



Εταιρεία Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδος

Πρακτικά
12^ο Πανελλήνιου Συνεδρίου
Γεωργικής Μηχανικής

«Η συμβολή της Γεωργικής Μηχανικής
στην επίτευξη των στόχων της πράσινης
συμφωνίας»

Θεσσαλονίκη
21-22 Οκτωβρίου 2021

ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΤΟΜΑΤΑΣ	
Π. Λόντρα, <u>Ι. Κοτσάτος</u> , Α. Θεοχάρης & Ν. Δέρκας.....	335
ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΕΙΚΤΩΝ ΞΗΡΑΣΙΑΣ ΣΕ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΥΣ ΣΤΑΘΜΟΥΣ ΤΗΣ Π.Ε. ΧΑΛΚΙΔΙΚΗΣ	
Ζ. Μπρόζου, <u>Π. Γεωργίου</u> & Δ. Καρπούζος.....	345
ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΝΟΣ ΕΜΠΕΙΡΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΗΣ ΑΠΟ ΓΥΜΝΟ ΕΔΑΦΟΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ	
Γ. Κάργας, <u>Σ. Πάλλη-Γραβάνη</u> , Α. Κοτσιρή & Π. Λόντρα.....	354
ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΟΜΒΡΟΔΕΞΑΜΕΝΩΝ ΓΙΑ ΑΡΔΕΥΤΙΚΗ ΧΡΗΣΗ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑΚΗ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΜΠΙΓΚΟΝΙΑΣ	
Π. Λόντρα, <u>Ν. Θεοτοκάτος</u> , Α. Θεοχάρης & Ν. Δέρκας.....	362
ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΛΗΨΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΚΡΗΤΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΑΙΝΟΤΟΜΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ	
<u>Ν. Κουργιαλάς</u> , Γ. Μοριανού, Α. Χλιαουτάκης, Α. Βουλγαράκης, Α. Αργυρίου, Ν. Παπαδόπουλος, Ε. Κόκκινου, Ι. Δαλιακόπουλος, Δ. Καλδέρης, Θ. Μανιός, Α. Παυλάκη & Α. Βαφείδης.....	370

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και Εξοικονόμηση Ενέργειας

ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΥΘΗΑ ΜΕ ΑΤΜΟ ΓΙΑ ΚΑΛΥΨΗ ΑΝΑΓΚΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΑΠΟΡΡΙΠΤΟΜΕΝΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΤΟΥ CO ₂ ΤΩΝ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ	
<u>Β. Φιρφίρης</u> , Α. Μαρτζοπούλου, Ι. Zlatanovic & Θ.Κωτσόπουλος.....	375
ΜΑΖΙΚΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΘΕΤΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ ΩΣ ΠΗΓΗ ΕΥΕΛΙΞΙΑΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΥΠΟ ΤΗ ΣΥΝΔΕΣΗ ΕΝΟΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ – ΤΡΟΦΙΜΩΝ. ΜΙΑ ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	
<u>Δ. Αυγουστάκη</u> , Γ. Ξύδης & Θ. Μπαρτζάνας.....	383
ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΑΙΚΗ ΕΝΩΣΗ	
<u>Π. Γιατσιώδης</u> & Ζ. Ανδρεοπούλου.....	388

Περιβάλλον και Διαχείριση Αποβλήτων

ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΡΟΦΗΣΗΣ ΦΩΣΦΟΡΟΥ ΚΑΙ ΑΜΜΩΝΙΑΚΟΥ ΑΖΩΤΟΥ ΑΠΟ ΑΝΑΕΡΟΒΙΩΣ ΧΩΝΕΜΕΝΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ ΣΕ ΖΕΟΛΙΘΟ ΚΑΙ ΙΠΤΑΜΕΝΗ ΤΕΦΡΑ	
<u>Δ. Μητρόγιαννης</u> , Μ. Ψυχογιού, Δ. Παλλές, Ε. Ι. Καμίτσος, Ν. Κούκουζας, Κ. Μαυρογόνατος & Ι. Μπαζιώτης.....	398
ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑΣ ΑΜΜΩΝΙΑΣ ΣΕ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΔΕΥΣΗΣ ΥΠΟ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΧΑΜΗΛΟΥ ΡΥΘΜΟΥ ΟΡΓΑΝΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ	
<u>Μ.Α. Τσιτσιμπίκου</u> , Χ. Τζένος & Θ. Κωτσόπουλος.....	402
CARBON FOOTPRINT OF BROILER MEAT PRODUCED WITH ALTERNATIVE PROTEIN SOURCES	
<u>V. Anestis</u> , T. Bartzanas & D. K. Papanastasiou	408
ΕΞΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΜΙΚΡΟΒΙΩΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑΣ ΑΠΟΙΚΟΔΟΜΗΣΗΣ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ ΛΟΓΩ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣ ΑΜΜΩΝΙΑΣ	
<u>Μ. Γάσπαρη</u> , L. Treu, N. Duan, Θ. Κωτσόπουλος, Ι. Angelidaki, S. Campanaro & Π. Γ. Κούγιας	412
ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΩΝ ΑΕΡΙΩΝ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΑΝΤΙΚΤΥΠΟΥ ΑΥΤΩΝ ΣΤΗ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑ ΕΝΟΣ ΚΤΗΝΟΤΡΟΦΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	
<u>Ε. Αλεξανδρόπουλος</u> , Β. Ανέστης & Θ. Μπαρτζάνας.....	416
ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT OF AN AQUACULTURE PRODUCTION SYSTEMS USING THE LIFE CYCLE APPROACH	
<u>A. Vatsanidou</u> , V. Anestis, I. Skoufos, A. Tzora & T. Bartzanas.....	420
ΕΥΡΕΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΣΤΙΚΗΣ ΙΛΥΟΣ ΜΕ ΥΠΕΡΚΡΙΣΙΜΗ ΕΚΡΗΞΗ CO ₂ ΜΕ ΣΚΟΠΟ ΤΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ	
<u>Γ.Χ. Μήτρακα</u> , Κ. Κοντογιαννόπουλος, Ι. Τσιβιντζέλης, Κ. Τσιόπτσιας, Α. Ζουμπούλης & Π. Κούγιας.....	423

ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΗΘΗΑ ΜΕ ΑΤΜΟ ΓΙΑ ΚΑΛΥΨΗ ΑΝΑΓΚΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΜΕΣΩ της ΑΠΟΡΡΙΠΤΟΜΕΝΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΤΟΥ CO₂ ΤΩΝ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ

Β. Φιρφίρης¹✉, Α. Μαρτζοπούλου², Ivan Zlatanovic³ και Θ.Κωτσόπουλος¹

¹Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωπονίας, Εργ. Γεωργικών Κατασκευών & Εξοπλισμού, 54124, Θεσσαλονίκη

² Τομέας Πολεοδομίας, Χωροταξίας και Περιφερειακής Ανάπτυξης, Τμήμα Αρχιτεκτόνων, Πολυτεχνική Σχολή Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

³ Department for Agricultural Engineering, University of Belgrade-Faculty of Mechanical Engineering
✉firfiris@agro.auth.gr

Περίληψη

Η χρήση απορριπτόμενης θερμότητας από μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μεγάλης κλίμακας έχει αξιοποιηθεί διαχρονικά για τη θέρμανση θερμοκηπίων με δίκτυα τηλεθέρμανσης. Τα τελευταία χρόνια εγκαθίστανται και λειτουργούν μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας μικρής δυναμικότητας, όπου η αποκρυπτόμενη θερμική ενέργεια και το CO₂, αξιοποιούνται ώστε να υποστηρίξουν τις ανάγκες θερμοκηπίων σε θέρμανση και να βοηθήσουν στην ανάπτυξη της καλλιέργειας. Οι μικρές μονάδες συμπαραγωγής που χρησιμοποιούνται, είναι είτε εμβολοφόρες μηχανές ή μονάδες αεριοστρόβιλων. Στη συγκεκριμένη εργασία εξετάζεται η αξιοποίηση μικρών μονάδων που λειτουργούν με ατμοστρόβιλους, υπό τον θερμοδυναμικό κύκλο Rankine και εξετάζεται η συνεισφορά που μπορεί να έχουν τόσο στις θερμικές ανάγκες όσο και στο απαραίτητο CO₂ των θερμοκηπίων.

Λέξεις κλειδιά: Θερμοκήπιο, Μονάδες συμπαραγωγής, Ατμοστρόβιλοι, Κύκλος Rankine, CO₂

THEORETICAL EVALUATION OF STEAM CHP SYSTEM FOR COVERING THE HEATING ENERGY NEEDS OF A GREENHOUSE THROUGH WASTE HEAT AND CO₂ NEEDS THROUGH THE COMBUSTION EXHAUST

V. Firfiris¹✉, A. Martzopoulou², I.Zlatanovic³, T.Kotsopoulos¹

¹ Aristotle University of Thessaloniki, Department of Agriculture, Laboratory of Agricultural Structures and Equipment, 54124, Thessaloniki

² Aristotle University of Thessaloniki, School of Architecture, Faculty of Engineering, Department of Urban Planning

³ Department for Agricultural Engineering, University of Belgrade-Faculty of Mechanical Engineering
✉firfiris@agro.auth.gr

