται για την μείωση των απωλειών λόγω άντλησης, ή υψηλότερη πίεση χρησιμοποιείται για την ελάττωση της απαιτούμενης ροής ή συνδυασμοί και των δυο προσεγγίσεων.

Πρόσφατες έρευνες και προσπάθειες εξέλιξης των ηλιακής ενέργειας LTD μηχανών Stirling δείχνουν ότι αυτές είναι πολλά υποσχόμενες για μελλοντικές εφαρμογές. Μπορεί η απόδοση των μηχανών Stirling να είναι χαμηλή, αλλά είναι πολύ αξιόπιστες και το κόστος κατασκευής τους είναι μικρό. Η απλότητα και η αξιοπιστία είναι το κλειδί για την κατασκευή μιας οικονομικά συμφέρουσας/ οικονομικής ηλιακής γεννήτριας Stirling.

Στόχος της παρούσης δουλειάς είναι η εύρεση μιας εφικτής λύσης η οποία μπορεί να οδηγήσει σε ένα προκαταρκτικό εννοιολογικό σχέδιο μιας λειτουργικής ηλιακής ενέργειας LTD μηχανής Stirling. Εφόσον αυτές οι μηχανές προορίζονται να χρησιμοποιηθούν σε υπαίθριες/ αγροτικές περιοχές, ο σχεδιασμός τους θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν απλούστερος. Ο καταλληλότερος τύπος ηλιακής ενέργειας μηχανής Stirling θα ήταν αυτός της LTD μηχανής Stirling. Το σχέδιο της μηχανής να είναι γάμα-διαμόρφωσης, , διπλής δράσης κατακόρυφη LTD μηχανή Stirling.

Εφόσον τα δύο τρίτα της ημέρας η ηλιακή ενέργεια δεν είναι διαθέσιμη υβρίδια ηλιακής ενέργειας/ καυσίμου είναι απαραίτητα. Μια τέτοια μηχανή θα μπορεί να δουλεύει τόσο με ηλιακή ενέργεια όσο και με θερμότητα από οποιοδήποτε καύσιμο υλικό. Μια υποστηρικτική κατασκευή, που θα επιτρέπει την κατάλληλη θέση της μηχανής ώστε αυτή να δουλεύει τόσο με ηλιακή ενέργεια όσο και με την παραγόμενη από το καύσιμο υλικό θερμότητα είναι απαραίτητη.

Για λειτουργία με ηλιακή ενέργεια, το αντανakλαστικό κάτοπτρο εστιάζει την ηλιακή ενέργεια απευθείας στο θερμό άκρο εξωτερικής επιφάνειας ενός εκτοπιστή για επακόλουθη μεταφορά με μετάδοση στο αέριο που βρίσκεται μέσα στον κύλινδρο του εκτοπιστή. Εφόσον αυτή η εστία λειτουργεί σαν ο απορροφητής ηλιακής ενέργειας και επίσης σαν η κεφαλή του κυλίνδρου εκτοπιστή, θα πρέπει να αντέχει στις επιπτώσεις της υψηλής μέγιστης εσωτερικής πίεσης και θερμοκρασίας.

Η ηλιακή ακτινοβολία συγκεντρώνεται στον απορροφητή, που είναι ο απορροφητής και η θερμή κεφαλή του εκτοπιστή. Καθώς ο απορροφητής λαμβάνει την ηλιακή ενέργεια, θερμαίνεται και μεταφέρει αυτή τη θερμότητα στο ρευστό που βρίσκεται μέσα στον κύλινδρο του εκτοπιστή. Το ρευστό διογκώνεται υπό την πίεση που παράγεται από την θερμότητα και μετακινεί το πιστόνι. Το πιστόνι με τη σειρά του κινεί τον στροφαλοφόρο άξονα οδηγώντας στην παραγωγή ωφέλιμης μηχανικής ενέργειας.

