



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

Ανάλυση Διατάξεων Παραγωγής Ισχύος Από
Θερμικές Στροβιλομηχανές Με Χρήση
Ηλιακής Ενέργειας

Διδακτορική Διατριβή

Χρήστου Α. Καλαθάκη

Μηχανολόγου Μηχανικού Ε.Μ.Π.

Επίβλεψη:

Καθηγητής Κων/νος Μαθιουδάκης

Αθήνα
Μάιος 2017

Εξεταστική Επιτροπή της Διατριβής

Δρ. Κ. Μαθιουδάκης**
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Δρ. Κ. Γιαννάκογλου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Δρ. Ν. Αρετάκης*
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Δρ. Α. Ζερβός
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Δρ. Ι. Ρουμελιώτης*
Επικ. Καθηγητής Σ.Ν.Δ.

Δρ. Σ. Καρέλλας
Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Δρ. Χ. Τζιβανίδης
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

* Μέλος της Συμβουλευτικής Επιτροπής

** Επιβλέπων

«...Η άσκηση της Επιστήμης χρειάζεται σπάνιο κουράγιο [...] Πιστεύω ότι μοναδικός σκοπός της Επιστήμης είναι τούτος: ν' αλαφρώσει το μόχθο της ανθρώπινης ύπαρξης. Αν οι επιστήμονες, φοβισμένοι απ' τους εγωιστές και δεσποτικούς άρχοντες, περιοριστούν να σωριάζουν γνώσεις πάνω σε γνώσεις μόνο και μόνο για τη χαρά της γνώσης, η Επιστήμη δεν θα είναι πια παρά μια θλιβερή σακάτισσα. Οι καινούριες σας μηχανές δεν θα χρησιμεύουν παρά για καινούρια μαρτύρια. Με τον καιρό, μπορεί ν' ανακαλύψετε ό,τι υπάρχει για να ανακαλυφθεί, κι ωστόσο η πρόοδός σας θα σας χωρίζει όλο και πιο πολύ απ' την Ανθρωπότητα. Η άβυσσος ανάμεσα σ' εκείνη και σ' εσάς μπορεί μια μέρα να γίνει τόσο βαθιά, που, στη χαρούμενη κραυγή σας για μια καινούρια κατάκτηση, ν' αποκριθεί μια κραυγή φρίκης απ' όλη την Οικουμένη!»

Η Ζωή του Γαλιλαίου, Bertolt Brecht

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα Καθηγητή Κ. Μαθιουδάκη που με εμπιστεύτηκε να εκπονήσω τη διδακτορική μου διατριβή υπό την επίβλεψή του και μου ανέθεσε αρμοδιότητες στο πλαίσιο ερευνητικών έργων που εκτελέστηκαν στο ΕΘΣ. Από τη συνεργασία μας αποκόμισα πληθώρα πραγμάτων, τόσο στο επίπεδο γνώσεων, όσο και στον τρόπο σκέψης του πραγματικού Μηχανικού. Τον ευχαριστώ για την επίμονη ενασχόλησή του και για την καθοδήγησή του.

Θερμά ευχαριστώ τον Επίκ. Καθηγητή Ν. Αρετάκη για τις συμβουλές του και για την έμπρακτη ενασχόλησή του στην υλοποίηση των ιδεών μου. Η βοήθειά του ήταν καθοριστικής σημασίας, τόσο για την εκπόνηση της διατριβής, όσο και για την περάτωση των ερευνητικών έργων. Επίσης τον ευχαριστώ ιδιαίτερα για την υποστήριξή του απέναντι στις δυσκολίες που αντιμετώπισα.

Ιδιαίτερα, ευχαριστώ τον Επίκ. Καθηγητή Ι. Ρουμελιώτη για τις συμβουλές και τις ιδέες του. Η αξιοποίηση των γνώσεών του συνετέλεσε καθοριστικά στην υλοποίηση της διατριβής.

Ευχαριστώ τον Δρ. Α. Αλεξίου για την αμέριστη βοήθειά του στην υλοποίηση των υπολογιστικών μοντέλων και για τις υποδείξεις του.

Οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στο προσωπικό του ΕΘΣ (Α. Δερμιτζάκη, Κ. Χουσέα, Χ. Ρωμέση, Σ. Μαυράκη και Β. Ζαφειράκη) για τη βοήθεια που μου παρείχε.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τις θυσίες που έκανε, για τη συνεχή και έμπρακτη στήριξη που μου παρείχε σε όλα τα επίπεδα και για την ανοχή της.

Χρήστος Α. Καλαθάκης

Η έγκριση της Διδακτορική Διατριβής από τη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα (Ν. 5343/ 1932, Άρθρο 202).

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 διείσδυση 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 αεριοστροβίλου. 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 αεριοστροβίλου 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 αεριοστρόβιλου 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 αεριοστρόβιλου. 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 ($\sim 3.5\%$).

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 ατμοστρόβιλου και οδηγεί σε αυξημένη ετήσια παραγόμενη ενέργεια χωρίς να επηρεάζεται ο κύκλος του αεριοστρόβιλου. Από οικονομικής άποψης, η υβριδοποίηση του αεριοστρόβιλου βρέθηκε προτιμότερη από την υβριδοποίηση του ατμοστρόβιλου σε όλο το εύρος τιμών του κόστους καυσίμου που μελετήθηκε και γίνεται ανταγωνιστική για τιμές καυσίμου $>8\$/\text{MBTU}$.

Εναλλακτικοί τρόποι υβριδοποίησης αεριοστρόβιλου: Η χρήση της ηλιακής ενέργειας για την προθέρμανση του αέρα του αεριοστρόβιλου 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 αεριοστρόβιλου 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 ΤΙΤ 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.

Analysis Of Thermal Turbomachine Configurations For Power Production Using Solar Power

PhD Thesis Abstract

Christos A. Kalathakis

Solar Thermal Power Plants (STPPs) are called the plants with thermal engines where solar energy replaces partly or wholly the fossil fuel. STPPs convert the solar thermal power into mechanical (or electrical) mainly through the use of thermal turbomachines (gas turbine, steam turbine and combined cycle). Two are the main technologies for collecting and exploiting the solar energy: a) parabolic mirrors (troughs) in which the solar heat is imparted to a medium flowing through tubing along the focal line and b) tower receiver with flat mirrors (power tower) wherein the solar rays are reflected to the receiver on the top of the tower which heats the medium.

Aim of this thesis is the development of a tool suitable for modelling any STPP configuration, simulating its operation and assessing its performance (thermodynamic and economic). Aim, also, is the study of STPP configurations with existing and alternative ways for exploiting solar power and to conduct studies on the design and operating parameters and components faults. The study carried out can be summarized as follows:

Modelling STPP components: A STPP performance simulation tool was developed. Components modeling was carried out in the object-oriented programming environment PROOSIS due to its capabilities and the existence of the gas turbine component models. The models developed concern the solar and water/steam cycle components. Firstly, the mathematical expressions that describe the relationship between the physical quantities which characterize them were identified. After, the mathematical expressions were transferred to the PROOSIS environment where the necessary component icons were created. The modeling of any STPP is possible by appropriate combination of the component icons (in which the equations are contained). Validation of the developed component models was performed via the simulation of experiments and theoretical studies found in bibliography. It was found that the models have the accuracy required.

Parameters of performance evaluation and comparison: The necessary thermodynamic and economic performance parameters were determined and expressed, in order to evaluate an STPP configuration and to compare configurations based on different technologies.

The parameters of thermodynamic performance concern both the production capacity of the installation (power, energy), and efficiency (thermal efficiency). Also, due to the particular nature of STPPs, the thermodynamic parameters refer both to the overall heat input as well as to its portions (solar and conventional fuel). Finally, such a thermodynamic parameter is the solar share fraction.

The economic performance is identified through LEC which is the sale price of electricity so that revenues are equal to expenses through the life of the plant. Based on existing expressions for calculating the LEC, a more detailed one was developed, taking into account economic factors such as the funding type and taxation. The correct behavior of the LEC expression was validated by using available financial data of the literature. The assessment of an STPP economic performance is able.

Study of STPPs: With the use of the developed simulation tool and the performance parameters, studies were carried out on hybrid gas turbines, solar Rankine cycles and hybrid combined cycles.

Hybrid gas turbine (solar air preheating): The study concerns the performance of the hybrid gas turbine where solar energy is used to preheat the air before the combustion chamber. The hybrid gas turbine requires a smaller amount of fuel but also presents a reduction in generated power.

Also, the effect of design and performance parameters on performance was investigated. For a number of mirrors and above, the performance change is constant. The smallest decrease in energy produced exhibit recuperated engines. The use of IGVs can increase power output during solar-only mode, while in hybrid mode can be utilized to increase revenue for given requirements and cost factors. Based on the requirements and specific cost factors can be selected the appropriate operation type (conventional, solar and hybrid). The hybrid gas turbine arrangement is competitive for fuel prices $>8\$/\text{MBTU}$.

Finally, in order to reduce investment costs and coping with structural difficulties, a hybrid turbine based on a turbocharger was studied. Solar components have the dominant influence on electricity cost while it also strongly depends on the maximum allowable cycle temperature.

Solar steam turbine: Three solar steam production technologies were examined: a) indirect by parabolic mirrors, b) direct by parabolic mirrors and c) direct from the tower configuration. It was found that the variation of flow rate of the heated medium is more efficient than the constant flow regarding power output. The assembly of the tower predominates over the other two concerning the annual energy production ($\sim 3.5\%$).

Hybrid combined cycle: The use of solar energy in a combined cycle configuration was studied. For two mirror field sizes, the performance of the two alternatives: a) use of solar energy in the gas turbine, and b) use of solar energy in the steam turbine was accessed. The first approach leads to a reduction of the

energy and a significant reduction of fuel consumption. The second approach requires oversizing the steam turbine and leads to increased annual energy output without affecting the gas turbine cycle. From the economic point of view, the hybridization of the gas turbine was found preferable from the hybridization of steam turbine throughout the range of fuel cost studied and is competitive for fuel prices $>8\$/\text{MBTU}$.

Alternative gas turbine hybridization configurations: The use of solar energy to preheat the gas turbine air is associated with construction and operating difficulties. Therefore, it is necessary to propose and study hybrid gas turbine configurations that utilize solar energy in different ways and use existing technologies so as to not require additional costs for the development of components.

In this context we examined two alternative arrangements: a) solar reheated gas turbine and b) solar steam injection in gas turbine.

Solar reheating requires the use of VSVs at power turbine and leads to an increase in power with unchanged fuel consumption. The increase in power is stronger as the TIT decreases, but this cause lower thermal efficiency. From the economic point of view, the arrangement is competitive only for high fuel cost values ($\sim 20\$/\text{MBTU}$).

The steam injection into the gas turbine combustion chamber has been studied both in case of solar and hybrid steam production. This method leads to increase in power and an increase of fuel consumption. More efficient configuration is that of the tower/receiver with direct evaporation of water. In the case of hybrid steam production, placing the receiver in parallel with the existing evaporator is relatively efficient (in terms of generated energy and electricity cost) as compared to its placement in parallel with the HRSG. However, due to the particular design requirements of HRSG, preferable is the second approach. The approach of injecting hybrid produced steam is competitive for fuel prices $>10\$/\text{MBTU}$.

Finally, in order to exploit waste heat from the off-focus mirrors in cases of high radiation, we studied the possibility of using this heat to generate steam and injecting it into the gas turbine. This approach reduces the negative effect of hybridization (generated power decrease) and increases the solar share. From the economic point of view, it has similar performance to the usual hybrid gas turbine configuration.

STPP faults: The efficient planning of maintenance tasks, and the health monitoring of components, requires the quantification of the effect of faults in performance. This field, although very important has not been studied yet. In the present study the influence of the main faults of STPPs accessed (mirror deposits, deregulation of flat mirror, breakage of parabolic mirrors glass envelope and compressor fouling) in their performance was accessed. It was found that

damage or reduction in performance of the solar components reduces the offered solar heat which reduces the production or in the case of the hybrid engine, the operation is shifted closer to the conventional. In the parabolic mirrors the deposits have a stronger effect on performance than the breakage of the glass envelope, while in the flat mirrors the effect of deregulation decreases with increasing the number of mirrors.

The development of a tool that allows to simulate the operation of any STPP configuration and the evaluation of its performance, the study of the effect of design and operating parameters and fault performance, comparative study of existing hybridization technology and the proposal and study of alternative hybridization methods of gas turbine, are innovative contribution and the basis of existing and future publications in scientific journals and conferences.

Περιεχόμενα

Πίνακας Συμβόλων.....	v
Τίτλοι Σχημάτων	ix
Τίτλοι Πινάκων	xvii
Κεφάλαιο 1: Ηλιακή Ενέργεια Και Θερμικές Στροβιλομηχανές	1
1.1 Γενικά	1
1.2 Φωτοβολταϊκές και Ηλιοθερμικές τεχνολογίες.....	2
1.3 Διατάξεις συγκέντρωσης και αξιοποίησης της ηλιακής ακτινοβολίας ...	4
1.3.1 Ηλιακή καμινάδα (Solar Chimney / Updraft Tower).....	4
1.3.2 Παραβολικό πιάτο (Parabolic Dish).....	6
1.3.3 Γραμμικά κοίλα κάτοπτρα (Troughs)	7
1.3.4 Ηλιακός πύργος.....	10
1.3.5 Αποθήκευση ενέργειας.....	13
1.4 Συγκριτικά στοιχεία Ηλιοθερμικών διατάξεων.....	14
1.5 Θερμικές στροβιλομηχανές στην εκμετάλλευση ηλιακής ενέργειας.....	16
1.5.1 Ηλιακή ενέργεια και αεριοστρόβιλοι.....	16
1.5.2 Ηλιακή ενέργεια και ατμοστρόβιλοι.....	22
1.5.3 Ηλιακή ενέργεια και συνδυασμένος κύκλος	26
1.5.4 Βλάβες Ηλιοθερμικών διατάξεων	30
1.5.5 Παρατηρήσεις περί ηλιακής ενέργειας και θερμικών στροβιλομηχανών	32
1.6 Αντικείμενο της Διατριβής.....	33
1.7 Δομή της Διατριβής.....	35
Κεφάλαιο 2: Συνιστώσες Ηλιοθερμικών Διατάξεων	37
2.1 Ο Ήλιος και η ακτινοβολία.....	37
2.1.1 Ο χρόνος	37
2.1.2 Οι γωνίες	39
2.1.3 Γωνία πρόσπτωσης	44
2.1.4 Ηλιακή ακτινοβολία.....	45
2.2 Συλλέκτες - Κάτοπτρα	48
2.2.1 Παραβολικοί συλλέκτες	49
2.2.1.1 Θερμότητα από τον απορροφητή στο HTF.....	53
2.2.1.2 Θερμότητα διαμέσου του απορροφητή.....	56
2.2.1.3 Θερμότητα από τον απορροφητή στο περίβλημα.....	57
2.2.1.4 Θερμότητα διαμέσου του περιβλήματος.....	58
2.2.1.5 Θερμότητα από το περίβλημα στο περιβάλλον	59
2.2.1.6 Θερμότητα από τα στηρίγματα στο περιβάλλον	61
2.2.1.7 Ανάκλαση και απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας.....	61
2.2.1.8 Προσδιορισμός θερμοκρασίας HTF	63
2.2.1.9 Απώλειες πίεσης.....	64
2.2.2 Πεδίο κατόπτρων	66
2.2.2.1 Λειτουργία πεδίου κατόπτρων	67
2.2.2.2 Παραγωγή πεδίου κατόπτρων	69
2.2.3 Δέκτες πύργου	70

2.2.3.1	Δέκτης αέρα	71
2.2.3.2	Δέκτης νερού/ατμού	72
2.2.3.3	Δέκτης ελαίου –αλάτων	72
2.2.3.4	Δέκτης Διπλής Ροής (αέρα – νερού/ατμού)	72
2.3	Εναλλάκτες θερμότητας	73
2.4	Αποθήκευση θερμότητας	75
2.5	Κύκλος Rankine	77
2.5.1	Αντλίες	78
2.5.2	Λέβητας Ανάκτησης Θερμότητας.....	79
2.5.3	Ατμοστρόβιλος	80
2.5.4	Συμπυκνωτής.....	82
2.6	Κύκλος Joule-Brayton.....	83
2.6.1	Αγωγοί	83
2.6.2	Συμπιεστής.....	84
2.6.3	Θάλαμος καύσης	85
2.6.4	Στρόβιλος.....	86
2.7	Υπολογισμός ιδιοτήτων	87
2.8	Σύνοψη – Συμπεράσματα	88
Κεφάλαιο 3: Μοντελοποίηση Συνιστωσών Ηλιοθερμικών Διατάξεων και Πιστοποίησή τους.....		89
3.1	Περιβάλλον PROOSIS	89
3.2	Μοντέλα Ήλιου	91
3.2.1	Μοντέλο γωνιών	92
3.2.2	Μοντέλο γωνιών και ακτινοβολίας	93
3.3	Μοντέλα παραβολικών κατόπτρων.....	95
3.3.1	Μοντέλο ελαίου	95
3.3.2	Μοντέλο νερού/ατμού.....	100
3.4	Μοντέλο επίπεδων κατόπτρων	102
3.4.1	Μοντέλο προσομοίωσης πεδίου κατόπτρων	102
3.4.2	Μοντέλο προσδιορισμού θέσης κατόπτρων.....	104
3.5	Μοντέλα δεκτών πύργου.....	106
3.5.1	Μοντέλο δέκτη αέρα	106
3.5.2	Μοντέλο δέκτη νερού/ατμού	110
3.5.3	Μοντέλο δέκτη ελαίου/αλάτων.....	111
3.5.4	Μοντέλο Δέκτη Διπλής Ροής	111
3.6	Μοντέλα εναλλακτών θερμότητας.....	111
3.6.1	Μοντέλο εναλλάκτη αισθητής θερμότητας	112
3.6.2	Μοντέλο εναλλάκτη λανθάνουσας θερμότητας.....	113
3.7	Μοντέλο αποθήκευσης θερμότητας.....	117
3.8	Μοντέλο ατμοστρόβιλου	121
3.9	Σύνοψη – Συμπεράσματα	123
Κεφάλαιο 4: Παράμετροι Επιδόσεων – Σύγκριση		125
4.1	Θερμοδυναμικές παράμετροι.....	125
4.2	Οικονομικές παράμετροι	127
4.2.1	Εφαρμογές υπολογισμού LEC	133
4.3	Σύνοψη – Συμπεράσματα	137
Κεφάλαιο 5: Υβριδικός Αεριοστρόβιλος – Ηλιακή Προθέρμανση Αέρα.....		139
5.1	Περιγραφή διάταξης.....	139
5.2	Μοντελοποίηση – Επιδόσεις	140

5.3	Επίδραση παραμέτρων σχεδίασης στις επιδόσεις	149
5.3.1	Ανάλυση ευαισθησίας για σχεδιαστικές παραμέτρους.....	149
5.3.2	Επίδραση αριθμού κατόπτρων στις επιδόσεις.....	150
5.3.3	Επίδραση διάταξης ατράκτων στις επιδόσεις	151
5.4	Επίδραση παραμέτρων λειτουργίας στις επιδόσεις	158
5.4.1	Επίδραση τύπου λειτουργίας στις επιδόσεις	159
5.4.2	Επίδραση λειτουργίας IGVs στις επιδόσεις.....	161
5.5	Υβριδικός αεριοστρόβιλος βασισμένος σε στροβιλοϋπερπληρωτή... 165	
5.5.1	Μοντελοποίηση υβριδικού στροβιλοϋπερπληρωτή.....	167
5.5.2	Επιδόσεις – Ηλιακή λειτουργία.....	171
5.5.3	Επιδόσεις – Υβριδική λειτουργία	176
5.5.4	Συγκριτική αξιολόγηση διατάξεων.....	178
5.6	Σύνοψη – Συμπεράσματα	183
Κεφάλαιο 6: Εναλλακτικοί Τρόποι Υβριδοποίησης Αεριοστροβίλου		185
6.1	Ηλιακή αναθέρμανση	185
6.1.1	Διάταξη – Σχεδίαση.....	185
6.1.2	Επιδόσεις – Σύγκριση.....	191
6.2	Έγχυση ατμού σε αεριοστρόβιλο	196
6.2.1	Ηλιακή παραγωγή ατμού	197
6.2.2	Παραγωγή ατμού με υβριδική διάταξη.....	201
6.3	Αξιοποίηση περίσσειας ηλιακής ενέργειας.....	207
6.4	Σύνοψη – Συμπεράσματα	211
Κεφάλαιο 7: Υβριδικός Ατμοστρόβιλος Και Συνδυασμένος Κύκλος		213
7.1	Διατάξεις ηλιακού ατμοστροβίλου	213
7.1.1	Χαρακτηριστικά σημείου σχεδίασης	215
7.1.2	Έλεγχος λειτουργίας	216
7.1.3	Επιδόσεις – Σύγκριση.....	219
7.2	Υβριδικός συνδυασμένος κύκλος	221
7.2.1	Παράμετροι σχεδίασης και οικονομικά στοιχεία.....	223
7.2.2	Επιδόσεις – Σύγκριση.....	226
7.3	Σύνοψη – Συμπεράσματα	231
Κεφάλαιο 8: Βλάβες Ηλιοθερμικών Διατάξεων		233
8.1	Βλάβες και λειτουργία ηλιοθερμικών διατάξεων	233
8.2	Επίδραση βλαβών στις επιδόσεις υβριδικού αεριοστροβίλου	234
8.2.1	Επικαθίσεις στα κάτοπτρα.....	235
8.2.2	Επικαθίσεις στα κάτοπτρα και στο συμπιεστή.....	236
8.2.3	Απορύθμιση κατόπτρων.....	238
8.3	Επίδραση βλαβών στις επιδόσεις υβριδικού ατμοστροβίλου	239
8.3.1	Επικαθίσεις στα κάτοπτρα.....	240
8.3.2	Θραύση υάλινου περιβλήματος	240
8.4	Σύνοψη – Συμπεράσματα	243
Κεφάλαιο 9: Ανακεφαλαίωση – Συμπεράσματα		245
9.1	Ανακεφαλαίωση.....	245
9.2	Συμπεράσματα.....	247
9.3	Προτάσεις	248
Βιβλιογραφία.....		250
Δημοσιεύσεις		263

Πίνακας Συμβόλων

\vec{V}_T	Διάνυσμα κατόπτρου-δέκτη
\vec{V}_S	Διάνυσμα Ήλιου-κατόπτρου
\vec{n}_H	Διάνυσμα κάθετο στην επιφάνεια του κατόπτρου
h_H	Ύψος του κάτοπτρου
h_T	Ύψος του δέκτη
\dot{q}'_i	Ροή θερμότητας ανά μονάδα μήκους
A	Εμβαδό
a_n	Συντελεστής σχέσεως Angstrom
$a_{ολ}$	Συντελεστής απορροφητικότητας όζοντος
AST	Ηλιακός χρόνος
$a_{αλ}$	Συντελεστής απορροφητικότητας αερίων
$a_{ωλ}$	Συντελεστής απορροφητικότητας υγρασίας
b	1) Σταθερά Laplace, 2) Συντελεστής αλληλεπίδρασης
CC	Συνδυασμένος κύκλος
Cp	Θερμοχωρητικότητα
D	Διάμετρος
DS	Διόρθωση θερινής ώρας
E	Ενέργεια
ECO	Economizer Οικονομητήρας
eff	Ολικός θερμικός βαθμός απόδοσης
eff _f	Θερμικός βαθμός απόδοσης καυσίμου
EGT	Θερμοκρασία καυσαερίων στην έξοδο του στροβίλου
ET	Εξίσωση χρόνου
EVA	Evaporator Ατμοποιητής
F	Καταναλισκόμενη μάζα καυσίμου
f	Συντελεστής Darcy
f_{ss}	Ποσοστό συνεισφοράς της ηλιακής ενέργειας (solar share)
Fuel-only / Fuel	Συμβατική μηχανή λειτουργούσα με ορυκτό καύσιμο
g	Επιτάχυνση βαρύτητας
GT	Αεριοστρόβιλος
h	1) Ωριαία ηλιακή γωνία, 2) Συντελεστής συναγωγής, 3) Ενθαλπία
HM	Μήκος του κατόπτρου
HRSG	Heat recovery Steam Generator (ΛΑΘ)
HTF	Heat Transfer Fluid
Hybrid	Υβριδικός / Υβριδική λειτουργία
I, DNI	Ένταση άμεσης ακτινοβολίας
IGV	Inlet Guide Vanes
k	Συντελεστής αγωγής
K	Συντελεστής απωλειών πίεσης

L	1) Γεωγραφικό πλάτος 2) Μήκος
LEC	Levelized Electricity Cost Σταθμισμένο Κόστος Ηλεκτροπαραγωγής
LL	Γεωγραφικό μήκος
LST	Ωρολογιακός χρόνος
\dot{m}	Παροχή μάζας
M	Μάζα
NTU	Number of Transfer Units
Nu	Αριθμός Nusselt
O ₃	Ύψος στήλης όζοντος
P	1) Περίμετρος, 2) Ισχύς
p	Πίεση
Pe	Αριθμός Peclet
Pr	Αριθμός Prandtl
Q	Θερμική ισχύς
q _{add}	Πρόσδοση θερμότητας
q _{loss}	Απώλειες θερμότητας
r	Λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης
R	Σταθερά του εργαζόμενου μέσου
Ra	Αριθμός Rayleigh
RD	Ακτινική απόσταση από τη βάση του πύργου-δέκτη
Re	Αριθμός Reynolds
s	Ειδική εντροπία
sfc	Ειδική κατανάλωση καυσίμου
SH	Super Heater Υπερθερμαντής
SL	Γεωγραφικό μήκος ισημερινού χώρας
Solar	Ηλιακή λειτουργία
ST	Ατμοστρόβιλος
STIG	Αεριοστρόβιλος με έγχυση ατμού στο θάλαμο καύσης
STPP	Solar Thermal Power Plants
T	Θερμοκρασία
T _{αλ}	Συντελεστής διαπερατότητας αεροζόλ
THT	Ύψος του πύργου-δέκτη
TIT	Turbine Inlet Temperature Θερμοκρασία εισόδου στροβίλου
T _{ολ}	Συντελεστής απορρόφησης λόγω όζοντος
T _{rl}	Συντελεστής μοριακής σκέδασης ατμόσφαιρας
T _{uλ}	Συντελεστής απορρόφησης λόγω λοιπόν αερίων
T _{wλ}	Συντελεστής απορρόφησης λόγω υγρασίας
U	Συντελεστής μετάδοσης θερμότητας
V	1) Ταχύτητα, 2) Όγκος
v	Ειδικός όγκος
W	παροχή
WM	Πλάτος του κατόπτρου
x	Υγρότητα
z	Γωνία αζιμούθιου
Zs	Αζιμούθιο επιφανείας
α	1) Ηλιακό ύψος, 2) Συντελεστής κάλυψης, 3) Συντελεστής θερμικής διάχυσης

α_{abs}	Απορροφητικότητα του απορροφητή
α_{env}	Απορροφητικότητα του υάλινου περιβλήματος
α_{rec}	Συντελεστής θερμικής απορρόφησης του δέκτη
ΑΠ	Αποσβέσεις
β	Κλίση επιπέδου
β_n	Οπτικό βάθος αεροζόλ
γ	Λόγος των ειδικών θερμοχωρητικοτήτων
δ	1) Ηλιακή απόκλιση, 2) Διάμετρος μορίου
ΔX	Μεταβολή $\Delta X = (X - X_{ref}) / X_{ref} * 100$
ε	1) Τραχύτητα, 2) Αποτελεσματικότητα του εναλλάκτη
ε'_1	Συντελεστής σκίασης κατόπτρου λόγω δέκτη, στηριγμάτων, κτλ
ε'_2	Συντελεστής απωλειών λόγω ανακρίβειας στην παρακολούθηση του Ήλιου
ε'_3	Συντελεστής απωλειών λόγω γεωμετρίας της τοποθέτησης του κατόπτρου
ε'_4	Συντελεστής απωλειών λόγω ρύπων στο κάτοπτρο
ε'_5	Συντελεστής απωλειών λόγω ρύπων στο δέκτη
ε'_6	Συντελεστής άλλων απωλειών
ε_3	Συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας του απορροφητή
ε_4	Συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας του υάλινου περιβλήματος
ε_5	Συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας του υάλινου περιβλήματος για την εξωτερική επιφάνεια
ε_{rec}	Συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας του δέκτη
ΕκΚ	Εκταμιεύσεις Κεφαλαίου
ΕΞ	Έξοδα
ΕΣ	Έσοδα
η_{aa}	Συντελεστής απωλειών λόγω της ατμόσφαιρας μεταξύ κατόπτρου και δέκτη
η_{cos}	Συντελεστής απωλειών συνημίτονου
η_{env}	Απόδοση του υάλινου περιβλήματος
η_{is}	Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης
η_{it}	Συντελεστής απωλειών λόγω απορρόφησης θερμότητας
η_{opt}	Συντελεστής οπτικών απωλειών
η_{ref}	Συντελεστής ανάκλασης κατόπτρου
η_{sb}	Συντελεστής απωλειών σκίασης - παρεμπόδισης
θ	Γωνία πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας
ΚΚ	Καθαρά Κέρδη μετά φόρων
ΚΠΑ	Καθαρή Παρούσα Αξία
ΚΤΡ	Καθαρή Ταμειακή Ροή μετά φόρων
λ	Μήκος κύματος
ΛΑΘ	Λέβητας Ανάκτησης Θερμότητας
ΛΚ	Λειτουργικό Κόστος
ΜΚ	Μεικτά Κέρδη
ν	Κινηματικό ιξώδες
π_c	Λόγος πίεσης συμπιεστή
π_T	Λόγος πίεσης στροβίλου
ρ	Πυκνότητα
ρ_{cl}	Συντελεστής αντανάκλασης καθαρών κατόπτρων
σ	1) επιφανειακή τάση, 2) σταθερά Stefan – Boltzmann

ΣΑ	Συντελεστής Απόσβεσης
ΣΦ	Συντελεστής Φορολογίας
τ_{env}	Συντελεστής διαπερατότητας του υάλινου περιβλήματος
TK	Τόκοι
ΤΠ	Τιμή Πώλησης
ΤΡ	Ταμειακή Ροή
Φ	Φόροι
Φ	1) Γωνία ζενίθ, 2) συνάρτηση εντροπίας
ΦΕ	Φορολογητέο Εισόδημα
ΧΡ	Χρεολύσια
Ω	Φόρτιση του θαλάμου καύσης

Δείκτες

br	Θάλαμος καύσης
c	Ψυχρό ρεύμα
C	Συμπιεστής
con	Convection boiling
cond	Αγωγή
conv	Συναγωγή
cor	Ανηγμένη
DP	Σημείο σχεδίασης
f	Καύσιμο
g	Αέρια φάση
h	Θερμό ρεύμα
i	Εσωτερική
in	Είσοδος
l	Υγρή φάση
mir	Κάτοπτρο
nuc	Nucleate boiling
o	Εξωτερική
out	Έξοδος
rad	Ακτινοβολία
s	Ηλιακή
ST	Ατμοστρόβιλος
stor	Αποθήκευση
t	Χρόνος
T	Στρόβιλος

Τίτλοι Σχημάτων

Σχήμα 1.1. Φουτουριστική απεικόνιση διάταξης ηλιακής καμινάδας (ClimateTechWiki, 2016).....	5
Σχήμα 1.2. Σχηματική απεικόνιση της αρχής λειτουργίας της ηλιακής καμινάδας (Solaripedia, 2016).....	5
Σχήμα 1.3. Παραβολικό πιάτο και τα μέρη του (NewEnergyDirection, 2010).....	6
Σχήμα 1.4. Εγκατάσταση κοίλων κατόπτρων και τρόπος λειτουργίας τους (Bowman, Knotts, & K., 2007; Wesoff, 2013).....	8
Σχήμα 1.5. Απορροφητής ηλιακής ακτινοβολίας κοίλου κατόπτρου (BINE, 2013)	8
Σχήμα 1.6. Κοίλα κάτοπτρα με δεξαμενές αποθήκευσης θερμότητας σε εγκατάσταση ατμοστροβίλου (EATON, 2016)	9
Σχήμα 1.7. Εγκατάσταση ηλεκτροπαραγωγής με κοίλα κάτοπτρα (BINE, 2013). 9	
Σχήμα 1.8. Τρόπος λειτουργίας ηλιακού πύργου (WISIONS, 2014)	10
Σχήμα 1.9. Εγκατάσταση ηλεκτροπαραγωγής με πύργο (Kitskinny, 2013)	10
Σχήμα 1.10. Μεταλλικός δέκτης (EU Commission, 2005).....	11
Σχήμα 1.11. Δέκτης υπό πίεση και η ροή του μέσου (EU Commission, 2005).....	11
Σχήμα 1.12. Διατάξεις πύργου (Heide et al., 2010; Kribus et al., 1998)	12
Σχήμα 1.13. Ηλιακή τεχνολογία συναρτήσεως του χρόνου και του κόστους (Riffelmann et al., 2000).....	15
Σχήμα 2.1. Η εξίσωση του χρόνου σε πρώτα λεπτά της ώρας συναρτήσεως της ημέρας του έτους (S. A. Kalogirou, 2009).....	39
Σχήμα 2.2. Η τροχιά της Γής, η απόσταση από τον Ήλιο και η κλίση του άξονα ιδιοπεριστροφής (S. A. Kalogirou, 2009).....	40
Σχήμα 2.3. Αλλαγή σημείων ανατολής και δύσης καθώς και του μέγιστου ύψους ανάλογα με την εποχή (S. A. Kalogirou, 2009)	40
Σχήμα 2.4. Απεικόνιση των γωνιών ζενίθ (Φ), ηλιακό ύψος (α) και αζιμούθιο Ηλίου (z) (S. A. Kalogirou, 2009)	41
Σχήμα 2.5. Ηλιακή απόκλιση και ωριαία γωνία (S. A. Kalogirou, 2009)	42
Σχήμα 2.6. Διάγραμμα ηλιακών γωνιών (S. A. Kalogirou, 2009).....	44
Σχήμα 2.7. Κοίλο κάτοπτρο: εστιακή γραμμή και ηλιακές ακτίνες.....	49
Σχήμα 2.8. Παράδειγμα δέκτη κοίλου κατόπτρου (SIEMENS)	50
Σχήμα 2.9. Τομή του δέκτη παραβολικού κατόπτρου και ανάλυση των ροών θερμότητας.....	51
Σχήμα 2.10. Γωνίες επίπεδου κατόπτρου (Spelling, 2013).....	68
Σχήμα 2.11. Κάτοπτρα διατεταγμένα σε ισο-αζιμουθιακές και ισο-ακτινικές θέσεις (Kistler, 1986)	69
Σχήμα 2.12. Άμεση αποθήκευση θερμότητας.....	76
Σχήμα 2.13. Έμμεση αποθήκευση θερμότητας.....	76
Σχήμα 2.14. Διάγραμμα Q-T Λέβητα Ανάκτησης Θερμότητας	80
Σχήμα 2.15. Παράδειγμα χάρτη συμπίεστη.....	85
Σχήμα 2.16. Παράδειγμα χάρτη στροβίλου	87
Σχήμα 3.1. Απεικόνιση Component μοντέλου γωνιών στο PROOSIS	92

Σχήμα 3.2. Σύγκριση μεταξύ δοθειςών και υπολογιζόμενων τιμών για τις γωνίες ζενίθ και αζιμούθιου	93
Σχήμα 3.3. Απεικόνιση Component μοντέλου γωνιών και ακτινοβολίας στο PROOSIS.....	94
Σχήμα 3.4. Σύγκριση μεταξύ δοθειςών και υπολογιζόμενων τιμών της έντασης της ακτινοβολίας.....	95
Σχήμα 3.5. Όλες οι σειρές κατόπτρων λειτουργούν πανομοιότυπα.....	96
Σχήμα 3.6. Διαδικασία μοντελοποίησης κοίλων κατόπτρων	98
Σχήμα 3.7. Απεικόνιση Component μοντέλου παραβολικών κατόπτρων (ελαίου) στο PROOSIS.....	98
Σχήμα 3.8. Διάταξη κατόπτρων με διαφορετικά κατασκευαστικά χαρακτηριστικά.....	99
Σχήμα 3.9. Σύγκριση μεταξύ της υπολογιζόμενης και μετρούμενης θερμοκρασίας εξόδου του ελαίου.....	100
Σχήμα 3.10. Απεικόνιση Component μοντέλου παραβολικών κατόπτρων (νερού/ατμού) στο PROOSIS	100
Σχήμα 3.11. Πειραματική διάταξη άμεσης ατμοποίησης σε παραβολικά κάτοπτρα (Zarza et al., 2006)	101
Σχήμα 3.12. Σύγκριση μεταξύ της υπολογιζόμενης και μετρούμενης πίεσης, θερμοκρασίας και παροχής του νερού/ατμού	102
Σχήμα 3.13. Διαδικασία μοντελοποίησης λειτουργίας επίπεδων κατόπτρων ...	103
Σχήμα 3.14. Απεικόνιση Component μοντέλου επίπεδων κατόπτρων στο PROOSIS.....	103
Σχήμα 3.15. Ανακλώμενη θερμική ισχύς από κάτοπτρο για δύο τιμές του συντελεστή ανάκλασης.....	104
Σχήμα 3.16. Απεικόνιση διάταξης επίπεδων κατόπτρων και γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους	105
Σχήμα 3.17. Διαδικασία μοντελοποίησης δέκτη πύργου	108
Σχήμα 3.18. Απεικόνιση Component μοντέλου δέκτη αέρα στο PROOSIS.....	108
Σχήμα 3.19. Πειραματική διάταξη υβριδικού αεριοστροβίλου (Dickey, 2011) .	109
Σχήμα 3.20. Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου και πειράματος για δέκτη αέρα	110
Σχήμα 3.21. Απεικόνιση Component μοντέλου δέκτη νερού/ατμού στο PROOSIS	110
Σχήμα 3.22. Απεικόνιση Component μοντέλου δέκτη ελαίου/αλάτων στο PROOSIS.....	111
Σχήμα 3.23. Απεικόνιση Component μοντέλου δέκτη διπλής ροής στο PROOSIS	111
Σχήμα 3.24. Διαδικασία μοντελοποίησης εναλλάκτη αισθητής θερμότητας.....	113
Σχήμα 3.25. Απεικόνιση Components μοντέλων εναλλακτών αισθητής θερμότητας στο PROOSIS.....	113
Σχήμα 3.26. Διαδικασία μοντελοποίησης εναλλάκτη λανθάνουσας θερμότητας	114
Σχήμα 3.27. Απεικόνιση Components μοντέλων εναλλακτών λανθάνουσας θερμότητας στο PROOSIS.....	114
Σχήμα 3.28. Σχηματική απεικόνιση διάταξης παραγωγής ατμού με τη χρήση θερμού ελαίου	115
Σχήμα 3.29. Σύγκριση μεταξύ δοθειςών και υπολογιζόμενων τιμών της διάταξης παραγωγής ατμού με τη χρήση θερμού ελαίου	117

Σχήμα 3.30. Απεικόνιση Component μοντέλου δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας στο PROOSIS.....	118
Σχήμα 3.31. Χρονική εξέλιξη φόρτισης και αποφόρτισης	119
Σχήμα 3.32. Χρονική εξέλιξη αποθηκευμένης μάζας και θερμότητας.....	119
Σχήμα 3.33. Χρονική εξέλιξη υπολογιζόμενης θερμοκρασίας αποθήκευσης και αναφοράς.....	120
Σχήμα 3.34. Χρονική εξέλιξη θερμοκρασίας αποθήκευσης (Torras et al., 2015)	121
Σχήμα 3.35. Διαδικασία μοντελοποίησης ατμοστροβίλου	122
Σχήμα 3.36. Απεικόνιση Component μοντέλου ατμοστροβίλου στο PROOSIS ..	122
Σχήμα 4.1. Χρονική εξέλιξη τιμής φυσικού αερίου (EIA, 2017a).	132
Σχήμα 4.2. Χρονική εξέλιξη τιμής δικαιωμάτων εκπομπής CO ₂ στην ΕΕ (Borghesi & Montini, 2016).	133
Σχήμα 4.3. Σύγκριση LEC για διάφορες τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής.	135
Σχήμα 4.4. Μεταβολή της τιμής του LEC για δανεισμό και συντελεστή φορολόγησης 50%.	136
Σχήμα 4.5. Σύγκριση LEC για διάφορες τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής από διάφορες πηγές.....	137
Σχήμα 5.1. Συμβατικός και υβριδικός αεριοστροβίλος απλής ατράκτου (SS)....	139
Σχήμα 5.2. Σχηματική απεικόνιση μοντέλου υβριδικού αεριοστροβίλου απλής ατράκτου στο PROOSIS.....	141
Σχήμα 5.3. Χρονική εξέλιξη της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας	143
Σχήμα 5.4. Χρονική εξέλιξη της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας	143
Σχήμα 5.5. Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας για χειμερινή και θερινή ημέρα	145
Σχήμα 5.6. Διαφορά στην παραγόμενη ισχύ για χειμερινή και θερινή ημέρα	145
Σχήμα 5.7. Διαφορά στην κατανάλωση καυσίμου για χειμερινή και θερινή ημέρα	145
Σχήμα 5.8. Διαφορά στην ειδική κατανάλωση καυσίμου για χειμερινή και θερινή ημέρα	146
Σχήμα 5.9. Σημείο λειτουργίας στο χάρτη του συμπιεστή για συμβατικό (A) και υβριδικό (B) αεριοστροβίλο απλής ατράκτου	147
Σχήμα 5.10. Διαφορά στο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας για διάφορες τιμές του κόστους καυσίμου	148
Σχήμα 5.11. Διαφορά επιδόσεων υβριδικού και συμβατικού αεριοστροβίλου για διάφορους αριθμούς κατόπτρων.....	150
Σχήμα 5.12. Διαφορά στο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας για διάφορους αριθμούς κατόπτρων	151
Σχήμα 5.13. Διάταξη υβριδικού αεριοστροβίλου απλής ατράκτου με ανακόμιση θερμότητας (SS_R)	152
Σχήμα 5.14. Διάταξη υβριδικού αεριοστροβίλου διδύμων ατράκτων (TS).....	152
Σχήμα 5.15. Διάταξη υβριδικού αεριοστροβίλου διπλού τυμπάνου με στροβίλο ισχύος και ανάψυξη – ανακόμιση θερμότητας (2Sp3Sh_I_R)	153
Σχήμα 5.16. Διαφορά στην παραγόμενη ισχύ μεταξύ υβριδικού και συμβατικού αεριοστροβίλου για μια χειμερινή ημέρα.....	155
Σχήμα 5.17. Διαφορά στην κατανάλωση καυσίμου μεταξύ υβριδικού και συμβατικού αεριοστροβίλου για μια χειμερινή ημέρα	155
Σχήμα 5.18. Διαφορά στην ειδική κατανάλωση καυσίμου μεταξύ υβριδικού και συμβατικού αεριοστροβίλου για μια χειμερινή ημέρα	156

Σχήμα 5.19. Διαφορά στην παραγόμενη ισχύ μεταξύ υβριδικού και συμβατικού αεριοστροβίλου για μια θερινή ημέρα.....	156
Σχήμα 5.20. Διαφορά στην κατανάλωση καυσίμου μεταξύ υβριδικού και συμβατικού αεριοστροβίλου για μια θερινή ημέρα	157
Σχήμα 5.21. Διαφορά στην ειδική κατανάλωση καυσίμου μεταξύ υβριδικού και συμβατικού αεριοστροβίλου για μια θερινή ημέρα	157
Σχήμα 5.22. Σημείο λειτουργίας στο χάρτη του συμπιεστή για συμβατικό (A) και υβριδικό (B) αεριοστροβίλο διδύμων ατράκτων.....	158
Σχήμα 5.23. Διαφορά επιδόσεων μεταξύ υβριδικού και συμβατικού αεριοστροβίλου για υβριδική και ηλιακή λειτουργία για μια χειμερινή ημέρα .	160
Σχήμα 5.24. Διαφορά επιδόσεων μεταξύ υβριδικού και συμβατικού αεριοστροβίλου για υβριδική και ηλιακή λειτουργία για μια θερινή ημέρα.....	160
Σχήμα 5.25. Ολική παραγόμενη ενέργεια και παραγόμενη ενέργεια από την ηλιακή θερμότητα κατά τη διάρκεια μιας θερινής ημέρας	161
Σχήμα 5.26. IGVs σε αεριοστροβίλο (RollsRoyce, 1996).....	162
Σχήμα 5.27. Μετατόπιση του χάρτη του συμπιεστή και του σημείου λειτουργίας λόγω μείωσης της γωνίας των IGVs.....	162
Σχήμα 5.28. Μεταβολή επιδόσεων υβριδικού αεριοστροβίλου υβριδικής λειτουργίας μεταξύ λειτουργίας για διάφορες γωνίες των IGVs και πλήρως ανοιχτά IGVs	164
Σχήμα 5.29. Μεταβολή επιδόσεων υβριδικού αεριοστροβίλου ηλιακής λειτουργίας μεταξύ λειτουργίας για διάφορες γωνίες των IGVs και πλήρως ανοιχτά IGVs	164
Σχήμα 5.30. Βέλτιστη γωνία των IGVs και αύξηση παραγόμενης ισχύος για διάφορες εντάσεις ακτινοβολίας	165
Σχήμα 5.31. Σχηματική απεικόνιση θαλάμου καύσης (http://aeromodelbasic.blogspot.gr).....	166
Σχήμα 5.32. Σχηματική απεικόνιση διάταξης υβριδικού αεριοστροβίλου με στροβιλοϋπερπληρωτή	167
Σχήμα 5.33. Παραγόμενη ισχύς και θερμικός βαθμός απόδοσης αναλόγως της TIT.....	169
Σχήμα 5.34. Επίδραση ταχύτητας περιστροφής στην παραγόμενη ισχύ αναλόγως της διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας.....	172
Σχήμα 5.35. Γραμμή λειτουργίας ηλιακής διάταξης και διαγράμματα h-s για δύο σημεία λειτουργίας	173
Σχήμα 5.36. Επιδόσεις ηλιακής λειτουργίας για TIT=400°C.....	173
Σχήμα 5.37. Επιδόσεις ηλιακής λειτουργίας για TIT=600°C.....	174
Σχήμα 5.38. Επιδόσεις ηλιακής λειτουργίας για TIT=800°C.....	174
Σχήμα 5.39. Σύγκριση παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας κατά την ηλιακή λειτουργία για τις τρεις TIT	175
Σχήμα 5.40. Σύγκριση κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κατά την ηλιακή λειτουργία για τις τρεις TIT.....	175
Σχήμα 5.41. Ημερήσια παραγόμενη ενέργεια κατά τη διάρκεια του έτους για TIT=800°C.....	175
Σχήμα 5.42. Επιδόσεις υβριδικής λειτουργίας για TIT=400°C.....	176
Σχήμα 5.43. Επιδόσεις υβριδικής λειτουργίας για TIT=600°C.....	177
Σχήμα 5.44. Επιδόσεις υβριδικής λειτουργίας για TIT=800°C.....	177
Σχήμα 5.45. Σύγκριση παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας κατά την υβριδική λειτουργία για τις τρεις TIT	177

Σχήμα 5.46. Σύγκριση κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κατά την υβριδική λειτουργία για τις τρεις TIT.....	178
Σχήμα 5.47. Βέλτιστη τιμή LEC, ο αντίστοιχος αριθμός κατόπτρων και η παραγόμενη ενέργεια αναλόγως της TIT (ηλιακή λειτουργία).....	179
Σχήμα 5.48. Βέλτιστη τιμή LEC, ο αντίστοιχος αριθμός κατόπτρων και η παραγόμενη ενέργεια αναλόγως της TIT (υβριδική λειτουργία).....	179
Σχήμα 5.49. Βέλτιστη τιμή του κόστους ηλεκτροπαραγωγής για τρεις τιμές του κόστους καυσίμου	180
Σχήμα 5.50. Ο αριθμός κατόπτρων για τον οποίο επιτυγχάνεται η βέλτιστη τιμή του κόστους ηλεκτροπαραγωγής για τρεις τιμές κόστους καυσίμου	180
Σχήμα 5.51. Μεταβολή της παραγόμενης ενέργειας και του LEC από τη βέλτιστη περίπτωση για ηλιακή λειτουργία και TIT=800°C	181
Σχήμα 5.52. Συνιστώσες του LEC για τη μικρότερη τιμή του στην περίπτωση ηλιακής λειτουργίας και TIT=800°C.....	182
Σχήμα 5.53. Μεταβολή του LEC από τη βέλτιστη περίπτωση συναρτήσει του ποσοστού μείωσης του κόστους των ηλιακών συνιστωσών.....	183
Σχήμα 6.1. Διάταξη συμβατικού αεριοστροβίλου και αεριοστροβίλου με ηλιακή αναθέρμανση και απεικόνισή της στο PROOSIS	186
Σχήμα 6.2. Διαφορά επιδόσεων στο σημείο σχεδίασης μεταξύ αεριοστροβίλου με ηλιακή αναθέρμανση και συμβατικού	189
Σχήμα 6.3. Σημείο λειτουργίας στο χάρτη του συμπιεστή: συμβατική λειτουργία (A) και λειτουργία με ηλιακή αναθέρμανση (B) για TIT=1000°C	189
Σχήμα 6.4. Επίδραση χρήσης VSVs στο χάρτη του στροβίλου.....	190
Σχήμα 6.5. Προγραμματισμός λειτουργίας VSVs με βάση την ανηγμένη παροχή και τις ανηγμένες στροφές για TIT=1000°C	190
Σχήμα 6.6. Διαφορά επιδόσεων στο σημείο σχεδίασης μεταξύ αεριοστροβίλου με ηλιακή αναθέρμανση με έλεγχο των VSVs και συμβατικού	191
Σχήμα 6.7. Διαφορά ετήσιων επιδόσεων μεταξύ αεριοστροβίλου ηλιακής αναθέρμανσης και συμβατικού για TIT=800°C.....	192
Σχήμα 6.8. Διαφορά παραγόμενης ενέργειας μεταξύ αεριοστροβίλου ηλιακής αναθέρμανσης και συμβατικού.....	192
Σχήμα 6.9. Διαφορά θερμικού βαθμού απόδοσης καυσίμου μεταξύ αεριοστροβίλου ηλιακής αναθέρμανσης και συμβατικού.....	193
Σχήμα 6.10. Ποσοστό συνεισφοράς της ηλιακής ενέργειας σε αεριοστροβίλο ηλιακής αναθέρμανσης.....	193
Σχήμα 6.11. Διαφορά οικονομικών επιδόσεων μεταξύ αεριοστροβίλου ηλιακής αναθέρμανσης και συμβατικού αεριοστροβίλου για 2\$/MBTU	194
Σχήμα 6.12. Διαφορά οικονομικών επιδόσεων μεταξύ αεριοστροβίλου ηλιακής αναθέρμανσης και συμβατικού αεριοστροβίλου για 10\$/MBTU	195
Σχήμα 6.13. Διαφορά οικονομικών επιδόσεων μεταξύ αεριοστροβίλου ηλιακής αναθέρμανσης και συμβατικού αεριοστροβίλου για 20\$/MBTU	195
Σχήμα 6.14. Κόστος ηλεκτροπαραγωγής για τιμή κόστους καυσίμου 20\$/MBTU για τις τρεις περιπτώσεις TIT	196
Σχήμα 6.15. Διατάξεις αεριοστροβίλου με έγχυση ηλιακού ατμού παραγόμενου από (α) δέκτη-πύργου, β) παραβολικά κάτοπτρα και η απεικόνισή τους στο PROOSIS.....	198
Σχήμα 6.16. Διαφορά ετήσιων επιδόσεων μεταξύ ηλιακών STIG και συμβατικού αεριοστροβίλου χωρίς STIG.....	200

Σχήμα 6.17. Διαφορά παραγόμενης ποσότητας ατμού μεταξύ ηλιακών διατάξεων STIG με δέκτη πύργου και παραβολικά κάτοπτρα	201
Σχήμα 6.18. Συμβατική και υβριδικές διατάξεις STIG και η απεικόνισή τους στο PROOSIS.....	202
Σχήμα 6.19. Σημεία λειτουργίας του συμπιεστή για υβριδική διάταξη STIG κατά τη διάρκεια του έτους.....	205
Σχήμα 6.20. Διαφορά οικονομικών επιδόσεων μεταξύ υβριδικών και συμβατικού STIG	207
Σχήμα 6.21. Οικονομικές επιδόσεις υβριδικών διατάξεων STIG.....	207
Σχήμα 6.22. Παράδειγμα διαθέσιμης και χρησιμοποιούμενης ηλιακής ενέργειας	208
Σχήμα 6.23. Διάταξη υβριδικού αεριοστροβίλου με δέκτη διπλής ροής (Dual Fluid Receiver – DFR) και η απεικόνισή της στο PROOSIS.....	209
Σχήμα 6.24. Διαφορά παραγόμενης ενέργειας μεταξύ υβριδικών αεριοστροβίλων (συνήθους και με δέκτη διπλής ροής) και συμβατικού για μια θερινή ημέρα....	210
Σχήμα 6.25. Οικονομικές επιδόσεις συνήθους και υβριδικών αεριοστροβίλων	211
Σχήμα 7.1. Διάταξη ηλιακού ατμοστροβίλου με έμμεση ατμοπαραγωγή από παραβολικά κάτοπτρα (TroughsHTF)	214
Σχήμα 7.2. Διάταξη ηλιακού ατμοστροβίλου με άμεση ατμοπαραγωγή από παραβολικά κάτοπτρα (TroughsDSG)	214
Σχήμα 7.3. Διάταξη ηλιακού ατμοστροβίλου με άμεση ατμοπαραγωγή από δέκτη πύργου (TowerDSG).....	214
Σχήμα 7.4. Λόγος καθαρής παραγόμενης ισχύος μεταξύ σεναρίων λειτουργίας c1 και c2 συναρτήσεως του λόγου της διαθέσιμης ηλιακής θερμότητας προς αυτή του σημείου σχεδίασης	217
Σχήμα 7.5. Λόγος παροχών ατμού και ελαίου μεταξύ σεναρίων λειτουργίας c1 και c2 συναρτήσεως του λόγου της διαθέσιμης ηλιακής θερμότητας προς αυτή του σημείου σχεδίασης	218
Σχήμα 7.6. Λόγος θερμοκρασιών ατμού και ελαίου μεταξύ σεναρίων λειτουργίας c1 και c2 συναρτήσεως του λόγου της διαθέσιμης ηλιακής θερμότητας προς αυτή του σημείου σχεδίασης.....	218
Σχήμα 7.7. Καθαρή παραγόμενη ισχύς διατάξεων ηλιακών ατμοστροβίλων για χειμερινή ημέρα.....	219
Σχήμα 7.8. Καθαρή παραγόμενη ισχύς διατάξεων ηλιακών ατμοστροβίλων για θερινή ημέρα.....	220
Σχήμα 7.9. Διατάξεις υβριδικών συνδυασμένων κύκλων.....	222
Σχήμα 7.10. Σχηματική απεικόνιση στο PROOSIS του μοντέλου συνδυασμένου κύκλου με υβριδικό αεριοστροβίλο (CC_HybGT).....	224
Σχήμα 7.11. Σχηματική απεικόνιση στο PROOSIS του μοντέλου συνδυασμένου κύκλου με υβριδικό ατμοστροβίλο (CC_HybST).....	224
Σχήμα 7.12. Διαφορά της καθαρής παραγόμενης ισχύος μεταξύ των υβριδικών και του συμβατικού συνδυασμένου κύκλου για τα δύο πεδία κατόπτρων	227
Σχήμα 7.13. Διαφορά της παραγόμενης ισχύος αεριοστροβίλου και ατμοστροβίλου μεταξύ των υβριδικών και του συμβατικού συνδυασμένου κύκλου για μεγάλο πεδίο κατόπτρων	227
Σχήμα 7.14. Διαφορά της κατανάλωσης καυσίμου μεταξύ των υβριδικών και του συμβατικού συνδυασμένου κύκλου για τα δύο πεδία κατόπτρων	229
Σχήμα 7.15. Ποσοστό συνεισφοράς της ηλιακής ενέργειας των υβριδικών συνδυασμένων κύκλων για τα δύο πεδία κατόπτρων	229

Σχήμα 7.16. Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας για τον συμβατικό και τους υβριδικούς συνδυασμένους κύκλους και για μεγάλο πεδίο κατόπτρων.....	230
Σχήμα 7.17. Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας για τον συμβατικό και τους υβριδικούς συνδυασμένους κύκλους και για μικρό πεδίο κατόπτρων.....	230
Σχήμα 8.1. Μεταβολή επιδόσεων μεταξύ υβριδικού και συμβατικού αεριοστροβίλου για υγιή και κατάσταση λειτουργίας με βλάβη για μια καλοκαιρινή μέρα θεωρώντας μόνο επικαθίσεις κατόπτρων	236
Σχήμα 8.2. Μεταβολή επιδόσεων μεταξύ υβριδικού και συμβατικού αεριοστροβίλου για υγιή και κατάσταση λειτουργίας με βλάβη για μια καλοκαιρινή μέρα θεωρώντας επικαθίσεις κατόπτρων και συμπιεστή.....	237
Σχήμα 8.3. Μεταβολή επιδόσεων μεταξύ υβριδικού και συμβατικού αεριοστροβίλου για υγιή και κατάσταση λειτουργίας με βλάβη για μια καλοκαιρινή μέρα θεωρώντας επικαθίσεις κατόπτρων και συμπιεστή για ώρες 09:00-17:00.....	237
Σχήμα 8.4. Μεταβολή επιδόσεων υβριδικού αεριοστροβίλου μεταξύ υγιούς και κατάστασης λειτουργίας με βλάβη για μια καλοκαιρινή μέρα.....	238
Σχήμα 8.5. Μεταβολή ετήσιων επιδόσεων μεταξύ υγιούς και κατάστασης λειτουργίας με 50 απορυθμισμένα κάτοπτρα για τρία μεγέθη πεδίου κατόπτρων	239
Σχήμα 8.6. Μεταβολή επιδόσεων ηλιακού ατμοστροβίλου μεταξύ λειτουργίας με επικαθίσεις κατόπτρων και υγιούς για διάφορες τιμές μεταβολής της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας	240
Σχήμα 8.7. Μεταβολή επιδόσεων ηλιακού ατμοστροβίλου μεταξύ λειτουργίας με σπασμένο υάλινο περίβλημα κατόπτρων και υγιούς για διάφορες τιμές μεταβολής της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας.....	241
Σχήμα 8.8. Μεταβολή παραγόμενης ισχύος ηλιακού ατμοστροβίλου μεταξύ λειτουργίας με σπασμένο υάλινο περίβλημα κατόπτρων και υγιούς για διάφορα ποσοστά κατόπτρων με βλάβη	242
Σχήμα 8.9. Υπογραφή βλάβης για την περίπτωση επικαθίσεων στα κάτοπτρα	242
Σχήμα 8.10. Υπογραφή βλάβης για την περίπτωση θραύσης του υάλινου περιβλήματος	243

Τίτλοι Πινάκων

Πίνακας 1.1. Σύγκριση Φ/Β και ηλιοθερμικών διατάξεων.....	3
Πίνακας 1.2. Σύγκριση ηλιακών διατάξεων (Müller-Steinhagen & Trieb, 2004) .	15
Πίνακας 1.3. Ηλεκτροπαραγωγή ανά τεχνολογία έως το 2009 (Greenpeace et al., 2009)	15
Πίνακας 2.1. Επεξήγηση των στοιχείων που απεικονίζονται στο Σχήμα 2.9.....	52
Πίνακας 3.1. Μετρηθείσες/υπολογισθείσες τιμές κατά την διεξαγωγή του πειράματος (Dickey, 2011).....	109
Πίνακας 3.2. Υπολογιζόμενα χαρακτηριστικά ροής διάταξης παραγωγής ατμού με θερμό έλαιο.....	115
Πίνακας 3.3. Υπολογισθείσες τιμές θερμοκρασίας εξόδου θερμού ελαίου, παροχής νερού και UA	116
Πίνακας 4.1. Πίνακας ταμειακών ροών	129
Πίνακας 4.2. Συντελεστές εκπομπής CO ₂ για φυσικό αέριο και πετρέλαιο.....	133
Πίνακας 4.3. Δεδομένα υπολογισμού LEC (IEA-NEA-OECD, 2010)	134
Πίνακας 5.1. Χαρακτηριστικά σημείου σχεδίασης αεριοστροβίλου και ηλιακού κομματιού.....	142
Πίνακας 5.2. Σύγκριση ετήσιων επιδόσεων μεταξύ υβριδικού και συμβατικού αεριοστροβίλου	144
Πίνακας 5.3. Οικονομικά μεγέθη διάταξης υβριδικού και συμβατικού αεριοστροβίλου	148
Πίνακας 5.4. Επίδραση της τιμής των σχεδιαστικών παραμέτρων στις επιδόσεις	149
Πίνακας 5.5. Χαρακτηριστικά σημείου σχεδίασης αεριοστροβίλων.....	153
Πίνακας 5.6. Διαφορά ετήσιων επιδόσεων μεταξύ υβριδικών και συμβατικών αεριοστροβίλων	154
Πίνακας 5.7. Χαρακτηριστικά ονομαστικού σημείου λειτουργίας στροβιλοϋπερπληρωτή.....	168
Πίνακας 5.8. Χαρακτηριστικά σημείου σχεδίασης ηλιακού κομματιού και λοιπών συνιστωσών.....	168
Πίνακας 5.9. Οικονομικά μεγέθη διάταξης υβριδικού αεριοστροβίλου με στροβιλοϋπερπληρωτή.....	171
Πίνακας 6.1. Χαρακτηριστικά σημείου σχεδίασης αεριοστροβίλου και ηλιακού κομματιού.....	188
Πίνακας 6.2. Παράμετροι σχεδίασης ηλιακού κομματιού	199
Πίνακας 6.3. Επιδόσεις σημείου σχεδίασης συμβατικού αεριοστροβίλου και ηλιακού STIG.....	199
Πίνακας 6.4. Επιδόσεις σημείου σχεδίασης εναλλακτών	203
Πίνακας 6.5. Επιδόσεις σημείου σχεδίασης συμβατικού και υβριδικών STIG ...	204
Πίνακας 6.6. Διαφορά ετήσιων επιδόσεων μεταξύ υβριδικών και συμβατικού STIG	204
Πίνακας 6.7. Περιθώριο πάλμωσης συμβατικού καυσίμου, συμβατικού και υβριδικών STIG αεριοστροβίλων	206
Πίνακας 6.8. Οικονομικά μεγέθη υβριδικής διάταξης STIG.....	206

Πίνακας 6.9. Διαφορά ετήσιων επιδόσεων μεταξύ υβριδικών αεριοστροβίλων (συνήθους και με δέκτη διπλής ροής) και συμβατικού για δύο μεγέθη πεδίου κατόπτρων	210
Πίνακας 7.1. Χαρακτηριστικά σημείου σχεδίασης διατάξεων ηλιακού ατμοστροβίλου	216
Πίνακας 7.2. Σύγκριση ετήσιων επιδόσεων διατάξεων ηλιακών ατμοστροβίλων	220
Πίνακας 7.3. Οικονομικά μεγέθη διατάξεων ηλιακού ατμοστροβίλου.....	221
Πίνακας 7.4. Χαρακτηριστικά σημείου σχεδίασης αεριοστροβίλου, ατμοστροβίλου και ηλιακού κομματιού	225
Πίνακας 7.5. Οικονομικά μεγέθη διατάξεων συνδυασμένου κύκλου.....	226
Πίνακας 7.6. Διαφορά ετήσιων επιδόσεων μεταξύ υβριδικών και συμβατικού συνδυασμένου κύκλου	231

Κεφάλαιο 1: Ηλιακή Ενέργεια Και Θερμικές Στροβιλομηχανές

1.1 Γενικά

Για τη μείωση της εξάρτησης από τα συμβατικά καύσιμα και τη μείωση των ρύπων που παράγονται από την καύση τους, αναζητήθηκαν πηγές ενέργειας φιλικές προς το περιβάλλον, μη ρυπογόνες, σε αφθονία και ουσιαστικά ανεξάντλητες. Τέτοιες πηγές είναι οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) στις οποίες συμπεριλαμβάνεται η ηλιακή ενέργεια, η αιολική ενέργεια, η ενέργεια των νερών των ποταμών κ.α. Αυτές οι πηγές ενέργειας διατίθενται από τη φύση και η χρησιμοποίησή τους δεν απαιτεί ρυπογόνες διαδικασίες όπως η καύση. Επίσης, είναι ανεξάντλητες αφού παράγονται από συνεχόμενες κυκλικές φυσικές διεργασίες. Η ενέργεια του νερού έχει αξιοποιηθεί από την αρχαιότητα ακόμα με τη δημιουργία νερόμυλων και άλλων παρόμοιων κατασκευών δίδοντας κίνηση σε κάποια μηχανή. Στις μέρες μας χρησιμοποιείται αυτή η ενέργεια από τα υδροηλεκτρικά εργοστάσια για την παραγωγή ρεύματος. Επίσης εύκολα αξιοποιήθηκε και η αιολική ενέργεια με τη χρήση διατάξεων που μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανική. Παλαιότερα αξιοποιήθηκε μέσω ανεμόμυλων και για την άντληση νερού από πηγάδια. Στις μέρες μας, αξιοποιείται μέσω των ανεμογεννητριών για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Η ηλιακή ενέργεια, αν και βρίσκεται σε αφθονία, δεν αξιοποιήθηκε λόγω της μικρής συγκέντρωσής της και της ανάγκης διατάξεων για τη μετατροπή της σε 'ευγενέστερη' μορφή, όπως η μηχανική ή η ηλεκτρική ενέργεια. Η δυναμική της ηλιακής ενέργειας είναι πολύ υψηλή, αφού αν και από την εκπεμπόμενη από τον Ήλιο θερμική ισχύ, στη Γή φτάνει μόνο ένα μικρό μέρος ($1,7 \times 10^{14}$ kW), αυτό σε περίοδο 1,5 ώρας αντιστοιχεί στην ετήσια παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας (900 EJ).

Τα τελευταία χρόνια, με την πρόοδο της επιστήμης, κυρίως στον τομέα των υλικών, επιτεύχθηκε η παραγωγή των φωτοβολταϊκών κυψελών με τις οποίες η ηλιακή ενέργεια μπορεί να μετατραπεί απευθείας σε ηλεκτρισμό. Ένας άλλος τρόπος εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας είναι με τη χρήση κατόπτρων τα οποία συγκεντρώνουν τις ανακλώμενες δέσμες τους σε μια μικρή περιοχή, με αποτέλεσμα την αύξηση της συγκέντρωσης της ηλιακής ενέργειας και την παραγωγή θερμότητας. Αυτή η μέθοδος λέγεται πως χρησιμοποιήθηκε από τον Αρχιμήδη κατά την πολιορκία των Συρακουσών για να καταστρέψει τα εχθρικά πλοία. Η θερμότητα που προέρχεται από τη συγκέντρωση των ηλιακών

ακτίνων δύναται να αξιοποιηθεί από θερμικές μηχανές (π.χ. αεριοστρόβιλος, ατμοστρόβιλος) για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας αντικαθιστώντας εν μέρει ή εν όλω την θερμική ενέργεια του καυσίμου. Οι διατάξεις που λειτουργούν με αυτόν τον τρόπο ονομάζονται ηλιοθερμικές διατάξεις ισχύος (Solar Thermal Power Plant – STPP). Η μελέτη τέτοιων διατάξεων αποτελεί το αντικείμενο της παρούσας διατριβής.

Πριν προχωρήσουμε στην παρουσίαση των χαρακτηριστικών τέτοιων διατάξεων και στις τρέχουσες σχετικές εξελίξεις, παρουσιάζουμε μια σύντομη συγκριτική επισκόπηση φωτοβολταϊκών και ηλιοθερμικών εγκαταστάσεων.

1.2 Φωτοβολταϊκές και Ηλιοθερμικές τεχνολογίες

Οι διατάξεις φωτοβολταϊκών (PV) έχουν γνωρίσει σήμερα αυξημένη διάδοση και υπερτερούν κατά πολύ σε εγκατεστημένη ισχύ σε σύγκριση με τις ηλιοθερμικές διατάξεις (STPP). Οι κύριοι λόγοι της επικράτησης των φωτοβολταϊκών είναι η δραματική μείωση του κόστους τους και η δυνατότητά τους να χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μικρής κλίμακας (οροφές σπιτιών). Ας δούμε όμως τα κύρια χαρακτηριστικά της κάθε τεχνολογίας.

Όσον αφορά το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οι διατάξεις PV κυμαίνονται στο εύρος 100 – 220 USD/MWh τη στιγμή που οι διατάξεις STPP βρίσκονται στο εύρος 200 – 300 USD/MWh (EIA, 2015; IEA, 2015; IRENA, 2015).

Επιπλέον, οι διατάξεις STPP αξιοποιούν μόνο την άμεση ακτινοβολία, σε αντίθεση με τις διατάξεις PV που χρησιμοποιούν και τη διάχυτη. Συνεπώς, οι διατάξεις PV μπορούν να χρησιμοποιηθούν ευρύτερα και δεν περιορίζονται από την τιμή της άμεσης ακτινοβολίας όπως οι STPP (IEA, 2014a, 2014b).

Ακόμα, οι διατάξεις STPP απαιτούν μεγαλύτερη έκταση ανά εγκατεστημένο MW (10 στρέμματα/MW) σε σχέση με τις διατάξεις PV (8 στρέμματα/MW) αφού αξιοποιούν μόνο την άμεση ακτινοβολία (Chu, 2011; Mohaghegh, 2015).

Οι διατάξεις PV μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακόμη και σε οικιακή κλίμακα -σε αντίθεση με τις διατάξεις STPP που έχουν νόημα μόνο σε μεγάλη κλίμακα- και συνεπώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αποκεντρωμένη ηλεκτροπαραγωγή (Chu, 2011; Gage & Borry, 2012; Mohaghegh, 2015).

Όμως, οι διατάξεις STPP έχουν τη δυνατότητα να αξιοποιήσουν συνήθεις υπάρχουσες θερμικές διατάξεις αντικαθιστώντας την θερμική ενέργεια του καυσίμου με αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους κατασκευής (Gage & Borry, 2012).

Επίσης, οι διατάξεις STPP μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για συμπαραγωγή με αποτέλεσμα να αυξάνει ακόμη περισσότερο ο βαθμός απόδοσής τους (Gage & Borry, 2012).

Οι ηλιοθερμικές διατάξεις (παρ' ότι απαιτούν μεγαλύτερη έκταση ανά εγκατεστημένο MW αφού αξιοποιούν μόνο την άμεση ακτινοβολία) παρουσιάζουν μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης μετατροπής της ηλιακής ενέργειας

σε ηλεκτρική (Chu, 2011), ειδικά αν ληφθεί υπ' όψιν και η χρήση inverter στα PV για την μετατροπή του παραγόμενου συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο (Chu, 2011).

Οι διατάξεις STPP δύνανται να αποθηκεύσουν θερμότητα, είτε λόγω της ίδιας θερμικής τους αδράνειας, είτε με χωριστές μονάδες αποθήκευσης και συνεπώς να συνεχίσουν να λειτουργούν σε περίπτωση σύντομης νέφωσης χωρίς να δημιουργούν έλλειμμα στο δίκτυο (Chu, 2011). Επίσης, στη περίπτωση που χρησιμοποιηθεί αποθήκευση θερμότητας, μπορούν να λειτουργούν ακόμα και μετά τη δύση του Ήλιου με συνέπεια τη μείωση του κόστους ηλεκτροπαραγωγής (Orosz, 2015). Η μεγαλύτερη ασφάλεια του δικτύου και η περαιτέρω αύξηση του χρόνου λειτουργίας μπορεί να επιτευχθεί και με τη χρήση συμβατικών ή και ανανεώσιμων καυσίμων που θα παρέχουν την απαιτούμενη θερμότητα στον κύκλο. Αντίθετα, οι διατάξεις PV δύνανται να αποθηκεύσουν τον παραγόμενο ηλεκτρισμό μόνο σε μπαταρίες (χημική αποθήκευση) που είναι δαπανηρότερες σε σχέση με την αποθήκευση θερμότητας (Orosz, 2015). Κατά συνέπεια, οι διατάξεις STPP δύνανται να παρέχουν την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια προγραμματισμένα και διαχειρίσιμα με συγκριτικά μικρότερο κόστος.

Τέλος, σημαντικός παράγοντας σύγκρισης είναι και η συνολική περιβαλλοντική επίπτωση της κάθε εγκατάστασης λαμβάνοντας υπ' όψιν τους πόρους για την κατασκευή των συνιστωσών, τη λειτουργία της εγκατάστασης και την ανακύκλωση των συνιστωσών στο τέλος της ζωής της εγκατάστασης. Ο Caballero (2012) πραγματοποιώντας ανάλυση του κύκλου ζωής (LCA) διατάξεων PV και STPP καταλήγει πως οι PV είναι κατά σχεδόν 3 φορές πιο ρυπογόνες (σε ισοδύναμα κιλά CO₂). Επίσης, διαπιστώνει πως οι διατάξεις STPP παράγουν την ισοδύναμη ενέργεια που απαιτήθηκε για την δημιουργία τους κατά μέσο όρο 4 φορές γρηγορότερα από ότι οι διατάξεις PV. Τα ανωτέρω συνοψίζει ο Πίνακας 1.1.

	PV	STPP
LEC	Μικρότερο κόστος ηλεκτροπαραγωγής	Υψηλότερο κόστος ηλεκτροπαραγωγής
Κύκλος Ζωής	3 φορές περισσότερα ισοδύναμα κιλά CO ₂	4 φορές γρηγορότερα η παραγωγή ενέργειας κατασκευής
Retrofitting	Μη δυνατό	Αντικατάσταση συμβατικής πρόσδοσης θερμότητας σε υπάρχουσες εγκαταστάσεις
Συμπαγωγή	Μη δυνατό	Δυνατότητα συμπαγωγής (αύξηση απόδοσης)
Αποθήκευση	Μπαταρίες (υψηλό κόστος)	Θερμική αδράνεια, διατάξεις αποθήκευσης θερμότητας
Dispatchability	Μόνο με χρήση αποθήκευσης	Θερμική αδράνεια και αποθήκευση
Χώρος	Λιγότερος	Περισσότερος
Εύρος Ισχύος	Όλο το εύρος	Μεγάλη κλίμακα
Απόδοση	Χαμηλότερη	Υψηλότερη
Ασφάλεια Δικτύου	Μηδενική	Υψηλή (θερμική αδράνεια, αποθήκευση)
Ηλιακή Ακτινοβολία	Άμεση & διάχυτη	Μόνο άμεση

Πίνακας 1.1. Σύγκριση Φ/Β και ηλιοθερμικών διατάξεων

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι παρ' ότου οι φωτοβολταϊκές διατάξεις έχουν σημαντικά μειωμένο κόστος σήμερα, οι ηλιοθερμικές θα μπορούσαν να παράσχουν συγκεκριμένα πλεονεκτήματα. Αν μάλιστα μειωθεί το κόστος τους θα μπορούσε να υπάρξει μεγαλύτερη διάδοσή τους, δίνοντας αυτά ακριβώς τα πλεονεκτήματα.

Όπως θα δούμε παρακάτω, οι ηλιοθερμικές τεχνολογίες έχουν σημαντικά περιθώρια βελτίωσης, κάτι που μπορεί να συμβάλει στη μείωση του κόστους τους και στην παραπέρα εξάπλωσή τους. Η μελέτη τέτοιων βελτιώσεων θα εξεταστεί λεπτομερέστερα. Πριν όμως προχωρήσουμε παραπέρα, παρουσιάζουμε τα βασικά χαρακτηριστικά των διατάξεων που υφίστανται σήμερα.

1.3 Διατάξεις συγκέντρωσης και αξιοποίησης της ηλιακής ακτινοβολίας

Τα τελευταία χρόνια, οι ηλιοθερμικές διατάξεις έχουν αποκτήσει ενδιαφέρον και έχουν αναπτυχθεί διάφορες διατάξεις συγκέντρωσης και αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας. Οι βασικότερες τέτοιες διατάξεις, για τις οποίες εν συνεχεία δίνεται συνοπτική περιγραφή είναι οι εξής (Greenpeace, ESTELA, & SolarPaces, 2009; Greenpeace, ESTIA, & SolarPaces, 2005; Riffelmann, Krüger, & Pitz-Paal, 2000):

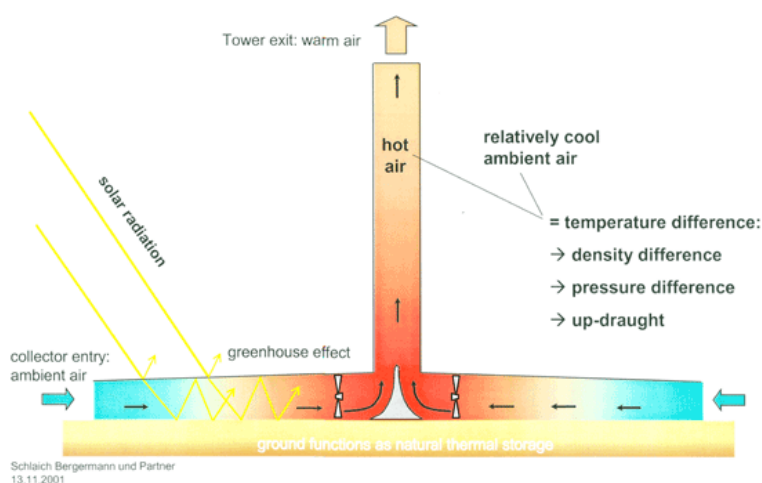
- 1) καμινάδα (Solar Chimney / Updraft Tower)
- 2) παραβολικό πιάτο (Parabolic Dish)
- 3) κοίλα κάτοπτρα (Trough)
- 4) πύργος (Solar Tower)

1.3.1 Ηλιακή καμινάδα (Solar Chimney / Updraft Tower)

Η διάταξη της καμινάδας αποτελείται από μια εγκατάσταση καμινάδας η οποία στη βάση της έχει στρόβιλο (κατακόρυφο) ή στροβίλους (οριζόντιους). Περιφερειακά της βάσης της, υπάρχει διαφανές υλικό ώστε να δημιουργεί φαινόμενο θερμοκηπίου για την θέρμανση του ατμοσφαιρικού αέρα ο οποίος κινείται προς την καμινάδα, εισέρχεται σε αυτή από τη βάση της περνώντας από τους στροβίλους κινώντας τους και εξέρχεται από την κορυφή της. Το Σχήμα 1.1 και το Σχήμα 1.2 απεικονίζουν μια ηλιακή εγκατάσταση καμινάδας.



Σχήμα 1.1. Φουτουριστική απεικόνιση διάταξης ηλιακής καμινάδας (ClimateTechWiki, 2016)



Σχήμα 1.2. Σχηματική απεικόνιση της αρχής λειτουργίας της ηλιακής καμινάδας (Solaripedia, 2016)

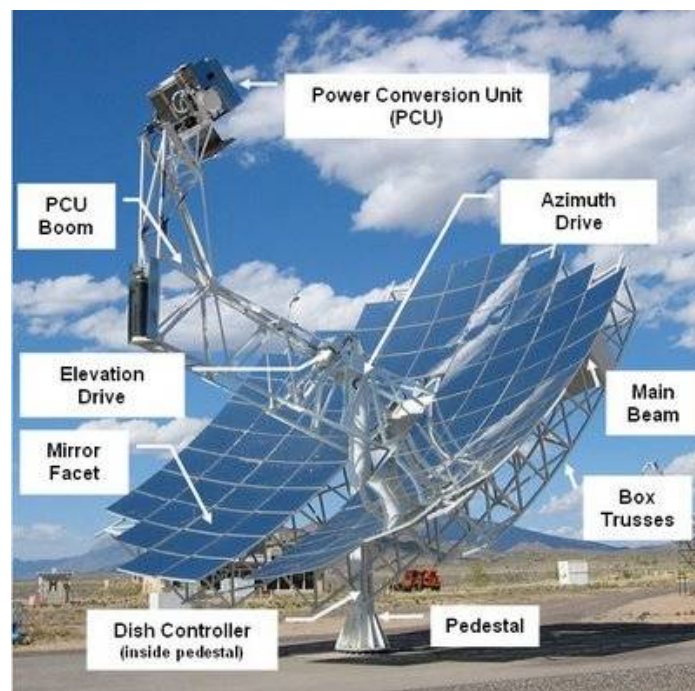
Η κίνηση του αέρα προκαλείται από τη διαφορά της πυκνότητας αυτού μεταξύ της βάσης (είσοδος) και της κορυφής (έξοδος) της καμινάδας, λόγω θερμοκρασιακής και υψομετρικής διαφοράς.

Η ηλιακή καμινάδα βρίσκεται ακόμα υπό ανάπτυξη και βελτίωση. Η πρώτη εγκατάσταση που κατασκευάστηκε ήταν το 1982 στην Ισπανία για πειραματικούς λόγους (HAAF, FRIEDRICH, MAYR, & SCHLAICH, 1983). Είχε ισχύ 50kW, καμινάδα ύψους σχεδόν 200m και επιφάνεια συλλογής ηλιακής ακτινοβολίας 46.000m². Από τα δεδομένα της πειραματικής εγκατάστασης και από μοντέλα που δημιουργήθηκαν υπολογίζεται ότι μια καμινάδα ύψους 1000m για να μπορεί να παράξει 100MW, απαιτείται περιοχή συλλογής ηλιακής ακτινοβολίας 20km².

Η ηλιακή καμινάδα αποτελεί μια απλή εφαρμογή που δεν απαιτεί τη χρήση θερμικών μηχανών, παρά μόνο στροβίλων εδρασμένους στη βάση της. Επιπλέον, ο χώρος θέρμανσης του αέρα μπορεί να αξιοποιηθεί και για γεωργική παραγωγή, αφού λειτουργεί ως θερμοκήπιο. Τα κυριότερα προβλήματα που συνδέονται με την ηλιακή καμινάδα (αλλά και με τις λοιπές διατάξεις) αφορούν στη δέσμευση και χρήση τεράστιας έκτασης για την θέρμανση του αέρα και στην αποθήκευση θερμότητας ώστε η εγκατάσταση να λειτουργεί απρόσκοπτα σε συννεφιά ή και τη νύχτα. Επίσης, στη διάταξη της καμινάδας προκύπτουν και ιδιαίτερα κατασκευαστικά προβλήματα που συνδέονται με την κατασκευή μιας τόσο μεγάλης σε ύψος καμινάδας. Για την αντιμετώπιση του τελευταίου προβλήματος έχει μελετηθεί σε θεωρητικό επίπεδο η προσέγγιση μιας ελεύθερα κινούμενης καμινάδας κατασκευασμένης από μαλακά και εύκαμπτα υλικά (Putkaradze, Vorobieff, Mammoli, & Fathi, 2013).

1.3.2 Παραβολικό πιάτο (Parabolic Dish)

Η εγκατάσταση του παραβολικού πιάτου αποτελείται από κάτοπτρο (ή κάτοπτρα) με παραβολικό σχήμα τοποθετημένα σε βάση η οποία ακολουθεί (κινούμενη σε δύο άξονες) την κίνηση του Ήλιου για βέλτιστη απόδοση. Στο εστιακό κέντρο του πιάτου συγκεντρώνονται οι από αυτό ανακλώμενες ηλιακές ακτίνες με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας. Στο εστιακό κέντρο είναι εγκατεστημένη η μονάδα μετατροπής της ηλιακής ενέργειας. Το Σχήμα 1.3 απεικονίζει μια εγκατάσταση παραβολικού πιάτου.



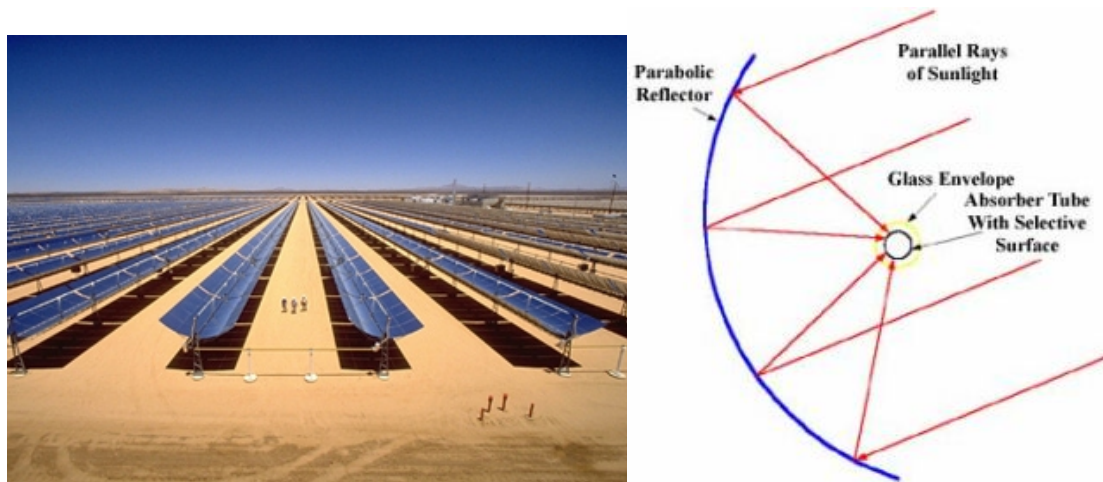
Σχήμα 1.3. Παραβολικό πιάτο και τα μέρη του (NewEnergyDirection, 2010)

Στην εγκατάσταση του παραβολικού πιάτου συνηθέστερη είναι η χρήση μηχανής που βασίζεται στον κύκλο Stirling. Ο κύκλος αυτός αποτελείται από: 1) ισοθερμοκρασιακή εκτόνωση, 2) ισόχωρη ψύξη, 3) ισοθερμοκρασιακή συμπίεση και 4) ισόχωρη θέρμανση. Η θερμότητα που απαιτεί ο κύκλος παρέχεται από την ηλιακή ακτινοβολία η οποία προσδίδεται στο αέριο το οποίο αποτελεί το εργαζόμενο μέσο του κύκλου. Η θερμοκρασία λόγω ηλιακής θέρμανσης μπορεί να φτάσει και στην περιοχή των 600-700 °C. Η διάταξη αυτή δεν περιλαμβάνει αποθήκευση θερμότητας με αποτέλεσμα τη μη λειτουργία της μηχανής σε καταστάσεις συννεφιάς ή το βράδυ. Μπορεί όμως να χρησιμοποιηθεί πρόσδοση θερμότητας με καύση, αν είναι επιθυμητή η συνεχής λειτουργία της μηχανής. Σημειώνεται πως η διάταξη του παραβολικού πιάτου δύναται να χρησιμοποιεί φωτοβολταϊκά κάτοπτρα αντί θερμική μηχανής.

Εγκαταστάσεις αυτού του είδους παράγουν ισχύ της τάξης των 8-25kW για ηλιακή ακτινοβολία 1000W/m² (Howard & Harley, 2010) απαιτώντας επιφάνεια 8-12 m²MWh⁻¹y⁻¹ (Müller-Steinhagen & Trieb, 2004). Για μεγαλύτερη ισχύ χρησιμοποιούνται περισσότερες της μιας μηχανές όπως στην Αριζόνα των ΗΠΑ (1,5MW) (NREL, 2013c) ενώ ήδη μελετώνται ή και κατασκευάζονται και άλλα έργα. Το παραβολικό πιάτο έχει πολύ υψηλή απόδοση όταν χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας της τάξεως μερικών kW. Η φύση της διάταξης επιτρέπει τη χρήση της στην ηλεκτροδότηση εγκαταστάσεων οι οποίες βρίσκονται μακριά από το ηλεκτρικό δίκτυο και συνήθως λειτουργούν μέσω τηλεχειρισμού. Η διάταξη αυτή μειονεκτεί όταν είναι επιθυμητή η παραγωγή περισσότερης ισχύος από την εγκατάσταση αφού δεν είναι δυνατή η μεγέθυνσή της αλλά απαιτείται η κατασκευή επιπλέον αριθμού παραβολικών πιάτων που το κάθε ένα θα φέρει τη δικιά του μηχανή. Ακόμα, λόγω του μεγέθους, αλλά και της συνεχούς κίνησης του πιάτου που φέρει τη μονάδα μετατροπής της ηλιακής ενέργειας, μπορεί να εμφανιστούν κατασκευαστικές δυσκολίες σχετιζόμενες με τη σύνδεσή του με τη γραμμή του δικτύου, με την παροχή καυσίμου (σε υβριδική διάταξη), την μηχανική καταπόνησή του από τον άνεμο κτλ.

1.3.3 Γραμμικά κοίλα κάτοπτρα (Troughs)

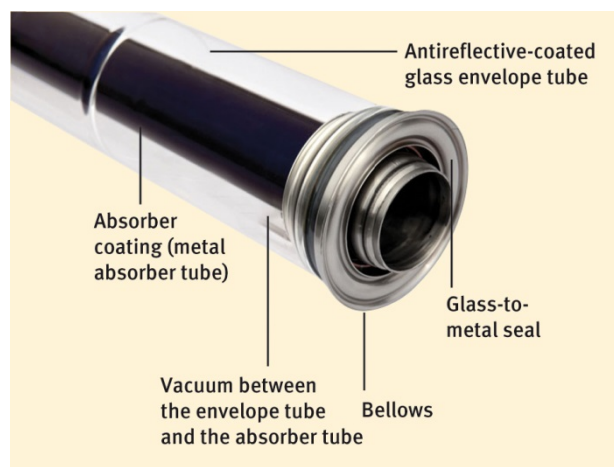
Στην εγκατάσταση των κοίλων κατόπτρων, υπάρχουν κάτοπτρα τα οποία συγκεντρώνουν τις ανακλώμενες ηλιακές δέσμες στο εστιακό τους κέντρο το οποίο είναι μια γραμμή παράλληλη στα κάτοπτρα. Από την εστιακή γραμμή διέρχεται σωλήνωση διαμέσου της οποίας κυκλοφορεί το μέσο μεταφοράς της θερμότητας (Heat Transfer Fluid – HTF) (Σχήμα 1.4). Το μέσο αυτό μπορεί να είναι έλαιο, τηγμένα άλατα ή νερό. Κατά την κίνηση του μέσου, προσδίδεται σε αυτό θερμότητα με αποτέλεσμα να αυξάνεται η θερμοκρασία του και να μπορεί να αξιοποιηθεί από μια θερμική μηχανή. Για την καλύτερη απόδοση της εγκατάστασης υπάρχει μηχανισμός που κινεί τα κάτοπτρα κατά τη διεύθυνση ενός άξονα ώστε να ακολουθούν την κίνηση του Ήλιου.



Σχήμα 1.4. Εγκατάσταση κοίλων κατόπτρων και τρόπος λειτουργίας τους
(Bowman, Knotts, & K., 2007; Wesoff, 2013)

Μια παραλλαγή της προαναφερθείσας διάταξης είναι η χρήση κοίλων κατόπτρων (linear Fresnel mirrors) τα οποία έχουν όλα κοινή εστιακή γραμμή σε υψηλότερο από αυτά σημείο. Με αυτό τον τρόπο μειώνονται οι απώλειες λόγω εκτεταμένης σωλήνωσης και η διακύμανση της ακτινοβολίας κάποιου κατόπτρου έχει μικρή επίδραση στην συνολικά προσδιδόμενη θερμότητα.

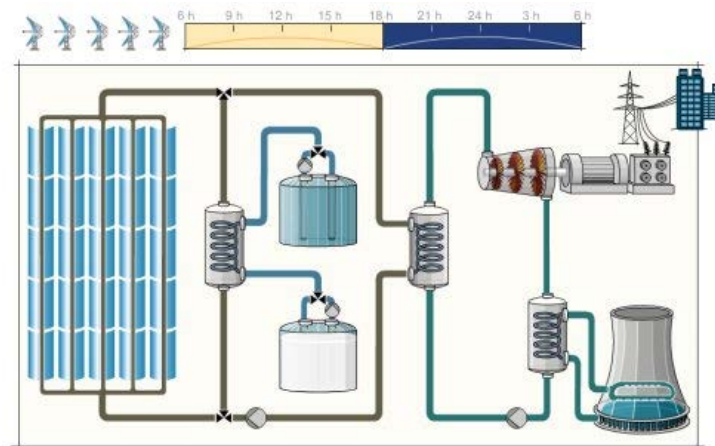
Ο σωλήνας στον οποίο κινείται το μέσο μπορεί στην πιο απλή περίπτωση να είναι μεταλλικός με μαύρη επικάλυψη για την καλλίτερη απορρόφηση της ακτινοβολίας. Οι τελευταίας τεχνολογίας σωλήνες περιβάλλονται από γυαλί με την ύπαρξη κενού αέρος ανάμεσα στο σωλήνα και στο γυάλινο περίβλημα για την ελαχιστοποίηση της απώλειας θερμότητας από αγωγή (Σχήμα 1.5), που όμως παρουσιάζουν κατασκευαστικές προκλήσεις σχετιζόμενες με την θραύση του γυαλιού και την απώλεια του κενού αέρος λόγω συστολής/διαστολής του απορροφητή (Cohen, Kearney, & Kolb, 1999; Lei, Wang, & Li, 2009; Price et al., 2002). Επίσης, η μαύρη επικάλυψη γίνεται από ειδικό υλικό που ελαχιστοποιεί τις αντανάκλασεις και μπορεί να απορροφήσει όλες τις ακτινοβολίες (Lei et al., 2009).



Σχήμα 1.5. Απορροφητής ηλιακής ακτινοβολίας κοίλου κατόπτρου (BINE, 2013)

Οι περισσότερες εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρισμού με χρήση της ηλιακής ενέργειας αποτελούνται από κοίλα κάτοπτρα (NREL, 2016). Σε αυτές τις εγκαταστάσεις, με την τεχνολογία των κοίλων κατόπτρων το μέσο μεταφοράς της θερμότητας μπορεί να φτάσει σε θερμοκρασίες (αναλόγως του είδους του) της τάξης των 400 °C - 600°C (Pitz-Paal, Dersch, & Milow, 2005). Η θερμοκρασία αυτή έχει επιτρέψει τη χρήση αυτής της διάταξης σε κύκλους αμμοστροβίλου, ενώ αποκλείει τη χρήση της σε διατάξεις που απαιτείται υψηλότερη θερμοκρασία. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από ένα τέτοιο έργο μπορεί να φτάσει τα 200MW ενώ η απαιτούμενη έκταση είναι 6-8 m²MWh⁻¹y⁻¹ (Müller-Steinhagen & Trieb, 2004).

Το Σχήμα 1.6 απεικονίζει διαγραμματικά μια διάταξη κοίλων κατόπτρων η οποία χρησιμοποιείται σε εγκατάσταση αμμοστροβίλου ενώ το Σχήμα 1.7 απεικονίζει μια υπάρχουσα εγκατάσταση ηλεκτροπαραγωγής κοίλων κατόπτρων.



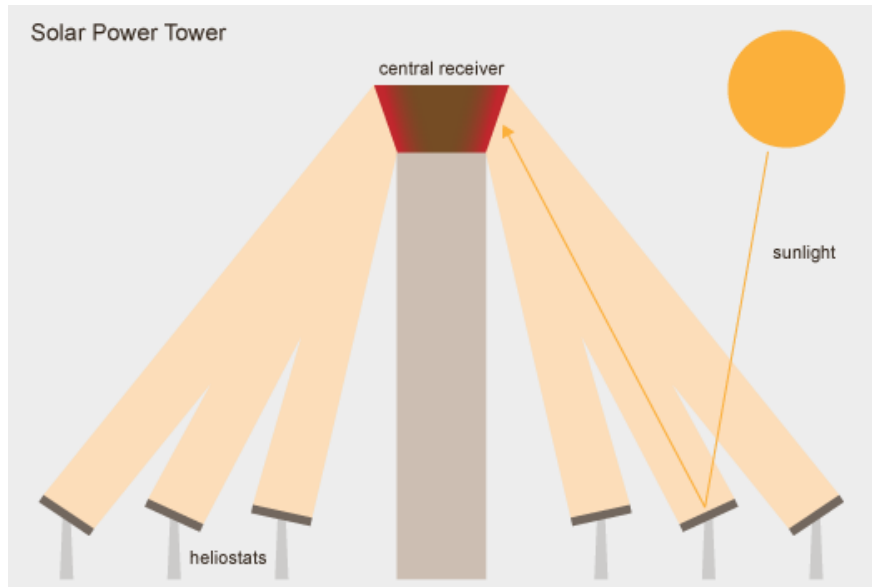
Σχήμα 1.6. Κοίλα κάτοπτρα με δεξαμενές αποθήκευσης θερμότητας σε εγκατάσταση αμμοστροβίλου (EATON, 2016)



Σχήμα 1.7. Εγκατάσταση ηλεκτροπαραγωγής με κοίλα κάτοπτρα (BINE, 2013)

1.3.4 Ηλιακός πύργος

Η εγκατάσταση του ηλιακού πύργου αξιοποιεί επίπεδα κάτοπτρα τα οποία συγκεντρώνουν τις ανακλώμενες ακτίνες στην κορυφή ενός πύργου όπου και υπάρχει ο δέκτης της ηλιακής ενέργειας (Σχήμα 1.8 και Σχήμα 1.9). Δέκτης είναι η διάταξη που μεταφέρει τη συγκεκριμένη ηλιακή ισχύ σε κάποιο εργαζόμενο μέσο, που στη συνέχεια αξιοποιείται από θερμική μηχανή. Τα κάτοπτρα κινούνται σε δύο άξονες, ούτως ώστε να αντανακλούν συνεχώς τις ηλιακές ακτίνες στο δέκτη.



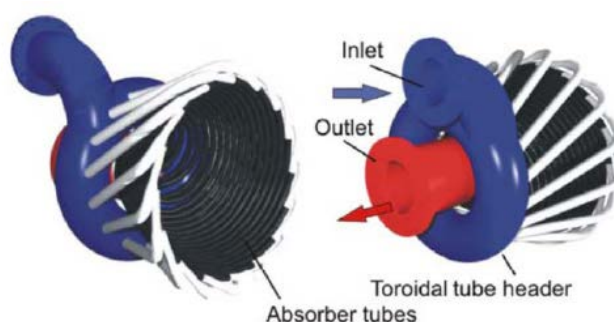
Σχήμα 1.8. Τρόπος λειτουργίας ηλιακού πύργου (WISIONS, 2014)



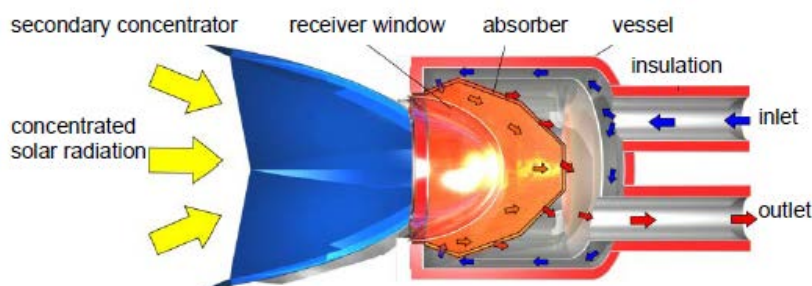
Σχήμα 1.9. Εγκατάσταση ηλεκτροπαραγωγής με πύργο (Kitskinny, 2013)

Στην περίπτωση που η διάταξη χρησιμοποιηθεί σε κύκλο ατμοστροβίλου, ο δέκτης επιτυγχάνει την ατμοπαραγωγή άμεσα (θερμαίνοντας νερό) ή έμμεσα (θέρμανση τηγμένων αλάτων χρησιμοποιούμενων για την ατμοπαραγωγή).

Όμως, λόγω της δυνατότητας υψηλής συγκέντρωσης ακτινοβολίας στο δέκτη και συνεπώς την επίτευξη υψηλής θερμοκρασίας (Müller-Steinhagen & Trieb, 2004), η διάταξη αυτή είναι κατάλληλη για χρήση και σε κύκλο αεριοστροβίλου χρησιμοποιώντας δέκτη με εργαζόμενο μέσο αέρα. Σε αυτή την περίπτωση, ο δέκτης μπορεί να είναι σύνολο μεταλλικών σωλήνων που απορροφούν την ηλιακή ενέργεια και τους διαρρέει αέρας (Σχήμα 1.10) ή ανοικτής παροχής όπου αναρροφάται ατμοσφαιρικός αέρας, θερμαίνεται στο δέκτη και μέσω εναλλακτών θερμαίνει το εργαζόμενο μέσο του κύκλου. Η σύγχρονη (αλλά και ακριβότερη περίπτωση) είναι αυτή του δέκτη υπό πίεση όπου ο υπό πίεση αέρας διέρχεται από την κοιλότητα του δέκτη. Τέτοια περίπτωση δέκτη απεικονίζει το Σχήμα 1.11. Ο εικονιζόμενος δέκτης ονομάζεται REFOS με βαθμό απόδοσης ~80% και αποτελεί πειραματική διάταξη (R. Buck & Friedmann, 2007; EU Commission, 2005).



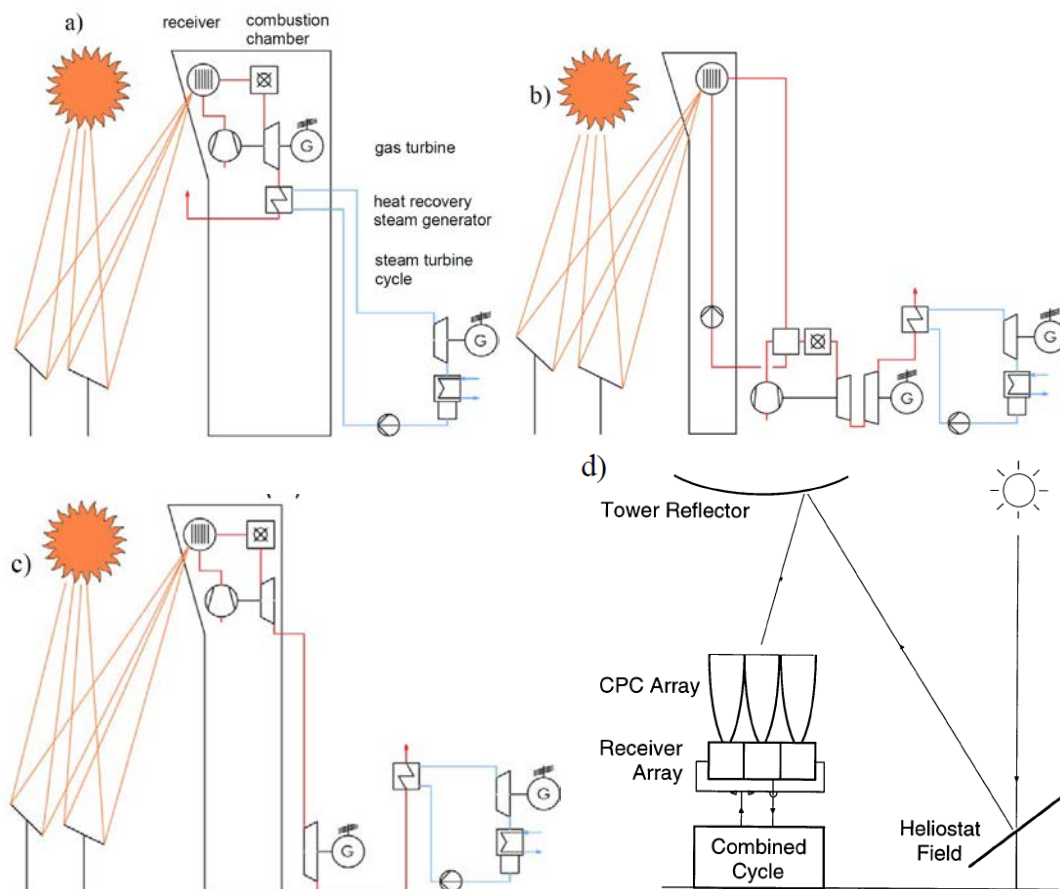
Σχήμα 1.10. Μεταλλικός δέκτης (EU Commission, 2005)



Σχήμα 1.11. Δέκτης υπό πίεση και η ροή του μέσου (EU Commission, 2005)

Όπως αναφέρθηκε, συνήθως ο δέκτης βρίσκεται στην κορυφή του πύργου (Σχήμα 1.12 (a)). Για την αποφυγή απώλειας θερμότητας λόγω της σωλήνωσης, επιθυμητό είναι η θερμική μηχανή να βρίσκεται κοντά στο δέκτη. Αυτό συνεπάγεται την εγκατάσταση της μηχανής στην κορυφή του πύργου, οπότε ο τελευταίος απαιτείται να αποτελεί στιβαρή και δαπανηρή κατασκευή αφού πρέπει να φέρει και το βάρος της μηχανής, της γεννήτριας κτλ. Οι Heide et al. (2010) παρουσιάζουν άλλες λειτουργικές διατάξεις οι οποίες αντιμετωπίζουν αυτό το πρόβλημα. Συγκεκριμένα, η μηχανή μπορεί να βρίσκεται στη βάση του πύργου και το θερμό μέσο να μεταφέρεται δια μέσου σωλήνωσης (Σχήμα 1.12 (b)). Αυτή η επιλογή όπως είναι λογικό, αν και μειώνει την στιβαρότητα και το

κόστος του πύργου, αυξάνει τις απώλειες λόγω της μεγάλης μήκους σωλήνωσης. Ακόμα, για την αποφυγή των απωλειών, θα μπορούσε να μεταφερθεί στη βάση του πύργου μόνο η γεννήτρια (Σχήμα 1.12 (c)). Τέλος, μια άλλη επιλογή είναι η τοποθέτηση κατόπτρου στην κορυφή του πύργου ο οποίος αντανακλά τις συγκεντρωμένες δέσμες των κατόπτρων στη βάση του πύργου (Σχήμα 1.12 (d)) όπου και βρίσκεται ο δέκτης καθώς επίσης η θερμική μηχανή και η γεννήτρια (Kribus, Zaibel, Carey, Segal, & Karni, 1998). Αυτή η λύση, αν και φαίνεται ενεργειακά αποδοτικότερη, έχει το μειονέκτημα της χρήσης πρόσθετου κατόπτρου με αποτέλεσμα την εμφάνιση απωλειών σε αυτό λόγω του βαθμού απόδοσής του καθώς επίσης και της γωνίας πρόσπτωσης.



Σχήμα 1.12. Διατάξεις πύργου (Heide et al., 2010; Kribus et al., 1998)

Οι εγκαταστάσεις που κάνουν χρήση αυτής της τεχνολογίας είναι λιγότερες από αυτές των κοίλων κατόπτρων και αφορούν μόνο κύκλους ατμοστροβίλου (NREL, 2016) ισχύος 10-150MW απαιτώντας επιφάνεια $8-12 \text{ m}^2\text{MWh}^{-1}\text{y}^{-1}$ (Müller-Steinhagen & Trieb, 2004). Η δυνατότητα επίτευξης υψηλής θερμοκρασίας ($>1000^\circ\text{C}$) καθιστά δυνατή την εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας σε κύκλους αεριοστροβίλου, που βρίσκεται όμως σε πειραματικό στάδιο (EU Commission, 2005; Heller, 2011; Quero et al., 2014).

1.3.5 Αποθήκευση ενέργειας

Οι περιγραφείσες διατάξεις δεσμεύουν και αξιοποιούν την θερμική ισχύ των ηλιακών ακτίνων μετατρέποντάς την σε μηχανική ή και σε ηλεκτρική ισχύ. Όμως, η μη συνεχής ηλιοφάνεια και η αυξομείωση της έντασής της (βράδυ, συννεφιά, ώρα της ημέρας) καθιστούν την παραγωγή ισχύος μη ελεγχόμενη. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος χρησιμοποιούνται διατάξεις αποθήκευσης θερμότητας οι οποίες φορτίζονται τις ώρες ηλιοφάνειας και παρέχουν την απαιτούμενη θερμότητα στον κύκλο τις ώρες μειωμένης ή ανύπαρκτης ηλιοφάνειας.

Στην περίπτωση της ηλιακής καμινάδας, πάνω στο έδαφος και κάτω από το διαφανές υλικό μπορεί να υπάρχει υλικό απορρόφησης και αποθήκευσης θερμότητας. Αυτό μπορεί να είναι νερό (ή άλλο υλικό) το οποίο βρίσκεται μέσα σε θύλακες ή διαρρέει σωλήνωση και το οποίο θερμαίνεται από την ηλιακή ακτινοβολία. Με αυτό τον τρόπο, κατά τη διάρκεια της ηλιοφάνειας, θερμότητα αποθηκεύεται σε αυτό το υλικό και προσδίδεται στον αέρα για να τον κινήσει σε συνθήκες συννεφιάς ή ακόμα και τη νύχτα. Έτσι, υπάρχει παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ακόμα και σε περιπτώσεις μειωμένης ή ανύπαρκτης ηλιοφάνειας (Zhou, Wang, & Ochieng, 2010).

Στις διατάξεις των κοίλων κατόπτρων και του πύργου, η αποθήκευση θερμότητας επιτυγχάνεται με τη θέρμανση υλικών μεγάλου όγκου και θερμοχωρητικότητας (μπετόν, σίδερα, πέτρες) ή της αποθήκευσης του θερμού μέσου μεταφοράς θερμότητας (HTF). Ειδικά στην περίπτωση κύκλου ατμοστροβίλου, καταλληλότερη χρήση των μπλοκ τσιμέντου είναι αυτή της αποθήκευσης με στοιχεία (modules) που το κάθε ένα επιτελεί συγκεκριμένη δουλειά (ατμοποίηση, προθέρμανση, υπερθέρμανση) (Lainig, Bauer, Lehmann, & Bahl, 2010). Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται τηγμένα άλατα ή λάδι ως μέσο μεταφοράς, δυνατή είναι η αποθήκευσή τους σε κατάλληλες δεξαμενές (Kearney et al., 2003). Η περίπτωση του λαδιού όμως δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μεγάλες θερμοκρασίες λόγω της καταστροφής του όπως επίσης δεν μπορεί να μειωθεί σε μεγάλο βαθμό η θερμοκρασία των αλάτων ώστε αυτά να μην στερεοποιηθούν. Οι δεξαμενές αποθήκευσης συνήθως είναι δύο, μία για το θερμότερο μέσο το οποίο έχει μόλις παραλάβει θερμότητα και μία για το ψυχρότερο το οποίο έχει προσδώσει θερμότητα (Herrmann & Kearney, 2002). Δυνατή ακόμα είναι και η χρήση μίας δεξαμενής στην οποία συνυπάρχει το θερμό με το ψυχρό μέσο σε δύο στρώματα (θερμοκλίνη) (Brosseau et al., 2005; Pacheco, Showalter, & Kolb, 2002). Η επιλογή παραμέτρων όπως η ταχύτητα κίνησης του μέσου, η θερμοκρασία του καθώς επίσης και η κατασκευή της δεξαμενής μπορούν να κάνουν δυνατή την ύπαρξη των δύο στρωμάτων χωρίς να υφίσταται μεταξύ τους ανάμιξη. Αυτή η διάταξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί και με αέρα. Στην περίπτωση αυτή, η δεξαμενή περιέχει κατάλληλα υλικά υψηλής θερμοχωρητικότητας (πέτρες) και η κατάλληλη θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση επιτυγχάνεται από τα χαρακτηριστικά ροής του αέρα.

Γενικά, το υλικό αποθήκευσης πρέπει να επιλέγεται κατάλληλα και με κριτήρια όπως, η διαθεσιμότητα, το κόστος, χημικά χαρακτηριστικά και τοξικότητα, θερμικά χαρακτηριστικά κ.α. Για μείωση του κόστους, δυνατή θα ήταν η επιλογή του ίδιου του HTF ως αποθηκευτικού μέσου, αφού με αυτόν τον τρόπο δεν απαιτείται εναλλάκτης ο οποίος αυξάνει το κόστος καθώς και τις απώλειες.

1.4 Συγκριτικά στοιχεία Ηλιοθερμικών διατάξεων

Συνοψίζοντας τα όσα αναφέρθηκαν περί των διατάξεων συγκέντρωσης και αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας είναι δυνατή η σύγκρισή τους σύμφωνα με την έκταση που απαιτούν, την απόδοσή τους (θερμική και ηλιακή), το βαθμό συγκέντρωσης της ακτινοβολίας, καθώς επίσης και με την δυσκολία ή πολυπλοκότητα κατασκευής τους. Με αυτό τον τρόπο παρέχονται συγκριτικά στοιχεία για επιλογή της τεχνολογίας που έχει τα καταλληλότερα χαρακτηριστικά (θερμοκρασία, δεσμευόμενος χώρος, κατασκευαστική ευκολία, απόδοση κτλ) για τη χρήση σε συνδυασμό με μια θερμική μηχανή.

Αρχικά, η ηλιακή καμινάδα απαιτεί μεγάλη έκταση χώρου (20km² για 100MW) και μεγάλο αρχικό κεφάλαιο επένδυσης, έχει ιδιαίτερη κατασκευαστική απαίτηση λόγω του μεγάλου ύψους της και επιφέρει σημαντική αισθητική υποβάθμιση. Όμως, λόγω της αρχής λειτουργίας της, απαιτεί μικρό αριθμό προσωπικού (5-7 άτομα), δεν χρειάζεται ιδιαίτερη συντήρηση και είναι ενεργειακά τελείως αυτόνομη.

Το παραβολικό πιάτο (Solar Dish), χρειάζεται μικρή έκταση, πραγματοποιεί μεγάλη συγκέντρωση των ηλιακών ακτίνων, καταφέρνει μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας και έχει υψηλή απόδοση. Όμως, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις ζήτησης μεγάλης ισχύος αφού κινείται στην περιοχή του 0,5MW. Επίσης, λόγω του σχήματός του και της μεγάλης επιφάνειάς του αντιμετωπίζει προβλήματα σε δυνατούς ανέμους.

Τα κοίλα κάτοπτρα απαιτούν μεγάλη δέσμευση χώρου κι έχουν αυξημένες απώλειες. Όμως, η θερμοκρασιακή αύξηση που επιτελούν κινείται σε τέτοιο εύρος που είναι αποδεκτό από πολλές εφαρμογές. Επίσης, είναι μια σχετικά απλή εγκατάσταση και έχει αναπτυχθεί αρκετά αφού έχει γνωρίσει και εμπορική εφαρμογή.

Ο ηλιακός πύργος αποτελεί μια διάταξη που απαιτεί μεγάλη έκταση και μελέτη της κίνησης των κατόπτρων. Επιτελεί μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας και έχει υψηλή απόδοση.

Ο Πίνακας 1.2 απεικονίζει τα χαρακτηριστικά σύγκρισης των διατάξεων με εφαρμογή σε θερμικές στροβιλομηχανές σύμφωνα με τις επιδόσεις και τις απαιτήσεις τους μέχρι το 2004. Ο Πίνακας 1.3 απεικονίζει την εγκατεστημένη ενέργεια έως το έτος 2009 για τις διάφορες τεχνολογίες καθώς και την τάση κατασκευής νέων εγκαταστάσεων, που φαίνεται πως παρουσιάζει υψηλό ρυθμό. Τέλος, το Σχήμα 1.13 παρουσιάζει την χρονική εξέλιξη κόστους παραγωγής

ηλεκτρικής ενέργειας από στοιχεία για διάφορες περιπτώσεις. Παρατηρείται πως με την πάροδο του χρόνου μειώνεται το κόστος ηλεκτροπαραγωγής.

Τα χαρακτηριστικά και οι δυνατότητες των διατάξεων επιτρέπουν την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας από θερμικές στροβιλομηχανές για την παραγωγή ισχύος. Οι τρόποι εκμετάλλευσης παρουσιάζονται στη συνέχεια.

	Capacity unit MW	Concentration	Peak solar efficiency	Annual solar efficiency	Thermal cycle efficiency	Capacity factor (solar)	Land use m ² MWh ⁻¹ y ⁻¹
Trough	10–200	70–80	21% (d)	10–15% (d) 17–18% (p)	30–40% ST	24% (d) 25–70% (p)	6–8
Fresnel	10–200	25–100	20% (p)	9–11% (p)	30–40% ST	25–70% (p)	4–6
Power tower	10–150	300–1000	20% (d) 35% (p)	8–10% (d) 15–25% (p)	30–40% ST 45–55% CC	25–70% (p)	8–12
Dish-Stirling	0.01–0.4	1000–3000	29% (d)	16–18% (d) 18–23% (p)	30–40% Stirl. 20–30% GT	25% (p)	8–12

(d) = demonstrated; (p) = projected; ST steam turbine; GT gas turbine; CC combined cycle.

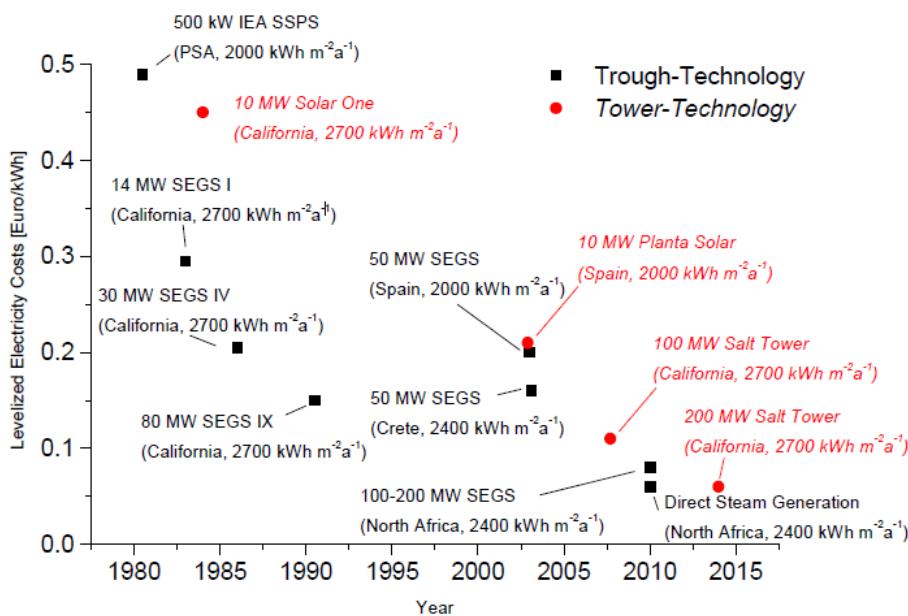
$$\text{Solar efficiency} = \frac{\text{net power generation}}{\text{incident beam radiation}}$$

$$\text{Capacity factor} = \frac{\text{solar operating hours per year}}{8760 \text{ hours per year}}$$

Πίνακας 1.2. Σύγκριση ηλιακών διατάξεων (Müller-Steinhagen & Trieb, 2004)

Technology	Installed Capacity 2009 (MW)	Electricity produced Up To 2009 (GWh)	Approximate Capacity Under Construction And Proposed (MW)
Parabolic Trough	500	>16000	>10000
Solar Tower	40	80	3000
Fresnel	5	8	500
Dish	0.5	3	1000

Πίνακας 1.3. Ηλεκτροπαραγωγή ανά τεχνολογία έως το 2009 (Greenpeace et al., 2009)



Σχήμα 1.13. Ηλιακή τεχνολογία συναρτήσε του χρόνου και του κόστους (Riffelmann et al., 2000)

1.5 Θερμικές στροβιλομηχανές στην εκμετάλλευση ηλιακής ενέργειας

Όπως αναφέρθηκε ήδη, η ηλιακή θερμότητα μπορεί να αντικαταστήσει τη θερμότητα από την καύση των ορυκτών καυσίμων που αξιοποιείται από μια θερμική μηχανή. Τα χαρακτηριστικά των διατάξεων συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας που περιγράφηκαν, επιτρέπουν τη συνεργασία αυτών των διατάξεων με τις θερμικές στροβιλομηχανές. Μέχρι σήμερα έχει πραγματοποιηθεί σημαντικός αριθμός μελετών και ερευνητικών εργασιών, ενώ έχουν υλοποιηθεί διαφόρων ειδών διατάξεις για το σκοπό αυτό. Προχωρούμε σε μια επισκόπηση των εξελίξεων για να καταδειχθεί το επίπεδο που βρισκόμαστε σήμερα και οι ανάγκες για παραπέρα έρευνα, που υπαγόρευσαν τη διάρθρωση της παρούσας διατριβής. Παρουσιάζονται οι τρεις διατάξεις με θερμικές στροβιλομηχανές, ο αεριοστρόβιλος, ο ατμοστρόβιλος και ο συνδυασμένος κύκλος.

1.5.1 Ηλιακή ενέργεια και αεριοστρόβιλοι

Το θερμό μέσο μεταφοράς της θερμότητας (εξερχόμενο από τον ηλιακό πύργο), στην περίπτωση του αεριοστρόβιλου, μπορεί να θερμάνει μέσω εναλλάκτη τον αέρα πριν εισέλθει στο θάλαμο καύσης με αποτέλεσμα τη μείωση της ποσότητας του χρησιμοποιούμενου καυσίμου. Σε περιπτώσεις μεγάλων ηλιακών εγκαταστάσεων, που παρέχουν επαρκή θερμότητα, μπορεί να αντικατασταθεί ο θάλαμος καύσης από το ηλιακό κομμάτι με την απαραίτητη αποθήκευση θερμότητας για τη συνεχή λειτουργία.