ABSTRACT

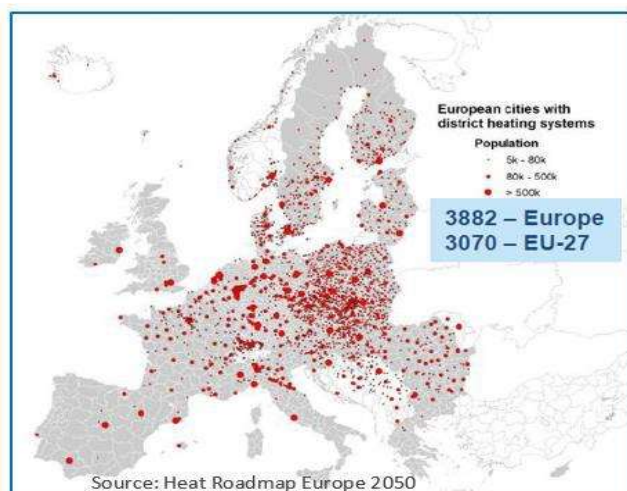
The use of waste heat by large-scale electricity generation plants has been used over time for greenhouse heating with district heating networks. In recent years, low-capacity CHP units have been installed and operated, where wasted heat energy and CO₂ are utilized to support the greenhouse needs for heating and crop growth. The small CHP units used are either piston engines or gas turbine units. In this work, the use of small CHP units that operate with steam turbines, under the Rankine thermodynamic cycle, is examined for contributing to the heating and CO₂ needs of a greenhouse.

Keywords: Greenhouse, CHP units, Steam turbines, Rankine Cycle, CO₂

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα σύγχρονα θερμοκήπια πρέπει να υποστηρίζονται από ένα πλήθος λειτουργιών ώστε να μπορούν να πετύχουν τη μέγιστη απόδοση λειτουργίας. Οι συνηθέστερες εξ' αυτών είναι η θέρμανση, ο δροσισμός, ο μηχανικός αερισμός, αυτόματη άρδευση, συστήματα εμπλουτισμού CO₂, φωτισμός κτλ. Οι λειτουργίες αυτές συνοδεύονται από την κατανάλωση πόρων και ενέργειας. Συγκεκριμένα η ενέργεια θέρμανσης μπορεί να αντιπροσωπεύει το 70-80% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας και η ηλεκτρική ενέργεια για τη χρήση του εξοπλισμού το 10-15% (S.Sanford, 2011). Ένα μεγάλο μέρος της έρευνας έχει επικεντρωθεί στην ανάπτυξη συστημάτων εξοικονόμησης ενέργειας. Ορισμένα συστήματα έχουν ενταχθεί στις κατασκευές και αποτελούν πλήρως ανεπτυγμένες τεχνολογικά λύσεις όπως η θερμοκουρτίνα, το διπλό φουσκωτό πλαστικό για εξοικονόμηση ενέργειας για θέρμανση (J.J. Hahan, 1988). Επιπλέον εξοικονόμηση ενέργειας επιτυγχάνεται και στην περίπτωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της χρήσης ρυθμιστών στροφών (inverters) σε ανεμιστήρες κτλ. Εκτός της εξοικονόμησης ενέργειας μέσω συστημάτων που εφαρμόζονται στο θερμοκήπιο- υπάρχει και ένα σημαντικό δυναμικό ενέργειας που απορρίπτεται από άλλες διεργασίες και θα μπορούσε να αξιοποιηθεί, εκτός των άλλων σε κατασκευές θερμοκηπίων. Η κυριότερη μορφή ενέργειας η οποία απορρίπτεται είναι η ενέργεια υπό τη μορφή θερμότητας. Αυτή η μορφή ενέργειας συνήθως είναι ενέργεια υψηλής εντροπίας που είναι αδύνατον να μετατραπεί εκ' νέου σε κάποια άλλη μορφή ενέργειας (π.χ μηχανική, χημική κτλ) (Cengel και Boles, 1998). Συνεπώς, αξιοποιείται για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης χώρων.

Η πιο συνηθισμένη περίπτωση αξιοποίησης απορριπτόμενης θερμότητας που αξιοποιείται για θέρμανση χώρων και κατ' επέκταση θερμοκηπίων είναι εκείνη από τις μονάδες ηλεκτροπαραγωγής. Με δεδομένο ότι η λειτουργία των μονάδων βασίζεται στον θερμοδυναμικό κύκλο Rankine, η απόδοση του κυμαίνεται μεταξύ 30-35% και μόνο υπό λειτουργία σε περιοχές κρίσιμων πιέσεων ή την εφαρμογή των μεθόδων της αναθέρμανσης και της αναγέννησης μπορούν να επιτευχθούν υψηλότεροι βαθμοί απόδοσης (I.Dincer,2018),(Cengel και Boles, 1998), (Mechanicalboost.com). Συνεπώς από την καταναλισκόμενη ενέργεια για την παραγωγή του υπέρθερμου ατμού, μόνο το ένα τρίτο μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια, ενώ το υπόλοιπο απορρίπτεται στον συμπυκνωτή ώστε να μπορέσει ο ατμός να αποκτήσει τα χαρακτηριστικά εκείνα που είναι απαραίτητα ώστε να επαναληφθεί η κυκλική διαδικασία. Αυτή η απορριπτόμενη θερμότητα έχει αξιοποιηθεί στην πράξη σε θερμοκήπια τα οποία εγκαθίστανται στο σύστημα τηλεθέρμανσης που εξυπηρετεί την περιοχή δίπλα από τη μονάδα. Παράλληλα και άλλες μορφές απορριπτόμενης θερμότητας από μονάδες ηλεκτροπαραγωγής (όπως από τους πύργους ψύξης) έχουν αξιοποιηθεί για τη θέρμανση θερμοκηπίων (Bredenbeck.H, 1992). Στην Εικόνα 1 φαίνονται τα ενεργά δίκτυα τηλεθέρμανσης στην Ευρώπη ανεξάρτητα από την ενεργειακή πηγή που χρησιμοποιείται στις μονάδες ηλεκτροπαραγωγής. Η περίπτωση της τηλεθέρμανσης εφαρμόζεται τόσο στην περίπτωση λιγνιτικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής, σε πυρηνικά εργοστάσια και σε μονάδες ηλεκτροπαραγωγής με γεωθερμία.



