

ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΤΕΧΝΙΚΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΩΝ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ

Μ. Γεωργιάδης, Σ. Στεφανής

Σ. Β. Παράς, Α. Ι. Καράμπελας

Εργαστήριο Τεχνολογίας Χημικών Εγκαταστάσεων, Πανεπιστ. Θυρίδα 455

Τμήμα Χημικών Μηχανικών Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσ/νίκης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην εργασία αυτή προτείνεται λογισμικό για μικροϋπολογιστή (H/Y) για τον προσδιορισμό της οικονομικότητας διαφόρων εναλλακτικών σεναρίων εκμετάλλευσης γεωθερμικών πεδίων χαμηλής ενθαλπίας ($T < 90^{\circ}\text{C}$), με δεδομένα τη θερμοκρασία, την παροχή του γεωθερμικού ρευστού, την απόσταση μεταφοράς του στον τόπο κατανάλωσης, το βάθος της γεώτρησης, το έτος έναρξης λειτουργίας των εγκαταστάσεων εκμετάλλευσης και την τιμή του συμβατικού καυσίμου και της kWh. Οι τρεις εφαρμογές που καλύπτονται απ' τον αλγόριθμο είναι η θέρμανση οικισμών, ο δροσισμός χώρων και η ξήρανση γεωργικών προϊόντων. Το προτεινόμενο λογισμικό, είναι εύχρηστο, ταχύτατο ως προς την εκτέλεση, και μπορεί να προσαρμοσθεί εύκολα στις ανάγκες τεχνικοοικονομικών μελετών.

ΛΕΞΕΙΣ-ΚΛΕΙΔΙΑ: Γεωθερμία, Τεχνικο-οικονομική μελέτη, Λογισμικό H/Y, Θέρμανση οικισμών, Κύκλο απορρόφησης, Δροσισμός, Ξήρανση γεωργικών προϊόντων.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Γενικά

Τα γεωθερμικά ρευστά χαμηλής ενθαλπίας μπορούν να υποκαταστήσουν τα συμβατικά καύσιμα σε πολλές εφαρμογές. Στην παρούσα εργασία μελετάται η δυνατότητα οικονομικής εκμετάλλευσης γεωθερμικών ρευστών για θέρμανση οικισμών, ήπια ψύξη (δροσισμός) με κύκλο απορρόφησης και ξήρανση αγροτικών προϊόντων. Προτείνεται ένας αλγόριθμος για μικρο-υπολογιστή (PC), με σκοπό το γρήγορο προσδιορισμό της οικονομικότητας διαφόρων εναλλακτικών σεναρίων εκμετάλλευσης γεωθερμικών ρευστών χαμηλής ενθαλπίας ($T < 90^{\circ}\text{C}$).

Στο χρήστη του λογισμικού παρέχεται η δυνατότητα να εξετάσει μια σειρά πιθανών δυνατοτήτων αξιοποίησης της διαθέσιμης ενέργειας, με δεδομένα τα κλιματολογικά στοιχεία της περιοχής που βρίσκεται το γεωθερμικό πεδίο, το μέγεθος των οικισμών, την ποσότητα της γεωργικής παραγωγής και την ποσότητα του απαιτούμενου ψυκτικού φορτίου. Το πρόγραμμα επιτρέπει τον προκαταρκτικό σχεδιασμό των εγκαταστάσεων εκμετάλλευσης της ενέργειας με βάση τις οικονομικά βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας, την κοστολόγηση των συσκευών και τον υπολογισμό της πάγιας επένδυσης. Υπολογίζεται τελικά το κόστος λειτουργίας των μονάδων και συγκρίνεται με το αντίστοιχο κόστος συστημάτων που χρησιμοποιούν συμβατικά καύσιμα.

Η μελέτη αυτή δεν έχει σκοπό να επιλέξει το βέλτιστο σενάριο αξιοποίησης της γεωθερμίας, που έχει επιτυχώς αντιμετωπισθεί από άλλους ερευνητές, αλλά να δώσει μία γρήγορη και αξιόπιστη εκτίμηση της οικονομικότητας διαφόρων προσφερομένων δυνατοτήτων εκμετάλλευσης της γεωθερμικής ενέργειας.

Χαρακτηριστικά - Χρήση του Λογισμικού

Το προτεινόμενο λογισμικό είναι γραμμένο σε γλώσσα MS Basic, Advanced Development System v.7.0 για H/Y με λειτουργικό σύστημα DOS™. Οι ελάχιστες απαιτήσεις του είναι ένας H/Y (XT ή AT) με οδηγό δισκέτας (floppy disk), μνήμη RAM 640 kbytes και εκτυπωτή.

Το λογισμικό είναι φιλικό και εύκολο στη χρήση. Όταν εκτελείται το πρόγραμμα, στο άνω τμήμα της οθόνης διατίθεται μια λίστα επιλογών, που αναφέρονται στις διάφορες δυνατότητες εκμετάλλευσης των γεωθερμικών ρευστών. Η επιλογή είναι δυνατό να γίνει με χρήση του πληκτρολογίου ή με χρήση "ποντικιού". Η επιλογή "HELP" δίνει επεξηγήσεις για τον τρόπο λειτουργίας του προγράμματος καθώς και βασικά σημεία της μεθοδολογίας που ακολουθείται. Ο απαιτούμενος χρόνος εκτέλεσης των υπολογισμών εξαρτάται από την συγκεκριμένη εφαρμογή καθώς και από το είδος του υπολογιστή. Για επεξεργαστή 80286/12 MHz ένας τυπικός χρόνος εκτέλεσης είναι περίπου 2 min. Τα αποτελέσματα εμφανίζονται ταυτόχρονα με τα αντίστοιχα δεδομένα και παρουσιάζουν την οικονομικότητα της χρήσης με κριτήριο τη διαφορά κόστους από όμοιες εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούν συμβατικά καύσιμα. Υπολογίζονται ακόμη οι ισοδύναμοι τόννοι πετρελαίου που εξοικονομούνται από τη χρήση γεωθερμικής ενέργειας.

Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να τονισθεί ότι σε κάθε περίπτωση υπολογίζεται η βέλτιστη απαιτούμενη παροχή του γεωθερμικού ρευστού. Ετσι αν η διαθέσιμη παροχή του πεδίου υπερκαλύπτει τις ανάγκες μιας εφαρμογής ζητείται από το χρήστη να δηλώσει αν επιθυμεί την διάθεση του πλεονάζοντος ρευστού σε κάποια άλλη κατάλληλη χρήση, η οποία θα λειτουργεί παράλληλα με την πρώτη. Ετσι είναι δυνατές εκτιμήσεις για μια καθολική εκμετάλλευση της γεωθερμικής πηγής. Το ποσοστό της συνολικής παροχής του πεδίου, το οποίο αξιοποιεί μια εφαρμογή καθορίζει και το ποσοστό συμμετοχής της στο κόστος χρήσης του πεδίου.

Το γενικό λογικό διάγραμμα στο οποίο βασίσθηκε η ανάπτυξη του προγράμματος φαίνεται στο Σχήμα 1. Στην εισήγηση αυτή παρουσιάζονται κυρίως οι γενικές αρχές του λογισμικού και μερικά αποτελέσματα υπολογισμών, ενώ λεπτομέρειες για τον αλγόριθμο και το σχεδιασμό των σχετικών εγκαταστάσεων δίνονται αλλού [19].

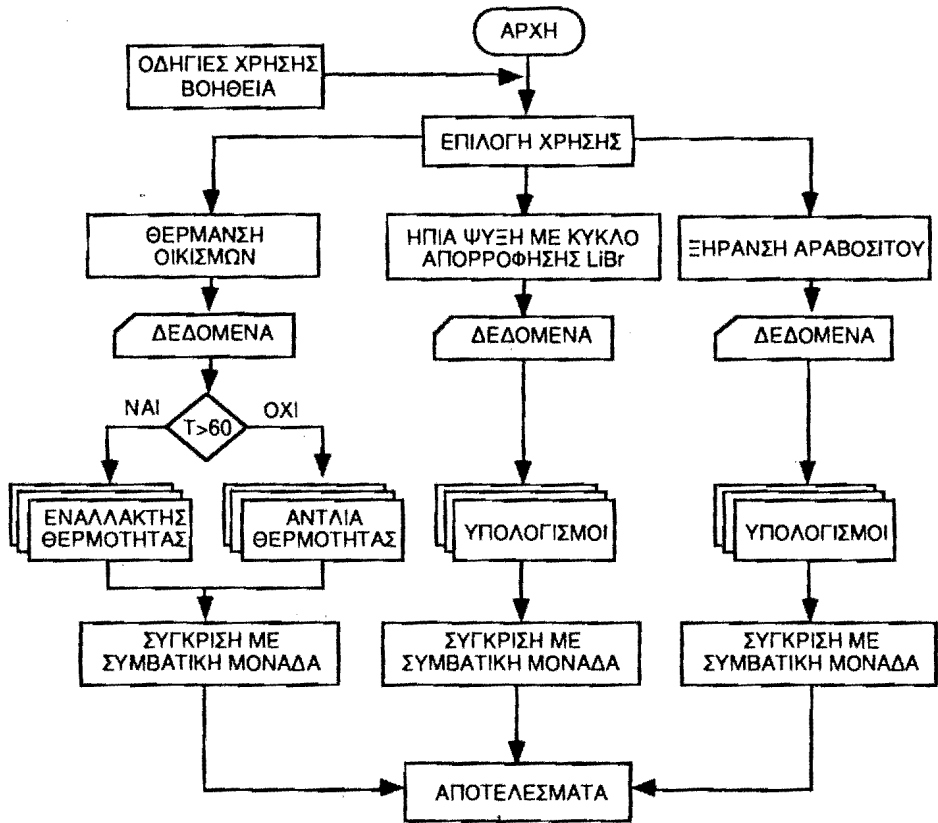
Παραδοχές

Οι βασικές παραδοχές που γίνονται στους υπολογισμούς είναι οι εξής:

- Επιθυμητή εσωτερική θερμοκρασία κατοικίας 18°C.
- Εξωτερική θερμοκρασία -7°C (θερμοκρασία περιβάλλοντος).
- Μέσος όγκος κατοικίας 200 m³.
- Ογκομετρικός συντελεστής απωλειών θερμότητας ίσος με 1 W/°C m³.
- Ελάχιστη θερμοκρασιακή προσέγγιση στους εναλλάκτες 8°C.
- Διαθέσιμο νερό ψύξης στους 25°C.
- Το γεωθερμικό ρευστό έχει ιδιότητες καθαρού νερού.
- Ετήσιες δαπάνες για συντήρηση-επισκευές 4% της πάγιας επένδυσης.
- Γραμμική απόσβεση 20 ετών και μέση τιμή πληθωρισμού 15%.
- Απόδοση αντλιών 65% και γεννήτριας 90%.
- Απόδοση φυσητήρων 85% και καυστήρα 80%.
- Ετήσια διάρκεια λειτουργίας του ξηραντήρα 2 μήνες.
- Ετήσια διάρκεια λειτουργίας ψυκτικού κύκλου 4 μήνες για δροσισμό.
- Επανέγχυση του απορριπτόμενου γεωθερμικού ρευστού στον υδροφόρο ορίζοντα.

2. ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΟΙΚΙΣΜΩΝ

Παγκοσμίως η συνηθέστερη χρήση των γεωθερμικών ρευστών χαμηλής ενθαλπίας είναι η τηλεθέρμανση [7, 8, 9, 10, 12]. Η τεχνολογία έχει αναπτυχθεί ικανοποιητικά ιδιαίτερα στην Γαλλία, την Ισλανδία και τις Η.Π.Α.



Σχήμα 1. Γενικό λογικό διάγραμμα του προτεινόμενου λογισμικού.

