



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΗΧΑΝΩΝ**  
**STIRLING ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**  
**ΑΠΟ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ**

**ΧΡΗΣΤΟΥ ΠΛΑΤΩΝΗ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ**

**ΚΑΘ. ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΚΕΦΑΛΑΣ**



## Περιεχόμενα

Περίληψη .....	5
1. Βασικές Αρχές θερμοδυναμικής.....	6
1.1 Έργο σε ένα κλειστό θερμοδυναμικό σύστημα.....	6
1.1.1 Έργο κατά την ισόχωρη διεργασία .....	8
1.1.2 Έργο κατά την ισοβαρή διεργασία .....	8
1.1.3 Έργο κατά την ισόθερμη διεργασία.....	9
1.1.4 Έργο κατά την αδιαβατική διεργασία .....	11
1.2 Πρώτο Θερμοδυναμικό Αξίωμα .....	12
1.3 Θερμοδυναμικοί Κύκλοι .....	13
1.4 Κύκλος Carnot .....	15
1.5 Κύκλος Ericsson.....	17
1.6 Δεύτερο Θερμοδυναμικό Αξίωμα.....	18
2. Μηχανές Stirling.....	20
2.1 Ιστορία .....	20
2.2 Αρχή λειτουργίας .....	22
2.3 Διατάξεις Μηχανών Stirling .....	25
2.3.1 Μηχανή Stirling τύπου Α.....	25
2.3.2 Μηχανή Stirling τύπου Β.....	27
2.3.3 Μηχανή Stirling τύπου Γ .....	29
2.3.4 Μηχανή Stirling τύπου FPSE .....	30
2.3.5 Σύγκριση μεταξύ διαφορετικών τύπων μηχανών Stirling .....	33
2.4 Οι μηχανές Stirling στην σημερινή εποχή.....	34
2.4.1 Τεχνολογία και Εταιρείες που δραστηριοποιούνται στον χώρο .....	34
2.4.2 Καύσιμα .....	36
2.4.3 Παραγόμενη Ισχύς.....	36
2.4.4 Επιτυγχανόμενη θερμοδυναμική απόδοση .....	38
2.4.5 Εκπομπές Αερίων.....	38
2.4.6 Εγκατάσταση Μηχανής Stirling.....	38
2.4.7 Κύκλος λειτουργίας και συντήρηση .....	39
2.4.8 Τεχνικές δυσκολίες μηχανών Stirling.....	40
3 Ανάλυση Μηχανών Stirling.....	41

3.1	Ισοθερμοκρασιακή Προσέγγιση .....	41
3.1.1	Ανάλυση Schmidt .....	45
3.2	Εμπειρικό Μοντέλο διαστασιολόγησης μηχανών Stirling.....	46
4.	Διαστασιολόγηση Μηχανής Stirling .....	49
4.1	Μοντέλα διαστασιολόγησης .....	49
4.1.1	Η μηχανή Stirling GPU-III .....	49
4.1.2	Αξιολόγηση μεθόδου Schmidt.....	54
4.1.3	Αξιολόγηση εμπειρικής μεθόδου με αριθμό Beale.....	56
4.2	Διατύπωση προβλήματος.....	59
4.3	Διαστασιολόγηση Μηχανής Stirling για συγκεκριμένη ισχύ .....	60
4.4	Λειτουργία προτεινόμενης διάταξης με ηλιακή ενέργεια .....	63
4.4.1	Υλικά κατασκευής συλλέκτη .....	66
4.4.2	Διάσταση κατόπτρου .....	67
4.4.3	Διάταξη δέκτη .....	69
4.4.4	Οικονομική Αξιολόγηση διάταξης .....	74
4.5	Παραγωγή Ηλεκτρισμού με μηχανή Stirling και θερμότητα από Βιομάζα .....	76
4.5.1	Τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρισμού από βιομάζα.....	76
4.5.2	Διάταξη και κόστος παραγωγής ενέργειας από βιομάζα.....	78
4.6	Λειτουργία προτεινόμενης διάταξης με ηλιακή ενέργεια .....	82
4.6.1	Βασικά στοιχεία ενός ηλιακού συλλέκτη .....	82
	Τα βασικά στοιχεία ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, είναι τα εξής: .....	82
4.6.2	Υπολογισμός κόστους .....	84
5.	Συμπεράσματα-Προτάσεις για μελλοντική Έρευνα .....	86
6.	Βιβλιογραφία .....	88

## Περίληψη

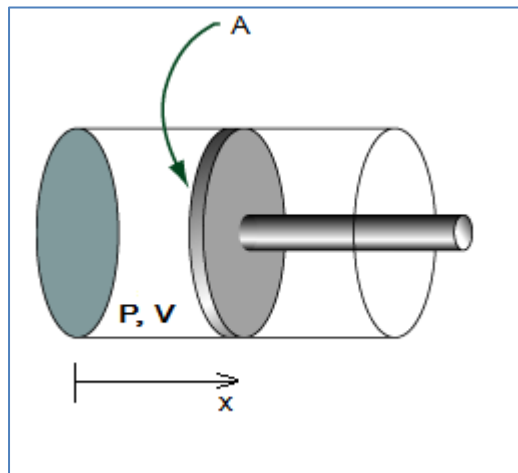
Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται παρουσίαση της τεχνολογίας των μηχανών Stirling. Παρουσιάζονται μαθηματικά μοντέλα με τα οποία γίνεται η ανάλυση αυτών, τα οποία έχουν θεωρητική, ή εμπειρική βάση. Στην συνέχεια έγινε οικονομική αξιολόγηση της εγκατάστασης μίας μηχανής Stirling για ηλεκτροδότηση μίας οικίας. Ερευνήθηκαν δύο διαφορετικές περιπτώσεις: α) Μηχανή Stirling με ηλιακή ενέργεια, και β) Μηχανή Stirling με βιομάζα. Από τις δύο αυτές περιπτώσεις, βρέθηκε ότι η περισσότερο συμφέρουσα είναι η μηχανή Stirling με ηλιακή ενέργεια, η οποία εν συνεχεία συγκρίθηκε σαν λύση με ένα φωτοβολταϊκό σύστημα ίδιας ισχύος, από το οποίο βρέθηκε επίσης οικονομικά περισσότερο συμφέρον.

## 1. Βασικές Αρχές Θερμοδυναμικής

Στο παρόν κεφάλαιο, πραγματοποιείται μία σύντομη ανασκόπηση σε βασικές αρχές θερμοδυναμικής,

### 1.1 Έργο σε ένα κλειστό θερμοδυναμικό σύστημα

Για την ανάλυση του έργου σε ένα κλειστό θερμοδυναμικό σύστημα θα θεωρήσουμε το κλειστό σύστημα κυλίνδρου εμβόλου το οποίο απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 1: Κλειστό σύστημα κυλίνδρου, αερίου και εμβόλου [3]

Το σύστημα καταλαμβάνει όγκο  $V$  βρίσκεται σε θερμοκρασία  $T$  και πίεση  $P$ . Θεωρείται ότι το σύστημα βρίσκεται σε ισορροπία, οπότε η πίεση είναι ομοιόμορφη καθ' όλο τον όγκο του αερίου.

Με βάση τα παραπάνω, η δύναμη η οποία ασκείται στο έμβολο είναι ίση με το γινόμενο της επιφάνειας του εμβόλου το οποίο έρχεται σε επαφή με το αέριο, επί την πίεση του αερίου, δηλ. από την σχέση:

$$F = PA \quad (1)$$

Όπου  $A$  η επιφάνεια του εμβόλου.

Έστω  $x$  η θέση του εμβόλου στον οριζόντιο άξονα. Θεωρώντας ότι το έμβολο μετατοπίζεται κατά ένα απειροστό διάστημα  $dx$ , το έργο της δύναμης που περιγράφηκε παραπάνω, δίνεται από την σχέση:

$$dW = Fdx \quad (2)$$

Όπου  $W$  το έργο της εν λόγω δύναμης και  $dW$  το διαφορικό έργο κατά την μετατόπιση του εμβόλου κατά  $dx$ .

Αντικαθιστώντας την σχέση (1) στην σχέση (2) προκύπτει ότι:

$$dW = PAdx \quad (3)$$

Δεδομένου ότι

$$dV = Adx \quad (4)$$

Όπου  $dV$  η μεταβολή του όγκου του αερίου κατά την μετατόπιση του εμβόλου κατά διάστημα  $dx$ .

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (3) και (4) το έργο δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$dW = PdV \quad (5)$$

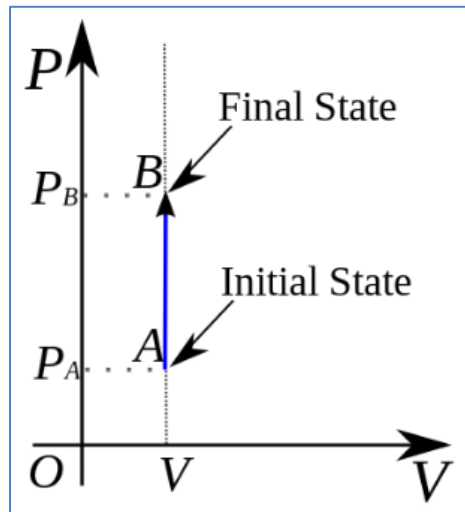
Κατά συνέπεια, το συνολικό έργο το οποίο παράγεται από το έμβολο, κατά την μετακίνησή του από το σημείο  $A$  στο σημείο  $B$ , όπου οι όγκοι του περικλειόμενου αερίου είναι  $V_A$  και  $V_B$  αντιστοίχως δίνεται από την ολοκλήρωση της παραπάνω σχέσης:

$$W_{AB} = \int_{V_A}^{V_B} P dV \quad (6)$$

Στην θερμοδυναμική ορίζεται ότι το έργο το οποίο αποδίδεται από ένα σύστημα στο περιβάλλον είναι θετικό, καθώς αυτό είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί κατά ωφέλιμο τρόπο (π.χ. ανύψωση ενός βάρους ή π.χ. περιστροφή ενός εμβόλου).

### 1.1.1 Έργο κατά την ισόχωρη διεργασία

Με τον όρο ισόχωρη διεργασία εννοείται ο σταθερός όγκος. Η ισόχωρη διεργασία σε διάγραμμα PV απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2: Ισόχωρη διεργασία αερίου [3]

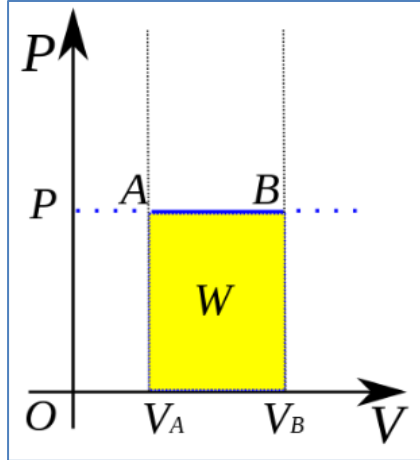
Κατά την ισόχωρη διεργασία το έργο είναι μηδενικό:

$$W_{AB} = 0 \quad (7)$$

### 1.1.2 Έργο κατά την ισοβαρή διεργασία

Με τον όρο ισοβαρής διεργασία εννοείται η διεργασία υπό σταθερή πίεση. Σε ένα διάγραμμα PV η ισοβαρής διεργασία απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:





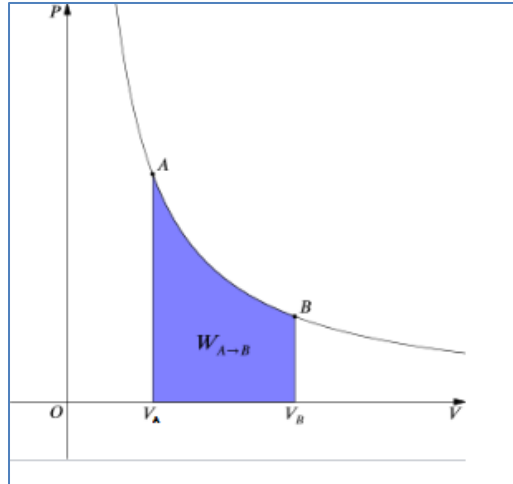
Σχήμα 3: Ισοβαρής διεργασία [3]

Κατά την ισοβαρή διεργασία, η πίεση είναι σταθερά και η σχέση (6) γίνεται:

$$W_{AB} = P(V_B - V_A) \quad (8)$$

### 1.1.3 Έργο κατά την ισόθερμη διεργασία

Με τον όρο ισόθερμη διεργασία, εννοείται η διεργασία κατά την οποία η θερμοκρασία παραμένει σταθερή. Η απεικόνιση μιας ισόθερμης διεργασίας για την περίπτωση τελείου αερίου δίδεται στο παρακάτω σχήμα



Σχήμα 4: Ισόθερμη διεργασία [3]

Σε ένα τέλειο αέριο ισχύει το παρακάτω:

$$PV = mRT \quad (9)$$

Όπου  $m$  η μάζα του αερίου και  $R$  η σταθερά των αερίων.

Καθώς το σύστημα είναι κλειστό, η μάζα  $m$  του αερίου είναι σταθερή. Επίσης, καθώς η θερμοκρασία  $T$  είναι σταθερή, το δεξί μέλος της εισώσης (9) είναι σταθερό. Δηλ. ισχύει:

$$C = mRT \quad (10)$$

Αντικαθιστώντας στην σχέση (9) προκύπτει:

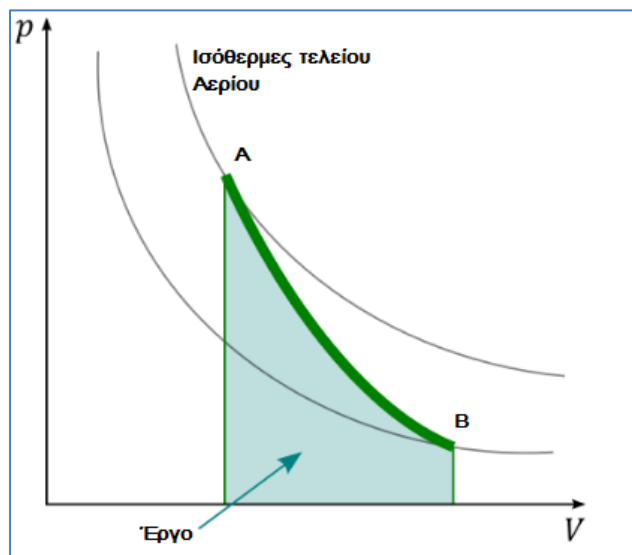
$$PV = C \Rightarrow P = \frac{C}{V} \quad (11)$$

Αντικαθιστώντας στην σχέση (6), το έργο σε μία ισόθερμη διεργασία παίρνει την μορφή:

$$W_{AB} = C \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right) \quad (12)$$

### 1.1.4 Έργο κατά την αδιαβατική διεργασία

Με τον όρο αδιαβατική διεργασία εννοείται η διεργασία, κατά την οποία δεν ανταλλάσσεται θερμότητα μεταξύ του συστήματος και του περιβάλλοντος. Η αδιαβατική διεργασία κατά την εκτόνωση/συμπίεση τελείου αερίου, δίδεται σε διάγραμμα PV στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 5: Αδιαβατική διεργασία [3]

Επίσης, για ένα τέλειο αέριο, η αδιαβατική διεργασία περιγράφεται από την εξής σχέση:

$$PV^\gamma = C \quad (13)$$

Όπου C σταθερά και  $\gamma$  είναι ο λόγος της ειδικής θερμότητας υπό σταθερή πίεση και της ειδικής θερμότητας υπό σταθερό όγκο, δηλ.

$$\gamma = \left( \frac{c_p}{c_v} \right) \quad (14)$$

Η σταθερά  $\gamma$  για ένα τέλειο μονοατομικό αέριο είναι ίση με 1.66 ενώ για τον ατμοσφαιρικό αέρα ο οποίος είναι κατά κύριο λόγο διατομικό αέριο είναι ίση με 1.4.

Με βάση τα παραπάνω, και χρήση των σχέσεων, (6), (13), (14), το έργο σε μία αδιαβατική διεργασία είναι ίσο με:

$$W = \frac{c(v_B^{1-\gamma} - v_A^{1-\gamma})}{1-\gamma} \quad (15)$$

## 1.2 Πρώτο Θερμοδυναμικό Αξίωμα

Το πρώτο θερμοδυναμικό αξίωμα, είναι μία από τις βασικότερες αρχές της θερμοδυναμικής, η οποία, σε ένα κλειστό σύστημα, συνδέει τα εξής φυσικά μεγέθη:

- Την εσωτερική ενέργεια  $u$  ενός σώματος
- Την θερμότητα που παράγει, καταναλώνει, ή ανταλλάσσει με το περιβάλλον του
- Το μηχανικό έργο που καταναλώνει, ή παράγει

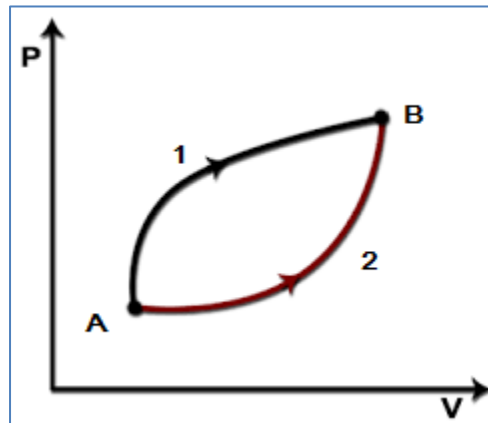
Η εσωτερική ενέργεια  $u$  ενός σώματος είναι η συνολική ενέργεια που περιλαμβάνεται από το σώμα αυτό, η οποία είναι ανεξάρτητη από ηλεκτρικά φαινόμενα, μαγνητικά πεδία, κίνηση του σώματος σε μακροσκοπικό επίπεδο, επιφανειακή τάση, βαρυτικά πεδία. Η εσωτερική ενέργεια  $u$  είναι θερμοδυναμική ιδιότητα και κατά συνέπεια είναι δυνατόν να εκφραστεί με την βοήθεια δύο οποιωνδήποτε θερμοδυναμικών συντεταγμένων του συστήματος (π.χ.  $P, T$ ).

Η εσωτερική ενέργεια, συνδέεται με την θερμότητα και το παραγόμενο έργο μέσω της παρακάτω σχέσης, για μία απειροστή μεταβολή της κατάστασης του συστήματος:

$$dq = du + dw \quad (16)$$

Όπου  $dq$  είναι η θερμότητα που προσλαμβάνεται/απορρίπτεται,  $du$  η απειροστή μεταβολή εσωτερικής ενέργειας και  $dW$  το μηχανικό έργο που παράγει ή καταναλώνεται από το σύστημα.

Έστω η μετάβαση ενός θερμοδυναμικού συστήματος από το σημείο  $A$ , στο σημείο  $B$ , όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα  $PV$ . Η μετάβαση αυτή είναι δυνατόν να γίνει μέσα από άπειρες διαδρομές. Έστω η διαδρομή 1 και η διαδρομή 2.



Σχήμα 6: Μετάβαση ενός συστήματος από συνθήκες  $A$  σε συνθήκες  $B$  [3]

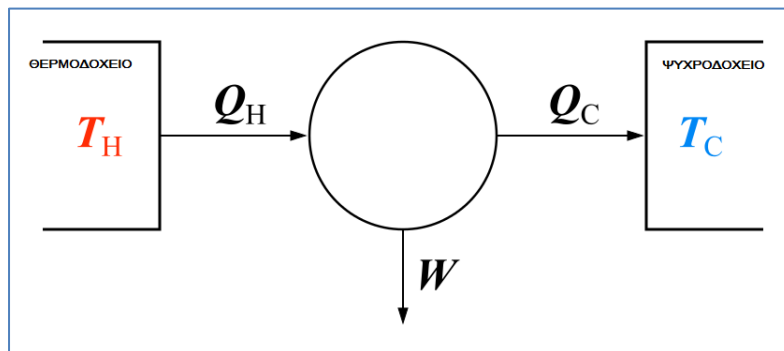
Κατά την μετάβαση από την κατάσταση  $A$ , στην κατάσταση  $B$ , η εσωτερική ενέργειά του στο σημείο  $B$ , εξαρτάται μόνον από τις συντεταγμένες του σημείου  $B$ . Αυτό έρχεται σε αντιδιαστολή με το έργο και την θερμότητα, τα οποία εξαρτώνται από την ακολουθούμενη διαδρομή. Κατά συνέπεια, το έργο και η θερμότητα είναι διαφορετικά στις διαδρομές 1 και 2 που εμφανίζονται στο παραπάνω σχήμα.

### 1.3 Θερμοδυναμικοί Κύκλοι

Μία θερμική μηχανή, για να λειτουργήσει, προϋποθέτει την ύπαρξη μίας ενεργειακής δεξαμενής ή αλλιώς μιας πηγής ενέργειας, η οποία ονομάζεται θερμοδοχείο, η οποία προσδίδει την απαραίτητη ενέργεια σε μορφή θερμότητας για την λειτουργία της.

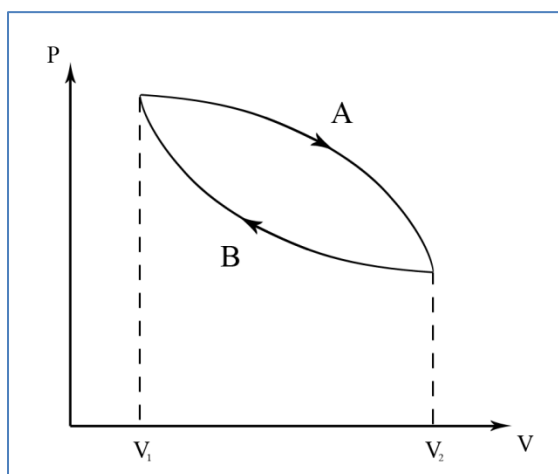
Εκτός αυτού, απαιτείται και η ύπαρξη μίας ενεργειακής δεξαμενής με χαμηλότερη θερμοκρασία, η οποία ονομάζεται ψυχροδοχείο, προς την οποία αποβάλλεται μέρος της θερμότητας, η οποία προσελήφθη από το θερμοδοχείο.

Η παραγωγή έργου από το σύστημα, καθώς επίσης και οι ροές θερμότητας μεταξύ συστήματος/θερμοδοχείου και ψυχοδοχείου, απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 7: Ροές έργου και θερμότητας σε μία θερμική μηχανή [3]

Μία θερμική μηχανή για να λειτουργήσει εκτελεί κυκλική διεργασία. Ένα παράδειγμα κυκλικής διεργασίας απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 8: Κυκλική διεργασία σε διάγραμμα PV [3]

Όπως αναφέρθηκε σε παραπάνω παραγράφους, το έργο, η θερμότητα και η εσωτερική ενέργεια ενός συστήματος συνδέονται μέσω του πρώτου θερμοδυναμικού αξιώματος. Επίσης, η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας ενός συστήματος κατά την ολοκλήρωση μίας κυκλικής

διεργασίας είναι μηδενική. Αυτό συμβαίνει καθώς η εσωτερική ενέργεια του συστήματος δεν εξαρτάται από την διαδρομή που ακολουθείται, αλλά μόνο από την αρχική και την τελική θέση.

Κατά συνέπεια, το πρώτο θερμοδυναμικό αξίωμα παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$Q_H - Q_C = W \quad (16)$$

Όπου  $Q_H$  η θερμότητα που παραλαμβάνεται από το θερμοδοχείο,  $Q_C$  η θερμότητα που προσδίδεται στο ψυχροδοχείο και  $W$  το ωφέλιμο μηχανικό έργο που παράγεται από την θερμική μηχανή. Ο βαθμός της αξιοποίησης της παρεχόμενης θερμικής ενέργειας  $Q_H$  εκφράζεται από την θερμοδυναμική απόδοση του συστήματος, η οποία ορίζεται ως εξής:

$$\eta = \frac{Q_H - Q_C}{Q_H} = \frac{W}{Q_H} \quad (17)$$

Τρεις από τους σημαντικότερους κύκλους θερμικούς κύκλους μηχανών είναι ο κύκλος Carnot, ο κύκλος Ericsson και ο κύκλος Stirling. Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται σύντομη αναφορά στους κύκλους Carnot και Ericsson για λόγους πληρότητας, ενώ στο κεφάλαιο 2 αναλύεται διεξοδικότερα ο κύκλος Stirling.

## 1.4 Κύκλος Carnot

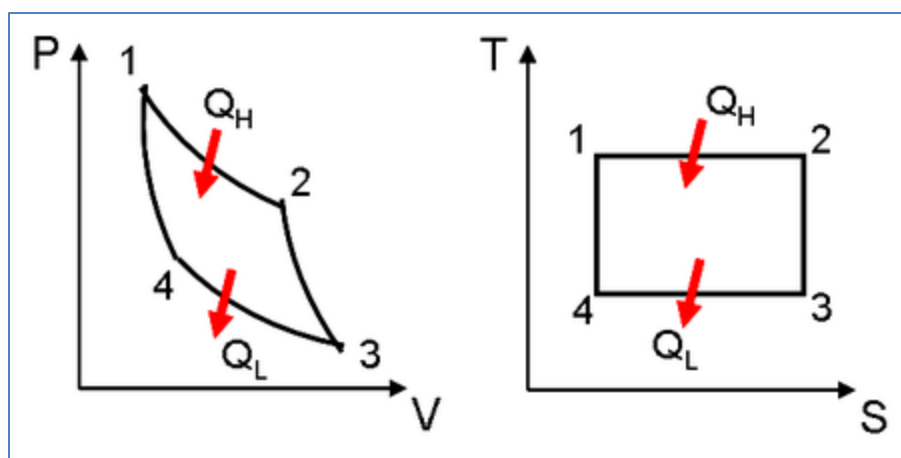
Έχοντας δεδομένη την ύπαρξη ενός θερμοδοχείου και ενός ψυχροδοχείου με δεδομένες θερμοκρασίες, και μία θερμική μηχανή η οποία λειτουργεί στα θερμοκρασιακά αυτά όρια, προκύπτουν τα εξής ερωτήματα:

- Ποιός είναι ο μέγιστος βαθμός εκμετάλλευσης της θερμότητας, δηλ. ποιός είναι ο μέγιστος δυνατός βαθμός απόδοσης που μπορεί να επιτευχθεί;
- Ποιά είναι τα χαρακτηριστικά μίας τέτοιας θερμικής μηχανής;
- Ποιές είναι οι επιπτώσεις στην λειτουργία του, που προέρχονται από την φύση του λειτουργούντος αερίου;

Τα ερωτήματα αυτά απασχόλησαν τον Γάλλο μηχανικό Nicolas Leonard Sadi Carnot, ο οποίος το 1824 δημοσίευσε μελέτη με τίτλο: "Σκέψεις επί της ικανότητας της θερμότητας να παράγει έργο, και επί της ανάπτυξης κατάλληλων μηχανών για τον σκοπό αυτό".