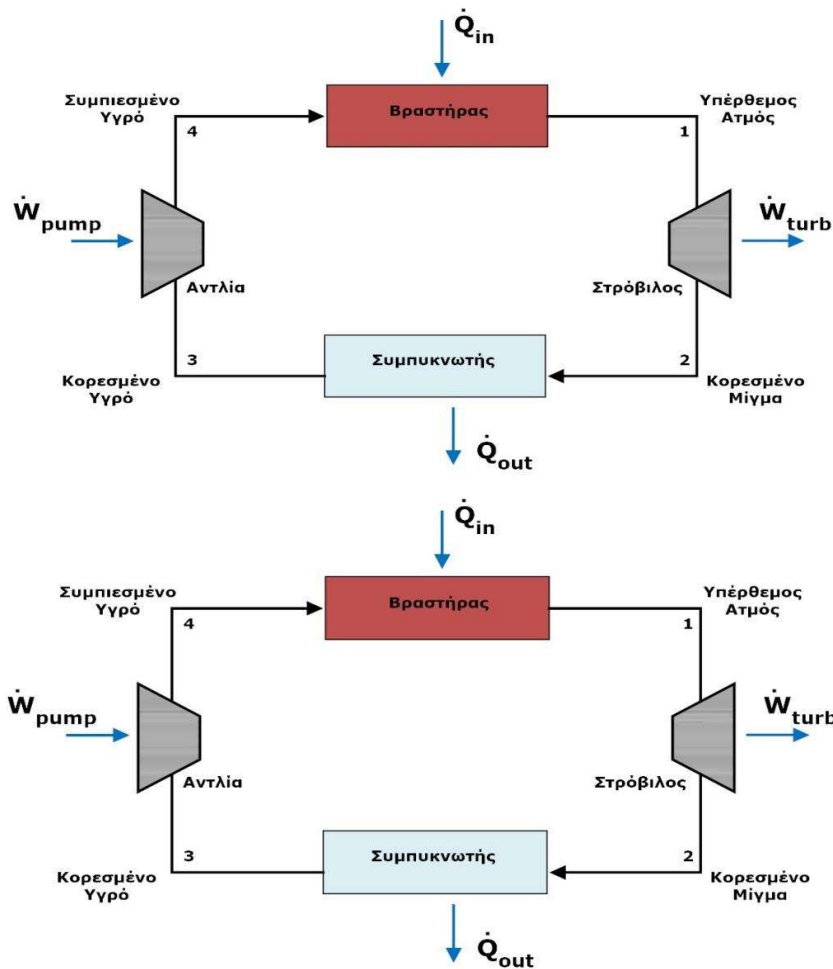
Εικόνα 1. Δίκτυα τηλεθέρμανσης στην Ευρώπη (G.A. Jóhannesson et al.,2016)

Εκτός των μεγάλων μονάδων ηλεκτροπαραγωγής, οι οποίες καλύπτουν ένα μεγάλο μέρος των αναγκών ηλεκτροπαραγωγής μίας περιοχής, έχουν εγκατασταθεί μικρές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής ισχύος της τάξης των 1-2MW για κάλυψη περιορισμένων αναγκών του δικτύου. Αυτές οι μονάδες είναι κατά κανόνα μονάδες αεριοστροβίλων που λειτουργούν υπό τον θερμοδυναμικό κύκλο Brayton ή εμβολοφόρες μηχανές. Οι μονάδες αυτές διαθέτουν ενσωματωμένο και το σύστημα ψύξης της μηχανής, με την απορριπτόμενη θερμότητα να είναι δυνατόν να αξιοποιηθεί υπό τη μορφή θερμού νερού. Μάλιστα, στην Ελλάδα, βάσει Νόμου η τιμή πώλησης του ηλεκτρικού ρεύματος τέτοιες μονάδες ηλεκτροπαραγωγής συνδέεται με την αξιοποίηση τόσο της απορριπτόμενης θερμότητας όσο και του CO₂ των καυσαερίων της καύσης (ΦΕΚ 4414/2016). Στις μηχανές αυτές η ποσότητα της απορριπτόμενης θερμότητας είναι περίπου ίδια με εκείνη της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Συνεπώς για μία μηχανή 1MW ηλεκτρικής ισχύος αντιστοιχεί ανάλογη ποσότητα θερμικής ισχύος που μπορεί να αξιοποιηθεί σε ένα θερμοκήπιο. Η θερμική ισχύς αυτή μπορεί να καλύψει ανάγκες θέρμανσης ανάλογα με την περιοχή και το επίπεδο του εγκατεστημένου εξοπλισμού από 5-10 στρ στην Ελλάδα.