Το πρώτο στάδιο των υπολογισμών του λογισμικού είναι η εκτίμηση του **απαιτούμενου θερμικού φορτίου** καθ' όλη την περίοδο θέρμανσης, το οποίο εξαρτάται από τις κλιματολογικές συνθήκες και το μέγεθος των οικισμών. Οι **βαθμοημέρες** είναι σημαντικό μέγεθος και ορίζονται ως το άθροισμα των γινομένων που προκύπτουν από τον πολλαπλασιασμό των ημερών, κατά τις οποίες η θερμοκρασία είναι χαμηλότερη από 18°C, επί τη διαφορά αυτής της θερμοκρασίας από τη μέση θερμοκρασία των ημερών αυτών. Για τον υπολογισμό τους έχουν χρησιμοποιηθεί κλιματολογικά δεδομένα τόσο από τη Βόρειο Ελλάδα όσο και από τη Μυτιλήνη, όπου το κλίμα είναι ημιώτερο. Έτσι καθορίζεται το είδος των κλιματολογικών συνθηκών ανάλογα με την τοποθεσία του οικισμού.

Το δεύτερο στάδιο είναι η **εκτίμηση των ενεργειακών απαιτήσεων** οι οποίες μπορούν να καλυφθούν από το διαθέσιμο γεωθερμικό ρευστό. Στον υπολογισμό αυτό χρησιμοποιούνται ισοζύγια μάζας και ενέργειας.

Το τρίτο στάδιο είναι η **κοστολόγηση των χρησιμοποιούμενων διατάξεων**, όπου υπολογίζονται το κόστος άντλησης και μεταφοράς του γεωθερμικού ρευστού, το κόστος των εναλλακτών θερμότητας και του δικτύου θέρμανσης. Το κόστος του δικτύου θέρμανσης εξαρτάται από την έκταση A (σε km^2) που καταλαμβάνει ο συγκεκριμένος οικισμός και από το μέγιστο απαιτούμενο θερμικό φορτίο [10].

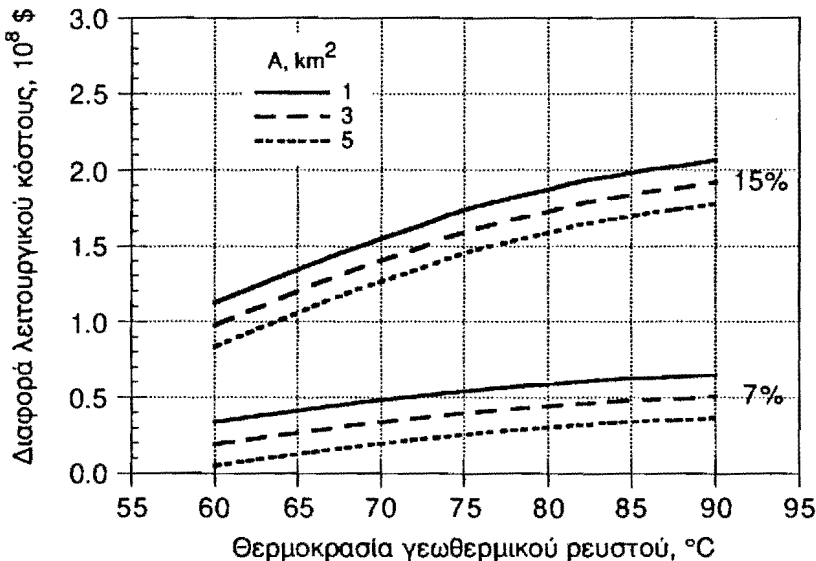
Τέλος υπολογίζονται οι δαπάνες λειτουργίας για 20 χρόνια, οι οποίες αποτελούνται από την επιβάρυνση λόγω της πάγιας επένδυσης, το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας και του **συμβατικού καυσίμου** που συμπληρώνει τις ενεργειακές απαιτήσεις, όταν δεν επαρκεί το γεωθερμικό ρευστό, και τη συντήρηση. Οι δαπάνες αυτές **συγκρίνονται με ένα σύστημα θέρμανσης που χρησιμοποιεί πετρέλαιο**. Επίσης υπολογίζονται οι ισοδύναμοι τόνοι πετρελαίου που εξοικονομούνται από την εκμετάλλευση του γεωθερμικού πεδίου.

Ανάλογα με τη θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού, T , εξετάζονται δύο περιπτώσεις [9, 10, 14]:

1. Για $T \geq 60^\circ\text{C}$ υπάρχει η δυνατότητα απευθείας εναλλαγής θερμότητας με το νερό του δικτύου σε συμβατικούς εναλλάκτες θερμότητας.
2. Για $T < 60^\circ\text{C}$ εξετάζεται η χρήση αντλίας θερμότητας σε συνδυασμό με εναλλάκτη.

Αποτελέσματα

Οι βασικές μεταβλητές που μελετώνται είναι η θερμοκρασία του ρευστού, η έκταση των οικισμών, και ο ετήσιος ρυθμός αύξησης της τιμής του συμβατικού καυσίμου.



Σχήμα 2. Επίδραση των βασικών μεταβλητών στη θέρμανση με γεωθερμικά ρευστά.

Όπως αναμένεται, αύξηση της θερμοκρασίας του γεωθερμικού ρευστού οδηγεί σε αύξηση της διαφοράς του κόστους λειτουργίας ενός συνήθους συστήματος θέρμανσης από το αντίστοιχο γεωθερμικό (Σχήμα 2). Η έκταση του οικισμού, A , είναι βασικός παράγοντας που επηρεάζει το κόστος του δικτύου θέρμανσης. Η μείωση της έκτασης (μεγαλύτερη πυκνότητα δόμησης), όπως και η αύξηση της τιμής του καυσίμου καθιστά ελκυστικότερη την λύση της γεωθερμίας. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2 όταν η ετήσια αύξηση του καυσίμου είναι 15% η διαφορά κόστους λειτουργίας είναι μεγαλύτερη από αυτή που αντιστοιχεί σε αύξηση 7%. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το κόστος του κλασσικού συστήματος θέρμανσης έχει υποτιμηθεί διότι έχει θεωρηθεί ότι είναι ένα σύστημα κεντρικής θέρμανσης για όλο τον οικισμό και όχι ατομικές θερμάνσεις που κοστίζουν ακριβότερα.

