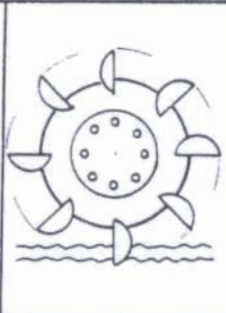


ΗΠΙΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Τόμος Β

- 10. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗ ΓΕΩΡΓΙΑ - 11. ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ
- 12. ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ - 13. ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ - 14. ΒΙΟΜΑΖΑ
- 15. ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΑ ΚΑΙ Η ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥΣ - 16. ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΥΜΑΤΩΝ
- 17. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ
- 18. ΝΟΜΙΚΑ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΙΣ ΗΠΙΕΣ ΜΟΡΦΕΣ
- 19. ΗΠΙΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ



ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ RANKINE
ΣΤΗΝ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ

Ι. Νικολαΐδης, Σ. Β. Παράς και Α. Ι. Καράμπελας
Εργαστήριο Τεχνολογίας Χημικών Εγκαταστάσεων
Τμήμα Χημικών Μηχανικών
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η εφαρμογή του κύκλου Rankine για μετατροπή θερμότητας σε ηλεκτρική ενέργεια απαιτεί τη χρήση βοηθητικού ρευστού με ειδικά τεχνικά χαρακτηριστικά. Για την προκαταρκτική τεχνικοοικονομική μελέτη εγκαταστάσεων βασιζομένων στο κύκλο Rankine και την αξιολόγηση υποψηφίων βοηθητικών ρευστών αναπτύχθηκε κατάλληλο πρόγραμμα Η/Υ. Οι υπολογισμοί δείχνουν, μεταξύ των άλλων, ότι για γεωθερμικά ρευστά θερμοκρασίας μεγαλύτερης των 150°C τα βοηθητικά ρευστά που πλεονεκτούν είναι η αμμωνία, το ισοβουτάνιο και το Freon-114, ενώ για θερμοκρασίες μικρότερες των 150°C το προπάνιο, η αμμωνία και το Freon-12. Κατάλληλα βοηθητικά ρευστά ($i\text{-C}_4$, NH_3) μπορούν να αποδώσουν ισχύ μεγαλύτερη από 2 MWe ανά 100 ton/hr γεωθερμικού υγρού θερμοκρασίας 190°C (περίπτωση Μήλου). Οι εκτιμήσεις του κόστους είναι ενθαρρυντικές, ενώ υπάρχουν προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπισθούν.

ΛΕΞΕΙΣ - ΚΛΕΙΔΙΑ: Γεωθερμικά Ρευστά, Κύκλο Rankine ή Δυαδικό, Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας, Πρόγραμμα Η/Υ, Τεχνικοοικονομικοί υπολογισμοί.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ: Η επιλογή κατάλληλου βοηθητικού ρευστού είναι καθοριστική για την αποδοτική λειτουργία του κύκλου Rankine και την οικονομικά συμφέρουσα παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η συστηματική αξιολόγηση βοηθητικών ρευστών απαιτεί ολοκληρωμένους τεχνικοοικονομικούς υπολογισμούς. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκε αλγόριθμος ο οποίος, με δεδομένα τη θερμοκρασία και παροχή του γεωθερμικού υγρού και τις ιδιότητες του βοηθητικού μέσου, επιτρέπει τον υπολογισμό της δυναμικότητας και του κόστους των συσκευών, της απολαμβανόμενης ισχύος, του βαθμού απόδοσης και του απαιτούμενου νερού φύξης. Επί πλέον, με τη βοήθεια του αλγορίθμου, γίνεται οικονομική αξιολόγηση της εγκατάστασης με προσδιορισμό του ύψους επένδυσης, του κόστους της παραγόμενης ενέργειας και χαρακτηριστικών οικονομικών δεικτών. Στην εισήγηση αυτή συνοψίζονται τα αποτελέσματα υπολογισμών, ενώ λεπτομέρειες για την εγκατάσταση και τον αλγόριθμο δίδονται αλλού (Νικολαΐδης - 6).

