

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ-ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:**

**“ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ**

**ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ”**

**‘MODERN TECHNOLOGIES FOR THE**

**USE OF GEOTHERMAL ENERGY ’**

**Μητρόπουλος Παναγιώτης (ΑΜ: 31948)**

**Επιβλέπων καθηγητής : Νίκας Κωνσταντίνος-Στέφανος**

**Αιγάλεω**

**Σεπτέμβριος 2020**

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....</b>	<b>3</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>4</b>
<b>Κεφ. 1: ΧΡΗΣΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ ΓΙΑ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΩΝ ΧΩΡΩΝ .....</b>	<b>6</b>
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
1.2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΑΝΙΧΝΕΥΤΩΝ ΠΗΓΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ ΒΡΟΧΟΥ ΔΙΠΛΟΥ U ΔΙΑΣΤΑΥΡΟΥΜΕΝΟΥ ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟΥ .....	8
1.3 ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ ΠΗΓΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ ΔΙΠΛΟΥ U ΜΗ ΔΙΑΣΤΑΥΡΟΥΜΕΝΟΥ ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟΥ .....	10
1.4 ΕΝΑΛΛΑΚΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ – ΑΕΡΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΕΞΑΕΡΙΣΜΟΥ .....	12
<b>Κεφ. 2: ΧΡΗΣΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....</b>	<b>22</b>
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	22
2.2 ΔΥΑΔΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΚΥΚΛΟ ΚΑΛΙΝΑ.....	24
2.2.1 Εξέλιξη .....	24
2.2.2 Στρόβιλος Euler.....	25
2.2.3 Στρόβιλος Euler με μαγνητική γεννήτρια .....	30
2.2.4 Στρόβιλος μεταβλητής φάσης .....	32
2.2.5 Κύκλος ΚΑΛΙΝΑ – Συστήματα - Εξέλιξη .....	42
2.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΓΙΑ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΞΗΡΟΥ ΑΤΜΟΥ ΚΑΙ ΔΙΦΑΣΙΚΟΥ ΥΓΡΟΥ.....	51
2.3.1 Τεχνολογία για τη βελτίωση της αντοχής των στροβίλων στη διάβρωση .....	51
2.3.2 Τεχνολογία για βελτίωση της αποδοτικότητας των στροβίλων .....	54
<b>Κεφ. 3: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>56</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>56</b>

Οι σημειώσεις είναι ελεγμένες ώστε να μην διαταράσσουν δικαιώματα  
ιδιωτικής προστασίας.

**ΟΙ ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΕΣ ΠΟΥ ΑΝΑΦΕΡΩ ΕΙΝΑΙ  
ΚΑΤΩΧΥΡΩΜΕΝΕΣ**

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η παρούσα εργασία αναφέρεται στις πιο σύγχρονες καινοτομίες για την αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας. Αρχικά παρουσιάζονται τεχνολογίες που αφορούν τον κλιματισμό και τη θέρμανση για οικιακή και επαγγελματική χρήση με εργαζόμενο μέσο ψυκτικό υγρό και στη συνέχεια και με αέρα. Στο υπόλοιπο μέρος παρουσιάζονται εξελιγμένοι στρόβιλοι και συναρμογή στρόβιλου με γεννήτρια, δυαδικός κύκλος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέγιστης αποδοτικότητας και τεχνοτροπίες για ενίσχυση στρόβιλων ενάντια στη διάβρωση.

## **SUMMARY**

Reference is made to the most modern innovations for the utilization of geothermal energy. Initially, technologies related to air conditioning and heating for home and professional use are presented with working coolant and then with air. The rest of this work presents advanced turbines and turbine assembly with generator, binary cycle of maximum power generation and styles for boosting turbines against corrosion.

## **ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ?**

Γεωθερμία είναι η θερμική ενέργεια που περιέχεται στο εσωτερικό της γης. Ανανεώσιμη και βιώσιμη πηγή ενέργειας, εκμεταλέυσιμη όλο το χρόνο ανεξάρτητα από το κλίμα και την εποχή και χαμηλό κόστος συντήρησης. Δεν μολύνει την ατμόσφαιρα γιατί εκπέμπει αμελητέους ρύπους και αυτό συμβαίνει μόνο στη χρήση της για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που εάν αντιμετωπιστεί με σύγχρονο εξοπλισμό φιλτραρίσματος δεν διατρέχεται σχεδόν κανένας κίνδυνος.

## **Κεφ. 1: ΧΡΗΣΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ ΓΙΑ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΩΝ ΧΩΡΩΝ**

### **1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Αυτή η κατηγορία της γεωθερμίας συνεργάζεται με τη χαμηλή ενθαλπία της γης στους 25 °C και φθάνει έως τους 80 °C, που απ' τους 30 °C και πάνω χρησιμοποιείται πιο πολύ για θέρμανση θερμοκηπίων, ιχθυοκαλλιεργειών και για παραγωγή γλυκού νερού. Η χρήση της για ψύξη και θέρμανση πραγματοποιείται με εξειδικευμένους πλαστικούς σωλήνες που φθάνουν σε βάθος περίπου 1,5 έως 3m εντός γης και εκτείνονται σε μεγάλη επιφάνεια 350 m<sup>2</sup> έως 1.700 m<sup>2</sup> είτε για οικιακή χρήση είτε για βιομηχανική χρήση, σε διάταξη κλειστού κυκλώματος (και έτσι σχηματίζεται ο εναλλάκτης) και ανακυκλοφορούν συνεχώς με αντλία ψυκτικό μέσο (μίγμα νερού-γλυκόλης - αντιψυκτικό) για να οδηγούν τη θερμοκρασία στην επιφάνεια (ο πιο ευρέως διαδεδομένος τρόπος χρήσης είναι σε εφαρμογή κατακόρυφου ή οριζόντιου εναλλάκτη). Η θερμοκρασία της γης είναι σταθερή όλο το χρόνο στους 20 °C έως 25 °C περίπου. Με τον ίδιο τρόπο περίπου λειτουργεί και μία ψυκτική συσκευή χώρου αποθήκευσης (ηλεκτρικό ψυγείο).



**Σχήμα 1.1:** Ενδοδαπέδια εγκατάσταση σωλήνων που συνεργάζεται με το γεωθερμικό κλιματισμό.

## **1.2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΑΝΙΧΝΕΥΤΩΝ ΠΗΓΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ ΒΡΟΧΟΥ ΔΙΠΛΟΥ U ΔΙΑΣΤΑΥΡΟΥΜΕΝΟΥ ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟΥ**



**Σχήμα 1.2:** Ανιχνευτής πηγής εδάφους- συνδυασμός σωληνώσεων γεωθερμικού εναλλάκτη πυθμένα, διπλού U(Βε) πολυαιθυλενίου σε σχήμα σταυρού μαζί με βαρίδιο στο κάτω μέρος

Τα πλεονεκτήματά ενός ανιχνευτή πηγής είναι:

- α) το άκρο δεν έχει συγκολλημένη άρθρωση επομένως δεν υπάρχει ενδεχόμενο διαρροής,
- β) εξ' αιτίας αυτού έχει ανθεκτικότητα έως 95 °C που πετυχαίνει με τη σειρά του ιδανικές συνθήκες για αποθήκευση θερμότητας και εφαρμογές ψύξης εδάφους,
- γ) ανθεκτικό σε φορτία διάτρησης,



- δ) υψηλή αντοχή σε εγκοπές κατά τη διάρκεια της μεταφοράς και της εγκατάστασης,
- ε) βελτιωμένη ακτίνα κάμψης
- στ) προστατευτικό άκρο προστατευμένο από ειδική ρητίνη και χρησιμοποιείται στεγανή εφαρμογή της πιο προηγμένης τεχνολογίας,
- ζ) μπορεί να εγκατασταθεί με όλες τις καιρικές συνθήκες (σε αντίθεση με ηλεκτροσυγκόλληση),
- η) γρήγορες και αξιόπιστες συνδέσεις.
- Επίσης αυτού του τύπου ο ανιχνευτής μπορεί να κατασκευαστεί για βάθη έως 800 m.



**Σχήμα 1.3:** Ανιχνευτής πηγής εδάφους- συνδυασμός σωληνώσεων γεωθερμικού εναλλάκτη πυθμένα, διπλού U(Βε) πολυαιθυλενίου σε σχήμα σταυρού

### **1.3 ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ ΠΗΓΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ ΔΙΠΛΟΥ U ΜΗ ΔΙΑΣΤΑΥΡΟΥΜΕΝΟΥ ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟΥ**

Είναι κατασκευασμένοι από πολυαιθυλένιο τύπου PE-RC που είναι ανθεκτικό στη ρωγμή και δημιουργεί παρακέντηση του στρες υπό φορτίο. Διατηρεί επίσης όλες τις ιδιότητες του προηγούμενου ανιχνευτή. Το άκρο του καθετήρα παρέχει κάθετες ραβδώσεις και λειτουργεί σαν βέλος για ασφαλέστερη εγκατάσταση και η μεμβράνη παρέχει υψηλότερη μηχανική προστασία στο συγκολλημένο άκρο του καθετήρα. Επίσης κοινά χαρακτηριστικά των 2 ειδών ανιχνευτών είναι ότι κατασκευάζονται και σε συγκεκριμένα βάρη, 12,5 και 25 kg και ότι χρησιμοποιούν καθετήρες μονού U ή διπλού U.



**Σχήμα 1.4:** Ανιχνευτής πηγής εδάφους- συνδυασμός σωληνώσεων γεωθερμικού εναλλάκτη πυθμένα , διπλού U(Βε) πολυαιθυλενίου χωρίς σχηματισμό σταυρού

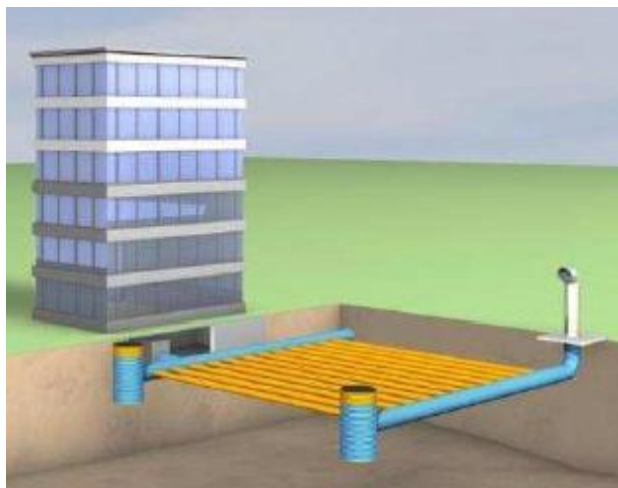


**Σχήμα 1.5:** Ανιχνευτής πηγής εδάφους- συνδυασμός σωληνώσεων γεωθερμικού εναλλάκτη πυθμένα, διπλού U(Bε) πολυαιθυλενίου χωρίς σχηματισμό σταυρού μαζί με βαρίδιο στο κάτω μέρος.

#### **1.4 ΕΝΑΛΛΑΚΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ – ΑΕΡΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΕΞΑΕΡΙΣΜΟΥ**

Πλεονεκτήματα:

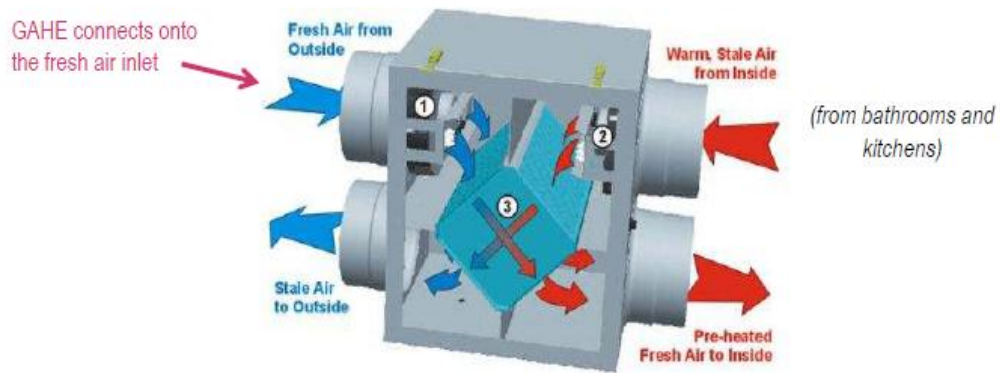
1. Προθέρμανση του καθαρού αέρα από έδαφος,
2. Ο πεπαλαιομένος ζεστός αέρας από το εσωτερικό του κτιρίου περνά παράλληλα με τον εξωτερικό προθερμασμένο εισερχόμενο αέρα,
3. Φιλτραρισμένη, καθαρή παροχή αέρα,
4. Μείωση κατανάλωσης ενέργειας έως και 20% για τη θέρμανση και 80% για την ψύξη,
5. Πλεονέκτημα αυτού του μηχανισμού είναι ότι ταυτόχρονα εξαερίζεται και ο χώρος και
6. ιδανικός επίσης για εξαερισμό σε θορυβώδεις περιοχές (μη χρήση ανοιγόμενων παραθύρων).



**Σχήμα 1.6:** Εναλλάκτης κλιματισμού εδάφους-αέρα.

Για τη χρήση του εναλλάκτη θερμότητας εδάφους-αέρα συνεπακόλουθη είναι και η μελέτη του αερισμού εσωτερικού χώρου σύμφωνα με τις απαιτήσεις χρήσης του. Για παράδειγμα, α) σε ένα σχολείο μετά από μελέτη η συγκέντρωση CO<sub>2</sub> πρέπει να είναι < 1500 μέρη ανά εκατομμύρια ppm όταν μετριέται ο μέσος όρος σε καθιστικό ύψος κεφαλής, β) όλοι οι κατεχόμενοι χώροι πρέπει να ελέγχονται με ελάχιστο ρυθμό αερισμού 3 l/s για να ξεπεραστεί το επίπεδο δυσφορίας, γ) όλα επίσης τα εκπαιδευτικά κτίρια πρέπει να αερίζονται με 8 l/s ανά άτομο εντός αιθουσών εργασίας. Η εφαρμογή αυτής της μελέτης σε δημοτικό σχολείο διαπίστωσε ότι

βελτιώθηκε η απόδοση των μαθητών περίπου 5% έως 7% , έδειξαν λιγότερη κόπωση, αυξημένη εγρήγορση και προσοχή.



**Σχήμα 1.7:** Μονάδα MVHR.

Ο πεπαλαιωμένος αέρας μέσα από το κτίριο περνά παράλληλα με τον εξωτερικό αέρα που εισέρχεται στο κτίριο διαμέσου του εναλλάκτη θερμότητας εδάφους-αέρα. Η μονάδα MVHR λειτουργεί συνήθως με απόδοση περίπου 90%.



*Σχήμα 1.8: Μηχανισμός εναλλάκτη κλιματισμού εδάφους-αέρα.*

Ο μηχανισμός εναλλάκτη κλιματισμού εδάφους-αέρα έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά (βλέπε Σχήμα 1.8):

1. Αναρρόφηση καθαρού αέρα.
2. Αλλαγή θερμοκρασίας του καθαρού αέρα από το έδαφος.
3. Μηχανικός αερισμός με ανάκτηση θερμότητας (MVHR).
4. Διανομή καθαρού αέρα.
5. Εσωτερικός αέρας που εξάγεται από τα δωμάτια.
6. Αποβολή του εξαγόμενου αέρα από το κτίριο (μετά από την ανάκτηση θερμότητας).

Οι τεχνικές προδιαγραφές των σωλήνων είναι τέτοιες, ώστε να μη είναι ευάλωτες στη συσσώρευση συμπύκνωσης, στη μικροβιακή ανάπτυξη για βέλτιστες επιδόσεις. Θα πρέπει να έχουν καλή αγωγιμότητα θερμότητας, σύστημα προστασίας από ραδόνια και άκαμπτο σωλήνα για την πρόβλεψη ανάπτυξης των ριζών των δέντρων. Εάν η ψύξη του αέρα είναι από 25 °C έως 16 °C, παράγονται σημαντικές ποσότητες συμπύκνωσης ειδικά το καλοκαίρι, αυτό πρέπει να προσεχθεί με εξειδικευμένες τεχνολογίες γιατί αναπτύσσονται μικρόβια και πιθανές μυρωδιές από μούχλα.

Εν συνεχεία, η σημαντικότερη μείωση της συμπύκνωσης συνεπώς μείωσης μικροβίων, επιτυγχάνεται με ενσωμάτωση στρώματος σωματιδίων αργύρου, στο εσωτερικό του σωλήνα. Η ασημένια επένδυση αποτρέπει επιπλέον την ανάπτυξη της *legionella pneumophila*. Όσον αφορά τη θερμική αγωγιμότητα, το πολυπροπυλένιο είναι πολύ πιο αποτελεσματικό απ' το PVC, αλλά οι σωλήνες PVC με αφρώδες πυρήνα και κυματοειδής εξωτερικά, επιτυγχάνουν υψηλό μονωτικό αποτέλεσμα σύνδεσης. Η σύνδεση με σωλήνες πολυπροπυλενίου για να είναι ανθεκτική, έχει σαν βάση τα ραδόνια. Η απαιτούμενη στεγανότητα μπορεί να επιτευχθεί με ασφαλή άρθρωση μόνιμου δακτυλίου στεγανοποίησης. Δεν είναι δυνατή η αφαίρεση του δακτυλίου, γιατί έχει δοκιμαστεί να αντέχει σε πίεση εκτόξευσης 100 bar ή 1450 psi. Το ραδόνιο είναι φυσικό ραδιενεργό αέριο και βρίσκεται σε πέτρες και στο έδαφος και είναι αποτέλεσμα της ραδιενεργής διάσπασης ουρανίου και θορίου.



Διαχέεται στο έδαφος, διαλύεται σε νερό και διαφύγει από την επιφάνεια της γης στην ατμόσφαιρα. Το προφιλτράρισμα του αέρα τροφοδοσίας επιτυγχάνεται με τη χρήση φίλτρου G4 σύμφωνα με το DIN EN 779. Το οποίο βελτιώνει την ποιότητα του αέρα με φιλτράρισμα σκόνης και γύρης και ελαχιστοποιεί τη μόλυνση των σωλήνων.



**Σχήμα 1.9:** Καμινάδες εξωτερικού αέρα τροφοδοσίας που χρησιμοποιούν φίλτρο G4 σύμφωνα με το DIN EN 779.

Για οικιακές εγκαταστάσεις, η παροχή του αέρα κυμαίνεται μεταξύ 150 έως 450 m<sup>3</sup>/h, το μέγεθος των σωλήνων είναι DN 200/250, ο βέλτιστος τρόπος τοποθέτησης των σωλήνων είναι, σε περιφερειακή διάταξη γύρω απ' το κτίσμα και το ελάχιστο συνολικό τους μήκος να είναι 40m. Για εμπορικές εγκαταστάσεις η παροχή του αέρα μπορεί να φτάσει έως και τα 24.000

$m^3/h$ , οι σωλήνες τοποθετούνται σε διάταξη 'Tichelmann' που σημαίνει αυτο-εξισορρόπησης. Απαιτούμενο μέγεθος σωλήνων για μεταφορά θερμότητας είναι DN200-250 και για σωλήνες κεφαλίδας DN500-1200. Τοποθετούνται σε βάθος περίπου 1,5 έως 2m, στην εκκένωση συμπύκνωσης να υπάρχει πτώση περίπου 2%, πρέπει να είναι συμπίεσιμο το υλικό συμπλήρωσης, οι σωλήνες μεταξύ τους να έχουν ελάχιστη απόσταση τουλάχιστον 1m (από κέντρο σε κέντρο), η ταχύτητα αέρα να είναι 1m/s έως 3m/s. Είναι απαραίτητο επίσης να συμπεριλάβουμε στους υπολογισμούς μας και τις απώλειες πίεσης που πρέπει να είναι μικρότερες των 50 Pa. Σωλήνες για μεταφορά θερμότητας χρησιμοποιούνται από DN200/ID186 με παροχή  $650 m^3/h$  έως DN400/ID373 με  $2500 m^3/h$ . Για σωλήνες κεφαλίδας οι διαστάσεις που χρησιμοποιούνται είναι από DN500/ID466 με  $3500 m^3/h$  έως DN1300/ID1200 με  $24.000 m^3/h$ . Για να αποφευχθεί ο θόρυβος η μέγιστη ταχύτητα αέρα για τους σωλήνες μεταφοράς θερμότητας να είναι  $< 3m/s$  και για τους σωλήνες κεφαλίδας επίσης  $< 6m/s$ .

Για να έχουμε στο σύστημα σωλήνων βέλτιστη απόδοση συνιστάται ο καθαρισμός τους τουλάχιστον μία φορά ετησίως. Οι μέθοδοι είναι με εκτόξευση νερού υψηλής πίεσης, περιστρεφόμενη βούρτσα και ομίχλη με βάση των οδηγιών HVCA TR/19.



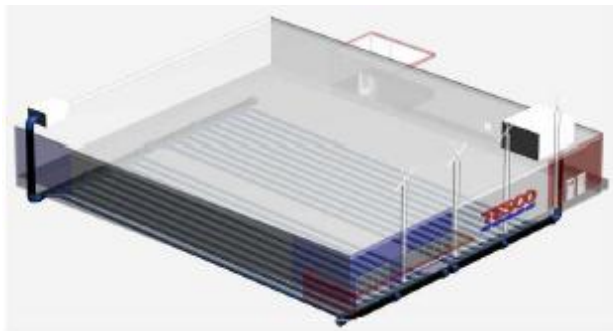
**Σχήμα 1.10:** Περιστρεφόμενη βούρτσα που χρησιμοποιείται περισσότερο



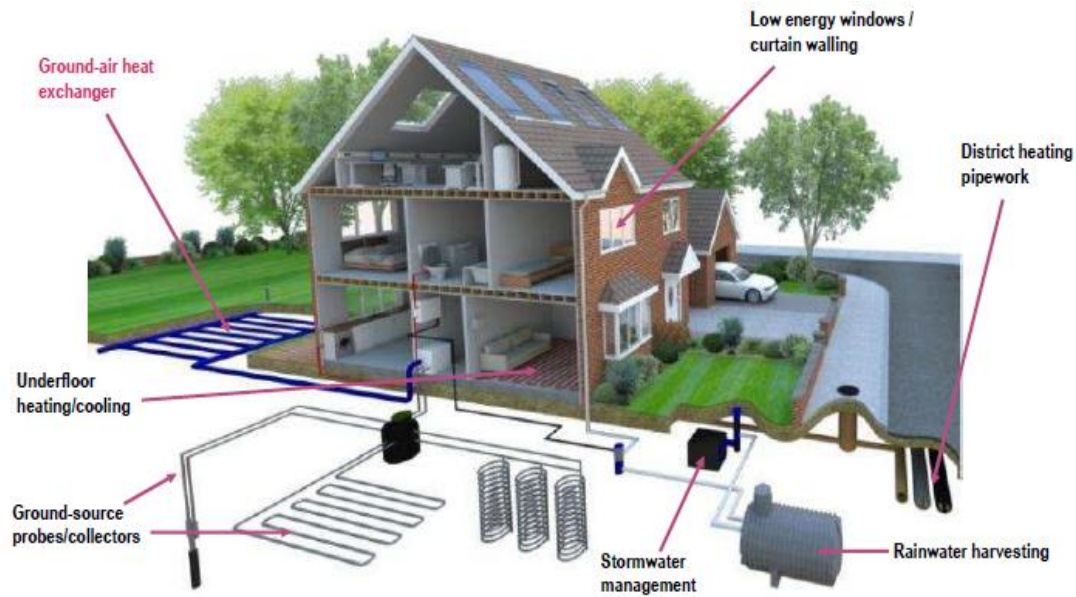
**Σχήμα 1.11:** Εκτόξευση νερού που χρησιμοποιείται κυρίως στα μεγάλα δίκτυα

Η αποτελεσματικότητα ολόκληρου του συστήματος εναλλάκτη θερμότητας εδάφους-αέρα εξαρτάται από τα καιρικά φαινόμενα στην εκάστοτε περιοχή, από τις θερμικές ιδιότητες του εδάφους, την περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό, το ρυθμό ροής του αέρα, το μήκος σωλήνα, το υλικό σωλήνων, το βάθος εγκατάστασης και την απόσταση μεταξύ σωλήνων.