Στην περίπτωση χρήσης αντλίας θερμότητας σε συνδυασμό με εναλλάκτες, τα αποτελέσματα της μελέτης δείχνουν ότι υπάρχουν μόνο οριακές προϋποθέσεις για εφαρμογή σε θέρμανση οικισμών, λόγω της πρόσθετης επιβάρυνσης από το κόστος της αντλίας θερμότητας, με το ιδιαίτερα υψηλό κόστος του συμπιεστή και την πρόσθετη ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνει.

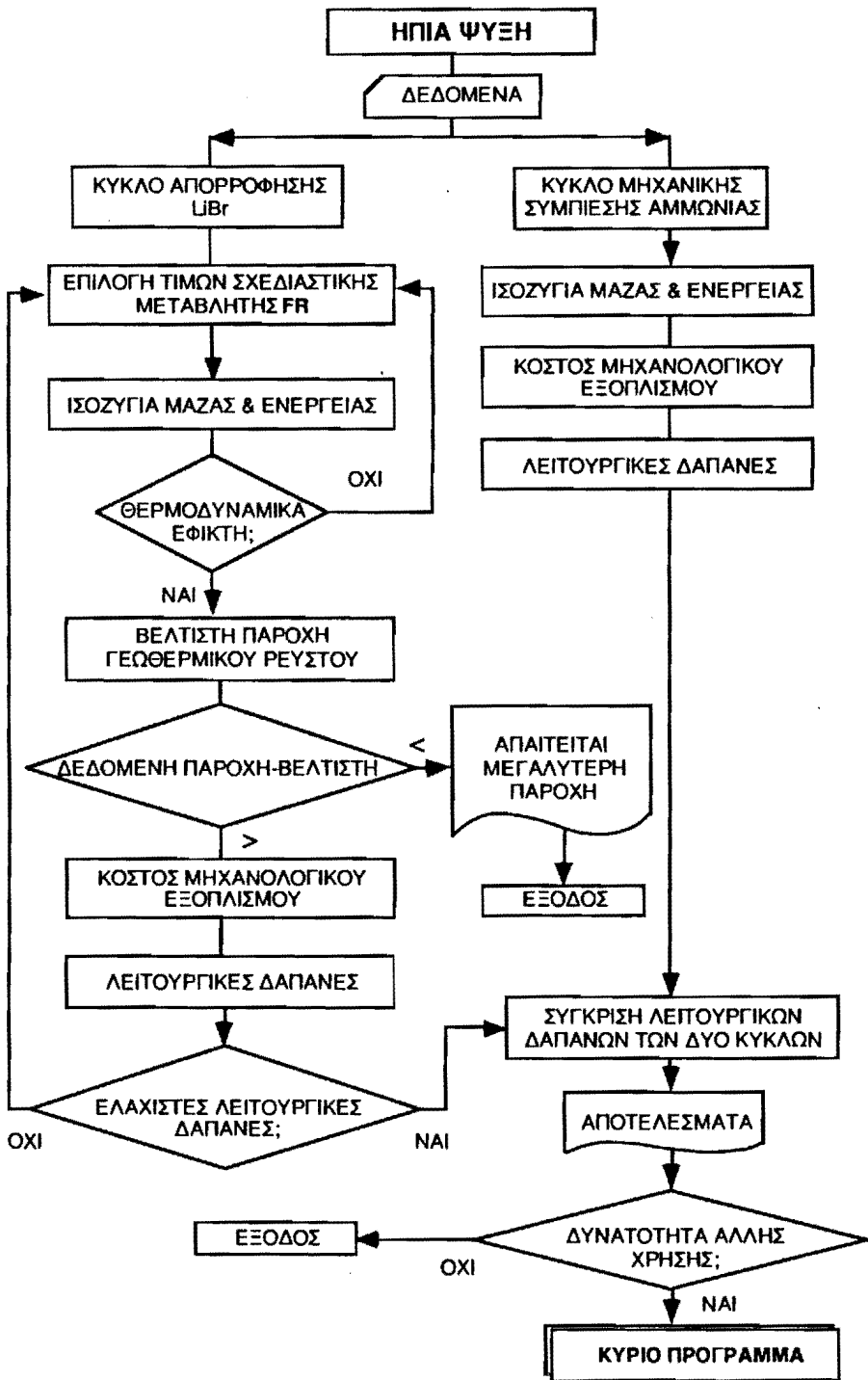
Οι μεταβλητές που μελετήθηκαν στην περίπτωση αυτή είναι ίδιες με αυτές στην περίπτωση θέρμανσης με χρήση εναλλάκτη θερμότητας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι συνήθως η εφαρμογή της αντλίας θερμότητας για θέρμανση οικισμών είναι αντιοικονομική.

