

ΧΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΚΥΚΛΟΥ STIRLING ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Κατερίνα Μαρκετάκη και Βασίλης Γκέκας
Εργαστήριο Φαινόμενων Μεταφοράς και Εφαρμοσμένης Θερμοδυναμικής
Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης
Πολυτεχνειούπολη, 731 00 Χανιά

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ένας κατεξοχήν περιβαλλοντικά φιλικός θερμοδυναμικός κύκλος μπορεί να συνδυαστεί με ένα κάτοπτρο/συλλέκτη ηλιακής ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Πολλές τέτοιες μονάδες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και να δώσουν ένα ηλιακό πάρκο για την κάλυψη των αναγκών αιχμής περιοχών με μεγάλη ηλιοφάνεια, όπως η Κρήτη. Οι πρώτες τεχνικοοικονομικές εκτιμήσεις παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία και επιτρέπουν την εξαγωγή ασίδοξων συμπερασμάτων.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

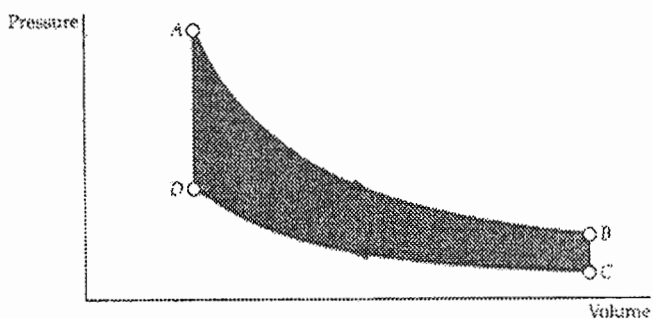
Στις μέρες μας το ενεργειακό πρόβλημα αποτελεί και ένα μείζον περιβαλλοντικό πρόβλημα, λόγω των γνωστών επιπτώσεων που προέρχονται από τις εκπομπές αερίων ρύπων, κινδύνους ατυχημάτων στα λιμάνια προσέγγισης καθώς και στις μακροχρόνιες απειλές από την ταφή πυρηνικών αποβλήτων όταν η λύση του προβλήματος είναι η χρήση της πυρηνικής ενέργειας.

Στην Κρήτη ιδιαίτερα το ενεργειακό πρόβλημα παρουσιάζεται οξύ τους θερινούς μήνες, όταν ο πληθυσμός του νησιού λόγω τουρισμού αυξάνεται. Χαρακτηριστικά ο τουρισμός απορροφά το ήμισυ της κατανάλωσης στον τριτογενή τομέα. Από την άλλη μεριά η Κρήτη παρουσιάζει μεγάλα ποσοστά ηλιοφάνειας τα οποία σε ωρισμένες περιοχές της ΝΑ Κρήτης, υπερβαίνουν τις 3000 ώρες ετησίως, (αποτελεί ρεκόρ Ευρώπης), με μέση μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία στα επίπεδα του 130-150 KWh/ m² . Τα δεδομένα αυτά αποτελούν μια πρόκληση εφαρμογής της ηλιακής ενέργειας στην Κρήτη και πράγματι έχουν μελετηθεί συστήματα αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας με τη χρήση φωτοβολταϊκών στοιχείων στο Φραγκοκάστελλο στην επαρχία Σφακίων.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η εξέταση μιας νέας μεθόδου η οποία βασίζεται στο μηδενικής ρύπανσης κύκλο του STIRLING. Έχουν ήδη αναπτυχτεί και στην πράξη εφαρμοστεί μονάδες των 25 KW για την παραγωγή ηλιακής ενέργειας. Ηλιακά πάρκα πολλών τέτοιων μονάδων (π.χ. 1000 μονάδων και πλέον) λειτουργούν στην Καλιφόρνια ΗΠΑ και στην Αλμέρια της Ισπανίας με κόστος παραπλήσιο των συμβατικών μονάδων.

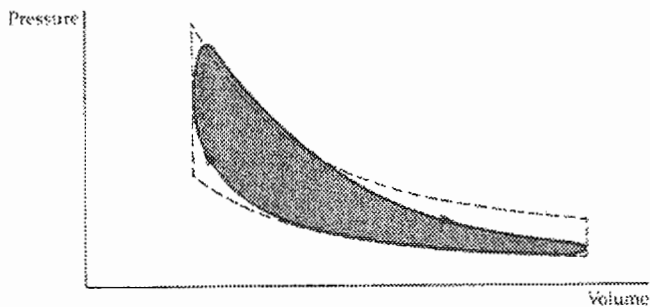
2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΥΚΛΟΥ STIRLING

Ο κύκλος αυτός είναι εξωτερικής καύσεως, περιλαμβάνει δυο ισόθερμες και δύο ισόχωρες μεταβολές.