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ - ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ

Τέσσερεις είναι οι βασικές διεργασίες του κύκλου Rankine (Σχήμα 1):
 α) Προθέρμανση, ατμοποίηση και υπερθέρμανση του βοηθητικού ρευστού σε συστοιχία εναλλακτών. β) Εκτόνωση σε στρόβιλο όπου παράγεται έργο μετατρεπόμενο σε ηλεκτρική ενέργεια. γ) Συμπύκνωση των ατμών του βοηθητικού ρευστού με νερό ψύξης (από πύργο ψύξης ή θάλασσα). δ) Αύξηση της πίεσης του βοηθητικού υγρού και ανακύκλωση με τη βοήθεια αντλίας.

Μεγάλης σημασίας για τη λειτουργικότητα και οικονομικότητα της εγκατάστασης είναι οι διεργασίες εναλλαγής θερμότητας (α) και (γ). Η απόληψη θερμότητας στο στάδιο (α) μπορεί να γίνει με συμβατικούς εναλλάκτες οπότε προστατεύεται το κύκλωμα του βοηθητικού ρευστού και ο στρόβιλος από ανεπιθύμητα αέρια και άλατα διαλυμένα στο γεωθερμικό υγρό. Παράλληλα όμως οι εναλλάκτες μπορεί να αντιμετωπίσουν σοβαρά προβλήματα διάβρωσης ή/και απόθεσης αλάτων. Στην εργασία αυτή γίνεται δεκτή η χρήση συμβατικών εναλλακτών και σε άλλη εργασία (Φαλτσή (10)) μελετώνται εναλλάκτες "άμεσης επαφής", που φαίνεται να αποτελούν μία ελκυστική λύση στο πρόβλημα.

Για τη συμπύκνωση στο στάδιο (γ) η λύση του πύργου ψύξης είναι δαπανηρή και προϋποθέτει διαθεσιμότητα νερού, ενώ η συμφερότερη λύση του θαλασσινού νερού (όταν υπάρχει) πρέπει να μην δημιουργεί προβλήματα θερμικής ρύπανσης. Στην εργασία αυτή έχουν ληφθεί υπόψη και οι δύο λύσεις.

Οι βασικές παραδοχές που έγιναν κατά τους υπολογισμούς είναι οι εξής:

1. Νερό ψύξης διαθέσιμο στους 80°F.
2. Ελάχιστη θερμοκρασιακή προσέγγιση ρευμάτων 20°F για εναλλάκτη και 10°F για συμπυκνωτή.
3. Συντελεστής ισεντροπικής μεταβολής στρόβιλου 0.85. Η τιμή αυτή προτείνεται απ' τους Bergmann και Mafi (1) για πτώση ενθαλπίας στο στρόβιλο μέχρι και 50 Btu/lb, πράγμα που ισχύει για τα περισσότερα υπό εξέταση βόηθητικά ρευστά.
4. Απόδοση αντλίας τροφοδοσίας 75% και γεννήτριας 85%.
5. Το γεωθερμικό ρευστό έχει ιδιότητες καθαρού νερού.
6. Αγνοείται το κόστος των γεωτρήσεων επειδή θεωρείται ότι επιβαρύνει κυρίως τη βασική μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τον ατμό του γεωθερμικού μίγματος.
7. Ετήσιες δαπάνες για συντήρηση - επισκευές 5% της παγίας επένδυσης. Συντελεστής απόσβεσης 10%.
8. Η οικονομική ανάλυση έγινε για το έτος 1985.

ΤΡΟΠΟΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΒΟΗΘΗΤΙΚΟΥ ΡΕΥΣΤΟΥ

Πολλά κριτήρια επιλογής βοηθητικού ρευστού έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία (π.χ. Sherwood (8), James (3), Kihara και Fukunaga (4)) και μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής:

α) Τεχνικά χαρακτηριστικά του ρευστού. Πίεση συμπύκνωσης, κρίσιμη θερμοκρασία, μοριακό βάρος, κλίση καμπύλης κεκορεσμένου ατμού σε διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας, ειδικός όγκος, λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης-σημείο βρασμού, θερμική αγωγιμότητα, ιξώδες, χημική σταθερότητα, διαβρωτικότητα.

β) Ασφάλεια. Το ρευστό πρέπει να μην είναι τοξικό και εύφλεκτο.

γ) Οικονομικότητα. Επιθυμητό το χαμηλό κόστος προμήθειας και αποθήκευσης του ρευστού.