3. ΗΠΙΑ ΨΥΞΗ ΧΩΡΩΝ (ΔΡΟΣΙΣΜΟΣ)

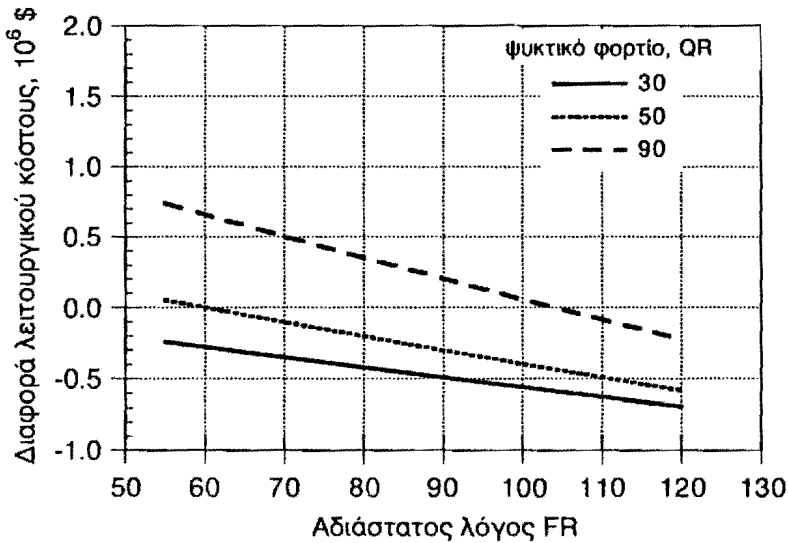
Η ήπια ψύξη με χρήση γεωθερμικών ρευστών χαμηλής ενθαλπίας έχει εφαρμοστεί με ψυκτικά κύκλα αμμωνίας ή υδατικού διαλύματος βρωμιούχου λιθίου (LiBr). Το ψυκτικό κύκλο νερού- LiBr παρουσιάζει ορισμένα πλεονεκτήματα, όπως απλούστερη κατασκευή και λειτουργία της μονάδας, ενώ αποφεύγεται η χρησιμοποίηση αμμωνίας, που χαρακτηρίζεται από υψηλότερη επικινδυνότητα. Συνήθως το κύκλο LiBr χρησιμοποιείται για κλιματισμό, ενώ αυτό της αμμωνίας για ψύξη [7, 8, 12].

Στην εργασία αυτή μελετάται η οικονομικότητα της λειτουργίας ενός τυπικού κύκλου LiBr , συγκρινόμενη με ένα κύκλο μηχανικής συμπίεσης. Οι βασικές συσκευές και ο τρόπος λειτουργίας ενός κύκλου περιγράφονται αλλού [19]. Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται το λογικό διάγραμμα των υπολογισμών της μονάδας δροσίσμου. Προκειμένου να γίνει σχεδιασμός αυτής της ψυκτικής μονάδας επιλύονται τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας της διεργασίας με χρήση κατάλληλων θερμοδυναμικών δεδομένων και εξισώσεων από τη βιβλιογραφία [4,13]. Η βασική σχεδιαστική μεταβλητή είναι ο λόγος FR ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της ροής μάζας του διαλύματος στο ρεύμα σύνδεσης αναγεννητή-απορροφητή προς τη ροή μάζας του καθαρού ψυκτικού που ρέει από τον συμπυκνωτή στον εξατμιστήρα. Γενικά αύξηση του FR προκαλεί ελάττωση της διαφοράς συγκέντρωσης ανάμεσα στον απορροφητή και τον αναγεννητή, αύξηση του φορτίου του εναλλάκτη με παράλληλη αύξηση ισχύος της αντλίας [3, 5, 11]. Η σχέση ανάμεσα στις λειτουργικές παραμέτρους του συστήματος και το βέλτιστο λόγο FR οδηγεί σε επιλογή μεγέθους των συσκευών. Ο βέλτιστος FR λαμβάνει τέτοια τιμή που να οδηγεί σε αποφυγή κρυστάλλωσης του διαλύματος με τις μικρότερες λειτουργικές δαπάνες.

Από την ανάλυση που έγινε βρέθηκε ότι η ελάχιστη θερμοδυναμικά επιτρεπτή τιμή του λόγου FR αποτελεί και τη βέλτιστη τιμή. Στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται η μεταβολή της διαφοράς του κόστους λειτουργίας σε σχέση με το λόγο FR για διάφορα ψυκτικά φορτία. Η θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού θεωρείται 85°C και η θερμοκρασία εξάτμισης 6°C . Παρατηρείται ότι το κύκλο απορρόφησης στη συγκεκριμένη περίπτωση λειτουργεί για τιμές του FR μεγαλύτερες από 54.



Σχήμα 3. Λογικό διάγραμμα υπολογισμών για τη μονάδα παραγωγής ήπιας ψύξης.



Σχήμα 4. Επίδραση του λόγου FR στην οικονομικότητα της μονάδας δροσισμού.

Ο υπολογισμός της πάγιας επένδυσης ενός τέτοιου κύκλου γίνεται με κοστολόγηση κάθε συσκευής χωριστά [6, 16]. Η σύγκριση γίνεται με ένα κύκλο μηχανικής συμπίεσης ατμών αμμωνίας. Υπολογίζονται και συγκρίνονται οι λειτουργικές δαπάνες των δύο κύκλων για όλη την οικονομική ζωή τους. Οι λειτουργικές δαπάνες του κύκλου απορρόφησης αποτελούνται από τις δαπάνες άντλησης και μεταφοράς του γεωθερμικού ρευστού, την δαπάνη λόγω επένδυσης και την καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια στις αντλίες. Οι λειτουργικές δαπάνες του κύκλου μηχανικής συμπίεσης αποτελούνται από τη δαπάνη λόγω επένδυσης και από την ηλεκτρική ενέργεια που καταναλίσκεται στις αντλίες και τους συμπιεστές.