Υπάρχει εξειδικευμένο λογισμικό για τον υπολογισμό της στιγμιαίας εξοικονόμησης ενέργειας με βάση του ρυθμού ροής αέρα, για τον υπολογισμό των καιρικών φαινομένων της περιοχής, τον τύπο του εδάφους . Διαθέτει επιλογή ωρών κ' ημερών λειτουργίας, καταγράφει τις απώλειες πίεσης, τις ταχύτητες αέρα διαμέσου των σωλήνων, αισθητήρες για θερμοκρασία, υγρασία, ρυθμό ροής , πίεση κ' άλλα.



**Σχήμα 1.12:** Εναλλάκτης κλιματισμού εδάφους-αέρα.



**Σχήμα 1.13:** Κλιματισμός εδάφους-αέρα, εναλλάκτης, Τηλεθέρμανση, σωληνώσεις, Πηγή εδάφους, ανιχνευτές / συλλέκτες, Καταιγίδα, διαχείριση, Ενδοδαπέδια, θέρμανση / ψύξη, Περισυλλογή βρόχινου νερού

Στο Σχήμα 1.13, εστιάζουμε κάτω αριστερά στο γεωεναλλάκτη στο εσωτερικό της γης τον οριζόντιο αλλά και τον κάθετο με το μαύρο βαρίδιο. Ακόμη, τον μπλέ γεωεναλλάκτη εδάφους-αέρα με τις υπόλοιπες περιφερειακές σωληνώσεις. Και τέλος, στην καινοτομία στη μέση στο εσωτερικό της γης τον γεωεναλλάκτη που είναι σε τρεις κάθετες σπείρες που ο εργοστασιακός σχεδιασμός του επιτρέπει να αγκαλιάσει τις υπόγειες κολώνες του κτίσματος εάν δεν υπάρχει χώρος για τους άλλους τρεις παραπλήσιους γεωεναλλάκτες, που προαναφέρθηκαν.

## **Κεφ. 2: ΧΡΗΣΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

### **2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Η κατηγορία αυτή έχει χρήση στην υψηλή και κυρίως στη μέση ενθαλπία και θερμοκρασία της γης στους 150 °C και πάνω και στους 80 °C έως 220 °C αντίστοιχα. Αυτό το κεφάλαιο θα αναφερθεί κυρίως στους γεωθερμικούς σταθμούς, ή αλλιώς ονομάζονται και φυτά, δυαδικού κύκλου 80 έως 220°C, γιατί οι πόροι υψηλής θερμοκρασίας, για γεωθερμικές εγκαταστάσεις παραγωγής ξηρού ατμού και εγκαταστάσεις διφασικού υγρού που έχουν σαν εργαζόμενο ρευστό το ίδιο το γεωρευστό, βέβαια έχουν υψηλότερη απόδοση όπως προσδιορίζεται απ' τον Carnot, αλλά είναι πολύ λιγότερο συχνές. Και επειδή η πλειοψηφία πόρων ξηρού ατμού έχει αξιοποιηθεί, το ενδιαφέρον στράφηκε στους πόρους που κατέχονται από υγρά που όμως αυτοί απαιτούσαν χρήση κλειστών θερμοδυναμικών κύκλων. Το ενδιαφέρον πλέον ήταν για πόρους υγρών υψηλής θερμοκρασίας, αλλά επειδή η πλειονότητά τους αξιοποιήθηκε σειρά έχουν τώρα οι χαμηλότερης θερμοκρασίας πόροι. Οι σταθμοί δυαδικού κύκλου γεωθερμικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που είναι από πόρους κυρίως μέσης, και στα χαμηλότερα επίπεδα ενθαλπίας και θερμοκρασίας είναι οι πιο αξιοποιήσιμες γεωθερμικές πηγές σύμφωνα και

με τις νέες τεχνολογίες που έχουν βρεθεί.

Είναι οι πιο προσβάσιμες και σε μεγαλύτερη πληθώρα στον πλανήτη, γιατί η πλειονότητα της γης έχει θερμοκρασία κάτω των 200 °C για τρέχοντα ρεαλιστικά γεωθερμικά βάθη. Ο δυαδικός κύκλος, και κυρίως οι εφαρμογές κύκλου KALINA που είναι οι πιο σύγχρονες και θα αναληθούν, λειτουργούν με τη συνεργασία δύο ομάδων ρευστών σε υγρή κατάσταση αρχικά, η μία ομάδα ρευστού που είναι και το εργαζόμενο μέσο της εγκατάστασης θα είναι είτε κάποιο τύπου freon, είτε θα είναι αμμωνία σε συνεργασία με νερό, είτε μείγμα freon, είτε μείγμα υδρογοναθράκων. Η άλλη ομάδα ρευστού είναι το γεωθερμικό ρευστό που θα προσδώσει τη θερμοκρασία του στην άλλη ομάδα για να ολοκληρωθεί ο κύκλος, ώστε να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια από την συνεργασία ταυτόχρονης περιστροφής στροβίλου με ηλεκτρική γεννήτρια. Επίσης πολλοί σταθμοί ξηρού ατμού διαχωρίζουν το υγρό απ' τα φρεάτια πριν φτάσει στον ατμοστρόβιλο. Το διαχωρισμένο υγρό ή η διαχωρισμένη άλμη μπορεί να διοχετευθεί ξανά στο έδαφος ή να επαναχρησιμοποιηθεί στους πύργους ψύξης ή να επαναχρησιμοποιηθούν οι 100 έως 120 °C της δυνητικά για ηλεκτρισμό. Η άλμη είναι μία περίσσεια πηγή θερμότητας που απαιτεί ελάχιστες πρόσθετες σωληνώσεις, ψύξη και ηλεκτρικά, που είναι ο απαραίτητος εξοπλισμός και χωρίς να απαιτεί νέες γεωτρήσεις.

## **2.2 ΔΥΑΔΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΚΥΚΛΟ ΚΑΛΙΝΑ**

### **2.2.1 Εξέλιξη**

Η επιδέξια χρήση πόρων είναι σημαντικότερη για τη βιωσιμότητα της γεωθερμικής εγκατάστασης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Νέος θερμοδυναμικός κύκλος έχει ευρεθεί, ο κύκλος ΚΑΛΙΝΑ, που είναι αρκετά αποτελεσματικότερος από τον κλασικό οργανικό κύκλο Rankine, και μπορεί να χρησιμοποιήσει αρκετά χαμηλότερη θερμοκρασία εξόδου οπότε μπορεί να εξάγει περισσότερη ενέργεια από μία γεωθερμική πηγή. Έχουν εξελιχθεί δύο τουρμπίνες που μεγιστοποιούν την οικονομική και παραγωγική διαχείριση αυτού του κύκλου, ο στρόβιλος Euler και ο στρόβιλος μεταβλητής φάσης. Αυτοί οι στρόβιλοι μπορούν να βελτιστοποιήσουν την παραγωγή ενέργειας από 30% έως 50% από πόρους μέσης θερμοκρασίας και αξιοποιήσιμους γεωθερμικούς πόρους και άλμη από φυτά δυαδικού κύκλου σε σύγκριση με οργανικούς κύκλους Rankine. Επίσης, μειώνουν ταυτόχρονα το συνολικό κόστος του έργου με αποτέλεσμα και το κόστος κεφαλαίου, συμπεριλαμβανομένου και του κόστους εξερεύνησης, γεώτρησης και κάτοψης, στο 30%. Ταυτόχρονα, επειδή αυτά τα έργα έχουν υψηλό κόστος ανά εγκατεστημένο kw το προτιμότερο είναι να μεγιστοποιείται η εκμετάλευσή τους. Τέλος, είναι και οι πιο πολυπληθείς πόροι.



Ο στρόβιλος Euler είναι ακτινικής εκροής και χρησιμοποιείται σε συστήματα ατμού, με ιστροπική αποδοτικότητα άνω του 80%. Το 2009 πραγματοποιήθηκε εφαρμογή του σε κύκλο Kalina 600kw στο Bruchsal της Γερμανίας. Ο στρόβιλος μεταβλητής φάσης χρησιμοποιεί τεχνολογία αξονικού παλμού με υψηλή ιστροπική απόδοση συνήθως μεγαλύτερη του 80%.

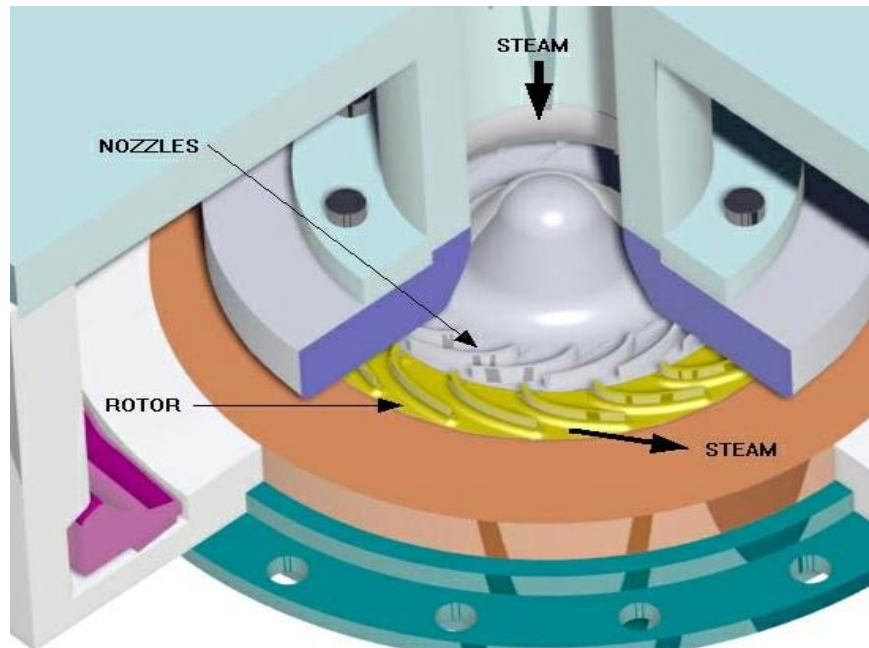
### **2.2.2 Στρόβιλος Euler**



**Σχήμα 2.1:** Στρόβιλος Euler (εξωτερική όψη)

Ο Euler είναι στρόβιλος αντίδρασης, ακτινικής εκροής που έχει ακροφύσια, λεπίδες και διαχύτη. Στο Σχήμα 2.2 διακρίνεται η διαδρομή

