



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ**

από τις

ΔΕΡΜΑΤΑ ΘΩΜΑΗ-ΚΟΜΝΗΝΗ

ΣΧΟΙΝΑ ΛΥΔΙΑ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

2015



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 14160/1
Ημερ. Εισ.: 08-03-2017
Δωρεά: Συγγραφέας
Ταξiθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜ
2015
ΔΕΡ

2015 Δερματά Θωμαή-Κομνηνή , Σχοινά Λυδία

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000125697

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων)	Δρ. Νικόλαος Ανδρίτσος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
(Συνεπιβλέπων)	Δρ. Αναστάσιος Σταμάτης Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Δεύτερος Εξεταστής	Δρ. Βασίλειος Μποντόζογλου Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Τρίτος Εξεταστής	Δρ. Αναστάσιος Σταματέλλος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας, Καθηγητή κ. Νικόλαο Ανδρίτσο, για τη βοήθεια και την καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μας. Επίσης, ευχαριστούμε πολύ τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας, Καθηγητές κκ. Βασίλειο Μποντόζογλου και Αναστάσιο Σταματέλλο για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας και για όσα μας δίδαξαν στη μέχρι τώρα πορεία μας ως φοιτήτριες. Οφείλουμε ευχαριστίες στον Αναπληρωτή Καθηγητή Αναστάσιο Σταμάτη που συνέβαλε στη διεξαγωγή της εργασίας με τις πολύτιμες υποδείξεις του. Ακόμη, είμαστε ευγνώμονες στον Υποψήφιο Διδάκτορα Φοιτητή Αποστόλη Γκούντα που ήταν πρόθυμος πάντα να συνδράμει και να λύσει τις απορίες μας. Ευχαριστούμε πολύ επίσης τους γονείς μας και τους φίλους μας που μας στήριξαν σε όλη τη διάρκεια της σταδιοδρομίας μας. Αφιερώνουμε αυτή την εργασία στη μνήμη του Αναστάσιου Σταμάτη.

Δερματά Θωμαή-Κομνηνή, Σχοινά Λυδία

ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ

Περίληψη

Η γεωθερμική ενέργεια αφορά τη θερμική ενέργεια που παράγεται και αποθηκεύεται στο εσωτερικό της Γης. Είναι εκμεταλλεύσιμη όταν τα υπόγεια ύδατα μεταφέρουν τη θερμότητα των πετρωμάτων μέσα από ρωγμές και οπές στην επιφάνεια. Πρόκειται για μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας διότι ο ρυθμός ροής της θερμότητας είναι σταθερός εφόσον στο εσωτερικό της γης υπάρχουν μεγάλα αποθέματα θερμικής ενέργειας και τα υπόγεια ύδατα αναπληρώνονται από τις βροχοπτώσεις και τον κύκλο του νερού. Αποτελεί μια εμπορικά αποδεδειγμένη μορφή ενέργειας που μπορεί να παρέχει συνεχή ενέργεια και θερμότητα.

Το μεγάλο πλεονέκτημα της γεωθερμικής ενέργειας ως προς τα ορυκτά καύσιμα είναι οι μειωμένες εκπομπές. Συγκεκριμένα, μια γεωθερμική εγκατάσταση εκπέμπει 5% CO₂, 1% SO₂ και λιγότερο από 1% NO των αντίστοιχων εκπομπών μιας εγκατάστασης ίδιου μεγέθους που λειτουργεί με λιγνίτη. Τα δυαδικά συστήματα ωστόσο είναι τα πλέον συμφέροντα καθώς έχουν σχεδόν μηδενικές εκπομπές κατά τη λειτουργία και ένα μικρό ποσοστό κατά τη διάρκεια της εξόρυξης του γεωθερμικού ρευστού. Επίσης, όταν το γεωθερμικό σύστημα δεν αποσκοπεί στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αλλά στην θέρμανση οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα είναι μηδενικές. Αν και οι γεωθερμικές εγκαταστάσεις ενδείκνυνται για την προστασία του περιβάλλοντος, ωστόσο μικρός είναι ο αριθμός των εφαρμογών τους εξαιτίας των ελλειπών χρηματοδοτήσεων από την Ευρωπαϊκή Ένωση, του μεγάλου κόστους και του ρίσκου αποτυχίας. Οι έρευνες που διεξάγονται στοχεύουν στην εξάλειψη των εμποδίων και στην ανάδειξη της γεωθερμικής ενέργειας ως μια από τις επικρατέστερες μορφές ενέργειας ώστε να εκμεταλλευτούν πλήρως τα μεγάλα αποθέματα του πλανήτη.

Η εργασία αυτή πραγματεύεται την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το γεωθερμικό πεδίο χαμηλής θερμοκρασίας (90° C) του Αρίστηνου Αλεξανδρούπολης σε συνδυασμό με καύση φυσικού αερίου. Το παραπάνω υβριδικό σύστημα βασίζεται στην ενίσχυση του δυαδικού κύκλου ORC από τα καυσαέρια ενός κύκλου Brayton. Στον κύκλο Brayton ο ατμοσφαιρικός αέρας εισέρχεται σε ένα συμπιεστή με λόγο πιέσεων 5 προκειμένου να αυξηθεί η πίεσή του. Στη συνέχεια ενώνεται με το καύσιμο που στην περίπτωσή μας είναι το φυσικό αέριο και μπαίνουν στο θάλαμο καύσης. Εκεί καίγονται και τα προϊόντα της καύσης σε υψηλή θερμοκρασία και πίεση εκτονώνονται στο στρόβιλο για παραγωγή ηλεκτρικής

ενέργειας. Τα καυσαέρια από το στρόβιλο υπερθερμαίνουν το οργανικό ρευστό (ισοβουτάνιο, κ-βουτάνιο, κ-πεντάνιο, κ-εξάνιο), μέσω ενός εναλλάκτη, πριν να αποτονωθεί στο στρόβιλο του κύκλου Rankine. Σ' αυτόν τον κύκλο το οργανικό ρευστό παραλαμβάνει θερμότητα από το γεωθερμικό ρευστό μέσω του εναλλάκτη (εξατμιστήρας). Το γεωθερμικό ρευστό από τη γεώτρηση (90°C, 2.5 bar) καταλήγει, μετά τη θερμική εκμετάλλευση μέσω εναλλάκτη, στην επιστροφή του γεωθερμικού νερού στον φυσικό ταμιευτήρα. Το οργανικό στη συνέχεια παραλαμβάνει θερμότητα μέσω ενός εναλλάκτη από τα προϊόντα της καύσης του φυσικού αερίου, μεταβαίνει σε κατάσταση υπέρθερμου ατμού και εκτονώνεται στον στρόβιλο, με αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, και τέλος ψύχεται στο συμπυκνωτή. Στην περίπτωση του ισοβουτανίου, του κ-βουτανίου και του κ-πεντανίου η ψύξη έγινε με αερόψυκτο συμπυκνωτή ενώ για το κ-εξάνιο εξετάστηκε η χρήση του πύργου ψύξης.

Η ενεργειακή και εξεργειακή ανάλυση του συστήματος που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας βασίζεται στον πρώτο και δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής. Μέσα από την εξεργειακή ανάλυση προσδιορίζονται οι διατάξεις της εγκατάστασης με τη μικρότερη αλλά και με τη μεγαλύτερη απόδοση συμβάλλοντας έτσι στην αξιολόγηση και βελτιστοποίηση του υπάρχοντος υβριδικού συστήματος με σκοπό τη μείωση των απωλειών και των αναντιστρεπτοτήτων. Ακόμη, διεξήχθη θερμοοικονομική ανάλυση προκειμένου να επιτευχθεί η μέγιστη παραγωγή ισχύος με το μικρότερο κόστος.

Το κ-βουτάνιο συνιστά την πιο συμφέρουσα επιλογή από πλευράς ισχύος, καθώς παράγει συνολικά το μεγαλύτερο άθροισμα έργων (3784 kW). Ωστόσο από πλευράς κόστους το ισοβουτάνιο έχει το μικρότερο μοναδιαίο κόστος παραγωγής ενέργειας (15,22 cents/kWh) και το μικρότερο συνολικό κεφάλαιο επένδυσης (4.427.474 \$).

Επίσης, η οικονομική βιωσιμότητα της κάθε διάταξης καθορίζεται από το άθροισμα του ρυθμού καταστροφής εξέργειας $\dot{C}_{D,k}$ και του \dot{Z}_k που αποτελεί το συνολικό ρυθμό κόστους για την κάθε συσκευή k.

Ένας ακόμα κρίσιμος δείκτης για την αξιολόγηση είναι ο εξεργοοικονομικός συντελεστής f_k , ο οποίος όταν είναι μεγάλος συνεπάγεται υψηλό κόστος συσκευής, διαφορετικά σημαίνει πως έχουμε μεγάλο κόστος αναντιστρεπτοτήτων οπότε πρέπει να χρησιμοποιηθούν συσκευές καλύτερου εξεργειακού βαθμού απόδοσης.

Έχοντας απώτερο στόχο την επιλογή ενός εκ των τεσσάρων συστημάτων, έλαβε χώρα βελτιστοποίηση ως προς τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης του κύκλου Rankine και ως προς το μοναδιαίο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ως τελικό συμπέρασμα της εργασίας προτείνεται η χρήση του κ-βουτανίου όταν το επιθυμητό αποτέλεσμα είναι η μεγαλύτερη

δυνατή παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος (4507 kW). Από την άλλη πλευρά αν ο στόχος είναι ο μέγιστος βαθμός απόδοσης με το μικρότερο κόστος το ισοβουτάνιο εμφανίζει το μεγαλύτερο εξεργειακό βαθμό απόδοσης του κύκλου ORC ($\eta_{ex,orc}=0,6585$ με κόστος 11,9 cents/kWh).

HYBRID SYSTEM OF LOW-ENTHALPY GEOTHERMAL ENERGY AND NATURAL GAS

Thomai-Komnini Dermata and Lydia Schina

Extended abstract

Geothermal energy is derived from the thermal energy generated and stored in the interior of the Earth. This energy is accessible since groundwater transfers the heat from rocks to the surface either through boreholes or natural cracks and faults. The geothermal resource is a renewable resource because there is a constant heat flow to the surface from the immense heat stored within the earth while the groundwater is replenished by rainfall and circulation within the crust. It is a commercially proven energy source that can provide constant energy and heat.

The great advantage of geothermal energy in comparison with fossil fuels is reduced emissions. In particular, geothermal plants emit 5% CO₂, 1% SO₂ and less than 1% of NO emissions compared to a plant of the same size that operates with coal. Binary systems however are the most favourable as they have zero emissions during operation and a small percentage during the extraction of the geothermal fluid. Also, when the geothermal system is not designed to generate electricity but heat, emissions of carbon dioxide are practically zero. Although geothermal plants are appropriate for the protection of the environment, the number of their applications is still small due to incomplete funding from the European Union, high cost and failure risk. The conducted research intends to facilitate the promotion of geothermal energy as one of the dominant forms of energy in order to fully exploit the large reserves of the planet.

This Thesis examines the production of electricity from low temperature geothermal resources (90 °C) at the geothermal field in Aristino, Alexandroupoli in combination with natural gas. The above hybrid system is based on the superheating of the working fluid of the binary cycle ORC from the exhaust gas of a Brayton cycle. In the Brayton cycle the air enters a compressor with pressure ratio 5 in order to increase its pressure. Then combined with the fuel, which is natural gas, enters the combustion chamber. There, the air and the fuel combust and the products of this process, having high temperature and pressure, are expanded in the

turbine to produce electricity. The exhaust gases from the turbine superheat the organic fluid (isobutane, n-butane, n-pentane, n-hexane) through a heat exchanger before the final expansion in the Rankine cycle turbine. In this cycle the organic fluid receives heat from the geothermal fluid through the heat exchanger (evaporator). The geothermal fluid from the well (90 °C, 2.5 bar) after it passes through the heat exchanger, returns in the natural reservoir. The organic fluid then receives heat through a heat exchanger from the combustion products of natural gas, becomes superheated steam and expands in the turbine, thus producing electricity, and is finally cooled in the condenser. In the case of isobutane, of n-butane and n-pentane cooling took place in an air cooled condenser while for the n-hexane a cooling tower was used.

The energy and exergy analysis of the plant was studied based on the first and second laws of thermodynamics. The exergy analysis identifies the plant components with the highest thermodynamic inefficiencies thus contributing to the evaluation and optimization of the existing hybrid system in order to reduce losses and irreversibilities. Furthermore, a thermoeconomic analysis was carried out to achieve maximum power production at the lowest cost.

The n-butane is the most attractive option in terms of power, as it produces the largest total power output (3784 kW). However, once the cost is taken into account the isobutane has the smallest unit power cost (15,22 cents / kWh) and the lower total capital investment (\$4.427.474). Additionally, the economic viability of each device of the plant is determined by the sum of the rate of exergy destruction and the total cost rate for each device k . Another critical indicator for the evaluation is the exergoeconomic factor f_k , which when it is very high it suggests a high device cost, otherwise it means that we have a great cost of irreversibilities, so better exergetic efficiency devices should be used.

To recapitulate, in order to select one of the four systems, optimization has occurred regarding the exergy efficiency of the Rankine cycle and the unit cost of electricity. The final conclusion of this thesis suggests the use of n-butane when the desired result is the maximum power output (4507 kW). On the other hand if the goal is maximum exergy efficiency at the lowest cost, isobutane displays the largest exergy efficiency of the cycle ORC ($n_{ex,orc} = 0,6585$ at 11.9 cents/kWh).

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	iii
Extended abstract	vi
Κατάλογος Εικόνων	xii
Κατάλογος Πινάκων	xiv
1 Εισαγωγή	1
2 Γεωθερμία	4
2.1 Ιστορική αναδρομή	4
2.2 Παρούσα κατάσταση της αξιοποίησης της γεωθερμίας	6
2.3 Η γεωθερμία στην Ελλάδα	8
3 Γεωθερμική ενέργεια, συστήματα και πεδία	10
3.1 Η δομή της γης	10
3.2 Γεωθερμικά συστήματα	11
3.3 Ταξινόμηση γεωθερμικών συστημάτων	13
3.4 Επανάγχυση	15
4 Χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας	16
4.1 Άμεσες χρήσεις	18
4.2 Γεωθερμικές αντλίες θερμότητας	18
4.3 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας	19
4.4 Συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας	21
4.4.1 Απευθείας χρήση ξηρού ατμού (Direct dry steam)	21
4.4.2 Κύκλος μονής και διπλής εκτόνωσης διαφασικού ρευστού (Single flash και Double flash)	23
4.4.3 Δυαδικός κύκλος (Binary)	24
4.4.4 Γεωθερμικά συστήματα EGS (engineered geothermal systems)	25
4.5 Περαιτέρω αξιοποίηση	26
5 Γεωθερμία και περιβάλλον	28
6 Θερμοδυναμικοί κύκλοι ηλεκτροπαραγωγής	32
6.1 Κύκλος Brayton	32
6.1.1 Λειτουργία του κύκλου Brayton	32
6.1.2 Θερμοδυναμική του κύκλου Brayton	33
6.1.3 Πραγματικός κύκλος Brayton	35
6.2 Οργανικός κύκλος Rankine	36
6.2.1 Ο ιδανικός κύκλος Rankine	36
6.2.2 Ο πραγματικός κύκλος Rankine	38

6.2.3	Θερμοδυναμική του ιδανικού κύκλου Rankine	38
6.2.4	Οργανικός κύκλος Rankine	39
6.2.5	Επιλογή εργαζόμενου μέσου	40
6.3	Κύκλος Kalina (Ηλεκτροπαραγωγή σε δυαδικό σύστημα)	41
7	Υβριδικά συστήματα ηλεκτροπαραγωγής	43
7.1	Βιομάζα	43
7.2	Απορριπτόμενη θερμότητα	45
7.3	Φυσικό αέριο	45
7.4	Ηλιακή ενέργεια	46
7.4.1	Ηλιακό-γεωθερμικό υβριδικό σύστημα βασισμένο σε ORC(Solar-geothermal hybrid plant based on an ORC)	47
7.4.2	Υβριδικό-γεωθερμικό με φωτοβολταϊκά και ηλιακή καμινάδα (Hybrid Geothermal / PV / Solar Chimney Power Plant - GPVSCP)	48
8	Υβριδικό σύστημα γεωθερμίας χαμηλής ενθαλπίας και φυσικού αερίου	50
8.1	Προτεινόμενη τοποθεσία στο Αρίστηνο Αλεξανδρούπολης	50
8.2	Περιγραφή του υβριδικού συστήματος	52
8.3	Μεταβλητές απόφασης-παράμετροι-υποθέσεις	54
9	Ενεργειακή ανάλυση του υβριδικού συστήματος	57
9.1	Κύκλος Brayton	57
9.2	Κύκλος Rankine	58
9.3	Αποτελέσματα της ενεργειακής ανάλυσης	60
10	Εξεργειακή ανάλυση του υβριδικού συστήματος	66
10.1	Αποτελέσματα της εξεργειακής ανάλυσης του υβριδικού συστήματος	69
11	Θερμοϋδραυλικός σχεδιασμός εναλλάκτη αυλών-κελύφους (Component sizing and cost estimation)	72
11.1	Σχεδιασμός κελύφους	75
11.2	Σχεδιασμός αυλών	75
11.3	Εύρεση ολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας	75
11.4	Υπολογισμός επιφάνειας	77
12	Οικονομική ανάλυση	79
12.1	Κόστος επένδυσης	80
12.1.1	Κόστος αγοράς εξοπλισμού (purchased-equipment cost)	80
12.1.2	Κόστος σωληνώσεων (piping cost)	82
12.1.3	Κόστος γης (land cost)	82
12.1.4	Κόστος εντός κι εκτός εγκατάστασης (onsite and offsite cost)	83
12.1.5	Άμεσο κι έμμεσο κόστος (direct and indirect cost)	83

12.1.6	Σταθερό κόστος κεφαλαίου (fixed capital investment)	83
12.1.7	Άλλα κόστη (other outlays)	83
12.2	Υποθέσεις για τη λειτουργία του εργοστασίου	84
12.3	Λοιποί υπολογισμοί	85
12.4	Θερμοοικονομική ανάλυση	89
13	Αξιολόγηση του υβριδικού συστήματος	98
14	Βελτιστοποίηση	105
14.1	Βελτιστοποίηση ως προς $\eta_{ex,ORC}$	105
14.2	Βελτιστοποίηση ως προς το μοναδιαίο κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (unit cost power produced)	108
15	Μέλλον – Παρόν - Προτάσεις	111
15.1	Μεγαλύτερη αξιοποίηση γεωθερμικών πόρων	111
15.2	Εκτίμηση του γεωθερμικού δυναμικού	111
15.3	Προτάσεις για τη μείωση του κόστους της ενέργειας σε ένα γεωθερμικό εργοστάσιο	112
15.4	Πρωτοβουλίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης σχετικά με τη γεωθερμία	112
15.5	Άλλες δραστηριότητες	116
16	Προτάσεις για τη βελτίωση του υβριδικού συστήματος	117
17	Τελικά συμπεράσματα	118
18	Βιβλιογραφία	119

Κατάλογος Εικόνων

Σχήμα 1.1 Γεωθερμικά πεδία της Ευρώπης [1]	2
Σχήμα 2.1 Ο πρώτος γεωθερμικός σταθμός παραγωγής ενέργειας στο Lardarello [19]	5
Σχήμα 2.2 Ιστορική τάση της εγκατεστημένης γεωθερμικής ισχύος [5].....	7
Σχήμα 2.3 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμία στον κόσμο (2012) [5]	7
Σχήμα 3.1 Ο φλοιός, ο μανδύας και ο πυρήνας της Γης [2]	11
Σχήμα 3.2 Τα μέρη του γεωθερμικού συστήματος [2]	13
Σχήμα 4.1 Διάγραμμα Lindal- καταμερισμός χρήσεων γεωθερμίας [1].....	16
Σχήμα 4.2 Άμεση χρήση γεωθερμίας: Θερμοκήπιο [2].....	17
Σχήμα 4.3 Εφαρμογή Γεωθερμικής αντλίας θερμότητας το χειμώνα και το καλοκαίρι[29]..	19
Σχήμα 4.4 Γεωθερμική εγκατάσταση [10].....	20
Σχήμα 4.5 Σύστημα Direct Dry steam [1].....	22
Σχήμα 4.6 Σύστημα Single flash [1]	23
Σχήμα 4.7 Σύστημα Double flash [1].....	23
Σχήμα 4.8 Δυαδικό σύστημα [2].....	25
Σχήμα 4.9 Enhanced Geothermal System (egs) [11]	26
Σχήμα 6.1 Ιδανικός κύκλος Brayton [14].....	34
Σχήμα 6.2 Αποκλίσεις του πραγματικού από τον ιδανικό κύκλο [15].....	36
Σχήμα 6.3 Ιδανικός κύκλος Rankine με εργαζόμενο ρευστό νερό [13].....	37
Σχήμα 6.4 Kalina cycle [1].....	42
Σχήμα 7.1 Σχηματικό διάγραμμα υβριδικού γεωθερμικού συστήματος [20].....	44
Σχήμα 7.2 Υβριδικό Σύστημα Γεωθερμίας-βιομάζας [21]	44
Σχήμα 7.3 Εκπομπές CO ₂ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [20].....	45
Σχήμα 7.4 Υβριδικό Σύστημα Γεωθερμίας-Φυσικού Αερίου [20]	46
Σχήμα 7.5 Υβριδικό Σύστημα Γεωθερμίας και Ηλιακής ενέργειας βασισμένο σε ORC [20].	47
Σχήμα 7.6 Φωτοβολταϊκά και λειτουργία της Ηλιακής Καμινάδας [22].....	49
Σχήμα 8.1 Το βεβαιωμένο και το πιθανό γεωθερμικό πεδίο του Αρίστηνου [23].....	51
Σχήμα 8.2 Γεωθερμικό Σύστημα με καύση φυσικού αερίου	53
Σχήμα 9.1 Διάγραμμα T-s για το ισοβουτάνιο	63
Σχήμα 9.2 Διάγραμμα T-s για το κ-βουτάνιο.....	63
Σχήμα 9.3 Διάγραμμα T-s για το κ-πεντάνιο	64
Σχήμα 9.4 Διάγραμμα T-s για το κ-εξάνιο	64

Σχήμα 9.5 Διάγραμμα T-s για τον κύκλο Brayton	65
Σχήμα 11.1 Εναλλάκτης αυλών κελύφους [26]	72

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της γεωθερμίας [2].....	29
Πίνακας 2 Χημική ανάλυση δειγμάτων νερού γεωτρήσεων στο Αρίστηνο [23].....	50
Πίνακας 3 Οριοθέτηση βεβαιωμένου γεωθερμικού πεδίου στο Αρίστηνο [23]	51
Πίνακας 4 Οριοθέτηση πιθανού γεωθερμικού πεδίου στο Αρίστηνο [23]	52
Πίνακας 5 Ερευνητικές και παραγωγικές γεωτρήσεις πεδίου Αρίστηνου [23]	52
Πίνακας 6 Συσκευές που περιλαμβάνει το υβριδικό σύστημα	53
Πίνακας 7 Παράμετροι της ενεργειακής ανάλυσης του υβριδικού συστήματος	55
Πίνακας 8 Πιέση, θερμοκρασία, ενθαλπία, εντροπία και ποιότητα για κάθε κατάσταση για το Ισοβουτάνιο	61
Πίνακας 9 Πιέση, θερμοκρασία, ενθαλπία, εντροπία και ποιότητα για κάθε κατάσταση για το κ-πεντάνιο	61
Πίνακας 10 Πιέση, θερμοκρασία, ενθαλπία, εντροπία και ποιότητα για κάθε κατάσταση για το κ-βουτάνιο	62
Πίνακας 11 Πιέση, θερμοκρασία, ενθαλπία, εντροπία και ποιότητα για κάθε κατάσταση για το κ-εξάνιο	62
Πίνακας 12 Εξέργεια, ειδική εξέργεια, ρυθμός κόστους και μοναδιαίο ρυθμό κόστους εξέργειας για κάθε κατάσταση για το Ισοβουτάνιο	69
Πίνακας 13 Εξέργεια, ειδική εξέργεια, ρυθμός κόστους και μοναδιαίο ρυθμό κόστους εξέργειας για κάθε κατάσταση για το κ-πεντάνιο	70
Πίνακας 14 Εξέργεια, ειδική εξέργεια, ρυθμός κόστους και μοναδιαίο ρυθμό κόστους εξέργειας για κάθε κατάσταση για το κ-βουτάνιο	70
Πίνακας 15 Εξέργεια, ειδική εξέργεια, ρυθμός κόστους και μοναδιαίο ρυθμό κόστους εξέργειας για κάθε κατάσταση για το κ-εξάνιο.....	71
Πίνακας 16 Διαστάσεις χαλυβδοσωλήνων [25].....	74
Πίνακας 17 Σχεδιαστικές τιμές θερμικής αντίστασης διάφορων ρευστών [25]	76
Πίνακας 18 Σχεδιαστικές τιμές θερμικής αντίστασης νερού [25]	77
Πίνακας 19 Οικονομική ανάλυση του υβριδικού συστήματος.....	88
Πίνακας 20 Παραδοχές για την επίλυση του συστήματος.....	94
Πίνακας 21 Μοναδιαίο κόστος καυσίμου και προϊόντος για κάθε συσκευή.....	94
Πίνακας 22 Παραγωγή ισχύος από τους κύκλους Rankine και Brayton για τα έσσερα ρευστά	98

Πίνακας 23 Απόδοση κύκλου Rankine και της υβριδικής εγκατάστασης για τα τέσσερα ρευστά	98
Πίνακας 24 Εξεργειακός βαθμός απόδοσης, ρυθμός και ρυθμός κόστους καταστροφής εξέργειας, άθροισμα κόστους καταστροφής και επένδυσης, σχετική διαφορά κόστους, εξεργοοικονομικός συντελεστής και ποσοστό καταστροφής και απώλειας εξέργειας για την κάθε συσκευή για το ισοβουτάνιο.....	99
Πίνακας 25 Εξεργειακός βαθμός απόδοσης, ρυθμός και ρυθμός κόστους καταστροφής εξέργειας, άθροισμα κόστους καταστροφής και επένδυσης, σχετική διαφορά κόστους, εξεργοοικονομικός συντελεστής και ποσοστό καταστροφής και απώλειας εξέργειας για την κάθε συσκευή για το κ-βουτάνιο.....	99
Πίνακας 26 Εξεργειακός βαθμός απόδοσης, ρυθμός και ρυθμός κόστους καταστροφής εξέργειας, άθροισμα κόστους καταστροφής και επένδυσης, σχετική διαφορά κόστους, εξεργοοικονομικός συντελεστής και ποσοστό καταστροφής και απώλειας εξέργειας για την κάθε συσκευή για το κ-πεντάνιο	100
Πίνακας 27 Εξεργειακός βαθμός απόδοσης, ρυθμός και ρυθμός κόστους καταστροφής εξέργειας, άθροισμα κόστους καταστροφής και επένδυσης, σχετική διαφορά κόστους, εξεργοοικονομικός συντελεστής και ποσοστό καταστροφής και απώλειας εξέργειας για την κάθε συσκευή για το κ-εξάνιο.....	100
Πίνακας 28 Κόστος του συστήματος , μοναδιαίο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας, συνολική παραγόμενη ισχύς και δείκτης ετήσιων εσόδων της εγκατάστασης για τα τέσσερα ρευστά	102
Πίνακας 29 Αποτελέσματα κόστους καυσίμου και προϊόντος για το ισοβουτάνιο	103
Πίνακας 30 Αποτελέσματα κόστους καυσίμου και προϊόντος για το κ-βουτάνιο.....	103
Πίνακας 31 Αποτελέσματα κόστους καυσίμου και προϊόντος για το κ-πεντάνιο	104
Πίνακας 32 Αποτελέσματα κόστους καυσίμου και προϊόντος για το κ-εξάνιο	104
Πίνακας 33 Βέλτιστες τιμές μεταβλητών απόφασης και βαθμός απόδοσης του ORC για τα τέσσερα ρευστά.....	105
Πίνακας 34 Απόδοση κύκλου της υβριδικής εγκατάστασης, συνολική παραγόμενη ισχύς, μοναδιαίο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας, ετήσιων εσόδων της εγκατάστασης και Κόστος του συστήματος δείκτης για τα τέσσερα ρευστά.....	105
Πίνακας 35 Βέλτιστες τιμές κόστους καταστροφής εξέργειας και επένδυσης και εξεργοοικονομικού συντελεστή για κάθε συσκευή για τα τέσσερα ρευστά.....	106
Πίνακας 36 Βέλτιστες τιμές μεταβλητών απόφασης και βαθμός απόδοσης του ORC για τα τέσσερα ρευστά.....	108

Πίνακας 37 Απόδοση κύκλου της υβριδικής εγκατάστασης, συνολική παραγόμενη ισχύς, μοναδιαίο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας, ετήσιων εσόδων της εγκατάστασης και Κόστος του συστήματος δείκτης για τα τέσσερα ρευστά.....	108
Πίνακας 38 Βέλτιστες τιμές κόστους καταστροφής εξέργειας και επένδυσης και εξεργοοικονομικού συντελεστή για κάθε συσκευή για τα τέσσερα ρευστά.....	109
Πίνακας 39 Γεωθερμική παραγωγή ενέργειας (σε MWth) από γεωθερμικές αντλίες θερμότητας στην Ευρώπη (EU-28) και στόχοι του NREAP για το 2012 και το 2020 [1] ...	113
Πίνακας 40 Γεωθερμική παραγωγή ενέργειας (σε MWth) άμεσων χρήσεων στην Ευρώπη (EU-28) το 2012 και στόχοι του NREAP για το 2012 και το 2020 [1].....	113
Πίνακας 41 Εγκατεστημένη γεωθερμική παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος (σε MWel) στην Ευρώπη (EU-28) το 2012 και στόχοι του NREAP για το 2012 και το 2020 [1].....	114

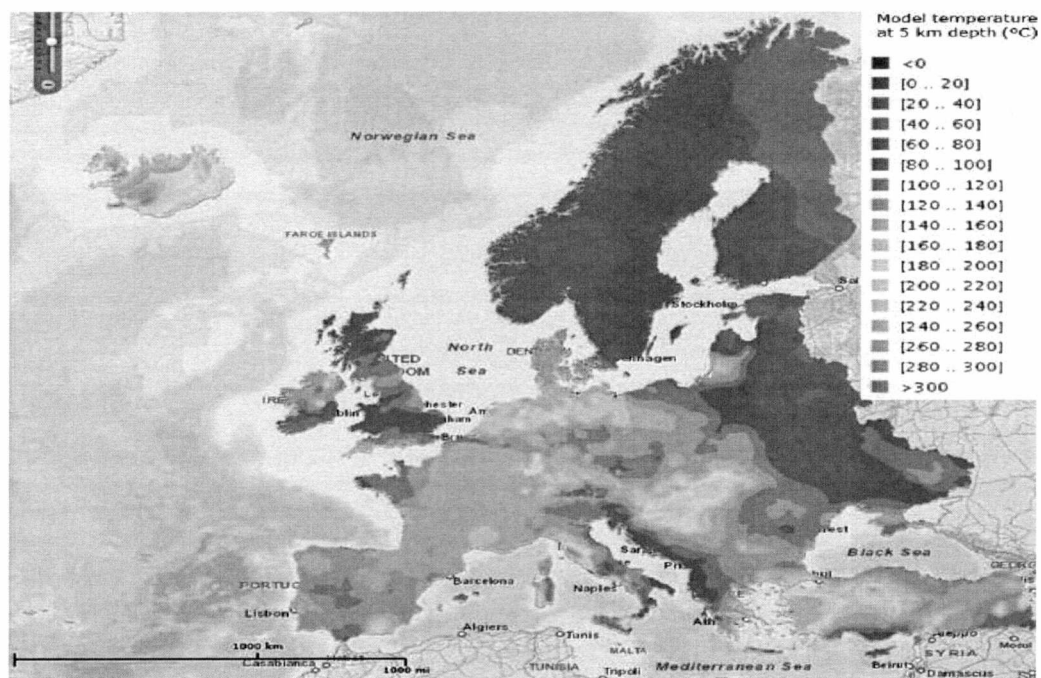
Τα τελευταία χρόνια η ευαισθητοποίηση των χωρών σε περιβαλλοντικά ζητήματα, αλλά και η μείωση των αποθεμάτων των ορυκτών καυσίμων, έχουν συμβάλλει στην έρευνα και ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως είναι η Γεωθερμία. Ένας από τους κύριους στόχους της είναι η εύρεση και μελέτη περιοχών με θετικές θερμικές ανωμαλίες (αύξηση της θερμοκρασία με το βάθος) και ευνοϊκές συνθήκες για την αξιοποίησή της [1,2].

Η γεωθερμική ενέργεια αφορά τη θερμική ενέργεια που παράγεται και αποθηκεύεται στο εσωτερικό της Γης. Είναι εκμεταλλεύσιμη όταν τα υπόγεια ύδατα μεταφέρουν τη θερμότητα των πετρωμάτων μέσα από ρωγμές και οπές στην επιφάνεια. Πρόκειται για μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας διότι ο ρυθμός ροής της θερμότητας είναι σταθερός εφόσον στο εσωτερικό της γης υπάρχουν μεγάλα αποθέματα θερμικής ενέργειας και τα υπόγεια ύδατα αναπληρώνονται από τις βροχοπτώσεις και τον κύκλο του νερού. Αποτελεί μια εμπορικά αποδεδειγμένη μορφή ενέργειας που μπορεί να παρέχει συνεχή ενέργεια και θερμότητα [1,2].

Ωστόσο, δεν είναι πάντα εύκολη η εκμετάλλευσή της, όπως στην περίπτωση της μειωμένης διαπερατότητας του πετρώματος, της δυσκολίας εξόρυξης λόγω της δομής των γεωλογικών σχηματισμών, της ανεπαρκούς ποσότητας του γεωθερμικού ρευστού κλπ. Επίσης, πολλές φορές το γεωθερμικό ρευστό στην επιθυμητή θερμοκρασία βρίσκεται σε μεγάλο βάθος συνιστώντας τροχοπέδη στην εκμετάλλευση της ενέργειας με οικονομικό τρόπο. Οι έρευνες που διεξάγονται έχουν ως στόχο να υπερνικήσουν τα παραπάνω εμπόδια προτείνοντας μεθόδους αξιοποίησης, όπως είναι η διάνοιξη τεχνητών περασμάτων στο πέτρωμα ή η επανεισαγωγή του ρευστού στη γη για τη διατήρηση του γεωθερμικού πεδίου [1,2].

Γεωθερμικά πεδία υψηλής θερμοκρασίας παρατηρούνται σε περιοχές με έντονη ηφαιστειότητα και σεισμικότητα. Τα πεδία με βάση τη θερμοκρασία διακρίνονται σε χαμηλής, μέσης και υψηλής ενθαλπίας. Μια εικόνα των γεωθερμικών πεδίων της Ευρώπης παρουσιάζεται παρακάτω [1,2].

Σε γενικές γραμμές, οι μεγαλύτερες αγορές για τη γεωθερμική ενέργεια είναι στην Αμερική, την Ευρώπη και την Ασία, με πρωταρχικό ρόλο να διαδραματίζουν οι ΗΠΑ, Καναδάς, Ιταλία, Ν. Ζηλανδία, Αυστραλία, Ισλανδία, Κένυα, Ιαπωνία και Φιλιππίνες.



Σχήμα 1.1 Γεωθερμικά πεδία της Ευρώπης [1]

Οι εφαρμογές της γεωθερμικής ενέργειας μπορούν να ταξινομηθούν σε άμεσες χρήσεις (π.χ. θέρμανση χώρων- district heating), στις γεωθερμικές αντλίες θερμότητας (ΓΑΘ) και στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ως προς την εγκατεστημένη ισχύ τα συστήματα ΓΑΘ κατέχουν σήμερα την πρώτη θέση. Όσον αφορά την ηλεκτροπαραγωγή, το γεωθερμικό δυναμικό είναι πολύ μεγάλο και μπορεί να καλύψει σημαντικό ποσοστό της ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας [1,2].

Προκειμένου να επιτευχθεί μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμία έχουν προταθεί συνδυασμοί πηγών ενέργειας, όπως γεωθερμία με ηλιακή ενέργεια, με βιομάζα, με φυσικό αέριο/βιοαέριο, κτλ. Αυτά τα συστήματα ονομάζονται υβριδικά και χαρακτηριστικό τους είναι ο μεγάλος βαθμός απόδοσης. Η επιλογή του υβριδικού συστήματος γίνεται με κριτήριο είτε το μικρότερο κόστος είτε την προστασία του περιβάλλοντος, χρησιμοποιώντας αποκλειστικά ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι να αναλύσει ένα υβριδικό σύστημα γεωθερμίας – φυσικού αερίου που θα εγκατασταθεί στο Αρίστηνο Αλεξανδρούπολης, εκμεταλλευόμενο τόσο το γεωθερμικό πεδίο χαμηλής ενθαλπίας της περιοχής όσο και την εγγύτητα της μονάδας στον αγωγό φυσικού αερίου Τουρκίας-Ελλάδας. Ιδανικός για τα συστήματα χαμηλής ενθαλπίας είναι ο δυαδικός κύκλος, πλεονεκτήματα του οποίου αποτελούν οι μηδενικές εκπομπές και ο χαμηλός θόρυβος. Στο σύστημα προς μελέτη χρησιμοποιείται το δυαδικό σύστημα που βασίζεται στον κύκλο Rankine. Συγκεκριμένα, το υβριδικό σύστημα

στηρίζεται στην προθέρμανση του οργανικού ρευστού του κύκλου Rankine από το γεωθερμικό ρευστό, το οποίο έχει 90°C και πίεση 2,5 bar όταν αντλείται στην επιφάνεια, και στη μετέπειτα εξάτμιση από τα καυσαέρια που εξέρχονται από τον αεριοστρόβιλο του κύκλου Brayton. Σε αυτόν τον κύκλο, ο αέρας με το καύσιμο καίγονται στο θάλαμο καύσης και τα καυσαέριά τους αποτονώνονται σε έναν αεριοστρόβιλο ο οποίος με τη σειρά του παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Το οργανικό ρευστό του κύκλου Rankine, όντας στην κατάσταση του αερίου εκτονώνεται σε έναν κανονικό στρόβιλο και παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Στη συνέχεια ψύχεται το οργανικό προκειμένου να ξαναρχίσει ο κύκλος.

Επιπλέον, στο πλαίσιο της εργασίας πραγματοποιείται βελτιστοποίηση του συστήματος ως προς τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης και ως προς το μοναδιαίο κόστος παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος, προτείνεται το πλέον αποδοτικό εργαζόμενο ρευστό.

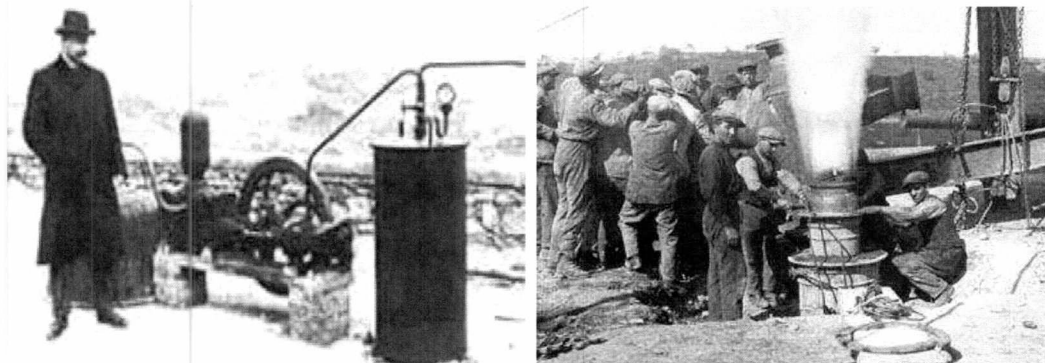
2.1 Ιστορική αναδρομή

Τα φυσικά θερμά ρευστά χρησιμοποιούνταν από την αρχαιότητα για ιαματικούς σκοπούς, όπως για παράδειγμα στην Αρχαία Ελλάδα, αλλά και για τη θέρμανση οικιών και λουτρών από τους Ρωμαίους και άλλους λαούς [3,4].

Η παρουσία ηφαιστείων, θερμών πηγών και άλλων επιφανειακών εκδηλώσεων θερμότητας είναι αυτή που οδήγησε τους προγόνους μας στο συμπέρασμα ότι το εσωτερικό της γης είναι ζεστό. Όμως, μόνο κατά την περίοδο μεταξύ του 16^{ου} και 17^{ου} αιώνα, όταν δηλαδή κατασκευάστηκαν τα πρώτα μεταλλεία που ανορύχθηκαν σε βάθος μερικών εκατοντάδων μέτρων κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, οι άνθρωποι, με τη βοήθεια κάποιων απλών φυσικών παρατηρήσεων, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η θερμοκρασία της γης αυξάνεται με το βάθος. Οι πρώτες μετρήσεις με θερμόμετρο έγιναν το 1740, σε ένα ορυχείο κοντά στο Belfort της Γαλλίας (Bullard, 1965) [2].

Το πιο παλιό γεωθερμικό σύστημα τηλεθέρμανσης λειτουργεί στην Chaudes-Aigues της Γαλλίας από τον 14^ο αιώνα [4]. Η πρώτη γεωθερμική γεώτρηση πραγματοποιήθηκε κοντά στο Ρέικιαβικ της Ισλανδίας το 1755 [5]. Στη σύγχρονη εποχή, η πρώτη βιομηχανική αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας πραγματοποιήθηκε στο Larderello της Ιταλίας το 1827 με τη χρήση του υπέρθερμου ατμού για την παραγωγή βορικού οξέος από τα βοριούχα θερμά νερά που ανέβλυζαν από φυσικές πηγές ή αντλούνταν από ρηχές γεωτρήσεις [3]. Μέχρι τότε η παραγωγή του βορικού οξέος γινόταν με εξάτμιση των βοριούχων νερών μέσα σε σιδερένιους «λέβητες», χρησιμοποιώντας ως καύσιμη ύλη ξύλα από τα κοντινά δάση. Έτσι, το 1827, ο Francesco Larderel, ιδρυτής της βιομηχανίας αυτής, ανέπτυξε ένα σύστημα για τη χρήση της θερμότητας των βοριούχων ρευστών στη διαδικασία εξάτμισης αντί να καίγονται ξύλα από τα διαρκώς αποψιλούμενα δάση της περιοχής [2].

Το 1892 ιδρύθηκε στο Boise του Αϊντάχο το πρώτο αμερικάνικο σύστημα τηλεθέρμανσης που τροφοδοτούνταν αποκλειστικά από γεωθερμική ενέργεια [4]. Η πρώτη συστηματική αξιοποίηση της γεωθερμίας για τη θέρμανση χώρων, θερμοκηπίων και κτηρίων ξεκίνησε το 1928 στην Ισλανδία, η οποία σήμερα είναι ανάμεσα στις πρώτες χώρες στην εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας καθώς το μεγαλύτερο ποσοστό του πληθυσμού θερμαίνεται με αυτόν τον τρόπο [2,3].



Σχήμα 2.1 Ο πρώτος γεωθερμικός σταθμός παραγωγής ενέργειας στο Lardarello [19]

Το 1852 ο Λόρδος Kelvin εφήυρε την αντλία θερμότητας, ενώ ο Heinrich Zoelly το 1912 ανακάλυψε την χρήση της για εκμετάλλευση θερμότητας από τη γη. Όμως, μετά το 1940 ξεκίνησε η επιτυχημένη εκμετάλλευση της θερμότητας αυτής με γεωθερμικές αντλίες θερμότητας [4].

Από τις αρχές του εικοστού αιώνα λόγω της αύξησης της ζήτησης για ηλεκτρική ενέργεια σε πολλές χώρες άρχισε η εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας. Έτσι, στο Lardarello το 1904 έγινε η πρώτη προσπάθεια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση του γεωθερμικού ατμού, η οποία στέφτηκε με επιτυχία καθώς κατέληξε στο άναμμα τεσσάρων λαμπτήρων. Αργότερα, το 1911, στην περιοχή ιδρύθηκε το πρώτο παγκοσμίως γεωθερμικό εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [4]. Το 1942, η εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς ανερχόταν στα 128 MWe [2]. Το εργοστάσιο αυτό παρέμεινε το μοναδικό στον κόσμο μέχρι το 1958, που ιδρύθηκε άλλο ένα εργοστάσιο στη Νέα Ζηλανδία [4].

Σύντομα, πολλές χώρες ακολούθησαν το παράδειγμα της Ιταλίας. Το 1919 κατασκευάστηκαν οι πρώτες γεωθερμικές γεωτρήσεις στο Berru της Ιαπωνίας, ενώ το 1921 ακολούθησαν εκείνες στο The Geysers της Καλιφόρνιας των ΗΠΑ [2]. Το 1960 η «Pacific Gas and Electric» ξεκίνησε τη λειτουργία του πρώτου επιτυχημένου γεωθερμικού εργοστασίου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, στο πεδίο «The Geysers» στην Καλιφόρνια. Ο αρχικός στρόβιλος λειτούργησε για πάνω από 30 χρόνια και παρήγαγε 11 MW καθαρής ισχύος [4]. Στη συνέχεια, η γεωθερμική ενέργεια υιοθετήθηκε από την Ιαπωνία, το Μεξικό, τις Φιλιππίνες και αρκετές χώρες της Κεντρικής Αμερικής [3].