Αν ως μέσο μεταφοράς της θερμότητας (HTF) χρησιμοποιηθεί αέρας τότε αυτός μπορεί να εισέρχεται απευθείας στο θάλαμο καύσης χωρίς την παρεμβολή εναλλάκτη. Η υψηλότερη θερμοκρασία του αέρα εισόδου στο θάλαμο καύσης λόγω της ηλιακής προθέρμανσης επιβάλλει μετατροπές όπως περιγράφονται από τους Sinai, Sugarmen, & Fisher (2005): Θα πρέπει να αλλάξει η διατομή εισόδου αφού έχουμε αραιότερο (θερμό) αέρα με αποτέλεσμα να αυξάνει η παροχή όγκου στη διάρκεια της μέρας, αλλά να μειώνεται η απόδοση του θαλάμου καύσης κατά την περίοδο της νύχτας ή συννεφιάς. Επιπλέον, θα πρέπει να επιλεγεί κατάλληλο υλικό κατασκευής ώστε να αντέχει την αυξημένη θερμοκρασία του αέρα. Όπως διαπιστώθηκε κατά τη λειτουργία πειραματικών διατάξεων (EU Commission, 2005; Heller, 2011; Quero et al., 2014), το μεγάλο εύρος παροχών καυσίμου και θερμοκρασίας εισόδου του αέρα επιφέρει προβλήματα στη σωστή λειτουργία του θαλάμου καύσης τόσο όσον αφορά στη θερμική του καταπόνηση όσο και στην ευστάθεια της καύσης. Επίσης, διαπιστώθηκε πως είναι αναγκαία η μετατροπή της μηχανής ώστε να μπορεί να γίνει σύνδεση του εναλλάκτη ή της απευθείας εισόδου του θερμού αέρα μετά το συμπιεστή και πριν το θάλαμο καύσης. Οι αλλαγές αυτές, καθώς επίσης και η

θέρμανση του συμπιεσμένου αέρα από τον Ήλιο διαμέσου του δέκτη, επιφέρουν πτώση πίεσης του εργαζόμενου μέσου.

Οι υλοποιηθείσες πειραματικές εγκαταστάσεις είχαν ως στόχο τη μεταφορά των θεωρητικών μελετών στο πεδίο ώστε να φανεί πρακτικά η δυνατότητα υλοποίησης τέτοιων διατάξεων αλλά και να εντοπιστούν οι δυσκολίες που σχετίζονται με την κατασκευή τους. Με σκοπό την περαιτέρω διερεύνηση αυτής της τεχνολογίας, έχουν πραγματοποιηθεί πληθώρα εργασιών σε θεωρητικό επίπεδο, όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια.

Για μικρότερης κλίμακας εγκαταστάσεις, ο αεριοστρόβιλος που κάνει χρήση της διάταξης ηλιακού πύργου μπορεί να αντικατασταθεί με μικροτουρμπίνα (micro turbine). Οι Buck & Friedmann (2007) μελετούν τη χρήση μικροτουρμπίνας (TURBEC T100, ηφυσικό_αέριο=30%) σε εγκατάσταση πύργου για “τρι-παραγωγή”, δηλαδή την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ψύξης και θέρμανσης νερού. Επισημαίνουν ότι, αν και θα δαπανηθεί μικρότερο ποσό ενέργειας στην αντλία διακίνησης του καυσίμου λόγω μειωμένης κατανάλωσης, ο ολικός θερμικός βαθμός απόδοσης θα μειωθεί στο 28% αφού η ποσότητα του εργαζόμενου μέσου στον στρόβιλο θα μειωθεί λόγω της μείωσης αυτής της ποσότητας του καυσίμου. Στην μείωση αυτή συντελεί και η αύξηση της πτώσης πίεσης λόγω του ηλιακού κομματιού.

Στην εργασία τους οι Garcia et al. (2008) εξετάζουν την προς υλοποίηση εγκατάσταση υβριδικού αεριοστρόβιλου με την τεχνολογία ηλιακού πύργου στην Γαλλία. Ο αεριοστρόβιλος είναι ένας αεριοστρόβιλος Turbomeca 1400kW_e με ανακόμιση θερμότητας και η θερμοκρασία και η πίεση στο στρόβιλο είναι αντίστοιχα 850 °C και 7bar. Ο υπολογιζόμενος ολικός βαθμός απόδοσης ανέρχεται στο 35,1%.

Οι Kitzmiller & Miller (2011a, 2012) στην εργασία τους μελετούν τη χρήση των VGVs στη λειτουργία ενός υβριδικού αεριοστρόβιλου με ανακόμιση, με σκοπό τη διατήρηση της θερμοκρασίας εισόδου στο θάλαμο καύσης σε επιθυμητά επίπεδα. Επίσης, μελετάται και η επίδραση βαλβίδας bypass ώστε να μη λειτουργεί ο θάλαμος καύσης για υψηλές θερμοκρασίες εισόδου σε αυτόν. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν πως η χρήση βαλβίδας μειώνει την απόδοση της εγκατάστασης και πως η χρήση VGVs είναι θετική. Συμπεραίνεται λοιπόν, πως οι παράμετροι ελέγχου της λειτουργίας ενός υβριδικού αεριοστρόβιλου (όπως τα IGVs), επηρεάζουν έντονα τις επιδόσεις του και λόγω της ιδιαίτερης φύσης μιας τέτοιας διάταξης, χρήζουν περαιτέρω μελέτης.

Πιθανή είναι και η χρήση μικροτουρμπίνας σε διάταξη παραβολικού πιάτου. Και σε αυτήν τη περίπτωση η ηλιακή ακτινοβολία θερμαίνει το εργαζόμενο μέσο με τον τρόπο που περιγράφηκε για τον ηλιακό πύργο. Ο Dickey (2011) περιγράφει τη δημιουργία πειραματικής εγκατάστασης ηλιακής μικροτουρμπίνας. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης υποδεικνύουν πως σε ονομαστικές συνθήκες αναφοράς ο ολικός θερμικός βαθμός απόδοσης θα μπορούσε να αγγίξει το 21%.

Οι Hong et al. (2011) στην εργασία τους μελετούν άλλο τρόπο αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας στον αεριοστρόβιλο μέσω της χρήσης της για διάσπαση οξειδίων μετάλλου και την οξείδωση του καυσίμου.

Οι Kitzmiller & Miller (2011b) στην εργασία τους μελετούν την επίδραση δέκτη μικροσωματιδίων σε διάφορες διατάξεις υβριδικού αεριοστρόβιλου. Στο δέκτη, αντί για πορώδες υλικό, εισέρχονται μαζί με το ρεύμα αέρα μικροσωματίδια άνθρακα προερχόμενα από τη πυρόλυση υδρογονάνθρακα. Τα σωματίδια αυτά απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία και τη μεταφέρουν στον αέρα. Μελετώνται διάφορες διατάξεις, από τον κλασικό υβριδικό κύκλο μέχρι χρήση του δέκτη στο ρεύμα καυσαερίων ακολουθούμενο από καυστήρα.

Οι Barigozzi et al. (2012b) πραγματοποιούν μια αναλυτική μοντελοποίηση ενός υβριδικού αεριοστρόβιλου δύο ατράκτων. Χρησιμοποιούν σε συνεργασία δύο εμπορικά λογισμικά ώστε να καταστεί εφικτή η επιθυμητή πιστότητα της μοντελοποίησης. Καταλήγουν, συγκρίνοντας τον υβριδικό με τον αρχικό αεριοστρόβιλο, ότι η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να μειωθεί ακόμα και 14%. Επίσης αναφέρουν πως ο θερμικός βαθμός απόδοσης μπορεί να μειωθεί κατά 3% (για υψηλή ένταση ακτινοβολίας), ενώ αντίθετα, αν ο θερμικός βαθμός απόδοσης υπολογιστεί λαμβάνοντας υπ' όψιν μόνο την θερμότητα λόγω της καύσης τότε ανέρχεται στο 110%. Στην εργασία τους δεν λαμβάνουν υπ' όψιν τα σημερινά όρια αντοχής των υπαρχόντων δεκτών.

Οι Barigozzi et al. (2012a) μελετούν την επίδραση της διάταξης ατράκτων αεριοστρόβιλου σε συνδυασμένο κύκλο όπου η ηλιακή ενέργεια δίδεται στον αεριοστρόβιλο για προθέρμανση. Μελετώνται μηχανές απλής ατράκτου, διπλής ατράκτου και διδύμων ατράκτων. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι πως ο συνδυασμένος κύκλος παρουσιάζει παραπλήσιο ετήσιο βαθμό απόδοσης και για τις τρεις μηχανές, αλλά καταλληλότερη κρίνεται η μηχανή απλής ατράκτου αφού παρουσιάζει τη μικρότερη μείωση ισχύος λόγω χρήσης ηλιακής ενέργειας και το μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρισμό. Επιπλέον, ο τύπος του αεριοστρόβιλου επηρεάζει τις επιδόσεις της υβριδικής διάταξης.

Οι Spelling, Laumert, & Fransson (2012a) στην εργασία τους μελετούν θερμοοικονομικά διάταξη ηλιακού αεριοστρόβιλου με ανάψυξη και ανακόμιση. Πραγματοποιείται βελτιστοποίηση ώστε να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά του κύκλου ώστε να επιτευχθεί ελαχιστοποίηση του αρχικού κόστους εγκατάστασης και μεγιστοποίηση της ετήσιας παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Καταλήγουν πως διατάξεις με ισχύ 35-45MW παρουσιάζουν μέγιστο βαθμό απόδοσης ενώ για ισχύ 55-65MW ελαχιστοποιείται το κόστος ηλεκτροπαραγωγής. Όμως, οι πειραματικές διατάξεις υβριδικού αεριοστρόβιλου και οι δυνατότητες των υπαρχόντων δεκτών αφορούν μηχανές της τάξης των 5MW, θέτοντας όρια στη μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία και πίεση.

Οι Spelling, Laumert, & Fransson (2012b) στην εργασία τους πραγματοποίησαν τον προσδιορισμό των βέλτιστων χαρακτηριστικών ενός υβριδικού αεριοστρόβιλου σταθερής παραγόμενης ισχύος με σκοπό την

ελαχιστοποίηση του παραγόμενου CO₂ και του κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε βάθος έτους. Το χρησιμοποιούμενο εμπορικό λογισμικό προσομοιώνει τη λειτουργία του αεριοστροβίλου μέσω πολυωνύμων, με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η μελέτη της επίδρασης παραμέτρων λειτουργίας στις επιδόσεις.

Οι Livshits & Kribus (2012a, 2012b) μελετούν τη χρήση ηλιακής ενέργειας σε αεριοστρόβιλο μέσω της παραγωγής ατμού και έγχυσης αυτού στο θάλαμο καύσης. Σκοπός τους είναι η πρόταση εναλλακτικού τρόπου αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας στον αεριοστρόβιλο ώστε να αποφευχθούν οι κατασκευαστικές δυσκολίες της διάταξης με ηλιακή προθέρμανση του αέρα. Πραγματοποιούν θερμοδυναμική ανάλυση του κύκλου στο σημείο σχεδίασης, θεωρώντας ότι το νερό/ατμός προθερμαίνεται και υπερθερμαίνεται από τον ΛΑΘ ενώ η ατμοποίηση υλοποιείται στο ηλιακό κομμάτι. Επίσης, εξετάζεται και η δέσμευση του νερού από τα καυσαέρια ώστε η εγκατάσταση να παρουσιάζει επάρκεια σε νερό. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν πως πρόκειται για συμφέρουσα επιλογή από άποψη θερμοδυναμικών επιδόσεων και προτείνουν τη μελέτη της οικονομικής συμπεριφοράς μιας τέτοιας διάταξης. Για τον προσδιορισμό όμως των συνολικών επιδόσεων (θερμοδυναμικών και οικονομικών) απαιτείται η μελέτη της λειτουργίας και σε σημεία εκτός σχεδίασης. Επιπλέον, θα πρέπει να διερευνηθεί και η επίδραση της έγχυσης ατμού στη λειτουργία του αεριοστροβίλου.

Οι Kusterer et al. (2013) μελέτησαν τη βελτίωση των επιδόσεων στο σημείο σχεδίασης με χρήση ηλιακής ενέργειας, ενός κύκλου Brayton μηχανής διδύμων ατράκτων. Μελετώνται δύο διατάξεις: 1) βελτίωση του κύκλου με ανάψυξη, ανακόμιση θερμότητας και προθέρμανση αέρα από τον Ήλιο και 2) η βελτιωμένη διάταξη σε συνδυασμό με ORC, με διάφορα εργαζόμενα μέσα, ο οποίος εκμεταλλεύεται τη θερμότητα του αναψύκτη και των θερμών καυσαερίων. Υπολογίζουν πως ο θερμικός βαθμός απόδοσης του υβριδικού αεριοστροβίλου, λαμβάνοντας υπ' όψιν μόνο τη θερμότητα του καυσίμου, είναι της τάξης του 40%, ενώ στην περίπτωση συνδυασμού του με ORC η απόδοση αυξάνεται μέχρι και 4%. Το λογισμικό που χρησιμοποιούν για την προσομοίωση της λειτουργίας της διάταξης δεν περιλαμβάνει τις ηλιακές συνιστώσες και η προσφερόμενη ηλιακή θερμότητα δίδεται εξωτερικά.

Οι Aichmayer et al. (2013) μελέτησαν τρεις διατάξεις μικροτουρμπίνων με θερμοοικονομικά κριτήρια ώστε να βρεθεί το βέλτιστο σημείο σχεδίασής τους και στη συνέχεια προσδιορίστηκε ο τρόπος λειτουργίας τους σε όλο το έτος. Οι τρεις διατάξεις είναι: 1) υβριδικός κύκλος με προθέρμανση από την ηλιακή ενέργεια, 2) υβριδικός κύκλος με ανακόμιση θερμότητας και 3) ηλιακός κύκλος με ανακόμιση θερμότητας και καύση πριν τον ανακομιστή. Θεωρείται ότι οι δύο πρώτοι κύκλοι έχουν θερμοκρασία εξόδου καυστήρα 900 °C ενώ ο τρίτος 780 °C. Επίσης, οι μηχανές λειτουργούν μεταξύ 7:00πμ-11:00μμ. Βρέθηκε ότι οι ανωτέρω μηχανές συγκρινόμενες με μηχανή diesel επιτυγχάνουν μείωση μέχρι 10-43% στο κόστος παραγωγής ρεύματος ενώ μειώνονται οι εκπομπές CO₂ κατά

20-35%. Η συγκεκριμένη μελέτη εξετάζει την εύρεση το βέλτιστων χαρακτηριστικών σχεδιασμού της μικροτουρμπίνας για συγκεκριμένη εφαρμογή με αποτέλεσμα να απαιτείται η παραγωγή των απαραίτητων συνιστωσών, γεγονός που οδηγεί σε αυξημένο κόστος. Μείωση του κόστους μπορεί να προέλθει από τη χρήση συνιστωσών μαζικής παραγωγής που αφορούν υπάρχουσες εφαρμογές. Επιπλέον, λόγω των σχετικά μικρών τιμών του λόγου πίεσης και της θερμοκρασίας τέτοιων διατάξεων, ο θερμοκός βαθμός απόδοσης είναι χαμηλός και συνεπώς μπορεί η λειτουργία της διάταξης μόνο με τη χρήση ηλιακής ενέργειας να είναι οικονομικά ανταγωνιστικότερη από ότι η υβριδική λειτουργία.

Οι Spelling, Laumert, & Fransson (2013) στην εργασία τους μελέτησαν τον υβριδικό κύκλο αεριοστρόβιλου και τη βελτίωσή του με χρήση αποθήκευσης θερμότητας και δημιουργία συνδυασμένου κύκλου. Η ανάλυση αφορά την επιλογή τριών διαφορετικών τύπων εμπορικών αεριοστροβίλων της SIEMENS (μια για κάθε διάταξη) και την εύρεση των καλύτερων χαρακτηριστικών σχεδίασης (αριθμός κατόπτρων, μέγεθος αποθήκευσης ενέργειας κτλ) ώστε να ελαχιστοποιείται το κόστος παραγωγής ρεύματος με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση των εκπομπών CO₂ στη περίοδο ενός έτους. Βρέθηκε πως τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά του αεριοστροβίλου επηρεάζουν τις επιδόσεις της αντίστοιχης υβριδικής διάταξης και πως το ελάχιστο κόστος ηλεκτροπαραγωγής κινείται στο εύρος των 90-120USD/MWh.

Οι Sánchez-Orgaz, Medina, & Calvo Hernández (2013) με σκοπό την επίτευξη υψηλότερων επιδόσεων από τον υβριδικό αεριοστρόβιλο μελετούν μηχανές απλής ατράκτου με, α) ανακόμιση θερμότητας, β) ανάψυξη και ανακόμιση θερμότητας, γ) αναθέρμανση και ανακόμιση θερμότητας και δ) ανάψυξη, αναθέρμανση και ανακόμιση θερμότητας. Συγκεκριμένα, μελετούν την επίδραση του βαθμού απόδοσης του αναγεννητή στο σημείο σχεδίασης. Προκύπτει ότι : 1) σε απλό ηλιακό κύκλο η αύξηση του βαθμού απόδοσης του αναγεννητή οδηγεί σε αύξηση του βαθμού απόδοσης του κύκλου μόνο για χαμηλούς λόγους πίεσης, 2) σε με ανάψυξη και αναθέρμανση δεν ισχύει το ανωτέρω και 3) για οποιοδήποτε ανοιχτό ηλιακό κύκλο με αναθέρμανση, στον οποίο ο λόγος πίεσης και η μέγιστη θερμοκρασία έχουν προσδιοριστεί ώστε να οδηγούν σε βέλτιστο βαθμό απόδοσης, η καλύτερη της απόδοσης του ανακομιστή θα βελτιώσει και την απόδοση του κύκλου. Η ανάλυση, αν και αφορά μόνο το σημείο σχεδίασης και χρησιμοποιεί αρκετές παραδοχές (π.χ. σταθερό Cp), καταδεικνύει την ανάγκη μελέτης της συμπεριφοράς διαφορετικών διατάξεων αεριοστροβίλων ώστε να προσδιοριστεί ο καταλληλότερος για υβριδοποίηση.

Η λογική της χρήσης της ηλιακής ενέργειας στον αεριοστρόβιλο με θέρμανση του εργαζόμενου μέσου με εναλλάκτη, γεννά την ιδέα της εφαρμογής αυτής της μεθόδου σε αεριοστρόβιλους κλειστού κύκλου οι οποίοι ούτως ή άλλως κάνουν χρήση εναλλάκτη. Αυτή η προσέγγιση απαλείφει τις κατασκευαστικές δυσκολίες που συνδέονται με τη διάταξη της ηλιακής

προθέρμανσης του αέρα. Ειδικότερα, ενδιαφέρον παρουσιάζει η χρήση διαφορετικών του αέρα εργαζόμενων μέσων στον κλειστό κύκλο, τα οποία έχουν τέτοια χαρακτηριστικά που αυξάνουν την απόδοση.

Οι Utamura & Tamaura (2006) μελετούν τη χρήση CO₂ ως εργαζόμενου μέσου αεριοστρόβιλου υβριδικού κλειστού κύκλου, αξιοποιώντας την έντονη μεταβολή της τιμής της συμπίεστικότητας αναλόγως της πίεσης και της θερμοκρασίας. Διαπιστώνουν ότι με τη χρήση CO₂ αυξάνεται το παραγόμενο έργο στο στρόβιλο ενώ μειώνεται το δαπανώμενο από το συμπιεστή σε σύγκριση με μια μηχανή που λειτουργεί με αέρα.

Οι Turchi, Ma, & Dyreby (2012) μελετούν δύο διατάξεις κλειστού κύκλου αεριοστρόβιλου με εργαζόμενο μέσο CO₂. Η πρώτη διάταξη αφορά μηχανή 10MW η οποία τοποθετείται στον πύργο και το εργαζόμενο μέσο θερμαίνεται από το δέκτη, ενώ η δεύτερη διάταξη αφορά μηχανή 100MW στην οποία το εργαζόμενο μέσο θερμαίνεται από εναλλάκτη αλάτων τα οποία θερμαίνονται στον πύργο. Συμπεραίνουν πως τέτοιες διατάξεις μπορούν να επιτύχουν μεγαλύτερο θερμικό βαθμό απόδοσης από ότι ηλιακοί κύκλοι Rankine.

Οι Kusterer et al. (2012) στην εργασία τους μελετούν έναν ηλιακό κλειστό κύκλο αεριοστρόβιλου με ήλιο στο σημείο σχεδίασής του. Διαπιστώνουν πως η αλλαγή του λόγου πίεσης δεν επιδρά στο βαθμό απόδοσης και πως η βέλτιστη διάταξη απαιτεί ανάψυξη και ανακόμιση. Επίσης, στη συνέχεια πραγματοποιούν και μονοδιάστατη ανάλυση ώστε να προσδιορίσουν τις χαρακτηριστικές διαστάσεις των συνιστωσών. Συμπεραίνουν πως μια εγκατάσταση που κάνει χρήση αυτού του κύκλου μπορεί να παρουσιάσει βαθμό απόδοσης που ξεπερνά το 21%.

Οι Mohagheghi & Karat (2013) μελέτησαν τέσσερις κλειστούς κύκλους αεριοστρόβιλου με υπερκρίσιμο CO₂ και με την εφαρμογή τεχνικών βελτιστοποίησης προσδιόρισαν τα χαρακτηριστικά τους για συγκεκριμένο σημείο σχεδίασης. Οι κύκλοι που μελετήθηκαν είναι: 1) απλός κύκλος με ανακόμιση θερμότητας, 2) κύκλος επανασυμπίεσης με ανακόμιση θερμότητας, 3) κύκλος επανασυμπίεσης με ανακόμιση θερμότητας και αναθέρμανση και 4) κύκλος επανασυμπίεσης με ανακόμιση θερμότητας, αναθέρμανση και ανάψυξη. Συμπερασματικά, ο βαθμός απόδοσης και η παραγόμενη ισχύς του κάθε κύκλου αυξάνονται αναλογικά με την πολυπλοκότητα του κύκλου.

Οι Kusterer et al. (2013) στην εργασία τους μελέτησαν έναν κλειστό κύκλο Brayton με ανάψυξη και ανακόμιση θερμότητας με εργαζόμενο μέσο ήλιο και αργό. Μελέτησαν διάφορα σημεία σχεδίασης για κάθε εργαζόμενο μέσο και συμπεραίνουν πως θερμικός βαθμός απόδοσης της τάξης του 46% είναι εφικτός, όπως επίσης και ότι ο κύκλος με εργαζόμενο μέσο αργό οδηγεί σε μηχανή μικρότερων διαστάσεων.

Οι Dunham & Lipinski (2013) μελέτησαν κλειστό κύκλο αεριοστρόβιλου με ανακόμιση θερμότητας για διάφορα εργαζόμενα μέσα ώστε να βρεθούν τα βέλτιστα χαρακτηριστικά του. Στη συνέχεια, μελετάται η χρήση της απορριπτόμενης θερμότητας σε κύκλο ORC. Προκύπτει ότι το CO₂ παρουσιάζει

την καλύτερη συμπεριφορά ως εργαζόμενο μέσο του αεριοστρόβιλου, ενώ το R-245fa προκύπτει ως το καλύτερο εργαζόμενο μέσο στον κύκλο ORC.

Οι Iverson, Conboy, Pasch, & Kruiuzenga (2013) στην εργασία τους μοντελοποίησαν υπάρχουσα πειραματική διάταξη split-flow recompression recuperated Brayton Cycle με υπερκρίσιμο CO₂, ώστε να μελετήσουν την επίδραση των μεταβατικών φαινομένων σε περιπτώσεις συννεφιάς. Καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι σύντομες μεταβολές της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας μπορούν να καλυφθούν από τη θερμοχωρητικότητα των συνιστωσών της εγκατάστασης.

Όπως φάνηκε, η συντριπτική πλειοψηφία των εργασιών έγκειται στη θεωρητική μελέτη υβριδικών διατάξεων μέσω της προσομοίωσης της λειτουργίας τους. Πολλοί ερευνητές, για να επιτύχουν την επιθυμητή πιστότητα μοντελοποίησης, χρησιμοποιούν διάφορα λογισμικά σε συνεργασία λόγω της ανυπαρξίας ενός ολοκληρωμένου πακέτου που δύναται να χρησιμοποιηθεί για κάθε περίπτωση. Επιπλέον, από τις προαναφερθείσες εργασίες φαίνεται η ανάγκη της περαιτέρω εμβάθυνσης στον προσδιορισμό της επίδρασης των παραμέτρων σχεδίασης (π.χ. μέγεθος πεδίου κατόπτρων, τύπος μηχανής) και λειτουργίας (π.χ. IGVs, παροχή καυσίμου) στις επιδόσεις μιας υβριδικής διάταξης, αφού υπάρχει άμεση εξάρτηση. Για να είναι εφικτή η πραγματοποίηση τέτοιων μελετών, θα πρέπει το λογισμικό προσομοίωσης να έχει τις ανάλογες δυνατότητες, όπως και δυνατότητα προσομοίωσης της λειτουργίας της διάταξης με ύπαρξη βλάβης σε κάποια συνιστώσα. Ακόμα, απαραίτητη είναι η πρόταση και η μελέτη διατάξεων που αξιοποιούν την ηλιακή ενέργεια με διαφορετικό τρόπο ούτως ώστε να αντιμετωπιστούν οι κατασκευαστικές δυσκολίες που παρουσιάζονται στη συνήθη υβριδική διάταξη αεριοστρόβιλου με ηλιακή προθέρμανση του αέρα. Αυτές οι κινήσεις συμβάλλουν στη βελτίωση των επιδόσεων, κάνοντας την τεχνολογία αυτή ανταγωνιστικότερη. Τέλος, φαίνεται πως η πλειονότητα των εργασιών αφορά στον προσδιορισμό των θερμοδυναμικών επιδόσεων των διατάξεων. Όμως, η ανταγωνιστικότητα και η ελκυστικότητα μιας διάταξης προκύπτει μέσω των οικονομικών επιδόσεών της. Συνεπώς απαιτείται η ανάπτυξη της απαραίτητης διαδικασίας προσδιορισμού των οικονομικών επιδόσεων ώστε να καταστεί δυνατή η σύγκριση των υβριδικών διατάξεων τόσο μεταξύ τους, όσο και με τις συμβατικές.

1.5.2 Ηλιακή ενέργεια και ατμοστρόβιλοι

Στην περίπτωση του ατμοστρόβιλου, η χρήση της ηλιακής ενέργειας αφορά στη θέρμανση του νερού ώστε να το ατμοποιήσει και στη συνέχεια ο ατμός να εκτονωθεί στον ατμοστρόβιλο. Για την συνεχή πρόσδοση θερμότητας για την ατμοποίηση του νερού μπορεί να χρησιμοποιηθεί και λέβητας στον οποίο θα χρησιμοποιείται καύσιμο ή και να υπάρχει αποθήκευση ηλιακής ενέργειας.

Οι πρώτη εγκατάσταση ατμοστροβίλου για την παραγωγή ηλεκτρισμού με ηλιακή ενέργεια κατασκευάστηκε τη δεκαετία του '80 στην έρημο Mojave της Αμερικής. Η παραγόμενη ισχύς της εγκατάστασης ανέρχεται στα 13,8MW και προέρχεται αποκλειστικά από την ηλιακή ενέργεια. Μετέπειτα κατασκευάστηκαν άλλα 8 τέτοια εργοστάσια τα οποία κάνουν χρήση και λέβητα θερμαινόμενο με καύσιμο, με αποτέλεσμα η συνολική ισχύς να ανέλθει περίπου στα 350MW_e (Price et al., 2002).

Μια άλλη εγκατάσταση που ατμοποιεί νερό με τη βοήθεια κοίλων κατόπτρων και λαδιού ως HTF, αποτελούν τα εργοστάσια Andasol 1,2,3 (SolarMillennium, 2008) συνολικής ισχύος 150MW. Η εγκατάσταση αυτή παρουσιάζει μέγιστο βαθμό απόδοσης $\eta_{\max}=28\%$ και μέσο ετήσιο $\eta_{\text{annual}}=15\%$ τη στιγμή που η ατμοποίηση γίνεται μόνο με χρήση ηλιακής ενέργειας.

Αν ως μέσο μεταφοράς της θερμότητας επιλέξουμε νερό τότε αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατευθείαν στην διάταξη του ατμοστροβίλου, ενώ με κατάλληλη επιλογή του ηλιακού μέρους της εγκατάστασης, το νερό αυτό μπορεί να ατμοποιείται ήδη από αυτό (Odeh, Morrison, & Behnia, 1998). Τέτοια πειραματική εγκατάσταση ατμοποίησης του νερού στο ηλιακό κομμάτι, αποτελεί το ευρωπαϊκό πρόγραμμα Direct Steam Generation in Parabolic Troughs (DISS project). Μελετώνται οι δυνατότητες ατμοποίησης του νερού και η αύξηση της θερμοκρασίας του (Eck & Steinmann, 2002; Zarza et al., 2002).

Ενδιαφέρουσα επίσης είναι και η εγκατάσταση PS10 στην Ισπανία (Riffelmann et al., 2000) ισχύος 11MW, στην οποία το νερό ατμοποιείται απευθείας στον δέκτη εγκατάστασης πύργου όπως και στην περίπτωση της εμπορικής εγκατάστασης Ivanpah ισχύος 377MW (NREL, 2014a). Η προσέγγιση της άμεσης ατμοπαραγωγής από διάταξη πύργου αποτελεί την πιο σύγχρονη τεχνολογία ηλιακής ατμοπαραγωγής και επιτρέπει την επίτευξη υψηλών θερμοκρασιών και πιέσεων του παραγόμενου ατμού.

Με σκοπό τη διερεύνηση της δυνατότητας αύξησης των επιδόσεων τέτοιων διατάξεων, οι ερευνητές έχουν πραγματοποιήσει πληθώρα εργασιών σε θεωρητικό επίπεδο, όπως παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Εγκατάσταση άμεσης ατμοπαραγωγής από παραβολικά κάτοπτρα μελετάται από τους Birnbaum et al. (2010). Το ηλιακό κομμάτι χωρίζεται σε τρία μέρη τα οποία επιτελούν διαφορετικές εργασίες (προθέρμανση, ατμοποίηση, υπερθέρμανση). Επισημαίνουν τα προβλήματα που εμφανίζονται (κυμαινόμενη πίεση ατμού) κατά την αποθήκευση και απαγωγή θερμότητας από την εγκατάσταση αποθήκευσης της ηλιακής ενέργειας. Επίσης, αναφέρουν την αναγκαιότητα της αναθέρμανσης του ατμού ώστε να μην υπάρχει το πρόβλημα της υγροποίησης στις τελευταίες βαθμίδες του ατμοστροβίλου. Επισημαίνουν ότι αποδοτικότερη μέθοδος αναθέρμανσης είναι μέσω απομάστευσης ατμού και όχι με τη χρήση της ηλιακής ενέργειας. Τέλος, καταδεικνύουν την αναγκαιότητα κατάλληλης ρύθμισης των παραμέτρων λειτουργίας ώστε να μεγιστοποιείται η παραγωγή και να αποφεύγονται προβλήματα λειτουργίας.

Οι Montes, Abánades, & Martínez-Val (2010) μελετούν τη διαφοροποίηση στις επιδόσεις ενός ηλιακού ατμοστροβίλου με διάταξη κοίλων κατόπτρων, αν στο ηλιακό κομμάτι χρησιμοποιηθεί ως HTF λάδι και άλατα ή αν το ηλιακό κομμάτι επιτελεί άμεσα την ατμοπαραγωγή. Στην περίπτωση άμεσης ατμοπαραγωγής επισημαίνουν την αναγκαιότητα της χρήσης κατάλληλων μοντέλων που να προσομοιώνουν σωστά τη μετάδοση θερμότητας στο διαφασικό μίγμα νερού/ατμού. Συμπεραίνουν πως αποδοτικότερη είναι η εφαρμογή της άμεσης ατμοπαραγωγής από το ηλιακό κομμάτι. Τέλος, αναφέρουν την αναγκαιότητα επιλογής κατάλληλων τιμών των παραμέτρων λειτουργίας (π.χ. παροχή και πίεση) ώστε να λειτουργεί η διάταξη αποδοτικότερα.

Οι Llorente García, Álvarez, & Blanco (2011) στην εργασία τους πραγματοποιούν μοντελοποίηση υπάρχουσας εγκατάστασης ηλιακού ατμοστροβίλου με αποθήκευση θερμότητας και συγκρίνουν τα αποτελέσματα με πραγματικές μετρήσεις διαπιστώνοντας ικανοποιητική προσέγγιση. Η προσέγγιση της μοντελοποίησης του ηλιακού κομματιού αφορά στη χρήση ημι-εμπειρικών σχέσεων για των υπολογισμό των απωλειών κάθε σειράς κατόπτρων. Μια τέτοια προσέγγιση δεν επιτρέπει την προσομοίωση της λειτουργίας της διάταξης με ύπαρξη βλάβης ή δυσλειτουργίας συγκεκριμένων κατόπτρων.

Οι Spelling, Jöcker, & Martin (2011) πραγματοποιούν μια αναλυτική μοντελοποίηση του ατμοστροβίλου δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στη μεταφορά θερμότητας ώστε να αξιολογήσουν τρόπους μείωσης του χρόνου εκκίνησης. Η χρήση μονωτικών καλυμμάτων και θερμαινόμενων “κουβερτών” κρίνεται ως η πιο αποδοτική ώστε να διατηρηθεί θερμό το κέλυφος της μηχανής, ενώ η αύξηση της θερμοκρασίας του ατμού που διαρρέει την άτρακτο κρίνεται ως πιο αποδοτική για την διατήρηση της θερμοκρασίας της ατράκτου.

Οι Camporeale, Fortunato, & Saponaro (2011) στην εργασία τους μελετούν τη χρήση ηλιακής ενέργειας σε υπάρχουσα εγκατάσταση ατμοστροβίλου τριών πιέσεων και επτά απομαστεύσεων ώστε να αυξηθεί η παραγόμενη ισχύς και να μειωθεί η εκπομπή CO₂. Αρχικά, μοντελοποιούν την υπάρχουσα εγκατάσταση και πραγματοποιούν μελέτη με βάση την εξέργια ώστε να προσδιοριστεί η καταλληλότερη θέση πρόσδοσης της ηλιακής ενέργειας μέσω θερμού λαδιού προερχόμενου από κοίλα κάτοπτρα. Ως πιο αποδοτική λύση προτείνεται η μερική αντικατάσταση των τριών απομαστεύσεων/προθερμάνσεων υψηλής πίεσης. Χρησιμοποιούν ημι-εμπειρικές σχέσεις για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας του HTF.

Οι Feldhoff et al. (2012) μελετούν τις διαφορές μιας εγκατάστασης ηλιακού ατμοστροβίλου, αν στο ηλιακό κομμάτι χρησιμοποιηθεί λάδι ή νερό. Η εγκατάσταση περιλαμβάνει και αποθήκευση θερμότητας. Η μελέτη αποτελείται από μια πολύ λεπτομερή μοντελοποίηση των συνιστωσών καθώς δίδεται και η δέουσα προσοχή ώστε οι συγκρινόμενες διατάξεις να είναι ισοδύναμες. Τέλος, πραγματοποιείται και οικονομική ανάλυση, καθώς επίσης και ανάλυση

ευαισθησίας. Συμπερασματικά, προτείνεται η διερεύνηση και η βελτίωση του σχεδιασμού της άμεσης ατμοποίησης καθώς και η βελτίωση των μέσων αποθήκευσης θερμότητας.

Οι Manzolini, Giostri, Saccilotto, Silva, & Macch, (2012) αναπτύσσουν ένα μοντέλο προσομοίωσης ηλιακών κύκλων Rankine. Το μοντέλο αφορά όλες τις συνιστώσες (κοίλα κάτοπτρα, εναλλάκτες, ατμοστρόβιλο κτλ) χρησιμοποιώντας ημι-εμπειρικές σχέσεις προσομοίωσης της λειτουργίας του ηλιακού κομματιού. Ακόμα, επισημαίνουν την επίδραση του τρόπου ελέγχου στις επιδόσεις της διάταξης κατά τη λειτουργία της εκτός του σημείου σχεδίασης. Τέλος, παρουσιάζονται αποτελέσματα για συγκεκριμένη διάταξη και συγκρίνονται με δημοσιευμένα αποτελέσματα καθώς και αποτελέσματα από άλλα μοντέλα.

Οι Han, Jin, Lin, Wang, & Su (2012) μελετούν έναν ηλιακό κύκλο ατμοστροβίλου με διατάξεις κοίλων κατόπτρων με λάδι και πύργου με άλατα. Ο κύκλος αποτελείται από μια αναθέρμανση και τρεις απομαστεύσεις για προθέρμανση. Το νερό προθερμαίνεται, ατμοποιείται και υπερθερμαίνεται από τα κοίλα κάτοπτρα, ενώ ο πύργος είναι υπεύθυνος για την περαιτέρω υπερθέρμανση και αναθέρμανση του ατμού. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ετήσιο θερμικό βαθμό απόδοσης της τάξης του 16% και μείωση του κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας 7.5-12.4% συγκρινόμενο με ηλιακούς κύκλους μόνο κοίλων κατόπτρων ή μόνο πύργου.

Οι Bakos & Tsechelidou (2013) στην εργασία τους μελετούν τη δυνατότητα προσθήκης ηλιακών κατόπτρων σε υπάρχων λιγνιτικό σταθμό (Σταθμός VI Πτολεμαΐδας). Η τεχνολογία που χρησιμοποιείται είναι αυτή των κοίλων κατόπτρων με λάδι και η θερμότητα στον κύκλο δίνεται στην προθέρμανση υψηλής πίεσης αντικαθιστώντας την αντίστοιχη απομάστευση. Μελετώνται δύο επιλογές λειτουργίας: 1) ίδια λειτουργία με την αρχική με εκτόνωση του ατμού που θα απομαστευόταν με αποτέλεσμα την παραγωγή μεγαλύτερης ισχύος και 2) θεωρώντας ίδια παραγωγή ισχύος με την αρχική με αποτέλεσμα να μειώνεται το καταναλισκόμενο καύσιμο. Καταλήγουν πως και οι δύο επιλογές είναι ευεργετικές και πως μια τέτοια τροποποίηση θα είχε χρόνο απόσβεσης τα 5 χρόνια περίπου.

Όσον αφορά στον ατμοστρόβιλο, κι εδώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί εργαζόμενο μέσο διαφορετικό του νερού/ατμού για αύξηση της απόδοσης και της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Οι Chacartegui et al. (2008) μελετούν τη χρήση άλλων εργαζόμενων μέσων στον κύκλο Rankine μιας εγκατάστασης συνδυασμένου κύκλου. Τα χαρακτηριστικά μιας τέτοιας εγκατάστασης με χρήση ηλιακής ενέργειας διαφέρουν από αυτά του γνωστού κύκλου που κάνει χρήση καυσίμου. Για αυτό κρίνεται επιβεβλημένη η μελέτη χρήσης διαφορετικών του νερού μέσων στο κύκλο Rankine τα οποία θα εκμεταλλεύονται καλύτερα τα χαρακτηριστικά ενός τέτοιου κύκλου. Καταλληλότερα εργαζόμενα μέσα είναι τα ξηρά αέρια τα οποία δεν συμπυκνώνονται στις τελευταίες βαθμίδες του ατμοστροβίλου και παρέχουν βαθμούς απόδοσης αυξημένους μέχρι και 3% σε σχέση με τη χρήση νερού. Κατά την ανάλυση, την καλύτερη συμπεριφορά

επέδειξε το R-113 ως εργαζόμενο μέσο με το κυκλοεξάνιο να έχει κι αυτό παρόμοια αποτελέσματα.

Οι He, Mei, Tao, Yang, & Liu (2012) στην εργασία τους πραγματοποιούν τη μοντελοποίηση ενός ηλιακού ORC με τέσσερις προθερμάνσεις, αποθήκευση θερμότητας και βοηθητικό καυστήρα. Πραγματοποιούν παραμετρική ανάλυση ώστε να προσδιορίσουν την επίδραση διαφόρων μεταβλητών όπως η παροχή του οργανικού μέσου, χωρητικότητα αποθήκευσης, πτώση πίεσης κτλ.

Η χρήση της ηλιακής ενέργειας στον κύκλο του ατμοστροβίλου είναι η πιο διαδεδομένη, μετρώντας αρκετά χρόνια εμπορικής εφαρμογής. Η επιλογή άμεσης ατμοποίησης από τα παραβολικά κάτοπτρα οδηγεί στη βελτίωση των επιδόσεων της διάταξης, όσον αφορά την παραγόμενη ισχύ και το κόστος ηλεκτροπαραγωγής. Η χρήση πύργου για την ατμοπαραγωγή αποτελεί τη σύγχρονη τάση, αφού επιτρέπει την επίτευξη μεγαλύτερης θερμοκρασίας ατμού και μεγαλύτερου έλεγχου της διάταξης. Όπως φαίνεται από τις αναφερθείσες εργασίες, σύγκριση επιδόσεων έχει πραγματοποιηθεί μόνο μεταξύ άμεσης και έμμεσης ατμοπαραγωγής από παραβολικά κάτοπτρα. Αναγκαία, όμως είναι και η συμμετοχή σε μια τέτοια σύγκριση της διάταξης πύργου άμεσης ατμοπαραγωγής, καθώς αυτή αποτελεί την πιο σύγχρονη προσέγγιση. Επιπλέον, απαραίτητη είναι και η μελέτη του τρόπου ελέγχου μιας διάταξης ηλιακού ατμοστροβίλου σε λειτουργία με ένταση ακτινοβολίας μικρότερη από την ονομαστική. Τέλος, η απαραίτητη ευελιξία για την προσομοίωση διαφόρων διατάξεων μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση των απαραίτητων μοντέλων των συνιστωσών. Όπως φαίνεται, στην πλειοψηφία των εργασιών που μελετούν συνολικά μια διάταξη, χρησιμοποιούνται μοντέλα βασιζόμενα σε ημι-εμπειρικές σχέσεις με τη μορφή πολυωνύμου που προέκυψαν από συγκεκριμένες διατάξεις. Τέτοια προσέγγιση δεν επιτρέπει τη μελέτη της επίδρασης κατασκευαστικών και λειτουργικών παραμέτρων στις συνολικές επιδόσεις της διάταξης, καθώς και τη προσομοίωση της λειτουργίας της διάταξης με μειωμένες επιδόσεις των συνιστωσών (βλάβες).

1.5.3 Ηλιακή ενέργεια και συνδυασμένος κύκλος

Στην περίπτωση του συνδυασμένου κύκλου η χρήση της ηλιακής ενέργειας έγκειται στην επιπλέον θέρμανση του προς ατμοποίηση νερού η οποία επιτυγχάνεται από τα θερμά καυσαέρια του αεριοστροβίλου ή και στην θέρμανση του αέρα πριν τον θάλαμο καύσης του αεριοστροβίλου. Εφικτή επίσης είναι και η χρήση άλλων, από τα συνηθισμένα, εργαζόμενων μέσων. Εφαρμόζονται, δηλαδή, τα όσα περιγράφηκαν μέχρι τώρα για την χρήση της ηλιακής ενέργειας τόσο στον αεριοστροβίλο όσο και στον ατμοστροβίλο.

Οι υπάρχουσες εγκαταστάσεις αφορούν τη χρήση της ηλιακής ενέργειας στον κύκλο του ατμοστροβίλου (Giovanna Barigozzi, Franchini, Perdichizzi, & Ravelli, 2013; NREL, 2012, 2013a, 2013b, 2015a). Βασίζονται κυρίως στην

τεχνολογία των παραβολικών κατόπτρων με έλαιο ή άλατα και επιτυγχάνουν την αύξηση της ατμοπαραγωγής και κατά συνέπεια της παραγόμενης ισχύος.

Μια διάταξη συνδυασμένου κύκλου, με τη θερμότητα που προέρχεται από την ηλιακή ενέργεια να εισέρχεται στον κύκλο Brayton αξιοποιώντας τα δεδομένα της λειτουργίας του πειραματικού δέκτη REFOS, περιγράφεται από τους Buck et al. (2002). Η εγκατάσταση είναι ισχύος 30MW με βαθμό απόδοσης 43% και ο κύκλος Brayton υλοποιείται από έναν αεριοστρόβιλο Westinghouse WR-21 με ανάψυξη. Αναφέρουν πως μείωση του κόστους ηλεκτροπαραγωγής μπορεί να επέλθει με αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας του δέκτη και με επανασχεδιασμό του πεδίου κατόπτρων.

Οι Kelly, Herrmann, & Hale (2001) κάνουν μελέτη της χρήσης της ηλιακής ενέργειας (με χρήση παραβολικών κατόπτρων) σε εγκατάσταση συνδυασμένου κύκλου με λέβητα ανάκτησης θερμότητας και αναθέρμανση χρησιμοποιώντας σε συνεργασία λογισμικά εκτίμησης των επιδόσεων του συνδυασμένου κύκλου και υπολογισμού της προσδιδόμενης ηλιακής θερμότητας. Ο αεριοστρόβιλος του συνδυασμένου κύκλου είναι ο PG7241(FA) και ανάκτηση θερμότητας στο λέβητα γίνεται σε τρεις πιέσεις. Η ισχύς και η κατανάλωση καυσίμου στον αεριοστρόβιλο της υβριδικής εγκατάστασης επηρεάζονται μόνο από την θερμοκρασία του αέρα ενώ η ισχύς του ατμοστροβίλου έχει ισχυρή συσχέτιση της θερμικής ενέργειας από το ηλιακό κομμάτι. Η πιο αποδοτική λύση υλοποίησης του υβριδικού κύκλου είναι η λήψη νερού από τη δεύτερη βαθμίδα (υψηλή θερμοκρασία) του Λέβητα Ανάκτησης Θερμότητας (ΛΑΘ), η παραγωγή κορεσμένου ατμού από το ηλιακό κομμάτι και η μεταφορά του στον ΛΑΘ για υπερθέρμανση. Με τον τρόπο αυτό μέρος της λανθάνουσας θερμότητας δίδεται από το ηλιακό κομμάτι, ενώ ο ΛΑΘ προσδίδει αισθητή θερμότητα με αποτέλεσμα την αύξηση της μέσης θερμοκρασίας και έτσι τη βελτίωση της απόδοσης. Όμως, η αύξηση του ποσοστού της ηλιακής ενέργειας στην εγκατάσταση έχει ως αποτέλεσμα την ατμοποίηση σε μεγάλη διαφορά θερμοκρασίας και όσο μεγαλύτερη είναι τόσο η απόδοση πλησιάζει αυτή του απλού κύκλου Rankine. Τέλος, συμπεραίνουν λειτουργικές δυσκολίες στη σύνδεση του υπάρχοντα ΛΑΘ με το ηλιακό κομμάτι.

Οι Cau, Cocco, Concas, & Tola (2010) μελετούν την χρήση της ηλιακής ενέργειας μέσω διάταξης παραβολικών κατόπτρων σε συνδυασμένο κύκλο για την ατμοποίηση του νερού και εξετάζουν δύο επιλογές: α) την ατμοποίηση όσης ποσότητας νερού είναι εφικτό με τη δεδομένη ηλιακή ενέργεια και β) την πρόσδοση της ηλιακής ενέργειας στον ΛΑΘ όπου η παραγόμενη ποσότητα ατμού και η θερμοκρασία του επιβάλλονται από τον ΛΑΘ. Μελετούν επίσης τη χρήση CO₂ ως HTF και αναφέρουν τα οφέλη και τα μειονεκτήματα. Για την υλοποίηση της μελέτης τους χρησιμοποιούν σε συνεργασία δύο λογισμικά ώστε να προσομοιώνεται η λειτουργία του ηλιακού κομματιού και του συνδυασμένου κύκλου.

Οι Baghernejad & Yaghoubi (2011) στην εργασία τους μελετούν τη βελτιστοποίηση συνδυασμένου κύκλου δύο πιέσεων με χρήση ηλιακής ενέργειας

στον ατμοποιητή υψηλής πίεσης μέσω παραβολικών κατόπτρων. Σκοπός η εύρεση των τιμών κατάλληλων μεταβλητών ώστε να μεγιστοποιηθεί ο βαθμός απόδοσης εξέργειας και να ελαχιστοποιηθεί το κόστος λειτουργίας.

Οι Mukhopadhyay, Ghosh, & Mandal (2011) μελετούν με απλά θερμοδυναμικά εργαλεία καθώς και με τη μέθοδο της εξέργειας το σημείο σχεδίασης συνδυασμένου κύκλου με υβριδικό αεριοστρόβιλο. Καταλήγουν πως για τη μελετηθείσα διάταξη, ο λόγος πίεσης μεγιστοποίησης του βαθμού απόδοσης βρίσκεται πολύ κοντά στο λόγο πίεσης μέγιστου βαθμού απόδοσης εξέργειας.

Οι Turchi, Ma, & Erbes (2011) στην εργασία τους μελετούν τη δυνατότητα χρήσης αεριοστρόβιλου σε διάταξη ηλιακού ατμοστροβίλου με κοίλα κάτοπτρα. Ο αεριοστρόβιλος χρησιμοποιείται έτσι ώστε τα θερμά καυσαερίά του να θερμαίνουν το λάδι των κατόπτρων ώστε να απορροφώνται οι μεταβολές στην ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Συζητούνται διάφορες πιθανές διατάξεις, ενώ ως καλύτερος τύπος αεριοστρόβιλου προτείνεται παράγωγος αεροπορικού λόγω και της ταχύτατης εκκίνησής του. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν πως η ιδέα χρήσης αεριοστρόβιλου για τη θέρμανση του λαδιού είναι αποδοτική.

Οι Peng, Hong, Jin, & Wang (2012) πραγματοποιούν τη μοντελοποίηση ενός συνδυασμένου κύκλου αποτελούμενου από έναν υβριδικό αεριοστρόβιλο με ανάψυξη και έναν κύκλο Kalina. Ο κύκλος Kalina, χρησιμοποιεί μείγμα νερού/αμμωνίας και δεσμεύει τη θερμότητα από τον αναψύκτη καθώς και από τα θερμά καυσαερία. Τέλος πραγματοποιείται διερεύνηση της επίδρασης των τιμών διάφορων παραμέτρων στο σημείο σχεδίασης.

Οι Spelling, Favrat, Martin, & Augsburger (2012) στην εργασία τους πραγματοποιούν τη μοντελοποίηση ενός ηλιακού συνδυασμένου κύκλου ο οποίος αποτελείται από αεριοστρόβιλο διδύμων ατράκτων με ανάψυξη και αναθέρμανση και ενός ατμοστροβίλου δύο πιέσεων. Η θερμότητα δίδεται στον κύκλο του αεριοστρόβιλου μέσω εναλλάκτη τον οποίο διαρρέει θερμός αέρας που θερμαίνεται από διάταξη πύργου και ανοιχτό δέκτη. Επίσης, υπάρχει και διάταξη αποθήκευσης θερμότητας. Στη συνέχεια πραγματοποιείται βελτιστοποίηση με ελεύθερες μεταβλητές όπως λόγος πίεσης, παροχή, υψηλή και χαμηλή πίεση κύκλου νερού/ατμού κτλ, ώστε να ελαχιστοποιηθούν τα κόστη εγκατάστασης και παραγωγής ρεύματος.

Οι Cau, Cocco, & Tola (2012) μελετούν τη χρήση του CO₂ ως μέσου μεταφοράς θερμότητας σε κοίλα κάτοπτρα και τη χρήση της θερμότητας σε έναν συνδυασμένο κύκλο με ΛΑΘ τριών πιέσεων και αναθέρμανσης. Εξετάζονται δύο εκδοχές: 1) το ηλιακό κομμάτι να προθερμαίνει, ατμοποιεί και υπερθερμαίνει το νερό/ατμό υψηλής πίεσης και 2) το ηλιακό κομμάτι να ατμοποιεί το νερό υψηλής και μέσης πίεσης. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν αύξηση του βαθμού απόδοσης σε σχέση με τη διαδεδομένη τεχνολογία του λαδιού και υπολογίζεται παραπλήσιος με τον εκτιμώμενο για άμεση ατμοποίηση. Επίσης, πραγματοποιούν και μια προκαταρκτική οικονομική μελέτη με την οποία

καταλήγουν στην αύξηση του κόστους σε σύγκριση με τον αντίστοιχο μη ηλιακό κύκλο, πράγμα για το οποίο ευθύνεται το υψηλό κόστος των ηλιακών συνιστωσών.

Οι Ojo, Pont, Conte, & Carroni (2012) στην εργασία τους μελετούν τη χρήση ηλιακής ενέργειας στο κομμάτι του νερού/ατμού συνδυασμένου κύκλου ώστε να επιτύχουν βέλτιστη απόδοση. Με θερμοδυναμικά εργαλεία μελετούν τη συμπεριφορά μιας τέτοιας εγκατάστασης.

Οι Heide et al. (2012) στην εργασία τους εξετάζουν την εύρεση των βέλτιστων χαρακτηριστικών υβριδικού αεριοστρόβιλου σε συνδυασμένο κύκλο είτε νερού ατμού είτε οργανικών. Θέτουν την TIT 950 °C (όριο που καθορίζεται από το δέκτη για μέγιστη επίδραση Ήλιου) με αποτέλεσμα μόνη παράμετρος να είναι ο λόγος πίεσης. Στη συνέχεια, για τους κύκλους νερού/ατμού και οργανικών βρίσκουν τα βέλτιστα χαρακτηριστικά τους συναρτήσει της πίεσης και της θερμοκρασίας. Τα παραπάνω εφαρμόζονται σε τρεις διατάξεις: 1) υβριδικός αεριοστρόβιλος με κύκλο νερού/ατμού διπλής πίεσης, 2) υβριδικός αεριοστρόβιλος με ORC και 3) υβριδικός αεριοστρόβιλος με ανακόμιση θερμότητας και ORC. Τα ανωτέρω εξετάζονται σε διάφορα σενάρια. Συμπερασματικά, ο κύκλος με ανακόμιση θερμότητας και ORC παρουσιάζει τη καλύτερη απόδοση, ενώ ο κύκλος νερού/ατμού παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ισχύ.

Οι Barigozzi, Franchini, Perdichizzi, & Ravelli (2013) μελέτησαν δύο εγκαταστάσεις συνδυασμένου κύκλου με χρήση ηλιακής ενέργειας και τις συνέκριναν με τον αντίστοιχο απλό συνδυασμένο κύκλο. Η πρώτη διάταξη αφορά την προθέρμανση του αέρα στον αεριοστρόβιλο με τη διάταξη πύργου, θέτοντας σταθερή τη θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο, ενώ στη δεύτερη διάταξη χρησιμοποιούνται κοίλα κάτοπτρα με λάδι σταθερής θερμοκρασίας εισόδου και εξόδου, ώστε να ατμοποιήσουν το νερό υψηλής πίεσης το οποίο στη συνέχεια υπερθερμαίνεται από το ΛΑΘ. Σύμφωνα με τα συμπεράσματά τους η πρώτη διάταξη βελτιώνει την απόδοση του κύκλου, ενώ η δεύτερη αυξάνει την παραγόμενη ενέργεια. Επισημαίνουν πως επιτακτική είναι η σύγκριση των δύο διατάξεων χρησιμοποιώντας την ίδια τεχνολογία στο ηλιακό κομμάτι (πύργο) και ίδιο μέγεθος πεδίου κατόπτρων. Ακόμα, η ανάλυσή τους αφορά μόνο στον προσδιορισμό των θερμοδυναμικών επιδόσεων.

Οι Sandoz, Spelling, Laumert, & Fransson (2013) στην εργασία τους μελέτησαν υβριδικό συνδυασμένο κύκλο αεριοστρόβιλου – αεριοστρόβιλου. Η διάταξη αποτελείται από έναν υβριδικό αεριοστρόβιλο του οποίου τα θερμά καυσαέρια χρησιμοποιούνται σε εναλλάκτη ο οποίος αντικαθιστά το θάλαμο καύσης αεριοστρόβιλου με ανάψυξη και ανακόμιση θερμότητας. Θεωρείται ότι η μηχανή του ανώτερου κύκλου λειτουργεί πάντα στο ονομαστικό φορτίο, ενώ η εγκατάσταση λειτουργεί μεταξύ 7:00-22:00. Πραγματοποιήθηκε θερμοοικονομική μελέτη με χρήση τεχνικών βελτιστοποίησης ώστε να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά του κύκλου για βέλτιστη λειτουργία. Βρέθηκε ότι η προτεινόμενη διάταξη παρουσιάζει μειωμένο περιβαλλοντικό

αντίκτυπο και μειωμένο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με τις λοιπές διατάξεις ανοιχτού κύκλου.

Οι Bakos & Parsa (2013) μελετούν με τεχνοοικονομικά εργαλεία τη χρήση ηλιακής ενέργειας στην υπάρχουσα μονάδα συνδυασμένου κύκλου της Μεγαλόπολης. Χρησιμοποιούνται κοίλα κάτοπτρα με λάδι ώστε να προθερμάνουν, ατμοποιήσουν και υπερθερμάνουν μέρος του νερού χαμηλής πίεσης. Μελετώνται δύο επιλογές λειτουργίας: 1) η αύξηση της παραγόμενης ισχύος δεδομένου ότι ο αεριοστρόβιλος λειτουργεί όπως και πριν και 2) τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου, δεδομένου ότι ο αεριοστρόβιλος λειτουργεί με τέτοιο τρόπο ώστε να παράγεται η ίδια ισχύς.

Οι Spelling & Laumert (2014) πραγματοποίησαν θερμοοικονομική ανάλυση υβριδικής εγκατάστασης συνδυασμένου κύκλου και φωτοβολταϊκών με σκοπό να προσδιορίσουν τα χαρακτηριστικά σχεδίασης που ελαχιστοποιούν το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η μελέτη τους αφορά στη χρήση διάταξης πύργου είτε στον αεριοστρόβιλο, είτε στον ατμοστρόβιλο. Εκτιμούν συνολικές θερμοδυναμικές και οικονομικές επιδόσεις χωρίς να εξετάζουν την επίδραση των δύο μεθόδων υβριδοποίησης στη λειτουργία του συνδυασμένου κύκλου.

Η χρήση της ηλιακής ενέργειας στον ήδη υψηλά αποδοτικό συνδυασμένο κύκλο οδηγεί στην περαιτέρω αύξηση των επιδόσεών του. Από τις ερευνητικές εργασίες φαίνεται ότι η επιλογή χρήσης της πιο σύγχρονης διάταξης άμεσης ατμοπαραγωγής (πύργος) στο συνδυασμένο κύκλο, δεν έχει μελετηθεί διεξοδικά όσον αφορά στις επιδόσεις αλλά και στην επίδραση της στη λειτουργία του κύκλου. Επιπλέον, απαραίτητη είναι και η σύγκριση των δύο επιλογών υβριδοποίησης του συνδυασμένου κύκλου (υβριδικός αεριοστρόβιλος ή υβριδικός ατμοστρόβιλος) χρησιμοποιώντας ίδια ηλιακή τεχνολογία, ώστε να προσδιοριστούν οι μεταβολές στη λειτουργία της διάταξης καθώς και να καταδειχθεί η ανταγωνιστικότερη επιλογή. Προφανώς, για την πραγματοποίηση τέτοιων μελετών απαιτούνται τα κατάλληλα εργαλεία προσομοίωσης και εκτίμησης επιδόσεων.

1.5.4 Βλάβες Ηλιοθερμικών διατάξεων

Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας μιας ηλιοθερμικής εγκατάστασης, μπορεί να παρουσιαστούν βλάβες στις συνιστώσες (πχ από-εστίαση κατόπτρων) ή συνθήκες μειωμένης απόδοσής τους (πχ σκόνη στα κάτοπτρα) που απαιτούν την πραγματοποίηση των απαραίτητων εργασιών συντήρησης.

Στης ηλιοθερμικές διατάξεις ηλεκτροπαραγωγής και ειδικά σε αυτές που χρησιμοποιούν πύργο, σημαντική περίπτωση δυσλειτουργίας είναι η απορύθμιση των κατόπτρων με αποτέλεσμα να μην αντανακλούν τις ηλιακές ακτίνες στο δέκτη και συνεπώς να μειώνεται η διαθέσιμη θερμική ισχύς. Λόγω της απορύθμισης και της στόχευσης σε άλλο σημείο, μπορεί να υπάρξει και καταστροφή της εγκατάστασης όπως στην περίπτωση του Ivanpah (Zhang,

2016) όπου τα κάτοπτρα στόχευσαν σε χαμηλότερο σημείο με συνέπεια την εκδήλωση φωτιάς στον πύργο. Για τον έλεγχο της σωστής συμπεριφοράς των επίπεδων κατόπτρων οι ερευνητές Song, Huang, & Zhu (2012) ανέπτυξαν μια διαδικασία ελέγχου που χρησιμοποιεί κάμερες και λογισμικό επεξεργασίας εικόνας ούτως ώστε να προσδιορίζονται τα κάτοπτρα που δεν στοχεύουν σωστά. Σύμφωνα με τα συμπεράσματά τους, είναι δυνατός ο εντοπισμός όλων των κατόπτρων με βλάβη.

Στις διατάξεις παραβολικών κατόπτρων για την θέρμανση ελαίου για ατμοπαραγωγή, διαπιστώνονται διάφορα είδη βλάβης (Cohen et al., 1999; Lei et al., 2009; Price et al., 2002). Οι συνηθέστερες βλάβες στα κάτοπτρα είναι η απώλεια κενού του υάλινου περιβλήματος και το σπάσιμο αυτού που οδηγούν στην αύξηση των θερμικών απωλειών και στη μείωση της απόδοσης του απορροφητή λόγω οξειδωσης. Μάλιστα, στην πρώτη εμπορική διάταξη (SEGS) το ποσοστό των κατόπτρων με βλάβη ανερχόταν σε 4-5% ετησίως. Επίσης, σε αυτή τη διάταξη διαπιστώθηκαν και άλλα προβλήματα όπως η μειωμένη αντοχή σε κυκλική λειτουργία των συνιστωσών του κύκλου Rankine, προβλήματα στο σχεδιασμό του συστήματος ελέγχου, διαρροή θερμού ελαίου και σπασμένα κάτοπτρα στις παρυφές της εγκατάστασης λόγω του ανέμου.

Τόσο στις διατάξεις πύργου όσο και σε αυτές των παραβολικών κατόπτρων, σημαντική μείωση της απόδοσης παρατηρείται λόγω της επικάθισης σκόνης στα κάτοπτρα με αποτέλεσμα τη μείωση της διαθέσιμης θερμικής ενέργειας και συνεπώς της ηλεκτροπαραγωγής. Η μείωση της ανακλαστικότητας μπορεί να φτάσει και το 26% (Wolfertstetter, Pottler, Merrouni, Mezrhab, & Pitz-paal, 2012). Εκτενής ανάλυση της επίδρασης της σκόνης καθώς και της επίδρασης του μεγέθους των σωματιδίων αυτής γίνεται από τους Sarver, Al-Qaraghuli, & Kazmerski (2013). Συμπεραίνεται πως το φαινόμενο αυτό είναι ισχυρά εξαρτώμενο από την περιοχή και τις κλιματολογικές συνθήκες. Η αποκατάσταση των κατόπτρων πραγματοποιείται με πλύσιμό τους με νερό υπό πίεση. Μελετήθηκε η χρήση πεπιεσμένου αέρα με υπερήχους αλλά κρίνεται λιγότερο αποδοτική. Οι ερευνητές μελετούν την δυνατότητα προσδιορισμού της μείωσης της ανακλαστικότητας είτε μέσω πυρηλιομέτρων (Wolfertstetter et al., 2012) είτε μέσω κάμερας και κατάλληλου λογισμικού (Birjukov, Faiman, & Goldfeld, 1999).

Όπως φαίνεται, αν και οι βλάβες είναι έντονες και επηρεάζουν τη λειτουργία των ηλιοθερμικών διατάξεων, η ποσοτικοποίηση και η εν γένει μελέτη της επίδρασής τους, έχει γίνει σε πολύ μικρό βαθμό. Αντίθετα, εκτενέστερα έχουν μελετηθεί βλάβες συστημάτων θέρμανσης νερού (de Keizer, Kuethe, Jordan, & Vajen, 2013; S. Kalogirou, Lalot, Florides, & Desmet, 2008; Wiese, Vajen, Krause, & Knoch, 2009). Η δυνατότητα του προσδιορισμού της επίδρασης των βλαβών των συνιστωσών στις συνολικές επιδόσεις, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εύρεση του βέλτιστου χρόνου των εργασιών συντήρησης (πχ πλύσιμο κατόπτρων) λαμβάνοντας υπ' όψιν και άλλες παραμέτρους που ισχύουν τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο όπως το κόστος

πλυσίματος, το κόστος των ανταλλακτικών, το κόστος καυσίμου, το χρονικό προφίλ της τιμής πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας κτλ. Επιπλέον, η πληροφορία της μεταβολής των επιδόσεων λόγω βλάβης μπορεί να αξιοποιηθεί για τον προσδιορισμό της συνιστώσας που έχει βλάβη καθώς και το μέγεθος της βλάβης αυτής. Άρα, απαιτείται η δυνατότητα προσομοίωσης της λειτουργίας των ηλιοθερμικών διατάξεων με ύπαρξη βλάβης σε κάποια συνιστώσα, καθώς και η ποσοτικοποίηση της επίδρασης διαφόρων βλαβών στις συνολικές επιδόσεις.

1.5.5 Παρατηρήσεις περί ηλιακής ενέργειας και θερμικών στροβιλομηχανών

Αρκετές εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρισμού έχουν κατασκευαστεί οι οποίες κάνουν χρήση των παραπάνω διατάξεων. Η πλειονότητά τους κάνει χρήση της ηλιακής ενέργειας για τη θέρμανση του νερού για τη χρήση του σε ατμοστρόβιλο χρησιμοποιώντας κοίλα κάτοπτρα. Η χρήση της ηλιακής ενέργειας στον αεριοστρόβιλο με τη χρήση του πύργου βρίσκεται ακόμα σε ερευνητικό στάδιο αν και έχουν κατασκευαστεί και μελετηθεί πειραματικές διατάξεις.

Με βάση τα όσα εξάγονται από την ανάλυση των ερευνητικών εργασιών παραπάνω, για τη βελτίωση της απόδοσης των ηλιοθερμικών εγκαταστάσεων και για να καταστούν ανταγωνιστικές συγκριτικά με τις συμβατικές, πρέπει οι νέες ερευνητικές προσπάθειες να επικεντρωθούν: α) στην βελτίωση των κατόπτρων (σχήμα, απόδοση, αντοχή κ.α.), όπως επίσης και των δεκτών και των HTF (μείωση απωλειών, αύξηση ανώτατης θερμοκρασίας κτλ), β) στην μελέτη της επίδρασης παραμέτρων σχεδιασμού και λειτουργίας ώστε να προσδιορίζονται οι βέλτιστες τιμές τους, γ) στην πρόταση εναλλακτικών διατάξεων κατασκευαστικά ευκολότερων και δ) στη διερεύνηση της επίπτωσης βλαβών στις επιδόσεις.

Οι μελέτες πρέπει να πραγματοποιηθούν λαμβάνοντας υπ' όψιν τα κατασκευαστικά όρια των υπαρχουσών συνιστωσών (τεχνολογία, υλικά κτλ) καθώς και το υψηλό κόστος επένδυσης αυτών των διατάξεων, αφού δεν βρίσκονται ακόμη στο στάδιο της μαζικής παραγωγής. Ειδικά στην περίπτωση του υβριδικού αεριοστρόβιλου, που ακόμα και σήμερα μόνο λίγες πειραματικές διατάξεις έχουν κατασκευαστεί, ισχύουν τα όσα είχαν αναφέρει οι Schwarzbözl et al. (2006) περί πρότασης και μελέτης πιλοτικών διατάξεων (kW-MW).

Οι απαιτήσεις που προκύπτουν και οι τρόποι αντιμετώπισής τους στην παρούσα διατριβή παρουσιάζονται αναλυτικά στη συνέχεια.

1.6 Αντικείμενο της Διατριβής

Οι ερευνητές, αναλόγως της μελετώμενης διάταξης, χρησιμοποιούν σε συνεργασία διάφορα λογισμικά προσομοίωσης, διότι δεν υπάρχει ένα ενιαίο εργαλείο που να παρέχει τη δυνατότητα μοντελοποίησης οποιασδήποτε ηλιοθερμικής διάταξης με την επιθυμητή ακρίβεια. Συνεπώς, θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμη η δημιουργία ενός εργαλείου που θα μπορεί να μοντελοποιήσει οποιαδήποτε ηλιοθερμική διάταξη.

Η ανάλυση της επίδρασης των παραμέτρων σχεδιασμού και λειτουργίας στις επιδόσεις, κρίνεται απαραίτητη από τους ερευνητές ώστε να προσδιοριστούν οι βέλτιστες τιμές τους που οδηγούν σε αύξηση των επιδόσεων των ηλιοθερμικών διατάξεων. Αυτή η δυνατότητα πρέπει να παρέχεται από το χρησιμοποιούμενο λογισμικό, όπως και η δυνατότητα υπολογισμού των συνολικών επιδόσεων με ύπαρξη βλάβης σε κάποια συνιστώσα. Η δυνατότητα ποσοτικοποίησης της επίδρασης της βλάβης σε όρους επιδόσεων καθιστά δυνατό το βέλτιστο προγραμματισμό των εργασιών συντήρησης καθώς και τη διάγνωση. Αν και το αντικείμενο αυτό έχει μεγάλη σημασία, εντούτοις, έχει μελετηθεί ελάχιστα, κυρίως λόγω των περιορισμένων δυνατοτήτων των υπαρχόντων λογισμικών.

Ακόμα, με σκοπό την αύξηση των επιδόσεων και την αντιμετώπιση κατασκευαστικών δυσκολιών, οι ερευνητές στρέφονται στη μελέτη εναλλακτικών τρόπων αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας στις θερμικές στροβιλομηχανές. Έτσι, απαιτείται η περαιτέρω διερεύνηση αυτού του πεδίου, δεδομένου ότι υφίσταται πλήθος δυνατοτήτων που δεν έχουν μέχρι σήμερα εξεταστεί.

Επιπλέον, φάνηκε και η ανάγκη σύγκρισης των επιδόσεων κύκλων ηλιακού ατμοστροβίλου που κάνουν χρήση διαφορετικών τεχνολογιών αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας, αφού οι υπάρχουσες συγκρίσεις αφορούν μόνο την άμεση και έμμεση ατμοπαραγωγή από παραβολικά κάτοπτρα. Επίσης, οι ερευνητές κρίνουν αναγκαία και τη σύγκριση των επιδόσεων των δύο υβριδικών διατάξεων συνδυασμένου κύκλου με χρήση πύργου και τον προσδιορισμό της επίδρασης της υβριδοποίησης στη λειτουργία.

Τέλος, οι υπάρχουσες μελέτες επικεντρώνονται στην εκτίμηση των θερμοδυναμικών επιδόσεων των διατάξεων. Όμως, η ανταγωνιστικότητα μιας επένδυσης κρίνεται με βάση τις οικονομικές επιδόσεις. Συνεπώς, η ανάλυση της λειτουργίας μιας διάταξης αλλά και η σύγκρισή της με άλλες πρέπει να βασίζεται τόσο στις θερμοδυναμικές, όσο και στις οικονομικές επιδόσεις.

Με βάση τα ανωτέρω και τα όσα αναφέρθηκαν στις παραγράφους 1.5.1-1.5.5, σκοπός της παρούσας διατριβής είναι η ανάπτυξη κατάλληλου εργαλείου προσομοίωσης της λειτουργίας οποιασδήποτε ηλιοθερμικής διάταξης καθώς και της εκτίμησης των επιδόσεών της (θερμοδυναμικές και οικονομικές). Επίσης, σκοπό αποτελεί και η μελέτη διατάξεων αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας με υφιστάμενους και εναλλακτικούς τρόπους καθώς και η διεξαγωγή μελετών που

αφορούν τις παραμέτρους σχεδιασμού και λειτουργίας όπως και τις βλάβες συνιστωσών.

Για την επίτευξη των σκοπών αυτών, δημιουργούνται μοντέλα που προσομοιώνουν τη λειτουργία των εμπλεκόμενων συνιστωσών, παρέχοντας τη δυνατότητα μοντελοποίησης οποιασδήποτε ηλιοθερμικής διάταξης με την επιθυμητή ακρίβεια. Τα μοντέλα αυτά έχουν τη δυνατότητα διεξαγωγής όλων των επιθυμητών μελετών (βλάβες, παράμετροι λειτουργίας κτλ.). Επίσης, αναπτύσσονται και μοντέλα αποτίμησης των επιδόσεων με βάση οικονομικά μεγέθη. Τα μοντέλα αυτά πιστοποιούνται με διαθέσιμα δεδομένα της ανοιχτής βιβλιογραφίας.

Με τη χρήση των παραχθέντων μοντέλων και των ήδη υπαρχόντων, πραγματοποιείται η μελέτη και μοντελοποίηση ηλιακών και υβριδικών κύκλων αεριοστρόβιλου, ηλιακών κύκλων Rankine και υβριδικών συνδυασμένων κύκλων με χρήση της ηλιακής ενέργειας είτε στον κύκλο του αεριοστρόβιλου είτε στον κύκλο του αμμοστρόβιλου. Στη περίπτωση του υβριδικού αεριοστρόβιλου, μελετάται επιπλέον και η επίδραση της τιμής διαφόρων παραμέτρων σχεδιασμού και λειτουργίας στις επιδόσεις της διάταξης.

Ακόμη, με σκοπό την αντιμετώπιση των κατασκευαστικών δυσκολιών του υβριδικού αεριοστρόβιλου, και έχοντας ως γνώμονα τη χρήση υπαρχουσών και ήδη εφαρμοσμένων τεχνικών, προτείνεται και μελετάται ένας νέος εναλλακτικός τρόπος αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας, αυτό της χρήσης της για αναθέρμανση σε κύκλο αεριοστρόβιλου. Επιπλέον, στο πλαίσιο της μελέτης εναλλακτικών τρόπων αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας, μελετάται η χρήση της για παραγωγή ατμού και έγχυση αυτού στο θάλαμο καύσης αεριοστρόβιλου, επεκτείνοντας έτσι τις υπάρχουσες μελέτες της βιβλιογραφίας και απαντώντας στα ζητήματα που προέκυψαν από αυτές. Ακόμα, μελετάται η δυνατότητα αξιοποίησης της περίσσειας ηλιακής ενέργειας για παραγωγή ατμού και έγχυσή του στο θάλαμο καύσης υβριδικού αεριοστρόβιλου με σκοπό τον περιορισμό των αρνητικών επιπτώσεων της υβριδοποίησης και την αύξηση του ποσοστού αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας.

Επιπλέον, με σκοπό τη χρήση υπαρχουσών τεχνολογιών και διατάξεων για την πιο εύκολη και οικονομικώς ανταγωνιστικότερη χρήση της ηλιακής ενέργειας διερευνάται η δυνατότητα χρήσης στροβιλοϋπερπληρωτών για την υλοποίηση της διάταξης του υβριδικού αεριοστρόβιλου.

Όσον αφορά τη διάταξη του ηλιακού αμμοστρόβιλου, πραγματοποιείται σύγκριση των επιδόσεων διατάξεων που χρησιμοποιούν διαφορετικές τεχνολογίες αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας, αφού πρώτα προσδιοριστεί ο αποδοτικότερος τρόπος ελέγχου τους.

Ακόμα, πραγματοποιείται σύγκριση των επιδόσεων των δύο διαφορετικών τρόπων αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας σε συνδυασμένο κύκλο και μελέτη της επίδρασης της υβριδοποίησης στη λειτουργία της διάταξης.

Τέλος, με σκοπό την ποσοτικοποίηση της επίδρασης βλαβών σε όρους επιδόσεων, μελετάται η λειτουργία υβριδικού αεριοστρόβιλου και ηλιακού

ατμοστροβίλου σε συνθήκες ύπαρξης βλάβης ή μείωσης της απόδοσης συγκεκριμένων συνιστωσών.

1.7 Δομή της Διατριβής

Συνοπτικά, η δομή της παρούσας διατριβής είναι εξής:

Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφεται η φυσική συμπεριφορά των συνιστωσών που χρησιμοποιούνται στις ηλιοθερμικές διατάξεις, καθώς και οι μαθηματικές εξισώσεις που περιγράφουν τη σχέση μεταξύ των φυσικών μεγεθών που τις χαρακτηρίζουν.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η υλοποίηση των μοντέλων των ηλιοθερμικών συνιστωσών που πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού με τη χρήση των μαθηματικών εκφράσεων του 2^{ου} Κεφαλαίου. Επιπλέον, τα αναπτυχθέντα μοντέλα πιστοποιούνται με βάση αποτελέσματα προσομοιώσεων και μετρήσεων που είναι διαθέσιμα στην ανοιχτή βιβλιογραφία. Με αυτόν τον τρόπο αναπτύχθηκε ένα ισχυρό λογισμικό που επιτρέπει τη προσομοίωση της λειτουργίας των ηλιοθερμικών διατάξεων, ανεξαρτήτως της πολυπλοκότητάς τους.

Στο Κεφάλαιο 4 αναλύονται οι παράμετροι που καθιστούν δυνατή τη σύγκριση τόσο των διαφορετικών ηλιοθερμικών διατάξεων μεταξύ τους όσο και τη σύγκρισή τους με συνήθεις θερμικές διατάξεις. Οι παράμετροι αυτές αφορούν θερμοδυναμικές και οικονομικές επιδόσεις.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται η διάταξη του υβριδικού αεριοστροβίλου, η προσομοίωση της λειτουργίας του και οι επιδόσεις του. Αναλύεται η λογική βάση της οποίας επιλέχθηκαν οι παράμετροι σχεδιασμού καθώς και ο τρόπος λειτουργίας. Επιπλέον, μελετάται η επίδραση των παραμέτρων σχεδίασης και λειτουργίας στις επιδόσεις της διάταξης. Τέλος, διερευνάται η δυνατότητα υλοποίησης μιας τέτοιας διάταξης με στροβιλοϋπερπληρωτή ούτως ώστε να μειωθούν οι κατασκευαστικές δυσκολίες αλλά και το κόστος επένδυσης.

Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται δύο εναλλακτικοί τρόποι ηλιακής υβριδοποίησης του αεριοστροβίλου και προσομοιώνεται η λειτουργία τους ώστε να προσδιοριστούν οι επιδόσεις τους. Η πρώτη διάταξη αφορά αεριοστροβίλο με ηλιακή αναθέρμανση και η δεύτερη την ηλιακή παραγωγή ατμού και της έγχυσης αυτού στο θάλαμο καύσης αεριοστροβίλου. Αυτές οι διατάξεις χρησιμοποιούν υπάρχουσες τεχνολογίες και επιλύουν κατασκευαστικές δυσκολίες που εμφανίζονται στην κλασική διάταξη υβριδικού αεριοστροβίλου.

Στο Κεφάλαιο 7 αναλύεται η λειτουργία κύκλων ηλιακού ατμοστροβίλου καθώς και υβριδικού συνδυασμένου κύκλου. Συγκεκριμένα, μελετώνται τρεις ηλιακές διατάξεις ατμοστροβίλου, προσδιορίζεται ο καταλληλότερος τρόπος ελέγχου της λειτουργίας τους και συγκρίνονται οι επιδόσεις τους. Εν συνεχεία, μελετάται η καταλληλότερη θέση πρόσδοσης της ηλιακής θερμότητας στο συνδυασμένο κύκλο, δηλαδή αν είναι αποδοτικότερη η πρόσδοσή της στον κύκλο του αεριοστροβίλου ή στον κύκλο του ατμοστροβίλου.

Στο Κεφάλαιο 8 παρουσιάζονται οι συνηθέστερες βλάβες που προκύπτουν κατά τη λειτουργία των ηλιοθερμικών διατάξεων και πραγματοποιείται η ποσοτικοποίηση της επίδρασής τους στις επιδόσεις των διατάξεων.

Στο Κεφάλαιο 9 πραγματοποιείται ανακεφαλαίωση της παρούσας, συνοψίζονται τα εξαχθέντα συμπεράσματα και αναφέρονται οι ερευνητικές κινήσεις στο πλαίσιο της συνέχισης της μελέτης των ηλιοθερμικών διατάξεων.

Κεφάλαιο 2: Συνιστώσες Ηλιοθερμικών Διατάξεων

Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάζεται η φυσική συμπεριφορά των συνιστωσών που χρησιμοποιούνται στις ηλιοθερμικές διατάξεις και παρουσιάζονται οι μαθηματικές εξισώσεις που περιγράφουν τη σχέση μεταξύ των φυσικών μεγεθών που τις χαρακτηρίζουν. Οι εξισώσεις αυτές αποτελούν τη βάση για την προσομοίωση της συμπεριφοράς τους με χρήση υπολογιστικών μοντέλων.

2.1 Ο Ήλιος και η ακτινοβολία

Η κίνηση του Ήλιου, σχετικά με μια θέση παρατήρησης σε ένα σημείο της επιφάνειας της Γής, διαφέρει κατά τη διάρκεια του έτους, όπως επίσης αλλάζει και η θέση του Ήλιου στον ουρανό κατά τη διάρκεια της μέρας. Η θέση του Ήλιου καθορίζει τη γωνία με την οποία προσπίπτουν οι ηλιακές ακτίνες σε ένα επίπεδο στην επιφάνεια της Γής. Από αυτήν προκύπτει το θερμικό κέρδος, ο προσανατολισμός των κατόπτρων για τη βέλτιστη συλλογή της ακτινοβολίας κτλ. Επιπλέον, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που προέρχεται από τον Ήλιο προσπίπτει μειωμένη στην επιφάνεια της Γής αφού αλληλεπιδρά με τα στρώματα της ατμόσφαιρας. Σε αυτήν την αλληλεπίδραση σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και η γωνία εισόδου των ηλιακών ακτίνων στην ατμόσφαιρα.

Συνεπώς, είναι σημαντικός ο υπολογισμός της κίνησης του Ήλιου στον ουράνιο θόλο καθώς και η γνώση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας είτε από μετρήσεις είτε από υπολογιστικά μοντέλα.

2.1.1 Ο χρόνος

Σημαντικό μέγεθος για την μοντελοποίηση της σχετικής ηλιακής κίνησης είναι ο ηλιακός χρόνος (Apparent Solar Time – AST). Ο ηλιακός χρόνος διαφέρει από τον ωρολογιακό χρόνο και ορίζεται ως ο χρόνος που υπολογίζεται με βάση την κίνηση του Ήλιου στον ουρανό όπως αυτή γίνεται αντιληπτή από παρατηρητή σε συγκεκριμένο τόπο. Ως ηλιακό μεσημέρι ορίζεται η στιγμή που ο Ήλιος διέρχεται από τον μεσημβρινό του παρατηρητή και κατά κανόνα δε συμπίπτει με το ωρολογιακό μεσημέρι. Γενικότερα, ο ηλιακός χρόνος δεν συμπίπτει με το χρόνο που απεικονίζεται στο ρολόι. Ο ωρολογιακός (LST) και ο ηλιακός χρόνος (AST) συνδέονται με την εξής σχέση (S. A. Kalogirou, 2009):

$$AST = LST + ET \pm 4(SL - LL) - DS \quad (2.1)$$

όπου

ET: η εξίσωση του χρόνου (Equation of Time)

LL: το γεωγραφικό μήκος του παρατηρητή

LST: ο ωρολογιακός χρόνος

SL: το γεωγραφικό μήκος του μεσημβρινού στον οποίο βασίζεται η τοπική ώρα (Ελλάδα $SL=30^\circ$)

Η σχέση ισχύει με (+) για τα δυτικά μήκη ενώ με (-) για τα ανατολικά. Ο συντελεστής 4 εκφράζει min/deg. Τέλος, στη σχέση υπάρχει και ο όρος χρόνου *DS* (Daylight Saving) και χρησιμοποιείται μόνο στην περίπτωση που έχουμε συμπεριλάβει στον ωρολογιακό χρόνο την αλλαγή για τη θερινή ώρα.

Ο όρος $4(SL-LL)$ της Εξ. (2.1) αποτελεί την διόρθωση γεωγραφικού μήκους ώστε να υπολογιστεί ο ηλιακός χρόνος ενώ ο όρος *ET* αποτελεί τη διόρθωση του χρόνου. Η διόρθωση του χρόνου σχετίζεται με την τροχιά της Γής γύρω από τον Ήλιο, η οποία λόγω της μορφής της επηρεάζει την ταχύτητα της Γής με αποτέλεσμα να διαφέρει το χρονικό διάστημα που απαιτείται ώστε η Γή να κάνει μια πλήρη περιστροφή γύρω από τον Ήλιο. Δηλαδή, το χρονικό διάστημα που καθορίζει τη μέρα δεν είναι σταθερό. Η εξίσωση του χρόνου απεικονίζεται στο Σχήμα 2.1 και για οποιαδήποτε μέρα του έτους (*N*) δίδεται από την εξής σχέση (S. A. Kalogirou, 2009):

$$ET = 9.87 \sin(2B) - 7.53 \cos(B) - 1.5 \sin(B) \quad (2.2)$$

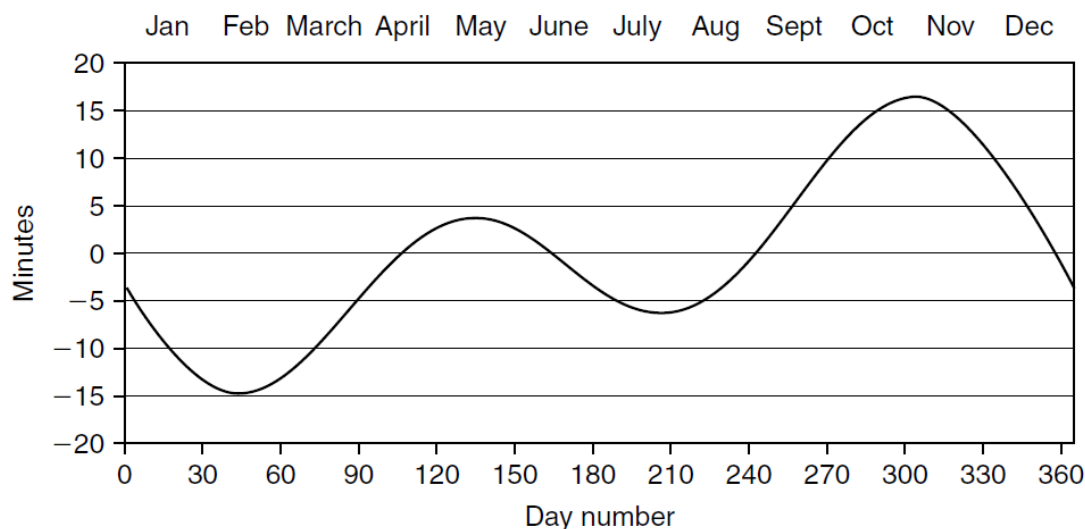
$$\text{με } B = (N - 81) \frac{360}{364}$$

Ή από την πιο ακριβή σχέση (Duffie & Beckman, 2013; Sen, 2008):

$$ET = 229.18[0.000075 + 0.001868 \cos(B) - 0.032077 \sin(B) - 0.014615 \cos(2B) - 0.04089 \sin(2B)] \quad (2.3)$$

$$\text{με } B = (N - 1) \frac{360}{365}$$

Στις σχέσεις (2.1) - (2.3), οι χρόνοι είναι σε λεπτά (min) και η ποσότητα *B* σε μοίρες (deg).

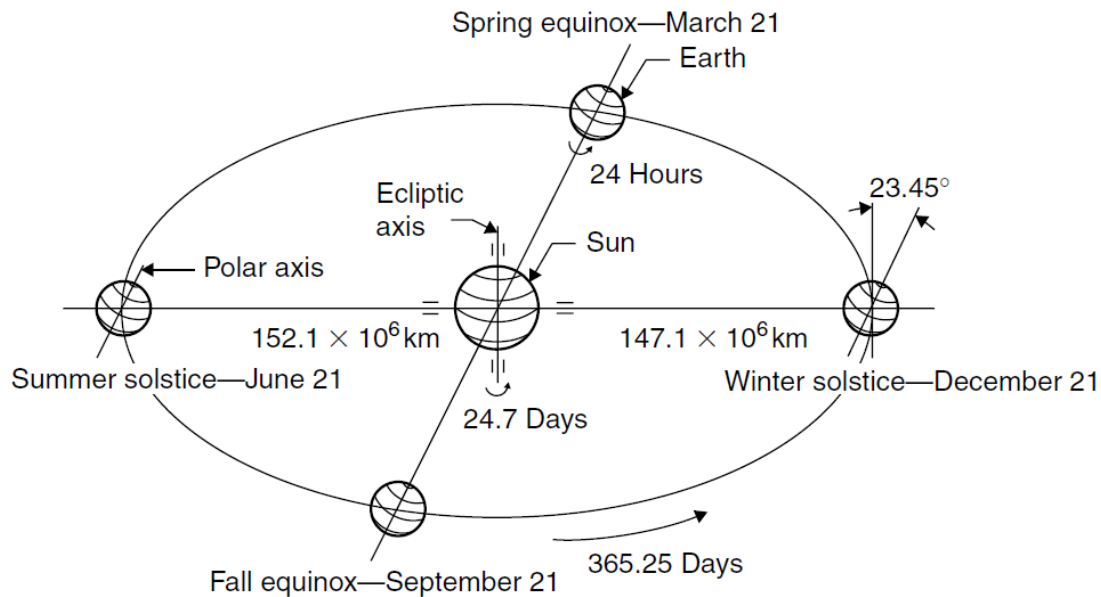


Σχήμα 2.1. Η εξίσωση του χρόνου σε πρώτα λεπτά της ώρας συναρτήσει της ημέρας του έτους (S. A. Kalogirou, 2009)

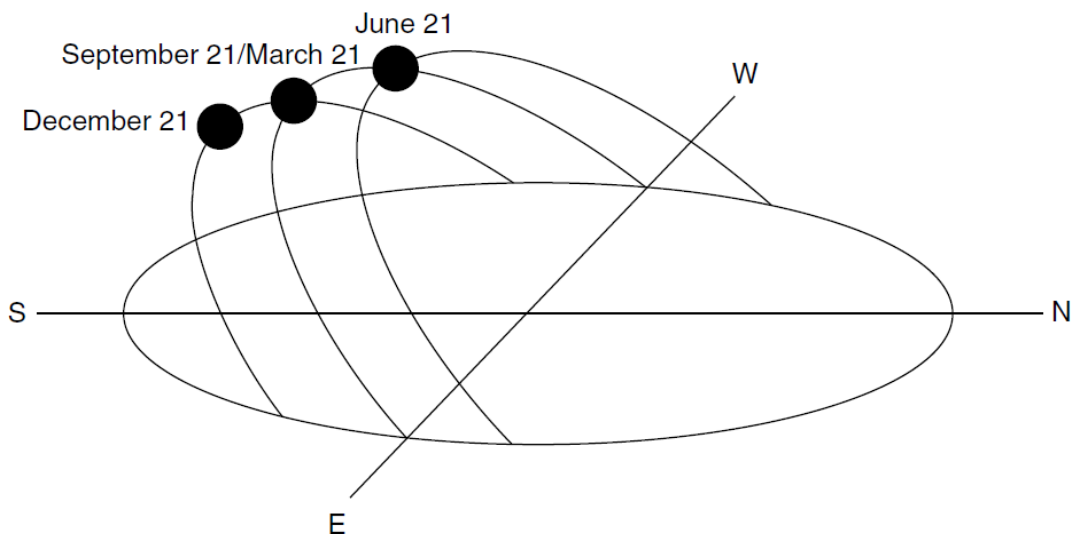
2.1.2 Οι γωνίες

Η Γή πραγματοποιεί μια πλήρη περιστροφή γύρω από τον Ήλιο σε 365,25 μέρες κινούμενη πάνω σε μια ελλειπτική τροχιά, με μικρή όμως εκκεντρότητα με αποτέλεσμα να θεωρείται σχεδόν κυκλική. Επίσης, η Γή πραγματοποιεί μια πλήρη περιστροφή γύρω από τον άξονά της σε περίπου 24 ώρες. Ο άξονας αυτής της περιστροφής έχει μία κλίση $23,45^\circ$ ως προς το επίπεδο που ορίζει η ελλειπτική τροχιά. Αξιοσημείωτο, επίσης, είναι ότι, λόγω της ελλειπτικής τροχιάς, η Γή απέχει από τον Ήλιο τη μέγιστη απόσταση (μετρούμενη από τα κέντρα τους) το χειμώνα ενώ την ελάχιστη το καλοκαίρι (Σχήμα 2.2). Η ακτινοβολία και συνεπώς η θερμοκρασία στη Γή δεν επηρεάζονται από την απόσταση από τον Ήλιο αλλά από τη γωνία του άξονα της Γής. Έτσι, αν και το καλοκαίρι η απόσταση είναι μέγιστη, η κλίση του άξονα της Γής είναι τέτοια ώστε (για το βόρειο ημισφαίριο) οι ηλιακές ακτίνες να προσπίπτουν πιο κάθετα από ότι το χειμώνα (Σχήμα 2.2).

Λόγω της τροχιάς της Γής και της κλίσης του άξονα, ο Ήλιος φαίνεται να διαγράφει τροχιά τόξου στον ουρανό, με αρχή την ανατολή και τέλος τη δύση, φτάνοντας στο μέγιστο ύψος το μεσημέρι. Κατά την εναλλαγή των εποχών από χειμώνα προς καλοκαίρι, τα σημεία ανατολής και δύσεως στον ορίζοντα κινούνται βορειότερα και για το βόρειο ημισφαίριο, η διάρκεια της μέρας αυξάνεται όπως και το μέγιστο ύψος στο οποίο φτάνει ο Ήλιος (Σχήμα 2.3).



Σχήμα 2.2. Η τροχιά της Γής, η απόσταση από τον Ήλιο και η κλίση του άξονα ιδιοπεριστροφής (S. A. Kalogirou, 2009)



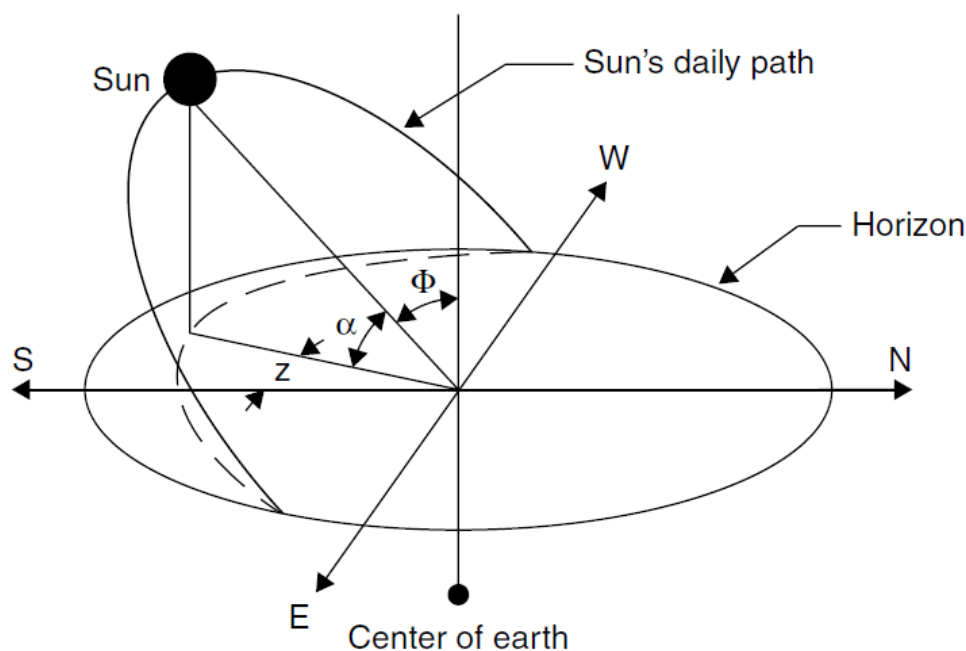
Σχήμα 2.3. Αλλαγή σημείων ανατολής και δύσης καθώς και του μέγιστου ύψους ανάλογα με την εποχή (S. A. Kalogirou, 2009)

Λόγω της σχετικότητας της κίνησης του Ήλιου με βάση τη Γή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η προσέγγιση του Πτολεμαίου, κατά την οποία η Γή θεωρείται ακίνητη και μελετάται η φαινόμενη κίνηση του Ήλιου με σημείο αναφοράς τον εξεταζόμενο τόπο στη Γή. Κατ' αυτήν την προσέγγιση, η κίνηση του Ήλιου στον ουράνιο θόλο έχει δύο βαθμούς ελευθερίας. Συνεπώς, η θέση του Ήλιου στον ουράνιο θόλο μπορεί να καθοριστεί από έναν παρατηρητή γνωρίζοντας δύο αστρονομικές γωνίες, το ηλιακό ύψος α (ή ισοδύναμα τη γωνία ζενίθ (Φ)) και το αζιμούθιο Ηλίου z . Το ηλιακό ύψος είναι η γωνία που σχηματίζεται από την

ευθεία όρασης του Ηλίου και την προβολή της στο οριζόντιο επίπεδο, ενώ το αζιμούθιο Ηλίου είναι η γωνία μεταξύ της προβολής της ευθείας όρασης του Ηλίου στο οριζόντιο επίπεδο και της νότιας κατεύθυνσης. Το ηλιακό ύψος σχετίζεται με τη γωνία ζενίθ (Φ) με τη σχέση:

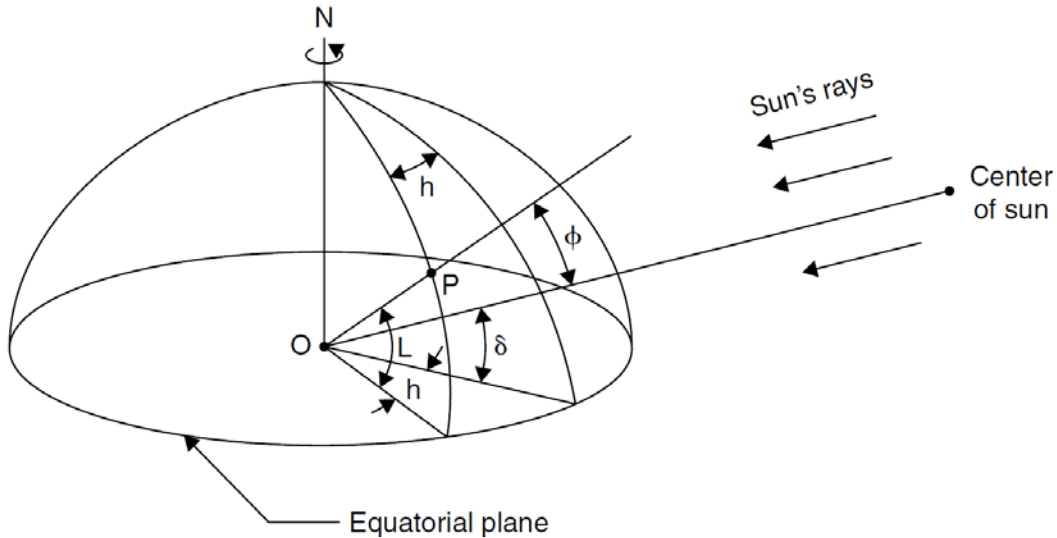
$$\Phi + \alpha = \frac{\pi}{2} = 90^\circ \quad (2.4)$$

Η γωνία ζενίθ είναι η γωνία που σχηματίζεται από την κατακόρυφο και την ευθεία όρασης του Ηλίου. Οι γωνίες ζενίθ, ηλιακό ύψος και αζιμούθιο Ηλίου απεικονίζονται στο Σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4. Απεικόνιση των γωνιών ζενίθ (Φ), ηλιακό ύψος (α) και αζιμούθιο Ηλίου (z) (S. A. Kalogirou, 2009)

Για τον προσδιορισμό των δύο γωνιών που ορίζουν την ηλιακή θέση απαιτείται ο προσδιορισμός δύο άλλων μεγεθών, της ηλιακής απόκλισης (δ) και της ωριαίας (ηλιακής) γωνίας (h) (Σχήμα 2.5).



Σχήμα 2.5. Ηλιακή απόκλιση και ωριαία γωνία (S. A. Kalogirou, 2009)

Η ηλιακή απόκλιση δ είναι η γωνιακή θέση του Ήλιου κατά το ηλιακό μεσημέρι ως προς το επίπεδο του ισημερινού. Η απόκλιση κατά το βόρειο ημισφαίριο θεωρείται θετική. Η ηλιακή απόκλιση (σε μοίρες) υπολογίζεται για κάθε μέρα του έτους (N) από την εξής σχέση (S. A. Kalogirou, 2009):

$$\delta = 23.45 \sin\left(\frac{360(284 + N)}{365}\right) \quad (2.5)$$

Ή από την πιο ακριβή σχέση (Duffie & Beckman, 2013; Sen, 2008):

$$\begin{aligned} \delta = \left(\frac{180}{\pi}\right) [& 0.006918 - 0.399912 \cos(B) + 0.070257 \sin(B) \\ & - 0.006758 \cos(2B) + 0.000907 \sin(2B) \\ & - 0.002697 \cos(3B) + 0.00148 \sin(3B)] \quad (2.6) \end{aligned}$$

$$\text{με } B = (N - 1) \frac{360}{365}$$

Η ωριαία (ηλιακή) γωνία h είναι η γωνιακή μετατόπιση του Ήλιου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού λόγω της περιστροφής της Γής περί τον άξονά της με ρυθμό $25^\circ/\text{min}$ ή, διαφορετικά, η γωνία κατά την οποία θα έπρεπε να περιστραφεί η Γή ώστε ο μεσημβρινός του μελετώμενου τόπου να βρεθεί ακριβώς κάτω από τον Ήλιο. Προφανώς, η ωριαία γωνία παίρνει την τιμή 0 όταν ο εξεταζόμενος χρόνος είναι το ηλιακό μεσημέρι αφού αυτό ορίζεται ως η χρονική στιγμή κατά την οποία ο Ήλιος βρίσκεται πάνω από τον τοπικό

μεσημβρινό. Η ωριαία (ηλιακή) γωνία δίδεται σε μοίρες από την εξής σχέση (S. A. Kalogirou, 2009):

$$h = \pm 0.25(\text{minutes from solar noon}) \quad (2.7)$$

Το (+) ισχύει για ώρες μ.μ. ενώ το (-) για ώρες π.μ. Η ωριαία γωνία δίδεται επίσης και με βάση τον ηλιακό χρόνο *AST* από την εξής σχέση (S. A. Kalogirou, 2009):

$$h = (AST - 12) \cdot 15 \quad (2.8)$$

Πλέον, μετά τον ορισμό της ηλιακής απόκλισης δ και της ωριαίας (ηλιακής) γωνίας h , μπορεί να ορισθεί και η σχέση από την οποία προκύπτει το ηλιακό ύψος (α) (ή ισοδύναμα η γωνία ζενίθ Φ) (Duffie & Beckman, 2013; S. A. Kalogirou, 2009):

$$\sin(\alpha) = \cos(\Phi) = \sin(L) \sin(\delta) + \cos(L) \cos(\delta) \cos(h) \quad (2.9)$$

όπου

L : το τοπικό γεωγραφικό πλάτος οριζόμενο ως η γωνία μεταξύ της ευθείας που συνδέει το κέντρο της Γής με το μελετώμενο τόπο και του επιπέδου του ισημερινού.

Επίσης, μπορεί να ορισθεί και η σχέση από την οποία προκύπτει το αζιμούθιο Ηλίου z (S. A. Kalogirou, 2009):

$$\sin(z) = \frac{\sin(h) \cos(\delta)}{\cos(\alpha)} \quad (2.10)$$

Η εξίσωση αυτή ισχύει στην περίπτωση που $\cos(h) > \tan(\delta) / \tan(L)$. Αν η ανίσωση αυτή δεν ισχύει, σημαίνει πως ο Ήλιος βρίσκεται πίσω από τη γραμμή Ανατολής - Δύσης (Σχήμα 2.3) και τότε το αζιμούθιο Ηλίου για τις πρωινές ώρες δίδεται από τη σχέση $-\pi + |z|$ ενώ τις απογευματινές από τη σχέση $\pi - z$.

Επίσης, το αζιμούθιο Ηλίου z δίδεται και από τη σχέση (Duffie & Beckman, 2013):

$$\sin(z) = \text{sign}(h) \left| \cos^{-1} \left(\frac{\cos(\Phi) \sin(L) - \sin(\delta)}{\sin(\Phi) \cos(L)} \right) \right| \quad (2.11)$$

2.1.3 Γωνία πρόσπτωσης

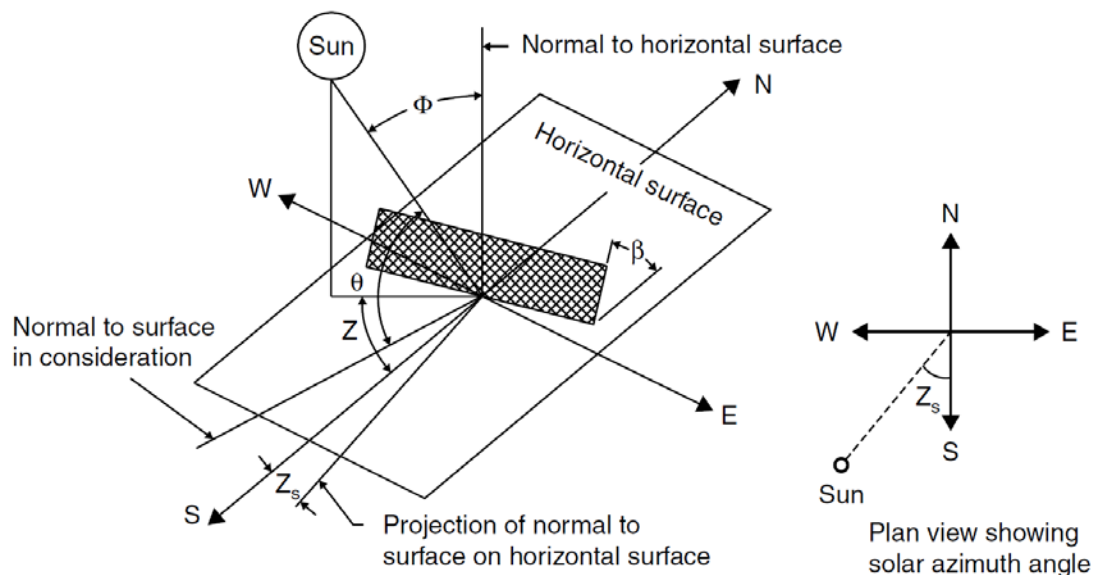
Η γωνία πρόσπτωσης θ (Σχήμα 2.6) της ακτινοβολίας πάνω σε μια επιφάνεια είναι η γωνία μεταξύ των προσπιπτουσών ηλιακών ακτίνων και της καθέτου στην επιφάνεια και δίδεται από τη σχέση (S. A. Kalogirou, 2009):

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & \sin(L) \sin(\delta) \cos(\beta) - \cos(L) \sin(\delta) \sin(\beta) \cos(Z_s) \\ & + \cos(L) \cos(\delta) \cos(h) \cos(\beta) \\ & + \sin(L) \cos(\delta) \cos(h) \sin(\beta) \cos(Z_s) \\ & + \cos(\delta) \sin(h) \sin(\beta) \sin(Z_s) \end{aligned} \quad (2.12)$$

όπου

β : η κλίση του επιπέδου ως προς το οριζόντιο

Z_s : το αζιμούθιο της επιφάνειας οριζόμενο ως η γωνία που σχηματίζεται από την προβολή της καθέτου στην επιφάνεια πάνω στο οριζόντιο επίπεδο και τη νότια κατεύθυνση. Παίρνει τιμές στο $[-180^\circ-180^\circ]$ με $Z_s=0^\circ$ για νότια κατεύθυνση, $Z_s=90^\circ$ για δυτική κατεύθυνση, $Z_s=180^\circ$ για βόρεια κατεύθυνση και $Z_s=-90^\circ$ για ανατολική κατεύθυνση. Οι τιμές ισχύουν για το βόρειο ημισφαίριο.



Σχήμα 2.6. Διάγραμμα ηλιακών γωνιών (S. A. Kalogirou, 2009)

Στην περίπτωση κινούμενης επιφάνειας, η Εξ. (2.12) μετασχηματίζεται ανάλογα με το είδος της κίνησης. Συγκεκριμένα, για επιφάνεια που παρακολουθεί συνεχώς την κίνηση του Ηλίου ώστε οι ηλιακές ακτίνες να είναι πάντα κάθετες στην επιφάνεια, για τη γωνία πρόσπτωσης θ ισχύει:

$$\cos(\theta) = 1 \Rightarrow \theta = 0^\circ \quad (2.13)$$

Για επιφάνεια η οποία κινείται γύρω από άξονα Βορρά – Νότου με αλλαγή της θέσης της μία φορά τη μέρα ώστε οι ηλιακές ακτίνες να προσπίπτουν κάθετα σε αυτήν κατά το ηλιακό μεσημέρι, η γωνία θ δίδεται από τη σχέση (S. A. Kalogirou, 2009):

$$\cos(\theta) = \sin^2(\delta) + \cos^2(\delta)\cos(h) \quad (2.14)$$

Η γωνία θ , για επιφάνεια κινούμενη συνεχόμενα περί άξονα Βορρά – Νότου παράλληλο προς τον άξονα της Γής, δίδεται από τη σχέση (S. A. Kalogirou, 2009):

$$\cos(\theta) = \cos(\delta) \quad (2.15)$$

Οριζόντια επιφάνεια κινούμενη περί άξονα Ανατολής – Δύσης και με διαρκή αλλαγή θέσης, η γωνία πρόσπτωσης θ υπολογίζεται από την εξής σχέση (S. A. Kalogirou, 2009):

$$\cos(\theta) = \sqrt{1 - \cos^2(\delta)\sin^2(h)} \quad (2.16)$$

Τέλος, για οριζόντια επιφάνεια κινούμενη περί άξονα Βορρά – Νότου και με διαρκή αλλαγή θέσης, η γωνία πρόσπτωσης θ υπολογίζεται από την εξής σχέση (S. A. Kalogirou, 2009):

$$\cos(\theta) = \sqrt{\sin^2(\alpha) - \cos^2(\delta)\sin^2(h)} \quad (2.17)$$

Η κίνηση του επιπέδου επιτρέπει την ελαχιστοποίηση της γωνίας πρόσπτωσης με αποτέλεσμα οι ηλιακές ακτίνες να προσπίπτουν πιο κάθετα στο επίπεδο (συλλέκτη). Η επιλογή του τρόπου κίνησης εξαρτάται από το είδος της εφαρμογής, την επιθυμητή ακρίβεια, το κόστος κ.ά. Ο Kalogirou (2009) διαπιστώνει πως οι κινήσεις περί άξονα Βορρά – Νότου παράλληλο προς τον άξονα της Γής και περί άξονα Βορρά – Νότου και με διαρκή αλλαγή θέσης είναι οι καταλληλότερες για κίνηση περί ενός άξονα αφού προσεγγίζουν αρκετά ικανοποιητικά την κίνηση συνεχούς παρακολούθησης του Ήλιου.

2.1.4 Ηλιακή ακτινοβολία

Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες (είτε παραβολικοί είτε επίπεδοι) αξιοποιούν την άμεση ακτινοβολία του συγκεκριμένου τόπου που βρίσκονται. Συνεπώς, για τον υπολογισμό των επιδόσεων των είναι απαραίτητη η γνώση της τιμής αυτής της ποσότητας για κάθε εξεταζόμενη χρονική στιγμή.

Συνήθως, υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις σε μορφή χρονοσειρών για την ένταση της ακτινοβολίας. Στην περίπτωση που είτε δεν είναι διαθέσιμες είτε απαιτείται μια εκτίμησή τους μπορεί να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο Bird (Bird, 1984; Bird & Hulstrom, 1981; Bird & Riordan, 1986). Το εν λόγω μοντέλο δύναται να εκτιμήσει την τιμή της άμεσης, διάχυτης και ολικής ακτινοβολίας σε οποιονδήποτε τόπο και οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιεί την τιμή της ακτινοβολίας η οποία κατευθύνεται προς τη Γή και εφαρμόζει συντελεστές για την μείωσή της που εξαρτώνται από την απόσταση που αυτή διανύει εντός της ατμόσφαιρας, τη σύνθεση της ατμόσφαιρας και την αλληλεπίδραση των συνιστωσών ακτινοβολιών με τα στρώματα της ατμόσφαιρας.

Έτσι, για μήκος κύματος λ η άμεση ακτινοβολία ($I_{d\lambda}$) είναι:

$$I_{d\lambda} = H_{o\lambda} \cdot D \cdot T_{r\lambda} \cdot T_{a\lambda} \cdot T_{w\lambda} \cdot T_{o\lambda} \cdot T_{u\lambda} \quad (2.18)$$

Όπου,

$H_{o\lambda}$: η ακτινοβολία για μήκος κύματος λ στη μέση απόσταση Γής-Ηλίου

D : συντελεστής διόρθωσης απόστασης Γής-Ηλίου

$T_{r\lambda}$: συντελεστής μοριακής σκέδασης ατμόσφαιρας

$T_{a\lambda}$: συντελεστής διαπερατότητας αεροζόλ

$T_{w\lambda}$: συντελεστής απορρόφησης λόγω υγρασίας

$T_{o\lambda}$: συντελεστής απορρόφησης λόγω όζοντος

$T_{u\lambda}$: συντελεστής απορρόφησης λόγω λοιπών αερίων

Οι συντελεστές της σχέσης (2.18) υπολογίζονται ως εξής:

$$\begin{aligned}
 D &= 1.00011 + 0.034221 \cos(B) + 0.00128 \sin(B) \\
 &\quad + 0.000719 \cos(2B) + 0.000077 \sin(2B) \\
 T_{r\lambda} &= \exp \left[-M' / \left(\lambda^4 (115.6406 - \frac{1.335}{\lambda^2}) \right) \right] \\
 T_{a\lambda} &= \exp[-\beta_n (\lambda/2)^{-\alpha_n} M] \\
 T_{w\lambda} &= \exp \left[-0.2385 \cdot a_{w\lambda} \cdot W \cdot M \left(\frac{1}{1 + 20.07 \cdot a_{w\lambda} \cdot W \cdot M} \right)^{0.45} \right] \\
 T_{o\lambda} &= \exp[-a_{o\lambda} \cdot O_3 \cdot M_o] \\
 T_{u\lambda} &= \exp \left[-1.41 \cdot a_{u\lambda} \cdot M' \left(\frac{1}{1 + 118.93 \cdot a_{u\lambda} \cdot M'} \right)^{0.45} \right]
 \end{aligned} \tag{2.19}$$

$$B = (N - 1) \frac{360}{365}, \quad N = 1 - 365$$

$$M = (\cos(\Phi) + 0.15(93.885 - \Phi)^{-1.253})^{-1}$$

$$M' = M \frac{p}{p_0}$$

$$M_o = (1 + 22/6370) / (\cos^2(\Phi) + 44/6370)^{0.5}$$

Όπου,

a_n : συντελεστής σχέσεως Angstrom

$a_{o\lambda}$: συντελεστής απορροφητικότητας όζοντος για μήκος κύματος λ

$a_{u\lambda}$: συντελεστής απορροφητικότητας αερίων για μήκος κύματος λ

$a_{w\lambda}$: συντελεστής απορροφητικότητας υγρασίας για μήκος κύματος λ

O_3 : ύψος στήλης όζοντος (cm)

p : πίεση περιοχής (mbar)

p_o : πίεση αναφοράς (1013mbar)

W : ύψος στήλης ατμών (cm)

β_n : οπτικό βάθος αεροζόλ

λ : μήκος κύματος (μm)

Φ : γωνία ζενίθ Ήλιου (deg)

Οι συντελεστές που εξαρτώνται από το μήκος κύματος λ , λαμβάνουν συγκεκριμένες τιμές αναλόγως του μήκους κύματος. Η συνολική άμεση ακτινοβολία προκύπτει με ολοκλήρωση της σχέσης (2.18) για τα επιλεγμένα μήκη κύματος:

$$I_d = \int I_{d\lambda} d\lambda \tag{2.20}$$

Στην παρούσα εργασία έχουν συμπεριληφθεί και οι σχέσεις υπολογισμού της διάχυτης ($I_{s\lambda}$) και ολικής ακτινοβολίας ($I_{T\lambda}$) όπως αυτές παρουσιάζονται στην εργασία των Bird & Riordan (1986):

$$\begin{aligned} I_{T\lambda} &= I_{d\lambda} \cos(\Phi) + I_{s\lambda} \\ I_{s\lambda} &= I_{r\lambda} + I_{a\lambda} + I_{g\lambda} \end{aligned} \quad (2.21)$$

$$I_{r\lambda} = H_{o\lambda} \cdot D \cdot \cos(\Phi) \cdot T_{o\lambda} \cdot T_{u\lambda} \cdot T_{w\lambda} \cdot T_{aa\lambda} \cdot (1 - T_{r\lambda}^{0.95})0.5$$

$$I_{a\lambda} = H_{o\lambda} \cdot D \cdot \cos(\Phi) \cdot T_{o\lambda} \cdot T_{u\lambda} \cdot T_{w\lambda} \cdot T_{aa\lambda} \cdot T_{r\lambda}^{1.5} \cdot (1 - T_{as\lambda})F_s$$

$$I_{g\lambda} = (I_{d\lambda} \cdot \cos(\Phi) + I_{r\lambda} + I_{a\lambda})r_{s\lambda}r_{g\lambda}/(1 - r_{s\lambda}r_{g\lambda})$$

$$T_{as\lambda} = \exp[-\omega_\lambda \beta_n (\lambda/2)^{-\alpha_n M}]$$

$$T_{aa\lambda} = \exp[-(1 - \omega_\lambda) \beta_n (\lambda/2)^{-\alpha_n M}]$$

$$\omega_\lambda = 0.945 \exp \left[-0.095 \left[\ln \left(\frac{\lambda}{0.4} \right) \right]^2 \right] \quad (2.22)$$

$$F_s = 1 - 0.5 \exp[(AFS + BFS \cos(\Phi)) \cos(\Phi)]$$

$$AFS = ALG[1.459 + ALG(0.1595 + ALG0.4129)]$$

$$BFS = ALG[0.0783 + ALG(-0.3824 - ALG0.5874)]$$

$$ALG = \ln(1 - aaf)$$

Όπου,

aaf : συντελεστής ασυμμετρίας αεροζόλ για μήκος κύματος λ

$r_{g\lambda}$: συντελεστής αντανάκλασης εδάφους για μήκος κύματος λ

$r_{s\lambda}$: συντελεστής αντανάκλασης ουρανού για μήκος κύματος λ

2.2 Συλλέκτες - Κάτοπτρα

Στις Ηλιοθερμικές Εγκατάστασης Παραγωγής Ενέργειας χρησιμοποιούνται κυρίως δύο είδη συλλεκτών-κατόπτρων:

- Οι παραβολικοί συλλέκτες/κάτοπτρα
- Επίπεδα κάτοπτρα με δέκτη πύργου

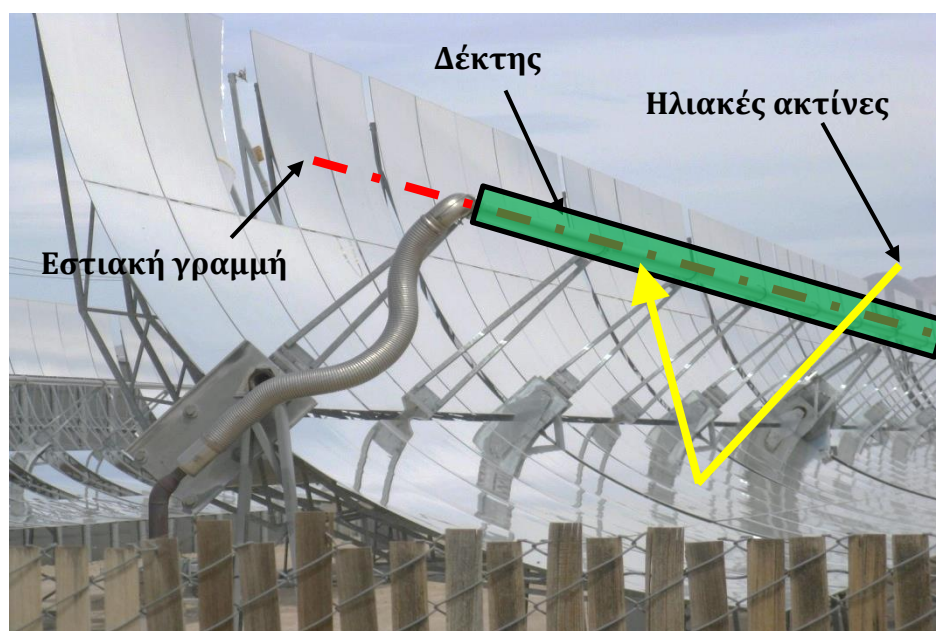
Οι παραβολικοί συλλέκτες συγκεντρώνουν την προσπίπτουσα ακτινοβολία στην εστιακή γραμμή τους, στην οποία είναι τοποθετημένος αγωγός που διαρρέεται από εργαζόμενο μέσο, το οποίο και θερμαίνεται. Οι συλλέκτες αυτοί, στις πλείστες των περιπτώσεων, έχουν τον άξονά τους στη διεύθυνση B-N και κινούνται γύρω από αυτόν ώστε να ακολουθούν την κίνηση του Ήλιου.

Τα επίπεδα κάτοπτρα κινούνται συνεχώς σε δύο άξονες ούτως ώστε να αντανακλούν την προσπίπτουσα ακτινοβολία σε δέκτη που βρίσκεται στην κορυφή πύργου. Ο δέκτης διαρρέεται από το εργαζόμενο μέσο το οποίο και θερμαίνει.

2.2.1 Παραβολικοί συλλέκτες

Τα κοίλα κάτοπτρα αποτελούνται από ένα πλαίσιο στήριξης με παραβολική επιφάνεια πάνω στην οποία προσδένεται παραβολικό κάτοπτρο ή σύνολο επίπεδων κατόπτρων που συνολικά προσεγγίζουν την παραβολική επιφάνεια. Οι προσπίπτουσες στα κάτοπτρα ηλιακές ακτίνες, αντανακλώνται από αυτά και συγκεντρώνονται στην εστιακή γραμμή του κατόπτρου (Σχήμα 2.7). Το πλαίσιο στήριξης θα πρέπει να είναι στιβαρό ώστε να φέρει το βάρος των κατόπτρων και να μην επηρεάζεται από τον άνεμο και παράλληλα, να μην αυξάνει το κόστος κατασκευής.