Ο κύκλος Carnot περιλαμβάνει μία σειρά από αντιστρεπτές διεργασίες τις οποίες είναι δυνατόν να υποστεί οποιοδήποτε κλειστό θερμοδυναμικό σύστημα, ανεξάρτητα αν πρόκειται για σύστημα χημικής, ηλεκτρικής, μαγνητικής ή οποιασδήποτε άλλης φύσεως και ανεξάρτητα από την φύση του συστήματος.

Για ένα τέλειο αέριο, ο κύκλος Carnot, σε διάγραμμα  $PV$  και διάγραμμα  $TS$  απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 9: Κύκλος Carnot σε διάγραμμα  $PV$  και διάγραμμα  $TS$  [3]

Συγκεκριμένα, ο κύκλος Carnot συνίσταται από τις παρακάτω επιμέρους θερμοδυναμικές διεργασίες:

- Καμπύλη 1 - 2: Αντιστρεπτή ισοθερμοκρασιακή διεργασία. Το σώμα βρίσκεται σε επαφή με το θερμοδοχείο και υφίσταται εκτόνωση απορροφώντας θερμότητα  $Q_H$
- Καμπύλη 2 - 3: Αντιστρεπτή αδιαβατική διεργασία. Κατά την διεργασία αυτή, η θερμοκρασία και η πίεση του συστήματος ελαττώνονται, έτσι ώστε στο τέλος αυτής, η θερμοκρασία του συστήματος να είναι ίση με την θερμοκρασία του ψυχροδοχείου.



- Καμπύλη 3 - 4: Αντιστρεπτή ισοθερμοκρασιακή διεργασία: Το σώμα βρίσκεται σε επαφή με το ψυχοδοχείο και έχει καθ' όλη τη διάρκειά της, την θερμοκρασία του ψυχοδοχείου, υφιστάμενο συμπίεση
- Καμπύλη 4 - 1: Το σώμα επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση μέσω μίας αδιαβατικής διεργασίας.

Είναι δυνατόν να αποδειχθεί ότι μία θερμική μηχανή η οποία λειτουργεί κατά αντιστρεπτό τρόπο με έναν κύκλο Carnot, έχει την μέγιστη δυνατή απόδοση από οποιαδήποτε άλλη μηχανή, η οποία λειτουργεί στα συγκεκριμένα θερμοκρασιακά όρια.

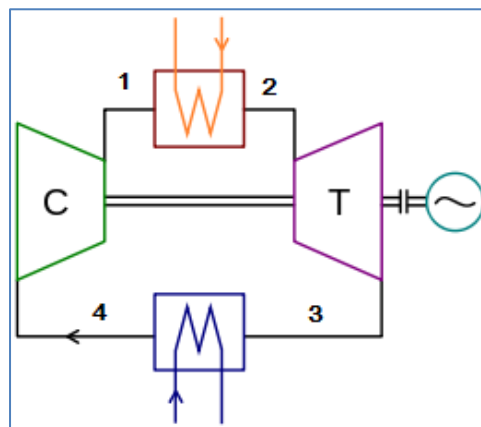
Το έργο και η απόδοση της μηχανής Carnot για ένα τέλειο αέριο είναι επίσης δυνατό να αποδειχθεί ότι δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$W = mC_p \left( T_C \ln \left( \frac{T_C}{T_H} \right) - (T_C - T_H) \right) \quad (18)$$

$$\eta = \frac{T_H - T_C}{T_H} \quad (19)$$

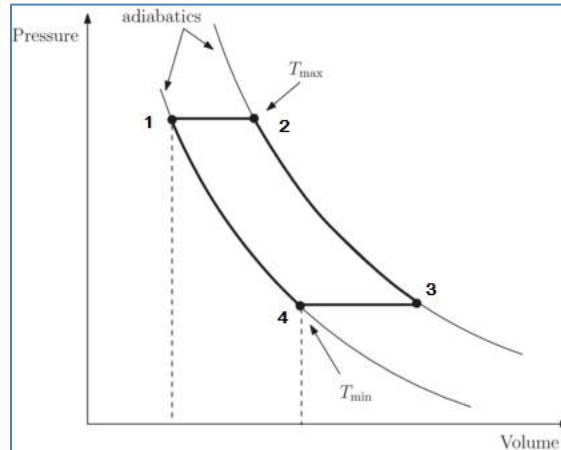
## 1.5 Κύκλος Ericsson

Για την ανάλυση του κύκλου Ericsson θα θεωρηθεί συμπεριφορά τελείου αερίου. Επίσης, το αέριο βρίσκεται σε συνεχή ροή μέσα σε ένα σύστημα δύο εναλλακτών θερμότητας, ενός αεριοστροβίλου και ενός συμπιεστή. Η διάταξη αυτή απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 10: Διάταξη κύκλου Ericsson [3]

Το διάγραμμα λειτουργίας ενός κύκλου Ericsson σε διάγραμμα PV εικονίζεται στο παρακάτω σχήμα για τέλειο αέριο:



Σχήμα 11: Κύκλος Ericsson [3]

Ο κύκλος Ericsson περιλαμβάνει τις εξής επιμέρους θερμοδυναμικές εργασίες:

- Καμπύλη 1 - 2: Ισοβαρής αύξηση του όγκου του αερίου κατά την απορρόφηση θερμότητας από το θερμοδοχείο.
- Καμπύλη 2 - 3: Ισοθερμοκρασιακή εκτόνωση του αερίου στον στρόβιλο. Για να είναι ισοθερμοκρασιακή η διεργασία αυτή, είναι απαραίτητη η ταυτόχρονη απορρόφηση θερμότητας από το θερμοδοχείο.
- Καμπύλη 3 - 4: Ισοβαρής συμπίεση του αερίου στον εναλλάκτη θερμότητας. Κατά την διεργασία αυτή, το αέριο αποδίδει θερμότητα στο ψυχοδοχείο.
- Καμπύλη 4 - 1: Ισοθερμοκρασιακή συμπίεση του αερίου στον συμπιεστή. Κατά την διεργασία αυτή επίσης, το αέριο αποδίδει θερμότητα στο ψυχοδοχείο.

## 1.6 Δεύτερο Θερμοδυναμικό Αξίωμα

Το δεύτερο θερμοδυναμικό αξίωμα μελετήθηκε για πρώτη φορά το 1820 από τον Carnot. Αργότερα διατυπώθηκε από τους Kelvin και Planck, με τον ακόλουθο τρόπο:

*Είναι αδύνατο να κατασκευαστεί θερμική μηχανή, στην οποία κατά την διάρκεια μίας πλήρους κυκλικής διεργασίας, το μοναδικό αποτέλεσμα να είναι η παραλαβή θερμότητας από ένα*

*θερμοδοχείο και απόδοση μηχανικού έργου σε ίσο ποσό, χωρίς δηλαδή απόρριψη προς το ψυχοδοχείο ένα μέρος της θερμότητας που προσέλαβε.*

Το πρώτο θερμοδυναμικό αξίωμα αρνείται την δυνατότητα παραγωγής ή καταστροφής της ενέργειας. Από την άλλη πλευρά, το δεύτερο θερμοδυναμικό αξίωμα απαγορεύει την δυνατότητα εκμεταλλεύσεως, μέρους της διαθέσιμης ενέργειας ενός συστήματος.

## 2. Μηχανές Stirling

### 2.1 Ιστορία

Η βιομηχανική επανάσταση προς το τέλος του 18ου αιώνα, ήταν εφικτή χάρη στην εξέλιξη των μεθόδων παραγωγής ενέργειας, με σκοπό αυτή να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή έργου, το οποίο σε παλαιότερες εποχές εκτελείτο χειροκίνητα. Η έρευνα στράφηκε στην εξέλιξη των μεθόδων αυτών, καθώς επίσης και στην αύξηση της ενεργειακής απόδοσής τους. Η τάση αυτή οδήγησε σε τεχνολογικά επιτεύγματα, τα οποία βασίζονται σε αρχές, πάνω στις οποίες στηρίζεται και η σημερινή τεχνολογία. Έως και σήμερα, η παραγωγή ενέργειας σε ένα μεγάλο ποσοστό, στηρίζεται στην θερμική ενέργεια.

Το πρώτο παράδειγμα μηχανής που ερευνήθηκε ήταν η ατμομηχανή, η οποία έφερε επανάσταση στον τομέα των μετακινήσεων. Στα πλαίσια της αναζήτησης όμως περισσότερο πρακτικών και ενεργειακά αποδοτικών συστημάτων, ένας μεγάλος αριθμός από άλλου τύπου τεχνολογίες ερευνήθηκαν, οι οποίες βασίζονταν στην θέρμανση άλλων τύπων ρευστού.

Σε αυτό το πλαίσιο, η αρχή λειτουργίας μηχανών οι οποίες βασίζονται σε θέρμανση αέρα (ή αερίου), είχαν ερευνηθεί από τον 17ο αιώνα. Τέτοιου τύπου μηχανές παρήγαγαν μηχανική ισχύ από εκτόνωση αέρα, λόγω θέρμανσής του. Ο κύκλος παραγωγής ισχύος ήταν δυνατόν να είναι κλειστός ή ανοικτός. Η έρευνες προς την συγκεκριμένη κατεύθυνση ενέπνευσαν τον Robert Stirling προς την κατασκευή θερμικής μηχανής στην οποία αποδόθηκε η πατέντα υπ' αριθμόν 4081 το 1816. Η καινοτομία του R. Stirling συνίστατο στην χρήση ενός αναγεννητήρα, ο οποίος συνέβαλλε στην αύξηση της θερμοδυναμικής απόδοσης της μηχανής.

Η μηχανή Stirling είναι κλειστού τύπου, καθώς το μέσο (αέριο) που θερμαινόμενο παράγει ενέργεια, δεν εξέρχεται από τα όρια της μηχανής (όπως π.χ. στην ατμομηχανή, ή στην μηχανή εσωτερικής καύσης). Επίσης στην μηχανή Stirling δεν λαμβάνει χώρα αλλαγή φάσης (όπως π.χ. στην ατμομηχανή) και μέρος της θερμικής ενέργειας που παρέχεται, ανακτάται στον αναγεννητήρα.

Από το 1816, έτος αρχικής υποβολής της πατέντας, έως το 1850, ο R. Stirling και ο αδερφός του J. Stirling, δημιούργησαν την πρώτη εμπορική έκδοση της μηχανής. Παράλληλα με αυτό, ένας μεγάλος αριθμός από εφευρέτες εργάστηκαν για την εξέλιξη εναλλακτικών σχεδιασμών μηχανών Stirling έως τις αρχές του 20ου αιώνα.

Το 1827, οι αδερφοί Stirling εισήγαγαν μία μετατροπή του αρχικού σχεδιασμού τους αποσκοπώντας στην απλοποίηση της πρώτης τους μηχανής. Από την απλοποίηση αυτή προέκυψε η μηχανή Stirling τύπου Γάμμα (Gamma Design).

Το 1860, ένα νέο σχέδιο προτάθηκε το οποίο περιελάμβανε 4 αλληλένδετα έμβολα διπλής δράσης αποσκοπώντας στην βελτίωση της μηχανικής απόδοσης. Το 1872 κατασκευάστηκε η πρώτη μηχανή Stirling με ηλιακή ενέργεια από τον J. Ericsson. Το 1876, από τον A. K. Rider προτάθηκε η μηχανή Stirling τύπου Α (Alpha Design), η οποία ήταν απλούστερη μηχανολογικά, και με αυξημένη θερμοδυναμική απόδοση.

Η τελευταία μεγάλη βελτίωση ήρθε το 1905, με την μηχανή Ringbom (Ringbom Stirling Engine), η οποία ήταν μία απλούστερη και αποδοτικότερη διάταξη σε σχέση με τις μηχανές Stirling τύπου Α, ή Β. Ο σχεδιασμός αυτός ήταν ο πρόδρομος για μία διάταξη η οποία ήρθε μετά από αρκετά χρόνια. Η διάταξη αυτή είναι η FPSE (Free Piston Stirling Engine).

Καθ' όλη την διάρκεια της συγκεκριμένης περιόδου αρκετές βελτιώσεις προτάθηκαν για έναν μεγάλο αριθμό πρακτικών εφαρμογών, όπως π.χ. παραγωγή ενέργειας, πρόωση πλοίων. Το ενδιαφέρον όμως για την μηχανή Stirling μειώθηκε με την ανακάλυψη της μηχανής εσωτερικής καύσης, η οποία ήταν σε θέση να έχει μεγαλύτερη απόδοση και καλύτερο λόγο ισχύος προς βάρος.

Επόμενη σημαντική εξέλιξη για την μηχανή Stirling μετά το 1905, ήρθε το 1930 από την Phillips, η οποία επιθυμούσε μία φορητή πηγή ενέργειας για ασυρμάτους σταθμούς χωρίς την ανάγκη μπαταρίας. Η μηχανή Stirling ήταν μία από τις πολλές επιλογές που ερευνήθηκαν. Η επιλογή αυτή έγινε, λόγω του γεγονότος ότι απείχε από τον θεωρητικό βαθμό απόδοσής της.

Την περίοδο 1940 έως 1970, η Phillips, ήταν ένας από τους κύριους ερευνητές σχετικά με την μηχανή Stirling. Άλλοι οργανισμοί που εργάστηκαν προς αυτή την κατεύθυνση ανεξάρτητα από την Phillips ήταν η NASA και μία σουηδική εταιρεία, με το όνομα United Stirling AB, η οποία υπάρχει και σήμερα με το όνομα Kockums AB.

Η έρευνα στράφηκε σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, από παραγωγή ενέργειας έως και αυτοκίνηση. Μία από τις σημαντικότερες καινοτομίες που προέκυψε την συγκεκριμένη περίοδο ήταν η διάταξη FPSE, η οποία ανακαλύφθηκε από τον W. Beale (πανεπιστήμιο του Ohio, Η.Π.Α.), το 1964. Άλλες καινοτομίες της συγκεκριμένης περιόδου ήταν η μηχανή Fluydine από

τον C. West, η οποία αντί πιστονιών λειτουργούσε με υγρό, καθώς επίσης και η μηχανή Stirling χαμηλής θερμοκρασίας (low temperature Stirling Engine).

Η εταιρεία Phillips επικεντρώθηκε προς το τέλος της συγκεκριμένης περιόδου στην εξέλιξη μηχανών Stirling για εφαρμογές αυτοκίνησης. Το 1978 τοποθετήθηκε με επιτυχία μηχανή Stirling σε ένα Ford Gran Torino. Παρ' όλο που η τοποθέτηση και η λειτουργία ήταν επιτυχής, βρέθηκε ότι η μηχανή Stirling σε αυτοκίνητα μειονεκτούσε σε σχέση με την μηχανή εσωτερικής καύσης σε πολλά σημεία, όπως π.χ. δυσκολία λειτουργίας σε μεταβλητή ισχύ έχοντας επίσης χαμηλότερο λόγο ισχύος προς βάρος. Με βάση τα αποτελέσματα αυτά, η Phillips διέκοψε την έρευνα προς την κατεύθυνση αυτή. Παρ' όλ' αυτά, ένας μηχανικός της Phillips, ο R. J. Meijer, δημιούργησε την δική του εταιρεία, την Stirling Thermal Motors, η οποία έκλεισε το 2007 και μετονομάστηκε σε Stirling Biopower.

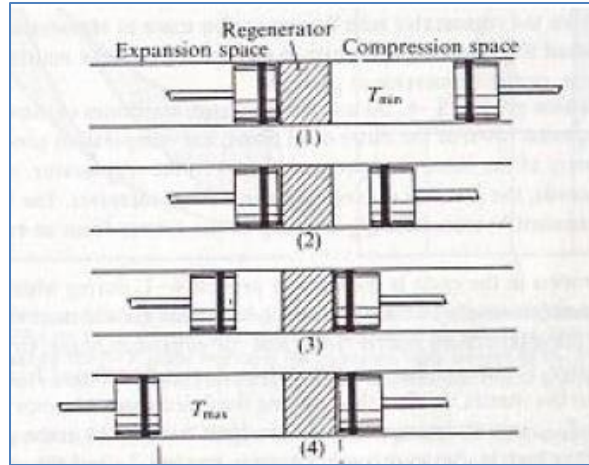
Καθώς η Phillips ήταν ο πρωτοπόρος στην έρευνα προς την συγκεκριμένη κατεύθυνση, η διακοπή της ενασχόλησής της στον συγκεκριμένο τομέα σήμανε μία περίοδο χωρίς σημαντικές εξελίξεις, έως το τέλος της δεκαετίας του 1980.

Συνοπτικά, τα κύρια βήματα εξέλιξης των μηχανών Stirling εμφανίζονται παρακάτω:

- 1807: Sir G. Calay, μηχανή θερμού αέρα
- 1816: R. Stirling, μηχανή κλειστού τύπου με αναγεννητήρα (τύπου B)
- 1827: Αδερφοί Stirling, μηχανή τύπου Γ
- 1872: J. Ericsson, ηλιακή μηχανή Stirling
- 1876: A. K. Rider, μηχανή Stirling τύπου A
- 1905: Μηχανή Ringbom Stirling
- 1938: Ενασχόληση της εταιρείας Phillips με μηχανές Stirling
- 1964: W. Beale, μηχανή FPSE (Free Piston Stirling Engine)
- 1978: Διακοπή έρευνας από την εταιρεία Phillips στον τομέα των μηχανών Stirling

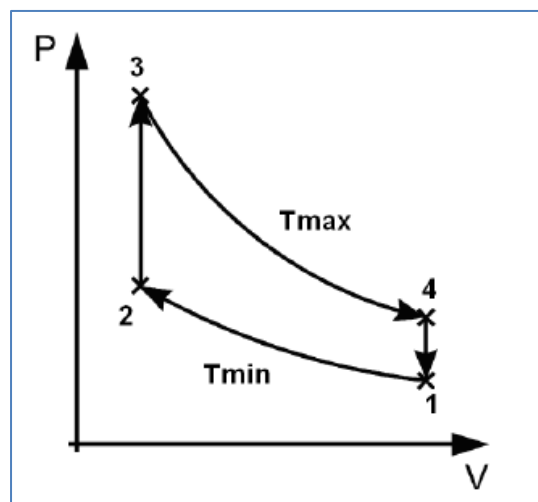
## 2.2 Αρχή λειτουργίας

Η αρχή λειτουργίας μίας μηχανής Stirling, καθώς επίσης και ο αντίστοιχος κύκλος λειτουργίας απεικονίζονται στα σχήματα 2.1, 2.2 και 2.3.

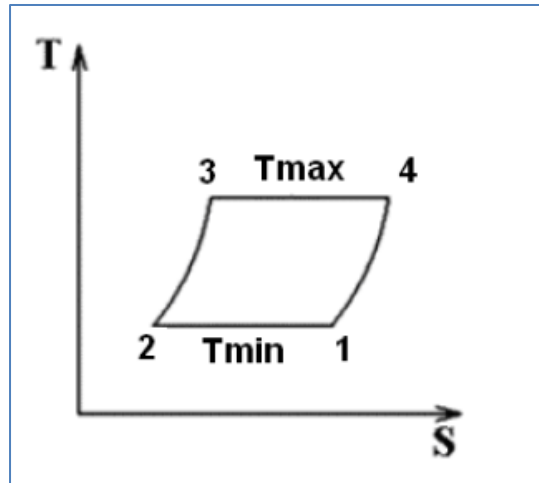


Σχήμα 12: Αρχή λειτουργίας κύκλου Stirling [3]

Η μηχανή αποτελείται από έναν κύλινδρο που φέρει ένα έμβολο σε κάθε πλευρά του. Στο μέσο του κυλίνδρου υπάρχει ο αναγεννητήρας, ο οποίος είναι δυνατόν να είναι πορώδης μάζα σε μορφή αμετακίνητου εμβόλου. Ιδανικά, ο αναγεννητήρας θεωρείται κακός θερμικός αγωγός. Κατά την ύπαρξη βαθμίδας θερμοκρασίας κατά μήκος του, το ποσό θερμότητας από αγωγή που μεταφέρεται από την θερμή προς την ψυχρή πλευρά του κυλίνδρου είναι αμελητέο. Επίσης, ο κύλινδρος είναι εξωτερικά τελείως μονωμένος, εκτός από τις θέσεις επαφής με το θερμοδοχείο και το ψυχοδοχείο.



Σχήμα 13: Κύκλος Stirling σε διάγραμμα P-V [3]



Σχήμα 14: Κύκλος Stirling σε διάγραμμα T-S [3]

Ως λειτουργούν σώμα στην μηχανή Stirling θεωρείται το τέλειο αέριο, για το οποίο ισχύει το διάγραμμα 2.2 και 2.3. Ο κύκλος Stirling ολοκληρώνεται στα εξής 4 στάδια:

- Διεργασία 1 - 2: Ισοθερμοκρασιακή συμπίεση του αερίου με ταυτόχρονη απόρριψη θερμότητας στο ψυχοδοχείο. Κατά την διεργασία αυτή προσδίδεται έργο στην μηχανή
- Διεργασία 2 - 3: Και τα δύο έμβολα κινούνται προς τα αριστερά με την ίδια ταχύτητα, ώστε ο όγκος να παραμένει σταθερός. Το αέριο θερμαίνεται ώστε με την ολοκλήρωση της μετάβασης στον αριστερό θάλαμο του κυλίνδρου, να έχει φτάσει την θερμοκρασία  $T_{max}$ . Κατά το στάδιο αυτό δεν παράγεται θερμότητα.
- Διεργασία 3 - 4: Ισοθερμοκρασιακή εκτόνωση του αερίου, κατά την διάρκεια της οποίας το αριστερό έμβολο κινείται προς τα αριστερά. Κατά την διάρκεια του σταδίου αυτού παράγεται έργο.
- Διεργασία 4 - 1: Και τα δύο έμβολα κινούνται προς τα δεξιά με την ίδια ταχύτητα, ώστε ο όγκος να παραμένει σταθερός. Κατά την διάρκεια της διεργασίας αυτής δεν παράγεται έργο. Το αέριο προσδίδει θερμότητα κατά τέτοιο τρόπο ώστε στο τέλος του σταδίου αυτού η θερμοκρασία του να είναι ίση με  $T_{min}$

Με τα παραπάνω 4 στάδια ολοκληρώνεται ο κύκλος Stirling.

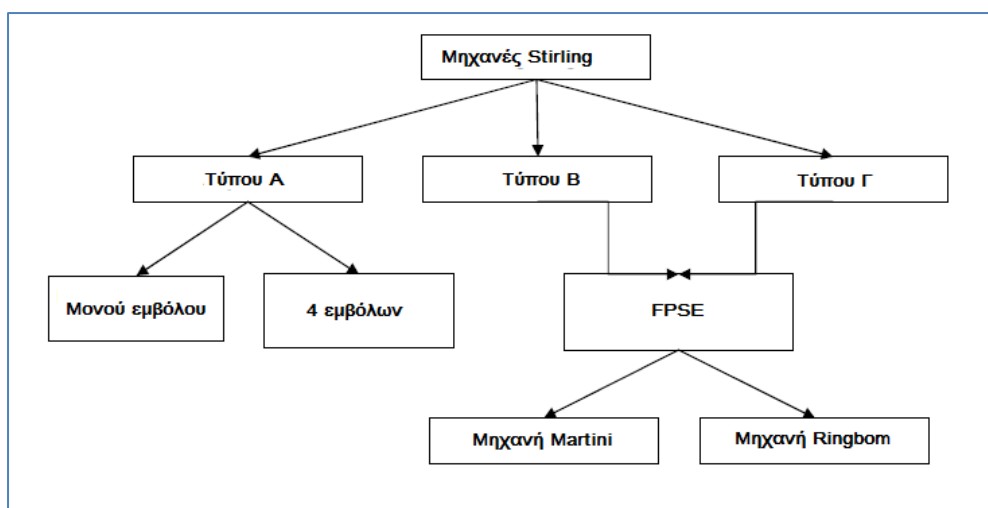


## 2.3 Διατάξεις Μηχανών Stirling

Οι μηχανές Stirling που έχουν κατασκευαστεί, είναι δυνατόν να κατηγοριοποιηθούν στους εξής τύπους:

- Μηχανές Stirling τύπου Α
- Μηχανές Stirling τύπου Β
- Μηχανές Stirling τύπου Γ
- Μηχανές Stirling FPSE (Free Piston Stirling Engines)

Η κατηγοριοποίηση αυτή απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:

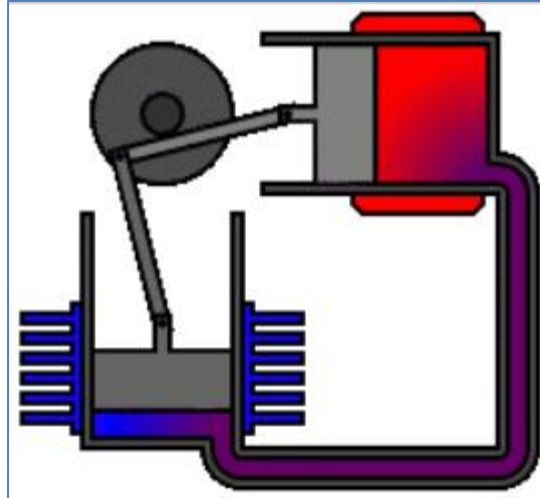


Σχήμα 15: Κατηγοριοποίηση μηχανών Stirling [4]

### 2.3.1 Μηχανή Stirling τύπου Α

Η μηχανή Stirling τύπου Α έχει το χαρακτηριστικό ότι έχει δύο έμβολα τα οποία είναι συνδεδεμένα σε σειρά με θερμοδοχείο, αναγεννητήρα και ψυχοδοχείο. Είναι η απλούστερη δυνατή διάταξη μηχανής Stirling, έχοντας όμως το μειονέκτημα ότι απαιτούνται μηχανικές διατάξεις (seals) για αποφυγή διαρροής του λειτουργούντος μέσου.