Η μηχανή Stirling σχεδιάστηκε και πήρε την αρχική της μορφή στα εργαστήρια εργαλειομηχανών του τμήματος της Μηχανολογίας. Ακολούθησαν βελτιώσεις στην κατασκευή της, για να γίνει λειτουργική. Το γεγονός αυτό ανέβασε το κόστος της κατασκευής. Για την κατασκευή χρειάστηκαν εργαλειομηχανές και εργαλεία που δεν υπήρχαν στα εργαστήρια, την αγορά των υλών κατασκευής καθώς και την εξωτερική εργασία για την κατασκευή εξαρτημάτων της μηχανής (ρεκτιφιέ κ.α.) το κόστος της παρούσας κατασκευής άγγιξε τα 600€. Λαμβάνοντας υπ' όψη το κόστος αυτό ακολούθησε ερευνά σε εξειδικευμένα εργαστήρια για την κοστολόγηση της πλήρους κατασκευής της, το οποίο ξεπερνούσε τα 2500€. Καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι για να κατασκευασθεί εξ'ολοκλήρου από άμορφες πρώτες ύλες μια μηχανή Stirling τετοιας κλίμακας, για πτυχιακή εργασία και όχι για βιομηχανική ή εργοστασιακή χρήση, το κόστος είναι μεγάλο. Αρκεστήκαμε έτσι στην ανάλυση της λειτουργίας της μηχανής Stirling και την παρουσίαση της τελικής κατασκευής ως μακέτας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Kongtragool B, Wongwiset S, A review of solar-powered Stirling engines and *low temperature differential Stirling engines*. In: Renewable and sustainable energy reviews 7 Pergamon, Bangkok, 2003, p 131-154
2. Stine WB. *Stirling engines*. In: Kreith F, editor. The CRC handbook of mechanical engineers. Boca Raton: CRC Press; 1998.
3. Van Arsdell BH. *Stirling engines*. In: Zumerchik J, editor. Macmillan encyclopedia of energy, vol.3. Macmillan Reference USA; 2001.
4. Senft JR. *Ringbom Stirling engines*. New York: Oxford University Press, 1993.
5. Walpita SH. *Development of the solar receiver for a small Stirling engine*. In: Special study project report no. ET-83-1. Bangkok: Asian Institute of Technology; 1983.
6. Rizzo JG. *The Stirling engine manual*. Somerset: Camden miniature steam services, 1997.
7. Howell JR, Bannerot RB. Optimum solar collector operation for maximizing cycle work output. *Sol Energy* 1977;19:149–53.
8. Schmidt G. *Theorie der Lehmannschen calorischenmaschine*. *Zeit Des Vereines deutsch Ing* 1871;15(1-12):97–112.
9. Martini WR. *Stirling engine design manual*. 2nd ed. NASA CR-168088; 1983.
10. West CD. *Principles and applications of Stirling engines*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1986.
11. Walker G. *Stirling engines*. Oxford: Clarendon Press, 1980.
12. Walker G. Elementary design guidelines for Stirling engines. In: Proceedings of the 14th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Paper 799230. Boston: American Chemical Society; 1979.
13. West CD. *Theoretical basis for the Beale number*. In: Proceedings of the 16th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Paper 819787. Atlanta: American Society of Mechanical Engineers; 1981.
14. Senft JR. *A simple derivation of the generalized Beale number*. In: Proceedings of the 17th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Paper 829273. Los Angeles: Institute of Electrical and Electronic Engineers; 1982.

