

Ανάπτυξη και Αξιολόγηση Υβριδικού Ηλιακού-Θερμοηλεκτρικού Συστήματος Παραγωγής Ενέργειας σε Θαλάσσιο Περιβάλλον και Χρήση Υδροδυναμικής Πρόωσης

Αίας Τάτσης, 25^{ης} Μαρτίου 1, 83100, Σάμος, aias.v.tatsis@gmail.com,

Περίληψη

Σε αυτή τη μελέτη, παρουσιάζεται η ανάπτυξη και αξιολόγηση ενός θαλάσσιου, πλωτού, υβριδικού συστήματος παραγωγής ενέργειας, που ενσωματώνει ηλιακή (Monocrystalline Solar Panel, MSP) και θερμοηλεκτρική (Thermo-Electric Generation, TEG) παραγωγή και μαγνητο-υδρο-δυναμική (Magneto Hydro-Dynamics, MHD) πρόωση. Το προτεινόμενο σύστημα εκμεταλλεύεται τα φυσικά φαινόμενα της θερμοηλεκτρικής και φωτοηλεκτρικής παραγωγής ενέργειας αλλά και της μαγνητο-υδροδυναμικής και παρέχει μια καινοτόμο λύση για βιώσιμη παραγωγή ενέργειας, φιλική προς θαλάσσια περιβάλλοντα, βελτιστοποιώντας την παραγωγή ενέργειας και την αποδοτικότητα. Το υβριδικό σύστημα παραγωγής ενέργειας διαθέτει ένα μονοκρυσταλλικό ηλιακό πάνελ (MSP) και μια σειρά θερμοηλεκτρικών γεννητριών (TEG), τοποθετημένων κάτω από το ηλιακό πάνελ. Ο ηλιακός συλλέκτης και τα TEGs περιλαμβάνονται μέσα σε ένα γυάλινο θόλο κενού, το οποίο βοηθά στη διατήρηση των βέλτιστων θερμοκρασιών για θερμοηλεκτρική απόδοση μετατροπής. Η συσκευή πρόωσης MHD, είναι ενσωματωμένη κάτω από την πλατφόρμα του συστήματος, χρησιμοποιώντας ένα σιδηρομαγνητικό υλικό και μια σειρά μαγνητών νεοδυμίου διατεταγμένων απέναντι ο ένας από τον άλλον. Η ολοκληρωμένη ανάλυση απόδοσης του υβριδικού συστήματος παραγωγής ενέργειας, περιλαμβάνει μετρήσεις παραγόμενης ενέργειας και αποδοτικότητας, αξιολόγηση της απόδοσης της πρόωσης MHD και βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών και της θερμοκρασίας παραγωγής ενέργειας. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το σύστημα όχι μόνο αυξάνει τη συνολική απόδοση παραγωγής ενέργειας σε σύγκριση με τους αυτόνομους ηλιακούς συλλέκτες. Επιπλέον, η μελέτη επιβεβαιώνει τη βιωσιμότητα της πρόωσης MHD σε θαλάσσιο περιβάλλον, συμβάλλοντας στη συνεχιζόμενη έρευνα και ανάπτυξη καινοτόμων λύσεων για βιώσιμη παραγωγή ενέργειας και πράσινες μεταφορές σε θαλάσσιες περιοχές.

Λέξεις κλειδιά: Ηλιακός Συλλέκτης, Θερμοηλεκτρική Γεννήτρια, TEG, Μαγνητο-Υδροδυναμική, MHD, Ενεργειακή Απόδοση

1. Εισαγωγή

Η αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας, σε συνδυασμό με την ανάγκη ελαχιστοποίησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, έχει οδηγήσει στη διερεύνηση εναλλακτικών και βιώσιμων πηγών ενέργειας. Μια τέτοια προσέγγιση είναι η ανάπτυξη υβριδικών ενεργειακών συστημάτων που συνδυάζουν πολλαπλές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για την ενίσχυση της αποδοτικότητας, της αξιοπιστίας και της βιωσιμότητας. Το έργο που παρουσιάζεται σε αυτή την εργασία διερευνά ένα νέο πλωτό υβριδικό ενεργειακό σύστημα, το οποίο συνδυάζει ένα μονοκρυσταλλικό ηλιακό πάνελ (Monocrystalline Solar Panel, MSP), θερμοηλεκτρικές γεννήτριες (Thermo-Electric Generators, TEG), σωλήνες απαγωγής θερμότητας (Heat Pipes) και ένα μαγνητο-υδροδυναμικό (Magneto Hydro-Dynamics, MHD) σύστημα πρόωσης. Το κίνητρο για αυτή την εργασία είναι να σχεδιάσει και να βελτιστοποιήσει ένα σύστημα που μπορεί να αξιοποιήσει αποτελεσματικά την ηλιακή ενέργεια αξιοποιώντας την σταθερότητα θερμοκρασίας στη θάλασσα, διατηρώντας παράλληλα την σταθερότητα και προσαρμοστικότητα μιας πλωτής δομής, χρησιμοποιώντας ένα καινοτόμο σύστημα πρόωσης MHD.

Η πρωταρχική πρόκληση σε αυτό το έργο είναι ο σχεδιασμός και η βελτιστοποίηση του υβριδικού ενεργειακού συστήματος για την επίτευξη της υψηλότερης δυνατής απόδοσης παραγωγής ενέργειας, διατηρώντας παράλληλα τη σταθερότητα και την προσαρμοστικότητα του συστήματος σε ποικίλες συνθήκες. Το ερευνητικό ερώτημα που καθοδηγεί αυτό το έργο είναι: Πώς μπορεί να βελτιστοποιηθεί το προτεινόμενο υβριδικό ενεργειακό σύστημα για να μεγιστοποιηθεί η απόδοση παραγωγής ενέργειας, να διατηρηθεί η διαφορά θερμοκρασίας στα TEGs και να διασφαλιστεί η σταθερότητα της πλωτής δομής χρησιμοποιώντας ένα σύστημα πρόωσης MHD;

Οι κύριοι στόχοι του έργου είναι:

- Διερεύνηση της απόδοσης του μονοκρυσταλλικού ηλιακού συλλέκτη εντός του συστήματος γυάλινου θόλου και αξιολόγηση της επίδρασης της θερμοκρασίας στην απόδοση του πάνελ.
- Ανάλυση της απόδοσης των TEG σε διαφορετικές διάφορες θερμοκρασίας και προσδιορισμός της βέλτιστης για την αποδοτική παραγωγή ενέργειας.
- Αξιολόγηση των δυνατοτήτων μεταφοράς θερμότητας των

σωλήνων απαγωγής θερμότητας στη διατήρηση της ψυχρής πλευράς των TEGs και την αποτελεσματικότητα του συστήματος ψύξης θαλασσινού νερού στη διαχείριση της συνολικής θερμοκρασίας του συστήματος.

4. Αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος πρόωσης MHD, συμπεριλαμβανομένης της βέλτιστης απόστασης των μαγνητών για τη δημιουργία της μεγαλύτερης δυνατής πρόωσης και αποδοτικής λειτουργίας.

Το υπόλοιπο της εργασίας είναι οργανωμένο ως εξής:

Στο κεφάλαιο II παρουσιάζεται η θεωρητική υποστήριξη των επιμέρους συστημάτων αλλά και ανάλυση των σημαντικότερων σχετικών ερευνητικών εργασιών που έχουν προηγηθεί.

Το κεφάλαιο III παρέχει λεπτομερή περιγραφή του προτεινόμενου υβριδικού ενεργειακού συστήματος, συμπεριλαμβανομένων των μονοκρυσταλλικών ηλιακών συλλεκτών, των TEG, των σωλήνων απαγωγής θερμότητας και του συστήματος πρόωσης MHD. Συζητούνται οι προδιαγραφές και οι θεωρητικές αρχές κάθε στοιχείου.

Το κεφάλαιο IV παρουσιάζει μια μαθηματική ανάλυση και βελτιστοποίηση του υβριδικού ενεργειακού συστήματος, εστιάζοντας στην απόδοση των ηλιακών συλλεκτών, την απόδοση των TEG, την απόδοση των σωλήνων απαγωγής θερμότητας και το σύστημα πρόωσης MHD. Αυτό το κεφάλαιο περιλαμβάνει την ανάλυση σχετικών μαθηματικών τύπων, τον προσδιορισμό της βέλτιστης θερμοκρασίας για τη λειτουργία TEG και τον προσδιορισμό της βέλτιστης απόστασης των μαγνητών για μέγιστη παραγωγή δύναμης Lorentz.

Το κεφάλαιο V εξετάζει τη μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση του υβριδικού ενεργειακού συστήματος, και των πειραματικών προσεγγίσεων που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος.

Το κεφάλαιο VI παρουσιάζει τα αποτελέσματα της διαδικασίας βελτιστοποίησης, αντιμετωπίζοντας τους στόχους που περιγράφονται στο πεδίο εφαρμογής του έργου. Υπογραμμίζονται βασικά ευρήματα, όπως η βέλτιστη θερμοκρασία για τη λειτουργία TEG και τα βέλτιστα χαρακτηριστικά λειτουργίας για το σύστημα πρόωσης MHD.

Στο κεφάλαιο VII ολοκληρώνεται η εργασία συνοψίζοντας τα βασικά ευρήματα και τις συνεισφορές του έργου. Επιπλέον, αυτό το κεφάλαιο συζητά τους περιορισμούς της τρέχουσας μελέτης και προτείνει τομείς για μελλοντική έρευνα για την περαιτέρω προώθηση της ανάπτυξης του προτεινόμενου συστήματος.