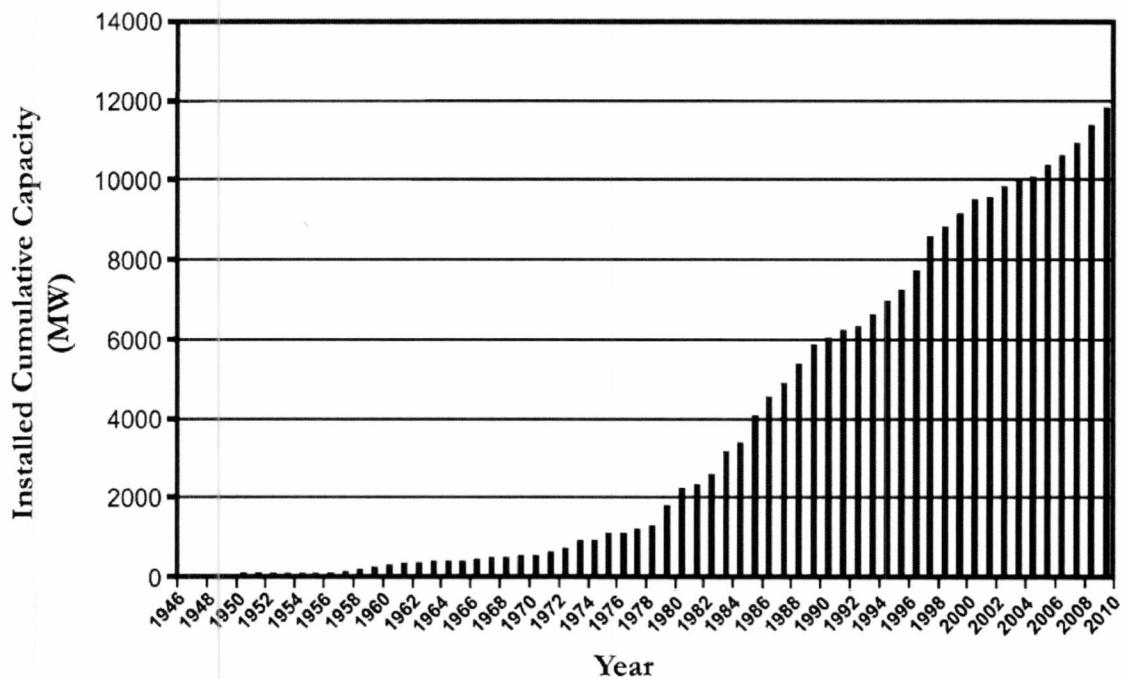
Το πρώτο γεωθερμικό εργοστάσιο με δυαδικό κύκλο εμφανίστηκε το 1967 στη Σοβιετική Ένωση και αργότερα το 1981 στις Ηνωμένες Πολιτείες. Αυτή η τεχνολογία επέτρεψε την

παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμικά ρευστά πολύ χαμηλότερης θερμοκρασίας [4]. Συγκεκριμένα, το 2006, το πρώτο δυαδικό εργοστάσιο ORC που χρησιμοποιεί μια γεωθερμική πηγή χαμηλής θερμοκρασίας σε θερμοκρασία 74 °C αναφέρθηκε ως η γεωθερμική πηγή ενέργειας με την πιο χαμηλή θερμοκρασία σε όλο τον κόσμο. Εγκαταστάθηκε στο Chena Hot Springs, στην Αλάσκα, με ικανότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας 200 kWe. Το 2008 εκτιμήθηκε ότι χαμηλής θερμοκρασίας γεωθερμική ενέργεια χρησιμοποιείται σε χώρες, όπως οι ΗΠΑ, οι Φιλιππίνες, το Μεξικό, η Ινδονησία, η Ισλανδία, η Γερμανία και η Αυστρία [6].

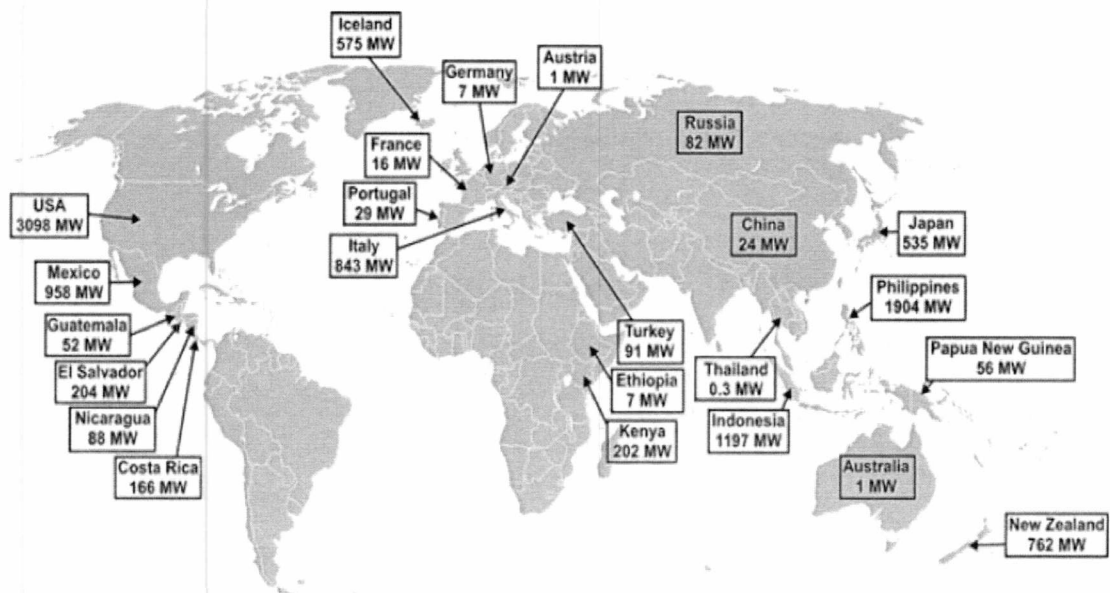
2.2 Παρούσα κατάσταση της αξιοποίησης της γεωθερμίας

Με το πέρας του δευτέρου παγκοσμίου πολέμου η αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας έγινε ελκυστική σε πολλές χώρες, ιδιαίτερα όταν αποτελούσε και το μοναδικό εγχώριο ενεργειακό πόρο. Το 1942 η εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς από γεωθερμία ανέρχεται στα 128 MWe ενώ πρόσφατες έρευνες μας δείχνουν την ανοδική πορεία της χρήσης γεωθερμικής ενέργειας από το 1975 με 1300 GWe, 4.764 GWe (το 1985), 6.833 GWe (σε 1995), 7.974 GWe (το 2000), 8.806 GWe (το 2004), 8.933 GWe (το 2005) με τελευταία την αναφορά στο 2007 για 9.732 GWe [6]. Η εγκατεστημένη γεωθερμική ηλεκτρική ισχύς στις αναπτυσσόμενες χώρες το 1995 και το 2000 αντιπροσωπεύει αντίστοιχα το 38% και το 47% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος παγκοσμίως. [6]Το 2010 υπήρξε αύξηση της τάξης του 20% της γεωθερμικής ενέργειας μεταξύ 2005 και 2010. Επιπλέον, παρατηρήθηκε από τον ίδιο ότι μεγάλωσαν τα έργα στην Αφρική και στην Ευρώπη [6].

Κατά την περίοδο 2000-2010 η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς άμεσης χρήσης γεωθερμίας τριπλασιάστηκε από 15 σε 50 GWth, ενώ η εγκατεστημένη ισχύς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμία αυξήθηκε από 8 σε 10.7 GWe. Σήμερα, η γεωθερμική ενέργεια χρησιμοποιείται σε 78 χώρες για θέρμανση (direct use – άμεση χρήση) και σε 24 χώρες για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. (στοιχεία 2010 περίπου) [5]. Το 2012 η εγκατεστημένη ισχύς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αγγίζει τα 11,2 GWe και συνεχίζει να αυξάνεται, συμβάλλοντας στη συνολική παγκόσμια ενεργειακή παραγωγή [6].



Σχήμα 2.2 Ιστορική τάση της εγκατεστημένης γεωθερμικής ισχύος [5]



Σχήμα 2.3 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμία στον κόσμο (2012) [5]

Όσον αφορά τη γεωθερμική ηλεκτρική ενέργεια στην Ευρώπη, η συντριπτική πλειοψηφία είναι συγκεντρωμένη στην Ιταλία, την Ισλανδία και την Τουρκία. Πιο συγκεκριμένα υπάρχουν δύο μεγάλες γεωθερμικές περιοχές της Ιταλίας, Larderello-Travale/Radicondoli και Monte Amiata που παράγουν 810 MWe ισχύ. Αποτελούν δύο γειτονικά τμήματα του ίδιου

πεδίου. Από την πλευρά του Larderello, η εγκαταστημένη ισχύς είναι 562 MWe ενώ από την πλευρά της Travale / Radicondoli, η εγκατεστημένη ισχύς είναι 160 MWe. Η περιοχή Monte Amiata περιλαμβάνει δύο γεωθερμικά πεδία, Piancastagnaiο και Bagnore. Επί του παρόντος, λειτουργεί μια μονάδα στο Bagnore και τέσσερις στο Piancastagnaiο, με ισχύ 88 MWe. Στην Ισλανδία οι γεωθερμικές πηγές σχετίζονται με το ενεργό ηφαιστειακό περιβάλλον του νησιού και έχουν εφαρμογή σε άμεσες χρήσεις όπως σε θερμοκήπια και τηλεθέρμανση με το 2006 να έχουν φτάσει τα 420 MWe ισχύος. Ωστόσο το δυναμικό του νησιού ανέρχεται σε περίπου 4000 MWe, αποδεικνύοντας ότι ένα πολύ μικρό ποσοστό γεωθερμίας αξιοποιείται. Στην Τουρκία η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο Kizildere παρέχεται από μονάδα 12 MWe. Η μεγαλύτερη γεωθερμική εγκατάσταση με ονομαστική ισχύ 45 MWe είναι προς το παρόν υπό κατασκευή στο Germencik της Τουρκίας [7].

Στη Ρωσία, γεωθερμική ανάπτυξη έλαβε χώρα στο Mutuonski της Καμτσάτκα η οποία, αν και πολιτικά ανήκει στην Ευρώπη, γεωγραφικά ανήκει στην Ασία. Εδώ, η έρευνα η οποία ξεκίνησε στα μέσα της δεκαετίας του 1980, κατέδειξε ένα σημαντικό δυναμικό (περίπου 200-300 MWe) από ένα υπέρθερμο γεωθερμικό σύστημα. Παρόμοια κατάσταση επικρατεί στη Γουαδελούπη και στις Αζόρες τα οποία είναι πολιτικά ευρωπαϊκά, αλλά γεωγραφικά και γεωλογικά ανήκουν στην Αμερική. Στο Bouillante (Γουαδελούπη, Γαλλία), ένα μικρό, (4,7 MWe) εργοστάσιο χτίστηκε το 1984, που ικανοποιούσε 2% της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας νησιού. Η χωρητικότητά του αυξήθηκε πρόσφατα σε 15 MWe [7].

2.3 Η γεωθερμία στην Ελλάδα

Λόγω κατάλληλων γεωλογικών συνθηκών, ο Ελλαδικός χώρος διαθέτει σημαντικές γεωθερμικές πηγές και των τριών κατηγοριών (υψηλής, μέσης και χαμηλής ενθαλπίας) σε οικονομικά βάθη (100-1500 μ) [8]. Το 1971 το ΙΓΜΕ (Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών) και στη συνέχεια η ΔΕΗ ξεκίνησαν να ερευνούν στην Ελλάδα γεωθερμικά πεδία υψηλών θερμοκρασιών, δηλαδή πάνω από 150 βαθμούς Κελσίου, κατάλληλα για ηλεκτροπαραγωγή, με οικονομικό όφελος και μεγάλη ισχύ [9]. Από το 1971 ερευνήθηκαν οι περιοχές: Μήλος, Νίσυρος, Λέσβος, Μέθανα, Σουσάκι, Καμένα Βούρλα, Θερμοπύλες, Υπάτη, Αιδηψός, Κίμωλος, Πολύαιγος, Σαντορίνη, Κως, Νότια Θεσσαλία, Αλμωπία, περιοχή Στρυμόνα, περιοχή Ξάνθης, Σαμοθράκη και άλλες [8].

Στην Βόρεια Ελλάδα πολλές γεωτρήσεις παράγουν νερά μέχρι 75 °C πολύ καλής ποιότητας και παροχής, έτσι η γεωθερμία προσφέρεται για θέρμανση, θερμοκήπια,

ιχθυοκαλλιέργειες κλπ. [8]. Σε διάφορες περιοχές, από τις έρευνες που έκανε το ΙΓΜΕ, εντοπίστηκαν 40 τουλάχιστον γεωθερμικά πεδία διάσπαρτα, όπου υπάρχουν ρευστά μέχρι 90-100 βαθμούς σε πολύ μικρά βάθη [9].

Στην Μήλο και Νίσυρο έχουν ανακαλυφθεί σπουδαία γεωθερμικά πεδία. και έχουν γίνει γεωτρήσεις παραγωγής, 5 και 2 αντίστοιχα. Στην Μήλο μετρήθηκαν θερμοκρασίες μέχρι 325 °C σε βάθος 1000 m. και στην Νίσυρο 350° C σε βάθος 1500 m. Οι γεωτρήσεις αυτές θα μπορούσαν να στηρίξουν μονάδες ηλεκτροπαραγωγής 20 και 5 MW αντίστοιχα, ενώ το πιθανό συνολικό δυναμικό υπολογίζεται να είναι της τάξης των 200 και 50 MW αντίστοιχα [8].

Στη Μήλο τη δεκαετία του 1980 η ΔΕΗ κατασκεύασε μια μονάδα ηλεκτροπαραγωγής 2 MW για να καλύψει τις βασικές ανάγκες του νησιού. Η μονάδα λειτούργησε για δύο χρόνια σε πιλοτικό επίπεδο και στη συνέχεια έκλεισε. Αυτό συνέβη διότι λειτουργούσε με παλιά τεχνολογία και οσμή κλούβιου αυγού ταλαιπωρούσε τους κατοίκους, λόγω του υδρόθειου. Έτσι οι κάτοικοι εναντιώθηκαν στην συνέχιση της λειτουργίας της γεωθερμικής μονάδας, το πλούσιο γεωθερμικό πεδίο δεν αξιοποιήθηκε, ενώ σταμάτησαν οι έρευνες και στη Νίσυρο [9].

Οι μοναδικοί τομείς που αναπτύχθηκαν στην Ελλάδα είναι οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας [8] και οι άμεσες χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας, όπως η θέρμανση θερμοκηπίων και ιχθυοκαλλιεργειών και τα θερμά λουτρά.

Είναι γεγονός ότι οι γεωθερμικοί πόροι στην Ευρώπη δεν είναι ισοκαταμεμημένοι και επιπλέον δεν έχουν διερευνηθεί όλοι. Ωστόσο η ανάπτυξη της γεωθερμικής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη ανέρχεται σε 1500-2000 MW το έτος 2010, ενώ για το 2020 μπορεί να φτάσει τα 4.000 – 6000 MWe αποδεικνύοντας ότι η έρευνα στη γεωθερμία είναι αναγκαία [7]. Παγκοσμίως μεταξύ 2008 και 2035, η χρήση της γεωθερμίας αναμένεται να αυξηθεί κατά περίπου 53% με το ήμισυ της αύξησης να αποδίδεται στην Ινδία και την Κίνα. Μεγάλο μέρος της αύξησης της ενέργειας προέρχεται από τις αναπτυσσόμενες χώρες [5].

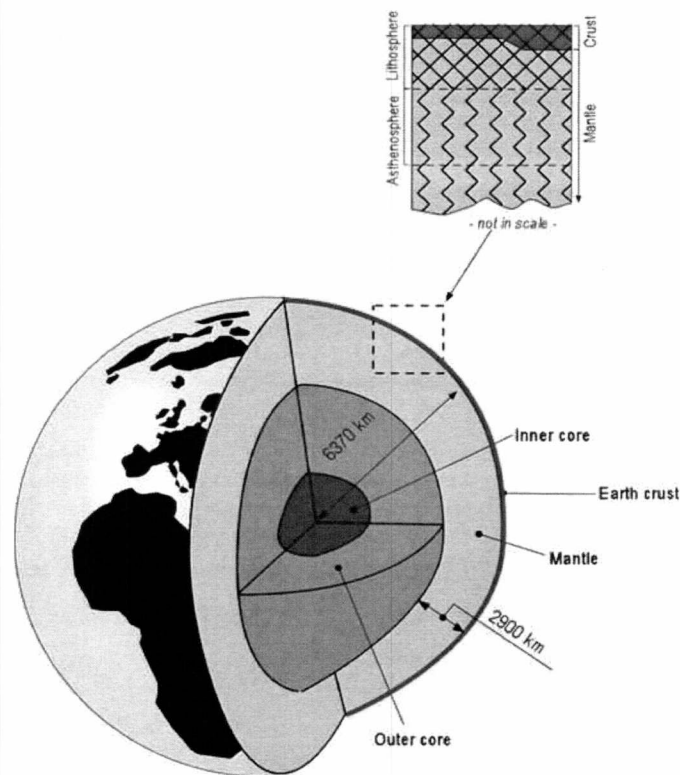
3 Γεωθερμική ενέργεια, συστήματα και πεδία

3.1 Η δομή της γης

Τα μέρη που απαρτίζουν τον πλανήτη γη είναι ο **φλοιός** με πάχος που ποικίλλει ανάλογα την περιοχή (20-65 km) στις ηπειρωτικές και (5-6 km) στις ωκεάνιες, ο **μανδύας** με πάχος κατά προσέγγιση 2900 km και ο **πυρήνας** με ακτίνα 3470 km (Σχήμα 3.1). Η λιθόσφαιρα ή αλλιώς το εξωτερικό περίβλημα της γης αποτελείται από το φλοιό και το ανώτερο τμήμα του μανδύα. Παρ' ότι έχει μεταβαλλόμενο πάχος συμπεριφέρεται σα συμπαγές σώμα ενώ κάτω από αυτή βρίσκεται η ασθενόσφαιρα. Αυτό το τμήμα γης συμπεριφέρεται περισσότερο ως ρευστό και η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των τμημάτων της ευθύνεται για τις μεταφορικές συναγωγικές κινήσεις [2].

Ως αποτέλεσμα αυτών των κινήσεων οι λιθοσφαιρικές πλάκες γνωστές και ως τεκτονικές μετατοπίζονται εξαιρετικά αργά (1-15 cm/έτος) αλλά σταθερά λόγω της αδιάκοπης προσφοράς θερμότητας από τη διάσπαση ραδιενεργών ορυκτών και την αστρική προέλευση [2,3].

Ανάλογα με τα όρια των τεκτονικών πλακών ταξινομούνται οι εξής κατηγορίες: (α) οι **μεσοωκεάνιες ράχες** που αποτελούν τις κορυφογραμμές των υποθαλάσσιων οροσειρών, (β) οι **εκτενόμενες ράχες** οι οποίες εκτείνονται σε μήκος μεγαλύτερο των 60 km κάτω από τους ωκεανούς και σε κάποιες περιοχές, όπως στις Αζόρες και την Ισλανδία, αναδύονται πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, ενώ σε άλλες, όπως στην Ερυθρά Θάλασσα, αναδύονται ανάμεσα στις ηπείρους, (γ) οι **ζώνες θραύσης ή ρήγματα μετασχηματισμού** που διαμορφώνονται όταν έχουμε οριζόντια κίνηση των πλακών και (δ) οι **ζώνες καταβύθισης** όπου καταστρέφεται η λιθόσφαιρα για να εξισορροπείται η συνεχής δημιουργία νέου φλοιού στις μεσοωκεάνιες ράχες και το άνοιγμα των ωκεάνιων τμημάτων [2,3].



Σχήμα 3.1 Ο φλοιός, ο μανδύας και ο πυρήνας της Γης [2]

Η **θερμότητα** που περιέχεται στο φλοιό της γης ανέρχεται στα $5,4 \times 10^{21}$ MJ . Στα πρώτα 10 km το ποσό θερμότητας είναι $1,25 \times 10^{27}$ J, 2000 φορές μεγαλύτερο από ότι θα μπορούσαν να προσφέρουν τα αποθέματα ορυκτών καυσίμων μαζί. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι πρόκειται για τεράστια ποσότητα ενέργειας η οποία ωστόσο είναι εκμεταλλεύσιμη σε ένα μικρό ποσοστό διότι είναι διάχυτη [3].

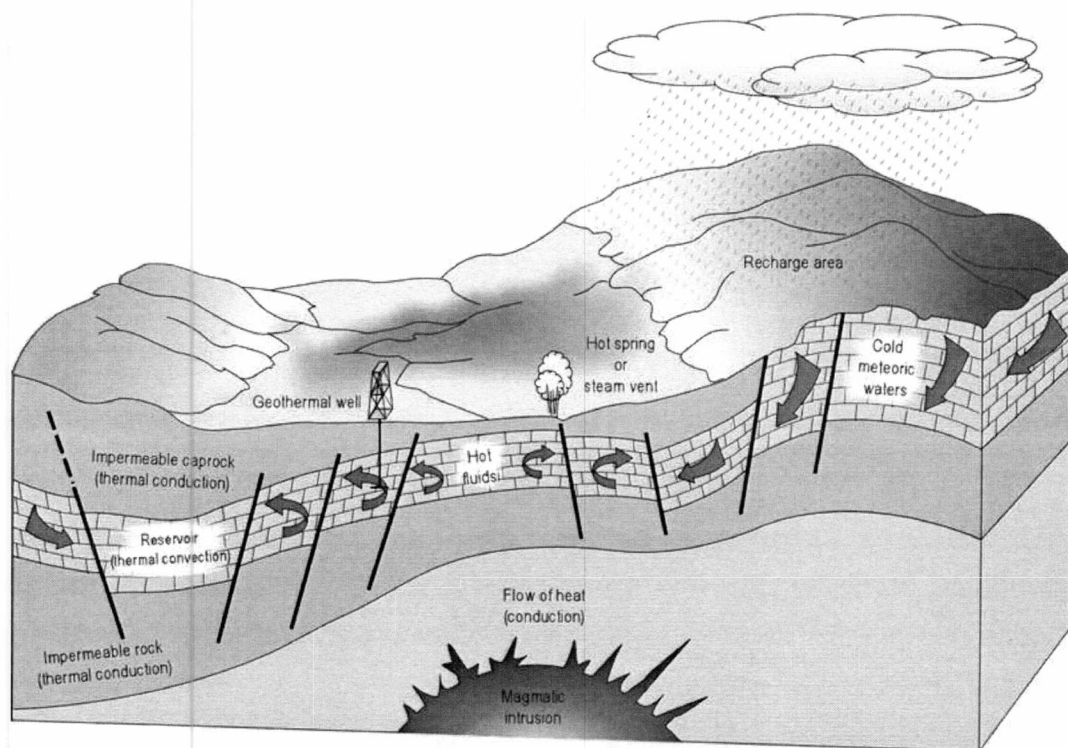
3.2 Γεωθερμικά συστήματα

Ως **γεωθερμική βαθμίδα**, λοιπόν ορίζεται ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας της γης σε συνάρτηση με το βάθος, μέσα στο γήινο φλοιό [2]. Η ηλικία των σχηματισμών, η φύση, η λιθολογία και ο μαγματισμός (λιώσιμο πετρώματος) συμβάλλουν στη διαφοροποίηση της ροής θερμότητας με αποτέλεσμα να υπάρχουν περιοχές όπου η γεωθερμική βαθμίδα είναι μικρότερη και από $1^\circ\text{C}/100$ m ή αντίθετα δεκαπλάσια της μέσης γήινης $2,5\text{-}3^\circ\text{C}/100$ m [2,3]. Η μέση θερμική ροή στην Ευρώπη εκτιμήθηκε σε 62 mW/ m² με τις χαμηλότερες τιμές να βρίσκονται στην Σκανδιναβία και τη μέγιστη τιμή στην κεντρική Ιταλία. Η μέτρηση στην Ελλάδα καταγράφηκε 58 mW/m² [3].

Γεωθερμικός πόρος είναι η θερμική ενέργεια που βρίσκεται στο εσωτερικό της γης σε ορισμένο βάθος και ανακτάται με ανταγωνιστικό κόστος σε σύγκριση με άλλες μορφές ενέργειας. Οι γεωθερμικοί πόροι όταν είναι προσβάσιμοι είτε ανακτώνται με οικονομικά ανταγωνιστικό τρόπο στο παρόν είτε θα μπορούσαν να γίνουν συμφέροντες οικονομικά σε λιγότερο από 100 χρόνια. Αυτοί με τη σειρά τους διακρίνονται σε ταυτοποιημένους, γνωστού και ως αποθέματα, και μη-ανακαλυφθέντες ανάλογα με το αν έχουν ταυτοποιηθεί μετά από ειδική μελέτη ή διερευνώνται ακόμη. Οι ταυτοποιημένοι αποτελούνται από τους δυνατούς, τους πιθανούς και τους αποδεδειγμένους. Δυνατοί είναι όσοι δε γνωρίζουμε πολλά γι' αυτούς και ερευνώνται ακόμη, πιθανοί είναι εκείνοι που μπορούν να αποκτηθούν από πιθανούς ταμειυτήρες και τέλος οι αποδεδειγμένοι είναι αυτοί που σίγουρα ανακτώνται με τις παρούσες συνθήκες. Μια επιπλέον κατηγοριοποίηση γίνεται ανάλογα με το ενεργειακό τους περιεχόμενο σε χαμηλής, μέσης και υψηλής ενθαλπίας πόροι. Χαμηλής ενθαλπίας ορίζονται τα ρευστά με θερμοκρασία μικρότερη από 90 °C, μέσης τα ρευστά με θερμοκρασία από 90 °C, και υψηλής με θερμοκρασία μεγαλύτερη από 150 °C [3].

Όπως προαναφέρθηκε η γεωθερμική βαθμίδα καθορίζει την ένταση με την οποία η θερμότητα περικλείεται στο εσωτερικό της γης. Στις περιοχές λοιπόν με μέση ή υψηλότερη βαθμίδα εντοπίζονται τα γεωθερμικά συστήματα. Αυτά στην πρώτη περίπτωση διέπονται από χαμηλές θερμοκρασίες σε οικονομικά βάθη και στη δεύτερη η θερμοκρασία μπορεί να ξεπερνάνε και τους 400 °C. Το **γεωθερμικό σύστημα** αποτελείται από τρία στοιχεία: την **εστία θερμότητας**, τον **ταμειυτήρα** και το **ρευστό**, όπως απεικονίζεται σχηματικά στο Σχήμα 3.2.

Από αυτά η εστία πρέπει να είναι φυσική ενώ τα άλλα δύο μπορούν να είναι και τεχνητά. Για παράδειγμα τα ρευστά μετά την αξιοποίησή τους μπορούν μέσω γεωτρήσεων να επανεισαχθούν στον ταμειυτήρα. Η εστία είναι είτε μάγμα (λιωμένη πέτρα) υψηλής θερμοκρασίας σε μικρά βάθη (5-10 km) ή σε χαμηλής θερμοκρασίας συστήματα πετρώματα κανονικής θερμοκρασίας. Ο ταμειυτήρας αποτελείται από θερμά υδατοπερατά πετρώματα, μέσα στα οποία κυκλοφορούν ρευστά και αντλούν θερμότητα. Για την αντικατάσταση των ρευστών που φεύγουν με γεωτρήσεις ο ταμειυτήρας συχνά συνδέεται με μια επιφανειακή περιοχή τροφοδοσίας. Τέλος, το ρευστό θερμαίνεται και ως εκ τούτου μειώνεται η πυκνότητα του οπότε ανεβαίνει προς τα πάνω και τη θέση του παίρνουν ψυχρότερα και μεγαλύτερης πυκνότητας ρευστά. Έτσι λοιπόν προκαλείται θερμοκρασιακή αύξηση στο ανώτερο τμήμα του γεωθερμικού συστήματος, καθώς οι θερμοκρασίες στα κατώτερα τμήματα μειώνονται.



Σχήμα 3.2 Τα μέρη του γεωθερμικού συστήματος [2]

3.3 Ταξινόμηση γεωθερμικών συστημάτων

Υπάρχουν διάφορα κριτήρια σύμφωνα με τα οποία μπορούν να κατηγοριοποιηθούν τα γεωθερμικά συστήματα. Μερικά από αυτά είναι η θερμοκρασία και ο τύπος των ρευστών, το είδος της εστίας και το είδος των γεωθερμικών πόρων. Μια διάκριση των συστημάτων που αφορά την κατάσταση του ταμιευτήρα σύμφωνα με την οποία λαμβάνεται υπόψη η κυκλοφορία των ρευστών σε αυτόν και ο μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας είναι τα **δυναμικά** και τα **στατικά** συστήματα. Στα πρώτα ο ταμιευτήρας τροφοδοτείται συνεχώς με νερό το οποίο θερμαίνεται. Όταν το ρευστό ανεβαίνει στην επιφάνεια ή γεμίζει τους υπόγειους σχηματισμούς το σύστημα αποφορτίζεται. Η θερμότητα μεταφέρεται μέσω συναγωγής και σ' αυτή την κατηγορία περιλαμβάνονται τόσο συστήματα υψηλής όσο και χαμηλής ενθαλπίας. Στα στατικά παρατηρείται ελάχιστη ή μηδενική τροφοδοσία του ταμιευτήρα και η μεταφορά γίνεται μόνο με αγωγή. Εδώ ανήκουν τα χαμηλής ενθαλπίας συστήματα και τα γεωπεπισμένα [2].

Σε σχέση με το είδος των πόρων διακρίνονται πέντε κατηγορίες [3]:

Τα **γεωπεπιεσμένα** που χαρακτηρίζονται από ρευστά υψηλής αλατότητας εγκλωβισμένα μαζί με μεθάνιο σε μεγάλο βάθος που περιβάλλονται από πετρώματα μη περατά και διέπονται από πίεση μεγαλύτερη της υδροστατικής (550-1350 bar).

Τα συστήματα **θερμών ξηρών πετρωμάτων** (hot dry rock) που βρίσκονται σε βάθος 3-10 km. Σ' αυτά η ανάκτηση θερμότητας γίνεται με τη διοχέτευση νερού από την επιφάνεια που επιστρέφει ως θερμότερο νερό ή ως ατμός. Παράδειγμα είναι τα μεγάλα γρανιτικά σώματα.

Τα **μαγματικά** συστήματα από το οποία ανακτάται η θερμότητα με γεωτρήσεις. Πρόκειται για λιωμένο ή σχεδόν λιωμένο μάγμα σε βάθος μικρότερο από 10 km. Συνιστά πρωταρχική πηγή όλων των πεδίων υψηλής ενθαλπίας και σπάνια βρίσκεται κοντά σε ηφαίστειο.

Η **αβαθής γεωθερμία** η οποία αναφέρεται σε νερό που ανακυκλοφορεί σε κλειστές υδροφόρες γεωτρήσεις ή ρηχές επιφάνειες εδάφους και δίνει θερμότητα. Η εκμετάλλευση της γίνεται με τη βοήθεια των γεωθερμικών αντλιών.

Τα **υδροθερμικά συστήματα** που στην πλειοψηφία τους είναι συστήματα νερού-ατμού. Συχνά ταυτίζονται με το σύνολο των γεωθερμικών πεδίων και αφορούν τα υπόγεια θερμά ρευστά των ταμιευτήρων που θερμαίνονται από μια εστία. Είναι γνωστά και ως συστήματα συναγωγής αφού ο κύριος μηχανισμός μετάδοσης της θερμότητας είναι η συναγωγή. Από την άλλη πλευρά υπάρχουν και τα συστήματα αγωγής που χαρακτηρίζονται από νερά υψηλής αλατότητας και κανονικής πίεσης σε μικρό βάθος.

Μια διάκριση των υδροθερμικών συστημάτων γίνεται με βάση το κυρίαρχο ρευστό σε «**vapour dominated systems**» (ή «**dry steam systems**») όταν πρόκειται για σύστημα που λειτουργεί με ατμό και χρησιμοποιείται στην ηλεκτροπαραγωγή και σε «**water dominated systems**» όταν πρόκειται για θερμό νερό. Όσον αφορά τα συστήματα που λειτουργούν με ατμό, οι δυο φάσεις συνήθως συνυπάρχουν ωστόσο ο ατμός είναι συνεχής και είναι αυτός που ελέγχει την πίεση. Παράγουν ξηρό έως υπέρθερμο ατμό. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν το Larderello στην Ιταλία, Kamojang στην Ινδονησία, Matsukawa στην Ιαπωνία, και το The Geysers στην Καλιφόρνια αλλά γενικά είναι σπάνια. Πλεονέκτημα αυτού του συστήματος είναι ότι δεν απαιτείται επανεισαγωγή και έχει απλές εγκαταστάσεις. Στα συστήματα που κυριαρχεί το νερό το υγρό ύδωρ είναι συνεχές και η πίεση ελέγχει τις αλλαγές φάσης. Είναι τα πλέον συνηθέστερα και μπορούν να παράγουν θερμό νερό, μίγμα νερού και ατμού, υγρό ατμό, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις και ξηρό ατμό. Υπάρχουν πολλά γεωθερμικά συστήματα αυτού του είδους σε όλο τον κόσμο, όπως στο Wairakei στη Νέα Ζηλανδία, Olkaria στην Κένυα, Tongonan στις Φιλιππίνες, Momotombo στη Νικαράγουα,

και Hatchobaru στην Ιαπωνία. Μπορεί να περιέχουν και κάποια αέρια με τη μορφή μικρών φυσαλίδων στην υγρή φάση αλλά έχουν το πλεονέκτημα της ανανεωσιμότητας αν το διαχωρισμένο νερό επανεγγχέται [2,5].

Έχουν οικονομικό ενδιαφέρον για άμεσες χρήσεις όταν η παροχή νερού είναι ικανοποιητική και βρίσκονται σε μικρό βάθος ενώ τα πιο γνωστά και αξιοποιήσιμα για αυτές τις χρήσεις είναι στη λεκάνη του Παρισιού, στην Παννονική λεκάνη στην Ουγγαρία, στην κοιλάδα του Πάδου στην Ιταλία και στο Klamath Falls στις Η.Π.Α [3].

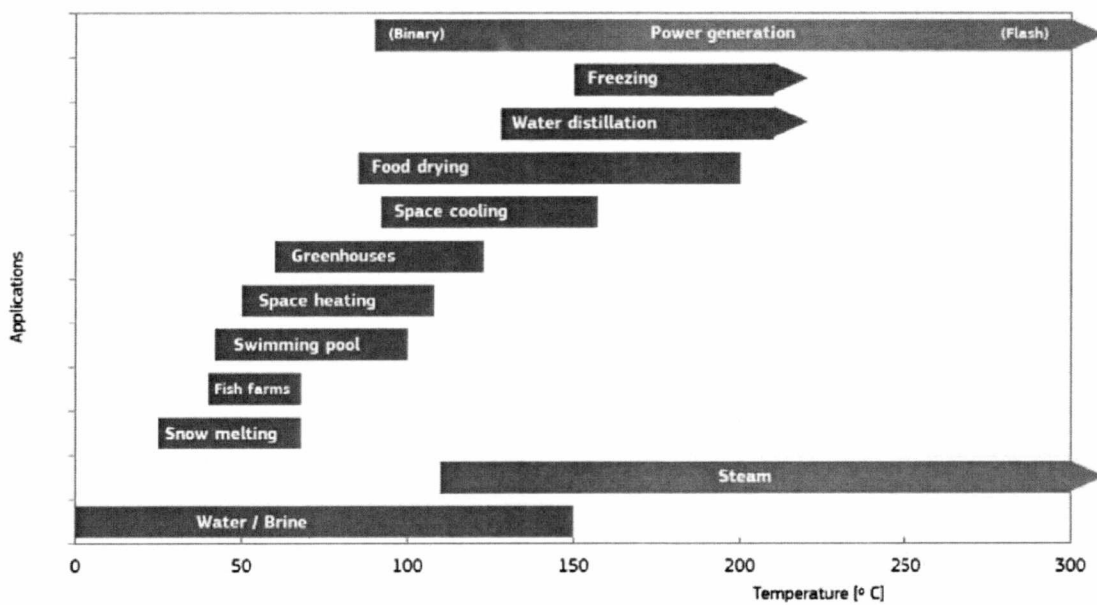
Όταν από τις απαραίτητες προϋποθέσεις ενός συστήματος λείπει η εστία θερμότητας με τη μορφή λιωμένου πετρώματος τότε η θερμική ανωμαλία είναι αμελητέα ή ανύπαρκτη. Ωστόσο αν κυριαρχεί εφελκυστικού τύπου τεκτονική, επιτρέπεται η σύντομη άνοδος θερμών ρευστών και η ανάκτηση ποσοτήτων θερμότητας. Εφόσον συντρέχουν λοιπόν και οι υπόλοιποι παράγοντες (ταμιευτήρας, ρευστό) δημιουργούνται ευνοϊκές συνθήκες και έχουμε στη διάθεση μας χαμηλής ή μέσης ενθαλπίας πεδία [3]. Τα παραδείγματα στον ελλαδικό χώρο είναι άφθονα όπως το Αρίστηνο Αλεξανδρούπολης που αποτελεί και το αντικείμενο μελέτης της εργασίας.

3.4 Επανάγχυση

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα στην εργασία το ρευστό μετά την αξιοποίηση του μπορεί να επανεισαχθεί στον ταμιευτήρα συμβάλλοντας έτσι στη συντήρηση και την ανανέωση των γεωθερμικών πεδίων καθώς και στην επαναφόρτιση του ταμιευτήρα που διατηρείται πάντα υπό πίεση. Η παραγωγή και το ποσοστό επανέγχυσης συνέχεια ελέγχονται για να αποτραπούν οι αρνητικές επιπτώσεις της πτώσης πίεσης και της θερμοκρασίας. Η επανέγχυση λοιπόν είναι εξίσου σημαντική με την παραγωγή ώστε να αποφευχθεί η υπερεκμετάλλευση του ταμιευτήρα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το Geysers στην Καλιφόρνια όπου παρατηρήθηκε δραστική μείωση της παραγωγής στα τέλη της δεκαετίας του 1980, λόγω της έλλειψης ρευστών στον ταμιευτήρα. Προκειμένου να αναστραφεί η κατάσταση το πρόγραμμα Southeast Geysers Effluent Recycling Project μετέφερε επεξεργασμένα αστικά απόβλητα στον ταμιευτήρα από απόσταση 48 km. Ως αποτέλεσμα ήταν η επαναλειτουργία αρκετών εργοστασίων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τα οποία είχαν εγκαταλειφθεί εξαιτίας της έλλειψης ρευστών. Από την άλλη πλευρά το κόστος επανέγχυσης και η πιθανότητα απόφραξης των πετρωμάτων κοντά στα φίλτρα της γεώτρησης με άλατα αποτελούν σοβαρά μειονεκτήματα [3,2,1].

4 Χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας

Η γεωθερμική ενέργεια καλύπτει μικρό ποσοστό της παγκόσμιας ζήτησης, μόλις το 0,5%. Παρ' όλα αυτά σε ορισμένες χώρες διαδραματίζει σημαντικό ρόλο όπως στην Ισλανδία όπου καλύπτει το 50% της πρωτογενούς παραγωγής. Οι κυριότερες χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας παρουσιάζονται στο διάγραμμα του Σχήματος 4.1, που αποτελεί μια τροποποίηση του Lindal. (1973)



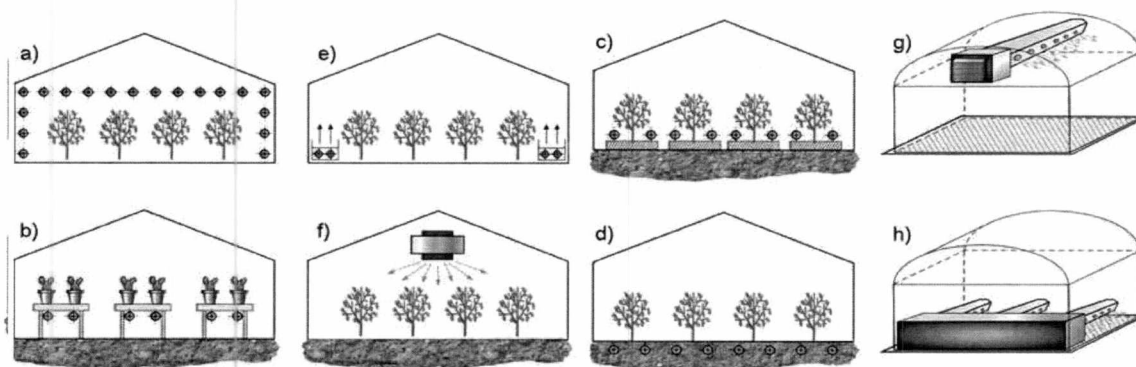
Σχήμα 4.1 Διάγραμμα Lindal- καταμερισμός χρήσεων γεωθερμίας [1]

Οι χρήσεις της λοιπόν είναι ποικίλες και μπορούν να ταξινομηθούν σε άμεσες και ηλεκτρικές. Στις άμεσες χρήσεις οι οποίες καλύπτουν όλη την κλίμακα των θερμοκρασιών συγκαταλέγονται: η θέρμανση χώρων και θερμοκηπίων οι υδατοκαλλιέργειες, η λουτροθεραπεία, οι αντλίες θερμότητας, οι βιομηχανικές και οι αγροτικές χρήσεις. Παρακάτω αυτές θα περιγραφούν πιο αναλυτικά [3].

Η θέρμανση χώρων με γεωθερμική ενέργεια μπορεί να γίνει με τους εναλλάκτες αέρα - υγρού με εξαναγκασμένη ή φυσική συναγωγή και με ακτινοβολία. Στην πρώτη περίπτωση κοινώς στα αερόθερμα - fan coils γίνεται η διέλευση του γεωθερμικού νερού μέσα από χάλκινους αγωγούς μικρής διαμέτρου στους οποίους βρίσκονται προσκολλημένα φύλλα αλουμινίου ανάμεσα από τα οποία περνάει ο αέρας και θερμαίνει το χώρο. Στους αγωγούς με

περύγια (φυσική συναγωγή) απαιτούνται πιο υψηλές θερμοκρασίες νερού απ' ότι στα αερόθερμα αλλά δεν ζητείται κατανάλωση ρεύματος. Τέλος η ενδοδαπέδια θέρμανση (ακτινοβολία) είναι η πλέον ιδανική καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί νερό χαμηλής θερμοκρασίας αφού αυτός ο τρόπος θέρμανσης εκμεταλλεύεται τη μεγάλη επιφάνεια [3].

Η θέρμανση θερμοκηπίων αποτελεί έναν ακόμη τομέα στον οποίο συμβάλλει ενεργά η γεωθερμία. Όχι μόνο ρυθμίζοντας τη θερμοκρασία αυξάνει το ρυθμό ανάπτυξης των φυτών αλλά επιτρέπει να παραχθούν και να ευδοκιμήσουν προϊόντα «εκτός εποχής». Υπάρχουν πολλοί τρόποι για να το πετύχει αυτό όπως είναι ο ψεκασμός της οροφής του θερμοκηπίου με γεωθερμικό νερό [3].



Σχήμα 4.2 Άμεση χρήση γεωθερμίας: Θερμοκήπιο [2]

Στις αγροτικές διεργασίες όπως στη ξήρανση σιτηρών μπορεί να υποκαταστήσει τα συμβατικά καύσιμα συντελώντας στη μείωση του φαινομένου του θερμοκηπίου και γενικότερα στην προστασία του περιβάλλοντος [3].

Όσον αφορά τις υδατοκαλλιέργειες η γεωθερμία είτε θερμαίνει το νερό είτε εγχέεται άμεσα στις δεξαμενές που εκτρέφονται τα ψάρια και συμβάλλει με οικονομικό τρόπο στην ανάπτυξη ορισμένων ειδών [3].

Στις γεωθερμικές αντλίες το θερμό επιφανειακό ή υπόγειο νερό προφέρει θερμότητα το χειμώνα και απάγει θερμότητα το καλοκαίρι. Υπερτερεί αυτού του είδους η αντλία ως προς όσες χρησιμοποιούν αέρα για πηγή καθώς το νερό διατηρεί σταθερή θερμοκρασία σχεδόν σε όλη τη διάρκεια του έτους σε αντίθεση με τον αέρα [3].

Όσον αφορά την παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύ για την παραγωγή ενέργειας, την άμεση χρήση και τις γεωθερμικές αντλίες θερμότητας οι μεγαλύτερες αγορές για τη γεωθερμική ενέργεια είναι στην Αμερική, την Ευρώπη και την Ασία. Η εγκατεστημένη ισχύ για ΓΑΘ

είναι η μεγαλύτερη, ακολουθούμενη από την άμεση χρήση και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [1].