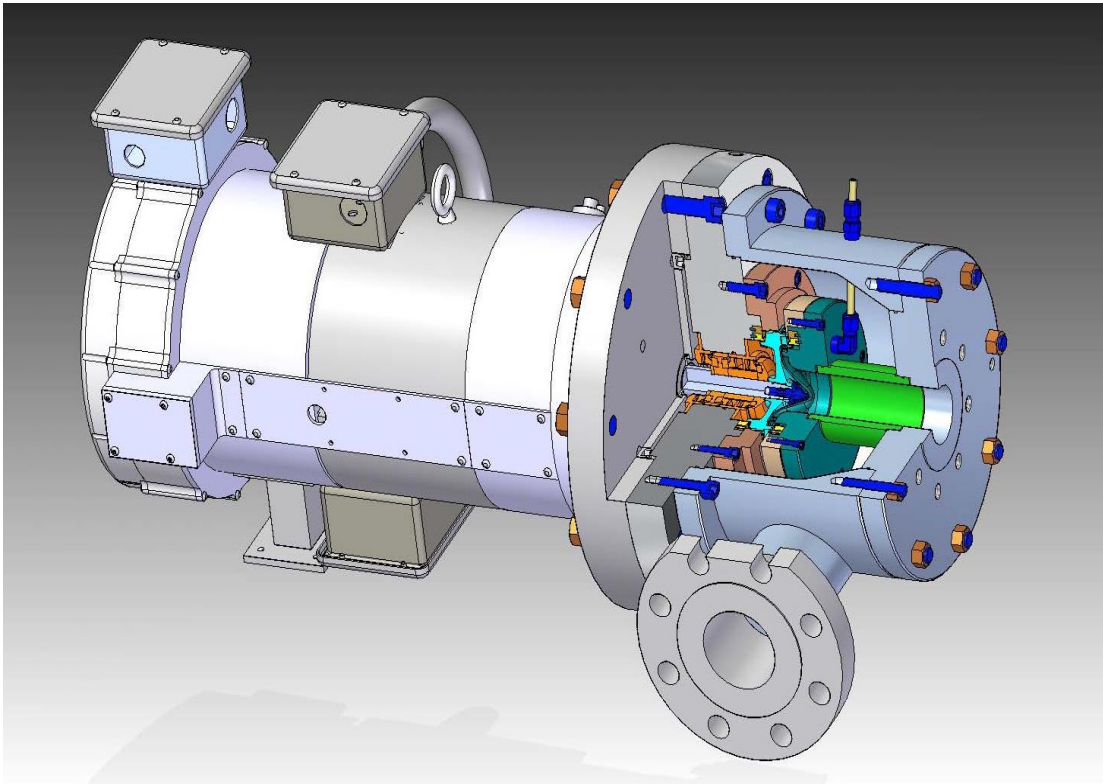
ροής μέσω του στροβίλου. Ο ατμός εισέρχεται αξονικά και περιστρέφεται ακτινικά προς τα έξω πριν εισέλθει στα ακροφύσια. Δηλαδή σε μία μέτρια πίεση στην είσοδο του ρότορα η πίεση μειώνεται ενώ η ροή επιταχύνεται, στη συνέχεια η ροή συνεχίζει να επιταχύνεται σταδιακά και κινείται ακτινικά προς τα έξω κατευθυνόμενη εφαπτομενικά αντίθετα από την κατεύθυνση περιστροφής του ρότορα. Και ο διαχύτης ανακτά την περισευόμενη κινητική ενέργεια της ροής πριν εξέλθει από την τουρμπίνα.



**Σχήμα 2.2:** Στρόβιλος Euler (εσωτερική όψη)

Η τουρμπίνα αυτή δημιουργήθηκε για να διαχειρίζεται κορεσμένο ατμό στην είσοδο, που μπορεί να οδηγήσει σε υγρασία έως και 10% στην έξοδο

του ρότορα, σε σύγκριση με στροβίλους ακτινικής εισροής οι φυγοκεντρικές δυνάμεις στον Euler ωθούν την υγρασία και τους ρύπους εκτός των ακροφυσίων και του ρότορα, έτσι πετυχαίνει ανθεκτικότητα στη διάβρωση. Χρησιμοποιεί δισδιάστατο πτερύγιο με λεπίδες με αποτέλεσμα να παρέχει ανθεκτική λεπίδα και χαμηλού κόστους κατασκευή (Σχήμα 2.1).



**Σχήμα 2.3:** Εγκατάσταση με στρόβιλο Euler 90kw.

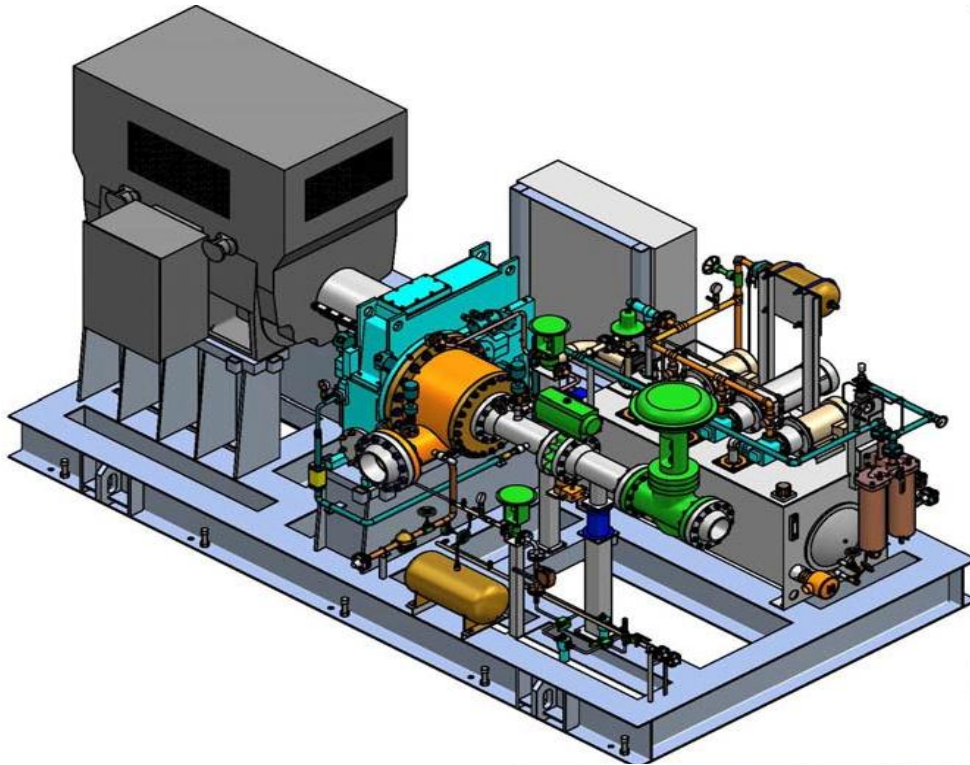
Σημαντικό πλεονέκτημά του είναι η μειωμένη ταχύτητά του στο μισό, σε σύγκριση με μηχανές ακτινικής εισροής, αποφεύγοντας με αυτή την

κατασκευή τις απώλειες και το μέγεθος ενός κιβωτίου ταχυτήτων, αυξάνοντας ταυτόχρονα την περιστροφική δυναμική. Στρόβιλοι με λόγους πίεσης υψηλότερους από 4:1 απαιτούν σχέδια με πολλαπλούς διαστολείς, πολύπλοκη κατασκευή και μέγεθος.

Ο κύκλος KALINA διαχειρίζεται ένα υγρό πολλαπλών συστατικών συνήθως αμμωνία και νερό και λειτουργεί με μεταβλητή θερμοκρασία βρασμού στον εξατμιστή. Κατά την έξοδο από τον εξατμιστή, το μίγμα δε βράζει τελείως και εξ' αιτίας αυτού χρειάζεται διαχωριστής, από το επάνω τμήμα του διαχωριστή το ρεύμα ατμού διανέμεται προς το στρόβιλο. Επίσης παρουσιάζεται υγρασία από την αύξηση των κορεσμένων ατμών. Το υγρό από το κάτω μέρος του διαχωριστή περνά από έναν εναλλάκτη θερμότητας και αφού βράσει ένα μέρος εισερχόμενου ψυχόμενου υγρού οδεύει εξατμιζόμενο προς τον στρόβιλο. Τα καυσαέρια στη συνέχεια συμπυκνώνονται και μετά αποψύχονται για να συνεχιστεί ο κύκλος. Επίσης, το υγρό πολλαπλών συστατικών στο συμπυκνωτή συμπυκνώνεται με μεταβλητή θερμοκρασία. Ο στρόβιλος Euler επιλέχθηκε για ένα εργοστάσιο κύκλου Kalina το 2003 στην Ευρώπη.

Η ισχύς του άξονα ήταν 610,5 kw και η ηλεκτρική ισχύς 557,4 kw για απόδοση άξονα 82,4% και ηλεκτρική απόδοση 75,3%. Αυτές οι αποδόσεις περιλαμβάνουν τις απώλειες ενέργειας στη βαλβίδα ελέγχου. Η ποιότητα των ατμών που παράγονται είναι 96%, ο ρότορας είναι κατασκευασμένος από τιτάνιο και ζυγίζει 5,9kg με εξωτερική διάμετρο 10" ή 25,4cm,

περιστρέφεται στις 28.000 rpm/s και συνδέεται με ένα επαγωγής κιβώτιο ταχυτήτων.



**Σχήμα 2.4:** Εργοστάσιο κύκλου Kalina 557,4 kw με στρόβιλο Euler

Η γεννήτρια στροβίλου συναρμολογήθηκε, δοκιμάστηκε και συγχρονίστηκε με (Σχήμα 2.5) τη μονάδα τοποθετημένη στη γεωθερμική τοποθεσία. Όσον αφορά τον κύκλο Kalina η περιεκτικότητα σε αμμωνία είναι 92,7% , η ροή μάζας 4,83 kg/s, η θερμοκρασία εισόδου 115,3 °C , πίεση εισόδου 20 bar,

πίεση εξόδου 7,81 bar. Η τουρμπίνα Euler μπορεί επίσης να συνεργαστεί με σχέδια Rankine.



*Σχήμα 2.5: Εργοστάσιο κύκλου Kalina 557,4 kw με στρόβιλο Euler τοποθετημένο*

### **2.2.3 Στρόβιλος Euler με μαγνητική γεννήτρια**

Μία άλλη εφαρμογή του στροβίλου Euler που εκσυγχρονίστηκε σε εργαστήριο, υψηλής ταχύτητας μικρής κλίμακας, για μέσης ποιότητας γεωθερμικές πηγές, που περιστρέφεται στις 56.000 rpm/s είναι

συνδεδεμένος απευθείας με γεννήτρια υψηλής ταχύτητας αλλά, μόνιμου μαγνήτη. Γεννήτρια υψηλής ταχύτητας 56.000rpm/s και 65kw που υποστηρίζεται από μαγνητικό ρουλεμάν αντί κιβωτίου ταχυτήτων. Στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχει η χρήση κιβωτίου ταχυτήτων και επωφελούμαστε από υψηλότερη απόδοση και μείωση συντήρησης. Τα 100kw της συναρμογής είναι εφοδιασμένα με ηλεκτρονικά ισχύος όπου παρέχουν ευελιξία στην ταχύτητα για λειτουργία εκτός σχεδιασμού. Εάν μειωθεί η θερμοκρασία των πόρων ή η θερμοκρασία περιβάλλοντος αυξηθεί, με έναν αερόψυκτο συμπυκνωτή μπορεί να μειωθεί η ταχύτητα του στροβίλου για να διατηρηθεί η αποτελεσματικότητα. Η βέλτιστη απόδοση για τις συνθήκες δοκιμής πραγματοποιήθηκε στις 30.000rpm/s.



**Σχήμα 2.6:** Μαγνητική γεννήτρια υψηλής ταχύτητας 100kw.

Όσον αφορά για τα ηλεκτρονικά ισχύος, η συσχέτιση του κόστους τους συναρτήσει με τη βιωσιμότητα του έργου καταλήγει οριακή, επειδή η ηλεκτρική ενέργεια είναι σχετικά φθηνή, αλλά δεν τίθεται θέμα αξιοπιστίας. Πλεονέκτημα όπως προαναφέρθηκε είναι η μεταβλητή ταχύτητα που της παρέχουν και αποφεύγουμε και τις πιέσεις στον συμπυκνωτή όπου ένας στρόβιλος σταθερής ταχύτητας δεν μπορεί.

Τέλος, τα ηλεκτρονικά ισχύος παρέχουν μεγάλο εύρος λειτουργίας για αλλαγή τάσεων και συχνοτήτων λειτουργίας με μία απλή αλλαγή του προγραμματισμού.