II. Θεωρητικό Υπόβαθρο και Σχετική Έρευνα

A. Φωτοβολταϊκά και μετατροπή ηλιακής ενέργειας

Η ηλιακή ενέργεια είναι μια πολλά υποσχόμενη πηγή καθαρής, ανανεώσιμης ενέργειας που έχει ερευνηθεί ευρέως και χρησιμοποιείται σε διάφορες εφαρμογές. Η φωτοβολταϊκή τεχνολογία (PV) είναι μία από τις πιο κοινές μεθόδους μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια. Τα φωτοβολταϊκά κελιά, συνήθως κατασκευασμένα από πυρίτιο, απορροφούν το ηλιακό φως και παράγουν ζεύγη ηλεκτρονίων-

οπών, τα οποία στη συνέχεια διαχωρίζονται από ένα ηλεκτρικό πεδίο, παράγοντας τάση συνεχούς ρεύματος (DC) κατά μήκος του κελιού (Green et al., 2018). Οι μονοκρυσταλλικοί ηλιακοί συλλέκτες, οι οποίοι αποτελούνται από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο, προσφέρουν υψηλότερη απόδοση και καλύτερη απόδοση σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού σε σύγκριση με τους πολυκρυσταλλικούς ή λεπτού υμενίου ηλιακούς συλλέκτες (Parida et al., 2011).

Η έρευνα έχει επικεντρωθεί στη βελτίωση της απόδοσης των ηλιακών συλλεκτών, βελτιστοποιώντας τις ιδιότητες των υλικών, τη δομή και τις συνθήκες λειτουργίας τους (Chow, 2010). Τα τελευταία χρόνια, οι ηλιακοί συγκεντρωτές έχουν χρησιμοποιηθεί για την ενίσχυση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια των φωτοβολταϊκών, με αποτέλεσμα την αυξημένη παραγωγή ενέργειας (García et al., 2018). Επιπλέον, η χρήση εξειδικευμένων επιστρώσεων ή μεμβρανών στην επιφάνεια των ηλιακών συλλεκτών ή των γυάλινων θόλων που τους περικλείουν μπορεί να βοηθήσει στην παγίδευση της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας, αυξάνοντας την απόδοσή τους (Yuan et al., 2014).

B. Θερμοηλεκτρικές γεννήτριες (TEG)

Οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες (TEG) είναι συσκευές στερεάς κατάστασης που μετατρέπουν άμεσα τη θερμική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω του φαινομένου Seebeck (Snyder et al., 2008). Η αποτελεσματικότητα των TEG εξαρτάται κυρίως από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των θερμών και κρύων πλευρών τους και τις ιδιότητες του θερμοηλεκτρικού υλικού, που αντιστοιχείται από τη παράμετρο «figure of merit» ZT (Bell, 2008). Η έρευνα έχει επικεντρωθεί στην ανάπτυξη νέων υλικών με υψηλές τιμές ZT και στη βελτιστοποίηση των σχεδίων TEG για διάφορες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης της ανάκτησης θερμότητας αποβλήτων και της απομακρυσμένης παραγωγής ενέργειας (Vineis et al., 2010).

Μια σημαντική πρόκληση στην πρακτική εφαρμογή των TEG, είναι η διατήρηση της απαιτούμενης διαφοράς θερμοκρασίας, ιδιαίτερα όταν λειτουργούν σε συνδυασμό με άλλα συστήματα μετατροπής ενέργειας, όπως οι ηλιακοί συλλέκτες (He et al., 2015). Η ενσωμάτωση σωλήνων απαγωγής θερμότητας και συστημάτων ψύξης θαλασσινού νερού έχει προταθεί για την αντιμετώπιση αυτής της πρόκλησης, παρέχοντας αποτελεσματική μεταφορά θερμότητας και διαχείριση θερμοκρασίας για συστήματα που βασίζονται σε TEG (Xie et al., 2015).

Γ. Συστήματα ψύξης θαλασσινού νερού

Τα συστήματα ψύξης θαλασσινού νερού προσφέρουν μια χαμηλού κόστους και φιλική προς το περιβάλλον λύση για θερμική διαχείριση σε διάφορες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής ενέργειας, της αφαλάτωσης και του κλιματισμού (Isa et al., 2014). Η χρήση του θαλασσινού νερού ως ψυκτικού μέσου παρέχει αρκετά πλεονεκτήματα, όπως υψηλή ειδική θερμοχωρητικότητα και χαμηλό ιξώδες, τα οποία επιτρέπουν την αποτελεσματική μεταφορά θερμότητας και τις μειωμένες απαιτήσεις ισχύος άντλησης (Al-Rashed et al., 2015).

Οι σωλήνες θερμότητας, οι οποίοι χρησιμοποιούν μηχανισμό

ψύξης με εξάτμιση κλειστού βρόχου, μπορούν να ενσωματωθούν σε συστήματα ψύξης θαλασσινού νερού για την αποτελεσματική μεταφορά θερμότητας από την πηγή θερμότητας στο μέσο ψύξης (Faghri, 2012). Η απόδοση των σωλήνων απαγωγής θερμότητας εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως το υγρό εργασίας, η τριχοειδής δομή και το εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας (Reay et al., 2013). Στο πλαίσιο των συστημάτων που βασίζονται σε TEG, η χρήση σωλήνων απαγωγής θερμότητας σε συνδυασμό με ψύξη θαλασσινού νερού μπορεί να βοηθήσει στη διατήρηση της απαιτούμενης διαφοράς θερμοκρασίας για αποτελεσματική μετατροπή ενέργειας ελαχιστοποιώντας παράλληλα τη θερμική αντίσταση και τις απώλειες ενέργειας (Xie et al., 2015).

Δ. Μαγνητο-υδροδυναμική (MHD) πρόωση

Η μαγνητο-υδροδυναμική (MHD) πρόωση έχει αναδειχθεί ως μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία, με πιθανές εφαρμογές σε θαλάσσια συστήματα πρόωσης. Βασίζεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ ενός ηλεκτρικά αγώγιμου υγρού (όπως το θαλασσινό νερό) και ενός μαγνητικού πεδίου για την παραγωγή ώθησης, προσφέροντας πλεονεκτήματα όπως χαμηλό θόρυβο, υψηλή απόδοση και μειωμένη μηχανική πολυπλοκότητα σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα θαλάσσιας πρόωσης (Branover & Lykoudis, 1998).

Η αρχή λειτουργίας της πρόωσης MHD βασίζεται στη δύναμη Lorentz, η οποία εμφανίζεται σε φορτισμένα σωματίδια σε μαγνητικό πεδίο. Όταν ένα αγώγιμο ρευστό ρέει μέσα από ένα μαγνητικό πεδίο κάθετο προς την κατεύθυνσή του, τα φορτισμένα σωματίδια μέσα στο ρευστό βιώνουν μια δύναμη που είναι ορθογώνια, τόσο στο μαγνητικό πεδίο όσο και στην κατεύθυνση της ροής του ρευστού. Αυτή η δύναμη, γνωστή ως δύναμη Lorentz, έχει ως αποτέλεσμα την επιτάχυνση του ρευστού, δημιουργώντας ώθηση (Way, 1998).

Τα κύρια μέρη ενός συστήματος πρόωσης MHD περιλαμβάνουν μαγνήτες (είτε μόνιμους είτε ηλεκτρομαγνήτες), ηλεκτρόδια, πηγή ενέργειας και υγρό (συνήθως θαλασσινό νερό). Οι μαγνήτες είναι υπεύθυνοι για τη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου, ενώ τα ηλεκτρόδια χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή ενός ηλεκτρικού πεδίου μέσα στο ρευστό. Η πηγή ενέργειας, παρέχει την απαραίτητη τάση για την ροή του ηλεκτρικού ρεύματος μέσω του θαλασσινού νερού, που χρησιμεύει ως αγώγιμο μέσο μέσω του οποίου αλληλεπιδρούν τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία (Watanabe & Ito, 2000).

Τα τελευταία χρόνια, έχουν προταθεί και δοκιμαστεί διάφορες διαμορφώσεις και σχέδια συστημάτων πρόωσης MHD. Ένας τέτοιος σχεδιασμός είναι η χρήση γραμμικών επιταχυντών MHD, οι οποίοι αποτελούνται από μια σειρά μαγνητών και ηλεκτροδίων διατεταγμένων με γραμμικό τρόπο κατά μήκος της κατεύθυνσης της ροής ρευστού. Οι μαγνήτες δημιουργούν ένα ομοιόμορφο μαγνητικό πεδίο και τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται σε στρατηγικές θέσεις για να μεγιστοποιήσουν την αλληλεπίδραση μεταξύ του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου (Molokov et al., 2007). Βελτιστοποιώντας τη διάταξη των μαγνητών και των ηλεκτροδίων, καθώς και την εφαρμοζόμενη τάση και την ένταση του μαγνητικού πεδίου, οι ερευνητές μπόρεσαν να επιτύχουν σημαντικές βελτιώσεις στην αποτελεσματικότητα και την

απόδοση των συστημάτων πρόωσης MHD (Doss et al., 2009).

Ένας άλλος τομέας ενδιαφέροντος στην έρευνα πρόωσης MHD είναι η ανάπτυξη υλικών και εξαρτημάτων που μπορούν να αντέξουν το σκληρό θαλάσσιο περιβάλλον, διατηρώντας παράλληλα υψηλή απόδοση. Για παράδειγμα, οι ερευνητές έχουν διερευνήσει τη χρήση ανθεκτικών στη διάβρωση υλικών ηλεκτροδίων, όπως το τιτάνιο και ο ανοξείδωτος χάλυβας, για τη μείωση των επιπτώσεων της διάβρωσης που προκαλείται από το θαλασσινό νερό στην απόδοση του συστήματος (Kim et al., 2007).

Σχετικές εργασίες

Αρκετές προηγούμενες μελέτες έχουν διερευνήσει τη χρήση TEGs σε συνδυασμό με ηλιακούς συλλέκτες για τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης μετατροπής ενέργειας. Για παράδειγμα, οι Sun et al. (2021) ανέπτυξαν ένα φορητό ηλιακό σύστημα TEG για εφαρμογές τροφοδοσίας εκτός δικτύου. Το σύστημα αποτελούνταν από ένα ηλιακό πάνελ, μονάδες TEG και μια συστοιχία μπαταριών. Ενώ η προσέγγισή τους είναι παρόμοια με στην παρούσα εργασία, χρήση TEGs και ηλιακών συλλεκτών, το έργο μας διαφέρει στο ότι επικεντρώνεται στη χρήση ψύξης θαλασσινού νερό.

