



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ - ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ**

**ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΣΕ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥΣ**  
**ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ ΜΕ**  
**ΣΧΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ-ΕΠΑΝΕΙΣΑΓΩΓΗΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**



**ΑΝΤΩΝΕΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ**

Επιβλέπων: Βασίλειος Γαγάνης, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2021





**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ - ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ**

**ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΣΕ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥΣ**  
**ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ ΜΕ**  
**ΣΧΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ-ΕΠΑΝΕΙΣΑΓΩΓΗΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΑΝΤΩΝΕΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ**

Επιβλέπων: Βασίλειος Γαγάνης, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις: \_\_/\_\_/2021

Β. Γαγάνης, Επίκουρος Καθηγητής: .....(Υπογραφή)

Σ. Σταματάκη, Καθηγήτρια: .....(Υπογραφή)

Α. Καλλιώρας, Αναπληρωτής Καθηγητής: .....(Υπογραφή)

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2021





## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε κατά την διάρκεια του εαρινού εξαμήνου του Ακαδημαϊκού Έτους 2020-2021, στα πλαίσια του Μαθήματος «Επιστήμη και Τεχνολογία Γεωθερμικών Πεδίων» της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Η εργασία πραγματοποιήθηκε υπό την επίβλεψη του κ. Βασίλειου Γαγάνη, Επίκουρου Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών Ε.Μ.Π., με συνεξεταστές την κα. Σοφία Σταματάκη, Καθηγήτρια του Τμήματος Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών Ε.Μ.Π. και τον κ. Ανδρέα Καλλιώρα, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών Ε.Μ.Π.

Αντικείμενο της εργασίας αποτελεί η ανάλυση, ερμηνεία και μελέτη ενός υποθετικού γεωθερμικού ταμειυτήρα υψηλής ενθαλπίας υπό σχήμα παραγωγής-επανεισαγωγής, με σκοπό τον βέλτιστο σχεδιασμό της διεργασίας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με αξιοποίηση του γεωθερμικού ρευστού υπό συνθήκες αειφορίας.

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στην εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας. Οφείλω να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες, προς τον επιβλέποντα της εργασίας, κ. Βασίλειο Γαγάνη, για την καθοδήγηση, την αφοσίωσή και την πολύτιμη βοήθεια που προσέφερε σε κάθε στάδιο εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Επίσης, την κα. Ειρήνη Δημητρέλλου, μέλος του Ειδικού Τεχνικού Εργαστηριακού Προσωπικού του Τμήματος Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών Ε.Μ.Π., για την καθοδήγηση της σχετικά με το τεχνικό μέρος της εργασίας. Χωρίς τη συμπαράσταση και τη βοήθειά τους, η ολοκλήρωση αυτής της εργασίας δεν θα ήταν δυνατή.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά την οικογένεια και τους φίλους μου, για την κατανόηση και συμπαράσταση που έδειξαν ολόκληρη την περίοδο εκπόνησης της εργασίας αυτής.



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία έχει ως αντικείμενο την ανάλυση, ερμηνεία και μελέτη ενός υποθετικού γεωθερμικού ταμειυτήρα υψηλής ενθαλπίας υπό σχήμα παραγωγής/επανεισαγωγής, με σκοπό τον βέλτιστο σχεδιασμό της διεργασίας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με αξιοποίηση του γεωθερμικού ρευστού υπό συνθήκες αειφορίας.

Η μελέτη πραγματοποιήθηκε με προσομοίωση του ταμειυτήρα στο υπολογιστικό λογισμικό *FEFLOW (Modeling)*, διαδικασία η οποία αποτελεί πρωταρχικό βήμα πριν την εκμετάλλευση ενός γεωθερμικού πεδίου, έτσι ώστε να βελτιστοποιηθούν οι ανθρωπογενείς παρεμβάσεις τόσο ως προς την παραγόμενη ενέργεια, όσο και ως προς την αειφορία του γεωθερμικού συστήματος. Μέσω της διαδικασίας αυτής μπορούν να προβλεφθούν πλήρως οι εσωτερικές ιδιότητες του εκάστοτε πεδίου μελέτης, καθώς και οι μεταβολές αυτών σε βάθος χρόνου. Ωστόσο, τα πιο σημαντικά δεδομένα σχετικά με τη φύση και τις ιδιότητες ενός γεωθερμικού συστήματος συγκεντρώνονται μέσω της συνεχούς παρακολούθησης και ελέγχου του πεδίου (*Monitoring*) και ιδίως παρακολουθώντας και καταγράφοντας την απόκρισή του κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του. Επιπλέον σημαντικό ρόλο αποτελεί ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών του ταμειυτήρα του γεωθερμικού πεδίου, «κλειστός» ή «ανοιχτός» ταμειυτήρας, με σκοπό την κατασκευή ή όχι, αντίστοιχα, του κατάλληλου σχεδίου επανεισαγωγής (*Reinjection*) του ρευστού στο γεωθερμικό πεδίο.

Η συγκεκριμένη μελέτη απέδειξε πως με τα διαθέσιμα δεδομένα και την κατάλληλη οργάνωση των θέσεων των γεωτρήσεων και του ρυθμού παραγωγής/επανεισαγωγής σε αυτές, μπορεί να παραχθεί μια γεωθερμική ισχύς της τάξης των 100MW και άνω, για ένα χρονικό διάστημα της τάξης των 100 ετών, τουλάχιστον. Μέσα από τη διαδικασία της ανάπτυξης του μοντέλου και της ερμηνείας των αποτελεσμάτων αυτού, φάνηκε ότι υπάρχουν περιθώρια μικρής βελτίωσης της απόδοσης του ταμειυτήρα, τα οποία θα μπορούσαν να αυξήσουν περαιτέρω την παραγόμενη ισχύ.

Όλα τα παραπάνω παρουσιάζονται και αναλύονται στα ακόλουθα 6 κεφάλαια της παρούσας εργασίας, τόσο από θεωρητική όσο και από πρακτική άποψη. Κύριο σκοπό αποτελεί η ουσιαστική κατανόηση των βασικών αρχών που διέπουν τη ροή μέσα σε ένα γεωθερμικό πεδίο, με αποτέλεσμα τη συνακόλουθη χρήση και εφαρμογή τους στο υπολογιστικό λογισμικό. Αναλυτικότερα στα Κεφάλαια 1, 2 & 3 περιγράφονται βασικές έννοιες που αφορούν γενικότερα τη γεωθερμία, την αειφορία των γεωθερμικών



**ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΣΕ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ  
ΜΕ ΣΧΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ-ΕΠΑΝΕΙΣΠΙΕΣΗΣ**

συστημάτων και τις μαθηματικές έννοιες στις οποίες στηρίζεται ένα υπολογιστικό λογισμικό, ενώ στα Κεφάλαια 4, 5 & 6, περιγράφεται η διαδικασία της ανάπτυξης του μαθηματικού μοντέλου στο λογισμικό, τα αποτελέσματα, και τα συμπεράσματα της συνολικής προσομοίωσης.



## ABSTRACT

The subject of this Diploma Thesis is the analysis, interpretation and flow study of a hypothetical high-enthalpy geothermal reservoir with a production/re-pressure scheme, aiming at an optimal power generation process plan, under the limitation of geothermal sustainability.

The study was carried out by simulating this reservoir in the computer software *FEFLOW (Modeling)*. This is a primary process before a geothermal field exploitation, in order to obtain the optimization of human interventions in the geothermal system, in terms of both energy produced and sustainable development. Through this process, the internal properties of the studied geothermal field and their changes over time, can be fully predicted. However, the most important data of a geothermal system relating to its nature and their properties, are collected through continuous *Monitoring*, especially by monitoring and recording its response during its operation. Additionally, an important role in modeling simulation is to determine the reservoir characteristics of the geothermal field, ("closed" or "open" reservoirs), in order to build the appropriate fluid *Reinjection* plan in the geothermal field.

By using the available data and appropriate organization tools to optimize the location and the rate of the production/reinjection wells, this study demonstrated that geothermal power of at least 100MW can be achieved for a period of at least 100 years. Through the model development process and the interpretation of its results, it appears that reservoir efficiency could be slightly improved, thus further increasing the output power.

In the light of the arguments presented above, the theoretical and practical aspects of this study are discussed in the following 6 chapters. The main purpose is the essential understanding of the engineering principles governing flow in the field, resulting thus to their use and implementation in the computer software. Chapters 1, 2 & 3 provides information related to the geothermal energy, the sustainability of geothermal systems and the mathematical operation concepts of a computer software. Subsequently, chapters 4, 5 & 6 describe the development process of the mathematical model in *FEFLOW*, the simulation results and the conclusions obtained.





## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Η Γεωθερμία ως Μορφή Ανανεώσιμης Ενέργειας.....	1
1.1.1 Γεωθερμία, Γεωθερμικό Δυναμικό και Γεωθερμικά Πεδία.....	1
1.1.2 Γεωθερμικά Συστήματα.....	3
1.1.3 Γεωθερμικός Πόρος.....	4
1.1.4 Η Γεωθερμία στην Ελλάδα.....	5
1.2 Γεωθερμία Υψηλής Ενθαλπίας και Ηλεκτροπαραγωγή.....	5
1.2.1 Το Μαθηματικό Μοντέλο.....	7
1.3 Δομή της Εργασίας.....	8
<b>2. ΒΙΩΣΙΜΗ Ή ΑΕΙΦΟΡΟΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ</b>	<b>10</b>
2.1 Εισαγωγή.....	10
2.2 Η έννοια της αειφορίας και της βιώσιμης χρήσης στη γεωθερμία .....	12
2.2.1 Αειφόρος ανάπτυξη – Ιστορική αναδρομή .....	12
2.2.2 Η Αειφορία στη Γεωθερμία .....	15
2.2.3 Οι επιπτώσεις της παραγωγής σε ένα γεωθερμικό σύστημα .....	17
2.3 Προϋποθέσεις Βιώσιμης Διαχείρισης Γεωθερμικών Πεδίων .....	21
2.4 Παρακολούθηση και Έλεγχος Γεωθερμικών Πεδίων ( <i>Monitoring</i> ).....	24
2.4.1 Άμεση Παρακολούθηση ( <i>Direct Monitoring</i> ) .....	24
2.4.2 Έμμεση Παρακολούθηση ( <i>Indirect Monitoring</i> ).....	29
2.5 Μοντελοποίηση Γεωθερμικών Συστημάτων ( <i>Modeling</i> ) .....	31
2.5.1 Μέθοδοι Μοντελοποίησης.....	33
2.5.2 Λειτουργία Μοντέλων Συγκεντρωμένων Παραμέτρων ( <i>Lumped-Parameter Modeling</i> ).....	35
2.5.3 Μοντέλο Κατανεμημένων Παραμέτρων ( <i>Distributed Parameter Modeling</i> )	38
2.6 Επανεισαγωγή Ρευστών σε ένα Γεωθερμικό Πεδίο ( <i>Reinjection</i> ).....	39
2.6.1 Δοκιμή Επανεισαγωγής ( <i>Reinjection Test</i> ).....	40



2.6.2 Δοκιμή Ιχνηλάτησης ( <i>Tracer Test</i> ).....	41
2.6.3 Θέσεις και Διάταξη Γεωτρήσεων Επανεισαγωγής ως προς τις Γεωτρήσεις Παραγωγής, σε ένα Γεωθερμικό Πεδίο .....	43
2.6.4 Παραδείγματα Εφαρμογής της Επανεισαγωγής σε Γεωθερμικά Πεδία .....	44
<b>3. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ.....</b>	<b>47</b>
3.1 Τα πρώτα Βήματα του Σχεδιασμού Εκμετάλλευσης ενός Γεωθερμικού Ταμειυτήρα .....	47
3.1.1 Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας με Αξιοποίηση της Γεωθερμικής Ενέργειας .....	50
3.2 Αριθμητική Προσομοίωση Γεωθερμικών Ταμειυτήρων.....	51
3.2.1 Ο Νόμος του Ντάρσι ( <i>Darcy's Law</i> ) .....	54
3.2.2 Η Μαθηματική Βάση της Προσομοίωσης Γεωθερμικών Ταμειυτήρων.....	55
3.3 Λειτουργία του Προγράμματος Προσομοίωσης <i>FEFLOW</i> .....	62
3.3.1 Κυρίαρχες Εξισώσεις Ροής και Μεταφοράς Θερμότητας στο <i>FEFLOW</i> .....	63
3.3.2 Συνοριακές Συνθήκες και Ρυθμίσεις στο <i>FEFLOW</i> .....	64
<b>4. ΕΙΔΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΝΟΣ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ .....</b>	<b>69</b>
4.1 Εισαγωγή .....	69
4.2 Ανάπτυξη Στατικού Μοντέλου ( <i>Steady-state model</i> ) .....	71
4.2.1 Γεωμετρία του Μοντέλου .....	71
4.2.2 Αρχικές Συνθήκες ( <i>Initial Conditions</i> ) .....	76
4.2.3 Συνοριακές Συνθήκες ( <i>Boundary Conditions</i> ).....	77
4.2.4 Ιδιότητες των Υλικών του Ταμειυτήρα ( <i>Material Properties</i> ).....	81
4.3 Προσομοίωση Σταθερής Κατάστασης ( <i>Steady-State Simulation</i> ).....	86
4.4 Ανάπτυξη Μοντέλου Μεταβατικής Κατάστασης ( <i>Transient-State Model</i> ).....	89
4.4.1 Συνοριακές Συνθήκες Βάσει Γεωτρήσεων που Διέρχονται από Διαφορετικούς Ορίζοντες ( <i>Multilayer Wells Boundary Conditions</i> ).....	89



ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΣΕ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ  
ΜΕ ΣΧΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ-ΕΠΑΝΕΙΣΠΙΣΗΣ

4.4.2 Χρονοσειρά Λειτουργίας των Γεωτρήσεων ( <i>Time-Series</i> ).....	94
<b>5. ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ</b>	
<b>ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ .....</b>	<b>98</b>
5.1 Προσομοίωση Μοντέλου Μεταβατικής Κατάστασης ( <i>Transient Model Simulation</i> ).....	98
5.1.1 Διακριτοποίηση του Χρόνου .....	99
5.1.2 Αποτελέσματα Προσομοίωσης Μεταβατικής Κατάστασης .....	100
5.2 Ανάλυση Αποτελεσμάτων Προσομοίωσης Μεταβατικής Κατάστασης ( <i>Transient</i> ) - Συμπεράσματα.....	107
5.2.1 Ανάλυση της Μεταφοράς Μάζας (Υδραυλικού Περιεχομένου) της Προσομοίωσης.....	107
5.2.2 Ανάλυση της Μεταφοράς Θερμότητας (Θερμικού Περιεχομένου) της Προσομοίωσης.....	112
5.2.3 Συμπεράσματα .....	116
5.3 Υπολογισμός Συνολικής Ισχύος της Παραγόμενης Ενέργειας .....	118
<b>6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>126</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>128</b>



## ΕΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα 1-1: Απλουστευμένη μορφή ενός πρότυπου γεωθερμικού συστήματος (Φυτίκας, 2004).....	4
Εικόνα 1-2: Ενδεικτική απεικόνιση ενός συστήματος ηλεκτροπαραγωγής αξιοποιώντας την γεωθερμική ενέργεια (Waweru Mwaura, 2018).....	6
Εικόνα 2-1: Οι βασικές συνιστώσες της Αειφόρου Ανάπτυξης (Ademovic, 2018).....	13
Εικόνα 3-1 Συνολικό Σχεδιάγραμμα Παραγωγικής Διαδικασίας (Γαγάνης, 2021) .....	50
Εικόνα 4-1: Προβολή supermesh του υποθετικού ταμιευτήρα στο FEFLOW (FEFLOW 7.0, Screenshots).....	72
Εικόνα 4-2: Τριγωνικό πρίσμα (triangular prism - triangle) ή στοιχείο διακριτοποίησης του FEFLOW.....	73
Εικόνα 4-3: Τελική απεικόνιση του αρχικού σταδίου της διακριτοποίησης του υποθετικού ταμιευτήρα στις 2D διαστάσεις (slice view) (FEFLOW 7.0, Screenshots).....	73
Εικόνα 4-4: Τελική 3D απεικόνιση της μορφολογίας του υποθετικού μοντέλου στο λογισμικό, μαζί με τη χρωματική κλίμακα εξέλιξης του βάθους (FEFLOW 7.0, Screenshots).....	75
Εικόνα 4-5: Τομή τελικής 3D απεικόνισης της μορφολογίας του υποθετικού μοντέλου στο λογισμικό, μαζί με τη χρωματική κλίμακα του βάθους (FEFLOW 7.0, Screenshots).....	75
Εικόνα 4-6: Χρωματική διακύμανση της πίεσης του ταμιευτήρα (FEFLOW 7.0, Screenshots).....	77
Εικόνα 4-7: Ζώνη 1 συνοριακής συνθήκης Cauchy, θερμοκρασίας 320°C (FEFLOW 7.0, Screenshots).....	78
Εικόνα 4-8: Ζώνη 2 συνοριακής συνθήκης Cauchy, θερμοκρασίας 300°C (FEFLOW 7.0, Screenshots).....	78
Εικόνα 4-9: Ζώνη 3 συνοριακής συνθήκης Cauchy, θερμοκρασίας 280°C (FEFLOW 7.0, Screenshots).....	79
Εικόνα 4-10: Ζώνη 4 συνοριακής συνθήκης Cauchy, θερμοκρασίας 260°C (FEFLOW 7.0, Screenshots).....	79