Κατά μήκος της εστιακής γραμμής είναι τοποθετημένος ο δέκτης της ηλιακής ενέργειας (Σχήμα 2.8). Πρόκειται για μεταλλικό σωλήνα (απορροφητής) μαύρου χρώματος και με κατάλληλη επίστρωση ώστε να αυξάνεται η απορροφητικότητα του. Συνήθως, ο σωλήνας αυτός περιβάλλεται από γυάλινο περίβλημα και στον ενδιάμεσο χώρο υπάρχει κατάσταση κενού ή αδρανές αέριο ώστε να μειωθούν οι απώλειες λόγω συναγωγής. Το γυάλινο περίβλημα όμως, μειώνει την απόδοση του συλλέκτη αφού δεν επιτρέπει να περάσουν όλες οι ακτίνες λόγω αντανάκλασης. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται σε ένα βαθμό με την επίστρωση του γυάλινου περιβλήματος με ειδικές ουσίες που μειώνουν την αντανάκλαση.



Σχήμα 2.7. Κοίλο κάτοπτρο: εστιακή γραμμή και ηλιακές ακτίνες

Ο απορροφητής (Σχήμα 2.8) διαρρέεται από το υγρό μεταφοράς θερμότητας (Heat Transfer Fluid – HTF) το οποίο κατά την κίνησή του απορροφά θερμότητα από το σωλήνα, ο οποίος έχει θερμανθεί από τις προσπίπτουσες ηλιακές ακτινοβολίες, με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του. Σημαντική εκτός των προαναφερθέντων, είναι και η συσκευή απορρόφησης των αερίων. Αυτή η συσκευή απορροφά τα αέρια (κυρίως υδρογόνο) που δημιουργούνται από την αποσύνθεση του HTF, λόγω της μεγάλης θερμοκρασίας λειτουργίας, ώστε να διατηρείται η κατάσταση κενού στον χώρο μεταξύ του απορροφητή και του γυάλινου περιβλήματος.



Σχήμα 2.8. Παράδειγμα δέκτη κοίλου κατόπτρου (SIEMENS)

Για τον καθορισμό της αύξησης της θερμοκρασίας του HTF θα πρέπει να προσδιοριστεί η θερμότητα που μεταφέρεται σε αυτό από τον απορροφητή. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητη η ανάλυση της μεταφοράς θερμότητας στο δέκτη του κατόπτρου.

Η ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία από το κάτοπτρο προσπίπτει στο δέκτη και ένα ποσοστό αυτής απορροφάται από το γυάλινο περίβλημα, ένα ποσοστό ανακλάται, ενώ η υπόλοιπη διαπερνά το γυάλινο περίβλημα και προσπίπτει στον απορροφητή (Odeh et al., 1998; Patnode, 2006; Qu, Yin, & Archer, 2010).

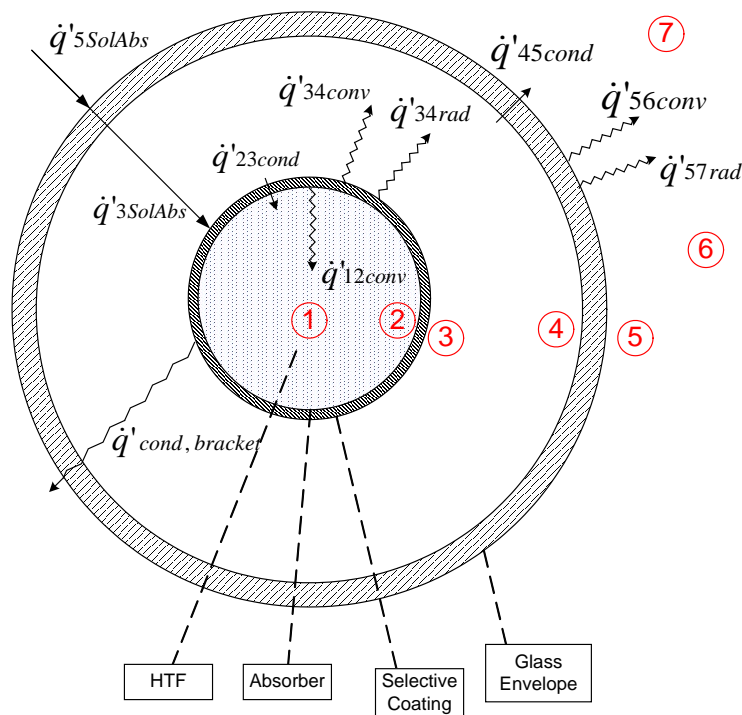
Από την προσπίπτουσα ακτινοβολία στον απορροφητή, απορροφάται το ποσό αυτής που αντιστοιχεί στο συντελεστή απορροφητικότητας. Η απορροφούμενη από τον απορροφητή ενέργεια μεταφέρεται κατά ένα μεγάλο ποσοστό μέσω αγωγής από την εξωτερική του επιφάνεια στην εσωτερική, ενώ η υπόλοιπη αποτελεί τις απώλειες του απορροφητή λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας στο χώρο κενού. Η θερμότητα η μεταφερόμενη μέσω αγωγής στο εσωτερικό τοίχωμα του απορροφητή αποτελεί τη θερμότητα που τελικά προσδίδεται στο υγρό μεταφοράς της θερμότητας (HTF) και προσδίδεται σε αυτό μέσω του μηχανισμού της συναγωγής.

Οι απώλειες θερμότητας του απορροφητή (συναγωγής και ακτινοβολίας) προσδίδουν θερμότητα στο εσωτερικό τοίχωμα του γυάλινου περιβλήματος η οποία μεταφέρεται με αγωγή δια μέσου αυτού στην εξωτερική του επιφάνεια. Από την εξωτερική επιφάνεια του γυάλινου περιβλήματος συντελείται

μεταφορά θερμότητας μέσω συναγωγής και ακτινοβολίας προς το περιβάλλον η οποία αποτελεί και μέρος των συνολικών απωλειών του δέκτη.

Τέλος, εμφανίζονται και απώλειες θερμότητας στα στηρίγματα του δέκτη κατά μήκος αυτού. Τα στηρίγματα αυτά είναι μεταλλικά και στηρίζουν τον δέκτη στην προκαθορισμένη θέση. Λόγω της επαφής στηρίγματος - δέκτη μεταφέρεται θερμότητα από το δέκτη στο στήριγμα μέσω αγωγής η οποία αποβάλλεται στο περιβάλλον μέσω συναγωγής.

Το Σχήμα 2.9 απεικονίζει την τομή ενός δέκτη παραβολικού κατόπτρου και τη ροή θερμότητας όπως αυτή περιγράφηκε ήδη. Επιπλέον, ο Πίνακας 2.1 παρέχει την επεξήγηση των συμβόλων που απεικονίζονται στο Σχήμα 2.9. Η ροή θερμότητας \dot{q}'_i αναφέρεται σε ανά μονάδα μήκους του δέκτη - απορροφητή (ανηγμένη ροή θερμότητας).



Σχήμα 2.9. Τομή του δέκτη παραβολικού κατόπτρου και ανάλυση των ροών θερμότητας

Σύμβολο	Επεξήγηση
1	Θέση 1: Κέντρο απορροφητή/HTF
2	Θέση 2: Εσωτερικό τοίχωμα απορροφητή
3	Θέση 3: Εξωτερικό τοίχωμα απορροφητή
4	Θέση 4: Εσωτερικό τοίχωμα γυάλινου περιβλήματος
5	Θέση 5: Εξωτερικό τοίχωμα γυάλινου περιβλήματος
6	Θέση 6: Χαρακτηριστικά αέρα περιβάλλοντος
7	Θέση 7: Χαρακτηριστικά περιβάλλοντος για απώλειες ακτινοβολίας
$\dot{q}'_{5SolAbs}$	Αποροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία από το γυάλινο περίβλημα
$\dot{q}'_{3SolAbs}$	Αποροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία από τον απορροφητή
\dot{q}'_{23cond}	Ανηγμένη ροή θερμότητας λόγω αγωγής από 3 σε 2
\dot{q}'_{34conv}	Ανηγμένη ροή θερμότητας λόγω συναγωγής από 3 σε 4
\dot{q}'_{34rad}	Ανηγμένη ροή θερμότητας λόγω ακτινοβολίας από 3 σε 4
\dot{q}'_{12conv}	Ανηγμένη ροή θερμότητας λόγω συναγωγής από 2 σε 1
\dot{q}'_{45cond}	Ανηγμένη ροή θερμότητας λόγω αγωγής από 4 σε 5
\dot{q}'_{56conv}	Ανηγμένη ροή θερμότητας λόγω συναγωγής από 5 σε 6
\dot{q}'_{57rad}	Ανηγμένη ροή θερμότητας λόγω ακτινοβολίας από 5 σε 7
$\dot{q}'_{cond,bracket}$	Ανηγμένη ροή θερμότητας λόγω αγωγής/συναγωγής στα στηρίγματα

Πίνακας 2.1. Επεξήγηση των στοιχείων που απεικονίζονται στο Σχήμα 2.9

Σύμφωνα με τα όσα ήδη περιγράφηκαν, καθώς και από το Σχήμα 2.9 και τον Πίνακα 2.1 οι εξισώσεις, που περιγράφουν τη μεταφορά θερμότητας που συντελείται στον απορροφητή είναι οι εξής:

$$\dot{q}'_{12conv} = \dot{q}'_{23cond} \quad (2.23)$$

$$\dot{q}'_{3SolAbs} = \dot{q}'_{34conv} + \dot{q}'_{34rad} + \dot{q}'_{23cond} + \dot{q}'_{cond,bracket} \quad (2.24)$$

$$\dot{q}'_{34conv} + \dot{q}'_{34rad} = \dot{q}'_{45cond} \quad (2.25)$$

$$\dot{q}'_{45cond} + \dot{q}'_{5SolAbs} = \dot{q}'_{56conv} + \dot{q}'_{57rad} \quad (2.26)$$

$$\dot{q}'_{HeatLoss} = \dot{q}'_{56conv} + \dot{q}'_{57rad} + \dot{q}'_{cond,bracket} \quad (2.27)$$

όπου,

$\dot{q}'_{HeatLoss}$ η συνολική απώλεια θερμότητας από το δέκτη.

Στην περίπτωση απορροφητή χωρίς γυάλινο περίβλημα οι εξισώσεις που περιγράφουν τη μεταφορά θερμότητας που συντελείται είναι οι εξής:

$$\dot{q}'_{12conv} = \dot{q}'_{23cond} \quad (2.28)$$

$$\dot{q}'_{3SolAbs} = \dot{q}'_{36conv} + \dot{q}'_{37rad} + \dot{q}'_{23cond} + \dot{q}'_{cond,bracket} \quad (2.29)$$

$$\dot{q}'_{HeatLoss} = \dot{q}'_{36conv} + \dot{q}'_{37rad} + \dot{q}'_{cond,bracket} \quad (2.30)$$

όπου,

\dot{q}'_{36conv} : Θερμότητα λόγω συναγωγής από 3 σε 6

\dot{q}'_{37rad} : Θερμότητα λόγω ακτινοβολίας από 3 σε 7

Στη συνέχεια θα αναλυθούν οι αναφερθείσες ροές θερμότητας μόνο στη περίπτωση της ύπαρξης του υάλινου περιβλήματος. Σε αντίθετη περίπτωση, οι εξισώσεις πρέπει να διαφοροποιηθούν όσον αφορά τις θερμοκρασίες από τις οποίες εξαρτώνται.

Για τον υπολογισμό των ροών θερμότητας ακολουθείται η διαδικασία που περιγράφηκε από τον Forristall (2003).

2.2.1.1 Θερμότητα από τον απορροφητή στο HTF

Η ανά μονάδα μήκους ροή θερμότητας από τον απορροφητή στο Heat Transfer Fluid δίδεται από τη σχέση (Forristall, 2003):

$$\dot{q}'_{12conv} = h_1 D_2 \pi (T_2 - T_1) = Nu_{D_2} \frac{k_1}{D_2} D_2 \pi (T_2 - T_1) \quad (2.31)$$

Όπου,

D_2 : εσωτερική διάμετρος του απορροφητή

h_1 : συντελεστής συναγωγής του HTF για T_1

k_1 : συντελεστής αγωγής του HTF για T_1

Nu_{D_2} : αριθμός Nusselt για τη διάμετρο D_2

T_1 : μέση θερμοκρασία του HTF

T_2 : θερμοκρασία του απορροφητή στην εσωτερική επιφάνεια

Ο υπολογισμός του αριθμού Nusselt εξαρτάται από το είδος της ροής. Συνήθης κατάσταση σε ένα κάτοπτρο είναι η τυρβώδης ροή ώστε να μεγιστοποιείται η μετάδοση της θερμότητας. Στη περίπτωση της πλήρους τυρβώδους ροής χρησιμοποιείται η ημιεμπειρική σχέση του Gnielinski (ομοιόμορφη μετάδοση θερμότητας και λεία εσωτερική επιφάνεια αγωγού), η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τη μεταβατική κατάσταση από ομαλή σε τυρβώδη ροή (ισχύει για $0,5 < Pr_1 < 2000$ και $2300 < Re_{D_2} < 5e+6$) (Forristall, 2003):

$$Nu_{D2} = \frac{(f_2/8)(Re_{D2} - 1000)Pr_1 \left(\frac{Pr_1}{Pr_2}\right)^{0.11}}{1 + 12.7\sqrt{\frac{f_2}{8}}(Pr_1^{\frac{2}{3}} - 1)} \quad (2.32)$$

$$f_2 = (1.82\log(Re_{D2}) - 1.64)^{-2}$$

Όπου,

f_2 : συντελεστής Darcy

Pr_1 : αριθμός Prandtl του HTF για T_1

Pr_2 : αριθμός Prandtl του HTF για T_2

Όπως αναφέρθηκε, εντός του απορροφητή η ροή είναι πλήρως τυρβώδης. Όμως, υπάρχουν περιπτώσεις που η ροή γίνεται στρωτή, όπως στην περίπτωση της πολύ μικρής ή μηδενικής ακτινοβολίας. Στην περίπτωση της στρωτής ροής ($2300 > Re_{D2}$) ο αριθμός Nusselt έχει σταθερή τιμή, ίση με 4.36 για ροή εντός αγωγού.

Στη περίπτωση που ως HTF χρησιμοποιηθεί νερό, τότε εμφανίζεται εντός του απορροφητή μια περιοχή όπου υπάρχει διφασικό μείγμα νερού ατμού και πλέον δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση (2.32) για τον υπολογισμό του αριθμού Nusselt και συνεπώς του συντελεστή συναγωγής. Στη περίπτωση νερού ή ατμού ισχύουν τα όσα περιγράφησαν μέχρι τώρα.

Καθώς το νερό εισέρχεται στη διάταξη των κατόπτρων, θερμαίνεται λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας και φτάνει στο σημείο κορεσμού του. Στη συνέχεια, η περαιτέρω θερμότητα που απορροφά οδηγεί στην ατμοποίηση η οποία πραγματοποιείται σε δύο φάσεις (Klimenko, 1988, 1990; Odeh et al., 1998). Η πρώτη φάση αφορά στο σχηματισμό φυσαλίδων στην επιφάνεια του τοιχώματος, δηλαδή τη δημιουργία πυρήνων ατμοποίησης (nucleate boiling) που κατευθύνονται στο κέντρο του αγωγού εκτοπίζοντας το νερό στο τοίχωμα. Κατά τη δεύτερη φάση, η θερμότητα περνά από το τοίχωμα του αγωγού στο φιλμ νερού που τον διαβρέχει και στη συνέχεια κατευθύνεται στο κέντρο του αγωγού όπου υπάρχει ατμός (convection boiling). Με αυτή τη διαδικασία απορροφάται θερμότητα από το φιλμ νερού με αποτέλεσμα να ατμοποιείται μέρος αυτού και έτσι να μειώνεται το πάχος του.

Η σχέση που προσδιορίζει το συντελεστή συναγωγής στη περιοχή του nucleate boiling είναι η εξής (Klimenko, 1990):

$$h_{nuc} = 0.0049 Pe_*^{0.6} K_p^{0.54} Pr_l^{-0.33} K_\lambda^{0.12} k_l / b$$

$$Pe_* = \frac{h_{nuc}(T_2 - T_1) b \rho_l c_{p_l}}{r \rho_g k_l}$$

$$K_p = pb / \sigma$$

$$K_\lambda = k_g / k_l$$

$$b = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_g)}}$$

(ισχύει για μονάδες στο SI)

Όπου,

b : σταθερά Laplace

c_{p_l} : ειδική θερμοχωρητικότητα της υγρής φάσης

g : επιτάχυνση της βαρύτητας

k_g : συντελεστής αγωγής του ατμού

k_l : συντελεστής αγωγής της υγρής φάσης

p : πίεση

Pe_* : τροποποιημένος αριθμός Peclet

Pr_l : αριθμός Prandtl της υγρής φάσης

r : λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης

ρ_g : πυκνότητα του ατμού

ρ_l : πυκνότητα της υγρής φάσης

σ : επιφανειακή τάση του νερού

Επίσης, προτείνεται για τη περίπτωση διαφασικού μείγματος νερού - ατμού μια απλούστερη σχέση που ισχύει για πίεση μέχρι 200 bar (Klimenko, 1990):

$$h_{nuc} = \frac{9.6 p^{0.14}}{1 - 0.004p} [h_{nuc}(T_2 - T_1)]^{0.6} \quad (p \text{ σε bar}) \quad (2.34)$$

Ο συντελεστής 9.6 αντιστοιχεί σε ατμοποίηση σε αγωγό ο οποίος έχει συντελεστή αγωγής 14-20 W/(mK) ενώ μπορεί να αυξηθεί στη τιμή 11.2 για υλικό αγωγού ανοξειδωτος χαλκός.

Η σχέση που προσδιορίζει το συντελεστή συναγωγής στη περιοχή του convection boiling είναι η εξής (Klimenko, 1988):

$$h_{con} = 0.087 Re_m^{0.6} Pr_l^{1/6} (\rho_g / \rho_l)^{0.2} k_\lambda^{0.09} k_l / b$$

$$Re_m = \dot{m} \left[1 + x \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} - 1 \right) \right] b / (v_l \rho_l)$$

$$K_\lambda = k_g / k_l \quad (2.35)$$

$$b = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_g)}}$$

(ισχύει για μονάδες στο SI)

Όπου,

b : σταθερά Laplace

g : επιτάχυνση της βαρύτητας

k_g : συντελεστής αγωγής του ατμού

k_l : συντελεστής αγωγής της υγρής φάσης

\dot{m} : παροχή μάζας

Pr_l : αριθμός Prandtl της υγρής φάσης

Re_m : αριθμός Reynolds του διαφασικού μείγματος

v_l : κινηματικό ιξώδες της υγρής φάσης

ρ_g : πυκνότητα του ατμού

ρ_l : πυκνότητα της υγρής φάσης

σ : επιφανειακή τάση του νερού

x : ποιότητα ατμού

2.2.1.2 Θερμότητα διαμέσου του απορροφητή

Η ανά μονάδα μήκους ροή θερμότητας λόγω αγωγής που διαρρέει το τοίχωμα αγωγού δίδεται από τη σχέση (Forristall, 2003; Incropera & DeWitt, 1990):

$$\dot{q}'_{23cond} = 2\pi k_{23} (T_2 - T_3) / \ln\left(\frac{D_3}{D_2}\right) \quad (2.36)$$

Όπου,

D_2 : εσωτερική διάμετρος του απορροφητή

D_3 : εξωτερική διάμετρος του απορροφητή

k_{23} : συντελεστής αγωγής του απορροφητή για $(T_2 + T_3)/2$

T_2 : θερμοκρασία του απορροφητή στην εσωτερική επιφάνεια

T_3 : θερμοκρασία του απορροφητή στην εξωτερική επιφάνεια

2.2.1.3 Θερμότητα από τον απορροφητή στο περίβλημα

Η μεταφορά θερμότητας από τον απορροφητή στο υάλινο περίβλημα πραγματοποιείται με το μηχανισμό της ακτινοβολίας και το μηχανισμό της συναγωγής.

Η ανά μονάδα μήκους ροή θερμότητας λόγω ακτινοβολίας δίδεται από τη σχέση (Incropera & DeWitt, 1990):

$$\dot{q}'_{34rad} = \frac{\sigma \pi D_3 (T_3^4 - T_4^4)}{\frac{1}{\varepsilon_3} + \frac{D_3}{D_4} \left(\frac{1}{\varepsilon_4} - 1 \right)} \quad (2.37)$$

Όπου,

D_3 : εξωτερική διάμετρος του απορροφητή

D_4 : εσωτερική διάμετρος του υάλινου περιβλήματος

T_3 : θερμοκρασία του απορροφητή στην εξωτερική επιφάνεια

T_4 : θερμοκρασία του περιβλήματος στην εσωτερική επιφάνεια

ε_3 : συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας του απορροφητή

ε_4 : συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας του υάλινου περιβλήματος

σ : σταθερά Stefan - Boltzmann

Η θερμότητα λόγω συναγωγής εξαρτάται από την πίεση που επικρατεί στο χώρο μεταξύ του απορροφητή και του υάλινου περιβλήματος. Σε χαμηλές πιέσεις (<1 torr) ο μηχανισμός που επικρατεί είναι μοριακή συναγωγή, ενώ σε υψηλότερες πιέσεις (>1 torr) ο μηχανισμός που επικρατεί είναι φυσική συναγωγή.

Στη περίπτωση μικρής πίεσης (<1 torr) χρησιμοποιείται η εξής σχέση η οποία ισχύει $Ra < (D_{out}/(D_{in}-D_{out}))^4$ αν και υπερεκτιμά την μετάδοση θερμότητας για πολύ μικρές πιέσεις (Forristall, 2003):

$$\dot{q}'_{34conv} = \pi D_3 h_{34} (T_3 - T_4)$$

$$h_{34} = \frac{k_{std}}{(D_3/2) \ln(D_4/D_3) + b \lambda \left(\frac{D_3}{D_4} + 1 \right)}$$

$$b = \frac{(2-a)(9\gamma-5)}{2a(\gamma-1)} \quad (2.38)$$

$$\lambda = \frac{2.331 \cdot 10^{-20} (T_3 + T_4)/2}{P_a \delta^2}$$

Ισχύει για δ (cm), p_a (mmHg), λοιπά (SI)

Όπου,

b : συντελεστής αλληλεπίδρασης

D_3 : εξωτερική διάμετρος του απορροφητή

D_4 : εσωτερική διάμετρος του υάλινου περιβλήματος
 k_{std} : συντελεστής αγωγής του αερίου στο δακτυλιοειδή χώρο για τυπική πίεση και θερμοκρασία
 p_a : πίεση στο δακτυλιοειδή χώρο
 T_3 : θερμοκρασία του απορροφητή στην εξωτερική επιφάνεια
 T_4 : θερμοκρασία του περιβλήματος στην εσωτερική επιφάνεια
 α : συντελεστής κάλυψης
 γ : λόγος των ειδικών θερμοχωρητικοτήτων του αερίου στο δακτυλιοειδή χώρο
 δ : διάμετρος μορίου του αερίου στο δακτυλιοειδή χώρο
 λ : μέση απόσταση μεταξύ συγκρούσεων ενός μορίου

Στην περίπτωση μεγαλύτερης πίεσης (>1 torr) χρησιμοποιείται η σχέση των Raithby και Holland η οποία ισχύει $Ra > (D_{out}/(D_{out} - D_{in}))^4$ (Forristall, 2003):

$$\dot{q}'_{34conv} = \frac{2.425k_{34}(T_3 - T_4)[Pr_{34}Ra_{D3}/(0.861 + Pr_{34})]^{1/4}}{[1 + (D_3/D_4)^{3/5}]^{5/4}}$$

$$Ra_{D3} = \frac{g\{1/[(T_3 + T_4)/2]\}(T_3 + T_4)D_3^3}{\alpha\nu} \quad (2.39)$$

(ισχύει για μονάδες στο SI)

Όπου,

D_3 : εξωτερική διάμετρος του απορροφητή
 D_4 : εσωτερική διάμετρος του υάλινου περιβλήματος
 k_{34} : συντελεστής αγωγής του αερίου στο δακτυλιοειδή χώρο για $(T_3 + T_4)/2$
 Pr_{34} : αριθμός Prandtl του αερίου για $(T_3 + T_4)/2$
 Ra_{D3} : αριθμός Rayleigh για D_3
 T_3 : θερμοκρασία του απορροφητή στην εξωτερική επιφάνεια
 T_4 : θερμοκρασία του περιβλήματος στην εσωτερική επιφάνεια

2.2.1.4 Θερμότητα διαμέσου του περιβλήματος

Η ανά μονάδα μήκους ροή θερμότητας λόγω αγωγής που διαρρέει το τοίχωμα υάλινου περιβλήματος δίδεται από τη σχέση (Forristall, 2003; Incropera & DeWitt, 1990):

$$\dot{q}'_{45cond} = 2\pi k_{45}(T_4 - T_5)/\ln(D_5/D_4) \quad (2.40)$$

Όπου,

D_4 : εσωτερική διάμετρος του υάλινου περιβλήματος
 D_5 : εξωτερική διάμετρος του υάλινου περιβλήματος
 k_{45} : συντελεστής αγωγής του υάλινου περιβλήματος για $(T_4 + T_5)/2$
 T_4 : θερμοκρασία του υάλινου περιβλήματος στην εσωτερική επιφάνεια
 T_5 : θερμοκρασία του υάλινου περιβλήματος στην εξωτερική επιφάνεια

Όπως αναφέρει ο Forristall (2003), η ειδική επίστρωση μείωσης της αντανάκλασης στο περίβλημα δεν επιβάλλει περαιτέρω θερμική αντίσταση κατά τη ροή της θερμότητας. Επίσης, αναφέρει ότι η τυπική τιμή του συντελεστή αγωγής k_{45} πυράντοχο γυαλί είναι 1,04.

2.2.1.5 Θερμότητα από το περίβλημα στο περιβάλλον

Η μεταφορά θερμότητας από το υάλινο περίβλημα στο περιβάλλον πραγματοποιείται με το μηχανισμό της ακτινοβολίας και το μηχανισμό της συναγωγής. Στη περίπτωση άπνοιας η συναγωγή είναι ελεύθερη, ενώ στη περίπτωση ανέμου η συναγωγή είναι εξαναγκασμένη.

Η ανά μονάδα μήκους ροή θερμότητας λόγω ακτινοβολίας από το περίβλημα στο περιβάλλον δίδεται από τη σχέση (Forristall, 2003; Incropera & DeWitt, 1990):

$$\dot{q}'_{57rad} = \sigma \pi D_5 \varepsilon_5 (T_5^4 - T_7^4) \quad (2.41)$$

Όπου,

D_5 : εξωτερική διάμετρος του υάλινου περιβλήματος

T_5 : θερμοκρασία του υάλινου περιβλήματος στην εξωτερική επιφάνεια

T_7 : ενεργός θερμοκρασία του περιβάλλοντος

ε_5 : συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας του υάλινου περιβλήματος για την εξωτερική επιφάνεια

σ : σταθερά Stefan – Boltzmann

Στην παραπάνω σχέση γίνεται η παραδοχή ότι το περιβάλλον (ουρανός) δρα ως μέλαν σώμα. Όπως αναφέρει ο Forristall (2003), η παραδοχή αυτή δεν είναι ιδιαίτερα σωστή καθώς ο ουρανός δρα διαφορετικά για διαφορετικά μήκη κύματος της ακτινοβολίας. Έτσι, έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα για τον προσδιορισμό της ενεργού θερμοκρασίας, εδώ όμως χρησιμοποιείται η προσέγγιση ότι η ενεργός θερμοκρασία ορίζεται ως η θερμοκρασία περιβάλλοντος μειωμένη κατά 8°C (Forristall, 2003).

Η ανά μονάδα μήκους ροή θερμότητας λόγω συναγωγής από το περίβλημα στο περιβάλλον δίδεται από τη σχέση (Forristall, 2003):

$$\dot{q}'_{56conv} = \pi D_5 h_{56} (T_5 - T_6) = Nu_{D_5} \frac{k_{56}}{D_5} \pi D_5 (T_5 - T_6) \quad (2.42)$$

Όπου,

D_5 : εσωτερική διάμετρος του υάλινου περιβλήματος

h_{56} : συντελεστής συναγωγής του αέρα για $(T_5 + T_6)/2$

k_{56} : συντελεστής αγωγής του αέρα για $(T_5 + T_6)/2$

Nu_{D_5} : αριθμός Nusselt για τη διάμετρο D_5

T_5 : θερμοκρασία του υάλινου περιβλήματος στην εξωτερική επιφάνεια

T_6 : θερμοκρασία περιβάλλοντος

Ο αριθμός Nusselt εξαρτάται από το αν υπάρχει άπνοια (ελεύθερη συναγωγή) ή αν υπάρχει αέρας (εξαναγκασμένη συναγωγή).

Στην περίπτωση άπνοιας (ελεύθερη συναγωγή) ο αριθμός Nusselt υπολογίζεται από την ημ εμπειρική σχέση των Churchill and Chu η οποία προϋποθέτει οριζόντιο ισόθερμο κύλινδρο και ισχύει για $10^5 < Ra < 10^{12}$ (Forristall, 2003; Incropera & DeWitt, 1990):

$$Nu_{D5} = \left(0.6 + \frac{0.387 Ra_{D5}^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0.559}{Pr_{56}} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right)^2$$

$$Ra_{D5} = \frac{g\beta(T_5 - T_6)D_5^3}{\alpha_{D5}\nu_{D5}} \quad (2.43)$$

$$\beta = \frac{1}{(T_5 - T_6)/2}$$

(ισχύει για μονάδες στο SI)

Όπου,

D_5 : εσωτερική διάμετρος του υάλινου περιβλήματος

g : επιτάχυνση της βαρύτητας

Pr_{56} : αριθμός Prandtl του αέρα για $(T_5 + T_6)/2$

Ra_{D5} : αριθμός Rayleigh του αέρα υπολογισμένος για D_5

T_5 : θερμοκρασία του υάλινου περιβλήματος στην εξωτερική επιφάνεια

T_6 : θερμοκρασία περιβάλλοντος

α_{56} : συντελεστής θερμικής διάχυσης του αέρα για $(T_5 + T_6)/2$

ν_{56} : κινηματικό ιξώδες του αέρα για $(T_5 + T_6)/2$

Στην περίπτωση ανέμου (εξαναγκασμένη συναγωγή) ο αριθμός Nusselt υπολογίζεται από την ημ εμπειρική σχέση του Zhukauskas η οποία προϋποθέτει ισόθερμο κύλινδρο που ο άνεμος είναι κάθετος σε αυτόν και ισχύει για $0.7 < Pr < 500$ και $1 < Re < 10^6$ (Forristall, 2003; Incropera & DeWitt, 1990):

$$Nu_{D5} = C Ra_{D5}^m Pr_6^n \left(\frac{Pr_6}{Pr_5} \right)^{1/4} \quad (2.44)$$

Όπου,

Pr_5 : αριθμός Prandtl του αέρα για T_5

Pr_6 : αριθμός Prandtl του αέρα για T_6

Re_{D5} : αριθμός Reynolds του αέρα υπολογισμένος για D_5

n : $n=0.37$ για $Pr \leq 10$, $n=0.36$ για $Pr > 10$

C, m:

Re	C	m
1-40	0.75	0.4
40-10 ³	0.51	0.5
10 ³ -2·10 ⁵	0.26	0.6
2·10 ⁵ -10 ⁶	0.076	0.7

2.2.1.6 Θερμότητα από τα στηρίγματα στο περιβάλλον

Στα κοίλα κάτοπτρα υπάρχουν κατάλληλα στηρίγματα τα οποία στηρίζουν τον δέκτη. Τα στηρίγματα αυτά βρίσκονται στην αρχή και στο τέλος κάθε κατόπτρου. Τα στηρίγματα αντιμετωπίζονται ως πτερύγια ψήκτρας απείρου μήκους με θερμοκρασία βάσης (T_{base}) ίση με τη θερμοκρασία στην εξωτερική επιφάνεια του απορροφητή στη θέση στήριξης μειωμένη κατά 10°C και θερμοκρασία σε κάθε άλλη θέση του βραχίονα (T_b) ίση με $(T_{base} + T_6)/3$ (Forristall, 2003).

Έτσι, η εξίσωση που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό αυτών των απωλειών είναι η εξής (Forristall, 2003; Incropera & DeWitt, 1990):

$$\dot{q}'_{cond,bracket} = \sqrt{\bar{h}_b P_b k_b A_{cs,b} (T_{base} - T_6) / L_{HCE}} \quad (2.45)$$

Όπου,

$A_{cs,b}$: εμβαδό τομής βραχίονα

\bar{h}_b : μέσος συντελεστής συναγωγής του αέρα για T_b

k_b : συντελεστής αγωγής για T_b

L_{HCE} : μήκος κάθε κατόπτρου (απόσταση ανάμεσα σε διαδοχικούς βραχίονες)

P_b : περίμετρος βραχίονα στήριξης

T_b : θερμοκρασία στη βάση του βραχίονα

T_6 : θερμοκρασία περιβάλλοντος

Για τον προσδιορισμό του μέσου συντελεστή συναγωγής (\bar{h}_b) χρησιμοποιούνται οι σχέσεις (2.41) - (2.44) ανάλογα με την ύπαρξη ανέμου.

2.2.1.7 Ανάκλαση και απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας

Η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο κάτοπτρο, αντανακλάται από αυτό και στη συνέχεια προσπίπτει στο δέκτη. Η απόδοση του κατόπτρου, η απόδοση δηλαδή της ανάκλασης, επηρεάζεται από παράγοντες όπως η ποιότητα της επιφάνειας του κατόπτρου, οι ρύποι στο κάτοπτρο, η σκίαση λόγω δέκτη και στηριγμάτων, μη ακριβής παρακολούθηση της κίνησης του Ηλίου κτλ (Forristall, 2003). Ακόμα, ένας άλλος σημαντικός παράγοντας είναι η γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών στην επιφάνεια του κατόπτρου. Όσο αυτή η γωνία απομακρύνεται από τις 0°, τόσο μειώνεται η απόδοση του κατόπτρου. Για αυτό

το λόγο χρησιμοποιείται ο όρος της Προσαρμογής της Γωνίας Πρόσπτωσης (Incident Angle Modifier – IAM) ο οποίος μειώνει κατάλληλα την τιμή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας ώστε αυτή να λειτουργεί σαν η ισοδύναμη κάθετη.

Η ανακλώμενη από το κάτοπτρο ακτινοβολία κατευθύνεται προς το δέκτη. Ένα μέρος της απορροφάται από το υάλινο περίβλημα, ένα μέρος ανακλάται, ενώ το μεγαλύτερο μέρος της διέρχεται διαμέσω αυτού κατευθυνόμενο προς τον απορροφητή. Το μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολίας απορροφάται από τον απορροφητή. Τα ποσά της ηλιακής ακτινοβολίας που θα ανακλαστούν – διαπεράσουν – απορροφηθούν από το περίβλημα και τον απορροφητή εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά των υλικών κατασκευής τους τα οποία καθορίζουν συντελεστές απορροφητικότητας, αντανάκλασης και διαπερατότητας.

Αν η απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία από το υάλινο περίβλημα εκφραστεί ως ροή θερμότητας και όχι ως παραγωγή θερμότητας λόγω έκθεσης σε ακτινοβολία τότε (Forristall, 2003):

$$\dot{q}'_{SolAbs} = \dot{q}'_{Irr} \eta_{env} a_{env} \quad (2.46)$$

$$\eta_{env} = \varepsilon'_1 \varepsilon'_2 \varepsilon'_3 \varepsilon'_4 \varepsilon'_5 \varepsilon'_6 \rho_{cl}$$

Όπου,

\dot{q}'_{Irr} : η ανα μονάδα μήκους άμεση προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στο κάτοπτρο μειωμένη κατά των απωλειών λόγω της γωνίας πρόσπτωσης (ανακλώμενη προς δέκτη)

a_{env} : απορροφητικότητα του υάλινου περιβλήματος

ε'_1 : συντελεστής σκίασης κατόπτρου λόγω δέκτη, στηριγμάτων, κτλ

ε'_2 : συντελεστής απωλειών λόγω ανακρίβειας στην παρακολούθηση του Ήλιου

ε'_3 : συντελεστής απωλειών λόγω γεωμετρίας της τοποθέτησης του κατόπτρου

ε'_4 : συντελεστής απωλειών λόγω ρύπων στο κάτοπτρο

ε'_5 : συντελεστής απωλειών λόγω ρύπων στο δέκτη

ε'_6 : συντελεστής άλλων απωλειών

η_{env} : απόδοση του υάλινου περιβλήματος

ρ_{cl} : συντελεστής αντανάκλασης καθαρών κατόπτρων

Αν με όμοιο τρόπο η απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία από τον απορροφητή εκφραστεί ως ροή θερμότητας και όχι ως παραγωγή θερμότητας λόγω έκθεσης σε ακτινοβολία έχουμε (Forristall, 2003):

$$\dot{q}'_{SolAbs} = \dot{q}'_{Irr} \eta_{env} \tau_{env} a_{abs} \quad (2.47)$$

Όπου,

a_{abs} : απορροφητικότητα του απορροφητή

τ_{env} : συντελεστής διαπερατότητας του υάλινου περιβλήματος

2.2.1.8 Προσδιορισμός θερμοκρασίας HTF

Η ανωτέρω ανάλυση του θερμικού ισολογισμού στα κάτοπτρα ως στόχο έχει τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας του HTF κατά την έξοδό του από αυτά. Για τον ακριβέστερο υπολογισμό της θερμοκρασίας, το συνολικό μήκος των κατόπτρων χωρίζεται σε N ισομήκη τμήματα. Σε κάθε τέτοιο τμήμα, η θερμότητα που προσδίδεται στο HTF αυξάνει την ενέργειά του, δηλαδή την ενθαλπία του. Επίσης, σε κάθε τέτοιο τμήμα μεταβάλλεται και η ταχύτητα του HTF λόγω μεταβολής της πυκνότητας. Αν και θεωρείται πως κατά μήκος κάθε τέτοιου τμήματος δεν παρουσιάζεται μεταβολή των μεγεθών, τα χαρακτηριστικά της ροής εξόδου προκύπτουν μέσω θερμικού ισολογισμού από τα χαρακτηριστικά της ροής εισόδου. Έτσι, η προσδιδόμενη θερμική ισχύς στο HTF σε κάθε τμήμα i ισούται με τη μεταβολή της ενθαλπίας και της κινητικής ενέργειάς του (ταχύτητας) (Forristall, 2003):

$$\dot{q}_{12conv,i} = \dot{q}'_{12conv}L = \dot{m} \left[\left(h + \frac{1}{2}V^2 \right)_{i,out} - \left(h + \frac{1}{2}V^2 \right)_{i,in} \right]$$

$$V = \frac{\dot{m}}{\rho A_{cs}} \tag{2.48}$$

$$\Delta h = Cp\Delta T$$

Όπου,

A_{cs} : εμβαδό διατομής απορροφητή

h : ειδική ολική ενθαλπία του HTF στη θέση i

L : μήκος τμήματος κατόπτρου

\dot{m} : παροχή μάζας του HTF

$\dot{q}_{12conv,i}$: η ολική προσδιδόμενη θερμότητα στο τμήμα i

V : ταχύτητα του HTF στη θέση i

ρ : η πυκνότητα του HTF στη θέση i

in, out : είσοδος και έξοδος του τμήματος i

Θεωρώντας ασυμπιεστο το HTF, για δύο διαδοχικά τμήματα $i, i+1$ ισχύει η συνέχεια της ταχύτητας και της ενθαλπίας, δηλαδή η ταχύτητα και η ενθαλπία εξόδου το τμήματος i ισούται με την ταχύτητα και τη ενθαλπία εισόδου του τμήματος $i+1$.

Το συνολικό μήκος του κατόπτρου διαιρείται σε N ισομήκη τμήματα. Για το πρώτο τμήμα ($i=1$) είναι γνωστή η θερμοκρασία εισόδου $T1_{in,1}$ αφού ισούται με την θερμοκρασία εισόδου $T1$ του HTF στο κομμάτι των κατόπτρων. Έτσι, επιλύονται οι σχέσεις (2.23) - (2.27) (ή (2.28) - (2.30) για δέκτη χωρίς περίβλημα) με τη βοήθεια των εξισώσεων (2.31) - (2.47) με αποτέλεσμα να προσδιορίζεται η προσδιδόμενη θερμότητα $\dot{q}'_{12conv,1}$ στο HTF κατά τη διέλευσή του στο πρώτο τμήμα.

Με γνωστή τη θερμοκρασία $T_{1in,1}$ μπορεί να προσδιοριστεί η πυκνότητα $\rho_{in,1}$ (η οποία θεωρείται ως συνάρτηση της θερμοκρασίας) και συνεπώς η ταχύτητα $V_{in,1}$. Επίσης, προσδιορίζεται και η ειδική θερμοχωρητικότητα $Cp_{in,1}$ (θεωρείται συνάρτηση της θερμοκρασίας) και συνεπώς η ενθαλπία $h_{in,1}$. Δηλαδή η ενθαλπία και η ταχύτητα του HTF για μια δεδομένη θέση θεωρείται ως συνάρτηση μόνο της θερμοκρασίας σε αυτή τη θέση. Έτσι από τη σχέση (2.48) μπορούν να υπολογιστούν η ταχύτητα και η ενθαλπία εξόδου με επαναληπτική διαδικασία μεταβάλλοντας τη θερμοκρασία εξόδου $T_{1out,1}$ μέχρι συγκλίσεως.

Η ανωτέρω περιγραφείσα διαδικασία επαναλαμβάνεται για τα υπόλοιπα $N-1$ τμήματα θεωρώντας ότι η ταχύτητα και η ενθαλπία εξόδου το τμήματος i ισούται με την ταχύτητα και τη ενθαλπία εισόδου του τμήματος $i+1$. Επίσης, η σχέση (2.45), οι απώλειες δηλαδή από τα στηρίγματα, χρησιμοποιείται μόνο στα τμήματα που περιέχουν στηρίγματα αλλιώς ισούται με 0.

Αν ως HTF χρησιμοποιηθεί νερό, τότε στη διαφασική περιοχή νερού/ατμού δεν συντελείται αύξηση της θερμοκρασίας αλλά αλλαγή φάσης υπό σταθερή θερμοκρασία, αυτή του κορεσμού. Δηλαδή, η προσδιδόμενη θερμότητα απορροφάται από το νερό ως λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης με αποτέλεσμα την αύξηση της ενθαλπίας και την αλλαγή της υγρότητας. Σε κάθε περίπτωση ο υπολογισμός των απαιτούμενων θερμοδυναμικών μεγεθών πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες σχέσεις, αναλόγως του HTF, όπως αναφέρεται στην παράγραφο 2.7.

2.2.1.9 Απώλειες πίεσης

Το δεύτερο σημαντικό στοιχείο του HTF εκτός της θερμοκρασίας του είναι η πίεσή του. Η μεταβολή της πίεσης μιας ροής σε έναν αγωγό ισούται με το άθροισμα των απωλειών τριβής (γραμμικές απώλειες), των εντοπισμένων απωλειών (απώλειες λόγω αλλαγής της διατομής από συσκευές όπως βάνες) και των απωλειών λόγω υψομετρικής διαφοράς. Οι σωληνώσεις των κατόπτρων δεν παρουσιάζουν συσκευές που εισάγουν εντοπισμένες απώλειες και επιπλέον είναι τοποθετημένες οριζόντια με αποτέλεσμα να μην εμφανίζεται πτώση πίεσης λόγω υψομετρικής διαφοράς. Έτσι, η ολική πτώση πίεσης ισούται με την πτώση πίεσης που εισάγουν οι γραμμικές απώλειες.

Οι γραμμικές απώλειες για κάθε τμήμα i δίδονται από την εξής σχέση (Forristall, 2003):

$$\Delta p_i = \frac{f L_i}{2 D_2} \rho V^2 = \frac{f L_i}{2 D_2} \cdot \frac{\dot{m}^2}{\rho_{ave,i} A_{cs}^2}$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\frac{\varepsilon}{D_2}}{3.7} + \frac{2.51}{Re_{D_2,i} \sqrt{f}} \right), \quad Re_{D_2,i} > 2320 \quad (2.49)$$

$$f = \frac{64}{Re_{D_2,i}}, \quad Re_{D_2,i} > 2320$$

Όπου,

A_{cs} : εμβαδό διατομής απορροφητή

D_2 : εσωτερική διάμετρος του απορροφητή

f : συντελεστής τριβής Darcy

L_i : μήκος κάθε τμήματος i

\dot{m} : παροχή μάζας του ΗΤΦ

$Re_{D_2,i}$: αριθμός Reynolds για D_2 και $T = (T1_{in,i} + T1_{out,i})/2$

V : ταχύτητα του ΗΤΦ

ε : τραχύτητα αγωγού

ρ : η μέση πυκνότητα του ΗΤΦ στο τμήμα i

Οι συνολικές απώλειες πίεσης του ΗΤΦ κατά την διέλευσή του από τα κάτοπτρα ισούνται με το άθροισμα των απωλειών των επιμέρους τμημάτων ($i=1-N$).

Στην περίπτωση διφασικού μείγματος νερού/ατμού η σχέσεις (2.49) μετασχηματίζονται ως εξής (Balasubramaniam, Ramé, Kizito, & Kassemi, 2006):

$$\Delta p_i = \frac{fL_i}{2D_2} \rho V^2 = \frac{fL_i}{2D_2} \cdot \frac{\dot{m}^2}{\rho_{ave,i} A_{cs}^2}$$

$$f = \frac{16}{Re_{D2,i}}, \quad Re_{D2,i} < 2000$$

$$f = 0.079 Re_{D2,i}^{-0.25}, \quad Re_{D2,i} > 2000$$

$$\rho_{ave,i} = \rho_l(1 - \varepsilon) + \rho_g \varepsilon$$

(2.50)

$$\varepsilon = \left[1 + \left(\frac{U_g}{U_l} \right) \frac{1 - x \rho_g}{x \rho_l} \right]^{-1}$$

$$U_g = \frac{x \cdot \dot{m}}{\rho_g A_{cs}}$$

$$U_l = \frac{(1 - x)m}{\rho_l A_{cs}}$$

Λόγω της θεώρησης λείου αγωγού για τον υπολογισμό των απωλειών, κρίνεται σκόπιμη η πρόσθεση ενός συντελεστή τροποποίησης του συντελεστή απωλειών πίεσης που υπολογίζεται και χρησιμοποιείται στις σχέσεις (2.49) και (2.50). Με τον τρόπο αυτό ουσιαστικά μπορούν να εκτιμηθούν ακριβέστερα οι απώλειες πίεσης δεδομένης της τραχύτητας του αγωγού. Επιπλέον, ο συντελεστής αυτός επιτρέπει την ακριβέστερη εκτίμηση των απωλειών πίεσης στην περίπτωση διφασικού μείγματος, μια κατάσταση κατά την οποία η εκτίμηση των απωλειών είναι αρκετά επίπονη και υπόκειται σε μεγάλο σφάλμα (Balasubramaniam et al., 2006).

2.2.2 Πεδίο κατόπτρων

Πεδίο κατόπτρων είναι η έκταση που είναι τοποθετημένα τα επίπεδα κάτοπτρα και αντανακλούν την ακτινοβολία στο δέκτη του πύργου. Λόγω του σταθερού σημείου εστίασης, τα κάτοπτρα αυτά κινούνται συνεχώς και παρουσιάζουν διαφορετική απόδοση αναλόγως της θέσης τους αφού αλλάζει η γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας. Τέλος, σημαντικό παράγοντα στην συνολική απόδοση κατόπτρων-δέκτη διαδραματίζει η θέση που είναι τοποθετημένα τα κάτοπτρα στο πεδίο και συνεπώς, αυτή πρέπει να προσδιοριστεί αναλυτικά. Η εκτίμηση του πεδίου και όχι ο αναλυτικός προσδιορισμός του, μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω διαδικασίας, όπως αυτή περιγράφεται στη συνέχεια (παράγραφος 2.2.2.2).

2.2.2.1 Λειτουργία πεδίου κατόπτρων

Η συνολική θερμική ισχύς από τα N κάτοπτρα του πεδίου προς το δέκτη του πύργου είναι το άθροισμα της θερμικής ισχύος που προέρχεται από κάθε κάτοπτρο:

$$Q = \sum_{1}^N Q_{mir} \quad (2.51)$$

Η θερμική ισχύς του κάθε κατόπτρου ισούται με το γινόμενο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας επί την επιφάνεια του κατόπτρου λαμβάνοντας υπ' όψιν συντελεστές οπτικών και θερμικών απωλειών (Schwarzbözl, 2006; Spelling, 2013; Stine & Geyer, 2001):

$$Q_{mir} = I_d \cdot A_{mir} \cdot \eta_{cos} \cdot \eta_{sb} \cdot \eta_{it} \cdot \eta_{aa} \cdot \eta_{ref} \quad (2.52)$$

Όπου,

Q_{mir} : θερμική ισχύς προερχόμενη από κάθε κάτοπτρο

I_d : η άμεση ακτινοβολία

A_{mir} : η επιφάνεια του κατόπτρου

η_{cos} : συντελεστής απωλειών συνημίτονου

η_{sb} : συντελεστής απωλειών σκίασης - παρεμπόδισης

η_{it} : συντελεστής απωλειών λόγω μη τέλειας εστίασης

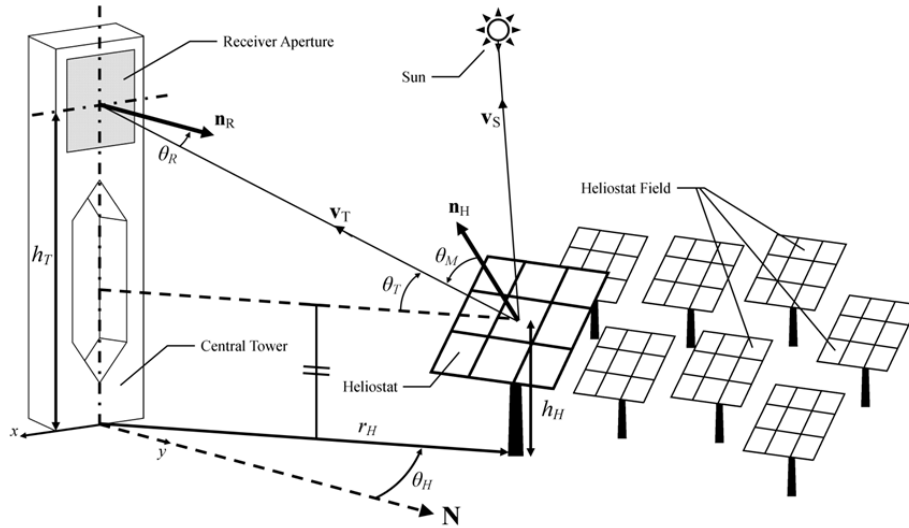
η_{aa} : συντελεστής απωλειών λόγω της ατμόσφαιρας μεταξύ κατόπτρου και δέκτη

η_{ref} : συντελεστής ανάκλασης κατόπτρου

Οι συντελεστές η_{ref} και η_{it} εξαρτώνται μόνο από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά και τον έλεγχο της θέσης του κατόπτρου και οι τιμές των μεταβλητών αυτών εκτιμώνται με βάση τα όσα αναφέρονται στη βιβλιογραφία (Collado, 2008; NREL, 2014b; SERI, 1985). Ο συντελεστής η_{sb} υποδηλώνει τη μείωση της ενεργής επιφάνειας του κατόπτρου λόγω της σκίασης και της παρεμπόδισης από άλλα κάτοπτρα και από τον πύργο και εξαρτάται τόσο από τη σχετική θέση των κατόπτρων, όσο και από τη χρονική στιγμή της μελέτης. Στην ανάλυση αυτή, ο συντελεστής αυτός δεν υπολογίζεται, αλλά λαμβάνει μια σταθερή μέση τιμή σύμφωνα με την ανάλυση του Collado (2008). Ο συντελεστής η_{aa} σχετίζεται με την μείωση της τελικά προσδιδόμενης θερμικής ισχύος στο δέκτη λόγω της ατμόσφαιρας που μεσολαβεί και εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ του κέντρου του κατόπτρου και του δέκτη (L_{M-R}) και από την καθαρότητα της ατμόσφαιρας. Για καθαρή ατμόσφαιρα είναι (Stine & Geyer, 2001):

$$\eta_{aa} = 0.99326 - 0.1046L_{M-R} + 0.017L_{M-R}^2 - 0.002845L_{M-R}^3 \quad (2.53)$$

L_{M-R} σε km



Σχήμα 2.10. Γωνίες επίπεδου κατόπτρου (Spelling, 2013)

Ο σημαντικότερος συντελεστής είναι ο η_{cos} που δηλώνει τις απώλειες λόγω της μη κάθετης πρόσπτωσης της ακτινοβολίας στην επιφάνεια του κατόπτρου (Σχήμα 2.10) και ισούται με το συνημίτονο της γωνίας θ_M ($\cos(\theta_M)$) μεταξύ του κάθετου διανύσματος στην επιφάνεια και του διανύσματος κατόπτρου-δέκτη. Συνεπώς, για κάθε κάτοπτρο, είναι αναγκαίος ο υπολογισμός των μοναδιαίων διανυσμάτων κατόπτρου-δέκτη (\vec{v}_T), Ήλιου-κατόπτρου (\vec{v}_S) και του κάθετου στην επιφάνεια του κατόπτρου (\vec{n}_H).

$$\vec{v}_T = \begin{bmatrix} \sin(\theta_H) \cdot \cos(\theta_T) \\ -\sin(\theta_H) \cdot \cos(\theta_T) \\ \sin(\theta_T) \end{bmatrix} \quad (2.54)$$

θ_H είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του φορέα του διανύσματος (\vec{r}_H) -που ορίζεται από τη βάση του κατόπτρου και του δέκτη- και της ευθείας από τη βάση του δέκτη προς την κατεύθυνση του Βορρά.

Η γωνία θ_T είναι η γωνία που σχηματίζεται από το διάνυσμα κατόπτρου-δέκτη (\vec{v}_T) και επίπεδο παράλληλο στην επιφάνεια της Γής και ανυψωμένο κατά το ύψος του κάτοπτρου (h_H). Το ύψος του δέκτη συμβολίζεται ως h_T .

$$\theta_T = \arctan\left(\frac{h_T - h_H}{\|\vec{r}_H\|}\right) \quad (2.55)$$

Το διάνυσμα Ήλιου-κατόπτρου (\vec{v}_S) υπολογίζεται λαμβάνοντας υπ' όψιν τις γωνίες αζιμούθιου (z) και ζενίθ (Φ) του Ήλιου:

$$\vec{v}_s = \begin{bmatrix} -\sin(\Phi) \cdot \cos(z) \\ -\sin(\Phi) \cdot \sin(z) \\ \sin(\Phi) \end{bmatrix} \quad (2.56)$$

Το κάθετο διάνυσμα στην επιφάνεια του κατόπτρου (\vec{n}_H) υπολογίζεται λαμβάνοντας υπ' όψιν τα διανύσματα Ήλιου-κατόπτρου (\vec{v}_s) και κατόπτρου-δέκτη (\vec{v}_T):

$$\vec{n}_H = \frac{\vec{v}_s + \vec{v}_T}{\|\vec{v}_s + \vec{v}_T\|} \quad (2.57)$$

Συνεπώς ο συντελεστής απωλειών συνημίτονου υπολογίζεται ως εξής:

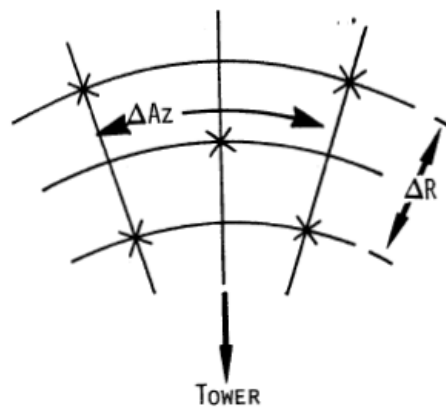
$$\eta_{cos} = \cos(\theta_M) = \vec{v}_T \cdot \vec{n}_H \quad (2.58)$$

2.2.2.2 Παραγωγή πεδίου κατόπτρων

Στην περίπτωση δεδομένου πεδίου, οι συντεταγμένες κάθε κατόπτρου με αναφορά τη θέση του δέκτη είναι γνωστές και έτσι μπορεί να υπολογιστεί η συνολική αντανακλώμενη θερμική ισχύς από το πεδίο σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως.

Όταν το πεδίο δεν είναι γνωστό ή πρέπει να εκτιμηθεί κατά την διαδικασία της προκαταρκτικής σχεδίασης, υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμού των συντεταγμένων του κάθε κατόπτρου λαμβάνοντας υπ' όψιν τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά καθώς και το ύψος του πύργου-δέκτη.

Αρχικά, θεωρείται πως τα κάτοπτρα είναι διατεταγμένα σε ισο-ακτινικές και ισο-αζιμουθιακές θέσεις (Σχήμα 2.11).



Σχήμα 2.11. Κάτοπτρα διατεταγμένα σε ισο-αζιμουθιακές και ισο-ακτινικές θέσεις (Kistler, 1986)

Συνεπώς, για τον προσδιορισμό των συντεταγμένων κάθε κατόπτρου, είναι απαραίτητος ο υπολογισμός των τιμών των μεταβλητών ΔAz και ΔR . Για ορθογώνια κάτοπτρα που χρησιμοποιούνται σε ηλιοθερμικές διατάξεις ισχύει (Kistler, 1986; Stine & Geyer, 2001):

$$\Delta R = (1.14424 \cot(\theta_L) - 1.0935 + 3.0684\theta_L - 1.1256\theta_L^2)HM \quad (2.59)$$

$$\Delta Az = \left(1.7491 + 0.6396\theta_L + \frac{0.02873}{\theta_L - 0.04902}\right)WM \frac{2 \cdot RD \cdot K}{2 \cdot RD - HM \cdot \Delta R}$$

$$K = \left(1 - \frac{HM \cdot \Delta R}{2 \cdot THT \cdot RD}\right)^{-1} \quad (2.60)$$

$$\theta_L = \frac{\pi}{2} - \theta_t$$

Όπου,

HM : το μήκος του κατόπτρου

RD : η ακτινική απόσταση από τη βάση του πύργου-δέκτη

THT : το ύψος του πύργου-δέκτη

WM : το πλάτος του κατόπτρου

θ_t : η γωνία μεταξύ της κατακόρυφης και της ευθείας που συνδέει τη θέση του κατόπτρου με τον δέκτη

Οι τιμές πλέον των ΔR και ΔAz μπορούν να μεταφραστούν σε συντεταγμένες, θεωρώντας σαν αρχή των αξόνων τη βάση του πύργου.

2.2.3 Δέκτες πύργου

Ο δέκτης πύργου θεωρείται μέλαν σώμα που ακτινοβολείται απευθείας με την ανακλώμενη εκ των κατόπτρων ακτινοβολία. Η θερμική ισχύς που τελικά μεταφέρεται στο εργαζόμενο μέσο είναι η εισερχόμενη εκ των κατόπτρων μειωμένη κατά τις οπτικές και θερμικές απώλειες. Λόγω της μονώσεως και των υψηλών θερμοκρασιών, θεωρείται ότι ο μοναδικός μηχανισμός θερμικών απωλειών είναι η ακτινοβολία.

Ο δέκτης μπορεί να θερμαίνει αέρα, να παράγει άμεσα ατμό ή να θερμαίνει κάποιο μέσο το οποίο στη συνέχεια θα πραγματοποιήσει την ατμοπαραγωγή. Οι τύποι των δεκτών περιγράφονται στη συνέχεια.

2.2.3.1 Δέκτης αέρα

$$Q = \eta_{opt} \cdot a_{rec} \cdot Q_{in} - A_{rec} \cdot \varepsilon_{rec} \cdot \sigma (T_m^4 - T_7^4) \quad (2.61)$$

$$Q = \dot{m}(h_{out} - h_{in}) \quad (2.62)$$

Όπου,

A_{rec} : εμβαδό διατομής υάλινου παραθύρου

h : ειδική ολική ενθαλπία

Q : προσδιδόμενη θερμική ισχύς στον αέρα

Q_{in} : προσδιδόμενη θερμική ισχύς στο δέκτη

T_7 : ενεργός θερμοκρασία του περιβάλλοντος

T_m : μέση τιμή των θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου

\dot{m} : παροχή αέρα

α_{rec} : συντελεστής θερμικής απορρόφησης του δέκτη

ε_{rec} : συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας του δέκτη

η_{opt} : συντελεστής οπτικών απωλειών

σ : σταθερά Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$)

Για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας εξόδου χρησιμοποιείται επαναληπτική διαδικασία. Αρχικά εκτιμάται μια θερμοκρασία εξόδου και υπολογίζεται η μέση θερμοκρασία, η ενθαλπία εξόδου και από τις σχέσεις (2.61) και (2.62) η προσδιδόμενη θερμική ισχύς στον αέρα. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να βρεθεί η θερμοκρασία εξόδου που ικανοποιεί την ισότητα των δύο σχέσεων.

Αν η θερμοκρασία εξόδου προκύψει μεγαλύτερη της επιτρεπτής, σημαίνει πως πρέπει να μειωθεί η προσδιδόμενη θερμική ισχύς στο δέκτη μέσω της αποεστίασης αριθμού κατόπτρων. Ο προσδιορισμός των κατάλληλων κατόπτρων που πρέπει να από-εστιάσουν αποτελεί πολύπλοκη διαδικασία. Πρακτικά, το αποτέλεσμα της, δηλαδή ο προσδιορισμός της απαιτούμενης θερμικής ισχύς στο δέκτη, μπορεί να προσεγγιστεί ως εξής (Spelling, 2013): η θερμοκρασία εξόδου λαμβάνει τη μέγιστη επιτρεπτή τιμή και υπολογίζεται η ενθαλπία εξόδου. Η προσδιδόμενη θερμική ισχύς στον αέρα υπολογίζεται από τη σχέση (2.62). Εν συνεχεία, μέσω της σχέσης (2.61) υπολογίζεται η απαιτούμενη προσπίπτουσα θερμική ισχύς στον δέκτη. Η διαφορά της θερμικής ισχύς που προέρχεται από τα κάτοπτρα από την υπολογισθείσα απαιτούμενη, δίδει την απορριπτόμενη και αναξιοποίητη θερμική ισχύ.

Τέλος, οι απώλειες πίεσης του δέκτη, στο σημείο σχεδίασης υπολογίζονται όπως στην περίπτωση αγωγού, με τη χρήση καθορισμένης τιμής συντελεστή απωλειών $K_{rec,DP}$:

$$p_{out} = p_{in}(1 - K_{rec,DP}) \quad (2.63)$$

Κατά τη λειτουργία εκτός σημείου σχεδίασης, η απώλειες πίεσης υπολογίζονται μέσω της μεταβολής της ανηγμένης παροχής:

$$p_{out} = p_{in}(1 - K_{rec})$$

$$K_{rec} = K_{rec,DP} \left(\frac{\dot{m}_{cor}}{\dot{m}_{cor,DP}} \right)^2 \quad (2.64)$$

$$\dot{m}_{cor} = \dot{m} \frac{\sqrt{T_{in}}}{p_{in}}$$

Όπου,

p : πίεση

\dot{m}_{cor} : ανηγμένη παροχή

2.2.3.2 Δέκτης νερού/ατμού

Στη περίπτωση που ο δέκτης πραγματοποιεί άμεση ατμοπαραγωγή, ισχύουν τα όσα αναφέρθηκαν στην περίπτωση του δέκτη αέρα. Η διαφορά έγκειται στο ότι η ενθαλπία, εκτός από τη θερμοκρασία, εξαρτάται από την πίεση και την υγρότητα. Έτσι, υπολογίζονται πρώτα οι απώλειες πίεσης σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν. Ακόμα, η αρχική υπόθεση της θερμοκρασίας εξόδου αντικαθίσταται από την υπόθεση της ενθαλπίας εξόδου. Έτσι, η θερμοκρασία εξόδου προκύπτει μέσω της ενθαλπίας και της πίεσης εξόδου.

2.2.3.3 Δέκτης ελαίου -αλάτων

Στη περίπτωση που το εργαζόμενο μέσο είναι λάδι/άλατα, ισχύουν τα όσα αναφέρθηκαν στην περίπτωση του δέκτη αέρα και χρησιμοποιούνται οι κατάλληλες κάθε φορά σχέσεις για τον υπολογισμό των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων.

2.2.3.4 Δέκτης Διπλής Ροής (αέρα - νερού/ατμού)

Ο δέκτης Διπλής Ροής αποτελεί έναν συνδυασμό των δεκτών αέρα και νερού/ατμού. Η κύρια λειτουργία του είναι η θέρμανση του αέρα υπολογιζόμενη όπως αναφέρθηκε στην περίπτωση του δέκτη αέρα. Στην περίπτωση που υπάρχει απορριπτόμενο ποσό θερμότητας, το ποσό αυτό θεωρείται ως η θερμότητα εισόδου στον δέκτη νερού/ατμού ο οποίος λειτουργεί όπως αναφέρθηκε ανωτέρω. Ουσιαστικά, προσομοιώνεται η διαδικασία κατά την

οποία τα από-εστιασμένα κάτοπτρα του κύριου δέκτη (αέρα), εστιάζουν σε δευτερεύοντα δέκτη (νερού/ατμού) ευρισκόμενο άνωθεν του κύριου.

2.3 Εναλλάκτες Θερμότητας

Η μέθοδος Number of Transfer Units (NTU) (Mills, 1995), χρησιμοποιείται κυρίως για τη μελέτη της λειτουργίας ενός εναλλάκτη και προσδιορίζει άμεσα τις άγνωστες θερμοκρασίες.

Η αδιάστατη ποσότητα NTU ορίζεται ως:

$$NTU = \frac{UA}{C_{min}} \quad (2.65)$$

$$\text{με } C_{min} = \min(\dot{m}_h \cdot Cp_h, \dot{m}_c \cdot Cp_c)$$

Όπου,

A : συνολική επιφάνεια μετάδοσης θερμότητας

c : ψυχρό ρεύμα

Cp : θερμοχωρητικότητα

h : θερμό ρεύμα

m : παροχή μάζας των ρευμάτων

U : οσονολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας

Η αποτελεσματικότητα του εναλλάκτη (“απόδοση”) ορίζεται ως:

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{max}} \quad (2.66)$$

$$Q = \dot{m}_h (h_{t,h,in} - h_{t,h,out}) = \dot{m}_c (h_{t,c,out} - h_{t,c,in})$$

$$= \dot{m}_h Cp_h (T_{h,in} - T_{h,out}) = \dot{m}_c Cp_c (T_{c,out} - T_{c,in})$$

$$Q_{max} = C_{min} (T_{h,in} - T_{c,in})$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (2.65) και (2.66) προκύπτει για εναλλάκτη αντιρροής:

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp\{-NTU[1 - (C_{min}/C_{max})]\}}{[1 - (C_{min}/C_{max})]\exp\{-NTU[1 - (C_{min}/C_{max})]\}} \quad (2.67)$$

Στην παρούσα εργασία, όλοι οι εναλλάκτες προσομοιώνονται ως αντιροής θεωρώντας μια ισοδύναμη τιμή UA .

Σε εναλλάκτη πρόσδοσης αισθητής θερμότητας, με αρχική υπόθεση των θερμοκρασιών εξόδου του θερμού ($T_{h,out}$) και του ψυχρού ρεύματος ($T_{c,out}$) και

γνωρίζοντας τις θερμοκρασίες εισόδου των δύο αυτών ρευμάτων, είναι δυνατός ο υπολογισμός των θερμοχωρητικοτήτων τους για τη μέση θερμοκρασία του κάθε ρεύματος. Συνεπώς, από τις σχέσεις (2.66) υπολογίζεται η αποτελεσματικότητα του εναλλάκτη για τις αρχικές υποθέσεις των θερμοκρασιών εξόδου των δύο ρευμάτων. Με γνωστή την ποσότητα UA και με χρήση της (2.65) υπολογίζεται εκ νέου από την (2.67) η αποτελεσματικότητα του εναλλάκτη. Οι υποθέσεις των θερμοκρασιών εξόδου επανεκτιμώνται έως της ταύτισης της τιμής της αποτελεσματικότητας που προκύπτει από τις δύο σχέσεις.

Στην περίπτωση εναλλάκτη πρόσδοσης λανθάνουσας θερμότητας ισχύει:

$$C_{min} = \dot{m}_h \cdot Cp_h$$

$$\varepsilon = 1 - \exp(-NTU) \quad (2.68)$$

Συνεπώς, ακολουθείται η ίδια διαδικασία αλλά απαιτείται η αρχική εκτίμηση μόνο της θερμοκρασίας εξόδου του θερμού ρεύματος.

Η ποσότητα UA στην παραπάνω ανάλυση θεωρήθηκε γνωστή. Έτσι, αν η ποσότητα αυτή είναι δεδομένη, δύναται ο απευθείας υπολογισμός των χαρακτηριστικών των δύο ρευμάτων. Η ποσότητα όμως αυτή μπορεί να υπολογιστεί για συγκεκριμένες απαιτήσεις του εναλλάκτη (θερμοκρασίες ή ενθαλπίες εξόδου των ρευμάτων) στο σημείο σχεδίασής του.

Για την εκτός σημείου σχεδίασης λειτουργία του εναλλάκτη θα πρέπει να είναι γνωστή η ποσότητα UA (είτε ως δεδομένη είτε μέσω συσχέτισης με την τιμή της στο σημείο σχεδίασης). Για την συσχέτισή της με αυτή του σημείου σχεδίασης ακολουθούμε την εξής διαδικασία:

Θεωρείται εναλλάκτης αντιρροής χωρίς επικαθίσεις και με σχεδόν ίσες την εξωτερική και εσωτερική διάμετρο της σωλήνωσης. Συνεπώς θα ισχύει:

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{1}{h_o A_o} \Rightarrow$$

$$UA = \frac{h_i A_i h_o A_o}{h_i A_i + h_o A_o} \quad (2.69)$$

Όπου,

A : επιφάνεια του τοιχώματος της σωλήνωσης

h : συντελεστής μετάδοσης θερμότητας

i : εσωτερική πλευρά της σωλήνωσης

o : εξωτερική πλευρά της σωλήνωσης

Συνεπώς,

$$UA/UA_{DP} = \left(\frac{1}{h_i A_i} + \frac{1}{h_o A_o} \right) / \left(\frac{1}{h_i A_i} + \frac{1}{h_o A_o} \right)_{DP} \quad (2.70)$$

Ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας h είναι ανάλογος του αριθμού Nusselt ο οποίος για πλήρως τυρβώδη ροή και από την σχέση των Dittus & Boelter (Rohsenow, Hartnett, & Cho, 1998) εξαρτάται από τους αριθμούς Reynolds και Prandtl. Ο αριθμός Reynolds στη σχέση αυτή υπάρχει υψωμένος στην 0.8 και είναι ανάλογος της παροχής ενώ ο αριθμός Prandtl εξαρτάται από θερμοδυναμικές ποσότητες (όπως η δυναμική συνεκτικότητα) και συνεπώς εξαρτάται από την πίεση και τη θερμοκρασία. Τέλος, θεωρώντας τις επιφάνειες ανάλογες (ή και ίσες) η σχέση (2.70) μπορεί να γραφτεί ως εξής (Flueckiger, Iverson, Garimella, & Pacheco, 2014):

$$UA/UA_{DP} = \left(\frac{\dot{m}_{c,DP}^{0.8}}{\dot{m}_c^{0.8} + A\dot{m}_h^{0.8}} + \frac{\dot{m}_{h,DP}^{0.8}}{B\dot{m}_c^{0.8} + \dot{m}_h^{0.8}} \right) \cdot \left(\frac{\dot{m}_c \cdot \dot{m}_h}{\dot{m}_{c,DP} \cdot \dot{m}_{h,DP}} \right)^{0.8} \quad (2.71)$$

Όπου,

A, B : συντελεστές σχετιζόμενοι με την διαφοροποίηση της πίεσης και της θερμοκρασίας

Η σχέση (2.71), θεωρώντας το θερμό μέσο ως το σημαντικότερο παράγοντα μεταβολής του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, μπορεί να απλοποιηθεί:

$$UA/UA_{DP} = \left(\dot{m}_h / \dot{m}_{h,DP} \right)^{0.8} \quad (2.72)$$

Για τις απώλειες πίεσης των δύο ρευμάτων του εναλλάκτη, αυτές υπολογίζονται θεωρώντας ότι τα ρεύματα διαρρέουν αγωγούς και ισχύει τα όσα ελέχθησαν για τις σχέσεις (2.63) και (2.64).

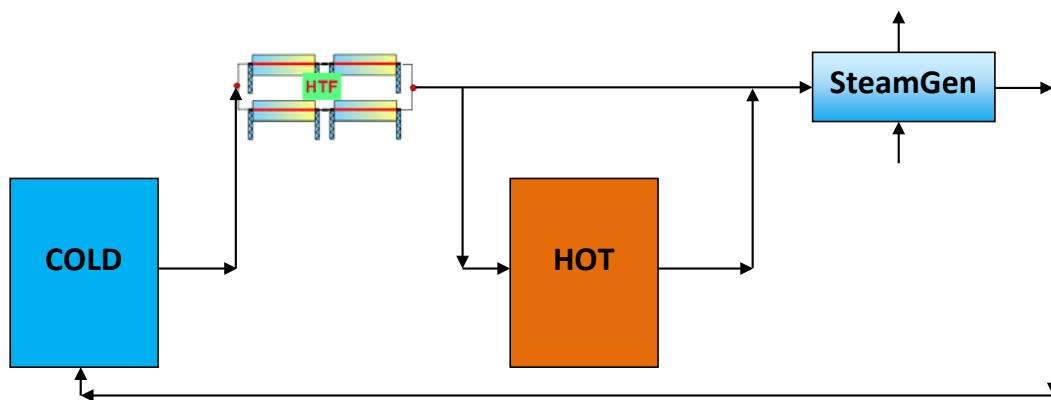
Τα όσα αναφέρθηκαν ανωτέρω, ισχύουν για κάθε είδους εναλλάκτη (αέρα/νερού, αέρα/αέρα, ελαίου/νερού κτλ). Η διαφοροποίηση έγκειται στην χρήση των κατάλληλων κάθε φορά σχέσεων για τον υπολογισμό των ιδιοτήτων (θερμοχωρητικότητα, ενθαλπίας κτλ) αναλόγως του ρευστού.

2.4 Αποθήκευση θερμότητας

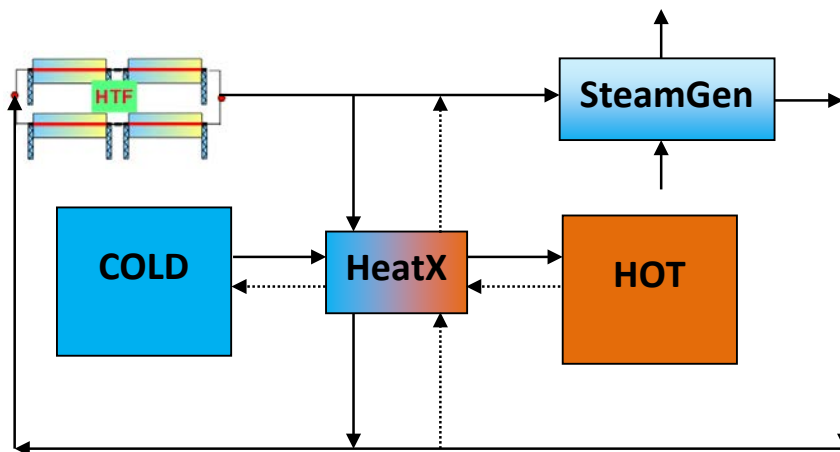
Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 1.3.5, η βασική διάταξη αποθήκευσης της θερμότητας είναι οι δεξαμενές. Σε αυτή τη διάταξη, το μέσο ρέει από τη ψυχρή δεξαμενή στο ηλιακό κομμάτι, όπου και θερμαίνεται. Η ροή

μάζας επιλέγεται ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή θερμοκρασία στην έξοδο του ηλιακού κομματιού. Αν η ροή μάζας που προκύπτει για την επίτευξη της επιθυμητής θερμοκρασίας είναι μεγαλύτερη από την απαιτούμενη, τότε η περίσσεια διοχετεύεται στη θερμή δεξαμενή. Όταν δεν υφίσταται ηλιακή ακτινοβολία για τη θέρμανση του εργαζόμενου μέσου, τότε η απαιτούμενη ποσότητα απάγεται από τη θερμή δεξαμενή (Σχήμα 2.12).

Ακόμα, με τη μέθοδο των δύο δεξαμενών, μπορεί να προσομοιωθεί η λειτουργία της διάταξης έμμεσης αποθήκευσης (Σχήμα 2.13) χρησιμοποιώντας διαφορετικό εργαζόμενο μέσο στη δεξαμενή αποθήκευσης από αυτό που χρησιμοποιείται στο ηλιακό κομμάτι. Η θέρμανση του μέσου αποθήκευσης επιτυγχάνεται με τη χρήση εναλλάκτη.



Σχήμα 2.12. Άμεση αποθήκευση θερμότητας



Σχήμα 2.13. Έμμεση αποθήκευση θερμότητας

Στη δεξαμενή ισχύει ο ισολογισμός μάζας και ενέργειας:

$$\frac{dM_{stor}}{dt} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} \quad (2.73)$$

$$\frac{dQ_{stor}}{dt} = \dot{m}_{in} \cdot h_{in} - \dot{m}_{out} \cdot h_{stor} - q_{loss} + q_{add} \quad (2.74)$$

Όπου,

h : ειδική ολική ενθαλπία

\dot{m} : η παροχή μάζας

M_{stor} : αποθηκευμένη μάζα

q_{add} : προσδιδόμενη θερμική ισχύς

q_{loss} : απώλειες θερμότητας

Q_{stor} : αποθηκευμένη θερμότητα

in : είσοδος

out : έξοδος

$stor$: αποθήκευση

Οι απώλειες θερμότητας (q_{loss}) εξαρτώνται από τις απώλειες στο σημείο σχεδίασης, το ποσό της αποθηκευμένης μάζας και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Συνεπώς (NREL, 2014b):

$$q_{loss} = q_{loss,DP} \cdot f_T \cdot f_M$$

$$f_T = a_0 + a_1 \cdot X_M + a_2 \cdot X_M^2 + a_3 \cdot X_M^3$$

$$f_M = b_0 + b_1 \cdot Y_T + b_2 \cdot Y_T^2 + b_3 \cdot Y_T^3$$

(2.75)

$$X_M = \frac{M_{stor}}{M_{stor,DP}}$$

$$Y_T = T_{amb,DP} - T_{amb}$$

2.5 Κύκλος Rankine

Ο κύκλος νερού – ατμού (ή κύκλος Rankine) περιλαμβάνει την συμπύεση του νερού, την ατμοποίησή του, την εκτόνωση του ατμού στον αμοστρόβιλο για την παραγωγή ισχύος και τέλος την συμπύκνωσή του ώστε να ξανασυμπιεστεί και να επαναληφθεί η αναφερθείσα αλληλουχία.

Η ατμοποίηση πραγματοποιείται από διάταξη καυστήρα – λέβητα (απλός κύκλος Rankine) όπου καίγεται καύσιμο ή με τη χρησιμοποίηση των θερμών καυσαερίων αεριοστρόβιλου (συνδυασμένος κύκλος) τα οποία διέρχονται διαμέσου εναλλάκτη θερμότητας (Λέβητας Ανάκτησης Θερμότητας – ΛΑΘ, HRSG) και παράγουν ατμό. Σε μια εγκατάσταση αποκλειστικά ηλιακής ενέργειας η απαιτούμενη θερμότητα για την παραγωγή του ατμού προέρχεται από το ηλιακό κομμάτι της εγκατάστασης, διαφορετικά, η ηλιακή ενέργεια δρα επικουρικά στην θερμότητα που προσφέρεται στο κύκλο είτε από το καίόμενο καύσιμο, είτε από τα θερμά καυσαέρια.

Για την αύξηση της απόδοσης της εγκατάστασης, το συμπυκνωμένο νερό, αφού διέλθει από τις αντλίες, προθερμαίνεται με τη χρήση ατμού που έχει απομαστευτεί από τον αμοστρόβιλο ώστε να δημιουργηθεί κατάσταση

κορεσμού. Έτσι, η διάταξη ατμοποίησης – υπερθέρμανσης δε προσφέρει θερμότητα για τη δημιουργία κορεσμένου νερού με αποτέλεσμα η θερμότητα να προσδίδεται σε υψηλότερη συγκριτικά θερμοκρασία με συνέπεια την αύξηση της απόδοσης.

2.5.1 Αντλίες

Οι αντλίες σε έναν κύκλο Rankine χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά του συμπυκνώματος που προέκυψε από τη ψύξη στο συμπυκνωτή, για την επίτευξη της επιθυμητής πίεσης του νερού (ατμού), καθώς και για τη διακίνηση άλλων υγρών όπως του ψυκτικού μέσου στο συμπυκνωτή.

Η χρήση της αντλίας επιτυγχάνει την πρόσδοση ενέργειας στο υγρό που εισέρχεται σε αυτήν από την αναρρόφηση (in), περνά από την πτερωτή και εξέρχεται από την κατάθλιψη (out). Αυτή η πρόσδοση ενέργειας επιφέρει την αύξηση της ενθαλπίας του υγρού στην κατάθλιψη σε σύγκριση με την αναρρόφηση.

Η λειτουργία της αντλίας δεν είναι ισεντροπική και χαρακτηρίζεται από τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης, που εξαρτάται τόσο από τη διακινούμενη παροχή όσο και από την επιθυμητή πίεση στην κατάθλιψη. Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης ορίζεται ως:

$$\eta_{is,pump} = \frac{h_{out,is} - h_{in}}{h_{out} - h_{in}} \quad (2.76)$$

Όπου,

h : ειδική ολική ενθαλπία

Η κατάσταση στην αναρρόφηση (in) θεωρείται δεδομένη με αποτέλεσμα να είναι γνωστή η ενθαλπία. Για την επιθυμητή πίεση κατάθλιψης p_{out} και με γνωστή την εντροπία αναρρόφησης s_{in} μπορεί να υπολογιστεί η ενθαλπία $h_{out,is}$. Έτσι, χρησιμοποιώντας τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης (έστω και μια αντιπροσωπευτική τιμή), μπορεί να υπολογιστεί από την Εξ. (2.76) η ενθαλπία στην κατάθλιψη (h_{out}). Για την επιθυμητή πίεση κατάθλιψης (p_{out}) και με την ενθαλπία h_{out} μπορούν να προσδιοριστούν όλα τα μεγέθη στην κατάθλιψη.

Επίσης, είναι δυνατή η χρήση της χαρακτηριστικής καμπύλης λειτουργίας της αντλίας η οποία συσχετίζει την παροχή, την πίεση εξόδου και τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης.

Η καταναλισκόμενη ισχύς στην αντλία υπολογίζεται ως:

$$P = \dot{m}(h_{out} - h_{in}) \quad (2.77)$$

Η ανάλυση αυτή ισχύει για κάθε αντλία ανεξαρτήτως του ρευστού που διακινεί (νερό, λάδι, θαλασσινό νερό κτλ). Αναλόγως της περίπτωσης, επιλέγονται οι κατάλληλες σχέσεις υπολογισμού των ιδιοτήτων του αντίστοιχου ρευστού.

2.5.2 Λέβητας Ανάκτησης Θερμότητας

Ο Λέβητας Ανάκτησης Θερμότητας -ΛΑΘ- που χρησιμοποιείται στον συνδυασμένο κύκλο, αξιοποιεί τη θερμότητα των καυσαερίων του αεριοστρόβιλου για την παραγωγή ατμού. Η λειτουργία του ΛΑΘ βασίζεται στην προθέρμανση νερού, την ατμοποίηση αυτού και τέλος την υπερθέρμανσή του ούτως ώστε να χρησιμοποιηθεί στον ατμοστρόβιλο. Ο ΛΑΘ μπορεί να είναι μίας ή και περισσότερων πιέσεων με αποτέλεσμα να παράγεται ατμός διαφορετικών πιέσεων και να εισέρχεται σε διαφορετικά σημεία στον ατμοστρόβιλο. Αυτό συμβαίνει για την πληρέστερη αξιοποίηση της θερμότητας των καυσαερίων και συνεπώς την αύξηση του θερμικού βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης.

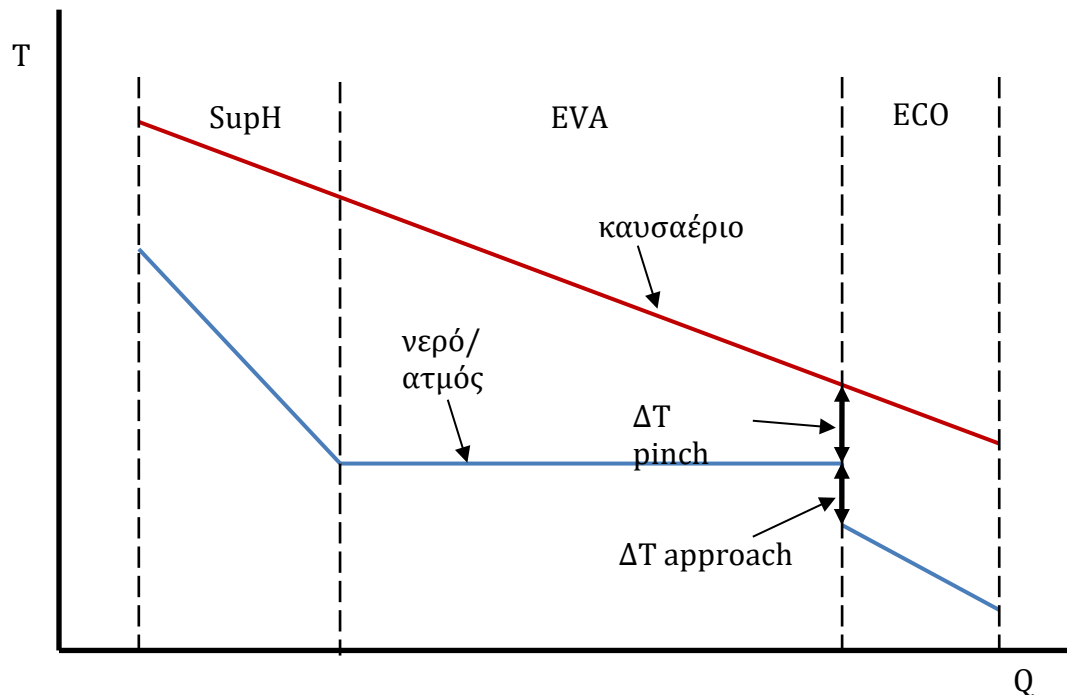
Ο ΛΑΘ αποτελείται από τύμπανα και εναλλάκτες αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας που υλοποιούν την προαναφερθείσα λειτουργία. Οι εναλλάκτες αισθητής θερμότητας χρησιμοποιούνται για την προθέρμανση του νερού (οικονομητήρες - Economizers (ECO)) και την υπερθέρμανση (υπερθερμαντές - Super Heaters (SupH)) του ατμού. Οι εναλλάκτες λανθάνουσας θερμότητας (ατμοποιητές - Evaporators (EVA)) παράγουν ατμό δεχόμενοι το προθερμασμένο νερό από τους οικονομητήρες. Στη διάταξη ενός ΛΑΘ μίας πίεσης το νερό που έχει προθερμανθεί από τον οικονομητήρα, εισέρχεται στο τύμπανο. Στο τύμπανο εισέρχεται επίσης και διφασικό μείγμα νερού/ατμού όπως έχει παραχθεί από τον ατμοποιητή. Κατά τη μίξη των δύο αυτών ρευμάτων, στο τύμπανο υπάρχει διφασικό μείγμα, δηλαδή κορεσμένο νερό και κορεσμένος ατμός. Ο κορεσμένος ατμός οδηγείται στον υπερθερμαντή ενώ το κορεσμένο νερό στον ατμοποιητή. Στον ατμοποιητή, η παροχή του νερού που κυκλοφορεί είναι μεγαλύτερη από αυτή του νερού εισόδου του οικονομητήρα (ή του ατμού του υπερθερμαντή) και καθορίζεται από το ποσοστό ανακυκλοφορίας.

Στην παρούσα εργασία το τύμπανο και ο ατμοποιητής μοντελοποιούνται σαν μία συνιστώσα ατμοποιητή θεωρώντας πως αυτή τροφοδοτείται με την ποσότητα του προθερμασμένου νερού του οικονομητήρα και παράγει κορεσμένο ατμό για την τροφοδοσία του υπερθερμαντή.

Κατά μήκος ενός ΛΑΘ, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.14, τα καυσαέρια χάνουν θερμότητα η οποία μεταφέρεται στο ρεύμα νερού/ατμού. Έτσι μειώνεται η θερμοκρασία τους ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται η θερμοκρασία του ρεύματος νερού/ατμού με εξαίρεση των ατμοποιητή όπου έχουμε σταθερή θερμοκρασία, διφασικό μείγμα και πρόσδοση λανθάνουσας θερμότητας. Ο οικονομητήρας προθερμαίνει το νερό σε θερμοκρασία κατά τι μικρότερη από τη θερμοκρασία κορεσμού. Η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας

κορεσμού και αυτής της εξόδου του οικονομητήρα ονομάζεται ΔT approach. Επίσης, η κινητήρια δύναμη της μετάδοσης θερμότητας στον ΛΑΘ είναι η διαφορά θερμοκρασίας των δύο ρευμάτων. Η ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά τους παρατηρείται μεταξύ εξόδου καυσαερίων και εισόδου νερού στον ατμοποιητή (ΔT pinch). Κατά το σχεδιασμό ενός ΛΑΘ, αυτές οι δύο ποσότητες (ΔT approach και ΔT pinch) διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο αφού επηρεάζουν το μέγεθος, τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας και την αποδοτικότητα των εναλλακτών. Συγκεκριμένα, όσο μικρότερη είναι η ΔT pinch, τόσο περισσότερη θερμότητα από τα καυσαέρια αξιοποιείται αλλά συνάμα τόσο αυξάνεται και το μέγεθος του εναλλάκτη. Τυπικό εύρος τιμών για την ποσότητα ΔT pinch είναι 10-30 °C ενώ για την ποσότητα ΔT approach είναι 10-40°C (Ganapathy, 1996).

Με βάση τα παραπάνω για τη συγκρότηση του μοντέλου ενός ΛΑΘ συνδέονται τα αντίστοιχα μοντέλα εναλλακτών λανθάνουσας και αισθητής θερμότητας, η μοντελοποίηση των οποίων έχει ήδη περιγραφεί στην παράγραφο 2.3.



Σχήμα 2.14. Διάγραμμα Q-T Λέβητα Ανάκτησης Θερμότητας

2.5.3 Ατμοστρόβιλος

Στον ατμοστρόβιλο πραγματοποιείται η εκτόνωση του ατμού και η παραγωγή μηχανικής ισχύος. Η εκτόνωση πραγματοποιείται στην πίεση που επιβάλλει το ψυγείο και είναι ουσιαστικά η πίεση κορεσμού της θερμοκρασίας που επιτυγχάνεται η ψύξη με τη χρήση ψυκτικού μέσου.

Αν θεωρήσουμε ως 1 την είσοδο, 3 την έξοδο και i_s την ισεντροπική μεταβολή, τότε ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης ορίζεται ως:

$$\eta_{is,ST} = \frac{h_1 - h_3}{h_1 - h_{3is}} \quad (2.78)$$

Όπου,

h : ειδική ολική ενθαλπία

$\eta_{is,ST}$: ισεντροπικός βαθμός απόδοσης

Στο σημείο σχεδίασης, ο ισεντροπικός βαθμός και τα χαρακτηριστικά της ροής εισόδου καθώς και η πίεση εξόδου είναι πλήρως γνωστά. Έτσι, από την Εξ. (2.78) δύναται να υπολογιστεί η ενθαλπία εξόδου και συνεπώς όλα τα λοιπά θερμοδυναμικά μεγέθη αυτής της θέσης.

Η παραγόμενη ισχύς συνεπώς θα είναι:

$$P = \dot{m}(h_1 - h_3) \quad (2.79)$$

Κατά τη λειτουργία σε μερικά φορτία, τα μεγέθη της πίεσης, της θερμοκρασίας και της παροχής εισόδου καθώς και της πίεσης εξόδου είναι αλληλοεξαρτώμενα. Αυτό περιγράφεται με τον κανόνα του Stodola (νόμος του κώνου), ο οποίος στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται με την εξής μορφή:

$$\dot{m} \cdot \sqrt{\frac{T_1}{p_1^2 - p_3^2}} = \left(\dot{m} \cdot \sqrt{\frac{T_1}{p_1^2 - p_3^2}} \right)_{DP} \quad (2.80)$$

Συνεπώς, απαιτείται κάποιο είδος ελέγχου της διάταξης ούτως ώστε ο ατμός που παράγεται να έχει τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά. Δύο είναι οι βασικοί τρόποι ελέγχου της λειτουργίας του αμοστροβίλου σε μερικά φορτία: α) με τη μέθοδο της ολισθαίνουσας πίεσης και β) με χρήση στραγγαλιστικής βάνας.

Με τη μέθοδο της ολισθαίνουσας πίεσης, η πίεση της τροφοδοτικής αντλίας μεταβάλλεται ούτως ώστε ο ατμός που παράγεται να έχει την πίεση, τη θερμοκρασία και την παροχή που απαιτείται κατά την λειτουργία του αμοστροβίλου σε μερικά φορτία (Εξ. (2.80)). Η χρήση της στραγγαλιστικής βάνας δεν επεμβαίνει στη λειτουργία της αμοπαγωγής, αλλά στραγγαλίζει ισενθαλπικά τον παραγόμενο ατμό πριν εισέλθει στον αμοστρόβιλο σε κατάλληλη πίεση, όπως απαιτεί η λειτουργία του αμοστροβίλου (Εξ. (2.80)). Έτσι, τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά του ατμού στην είσοδο του αμοστρόβιλου είναι τώρα αυτά της εξόδου της στραγγαλιστικής βάνας και όχι αυτά της εξόδου του αμοπαγωγού.

Επειδή η μέθοδος της ρύθμισης με στραγγαλισμό είναι η συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη σε απλές διατάξεις αμοστροβίλου (όπως αυτές που μελετώνται εδώ), επιλέγεται για την παρούσα εργασία. Τα χαρακτηριστικά του ατμού εισόδου στη βάνα είναι γνωστά αφού είναι αυτά που προκύπτουν από τον αμοπαγωγό. Η βάνα πραγματοποιεί ισενθαλπικό στραγγαλισμό σε μια

ορισμένη πίεση, αυτή που απαιτεί ο ατμοστρόβιλος. Συνεπώς, είναι γνωστή η ενθαλπία και η πίεση εξόδου και άρα όλα τα υπόλοιπα θερμοδυναμικά μεγέθη.

Επίσης, κατά την λειτουργία σε μερικά φορτία μεταβάλλεται και η τιμή του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης. Στην παρούσα εργασία η συσχέτιση του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης σε μερικά φορτία με την τιμή του στο σημείο σχεδίασης (DP) μπορεί να γίνει με δύο τρόπους (Εξ. (2.81) (GeneralElectric, 2010) και Εξ. (2.82) (Patnode, 2006)):

$$\frac{\eta_{is,ST}}{\eta_{is,ST,DP}} = A \cdot \Delta^x + B \cdot \Delta^y + C$$

$$\Delta = \frac{\dot{m}/v_1}{(\dot{m}/v_1)_{DP}} \quad (2.81)$$

Όπου,
A, B, C, x, y : συντελεστές
v : ειδικός όγκος

$$\eta_{is,ST} = \eta_{is,ST,DP} - \left[0.191 - 0.409 \left(\frac{\dot{m}}{\dot{m}_{DP}} \right) + 0.218 \left(\frac{\dot{m}}{\dot{m}_{DP}} \right)^2 \right] \quad (2.82)$$

Στην περίπτωση προσομοίωσης ατμοστρόβιλου πολλαπλών πιέσεων, μόνο το κέλυφος υψηλής πίεσης ρυθμίζεται με στραγγαλισμό. Οι απομαστεύσεις (αν υφίστανται) και τα χαρακτηριστικά εισόδου και εξόδου των υπολοίπων κελυφών (πλην της πίεσης εξόδου του τελευταίου) καθορίζονται από τον κανόνα του Stodola κάθε κελύφους. Συνεπώς, για τα υπόλοιπα κελύφη, η μοντελοποίηση ισχύει όπως περιγράφηκε χωρίς όμως να γίνεται χρήση της στραγγαλιστικής βάνας.

2.5.4 Συμπυκνωτής

Ο συμπυκνωτής είναι ουσιαστικά ένας εναλλάκτης λανθάνουσας θερμότητας όπου το ψυχρό ρεύμα απάγει θερμότητα από το θερμό διφασικό ρεύμα νερού ατμού. Συνεπώς ισχύουν τα όσα είδη αναφέρθηκαν περί της μοντελοποίησης εναλλακτών λανθάνουσας θερμότητας.

Στην παρούσα εργασία θεωρείται πως το ψυχρό ρεύμα του συμπυκνωτή είναι θαλασσινό νερό και ως εκ τούτου χρησιμοποιούνται οι κατάλληλες σχέσεις υπολογισμού των ιδιοτήτων του (ενθαλπίας, θερμοχωρητικότητας κτλ).

Ο συμπυκνωτής θαλασσινού νερού μπορεί να αντικατασταθεί με άλλες μεθόδους συμπύκνωσης (συμπυκνωτής αέρα, πύργος ψύξης κτλ), αναλόγως της εφαρμογής, χωρίς όμως να υφίσταται ουσιαστική αλλαγή των συμπερασμάτων.

2.6 Κύκλος Joule-Brayton

Ο κύκλος που υλοποιείται από τον αεριοστρόβιλο (κύκλος Joule-Brayton) περιλαμβάνει την συμπίεση του αέρα, την θέρμανσή του μέσω της καύσης και τέλος την εκτόνωση του αερίου. Στην παραλλαγή του κλειστού κύκλου, το εργαζόμενο μέσο θερμαίνεται μέσω εναλλακτών αντί της καύσης και ψύχεται στην επιθυμητή θερμοκρασία μετά την εκτόνωσή του ώστε να επαναληφθεί η αλληλουχία.

Η συμπίεση του αέρα πραγματοποιείται στον συμπιεστή, η εκτόνωση στον στρόβιλο και η θέρμανση στο θάλαμο καύσης όπου και εγχέεται η απαιτούμενη ποσότητα καυσίμου.

Λόγω της υψηλής θερμοκρασίας των καυσαερίων που εκτονώνονται στον στρόβιλο είναι απαραίτητη η ψύξη των πτερυγίων του στρόβιλου. Η ψύξη πραγματοποιείται με τη χρήση αέρα που απομαστεύεται από τον συμπιεστή.

Εν συνεχεία, ακολουθεί η συνοπτική περιγραφή της μοντελοποίησης των συνιστωσών. Για την πληρέστερη περιγραφή της λειτουργίας των συνιστωσών και της μοντελοποίησης τους ο αναγνώστης παραπέμπεται στην αναφορά (Walsh & Fletcher, 1998)

2.6.1 Αγωγοί

Η συνιστώσα του αγωγού ουσιαστικά χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των απωλειών πίεσης του εργαζόμενου μέσου. Οι απώλειες πίεσης στο σημείο σχεδιασμού υπολογίζονται με τη χρήση καθορισμένης τιμής συντελεστή απωλειών K_{DP} :

$$p_{out} = p_{in}(1 - K_{DP}) \quad (2.83)$$

Κατά τη λειτουργία εκτός σημείου σχεδιασμού, οι απώλειες πίεσης υπολογίζονται μέσω της μεταβολής της ανηγμένης παροχής:

$$p_{out} = p_{in}(1 - K)$$

$$K = K_{DP} \left(\frac{\dot{m}_{cor}}{\dot{m}_{cor,DP}} \right)^2 \quad (2.84)$$

$$\dot{m}_{cor} = \dot{m} \frac{\sqrt{T_{in}}}{p_{in}}$$

Όπου,

p : πίεση του αέρα

\dot{m}_{cor} : ανηγμένη παροχή

2.6.2 Συμπιεστής

Ο συμπιεστής αποτελεί τη συνιστώσα που είναι υπεύθυνη για την ανύψωση της πίεσης του αέρα εισόδου της μηχανής. Για τον υπολογισμό των επιδόσεων του χρησιμοποιείται κατάλληλος χάρτης (Σχήμα 2.15) ο οποίος συνδέει την ανηγμένη παροχή, τις ανηγμένες στροφές, το λόγο πίεσης και τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης.

Χρησιμοποιούνται γενικευμένοι χάρτες οι οποίοι επαναδιαστασιοποιούνται (scaling) σύμφωνα με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά του σημείου σχεδίασης. Οι χάρτες που προκύπτουν, χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για τον υπολογισμό των επιδόσεων στα υπόλοιπα σημεία λειτουργίας.

Επιπλέον, κατά τους υπολογισμούς λαμβάνονται υπ' όψιν απομαστεύσεις αέρα από το συμπιεστή για τη ψύξη του θερμού τμήματος της μηχανής.

Για τον υπολογισμό των επιδόσεων, αν ο λόγος πίεσης και η ταχύτητα περιστροφής είναι γνωστά (ή έστω υποτεθούν στα πλαίσια μιας επαναληπτικής διαδικασίας), τότε από τον χάρτη μπορούν να βρεθούν ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης και η ανηγμένη παροχή. Εν συνεχεία, αν 1 θεωρήσουμε την είσοδο του συμπιεστή, 3 την έξοδο και με δείκτη is την ισεντροπική μεταβολή, ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης ορίζεται ως:

$$\eta_{is,c} = \frac{h_{3is} - h_1}{h_3 - h_1} \quad (2.85)$$

Όπου,

h : ειδική ολική ενθαλπία

$\eta_{is,c}$: ισεντροπικός βαθμός απόδοσης

Στην Εξ. (2.85) οι τιμές των μεταβλητών h_3 και h_{3is} είναι άγνωστες. Η μεταβολή $1-3is$ είναι ισεντροπική και συνεπώς $s_1 = s_{3is}$. Χρησιμοποιώντας και την έκφραση της συνάρτησης εντροπίας, ισχύει:

$$s_{3is} - s_1 = 0 = \Phi_{3is} - \Phi_1 - R \cdot \ln(\pi_c) \quad (2.86)$$

Όπου,

R : σταθερά του εργαζόμενου μέσου

s : ειδική εντροπία

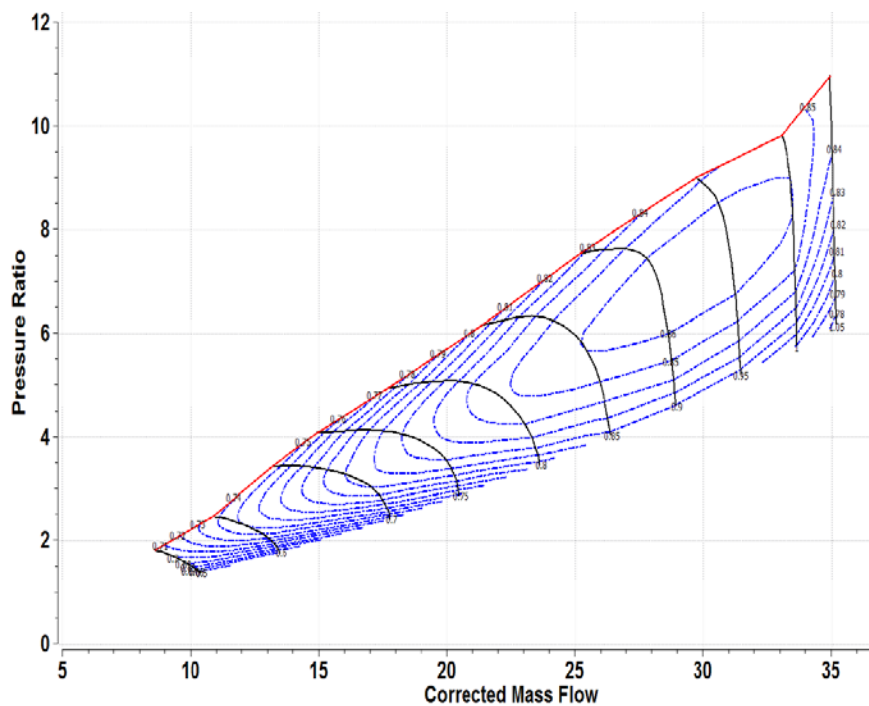
π_c : λόγος πίεσης συμπιεστή

Φ : συνάρτηση εντροπίας

Από την Εξ. (2.86), η ποσότητα Φ_{3is} μπορεί να υπολογιστεί και ως εκ τούτου η θερμοκρασία και η ενθαλπία στη θέση $3is$. Συνεπώς, τώρα μπορεί να υπολογιστεί η ενθαλπία και η θερμοκρασία της θέσης 3 από την Εξ. (2.85) και ως εκ τούτου είναι πλήρως καθορισμένη η κατάσταση εξόδου του συμπιεστή.

Τέλος, η καταναλισκόμενη ισχύς από τον συμπιεστή υπολογίζεται ως:

$$P = \dot{m}(h_3 - h_1) \quad (2.87)$$



Σχήμα 2.15. Παράδειγμα χάρτη συμπίεστή

2.6.3 Θάλαμος καύσης

Ο θάλαμος καύσης αποτελεί τη συνιστώσα που πραγματοποιεί την ανύψωση της θερμοκρασίας του εργαζόμενου μέσου μέσω της καύσης όπου ο αέρας εισόδου μετατρέπεται σε καυσαέριο. Επιπλέον, εισάγει και απώλειες πίεσης που υπολογίζονται θεωρώντας πως συμπεριφέρεται ως αγωγός και συνεπώς ισχύουν τα όσα αναφέρθηκαν στην περίπτωση της συνιστώσας του αγωγού.

Για τον υπολογισμό της θερμοκρασιακής ανύψωσης, χρησιμοποιούνται δεδομένα όπως η θερμοκρασία του αέρα εισόδου, ο λόγος καυσίμου αέρα, ο λόγος νερού αέρα, η θερμογόνος δύναμη του καυσίμου, ο βαθμός απόδοσης κτλ.

Στο σημείο σχεδιασμού, ο βαθμός απόδοσης του θαλάμου καύσης ($\eta_{br,DP}$) λαμβάνει την επιθυμητή δεδομένη τιμή. Σε οποιοδήποτε σημείο λειτουργίας εκτός του σημείου σχεδίασης, ο βαθμός απόδοσης του θαλάμου καύσης (η_{br}) μπορεί να συσχετιστεί με τη φόρτισή του (Ω) ως εξής (Kurzke, 2012):

$$\log(1 - n_{br}) = \log(1 - n_{br,DP}) + b * \log\left(\frac{\Omega}{\Omega_{DP}}\right) \tag{2.88}$$

b: σταθερά μερικού φορτίου

Η σχέση υπολογισμού της φόρτισης του θαλάμου καύσης είναι (Kurzke, 2012):

$$\Omega = \frac{\dot{m}}{p_3^{1.8} \exp(T_3/300) V_c} \quad (2.89)$$

\dot{m} (kg/s), p (bar) T (K), V (m³)

Όπου,

\dot{m} : παροχή αέρα εισόδου

p_3 : πίεση εισόδου

T_3 : θερμοκρασία εισόδου

V_c : όγκος θαλάμου καύσης

Η ποσότητα $\frac{\Omega}{\Omega_{DP}}$ που εμφανίζεται στη σχέση (2.88) εξαρτάται μόνο από την πίεση, την παροχή και τη θερμοκρασία αέρα του σημείου λειτουργίας και του σημείου σχεδίασης:

$$\frac{\Omega}{\Omega_{DP}} = \left(\frac{\dot{m}}{p_{t3}^{1.8} \exp\left(\frac{T_{t3}}{300}\right)} \right) / \left(\frac{\dot{m}}{p_{t3}^{1.8} \exp\left(\frac{T_{t3}}{300}\right)} \right)_{DP} \quad (2.90)$$

2.6.4 Στρόβιλος

Ο συμπιεστής αποτελεί τη συνιστώσα που είναι υπεύθυνη για την παραγωγή ισχύος μέσω της εκτόνωσης του εργαζόμενου μέσου. Για τον υπολογισμό των επιδόσεων ακολουθείται παρόμοια διαδικασία με αυτή που περιγράφηκε για το συμπιεστή τροποποιώντας γενικευμένους χάρτες (Σχήμα 2.16) και υπολογίζοντας το ποσό του αέρα ψύξης στο σημείο σχεδίασης ούτως ώστε η θερμοκρασία του μετάλλου των πτερυγίων να βρίσκεται σε αποδεκτά όρια.

Κατά τους υπολογισμούς ισχύουν τα όσα αναφέρθηκαν για το συμπιεστή με τη διαφοροποίηση ότι ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης ορίζεται ως:

$$\eta_{is,T} = \frac{h_1 - h_3}{h_1 - h_{3is}} \quad (2.91)$$

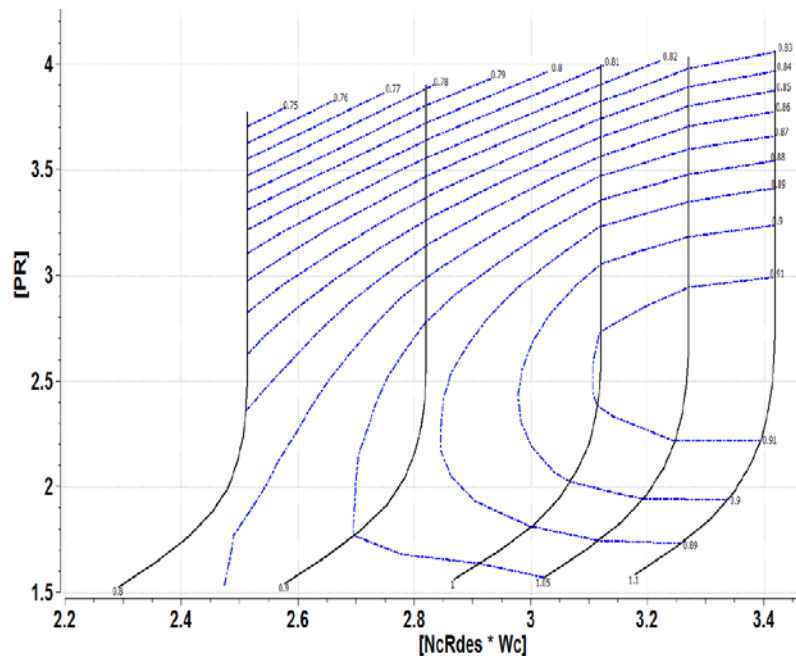
η ισεντροπική μεταβολή ως:

$$s_{3is} - s_1 = 0 = \Phi_{3is} - \Phi_1 - R \cdot \ln\left(\frac{1}{\pi_T}\right) \quad (2.92)$$

$$\pi_T = p_1/p_3$$

και η παραγόμενη ισχύς ως:

$$P = \dot{m}(h_1 - h_3) \tag{2.93}$$



Σχήμα 2.16. Παράδειγμα χάρτη στροβίλου

2.7 Υπολογισμός ιδιοτήτων

Οι ιδιότητες του εργαζόμενου μέσου (ενθαλπία, πυκνότητα, θερμοχωρητικότητα κτλ.) υπολογίζονται με βάση τα χαρακτηριστικά της ροής (πίεση, θερμοκρασία κτλ.). Συγκεκριμένα, για νερό/ατμό χρησιμοποιούνται οι αναλυτικές σχέσεις του IAPWS (Wagner et al., 2000) και οι ιδιότητες υπολογίζονται με βάση την πίεση, τη θερμοκρασία και την ξηρότητα. Στην περίπτωση του αέρα/καυσαερίου, χρησιμοποιούνται πίνακες που συνδέουν την τιμή των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων με τη θερμοκρασία, την υγρασία και το λόγο καυσίμου-αέρα. Οι πίνακες έχουν προκύψει από το λογισμικό NASA-CEA (Gordon & Mcbride, 1994) και χρησιμοποιούνται με τη μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής. Τέλος, οι ιδιότητες του ελαίου/άλατος που θερμαίνονται από την ηλιακή ενέργεια, εξαρτώνται μόνο από τη θερμοκρασία αυτού και προσδιορίζονται με γραμμική παρεμβολή από πίνακες που δημιουργήθηκαν με τη χρήση δεδομένων από τους κατασκευαστές (Coastal, 2012; DOW, 2016).

2.8 Σύνοψη - Συμπεράσματα

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν οι συνιστώσες που συναντώνται στις ηλιοθερμικές διατάξεις. Αναλύθηκε ο τρόπος λειτουργίας τους και αναφέρθηκαν οι μαθηματικές εξισώσεις που περιγράφουν τη σχέση μεταξύ των φυσικών μεγεθών που τις χαρακτηρίζουν. Οι εξισώσεις αυτές αποτελούν τη βάση για την ανάπτυξη υπολογιστικών μοντέλων που προσομοιώνουν τη λειτουργία τους, όπως παρουσιάζεται στο επόμενο Κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 3: Μοντελοποίηση Συνιστωσών Ηλιοθερμικών Διατάξεων και Πιστοποίησή τους

Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάζεται η υλοποίηση των μοντέλων των συνιστωσών ηλιοθερμικών διατάξεων χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις που περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 2. Η ανάπτυξη των μοντέλων πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού PROOSIS λόγω των αυξημένων δυνατοτήτων του. Τέλος, παρουσιάζεται η πιστοποίηση των μοντέλων είτε μέσω πειραματικών και υπολογιστικών δεδομένων της ανοιχτής βιβλιογραφίας, είτε μέσω προσομοίωσης που στοχεύει στην ποιοτική επαλήθευση της σωστής συμπεριφοράς των μοντέλων.

3.1 Περιβάλλον PROOSIS

Η προσομοίωση της λειτουργίας των ηλιοθερμικών διατάξεων είναι απαραίτητη ούτως ώστε να είναι δυνατή η εκτίμηση της απόδοσης μιας επένδυσης αλλά και της διερεύνησης νέων αποδοτικότερων διατάξεων.

Στην παρούσα εργασία, επιλέχθηκε η ανάπτυξη των μοντέλων των ηλιοθερμικών συνιστωσών στο PROOSIS λόγω των προτερημάτων και των δυνατοτήτων του σε σχέση με άλλα υπάρχοντα λογισμικά προσομοίωσης της λειτουργίας ηλιοθερμικών διατάξεων καθώς και λόγω της ύπαρξης των μοντέλων των συνιστωσών αεριοστροβίλου. Τα υπάρχοντα λογισμικά, είτε για εμπορική είτε για ερευνητική χρήση, βασίζονται ή συνδέονται με δύο ευρέως χρησιμοποιούμενα προγράμματα, το SAM (Blair et al., 2014) και το TRNSYS (Schwarzbözl, 2006). Το SAM, αν και είναι ένα πολύ ισχυρό εργαλείο, περιορίζεται όμως στη μοντελοποίηση μόνο ηλιοθερμικών διατάξεων κύκλου Rankine και συνεπώς δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση διατάξεων υβριδικού αεριοστροβίλου ή συνδυασμένου κύκλου. Το TRNSYS κάνει χρήση ημι-εμπειρικών σχέσεων για την προσομοίωση της λειτουργίας των συνιστωσών του αεριοστροβίλου και του ατμοστροβίλου. Συνεπώς δεν έχει την απαιτούμενη ευελιξία για την πραγματοποίηση μελετών (βελτιστοποίηση παραμέτρων λειτουργίας, επίδραση των IGVs, προσομοίωση βλαβών κτλ..) που κρίνονται απαραίτητες όπως αναλύθηκε στην παράγραφο 1.5.5.

Το περιβάλλον αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού PROOSIS (Empresarios Agrupados Internacional, 2016) αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο

προσομοίωσης της λειτουργίας θερμικών στροβιλομηχανών και χρησιμοποιείται ευρέως τόσο από κατασκευάστριες εταιρίες αεροπορικών κινητήρων όσο και από ερευνητικά κέντρα και πανεπιστήμια. Ως γλώσσα προγραμματισμού χρησιμοποιεί την EL (EcosimPro Language) με την οποία είναι δυνατή η μαθηματική έκφραση διεργασιών που προσεγγίζονται από συνήθεις διαφορικές και αλγεβρικές εξισώσεις. Επιπλέον, μέσω της γλώσσας αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού είναι δυνατή η χρήση τεχνικών όπως: η α) κληρονομικότητα (inheritance), δηλαδή η δυνατότητα δημιουργίας νέων μοντέλων που να βασίζονται σε υπάρχοντα, β) ο πολυμορφισμός (polymorphism) με τον οποίο δύνανται να χρησιμοποιούνται διαφορετικές μέθοδοι και ιδιότητες με το ίδιο όνομα σε διαφορετικά μοντέλα και γ) η ενθυλάκωση (encapsulation) που παρέχει τη δυνατότητα της κρυφής εκτέλεσης των διεργασιών.

Η φυσική διεργασία που υλοποιεί κάποια συνιστώσα (συμπιεστής, στρόβιλος κτλ) εκφράζεται με μαθηματικό τρόπο στο PROOSIS μέσω της δημιουργίας του Component. Το Component είναι ουσιαστικά η απεικόνιση με μαθηματικό τρόπο της συνιστώσας του φυσικού κόσμου. Το Component απεικονίζεται με επιθυμητό εικονίδιο που πίσω του κρύβεται η προγραμματιστική κωδικοποίηση της μαθηματικής έκφρασης. Η συνιστώσα αυτή μπορεί να συνδεθεί με άλλες συνιστώσες (Components) για τη συγκρότηση του πλήρους μοντέλου πχ ενός αεριοστροβίλου. Η σύνδεση – επικοινωνία των συνιστωσών γίνεται μέσω θυρών (Ports) οι οποίες μεταφέρουν προκαθορισμένη πληροφορία. Μεταφορά πληροφορίας μεταξύ των συνιστωσών μπορεί να πραγματοποιηθεί και μέσω Γενικής Μεταβλητής (Global Variable), η οποία υπολογίζεται από κάποιο Component και η τιμή της είναι διαθέσιμη σε όποιο άλλο Component απαιτείται. Η ομαδοποίηση των Components αναλόγως της εφαρμογής τους πραγματοποιείται μέσω της συγκρότησης βιβλιοθηκών (Libraries).

Μετά τη συγκρότηση του επιθυμητού μοντέλου μέσω της σύνδεσης των απαραίτητων Components είναι δυνατός ο καθορισμός του μαθηματικού μοντέλου (Partition). Ο τρόπος σύνδεσης των Components στο PROOSIS επιτρέπει την δημιουργία μοντέλων ανεξαρτήτως της πολυπλοκότητάς τους. Το λογισμικό χρησιμοποιεί τις συνδέσεις μέσω των θυρών και τις μεταβλητές που «κρύβονται» πίσω από το εικονίδιο του κάθε Component και βρίσκει των αριθμό των απαιτούμενων οριακών συνθηκών για την επίλυση του μοντέλου, οι οποίες αποτελούν και τα δεδομένα εισόδου μαζί με μεταβλητές ιδιοτήτων (Data Variables). Αφού επιλεχθούν οι μεταβλητές που είναι επιθυμητές ως οριακές συνθήκες, στη συνέχεια το λογισμικό ελέγχει αν προκύπτουν μη γραμμικά συστήματα εξισώσεων. Στην περίπτωση που απαιτείται η επίλυση μη γραμμικών συστημάτων, ο χρήστης καλείται να επιλέξει τις αλγεβρικές μεταβλητές, αυτές δηλαδή που θα χρησιμοποιηθούν στην επαναληπτική διαδικασία και των οποίων απαιτείται η εκτίμηση της τιμής. Σημειώνεται πως σε αυτό το στάδιο επιλέγονται μεταβλητές των οποίων η τιμή είναι ευκόλως εκτιμήσιμη. Έτσι, για παράδειγμα, σε ένα μοντέλο αεριοστροβίλου, ως

αλγεβρική μεταβλητή θα επιλεγθεί ο λόγος καυσίμου – αέρα και όχι κάποια ενδιάμεση θερμοκρασία.

Τέλος, η επίλυση του μαθηματικού μοντέλου γίνεται στο Experiment, όπου και δίδονται τιμές στις οριακές συνθήκες και στις αλγεβρικές μεταβλητές.

Αναλυτική περιγραφή των ανωτέρω καθώς και τη διαδικασία συγκρότησης μοντέλων, μπορεί ο αναγνώστης να βρει στο εγχειρίδιο χρήσης (Alexiou, 2014).

Τα μοντέλα (Components) των συνιστωσών του αεριοστροβίλου έχουν ήδη υλοποιηθεί στο PROOSIS με βάση τα όσο αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.6, και περιέχονται στη βιβλιοθήκη TURBO (Alexiou, 2014). Για να γίνει εφικτή η μοντελοποίηση των ηλιοθερμικών διατάξεων, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας υλοποιήθηκαν τα απαραίτητα μοντέλα (Components) τα οποία και συγκροτούν τις βιβλιοθήκες WAST και SOLAR που περιέχουν αντιστοίχως τα μοντέλα του κύκλου νερού/ατμού και του ηλιακού κομματιού. Τέλος, με τη χρήση των τριών αυτών βιβλιοθηκών είναι δυνατή η προσομοίωση της λειτουργίας υπάρχοντων και νέων ηλιοθερμικών διατάξεων καθώς και ο προσδιορισμός των επιδόσεων για διαφορετικά σενάρια λειτουργίας και βλάβες συνιστωσών, που θα αποτελέσουν αντικείμενο μελέτης στη συνέχεια.

3.2 Μοντέλα Ήλιου

Περιγράφονται τα δύο μοντέλα του Ήλιου που αναπτύχθηκαν. Το πρώτο αφορά στον υπολογισμό μόνο των γωνιών των ηλιακών ακτίνων, ενώ το δεύτερο παρέχει την επιπλέον δυνατότητα της εκτίμησης της έντασης της ακτινοβολίας.