Σε μια άλλη μελέτη, οι Zhang et al. (2019) ανέπτυξαν ένα υβριδικό ηλιακό σύστημα TEG για κτιριακές εφαρμογές. Το σύστημά τους χρησιμοποίησε ένα ηλιακό πάνελ και μονάδες TEG για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε για να τροφοδοτήσει μια αντλία θερμότητας για σκοπούς θέρμανσης και ψύξης. Η παρούσα εργασία διαφέρει στο ότι έχει σχεδιαστεί για θαλάσσιες εφαρμογές και χρησιμοποιεί ψύξη θαλασσινού νερού και πρόωση MHD.

Σε μια τρίτη μελέτη, οι Jia et al. (2018) ανέπτυξαν ένα μη επανδρωμένο επιφανειακό όχημα (USV) με ηλιακή ενέργεια και TEG για εφαρμογές περιβαλλοντικής έρευνας. Το σύστημά τους χρησιμοποίησε ένα ηλιακό πάνελ, μονάδες TEG και συστοιχία μπαταριών για να τροφοδοτήσει το USV, το οποίο ήταν εξοπλισμένο με διάφορους αισθητήρες για τη συλλογή περιβαλλοντικών δεδομένων. Ενώ η προσέγγισή τους τροφοδοτείται επίσης από ηλιακή ενέργεια, το παρόν έργο διαφέρει στο ότι χρησιμοποιεί ψύξη θαλασσινού νερού και πρόωση MHD για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας και της ευελιξίας της θαλάσσιας πλατφόρμας.

Επιπλέον, έχουν υπάρξει αρκετές μελέτες που διερευνούν τη χρήση της πρόωσης MHD για θαλάσσιες εφαρμογές. Για παράδειγμα, οι Kim et al. (2017) ανέπτυξαν ένα σύστημα πρόωσης MHD για ένα υποβρύχιο ρομπότ. Το σύστημα χρησιμοποίησε μια συστοιχία μόνιμων μαγνητών και μια συστοιχία πηνίων για να δημιουργήσει δύναμη Lorentz, η οποία ώθησε το ρομπότ μέσα από το νερό. Σε μια άλλη μελέτη, οι Gurpta et al. (2018) διερευνήσαν τη χρήση πρόωσης MHD για μικρά σκάφη. Το σύστημά τους χρησιμοποίησε έναν μαγνητοϋδροδυναμικό προωθητήρα που τροφοδοτείται από μια πηγή ενέργειας DC για να ωθήσει το σκάφος. Ενώ η προσέγγισή είναι παρόμοια στη χρήση της πρόωσης MHD, το παρόν έργο διαφέρει στο ότι χρησιμοποιεί TEGs και ηλιακούς συλλέκτες για την παροχή πρόσθετης ισχύος και ενσωματώνει ψύξη

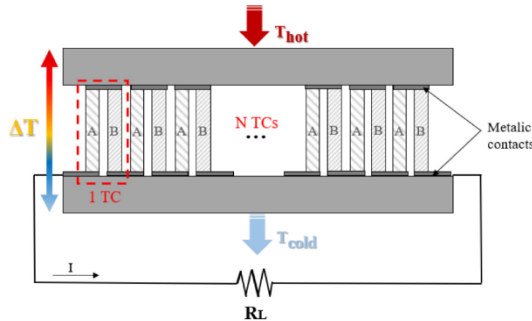
θαλασσινού νερού για τη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος.

Συνολικά, ενώ αρκετές προηγούμενες μελέτες έχουν διερευνήσει τη χρήση TEG, ηλιακών συλλεκτών και πρόωσης MHD για διάφορες εφαρμογές, το έργο μας συνδυάζει αυτές τις τεχνολογίες με μοναδικό τρόπο για να βελτιώσει την αποτελεσματικότητα και την ευελιξία μιας θαλάσσιας πλατφόρμας για παραγωγή ενέργειας και πρόωση.

IV. Πρότυπο σύστημα

A. Σχεδιασμός Υβριδικού Συστήματος Παραγωγής Ενέργειας

Για να σχεδιαστεί ένα αποτελεσματικό υβριδικό ενεργειακό σύστημα, είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη η επίδραση της θερμοκρασίας στους μονοκρυσταλλικούς ηλιακούς συλλέκτες, οι οποίοι είναι οι πιο αποδοτικοί συλλέκτες που διατίθενται στο εμπόριο. Η απόδοση των ηλιακών συλλεκτών μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, λόγω του αρνητικού συντελεστή θερμοκρασίας της ηλεκτρικής εξόδου του πάνελ. Οι μονοκρυσταλλικοί ηλιακοί συλλέκτες έχουν πτώση απόδοσης περίπου $-0,3\% / ^\circ\text{C}$ έως $-0,5\% / ^\circ\text{C}$ (Amin et al., 2018). Αυτό σημαίνει ότι η απόδοση του πάνελ μειώνεται κατά $0,3\%$ έως $0,5\%$ για κάθε βαθμό Κελσίου αύξησης της θερμοκρασίας.



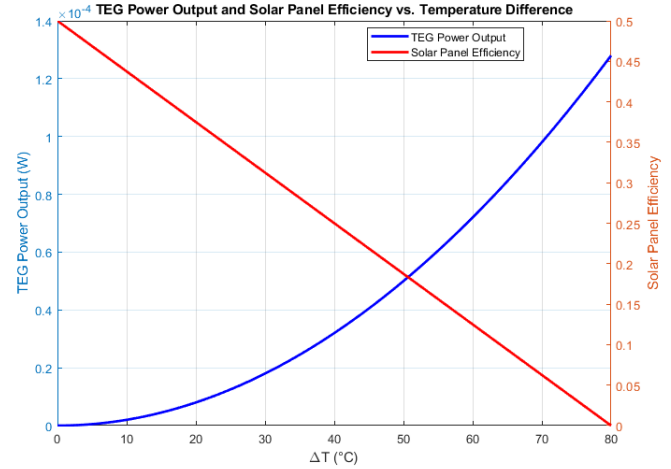
Εικόνα 1 Θερμοηλεκτρική Γεννήτρια TEG

Ωστόσο, η αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να είναι επωφελής για την απόδοση των θερμοηλεκτρικών γεννητριών (TEG) που χρησιμοποιούνται στο υβριδικό ενεργειακό σύστημα. Τα TEG λειτουργούν με βάση το φαινόμενο Seebeck, το οποίο δημιουργεί μια διαφορά ηλεκτρικού δυναμικού σε μια βαθμίδα θερμοκρασίας. Επομένως, μια υψηλότερη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της θερμής και της κρύας πλευράς των TEG μπορεί να οδηγήσει σε υψηλότερη απόδοση μετατροπής ενέργειας (Snyder et al., 2008).

Ωστόσο, υπάρχει μια αντιστάθμιση μεταξύ της απόδοσης του ηλιακού συλλέκτη και του TEG. Θεωρητικά καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία, η απόδοση του ηλιακού συλλέκτη μειώνεται, ενώ η απόδοση του TEG αυξάνεται. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να βρεθεί ένα βέλτιστο σημείο θερμοκρασίας όπου μεγιστοποιείται η συνδυασμένη απόδοση του ηλιακού συλλέκτη και του TEG.

Αρκετές μελέτες έχουν διερευνήσει την επίδραση της θερμοκρασίας στην απόδοση των TEGs και των ηλιακών συλλεκτών και έχουν προτείνει διάφορες τεχνικές για τη βελτιστοποίηση της θερμοκρασίας του συστήματος. Για παράδειγμα, οι Xie et al. (2015) πρότειναν ένα υβριδικό σύστημα

που χρησιμοποιούσε ένα σύστημα ψύξης θαλασσινού νερού και σωλήνες απαγωγής θερμότητας για τη διαχείριση της θερμοκρασίας των TEG, παρέχοντας παράλληλα ψύξη για τους ηλιακούς συλλέκτες. Διαπίστωσαν ότι το σύστημα θα μπορούσε να επιτύχει μέγιστη απόδοση μετατροπής ενέργειας $12,6\%$ βελτιστοποιώντας τη θερμοκρασία των TEGs και των ηλιακών συλλεκτών.



Εικόνα 2 Μεταβολή παραγόμενης ισχύος TEG και απόδοσης Monocrystalline Solar panel σε σχέση με τη μεταβολή της θερμοκρασίας

Οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες (TEG) μετατρέπουν τη θερμική ενέργεια απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω φαινομένου Seebeck. Σε ένα TEG, η διαφορά θερμοκρασίας (ΔT) σε θερμοηλεκτρικό υλικό δημιουργεί τάση (V_{TEG}) ανάλογη με τον συντελεστή Seebeck (S) του υλικού. Καθώς το ρεύμα (I_{TEG}) ρέει μέσω του TEG, το οποίο έχει ηλεκτρική αντίσταση (R_{TEG}), παράγεται ηλεκτρική ισχύς (P_{TEG}) σύμφωνα με:

$$P_{TEG} = \frac{S^2 \Delta T^2}{R_{TEG}} \quad \text{Εξ. 1}$$

Η αποτελεσματικότητα ενός TEG (η_{TEG}) αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για την αξιολόγηση της απόδοσής του. Ορίζεται ως ο λόγος της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος (P_{TEG}) προς την είσοδο θερμικής ισχύος (Q_{TEG}), όπου $Q_{TEG} = K * \Delta T$, και K είναι η θερμική αγωγιμότητα του TEG. Η απόδοση δείχνει πόσο αποτελεσματικά το TEG μπορεί να μετατρέψει τη θερμική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Γενικά, η απόδοση TEG εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού, τη διαφορά θερμοκρασίας σε ολόκληρη τη συσκευή και τις θερμικές και ηλεκτρικές αντιστάσεις.

$$\eta_{TEG} = \frac{S^2 \Delta T}{R_{TEG} K} \quad \text{Εξ. 2}$$

Προκειμένου να αυξηθεί η απόδοση του υβριδικού ενεργειακού συστήματος σε συνθήκες χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας, μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ της ζεστής και της κρύας πλευράς του TEG, οδηγώντας σε μείωση της αποτελεσματικότητάς του.

Λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η εφαρμογή ενός θαλάμου κενού, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απομάκρυνση αέρα και άλλων αερίων από το σύστημα, δημιουργώντας ένα περιβάλλον κενού. Αυτό το περιβάλλον κενού μειώνει τη

μεταφορά θερμότητας με μεταφορά και αγωγιμότητα, επιτρέποντας υψηλότερες διαφορές θερμοκρασίας και αυξημένη απόδοση TEG. Επιπλέον, το περιβάλλον κενού μπορεί να συμβάλει και στη μείωση της διάβρωσης και στην αύξηση της διάρκειας ζωής των εξαρτημάτων του συστήματος. Ως εκ τούτου, η εφαρμογή ενός θαλάμου κενού στο υβριδικό ενεργειακό σύστημα μπορεί να βοηθήσει στην επίτευξη βέλτιστων συνθηκών για την παραγωγή ενέργειας, ειδικά σε συνθήκες χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας, και να βελτιώσει τη συνολική απόδοση και αξιοπιστία του συστήματος.

Η ψύξη με θαλασσινό νερό είναι μια αποτελεσματική μέθοδος για την αύξηση της απόδοσης του υβριδικού ενεργειακού συστήματος παρέχοντας ένα σταθερό περιβάλλον θερμοκρασίας για τα TEG. Το θαλασσινό νερό, με την υψηλή θερμική αγωγιμότητα και το σταθερό εύρος θερμοκρασίας 15-18 °C, μπορεί να λειτουργήσει ως ψύκτρα για το TEG, επιτρέποντας στη μία πλευρά της γεννήτριας να διατηρήσει μια σταθερή διαφορά θερμοκρασίας με την άλλη πλευρά, η οποία είναι κρίσιμη για τη βέλτιστη μετατροπή ενέργειας. Με αποτελεσματική μεταφορά θερμότητας και έλεγχο θερμοκρασίας, η ψύξη με θαλασσινό νερό συμβάλλει στη μεγιστοποίηση της ισχύος εξόδου του TEG και στη βελτίωση της συνολικής απόδοσης του υβριδικού ενεργειακού συστήματος.

B. Σχεδιασμός Συστήματος Πρόωσης MHD

Στη παρούσα εργασία προτείνεται ένα σύστημα πρόωσης MHD για θαλασσινό νερό που είναι βελτιστοποιημένο για να χρησιμοποιεί μόνιμους μαγνήτες και ενέργεια που παράγεται από το υβριδικό ενεργειακό σύστημα. Αυτό το σύστημα MHD είναι ουσιαστικά ένας γραμμικός κινητήρας που ωθεί το θαλασσινό νερό μέσω της δύναμης Lorentz που παράγεται από την αλληλεπίδραση ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων. Το σύστημα υλοποιείται ως τετράγωνος σωλήνας με μόνιμους μαγνήτες στις δύο πλευρές και ηλεκτρικές πλάκες στις άλλες δύο πλευρές, οι οποίες δημιουργούν την τρέχουσα ροή. Χρησιμοποιώντας μόνιμους μαγνήτες, έχει εξαιρεθεί η ανάγκη για μια εξωτερική πηγή ενέργειας για τους μαγνήτες, μειώνοντας έτσι την πολυπλοκότητα και το κόστος του συστήματος. Το σύστημα MHD έχει σχεδιαστεί για να εξασφαλίσει υψηλή απόδοση, χαμηλό θόρυβο και ελάχιστη μηχανική πολυπλοκότητα.

Η χρήση χαμηλής τάσης 1,2V είναι ωφέλιμη για την πρόωση MHD επειδή σε αυτή την τάση, δεν υπάρχει σημαντική ηλεκτρόλυση του νερού (Zhang et al., 2014). Η ηλεκτρόλυση μπορεί να συμβεί όταν η τάση που εφαρμόζεται στο θαλασσινό νερό είναι πολύ υψηλή, οδηγώντας στη διάσπαση του νερού στα συστατικά του στοιχεία, υδρογόνο και οξυγόνο. Αυτό όχι μόνο μειώνει την απόδοση του συστήματος πρόωσης MHD, αλλά μπορεί επίσης να οδηγήσει στο σχηματισμό φυσαλίδων αερίου, που εμποδίζουν τη ροή του νερού και μειώνουν την ώθηση που παράγεται. Με τη χρήση χαμηλής τάσης, η απόδοση του συστήματος πρόωσης MHD μπορεί να μεγιστοποιηθεί και ο κίνδυνος ηλεκτρόλυσης και σχηματισμού φυσαλίδων αερίου μπορεί να ελαχιστοποιηθεί, οδηγώντας σε ένα πιο αξιόπιστο και αποτελεσματικό σύστημα θαλάσσιας πρόωσης.

Η απόσταση των μαγνητών είναι μια κρίσιμη παράμετρος στο σχεδιασμό ενός συστήματος πρόωσης MHD, καθώς επηρεάζει άμεσα την επιφάνεια της ηλεκτρικής επαφής και ως εκ τούτου την ποσότητα ρεύματος που μπορεί να ρέει μέσω του θαλασσινού νερού. Η ποσότητα του ρεύματος που παράγεται, εξαρτάται από την αντίσταση στο θαλασσινό νερό, η οποία με τη σειρά της είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων, όπως η θερμοκρασία, η αλατότητα και η ταχύτητα ροής. Καθώς η απόσταση μεταξύ των μαγνητών αυξάνεται, η επιφάνεια της ηλεκτρικής επαφής ανάμεσα στους μαγνήτες αυξάνεται επίσης, με αποτέλεσμα χαμηλότερη αντίσταση στο θαλασσινό νερό και υψηλότερη παραγωγή ρεύματος. Ωστόσο, αυτό οδηγεί σε μείωση της έντασης του μαγνητικού πεδίου και ως εκ τούτου σε μείωση της δύναμης Lorentz που παράγεται από το σύστημα. Επομένως, υπάρχει μια αντιστάθμιση μεταξύ της επιφάνειας της ηλεκτρικής επαφής και της έντασης του μαγνητικού πεδίου και πρέπει να βρεθεί μια βέλτιστη απόσταση μαγνήτη για να επιτευχθεί η υψηλότερη απόδοση.

Από την άλλη, καθώς οι μαγνήτες έρχονται πιο κοντά μεταξύ τους, η ένταση του μαγνητικού πεδίου αυξάνεται, με αποτέλεσμα μια ισχυρότερη δύναμη Lorentz να παράγεται από το σύστημα.

Ωστόσο, αυτό οδηγεί σε μείωση της επιφάνειας της ηλεκτρικής πλάκας και, ως εκ τούτου, σε αύξηση της αντίστασης στο θαλασσινό νερό και μείωση της δύναμης. Επομένως, πρέπει να βρεθεί μια βέλτιστη απόσταση μαγνήτη για να εξισορροπηθεί η αντιστάθμιση μεταξύ της περιοχής της ηλεκτρικής πλάκας και της έντασης του μαγνητικού πεδίου για να επιτευχθεί η υψηλότερη δυνατή απόδοση. Επιπλέον, ο σχεδιασμός και η διαμόρφωση του μαγνήτη παίζουν σημαντικό ρόλο στην απόδοση του συστήματος MHD. Οι μόνιμοι μαγνήτες συχνά προτιμώνται έναντι των ηλεκτρομαγνητών, καθώς είναι πιο αξιόπιστοι, απαιτούν λιγότερη συντήρηση και έχουν χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας. Ωστόσο, οι διαστάσεις του μαγνήτη θα πρέπει να επιλέγονται προσεκτικά για να επιτευχθεί η επιθυμητή ένταση και κατεύθυνση μαγνητικού πεδίου για βέλτιστη απόδοση.

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου B μαγνητών νεοδυμίου που βρίσκονται απέναντι ο ένας από τον άλλο και συνδέονται με σιδηρομαγνητικό υλικό για να δημιουργήσουν ένα μαγνητικό κύκλωμα με κενό, εκεί που λαμβάνει χώρα το MHD, το οποίο αντιπροσωπεύει την απόσταση μεταξύ των μαγνητών, μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο τύπο:

$$B = \frac{\mu_0 N H}{2 \left(\frac{d}{2} + s \right)^2} \quad \text{Εξ. 3}$$

όπου μ_0 είναι η διαπερατότητα του ελεύθερου χώρου, N είναι ο αριθμός των μαγνητών, H είναι η ένταση του μαγνητικού πεδίου των μαγνητών, d είναι η απόσταση κενού μεταξύ των μαγνητών και s είναι το πάχος του σιδηρομαγνητικού υλικού. Υπολογίζοντας την ένταση του μαγνητικού πεδίου, μπορούμε να προσδιορίσουμε τη μαγνητική δύναμη που δρα στο ηλεκτρικά αγωγίμο θαλασσινό νερό στο σύστημα MHD. Ως εκ τούτου, η βελτιστοποίηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου είναι ζωτικής σημασίας για το σχεδιασμό ενός αποδοτικού και

αποτελεσματικού συστήματος πρόωσης MHD.