Ο σχετικά μεγάλος αριθμός κριτηρίων αλλά και υποψηφίων ρευστών καθιστούν δυσχερή την επιλογή.

Όπως δείχνουν οι πρόσφατες ανακοινώσεις των Hiron et al (2), Mink et al (5), Salucci et al (7) και Yihon (9) παρατηρείται σημαντική δραστηριότητα σε διεθνή κλίμακα για την έρευνα και ανάπτυξη μονάδων βασισμένων στο κύκλο Rankine. Οι παραπάνω ανακοινώσεις δείχνουν επίσης ότι υπάρχουν πολλά ερωτήματα, σχετικά με τη επιλογή του βοηθητικού ρευστού και το σχεδιασμό των εγκαταστάσεων, που πρέπει να απαντηθούν.

Στην εργασία αυτή ακολουθείται η εξής μεθοδολογία: Γίνεται συνδυασμένη χρήση των προαναφερομένων κριτηρίων και μελετώνται οι επιπτώσεις των τεχνικών χαρακτηριστικών των ρευστών στην οικονομικότητα της συνολικής εγκατάστασης. Πιστεύεται ότι η μεθοδολογία οδηγεί στη σωστή επιλογή του βοηθητικού μέσου για δεδομένη θερμοκρασία και παροχή του γεωθερμικού ρευστού.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΧΟΛΙΑ

Οι βασικές μεταβλητές που μελετώνται είναι η θερμοκρασία και παροχή του γεωθερμικού υγρού και το είδος του βοηθητικού ρευστού. Επίσης χρησιμοποιείται για συντομία ο όρος "άλμη" αντί γεωθερμικό υγρό.

Θερμοκρασία άλμης. Είναι φυσικό ότι αύξηση της θερμοκρασίας συνεπάγεται αύξηση της απολαμβανόμενης ισχύος P (Σχήμα 2) και μείωση του κόστους C της παραγόμενης ενέργειας (Σχήμα 3). Είναι χαρακτηριστική η μεγάλη αύξηση του κόστους για θερμοκρασίες μικρότερες από $\sim 150^{\circ}\text{C}$.

Τα ίδια αποτελέσματα προκύπτουν με διάφορα βοηθητικά ρευστά που εξετάζονται για θερμοκρασίες άλμης $380^{\circ}\text{F} = 193^{\circ}\text{C}$ (Πίνακας 1) και $185^{\circ}\text{F} = 85^{\circ}\text{C}$ (Πίνακας 2). Για θερμοκρασία 185°F η απόδοση (kWh/ton άλμης) είναι μικρή ενώ το κόστος ενέργειας υψηλό με αποτέλεσμα να είναι αντι-

οικονομική η λειτουργία της εγκατάστασης με σημερινά δεδομένα. Για 380°F το κόστος της ενέργειας είναι γενικά 3-4 φορές μικρότερο (σε σχέση με άλυτη 185°F), ενώ η παραγόμενη ισχύς είναι 15-20 φορές μεγαλύτερη.

Παροχή άλυτης. Είναι ενδιαφέρον ότι το κόστος της ενέργειας δεν επηρεάζεται σημαντικά για παροχές άλυτης μεγαλύτερες από ~ 200 ton/hr (Σχήμα 4). Επίσης η επίδραση της παροχής στο ύψος επένδυσης δεν φαίνεται να είναι μεγάλη στην περιοχή των μεγάλων παροχών (Σχήμα 5).

Επιλογή βοηθητικού ρευστού. Βασικά μεγέθη για την αξιολόγηση βοηθητικών ρευστών είναι η απολαμβανόμενη καθαρή ισχύς, το επενδεδυμένο κεφάλαιο ανά kW, το κόστος της ενέργειας και η καθαρή ισχύς ανά τόνο διαθέρσιμης άλυτης. Στον Πίνακα 1 δίδονται τα αποτελέσματα υπολογισμών με τα επικρατέστερα βοηθητικά ρευστά για θερμοκρασία άλυτης 380°F , παροχή 400 ton/hr και για περιπτώσεις πύργου ψύξης και ψύξης με θαλασσινό νερό. Είναι φανερό ότι η χρησιμοποίηση πύργου ψύξης επιβαρύνει σημαντικά την πάγια επένδυση και τις δαπάνες λειτουργίας.