4.1 Άμεσες χρήσεις

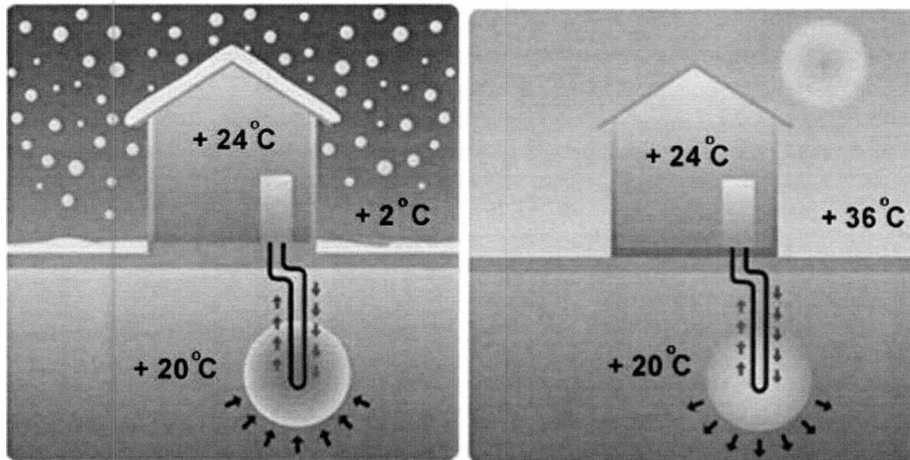
Η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς για άμεσες χρήσεις (χωρίς αντλίες θερμότητας) εκτιμάται μεταξύ 19 GWth και 26 GWth. Οι χώρες με τη μεγαλύτερη εφαρμογή άμεσης χρήσης (χωρίς αντλίες θερμότητας) περιλαμβάνουν την Κίνα (περίπου 3,7 GWth), την Τουρκία (περίπου 2,7 GWth), την Ισλανδία (περίπου 2,2 GWth), και την Ιαπωνία με περίπου 2,1 GWth της εγκατεστημένης ισχύος. Το 2013, η εγκατεστημένη δυναμικότητα γεωθερμικής ενέργειας για άμεση χρήση αυξήθηκε [1].

Στην Ευρώπη η εγκατεστημένη ισχύς για θέρμανση φτάνει τα 3.0 GWth το 2012 με την Ισλανδία να παράγει τα 2,2 και την Τουρκία το υπόλοιπο. Οι χώρες με τις περισσότερες εφαρμογές άμεσων χρήσεων είναι η Ιταλία, η Ουγγαρία κι η Γαλλία. Οι κύριοι κλάδοι άμεσης χρήσης είναι τα θερμικά δίκτυα (50%) κι η λουτροθεραπεία (20%) [1]. Στην Ασία οι Zhao και Wan το 2014 εκτίμησαν ότι η παραγωγή για άμεσες χρήσεις αγγίζει τις 12,8 TWh [1]. Στις Η.Π.Α οι άμεσες χρήσεις ποικίλλουν ωστόσο το δυναμικό είναι μικρό σε σύγκριση με την ηλεκτρική ενέργεια και τις αντλίες [1]. Κάτι αντίστοιχο συμβαίνει και στον Καναδά με δυναμικό 26 MWth. Στην Αυστραλία η παραγωγή ανέρχεται στις 33 MWth κυρίως για κολύμβηση. Τέλος, στην Αφρική οι άμεσες χρήσεις διαφέρουν με τη θέρμανση και την κολύμβηση να είναι οι υψηλότερες σε ποσοστά [1].

4.2 Γεωθερμικές αντλίες θερμότητας

Όσον αφορά την εγκατεστημένη ισχύ για τις αντλίες θερμότητας ξεπερνούν κατά πολύ την ισχύ για όλες τις υπόλοιπες χρήσεις μαζί. Αυτά τα δεδομένα λαμβάνονται για τις χρονιές 1995-2010. Ωστόσο νεότερα στοιχεία εκλείπουν. Εντυπωσιακό είναι το γεγονός ότι το 2010 η εγκατεστημένη ισχύς ήταν 2 φορές υψηλότερη από το 2005 και 18 περισσότερη από το 1995 [1]. Στην Ευρώπη η εγκατεστημένη ισχύς των ΓΑΘ ανέρχονται στα 16,5 GWth με σημαντικότερες τις αγορές στη Σουηδία, Γαλλία, Αυστρία και Γερμανία. Βέβαια τα τελευταία χρόνια η αγορά των ΓΑΘ καταρρακώνεται καθώς αυτές εφαρμόζονται στις νέες κατασκευές και δεδομένου ότι αυτός ο τομέας διέρχεται κρίση είναι επόμενο και λιγότερες αντλίες να

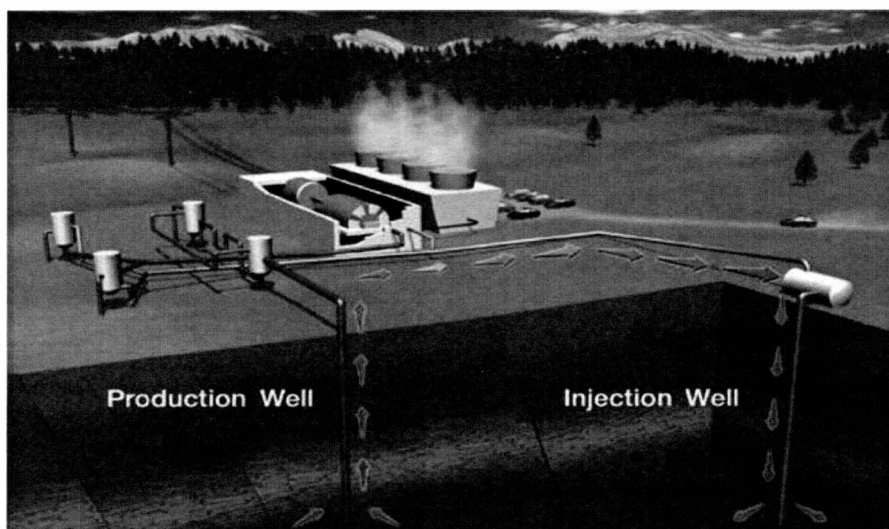
πουλιούνται [1]. Στην Ασία εκτιμήθηκε το δυναμικό για ΓΑΘ 8 TWh από τους Zhao και Wan το 2014. Στις Η.Π.Α. η ισχύς των ΓΑΘ ισοδυναμεί με την εγκατεστημένη ισχύ της Ευρώπης, ενώ στον Καναδά η γεωθερμία χρησιμοποιείται αποκλειστικά για ΓΑΘ με 1100 MW το 2010 και 12000 νέες ΓΑΘ το 2011. Στη Νέα Ζηλανδία οι ΓΑΘ βρίσκονται σε πρώιμο στάδιο και στην Αυστραλία η παραγωγή φτάνει τα 24 MWth [1].



Σχήμα 4.3 Εφαρμογή Γεωθερμικής αντλίας θερμότητας το χειμώνα και το καλοκαίρι[29].

4.3 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Το 2013, η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμικά πεδία ανήλθε σε 11,8 GWe. Η εγκατεστημένη ισχύς για το έτος 2013 ανήλθε σε 530 MWe , το οποίο αποτελεί ρεκόρ στις ετήσιες εγκαταστάσεις. Από αυτό, 145 MWe εγκαταστάθηκαν στην Ευρώπη, 107 MWe στη Νέα Ζηλανδία, 85 MWe στις ΗΠΑ και 36 MWe στην Κένυα. Η Ασία πρωτοστατεί στην εγκατεστημένη ισχύ με 3,8 GWe, με κυρίαρχες τις Φιλιππίνες (1,8 GWe) και την Ινδονησία (1,3 GWe), ακολουθούμενο από τις ΗΠΑ με 3,4 GWe). Η συνολική εγκατεστημένη ικανότητα στην Ευρώπη ανέρχεται σε περίπου 1,7 GWe. Όσον αφορά το υπόλοιπο του κόσμου, το Μεξικό αξίζει να αναφερθεί με εγκατεστημένη ισχύ περίπου 1 GWe [1].



Σχήμα 4.4 Γεωθερμική εγκατάσταση [10]

Στην Ευρώπη ξεχωρίζουν στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας η Ιταλία (περισσότερα από 800 MWe) κι η Ισλανδία (περισσότερα από 600 MWe). Κυρίαρχα συστήματα παραγωγής για τη γηραιά ήπειρο είναι του ξηρού ατμού και του single flash [1]. Στην Ασία η σημαντική αύξηση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έλαβε χώρα από το 1990 μέχρι και το 2010. Το 2013 αναφέρθηκε υποβάθμιση κάποιων πεδίων στις Φιλιππίνες. Παρ' όλα αυτά το 2014 εμφανίστηκαν ενθαρρυντικά στοιχεία με την εγκατάσταση μονάδας παραγωγής 20 MW στη Μαϊβαράρα στις Φιλιππίνες [1]. Στις Η.Π.Α λόγω της μείωσης που υπέστησαν οι τιμές των ορυκτών καυσίμων τα τελευταία χρόνια η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμία έχει σημειώσει κάθοδο. Επιπλέον πρέπει να επισημανθεί ότι σε πολλούς σταθμούς παραγωγής η πραγματική δυναμικότητα είναι μικρότερη από αυτή για την οποία σχεδιάστηκε. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το Geysers που παράγει 950 MWe ενώ η ονομαστική δυναμικότητα ήταν 1550 MWe [1]. Το Μεξικό από την άλλη πλευρά χρησιμοποιεί αποκλειστικά τα γεωθερμικά του πεδία για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με πιο πρόσφατη την αναφορά σε 1 GWe το 2012. Στον Καναδά υπάρχει ένα δυναμικό παραγωγής 5000 MWe. Στη Νέα Ζηλανδία το 13% της εγχώριας ζήτησης σε ηλεκτρική ενέργεια καλύπτεται από τη γεωθερμία ενώ στην Αυστραλία υπάρχει μόνο μια μικρή μονάδα 80 kW στο Birdsville [1].

Η αξιόλογη πρόοδος που σημειώνεται στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας τόσο από χαμηλής και μέσης θερμοκρασίας ρευστά όσο και από υψηλής τα τελευταία χρόνια οφείλεται στην ανάπτυξη της τεχνολογίας των δυαδικών ρευστών. Στην περίπτωση των πόρων χαμηλής θερμοκρασίας, εκείνα που είναι γενικά κάτω $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, η χρήση ενός δευτερεύοντος ρευστού

χαμηλού σημείου ζέσεως για τη δημιουργία του ατμού είναι απαραίτητη, καταλήγοντας σε δυαδικό ή οργανικό κύκλο Rankine (ORC). Συγκεκριμένα, το γεωθερμικό ρευστό προσφέρει θερμότητα στο δευτερεύον-οργανικό μέσω εναλλακτών θερμότητας και το εξατμίζει. Ο ατμός που παράγεται στη συνέχεια κινεί έναν στρόβιλο ο οποίος μετατρέπει τη μηχανική σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω της γεννήτριας και συμπυκνώνεται ώστε να κλείσει ο κύκλος [2]. Η ψύξη γίνεται μέσω πύργου ψύξης ή με αερόψυκτο συμπυκνωτή. Ξηρή ψύξη χρησιμοποιείται συχνά σε άγονες περιοχές όπου οι υδάτινοι πόροι είναι περιορισμένοι. Η ψύξη με αέρα έχει συνήθως χαμηλότερες αποδόσεις κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, όταν η θερμοκρασία του αέρα είναι υψηλή και η υγρασία είναι χαμηλή [5]. Το ανώτερο όριο του οργανικού όπως και το κατώτερο εξαρτώνται από οικονομικοτεχνικούς παράγοντες. Για παράδειγμα αν απαιτούνται μεγάλοι εναλλάκτες λόγω χαμηλών ορίων είναι ασύμφορο το πρόγραμμα [2]. Η πρώτη προσπάθεια για αξιοποίηση ρευστών με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έγινε το 1904 στο Larderello της Ιταλίας από τον πρίγκιπα Ginori Conti ενώ ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα της είναι η μείωση των εκπομπών CO₂ κατά 11 εκατομμύρια τόνους το χρόνο στην περίπτωση που αντικαθιστά το πετρέλαιο [3].

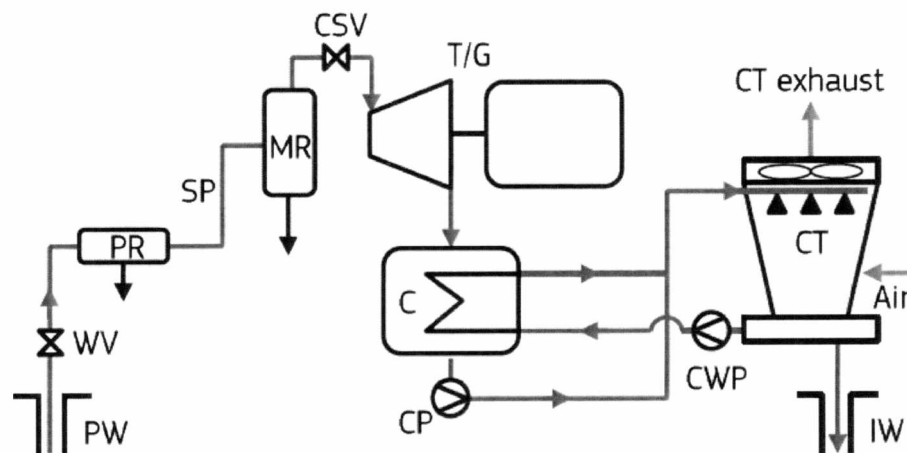
4.4 Συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Ο τύπος της μονάδας για τη μετατροπή της γεωθερμικής σε ηλεκτρική ενέργεια καθορίζεται από το είδος του πεδίου, τον τύπο του γεωθερμικού πόρου τη θερμοκρασία, τη σύσταση και την πίεση των ρευστών όπως και από την τάση τους για διάβρωση και επικαθήσεις [3]. Για παράδειγμα υψηλής θερμοκρασίας πόροι χρησιμοποιούν μία από τις ακόλουθες μεθόδους: (1) single-flash steam power systems, (2) double-flash steam power systems, and (3) dry-steam power systems. Αντίστοιχα οι χαμηλής θερμοκρασίας πόροι binary όπως είναι ο ORC [6].

4.4.1 Απευθείας χρήση ξηρού ατμού (Direct dry steam)

Τα συστήματα με απευθείας χρήση ξηρού ατμού (dry-steam power systems) είναι τα παλαιότερα όσον αφορά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμία, καθώς η πρώτη χρήση τους πραγματοποιήθηκε το 1904. Σήμερα οι μονάδες παραγωγής ενέργειας με ξηρό ατμό καταλαμβάνουν σχεδόν το ένα τέταρτο της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος και έχουν

τις υψηλότερες αποδόσεις από όλα τα γεωθερμικά συστήματα, οι οποίες φτάνουν μέχρι 50-70% [1,12]. Αποτελούν τον απλούστερο τύπο γεωθερμικής μονάδας, καθώς και τον τύπο που απαιτεί το χαμηλότερο κόστος κεφαλαίου. Όμως, είναι κατάλληλα μόνο για πόρους με κυρίαρχο τον ατμό και στον κόσμο υπάρχουν λίγα πεδία που να παράγουν υπέρθερμο γεωθερμικό ατμό, όπως το The Geysers στις ΗΠΑ, το Lardarello στην Ιταλία κ.α. [3] και λίγα τέτοια πεδία που παραμένουν ανεξερεύνητα [1].

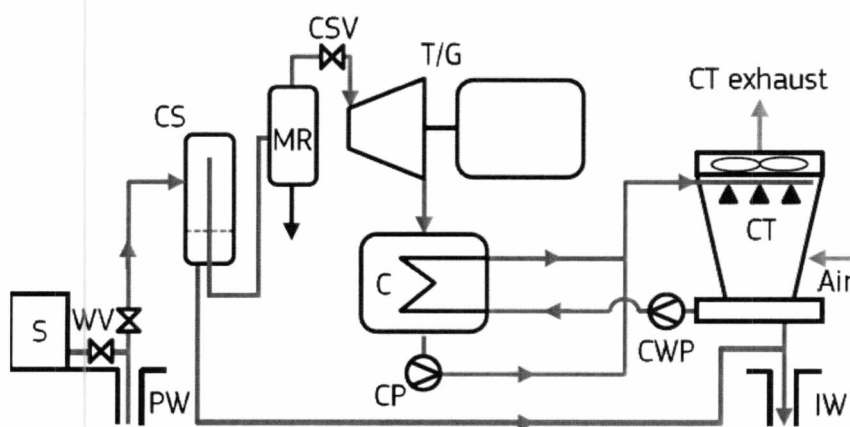


Σχήμα 4.5 Σύστημα Direct Dry steam [1]

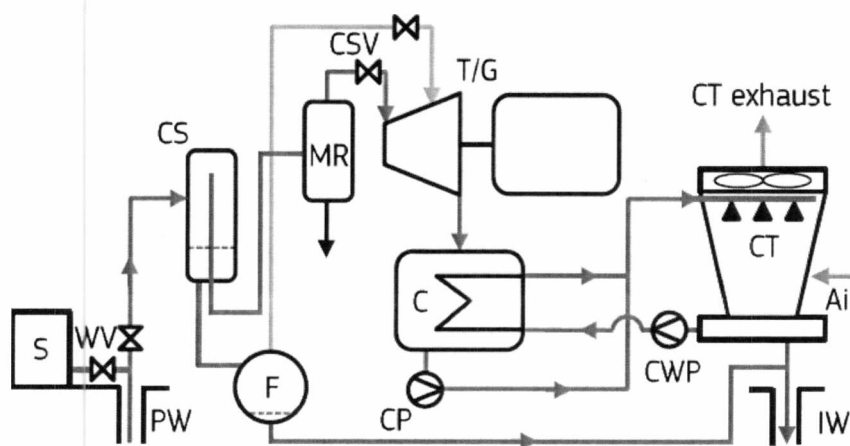
Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα, ο ατμός από τις γεωτρήσεις, αφού διέλθει μέσα από τις συσκευές απομάκρυνσης σωματιδίων (PR) και υγρασίας (MR), οδηγείται κατευθείαν στο στρόβιλο για εκτόνωση [1]. Στη συνέχεια, ο ατμός είτε διέρχεται από το συμπυκνωτή και τον πύργο ψύξης, όπου η πίεση διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα (condensing type), είτε απελευθερώνεται κατευθείαν στην ατμόσφαιρα (ατμοσφαιρικής εκτόνωσης) [2]. Ο δεύτερος τύπος προτιμάται όταν ο ατμός περιέχει μεγάλες ποσότητες μη-συμπυκνώσιμων αερίων (>12% w/w) ή για πιλοτικές μονάδες. Συνήθως, όμως, όταν είναι δυνατό, προτιμάται ο πρώτος τύπος με συμπυκνωτή καθώς έχει υψηλότερη απόδοση [3] και τη μισή κατανάλωση ατμού από τον δεύτερο τύπο [2].

4.4.2 Κύκλος μονής και διπλής εκτόνωσης διφασικού ρευστού (Single flash και Double flash)

Τα γεωθερμικά συστήματα με εκτόνωση διφασικού ρευστού (flash power systems) αποτελούν τον πιο συνηθισμένο τύπο γεωθερμικής εγκατάστασης, καθώς αντιπροσωπεύουν τα δύο τρίτα της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος. Η τεχνολογία flash steam χρησιμοποιεί πόρους με κυρίαρχη την υγρή φάση και θερμοκρασία πάνω από 180° C. Συγκεκριμένα, το γεωθερμικό ρευστό είτε έρχεται ως διφασική ροή από τη γεώτρηση είτε εκτονώνεται σε πίεση χαμηλότερη από την πίεση που επικρατεί στην κεφαλή της γεώτρησης και μετατρέπεται σε διφασικό μίγμα.



Σχήμα 4.6 Σύστημα Single flash [1]



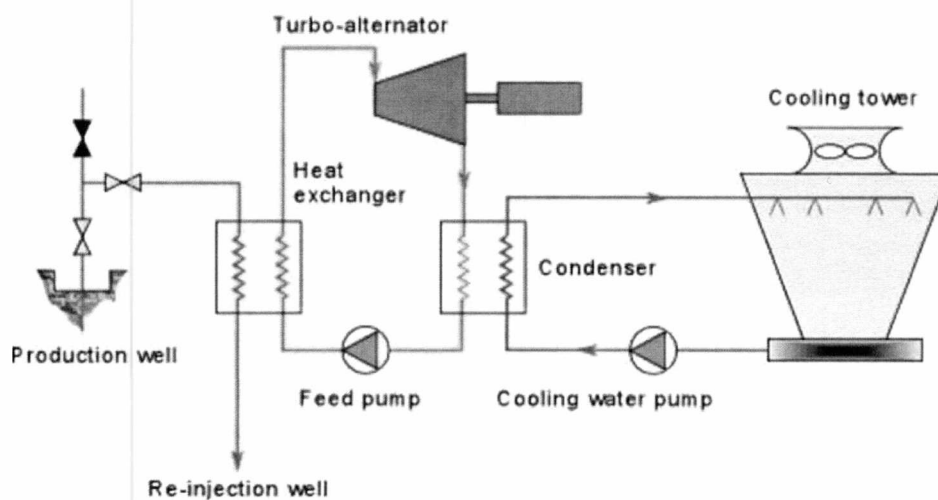
Σχήμα 4.7 Σύστημα Double flash [1]

Το ρευστό στη συνέχεια διέρχεται από έναν κατακόρυφο διαχωριστή (CS) και ο ατμός οδηγείται στο στρόβιλο για εκτόνωση και παραγωγή ενέργειας. Στο σύστημα μιας εκτόνωσης (single flash power system) το νερό από το διαχωριστή επανεισάγεται στον ταμειυτήρα. Όμως, αν η θερμοκρασία και πίεση του υγρού είναι κατάλληλες, το υγρό μπορεί να εκτονωθεί για δεύτερη φορά (Flasher –F) και να παραχθεί επιπλέον ατμός σε πίεση χαμηλότερη της πρώτης εκτόνωσης. Ο ατμός αυτός οδηγείται στην τουρμπίνα στο στάδιο χαμηλότερης πίεσης και το σύστημα αυτό ονομάζεται διπλής εκτόνωσης (double flash power system). Οι μονάδες εκτόνωσης διαφασικού ρευστού μπορεί να διαθέτουν συμπυκνωτή ή όχι, ακριβώς όπως και στα συστήματα απευθείας χρήσης ατμού, με τις μονάδες με συμπυκνωτή να έχουν μεγαλύτερες αποδόσεις.

Τα συστήματα μιας εκτόνωσης και διπλής εκτόνωσης έχουν αποδόσεις που κυμαίνονται στο 30-35% και 35-45% αντίστοιχα και είναι απλά στην κατασκευή. Τα single flash απαιτούν μικρό κεφάλαιο αλλά λειτουργούν με οικονομικό και ανταγωνιστικό τρόπο μόνο όταν ο γεωθερμικός πόρος είναι θερμοκρασίας 200-240°C και άνω. Από την άλλη, τα double flash συστήματα παρουσιάζουν 5-10% μεγαλύτερη απόδοση, όμως απαιτούν μεγαλύτερο κεφάλαιο και για ανταγωνιστικότητα πόρους θερμοκρασίας 240° C και άνω. Και στα δύο συστήματα όταν οι πόροι έχουν υψηλές συγκεντρώσεις μετάλλων, τα κόστη συντήρησης και λειτουργίας αυξάνονται σημαντικά λόγω επικαθίσεων [1].

4.4.3 Δυαδικός κύκλος (Binary)

Οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση δυαδικών κύκλων είναι οι ταχύτερα αναπτυσσόμενες και χρησιμοποιούν χαμηλής ή μέσης θερμοκρασίας πόρους που είναι οι πιο διαδεδομένοι. Έχουν ένα μερίδιο 11% της παγκόσμιας εγκαταστημένης παραγωγής και χρησιμοποιώντας οργανικό Rankine κύκλο (ORC) είτε Kalina λειτουργούν αντλώντας το γεωθερμικό, απομακρύνοντας υπολείμματα αποστέλλοντας το αρχικά σε έναν προθερμαντήρα και τελικά σε έναν εξατμιστήρα [1]. Τα κύρια τμήματα λοιπόν που τον απαρτίζουν είναι οι εναλλάκτες, ο ατμοστρόβιλος, η γεννήτρια, ο συμπυκνωτής, οι αντλίες κυκλοφορίας και επανεισαγωγής καθώς και οι απαραίτητες βαλβίδες. Στα πλεονεκτήματα αυτού συγκαταλέγονται η αξιοποίηση ακόμη και ρευστών με διαβρωτικά στοιχεία, οι μηδαμινές περιβαλλοντικές επιπτώσεις και η χρήση γεωθερμικών ρευστών χαμηλών ορίων. Από την άλλη πλευρά στα μειονεκτήματα είναι το κόστος του εναλλάκτη, η μικρή δυναμικότητα των μονάδων και η πτητικότητα ή τοξικότητα ορισμένων ρευστών [3].



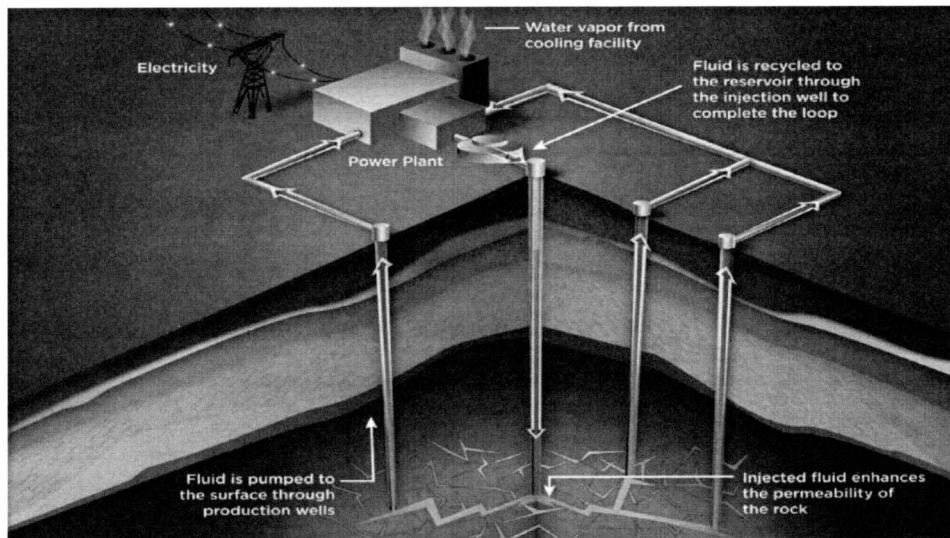
Σχήμα 4.8 Λυαδικό σύστημα [2]

4.4.4 Γεωθερμικά συστήματα EGS (engineered geothermal systems)

Τα συστήματα EGS (engineered geothermal systems) βασίζονται στην εκμετάλλευση γεωθερμικών πόρων που βρίσκονται σε πολύ μεγάλο βάθος και χωρίς αυτήν την τεχνολογία δε θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν εξαιτίας της έλλειψης νερού, σχισμών, σωστού τύπου πετρώματος κλπ. Τα συστήματα αυτά βρίσκονται ακόμη σε ερευνητικό – πιλοτικό στάδιο, αλλά παρέχουν τη δυνατότητα για μεγάλη παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος με οικονομικό τρόπο. Συγκεκριμένα, η τεχνική αυτή περιλαμβάνει τη δημιουργία δύο γεωτρήσεων σε ένα θερμό ξηρό πέτρωμα σε βάθος 5-10 χιλιόμετρα. Στη μία γεώτρηση πραγματοποιείται έγχυση ψυχρού νερού με μεγάλη πίεση πάνω στην επιφάνεια του τοιχώματος με στόχο τη δημιουργία ρωγμών για την επίτευξη κυκλοφορίας και θέρμανσης του γεωθερμικού ρευστού. Στη δεύτερη γεώτρηση (παραγωγική) γίνεται η άντληση του θερμού πλέον γεωθερμικού ρευστού για την παραγωγή ενέργειας.

Τα συστήματα αυτά παρουσιάζουν εξεργειακές αποδόσεις 25-50%, ενώ με τη βελτίωση των διαφόρων συσκευών του συστήματος (εναλλάκτες, τουρμπίνες κλπ) αναμένονται στο μέλλον αποδόσεις μέχρι 60%. Παρόλα αυτά λόγω του μεγάλου βάθους των γεωτρήσεων τα κόστη επένδυσης είναι πολύ υψηλά και αποτελούν τροχοπέδη για την ένταξή τους στην αγορά ενέργειας [1].





Σχήμα 4.9 Enhanced Geothermal System (egs) [11]

4.5 Περαιτέρω αξιοποίηση

Τα γεωθερμικά ρευστά ως επί το πλείστον εκτός από τη θερμότητα περιέχουν αέρια όπως αμμωνία, υδρόθειο, μεθάνιο, διοξείδιο του άνθρακα, βλαβερές χημικές ενώσεις (NaCl, B, As) αν διατεθούν στο περιβάλλον καθώς και στοιχεία που θα μπορούσαν να ανακτηθούν. Μερικά από αυτά είναι ο χρυσός, ο λευκόχρυσος και το μαγνήσιο [3]. Αξιοσημείωτο είναι ωστόσο το γεγονός ότι η φυσική παραγωγή CO₂ είναι ανεξάρτητη από γεωθερμική εκμετάλλευση. Τουναντίον χάρη στη βιομηχανική εκμετάλλευση των γεωθερμικών ρευστών αυτά διοχετεύονται σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ διαφορετικά θα μόλυναν την ατμόσφαιρα και τα γύρω εδάφη [7]. Επιπλέον, το CO₂ μπορεί να δεσμευτεί και να χρησιμοποιηθεί ως εμπορικό παραπροϊόν, ως πυροσβεστικό μέσο, στη συντήρηση τροφίμων, στη χημική βιομηχανία και στη δευτερογενή εξόρυξη του πετρελαίου. Στο Kizildere της Τουρκίας μεγάλο ποσοστό των αναγκών της βιομηχανίας αναψυκτικών καλύπτονται από το CO₂ που ανακτάται από τη γεωθερμικά ρευστά και η Ισλανδία καλύπτει όλες τις ανάγκες της σε CO₂ από τη γεωθερμία [3]. Η πρωτοποριακή πρόταση έγινε το 2000 και αφορά ένα σύστημα που θα χρησιμοποιεί υπερκρίσιμο CO₂, αντί του νερού και θα επιτευχθεί ταυτόχρονα CO₂ γεωλογική παγίδευση ως πρόσθετο όφελος. Στα πλεονεκτήματα αυτής της εναλλακτικής πρότασης συγκαταλέγονται η μεγαλύτερη συμπίεστικότητα και διαστολή του σε σύγκριση με το νερό που θα αυξήσει τις δυνάμεις πλευστότητας και θα μειώσει την παρασιτική κατανάλωση ισχύος (μειώνοντας έτσι το κόστος άντλησης). Ακόμη, μπορεί να

καταστεί δυνατή η χρήση χαμηλότερης θερμοκρασίας γεωλογικών σχηματισμών από εκείνα που σήμερα θεωρούνται οικονομικά βιώσιμες οδηγώντας σε πιο εκτεταμένη εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας. Συνοψίζοντας το CO₂ είναι πιο αποτελεσματικό από το νερό στη γεωθερμική μεταφορά θερμότητας αν και υπάρχουν εμπόδια που πρέπει να υπερνικήσει όπως η πρόσβαση σε νερό ψύξης [6].

5 Γεωθερμία και περιβάλλον

Η χρήση της γεωθερμίας είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου που προκαλεί η καύση των συμβατικών καυσίμων. Ωστόσο πολλές φορές δρουν ως ανασταλτικοί παράγοντες στην απόφαση για τη χρήση της οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της κάποιες από τις οποίες είναι η υδάτινη και θερμική ρύπανση που προκαλεί, το υδρόθειο που εκπέμπει και η χρήση γης [3]. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων όμως, ο βαθμός επιρροής του περιβάλλοντος από τη γεωθερμική εκμετάλλευση είναι ανάλογος με το μέγεθος της εκμετάλλευσης [2].

Στον Πίνακα 5.1. συνοψίζονται οι επιπτώσεις που έχει η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και οι άμεσες χρήσεις στο περιβάλλον. Θα πρέπει να τονιστεί μολτατά ότι σε περίπτωση επανέγχυσης οι επιπτώσεις όσον αφορά στις εκπομπές αερίων και τη διάθεση του νερού γίνονται αμελητέες. Τα στάδια κατά τα οποία γίνονται ορατές οι επιβλαβείς συνέπειες είναι οι φάσεις της έρευνας, των γεωτρήσεων των δοκιμών της κατασκευής της εγκατάστασης και της λειτουργίας. Συγκεκριμένα, όπως έχουν ταξινομηθεί κατά τον Mannvit HF οι διαταραχές περιλαμβάνουν α) ελαφριά τροποποίηση της επιφανειακής μορφολογίας της περιοχής λόγω των σωλήνων και γραμμών μεταφοράς β) θόρυβο γ) θερμική ρύπανση από τον ατμό και τα καυτά υγρά που απελευθερώνονται στο περιβάλλον από τις γεωθερμικές εγκαταστάσεις δ) χημική ρύπανση από τη διάθεση των υγρών και στερεών αποβλήτων ε) επιπτώσεις στη χλωρίδα και πανίδα ζ) καθίζηση και σεισμικότητα. Τα single και double flash συστήματα αξιοποιούν υψηλής ενθαλπίας πόρους και απελευθερώνουν ατμό στην ατμόσφαιρα ή υγρά σε βαθείς ταμιευτήρες ή στην επιφάνεια. Αντίθετα τα δυαδικά με χαμηλής ή μέσης ενθαλπίας πόρους δεν έχουν σημαντική απελευθέρωση μη συμπυκνώσιμων αερίων στην ατμόσφαιρα και στα χαμηλής θερμοκρασίας ρευστά ο θόρυβος είναι ανύπαρκτος [1].

Από τα εκπεμπόμενα αέρια το διοξείδιο του άνθρακα αποτελεί και το κυριότερο ενώ το υδρόθειο ακολουθεί μαζί με το υδρογόνο, το μεθάνιο, την αμμωνία και το άζωτο και ίχνη από άλλα αέρια, καθώς και *διαλυμένες χημικές ενώσεις*. Όλα αυτά γνωστά και ως μη συμπυκνώσιμα αέρια δεν συμπυκνώνονται στον ατμό και αυξάνονται σε ποσότητα όσο αυξάνεται η θερμοκρασία των πόρων. Το CO₂ προέρχεται είτε από διφασικούς εναλλάκτες είτε μετά την έξοδο του ρευστού από το συμπυκνωτή και αποτελεί το 90% των μη συμπυκνώσιμων αερίων. Τα ποσοστά του κυμαίνονται μεταξύ 4-740 kg/MWh με μέσο όρο

122 kg/MWh. Παρόλα αυτά οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας εκπέμπουν 45% λιγότερο CO₂ από ένα λέβητα πετρελαίου και 33% λιγότερο από έναν φυσικού αερίου, στοιχεία άκρως ενθαρρυντικά για την επιλογή της γεωθερμίας. Ένα άλλο παράδειγμα ενδεικτικό της φιλικότητας ως προς το περιβάλλον της γεωθερμίας συνιστά το εξής: Οι άμεσες και έμμεσες εκπομπές CO₂ από μια εγκατάσταση με ORC για την παραγωγή ηλεκτρισμού είναι 96 kg/MWh_e ενώ για την παραγωγή θερμότητας 62 kg/MWh_{th}. Από την άλλη πλευρά αυτές οι εκπομπές σε εργοστάσιο με καύσιμο τον άνθρακα ανέρχονται στα 456 kg/MWh_e και με καύσιμο το λιθάνθρακα στα 414 kg/MWh_{th}. Είναι επομένως φανερή η υψηλή εξοικονόμηση εκπομπών CO₂ στην περίπτωση της γεωθερμίας [1].

Πίνακας 1 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της γεωθερμίας [2]

Impact (Επίπτωση)	Probability of occurring	Severity of consequences
Air quality pollution (ρύπανση της ατμόσφαιρας)	L	M
Surface water pollution (ρύπανση υδάτων)	M	M
Underground pollution (ρύπανση υδροφόρου ορίζοντα)	L	M
Land subsidence (χρήση γης)	L	L to M
High noise levels (επίπεδα θορύβου)	H	L to M
Well blowouts (εκρήξεις πηγαδιών)	L	L to M
Conflicts with cultural and archaeological features (διαμάχες για αλλαγή τοπίου με αρχαιολόγους)	L to M	M to H
Social-economic problems (κοινωνικοοικονομικά προβλήματα)	L	L
Chemical or thermal pollution (χημική ή θερμική ρύπανση)	L	M to H
Solid waste disposal (διάθεση αποβλήτων)	M	M to H

L = Low; M = Moderate; H= High

Source: Lunis and Breckenridge (1991)

Το υδρόθειο σε εγκαταστάσεις πόρων υψηλής θερμοκρασίας έχει πρωταρχική σημασία λόγω της τοξικότητάς του και μπορεί να αποτελέσει μέχρι το 20-35% των μη συμπυκνώσιμων αερίων. Το όριο οσμής του στον αέρα είναι περίπου 5 p.p.b. Σε χαμηλά

επίπεδα μπορεί να γίνει ανεκτό ωστόσο σε υψηλά επίπεδα οδηγεί σε απώλεια της αναπνοής ή ακόμη και στο θάνατο [1].

Ο υδράργυρος από την άλλη πλευρά δεν είναι παρών πάντα. Όταν εκπέμπεται μπορεί να είναι τόσο σε σωματιδιακή μορφή όσο και σε αέρια. Στην πρώτη περίπτωση παραμένει στην ατμόσφαιρα για 1-10 ημέρες τοπικά και περιφερειακά. Ένα σημαντικό βήμα που συντελεί στην απομάκρυνσή του είναι η τοποθέτηση συστημάτων αφαίρεσης του υδραργύρου γνωστά και ως AMIS που όταν εγκαταστάθηκαν στο Lardarello της Ιταλίας πέτυχαν μείωση από 0,21 σε 0,16 $\mu\text{g}/\text{kWh}$ από το 2003 μέχρι το 2007. Τα συστήματα αυτά έχουν βαθμό απόδοσης 95% και χρησιμοποιούν ενεργοποιημένο άνθρακα για την απορρόφηση του υδραργύρου από το αέριο ρεύμα πριν μετατραπεί το θείο σε στερεά μορφή [1].

Η διάθεση αποβλήτων αποτελεί μια πιθανή πηγή χημικής ρύπανσης. Για αυτό και τα ρευστά με μεγάλη περιεκτικότητα σε βόριο, αρσενικό, φθόριο κλπ. θα πρέπει να υφίστανται κάποια χημική επεξεργασία προτού επανεισχυθούν στον ταμιευτήρα. Ακόμα, η καθίζηση που συμπεριλαμβάνεται στις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις της χρήσης της γεωθερμίας οφείλεται σε άντληση μεγάλων ποσοτήτων ρευστών από τους ταμιευτήρες. Αποτελεί ως επί το πλείστον ένα μη αναστρέψιμο φαινόμενο το οποίο με το πέρασμα των χρόνων μπορεί να φτάσει σε μετρήσιμα επίπεδα οπότε και θα πρέπει να παρακολουθείται για να μη θέσει σε κίνδυνο τη σταθερότητα των κτιρίων της περιοχής [2]. Ωστόσο σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να αποτραπεί η καθίζηση με την επανέγχυση των χρησιμοποιηθέντων γεωθερμικών ρευστών η οποία όμως μπορεί να αυξήσει τη συχνότητα των σεισμικών φαινομένων. Μεγάλα σεισμικά συμβάντα είναι απίθανο να προκληθούν.

Όλες αυτές οι επιπτώσεις πρέπει να τονιστεί ότι σε μονάδες χαμηλής ενθαλπίας είναι ηπιότερες. Συγκεκριμένα, η θερμική ρύπανση είναι μικρότερη με την προϋπόθεση ότι τα νερά μετά τη χρήση τους βρίσκονται σε θερμοκρασία μικρότερη των 30-35° C, η περιεκτικότητά τους σε επιβλαβή και τοξικά στοιχεία είναι αμελητέα, τα μη συμπυκνώσιμα αέρια είναι περιορισμένα και περιπτώσεις καθίζησης δεν έχουν καταγραφεί [3].

Κλείνοντας αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθούν δύο χαρακτηριστικά της γεωθερμίας αυτά της αειφορίας και της ανανεωσιμότητας. Η ανανεωσιμότητα αποτελεί ιδιότητα του πόρου και σημαίνει ότι η οποιαδήποτε ποσότητα ενέργειας που λαμβάνεται, η ίδια αναπληρώνεται κατά το ίδιο χρονικό διάστημα. Ο ρυθμός και η δυνατότητα επαναφόρτισης αποτελούν τα κριτήρια στην ταξινόμηση ενός πεδίου ως ανανεώσιμο. Η αειφορία αφορά τον τρόπο αξιοποίησης και ιδιαίτερα την κατανάλωση-διαχείριση του πόρου αλλά και τη διάθεσή του σε προσιτό κόστος. Η γεωθερμική ενέργεια λοιπόν παρουσιάζει μια πληθώρα οφελών ως προς το περιβάλλον κάποια από τα οποία συνοψίζονται παρακάτω [3]:

- ✓ Συνεχής παροχή. Είναι διαθέσιμη όλο το χρόνο με συντελεστή αξιοποίησης που φτάνει και το 90%. Συγκριτικά η υδροηλεκτρική έχει συντελεστή 75% ενώ η ηλιακή και αιολική 20-35%.
- ✓ Μικρό λειτουργικό κόστος σε αντίθεση με το κόστος παγίων.
- ✓ Μηδενικές εκπομπές σωματιδίων και μειωμένες εκπομπές αερίων σε σχέση με τα συμβατικά καύσιμα.
- ✓ Οι χρησιμοποιηθέντες εκτάσεις γης είναι πολύ μικρές καθώς δεν απαιτούνται αποθηκευτικοί χώροι όπως στη βιομάζα ή στα συμβατικά καύσιμα.
- ✓ Συντελεί στην επίτευξη των στόχων του Πρωτοκόλλου του Κιότο και της Λευκής Βίβλου της Ε.Ε.
- ✓ Περιορίζει τις εισαγωγές ορυκτών συμβάλλοντας στην ενεργειακή και οικονομική ανεξάρτηση μιας χώρας [3].

6 Θερμοδυναμικοί κύκλοι ηλεκτροπαραγωγής

Για τους σκοπούς της εργασίας θα αναλυθούν οι κύκλοι ηλεκτροπαραγωγής Brayton , Rankine και Kalina.

6.1 Κύκλος Brayton

6.1.1 Λειτουργία του κύκλου Brayton

Ο κύκλος Brayton είναι ένας θερμοδυναμικός κύκλος που περιγράφει μια θερμική μηχανή, τον Αεριοστρόβιλο (Gas turbine), η οποία χρησιμοποιεί ως εργαζόμενο μέσο αέριο (συνήθως τον αέρα) [13]. Ο κύκλος αυτός ονομάστηκε από τον George Brayton (1830–1892), έναν Αμερικανό μηχανικό που τον εφάρμοσε το 1872 στον παλινδρομικό πετρελαιοκινητήρα που ανέπτυξε, αν και αρχικά ο κύκλος αυτός είχε προταθεί από τον Άγγλο John Barber το 1791. Ο κύκλος είναι επίσης γνωστός και με το όνομα κύκλος Joule. Οι δύο κυριότερες περιοχές εφαρμογών των αεριοστροβίλων είναι η προώθηση αεροσκαφών και η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος [14].

Οι τρεις βασικές διεργασίες κατά τη λειτουργία του Αεριοστροβίλου είναι η Συμπίεση, η Καύση (γενικότερα η Παροχή Θερμότητας) και η Εκτόνωση, οι οποίες λαμβάνουν χώρα στα εξής τρία διακριτά μέρη της εγκατάστασης [13]:

- Ο Συμπιεστής (Compressor), ο οποίος αυξάνει την πίεση και τη θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου, το οποίο αναρροφά συνήθως ο συμπιεστής από την ατμόσφαιρα.
- Ο Θάλαμος Καύσης (Combustion chamber), στον οποίο γίνεται αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα με την καύση του καυσίμου, πρακτικά υπό σταθερή πίεση. Αντί για εσωτερική καύση η απαιτούμενη παροχή θερμότητας μπορεί να προέλθει από εξωτερική πηγή μέσω εναλλάκτη θερμότητας. Μετά την καύση τα καυσαέρια εκτονώνονται στον Στρόβιλο.
- Ο Στρόβιλος (Turbine), στον οποίο εκτονώνονται τα καυσαέρια. Ο στρόβιλος συνδέεται πάντοτε με το Συμπιεστή και του παρέχει το αναγκαίο μηχανικό έργο για την κίνησή του. Το υπόλοιπο έργο του Στροβίλου αποτελεί το ωφέλιμο έργο της εγκατάστασης, το οποίο προσδίνεται στη γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι εγκαταστάσεις αεριοστροβίλων διακρίνονται σε εγκαταστάσεις Ανοικτού Κυκλώματος (Open - cycle gas turbine engine) και εγκαταστάσεις Κλειστού Κυκλώματος (Closed - cycle gas turbine engine). Στον ανοικτό κύκλο η θέρμανση του εργαζόμενου μέσου γίνεται με εσωτερική καύση στον θάλαμο καύσης και τα καυσαέρια, μετά την εκτόνωσή τους στον στρόβιλο, απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα. Από την άλλη, στον κλειστό κύκλο η θέρμανση του μέσου πραγματοποιείται με εξωτερική καύση και μεταφορά θερμότητας μέσω εναλλάκτη και τα καυσαέρια μετά την εκτόνωσή τους επιστρέφουν στον συμπιεστή. Στην εργασία θα μελετηθεί ο Ανοικτός κύκλος Brayton [13].

Οι εγκαταστάσεις ανοικτού κυκλώματος θεωρούνται μηχανές εσωτερικής καύσης γιατί έχουμε ανάμειξη του καυσίμου με το εργαζόμενο μέσο. Τα καυσαέρια μετά την εκτόνωσή τους στον στρόβιλο εξέρχονται στην ατμόσφαιρα με πίεση ίση με την ατμοσφαιρική, αλλά με αρκετά υψηλότερη θερμοκρασία (400-600° C). Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται ως καύσιμα το φυσικό αέριο ή το αέριο που προέρχεται από την αεριοποίηση του άνθρακα ή το αέριο των υψικαμίνων (στα πλαίσια της εξοικονόμησης ενέργειας) καθώς επίσης και τα αποστάγματα του πετρελαίου, το ντίζελ σε ευρεία κλίμακα και σπανιότερα το μαζούτ [13].