Η ροή ρεύματος που παράγεται στο θαλασσινό νερό μεταξύ δύο τετράγωνων ηλεκτροδίων με απόσταση l μεταξύ τους και πλάτος d , που αντιστοιχεί στην απόσταση των μαγνητών, μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας το νόμο του Ohm. Η τάση που εφαρμόζεται στα ηλεκτρόδια είναι 1,2V και η αντίσταση του θαλασσινού νερού εξαρτάται από την αλατότητα και τη θερμοκρασία του. Υποθέτοντας αγωγιμότητα θαλασσινού νερού 4,5 S/m στους 20°C, το ρεύμα μέσω του θαλασσινού νερού μεταξύ των ηλεκτροδίων μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τον τύπο:

$$I = \frac{V d m}{\rho l} \quad \text{Εξ. 4}$$

όπου ρ είναι η ειδική αντίσταση θαλασσινού νερού, d η απόσταση των μαγνητών που καθορίζει το ενεργό εμβαδό των πλακών ηλεκτροδίων και m το μήκος των πλακών ηλεκτροδίων και l η απόσταση των δύο πλακών ηλεκτροδίων.

Επομένως, η ισχύς και η διάταξη των μαγνητών και των ηλεκτροδίων πρέπει να σχεδιαστούν προσεκτικά για να βελτιστοποιήσουν τη παραγόμενη ένταση ρεύματος στο θαλασσινό νερό και τελικά την ώθηση που παράγεται από το σύστημα MHD.

Αντικαθιστώντας το I στον τύπο δύναμης Lorentz με V/R , όπου V είναι η τάση και R είναι η αντίσταση του θαλασσινού νερού, λαμβάνουμε:

$$F_{prop} = \frac{\mu_0 N H V d m}{2 \left(\frac{d}{2} + s \right)^2 \rho} \quad \text{Εξ. 5}$$

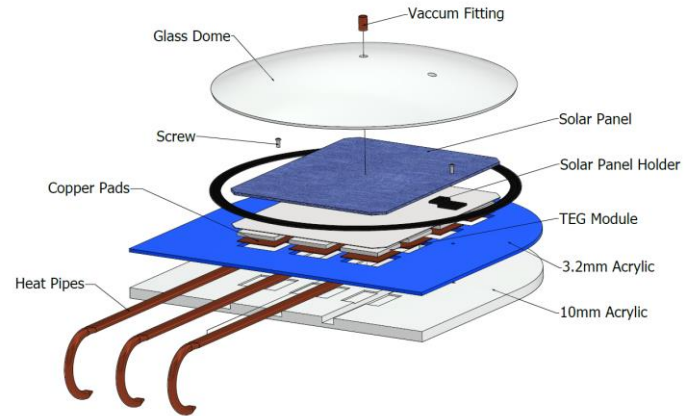
Αυτός ο τύπος δείχνει ότι η δύναμη Lorentz, F_{prop} που παράγεται από το σύστημα MHD, εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των μαγνητών d και από την τάση V , την ειδική αντίσταση του θαλασσινού νερού ρ και την ένταση του μαγνητικού πεδίου του μαγνήτη H . Βελτιστοποιώντας την απόσταση μεταξύ των μαγνητών και των ηλεκτροδίων, καθώς και την τάση και τη μαγνητική ροπή, μπορούμε να επιτύχουμε τη μέγιστη απόδοση του συστήματος MHD.

Από τον παραπάνω μαθηματικό τύπο, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι η δύναμη Lorentz που δρα στο θαλασσινό νερό στο σύστημα MHD, μπορεί να λάβει τη μέγιστη τιμή ως συνάρτηση της απόστασης των μαγνητών, δεδομένου ότι, το μέγεθος και η ένταση μαγνητικού πεδίου των μαγνητών, η τάση που εφαρμόζεται (η οποία είναι σταθερή στα 1,2V), το πάχος του σιδηρομαγνητικού υλικού και η αντίσταση του θαλασσινού νερού είναι σταθερά. Στο σύστημά μας η δύναμη που παράγεται είναι ανεξάρτητη από την απόσταση μεταξύ των δύο ηλεκτρικών επαφών. Επομένως, η βελτιστοποίηση της απόστασης των μαγνητών στο σύστημα μας είναι ζωτικής σημασίας για την επίτευξη της βέλτιστης δυνατής δύναμης πρόωσης.

Γ. Πειραματική διάταξη και συλλογή δεδομένων

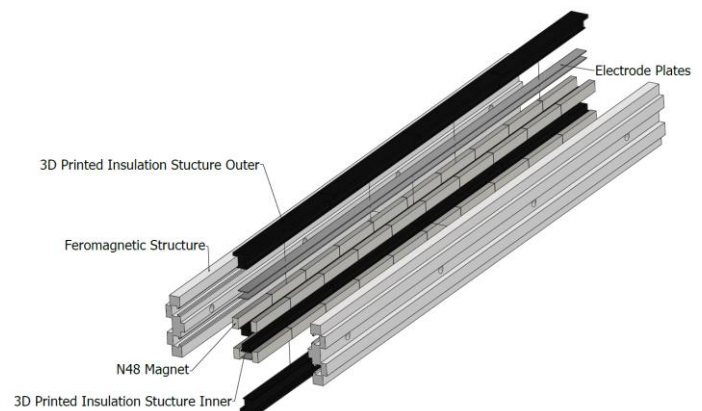
Σχεδιάσαμε και κατασκευάσαμε μια νέα υβριδική συσκευή παραγωγής ενέργειας που έχει σχεδιαστεί για να επιπλέει στο

θαλασσινό νερό, αξιοποιώντας ηλιακές, θερμοηλεκτρικές και μαγνητο-υδροδυναμικές (MHD) τεχνολογίες για την παραγωγή ενέργειας. Η συσκευή είναι εξοπλισμένη με μονοκρυσταλλικό ηλιακό πάνελ διαστάσεων 170x220mm, ικανό να παράγει 5W στα 3V. Επιπλέον, διαθέτει 12 θερμοηλεκτρικές γεννήτριες (TEG), που παράγει η κάθε μία 1V και 200mA σε διαφορά θερμοκρασίας (ΔT) 40°C, συνδεδεμένες σε σειρά. Αυτές οι μονάδες TEG είναι στρατηγικά τοποθετημένες κάτω από τον ηλιακό συλλέκτη, μεγιστοποιώντας την παραγωγή ενέργειας τόσο από το ηλιακό φως όσο και από τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας.



Εικόνα 3 Σχέδιο της συσκευής σε προβολή “explode”

Ο ηλιακός συλλέκτης και τα TEG περικλείονται μέσα σε ένα γυάλινο θόλο κενού, το οποίο βοηθά στη διατήρηση υψηλών θερμοκρασιών και στη βελτιστοποίηση της απόδοσης θερμοηλεκτρικής μετατροπής. Η θερμή πλευρά των TEGs βρίσκεται σε θερμική επαφή με τον ηλιακό συλλέκτη, ενώ η ψυχρή πλευρά έρχεται σε επαφή με σωλήνες απαγωγής θερμότητας, που μεταφέρουν θερμότητα στο θαλασσινό νερό. Για να βελτιωθεί η απόδοση, οι ζεστές και κρύες πλευρές των TEG είναι θερμικά απομονωμένες. Ολόκληρο το συγκρότημα είναι τοποθετημένο σε ακρυλικό φύλλο πάχους 10mm, το οποίο φιλοξενεί επίσης θερμομέτρο και βαρόμετρο για την παρακολούθηση των εσωτερικών συνθηκών. Ξεχωριστά βολτόμετρα και αμπερόμετρα μετρούν την ισχύ εξόδου από κάθε πηγή ενέργειας.



Εικόνα 4 Σχέδιο της συσκευής MHD σε προβολή «Explode»

Κάτω από το ακρυλικό φύλλο, μια συσκευή MHD χρησιμοποιεί ένα σιδηρομαγνητικό προφίλ και 40 μαγνήτες νεοδυμίου N48, διαστάσεων 7x4x10mm ο καθένας, διατεταγμένους απέναντι ο ένας από τον άλλον σε βέλτιστη απόσταση 7mm σύμφωνα με τη εξ.5, με αντίθετους πόλους σχηματίζοντας δύο σωλήνες τετράγωνης διατομής. Οι δύο άλλες πλευρές συγκρατούν πλάκες ηλεκτροδίων, επίσης σε απόσταση 7 χιλιοστών. Καθώς το νερό ρέει μέσα από τους σωλήνες, το προκύπτει φαινόμενο MHD ωθεί την πλωτή συσκευή.

Η σχεδίαση και κατασκευή της υβριδικής συσκευής Solar-TEG-MHD περιλαμβάνει εκτεταμένη χρήση τεχνολογιών CAD-CAM, που επιτρέπει τον ακριβή σχεδιασμό και κατασκευή των διαφόρων εξαρτημάτων. Χρησιμοποιώντας λογισμικό σχεδιασμού με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD), δημιουργήσαμε λεπτομερή μοντέλα της συσκευής και των εξαρτημάτων της, εξασφαλίζοντας βέλτιστο σχεδιασμό και απρόσκοπτη ενσωμάτωση όλων των εξαρτημάτων. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τεχνολογίες κατασκευής με τη βοήθεια υπολογιστή (CAM) σύγχρονες μηχανές CNC αλλά και εξοπλισμό 3D εκτύπωσης για τη μετατροπή αυτών των σχεδίων σε πραγματικά εξαρτήματα. Αυτή η προσέγγιση επέτρεψε την αποτελεσματική και με ακρίβεια κατασκευή, με αποτέλεσμα μια υψηλής ποιότητας, καλά κατασκευασμένη συσκευή.