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται από θερμοδυναμικής και τεχνικής άποψης η δυνατότητα λειτουργίας μονάδων συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας (ΣΗΘΥΑ) μικρής κλίμακας που λειτουργούν με εργαζόμενο μέσο τον ατμό, υπό τον κύκλο Rankine. Τα αποτελέσματα της μελέτης θα δείξουν κατά πόσο αξίζει να εξεταστεί ως εναλλακτική λύση η εγκατάσταση τέτοιων μονάδων έναντι των μονάδων που εγκαθίστανται κατά κύριο λόγο για τέτοιου τύπου εφαρμογές.

2. ΥΠΟΘΕΣΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ- ΕΠΙΛΟΓΗ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΓΙΑ ΜΙΚΡΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΣΗΘΥΑ ΜΕ ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΟ ΜΕΣΟ ΤΟΝ ΑΤΜΟ

Η λειτουργία μίας τέτοιας μονάδας λειτουργεί υπό τον θερμοδυναμικό κύκλο Rankine. Στο Σχήμα 1 απεικονίζεται η διάταξη του θερμοδυναμικού κύκλου και απεικονίζονται οι συσκευές οι οποίες συνεργάζονται για την υλοποίηση της διεργασίας. Επίσης στο Σχήμα 1 σημειώνονται οι φάσεις στις οποίες εμφανίζεται το εργαζόμενο μέσο στα διάφορα σημεία του κύκλου. Στον κύκλο δεν εμφανίζεται η πηγή από την οποία προέρχεται η θερμότητα στη συσκευή παραγωγής του υπέρθερμου ατμού όπου θα αναλυθεί στη συνέχεια.



Σχήμα 1. Σχηματική απεικόνιση του συστήματος ηλεκτροπαραγωγής με ατμό

Οι συσκευές οι οποίες συμμετέχουν στη διεργασία είναι ο βραστήρας-λέβητας, στον οποίο παράγεται ο υπέρθερος ατμός. Ο στρόβιλος στον οποίο παράγεται το μηχανικό έργο το οποίο εν' συνεχεία μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Στον συμπυκνωτή το κορεσμένο μίγμα χάνει μέρος της ενέργειας του ώστε να γίνει κορεσμένο υγρό και να μπορεί να επαναλάβει τον κύκλο. Η αντλία πρακτικά έχει τον ρόλο να κυκλοφορεί το μέσο με τη σωστή πίεση και παροχή στον σύνολο της κυκλικής διεργασίας. Στην πράξη για να υλοποιηθεί ένα τέτοιο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας απόδοσης 1MW θα πρέπει να εγκατασταθούν συσκευές οι οποίες θα είναι δυνατόν να επιτευχθεί το αποτέλεσμα αυτό βάσει των βαθμών απόδοσης του θερμοδυναμικού κύκλου Rankine. Έτσι για τους σκοπούς της μελέτης θα επιλεγούν οι συσκευές οι οποίες περιγράφονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Ενδεικτικά χαρακτηριστικά συσκευών για την εγκατάσταση μονάδας ηλεκτροπαραγωγής μικρής κλίμακας (περίπου 1MW) για υποστήριξη αναγκών θερμοκηπίου

A/A	Τμήμα θερμοδυναμικού κύκλου	Περιγραφή χαρακτηριστικά	εξοπλισμού	Ενεργειακά χαρακτηριστικά
1	Βραστήρας- Μονάδα παραγωγής υπέρθερμου ατμού (Zozen official webiste)	-Παροχή ατμού: ≤20tn/hour -Πίεση λειτουργίας:0,7-2MPa -Θερμοκρασία: ≤204°C		-Βαθμός απόδοσης:88%
2	Ατμοστρόβιλος ηλεκτροπαραγωγής (Siemens-Energy official website)	-Πίεση λειτουργίας: ≤6,3MPa -Θερμοκρασία ατμού:≤482°C	εισόδου	-Ισχύς εξόδου≤3,5MW -Βαθμός απόδοσης: 90%
3	Συμπυκνωτής εναλλάκτης κελύφους/αυλών (Watco group official website)	-Θερμοκρασία συμπύκνωσης: 25°C -Ικανότητα παροχής: ≤50tn/hour		-Βαθμός απόδοσης: 85%
4	Αντλία/κυκλοφορητής	Η ισχύς θα προκύψει από τους υπολογισμούς		

3. ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Η προτεινόμενη διάταξη λειτουργεί υπό τον θερμοδυναμικό κύκλο Rankine. Σύμφωνα με τον ιδανικό κύκλο στον βραστήρα η διεργασία είναι ισοβαρής θέρμανση. Η διεργασία στον στρόβιλο είναι ισεντροπική παραγωγή έργου. Η συμπύκνωση αποτελεί επίσης μία ισοβαρής απόρριψη θερμότητας, ενώ η συμπίεση που λαμβάνει χώρα στην αντλία θεωρείται ισεντροπική. Τα ενεργειακά μεγέθη που απεικονίζονται στο Σχήμα 1 , όπως και ο βαθμός απόδοσης του κύκλου περιγράφονται στις Εξισώσεις [1]-[5]. Οι Εξισώσεις [1]-[4], προκύπτουν από την εφαρμογή του 1^{ου} θερμοδυναμικού νόμου σε κάθε συσκευή ξεχωριστά. Στην Εξίσωση [6], δίνεται το ενεργειακό ισοζύγιο του κύκλου.

$$\dot{Q}_{in}=\dot{m}(h_4-h_1) \quad [1]$$

$$\dot{W}_{turb}=\dot{m}(h_2-h_1) \quad [2]$$

$$\dot{Q}_{out}=\dot{m}(h_3-h_2) \quad [3]$$

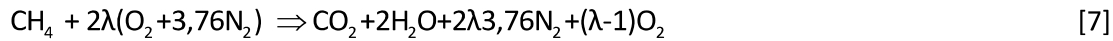
$$\dot{W}_{pump}=v_3(p_4-p_3) \quad [4]$$

$$\eta_{th}=\frac{\dot{W}_{turb}-\dot{W}_{pump}}{\dot{Q}_{in}} \quad [5]$$

$$\dot{W}_{turb} + \dot{Q}_{out} = \dot{W}_{pump} + \dot{Q}_{in} \quad [6]$$

Οι ποσότητες h_i είναι η ειδική ενθαλπία του ατμού σε κάθε σημείο του κύκλου και λαμβάνεται από θερμοδυναμικούς πίνακες ανάλογα με τη θερμοκρασία ή την πίεση στην οποία βρίσκεται το μέσο. Η ποσότητα v_3 είναι ο ειδικός όγκος του κορεσμένου υγρού κατά την είσοδο του στην αντλία. Μέσω των παραπάνω Εξισώσεων είναι δυνατόν μέσω και του βαθμού απόδοσης της κάθε μίας εξ' αυτών να βρεθούν από την ποσότητα W_{turb} η εξερχόμενη ηλεκτρική ισχύς από το σύστημα και η απορριπτόμενη θερμότητα στον συμπυκνωτή. Αυτά είναι δύο από τα μεγέθη που έχουν ενδιαφέρον στην παρούσα ανάλυση καθώς μπορούν να αξιοποιηθούν είτε ως προς πώληση (ηλεκτρική ενέργεια) , είτε ως προς κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του θερμοκηπίου (απορριπτόμενη θερμότητα ή ηλεκτρική ενέργεια).

Ένα δεύτερο σημαντικό κομμάτι, ώστε να θεωρηθεί η λύση συγκρίσιμη με εκείνη των ΣΗΘΥΑ που εργάζονται με αεριοστροβίλους ή εμβολοφόρες μηχανές είναι η αξιοποίηση του CO₂ που προκύπτει από την καύση που πραγματοποιείται στη διεργασία 4 -> 1. Εδώ θα γίνει η υπόθεση ότι ο θερμοαντήρας δουλεύει με φυσικό αέριο, ώστε η υπόθεση να είναι πιο κοντά στην περίπτωση των ΣΗΘΥΑ που δουλεύουν με αεριοστροβίλους ή εμβολοφόρες μηχανές. Η καύση με λόγο αέρα λ, περιγράφεται στην Εξίσωση [7].



Για να εκτιμηθεί η ποσότητα παραγόμενου CO₂ θα πρέπει να καθοριστεί η ποσότητα CH₄ που πρέπει να διοχετευθεί στον θάλαμο καύσης ώστε να παραχθεί η απαραίτητη θερμική ισχύς που χρειάζεται για να παραχθεί ο υπέρθερμος ατμός. Η θερμική ισχύς αυτή προκύπτει από τον βαθμό απόδοσης του θερμοαντήρα και της θερμικής ισχύος όπως θα προκύψει από το ισοζύγιο της Εξίσωσης [6]. Για τον καθορισμό της θερμικής ισχύος που εκλύεται κατά την καύση θα πρέπει να εφαρμοστεί το ενεργειακό ισοζύγιο της καύσης. Το ενεργειακό ισοζύγιο της καύσης περιγράφεται από την Εξίσωση [8]. Για τον καθορισμό της ενθαλπίας του κάθε στοιχείου είναι απαραίτητη η γνώση της ενθαλπίας αναφοράς ή μέσης ειδικής θερμοχωρητικότητας της ένωσης, που είναι πρακτικά το ενεργειακό περιεχόμενο της ένωσης όπως έχει μετρηθεί σε συγκεκριμένη θερμοκρασία και η θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται κατά την εκτέλεση της χημικής αντίδρασης (Baehr, 2001). Η λογική περιγράφεται στην Εξίσωση [9], όπου c_{pi} η μέση ειδική θερμοχωρητικότητα του καυσίμου σε θερμοκρασία αναφοράς T_j. Γίνεται αντιληπτό ότι η μεταβολή της θερμοκρασίας παίζει σημαντικό ρόλο στην περίπτωση των καυσαερίων όπου η θερμοκρασία τους μπορεί να μεταβληθεί σημαντικά από τη θερμοκρασία αναφοράς η οποία είναι μία συνηθισμένη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Οι τιμές της ειδικής θερμοχωρητικότητας λαμβάνονται από σχετικούς θερμοδυναμικούς πίνακες από τη βιβλιογραφία.