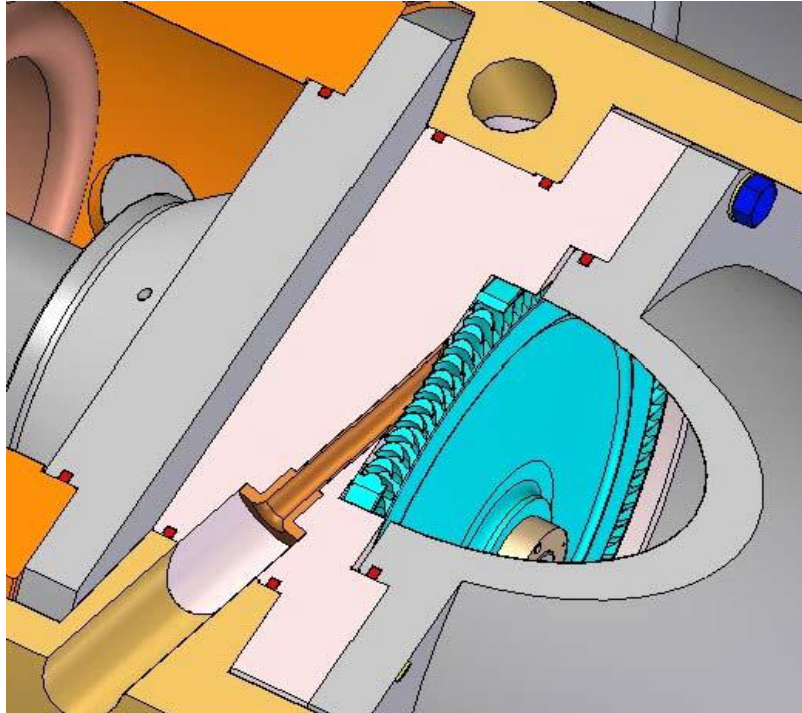
*Σχήμα 2.7: Απεκόνιση ηλεκτρονικών ισχύος.*

#### **2.2.4 Στρόβιλος μεταβλητής φάσης**

Ο επόμενος στρόβιλος που έχει εξελιχθεί για να λειτουργήσει σύμφωνα τον κύκλο Kalina είναι ο στρόβιλος μεταβλητής φάσης ο οποίος αποτελείται από σταθερά ακροφύσια και αξονικό ρότορα παλμών, και το



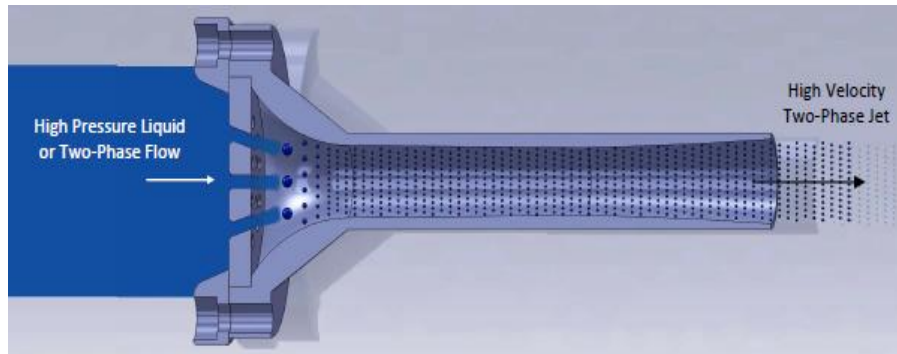
ακροφύσιο που είναι διφασικό είναι το θερμοδυναμικό στοιχείο μετατροπής ενέργειάς της τουρμπίνας (Σχήμα 2.8).



**Σχήμα 2.8:** Στρόβιλος μεταβλητής φάσης με ακροφύσιο

Το υγρό εργασίας συμπιέζεται και θερμαίνεται στον εναλλάκτη θερμότητας χωρίς όμως να εξατμιστεί, στη συνέχεια χρησιμοποιείται για διφασική μετατροπή και μετά συμπυκνώνεται στο συμπυκνωτή και συμπιέζεται σε ερμητική αντλία. Και τέλος κυκλοφορεί μέσω του εναλλάκτη θερμότητας κλείνοντας τον κύκλο. Το σύστημα αποτελείται από αντλία, υγρό εργασίας, εναλλάκτη θερμότητας, στρόβιλο και συμπυκνωτή, δηλαδή είναι ένα απλό σύστημα με στοιχεία χαμηλότερου κόστους από τα περισσότερα

συστήματα Rankine.

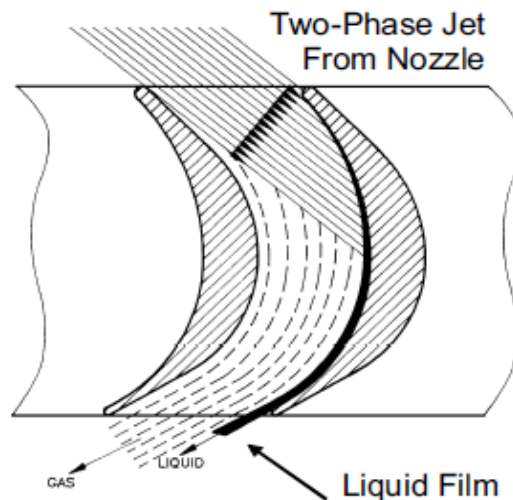


*Σχήμα 2.9: Ακροφύσιο στροβίλου μεταβλητής φάσης, δύο φάσεων*

Σημαντικό πλεονέκτημα αυτού του στροβίλου είναι ότι μπορεί να μετατραπεί σε διαφορετικά επίπεδα ισχύος, εξ' αιτίας της δυνατότητας αλλαγής των ακροφυσίων με διαφορετικά προφίλ, για τον ίδιο ρότορα. Επιτρέπει την αλλαγή ακροφυσίων, χωρίς διακοπή λειτουργίας με απόδοση μερικού φορτίου, για αλλαγή παραγωγής γεωθερμικών πόρων, εντός συγκεκριμένων συνθήκων.

Η ενθαλπία μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια δύο φάσεων και σχεδόν σε ισοτροπική κατάσταση. Το υγρό που επιλέγεται έχει χαμηλή επιφανειακή τάση και ιξώδες. Κατά τη διαδικασία ενώ το υγρό κινείται στο συγκλίνον-αποκλίνον ακροφύσιο η πίεση μειώνεται και μετατρέπεται το μεγαλύτερο ποσοστό του σε ατμό, το διογκωμένο αέριο με επιτάχυνση διασπάει το υγρό μικρών σταγονιδίων μέγεθους 10 μικρών σε μικρότερα σταγονίδια , η

ορμή από το αέριο μεταφέρεται στα σταγονίδια με πίεση και εξ' αιτίας της μικρής διαμέτρου των σταγονιδίων το αέριο και το υγρό συμπιέζονται δημιουργώντας επαρκή επιτάχυνση και για τις δύο φάσεις . Η διφασική κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε ικανοποιητικότερη ισχύ στον άξονα. Η είσοδος στο ακροφύσιο μπορεί να είναι υγρό, διφασικό, υπερκρίσιμο ή ατμός. Ο στρόβιλος μεταβλητής φάσης είναι αξονικής ώθησης με τουρμπίνα ενός σταδίου και δε μας αναγκάζει στη χρήση ακριβού κιβωτίου ταχυτήτων που απαιτούν τα συστήματα ατμοστρόβιλων Rankine, και έτσι βελτιώνεται και η αξιοπιστία και η μειωμένη συντήρηση.



**Σχήμα 2.10:** Λεπίδα και το ειδικό της περίγραμμα, σχηματική διαδρομή ροής σε δύο φάσεις

Ο λόγος που μας αρκεί η τουρμπίνα ενός σταδίου, δηλαδή χαμηλής ταχύτητας τουρμπίνα, είναι γιατί η διφασική ροή επιτυγχάνει υψηλή ροή μάζας με χαμηλή ταχύτητα. Επίσης η χαμηλή ταχύτητα μειώνει αρκετά το

φαινόμενο της διάβρωσης που στη δική μας περίπτωση η ταχύτητα είναι πολύ πιο χαμηλή ώστε να προκληθεί το φαινόμενο της διάβρωσης κατωφλίου για χάλυβα ή τιτάνιο, από το οποίο είναι κατασκευασμένες οι λεπίδες. Στις λεπίδες του στροβίλου έχει προστεθεί ειδικό περίγραμμα για την ελαχιστοποίηση της ορμής και τις απώλειες τριβής του υγρού που προσκρούει και ρέει πάνω απ' την επιφάνεια.



**Σχήμα 2.11:** Αναλυτική εικόνα λεπίδων παλμικού τροχού στρόβιλου

Η ταχύτητα πρόσκρουσης κατωφλίου για την διάβρωση των λεπίδων τιτανίου ορίζεται με βάση την ταχύτητα του τροχού αλουμινίου έως του ορίου των 1000 feet/s (πόδια/δευτερόλεπτο). Για συνηθισμένες συνθήκες λειτουργίας η μέγιστη ταχύτητα πρόσκρουσης σταγονιδίων κυμαίνεται στα 300 έως 500 feet/s. Η τουρμπίνα είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε τα

ακροφύσια της να έχουν κλίση σε εφαπτομενική γωνία προς τον ρότορα.

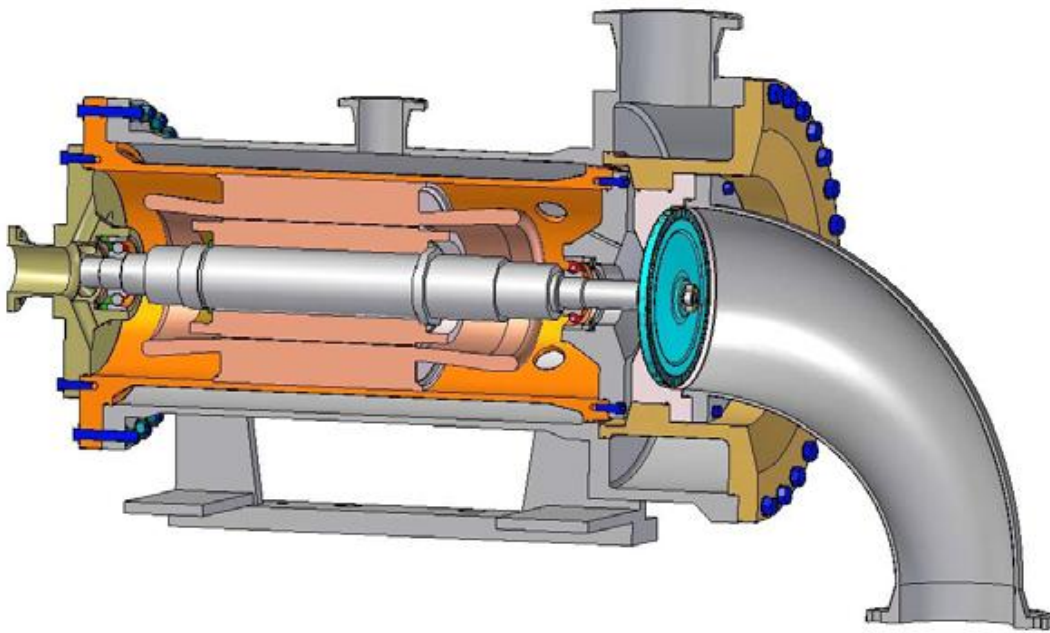
Ο διφασικός παλμικός τροχός της τουρμπίνας είναι μία κατασκευή λεπίδων – ρότορα, που επίσης ενσωματώνονται σε ένα κάλυμα, και αυτό με τη σειρά του έλεγχει κάθε υγρό που ξεφεύγει απ’ την πορεία προς τις λεπίδες (Σχήμα 2.12).



**Σχήμα 2.12:** Στρόβιλος μεταβλητής φάσης: κάλυμα με ακροφύσια και διφασικός παλμικός τροχός – ρότορας, αναλυτικά (συγκρότημα).

