



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΟΣΜΗΤΟΡΑΣ**

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Πολυτεχ/πολη Ζωγράφου 157 80✦ Τηλ. : 210 772 1347 Τηλ/πια : 210 772 3541

Αρ.Πρωτ.: 2239

Αθήνα, 26/4/2017

**Προς τα Μέλη ΔΕΠ της
Σχολής Μηχ/γων
Μηχ/κών**

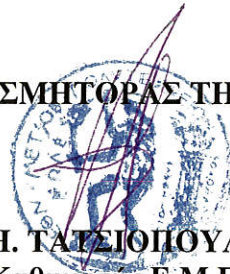
ΠΡΟΣΚΛΗΣΗ

Σας προσκαλούμε στην παρουσίαση της Διδακτορικής Διατριβής του **ΚΑΛΑΘΑΚΗ Χρήστου**, Διπλωματούχου **Μηχανολόγος Μηχανικός του ΕΜΠ**, που θα πραγματοποιηθεί την Τετάρτη 3 Μαΐου 2017, ώρα 11:00π.μ. στο Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών (Κτίριο Ο, 1^{ος} όροφος) Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου. Ο τίτλος της Διδακτορικής Διατριβής είναι ο εξής :

**«ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΑΠΟ ΘΕΡΜΙΚΕΣ
ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΕΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ»**

Επισυνάπτεται περίληψη της παραπάνω Διδακτορικής Διατριβής

Ο ΚΟΣΜΗΤΟΡΑΣ ΤΗΣ ΣΧΟΛΗΣ



Η. ΤΑΤΣΙΟΠΟΥΛΟΣ
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Ανάλυση Διατάξεων Παραγωγής Ισχύος Από Θερμικές Στροβιλομηχανές Με Χρήση Ηλιακής Ενέργειας

Περίληψη Διδακτορικής Διατριβής

Χρήστος Α. Καλαθάκης

Διατάξεις θερμικών μηχανών όπου η ηλιακή ενέργεια αντικαθιστά εν μέρει ή εν όλω τη συμβατική ονομάζονται Ηλιοθερμικές Διατάξεις (Solar Thermal Power Plants – STPPs). Οι ηλιοθερμικές διατάξεις μετατρέπουν την ηλιακή θερμική ισχύ σε μηχανική (ή και ηλεκτρική) κυρίως μέσω της χρήσης θερμικών στροβιλομηχανών (αεριοστρόβιλος, ατμοστρόβιλος και συνδυασμένος κύκλος). Δύο είναι οι βασικότερες τεχνολογίες συγκέντρωσης και αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας: α) παραβολικά κάτοπτρα (troughs) όπου η ηλιακή θερμότητα προσδίδεται σε μέσο που διαρρέει σωλήνωση διερχόμενη από την εστιακή γραμμή τους και β) δέκτης πύργου με επίπεδα κάτοπτρα (power tower) όπου οι ηλιακές ακτίνες ανακλώνται σε δέκτη στην κορυφή του πύργου ο οποίος θερμαίνει το μέσο.

Αντικείμενο της διατριβής είναι κατ' αρχήν η ανάπτυξη γενικευμένου εργαλείου προσομοίωσης της λειτουργίας ηλιοθερμικών διατάξεων καθώς και αποτίμησης των επιδόσεών τους (θερμοδυναμικών και οικονομικών). Με χρήση του εργαλείου αυτού μελετώνται ηλιοθερμικές διατάξεις με στόχο τον προσδιορισμό λύσεων που θα συνεισφέρουν στη σχεδίαση για βελτίωση των επιδόσεων τους καθώς και στην αποδοτικότερη διαχείριση της λειτουργίας τους. Σκοπός είναι να συνεισφέρουμε στην εξέλιξη των εγκαταστάσεων αυτού του είδους, ώστε να διευκολυνθεί η ανάπτυξη και διεξόδυση τους στο ενεργειακό μίγμα, ώστε να μπορέσουν αποτελέσουν έναν από τους εναλλακτικούς τρόπους εκμετάλλευσης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην προοπτική της μελλοντικής εξάπλωσης τους με στόχο να αποτελέσουν τη βασική (και μελλοντικά αποκλειστική) πηγή ενέργειας. Οι επί μέρους ενότητες της εργασίας συνοψίζονται παρακάτω.

Μοντελοποίηση συνιστωσών ηλιοθερμικών διατάξεων: Δημιουργήθηκε ένα ενιαίο εργαλείο προσομοίωσης της λειτουργίας όλων των βασικών τύπων ηλιοθερμικών διατάξεων. Η μοντελοποίηση υλοποιήθηκε στο περιβάλλον αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού PROOSIS λόγω των υψηλών δυνατοτήτων του και της ύπαρξης των μοντέλων των συνιστωσών του αεριοστρόβιλου. Τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν στην παρούσα εργασία αφορούν τις ηλιακές συνιστώσες και τις συνιστώσες του κύκλου νερού/ατμού.