15. West CD. A historical perspective on Stirling engine performance. In: Proceedings of the 23rd Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Paper 889004. Denver: American Society of Mechanical Engineers; 1988.
16. Trayser DA, Eibling JA. A 50-Watts portable generator employing a solar-powered Stirling engine. *Sol Energy* 1967;11:153–9.
17. Gupta RK, Deshpande AM, Brave KM. *Development of 1 kW solar powered reciprocating engine for rural applications*. In: International Solar Energy Congress, New Delhi. 1978. p. 2016–20.
18. Spencer LC. A comprehensive review of small solar-powered heat engines: Part I.I. Research since 1950—“Conventional” engines up to 100 kW. *Sol Energy* 1989;43:197–210.
19. Pearce JM, Al Zahawi BA, Auckland DW, Starr F. Electricity generation in the home: evaluation of single-house domestic combined heat and power. *IEE Proc-A* 1996;143:345–50.
20. Prodesser E. Electricity production in rural villages with biomass Stirling engine. *Renew Energ* 1999;16:1049–52.
21. Dixit DK, Ghodke SV. *Renewable energy powered Stirling engines—a viable energy alternative*. In: Sayigh AAM, editor. *Renewable energy technology and the environment*. Proceedings of the Second World Renewable Energy Congress, vol. 2. 1992. p. 934–8.
22. Markman MA, Shmatok YI, Krasovkii VG. *Experimental investigation of a low-power Stirling engine*. *Geliotekhnika* 1983;19:19–24.
23. Orunov B, Trukhov VS, Tursunbaev IA. Calculation of the parameters of a symmetrical rhombic drive for a single-cylinder Stirling engine. *Geliotekhnika* 1983;19:29–33.
24. Abdalla S, Yacoub SH. Feasibility prediction of potable water production using waste heat from refuse incinerator hooked up at Stirling cycling machine. *Desalination* 1987;64:491–500.
25. Nakajima N, Ogawa K, Fujimasa I. Study on microengines: miniaturizing Stirling engines for actuators. *Sensor Actuator* 1989;20:75–82.
26. Aramtummaphon D. A study of the feasibility of using heat energy from producer gas for running stirling engine by steam as working Fluid. Master thesis, King Mongkut’s University of technology Thonburi; 1996.

27. Hirata K, Iwamoto S, Toda F, Hamaguchi K. *Performance evaluation for a 100 W Stirling engine*. In: Proceedings of Eighth International Stirling Engine Conference. 1997. p. 19–28.
28. Costea M, Feidt M. The effect of the overall heat transfer coefficient variation on the optimal distribution of the heat transfer surface conductance or area in a Stirling engine. *Energ Convers Manage* 1998;39:1753–63.
29. Wu F, Chen L, Wu C, Sun F. Optimum performance of irreversible Stirling engine with imperfect regeneration. *Energ Convers Manage* 1998;39:727–32.
30. Wu F, Chen L, Sun F, Wu C, Zhu Y. Performance and optimization criteria for forward and reverse quantum Stirling cycles. *Energ Convers Manage* 1998;39:733–9.
31. Wu F, Chen L, Sun F, Wu C. Finite-time exergoeconomic performance bound for a quantum Stirling engine. *Int J Eng Sci* 2000;38:239–47.
32. Gu Z, Sato H, Feng X. Using supercritical heat recovery process in Stirling engines for high thermal efficiency. *Appl Therm Eng* 2001;21:1621–30.
33. Winkler W, Lorenz H. Design studies of mobile applications with SOFC-heat engine modules. *J Power Sources* 2002;106:338–43.
34. Hsu ST, Lin FY, Chiou JS. Heat-transfer aspects of Stirling power generation using incinerator waste energy. *Renew Energ* 2003;28:59–69.
35. Ptrescu S, Costea M, Harman C, Florea T. Application of the direct method to irreversible Stirling cycles with finite speed. *Int J Energ Res* 2002;26:589–609.
36. Jordan RC, Ibele WE. *Mechanical energy from solar energy*. In: Proceedings of the World Symposium on Applied Solar Energy, Phoenix. 1955. p. 81–101.
37. Spencer LC. *A comprehensive review of small solar-powered heat engines: Part I. A history of solar-powered devices up to 1950*. *Sol Energy* 1989;43:191–6.
38. Ericsson J. *Sun power; the solar engine*. Contributions to the Centennial Exhibition, Philadelphia: John Ericsson, 1870. p. 571–77.
39. Daniels F. *Direct use of the sun's energy*. New Haven: Yale University Press, 1964.
40. Meinel AB, Meinel MP. *Applied solar energy: an introduction*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1976.
41. Reader GT, Hooper C. *Stirling engines*. London: Cambridge University Press, 1983.
42. Ghai ML. *Small solar power plants*. In: Daneils F, Duffie JA, editors. *Solar energy research*. London: Thames and Hudson; 1955. p. 81–4 [Section 4].
43. Dunn PD. *Solar powered pumps*. Joint Conference: University of Reading and U. K. I.S.E.S.: Solar Energy in Agriculture; 1976. p. 55–7.