Η αποδοτικότητα του διφασικού ακροφυσίου συνήθως είναι από 90% έως 97% και την επηρεάζει έντονα η επιφανειακή τάση του υγρού εργασίας και η πυκνότητα των ατμών στην πίεση συμπύκνωσης. Ο βαθμός απόδοσης του ρότορα κυμαίνεται μεταξύ 78% έως 85% και τον επηρεάζει έντονα η ποιότητα των ατμών στην έξοδο του ακροφυσίου. Ένα σημαντικό

πλεονέκτημα αυτού του συστήματος είναι η χρήση του εναλλάκτη θερμότητας για ανάκτηση θερμότητας που λειτουργεί με το αντίθετο ρεύμα της θερμότητας των υγρών έναντι του λέβητα που χρησιμοποιεί ο Rankine ο οποίος διαθέτει ένα μεγάλο τύμπανο διαχωρισμού, απαιτεί πολύπλοκη λειτουργία και συντήρηση.

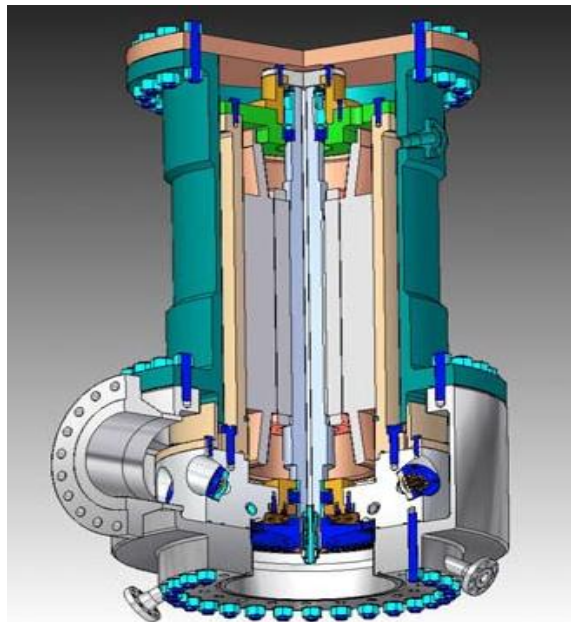


**Σχήμα 2.13:** Τμήμα μονάδας γεωθερμικής εγκατάστασης που περιλαμβάνει το στρόβιλο μεταβλητής φάσης

Το υγρό εργασίας λειτουργεί σαν λιπαντικό και σαν ψυκτικό για τη γεννήτρια. Ο στρόβιλος είναι ερμητικά σφραγισμένος και μαζί με τη γεννήτρια βυθίζονται στο υγρό εργασίας, στην περίπτωση αυτή είναι το R134a ή και τα R227ea και R245fa που έχουν δοκιμαστεί, και έτσι εξαλείφεται πλήρως η ανάγκη για στεγανοποίηση και συστήματος λαδιού

για τον άξονα της γεννήτριας και των ρουλεμάν. Και έτσι πετυχαίνουμε πιο συμπαγή κατασκευή, λιγότερο δαπανηρή και πιο αξιόπιστη.

Επειδή όμως τα ρουλεμάν δεν μπορούν να εκμεταλευτούν πλήρως τις ακτινικές δυνάμεις εξ' αιτίας του ψυκτικού λιπαντικού που είναι κατώτερο από το λιπαντικό λάδι, το σχέδιο γεννήτριας-στροβίλου άλλαξε από οριζόντιο σε κατακόρυφο με το στρόβιλο στο κάτω μέρος (Σχήμα 2.14).

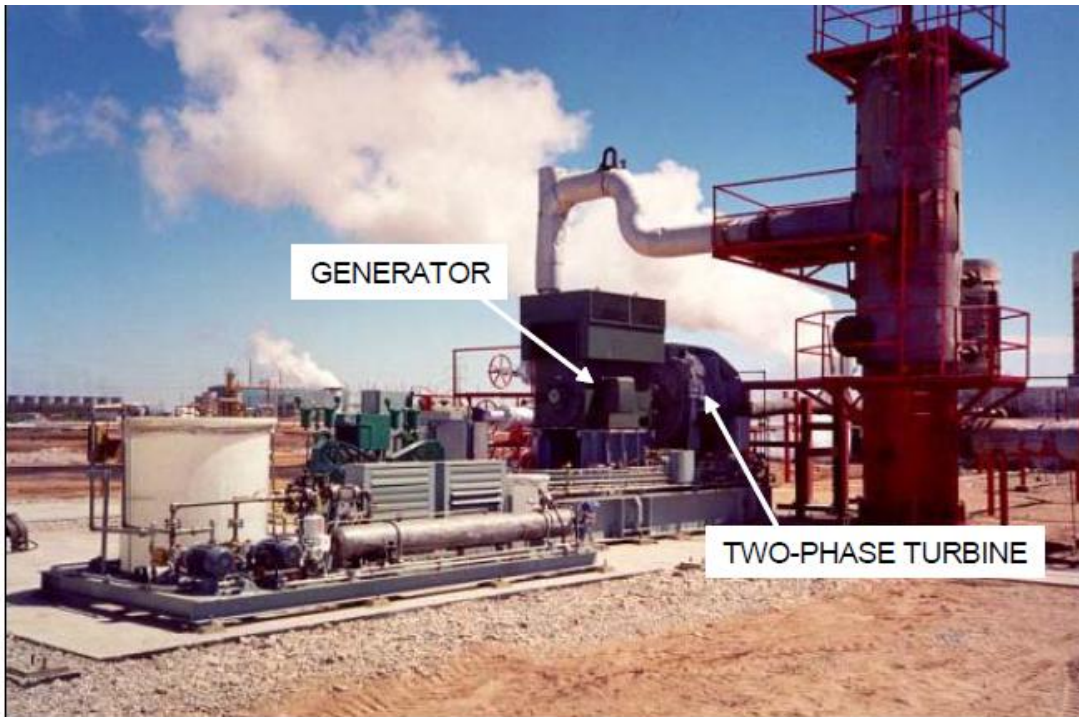


**Σχήμα 2.14:** Κατακόρυφη συναρμογή γεννήτριας-στροβίλου μεταβλητής φάσεως με το στρόβιλο στο κάτω μέρος του επάνω τμήματος





Αυτός ο κύκλος ονομάζεται κύκλος μεταβλητής φάσης και ακόμη ονομάζεται τριγωνικός ή τριμερής κύκλος, και είναι ο ιδανικός θερμοδυναμικός κύκλος για μέση θερμοκρασία και ο πιο αποδοτικός για γεωθερμικές εφαρμογές, όπως αποδεικνύεται μετά από έρευνες και στην πράξη σε γεωθερμικές εγκαταστάσεις.



**Σχήμα 2.17:** Γεωθερμική εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας  
δυσφασικού κύκλου KALINA με στρόβιλο – τουρμπίνα μεταβλητής  
φάσεως 890 KW.

## **2.2.5 Κύκλος KALINA – Συστήματα - Εξέλιξη**

### Αρχικό Σύστημα

Αρχικά περίπου πριν 12 χρόνια αναπτύχθηκε το πρώτο σύστημα KALINA, KCS-11 για γεωθερμικές εφαρμογές και σχεδιάστηκε για γεωφθόδιο από 190 °C και πάνω. Η σύνθεση του ρευστού εργασίας δεν μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της διεργασίας του στο σύστημα ενώ στις μετέπειτα εφαρμογές KALINA ποικίλλει η σύνθεσή του. Εάν η θερμοκρασία του γεωρευστού μειωθεί η θερμοδυναμική του απόδοση μειώνεται με αποτέλεσμα να κρίνεται ακατάλληλο για χαμηλότερες θερμοκρασίες, σε σχέση με τη τεχνολογία Rankine που είναι παλαιότερη και αποτελεσματικότερη.

### Σύστημα Εξέλιξης

Το σύστημα ισχύος KALINA, Kallex LLC SG-2 είναι της πιο πρόσφατης τεχνολογίας και χρησιμοποιεί μεταβλητή σύνθεση ρευστών πολλαπλών συστατικών και είναι σχεδιασμένο για να συνεργάζεται με γεωρευστό σε κατάσταση υγρού, στη διαδικασία της δυαδικής εφαρμογής που αναφέρεται η εργασία . Η σύνθεση του εργαζόμενου ρευστού, υγρού αλλάζει σε διαφορετικά σημεία του συστήματος και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να πετυχαίνει υψηλές θερμοδυναμικές αποδόσεις.

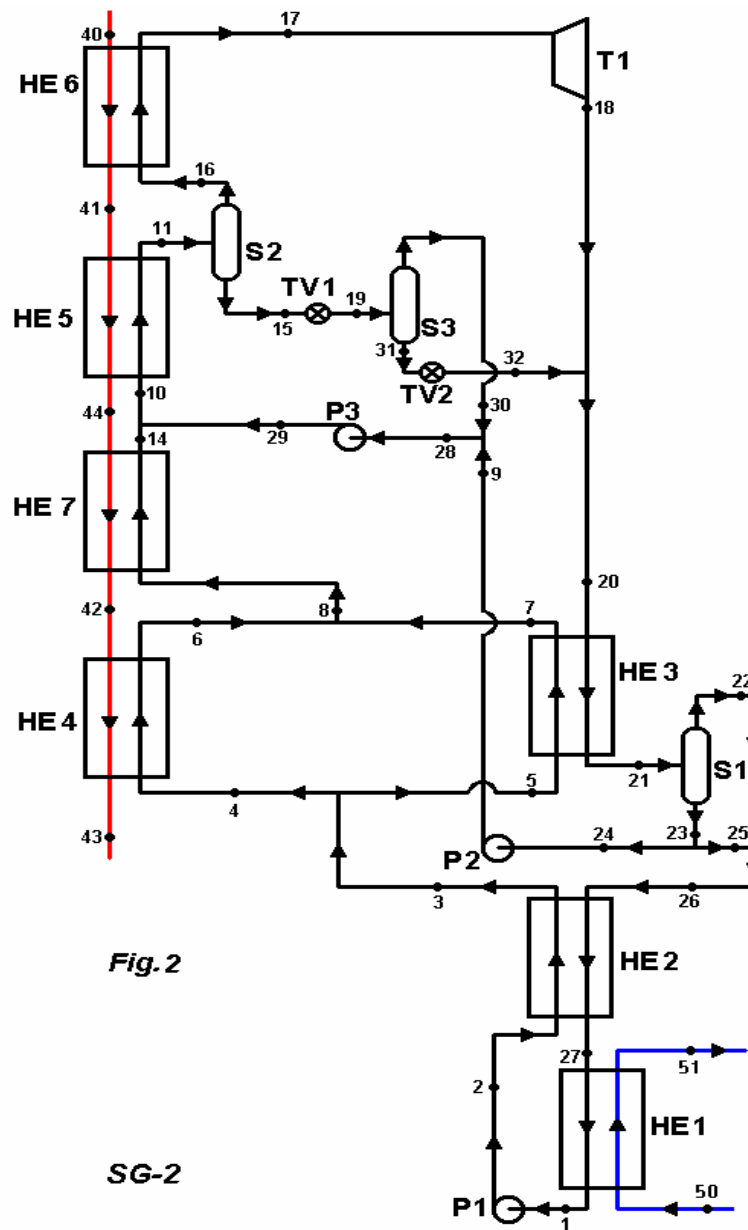


Fig.2

SG-2

Σχήμα 2.18: Διάγραμμα ροής του συστήματος ισχύος KALINA Kallex LLC SG-2

Η θερμοδυναμική απόδοση είναι ο λόγος της πραγματικής θερμικής απόδοσης της εγκατάστασης, προς τη μέγιστη θεωρητική απόδοση σύμφωνα με το 2ο νόμο της θερμοδυναμικής. Η σύνθεση του ρευστού εργασίας μεταβάλλεται με βάση τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, με μεταβαλλόμενες καιρικές συνθήκες και η εγκατάσταση επιτρέπει τη συντήρηση αυτής της κατάστασης, με μεταβαλλόμενη σύνθεση, εάν υπάρχει υψηλή θερμοδυναμική απόδοση. Το πιο συνηθισμένο υγρό εργασίας είναι το μείγμα νερού-αμμωνίας, μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί μείγμα freons ή υδρογοναθράκων. Αυτή η εγκατάσταση έχει μέγιστες αποδόσεις όταν το γεωφθόδιο κυμαίνεται από 180 °C έως 120 °C. Η θερμοδυναμική απόδοση της είναι 50 – 60%, με αποτέλεσμα εντός αυτού του εύρους η αποδοτικότητά της είναι από 20 – 40% υψηλότερη από συστήματα που λειτουργούν με οργανικό κύκλο Rankine.