Εικόνα 4-11: Χρωματική απεικόνιση του πορώδους του μοντέλου (FEFLOW 7.0, Screenshots).....	81
Εικόνα 4-12: Χρωματική διαβάθμιση της διαπερατότητας και στις 3 διαστάσεις του μοντέλου (FEFLOW 7.0, Screenshots).....	83
Εικόνα 4-13: Γεωμετρία υπολογιστικού ταμιευτήρα για την εύρεση του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας ( $\Phi$ ). Στη συγκεκριμένη εικόνα παρουσιάζεται η διακύμανση της θερμοκρασίας του ταμιευτήρα έπειτα από 100 χρόνια. (Η πύκνωση του πλέγματος της διακριτοποίησης στα 4 σημεία της επιφάνειας, δημιουργήθηκε εκ παραδρομής και δεν επηρεάζει την παρούσα υπολογιστική δοκιμή για το $\Phi$ ) (FEFLOW 7.0, Screenshots).....	84
Εικόνα 4-14: Χρωματική διαβάθμιση της κατανομή των θερμοκρασιών του μοντέλου μετά την επίλυση της steady-state κατάστασης (FEFLOW 7.0, Screenshots). .....	87
Εικόνα 4-15: Steady-State Rate Budget (FEFLOW 7.0, Screenshots).....	88
Εικόνα 4-16: Λειτουργική διαφορά των απλών Well BC, και των Multilayer Well BC σε γεωτρήσεις παραγωγής. Στη πρώτη περίπτωση (αριστερά), το μοντέλο χρησιμοποιεί μία ποσότητα παροχής ‘q’ για να υπολογίσει την αντίστοιχη πίεση, ενώ στη δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιεί το σύνολο των ‘q <sub>1</sub> ’ και ‘q <sub>2</sub> ’ (HIS Markit, 2020). .....	90
Εικόνα 4-17: Απεικόνιση των σημείων χωροθέτησης των γεωτρήσεων του μοντέλου στο slice 2. Ως prod_well έχουν ονομαστεί οι γεωτρήσεις παραγωγής και ως inj_well οι γεωτρήσεις επανεισαγωγής. Η κόκκινη περιοχή αποτελεί την «καρδιά» του θερμικού ταμιευτήρα λόγω του ότι έχει τις μεγαλύτερες θερμοκρασίες που προκαλούνται από τη μαγματική διείσδυση στον πυθμένα του (FEFLOW 7.0, Screenshots). .....	91
Εικόνα 4-18: Προεπισκόπηση της μορφής των γεωτρήσεων στις θέσεις παραγωγής (αριστερά) και επανεισπίεσης (δεξιά), αντίστοιχα. Ενδεικτικά παρουσιάζεται η γεώτρηση παραγωγής 7 (prod_well_7) και η γεώτρηση επανεισαγωγής 3 (inj_well_3), που απεικονίζονται και στη 3D προβολή τους παρακάτω (Εικόνες 4-19 και 4-20, αντίστοιχα) (FEFLOW 7.0, Screenshots). .....	92
Εικόνα 4-19: Ενδεικτική απεικόνιση μιας γεώτρησης παραγωγής (prod_well_7) (FEFLOW 7.0, Screenshots).....	93
Εικόνα 4-20: Ενδεικτική απεικόνιση μιας γεώτρησης επανεισαγωγής (inj_well_3) (FEFLOW 7.0, Screenshots).....	93



Εικόνα 5-1: Διακύμανση θερμοκρασίας στο εσωτερικό του ταμιευτήρα κατά το 5 <sup>ο</sup> έτος της εκμετάλλευσής του. Πάνω: 3D απεικόνιση, Κάτω: 2D απεικόνιση (slice 2) (FEFLOW 7.0, Screenshots).....	102
Εικόνα 5-2: Διακύμανση θερμοκρασίας στο εσωτερικό του ταμιευτήρα κατά το 10 <sup>ο</sup> έτος της εκμετάλλευσής του. Πάνω: 3D απεικόνιση, Κάτω: 2D απεικόνιση (slice 2) (FEFLOW 7.0, Screenshots).....	103
Εικόνα 5-3: Διακύμανση θερμοκρασίας στο εσωτερικό του ταμιευτήρα κατά το 25 <sup>ο</sup> έτος της εκμετάλλευσής του. Πάνω: 3D απεικόνιση, Κάτω: 2D απεικόνιση (slice 2) (FEFLOW 7.0, Screenshots).....	104
Εικόνα 5-4: Διακύμανση θερμοκρασίας στο εσωτερικό του ταμιευτήρα κατά το 50 <sup>ο</sup> έτος της εκμετάλλευσής του. Πάνω: 3D απεικόνιση, Κάτω: 2D απεικόνιση (slice 2) (FEFLOW 7.0, Screenshots).....	105
Εικόνα 5-5: Διακύμανση θερμοκρασίας στο εσωτερικό του ταμιευτήρα κατά το 100 <sup>ο</sup> έτος της εκμετάλλευσής του. Πάνω: 3D απεικόνιση, Κάτω: 2D απεικόνιση (slice 2) (FEFLOW 7.0, Screenshots).....	106
Εικόνα 5-6: Χρωματική διαβάθμιση της πίεσης του ταμιευτήρα κατά το 100 <sup>ο</sup> έτος της εκμετάλλευσής του (FEFLOW 7.0, Screenshots). .....	108
Εικόνα 5-7: Θέσεις τοποθέτησης των σημείων παρατήρησης (observation points) 1 και 2, στο slice 1 του ταμιευτήρα του μοντέλου. Με τα γράμματα a, b, c, d, e, f, g, h απεικονίζονται οι θέσεις των γεωτρήσεων παραγωγής (FEFLOW 7.0, Screenshots). .....	109



## ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

Διάγραμμα 2-1: Ιστορικό παραγωγής και στάθμης νερού του γεωθερμικού συστήματος Laugarnes στη ΝΔ. Ισλανδία (Axelsson and Gunnlaugsson, 2000).....	19
Διάγραμμα 2-2: Ιστορικό παραγωγής και επανεισπίεσης του γεωθερμικού συστήματος Geysers στην Καλιφόρνια (Barker, 2000) .....	20
Διάγραμμα 2-3: Ιστορικό εικοσαετούς παραγωγής και στάθμης νερού στο γεωθερμικό σύστημα χαμηλής θερμοκρασίας Laugaland στην κεντρική και βόρεια Ισλανδία (Axelsson et al., 2001). .....	28
Διάγραμμα 2-4: Παράδειγμα δεδομένων (παραγωγής και εξωτερικής θερμοκρασίας) που συλλέχθηκαν μέσω μηχανογραφημένης παρακολούθησης στο γεωθερμικό σύστημα Urridavatn κοντά στη πόλη Egilsstaðir, στην ανατολική Ισλανδία (Axelsson, 1991). .....	28
Διάγραμμα 2-5: Προσομοίωση με μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων των μεταβολών στάθμης νερού σε πεδίο χαμηλής θερμοκρασίας συναρτήσει του ιστορικού παραγωγής (γεωθερμικό πεδίο Hamar στην Β.-Ισλανδία), για παραγωγής ενέργειας για τηλεθέρμανση (Axelsson, 1991). .....	37
Διάγραμμα 2-6: Προσομοίωση με μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων των μεταβολών πίεσης του γεωθερμικού πεδίου υψηλής θερμοκρασίας Ahuachapan στο Ελ Σαλβαδόρ (Montalvo et al., 1997), για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.....	38
Διάγραμμα 2-7: Ιστορικό Παραγωγής και Επανεισαγωγής στο γεωθερμικό πεδίο υψηλής θερμοκρασίας Miravalles, στην Κόστα Ρίκα 1994-1999 (Mainieri, 2000).....	44
Διάγραμμα 2-8: Αποτελέσματα μοντελοποίησης του γεωθερμικού πεδίου χαμηλής θερμοκρασίας Shade, στο Πεκίνο της Κίνας (Axelsson et al., 2002). Πρόβλεψη μοντέλου για σενάρια εφαρμογής επανεισαγωγής ή όχι. ....	45
Διάγραμμα 4-1: Εξέλιξη της διακύμανση της θερμοκρασίας του τετραγωνικού ταμιευτήρα σε κάθε slice στα 100 χρόνια.....	86
Διάγραμμα 4-2: Χρονοδιάγραμμα αύξησης και μείωσης της ογκομετρικής παροχής ανά έτος, για τις γεωτρήσεις παραγωγής και επανεισαγωγής, αντίστοιχα. ....	97
Διάγραμμα 5-1: Διάγραμμα φάσης του νερού συναρτήσει της θερμοκρασίας και της πίεσης. Τα σημεία πάνω από την καμπύλη αφορούν την υγρή φάση, ενώ τα σημεία κάτω από την καμπύλη την αέρια (Γαγάνης, 2021). ....	111



**ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΣΕ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ  
ΜΕ ΣΧΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ-ΕΠΑΝΕΙΣΠΙΕΣΗΣ**

Διάγραμμα 5-2: Καμπύλη διακύμανσης της τοπικής πίεσης στην γεώτρηση παραγωγή “e” (prod\_well\_6). Τα σημεία A, B, Γ, Δ, E, Z, H, Θ αντιστοιχούν σε χαρακτηριστικά σημεία αλλαγής κλίσης της καμπύλης (FEFLOW 7.0, Screenshots).  
..... 120

Διάγραμμα 5-3: Συνολική καμπύλη διακύμανσης της τοπική πίεσης της γεώτρησης παραγωγής “e” (prod\_well\_6) στα 100 χρόνια (FEFLOW 7.0, Screenshots)..... 121

Διάγραμμα 5-4: Καμπύλες διακύμανσης της τοπικής θερμοκρασίας (Local Temperature [°C]) των observation points 1 και 2 του ταμειυτήρα του μοντέλου, συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης (Simulation Time [d]) (FEFLOW 7.0, Screenshots)..... 122

Διάγραμμα 5-5: Καμπύλες διακύμανσης του μέσου όρου των θερμοκρασιών (Average Temperature [°C]) των γεωτρήσεων παραγωγής/επανεισαγωγής συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης (Simulation Time [d]) (FEFLOW 7.0, Screenshots)..... 123





## ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 4-1: Πίνακας αποτύπωσης χρονολογικής έναρξης λειτουργίας των γεωτρήσεων και υπολογισμού των ογκομετρικών παροχών ανά έτος. ....	97
Πίνακας 5-1: Διακύμανση και μέσος όρος των θερμοκρασιών των γεωτρήσεων παραγωγής κατά το 25 <sup>ο</sup> , 50 <sup>ο</sup> και 100 <sup>ο</sup> έτος εκμετάλλευσης του ταμιευτήρα. Οι θερμοκρασίες για κάθε γεώτρηση λήφθηκαν από το slice 2, στο FEFLOW .....	116
Πίνακας 5-3: Υπολογισμός συνολικής ισχύος των γεωτρήσεων παραγωγής στα 25 χρόνια εκμετάλλευσης. ....	124
Πίνακας 5-4: Υπολογισμός συνολικής ισχύος των γεωτρήσεων παραγωγής στα 100 χρόνια εκμετάλλευσης. ....	125

## ΣΧΗΜΑΤΑ

Σχήμα 2-1: Γενική αποτύπωση μοντέλου με συγκεντρωμένες παραμέτρους που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της στάθμης του νερού ή των μεταβολών πίεσης στα γεωθερμικά συστήματα (Axelsson and Arason, 1992). ....	36
Σχήμα 2-2: Σχεδιάγραμμα απεικόνισης της αρχής λειτουργίας και εγκατάστασης των ζευγών των γεωθερμικών γεωτρήσεων στη λεκάνη του Παρισιού και των σημείων μέτρησης για την απομακρυσμένη πρόσκτηση των δεδομένων παρακολούθησης (Boisdet et al., 1990).....	46
Σχήμα 3-1: Απεικόνιση της επιρροής των τιμών των κόμβων σε μια επίλυση πεπερασμένων διαφορών μονο-διάστατης μεταβατικής θερμικής αγωγής (Watson, 2013, Bookmark: 13.3.1). ....	58



## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Η Γεωθερμία ως Μορφή Ανανεώσιμης Ενέργειας

Έχοντας ως δεδομένο τους υψηλούς ρυθμούς ανάπτυξης των χωρών και την ολοένα αυξανόμενη ενεργειακή ζήτηση, στην καθημερινότητα των ανθρώπων παρουσιάζονται μια σειρά από προκλήσεις και προβλήματα που αφορούν κυρίως το ενεργειακό μέλλον και την εντατική εκμετάλλευση των ορυκτών καυσίμων. Τα πιο γνωστά από αυτά αποτελούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου, η ατμοσφαιρική ρύπανση, η άνιση κατανομή των ορυκτών καυσίμων, τα υψηλά κόστη και η μείωση των ενεργειακών αποθεμάτων. Λύση στα παραπάνω αποτελεί η εξοικονόμηση ενέργειας, η αποκέντρωση της παραγωγής και κυρίως η χρησιμοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό ισοζύγιο του πλανήτη, σε όσο το δυνατόν υψηλότερο ποσοστό. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως είναι γνωστό, είναι: η ηλιακή, η αιολική, η υδροδυναμική, η βιομάζα και η γεωθερμία.

Η γεωθερμική ενέργεια είναι μία ήπια, πρακτικά ανεξάντλητη και, συνεπώς, ανανεώσιμη μορφή ενέργειας, η οποία αποτελεί φυσικό, εγχώριο πλούτο κάθε χώρας και με τα σημερινά τεχνολογικά δεδομένα μπορεί να καλύψει σημαντικό ποσοστό από τις ενεργειακές ανάγκες της χώρας.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η αξιοποίηση της γεωθερμίας με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία παρουσιάζει ορισμένες ενδιαφέρουσες ιδιαιτερότητες και πλεονεκτήματα που αξίζει να αναλυθούν. Αρχικά, όμως χρήσιμο είναι να παρατεθούν ορισμένοι βασικοί ορισμοί και έννοιες.

#### 1.1.1 Γεωθερμία, Γεωθερμικό Δυναμικό και Γεωθερμικά Πεδία

Η γεωθερμία ή γεωθερμική ενέργεια είναι μια ανανεώσιμη, φιλική προς το περιβάλλον πηγή ενέργειας βασισόμενη στη θερμική ενέργεια της Γης που διαρρέεται από το θερμό εσωτερικό του υπεδάφους της προς την επιφάνεια. Μπορεί επίσης να συσχετίζεται με την ηφαιστειακή δραστηριότητα, με τον θερμό φλοιό στο βάθος της Γης, τις τεκτονικά ενεργές περιοχές ή τους διαπερατούς ιζηματογενείς σχηματισμούς σε μεγάλα βάθη (Καρυδάκης, 2005). Η μετάδοση θερμότητας στα γεωθερμικά πεδία πραγματοποιείται με δύο τρόπους:



ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΣΕ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ  
ΜΕ ΣΧΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ-ΕΠΑΝΕΙΣΠΙΕΣΗΣ

- α) Με αγωγή από το εσωτερικό προς την επιφάνεια
- β) Με ρεύματα μεταφοράς, που περιορίζονται όμως στις ζώνες κοντά στα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών, λόγω ηφαιστειακών και υδροθερμικών φαινομένων.

Σε περιοχές με σχετικά πρόσφατη ηφαιστειότητα παρουσιάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο διάπυρο υλικό από το εσωτερικό της γης έχει κινηθεί προς την επιφάνεια, θερμαίνοντας στο πέρασμά του το υπέδαφος της Γης. Η θερμότητα αυτή μεταφέρεται σε τυχόν υδροφόρους σχηματισμούς της περιοχής, με αποτέλεσμα τα νερά να θερμαίνονται και να κυκλοφορούν μέσα στα πετρώματα φθάνοντας σε πολλές περιπτώσεις μέχρι την επιφάνεια, αφού προηγουμένως έχουν εμπλουτιστεί από άλατα των πετρωμάτων (θερμές πηγές, ατμίδες). Κάποιες άλλες όμως φορές, τα νερά εγκλωβίζονται σε μη υδροπερατά πετρώματα και αποκτούν θερμοκρασίες που ξεπερνούν τους 350°C. Η θερμική αυτή ροή εμφανίζεται:

1. Κατά τη βύθιση λιθοσφαιρικών πλακών
2. Στα ηπειρωτικά βυθίσματα
3. Στις ηπειρωτικές περιοχές διόγκωσης

Ο ρυθμός μετάδοσης της θερμότητας στο εσωτερικό της γης είναι εξαιρετικά αργός, καθώς τα πετρώματα και τα γεωλικά είναι θερμοκοι μονωτές. Επιταχύνεται καθώς πλησιάζει στο κέντρο της γης, λόγω του ότι ο μανδύας αν και στερεός συμπεριφέρεται σαν ιξώδες ρευστό. Γενικότερα, η θερμική ροή είναι υψηλότερη στους ωκεανούς σε σχέση με τις ηπειρωτικές περιοχές. Οι διαφορές μεταξύ γεωθερμικής ενέργειας στα διάφορα μέρη της γης οφείλονται στην κατά τόπους γεωλογική σύσταση.

Το **Γεωθερμικό Δυναμικό** είναι το σύνολο των γηγενών φυσικών ατμών, των θερμών νερών, επιφανειακών ή υπόγειων, και της θερμότητας των γεωλογικών σχηματισμών που υπερβαίνουν τους 25°C.

Ως **Γεωθερμικό Πεδίο** ορίζεται ο ενιαίος μεταλλευτικός χώρος μέσα στον οποίο εντοπίζεται αυτοτελές γεωθερμικό δυναμικό. Τα γεωθερμικά πεδία, ανάλογα με το θερμοκρασιακό επίπεδό τους, διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

- a) Γεωθερμία Υψηλής Ενθαλπίας (>150°C): Χρησιμοποιείται συνήθως για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- b) Γεωθερμία Μέσης Ενθαλπίας (80 έως 150°C): Χρησιμοποιείται για θέρμανση ή/και ξήρανση ξυλείας και αγροτικών προϊόντων, καθώς και μερικές φορές και για την παραγωγή ηλεκτρισμού.



- c) Γεωθερμία Χαμηλής Ενθαλπίας (25 έως 80°C): Χρησιμοποιείται για θέρμανση χώρων και θερμοκηπίων, ιχθυοκαλλιέργειες και αφαλάτωση.

Τέλος, η **Αειφορία των Γεωθερμικών Συστημάτων** αποτελεί σημαντικό παράγοντα μελέτης πριν την εκμετάλλευση ενός γεωθερμικού πεδίου, καθώς μέσω αυτής κρίνεται η ανανεωσιμότητα της γεωθερμική ενέργειας, όπως θα αναλυθεί και στο [Κεφάλαιο 2](#).

### **1.1.2 Γεωθερμικά Συστήματα**

Ως γεωθερμικό σύστημα ορίζεται ένας γεωλογικός σχηματισμός με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, μέσα στον οποίο είναι αποθηκευμένη η γεωθερμική ενέργεια. Τα γεωθερμικά συστήματα εντοπίζονται σε περιοχές με κανονική γεωθερμική βαθμίδα<sup>1</sup>, ή λίγο μεγαλύτερη από τη μέση γήινη, και κυρίως γύρω από τα όρια των τεκτονικών πλακών, όπου η βαθμίδα μπορεί να είναι σημαντικά υψηλότερη της μέσης τιμής. Στην πρώτη περίπτωση τα γεωθερμικά συστήματα χαρακτηρίζονται από χαμηλές θερμοκρασίες (< 100°C), ενώ στη δεύτερη περίπτωση οι θερμοκρασίες μπορεί να καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα, από σχετικά χαμηλές μέχρι και μεγαλύτερες, της τάξεως των 400°C. Επομένως, το γεωθερμικό σύστημα περιγράφεται ως ένα σύστημα που βρίσκεται σε περιορισμένο χώρο στον ανώτερο φλοιό της γης. Στο εσωτερικό του υπάρχει κινούμενο νερό, το οποίο μεταφέρει θερμότητα από μία πηγή σε μια δεξαμενή θερμότητας, η οποία συνήθως είναι μια ελεύθερη επιφάνεια (Φυτίκας, 2004). Έτσι λοιπόν, ένα γεωθερμικό σύστημα αποτελείται από τα εξής τρία στοιχεία: την εστία θερμότητας, τον ταμιευτήρα και το γεωθερμικό ρευστό.