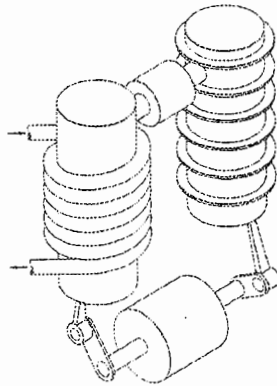
Σχήμα 1

Στην πράξη



Σχήμα 2

Οι ισόχωρες μεταβολές πετυχαίνονται με ένα έξυπνο σύστημα μετάδοσης κίνησης εμβόλων όπως παρακάτω



Σχήμα 3

Ως γνωστό μία θερμική μηχανή μετατρέπει τη θερμική ενέργεια σε μηχανικό έργο και για να λειτουργήσει χρειάζεται τα εξής :

- Ένα εργαζόμενο μέσο (ρευστό) που σε κάθε κυκλική μεταβολή που εκτελεί αποδίδει μηχανικό έργο στο περιβάλλον.
- Μια θερμή πηγή (σε υψηλή θερμοκρασία T_1) που δίνει ένα ποσό θερμότητας στο εργαζόμενο μέσο σε κάθε κύκλο.
- Μία ψυχρή πηγή (σε χαμηλή θερμοκρασία T_4) που δέχεται ένα ποσό θερμότητας από το εργαζόμενο μέσο σε κάθε κύκλο.

Επιπλέον ο κύκλος STIRLING έχει το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό να χρησιμοποιεί μία διάταξη προσωρινής αποθήκευσης της θερμότητας σε κάθε κύκλο, τον Αναγεννητή (REGENERATOR ή ECONOMIZER). Η λειτουργία του αναγεννητή θα φανεί από την περιγραφή του κύκλου που ακολουθεί. Οι τέσσερις μεταβολές του κύκλου σ' ένα ιδανικό αντιστρεπτό κλειστό σύστημα είναι:

1-2 (AB) ισόθερμη εκτόνωση:

Κατά τη μεταβολή αυτή, θερμότητα προσφέρεται από τη θερμή πηγή στο εργαζόμενο μέσο υπό σταθερή θερμοκρασία T_1 . Η προσφερόμενη θερμότητα μεταφέρεται μέσω μηχανικού έργου στο περιβάλλον.

2-3 (BC) ισόχωρη ψύξη

Θερμότητα απορρίπτεται από το εργαζόμενο μέσο υπό σταθερό όγκο και αποθηκεύεται στον αναγεννητή
 Δηλαδή η απόρριψη θερμότητας από το εργαζόμενο μέσο οδηγεί σε μείωση της εσωτερικής ενέργειας του.

3-4 (CD) ισόθερμη συμπίεση

Θερμότητα απορρίπτεται από το εργαζόμενο μέσο στη ψυχρή πηγή υπό σταθερή θερμοκρασία T_3 . Δηλαδή η ενέργεια που μεταφέρεται από το περιβάλλον στο εργαζόμενο μέσο μέσω του μηχανικού έργου, ισούται με τη θερμότητα που αποβάλλεται από το εργαζόμενο μέσο στο περιβάλλον.

4-1 (DA) ισόχωρη θέρμανση

Η θερμότητα που είχε αποθηκευτεί στον αναγεννητή κατά τη μεταβολή 2-3 αποδίδεται τώρα στο εργαζόμενο μέσο υπό σταθερό όγκο.

Δηλαδή η προσφερόμενη θερμότητα στο εργαζόμενο μέσο οδηγεί σε αύξηση της εσωτερικής του ενέργειας.

Απόδοση κύκλου

Σύμφωνα με το 1^ο θερμοδυναμικό νόμο για τον κύκλο ισχύει:

$$\Delta q = w \quad (1.1)$$

όπου έχει ληφθεί:

$$\Delta u = 0 \quad (1.2)$$

Άρα το καθαρό μηχανικό έργο που αποδίδεται από το αέριο στο περιβάλλον σε κάθε κύκλο ισούται με την καθαρή εισροή θερμότητας από το περιβάλλον στο αέριο κατά τη διάρκεια αυτού του κύκλου. Ενώ η ενέργεια που δαπανάται προκειμένου να παραχθεί το έργο w σε κάθε κύκλο είναι q_{12} . Η απόδοση μιας μηχανής ορίζεται από τη σχέση:

$$\alpha = \frac{\text{ΩΦΕΛΙΜΟ ΜΗΧΑΝΙΚΟ ΕΡΓΟ}}{\text{ΔΑΠΑΝΩΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ}} \quad (1.3)$$