Οι εγκαταστάσεις αεριοστροβίλων ανοικτού κυκλώματος είναι οι πλέον συνήθεις για την κάλυψη των αναγκών ηλεκτρικής ενέργειας στη ζώνη αιχμής ή ως μονάδες εφεδρείας ισχύος. Είναι τεχνικά και οικονομικά ελκυστικές, λόγω της απλότητας τους και του μικρού κόστους εγκατάστασης. Επίσης, αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι των μονάδων συνδυασμένου κύκλου (Combined – cycle power plants) και των μονάδων που χρησιμοποιούν ως καύσιμο αεριοποιημένο άνθρακα (Integrated Gasification Combine Cycle –IGCC) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και των μονάδων συμπαραγωγής (Cogeneration plants) για τη συνδυασμένη παραγωγή θερμότητας (ατμού) και ηλεκτρικής ενέργειας [13].

6.1.2 Θερμοδυναμική του κύκλου Brayton

Σε μια απλή εγκατάσταση αεριοστροβίλου ανοικτού κυκλώματος η παροχή μάζας των καυσαερίων είναι μεγαλύτερη της αντίστοιχης του αέρα κατά την παροχή της μάζας του καυσίμου, η οποία είναι πολύ μικρή. Συγκεκριμένα, η παροχή μάζας του αέρα είναι συνήθως πάνω από 50 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του καυσίμου και για αυτόν το λόγο κατά την εξέταση του θερμοδυναμικού κύκλου ενός αεριοστροβίλου ανοικτού κυκλώματος γίνεται

η υπόθεση, χωρίς σημαντικό σφάλμα, ότι η παροχή μάζας των καυσαερίων είναι ίση με την αντίστοιχη του αέρα, δηλαδή σαν να είχαμε ένα αεριοστρόβιλο κλειστού κυκλώματος με εργαζόμενο μέσο τον αέρα. Έτσι όλοι οι υπολογισμοί των διαφορών θερμοδυναμικών μεγεθών και οι σχετικοί τύποι και εξισώσεις είναι ίδιοι είτε πρόκειται για αεριοστρόβιλο ανοικτού ή κλειστού κυκλώματος [13].

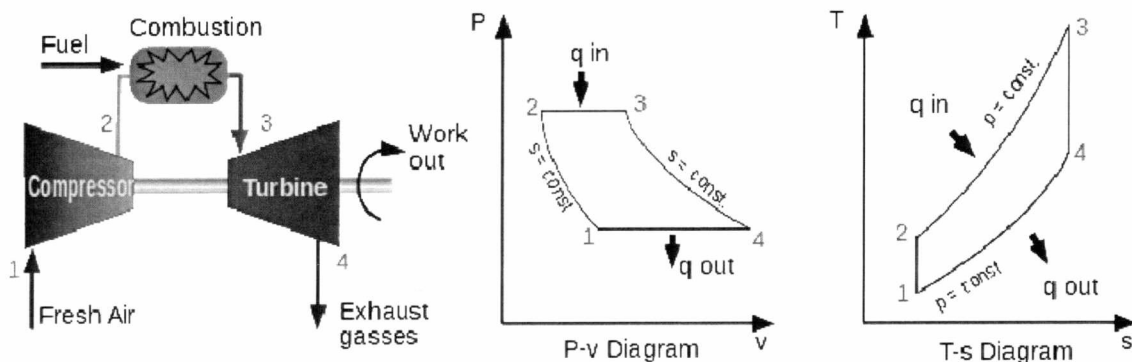
Ως προς το εργαζόμενο μέσο, που είναι ο αέρας, γίνονται οι παραδοχές του πρότυπου αέρα:

1. Ο αέρας θεωρείται ότι συμπεριφέρεται ως ιδανικό αέριο, με αποτέλεσμα η εσωτερική ενέργεια και η ενθαλπία να είναι συνάρτηση μόνον της θερμοκρασίας.
2. Οι ειδικές θερμοχωρητικότητες υπό σταθερό όγκο (C_v) και πίεση (C_p) είναι σταθερές και ο λόγος των ειδικών θερμοχωρητικοτήτων $k = C_p / C_v$.

Έτσι, η μεταβολή της ενθαλπίας είναι ανάλογη της μεταβολής των θερμοκρασιών, δηλαδή $\Delta h = c_p \cdot \Delta T$ [13].

Ο ιδανικός κύκλος Brayton αποτελείται από τις εξής τέσσερις διεργασίες (Σχήμα 6.1):

1. Ισεντροπική συμπίεση του ατμοσφαιρικού αέρα που αναρροφάται από τον συμπιεστή.
2. Ισοβαρής προσθήκη θερμότητας μέσω καύσης του καυσίμου με τον συμπιεσμένο αέρα στο θάλαμο καύσης.
3. Ισεντροπική εκτόνωση των καυσαερίων στον στρόβιλο προς παραγωγή έργου, ένα μέρος του οποίου τροφοδοτεί τον συμπιεστή.
4. Ισοβαρής διεργασία απόρριψης θερμότητας στην ατμόσφαιρα [14].



Σχήμα 6.1 Ιδανικός κύκλος Brayton [14]

Όπως είναι φανερό από τα παραπάνω διαγράμματα ισχύει ότι $P_2 = P_3$ και $P_1 = P_4$.

Επιπλέον ισχύουν οι ισεντροπικές σχέσεις $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(k-1)/k} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{(k-1)/k} = \frac{T_3}{T_4}$ [15]. Η

θερμική απόδοση του ιδανικού κύκλου Brayton είναι:

$$\eta_{th,Brayton} = \frac{W_{net}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = 1 - r_p^{(1-k)/k}, \quad \text{όπου } r_p \text{ είναι ο λόγος πιέσεων του κύκλου και}$$

ισούται με $\frac{P_2}{P_1}$ [15].

6.1.3 Πραγματικός κύκλος Brayton

Στην πραγματικότητα ούτε η συμπίεση ούτε η εκτόνωση μπορούν να είναι ισεντροπικές. Λόγω μη-αντιστρεπτοτήτων το πραγματικό έργο του συμπιεστή θα είναι μεγαλύτερο και το πραγματικό έργο της τουρμπίνας μικρότερο. Επίσης, παρόλο που κατά τις διεργασίες προσθήκης και απόρριψης θερμότητας η πτώση πίεσης είναι αναπόφευκτη, για πρακτικούς λόγους θα θεωρηθούν ισοβαρείς οι διεργασίες. Έτσι, ο πραγματικός κύκλος Brayton αποτελείται από τις εξής διεργασίες (Σχήμα 6.2):

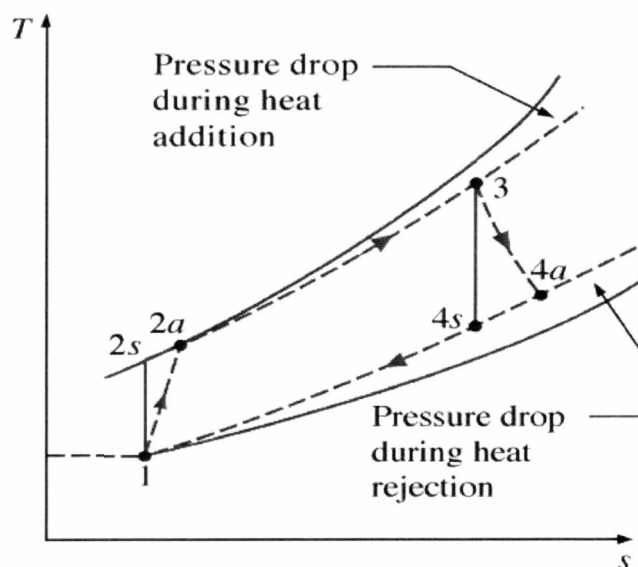
1. Αδιαβατική συμπίεση του αέρα στον συμπιεστή.
2. Ισοβαρή προσθήκη θερμότητας μέσω καύσης του καυσίμου με τον συμπιεσμένο αέρα στο θάλαμο καύσης.
3. Αδιαβατική εκτόνωση των καυσαερίων στον στρόβιλο.
4. Ισοβαρή απόρριψη θερμότητας στην ατμόσφαιρα [15].

Οι αποκλίσεις των πραγματικών συμπιεστών και στροβίλων από τις αντίστοιχες ιδανικές-ισεντροπικές περιγράφονται από τις ισεντροπικές (ή αδιαβατικές) αποδόσεις τους:

$$\eta_{compr,s} = \frac{w_s}{w_a} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1} \quad \text{και} \quad \eta_{turb,s} = \frac{w_a}{w_s} = \frac{h_3 - h_{4a}}{h_3 - h_{4s}},$$

όπου οι καταστάσεις 4a και 2a είναι οι πραγματικές έξοδοι της τουρμπίνας και του συμπιεστή, ενώ οι καταστάσεις 4s και 2s είναι οι ισεντροπικές [15].

Οι αποκλίσεις από τον ιδανικό κύκλο λόγω μη-αντιστρεπτοτήτων φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα T-s.



Σχήμα 6.2 Αποκλίσεις του πραγματικού από τον ιδανικό κύκλο [15]

Η κατάσταση *a* αντιπροσωπεύει την πραγματική διεργασία, ενώ η κατάσταση *s* την ισεντροπική διεργασία.

Ο θερμοκός βαθμός απόδοσης του πραγματικού κύκλου Brayton είναι [15]:

$$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_{in}}, \text{ όπου } q_{in} = h_3 - h_{2a} \text{ και } w_{net} = w_{turb,out} - w_{comp,in}$$

6.2 Οργανικός κύκλος Rankine

6.2.1 Ο ιδανικός κύκλος Rankine

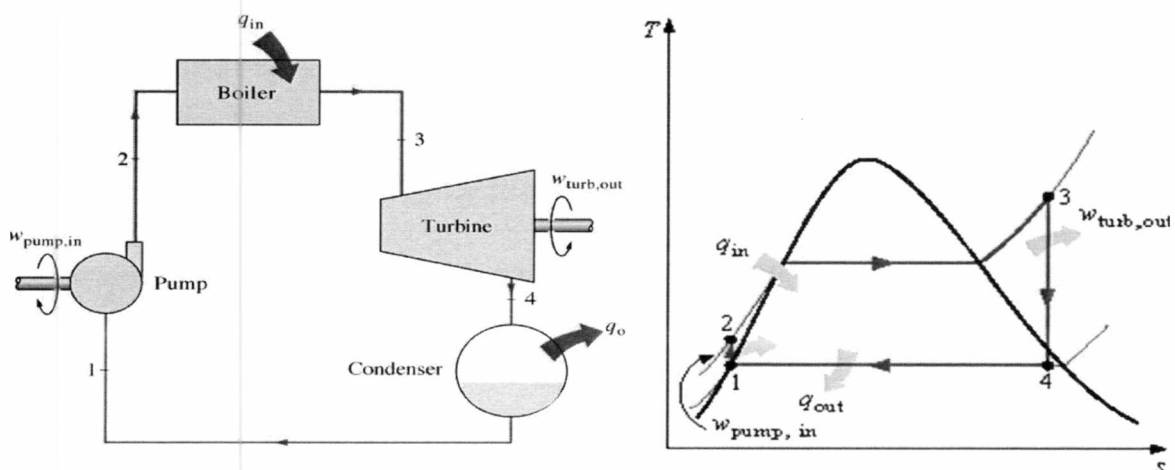
Ο κύκλος Rankine περιγράφει τη λειτουργία των συστημάτων των Ατμοστροβίλων. Αποτελεί έναν ιδανικό θερμοδυναμικό κύκλο μιας θερμικής μηχανής, η οποία μετατρέπει τη θερμότητα σε μηχανικό έργο, το οποίο στη συνέχεια χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Ο κύκλος ονομάστηκε από τον William John Macquorn Rankine, έναν Σκωτσέζο πολυμαθή και καθηγητή του πανεπιστημίου της Γλασκόβης [16].

Ο κύκλος αυτός συναντάται σε πολλά θερμοηλεκτρικά εργοστάσια παραγωγής ενέργειας. Θερμότητα από εξωτερική πηγή τροφοδοτείται σε έναν κλειστό κύκλο, ο οποίος συνήθως χρησιμοποιεί νερό ως εργαζόμενο μέσο. Πηγές της θερμότητας μπορεί να είναι η πυρηνική ενέργεια ή η καύση ορυκτών καυσίμων, όπως κάρβουνο, πετρέλαιο ή φυσικό αέριο. Παρόλο

που υπάρχουν πολλά ρευστά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εργαζόμενο μέσο του κύκλου Rankine, το νερό είναι αυτό που χρησιμοποιείται συνήθως λόγω των πολύ καλών ιδιοτήτων του, όπως η μη-τοξικότητα, η αφθονία στη φύση, το χαμηλό κόστος και οι χημικές και θερμοδυναμικές του ιδιότητες [16].

Ο ιδανικός κύκλος Rankine αποτελείται από τις εξής τέσσερις διεργασίες (Σχήμα 6.3):

1. Ισεντροπική συμπίεση στην αντλία του ρευστού που μετατρέπεται από κορεσμένο υγρό σε συμπιεσμένο, ενώ παράλληλα η θερμοκρασία του αυξάνει ελάχιστα εξαιτίας της μικρής μείωσης στον ειδικό όγκο του υγρού.
2. Ισοβαρής προσθήκη θερμότητας στο βραστήρα, με αποτέλεσμα το ρευστό να εξατμιστεί και να υπερθερμανθεί. Ο βραστήρας είναι ένας μεγάλος εναλλάκτης θερμότητας στον οποίο η θερμότητα προέρχεται από αέρια καύσης, πυρηνικούς αντιδραστήρες ή άλλες πηγές και μεταφέρεται στο υγρό ιδανικά σε σταθερή πίεση.
3. Ισεντροπική εκτόνωση του υπέρθερμου ατμού στον στρόβιλο με αποτέλεσμα την παραγωγή έργου που τροφοδοτεί μια ηλεκτρογεννήτρια.
4. Ισοβαρής απόρριψη θερμότητας στον συμπυκνωτή, ο οποίος είναι ένας μεγάλος εναλλάκτης θερμότητας που απορρίπτει θερμότητα σε ένα ψυκτικό μέσο όπως ένα ποτάμι, μία λίμνη ή η ατμόσφαιρα. Σε περιοχές όπου το νερό είναι πολύτιμο οι εγκαταστάσεις παραγωγής ισχύος ψύχονται με αέρα αντί για νερό. Στην είσοδο του συμπυκνωτή το ρευστό είναι μίγμα κορεσμένου υγρού - ατμού με μεγάλη ποιότητα, ενώ στην έξοδο έχει μετατραπεί σε κορεσμένο υγρό [16].



Σχήμα 6.3 Ιδανικός κύκλος Rankine με εργαζόμενο ρευστό νερό [13]

6.2.2 Ο πραγματικός κύκλος Rankine

Ο πραγματικός κύκλος Rankine διαφέρει από τον ιδανικό εξαιτίας των μη-αντιστρεπτοτήτων που συμβαίνουν στα στοιχεία του κύκλου. Οι μη-αντιστρεπτότητες οφείλονται στις τριβές του ρευστού, οι οποίες οδηγούν σε απώλειες πίεσης στις σωληνώσεις και στα στοιχεία του συστήματος, και στις απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον, οι οποίες μειώνουν το καθαρό παραγόμενο έργο. Έτσι, στον πραγματικό κύκλο οι διεργασίες συμπίεσης και εκτόνωσης δεν είναι ισεντροπικές, καθώς η εντροπία αυξάνεται λόγω των μη-αντιστρεπτοτήτων. Επομένως, απαιτείται περισσότερο έργο για την αντλία και παράγεται λιγότερο έργο από τον στρόβιλο [16].

6.2.3 Θερμοδυναμική του ιδανικού κύκλου Rankine

Οι τέσσερις διεργασίες του κύκλου Rankine είναι διεργασίες σταθεροποιημένης ροής. Οι μεταβολές κινητικής και δυναμικής ενέργειας του υδρατμού είναι συνήθως μικρές σε σχέση με τους όρους του έργου και της μεταφερόμενης θερμότητας με αποτέλεσμα να θεωρούνται συνήθως αμελητέες. Η εξίσωση ενέργειας για σταθεροποιημένη ροή ανά μονάδα μάζας υδρατμού απλοποιείται σε [13]:

$$(q_{in} - q_{out}) + (w_{in} - w_{out}) = h_e - h_i \quad (\text{kJ/kg})$$

Ο βραστήρας και ο συμπυκνωτής δεν παράγουν έργο, ενώ η αντλία και ο στρόβιλος θεωρείται ότι λειτουργούν ισεντροπικά. Η διατήρηση ενέργειας για κάθε συσκευή μπορεί να εκφραστεί από τις ακόλουθες σχέσεις [13]:

1. Αντλία ($q=0$) : $w_{pump,in} = h_2 - h_1$ ή $w_{pump,in} = v(P_2 - P_1)$, όπου $h_1 = h_{f@P_1}$ και

$$v \cong v_1 = v_{f@P_1}$$

2. Βραστήρας ($w=0$): $q_{in} = h_3 - h_2$

3. Στρόβιλος ($q=0$): $w_{turb,out} = h_3 - h_4$

4. Συμπυκνωτής ($w=0$): $q_{out} = h_4 - h_1$

Ο θερμικός βαθμός απόδοσης του κύκλου Rankine ορίζεται ως [13]:

$$\eta = \frac{w_{net}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}}, \text{ όπου } w_{net} = w_{turb,out} - w_{pump,in} = q_{in} - q_{out}$$

6.2.4 Οργανικός κύκλος Rankine

Ο οργανικός κύκλος Rankine (organic rankine cycle – ORC) χρησιμοποιεί αντί για νερό/ατμό ένα οργανικό ρευστό μεγάλου μοριακού βάρους με σημείο βρασμού χαμηλότερο από το νερό. Το ρευστό αυτό επιτρέπει στον κύκλο Rankine να παραλαμβάνει θερμότητα από πηγές χαμηλότερης θερμοκρασίας, όπως η καύση βιομάζας, η θερμότητα από γεωθερμία, η ηλιακή ενέργεια, η θερμότητα που απορρίπτεται από τη βιομηχανία κλπ. Αυτή η θερμότητα χαμηλότερης θερμοκρασίας μετατρέπεται σε έργο και στη συνέχεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Για πρώτη φορά το 1961 κατασκευάστηκε ένα πρωτότυπο που χρησιμοποιούσε τον κύκλο αυτό από τους ηλιακούς μηχανικούς Harry Zvi Tabor και Lucien Bronicki [17].

Αρχές λειτουργίας του ORC

Οι αρχές λειτουργίας του ORC είναι ίδιες με αυτές του κύκλου Rankine:

Το εργαζόμενο μέσο συμπιέζεται σε μια αντλία, στη συνέχεια εξατμίζεται σε έναν βραστήρα, εκτονώνεται στον στρόβιλο προς παραγωγή έργου και τελικά συμπυκνώνεται στον εναλλάκτη θερμότητας-συμπυκνωτή [17].

Στον ιδανικό κύκλο η εκτόνωση και η συμπίεση είναι ισεντροπικές διεργασίες, ενώ η εξάτμιση και η συμπύκνωση είναι ισοβαρείς. Όμως, στον πραγματικό κύκλο η παρουσία μη-αντιστρεπτοτήτων μειώνει την απόδοση του κύκλου. Οι κυριότερες μη-αντιστρεπτότητες που λαμβάνουν χώρα είναι:

- Κατά την εκτόνωση, όπου ένα μέρος της ενέργειας που προκύπτει από τη διαφορά πίεσης μετατρέπεται σε χρήσιμο έργο ενώ το υπόλοιπο μετατρέπεται σε θερμότητα και χάνεται.
- Στους εναλλάκτες θερμότητας, όπου προκαλείται πτώση πίεσης λόγω τριβών και καταστροφή εξέργειας λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του εργαζόμενου μέσου και του άλλου ρευστού.
- Κατά την συμπίεση στην αντλία, όπου εξαιτίας των μη-αντιστρεπτοτήτων θα απαιτηθεί περισσότερο έργο εισόδου [17].

Οι αποκλίσεις των πραγματικών αντλιών και στροβίλων από τις αντίστοιχες ιδανικές-ισεντροπικές περιγράφονται από τις ισεντροπικές (ή αδιαβατικές) αποδόσεις τους:

$$\eta_{pump,s} = \frac{w_s}{w_a} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1} \quad \text{και} \quad \eta_{turb,s} = \frac{w_a}{w_s} = \frac{h_3 - h_{4a}}{h_3 - h_{4s}},$$

όπου οι καταστάσεις 4a και 2a είναι οι πραγματικές έξοδοι της τουρμπίνας και της αντλίας, ενώ οι καταστάσεις 4s και 2s είναι οι ισεντροπικές [13].

6.2.5 Επιλογή εργαζόμενου μέσου

Η επιλογή του εργαζόμενου μέσου είναι πολύ σημαντική τους κύκλους Rankine χαμηλής θερμοκρασίας. Εξαιτίας της χαμηλής θερμοκρασίας, οι μη-αντιστρεπτότητες που σχετίζονται με τη μεταφορά θερμότητας είναι ιδιαίτερα επιβλαβείς και σχετίζονται με τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του ρευστού αλλά και με τις συνθήκες λειτουργίας. Το ρευστό για να μπορεί να απορροφήσει τη θερμότητα χαμηλής θερμοκρασίας πρέπει να έχει σημείο βρασμού χαμηλότερο από το νερό. Έτσι, τα πιο συνήθως χρησιμοποιούμενα οργανικά ρευστά είναι τα ψυκτικά και οι υδρογονάνθρακες [17].

Κάποιες βέλτιστες ιδιότητες που πρέπει να διαθέτουν αυτά τα οργανικά ρευστά είναι:

- Χαμηλό σημείο πήξης, ώστε να είναι χαμηλότερο από την ελάχιστη θερμοκρασία του κύκλου και χαμηλό σημείο ζέσεως, ώστε να οδηγούν σε υψηλή θερμική απόδοση του ORC.
- Σταθερότητα σε υψηλές θερμοκρασίες, ώστε να μην αλλοιώνονται και να διατηρούν τη χημική τους σταθερότητα στην υψηλότερη θερμοκρασία του κύκλου.
- Μεγάλη λανθάνουσα θερμότητα και μεγάλη πυκνότητα, ώστε να μπορούν να απορροφήσουν περισσότερη θερμότητα στον εναλλάκτη για μικρότερη παροχή μάζας, μικρότερο μέγεθος της εγκατάστασης και μικρότερο έργο της αντλίας.
- Μικρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, κυρίως ως προς το φαινόμενο του θερμοκηπίου και τη μείωση της στιβάδας του όζοντος.
- Να είναι μη-διαβρωτικά, μη-τοξικά και μη-αναφλέξιμα.
- Να έχουν καλή διαθεσιμότητα και μικρό κόστος.

- Να έχουν χαμηλό ιξώδες και επιφανειακή τάση.
- Να οδηγούν σε χαμηλό κόστος συντήρησης.
- Να έχουν ένα αποδεκτό εύρος πιέσεων [17,6].

Παραδείγματα οργανικών ρευστών για τον ORC είναι:

- τα CFCs (πχ R-11, R-12), τα οποία απαγορεύτηκαν από τη συνθήκη του Μόντρεαλ λόγω της επίπτωσής τους στο όζον της στρατόσφαιρας
- τα HCFCs (πχ R-22, R-123), που καταργούνται σταδιακά λόγω της τροποποίησης της Κοπεγχάγης στο Πρωτόκολλο του Μόντρεαλ
- τα HFCs (πχ R134a, R245fa)
- τα HCs που είναι υποπροϊόντα της επεξεργασίας φυσικού αερίου, όπως ισοβουτάνιο, πεντάνιο, προπάνιο κλπ
- τα PFCs (φθοράνθρακες) [17].

6.3 Κύκλος Kalina (Ηλεκτροπαραγωγή σε δυαδικό σύστημα)

Ο κύκλος Kalina πήρε το όνομά του από τον άνθρωπο που τον εφηύρε το 1983, τον Δρ. Alexander Kalina. Είναι ένας θερμοδυναμικός κύκλος ο οποίος μετατρέπει τη θερμική ενέργεια σε μηχανική ενέργεια και τελικά σε ηλεκτρισμό. Ο κύκλος αυτός χρησιμοποιεί σαν εργαζόμενο μέσο ένα μίγμα δύο συστατικών με διαφορετικά σημεία βρασμού, κυρίως αμμωνίας και νερού. Έτσι, επειδή το μίγμα βράζει σε ένα εύρος θερμοκρασιών, μπορεί να απορροφηθεί περισσότερη θερμότητα από την πηγή (πχ γεωθερμικό ρευστό) σε σύγκριση με την περίπτωση του ενός ρευστού [18]. Το ίδιο συμβαίνει και στη συμπύκνωση. Ο λόγος των δύο συστατικών ποικίλλει σε κάθε τμήμα του κύκλου ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη αποδοτικότητά του. Η λειτουργία του κύκλου βελτιστοποιείται όταν γίνεται χρήση πηγών θερμότητας σχετικά χαμηλής θερμοκρασίας, όπως είναι τα γεωθερμικά ρευστά χαμηλής ενθαλπίας [19]. Άλλες εφαρμογές του κύκλου αποτελούν η εκμετάλλευση της αποβαλλόμενης θερμότητας από βιομηχανίες και της ηλιακής ενέργειας [18].

Η πιο απλή μορφή του κύκλου Kalina παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.4.

7 Υβριδικά συστήματα ηλεκτροπαραγωγής

Στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας επιλέχθηκαν οι δύο παραπάνω περιγραφόμενοι κύκλοι (Rankine και Brayton) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα, το υβριδικό σύστημα που προκύπτει περιλαμβάνει την ενίσχυση ενός τυπικού γεωθερμικού δυαδικού κύκλου (Rankine) με την καύση φυσικού αερίου (Brayton).

Γενικά, η επιλογή του υβριδικού συστήματος γίνεται εξαιτίας της δυσκολίας εκμετάλλευσης της καθαρής γεωθερμικής ενέργειας με οικονομικό τρόπο. Αποτέλεσμα αυτού είναι η μεγαλύτερη δυνατή αξιοποίηση γεωθερμικών πόρων χαμηλών θερμοκρασιών, η μείωση της πιθανότητας αποτυχίας και η ελκυστικότητα για ιδιωτικές επενδύσεις. Σε αντίθεση με τα παλαιότερα υβριδικά συστήματα που αρκόντουσαν στη χρήση των γεωθερμικών πόρων για την προθέρμανση των εργαζόμενων ρευστών σε εγκαταστάσεις με συμβατικά καύσιμα έχουν προταθεί μέχρι σήμερα στην αγορά διάφοροι τύποι υβριδικών συστημάτων, με κυρίαρχο σύστημα το γεωθερμικό και τη συμβολή ενός οποιουδήποτε καυσίμου ανανεώσιμου ή μη όπως:

- Βιομάζα
- Ηλιακή ενέργεια
- Φυσικό αέριο
- Απορριπτόμενη θερμότητα [20,21]

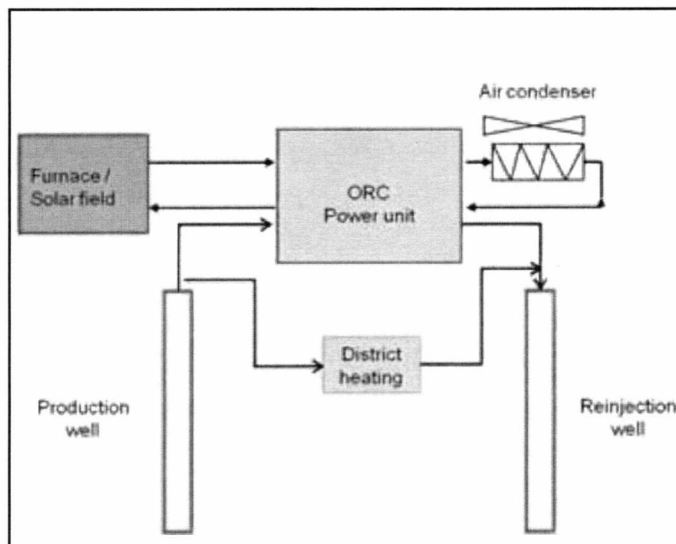
Ένα απλουστευμένο διαγραμμα υβριδικού γεωθερμικού συστήματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.1.

Ένα ακόμη πλεονέκτημα του οποίου χαίρει αυτή η πρόταση είναι η μικρότερη εξάρτηση από τη θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού καθώς η κρίσιμη θερμοκρασία του κύκλου (πριν από την εκτόνωση) καθορίζεται από το δευτερεύον καύσιμο [21].

7.1 Βιομάζα

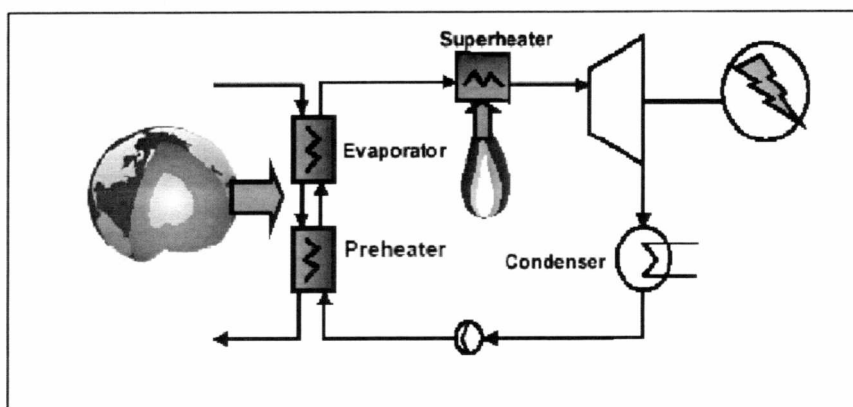
Στην περίπτωση της βιομάζας η αρχική προθέρμανση του εργαζόμενου ρευστού επιτυγχάνεται χάρη στο γεωθερμικό ρευστό μέσα από έναν εναλλάκτη θερμότητας και η εξάτμιση (υπερθέρμανση) γίνεται ανάλογα μέσω ατμού από το λέβητα βιομάζας. Το εργαζόμενο ρευστό τροφοδοτεί την τουρμπίνα που είναι συνδεδεμένη με μια γεννήτρια και

παράγει την ενέργεια. Το εξατμιζόμενο ρευστό εργασίας μεταφέρεται σε ένα συμπυκνωτή για ψύξη.



Σχήμα 7.1 Σχηματικό διάγραμμα υβριδικού γεωθερμικού συστήματος [20]

Επιπλέον, οι Kohl και Speck παρουσίασαν ένα σύστημα στο οποίο επιτυγχάνεται η μεταφορά ενέργειας με χρήση τριών εναλλακτών θερμότητας: έναν προθερμαντήρα, έναν εξατμιστήρα και έναν υπερθερμαντήρα. Για τους δύο εναλλάκτες θερμότητας η πηγή ενέργειας είναι η γεωθερμική, ενώ για το τελευταίο η βιομάζα. Σαν εργαζόμενα ρευστά μπορούν να χρησιμοποιηθούν το εξάνιο, το ισοβουτάνιο κ.α.. Η βιομάζα δε χρησιμοποιείται ωστόσο μόνο για την υπερθέρμανση του οργανικού αλλά και για την ξεχωριστή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με στόχο την κάλυψη των αιχμών ζήτησης.



Σχήμα 7.2 Υβριδικό Σύστημα Γεωθερμίας-βιομάζας [21]

Στην Αυστρία, στην περιοχή του Neukirchen an der Vöckla μια συνδυασμένη χρήση της γεωθερμίας και βιομάζας λειτουργεί από το 2012.

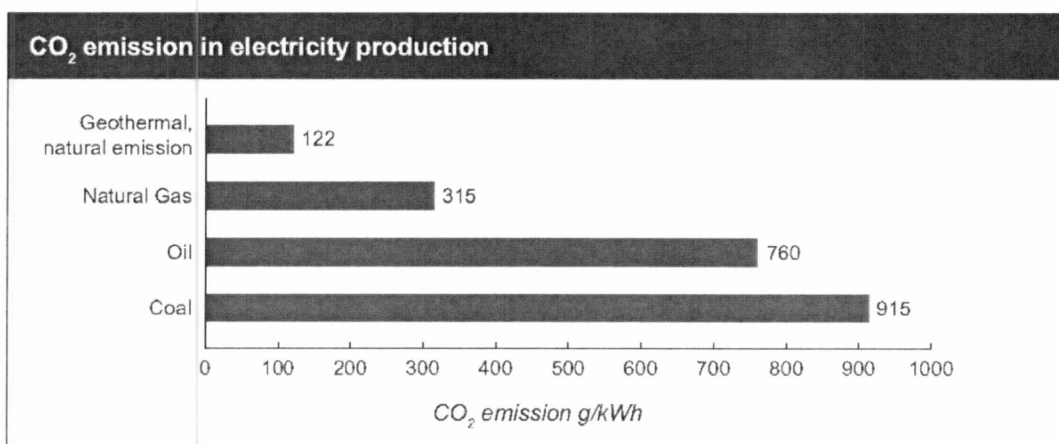
Είναι θετικό το γεγονός ότι η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από αυτό το συνδυασμό είναι 100% ανανεώσιμη. Το κόστος της βιομάζας, που ανέρχεται σε υψηλά επίπεδα όταν είναι το μόνο καύσιμο, μετριάζεται από τη συμπαραγωγή [20].

7.2 Απορριπτόμενη θερμότητα

Η απορριπτόμενη θερμότητα είναι η ενέργεια που απελευθερώνεται από ένα σύστημα (μηχάνημα, εγκατάσταση κ.α.) όχι στοχευμένα αλλά ως παραπροϊόν όπως για παράδειγμα η θερμότητα συμπύκνωσης ή η λανθάνουσα θερμότητα καυσαερίων σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Ανάλογα με τις ιδιότητες των παραπροϊόντων υπάγονται σε διάφορες κατηγορίες με την πιο μελετημένη να είναι η μετατροπή της απορριπτόμενης θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας σε ηλεκτρική ενέργεια με χρήση του κύκλου Rankine, Kalina κ.α. Μια επιπλέον χρήση της είναι η επανέγχυση για επαναφόρτιση της γεωθερμικής πηγής [20].

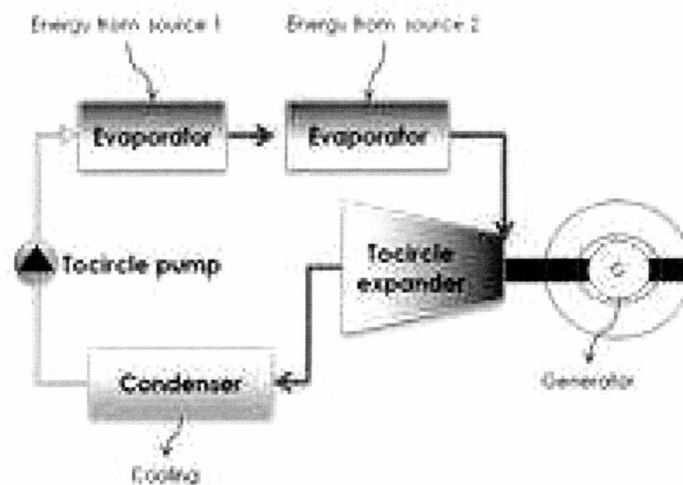
7.3 Φυσικό αέριο

Όσον αφορά τις εκπομπές του CO₂ και άλλων αερίων η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το υβριδικό σύστημα γεωθερμίας και φυσικού αερίου είναι από τους πλέον αποδοτικούς συνδυασμούς [20].



Σχήμα 7.3 Εκπομπές CO₂ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [20]

Παρόλο που υπάρχουν πολλοί τρόποι για να εκτελεστεί αυτός ο συνδυασμός σήμερα δεν υπάρχουν σε λειτουργία πολλές τέτοιες υβριδικές μονάδες. Οι εναλλακτικές λύσεις είναι είτε η υπερθέρμανση του οργανικού ρευστού από τα παραγόμενα καυσαέρια της καύσης του φυσικού αερίου σε ORC είτε η ταυτόχρονη παραγωγή ενέργειας σε κύκλο Brayton και θέρμανση του οργανικού [20].



Σχήμα 7.4 Υβριδικό Σύστημα Γεωθερμίας-Φυσικού Αερίου [20]

7.4 Ηλιακή ενέργεια

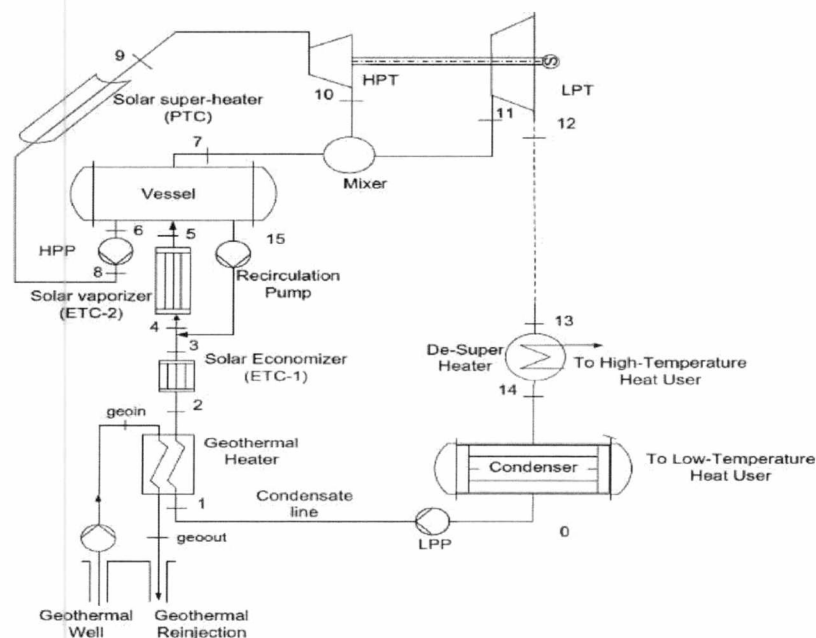
Η γεωγραφική θέση, το κλίμα και οι τοπικές συνθήκες είναι οι πιο σημαντικοί παράγοντες που καθορίζουν τις δυνατότητες εφαρμογής της ηλιακής ενέργειας και άλλων ανανεώσιμων πηγών και των μεθόδων μετατροπής της ενέργειας. Όμως ακόμα και οι περιοχές που δεν πληρούν τα κριτήρια για εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας όπως το μεγαλύτερο μέρος της Ευρώπης έχουν την εναλλακτική της εισαγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ηλιακά συστήματα από χώρες της Μέσης Ανατολής και της Βόρειας Αφρικής. Σε όλα τα ηλιακά συστήματα, οι ηλιακοί συλλέκτες αποτελούν το κύριο στοιχείο κόστους, αντιπροσωπεύοντας περίπου το 80% του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό σε συνδυασμό με τη μειωμένη απόδοση των ηλιακών συστημάτων είναι το κίνητρο για έρευνα πάνω σε υβριδικά συστήματα που συνδυάζουν την ηλιακή ενέργεια με τη γεωθερμική πόρων χαμηλής θερμοκρασίας. Συγκεκριμένα παρατίθενται τέσσερις προτεινόμενοι συνδυασμοί [22,20].

1. Υβριδικό-γεωθερμικό με ηλιακούς συλλέκτες σωλήνων κενού (ETCS)

2. Υβριδικό- γεωθερμικό με ηλιακούς συλλέκτες σωλήνων κενού και παραβολικά κάτοπτρα (ETCS & PTCS)
3. Υβριδικό-γεωθερμικό με ηλιακή καμινάδα (Hybrid Geothermal / Solar Chimney Power Plant)
4. Υβριδικό-γεωθερμικό με φωτοβολταϊκά και ηλιακή καμινάδα (Hybrid Geothermal / PV / Solar Chimney Power Plant) [22,20].

7.4.1 Ηλιακό-γεωθερμικό υβριδικό σύστημα βασισμένο σε ORC(Solar-geothermal hybrid plant based on an ORC)

Οι Lentz και Almanza πρότειναν το 2006 έναν συνδυασμό ηλιακής και γεωθερμικής ενέργειας, ο οποίος βασίζεται σε κύκλο μιας εκτόνωσης ή διπλής εκτόνωσης διαφασικού ρευστού (single or double flash). Συγκεκριμένα, από το διαφασικό μίγμα του γεωθερμικού ρευστού το υγρό εξατμίζεται όταν διέρχεται από τους ηλιακούς συλλέκτες (Direct Steam Generation – DSG) και στη συνέχεια ο παραγόμενος ατμός εκτονώνεται στην τουρμπίνα για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μαζί με τον ατμό που προέρχεται από το διαχωριστή. Όμως, αυτή η πρόταση δημιουργεί ένα σημαντικό πρόβλημα στους ηλιακούς συλλέκτες, καθώς το γεωθερμικό ρευστό που ρέει στις σωληνώσεις τους είναι πλούσιο σε επικίνδυνα συστατικά, όπως CO_2 , H_2S , SO_2 , HCl , NH_3 [20].



Σχήμα 7.5 Υβριδικό Σύστημα Γεωθερμίας και Ηλιακής ενέργειας βασισμένο σε ORC [20]

Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα προτάθηκε η χρήση του οργανικού κύκλου Rankine, όπου αντί για το επικίνδυνο γεωθερμικό ρευστό ένα οργανικό ρευστό θα προθερμαίνεται από το γεωθερμικό χαμηλής θερμοκρασίας και στη συνέχεια θα παραλαμβάνει θερμότητα από τους ηλιακούς συλλέκτες μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας.

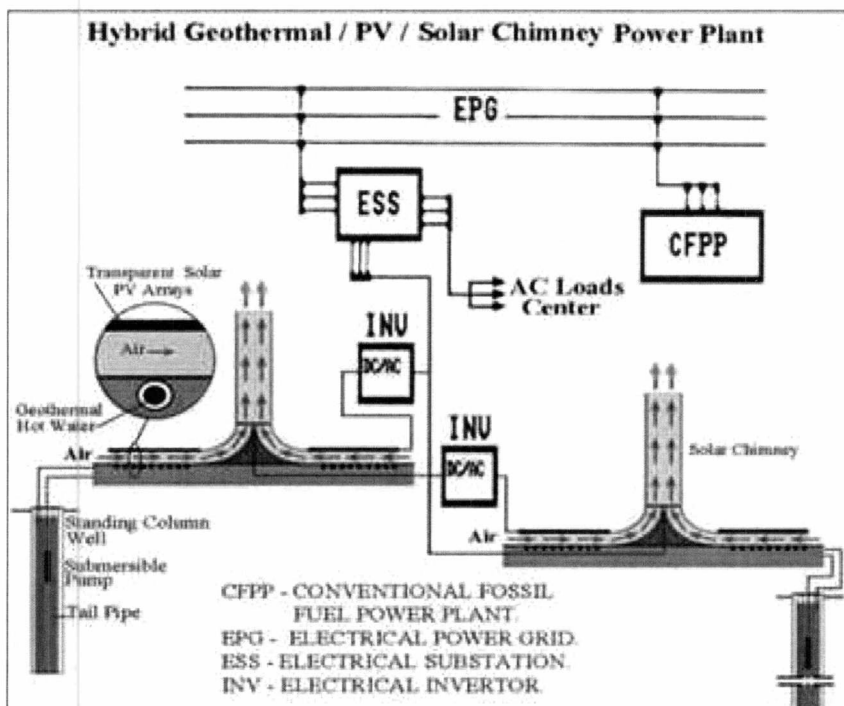
Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν παραπάνω από ένας τρόποι εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας στον ίδιο κύκλο. Μία πρόταση είναι το οργανικό ρευστό να θερμαίνεται πρώτα από ηλιακούς συλλέκτες σωλήνων κενού (ETCs) και στη συνέχεια από σύστημα παραβολικών κατόπτρων (PTCs) [20].

7.4.2 Υβριδικό-γεωθερμικό με φωτοβολταϊκά και ηλιακή καμινάδα (Hybrid Geothermal / PV / Solar Chimney Power Plant - GPVSCP)

Το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ηλιακή καμινάδα (Solar chimney power plant – S CPP) είναι ένας εναλλακτικός τρόπος για εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας (Σχήμα 7.6). Ο ήλιος θερμαίνει τον αέρα που βρίσκεται κάτω από μια μεγάλη γυάλινη ή πλαστική στέγη-συλλέκτη και ο θερμός αέρας ρέει προς τα πάνω σε μια καμινάδα που είναι τοποθετημένη στο κέντρο του συλλέκτη. Αυτό το συνεχές ρεύμα αέρα που δημιουργείται από την ηλιακή ακτινοβολία μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια σε μια ανεμογεννήτρια στη βάση της καμινάδας. Πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας είναι ότι δεν απαιτεί νερό ψύξης και ότι μπορεί να λειτουργήσει και με συννεφιά λόγω της διάχυσης της ακτινοβολίας στη γυάλινη στέγη, η οποία επίσης θερμαίνει τον αέρα. Επιπλέον, θερμότητα μπορεί να αποθηκεύεται στο έδαφος κάτω από το συλλέκτη, εξασφαλίζοντας έτσι αξιόπιστη παραγωγή [22].