Η ύπαρξη δύο μοντέλων αφορά στη διαθεσιμότητα πληροφορίας σχετικά με την τιμή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας (αποτελεί Global Variable). Αν η πληροφορία αυτή είναι διαθέσιμη (πχ με τη μορφή χρονοσειράς) χρησιμοποιείται το πρώτο μοντέλο που πραγματοποιεί μόνο τους απαιτούμενους υπολογισμούς των ηλιακών γωνιών. Έτσι, αποφεύγεται η εκτέλεση άσκοπων υπολογισμών καθώς και η απαίτηση επιπλέον δεδομένων εισόδου που θα ίσχυε στην περίπτωση της χρήσης του δεύτερου μοντέλου. Αν απαιτείται η εκτίμηση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας χρησιμοποιείται το δεύτερο μοντέλο.

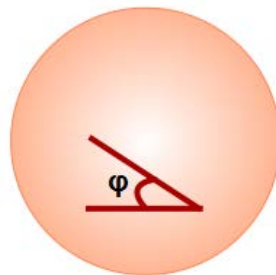
3.2.1 Μοντέλο γωνιών

Το μοντέλο αυτό υπολογίζει τις γωνίες ζενίθ και αζιμούθιου του Ήλιου. Με γνώση των τιμών αυτών των γωνιών είναι εν συνεχεία δυνατός ο προσδιορισμός της κλίσης των ηλιακών ακτίνων πάνω σε οποιαδήποτε επιφάνεια-κάτοπτρο.

Τα δεδομένα εισόδου είναι η ημέρα του έτους, η ώρα εκφρασμένη σε ακέραιες ώρες και λεπτά, οι γεωγραφικές συντεταγμένες του μελετώμενου τόπου (γεωγραφικό μήκος και πλάτος), το γεωγραφικό μήκος του μεσημβρινού στον οποίο βασίζεται η τοπική ώρα (πχ για την Ελλάδα $SL=30^\circ$) και τέλος η τιμή της άμεσης ακτινοβολίας.

Το μοντέλο, χρησιμοποιώντας τη σχέση (2.3) υπολογίζει τη γωνία ημέρας (B) και την τιμή της εξίσωσης του χρόνου (ET). Εν συνεχεία με τη χρήση της σχέσης (2.6) υπολογίζεται η γωνία ηλιακής απόκλισης και η ωριαία γωνία από την (2.8). Τέλος, οι γωνίες ζενίθ και αζιμούθιου υπολογίζονται χρησιμοποιώντας της σχέσεις (2.9) και (2.11) αντιστοίχως. Οι τιμές των υπολογιζόμενων γωνιών και της άμεσης ακτινοβολίας αποτελούν γενικές μεταβλητές, είναι δηλαδή ορατές από οποιαδήποτε άλλη μοντελοποιηθείσα συνιστώσα που τις απαιτεί.

Τη σχηματική απεικόνιση του Component στο PROOSIS παρουσιάζει το Σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1. Απεικόνιση Component μοντέλου γωνιών στο PROOSIS

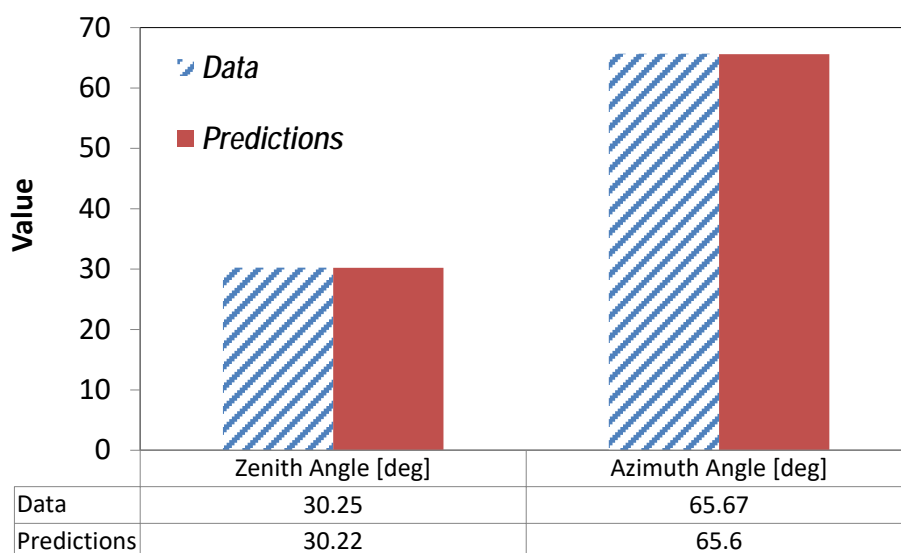
Η πιστοποίηση της σωστής λειτουργίας του μοντέλου πραγματοποιείται μέσω της προσομοίωσης του παραδείγματος 2.6 (S. A. Kalogirou, 2009). Σκοπό του παραδείγματος αποτελεί ο υπολογισμός των γωνιών ζενίθ και αζιμούθιου του Ήλιου για τόπο που βρίσκεται $40^\circ B$ στις 14:00 της 15ης Ιουνίου.

Για την προσομοίωση του παραδείγματος, δημιουργείται στο PROOSIS το απαραίτητο σχηματικό και τοποθετείται σε αυτό το εξεταζόμενο Component από τη βιβλιοθήκη SOLAR. Εν συνεχεία, δημιουργείται το Partition όπου και ορίζονται οι οριακές συνθήκες (μεταβλητές εισόδου): ημέρα, ώρα, γεωγραφικές συντεταγμένες και ένταση ακτινοβολίας. Η ένταση της ακτινοβολίας δεν χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς, αλλά αποτελεί Γενική Μεταβλητή που η τιμή της θα ήταν διαθέσιμη σε οποιοδήποτε άλλο Component υπήρχε στο σχηματικό και την χρειαζόταν. Τέλος, δημιουργείται το Experiment όπου και δίδονται τιμές στις μεταβλητές εισόδου. Με την εκτέλεση του Experiment

υλοποιείται η περιγραφείσα διαδικασία και υπολογίζονται οι τιμές των γωνιών ζενίθ και αζιμούθιου.

Αυτή η διαδικασία ακολουθείται κάθε φορά για την προσομοίωση της λειτουργίας οποιασδήποτε συνιστώσας ή συνδυασμού συνιστωσών, όπως στην περίπτωση της πιστοποίησης της σωστής λειτουργίας των αναπτυχθέντων συνιστωσών που περιγράφεται στις επόμενες παραγράφους.

Όπως αναφέρθηκε, η ημέρα, η ώρα και το γεωγραφικό πλάτος του παραδείγματος χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου. Το γεωγραφικό μήκος αναφοράς και το γεωγραφικό μήκος του τόπου θεωρούνται ίδια και συνεπώς η τιμή τους δεν διαδραματίζει ρόλο αφού δεν γίνεται διόρθωση γεωγραφικού μήκους στον υπολογισμό του ηλιακού χρόνου και της ωριαίας γωνίας. Τα αποτελέσματα του παραδείγματος και του μοντέλου παρουσιάζει το Σχήμα 3.2. Οι παρατηρούμενες διαφορές (0.03° - 0.07°) οφείλονται σε στρογγυλοποιήσεις και στην διαφορά στην ακρίβεια των χρησιμοποιηθεισών εξισώσεων.



Σχήμα 3.2. Σύγκριση μεταξύ δοθεισών και υπολογιζόμενων τιμών για τις γωνίες ζενίθ και αζιμούθιου

3.2.2 Μοντέλο γωνιών και ακτινοβολίας

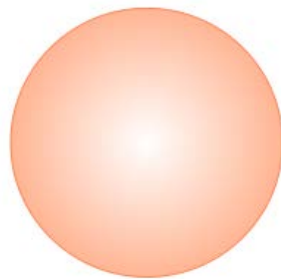
Το μοντέλο αυτό υπολογίζει τις γωνίες ζενίθ και αζιμούθιου του Ήλιου, (όπως στην περίπτωση του μοντέλου γωνιών) και επιπλέον εκτιμά την τιμή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας.

Τα δεδομένα εισόδου είναι η ημέρα του έτους, η ώρα εκφρασμένη σε ακέραιες ώρες και λεπτά, οι γεωγραφικές συντεταγμένες του τόπου (γεωγραφικό μήκος και πλάτος), το γεωγραφικό μήκος στο οποίο βασίζεται η τοπική ώρα (Ελλάδα $SL=30^\circ$) και τέλος η τιμή της ατμοσφαιρικής πίεσης. Δεδομένα εισόδου με τη μορφή δεδομένων τιμών (Data Variables) αποτελούν και οι τιμές των παραμέτρων απορρόφησης ακτινοβολίας. Στις μεταβλητές αυτές έχουν δοθεί τυπικές τιμές όπως στις αντίστοιχες της εργασίας (Bird, 1984;

Bird & Hulstrom, 1981; Bird & Riordan, 1986) και στην εφαρμογή της NREL (NREL, 2004).

Για τον υπολογισμό των γωνιών ακολουθείται η ίδια διαδικασία όπως και στο μοντέλο γωνιών, ενώ η ένταση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας εκτιμάται με τη χρήση των σχέσεων (2.18) και (2.19) για κάθε μήκος κύματος. Εν συνεχεία, μέσω ολοκλήρωσης με τη χρήση της μεθόδου του τραπεζίου, για όλα τα μήκη κύματος, προσδιορίζεται η τιμή της συνολικής άμεσης ακτινοβολίας. Το εν λόγω μοντέλο περιλαμβάνει και τις εξισώσεις προσδιορισμού της διάχυτης και της ολικής ακτινοβολίας, οι οποίες όμως δεν χρησιμοποιούνται από συγκεντρωτικά κάτοπτρα/συλλέκτες. Οι τιμές των υπολογιζόμενων γωνιών και της άμεσης ακτινοβολίας αποτελούν και σε αυτήν την περίπτωση γενικές μεταβλητές.

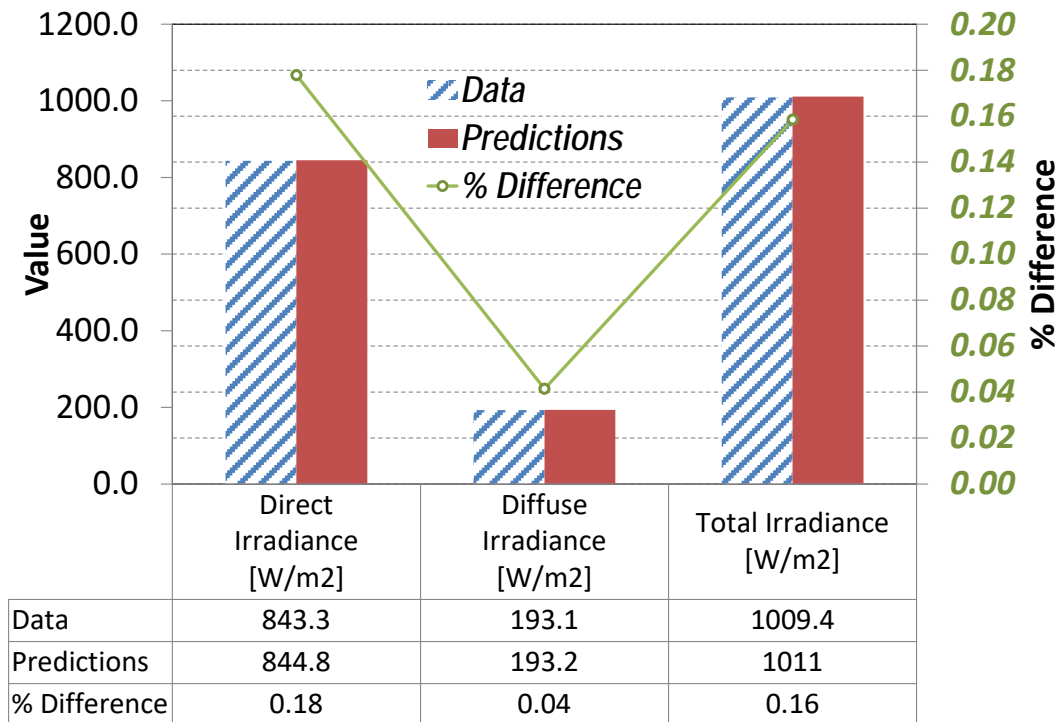
Τη σχηματική απεικόνιση του Component στο PROOSIS παρουσιάζει το Σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3. Απεικόνιση Component μοντέλου γωνιών και ακτινοβολίας στο PROOSIS

Η σωστή συμπεριφορά της συνιστώσας πιστοποιείται μέσω σύγκρισης των τιμών των υπολογιζόμενων ακτινοβολιών με αυτών που προκύπτουν από την διαθέσιμη εφαρμογή της NREL σε Excel (NREL, 2004) για οριζόντια επιφάνεια.

Ως δεδομένα εισόδου επιλέγονται η 12η μεσημβρινή της 21ης Ιουνίου, γεωγραφικό μήκος και πλάτος 30° και 38° αντιστοίχως και πίεση τυπικής ημέρας. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής και του μοντέλου παρουσιάζει το Σχήμα 3.4. Οι παρατηρούμενες διαφορές (μικρότερες του 0.2%) οφείλονται σε στρογγυλοποιήσεις και στις χρήσιμες διαφορετικές εξισώσεις υπολογισμού των ηλιακών γωνιών.



Σχήμα 3.4. Σύγκριση μεταξύ δοθεισών και υπολογιζόμενων τιμών της έντασης της ακτινοβολίας

3.3 Μοντέλα παραβολικών κατόπτρων

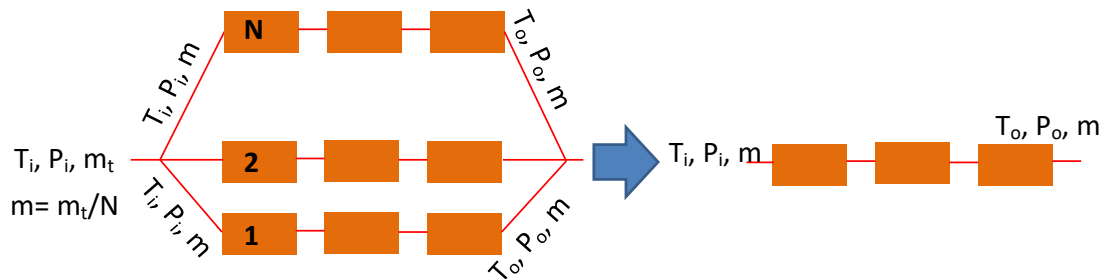
Περιγράφονται τα δύο μοντέλα παραβολικών κατόπτρων που αναπτύχθηκαν. Τα μοντέλα αφορούν τον προσδιορισμό των θερμοδυναμικών μεγεθών της ροής στην έξοδο των κατόπτρων. Στο πρώτο μοντέλο ως εργαζόμενο μέσο χρησιμοποιείται έλαιο, ενώ στο δεύτερο το εργαζόμενο μέσο είναι νερό/ατμός.

3.3.1 Μοντέλο ελαίου

Το μοντέλο αυτό υπολογίζει τη θερμοδυναμική κατάσταση εξόδου του ελαίου από τα παραβολικά κάτοπτρα. Τα δεδομένα εισόδου είναι: ατμοσφαιρικές συνθήκες, συντελεστές απωλειών λόγω σκίασης, ανακρίβειας παρακολούθησης της κίνησης του Ήλιου, γεωμετρίας, ρύπων κατόπτρου, ρύπων δέκτη, γενικών απωλειών, συντελεστής αντανάκλασης καθαρού κατόπτρου, πλάτος και μήκος κατόπτρου, κλίση, συντελεστές απορροφητικότητας υάλινου περιβλήματος και δέκτη, διαπερατότητας υάλινου περιβλήματος, θερμική αγωγιμότητα υάλινου περιβλήματος, συντελεστές εκπομπής ακτινοβολίας υάλινου περιβλήματος και δέκτη, εσωτερική και εξωτερική διάμετρος δέκτη και υάλινου περιβλήματος, πίεση μεταξύ υάλινου περιβλήματος και δέκτη, συντελεστής διόρθωσης συντελεστή απωλειών πίεσης, περίμετρος, ενεργή διάμετρος, εμβαδό διατομής και συντελεστής αγωγής στηριγμάτων, αριθμός σειρών κατόπτρων, αριθμός κατόπτρων σε κάθε σειρά, αριθμός διαμέρισης του

κάθε κατόπτρου, υλικό του δέκτη και τέλος επιλογή λειτουργίας. Η επιλογή λειτουργίας περιλαμβάνει τρεις δυνατότητες: α) πλήρους παρακολούθησης, όπου οι ηλιακές ακτίνες προσπίπτουν πάντα κάθετα στο κάτοπτρο, β) κανονικής παρακολούθησης όπου το κάτοπτρο κινείται σε άξονα B-N και ακολουθεί την κίνηση του Ηλίου και γ) μη λειτουργίας, όπου θεωρείται πως το κάτοπτρο παρακάμπτεται και η κατάσταση εξόδου του ελαίου ταυτίζεται με την κατάσταση εισόδου.

Αρχικά, θεωρείται πως όλα τα κάτοπτρα έχουν τα ίδια κατασκευαστικά χαρακτηριστικά (μέγεθος, ανακλαστικότητα, απορροφητικότητα κτλ) και συνεπώς κάθε σειρά κατόπτρων λειτουργεί πανομοιότυπα με τις υπόλοιπες. Έτσι, αρκεί η προσομοίωση της λειτουργίας μιας σειράς για τον υπολογισμό της πίεσης και της θερμοκρασίας εξόδου. Η παροχή ελαίου που περνά από κάθε σειρά είναι το πηλίκο της ολικής παροχής προς τον αριθμό των σειρών. Αυτή τη θεώρηση παρουσιάζει το Σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.5. Όλες οι σειρές κατόπτρων λειτουργούν πανομοιότυπα

Εν συνεχεία, υπολογίζεται η απορροφώμενη θερμότητα από το υάλινο περιβλήμα ($\dot{q}'_{5SolAbs}$) και τον απορροφητή/δέκτη ($\dot{q}'_{3SolAbs}$) από τις σχέσεις (2.46) και (2.47). Με τη θεώρηση πως όλα τα κάτοπτρα έχουν τα ίδια κατασκευαστικά χαρακτηριστικά, οι ποσότητες αυτές είναι ίδιες για όλα τα κάτοπτρα (ή για τα επιμέρους στοιχειώδη τμήματα (διαμερίσεις) του κάθε κατόπτρου) αφού εξαρτώνται μόνο από τη θέση του Ήλιου και την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Σε κάθε στοιχειώδες τμήμα του κατόπτρου θεωρείται πως τα χαρακτηριστικά της ροής και οι θερμοκρασίες του δέκτη και του υάλινου περιβλήματος παραμένουν αμετάβλητες καθ' όλο το μήκος του. Συνεπώς, όλες οι ποσότητες που εξαρτώνται από τα βασικά θερμοδυναμικά μεγέθη, υπολογίζονται για τα χαρακτηριστικά εισόδου της ροής σε κάθε στοιχειώδες τμήμα.

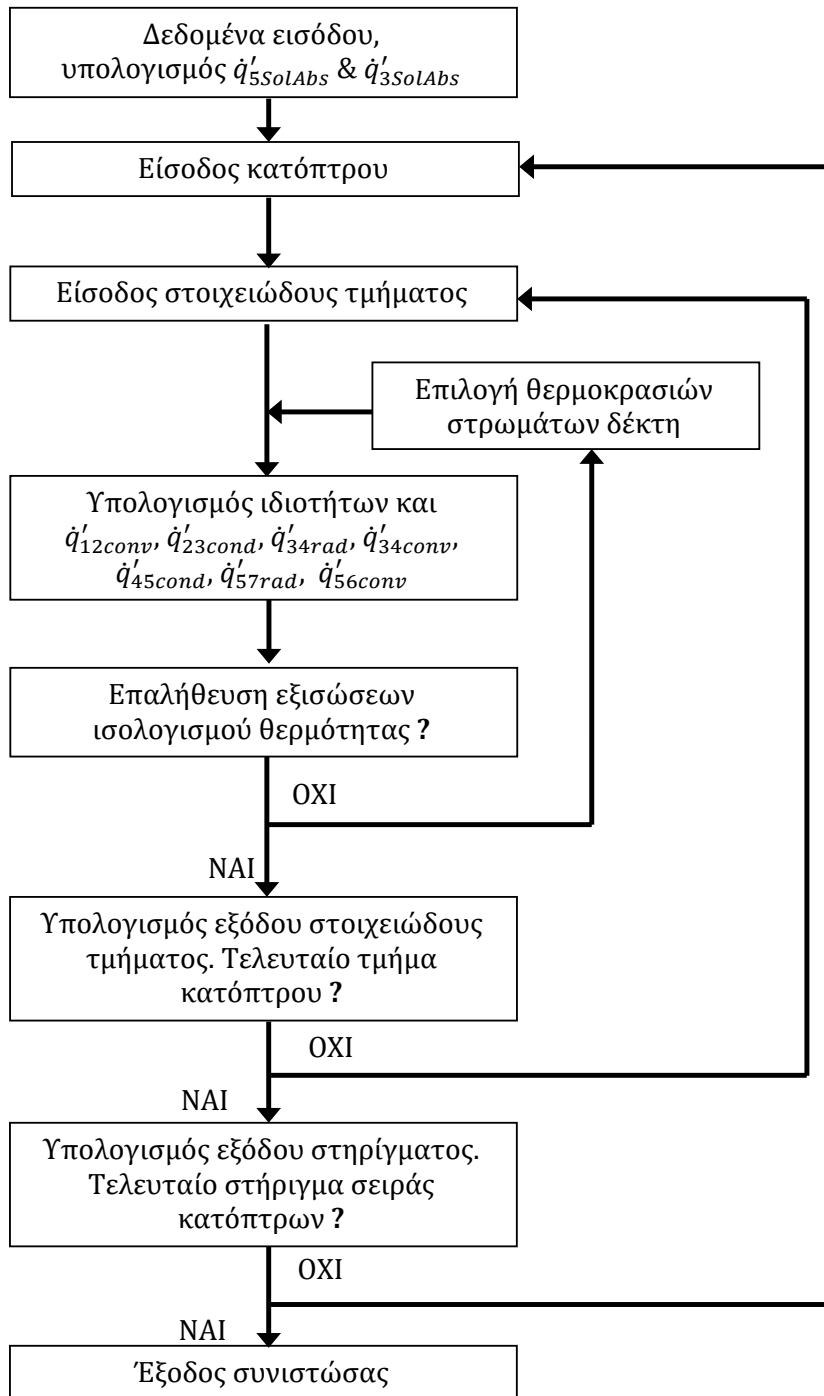
Κατόπιν, για οποιοδήποτε στοιχειώδες τμήμα, γίνεται υπόθεση των θερμοκρασιών της εσωτερικής και εξωτερικής επιφάνειας του δέκτη/απορροφητή και του υάλινου περιβλήματος (θερμοκρασίες T2, T3, T4 και T5 αντίστοιχα). Συνεπώς, είναι δυνατός ο υπολογισμός των ποσοτήτων \dot{q}'_{12conv} , \dot{q}'_{23cond} , \dot{q}'_{34rad} , \dot{q}'_{34conv} , \dot{q}'_{45cond} , \dot{q}'_{57rad} και \dot{q}'_{56conv} (σχέσεις (2.31), (2.36), (2.37), (2.38)/(2.39), (2.40), (2.41), (2.42) αντίστοιχα). Μέσω της μεθόδου

Newton-Raphson, οι τιμές των θερμοκρασιών μεταβάλλονται έτσι ώστε τελικά να ικανοποιείται το σύστημα μη γραμμικών εξισώσεων θερμικής ισορροπίας (2.23)-(2.26). Έτσι, στο τέλος της επαναληπτικής διαδικασίας, έχει προσδιοριστεί η θερμότητα που απορροφάται από το εργαζόμενο μέσο και από τις σχέσεις (2.48) και (2.49) προσδιορίζεται αντίστοιχα η θερμοκρασία και η πίεση στην έξοδο του στοιχειώδους τμήματος.

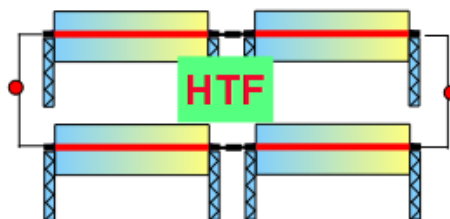
Η ανωτέρω διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλα τα στοιχειώδη τμήματα του κάθε κατόπτρου. Προτού ξεκινήσει η ίδια διαδικασία για το επόμενο κάτοπτρο, υπολογίζονται οι απώλειες θερμότητας από το στήριγμα (σχέση (2.45)) και συνεπώς προσδιορίζεται η θερμοκρασία εξόδου από το στήριγμα που αποτελεί και τη θερμοκρασία εισόδου του πρώτου στοιχειώδους τμήματος του επόμενου κατόπτρου.

Η επανάληψη της προαναφερθείσας διαδικασίας για όλα τα κάτοπτρα της σειράς καταλήγει στον υπολογισμό των χαρακτηριστικών της ροής του εργαζόμενου μέσου. Την υλοποιηθείσα διαδικασία συνοψίζει το Σχήμα 3.6.

Τη σχηματική απεικόνιση του Component στο PROOSIS παρουσιάζει το Σχήμα 3.7.

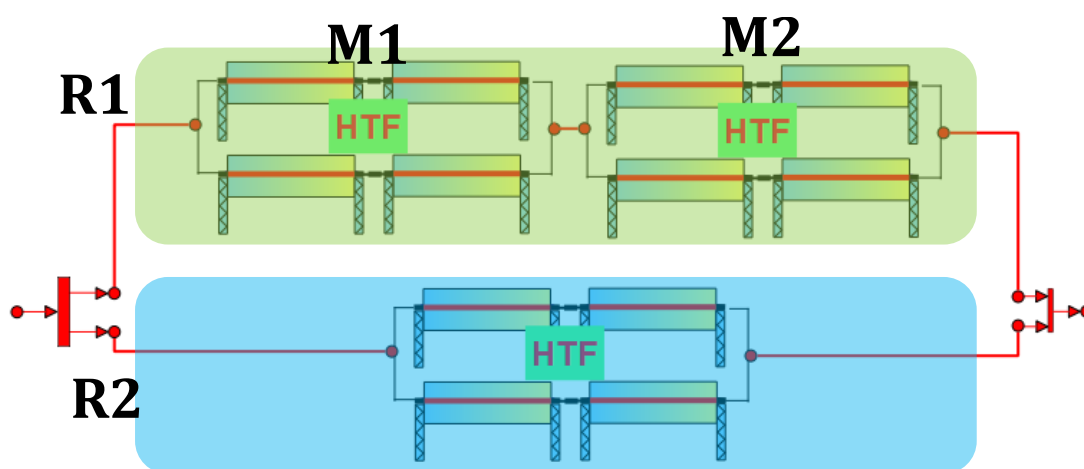


Σχήμα 3.6. Διαδικασία μοντελοποίησης κοίλων κατόπτρων



Σχήμα 3.7. Απεικόνιση Component μοντέλου παραβολικών κατόπτρων (ελαίου) στο PROOSIS

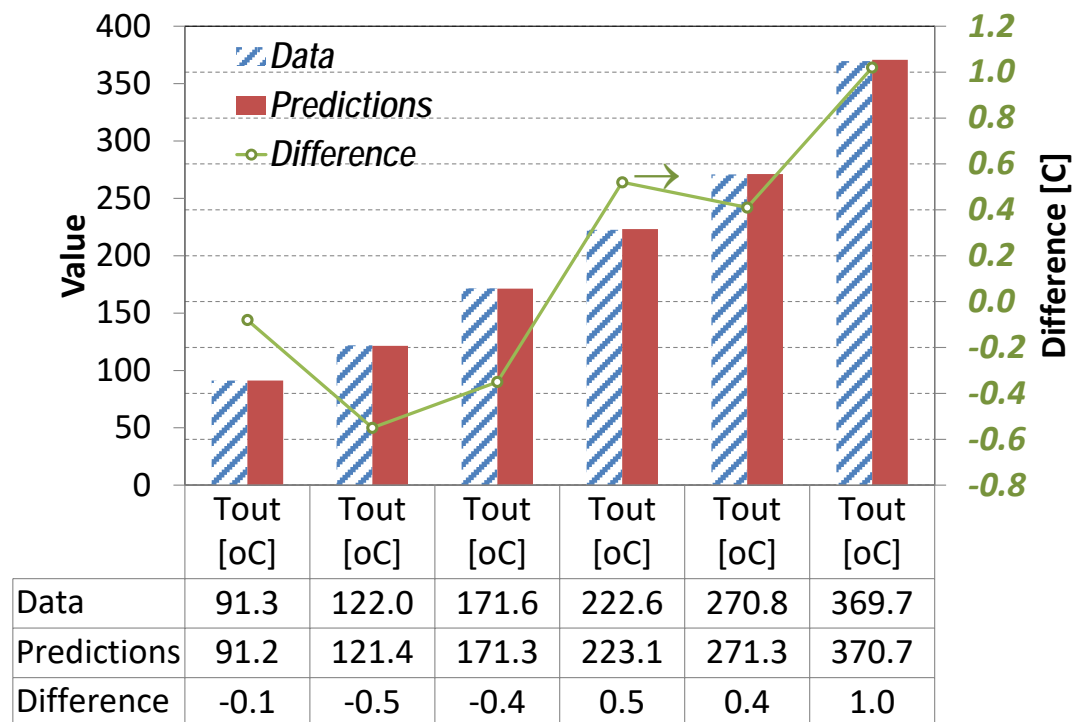
Σημειώνεται πως αν υπάρχει διαφοροποίηση στα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά κάποιων σειρών κατόπτρων ή και διαφοροποίηση στα χαρακτηριστικά των κατόπτρων της ίδιας σειράς, τότε χρησιμοποιείται ο απαιτούμενος αριθμός Component κατόπτρων ομαδοποιώντας κάθε εν σειρά συνδεδεμένα κάτοπτρα με ίδια χαρακτηριστικά. Σε αυτήν την περίπτωση, τα χαρακτηριστικά της ροής εξόδου από το πεδίο κατόπτρων προκύπτουν με μίξη των ροών κάθε σειράς. Παράδειγμα μιας τέτοιας περίπτωσης απεικονίζει το Σχήμα 3.8 όπου ο κλάδος R2 αντικατοπτρίζει όλες τις παράλληλα συνδεδεμένες σειρές κατόπτρων με ίδια κατασκευαστικά χαρακτηριστικά και ο κλάδος R1 αντικατοπτρίζει μια σειρά κατόπτρων που αποτελείται από δύο ομάδες εν σειρά συνδεδεμένων κατόπτρων με διαφορετικά κατασκευαστικά χαρακτηριστικά.



Σχήμα 3.8. Διάταξη κατόπτρων με διαφορετικά κατασκευαστικά χαρακτηριστικά

Για να ελεγχθεί η πιστότητα υπολογισμών της συνιστώσας αυτής, μοντελοποιείται πείραμα που διενήργησε η SANDIA (Moss & Brosseau, 2005) για το οποίο υπάρχουν διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα, με τα οποία μπορούν να συγκριθούν οι προβλέψεις που δίνει η συνιστώσα.

Το πείραμα αφορά τη μέτρηση της θερμοκρασίας εξόδου του ελαίου από δέκτη LS-2 πλήρους παρακολούθησης της ηλιακής κίνησης για συγκεκριμένες ατμοσφαιρικές συνθήκες και θερμοκρασία εισόδου ελαίου. Τα δεδομένα εισόδου που αφορούν γεωμετρικά χαρακτηριστικά, ατμοσφαιρικές συνθήκες και συνθήκες εισόδου του ελαίου (Syltherm® 800) επιλέχθηκαν σύμφωνα με την αναφορά του πειράματος (Moss & Brosseau, 2005). Στο μοντέλο επιλέχθηκε η επιλογή πλήρους παρακολούθησης της ηλιακής κίνησης, ενώ για την επιλογή διαίρεσης του κατόπτρου, επιλέγησαν 10 τμήματα. Αποκλίσεις μικρότερες του 0.5% παρατηρήθηκαν για όλο το εύρος του πειράματος. Αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα παρουσιάζει το Σχήμα 3.9.

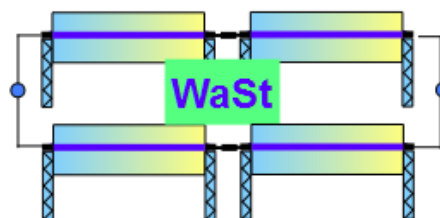


Σχήμα 3.9. Σύγκριση μεταξύ της υπολογιζόμενης και μετρούμενης θερμοκρασίας εξόδου του ελαίου

3.3.2 Μοντέλο νερού/ατμού

Το μοντέλο των παραβολικών κατόπτρων με εργαζόμενο μέσο νερό/ατμό υλοποιείται ακολουθώντας ακριβώς την ίδια διαδικασία που περιγράφηκε και στην περίπτωση του μοντέλου ελαίου. Η διαφορά έγκειται στην περίπτωση ύπαρξης διαφασικού μείγματος κατά την ατμοποίηση του νερού. Έτσι, η ποσότητα \dot{q}'_{12conv} υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (2.34) και (2.35), ενώ η πτώση πίεσης υπολογίζεται από τη σχέση (2.50).

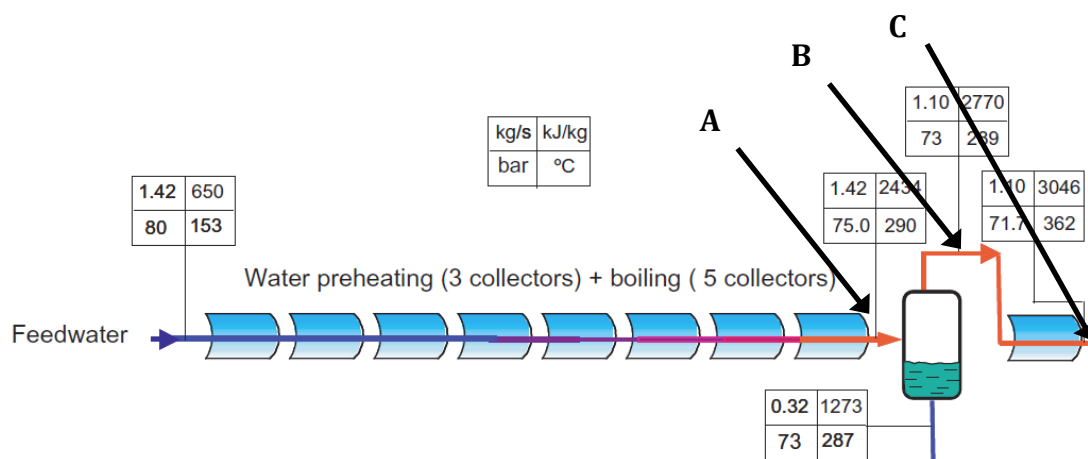
Τη σχηματική απεικόνιση του Component στο PROOSIS παρουσιάζει το Σχήμα 3.10.



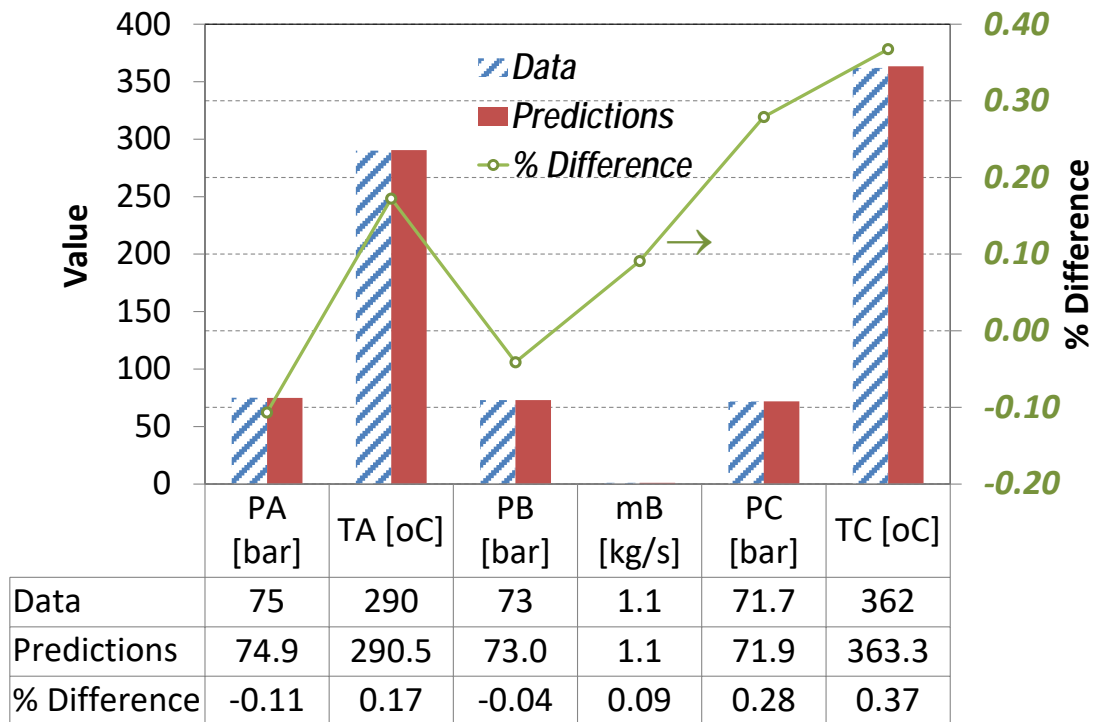
Σχήμα 3.10. Απεικόνιση Component μοντέλου παραβολικών κατόπτρων (νερού/ατμού) στο PROOSIS

Ο έλεγχος της πιστότητας υπολογισμών της συνιστώσας πραγματοποιείται μέσω προσομοίωσης του πειράματος χρήσης των παραβολικών κατόπτρων για άμεση ατμοποίηση του νερού (Zarza, Rojas, González, Caballero, & Rueda, 2006). Η πειραματική διάταξη (Σχήμα 3.11)

αφορά την προθέρμανση και την εν μέρει ατμοποίηση του νερού εισόδου. Στη συνέχεια, χρησιμοποιείται μια διάταξη διαχωρισμού της υγρής και της αέριας φάσης, ώστε η παροχή του ατμού να τροφοδοτηθεί στα κάτοπτρα που επιτελούν την υπερθέρμανση. Τα δεδομένα εισόδου που αφορούν γεωμετρικά χαρακτηριστικά, ατμοσφαιρικές συνθήκες και συνθήκες εισόδου του νερού επιλέχθηκαν σύμφωνα με την εργασία που περιγράφει τη διάταξη (Zarza et al., 2006). Το κάθε κάτοπτρο (μέσω της κατάλληλης επιλογής του μοντέλου) διαιρέθηκε σε 10 τμήματα. Επιπλέον, το μοντέλο χρησιμοποιεί υπόθεση λείου αγωγού για τον υπολογισμό των απωλειών πίεσης, ενώ η πειραματική διάταξη αναφέρει τη σχετική τραχύτητα του αγωγού. Από τον υπολογισμό της τιμής του αριθμού Reynolds για τα χαρακτηριστικά του νερού τροφοδοσίας και με τη χρήση διαγράμματος Moody, επιλέγεται η τιμή 1.6 για τον συντελεστή διόρθωσης του συντελεστή απωλειών πίεσης. Επιπλέον, για τα κάτοπτρα που επιτελούν την ατμοποίηση, ο συντελεστής αυτός αυξάνεται κατά 7. Η μεγαλύτερη απόκλιση σε αυτή τη συνιστώσα έχει να κάνει με την έντονη διαφοροποίηση των απωλειών πίεσης κατά τις διάφορες καταστάσεις αλλαγής φάσης. Όπως ειπώθηκε, χρησιμοποιείται το γενικό μοντέλων απωλειών που παρουσιάζει μεγάλες αποκλίσεις και συνεπώς απαιτείται η περαιτέρω διόρθωση των απωλειών πίεσης μέσω του συντελεστή. Η σύγκριση αφορά τις τιμές της πίεσης και της θερμοκρασίας στην έξοδο των κατόπτρων ατμοποίησης (θέση A), της πίεσης και παροχής στην είσοδο (θέση B) και της πίεσης και θερμοκρασίας στην έξοδο (θέση C) των κατόπτρων υπερθέρμανσης. Παρατηρήθηκαν αποκλίσεις μικρότερες του 0.5%. Τη σύγκριση υπολογιζόμενων και μετρούμενων μεγεθών παρουσιάζει το Σχήμα 3.12.



Σχήμα 3.11. Πειραματική διάταξη άμεσης ατμοποίησης σε παραβολικά κάτοπτρα (Zarza et al., 2006)



Σχήμα 3.12. Σύγκριση μεταξύ της υπολογιζόμενης και μετρούμενης πίεσης, θερμοκρασίας και παροχής του νερού/ατμού

3.4 Μοντέλο επίπεδων κατόπτρων

Περιγράφεται το αναπτυχθέν μοντέλο της προσομοίωσης της λειτουργίας των επίπεδων κατόπτρων, καθώς και αυτό που υπολογίζει τη θέση του κάθε κατόπτρου στο χώρο.

Το πρώτο μοντέλο χρησιμοποιείται σε διατάξεις πύργου και υπολογίζει τη συνολική θερμική ισχύ από τα επίπεδα κάτοπτρα προς το δέκτη του πύργου.

Το δεύτερο μοντέλο προσδιορίζει τις συντεταγμένες της θέσης του κάθε επίπεδου κατόπτρου σε σχέση με τη θέση του πύργου. Παράγει δηλαδή ένα πεδίο κατόπτρων στην περίπτωση που δεν υπάρχει κάποιο διαθέσιμο.

3.4.1 Μοντέλο προσομοίωσης πεδίου κατόπτρων

Το μοντέλο αυτό υπολογίζει τη συνολική θερμική ισχύ από τα επίπεδα κάτοπτρα προς το δέκτη του πύργου.

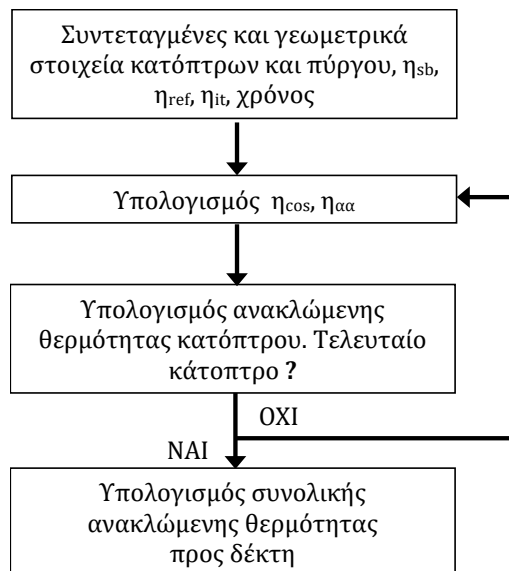
Το μοντέλο έχει σαν εισόδους τον αριθμό, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τις συντεταγμένες των κατόπτρων που περιέχονται σε κατάλληλο αρχείο. Επιπλέον, δεδομένα εισόδου αποτελούν οι τιμές (σταθερές) των συντελεστών: απωλειών σκίασης – παρεμπόδισης (η_{sb}), απωλειών λόγω μη τέλειας εστίασης (η_{it}) και ανάκλασης κατόπτρου (η_{ref}). Οι συντελεστές η_{ref} και η_{it} εξαρτώνται μόνο από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά και τον έλεγχο της θέσης του κατόπτρου και οι τιμές των μεταβλητών αυτών εκτιμώνται με βάση όσα αναφέρονται στη βιβλιογραφία (Collado, 2008; NREL, 2014b; SERI, 1985). Ο

συντελεστής η_{sb} εξαρτάται τόσο από τη σχετική θέση των κατόπτρων, όσο και από τη χρονική στιγμή της μελέτης αλλά στην εργασία αυτή λαμβάνει μια σταθερή μέση τιμή σύμφωνα με τα όσα περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 2 (Παράγραφος 2.2.2.1).

Εν συνεχεία, για κάθε κάτοπτρο ξεχωριστά, υπολογίζεται συντελεστής απωλειών λόγω της ατμόσφαιρας μεταξύ κατόπτρου και δέκτη ($\eta_{αα}$) από τη σχέση (2.53). Επιπλέον, για κάθε κάτοπτρο και για κάθε εξεταζόμενη χρονική στιγμή, υπολογίζεται από τη σχέση (2.58) ο συντελεστής απωλειών συνημίτονου με τη χρήση των σχέσεων (2.54)-(2.57).

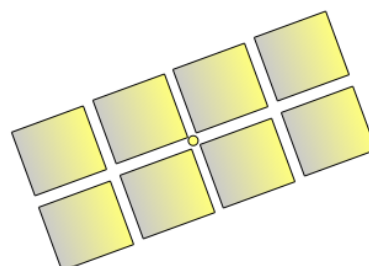
Συνεπώς, με τη χρήση της σχέσης (2.52) υπολογίζεται η ανακλώμενη εκ του κατόπτρου ηλιακή θερμική ισχύς προς τον δέκτη του πύργου.

Τέλος, η προαναφερθείσα διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε κάτοπτρο ξεχωριστά και από τη σχέση (2.51) υπολογίζεται η συνολική ανακλώμενη θερμική ισχύς προς τον δέκτη. Τη διαδικασία συνοψίζει το Σχήμα 3.13.



Σχήμα 3.13. Διαδικασία μοντελοποίησης λειτουργίας επίπεδων κατόπτρων

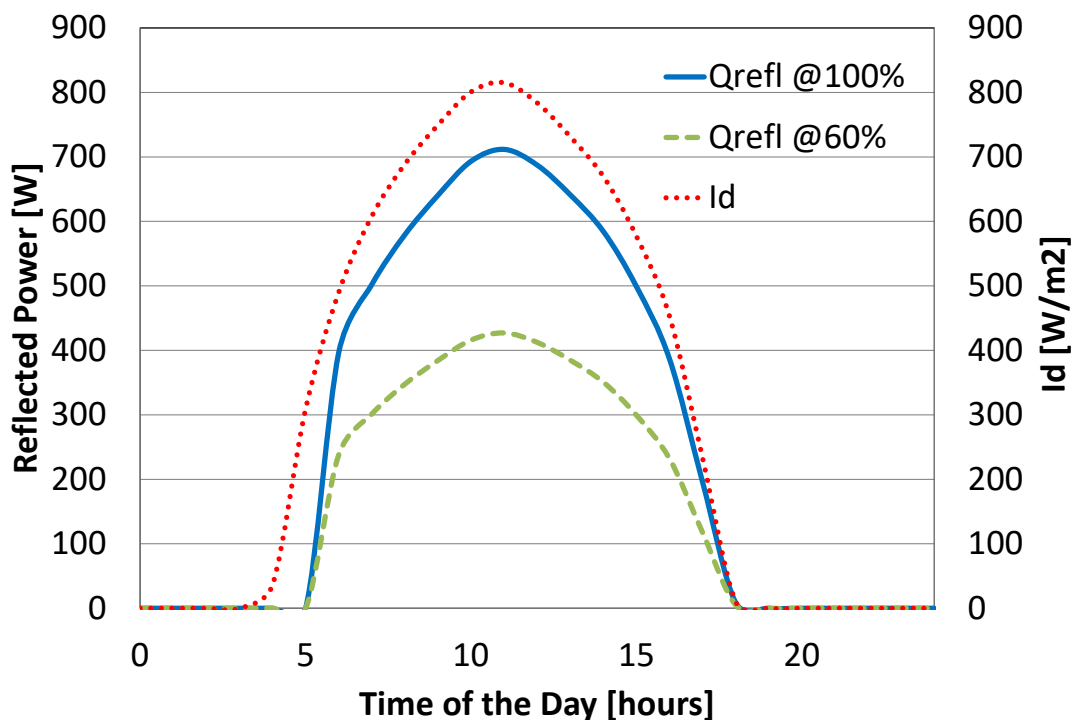
Τη σχηματική απεικόνιση του Component στο PROOSIS παρουσιάζει το Σχήμα 3.14.



Σχήμα 3.14. Απεικόνιση Component μοντέλου επίπεδων κατόπτρων στο PROOSIS

Η πιστοποίηση της σωστής λειτουργίας του μοντέλου πραγματοποιείται μέσω της προσομοίωσης παραδείγματος υπολογισμού της γωνίας πρόσπτωσης (Stine & Geyer, 2001) που αποτελεί και τον κύριο παράγοντα απωλειών. Το παράδειγμα εξετάζει ένα κάτοπτρο τοποθετημένο 50m N και 100m E από τον πύργο, με σημείο στόχευσης 200m πάνω από το ύψος του, για γωνίες αζιμούθιου και ηλιακού ύψους 180° και 50° αντίστοιχα. Η υπολογισθείσα τιμή της γωνίας πρόσπτωσης καθώς και η δοθείσα από το παράδειγμα ταυτίζονται (18.002deg και 18deg αντίστοιχα).

Επίσης, πραγματοποιείται και ποιοτική επαλήθευση της σωστής συμπεριφοράς του μοντέλου προσομοιώνοντας τη λειτουργία ενός κατόπτρου 1m² τοποθετημένου βόρεια σε απόσταση ίση με το 75% του ύψους του πύργου, για το θερινό ηλιοστάσιο και για συντελεστές ανάκλασης 100% και 60%. Την ανακλώμενη θερμική ισχύ για τις δύο τιμές του συντελεστή, καθώς και την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας παρουσιάζει το Σχήμα 3.15. Όπως αναμενόταν, το ποσό της ανακλώμενης θερμικής ισχύος μειώνεται καθώς μειώνεται η τιμή του συντελεστή ανάκλασης.



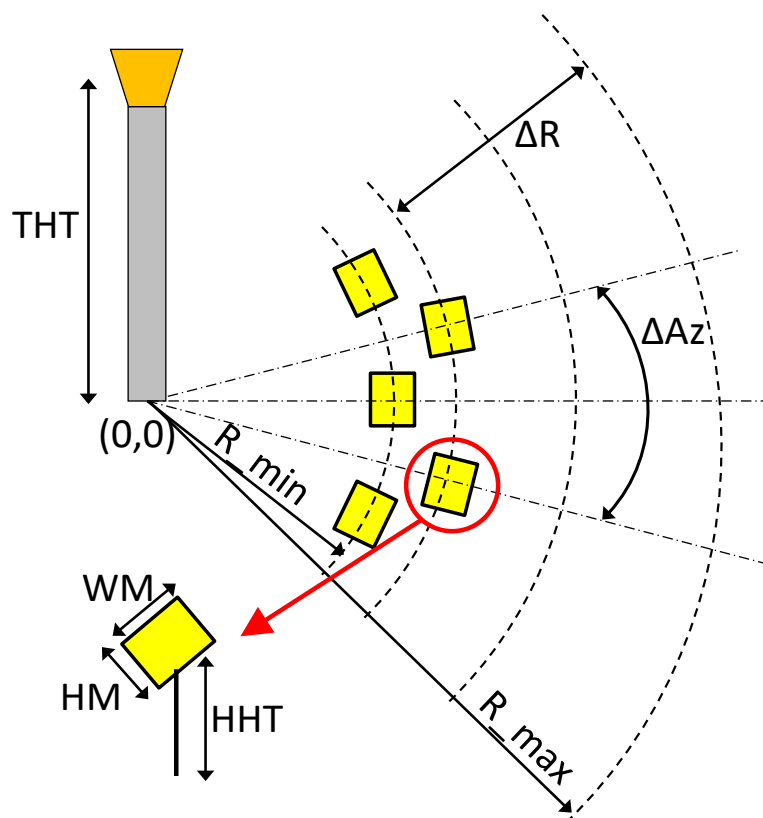
Σχήμα 3.15. Ανακλώμενη θερμική ισχύς από κάτοπτρο για δύο τιμές του συντελεστή ανάκλασης

3.4.2 Μοντέλο προσδιορισμού θέσης κατόπτρων

Το μοντέλο αυτό παράγει ένα πεδίο κατόπτρων, δηλαδή προσδιορίζει τις συντεταγμένες κάθε κατόπτρου του πεδίου σε σχέση με τη βάση του πύργου, με βάση τις σχέσεις (2.59) και (2.60). Το μοντέλο με τη μορφή εκτελέσιμου κώδικα (.exe), δημιουργεί αρχείο το οποίο περιέχει τις συντεταγμένες και το ύψος του

πύργου, καθώς και τις συντεταγμένες και το ύψος του κάθε κατόπτρου. Έτσι, στη περίπτωση που δεν είναι διαθέσιμη η πληροφορία της θέσης των κατόπτρων, αυτή μπορεί να εκτιμηθεί με τη χρήση του εκτελέσιμου κώδικα σε επίπεδο Experiment.

Ο πύργος θεωρείται πως βρίσκεται στη θέση (0,0). Δεδομένα εισόδου αποτελούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κατόπτρου (μήκος HM, πλάτος WM, ύψος, HHT), το ύψος του δέκτη (THT) καθώς και η ελάχιστη (R_min) και η μέγιστη ακτίνα (R_max) κύκλου (ανηγμένες ως προς το ύψος του δέκτη) που επί των οποίων δύναται να βρεθεί κάτοπτρο (Σχήμα 3.16).



Σχήμα 3.16. Απεικόνιση διάταξης επίπεδων κατόπτρων και γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους

Οι ισο-ακτινικές γραμμές πάνω στις οποίες βρίσκονται κάτοπτρα διακρίνονται σε μονές και σε ζυγές.

Μονές ισο-ακτινικές γραμμές: Αρχικά, για την ελάχιστη απόσταση-ακτίνα R_min, υπολογίζεται η γωνία θ_L και η απόσταση από τη βάση του πύργου (RD). Κατόπιν, από τη σχέση (2.59) υπολογίζεται η απόσταση μέχρι την επόμενη μονή ισο-ακτινική γραμμή (ΔR) ενώ από τη σχέση (2.60) η ισο-αζιμουθιακή απόσταση μεταξύ των κατόπτρων που βρίσκονται επάνω στην ισο-ακτινική γραμμή (ΔAz). Με γνώση της ισο-ακτινικής γραμμής και της αζιμουθιακής απόστασης μεταξύ των κατόπτρων, πραγματοποιείται σάρωση στο εύρος (0° - 180°) (ημικύκλιο) και προσδιορίζονται οι συντεταγμένες των κατόπτρων. Η διαδικασία

επαναλαμβάνεται μέχρι η ισο-ακτινική απόσταση να ξεπεράσει τη μέγιστη (R_{max}).

Ζυγές ισο-ακτινικές γραμμές: Πραγματοποιείται η ίδια διαδικασία, αλλά η πρώτη ακτίνα προσδιορίζεται αθροίζοντας την ελάχιστη (R_{min}) και το ήμισυ της ακτινικής απόστασης (ΔR) όπως προέκυψε για την πρώτη μονή ισο-ακτινική γραμμή.

3.5 Μοντέλα δεκτών πύργου

Περιγράφονται τα μοντέλα δεκτών πύργου που αναπτύχθηκαν. Τα μοντέλα αυτά υπολογίζουν τη θερμοδυναμική κατάσταση εξόδου του ρευστού από το δέκτη διάταξης πύργου. Αναπτύχθηκαν μοντέλα για διαφορετικά εργαζόμενα μέσα, τα οποία είναι:

- 1) Μοντέλο δέκτη αέρα
- 2) Μοντέλο δέκτη νερού/ατμού
- 3) Μοντέλο δέκτη ελαίου/αλάτων
- 4) Μοντέλο δέκτη διπλής ροής

3.5.1 Μοντέλο δέκτη αέρα

Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται στην περίπτωση που το εργαζόμενο μέσο είναι αέρας και υπολογίζει τη θερμοδυναμική του κατάσταση στην έξοδο του δέκτη.

Οι συντελεστές οπτικών απωλειών (η_{opt}), θερμικής απορρόφησης του δέκτη (α_{rec}) και εκπομπής ακτινοβολίας του δέκτη (ϵ_{rec}) και η επιφάνεια του παραθύρου (A_{rec}) που εισέρχεται η ανακλώμενη εκ των κατόπτρων θερμότητα, αποτελούν δεδομένα εισόδου και έχουν σταθερές επιλεγμένες τιμές. Επίσης, δεδομένο εισόδου αποτελεί και η μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου στην έξοδο του δέκτη. Τέλος, δίδεται τιμή στο συντελεστή απωλειών πίεσης του δέκτη στο σημείο σχεδίασης ($K_{rec,DP}$) καθώς και στην ανηγμένη παροχή σχεδίασης ($W_{cor,DP}$).

Το μοντέλο του δέκτη επικοινωνεί με το μοντέλο των επίπεδων κατόπτρων και λαμβάνει την τιμή της ανακλώμενης θερμική ισχύος (Q_{in}), ενώ «γνωρίζει» και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος η οποία και αποτελεί γενική μεταβλητή.

Τέλος, το μοντέλο λαμβάνει ως είσοδο και τα χαρακτηριστικά της ροής εισόδου (παροχή, πίεση, θερμοκρασία, υγρασία, λόγο καυσίμου/αέρα). Το μοντέλο περιλαμβάνει κατάλληλη επιλογή ενεργούς ή μη λειτουργίας. Αν η επιλογή αυτή τεθεί στη μη λειτουργία, τότε τα χαρακτηριστικά της ροής εξόδου ταυτίζονται με αυτά της εισόδου. Ουσιαστικά, ο δέκτης παρακάμπτεται. Σε αντίθετη περίπτωση ισχύουν τα όσα αναφέρονται στη συνέχεια.

Στο μοντέλο, υπάρχει η δυνατότητα επιλογής του τρόπου εκτίμησης των απωλειών πίεσης. Αν η επιλογή αυτή τεθεί στη χρήση του συντελεστή απωλειών

σχεδίασης, τότε το μοντέλο υπολογίζει την πίεση εξόδου με τη χρήση της σχέσης (2.63) για οποιοδήποτε σημείο λειτουργίας. Αν η επιλογή αυτή τεθεί στον υπολογισμό των απωλειών με βάση την πραγματική ανηγμένη παροχή, τότε χρησιμοποιείται η σχέση (2.64).

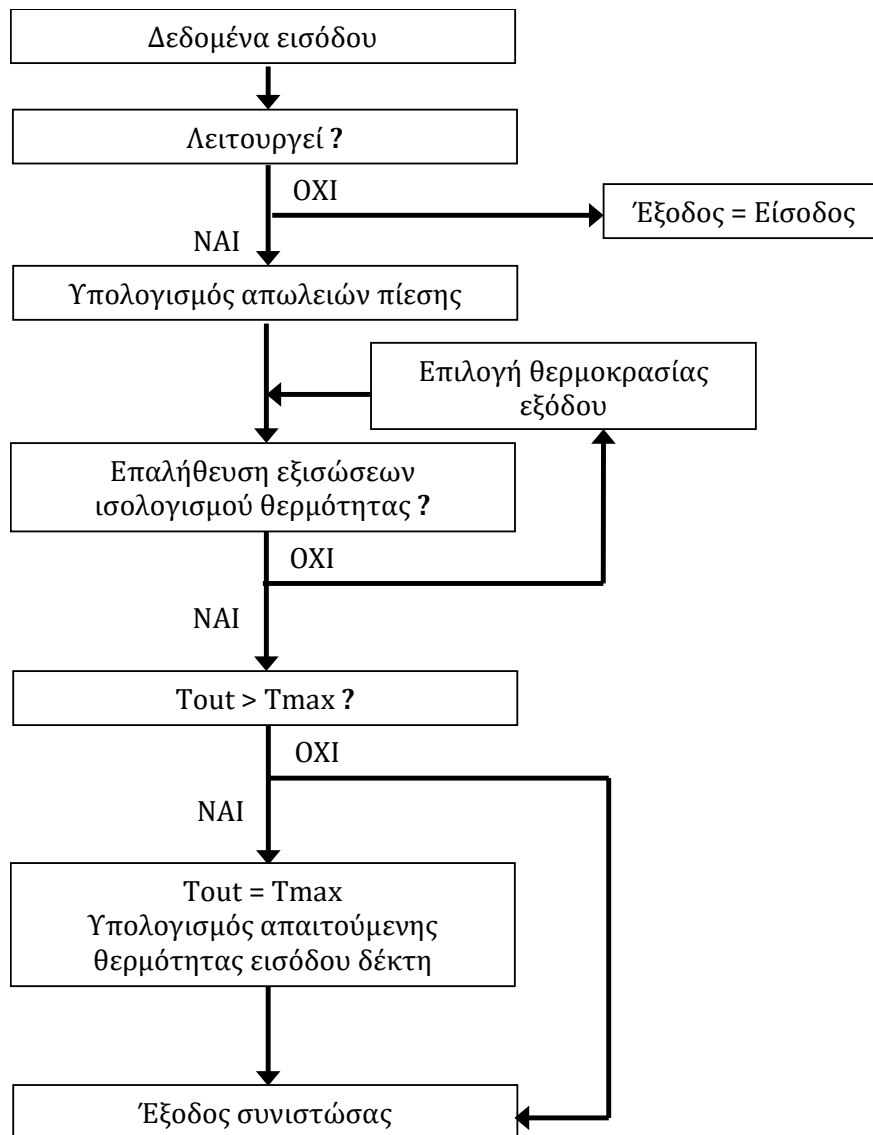
Κατά την λειτουργία του μοντέλου, αρχικά δίνονται στις μεταβλητές εξόδου παροχής, υγρασίας και λόγου καυσίμου/αέρα, οι τιμές εισόδου τους αφού από το δέκτη συντελείται μόνο θέρμανση. Εν συνεχεία, υπολογίζεται η πίεση εξόδου από τη σχέση (2.63) ή (2.64). Από τα χαρακτηριστικά της ροής εισόδου, υπολογίζεται και η ενθαλπία εισόδου.

Για τον προσδιορισμό των απωλειών θερμότητας απαιτείται η γνώση της μέσης θερμοκρασίας και συνεπώς της θερμοκρασίας εξόδου η οποία και αποτελεί ζητούμενο. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος χρησιμοποιείται επαναληπτική διαδικασία μέσω της συνάρτησης `zreal`¹ του PROOSIS. Αρχικά, εκτιμάται η θερμοκρασία εξόδου, και συνεπώς, η μέση θερμοκρασία και η ενθαλπία εξόδου. Έτσι, από τις σχέσεις (2.61) και (2.62) υπολογίζονται δύο διαφορετικές τιμές του απορροφώμενου ποσού θερμότητας (Q) από το εργαζόμενο μέσο. Αν οι δύο αυτές τιμές συμπίπτουν τότε η αρχική εκτίμηση της θερμοκρασίας εξόδου είναι σωστή. Σε αντίθετη περίπτωση, η συνάρτηση `zreal` επαναπροσδιορίζει την αρχική εκτίμηση έως της σύγκλισης.

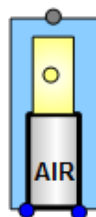
Αν η θερμοκρασία εξόδου από την προαναφερθείσα διαδικασία προκύψει μεγαλύτερη της μέγιστης επιτρεπτής που έχει τεθεί, σημαίνει πως πρέπει να μειωθεί η προσδιδόμενη θερμική ισχύς στο δέκτη μέσω της από-εστίασης αριθμού κατόπτρων. Σε αυτή την περίπτωση, η θερμοκρασία εξόδου λαμβάνει τη μέγιστη επιτρεπτή τιμή και υπολογίζεται η ενθαλπία εξόδου. Η απορροφώμενη θερμότητα από τον αέρα υπολογίζεται από τη σχέση (2.62). Εν συνεχεία, μέσω της σχέσης (2.61) υπολογίζεται η απαιτούμενη θερμότητα εισόδου στον δέκτη. Η διαφορά της αρχικά εισερχόμενης θερμότητας στο δέκτη με την υπολογισθείσα απαιτούμενη δίδει το απορριπτόμενο και αναξιοποίητο ποσό θερμότητας που θα προέκυπτε από την από-εστίαση των κατόπτρων (Παράγραφος 2.2.3.1).

Τη διαδικασία μοντελοποίησης της λειτουργίας του δέκτη συνοψίζει το Σχήμα 3.17, ενώ τη σχηματική απεικόνιση του Component στο PROOSIS παρουσιάζει το Σχήμα 3.18.

¹ Η συνάρτηση `zreal` που περιέχεται στο PROOSIS εκτιμά τη λύση μιας εξίσωσης με τη μέθοδο της διχοτόμου



Σχήμα 3.17. Διαδικασία μοντελοποίησης δέκτη πύργου



Σχήμα 3.18. Απεικόνιση Component μοντέλου δέκτη αέρα στο PROOSIS

Για να ελεγχθεί η πιστότητα υπολογισμών της συνιστώσας αυτής, πραγματοποιείται προσομοίωση του πειράματος (Dickey, 2011) χρήσης επίπεδων κατόπτρων και δέκτη πύργου για την προθέρμανση του αέρα πριν αυτός εισέλθει στον θάλαμο καύσης μικροτουρμπίνας (Σχήμα 3.19). Με βάση τις ατμοσφαιρικές συνθήκες και το μέγεθος του πεδίου κατόπτρων, υπολογίζεται κατά την εκτέλεση του πειράματος η ολική εισερχόμενη ενέργεια στον δέκτη,

ενώ τα χαρακτηριστικά της ροής εισόδου αποτελούν μετρούμενα μεγέθη. Τα χαρακτηριστικά εισόδου που μετρήθηκαν/υπολογίστηκαν κατά την εκτέλεση του πειράματος και χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου στο μοντέλο προσομοιώσεως παρουσιάζει ο Πίνακας 3.1.

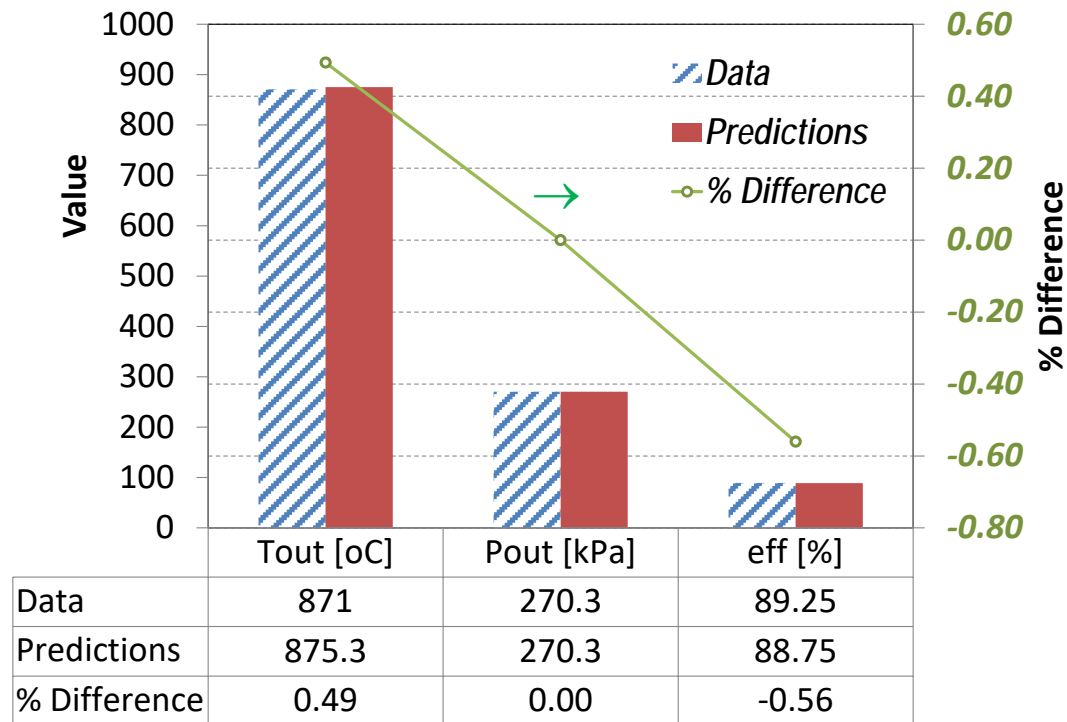


Σχήμα 3.19. Πειραματική διάταξη υβριδικού αεριοστροβίλου (Dickey, 2011)

Παράμετρος	Τιμή
Θερμική ισχύς εισόδου [kW]	175
Παροχή εισόδου [kg/s]	0.41
Πίεση εισόδου [kPa]	273.2
Θερμοκρασία εισόδου [°C]	542
Θερμοκρασία περιβάλλοντος [°C]	43.3
Συντελεστής απωλειών πίεσης [%]	1.06

Πίνακας 3.1. Μετρηθείσες/υπολογισθείσες τιμές κατά την διεξαγωγή του πειράματος (Dickey, 2011)

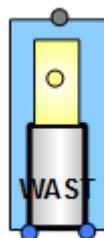
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για την πίεση και την θερμοκρασία εξόδου καθώς και για τον συνολικό βαθμό απόδοσης του δέκτη συγκρίνονται με αυτά που μετρήθηκαν/υπολογίστηκαν κατά την εκτέλεση του πειράματος. Τις υπολογισθείσες και μετρηθείσες παραμέτρους, καθώς και την ποσοστιαία διαφορά τους απεικονίζει το Σχήμα 3.20, όπου και παρατηρούνται αποκλίσεις της τάξης του 0.5%.



Σχήμα 3.20. Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου και πειράματος για δέκτη αέρα

3.5.2 Μοντέλο δέκτη νερού/ατμού

Το μοντέλο αυτό λειτουργεί όπως και το μοντέλο του δέκτη αέρα. Η διαφορά έγκειται στις μεταβλητές της ροής που πλέον είναι η παροχή, η θερμοκρασία, η πίεση και η ξηρότητα. Επίσης, διαφοροποιείται και η επαναληπτική διαδικασία, αφού, η τιμή της θερμοκρασίας εξόδου δεν καθορίζει και την ενθαλπία εξόδου. Ειδικότερα, στη περίπτωση διφασικού μείγματος, η θερμοκρασία παραμένει σταθερή για διάφορες τιμές της ενθαλπίας με αλλαγή όμως της τιμής της ξηρότητας. Συνεπώς, στη συνάρτηση zreal γίνεται αρχική εκτίμηση της ενθαλπίας εξόδου. Με τη χρήση της τιμής της πίεσης εξόδου προσδιορίζεται και η θερμοκρασία εξόδου και η διαδικασία συνεχίζεται όπως περιγράφηκε στην περίπτωση του δέκτη αέρα. Τη σχηματική απεικόνιση του Component στο PROOSIS παρουσιάζει το Σχήμα 3.21.

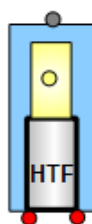


Σχήμα 3.21. Απεικόνιση Component μοντέλου δέκτη νερού/ατμού στο PROOSIS

3.5.3 Μοντέλο δέκτη ελαίου/αλάτων

Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται στην περίπτωση που το εργαζόμενο μέσο του δέκτη είναι έλαιο/άλας. Ισχύουν τα όσα αναφέρθηκαν στην περίπτωση του μοντέλου αέρα με τη διαφοροποίηση πως πλέον ως δεδομένα ροής εισόδου είναι η πίεση, η θερμοκρασία και η παροχή του ελαίου/άλατος και τα απαιτούμενα θερμοδυναμικά μεγέθη υπολογίζονται με τη χρήση των αντίστοιχων εξισώσεων για αυτό το εργαζόμενο μέσο.

Τη σχηματική απεικόνιση του Component στο PROOSIS παρουσιάζει το Σχήμα 3.22.



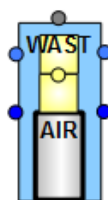
Σχήμα 3.22. Απεικόνιση Component μοντέλου δέκτη ελαίου/αλάτων στο PROOSIS

3.5.4 Μοντέλο Δέκτη Διπλής Ροής

Το μοντέλο αυτό αποτελεί συνδυασμό των μοντέλων αέρα και νερού/ατμού. Θεωρείται πως υπάρχουν δύο δέκτες: ο κύριος (δέκτης αέρα) και ο δευτερεύων (δέκτης νερού/ατμού).

Αρχικά, υλοποιείται η διαδικασία που περιγράφηκε για τον δέκτη αέρα. Στην περίπτωση που η θερμοκρασία εξόδου υπερβεί τη μέγιστη επιλεγείσα επιτρεπτή, υπολογίζεται, με βάση τα όσα ειπώθηκαν, η απορριπτόμενη θερμική ισχύς. Αυτή η θερμική ισχύς αποτελεί την είσοδο (Q_{in}) στον δευτερεύοντα δέκτη, ο οποίος λειτουργεί όπως περιγράφηκε ανωτέρω. Ουσιαστικά, θεωρείται ότι τα από-εστιασμένα κάτοπτρα εστιάζονται σε δεύτερο δέκτη, άνωθεν του κύριου.

Τη σχηματική απεικόνιση του Component στο PROOSIS παρουσιάζει το Σχήμα 3.23.



Σχήμα 3.23. Απεικόνιση Component μοντέλου δέκτη διπλής ροής στο PROOSIS

3.6 Μοντέλα εναλλακτών θερμότητας

Περιγράφονται τα μοντέλα εναλλακτών αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας. Οι εναλλάκτες θερμότητας σε μια ηλιοθερμική διάταξη υλοποιούν

το κομμάτι της ατμοπαραγωγής. Το μέσο που προσδίδει θερμότητα στο νερό για την ατμοποίησή του μπορεί να είναι καυσαέρια (συνδυασμένος κύκλος) ή θερμό έλαιο/άλας (υβριδικός ατμοστρόβιλος). Επίσης, η λειτουργία της διάταξης έμμεσης αποθήκευσης απαιτεί τη χρήση εναλλακτών θερμότητας ελαίου/ελαίου. Τέλος, εναλλάκτης θερμότητας χρησιμοποιείται και για τη διαδικασία της συμπύκνωσης στον κύκλο Rankine.

3.6.1 Μοντέλο εναλλάκτη αισθητής θερμότητας

Το μοντέλο αυτό υπολογίζει τη θερμοδυναμική κατάσταση εξόδου των δύο ρευμάτων από εναλλάκτη αισθητής θερμότητας με γνωστή την κατάσταση εισόδου τους. Σε κανένα από τα δύο ρεύματα δεν συντελείται αλλαγή φάσης.

Σημειώνεται, πως και σε αυτήν τη συνιστώσα (όπως και στους δέκτες πύργου) υπάρχει κατάλληλη επιλογή παράκαμψης και συνεπώς τα χαρακτηριστικά των ρευμάτων εξόδου ταυτίζονται με αυτά της εισόδου.

Δεδομένα εισόδου στο μοντέλο (εκτός από τα θερμοδυναμικά μεγέθη εισόδου των ρευμάτων) είναι οι παροχές, οι συντελεστές πτώσης πίεσης και οι ανηγμένες παροχές στο σημείο σχεδίασης των δύο ρευμάτων καθώς και η ποσότητα UA.

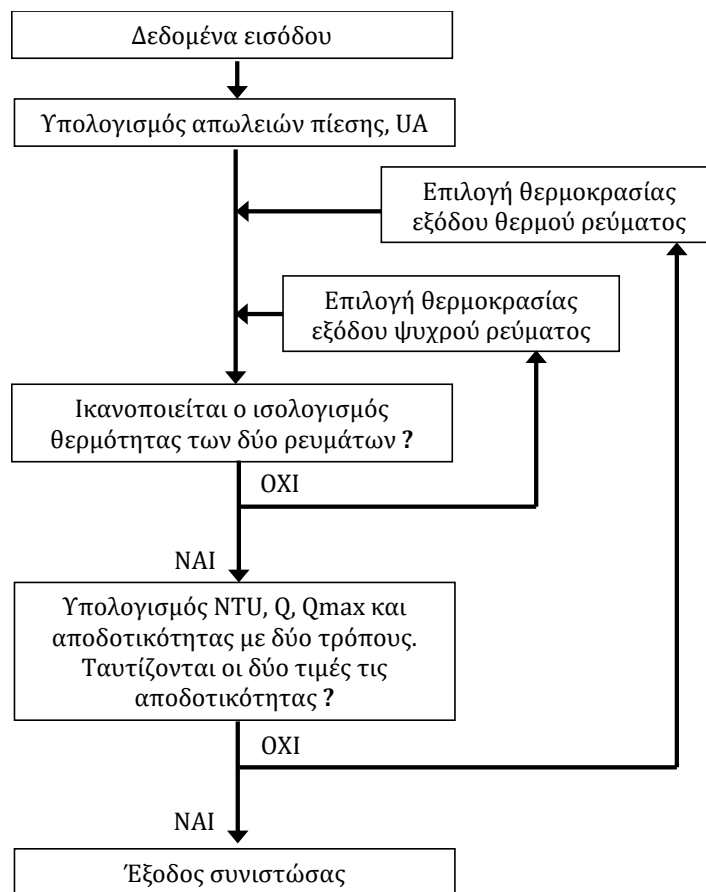
Για κάθε ρεύμα και σε αυτήν τη συνιστώσα υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμού των απωλειών πίεσης με σταθερή τιμή του συντελεστή απωλειών πίεσης ή υπολογισμού του με χρήση της ανηγμένης παροχής, όπως περιγράφηκε και στις συνιστώσες των δεκτών πύργου.

Επιπλέον, υπάρχει η επιλογή προσομοίωσης της λειτουργίας με σταθερή τιμή της ποσότητας UA ή υπολογισμού αυτής με χρήση της τιμής της στο σημείο σχεδίασης και της συσχέτισης των παροχών των δύο ρευμάτων με τις παροχές σχεδίασης.

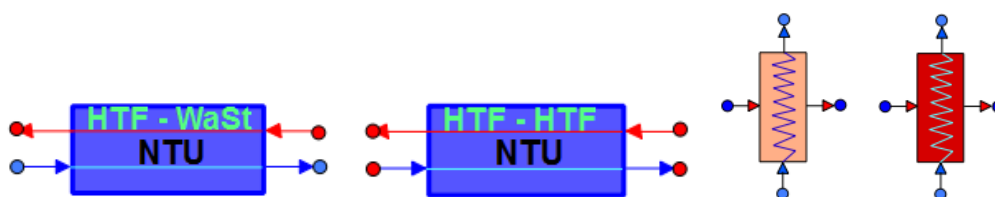
Αρχικά, το μοντέλο υπολογίζει την πίεση εξόδου του κάθε ρεύματος από τη σχέση (2.63) ή (2.64) και την ποσότητα UA από τη σχέση (2.71).

Στη συνέχεια ακολουθείται επαναληπτική διαδικασία για τον προσδιορισμό των θερμοκρασιών εξόδου των δύο ρευμάτων μέσω της συνάρτησης z_{real} . Η εν λόγω συνάρτηση χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας εξόδου του θερμού ρεύματος με χρήση αρχικής υπόθεσής της. Κατόπιν, χρησιμοποιείται δεύτερη συνάρτηση z_{real} για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας εξόδου του ψυχρού ρεύματος ώστε να ικανοποιείται η σχέση (2.66). Δηλαδή προσδιορίζεται η θερμοκρασία εξόδου του ψυχρού ρεύματος (με βάση την υπόθεση της θερμοκρασίας εξόδου του θερμού ρεύματος) για την οποία ισχύει ο θερμοκός ισολογισμός της μεταφοράς θερμότητας μεταξύ των δύο ρευμάτων. Ακολούθως, για τη μέση θερμοκρασία του κάθε ρεύματος υπολογίζονται οι ποσότητες C_{min} και C_{max} και συνεπώς και η ποσότητα NTU (σχέση (2.65)). Κατόπιν, υπολογίζεται και η ποσότητα Q_{max} από τη σχέση (2.66). Τέλος, υπολογίζεται η αποδοτικότητα του εναλλάκτη από τις σχέσεις (2.66) και (2.67). Αν οι υπολογιζόμενες τιμές δεν ταυτίζονται, η συνάρτηση z_{real}

επαναπροσδιορίζει την τιμή της θερμοκρασίας εξόδου του θερμού ρεύματος έως της σύγκλισης. Συνεπώς, στο τέλος της διαδικασίας είναι προσδιορισμένες οι θερμοκρασίες εξόδου των δύο ρευμάτων. Τη διαδικασία συνοψίζει το Σχήμα 3.24, ενώ τη σχηματική απεικόνιση των Components στο PROOSIS παρουσιάζει το Σχήμα 3.25.



Σχήμα 3.24. Διαδικασία μοντελοποίησης εναλλάκτη αισθητής θερμότητας



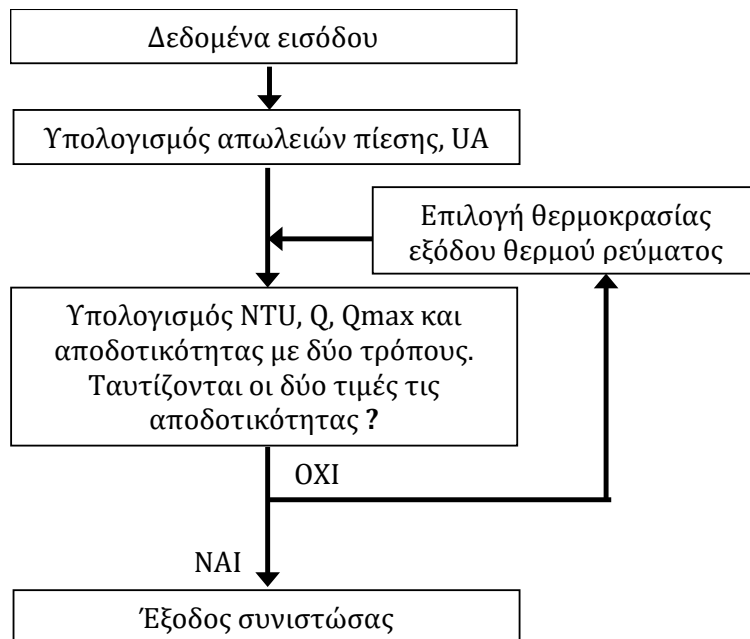
Σχήμα 3.25. Απεικόνιση Components μοντέλων εναλλακτών αισθητής θερμότητας στο PROOSIS

3.6.2 Μοντέλο εναλλάκτη λανθάνουσας θερμότητας

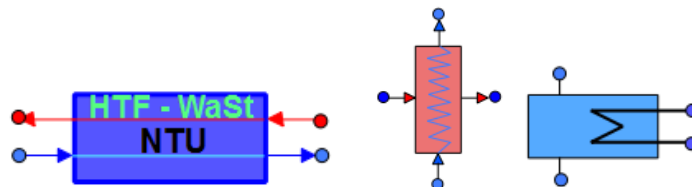
Το μοντέλο αυτό υπολογίζει τη θερμοδυναμική κατάσταση εξόδου των δύο ρευμάτων από εναλλάκτη αισθητής θερμότητας με γνωστή την κατάσταση εισόδου τους, με αλλαγή φάσης στο ψυχρό ρεύμα.

Τα δεδομένα εισόδου της συνιστώσας και οι επιλογές περί απωλειών και UA είναι όπως περιγράφηκαν για τη συνιστώσα του εναλλάκτη πρόσδοσης αισθητής θερμότητας.

Η διαφορά έγκειται στην επαναληπτική διαδικασία, αφού πλέον η ποσότητα C_{min} αφορά το θερμό ρεύμα. Συγκεκριμένα, η συνάρτηση $zreal$ χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας εξόδου του θερμού ρεύματος με χρήση αρχικής υπόθεσής της. Με βάση την αρχική υπόθεση της εν λόγω θερμοκρασίας, υπολογίζεται η ποσότητα C_{min} για τη μέση θερμοκρασία (σχέση (2.68)), η ποσότητα NTU (σχέση (2.65)) και η αποτελεσματικότητα από τις σχέσεις (2.66) και (2.68). Αν οι υπολογιζόμενες τιμές δεν ταυτίζονται, η συνάρτηση $zreal$ επαναπροσδιορίζει την τιμή της θερμοκρασίας εξόδου του θερμού ρεύματος έως της σύγκλισης. Έτσι, έχει προσδιοριστεί η θερμοκρασία εξόδου του θερμού ρεύματος και το ποσό θερμότητας (Q) που μεταφέρεται στο ψυχρό ρεύμα. Συνεπώς, από τη σχέση (2.66) είναι πλέον δυνατός ο υπολογισμός της ενθαλπίας εξόδου του ψυχρού ρεύματος και συνεπώς η θερμοκρασία και η ξηρότητά του. Τη διαδικασία συνοψίζει το Σχήμα 3.26, ενώ τη σχηματική απεικόνιση των Components στο PROOSIS παρουσιάζει το Σχήμα 3.27.

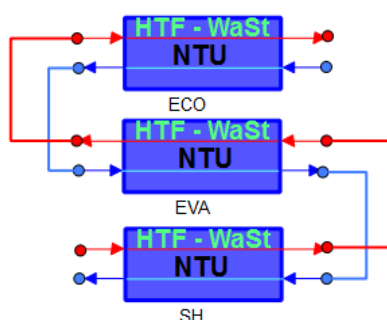


Σχήμα 3.26. Διαδικασία μοντελοποίησης εναλλάκτη λανθάνουσας θερμότητας



Σχήμα 3.27. Απεικόνιση Components μοντέλων εναλλακτών λανθάνουσας θερμότητας στο PROOSIS

Για να ελεγχθεί η πιστότητα υπολογισμών των μοντέλων των εναλλακτών (λανθάνουσας και αισθητής θερμότητας), πραγματοποιείται προσομοίωση υπάρχουσας διάταξης² παραγωγής ατμού από θερμό έλαιο (Patnode, 2006) όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.28. Τις υπολογισθείσες τιμές της τεχνικής έκθεσης της εγκατάστασης για την παροχή, την πίεση, τη θερμοκρασία και την ξηρότητα παρουσιάζει ο Πίνακας 3.2. Επίσης, ο πίνακας περιλαμβάνει και την υπολογισθείσα τιμή της ποσότητας UA από τα χαρακτηριστικά του ρεύματος νερού/ατμού και από τα χαρακτηριστικά του ρεύματος θερμού ελαίου. Προτείνεται η χρήση της τιμής που προκύπτει από το ρεύμα νερού ή ο μέσος όρος των τιμών των δύο ρευμάτων (Patnode, 2006) καθώς υπάρχει αβεβαιότητα σχετικά με τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του θερμού ελαίου.



Σχήμα 3.28. Σχηματική απεικόνιση διάταξης παραγωγής ατμού με τη χρήση θερμού ελαίου

	Economizer - ECO	Evaporator - EVA	SuperHeater - SH
$T_{in,w/s}$ [°C]	234.8	-	-
$T_{out,w/s}$ [°C]	-	-	371.0
$T_{in,HTF}$ [°C]	317.8	377.2	390.6
$T_{out,HTF}$ [°C]	297.8	317.8	377.2
$P_{in,w/s}$ [bar]	103.6	103.4	103.4
$P_{out,w/s}$ [bar]	103.4	103.4	100.0
$X_{in,w/s}$	υπόψυκτο	1	1
$X_{out,w/s}$	0	1	υπέρθερμο
$m_{w/s}$ [kg/s]	39.0	39.0	39.0
m_{HTF} [kg/s]	345.5	345.5	345.5
$UA_{w/s}$	724.0	2051.0	292.5
UA_{HTF}	891.1	2371.0	356.9

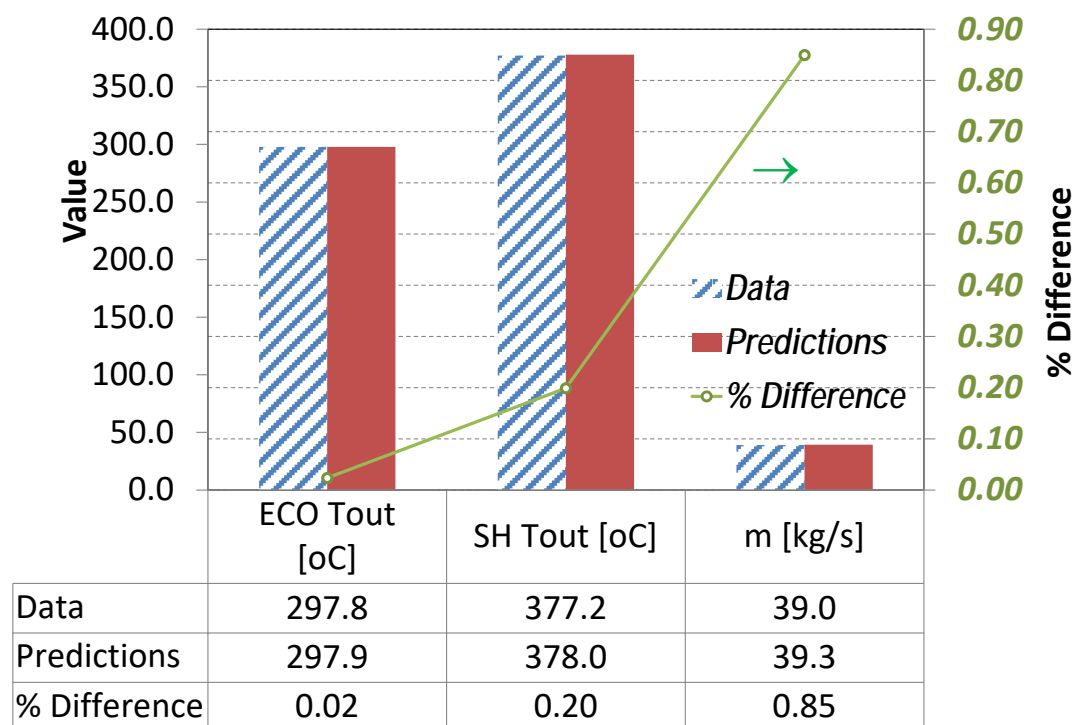
Πίνακας 3.2. Υπολογιζόμενα χαρακτηριστικά ροής διάταξης παραγωγής ατμού με θερμό έλαιο

² Οι συνιστώσες των εναλλακτών έχουν χρησιμοποιηθεί και στη συγκρότηση μοντέλου Λέβητα Ανάκτησης Θερμότητας τριών πέσεων σύγχρονης μονάδας συνδυασμένου κύκλου στα πλαίσια ερευνητικού έργου που εκτελέστηκε στο ΕΘΣ. Το μοντέλο του ΛΑΘ πιστοποιήθηκε με τη χρήση δεδομένων του κατασκευαστή αλλά και με τη χρήση μετρήσεων της εγκατάστασης.

Για την προσομοίωση της διάταξης παραγωγής ατμού και την πιστοποίηση της σωστής λειτουργίας της, ως σκοπός τίθεται ο προσδιορισμός της ποσότητας UA του κάθε εναλλάκτη ώστε να προκύπτει κορεσμένος ατμός στην έξοδο του ατμοποιητή και υπέρθερμος ατμός θερμοκρασίας 371°C στην έξοδο του υπερθερμαντή. Ως δεδομένα εισόδου χρησιμοποιούνται η θερμοκρασία pinch point (ή ισοδύναμα τη θερμοκρασία εξόδου του ελαίου από τον ατμοποιητή), η πίεση και η θερμοκρασία εισόδου του νερού στον οικονομητήρα, η θερμοκρασία και η παροχή θερμού ελαίου στην είσοδο του υπερθερμαντή, η θερμοκρασία εξόδου του θερμού ελαίου στην έξοδο του ατμοποιητή, καθώς και ο συντελεστής πτώσης πίεσης του κάθε εναλλάκτη όπως προσδιορίζεται από τις μετρήσεις πίεσης (Πίνακας 3.2). Λόγω μη αναφοράς σε θερμοκρασία approach, θεωρείται πως ο οικονομητήρας παράγει κορεσμένο νερό. Τέλος, εκτός του προσδιορισμού των UA των εναλλακτών, προσδιορίζεται και η παροχή του νερού έτσι ώστε να προκύπτει κορεσμένο νερό στην έξοδο του ατμοποιητή. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που περιλαμβάνουν τις τιμές των UA των εναλλακτών, τις τιμές της θερμοκρασίας του ελαίου στην έξοδο του κάθε εναλλάκτη και την παροχή νερού απεικονίζει ο Πίνακας 3.3. Τη σύγκριση ανάμεσα στις υπολογισθείσες και τις τιμές των παραμέτρων της αναφοράς παρουσιάζει το Σχήμα 3.29. Από τη σύγκριση παρατηρείται απόκλιση μικρότερη του 0.02% για τις τιμές της θερμοκρασίας, απόκλιση 0.8% για την τιμή της παροχής νερού, ενώ οι υπολογισθείσες τιμές της ποσότητας UA βρίσκονται εντός των ορίων των τιμών που προέκυψαν από τις μετρήσεις.

	Economizer - ECO	Evaporator - EVA	SuperHeater - SH
$T_{out,HTF}$ [°C]	297.9	317.8	378.0
$m_{w/s}$ [kg/s]	39.3	39.3	39.3
UA	838.4	2290.1	357.2

Πίνακας 3.3. Υπολογισθείσες τιμές θερμοκρασίας εξόδου θερμού ελαίου, παροχής νερού και UA



Σχήμα 3.29. Σύγκριση μεταξύ δοθεισών και υπολογιζόμενων τιμών της διάταξης παραγωγής ατμού με τη χρήση θερμού ελαίου

3.7 Μοντέλο αποθήκευσης θερμότητας

Το μοντέλο αυτό προσομοιώνει τη λειτουργία των δεξαμενών αποθήκευσης θερμότητας που χρησιμοποιούνται στις ηλιοθερμικές διατάξεις και παρέχουν θερμότητα στον κύκλο σε συνθήκες μειωμένης ή ανύπαρκτης ηλιακής ακτινοβολίας.

Δεδομένα εισόδου στο μοντέλο είναι: παροχή, πίεση και θερμοκρασία του ρεύματος εισόδου (ρεύμα φόρτισης), απαιτούμενη παροχή εξόδου (ρεύμα αποφόρτισης), η τιμή των απωλειών θερμότητας και της αποθηκευόμενης μάζας στο σημείο σχεδίασης, οι συντελεστές a και b στη Σχέση (2.75) καθώς και το ποσό της προσδιδόμενης θερμικής ισχύος για θέρμανση. Επίσης, δίδεται η δυνατότητα επιλογής της τιμής των απωλειών θερμότητας αντί του υπολογισμού της όταν υπάρχουν διαθέσιμες τιμές από μετρήσεις ή από εκτίμηση.

Η ροή εισόδου προέρχεται από την έξοδο της διάταξης ηλιακής θέρμανσης και είναι η διαφορά της ροής μάζας που θερμαίνεται και αυτής που απαιτείται για την ατμοπαραγωγή. Η ροή εξόδου επιλέγεται ούτως ώστε να καλύψει την απαίτηση της συνιστώσας ατμοπαραγωγής όταν δεν επαρκεί ή είναι μηδενική η ροή από τη διάταξη ηλιακής θέρμανσης. Η τιμή της αποθηκευόμενης μάζας στο σημείο σχεδίασης, ουσιαστικά αντικατοπτρίζει τις διαστάσεις της δεξαμενής και το χρονικό διάστημα που η συνολική διάταξη μπορεί να λειτουργεί χωρίς την ύπαρξη ηλιακής ακτινοβολίας. Η τιμή αυτή θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση

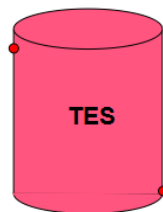
με τη μέγιστη που μπορεί να επιτευχθεί κατά τη διάρκεια οποιασδήποτε στιγμής του έτους.

Οι απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον στο σημείο σχεδίασης, σχετίζονται με τις διαστάσεις της δεξαμενής και τη μόνωσή της και λαμβάνουν την επιθυμητή τιμή. Η προσδιδόμενη θερμική ισχύς για θέρμανση, ουσιαστικά αντικατοπτρίζει την ύπαρξη θερμαντικών στοιχείων στη δεξαμενή που μπορούν να θερμάνουν το μέσο αποθήκευσης ούτως ώστε να παραταθεί η λειτουργία της εγκατάστασης. Επίσης, στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ως μέσο αποθήκευσης άλας, η προσδιδόμενη θερμική ισχύς πρέπει να επιλέγεται ούτως ώστε η θερμοκρασία αποθήκευσης να μην πάρει χαμηλότερη τιμή από την θερμοκρασία στερεοποίησης του άλατος.

Συνεπώς, το μοντέλο ακολουθεί το ρυθμό φόρτισης που επιβάλλει η ηλιακή συνιστώσα θέρμανσης και η ατμοπαραγωγή, όπως δηλαδή συμβαίνει και σε μια υπαρκτή εγκατάσταση. Ο ρυθμός αποφόρτισης μπορεί να επιλεγεί ανάλογα με το σενάριο λειτουργίας. Η αποφόρτιση μπορεί να είναι τέτοια, ούτως ώστε η ατμοπαραγωγή να είναι η ονομαστική ή να είναι μικρότερη της ονομαστικής με αποτέλεσμα να επεκτείνεται το χρονικό διάστημα λειτουργίας. Σημειώνεται πως κατά την αποφόρτιση, στην επιλογή ονομαστικού σημείου λειτουργίας, η ατμοπαραγωγή θα είναι κατά τι μικρότερη της ονομαστικής αφού η θερμοκρασία αποθήκευσης είναι μικρότερη της ονομαστικής του ελαίου λόγω των απωλειών θερμότητας.

Το μοντέλο, με βάση τη χρονική εξέλιξη των ρευμάτων εισόδου και εξόδου, υπολογίζει την εισερχόμενη και εξερχόμενη ροή στη δεξαμενή και μέσω ολοκλήρωσης υπολογίζει την αποθηκευμένη μάζα (Σχέση (2.73)) και την αποθηκευμένη θερμότητα (Σχέση (2.74)).

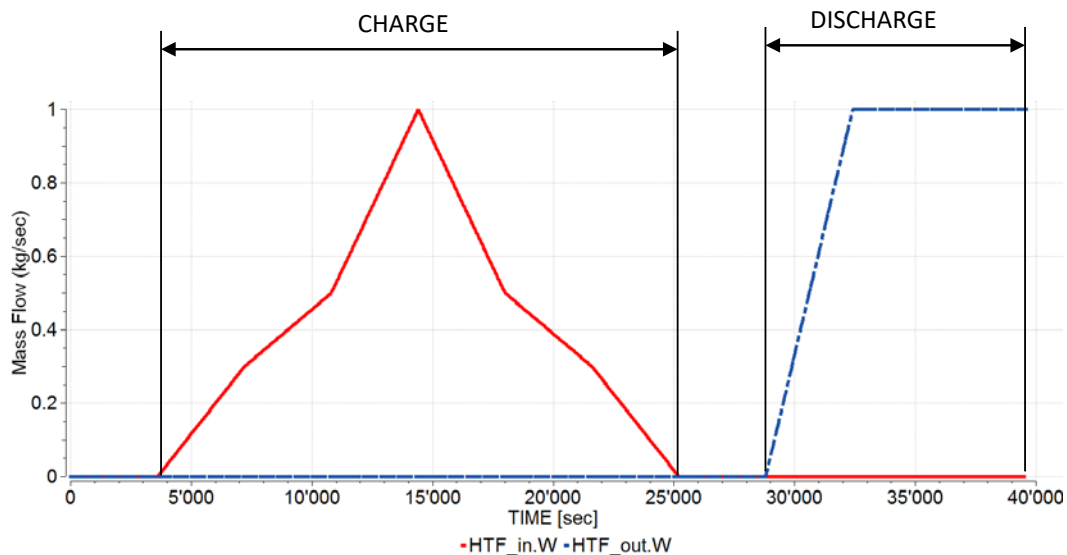
Τη σχηματική απεικόνιση του Component στο PROOSIS παρουσιάζει το Σχήμα 3.30.



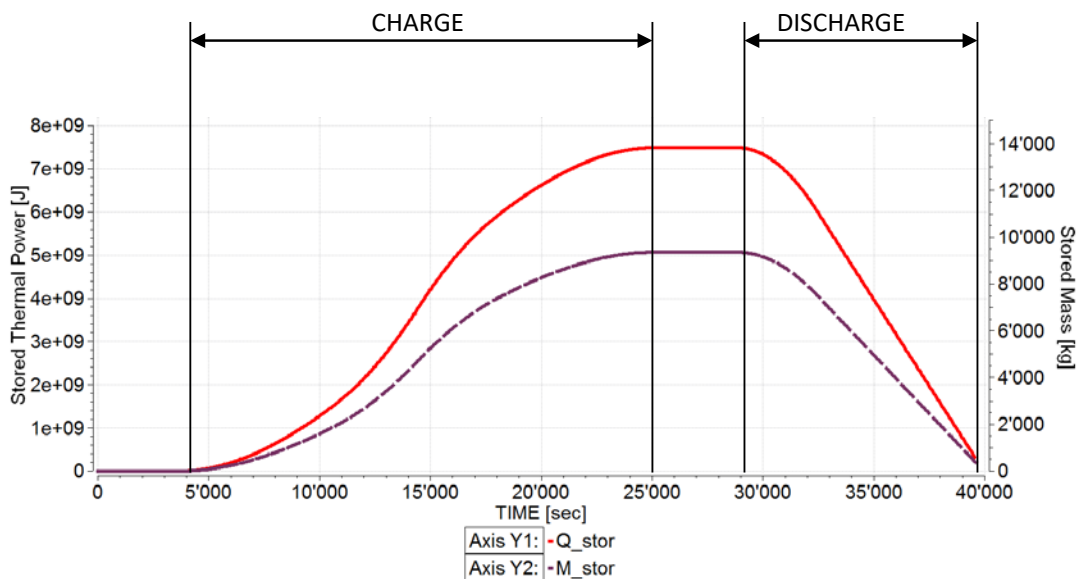
Σχήμα 3.30. Απεικόνιση Component μοντέλου δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας στο PROOSIS

Ως παράδειγμα της προσομοίωσης της λειτουργίας της δεξαμενής, επιλέγεται μια τυχαία διαδικασία φόρτισης/αποφόρτισης όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.31, για σταθερή θερμοκρασία του ρεύματος εισόδου (400°C) και για μηδενικές απώλειες θερμότητας. Το Σχήμα 3.32 απεικονίζει την χρονική εξέλιξη της αποθηκευμένης μάζας και θερμότητας στη δεξαμενή όπως υπολογίζεται από το λογισμικό. Παρατηρείται πως, τόσο η μάζα όσο και η θερμότητα αυξάνονται κατά τη διαδικασία φόρτισης της δεξαμενής. Κατά την

αποφόρτιση παρατηρείται η αντίθετη συμπεριφορά. Τέλος, μεταξύ του διαστήματος φόρτισης και αποφόρτισης, η μάζα και η θερμότητα στο δοχείο παραμένουν σταθερές αφού δεν απάγεται μάζα και οι απώλειες θερμότητας έχουν ληφθεί μηδενικές.



Σχήμα 3.31. Χρονική εξέλιξη φόρτισης και αποφόρτισης

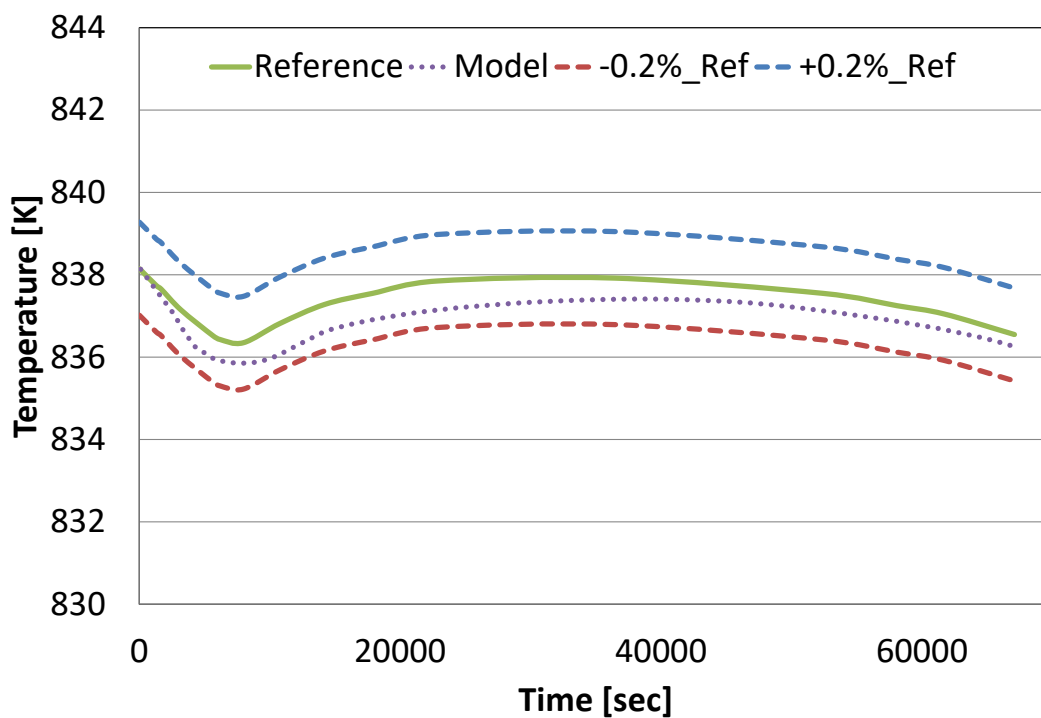


Σχήμα 3.32. Χρονική εξέλιξη αποθηκευμένης μάζας και θερμότητας

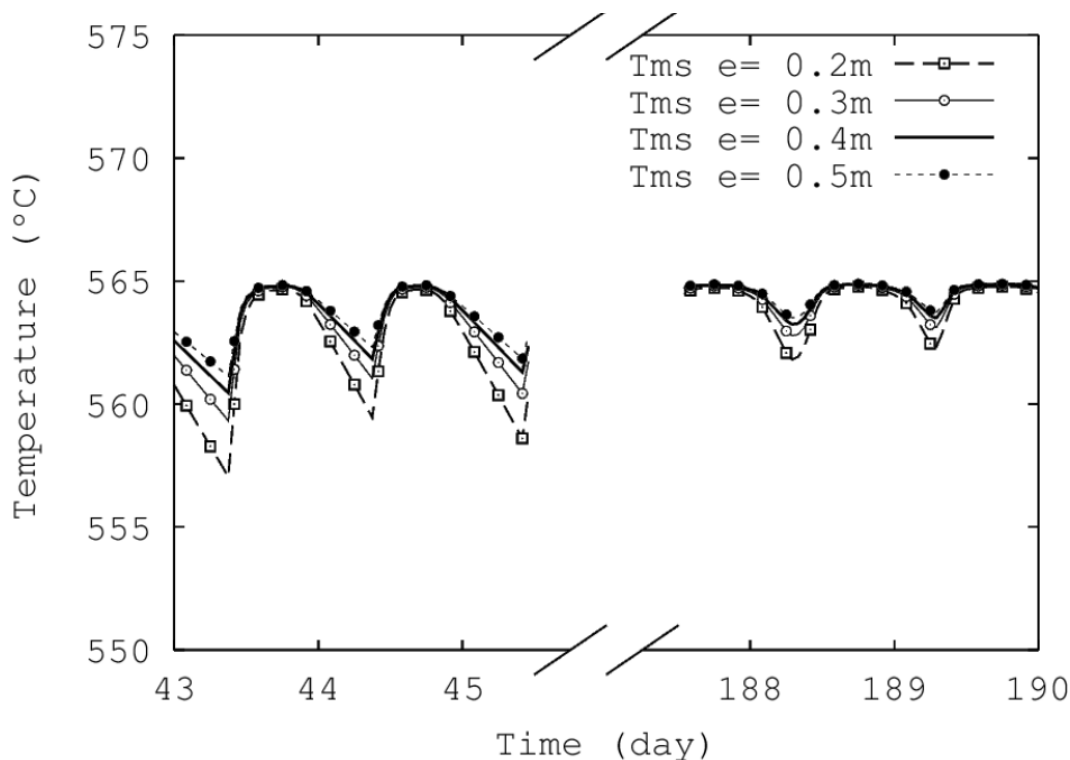
Η πιστοποίηση της σωστής λειτουργίας της συνιστώσας πραγματοποιείται μέσω προσομοίωσης της μελέτης της λειτουργίας δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας των Torras et al. (2015). Το μέσο αποθήκευσης είναι λιωμένο άλας με σταθερή θερμοκρασία του ρεύματος φόρτισης. Τα διαστήματα λειτουργίας διαφοροποιούνται μόνο ως προς την τιμή των παροχών εισόδου και εξόδου και την τιμή των απωλειών θερμότητας και ως εκ τούτου για τη σύγκριση, επιλέγεται ένα αντιπροσωπευτικό διάστημα λειτουργίας μεταξύ των ημερών

188 και 189. Ως δεδομένα εισόδου για την προσομοίωση λαμβάνονται: α) η θερμοκρασία του ρεύματος εισόδου, και μέσω ψηφιοποίησης που πραγματοποιήθηκε β) η χρονική εξέλιξη των παροχών εισόδου και εξόδου και γ) των απωλειών θερμότητας για πάχος μόνωσης 0.5m.

Η σύγκριση αφορά στη χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας αποθήκευσης. Στο Σχήμα 3.33 απεικονίζεται η χρονική εξέλιξη της υπολογιζόμενης θερμοκρασίας αποθήκευσης και της ληφθείσας από την εργασία (Σχήμα 3.34) μέσω ψηφιοποίησης. Επίσης, απεικονίζεται η ίδια ποσότητα που λήφθηκε μέσω ψηφιοποίησης με απόκλιση $\pm 0.2\%$ ούτως ώστε να καταδειχθεί η επίδραση τυχόν σφάλματος κατά τη διαδικασία της ψηφιοποίησης. Παρατηρείται πως οι υπολογισμένες και οι δημοσιευμένες καμπύλες έχουν την ίδια μορφή και μικρή απόκλιση στην απόλυτη τιμή, που όπως φαίνεται καλύπτεται από την αβεβαιότητα στην ακρίβεια της διαδικασίας ψηφιοποίησης.



Σχήμα 3.33. Χρονική εξέλιξη υπολογιζόμενης θερμοκρασίας αποθήκευσης και αναφοράς



Σχήμα 3.34. Χρονική εξέλιξη θερμοκρασίας αποθήκευσης (Torras et al., 2015)

3.8 Μοντέλο ατμοστροβίλου

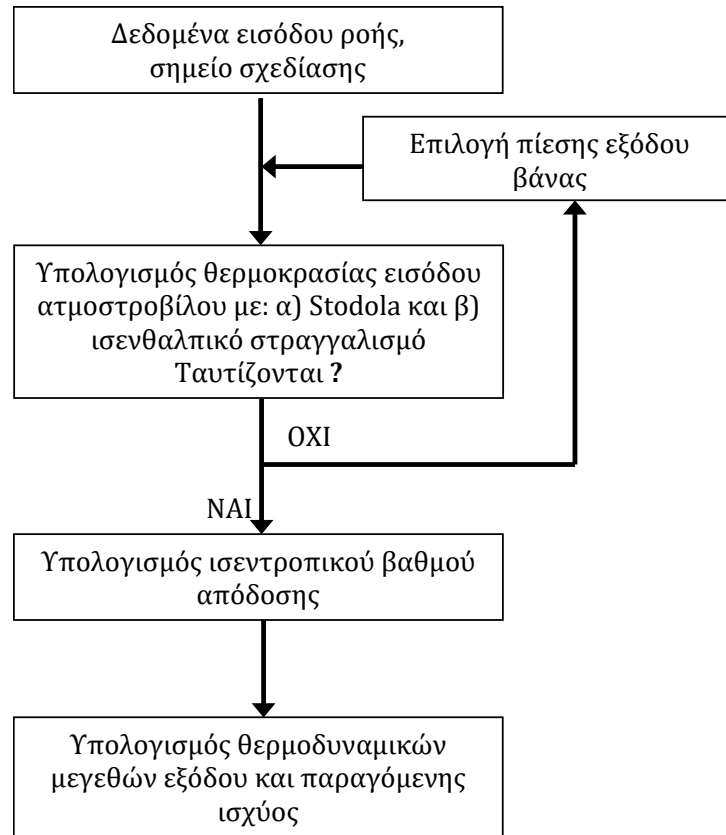
Το μοντέλο αυτό προσομοιώνει τη λειτουργία της συνιστώσας του ατμοστροβίλου³.

Δεδομένα εισόδου στο μοντέλο είναι: παροχή, πίεση, θερμοκρασία και υγρασία του ρεύματος εισόδου του ατμού και η πίεση εξόδου (πίεση ψυγείου). Επιπλέον, οι πιέσεις εισόδου-εξόδου, παροχή και θερμοκρασία εισόδου και ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στο σημείο σχεδίασης. Τέλος, οι συντελεστές A , B , C , x , y της Εξ. (2.82)

Το μοντέλο, με βάση τα χαρακτηριστικά της ροής στο εξεταζόμενο σημείο λειτουργίας και αξιοποιώντας την Εξ. (2.80), υπολογίζει την απαιτούμενη πίεση στην έξοδο της στραγγαλιστικής βάνας (είσοδος ατμοστροβίλου) μέσω επαναληπτικής διαδικασίας, αφού η θερμοκρασία της θέσης αυτής εξαρτάται από την πίεση μιας και ο στραγγαλισμός είναι ισενθαλπικός. Με αυτόν τον τρόπο, είναι πλέον γνωστά τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά στην είσοδο του ατμοστροβίλου. Εν συνεχεία, μέσω της Εξ. (2.81) ή (2.82) υπολογίζεται ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης και από την Εξ. (2.78) η ενθαλπία εξόδου και με

³ Το μοντέλο του ατμοστροβίλου έχει πιστοποιηθεί και χρησιμοποιηθεί στα πλαίσια ερευνητικού έργου που εκτελέστηκε στο ΕΘΣ που αφορά τη συγκρότηση μοντέλου προσομοίωσης της λειτουργίας σύγχρονης μονάδας συνδυασμένου κύκλου τριών πιέσεων όπως αναφέρθηκε και στην περίπτωση των εναλλακτών θερμότητας.

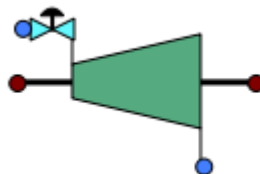
γνωστή την πίεση εξόδου και τα υπόλοιπα θερμοδυναμικά μεγέθη αυτής της θέσης. Τέλος, από την Εξ. (2.79), υπολογίζεται και η παραγόμενη ισχύς από τον ατμοστρόβιλο. Τη διαδικασία συνοψίζει το Σχήμα 3.35.



Σχήμα 3.35. Διαδικασία μοντελοποίησης ατμοστρόβιλου

Τέλος, στην περίπτωση ατμοστρόβιλου πολλαπλών κελυφών, τα όσα περιγράψαμε ισχύουν και για τα υπόλοιπα κελύφη πέραν του πρώτου με τη διαφοροποίηση ότι δεν χρησιμοποιείται στραγγαλιστική βάνα, αλλά τα χαρακτηριστικά της εισόδου και της εξόδου προκύπτουν από την απαίτηση να ικανοποιείται ο κανόνας του Stodola για κάθε κέλυφος.

Τη σχηματική απεικόνιση του Component μοντέλου ατμοστρόβιλου στο PROOSIS παρουσιάζει το Σχήμα 3.36.



Σχήμα 3.36. Απεικόνιση Component μοντέλου ατμοστρόβιλου στο PROOSIS

3.9 Σύνοψη - Συμπεράσματα

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε η διαδικασία που εφαρμόστηκε για την υλοποίηση των μοντέλων των συνιστωσών ηλιοθερμικών διατάξεων στο λογισμικό PROOSIS. Για κάθε συνιστώσα καθορίστηκαν τα δεδομένα εισόδου/εξόδου, μέσω της χρήσης θυρών (Ports), μεταβλητών ιδιοτήτων (Data Variables) και γενικών μεταβλητών (Global Variables). Οι μεταβλητές εισόδου και εξόδου συνδέονται μέσω των μαθηματικών εκφράσεων που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2, οι οποίες και υλοποιήθηκαν στον περιβάλλον του PROOSIS μέσω της γλώσσας προγραμματισμού EL, όπως περιγράφηκε για κάθε συνιστώσα. Τέλος, δημιουργήθηκαν και τα απαραίτητα εικονίδια των Components.

Ακόμα, παρουσιάστηκε και η πιστοποίηση των μοντέλων μέσω πειραματικών και υπολογιστικών δεδομένων της ανοιχτής βιβλιογραφίας. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των μοντέλων και των αντίστοιχων της βιβλιογραφίας, φαίνεται πως τα αναπτυχθέντα μοντέλα μπορούν να προσομοιώσουν την λειτουργία των συνιστωσών με την επιθυμητή ακρίβεια.

Τα μοντέλα που περιγράφηκαν, αποτελούν τα εργαλεία για τη συγκρότηση του συνολικού μοντέλου μιας ηλιοθερμικής διάταξης και τη διεξαγωγή όλων των επιθυμητών μελετών, όπως σχεδίαση, υπολογισμό επιδόσεων, επίδραση παραμέτρων λειτουργίας στις επιδόσεις κτλ.

Κεφάλαιο 4: Παράμετροι Επιδόσεων – Σύγκρισης

Για την αξιολόγηση μιας εγκατάστασης καθώς και για τη σύγκριση εγκαταστάσεων διαφορετικών τεχνολογιών είναι απαραίτητη η χρήση παραμέτρων επιδόσεων/σύγκρισης. Αυτές οι παράμετροι αφορούν τις θερμοδυναμικές επιδόσεις και τις οικονομικές επιδόσεις, δηλαδή το κόστος ηλεκτροπαραγωγής.

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι θερμοδυναμικές και οικονομικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται στη παρούσα διατριβή, καθώς και οι σχέσεις υπολογισμού τους.

4.1 Θερμοδυναμικές παράμετροι

Εκτός της παραγόμενης ενέργειας και άλλα στοιχεία είναι σημαντικά για την αξιολόγηση μιας εγκατάστασης. Το βασικότερο εξ αυτών είναι ο θερμικός βαθμός απόδοσης, δηλαδή το πόσο αποδοτικά μετατρέπεται η προσδιδόμενη θερμότητα σε ηλεκτρική ενέργεια.

Η λειτουργία μιας ηλιοθερμικής διάταξης διαφοροποιείται αναλόγως της διαθεσιμότητας της ηλιακής ενέργειας και του τύπου της. Έτσι, μπορεί να υφίσταται λειτουργία μόνο με τη χρήση ηλιακής ενέργειας, μόνο με τη χρήση καυσίμου ή συνδυασμός των δύο (υβριδική). Συνεπώς, για τον υπολογισμό των συνολικών επιδόσεων μιας τέτοιας διάταξης, είναι απαραίτητος ο υπολογισμός ποσοτήτων όπως: η παραγόμενη ενέργεια και ισχύς (καθώς και το ποσό αυτών που προέρχεται από την ηλιακή θερμότητα και την θερμότητα του καυσίμου), ο ολικός θερμικός βαθμός απόδοσης, ο θερμικός βαθμός απόδοσης καυσίμου και το ποσοστό συνεισφοράς της ηλιακής ενέργειας.

Ο βασικότερος παράγοντας επίδοσης μιας διάταξης είναι η ενέργεια (E) που δύναται να παράξει σε μια χρονική περίοδο. Δεδομένου ότι ο ρυθμός παραγωγής της, δηλαδή η ισχύς (P) μιας εγκατάστασης, είναι μεταβλητός, η παραγόμενη ενέργεια προκύπτει ως το ολοκλήρωμα της παραγόμενης ισχύος σε ένα χρονικό διάστημα:

$$E = \int P dt \quad (4.1)$$

Στην περίπτωση διαμέρισης του χρονικού διαστήματος, η παραγόμενη ενέργεια μπορεί να προσεγγιστεί μέσω αριθμητικών μεθόδων. Στην περίπτωση χρήσης της μεθόδου Τραπεζίου ισχύει:

$$E \approx \sum_{t_i}^{t_N} \frac{(P_{t_i} + P_{t_{i+1}})(t_i - t_{i+1})}{2} \quad (4.2)$$

Οι σχέσεις (4.1) και (4.2) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό τόσο της ολικής παραγόμενης ενέργειας όσο και των συνιστωσών αυτής (δηλαδή της παραγόμενης ενέργειας που οφείλεται στην ηλιακή ενέργεια και σε αυτήν που οφείλεται στην ενέργεια του καυσίμου), χρησιμοποιώντας αντίστοιχα την ολική παραγόμενη ισχύ, την παραγόμενη ισχύ που προέρχεται από την ηλιακή θερμότητα και την παραγόμενη ισχύ που προέρχεται από τη θερμότητα του καυσίμου. Ο υπολογισμός των επιμέρους συνιστωσών της ολικής παραγόμενης ισχύος πραγματοποιείται μέσω της σχέσης (4.9), όπως περιγράφεται στη συνέχεια.