Η (1.3) για τον κύκλο Stirling παίρνει τη μορφή:

$$\alpha = \frac{w}{q_{12}} = \frac{q_{12} - q_{34}}{q_{12}} = 1 - \frac{q_{34}}{q_{12}} \quad (1.4)$$

Επειδή τα ποσά θερμότητας είναι ανάλογα των θερμοκρασιών η (1.4) μπορεί να γραφτεί με την ισοδύναμη μορφή:

$$\alpha = 1 - \frac{T_3}{T_1} < 1 \quad (1.5)$$

Έτσι ικανοποιείται και ο 2^{ος} θερμοδυναμικός νόμος όπου σύμφωνα με τη διατύπωση των Kelvin-Planck είναι αδύνατο να κατασκευαστεί μηχανή που μετασχηματίζει τη θερμική ενέργεια σε έργο κατά 100%. Η σχέση (1.5) μπορεί να γραφτεί στη γενική μορφή:

$$\alpha = 1 - \frac{\text{Θερμοκρασι}'\alpha_{\text{ΨΥΧΡΗ}}}{\text{Θερμοκρασι}'\alpha_{\text{ΘΕΡΜΗ}}} \quad (1.6)$$

Παρατηρώντας τη τελευταία σχέση μπορούμε να συμπεράνουμε ότι όσο πιο υψηλή είναι η θερμοκρασία της θερμής πηγής και όσο πιο χαμηλή η θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται η ψυχρή πηγή τόσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός απόδοσης της μηχανής Stirling.

Ο βαθμός απόδοσης δίνεται από τη σχέση (1.6) όταν ο αναγεννητής είναι ιδανικός. Δηλαδή όταν η ποσότητα θερμότητας που αποθηκεύεται σ' αυτόν κατά τη μεταβολή 2-3 (ισόχωρη ψύξη) είναι ίση με την ποσότητα που απελευθερώνεται κατά τη μεταβολή 4-1 (ισόχωρη θέρμανση) και επομένως ισχύει $q_{23}=q_{41}$. Στην

πραγματικότητα όμως η θερμότητα που απελευθερώνεται (q_{23}') από τον αναγεννητή είναι μικρότερη από αυτή που λαμβάνεται (q_{23}), δηλαδή ισχύει:
 $q_{23}' < q_{23}$.

Επομένως κατά την ισόχωρη θέρμανση, το ποσό θερμότητας που προσφέρεται από τον αναγεννητή στο εργαζόμενο μέσο, δεν είναι επαρκές για να επιτευχθεί αύξηση της θερμοκρασίας σε T_1 και κατά συνέπεια είναι αναγκαία η πρόσδοση θερμότητας q από το περιβάλλον. Άρα για την ποσότητα q_{41} ισχύει:

$$q_{41} = q_{23}' + q \Rightarrow$$

$$q = q_{41} - q_{23}' \Rightarrow$$

$$q = q_{41} - e q_{23} \quad (1.7)$$

όπου e η απόδοση του αναγεννητή που ορίζεται:

$$e = \frac{q_{23}'}{q_{23}} \quad (1.8)$$

Επομένως η απόδοση του κύκλου είναι:

$$n = \frac{w}{q_{12} + q} = \frac{w_{12} - w_{34}}{q_{12} + q_{41} - e q_{23}} \quad (1.9)$$

Με εφαρμογή των δυο θερμοδυναμικών νόμων η τελευταία σχέση γίνεται:

$$n = \frac{R(T_1 - T_3) \ell \frac{v_1}{v_2}}{RT_1 \ell \frac{v_1}{v_2} + (1 - e)c_v(T_1 - T_3)} \Rightarrow$$

$$n = \frac{\left(\frac{T_1}{T_3} - 1\right) \ell \frac{v_1}{v_2}}{(1 - e)[1/(\gamma - 1)] \left[\left(\frac{T_1}{T_3} - 1\right) + \frac{T_1}{T_3} \ell \frac{v_1}{v_2}\right]} \quad (1.10)$$

Από την τελευταία σχέση φαίνεται ότι ο βαθμός απόδοσης του κύκλου Stirling εξαρτάται από τις θερμοκρασίες T_1 , T_3 , τους ειδικούς όγκους v_1 , v_2 , την απόδοση του αναγεννητή και το συντελεστή γ . Ο συντελεστής γ ορίζεται: $\gamma = c_p/c_v$ και ισχύει:

$C_v/R = 1/(\gamma - 1)$. Άρα ο συντελεστής απόδοσης εξαρτάται και από το εργαζόμενο μέσο. Όταν $e = 1$, από τη σχέση (1.10) προκύπτει ο μέγιστος βαθμός απόδοσης (σχέση 1.5).