Η εστία θερμότητας μπορεί να είναι είτε μία πολύ υψηλής θερμοκρασίας (>600°C) μαγματική διείδυση που έχει φτάσει σε σχετικά μικρά βάθη (5-10Km), είτε, στα χαμηλής θερμοκρασίας συστήματα, η κανονική θερμοκρασία των πετρωμάτων του εσωτερικού της γης, η οποία, όπως έχει αναφερθεί, αυξάνεται με το βάθος.

Ο ταμιευτήρας είναι ένας σχηματισμός από θερμά υδροπερατά πετρώματα που επιτρέπουν την κυκλοφορία των ρευστών και από τα οποία το ρευστό αντλεί θερμότητα. Πάνω από τον ταμιευτήρα βρίσκεται συνήθως ένα κάλυμμα αδιαπέρατων πετρωμάτων. Ο ταμιευτήρας πολλές φορές συνδέεται σε μια επιφανειακή περιοχή τροφοδοσίας,

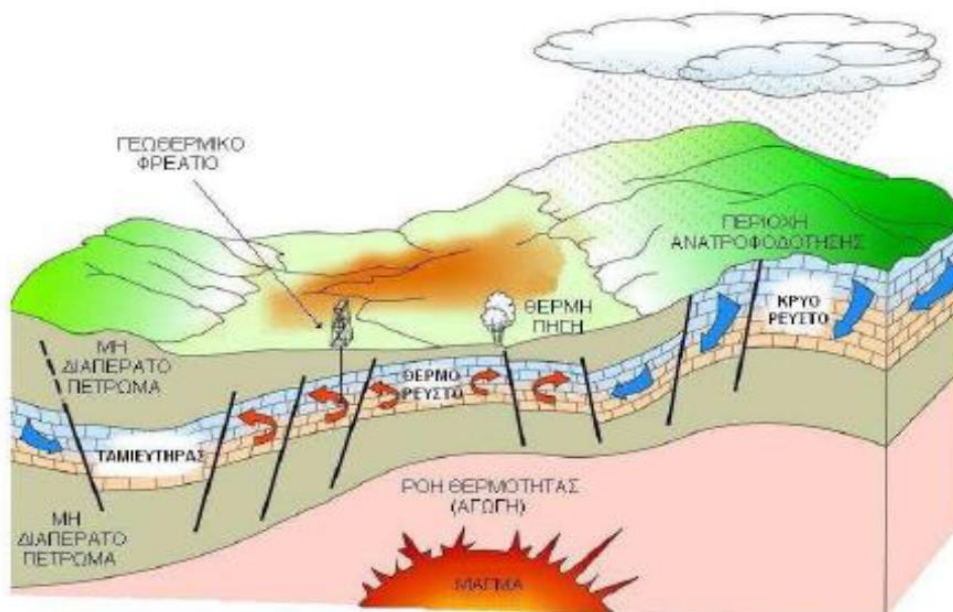
---

<sup>1</sup> Γεωθερμική Βαθμίδα είναι ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της γης ανά μονάδα μήκους, η μέση τιμή της είναι 3°C/100m και χαρακτηρίζεται ως κανονική γεωθερμική βαθμίδα (Καρυδάκης, 2005).



διαμέσου της οποίας επιφανειακό νερό κατεβαίνει, επαναφορτίζοντας τον ταμιευτήρα και αντικαθιστώντας τα ρευστά που φεύγουν από τον ταμιευτήρα και εξέρχονται στην επιφάνεια με τη μορφή θερμών πηγών ή αντλούνται μέσω γεωτρήσεων.

Το γεωθερμικό ρευστό είναι νερό, το οποίο ανάλογα με τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που επικρατούν στον ταμιευτήρα βρίσκεται σε υγρή ή αέρια φάση. Συχνά είναι εμπλουτισμένο με χημικά στοιχεία και αέρια, όπως CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S και άλλα.



*Εικόνα 1-1: Απλουστευμένη μορφή ενός πρότυπου γεωθερμικού συστήματος (Φυτίκας, 2004).*

### **1.1.3 Γεωθερμικός Πόρος**

Ως γεωθερμικός πόρος ορίζεται ουσιαστικά η θερμική ενέργεια (δυναμικό) που βρίσκεται αποθηκευμένη κάτω από μια συγκεκριμένη περιοχή, μεταξύ της επιφάνειας της γης και ενός ορισμένου βάθους στον φλοιό. Ο ωφέλιμος και προσβάσιμος γεωθερμικός πόρος αναφέρεται στο τμήμα της ενέργειας που μπορεί να ανακτηθεί με νόμιμο και οικονομικά συμφέροντα τρόπο κάποια στιγμή στο σχετικά άμεσο μέλλον, δηλαδή μέσα σε λιγότερο από 100 χρόνια. Ο οικονομικά επωφελής γεωθερμικός πόρος αποτελεί μέρος του ωφέλιμου και προσβάσιμου πόρου. Αυτού του είδους οι γεωθερμικοί πόροι είναι γνωστοί και ως αποθέματα και αναφέρονται στην ποσότητα της γεωθερμικής ενέργειας μιας συγκεκριμένης περιοχής, η οποία μπορεί να αξιοποιηθεί με ανταγωνιστικό κόστος σε σχέση με άλλες πηγές ενέργειας. Οι πόροι αυτοί έχουν ερευνηθεί και αξιολογηθεί με τη βοήθεια γεωφυσικών, γεωτρητικών, γεωχημικών και άλλων γεωλογικών ερευνών και μελετών.



#### **1.1.4 Η Γεωθερμία στην Ελλάδα**

Στην Ελλάδα, οι γεωλογικές συνθήκες ευνόησαν τη δημιουργία ενός πολύ σημαντικού γεωθερμικού δυναμικού χαμηλής ενθαλπίας, σε μικρά κυρίως βάθη, σε διάφορες περιοχές. Η έρευνα για τον εντοπισμό αξιοποιήσιμων γεωθερμικών ρευστών χαμηλής ενθαλπίας άρχισε από το ΙΓΜΕ (Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών) το 1980 και εντατικοποιείται όλο και περισσότερο τα τελευταία χρόνια (ΙΓΜΕ, 2007). Τα περισσότερα από τα γεωθερμικά πεδία που ερευνήθηκαν βρίσκονται σε περιοχές με ευνοϊκές γεωλογικές συνθήκες για τη δημιουργία τους, ενώ οι προοπτικές άμεσης εκμετάλλευσης των ρευστών είναι πολύ ευοίωνες.

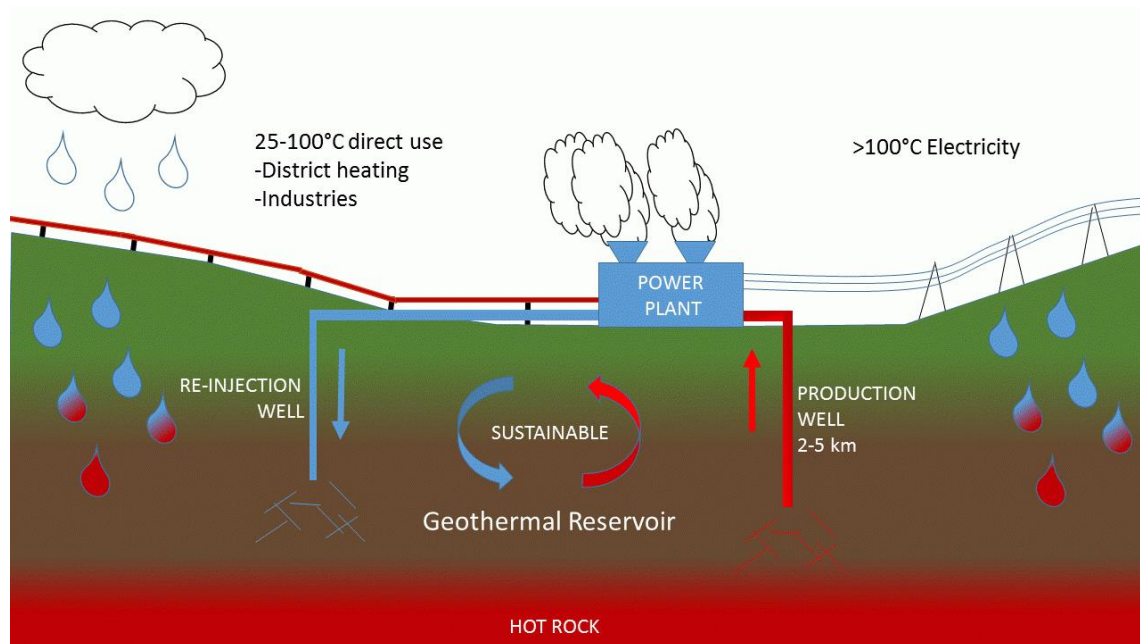
Έτσι, αναπτύχθηκαν αξιόλογες εφαρμογές όπως: γεωθερμικά θερμοκήπια συνολικής έκτασης 240 περίπου στρεμμάτων λειτουργούν σήμερα στη Νέα Απολλωνία Θεσσαλονίκης, στο Σιδηρόκαστρο και τη Νιγρίτα Σερρών, στο Νέο Εράσμιο Ξάνθης (80 στρέμματα), στον Πολυχνίτο Λέσβου και τη Μήλο (Φυτίκας, 2008). Επιπλέον αξιόλογες και πρωτοποριακές εφαρμογές αποτελούν η ξήρανση αγροτικών προϊόντων (κυρίως τομάτας), η θέρμανση εδάφους για τη δημιουργία πρώιμων σπαραγγιών στο Νέο Εράσμιο, η παραγωγή σπιρουλίνας στη Νιγρίτα και οι ιχθυοκαλλιέργειες στο Νέο Εράσμιο και το Πόρτο Λάγος.