Ακολουθώντας την ίδια λογική, είναι δυνατός ο υπολογισμός της συνολικής ποσότητας (M) ενός ρευστού (π.χ. καταναλισκόμενο καύσιμο) σε μια χρονική περίοδο, χρησιμοποιώντας την παροχή του (\dot{m}):

$$M = \int \dot{m} dt \quad (4.3)$$

Και προσεγγίζοντας το ολοκλήρωμα με τη μέθοδο του τραπεζίου ισχύει:

$$M \approx \sum_{t_i}^{t_N} \frac{(\dot{m}_{t_i} + \dot{m}_{t_{i+1}})(t_i - t_{i+1})}{2} \quad (4.4)$$

Όπως αναφέρθηκε, εκτός της παραγόμενης ενέργειας, υπάρχουν και άλλες σημαντικές παράμετροι σύγκρισης (π.χ. θερμικός βαθμός απόδοσης, ειδική κατανάλωση καυσίμου κτλ). Συγκεκριμένα, η αποδοτικότητα της μετατροπής της προσδιδόμενης θερμικής ισχύος σε ηλεκτρική, δηλαδή ο ολικός θερμικός βαθμός απόδοσης (eff), ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής παραγόμενης ισχύος (P) προς την ολική προσφερόμενη θερμική ισχύ (από το καύσιμο και από τον Ήλιο):

$$eff = \frac{P}{Q_f + Q_s} = \frac{P}{\dot{m}_f \cdot q_f + Q_s} \quad (4.5)$$

Όπου,

\dot{m}_f : παροχή καυσίμου

q_f : θερμογόνος δύναμη καυσίμου
 Q_s : ηλιακή θερμική ισχύς
 Q_f : θερμική ισχύς του καυσίμου

Με την ίδια λογική, αν λάβουμε υπ' όψιν μόνο τη θερμική ισχύ του καυσίμου, ορίζεται ο θερμικός βαθμός απόδοσης καυσίμου (eff_f) ως:

$$eff_f = \frac{P}{Q_f} \quad (4.6)$$

Η ειδική κατανάλωση καυσίμου (sfc) ορίζεται ως η παροχή του καυσίμου που απαιτείται για την παραγωγή μιας μονάδας ισχύος:

$$sfc = \frac{\dot{m}_f}{P} \quad (4.7)$$

Σημαντική παράμετρος σύγκρισης των ηλιοθερμικών διατάξεων είναι το ποσοστό συνεισφοράς της ηλιακής ενέργειας (solar share - f_{ss}) που ουσιαστικά καθορίζει τη σχέση μεταξύ της προσδιδόμενης ηλιακής θερμικής ισχύος και της θερμικής ισχύος του καυσίμου:

$$f_{ss} = \frac{Q_s}{Q_f + Q_s} \quad (4.8)$$

Οι σχέσεις (4.5)-(4.8) μπορούν να εφαρμοστούν για τον υπολογισμό των συνολικών επιδόσεων ενός χρονικού διαστήματος αν σε αυτές χρησιμοποιηθούν τα αντίστοιχα μεγέθη προσδιδόμενης και παραγόμενης ενέργειας. Τα ποσά των προσδιδόμενων ενεργειών υπολογίζονται μέσω ολοκλήρωσης της θερμικής ισχύος για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, όπως ακριβώς περιγράφηκε και για τον υπολογισμό της παραγόμενης ενέργειας από τις σχέσεις (4.1) και (4.2).

Τέλος, θεωρώντας πως σε μια υβριδική διάταξη, η θερμική ισχύς του καυσίμου και η ηλιακή θερμική ισχύς μετατρέπονται σε ηλεκτρική ισχύ με τον ίδιο βαθμό απόδοσης, είναι δυνατός ο υπολογισμός της παραγόμενης ισχύος από την ηλιακή ενέργεια (P_s) και από το καύσιμο (P_f):

$$\begin{aligned} P_s &= eff \cdot Q_s \\ P_f &= eff \cdot Q_f \\ P &= P_f + P_s \end{aligned} \quad (4.9)$$

4.2 Οικονομικές παράμετροι

Οι θερμοδυναμικές επιδόσεις αφορούν σε καθαρά τεχνικά χαρακτηριστικά μιας διάταξης, δηλαδή την ικανότητα παραγωγής και την ποιότητα αυτής. Στη

σύγχρονη όμως οικονομία και στην αγορά ενέργειας, η εκάστοτε επένδυση αξιολογείται με οικονομικούς όρους. Έτσι, η οικονομική αξιολόγηση μιας επένδυσης καθορίζει την ανταγωνιστικότητά της και το αν είναι ελκυστικότερη σε σύγκριση με άλλου είδους επενδύσεις. Επίσης, με αυτόν τον τρόπο μπορούν να προσδιοριστούν οι βελτιώσεις που πρέπει να επιτευχθούν ώστε να γίνει οικονομικά ανταγωνιστική μια τεχνολογία, καθώς και την επίδραση παραμέτρων που μεταβάλλονται εντόνως λόγω εξωγενών παραγόντων (π.χ. κόστος καυσίμου).

Κύρια παράμετρος οικονομικής αποτίμησης και σύγκρισης είναι το Σταθμισμένο Κόστος Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας (Levelized Electricity Cost – LEC). Η παράμετρος αυτή ορίζεται ως η τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας έτσι ώστε, στη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης, τα έξοδα να ισούνται με τα έσοδα. Προφανώς, όσο μικρότερη η τιμή αυτής της παραμέτρου, τόσο πιο ελκυστική η επένδυση για την εξεταζόμενη εγκατάσταση.

Για τον υπολογισμό του LEC, απαιτείται ο προσδιορισμός των συνιστωσών εσόδων και εξόδων. Κατά τη διάρκεια ζωής του έργου, τα έσοδα προκύπτουν από την πώληση της παραγόμενης ενέργειας (Energy), ενώ τα έξοδα είναι το άθροισμα των επενδύσεων (Investment), του κόστους συντήρησης (O&M), καυσίμου (Fuel) και εκπομπών ρύπων (Carbon), καθώς και τα έξοδα διάλυσης της εγκατάστασης (Decom) (IEA-NEA-OECD, 2010; IEA, 2013). Συνεπώς για τον υπολογισμό του LEC ισχύει:

$$LEC = \frac{Investment + O\&M + Fuel + Carbon + Decom}{Energy} \quad (4.10)$$

Επειδή τόσο τα έσοδα όσο και τα έξοδα πραγματοποιούνται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές t , έχουν διαφορετική αξία χρήματος. Συνεπώς, πρέπει να γίνει η αναγωγή τους στη χρονική στιγμή αξιολόγησης. Η αναγωγή πραγματοποιείται με τη χρήση του επιτοκίου προεξόφλησης r το οποίο εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως το σχήμα χρηματοδότησης, τον κίνδυνο της συγκεκριμένης επένδυσης, το χρονικό ορίζοντα κτλ (Walter Short, Daniel J. Packey, & Thomas Holt, 1995). Το επιτόκιο προεξόφλησης δύναται να είναι ονομαστικό ή πραγματικό αναλόγως του αν λαμβάνεται υπ' όψιν ο πληθωρισμός. Η σχέση που συνδέει το ονομαστικό επιτόκιο προεξόφλησης (r_n) με το πραγματικό (r_r) λαμβάνοντας υπ' όψιν τον πληθωρισμό (π) είναι (Walter Short et al., 1995):

$$(1 + r_n) = (1 + r_r) \cdot (1 + \pi) \quad (4.11)$$

Η αναγωγή στην χρονική στιγμή αξιολόγησης των εσόδων και εξόδων που πραγματοποιούνται τη χρονική στιγμή t πραγματοποιείται διαιρώντας κάθε όρο εσόδων-εξόδων με την ποσότητα $(1+r)^t$. Έτσι, κατά τη διάρκεια ζωής της

εγκατάστασης, τα συνολικά αναγόμενα έσοδα και έξοδα στη χρονική στιγμή αξιολόγησης θα είναι το άθροισμα των αναγόμενων εσόδων και εξόδων κάθε χρονικής στιγμής t . Άρα, η σχέση (4.10) θα γίνει (IEA-NEA-OECD, 2010; IEA, 2013):

$$LEC = \frac{\sum_t \left(\frac{Investment_t + O\&M_t + Fuel_t + Carbon_t + Decom_t}{(1+r)^t} \right)}{\sum_t \left(\frac{Energy_t}{(1+r)^t} \right)} \quad (4.12)$$

Οι σχέσεις υπολογισμού του LEC αυτής της μορφής δεν περιλαμβάνουν παράγοντες που αφορούν μεγέθη όπως το σχήμα χρηματοδότησης και τη φορολογία. Όμως, τέτοια μεγέθη είναι απαραίτητα για τη δυνατότητα παραμετρικών οικονομικών αναλύσεων, καθώς και για τον ακριβέστερο υπολογισμό των οικονομικών επιδόσεων, αφού αυτές επηρεάζονται και από το φορολογικό πλαίσιο της κάθε χώρας. Ως εκ τούτου, η Εξ. (4.12) θα πρέπει να τροποποιηθεί ώστε να λαμβάνει υπ' όψιν αυτούς τους παράγοντες (Cambell, 2008; Darling, You, Veselka, & Velosa, 2011).

Για να συμπεριληφθούν στον υπολογισμό του LEC παράμετροι όπως η φορολογία, απαραίτητος είναι ο αναλυτικότερος προσδιορισμός της οικονομικής συμπεριφοράς μιας εγκατάστασης κατά τη διάρκεια ζωής της, δηλαδή ο αναλυτικός προσδιορισμός των ταμειακών ροών (TP) (επενδύσεις, έσοδα, έξοδα κτλ) κάθε χρονικής στιγμής. Αυτό πραγματοποιείται με την κατάστρωση του πίνακα ταμειακών ροών για τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης (Πίνακας 4.1).

	Χρόνος			
	0	1	2	... v
Εκταμιεύσεις Κεφαλαίου (ΕκΚ)				
Έσοδα (ΕΣ)				
Έξοδα (ΕΞ)				
Μεικτά Κέρδη (ΜΚ)				
Αποσβέσεις (ΑΠ)				
Τόκοι (ΤΚ)				
Φορολογητέο Εισόδημα (ΦΕ)				
Φόροι (Φ)				
Καθαρά Κέρδη μετά φόρων (ΚΚ)				
Χρεολύσια (ΧΡ)				
Καθαρή Ταμειακή Ροή μετά φόρων (ΚΤΡ)				

Πίνακας 4.1. Πίνακας ταμειακών ροών

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι ταμειακές ροές (TP) πραγματοποιούνται σε διαφορετικές χρονικές περιόδους και πρέπει να γίνει η αναγωγή τους στη χρονική στιγμή αξιολόγησης t_0 . Με βάση τα όσα

αναφέρθηκαν για την αναγωγή, χρησιμοποιείται ποσότητα $(1+r)^{t-0.5}$, θεωρώντας δηλαδή το μέσο του κάθε χρόνου ως πιο αντιπροσωπευτικό (IEA, 2013):

$$TP_{t_0} = \frac{TP_t}{(1+r)^{t-0.5}} \quad (4.13)$$

Από τον πίνακα ταμειακών ροών μπορεί να υπολογιστεί η καθαρή παρούσα αξία (ΚΠΑ) της εγκατάστασης κάθε χρονική στιγμή t (KPA_t), και θεωρώντας ως χρονική στιγμή αξιολόγησης t_0 την αρχή της χρονικής ζωής της εγκατάστασης, μπορεί να υπολογιστεί η καθαρή παρούσα αξία, σε αυτή τη χρονική στιγμή (KPA_{t_0}):

$$KPA_{t_0} = \sum_t \left(\frac{KTP_t}{(1+r)^{t-0.5}} \right) - IK_{t_0} \quad (4.14)$$

Όπου:

IK_{t_0} : Οι εκταμιεύσεις ιδίων κεφαλαίων στην αρχή της χρονικής ζωής της εγκατάστασης

Για τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας ώστε τα έξοδα να ισούνται με τα έσοδα, προκύπτει μηδενική καθαρή παρούσα αξία. Δηλαδή, το LEC προκύπτει από το μηδενισμό της καθαρής παρούσας αξίας:

$$LEC \rightarrow KPA_{t_0} = 0 \quad (4.15)$$

Για τον υπολογισμό του LEC, από τις σχέσεις (4.14) και (4.15), απαιτείται ο υπολογισμός της καθαρής ταμειακής ροής μετά φόρων (KTP) κάθε χρονικής στιγμής και άρα η περαιτέρω ανάλυση των ποσοτήτων που εμφανίζονται στον πίνακα ταμειακών ροών (Πίνακας 4.1). Τα έσοδα (ΕΣ) της εγκατάστασης προέρχονται από την πώληση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (ΗΛ) σε κάποια τιμή (ΤΠ). Προφανώς, η τιμή της ΤΠ για την οποία ισχύει η σχέση (4.15) είναι το LEC. Τα μικτά κέρδη (ΜΚ) είναι η διαφορά των εσόδων και των εξόδων (ΕΞ), με τα τελευταία να αποτελούν ουσιαστικά το λειτουργικό κόστος (ΛΚ) που περιλαμβάνει όλες τις συνιστώσες κόστους λειτουργίας (κόστος συντήρησης, κόστος καυσίμου και κόστος εκπομπής ρύπων). Τα καθαρά κέρδη (ΚΚ) προκύπτουν από το φορολογητέο εισόδημα (ΦΕ) αν αφαιρεθούν οι φόροι (Φ). Το φορολογητέο εισόδημα προκύπτει από τα μικτά κέρδη αν αφαιρεθούν οι αποσβέσεις (ΑΠ) και οι τόκοι (ΤΚ), ενώ οι φόροι προκύπτουν από το φορολογητέο εισόδημα μέσω του συντελεστή φορολογίας (ΣΦ). Οι αποσβέσεις προκύπτουν από το επενδυθέν κεφάλαιο και το συντελεστή απόσβεσης (ΣΑ). Τέλος, η καθαρή ταμειακή ροή μετά φόρων (KTP) προκύπτει αν από το άθροισμα των καθαρών κερδών και των αποσβέσεων αφαιρεθούν τα χρεολύσια

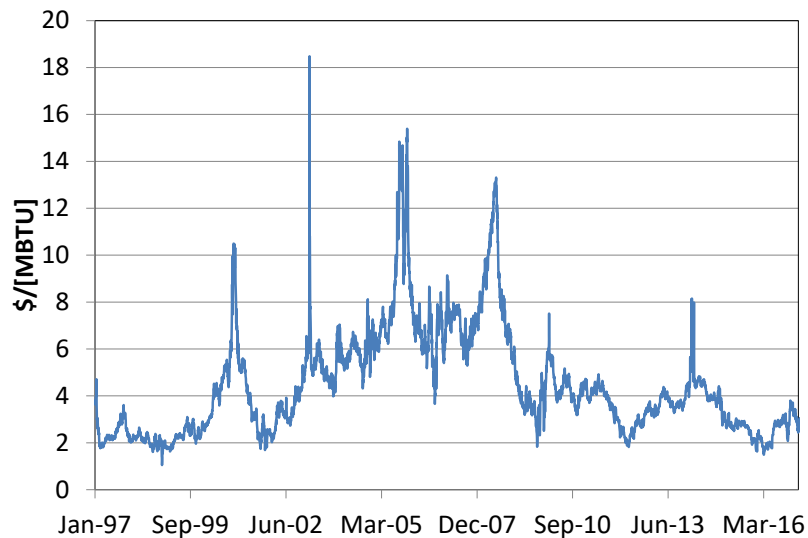
(XP) και οι εκταμιεύσεις κεφαλαίων. Από τη σχέση (4.15) και με αντικατάσταση των μεγεθών σύμφωνα με τους συσχετισμούς που αναφέρθηκαν, προκύπτει η τιμή πώλησης (ΤΠ) για την οποία τα έσοδα ισούνται με τα έξοδα, δηλαδή το LEC:

$$LEC = \frac{IK_0 - \sum_t \left(\frac{AP_t + TK_t}{(1+r)^{t-0.5}} \Sigma\Phi_t \right) + \sum_t \left(\frac{XP_t + TK_t}{(1+r)^{t-0.5}} \right)}{\sum_t \left(\frac{H\Lambda_t}{(1+r)^{t-0.5}} (1 - \Sigma\Phi_t) \right)} + \frac{\sum_t \left(\frac{\Lambda K_t}{(1+r)^{t-0.5}} (1 - \Sigma\Phi_t) \right)}{\sum_t \left(\frac{H\Lambda_t}{(1+r)^{t-0.5}} (1 - \Sigma\Phi_t) \right)} \quad (4.16)$$

Το σημαντικότερο οικονομικό μέγεθος μιας εγκατάστασης, το οποίο επηρεάζει άμεσα τον υπολογισμό του LEC, είναι το λειτουργικό κόστος (ΛΚ). Το λειτουργικό κόστος περιλαμβάνει όλες τις συνιστώσες κόστους λειτουργίας μιας εγκατάστασης (κόστος συντήρησης, κόστος καυσίμου, κόστος εκπομπής ρύπων κτλ). Οι συνιστώσες αυτές είναι σταθερές και μεταβλητές. Οι σταθερές σχετίζονται με το μέγεθος και τον τύπο της εγκατάστασης και αφορούν πάγιες ανάγκες της εγκατάστασης, όπως αμοιβές προσωπικού και εργασιών συντήρησης. Ακριβώς επειδή σχετίζονται με το μέγεθος της εγκατάστασης, συνήθως δίδονται με τη μορφή \$/kWe. Οι μεταβλητές συνιστώσες σχετίζονται τόσο με το προφίλ λειτουργίας της εγκατάστασης όσο και με μεταβολές οικονομικών μεγεθών λόγω παραγόντων μη άμεσα σχετιζόμενων με τη λειτουργία της. Για παράδειγμα κάποιες εργασίες συντήρησης συνδέονται με το φορτίο και τις ώρες λειτουργίας της εγκατάστασης. Συνήθως δίδονται με τη μορφή \$/MWh.

Οι κυριότερες και πιο έντονα μεταβαλλόμενες μεταβλητές συνιστώσες είναι το κόστος του καυσίμου και το κόστος εκπομπής ρύπων. Οι συνολικές ποσότητες καταναλισκόμενου καυσίμου και εκπεμπόμενων ρύπων εξαρτώνται από τις ώρες και το προφίλ λειτουργίας και το κόστος τους εξαρτάται επιπλέον και από την τιμή τους.

Το καύσιμο επηρεάζει το λειτουργικό κόστος μιας εγκατάστασης κυρίως λόγω του κόστους του. Πληθώρα παραγόντων (οικονομικοί, πολιτικοί κτλ) επηρεάζει την τιμή των καυσίμων, η οποία μπορεί να παρουσιάσει έντονες διακυμάνσεις στο χρόνο. Για παράδειγμα, στο διάστημα 2012-2017 το κόστος του πετρελαίου παρουσίασε ελάχιστη και μέγιστη τιμή 0.98\$/gallon και 3.3\$/gallon αντιστοίχως (EIA, 2017b). Τη χρονική εξέλιξη της τιμής του φυσικού αερίου σε περίοδο 20ετίας (1997-2017) παρουσιάζει το Σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1. Χρονική εξέλιξη τιμής φυσικού αερίου (EIA, 2017a).

Κατά την καύση οποιουδήποτε καυσίμου με αέρα παράγονται ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα, νερού, οξειδίων του αζώτου, μονοξειδίου του άνθρακα, ενώ, λόγω της ατελούς λειτουργίας του καυστήρα εκλύονται επίσης και ποσότητες άκαυστων υδρογονανθράκων.

Από τα προϊόντα της καύσης σημαντικότερο ρόλο διαδραματίζει το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) αφού αποτελεί τη σημαντικότερη παράμετρο για το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για ηλεκτροπαραγωγή στοχεύει και στη μείωση των εκπομπών CO_2 ούτως ώστε να μειωθούν οι επιπτώσεις του φαινομένου του θερμοκηπίου.

Για να ελεγχθεί και να περιοριστεί η ποσότητα CO_2 που εκπέμπεται, έχει τεθεί σε ισχύ το Σύστημα Εμπορίας Ρύπων (Emissions Trading System – ETS). Σύμφωνα με αυτό, όποιος παράγει CO_2 αγοράζει το δικαίωμα εκπομπής συγκεκριμένης ποσότητας. Η τιμή του δικαιώματος εκπομπής προκύπτει από διαπραγμάτευση σε αντίστοιχα χρηματιστήρια. Τη χρονική εξέλιξη της τιμής δικαιώματος εκπομπής CO_2 παρουσιάζει το Σχήμα 4.2. Έτσι, στο λειτουργικό κόστος συμπεριλαμβάνεται και το κόστος εκπομπής CO_2 .



Σχήμα 4.2. Χρονική εξέλιξη τιμής δικαιωμάτων εκπομπής CO₂ στην ΕΕ (Borghesi & Montini, 2016).

Συνεπώς, είναι απαραίτητος ο υπολογισμός της ποσότητας εκλυόμενου CO₂ αναλόγως και του καυσίμου που χρησιμοποιείται. Ο υπολογισμός μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας τη χημική εξίσωση της καύσης και λαμβάνοντας υπ’ όψιν τον βαθμό απόδοσης της καύσης ή χρησιμοποιώντας συντελεστές εκπομπών οι οποίοι εκτιμούν την ποσότητα παραγόμενου CO₂. Ο πρώτος τρόπος απαιτεί τη γνώση της χημικής σύστασης του καυσίμου η οποία όμως μπορεί να μεταβάλλεται αναλόγως της προέλευσης αλλά και της χρονικής στιγμής, ενώ ο δεύτερος δεν απαιτεί τέτοια πληροφορία αλλά είναι προσεγγιστικός με συνέπεια την εκτίμηση και όχι τον ακριβή υπολογισμό της εκπεμπόμενης ποσότητας CO₂. Για αυτό το λόγο, στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται ο δεύτερος τρόπος και οι συντελεστές λαμβάνονται από την Energy Information Administration – EIA (EIA, 2016). Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται τα δύο συνηθέστερα καύσιμα διατάξεων παραγωγής ισχύος (εξαιρούνται οι λιγνιτικοί σταθμοί) (φυσικό αέριο και πετρέλαιο) και τους συντελεστές εκπομπής με βάση την EIA απεικονίζει ο Πίνακας 4.2.

	kgCO ₂ /MBTU
Φ.Α.	53.07
Πετρέλαιο	73.16

Πίνακας 4.2. Συντελεστές εκπομπής CO₂ για φυσικό αέριο και πετρέλαιο

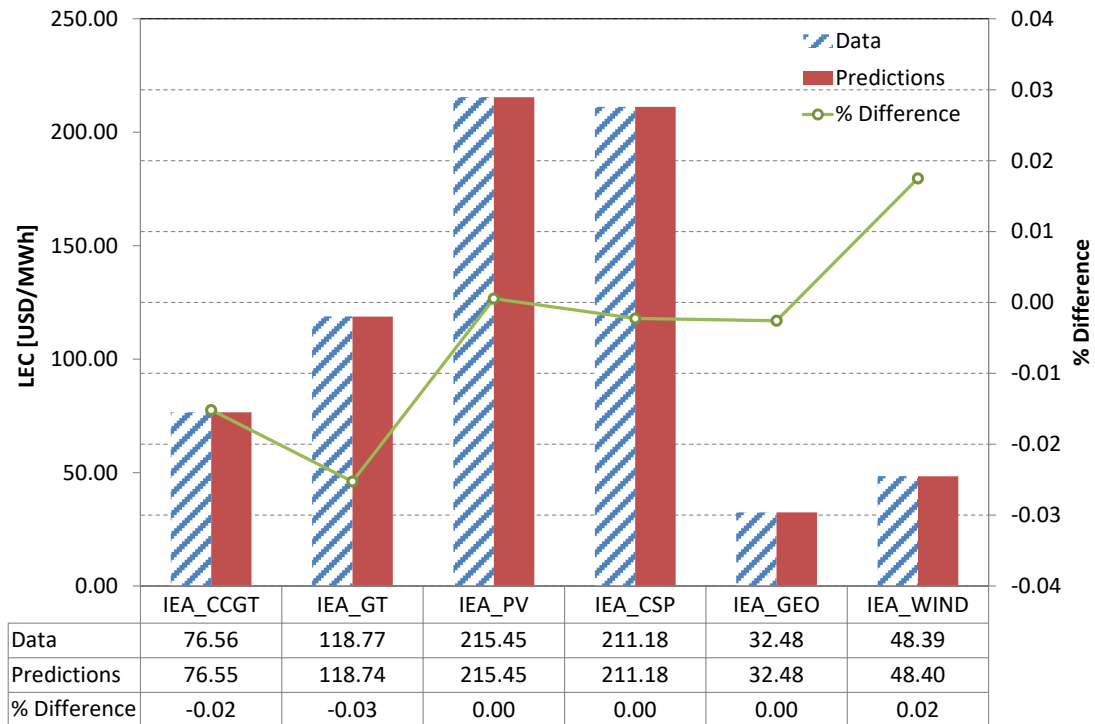
4.2.1 Εφαρμογές υπολογισμού LEC

Ο έλεγχος της δυνατότητας εκτίμησης του LEC με ικανοποιητική ακρίβεια από την αναπτυχθείσα σχέση, πραγματοποιείται με την εφαρμογή της σε διαθέσιμα δεδομένα από αναφορές διεθνών οργανισμών (IEA, NEA, FRAUNHOFER, LAZARD) και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Στην περίπτωση της αναφοράς της IEA (IEA-NEA-OECD, 2010), επιλέγονται και εξετάζονται έξι τύποι διατάξεων ηλεκτροπαραγωγής. Οι τέσσερις εξ αυτών αφορούν διατάξεις ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και τα δεδομένα ελήφθησαν από τον Πίνακα 3.7d της προαναφερθείσας αναφοράς για την περίπτωση της Αμερικής. Για τις άλλες δύο χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα από τον Πίνακα 3.7c της αναφοράς, για συνδυασμένο κύκλο (Αμερική) και για διάταξη αεριοστροβίλου (Γερμανία). Τα στοιχεία των διατάξεων, όπως υπάρχουν στην αναφορά, παρουσιάζει ο Πίνακας 4.3. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης παρουσιάζει το Σχήμα 4.3. Όπως φαίνεται, η υπολογισθείσα τιμή του LEC ουσιαστικά ταυτίζεται με αυτή της αναφοράς. Συνεπώς, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η σχέση υπολογισμού του LEC έχει την επιθυμητή ακρίβεια για τον προσδιορισμό των οικονομικών επιδόσεων μιας διάταξης.

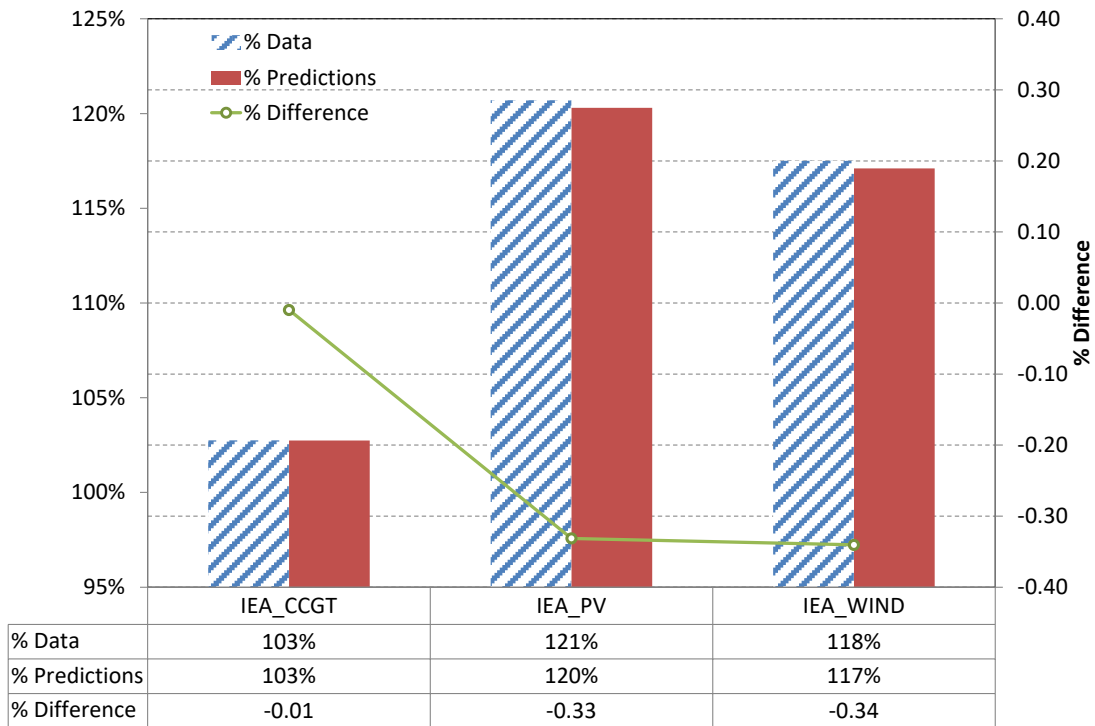
Technology	Onshore wind	Solar PV	CSP	Geothermal	GT	CCGT
Capacity [MWe]	150	5	100	50	150	400
Load Factor [%]	41	24	24	87	38	54
Investment Cost [\$/kWe]	2041	6365	5518	1892	582	1039
Decommissioning Cost [\$/MWh]	0.42	0.11	1.85	0.15	0.04	0.07
Fuel Cost [\$/MWh]	0	0	0	0	92.48	49.27
Carbon Cost [\$/MWh]	0	0	0	0	15.92	14.74
O&M Cost [\$/MWh]	8.63	5.71	27.59	18.21	5.38	3.61
Plant's Life [y]	25	25	25	40	30	30
Discount Rate [%]	5	5	5	5	5	5
LEC [\$/MWh]	48.39	215.45	211.18	32.48	118.77	76.56

Πίνακας 4.3. Δεδομένα υπολογισμού LEC (IEA-NEA-OECD, 2010)



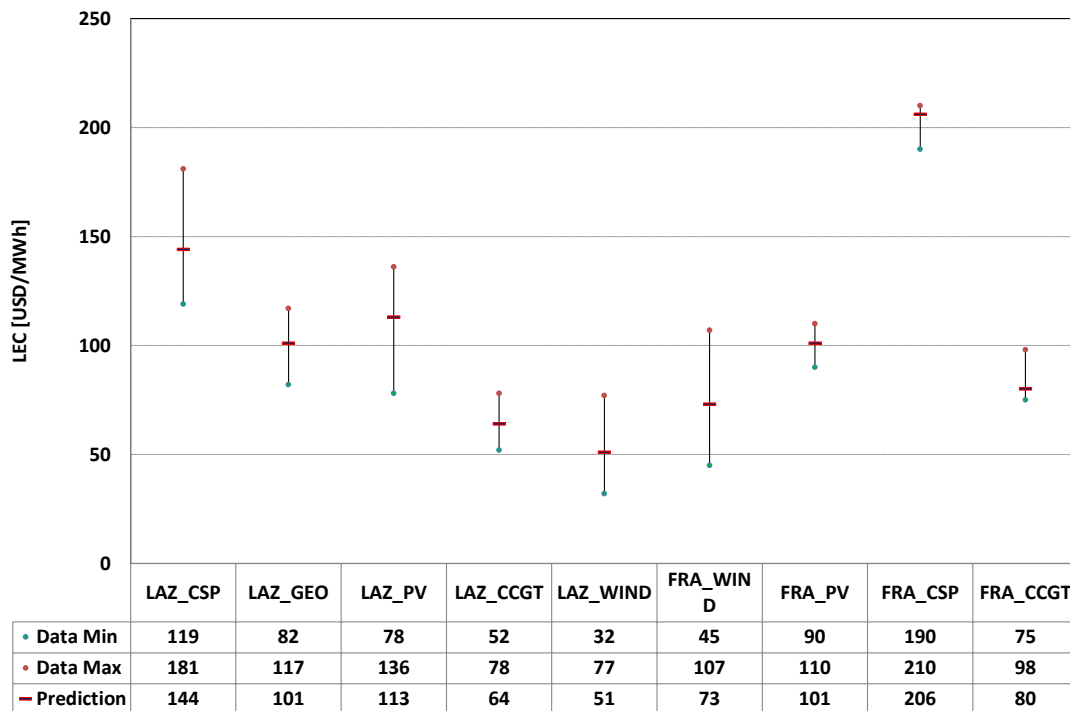
Σχήμα 4.3. Σύγκριση LEC για διάφορες τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής.

Επίσης, σε αυτή την αναφορά μελετάται και η επίδραση του σχήματος χρηματοδότησης και της φορολογίας. Τα αποτελέσματα, ως ποσοστιαία μεταβολή του LEC και με τη μορφή διαγράμματος, παρουσιάζονται στο Σχήμα 8.1 της αναφοράς για λόγο δανεικών προς ίδια κεφάλαια (ΛΚΕ) 50% και για διάφορους συντελεστές φορολόγησης (ΣΦ). Για την πιστοποίηση της σωστής συμπεριφοράς του μοντέλου σε σχέση με το σχήμα χρηματοδότησης και τη φορολόγηση, υπολογίζεται η μεταβολή του LEC τριών τύπων διατάξεων ενδεικτικά για ΛΚΕ=50% και ΣΦ=50%. Τη σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου με αυτά της αναφοράς παρουσιάζει το Σχήμα 4.4. Οι υπολογιζόμενες μεταβολές προσεγγίζουν ικανοποιητικά τις αντίστοιχες της αναφοράς και συνεπώς μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα πως η χρησιμοποιηθείσα σχέση εκτιμά ικανοποιητικά το LEC στην περίπτωση διαφόρων σχημάτων χρηματοδότησης και φορολογίας



Σχήμα 4.4. Μεταβολή της τιμής του LEC για δανεισμό και συντελεστή φορολόγησης 50%.

Στην περίπτωση των αναφορών των FRAUNHOFER (Kost et al., 2013) και LAZARD (Lazard, 2015), το LEC δίδεται με τη μορφή εύρους τιμών. Επίσης, με τη μορφή εύρους δίνονται και οι τιμές των μεγεθών που αφορούν το αρχικό κόστος επένδυσης, το κόστος λειτουργίας κτλ. Για αυτό το λόγο το LEC υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη μέση τιμή του εύρους κάθε μεταβλητής. Εν συνεχεία, η υπολογισθείσα τιμή του LEC ελέγχεται εάν βρίσκεται εντός του εύρους τιμών του LEC της αναφοράς. Το Σχήμα 4.5 απεικονίζει το εύρος αυτό καθώς και την υπολογισθείσα τιμή. Όπως παρατηρείται, η τιμή του LEC που προσδιορίστηκε μέσω της χρησιμοποιηθείσας σχέσης, βρίσκεται εντός των ορίων της αναφοράς. Άρα μπορούμε να θεωρήσουμε πως η σχέση υπολογισμού του LEC μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον ικανοποιητικό προσδιορισμό των οικονομικών επιδόσεων μιας διάταξης.



Σχήμα 4.5. Σύγκριση LEC για διάφορες τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής από διάφορες πηγές

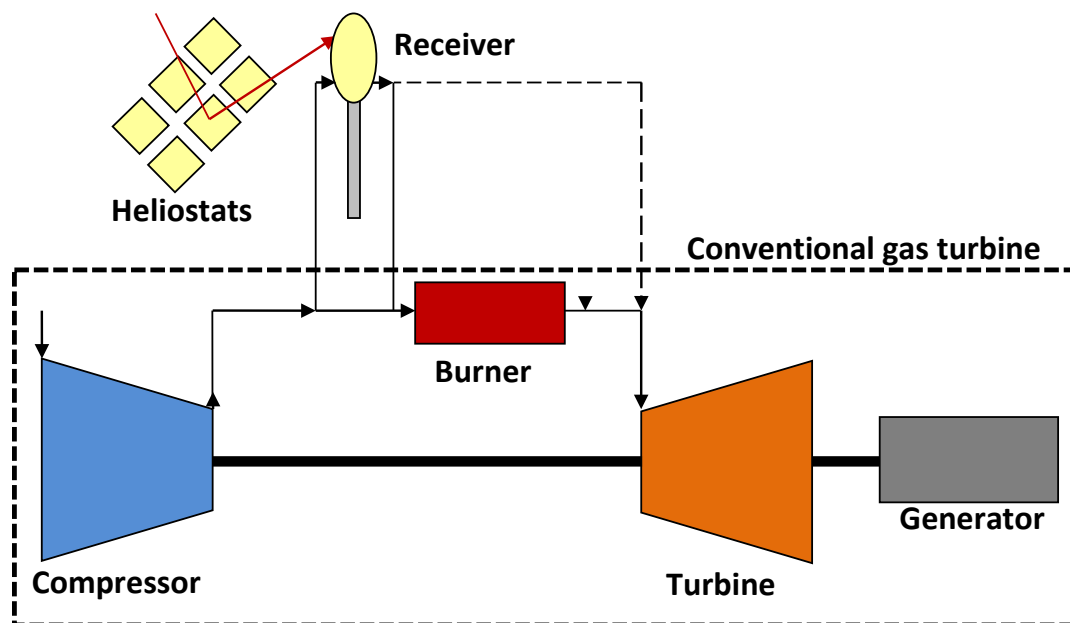
4.3 Σύνοψη - Συμπεράσματα

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν οι παράμετροι αξιολόγησης και σύγκρισης διατάξεων παραγωγής ισχύος. Οι παράμετροι αυτές αφορούν τις θερμοδυναμικές και τις οικονομικές επιδόσεις μιας διάταξης. Επιπλέον, αναλύθηκαν οι συνιστώσες του λειτουργικού κόστους με ιδιαίτερη έμφαση στο κόστος καυσίμου και εκπομπής ρύπων. Επίσης, μέσω συγκρίσεων με παραδείγματα της βιβλιογραφίας, διαπιστώθηκε ότι η διαδικασία υπολογισμού των οικονομικών επιδόσεων έχει ικανοποιητική ακρίβεια και συνεπώς μπορούμε να θεωρήσουμε πως έχουμε ένα αξιόπιστο εργαλείο υπολογισμού των οικονομικών επιδόσεων διαφόρων διατάξεων.

Κεφάλαιο 5: Υβριδικός Αεριοστρόβιλος – Ηλιακή Προθέρμανση Αέρα

5.1 Περιγραφή διάταξης

Για την υλοποίηση της διάταξης του υβριδικού αεριοστρόβιλου, τοποθετείται ο δέκτης πριν το θάλαμο καύσης (Σχήμα 5.1). Έτσι, ο αναρροφώμενος αέρας περνά από το συμπιεστή όπου λόγω της διαδικασίας της συμπίεσης αυξάνεται η πίεση και η θερμοκρασία του και εν συνεχεία οδηγείται στο δέκτη όπου συγκεντρώνονται οι ανακλώμενες ηλιακές ακτίνες από τα κάτοπτρα και θερμαίνεται. Κατόπιν, ακολουθεί ο θάλαμος καύσης, όπου καίγεται καύσιμο ούτως ώστε να δώσει την απαιτούμενη θερμότητα στο εργαζόμενο μέσο και συνεπώς ο αέρας μετατρέπεται σε καυσαέριο. Τέλος, το καυσαέριο εκτονώνεται στο στρόβιλο όπου και παράγεται η ωφέλιμη ισχύς. Όταν δεν υπάρχει διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια, ο δέκτης παρακάμπτεται και η μηχανή λειτουργεί όπως κάθε συμβατικός αεριοστρόβιλος.



Σχήμα 5.1. Συμβατικός και υβριδικός αεριοστρόβιλος απλής ατράκτου (SS)

Η μείωση της κατανάλωσης καυσίμου είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη θερμοκρασία εξόδου του δέκτη. Η μέγιστη μείωση στην κατανάλωση καυσίμου μπορεί να επιτευχθεί όταν ο δέκτης δύναται να θερμάνει τον αέρα στην επιθυμητή θερμοκρασία εισόδου του στρόβιλου (TIT). Σε μια τέτοια κατάσταση

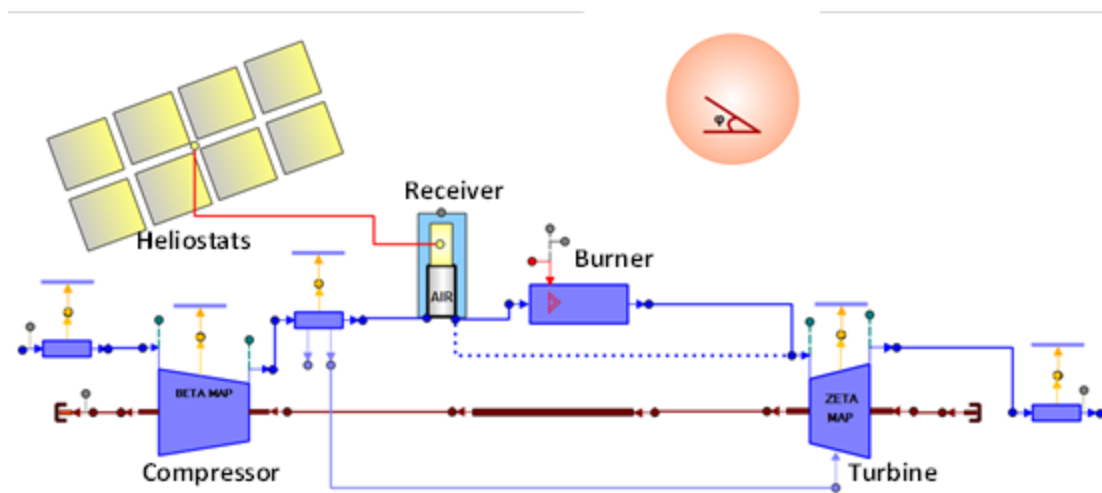
ο θάλαμος καύσης παρακάμπτεται και συνεπώς η κατανάλωση καυσίμου είναι μηδενική. Όμως, τα υλικά του δέκτη επιβάλλουν μέγιστα όρια λόγω αντοχής τόσο για τη θερμοκρασία, όσο και για την πίεση. Οι δέκτες που έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί σε πειραματικές διατάξεις υβριδικών αεριοστροβίλων έχουν όριο της τάξης των 1000°C για τη θερμοκρασία και 10bar για την πίεση (Ávila-Marín, 2011; EU Commission, 2005; Quero et al., 2014).

Αύξηση της τιμής της TIT σχεδίασης ενός αεριοστροβίλου οδηγεί σε αύξηση των επιδόσεων του. Όμως, τιμή της TIT μεγαλύτερη από το θερμοκρασιακό όριο του δέκτη οδηγεί στην απαίτηση κατανάλωσης καυσίμου. Με σκοπό την επίτευξη υψηλών επιδόσεων αλλά και τη μείωση του καταναλισκόμενου καυσίμου, η TIT επιλέγεται να ισούται με το θερμοκρασιακό όριο του δέκτη ούτως ώστε να υπάρχει η δυνατότητα λειτουργίας της μηχανής μόνο με τη χρήση ηλιακής ενέργειας. Ως εκ τούτου, όπως φαίνεται και από την Εξ. (4.8), σε αυτήν την περίπτωση μεγιστοποιείται και το ποσοστό συνεισφοράς της ηλιακής ενέργειας (solar share).

Κατά τη λειτουργία μιας τέτοιας διάταξης, υπάρχει περίπτωση, κάποια χρονική στιγμή, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας να είναι τέτοια που να οδηγεί σε υπέρβαση του ορίου θερμοκρασίας του δέκτη. Αυτό μπορεί να συμβεί επίσης όταν απαιτείται η λειτουργία σε μειωμένο φορτίο και συνεπώς σε μειωμένη TIT. Σε κάθε περίπτωση, η θερμοκρασία εξόδου του δέκτη θα πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση του ορίου του δέκτη και ίση με την απαιτούμενη TIT. Για να επιτευχθεί ο έλεγχος της θερμοκρασίας εξόδου του δέκτη στη διάταξη του υβριδικού αεριοστροβίλου, πραγματοποιείται η «απορύθμιση» κατάλληλου αριθμού κατόπτρων. Δηλαδή, κάτοπτρα σταματούν να στοχεύουν το δέκτη με αποτέλεσμα να δίδεται στη μηχανή μικρότερο ποσό ηλιακής θερμότητας από το μέγιστο δυνατό.

5.2 Μοντελοποίηση - Επιδόσεις

Για να μελετηθεί η επίδραση της χρήσης της ηλιακής ενέργειας σε κύκλο αεριοστροβίλου και εν γένει, η συμπεριφορά ενός υβριδικού αεριοστροβίλου, συγκροτείται το αντίστοιχο μοντέλο για την πιο απλή περίπτωση, τον αεριοστροβίλο απλής ατράκτου. Για την συγκρότηση του μοντέλου χρησιμοποιούνται οι κατάλληλες συνιστώσες των βιβλιοθηκών TURBO και SOLAR που συγκροτήθηκε στην παρούσα εργασία από το PROOSIS. Τη σχηματική απεικόνιση της διάταξης στο PROOSIS παρουσιάζει το Σχήμα 5.33.



Σχήμα 5.2. Σχηματική απεικόνιση μοντέλου υβριδικού αεριοστροβίλου απλής ατράκτου στο PROOSIS

Θεωρείται πως ο υβριδικός αεριοστροβίλος έχει προκύψει από την τροποποίηση συμβατικού μέσω της προσθήκης ηλιακού κομματιού (δέκτης και κάτοπτρα). Σε οικονομικούς όρους, η χρήση μηχανών με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ονομαστική ισχύ είναι προτιμότερη (Pitz-Paal et al., 2005), αλλά για πιλοτικές διατάξεις επίδειξης της τεχνολογίας, επιλέγονται μηχανές της τάξης των μερικών MW (Schwarzbözl et al., 2006). Επιπλέον, πειραματικές διατάξεις έχουν αποδείξει τη δυνατότητα χρήσης μηχανών της τάξης των 4.5MWe για τη δημιουργία υβριδικού αεριοστροβίλου τοποθετημένου στον πύργο που εδράζεται ο δέκτης (EU Commission, 2005; Quero et al., 2014). Για την ελαχιστοποίηση των απωλειών θερμότητας και πίεσης λόγω της σύνδεσης της μηχανής με το δέκτη, θεωρείται πως αυτή εγκαθίσταται στον πύργο και συνεπώς, με βάση τα ανωτέρω επιλέγεται ως ονομαστική ισχύς τα 5MW. Θεωρείται πως η μηχανή έχει σχεδιαστεί με στόχο τη μεγιστοποίηση της ειδικής ισχύος ούτως ώστε να παρουσιάζει μικρότερες διαστάσεις και συνεπώς μικρότερο βάρος, πράγμα που διευκολύνει την εγκατάσταση του υβριδικού αεριοστροβίλου στην κορυφή του πύργου.

Για την επιλογή του λόγου πίεσης και της θερμοκρασίας εισόδου του στροβίλου στο σημείο σχεδίασης, ακολουθούνται τα όσα αναφέρθηκαν ανωτέρω σχετικά με τα όρια που επιβάλλει ο δέκτης και επιλέγοντας μεγιστοποίηση της ειδικής ισχύος. Έτσι προκύπτουν $TIT= 1000^{\circ}C$ και $p_c= 10bar$. Σημειώνεται πως για αυτά τα χαρακτηριστικά σχεδίασης μεγιστοποιείται και ο θερμικός βαθμός απόδοσης της διάταξης (ικανοποιώντας όρια του δέκτη).

Οι πολυτροπικοί βαθμοί απόδοσης του συμπιεστή και του στροβίλου λαμβάνονται 0.88 και 0.90 αντίστοιχα (Mattingly, Heiser, & Pratt, 2002). Τέλος, θεωρείται πως ο θάλαμος καύσης του συμβατικού αεριοστροβίλου θα δύναται να λειτουργεί και στον υβριδικό χωρίς επανασχεδίαση, έχοντας την ίδια αεροθερμοδυναμική συμπεριφορά.

Ο δέκτης θεωρείται ότι εισάγει επιπλέον πτώση πίεσης η οποία και λαμβάνεται ίση με 2% (Aichmayer et al., 2013; G. Barigozzi et al., 2012b). Το

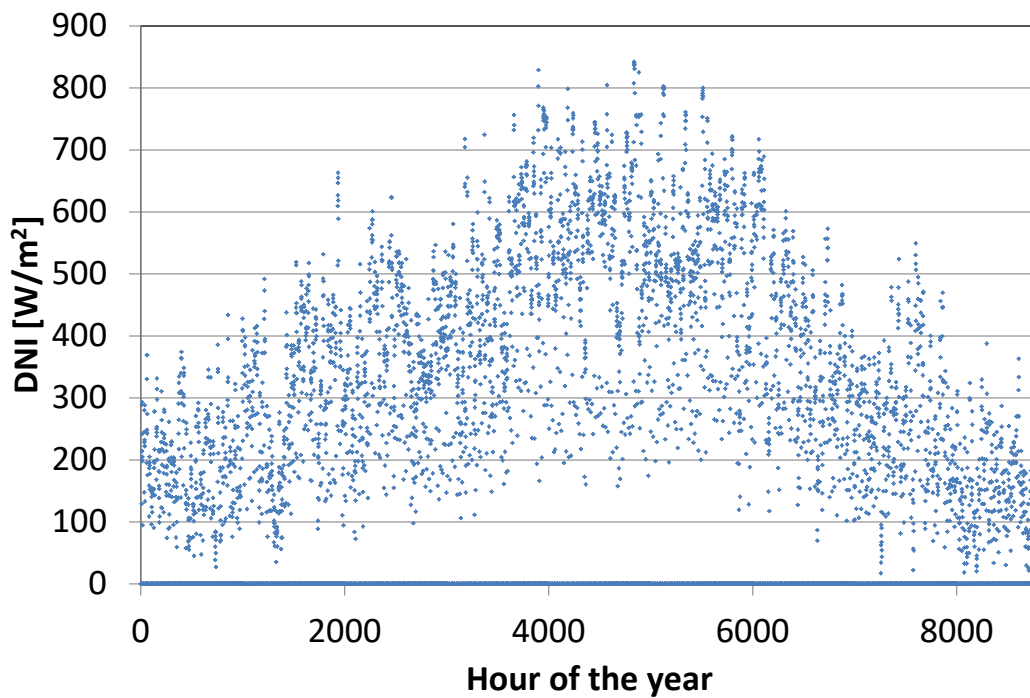
πεδίο των κατόπτρων αποτελείται από επίπεδα κάτοπτρα εμβαδού 64m^2 έκαστο, ενώ ο αριθμός τους (567) υπολογίζεται ούτως ώστε στον δέκτη να επιτυγχάνεται η μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία για συνθήκες τυπικής ημέρας, έντασης ακτινοβολίας $600\text{W}/\text{m}^2$ και χρονική στιγμή το μεσημέρι του θερινού ηλιοστασίου για την επιλεγείσα τοποθεσία. Για τον προσδιορισμό του αριθμού των κατόπτρων, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση της λειτουργίας του υβριδικού αεριοστροβίλου με τη χρήση του μοντέλου για τις ονομαστικές συνθήκες. Μεταβάλλοντας τον αριθμό των κατόπτρων προσδιορίστηκε ο αριθμός τους για τον οποίο ο δέκτης επιτυγχάνει τη θέρμανση του αέρα στη μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία.

Τις τιμές των βασικών παραμέτρων σχεδίασης των συνιστωσών της μηχανής και του ηλιακού κομματιού συνοψίζει ο Πίνακας 5.1.

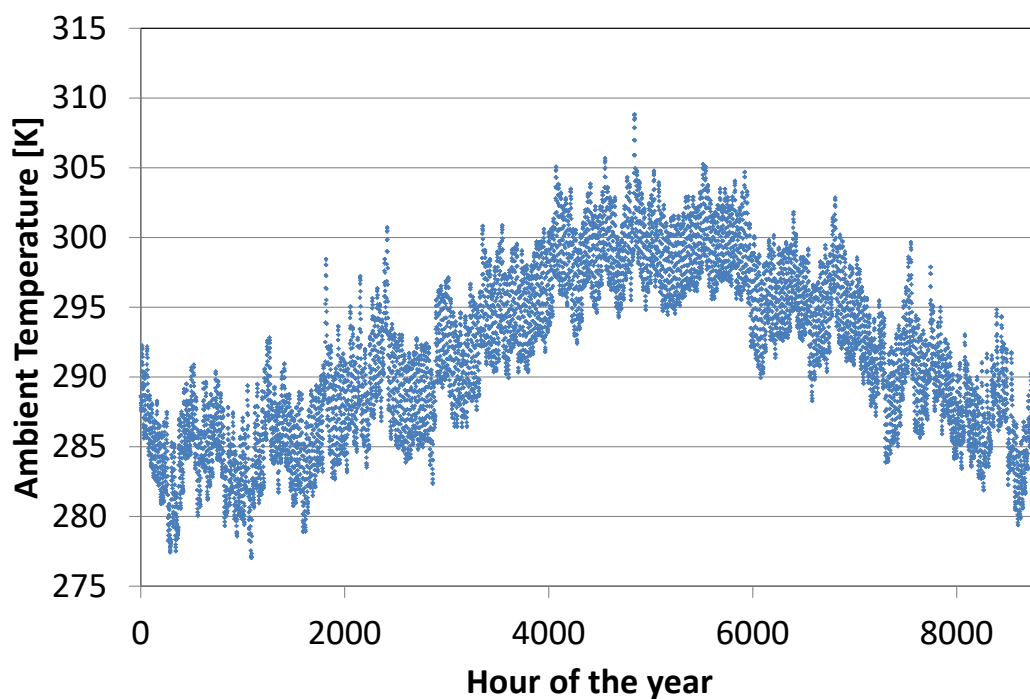
Κάτοπτρα	
Ανακλαστικότητα	0.97
Συντελεστής εστίασης	1
Σκίαση	0.97
Εμβαδόν [m^2]	64
Πλήθος	567
Δέκτης	
Απορροφητικότητα	0.95
Οπτική απόδοση	0.96
Εκπομπή	0.05
Αεριοστρόβιλος	
Λόγος πίεσης	10
TIT [C]	1000
Πολυτροπικός β.α. συμπίεστή	0.88
Πολυτροπικός β.α. στροβίλου	0.90
Ισχύς [MW]	5
Θερμικός β.α. [%]	31.51
Παροχή αέρα [kg/s]	20.15
Παροχή καυσίμου [kg/s]	0.33
LHV [MJ/kg]	48.12
Εκπομπές CO ₂ [kgCO ₂ /MJ _{fuel}]	0.053

Πίνακας 5.1. Χαρακτηριστικά σημείου σχεδίασης αεριοστροβίλου και ηλιακού κομματιού

Για την διεξαγωγή της μελέτης, επιλέγεται ως τοποθεσία η νότια Κρήτη ως τυπική περιοχή της Ελλάδας κατάλληλη για την εγκατάσταση ηλιοθερμικών εγκαταστάσεων. Χρησιμοποιούνται μετεωρολογικά δεδομένα (πίεση, θερμοκρασία, υγρασία, ηλιακή ακτινοβολία και ένταση ανέμου) τυπικού μετεωρολογικού έτους το οποίο προέκυψε από μετρήσεις 10ετίας (Meteotest, 2016) για την επιλεγείσα τοποθεσία. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται σε όλες τις αναλύσεις που παρουσιάζονται παρακάτω. Ως παράδειγμα των δεδομένων παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη, κατά τη διάρκεια του έτους, της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας (Σχήμα 5.3) και της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας (Σχήμα 5.4).



Σχήμα 5.3. Χρονική εξέλιξη της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας



Σχήμα 5.4. Χρονική εξέλιξη της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας

Η επίδραση της χρήσης της ηλιακής ενέργειας στον κύκλο αεριοστροβίλου αξιολογείται συγκρίνοντας τις επιδόσεις του υβριδικού κύκλου με το συμβατικό. Συνεπώς, εκτός του μοντέλου του υβριδικού αεριοστροβίλου, συγκροτείται και

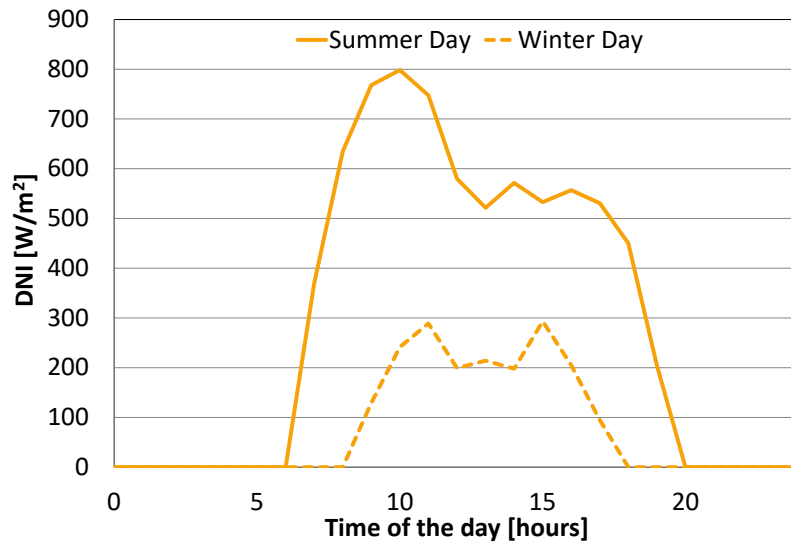
το αντίστοιχο του συμβατικού με τα ίδια χαρακτηριστικά σχεδίασης. Ουσιαστικά το μοντέλο του συμβατικού αεριοστροβίλου προκύπτει από το μοντέλο του αντίστοιχου υβριδικού με μόνιμη παράκαμψη του δέκτη. Και τα δύο μοντέλα χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της λειτουργίας των δύο μηχανών σε ωριαία βάση χρησιμοποιώντας τα προαναφερθέντα μετεωρολογικά δεδομένα. Τα μοντέλα προσομοίωσης λαμβάνουν υπ' όψιν τη μεταβολή των συνθηκών λειτουργίας σε ωριαία βάση και προσομοιώνουν πλήρως την εκτός σημείου σχεδίασης λειτουργία της μηχανής. Οι ετήσιες επιδόσεις προκύπτουν ύστερα από ολοκλήρωση των ωριαίων επιδόσεων όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 4.1. Ως σενάριο λειτουργίας επιλέγεται αυτό της συνεχούς λειτουργίας με σταθερή TIT με σκοπό τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος.

Η διαφορά στην παραγόμενη ενέργεια, στην καταναλισκόμενη ποσότητα καυσίμου, στο θερμικό βαθμό απόδοσης καυσίμου, στην ειδική κατανάλωση καυσίμου, καθώς και το ποσοστό συνεισφοράς της ηλιακής ενέργειας (solar share) παρουσιάζει ο Πίνακας 5.2. Όπως φαίνεται, τα επιλεγέντα χαρακτηριστικά σχεδίασης οδηγούν σε ποσοστό συνεισφοράς της ηλιακής ενέργειας της τάξης του 24%. Επιπλέον, το όφελος στην κατανάλωση καυσίμου ανέρχεται περίπου στο 25%. Σημαντική παρατήρηση αποτελεί το γεγονός πως παρατηρείται μείωση και στην παραγόμενη ενέργεια, της τάξης του 3%.

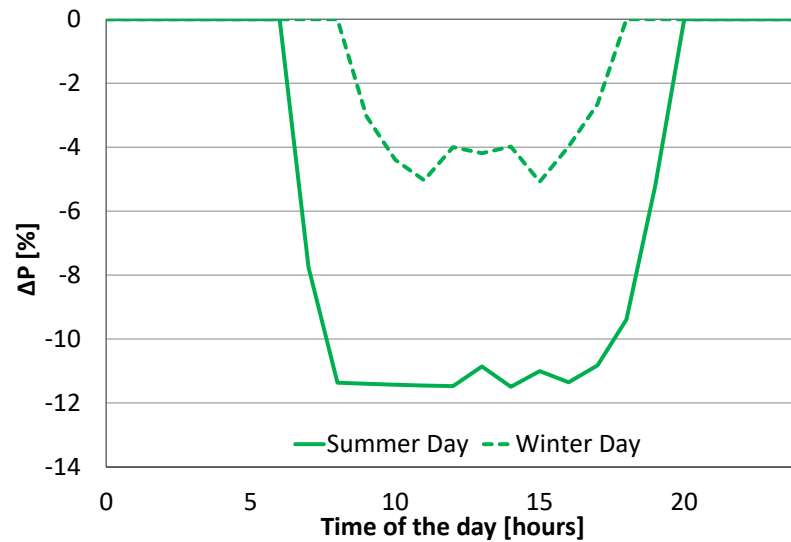
Παράμετρος	Διαφορά [%]
ΔE	-3.15
ΔF	-25.34
Δeff_f	29.72
Δsfc	-22.91
fss	23.61

Πίνακας 5.2. Σύγκριση ετήσιων επιδόσεων μεταξύ υβριδικού και συμβατικού αεριοστροβίλου

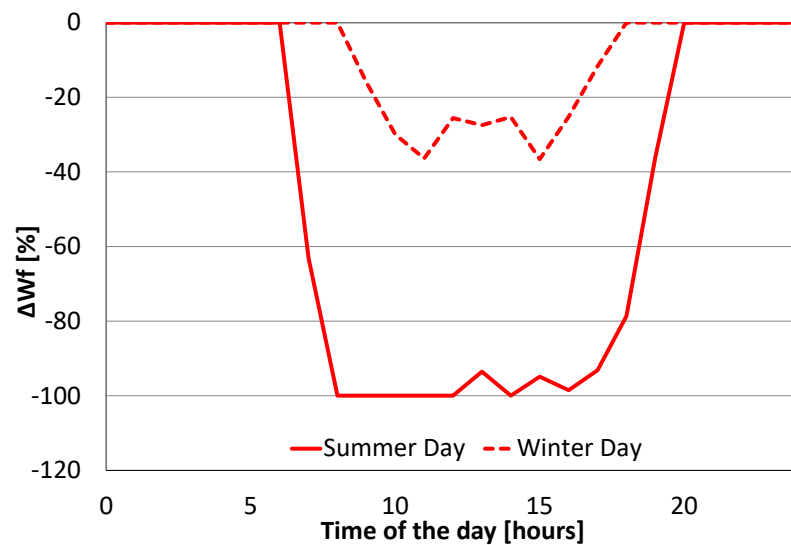
Ανάλογα συμπεράσματα εξάγονται και από την σύγκριση σε ωριαία βάση. Η επίδραση της εποχής φαίνεται από την ημερήσια σύγκριση για μια χειμερινή και μια θερινή ημέρα με ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας όπως παρουσιάζει το Σχήμα 5.5. Κατά τις ώρες ηλιοφάνειας, η παραγόμενη ισχύς μειώνεται (Σχήμα 5.6), όπως επίσης και η κατανάλωση καυσίμου (Σχήμα 5.7) και η ειδική κατανάλωση καυσίμου (Σχήμα 5.8). Τις ώρες που δεν υπάρχει ηλιοφάνεια, η υβριδική μηχανή λειτουργεί ως συμβατική (παρακάμπτοντας τον δέκτη) και ως εκ τούτου δεν παρουσιάζονται αποκλίσεις στις επιδόσεις. Ακόμα, η μέγιστη τιμή στη διαφορά των παραμέτρων σύγκρισης παρουσιάζεται για υψηλές τιμές της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τις οποίες η απαιτούμενη TIT επιτυγχάνεται μόνο από την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας όπου ο θάλαμος καύσης παρακάμπτεται. Ως εκ τούτου, η διαφορά στις επιδόσεις είναι εν γένει μεγαλύτερη κατά τις θερινές ημέρες όπου η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας λαμβάνει υψηλότερες τιμές.



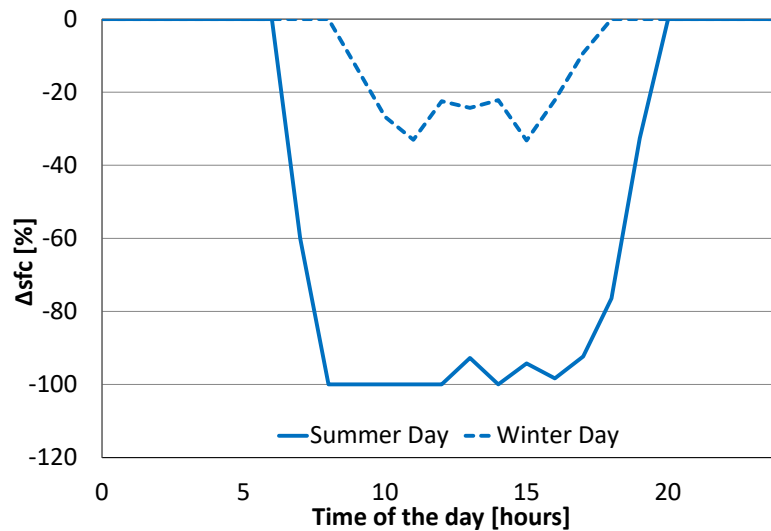
Σχήμα 5.5. Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας για χειμερινή και θερινή ημέρα



Σχήμα 5.6. Διαφορά στην παραγόμενη ισχύ για χειμερινή και θερινή ημέρα



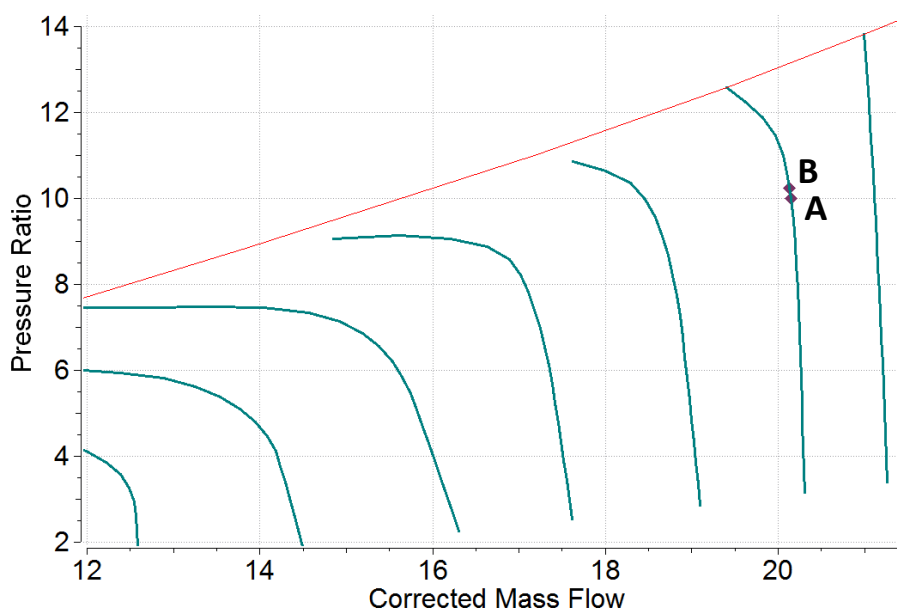
Σχήμα 5.7. Διαφορά στην κατανάλωση καυσίμου για χειμερινή και θερινή ημέρα



Σχήμα 5.8. Διαφορά στην ειδική κατανάλωση καυσίμου για χειμερινή και θερινή ημέρα

Όπως αναφέρθηκε αρχικά, η χρήση της ηλιακής ενέργειας στον αεριοστρόβιλο στοχεύει στη μείωση της απαιτούμενης ποσότητας καυσίμου. Όμως, από τη σύγκριση των επιδόσεων, παρατηρείται το μειονέκτημα της μείωσης της παραγόμενης ποσότητας ενέργειας. Η μείωση αυτή είναι αποτέλεσμα δύο παραγόντων. Ο πρώτος αφορά τις πρόσθετες απώλειες πίεσης που εισάγει ο δέκτης. Οι απώλειες αυτές οδηγούν σε μείωση της παραγόμενης ισχύος. Ως εκ τούτου, κατά τις ώρες λειτουργίας του δέκτη η παραγόμενη ισχύς θα είναι μειωμένη. Ο δεύτερος αφορά στη σύσταση του εργαζόμενου μέσου. Σε ένα συμβατικό αεριοστρόβιλο, στην είσοδο του στρόβιλου, το εργαζόμενο μέσο είναι καυσαέριο που προέκυψε από την καύση του αέρα με καύσιμο περίπου στο 2% της μάζας του. Στον υβριδικό αεριοστρόβιλο, λόγω της ηλιακής προθέρμανσης του αέρα, η χρησιμοποιούμενη ποσότητα καυσίμου είναι μικρότερη (μειωμένος λόγος καυσίμου - αέρα). Τα παραγόμενα καυσαέρια έχουν σύσταση που πλησιάζει περισσότερο αυτή του αέρα, με συνέπεια να έχουν μικρότερη θερμοχωρητικότητα. Για ίδιες ατμοσφαιρικές συνθήκες, ο συμπιεστής λειτουργεί στις ίδιες ανηγμένες στροφές και αναρροφά περίπου την ίδια ποσότητα αέρα, αφού οι χαρακτηριστικές των στροφών είναι σχεδόν κάθετες προς τον άξονα των ανηγμένων παροχών (Σχήμα 5.9). Έτσι, η απαίτηση ισχύος του συμπιεστή είναι περίπου σταθερή. Όμως, η μειωμένη ειδική θερμοχωρητικότητα του εργαζόμενου μέσου στο στρόβιλο έχει ως αποτέλεσμα τη μειωμένη παραγόμενη ισχύ για δεδομένη θερμοκρασία εισόδου στρόβιλου και λόγο πίεσης. Με σταθερή την απαίτηση ισχύος του συμπιεστή, προκύπτει μείωση στην ωφέλιμη παραγόμενη ισχύ. Τα ανωτέρω παρουσιάζονται εντονότερα όσο μειώνεται η ειδική θερμοχωρητικότητα του εργαζόμενου μέσου του στρόβιλου, ή διαφορετικά όσο η σύσταση του εργαζόμενου μέσου πλησιάζει αυτή του αέρα. Έτσι, η μέγιστη μείωση της παραγόμενης ισχύος παρουσιάζεται για τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τις οποίες ο θάλαμος καύσης

παρακάμπτεται και το εργαζόμενο μέσο είναι αέρας καθ' όλο το μήκος της μηχανής.



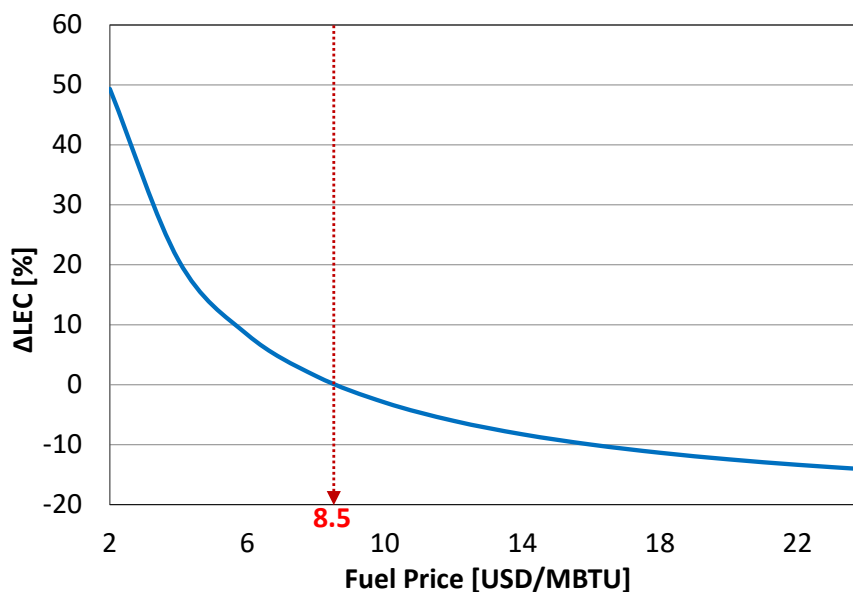
Σχήμα 5.9. Σημείο λειτουργίας στο χάρτη του συμπιεστή για συμβατικό (A) και υβριδικό (B) αεριοστρόβιλο απλής ατράκτου

Όπως λέχθηκε στο Κεφάλαιο 4, εκτός των αεροθερμοδυναμικών επιδόσεων που παρουσιάστηκαν, η κύρια παράμετρος αξιολόγησης μιας εγκατάστασης είναι η απόδοσή της σε οικονομικούς όρους. Για τη σύγκριση μεταξύ υβριδικού και συμβατικού αεριοστροβίλου, χρησιμοποιείται το LEC θεωρώντας διάρκεια ζωής εγκατάστασης τα 30 έτη και σταθερό επιτόκιο 5%. Τα οικονομικά μεγέθη σχετικά με το κόστος κτήσης και λειτουργίας λαμβάνονται από δημοσιευμένες εργασίες και αναφορές (Pitz-Paal et al., 2005; Schwarzbözl et al., 2006; Spelling, 2013) όπως παρατίθενται από τους Spelling & Laumert (Spelling & Laumert, 2014). Το κόστος του καυσίμου δύναται να παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις αναλόγως διαφόρων παραγόντων όπως πολιτικών, διαθεσιμότητας κτλ. Για το λόγο αυτό, εξετάζεται ένα εύρος τιμών κόστους του καυσίμου. Τα οικονομικά μεγέθη εκφράζονται σε USD αφού διατίθενται με αυτή τη μορφή τόσο στις προαναφερθείσες αναφορές όσο και γενικότερα. Δεν επιλέγεται η μετατροπή τους σε EUR λόγω της μη σταθερής ισοτιμίας. Τα χρησιμοποιούμενα οικονομικά μεγέθη παρουσιάζει συγκεντρωτικά ο Πίνακας 5.3.

Κόστος Κτήσης	
Αεριοστρόβιλος [USD/MWe]	589000
Κάτοπτρα [USD/m ²]	200
Δέκτης [USD/MWth]	231000
Ετήσιο Κόστος Λειτουργίας	
Αεριοστρόβιλος [USD/MWe]	27700
Αεριοστρόβιλος [USD/MWhe]	0.93
Κάτοπτρα [USD/m ²]	1.1
Δέκτης [USD/MWth]	11400
Δέκτης [USD/MWthh]	0.68
Καύσιμο [USD/MBTU]	2-24
Εκπομπές CO ₂ [USD/t]	5

Πίνακας 5.3. Οικονομικά μεγέθη διάταξης υβριδικού και συμβατικού αεριοστροβίλου

Το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας (LEC) υπολογίζεται τόσο για τον υβριδικό αεριοστρόβιλο όσο και για το συμβατικό, για διάφορες τιμές του κόστους καυσίμου και τη διαφορά τους παρουσιάζει το Σχήμα 5.10. Ο υβριδικός αεριοστρόβιλος παρουσιάζει μεγαλύτερο LEC για μικρές τιμές του κόστους καυσίμου. Στην τιμή των 8.5 USD/MBTU οι δύο διατάξεις έχουν τις ίδιες οικονομικές επιδόσεις, ενώ για τιμές υψηλότερες των 8.5 USD/MBTU, ο υβριδικός αεριοστρόβιλος υπερτερεί. Όταν το LEC για τις δύο διατάξεις είναι το ίδιο, σημαίνει πως το κόστος επένδυσης και λειτουργίας του ηλιακού κομματιού ισούται με το αποφευχθέν κόστος καυσίμου λαμβάνοντας υπ' όψιν και τη μείωση της παραγόμενης ενέργειας. Είναι προφανές ότι η βαρύτητα της ποσότητας καυσίμου που εξοικονομείται, αυξάνεται όσο αυξάνεται και το κόστος καυσίμου.



Σχήμα 5.10. Διαφορά στο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας για διάφορες τιμές του κόστους καυσίμου

5.3 Επίδραση παραμέτρων σχεδίασης στις επιδόσεις

Στη μέχρι στιγμής ανάλυση, οι τιμές των παραμέτρων σχεδίασης επελέγησαν σύμφωνα με ενδεικτικές τιμές της βιβλιογραφίας και με βάση συγκεκριμένες παραδοχές. Όμως, τιμές παραμέτρων όπως η πτώση πίεσης του δέκτη και ο συντελεστής οπτικής απόδοσής του ενέχουν αβεβαιότητα αφού εκτιμώνται από πειραματικές διατάξεις χωρίς να είναι βέβαιο ότι για τις εμπορικές εφαρμογές αυτές οι τιμές θα είναι αντιπροσωπευτικές. Επιπλέον, ο αριθμός των κατόπτρων που χρησιμοποιήθηκε, προέκυψε βάση της παραδοχής της επίτευξης της μέγιστης TIT υπό συγκεκριμένες ατμοσφαιρικές συνθήκες, χωρίς να λαμβάνεται η επίπτωσή του στις συνολικές επιδόσεις. Τέλος, παρουσιάστηκε η επίδραση της χρήσης της ηλιακής ενέργειας σε μηχανή απλής ατράκτου, ενώ μηχανές διαφορετικής διάταξης ενδέχεται να παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά.

Ως εκ τούτου, κρίνεται αναγκαία η μελέτη της επίδρασης των τιμών των βασικών σχεδιαστικών παραμέτρων στις επιδόσεις και ιδίως όσων η τιμή συνδέεται με αβεβαιότητα.

5.3.1 Ανάλυση ευαισθησίας για σχεδιαστικές παραμέτρους

Αρχικά, πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων της πτώσης πίεσης του δέκτη, των συντελεστών οπτικής απόδοσης δέκτη και κατόπτρων και του βαθμού απόδοσης του θαλάμου καύσης. Ο θάλαμος καύσης, με βάση τα όσα αναφέρθηκαν, χρειάζεται επανασχεδίαση και ως εκ τούτου διερευνάται η επίδραση της μείωσης του βαθμού απόδοσής του στον υβριδικό αεριοστροβίλο.

Η τιμή κάθε μίας παραμέτρου μεταβάλλεται κατά $\pm 0.01\%$ από την αντίστοιχη τιμή αναφοράς (Πίνακας 5.1) (με εξαίρεση την απόδοση του θαλάμου καύσης, -0.01%) και υπολογίζονται οι ετήσιες επιδόσεις του υβριδικού αεριοστροβίλου. Κατόπιν, συγκρίνονται με αυτές που προέκυψαν για την ανάλυση που προηγήθηκε για τις τιμές που παρουσιάζει ο Πίνακας 5.1. Τη σύγκριση με τη μορφή ποσοστιαίας διαφοράς για την παραγόμενη ενέργεια (ΔE), την κατανάλωση καυσίμου (ΔF) και το θερμικό βαθμό απόδοσης καυσίμου (eff_f) παρουσιάζει ο Πίνακας 5.4.

Παράμετρος	Τιμή	ΔE [%]	ΔF [%]	Δeff_f [%]
ΔΡ Δέκτη	1%	0.37	0.14	0.23
	3%	-0.37	-0.14	-0.23
β.α. Θαλάμου Καύσης	98.5%	0.03	0.85	-0.82
Οπτικός β.α. δέκτη	95%	0.02	0.27	-0.25
	97%	-0.02	-0.27	0.25
Οπτικός β.α. κατόπτρων	96%	0.02	0.28	-0.26
	98%	-0.02	-0.27	0.25

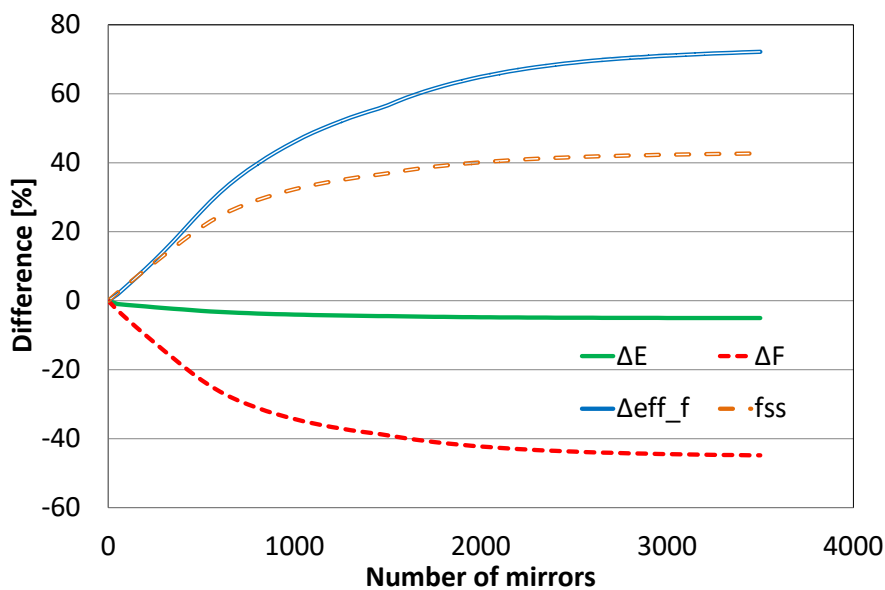
Πίνακας 5.4. Επίδραση της τιμής των σχεδιαστικών παραμέτρων στις επιδόσεις

Παρατηρείται πως την ισχυρότερη επίδραση όσον αφορά στην κατανάλωση καυσίμου, έχει ο βαθμός απόδοσης του θαλάμου καύσης, ενώ όσον αφορά στην παραγόμενη ενέργεια, η πτώση πίεσης του δέκτη.

5.3.2 Επίδραση αριθμού κατόπτρων στις επιδόσεις

Μια σημαντική παράμετρος σχεδίασης είναι ο αριθμός των κατόπτρων, που επηρεάζει τις αεροθερμοδυναμικές επιδόσεις αφού καθορίζει το ποσό της προσδιδόμενης ηλιακής θερμότητας. Επίσης, επηρεάζει και τις οικονομικές επιδόσεις αφού επηρεάζει σημαντικά το αρχικό κόστος επένδυσης ενώ έχει κάποια επίπτωση και στο κόστος λειτουργίας.

Για τη διερεύνηση της επίδρασης του αριθμού των κατόπτρων στις συνολικές επιδόσεις, η λειτουργία του υβριδικού αεριοστροβίλου προσομοιώνεται για διάφορους αριθμούς κατόπτρων και οι επιδόσεις του υβριδικού αεριοστροβίλου συγκρίνονται με αυτές του συμβατικού. Οι διαφορές επιδόσεων παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.11 για την παραγόμενη ενέργεια (ΔE), την κατανάλωση καυσίμου (ΔF) και το θερμικό βαθμό απόδοσης καυσίμου (Δeff_f). Επιπλέον, απεικονίζεται και το ποσοστό συνεισφοράς της ηλιακής ενέργειας (f_{ss}).

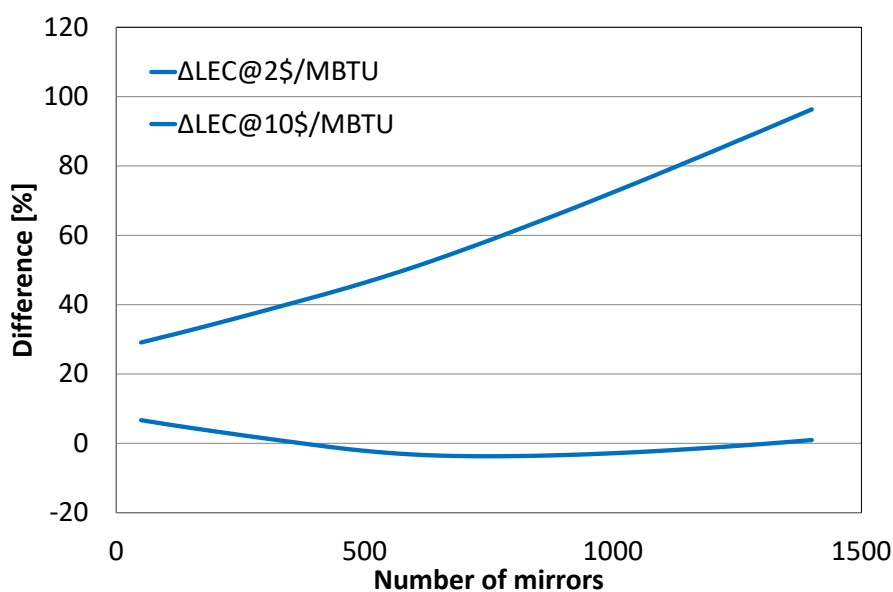


Σχήμα 5.11. Διαφορά επιδόσεων υβριδικού και συμβατικού αεριοστροβίλου για διάφορους αριθμούς κατόπτρων

Όσο αυξάνει ο αριθμός των κατόπτρων τόσο μειώνεται η κατανάλωση καυσίμου αλλά και η παραγόμενη ενέργεια, ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται και το ποσοστό συνεισφοράς της ηλιακής ενέργειας. Επίσης, παρατηρείται πως η ένταση της επίδρασης αυτής στις επιδόσεις μειώνεται όσο αυξάνεται ο αριθμός των κατόπτρων. Η αύξηση του αριθμού των κατόπτρων συνεπάγεται μεγαλύτερο ποσό διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας κάθε στιγμή, το οποίο όμως δεν μπορεί να αξιοποιηθεί λόγω του θερμοκρασιακού ορίου του δέκτη. Ο μεγάλος

αριθμός κατόπτρων δρα θετικά για χαμηλές εντάσεις ηλιακής ακτινοβολίας (πχ χειμερινοί μήνες) διότι διαθέτει το απαιτούμενο ποσό ηλιακής ενέργειας στο δέκτη ούτως ώστε να επιτευχθεί η απαιτούμενη ΤΙΤ. Όταν η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι μεγάλη (πχ θερινοί μήνες), περισσότερα κάτοπτρα θα πρέπει να απο-εστιάζουν ούτως ώστε να μην υπάρξει υπέρβαση του θερμοκρασιακού ορίου του δέκτη.

Τις επιδόσεις σε οικονομικούς όρους του υβριδικού αεριοστρόβιλου σε σχέση με τον συμβατικό για διάφορους αριθμούς κατόπτρων και για δύο τιμές του κόστους καυσίμου παρουσιάζει το Σχήμα 5.12. Όπως φαίνεται, για μικρή τιμή του κόστους καυσίμου, το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας του υβριδικού αεριοστρόβιλου είναι σταθερά μεγαλύτερο και με αυξητική τάση σε σχέση με το συμβατικό. Για υψηλή τιμή του κόστους καυσίμου, παρουσιάζεται ελάχιστο στο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας για συγκεκριμένο αριθμό κατόπτρων. Η διαφορετική συμπεριφορά έγκειται στη βαρύτητα που έχει το κόστος του καυσίμου και στο απόλυτο μέγεθος της μείωσης του καυσίμου όσο αυξάνεται ο αριθμός των κατόπτρων. Συνεπώς, το κόστος του καυσίμου αποτελεί σημαντικό παράγοντα που θα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν κατά τη σχεδίαση μιας τέτοιας διάταξης (άλλωστε αυτό συμβαίνει και για συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρισμού από ορυκτά καύσιμα).



Σχήμα 5.12. Διαφορά στο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας για διάφορους αριθμούς κατόπτρων

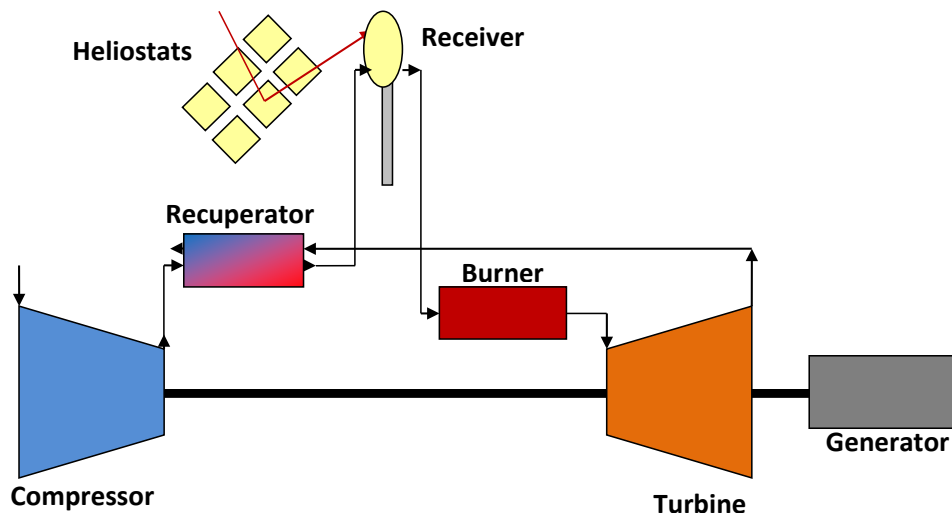
5.3.3 Επίδραση διάταξης ατράκτων στις επιδόσεις

Μια επιλογή που γίνεται κατά τον σχεδιασμό μιας ηλιοθερμικής διάταξης είναι ο τύπος του αεριοστρόβιλου ως προς τη διάταξη των ατράκτων του, τον αριθμό των τυμπάνων και την παρουσία βελτιωτικών διατάξεων, όπως η ανακόμιση θερμότητας. Διαφορετικοί τύποι συμβατικών αεριοστρόβιλων συμπεριφέρονται με διαφορετικό τρόπο κατά την λειτουργία τους. Προχωρούμε

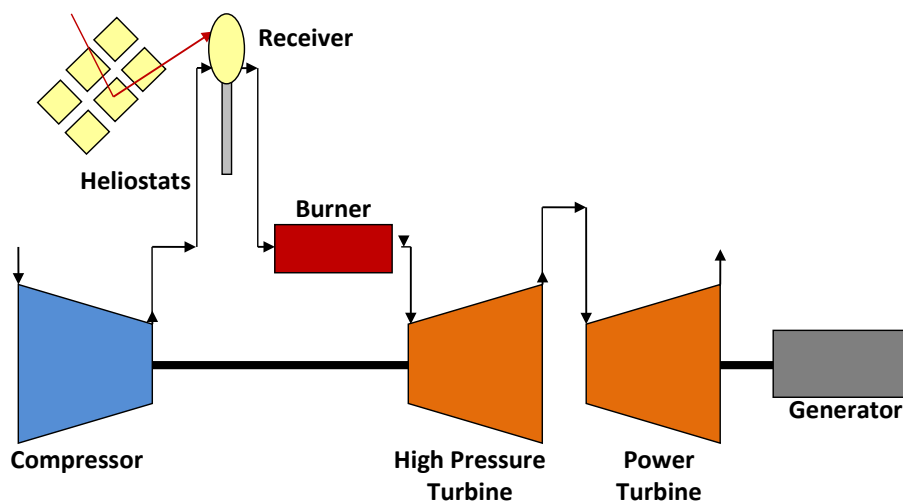
λοιπόν σε διερεύνηση της επίδρασης του τύπου του αεριοστροβίλου στις επιδόσεις της υβριδικής διάταξης.

Εξετάζονται τέσσερις διαφορετικοί τύποι αεριοστροβίλου αναλόγως της διάταξης των ατράκτων τους:

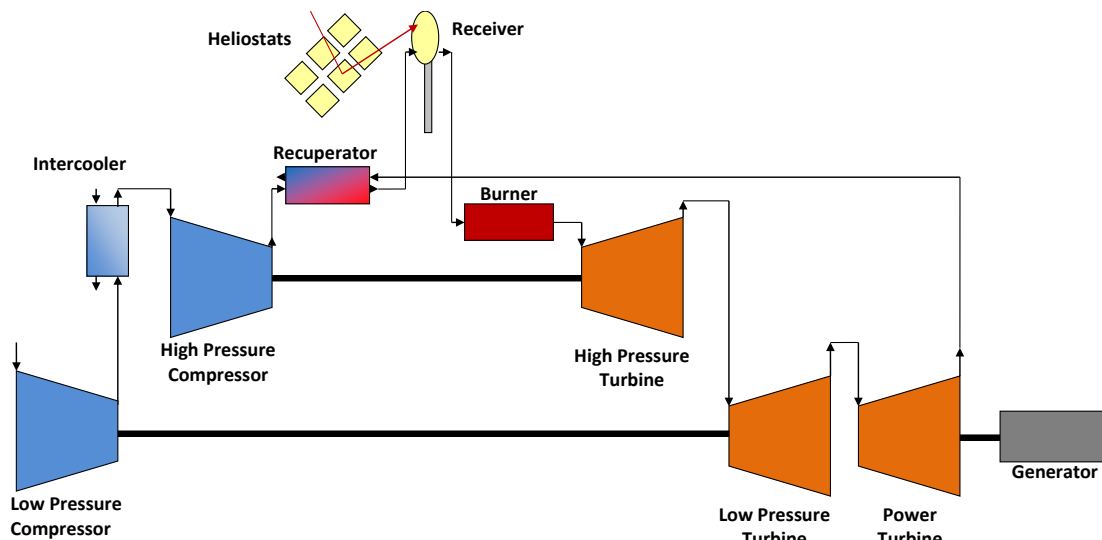
1. Διάταξη απλής ατράκτου (SS) (Σχήμα 5.1): ως η απλούστερη διάταξη
2. Διάταξη απλής ατράκτου με ανακόμιση θερμότητας (SS_R) (Σχήμα 5.13): ώστε να διερευνηθεί η επίδραση της ανακόμισης θερμότητας
3. Διάταξη διδύμων ατράκτων (TS) (Σχήμα 5.14): για να διερευνηθεί η επίδραση του στροβίλου ισχύος
4. Διάταξη διπλού τυμπάνου με στρόβιλο ισχύος και ανάψυξη - ανακόμιση θερμότητας (2Sp3Sh_I_R) (Σχήμα 5.15): διότι αυτή η διάταξη έχει εν γένει χαμηλό λόγο πίεσης και TIT, συνθήκες που είναι επιθυμητές σε έναν υβριδικό αεριοστρόβιλο



Σχήμα 5.13. Διάταξη υβριδικού αεριοστροβίλου απλής ατράκτου με ανακόμιση θερμότητας (SS_R)



Σχήμα 5.14. Διάταξη υβριδικού αεριοστροβίλου διδύμων ατράκτων (TS)



Σχήμα 5.15. Διάταξη υβριδικού αεριοστροβίλου διπλού τυμπάνου με στρόβιλο ισχύος και ανάψυξη - ανακόμιση θερμότητας (2Sp3Sh_I_R)

Τα χαρακτηριστικά σχεδίασης και οι επιδόσεις της διάταξης απλής ατράκτου (SS), παρουσιάστηκαν σε προηγούμενη παράγραφο. Ακολουθώντας την ίδια λογική που περιγράφηκε (όρια υλικών δέκτη, μεγιστοποίηση ειδικής ισχύος κτλ), προκύπτουν τα χαρακτηριστικά σχεδίασης και των υπόλοιπων διατάξεων (Πίνακας 5.5). Οι επιδόσεις κάθε υβριδικής διάταξης συγκρίνονται με αυτές της αντίστοιχης συμβατικής θεωρώντας συνεχή λειτουργία με σταθερή ΤΙΤ κατά τη διάρκεια του έτους.

	SS	SS_R	TS	2Sp3Sh_I_R
Λόγος πίεσης συμπίεστή υψηλής	10	10	10	3.18
Λόγος πίεσης συμπίεστή χαμηλής	-	-	-	3.18
Πολυτροπικός β.α. συμπίεστή υψηλής	0.88	0.88	0.88	0.88
Πολυτροπικός β.α. συμπίεστή χαμηλής	-	-	-	0.88
Πολυτροπικός β.α. στροβίλου υψηλής	0.90	0.90	0.90	0.90
Πολυτροπικός β.α. στροβίλου χαμηλής	-	-	-	0.90
Πολυτροπικός β.α. στροβίλου ισχύος	-	-	0.90	0.90
Αποδοτικότητα αναψύκτη	-	-	-	0.80
Αποδοτικότητα ανακομιστή	-	0.90	-	0.92
Ισχύς [MW]	5	5	5	5
Θερμικός β.α. [%]	31.51	39.20	32.25	45.97
Παροχή αέρα [kg/s]	20.15	21.23	19.68	18.23
Παροχή καυσίμου [kg/s]	0.33	0.27	0.32	0.23
Αριθμός κατόπτρων	567	461	514	370

Πίνακας 5.5. Χαρακτηριστικά σημείου σχεδίασης αεριοστροβίλων

Τη διαφορά των επιδόσεων σε ετήσια βάση μεταξύ των υβριδικών και των αντίστοιχων συμβατικών διατάξεων παρουσιάζει ο Πίνακας 5.6.

Παράμετρος	SS	SS_R	TS	2Sp3Sh_I_R
ΔE [%]	-3.15	-2.49	-6.04	-2.83
ΔF [%]	-25.34	-25.21	-25.68	-25.44
Δeff_f [%]	29.72	30.38	26.42	30.32
fss [%]	23.61	23.92	22.36	23.05

Πίνακας 5.6. Διαφορά ετήσιων επιδόσεων μεταξύ υβριδικών και συμβατικών αεριοστροβίλων

Όλες οι διατάξεις παρουσιάζουν την ίδια τάση μεταβολής, με μείωση στην κατανάλωση καυσίμου αλλά και στην παραγόμενη ισχύ. Η ερμηνεία της συμπεριφοράς αυτής αναλύθηκε στη παράγραφο 5.2 για τη διάταξη της απλής ατράκτου.

Το μέγεθος των αποκλίσεων των εξεταζόμενων μεταβλητών επιδόσεων διαφέρει για τις διάφορες διατάξεις. Έτσι, αν και οι τέσσερις διατάξεις παρουσιάζουν παραπλήσια μείωση στην κατανάλωση καυσίμου, έχουν σημαντικές αποκλίσεις όσον αφορά στη μείωση της παραγόμενης ενέργειας. Για τις διατάξεις χωρίς ανακόμιση θερμότητας (απλής ατράκτου και διδύμων ατράκτων) η διαφορά είναι η μεγαλύτερη. Τη μεγαλύτερη διαφορά παρουσιάζει η διάταξη διδύμων ατράκτων, όπως θα εξηγηθεί στη συνέχεια. Όσον αφορά το συντελεστή συνεισφοράς της ηλιακής ενέργειας και οι τέσσερις διατάξεις έχουν παραπλήσια τιμή.

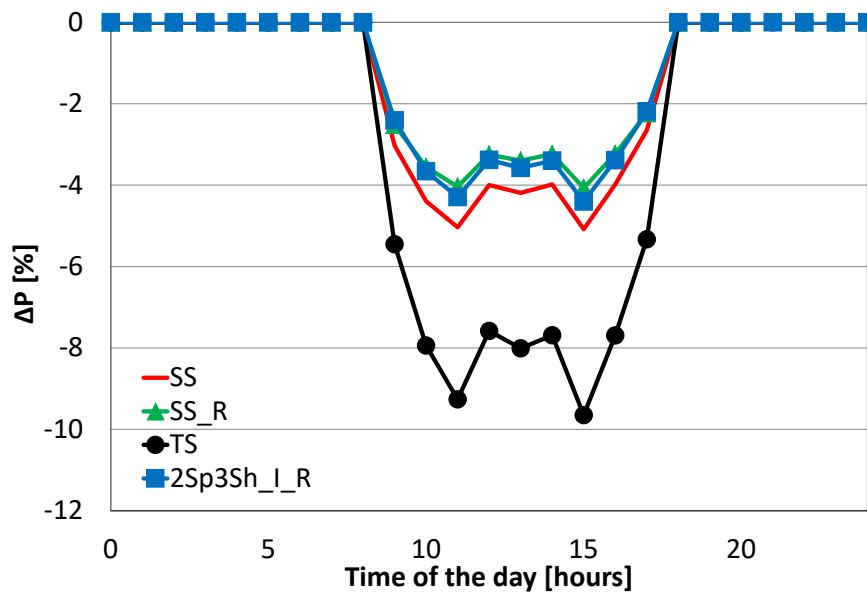
Επιπλέον, παρουσιάζεται η διαφορά των επιδόσεων σε ημερήσια βάση για χειμερινή και θερινή ημέρα όσον αφορά την παραγόμενη ισχύ (Σχήμα 5.16, Σχήμα 5.19), την κατανάλωση καυσίμου (Σχήμα 5.17, Σχήμα 5.20) και την ειδική κατανάλωση καυσίμου (Σχήμα 5.18, Σχήμα 5.21).

Οι αποκλίσεις όλων των παραμέτρων είναι υψηλότερες κατά τη θερινή ημέρα λόγω της υψηλότερης έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας. Όπως και στην περίπτωση των ετήσιων επιδόσεων, και οι τέσσερις διατάξεις παρουσιάζουν παραπλήσια μεταβολή όσον αφορά την κατανάλωση καυσίμου. Έντονη διαφοροποίηση παρατηρείται στη μεταβολή της παραγόμενης ισχύος.

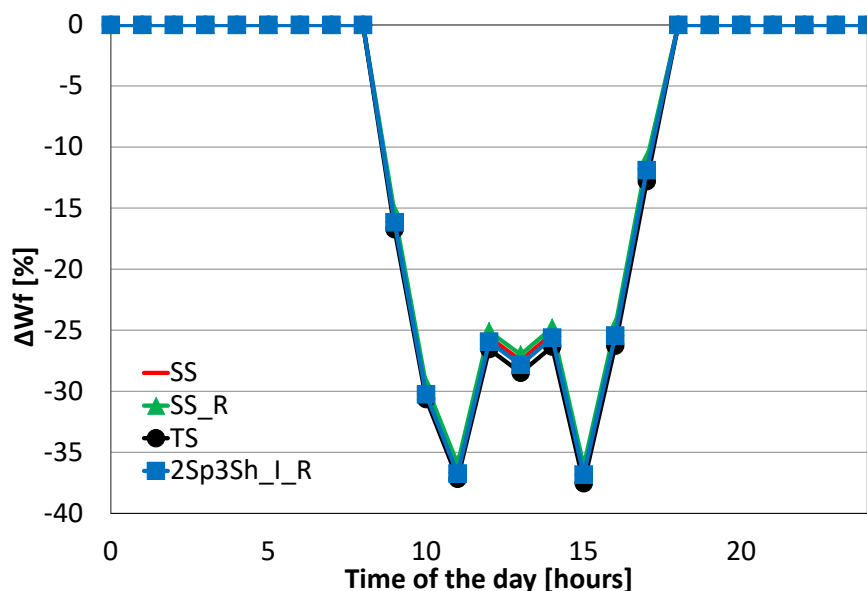
Στη διάταξη απλής ατράκτου, όπως αναλύθηκε, μειώνεται η ωφέλιμη ισχύς στην άτρακτο αφού η απαίτηση του συμπιεστή παραμένει σταθερή ενώ η παραγωγή του στροβίλου μειώνεται. Στη διάταξη διδύμων ατράκτων, το κομμάτι της αεριογόνου βρίσκεται σε ισορροπία ισχύος, δηλαδή τις απαιτήσεις του συμπιεστή καλύπτει ο στρόβιλος υψηλής. Έτσι, όταν χρησιμοποιείται ηλιακή ενέργεια, η παραγόμενη ισχύς του στροβίλου υψηλής θα μειωθεί λόγω της αλλαγής της σύστασης του εργαζόμενου μέσου και συνεπώς ο συμπιεστής θα πρέπει να μεταβεί σε σημείο λειτουργίας με μειωμένη απαίτηση ισχύος, δηλαδή με μειωμένη παροχή (Σχήμα 5.22). Αυτό συνεπάγεται μείωση της παροχής στο στρόβιλο ισχύος και σε συνδυασμό με την αλλαγή της σύστασης του εργαζόμενου μέσου, η ωφέλιμη ισχύς μειώνεται περισσότερο συγκριτικά με τη διάταξη απλής ατράκτου.

Οι διατάξεις με ανακόμιση θερμότητας επηρεάζονται λιγότερο όσον αφορά τη μείωση της παραγόμενης ισχύος ακόμα και για τη διάταξη που περιλαμβάνει

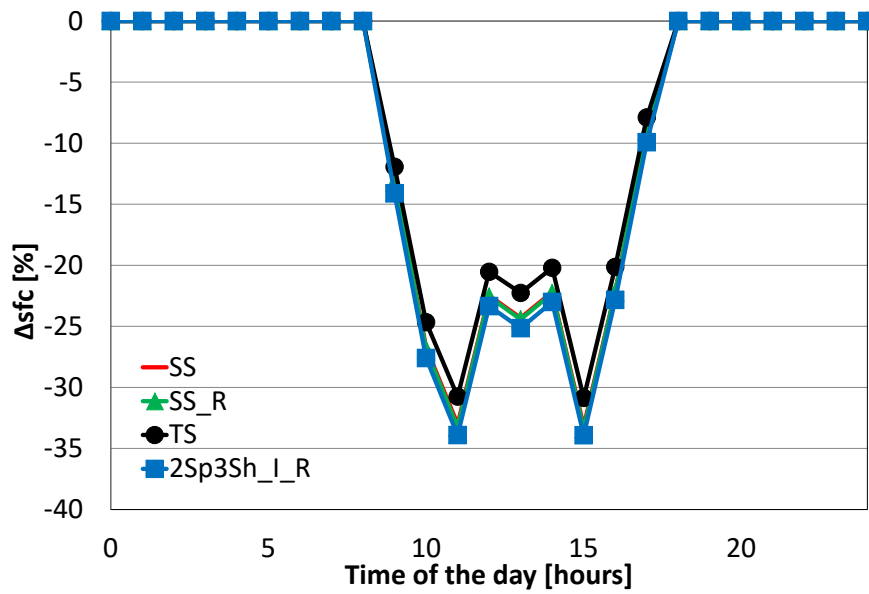
στρόβιλο ισχύος (2Sp3Sh_I_R). Ο λόγος είναι ότι τέτοιου τύπου μηχανές λειτουργούν με μικρότερο λόγο καυσίμου/αέρα, αφού ο αέρας προθερμαίνεται από τα καυσαέρια ήδη κατά τη συμβατική λειτουργία. Συνεπώς, περαιτέρω μείωση της παραγωγής καυσίμου λόγω της αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας, δεν οδηγεί σε έντονη αλλαγή του σημείου λειτουργίας. Με άλλα λόγια, το σημείο λειτουργίας τέτοιων συμβατικών μηχανών είναι πλησιέστερα με αυτό των αντίστοιχων υβριδικών.



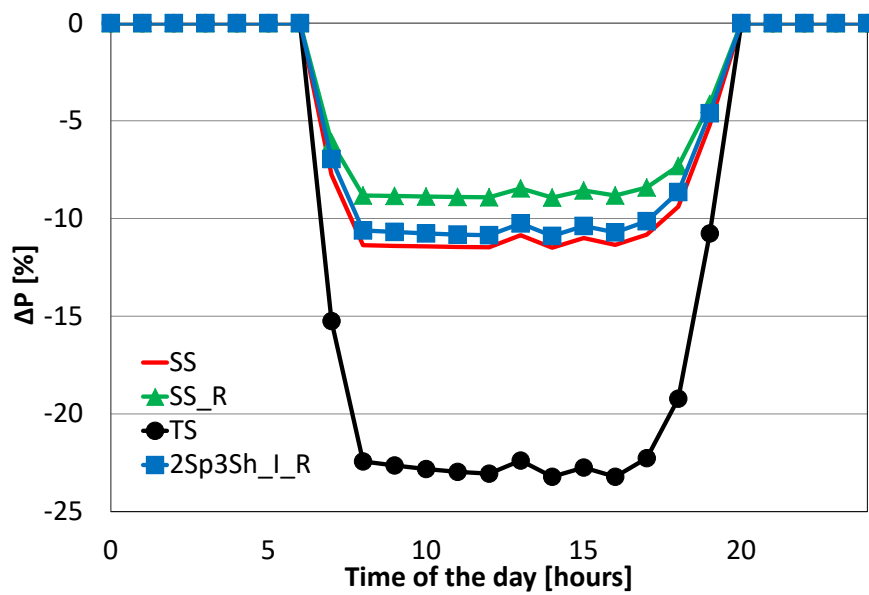
Σχήμα 5.16. Διαφορά στην παραγόμενη ισχύ μεταξύ υβριδικού και συμβατικού αεριοστρόβιλου για μια χειμερινή ημέρα



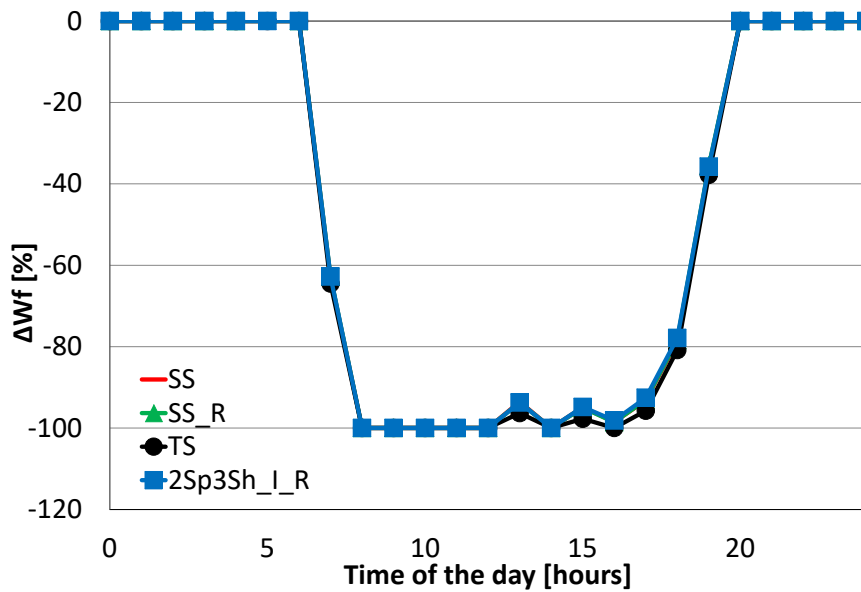
Σχήμα 5.17. Διαφορά στην κατανάλωση καυσίμου μεταξύ υβριδικού και συμβατικού αεριοστρόβιλου για μια χειμερινή ημέρα



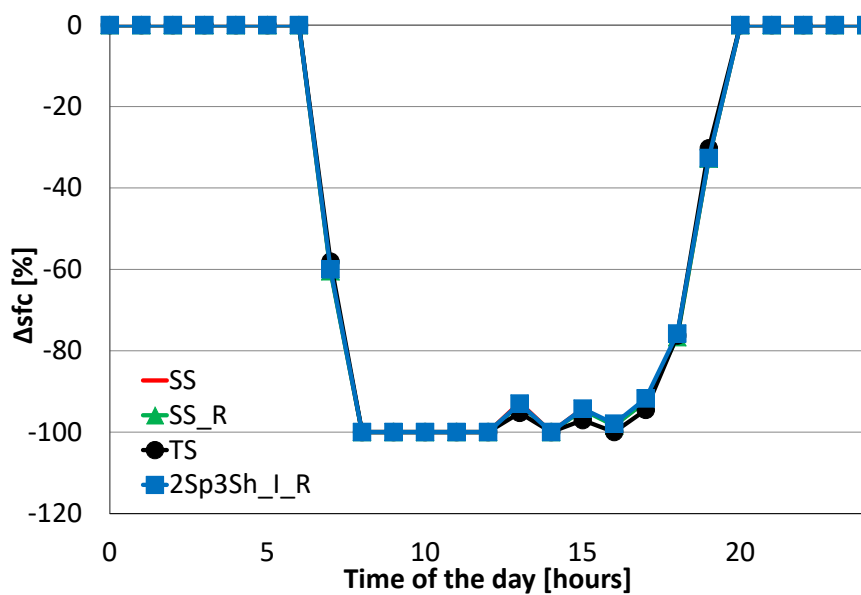
Σχήμα 5.18. Διαφορά στην ειδική κατανάλωση καυσίμου μεταξύ υβριδικού και συμβατικού αεριοστροβίλου για μια χειμερινή ημέρα



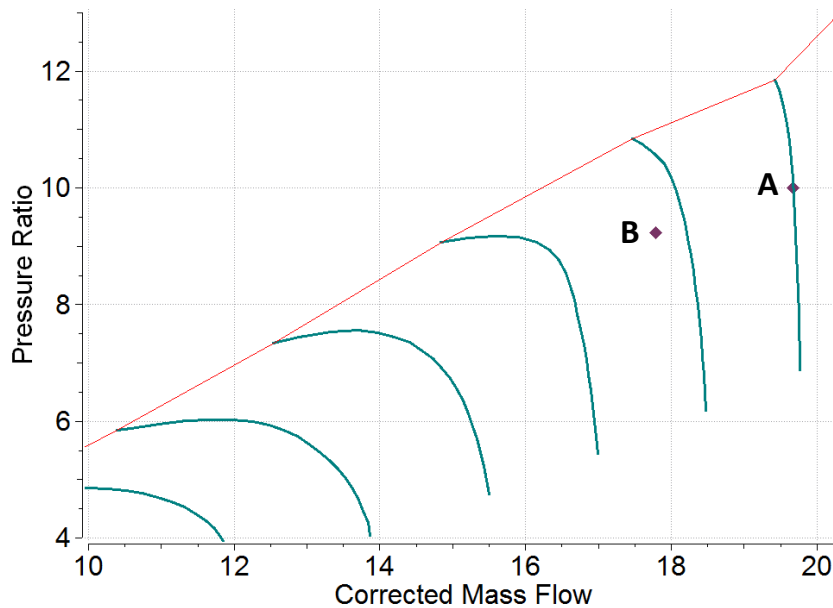
Σχήμα 5.19. Διαφορά στην παραγόμενη ισχύ μεταξύ υβριδικού και συμβατικού αεριοστροβίλου για μια θερινή ημέρα



Σχήμα 5.20. Διαφορά στην κατανάλωση καυσίμου μεταξύ υβριδικού και συμβατικού αεριοστροβίλου για μια θερινή ημέρα



Σχήμα 5.21. Διαφορά στην ειδική κατανάλωση καυσίμου μεταξύ υβριδικού και συμβατικού αεριοστροβίλου για μια θερινή ημέρα



Σχήμα 5.22. Σημείο λειτουργίας στο χάρτη του συμπιεστή για συμβατικό (A) και υβριδικό (B) αεριοστρόβιλο διδύμων ατράκτων

Από τα παραπάνω, καταλληλότερες διατάξεις για την υλοποίηση του σχήματος του υβριδικού αεριοστροβίλου φαίνονται να είναι αυτές με ανακόμιση θερμότητας αφού παρουσιάζουν τη μικρότερη μείωση στην παραγόμενη ενέργεια και όμοια μείωση στην κατανάλωση καυσίμου. Όμως, η απόφαση θα πρέπει να ληφθεί συμπεριλαμβάνοντας και άλλους παράγοντες που επηρεάζουν τελικώς το LEC, όπως το κόστος κτήσης και τροποποίησης της μηχανής, την ευκολία τροποποίησης της μηχανής, το βάρος της κτλ. Στην παρούσα εργασία το κόστος του αεριοστροβίλου θεωρείται πως εξαρτάται μόνο από την ονομαστική ισχύ του και όχι από τον τύπο της μηχανής. Με αυτή τη θεώρηση και οι τέσσερις μηχανές θα παρουσίαζαν ίδιο κόστος κτήσης, πράγμα που δεν ισχύει λόγω των επιπλέον συνιστωσών που φέρουν. Συνεπώς, η εκτίμηση του LEC για τις εξεταζόμενες διατάξεις δεν είναι δυνατή. Κάτι τέτοιο απαιτεί τη γνώση του κόστους όλων των επιμέρους συνιστωσών του αεριοστροβίλου ή τη σύνδεση του κόστους κτήσης με την ονομαστική ισχύ για κάθε τύπο μηχανής.

5.4 Επίδραση παραμέτρων λειτουργίας στις επιδόσεις

Κατά την λειτουργία μιας δεδομένης εγκατάστασης, οι παράμετροι λειτουργίας ελέγχονται με σκοπό τη μεγιστοποίηση της απόδοσης της διάταξης, με τελικό σκοπό την μεγιστοποίηση του οικονομικού οφέλους από τη λειτουργία της. Σε έναν συμβατικό αεριοστρόβιλο, οι βασικές παράμετροι λειτουργίας είναι η θερμοκρασία εισόδου του στροβίλου (TIT) και η αναρροφώμενη παροχή αέρα. Η TIT ελέγχεται μέσω της παροχής καυσίμου, ενώ η αναρροφώμενη παροχή αέρα μέσω της λειτουργίας των IGVs.

Για συνθήκες λειτουργίας με ένταση ακτινοβολίας μικρότερη της ονομαστικής, η θερμοκρασία του δέκτη θα είναι μειωμένη. Έτσι, η TIT και

συνεπώς η παραγόμενη ισχύς εξαρτάται από την παροχή καυσίμου. Επιπλέον, σε αυτές τις συνθήκες λειτουργίας, μείωση της αναρροφώμενης παροχής αέρα θα οδηγούσε σε αύξηση της θερμοκρασίας στο δέκτη και μείωση της κατανάλωσης του καυσίμου, αλλά και ταυτόχρονη μείωση της ισχύος. Η επιλογή της παροχής καυσίμου καθώς και της λειτουργίας των IGVs θα πρέπει να πραγματοποιείται κάθε φορά λαμβάνοντας υπ' όψιν μεταβαλλόμενους παράγοντες (π.χ. κόστος καυσίμου, απαίτηση ισχύος, οικονομικό σχήμα στήριξης) με σκοπό τη μεγιστοποίηση του οφέλους. Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί η επίδραση των δύο αυτών παραμέτρων λειτουργίας στις επιδόσεις του υβριδικού αεριοστροβίλου.

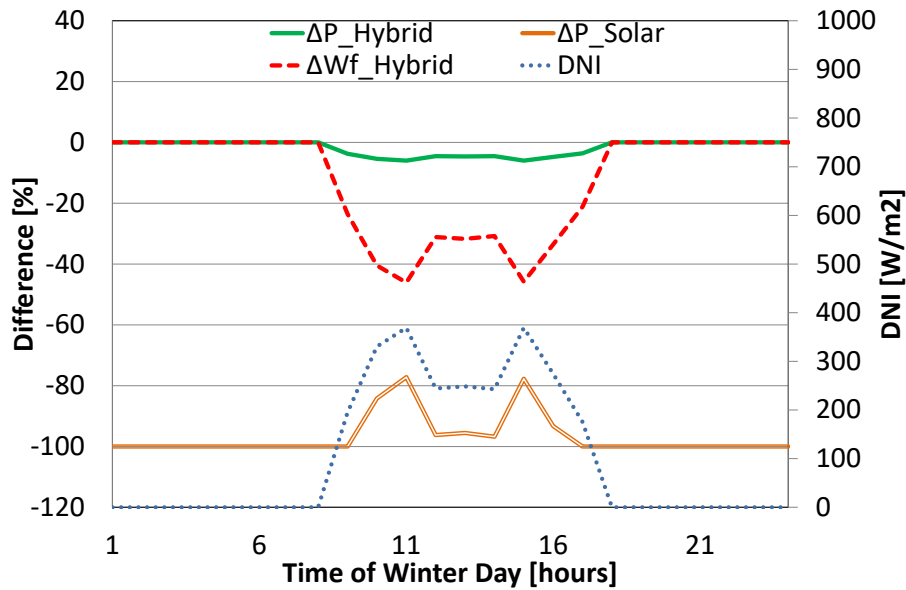
5.4.1 Επίδραση τύπου λειτουργίας στις επιδόσεις

Σε έναν αεριοστρόβιλο ηλεκτροπαραγωγής, δεδομένες ατμοσφαιρικές συνθήκες οδηγούν σε σταθερές ανηγμένες στροφές και αναρροφώμενη παροχή αέρα. Συνεπώς, η ωφέλιμη ισχύς του μπορεί να ελεγχθεί μέσω της TIT, η οποία και καθορίζεται από την παροχή καυσίμου στο θάλαμο καύσης. Συνεπώς, η παροχή καυσίμου αποτελεί παράμετρο ελέγχου της λειτουργίας του αεριοστροβίλου.

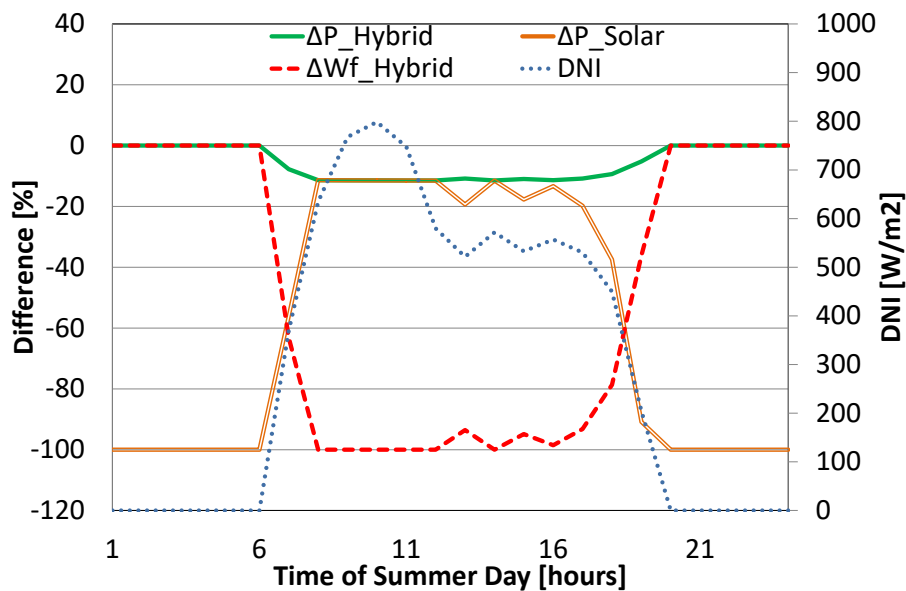
Ο υβριδικός αεριοστρόβιλος δύναται κάθε φορά να βρίσκεται: 1) σε λειτουργία μόνο-καυσίμου (συμβατική λειτουργία), όπου ο δέκτης παρακάμπτεται, 2) σε ηλιακή λειτουργία, όπου ο θάλαμος καύσης παρακάμπτεται και η επιτεύξιμη TIT εξαρτάται μόνο από τη διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια 3) σε υβριδική λειτουργία όπου η μηχανή αξιοποιεί τόσο την ηλιακή ενέργεια όσο και αυτή από το καιόμενο καύσιμο για την επίτευξη της επιθυμητής TIT.

Η υβριδική και ηλιακή λειτουργία αποτελούν τις ακραίες περιπτώσεις όσον αφορά στον έλεγχο του υβριδικού αεριοστροβίλου με βάση την παροχή καυσίμου, αφού στην υβριδική λειτουργία, κάθε φορά χρησιμοποιείται η μέγιστη παροχή καυσίμου ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή TIT, ενώ κατά την ηλιακή λειτουργία δεν χρησιμοποιείται καθόλου καύσιμο.

Για τον υπολογισμό των επιδόσεων του υβριδικού αεριοστροβίλου στις δύο αυτές περιπτώσεις, προσομοιώνεται η λειτουργία του και η διαφορά στην παραγόμενη ισχύ (ΔP) για υβριδική (Hybrid) και ηλιακή (Solar) λειτουργία καθώς και η διαφορά στην κατανάλωση καυσίμου (ΔW_f) για υβριδική λειτουργία μεταξύ του υβριδικού και του συμβατικού αεριοστροβίλου για μια χειμερινή και μια θερινή ημέρα παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.23 και στο Σχήμα 5.24 αντίστοιχα. Για την υβριδική λειτουργία επιλέγεται η σταθερή TIT.