Αρχικά προσδιορίστηκαν οι μαθηματικές εκφράσεις που περιγράφουν τη σχέση μεταξύ των φυσικών μεγεθών που τις χαρακτηρίζουν. Με βάση αυτές υλοποιήθηκαν υπολογιστικά μοντέλα στο PROOSIS, αντιπροσωπεύοντας κάθε διάταξη με ένα εικονίδιο. Η δημιουργία μοντέλου μιας σύνθετης ηλιοθερμικής διάταξης, είναι δυνατή μέσω της κατάλληλης σύνδεσης των εικονιδίων.

Η σωστή λειτουργία των αναπτυχθέντων μοντέλων των συνιστωσών πιστοποιήθηκε με εφαρμογή σε δεδομένα πειραμάτων και θεωρητικών μελετών της βιβλιογραφίας. Από τη διαδικασία αυτή προέκυψε πως τα αναπτυχθέντα μοντέλα έχουν την απαιτούμενη ακρίβεια.

Παράμετροι αξιολόγησης επιδόσεων και σύγκρισης: Για την αξιολόγηση μιας ηλιοθερμικής διάταξης καθώς και για τη σύγκριση διατάξεων διαφορετικών τεχνολογιών, προσδιορίστηκαν και εκφράστηκαν οι απαραίτητες παράμετροι που αφορούν τις θερμοδυναμικές και τις οικονομικές επιδόσεις.

Οι παράμετροι των θερμοδυναμικών επιδόσεων αφορούν τόσο τη δυνατότητα παραγωγής της εγκατάστασης (ισχύς, ενέργεια), όσο και την αποδοτικότητα (θερμικός βαθμός απόδοσης). Λόγω της ιδιαίτερης φύσης των ηλιοθερμικών διατάξεων, οι θερμοδυναμικές παράμετροι αναφέρονται τόσο στη συνολική προσδιδόμενη ενέργεια όσο και στις συνιστώσες της (ηλιακή και συμβατικού καυσίμου). Τέλος, θερμοδυναμική παράμετρο αποτελεί και το ποσοστό συνεισφοράς της ηλιακής ενέργειας.

Οι οικονομικές επιδόσεις προσδιορίζονται μέσω της ποσότητας LEC (Levelized electricity Cost) που είναι η τιμή πώλησης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας έτσι ώστε τα έσοδα να ισούνται με τα έξοδα στη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης. Με βάση τις υπάρχουσες εκφράσεις για τον υπολογισμό του LEC, προσδιορίστηκε μια πληρέστερη που λαμβάνει υπ' όψιν οικονομικούς παράγοντες όπως το σχήμα χρηματοδότησης και τη φορολογία. Η σωστή συμπεριφορά της σχέσης υπολογισμού του LEC πιστοποιήθηκε μέσω χρήσης διαθέσιμων οικονομικών δεδομένων της βιβλιογραφίας. Από τη διαδικασία αυτή φάνηκε η δυνατότητα αξιόπιστης εκτίμησης των οικονομικών επιδόσεων.

Με τη χρήση των αναπτυχθέντων εργαλείων μοντελοποίησης και αξιολόγησης, πραγματοποιήθηκε η μελέτη ηλιακών και υβριδικών κύκλων αεριοστρόβιλου, ηλιακών κύκλων Rankine και υβριδικών συνδυασμένων κύκλων.

Υβριδικός αεριοστρόβιλος με ηλιακή προθέρμανση αέρα: Μελετήθηκε η λειτουργία και προσδιορίστηκαν οι επιδόσεις του υβριδικού αεριοστρόβιλου όπου η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται για να προθερμάνει τον αέρα πριν τον θάλαμο καύσης. Ο υβριδικός αεριοστρόβιλος απαιτεί μικρότερη ποσότητα καυσίμου αλλά παράλληλα παρουσιάζει και μείωση στην παραγόμενη ενέργεια.

Ακόμα, μελετήθηκε η επίδραση παραμέτρων σχεδίασης και λειτουργίας στις επιδόσεις. Η μεταβολή των επιδόσεων παραμένει σταθερή από έναν αριθμό κατόπτρων και άνω. Τη μικρότερη μείωση στην παραγόμενη ενέργεια παρουσιάζουν διατάξεις με ανακόμιση θερμότητας. Η χρήση των IGVs δύναται

να αυξήσει την παραγόμενη ισχύ κατά τη λειτουργία μόνο με ηλιακή ενέργεια, ενώ κατά την υβριδική λειτουργία μπορεί να επιλεγεί για αύξηση των εσόδων για δεδομένες απαιτήσεις και παράγοντες κόστους. Με βάση τις απαιτήσεις και συγκεκριμένους παράγοντες κόστους μπορεί να επιλεγεί και ο καταλληλότερος τύπος λειτουργίας (συμβατικός, ηλιακός και υβριδικός). Η διάταξη υβριδικού αεριοστροβίλου γίνεται ανταγωνιστική για τιμές καυσίμου $>8\$/\text{MBTU}$.