Καμμία ουσία στον Πίνακα 1 δεν φαίνεται να υπερτερεί και ως προς τα τέσσερα προαναφερθέντα κριτήρια. Εν τούτοις η αμμωνία, το Freon-114 και το ισοβουτάνιο ($i\text{-C}_4$) υπερτερούν σχετικά, αφού παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη απόδοση και ισχύ και τη μικρότερη επένδυση ανά kW. Το $i\text{-C}_4$, που υστερεί μόνο ως προς το επενδεδυμένο κεφάλαιο αλλά υπερτερεί στα άλλα τρία κριτήρια, συνιστάται από τους περισσότερους ερευνητές (π.χ. Kihara και Fukunaga (4)) γιατί επιπλέον είναι ψηνό, μη τοξικό, μη διαβρωτικό και συμπυκνώνεται σε μέτριες θερμοκρασίες και πιέσεις. Πρέπει να προστεθεί ότι ευνοϊκά αποτελέσματα προκύπτουν από μίγματα βοηθητικών ρευστών ιδιαίτερα όταν απαιτείται πύργος ψύξης.

Στον Πίνακα 2 συνοψίζονται αποτελέσματα για θερμοκρασία άλυτης 185°F . Ο αριθμός των υποψηφίων βοηθητικών ρευστών είναι περιορισμένος (σε σύγκριση με τον Πίνακα 1) γιατί πολλές ουσίες δεν πληρούν βασικές τεχνικές προϋποθέσεις για χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας. Το προπάνιο, το F-11 και η αμμωνία υπερτερούν σαυτή την περίπτωση.

Αποδοτικότητα Επένδυσης - Προβλήματα. Στο Σχήμα 6 δίδονται τιμές των δεικτών "χρόνος εξώφλησης" (POT) και "απόδοση με βάση την αρχική επένδυση" (ROI), για εγκαταστάσεις με πύργο ψύξης, σαν συνάρτηση της τιμής πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας ($\$/\text{kWh}$). Για τιμές 6-8 $\$/\text{kWh}$ ο χρόνος εξώφλησης κυμαίνεται μεταξύ 5-3 χρόνια και ο δείκτης ROI από 7-20%. Οι τιμές αυτές των δεικτών και οι εκτιμήσεις κόστους της ενέργειας για ρευστά θερμοκρασίας 193°C (περίπτωση Μήλου) και παροχές άνω των 150 ton/hr είναι ενθαρρυντικές. Για να προωθηθεί όμως η εφαρμογή

του κύκλου Rankine πρέπει προηγουμένως να αντιμετωπισθούν επιτυχώς ωριμαμένα σοβαρά προβλήματα, όπως ο καθορισμός κατάλληλης μεθόδου εναλλαγής θερμότητας μεταξύ γεωθερμικού ρευστού και βοηθητικού μέσου, όταν το πρώτο έχει την τάση να δημιουργεί αποθέσεις αλάτων. Άλλα προβλήματα επίσης πιθανώς να δημιουργεί η διάθεση του "ψυχρού" γεωθερμικού υγρού μετά την εκμετάλλευση, και η διαθεσιμότητα νερού φύξης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Bergmann, D. and D. Mafi, "Selection Guide for Expansion Turbines", Hydrocarbon Process., 58, 8, p. 83, 1979.
2. Hirons, B.W., et al "The Conceptual Design of a 4 MWe Organic Fluid Power Plant for a Geothermal Resource", Proceedings, Intern. Conference on Geothermal Energy, Vol. 2, p. 265, Florence, Italy, May 11-14, 1982.
3. James, C.R. "The Applicability of the Binary Cycle", Proceedings, 2nd U.N. Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, Vol. 1, Sect VIII, p. 2007, San Francisco, 1975.
4. Kihara, D.H. and P.S. Fukunaga, "Working Fluid Selection and Preliminary Heat Transfer Design for a Rankine Cycle Geothermal Power Plant", Proceedings, 2nd U.N. Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, Vol. 1, Sect VIII, p. 2013, S. Franc., 1975.
5. Mink, L.L. et al "The Raft River Idaho 5 MWe Binary Project", Proceedings, Inter. Conference on Geothermal Energy, Vol. 2, p. 283, Florence, May 1982.
6. Νικολαΐδης Ι. "Εφαρμογή του κύκλου Rankine στην αξιοποίηση γεωθερμικών ρευστών", Διπλωμ. Εργασία Τμήμα Χημ. Μηχαν., Α.Π.Θ., Μάϊος 1983.
7. Salucci, B. et al "A 500 kWe ORC Plant for the Recovery of Heat from Geothermal Water", Proceedings, Intern. Conference on Geothermal Energy, Vol. 2, p. 249, Florence, Italy, 1982.
8. Sherwood, T.K. "Process Design for Geothermal Power", Chem. Eng. Progr., 72, 7, p. 83, 1976.
9. Yihan, C. "Research Work on Binary Cycle Geothermal Power Production in China", Proceedings, Intern. Conference on Geothermal Energy, Vol. 1, p. 49, Florence, Italy, May 11-14, 1982.
10. Φαλτσή Ο. "Αρχές σχεδιασμού και μαθηματική προσομοίωση εναλλακτική άμεσης επαφής", Διπλωμ. Εργασία Τμήμα Χημ. Μηχαν., Α.Π.Θ., 1985.