Σχήμα 5.23. Διαφορά επιδόσεων μεταξύ υβριδικού και συμβατικού αεριοστρόβιλου για υβριδική και ηλιακή λειτουργία για μια χειμερινή ημέρα

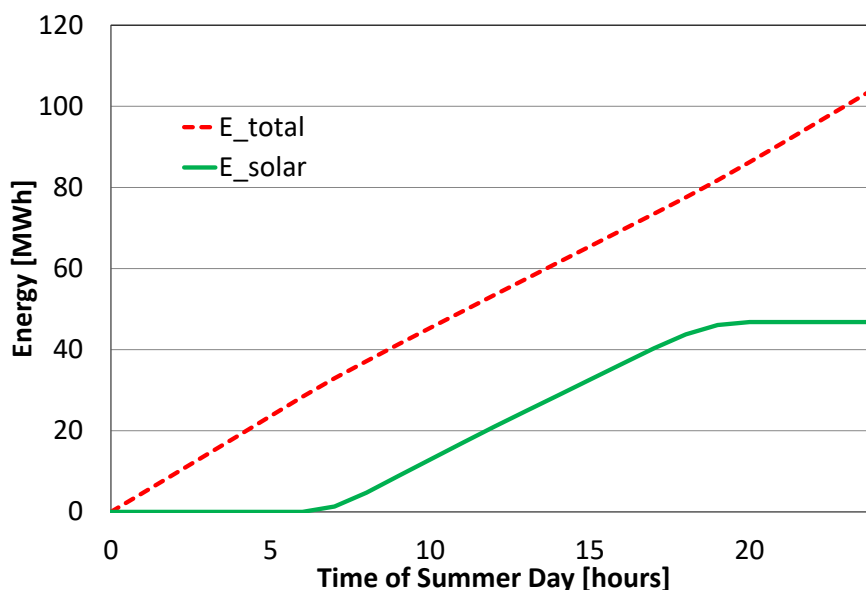


Σχήμα 5.24. Διαφορά επιδόσεων μεταξύ υβριδικού και συμβατικού αεριοστρόβιλου για υβριδική και ηλιακή λειτουργία για μια θερινή ημέρα

Όπως φαίνεται, η υβριδική λειτουργία, αναλόγως της διαθέσιμης ακτινοβολίας, δύναται να μεταπέσει σε συμβατική ή και ηλιακή λειτουργία. Έτσι, τις νυχτερινές ώρες ο υβριδικός αεριοστρόβιλος βρίσκεται σε συμβατική λειτουργία, σε ώρες υψηλής ακτινοβολίας βρίσκεται σε ηλιακή λειτουργία, ενώ τις υπόλοιπες ώρες σε υβριδική λειτουργία. Κατά την ηλιακή λειτουργία, η επιτεύξιμη TIT και συνεπώς η παραγόμενη ισχύς εξαρτάται μόνο από την διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία, η οποία παρουσιάζει υψηλότερη τιμή κατά τους θερινούς μήνες.

Όπως αναφέρθηκε, η επιλογή της τιμής των παραμέτρων λειτουργίας πρέπει να επιλέγεται έτσι ώστε να μεγιστοποιούνται τα έσοδα. Με τη χρήση του

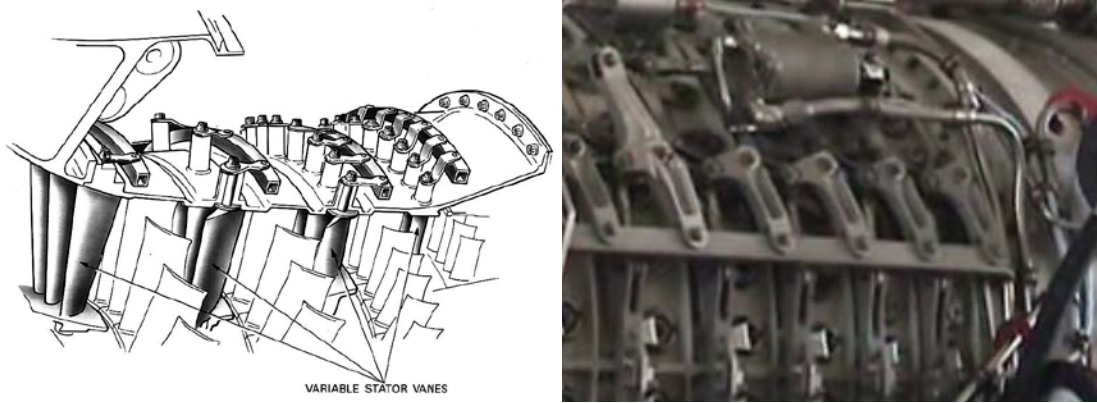
μοντέλου προσομοίωσης της λειτουργίας του υβριδικού αεριοστροβίλου, είναι δυνατή η πρόβλεψη της ηλεκτροπαραγωγής που προέρχεται από την ηλιακή ενέργεια (E_{solar}), καθώς και η ολική (E_{total}), κατά τη διάρκεια μιας μέρας (Σχήμα 5.25) για διάφορα σενάρια ελέγχου της παροχής καυσίμου. Αυτή η πληροφορία μπορεί να αξιοποιηθεί ούτως ώστε να επιλέγεται κάθε φορά το σημείο λειτουργίας της εγκατάστασης όπου μεγιστοποιείται το κέρδος, λαμβάνοντας υπ' όψιν τις καιρικές συνθήκες, το κόστος καυσίμου, την απαίτηση ισχύος, το οικονομικό σχήμα στήριξης (feed-in tariffs) κτλ.



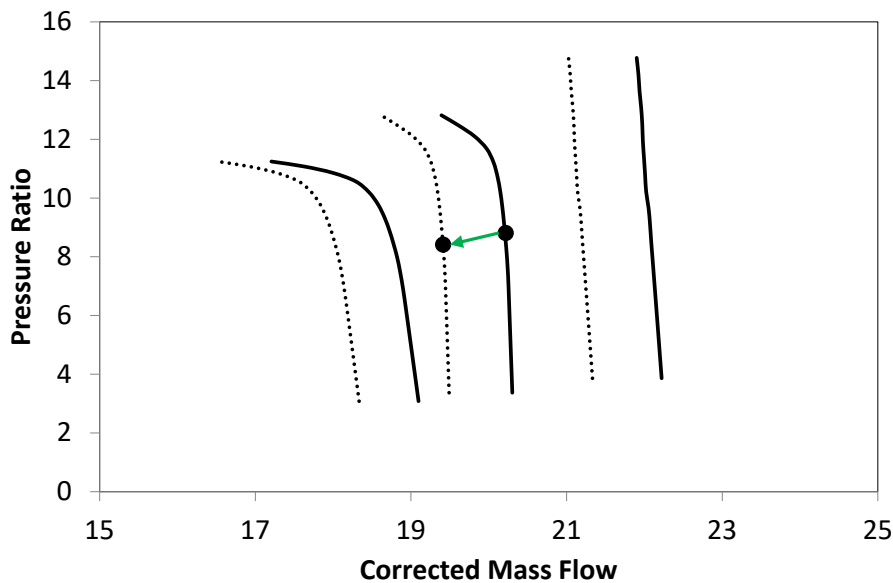
Σχήμα 5.25. Ολική παραγόμενη ενέργεια και παραγόμενη ενέργεια από την ηλιακή θερμότητα κατά τη διάρκεια μιας θερινής ημέρας

5.4.2 Επίδραση λειτουργίας IGVs στις επιδόσεις

Μια άλλη παράμετρος λειτουργίας, εκτός της ΤΙΤ, είναι η παροχή αναρροφώμενου αέρα. Τα μεταβλητά οδηγία πτερύγια του συμπιεστή (IGVs) (Σχήμα 5.26) χρησιμοποιούνται (με τη μεταβολή της γωνίας τους) για τον έλεγχο της αναρροφώμενης ποσότητας αέρα από τη μηχανή αλλάζοντας τα χαρακτηριστικά επιδόσεων του συμπιεστή. Παράδειγμα της μετατόπισης του χάρτη του συμπιεστή καθώς και του σημείου λειτουργίας λόγω της μείωσης της γωνίας των IGVs παρουσιάζει το Σχήμα 5.27.



Σχήμα 5.26. IGVs σε αεριοστρόβιλο (RollsRoyce, 1996)



Σχήμα 5.27. Μετατόπιση του χάρτη του συμπιεστή και του σημείου λειτουργίας λόγω μείωσης της γωνίας των IGVs

Σε έναν υβριδικό αεριοστρόβιλο, όταν η διαθέσιμη ακτινοβολία είναι μικρότερη αυτής του σημείου σχεδίασης, τότε και η διαθέσιμη θερμότητα θα είναι μειωμένη και συνεπώς η θερμοκρασία στην έξοδο του δέκτη θα είναι μικρότερη της μέγιστης. Ως εκ τούτου, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί η κατάλληλη ποσότητα καυσίμου ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή TIT. Σε αυτή την περίπτωση, μείωση της γωνίας (κλείσιμο) των IGVs, θα σήμαινε μειωμένη παροχή αέρα και συνεπώς μεγαλύτερη θερμοκρασία στην έξοδο του δέκτη για τη δεδομένη ηλιακή ακτινοβολία και άρα μικρότερη απαίτηση παροχής καυσίμου για την επίτευξη της επιθυμητής TIT. Όμως, η μείωση της παροχής αέρα με σταθερή TIT οδηγεί σε μείωση της παραγόμενης ισχύος. Το αν είναι ωφέλιμη η μείωση του καυσίμου με ταυτόχρονη μείωση της ισχύος εξαρτάται από διάφορους οικονομικούς παράγοντες που ισχύουν την κάθε χρονική στιγμή.

Για να διερευνηθεί η επίδραση της λειτουργίας των IGVs στις επιδόσεις του υβριδικού αεριοστρόβιλου, η λειτουργία του προσομοιώνεται για διάφορες γωνίες των IGVs θεωρώντας συνθήκες τυπικής ημέρας και ενδεικτική τιμή

έντασης ακτινοβολίας στο ήμισυ ($300\text{W}/\text{m}^2$) αυτής του σημείου σχεδίασης. Η μελέτη αφορά τόσο την υβριδική λειτουργία όσο και την ηλιακή.

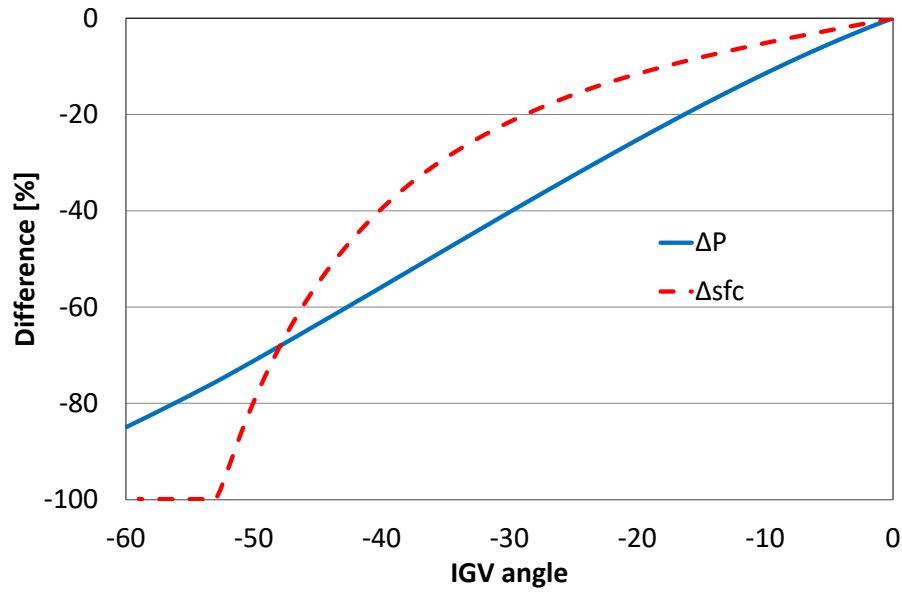
Τη διαφορά στην παραγόμενη ισχύ και στην ειδική κατανάλωση καυσίμου μεταξύ της λειτουργίας για διάφορες γωνίες IGVs και πλήρως ανοιχτά IGVs απεικονίζει το Σχήμα 5.28 για υβριδική λειτουργία με σταθερή TIT. Την αντίστοιχη μεταβολή της παραγόμενης ισχύος για ηλιακή λειτουργία απεικονίζει το Σχήμα 5.29.

Κατά την υβριδική λειτουργία, το κλείσιμο των IGVs οδηγεί σε μείωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου λόγω της υψηλότερης θερμοκρασίας που επιτυγχάνεται στο δέκτη. Επίσης μειώνεται και η παραγόμενη ισχύς λόγω της μειωμένης παροχής αέρα και την αλλαγή στη σύσταση του εργαζόμενου μέσου αφού χρησιμοποιείται λιγότερο καύσιμο. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.28, για γωνία -53° η κατανάλωση καυσίμου είναι μηδενική διότι η διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια δύναται να θερμάνει τον αέρα στη μέγιστη TIT.

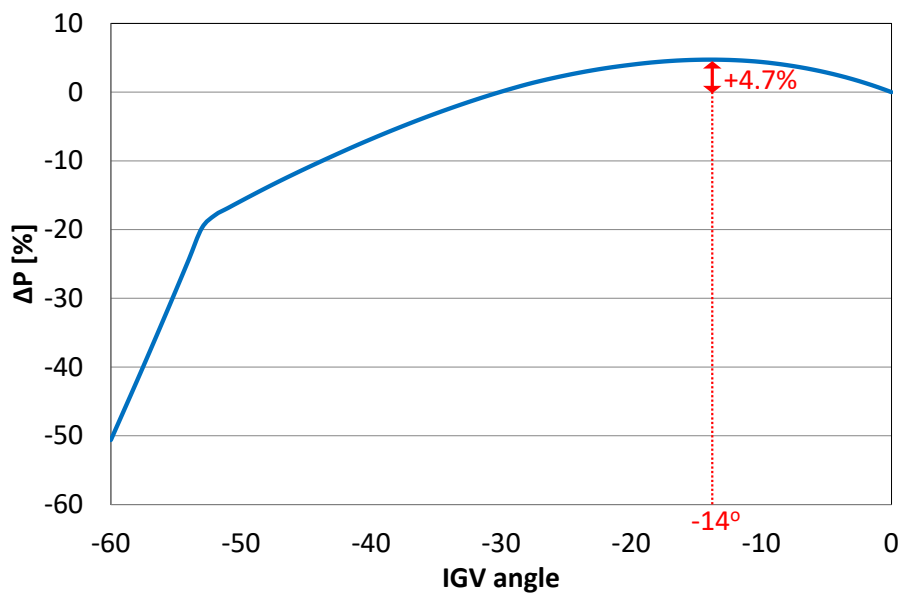
Κατά την ηλιακή λειτουργία το κλείσιμο των IGVs συνεπάγεται μεγαλύτερη TIT και μειωμένη παροχή αέρα. Οι δύο αυτοί παράγοντες επιδρούν αντίρροπα στην παραγόμενη ισχύ. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 5.29, για γωνία -14° επιτυγχάνεται η βέλτιστη λειτουργία, αφού για δεδομένο ποσό ηλιακής θερμότητας παρατηρείται αύξηση της παραγόμενης ισχύος κατά 4.7%. Τις γωνίες των IGVs που οδηγούν σε μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος για διάφορες τιμές της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, όπως επίσης και το ποσοστιαίο κέρδος της παραγόμενης ισχύος παρουσιάζει το Σχήμα 5.30. Όπως φαίνεται, με την επίδραση των IGVs είναι δυνατή η λειτουργία της μηχανής για ακτινοβολία μέχρι και $150\text{W}/\text{m}^2$, όταν για πλήρως ανοιχτά IGVs το όριο ήταν $200\text{W}/\text{m}^2$.

Όπως και στην περίπτωση του ελέγχου της παροχής καυσίμου, η λειτουργία των IGVs μπορεί να καθοριστεί ούτως ώστε να επιλέγεται κάθε φορά το σημείο λειτουργίας της εγκατάστασης όπου μεγιστοποιείται το όφελος, λαμβάνοντας υπ' όψιν τις καιρικές συνθήκες, το κόστος καυσίμου, την απαίτηση ισχύος, το οικονομικό σχήμα στήριξης (feed-in tariffs) κτλ.

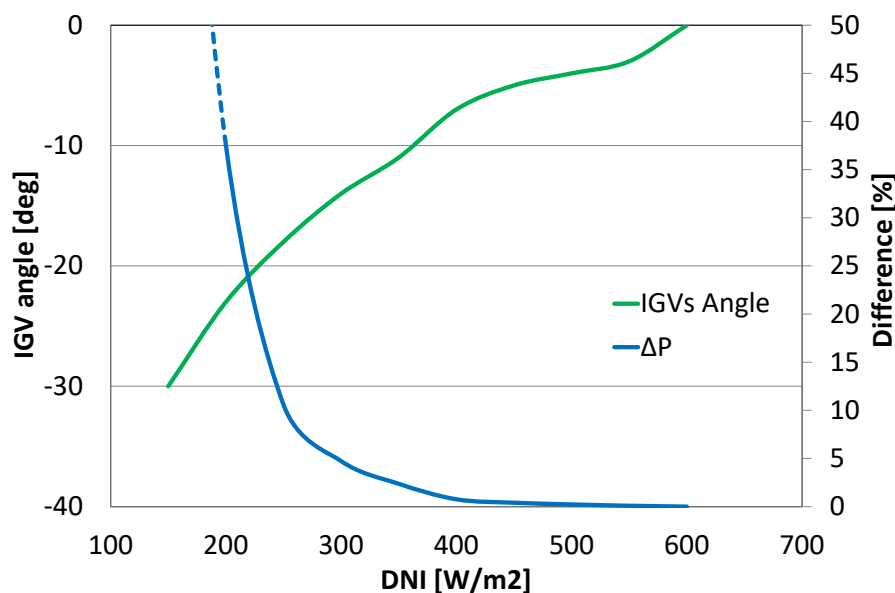
Σημειώνεται ότι συνήθως υπάρχουν συστήματα μεταβλητής γεωμετρίας σε συμβατικούς βιομηχανικούς αεριοστροβίλους, οπότε η μετατροπή τους σε υβριδικούς απαιτεί απλά και μόνο τον επανα-προγραμματισμό του σχήματος ελέγχου.



Σχήμα 5.28. Μεταβολή επιδόσεων υβριδικού αεριοστροβίλου υβριδικής λειτουργίας μεταξύ λειτουργίας για διάφορες γωνίες των IGVs και πλήρως ανοιχτά IGVs



Σχήμα 5.29. Μεταβολή επιδόσεων υβριδικού αεριοστροβίλου ηλιακής λειτουργίας μεταξύ λειτουργίας για διάφορες γωνίες των IGVs και πλήρως ανοιχτά IGVs



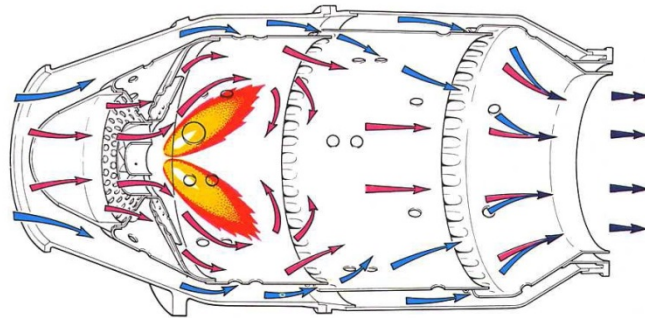
Σχήμα 5.30. Βέλτιστη γωνία των IGVs και αύξηση παραγόμενης ισχύος για διάφορες εντάσεις ακτινοβολίας

5.5 Υβριδικός αεριοστροβίλος βασισμένος σε στροβιλοϋπερπληρωτή

Η ήδη περιγραφείσα διάταξη υβριδικού αεριοστροβίλου, αν και πολλά υποσχόμενη λόγω της μείωσης του καταναλισκόμενου καυσίμου, παρουσιάζει κατασκευαστικές προκλήσεις και δυσκολίες που δεν της έχουν επιτρέψει να περάσει στο εμπορικό στάδιο όπως συμβαίνει με ηλιοθερμικές διατάξεις κύκλου νερού/ατμού. Οι δυσκολίες υλοποίησης μιας τέτοιας διάταξης αφορούν κυρίως το θάλαμο καύσης και την απομάστευση αέρα για την τροφοδοσία του δέκτη.

Ο θάλαμος καύσης ενός συμβατικού αεριοστροβίλου (Σχήμα 5.31) τροφοδοτείται με τον αέρα που εξέρχεται από τον συμπιεστή. Η διαμόρφωσή του επιτρέπει την καύση ενός μέρους του αέρα περίπου στοιχειομετρικά στην πρωτεύουσα ζώνη, ενώ ο υπόλοιπος αέρας αναμιγνύεται σταδιακά με τα παραγόμενα καυσαέρια και χρησιμοποιείται για την ψύξη του θαλάμου καύσης. Ο θάλαμος καύσης ενός υβριδικού αεριοστροβίλου τροφοδοτείται με αέρα υψηλής θερμοκρασίας αφού προηγείται η ηλιακή προθέρμανση. Συνεπώς, ο αέρας ψύξης έχει συγκριτικά υψηλότερη θερμοκρασία με αποτέλεσμα ο θάλαμος καύσης να υπόκειται σε μεγαλύτερες θερμικές φορτίσεις και καταπονήσεις. Επιπλέον, λόγω της ηλιακής προθέρμανσης του αέρα, το θερμοκρασιακό κενό που καλείται να καλύψει ο θάλαμος καύσης γίνεται μικρότερο και συνεπώς απαιτείται μικρότερη ποσότητα καυσίμου για την ίδια παροχή αέρα. Έτσι, ο θάλαμος καύσης καλείται να λειτουργεί υπό μεγάλο εύρος παροχών καυσίμου και θερμοκρασίας αέρα εισόδου, που μπορεί να περιλαμβάνει περιοχές λειτουργίας στις οποίες η καύση δεν μπορεί να είναι ευσταθής. Τα προβλήματα

που σχετίζονται με το θάλαμο καύσης έχουν αποτελέσει αντικείμενο αρκετών εργασιών (EU Commission, 2005; Heller, 2011; Quero et al., 2014).



Σχήμα 5.31. Σχηματική απεικόνιση θαλάμου καύσης
(<http://aeromodelbasic.blogspot.gr>)

Σε διατάξεις αεροστροβίλων με εξωτερικό θάλαμο καύσης (παλιότερης τεχνολογίας), ο αέρας οδηγούνταν εκτός του κυρίου σώματος της μηχανής ώστε να τροφοδοτηθεί ο θάλαμος καύσης και στη συνέχεια επαν-οδηγούνταν στο στρόβιλο. Στους σημερινής τεχνολογίας αεροστρόβιλους, οι συνιστώσες βρίσκονται εν σειρά στο κυρίως σώμα της μηχανής με άμεση σύνδεση μεταξύ τους. Ως εκ τούτου, η τροφοδοσία του ηλιακού δέκτη απαιτεί επανασχεδιασμό του κελύφους της μηχανής ώστε να καταστεί δυνατή η εξαγωγή του αέρα (EU Commission, 2005; Quero et al., 2014; Sinai et al., 2005). Η αλλαγή στο κέλυφος και η εξαγωγή του αέρα συνεπάγεται απώλειες πίεσης και οδηγεί σε μείωση της αεροθερμοδυναμικής επίδοσης. Επιπλέον, αυτή η διαδικασία του επανασχεδιασμού συνεπάγεται και σημαντικό κόστος για την βέλτιστη ανάπτυξη και υλοποίησή της.

Με βάση τα ανωτέρω, για την υλοποίηση του υβριδικού αεροστρόβιλου (και ειδικά στο στάδιο της επίδειξης της τεχνολογίας αυτής) είναι επιθυμητό να χρησιμοποιηθούν διατάξεις στις οποίες η δρομολόγηση του αέρα θα ήταν σχετικά εύκολη και η μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου σχετικά χαμηλή. Τέτοιες διατάξεις μπορούν να υλοποιηθούν με τη χρήση στροβιλοϋπερπληρωτών μηχανών Diesel.

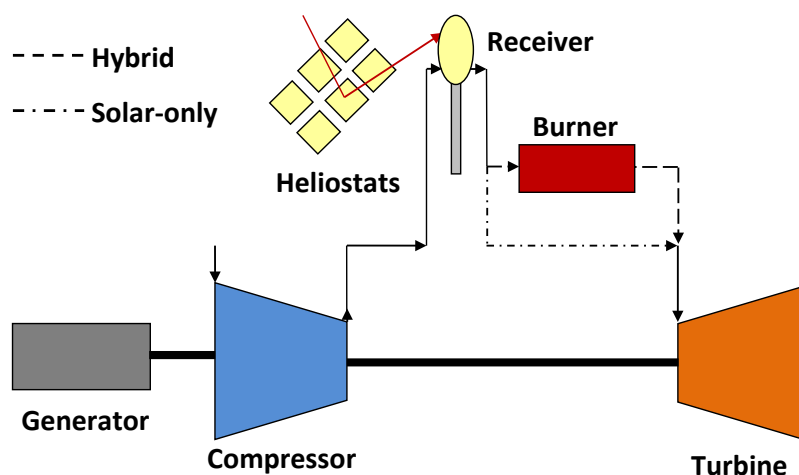
Η μορφολογία των στροβιλοϋπερπληρωτών επιτρέπει την εύκολη δρομολόγηση του αέρα από την έξοδο του συμπιεστή στον ηλιακό δέκτη. Επιπλέον, λόγω και του συγκριτικά χαμηλού λόγου πίεσης, η μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου θα είναι και αυτή χαμηλή με αποτέλεσμα ο θάλαμος καύσης να μην έχει μεγάλες απαιτήσεις ψύξης και συνεπώς να μην επηρεάζεται έντονα από την υψηλή θερμοκρασία του αέρα εισόδου. Τέλος, οι στροβιλοϋπερπληρωτές βρίσκονται σε μαζική παραγωγή με αποτέλεσμα το κόστος κτήσης να είναι χαμηλό. Οι συγκριτικά μικρές παροχές αέρα που διακινούνται από τέτοιες διατάξεις έχουν μικρότερη θερμική απαίτηση από το ηλιακό κομμάτι με αποτέλεσμα το κόστος επένδυσης να παραμένει χαμηλό (όμως και η ισχύς) με αποτέλεσμα να αποτελεί μια πιο εύκολα υλοποιήσιμη

διάταξη από ότι μία μεγαλύτερης ισχύος αλλά με πολύ μεγαλύτερο κόστος επένδυσης, ειδικά στο πρώιμο στάδιο που βρίσκεται αυτή η τεχνολογία.

Η μελέτη της διάταξης υβριδικού αεριοστροβίλου με τη χρήση στροβιλοϋπερπληρωτή αποτελεί μια προσέγγιση που πραγματοποιείται για πρώτη φορά.

5.5.1 Μοντελοποίηση υβριδικού στροβιλοϋπερπληρωτή

Στον υβριδικό αεριοστρόβιλο με χρήση στροβιλοϋπερπληρωτή, ο αέρας μετά το συμπιεστή τροφοδοτείται στον ηλιακό δέκτη όπου και προθερμαίνεται, εν συνεχεία οδηγείται στο θάλαμο καύσης εάν είναι επιθυμητό να καλυφθούν επιπλέον απαιτήσεις θερμότητας και τέλος εκτονώνεται στο στρόβιλο (Σχήμα 5.32). Η γεννήτρια συνδέεται στον άξονα που συνδέει τις στροβιλοσυνιστώσες στην πλευρά του συμπιεστή. Η γεννήτρια επιλέγεται ταχύστροφη μεταβλητών στροφών σε συνδυασμό με τη χρήση ηλεκτρονικών ισχύος, που επιτρέπουν το μετασχηματισμό του παραγόμενου ρεύματος σε εναλλασσόμενο συχνότητας 50Hz, ώστε να μπορεί να συνδέεται στο δίκτυο (Benaboud & Rufer, 2016; Stemmler, 1994). Επιπλέον, η δυνατότητα κατασκευής και χρήσης θαλάμου καύσης με διάταξη στροβιλοϋπερπληρωτή έχει ήδη παρουσιαστεί σε πειραματική διάταξη συμβατικού κύκλου (de Campos, Sacomano Filho, & Krieger Filho, 2012; Krieger, De Campos, Filho, & De Souza, 2012) και συνεπώς υφίσταται η δυνατότητα κατασκευής θαλάμου καύσης σε διάταξη υβριδικού στροβιλοϋπερπληρωτή. Ο υβριδικός αεριοστρόβιλος που προκύπτει μπορεί να τοποθετείται στην κορυφή του πύργου που είναι εγκατεστημένος ο δέκτης.



Σχήμα 5.32. Σχηματική απεικόνιση διάταξης υβριδικού αεριοστροβίλου με στροβιλοϋπερπληρωτή

Εξετάζεται η χρήση ευρείας χρήσης εμπορικού στροβιλοϋπερπληρωτή που χρησιμοποιείται στη ναυσιπλοΐα σε μηχανές Diesel (γεννήτριες) ισχύος της τάξης των 600kW με χαρακτηριστικά στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας όπως παρουσιάζει ο Πίνακας 5.7. Για το συγκεκριμένο στροβιλοϋπερπληρωτή, είναι

διαθέσιμος ο χάρτης του συμπιεστή, ενώ ο χάρτης του στροβίλου προέκυψε από το λογισμικό TurboGenius που έχει αναπτυχθεί από το ΕΘΣ. Το λογισμικό αυτό σχεδιάστηκε ώστε να «ταιριάζει» (matching) μηχανές Diesel με στροβιλοϋπερπληρωτές, ενώ δύναται να εκτιμήσει τους χάρτες ακτινικού συμπιεστή και στροβίλου δοθείσης της γεωμετρίας βάσει ευρέος αποδεκτών μεθόδων (Galvas, 1973; Wasserbauer & Glassman, 1975).

Παροχή αέρα [kg/s]	1.49
Ισεντροπικός β.α. συμπιεστή [%]	86.5
Λόγος πίεσης	3.69
Ταχύτητα περιστροφής [RPM]	52000
Θερμοκρασία εισόδου στροβίλου [C]	400

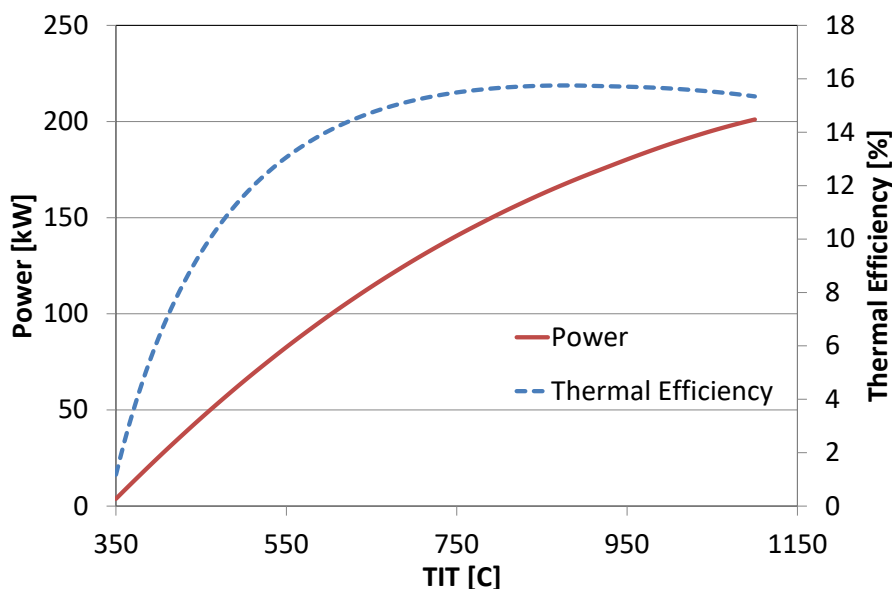
Πίνακας 5.7. Χαρακτηριστικά ονομαστικού σημείου λειτουργίας στροβιλοϋπερπληρωτή

Οι απώλειες πίεσης του δέκτη λαμβάνονται ίσες με 2% ενώ ο βαθμός απόδοσης της γεννήτριας/άξονα 98% (SIEMENS, 2016; Spelling, 2013). Τα χαρακτηριστικά του ηλιακού μέρους, καθώς και χαρακτηριστικά σχεδίασης των λοιπών συνιστωσών και τα χαρακτηριστικά του καυσίμου παρουσιάζει ο Πίνακας 5.8. Ο αριθμός των χρησιμοποιούμενων κατόπτρων αποτελεί μεταβλητή σχεδιασμού, ούτως ώστε να βρεθεί το μέγεθος του ηλιακού κομματιού που οδηγεί στις βέλτιστες επιδόσεις (ελαχιστοποίηση κόστους παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας). Η μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία του δέκτη τίθεται ίση με την TIT που επιλέγεται, όπως αναφέρεται στη συνέχεια.

Κάτοπτρα	
Ανακλαστικότητα	0.97
Συντελεστής εστίασης	1
Σκίαση	0.98
Εμβαδόν [m ²]	64
Δέκτης	
Απορροφητικότητα	0.95
Οπτική απόδοση	0.96
Εκπομπή	0.05
Συνιστώσες Μηχανής	
Πτώση πίεσης αγωγών	0.02
Πτώση πίεσης δέκτη	0.02
Πτώση πίεσης θαλάμου καύσης	0.02
Απόδοση γεννήτριας	0.98
TIT [C]	a)400, b)600, c)800
LHV [MJ/kg]	42.6
Εκπομπές CO ₂ [kgCO ₂ /MJfuel]	0.07315

Πίνακας 5.8. Χαρακτηριστικά σημείου σχεδίασης ηλιακού κομματιού και λοιπών συνιστωσών

Οι επιδόσεις μιας αεριοστροβιλικής διάταξης με δεδομένες συνιστώσες καθορίζεται κυρίως από τη θερμοκρασία εισόδου του στροβίλου (TIT). Είναι γνωστό ότι η αύξηση της TIT οδηγεί σε καλύτερες επιδόσεις. Όμως, η αύξηση της μέγιστης αυτής θερμοκρασίας απαιτεί και τη χρήση ανθεκτικότερων και συνεπώς ακριβότερων υλικών. Η μέγιστη επιτρεπτή TIT καθορίζεται από τις ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων υλικών, ειδικά αυτών του στροβίλου. Με βάση τα ανωτέρω και για την εξαγωγή πληροφορίας που θα χρησιμοποιηθεί για την επιλογή της TIT σχεδίασης, πραγματοποιείται προσομοίωση της λειτουργίας της διάταξης για διάφορες τιμές της εν λόγω μεταβλητής και τα αποτελέσματα, όσον αφορά την παραγόμενη ισχύ και το θερμικό βαθμό απόδοσης, παρουσιάζει το Σχήμα 5.33. Όπως φαίνεται, η ισχύς αυξάνεται, όσο αυξάνεται η TIT ενώ ο θερμικός βαθμός απόδοσης λαμβάνει τη μέγιστη τιμή για TIT=850°C. Για τη διερεύνηση της επίδρασης της τιμής της TIT στις συνολικές επιδόσεις της διάταξης, θεωρούνται τρεις τιμές της: α) η ονομαστική του στροβιλοϋπερπληρωτή (400°C), β) η μέγιστη πειραματικά επιτεύξιμη (800°C) (de Campos et al., 2012; Krieger et al., 2012) –χωρίς να είναι βέβαιο ότι βρίσκεται εντός των θερμοκρασιακών ορίων του επιλεγέντος στροβιλοϋπερπληρωτή- και γ) η ενδιάμεσή τους (600°C), ώστε να καθοριστεί πληρέστερα η τάση μεταβολής των επιδόσεων.



Σχήμα 5.33. Παραγόμενη ισχύς και θερμικός βαθμός απόδοσης αναλόγως της TIT

Η βιωσιμότητα και συνεπώς το πόσο ελκυστική είναι μια διάταξη, κρίνεται με βάση τις επιδόσεις της διάταξης σε οικονομικούς όρους. Για τον υπολογισμό των οικονομικών επιδόσεων, όπως ήδη αναφέρθηκε, χρησιμοποιείται η ποσότητα LEC. Τα κόστη κτήσης και λειτουργίας του ηλιακού μέρους (δέκτης και κάτοπτρα) λαμβάνονται από δημοσιευμένες εργασίες και αναφορές (Pitz-Paal et al., 2005; Schwarzbözl et al., 2006) με τη μορφή που παρατίθενται από τους Spelling & Laumert (Spelling & Laumert, 2014). Το κόστος κτήσης της

γεννήτριας και του στροβιλοϋπερπληρωτή ελήφθησαν κατόπιν επικοινωνίας με κατασκευαστές ενώ το κόστος κτήσης του θαλάμου καύσης επιλέχθηκε σύμφωνα με τα όσα αναφέρει ο Spelling (Spelling, 2013). Το ετήσιο κόστος λειτουργίας των στροβιλοσυνιστωσών λαμβάνεται ίσο με το 2% του κόστους κτήσης των και αφορά τις εργασίες συντήρησης και την αγορά ανταλλακτικών (Spelling, 2013).

Για τις συνιστώσες που βρίσκονται σε μαζική παραγωγή και χρησιμοποιούνται ήδη σε διάφορες εφαρμογές (στροβιλοσυνιστώσες, γεννήτρια κτλ), δεν αναμένεται η ουσιαστική μεταβολή του κόστους κτήσης τους με την πάροδο του χρόνου ή την περαιτέρω εξέλιξη των ηλιοθερμικών διατάξεων. Αντιθέτως, για τις συνιστώσες του ηλιακού κομματιού, η περαιτέρω ανάπτυξη της τεχνολογίας καθώς και η προοπτική της μαζικής παραγωγής τους, μπορεί να οδηγήσει στη μείωση του κόστους κτήσης τους. Η τάση αυτή αναμένεται περισσότερο για τον δέκτη αέρα, αφού βρίσκεται σε πειραματικό στάδιο ενώ τα κάτοπτρα χρησιμοποιούνται ήδη σε εμπορικές διατάξεις ηλιακών κύκλων Rankine. Τέλος, τα κόστη κτήσης και λειτουργίας του δέκτη στην παρούσα μελέτη ενδέχεται να είναι υπερεκτιμημένα αφού ο λόγος πίεσης και η θερμοκρασία στη μελετώμενη διάταξη έχουν μικρότερες τιμές από αυτές των διατάξεων για τις οποίες προέκυψαν οι χρησιμοποιούμενες τιμές. Συνεπώς, λόγω απλούστερης κατασκευαστικά διάταξης και μικρότερου θερμικού φορτίου λειτουργίας ενδέχεται να παρουσιάζουν και μικρότερα κόστη.

Το κόστος του καυσίμου είναι κυρίαρχος παράγοντας που καθορίζει την οικονομική βιωσιμότητα και την ανταγωνιστικότητα μιας διάταξης που χρησιμοποιεί ανανεώσιμες πηγές ενέργειας σε σύγκριση με μια συμβατική διάταξη ορυκτού καυσίμου. Εξαιτίας πληθώρας παραγόντων (οικονομικοί, πολιτικοί κτλ) η τιμή των ορυκτών καυσίμων παρουσιάζει έντονη μεταβολή. Για παράδειγμα, στο διάστημα 2012-2017 το κόστος του πετρελαίου παρουσίασε ελάχιστη και μέγιστη τιμή 280USD/t και 943USD/t αντιστοίχως (EIA, 2017b).

Ο χρόνος ζωής της διάταξης λαμβάνεται ίσος με 30 έτη (Fitzpatrick, 2013; IEA-OECD, 2009), υλοποιηθείσα από ίδια κεφάλαια και το επιτόκιο ίσο με 5%. Τα χρησιμοποιούμενα οικονομικά μεγέθη παρουσιάζει συγκεντρωτικά ο Πίνακας 5.9.

Κόστος Κτήσης	
Στροβιλοϋπερπληρωτής [USD]	2000
Θάλαμος καύσης [USD]	10000
Γεννήτρια [USD]	50000
Κάτοπτρα [USD/m ²]	200
Δέκτης [USD/MWth]	231000
Ετήσιο Κόστος Λειτουργίας (OPEX)	
Στροβιλοϋπερπληρωτής [USD]	2% Κόστους Κτήσης
Θάλαμος καύσης [USD]	2% Κόστους Κτήσης
Γεννήτρια [USD]	2% Κόστους Κτήσης
Κάτοπτρα [USD/m ²]	1.1
Δέκτης [USD/MWth]	11400
Δέκτης [USD/MWtht]	0.68
Καύσιμο [USD/t]	465
Εκπομπές CO ₂ [USD/t]	5

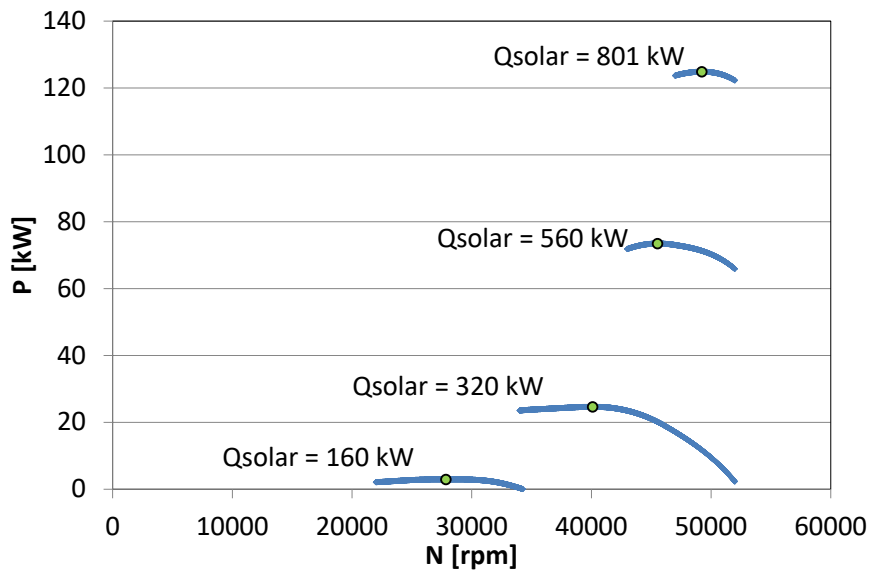
Πίνακας 5.9. Οικονομικά μεγέθη διάταξης υβριδικού αεριοστροβίλου με στροβιλοϋπερπληρωτή

5.5.2 Επιδόσεις - Ηλιακή λειτουργία

Κατά την ηλιακή λειτουργία, η διάταξη λειτουργεί αξιοποιώντας μόνο την διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια. Ο συμπιεσμένος αέρας θερμαίνεται στο δέκτη και ακολούθως εκτονώνεται στο στρόβιλο.

Η TIT εξαρτάται μόνο από τη διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια. Η TIT σχεδίασης λαμβάνεται και ως το θερμοκρασιακό όριο του δέκτη. Όπως και στην περίπτωση του υβριδικού αεριοστροβίλου (Παράγραφος 5.1), αν η διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια οδηγεί σε επίτευξη θερμοκρασίας στο δέκτη μεγαλύτερης της οριακής, τότε κατάλληλος αριθμός κατόπτρων από-εστιάζεται.

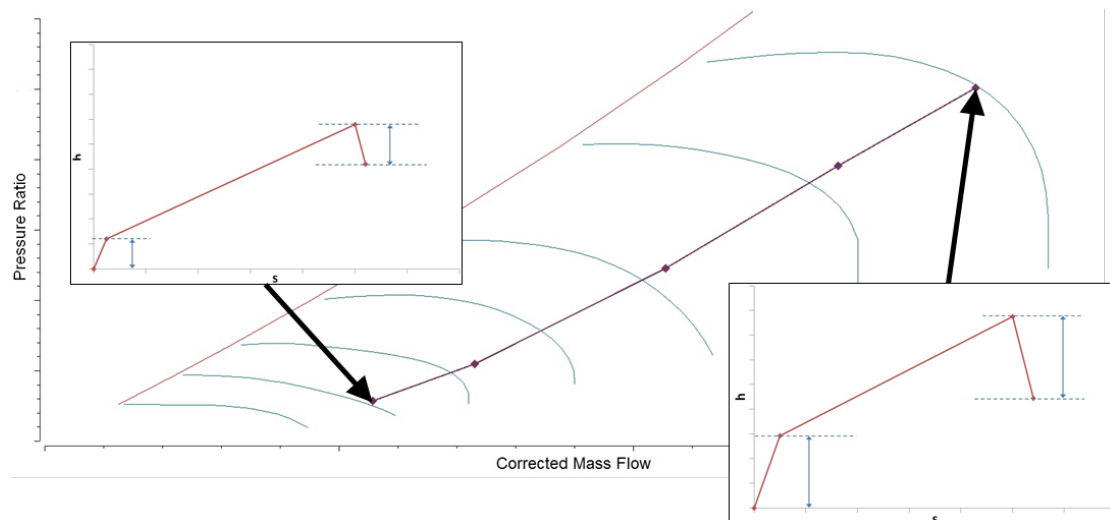
Όταν η διάταξη λειτουργεί με ηλιακή ενέργεια μικρότερη της μέγιστης, τότε για ίδια παροχή αέρα θα μειωθεί και η θερμοκρασία που επιτυγχάνεται στο δέκτη και συνεπώς η παραγόμενη ισχύς. Μείωση της παροχής αέρα οδηγεί σε αύξηση της επιτεύξιμης θερμοκρασίας στο δέκτη για δεδομένη ηλιακή ενέργεια αλλά παράλληλα οδηγεί και σε μείωση της παραγόμενης ισχύος λόγω της μικρότερης παροχής αέρα στο στρόβιλο. Η αλλαγή της τιμής της αναρροφώμενης παροχής αέρα δύναται να επιτευχθεί με αλλαγή των στροφών λειτουργίας της μηχανής. Με σκοπό τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος προσδιορίστηκε το προφίλ της ταχύτητας περιστροφής, συναρτήσει της διαθέσιμης ηλιακής θερμότητας για το οποίο μεγιστοποιείται η παραγόμενη ισχύς, το οποίο και χρησιμοποιήθηκε κατά τους υπολογισμούς. Η επίδραση της ταχύτητας περιστροφής στην παραγόμενη ισχύ για διάφορες τιμές της διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας καθώς και η βέλτιστη τιμή που οδηγεί σε μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος απεικονίζεται στο Σχήμα 5.34 για συνθήκες τυπικής ημέρας και μέγιστη TIT=800°C.



Σχήμα 5.34. Επίδραση ταχύτητας περιστροφής στην παραγόμενη ισχύ αναλόγως της διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας

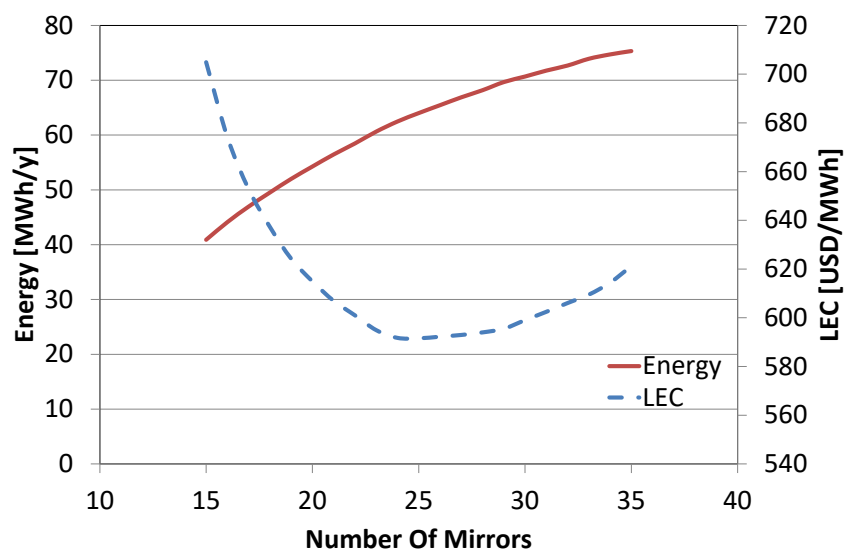
Η διάταξη λειτουργεί μόνο όταν η διαθέσιμη ηλιακή θερμότητα είναι τέτοια ώστε να μπορεί να παραχθεί ωφέλιμη ισχύς. Αναλόγως της διαθέσιμης ηλιακής θερμότητας, μεταβάλλεται και η παραγόμενη ισχύς εκ του στροβίλου. Όταν η διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια οδηγεί σε επίτευξη TIT τέτοιας που η παραγόμενη ισχύς του στροβίλου είναι μεγαλύτερη της καταναλισκόμενης του συμπιεστή, τότε η διάταξη μπορεί να τεθεί σε λειτουργία. Επιπλέον, η ελάχιστη διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια με την οποία μπορεί να λειτουργήσει η διάταξη, εξαρτάται και από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος οδηγεί σε μείωση της παραγόμενης ισχύος και άρα η τιμή της ελάχιστης ηλιακής ενέργειας κατά την οποία δύναται να λειτουργήσει η διάταξη αυξάνεται. Η ελάχιστη τιμή της ηλιακής θερμότητας κατά την οποία δύναται να λειτουργήσει η διάταξη προσδιορίστηκε για διάφορες θερμοκρασίες περιβάλλοντος.

Η γραμμή λειτουργίας της ηλιακής διάταξης πάνω στο χάρτη του συμπιεστή καθώς και το διάγραμμα h-s του κύκλου για δύο σημεία λειτουργίας φαίνεται στο Σχήμα 5.35.

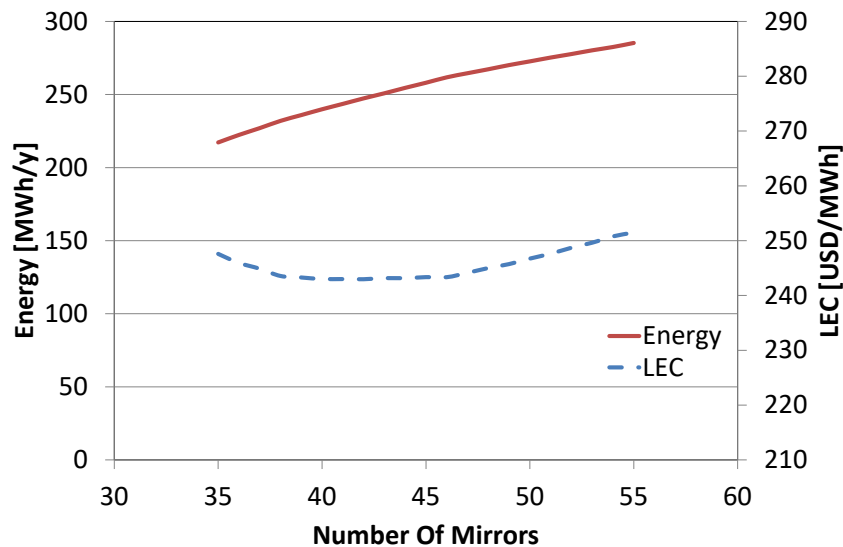


Σχήμα 5.35. Γραμμή λειτουργίας ηλιακής διάταξης και διαγράμματα h-s για δύο σημεία λειτουργίας

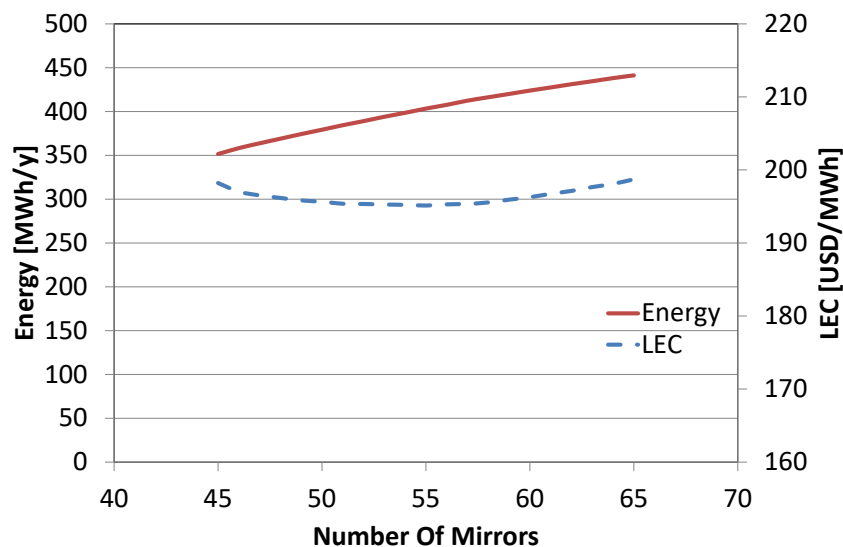
Ακολουθώντας τα όσα αναφέρθηκαν, οι επιδόσεις για την ηλιακή λειτουργία και για τις τρεις εξεταζόμενες ΤΙΤ, όσον αφορά την ετήσια παραγόμενη ενέργεια και το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας, παρουσιάζονται στη συνέχεια (Σχήμα 5.36 - Σχήμα 5.38). Για κάθε τιμή της ΤΙΤ, η παραγόμενη ενέργεια αυξάνει με την αύξηση του αριθμού των κατόπτρων, ενώ το κόστος ηλεκτροπαραγωγής (LEC) παρουσιάζει ελάχιστη τιμή για συγκεκριμένο αριθμό κατόπτρων.



Σχήμα 5.36. Επιδόσεις ηλιακής λειτουργίας για ΤΙΤ=400°C



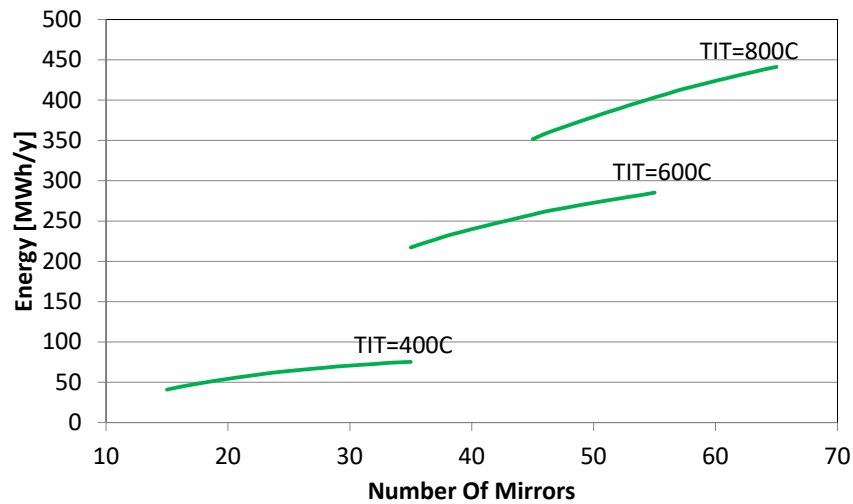
Σχήμα 5.37. Επιδόσεις ηλιακής λειτουργίας για TIT=600°C



Σχήμα 5.38. Επιδόσεις ηλιακής λειτουργίας για TIT=800°C

Η σύγκριση της παραγόμενης ενέργειας και του κόστους ηλεκτροπαραγωγής για τις τρεις τιμές της TIT παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.39 και στο Σχήμα 5.40 αντιστοίχως. Για συγκεκριμένο αριθμό κατόπτρων, η παραγόμενη ενέργεια αυξάνεται με την αύξηση της TIT. Αυτό οφείλεται στην αύξηση του θερμικού βαθμού απόδοσης (Σχήμα 5.33) και στην δυνατότητα αξιοποίησης μεγαλύτερου μέρους της διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας λόγω της υψηλότερης τιμής του θερμοκρασιακού ορίου του δέκτη. Αποτέλεσμα των ανωτέρω είναι και η μείωση του κόστους ηλεκτροπαραγωγής με την αύξηση της TIT.

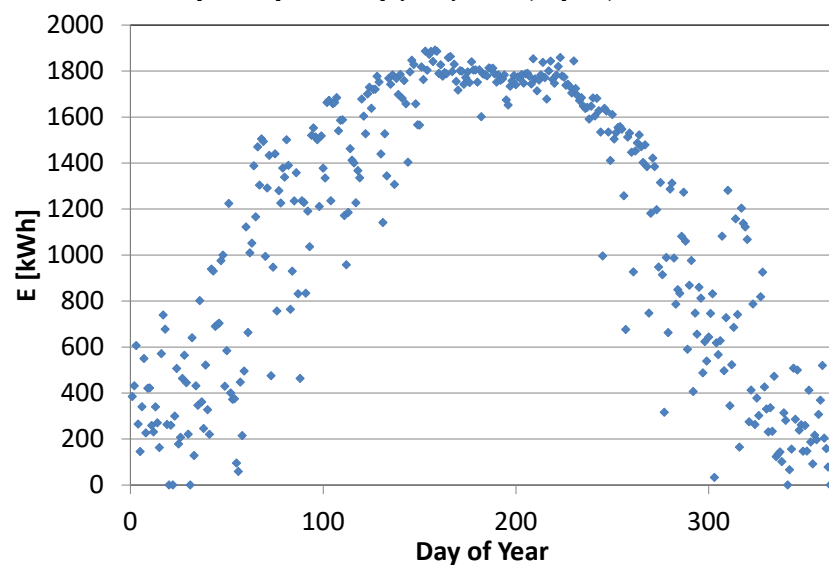
Η έντονη επίδραση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στην παραγόμενη ενέργεια φαίνεται στο Σχήμα 5.41 που παρουσιάζει την παραγόμενη ενέργεια κάθε ημέρας του έτους για την περίπτωση TIT=800°C.



Σχήμα 5.39. Σύγκριση παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας κατά την ηλιακή λειτουργία για τις τρεις TIT



Σχήμα 5.40. Σύγκριση κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κατά την ηλιακή λειτουργία για τις τρεις TIT



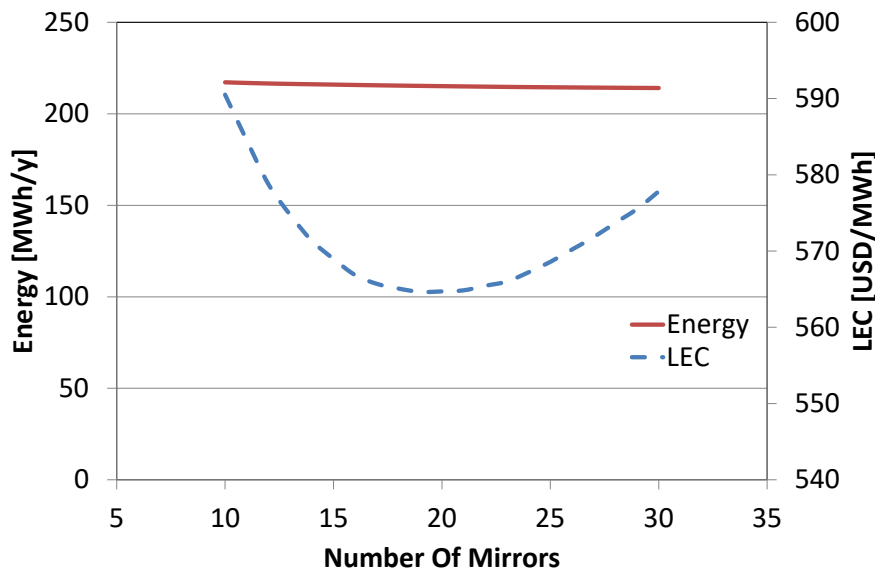
Σχήμα 5.41. Ημερήσια παραγόμενη ενέργεια κατά τη διάρκεια του έτους για TIT=800°C

5.5.3 Επιδόσεις - Υβριδική λειτουργία

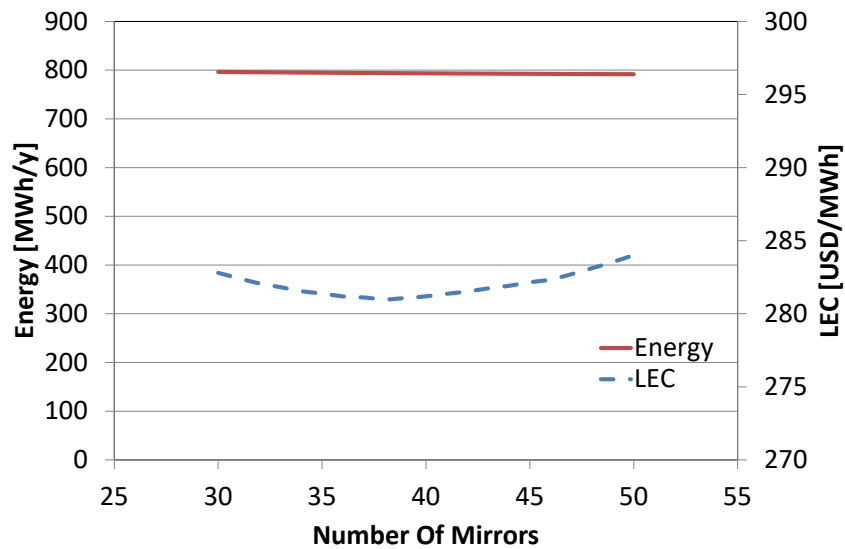
Οι επιδόσεις του σχήματος της ηλιακής λειτουργίας καθορίζονται από τη διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια (Σχήμα 5.41). Συνεπώς, η ηλεκτροπαραγωγή είναι δυνατή μόνο όταν είναι διαθέσιμη η απαιτούμενη ηλιακή ενέργεια. Ελεγχόμενη παραγωγή ισχύος δύναται να επιτευχθεί με τη χρήση της υβριδικής διάταξης (Σχήμα 5.32). Αυτή η διάταξη προκύπτει από την ηλιακή με την τοποθέτηση θαλάμου καύσης κατάντη του δέκτη.

Κατά τη λειτουργία της υβριδικής διάταξης, ο θάλαμος καύσης λειτουργεί όταν απαιτείται ούτως ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη ΤΙΤ. Κατά τις ώρες χωρίς ηλιοφάνεια, όλη η απαιτούμενη θερμότητα παρέχεται από το καύσιμο.

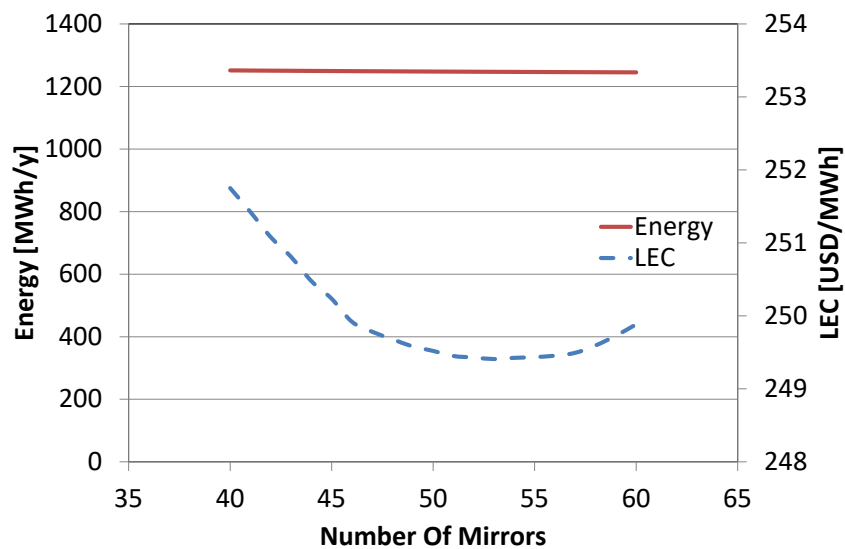
Οι επιδόσεις της υβριδικής διάταξης και για τις τρεις εξεταζόμενες ΤΙΤ, όσον αφορά την ετήσια παραγόμενη ενέργεια και το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας, παρουσιάζονται στη συνέχεια (Σχήμα 5.42 - Σχήμα 5.44). Στην υβριδική διάταξη, η παραγόμενη ενέργεια είναι ουσιαστικά σταθερή μεταβαλλόμενου του αριθμού των κατόπτρων, που οφείλεται στην σταθερή ΤΙΤ για τη μέγιστη παροχή αέρα. Η αύξηση της ΤΙΤ επιδρά θετικά στην παραγόμενη ενέργεια και στο κόστος ηλεκτροπαραγωγής (Σχήμα 5.45 & Σχήμα 5.46) λόγω της αύξησης του θερμικού βαθμού απόδοσης που συνεπάγεται την καλύτερη αξιοποίηση της προσδιδόμενης στον κύκλο θερμότητας (ηλιακή και καυσίμου).



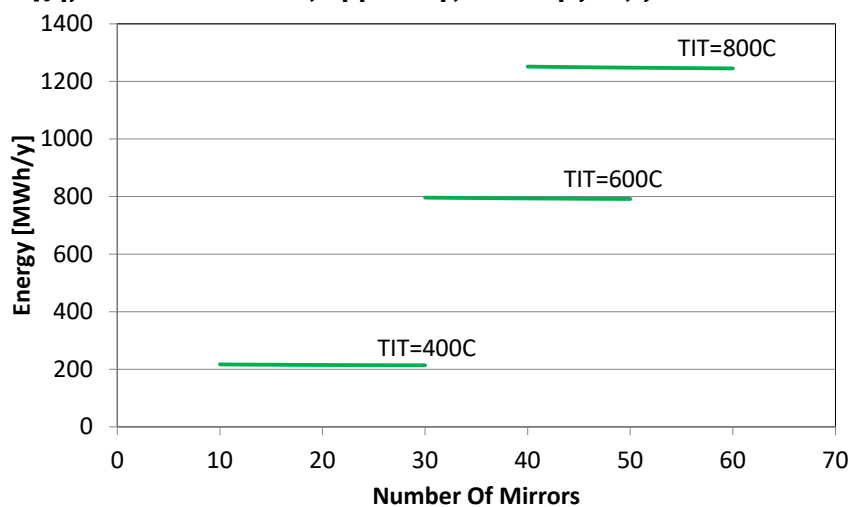
Σχήμα 5.42. Επιδόσεις υβριδικής λειτουργίας για ΤΙΤ=400°C



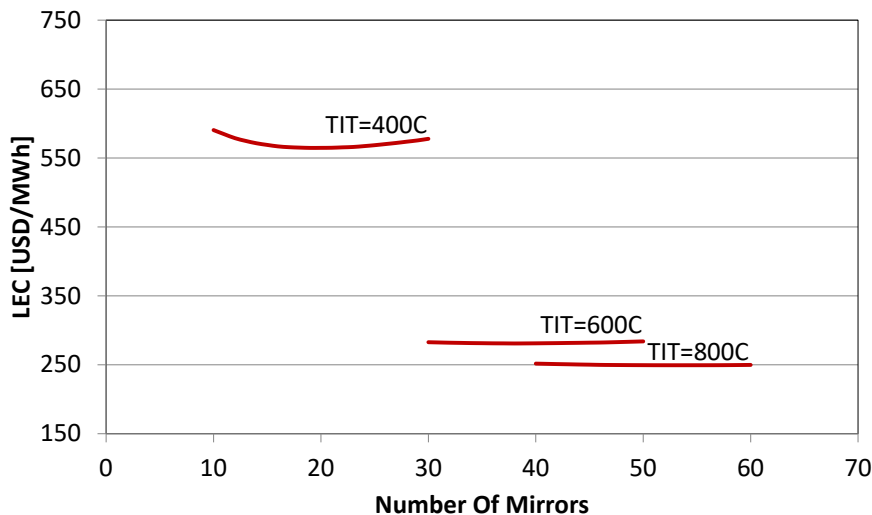
Σχήμα 5.43. Επιδόσεις υβριδικής λειτουργίας για TIT=600°C



Σχήμα 5.44. Επιδόσεις υβριδικής λειτουργίας για TIT=800°C



Σχήμα 5.45. Σύγκριση παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας κατά την υβριδική λειτουργία για τις τρεις TIT



Σχήμα 5.46. Σύγκριση κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κατά την υβριδική λειτουργία για τις τρεις TIT

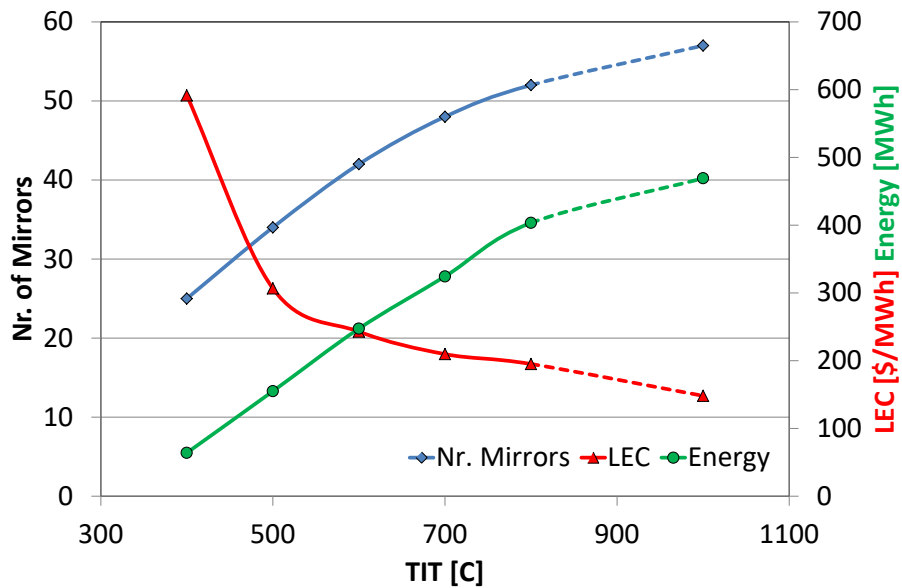
5.5.4 Συγκριτική αξιολόγηση διατάξεων

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.40 και στο Σχήμα 5.46, για κάθε τιμή της TIT υπάρχει ένας βέλτιστος αριθμός κατόπτρων για τον οποίο το κόστος ηλεκτροπαραγωγής ελαχιστοποιείται. Η ελάχιστη τιμή του κόστους ηλεκτροπαραγωγής, η αντίστοιχη παραγόμενη ενέργεια και ο βέλτιστος αριθμός κατόπτρων συναρτήσει της TIT για ηλιακή και υβριδική λειτουργία απεικονίζεται στο Σχήμα 5.47 και Σχήμα 5.48 αντιστοίχως.

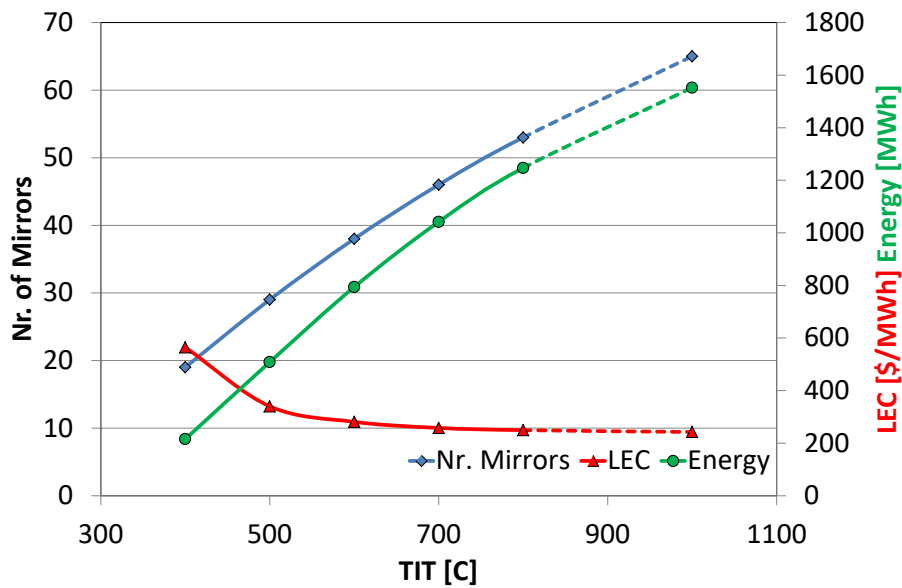
Για την ηλιακή διάταξη (Σχήμα 5.47) παρατηρείται ότι αυξανόμενης της TIT η βέλτιστη τιμή του LEC μειώνεται, ενώ παράλληλα αυξάνεται η παραγόμενη ενέργεια αλλά και ο αριθμός των κατόπτρων που απαιτούνται για τους λόγους που αναλύθηκαν στην παράγραφο 5.5.2. Τα ίδια συμπεράσματα εξάγονται και για την υβριδική διάταξη (Σχήμα 5.48) σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 5.5.3. Και για τις δύο διατάξεις παρατηρείται πως η αύξηση της παραγόμενης ενέργειας και η μείωση της τιμής του LEC γίνονται με φθίνοντα ρυθμό λόγω του φθίνοντος ρυθμού αύξησης του θερμικού βαθμού απόδοσης σε σχέση με την αύξηση της TIT (Σχήμα 5.33).

Ακόμα παρατηρείται πως για κάθε τιμή της TIT, η παραγόμενη ενέργεια στο βέλτιστο σημείο της υβριδικής διάταξης είναι περίπου 3.5 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη ηλιακή διάταξη. Αυτό συμβαίνει λόγω της διαρκούς λειτουργίας της υβριδικής διάταξης μέσω της χρήσης καυσίμου, εν αντιθέσει με την ηλιακή διάταξη που λειτουργεί μόνο όταν υπάρχει η απαιτούμενη ηλιακή ενέργεια. Αντιθέτως, η ελάχιστη τιμή του LEC για κάθε TIT είναι μικρότερη στην ηλιακή διάταξη από ότι στην υβριδική. Αυτό συμβαίνει διότι το κόστος της προσφερόμενης ενέργειας ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας στην ηλιακή διάταξη είναι μικρότερο από ότι στην υβριδική διάταξη στην οποία και συνδέεται ισχυρά με το κόστος του καυσίμου.

Συνεπώς, με βάση τα ανωτέρω, η ηλιακή λειτουργία εμφανίζεται ως η αποδοτικότερη, από άποψη μοναδιαίου κόστους ηλεκτροπαραγωγής.



Σχήμα 5.47. Βέλτιστη τιμή LEC, ο αντίστοιχος αριθμός κατόπτρων και η παραγόμενη ενέργεια αναλόγως της TIT (ηλιακή λειτουργία)

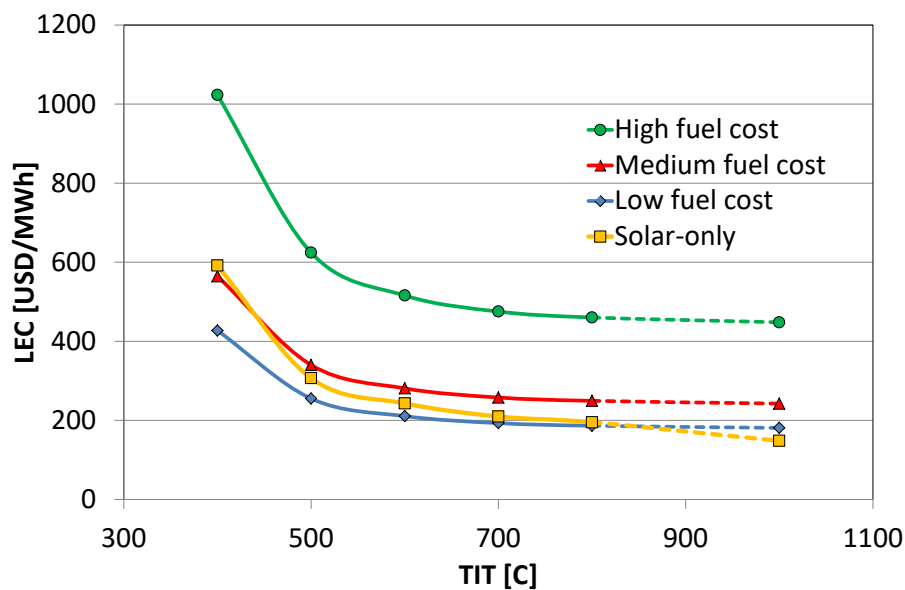


Σχήμα 5.48. Βέλτιστη τιμή LEC, ο αντίστοιχος αριθμός κατόπτρων και η παραγόμενη ενέργεια αναλόγως της TIT (υβριδική λειτουργία)

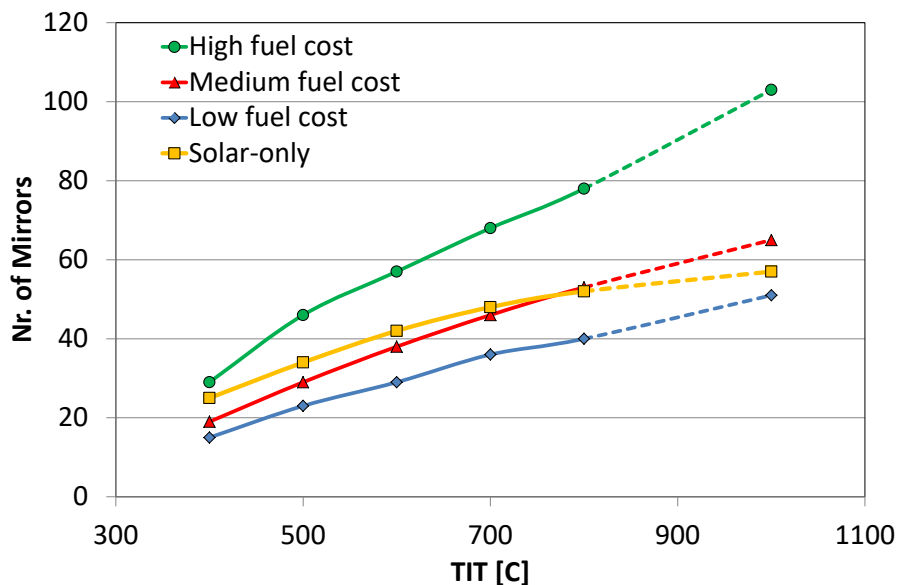
Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το κόστος του καυσίμου μπορεί να μεταβάλλεται έντονα και συνεπώς να επηρεάζει και την βέλτιστη τιμή του LEC στην περίπτωση της υβριδικής διάταξης. Με σκοπό τη διερεύνηση της επίδρασης του κόστους καυσίμου στις επιδόσεις της υβριδικής διάταξης, υπολογίζεται το κόστος ηλεκτροπαραγωγής για τρεις τιμές του κόστους καυσίμου: α) medium (465USD/t), αυτή που χρησιμοποιήθηκε στη μέχρι τώρα μελέτη (Πίνακας 5.9), β) high (943USD/t) και γ) low (280USD/t), η μέγιστη και η

ελάχιστη τιμή αντιστοίχως για το διάστημα 2012-2017. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν, καθώς και το κόστος ηλεκτροπαραγωγής για την ηλιακή διάταξη παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.49. Όπως αναμενόταν, η τιμή του κόστους καυσίμου έχει ισχυρή επίδραση στις οικονομικές επιδόσεις της διάταξης. Η ηλιακή διάταξη παρουσιάζει μικρότερο κόστος ηλεκτροπαραγωγής από αυτό για μέσες και υψηλές τιμές του κόστους καυσίμου, ενώ για χαμηλές τιμές κόστους καυσίμου είναι λίγο μικρότερο για $TIT > 800^{\circ}\text{C}$.

Επιπλέον, όσο αυξάνεται το κόστος καυσίμου, ο βέλτιστος αριθμός κατόπτρων μετατοπίζεται σε μεγαλύτερο αριθμό (Σχήμα 5.50).

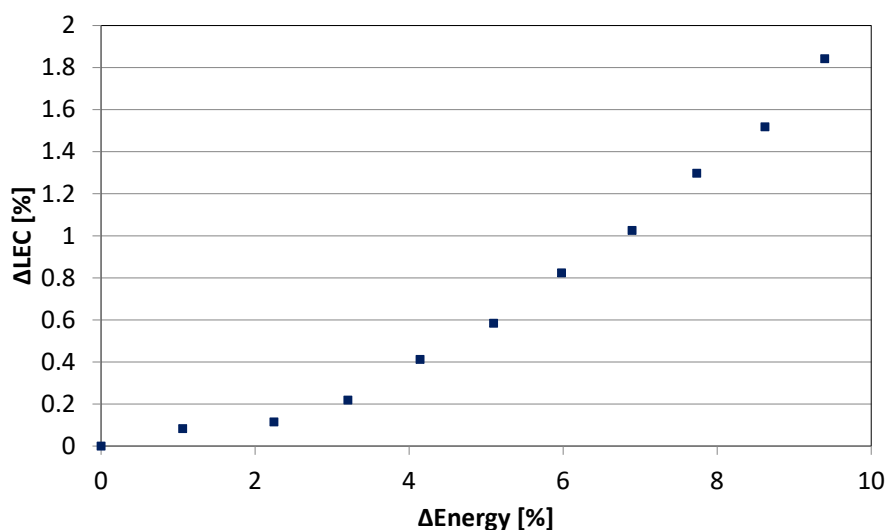


Σχήμα 5.49. Βέλτιστη τιμή του κόστους ηλεκτροπαραγωγής για τρεις τιμές του κόστους καυσίμου



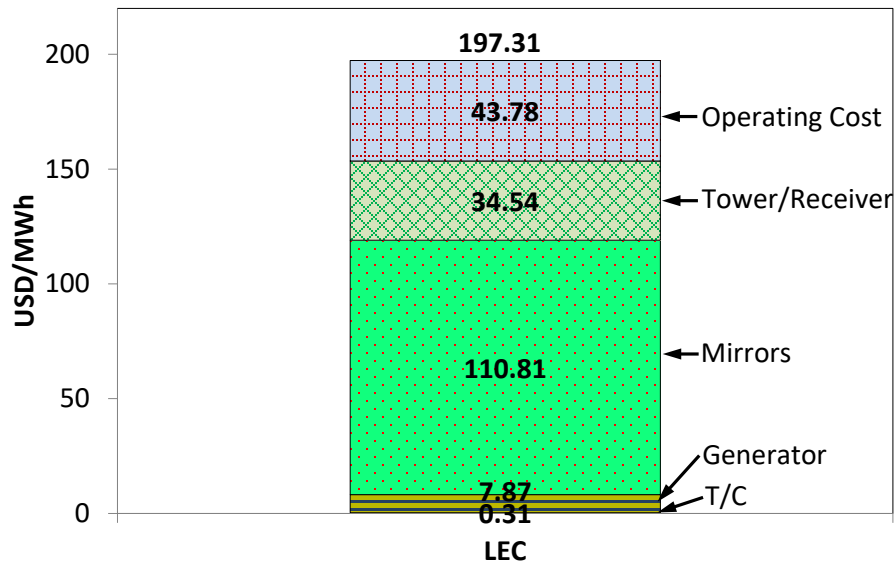
Σχήμα 5.50. Ο αριθμός κατόπτρων για τον οποίο επιτυγχάνεται η βέλτιστη τιμή του κόστους ηλεκτροπαραγωγής για τρεις τιμές κόστους καυσίμου

Στην ηλιακή διάταξη, παρατηρείται πως ο αριθμός των κατόπτρων έχει μεγαλύτερη επίδραση στην παραγόμενη ενέργεια από ότι στο LEC. Δηλαδή, ένα μεγαλύτερο πεδίο κατόπτρων από αυτό που αντιστοιχεί στο ελάχιστο LEC, οδηγεί σε αύξηση της παραγόμενης ενέργειας με σχετικά μικρή επιβάρυνση στο κόστος της ηλεκτροπαραγωγής. Αυτό μπορεί να φανεί ποσοτικοποιημένα στο Σχήμα 5.51 στο οποίο και απεικονίζεται η μεταβολή της παραγόμενης ενέργειας (ΔE) και του LEC από τις τιμές τους στη βέλτιστη περίπτωση, ως αποτέλεσμα της αύξησης του αριθμού των κατόπτρων. Όπως φαίνεται μεγαλύτερο πεδίο κατόπτρων οδηγεί σε αύξηση της τάξης του 9.5% στην παραγόμενη ενέργεια, ενώ για το κόστος η επιβάρυνση είναι της τάξης του 1.8%. Τέτοιου είδους πληροφορία είναι χρήσιμη όταν επιζητείται η κάλυψη μεγαλύτερων αναγκών, έστω και αν αυτό δεν μπορεί να γίνει με το ελάχιστο (βέλτιστο) κόστος.



Σχήμα 5.51. Μεταβολή της παραγόμενης ενέργειας και του LEC από τη βέλτιστη περίπτωση για ηλιακή λειτουργία και TIT=800°C

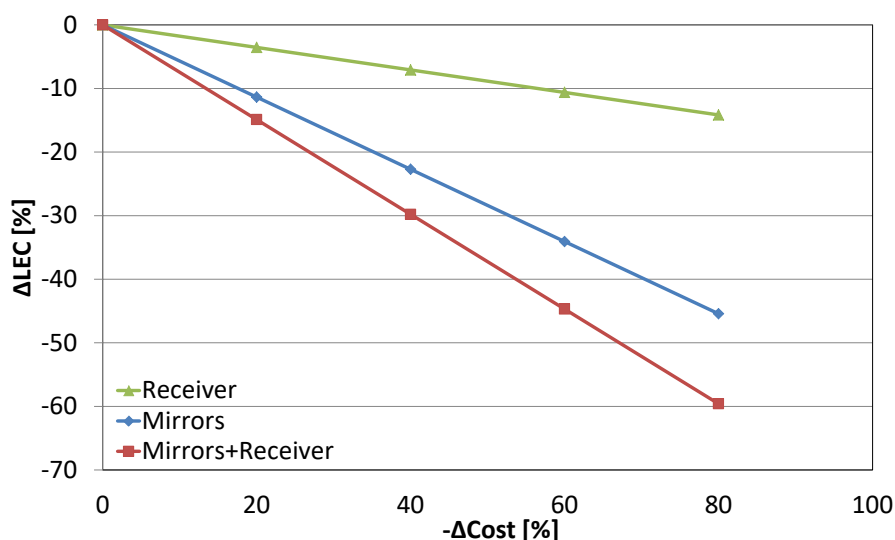
Η ηλιακή διάταξη δεν έχει κόστη λειτουργίας σχετιζόμενα με το καύσιμο και το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας καθορίζεται κυρίως από το κόστος κτήσης των συνιστωσών. Μείωση του κόστους της παραγόμενης ενέργειας μπορεί να προέλθει συνεπώς μόνο από μείωση του κόστους κτήσης των συνιστωσών της διάταξης. Είναι ενδιαφέρον να προσδιοριστεί η επίδραση του κάθε παράγοντα στην τιμή του LEC ώστε να βρεθούν οι συνιστώσες που έχουν τη μεγαλύτερη επίδραση. Το Σχήμα 5.52 παρουσιάζει την συνεισφορά των επιμέρους συνιστωσών κόστους στο LEC για τη βέλτιστη τιμή του στη περίπτωση ηλιακής λειτουργίας με TIT=800°C. Όπως φαίνεται, το κόστος των ηλιακών συνιστωσών (ειδικά τα κάτοπτρα) έχει τη μεγαλύτερη επίδραση. Επίσης, το κόστος λειτουργίας των ηλιακών συνιστωσών είναι αρκετά υψηλό (~16 φορές από αυτό των συνιστωσών παραγωγής ισχύος), με αποτέλεσμα το υψηλό συνολικό λειτουργικό κόστος της διάταξης. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το κόστος κτήσης και λειτουργίας των ηλιακών συνιστωσών ενδέχεται να είναι υπερεκτιμημένο.



Σχήμα 5.52. Συνιστώσες του LEC για τη μικρότερη τιμή του στην περίπτωση ηλιακής λειτουργίας και TIT=800°C

Η μείωση του κόστους των ηλιακών συνιστωσών θα μπορούσε να προέλθει από τη μαζική παραγωγή τους, εάν η τεχνολογία αυτή περνούσε σε εμπορικό στάδιο. Για την ποσοτικοποίηση της επίδρασης στο LEC, η τιμή αυτού υπολογίζεται για διάφορα ποσοστά μείωσης του κόστους κτήσης των ηλιακών συνιστωσών (κάτοπτρα, δέκτης και αμφότερα) όπως απεικονίζει το Σχήμα 5.53 για την περίπτωση ηλιακής λειτουργίας με TIT=800°C. Παρατηρείται η έντονη εξάρτηση του κόστους ηλεκτροπαραγωγής με την τιμή του κόστους κτήσης των ηλιακών συνιστωσών και ειδικά των κατόπτρων. Συνεπώς, η μαζική παραγωγή των κατόπτρων που θα οδηγούσε σε μείωση του κόστους κτήσης τους θα επηρέαζε άμεσα και έντονα το κόστος ηλεκτροπαραγωγής.

Οι Aichmayer et al. (2013) αναφέρουν ότι κόστος απομακρυσμένης ηλεκτροπαραγωγής μικρής κλίμακας στο εύρος των 250-300EUR/MWh αποτελεί μείωση 10-43% σε σχέση με το κόστος μιας ηλεκτρογεννήτριας Diesel. Ο επενδυτικός και συμβουλευτικός οίκος Lazard (2015), εκτιμά το LEC ηλεκτρογεννήτριας Diesel στο εύρος των 212-281USD/MWh. Όπως φαίνεται, ακόμα και με τις επιλεγείσες τιμές κόστους, η εξετασθείσα διάταξη θα μπορούσε να είναι ανταγωνιστική σε σχέση με μηχανές Diesel για απομακρυσμένη ηλεκτροπαραγωγή μικρής κλίμακας.



Σχήμα 5.53. Μεταβολή του LEC από τη βέλτιστη περίπτωση συναρτήσσει του ποσοστού μείωσης του κόστους των ηλιακών συνιστωσών

5.6 Σύνοψη – Συμπεράσματα

Στο Κεφάλαιο αυτό μελετήθηκε η λειτουργία και προσδιορίστηκαν οι επιδόσεις του υβριδικού αεριοστροβίλου όπου η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται για να προθερμάνει τον αέρα πριν τον θάλαμο καύσης. Ο υβριδικός αεριοστροβίλος απαιτεί μικρότερη ποσότητα καυσίμου αλλά παράλληλα παρουσιάζει και μείωση στην παραγόμενη ενέργεια. Επίσης, παρουσιάζει κατασκευαστικές δυσκολίες που έγκεινται στην οδήγηση του αέρα στο δέκτη καθώς και στη σχεδίαση του θαλάμου καύσης. Η διάταξη υβριδικού αεριοστροβίλου γίνεται ανταγωνιστική για τιμές καυσίμου >8\$/MBTU.

Όσον αφορά στις παραμέτρους σχεδίασης και λειτουργίας, μελετήθηκε η επίδραση του αριθμού των κατόπτρων, της διάταξης ατράκτων, της λειτουργίας των IGVs και του τύπου λειτουργίας. Η μεταβολή των επιδόσεων γίνεται με φθίνοντα ρυθμό, όσο αυξάνεται ο αριθμός των κατόπτρων. Ακόμα, καταλληλότερες για υβριδοποίηση εμφανίζονται μηχανές με ανακόμιση θερμότητας. Τέλος, η χρήση των IGVs μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της παραγόμενης ισχύος ή σε μείωση της παροχής του καυσίμου με ταυτόχρονη μείωση της παραγόμενης ισχύος, αναλόγως του τύπου λειτουργίας.

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. Η διάταξη αυτή φαίνεται οικονομικά ανταγωνιστική των μηχανών Diesel για απομακρυσμένη ηλεκτροπαραγωγή μικρής κλίμακας (~200\$/MWh).

Με γνώμονα την αντιμετώπιση των κατασκευαστικών δυσκολιών της διάταξης του υβριδικού αεριοστροβίλου, στο επόμενο Κεφάλαιο μελετώνται

διατάξεις όπου η ηλιακή ενέργεια προσφέρεται στον κύκλο με διαφορετικό τρόπο και χρησιμοποιώντας υπάρχουσες τεχνολογίες.

Κεφάλαιο 6: Εναλλακτικοί Τρόποι Υβριδοποίησης Αεριοστροβίλου

Λόγω των δυσκολιών που εμφανίζει η συνήθης προσέγγιση του υβριδικού αεριοστροβίλου, είναι αναγκαία η πρόταση και η διερεύνηση διατάξεων αεριοστροβίλου που αξιοποιούν την ηλιακή ενέργεια με διαφορετικό τρόπο. Είναι ενδιαφέρον να εξεταστεί αν μπορούν να χρησιμοποιηθούν διατάξεις που εκμεταλλεύονται την ηλιακή θερμότητα με υπάρχουσες τεχνολογίες ούτως ώστε να μην απαιτείται επιπλέον κόστος για την ανάπτυξη των συνιστωσών. Κάτι τέτοιο αποτελεί αναγκαία συνθήκη για την περαιτέρω ανάπτυξη και εμπορική εγκαθίδρυση των ηλιοθερμικών διατάξεων, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 1.5.5.

Σε αυτό το πλαίσιο, στο παρόν κεφάλαιο προτείνονται και εξετάζονται δύο εναλλακτικές διατάξεις: αεριοστροβίλος με ηλιακή αναθέρμανση και αεριοστροβίλος με έγχυση ατμού παραγόμενου από ηλιακή ενέργεια. Και οι δύο διατάξεις αποσκοπούν στη χρήση της ηλιακής ενέργειας στον αεριοστροβίλο μέσω της αξιοποίησης υπάρχουσων τεχνολογιών.

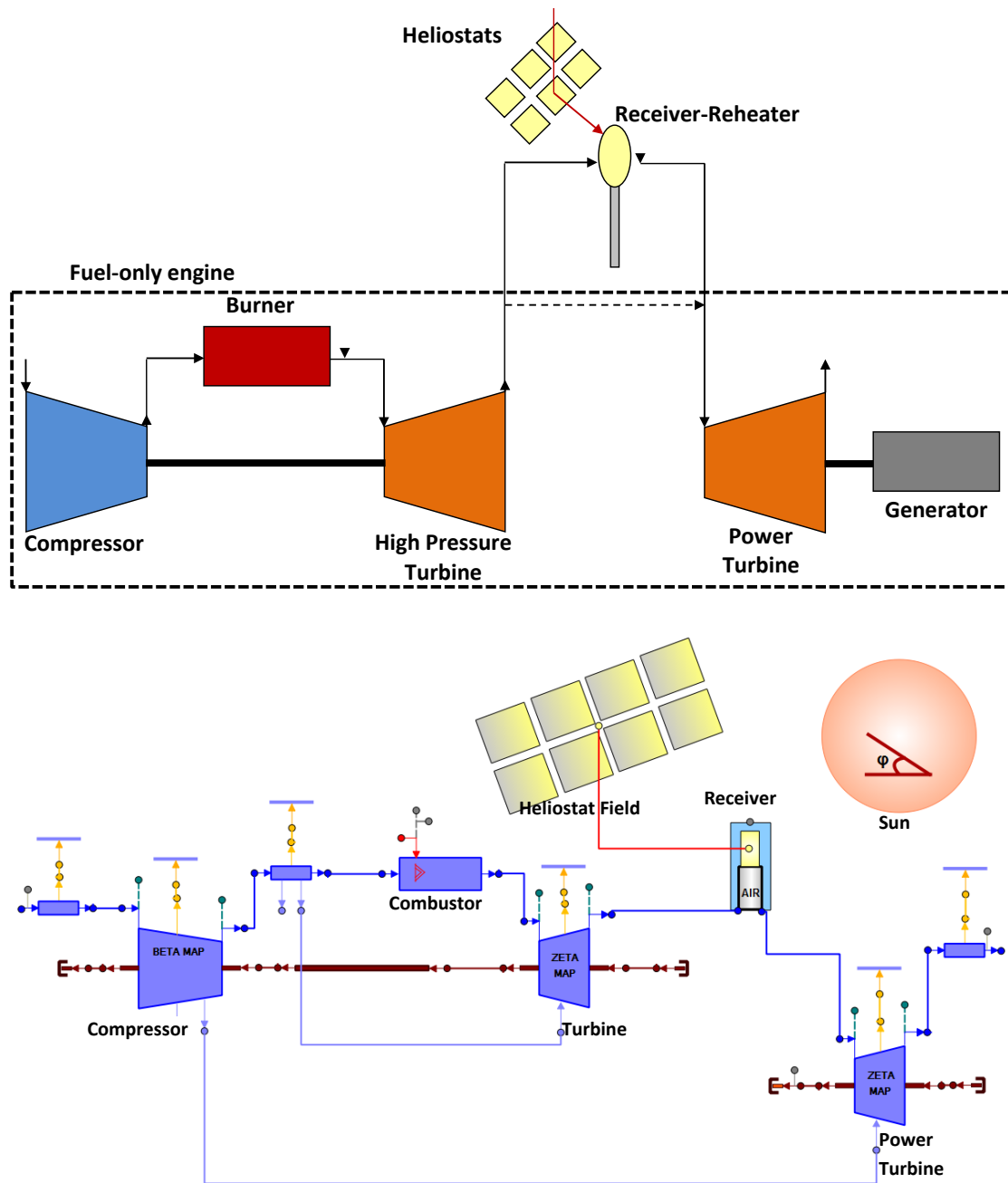
Επιπλέον, με σκοπό την αξιοποίηση της απορριπτόμενης ηλιακής θερμότητας μέσω της απο-εστίασης των κατόπτρων, εξετάζεται υβριδική διάταξη όπου η απορριπτόμενη θερμότητα χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού και έγχυση αυτού στο θάλαμο καύσης του υβριδικού αεριοστροβίλου.

6.1 Ηλιακή αναθέρμανση

Ένας αεριοστροβίλος με αναθέρμανση περιλαμβάνει έναν δεύτερο θάλαμο καύσης μεταξύ δύο στροβίλων ούτως ώστε να επιτυγχάνεται υψηλότερη θερμοκρασία καυσαερίων στο δεύτερο στροβίλο και συνεπώς να αυξάνεται η παραγόμενη ισχύς. Στη διάταξη της ηλιακής αναθέρμανσης, η αναθέρμανση του καυσαερίου πραγματοποιείται με τη χρήση της ηλιακής ενέργειας.

6.1.1 Διάταξη - Σχεδίαση

Για την υλοποίηση της διάταξης της ηλιακής αναθέρμανσης, θεωρείται αεριοστροβίλος διδύμων ατράκτων (Σχήμα 6.1) με ηλιακή αναθέρμανση πριν την είσοδο των καυσαερίων στο στροβίλο ισχύος.



Σχήμα 6.1. Διάταξη συμβατικού αεριοστροβίλου και αεριοστροβίλου με ηλιακή αναθέρμανση και απεικόνισή της στο PROOSIS

Τα καυσαέρια έχουν ήδη υψηλή θερμοκρασία και ως εκ τούτου, για να μπορεί να επιτευχθεί η αναθέρμανση, ο δέκτης θα πρέπει να μπορεί να τα θερμάνει σε ακόμα μεγαλύτερη θερμοκρασία. Επιπλέον, οι δέκτες που έχουν χρησιμοποιηθεί σε πειραματικές διατάξεις υβριδικών αεριοστροβίλων είναι σχεδιασμένοι και κατασκευασμένοι με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτελούν τη θέρμανση αέρα και συνεπώς η θέρμανση καυσαερίου ενδέχεται να δημιουργήσει προβλήματα στη λειτουργία τους (μειωμένες επιδόσεις λόγω επικαθίσεων και αύξησης πτώσης πίεσης). Πρόσφατες εξελίξεις στο πεδίο της σχεδίασης του

δέκτη (Iniesta et al., 2015) θα επέτρεπαν την άμεση αναθέρμανση των καυσαερίων από το δέκτη (Σχήμα 6.1).

Για να είναι εφικτή η αναθέρμανση, η θερμοκρασία των καυσαερίων στην έξοδο του στροβίλου υψηλής θα πρέπει να είναι μικρότερη της μέγιστης επιτρεπτής από το δέκτη. Για δεδομένη TIT η ικανότητα αναθέρμανσης εξαρτάται από την αντοχή του δέκτη, ενώ για δεδομένη θερμοκρασιακή αντοχή του δέκτη η αναθέρμανση εξαρτάται από την TIT αφού αυτή καθορίζει και την θερμοκρασία εξόδου του στροβίλου υψηλής. Με δεδομένο ότι η αντοχή του δέκτη είναι καθορισμένη (900-1000°C) (Iniesta et al., 2015), η δυνατότητα αναθέρμανσης καθώς και η θερμοκρασιακή αύξηση που μπορεί να επιτευχθεί καθορίζεται από την TIT.

Όσο μικρότερη είναι η TIT, τόσο μικρότερη θα είναι και η θερμοκρασία εξόδου του στροβίλου υψηλής και συνεπώς τόσο περισσότερη ηλιακή θερμότητα θα μπορεί να δοθεί στον κύκλο. Μείωση της TIT θα οδηγούσε σε αύξηση του ποσού της αξιοποιήσιμης ηλιακής θερμότητας και συνεπώς σε αύξηση της ισχύος λόγω της αναθέρμανσης. Όμως, σε έναν αεριοστρόβιλο, όσο μειώνεται η TIT, μειώνεται και ο θερμοκός βαθμός απόδοσης. Δηλαδή απαιτείται περισσότερη ποσότητα καυσίμου για την παραγωγή μιας μονάδας ενέργειας. Συνεπώς, η μείωση της TIT ευνοεί την αναθέρμανση αλλά επιδρά αρνητικά στην συμβατική λειτουργία.

Στη μελετηθείσα διάταξη, η ηλιακή αναθέρμανση θεωρείται πως λειτουργεί μόνο στην περίπτωση που οδηγεί σε αύξηση της παραγόμενης ισχύος συμπεριλαμβανοντας και την μείωση των επιδόσεων λόγω των επιπλέον απωλειών που εισάγει ο δέκτης.

Η θερμοκρασία αναθέρμανσης επιλέγεται 900 °C, ούτως ώστε να μην απαιτείται ψύξη των πτερυγίων του στροβίλου ισχύος (Walsh & Fletcher, 1998). Σε περίπτωση που η διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια επιτρέπει την επίτευξη μεγαλύτερης θερμοκρασίας, τότε απο-εστιάζεται κατάλληλος αριθμός κατόπτρων ώστε να τηρείται το όριο.

Για τη διερεύνηση της επίδρασης της TIT εξετάζονται τρεις περιπτώσεις: 800 °C, 900 °C και 1000 °C. Η μηχανή θεωρείται ότι έχει σχεδιαστεί για μέγιστη ειδική ισχύ με στόχο την ελαχιστοποίηση του μεγέθους της ώστε να είναι δυνατή η τοποθέτησή της στην κορυφή του πύργου, όπως αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Συνεπώς, για κάθε τιμή της TIT, επιλέγεται ο λόγος πίεσης που ικανοποιεί αυτό το κριτήριο. Το λόγο πίεσης για τον οποίο μεγιστοποιείται η ειδική ισχύς για κάθε TIT, παρουσιάζει ο Πίνακας 6.1.

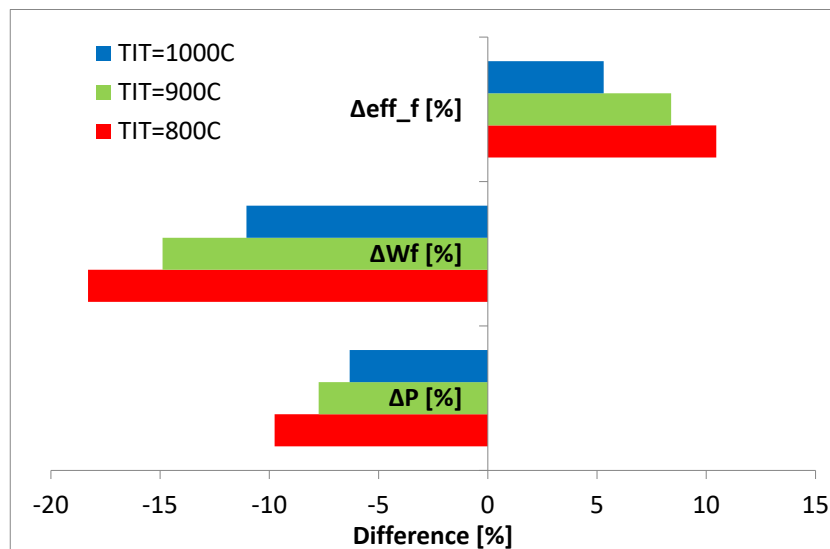
Ο αριθμός των χρησιμοποιούμενων κατόπτρων αποτελεί μεταβλητή σχεδιασμού ούτως ώστε να βρεθεί το μέγεθος του ηλιακού κομματιού που οδηγεί στις βέλτιστες επιδόσεις. Το σενάριο λειτουργίας και σε αυτή τη περίπτωση είναι η λειτουργία με σταθερή TIT.

Τα χαρακτηριστικά σχεδίασης συνοψίζει ο Πίνακας 6.1.

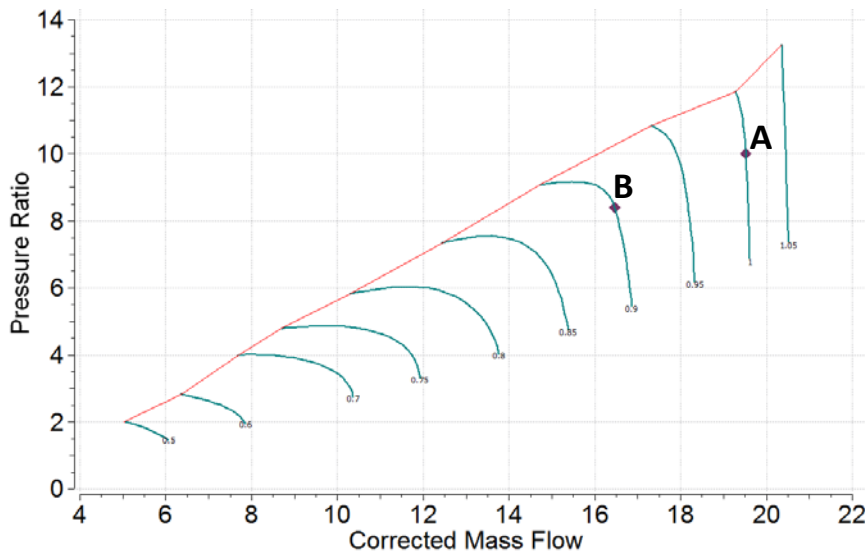
Κάτοπτρα	
Ανακλαστικότητα	0.97
Συντελεστής εστίασης	1
Σκίαση	0.97
Εμβαδόν [m ²]	64
Δέκτης	
Απορροφητικότητα	0.95
Οπτική απόδοση	0.96
Εκπομπή	0.05
Αεριοστρόβιλος	
Λόγος πίεσης	7, 8.5, 10
TIT [C]	800, 900, 1000
Πολυτροπικός β.α. συμπιεστή	0.88
Πολυτροπικός β.α. στροβίλων	0.90
Ισχύς [MW]	5
Θερμικός β.α. [%]	27.10, 30.07, 32.25
Παροχή αέρα [kg/s]	30.59, 24.00, 19.68
Παροχή καυσίμου [kg/s]	0.38, 0.34, 0.32
LHV [MJ/kg]	48.12
Εκπομπές CO ₂ [kgCO ₂ /MJfuel]	0.053

Πίνακας 6.1. Χαρακτηριστικά σημείου σχεδίασης αεριοστρόβιλου και ηλιακού κομματιού

Η λειτουργία της αναθέρμανσης έχει ως συνέπεια τη λειτουργία του αεριοστρόβιλου εκτός σημείου σχεδίασης. Τη διαφορά των επιδόσεων στο σημείο σχεδίασης για την παραγόμενη ισχύ (ΔP), την παροχή καυσίμου (ΔW_f) και τον θερμικό βαθμό απόδοσης καυσίμου (Δeff_f) μεταξύ του αεριοστρόβιλου με ηλιακή αναθέρμανση και του συμβατικού για τις τρεις TIT, παρουσιάζει το Σχήμα 6.2. Όπως παρατηρείται, παρουσιάζεται μείωση τόσο στην παροχή καυσίμου όσο και στην παραγόμενη ισχύ. Η εξήγηση είναι η εξής: Αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου στο στρόβιλο ισχύος τείνει να αυξήσει την ανηγμένη παροχή ($q = m\sqrt{T}/P$). Ο στρόβιλος εν γένει λειτουργεί στραγγαλισμένος και συνεπώς μπορεί να μεταβάλλεται ο λόγος πίεσής του με σταθερή ανηγμένη παροχή. Για να μπορέσει να διακινήσει ο στρόβιλος ισχύος την ίδια παροχή μάζας αλλά μεγαλύτερης θερμοκρασίας πρέπει να αυξήσει την ταχύτητα περιστροφής του. Όμως, ο στρόβιλος ισχύος κινεί τη γεννήτρια και ως εκ τούτου απαιτείται η διατήρηση σταθερών μηχανικών στροφών για την παραγωγή ρεύματος σταθερής συχνότητας. Συνεπώς, μεταβάλλεται το σημείο λειτουργίας της αεριογόνου και μεταβαίνει σε μικρότερη παροχή όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.3 όπου απεικονίζεται η μεταβολή του σημείου λειτουργίας στο χάρτη του συμπιεστή.

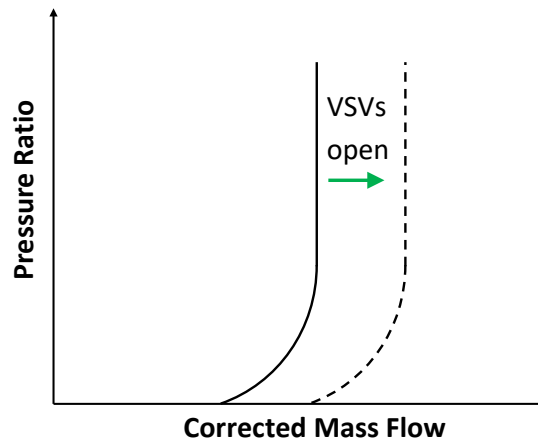


Σχήμα 6.2. Διαφορά επιδόσεων στο σημείο σχεδίασης μεταξύ αεροστροβίλου με ηλιακή αναθέρμανση και συμβατικού



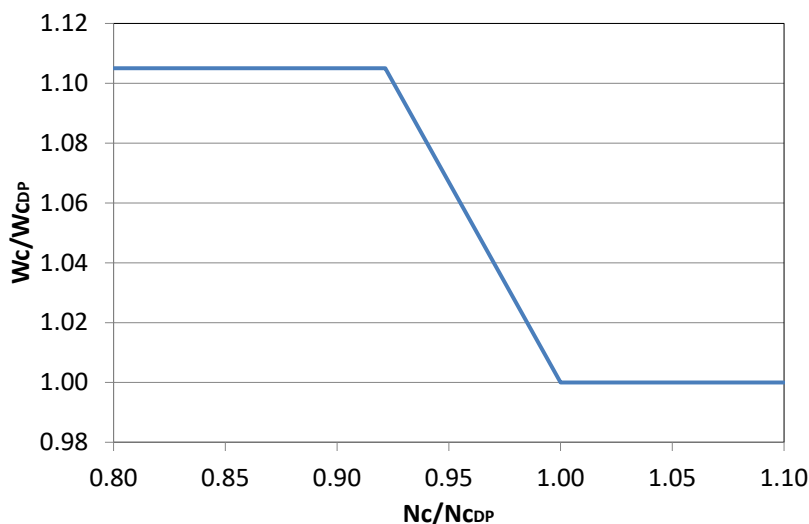
Σχήμα 6.3. Σημείο λειτουργίας στο χάρτη του συμπιεστή: συμβατική λειτουργία (A) και λειτουργία με ηλιακή αναθέρμανση (B) για TIT=1000°C

Ένας τεχνολογικά εφικτός τρόπος να αντιμετωπιστεί αυτή η κατάσταση είναι η χρήση των πτερυγίων μεταβλητής γεωμετρίας (Variable Stator Vanes – VSVs) στο στρόβιλο ισχύος. Η χρήση των VSVs τροποποιεί τον χάρτη του στροβίλου ισχύος (Σχήμα 6.4). Άνοιγμα των VSVs οδηγεί σε μετατόπιση της χαρακτηριστικής λειτουργίας σε υψηλότερες τιμές ανηγμένης παροχής. Έτσι ο επιθυμητός λόγος πίεσης επιτυγχάνεται για μεγαλύτερη ανηγμένη παροχή.



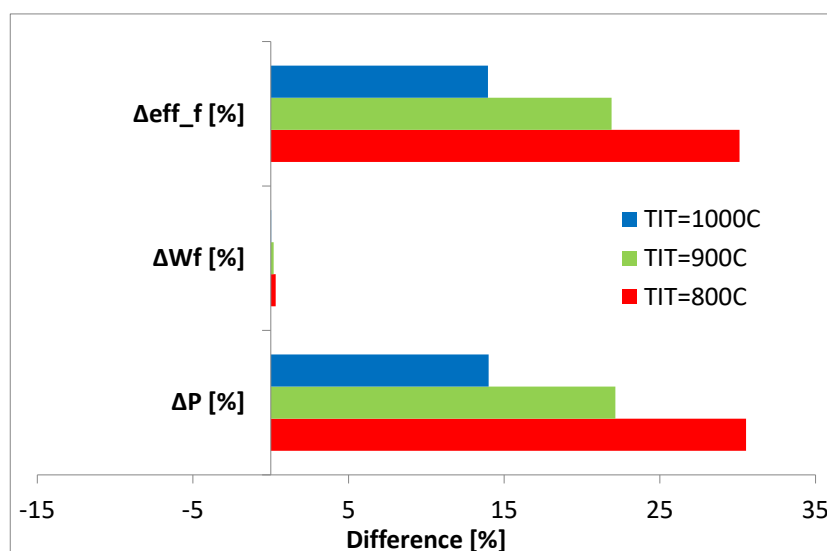
Σχήμα 6.4. Επίδραση χρήσης VSVs στο χάρτη του στροβίλου

Με τη χρήση του μοντέλου προσομοίωσης, προσδιορίστηκε η λειτουργία των VSVs ώστε τα σημεία λειτουργίας του συμπιεστή με και χωρίς αναθέρμανση να συμπίπτουν. Τον προγραμματισμό των VSVs με τη μορφή της επίδρασης στην ανηγμένη παροχή του στροβίλου ισχύος συναρτήσε των ανηγμένων στροφών του για $TIT=1000^{\circ}C$, παρουσιάζει το Σχήμα 6.5. Όμοια, προέκυψε και ο προγραμματισμός των VSVs και για τις άλλες δύο τιμές της TIT . Ο λόγος της τιμής των ανηγμένων στροφών του σημείου λειτουργίας προς αυτή του σημείου σχεδίασης, αλλάζει μόνο από τη θερμοκρασία εισόδου του στροβίλου ισχύος ($N_c = \frac{N}{\sqrt{T/T_{ref}}}$). Τιμές του λόγου αυτού μεγαλύτερες ή ίσες του 1 δηλώνουν ότι η θερμοκρασία εισόδου στο στροβίλο ισχύος είναι μικρότερη ή ίση με αυτή του σημείου σχεδίασης και τα VSVs παραμένουν στην αρχική τους θέση. Η τιμή 0.92 επιτυγχάνεται όταν η θερμοκρασία εισόδου του στροβίλου έχει τη μέγιστη τιμή της ($900^{\circ}C$). Τιμές μικρότερες αυτής θα επιτυγχάνονταν μόνο αν η θερμοκρασία εισόδου ξεπερνούσε τη μέγιστη.



Σχήμα 6.5. Προγραμματισμός λειτουργίας VSVs με βάση την ανηγμένη παροχή και τις ανηγμένες στροφές για $TIT=1000^{\circ}C$

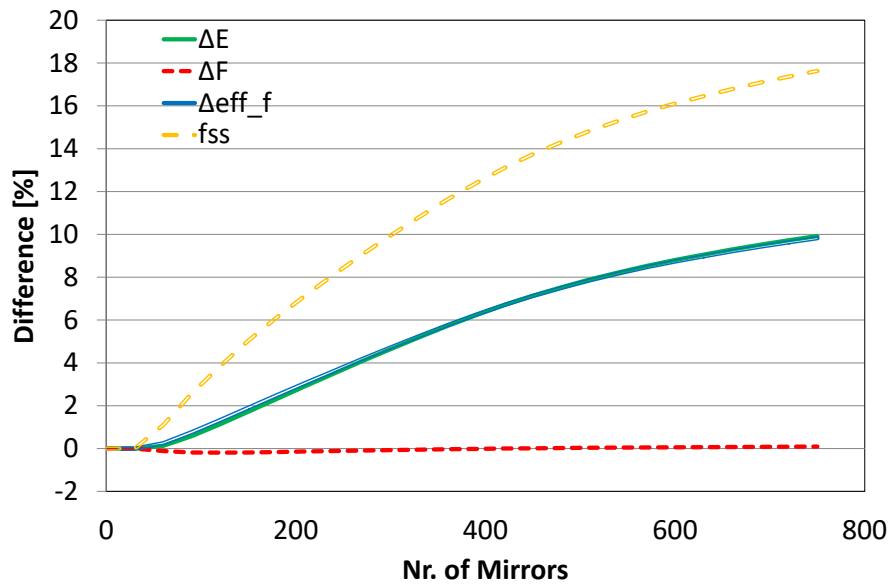
Εφαρμόζοντας την λειτουργία των VSVs στην προσομοίωση της λειτουργίας, πραγματοποιείται εκ νέου η σύγκριση των επιδόσεων στο σημείο σχεδίασης μεταξύ του αεριοστροβίλου με ηλιακή αναθέρμανση και του συμβατικού για τις τρεις TIT (Σχήμα 6.6). Όπως παρατηρείται, η παροχή καυσίμου παραμένει σταθερή ενώ η παραγόμενη ισχύς αυξάνει κατά 14%. Συνεπώς, με τη χρήση των VSVs αυξάνει περαιτέρω ο θερμικός βαθμός απόδοσης καυσίμου και αυξάνει η παραγόμενη ισχύς, η οποία χωρίς τη χρήση των VSVs μειώνεται (Σχήμα 6.2).



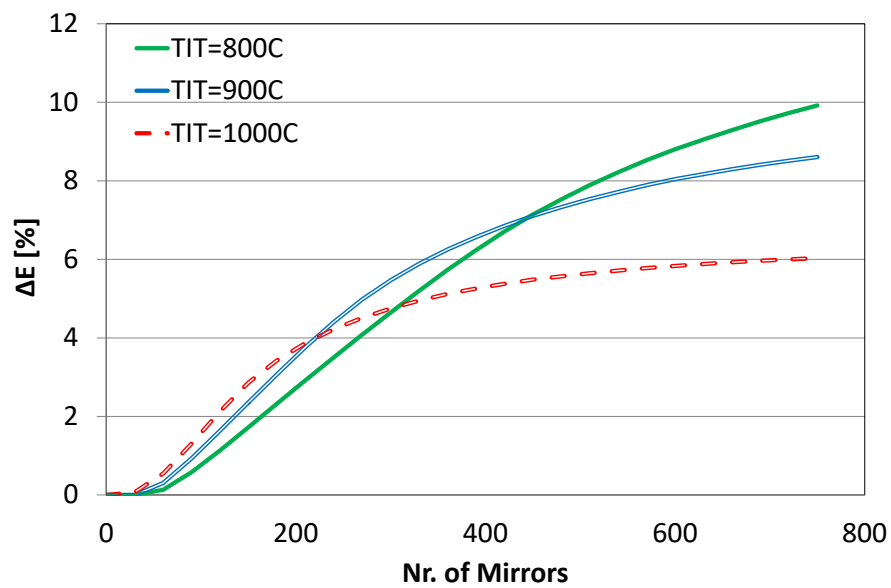
Σχήμα 6.6. Διαφορά επιδόσεων στο σημείο σχεδίασης μεταξύ αεριοστροβίλου με ηλιακή αναθέρμανση με έλεγχο των VSVs και συμβατικού

6.1.2 Επιδόσεις - Σύγκριση

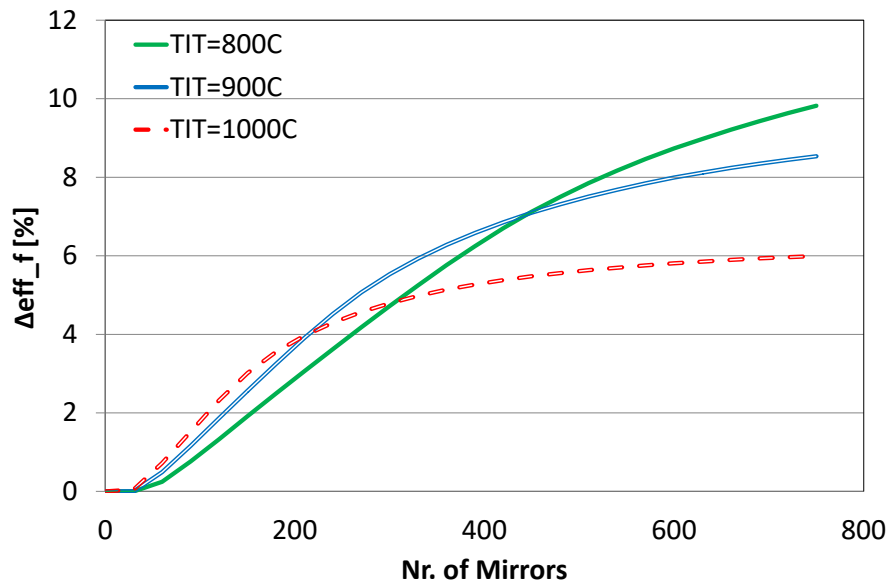
Για τον υπολογισμό των συνολικών επιδόσεων (αεροθερμοδυναμικών και οικονομικών) της διάταξης ηλιακής αναθέρμανσης, πραγματοποιείται η προσομοίωση της λειτουργίας της διάταξης για ολόκληρο το έτος και για διάφορους αριθμούς κατόπτρων. Τη σύγκριση των ετήσιων επιδόσεων μεταξύ του αεριοστροβίλου με ηλιακή αναθέρμανση και του συμβατικού με τη μορφή ποσοστιαίας διαφοράς όσον αφορά την παραγόμενη ενέργεια (ΔE), την καταναλισκόμενη ποσότητα καυσίμου (ΔF) και τον θερμικό βαθμό απόδοσης καυσίμου (Δeff_f) παρουσιάζει το Σχήμα 6.7 για TIT=800°C. Το Σχήμα 6.8 παρουσιάζει τη διαφορά της παραγόμενης ενέργειας, το Σχήμα 6.9 τη διαφορά του θερμικού βαθμού απόδοσης καυσίμου και το Σχήμα 6.10 το ποσοστό συνεισφοράς της ηλιακής ενέργειας για τις τρεις περιπτώσεις TIT.