Τέλος, με σκοπό τη μείωση του κόστους επένδυσης αλλά και την αντιμετώπιση κατασκευαστικών δυσκολιών μελετήθηκε η χρήση στροβιλοϋπερπληρωτή για τη συγκρότηση της διάταξης του υβριδικού αεριοστροβίλου. Παρατηρήθηκε η κυρίαρχη επίδραση του κόστους των ηλιακών συνιστωσών στο κόστος ηλεκτροπαραγωγής, ενώ αυτό εξαρτάται άμεσα και από τη μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία του κύκλου.

Ηλιακός ατμοστρόβιλος: Εξετάστηκαν τρεις τεχνολογίες ατμοπαραγωγής: α) έμμεση από παραβολικά κάτοπτρα, β) άμεση από παραβολικά κάτοπτρα και γ) άμεση από διάταξη πύργου. Βρέθηκε ότι η λειτουργία με μεταβαλλόμενη παροχή του θερμαινόμενου μέσου είναι αποδοτικότερη από αυτή της σταθερούς παροχής, όσον αφορά την παραγόμενη ισχύ. Η διάταξη του πύργου υπερτερεί έναντι των άλλων δύο όσον αφορά την ετήσια παραγόμενη ενέργεια (~3.5%).

Υβριδικός συνδυασμένος κύκλος: Εξετάστηκε η χρήση της ηλιακής ενέργειας σε διάταξη συνδυασμένου κύκλου. Για δύο συγκεκριμένα μεγέθη πεδίου κατόπτρων μελετήθηκε η απόδοση των δύο εναλλακτικών: α) χρήση της ηλιακής ενέργειας στον αεριοστρόβιλο και β) χρήση της ηλιακής ενέργειας στον ατμοστρόβιλο. Η πρώτη προσέγγιση οδηγεί σε μείωση της παραγόμενης ενέργειας αλλά και σε σημαντική μείωση της κατανάλωσης καυσίμου. Η δεύτερη προσέγγιση απαιτεί την υπερδιαστασιολόγηση του ατμοστροβίλου και οδηγεί σε αυξημένη ετήσια παραγόμενη ενέργεια χωρίς να επηρεάζεται ο κύκλος του αεριοστροβίλου. Από οικονομικής άποψης, η υβριδοποίηση του αεριοστροβίλου βρέθηκε προτιμότερη από την υβριδοποίηση του ατμοστροβίλου σε όλο το εύρος τιμών του κόστους καυσίμου που μελετήθηκε και γίνεται ανταγωνιστική για τιμές καυσίμου $>8\$/\text{MBTU}$.

Εναλλακτικοί τρόποι υβριδοποίησης αεριοστροβίλου: Η χρήση της ηλιακής ενέργειας για την προθέρμανση του αέρα του αεριοστροβίλου συνδέεται με κατασκευαστικές και λειτουργικές δυσκολίες συνδεδεμένες με τον τρόπο εξαγωγής του αέρα από τη μηχανή και τη σχεδίαση και τη λειτουργία του θαλάμου καύσης. Ως εκ τούτου, είναι αναγκαία η πρόταση και η διερεύνηση διατάξεων αεριοστροβίλου που αξιοποιούν την ηλιακή ενέργεια με διαφορετικό τρόπο και η χρήση υπαρχουσών τεχνολογιών ούτως ώστε να μην απαιτείται επιπλέον κόστος για την ανάπτυξη των συνιστωσών.

Σε αυτό το πλαίσιο εξετάστηκαν δύο εναλλακτικές διατάξεις: α) αεριοστρόβιλος με ηλιακή αναθέρμανση και β) αεριοστρόβιλος με έγχυση ατμού παραγόμενου από ηλιακή ενέργεια.

Η ηλιακή αναθέρμανση απαιτεί τη χρήση των VSVs στο στρόβιλο ισχύος και οδηγεί σε αύξηση της παραγόμενης ισχύος με αμετάβλητη την κατανάλωση

καυσίμου. Η αύξηση της παραγόμενης ισχύος είναι εντονότερη όσο μειώνεται η TIT του αεριοστροβίλου, που όμως επιφέρει μικρότερο θερμικό βαθμό απόδοσης. Από οικονομικής άποψης, η διάταξη είναι ανταγωνιστική μόνο για υψηλές τιμές του κόστους καυσίμου (~20\$/MBTU).