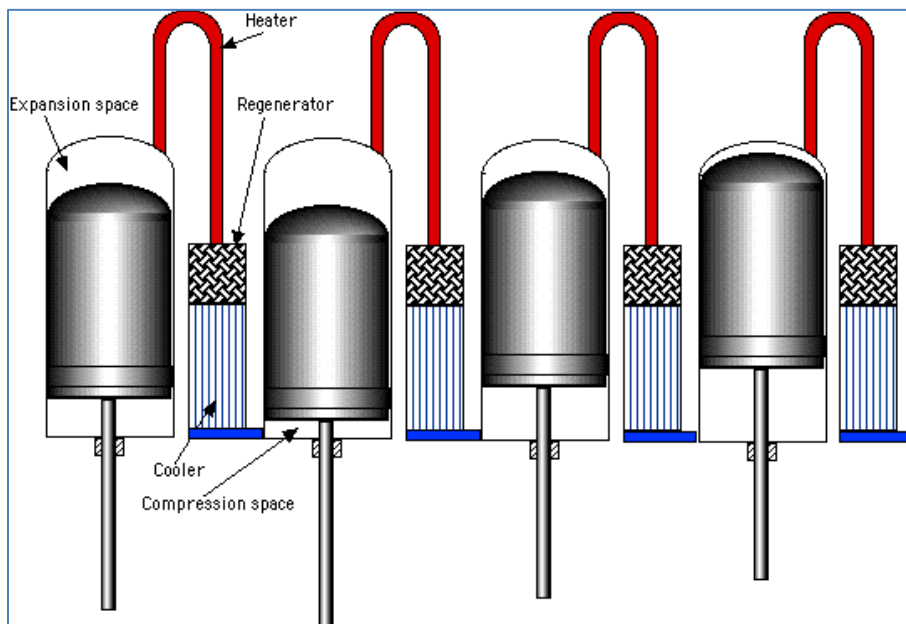
Η βασική διάταξη μηχανής Stirling τύπου Α απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 16: Διάταξη μηχανής Stirling τύπου A [4]

Στο παραπάνω σχήμα, το ένα έμβολο είναι το έμβολο συμπίεσης (μπλε) το οποίο ωθεί το αέριο στην θερμή πλευρά της διάταξης (κόκκινο) όπου βρίσκεται το έμβολο εκτόνωσης το οποίο παράγει έργο.

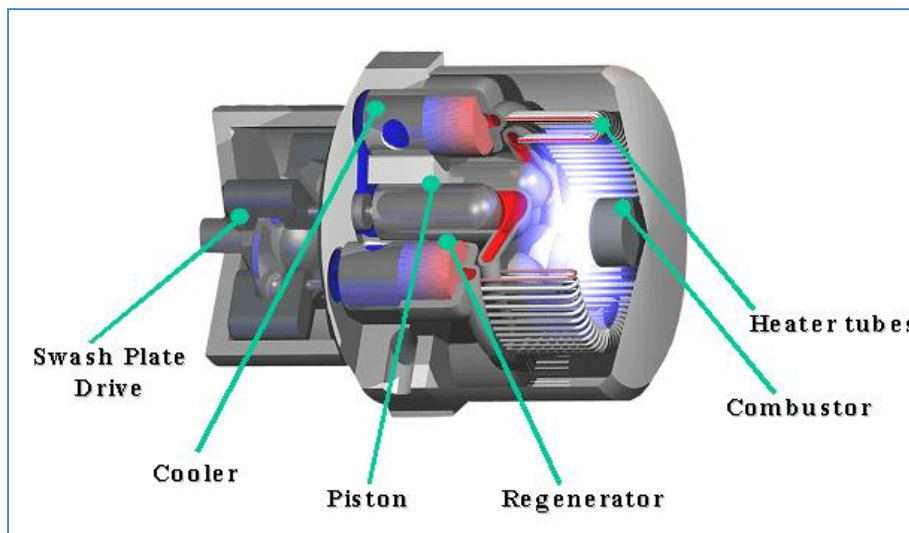
Μία μηχανή Stirling τύπου A είναι δυνατόν να κατασκευαστεί σε διάταξη τεσσάρων κυλίνδρων το οποίο επιτρέπει μεγάλο λόγο ισχύος προς βάρος. Ένα διάγραμμα τέτοιας διάταξης απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 17: Διάταξη τύπου A τεσσάρων κυλίνδρων [4]

Στην παραπάνω διάταξη, οι κύλινδροι είναι διασυνδεδεμένοι, ώστε ο χώρος εκτόνωσης ενός κυλίνδρου να συνδέεται με τον χώρο συμπίεσης του επόμενου μέσω του θερμοδοχείου αναγεννητήρα και ψυχοδοχείου. Τα έμβολα κινούνται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να έχουν διαφορά φάσης 90 μοιρών.

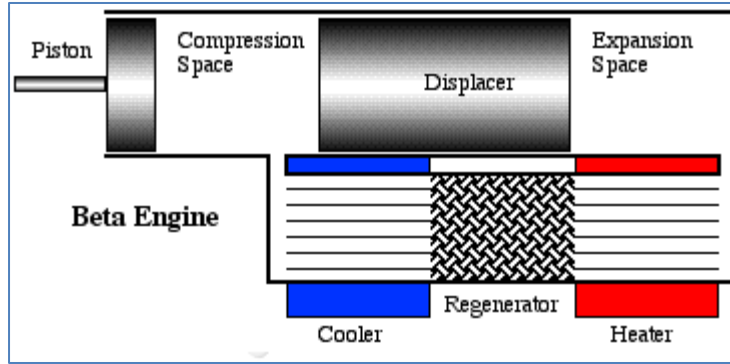
Ένα παράδειγμα μηχανής Stirling τύπου A τεσσάρων κυλίνδρων έχει κατασκευαστεί από το πανεπιστήμιο Michigan, Ann Arbor και απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 18: Παράδειγμα μηχανής Stirling τύπου A τεσσάρων κυλίνδρων [4]

### 2.3.2 Μηχανή Stirling τύπου B

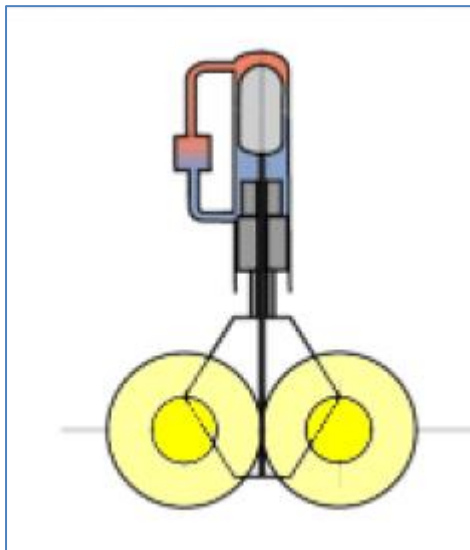
Στην διάταξη τύπου B, δύο έμβολα βρίσκονται στον ίδιο κύλινδρο. Το ένα έμβολο (power piston) χρησιμοποιείται για την παραγωγή ισχύος και το δεύτερο (displacer piston) χρησιμοποιείται για τον εκτοπισμό του λειτουργούντος μέσου μεταξύ των χώρων εκτόνωσης και συμπίεσης. Η αρχή λειτουργίας της μηχανής Stirling τύπου B απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



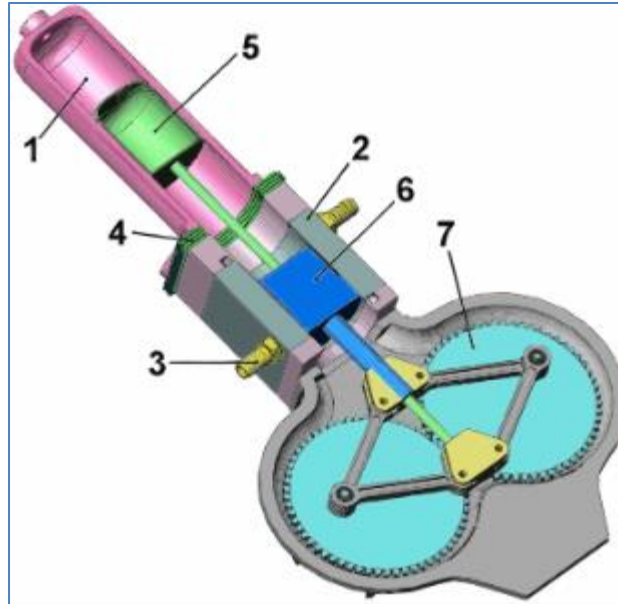
Σχήμα 19: Μηχανή Stirling τύπου B [4]

Η διάταξη τύπου Β αντιστοιχεί στην αρχική σύλληψη της μηχανής Stirling και είναι από τις δημοφιλέστερες διατάξεις. Η αρχική πατέντα του R. Stirling το 1816 αντιστοιχούσε σε διάταξη τύπου Β.

Μία από τις πιο κλασικές μηχανές Stirling που έχουν δημιουργηθεί είναι η μηχανή που δημιουργήθηκε από τον R. Meijer στην εταιρεία Phillips (rhombic drive) στις αρχές της δεκαετίας του 1960. Η διάταξη αυτή απεικονίζεται στα παρακάτω σχήματα:



Σχήμα 20: Αρχή λειτουργίας rhombic drive [4]

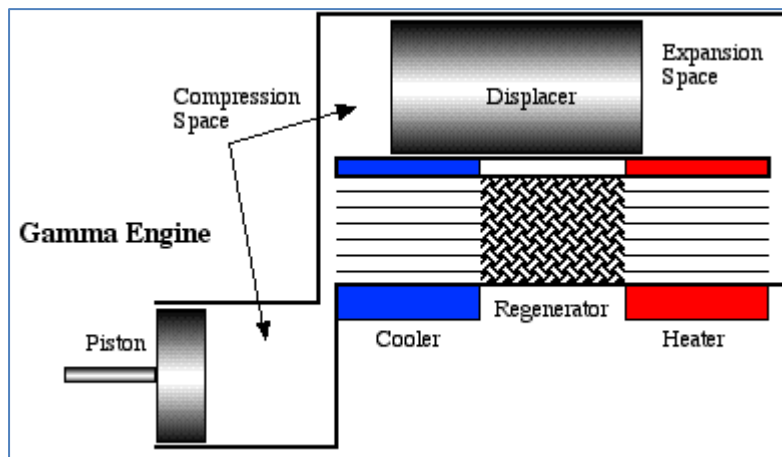


Σχήμα 21: Αρχή λειτουργίας rhombic drive [8]

Στην κλασική αυτή μηχανή, χρησιμοποιούνται ράβδοι σε ρομβοειδή διάταξη, οι οποίες μετατρέπουν γραμμική κίνηση των εμβόλων σε περιστροφική κίνηση.

### 2.3.3 Μηχανή Stirling τύπου Γ

Οι μηχανές Stirling τύπου Γ είναι παρόμοιες με τις μηχανές τύπου Β, με την διαφορά ότι τα έμβολα κινούνται σε δύο διαφορετικούς κυλίνδρους. Η αρχή λειτουργίας απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



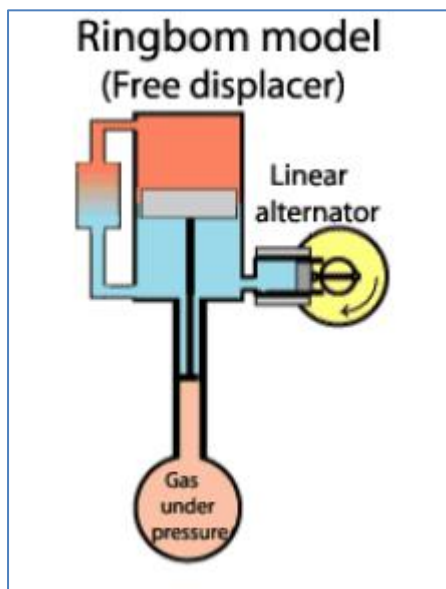
Σχήμα 22: Αρχή λειτουργίας μηχανής τύπου Γ [4]

Αυτό επιτρέπει τον πλήρη διαχωρισμό του χώρου των εναλλακτών (θερμοδοχείου, αναγεννητήρα και ψυχοδοχείου) από το χώρο συμπίεσης και εκτόνωσης. Η συγκεκριμένη διάταξη οδηγεί σε διατάξεις μεγαλύτερου όγκου, με αποτέλεσμα να μειώνεται ο λόγος ισχύος προς βάρος.

#### 2.3.4 Μηχανή Stirling τύπου FPSE

Μία μηχανή Stirling τύπου FPSE (Free Piston Stirling Engine) είναι παρόμοια με μηχανή τύπου Β και τύπου Γ. Η κύρια διαφορά είναι ότι τουλάχιστον ένα από τα έμβολα συνδέεται με μηχανικό σύστημα (όπως π.χ. στροφαλοφόρος). Υπάρχουν διάφορες εναλλακτικές για την υλοποίηση του συγκεκριμένου σχεδιασμού.

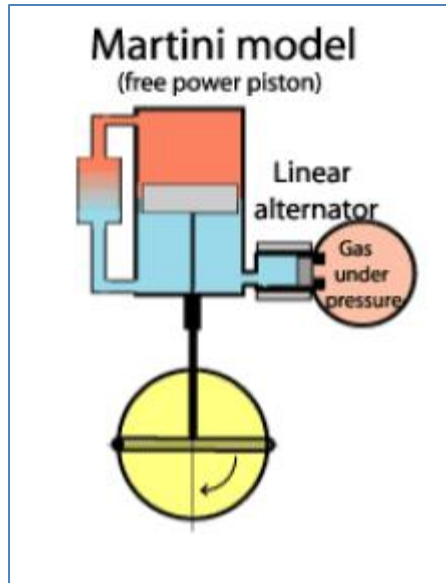
Μία πιθανή εκδοχή είναι η μηχανή Stirling Ringbom. Η αρχή λειτουργίας της απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 23: Μηχανή Rinbom [4]

Το ένα από τα έμβολα δεν είναι συνδεδεμένο σε κάποιο μηχανικό σύστημα, αλλά η κίνησή του οφείλεται σε συμπίεση και αποσυμπίεση αερίου. Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, το δεύτερο έμβολο είναι συνδεδεμένο με μία γεννήτρια (παλινδρομική ή περιστροφική).

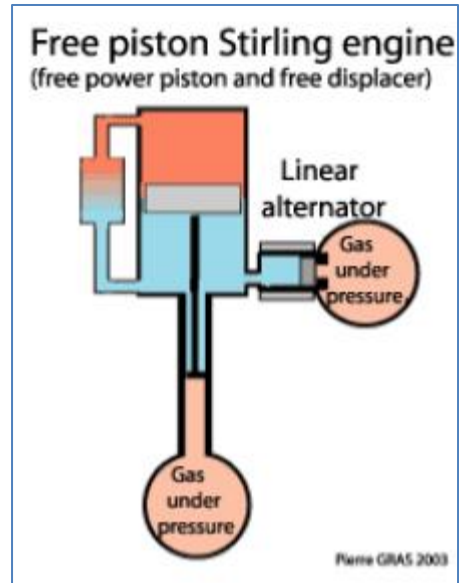
Μία δεύτερη εκδοχή είναι η μηχανή Martini, η οποία απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 24: Μηχανή Martini [4]

Και σε αυτή την περίπτωση, μόνο ένα από τα έμβολα είναι συνδεδεμένο με μηχανικούς συνδέσμους. Η κίνηση του άλλου καθορίζεται από την συμπίεση/αποσυμπίεση ενός αερίου. Η διαφορά με παραπάνω, είναι ότι στην συγκεκριμένη περίπτωση, το έμβολο το οποίο παράγει ενέργεια, είναι συνδεδεμένο με τον θάλαμο όπου βρίσκεται το αέριο. Για την παραγωγή ενέργειας, συνδέεται με γραμμική ηλεκτρογεννήτρια.

Είναι επίσης δυνατόν να κατασκευαστεί μηχανή Stirling τύπου FPSE, όπου η παλινδρόμηση των εμβόλων δεν έχει κανέναν μηχανικό σύνδεσμο, παρά μόνο μία γραμμική ηλεκτρογεννήτρια. Η αρχή λειτουργίας μίας τέτοιας μηχανής απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 25: Μηχανή Stirling FPSE, χωρίς κανέναν μηχανικό σύνδεσμο [4]

Στην συγκεκριμένη αρχή λειτουργίας, ο σωστός συγχρονισμός της μηχανής εξαρτάται από την σωστή διαστασιολόγηση των δομικών της στοιχείων.

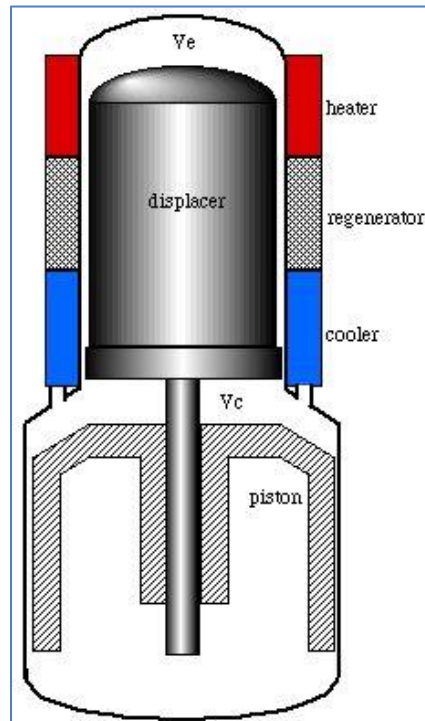
Ένα παράδειγμα μηχανής Stirling τύπου FPSE που έχει κατασκευαστεί είναι το μοντέλο EG-1000 της εταιρείας Sunpower Inc., το οποίο απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 26: Μηχανή Stirling EG-1000 της εταιρείας Sunpower Inc. [4]



Η αρχή λειτουργίας της συγκεκριμένης μηχανής απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 27: Αρχή λειτουργίας της μηχανής EG-1000 [4]

Η συγκεκριμένη μηχανή είναι σχεδιασμένη να παράγει ηλεκτρισμό 1 kW και προορίζεται για οικιακή χρήση. Το λειτουργούν μέσο είναι ήλιο, το οποίο έχει χαμηλό μοριακό βάρος και υψηλή θερμική αγωγιμότητα σε σχέση με τον αέρα.

### 2.3.5 Σύγκριση μεταξύ διαφορετικών τύπων μηχανών Stirling

Καθένας από τους τύπους που παρουσιάστηκαν παραπάνω, παρουσιάζουν μία σειρά πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων. Αυτά παρουσιάζονται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα:

Τύπος	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
<b>Μηχανή τύπου Α</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Απλούστερη μηχανική διάταξη</li> <li>• Για χαμηλές τιμές ισχύος, μεγάλος λόγος ισχύος προς βάρος</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Δυσκολότερη στεγανοποίηση των εμβόλων</li> <li>• Για παραγωγή μεγαλύτερης ισχύος, το απαραίτητο βάρος αυξάνεται σημαντικά</li> </ul>
<b>Μηχανή τύπου Β</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Μικρότερος όγκος</li> <li>• Ευκολότερη στεγανοποίηση</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Αυξημένο κόστος, λόγω αυξημένης πολυπλοκότητας</li> </ul>
<b>Μηχανή τύπου Γ</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Απλούστερη κατασκευή από την μηχανή τύπου Β</li> <li>• Χαμηλότερη απαιτούμενη θερμοκρασιακή διαφορά</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Μεγαλύτερος όγκος από την μηχανή τύπου Β, το οποίο μειώνει τον λόγο ισχύος προς βάρος</li> </ul>
<b>Μηχανή FPSE</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Μικρότερες μηχανικές απώλειες, λόγω απουσίας μηχανικών συνδέσμων</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Αυξημένη περιπλοκότητα στην κατασκευή. Η σωστή λειτουργία απαιτεί ακριβή διαστασιολόγηση</li> </ul>

Πίνακας 1: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα διαφόρων τύπων μηχανής Stirling [4]

## 2.4 Οι μηχανές Stirling στην σημερινή εποχή

### 2.4.1 Τεχνολογία και Εταιρείες που δραστηριοποιούνται στον χώρο

Στην σημερινή εποχή υπάρχει έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον για τις μηχανές Stirling και υπάρχουν εταιρείες, οι οποίες δραστηριοποιούνται στον συγκεκριμένο χώρο και έχουν κατασκευάσει μοντέλα τα οποία βρίσκονται είτε στο στάδιο πρωτοτύπου, είτε σε φάση πλήρους παραγωγής. Στους παρακάτω πίνακες αναφέρονται ενδεικτικά κάποιες από αυτές, όπως ήταν το 2002:

Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται εταιρείες οι οποίες έχουν μηχανή Stirling σε στάδιο πρωτοτύπου:

Όνομα Εταιρείας	Παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς πρωτοτύπου
ADI Thermal Power Corp.	25 kW με 60 ώρες λειτουργίας
BSR Solar Technologies	<b>Πρωτότυπο με ηλεκτρική ισχύ 1 kW</b>
External Power	Πρωτότυπο με ηλεκτρική ισχύ 2.5 kW
Quiet Revolution Motor Company	<b>Πρωτότυπο με ηλεκτρική ισχύ 75 kW</b>
Stirling Advantage	Σχεδιάζονται πρωτότυπα με ισχύ 200 kW και 25 kW
Sustainable Energy Systems	<b>Πρωτότυπο με ηλεκτρική ισχύ 10 kW</b>
Tamin	Πρωτότυπο με ηλεκτρική ισχύ 10 kW
Uwe Moch	<b>Πρωτότυπο το οποίο έχει συμπληρώσει 1400 ώρες λειτουργίας και παράγει 950 W</b>

Πίνακας 2: Εταιρείες με μηχανές Stirling σε στάδιο πρωτοτύπου [2]

Στον πίνακα 3 παρουσιάζονται εταιρείες οι οποίες έχουν περάσει το στάδιο πρωτοτύπου και βρίσκονται σε στάδιο παραγωγής:

Εταιρεία	Παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς πρωτοτύπου
Sigma Elektroteknisk	6 μηχανές Stirling CHP (Combined Heat and Power). Χρόνος λειτουργίας μηχανής άνω έτους
Stirling Energy Systems	<b>2 ηλιακές μηχανές Stirling σε λειτουργία.</b>
Stirling Technology Company	3 συστήματα CHP σε λειτουργία. 100 συστήματα σε επίπεδο επίδειξης (demo) Επίσης άνω των 20 συστημάτων σε λειτουργία, 67000 ώρες λειτουργίας χωρίς συντήρηση σε μηχανή 10 W
STM Power	Σε επίπεδο testing, 10 συστήματα σε λειτουργία
BG Group	<b>28 συστήματα σε λειτουργία</b>
SOLO Kleinmotoren	150 συστήματα έχουν κατασκευαστεί με άνω των 150000 ωρών λειτουργίας. 20000 ώρες το κάθε σύστημα και 6500 ώρες χωρίς συντήρηση. 16 συστήματα CHP 15 ηλιακές μηχανές stirling σε λειτουργία
Sunpower	<b>Βλ. BG Group και External Power</b>
Uwe Moch	70 μηχανές πωλήθηκαν και άνω των 40 βρίσκονται σε λειτουργία
Whisper Tech	<b>450 συστήματα πωλήθηκαν το 2001 με άνω των 2000 ωρών λειτουργίας, 500 συστήματα σε επίπεδο παραγγελίας και 1500 πωλήσεις που αναμένονταν το 2002</b>
Kockums	Η συγκεκριμένη εταιρεία παράγει το μοντέλο 4-275 που είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί σε υποβρύχια όπου υπάρχουν απαιτήσεις για

αθόρυβη λειτουργία.  
 Άνω των 200 συστημάτων έχουν πωληθεί με  
 18000 ώρες λειτουργίας χωρίς συντήρηση.  
 5 συστήματα έχουν εγκατασταθεί σε υποβρύχια  
 και 12 σχεδιάζονται να εγκατασταθούν μέσα στο  
 2002

Πίνακας 3: Εταιρείες με πρωτότυπα σε στάδιο παραγωγής [2]

### 2.4.2 Καύσιμα

Οι μηχανές Stirling παρουσιάζουν μεγάλη ευελιξία, καθώς η λειτουργία τους απαιτεί μόνον θερμότητα και η λειτουργία της είναι ανεξάρτητη από τον τύπο καυσίμου που θα χρησιμοποιηθεί. Ένα ποσοστό των κατασκευαστών μηχανών Stirling επικεντρώνονται σε παραγωγή ηλεκτρική ισχύος σε περιοχές όπου υπάρχει προσβασιμότητα σε ορυκτά καύσιμα, π.χ. φυσικό αέριο, ή πετρέλαιο. Ένα άλλο μέρος, προσανατολίζεται σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως π.χ. ηλιακή.