44. Meijer RJ. *STM4-120 Stirling engine for solar application*. Abs. I.S.E.S, Solar World Congress, Hamburg; 1987. p. 2, 13, 16.
45. Khanna ML. *Studies on hot-air engine run with solar energy conducted at the National Physical Laboratory*, New Delhi, and a critical review of its present status, Paper 7/14, I.S.E.S. Conference, Melbourne; 1970. p. 1–7.
46. Finkelstein T. *Generalized thermodynamic analysis of Stirling engines*. American Society of Automotive Engineers, Paper 118 B. Annual Meeting; 1960.
47. Finkelstein T. *Cyclic processes in closed regenerative gas machines*. American Society of Mechanical Engineers, Paper 61-SA-21. Annual Meeting; 1961.
48. Finkelstein T. *Conversion of solar radiation into power*. American Society of Mechanical Engineers, Paper 61-WA-297. Annual Meeting; 1961.
49. Farber EA. *A closed cycle solar engine*. In: Solar Energy Symposium. Gainesville: University of Florida; 1964.
50. Farber EA. *An open cycle solar engine*. In: Solar Energy Symposium. Gainesville: University of Florida; 1964.
51. Jordan RC. *Conversion of solar to mechanical energy*. In: Zarem AM, Erway DD, editors. Introduction to the utilization of solar energy. New York: McGraw-Hill; 1963. p. 125–52.
52. Utz JA, Braun RA. *Design and initial tests of a Stirling engine for solar energy applications*. MS thesis, Mechanical Engineering Department, University of Wisconsin; 1960.
53. Finkelstein T. *Internally focussing solar power systems*. American Society of Mechanical Engineers, Paper 61-WA-297. Annual Meeting; 1961.
54. Gurtler RW. *Optically driven solar engine*. U.S. Patent; 1979. p. 4, 173, 123.
55. Walker G, Kentfield J, Johnson E, Fauvel R, Srinivasen V. *Coal-fired Stirling engines for railway locomotive and stationary applications*. Proc Inst Mech Eng 1983;197:46.
56. Hull PG, Hunt AJ. A reciprocating solar-heated engine utilizing direct absorption by small particles. J Sol Eng Trans ASME 1984;106:29–34.
57. Holland MB. *The Stirling engine—power plant of the future?* Charter Mech Eng 1979;April:60–3.
58. Pons RL, Fox RJ. *A solar/Stirling total energy system*. In: Sharing the Sun, Solar Technology in the 1970s Conference, Winnipeg. 1976. p. 77–91.
59. Brown CT, Mackie PE, Neale DH. *Advanced component research in the solar thermal program*. In: Proceedings of the Solar World Congress, Perth. 1983. p. 1421–5.

60. Marriott AT. *Solar electric power from parabolic dishes*. In: Proceedings of the Solar World Congress, Perth. 1983. p. 1438–43.
61. Selcuk MK, Bowyer JM. Dish Stirling module performance analysis as evaluated from tests of various TBC concentrator/USAB engine configurations as the parabolic dish test site. Ext. Abst. Intersol '85, Montreal; 1985. p. 313.
62. McGlaun MA. The LaJet energy large scale innovative solar concentrator study of wind loading effects. Abs., I.S.E.S. Solar World Congress, Hamburg; 1987. p. 2, 18, 15.
63. Schlaich J. *Solar power plants with a membrane concave mirror-50 kW*. Abs., I.S.E.S. Solar World Congress, Hamburg; 1987. p. 2, 18, 16.
64. Al-Rebaian A, Hansen J. 50 kW Solar concentrators with stirling generators—results of the first six mounts of operation in Saudi Arabia. Abs., I.S.E.S. Solar World Congress, Hamburg; 1987. p. 2, 13, 15.
65. Leibowitz L, Hanseth E. *Solar thermal technology-outlook the 80's*. Mech Eng 1982;104:30–5.
66. Ahmed A, Al-Agami M, Al-Garni M. *Solar powered Stirling engine with a single membrane dish concentrator*. In: Proceedings of the First World Renewable Energy Congress, Energy and the Environment, Reading, UK, September 23–28, vol. 2. 1990. p. 1202–7.
67. Childs WD, Dabiri AE, Al-Hinai HA, Abdullah HA. *VARI-RO solar-powered desalting technology*. Desalination 1999;125:155–66.
68. Audy Ch, Fischer M, Messerschmid EW. Nonsteady behaviour of solar dynamic power systems with Stirling cycle for space stations. Aerosp Sci Technol 1999;1:49–58.
69. Washom B. *Parabolic dish Stirling module development and test results*. In: Proceedings of the IECEC, Paper No. 849516, San Francisco. 1984.
70. Stine WB, Diver RP. *A compendium of solar dish/Stirling technology*. Sandia National Laboratories, Albuquerque, Report SAND93-7026 UC-236; 1994.
71. Droher J, Squier S. *Performance of the Vanguard solar dish-Stirling module*. Electric Power Research Institute, Palo Alto, Report AP-4608; 1986.
72. Lopez CW, Stone KW. *Design and performance of the Southern California Edison Stirling dish*. In: Proceedings of the 1992 ASME-JSES-KSES International Solar Energy Conference, Maui. 1992.