Αποτελέσματα

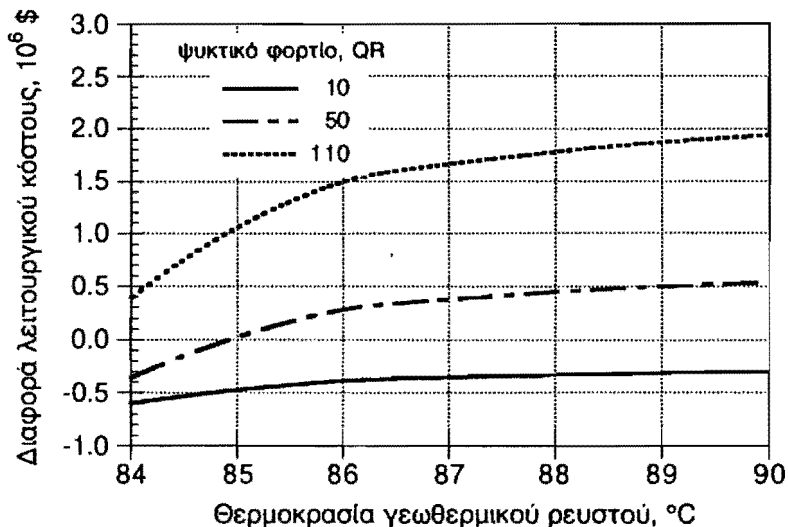
Οι βασικές μεταβλητές που μελετώνται είναι η θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού, η θερμοκρασία εξάτμισης του ψυκτικού, το απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο που εκφράζεται σε ψυκτικούς τόννους και η παροχή του γεωθερμικού ρευστού.

Η ελάχιστη απαιτούμενη **θερμοκρασία** του γεωθερμικού ρευστού, ώστε να λειτουργεί θερμοδυναμικά το κύκλο εξαρτάται από τη θερμοκρασία του ψυκτικού. Όπως διακρίνεται στο **Σχήμα 5** η ελάχιστη αυτή θερμοκρασία είναι 84°C και αντιστοιχεί σε θερμοκρασία εξάτμισης 6°C. Τέλος όπως φαίνεται στο ίδιο σχήμα αύξηση της θερμοκρασίας του γεωθερμικού ρευστού οδηγεί σε αύξηση της διαφοράς του κόστους λειτουργίας.

Το **ψυκτικό φορτίο** είναι ένα ιδιαίτερα σημαντικό μέγεθος. Όσο λιγότεροι είναι οι ψυκτικοί τόννοι, τόσο πιο ασύμφορη είναι η λειτουργία του κύκλου απορρόφησης σε σχέση με το κύκλο μηχανικής συμπίεσης (**Σχήμα 5**). Παρατηρείται ότι για 10 ψυκτικούς τόννους (QR) η λειτουργία του κύκλου απορρόφησης είναι αντιοικονομική, ενώ αντίθετα για 110 QR η λειτουργία είναι σχεδόν πάντα οικονομική.

Η **θερμοκρασία** εξάτμισης του ψυκτικού μέσου στο κύκλο απορρόφησης καθορίζει και την ελάχιστη απαιτούμενη θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού για να λειτουργεί θερμοδυναμικά το κύκλο. Ωστόσο η τιμή που λαμβάνει η θερμοκρασία

εξάτμιση δεν επηρεάζει την οικονομικότητα της λειτουργίας του κύκλου. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η μείωση των λειτουργικών δαπανών αντιστοιχεί σε 10-40% των δαπανών του κύκλου συμπίεσης, για $T=85^{\circ}\text{C}$ και για δυναμικότητες που κυμαίνονται από 50-110 QR.



Σχήμα 5. Επίδραση της θερμοκρασίας του γεωθερμικού ρευστού και της δυναμικότητας στην οικονομικότητα της μονάδας δροσίσιμου.

4. ΞΗΡΑΝΣΗ ΑΓΡΟΤΙΚΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ

Η ξήρανση αγροτικών προϊόντων αποτελεί μια σημαντική εφαρμογή εκμετάλλευσης της γεωθερμικής ενέργειας. Η απαιτούμενη θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού πρέπει να είναι τουλάχιστον 60°C [1, 7, 14]. Στην εργασία αυτή μελετάται η δυνατότητα ξήρανσης αραβόσιτου επειδή είναι ένα από τα σημαντικότερα προϊόντα της γεωργικής παραγωγής της χώρας μας και η ξήρανσή του αποτελεί ένα βασικό στάδιο πριν την αποθήκευσή του. Σήμερα η ξήρανση του προϊόντος γίνεται σε μονάδες ξηραντηρίων που βρίσκονται κοντά στους τόπους παραγωγής του και κυρίως στη Βόρειο Ελλάδα. Φαίνεται όμως ότι ο ατελής σχεδιασμός πολλών ξηραντηρίων έχει ως αποτέλεσμα τις μεγάλες απώλειες θερμότητας και άρα την υπερβολική κατανάλωση καυσίμου [20].

Δύο είναι οι βασικές συσκευές ενός ξηραντηρίου αραβόσιτου που χρησιμοποιεί γεωθερμική ενέργεια:

- Ο **εναλλάκτης θερμότητας**, όπου το γεωθερμικό ρευστό θερμαίνει τον αέρα ο οποίος μεταφέρεται με την βοήθεια φυστήρα. Ο σχεδιασμός του εναλλάκτη γίνεται με βάση τη βιβλιογραφία [15, 16, 17]. Υπολογίζεται η βέλτιστη επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας, η πίεση πίεσης και άλλα τεχνικά χαρακτηριστικά του.

- Ο **περιστροφικός ξηραντήρας** όπου γίνεται η ξήρανση του προϊόντος. Ο τύπος αυτός ξηραντήρα είναι συνεχούς λειτουργίας, κατάλληλος για υλικά που δεν είναι ευαίσθητα στις τριβές, όπως ο αραβόσιτος, δεν είναι όμως διαδεδομένος στην Ελλάδα. Θα πρέπει να τονισθεί ότι ο ίδιος τύπος ξηραντήρα ενδείκνυται για κοκκώδη, κρυσταλλικά υλικά με υψηλό ποσοστό υγρασίας όπως η ζάχαρη και το

αλάτι. Οι βασικές αρχές σχεδιασμού που περιγράφονται παρακάτω είναι οι ίδιες, μεταβάλλονται μόνο οι φυσικές ιδιότητες του υλικού που ξηραίνεται [2, 15, 18, 20].