Για τη μείωση του κόστους και την αύξηση της ανταγωνιστικότητας σε σχέση με τα συμβατικά εργοστάσια παραγωγής ενέργειας, αλλά και την επίτευξη της λειτουργίας του S CPP όλο το 24ωρο είναι απαραίτητος ο συνδυασμός με μια άλλη πηγή ενέργειας, όπως η γεωθερμική. Στο υβριδικό γεωθερμικό σύστημα με ηλιακή καμινάδα (Geothermal /Solar Chimney power Plant- GSCP) ο αέρας μπορεί να θερμαίνεται από την ηλιακή ακτινοβολία κατά τις περιόδους ηλιοφάνειας και κατά τη διάρκεια της νύχτας ή όταν υπάρχει συννεφιά είτε αποκλειστικά από το γεωθερμικό ρευστό που ρέει σε σωλήνες από κάτω είτε από το συνδυασμό τους. Η θέρμανση από το συνδυασμό ηλιακής –γεωθερμικής ενέργειας εκμεταλλεύεται πλήρως τα πλεονεκτήματα του υβριδικού συστήματος. Έτσι, λόγω της ευελιξίας του το GSCP προσφέρει τη δυνατότητα λειτουργίας του εργοστασίου ανάλογα με

τη ζήτηση σε ενέργεια αλλά και φωτίζει το δρόμο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αποκλειστικά από ανανεώσιμες πηγές [22].



Σχήμα 7.6 Φωτοβολταϊκά και λειτουργία της Ηλιακής Καμινάδας [22]

Τέλος, μια ακόμη βελτίωση της απόδοσης του παραπάνω συστήματος αποτελεί η προσθήκη φωτοβολταϊκών. Η θερμική ενέργεια που απορροφάται από τα φωτοβολταϊκά μπορεί να θερμάνει και αυτή τον αέρα κάτω από τη στέγη-συλλέκτη. Είναι γεγονός ότι η θερμική ενέργεια που μπορεί να παράγει μια διάταξη φωτοβολταϊκών είναι σχεδόν τετραπλάσια από την αντίστοιχη ηλεκτρική. Επομένως, με την προσθήκη των φωτοβολταϊκών στο υβριδικό σύστημα αυξάνεται η απόδοσή του και μπορεί να επιτευχθεί ακόμη μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας [22].

8 Υβριδικό σύστημα γεωθερμίας χαμηλής ενθαλπίας και φυσικού αερίου

8.1 Προτεινόμενη τοποθεσία στο Αρίστηνο Αλεξανδρούπολης

Η εργασία θα επικεντρωθεί στο γεωθερμικό πεδίο του Αρίστηνου. Η περιοχή αυτή βρίσκεται ανατολικά της Αλεξανδρούπολης και δυτικά της τριτογενούς λεκάνης του Έβρου και χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα έντονη τεκτονική με σημαντική ανάπτυξη Τριτογενούς ηφαιστειότητας. Τα ρευστά που φιλοξενεί το πεδίο είναι στην υγρή φάση, έχουν θερμοκρασία 30-95° C και εκτείνονται σε απόσταση 14 χιλιομέτρων ανατολικά της Αλεξανδρούπολης και 1 χιλιόμετρο βορειοανατολικά του οικισμού Αρίστηνου.

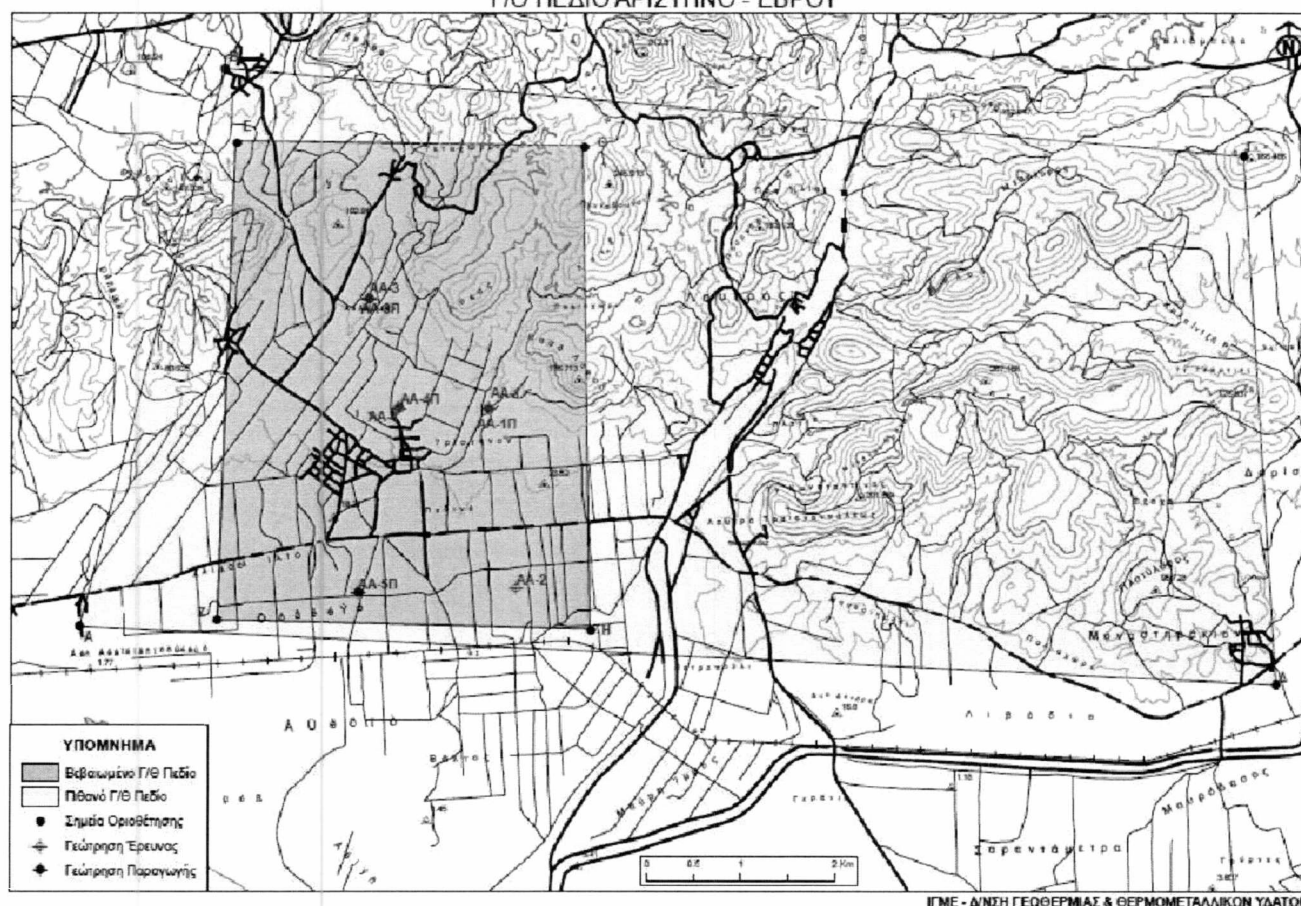
Από την έρευνα που διεξήχθη συμπεράνε ότι το πιθανό γεωθερμικό πεδίο εκτείνεται στα 50 km² (Σχήμα 8.1). Από αυτά το βεβαιωμένο γεωθερμικό πεδίο έχει έκταση 20 km², θερμοκρασία 30-90° C και βάθος ταμιευτήρα 150-450 m. Η παροχή του ρευστού ανέρχεται στα 200 m³/h και η χημική σύσταση παρατίθεται στον Πίνακα 2, ενώ η περιεκτικότητα σε ραδιενεργά στοιχεία είναι μηδενική [23]. Από τις χημικές αναλύσεις φαίνεται ότι δεν υπάρχει περιεκτικότητα σε σίδηρο, διοξείδιο του άνθρακα, υδρόθειο, υδρογόνο και άζωτο, γεγονός που κάνει πιο ελκυστική την επιλογή αυτού του πεδίου.

Στους Πίνακες 3-5 δίνονται οι συντεταγμένες του βεβαιωμένου και του πιθανού γεωθερμικού πεδίου στο Αρίστηνο καθώς και χαρακτηριστικά των υπαρχόντων γεωτρήσεων.

Πίνακας 2 Χημική ανάλυση δειγμάτων νερού γεωτρήσεων στο Αρίστηνο [23]

" ΧΗΜΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΝΕΡΟΥ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΑΡΙΣΤΗΝΟ (mg/l) "																
Δείγμα	Αγ/τητα σε μS/cm	pH	T.D.S	Ca	Mg	Na	K	CO3	HCO3	Cl	SO4	SiO2	Al	B	Fe	F
Γεώτρηση ΑΑ 1Π	12200	7,72	9582,06	340,7	24,3	2000	100		124,4	4255,5	235,5	64,2		7		4,4
Γεώτρηση ΑΑ 3Π	15170	7,58	10530,57	517,03	12,15	3400	104		84,18	5655,9	750	23,54		0,4		1,86
Γεώτρηση ΑΑ 4Πεξ	14440	7,91	9728,42	391,68	14,58	3300	30		69,54	5212,6	710	28,3		8,8		1,99
Γεώτρηση ΑΑ 4Πεξ	13530	8,11	10235,34	529,06	24,3	3200	152		219,6	5425,4	685	47,1		6,5		3
Γεώτρηση ΑΑ 5Π	11620	7,95	7618,21	334,27	10,21	2500	100		211,06	3836,8	625	27,6		9,4		

Γ/Θ ΠΕΔΙΟ ΑΡΙΣΤΗΝΟ - ΕΒΡΟΥ



Σχήμα 8.1 Το βεβαιωμένο και το πιθανό γεωθερμικό πεδίο του Αρίστηνου [23]

Πίνακας 3 Οριοθέτηση βεβαιωμένου γεωθερμικού πεδίου στο Αρίστηνο [23]

ΚΟΡΥΦΗ ΠΟΛΥΓΩΝΟΥ	ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ (ΕΓΣΑ87)	
	X	Y
Ε	666426,37	4529482,00
Z	666217,53	4524356,01
Η	670223,39	4524242,10
Θ	670147,45	4529425,04

Πίνακας 4 Οριοθέτηση πιθανού γεωθερμικού πεδίου στο Αρίστηνο [23]

ΚΟΡΥΦΗ ΠΟΛΥΓΩΝΟΥ	ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ (ΕΓΣΑ87)	
	Χ	Υ
Α	664749,11	4524286,94
Β	666298,95	4530277,11
Γ	677196,29	4529331,62
Δ	677547,82	4523658,70

Πίνακας 5 Ερευνητικές και παραγωγικές γεωτρήσεις πεδίου Αρίστηνου [23]

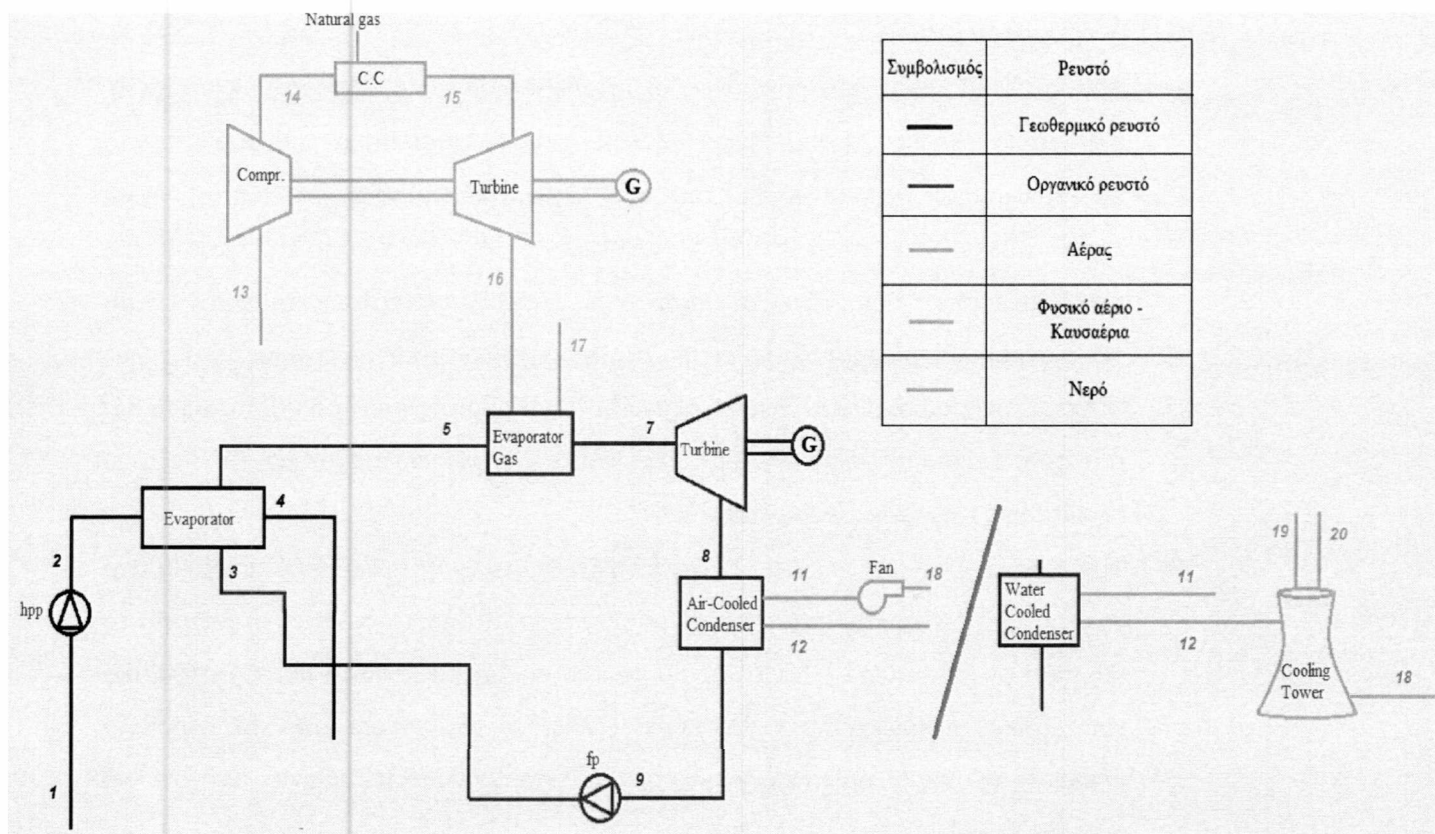
ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ (ΕΓΣΑ87)		Υψόμετρο σε μ. (υ.ε.θ.)	Είδος γεωτρ.
	Χ	Υ		
ΑΑ-1	669124,35	4526631,35	30,08	Ερευνητική
ΑΑ-1Π	669124,35	4526631,35	30,08	Παραγωγική
ΑΑ-2	669421,07	4524705,53	9,46	Ερευνητική
ΑΑ-3	667848,15	4527815,32	44,64	Ερευνητική
ΑΑ-3Π	667849,46	4527802,33	44,50	Παραγωγική
ΑΑ-4	668152,42	4526631,31	23,91	Ερευνητική
ΑΑ-4Π	668168,07	4526638,70	24,26	Παραγωγική
ΑΑ-5Π	667732,90	4524648,66	7,03	Παραγωγική

Η επιλογή της τοποθεσίας του παραπάνω πεδίου έγινε προκειμένου να συνδυαστεί η στρατηγική θέση με το γεωθερμικό ρευστό χαμηλής ενθαλπίας (90° C). Ο όρος στρατηγική θέση αναφέρεται στην εκμετάλλευση τόσο της μικρής απόστασης του εργοστασίου από τον αγωγό φυσικού αερίου Τουρκίας-Ελλάδας όσο και του ποταμού Έβρου, τα νερά του οποίου συντελούν στην ψύξη του υβριδικού συστήματος. Το πλεονέκτημα της χαμηλής θερμοκρασίας είναι η έλλειψη θορύβου κατά τη λειτουργία του συστήματος.

8.2 Περιγραφή του υβριδικού συστήματος

Το υβριδικό σύστημα που μοντελοποιήθηκε περιλαμβάνει τρία κυκλώματα ρευστών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.2. Θερμότητα μεταφέρεται από το κύκλωμα του γεωθερμικού ρευστού και τον κύκλο Brayton του φυσικού αερίου στο κύκλωμα του οργανικού ρευστού,

μέσω συστήματος εναλλακτών θερμότητας. Το γεωθερμικό ρευστό αντλείται από γεωτρήσεις και αφού εξέλθει από το κύκλωμα των εναλλακτών θερμότητας επιστρέφει στο γεωθερμικό πεδίο. Οι κυριότερες συσκευές του υβριδικού συστήματος δίνονται στον Πίνακα 6.



Σχήμα 8.2 Γεωθερμικό Σύστημα με καύση φυσικού αερίου

Πίνακας 6 Συσκευές που περιλαμβάνει το υβριδικό σύστημα

Compressor	Συμπιεστής ατμοσφαιρικού αέρα
Combustion Chamber	Θάλαμος καύσης
Turbine 15-16	Στρόβιλος εκτόνωσης καυσαερίων
Generator	Γεννήτρια
Hpp	High pressure pump-Αντλία υψηλής πίεσης
Evaporator	Εξατμιστήρας-εναλλάκτης γεωθερμικού-οργανικού
Evaporator Gas	Εξατμιστήρας-εναλλάκτης καυσαερίου-οργανικού
Turbine 7-8	Στρόβιλος αποτόνωσης του οργανικού
Air-Cooled Condenser	Αερόψυκτος συμπυκνωτής
Fan	Ανεμιστήρας
Fp	Feed pump αντλία τροφοδοσίας
Water Cooled Condenser	Υδρόψυκτος συμπυκνωτής
Cooling Tower	Πύργος ψύξης

Το σύστημα προς μελέτη περιλαμβάνει:

- Το κύκλωμα του γεωθερμικού ρευστού (θέσεις 1-2-4): ξεκινά με την είσοδο του γεωθερμικού ρευστού από τη γεώτρηση και καταλήγει, μετά τη θερμική εκμετάλλευση μέσω εναλλάκτη, στην επιστροφή του γεωθερμικού νερού στον φυσικό ταμιευτήρα.
- Τον κύκλο Rankine του οργανικού ρευστού (ισοβουτάνιο, κ-βουτάνιο, κ-εξάνιο, κ-πεντάνιο) (θέσεις 7-8-9-3-5): το οργανικό ρευστό παραλαμβάνει θερμότητα από το γεωθερμικό ρευστό μέσω του εναλλάκτη (εξατμιστήρας). Στη συνέχεια παραλαμβάνει θερμότητα μέσω ενός εναλλάκτη από τα προϊόντα της καύσης του φυσικού αερίου, μεταβαίνει σε κατάσταση υπέρθερμου ατμού και εκτονώνεται στον στρόβιλο, με αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, και τέλος ψύχεται στο συμπυκνωτή. Στην περίπτωση του ισοβουτανίου, του κ-βουτανίου και του κ-πεντανίου η ψύξη έγινε με αερόψυκτο συμπυκνωτή ενώ για το κ-εξάνιο εξετάστηκε η χρήση του πύργου ψύξης.
- Τον κύκλο Brayton (θέσεις 13-14-15-16-17) με χρήση φυσικού αερίου: στο θάλαμο καύσης ο ατμοσφαιρικός αέρας εισέρχεται από το συμπιεστή μαζί με το καύσιμο (φυσικό αέριο) και τα προϊόντα της καύσης εκτονώνονται στο στρόβιλο για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος, τα καυσαέρια από το στρόβιλο υπερθερμαίνουν το οργανικό ρευστό μέσω ενός εναλλάκτη πριν να αποτονωθεί στο στρόβιλο.

8.3 Μεταβλητές απόφασης-παράμετροι-υποθέσεις

Μεταβλητές απόφασης ορίζονται εκείνες που είναι κρίσιμες για τη βελτιστοποίηση του συστήματος. Στο υβριδικό σύστημα που εξετάζεται επιλέχθηκαν για αυτό το σκοπό α) η θερμοκρασία του οργανικού ρευστού στην κατάσταση 3 (T_3) δηλαδή στην είσοδο του προθερμαντήρα. Τα όρια για τη μεταβλητή T_3 ορίστηκαν ώστε το ρευστό να είναι συμπιεσμένο (ποιότητα =0). β) η θερμοκρασία του οργανικού ρευστού στην κατάσταση 5 (T_5) δηλαδή στην έξοδο του προθερμαντήρα η οποία εκφράζει το αποτέλεσμα της εκμετάλλευσης της γεωθερμικής ενέργειας. γ) το έργο του στρόβιλου του κύκλου Rankine W_t , ώστε να εξασφαλιστεί η παραγωγή 1000 και άνω KW. Εναλλακτικά αντί για το έργο του στρόβιλου μπορεί να οριστεί ως μεταβλητή απόφασης η θερμοκρασία T_8 που αντιπροσωπεύει την έξοδο του στρόβιλου και κατά συνέπεια επηρεάζει το παραγόμενο έργο.

Παράμετροι είναι οι μεταβλητές που θεωρήθηκε ότι έχουν σταθερή τιμή. Οι παράμετροι της ενεργειακής ανάλυσης του υβριδικού συστήματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.

Πίνακας 7 Παράμετροι της ενεργειακής ανάλυσης του υβριδικού συστήματος

m_{orc}	15 kg/sec
V_{geo}	200 m ³ /hr
ρ_{geo}	1000 kg/m ³
P_{14}/P_{13}	5
P_{15}/P_{16}	5
T_{13}	298 K
P_{13}	1 bar
$n_{is,c}$	0,85
$n_{is,at}$	0,85
n_{thk}	0,8
l	1,1
L_{min}	17,16 A/F

$C_{p,air}$	1,005 kJ/kg K
LHV	46000 kJ/kg
P_{17}	1 bar
T_{17}	350 K
T_1	363 K
P_1	2,5 bar
P_2/P_1	10
T_{11}	288 K
P_{11}	1 bar
P_{12}	1 bar
P_4	22 bar
η_{pump}	0,85

Λοιπές παράμετροι	ισοβουτάνιο	κ-βουτάνιο	κ-πεντάνιο	κ-εξάνιο
T_5	335	335	360	380
P_5	11	12	11	13
T_7	450	420	400	450
P_7	10	11	10	12
P_7/P_8	10	11	10	12
$T_9=T_3$	261	271	280	340
P_3/P_9	13	13	12,5	14
n_m	0,95	0,95	0,99	0,95
T_{12}	297	297	333	372,8
T_{18}	-	-	-	296
T_{19}	-	-	-	288,4
T_{20}	-	-	-	298,4
$P_{18,19,20}$	-	-	-	1

Για τη διεξαγωγή της μοντελοποίησης στο πρόγραμμα EES (Engineering Equation Solver) έγιναν οι εξής υποθέσεις:

- Στο σύστημα Brayton η πίεση στην κατάσταση 15 θεωρήθηκε ίση με την κατάσταση 14. Επιπλέον, ο λόγος πιέσεων του συμπιεστή $P[14]/P[13]$ και του στροβίλου $P[15]/P[16]$ είναι ίσος με 5.
- Τα καυσαέρια ληφθήκαν και αναλύθηκαν ως αέρας.
- Η κατώτερη θερμογόνο δύναμη (LHV) λήφθηκε 46000 kJ/kg, με βάση την τιμή για το φυσικό αέριο Ρωσίας.

- Έγινε η υπόθεση ότι η μηχανική ενέργεια που παράγεται από το στρόβιλο μετατρέπεται εξ ολοκλήρου σε ηλεκτρική (βαθμός απόδοσης ηλ. γεννήτριας 100%).
- Η θερμοκρασία εξόδου από τον εναλλάκτη καυσαερίου οργανικού θεωρήθηκε 350 K. Δε λάβαμε μεγαλύτερη από αυτή την τιμή προκειμένου να έχουμε το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα στη θέρμανση του οργανικού.
- Το γεωθερμικό ρευστό έχει δεδομένα εισόδου 90 °C και 2,5 bar και είναι στην υγρή φάση. Η παροχή του είναι 200 m³/hr και θεωρήθηκε ότι έχει τις ιδιότητες του νερού.
- Η παροχή του οργανικού είναι 15 kg/sec.
- Η κατάσταση 9 (T₉,P₉) λήφθηκε έτσι ώστε το οργανικό να είναι σε κατάσταση συμπιεσμένου υγρού και πολύ κοντά στον κορεσμό πριν την είσοδό του στην αντλία.
- Το γεωθερμικό ρευστό επιστρέφει στον ταμιευτήρα σε πίεση 20 bar και σε θερμοκρασία μικρότερη από την είσοδό του στο σύστημα.
- Το εργαζόμενο μέσο του ORC είναι υπέρθερμος ατμός στην είσοδο και έξοδο του στρόβιλου και συμπιεσμένο υγρό στις υπόλοιπες καταστάσεις.
- Στην περίπτωση του κ-εξανίου δε συνέφερε ο αερόψυκτος συμπυκνωτής διότι η θερμοκρασία του αέρα ήταν πολύ μεγάλη. Προτιμήθηκε ο πύργος ψύξης με τον υδρόψυκτο συμπυκνωτή όπου το νερό είναι στη διάθεση μας λόγω των συνόρων του εργοστασίου με τον Έβρο.
- Ορίστηκε η θερμοκρασία του αέρα στην είσοδο του πύργου ψύξης 15° C και στην έξοδο 25° C. Από τον προσεγγιστικό τύπο της θεωρίας του πύργου ψύξης η θερμοκρασία εξόδου του νερού από τον πύργο είναι ίση με την αντίστοιχη του αέρα στην είσοδο προσαυξημένη κατά 8° C, δηλ. $T_{L,18}=T_{19}+8^{\circ}$ C. Έτσι, προκύπτει ότι $T_{18}=296$ K (23° C).
- Η θερμοκρασία στην κατάσταση 3 είναι ίση με την κατάσταση 9 καθώς θεωρήσαμε αμελητέα την αύξηση στην αντλία.
- Στη ψύξη με υδρόψυκτο συμπυκνωτή θεωρήσαμε μηδενική εξάτμιση και ότι το νερό που φεύγει από τον πύργο ψύξης επιστρέφει στο περιβάλλον.

9 Ενεργειακή ανάλυση του υβριδικού συστήματος

9.1 Κύκλος Brayton

Ο ατμοσφαιρικός αέρας εισέρχεται στον συμπιεστή σε συνθήκες 25°C και 1 bar . Έχοντας αυξηθεί η πίεσή του στην έξοδο στα 5 bar , αναμιγνύεται με το καύσιμο και καίγεται στο θάλαμο καύσης. Τα καυσαέρια εισέρχονται στο στρόβιλο, όπου και αποτονώνονται για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στην έξοδο του στρόβιλου τα καυσαέρια έχοντας υψηλή θερμοκρασία διατίθενται στον εναλλάκτη για υπερθέρμανση του οργανικού ρευστού.

Ο θερμοκός βαθμός απόδοσης του κύκλου Brayton βρίσκεται από τον τύπο [24]:

$$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q},$$

όπου q είναι η ειδική θερμότητα που παράγεται στο θάλαμο καύσης, $q = h[15] - h[14]$ και w_{net} είναι το καθαρό έργο του κύκλου (kJoule), $w_{net} = w_{tg} - w_c$, όπου

$w_{tg} = n_m \cdot (h[15] - h[16])$ είναι το ειδικό έργο του στρόβιλου

$w_c = h[14] - h[13]$ είναι το ειδικό έργο του συμπιεστή και

n_m ο μηχανικός βαθμός απόδοσης.

Εναλλακτικά:

$W_{tg} = n_m \cdot m_A \cdot (h[15] - h[16])$ η ισχύς του στρόβιλου και

$W_c = m_a \cdot (h[14] - h[13])$ η ισχύς του συμπιεστή.

Για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας εξόδου από το συμπιεστή και το στρόβιλο χρησιμοποιήθηκαν οι εξής ισεντροπικές σχέσεις [24]:

$$\frac{T_{14}}{T_{13}} = \left(\frac{P_{14}}{P_{13}} \right)^{\left(\frac{0.4}{1.4 \cdot n_{IS,C}} \right)}$$

$$\frac{T_{15}}{T_{16}} = \left(\frac{P_{15}}{P_{16}} \right)^{\left(\frac{0.4 \cdot n_{IS,στ}}{1.4} \right)},$$

όπου $n_{is,c}$ και $n_{is,at}$ είναι οι ισεντροπικοί βαθμοί απόδοσης των αντίστοιχων διατάξεων.

Η θερμοκρασία των καυσαερίων που εξέρχονται από το θάλαμο καύσης (T_{15}) υπολογίζεται συναρτήσει του βαθμού απόδοσής του, του στοιχειομετρικού λόγου αέρα/καυσίμου, της περίσσειας αέρα και της κατώτερης θερμογόνου δύναμης του φυσικού αερίου από τον τύπο:

$$n_{thk} = 1 - \left((1 + l \cdot L_{min}) \cdot C_p \cdot (T_{15} - T_{14}) \right) / LHV$$

Η παροχή των καυσαερίων m_A υπολογίζεται από τη σχέση του εναλλάκτη

$$m_A \cdot (h[16] - h[17]) = m_{orc} \cdot (h[7] - h[5])$$

και έχοντάς τη δεδομένη βρίσκεται η παροχή του καυσίμου m_b και εν συνεχεία η παροχή του απαραίτητου για την καύση αέρα m_a από τις σχέσεις:

$$m_A = m_b \cdot (1 + l \cdot L_{min}) \quad \text{και} \quad m_a = l \cdot L_{min} \cdot m_b$$

Η θερμότητα που παράγεται στο θάλαμο καύσης (σε kW) προκύπτει από τη σχέση:

$$m_b = \frac{Q_{thk}}{LHV \cdot n_{thk}}$$

Τέλος, η καθαρή ισχύς του συστήματος αεριοστροβίλου (P_{net}) δίνεται από τον τύπο:

$$m_a = \frac{P_{net}}{w_{net}} \quad [24].$$

9.2 Κύκλος Rankine

Όπως προαναφέρθηκε το οργανικό ρευστό υπερθερμαίνεται από τα καυσαέρια του αεριοστροβίλου στον εναλλάκτη και αποτονώνεται στο στρόβιλο του ORC για να

επιτύχει τη ζητούμενη παραγωγή ισχύος των 1300 kW. Η κατάσταση στην έξοδο του στροβίλου προσδιορίζεται από την πίεση $P_8=1$ bar την ενθαλπία h_8 που υπολογίζεται με τη βοήθεια του τύπου:

$$W_t = m_{orc} \cdot (h[7] - h[8])$$

Στην περίπτωση του αερόψυκτου συμπυκνωτή η παροχή του απαιτούμενου αέρα βρίσκεται ως εξής:

$$m_{orc} \cdot (h[8] - h[9]) = m_{air} \cdot (h[12] - h[11])$$

ενώ η παροχή του νερού για τον υδρόψυκτο συμπυκνωτή δίνεται από:

$$m_{orc} \cdot (h[8] - h[9]) = m_{water} \cdot (h[12] - h[11])$$

και η παροχή του αέρα για τον πύργο ψύξης από:

$$m_{water} \cdot 4,18 \cdot (T[12] - 296) = M_{air} \cdot (298,4 - 288,4)$$

Το έργο της αντλίας (feed pump) υπολογίζεται από τη σχέση

$$w_{fp} = \frac{m_{orc} \cdot (P[3] - P[9])}{r_{orc}} \cdot 100 / \eta_{pump}$$

όπου $\eta_{pump}=0,85$ και r_{orc} = μέση πυκνότητα του οργανικού ρευστού [24].

Από το σύστημα εξισώσεων για τον προθερμαντήρα και τον εναλλάκτη προκύπτουν οι ενθαλπίες h_4 του γεωθερμικού

$$m_{geo} \cdot (h[2] - h[4]) = m_{orc} \cdot (h[5] - h[3])$$

όπου m_{geo} η παροχή του γεωθερμικού

$$m_{geo} = \frac{V_{dot,geo} \cdot density_{geo}}{3600}$$

Η ισχύς της high pressure pump βρίσκεται από τον τύπο:

$$w_{hpp} = \left(\frac{m_{geo} \cdot (P[2] - P[1])}{1000} \right) \cdot 100 / n_{pump}$$

και το έργο του ανεμιστήρα (fan), το οποίο τροφοδοτεί τον αερόψυκτο συμπυκνωτή, υπολογίζεται συναρτήσει της ογκομετρικής παροχής του αέρα:

$$W_{fan} = \frac{0,01 \cdot V_{air}}{0,75}$$

όπου 0,01 είναι η πτώση πίεσης ΔP και 0,75 ο βαθμός απόδοσής του.

Τέλος, ο θερμικός βαθμός απόδοσης του κύκλου Rankine δίνεται από τη σχέση:

$$n_{th,orc} = \left(\frac{W_t - w_{fp}}{m_{geo} \cdot (h[2] - h[4]) + m_A \cdot (h[16] - h[17])} \right) \quad [24]$$

9.3 Αποτελέσματα της ενεργειακής ανάλυσης

Οι Πίνακες 8-11 πληροφορούν για τις τιμές των μεταβλητών των τεσσάρων ρευστών σε όλες τους τις καταστάσεις όπως αυτές προέκυψαν από τη μοντελοποίηση στο EES. Ο κάθε πίνακας δίνει την πίεση, τη θερμοκρασία, την ενθαλπία, την εντροπία και την ποιότητα. Η τιμή 100 στην ποιότητα συμβολίζει ότι το ρευστό βρίσκεται στην κατάσταση συμπιεσμένου υγρού ενώ το 100 ότι είναι υπέρθερμος ατμός. Επιπλέον, παρουσιάζονται τα διαγράμματα θερμοκρασίας εντροπίας T-s για τους κύκλους Rankine (τα τέσσερα πρώτα) και Brayton όπως αυτά έγιναν στο EES (Σχήματα 9.1-9.5).

Πίνακας 8 Πίεση, θερμοκρασία, ενθαλπία, εντροπία και ποιότητα για κάθε κατάσταση για το Ισοβουτάνιο

ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	P[i] bar	T[i] K	h[i] kJ/kg	s[i] kJ/kg K	x[i]
[0]	1	278,2			
[1]	2,5	363	376,4	1,191	-100
[2]	25	363	378,2	1,189	-100
[3]	13	261	173,4	0,8933	-100
[4]	22	358,8	360,5	1,141	-100
[5]	11	335	354,7	1,503	-100
[7]	10	450	893,8	2,991	100
[8]	1	405,8	807,2	3,108	100
[9]	1	261	172,4	0,8971	-100
[11]	1	288	288,4	5,664	
[12]	1	297	297,4	5,695	
[13]	1	298	298,4	5,699	
[14]	5	511,9	515,6	5,785	
[15]	5	972,4	1015	6,477	
[16]	1	657,8	668,5	6,509	
[17]	1	350	350,7	5,861	
[18]			285,4	5,654	

Πίνακας 9 Πίεση, θερμοκρασία, ενθαλπία, εντροπία και ποιότητα για κάθε κατάσταση για το κ-πεντάνιο

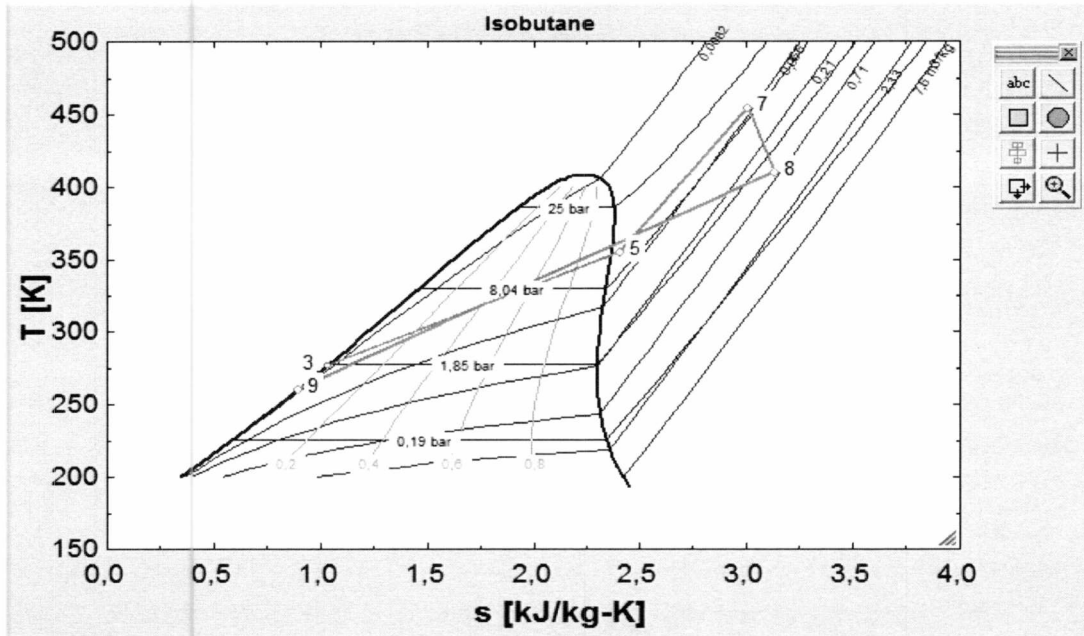
ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	P[i] bar	T[i] K	h[i] kJ/kg	s[i] kJ/kg K	x[i]
[0]	1	278,2			
[1]	2,5	363	376,4	1,191	-100
[2]	25	363	378,2	1,189	-100
[3]	12,5	280	-42,34	-0,1517	-100
[4]	22	355	344,5	1,096	-100
[5]	11	360	151,5	0,4558	-100
[7]	10	400	526,7	1,412	100
[8]	1	341,3	440	1,417	100
[9]	1	280	-43,39	-0,149	-100
[11]	1	288	288,4	5,664	
[12]	1	333	333,6	5,81	
[13]	1	298	298,4	5,699	
[14]	5	511,9	515,6	5,785	
[15]	5	972,4	1015	6,477	
[16]	1	657,8	668,5	6,509	
[17]	1	350	350,7	5,861	
[18]			285,4	5,654	

Πίνακας 10 Πιέση, θερμοκρασία, ενθαλπία, εντροπία και ποιότητα για κάθε κατάσταση για το κ-βουτάνιο

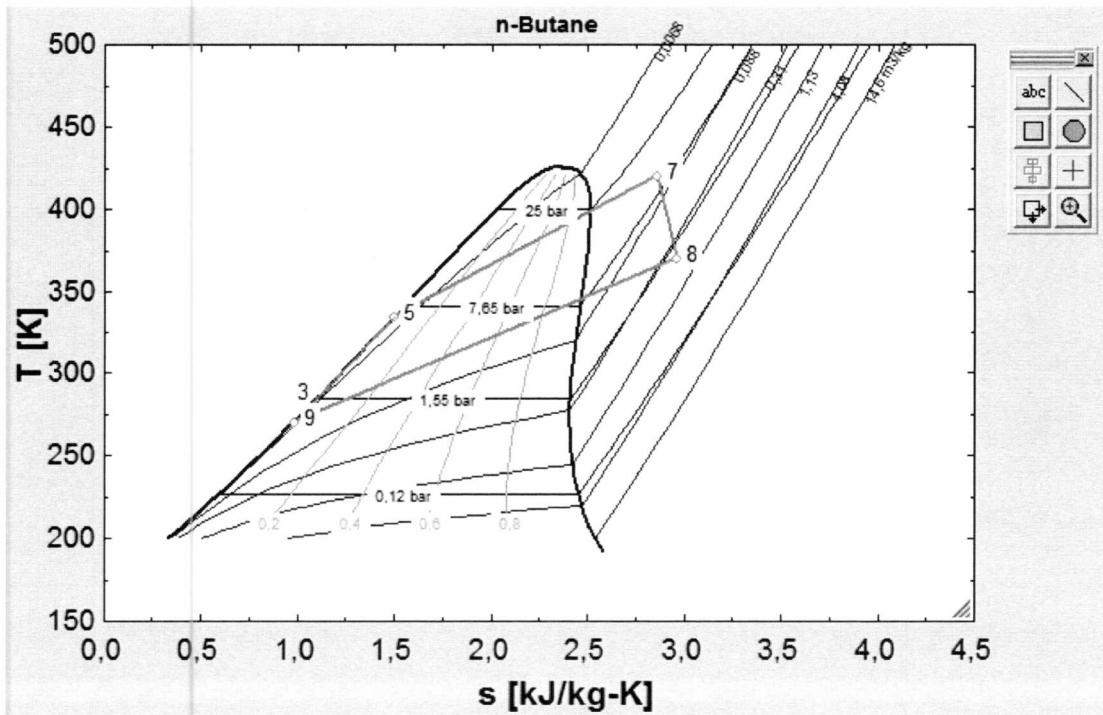
ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	P[i] bar	T[i] K	h[i] kJ/kg	s[i] kJ/kg K	x[i]
[0]	1	278,2			
[1]	2,5	363	376,4	1,191	-100
[2]	25	363	378,2	1,189	-100
[3]	13	271	196,1	0,9784	-100
[4]	22	358,9	360,8	1,142	-100
[5]	12	335	353,5	1,499	-100
[7]	11	420	848,2	2,858	100
[8]	1	369,8	761,5	2,964	100
[9]	1	271	195,1	0,9819	-100
[11]	1	288	288,4	5,664	
[12]	1	297	297,4	5,695	
[13]	1	298	298,4	5,699	
[14]	5	511,9	515,6	5,785	
[15]	5	972,4	1015	6,477	
[16]	1	657,8	668,5	6,509	
[17]	1	350	350,7	5,861	
[18]			285,4	5,654	

Πίνακας 11 Πιέση, θερμοκρασία, ενθαλπία, εντροπία και ποιότητα για κάθε κατάσταση για το κ-εξάνιο

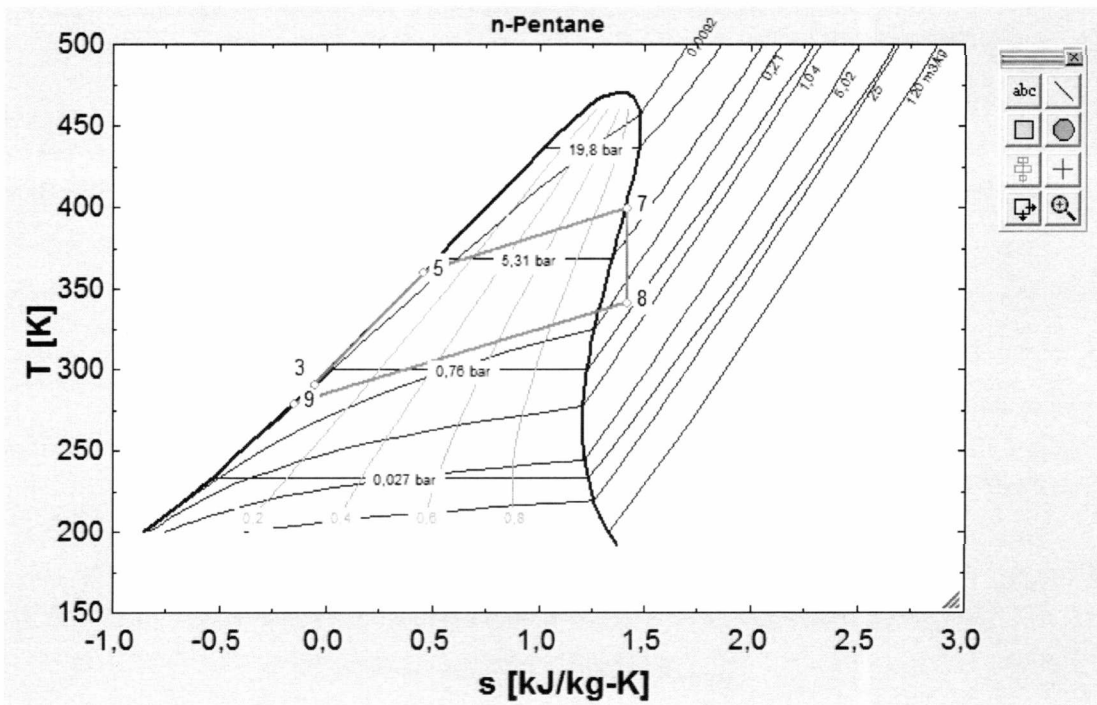
ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	P[i] bar	T[i] K	h[i] kJ/kg	s[i] kJ/kg K	x[i]
[0]	1	278,2			
[1]	2,5	363	376,4	1,191	-100
[2]	25	363	378,2	1,189	-100
[3]	14	340	99,61	0,3062	-100
[4]	22	359,9	364,7	1,153	-100
[5]	13	380	197,6	0,5791	-100
[7]	12	450	620,6	1,556	100
[8]	1	392,2	534	1,563	100
[9]	1	340	98,69	0,3097	-100
[11]	1	288	62,38	0,222	
[12]	1	372,8	2675	7,359	
[13]	1	298	298,4	5,699	
[14]	5	511,9	515,6	5,785	
[15]	5	972,4	1015	6,477	
[16]	1	657,8	668,5	6,509	
[17]	1	350	350,7	5,861	
[18]	1	296	95,85	0,3367	
[19]	1	288,4	288,8	5,666	
[20]	1	298,4	298,8	5,7	



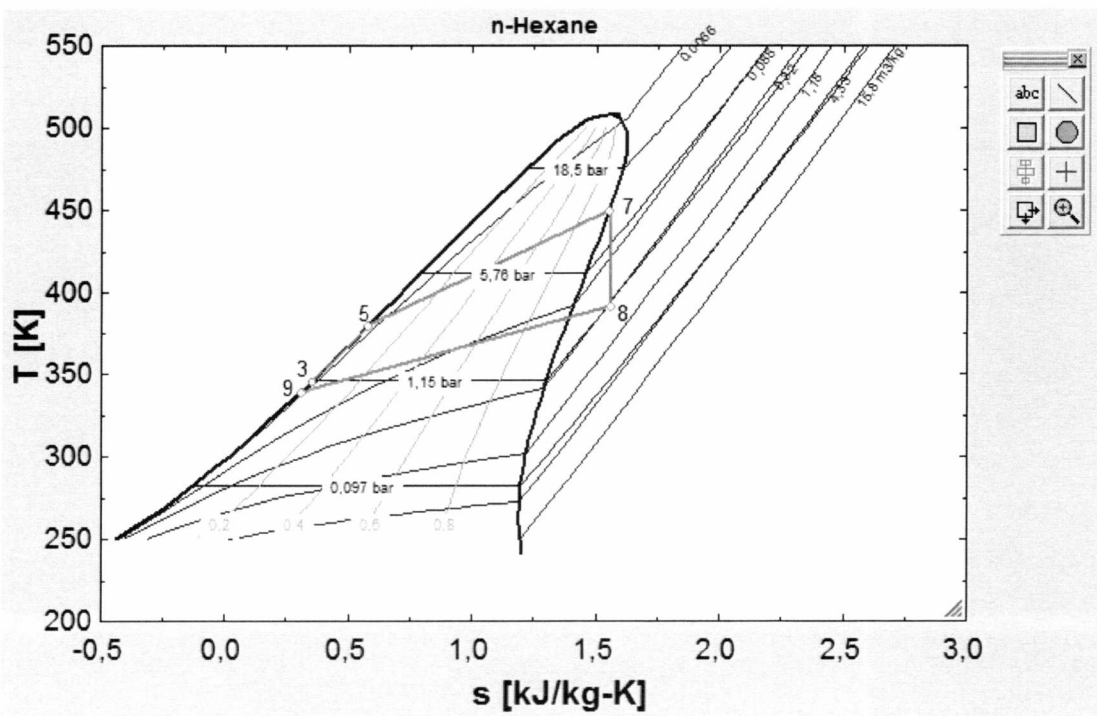
Σχήμα 9.1 Διάγραμμα T-s για το ισοβουτάνιο



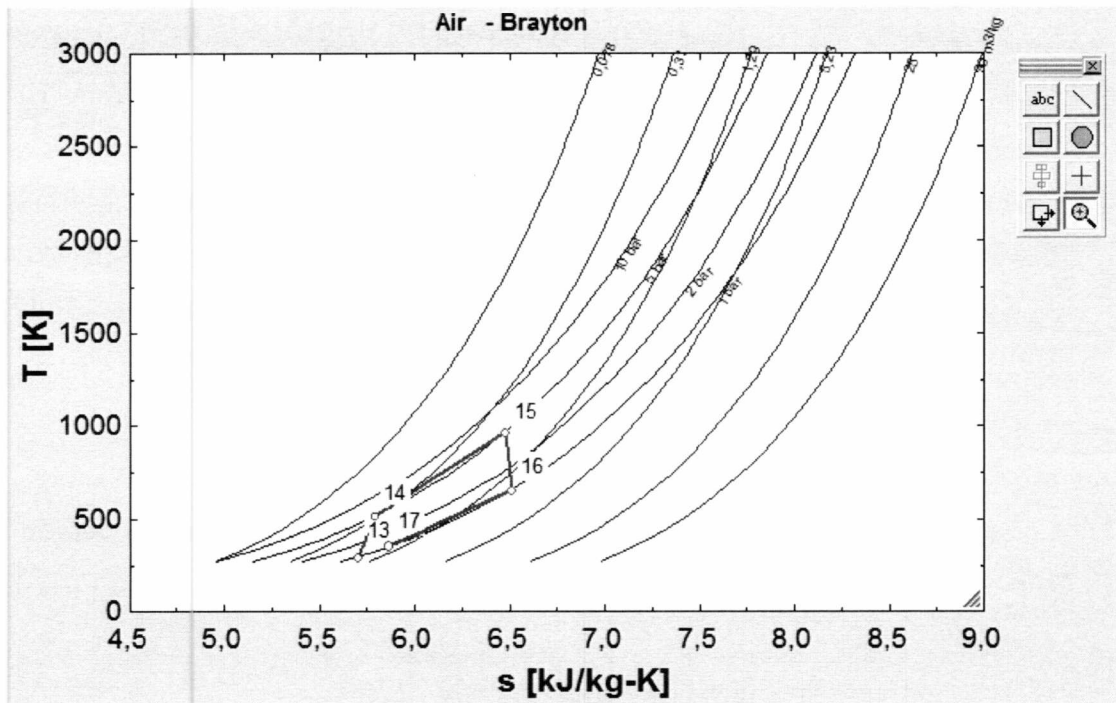
Σχήμα 9.2 Διάγραμμα T-s για το κ-βουτάνιο



Σχήμα 9.3 Διάγραμμα T-s για το κ-πεντάνιο



Σχήμα 9.4 Διάγραμμα T-s για το κ-εξάνιο



Σχήμα 9.5 Διάγραμμα T-s για τον κύκλο Brayton

10 Εξεργειακή ανάλυση του υβριδικού συστήματος

Για την εξεργειακή ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν οι εξής πρότυπες συνθήκες αναφοράς $T(0)=278,15$ K και $P(0)=1$ bar. Στη συνέχεια υπολογίστηκαν με βάση αυτές τις πληροφορίες η εντροπία και η ενθαλπία στις πρότυπες συνθήκες ($h_i[0]$, $s_i[0]$) και η εξέργεια (E_i) σε κάθε κατάσταση σύμφωνα με τον τύπο:

$$E_i = m \cdot (h_i - h_i[0] - T[0] \cdot (s_i - s_i[0]))$$

όπου h_i και s_i η ενθαλπία και εντροπία του ρευστού στην κατάσταση i και m η παροχή του αντίστοιχου ρευστού.