73. Lopez CW, Stone KW. *Design and performance of the Southern California Edison Stirling dish*. Sandia National Laboratories, Albuquerque, Report SAND93-7098; 1993.
74. Stone KW, Drubka RE. *Impact of Stirling engine operational requirements on dish-Stirling system life cycle costs*. In: Proceedings of the 1994 ASME Solar Energy Conference, San Francisco. 1994.
75. Stone KW, Lopez CW, McAlister R. *Economic performance of the SCE Stirling dish*. In: Proceedings of the IECEC, Atlanta. 1993.
76. Bean JR, Diver RB. *The CPG 5-kWe dish/Stirling development program*. In: Proceedings of the IECEC, San Diego, Paper No. 929181. 1992.
77. Gallup DR, Mancini TR, Christensen J, Beninga K. *The utility scale joint-venture program*. In: Proceedings of the IECEC, Monterey, AIAA-94-3945-CP. 1994.
78. Beninga K, Davenport R, Sellars J, Smith D, Johansson S. *Performance results for the SAIC/STM prototype dish/Stirling systems*. In: Proceedings of the 1997 ASME International Solar Energy Conference, Washington. 1997.
79. Diver R, Andraka CE, Rawlinson KS, Goldberg V, Thomas G. *The advanced dish development system project*. In: Proceedings of the Solar Forum 2001, Technical paper. 2001.
80. Davenport R, Mayette J, Forristall RE. *The salt river project sundish/Stirling system*. In: Proceedings of the ASME Solar Forum 2001, Washington. 2001.
81. Davenport RL, Butler BL, Taylor R, Forristall R, Johansson S, Ulrich J et al. *Operation of secondgeneration dish/Stirling power systems*. In: Proceedings of the ASES 2002 Solar Conference, Reno. 2002.
82. Umarov GY, Orunov BB, Klyuchevskii YE, Tursunbaev IA, Trukhov VS. Thermodynamic analysis and choice of optimal parameters of dynamic converter for solar energy plant. *Geliotekhnika* 1976;12:31–4.
83. Umarov GY, Trukhov VS, Tursunbaev IA, Orunov BB. *A method for optimizing heat exchangers of a stirling engine*. *Geliotekhnika* 1976;12(6):18–23.
84. Eldighidy SM, Taha IS, Darwish MA. *Optimum conditions for maximum solar energy absorbed by flat plate collector augmented by plane reflector*. In: Proceedings of the Energy Symposium (ISATED), Montreux, Swiss. 1979. p. 28–32.
85. Eldighidy SM. Optimum outlet temperature of solar collector for maximum work output for an Otto air-standard cycle with ideal regeneration. *Sol Energy* 1993;51:175–82.