Ένας αριθμός εταιρειών, στις Η.Π.Α., με την υποστήριξη της κυβέρνησης των Η.Π.Α. προωθούν την εξέλιξη ηλιακών μηχανών Stirling, όπου ηλιακοί συλλέκτες χρησιμοποιούνται για την παροχή της απαιτούμενης θερμότητας.

Άλλες εναλλακτικές πηγές καυσίμων είναι η βιομάζα (π.χ. ξύλο το οποίο δεν έχει άλλη χρήση, αέριο από ζύμωση). Καθώς στις μηχανές Stirling η καύση γίνεται εξωτερικά δεν απαιτείται ειδική διάταξη για καθαρισμό των καυσίμων (π.χ. απομάκρυνση θείου ή νερού).

### 2.4.3 Παραγόμενη Ισχύς

Όπως φαίνεται στον πίνακα 4, η πλειοψηφία των μηχανών Stirling που έχουν κατασκευαστεί είναι τις τάξης των 25 kW ηλεκτρικής ισχύος. Υπάρχουν εξαιρέσεις σε αυτή την τάση, όπως π.χ. ένα μοντέλο ισχύος 75 kW (Quiet Revolution Motor Company) και ένα μοντέλο 200 kW (Stirling Advantage). Αυτό οφείλεται στην τάση των εταιρειών αυτών να στηρίζουν την εξέλιξή τους στο πρωτότυπο της Phillips το οποίο ήταν 25 kW. Ένας άλλος παράγοντας που συνετέλεσε προς την κατεύθυνση αυτή είναι ο αρχικός προσανατολισμός της εξέλιξης των μηχανών Stirling σε μηχανές αυτοκίνησης.

Όνομα Εταιρείας	Ωφέλιμη Ισχύς
ADI Thermal Power Corp.	25 kW
BG Group	1.1 kW

<b>BSR Solar Technologies</b>	5-10 kW
<b>External Power</b>	15 kW
<b>Kockums</b>	25 kW
<b>Quiet Revolution Motor Company</b>	75 kW
<b>Sigma Elektroteknisk</b>	3 kW
<b>SOLO Kleinmotoren</b>	2-10 kW
<b>Stirling Advantage</b>	200 kW
<b>Stirling Energy Systems</b>	25 kW
<b>Stirling Technology Company</b>	350 W 550 W 1.25 kW 3 kW
<b>STM Power</b>	25 kW
<b>Sunpower</b>	1 kW
<b>Sustainable Energy Systems</b>	10 kW
<b>Tamin</b>	10 kW
<b>Uwe Moch</b>	900 - 950 W
<b>Whisper Tech</b>	950 W (AC) 1 - 1.1 kW (DC)

Πίνακας 4: Παραγόμενη ωφέλιμη ισχύς ανά εταιρεία [2]

Η ευχέρεια στην κατασκευή μηχανών Stirling μικρής ισχύος έχει οδηγήσει σε έναν αριθμό προϊόντων με προσανατολισμό την οικιακή χρήση και οι περισσότερες εταιρείες ξεκίνησαν κατασκευάζοντας μηχανές μικρής ισχύος. Επόμενο βήμα για τις εταιρείες αυτές είναι η αύξηση της ισχύος, ώστε να καλυφθούν και άλλοι τύποι εφαρμογών. Αυτό είναι δυνατόν να επιτευχθεί αυξάνοντας τον αριθμό των κυλίνδρων, αυξάνοντας τον όγκο των κυλίνδρων, καθώς επίσης και την αντιμετώπιση μίας σειράς προβλημάτων τα οποία συνδέονται με την διαδικασία μίας κατασκευής σε μεγαλύτερο μέγεθος .

Σε ορισμένες περιπτώσεις, η διατήρηση ισχύος σε μικρά μεγέθη είναι εμπορική απόφαση. Παρ' όλο που κάποιες εταιρείες (π.χ. Stirling Advantage, Quiet Revolution Motor Company) έχουν πρωτότυπα τα οποία παράγουν μεγαλύτερη ισχύ, είναι εταιρική στρατηγική να στοχεύσουν αγορές όπου οι εφαρμογές είναι μη εμπορικές (π.χ. οικιακή χρήση) και οι τιμές απαιτούμενης ισχύος είναι χαμηλές.

#### 2.4.4 Θερμοδυναμική απόδοση

Όπως θα αναλυθεί σε παρακάτω κεφάλαιο, η θεωρητική απόδοση μίας μηχανής Stirling είναι η απόδοση μίας θερμικής μηχανής Carnot. Κατά συνέπεια, η θερμοδυναμική απόδοση εξαρτάται άμεσα από την διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ θερμοδοχείου και ψυχροδοχείου.

Ένα μέρος των κατασκευαστών επιλέγει σχεδιασμό συστημάτων με μεγάλη θερμοκρασία στο θερμοδοχείο. Η προσέγγιση αυτή αυξάνει τον θερμοδυναμικό βαθμό απόδοσης, αλλά αυξάνονται οι απαιτήσεις σε επίπεδο υλικών κατασκευής. Ένα άλλο μέρος επιλέγει σχεδιασμό συστημάτων με μικρή θερμοκρασία στο θερμοδοχείο. Αυτό μειώνει την θερμοδυναμική απόδοση, και η αντιστάθμισή του απαιτεί διαφορετικές λειτουργικές συνθήκες, δηλ. μικρότερη ταχύτητα με σκοπό την ελάττωση των απωλειών λόγω τριβών.

Οι κατασκευαστές που παρουσιάστηκαν παραπάνω, στοχεύουν σε αποδόσεις της τάξης του 50%. Η μέγιστη θερμοδυναμική απόδοση που έχει παρατηρηθεί σε πραγματικό σύστημα είναι 29.6% (STM 25 kW).

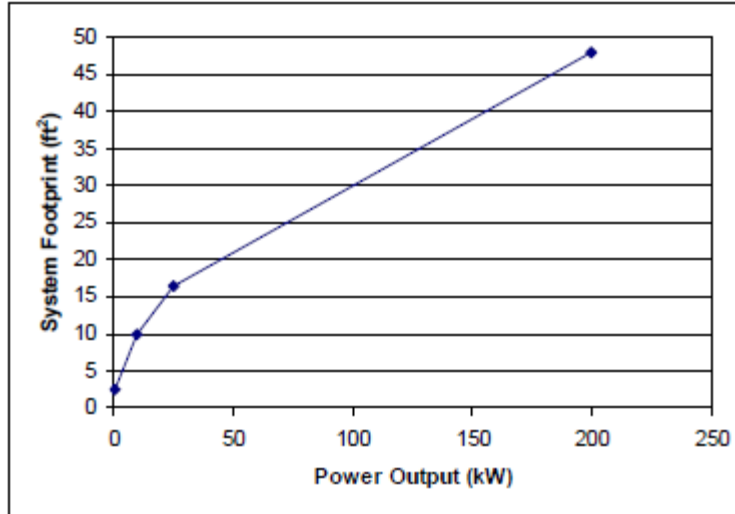
#### 2.4.5 Εκπομπές Αερίων

Οι μηχανές Stirling είναι φιλικότερες προς το περιβάλλον από τις μηχανές εσωτερικής καύσης. Οι λόγοι γι αυτό είναι απλοί:

- Για την λειτουργία τους απαιτείται θερμότητα, ανεξαρτήτως τρόπου παραγωγής της. Κατά συνέπεια είναι εφικτή η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως π.χ. ηλιακή, ή θερμότητα που απορρίπτεται στο περιβάλλον από κάποια βιομηχανική διεργασία.
- Σε περιπτώσεις όπου απαιτείται καύση, αυτή λαμβάνει χώρα στο εξωτερικό της μηχανής και είναι συνεχής. Κατά συνέπεια είναι ευκολότερα ελεγχόμενη, οπότε και οι εκπομπές είναι ευκολότερο να ελεγχθούν.

#### 2.4.6 Εγκατάσταση Μηχανής Stirling

Η απαιτούμενη επιφάνεια για την εγκατάσταση μίας μηχανής καθώς επίσης και ο όγκος της, είναι φυσικό να αυξάνεται με την παραγόμενη ισχύ. Η εξάρτηση αυτή είναι δυνατόν να φανεί στον παρακάτω πίνακα.



Σχήμα 28: Απαιτούμενη επιφάνεια για εγκατάσταση [2]

Μικρά συστήματα για οικιακές εφαρμογές απαιτούν τυπικά για την εγκατάστασή τους 0.2 έως 1 m<sup>2</sup>, έχοντας βάρος της τάξης 90 - 500 kg. Μεγαλύτερα συστήματα με ωφέλιμη ισχύ π.χ. 25 kW απαιτούν για την εγκατάστασή τους 1.5 - 1.9 m<sup>2</sup>. Τάξη μεγέθους του βάρους τέτοιων συστημάτων είναι 4 tn.

#### 2.4.7 Κύκλος λειτουργίας και συντήρηση

Βασικός στόχος των κατασκευαστών μηχανών Stirling είναι η αύξηση του κύκλου λειτουργίας των προϊόντων τους. Η σημασία της επιδίωξης αυτής γίνεται αισθητή από παραδείγματα εφαρμογών στις οποίες έχουν χρησιμοποιηθεί μηχανές Stirling. Μία από αυτές είναι προϊόν της εταιρείας Kockums όπου ο κύκλος λειτουργίας της κάποιων προϊόντων της είναι άνω των 18000 ωρών χωρίς συντήρηση με χρήση σε υποβρύχια. Ένα άλλο παράδειγμα είναι η Stirling Technology Company, η οποία έχει ασχοληθεί με μηχανές οι οποίες είναι δυνατόν να παράσχουν ισχύ για τεχνητή καρδιά. Το συγκεκριμένο πρωτότυπο έχει λειτουργήσει για άνω των 67000 ωρών.

Στόχος κάποιων κατασκευαστών είναι η επίτευξη 30000 - 100000 ωρών συνεχούς λειτουργίας. Η συντήρηση θα αφορά αντικατάσταση συστήματος στεγανοποίησης, φίλτρων και λιπαντικού. Σε περιπτώσεις όπου η θερμότητα έχει προκύψει από "μη καθαρές" πηγές (π.χ. βιομάζα) οι απαιτήσεις συντήρησης αυξάνονται καθώς η επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας στο θερμοδοχείο θα είναι απαραίτητο να καθαρίζεται συχνά,

#### 2.4.8 Τεχνικές δυσκολίες μηχανών Stirling

Οι κύριες τεχνικές δυσκολίες που παρουσιάζονται στις μηχανές Stirling, και επηρεάζουν τον κύκλο λειτουργίας είναι οι εξής:

- Στεγανοποίηση του λειτουργούντος μέσου
- Μηχανικές τάσεις στο υλικό και φθορά λόγω υψηλών θερμοκρασιών και πιέσεων
- Απώλεια της αποδοτικότητας ψυχροδοχείου ή θερμοδοχείου λόγω απόθεσης σωματιδίων (fouling)

Εκτός των παραπάνω, υπάρχουν ακόμα αναπάντητα ερωτήματα όσον αφορά τον σχεδιασμό μηχανών Stirling, όπως π.χ. αν είναι πλεονεκτικότερη η λειτουργία σε υψηλή ή χαμηλή θερμοκρασία, η λειτουργία σε υψηλή ή χαμηλή ταχύτητα. Επίσης δεν έχει απαντηθεί οριστικά το ερώτημα αν είναι καλύτερη η λειτουργία με αέρια χαμηλού ή μέσου μοριακού βάρους. Κάθε κατασκευαστής επιλέγει την δική του κατεύθυνση. Σε αυτό το επίπεδο, η τεχνολογία μηχανών εσωτερικής καύσης θεωρείται περισσότερο ώριμη.

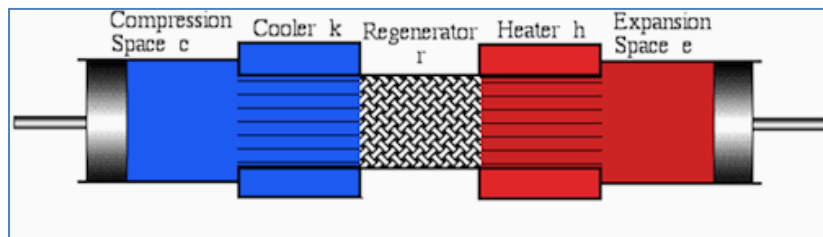


### 3 Ανάλυση Μηχανών Stirling

Η ανακάλυψη της μηχανής Stirling το 1816 ήταν μία εξαιρετικά σημαντική ανακάλυψη, μπροστά από την εποχή της. Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μία σύντομη παρουσίαση των διαφόρων υπολογιστικών μεθόδων που έχουν παρουσιαστεί για να αναλυθεί μία μηχανή Stirling.

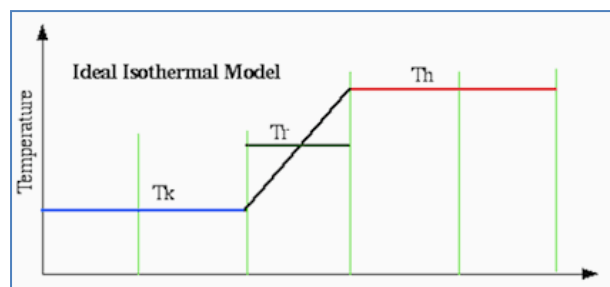
#### 3.1 Ισοθερμοκρασιακή Προσέγγιση

Για την ανάλυση της ιδανικής ισοθερμοκρασιακής προσέγγισης, έστω η ιδανική μηχανή, η οποία παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 29: Μηχανή Stirling για απλοποιημένη ισοθερμοκρασιακή ανάλυση [4]

Η βασική παραδοχή της ιδανικής ισοθερμοκρασιακής προσέγγισης, είναι ότι το αέριο στον χώρο εκτόνωσης είναι στην θερμοκρασία του θερμοδοχείου, ενώ η θερμοκρασία του αερίου στον χώρο συμπίεσης είναι ίση με την θερμοκρασία του ψυχοδοχείου. Με βάση την παραπάνω υπόθεση, το θερμοδοχείο και το ψυχοδοχείο συμπεριφέρονται ιδανικά, και η κατανομή θερμοκρασιών είναι όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 30: Θερμοκρασιακή κατανομή κατά την ιδανική ισοθερμοκρασιακή προσέγγιση [4]

Τα δομικά στοιχεία της μηχανής, όπως φαίνεται στα παραπάνω σχήματα είναι τα εξής:

- Ο χώρος συμπίεσης ( c )
- Το ψυχοδοχείο ( k )
- Αναγεννητήρας ( r )
- Θερμοδοχείο ( h )
- Χώρος εκτόνωσης ( e )

Βασική προϋπόθεση για την ισοθερμοκρασιακή ανάλυση, είναι ότι η μηχανή δεν έχει διαρροές μάζας κατά την λειτουργία της, κατά συνέπεια, η συνολική μάζα παραμένει σταθερή. Με βάση αυτό, ισχύει:

$$M = m_c + m_k + m_r + m_h + m_e$$

Θεωρώντας ότι το λειτουργούν μέσο ακολουθεί τον νόμο των τελείων αερίων, ισχύει:

$$m = PV/RT$$

Και με βάση το παραπάνω ισχύει:

$$M = \frac{P}{R} \left( \frac{V_c}{T_k} + \frac{V_k}{T_k} + \frac{V_r}{T_r} + \frac{V_h}{T_h} + \frac{V_e}{T_e} \right)$$

Στην παραπάνω σχέση, είναι δυνατόν να αποδειχθεί ότι η μέση θερμοκρασία του αναγεννητήρα δίνεται από την σχέση:

$$T_r = \frac{T_h - T_k}{\ln \left( \frac{T_h}{T_k} \right)}$$

Το οποίο αντιστοιχεί στην μέση λογαριθμική διαφορά θερμοκρασίας (LMTD) για εναλλάκτη θερμότητας.

Με βάση τα παραπάνω, το μηχανικό έργο το οποίο αποδίδεται από το σύστημα δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$W = W_e + W_c = \oint P dV_c + \oint P dV_e = \oint \left( \frac{dV_c}{d\theta} + \frac{dV_e}{d\theta} \right) d\theta$$

Όπου  $\theta$ , η γωνία περιστροφής του άξονα, με τον οποίο συνδέονται τα έμβολα της μηχανής.

Με βάση το πρώτο θερμοδυναμικό αξίωμα, είναι δυνατόν να αποδειχθεί κατά την ιδανική ισοθερμοκρασιακή προσέγγιση ότι:

$$Q_c = W_c$$

$$Q_e = W_e$$

$$Q_k = 0$$

$$Q_h = 0$$

$$Q_r = 0$$

Με βάση τα παραπάνω, οι εξισώσεις που προκύπτουν από το ιδανικό ισοθερμοκρασιακό μοντέλο είναι οι εξής:

Η μέση πίεση του συστήματος θα δίνεται από την σχέση:

$$P = \frac{MR}{\left( \frac{V_c}{T_k} + \frac{V_k}{T_k} + \frac{V_r \ln\left(\frac{T_h}{T_k}\right)}{T_h - T_k} + \frac{V_h}{T_h} + \frac{V_e}{T_h} \right)}$$

Η θερμότητα κατά την εκτόνωση, θα είναι ίση με το αντίστοιχο παραγόμενο έργο, και θα δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$Q_e = W_e = \oint P \left( \frac{dV_e}{d\theta} \right) d\theta$$

Η θερμότητα κατά την συμπίεση, θα είναι ίση με το έργο το οποίο προσδίδεται κατά την συμπίεση, και θα δίνεται από την σχέση:

$$Q_c = W_c = \oint P \left( \frac{dV_c}{d\theta} \right) d\theta$$

Το συνολικό έργο του συστήματος θα δίνεται από την σχέση:

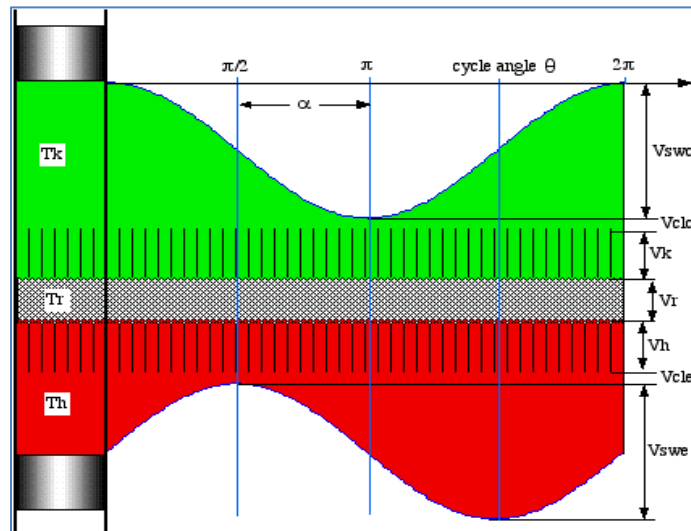
$$W = W_c + W_e$$

Τέλος, η θερμοδυναμική απόδοση θα δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\eta = \frac{W}{Q_e}$$

### 3.1.1 Ανάλυση Schmidt

Ο Gustav Schmidt, δημοσίευσε μία ανάλυση το 1871, στην οποία κατέληξε σε αναλυτική λύση, για τις παραπάνω διαφορικές εξισώσεις. Έστω η μηχανή Α τύπου η οποία έχει όγκο εκτόνωσης  $V_e$  και όγκο συμπίεσης  $V_c$ , όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 31: Ανάλυση Schmidt μηχανής τύπου Α [4]

Θεωρούμε ότι οι μεταβολές των όγκων ακολουθούν ημιτονοειδείς καμπύλες, δηλ:

$$V_c = V_{clc} + \frac{V_{swc}(1 + \cos\theta)}{2}$$

$$V_e = V_{cle} + \frac{V_{swe}(1 + \cos(\theta + \alpha))}{2}$$

Με βάση την παραδοχή αυτή, είναι δυνατόν να βρεθούν αναλυτικά τα ολοκληρώματα τα οποία παρουσιάστηκαν παραπάνω, οπότε ισχύει:

$$W_c = Q_c = \pi V_{swc} P \sin\beta \frac{\sqrt{1 - b^2} - 1}{b}$$

$$W_e = Q_e = \pi V_{swe} P \sin(\beta - \alpha) \frac{\sqrt{1 - b^2} - 1}{b}$$

$$W = W_c + W_e$$

$$\eta = \frac{W}{Q_e} = 1 - \frac{T_k}{T_h}$$

$$\tan \beta = \frac{\frac{V_{swe} \sin \alpha}{T_h}}{\frac{V_{swe} \cos \alpha}{T_h} + \frac{V_{swc}}{T_k}}$$

$$c = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{V_{swe}}{T_h}\right)^2 + 2 \left(\frac{V_{swe}}{T_h}\right) \left(\frac{V_{swc}}{T_k}\right) \cos \alpha + \left(\frac{V_{swc}}{T_k}\right)^2}$$

$$s = \frac{V_{swc}}{2T_k} + \frac{V_{clc}}{T_k} + \frac{V_k}{T_k} + \frac{V_r \ln\left(\frac{T_h}{T_k}\right)}{T_h - T_k} + \frac{V_h}{T_h} + \frac{V_{swe}}{2T_h} + \frac{V_{cle}}{T_h}$$

$$b = c/s$$

$$P = \frac{MR}{s\sqrt{1 - b^2}}$$

### 3.2 Εμπειρικό Μοντέλο διαστασιολόγησης μηχανών Stirling

Προτού γίνει λεπτομερής ανάλυση μίας συγκεκριμένης διάταξης που περιλαμβάνει μηχανή Stirling, γίνεται μία αρχική αξιολόγηση με εμπειρικά μοντέλα πρώτης τάξης. Τα εμπειρικά μοντέλα δεν υπεισέρχονται σε τεχνικές λεπτομέρειες, αλλά δίνουν μία αρχική εικόνα, και βοηθούν στην αρχική εκτίμηση, αν μία διάταξη μηχανής Stirling είναι συμφέρουσα λύση. Εφόσον είναι, τότε ακολουθούν λεπτομερέστεροι υπολογισμοί.

Ένα εμπειρικό μοντέλο με βάση το οποίο εκτιμάται η απόδοση, είναι το μοντέλο που προτάθηκε από τους Carlqvist, et. al. [5]. Με βάση το μοντέλο αυτό, η εκτιμώμενη απόδοση μίας μηχανής Stirling, με λειτουργούν μέσω το υδρογόνο, έχει μέγιστη δυνατή θερμοδυναμική απόδοση, η οποία δίνεται από την σχέση:

$$\eta_{eff} = \left(1 - \frac{T_c}{T_h}\right) \cdot C \cdot \eta_h \cdot \eta_m \cdot f_A$$

Όπου:

$\eta_{eff}$ : Η θερμοδυναμική απόδοση της μηχανής Stirling

$C$ : Λόγος απόδοσης, ως προς την απόδοση μηχανής Carnot. Τυπικά είναι μεταξύ 65% - 75%

$\eta_h$ : Η απόδοση της διάταξης που προσδίδει θερμότητα. Τυπικά είναι μεταξύ 85% - 90%

$\eta_m$ : Μηχανική απόδοση διάταξης. Τυπικά μεταξύ 85% - 90%

$f_A$ : Auxiliary ratio. Σε μέγιστη απόδοση 95%

Με βάση τα παραπάνω, τιμές ρεαλιστικής απόδοσης που είναι δυνατόν να πετύχει μία μηχανή Stirling είναι της τάξης του 60% της απόδοσης της μηχανής Carnot.

Όσον αφορά την αρχική εκτίμηση της ισχύος μίας μηχανής Stirling, είναι της τάξης του 30-40% της ισχύος που υπολογίζεται από την ανάλυση Schmidt. Πειραματικά έχει παρατηρηθεί από τον William Beale [5], ότι η παραγόμενη ισχύς ενός μεγάλου αριθμού μηχανών Stirling ακολουθεί την παρακάτω σχέση:

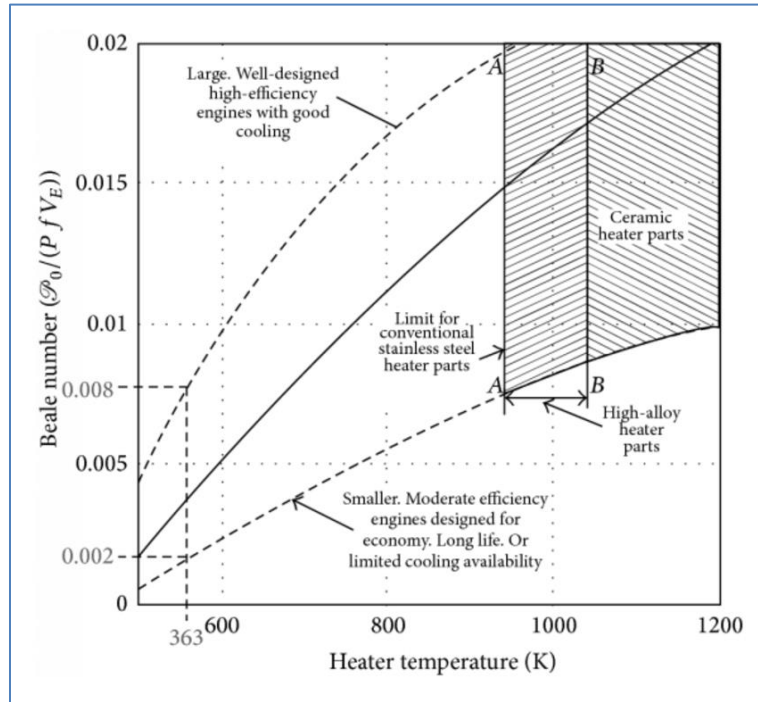
$$P = 0.015 p \cdot f \cdot V_0$$

Όπου,  $P$  η παραγόμενη ισχύς της μηχανής,  $p$  η μέση πίεση,  $f$  η συχνότητα και  $V_0$  ο όγκος που εκτοπίζεται από το έμβολο.