Η εξέργεια του καυσίμου (φ.α.) είναι: $E_b = m_b \cdot LHV$

Ενώ οι ειδικές εξέργειες σε κάθε κατάσταση προκύπτουν από τη διαίρεση της E_i με την παροχή m :

$$e_i = h_i - h_i[0] - T[0] \cdot (s_i - s_i[0])$$

Η απόδοση του πρώτου νόμου δεν αποτελεί ρεαλιστικό μέτρο της λειτουργίας των μηχανολογικών συσκευών. Για να ξεπερασθεί αυτή η δυσκολία, ορίζεται η απόδοση του δεύτερου νόμου, ή εξεργειακός βαθμός απόδοσης, ως ο λόγος της πραγματικής θερμικής απόδοσης προς τη μέγιστη δυνατή (αντιστρεπτή) θερμική απόδοση της μηχανής κάτω από τις ίδιες συνθήκες. Ένας γενικότερος ορισμός είναι:

$$\eta_{ex} = \text{εξέργεια που ανακτάται} / \text{εξέργεια που παρέχεται}$$

Οι εξεργειακοί βαθμοί απόδοσης διαφέρουν στον υπολογισμό ανάλογα με τη διάταξη.

Για τους στροβίλους ισχύει:

$$\eta_{ex,t,g} = \frac{W_t}{(E_{in} - E_{out})}$$

Για τις αντλίες και το συμπιεστή :

$$n_{ex,fp,hpp,c} = \left(\frac{E_{out} - E_{in}}{W} \right)$$

Για τους εναλλάκτες:

$$n_{ex,ev,evg,ac} = \frac{(E_{1out} - E_{1in})}{(E_{2in} - E_{2out})}$$

όπου 1 είναι το ρευστό που λαμβάνει θερμότητα και 2 αυτό που τη δίνει [24].

Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης του θαλάμου καύσης είναι:

$$n_{ex,thk} = \frac{E_g}{E_a + E_b}$$

όπου E_b η εξέργεια του καυσίμου, E_a του αέρα και E_g των καυσαερίων, ενώ του ανεμιστήρα είναι:

$$n_{ex,fan} = \frac{(E_{out} - E_{in})}{W_{fan}}$$

Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης του κύκλου ORC είναι:

$$n_{ex,orc} = \frac{W_t}{(w_{hpp} + w_{fp} + (E_{geo,in} - E_{geo,out}) + (E_{gas,in} - E_{gas,out}))}$$

όπου E_{geo} είναι η εξέργεια του γεωθερμικού ρευστού στην είσοδο και έξοδο του στο σύστημα και E_{gas} η εξέργεια των καυσαερίων στην είσοδο και έξοδο του εναλλάκτη [24].

Οποιαδήποτε διεργασία παράγει εντροπία καταστρέφει εξέργεια. Πιο συγκεκριμένα, η καταστρεφόμενη εξέργεια είναι ανάλογη της παραγόμενης εντροπίας. Για συστήματα μόνιμης ροής ισχύει το παρακάτω ισοζύγιο εξέργειας:

$$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k} \right) \cdot \dot{Q}_k + \dot{W} + \sum E_{in} - \sum E_{out} - E_{d,k} = 0$$

Έτσι, προκύπτει η καταστροφή εξέργειας για κάθε διάταξη ως εξής:

$$E_{d,t} = 0 + W + E_{in} - E_{out} \text{ για τους στροβίλους}$$

$$E_{d,fp} = 0 - W + E_{out} - E_{in} \text{ για τις αντλίες, το συμπιεστή και τον ανεμιστήρα}$$

$$E_{d,ev} = (E_{1in} + E_{2in}) - (E_{1out} + E_{2out}) \text{ για τους εναλλάκτες}$$

$$E_{d,thk} = -E_g + E_a + E_b \text{ για το θάλαμο καύσης [24].}$$

Η συνολική καταστροφή εξέργειας του συστήματος $E_{d,total}$ προκύπτει από το άθροισμα όλων των διατάξεων.

Όσον αφορά το λόγο καταστροφής της εξέργειας y_d^* είναι το ποσοστό καταστροφής της κάθε συσκευής ως προς το συνολικό ποσό που υπολογίστηκε παραπάνω.

$$y_{d,k}^* = \frac{E_{d,k}}{E_{d,total}} \cdot 100$$

Ένας εξίσου χρήσιμος τύπος είναι ο λόγος καταστροφής εξέργειας y_d ως προς τα καύσιμα που τροφοδοτούνται στο σύστημα (γεωθερμικό ρευστό και φυσικό αέριο):

$$y_{d,k} = \frac{E_{d,k}}{E_{f,total}} \cdot 100, \text{ όπου } E_{f,total} = E_{geo,in} + E_b$$

Μια εναλλακτική σχέση για το ισοζύγιο εξέργειας σε κάθε συσκευή είναι η ακόλουθη:

$$E_{F,k} = E_{P,k} + E_{L,k} + E_{d,k}$$

όπου $E_{F,k}$ είναι η εξέργεια του καυσίμου που δίνεται σε κάθε διάταξη, $E_{P,k}$ η εξέργεια του προϊόντος, δηλαδή η εξέργεια που ανακτάται από το ρευστό σε κάθε διάταξη και $E_{L,k}$ η απώλεια εξέργειας στη συσκευή k [24].

Για παράδειγμα,

$$E_{L,c} = W_c - (E_{out} - E_{in}) - E_{d,c} \text{ για το συμπιεστή.}$$

Τέλος, ο λόγος απώλειας εξέργειας $y_{L,k}$ είναι το κλάσμα της απώλειας εξέργειας κάθε συσκευής προς τη συνολική εξέργεια των καυσίμων που παρέχονται στο σύστημα:

$$y_{L,k} = \frac{E_{L,k}}{E_{f,total}} \cdot 100 \quad [24]$$

10.1 Αποτελέσματα της εξεργειακής ανάλυσης του υβριδικού συστήματος

Στους Πίνακες 12-15 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της παρούσας εξεργειακής ανάλυσης του υβριδικού συστήματος.

Πίνακας 12 Εξέργεια, ειδική εξέργεια, ρυθμός κόστους και μοναδιαίο ρυθμό κόστους εξέργειας για κάθε κατάσταση για το Ισοβουτάνιο

ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	\dot{E}_i kW	e_i kJ/kg	\dot{C}_i \$/sec	c_i \$/kJ
[1]	2519	45,35	0,002143	8,505E-07
[2]	2641	47,54	0,002246	8,505E-07
[3]	402	26,8	10,5	0,02612
[4]	2403	43,25	0,0009836	8,505E-07
[5]	575,4	38,36	39,57	0,02612
[7]	2454	163,6	67,09	0,02612
[8]	668,7	44,58	18,8	0,02612
[9]	370,8	24,72	9,685	0,02612
[11]	341616	324,3	-6674	-0,01921
[12]	342082	324,8	-6683	-0,01921
[13]	7852	324,8	0	0
[14]	12521	518	0	0
[15]	20995	824,9	0,0873	0,000009508
[16]	11947	469,4	0,04968	0,000009508
[17]	8453	332,1	0,03515	0,000009508
[18]	341608		-6673	-0,01921

Πίνακας 13 Εξέργεια, ειδική εξέργεια, ρυθμός κόστους και μοναδιαίο ρυθμό κόστους εξέργειας για κάθε κατάσταση για το κ-πεντάνιο

ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	\dot{E}_i kW	e_i kJ/kg	\dot{C}_i \$/sec	c_i \$/kJ
[1]	2519	45,35	0,002143	8,505E-07
[2]	2641	47,54	0,002246	8,505E-07
[3]	27,12	1,808	15	0,553
[4]	2206	39,71	0,00169	8,505E-07
[5]	399,8	26,65	221,1	0,553
[7]	2037	135,8	1127	0,553
[8]	715,9	47,73	395,9	0,553
[9]	0,2053	0,01369	0,1136	0,553
[11]	51986	324,3	-27863	-0,536
[12]	52725	328,9	-28259	-0,536
[13]	5465	324,8	0	0
[14]	8714	518	0	0
[15]	14612	824,9	0,1389	0,000009506
[16]	8315	469,4	0,07904	0,000009506
[17]	5883	332,1	0,05593	0,000009506
[18]	51985		-27862	-0,536

Πίνακας 14 Εξέργεια, ειδική εξέργεια, ρυθμός κόστους και μοναδιαίο ρυθμό κόστους εξέργειας για κάθε κατάσταση για το κ-βουτάνιο

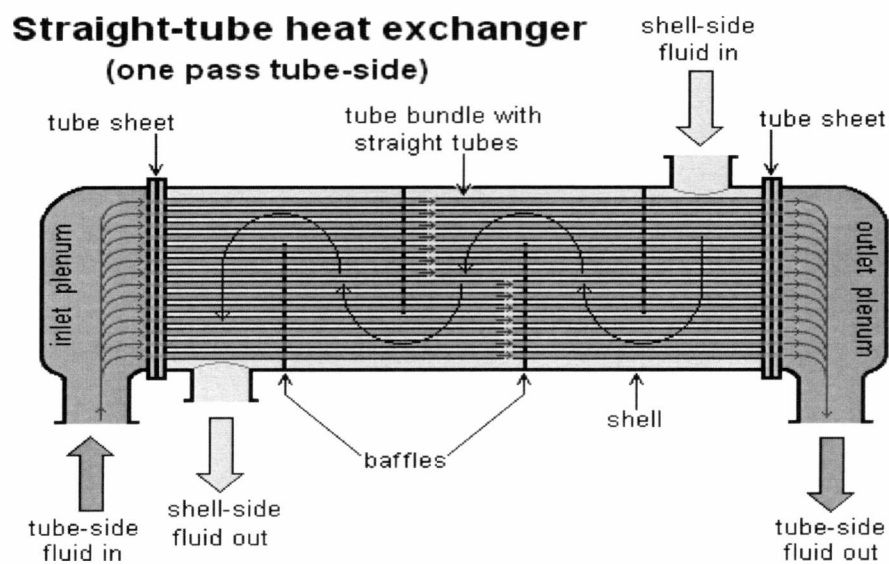
ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	\dot{E}_i kW	e_i kJ/kg	\dot{C}_i \$/sec	c_i \$/kJ
[1]	2519	45,35	0,002143	8,505E-07
[2]	2641	47,54	0,002246	8,505E-07
[3]	158,1	10,54	11,25	0,07114
[4]	2406	43,31	0,001787	8,505E-07
[5]	347,3	23,15	24,71	0,07114
[7]	2098	139,8	149,2	0,07114
[8]	353,2	23,54	25,12	0,07114
[9]	128	8,531	9,103	0,07114
[11]	304879	324,3	-11734	-0,03849
[12]	305295	324,8	-11750	-0,03849
[13]	7204	324,8	0	0
[14]	11488	518	0	0
[15]	19263	824,9	0,1831	0,000009505
[16]	10961	469,4	0,1042	0,000009505
[17]	7756	332,1	0,07372	0,000009505
[18]	304871		-11733	-0,03849

Πίνακας 15 Εξέργεια, ειδική εξέργεια, ρυθμός κόστους και μοναδιαίο ρυθμό κόστους εξέργειας για κάθε κατάσταση για το κ-εξάνιο

ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	\dot{E}_i kW	e_i kJ/kg	\dot{C}_i \$/sec	c_i \$/kJ
[1]	2519	45,35	0,002143	8,505E-07
[2]	2641	47,54	0,002246	8,505E-07
[3]	241	16,07	16,5	0,06845
[4]	2456	44,21	0,001951	8,505E-07
[5]	572,9	38,19	39,21	0,06845
[7]	2841	189,4	194,5	0,06845
[8]	1515	101	103,7	0,06845
[9]	212,7	14,18	14,56	0,06845
[11]	1,783	0,7134	0,1013	0,05682
[12]	1570	628,4	89,22	0,05682
[13]	6161	324,8	0	0
[14]	9824	518	0	0
[15]	16472	824,9	0,1566	0,000009506
[16]	9373	469,4	0,0891	0,000009506
[17]	6632	332,1	0,06304	0,000009506
[18]	5,744	2,299	0,3264	0,05682
[19]	26019	324,3	55326	2,126
[20]	26061	324,9	55415	2,126

11 Θερμοϋδραυλικός σχεδιασμός εναλλάκτη αυλών-κελύφους (Component sizing and cost estimation)

Η εκτίμηση μεγέθους επιφάνειας και περασμάτων των εναλλακτών θερμότητας του υβριδικού συστήματος γίνεται με τη μέθοδο LMTD (log mean temperature difference method). Σχηματική παράσταση ενός εναλλάκτη αυλών κελύφους δίνεται στο Σχήμα 11.1.



Σχήμα 11.1 Εναλλάκτης αυλών κελύφους [26]

Για έναν εναλλάκτη θερμότητας η ολική μεταφορά θερμότητας ανά μονάδα χρόνου μπορεί να εκφραστεί με την παρακάτω μορφή:

$$q = UA\Delta T_m = UA \cdot \left[\frac{(T_{h2} - T_{c2}) - (T_{h1} - T_{c1})}{\ln[(T_{h2} - T_{c2}) / (T_{h1} - T_{c1})]} \right] \quad (1)$$

όπου U είναι ο ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, A είναι η επιφάνεια του εναλλάκτη και ΔT_m είναι η μέση λογαριθμική διαφορά θερμοκρασίας [25].

Από αυτή την εξίσωση προκύπτει η επιφάνεια του εναλλάκτη.

Με T_{h1} και T_{h2} συμβολίζουμε τις θερμοκρασίες στην έξοδο και την είσοδο του θερμού ρευστού αντίστοιχα, ενώ οι T_{c1} και T_{c2} αναπαριστούν τις θερμοκρασίες

εισόδου και εξόδου του ψυχρού ρευστού. Ο ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας εξαρτάται από τα ρευστά που συμμετέχουν στην εναλλαγή θερμότητας και τις ιδιότητές τους. Παρακάτω θα δοθεί αναλυτική επεξήγηση του υπολογισμού του.

Τα κυριότερα κατασκευαστικά τους τμήματα είναι οι αυλοί, η αυλοφόρος πλάκα, το κέλυφος, οι κεφαλές του κελύφους και οι ανακλαστήρες. Το ένα ρευστό κυκλοφορεί στο κέλυφος, ενώ το περισσότερο διαβρωτικό ρευστό τοποθετείται στους αυλούς, όπου σε περίπτωση φθοράς ο καθαρισμός και η αντικατάσταση των αυλών είναι πιο εύκολοι και οικονομικοί. Οι αυλοί είναι σωλήνες με συνήθεις διαμέτρους από 10 έως 30 mm. Το μήκος τους επηρεάζει το κόστος και την επιφάνεια του εναλλάκτη, καθώς και τη διάμετρο του κελύφους. Ένας γενικός κανόνας είναι ο λόγος του μήκους των αυλών προς τη διάμετρο του κελύφους να κυμαίνεται μεταξύ 5 και 15. Οι αυλοί στερεώνονται στα δύο άκρα του εναλλάκτη, που ονομάζονται αυλοφόρες πλάκες, και η διάταξή τους είναι σε σχήμα τριγώνου ή τετραγώνου και χαρακτηρίζεται από την απόσταση μεταξύ διαδοχικών αυλών P_T . Το κέλυφος στο οποίο κυκλοφορεί το ρευστό μπορεί να έχει ένα ή περισσότερα περάσματα. Το ένα πέραςμα οδηγεί σε πλήρη αντιροή (εναλλάκτης 1-1), ενώ όλες οι άλλες παραλλαγές λειτουργούν κατά ένα ποσοστό σε ομοροή (εναλλάκτες 1-2, 1-4, 2-4 κλπ) - ο πρώτος αριθμός αντιστοιχεί στα περάσματα του κελύφους, ενώ ο δεύτερος στα περάσματα των αυλών. Τα πολλαπλά περάσματα του ρευστού στους αυλούς αποσκοπούν στην αύξηση της ταχύτητας ροής και του συντελεστή συναγωγής, μέσα στα πλαίσια της διαθέσιμης πτώσης πίεσης. Για αρχιτεκτονικούς λόγους κρίνεται απαραίτητη η χρήση ζυγού αριθμού περασμάτων. Οι ανακλαστήρες όχι μόνο στηρίζουν τους αυλούς αλλά και καθοδηγούν τη ροή του κελύφους εγκάρσια στους αυλούς, επιτυγχάνοντας υψηλό συντελεστή συναγωγής. Η συνηθισμένη απόστασή τους είναι 0,4-0,6 της διαμέτρου του κελύφους, ενώ η προσθήκη επιπλέον ανακλαστήρων βελτιώνει τη θερμική απόδοση του κελύφους, ωστόσο αυξάνει την πτώση πίεσης [25].

Από τον Πίνακα 16 επιλέχθηκαν η εσωτερική και εξωτερική διάμετρος των αυλών του κάθε εναλλάκτη (προθερμαντήρας, εξατμιστήρας, εναλλάκτης καυσαερίου-οργανικού και αερόψυκτος ή υδρόψυκτος συμπυκνωτής). Οι ιδιότητες των επιμέρους ρευστών (ιξώδες μ , θερμική αγωγιμότητα k , πυκνότητα ρ και ειδική θερμοχωρητικότητα C_p) υπολογίστηκαν για τη μέση θερμοκρασία και πίεση (είσοδος + έξοδος/2) του κάθε ρεύματος. Υποτέθηκε ταχύτητα ρευστών 1 m/sec ώστε να

αποφευχθούν τόσο προβλήματα επικαθήσεων όσο και διάβρωσης. Το βήμα P_T (απόσταση αυλών) δίνεται βάσει του τύπου: $P_T=C+OD$ όπου C είναι η σταθερή απόσταση των αυλών που θεωρήθηκε 0,00635m και OD η εξωτερική διάμετρος τους.

Πίνακας 16 Διαστάσεις χαλυβδοσωλήνων [25]

NPS ^[5]	DN ^[2]	OD [in (mm)]	Wall thickness [in (mm)]				
			SCH 5	SCH 10s/10	SCH 30	SCH 40s/40 /STD	SCH 80s/80 /XS
1/8	6	0.405 (10.29)	0.035 (0.889)	0.049 (1.245)	0.057 (1.448)	0.068 (1.727)	0.095 (2.413)
1/4	8	0.540 (13.72)	0.049 (1.245)	0.065 (1.651)	0.073 (1.854)	0.088 (2.235)	0.119 (3.023)
3/8	10	0.675 (17.15)	0.049 (1.245)	0.065 (1.651)	0.073 (1.854)	0.091 (2.311)	0.126 (3.200)
1/2	15	0.840 (21.34)	0.065 (1.651)	0.083 (2.108)	0.095 (2.413)	0.109 (2.769)	0.147 (3.734)
3/4	20	1.050 (26.67)	0.065 (1.651)	0.083 (2.108)	0.095 (2.413)	0.113 (2.870)	0.154 (3.912)
1	25	1.315 (33.40)	0.065 (1.651)	0.109 (2.769)	0.114 (2.896)	0.133 (3.378)	0.179 (4.547)
1 1/4	32	1.650 (42.16)	0.065 (1.651)	0.109 (2.769)	0.117 (2.972)	0.140 (3.556)	0.191 (4.851)
1 1/2	40	1.900 (48.26)	0.065 (1.651)	0.109 (2.769)	0.125 (3.175)	0.145 (3.683)	0.200 (5.080)
2	50	2.375 (60.33)	0.065 (1.651)	0.109 (2.769)	0.125 (3.175)	0.154 (3.912)	0.218 (5.537)
2 1/2	65	2.875 (73.03)	0.083 (2.108)	0.120 (3.048)	0.188 (4.775)	0.203 (5.156)	0.276 (7.010)
3	80	3.500 (88.90)	0.083 (2.108)	0.120 (3.048)	0.188 (4.775)	0.216 (5.486)	0.300 (7.620)
3 1/2	90	4.000 (101.60)	0.083 (2.108)	0.120 (3.048)	0.188 (4.775)	0.226 (5.740)	0.318 (8.077)

Η υδραυλική διάμετρος βρίσκεται ως εξής $D_h = \frac{4 \cdot (P_T^2 - \pi \cdot OD^2 / 4)}{\pi \cdot OD}$. Η

εξίσωση συνέχειας δίνει τον αριθμό των περασμάτων των αυλών όπως φαίνεται στον τύπο: $m = (\rho \cdot u \cdot \pi \cdot ID^2 \cdot N) / 4$ όπου N ο αριθμός των αυλών ανά πέρασμα, ρ η πυκνότητα του ρευστού και ID η εσωτερική διάμετρος των αυλών. Σε περίπτωση που το N δεν προκύψει ακέραιος αριθμός στρογγυλοποιείται προς τα πάνω. Προκειμένου ο λόγος του μήκους των αυλών προς τη διάμετρο του κελύφους να κυμαίνεται μεταξύ 5 και 15 ο αριθμός των αυλών πολλαπλασιάζεται με 2 ή 4 (περάσματα) και υπολογίζεται ο συνολικός αριθμός αυλών του εναλλάκτη (N_{TOTAL}). Με δεδομένο, λοιπόν αυτόν τον αριθμό προκύπτει η διάμετρος του κελύφους ως εξής:

$$N_{TOTAL} = \frac{C_{PT}}{C_L} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \left[\frac{D_S}{P_T} - 1 \right]^2 \quad \text{όπου } C_{PT} \text{ είναι } 0,93/0,9 \text{ για ένα/δύο, τρία κ.λ.π.}$$

περάσματα, C_L είναι ίση με τη μονάδα για τετραγωνική διάταξη και D_S η διάμετρος του κελύφους [25].

11.1 Σχεδιασμός κελύφους

Η απόσταση μεταξύ ανακλαστήρων B θεωρήθηκε στους υπολογισμούς ίση με $0,5 D_S$. Απαραίτητο για το σχεδιασμό του κελύφους είναι η ελεύθερη διατομή ροής κελύφους a_s που συμβάλλει μετέπειτα στον υπολογισμό της μαζικής ταχύτητας G :

$$a_s = D_S \cdot B \cdot \frac{C}{P_T} \quad G_o = \frac{\dot{m}_o}{a_s}$$

Τέλος προκύπτει ο συντελεστής συναγωγής από την πλευρά του κελύφους ως εξής:

$$\frac{h_o \cdot D_S}{k_o} = 0,36 \cdot \left(\frac{D_h \cdot G_o}{\mu_o} \right)^{0,55} \cdot Pr_o^{0,33} \quad \text{όπου } Pr \text{ είναι ο αδιάστατος αριθμός}$$

$Pr = \mu \cdot C_p / k$ [25].

11.2 Σχεδιασμός αυλών

Προκειμένου να οριστεί ο συντελεστής συναγωγής από την πλευρά των αυλών παρατίθεται προηγουμένως η μαζική ταχύτητα του ρευστού. $G_i = \frac{\dot{m}_i}{(\pi \cdot ID^2 \cdot N)}$

$$\frac{h_i \cdot ID}{k_i} = 0,027 \cdot \left(\frac{G_i \cdot ID}{\mu_i} \right)^{0,8} \cdot Pr_i^{0,33} \quad [25].$$

11.3 Εύρεση ολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας

Με την ολοκλήρωση της εύρεσης των συντελεστών συναγωγής τόσο από την πλευρά των αυλών όσο και του κελύφους σειρά έχει ο προσδιορισμός των

συντελεστών επικαθήσεων τους αντίστοιχα ($R_{fi}-R_{fo}$) με βάση τις ιδιότητες των ρευστών. Οι συντελεστές επικαθήσεων προκύπτουν από τους Πίνακες 17 και 18.

Πίνακας 17 Σχεδιαστικές τιμές θερμικής αντίστασης διάφορων ρευστών [25]

TEMA Design Fouling Resistances for Industrial Fluids,	
(m² · K) / kW [19]	
Oils	
Fuel oil #2	0.352
Fuel oil #6	0.881
Transformer oil	0.176
Engine lube oil	0.176
Quench oil	0.705
Gases and vapors	
Manufactured gas	1.761
Engine exhaust gas	1.761
Steam (nonoil bearing)	0.088
Exhaust stream (oil bearing)	0.264–0.352
Refrigerant vapors (oil bearing)	0.352
Compressed air	0.176
Ammonia vapor	0.176
CO ₂ vapor	0.176
Chlorine vapor	0.352
Coal flue gas	1.761
Natural gas flue gas	0.881
Liquids	
Molten heat transfer salts	0.088
Refrigerant liquids	0.176
Hydraulic fluid	0.176
Industrial organic heat transfer media	0.352
Ammonia liquid	0.176
Ammonia liquid (oil bearing)	0.528
Calcium chloride solutions	0.528
Sodium chloride solutions	0.528
CO ₂ liquid	0.176
Chlorine liquid	0.352
Methanol solutions	0.352
Ethanol solutions	0.352
Ethylene glycol solutions	0.352

Πίνακας 18 Σχεδιαστικές τιμές θερμικής αντίστασης νερού [25]

TEMA Design Fouling Resistances for Water				
Temperature of Heating Medium	Up to 115°C		115 to 205°C	
Temperature of Water	50°C		Over 50°C	
	Water Velocity, m/s		Water Velocity, m/s	
	< 0.9	> 0.9	< 0.9	> 0.9
Sea water	0.088	0.088	0.176	0.176
Brackish water	0.352	0.176	0.528	0.352
Cooling tower and artificial spray pond				
Treated makeup	0.176	0.176	0.352	0.352
Untreated	0.528	0.528	0.881	0.705
City or well water	0.176	0.176	0.352	0.352
River water				
Minimum	0.352	0.176	0.528	0.352
Average	0.528	0.352	0.705	0.528
Muddy or silty	0.528	0.352	0.705	0.528
Hard (over 15 grains/gallon)	0.528	0.528	0.881	0.881
Engine jacket	0.176	0.176	0.176	0.176
Distilled or closed cycle				
Condensate	0.088	0.088	0.088	0.088
Treated boiler feed water	0.176	0.088	0.176	0.176
Boiler blowdown	0.352	0.352	0.352	0.352

Το τελικό βήμα είναι ο υπολογισμός του ολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας σε W/m^2K συναρτήσει των συντελεστών συναγωγής, των συντελεστών επικαθήσεων και των διατομών ροής [25].

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_o} + \frac{R_{fo}}{1000} + \frac{A_o}{A_i} \cdot \left(\frac{1}{h_i} + \frac{R_{fi}}{1000} \right)$$

11.4 Υπολογισμός επιφάνειας

Με δεδομένες τις παροχές των δυο ρευμάτων και των ενθαλιπών εισόδου κι εξόδου προσδιορίζεται ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας στον εναλλάκτη (Q) σε Watt ως εξής:

$$Q = \dot{m} \cdot \Delta h \cdot 1000$$

Στη συνέχεια από τη σχέση (1) βρίσκεται η επιφάνεια του εναλλάκτη. Για τον έλεγχο της σωστής επιλογής τύπου εναλλάκτη (περάσματα αυλών κελύφους) υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο το μήκος των αυλών L που χρησιμοποιείται στο λόγο L/D_s .

$$A = \pi \cdot OD \cdot L \cdot N_{TOTAL}.$$

Όταν ο λόγος είναι από 5 ως 15 ο υπολογισμός της επιφάνειας είναι σωστός και κατ' επέκταση ο τύπος του εναλλάκτη, ειδάλλως επιλέγονται είτε διαφορετικός αριθμός περασμάτων είτε διαφορετική διάμετρος αυλών, που συνεπάγονται επανάληψη της προαναφερθείσας διαδικασίας με αλλαγή των τιμών (N_{TOTAL}, L, D_s, U κ.λ.π). Πιο συγκεκριμένα, όταν ο λόγος είναι μικρότερος από 5 τα περάσματα μειώνονται. Αν ακόμα ο λόγος είναι μικρότερος του 5 το επόμενο βήμα είναι να μεγαλώσει η διάμετρος. Στην αντίθετη περίπτωση, δηλαδή όταν ο λόγος υπερβαίνει το 15 αυξάνονται τα περάσματα και μικραίνει η διάμετρος [25].

12 Οικονομική ανάλυση

Οι γεωθερμικές μονάδες, όπως και μονάδες άλλων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, έχουν υψηλό αρχικό κόστος και χαμηλό λειτουργικό. Βέβαια, οι δαπάνες αυτές διαφέρουν ανάλογα με το μέγεθος της μονάδας και την ποιότητα και τη θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού, τα οποία επηρεάζουν το μέγεθος του στροβίλου ORC, των εναλλακτών θερμότητας και το σύστημα ψύξης. Ωστόσο είναι προβλέψιμες σε σύγκριση με τις συμβατικές πηγές που υπόκεινται στις διακυμάνσεις της αγοράς όσον αφορά τις τιμές των καυσίμων [5,6].

Η συνολική επένδυση για ένα γεωθερμικό σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει κυρίως τα ακόλουθα είδη δαπανών:

(1) το κόστος εξερεύνησης και επιβεβαίωσης των πόρων: Αυτό το στοιχείο περιλαμβάνει την απόκτηση, τη μίσθωση, την αδειοδότηση, την αναζήτηση και τις γεωτρήσεις εξερεύνησης. Η γεώτρηση αυτών των πηγαδιών έχει ποσοστό επιτυχίας που είναι τυπικά 50-60%.

(2) το κόστος των γεωτρήσεων παραγωγής - ο πιο σημαντικός παράγοντας κόστους σε όλες τις δραστηριότητες της γεωθερμίας ,

(3) το κόστος των υποδομών: Αυτό το στοιχείο περιλαμβάνει τη συλλογή και την επεξεργασία άλμης, τους διαχωριστές, τις αντλίες και τους αγωγούς.

(4) το κόστος της μονάδας παραγωγής ενέργειας: Σε αυτό εμπεριέχονται τα κόστη της τουρμπίνας, της γεννήτριας, των εναλλακτών κλπ. καθώς και τα συστήματα μείωσης της ρύπανσης. Επιπλέον, το κόστος σχεδιασμού και κατασκευής σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται από τον τύπο (δυαδικό, ξηρού ατμού, ή υβριδικό) και τον κύκλο ψύξης που χρησιμοποιείται.

(5) το κόστος λειτουργίας και συντήρησης [5,6].

Ένας παράγοντας που συμβάλλει στην αποτίμηση της οικονομικής βιωσιμότητας είναι τα κόστη εργασίας και υλικών, τα οποία ευθύνονται περίπου για το 40% του συνολικού κόστους κατασκευής του έργου. Το κόστος εργασίας μπορεί να αυξηθεί κατά 10%, όταν ένας πόρος βρίσκεται σε απομακρυσμένη περιοχή. Εκτός από τις πρώτες ύλες και την εργασία, η επιλογή του μεγέθους των σταθμών είναι ένας βασικός παράγοντας για τον καθορισμό του τελικού κόστους της εγκατάστασης. Για παράδειγμα, χρησιμοποιώντας μία εγκατάσταση 50 MWe αντί των πολλαπλών 10

MWe μπορεί να μειωθεί το κόστος παραγωγής ενέργειας ανά κιλοβατώρα κατά περίπου 30-35% για τα δυαδικά συστήματα. Από την άλλη οι αρθρωτές μονάδες έχουν μια ικανοποιητική οικονομική αποδοτικότητα, επειδή η αρθρωτή κατασκευή μειώνει το χρόνο και το κόστος εγκατάστασης [5,6].

Η αποτίμηση του συνολικού κόστους του υβριδικού συστήματος σε (\$) είναι το πλέον καθοριστικό βήμα για την αξιολόγηση της βιωσιμότητας της εγκατάστασης. Η οικονομική ανάλυση στηρίζεται στον υπολογισμό του συνολικού κόστους επένδυσης κεφαλαίου, του κόστους των «καυσίμων» (γεωθερμικό νερό, φυσικό αέριο, οργανικό υγρό), του κόστους των προϊόντων και το ισοσταθμισμένο κόστος λειτουργίας και συντήρησης.

12.1 Κόστος επένδυσης

12.1.1 Κόστος αγοράς εξοπλισμού (purchased-equipment cost)

Το κόστος αγοράς κάθε συσκευής του συστήματος υπολογίστηκε με βάση την κάθε διάταξη δεδομένων της επιφάνειας ή των έργων [27,28].

Για τους στροβίλους και το συμπιεστή (Turbine, Turbine gas, Compressor) το κόστος αγοράς δίνεται συναρτήσει του έργου με βάση τον προσεγγιστικό τύπο:

$$C_{eq,t/tg}=4405*(w_{t/tg})^{0,7}$$

Στις αντλίες (Feed pump, High pressure pump) αντίστοιχα:

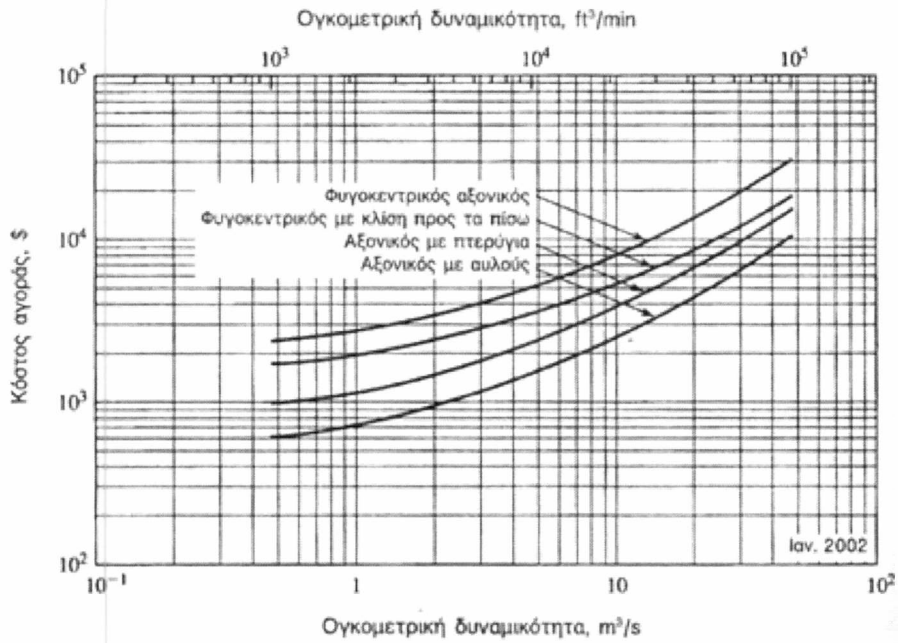
$$C_{eq,fp}=1120*(w_{fp})^{0,7}$$

Στους εναλλάκτες θερμότητας (Preheater, evaporators, air/water-cooled condenser) ο υπολογισμός βασίζεται στην επιφάνεια:

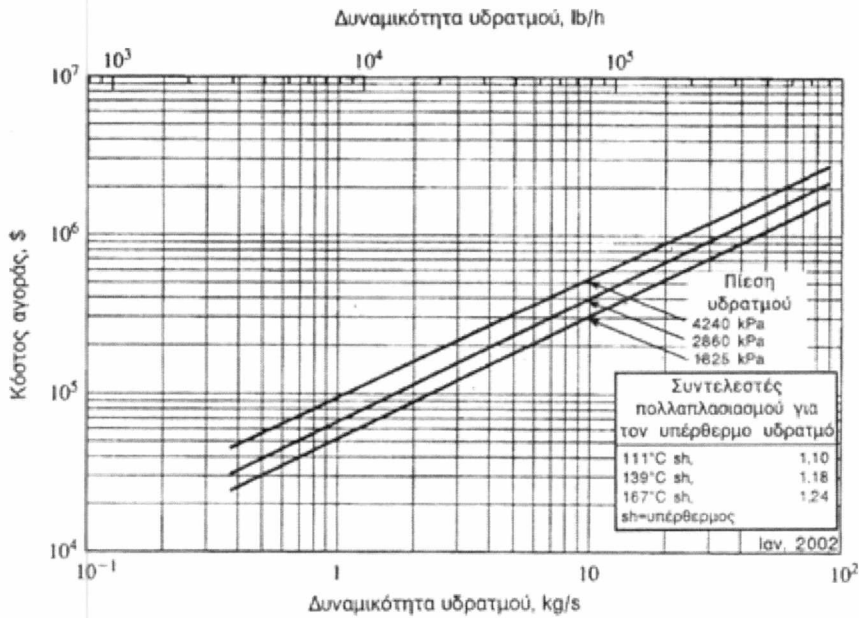
$$C_{eq,ph}=580*(A_{ph})^{0,8}$$

Για τον ανεμιστήρα (Fan) η τιμή προσδιορίστηκε από διαγράμματα συναρτήσει της ογκομετρικής παροχής στα 1250\$ ενώ στο θάλαμο καύσης συναρτήσει των καυσαερίων στα 10000\$. Για τον πύργο ψύξης υπολογίστηκε συναρτήσει της ογκομετρικής παροχής του νερού στα 100000 \$.

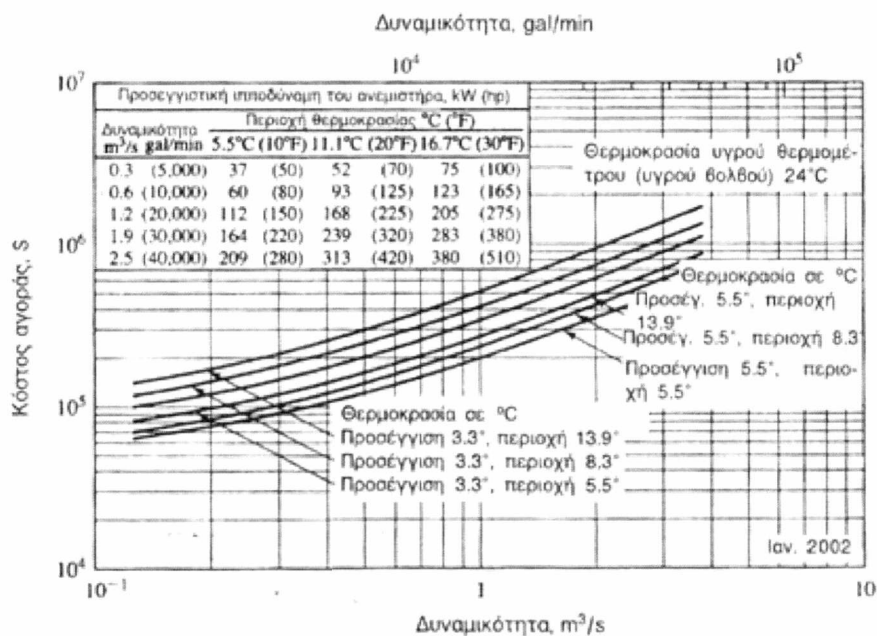
Έτσι προέκυψε το συνολικό κόστος αγοράς εξοπλισμού ως άθροισμα των επιμέρους διατάξεων (C_{PEC}).



Σχήμα 12.1 Κόστος αγοράς φυγοκεντρικών ανεμιστήρων με ηλεκτρικούς κινητήρες [28]



Σχήμα 12.2 Κόστος μονάδων ατμολεβήτων [28]



Σχήμα 12.3 Κόστος πύργων ψύξης [28]

12.1.2 Κόστος σωληνώσεων (piping cost)

Το κόστος των απαραίτητων σωληνώσεων C_{piping} για την εγκατάσταση στηρίζεται στον προηγούμενο υπολογισμό. Προσεγγιστικά θεωρείται ότι είναι το 10% του C_{PEC} [27,24].

$$C_{\text{piping}} = 0.1 \cdot C_{\text{PEC}}$$

12.1.3 Κόστος γης (land cost)

Το κόστος της αναγκαίας γης για τις γεωτρήσεις και την τοποθέτηση του εργοστασίου ανέρχεται στα 1000 €/στρέμμα ενώ η δυναμικότητα του εργοστασίου απαιτεί 10 στρέμματα.

$$C_{land} = 11011 \text{ \$}$$

12.1.4 Κόστος εντός κι εκτός εγκατάστασης (onsite and offsite cost)

Το κόστος εντός εγκατάστασης C_{onsite} ορίζεται ως το άθροισμα του κόστους εξοπλισμού και σωληνώσεων ενώ το κόστος εκτός εγκατάστασης $C_{offsite}$ είναι το κόστος της γης [27,24].

$$C_{onsite} = C_{PEC} + C_{piping}$$

$$C_{offsite} = C_{land}$$

12.1.5 Άμεσο κι έμμεσο κόστος (direct and indirect cost)

Όσον αφορά το άμεσο κόστος C_{direct} είναι το άθροισμα του κόστους εντός και εκτός εγκατάστασης. Το έμμεσο $C_{indirect}$ ορίζεται ως το 5% του άμεσου κόστους και συνιστά το ενδεχόμενο κόστος που μπορεί να προκύψει [27,24].

$$C_{direct} = C_{onsite} + C_{offsite}$$

$$C_{indirect} = 0.05 \cdot C_{direct}$$

12.1.6 Σταθερό κόστος κεφαλαίου (fixed capital investment)

Μια νέα έννοια που εισάγεται είναι το σταθερό κόστος κεφαλαίου (FCI) ως το άθροισμα του άμεσου και έμμεσου κόστους [27,24].

$$C_{FCI} = C_{direct} + C_{indirect}$$

12.1.7 Άλλα κόστη (other outlays)

Σε αυτήν την κατηγορία περιλαμβάνονται το κόστος εκκίνησης (SUC), το κόστος του ανθρώπινου δυναμικού (CWC), το κόστος αδειοδότησης, έρευνας και ανάπτυξης

(LRD) και την επιπλέον διαθέσιμη ρευστότητα κατά τη διάρκεια της κατασκευής (AFUDC) [27].