$$q_{\text{καύσης}} + (h_{\text{καυσ}(T_{\text{καυσ}})}) = (h_{\text{καυσίμου}(T_{\text{καυσίμου}})}) + (h_{\text{αέρα}(T_{\text{αέρα}})}) \quad [8]$$

$$h_{i(T_j)} = (c_{pi})T_j \quad [9]$$

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στον Πίνακα 2 περιγράφονται τα ενεργειακά μεγέθη όπως αυτά υπολογίστηκαν βάσει των Εξισώσεων [1]-[7] και των δεδομένων του Πίνακα 1.

Πίνακας 2. Αποτελέσματα θερμοδυναμικής ανάλυσης

Διεργασία	Περιγραφή	Ρεισόδος	Ρεξόδος	Παροχή	Ενεργειακός υπολογισμός	Βαθμός απόδοσης
4 -> 1	Ισοβαρής θέρμανση	1,4MPa	1,4MPa	5tn/hr	$\dot{Q}_{in}=3,68\text{MW}$	88%
1 -> 2	Ισεντροπική εκτόνωση	1,4MPa	10kPa	5tn/hr	$\dot{W}_{turb}=1,14\text{MW}$	90%
2 -> 3	Ισοβαρής απόρριψη θερμότητας	10kPa	10kPa	5tn/hr	$\dot{Q}_{out}=2,52\text{MW}$	85%
3 -> 4	Ισεντροπική συμπίεση	10kPa	1,4MPa	5tn/hr	$\dot{W}_{pump}=1,9\text{kW}$	90%

*Ο ατμός θεωρείται ότι εξέρχεται από το μίγμα σε μορφή κορεσμένου μίγματος με βαθμό ξηρότητας x=0,7 σε πίεση 10kPa

*Στην είσοδο του στροβίλου ο υπέρθερμος ατμός θεωρείται ότι έχει θερμοκρασία 200°C

*Οι διεργασίες λαμβάνουν χώρα ιδανικά- οι βαθμοί απόδοσης αφορούν στην μετέπειτα μετατροπή τους

*Οι τιμές των μεγεθών των ενθαλπιών *hi* λαμβάνονται από τη βιβλιογραφία (Cengel.Y.A και M. A. Boles, 1998)

Σε επίπεδο διεργασίας καύσης, με δεδομένο ότι η αποδιδόμενη θερμική ισχύς στον βραστήρα πρέπει να είναι 3,86MW και με δεδομένο ότι ο βαθμός απόδοσης είναι 88% προκύπτει ότι η προσδιδόμενη θερμότητα από τον λέβητα προς τη συσκευή παραγωγής ατμού πρέπει να είναι 4,38MW. Θεωρώντας θερμοκρασία καυσαερίων 700-750°C (Cengel.Y.A και M. A. Boles, 1998) και λόγο αέρα λ=1,2 για να επιτευχθεί πλήρης καύση προκύπτουν τα δεδομένα του Πίνακα 3. Μέσω της απαιτούμενης ισχύος θα προκύψει η παροχή του καυσίμου και κατ' επέκταση η παροχή του CO₂.

Πίνακας 3. Δεδομένα καύσης

Ένωση	Ενθαλπία καύσης (kJ/kmol)	Ειδική ενθαλπία (7°C) (kJ/kmol)	Ειδική ενθαλπία (25°C) (kJ/kmol)	Ειδική ενθαλπία (727°C)
CH ₄	-74,21	-	-	-
O ₂	-	8150	8682	31,389
N ₂	-	8144	8669	30,129
CO ₂	-393,52	-	9364	42,76
H ₂ O	-241,82	-	9904	35,882

Από την εκτέλεση του υπολογισμού προκύπτει ειδική θερμότητα καύσης 103,440 (kJ/kmol) ή 1655,04 (kJ/kg). Με δεδομένη την ισχύς προκύπτει απαιτούμενη παροχή 2,645 (kg/sec). Ακριβώς ίδια είναι και η απαιτούμενη ποσότητα CO₂ που παράγεται από τον θάλαμο καύσης υπό τη μορφή καυσαερίων.