### **1.2 Γεωθερμία Υψηλής Ενθαλπίας και Ηλεκτροπαραγωγή**

Η γεωθερμική ενέργεια χρησιμοποιείται εδώ και χιλιάδες χρόνια σε νοικοκυριά και, συγκεκριμένα, για τη μαγειρική, το λουτρό και το πλύσιμο γενικότερα. Ωστόσο, η χρήση της ενέργειας αυτής για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ξεκίνησε κατά τη διάρκεια του πρώτου μισού του 20<sup>ου</sup> αιώνα, ενώ σήμερα χρησιμοποιείται σε περισσότερο από 50 χώρες παγκοσμίως, με παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε περίπου 20 χώρες.

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιώντας γεωθερμική ενέργεια ξεκίνησε για πρώτη φορά το 1904 στο *Larderello* της Ιταλίας, ενώ η λειτουργία του μεγαλύτερου γεωθερμικού συστήματος τηλεθέρμανσης, στο Ρέικιαβικ της Ισλανδίας και του πλέον εκτεταμένου θερμοκηπίου θέρμανσης στην Ουγγαρία ξεκίνησαν τη δεκαετία του 1930. Η γεωθερμική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι εξαιρετικά σημαντική στις Φιλιππίνες, την Ινδονησία, το Μεξικό, την Κόστα Ρίκα και το Ελ Σαλβαδόρ (Huttrer, 2001), ενώ η πιο άμεση χρήση της είναι διαδεδομένη στην Κίνα, την Ιαπωνία, την Ισλανδία και τις ΗΠΑ (Lund and Freeston, 2001).





Εικόνα 1-2: Ενδεικτική απεικόνιση ενός συστήματος ηλεκτροπαραγωγής αξιοποιώντας την γεωθερμική ενέργεια (Waweru Mwaura, 2018).

Τα γεωθερμικά πεδία υψηλής ενθαλπίας συνήθως χαρακτηρίζονται από «κλειστά» γεωθερμικά συστήματα, στα οποία δεν υπάρχει εναλλαγή ή ροή ρευστού στο εσωτερικό τους. Τα συστήματα αυτά συνήθως θερμαίνονται από κάποιου είδους μαγματική διείδυση που υπάρχει σε κάποιο σημείο στο εσωτερικό τους και η οποία με τη σειρά της θερμαίνει τα πετρώματα του ταμιευτήρα του γεωθερμικού συστήματος. Το ρευστό (νερό) που υπάρχει παγιδευμένο στο κλειστό αυτό σύστημα θερμαίνεται μέσω της αγωγής από τα πετρώματα που έρχεται σε επαφή, φτάνοντας σε αρκετά υψηλές θερμοκρασίες (>150°C). Η εισαγωγή ενός συστήματος γεωτρήσεων στο γεωθερμικό αυτό πεδίο (σχέδιο εκμετάλλευσης) οδηγεί στην άντληση του θερμού αυτού ρευστού, προκειμένου αυτό να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το σύστημα των γεωτρήσεων είναι απαραίτητο προκειμένου να πραγματοποιηθεί ροή ρευστού στο εσωτερικό του «κλειστού» ταμιευτήρα.

Απαραίτητη προϋπόθεση για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμικά συστήματα είναι η υψηλή εσωτερική θερμότητα (υψηλή ενθαλπία) του ρευστού αυτών. Σε γενικά πλαίσια, μέσω των γεωτρήσεων άντλησης του ρευστού, χρησιμοποιώντας ένα σύστημα εσωτερικών και εξωτερικών σωληνώσεων, αυτό οδηγείται στην τουρμπίνα (ατμοστρόβιλος) του εργοστασίου ηλεκτροπαραγωγής, προκειμένου να περιστρέψει τη γεννήτρια και να παραχθεί ηλεκτρικό ρεύμα. Κατά κανόνα το νερό επανεισάγεται (*reinjection*) ξανά στο γεωθερμικό πεδίο μετά την έξοδό του από την τουρμπίνα



ηλεκτροπαραγωγής. Σε κάποιες περιπτώσεις, ωστόσο, αυτό θα πρέπει να εξεταστεί καθώς δεν είναι γνωστές οι ιδιότητες του ταμιευτήρα. Ο γεωθερμικός ταμιευτήρας θα πρέπει να διερευνηθεί ως προς τη συμπεριφορά του στις διάφορες αλλαγές που του επιφέρουν οι γεωτρήσεις, προκειμένου να γίνουν αντιληπτά τα χαρακτηριστικά του. Το αν ο ταμιευτήρας είναι «ανοιχτός», που σημαίνει ότι από κάποιο σημείο του εισάγεται νερό σε αυτόν (π.χ. κάποιο ρήγμα που εισάγει θερμό νερό σε αυτόν), ή «κλειστός», δεν είναι γνωστό εκ των προτέρων και θα πρέπει να διερευνηθεί.

Η διερεύνηση και μελέτη των παραπάνω, καθώς και άλλων πολλών παραμέτρων που αφορούν στη συμπεριφορά του ταμιευτήρα, πραγματοποιείται μέσω ενός συνόλου παρατηρήσεων και μετρήσεων (*monitoring*) πριν και κατά τη διάρκεια της εκμετάλλευσης του γεωθερμικού πεδίου. Ύστερα από την εκτέλεση όλων των απαραίτητων ερευνών, όπως οι γεωφυσικές μελέτες, η μελέτη του χημισμού του ρευστού κ.ά., είναι απαραίτητη και η προσομοίωση του ταμιευτήρα του γεωθερμικού πεδίου, μέσω της οποίας θα προβλέπεται η συμπεριφορά του στο σχέδιο εκμετάλλευσης που θα εφαρμοστεί σε αυτόν (*modeling simulation*). Το σχέδιο αυτό δεν μπορεί να υλοποιηθεί κατευθείαν σε ένα ανεπαρκώς μελετημένο γεωθερμικό σύστημα, καθώς δεν είναι γνωστή η μηχανική συμπεριφορά του ταμιευτήρα.

Επομένως με λίγα λόγια, προηγείται ο μαθηματική προσομοίωση της συμπεριφοράς του ταμιευτήρα στο σχέδιο της εκμετάλλευσης, μέσω της κατασκευής ενός μοντέλου εικονικής παρουσίασης αυτού, ώστε στο επόμενο βήμα να πραγματοποιηθεί η βελτιστοποίηση της παραγωγής υπό αειφόρες συνθήκες. Μετά την πραγματοποίηση των παραπάνω, τελικό βήμα αποτελεί η υλοποίηση του έργου για την αξιοποίηση του γεωθερμικού πεδίου που ερευνήθηκε.

### **1.2.1 Το Μαθηματικό Μοντέλο**

Αξίζει να αναφερθεί επιπλέον η έννοια του μαθηματικού μοντέλου, καθώς αυτό αποτελεί τη βάση για τον σχεδιασμό της προσομοίωσης που θα αναλυθεί στην παρούσα εργασία. Ουσιαστικά, το μαθηματικό μοντέλο αποτελεί το βασικότερο εργαλείο της προσομοίωσης, καθώς είναι εκείνο που επιλύει τις διαφορικές εξισώσεις που διέπουν τη ροή των ρευστών και της θερμότητας στο πορώδες μέσον. Χρησιμοποιείται για τον έλεγχο υποθέσεων και τον προσδιορισμό των παραμέτρων του ταμιευτήρα, όπως το μέγεθος, αν είναι ανοικτός, αν έχει ρήγματα επικοινωνίας κ.λπ. Επιπλέον, χρησιμοποιείται για την προσομοίωση πολλαπλών σεναρίων εκμετάλλευσης προκειμένου





να προσδιοριστεί το βέλτιστο. Η προσομοίωση, σε αντίθεση με την υλοποίηση του έργου, δεν κοστίζει και, επομένως, μπορεί να εφαρμοστεί όσες φορές χρειαστεί. Τέλος, το μαθηματικό μοντέλο έχει τη δυνατότητα να ενημερώνεται κατά τη διάρκεια της εκμετάλλευσης, ώστε να γίνεται πιο ρεαλιστικό, ακριβές και έμπειρο. Επιπροσθέτως, όσον αφορά την ακρίβεια των αποτελεσμάτων του μαθηματικού μοντέλου, συνήθως απαιτείται και το λεγόμενο *history matching* (αναπαραγωγή του ιστορικού παραγωγής του ταμιευτήρα: «*history matching*», βλ. ενότητα 3.1), ώστε τα αποτελέσματα σχετικά με τη μελλοντική συμπεριφορά του ταμιευτήρα να θεωρούνται αξιόπιστα και αντιπροσωπευτικά σε σχέση με τη πραγματικότητα.