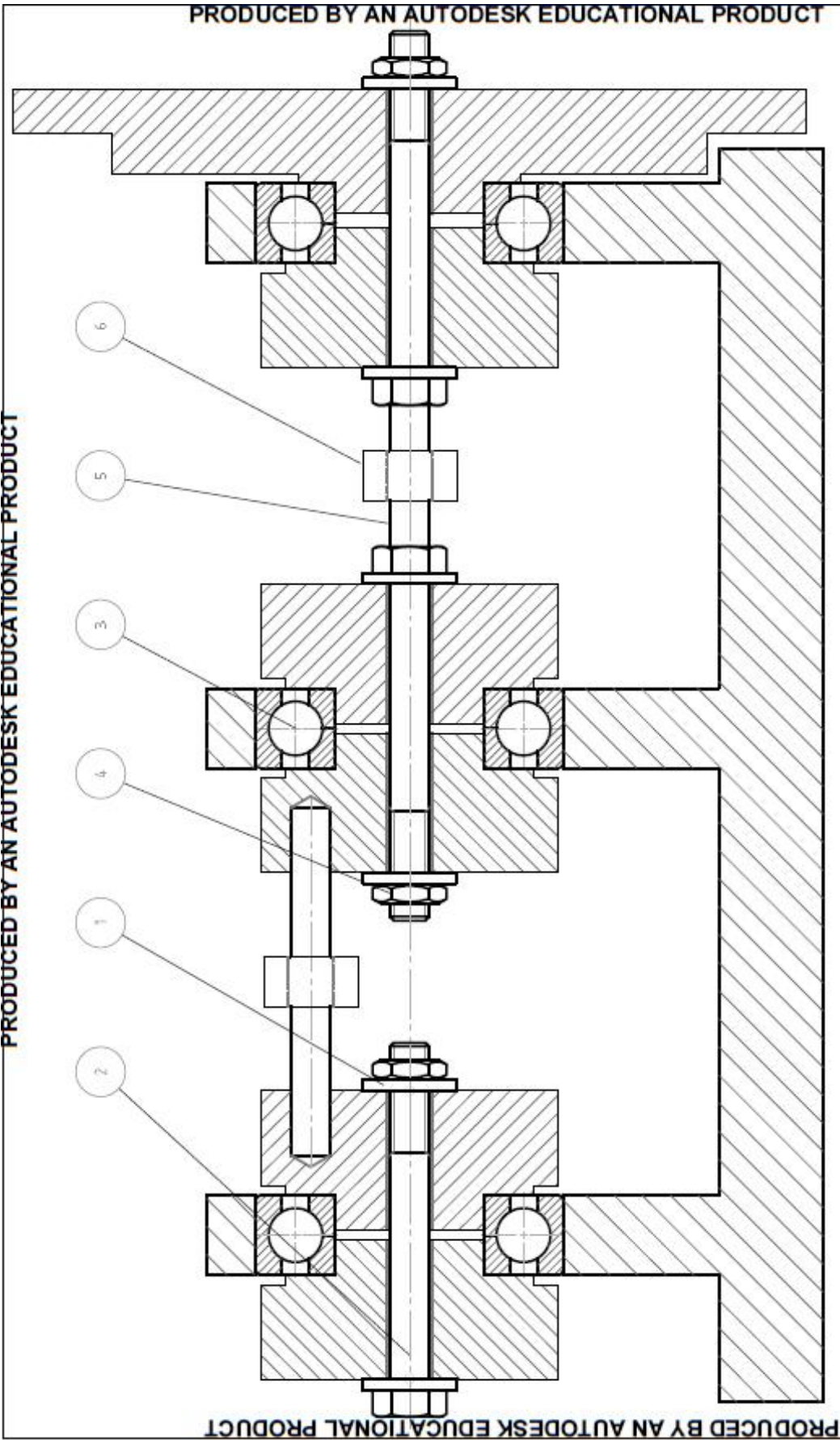
86. Gordon JM. *On optimized solar-driven heat engines*. Sol Energy 1988;40:457–61.
87. Altfeld K, Leiner W, Feebig M. *Second law optimization of flat-plate air heaters*. Sol Energy 1988;41:127–32.
88. Costea M, Petrescu S, Harman C. The effect of irreversibilities on solar Stirling engine cycle performance. Energ Convers Manage 1999;40:1723–31.
89. Chen YT, Chong KK, Bligh TP, Chen LC, Yunus J, Kannan KS et al. *Non-imaging, focusing heliostat*. Sol Energy 2001;71:155–64.
90. Haneman D. *Theory and principles of low-temperature hot air engines fuelled by solar energy*. Report Prepared for U.S. Atomic Energy Comm. Contract W-7405-Eng-48; 1975.
91. Spencer LC. *A comprehensive review of small solar-powered heat engines: Part III. Research since 1950-“unconventional” engines up to 100 kW*. Sol Energy 1989;43:211–25.
92. White EW. *Solar heat engines*, U.S. Patent; 1983. p. 4, 414, 814.
93. O’Hare R. *Convection powered solar engine*, U.S. Patent; 1984. p. 4, 453, 382.
94. Senft JR. *An ultra low temperature differential Stirling engine*. In: Proceedings of the Fifth International Stirling Engine Conference, Paper ISEC 91032, Dubrovnik, May. 1991.
95. Ε. Δ. Ρογδάκης, Ν. Α. Μπορμπιλιάς, *Η Μηχανή του Stirling. Παλαιά αλλά και πολύ σύγχρονη!*, Πανελλήνιο Εκπαιδευτικό Δύκτιο, Αθήνα, 2005
96. Ν. Α. Μπορμπιλιάς, *Εισαγωγή στις μηχανές Stirling*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνίο, Αθήνα, 2005
97. Timoumi Y, Tlili I, Ben Nasrallah S. *Design and performance optimization of GPU-3 Stirling engines*, Elsevier Energy 33, Tunisie, 2008
98. Τερζάκης Κ, Βελτιστοποίηση Αδιαβατικής Ανάλυσης Μηχανών Stirling – Παράγοντες Επίδρασης της Απόδοσης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνίο, Αθήνα, 2008
99. Ρεντζεπέρης Γ, Θερμοδυναμική ανάλυση και παραμετρική μελέτη του εξωτερικού συστήματος θέρμανσης Θερμαντλιών Stirling, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνίο, Αθήνα, 2007