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει συγκεντρωτικά ότι προς μία υποτιθέμενη θερμοκηπιακή μονάδα παρέχονται:

1. Θερμική ισχύς υπό τη μορφή θερμού νερού (2142kW)
2. Ηλεκτρική ισχύς προς το δίκτυο (1026kW)
3. CO₂ (2,645 kg/sec)

Η θερμική ισχύς που προκύπτει μπορεί να καλύψει ανάγκες θέρμανσης θερμοκηπίου ανάλογα με την περιοχή εγκατάστασης, το υλικό κάλυψης, τα συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας κτλ. Θεωρώντας ότι οι ανάγκες θέρμανσης στην Ελλάδα κυμαίνονται από 100-300 kW/στρέμμα η διαθέσιμη θερμική ισχύς μπορεί να καλύψει θερμοκήπια από 7-20 στρέμματα. Αντίστοιχα μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να καλύψει πλήρως τις ανάγκες του θερμοκηπίου, έστω και θεωρητικά καθώς από το κόστος πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας είναι δυνατόν να καλυφθεί το κόστος αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος ανάλογα με το είδος και τις ανάγκες της καλλιέργειας είναι δυνατόν να αξιοποιηθεί η συνεχόμενη παροχή CO₂ για τη βελτίωση των αποδόσεων.

5.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα μελέτη διερευνήθηκε η απόδοση ενός συστήματος συμπαραγωγής με ατμό μικρής κλίμακας για την κάλυψη αναγκών ενέργειας CO₂ θερμοκηπίου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο συνδυασμός εμπορικών συσκευών μικρής κλίμακας μπορεί να επιτύχει αποτελέσματα παρόμοια με εκείνα των μηχανών που λειτουργούν με αεριοστρόβιλους. Η εφαρμογή τέτοιων συστημάτων είναι πιο συμφέρουσα στην περίπτωση θερμοκηπίων μεγάλης αξίας με εξοπλισμό και καλής ποιότητας κατασκευή. Παρόλα τα θετικά αποτελέσματα από ενεργειακής άποψης θα πρέπει να εξεταστεί η βιωσιμότητα του συστήματος από οικονομικής και τεχνικής σκοπιάς, κυρίως γιατί αποτελείται από πλήθος διαφορετικών συσκευών ενώ απαιτεί και σημαντικό αριθμό συμπληρωματικού εξοπλισμού που δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Baehr H.D, Θερμοδυναμική-Εισαγωγή στα θεμελιώση και στις τεχνικές εφαρμογές, Γιαχούδη-Γιαπούλη, Θεσσαλονίκη 2001
- Bredenbeck.H, *The use of waste heat from a power plant for greenhouse heating in commercial application in Germany*, ISHS Acta Horticulturae 312, (1992)
- Cengel.Y.A και M. A. Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach*. Thessaloniki-Greece, Tziolas Publications (1998)
- Davies P. A., Hossain A. K., Lychnos, G, Pato.C, *Energy saving and solar electricity in fan-ventilated greenhouses*, ISHS International Workshop on Greenhouse Environmental Control and Crop Production in Semi-Arid Regions, Acta Horticulturae,, 797, 95-101 (2008)
- Dincer.I, *Energy Fundamentals-Steam Rankine Cycle*, Comprehensive Energy Systems-Elsevier (2018)
- Hanan J.J., *Greenhouses-Advanced Technology for Protected Horticulture*. USA, CRC Press, (1988)
- Jóhannesson, G.A., H.P. Ingólfsson, G.Siddiqi, P.Ramsak, G.Breembroek, A.Manzella, E.Trumpy, S.Schreiber, B.Pétursson, A.W. Stoklosa, S.Björnsson,P.Calcagno,M.Lacirignol, A.Lapanje,A.Nador,M.Cunha,J.Stadtruckerová,Karaoz, *European cooperation on geothermal research through the GEOTHERMAL ERA NET*, European Geothermal Congress (2016)
- Mechanicalboost official website, *Rankine Cycle | How to Calculate the Efficiency of the Rankine Cycle?*, URL: <https://mechanicalboost.com/rankine-cycle/>
- Sanford.S, *Reducing greenhouse energy consumption-an overview*, A3907-1/University of Wisconsin -USDA, (2011)
- Siemens- Energy official website, *Dresser-Rand steam turbines*, URL: <https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-generation/steam-turbines/d-r-steam-turbines.html>
- Watco Group official website, *Surface condenser and its function in thermal power plant*, URL: <https://www.watco-group.co/surface-condenser-in-thermal-power-plant/>
- Zezon official website, *DZL series biomass-fired steam boiler- DZL6-1.60-M*, URL: <https://en.zozen.com/products/dzl-series-biomass-fired-steamboiler.html?5xyFrom=google-gg#div1>
- Νόμος 4414/2016 : *Νέο καθεστώς στήριξης των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας Υψηλής Απόδοσης - Διατάξεις για το νομικό και λειτουργικό διαχωρισμό των κλάδων προμήθειας και διανομής στην αγορά του φυσικού αερίου και άλλες διατάξεις.*