Μία άλλη διατύπωση της παραπάνω σχέσης είναι η εξής:

$$\frac{P}{pfV_0} = const$$

Η σταθερά αυτή ονομάζεται αριθμός Beale, και είναι δυνατόν να δοθεί εμπειρικά από το παρακάτω διάγραμμα [5]:



Σχήμα 32: Διάγραμμα Beale [5]



## 4. Διαστασιολόγηση Μηχανής Stirling

Η διαστασιολόγηση μηχανής Stirling θα πραγματοποιηθεί στις εξής φάσεις:

Κατ' αρχήν θα πραγματοποιηθεί μία σύντομη παρουσίαση μίας μηχανής Stirling, η οποία έχει κατασκευαστεί στο παρελθόν, και για την οποία υπάρχουν διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα από βιβλιογραφία [5]. Τα υπάρχοντα πειραματικά δεδομένα, θα συγκριθούν με δύο διαφορετικές μεθόδους διαστασιολόγησης (μέθοδος Schmidt και εμπειρικό μοντέλο Beale), για να βρεθεί ποιά μέθοδος παρέχει περισσότερο ρεαλιστικά αποτελέσματα.

Με βάση την μέθοδο που δίνει περισσότερο ρεαλιστικά αποτελέσματα, θα τεθεί ένας στόχος επιθυμητής ηλεκτρικής ισχύος, και θα γίνει διαστασιολόγηση μίας μηχανής Stirling η οποία θα παρέχει την ισχύ αυτήν.

Με βάση την απόδοση της μηχανής, θα υπολογιστεί το απαιτούμενο θερμικό φορτίο. Ακολούθως θα αναλυθούν οι εξής πιθανοί τρόποι παροχής του θερμικού φορτίου:

- Από Ηλιακή Ενέργεια
- Από Βιομάζα

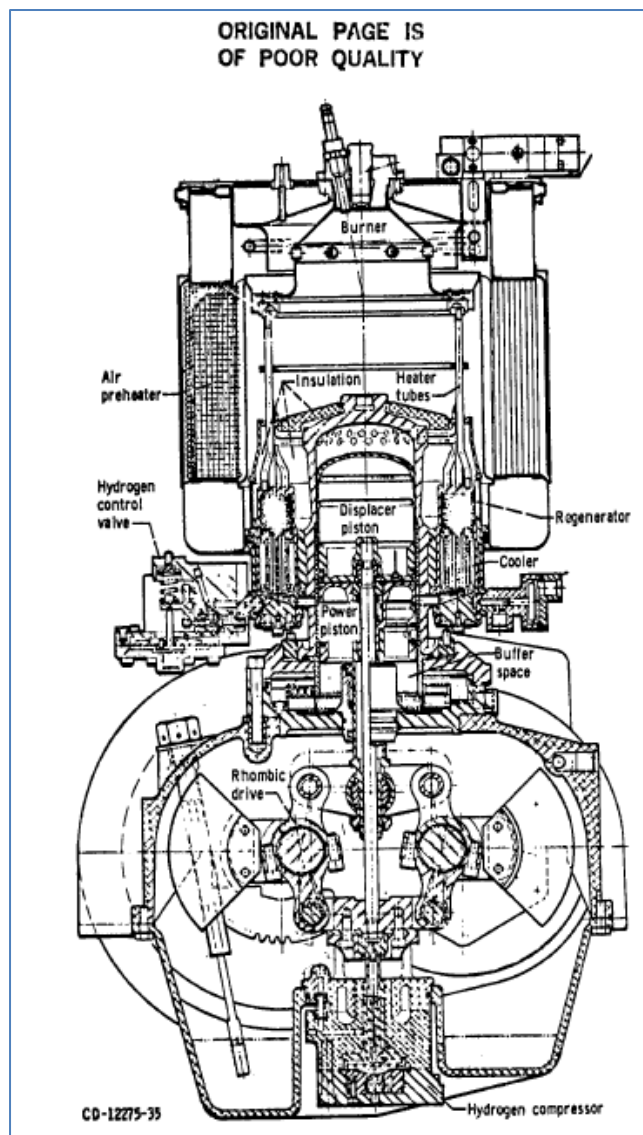
Οι δύο αυτές διατάξεις θα συγκριθούν με απ' ευθείας παραγωγή ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα

### 4.1 Μοντέλα διαστασιολόγησης

Όπως αναλύθηκε παραπάνω, θα γίνει σύγκριση δύο μεθόδων διαστασιολόγησης σε μηχανή η οποία έχει ήδη κατασκευαστεί και για την οποία υπάρχουν διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα από την βιβλιογραφία. Η μηχανή αυτή είναι η GPU-III, και παρουσιάζεται εν συντομία στην παρακάτω παράγραφο.

#### 4.1.1 Η μηχανή Stirling GPU-III

Η μηχανή Stirling GPU-III (Ground Power Unit 3) κατασκευάστηκε από την General Motors την περίοδο 1960 - 1966 για τον Αμερικανικό Στρατό. Παρ' όλο που το πρόγραμμα δεν προχώρησε, κάποιες από τις μηχανές GPU-III που κατασκευάστηκαν προσέλκυσαν το ενδιαφέρον της NASA. Μία από τις μηχανές πάνω στις οποίες εργάστηκε η NASA, εικονίζεται στο παρακάτω σχήμα [5].



Σχήμα 33: Μηχανή GPU-3 [5]

Έχει ρομβοειδή διάταξη (rhombic drive) και η αρχή λειτουργίας της παρουσιάζεται στο σχήμα 21 του κεφ. 2. Για την συγκεκριμένη μηχανή υπάρχει ένας μεγάλος όγκος από διαθέσιμα δεδομένα, τα οποία αφορούν κατ' αρχήν τις διαστάσεις της μηχανής, όπως επίσης και δεδομένα ισχύος και απόδοσης.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι διαστάσεις της συγκεκριμένης μηχανής, όπως δίδονται στο [5].

Όγκος Θερμοδοχείου (cm <sup>3</sup> )	80.8
Όγκος Αναγεννητήρα (cm <sup>3</sup> )	65.5
Όγκος Ψυχοδοχείου (cm <sup>3</sup> )	13.3
Διάμετρος κυλίνδρου (cm)	6.99
Κίνηση (stroke) εμβόλου (cm)	3

Πίνακας 5: Διαστάσεις Μηχανής GPU-3 [5]

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται πειραματικές μετρήσεις που αφορούν την ισχύ και την απόδοση της μηχανής, όπως αυτές παρουσιάζονται στην βιβλιογραφία [5]:

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι μετρήσεις απόδοσης της μηχανής, στην περίπτωση όπου το αέριο είναι υδρογόνο, η θερμοκρασία του θερμοδοχείου είναι 704 C και η θερμοκρασία του ψυχοδοχείου είναι 15 C.

Pt	Mean P (Mpa)	Speed (Hz)	Speed (rpm)	Brake Power (kW)	Heat input (kW)	Eff (%)
1	1.38	16.67	1000	0.39	2.46	15.6
2	1.38	25	1500	0.58	3.06	17.5
3	1.38	33.33	2000	0.71	3.69	18.1
4	1.38	41.67	2500	0.78	3.97	19.1
5	1.38	50	3000	0.82	4.51	17.2
6	1.38	58.33	3500	0.56	4.83	11
7	2.76	16.67	1000	1.13	4.47	24.4
8	2.76	25	1500	1.49	5.64	25.7
9	2.76	33.33	2000	1.95	7.08	27.2
10	2.76	41.67	2500	2.39	8.58	27
11	2.76	50	3000	2.61	9.88	25.7
12	2.76	58.33	3500	2.7	11	23.9
13	4.14	58.33	3500	4.47	16.18	27

Πίνακας 6: Πειραματικές μετρήσεις για μηχανή GPU-3 [5]. Λειτουργούν μέσο είναι το υδρογόνο, θερμοκρασία θερμοδοχείου είναι 704 C και θερμοκρασία ψυχοδοχείου είναι 15 C [5].

Στον παρακάτω πίνακα, γίνεται εστίαση στην πίεση 2.76 MPa όπου η απόδοση είναι η μέγιστη δυνατή, με βάση τα δεδομένα του πίνακα 5, και μελετάται η επίδραση της θερμοκρασίας του θερμοδοχείου, με δεδομένη την θερμοκρασία του ψυχοδοχείου στους 15 C [5].

Pt	Heater T ( C )	Mean P (Mpa)	Speed (Hz)	Speed (rpm)	Brake Power (kW)
1	704	2.76	16.67	1000	1.13
2	704	2.76	25	1500	1.49
3	704	2.76	33.33	2000	1.95
4	704	2.76	41.67	2500	2.35
5	704	2.76	50	3000	2.61
6	704	2.76	58.33	3500	2.7
7	649	2.76	16.67	1000	0.89
8	649	2.76	25	1500	1.34
9	649	2.76	33.33	2000	1.85
10	649	2.76	41.67	2500	2.24
11	649	2.76	50	3000	2.42
12	649	2.76	58.33	3500	2.44
13	593	2.76	16.67	1000	0.86
14	593	2.76	25	1500	1.36
15	593	2.76	33.33	2000	1.72
16	593	2.76	41.67	2500	2.07
17	593	2.76	50	3000	2.13
18	593	2.76	58.33	3500	2.09

Πίνακας 7: Επίδραση θερμοκρασίας στην ισχύ μηχανής GPU-3 [5]

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται μετρήσεις της μηχανής GPU-3, με λειτουργούν μέσω το ήλιο [5], θερμοκρασία θερμοδοχείου 704 C και θερμοκρασία ψυχοδοχείου 13 C.

Pt	Mean P (Mpa)	Speed (Hz)	Speed (rpm)	Brake Power (kW)
1	2.76	16.67	1000	0.88
2	2.76	25	1500	1.21
3	2.76	33.33	2000	1.4
4	2.76	41.67	2500	1.53
5	2.76	50	3000	1.42
6	2.76	58.33	3500	0.89
7	1.38	16.67	1000	0.25
8	1.38	25	1500	0.26
9	1.38	33.33	2000	0.37
10	1.38	41.67	2500	0.15

Pt	Mean P (Mpa)	Speed (Hz)	Speed (rpm)	Brake Power (kW)
11	4.14	33.33	2000	2.35
12	4.14	41.67	2500	2.65
13	4.14	50	3000	2.55
14	4.14	58.33	3500	2.01
15	5.52	50	3000	3.77
16	5.52	58.33	3500	3.39

Πίνακας 8: Πειραματικές μετρήσεις GPU-3 με λειτουργούν μέσω το ήλιο. Θερμοκρασία θερμοδοχείου είναι 704 C, ενώ θερμοκρασία ψυχοδοχείου είναι 13 C [5]

Στον ακόλουθο πίνακα, παρουσιάζονται πειραματικά δεδομένα της συγκεκριμένης μηχανής με λειτουργούν μέσω το ήλιο, θερμοκρασία θερμοδοχείου 349 C και θερμοκρασία ψυχοδοχείου 13 C [5].

Pt	Mean P (Mpa)	Speed (Hz)	Speed (rpm)	Brake Power (kW)
1	2.76	16.67	1000	0.69
2	2.76	25	1500	0.93
3	2.76	33.33	2000	1.01
4	2.76	41.67	2500	0.94
5	2.76	50	3000	0.7
6	2.76	58.33	3500	0.27
7	5.52	33.33	2000	2.59
8	5.52	41.67	2500	2.96
9	5.52	50	3000	2.73
10	5.52	58.33	3500	1.8

Πίνακας 9: Πειραματικές μετρήσεις μηχανής GPU-3 με λειτουργούν μέσω το ήλιο, θερμοκρασία θερμοδοχείου 349 C και θερμοκρασία ψυχοδοχείου 13 C [5]

Τέλος, στον παρακάτω πίνακα, δίδονται πειραματικές μετρήσεις της μηχανής GPU-3, για θερμοκρασία ψυχοδοχείου 13 C, θερμοκρασία θερμοδοχείου 649 C.

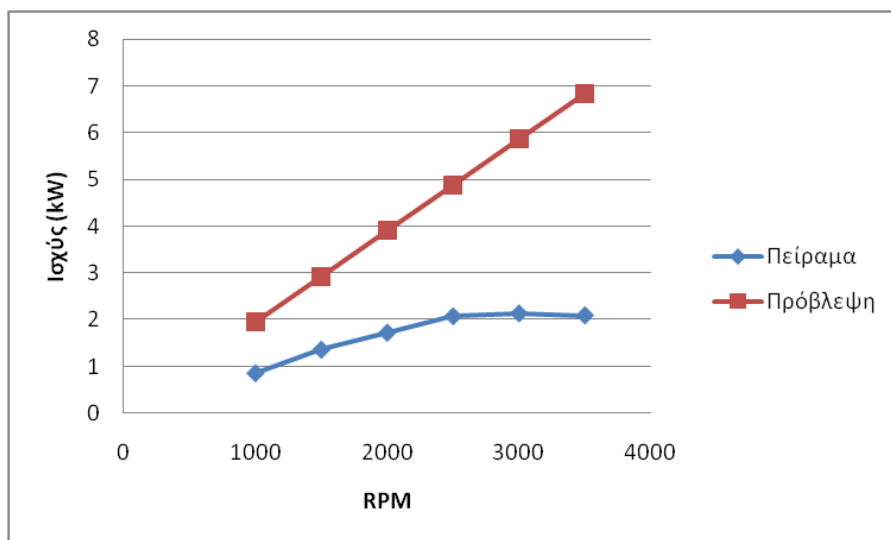
Pt	Mean P (Mpa)	Speed (Hz)	Speed (rpm)	Brake Power (kW)	Heat input (kW)	Eff (%)
1	2.76	16.67	1000	0.82	3.95	20.5
2	2.76	25	1500	1.12	5.41	20.7
3	2.76	33.33	2000	1.21	6.64	18
4	2.76	41.67	2500	1.21	7.64	15.2
5	2.76	50	3000	1.04	8.95	11.8
6	2.76	58.33	3500	0.56	9.88	5.4
7	4.14	25	1500	1.79	7.23	24.8
8	4.14	33.33	2000	2.2	9.17	23.9
9	4.14	41.67	2500	2.42	11.33	21.3
10	4.14	50	3000	2.35	12.83	18.2
11	4.14	58.33	3500	1.73	14.32	12
12	5.52	41.67	2500	3.28	14.69	22.5
13	5.52	50	3000	3.28	17.45	18.8
14	5.52	58.33	3500	2.76	19.18	14.2
15	6.9	50	3000	3.93	20.88	18.7
16	6.9	58.33	3500	3.37	23.15	14.2

Πίνακας 10: Πειραματικές μετρήσεις της μηχανής GPU-3 με λειτουργούν μέσω το ήλιο, θερμοκρασία ψυχοδοχείου 13 C, και θερμοκρασία θερμοδοχείου 649 C [5]

#### 4.1.2 Αξιολόγηση μεθόδου Schmidt

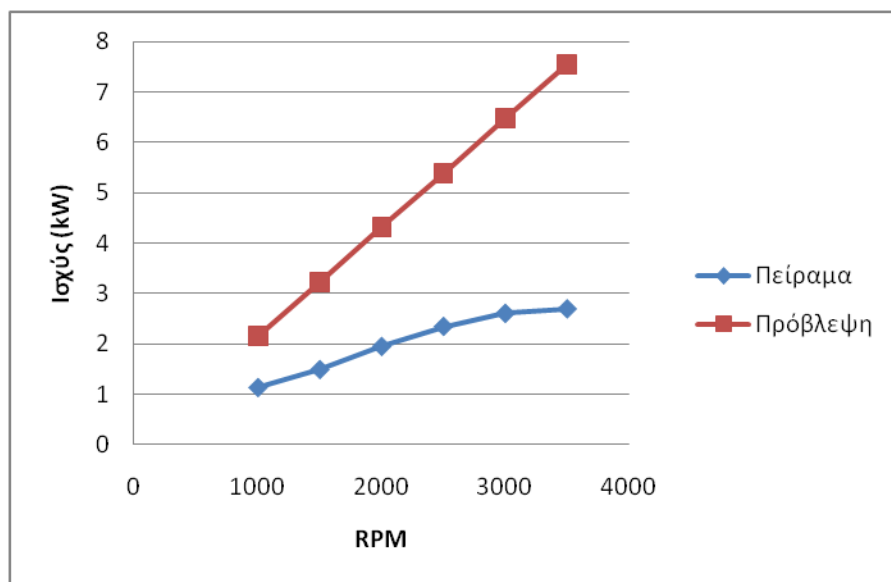
Όπως αναλύθηκε στα παραπάνω, η μέθοδος Schmidt, παρ' όλη τη σημασία που έχει σε θεωρητικό επίπεδο, έχει συγκεκριμένους περιορισμούς, οι οποίοι απορρέουν από το γεγονός ότι η προσέγγιση είναι ισοθερμοκρασιακή, και αγνοούνται δυναμικά φαινόμενα, τα οποία σχετίζονται με τις εσωτερικές ροές θερμότητας και μάζας της μηχανής.

Όπως προβλέπεται στο [5], η ανάλυση Schmidt προβλέπει υπερβολικά υψηλές τιμές ισχύος. Όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα, η πραγματική τιμή ισχύος είναι στο 35% της πρόβλεψης που προέρχεται από την ανάλυση Schmidt.



Σχήμα 34: Πρόβλεψη Ισχύος μηχανής Stirling με την μέθοδο Schmidt (TH = 593 C, P = 2.76 MPa)

Το ίδιο επίπεδο ακρίβειας παρατηρείται και σε υψηλότερες θερμοκρασίες, για τις οποίες υπάρχουν διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα, όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 35: Πρόβλεψη ισχύος με την μέθοδο Schmidt (TH = 704 C, P = 2.76MPa)

Με βάση τα παραπάνω, είναι προφανές ότι η ανάλυση Schmidt, όπως επίσης και το ιδανικό ισοθερμικό μοντέλο, δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί για διαστασιολόγηση μηχανής Stirling.

#### 4.1.3 Αξιολόγηση εμπειρικής μεθόδου με αριθμό Beale

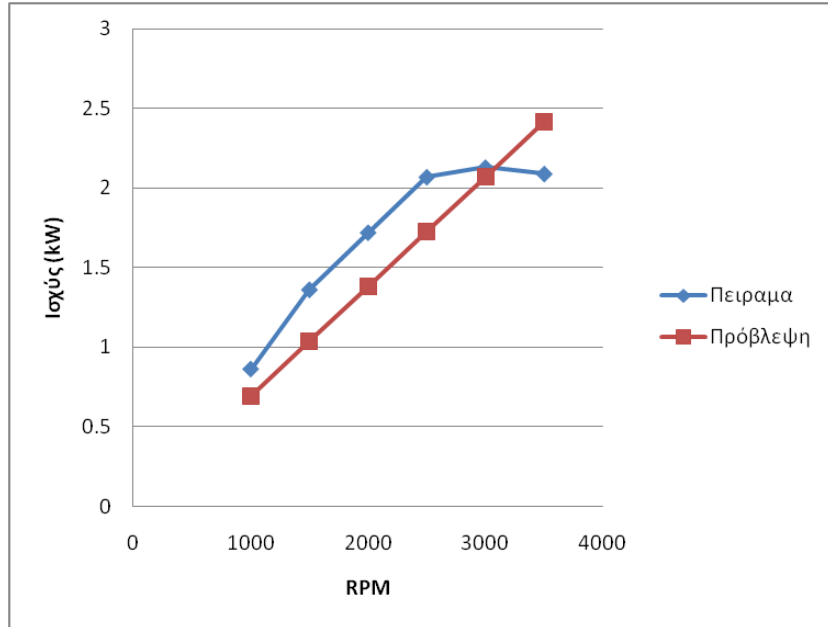
Στην παρούσα παράγραφο θα γίνει αξιολόγηση της μεθόδου διαστασιολόγησης με βάση τον αριθμό Beale. Όπως αναφέρεται στο [5], είναι μία εμπειρική απλοποιημένη μέθοδος η οποία δεν υπεισέρχεται σε σχεδιαστικές λεπτομέρειες. Παρ' όλ' αυτά δίνει ικανοποιητικά επίπεδα σε επίπεδο πρώτης προσέγγισης, ώστε να γίνει μία αρχική εκτίμηση αν είναι συμφέρον να επιλεγεί μία μηχανή Stirling.

Εφόσον η αρχική εκτίμηση υποδεικνύει προς την κατεύθυνση ότι η χρήση μίας μηχανής Stirling είναι συμφέρουσα, επιλέγονται υπολογιστικές μέθοδοι, οι οποίες λαμβάνουν υπ' όψη μηχανολογικά χαρακτηριστικά της εκάστοτε μηχανής, καθώς επίσης και την δυναμική των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά την λειτουργία της. Η ανάλυση σε τέτοιο επίπεδο ξεφεύγει από τον σκοπό της παρούσας εργασίας.

Στην παρούσα παράγραφο επιχειρείται σύγκριση των αποτελεσμάτων που δίνει η διαστασιολόγηση με την μέθοδο Beale, με τα πειραματικά δεδομένα που παρουσιάστηκαν παραπάνω

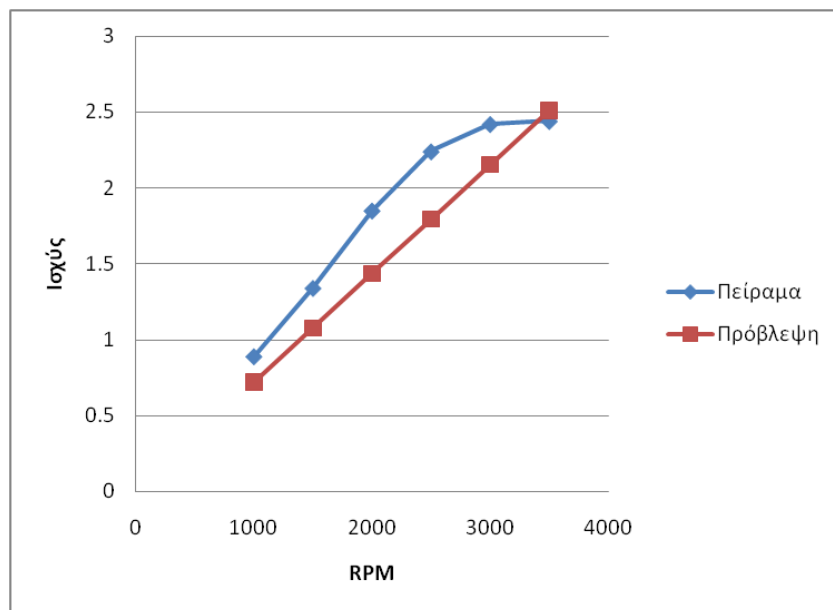
Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η πρόβλεψη ισχύος με βάση τον αριθμό Beale, για υδρογόνο, θερμοκρασία θερμοδοχείου 593 C, θερμοκρασία ψυχοδοχείου 15 C και πίεση 2.76 MPa.





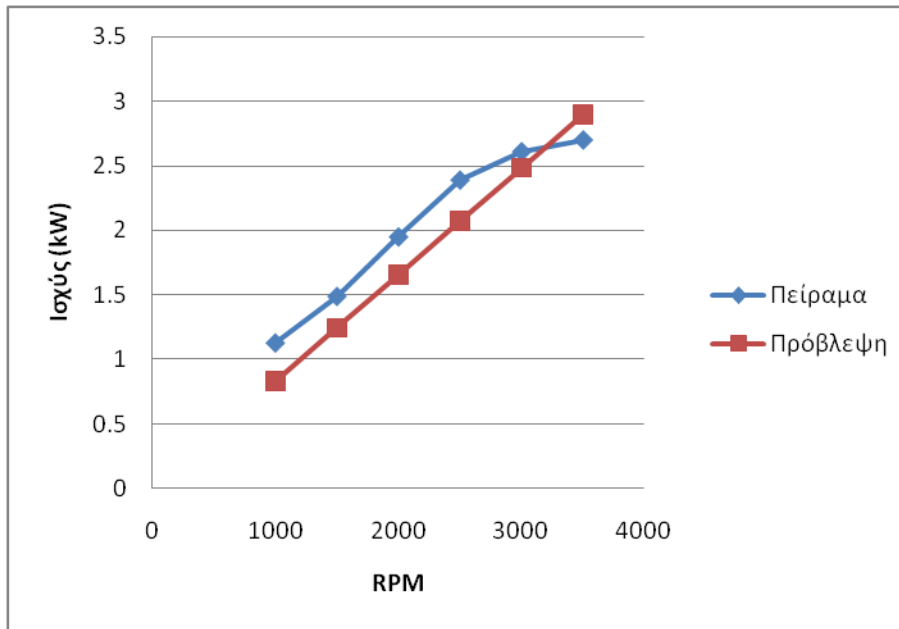
Σχήμα 36: Πρόβλεψη ισχύος μηχανής GPU-3 με λειτουργούν μέσω το υδρογόνο, θερμοκρασία θερμοδοχείου 593 C, και θερμοκρασία ψυχοδοχείου 15 C

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η πρόβλεψη ισχύος, με βάση τον αριθμό Beale για υδρογόνο, θερμοκρασία θερμοδοχείου 649 C, ψυχοδοχείου 15 C και πίεση 2.76 MPa.