Κατά την διάρκεια της ξήρασης διακρίνονται 3 ζώνες. Στην πρώτη θερμαίνονται τα στερεά μέχρι τη θερμοκρασία υγρού θερμομέτρου. Στη δεύτερη ζώνη λαμβάνει χώρα η ξήραση μέχρι κάποιο επιτρεπόμενο όριο, ενώ στην τρίτη ζώνη αυξάνει η θερμοκρασία του στερεού προϊόντος. Ο σχεδιασμός του ξηραντήρα γίνεται με βάση το ισοζύγιο υγρασίας και τα ισοζύγια ενέργειας στις τρεις ζώνες για τον αέρα και το υλικό που ξηραίνεται. Ακολούθως υπολογίζονται οι βαθμίδες μεταφοράς οι οποίες πρέπει να κυμαίνονται μεταξύ 1.5 και 2.5. Ο περιορισμός αυτός καθορίζει την τιμή του ρυθμού ροής του αέρα. Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία εισόδου του αέρα (T_a) τόσο μικρότερο είναι το μέγεθος του ξηραντήρα και τόσο μεγαλύτερο το μέγεθος του εναλλάκτη. Οι τιμές που μπορεί να πάρει αυτή είναι:

$$20 < T_a < T + 12$$

όπου η θερμοκρασία εισόδου του αέρα στον εναλλάκτη λαμβάνεται 20°C , η ελάχιστη θερμοκρασιακή προσέγγιση στον εναλλάκτη 12°C , και T είναι η θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού. Στην περίπτωση της ξήρασης με συμβατικά καύσιμα η θερμοκρασία αυτή παίρνει τιμές από 50 έως 250°C .

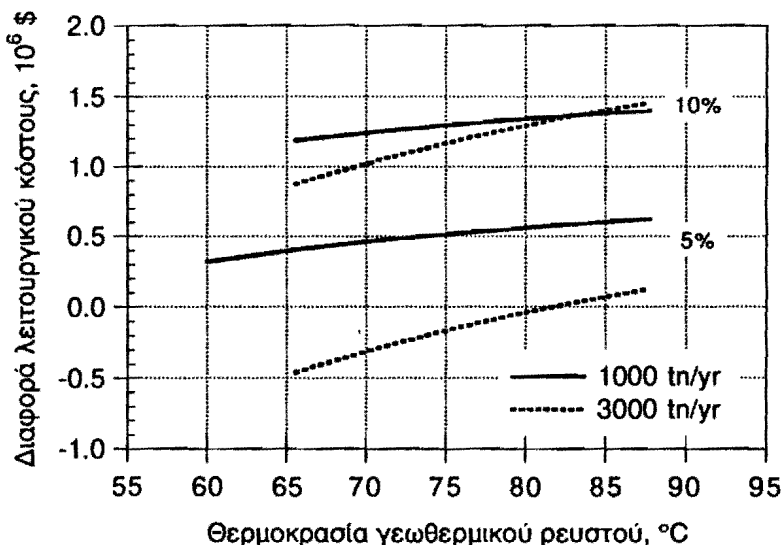
Η θερμοκρασία εξόδου του προϊόντος αποτελεί και αυτή μια σχεδιαστική μεταβλητή. Η θερμοκρασία αυτή δεν θα πρέπει να λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες από $35-40^\circ\text{C}$ διότι σ' αυτή την περίπτωση το προϊόν καταστρέφεται, ενώ πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την θερμοκρασία εισόδου του προϊόντος που θεωρείται 20°C . Η υγρασία εισόδου του αραβοσίτου θεωρείται ότι είναι 22% ενώ η τελική μετά την ξήραση φθάνει στο 12-14% [20].

Αφού σχεδιαστεί το σύστημα εναλλάκτη-ξηραντήρα σύμφωνα με τις οικονομικά βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας του, υπολογίζονται οι συνολικές δαπάνες λειτουργίας και συγκρίνονται με τις αντίστοιχες ενός περιστροφικού ξηραντήρα που χρησιμοποιεί συμβατικό καύσιμο (πετρέλαιο). Οι δαπάνες αυτές για το σύστημα ξήρασης αποτελούνται από το κόστος άντλησης και μεταφοράς του γεωθερμικού ρευστού, από την επιβάρυνση λόγω επένδυσης και τέλος από την ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται στο φυσητήρα. Το συμβατικό σύστημα ξήρασης επιβαρύνεται από τη δαπάνη επένδυσης και από το κόστος του καυσίμου.

Αποτελέσματα

Οι παράμετροι που εξετάστηκαν είναι η θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού και η ετήσια αύξηση της τιμής του συμβατικού καυσίμου. Η αύξηση της θερμοκρασίας του γεωθερμικού ρευστού καθώς και η αύξηση της τιμής του συμβατικού καυσίμου έχουν σαν αποτέλεσμα την αύξηση της διαφοράς του λειτουργικού κόστους. Στο Σχήμα 6 απεικονίζεται αυτή η μεταβολή για δύο δυναμικότητες προϊόντος (1000 και 3000 tn/yr) και δύο τιμές του ρυθμού αύξησης του καυσίμου (5 και 10%). Πρέπει να τονισθεί ότι για να διατηρηθεί ο περιορισμός του μέγιστου αριθμού βαθμίδων μεταφοράς στον ξηραντήρα σε 2.5 [18], η θερμοκρασία εισόδου του αέρα μεταβάλλεται από το πρόγραμμα, με αποτέλεσμα για κάθε δυναμικότητα που εξετάζεται να προκύπτει από τους ενεργειακούς υπολογισμούς διαφορετική ελάχιστη απαιτούμενη θερμοκρασία γεωθερμικού ρευστού. Έτσι για 3000tn/yr προϊόντος αυτή είναι περίπου 65°C .

Αναφέρεται ακόμη ενδεικτικά ότι η μείωση των λειτουργικών δαπανών αντιστοιχεί σε 5-15% των δαπανών της συμβατικής μονάδας ξήρασης, για ρυθμό αύξησης του καυσίμου 7% και για θερμοκρασίες ρευστού από $60-85^\circ\text{C}$.



Σχήμα 6. Επίδραση των βασικών μεταβλητών στην ξήρανση με γεωθερμικά ρευστά.