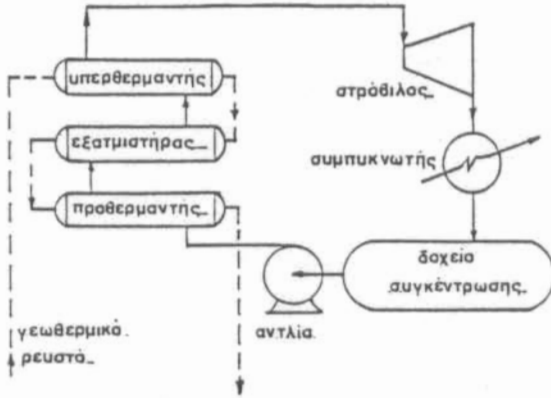
ΠΙΝΑΚΑΣ 1: Αποτελέσματα τεχνικοοικονομικών υπολογισμών για βερμωμένα άμυνας 193°C (380°F) και ποροχή 400 tn/hr

Βοηθητικό Πευστό	Ισχύς (MW)	Ενέχυση (\$/KWh)	Μήγρος φύλης	Βαθασυνώ νερό	Κόστος ενέργειας (\$/KWh)	Μήγρος φύλης	Βαθασυνώ νερό	Μερό φύλης/ τελεσπ. πευστό	Απόδοση ανά τόνο άμυνας KWh/tn
F-11	5.445	2167	1549	0.080	0.045	0.045	0.045	9.99	13.613
F-12	7.095	2387	1792	0.090	0.054	0.054	0.054	14.57	17.738
F-113	5.107	2327	1672	0.090	0.045	0.045	0.045	9.87	12.768
F-114	8.223	1820	1331	0.075	0.046	0.046	0.046	13.42	20.558
F-113/F-114(3:1)	4.957	1770	1404	0.065	0.046	0.046	0.046	3.57	12.393
NH ₃	7.296	1910	1290	0.068	0.029	0.029	0.029	16.23	18.240
C ₂ H ₅ Cl	5.250	2107	1500	0.068	0.036	0.036	0.036	9.11	13.125
I-C ₄	8.695	1916	1430	0.061	0.031	0.031	0.031	14.60	21.738
I-C ₅	5.105	2239	1600	0.072	0.037	0.037	0.037	9.48	12.763
I-C ₄ /I-C ₅ (1:3)	4.912	1890	1485	0.053	0.034	0.034	0.034	4.15	12.280

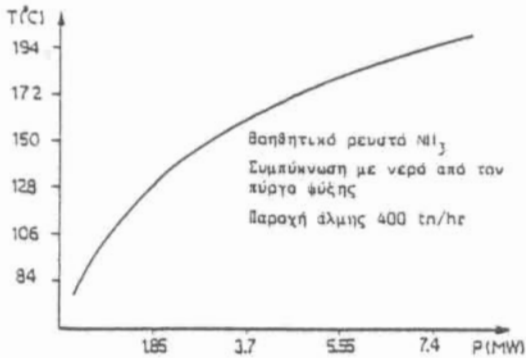
ΠΙΝΑΚΑΣ 2: Αποτελέσματα τεχνικοοικονομικών υπολογισμών για βερμωμένα-
στά άμυνας 85°C (185°F) και ποροχή 400 tn/hr*