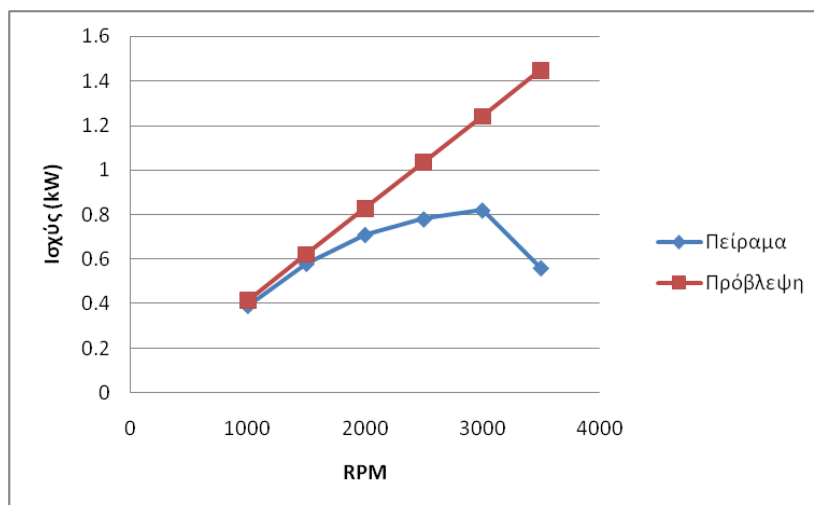
Σχήμα 37: Πρόβλεψη ισχύος μηχανής GPU-3 με λειτουργούν μέσω το υδρογόνο, θερμοκρασία θερμοδοχείου 649 C, ψυχοδοχείου 15 C και πίεση 2.76 MPa

Στο παρακάτω διάγραμμα, παρουσιάζεται η πρόβλεψη ισχύος της συγκεκριμένης μηχανής με λειτουργούν μέσο υδρογόνο, θερμοκρασία θερμοδοχείου 704 C, ψυχοδοχείου 15 C και πίεση 2.76 MPa.



Σχήμα 38: Πρόβλεψη ισχύος μηχανής GPU-3 για λειτουργούν μέσο υδρογόνο, θερμοκρασία θερμοδοχείου 704 C, ψυχοδοχείου 15 C και πίεση 2.76 MPa

Τέλος, στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η εκτίμηση της ισχύος της μηχανής GPU-3 για πίεση 1.38 MPa, θερμοκρασία θερμοδοχείου 704 C, και θερμοκρασία ψυχοδοχείου 15 C.



Σχήμα 39: Πρόβλεψη ισχύος μηχανής GPU-3 για θερμοκρασία θερμοδοχείου 704 C, ψυχοδοχείου 15 C και πίεση 1.38 MPa

Παρ' όλο που η συγκεκριμένη μέθοδος διαστασιολόγησης, δεν είναι σε θέση να προσεγγίσει το γεγονός ότι μία μηχανή παρουσιάζει την μέγιστη δυνατή ισχύ σε συγκεκριμένο αριθμό στροφών, όπως παρουσιάζεται στο πείραμα, είναι αρκετή για να δώσει μία αρχική τάξη μεγέθους της μηχανής που απαιτείται, ώστε να παραχθεί ένα συγκεκριμένο επίπεδο μηχανικής ισχύος.

Επίσης, παρ' όλο που είναι απλούστερη από την ανάλυση Schmidt, καθώς δίνει περισσότερο ρεαλιστικά αποτελέσματα σε σχέση με υπάρχουσα μηχανή Stirling, θα χρησιμοποιηθεί στις εφαρμογές που περιγράφονται στις επόμενες παραγράφους.

## 4.2 Διατύπωση προβλήματος

Έχοντας δεδομένη μία μέθοδο η οποία είναι σε θέση να δώσει μία αρχική εικόνα του μεγέθους της μηχανής Stirling που απαιτείται για να δώσει μία συγκεκριμένη ισχύ, θα γίνει εστίαση στο πρόβλημα της κατασκευής μίας μηχανής Stirling, η οποία να είναι σε θέση να δώσει ισχύ αντίστοιχη με την κατανάλωση ενός μέσου νοικοκυριού στις ΗΠΑ, που υπολογίζεται στα 11700 kWh/χρόνο [12].

### 4.3 Διαστασιολόγηση Μηχανής Stirling για συγκεκριμένη ισχύ

Με βάση τον στόχο ισχύος 11700 kWh/h, ο οποίος ετέθη παραπάνω, επόμενη επιλογή είναι οι εξής παράμετροι:

- **Διάταξη μηχανής:** ΩΣ διάταξη μηχανής Stirling επιλέγεται η ρομβοειδής διάταξη, η οποία παρουσιάστηκε στην παράγραφο 2.3.2. Ο λόγος επιλογής της συγκεκριμένης διάταξης είναι απλώς ότι είναι μία αρχιτεκτονική η οποία έχει κατασκευαστεί, ελεγχθεί, και για την οποία υπάρχουν αξιόπιστα πειραματικά δεδομένα, τα οποία έχουν δημοσιευτεί στην βιβλιογραφία, και παρουσιάστηκαν στις παραπάνω παραγράφους. Επιπλέον, η τεχνολογία των μηχανών Stirling δεν έχει φτάσει το επίπεδο ωριμότητας ανταγωνιστικών τεχνολογιών, όπως π.χ. μηχανές εσωτερικής καύσης, ώστε να υπάρχει σαφής εικόνα για την βέλτιστη δυνατή διάταξη. Κατά συνέπεια, για το πρόβλημα που ετέθη, επελέγη μία λύση η οποία έχει ήδη κατασκευαστεί, οπότε δεν τίθεται υπό αμφισβήτηση ο βαθμός στον οποίο είναι εφικτή η υλοποίηση.
- **Λειτουργούν μέσο:** ΩΣ λειτουργούν μέσο, επιλέγεται το υδρογόνο. Με βάση τα πειραματικά δεδομένα που παρουσιάστηκαν παραπάνω, το υδρογόνο ήταν σε θέση να προσδώσει μεγαλύτερες τιμές ισχύος για αντίστοιχα πλαίσια θερμοκρασίας και τιμές μέσης πίεσης.
- **Όρια θερμοκρασιακής λειτουργίας:** ΩΣ όριο θερμοκρασιακής λειτουργίας, στα πλαίσια των δεδομένων που παρουσιάστηκαν παραπάνω επιλέγεται η θερμοκρασία 650 C για θερμοδοχείο και 15 C για ψυχοδοχείο. Επίσης επιλέγεται σαν πίεση λειτουργίας τα 2.76 MPa. Παρ' όλο που η θερμοκρασία λειτουργίας των 704 C που παρουσιάστηκε παραπάνω δίνει μεγαλύτερες τιμές ισχύος, επελέγη μία χαμηλότερη τιμή θερμοκρασίας, για δύο λόγους:
  - α) Για μικρότερο επίπεδο θερμικής καταπόνησης υλικών, καθώς επίσης και ευκολότερη επιλογή υλικών από τα οποία θα κατασκευαστεί η μηχανή. Κατά την διάρκεια λειτουργίας μίας μηχανής αναμένεται να υπάρχουν πιθανές δυσλειτουργίες, όπως πχ αυξομείωση ισχύος, θερμοκρασίας, κτλ. Με αυτό τον τρόπο μειώνεται η πιθανότητα σε μία αυξομείωση της θερμοκρασίας του θερμοδοχείου, να εκτεθούν τα υλικά σε θερμοκρασίες όπου συμβατικά υλικά (π.χ. χάλυβας) χάνουν την μηχανική τους αντοχή.
  - β) Για μεγαλύτερη ευελιξία σε πηγή θερμότητας. Καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία, μειώνεται το φάσμα των επιλογών, από τις οποίες η θερμότητα αυτή δύναται να προέλθει.

- **Πηγή θερμότητας:** Όπως αναφέρθηκε στις παραπάνω παραγράφους, οι μηχανές Stirling απαιτούν ένα ποσό θερμότητας για την λειτουργία τους, το οποίο είναι δυνατόν να προέρχεται από οποιαδήποτε πηγή, υπό την προϋπόθεση ότι είναι εφικτή η επίτευξη της επιθυμητής θερμοκρασίας. Κατά συνέπεια, μία ρομβοειδής διάταξη, όπως η μηχανή GPU-3 που παρουσιάστηκε παραπάνω, η οποία είναι σχεδιασμένη να λειτουργεί με καύση, είναι εξίσου δυνατόν να λειτουργήσει με θερμική ενέργεια από οποιαδήποτε άλλη πηγή. Στα επόμενα θα εξεταστούν οι δύο παρακάτω δυνατές πηγές θερμότητας:

- α) Θερμότητα από ηλιακή ενέργεια
- β) θερμότητα από καύση βιομάζας

Έχοντας θέσει τον στόχο επιθυμητής ηλεκτρικής ισχύος, την διάταξη και τις παραμέτρους λειτουργίας, τις πιθανές πηγές θερμότητας, καθώς επίσης και μία μέθοδο με την οποία μπορούν να γίνουν προκαταρκτικές προβλέψεις ισχύος για διάφορα μεγέθη μηχανής, προκύπτουν τα παρακάτω:

Θεωρώντας μία ηλεκτρογεννήτρια, η οποία έχει απόδοση 90% κατά την μετατροπή μηχανικής ισχύος σε ηλεκτρική, για ένα επίπεδο ισχύος 1,33 kW, απαιτούνται 1,47 kW μηχανικής ισχύος, αν αυτή είναι σε λειτουργία 24 ώρες την ημέρα.

Με βάση τα πειραματικά δεδομένα που παρουσιάστηκαν παραπάνω, για μηχανική ισχύ 2 kW στην έξοδο της μηχανής Stirling, απαιτείται λειτουργία της μηχανής στις 3000 στροφές το λεπτό.

Με βάση τα δεδομένα ισχύος που παρουσιάστηκαν παραπάνω, για τους αρχικούς υπολογισμούς γίνονται οι παρακάτω εκτιμήσεις: Με βάση το γεγονός ότι για θερμοδοχείο σε θερμοκρασία 704 C, η θερμική απόδοση της μηχανής είναι της τάξης του 25%, ένα συντηρητικό επίπεδο απόδοσης της κατασκευαζόμενης μηχανής για θερμοδοχείο σε θερμοκρασία λειτουργίας 650 C, είναι της τάξεως του 20%. 1,47 kW μηχανικής ισχύος, με θερμική απόδοση 20% απαιτούν 7,35 kW θερμότητας.

Με βάση τα παραπάνω, η πηγή θερμότητας που απαιτείται, είναι απαραίτητο να έχει τα δύο παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Να είναι δυνατόν να παράξει τουλάχιστον 7,35 kW θερμικής ισχύος

- Να είναι δυνατόν να παράξει υψηλό επίπεδο θερμοκρασίας ίσο ή μεγαλύτερο από 650 C

Με βάση την μέθοδο Beale, μία τέτοια μηχανή θα είχε κίνηση εμβόλου τέτοια ώστε να εκτοπίζει 200 cm<sup>3</sup>.

Τα στοιχεία που παρουσιάζονται παραπάνω, συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Μέγεθος	Τιμή
Απαιτούμενη Ηλ. Ισχύς (kW)	1,33
Μηχανική Ισχύς (kW)	3.2
Θερμική Ισχύς (kW)	7,35
Στροφές λειτουργίας (rpm)	3000
Λειτουργούν Μέσο	Υδρογόνο
Θερμοκρασία Θερμοδοχείου ( C )	650
Θερμοκρασία Ψυχοδοχείου ( C )	15
Όγκος στον οποίο κινείται το έμβολο (cm <sup>3</sup> )	180

Πίνακας 11: Δεδομένα της προτεινόμενης μηχανής Stirling

Με βάση τα παραπάνω, στα επόμενα, θα προταθούν διατάξεις οι οποίες προσδίδουν την απαιτούμενη θερμότητα στην υπό μελέτη διάταξη, προκειμένου να παραχθεί η απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύς.

Σε αυτό το σημείο, τονίζεται ότι παρ' όλο που οι μηχανές Stirling είναι ανεξάρτητες από την πηγή θερμότητας, είναι απαραίτητες συγκεκριμένες προσαρμογές στην μηχανή, για να είναι συμβατές με την εκάστοτε πηγή θερμότητας. Π.χ. αν επιλεγεί μηχανή Stirling όπου γίνεται καύση, είναι απαραίτητη η βελτιστοποίηση του σχήματος του θερμοδοχείου ώστε να βελτιστοποιείται η μεταφορά θερμότητας, από την καύση του καυσίμου, όπως επίσης είναι απαραίτητη η ορθή επιλογή της διάταξης όπου θα διεξάγεται η καύση. Ομοίως και για την

περίπτωση όπου η μηχανή θα λειτουργεί με θερμική ενέργεια. Η εμβάθυνση σε τέτοιο επίπεδο λεπτομέρειας, ξεφεύγει από τον σκοπό της παρούσας εργασίας.

#### 4.4 Λειτουργία προτεινόμενης διάταξης με ηλιακή ενέργεια

Όπως παρουσιάστηκε παραπάνω, είναι εφικτή η κατασκευή μίας μηχανής Stirling η οποία είναι δυνατόν να δίνει 1,33 kW ηλεκτρικής ενέργειας αν προσδοθούν σε αυτήν 7,35 kW θερμότητας, το οποίο να χρησιμοποιείται για οικιακή χρήση. Στην παρούσα παράγραφο θα παρουσιαστεί ο τρόπος με τον οποίο αυτό είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί με ηλιακή ενέργεια.

Οι τιμές ισχύος που υπολογίστηκαν παραπάνω, έλαβαν υπ' όψη λειτουργία μηχανής 24 ώρες την ημέρα. Προφανώς αυτό δεν ισχύει εφόσον η μηχανή είναι ηλιακή. Κατά συνέπεια, θα είναι απαραίτητη η αναπροσαρμογή της τιμής ισχύος για ώρες όπου υπάρχει ηλιοφάνεια. Θα θεωρηθεί η ευνοϊκή περίπτωση, 10 ωρών ηλιοφάνειας την ημέρα. Η μηχανή θα είναι απαραίτητο να παράξει 11700 kWh μέσα σε έναν χρόνο λειτουργώντας μόνον 10 ώρες ανά ημέρα.

Για να παραχθούν 11700 kWh τον χρόνο, με 10 ώρες ημερήσιας λειτουργίας, απαιτείται διάταξη ισχύος 3.2 kW. Η περίσσεια ισχύος (τάξη μεγέθους  $3.2 - 1.33 = 1.87$  kW) θα αποθηκεύεται σε συσσωρευτή (μπαταρία), ώστε να χρησιμοποιείται όταν δεν υπάρχει ηλιοφάνεια.

Η απαιτούμενη θερμική ισχύς της διάταξης που περιγράφηκε παραπάνω, προσλαμβάνεται από το σύστημα με χρήση διάταξης ηλιακού συλλέκτη. Μία τυπική τέτοια διάταξη, η οποία συνδέεται με μηχανή Stirling εικονίζονται στα παρακάτω σχήματα [6]:



Σχήμα 40: Διάταξη ηλιακού συλλέκτη μονού κατόπτρου με μηχανή Stirling [6]





Σχήμα 41: Διάταξη ηλιακού συλλέκτη πολλαπλών κατόπτρων με μηχανή Stirling [6]



Σχήμα 42: Διάταξη ηλιακού συλλέκτη πολλαπλών κατόπτρων με μηχανή Stirling [6]

Ο ηλιακός συλλέκτης είναι δυνατόν να είναι μία ενιαία επιφάνεια (σχ. 38) ή συνδυασμός περισσότερων μικρών κατόπτρων (σχ. 39, 40).

Σε μία διάταξη πολλαπλών κατόπτρων, κάθε κάτοπτρο έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά καμπυλότητας και προσανατολισμού προς τον ήλιο. Το σύνολο των μικρών κατόπτρων είναι απαραίτητο να έχει αξονική συμμετρία και να σχηματίζει συνολικά ένα ενιαίο παραβολοειδές κάτοπτρο.

Μία διάταξη πολλαπλών κατόπτρων έχει το σημαντικό πλεονέκτημα ότι αποφεύγεται η κατασκευή μίας μεγάλης παραβολοειδούς επιφάνειας, η οποία θα ήταν τεχνικά δύσκολο και θα εκτόξευε το κόστος.

Σε νέας τεχνολογίας ηλιακούς συλλέκτες τα οπτικά στοιχεία της κατασκευής είναι διαφορετικά από τα δομικά στοιχεία [6]. Μία συχνά χρησιμοποιούμενη λύση είναι υάλινα κάτοπτρα, στηριγμένα πάνω σε χωροδικτύωμα. Το συνηθέστερο είναι η διάταξη να είναι πολλαπλών κατόπτρων, λόγω ευκολίας κατασκευής και μεταφοράς.

#### 4.4.1 Υλικά κατασκευής συλλέκτη

Το υλικό κατασκευής του κατόπτρου θα είναι απαραίτητο να πληροί τις παρακάτω προϋποθέσεις:

- Ανακλαστική επιφάνεια, η οποία να είναι σε θέση να ανακλά το μεγαλύτερο ποσοστό από την ακτινοβολία στην οποία εκτίθεται. Τυπικές αποδόσεις ενός ηλιακού συλλέκτη είναι μεταξύ 70 - 95%
- Καθώς ο ηλιακός συλλέκτης θα είναι εκτεθειμένο σε εξωτερικό χώρο, θα είναι απαραίτητο να είναι ανθεκτικό στις κλιματικές συνθήκες της περιοχής στην οποία βρίσκεται
- Χαμηλό βάρος, το οποίο σχετίζεται με την ευκολία κατασκευής, την ευκολία μεταφοράς, καθώς επίσης και με την ευκολία με την οποία είναι δυνατόν να γίνει η στήριξη

Τα πιθανά υλικά τα οποία είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν για μία τέτοια κατασκευή είναι τα παρακάτω:

- Λείες μεταλλικές επιφάνειες. Συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα είναι το αλουμίνιο, ή ο ανοξείδωτος χάλυβας. Έχουν χαμηλό κόστος, είναι εύκολα στην κατασκευή, υπάρχει ευελιξία όσον αφορά το σχήμα τους, αλλά μειονεκτούν όσον αφορά το ποσοστό ανακλώμενης ακτινοβολίας, και στην αντοχή στην διάβρωση λόγω κλιματικών συνθηκών.
- Επόμενη πιθανή επιλογή είναι υάλινα κάτοπτρα με επίστρωση μετάλλου στην εσωτερική τους πλευρά (συνήθως αλουμίνιο, ή και άργυρος), όπως στα οικιακά κάτοπτρα. Ο άργυρος έχει υψηλότερη ανακλαστικότητα, αλλά μεγαλύτερο κόστος. Ενδεικτικά αναφέρεται, ότι ο λείος άργυρος, έχει ανακλαστικότητα 98%. Καθώς όμως, μεταξύ της φωτεινής πηγής και της στρώσης αργύρου παρεμβάλλεται η γυάλινη επιφάνεια, η ανακλαστικότητα ελαττώνεται ελαφρώς και είναι της τάξης του 98%. Κάτοπτρα με επίστρωση αλουμινίου παρουσιάζουν χαμηλότερο επίπεδο ανακλαστικότητας, έχοντας όμως μικρότερο κόστος. Τα γυάλινα κάτοπτρα, είναι ανθεκτικά σε κλιματικές συνθήκες, αλλά είναι βαρύτερα, και δεν υπάρχει ευελιξία όσον αφορά την μορφοποίησή τους, σε σύγκριση με τα μεταλλικά κάτοπτρα.

#### 4.4.2 Διάσταση κατόπτρου

Όπως είναι προφανές, η διάσταση του ηλιακού συλλέκτη, εξαρτάται από την επιθυμητή ισχύ του προς κατασκευή συστήματος. Για δεδομένο προσανατολισμό, η συνολική επιφάνεια του ηλιακού συλλέκτη, δίνεται από την παρακάτω σχέση [6]:

$$A = \frac{P}{\eta DNI}$$

Με βάση την επιφάνεια, θεωρώντας μία ενιαία επιφάνεια παραβολικού κατόπτρου, η διάμετρος δίνεται από την σχέση:

$$d = 2 \sqrt{\frac{P}{\pi \eta DNI}}$$

Όπου

$P$ : Η επιθυμητή ηλεκτρική ισχύς,

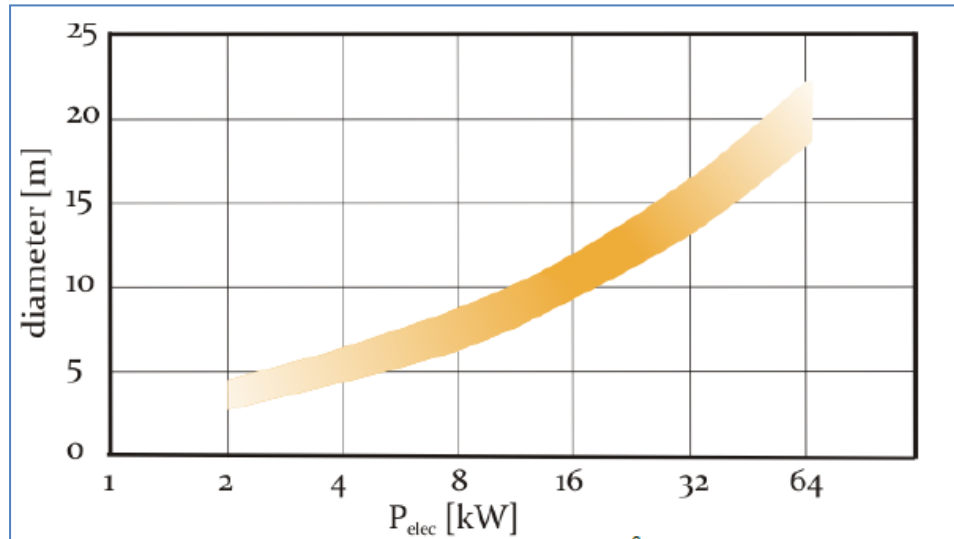
$\eta$ : Η συνολική απόδοση του συστήματος μηχανή Stirling, ηλιακός συλλέκτης, ηλεκτρογεννήτρια

$A$ : Η επιφάνεια του ηλιακού συλλέκτη

$d$ : Η διάμετρος του ηλιακού συλλέκτη

DNI: Είναι ένα φυσικό μέγεθος, το οποίο ονομάζεται Direct Normal Irradiance. Ορίζεται ως το ποσό ηλιακής ακτινοβολίας το οποίο προσπίπτει σε μία επιφάνεια, όταν το κάθετο διάνυσμα προς αυτήν είναι στραμμένο προς τον ήλιο.

Στο παρακάτω διάγραμμα, παρουσιάζεται η εξάρτηση της διαμέτρου με βάση την επιθυμητή επιτυγχανόμενη ισχύ για  $DNI = 1000 \frac{W}{m^2}$  [6], ο οποίος είναι εφικτός αριθμός για περιοχές με υψηλό επίπεδο ηλιοφάνειας.



Σχήμα 43: Εξάρτηση Ισχύος από διάμετρο ηλιακού συλλέκτη [6]

Για την διαστασιολόγηση ενός κατόπτρου στο συγκεκριμένο πρόβλημα, όπου εξετάζεται η παραγωγή ισχύος 3.2 kW, θεωρούνται τα εξής:

- Απόδοση κατόπτρου της τάξης του 85% το οποίο αντιστοιχεί σε γυάλινο κάτοπτρο με επίστρωση αλουμινίου [8].
- Απόδοση ηλεκτρογεννήτριας της τάξης του 90%, το οποίο είναι μία συντηρητική προσέγγιση για μία ηλεκτρογεννήτρια
- Απόδοση μηχανής Stirling της τάξης του 20%, όπως αναλύθηκε παραπάνω

Με βάση τις παραπάνω τιμές απόδοσης, η συνολική απόδοση του συστήματος θα είναι της τάξης του  $\eta = 0.9 \cdot 0.85 \cdot 0.2 = 0.15$  ή 15%.

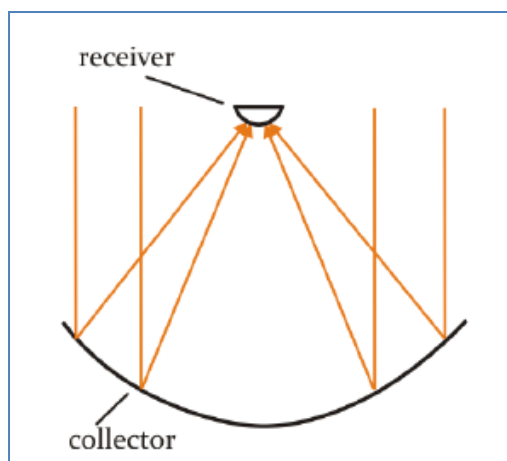
Έχοντας τα παραπάνω ως δεδομένα, η επιφάνεια του ηλιακού συλλέκτη θα πρέπει να είναι της τάξης των  $21 \text{ m}^2$ , το οποίο είναι δυνατόν να δοθεί από έναν ηλιακό συλλέκτη διαμέτρου της τάξεως των 5 μέτρων.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η επιφάνεια αυτή είναι δυνατόν να είναι επιφάνεια πολλαπλών κατόπτρων, το οποίο παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως παρουσιάστηκε σε προηγούμενες παραγράφους.