Πίνακας 1 Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν και κόστος

A/A	Ονομασία	Περιγραφή	Κόστος €
1	Ακρυλικό Φύλλο	10mm και 3.2μm	54
2	Γυάλινος Θόλος	Πάχος 4mm, R=285mm	12
3	TEG	40x40x3mm, 1V, 200mA @ΔT=40°C (12 τεμ.)	82
4	Solar Panel	170x220mm monocryst. 5W, 3V	25
5	Heat-Pipes	D=8mm, 70W @ 70°C	85
6	Χάλκινα pads	40x40x1.2mm	14
7	Μεταλλικό Profile	400x20x10 σιδηρομαγνητικό	10
8	Μαγνήτες N48	10x7x4, Neodymium, N48 (40 τεμ.)	142
9	Ηλεκτρόδια	Aluminium 400x7x0.5mm	2
10	Βάση Ηλεκτροδίων	3d printed 400x7x4mm	18
11	Αντλία κενού	-85KPa, 12V, 40L/min	65
12	Ψύκτρες	Star shape, 150x10mm	15
13	Βίδες	Διάφορες	-
14	Σωλήνες	Για το κενό	8
15	Καλώδια	Διάφορα	-
16	Βολτόμετρο	0-50V	35
17	Αμπερόμετρο	0-10A	
18	Θερμόμετρο	-20-200°C	16
19	Μετρητής ροής	5-18V, 15mA, 1.75Mpa	8
20	Βαρόμετρο	-15-20KPa	16
21	Θερμοαγώγιμη πάστα		30
22	Αντιστάσεις	1,2,4,8,10Ω	5
		Σύνολο	645

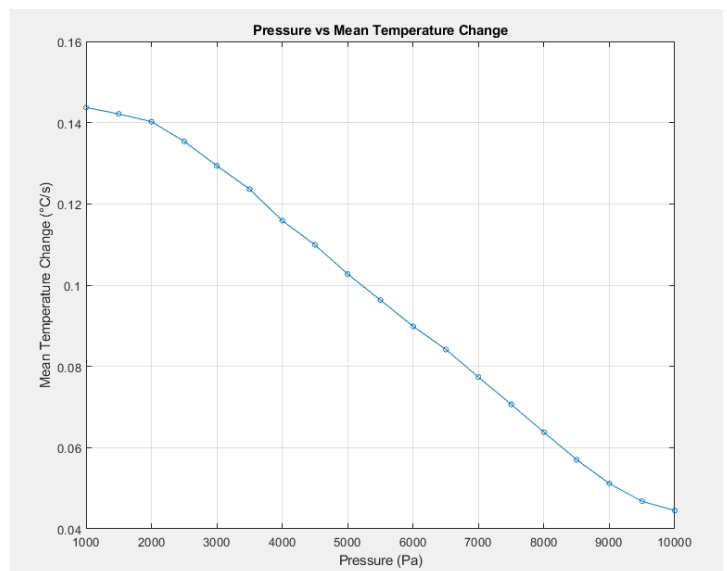
Ορισμένα από τα υλικά και τα εξαρτήματα που απαιτούνται για τη συσκευή ήταν δύσκολο να βρεθούν λόγω της εξειδικευμένης φύσης τους. Για παράδειγμα, οι σωλήνες απαγωγής θερμότητας, οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες (TEG) και οι μόνιμοι μαγνήτες με

συγκεκριμένες διαστάσεις ήταν ζωτικής σημασίας για τον βέλτιστο σχεδιασμό και την απόδοση της συσκευής. Καταβλήθηκαν σημαντικές προσπάθειες για τον εντοπισμό και την προμήθεια αυτών των εξειδικευμένων εξαρτημάτων, διασφαλίζοντας ότι το τελικό προϊόν πληρούσε τις επιθυμητές προδιαγραφές και λειτουργούσε στο μέγιστο των δυνατοτήτων του.

V. Αποτελέσματα

Για να συλλέξουμε δεδομένα από την υβριδική συσκευή μας, η οποία συνδυάζει ηλιακή και θερμοηλεκτρική ενέργεια, τοποθετήσαμε πρώτα τη συσκευή στη θάλασσα, επιτρέποντάς της να εκτεθεί τόσο στο ηλιακό φως όσο και στην υγρασία του νερού στους 18°C. Χρησιμοποιήσαμε μια αντλία κενού για να μειώσει την πίεση μέσα στον θόλο, ενισχύοντας αποτελεσματικά την ταχύτητα αύξησης της θερμοκρασίας μέσα στο θόλο και συνεπώς στη ζεστή πλευρά της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας (TEG).

Για την παρακολούθηση των συνθηκών λειτουργίας της συσκευής, εγκαταστήσαμε ένα θερμόμετρο μέσα στον θόλο για τη μέτρηση της εσωτερικής θερμοκρασίας και ένα βαρόμετρο για τη συνεχή παρακολούθηση των επιπέδων πίεσης. Η ενέργεια που παράγεται από το υβριδικό σύστημα, καταναλώνεται στη συνέχεια από μια μεταβλητή αντίσταση, επιτρέποντάς μας να προσαρμόσουμε το φορτίο όπως απαιτείται για τη βελτιστοποίηση της παραγωγής ενέργειας. Τέλος, χρησιμοποιήσαμε ένα αμπερόμετρο και ένα βολτόμετρο για τη μέτρηση του ρεύματος και της τάσης, αντίστοιχα, τα οποία μας επέτρεψαν να υπολογίσουμε με ακρίβεια την ισχύ εξόδου της συσκευής υπό διάφορες συνθήκες. Συλλέγοντας και αναλύοντας αυτά τα δεδομένα, μπορέσαμε να αποκτήσουμε γνώσεις σχετικά με την απόδοση και την αποδοτικότητα του υβριδικού μας συστήματος παραγωγής ενέργειας, ενημερώνοντας τελικά το σχεδιασμό και τη λειτουργία των μελλοντικών συσκευών.



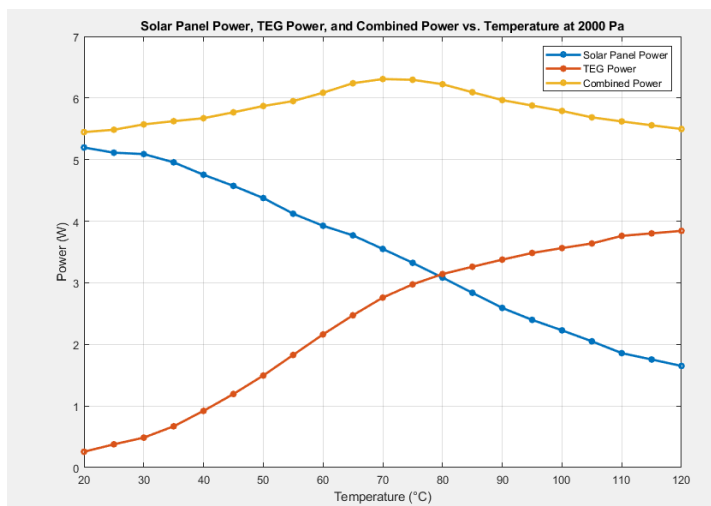
Εικόνα 5 Μέση Ταχύτητα μεταβολής της Θερμοκρασίας συναρτήσει της πίεσης

Τα αποτελέσματα δείχνουν μια σαφή σχέση μεταξύ της εφαρμοζόμενης πίεσης στο εσωτερικό του θόλου και του ρυθμού

αύξησης της θερμοκρασίας. Καθώς η πίεση μειωνόταν χρησιμοποιώντας την αντλία κενού, παρατηρήθηκε, όπως θα περιμέναμε, ότι ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας μέσα στον θόλο αυξήθηκε.

Αυτό το εύρημα μπορεί να αποδοθεί στη μειωμένη μεταφορά θερμότητας από το εσωτερικό του θόλου στο περιβάλλον σε χαμηλότερα επίπεδα πίεσης. Κατά συνέπεια, επιτεύχθηκε μια πιο σημαντική βαθμίδα θερμοκρασίας κατά μήκος της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας (TEG), οδηγώντας σε αυξημένη παραγωγή ενέργειας και συνολική απόδοση του συστήματος.

Αυτά τα αποτελέσματα υπογραμμίζουν τη σημασία της βελτιστοποίησης των συνθηκών πίεσης σε υβριδικές συσκευές, που συνδυάζουν ηλιακή και θερμοηλεκτρική παραγωγή ενέργειας, αποδεικνύοντας τελικά τις δυνατότητες βελτίωσης της απόδοσης μέσω προσεκτικού χειρισμού του περιβάλλοντος λειτουργίας.

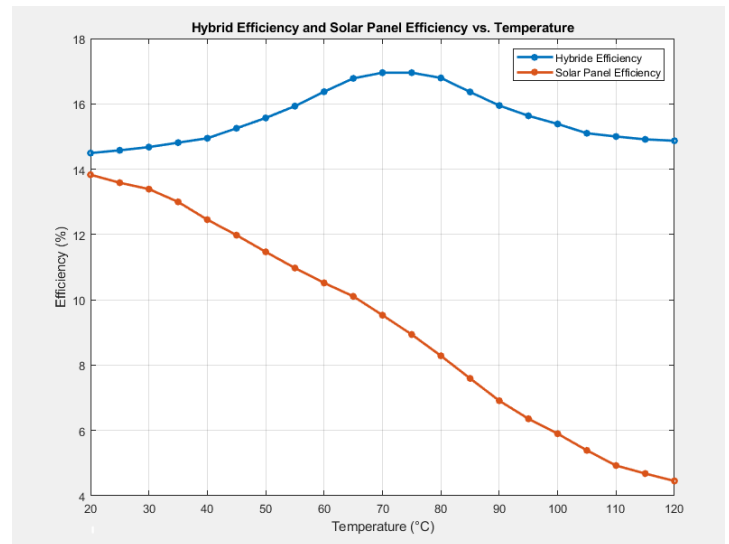


Εικόνα 6 Επιμέρους και συνδυασμένη παραγωγή ισχύος

Τα αποτελέσματα της μελέτης μας (Εικ.6) καταδεικνύουν τα ξεχωριστά χαρακτηριστικά παραγωγής ενέργειας των ηλιακών συλλεκτών και των TEG, καθώς και τη συνδυασμένη απόδοσή τους ως συνάρτηση της θερμοκρασίας. Καθώς η θερμοκρασία αυξανόταν, η ισχύς εξόδου του ηλιακού συλλέκτη εμφάνιζε γενική μείωση, λόγω της μείωσης της απόδοσης των ηλιακών κυψελών σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Αντίθετα, οι μονάδες TEG παρουσίασαν μη γραμμική αύξηση της ισχύος εξόδου καθώς η διαφορά θερμοκρασίας ΔT μεταξύ της θερμής και της ψυχρής πλευράς της TEG αυξήθηκε.