12.2 Υποθέσεις για τη λειτουργία του εργοστασίου

Το υβριδικό σύστημα θα λειτουργεί 335 ημέρες ή 8040 hr από τις συνολικές 8760 hr το χρόνο. Θεωρήθηκε ότι απαραίτητες για τη λειτουργία και συντήρηση είναι πέντε θέσεις εργασίας (*Labour_positions*) με 5\$/hr μισθό (*Average_labour_rate*) και 2080 hr ώρες εργασίας το χρόνο να αντιστοιχούν σε κάθε θέση εργασίας (*Working_hours*). Το κόστος γεώτρησης και εξερεύνησης του γεωθερμικού πεδίου C_{geo} ανέρχεται στα 528000\$. Ο υπολογισμός αυτός έγινε με βάση το βάθος γεώτρησης στα 400 m και 400 \$ ανά ft τη χρέωση.

Το κόστος εργασίας του ανθρώπινου δυναμικού προκύπτει ως το γινόμενο των θέσεων εργασίας επί το ωρομίσθιο επί τις ώρες εργασίας ανά χρόνο [27].

$$C_{LABOUR} = Labour_positions \cdot Average_labour_rate \cdot Working_hours$$

Το ετήσιο σταθερό κόστος συντήρησης και λειτουργίας του συστήματος δίνεται βάσει του τύπου [27]:

$$C_{O\&M, fixed} = 2 \cdot C_{LABOUR}$$

Το ετήσιο μεταβλητό κόστος συντήρησης και λειτουργίας του συστήματος δίνεται βάσει του τύπου [27]:

$$C_{O\&M, variable} = 0.09 \cdot C_{O\&M, fixed}$$

Οι ώρες λειτουργίας του εργοστασίου μετατρέπόμενες σε δευτερόλεπτα είναι:

$$t_{op} = 8040 \cdot 3600 = 28944000 \text{ sec}$$

12.3 Λοιποί υπολογισμοί

- Παράγοντας ανάκτησης κεφαλαίου (Capital recovery factor- CRF)

Το επιτόκιο είναι 10% ($i = 0,1$), ενώ οι φορές απόδοσης το χρόνο p είναι ίσες με 1. Η αποτελεσματικότητα απόδοσης (effective rate of return- i_{eff}) βρίσκεται από τη σχέση [27]:

$$i_{eff} = \left(1 + \frac{i}{p}\right)^p - 1$$

Με περιθώριο απόσβεσης της επένδυσης $N=20$ χρόνια προσδιορίζεται ο παράγοντας ανάκτησης κεφαλαίου από τον τύπο [27]:

$$CRF = \frac{i_{eff} \cdot (1 + i_{eff})^N}{((1 + i_{eff})^N - 1)}$$

- Παράγοντας ισοστάθμισης της συνεχής κλιμάκωσης (Constant escalation levelization factor- CELF)

Με δεδομένο τον ονομαστικό ρυθμό κλιμάκωσης $r_n = 0.06$ και το συντελεστή

$$k = \frac{1 + r_n}{1 + i_{eff}}$$
 προκύπτει ο παράγοντας ισοστάθμισης της συνεχής κλιμάκωσης

[27]:

$$CELF = \frac{CRF \cdot k \cdot (1 - k^N)}{1 - k} \quad (\$/\text{year})$$

- Το κόστος γεωθερμικού νερού καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου (Geothermal water cost in the whole year - CGW, $\$/\text{year}$) προκύπτει ως εξής [27]:

$$CGW = C_{geo} \cdot CRF$$

- Το ισοσταθμισμένο ειδικό κόστος του γεωθερμικού νερού (levelized specific cost of the geothermal water – $c_{F,sp,L}$, $\$/\text{kg}$) είναι [27]:

$CGW = c_{F,sp,L} \cdot t_{op} \cdot \dot{m}_{geo}$, όπου \dot{m}_{geo} η μαζική παροχή του γεωθερμικού ρευστού.

- Το ποσό πληρωμής στην αρχή του πρώτου χρόνου $P_{o,geothermal}$ όσον αφορά τις γεωτρήσεις-εξερευνήσεις είναι [27]:

$$P_{o,geothermal} = CGW / CELF \quad (\$)$$

- Το συνολικό κόστος κατασκευής του εργοστασίου $C_{plantfacilities}$ ορίζεται ως το άθροισμα του κόστους εντός εγκατάστασης και του έμμεσου κόστους, δηλαδή [27]:

$$C_{PlantFacilities} = C_{onsite} + C_{indirect} \quad (\$)$$

Έχοντας παραθέσει τις απαραίτητες βοηθητικές σχέσεις υπολογίζεται το κόστος εκκίνησης ως εξής:

$$SUC = \frac{C_{O\&M, fixed}}{12} + \left(\frac{C_{O\&M, variable}}{12} \right) \cdot 0.875 + \frac{CGW}{52} + 0.02 \cdot C_{PlantFacilities} \quad (\$)$$

όπου ο πρώτος όρος αναπαριστά ένα μήνα του ετήσιου σταθερού κόστους συντήρησης και λειτουργίας, ο δεύτερος όρος ένα μήνα του μεταβλητού κόστους υπολογισμένου σε πλήρες φορτίο, ο τρίτος μια εβδομάδα του κόστους του πλήρους φορτίου του γεωθερμικού νερού και ο τελευταίος το 2% του συνολικού κόστους κατασκευής του εργοστασίου [27].

Αντίστοιχα ορίζεται το συνολικό κόστος του ανθρώπινου δυναμικού (CWC) με βάση το κόστος εργασίας και το κόστος πληρωμής των γεωτρήσεων/εξερευνήσεων:

$$CWC = \left(\frac{P_{o,geothermal}}{6} + \frac{C_{LABOUR}}{4} \right) \cdot 1.25 \quad (\$)$$

Το κόστος αδειοδότησης, έρευνας και ανάπτυξης (LRD) καθώς και η επιπλέον διαθέσιμη ρευστότητα κατά τη διάρκεια της κατασκευής (AFUDC) παρουσιάζονται παρακάτω:

$$LRD = 150 \cdot W_t$$

$$AFUDC = 0.15 \cdot C_{FCI} - LRD$$

Τα συνολικά άλλα κόστη είναι το παρακάτω άθροισμα:

$$C_{OTHER} = SUC + CWC + LRD + AFUDC$$

Τελικά, το συνολικό κόστος επένδυσης κεφαλαίου είναι το άθροισμα του σταθερού κόστους επένδυσης και του παραπάνω ποσού, δηλαδή [27]:

$$C_{TCI} = C_{FCI} + C_{OTHER}$$

Από τους παραπάνω υπολογισμούς προκύπτει ότι ως προς τη συνολική επένδυση κεφαλαίου το ισοβουτάνιο είναι το πιο συμφέρον ενώ το κ-βουτάνιο το πιο ακριβό.

Πίνακας 19 Οικονομική ανάλυση του υβριδικού συστήματος

Επένδυση σταθερού κεφαλαίου (fixed capital investment)	ισοβουτάνιο	κ-βουτάνιο	κ-πεντάνιο	κ-εξάνιο
Άμεσα κόστη (direct costs)				
Κόστη εντός της εγκατάστασης (onsite costs)				
Κόστος αγοράς εξοπλισμού				
Συμπιεστής αέρα	992.100	1.666.584	1.373.448	1.493.649
Θάλαμος καύσης φυσικού αερίου	10.000	10.000	10.000	10.000
Αεριοστρόβιλος	1.376.221	2.311.852	1.961.025	2.071.961
Αντλία υψηλής πίεσης	36.852	36.852	36.852	36.852
Εξατμιστήρας (εναλλάκτης γεωθερμικού-οργανικού)	51.767	33.843	33.088	33.396
Εξατμιστήρας (εναλλάκτης οργανικού-καυσαερίων)	42.081	51.454	35.249	28.569
Αξονικός στρόβιλος	666.356	666.356	666.356	666.356
Αερόψυκτος συμπυκνωτής	50.149	52.256	51.132	-
Ανεμιστήρας	1.250	1.250	1.250	-
Υδρόψυκτος συμπυκνωτής	-	-	-	41.830
Πύργος ψύξης	-	-	-	100.000
Αντλία τροφοδοσίας οργανικού	14.015	14.015	12.787	13.501
Συνολικό κόστος εξοπλισμού (PEC)	3.240.791	4.844.464	4.181.186	4.496.114
Σωληνώσεις (10% του PEC)	324.079	484.446	418.119	449.611
Συνολικό κόστος εντός εγκατάστασης	3.564.870	5.328.910	4.599.305	4.945.726
Κόστη εκτός της εγκατάστασης (offsite costs)				
Γη	11.011	11.011	11.011	11.011
Συνολικό κόστος εκτός εγκατάστασης	11.011	11.011	11.011	11.011
Συνολικό άμεσο κόστος	3.575.881	5.339.921	4.610.316	4.956.737
Έμμεσα κόστη (indirect costs)				
Ενδεχόμενα κόστη (5% του παραπάνω του άμεσου)	178.794	266.996	230.516	247.837
Συνολικό έμμεσο κόστος	178.794	266.996	230.516	247.837
Επένδυση σταθερού κεφαλαίου (FCI)	3.754.675	5.606.917	4.840.832	5.204.573
Άλλες δαπάνες				
A. Κόστος εκκίνησης (SUC)	85.415	122.460	107.138	114.413
B. Κόστος ανθρώπινου δυναμικού (CWC)	24.183	24.183	29.170	24.182
Γ. Κόστος αδειοδότησης, έρευνας και ανάπτυξης (LRD)	195.000	195.000	195.000	195.000
Δ. Επιπλέον διαθέσιμη ρευστότητα κατά τη διάρκεια της κατασκευής (AFUDC)	368.201	646.038	531.125	585.686
Σύνολο άλλων δαπανών	672.799	987.681	862.433	919.281
Συνολική επένδυση κεφαλαίου (TCI)	4.427.474	6.594.598	5.703.265	6.123.854

12.4 Θερμοοικονομική ανάλυση

- Ο ρυθμός επένδυσης κεφαλαίου για όλες τις διατάξεις του συστήματος (\$/sec) είναι:

$$Z_{CI,k} = \frac{CRF}{t_{op}} \cdot C_{eq,k} \cdot (1+r_n)^2 \quad \text{όπου } k \text{ είναι ο δείκτης που αντιπροσωπεύει την}$$

κάθε διάταξη

και $Z_{CI,TOTAL}$ είναι το άθροισμα όλων των ρυθμών όλων των διατάξεων [27,24].

- Το κόστος συντήρησης και λειτουργίας του γεωθερμικού πεδίου υπολογίζεται συναρτήσει του κόστους του γεωθερμικού νερού παρακάτω [27]:

$$C_{L,OM,GEO} = CGW \cdot 0.1$$

- Ενώ το ετήσιο κόστος συντήρησης και λειτουργίας του εργοστασίου και το αντίστοιχο ισοσταθμισμένο βρίσκονται ως εξής [27]:

$$C_{OM} = C_{O\&M, fixed} + C_{O\&M, variable}$$

$$C_{L,OM} = C_{OM} \cdot (1 + 0.05)^{2.5} \cdot CELF$$

- Ο ρυθμός κόστους συντήρησης και λειτουργίας για την κάθε συσκευή προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$Z_{O\&M,k} = \frac{CRF \cdot C_{L,OM} \cdot C_{eq,k}}{t_{op} \cdot C_{PEC}} \quad (\$/sec)$$

και $Z_{O\&M,TOTAL}$ είναι το άθροισμα όλων των ρυθμών όλων των διατάξεων [27,24].

- Στη θερμοοικονομική ανάλυση ενός συστήματος η συνήθης κοστολόγηση ενός προϊόντος στηρίζεται στο ακόλουθο ισοζύγιο:

$$\dot{C}_{P,k} = \dot{C}_{F,k} + \dot{Z}_{CI,k} + \dot{Z}_{O\&M,k} \quad , \quad \dot{Z}_k = \dot{Z}_{CI,k} + \dot{Z}_{O\&M,k}$$

όπου $\dot{C}_{P,k}$ είναι το κόστος κάθε προϊόντος, $\dot{C}_{F,k}$ το κόστος των καυσίμων και $\dot{Z}_{CI,k}$, $\dot{Z}_{O\&M,k}$ οι ρυθμοί κόστους επένδυσης και συντήρησης-λειτουργίας κάθε συσκευής αντίστοιχα. Το \dot{Z}_k αποτελεί το συνολικό ρυθμό κόστους για την κάθε συσκευή k. Το προϊόν αντιπροσωπεύει το χρήσιμο αποτέλεσμα της λειτουργίας της συσκευής, δηλαδή σε ένα στρόβιλο το έργο. Από την άλλη πλευρά, το καύσιμο αντιπροσωπεύει αυτό που δίνεται στη συσκευή για να παράξει το επιθυμητό αποτέλεσμα, δηλαδή σε έναν συμπιεστή το έργο [27,24].

- Οι προηγούμενοι ρυθμοί κόστους $\dot{C}_{P,k}$, $\dot{C}_{F,k}$ (\$/sec) για τον υπολογισμό τους στηρίζονται στο ρυθμό εξέργειας της κάθε κατάστασης \dot{E}_i (kJ/sec) του συστήματος και στους συντελεστές c_i (\$/kJ), οι οποίοι αναπαριστούν τον ισοσταθμισμένο μοναδιαίο ρυθμό κόστους της εξέργειας (levelised unit cost of exergy). Για τους εναλλάκτες θερμότητας, το θάλαμο καύσης και τον πύργο ψύξης από τον πολλαπλασιασμό του c_i και του \dot{E}_i προκύπτει για κάθε κατάσταση i ο ισοσταθμισμένος ρυθμός κόστους \dot{C}_i . Αντίθετα, στην περίπτωση των στροβίλων, του συμπιεστή, του ανεμιστήρα και των αντλιών, το \dot{C}_i προκύπτει από το γινόμενο των c_i και των αντίστοιχων έργων \dot{W}_i [27,24].

$$\dot{C}_{in} = c_{in} \cdot \dot{E}_{in} \quad , \quad \text{όπου } in \text{ η είσοδος στη συσκευή}$$

$$\dot{C}_{ex} = c_{ex} \cdot \dot{E}_{ex} \quad , \quad \text{όπου } ex \text{ η έξοδος από τη συσκευή}$$

$$\dot{C}_w = c_w \cdot \dot{W} \quad , \quad \text{που ισχύει για τους στρόβιλους, το συμπιεστή, τον ανεμιστήρα και τις αντλίες}$$

$$\dot{C}_b = c_b \cdot \dot{E}_b \quad , \quad \text{που ισχύει για την είσοδο του καυσίμου στο θάλαμο καύσης}$$

- Με δεδομένα τα \dot{C}_i για κάθε κατάσταση, τα $\dot{C}_{P,k}$ και $\dot{C}_{F,k}$ αντικαθίστανται και το ισοζύγιο κόστους παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$\sum_{ex} \dot{C}_{ex,k} + \dot{C}_{w,k} = \sum_i \dot{C}_{in,k} + \dot{Z}_k.$$

Πιο αναλυτικά, τα $\dot{C}_{p,k}$ και $\dot{C}_{F,k}$ αντιστοιχούν είτε στη διαφορά εισόδου-εξόδου ενός ρεύματος $\dot{C}_{ex} - \dot{C}_{in}$ είτε στο $\dot{C}_{w,k}$ της συσκευής. Συγκεκριμένα, το ισοζύγιο για κάθε συσκευή είναι:

Συγκεκριμένα, το ισοζύγιο για κάθε συσκευή είναι:

- $c[14] \cdot E[14] - c[13] \cdot E[13] = c_{w,c} \cdot W_c + \dot{Z}_c$ για το συμπιεστή [24]

$$C_{p,c} = c[14] \cdot E[14] - c[13] \cdot E[13] \text{ και}$$

$$C_{f,c} = c_{w,c} \cdot W$$

$$E_{p,c} = E[14] - E[13]$$

$$E_{f,c} = W_c$$

- $c_{w,tg} \cdot W_{tg} = c[15] \cdot E[15] - c[16] \cdot E[16] + \dot{Z}_{tg}$ για το στρόβιλο του Brayton [24]

$$C_{f,tg} = c[15] \cdot E[15] - c[16] \cdot E[16]$$

$$C_{p,tg} = c_{w,tg} \cdot W$$

$$E_{p,tg} = W_{tg}$$

$$E_{f,tg} = E[15] - E[16]$$

- $c_{w,t} \cdot W_t = c[7] \cdot E[7] - c[8] \cdot E[8] + \dot{Z}_t$ για το στρόβιλο του ORC [24]

$$C_{f,t} = c[7] \cdot E[7] - c[8] \cdot E[8]$$

$$C_{p,t} = c_{w,t} \cdot W$$

$$E_{p,t} = W_t$$

$$E_{f,t} = E[7] - E[8]$$

- $c[5] \cdot E[5] - c[3] \cdot E[3] = c[2] \cdot E[2] - c[4] \cdot E[4] + \dot{Z}_{ev}$ για τον εξατμιστήρα [24]

$$C_{p,ev} = c[5] \cdot E[5] - c[3] \cdot E[3]$$

$$C_{f,ev} = c[2] \cdot E[2] - c[4] \cdot E[4]$$

$$E_{p,ev} = E[5] - E[3]$$

$$E_{f,ev} = E[2] - E[4]$$

- $c[7] \cdot E[7] - c[5] \cdot E[5] = c[16] \cdot E[16] - c[17] \cdot E[17] + \dot{Z}_{evg}$ για τον εξατμιστήρα καυσαερίου [24]

$$C_{p,evg} = c[7] \cdot E[7] - c[5] \cdot E[5]$$

$$C_{f,evg} = c[16] \cdot E[16] - c[17] \cdot E[17]$$

$$E_{p,evg} = E[7] - E[5]$$

$$E_{f,evg} = E[16] - E[17]$$

- $c[8] \cdot E[8] - c[9] \cdot E[9] = c[11] \cdot E[11] - c[12] \cdot E[12] + \dot{Z}_{ac}$ για τον αερόψυκτο/υδρόψυκτο συμπυκνωτή [24]

$$C_{p,ac} = c[8] \cdot E[8] - c[9] \cdot E[9]$$

$$C_{f,ac} = c[11] \cdot E[11] - c[12] \cdot E[12]$$

$$E_{p,ac} = E[8] - E[9]$$

$$E_{f,ac} = E[11] - E[12]$$

- $c[2] \cdot E[2] - c[1] \cdot E[1] = c_{w,hpp} \cdot W_{hpp} + \dot{Z}_{hpp}$ για την αντλία υψηλής πίεσης [24]

$$C_{p,hpp} = c[2] \cdot E[2] - c[1] \cdot E[1] \text{ και}$$

$$C_{f,hpp} = c_{w,hpp} \cdot W_{hpp}$$

$$E_{p,hpp} = E[2] - E[1]$$

$$E_{f,hpp} = W_{hpp}$$

- $c[10] \cdot E[10] - c[9] \cdot E[9] = c_{w,fp} \cdot W_{fp} + \dot{Z}_{fp}$ για την αντλία του ORC [24]

$$C_{p,fp} = c[10] \cdot E[10] - c[9] \cdot E[9] \text{ και}$$

$$C_{f,fp} = c_{w,fp} \cdot W_{fp}$$

$$E_{p,fp} = E[10] - E[9]$$

$$E_{f,fp} = W_{fp}$$

- $c[15] \cdot E[15] = c[14] \cdot E[14] + c_b \cdot E_b + \dot{Z}_{thk}$ για το θάλαμο καύσης [24]
 $C_{p,thk} = c[15] \cdot E[15]$ και
 $C_{f,thk} = c[14] \cdot E[14] + c_b \cdot E_b$
 $E_{p,thk} = E[15]$
 $E_{f,thk} = E[14] + E_b$
- $c[11] \cdot E[11] - c[18] \cdot E[18] = c_{w,fan} \cdot W_{fan} + \dot{Z}_{fan}$ για τον ανεμιστήρα [24]
 $C_{p,fan} = c[11] \cdot E[11] - c[18] \cdot E[18]$ και
 $C_{f,fan} = c_{w,fan} \cdot W_{fan}$
 $E_{p,fan} = E[11] - E[18]$
 $E_{f,fan} = W_{fan}$
- $c[12] \cdot E[12] - c[18] \cdot E[18] = c[20] \cdot E[20] - c[19] \cdot E[19] + \dot{Z}_{tower}$ για τον πύργο ψύξης [24]
 $C_{p,tower} = c[12] \cdot E[12] - c[18] \cdot E[18]$ και
 $C_{f,tower} = c[20] \cdot E[20] - c[19] \cdot E[19]$
 $E_{p,tower} = E[12] - E[18]$
 $E_{f,tower} = E[20] - E[19]$

➤ Τα c_i αντιπροσωπεύουν το κόστος του ρευστού σε κάθε συσκευή. Πρακτικά ορίζεται ως ο λόγος του κόστους καυσίμου (\$/kg) με την ειδική εξέργεια (kJ/kg). Στο σύστημα υπάρχουν έξι ρευστά (φυσικό αέριο, οργανικό ρευστό, καυσαέρια, γεωθερμικό νερό, αέρας και νερό στην περίπτωση του υδρόψυκτου συμπυκνωτή) και έξι διαφορετικά c_i (c_{org} , c_{geo} , c_{air} , c_b , c_{gas} , c_{water})

- Το c_{org} θεωρήθηκε ίσο κάθε φορά με το κόστος του αντίστοιχου οργανικού ρευστού (ισοβουτάνιο 0,7 \$/kg, κ-βουτάνιο 0,75 \$/kg, κ-πεντάνιο 1 \$/kg και κ-εξάνιο 1,1 \$/kg) διαιρεμένο με την ειδική εξέργεια στην κατάσταση 3.
- Το c_{geo} ισούται με το ισοσταθμισμένο ειδικό κόστος του γεωθερμικού νερού (levelized specific cost of the geothermal water – $c_{F,sp,L}$) προς την ειδική εξέργεια στην κατάσταση 1.

- Το c_b είναι το κόστος του φυσικού αερίου (0,1558 \$/kg) προς την κατώτερη θερμογόνο δύναμη.
- Το κόστος του αέρα για το συμπιεστή, τον ανεμιστήρα και τον αερόψυκτο συμπυκνωτή θεωρήθηκε ίσο με το μηδέν.
- Το κόστος των καυσαερίων c_{gas} προκύπτει από την επίλυση του συστήματος των ισοζυγίων κόστους. Από το ίδιο σύστημα εξισώσεων προκύπτουν αντίστοιχα και τα c_w για τον ανεμιστήρα, τις αντλίες, τους στροβίλους και το συμπιεστή.
- Στην περίπτωση του κ-εξανίου προκύπτει από το σύστημα των εξισώσεων το κόστος του νερού c_{water} για τον υδρόψυκτο συμπυκνωτή και το κόστος του αέρα $c_{air,tower}$ (αυτή τη φορά δε θεωρήθηκε μηδέν) στον πύργο ψύξης.

Παραδοχές για την επίλυση του συστήματος

Πίνακας 20 Παραδοχές για την επίλυση του συστήματος

$c[1]$	c_{geo}	$c[12]$	c_{air} / c_{water}
$c[2]$	c_{geo}	$c[13]$	c_{air}
$c[3]$	c_{org}	$c[14]$	c_{air}
$c[4]$	c_{geo}	$c[15]$	c_{gas}
$c[5]$	c_{org}	$c[16]$	c_{gas}
$c[7]$	c_{org}	$c[17]$	c_{gas}
$c[8]$	c_{org}	$c[18]$	c_{air} / c_{water}
$c[9]$	c_{org}	$c[19]$	$c_{air,tower}$
$c[11]$	c_{air} / c_{water}	$c[20]$	$c_{air,tower}$

- Ένα ενδιαμέσο βήμα που συντελεί στην ολοκλήρωση των υπολογισμών της θερμοοικονομικής ανάλυσης είναι η εύρεση του μοναδιαίου κόστους του καυσίμου $c_{F,k}$ και του προϊόντος $c_{P,k}$ για κάθε συσκευή. Πρακτικά προκύπτουν από το ισοζύγιο κόστους εξέργειας των συσκευών ως εξής:

Πίνακας 21 Μοναδιαίο κόστος καυσίμου και προϊόντος για κάθε συσκευή

$c_{F,k}$	$c_{P,k}$
$c_{F,t} = c[7] = c[8] = c_{org}$	$c_{P,t} = c_{w,t}$
$c_{F,fg} = c[15] = c[16] = c_{gas}$	$c_{P,tg} = c_{w,tg}$
$c_{F,c} = c_{w,c}$	$c_{P,c} = c[14] = c[13] = c_{air}$

$c_{F,thk} = c_b + c[14] = c_b + c_{air}$	$c_{P,thk} = c[15] = c_{gas}$
$c_{F,ev} = c[2] = c[4] = c_{geo}$	$c_{P,ev} = c[5] = c[3] = c_{org}$
$c_{F,evg} = c[16] = c[17] = c_{gas}$	$c_{P,evg} = c[5] = c[7] = c_{org}$
$c_{F,ac} = c[11] = c[12] = c_{air} \text{ ή } c_{water}$	$c_{P,ac} = c[8] = c[9] = c_{org}$
$c_{F,fp} = c_{w,fp}$	$c_{P,fp} = c[9] = c_{org}$
$c_{F,hpp} = c_{w,hpp}$	$c_{P,hpp} = c[1] = c[2] = c_{geo}$
$c_{F,fan} = c_{w,fan}$	$c_{P,fan} = c[11] = c[18] = c_{air}$
$c_{F,tower} = c[19] = c[20] = c_{air,tower}$	$c_{P,tower} = c[12] = c[18] = c_{water}$

- Το κόστος απώλειας της εξέργειας είναι δυνατό να υπολογιστεί με βάση το κόστος του προϊόντος ή του καυσίμου ως εξής:

$$\dot{C}_{L,k} = c_{P,k} \cdot E_{L,k}$$

$$\dot{C}_{L,k} = c_{F,k} \cdot E_{L,k}$$

- Σε αυτή την εργασία χρησιμοποιήθηκε στους υπολογισμούς ο δεύτερος τύπος [24].

- Όσον αφορά το κόστος καταστροφής εξέργειας προκύπτει με βάση το κόστος του προϊόντος ή του καυσίμου ως εξής:

$$\dot{C}_{D,k} = c_{P,k} \cdot E_{D,k}$$

$$\dot{C}_{D,k} = c_{F,k} \cdot E_{D,k}$$

- Σε αυτή την εργασία χρησιμοποιήθηκε στους υπολογισμούς ο δεύτερος τύπος [24].

- Σχετική διαφορά κόστους r_k για κάθε συσκευή

$$r_k = \frac{c_{F,k} \cdot (E_{D,k} + E_{L,k}) + \dot{Z}_k + \dot{Z}_{O\&M,k}}{c_{F,k} \cdot E_{P,k}}$$

Πρόκειται για τη διαφορά του κόστους προϊόντος καυσίμου ως προς το κόστος καυσίμου ή αλλιώς το καθαρό κόστος καταστροφής, απώλειας εξέργειας, επένδυσης και συντήρησης ως προς το γινόμενο της εξέργειας του προϊόντος με το ειδικό κόστος του καυσίμου. Είναι επιθυμητές οι μικρές τιμές του.

Εναλλακτικός ορισμός είναι αυτός που περιγράφει το r ως τη σχετική αύξηση στη μέση τιμή του κόστους ανά μονάδα εξέργειας ανάμεσα στο καύσιμο και το προϊόν κάθε συσκευής [24].

- Εξεργοοικονομικός συντελεστής f_k για κάθε συσκευή

$$f_k = \frac{\dot{Z}_k}{\dot{Z}_k + c_{F,k} \cdot (\dot{E}_{D,k} + \dot{E}_{L,k})}$$

Ορίζεται ως η αναλογία κόστους επένδυσης και λειτουργίας προς το συνολικό κόστος (συμπεριλαμβάνεται το κόστος καταστροφής και απώλειας εξέργειας). Αποτελεί εκτίμηση της σημαντικότερης πηγής δαπανών ενός συστήματος (είτε επένδυσης είτε καταστροφής της εξέργειας).

- Μικρή τιμή του μαρτυρά ότι έχουμε μεγάλη συνεισφορά από κόστος αντιστρεπτοτήτων και θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί καλύτερου εξεργειακού βαθμού απόδοσης συσκευή σε βάρος του κόστους επένδυσης.
- Μεγάλη τιμή συνιστά να προσανατολισθούμε σε φτηνότερη λύση σε βάρος της ποιότητας της συσκευής [24].

- Εξεργειακή απόδοση του υβριδικού συστήματος:

$$n_{ex,plant} = \frac{E_{p,total}}{E_{f,total}},$$

όπου $E_{p,total}$ είναι το άθροισμα των επιμέρους εξεργειών των προϊόντων και $E_{f,total}$ είναι αντίστοιχα το άθροισμα των επιμέρους εξεργειών των καυσίμων [27,24].

- Το μοναδιαίο κόστος παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ορίζεται σε cents/kWh και υπολογίζεται από τον τύπο [27]:

$$ucpp = \left(\dot{Z}_{CI,total} + \dot{Z}_{O\&M,total} + \dot{C}_{f,total} \right) \cdot t_{op} \cdot 100 / (P_{net} + W_t) \cdot 8040, \text{ όπου}$$

$\dot{C}_{f,total} = c[1] \cdot E[1] + c_b \cdot E_b$ ο ρυθμός κόστους των καυσίμων, (του γεωθερμικού ρευστού και του φυσικού αερίου) που συμβάλλουν στο συνολικό κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

- Ένας δείκτης για τη βιωσιμότητα του υβριδικού συστήματος είναι τα ετήσια έσοδα C_{income} τα οποία προκύπτουν από τα ολικά έσοδα της πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας $C_{electricity}$ αφαιρώντας το κόστος συντήρησης και λειτουργίας του γεωθερμικού πεδίου $C_{L,O\&M,geo}$ και το ετήσιο ισοσταθμισμένο κόστος συντήρησης και λειτουργίας $C_{L,O\&M}$ [27].

$$C_{income} = C_{electricity} - C_{L,O\&M,geo} - C_{L,O\&M}, \text{ όπου η } C_{electricity} \text{ δίνεται από τον τύπο}$$

$$C_{electricity} = c_{wt} \cdot t_{op} \cdot W_t + c_{wtg} \cdot t_{op} \cdot P_{net} \quad \$/\text{year}$$

- Το συνολικό κόστος του συστήματος δίνεται συναρτήσει των ολικών ρυθμών κόστους επένδυσης, συντήρησης και λειτουργίας και κόστους καταστροφής εξέργειας σε ($\$/\text{year}$) [27].

$$C_{system} = \left(\sum_k \dot{C}_{D,k} + \dot{Z}_{O\&M,total} + \dot{Z}_{CI,total} \right) \cdot t_{op}$$

13 Αξιολόγηση του υβριδικού συστήματος

➤ Παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος

Στη μοντελοποίηση του συστήματος τέθηκε ως δεδομένη η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος από το στρόβιλο του κύκλου Rankine 1300 kW. Ωστόσο η καθαρή παραγωγή ισχύος από το στρόβιλο του κύκλου Brayton διαφέρει ανάλογα με το ρευστό. Στον Πίνακα 25 παρατίθενται οι τιμές, από τις οποίες φαίνεται ότι το σύστημα με το κ-βουτάνιο συνολικά παράγει τη μεγαλύτερη ισχύ:

Πίνακας 22 Παραγωγή ισχύος από τους κύκλους Rankine και Brayton για τα έσσερα ρευστά

Ρευστό	W_t (kW)	P_{net} (kW)
κ-βουτάνιο	1300	2484
κ-εξάνιο	1300	2124
κ-πεντάνιο	1300	2117
ισοβουτάνιο	1300	1184

➤ Απόδοση κύκλου Rankine και υβριδικής εγκατάστασης (Πίνακας 26)

Πίνακας 23 Απόδοση κύκλου Rankine και της υβριδικής εγκατάστασης για τα τέσσερα ρευστά

Ρευστό	η_{ORC}	η_{PLANT}
κ-βουτάνιο	0.3414	0.4154
κ-εξάνιο	0.4129	0.4781
κ-πεντάνιο	0.4136	0.4427
ισοβουτάνιο	0.4228	0.4484

Από την επίλυση του προγράμματος EES βρέθηκε ότι η μεγαλύτερη εξεργειακή απόδοση του κύκλου Rankine αντιστοιχεί στο ισοβουτάνιο, ενώ η μεγαλύτερη εξεργειακή απόδοση της συνολικής εγκατάστασης αντιστοιχεί στο κ-εξάνιο.

➤ Εξεργοοικονομική αξιολόγηση

Πίνακας 24 Εξεργειακός βαθμός απόδοσης, ρυθμός και ρυθμός κόστους καταστροφής εξέργειας, άθροισμα κόστους καταστροφής και επένδυσης, σχετική διαφορά κόστους, εξεργοοικονομικός συντελεστής και ποσοστό καταστροφής και απώλειας εξέργειας για την κάθε συσκευή για το ισοβουτάνιο

Συσκευή	$\eta_{ex,k}$	$\dot{E}_{D,k}$ (kW)	$\dot{C}_{D,k}$ (\$/sec)	$\dot{C}_{D,k} + \dot{Z}_k$ (\$/sec)	Γ_k	f_k (%)	$y_{D,k}$ (%)	$y_{L,k}$ (%)
Compressor, c	0.8895	-253.6	0.00052 84	0.005311	1	112.4	-0.8968	1.794
Turbine, t	0.7031	3149	82.25	82.25	0.4224	0.0224	11.14	-9.194
Turbine Gas, tg	0.9259	7620	0.07246	0.07909	0.2704	70.43	26.95	-25.91
Evaporator, ev	0.7496	371.7	0.00032	0.000566	0.5977	44.11	1.315	~0
Evaporator, evg	0.6896	474.3	0.00451	0.004712	0.4703	4.305	1.677	~0
Air-cooled condenser, ac	0.7356	-125.4	2.409	2.4089	2.359	0.00153	-0.4433	-2.467
High pressure pump, hpp	0.8281	-25.27	0.00001 273	0.00019	2.688	107.7	-0.0894	0.1787
Feed pump, fp	0.8447	-5.74	-0.1266	-0.1265	0.184	0.053	-0.0203	0.04059
Combustion chamber, thk	0.2939	22055	-0.0747	0.07475	2.404	0.065	77.99	0
Fan	-	-3.365	0.04637	0.04637	0.9999		-0.0119	0.04208

Πίνακας 25 Εξεργειακός βαθμός απόδοσης, ρυθμός και ρυθμός κόστους καταστροφής εξέργειας, άθροισμα κόστους καταστροφής και επένδυσης, σχετική διαφορά κόστους, εξεργοοικονομικός συντελεστής και ποσοστό καταστροφής και απώλειας εξέργειας για την κάθε συσκευή για το κ-βουτάνιο

Συσκευή	$\eta_{ex,k}$	$\dot{E}_{D,k}$ (kW)	$\dot{C}_{D,k}$ (\$/sec)	$\dot{C}_{D,k} + \dot{Z}_k$ (\$/sec)	Γ_k	f_k (%)	$y_{D,k}$ (%)	$y_{L,k}$ (%)
Compressor, c	0.8895	-532.1	0.00087	0.00876	1	112.4	-0.9406	1.881
Turbine, t	0.7453	3044	216.6	216.6	0.3419	0.0099	5.382	-4.596
Turbine Gas, tg	0.9259	15988	0.152	0.1629	0.2298	65.19	28.26	-27.18
Evaporator, ev	0.3505	350.6	0.00029 8	0.000458 4	2.849	34.95	0.6198	~0
Evaporator, evg	0.546	1456	0.01384	0.01408	0.8463	1.73	2.573	~0
Air-cooled condenser, ac	0.541	-191	7.353	7.353	2.848	0.001	-0.3377	-0.7962
High pressure pump, hpp	0.8281	-25.27	0.00001 22	0.000187	2.764	107.5	-0.04468	0.08936
Feed pump, fp	0.8167	-6.773	-0.3935	-0.3934	0.2244	0.0169	-0.01197	0.02395
Combustion chamber, thk	0.2939	46272	0.1567	0.1568	2.403	0.0302	81.8	0
Fan	-	-2.953	-0.08152	-0.08153	1		-0.0052	0.0185

Πίνακας 26 Εξεργειακός βαθμός απόδοσης, ρυθμός και ρυθμός κόστους καταστροφής εξέργειας, άθροισμα κόστους καταστροφής και επένδυσης, σχετική διαφορά κόστους, εξεργοοικονομικός συντελεστής και ποσοστό καταστροφής και απώλειας εξέργειας για την κάθε συσκευή για το κ-πεντάνιο

Συσκευή	$\eta_{ex,k}$	$\dot{E}_{D,k}$ (kW)	$\dot{C}_{D,k}$ (\$/sec)	$\dot{C}_{D,k} + \dot{Z}_k$ (\$/sec)	r_k	f_k (%)	$y_{D,k}$ (%)	$y_{L,k}$ (%)
Compressor, c	0.8895	-403.6	0.00072 3	0.007263	1	112.4	-0.9275	1.855
Turbine, t	0.9837	2622	1450	1450	0.0166	0.02659	6.024	-5.975
Turbine Gas, tg	0.9649	12373	0.1176	0.127	0.198	81.65	28.43	-27.93
Evaporator, ev	0.5698	281.3	0.00023 9	0.000397	1.252	39.71	0.6464	~0
Evaporator, evg	0.6735	794	0.00754 8	0.007716	0.4956	2.176	1.825	~0
Air-cooled condenser, ac	0.9691	-22.79	12.21	12.22	2.032	0.00003	- 0.05237	-3.289
High pressure pump, hpp	0.8281	-25.27	0.00001 2	0.000188	2.739	107.6	- 0.05808	0.1162
Feed pump, fp	0.8303	-5.501	-2.526	-2.526	0.2044	0.0024	- 0.01264	0.02528
Combustion chamber, thk	0.2939	35099	0.1189	0.1189	2.403	0.04	80.66	0
Fan		1.099	-4.226	-4.226	1		0.00252 6	0.00041

Πίνακας 27 Εξεργειακός βαθμός απόδοσης, ρυθμός και ρυθμός κόστους καταστροφής εξέργειας, άθροισμα κόστους καταστροφής και επένδυσης, σχετική διαφορά κόστους, εξεργοοικονομικός συντελεστής και ποσοστό καταστροφής και απώλειας εξέργειας για την κάθε συσκευή για το κ-εξάνιο

Συσκευή	$\eta_{ex,k}$	$\dot{E}_{D,k}$ (kW)	$\dot{C}_{D,k}$ (\$/sec)	$\dot{C}_{D,k} + \dot{Z}_k$ (\$/sec)	r_k	f_k (%)	$y_{D,k}$ (%)	$y_{L,k}$ (%)
Compressor, c	0.8895	-455	0.00078 35	0.007875	1	112.4	-0.9336	1.867
Turbine, t	0.9803	2626	179.8	179.8	0.02009	0.177	5.388	-5.335
Turbine Gas, tg	0.9259	13672	0.13	0.1398	0.2374	66.31	28.05	-26.97
Evaporator, ev	0.9558	15.34	0.00001 3	0.000171 6	0.6081	92.4	0.03148	0
Evaporator, evg	0.8273	473.5	0.00450 1	0.004636	0.2151	2.929	0.9715	~0
Air-cooled condenser, ac	0.8301	-266.5	-15.14	-15.14	0.2047	0.00131 2	-0.5467	1.093
High pressure pump, hpp	0.8281	-25.27	0.00001 2	0.000187 2	2.752	107.5	- 0.05186	0.1037
Feed pump, fp	0.8099	-6.659	-0.3692	-0.3691	0.2347	0.01736	- 0.01366	0.02733
Combustion chamber, thk	0.2939	39569	0.134	0.134	2.403	0.0354	81.19	~0
Cooling Tower		1523	3238	3238	0.9733		3.124	-6.249

Η λεπτομερής αξιολόγηση του υβριδικού συστήματος βασίζεται στις παραπάνω μεταβλητές. Συγκεκριμένα, ο ρυθμός κόστους καταστροφής εξέργειας για κάθε συσκευή $\dot{C}_{D,k}$ όσο μεγαλύτερη τιμή έχει τόσο λιγότερο οικονομικά συμφέρουσα είναι η διάταξη. Η οικονομική βιωσιμότητα της κάθε διάταξης καθορίζεται από το άθροισμα του παραπάνω ρυθμού και του \dot{Z}_k που αποτελεί το συνολικό ρυθμό κόστους για την κάθε συσκευή k.

Για το σύστημα με το ισοβουτάνιο, ο στρόβιλος και ο αερόψυκτος συμπυκνωτής παρουσιάζουν το μεγαλύτερο άθροισμα δαπανών $\dot{C}_{D,k} + \dot{Z}_k$, με 82,25 \$/sec και 2,4089 \$/sec αντιστοίχως.

Όσον αφορά το κ-βουτάνιο και το κ-πεντάνιο, ο στρόβιλος και ο αερόψυκτος συμπυκνωτής εξακολουθούν να είναι οι λιγότερο συμφέρουσες συσκευές. Ο συνολικός ρυθμός δαπανών είναι 216,6 \$/sec και 7,353 \$/sec αντίστοιχα για το πρώτο ρευστό και 1450 \$/sec και 12,22 \$/sec αντίστοιχα για το δεύτερο ρευστό.

Στο κ-εξάνιο ωστόσο, ο πύργος ψύξης αποδεικνύεται ότι είναι ο πιο δαπανηρός με 3238 \$/sec και αμέσως μετά ο στρόβιλος με 179,8 \$/sec.

Η παραπάνω ανάλυση οδηγεί στο συμπέρασμα ότι αυτές οι συσκευές είναι οι πρώτες που πρέπει να αντικατασταθούν με άλλες που παρουσιάζουν μικρότερη καταστροφή εξέργειας.

Η σχετική διαφορά κόστους r_k εξ ορισμού πρέπει να κυμαίνεται σε μικρές τιμές. Όπως φαίνεται το r για όλες τις συσκευές δε φτάνει σε υψηλά επίπεδα, γεγονός θετικό για την επιλογή των συγκεκριμένων διατάξεων.

Ένας πιο κρίσιμος δείκτης για την αξιολόγηση είναι ο εξεργοοικονομικός συντελεστής f_k , ο οποίος όταν είναι μεγάλος συνεπάγεται υψηλό κόστος συσκευής, διαφορετικά σημαίνει πως έχουμε μεγάλο κόστος αναντιστρεπτοτήτων οπότε πρέπει να χρησιμοποιηθούν συσκευές καλύτερου εξεργειακού βαθμού απόδοσης. Πιο αναλυτικά, σε όλα τα ρευστά οι αντλίες δεν κυμαίνονται μέσα στα επιθυμητά όρια τιμών (> 70%), με την Feed pump να είναι πολύ χαμηλότερη από αυτά και την High pressure pump να τα ξεπερνά κατά πολύ. Κάτι αντίστοιχο συμβαίνει και με το συντελεστή της τουρμπίνας του ORC, ο οποίος είναι μικρότερος από το επιθυμητό εύρος τιμών 35-75%. Ο συντελεστής της τουρμπίνας του κύκλου Brayton ξεπερνάει τα προαναφερθέντα όρια μόνο στην περίπτωση του κ-πεντανίου. Επίσης, ο συντελεστής του θαλάμου καύσης είναι πολύ μικρός και στα τέσσερα συστήματα και του συμπιεστή είναι πολύ μεγάλος. Οι εναλλάκτες θερμότητας είναι καλό να έχουν εξεργοοικονομικό συντελεστή μικρότερο του 55%. Ωστόσο, ο εξατμιστήρας (evaporator) το

ξεπερνά μόνο στην περίπτωση του κ-εξανίου και φτάνει το 92,4%. Αντίθετα, ο εξατμιστήρας καυσαερίων-οργανικού και ο συμπυκνωτής έχουν συντελεστή πολύ μικρότερο του ορίου.

Συνοψίζοντας, συστήνεται ο εξατμιστήρας (μόνο στην περίπτωση του κ-εξανίου), η αντλία και ο συμπιεστής να αντικατασταθούν με φθηνότερες συσκευές σε βάρος της ποιότητας, ενώ ο συμπυκνωτής, ο θάλαμος καύσης, ο στρόβιλος του ORC, η Feed pump και ο εξατμιστήρας καυσαερίων-οργανικού είναι απαραίτητο να αντικατασταθούν με συσκευές καλύτερου εξεργειακού βαθμού σε βάρος του κόστους.