Σύμφωνα με το διάγραμμα ροής του συστήματος (Σχήμα 2.18), η λειτουργία της εγκατάστασης ξεκινάει με το ρευστό εργασίας να είναι πλήρως συμπυκνωμένο υγρό σε θερμοκρασία κοντά στο περιβάλλοντος με παραμέτρους έως το σημείο 1 εισέρχεται σε αντλία τροφοδοσίας P1 και αντλείται σε υψηλή πίεση και αποκτά παραμέτρους ως το σημείο 2. Διέρχεται μέσω εναλλάκτη θερμότητας HE2 όπου θερμαίνεται σε αντίθετη ροή με επιστροφή ροής του ίδιου του υγρού εργασίας και λαμβάνει παραμέτρου έως το σημείο 3 που είναι σε κατάσταση κορεσμένου ή ελαφρώς υποψυγμένου υγρού. Στο σημείο 3 χωρίζεται σε δύο υποσυστήματα στα σημεία 4 και 5. Η ροή στο σημείο 4 διέρχεται απ' τον

εναλλάκτη θερμότητας HE4 όπου θερμαίνεται και εξατμίζεται κατά ένα μέρος, από το γεωρευστό, και μετατρέπεται έως του σημείο 6. Η ροή στο σημείο 5 περνάει απ' τον εναλλάκτη θερμότητας HE3 όπου θερμαίνεται και εξατμίζεται μερικώς από το ρεύμα συμπύκνωσης 20-21 και λαμβάνει παραμέτρους ως το σημείο 7. Στη συνέχεια, οι απορροές των σημείων 6 και 7 συνδυάζονται δημιουργώντας τη ροή του σημείου 8 που διέρχεται απ' τον εναλλάκτη θερμότητας HE7 που θερμαίνεται και εξατμίζεται σε αντίθετη ροή από ρεύμα γεωφθόδιου και μετατρέπεται έως το σημείο 14. Η ροή με παραμέτρους στο σημείο 14 συνδυάζεται με ρεύμα διαλύματος ανακυκλοφορίας με παραμέτρους του σημείου 29, δημιουργώντας στη συνέχεια το μετατροποποιημένο ρεύμα στο σημείο 10. Η μεταβαλλόμενη ροή στο σημείο 29 είναι σε κατάσταση υποψυγμένου υγρού.

Στη συνέχεια, η ροή του σημείου 10 κινείται προς τον εναλλάκτη θερμότητας HE5 και εκεί θερμαίνεται και εξατμίζεται από ρεύμα του γεωρευστού και μεταβάλλεται έως το σημείο 11. Η ροή του σημείου 11 εισέρχεται σε διαχωριστή βαρύτητας S2 όπου και διαχωρίζεται σε ρεύμα ατμού και ρεύμα υγρού στα σημεία 16 και 15 αντίστοιχα. Η ροή του σημείου 16 διέρχεται μέσω του εναλλάκτη θερμότητας HE6 που θερμαίνεται επιπλέον απ' το γεωρευστό έως ότου υπερθερμανθεί στο σημείο 17. Στη συνέχεια το ρευστό εργασίας μετά το σημείο 17 περνά μέσω του στροβίλου T1-παράγοντας ισχύ στο σημείο 18.

Το ρεύμα υγρού που προαναφέραμε στο σημείο 15 στο διαχωριστή,

διέρχεται μέσα από μία βαλβίδα, πεταλούδα TV1 όπου η πίεση του πέφτει στο μισό και με την επιτάχυνση που δέχτηκε καταλήγει σε κατάσταση μίγματος υγρού ατμού στο σημείο 19. Η ροή στη συνέχεια εισέρχεται σε διαχωριστή βαρύτητας S3 και διαχωρίζεται σε ρεύμα ατμού έως το σημείο 30 και ρεύμα υγρού έως το σημείο 31. Μετά το υγρό του σημείου 31 περνάει από μία βαλβίδα TV2 όπου η πίεση μειώνεται στο σημείο 32 και είναι ίση με του σημείου 18. Η ροή του σημείου 32 και το ρεύμα του σημείου 18 ενώνονται δημιουργώντας ρεύμα διαλύματος συμπύκνωσης στο σημείο 20 και αυτό με τη σειρά του περνά από εναλλάκτη θερμότητας HE3 σε αντίθετη ροή με το ρεύμα 5-7 που είναι μερικώς συμπυκνωμένο απελευθερώνοντας θερμότητα για τη διαδικασία 5-7 στο σημείο 21.

Το ρεύμα του σημείου 21 εισέρχεται στο διαχωριστή S1 και χωρίζεται σε ρεύμα ατμού στο σημείο 22 και ρεύμα υγρού στο σημείο 23 και η ροή του υγρού με τη σειρά της χωρίζεται σε δύο υποσυστήματα τα σημεία 24 και 25. Στη συνέχεια, το υγρό στο σημείο 25 συνδυάζεται με το ρεύμα ατμού που προαναφέρθηκε στο σημείο 22 δημιουργώντας βασικό διάλυμα στο σημείο 26.

Η υπόλοιπη ροή υγρού του σημείου 24 περνάει από κυκλοφορητή P2 όπου η πίεση του αυξάνεται και καταλήγει ίση με την πίεση του διαχωριστή S3 που είναι η πίεση της ροής ατμού στο σημείο 30, και η μετατροπή αυτή γίνεται στο σημείο 9 που έχει ως αποτέλεσμα την κατάσταση υποψυγμένου υγρού. Το ρεύμα υγρού του σημείου 9 συνεργάζεται με το

ρεύμα ατμού του σημείου 30 αλλά η πίεση τους επιλέγεται έτσι ώστε το υποψυγμένο υγρό να απορροφά πλήρως τη ροή ατμών και το νέο ρεύμα υγρού σχηματίζεται στο σημείο 28, το οποίο είναι σε κατάσταση κορεσμένου ή ελαφρώς υποψυγμένου υγρού. Η ροή του σημείου 28 εισέρχεται σε κυκλοφορητική αντλία P3, όπου η πίεση αυξάνεται τόσο ώστε να είναι ίση με του σημείου 14 που προαναφέρθηκε, και αυτά δημιουργούνται στο σημείο 29 του οποίου το ρεύμα συνεργάζεται με το ρεύμα διαλύματος του σημείου 14 όπου σχηματίζουν το ρεύμα διαλύματος βρασμού στο σημείο 10.

Το βασικό διάλυμα του σημείου 26 που αναφέρθηκε παραπάνω εισέρχεται στον εναλλάκτη θερμότητας HE2 και συμπυκνώνεται κατά ένα μέρος απελευθερώνοντας θερμότητα για τη διεργασία 2-3, στο σημείο 27. Το ρεύμα του σημείου 27 περνάει από έναν συμπυκνωτή HE1, όπου ψύχεται και συμπυκνώνεται πλήρως από ρεύμα αέρα ή νερού στο σημείο 50 και μεταβάλλεται έως το σημείο 1. Η ροή αέρα ή νερού του σημείου 50 εισέρχεται στο HE1 και ψύχει τη ροή του βασικού ρευστού εργασίας της διεργασίας 27-1, στο σημείο 51.

Το γεωρευστό στο σημείο 40 περνάει διαμέσου του εναλλάκτη θερμότητας HE6 και προσδίδει θερμότητα στη διεργασία 16-17 στο σημείο 41 και εν συνεχεία, διέρχεται και από τον εναλλάκτη θερμότητας HE5, παρέχοντας θερμότητα για τη διαδικασία 10-11, στο σημείο 44. Το ρεύμα του γεωρευστού του σημείου 44 περνάει από τον εναλλάκτη θερμότητας HE7

και προσδίδει θερμότητα για τη διεργασία 8-14, στο σημείο 42 και στη συνέχεια εισέρχεται στον εναλλάκτη θερμότητας HE4 και ψύχεται παρέχοντας θερμότητα για τη διαδικασία 4-6, στο σημείο 43 και αφαιρείται απ' το σύστημα.

Στην εγκατάσταση, το υγρό που παράγεται στο διαχωριστή S1 διέρχεται διαμέσου εναλλάκτη θερμότητας HE5 και εξατμίζεται μερικώς και η σύνθεση αυτού του υγρού είναι ελαφρώς πλουσιότερη από τη σύνθεση του υγρού που διαχωρίζεται στο διαχωριστή S2.

Συμπερασματικά, η πιο πλούσια σύνθεση υγρού, σε σύγκριση, προστίθεται στο βασικό διάλυμα και όχι στο χρησιμοποιημένο διάλυμα εργασίας (σημείο 18). Στο σύστημα η περισσότερη ποσότητα του υγρού απ' το διαχωριστή S2 σταθεροποιείται σε μία ενδιάμεση πίεση και στη συνέχεια διαιρείται σε ατμό και υγρό στο διαχωριστή S3, στο σημείο 15. Το αποτέλεσμα είναι το υγρό που αναμιγνύεται με το χρησιμοποιημένο διάλυμα εργασίας στο σημείο 32 να είναι πιο λιτό απ' το υγρό που διαχωρίζεται στο διαχωριστή S2, στο σημείο 18. Ακόμη το υγρό ανακυκλοφορίας που προκύπτει απ' το διαχωριστή S1 αναμιγνύεται με ατμό απ' το διαχωριστή S3, και εμπλουτίζεται, με αποτέλεσμα το υγρό του σημείου 29 που αναμίχθηκε με τη ροή του βασικού διαλύματος του σημείου 10 να είναι πλουσιότερο από το παραγόμενο υγρό του διαχωριστή S1.



Όσον αφορά τη θερμοδυναμική λειτουργία της εγκατάστασης τελικά συμπεραίνεται, ότι εκτελούνται δύο θερμοδυναμικοί κύκλοι σε συνεργασία. Ο ένας κύκλος, ο βασικός, εκτελείται από το βασικό υγρό λειτουργίας εργασίας το οποίο περνάει από όλους τους εναλλάκτες θερμότητας της εγκατάστασης διαμέσου και του στροβίλου και του διαχωριστή S1 και η απορριφθείσα θερμότητα αυτού του κύκλου οδηγείται στον συμπυκνωτή HE1.

Ο δεύτερος κύκλος εκτελείται, από μέρος του υγρού που αφαιρείται, στον διαχωριστή S1 στο σημείο 24, το οποίο διέρχεται μέσω του εναλλάκτη θερμότητας HE5 και εισέρχεται στον διαχωριστή S2. Το εξατμισμένο τμήμα του ενώνεται με το ρεύμα 16 και περνά διαμέσου του εναλλάκτη θερμότητας HE6 και του στροβίλου T1. Το υγρό μέρος του διαλύματος περνά από το διαχωριστή S3 και στη συνέχεια συνδυάζεται με την εξάτμιση του στροβίλου, περνά απ' τον εναλλάκτη θερμότητας HE3, εισέρχεται στο διαχωριστή S1 απ' τον οποίο απορρίπτεται με τη μορφή υγρού. Η θερμότητα που απορρίπτεται απ' τον συμπληρωματικό, δεύτερο κύκλο χρησιμοποιείται στο εναλλάκτη θερμότητας HE3 για τη διεργασία 5-7. Για αρχική θερμοκρασία του γεωφθόδιου στους 157 °C και θερμοκρασία ψύξης, αέρα περιβάλλοντος στους 10,5 °C .