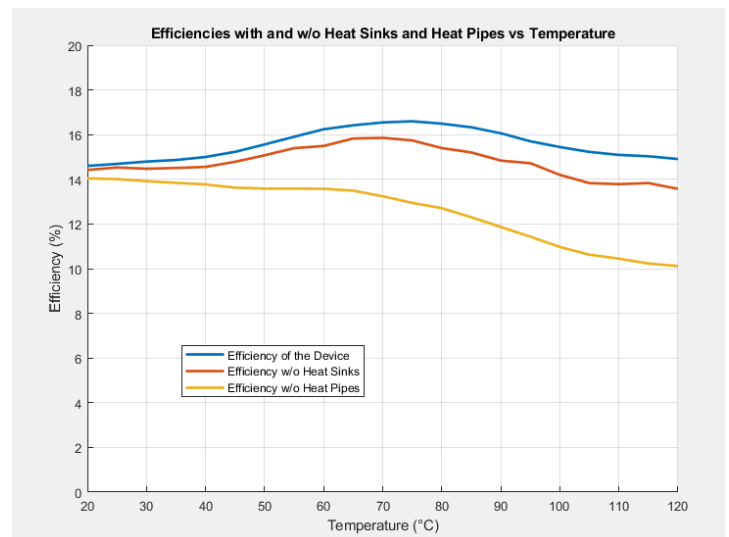
Κατά την εξέταση της συνδυασμένης παραγωγής ενέργειας, το σύστημα παρουσίασε μια πιο σταθερή ισχύ εξόδου σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών, με σαφή αιχμή στην παραγωγή ενέργειας στους 70-80 °C. Συγκεκριμένα, η συνδυασμένη ισχύς έφτασε τη μέγιστη τιμή των 6,3 W στους 75 °C. Αυτό το αποτέλεσμα μπορεί να αποδοθεί στην ισορροπία μεταξύ της φθίνουσας ισχύος εξόδου του ηλιακού συλλέκτη, η οποία μειώνεται γραμμικά με τη θερμοκρασία, και της μη γραμμικής αύξησης της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας TEG. Η παρατηρούμενη αιχμή δίνει έμφαση στην αξία των υβριδικών συσκευών παραγωγής ενέργειας, καθώς μπορούν να αντισταθμίσουν αποτελεσματικά τους περιορισμούς

των μεμονωμένων τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας και να διατηρήσουν σταθερή παραγωγή ενέργειας υπό ποικίλες περιβαλλοντικές συνθήκες.



Εικόνα 7 Απόδοση της συσκευής και του Ηλιακού πάνελ σε σχέση με τη μεταβολή της θερμοκρασίας

Το γράφημα (Εικ.7) που απεικονίζει την απόδοση του ηλιακού συλλέκτη και του υβριδικού συστήματος ως συνάρτηση της θερμοκρασίας παρέχει πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την απόδοση και των δύο συστημάτων. Είναι προφανές από το γράφημα ότι η απόδοση του ηλιακού συλλέκτη τείνει να μειώνεται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία. Αντίθετα, το υβριδικό σύστημα επιδεικνύει μια πιο σύνθετη σχέση με τη θερμοκρασία, καθώς συνδυάζει την ισχύ του ηλιακού συλλέκτη με εκείνη των θερμοηλεκτρικών γεννητριών (TEGs).



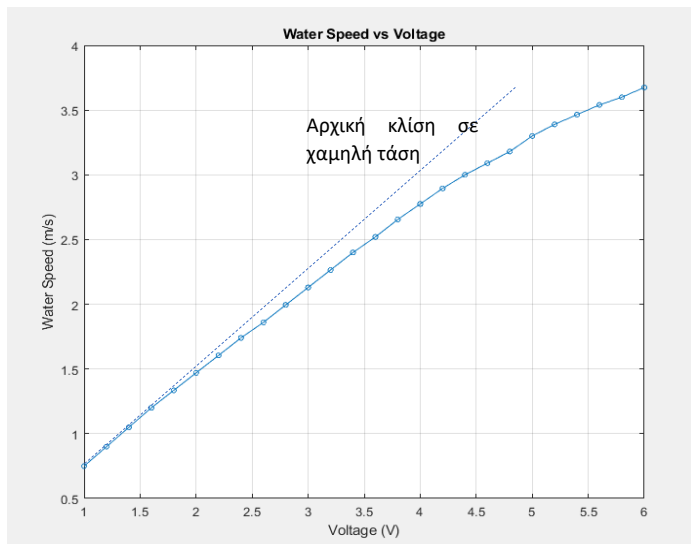
Εικόνα 8 Μεταβολή της απόδοσης του συστήματος με πλήρη ψύξη, χωρίς σωλήνες απαγωγής θερμότητας και χωρίς ψύκτρες.

Είναι αξιοσημείωτο ότι η απόδοση του υβριδικού συστήματος παρουσιάζει μέγιστη θερμοκρασία στους 75°C, φθάνοντας το εντυπωσιακό 17%. Αυτή η βέλτιστη απόδοση μπορεί να αποδοθεί στη συνδυασμένη επίδραση της μειούμενης απόδοσης του ηλιακού συλλέκτη και της μη γραμμικής αύξησης της παραγωγής ενέργειας από τα TEG. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται, τα TEGs

γίνονται πιο αποδοτικά, αντισταθμίζοντας τη φθίνουσα απόδοση του ηλιακού συλλέκτη. Κατά συνέπεια, η συνολική απόδοση του υβριδικού συστήματος ενισχύεται, καθιστώντας το μια πιο αποτελεσματική ενεργειακή λύση, ειδικά σε περιβάλλοντα με υψηλότερες θερμοκρασίες. Η απόδοση υπολογίζεται ως η ισχύς P (W) που παράγεται ανά μονάδα ενεργής επιφάνειας.

Αυτό το γράφημα (Εικ.8) δείχνει τη σχέση μεταξύ απόδοσης και θερμοκρασίας για το υβριδικό σύστημα με και χωρίς ψύκτρες και σωλήνες απαγωγής θερμότητας. Είναι προφανές ότι η απόδοση του συστήματος μειώνεται όταν αφαιρούνται οι ψύκτρες, καθώς περιορίζεται η ισχύς των TEG. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι ψύκτρες διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη απαγωγή της θερμότητας και της διασφάλισης σταθερής θερμοκρασίας στη κρύα πλευρά των TEG, διασφαλίζοντας τη βέλτιστη απόδοση των TEG.

Η απόδοση πέφτει ακόμη περισσότερο χωρίς τους σωλήνες απαγωγής θερμότητας. Σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, δεν υπάρχει σχεδόν καμία συμβολή TEG στη συνολική απόδοση, καθώς η διαφορά θερμοκρασίας (ΔT) είναι ανεπαρκής για την παραγωγή σημαντικής θερμοηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία, τα TEG αρχίζουν να λειτουργούν ακόμη και χωρίς τους σωλήνες θερμότητας, επειδή το ΔT γίνεται μεγαλύτερο, επιτρέποντας κάποια παραγωγή θερμοηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 9 Μεταβολή της ταχύτητας πρόωσης του νερού συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης.

Το γράφημα (Εικ.9) που απεικονίζει την ταχύτητα του νερού συναρτήσει της τάσης για το σύστημα πρόωσης MHD και παρέχει σαφείς ενδείξεις ότι το σύστημα λειτουργεί αποτελεσματικά και παράγει σημαντικά αποτελέσματα. Η ταχύτητα του νερού μετράται χρησιμοποιώντας ένα μετρητή ροής υγρού. Η καμπύλη δείχνει ότι σε χαμηλές τάσεις, υπάρχει σχετικά υψηλή κλίση (διακεκομμένη γραμμή), υποδεικνύοντας ότι η ταχύτητα του νερού αυξάνεται γρήγορα με μικρή αύξηση της τάσης. Αυτό υποδηλώνει ότι η πρόωση MHD είναι εξαιρετικά αποδοτική, σε χαμηλότερα επίπεδα τάσης.

Ωστόσο, καθώς η τάση αυξάνεται, η κλίση γίνεται λιγότερο

απότομη, υποδεικνύοντας ότι η σχέση μεταξύ ταχύτητας νερού και τάσης δεν είναι γραμμική. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στην έναρξη της ηλεκτρόλυσης σε υψηλότερα επίπεδα τάσης, η οποία θα μπορούσε ενδεχομένως να μειώσει τη συνολική απόδοση του συστήματος πρόωσης MHD. Η ηλεκτρόλυση καταναλώνει μέρος της εφαρμοζόμενης τάσης, οδηγώντας σε λιγότερο έντονη αύξηση της ταχύτητας του νερού σε σύγκριση με την περιοχή χαμηλότερης τάσης.

Συμπερασματικά, το γράφημα παρουσιάζει την αποτελεσματικότητα της πρόωσης MHD σε χαμηλότερες τάσεις και υπογραμμίζει την επίδραση της ηλεκτρόλυσης στην απόδοση του συστήματος σε υψηλότερες τάσεις. Αυτές οι πληροφορίες, που λαμβάνονται μέσω μετρήσεων ροής, μπορούν να είναι χρήσιμες για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και της λειτουργίας των συστημάτων πρόωσης MHD για την επίτευξη μέγιστης απόδοσης, αποφεύγοντας παράλληλα τις αρνητικές επιπτώσεις της ηλεκτρόλυσης.

VII. Συμπεράσματα

Συμπερασματικά, η παρούσα εργασία έχει αποδείξει με επιτυχία τις δυνατότητες συνδυασμού ηλιακών και θερμοηλεκτρικών και μαγνητοϋδροδυναμικών τεχνολογιών για αποτελεσματική παραγωγή ενέργειας και πρόωση. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα πειράματα που διεξήχθησαν από τη συνδυασμένη χρήση φωτοηλεκτρικών και θερμοηλεκτρικών συσκευών, παρείχαν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την απόδοση του συστήματος και των εξαρτημάτων του υπό διαφορετικές συνθήκες, συμβάλλοντας σημαντικά στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της θαλάσσιας πρόωσης.