#### 4.4.3 Διάταξη δέκτη

Ο δέκτης, είναι ένα σημαντικό στοιχείο της διάταξης που προτείνεται, καθώς είναι ο συνδετικός κρίκος, μεταξύ του ηλιακού συλλέκτη και της θερμικής μηχανής Stirling.

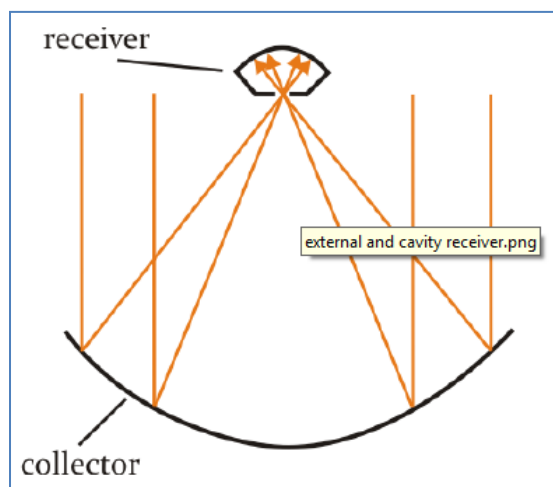
Στους ηλιακούς συλλέκτες υπάρχουν δύο ειδών δέκτες, οι εξωτερικοί (external receivers) και οι δέκτες με κοιλότητα (cavity receivers). Η αρχή λειτουργίας ενός εξωτερικού δέκτη, φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 44: Αρχή λειτουργίας direct δέκτη [6]

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, ο εξωτερικός δέκτης προσλαμβάνει ακτινοβολία από πολλές κατευθύνσεις. Οι εξωτερικοί δέκτες, παρουσιάζουν όμως μία σειρά μειονεκτημάτων, το σημαντικότερο των οποίων είναι οι θερμικές απώλειες, ειδικότερα, οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας, καθώς η επιφάνεια είναι εκτεθειμένη στο περιβάλλον, και οι θερμοκρασίες που επιτυγχάνονται είναι εξαιρετικά υψηλές.

Για την αντιστάθμιση του παραπάνω μειονεκτήματος, επιλέγονται οι δέκτες με κοιλότητα (cavity receiver). Η αρχή λειτουργίας ενός δέκτη με κοιλότητα, παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 45: Αρχή λειτουργίας δέκτη με κοιλότητα (cavity receiver) [6]

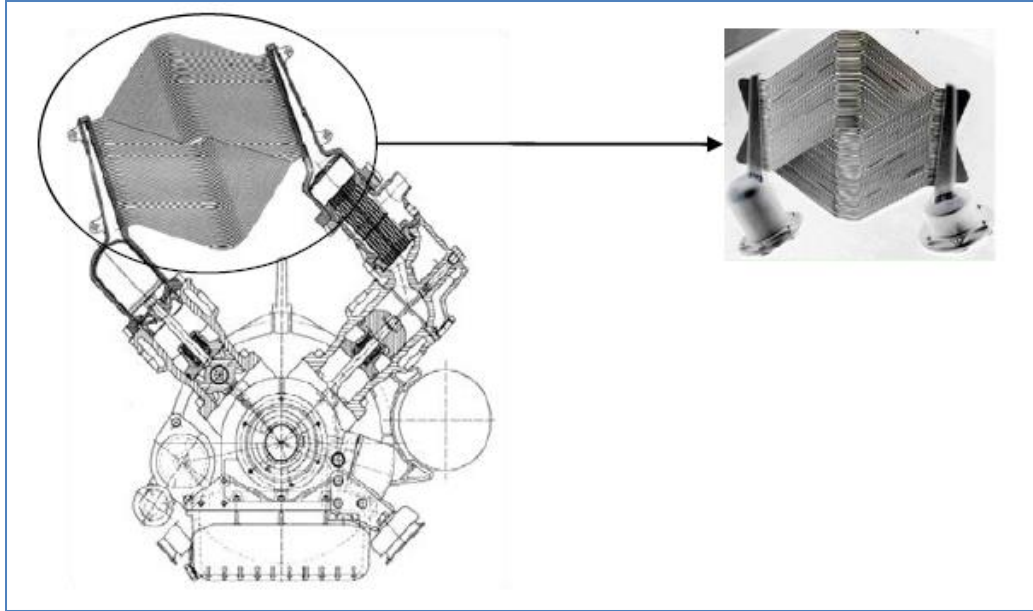
Σε έναν δέκτη με κοιλότητα, ένα μεγάλο μέρος της ανακλώμενης ακτινοβολίας από το κάτοπτρο, παραμένει εντός της κοιλότητας, οπότε η απώλεια θερμότητας, λόγω ακτινοβολίας είναι μικρότερη. Η απορρόφηση θερμότητας εντός της κοιλότητας είναι υψηλότερη από την απορρόφηση θερμότητας της εσωτερικής της επιφάνειας. Εκτός αυτού, λόγω του σχήματος του δέκτη, η απώλεια θερμότητας λόγω συναγωγής είναι και αυτή μικρότερη.

Καθώς οι δέκτες με κοιλότητα, παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους εξωτερικούς, μόνον τέτοιοι τύποι δεκτών χρησιμοποιούνται σε ηλιακές μηχανές Stirling. Οι εξωτερικοί δέκτες συνήθως χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές, όπου η θερμοκρασία λειτουργίας είναι μικρότερη.

Καθώς οι δέκτες με κοιλότητα είναι συνήθως οι προτιμώμενοι σε ηλιακές μηχανές Stirling, θα γίνει μία σύντομη αναφορά σε αυτή την κατηγορία.

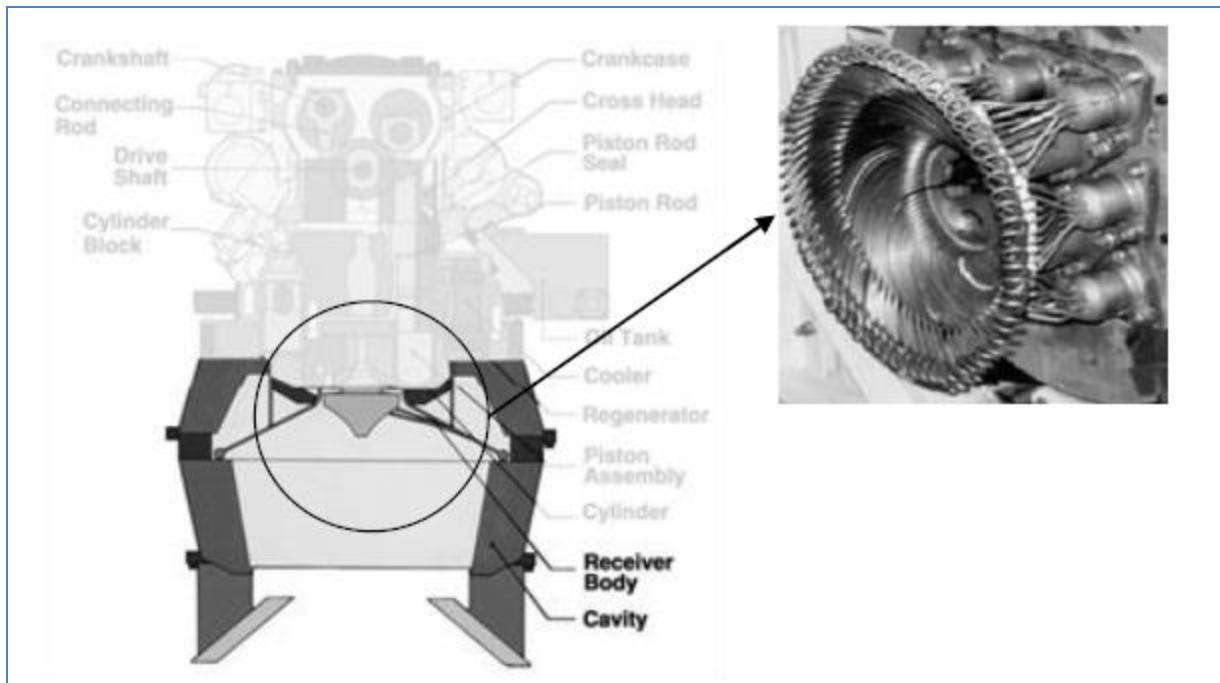
Οι δέκτες με κοιλότητα είναι δυνατόν με την σειρά τους να χωριστούν σε δύο υποκατηγορίες, στους άμεσους δέκτες (direct illumination receiver) και έμμεσους δέκτες (indirect illumination receivers).

Σε έναν direct illumination receiver, η συγκεντρωμένη ακτινοβολία θερμαίνει το λειτουργούν μέσο της θερμικής μηχανής, το οποίο βρίσκεται εντός μίας διάταξης μεγάλου αριθμού σωλήνων μικρής διαμέτρου. Πρόκειται απλούστερη διάταξη δέκτη, σε σύγκριση με έμμεσο. Παράδειγμα άμεσου δέκτη απεικονίζεται στα παρακάτω σχήματα [6].



Σχήμα 46: Παράδειγμα από άμεσο δέκτη (direct illumination receiver) [6]

Παράδειγμα τοποθέτησης ενός direct illumination receiver σε μία μηχανή Stirling, απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.

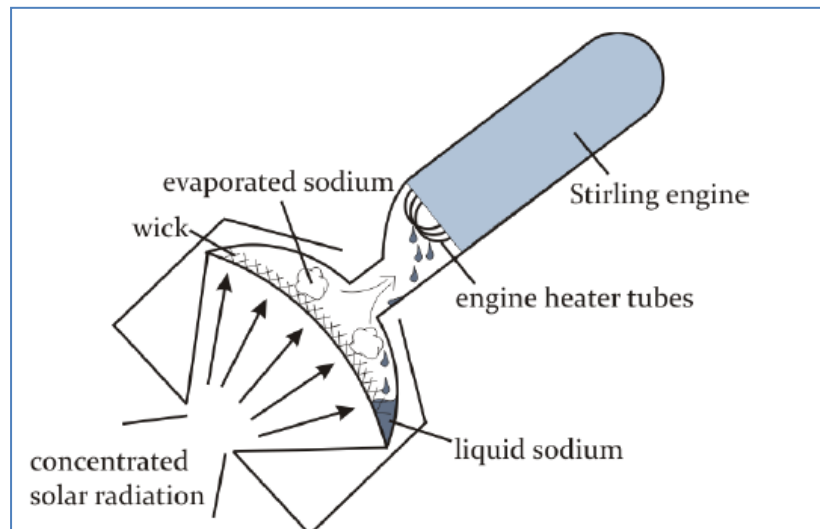


Σχήμα 47: Παράδειγμα άμεσου δέκτη, τοποθετημένου σε διάταξη μηχανής Stirling [6]



Σε έναν έμμεσο δέκτη, το λειτουργούν μέσο, θερμαίνεται από ένα ενδιάμεσο ρευστό, το οποίο χρησιμοποιείται μόνον γι αυτόν τον σκοπό. Το ενδιάμεσο ρευστό θερμαίνεται στην επιφάνεια του δέκτη, εξατμίζεται, και εν συνέχεια ψύχεται ερχόμενο σε επαφή με διάταξη σωλήνων που περιέχουν το λειτουργούν μέσο της μηχανής Stirling.

Η αρχή λειτουργίας ενός έμμεσου δέκτη απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 48: Αρχή λειτουργίας έμμεσου δέκτη [6]

Οι έμμεσοι δέκτες παρουσιάζουν μία σειρά πλεονεκτημάτων σε σχέση με τους άμεσους. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα είναι ότι η λειτουργία του θερμοδοχείου της μηχανής Stirling πραγματοποιείται σε σταθερή θερμοκρασία, σε αντίθεση με τον άμεσο δέκτη, ο οποίος λόγω της έκθεσής του σε μεγάλη ένταση ακτινοβολίας είναι δυνατόν να παρουσιάσει μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές κατά την λειτουργία του. Εκτός αυτού, λόγω της αλλαγής φάσης, επιτρέπει μεγαλύτερους ρυθμούς μεταφοράς θερμότητας.

Ένα επίσης σημαντικό πλεονέκτημα ενός έμμεσου δέκτη, είναι ότι η ύπαρξη ενός ενδιάμεσου μέσου μεταξύ της μηχανής Stirling και του δέκτη, διαχωρίζει το πρόβλημα της βελτιστοποίησης της μηχανής Stirling, από την βελτιστοποίηση του δέκτη, παρέχοντας μεγαλύτερη ευελιξία στον σχεδιασμό. Επίσης, προσθέτει την ευελιξία της δυνατότητας εγκατάστασης καυστήρων, μετατρέποντας την διάταξη σε υβριδική. Π.χ. σε ώρες όπου δεν

υπάρχει ηλιοφάνεια, είναι δυνατόν να εγκατασταθούν καυστήρες, οι οποίες προσδίδουν θερμότητα για την λειτουργία της μηχανής Stirling.

Το μειονέκτημα ενός έμμεσου δέκτη είναι η πολυπλοκότητά του, το οποίο προσθέτει σε αύξηση πιθανότητας δυσλειτουργιών, καθώς επίσης και στο κόστος συντήρησης.

#### 4.4.4 Οικονομική Αξιολόγηση διάταξης

Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, η τεχνολογία των μηχανών Stirling δεν έχει το επίπεδο ωριμότητας ανταγωνιστικών τεχνολογιών, όπως π.χ. μηχανές εσωτερικής καύσης. Εκτός από τις τεχνικές προκλήσεις, η έρευνα επίσης είναι απαραίτητο να στραφεί στην ελάττωση του κόστους.

Το κόστος των μηχανών Stirling αυξάνεται σημαντικά, λόγω ορισμένων τεχνικών χαρακτηριστικών τους. Ενδεικτικά αναφέρονται κάποια από αυτά, παρακάτω:

- Το θερμοδοχείο λειτουργεί σε υψηλή θερμοκρασία, και απαιτεί χρήση εξωτικών υλικών υψηλού κόστους
- Το ψυχοδοχείο απαιτεί μεγάλη επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας, οπότε αυτό απαιτεί μεγάλο λόγο επιφάνειας προς όγκο, γεγονός το οποίο αυξάνει την πολυπλοκότητα της κατασκευής, επομένως και το κόστος
- Ο αναγεννητήρας απαιτεί κατασκευή πυκνού πλέγματος, το οποίο θα πρέπει να λειτουργεί σε θερμοκρασίες κοντά στην θερμοκρασία του ψυχοδοχείου, απαιτώντας την χρήση ειδικών υλικών που αυξάνουν το κόστος.
- Οι μηχανές Stirling, καθώς είναι κλειστά συστήματα, απαιτούν διατάξεις που εξασφαλίζουν την στεγανότητά τους, γεγονός το οποίο αυξάνει την τεχνική δυσκολία και επομένως το κόστος κατασκευής.

Η αντιμετώπιση των ανωτέρω προβλημάτων, δεν είναι μονοσήμαντη. Κάθε κατασκευαστής, έχει την δική του προσέγγιση. Π.χ. μία πιθανή προσέγγιση, που ακολουθείται από την εταιρεία BSR Solar, είναι η ελάττωση της θερμοκρασίας του θερμοδοχείου, το οποίο εξαλείφει την ανάγκη χρήσης ειδικών υλικών.

Η τάξη μεγέθους του κόστους μίας διάταξης μηχανής Stirling 3,2 kW, όπως περιγράφηκε παραπάνω, θα εκτιμηθεί, με βάση κόστη τα οποία εκτιμήθηκαν από εταιρείες οι οποίες εξειδικεύονταν στο αντικείμενο, και υπάρχουν δημοσιευμένα στοιχεία στην βιβλιογραφία [2].

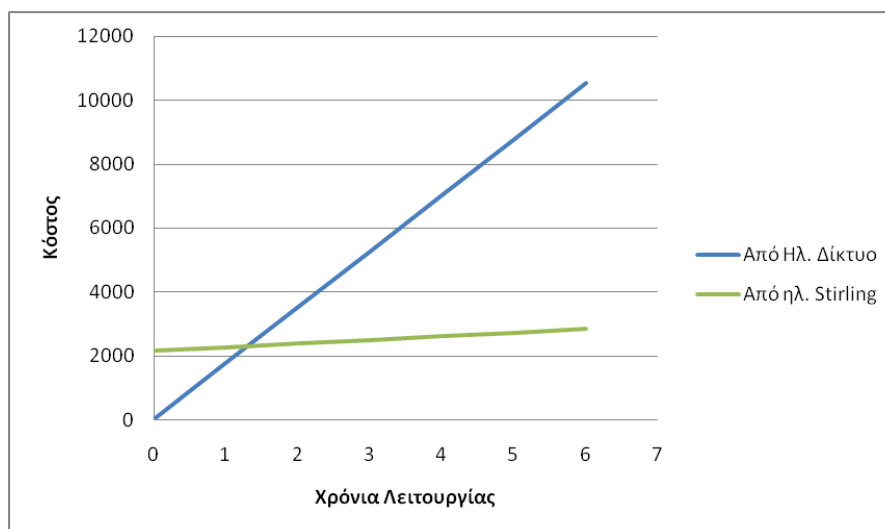
Η πλειοψηφία των κατασκευαστών μηχανών Stirling, εκτιμά το κόστος, βασισμένη σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο παραγωγής αριθμών μονάδων ανά έτος. Με βάση δεδομένα τα οποία δημοσιεύτηκαν, εκτίμηση κόστους παραγωγής μίας μηχανής Stirling, η οποία λειτουργεί με ηλιακή ενέργεια είναι της τάξης των 675 USD/kW [2].

Οι κατασκευαστές μηχανών Stirling έχουν σαν στόχο, κύκλο ζωής μίας μηχανής Stirling 40000 ωρών [2]. Ρεαλιστικότερες εκτιμήσεις, δίνουν στα διάφορα μέρη της μηχανής Stirling κύκλο ζωής 5000 - 10000 ωρών, αυξάνοντας το κόστος λειτουργίας και συντήρησης και δίνουν τάξη μεγέθους σαν 0.5 - 1 cents/kWh.

Με βάση το παραπάνω, η κατασκευή μίας ηλιακής μηχανής Stirling για οικιακή χρήση, η οποία παράγει 3,2 kW θα κόστιζε 2160 USD, και μία συντηρητική εκτίμηση κόστους συντήρησης/λειτουργίας θα ήταν 1 cent/kWh.

Μέση κατανάλωση ηλεκτρισμού ανά νοικοκυριό στις ΗΠΑ είναι 11700 kWh/χρόνο ή 975 kWh/μήνα [9]. Επίσης, μία αντιπροσωπευτική τιμή ηλεκτρικής ισχύος στον καταναλωτή στις ΗΠΑ είναι 15 cents/kWh [12].

Με βάση τα παραπάνω, στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η αντιπαραβολή της επένδυσης σε μία ηλιακή μηχανή Stirling σε σχέση με χρήση ηλεκτρισμού από το δίκτυο στις ΗΠΑ.



Σχήμα 49: Απόσβεση επένδυσης από εγκατάσταση μηχανής Stirling

Με βάση τα παραπάνω, συμπεραίνεται, ότι η επένδυση σε μία εγκατάσταση μηχανής Stirling θα έχει απόσβεση σε λιγότερο από δύο έτη, και θα είναι οικονομικά συμφέρουσα επιλογή μετά από αυτό το διάστημα σε σχέση με την συμβατική χρήση ισχύος από το δίκτυο.

Τονίζεται επίσης, ότι διάστημα ενός έτους αντιστοιχεί σε τάξη μεγέθους 8000 ωρών λειτουργίας, το οποίο είναι μακριά από το τέλος του αναμενόμενου κύκλου ζωής της μηχανής Stirling ο οποίος, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, αναμένεται να είναι της τάξης των 40000 ωρών.

## 4.5 Παραγωγή Ηλεκτρισμού με μηχανή Stirling και θερμότητα από Βιομάζα

Στο παρόν κεφάλαιο, θα εξεταστεί η παραγωγή ηλεκτρισμού από βιομάζα. Κατ' αρχήν θα γίνει μία σύντομη παρουσίαση των τεχνολογιών που υπάρχουν, τις πιθανές τροφοδοσίες, και επίσης μία εκτίμηση κόστους.

### 4.5.1 Τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρισμού από βιομάζα

Η τεχνολογία παραγωγής θερμότητας από βιομάζα, έχει τρία βασικά συστατικά:

- Το είδος της τροφοδοσίας βιομάζας
- Ο τρόπος μετατροπής βιομάζας σε θερμότητα
- Η τεχνολογία μετατροπής θερμότητας σε ηλεκτρισμό

Όσον αφορά την τροφοδοσία της βιομάζας, τα σημαντικά στοιχεία είναι η θερμογόνος δύναμη, η περιεκτικότητα στάχτης, ομοιογένεια και περιεκτικότητα σε υγρασία. Τα χαρακτηριστικά αυτά, έχουν επίπτωση στην παραγόμενη ενέργεια, στο κόστος μεταφοράς και στην αποθήκευση. Οι πιθανές πηγές βιομάζας παρουσιάζονται εν συντομία στον παρακάτω πίνακα:

Υπαίθριες πηγές βιομάζας	Αστικές πηγές βιομάζας
Κατάλοιπα από δασικές εκτάσεις, ή κατεργασία ξύλου	Απόβλητα από ξυλεία η οποία χρησιμοποιείται σε αστικές εφαρμογές (συσσκευασίες, παλέτες, κτλ)
Αγροτικά απόβλητα από καλλιέργειες	Βιοαέριο, από αστικά απόβλητα
Φυτά καλλιεργημένα ειδικά για να χρησιμοποιηθούν ως βιοκάυσμα (energy crops)	Αέρια από υγειονομικούς χώρους ταφής απορριμμάτων
Βιοαέριο από κτηνοτροφικά απόβλητα	Απόβλητα από κατεργασία τροφίμων

Πίνακας 12: Πιθανές πηγές βιομάζας [11]

Η βιομάζα είναι δυνατόν να μετατραπεί σε ενέργεια, μέσω θερμοχημικών διεργασιών (αεριοποίηση και πυρόλυση), ή βιοχημικές διεργασίες (αναερόβια χώνευση). Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι διεργασίες με τις οποίες η βιομάζα είναι δυνατόν να μετατραπεί σε ενέργεια, μέσω θερμοχημικών διεργασιών.

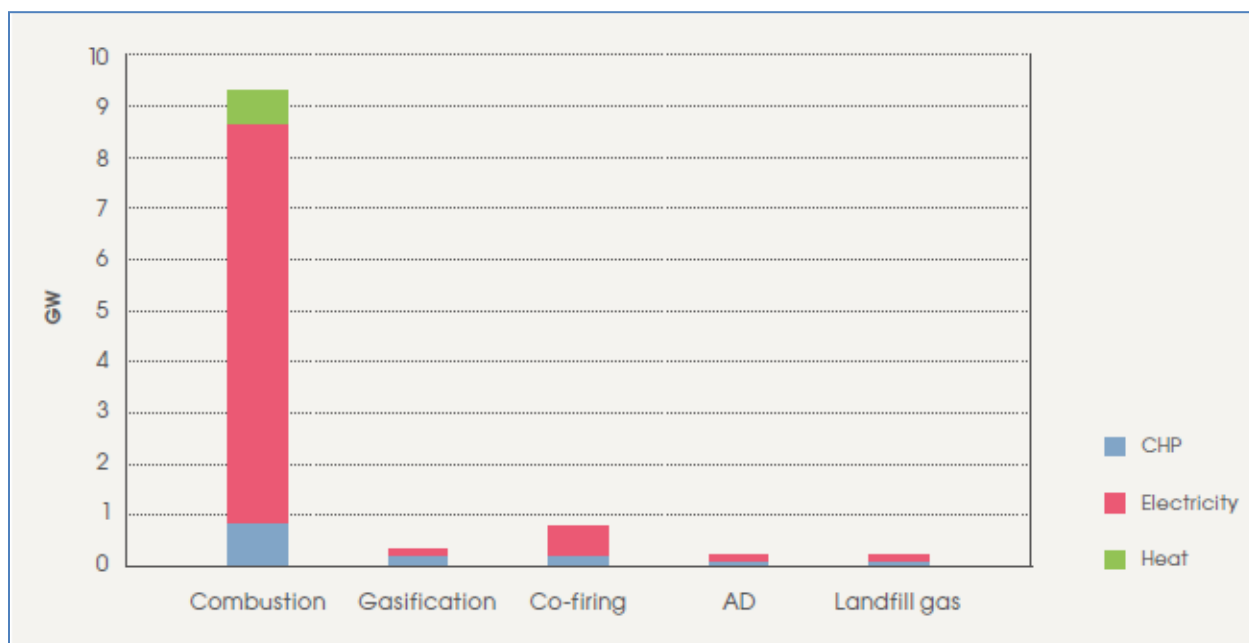
Είδος διεργασίας	Περιγραφή
<b>Καύση</b>	Κατά την παραγωγή ενέργειας με καύση βιομάζας, χρησιμοποιείται ένας κλασικός κύκλος Rankine. Η βιομάζα καίγεται, με την ενέργεια παράγεται ατμός, ο οποίος κινεί τουρμπίνα, η οποία με την σειρά της κινεί γεννήτρια παραγωγής ρεύματος. Οι αποδόσεις σε μία τέτοια διάταξη κυμαίνονται μεταξύ 23-25%
<b>Αεριοποίηση</b>	Η αεριοποίηση επιτυγχάνεται μέσω της μερικής καύσης της βιομάζας σε περιβάλλον μερικής έλλειψης οξυγόνου, οπότε παράγεται το αέριο σύνθεσης (syngas). Ο αεριοποιητής είναι δυνατόν να είναι σταθερός, ή ρευστοποιημένης κλίνης. Το αέριο που παράγεται είναι μείγμα CO, CO <sub>2</sub> , στάχτης, και υδρογόνου. Αφού παραχθεί, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί σε τουρμπίνες, ή κυψέλες καυσίμου.
<b>Πυρόλυση</b>	Η πυρόλυση είναι μία υποκατηγορία της αεριοποίησης. Κατά την πυρόλυση, η μερική καύση διακόπτεται σε μία χαμηλότερη θερμοκρασία (450 - 600 C), το οποίο δημιουργεί βιοντήζελ, όπως επίσης και στερεά/αέρια προϊόντα. Το παραγόμενο βιοντήζελ είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί απ' ευθείας σαν καύσιμο για την παραγωγή ηλεκτρισμού

Πίνακας 13: Τρόποι παραγωγής ενέργειας από βιομάζα, μέσω θερμοχημικών διεργασιών [11]

Εκτός από τις θερμοχημικές διεργασίες, υπάρχουν και η αναερόβια χώνευση, η οποία είναι βιοχημική διεργασία. Κατά την αναερόβια χώνευση, γίνεται αποσύνθεση ενός βιολογικού αποβλήτου (οποιασδήποτε προέλευσης) σε αναερόβιες συνθήκες υψηλής υγρασίας και θερμοκρασίας. Με τον τρόπο αυτό παράγεται αέριο μείγμα, αποτελούμενο από μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα, το οποίο ονομάζεται βιαέριο. Το αέριο αυτό είναι δυνατόν, με καύση, να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή θερμότητας με χρήση τουρμπίνας, κυψελών καυσίμου, μηχανών εσωτερικής καύσης ή μηχανές Stirling.