Στον Πίνακα 31 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της θερμοοικονομικής ανάλυσης όσον αφορά το κόστος του συστήματος (C_{SYST}), το μοναδιαίο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας (unit cost of power produced) σε cent/kWh, η συνολική παραγόμενη ισχύς ($P_{\text{net}}+W_t$) και ο δείκτης ετήσιων εσόδων της εγκατάστασης (χωρίς το φόρο). Όπως φαίνεται από πλευρά κόστους συνιστάται η επιλογή του ισοβουτανίου. Αντίθετα το κ-βουτάνιο παράγει τη μέγιστη ηλεκτρική ενέργεια με το μεγαλύτερο κόστος (cent/kwh). Το κ-πεντάνιο καθώς και το κ-εξάνιο έχουν πολύ μεγάλα κόστη επένδυσης και δεν καθίστανται προτιμητέα.

Πίνακας 28 Κόστος του συστήματος , μοναδιαίο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας, συνολική παραγόμενη ισχύς και δείκτης ετήσιων εσόδων της εγκατάστασης για τα τέσσερα ρευστά

ρευστό	Ισοβουτάνιο	κ-βουτάνιο	κ-πεντάνιο	κ-εξάνιο
C_{SYST}	$2,453 \cdot 10^9$	$6,482 \cdot 10^9$	$42,129 \cdot 10^9$	$98,477 \cdot 10^9$
cent/kWh	15,22	19,8	16,95	18,93
$P_{\text{net}}+W_t$	2484	3784	3417	3424
C_{income}	$1,398 \cdot 10^9$	$3,592 \cdot 10^9$	$21,155 \cdot 10^9$	$2,628 \cdot 10^9$

Παρουσιάζονται, τέλος, στους Πίνακες 32-35 τα αποτελέσματα για το κόστος προϊόντος και καυσίμου για την κάθε συσκευή και το κάθε ρευστό.

Πίνακας 29 Αποτελέσματα κόστους καυσίμου και προϊόντος για το ισοβουτάνιο

$c_{F,K}$	$c_{P,K}$
$c_{F,c} = -0.000002084$	$c_{P,c} = 0$
$c_{F,t} = 0.02612$	$c_{P,t} = 0.03715$
$c_{F,tg} = 0.000009508$	$c_{P,tg} = 0.00001208$
$c_{F,ev} \sim 0$	$c_{P,ev} = 0.02612$
$c_{F,evg} = 0.000009508$	$c_{P,evg} = 0.02612$
$c_{F,ac} = -0.01921$	$c_{P,ac} = 0.02612$
$c_{F,fp} = 0.02206$	$c_{P,fp} = 0.02612$
$c_{F,hpp} \sim 0$	$c_{P,hpp} \sim 0$
$c_{F,fan} = -0.01378$	$c_{P,fan} = -0.01921$
$c_{F,thk} = 0.000003387$	$c_{P,thk} = 0.000009508$

Πίνακας 30 Αποτελέσματα κόστους καυσίμου και προϊόντος για το κ-βουτάνιο

$c_{F,K}$	$c_{P,K}$
$c_{F,c} = -0.000001638$	$c_{P,c} = 0$
$c_{F,t} = 0.07114$	$c_{P,t} = 0.09546$
$c_{F,tg} = 0.000009505$	$c_{P,tg} = 0.00001169$
$c_{F,ev} \sim 0$	$c_{P,ev} = 0.07114$
$c_{F,evg} = 0.000009505$	$c_{P,evg} = 0.07114$
$c_{F,ac} = -0.03849$	$c_{P,ac} = 0.07114$
$c_{F,fp} = 0.0581$	$c_{P,fp} = 0.07114$
$c_{F,hpp} \sim 0$	$c_{P,hpp} \sim 0$
$c_{F,fan} = -0.02761$	$c_{P,fan} = -0.03849$
$c_{F,thk} = 0.000003387$	$c_{P,thk} = 0.000009505$

Πίνακας 31 Αποτελέσματα κόστους καυσίμου και προϊόντος για το κ-πεντάνιο

$C_{F,K}$	$C_{P,K}$
$c_{F,c} = -0.0000002$	$c_{P,c} = 0$
$c_{F,t} = 0.553$	$c_{P,t} = 0.5622$
$c_{F,tg} = 0.000010$	$c_{P,tg} = 0.000011$
$c_{F,ev} = 0.000001$	$c_{P,ev} = 0.553$
$c_{F,evg} = 0.000010$	$c_{P,evg} = 0.553$
$c_{F,ac} = -0.536$	$c_{P,ac} = 0.553$
$c_{F,fp} = 0.4592$	$c_{P,fp} = 0.553$
$c_{F,hpp} = -0.000000489$	$c_{P,hpp} = 0.0000009$
$c_{F,fan} = -3.844$	$c_{P,fan} = -0.536$
$c_{F,thk} = 0.000003$	$c_{P,thk} = 0.000010$

Πίνακας 32 Αποτελέσματα κόστους καυσίμου και προϊόντος για το κ-εξάνιο

$C_{F,K}$	$C_{P,K}$
$c_{F,c} = -0.000002$	$c_{P,c} = 0$
$c_{F,t} = 0.06845$	$c_{P,t} = 0.06983$
$c_{F,tg} = 0.000010$	$c_{P,tg} = 0.000012$
$c_{F,ev} = 0.000001$	$c_{P,ev} = 0.06845$
$c_{F,evg} = 0.000010$	$c_{P,evg} = 0.06845$
$c_{F,ac} = 0.05682$	$c_{P,ac} = 0.06845$
$c_{F,fp} = 0.05544$	$c_{P,fp} = 0.06845$
$c_{F,hpp} = -0.00000049$	$c_{P,hpp} = 0.000001$
$c_{F,tower} = 2.126$	$c_{P,tower} = 0.05682$
$c_{F,thk} = 0.000003$	$c_{P,thk} = 0.000010$

Η βελτιστοποίηση αποτελεί μια διαδικασία που βρίσκει την καλύτερη δυνατή τιμή για μια μεταβλητή του συστήματος με βάση τις μεταβλητές απόφασης. Σε αυτήν την εργασία οι κρίσιμες μεταβλητές ως προς τις οποίες έγινε η βελτιστοποίηση είναι ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης του ORC και το μοναδιαίο κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται.

14.1 Βελτιστοποίηση ως προς $\eta_{ex,ORC}$

Τα σημαντικότερα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης ως προς τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης του ORC παρατίθενται στους Πίνακες 36-38, ενώ τα υπόλοιπα βρίσκονται στο Παράρτημα (στο συνημμένο CD).

Πίνακας 33 Βέλτιστες τιμές μεταβλητών απόφασης και βαθμός απόδοσης του ORC για τα τέσσερα ρευστά

Ρευστό	T_3	T_5	T_8 ή W_t	$\eta_{ex,ORC}$
Ισοβουτάνιο	261,1	352	388,1	0,6536
κ-πεντάνιο	285,4	350,5	340,9	0,4109
κ-βουτάνιο	270,8	330,9	352,1	0,4757
κ-εξάνιο	340,9	380,9	392,2 ή $W_t=1300$	0,4148

Πίνακας 34 Απόδοση κύκλου της υβριδικής εγκατάστασης, συνολική παραγόμενη ισχύς, μοναδιαίο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας, ετήσιων εσόδων της εγκατάστασης και Κόστος του συστήματος δείκτης για τα τέσσερα ρευστά

Ρευστό	$\eta_{ex,plant}$	W_t+P_{net}	ucpp (c/kWh)	C_{income}	C_{SYST}
Ισοβουτάνιο	0,4558	3247	12,08	$1,566 \cdot 10^9$	$3,170 \cdot 10^9$
κ-πεντάνιο	0,44	3568	17,24	$1,913 \cdot 10^{10}$	$3,827 \cdot 10^{10}$
κ-βουτάνιο	0,4189	4366	17,59	$3,837 \cdot 10^9$	$7,731 \cdot 10^9$
κ-εξάνιο	0,4786	3412	18,89	$2,566 \cdot 10^9$	$9,614 \cdot 10^{10}$

Το ρευστό που παρουσιάζει το μεγαλύτερο εξεργειακό βαθμό απόδοσης του ORC είναι το ισοβουτάνιο και αμέσως μετά το κ-βουτάνιο.

Από πλευράς συνολικού εξεργειακού βαθμού της εγκατάστασης το εξάνιο είναι το

πιο συμφέρον, ενώ το κ-βουτάνιο παράγει τη μεγαλύτερη συνολική ισχύ. Το μικρότερο μοναδιαίο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αντιστοιχεί στο ισοβουτάνιο. Το κ-εξάνιο, όπως φαίνεται από τον πίνακα, έχει τα περισσότερα έξοδα και τα χαμηλότερα έσοδα. Αντίθετα, το ισοβουτάνιο και το κ-βουτάνιο είναι τα πιο συμφέροντα από οικονομικής άποψης.

Πίνακας 35 Βέλτιστες τιμές κόστους καταστροφής εξέργειας και επένδυσης και εξεργοοικονομικού συντελεστή για κάθε συσκευή για τα τέσσερα ρευστά

Ισοβουτάνιο

Συσκευή	$\dot{C}_{D,k} + \dot{Z}_k$ (\$/sec)	f_k (%)
Compressor, c	0,005395	112.4
Turbine, t	107,1	0,3935
Turbine Gas, tg	0,08132	70,15
Evaporator, ev	0,0005707	43.94
Evaporator, evg	0,004929	4,126
Air-cooled condenser, ac	2,369	0,006
Feed pump, fp	-0,1321	0,05087
High pressure pump, hpp	0,000189	107.7
Combustion chamber , thk	0,07694	0,06237
Fan	0,01703	

κ-βουτάνιο

Συσκευή	$\dot{C}_{D,k} + \dot{Z}_k$ (\$/sec)	f_k (%)
Compressor, c	0,008878	112.4
Turbine, t	262,4	0,15
Turbine Gas, tg	0,1664	65
Evaporator, ev	0,0004525	35.25
Evaporator, evg	0,01458	2,263
Air-cooled condenser, ac	5,425	0,003258
Feed pump, fp	-0,2918	0,02189
High pressure pump, hpp	0,0001863	107.5
Combustion chamber , thk	0,1602	0,0295
Fan	-0,8219	

κ-πεντάνιο

Συσκευή	$\dot{C}_{D,k} + \dot{Z}_k$ (\$/sec)	f_k (%)
Compressor, c	0,007587	112.4
Turbine, t	1315	0,04798
Turbine Gas, tg	0,1352	81,33
Evaporator, ev	0,0003688	42,54
Evaporator, evg	0,008477	1,928
Air-cooled condenser, ac	11,42	~ 0
Feed pump, fp	-1,191	0,005
High pressure pump, hpp	0,0001875	107,6
Combustion chamber , thk	0,1268	0,03749
Fan	-3,807	

κ-εξάνιο

Συσκευή	$\dot{C}_{D,k} + \dot{Z}_k$ (\$/sec)	f_k (%)
Compressor, c	0,007846	112.4
Turbine, t	175,5	0,1827
Turbine Gas, tg	0,1391	66,35
Evaporator, ev	0,0001693	93,74
Evaporator, evg	0,004583	2,962
Air-cooled condenser, ac	-14,78	0,001344
Feed pump, fp	-0,05197	0,1231
High pressure pump, hpp	0,0001873	107.5
Combustion chamber , thk	0,1333	0,03562
Cooling Tower	3161	

Όπως γίνεται φανερό από τους παραπάνω πίνακες ο στρόβιλος του κύκλου ORC όπως και ο πύργος ψύξης στην περίπτωση του κ-εξανίου είναι τα πλέον ακριβά όσον αφορά το άθροισμα του κόστους της καταστροφής εξέργειας και το κόστος συντήρησης, λειτουργίας και επένδυσης.

Κλείνοντας, ο εξατμιστήρας (μόνο στην περίπτωση του κ-εξανίου) , η αντλία hpp και ο συμπιεστής εξακολουθούν να έχουν πολύ υψηλό εξεργοοικονομικό συντελεστή και πρέπει να αντικατασταθούν με φθηνότερες συσκευές σε βάρος της ποιότητας, ενώ ο συμπυκνωτής, ο θάλαμος καύσης, ο στρόβιλος του ORC, η Feed pump και ο εξατμιστήρας καυσαερίων-οργανικού λόγω του χαμηλού τους εξεργοοικονομικού συντελεστή είναι απαραίτητο να αντικατασταθούν με συσκευές καλύτερου εξεργειακού βαθμού σε βάρος του κόστους.

14.2 Βελτιστοποίηση ως προς το μοναδιαίο κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (unit cost power produced)

Τα σημαντικότερα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης ως προς το μοναδιαίο κόστος της παραγόμενης ισχύος παρατίθενται στους Πίνακες 39-41, ενώ τα υπόλοιπα βρίσκονται στο Παράρτημα:

Πίνακας 36 Βέλτιστες τιμές μεταβλητών απόφασης και βαθμός απόδοσης του ORC για τα τέσσερα ρευστά

Ρευστό	T ₃	T ₅	T ₈ ή W _t	$\eta_{ex,ORC}$
Ισοβουτάνιο	260	355	388,1	0,6585
κ-πεντάνιο	285	350,9	341,2	0,4084
κ-βουτάνιο	270	321,9	351,3	0,4716
κ-εξάνιο	340	383,9	392,2 ή 1301 kW	0,4172

Πίνακας 37 Απόδοση κύκλου της υβριδικής εγκατάστασης, συνολική παραγόμενη ισχύς, μοναδιαίο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας, ετήσιων εσόδων της εγκατάστασης και Κόστος του συστήματος δείκτης για τα τέσσερα ρευστά

Ρευστό	$\eta_{ex,plant}$	W _t +P _{net}	ucpp (c/kWh)	C _{income}	CSYST
Ισοβουτάνιο	0,4576	3213	11,9	$1,556 \cdot 10^9$	$3.152 \cdot 10^9$
κ-πεντάνιο	0,44	3554	17,26	$1,932 \cdot 10^{10}$	$3,852 \cdot 10^{10}$
κ-βουτάνιο	0,4178	4507	17,81	$3,828 \cdot 10^9$	$7,748 \cdot 10^9$
κ-εξάνιο	0,4802	3375	18,78	$2,628 \cdot 10^9$	$9,847 \cdot 10^{10}$

Το ρευστό που παρουσιάζει το μεγαλύτερο εξεργειακό βαθμό απόδοσης του ORC είναι το ισοβουτάνιο και αμέσως μετά το κ-βουτάνιο.

Από πλευράς συνολικού εξεργειακού βαθμού της εγκατάστασης το εξάνιο είναι το πιο συμφέρον, ενώ το κ-βουτάνιο παράγει τη μεγαλύτερη συνολική ισχύ. Το μικρότερο μοναδιαίο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αντιστοιχεί στο ισοβουτάνιο. Το κ-εξάνιο, όπως φαίνεται από τον πίνακα, έχει τα περισσότερα έξοδα και τα χαμηλότερα έσοδα. Αντίθετα, το ισοβουτάνιο και το κ-βουτάνιο είναι τα πιο συμφέροντα από οικονομικής άποψης.

Πίνακας 38 Βέλτιστες τιμές κόστους καταστροφής εξέργειας και επένδυσης και εξεργοοικονομικού συντελεστή για κάθε συσκευή για τα τέσσερα ρευστά

Ισοβουτάνιο

Συσκευή	$\dot{C}_{D,k} + \dot{Z}_k$ (\$/sec)	f_k (%)
Compressor, c	0,005291	112,4
Turbine, t	106,4	0,4029
Turbine Gas, tg	0,07908	70,34
Evaporator, ev	0,0005706	43,45
Evaporator, evg	0,004712	4,268
Air-cooled condenser, ac	2,351	0,006086
Feed pump, fp	-0,08143	0,08252
High pressure pump, hpp	0,0001896	107,7
Combustion chamber , thk	0,07476	0,06424
Fan	0,01689	

κ-βουτάνιο

Συσκευή	$\dot{C}_{D,k} + \dot{Z}_k$ (\$/sec)	f_k (%)
Compressor, c	0,009153	112,4
Turbine, t	263,1	0,2952
Turbine Gas, tg	0,1739	64,66
Evaporator, ev	0,0004369	36,24
Evaporator, evg	0,01556	2,296
Air-cooled condenser, ac	5,23	0,0065
Feed pump, fp	-0,2487	0,026
High pressure pump, hpp	0,000186	107,5
Combustion chamber , thk	0,1676	0,02815
Fan	-0,78	

κ-πεντάνιο

Συσκευή	$\dot{C}_{D,k} + \dot{Z}_k$ (\$/sec)	f_k (%)
Compressor, c	0,007574	112,4
Turbine, t	1325	0,0315
Turbine Gas, tg	0,1349	81,35
Evaporator, ev	0,0003709	42,3
Evaporator, evg	0,008444	1,937
Air-cooled condenser, ac	11,23	~0
Feed pump, fp	-1,338	0,0945
High pressure pump, hpp	0,0001876	107,6
Combustion chamber , thk	0,1265	0,03759
Fan	-3,856	

κ-εξάνιο

Συσκευή	$\dot{C}_{D,k} + \dot{Z}_k$ (\$/sec)	f_k (%)
Compressor, c	0,00775	112,4
Turbine, t	179,8	0,18
Turbine Gas, tg	0,1366	66,48
Evaporator, ev	0,0001653	96,08
Evaporator, evg	0,004411	3,084
Air-cooled condenser, ac	-15,14	0,001312
Feed pump, fp	-0,3692	0,01736
High pressure pump, hpp	0,0001874	107,5
Combustion chamber , thk	0,1309	0,03628
Fan	3237	

Όπως γίνεται φανερό από τους παραπάνω πίνακες ο στρόβιλος του κύκλου ORC όπως και ο πύργος ψύξης στην περίπτωση του κ-εξανίου είναι τα πλέον ακριβά όσον αφορά το άθροισμα του κόστους της καταστροφής εξέργειας και το κόστος συντήρησης, λειτουργίας και επένδυσης.

Κλείνοντας, ο εξατμιστήρας (μόνο στην περίπτωση του κ-εξανίου), η αντλία hpp και ο συμπιεστής εξακολουθούν να έχουν πολύ υψηλό εξεργοοικονομικό συντελεστή και πρέπει να αντικατασταθούν με φθηνότερες συσκευές σε βάρος της ποιότητας, ενώ ο συμπυκνωτής, ο θάλαμος καύσης, ο στρόβιλος του ORC και η Feed pump λόγω του χαμηλού τους εξεργοοικονομικού συντελεστή είναι απαραίτητο να αντικατασταθούν με συσκευές καλύτερου εξεργειακού βαθμού σε βάρος του κόστους.

Στόχος αυτής της εργασίας είναι η αξιολόγηση της βιωσιμότητας του υβριδικού συστήματος γεωθερμίας-φυσικού αερίου και των διάφορων παραμέτρων της γεωθερμικής εκμετάλλευσης.

Η γεωθερμική ενέργεια είναι μορφή ανανεώσιμης ενέργειας και μπορεί να παρέχει με συνεχές τρόπο ηλεκτρική ενέργεια. Στην Ευρώπη το γεωθερμικό δυναμικό είναι πολύ μεγάλο, αλλά δεν είναι ισοκατανομημένο και για τεχνοοικονομικούς παράγοντες μόνο ένα μέρος του μπορεί να αξιοποιηθεί. Η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος στην Ευρώπη ανέρχεται στα 0,9 GWe (2013) και προβλέπεται να αυξηθεί μέχρι το 2020 στα 1,6 GWe. Τα δυαδικά συστήματα αποτελούν το 10% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος και το 45% σε αριθμό εργοστασίων. Επίσης είναι και ο πιο γρήγορα αναπτυσσόμενος τύπος συστήματος. Έρευνα πραγματοποιείται πάνω στο δυαδικό σύστημα με κύκλο Kalina, το οποίο παρουσιάζει πολύ υψηλές αποδόσεις, αλλά ακόμα δεν προτιμάται λόγω υψηλού κόστους [1].

15.1 Μεγαλύτερη αξιοποίηση γεωθερμικών πόρων

Η παραγωγικότητα των γεωτρήσεων εξαρτάται από τη διαπερατότητα των πετρωμάτων. Έτσι η έρευνα έχει στραφεί προς τη δημιουργία ή ενίσχυση αυτής της διαπερατότητας με διάφορες μεθόδους, όπως για παράδειγμα τα συστήματα EGS. Στόχος της έρευνας είναι να βελτιστοποιηθούν αυτές οι μέθοδοι με ταυτόχρονη μείωση των κινδύνων που εγκυμονούν, όπως κατάρρευση του πετρώματος, μόλυνση του υδροφόρου ορίζοντα, αύξηση της σεισμικότητας κ.α. [1].

15.2 Εκτίμηση του γεωθερμικού δυναμικού

Με πρωτοβουλία του Ευρωπαϊκού συμβουλίου γεωθερμικής ενέργειας, προτάθηκε η δημιουργία γεωτρήσεων σε διάφορα μέρη της Ευρώπης για την εκτίμηση του γεωθερμικού δυναμικού. Αυτή η πρόταση παρουσιάζει αρκετά θετικά στοιχεία καθώς διευκολύνει τις ακριβείς προβλέψεις της συνολικής εκμεταλλεύσιμης γεωθερμικής ενέργειας, της γεωθερμικής βαθμίδας και της ροής θερμότητας σε διάφορα σημεία αλλά και παρέχει πληροφορίες για τη γεωλογία κάθε περιοχής. Επιπλέον, από μια τέτοια εκστρατεία ο τομέας

των γεωτρήσεων θα αναπτυχθεί πολύ πιο γρήγορα λόγω της γνώσης που θα συσσωρευτεί και το ρίσκο και το κόστος γεωτρήσεων μπορεί να μειωθεί σημαντικά [1].

15.3 Προτάσεις για τη μείωση του κόστους της ενέργειας σε ένα γεωθερμικό εργοστάσιο

- Μείωση του κόστους γεωτρήσεων μέσω εξέλιξης της τεχνολογίας τους.
- Αύξηση της απόδοσης στη μετατροπή και τη μεταφορά ενέργειας (τουρμπίνες, εναλλάκτες κ.α.)
- Ανάπτυξη φθηνότερων υλικών και μεθόδων κατά της διάβρωσης και των επικαθίσεων
- Πιο αξιόπιστες μέθοδοι εκτίμησης του γεωθερμικού δυναμικού και εξερεύνησης του πεδίου, ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο αριθμός των έργων που εγκαταλείπονται [1].

15.4 Πρωτοβουλίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης σχετικά με τη γεωθερμία

Στην κατεύθυνση της μείωσης της χρήσης των συμβατικών καυσίμων και της προώθησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας συμπεριλαμβανομένης και της γεωθερμίας κινούνται οι οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Συγκεκριμένα, η πιο σημαντική οδηγία είναι η 2009/28/EC που εισάγει τα εθνικά σχέδια δράσης για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας National Renewable Energy Action Plans (NREAP) για κάθε μέλος της Ε.Ε. Σκοπός του NREAP είναι το 20% της κατανάλωσης της ενέργειας για κάθε μέλος να προέρχεται από τις ανανεώσιμες πηγές μέχρι το 2020. Δεκαεννέα χώρες της Ε.Ε έχουν εντάξει τις χρήσεις της γεωθερμίας προκειμένου να επιτύχουν τον παραπάνω στόχο. Στους πίνακες που παρατίθενται παρουσιάζονται για τα έτη 2012 και 2020 οι στόχοι των τριών χρήσεων (ΓΑΘ, άμεσες και ηλεκτρική) της γεωθερμίας [1].

Πίνακας 39 Γεωθερμική παραγωγή ενέργειας (σε MWth) από γεωθερμικές αντλίες θερμότητας στην Ευρώπη (EU-28) και στόχοι του NREAP για το 2012 και το 2020 [1]

Country	2012				2020
	NREAP target	Reported values ¹	Difference	% difference	NREAP target
	GWh _{th}	GWh _{th}	GWh _{th}		GWh _{th}
AT	128	1440	1312	1026	302
BE	442	335	-107	-24	1710
DE	3710	4200	490	13	6059
DK	1570	695	-875	-56	2314
EL	105	135	30	29	582
ES	187	210	23	12	471
FR	3954	2775	-1179	-30	6629
HU	70	110	40	58	1244
IT	779	472	-307	-39	6071
NL	1372	880	-492	-36	2814
RO	12	32	20	175	93
SE	4431	15200	10769	243	9478
SI	151	96	-55	-37	442
SK	12		-12	-100	47
UK	2024	500	-1524	-75	11083
Total	18947	27080	8133		49340

1) Source: [Antics et al. 2013]

Πίνακας 40 Γεωθερμική παραγωγή ενέργειας (σε MWth) άμεσων χρήσεων στην Ευρώπη (EU-28) το 2012 και στόχοι του NREAP για το 2012 και το 2020 [1]

Country	2012				2020
	NREAP target	Reported values ¹	Difference	% difference	NREAP target
	GWh _{th}	GWh _{th}	GWh _{th}		GWh _{th}
AT	256	184	-72	-28	465
BE	41	18	-23	-56	66
BG	28	16	-12	-44	105
CZ	0	25	25	0	174
DE	1326	729	-597	-45	7978
EL	244	504	260	106	593
ES	44			0	110
FR	2268	1316	-952	-42	5815
HU	1396	2849	1453	104	4152
IT	2780	2368	-412	-15	3489
LT	35	93	58	167	58
NL	872	202	-670	-77	3012
PL	337	187	-151	-45	2070
PT	163	96	-67	-41	291
RO	407	362	-45	-11	930
SE		270	270	0	
SI	209	164	-45	-22	233
SK	35			0	1047
UK		21	21	0	
Total	10440	9404	-958		30589

1) Source: [Antics et al. 2013]

Πίνακας 41 Εγκατεστημένη γεωθερμική παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος (σε MW_{el}) στην Ευρώπη (EU-28) το 2012 και στόχοι του NREAP για το 2012 και το 2020 [1]

Country	2012				2020 target
	NREAP target	Reported values ¹	Difference	% difference	
	MW	MW	MW		
AT	1	14	0.4	40	1
BE	0		0	0	3.5
CZ	0		0	0	4.4
DE	27	11.9	-15.1	-56	298
EL	0		0	0	120
ES	0		0	0	50
FR	37	17	-20	-54	80
HU	0		0	0	57
IT	787	875.5	88.5	11	920
PT	25	28.5	3.5	14	75
RO	0	0.05	0.05	0	0
SK	4		-4	-100	4
Total	881	934	53	0	1613

1) Source: [Antics et al. 2013]

Σύμφωνα με το JRC Geothermal Energy Status Report το 2012 στην Ελλάδα η παραγόμενη θερμική ενέργεια από τις γεωθερμικές αντλίες θερμότητας ήταν 135 MWh_{th} ενώ ο στόχος του NREAP ήταν 105 MWh_{th}. Σύμφωνα με την ίδια πηγή, η παραγωγή θερμικής ενέργειας για άμεσες χρήσεις το 2012 στην Ελλάδα ήταν 504 MWh_{th}, διπλάσια περίπου από το στόχο του NREAP που ήταν 244 MWh_{th}. Επιπλέον, μέχρι το 2020 προβλέπεται και στους δύο τομείς περαιτέρω αύξηση. Τα τελευταία χρόνια η γεωθερμική παραγωγή ενέργειας άρχισε να επανέρχεται στο προσκήνιο και στην Ελλάδα λόγω της ενεργειακής και οικονομικής κρίσης ως αναζήτηση μιας φθηνότερης και «πράσινης» ενέργειας. Ο στόχος του NREAP για την Ελλάδα είναι να παράγει ηλεκτρική ενέργεια από γεωθερμικές πηγές που να ανέρχεται στα 120 MW_{el} το 2020 [1].

Είναι γεγονός ότι τα τελευταία δέκα χρόνια τα κράτη μέλη έχουν δαπανήσει 4,5 δισεκατομμύρια για τις ανανεώσιμες πηγές μέσω του European Energy Programme for Recovery (EPR). Ακόμη, μέχρι το 2012, διατέθηκαν 29,4 εκατομμύρια ευρώ από τα προγράμματα FP6 και FP7 (Framework Programme) σε γεωθερμικές επενδύσεις. Παρόλα αυτά από το έκτο στο έβδομο πρόγραμμα σημειώθηκε σημαντική μείωση στη χρηματοδότηση και σε έργα που άρχισαν μετά το 2009 το EPR δεν παρείχε οικονομική στήριξη.

Ένα άλλο μέσο χρηματοδότησης είναι το NER 300 που επιδοτεί τις καινοτόμες ενεργειακές εγκαταστάσεις και τεχνολογίες με ανανεώσιμες πηγές.

Τα γεωθερμικά έργα που χρηματοδοτούνται από το NER 300 είναι EGS προγράμματα με ονομαστική ισχύ μεγαλύτερη των 5 MWe. Τα μέγιστα ποσά με τα οποία ενισχύουν τα έργα οικονομικά κυμαίνονται μεταξύ 21 και 57 €/MWh [1].

Μια επιπλέον πρωτοβουλία δηλαδή ένα σταθερό και εγγυημένο ποσό που καταβλήθηκε σε όσα κράτη μέλη της Ε.Ε παρήγαγαν ηλεκτρική ενέργεια από τις ανανεώσιμες πηγές είναι η επονομαζόμενη feed in tariff (FIT). Ενώ αυτό το ποσό ήταν διαθέσιμο σε 24 κράτη μέλη μόνο η Γερμανία, η Γαλλία, η Σλοβενία, η Σλοβακία, η Ισπανία, η Αυστρία, η Τσεχική Δημοκρατία, η Ελλάδα, η Πορτογαλία (Αζόρες) και η Ουγγαρία το αξιοποίησαν για τη γεωθερμία. Αυτή η υποστήριξη λοιπόν από την Ε.Ε. μπορεί να επηρεάσει την κοινωνική και πολιτική αποδοχή σε ότι αφορά τις ανανεώσιμες πηγές. Τέλος, οι κυβερνήσεις προκειμένου να ενισχύσουν την προσπάθεια επιλογής των ανανεώσιμων πηγών παρέχουν δάνεια με χαμηλά επιτόκια και μεγάλη περίοδο αποπληρωμής. Πέρα από το κόστος όμως το χρονοδιάγραμμα των δαπανών έχει σημασία, ιδιαίτερα όταν για τα γεωθερμικά έργα χρειάζονται εφτά με οχτώ χρόνια από την έναρξη της έρευνας μέχρι την είσοδο στην αγορά [1].

Στις μέρες μας είναι ευρέως διαδεδομένα τα προγράμματα εμπορεύσιμων πράσινων πιστοποιητικών (TGC) που καθορίζουν τα ποσοστά της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιούν ανανεώσιμες πηγές. Όσοι εξασφαλίζουν επομένως τα παραπάνω πιστοποιητικά όχι μόνο παράγουν ηλεκτρική ενέργεια αλλά μπορούν να διαθέσουν στο εμπόριο και τα πράσινα πιστοποιητικά. Τα έσοδα από την πώλησή τους σε παραγωγούς ή διανομείς της ηλεκτρικής ενέργειας προερχόμενη από άλλες πηγές καλύπτουν το κενό μεταξύ του οριακού κόστους της ηλεκτροπαραγωγής από ανανεώσιμες πηγές και της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας [1].

Στις προτάσεις αναβάθμισης κι έρευνας συγκαταλέγεται η προσπάθεια για αντικατάσταση μεταλλικών υλικών όπως ο κοινός χάλυβας και ο όλκιμος χυτοσίδηρος, που χρησιμοποιούνται στη γεωθερμία και συχνά εμφανίζουν προβλήματα διάβρωσης, με πλαστικά υλικά. Αυτά διακρίνονται σε ελαστομερή, θερμοπλαστικά και θερμοσκληρυνόμενα. Τα θερμοπλαστικά ήδη χρησιμοποιούνται σε σωληνώσεις κι εξαρτήματα και είναι φθηνά. Μερικά από αυτά είναι το πολυπροπυλένιο, με αντοχή σε χαμηλότερες των 75° C θερμοκρασίες που ωστόσο δε μειώνεται με το χρόνο, το πολυαιθυλένιο το οποίο είναι εύκαμπτο και λειτουργεί και σε υψηλές πιέσεις και το πολυβινυλοχλωρίδιο για εφαρμογές χαμηλής θερμοκρασίας που παρουσιάζει επιφανειακή οξείδωση όταν επηρεάζεται από την υπεριώδη ακτινοβολία.

Τα ελαστομερή είναι ιδανικά για την κατασκευή φλαντζών και παρεμβυσμάτων καθώς και για την προστασία ηλεκτρικών καλωδίων και μεταλλικών σωληνώσεων. Το κύριο μειονέκτημά τους όμως είναι η γήρανση που παρουσιάζουν κάτι που δεν επηρεάζει τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά τους.

Τέλος, τα θερμοσκληρυνόμενα είναι διαδεδομένα για εφαρμογές γεωθερμίας χαμηλής ενθαλπίας.

Όλα τα παραπάνω εξακολουθούν να ερευνώνται προκειμένου να μειωθούν στο ελάχιστο τα μειονεκτήματά τους και να καταστήσουν τις γεωθερμικές εγκαταστάσεις πιο ελκυστικές, συμφέρουσες και σίγουρες επενδύσεις [1].

15.5 Άλλες δραστηριότητες

Η γεωθερμία μέχρι σήμερα χρησιμοποιείται σε πολλούς τομείς. Παρόλα αυτά η έρευνα εξελίσσεται και συνεχώς βρίσκονται νέα πεδία στα οποία μπορεί να συνδράμει ενεργά. Η καλλιέργεια σπιρουλίνας με ταυτόχρονη δέσμευση και χρήση του CO₂ που διαχωρίζεται από το γεωθερμικό νερό αποτελεί ένα παράδειγμα. Πρόκειται για ένα κυανό-πράσινο μικροφύκος πλούσιο σε βιταμίνη B12, σίδηρο και πρωτεΐνη που εδώ και μερικά χρόνια παράγεται σε μονάδα του πεδίου Νιγρίτας [3].

Το ρίσκο ενός γεωθερμικού έργου περιλαμβάνει αρχικά τον κίνδυνο να μη βρεθεί ικανοποιητική ποσότητα γεωθερμικού ρευστού για τη λειτουργία του εργοστασίου, ενώ στη συνέχεια μετά την έναρξη λειτουργίας του εργοστασίου μπορεί να εξαντληθεί ο πόρος. Ο γεωθερμικός πόρος επιβεβαιώνεται μετά την εξερεύνηση του πεδίου και τη δημιουργία γεωτρήσεων. Όμως, αυτές είναι οι ενέργειες που ευθύνονται για το μεγαλύτερο μέρος του κόστους ενός έργου. Έτσι, είναι πολύ σημαντική η δημιουργία ενός ταμείου στήριξης για την ασφάλεια των επενδύσεων, το οποίο προτάθηκε από τον EGEC. Αν αυτό υιοθετηθεί από όλες τις χώρες της Ευρώπης οι επενδύσεις σε γεωθερμικά έργα θα αυξηθούν κατά πολύ [1].

16 Προτάσεις για τη βελτίωση του υβριδικού συστήματος

Μια πρόταση για τη βελτίωση του συστήματος είναι η εκμετάλλευση της απορριπτόμενης θερμότητας στο περιβάλλον από το συμπυκνωτή μέσω της χρήσης του νερού ψύξης. Συγκεκριμένα, αυτό θερμαίνεται μετά την επαφή του με το θερμό οργανικό ρευστό και δύναται να αξιοποιηθεί είτε με τηλεθέρμανση μέσω υπογείων σωλήνων είτε για κάλυψη των αναγκών του εργοστασίου σε ζεστό νερό ή θέρμανση.

Ως τηλεθέρμανση (district heating) ορίζεται η προμήθεια θερμότητας για θέρμανση χώρων καθώς και θερμού νερού χρήσης σε ένα σύνολο κτιρίων, έναν οικισμό, ένα χωριό ή μια πόλη, από έναν κεντρικό σταθμό παραγωγής θερμότητας. Η θερμότητα μεταφέρεται με μονωμένο δίκτυο αγωγών από το σταθμό προς τα θερμαινόμενα κτίρια. Η πρώτη μικρού μεγέθους εγκατάσταση Τ/Θ στην Ελλάδα ξεκίνησε στην Πτολεμαΐδα το 1960, θερμαίνοντας τον οικισμό της ΔΕΗ στο Προάστιο Εορδαίας από τον ΑΗΣ Πτολεμαΐδας. Σήμερα εγκαταστάσεις Τ/Θ διαθέτουν οι πόλεις της Κοζάνης, Πτολεμαΐδας, Αμύνταιου, Φιλώτα, Μεγαλόπολης και των Σερρών που αξιοποιούν το θερμικό φορτίο των γειτονικών θερμοηλεκτρικών σταθμών. Στα πλεονεκτήματα αυτής συγκαταλέγονται η μείωση της περιβαλλοντικής ρύπανσης εφόσον δεν απορρίπτεται η θερμότητα στις λίμνες και στα ποτάμια αλλά και η μείωση του κόστους μιας και δεν απαιτείται πύργος ψύξης [29].

Παρόλο που το εργοστάσιο βασίζεται στη γεωθερμική ενέργεια δεν είναι 100% φιλικό προς το περιβάλλον καθώς μεγάλο ποσοστό της ηλεκτρικής ισχύος οφείλεται στην καύση του φυσικού αερίου. Προκειμένου λοιπόν να χρησιμοποιεί μόνο ανανεώσιμες πηγές προτείνεται η αντικατάσταση του φυσικού αερίου με βιοαέριο. Για ακόμη μεγαλύτερη ενίσχυση του συστήματος και παραγωγή περισσότερης ισχύος υπάρχουν πολλές επιλογές αντί του φυσικού αερίου, μερικές από τις οποίες είναι η ηλιακή ενέργεια, η βιομάζα κλπ. τα οποία έχουν αναλυθεί εκτενέστερα στο κεφάλαιο των υβριδικών συστημάτων. Μάλιστα όσες περισσότερες πηγές συνδυάζονται τόσο πιο ασφαλή επιλογή συνιστά το σύστημα για τους επενδυτές.

Από τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης γίνεται αντιληπτό ότι το υβριδικό σύστημα γεωθερμίας-φυσικού αερίου δεν είναι αποδοτικό όταν χρησιμοποιείται για τον κύκλο Rankine κ-εξάνιο ή κ-πεντάνιο. Ωστόσο η επιλογή του κ-βουτανίου ή του ισοβουτανίου για το σύστημα το καθιστά βιώσιμο και οικονομικά ελκυστικό.

Εν κατακλείδι, στην περίπτωση που το επιθυμητό αποτέλεσμα είναι η μεγαλύτερη δυνατή παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος προτείνεται η επιλογή του κ-βουτανίου με 4507 kW με σχετικά μικρό μοναδιαίο κόστος της παραγόμενης ισχύος 17,81 cents/kWh. Από την άλλη πλευρά αν ο στόχος είναι ο μέγιστος βαθμός απόδοσης με το μικρότερο κόστος το ισοβουτάνιο εμφανίζει το μεγαλύτερο εξεργειακό βαθμό απόδοσης του κύκλου ORC $n_{ex,orc}=0,6585$ με μοναδιαίο κόστος 11,9 cents/kWh. Επομένως και τα δυο ρευστά αποτελούν εξίσου συμφέρουσες προτάσεις και η τελική επιλογή έγκειται στις ανάγκες που διαμορφώνονται στην αγορά.

18 Βιβλιογραφία

- [1] B. Sigfusson, A. Uihlein, «2014 JRC Geothermal Energy Status Report, Technology, market and economic aspects of geothermal energy in Europe», EUROPEAN COMMISSION, Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport, 2015
- [2] M. H. Dickson και M. Fanelli, Istituto di Geoscienze e Georisorse, CNR, Pisa, Italy, Μετάφραση : Μ. Φυτίκας και Μ. Παπαχρήστου, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης/Τμήμα Γεωλογίας, http://www.geothermal-energy.org/what_is_geothermal_energy.html, Ανάκτηση 15/03/2015
- [3] Μ. Φυτίκας, Ν. Ανδρίτσος, «Γεωθερμία», Εκδόσεις Τζιόλα 2004, Θεσσαλονίκη
- [4] Geothermal Energy, http://en.wikipedia.org/wiki/Geothermal_energy, Ανάκτηση 15/03/2015
- [5] H. Saibi, S. Finsterle, R. Bertani, and Jun Nishijima, « Geothermal Energy in Handbook of Sustainable Engineering», eds. J. Kauffman, K.-M. Lee, Springer Science+Business Media Dordrecht 2013
- [6] B. I. Ismail, Chapter 13 «ORC-Based Geothermal Power Generation and CO₂-Based EGS for Combined Green Power Generation and CO₂ Sequestration in New developments in renewable energy», Department of Mechanical Engineering, Lakehead University, Thunder Bay, Ontario, Canada,
- [7] R. Bertani, P. Ungemach, «Geothermal Electricity and Combined Heat & Power», European Geothermal Energy Council, December 2007, Brussels
- [8] «Γεωθερμία»,<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%93%CE%B5%CF%89%CE%B8%CE%B5%CF%81%CE%BC%CE%AF%CE%B1>, Ανάκτηση 21/03/2015
- [9] Μ. Σταθακόπουλος, συνέντευξη του Μ. Φυτίκα, <http://www.thermoydravlikos.gr/article.php?ID=180>, Ανάκτηση 28/03/2015
- [10] «Geothermal power plant» <https://forum.paradoxplaza.com/forum/index.php?threads/released-geothermal-power-plant.849342/>, Ανάκτηση 21/04/2015
- [11] «Enhanced Geothermal System Ciptakan Listrik melalui Stimulasi Hidrolik» <http://energitoday.com/2015/04/23/enhanced-geothermal-system-ciptakan-listrik-melalui-stimulasi-hidrolik/>, Ανάκτηση 21/05/2015
- [12] R. DiPippo, «Geothermal Power Plants, Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact», Dartmouth, Massachusetts, May 2007, Second Edition.
- [13] Κ. Ντελκίς, Σημειώσεις μαθήματος: «Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, 4^η ενότητα: Αεριοστρόβιλοι - Μονάδες Συνδυασμένου Κύκλου», Ε.Μ.Π
- [14] «Brayton cycle» http://en.wikipedia.org/wiki/Brayton_cycle, Ανάκτηση 21/04/2015

- [15] Y. A. Cengel, M. A. Boles, Βιβλίο: «Θερμοδυναμική για μηχανικούς», 7^η έκδοση, επιμέλεια μετάφρασης Παναγιώτης Ε. Τσιακάρας
- [16] «Rankine cycle» http://en.wikipedia.org/wiki/Rankine_cycle, Ανάκτηση 21/04/2015
- [17] «Organic Rankine cycle», http://en.wikipedia.org/wiki/Organic_Rankine_cycle, Ανάκτηση 21/04/2015
- [18] Kalina cycle» http://en.wikipedia.org/wiki/Kalina_cycle, Ανάκτηση 21/04/2015
- [19] Δαμιανίδης Χ. Διπλωματική εργασία: «Σύγκριση κύκλων Kalina και ORC για γεωθερμικές πηγές ενέργειας», Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ
- [20] «Review of technologies for hybrid uses of geothermal and additional RES», Activity 3.2 in WP 3, South east Europe Transitional Cooperation Programme, GeoSEE, European Union (Coordinated by UM)
- [21] T. Kohl ,R. Speck, «Electricity production by geothermal hybrid- plants in low-enthalpy areas»
- [22] Dr. H. Alrobaei, «Hybrid Geothermal/Solar Energy Technology For Power Generation», Higher Institute of Engineering, Hoon, Libya
- [23] «Τα γεωθερμικά πεδία της χώρας» (χαρακτηρισμός σύμφωνα με ν.3175/ 2003), Ινστιτούτο γεωλογικών και μεταλλευτικών ερευνών, τομέας υδατικών πόρων και περιβάλλοντος, διεύθυνση γεωθερμίας και θερμομεταλλικών υδάτων, Αθήνα 2007
- [24] Α. Σταμάτης, Σημειώσεις μαθήματος: «Σχεδιασμός Ενεργειακών Συστημάτων», Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Βόλος.
- [25] Β.Μποντόζογλου, Διδακτικές σημειώσεις «Συσκευές θερμικών διεργασιών», Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Βόλος, Σεπτέμβριος 2014.
- [26] «Shell and tube heat exchanger», http://en.wikipedia.org/wiki/Shell_and_tube_heat_exchanger, Ανάκτηση 21/03/2015.
- [27] Purevsuren Dorj, MSc thesis, «Thermoeconomic analysis of a new geothermal utilization chp plant in Tsetserleg,Mongolia», Department of Mechanical and Industrial Engineering University of Iceland by Renewable Energy Corporation, United Nations University Geothermal Training Programme Reykjavík, Iceland Report 2, Published in June 200 .
- [28] M. S.Peters, K. D. Timmerhaus, R. E. West, «Σχεδιασμός και οικονομική μελέτη εγκαταστάσεων για μηχανικούς», University of Colorado, Επιμέλεια μετάφρασης:Δ.Μαρίνος-Κουρής, Ζ.Μαρούλης, Μ. Κροκίδα, Εκδόσεις Τζιόλα, Πέμπτη Έκδοση, 2006, Θεσσαλονίκη.
- [29] «Γεωθερμικές αντλίες θερμότητας, εφαρμογές στον οικιακό τομέα», Ενεργειακό γραφείο Κυπρίων πολιτών, www.cea.org.cy, Ανάκτηση 11/06/2015.