Ο Αναγεννητής

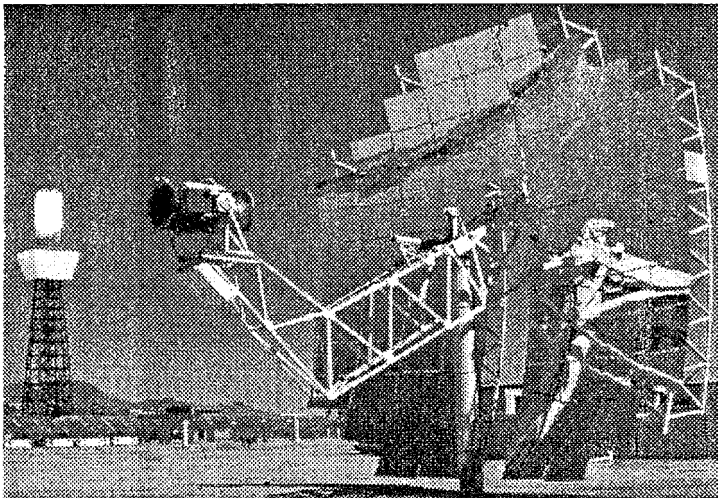
Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της μηχανής Stirling είναι ο αναγεννητής εξαιτίας του διπλού ρόλου του. Αφενός αποτελεί ένα είδος «μονωτή» επειδή βρίσκεται μεταξύ ψυχρών και θερμών περιοχών της μηχανής και διατηρεί τη διαφορά θερμοκρασίας. Αφετέρου αποτελεί ένα δοχείο προσωρινής αποθήκευσης και εναλλαγής θερμότητας με το αέριο, με στόχο τη θέρμανση του τελευταίου όταν είναι ψυχρό και τη ψύξη του όταν είναι θερμό. Με άλλα λόγια ο αναγεννητής έχει μικρή πυκνότητα ροής θερμότητας και ταυτόχρονα παρουσιάζει μεγάλη αγωγιμότητα. Τα δύο αυτά χαρακτηριστικά του οφείλονται στην κατασκευή του. Ουσιαστικά πρόκειται για ένα πλέγμα συρμάτων από ανοξείδωτο χάλυβα. Κάθε σύρμα έχει διάμετρο ίση με τη μισή διάμετρο της ανθρώπινης τρίχας και συνολικό μήκος 16 Km περίπου. Για μια υδραυλική ακτίνα 0,02 mm το εμβαδόν της επιφάνειας ανά m^3 είναι 1000 m x 50 m που είναι ισοδύναμο ανά m^3 με το εμβαδόν της επιφάνειας ενός αεροδιαδρόμου. Ο αναγεννητής διατηρεί μια διαφορά θερμοκρασίας 600 K σε μια απόσταση 20 mm περίπου, που αντιστοιχεί σε μια βαθμίδα $\partial T/\partial x$ είναι 30000 K/m.

Σύγκριση κύκλων Carnot-Stirling

Ο μέγιστος θεωρητικός βαθμός απόδοσης της μηχανής Stirling (σχέση 1.6) ταυτίζεται με τον αντίστοιχο της μηχανής Carnot, που είναι και ο μέγιστος που μπορεί να επιτευχθεί σε μία θερμική μηχανή που λειτουργεί στις ίδιες θερμοκρασίες. Ουσιαστικά με τη χρήση αναγεννητή οι ισόχωρες μεταβολές του κύκλου Stirling αποκτούν το «πλεονέκτημα» των αδιαβατικών δηλαδή τη μηδενική ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ περιβάλλοντος-εργαζόμενου μέσου. Έτσι για την ίδια απόδοση, το έργο που παράγεται είναι μεγαλύτερο ανά κύκλο απ' ότι στη μηχανή Carnot.