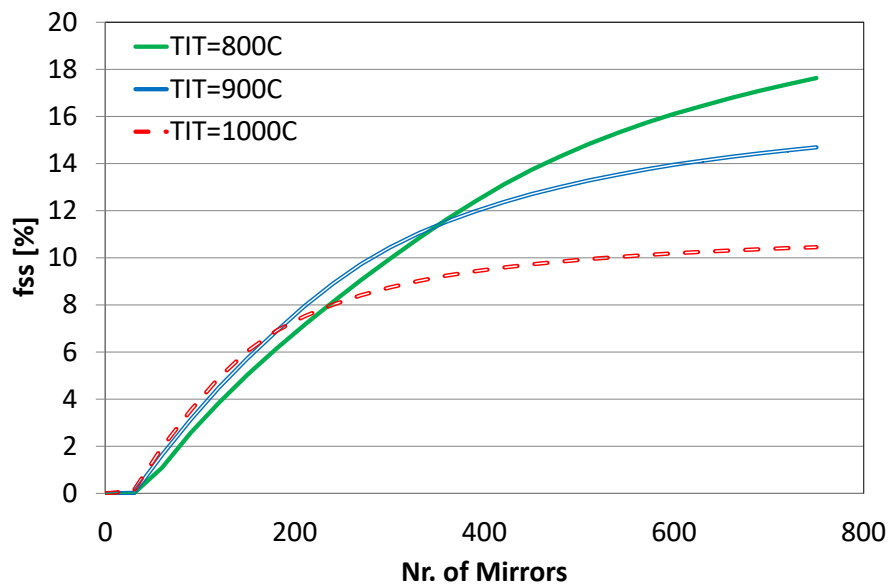
Σχήμα 6.7. Διαφορά ετήσιων επιδόσεων μεταξύ αεριοστροβίλου ηλιακής αναθέρμανσης και συμβατικού για TIT=800°C



Σχήμα 6.8. Διαφορά παραγόμενης ενέργειας μεταξύ αεριοστροβίλου ηλιακής αναθέρμανσης και συμβατικού



Σχήμα 6.9. Διαφορά θερμοκού βαθμού απόδοσης καυσίμου μεταξύ αεριοστροβίλου ηλιακής αναθέρμανσης και συμβατικού



Σχήμα 6.10. Ποσοστό συνεισφοράς της ηλιακής ενέργειας σε αεριοστροβίλο ηλιακής αναθέρμανσης

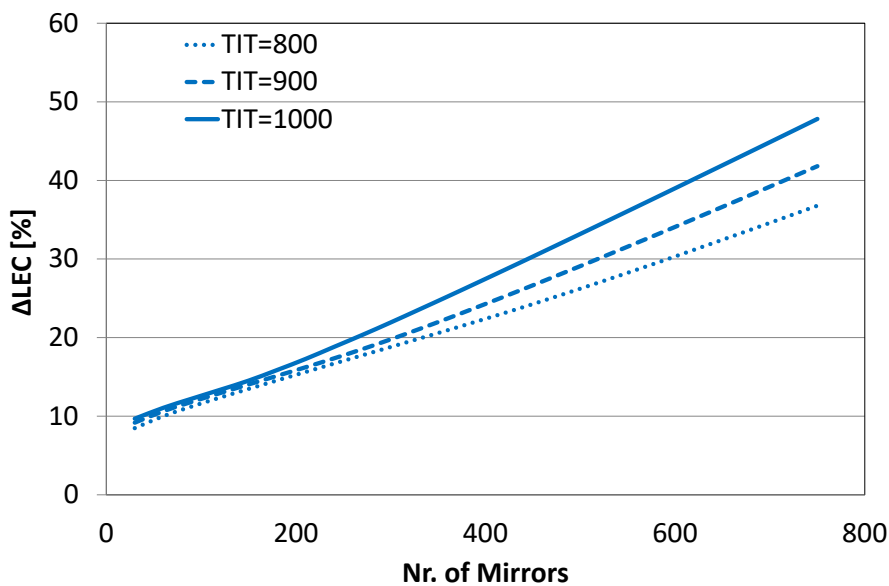
Όπως παρατηρείται και για τις τρεις περιπτώσεις, η καταναλισκόμενη ποσότητα καυσίμου παραμένει σχεδόν σταθερή, ενώ η παραγόμενη ενέργεια αυξάνεται (με φθίνοντα ρυθμό) όσο αυξάνεται ο αριθμός των κατόπτρων. Η διαφοροποίηση των επιδόσεων ξεκινά από ένα αριθμό κατόπτρων και έπειτα. Για μέγεθος πεδίου κατόπτρων έως αυτόν τον αριθμό, η διαθέσιμη ηλιακή θερμότητα δεν επαρκεί για την αναθέρμανση των καυσαερίων σε καμία χρονική στιγμή στη διάρκεια του έτους.

Επιπλέον, φαίνεται πως όσο μειώνεται η TIT, τόσο αυξάνεται η παραγόμενη ενέργεια λόγω της αναθέρμανσης αφού αξιοποιείται μεγαλύτερη

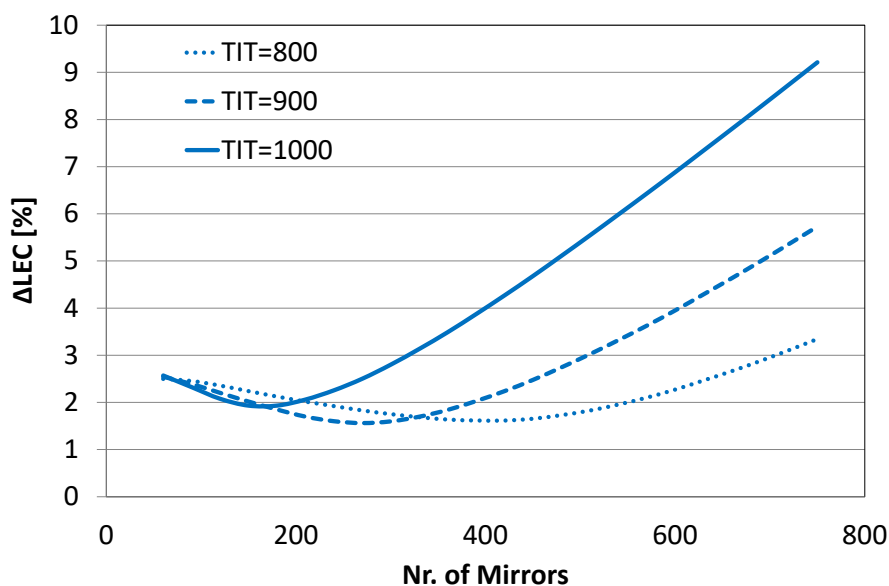
ποσότητα ηλιακής θερμότητας. Γι αυτό το λόγο αυξάνει και το ποσοστό συνεισφοράς της ηλιακής ενέργειας.

Για την περαιτέρω ανάλυση και σύγκριση των διατάξεων, πραγματοποιείται και ανάλυση οικονομικών επιδόσεων χρησιμοποιώντας τα οικονομικά στοιχεία που περιγράφηκαν για τον υβριδικό αεριοστρόβιλο (Πίνακας 5.3). Γίνεται η παραδοχή πως το κόστος κτήσης και λειτουργίας εξαρτάται μόνο από την ισχύ και δεν επηρεάζεται από την TIT ή την παροχή αέρα. Όσον αφορά το κόστος καυσίμου, εξετάζονται τρεις περιπτώσεις: 2, 10 και 20 USD/MBTU με βάση τη χρονική εξέλιξη της τιμής του φυσικού αερίου (Σχήμα 4.1).

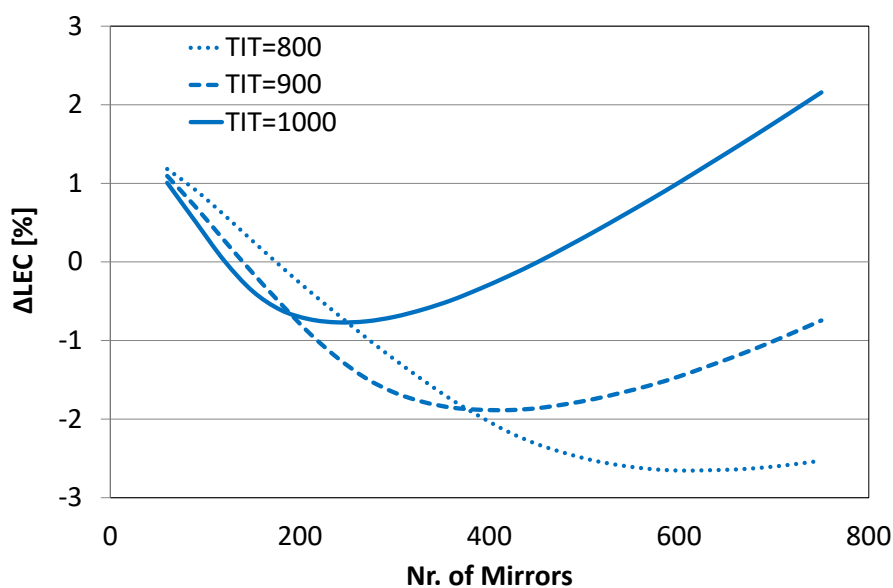
Τη διαφορά του κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ των υβριδικών και των αντίστοιχων συμβατικών, για διάφορους αριθμούς κατόπτρων και για τρεις τιμές της TIT παρουσιάζει το Σχήμα 6.11 για κόστος καυσίμου 2 USD/MBTU το Σχήμα 6.12 για 10 USD/MBTU και το Σχήμα 6.13 για 20 USD/MBTU. Όπως παρατηρείται από τα σχήματα αυτά, η υβριδική διάταξη παρουσιάζει μείωση του κόστους ηλεκτροπαραγωγής σε σύγκριση με τη συμβατική, μόνο για υψηλές τιμές του κόστους καυσίμου. Επίσης, φαίνεται πως το κέρδος μεγιστοποιείται για συγκεκριμένο αριθμό κατόπτρων κάθε φορά.



Σχήμα 6.11. Διαφορά οικονομικών επιδόσεων μεταξύ αεριοστρόβιλου ηλιακής αναθέρμανσης και συμβατικού αεριοστρόβιλου για 2\$/MBTU



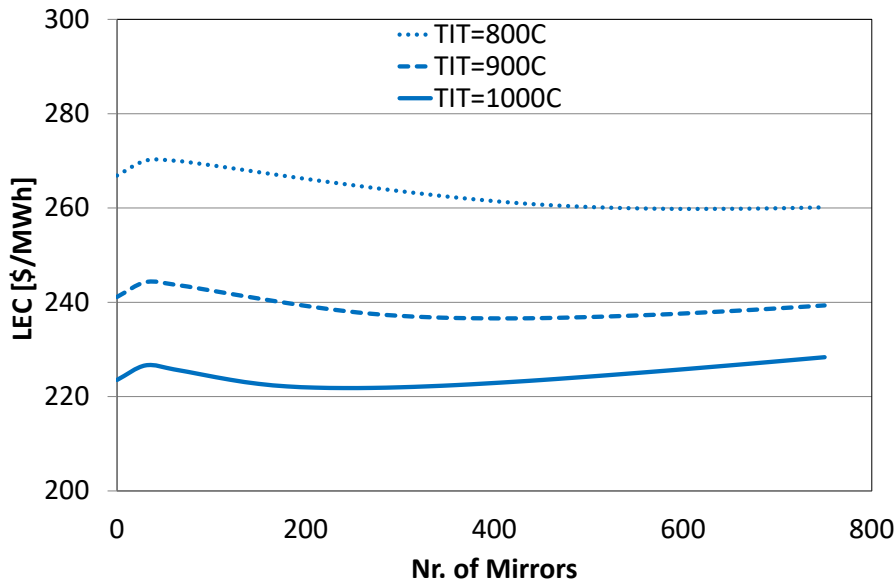
Σχήμα 6.12. Διαφορά οικονομικών επιδόσεων μεταξύ αεριοστροβίλου ηλιακής αναθέρμανσης και συμβατικού αεριοστροβίλου για 10\$/MBTU



Σχήμα 6.13. Διαφορά οικονομικών επιδόσεων μεταξύ αεριοστροβίλου ηλιακής αναθέρμανσης και συμβατικού αεριοστροβίλου για 20\$/MBTU

Στη περίπτωση του αεριοστροβίλου με ηλιακή αναθέρμανση εξετάστηκε και η επίδραση της TIT στις επιδόσεις. Όμως, η τιμή της TIT επιδρά και στο θερμικό βαθμό απόδοσης και κατά συνέπεια στο κόστος ηλεκτροπαραγωγής. Ως εκ τούτου, η σύγκριση των οικονομικών επιδόσεων πραγματοποιείται και στη βάση της απόλυτης τιμής του κόστους της ηλεκτροπαραγωγής. Το Σχήμα 6.14 απεικονίζει το κόστος ηλεκτροπαραγωγής και για τις τρεις περιπτώσεις της TIT και για κόστος καυσίμου 20\$/MBTU. Όπως φαίνεται, αύξηση της TIT οδηγεί σε μείωση του κόστους ηλεκτροπαραγωγής λόγω του μεγαλύτερου βαθμού απόδοσης.

Συνοψίζοντας, στη διάταξη αεριοστρόβιλου με ηλιακή αναθέρμανση, μείωση της TIT σχεδίασης οδηγεί σε μεγαλύτερη ποσοστιαία μείωση του κόστους ηλεκτροπαραγωγής. Όμως, λόγω του μικρότερου βαθμού απόδοσης, το κόστος ηλεκτροπαραγωγής, σε απόλυτα μεγέθη (\$/MWh) αυξάνεται.



Σχήμα 6.14. Κόστος ηλεκτροπαραγωγής για τιμή κόστους καυσίμου 20\$/MBTU για τις τρεις περιπτώσεις TIT

6.2 Έγχυση ατμού σε αεριοστρόβιλο

Ένας τρόπος αύξησης των επιδόσεων ενός συμβατικού αεριοστρόβιλου είναι η έγχυση ατμού στο θάλαμο καύσης. Ο εγχόμενος ατμός έχει υψηλότερη ενθαλπία από τα καυσαέρια και επίσης αυξάνει τη μάζα που εκτονώνεται στο στρόβιλο με αποτέλεσμα την αύξηση της παραγόμενης ισχύος. Σε συμβατικές μονάδες, ο ατμός παράγεται από τα θερμά καυσαέρια του αεριοστρόβιλου μέσω Λέβητα Ανάκτησης Θερμότητας (ΛΑΘ), η δε ποσότητά του είναι τέτοια που να μην δημιουργεί προβλήματα αστάθειας της λειτουργίας της μηχανής.

Αντί ΛΑΘ (ή σε συνεργασία με τον ΛΑΘ) μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ηλιακή ενέργεια για την παραγωγή ατμού. Μια τέτοια διάταξη αξιοποιεί ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες (θάλαμος καύσης με έγχυση ατμού, ατμοπαραγωγή από τον Ήλιο) με αποτέλεσμα να μην απαιτεί κόστος ανάπτυξης της τεχνολογίας και αντιμετώπιση κατασκευαστικών δυσκολιών όπως στην συνήθη διάταξη υβριδικού αεριοστρόβιλου. Βέβαια, μια τέτοια διάταξη απαιτεί την ύπαρξη διαθέσιμου νερού, γεγονός που αποτελεί μειονέκτημα για περιοχές που υπάρχει υψηλή ακτινοβολία αλλά η πρόσβαση σε νερό είναι δύσκολη. Διατάξεις ανάκτησης του νερού από τα καυσαέρια (Takeda, Araki, Iwai, Morisaki, & Sato, 2014) θα μπορούσαν να αμβλύνουν αυτό το πρόβλημα.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται και εξετάζονται υβριδικές διατάξεις, όπου η ατμοπαραγωγή πραγματοποιείται είτε μόνο με τη χρήση ηλιακής θερμότητας, είτε με τη χρήση της ηλιακής θερμότητας και της θερμότητας των καυσαερίων.

6.2.1 Ηλιακή παραγωγή ατμού

Αρχικά μελετάται η χρήση της ηλιακής ενέργειας για παραγωγή ατμού και έγχυση αυτού σε συμβατικό αεριοστρόβιλο. Η παραγωγή ατμού από ηλιακή ενέργεια δύναται να πραγματοποιηθεί είτε από διατάξεις δέκτη-πύργου είτε παραβολικών κατόπτρων. Μπορεί να είναι άμεση όπου η ηλιακή ενέργεια παρέχεται απευθείας στο ρεύμα νερού/ατμού (DSG) ή έμμεση, όπου η ηλιακή ενέργεια παρέχεται σε άλλο εργαζόμενο μέσο (έλαια, άλατα κτλ), το οποίο μέσω εναλλακτών πραγματοποιεί την ατμοπαραγωγή.

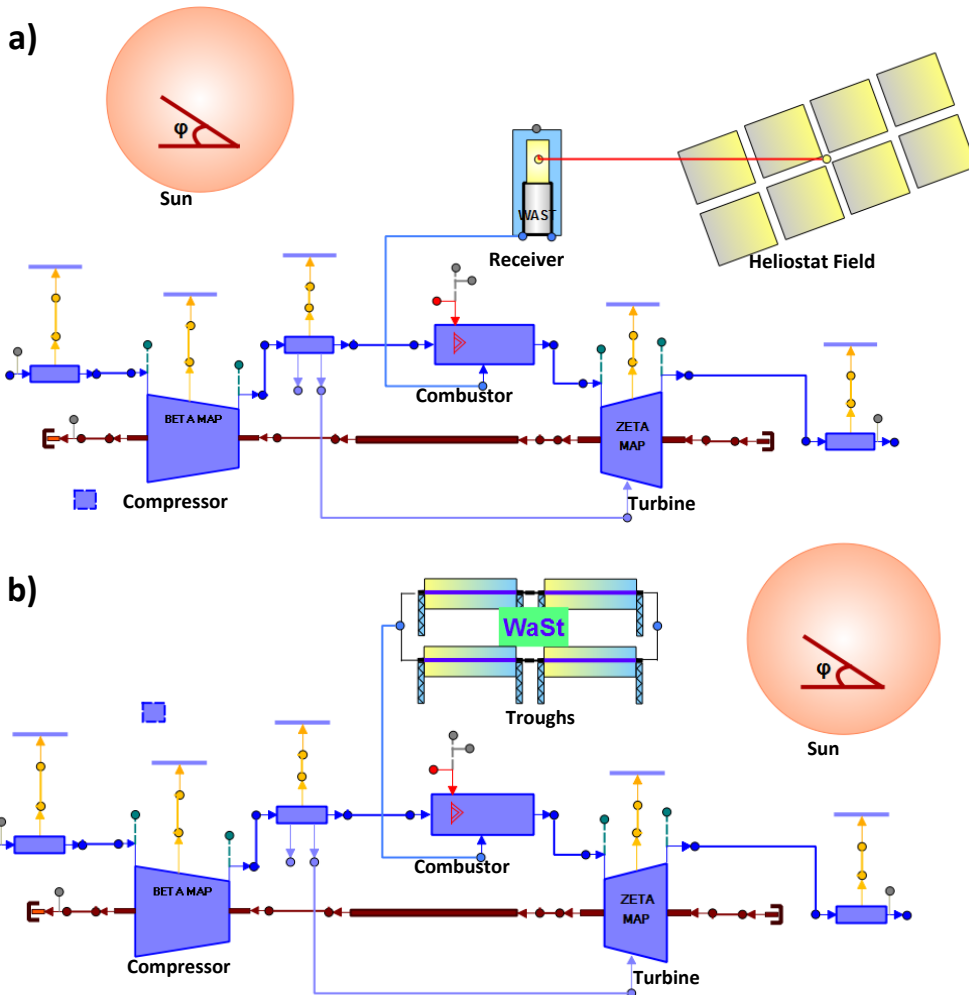
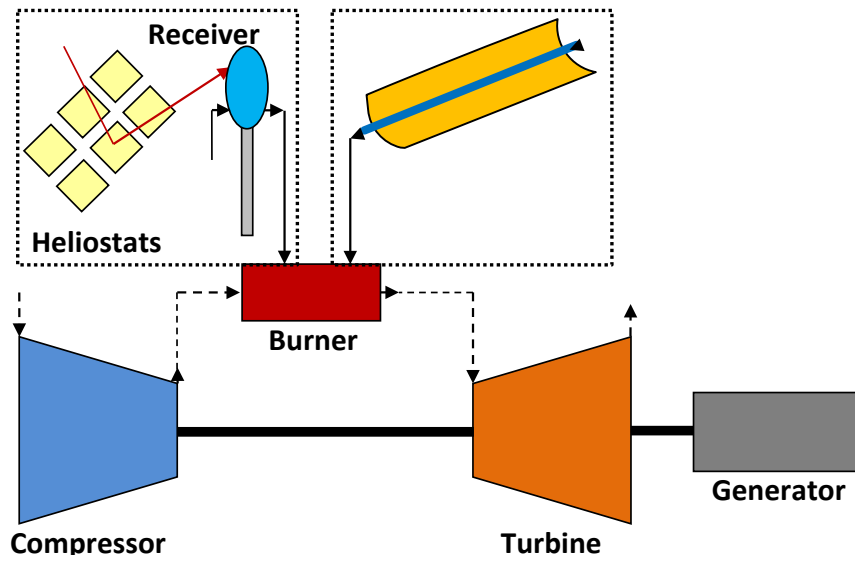
Η άμεση ατμοπαραγωγή υπερτερεί της έμμεσης αφού δεν απαιτεί εναλλάκτες (αποδοτικότερη) και δεν υπόκειται σε θερμοκρασιακά όρια που θέτει το ηλιακό θερμαινόμενο μέσο. Η άμεση ατμοπαραγωγή από δέκτη-πύργου είναι ήδη σε εμπορικό στάδιο (Plotkin et al., 2011), ενώ από παραβολικά κάτοπτρα, σε πειραματικό ως και πρώιμο εμπορικό (Bürkle & Krüger, 2012; Zarza et al., 2006).

Με σκοπό να προσδιοριστεί η αποδοτικότερη εκ των δύο διατάξεων άμεσης ατμοπαραγωγής (Σχήμα 6.15), μελετάται η λειτουργία τους και προσδιορίζονται οι επιδόσεις τους.

Ως περίπτωση εφαρμογής, χρησιμοποιείται ο αεριοστρόβιλος απλής ατράκτου με χαρακτηριστικά σχεδίασης όπως αναφέρθηκαν στην παράγραφο 5.2 (Πίνακας 5.1), στον οποίο προστίθενται οι ηλιακές συνιστώσες που επιτελούν την άμεση ατμοπαραγωγή. Συγκροτείται η σχηματική απεικόνιση των διατάξεων στο PROOSIS και προκύπτουν τα αντίστοιχα μοντέλα προσομοίωσης. Στη περίπτωση της διάταξης δέκτη-πύργου, θεωρείται πως αυτή είναι εγκατεστημένη στην κορυφή του πύργου.

Και στις δύο διατάξεις, το ηλιακό κομμάτι ατμοπαραγωγής τροφοδοτείται με νερό θερμοκρασίας 15°C και πίεσης 35bar. Η παροχή μάζας του νερού υπολογίζεται από το μοντέλο ούτως ώστε να παράγεται κορεσμένος ατμός, αναλόγως της κάθε φορά διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας. Η συνολική επιφάνεια των κατόπτρων επιλέγεται ούτως ώστε να επιτυγχάνεται λόγος ατμού/αέρα (SAR) ίσος με 12% το μεσημέρι του θερινού ηλιοστασίου για ένταση ακτινοβολίας 900W/m². Ο υπολογισμός του αριθμού των κατόπτρων πραγματοποιήθηκε μέσω προσομοίωσης της λειτουργίας της διάταξης μεταβάλλοντας το πλήθος τους ώστε να βρεθεί αυτό που επιτυγχάνει τον επιθυμητό λόγο ατμού/αέρα (SAR).

Τα χαρακτηριστικά του σημείου σχεδίασης του ηλιακού κομματιού και του αεριοστρόβιλου συνοψίζει ο Πίνακας 6.2 και ο Πίνακας 6.3 αντίστοιχα.



Σχήμα 6.15. Διατάξεις αεριοστροβίλου με έγχυση ηλιακού ατμού παραγόμενου από (α) δέκτη-πύργου, β) παραβολικά κάτοπτρα και η απεικόνισή τους στο PROOSIS

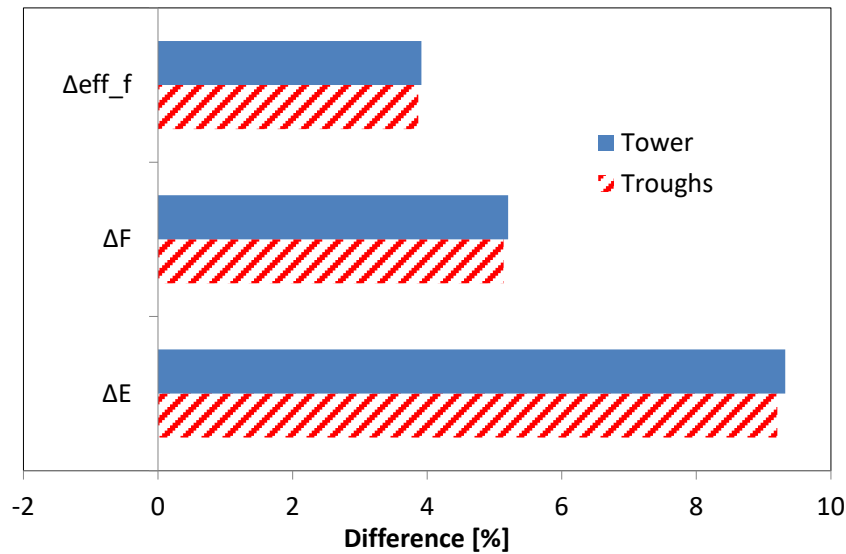
Κάτοπτρα / Δέκτης	
Ανακλαστικότητα	0.97
Συντελεστής εστίασης	1
Σκίαση	0.97
Απορροφητικότητα	0.95
Οπτική απόδοση	0.96
Εκπομπή	0.05
Παραβολικά Κάτοπτρα	
Σκίαση	0.98
Σφάλμα κίνησης	0.99
Σφάλμα γεωμετρίας	0.98
Ανακλαστικότητα	0.92
Εκπομπή	0.90
Διαπερατότητα	0.98
Απορροφητικότητα	0.97

Πίνακας 6.2. Παράμετροι σχεδίασης ηλιακού κομματιού

	Συμβατικός Καυσίμου	Ηλιακός STIG
Ισχύς [MW]	5	7.39
Λόγος πίεσης	10	11.11
TIT [C]	1000	1000
Θερμικός β.α. [%]	31.51	36.80
Παροχή αέρα [kg/s]	20.15	20.04

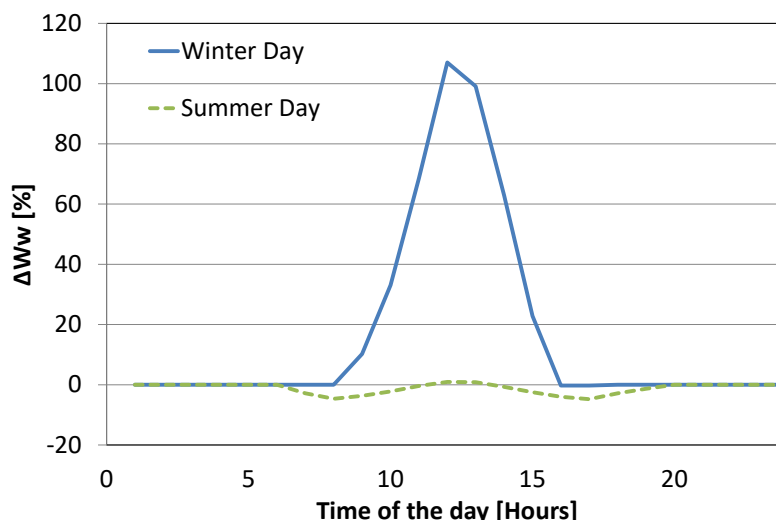
Πίνακας 6.3. Επιδόσεις σημείου σχεδίασης συμβατικού αεριοστροβίλου και ηλιακού STIG

Μετά τη συγκρότηση των μοντέλων και τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών σχεδίασης, είναι δυνατός ο υπολογισμός των επιδόσεων των δύο διατάξεων μέσω της προσομοίωσης της λειτουργίας τους για ένα έτος και συνεπώς η σύγκρισή τους. Το Σχήμα 6.16 παρουσιάζει τη διαφορά των ετήσιων επιδόσεων παραγόμενης ενέργειας (ΔE), καταναλισκόμενης ποσότητας καυσίμου ($\Delta W F$) και θερμικού βαθμού απόδοσης καυσίμου ($\Delta e f f _ f$) μεταξύ των διατάξεων με έγχυση ατμού και της συμβατικής. Όπως αναμένεται, ένας αεριοστροβίλος με έγχυση ατμού παράγει περισσότερη ισχύ αλλά καταναλώνει και περισσότερο καύσιμο (Mathioudakis, 2002). Ο εγχεόμενος κορεσμένος ατμός έχει χαμηλότερη θερμοκρασία από τον αέρα στην είσοδο του θαλάμου καύσης. Συνεπώς, περισσότερη ποσότητα καυσίμου απαιτείται για την επίτευξη της επιθυμητής TIT. Το σχήμα της έγχυσης ηλιακά παραγόμενου ατμού παρουσιάζει σημαντική αύξηση του θερμικού βαθμού απόδοσης καυσίμου. Ο διάταξη δέκτη-πύργου παρουσιάζει οριακά καλύτερες επιδόσεις.



Σχήμα 6.16. Διαφορά ετήσιων επιδόσεων μεταξύ ηλιακών STIG και συμβατικού αεριοστροβίλου χωρίς STIG

Στο Σχήμα 6.17 παρουσιάζεται η διαφορά παραγόμενου ατμού μεταξύ δέκτη-πύργου και παραβολικών κατόπτρων για μια θερινή και μια χειμερινή ημέρα, ούτως ώστε να φανεί η επίδραση της εποχής στην ατμοπαραγωγή. Σε μια χειμερινή ημέρα, η διάταξη δέκτη-πύργου μπορεί να παράξει 110% περισσότερο ατμό από τη διάταξη παραβολικών κατόπτρων. Σε μια καλοκαιρινή ημέρα, παρατηρείται η αντίθετη συμπεριφορά με τη διαφορά στον παραγόμενο ατμό να φτάνει το 5%. Όμως, επειδή το χειμώνα η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι εν γένει μικρότερη από ότι το καλοκαίρι, η διαφορά του παραγόμενου ατμού σε απόλυτα μεγέθη είναι μικρή. Η διαφορετική επίδραση της εποχής του έτους έγκειται στον διαφορετικό τρόπο λειτουργίας των δύο τεχνολογιών. Τα επίπεδα κάτοπτρα εστιάζουν συνέχεια σε συγκεκριμένο σημείο κινούμενα σε δύο άξονες, ενώ τα παραβολικά κάτοπτρα κινούνται σε έναν άξονα. Συνεπώς, στην περίπτωση των παραβολικών κατόπτρων, η ατμοπαραγωγή θα είναι μεγαλύτερη το καλοκαίρι όπου οι ηλιακές ακτίνες είναι σχεδόν κάθετες στην επιφάνειά τους, ενώ τα επίπεδα κάτοπτρα αξιοποιούν σχεδόν στον ίδιο βαθμό την ηλιακή ενέργεια κατά τη διάρκεια του έτους.



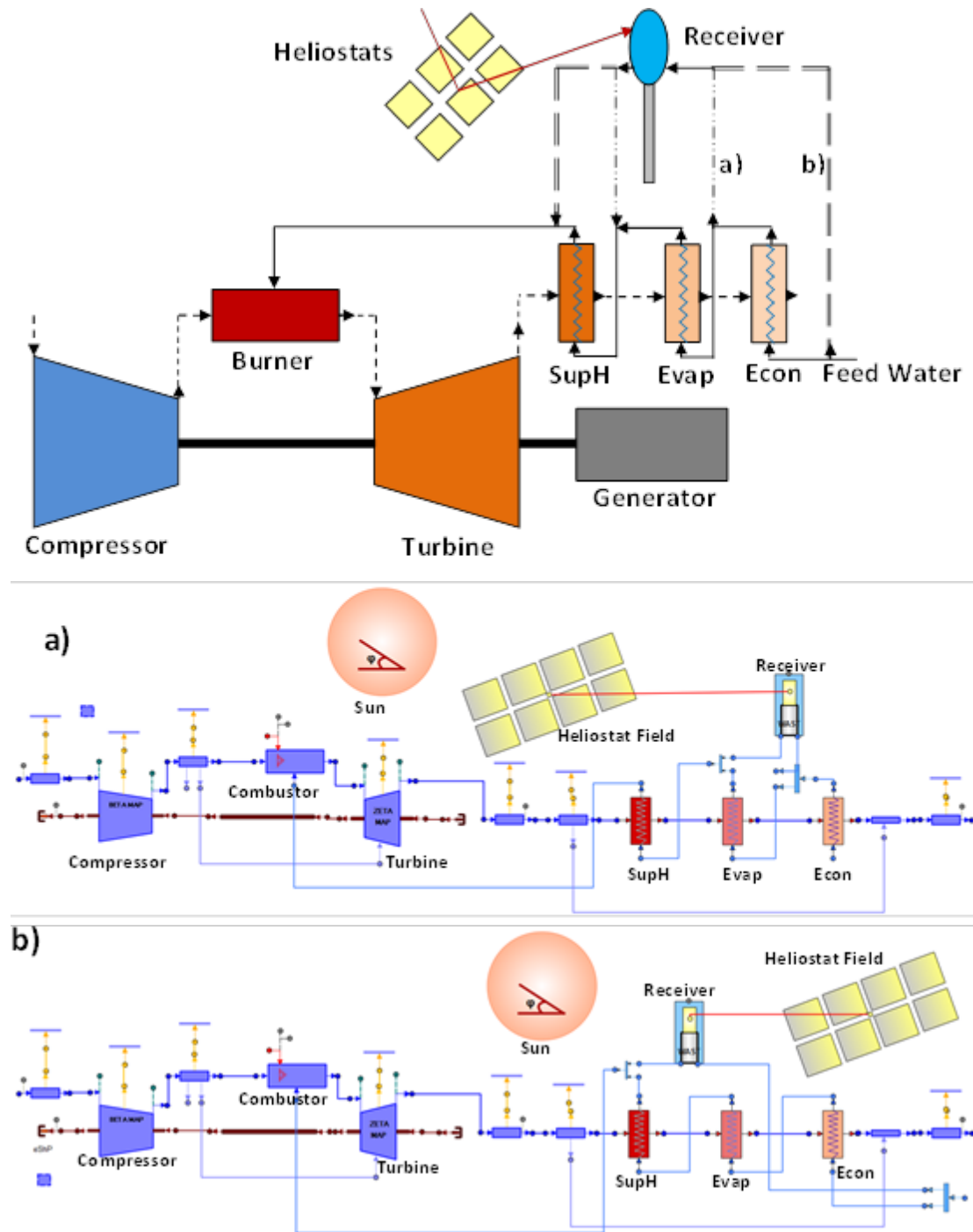
Σχήμα 6.17. Διαφορά παραγόμενης ποσότητας ατμού μεταξύ ηλιακών διατάξεων STIG με δέκτη πύργου και παραβολικά κάτοπτρα

Με βάση τα ανωτέρω (μεγαλύτερη παραγόμενη ενέργεια και λειτουργία ανεξάρτητη της εποχής), η διάταξη δέκτη-πύργου θεωρείται καλύτερη της διάταξης παραβολικών κατόπτρων.

6.2.2 Παραγωγή ατμού με υβριδική διάταξη

Όπως αναφέρθηκε, στη συμβατική διάταξη εγχεόμενου ατμού, η ατμοπαραγωγή επιτυγχάνεται μέσω του ΛΑΘ. Με σκοπό τη διερεύνηση της δυνατότητας χρήσης της ηλιακής ενέργειας για επιπλέον παραγωγή ατμού και αύξηση των επιδόσεων μιας τέτοιας διάταξης, εξετάζεται η ατμοπαραγωγή με υβριδική διάταξη όπου η ηλιακή θερμότητα χρησιμοποιείται σε συνεργασία με την θερμότητα των καυσαερίων του αεριοστροβίλου.

Οι δύο εξεταζόμενες διατάξεις φαίνονται στο Σχήμα 6.18. Στην πρώτη (a) ο δέκτης τοποθετείται παράλληλα με τον υπάρχοντα ατμοποιητή όπως στην διάταξη που προτείνουν οι Livshits & Kribus (2012a, 2012b), στην οποία, λόγω των σχετικά χαμηλών θερμοκρασιών μπορούν να χρησιμοποιηθούν και παραβολικά κάτοπτρα ενώ στη δεύτερη (b), ο δέκτης τοποθετείται παράλληλα με τον Λέβητα Ανάκτησης Θερμότητας (ΛΑΘ) ούτως ώστε η υπάρχουσα διάταξη να μην υποστεί σημαντικές μετατροπές και να αξιοποιηθεί η δυνατότητα της διάταξης πύργου για επίτευξη υψηλών θερμοκρασιών.



Σχήμα 6.18. Συμβατική και υβριδικές διατάξεις STIG και η απεικόνισή τους στο PROOSIS

Αρχικά, θεωρείται αεριοστρόβιλος απλής ατράκτου με χαρακτηριστικά σημείου σχεδίασης όπως παρουσιάστηκαν προηγουμένως. Εν συνέχεια, τοποθετείται ο ΛΑΘ με $\Delta T_{\text{trinch}} = 27\text{deg}$ και $\Delta T_{\text{approach}} = 32\text{deg}$ (Ganapathy, 1996) και λοιπά χαρακτηριστικά σχεδίασης όπως τα παρουσιάζει ο Πίνακας 6.4 ούτως ώστε να επιτυγχάνεται λόγος ατμού/αέρα $\text{SAR}=6\%$ (Koivu, 2007) και θερμοκρασία ατμού 700K (Koivu, 2007; Kosla, Hamill, & Strothers, 1983). Η τιμή του SAR επιλέγεται στο μέσο του συνήθους εύρους, ώστε να δύναται να αυξηθεί

μέσω της ηλιακής ατμοπαραγωγής. Σημειώνεται, πως λόγω της μεγάλης διαθέσιμης ποσότητας θερμότητας στα καυσαέρια και της δεδομένης απαίτησης ατμοπαραγωγής, θεωρείται πως ο ΛΑΘ αξιοποιεί περίπου τη μισή παροχή καυσαερίων, διότι αν την αξιοποιούσε ολόκληρη το σημείο σχεδίασης θα οδηγούσε σε τιμές ΔΤ_{pinch} εκτός του συνήθους εύρους. Εν συνεχεία τοποθετείται το ηλιακό κομμάτι με συνολική επιφάνεια κατόπτρων τέτοια ώστε να επιτυγχάνεται ο διπλασιασμός του λόγου ατμού/αέρα (SAR=12%) το μεσημέρι του θερινού ηλιοστασίου με ένταση ακτινοβολίας 900W/m². Τα μοντέλα των διατάξεων υλοποιούνται στο PROOSIS (Σχήμα 6.18), με τη χρήση της βιβλιοθήκης TURBO και των SOLAR και WAST που συγκροτήθηκαν στην παρούσα εργασία.

	Οικονομητήρας	Ατμοποιητής	Υπερθερμαντής
NTU	1.7	1.5	0.7
Αποδοτικότητα [%]	73.0	77.1	49.9

Πίνακας 6.4. Επιδόσεις σημείου σχεδίασης εναλλακτών

Στην υβριδική διάταξη (a) (Σχήμα 6.18), ο οικονομητήρας τροφοδοτείται με νερό πίεσης 35bar και θερμοκρασίας 15oC και το προθερμαίνει σε θερμοκρασία μικρότερη αυτής του κορεσμού. Εν συνεχεία, η παροχή του νερού διαχωρίζεται σε δύο επιμέρους παροχές: η μία τροφοδοτεί τον συμβατικό ατμοποιητή του ΛΑΘ ενώ η άλλη τροφοδοτεί τον ηλιακό ατμοποιητή (δέκτης). Η παροχή του νερού στους δύο ατμοποιητές (συμβατικό και ηλιακό) καθορίζεται έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η παραγωγή κορεσμένου ατμού. Κατόπιν, τα δύο ρεύματα του κορεσμένου ατμού αναμειγνύονται και τροφοδοτούν τον υπερθερμαντή για την παραγωγή υπέρθερμου ατμού. Τέλος, ο παραγόμενος ατμός εγχέεται στο θάλαμο καύσης του αεριοστροβίλου. Η συνολική εγχεόμενη ποσότητα στο θάλαμο καύσης επηρεάζεται από τη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία, αφού αυτή καθορίζει την ηλιακά παραγόμενη ποσότητα ατμού. Για σύγκριση, αυτή η διάταξη εξετάζεται και στην περίπτωση που ο δέκτης-πύργου αντικατασταθεί από παραβολικά κάτοπτρα.

Στην υβριδική διάταξη (b) (Σχήμα 6.18), ο δέκτης και ο οικονομητήρας τροφοδοτούνται με νερό πίεσης 35bar και θερμοκρασίας 15oC. Η παροχή νερού στον οικονομητήρα επιλέγεται ούτως ώστε να επιτυγχάνεται η παραγωγή κορεσμένου ατμού στον ατμοποιητή ενώ η παροχή του νερού στο δέκτη επιλέγεται ούτως ώστε να παράγεται υπέρθερμος ατμός ίδιας θερμοκρασίας με τον συμβατικά παραγόμενο εκ του ΛΑΘ. Τα δύο ρεύματα ατμού αναμειγνύονται και εγχέονται στον θάλαμο καύσης.

Κατά τις νυχτερινές ώρες ή τις ώρες που η διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια δεν επιτρέπει τη λειτουργία του δέκτη, τότε ο δέκτης τίθεται εκτός λειτουργίας και η διάταξη λειτουργεί ως συμβατική όπου η ατμοπαραγωγή συντελείται μόνο από τη θερμότητα των καυσαερίων.

Τις επιδόσεις στο σημείο σχεδίασης για SAR=0%, SAR=6% και SAR=12% παρουσιάζει ο Πίνακας 6.5.

	Συμβατικός Καυσίμου	Συμβατικός STIG	Υβριδικός STIG
Ισχύς [MW]	5	6.17	7.21
Λόγος πίεσης	10	10.56	11.12
TIT [C]	1000	1000	1000
Θερμικός β.α. [%]	31.51	35.55	37.79
Παροχή αέρα [kg/s]	20.15	20.11	20.04
EGT [C]	501	504	498

Πίνακας 6.5. Επιδόσεις σημείου σχεδίασης συμβατικού και υβριδικών STIG

Με τη χρήση των μοντέλων, προσομοιώνεται η λειτουργία των διατάξεων και υπολογίζονται οι επιδόσεις τους. Τη ποσοστιαία ετήσια διαφορά στις επιδόσεις μεταξύ των υβριδικών και της συμβατικής διάταξης παρουσιάζει ο Πίνακας 6.6.

	Υβριδικός STIG (a)		Υβριδικός STIG (b)
	Tower	Troughs	Tower
ΔE [%]	3.77	3.66	3.53
ΔF [%]	1.97	1.93	1.78
Δeff_f [%]	1.76	1.74	1.72
ΔM_{steam} [%]	20.43	20.05	19.51

Πίνακας 6.6. Διαφορά ετήσιων επιδόσεων μεταξύ υβριδικών και συμβατικού STIG

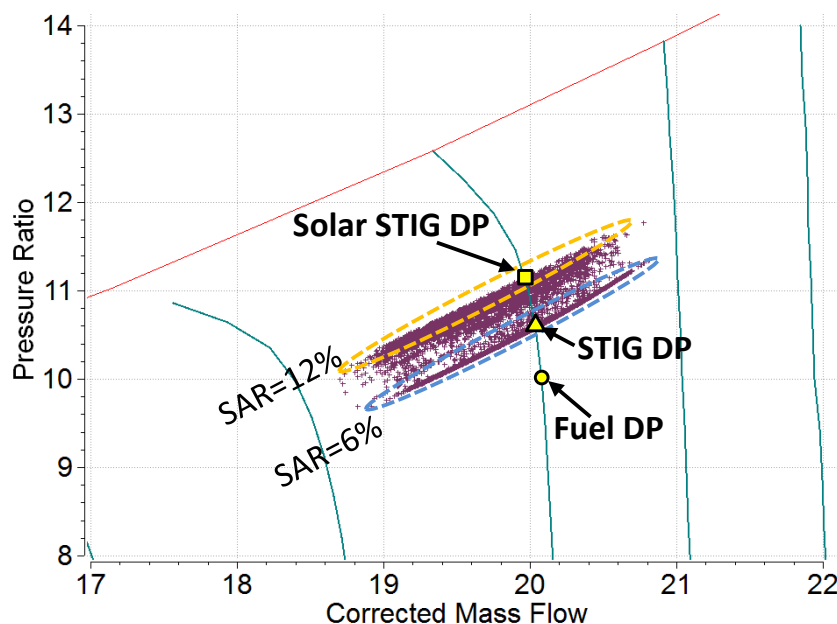
Όπως φαίνεται, η παραγόμενη ποσότητα ατμού των υβριδικών διατάξεων είναι μεγαλύτερη από αυτήν της συμβατικής διάταξης, όπως αναμενόταν. Αυτό οδηγεί σε ετήσια αύξηση κατά περίπου 3.8% στην παραγόμενη ενέργεια και περίπου 1.8% στο θερμικό βαθμό απόδοσης καυσίμου. Καλύτερες επιδόσεις παρουσιάζει η τοποθέτηση του δέκτη παράλληλα με τον υπάρχοντα συμβατικό ατμοποιητή (διάταξη (a)). Επίσης, για τη διάταξη (a) φαίνεται πως χρήση παραβολικών κατόπτρων οδηγεί ουσιαστικά στην ίδια συμπεριφορά ως προς τη μεταβολή των επιδόσεων σε σχέση με τη περίπτωση χρήσης δέκτη. Η διαφοροποίηση έγκειται στην απόλυτη τιμή των μεταβλητών των επιδόσεων αφού οι δύο τεχνολογίες αξιοποιούν την διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια σε διαφορετικό βαθμό κατά τη διάρκεια του έτους.

Από τη σύγκριση προκύπτει ότι η χρήση του δέκτη σε παράλληλη τοποθέτηση με τον υπάρχοντα ατμοποιητή είναι αποδοτικότερη σε σχέση με την παράλληλη τοποθέτηση με τον ΛΑΘ. Όμως, λόγω του αυξημένου θερμικού φορτίου στον υπερθερμαντή και τον οικονομητήρα εξαιτίας της αυξημένης παροχής νερού η δυνατότητα της λειτουργίας της διάταξης εξαρτάται άμεσα από τα χαρακτηριστικά σχεδίασης του ΛΑΘ. Έτσι, αν ο ΛΑΘ σχεδιαστεί για μικρές τιμές ΔT_{pinch} και $\Delta T_{\text{approach}}$ (Σχήμα 2.14), η ύπαρξη επιπλέον ποσότητας νερού κατά την υβριδική λειτουργία θα οδηγούσε σε αδυναμία

λειτουργίας του ΛΑΘ αφού η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από τον συμβατικό ατμοποιητή θα έτεινε να γίνει μικρότερη αυτής του κορεσμού.

Με βάση τα ανωτέρω, αποδοτικότερη είναι η τοποθέτηση του δέκτη παράλληλα στον υπάρχοντα ατμοποιητή, αλλά λόγω της απαίτησης συγκεκριμένων σχεδιαστικών χαρακτηριστικών του ΛΑΘ ασφαλέστερη επιλογή είναι η τοποθέτηση του δέκτη παράλληλα στον ΛΑΘ.

Η έγχυση ατμού στο θάλαμο καύσης ενός αεριοστροβίλου οδηγεί σε αυξημένη παροχή στην είσοδο του στροβίλου. Για στραγγαλισμένο στρόβιλο (συνήθης περίπτωση) και για λειτουργία με σταθερή ΤΙΤ, η αυξημένη παροχή οδηγεί σε απαίτηση της αύξησης της πίεσης. Έτσι, ο συμπιεστής εξαναγκάζεται να μεταβάλει το σημείο λειτουργίας του σε μεγαλύτερο λόγο πίεσης και συνεπώς εγγύτερα της γραμμής πάλμωσης (Mathioudakis, 2002). Τα σημεία λειτουργίας στο χάρτη του συμπιεστή της υβριδικής μηχανής κατά τη διάρκεια του έτους παρουσιάζει το Σχήμα 6.19. Επίσης απεικονίζονται τα σημεία σχεδίασης της μηχανής χωρίς έγχυση ατμού (Fuel DP), με έγχυση συμβατικά παραγόμενου ατμού (STIG DP) και υβριδικά παραγόμενου ατμού (Solar STIG DP). Όπως φαίνεται, υπάρχουν δύο βασικές περιοχές για λειτουργία με SAR=6% και SAR=12% που αντιστοιχούν σε συμβατική και υβριδική μέγιστη ατμοπαραγωγή αντίστοιχα. Τα άλλα σημεία λειτουργίας έχουν SAR ανάμεσα σε αυτές τις δύο τιμές. Μείωση περίπου 45% (Πίνακας 6.7) για το περιθώριο πάλμωσης (SM⁴) παρατηρείται μεταξύ αεριοστροβίλου χωρίς έγχυση ατμού και αεριοστροβίλου με έγχυση υβριδικά παραγόμενου ατμού (από 31.5% σε 17%).



Σχήμα 6.19. Σημεία λειτουργίας του συμπιεστή για υβριδική διάταξη STIG κατά τη διάρκεια του έτους

⁴ Περιθώριο πάλμωσης ορίζεται η ποσοστιαία διαφορά μεταξύ του λόγου πίεσης πάλμωσης ($\pi_{C,surge}$) για την ανηγμένη παροχή του σημείου λειτουργίας και του λόγου πίεσης λειτουργίας (π_C):
 $SM = (\pi_{C,surge} - \pi_C) / \pi_C$

	Συμβατικός Καυσίμου	Συμβατικός STIG	Υβριδικός STIG
SM [%]	31.5	24	17

Πίνακας 6.7. Περιθώριο πάλμωσης συμβατικού καυσίμου, συμβατικού και υβριδικών STIG αεριοστρόβιλων

Οι οικονομικές επιδόσεις των διατάξεων (a) και (b) με δέκτη πύργου (Σχήμα 6.18) προσδιορίζονται με τον υπολογισμό του LEC για διάφορες τιμές του κόστους καυσίμου. Τα χρησιμοποιηθέντα οικονομικά μεγέθη συνοψίζει ο Πίνακας 6.8.

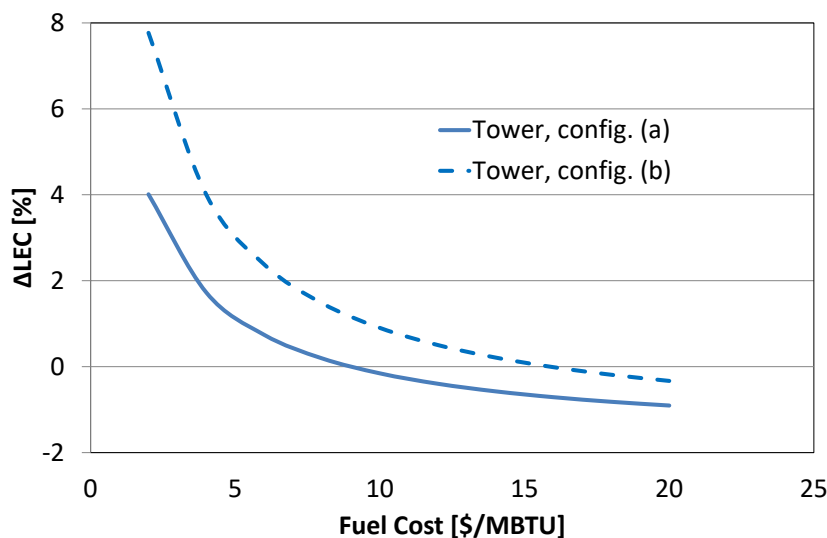
Κόστος Κτήσης	
Αεριοστρόβιλος [USD/MWe]	589000
Εναλλάκτες [USD/m ²]	135
Κάτοπτρα [USD/m ²]	200
Δέκτης [USD/MWth]	144000
Ετήσιο Κόστος Λειτουργίας	
Αεριοστρόβιλος [USD/MWe]	27700
Αεριοστρόβιλος [USD/MWhe]	0.93
Εναλλάκτες [USD/m ²]	2% Κόστος Κτήσης
Κάτοπτρα [USD/m ²]	1.1
Δέκτης [USD/MWth]	7100
Δέκτης [USD/MWth]	0.42
Καύσιμο [USD/MBTU]	2 - 20
Εκπομπές CO ₂ [USD/t]	5

Πίνακας 6.8. Οικονομικά μεγέθη υβριδικής διάταξης STIG

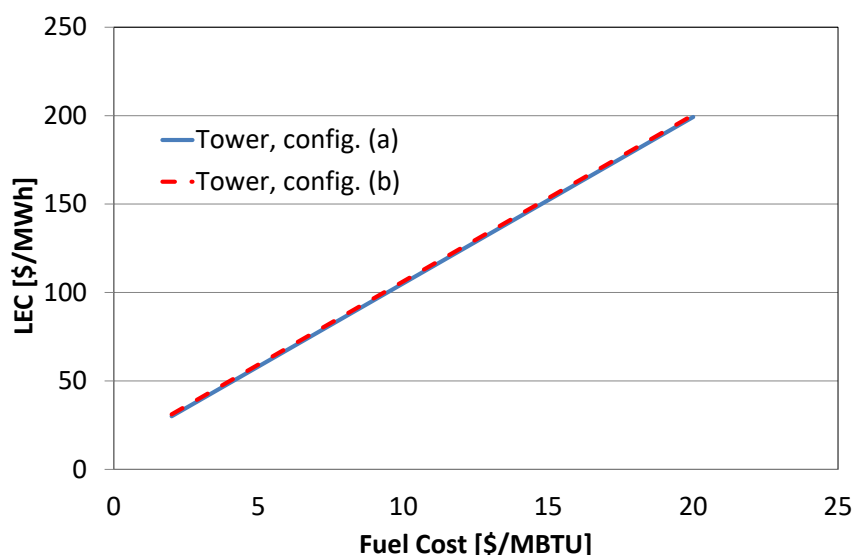
Τη διαφορά του κόστους ηλεκτροπαραγωγής μεταξύ των υβριδικών και της συμβατικής διάταξης με έγχυση ατμού παρουσιάζει το Σχήμα 6.20 ενώ το Σχήμα 6.21 παρουσιάζει το κόστος ηλεκτροπαραγωγής των δύο υβριδικών διατάξεων έγχυσης ατμού.

Όπως φαίνεται, η διάταξη (a) είναι οριακά αποδοτικότερη από τη διάταξη (b). Η διάταξη (b) παρουσιάζει μεγαλύτερο κόστος ηλεκτροπαραγωγής από τη διάταξη (a) αφού σε αυτή παράγεται μικρότερη ποσότητα ενέργειας και απαιτεί μεγαλύτερο αριθμό κατόπτρων αφού έχει μεγαλύτερο θερμικό φορτίο. Τέλος, παρατηρείται ότι όσο αυξάνει το κόστος του καυσίμου τόσο αυξάνει και η αποδοτικότητα των διατάξεων.

Λόγω της ανάγκης σύνδεσης του δέκτη με τον υπάρχοντα ΛΑΘ και των σχεδιαστικών απαιτήσεων αυτού για την υλοποίηση της διάταξης (a) αλλά και λόγω των οριακά καλύτερων επιδόσεων, πιο ελκυστική κρίνεται η διάταξη (b).



Σχήμα 6.20. Διαφορά οικονομικών επιδόσεων μεταξύ υβριδικών και συμβατικού STIG

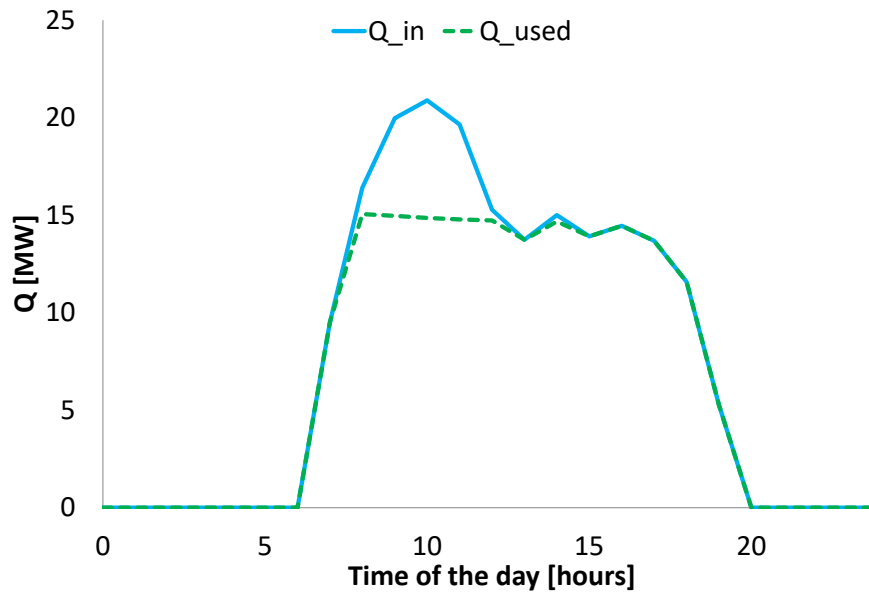


Σχήμα 6.21. Οικονομικές επιδόσεις υβριδικών διατάξεων STIG

6.3 Αξιοποίηση περίσσειας ηλιακής ενέργειας

Στην περίπτωση του συνήθους υβριδικού αεριοστροβίλου όπου η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται για την προθέρμανση του αέρα (παράγραφος 5.1), τα υλικά του δέκτη θέτουν ένα θερμοκρασιακό όριο και όταν η διαθέσιμη ηλιακή θερμότητα είναι υψηλότερη της απαιτούμενης, κατάλληλος αριθμός κατόπτρων από-εστιάζεται ούτως ώστε να μειωθεί η προσφερόμενη θερμότητα στο δέκτη.

Έτσι, κατά τη διάρκεια της λειτουργίας ενδέχεται να υπάρχει διαθέσιμη ηλιακή θερμότητα η οποία δεν αξιοποιείται και το ποσό αυτής εξαρτάται από το μέγεθος του πεδίου των κατόπτρων. Αυτό μπορεί να φανεί και στο Σχήμα 6.22 όπου παρουσιάζεται η διαθέσιμη και αξιοποιούμενη ηλιακή ενέργεια από τον υβριδικό αεριοστροβίλο απλής ατράκτου (της παραγράφου 5.2) για μια θερινή μέρα.

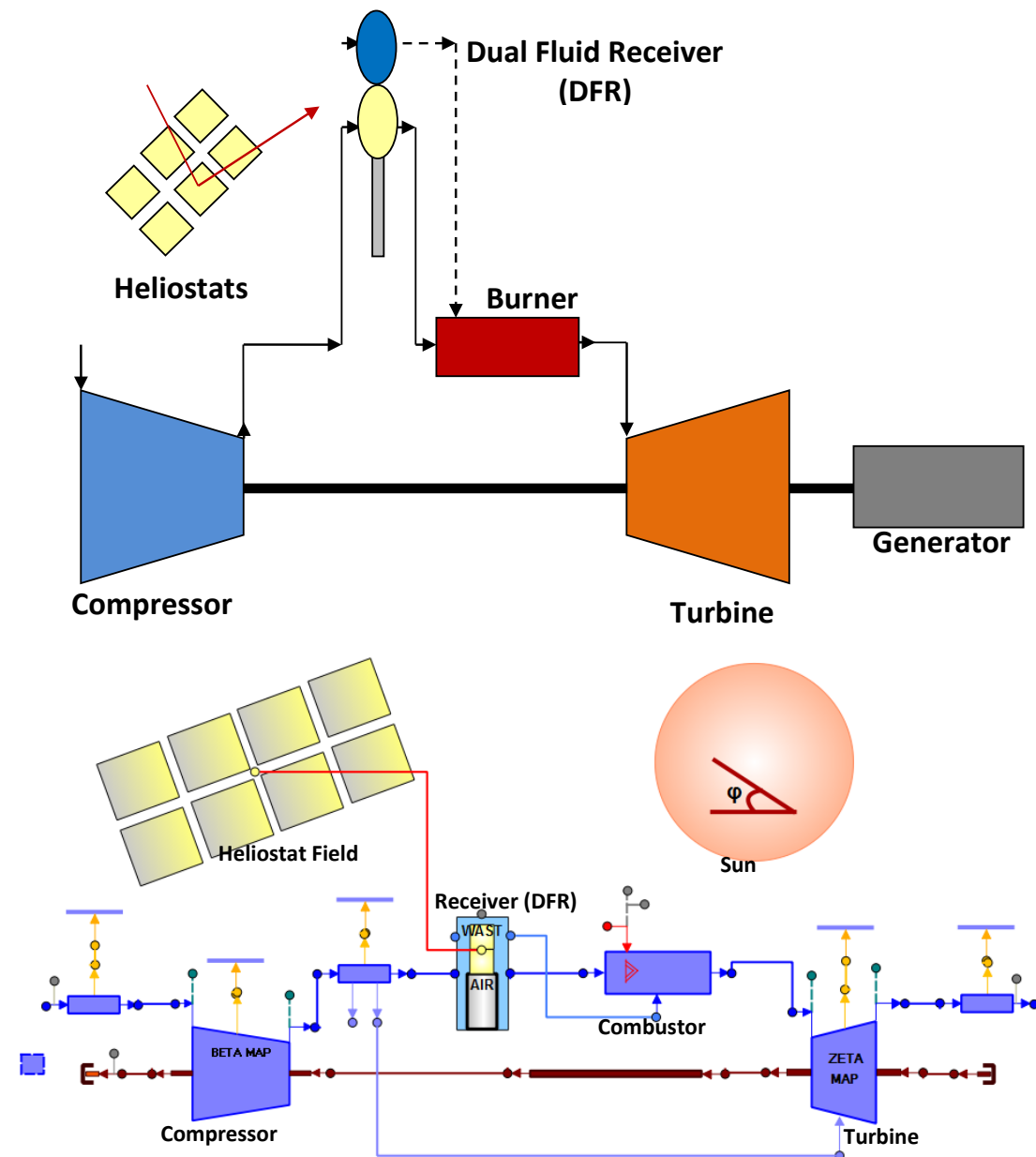


Σχήμα 6.22. Παράδειγμα διαθέσιμης και χρησιμοποιούμενης ηλιακής ενέργειας

Ένας τρόπος αξιοποίησης της απορριπτόμενης ηλιακής ενέργειας θα ήταν με τη χρήση διάταξης αποθήκευσης θερμότητας. Όταν η ηλιακή ακτινοβολία είναι υψηλή μπορεί να αυξηθεί η παροχή αέρα στο δέκτη αλλάζοντας την γωνία των IGVs. Εν συνεχεία, ο ηλιακά προθερμασμένος αέρας περνά από διάταξη αποθήκευσης θερμότητας όπου μεταφέρει ένα μέρος της θερμότητάς του. Κατά τις ώρες που δεν υπάρχει διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια, ο αέρας εξόδου του συμπιεστή περνά από τη διάταξη αποθήκευσης θερμότητας όπου και θερμαίνεται και εν συνεχεία τροφοδοτείται στο θάλαμο καύσης. Όμως, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας αποθήκευσης της ενέργειας και της μεγάλης παροχής αέρα, το δοχείο αποθήκευσης θερμότητας πρέπει να είναι πλήρως μονωμένο και μεγάλων διαστάσεων ούτως ώστε να επιτρέπει τη μετάδοση θερμότητας για τον επιθυμητό χρόνο. Αυτό οδηγεί σε υψηλό κόστος επένδυσης και αυξημένη πτώση πίεσης. Επιπλέον, η πολυπλοκότητα αυτής της προσέγγισης δυσχεραίνει τον έλεγχο. Ως εκ τούτου, η αποθήκευση θερμότητας σε διάταξη υβριδικού αεριοστροβίλου δεν αποτελεί μια ρεαλιστική εκδοχή.

Ο συνδυασμός της διάταξης του συνήθους υβριδικού αεριοστροβίλου και αυτού με έγχυση ηλιακά παραγόμενου ατμού θα οδηγούσε σε έναν εναλλακτικό τρόπο αξιοποίησης της απορριπτόμενης ηλιακής ενέργειας. Ένας δευτερεύων δέκτης νερού/ατμού τοποθετείται ακριβώς πάνω από τον υπάρχοντα για την προθέρμανση του αέρα. Έτσι, όταν η διαθέσιμη ενέργεια είναι υψηλότερη από την απαιτούμενη, τα κάτοπτρα αντί να απο-εστιάζουν, εστιάζουν στο δευτερεύοντα δέκτη όπου παράγεται ατμός ο οποίος στη συνέχεια εγχέεται στο θάλαμο καύσης. Με αυτό τον τρόπο, και όπως περιγράφηκε σε προηγούμενη παράγραφο, είναι δυνατή η παραγωγή αυξημένης ισχύος. Επιπλέον, επειδή ο ατμός έχει μικρότερη θερμοκρασία από τον αέρα στην είσοδο του θαλάμου καύσης, λειτουργεί ως ψυκτικό και συνεπώς μειώνει τη θερμική καταπόνησή του. Ένας αριθμός κατόπτρων θα μπορούσε να επιλεγεί να εστιάζει συνεχώς στο

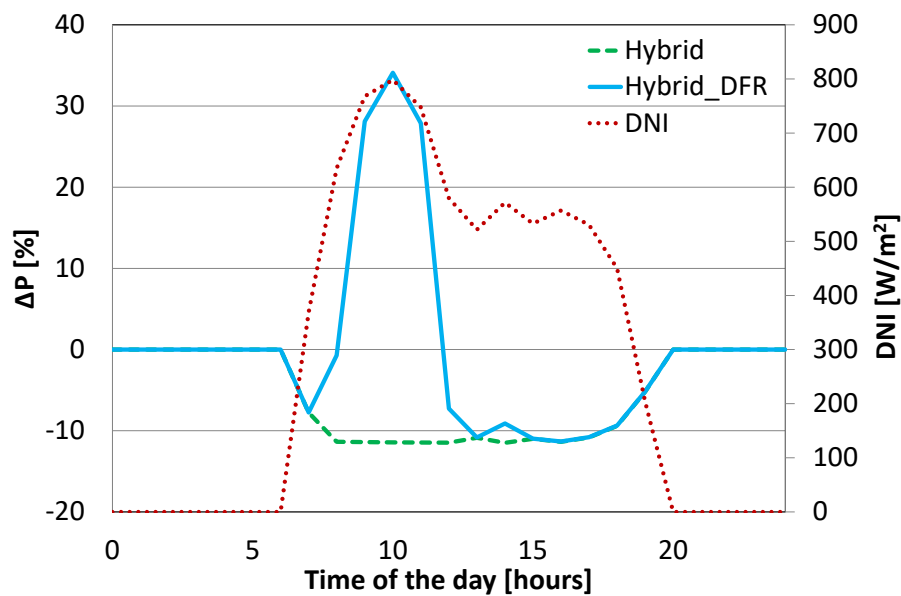
δευτερεύοντα δέκτη ούτως ώστε να είναι συνεχώς εξασφαλισμένη η ψύξη του θαλάμου καύσης. Διατάξεις ανάκτησης του νερού από τα καυσαέρια (Takeda et al., 2014) θα επέτρεπαν τη λειτουργία της προτεινόμενης διάταξης στις περιοχές με υψηλή ακτινοβολία, που συνήθως όμως είναι άνυδρες. Τη σχηματική απεικόνιση της προτεινόμενης διάταξης παρουσιάζει το Σχήμα 6.23.



Σχήμα 6.23. Διάταξη υβριδικού αεριοστρόβιλου με δέκτη διπλής ροής (Dual Fluid Receiver - DFR) και η απεικόνισή της στο PROOSIS

Για τη μελέτη της λειτουργίας της προτεινόμενης διάταξης διπλού δέκτη, θεωρείται ο υβριδικός αεριοστρόβιλος απλής ατράκτου (Σχήμα 5.1) με τα χαρακτηριστικά σχεδίασης που αναφέρθηκαν ήδη (Πίνακας 5.1), ο οποίος τροποποιείται με την προσθήκη του δευτερεύοντος δέκτη. Ο δευτερεύων δέκτης τροφοδοτείται με νερό θερμοκρασίας 15°C και πίεσης 35bar. Η παροχή του νερού μεταβάλλεται ούτως ώστε να προκύπτει κορεσμένος ατμός. Τη διαφορά

της παραγόμενης ισχύος (ΔP) για μια θερινή ημέρα μεταξύ των υβριδικών αεριοστροβίλων (συνήθης και με δέκτη διπλής ροής) και του συμβατικού παρουσιάζει το Σχήμα 6.24. Κατά τις ώρες που υπάρχει περίσσεια ηλιακής θερμότητας αυτή αξιοποιείται για την παραγωγή ατμού, η οποία οδηγεί σε αύξηση της παραγόμενης ισχύος. Λόγω της έγχυσης ατμού, όπως περιγράφηκε και προηγουμένως, το σημείο λειτουργίας του συμπιεστή πλησιάζει τη γραμμή πάλμωσης και ως εκ τούτου ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί κατά τη σχεδίαση της διάταξης ούτως ώστε να αποφευχθεί η ασταθής λειτουργία της μηχανής.



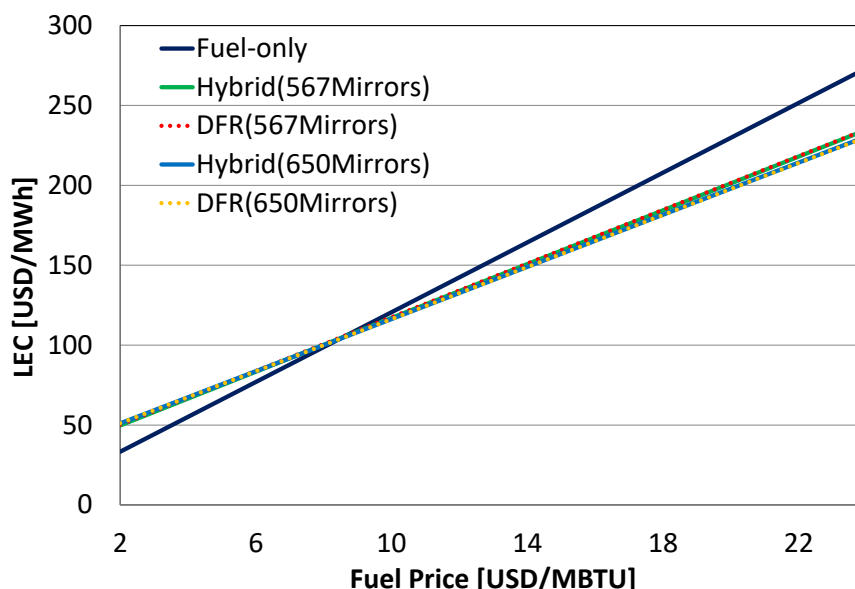
Σχήμα 6.24. Διαφορά παραγόμενης ενέργειας μεταξύ υβριδικών αεριοστροβίλων (συνήθους και με δέκτη διπλής ροής) και συμβατικού για μια θερινή ημέρα

Τη σύγκριση των επιδόσεων σε ετήσια βάση παρουσιάζει ο Πίνακας 6.9 για δύο μεγέθη πεδίου κατόπτρων. Όπως φαίνεται η παραγόμενη ενέργεια αυξάνεται σε σχέση με τη συνήθη υβριδική διάταξη, ενώ η μείωση του καταναλισκόμενου καυσίμου παραμένει υψηλή. Ευνοϊκότερη είναι η χρήση μεγαλύτερου πεδίου κατόπτρων, αφού σε αυτήν την περίπτωση υφίσταται μεγαλύτερο ποσό απορριπτόμενης ενέργειας και συνεπώς η ατμοπαραγωγή και η ηλεκτροπαραγωγή αυξάνεται περισσότερο.

Αρ. κατόπτρων	Υβριδικός		Υβριδικός DFR	
	567	650	567	650
ΔE [%]	-3.15	-3.39	-2.23	-1.24
ΔF [%]	-25.34	-27.77	-24.71	-26.34
Δ_{eff_f} [%]	29.72	33.75	29.86	34.07
f_{ss} [%]	23.61	25.95	24.75	27.61

Πίνακας 6.9. Διαφορά ετήσιων επιδόσεων μεταξύ υβριδικών αεριοστροβίλων (συνήθους και με δέκτη διπλής ροής) και συμβατικού για δύο μεγέθη πεδίου κατόπτρων

Το Σχήμα 6.25 παρουσιάζει το LEC για τον συμβατικό αεριοστρόβιλο (Fuel-only), τον συνήθη υβριδικό (Hybrid) και τον υβριδικό με δέκτη διπλής ροής (DFR). Η συνήθης υβριδική διάταξη παρουσιάζει σχεδόν ίδιο κόστος ηλεκτροπαραγωγής με τη διάταξη διπλού δέκτη. Συνεπώς, η χρήση του διπλού δέκτη έχει το ίδιο κόστος ηλεκτροπαραγωγής, αυξημένη παραγωγή ενέργειας και υψηλή μείωση της κατανάλωσης καυσίμου.



Σχήμα 6.25. Οικονομικές επιδόσεις συνήθους και υβριδικών αεριοστροβίλων

6.4 Σύνοψη - Συμπεράσματα

Στο Κεφάλαιο αυτό εξετάστηκε η δυνατότητα εναλλακτικού τρόπου πρόσδοσης της ηλιακής ενέργειας στον αεριοστρόβιλο χρησιμοποιώντας υπάρχουσες τεχνολογίες, με σκοπό την αντιμετώπιση των κατασκευαστικών δυσκολιών του συνήθους σχήματος του υβριδικού αεριοστροβίλου. Μελετήθηκαν δύο διατάξεις, αυτή της ηλιακής αναθέρμανσης και αυτή της έγχυσης ηλιακά παραγόμενου ατμού στο θάλαμο καύσης του αεριοστροβίλου.

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 ΤΙΤ σχεδίασης 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 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 $>10\$/\text{MBTU}$.

Τέλος, με σκοπό την αξιοποίηση της απορριπτόμενης θερμότητας από την απο-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 με ίδιο κόστος ηλεκτροπαραγωγής.

Στη συνέχεια, μελετάται η χρήση της ηλιακής ενέργειας σε διατάξεις ατμοστροβίλου και συνδυασμένου κύκλου.

Κεφάλαιο 7: Υβριδικός Ατμοστροβίλος Και Συνδυασμένος Κύκλος

Στο παρόν κεφάλαιο μελετώνται ηλιοθερμικές διατάξεις κύκλου ατμοστροβίλου και συνδυασμένου κύκλου.

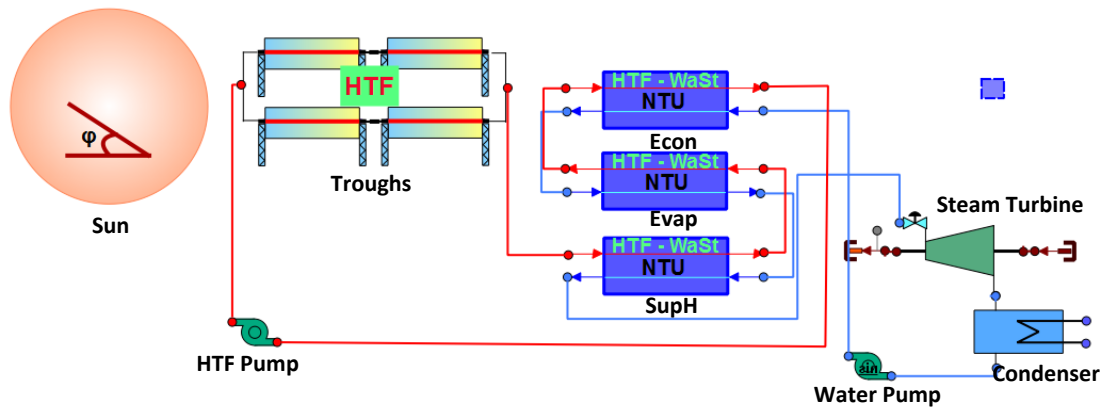
Όπως αναφέρθηκε στις παραγράφους 1.5.2 και 1.6, απαιτείται η σύγκριση των επιδόσεων των διατάξεων ηλιακού ατμοστροβίλου οι οποίες χρησιμοποιούν διαφορετικές τεχνολογίες ατμοπαραγωγής καθώς και η μελέτη του τρόπου ελέγχου τους.

Επιπλέον, όπως φάνηκε από τη βιβλιογραφία (παράγραφοι 1.5.3 και 1.6), απαραίτητη είναι η διερεύνηση της επίδρασης των δύο διαφορετικών προσεγγίσεων υβριδοποίησης στη λειτουργία του συνδυασμένου κύκλου καθώς και η εκτίμηση των επιδόσεών τους.

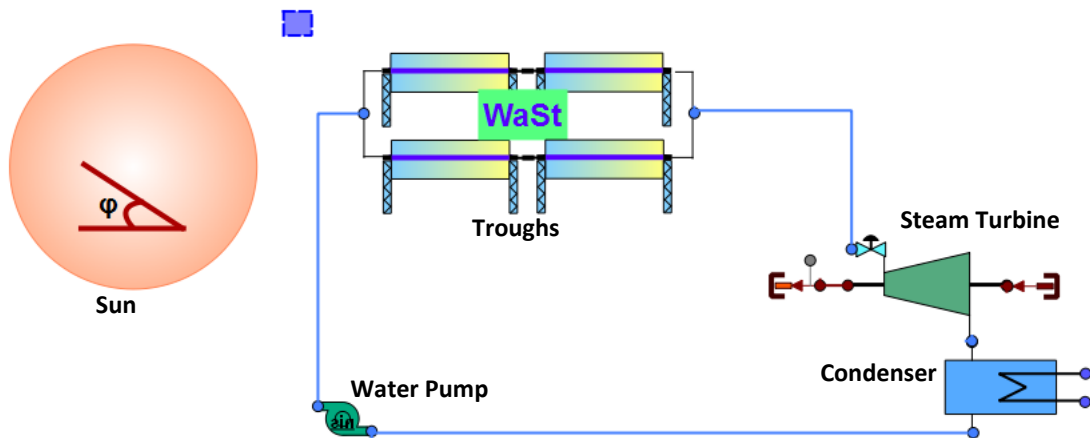
Η ανάλυση που παρουσιάζεται αφορά στην εύρεση του καταλληλότερου τρόπου ελέγχου διατάξεων ηλιακού ατμοστροβίλου και η σύγκριση των επιδόσεων των διατάξεων με θερμοδυναμικούς και οικονομικούς όρους. Επιπλέον, μελετώνται και συγκρίνονται υβριδικές διατάξεις συνδυασμένου κύκλου όπου η ηλιακή θερμότητα προσδίδεται είτε στον κύκλο του αεριοστροβίλου, είτε στον κύκλο του ατμοστροβίλου.

7.1 Διατάξεις ηλιακού ατμοστροβίλου

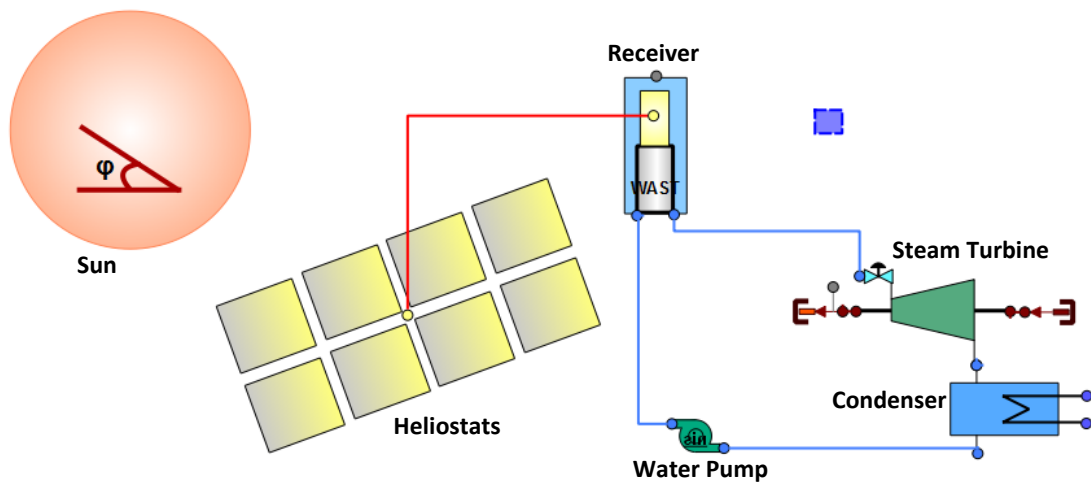
Για τη μελέτη επιλέγεται η πιο απλή διάταξη κύκλου Rankine, όπου το εργαζόμενο μέσο εκτονώνεται στον ατμοστροβίλο, ψύχεται στο συμπυκνωτή, καταθλίβεται στην τροφοδοτική αντλία και τέλος, εισέρχεται στη συνιστώσα ατμοπαραγωγής. Η συνιστώσα ατμοπαραγωγής αποτελεί ουσιαστικά το ηλιακό κομμάτι της εγκατάστασης και μπορεί να βασίζεται στην τεχνολογία της: α) έμμεσης ατμοπαραγωγής από παραβολικά κάτοπτρα (TroughsHTF, Σχήμα 7.1), είτε β) της άμεσης ατμοπαραγωγής από παραβολικά κάτοπτρα (TroughsDSG, Σχήμα 7.2) ή γ) της άμεσης ατμοπαραγωγής από δέκτη πύργου (TowerDSG, Σχήμα 7.3). Τα μοντέλα των τριών διατάξεων υλοποιούνται στο PROOSIS χρησιμοποιώντας συνιστώσες από τις αναπτυχθείσες βιβλιοθήκες WAST και SOLAR (Κεφάλαιο 3).



Σχήμα 7.1. Διάταξη ηλιακού ατμοστροβίλου με έμμεση ατμοπαραγωγή από παραβολικά κάτοπτρα (TroughsHTF)



Σχήμα 7.2. Διάταξη ηλιακού ατμοστροβίλου με άμεση ατμοπαραγωγή από παραβολικά κάτοπτρα (TroughsDSG)



Σχήμα 7.3. Διάταξη ηλιακού ατμοστροβίλου με άμεση ατμοπαραγωγή από δέκτη πύργου (TowerDSG)

7.1.1 Χαρακτηριστικά σημείου σχεδίασης

Σκοπός της μελέτης είναι η σύγκριση των επιδόσεων ηλιακών ατμοστροβίλων δεδομένης απαίτησης ισχύος, που χρησιμοποιούν διαφορετικές τεχνολογίες ηλιακής ατμοπαραγωγής, ώστε να προσδιοριστεί η αποδοτικότερη.

Τα χαρακτηριστικά σχεδίασης ενός κύκλου Rankine επιλέγονται ούτως ώστε η εγκατάσταση να παρουσιάζει τις βέλτιστες επιδόσεις αναλόγως της μορφής της διάταξης και της ονομαστικής ισχύος. Έτσι, αν και για τον απλό ιδανικό κύκλο Rankine μπορεί να προκύψει η συσχέτιση πίεσης και θερμοκρασίας ατμού για βέλτιστο θερμικό βαθμό απόδοσης, ο υπολογισμός της συσχέτισης αυτής γίνεται περίπλοκος για κύκλους με αναθέρμανση, απομαστεύσεις για προθέρμανση κτλ (Leyzerovich, 2008). Επιπλέον, τα βέλτιστα χαρακτηριστικά του ατμού σχετίζονται και με την απαιτούμενη ισχύ της εγκατάστασης (Ganapathy, 1996). Συνεπώς, για το σχεδιασμό μιας διάταξης απαιτείται μια διαδικασία βελτιστοποίησης η οποία θα κάνει χρήση των αποτελεσμάτων τεχνοοικονομικής ανάλυσης.

Οι εξεταζόμενες τεχνολογίες ηλιακής ατμοπαραγωγής (Σχήμα 7.1-Σχήμα 7.3) παρουσιάζουν κάποιους περιορισμούς στα χαρακτηριστικά σχεδίασης, όπως στην περίπτωση της έμμεσης ατμοπαραγωγής από παραβολικά κάτοπτρα που η μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία ελαίου είναι της τάξης των 400°C. Συνεπώς, τα βέλτιστα χαρακτηριστικά σχεδίασης της κάθε διάταξης θα προέκυπταν μέσω διαδικασίας βελτιστοποίησης, λαμβάνοντας υπ' όψιν τους περιορισμούς και τις δυνατότητες της κάθε τεχνολογίας.

Στη παρούσα μελέτη, επιλέγονται χαρακτηριστικά σχεδίασης για την ατμοπαραγωγή που ικανοποιούν τους περιορισμούς και των τριών τεχνολογιών. Τα χαρακτηριστικά αφορούν υπάρχουσα διάταξη καθαρής παραγόμενης ισχύος 11MW (NREL, 2015b): Ο ατμοστρόβιλος στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας τροφοδοτείται με ατμό παροχής 12.86kg/s, θερμοκρασίας 300 °C και πίεσης 45bar. Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσής του θεωρείται 88% και η πίεση εκτόνωσης επιλέγεται 0.08bar και σταθερή σε κάθε σημείο λειτουργίας. Ο συμπυκνωτής, σε κάθε σημείο λειτουργίας, παράγει κορεσμένο νερό μεταβάλλοντας καταλλήλως την παροχή ψυκτικού.

Για τη διάταξη της έμμεσης ατμοποίησης από παραβολικά κάτοπτρα, το έλαιο (Therminol VP1) έχει παροχή 120.1kg/s και θερμοκρασία 350 °C. Η διάταξη των εναλλακτών για την ατμοπαραγωγή σχεδιάζεται με $\Delta T_{pinch} = 7deg$ και $\Delta T_{approach} = 3deg$.

Ο αριθμός των κατόπτρων της κάθε διάταξης υπολογίζεται θεωρώντας ως σημείο σχεδίασης το μεσημέρι του θερινού ηλιοστασίου με ακτινοβολία 900W/m². Έτσι, χρησιμοποιώντας τα μοντέλα, προσομοιώνεται η λειτουργία των διατάξεων στο σημείο σχεδίασης μεταβάλλοντας τον αριθμό των κατόπτρων μέχρις ότου επιτευχθούν οι επιθυμητές επιδόσεις σχεδίασης.

Τα αναφερθέντα χαρακτηριστικά σχεδίασης συνοψίζει ο Πίνακας 7.1.

Επίπεδα κάτοπτρα / Δέκτης	
Ανακλαστικότητα	0.97
Συντελεστής εστίασης	1
Σκίαση	0.97
Απορροφητικότητα	0.95
Οπτική απόδοση	0.96
Εκπομπή	0.05
Πτώση πίεσης	0.05
Εμβαδόν κατόπτρου [m ²]	64
Πλήθος κατόπτρων	958
Παραβολικά κάτοπτρα	
Σκίαση	0.98
Σφάλμα κίνησης	0.99
Σφάλμα γεωμετρίας	0.98
Ανακλαστικότητα	0.92
Εκπομπή	0.90
Διαπερατότητα	0.98
Απορροφητικότητα	0.97
Εμβαδόν κατόπτρου [m ²]	18
Πλήθος κατόπτρων	HTF: 2958 ,DSG: 2813
Εναλλάκτες	
ΔT _{pinch} [°C]	7
ΔT _{approach} [°C]	3
Παροχή ελαίου [kg/s]	120.1
Θερμοκρασία εισόδου ελαίου [°C]	350
Πτώση πίεσης νερού/ατμού	0.05
Ατμοστροβίλος	
Θερμοκρασία ατμού [°C]	300
Πίεση ατμού [bar]	45
Παροχή ατμού [kg/s]	12.86
Πίεση συμπυκνωτή [bar]	0.08
Ισεντροπικός β.α.	0.88
Καθαρή ισχύς [MW]	11

Πίνακας 7.1. Χαρακτηριστικά σημείου σχεδίασης διατάξεων ηλιακού ατμοστροβίλου

7.1.2 Έλεγχος λειτουργίας

Για να προσδιοριστούν οι επιδόσεις των εξεταζόμενων διατάξεων ηλιακού ατμοστροβίλου και να πραγματοποιηθεί η σύγκρισή τους, αρχικά πρέπει να προσδιοριστεί ο καταλληλότερος τρόπος ελέγχου.

Σε μια συμβατική διάταξη ατμοστροβίλου (ή και συνδυασμένου κύκλου), τα χαρακτηριστικά του παραγόμενου ατμού εξαρτώνται από το διαθέσιμο ποσό θερμότητας. Σε μια εγκατάσταση ηλιακού ατμοστροβίλου, το διαθέσιμο ποσό θερμότητας εξαρτάται από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ η παραγόμενη ισχύς από την παροχή και τα χαρακτηριστικά του παραγόμενου ατμού. Ο έλεγχος μιας τέτοιας διάταξης δύναται να πραγματοποιηθεί με τη μεταβολή της παροχής του ηλιακά θερμαινόμενου μέσου (Patnode, 2006). Στις διατάξεις άμεσης ατμοποίησης ελέγχεται η παροχή νερού/ατμού ενώ στη

διάταξη έμμεσης ατμοποίησης η παροχή του ατμού εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του ρεύματος ελαίου και συνεπώς σε αυτήν την περίπτωση ελέγχεται η παροχή του ελαίου.

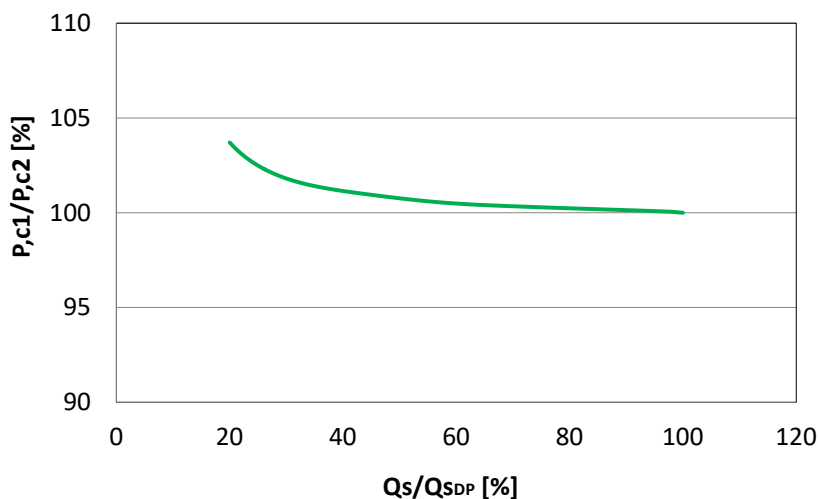
Εξετάζονται δύο σενάρια τρόπου λειτουργίας:

c1) αναλογική μεταβολή της παροχής σε σχέση με τη μεταβολή της διαθέσιμης ηλιακής θερμότητας ώστε να επιτυγχάνεται υψηλή θερμοκρασία στο θερμαινόμενο μέσο

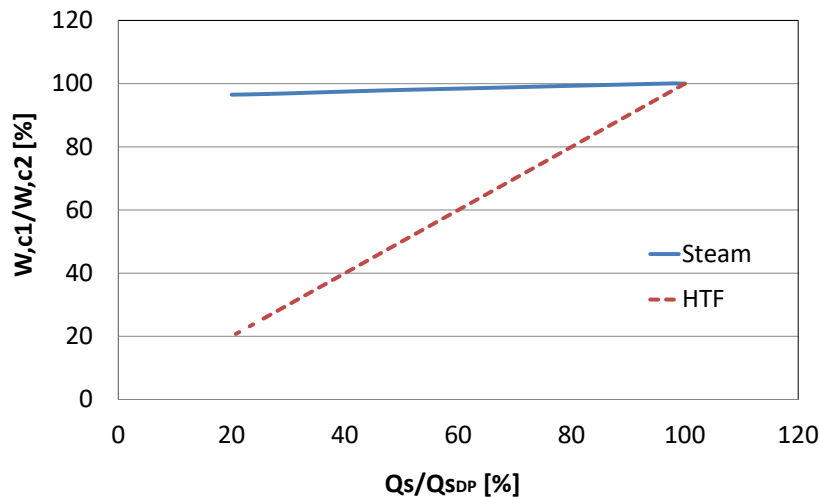
c2) σταθερή παροχή ίση με του σημείου σχεδίασης, ώστε να επιτυγχάνεται υψηλή παροχή του θερμαινόμενου μέσου

Για την εύρεση του αποδοτικότερου τρόπου λειτουργίας, πραγματοποιείται η προσομοίωση της λειτουργίας των τριών διατάξεων (με τη χρήση των μοντέλων) και για τους δύο τρόπους λειτουργίας μεταβάλλοντας τη διαθέσιμη ηλιακή θερμότητα.

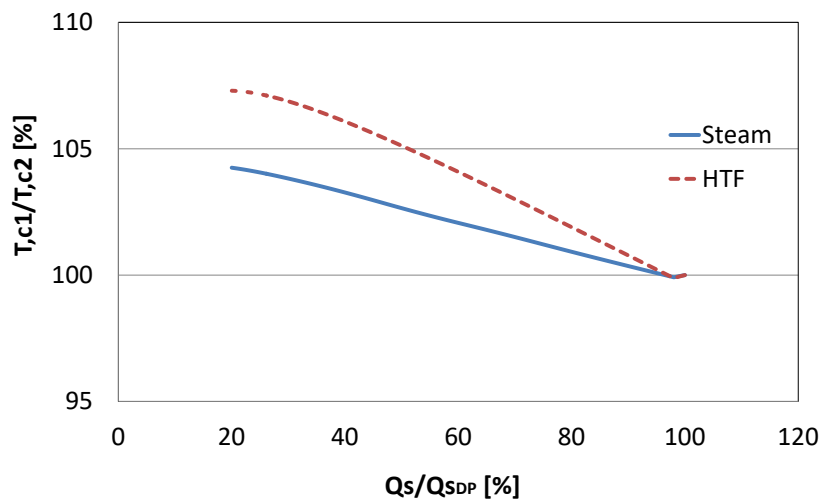
Από την ανάλυση προέκυψε πως και για τις τρεις διατάξεις, αποδοτικότερος τρόπος λειτουργίας είναι αυτός της μεταβαλλόμενης παροχής (c1). Παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα για την πιο περίπλοκη διάταξη, αυτής της έμμεσης ατμοπαραγωγής με παραβολικά κάτοπτρα (Σχήμα 7.1). Το Σχήμα 7.4 παρουσιάζει το λόγο της καθαρής παραγόμενης ισχύος μεταξύ των σεναρίων c1 και c2, ενώ το λόγο των παροχών και των θερμοκρασιών για τα ρεύματα νερού/ατμού και ελαίου παρουσιάζει το Σχήμα 7.5 και το Σχήμα 7.6 αντίστοιχα.



Σχήμα 7.4. Λόγος καθαρής παραγόμενης ισχύος μεταξύ σεναρίων λειτουργίας c1 και c2 συναρτήσει του λόγου της διαθέσιμης ηλιακής θερμότητας προς αυτή του σημείου σχεδίασης



Σχήμα 7.5. Λόγος παροχών ατμού και ελαίου μεταξύ σεναρίων λειτουργίας c1 και c2 συναρτήσει του λόγου της διαθέσιμης ηλιακής θερμότητας προς αυτή του σημείου σχεδίασης



Σχήμα 7.6. Λόγος θερμοκρασιών ατμού και ελαίου μεταξύ σεναρίων λειτουργίας c1 και c2 συναρτήσει του λόγου της διαθέσιμης ηλιακής θερμότητας προς αυτή του σημείου σχεδίασης

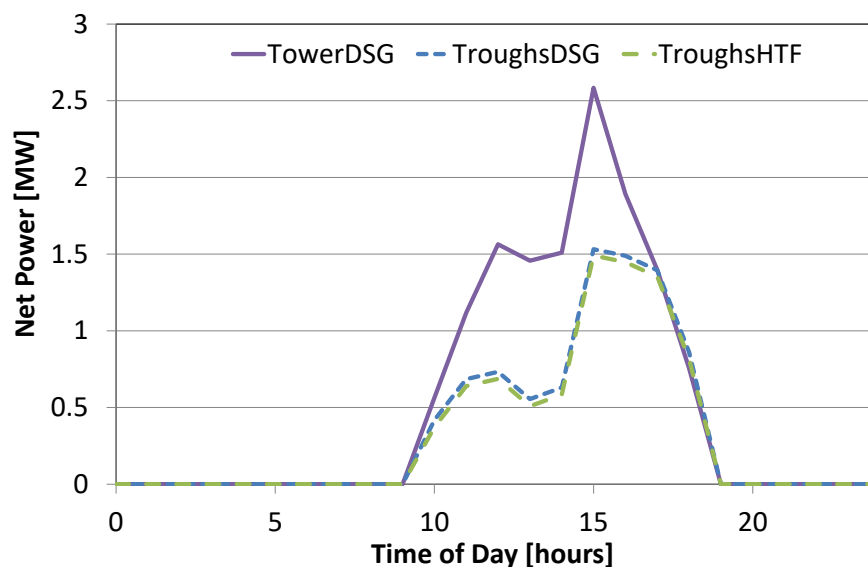
Όπως φαίνεται, η μεταβαλλόμενη παροχή οδηγεί στην επίτευξη μεγαλύτερων θερμοκρασιών τόσο για το έλαιο όσο και για το ρεύμα νερού/ατμού. Παρά την οριακά μικρότερη παροχή του ατμού (Σχήμα 7.5), η καθαρή παραγόμενη ισχύς (Σχήμα 7.4) αυξάνεται και λόγω του μικρότερου φορτίου των αντλιών αλλά και λόγω της υψηλότερης θερμοκρασίας του ατμού (Σχήμα 7.6). Η αύξηση γίνεται εντονότερη όσο μειώνεται η διαθέσιμη ηλιακή θερμότητα.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.3, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια του έτους, είναι κατά βάση μικρότερη από αυτή της σχεδίασης. Κρίνοντας μόνο με βάση την μεγιστοποίηση της παραγωγής, ο τρόπος λειτουργίας με μεταβαλλόμενη παροχή (c1) είναι αποδοτικότερος. Στην ανάλυση που ακολουθεί για τη σύγκριση των διατάξεων, υιοθετείται ο τρόπος λειτουργίας με μεταβαλλόμενη παροχή.

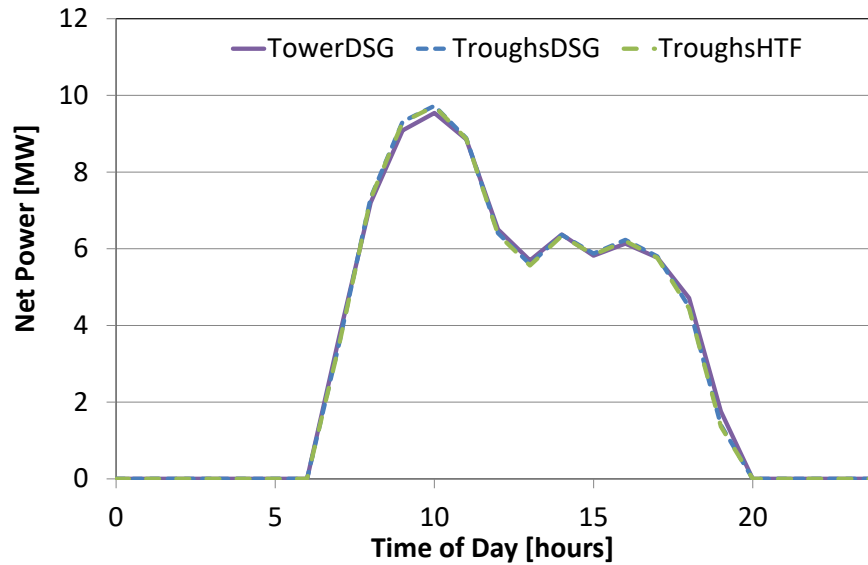
7.1.3 Επιδόσεις - Σύγκριση

Τα μοντέλα των τριών διατάξεων χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της λειτουργίας τους και τον προσδιορισμό των επιδόσεών τους. Η σύγκρισή τους πραγματοποιείται σε ημερήσια (θερινή και χειμερινή ημέρα) και σε ετήσια βάση.

Το Σχήμα 7.7 παρουσιάζει την καθαρή παραγόμενη ισχύ από τις τρεις διατάξεις για μια χειμερινή ημέρα ενώ το Σχήμα 7.8 για μια θερινή. Όπως παρατηρείται, για τις διατάξεις παραβολικών κατόπτρων, η παραγόμενη ισχύς στην περίπτωση της άμεσης ατμοποίησης είναι οριακά υψηλότερη αυτής της διάταξης έμμεσης ατμοποίησης ανεξαρτήτως εποχής. Επιπλέον, και οι δύο αυτές διατάξεις παρουσιάζουν χαμηλότερες επιδόσεις από τη διάταξη δέκτη κατά τη χειμερινή περίοδο αλλά οριακά υψηλότερες τη θερινή περίοδο. Αυτό οφείλεται στον τρόπο λειτουργίας των δύο τεχνολογιών. Τα επίπεδα κάτοπτρα στρέφονται σε δύο άξονες και στοχεύουν συγκεκριμένο σημείο ενώ τα παραβολικά στρέφονται σε ένα άξονα και οι ηλιακές ακτίνες τείνουν να είναι κάθετες στην επιφάνειά τους τους καλοκαιρινούς μήνες.



Σχήμα 7.7. Καθαρή παραγόμενη ισχύς διατάξεων ηλιακών ατμοστροβίλων για χειμερινή ημέρα



Σχήμα 7.8. Καθαρή παραγόμενη ισχύς διατάξεων ηλιακών ατμοστροβίλων για θερινή ημέρα

Ο Πίνακας 7.2 παρουσιάζει την ετήσια παραγόμενη ενέργεια καθώς και την απόκλιση της παραγόμενης ενέργειας των δύο διατάξεων παραβολικών κατόπτρων από την αντίστοιχη της διάταξης δέκτη πύργου. Η διάταξη δέκτη παρουσιάζει υψηλότερη ετήσια παραγωγή κατά περίπου 3.6%.

Διάταξη	E [GWh]	ΔE [%]
TowerDSG	13.708	
TroughsDSG	13.220	-3.56
TroughsHTF	13.205	-3.67

Πίνακας 7.2. Σύγκριση ετήσιων επιδόσεων διατάξεων ηλιακών ατμοστροβίλων

Οι διατάξεις που χρησιμοποιούν τις δύο τεχνολογίες ατμοπαραγωγής που βρίσκονται σε εμπορικό στάδιο (έμμεση ατμοπαραγωγή από παραβολικά κάτοπτρα και άμεση ατμοπαραγωγή από πύργο), συγκρίνονται και με βάση τις οικονομικές τους επιδόσεις. Τα οικονομικά μεγέθη κτήσης των συνιστωσών του κύκλου Rankine και των κοίλων κατόπτρων λαμβάνονται από την αναφορά του Turchi (2010), ενώ τα κόστη κτήσης των επίπεδων κατόπτρων και του δέκτη πύργου καθώς και τα κόστη λειτουργίας λαμβάνονται από την εργασία των Spelling & Laumert (2014). Τα οικονομικά μεγέθη συνοψίζει ο Πίνακας 7.3.

Κόστος Κτήσης	
Συνιστώσες κύκλου Rankine [USD/MWe]	940000
Επίπεδα κάτοπτρα [USD/m ²]	200
Παραβολικά κάτοπτρα και έλαιο [USD/m ²]	385
Δέκτης νερού/ατμού [USD/MWth]	144000
Ετήσιο Κόστος Λειτουργίας	
Συνιστώσες κύκλου Rankine [USD/MWe]	28300
Συνιστώσες κύκλου Rankine [USD/MWhe]	0.96
Κάτοπτρα [USD/m ²]	1.1
Δέκτης νερού/ατμού [USD/MWth]	7100
Δέκτης νερού/ατμού [USD/MWthh]	0.42

Πίνακας 7.3. Οικονομικά μεγέθη διατάξεων ηλιακού ατμοστροβίλου

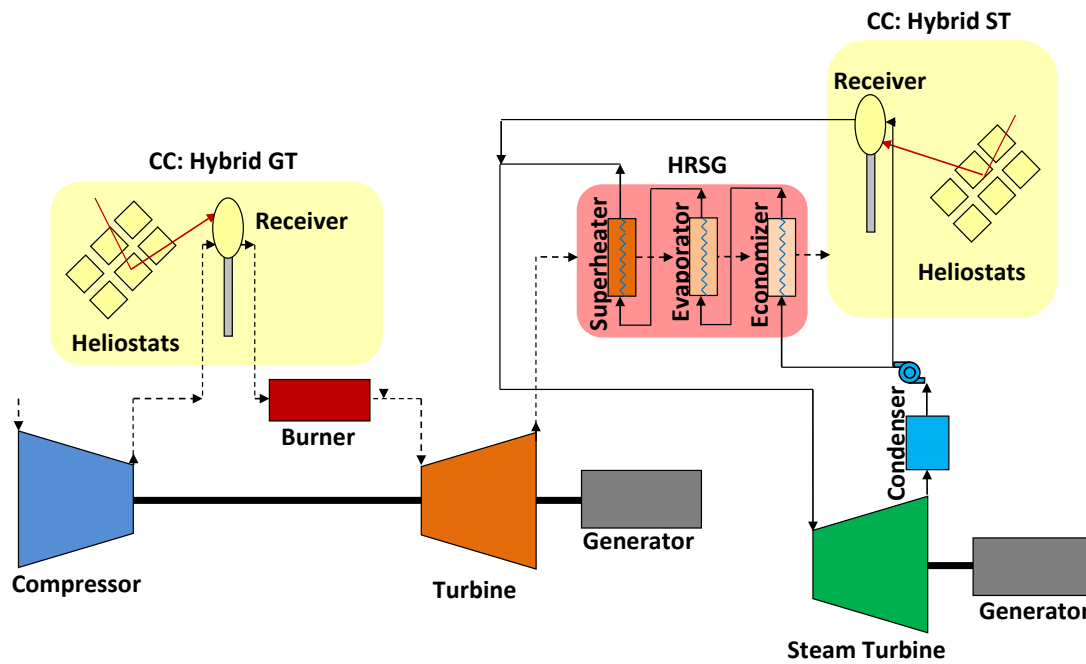
Οι διατάξεις από άποψη οικονομικών επιδόσεων είναι ουσιαστικά ισοδύναμες, με οριακά αποδοτικότερη αυτή του πύργου (177USD/MWh έναντι 177.5USD/MWh).

Η διάταξη δέκτη πύργου εμφανίζεται ως η αποδοτικότερη, αφού παρουσιάζει υψηλότερη παραγόμενη ισχύ, η λειτουργία της επηρεάζεται λιγότερο από την εποχή και παρουσιάζει σχεδόν τις ίδιες οικονομικές επιδόσεις με τη διάταξη παραβολικών κατόπτρων.

7.2 Υβριδικός συνδυασμένος κύκλος

Ο υβριδικός συνδυασμένος κύκλος βασίζεται στον ίδιο τρόπο λειτουργίας με το συμβατικό, με τη διαφορά ότι προσφέρεται και ηλιακή θερμότητα. Η ηλιακή θερμότητα μπορεί να προσφερθεί είτε στον κύκλο του αεριοστροβίλου είτε στον κύκλο του ατμοστροβίλου. Στην πρώτη περίπτωση, η ηλιακή θερμότητα χρησιμοποιείται για να αντικαταστήσει εν μέρει ή εν όλω τη θερμότητα που δίδεται στον αεριοστροβίλο από την καύση του καυσίμου. Στη δεύτερη περίπτωση, η ηλιακή θερμότητα προσφέρεται στον κύκλο του νερού/ατμού με σκοπό την αύξηση του παραγόμενου ατμού και συνεπώς της παραγόμενης ισχύος. Σκοπός της παρούσας ανάλυσης είναι η μελέτη της λειτουργίας των δύο τρόπων υβριδοποίησης του συνδυασμένου κύκλου, ο υπολογισμός των επιδόσεών τους και η σύγκρισή τους ώστε να βρεθεί η ελκυστικότερη.

Τα δύο είδη διατάξεων, συνδυασμένος κύκλος με υβριδικό αεριοστροβίλο (CC_HybGT) και συνδυασμένος κύκλος με υβριδικό ατμοστροβίλο (CC_HybST), παρουσιάζει το Σχήμα 7.9.



Σχήμα 7.9. Διατάξεις υβριδικών συνδυασμένων κύκλων

Στην περίπτωση του συνδυασμένου κύκλου με υβριδικό αεριοστρόβιλο (CC_HybGT), οι τροποποιήσεις στη διάταξη αφορούν μόνο τον αεριοστρόβιλο αφήνοντας ανέπαφο τον κύκλο νερού/ατμού.

Το ηλιακό κομμάτι της ατμοπαραγωγής στην περίπτωση του συνδυασμένου κύκλου με υβριδικό ατμοστρόβιλο (CC_HybST), επιλέγεται να είναι δέκτης πύργου και αυτό διότι: α) φάνηκε σε προηγούμενη παράγραφο η εποχιακά ομοιόμορφη συμπεριφορά του και η καλύτερη απόδοσή του, β) έχει τη δυνατότητα παραγωγής ατμού υψηλής θερμοκρασίας και γ) αποτελεί την πιο σύγχρονη και επικρατούσα τεχνολογία (Spelling & Laumert, 2014). Στην περίπτωση αυτή, ο αεριοστρόβιλος δεν υπόκειται σε καμία τροποποίηση. Όμως, λόγω της αύξησης του παραγόμενου ατμού απαιτείται η επανασχεδίαση των απαραίτητων συνιστωσών του κύκλου νερού/ατμού ούτως ώστε να δύνανται να διαχειριστούν την αυξημένη παροχή. Με σκοπό την ελαχιστοποίηση των τροποποιήσεων αλλά και τους περιορισμούς που τίθενται σχετικά με τη λειτουργία του ΛΑΘ όπως διαπιστώθηκαν στη περίπτωση της έγχυσης ηλιακού ατμού σε αεριοστρόβιλο (παράγραφος 6.2.2), επιλέγεται η ηλιακή ατμοπαραγωγή να τοποθετηθεί παράλληλα με τον υπάρχοντα ΛΑΘ. Έτσι, απαιτείται η τροποποίηση του ατμοστροβίλου, του συμπυκνωτή και της αντλίας για να διαχειριστούν την αυξημένη παροχή, αλλά και της γεννήτριας λόγω της αυξημένης παραγωγής ισχύος. Σε αυτή τη διάταξη τα θερμά καυσαέρια του αεριοστροβίλου αξιοποιούνται από τον υπάρχοντα ΛΑΘ ο οποίος και παράγει την ποσότητα ατμού που δύναται. Ο παραγόμενος ατμός από το ΛΑΘ αναμειγνύεται με τον ατμό που παράγεται από το ηλιακό κομμάτι. Εν συνεχεία, η συνολική παροχή ατμού εκτονώνεται στον ατμοστρόβιλο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η λειτουργία του συμπυκνωτή είναι τέτοια ώστε να

εξέρχεται από αυτόν κορεσμένο νερό. Μέσω της τροφοδοτικής αντλίας, επιτυγχάνεται η απαιτούμενη πίεση στο ρεύμα του νερού, το οποίο στη συνέχεια διακλαδίζεται για να τροφοδοτήσει τον υπάρχοντα/συμβατικό ΛΑΘ και το ηλιακό κομμάτι.

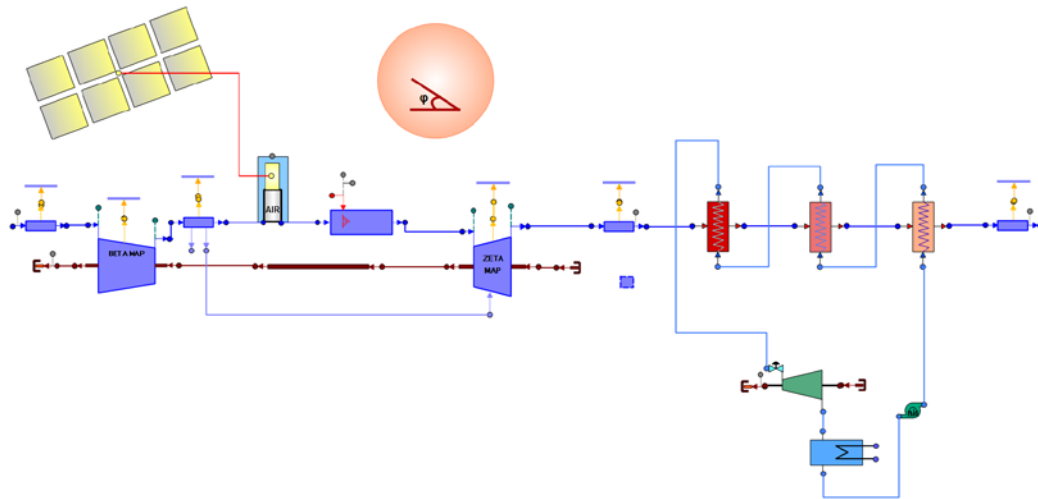
Και για τις δύο διατάξεις, η παροχή του νερού στον ΛΑΘ σε κάθε σημείο λειτουργίας, προκύπτει από την απαίτηση της παραγωγής κορεσμένου ατμού από τον ατμοποιητή του ΛΑΘ. Στην περίπτωση του υβριδικού ατμοστροβίλου, η παροχή του νερού στο ηλιακό κομμάτι προκύπτει από την απαίτηση ο παραγόμενος ατμός να έχει την ίδια θερμοκρασία με τον παραγόμενο εκ του ΛΑΘ ατμό.

7.2.1 Παράμετροι σχεδίασης και οικονομικά στοιχεία

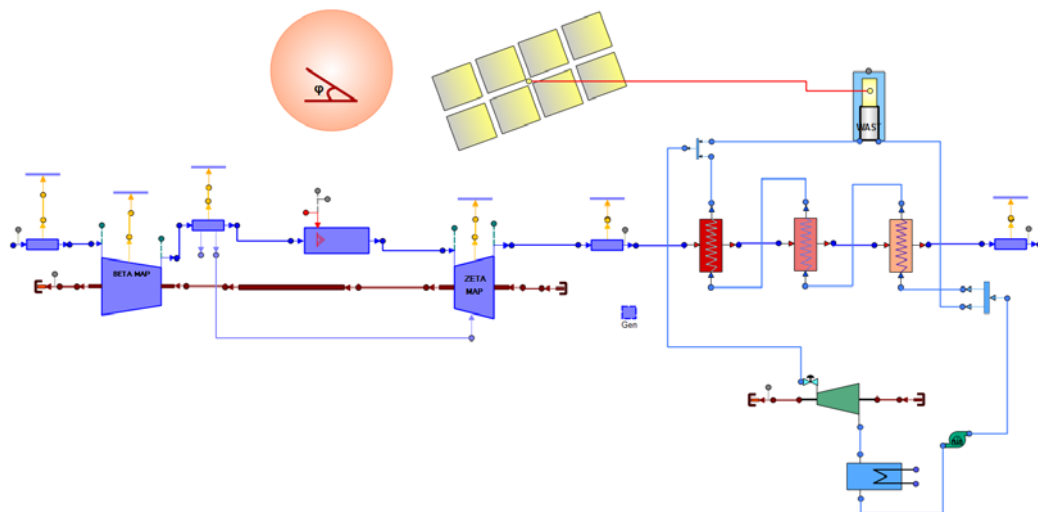
Οι υβριδικές διατάξεις θα συγκριθούν με τη συμβατική διάταξη από την οποία προήλθαν αλλά και μεταξύ τους ώστε να διαπιστωθεί η επίδραση των δύο τρόπων εισαγωγής της ηλιακής ενέργειας στις επιδόσεις αλλά και να δειχθεί η αποδοτικότερη διάταξη.

Για τον υπολογισμό των επιδόσεων των διατάξεων, απαιτείται η προσομοίωση της λειτουργίας τους με τη χρήση των κατάλληλων μοντέλων. Αρχικά, χρησιμοποιούνται οι κατάλληλες συνιστώσες (από τη βιβλιοθήκη TURBO) για τη συγκρότηση του μοντέλου του αεριοστροβίλου και καθορίζονται οι παράμετροι σχεδίασής τους. Εν συνεχεία, προστίθενται οι συνιστώσες του κύκλου νερού/ατμού (από τη βιβλιοθήκη WAST) με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά σχεδίασης. Με αυτόν τον τρόπο, έχει συγκροτηθεί το μοντέλο προσομοίωσης της λειτουργίας του συμβατικού συνδυασμένου κύκλου. Εν συνεχεία, αναλόγως της υβριδικής διάταξης, προστίθενται οι απαιτούμενες ηλιακές συνιστώσες (από τη βιβλιοθήκη SOLAR) ώστε να συγκροτηθούν και τα μοντέλα προσομοίωσης της λειτουργίας των υβριδικών συνδυασμένων κύκλων. Σημειώνεται πως για τη διάταξη με υβριδικό ατμοστρόβιλο, επανακαθορίζεται το σημείο σχεδίασης για τις συνιστώσες του ατμοστροβίλου, του συμπυκνωτή και της αντλίας λαμβάνοντας υπ' όψιν τη μέγιστη παροχή ατμού (συμβατική και ηλιακή ατμοπαραγωγή).

Τα υλοποιηθέντα μοντέλα των δύο διατάξεων παρουσιάζει το Σχήμα 7.10 και το Σχήμα 7.11.



Σχήμα 7.10. Σχηματική απεικόνιση στο PROOSIS του μοντέλου συνδυασμένου κύκλου με υβριδικό αεριοστρόβιλο (CC_HybGT)



Σχήμα 7.11. Σχηματική απεικόνιση στο PROOSIS του μοντέλου συνδυασμένου κύκλου με υβριδικό ατμοστρόβιλο (CC_HybST)

Τα χαρακτηριστικά του σημείου σχεδίασης επιλέγονται με βάση τα όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 5.2, λαμβάνοντας υπ' όψιν τους κατασκευαστικούς περιορισμούς του δέκτη. Συνεπώς επιλέγεται λόγος πίεσης 10 και TIT 1000°C. Η ονομαστική ισχύς του αεριοστροβίλου (5MW) επιλέγεται με βάση τις δυνατότητες που έχουν δειχθεί σε πειραματικές διατάξεις υβριδικού αεριοστροβίλου (EU Commission, 2005; Quero et al., 2014) και το γεγονός ότι εγκαταστάσεις της τάξης των μερικών MW είναι προτιμητέες ως εγκαταστάσεις εισαγωγής της τεχνολογίας (Schwarzbözl et al., 2006). Αν και είναι γνωστό πως οι συνδυασμένοι κύκλοι μικρής ισχύος είναι ασύμφοροι λόγω οικονομικών κλίμακας, εντούτοις οι υβριδικοί συνδυασμένοι κύκλοι, ακόμα και σε μικρή ισχύ μπορεί να είναι αποδοτικοί λόγω της πρόσθετης ηλιακής θερμότητας.

Ο Λέβητας Ανάκτησης Θερμότητας σχεδιάζεται ούτως ώστε να παράγει στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας ατμό θερμοκρασίας 750K και πίεσης 60bar με $\Delta T_{pinch} = 17\text{deg}$ και $\Delta T_{approach} = 25\text{deg}$ (Ganapathy, 1996; Siemens, 2009).

Η πτώση πίεσης του ρεύματος καυσαερίων και του ρεύματος νερού/ατμού επιλέγεται 3% και 5% αντίστοιχα.

Ο ατμοστρόβιλος στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας παράγει 2.25MW, έχει ισεντροπικό βαθμό απόδοσης 88% και εκτονώνει σε πίεση 0.08bar η οποία και θεωρείται σταθερή σε κάθε σημείο λειτουργίας.

Η κάθε υβριδική διάταξη θεωρείται πως είναι τοποθετημένη στο έδαφος και συνδέεται με το δέκτη μέσω σωλήνωσης η οποία και επιφέρει απώλειες πίεσης συμπεριλαμβανομένων αυτών του δέκτη, 5%. Τα κάτοπτρα έχουν εμβαδό 64m² έκαστο. Το διαθέσιμο ποσό ηλιακής θερμότητας είναι ανάλογο του αριθμού κατόπτρων. Για να βρεθεί η διαφοροποίηση της συμπεριφοράς των διατάξεων αναλόγως του διαθέσιμου ποσού ηλιακής θερμότητας, επιλέγονται ενδεικτικά δύο μεγέθη πεδίου κατόπτρων. Ο αριθμός των κατόπτρων (570 και 370) επιλέγεται έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή TIT από τον δέκτη της διάταξης με τον υβριδικό αεριοστρόβιλο για ένταση ακτινοβολίας 600W/m² και 900W/m² αντίστοιχα.

Τα αναφερθέντα χαρακτηριστικά σχεδίασης συνοψίζει ο Πίνακας 7.4.