Η συνολική απόρριψη θερμότητας του συστήματος στο περιβάλλον εξαρτάται από τον συμπυκνωτή HE1 και αυτή η θερμότητα απορρίπτεται απ' το βασικό διάλυμα και συμπεραίνεται, ότι όσο μεγαλύτερη είναι η

μάζα της ανακυκλοφορίας της ροής του σημείου 24 τόσο μεγαλύτερη είναι η πρόσθετη ισχύς που αποδίδει ο συμπληρωματικός κύκλος. Το SG-2 ρυθμίζεται για λειτουργία σε διαφορετικές καιρικές συνθήκες για βέλτιστα αποτελέσματα.

Είναι αυτορυθμιζόμενο στις αλλαγές των καιρικών συνθηκών αφότου πάρουμε σαν βάση την αρχική θερμοκρασία ψύξης αέρα, και αυτορυθμιζόμενο και στις αλλαγές θερμοκρασίας του γεωφθόδιου ενός πηγαδιού, που παρουσιάζει πτώση με την πάροδο των ετών χρήσης του, αφού πάρουμε σαν βάση την αρχική θερμοκρασία του. Ακόμη και στους 190,5 °C η εγκατάσταση έχει απόδοση 4% ανώτερη έναντι του KCS-11. Για μια τυπική γεωθερμική πηγή που η αρχική θερμοκρασία του γεωρευστού είναι 157 °C το SG-2 έχει 25% υψηλότερη απόδοση απ' το KCS-11. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ότι μέσα στα οφέλη είναι και η σημαντική μείωση του ειδικού κόστους κεφαλαίου έναντι του άλλου συστήματος, που παρουσιάζει 28% χαμηλότερο ειδικό κόστος κεφαλαίου ανά εγκατεστημένο kw . Επίσης είναι ακόμη, περισσότερο πιο αποτελεσματικό και απ' τα συστήματα οργανικού κύκλου Rankine, όπως έχει προαναφερθεί.

## **2.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΓΙΑ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΞΗΡΟΥ ΑΤΜΟΥ ΚΑΙ ΔΙΦΑΣΙΚΟΥ ΥΓΡΟΥ**

### **2.3.1 Τεχνολογία για τη βελτίωση της αντοχής των στροβίλων στη διάβρωση**

Το γεωθερμικό ρευστό περιέχει μεγάλες ποσότητες χλωριούχου, θειϊκού υδρόθειου και διοξειδίου του άνθρακα και άλλα διαβρωτικά χημικά. Συνήθως αυτές οι διαβρωτικές ουσίες απορρίπτονται από διαχωριστή υγρού- ατμού ή φιάλη μειωμένης πίεσης ή εξατμιστής που βρίσκεται απέναντι απ' τον στρόβιλο. Τελικά αυτές οι ουσίες εισέρχονται στον ατμοστρόβιλο του σταθμού διφασικού υγρού ή ξηρού ατμού και είναι 100 έως 1000 φορές περισσότερες απ' ό,τι στους ατμοστρόβιλους ορυκτών καυσίμων όπου το νερό τροφοδοσίας έχει δεχθεί χημική επεξεργασία. Οπότε οι ατμοστρόβιλοι για αντοχή στη φθορά απαιτείται να είναι ανθεκτικοί στη διάβρωση, διάβρωση τάσης, στην κόπωση και διάβρωση εξαρτημάτων και υλικών.

Πρώτα είναι η τεχνολογία επιστρώματος, για αντοχή στη διάβρωση. Οι ρότορες και οι σταθεροί δίσκοι που εκτίθενται στο γεωθερμικό ατμό είναι πολύ ευαίσθητα εξαρτήματα στη διάβρωση και μπορούν να οδηγήσουν στην πτώση του πτερυγίου στεγανοποίησης μεταξύ των λεπίδων.

Αυτή η τεχνολογία είναι η επίστρωση θερμικού ψεκασμού για μέρη

επιφανειών. Μετά από δοκιμές σε εργαστήρια και γεωθερμικές τοποθεσίες καθιερώθηκε μία πρακτική τεχνολογία χρησιμοποιώντας ένα HVOF δηλαδή θερμικό σπρέι οξυγόνου καυσίμου, επίστρωση ψεκασμού πλαισίου υψηλής ταχύτητας, για επικάλυψη θερμικού υλικού ψεκασμού WC-CoCr.

Δεύτερη είναι η τεχνολογία πυροβολισμού, peening η οποία με βολές βομβαρδίζει τις περιοχές με υψηλό άγχος, που είναι η λεπίδα και ο ρότορας με χαλύβδινες μπάλες με υψηλή ταχύτητα. Και με αυτόν τον τρόπο δημιουργεί συμπιεστική υπολειμματική τάση στην επιφάνεια του εξαρτήματος ενισχύοντας έτσι την αντοχή τους SCC στη διάβρωση κόπωσης. Ενισχύει δηλαδή τα κενά μεταξύ της ρίζας της λεπίδας και τις αυλακώσεις του ρότορα γιατί ενώ επιλέγονται υλικά εξαρτημάτων που έχουν μεγάλη αντοχή στη διάβρωση κόπωσης, το διαβρωτικό υλικό είναι πιθανό να συμπυκνωθεί στα κενά που προαναφέρθηκαν. Η τεχνολογία αυτή έχει δοκιμαστεί και σε γεωθερμικές εφαρμογές και αντέχει σε αυστηρά περιβάλλοντα. Ακόμη εφαρμόστηκε και σε σφυρηλατημένα εξαρτήματα και η βελτίωση ήταν σημαντική. Η εφαρμογή αυτή εκτελείται με ρομπότ για σταθερά αποτελέσματα στα ευαίσθητα σημεία.

Τρίτη είναι, η τεχνολογία εξοπλισμού δοκιμής υλικών, που χρησιμοποιείται σε διαφορετικές γεωθερμικές τοποθεσίες. Έχει εφευρεθεί τρόπος να γνωρίζουμε σε κάθε τοποθεσία παγκοσμίως τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν ώστε να επιτύχουμε αντοχή στο χρόνο ενάντια στη

διάβρωση γιατί υπάρχουν γεωρευστά σε κάποιες περιοχές που δεν εμφανίζουν συνηθισμένη συμπεριφορά στη διάβρωση. Αυτό πραγματοποιείται μέσα σε μια κατασκευή εξοπλισμού δοκιμής υλικών με προσομοίωση πραγματικού γεωθερμικού υγρού και ατμού της εκάστοτε τοποθεσίας για ακριβέστατα συμπεράσματα διάβρωσης. Σε αυτό τον εξοπλισμό δοκιμάζονται διάφορα κατάλληλα υλικά σε συγκεκριμένο εργασιακό άγχος που αφορούν την κάθε περιοχή, επίσης πραγματοποιούνται δοκιμές κλιμάκωσης και τα συμπεράσματα οδηγούν στη χρήση των καταλληλότερων υλικών για την κατασκευή του ατμοστροβίλου.



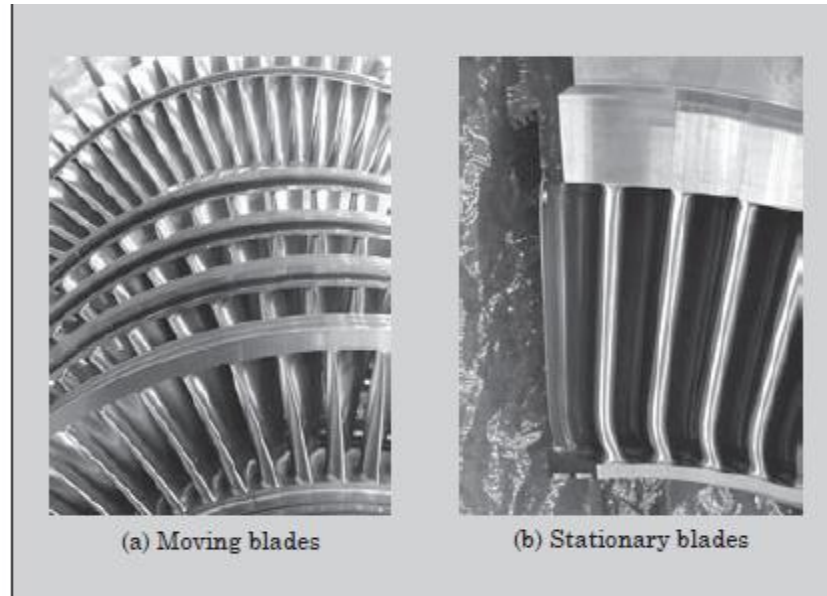
**Σχήμα 2.19:** Γεωθερμικός εξοπλισμός δοκιμής υλικών για την αντιμετώπιση της διάβρωσης.

### **2.3.2 Τεχνολογία για βελτίωση της αποδοτικότητας των στροβίλων**

Για αύξηση της αποδοτικότητας των στροβίλων έχουν αναπτυχθεί νέας γενιάς χαμηλής πίεσης λεπίδες που ο σχεδιασμός τους βασίζεται στην αντιμετώπιση της υψηλής διαβρωτικότητας, της διάβρωσης κόπωσης κ.λ.π. Τα χαρακτηριστικά αυτών των λεπίδων είναι η υψηλή αξιοπιστία που βασίζεται στη αντίσταση στη διάβρωση του γεωθερμικού ατμού, διαθέτουν την πιο πρόσφατη τεχνολογία υπολογιστικής δυναμικής ρευστού (CFD), ο σχεδιασμός τους υψηλού φορτίου δημιουργεί πιο συμπαγές μέγεθος στροβίλου. Οι λεπίδες νέας γενιάς είναι 798 mm για χρήση 50 Hz και η λεπίδα 665 mm για χρήση 60 Hz είναι η μεγαλύτερη στον κόσμο χαμηλής πίεσης και συμβάλλουν στην αύξηση της χωρητικότητας μονάδας. Στις λεπίδες γίνονται και δοκιμές δόνησης για πιο σίγουρα αποτελέσματα.

Στη βελτίωση της αποδοτικότητας συμβάλει και η κατασκευή των νέων λεπίδων αντίδρασης υψηλής απόδοσης. Αυτές οι σειρές λεπίδων δεν ανήκουν στη χαμηλή πίεση και έχουν σχεδιαστεί για υψηλή απόδοση και διατηρούν υψηλή απόδοση ενώ αυξάνουν το φορτίο ανά σειρά.

Αυτές οι λεπίδες αυξάνουν 1 έως 2% την απόδοση σε καταρράκτη σε σύγκριση με τα συμβατικά πτερύγια. Τα πτερύγια αντίδρασης είναι αναπόσπαστα και γι 'αυτό το λόγο επιτυγχάνουν υψηλή αξιοπιστία και στα πιο διαβρωτικά περιβάλλοντα διαβρωτικού ατμού (Σχήμα 2.20).



**Σχήμα 2.20:** Αναπόσπαστα πτερύγια αντίδρασης υψηλής απόδοσης.

### **Κεφ. 3: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Η αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας με τις νέες τεχνολογίες τελικά μεγιστοποιείται. Και ιδιαίτερα στους σταθμούς δυαδικού κύκλου που οδέυουν προς υπερικανοποιητικές αποδόσεις έναντι των σταθμών διφασικού υγρού και ξηρού ατμού που εκλείπουν αυτήν την εποχή.

### **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. REHAU Unlimited Polymer Solutions / [WWW.REHAU.CO.UK](http://WWW.REHAU.CO.UK)
2. New Turbines to Enable Efficient Geothermal Power Plants Phil Welch and Patrick Boyle Energent Corporation / [www.energent.net](http://www.energent.net)
3. Construction and Startup of Low Temperature Geothermal Power Plants Phil Welch, Patrick Boyle, Michelle Giron, and Marc Sells Energent Corporation / [www.energent.net](http://www.energent.net)
4. NEW BINARY GEOTHERMAL POWER SYSTEM
5. Alexander I. Kalina<sup>1</sup> / [www.geothermal-energy.org](http://www.geothermal-energy.org)
6. The Latest Geothermal Steam Turbines/[www.fujielectric.com](http://www.fujielectric.com)