ΧΡΗΣΙΜΕΣ ΔΙΕΥΘΥΝΣΕΙΣ ΣΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ

1. American Stirling Co. - Stirling engines, Waste heat consulting, Sterling engines.
(www.stirlingengine.com)
2. American Stirling Co. - Stirling engines, Waste heat consulting, Sterling engines.
(www.stirlingengine.com)
3. Acoustic Stirling Heat Engine Home Los Alamos National Laboratory.
(www.lanl.gov/mst/engine)
4. NASA John H. Glenn Research Center. (www.grc.nasa.gov)
5. Stirling Engine - SOLO und Stirling. (www.stirling-engine.de)
6. Stirling Engine Society USA. (www.sesusa.org)
7. Howstuffworks "How Stirling Engines Work".
(www.howstuffworks.lycos.com/stirling-engine3.htm)
8. Stirlingmotor, E. Schmidt Stirling Engines, Oberursel. (www.stirlingmotor.com/)
9. Stirling Engine Steam Engine Auto Steam Engine Locomotive Fire Engine Design.
(www.sci.lib.uci.edu/HSG/RefCalculators1.html)
10. Stirling Engines. (www.ucolick.org/~de/StirlingEngines.html)
11. Swedish Submarine Description of Boat.
(www.kockums.se/Submarines/aipstirling.html)
12. Links. (www.sesusa.hypermart.net/links.htm) (www.keveney.com/Engines.html)
13. Idaho Stirling Engine. (www.uidaho.edu/engr/ME/sr_des/hev/stir/)
14. The Little Engine Pages. (www.stirlingsouth.com/)
15. External Combustion Engines (www.geocities.com/Yosemite/Rapids/2068/)