Η έγχυση ατμού στο θάλαμο καύσης αεριοστροβίλου μελετήθηκε τόσο για την περίπτωση της ηλιακής όσο και της υβριδικής παραγωγής ατμού. Η μέθοδος αυτή οδηγεί στην αύξηση της παραγόμενης ισχύος με ταυτόχρονη αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου. Αποδοτικότερη ηλιακή διάταξη κρίνεται αυτή του πύργου/δέκτη με άμεση ατμοποίηση του νερού. Στη περίπτωση της υβριδικής παραγωγής ατμού, η τοποθέτηση του δέκτη παράλληλα με τον υπάρχοντα ατμοποιητή είναι σχετικά αποδοτικότερη (όσον αφορά την παραγόμενη ενέργεια και το κόστος ηλεκτροπαραγωγής) σε σύγκριση με την τοποθέτησή του παράλληλα με τον ΛΑΘ. Όμως, λόγω των ιδιαίτερων απαιτήσεων σχεδίασης του ΛΑΘ, ευκολότερα υλοποιήσιμη κρίνεται η δεύτερη προσέγγιση. Η προσέγγιση της έγχυσης υβριδικά παραγόμενου ατμού γίνεται ανταγωνιστική για τιμές καυσίμου >10\$/MBTU.

Τέλος, με σκοπό την αξιοποίηση της απορριπτόμενης θερμότητας από την από-εστίαση των κατόπτρων σε περιπτώσεις υψηλής ακτινοβολίας, μελετήθηκε η δυνατότητα της αξιοποίησης αυτής της θερμότητας για παραγωγή και έγχυση ατμού στη συνήθη διάταξη υβριδικού αεριοστροβίλου. Αυτή η προσέγγιση έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της αρνητικής επίδρασης της υβριδοποίησης (μείωση παραγόμενης ισχύος) και την αύξηση της ηλιακής ενέργειας που αξιοποιείται. Από οικονομικής άποψης παρουσιάζει παρόμοιες επιδόσεις με τη συνήθη διάταξη υβριδικού αεριοστροβίλου.

Βλάβες ηλιοθερμικών διατάξεων: Ο αποδοτικότερος προγραμματισμός των εργασιών συντήρησης, καθώς και η παρακολούθηση της υγείας των συνιστωσών μιας διάταξης απαιτεί την ποσοτικοποίηση της επίδρασης των βλαβών στις επιδόσεις. Το πεδίο αυτό, αν και ιδιαίτερα σημαντικό δεν έχει μελετηθεί. Στη παρούσα εργασία μελετήθηκε η επίδραση των κυριότερων βλαβών των ηλιοθερμικών διατάξεων στις επιδόσεις τους (επικαθίσεις στα κάτοπτρα, απορύθμιση επίπεδων κατόπτρων, θραύση υάλινου μονωτικού περιβλήματος παραβολικών κατόπτρων και επικαθίσεις στα πτερύγια του συμπιεστή). Βρέθηκε πως βλάβη ή μείωση των επιδόσεων των ηλιακών συνιστωσών μειώνει την προσφερόμενη ηλιακή θερμότητα με αποτέλεσμα να μειώνεται η παραγωγή της ηλιακά λειτουργούσας διάταξης ή στην περίπτωση της υβριδικής μηχανής, η λειτουργία μετατοπίζεται πλησιέστερα της συμβατικής. Στα παραβολικά κάτοπτρα οι επικαθίσεις έχουν εντονότερη επίδραση στις επιδόσεις από ότι η θραύση του υάλινου περιβλήματος, ενώ στα επίπεδα κάτοπτρα η επίδραση της βλάβης της απορύθμισης μειώνεται με την αύξηση του αριθμού των κατόπτρων.

Η ανάπτυξη ενός εργαλείου που επιτρέπει την προσομοίωση της λειτουργίας οποιασδήποτε ηλιοθερμικής διάταξης και την εκτίμηση των

επιδόσεών της, η μελέτες της επίδρασης παραμέτρων σχεδίασης και λειτουργίας καθώς και βλαβών στις επιδόσεις που πραγματοποιήθηκαν, η συγκριτική μελέτη υπαρχουσών τεχνολογιών υβριδοποίησης καθώς και η πρόταση και μελέτη εναλλακτικών τρόπων υβριδοποίησης του αεριοστροβίλου, αποτελούν στοιχεία καινοτόμου συμβολής της παρούσας εργασίας, έχουν ήδη αποτελέσει τη βάση υφιστάμενων και μελλοντικών δημοσιεύσεων σε επιστημονικά περιοδικά και συνέδρια.