Κάτοπτρα	
Ανακλαστικότητα	0.97
Συντελεστής εστίασης	1
Σκίαση	0.97
Εμβαδόν [m ²]	64
Πλήθος	370, 570
Δέκτης	
Απορροφητικότητα	0.95
Οπτική απόδοση	0.96
Εκπομπή	0.05
Πτώση πίεσης	0.05
Αεριοστρόβιλος	
Λόγος πίεσης	10
TIT [C]	1000
Πολυτροπικός β.α. συμπίεστή	0.88
Πολυτροπικός β.α. στρόβιλου	0.90
Ισχύς [MW]	5
LHV [MJ/kg]	48.12
Εκπομπές CO ₂ [kgCO ₂ /MJfuel]	0.053
ΛΑΘ	
ΔT _{pinch} [C]	17
ΔT _{approach} [C]	25
Πτώση πίεσης καυσαερίων	0.03
Πτώση πίεσης νερού/ατμού	0.05
Ατμοστρόβιλος	
Θερμοκρασία ατμού [K]	750
Πίεση ατμού [bar]	60
Πίεση συμπυκνωτή [bar]	0.08
Ισεντροπικός β.α.	0.88
Ισχύς [MW]	2.25

Πίνακας 7.4. Χαρακτηριστικά σημείου σχεδίασης αεριοστρόβιλου, ατμοστρόβιλου και ηλιακού κομματιού

Για τον υπολογισμό των οικονομικών επιδόσεων των διατάξεων, τα κόστη κτήσης και λειτουργίας του αεριοστροβίλου, των συνιστωσών του κύκλου νερού/ατμού και του ηλιακού μέρους (δέκτης και κάτοπτρα) λαμβάνονται από δημοσιευμένες εργασίες και αναφορές (Pitz-Paal et al., 2005; Schwarzbözl et al., 2006) με τη μορφή που παρατίθενται από τους Spelling & Laumert (Spelling & Laumert, 2014). Όπως αναφέρθηκε, στη περίπτωση της διάταξης με υβριδικό ατμοστρόβιλο, όλες οι συνιστώσες του κύκλου νερού/ατμού επανασχεδιάζονται με εξαίρεση τον ΛΑΘ. Έτσι, από το κόστος κτήσης των συνιστωσών νερού/ατμού που υπολογίζεται με βάση τους Spelling & Laumert (Spelling & Laumert, 2014), το κόστος κτήσης του ΛΑΘ αντικαθίσταται (αφού δεν έχει τροποποιηθεί) με αυτό που προκύπτει για τον συμβατικό συνδυασμένο κύκλο με βάση τις τιμές στην εργασία των Gewald et al. (Gewald, Siokos, Karellas, & Spliethoff, 2012). Η τιμή του κόστους του καυσίμου λαμβάνεται υπ' όψιν θεωρώντας ένα εύρος τιμών. Τα χρησιμοποιούμενα οικονομικά μεγέθη παρουσιάζει συγκεντρωτικά ο Πίνακας 7.5.

Κόστος Κτήσης	
Αεριοστρόβιλος [USD/MWe]	589000
Συνιστώσες κύκλου Rankine [USD/MWe]	1478000
ΛΑΘ [USD/MWe]	445000
Κάτοπτρα [USD/m ²]	200
Δέκτης αέρα [USD/MWth]	231000
Δέκτης νερού/ατμού [USD/MWth]	144000
Ετήσιο Κόστος Λειτουργίας	
Αεριοστρόβιλος [USD/MWe]	27700
Αεριοστρόβιλος [USD/MWhe]	0.93
Συνιστώσες κύκλου Rankine [USD/MWe]	28300
Συνιστώσες κύκλου Rankine [USD/MWhe]	0.96
Κάτοπτρα [USD/m ²]	1.1
Δέκτης αέρα [USD/MWth]	11400
Δέκτης αέρα [USD/MWthh]	0.68
Δέκτης νερού/ατμού [USD/MWth]	7100
Δέκτης νερού/ατμού [USD/MWthh]	0.42
Καύσιμο [USD/MBTU]	0 - 22
Εκπομπές CO ₂ [USD/t]	5

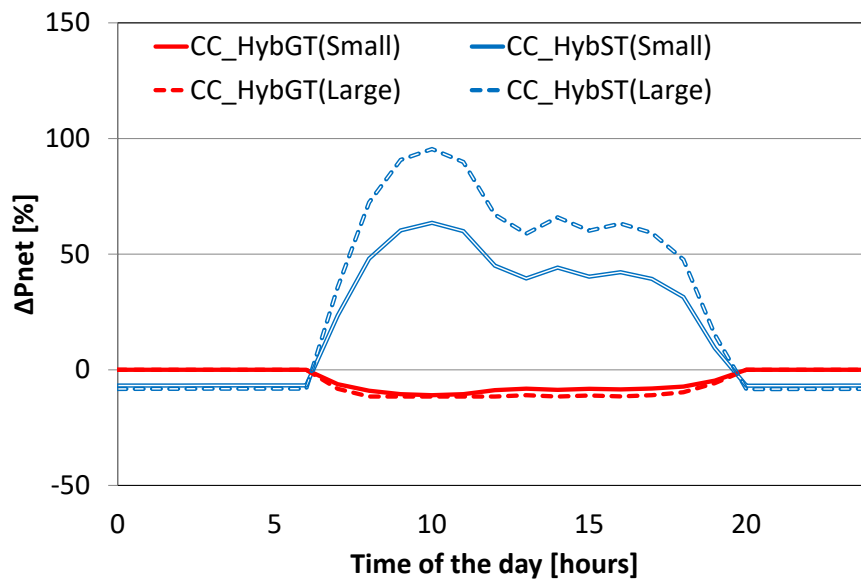
Πίνακας 7.5. Οικονομικά μεγέθη διατάξεων συνδυασμένου κύκλου

7.2.2 Επιδόσεις - Σύγκριση

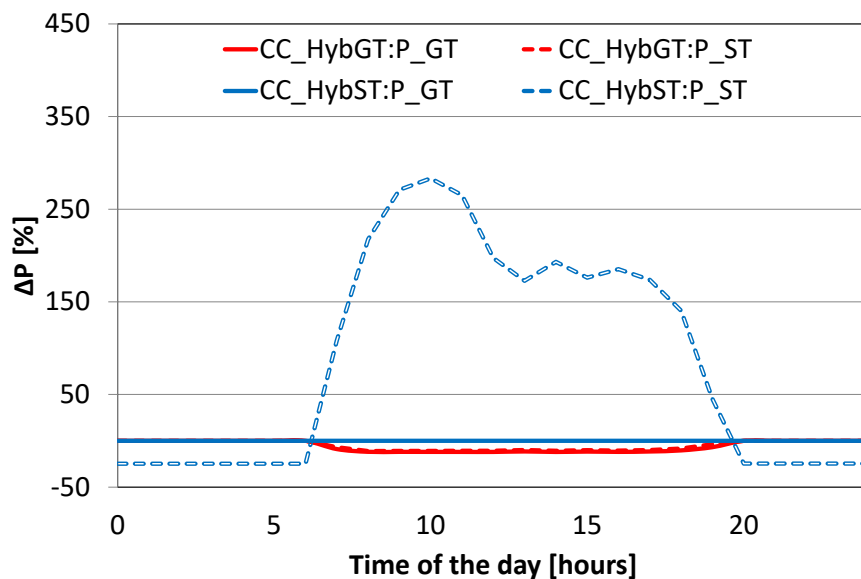
Χρησιμοποιώντας τα μοντέλα είναι πλέον δυνατή η προσομοίωση της λειτουργίας των δύο υβριδικών αλλά και του συμβατικού συνδυασμένου κύκλου ώστε να πραγματοποιηθεί η σύγκρισή τους. Το σενάριο λειτουργίας που επιλέγεται είναι αυτό της σταθερής TIT.

Οι επιδόσεις των δύο υβριδικών συνδυασμένων κύκλων παρουσιάζονται ως ποσοστιαία διαφορά από αυτές του συμβατικού συνδυασμένου κύκλου ενδεικτικά για μια θερινή ημέρα για μεγάλο (Large) και μικρό (Small) πεδίο κατόπτρων.

Το Σχήμα 7.12 απεικονίζει τη μεταβολή της καθαρής παραγόμενης ισχύος, για τα δύο πεδία κατόπτρων ενώ στο Σχήμα 7.13 η διαφορά αυτή αναλύεται για την παραγόμενη ισχύ του αεριοστροβίλου και του ατμοστροβίλου.



Σχήμα 7.12. Διαφορά της καθαρής παραγόμενης ισχύος μεταξύ των υβριδικών και του συμβατικού συνδυασμένου κύκλου για τα δύο πεδία κατόπτρων



Σχήμα 7.13. Διαφορά της παραγόμενης ισχύος αεριοστροβίλου και ατμοστροβίλου μεταξύ των υβριδικών και του συμβατικού συνδυασμένου κύκλου για μεγάλο πεδίο κατόπτρων

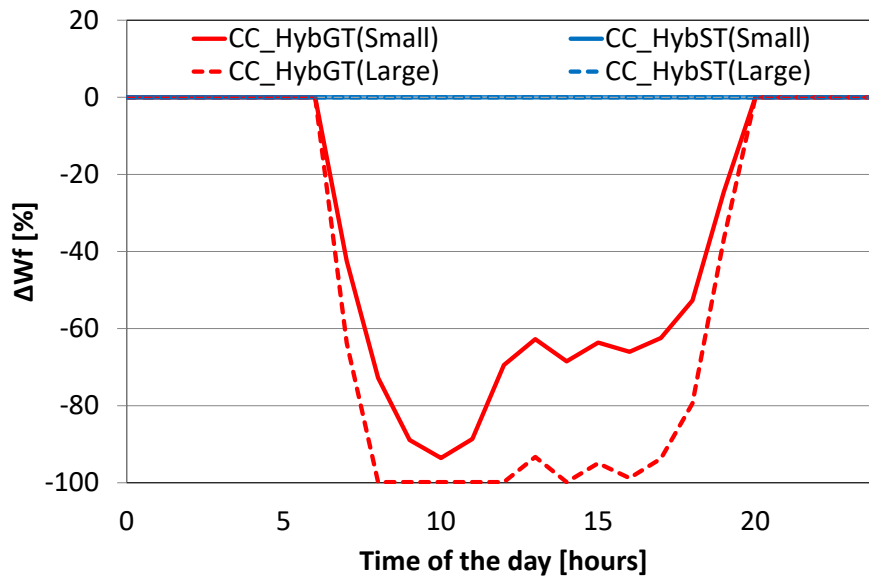
Όπως παρατηρείται, η παραγόμενη καθαρή ισχύς συνδυασμένου κύκλου με υβριδικό αεριοστροβίλο (CC_HybGT) (Σχήμα 7.12) είναι η ίδια με αυτή του συμβατικού όταν δεν υπάρχει διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια. Αυτό συμβαίνει διότι σε μια τέτοια περίπτωση, ο δέκτης παρακάμπτεται και συνεπώς η διάταξη λειτουργεί ως συμβατική. Κατά τις ώρες ηλιοφάνειας, η παραγόμενη ισχύς του

αεριοστροβίλου μειώνεται εξαιτίας της αλλαγής της σύστασης του εργαζόμενου μέσου και των απωλειών πίεσης του δέκτη (Σχήμα 7.13). Η αλλαγή της σύστασης του εργαζόμενου μέσου, εκτός του αεριοστροβίλου, επηρεάζει και τον ατμοστρόβιλο λόγω της μείωσης της παραγόμενης ποσότητας ατμού εξαιτίας της χαμηλότερης ενθαλπίας των καυσαερίων (Σχήμα 7.13).

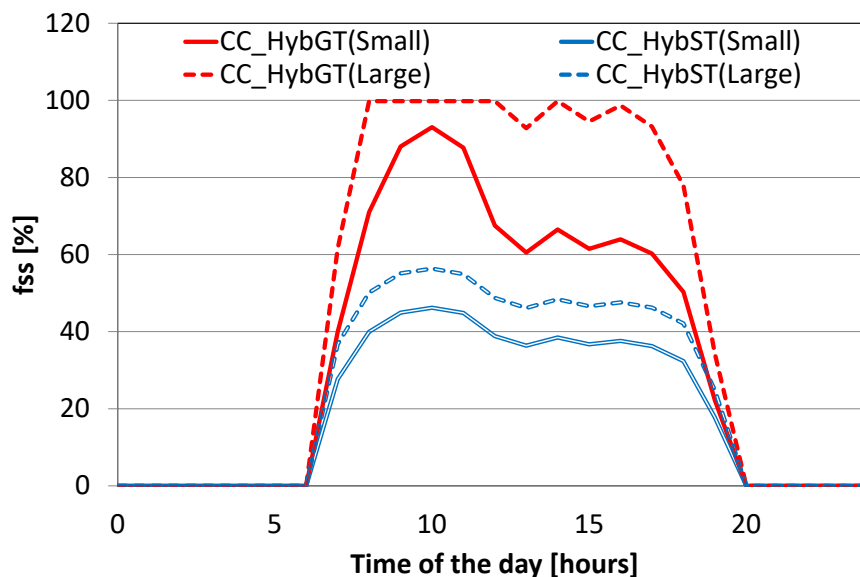
Για τη διάταξη του συνδυασμένου κύκλου με υβριδικό ατμοστρόβιλο (CC_HybST), παρατηρείται πως τις ώρες ηλιοφάνειας, αυξάνεται η καθαρή παραγόμενη ισχύς σε σχέση με τη συμβατική διάταξη, ενώ μειώνεται τις νυχτερινές ώρες (Σχήμα 7.12). Αυτό συμβαίνει γιατί ο ατμοστρόβιλος παράγει περισσότερη ισχύ αφού πλέον προστίθεται στο συμβατικά παραγόμενο ατμό και αυτός από την ηλιακή ατμοπαραγωγή (Σχήμα 7.13). Κατά τις ώρες που δεν υπάρχει διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια, η παραγωγή του υβριδικού ατμοστροβίλου είναι μικρότερη σε σύγκριση με αυτή του συμβατικού. Αυτό συμβαίνει διότι αυτές τις ώρες ο ατμοστρόβιλος λειτουργεί μακριά από το σημείο σχεδίασής του και συνεπώς έχει χαμηλότερη απόδοση. Για παράδειγμα, στην περίπτωση του μικρού πεδίου κατόπτρων, η παροχή του ατμοστροβίλου μειώνεται κατά 68%, ενώ ο ισημερινός βαθμός απόδοσής του κατά 8%. Σε αυτή τη διάταξη, επίδραση στην καθαρή παραγόμενη ισχύ έχει μόνο η μεταβολή της παραγωγής του ατμοστροβίλου, αφού η παραγόμενη ισχύς του αεριοστροβίλου είναι ίδια με της συμβατικής διάταξης για οποιαδήποτε ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, αφού η δοθείσα ηλιακή ενέργεια επηρεάζει μόνο την παραγόμενη ποσότητα ατμού (Σχήμα 7.13).

Λόγω της μη επίδρασης της λειτουργίας του αεριοστροβίλου στη διάταξη του συνδυασμένου κύκλου με υβριδικό ατμοστρόβιλο (CC_HybST), αμετάβλητη παραμένει και η κατανάλωση καυσίμου όπως φαίνεται από το Σχήμα 7.14 που απεικονίζει τη μεταβολή της κατανάλωσης καυσίμου. Αντίθετα, στη διάταξη του συνδυασμένου κύκλου με υβριδικό αεριοστρόβιλο (CC_HybGT), η παροχή καυσίμου μειώνεται λόγω της ηλιακής προθέρμανσης του αέρα όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 5.2.

Από το Σχήμα 7.15 που απεικονίζει το ποσοστό συνεισφοράς της ηλιακής ενέργειας για τις δύο υβριδικές διατάξεις, παρατηρείται πως το ποσοστό συνεισφοράς της ηλιακής ενέργειας λαμβάνει μεγαλύτερη τιμή στην περίπτωση της διάταξης υβριδικού αεριοστροβίλου.



Σχήμα 7.14. Διαφορά της κατανάλωσης καυσίμου μεταξύ των υβριδικών και του συμβατικού συνδυασμένου κύκλου για τα δύο πεδία κατόπτρων

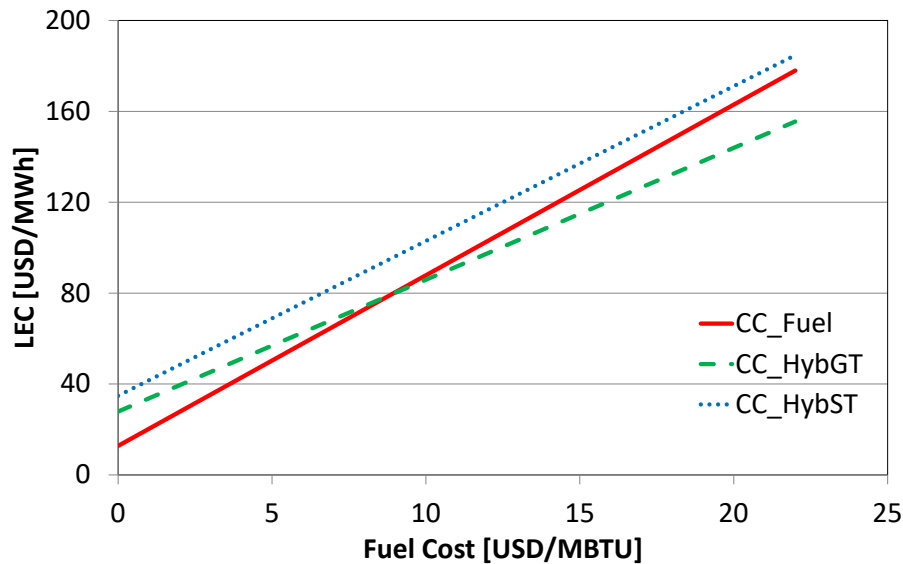


Σχήμα 7.15. Ποσοστό συνεισφοράς της ηλιακής ενέργειας των υβριδικών συνδυασμένων κύκλων για τα δύο πεδία κατόπτρων

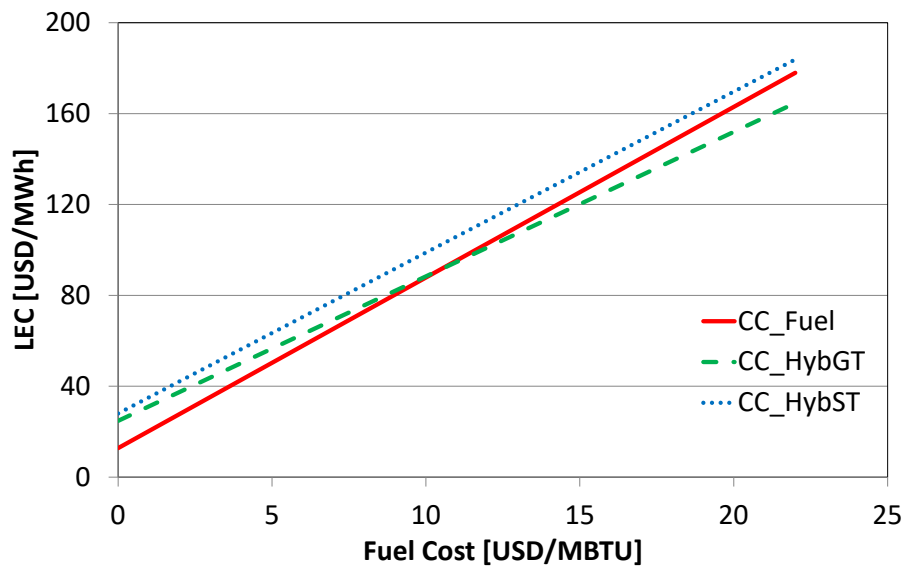
Τα αναφερθέντα συμπεράσματα που προέκυψαν από τα ανωτέρω σχήματα ισχύουν ανεξαρτήτως του μεγέθους του πεδίου κατόπτρων και γίνονται εντονότερα όσο αυξάνει ο αριθμός των κατόπτρων.

Τέλος, οι οικονομικές επιδόσεις των τριών διατάξεων, με τη μορφή του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας (LEC) για διάφορες τιμές του κόστους καυσίμου, παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.16 και στο Σχήμα 7.17 για μεγάλο και μικρό πεδίο κατόπτρων αντίστοιχα. Παρατηρείται πως η διάταξη του υβριδικού ατμοστροβίλου παρουσιάζει σταθερά υψηλότερο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας τόσο από τη συμβατική όσο και από αυτή με υβριδικό αεριοστροβίλο ανεξαρτήτως του μεγέθους του πεδίου κατόπτρων και της τιμής του κόστους

καυσίμου. Επιπλέον, μεγαλύτερο πεδίο κατόπτρων επιδρά θετικά στη διάταξη με υβριδικό αεριοστρόβιλο, ενώ το αντίθετο ισχύει για τη διάταξη με υβριδικό ατμοστρόβιλο. Τέλος, παρατηρείται πως η συμβατική διάταξη και αυτή με υβριδικό αεριοστρόβιλο παρουσιάζουν ίδια τιμή κόστους ηλεκτρικής ενέργειας για τιμή κόστους καυσίμου περίπου στα 10USD/MBTU.



Σχήμα 7.16. Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας για τον συμβατικό και τους υβριδικούς συνδυασμένους κύκλους και για μεγάλο πεδίο κατόπτρων



Σχήμα 7.17. Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας για τον συμβατικό και τους υβριδικούς συνδυασμένους κύκλους και για μικρό πεδίο κατόπτρων

Ο Πίνακας 7.6 παρουσιάζει τη διαφορά μεταξύ των ετήσιων επιδόσεων των υβριδικών και του συμβατικού συνδυασμένου κύκλου για την παραγόμενη ισχύ (ΔE) (καθάρη – Net, του αεριοστρόβιλου – GT και του ατμοστρόβιλου – ST), για την κατανάλωση καυσίμου (ΔF), το θερμικό βαθμό απόδοσης καυσίμου

(Δ_{eff_f}) και το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Δ_{LEC}) για τυπική τιμή κόστους καυσίμου 10USD/MBTU. Επίσης, παρουσιάζεται και το ετήσιο ποσοστό συνεισφοράς της ηλιακής ενέργειας (f_{ss}) για του υβριδικούς κύκλους. Τα ανωτέρω ετήσια αποτελέσματα παρουσιάζονται και για τα δύο μεγέθη του πεδίου κατόπτρων.

[%]	570 Κάτοπτρα		370 Κάτοπτρα	
	CC_HybGT	CC_HybST	CC_HybGT	CC_HybST
ΔE_{Net}	-3.42	10.20	-2.70	6.02
ΔE_{GT}	-3.70	0.00	-3.08	0.00
ΔE_{ST}	-2.82	31.85	-1.89	18.81
ΔF	-25.37	0.00	-17.60	0.00
Δ_{eff_f}	29.41	10.20	18.09	6.02
f_{ss}	23.64	19.24	16.14	13.69
Δ_{LEC}	-2.22	17.20	0.57	12.51

Πίνακας 7.6. Διαφορά ετήσιων επιδόσεων μεταξύ υβριδικών και συμβατικού συνδυασμένου κύκλου

Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από τη μελέτη της ημερήσιας λειτουργίας μπορούν να αναχθούν και σε ετήσια βάση. Η υβριδοποίηση του αεριοστροβίλου οδηγεί σε μείωση του καταναλισκόμενου καυσίμου και σε μείωση της παραγόμενης ενέργειας τόσο από τον αεριοστροβίλο, όσο και από τον ατμοστροβίλο. Αντίθετα, η υβριδοποίηση του ατμοστροβίλου οδηγεί σε αύξηση της παραγόμενης ενέργειας του ατμοστροβίλου με αμετάβλητη την κατανάλωση καυσίμου και την παραγόμενη ενέργεια του αεριοστροβίλου. Ακόμα, η υβριδοποίηση του αεριοστροβίλου παρουσιάζει υψηλότερο ποσοστό συνεισφοράς της ηλιακής ενέργειας και μικρότερο κόστος ηλεκτροπαραγωγής.

7.3 Σύνοψη - Συμπεράσματα

Στο Κεφάλαιο αυτό μελετήθηκε η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας από διατάξεις ατμοστροβίλου και συνδυασμένου κύκλου.

Εξετάστηκαν τρεις τεχνολογίες ατμοπαραγωγής στη διάταξη ηλιακού ατμοστροβίλου: 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 αυτήν της σταθερούς παροχής, όσον αφορά την παραγόμενη ισχύ. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των ετήσιων επιδόσεων των διατάξεων. Διαπιστώθηκε ότι η διάταξη του πύργου υπερτερεί έναντι των άλλων δύο όσον αφορά την ετήσια παραγόμενη ενέργεια (~3.7%).

Επίσης, 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.

Κεφάλαιο 8: Βλάβες Ηλιοθερμικών Διατάξεων

Στο παρόν Κεφάλαιο μελετάται η επίδραση των συνηθέστερων βλαβών στις επιδόσεις μιας ηλιοθερμικής διάταξης. Η ποσοτικοποίηση της επίδρασης αυτής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον βέλτιστο προγραμματισμό εργασιών συντήρησης αλλά και για διαγνωστικούς σκοπούς.

8.1 Βλάβες και λειτουργία ηλιοθερμικών διατάξεων

Σε μια διάταξη, η ύπαρξη βλάβης σε κάποια συνιστώσα ή η λειτουργία της με μειωμένες επιδόσεις, επηρεάζει τη λειτουργία και τις επιδόσεις ολόκληρης της διάταξης με συνέπεια να μειώνεται η παραγωγή και τα έσοδα. Για την αποκατάσταση της βλάβης ή την επαναφορά των επιδόσεων της συνιστώσας απαιτούνται οι κατάλληλες εργασίες συντήρησης, που όμως επιφέρουν κάποιο κόστος που συνδέεται με την αγορά ανταλλακτικών, τη διακοπή λειτουργίας της διάταξης, τη χρήση μηχανημάτων κτλ. Συνεπώς, οι εργασίες συντήρησης πρέπει να προγραμματίζονται έτσι ώστε να ομαδοποιούνται χρονικά, να αντιμετωπίζονται οι βλάβες σε πρώιμο στάδιο ώστε να μην επιφέρουν καταστροφή της συνιστώσας και να ελαχιστοποιείται η απώλεια εσόδων. Για αυτό απαιτείται η δυνατότητα υπολογισμού των επιδόσεων με ύπαρξη βλάβης και η συνεκτίμηση των οικονομικών παραμέτρων αποκατάστασης ούτως ώστε να προκύψει ο αποδοτικότερος προγραμματισμός εργασιών συντήρησης.

Ειδικά στις ηλιοθερμικές διατάξεις που έχουν μεγάλο πλήθος συνιστωσών και αυτές εκτίθενται σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες, οι συνολικές επιδόσεις μπορούν να επηρεαστούν έντονα από βλάβη ή μείωση των επιδόσεων. Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 1.5.4, η ανάλυση της επίδρασης βλαβών στις επιδόσεις των υβριδικών διατάξεων και η δυνατότητα διάγνωσής τους δεν έχει μελετηθεί.

Ο τρόπος μοντελοποίησης των συνιστωσών, καθώς και οι δυνατότητες του χρησιμοποιηθέντος λογισμικού σε αυτήν την εργασία δίνουν τη δυνατότητα προσδιορισμού της επίδρασης των βλαβών των συνιστωσών στις επιδόσεις. Μια τέτοια πληροφορία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εύρεση του βέλτιστου χρόνου των εργασιών συντήρησης (πχ πλύσιμο κατόπτρων) λαμβάνοντας υπ' όψιν και άλλες παραμέτρους που ισχύουν τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο όπως το κόστος πλυσίματος, το κόστος των ανταλλακτικών, το κόστος καυσίμου, το χρονικό προφίλ της τιμής πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας κτλ.

Επιπλέον, ένα τέτοιο μοντέλο προσομοίωσης της λειτουργίας μιας ηλιοθερμικής διάταξης δύναται να χρησιμοποιηθεί και για διαγνωστικούς σκοπούς. Στην περίπτωση ύπαρξης βλάβης, οι τιμές παραμέτρων λειτουργίας που λαμβάνονται από τη διάταξη θα διαφέρουν από τις αντίστοιχες που υπολογίζει το μοντέλο. Συνεπώς, μπορούν να προσδιοριστούν οι τιμές συγκεκριμένων παραμέτρων υγείας (πχ συντελεστής μεταβολής ανακλαστικότητας) των συνιστωσών ούτως ώστε οι υπολογιζόμενες τιμές των παραμέτρων λειτουργίας να συμπίπτουν με τις μετρήσεις. Έτσι, είναι δυνατός ο προσδιορισμός της συνιστώσας που έχει βλάβη καθώς και το μέγεθος της βλάβης αυτής.

Με σκοπό την ποσοτικοποίηση της επίδρασης των συνηθέστερων βλαβών των ηλιοθερμικών διατάξεων, χρησιμοποιούνται μοντέλα προσομοίωσης για την εκτίμηση της επίδρασης της βλάβης στις συνολικές επιδόσεις.

8.2 Επίδραση βλαβών στις επιδόσεις υβριδικού αεριοστρόβιλου

Η συνηθέστερη αιτία μείωσης της επίδοσης μιας ηλιοθερμικής εγκατάστασης είναι οι επικαθίσεις σκόνης στα κάτοπτρα. Οι επικαθίσεις μειώνουν την ανακλαστικότητα των κατόπτρων και συνεπώς μειώνεται η προσφερόμενη στη μηχανή ηλιακή θερμική ενέργεια. Το μέγεθος αυτής της αιτίας γίνεται πληρέστερα κατανοητό θεωρώντας ότι τέτοιες διατάξεις εγκαθίστανται σε περιοχές υψηλής ακτινοβολίας οι οποίες, ως εκ τούτου, είναι συνήθως άνυδρες.

Στην περίπτωση του υβριδικού αεριοστρόβιλου, η ύπαρξη σκόνης, εκτός των κατόπτρων επηρεάζει τη λειτουργία και του αεριοστροβίλου. Η ύπαρξη σωματιδίων στον αναρροφώμενο εκ της μηχανής αέρα, οδηγεί στην αύξηση της πτώσης πίεσης στα φίλτρα, σε επικαθίσεις στα πτερύγια του συμπιεστή (fouling) ή ακόμα και σε διάβρωσή τους.

Τέλος, σε μια τέτοια διάταξη πύργου, είναι πιθανή η δυσλειτουργία του μηχανισμού κίνησης των κατόπτρων με αποτέλεσμα κάποια από αυτά να απορυθμίζονται και να μην εστιάζουν στο δέκτη, με αποτέλεσμα τη μείωση της διαθέσιμης ηλιακής θερμότητας.

Για την εξέταση της επίδρασης των βλαβών στις επιδόσεις ορίζονται οι απαιτούμενες παράμετροι υγείας f . Η παράμετρος υγείας δείχνει πόσο έχει μεταβληθεί η τιμή ενός χαρακτηριστικού μεγέθους λειτουργίας κάποιας συνιστώσας κατά τη λειτουργία με βλάβη από την αντίστοιχη της υγιούς λειτουργίας. Τέτοια χαρακτηριστικά μεγέθη είναι η ανηγμένη παροχή και ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του συμπιεστή και η ανακλαστικότητα των κατόπτρων. Έτσι, για τη μελέτη των προαναφερθεισών βλαβών ορίζονται οι παράμετροι υγείας:

- f_1 , που αναφέρεται στην παροχή του συμπιεστή:
 $f_1 = \dot{m} / \dot{m}_{healthy}$
- f_2 , που αναφέρεται στον ισεντροπικό β.α. του συμπιεστή:
 $f_2 = \eta_{is} / \eta_{is,healthy}$
- f_{RM} , που αναφέρεται στην ανακλαστικότητα των κατόπτρων:
 $f_{RM} = \eta_{ref} / \eta_{ref,healthy}$

Οι τιμή της παραμέτρου υγείας κατά την υγιή λειτουργία έχει τιμή 1. Κατά τη λειτουργία με βλάβη, η τιμή του μεταβάλλεται και οι τιμές που μπορεί να πάρει εξαρτώνται από το μέγεθος της βλάβης.

Κατά τη λειτουργία όπου οι παράμετροι υγείας έχουν τιμή διαφορετική της μονάδας (δηλαδή κατά τη λειτουργία με βλάβη), οι επιδόσεις της εκάστοτε συνιστώσας μεταβάλλονται με αποτέλεσμα να μεταβάλλονται και τα θερμοδυναμικά μεγέθη του κύκλου (π.χ. πίεση και θερμοκρασία εξόδου συμπιεστή). Το μέγεθος της μεταβολής των θερμοδυναμικών μεγεθών εξαρτάται από το μέγεθος της βλάβης, δηλαδή την τιμή της παραμέτρου υγείας. Τέλος, η κάθε βλάβη αντιστοιχεί σε απόκλιση συγκεκριμένων παραμέτρων υγείας και υπάρχει συσχέτιση της τιμής της μεταβολής μεταξύ των παραμέτρων.

Η μελέτη των βλαβών παρουσιάζεται στη συνέχεια και πραγματοποιείται με τη χρήση του μοντέλου προσομοίωσης της λειτουργίας του υβριδικού αεριοστροβίλου απλής ατράκτου όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 5.2.

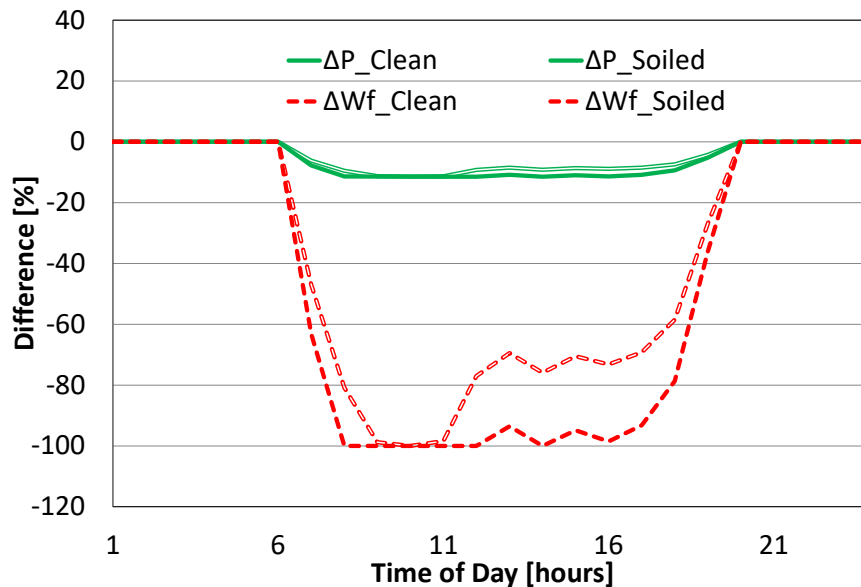
8.2.1 Επικαθίσεις στα κάτοπτρα

Αρχικά, μελετάται η επίδραση μόνο των επικαθίσεων των κατόπτρων στις επιδόσεις του υβριδικού αεριοστροβίλου. Με τη χρήση του μοντέλου, προσομοιώνεται η λειτουργία του για μια τυπική θερινή ημέρα με σταθερή ΤΙΤ για καθαρά κάτοπτρα και για κάτοπτρα που η ανακλαστικότητά τους έχει μειωθεί λόγω επικαθίσεων σκόνης κατά 26% (Wolfertstetter et al., 2012). Δηλαδή, οι παράμετροι υγείας είναι $f_1=1$, $f_2=1$ και $f_{RM}=0.74$.

Η μεταβολή της παραγόμενης ισχύος (ΔP) και της κατανάλωσης καυσίμου (ΔW_f) ανάμεσα στον υβριδικό και στο συμβατικό αεριοστροβίλο⁵ για υγιή λειτουργία και λειτουργία με βλάβη για μια καλοκαιρινή μέρα, παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.1. Όπως αναμένεται, οι επικαθίσεις των κατόπτρων επηρεάζουν τη λειτουργία της εγκατάστασης μόνο τις ώρες ύπαρξης ηλιοφάνειας αφού επηρεάζουν μόνο την προσφερόμενη ηλιακή θερμική ενέργεια στον κύκλο. Παρατηρείται αύξηση της παραγόμενης ισχύος και ταυτόχρονη αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου. Αυτό συμβαίνει διότι μειώθηκε η προσφερόμενη θερμότητα από τα κάτοπτρα, με αποτέλεσμα τη μείωση της θερμοκρασίας στην έξοδο του δέκτη. Συνεπώς, απαιτείται η καύση μεγαλύτερης ποσότητας

⁵ Η σύγκριση μέσω του συμβατικού αεριοστροβίλου πραγματοποιείται λόγω της αδυναμίας καθορισμού μεταβολής της παροχής καυσίμου, αφού στην υβριδική διάταξη μπορεί να λάβει μηδενική τιμή όταν επαρκεί η ηλιακή θερμότητα για την επίτευξη της επιθυμητής τιμής.

καυσίμου ούτως ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή ΤΙΤ. Η αύξηση της ποσότητας του καυσίμου επιφέρει αλλαγή στη σύσταση του εργαζόμενου μέσου του στροβίλου με αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη ενθαλπία και συνεπώς την αύξηση της παραγόμενης ισχύος. Τα ανωτέρω ισχύουν για όλες τις ώρες ηλιοφάνειας εκτός των ωρών 09:00-11:00, όπου και δεν παρατηρείται καμία μεταβολή. Αυτό συμβαίνει διότι αυτές τις ώρες, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι αρκετή ώστε να μπορεί να επιτευχθεί η μέγιστη τιμή θερμοκρασίας στο δέκτη παρ' όλη τη μείωση της ανακλαστικότητας των κατόπτρων.



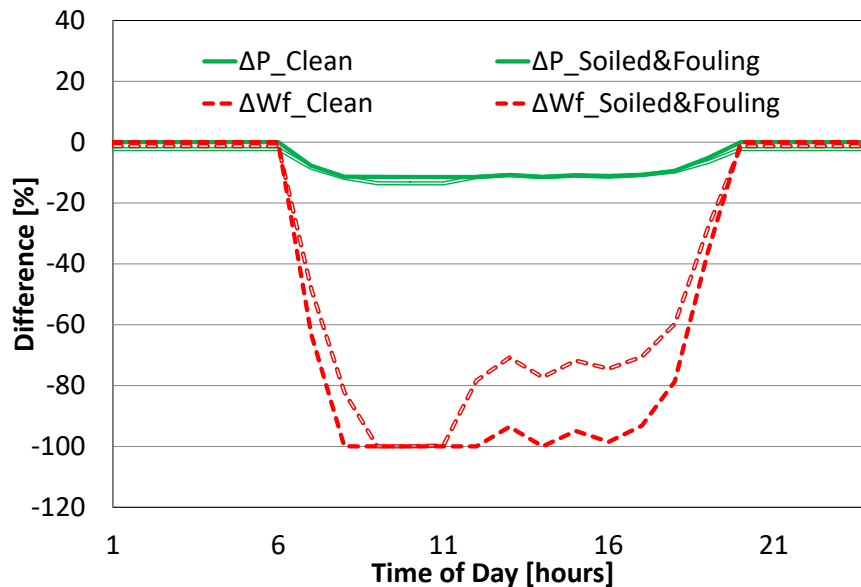
Σχήμα 8.1. Μεταβολή επιδόσεων μεταξύ υβριδικού και συμβατικού αεριοστρόβιλου για υγιή και κατάσταση λειτουργίας με βλάβη για μια καλοκαιρινή μέρα θεωρώντας μόνο επικαθίσεις κατόπτρων

8.2.2 Επικαθίσεις στα κάτοπτρα και στο συμπιεστή

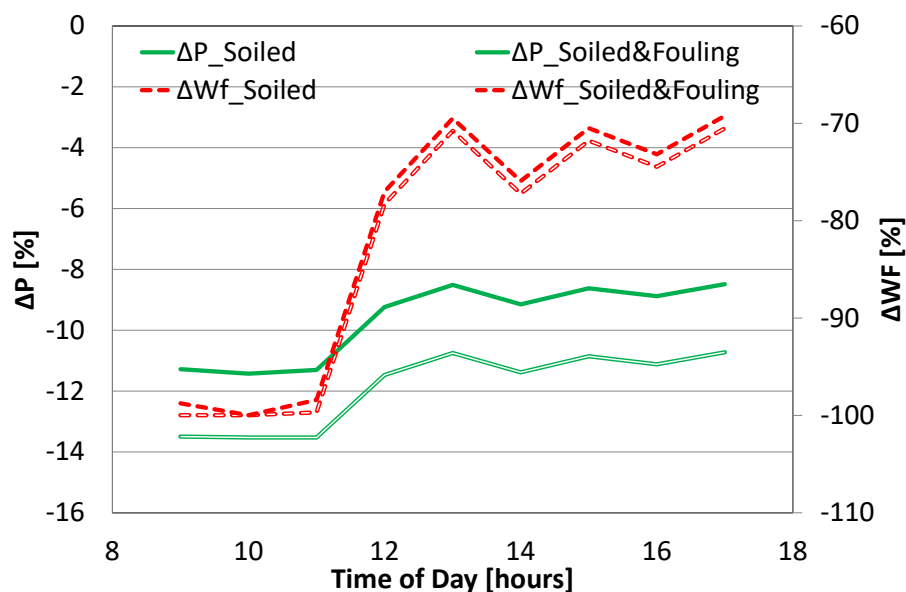
Η ύπαρξη σκόνης επηρεάζει και τη συνιστώσα του συμπιεστή αφού δημιουργεί επικαθίσεις στα πτερύγια (fouling). Οι επικαθίσεις στα πτερύγια έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση της αναρροφητικής ικανότητας και του βαθμού απόδοσης του συμπιεστή και έτσι θεωρείται ότι οι παράμετροι υγείας έχουν τιμές: $f_1=0.986$, $f_2=0.993$ και $f_{RM}=0.74$.

Η μεταβολή των επιδόσεων παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.2 και με έμφαση στις ώρες ηλιοφάνειας 09:00-17:00, στο Σχήμα 8.3. Και σε αυτή τη περίπτωση ισχύουν κατά βάση τα όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως. Η διαφορά έγκειται στο ότι η αύξηση της παραγόμενης ισχύος και κατανάλωσης καυσίμου είναι μικρότερη, όπως επίσης και στο ότι τις βραδινές ώρες η μηχανή παρουσιάζει μείωση στην παραγόμενη ισχύ και στην κατανάλωση καυσίμου. Η διαφοράς αυτές οφείλονται στο γεγονός πως οι επικαθίσεις του συμπιεστή επιφέρουν τη μείωση της αναρροφώμενης παροχής αέρα με αποτέλεσμα και τη μείωση της παραγόμενης ισχύος κατά τη συμβατική ή την υβριδική λειτουργία. Επιπλέον, η μείωση της παροχής αέρα συμβάλει στην αύξηση της επιτευχθείσας

θερμοκρασίας στο δέκτη και συνεπώς της μείωσης του καταναλισκόμενου καυσίμου. Σε αυτό επίσης συμβάλλει και το ότι για την επίτευξη της ίδιας TIT με μείωση της παροχής, απαιτείται μειωμένη κατανάλωση καυσίμου.



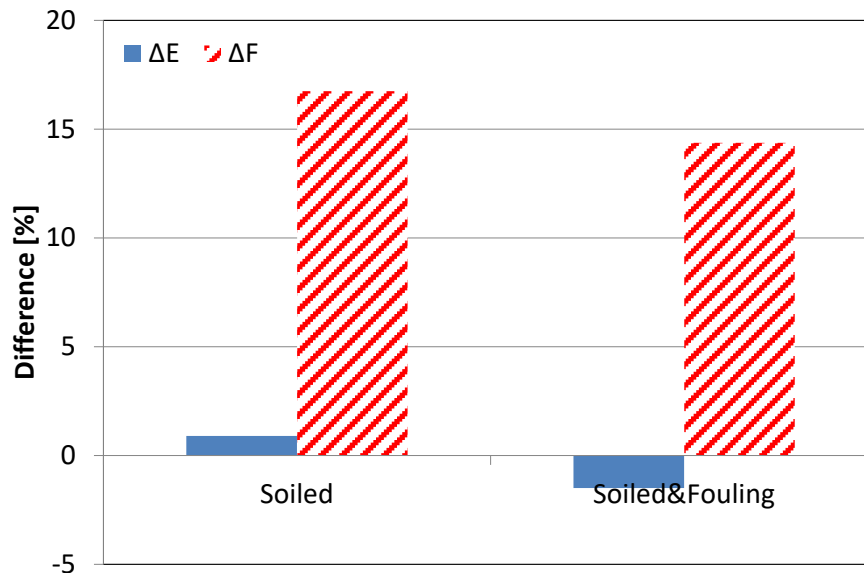
Σχήμα 8.2. Μεταβολή επιδόσεων μεταξύ υβριδικού και συμβατικού αεριοστρόβιλου για υγιή και κατάσταση λειτουργίας με βλάβη για μια καλοκαιρινή μέρα θεωρώντας επικαθίσεις κατόπτρων και συμπιεστή



Σχήμα 8.3. Μεταβολή επιδόσεων μεταξύ υβριδικού και συμβατικού αεριοστρόβιλου για υγιή και κατάσταση λειτουργίας με βλάβη για μια καλοκαιρινή μέρα θεωρώντας επικαθίσεις κατόπτρων και συμπιεστή για ώρες 09:00-17:00

Τη μεταβολή των ημερησίων συνολικών επιδόσεων του υβριδικού αεριοστρόβιλου μεταξύ υγιούς και κατάστασης λειτουργίας με βλάβη όσον αφορά στην παραγόμενη ενέργεια (ΔΕ) και στην κατανάλωση καυσίμου (ΔF)

παρουσιάζει το Σχήμα 8.4. Στην περίπτωση ύπαρξης επικαθίσεων μόνο στα κάτοπτρα, αυξάνεται η παραγόμενη ενέργεια με σημαντική αύξηση στην απαιτούμενη ποσότητα καυσίμου. Στην περίπτωση ύπαρξης επικαθίσεων και στα πτερύγια του συμπιεστή, η παραγόμενη ενέργεια μειώνεται, ενώ αυξάνεται η καταναλισκόμενη ποσότητα καυσίμου.



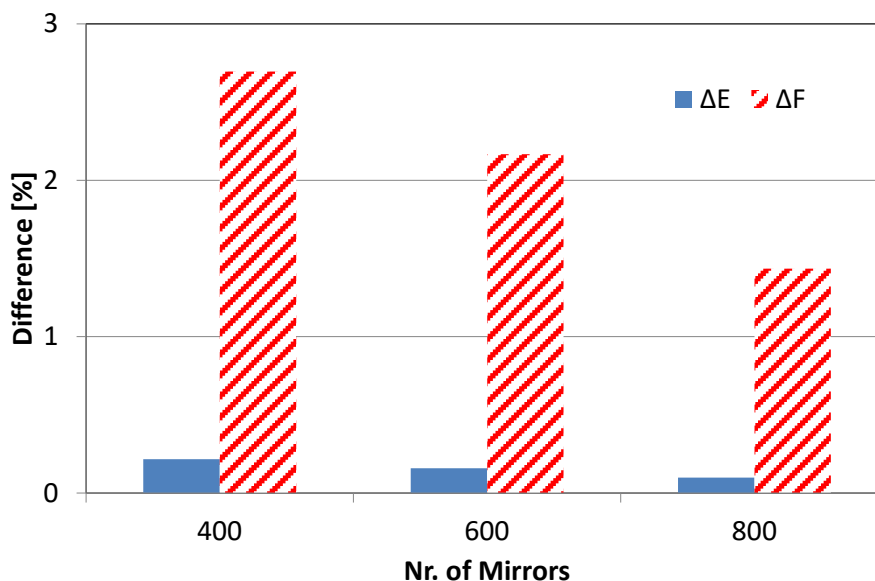
Σχήμα 8.4. Μεταβολή επιδόσεων υβριδικού αεριοστροβίλου μεταξύ υγιούς και κατάστασης λειτουργίας με βλάβη για μια καλοκαιρινή μέρα

Σημειώνεται πως οι επικαθίσεις στον αεριοστροβίλο μπορούν να εντοπιστούν από διαγνωστικά συστήματα. Έτσι, όταν οι τιμές των θερμοδυναμικών παραμέτρων είναι διαφορετικές από αυτές της περίπτωσης επικαθίσεων στο συμπιεστή, μπορεί να πραγματοποιηθεί διάγνωση της κατάστασης επικαθίσεων στα κάτοπτρα.

8.2.3 Απορύθμιση κατόπτρων

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 1.5.4, εκτός των επικαθίσεων των κατόπτρων, στη διάταξη του πύργου μπορεί να παρουσιαστεί απορύθμιση των κατόπτρων με αποτέλεσμα να μη στοχεύουν στο δέκτη με συνέπεια τη μείωση της προσφερόμενης ηλιακής θερμότητας. Όπως αναλύθηκε στην παράγραφο 5.3.2, οι ετήσιες επιδόσεις εξαρτώνται από τον αριθμό των κατόπτρων και υπάρχει ένας αριθμός κατόπτρων πάνω από τον οποίο η μεταβολή των επιδόσεων είναι ουσιαστικά αμελητέα. Για να φανεί η επίδραση της βλάβης των απορυθμισμένων κατόπτρων, υπολογίζονται οι ετήσιες επιδόσεις για λειτουργία με βλάβη 50 κατόπτρων για τρία μεγέθη του ηλιακού πεδίου και συγκρίνονται με τις αντίστοιχες επιδόσεις της υγιούς λειτουργίας. Η σύγκριση παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.5 για τη μεταβολή στην παραγόμενη ενέργεια (ΔΕ) και στην

κατανάλωση καυσίμου (ΔF). Όσο το μέγεθος του πεδίου κατόπτρων αυξάνεται, η επίδραση των κατόπτρων με βλάβη στις επιδόσεις μειώνεται.



Σχήμα 8.5. Μεταβολή ετήσιων επιδόσεων μεταξύ υγιούς και κατάστασης λειτουργίας με 50 απορυθμισμένα κάτοπτρα για τρία μεγέθη πεδίου κατόπτρων

Από τις ανωτέρω μελέτες βλαβών προκύπτει πως βλάβες που αφορούν μόνο το ηλιακό κομμάτι μια τέτοιας διάταξης, μειώνουν την προσφερόμενη ηλιακή θερμική ενέργεια και συνεπώς η λειτουργία μετατοπίζεται πιο κοντά σε αυτή του συμβατικού αεριοστροβίλου. Βλάβες του αεριοστροβίλου που επιφέρουν μείωση της αναρροφητικής του ικανότητας, μειώνουν την παραγόμενη ισχύ (όπως σε οποιονδήποτε συμβατικό αεριοστροβίλο) αλλά με ταυτόχρονη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου αφού επιτυγχάνεται υψηλότερη θερμοκρασία στο δέκτη.

8.3 Επίδραση βλαβών στις επιδόσεις υβριδικού ατμοστροβίλου

Στις διατάξεις υβριδικού ατμοστροβίλου, εκτός των επικαθίσεων στα κάτοπτρα, παρατηρείται και η θραύση του υάλινου περιβλήματος του απορροφητή. Έτσι, εκτός της παραμέτρου υγείας f_{RM} , που αναφέρεται στην ανακλαστικότητα των κατόπτρων, ορίζεται και η f_{BM} που αναφέρεται στο ποσοστό των κατόπτρων με σπασμένο περίβλημα:

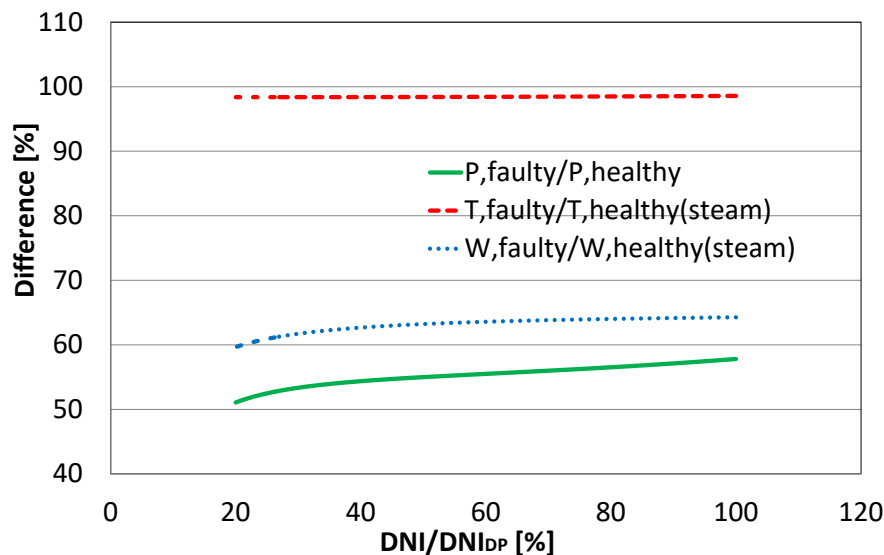
- $$f_{BM} = \frac{\text{Αριθμός κατόπτρων με ανέπαφο περίβλημα}}{\text{Συνολικός αριθμός κατόπτρων}}$$

Για την μελέτη της επίδρασης αυτών των βλαβών στις επιδόσεις μιας διάταξης ηλιακού ατμοστροβίλου, χρησιμοποιείται το μοντέλο του ηλιακού ατμοστροβίλου έμμεσης ατμοπαραγωγής όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 7.1.

8.3.1 Επικαθίσεις στα κάτοπτρα

Η ύπαρξη επικαθίσεων στα κάτοπτρα, όπως και στην περίπτωση του υβριδικού αεριοστρόβιλου, θα επιφέρει μείωση της προσφερόμενης ηλιακής θερμότητας. Χρησιμοποιώντας το μοντέλο, προσομοιώνεται η λειτουργία για καθαρά κάτοπτρα και για κάτοπτρα με μειωμένη ανακλαστικότητα κατά 26% (Wolfertstetter et al., 2012). Δηλαδή, $f_{RM}=0.74$.

Το Σχήμα 8.6 παρουσιάζει τη μεταβολή της παραγόμενης ισχύος καθώς και της παροχής και θερμοκρασίας του ατμού μεταξύ της λειτουργίας με επικαθίσεις στα κάτοπτρα και της υγιούς για διάφορες εντάσεις της ηλιακής ακτινοβολίας. Όπως παρατηρείται, η μείωση της διαθέσιμης θερμότητας λόγω των επικαθίσεων, επιφέρει μείωση της παραγόμενης ποσότητας ατμού και συνεπώς μείωση της παραγόμενης ισχύος. Ακόμα και στην περίπτωση της λειτουργίας υπό ονομαστική ένταση ακτινοβολίας η παραγόμενη ισχύς είναι περίπου το 58% της ονομαστικής.

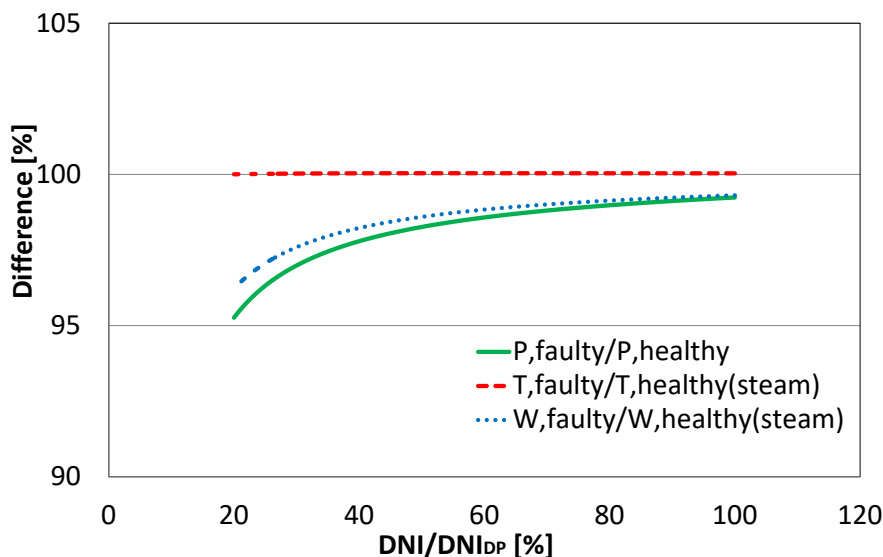


Σχήμα 8.6. Μεταβολή επιδόσεων ηλιακού αεριοστρόβιλου μεταξύ λειτουργίας με επικαθίσεις κατόπτρων και υγιούς για διάφορες τιμές μεταβολής της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας

8.3.2 Θραύση υάλινου περιβλήματος

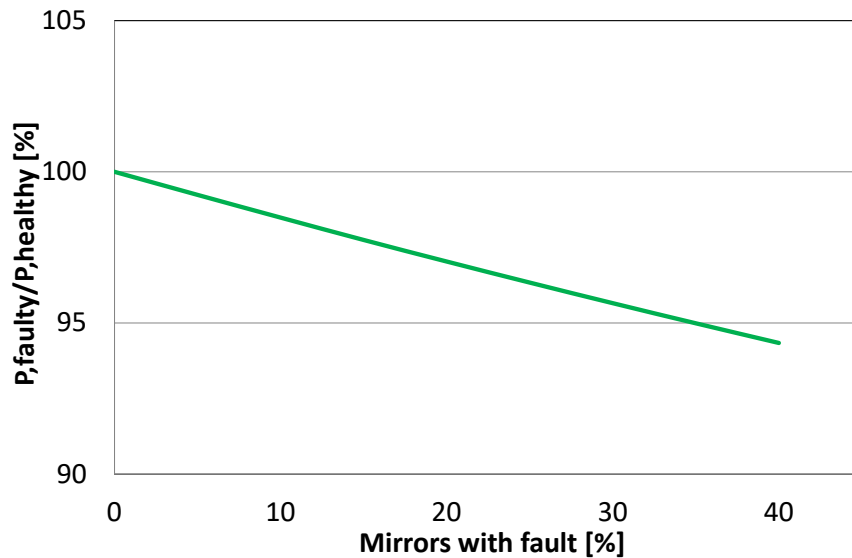
Η θραύση/ράγισμα του υάλινου περιβλήματος του απορροφητή επιφέρει την εισροή αέρα εντός του ή και την πλήρη καταστροφή του με αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών θερμότητας προς το περιβάλλον και ως εκ τούτου τη μείωση της επιτεύξιμης θερμοκρασίας του ελαίου (HTF). Με τη χρήση του μοντέλου προσομοιώνεται η λειτουργία της διάταξης για ανέπαφα κάτοπτρα και για θραύση του περιβλήματος του 5% των κατόπτρων (Cohen et al., 1999; Lei et al., 2009; Price et al., 2002), δηλαδή, $f_{BM}=0.95$. Το Σχήμα 8.7 παρουσιάζει τη μεταβολή της παραγόμενης ισχύος καθώς και της παροχής και θερμοκρασίας

του ατμού μεταξύ της λειτουργίας με θραύση του υάλινου περιβλήματος του 5% των κατόπτρων και της υγιούς για διάφορες εντάσεις της ηλιακής ακτινοβολίας. Όπως παρατηρείται, η αύξηση των απωλειών λόγω της καταστροφής του υάλινου περιβλήματος, επιφέρει μείωση της παραγόμενης ποσότητας ατμού και συνεπώς μείωση της παραγόμενης ισχύος. Για λειτουργία υπό ονομαστική ένταση ακτινοβολίας παρατηρείται μείωση περίπου 1% στην παραγόμενη ισχύ.



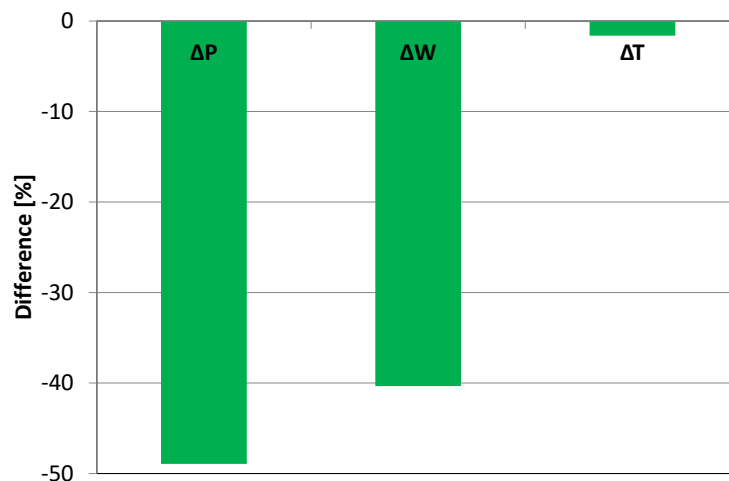
Σχήμα 8.7. Μεταβολή επιδόσεων ηλιακού ατμοστροβίλου μεταξύ λειτουργίας με σπασμένο υάλινο περίβλημα κατόπτρων και υγιούς για διάφορες τιμές μεταβολής της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας

Η μείωση των επιδόσεων συνδέεται άμεσα με το μέγεθος της βλάβης. Για τη διερεύνηση της επίδρασης του αριθμού κατόπτρων με βλάβη στις επιδόσεις της μηχανής, πραγματοποιείται η προσομοίωση της λειτουργίας για τις ονομαστικές συνθήκες θεωρώντας κάθε φορά διαφορετικό ποσοστό κατόπτρων που λειτουργούν με βλάβη. Το αποτέλεσμα αυτής της προσομοίωσης όσον αφορά στην παραγόμενη ισχύ φαίνεται στο Σχήμα 8.8 όπου και παρατηρείται η γραμμική σχέση της μείωσης της παραγόμενης ισχύος με το ποσοστό του αριθμού κατόπτρων με βλάβη.

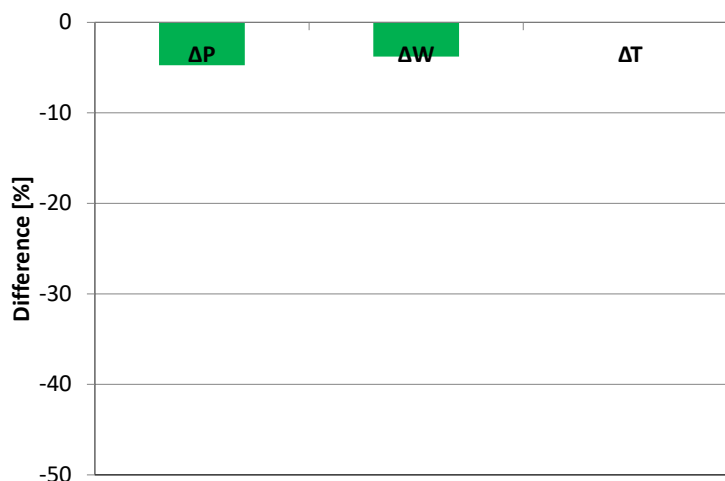


Σχήμα 8.8. Μεταβολή παραγόμενης ισχύος ηλιακού ατμοστροβίλου μεταξύ λειτουργίας με σπασμένο υάλινο περίβλημα κατόπτρων και υγιούς για διάφορα ποσοστά κατόπτρων με βλάβη

Παρατηρώντας το Σχήμα 8.6 και το Σχήμα 8.7 για ένταση ακτινοβολίας στο 20% της ονομαστικής, φαίνεται η όμοια επίδραση των δύο βλαβών στις επιδόσεις αλλά με διαφορετική ένταση. Με άλλα λόγια, οι δύο αυτές βλάβες έχουν όμοια υπογραφή. Για την περίπτωση των επικαθίσεων, η υπογραφή βλάβης φαίνεται στο Σχήμα 8.9, ενώ για την περίπτωση της θραύσης του υάλινου περιβλήματος στο Σχήμα 8.10. Μεγάλη μείωση στις επιδόσεις οδηγεί στο συμπέρασμα της ύπαρξης επικαθίσεων στα κάτοπτρα, ενώ μικρή μεταβολή στις επιδόσεις μπορεί να σημαίνει θραύση του υάλινου περιβλήματος.



Σχήμα 8.9. Υπογραφή βλάβης για την περίπτωση επικαθίσεων στα κάτοπτρα



Σχήμα 8.10. Υπογραφή βλάβης για την περίπτωση θραύσης του υάλινου περιβλήματος

8.4 Σύνοψη - Συμπεράσματα

Στο Κεφάλαιο αυτό μελετήθηκε η επίδραση της λειτουργίας των συνιστωσών με μειωμένες επιδόσεις στις συνολικές επιδόσεις μιας ηλιοθερμικής διάταξης.

Ποσοτικοποίηση της επίδρασης των βλαβών στις συνολικές επιδόσεις συνεισφέρει στον αποδοτικότερο προγραμματισμό των εργασιών συντήρησης. Επιπλέον, η χρήση μοντέλου προσομοίωσης της λειτουργίας μιας ηλιοθερμικής διάταξης δύναται να χρησιμοποιηθεί και για διαγνωστικούς σκοπούς.

Επιδείχθηκε η δυνατότητα μελέτης σεναρίων λειτουργίας με ύπαρξη βλαβών στις συνιστώσες των ηλιοθερμικών διατάξεων. Συγκεκριμένα, για την περίπτωση του αεριοστροβίλου μελετήθηκε η περίπτωση της απο-εστίασης κατόπτρων και αυτής των επικαθίσεων στα κάτοπτρα. Ειδικά στη δεύτερη περίπτωση μελετήθηκε και η επίδραση επικαθίσεων στα πτερύγια του συμπιεστή. Για την περίπτωση του ηλιακού ατμοστροβίλου με έμμεση ατμοπαραγωγή από παραβολικά κάτοπτρα μελετήθηκε η περίπτωση των επικαθίσεων στα κάτοπτρα και αυτή της θραύσης του υάλινου περιβλήματος του δέκτη. Οι επικαθίσεις έχουν εντονότερη επίδραση στις επιδόσεις από ότι η θραύση του υάλινου περιβλήματος.

Η διαφορετική επίδραση της κάθε βλάβης στις επιδόσεις έχει ως αποτέλεσμα οι υπογραφές βλαβών να είναι διαφορετικές και συνεπώς να είναι εφικτή η διάγνωση. Έτσι, παράχθηκαν στοιχεία που θα μπορούσαν να αποτελέσουν τη βάση για συγκροτημένη διαγνωστική προσέγγιση των ηλιοθερμικών διατάξεων.

Κεφάλαιο 9: Ανακεφαλαίωση – Συμπεράσματα

9.1 Ανακεφαλαίωση

Τα κύρια σημεία της εργασίας που πραγματοποιήθηκε για τη χρήση της ηλιακής ενέργειας στις θερμικές στροβιλομηχανές, μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

- Αναπτύχθηκε, υλοποιήθηκε και πιστοποιήθηκε η μοντελοποίηση των ηλιακών συνιστωσών ηλιοθερμικών διατάξεων καθώς και των συνιστωσών του κύκλου Rankine. Τα μοντέλα αυτά καθώς και τα υπάρχοντα για τον κύκλο Brayton παρέχουν τη δυνατότητα προσομοίωσης οποιασδήποτε ηλιοθερμικής διάταξης.
- Αναπτύχθηκε διαδικασία υπολογισμού του κόστους ηλεκτροπαραγωγής (LEC) και πιστοποιήθηκε με δεδομένα της βιβλιογραφίας ούτως ώστε να είναι εφικτή η αποτίμηση των οικονομικών επιδόσεων των ηλιοθερμικών διατάξεων.
- Μελετήθηκε η διάταξη υβριδικού αεριοστροβίλου απλής ατράκτου. Μελετήθηκαν οι αεροθερμοδυναμικές επιδόσεις σε ετήσια και ημερήσια βάση καθώς και οι οικονομικές επιδόσεις της διάταξης.
- Εξετάστηκε η επίδραση της τιμής των παραμέτρων σχεδίασης της διάταξης υβριδικού αεριοστροβίλου απλής ατράκτου. Αρχικά μέσω ανάλυσης ευαισθησίας προσδιορίστηκε η επίδραση της τιμής σχεδιαστικών παραμέτρων (πτώση πίεσης δέκτη, ανακλαστικότητα κατόπτρων κτλ) στις επιδόσεις της διάταξης. Οι μελέτη επεκτάθηκε στην επίδραση του αριθμού των κατόπτρων στις αεροθερμοδυναμικές και οικονομικές επιδόσεις της διάταξης. Τέλος, μελετήθηκε η επίδραση του τύπου του αεριοστροβίλου στη συμπεριφορά της υβριδικής αεριοστροβλικής διάταξης.
- Μελετήθηκε η επίδραση των παραμέτρων λειτουργίας στη συμπεριφορά και τις επιδόσεις αεριοστροβίλου απλής ατράκτου. Η μελέτη αφορά στις συνήθεις παραμέτρους ελέγχου ενός αεριοστροβίλου, ήτοι την παροχή καυσίμου και την παροχή αέρα. Μελετήθηκε η επίδραση του τύπου

λειτουργίας (υβριδική ή ηλιακή) με την οποία ρυθμίζεται η παροχή καυσίμου και η επίδραση της λειτουργίας των οδηγών πτερυγίων συμπίεστή με την οποία ρυθμίζεται η παροχή αέρα.

- Με σκοπό την αντιμετώπιση κατασκευαστικών δυσκολιών ενός συνήθους υβριδικού αεριοστροβίλου, καθώς τη μείωση του κόστους κτήσης, μελετήθηκε η δυνατότητα υλοποίησης υβριδικού αεριοστροβίλου βασισμένου σε στροβιλοϋπερπληρωτή. Η μελέτη αφορά την επίδραση του τύπου λειτουργίας (υβριδική ή ηλιακή), την επίδραση του αριθμού των κατόπτρων και την επίδραση της μέγιστης επιτρεπτής θερμοκρασίας του κύκλου στις αεροθερμοδυναμικές και οικονομικές επιδόσεις.
- Με σκοπό την πρόταση εναλλακτικών διατάξεων υβριδικού αεριοστροβίλου που θα βασίζονται σε υπάρχουσες τεχνολογίες και συνεπώς η υλοποίησή του θα είναι ευκολότερη, μελετήθηκε η διάταξη ηλιακής αναθέρμανσης αεριοστροβίλου και η διάταξη έγχυσης ηλιακά παραγόμενου ατμού στο θάλαμο καύσης αεριοστροβίλου. Η ανάλυση αφορά τον υπολογισμό των αεροθερμοδυναμικών και οικονομικών επιδόσεων των διατάξεων και παραλλαγών τους.
- Μελετήθηκε η συμπεριφορά και υπολογίστηκαν οι επιδόσεις ηλιακού ατμοστροβίλου σε τρεις παραλλαγές με βάση τις διαθέσιμες τεχνολογίες: α) άμεση ατμοπαραγωγή με διάταξη επίπεδων κατόπτρων – δέκτη, β) άμεση ατμοπαραγωγή με διάταξη παραβολικών κατόπτρων και γ) έμμεση ατμοπαραγωγή με διάταξη παραβολικών κατόπτρων. Επίσης, μελετήθηκε και αξιολογήθηκε η δυνατότητα ελέγχου των διατάξεων με βάση τη ροή του εργαζόμενου μέσου.
- Με σκοπό τη διερεύνηση της δυνατότητας αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας σε συνδυασμένο κύκλο, μελετήθηκαν δύο διατάξεις α) με υβριδικό αεριοστροβίλο και β) με υβριδικό ατμοστροβίλο. Η μελέτη αφορά τον υπολογισμό των αεροθερμοδυναμικών και οικονομικών επιδόσεων των δύο διατάξεων.
- Τέλος, μελετήθηκε η επίδραση της λειτουργίας με βλάβη στις επιδόσεις μιας ηλιοθερμικής διάταξης. Στην περίπτωση του αεριοστροβίλου εξετάστηκε η περίπτωση επικαθίσεων στα κάτοπτρα και στα πτερύγια του συμπίεστή όπως και της απορύθμισης των κατόπτρων. Στην περίπτωση του ατμοστροβίλου εξετάστηκε η περίπτωση επικαθίσεων στα κάτοπτρα όπως επίσης και αυτή της θραύσης του υάλινου μονωτικού περιβλήματος των παραβολικών κατόπτρων,

9.2 Συμπεράσματα

Τα κύρια συμπεράσματα από την εκπόνηση της παρούσας διατριβής συνοψίζονται παρακάτω.

- Τα αναπτυχθέντα μοντέλα επιτρέπουν την προσομοίωση της λειτουργίας υπαρχουσών και νέων διατάξεων, καθώς και την αποτίμηση των επιδόσεών τους με αεροθερμοδυναμικούς και οικονομικούς όρους. Επιπλέον, επιτρέπουν τον υπολογισμό της επίδρασης παραμέτρων σχεδίασης και λειτουργίας στις επιδόσεις αλλά και την εκτίμηση των επιδόσεων για διάφορες βλάβες. Τέτοιου είδους πληροφορία μπορεί να αξιοποιηθεί για την βέλτιστη σχεδίαση και λειτουργία, καθώς και για τον βέλτιστο προγραμματισμό εργασιών συντήρησης.
- Ο υβριδικός αεριοστρόβιλος, σε οικονομικούς όρους, είναι τόσο ανταγωνιστικότερος όσο αυξάνει το κόστος του καυσίμου.
- Ο ρυθμός μεταβολής των επιδόσεων λόγω της υβριδοποίησης μειώνεται όσο αυξάνεται το μέγεθος του πεδίου των κατόπτρων. Από έναν αριθμό κατόπτρων και άνω, οι επιδόσεις μένουν ουσιαστικά αμετάβλητες. Τέλος, οι αεριοστρόβιλοι με ανακόμιση θερμότητας εμφανίζονται ως καταλληλότεροι για υβριδοποίηση.
- Κατά τη λειτουργία του υβριδικού αεριοστροβίλου, μπορεί να επιλεγθεί ο κατάλληλος τύπος λειτουργίας (υβριδικός ή ηλιακός) και η αποδοτικότερη λειτουργία μέσω ρύθμισης παραμέτρων ελέγχου όπως των IGVs, με βάση τις απαιτήσεις και τα κόστη ούτως ώστε να μεγιστοποιηθούν οι επιδόσεις και συνακόλουθα τα οφέλη από τη λειτουργία της εγκατάστασης.
- Η χρήση στροβιλοϋπερπληρωτή για τη συγκρότηση ενός υβριδικού αεριοστροβίλου μπορεί να αποτελέσει έναν τρόπο συγκρότησης εγκαταστάσεων με κόστος συγκριτικά χαμηλό. Αύξηση της μέγιστης επιτρεπτής θερμοκρασίας της διάταξης οδηγεί σε αύξηση της παραγόμενης ισχύος με ταυτόχρονη μείωση του κόστους ηλεκτροπαραγωγής. Η ηλιακή λειτουργία είναι αποδοτικότερη της υβριδικής λόγω του χαμηλού βαθμού απόδοσης. Τα υπολογιστικά εργαλεία που αναπτύχθηκαν επιτρέπουν τόσο τη μελέτη για βελτιστοποίηση του σχεδιασμού, όσο και για την υλοποίηση της διάταξης, παρέχοντας στοιχεία για τη συγκρότηση του συστήματος ελέγχου της για βέλτιστη λειτουργία.

- Η διάταξη αεριοστροβίλου με ηλιακή αναθέρμανση των καυσαερίων αποτελεί μια εναλλακτική πρόταση που δεν απαιτεί την επίλυση κατασκευαστικών δυσκολιών όπως στην περίπτωση της ηλιακής προθέρμανσης. Σε μια τέτοια διάταξη απαραίτητη είναι η χρήση πτερυγίων μεταβλητής γεωμετρίας στο στρόβιλο ισχύος. Επιπλέον, μείωση της TIT οδηγεί σε αύξηση της ηλιακά παραγόμενης ισχύος, αλλά με ταυτόχρονη αύξηση του κόστους ηλεκτροπαραγωγής λόγω της μείωσης του θερμικού βαθμού απόδοσης.
- Η χρήση της ηλιακής ενέργειας για την παραγωγή ατμού και έγχυση αυτού στο θάλαμο καύσης ενός αεριοστροβίλου αποτελεί μια εναλλακτική διάταξη υβριδοποίησης αεριοστροβίλου που μπορεί εύκολα να εισαχθεί σε υπάρχουσες εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούν ήδη την έγχυση ατμού που παράγεται από συμβατικές θερμικές εγκαταστάσεις. Γίνεται οικονομικά ανταγωνιστικότερη με την αύξηση του κόστους καυσίμου.
- Για την παραγωγή ατμού με χρήση ηλιακής ενέργειας και εκτόνωση αυτού σε ατμοστρόβιλο, αποδοτικότερη μέθοδος είναι αυτή της άμεσης ατμοποίησης με διάταξη επίπεδων κατόπτρων και δέκτη. Επιπλέον, σε μια διάταξη ηλιακού ατμοστροβίλου, η παροχή του εργαζόμενου μέσου θα πρέπει να ρυθμίζεται αναλόγως της διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας.
- Η εισαγωγή ηλιακής ενέργειας σε συνδυασμένο κύκλο είναι αποδοτικότερη όταν η χρήση της ηλιακής ενέργειας γίνεται στη μονάδα αεριοστροβίλου του κύκλου

9.3 Προτάσεις

Με βάση τα όσα αναλύθηκαν αλλά και τις περαιτέρω ανάγκες αυτής της επιστημονικής περιοχής, μπορούν να αναφερθούν τα εξής:

- Μοντελοποίηση του θαλάμου καύσης λαμβάνοντας υπ' όψιν τις σχεδιαστικές απαιτήσεις της υβριδικής διάταξης ώστε να προσομοιώνεται ρεαλιστικότερα η λειτουργία του.
- Χρήση του αναπτυχθέντος λογισμικού για την εύρεση του βέλτιστου τρόπου λειτουργίας του συστήματος αποθήκευσης θερμότητας (ρυθμός φόρτισης και αποφόρτισης), για διάφορα σενάρια (απαίτηση ισχύος, feed-in tariffs, ατμοσφαιρικές συνθήκες κτλ.)
- Βελτίωση της μοντελοποίησης των συνιστωσών ούτως ώστε να είναι δυνατή η προσομοίωση μεταβατικών καταστάσεων λειτουργίας. Με

αυτόν τον τρόπο θα είναι δυνατή η προσομοίωση καταστάσεων εκκίνησης και παύσης της λειτουργίας της διάταξης.

- Υλοποίηση μοντελοποίησης ηλιοθερμικής διάταξης με ενσωμάτωση συνιστωσών ελέγχου ούτως ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά της διάταξης σε μεταβατικά φαινόμενα με ρεαλιστικό τρόπο.
- Ανάπτυξη αυτοματοποιημένης διαδικασίας προσδιορισμού των βέλτιστων σχεδιαστικών και λειτουργικών παραμέτρων ηλιοθερμικών διατάξεων με βάση συγκεκριμένες απαιτήσεις και περιορισμούς (ισχύς, χώρος, διαθεσιμότητα νερού κτλ). Επιπλέον, σύγκριση των επιδόσεων των διαφόρων ηλιοθερμικών διατάξεων ούτως ώστε να προτείνεται η πιο αποδοτική για κάθε περίπτωση.

Βιβλιογραφία

- Aichmayer, L., Spelling, J., Laumert, B., & Fransson, T. (2013). Micro Gas-Turbine Design for Small-Scale Hybrid Solar Power Plants. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 135(11), 113001. <http://doi.org/10.1115/1.4025077>
- Alexiou, A. (2014). *Introduction to Gas Turbine Modelling with PROOSIS, 2nd Edition*. Madrid, Spain: Empresarios Agrupados Internacional.
- Ávila-Marín, A. L. (2011). Volumetric receivers in Solar Thermal Power Plants with Central Receiver System technology: A review. *Solar Energy*, 85(5), 891–910. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2011.02.002>
- Baghernejad, A., & Yaghoubi, M. (2011). Multi-objective exergoeconomic optimization of an Integrated Solar Combined Cycle System using evolutionary algorithms. *International Journal of Energy Research*, 35(7), 601–615. <http://doi.org/10.1002/er.1715>
- Bakos, G. C., & Parsa, D. (2013). Technoeconomic assessment of an integrated solar combined cycle power plant in Greece using line-focus parabolic trough collectors. *Renewable Energy*, 60, 598–603. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2013.05.025>
- Bakos, G. C., & Tschelidou, C. (2013). Solar aided power generation of a 300 MW lignite fired power plant combined with line-focus parabolic trough collectors field. *Renewable Energy*, 60, 540–547. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2013.05.024>
- Balasubramaniam, R., Ramé, E., Kizito, J., & Kassemi, M. (2006). *Two Phase Flow Modeling: Summary of Flow Regimes and Pressure Drop Correlations in Reduced and Partial Gravity*. NASA. Cleveland, Ohio, US.
- Barigozzi, G., Bonetti, G., Franchini, G., Perdichizzi, A., & Ravelli, S. (2012a). Solar Hybrid Combined Cycle Performance Prediction: Influence of GT Model and Spool Arrangement. In *Volume 6: Oil and Gas Applications; Concentrating Solar Power Plants; Steam Turbines; Wind Energy* (p. 291). ASME. <http://doi.org/10.1115/GT2012-68881>
- Barigozzi, G., Bonetti, G., Franchini, G., Perdichizzi, A., & Ravelli, S. (2012b). Thermal performance prediction of a solar hybrid gas turbine. *Solar Energy*, 86(7), 2116–2127. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2012.04.014>
- Barigozzi, G., Franchini, G., Perdichizzi, A., & Ravelli, S. (2013). Simulation of Solarized Combined Cycles: Comparison Between Hybrid Gas Turbine and ISCC Plants. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 136(3), 31701. <http://doi.org/10.1115/1.4025836>
- Benaboud, A., & Rufer, A. (2016). Gas Turbine: Optimization of Energy Production and High Efficiency by Using Power Electronics. *Procedia Engineering*, 138, 337–346. <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.02.094>
- BINE. (2013). Parabolic trough collector technology. Retrieved June 10, 2016,

- from
<http://www.bine.info/en/publications/themeninfos/publikation/solarthermische-kraftwerke-2/parabolrinnen-kollektortechnik/>
- Bird, R. E. (1984). A simple, solar spectral model for direct-normal and diffuse horizontal irradiance. *Solar Energy*, 32(4), 461–471.
[http://doi.org/10.1016/0038-092X\(84\)90260-3](http://doi.org/10.1016/0038-092X(84)90260-3)
- Bird, R. E., & Hulstrom, R. (1981). *A Simplified Clear Sky Model for Direct and Diffuse Insolation on Horizontal Surfaces*. Colorado, USA.
- Bird, R. E., & Riordan, C. (1986). Simple Solar Spectral Model for Direct and Diffuse Irradiance on Horizontal and Tilted Planes at the Earth's Surface for Cloudless Atmospheres. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 25(1), 87–97. [http://doi.org/10.1175/1520-0450\(1986\)025<0087:SSSMFD>2.0.CO;2](http://doi.org/10.1175/1520-0450(1986)025<0087:SSSMFD>2.0.CO;2)
- Birnbaum, J., Eck, M., Fichtner, M., Hirsch, T., Lehmann, D., & Zimmermann, G. (2010). A Direct Steam Generation Solar Power Plant With Integrated Thermal Storage. *Journal of Solar Energy Engineering*, 132(3), 31014.
<http://doi.org/10.1115/1.4001563>
- Biryukov, S., Faiman, D., & Goldfeld, A. (1999). An Optical System for the Quantitative Study of Particulate Contamination on Solar Collector Surfaces. *Solar Energy*, 66(5), 371–378. [http://doi.org/10.1016/S0038-092X\(99\)00020-1](http://doi.org/10.1016/S0038-092X(99)00020-1)
- Blair, N., Dobos, A. P., Freeman, J., Neises, T., Wagner, M., Ferguson, T., ... Janzou, S. (2014). *System Advisor Model, SAM 2014.1.14: General Description, NREL/TP-6A20-61019*. Golden, USA. Retrieved from
<http://www.nrel.gov/docs/fy14osti/61019.pdf>
- Borghesi, S., & Montini, M. (2016). The Best (and Worst) of GHG Emission Trading Systems: Comparing the EU ETS with Its Followers. *Frontiers in Energy Research*, 4. <http://doi.org/10.3389/fenrg.2016.00027>
- Bowman, B., Knotts, W., & K., S. (2007). Thermal Systems. Retrieved June 10, 2016, from <http://me1065.wikidot.com/solar-thermal-electric-power-plants>
- Brosseau, D., Kelton, J. W., Ray, D., Edgar, M., Chisman, K., & Emms, B. (2005). Testing of Thermocline Filler Materials and Molten-Salt Heat Transfer Fluids for Thermal Energy Storage Systems in Parabolic Trough Power Plants. *Journal of Solar Energy Engineering*, 127(1), 109.
<http://doi.org/10.1115/1.1824107>
- Buck, R., Bräuning, T., Denk, T., Pfänder, M., Schwarzbözl, P., & Tellez, F. (2002). Solar-Hybrid Gas Turbine-based Power Tower Systems (REFOS). *Journal of Solar Energy Engineering*, 124(1), 2. <http://doi.org/10.1115/1.1445444>
- Buck, R., & Friedmann, S. (2007). Solar-Assisted Small Solar Tower Trigenation Systems. *Journal of Solar Energy Engineering*, 129(4), 349.
<http://doi.org/10.1115/1.2769688>
- Bürkle, D., & Krüger, D. (2012). First solar thermal power plant in Southeast Asia is fully operational. Retrieved October 10, 2016, from
http://www.dlr.de/dlr/presse/en/desktopdefault.aspx/tabid-10309/472_read-2343/year-2012/#/gallery/4361
- Caballero, J. P. (2012). *Comparison between PV and CSP plants through LCA approach*. UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID & UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PERUGIA UNDERGRADUATE.

- Cambell, M. (2008). *The Drivers of the Levelized Cost of Electricity for Utility-Scale Photovoltaics*. SUNPOWER Corporation. Retrieved from sunpowercorp.com
- Camporeale, S. M., Fortunato, B., & Saponaro, A. (2011). Repowering of a Rankine Cycle Power Plant by Means of Concentrating Solar Collectors. In *Volume 4: Cycle Innovations; Fans and Blowers; Industrial and Cogeneration; Manufacturing Materials and Metallurgy; Marine; Oil and Gas Applications* (pp. 163–170). ASME. <http://doi.org/10.1115/GT2011-45736>
- Cau, G., Cocco, D., Concas, P., & Tola, V. (2010). Integration of Combined Cycle Power Plants and Parabolic Solar Troughs Using CO₂. In *Volume 3: Controls, Diagnostics and Instrumentation; Cycle Innovations; Marine* (pp. 711–719). ASME. <http://doi.org/10.1115/GT2010-22886>
- Cau, G., Cocco, D., & Tola, V. (2012). Performance and cost assessment of Integrated Solar Combined Cycle Systems (ISCCs) using CO₂ as heat transfer fluid. *Solar Energy*, 86(10), 2975–2985. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.004>
- Chacartegui, R., Sánchez, D., Jiménez-Espadafor, F., Muñoz, A., & Sánchez, T. (2008). Analysis of Intermediate Temperature Combined Cycles With a Carbon Dioxide Topping Cycle. In *Volume 2: Controls, Diagnostics and Instrumentation; Cycle Innovations; Electric Power* (pp. 673–680). ASME. <http://doi.org/10.1115/GT2008-51053>
- Chu, Y. (2011). *Review and Comparison of Different Solar Energy Technologies*. GENI.
- ClimateTechWiki. (2016). Solar towers (updraft). Retrieved June 10, 2016, from http://www.climatechwiki.org/technology/solar_towers
- Coastal. (2012). Coastal Chemical Co. Retrieved December 10, 2011, from <http://www.coastalchem.com/index.html#>
- Cohen, G., Kearney, D., & Kolb, G. (1999). *Final report on the operation and maintenance improvement program for concentrating solar power plants*.
- Collado, F. J. (2008). Quick evaluation of the annual heliostat field efficiency. *Solar Energy*, 82(4), 379–384. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2007.10.007>
- Darling, S. B., You, F., Veselka, T., & Velosa, A. (2011). Assumptions and the levelized cost of energy for photovoltaics. *Energy & Environmental Science*, 4(9), 3133. <http://doi.org/10.1039/c0ee00698j>
- de Campos, A. P. V., Sacomano Filho, F. L., & Krieger Filho, G. C. (2012). Design Analysis of a Micro Gas Turbine Combustion Chamber Burning Natural Gas. In *Volume 5: Manufacturing Materials and Metallurgy; Marine; Microturbines and Small Turbomachinery; Supercritical CO₂ Power Cycles* (p. 797). ASME. <http://doi.org/10.1115/GT2012-69180>
- de Keizer, C., Kuethe, S., Jordan, U., & Vajen, K. (2013). Simulation-based long-term fault detection for solar thermal systems. *Solar Energy*, 93, 109–120. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2013.03.023>
- Dickey, B. (2011). Test Results From a Concentrated Solar Microturbine Brayton Cycle Integration. In *Volume 3: Controls, Diagnostics and Instrumentation; Education; Electric Power; Microturbines and Small Turbomachinery; Solar Brayton and Rankine Cycle* (pp. 1031–1036). ASME. <http://doi.org/10.1115/GT2011-45918>
- DOW. (2016). DOW Chemical Company. Retrieved June 10, 2011, from <http://www.dow.com/heattrans/products/>

- Duffie, J., & Beckman, W. (2013). *Solar Engineering Of Thermal Processes* (Fourth). New Jersey: John Wiley & Sons.
- Dunham, M. T., & Lipinski, W. (2013). Thermodynamic Analyses of Single Brayton and Combined Brayton–Rankine Cycles for Distributed Solar Thermal Power Generation. *Journal of Solar Energy Engineering*, 135(3), 31008. <http://doi.org/10.1115/1.4023591>
- EATON. (2016). Concentrated Solar. Retrieved June 10, 2016, from <http://www.eatonmetal.com/concentrated-solar/>
- Eck, M., & Steinmann, W.-D. (2002). Direct Steam Generation in Parabolic Troughs: First Results of the DISS Project. *Journal of Solar Energy Engineering*, 124(2), 134. <http://doi.org/10.1115/1.1464125>
- EIA. (2015). *Levelized Cost and Levelized Avoided Cost of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook 2015*.
- EIA. (2016). Carbon Dioxide Emissions Coefficients. Retrieved October 21, 2016, from https://www.eia.gov/environment/emissions/co2_vol_mass.cfm
- EIA. (2017a). Henry Hub Natural Gas Spot Price. Retrieved March 27, 2017, from <https://www.eia.gov/dnav/ng/hist/rngwhhdD.htm>
- EIA. (2017b). Petroleum & Other Liquids. Retrieved January 15, 2017, from http://www.eia.gov/dnav/pet/hist/LeafHandler.ashx?n=pet&s=eer_epd2dx10_pf4_y35ny_dpg&f=m
- Empresarios Agrupados Internacional. (2016). EcosimPro/PROOSIS System Modelling and Simulation Toolkits and Services. Retrieved November 5, 2015, from <http://www.proosis.com/>
- EU Commission. (2005). *SOLGATE: Solar Hybrid Gas Turbine Electric Power System*. Luxembourg: EU Commission, Directorate-General for Research and Innovation.
- Feldhoff, J. F., Schmitz, K., Eck, M., Schnatbaum-Laumann, L., Laing, D., Ortiz-Vives, F., & Schulte-Fischedick, J. (2012). Comparative system analysis of direct steam generation and synthetic oil parabolic trough power plants with integrated thermal storage. *Solar Energy*, 86(1), 520–530. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2011.10.026>
- Fitzpatrick, E. (2013). World's biggest solar thermal power plant fires up for first time. Retrieved June 4, 2016, from <http://reneweconomy.com.au/worlds-biggest-solar-thermal-power-plant-fires-first-time-89135/>
- Flueckiger, S. M., Iverson, B. D., Garimella, S. V., & Pacheco, J. E. (2014). System-level simulation of a solar power tower plant with thermocline thermal energy storage. *Applied Energy*, 113, 86–96. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.07.004>
- Forristall, R. (2003). *Heat Transfer Analysis and Modeling of a Parabolic Trough Solar Receiver Implemented in Engineering Equation Solver*.
- Gage, B. T., & Borry, R. (2012). *Technological Niches: Concentrated Solar Thermal vs. Photovoltaic Solar*.
- Galvas, M. (1973). *FORTTRAN program for predicting off-design performance of centrifugal compressors*.
- Ganapathy, V. (1996). Heat-Recovery Steam Generators : Understand the Basics. *Chemical Engineering Progress*.
- Garcia, P., Ferriere, A., Flamant, G., Costerg, P., Soler, R., & Gagnepain, B. (2008). Solar Field Efficiency and Electricity Generation Estimations for a Hybrid Solar Gas Turbine Project in France. *Journal of Solar Energy Engineering*,

- 130(1), 14502. <http://doi.org/10.1115/1.2807211>
- GeneralElectric. (2010). GateCycle Manual. General Electric.
- Gewald, D., Siokos, K., Karellas, S., & Spliethoff, H. (2012). Waste heat recovery from a landfill gas-fired power plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(4), 1779–1789. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.036>
- Gordon, S., & McBride, B. J. (1994). *Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Composition and Applications*. Washington DC.
- Greenpeace, ESTELA, & SolarPaces. (2009). *Concentrating Solar Power Global Outlook 09*.
- Greenpeace, ESTIA, & SolarPaces. (2005). *Exploiting the Heat From the Sun To Combat Climate Change Concentrated Solar Thermal Power – Now !*
- HAAF, W., FRIEDRICH, K., MAYR, G., & SCHLAICH, J. (1983). Solar Chimneys Part I: Principle and Construction of the Pilot Plant in Manzanares. *International Journal of Solar Energy*, 2(1), 3–20. <http://doi.org/10.1080/01425918308909911>
- Han, W., Jin, H., Lin, R., Wang, Y., & Su, J. (2012). A Novel Concentrated Solar Power System Hybrid Trough and Tower Collectors. In *Volume 6: Oil and Gas Applications; Concentrating Solar Power Plants; Steam Turbines; Wind Energy* (p. 303). ASME. <http://doi.org/10.1115/GT2012-68991>
- He, Y.-L., Mei, D.-H., Tao, W.-Q., Yang, W.-W., & Liu, H.-L. (2012). Simulation of the parabolic trough solar energy generation system with Organic Rankine Cycle. *Applied Energy*, 97, 630–641. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.02.047>
- Heide, S., Felsmann, C., Gampe, U., Boje, S., Gericke, B., Freimark, M., ... Giuliano, S. (2012). Parameterization of High Solar Share Gas Turbine Systems. In *Volume 6: Oil and Gas Applications; Concentrating Solar Power Plants; Steam Turbines; Wind Energy* (p. 281). ASME. <http://doi.org/10.1115/GT2012-68608>
- Heide, S., Gampe, U., Orth, U., Beukenberg, M., Gericke, B., Freimark, M., ... Giuliano, S. (2010). Design and Operational Aspects of Gas and Steam Turbines for the Novel Solar Hybrid Combined Cycle SHCC. In *Volume 3: Controls, Diagnostics and Instrumentation; Cycle Innovations; Marine* (pp. 465–474). ASME. <http://doi.org/10.1115/GT2010-22124>
- Heller, P. (2011). *SOLHYCO_Final Public Report*.
- Herrmann, U., & Kearney, D. W. (2002). Survey of Thermal Energy Storage for Parabolic Trough Power Plants. *Journal of Solar Energy Engineering*, 124(2), 145. <http://doi.org/10.1115/1.1467601>
- Hong, H., Pan, Y., Zhang, X., Han, T., Peng, S., & Jin, H. (2011). A Solar-Hybrid Power Plant Integrated With Ethanol Chemical-Looping Combustion. In *Volume 3: Controls, Diagnostics and Instrumentation; Education; Electric Power; Microturbines and Small Turbomachinery; Solar Brayton and Rankine Cycle* (pp. 997–1010). ASME. <http://doi.org/10.1115/GT2011-45600>
- Howard, D., & Harley, R. G. (2010). Modeling of dish-Stirling solar thermal power generation. In *IEEE PES General Meeting* (pp. 1–7). IEEE. <http://doi.org/10.1109/PES.2010.5590188>
- IEA. (2013). Levelized cost calculation from TIMES - TIMES User Note. IEA.
- IEA. (2014a). *Technology Roadmap Solar Photovoltaic Energy*. Retrieved from http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapSolarPhotovoltaicEnergy_2014edition.pdf

- IEA. (2014b). *Technology Roadmap Solar Thermal Electricity*. Retrieved from www.iea.org
- IEA. (2015). *Tracking Clean Energy Progress 2015*. Retrieved from http://www.iea.org/media/etp/Tracking_Clean_Energy_Progress.pdf
- IEA-NEA-OECD. (2010). *Projected Costs of Generating Electricity. Atomic Energy* (Vol. 118 Suppl). OECD Publishing. <http://doi.org/10.1787/9789264084315-en>
- IEA-OECD. (2009). *Renewable Energy Essentials: Concentrating Solar Thermal Power*. IEA-OECD. Retrieved from <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/renewable-energy-essentials-concentrating-solar-thermal-power.html>
- Incropera, F., & DeWitt, D. (1990). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (Third Edit). New York: NY: John Wiley and Sons.
- Iniesta, A. C., Diago, M., Delclos, T., Falcoz, Q., Shamim, T., & Calvet, N. (2015). Gravity-fed Combined Solar Receiver/Storage System Using Sand Particles as Heat Collector, Heat Transfer and Thermal Energy Storage Media. *Energy Procedia*, 69, 802–811. <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.089>
- IRENA. (2015). *Renewable power generation costs in 2014*.
- Iverson, B. D., Conboy, T. M., Pasch, J. J., & Kruizenga, A. M. (2013). Supercritical CO₂ Brayton cycles for solar-thermal energy. *Applied Energy*, 111, 957–970. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.06.020>
- Kalogirou, S. A. (2009). *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. Elsevier Inc.
- Kalogirou, S., Lalot, S., Florides, G., & Desmet, B. (2008). Development of a neural network-based fault diagnostic system for solar thermal applications. *Solar Energy*, 82(2), 164–172. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2007.06.010>
- Kearney, D., Herrmann, U., Nava, P., Kelly, B., Mahoney, R., Pacheco, J., ... Price, H. (2003). Assessment of a Molten Salt Heat Transfer Fluid in a Parabolic Trough Solar Field. *Journal of Solar Energy Engineering*, 125(2), 170. <http://doi.org/10.1115/1.1565087>
- Kelly, B., Herrmann, U., & Hale, M. J. (2001). OPTIMIZATION STUDIES FOR INTEGRATED SOLAR COMBINED CYCLE SYSTEMS. In *Proceedings of Solar Forum 2001 Solar Energy: The Power to Choose*.
- Kistler, B. (1986). *A User's Manual for DELSOL3*.
- Kitskinny. (2013). The Solar Power Towers of Seville, Spain. Retrieved June 10, 2016, from <https://kitskinny.wordpress.com/2013/09/06/the-solar-power-towers-of-seville-spain/>
- Kitzmler, K., & Miller, F. (2011a). Effect of Variable Guide Vanes and Natural Gas Hybridization for Accommodating Fluctuations in Solar Input to a Gas Turbine. In *Proceedings of ASME Turbo Expo* (Vol. 134, p. 41008). <http://doi.org/10.1115/1.4006894>
- Kitzmler, K., & Miller, F. (2011b). Thermodynamic Cycles for a Small Particle Heat Exchange Receiver Used in Concentrating Solar Power Plants. *Journal of Solar Energy Engineering*, 133(3), 31014. <http://doi.org/10.1115/1.4004270>
- Kitzmler, K., & Miller, F. (2012). Effect of Variable Guide Vanes and Natural Gas Hybridization for Accommodating Fluctuations in Solar Input to a Gas Turbine. *Journal of Solar Energy Engineering*, 134(4), 41008. <http://doi.org/10.1115/1.4006894>

- Klimenko, V. V. (1988). A generalized correlation for two-phase forced flow heat transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 31(3), 541–552. [http://doi.org/10.1016/0017-9310\(88\)90035-X](http://doi.org/10.1016/0017-9310(88)90035-X)
- Klimenko, V. V. (1990). A generalized correlation for two-phase forced flow heat transfer—second assessment. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 33(10), 2073–2088. [http://doi.org/10.1016/0017-9310\(90\)90110-G](http://doi.org/10.1016/0017-9310(90)90110-G)
- Koivu, T. G. (2007). New Technique for Steam Injection (STIG) Using Once Through Steam Generator (GTI/OTSG) Heat Recovery to Improve Operational Flexibility and Cost Performance. *17th Symposium on Industrial Application of Gas Turbines (IAGT)*, 4–32.
- Kosla, L., Hamill, J., & Strothers, J. (1983). Inject steam in a gas turbine - but not just for NO_x control. *Power*. McGraw-Hill, Inc. Retrieved from http://intpower.com/archives/repr_feb_1983_power.pdf
- Kost, C., Mayer, J. N., Thomsen, J., Hartmann, N., Senkpiel, C., Philipps, S., ... Schlegel, T. (2013). Levelized Cost of Electricity Renewable Energy Technologies. FRAUNHOFER Institute for Solar Energy Systems ISE. Retrieved from <https://www.ise.fraunhofer.de/en>
- Kribus, a., Zaibel, R., Carey, D., Segal, A., & Karni, J. (1998). A solar-driven combined cycle power plant. *Solar Energy*, 62(2), 121–129. [http://doi.org/10.1016/S0038-092X\(97\)00107-2](http://doi.org/10.1016/S0038-092X(97)00107-2)
- Krieger, G. C., De Campos, A. P. V., Filho, F. L. S., & De Souza, R. C. (2012). A swirler stabilized combustion chamber for a micro-gas turbine fuelled with natural gas. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 34(4), 441–449. <http://doi.org/10.1590/S1678-58782012000400004>
- Kurzke, J. (2012). *GasTurb 12 Manual*. Retrieved from <http://www.gasturb.de/manual.html>
- Kusterer, K., Braun, R., Köllen, L., Sugimoto, T., Tanimura, K., & Bohn, D. (2013). Combined Solar Thermal Gas Turbine and Organic Rankine Cycle Application for Improved Cycle Efficiencies. In *Volume 4: Ceramics; Concentrating Solar Power Plants; Controls, Diagnostics and Instrumentation; Education; Electric Power; Fans and Blowers* (p. V004T05A005). ASME. <http://doi.org/10.1115/GT2013-94713>
- Kusterer, K., Braun, R., Moritz, N., Lin, G., & Bohn, D. (2012). Helium Brayton Cycles With Solar Central Receivers: Thermodynamic and Design Considerations. In *Volume 6: Oil and Gas Applications; Concentrating Solar Power Plants; Steam Turbines; Wind Energy* (p. 271). ASME. <http://doi.org/10.1115/GT2012-68407>
- Kusterer, K., Braun, R., Moritz, N., Sugimoto, T., Tanimura, K., & Bohn, D. (2013). Comparative Study of Solar Thermal Brayton Cycles Operated With Helium or Argon. In *Volume 4: Ceramics; Concentrating Solar Power Plants; Controls, Diagnostics and Instrumentation; Education; Electric Power; Fans and Blowers* (p. V004T05A007). ASME. <http://doi.org/10.1115/GT2013-94990>
- Laing, D., Bauer, T., Lehmann, D., & Bahl, C. (2010). Development of a Thermal Energy Storage System for Parabolic Trough Power Plants With Direct Steam Generation. *Journal of Solar Energy Engineering*, 132(2), 21011. <http://doi.org/10.1115/1.4001472>
- Lazard. (2015). *Levelized Cost of Energy Analysis 9.0. Lazard*. Retrieved from <http://www.lazard.com/>

- Lei, D., Wang, Z., & Li, J. (2009). The study of one-through solar absorber receiver. *2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply*, 1–4. <http://doi.org/10.1109/SUPERGEN.2009.5348147>
- Leyzerovich, A. (2008). *Steam Turbines for Modern Fossil-Fuel Power Plants*. The Fairmont Press, Inc.
- Livshits, M., & Kribus, A. (2012a). Performance and Water Consumption of the Solar Steam-Injection Gas Turbine Cycle. *Journal of Solar Energy Engineering*, 135(1), 11020. <http://doi.org/10.1115/1.4007687>
- Livshits, M., & Kribus, A. (2012b). Solar hybrid steam injection gas turbine (STIG) cycle. *Solar Energy*, 86(1), 190–199. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2011.09.020>
- Llorente García, I., Álvarez, J. L., & Blanco, D. (2011). Performance model for parabolic trough solar thermal power plants with thermal storage: Comparison to operating plant data. *Solar Energy*, 85(10), 2443–2460. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2011.07.002>
- Manzolini, G., Giostri, A., Saccilotto, C., Silva, P., & Macchi, E. (2012). A Numerical Model for Off-Design Performance Prediction of Parabolic Trough Based Solar Power Plants. *Journal of Solar Energy Engineering*, 134(1), 11003. <http://doi.org/10.1115/1.4005105>
- Mathioudakis, K. (2002). Evaluation of steam and water injection effects on gas turbine operation using explicit analytical relations. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 216(6), 419–431. <http://doi.org/10.1243/095765002761034195>
- Mattingly, J. D., Heiser, W. H., & Pratt, D. T. (2002). *Aircraft Engine Design* (2nd Edition). AIAA Education Series.
- Meteotest. (2016). Meteororm. Retrieved October 18, 2016, from <http://www.meteororm.com/>
- Mills, A. (1995). *Heat and Mass Transfer*. CRC Press.
- Mohaghegh, S. M. (2015). CSP vs PV – Understanding the current situation and future outlook. Retrieved April 14, 2016, from <https://blogs.ucl.ac.uk/sustainable-resources/2015/11/30/csp-vs-pv-understanding-the-current-situation-and-future-outlook/>
- Mohagheghi, M., & Kapat, J. (2013). Thermodynamic Optimization of Recuperated S-CO₂ Brayton Cycles for Solar Tower Applications. In *Volume 2: Aircraft Engine; Coal, Biomass and Alternative Fuels; Cycle Innovations* (p. V002T07A013). ASME. <http://doi.org/10.1115/GT2013-94799>
- Montes, M. J., Abánades, A., & Martínez-Val, J. M. (2010). Thermofluidynamic Model and Comparative Analysis of Parabolic Trough Collectors Using Oil, Water/Steam, or Molten Salt as Heat Transfer Fluids. *Journal of Solar Energy Engineering*, 132(2), 21001. <http://doi.org/10.1115/1.4001399>
- Moss, T. A., & Brosseau, D. A. (2005). *Final test results for the Schott HCE on a LS-2 collector*. Albuquerque, NM, and Livermore, CA (United States). Retrieved from <http://dx.doi.org/10.2172/958386>
- Mukhopadhyay, S., Ghosh, S., & Mandal, B. K. (2011). MW Level Solar Powered Combined Cycle Plants: Performance Prediction Using Thermodynamic Methods. In *Proceedings of ASME Turbo Expo* (pp. 1–7).
- Müller-Steinhagen, H., & Trieb, F. (2004). Concentrating solar power: A review of the technology. *Quarterly of the Royal Academy of Engineering, Ingenia*, (Issue 18).

- NewEnergyDirection. (2010). Solar Stirling Engine. Retrieved June 10, 2016, from <http://newenergydirection.com/blog/2010/01/solar-stirling-engine/>
- NREL. (2004). SPCTRAL2. NREL.
- NREL. (2012). Archimede. Retrieved June 20, 2016, from https://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project_detail.cfm/projectID=19
- NREL. (2013a). ISCC Ain Beni Mathar. Retrieved June 20, 2016, from https://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project_detail.cfm/projectID=43
- NREL. (2013b). ISCC Kuraymat. Retrieved June 20, 2016, from https://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project_detail.cfm/projectID=65
- NREL. (2013c). Maricopa Solar Project. Retrieved June 20, 2016, from https://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project_detail.cfm/projectID=58
- NREL. (2014a). Ivanpah Solar Electric Generating System. Retrieved June 20, 2016, from https://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project_detail.cfm/projectID=62
- NREL. (2014b). SAM Manual-Help. NREL. Retrieved from <https://www.nrel.gov/analysis/sam/help/html-php/index.html>
- NREL. (2015a). ISCC Hassi R'mel. Retrieved June 20, 2016, from https://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project_detail.cfm/projectID=44
- NREL. (2015b). Planta Solar 10. Retrieved June 20, 2016, from http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project_detail.cfm/projectID=38
- NREL. (2016). Concentrating Solar Power Projects by Technology. Retrieved December 2, 2016, from https://www.nrel.gov/csp/solarpaces/by_technology.cfm
- Odeh, S. D., Morrison, G. L., & Behnia, M. (1998). Modelling of parabolic trough direct steam generation solar collectors. *Solar Energy*, 62(6), 395–406. [http://doi.org/10.1016/S0038-092X\(98\)00031-0](http://doi.org/10.1016/S0038-092X(98)00031-0)
- Ojo, C. O., Pont, D., Conte, E., & Carroni, R. (2012). Performance Evaluation of an Integrated Solar Combined Cycle. In *Volume 6: Oil and Gas Applications; Concentrating Solar Power Plants; Steam Turbines; Wind Energy* (p. 261). ASME. <http://doi.org/10.1115/GT2012-68134>
- Orosz, M. (2015). Photovoltaics and concentrating solar power: why hybridization makes sense. *SPIE Newsroom*. <http://doi.org/10.1117/2.1201508.006018>
- Pacheco, J. E., Showalter, S. K., & Kolb, W. J. (2002). Development of a Molten-Salt Thermocline Thermal Storage System for Parabolic Trough Plants. *Journal of Solar Energy Engineering*, 124(2), 153. <http://doi.org/10.1115/1.1464123>
- Patnode, A. (2006). *Simulation and Performance Evaluation of Parabolic Trough Solar Power Plants*. UNIVERSITY OF WISCONSIN-MADISON.
- Peng, S., Hong, H., Jin, H., & Wang, Z. (2012). An integrated solar thermal power system using intercooled gas turbine and Kalina cycle. *Energy*, 44(1), 732–740. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2012.04.063>
- Pitz-Paal, R., Dersch, J., & Milow, B. (2005). *European COncentrated Solar Thermal Road - Mapping*.
- Plotkin, A. R., Toupin, K. M., Gillum, C. B., Rancatore, R. J., Yang, T., & Mier, D. (2011). Solar Receiver Steam Generator Design for the Ivanpah Solar Electric Generating System. In *ASME 2011 Power Conference, Volume 2* (pp. 523–529). ASME. <http://doi.org/10.1115/POWER2011-55248>
- Price, H., Lüpfer, E., Kearney, D., Zarza, E., Cohen, G., Gee, R., & Mahoney, R. (2002). Advances in Parabolic Trough Solar Power Technology. *Journal of*

- Solar Energy Engineering*, 124(2), 109. <http://doi.org/10.1115/1.1467922>
- Putkaradze, V., Vorobieff, P., Mammoli, A., & Fathi, N. (2013). Inflatable free-standing flexible solar towers. *Solar Energy*, 98, 85–98. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2013.07.010>
- Qu, M., Yin, H., & Archer, D. H. (2010). Experimental and Model Based Performance Analysis of a Linear Parabolic Trough Solar Collector in a High Temperature Solar Cooling and Heating System. *Journal of Solar Energy Engineering*, 132(2), 21004. <http://doi.org/10.1115/1.4001406>
- Quero, M., Korzynietz, R., Ebert, M., Jiménez, A. a., del Río, A., & Brioso, J. a. (2014). Solugas – Operation Experience of the First Solar Hybrid Gas Turbine System at MW Scale. *Energy Procedia*, 49, 1820–1830. <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.03.193>
- Riffelmann, K., Krüger, D., & Pitz-Paal, R. (2000). Solar thermal plants – power and process heat. Klagenfurt (Österreich).
- Rohsenow, W., Hartnett, J., & Cho, Y. (1998). *Handbook of Heat Transfer* (Third). McGraw-Hill, Inc.
- RollsRoyce. (1996). *The Jet Engine* (Fifth). Rolls Royce.
- Sánchez-Orgaz, S., Medina, A., & Calvo Hernández, A. (2013). Recuperative solar-driven multi-step gas turbine power plants. *Energy Conversion and Management*, 67, 171–178. <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.11.006>
- Sandoz, R., Spelling, J., Laumert, B., & Fransson, T. (2013). Air-Based Bottoming-Cycles for Water-Free Hybrid Solar Gas-Turbine Power Plants. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 135(10), 101701. <http://doi.org/10.1115/1.4025003>
- Sarver, T., Al-Qaraghuli, A., & Kazmerski, L. L. (2013). A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 698–733. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.065>
- Schwarzbözl, P. (2006). *A TRNSYS Model Library for Solar Thermal Electric Components (STEC) Reference Manual*. Köln, Germany. Retrieved from http://sel.me.wisc.edu/trnsys/trnlib/stec/stec_refguide_v3.0.pdf
- Schwarzbözl, P., Buck, R., Sugarmen, C., Ring, A., Marcos Crespo, M. J., Altwegg, P., & Enrile, J. (2006). Solar gas turbine systems: Design, cost and perspectives. *Solar Energy*, 80(10), 1231–1240. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2005.09.007>
- Sen, Z. (2008). *Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques*. London: Springer London. <http://doi.org/10.1007/978-1-84800-134-3>
- SERI. (1985). *Silver/Glass Mirrors for Solar Thermal Systems*. Colorado, USA.
- Siemens. (2009). Industrial Steam Turbines. *Industrial Steam Turbines*. SIEMENS AG.
- SIEMENS. (2016). Siemens Generators. Retrieved May 18, 2016, from <http://www.energy.siemens.com/hq/en/fossil-power-generation/generators/>
- Sinai, J., Sugarmen, C., & Fisher, U. (2005). Adaptation and Modification of Gas Turbines for Solar Energy Applications. In *Volume 5: Turbo Expo 2005* (pp. 87–94). ASME. <http://doi.org/10.1115/GT2005-68122>
- Solaripedia. (2016). Solar Updraft Towers Generate Mega Power. Retrieved June 10, 2016, from

- http://www.solaripedia.com/13/371/5041/solar_updraft_tower_schematic_from_enviromission.html
- SolarMillennium. (2008). The parabolic trough power plants Andasol 1 to 3.
- Song, Y., Huang, W., & Zhu, X. (2012). A vision-based fault diagnosis system for heliostats in a central receiver solar power plant. *Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*, 3417–3421. <http://doi.org/10.1109/WCICA.2012.6359038>
- Spelling, J. (2013). *Hybrid Solar Gas-Turbine Power Plants - A Thermoeconomic Analysis*. KTH Royal Institute of Technology.
- Spelling, J., Favrat, D., Martin, A., & Augsburger, G. (2012). Thermoeconomic optimization of a combined-cycle solar tower power plant. *Energy*, 41(1), 113–120. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2011.03.073>
- Spelling, J., Jöcker, M., & Martin, A. (2011). Thermal Modeling of a Solar Steam Turbine With a Focus on Start-Up Time Reduction. In *Volume 3: Controls, Diagnostics and Instrumentation; Education; Electric Power; Microturbines and Small Turbomachinery; Solar Brayton and Rankine Cycle* (pp. 1021–1030). ASME. <http://doi.org/10.1115/GT2011-45686>
- Spelling, J., & Laumert, B. (2014). Thermoeconomic Evaluation of Solar Thermal and Photovoltaic Hybridization Options for Combined-Cycle Power Plants. In *Volume 3A: Coal, Biomass and Alternative Fuels; Cycle Innovations; Electric Power; Industrial and Cogeneration* (p. V03AT09A001). ASME. <http://doi.org/10.1115/GT2014-25173>
- Spelling, J., Laumert, B., & Fransson, T. (2012a). A Thermoeconomic Study of Low-Temperature Intercooled-Recuperated Cycles for Pure-Solar Gas-Turbine Applications. *Journal of Solar Energy Engineering*, 134(4), 41015. <http://doi.org/10.1115/1.4007532>
- Spelling, J., Laumert, B., & Fransson, T. (2012b). Optimal Gas-Turbine Design for Hybrid Solar Power Plant Operation. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 134(9), 92301. <http://doi.org/10.1115/1.4006986>
- Spelling, J., Laumert, B., & Fransson, T. (2013). A Comparative Thermoeconomic Study of Hybrid Solar Gas-Turbine Power Plants. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 136(1), 11801. <http://doi.org/10.1115/1.4024964>
- Stemmler, H. (1994). High-power industrial drives. *Proceedings of the IEEE*, 82(8), 1266–1286. <http://doi.org/10.1109/5.301688>
- Stine, W., & Geyer, M. (2001). Power From The Sun. Retrieved January 23, 2013, from <http://www.powerfromthesun.net/book.html>
- Takeda, T., Araki, H., Iwai, Y., Morisaki, T., & Sato, K. (2014). Test Results of 40MW-Class Advanced Humid Air Turbine and Exhaust Gas Water Recovery System. In *Volume 3A: Coal, Biomass and Alternative Fuels; Cycle Innovations; Electric Power; Industrial and Cogeneration* (p. V03AT07A037). ASME. <http://doi.org/10.1115/GT2014-27281>
- Torras, S., Pérez-Segarra, C. D., Rodríguez, I., Rigola, J., & Oliva, A. (2015). Parametric Study of Two-tank TES Systems for CSP Plants. *Energy Procedia*, 69, 1049–1058. <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.206>
- Turchi, C. (2010). *Parabolic Trough Reference Plant for Cost Modeling with the Solar Advisor Model (SAM)*. TP-550-47605. Golden, CO. USA. Retrieved from <http://www.nrel.gov/docs/fy10osti/47605.pdf>
- Turchi, C. S., Ma, Z., & Dyreby, J. (2012). Supercritical Carbon Dioxide Power Cycle Configurations for Use in Concentrating Solar Power Systems. In *Volume 5:*

- Manufacturing Materials and Metallurgy; Marine; Microturbines and Small Turbomachinery; Supercritical CO₂ Power Cycles* (p. 967). ASME.
<http://doi.org/10.1115/GT2012-68932>
- Turchi, C. S., Ma, Z., & Erbes, M. (2011). Gas Turbine/Solar Parabolic Trough Hybrid Designs. *Volume 3: Controls, Diagnostics and Instrumentation; Education; Electric Power; Microturbines and Small Turbomachinery; Solar Brayton and Rankine Cycle*, 989–996. <http://doi.org/10.1115/GT2011-45184>
- Utamura, M., & Tamaura, Y. (2006). A Solar Gas Turbine Cycle With Super-Critical Carbon Dioxide as a Working Fluid. *Volume 4: Cycle Innovations; Electric Power; Industrial and Cogeneration; Manufacturing Materials and Metallurgy, 2006*, 329–335. <http://doi.org/10.1115/GT2006-90864>
- Wagner, W., Cooper, J. R., Dittmann, A., Kijima, J., Kretzschmar, H.-J., Kruse, A., ... Willkommen, T. (2000). The IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 122(1), 150. <http://doi.org/10.1115/1.483186>
- Walsh, P., & Fletcher, P. (1998). *Gas Turbine Performance*. Blackwell Science Ltd.
- Walter Short, Daniel J. Packey, & Thomas Holt. (1995). A Manual for the Economic Evaluation of Energy Efficiency and Renewable Energy Technologies. *National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-46(March)*, 120. <http://doi.org/10.2172/35391>
- Wasserbauer, C. A., & Glassman, A. J. (1975). *Fortran program for predicting off-design performance of radial-inflow turbines*.
- Wesoff, E. (2013). The Sunset of Solel, Siemens and Solar Trough CSP Technology. Retrieved June 10, 2016, from <https://www.greentechmedia.com/articles/read/The-Sunset-of-Solel-Siemens-CSP-and-Solar-Trough-Technology>
- Wiese, F., Vajen, K., Krause, M., & Knoch, A. (2009). Automatic fault detection for big solar heating systems. *Proceedings of ISES World Congress 2007*, 3(Vanoli 01), 759–763. http://doi.org/10.1007/978-3-540-75997-3_143
- VISIONS. (2014). Solar Power Towers. Retrieved June 10, 2016, from <http://www.wisions.net/technologyradar/technology/solar-power-towers>
- Wolfertstetter, F., Pottler, K., Merrouni, A. A., Mezrhab, A., & Pitz-paal, R. (2012). A Novel Method for Automatic Real-Time Monitoring of Mirror Soiling Rates. In *SolarPACES Concentrated Solar Power and Chemical Energy Systems* (pp. 2–5). Marrakech, Morocco.
- Zarza, E., Rojas, M. E., González, L., Caballero, J. M., & Rueda, F. (2006). INDITEP: The first pre-commercial DSG solar power plant. *Solar Energy*, 80(10), 1270–1276. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2005.04.019>
- Zarza, E., Valenzuela, L., León, J., Weyers, H.-D., Eickhoff, M., Eck, M., & Hennecke, K. (2002). The DISS Project: Direct Steam Generation in Parabolic Trough Systems. Operation and Maintenance Experience and Update on Project Status. *Journal of Solar Energy Engineering*, 124(2), 126. <http://doi.org/10.1115/1.1467645>
- Zhang, S. (2016). A Huge Solar Plant Caught on Fire, and That's the Least of Its Problems. Retrieved July 10, 2016, from <https://www.wired.com/2016/05/huge-solar-plant-caught-fire-thats-least-problems/>
- Zhou, X., Wang, F., & Ochieng, R. M. (2010). A review of solar chimney power

technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(8), 2315–2338.
<http://doi.org/10.1016/j.rser.2010.04.018>

Δημοσιεύσεις

Kalathakis, C., Aretakis, N., Alexiou, A., Roumeliotis, I., & Mathioudakis, K. (2016). Study Of Solar Gas And Steam Turbines Performance. In 1st Energy Tech Forum. Athens, Greece.

Kalathakis, C., Aretakis, N., Roumeliotis, I., Alexiou, A., & Mathioudakis, K. (2016). Assessment of Solar Steam Injection in Gas Turbines. In Volume 3: Coal, Biomass and Alternative Fuels; Cycle Innovations; Electric Power; Industrial and Cogeneration; Organic Rankine Cycle Power Systems (p. V003T06A012). Seoul, South Korea: ASME.
<http://doi.org/10.1115/GT2016-57272>

Kalathakis, C., Aretakis, N., Roumeliotis, I., Alexiou, A., & Mathioudakis, K. (2016). Investigation of Different Solar Hybrid Gas Turbines and Exploitation of Rejected Sun Power. In Volume 3: Coal, Biomass and Alternative Fuels; Cycle Innovations; Electric Power; Industrial and Cogeneration; Organic Rankine Cycle Power Systems (p. V003T06A017). Seoul, South Korea: ASME.
<http://doi.org/10.1115/GT2016-57700>

Kalathakis, C., Aretakis, N., Roumeliotis, I., Alexiou, A., & Mathioudakis, K. (2017). Assessment of Solar Gas Turbine Hybridization Schemes. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 139(6), 61701.
<http://doi.org/10.1115/1.4035289>

Kalathakis, C., Aretakis, N., Roumeliotis, I., Alexiou, A., & Mathioudakis, K. (2017). Concentrated solar power components toolbox in an object oriented environment. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 70, 21–35.
<http://doi.org/10.1016/j.simpat.2016.10.002>

Kalathakis, C., Aretakis, N., Roumeliotis, I., Alexiou, A., & Mathioudakis, K. Simulation Models for Supporting the Solar Thermal Power Plant Operator. *Submitted to Renewable Energy*

Kalathakis, C., Aretakis, N., & Mathioudakis, K. Solar Hybrid Micro Gas Turbine Based On Turbocharger. *Submitted to Sustainable Energy Technologies and Assessments*