### 1.3 Δομή της Εργασίας

Η διαδικασία της μοντελοποίησης που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα γίνεται μέσω της χρήσης υπολογιστικών λογισμικών που επιλύουν με αριθμητικές μεθόδους τις διαφορικές εξισώσεις που διέπουν τη συμπεριφορά ενός γεωθερμικού πεδίου. Στην παρούσα εργασία γίνεται χρήση του υπολογιστικού λογισμικού *FEFLOW*, προκειμένου να υλοποιηθεί η μελέτη και προσομοίωση ενός υποθετικού γεωθερμικού πεδίου υψηλής θερμοκρασίας, ώστε να το προσδιοριστεί ο σχεδιασμός και οι προϋποθέσεις εκμετάλλευσης που θα οδηγήσουν στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σκοπός είναι η βέλτιστη αξιοποίηση του θερμικού περιεχομένου του γεωθερμικού πεδίου που μπορεί να οδηγήσει σε υψηλή ισχύ παραγόμενης ενέργειας, στα πλαίσια της αειφόρου ανάπτυξης.

Έτσι, στο [Κεφάλαιο 2](#) παρουσιάζονται, κατά σειρά, οι έννοιες της αειφόρου ανάπτυξης τόσο σε γενικό, όσο και σε ειδικό πλαίσιο αναφοράς στη γεωθερμία, οι προϋποθέσεις της βιώσιμης διαχείρισης των γεωθερμικών πεδίων, η παρακολούθηση και ο έλεγχος των γεωθερμικών πεδίων (*monitoring*), η μοντελοποίηση των γεωθερμικών συστημάτων (*modeling*) και η επανεισαγωγή ρευστών σε ένα γεωθερμικό πεδίο (*reinjection*).

Στο [Κεφάλαιο 3](#) αναλύεται ο σχεδιασμός της εκμετάλλευσης και η προσομοίωση των γεωθερμικών πεδίων. Συγκεκριμένα, αναφέρονται τα πρώτα βήματα που υλοποιούνται για τον επιτυχή σχεδιασμό της εκμετάλλευσης ενός γεωθερμικού ταμιευτήρα, η ανάλυση της αριθμητικής προσομοίωσης των γεωθερμικών ταμιευτήρων και η λειτουργία του λογισμικού προσομοίωσης *FEFLOW*. Με λίγα λόγια σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται η λεπτομερής ανάλυση των εννοιών της προσομοίωσης, των



διαφορικών εξισώσεων που διέπουν το πρόβλημα αυτής, των αρχικών και συνοριακών συνθηκών και των τεχνικών που χρησιμοποιούν τα λογισμικά για την επίλυση όλων αυτών.

Στο **Κεφάλαιο 4** γίνεται αναφορά στην ειδική μελέτη του υποθετικού κλειστού γεωθερμικού ταμειυτήρα που μελετήθηκε στην παρούσα εργασία και συγκεκριμένα στον τρόπο με τον οποίο οι φυσικές ιδιότητες του φυσικού μοντέλου, μετατρέπονται σε μαθηματικές ώστε να δημιουργηθεί ένα μαθηματικό μοντέλο (διακριτοποίηση σε πεπερασμένα στοιχεία, αρχικές και συνοριακές συνθήκες κ.ο.κ.). Αναλυτικότερα, παρουσιάζονται η ανάπτυξη και προσομοίωση του αρχικού στατικού μοντέλου (*steady-state model*) και η ανάπτυξη του μοντέλου μεταβατικής κατάστασης (*transient-state model*). Ως *steady-state model* κατά τη μοντελοποίηση ενός ταμειυτήρα ορίζεται η σταθερή κατάσταση στην οποία αυτός βρίσκεται πριν από οποιαδήποτε ανθρωπογενή παρέμβαση. Αντίθετα, ως *transient-state model* ορίζεται η μεταβατική κατάσταση του ταμειυτήρα κατά την οποία υπάρχουν μεταβολές στα εσωτερικά χαρακτηριστικά του, λόγω της ανθρωπογενούς παρέμβασης σε αυτόν.

Το **Κεφάλαιο 5** αφορά την λεπτομερή ανάλυση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης του μοντέλου μεταβατικής κατάστασης, με στόχο την επαρκή παραγόμενη ενέργεια και την αειφορία του πεδίου, ύστερα από την εκμετάλλευση αυτού και τον τελικό υπολογισμό της συνολικής ισχύος της παραγόμενης ενέργειας. Τέλος, η εργασία ολοκληρώνεται στο **Κεφάλαιο 6** με τη σύνοψη όλων των συμπερασμάτων που προέκυψαν από τη συγκεκριμένη εργασία.



## 2. ΒΙΩΣΙΜΗ Ή ΑΕΙΦΟΡΟΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

### 2.1 Εισαγωγή

Ο όρος «βιώσιμη» ή «αειφόρος» ενέργεια περιγράφει τη χρήση των ενεργειακών πόρων κατά τρόπο που ικανοποιεί μεν τις ανάγκες του παρόντος, χωρίς να θέτει δε υπό διακύβευση τις ανάγκες των μελλοντικών γενεών. Οι ορισμοί της αειφόρου ή βιώσιμης ενέργειας (*sustainable energy*) συνήθως περιλαμβάνουν περιβαλλοντικές πτυχές, όπως οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου, αλλά και κοινωνικές και οικονομικές πτυχές, όπως η ενεργειακή φτώχεια (*energy poverty*). Είναι γεγονός ότι προκειμένου η χρήση μιας ενεργειακής πηγής να θεωρείται βιώσιμη δεν θα πρέπει να προκαλεί σε γενικές γραμμές βλάβες στο περιβάλλον. Επομένως, όλες οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή, η αιολική, η γεωθερμική, η υδροηλεκτρική και η ωκεάνια, μπορούν εύκολα να είναι βιώσιμες. Σε σύγκριση με τα ορυκτά καύσιμα οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι πάντα περισσότερο βιώσιμες, καθώς διατίθενται σε αφθονία, ωστόσο όμως σε ορισμένα έργα μπορούν να προκαλέσουν σοβαρές περιβαλλοντικές ζημίες.

Το εσωτερικό της Γης είναι μια τεράστια δεξαμενή θερμότητας. Η γεωθερμική θερμοκρασία μέσα στη Γη αυξάνεται με την αύξηση του βάθους. Η γεωθερμική ενέργεια που φτάνει ως την επιφάνειά της είναι 2,5 φορές μεγαλύτερη από την ενέργεια που καταναλώνεται ανά ημέρα σε παγκόσμιο επίπεδο. Σήμερα, η παγκόσμια αλλαγή του κλίματος και η ρύπανση του περιβάλλοντος ωθούν τους ανθρώπους να δώσουν μεγαλύτερη προσοχή στη γεωθερμική ενέργεια, καθώς είναι μια μορφή καθαρής ενέργειας. Έτσι, η ανάπτυξη ενός ταμιευτήρα με τρόπο που να διασφαλίζει την αειφόρο διαχείρισή του ή γενικότερα η ανάπτυξη μιας μορφής ενέργειας με βιώσιμο τρόπο, αρχίζει να κατακτά σημαντική βαρύτητα για την εξέλιξη της ανθρωπότητας.

Η γεωθερμική ενέργεια μπορεί να ταξινομηθεί ως ένα είδος ανανεώσιμης ενέργειας. Όταν η εκφόρτιση θερμότητας από τον γεωθερμικό ταμιευτήρα είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την επαναφόρτισή του, η εκμετάλλευση του ταμιευτήρα δεν είναι αειφόρος και ως εκ τούτου μη βιώσιμη τεχνολογικά και οικονομικά. Προς τον σκοπό αυτόν, λοιπόν, το επιστημονικά τεκμηριωμένο και ορθολογικά σχεδιασμένο σύστημα εκμετάλλευσης ενός γεωθερμικού ταμιευτήρα (παραγωγής θερμών ρευστών, αξιοποίησης της περιεχόμενης θερμότητας και επανεισπίεσης του ρευστού) είναι εκείνο



που μπορεί να προχωρήσει στην αιεφόρο ανάπτυξη και αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας (Kaya, Zarrouk, O'Sullivan, et al, 2011).

Οι γεωθερμικοί πόροι έχουν τη δυνατότητα να συμβάλουν σημαντικά στην αιεφόρο χρήση της ενέργειας αυτής σε πολλά μέρη του κόσμου. Η παραγωγική ικανότητα των γεωθερμικών συστημάτων είναι αρκετά μεταβλητή, λόγω της διαφοροποίησης της εκάστοτε γεωμορφολογίας του υπεδάφους και τα διαφορετικά συστήματα που συναντώνται ανά περιοχή, ανταποκρίνονται διαφορετικά στην παραγωγή, κυρίως λόγω, των γεωλογικών, υδρολογικών, τεκτονικών και πετροφυσικών χαρακτηριστικών τους. Επομένως, κρίνεται ως απολύτως απαραίτητη και αναγκαία μια ολοκληρωμένη διαδικασία διαχείρισης που θα διασφαλίζει κατά το δυνατόν την πλέον βιώσιμη χρήση κάθε πεδίου, κατά τη εκμετάλλευσή του για την παραγωγή γεωθερμικής ενέργειας.