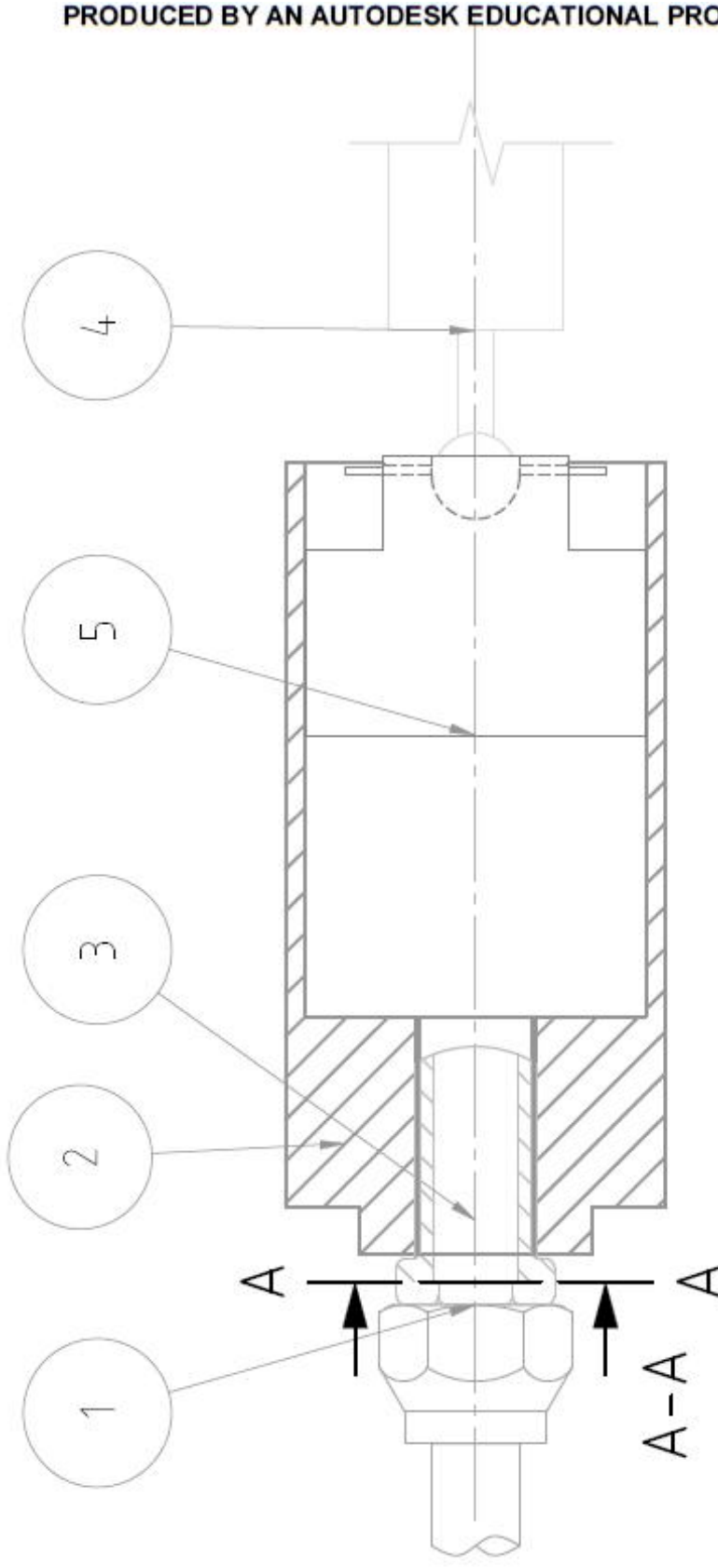
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ
ΣΧΕΔΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT



Item No.	Description	Standard	Material
6	Pushing Rod	ISO 2338 - 6 h11 x 70 - C	Aluminum
5	Parallel Pin	DIN 439 - M8	Iron
4	Hex Nut	DIN 628 T4 - DJ206 - 30 x 62 x 16	Aluminum
3	Four-Point Contact Ball Bearing	ISO 4016 - M8 x 70	Aluminum
2	Hex-Head Bolt	ANSI B18.22 M - 8 N	Aluminum
1	Plain Washer	Standard	Aluminum

ΤΟΜΗ ΤΡΟΦΑΙΟΦΟΡΟΥ ΑΞΟΝΑ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΣΤΙΡΛΙΝΓ



PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

5	2	Εμβολο	20mmXØ36,67	Αλουμνιο
4	2	Ωστήριο	138mmX19mm	Αλουμνιο
3	2	Ρακόρ	M14XM14	Ορείχαλκος
2	2	Κύλινδρος	80mmX41mmXØ36,7mm	Φωσφωρούχος Ορείχαλκος
1	1	Σωλήνας με 2 κοχλιωτες συνδέσεις	M14	Χαλκός και Ορείχαλκος

Κλίμακα 1:0,65

ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΤΟΜΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΣΤΙΡΗΓΩΝ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΩΝ ΠΡΟΔΙΟΡΩΝΤΕΣ ΤΗΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΣΤΗΝ ΚΙΝΗΣΗ