Το έργο έδειξε ότι το υβριδικό σύστημα μπορεί να επιτύχει μέγιστη απόδοση σε συγκεκριμένα εύρη θερμοκρασιών, με αξιοσημείωτη μέγιστη απόδοση 17% στους 75°C. Η διερεύνηση των επιπτώσεων των ψυκτών και των σωλήνων απαγωγής θερμότητας στην απόδοση του συστήματος αποκάλυψε τη σημασία τους για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης των θερμοηλεκτρικών γεννητριών και τη διατήρηση της συνολικής απόδοσης του συστήματος.

Επιπλέον, η επιτυχής επίδειξη της πρόωσης MHD σε περιβάλλον θαλασσινού νερού, χρησιμοποιώντας μετρήσεις μετρητών ροής της ταχύτητας του νερού ως συνάρτηση της τάσης, παρείχε ισχυρές ενδείξεις για τη σκοπιμότητα αυτής της τεχνολογίας. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η πρόωση MHD μπορεί να ενσωματωθεί αποτελεσματικά στο σύστημα Solar-TEG, ανοίγοντας το δρόμο για μελλοντικές καινοτομίες στην θαλάσσια πρόωση.

Τελικά, το έργο αυτό συνέβαλε στην προώθηση της κατανόησης των δυνατοτήτων της συνδυασμένης εφαρμογής φωτοηλεκτρικών και θερμοηλεκτρικών φυσικών φαινομένων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο θαλάσσιο περιβάλλον. Οι γνώσεις που αποκτήθηκαν από αυτό το έργο μπορούν να χρησιμεύσουν ως βάση για μελλοντική έρευνα και ανάπτυξη στον τομέα, οδηγώντας ενδεχομένως στο σχεδιασμό και την εφαρμογή πιο αποδοτικών, φιλικών προς το περιβάλλον και βιώσιμων συστημάτων παραγωγής ενέργειας και πρόωσης για θαλάσσια

σκάφη.

Γ. Μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις και πιθανές εφαρμογές

Οι μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις και οι πιθανές εφαρμογές του υβριδικού συστήματος Solar-TEG-MHD είναι τεράστιες και ελπιδοφόρες. Με βάση τα αποτελέσματα του παρόντος έργου, μπορούν να διερευνηθούν πολλοί καινοτόμοι τρόποι βελτίωσης της απόδοσης, της αποτελεσματικότητας και της εφαρμοσιμότητας του συστήματος σε διάφορους τομείς.

Η μαγνητο-υδροδυναμική παραγωγή ενέργειας είναι ένας τομέας έρευνας όπου οι ερευνητές θα μπορούσαν να αξιοποιήσουν την κινητική ενέργεια της ροής του νερού μέσα στο σωλήνα MHD για την παραγωγή ενέργειας. Με τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και των υλικών, η συνολική παραγωγή ενέργειας του συστήματος θα μπορούσε να ενισχυθεί.

Η ενσωμάτωση μονόδρομων μεμβρανών στον θόλο της συσκευής είναι ένας άλλος τομέας διερεύνησης. Αυτές οι μεμβράνες θα επέτρεπαν στο φως του ήλιου να εισέλθει στον θόλο, περιορίζοντας παράλληλα τη διαφυγή θερμικής ενέργειας, βελτιώνοντας έτσι την απόδοση τόσο των ηλιακών συλλεκτών όσο και των θερμοηλεκτρικών γεννητριών.

Η μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να επικεντρωθεί στη βελτιστοποίηση μεμονωμένων εξαρτημάτων, όπως ψύκτρες, σωλήνες θερμότητας, TEGs και ηλιακούς συλλέκτες, για την ενίσχυση της συνολικής απόδοσης του υβριδικού συστήματος. Αυτό θα μπορούσε να περιλαμβάνει τη διερεύνηση νέων υλικών, σχεδίων και τεχνικών κατασκευής. Μια άλλη πιθανή ερευνητική κατεύθυνση είναι η ενσωμάτωση του υβριδικού συστήματος Solar-TEG-MHD με άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η αιολική ή η κυματική ενέργεια, για τη δημιουργία ενός πιο ολοκληρωμένου και ισχυρού συστήματος παραγωγής ενέργειας για θαλάσσια σκάφη. Καθώς το υβριδικό σύστημα Solar-TEG-MHD συνεχίζει να αναπτύσσεται και να βελτιώνεται, οι ερευνητές μπορούν να διερευνήσουν τις δυνατότητες κλιμάκωσης της τεχνολογίας για εμπορικές εφαρμογές, όπως η τροφοδοσία μεγάλων πλοίων, υπεράκτιων πλατφορμών και παράκτιων εγκαταστάσεων. Αυτό συνεπάγεται την αντιμετώπιση των προκλήσεων που σχετίζονται με την αξιοπιστία, την ανθεκτικότητα και τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας του συστήματος.

Ακολουθώντας αυτές τις μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις και πιθανές εφαρμογές, το υβριδικό σύστημα Solar-TEG-MHD μπορεί να συνεχίσει να συμβάλλει στην πρόοδο των τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και να βοηθήσει να ανοίξει ο δρόμος προς ένα πιο βιώσιμο μέλλον για τις θαλάσσιες μεταφορές και την παραγωγή ενέργειας.

Αναφορές

Al-Rashed, A. A., et al. "Thermoelectric generator systems for industrial waste heat recovery: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 51 (2015): 1031-1045.

Bell, L. E. (2008). Cooling, heating, generating power, and recovering waste heat with thermoelectric systems. *Science*, 321(5895), 1457-1461.

Branover, H., & Lykoudis, P. (1998). *MHD power generation: selected problems of combusting plasma magneto-hydrodynamic generators*. CRC Press.

Chow, T.T. (2010). *A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology*.

Applied Energy, 87(2), 365-379.

Doss, E. D., Bogdanoff, D. W., Weyant, J. P., & Turner, L. R. (2009). Experimental study of a magnetohydrodynamic thruster for small unmanned underwater vehicle propulsion. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 34(3), 406-415.

Faghri, A. (2012). *Heat pipe science and technology*. Taylor & Francis.

García, E., et al. "Photovoltaic technologies: State-of-the-art and future prospects." *Solar Energy Materials and Solar Cells* 174 (2018): 129-136.

Green, M. A., et al. "Solar cell efficiency tables (version 52)." *Progress in photovoltaics: Research and applications* 26.7 (2018): 427-436.

Gupta, R., Singh, J. P., & Jain, R. K. (2018). Numerical and experimental study of magnetohydrodynamic propulsion system for underwater vehicles. *Journal of Ship Research*, 62(4), 213-219.

Isa, M. H., et al. "State-of-the-art of thermoelectric power generation: Applications and case studies." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 30 (2014): 337-355.

Jia, C., Zhang, Y., & Wang, Q. (2018). Simulation of the flow field in a magnetohydrodynamic propulsion system for an underwater vehicle. *Journal of Marine Science and Engineering*, 6(3), 76.

Kim, D. H., Kim, J. H., Lee, S. W., & Nam, S. H. (2017). Development of MHD propulsion system for a fast underwater vehicle. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 31(1), 1-9.

Kim, H., Kim, M., Nam, J., & Lee, H. (2007). Design and performance evaluation of a superconducting magnetohydrodynamic propulsion system. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 17(2), 1671-1674.

Molokov, S., Khripchenko, N., Kolesnikov, Y., & Kolesnikov, Y. (2007). New MHD concept for marine propulsion: results of ground tests. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 35(3), 578-583.

Parida, B., Iniyar, S., & Goic, R. (2011). A review of solar photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1625-1636.

Reay, D. A., & Kew, P. A. (2013). *Heat pipes: Theory, design and applications*. Elsevier.

Snyder, G. J., & Toberer, E. S. (2008). Complex thermoelectric materials. *Nature materials*, 7(2), 105-114.

Snyder, G. J., Ursell, T. S., Yang, J., & Hu, Y. (2008). Advanced thermoelectric materials for energy harvesting applications. *Journal of Electronic Materials*, 37(9), 1143-1151.

Sun, R., Zhang, Y., Wei, H., Huang, J., & Chen, Y. (2021). A hybrid ocean energy conversion system combining TEG and MHD. *Journal of Cleaner Production*, 312, 127676.

Vineis, C. J., et al. "Nanomaterials in thermoelectrics." *Energy & Environmental Science* 3.4 (2010): 422-427.

Watanabe, T., & Ito, Y. (2000). Numerical study on the optimization of MHD propulsion system. In *Proceedings of the ASME Heat Transfer Division (Volume 2)* (pp. 269-276). American Society of Mechanical Engineers.

Way, A. J. (1998). The magnetohydrodynamic ship propulsion experiment. *Journal of ship production*, 14(2), 85-91.

Xie, W., et al. "A review of thermoelectric cooling: Materials, modeling and applications." *Applied Thermal Engineering* 76 (2015): 1-14.

Xie, W., Yan, Y., Chen, H., & Chen, Z. (2015). Study of a thermoelectric generator (TEG) system for harvesting waste heat from an auxiliary power unit (APU) of a truck. *Applied Energy*, 137, 111-122.

Yuan, H., et al. "Review on photovoltaic/thermoelectric hybrid solar energy systems." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 30 (2014): 337-355.

Zhang, S., Sun, F., Gao, Y., & Wang, R. (2014). A hybrid ocean energy conversion system combining a thermoelectric generator and solar panel. *Energy*, 76, 748-753.

Zhang, Y., Sun, R., Wei, H., & Huang, J. (2019). Optimization of a magnetohydrodynamic propulsion system for unmanned underwater vehicles. *Ocean Engineering*, 186, 106042.