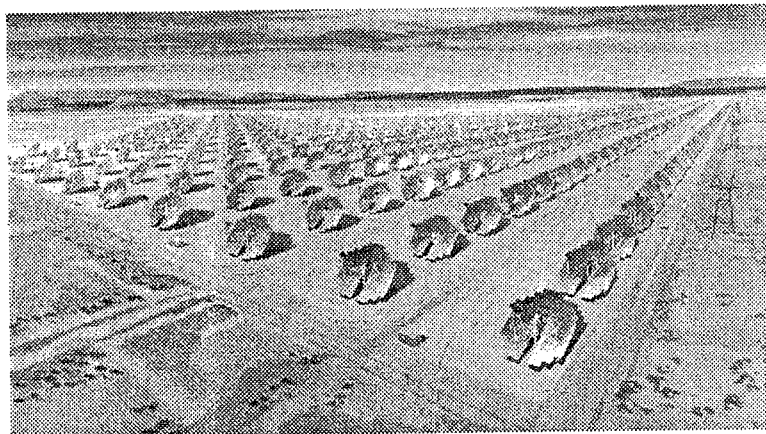
3. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η ιδέα είναι στη θερμοπηγή του κύκλου STIRLING να χρησιμοποιηθεί εστιασμένη ηλιακή ακτινοβολία (Αναπτύσσονται θερμοκρασίες 1000 K) και στο ψυχοδοχείο θερμοκρασία περιβάλλοντος (της τάξης των 300 K). (Εικόνα 1)



Εικόνα1. Ο κινητήρας Stirling μπορεί να χρησιμοποιήσει την ηλιακή ενέργεια για να παράγει μηχανική και στη συνέχεια ηλεκτρική ενέργεια

Μία τυπική μονάδα παράγει ισχύ 25 kW. Ένα ηλιακό πάρκο σαν αυτό που είναι εγκαταστημένο στη Καλιφόρνια περιλαμβάνει πολλές τέτοιες μονάδες.



Εικόνα 2. Ηλιακό Πάρκο αποτελούμενο από πολλές μονάδες συνδυασμού κατόπτρου και κινητήρα STIRLING.

4. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΕΧΝΙΚΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΣΥΓΚΡΙΣΗΣ

Το κόστος κεφαλαίου των ηλιοθερμικών σταθμών είναι υψηλότερο από το κόστος κεφαλαίου των συμβατικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, πρέπει να ληφθούν υπόψη ότι στους ηλιοθερμικούς σταθμούς δεν υπάρχει κόστος καυσίμων, λειτουργούν τυπικά μόνο κατά τη διάρκεια της ημέρας και επιπλέον δεν επιβαρύνουν το περιβάλλον. Σύμφωνα με πρόσφατα οικονομικά στοιχεία ηλιοθερμικού σταθμού που λειτουργεί στις ΗΠΑ το συνολικό κόστος της εγκατάστασης ανέρχεται σε \$300 εκατομμύρια ενώ το κόστος ανά εγκατεστημένο Kw είναι \$2000. Έτσι για τα πρώτα δέκα χρόνια λόγω αποσβέσεων το κόστος παραγωγής ενέργειας είναι \$0,155 ανά Kw ενώ μετά μειώνεται σε \$0,10 ανά Kw. Αν αυξηθεί η χρήση των μηχανών Stirling ώστε να αυξηθεί η παραγωγή τους σε 10000 με 20000 μονάδες το χρόνο, τότε θα μειωθεί το κόστος κεφαλαίου του συστήματος σε \$1000 ανά εγκατεστημένο Kw. Επιπρόσθετα αν η μηχανή Stirling λειτουργεί σε υβριδική μορφή, δηλαδή χρησιμοποιώντας φυσικό αέριο (το οποίο έχει λιγότερες εκπομπές καυσαερίων σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα) όταν δεν είναι διαθέσιμη η ηλιακή ενέργεια, το κόστος ηλεκτρισμού μειώνεται σε \$0,04 ανά Kwh. Έτσι οι εγκαταστάσεις αυτές γίνονται ανταγωνιστικές σε σχέση με άλλες μεθόδους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα καταρχήν συμπεράσματα είναι ότι ο κύκλος STIRLING παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, ανάμεσα στα άλλα μηδενική ρύπανση, ώστε να ληφθεί σοβαρά υπόψη για παραπέρα μελέτη του και εφαρμογή του στη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ιδιαίτερα σε περιοχές μεγάλης ηλιοφάνειας, όπως είναι η νότια Κρήτη για την κάλυψη των αναγκών αιχμής της.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Atkins, R.W, "The 2nd Law", Scientific American Books, NY, 1994

Βουρδουμπάς, Γ.Σ., «Το Ενεργειακό Πρόβλημα της Κρήτης και οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας»
Χανιά 1998

Hargreaves, C.M., «The Philips Stirling Engine», Elsevier, Amsterdam, 1991

Organ, A.J., «The Regenerator and the Stirling Engine», MEP, London, 1997