Βοηθητικό πευστό	Κόστος ενέργειας (\$/KWh)	Ενέχυση (\$/KWh)	Ισχύς (KW)	Απόδοση (KWh/tn)
F-12	0.250	7166	397	0.993
F-11, F-12	0.294	8219	334	0.835
CH ₃ Cl	0.205	6966	388	0.970
CH ₃ Cl, C ₂ H ₅ Cl	0.221	10399	346	0.865
NH ₃	0.218	7859	394	0.985

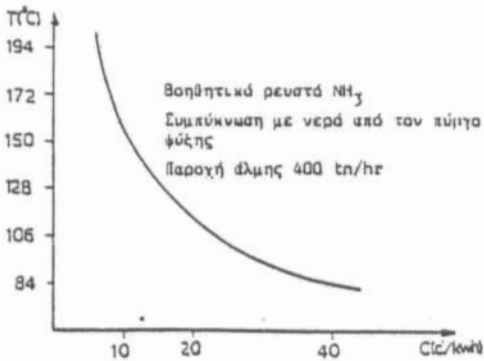
* Συμπύκνωση με θαλασσινό νερό



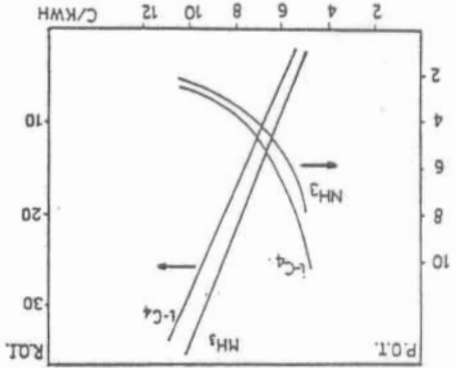
ΣΧΗΜΑ 1
Γενική διάταξη εγκατάστασης για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με κύκλο Rankine



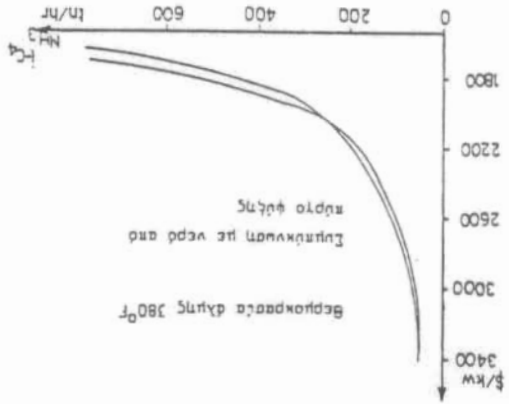
ΣΧΗΜΑ 2
Μεταβολή της ισχύος με τη θερμοκρασία άμλης



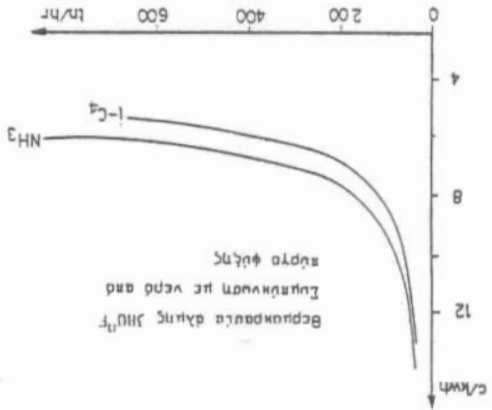
ΣΧΗΜΑ 3
Μεταβολή του κόστους της ενέργειας με την θερμοκρασία της άμλης



ΣΧΗΜΑ 6
 Εξέρχεται δεκτικά POT και ROI από την
 τιμή καύσης της ηλεκτρ. ενέργειας
 (Βαροχή 400 tn/hr, θερμοκρασία
 380°F)



ΣΧΗΜΑ 5
 Μεταβολή της στένωσης με
 την παροχή της 400 tn/hr



ΣΧΗΜΑ 4
 Μεταβολή του κόστους ενέργειας
 με την παροχή της 400 tn/hr