Από τις παραπάνω τεχνολογίες που περιγράφηκαν, η περισσότερο διαδεδομένη, είναι η καύση, καθώς είναι η απλούστερη και παρουσιάζει το μικρότερο κόστος [11].

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η έκταση της ανάπτυξης, για καθεμία από τις τεχνολογίες που περιγράφηκαν παραπάνω [11].



Σχήμα 50: Έργα παραγωγής ηλεκτρισμού από βιομάζα υπό κατασκευή, ή εξασφαλισμένη χρηματοδότηση. Δεδομένα για 2011, από [11]

#### 4.5.2 Διάταξη και κόστος παραγωγής ενέργειας από βιομάζα

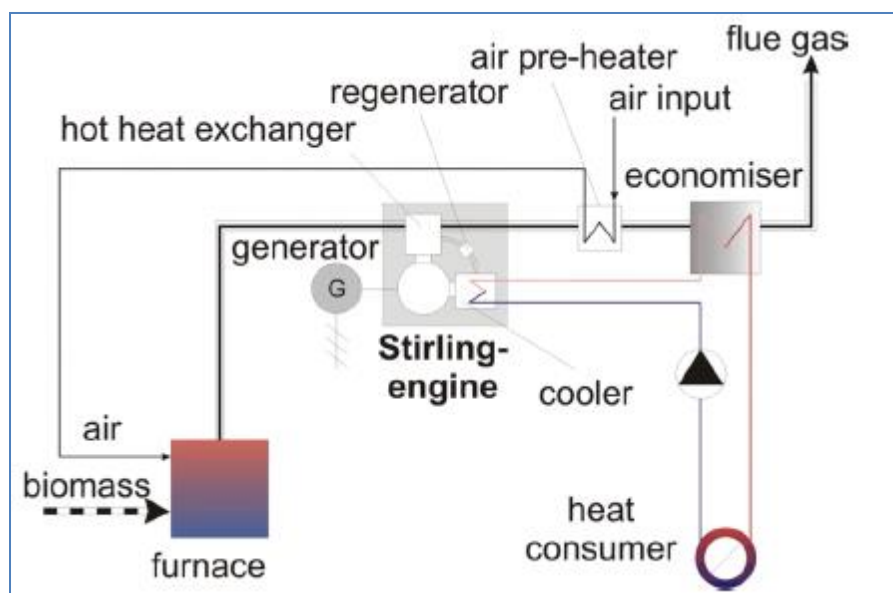
Στον παρακάτω πίνακα απεικονίζονται ενδεικτικά κόστη κατασκευής, για καθεμία από τις τεχνολογίες που παρουσιάστηκαν παραπάνω:

Είδος Τεχνολογίας	Κόστος επένδυσης (USD/kW)	Κόστος λειτουργίας/συντήρησης
Απλός Καυστήρας (stoker boiler)	1880 - 4260	0.06 - 0.21
Καυστήρας ρευστοποιημένης κλίνης	2170 - 4500	0.07 - 0.21
Αεριοποιητής	2140 - 5700	0.07 - 0.24
Καυστήρας με σύστημα CHP	3550 - 6820	0.07 - 0.29
Αεριοποιητής με σύστημα CHP	5570 - 6545	0.11 - 0.28
Αέριο από υγειονομική ταφή απορριμμάτων	1917 - 2436	0.09 - 0.12
Σύστημα αναερόβιας χώνευσης (digester)	2574 - 6104	0.06 - 0.15

Πίνακας 14: Κόστη εγκατάστασης και λειτουργίας ανά τεχνολογία [11]

Με βάση τα παραπάνω, και κριτήρια κόστους, η προτιμώμενη διάταξη για παραγωγή ενέργειας από βιομάζα θα είναι διάταξη καύσης.

Ένα διάγραμμα μίας διάταξης, η οποία συνδυάζει την παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού από καύση βιομάζας και μηχανή Stirling απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 51: Διάταξη παραγωγής ηλεκτρισμού, με μηχανή Stirling και θερμότητα από βιομάζα [10]

Η διάταξη, περιλαμβάνει καυστήρα, από τον οποίο παράγεται η θερμότητα από βιομάζα, η οποία χρησιμοποιείται σαν θερμοδοχείο για την μηχανή Stirling, η οποία μέσω της γεννήτριας παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Μέρος της θερμότητας που δεν χρησιμοποιείται για ηλεκτρισμό, ανακτάται σε απ' ευθείας κατανάλωση θερμότητας.

Το κόστος για μία τέτοια διάταξη αποτελείται από τρία κομμάτια: α) Κόστος αγοράς, β) Κόστος λειτουργίας/συντήρησης, και γ) κόστος πρώτων υλών. Ενδεικτικό κόστος πρώτων υλών, όπως αυτό υφίσταται στις ΗΠΑ, και δεδομένα θερμογόνου δύναμης παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα [11]:

	Higher heating value MJ/kg	Lower heating value MJ/kg
<b>Agricultural Residues</b>		
Corn stalks/stover	17.6 - 20.5	16.8 - 18.1
Sugarcane bagasse	15.6 - 19.4	15 - 17.9
Wheat straw	16.1 - 18.9	15.1 - 17.7
Hulls, shells, prunings	15.8 - 20.5	
Fruit pits		
<b>Herbaceous Crops</b>		
Miscanthus	18.1 - 19.6	17.8 - 18.1
Switchgrass	18.0 - 19.1	16.8 - 18.6
Other grasses	18.2 - 18.6	16.9 - 17.3
Bamboo	19.0 - 19.8	
<b>Woody Crops</b>		
Black locust	19.5 - 19.9	18.5
Eucalyptus	19.0 - 19.6	18.0
Hybrid poplar	19.0 - 19.7	17.7
Douglas fir	19.5 - 21.4	
Poplar	18.8 - 22.4	
Maple wood	18.5 - 19.9	
Pine	19.2 - 22.4	
Willow	18.6 - 20.2	16.7 - 18.4
<b>Forest Residues</b>		
Hardwood wood	18.6 - 20.7	
Softwood wood	18.6 - 21.1	17.5 - 20.8
<b>Urban Residues</b>		
MSW	13.1 - 19.9	12.0 - 18.6
RDF	15.5 - 19.9	14.3 - 18.6
Newspaper	19.7 - 22.2	18.4 - 20.7
Corrugated paper	17.3 - 18.5	17.2
Waxed cartons	27.3	25.6

Πίνακας 15: Ενδεικτική θερμογόνος δύναμη πρώτων υλών, όπως αυτά υφίστανται στις ΗΠΑ [11]

Η βασική διαφορά με την ηλιακή Stirling είναι ότι στην περίπτωση της βιομάζας, η 24ωρη λειτουργία είναι εφικτή. Κατά συνέπεια η επίτευξη 1.33 kW ισχύος, απαιτεί μηχανή εγκατεστημένης ισχύος 1.33 kW

Με βάση τα παραπάνω, μία εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρισμού 1,33 kW που απευθύνεται σε νοικοκυριό, θα είχε ενδεικτικό κόστος εγκατάστασης, θα είχε τάξη μεγέθους 3000 USD/kWh [11]. Μέγιστο λειτουργικό κόστος αναμένεται να είναι 0.21 USD/kWh, χωρίς



ακόμα να συνυπολογιστούν οι πρώτες ύλες. Με βάση το κόστος που αναφέρθηκε, το λειτουργικό κόστος ανά μήνα είναι της τάξης των 300 USD/μήνα

Θεωρώντας μία συντηρητική απόδοση συστήματος 20% μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας σε θερμική, για 1.33 kW, απαιτούνται 6.65 kW θερμότητας. Θεωρώντας π.χ. ότι η πρώτη ύλη είναι μαλακό ξύλο, αυτό έχει αναμενόμενη θερμογόνο δύναμη 17.5 MJ/kg (συντηρητική εκτίμηση). Κατά συνέπεια, η παραγωγή 10 kW θερμότητας, απαιτεί:

$$(6.65 \text{ kW}) \cdot \left(17,5 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}\right)^{-1} \cdot \left(1000 \frac{\text{kJ}}{\text{MJ}}\right)^{-1} \cdot 3600 = 1.368 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Θεωρώντας έναν πλήρη κύκλο λειτουργίας ενός μήνα στην μέγιστη ισχύ, απαιτούνται 985 kg/μήνα. Όσον αφορά το κόστος της πρώτης ύλης, θα θεωρηθεί η συντηρητική τιμή των 50 USD/tonne, ή 0.05 USD/kg [11]. Κατά συνέπεια, το μηνιαίο κόστος της πρώτης ύλης θα είναι  $0.05 * 985 = 49.2 \text{ USD/μήνα}$ .

Κόστος λειτουργίας:

$$975 \frac{\text{kWh}}{\text{μήνα}} \cdot 0.21 \frac{\text{USD}}{\text{kWh}} = 204.5 \frac{\text{USD}}{\text{μήνα}}$$

Με βάση κόστος 0.05 USD/kg, το κόστος πρώτων υλών ανά μήνα θα ήταν 50 USD/μήνα. Κατά συνέπεια, το λειτουργικό κόστος θα ήταν το άθροισμα του κόστους λειτουργίας/συντήρησης και του κόστους πρώτων υλών, δηλ. της τάξης των 250 USD/μήνα.

Με βάση τα παραπάνω, αν ένα νοικοκυριό στρεφόταν σε μία μηχανή Stirling με θερμότητα από βιομάζα, μόνο το κόστος λειτουργίας/συντήρησης/πρώτων υλών θα ήταν υψηλότερο από την αγορά ρεύματος από το δίκτυο, κατά συνέπεια σαν διάταξη κρίνεται ως μη συμφέρουσα για μικρές τιμές ισχύος. Τέτοια διάταξη θα ήταν δυνατόν να κατασκευαστεί και να είναι οικονομικά βιώσιμη, μόνον σε μεγάλες κλίμακες, όπου θα ίσχυε η οικονομία κλίμακας.

## 4.6 Λειτουργία προτεινόμενης διάταξης με ηλιακή ενέργεια

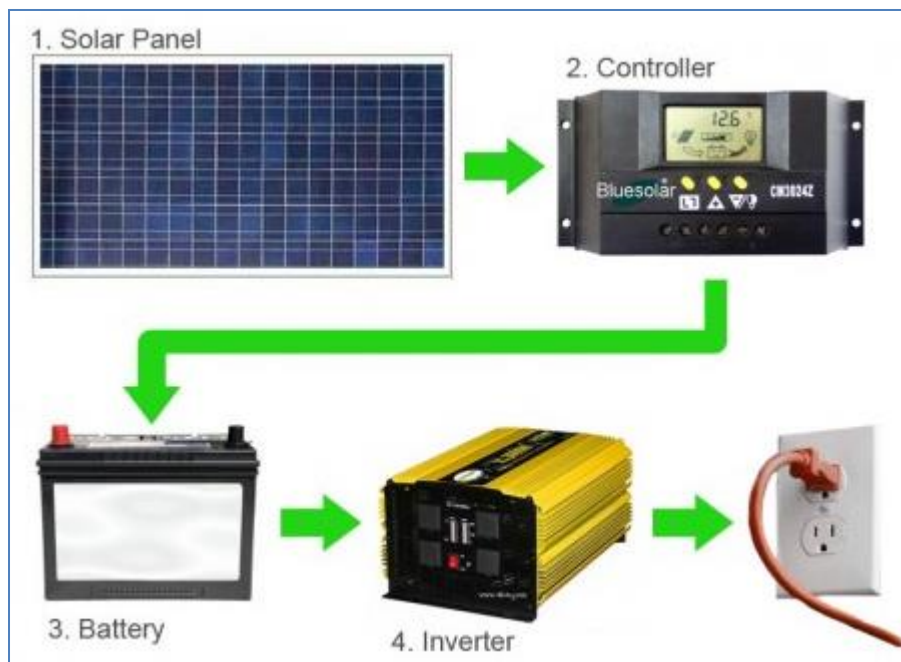
Η απ' ευθείας παραγωγή ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκών συστημάτων (solar panels) είναι μία τεχνολογία η οποία έχει φτάσει σε ένα σημαντικό επίπεδο ωριμότητας, και το ποσοστό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται συνεχώς. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η εγκατεστημένη ισχύς solar panels στις ΗΠΑ, έχει αυξηθεί από 1.2 GW το 2008, σε 30 GW σήμερα. Από το 2010 έως σήμερα, το κόστος ηλιακών συλλεκτών στις ΗΠΑ έχει μειωθεί κατά 50% [12].

### 4.6.1 Βασικά στοιχεία ενός ηλιακού συλλέκτη

Τα βασικά στοιχεία ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, είναι τα εξής:

- **Ηλιακοί συλλέκτες:** Συλλέγουν την ηλιακή ενέργεια και την μετατρέπουν σε ηλεκτρισμό
- **Κύκλωμα αυτομάτου ελέγχου:** Προστατεύει την μπαταρία, ρυθμίζοντας την ροή ηλεκτρικού ρεύματος
- **Μπαταρίες:** Αποθηκεύουν την ηλεκτρική ενέργεια όταν οι ηλιακοί συλλέκτες δεν παράγουν ρεύμα (π.χ. βραδινές ώρες)
- **Inverter:** Μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια από την μπαταρία (DC) σε AC στην σωστή τάση, ώστε να χρησιμοποιηθεί σε οικιακές συσκευές.

Τα διάφορα δομικά στοιχεία ενός φωτοβολταϊκού συστήματος φαίνονται ενδεικτικά στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 52: Βασικά δομικά στοιχεία εγκατάστασης φωτοβολταϊκού συστήματος [14]

Επίσης, ένα πλήρως εγκατεστημένο φωτοβολταϊκό σύστημα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



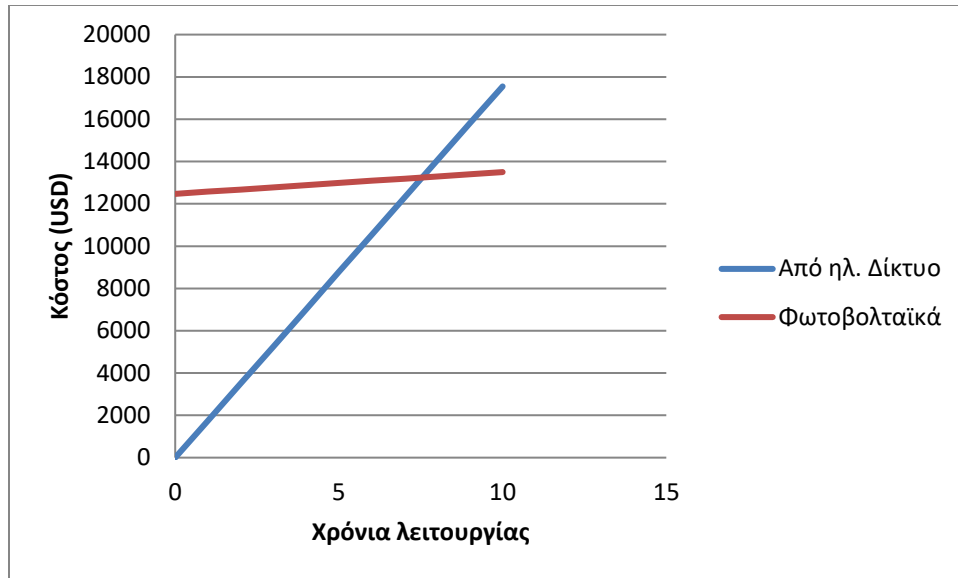
Σχήμα 53: Τυπική εγκατάσταση φωτοβολταϊκού συστήματος σε οικία [14]

Ένα τυπικό φωτοβολταϊκό σύστημα είναι σε θέση να παράξει ενέργεια της τάξης των 100 W/m<sup>2</sup> όταν υπάρχει ηλιοφάνεια. Θεωρώντας μία εκτίμηση ηλιοφάνειας 10 ωρών ανά ημέρα, μία εκτίμηση παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ανά ημέρα είναι 1 kWh/(day\*m<sup>2</sup>).

Δεδομένου του στόχου ισχύος 11700 kWh/χρόνο που ετέθη, με βάση τα παραπάνω, αυτό θα απαιτούσε επιφάνεια εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών 32 m<sup>2</sup>, το οποίο παράγει ισχύ 3.2 kW.

#### 4.6.2 Υπολογισμός κόστους

Ενδεικτικό κόστος ενός φωτοβολταϊκού συστήματος στις ΗΠΑ είναι 3897 USD/kW [15]. Με βάση αυτό το δεδομένο, το κόστος εγκατάστασης ενός τέτοιου συστήματος είναι της τάξης των 12470 USD. Κόστος λειτουργίας και συντήρησης είναι 19 USD/kW\*year, κατά συνέπεια μία εγκατάσταση 5.41 kW θα έχει κόστος λειτουργίας/συντήρησης 103 USD/year. Επίσης, θα έχει χρόνο ζωής 33 χρόνων [15]. Με βάση τα παραπάνω, το διάγραμμα στο οποίο αποσβένεται η επένδυση είναι το παρακάτω:



Σχήμα 54: Σύγκριση εξόδων από φωτοβολταϊκά σε σχέση με αγορά ρεύματος από το ηλεκτρικό δίκτυο

Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα, η αρχική επένδυση θα αποσβεστεί μετά από πάροδο επταετίας.

## 5. Συμπεράσματα-Προτάσεις για μελλοντική Έρευνα

Στην παρούσα εργασία έγινε μία παρουσίαση της αρχής λειτουργίας των μηχανών Stirling, παρουσιάστηκαν μέθοδοι για την διαστασιολόγηση αυτών, και ακολούθως αξιολογήθηκαν λύσεις, με τις οποίες είναι δυνατόν αυτές να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος για οικιακή χρήση.

Δεδομένου ότι οι μηχανές Stirling είναι δυνατόν να χρησιμοποιήσουν οποιαδήποτε πηγή θερμότητας, εξετάστηκαν δύο πιθανές πηγές θερμότητας: α) Ηλιακή ενέργεια με κάτοπτρα, και β) Καύση με βιομάζα. Μεταξύ των δύο, βρέθηκε ότι περισσότερο συμφέρουσα είναι η λύση της ηλιακής ενέργειας, λόγω σαφούς διαφοράς σε λειτουργικό κόστος. Η εγκατάσταση μηχανής Stirling με καύση βιομάζας αποδείχθηκε ως οικονομικά μη βιώσιμη λύση.

Εν συνεχεία έγινε σύγκριση της παραγωγής ενέργειας μεταξύ ηλιακής μηχανής Stirling και φωτοβολταϊκών συστημάτων. Μεταξύ του φωτοβολταϊκού συστήματος και της ηλιακής μηχανής Stirling, ως οικονομικότερη λύση βρέθηκε η ηλιακή μηχανή Stirling.

Και στις τρεις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, είναι απαραίτητη η χρήση συσσωρευτή (μπαταρίας), ώστε να καλύψει τις περιπτώσεις όπου δεν παράγεται ρεύμα, ή όταν ζητείται παραπάνω ενέργεια από την εγκατεστημένη ισχύ της μηχανής, αυτό να καλύπτεται απρόσκοπτα, από την ενέργεια που έχει ήδη συσσωρευτεί. Στα ηλιακά συστήματα αυτό είναι εξαιρετικά σημαντικό, καθώς τις ώρες όπου δεν υπάρχει ηλιοφάνεια, η παραγωγή ενέργειας είναι εξ ορισμού μηδενική.

Παρ' όλο που οι μηχανές Stirling βρέθηκαν οικονομικότερες των εναλλακτικών συστημάτων, η τεχνολογία αυτή δεν έχει διαδοθεί τόσο, όσο τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Οι πιθανότεροι λόγοι για αυτό είναι οι εξής:

- Το σχήμα ενός ηλιακού συλλέκτη για θερμική μηχανή Stirling είναι δύσκολο να ενσωματωθεί στην αρχιτεκτονική ενός οικιστικού χώρου
- Η τεχνολογία μηχανών Stirling δεν έχει φτάσει ακόμα το επίπεδο ωριμότητας ανταγωνιστικών τεχνολογιών, όπως π.χ. τουρμπίνες, μηχανές εσωτερικής καύσης, φωτοβολταϊκά.

- Καθώς η τεχνολογία δεν έχει ωριμάσει, δεν υπάρχει ιστορικό εγκατάστασης σε μεγάλη κλίμακα τέτοιων μηχανών, ώστε να αποδειχθεί η αξιοπιστία τους και να κερδίσουν την εμπιστοσύνη του καταναλωτή.

Καθώς οι μηχανές Stirling έχουν λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες, υπάρχουν τεχνικές προκλήσεις σε επίπεδο υλικών κατασκευής. Με την πρόοδο όμως της τεχνολογίας των υλικών, θα υπάρξει σημαντική βελτίωση στην αντιμετώπιση τέτοιου είδους τεχνολογικών δυσκολιών.

Επίσης, με την ανάπτυξη των υπολογιστών και των υπολογιστικών εργαλείων, μειώνεται το κόστος των πειραμάτων ανάπτυξης μηχανών Stirling, με αποτέλεσμα να διευκολυνθεί σε μεγάλο βαθμό η σχετική έρευνα, και η ωρίμανση της τεχνολογίας των μηχανών αυτών να επιταχυνθεί.

Όπως αναφέρθηκε στα παραπάνω κεφάλαια, οι μηχανές Stirling, έχουν θεωρητική απόδοση, αντίστοιχη με τις μηχανές Carnot, γεγονός που τις καθιστά σοβαρές εναλλακτικές προτάσεις όσον αφορά την παραγωγή ενέργειας, εφόσον η τεχνολογία αυτή ωριμάσει, και επιλυθούν συγκεκριμένες τεχνικές προκλήσεις.

## 6. Βιβλιογραφία

- [1] Alan J. Organ, Stirling Cycle Engines, Inner Workings and Design, 1st Edition
- [2] Stirling Engine Assessment, ERPI (Electric Power Research Institute Inc., USA) Report, 2006
- [3] Ν.Γ. Κουμούτσος, Εφηρμοσμένη Θερμοδυναμική, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 1992
- [4] Ιστοσελίδα Πανεπιστημίου του Ohio: <https://www.ohio.edu/mechanical/stirling/>
- [5] William R. Martini, Martini Engineering, Stirling Engine Design Manual, second edition, January 1983, prepared for NASA, Lewis Research Center, Under Grant NSG-3194, for US Dept. of Energy
- [6] Matthias Gunther, Reza Shahbazfar, Advanced CSP Teaching Materials, Chapter 7, Solar Dish Technologies, Deutsches Zentrum fur Luft und Raumfahrt
- [7] US Energy Forum: <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=97&t=3>
- [8] [https://en.wikipedia.org/wiki/Optical\\_coating](https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_coating)
- [9] Ιστοσελίδα, US Energy Administration  
[https://www.eia.gov/electricity/monthly/epm\\_table\\_grapher.cfm?t=epmt\\_5\\_6\\_a](https://www.eia.gov/electricity/monthly/epm_table_grapher.cfm?t=epmt_5_6_a)
- [10] Franko Cotana, et al, Comparison of ORC Turbine and Stirling Engine to Produce Electricity from Gasified Poultry Waste
- [11] International Renewable Energy Analysis, Renewable Energy Technologies: Cost analysis series, June 2012
- [12] US Department of Energy website: <https://energy.gov/eere/solarpoweringamerica/solar-energy-united-states>
- [13] A Guide to Photovoltaic (PV) System Design and Installation. Prepared by Endecon Engineering, for California Energy Commission, Energy Development Division, June 2001
- [14] Solar Power Authority website: <https://www.solarpowerauthority.com/how-much-does-it-cost-to-install-solar-on-an-average-us-house/>
- [15] National Renewable Energy Laboratory website:  
[http://www.nrel.gov/analysis/tech\\_lcoe\\_re\\_cost\\_est.html](http://www.nrel.gov/analysis/tech_lcoe_re_cost_est.html)