5. ΣΧΟΛΙΑ

Όπως έχει ήδη προαναφερθεί το προτεινόμενο λογισμικό θεωρείται ως ένα εύχρηστο εργαλείο το οποίο επιτρέπει ταχεία και αξιόπιστη εκτίμηση οικονομικότητας των διαφόρων εφαρμογών. Στην παρούσα μορφή του δεν παρέχει την βέλτιστη συνολικά λύση για την αξιοποίηση κάποιου πεδίου, η οποία αποτελεί αντικείμενο άλλων μελετών. Θεωρείται όμως ότι αποτελεί βασικό δομικό στοιχείο για διαμόρφωση ενός τέτοιου, πιο γενικευμένου αλγορίθμου.

Εξάλλου από την κατασκευή του είναι επεκτάσιμο ώστε να επιτρέπει τη μελλοντική συμπλήρωσή του με άλλες εφαρμογές της γεωθερμίας (π.χ. θερμοκήπια, ιχθυοκαλλιέργειες κλπ). Ένα ακόμη βασικό πλεονέκτημα του προτεινόμενου λογισμικού είναι η αξιοπιστία των σχεδιαστικών σχέσεων οι οποίες δίνονται με λεπτομέρεια αλλού [19].

Πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι στην ανάπτυξη του λογισμικού δεν έχουν συμπεριληφθεί δαπάνες για αντιμετώπιση λειτουργικών προβλημάτων όπως η διάβρωση και οι επικαθίσεις. Δεν έχουν όμως συνεκτιμηθεί και έσοδα που θα μπορούσαν να προέρχονται από διάθεση των υγρών αποβλήτων για άλλες χρήσεις ή από την απόληψη του CO₂.

Τα αριθμητικά αποτελέσματα τα οποία συνοψίζονται για τις τρεις περιπτώσεις (θέρμανση οικισμών, δροσισμό χώρων και ξήρανση γεωργικών προϊόντων) έχουν χαρακτήρα ενδεικτικό και δεν αντιπροσωπεύουν ολοκληρωμένη μελέτη για κάθε περίπτωση. Παρόλα αυτά οι υπολογισμοί, που έγιναν με συστηματική μεταβολή των κύριων μεταβλητών σε μία σχετικά ευρεία περιοχή τιμών, δείχνουν ότι οι προαναφερόμενες χρήσεις είναι κατ' αρχήν ελκυστικές και θα πρέπει να διερευνηθούν ιδιαίτερα για τα γεωθερμικά πεδία της Β. Ελλάδας.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Anchissi, A.C. 1988 Direct application of geothermal energy for process heat in Guatemala. *Geothermics* **17**, 311-318.
2. Belcher, W.D., Smith, A.D. & Cook, M.E. 1977 Methods for Analyzing Drying equipment. *Chemical Engineering*, January 17, 101-123.
3. Eisa, M.A.R., Devotta, S. & Holland, F.A. 1985 A study of economizer performance in a Water-Lithium Bromide Absorption cooler. *Int. J. Heat Mass Transfer* **28**, 2323-2329.
4. Eisa, M.A.R., Devotta, S. & Holland, F.A. 1986 Thermodynamic Design Data for Absorption Heat Pump Systems Operating on Water-Lithium Bromide. *Applied Energy* **24**, 287-301.
5. Eisa, M.A.R., Sane, M.G., Devotta, S. & Holland, F.A. 1985 Experimental Studies to Determine the Optimum Flow Ratio in a Water-Lithium Bromide Absorption Cooler for High Absorber Temperatures. *Chem. Eng. Res. Des.* **63**, p. 267-271.
6. Garrett, E.D. 1989 Chem. Engineering Economics. Van Nostrand Reinhold, New York.
7. Gudmundsson, J.S. 1985 Direct uses of earth heat. *Energy Research* **9**, 345-375.
8. Gudmundsson, J.S. 1988 The elements of direct uses. *Geothermics* **17**, 119-136.
9. Harrison, R. 1987 Design and performance of direct heat Exchange Geothermal District Heating Schemes. *Geothermics* **16**, 197-211.
10. Harrison, R., Mortinemer, N.D. & Smarason, O.B. 1990 Geothermal Heating: A handbook of engineering economics, Pergamon Press.
11. Kumar, P., Devotta, S. & Holland, F.A. 1984 Effect of Flow Ratio on the performance of an Experimental Absorption Cooling System. *Chem. Eng. Res. Des.* **62**, p. 194-198.
12. Lund, J.W. 1988 U.S.A. experience in direct heat use. *Geothermics* **17**, 225-235.
13. McNeely, L.A. 1979 Thermodynamic Properties of aqueous Solutions of Lithium bromide. *ASHRAE Trans.* **85**, 413-434.
14. Mitsuru, S. 1990 Direct uses of geothermal energy in Japan. *Geothermics* **19**, 223-232.
15. Peters, M.S. & Timmerhaus, K.D. 1981 Plant Design and Economics for Chemical Engineers. McGraw Hill, New York.
16. Purohit, P.G. 1983 Estimating Costs of Shell and tube heat Exchangers. *Chemical Engineering*, August 22, 56-67.
17. Tarter, A.R., Lim, H.C. & Koppel, L.B. 1971 Finding the Economically Optimum Heat Exchanger. *Chemical Engineering*, October 4, 79-84.
18. Tsao, T.G. & Wheelock, D.T. 1967 Drying Theory and Calculations. *Chemical Engineering*, June 19, 201-214.
19. Γεωργιάδης, Μ. & Στεφανής, Σ. 1992 Τεχνικο-οικονομική Μελέτη Αξιοποίησης Γεωθερμικών Ρευστών Χαμηλής Ενθαλπίας. Διπλωμ. Εργασία, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.
20. Φαλαγκάς, Σ. 1985 Εήρανη αγροτικών προϊόντων. *Ελληνικό Κέντρο Παραγωγικότητας*, Αθήνα.