Πιο συγκεκριμένα, η γεωθερμική εκμετάλλευση περιλαμβάνει την εκροή ενέργειας από πολύπλοκα υπόγεια συστήματα, ενώ η διαχείριση των γεωθερμικών πεδίων συνεπάγεται τον έλεγχο αυτής της εξορυχθείσας ενέργειας, έτσι ώστε να μεγιστοποιούνται τα προκύπτοντα οφέλη, χωρίς την υπερεκμετάλλευση των φυσικών πόρων<sup>2</sup>. Η ικανότητα παραγωγής των γεωθερμικών συστημάτων είναι συχνά ελάχιστα γνωστή εκ των προτέρων, ενώ η απόκριση των συστημάτων αυτών σε μακροπρόθεσμη εκμετάλλευση, είναι δύσκολο να προβλεφθεί. Αυτό συμβαίνει επειδή η δομή, οι ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά του συστήματος, είναι ελάχιστα γνωστά και μπορούν να παρατηρηθούν μόνο έμμεσο τρόπο. Ως εκ τούτου, η διαχείριση των γεωθερμικών πεδίων γίνεται περισσότερο περίπλοκη. Κατά τη διάρκεια λειτουργίας του γεωθερμικού πεδίου αυτή περιλαμβάνει τη λήψη αποφάσεων μεταξύ διαφορετικών ενεργειών δράσης με στόχο τη βελτίωση των συνθηκών λειτουργίας ή την αντιμετώπιση δυσμενών συνθηκών στον ταμιευτήρα, οι οποίες μπορεί να εμφανιστούν κατά την εξέλιξη της εκμετάλλευσης (πτώση πίεσης, εισροή κρύου νερού). Σε πολλές περιπτώσεις χρειάζεται να ληφθούν αποφάσεις ή βελτιώσεις στην τεχνολογία της παραγωγής (αντλίες, επανεισαγωγή) με στόχο πάντα την επιμήκυνση του χρόνου ζωής του γεωθερμικού πόρου (Stefansson et al., 1995, Axelsson and Gunnlaugsson, 2000). Οι διαχειριστές ενός γεωθερμικού πεδίου πρέπει να έχουν κάποια γνώση για τα πιθανά αποτελέσματα των διαφορετικών επιλογών παραγωγής, έτσι ώστε να είναι σε θέση να πάρουν τις κατάλληλες αποφάσεις μελλοντικά.

<sup>2</sup> Οι **Φυσικοί Πόροι** είναι κυρίως φυσικά αγαθά, εύκολα προσβάσιμα και διαθέσιμα, τα οποία ο άνθρωπος έχει την ικανότητα να τα χρησιμοποιήσει για κάλυψη αναγκών του. Οι φυσικοί πόροι μιας χώρας ή μιας γεωπολιτικής ενότητας αναφέρονται συνήθως στις οικονομικά αξιοποιήσιμες άμεσες (πρωτογενείς) ύλες, κάποιες από τις οποίες χαρακτηρίζονται ως πηγές ενέργειας που μας προσφέρει η βιόσφαιρα, το έδαφος, το υπέδαφος, το νερό, η ατμόσφαιρα και το φως του ήλιου που επιδρά στην περιοχή αναφοράς.



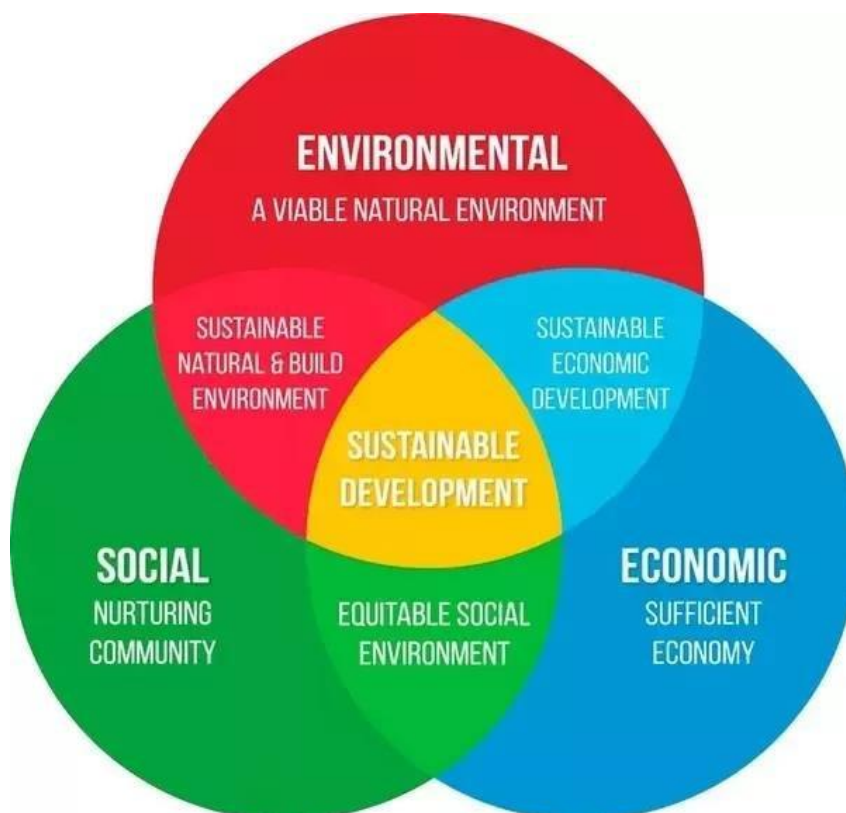
Γι' αυτό η προσεκτική παρακολούθηση και ο συνεχής έλεγχος του γεωθερμικού πεδίου (*monitoring*) είναι το πλέον βασικό συστατικό οποιουδήποτε προγράμματος διαχείρισης.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα συζητηθεί κυρίως η διαχείριση των γεωθερμικών πόρων από την οπτική της φυσικής συμπεριφοράς ενός ταμιευτήρα (Μηχανική Υπόγειων Ταμιευτήρων). Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην **παρακολούθηση** (*monitoring*), **μοντελοποίηση** (*modeling*) και **επανείσπιση** (*reinjection*), οι οποίες θεωρούνται βασικές διαδικασίες για την αποτελεσματική διαχείριση των γεωθερμικών πόρων. Επίσης, γίνεται αναφορά στη βιώσιμη διαχείριση των γεωθερμικών πόρων (αιφορία) και πως αυτοί συμπεριφέρονται σε καταστάσεις μακροπρόθεσμης λειτουργίας και εκμετάλλευσης, αναφέροντας και σχετικά παραδείγματα από διάφορες περιοχές.

## 2.2 Η έννοια της αιφορίας και της βιώσιμης χρήσης στη γεωθερμία

### 2.2.1 Αειφόρος ανάπτυξη – Ιστορική αναδρομή

Ο όρος Αειφόρος Ανάπτυξη (ΑΑ) ή βιώσιμη ανάπτυξη (*sustainable development*) έγινε ιδιαίτερα γνωστός μετά τη δημοσίευση της έκθεσης **Brundtland** το 1987 ([World Commission on Environment and Development, 1987](#)). Η έκθεση *Brundtland*, πήρε το όνομά της από την πρώτη πρωθυπουργό της Νορβηγίας *Gro Harlem Brundtland*, η οποία, ως πρόεδρος της Παγκόσμιας Επιτροπής για το Περιβάλλον και την Ανάπτυξη, παρέδωσε στη Γενική Συνέλευση των Ηνωμένων Εθνών το 1987, την αναφορά της με τίτλο «Το Κοινό μας Μέλλον», γνωστή ως «*Brundtland report*». Σύμφωνα, λοιπόν, με την έκθεση αυτή: «*Αειφόρος ή βιώσιμη ανάπτυξη θεωρείται το είδος της ανάπτυξης που ικανοποιεί τις ανάγκες του παρόντος, χωρίς να θέτει σε κίνδυνο τη δυνατότητα των μελλοντικών γενεών να ικανοποιήσουν τις δικές τους ανάγκες*». Αυτό σημαίνει ότι κάθε σύγχρονο κράτος οφείλει να εντάσσει στα αναπτυξιακά του προγράμματα τη μέριμνα για τις μελλοντικές γενιές. Σκοπός της αιφορίας είναι η βελτίωση των συνθηκών διαβίωσης των ατόμων, διαφυλάσσοντας παράλληλα το περιβάλλον τους σε βραχυπρόθεσμη, μεσοπρόθεσμη και, κυρίως, μακροπρόθεσμη βάση. Έτσι, συνιστά ένα διαφορετικό τρόπο σκέψης για το μέλλον, στα πλαίσια του οποίου συνυπολογίζονται και βρίσκονται σε αρμονία το **Περιβάλλον**, η **Κοινωνία** και η **Οικονομία** (*Error! Reference source not found.*) αποσκοπώντας στην επίτευξη ενός υψηλού επιπέδου ποιότητας ζωής.



Εικόνα 2-1: Οι βασικές συνιστώσες της Αειφόρου Ανάπτυξης (Ademovic, 2018).

Η ευρωπαϊκή στρατηγική για την Αειφόρο Ανάπτυξη, που εγκρίθηκε το 2001 από το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και αναθεωρήθηκε το 2006, στηρίζεται σε τρεις άξονες:

- Την προστασία του περιβάλλοντος
- Την κοινωνική δικαιοσύνη και συνοχή
- Την οικονομική ευημερία

Όσον αφορά την προστασία του περιβάλλοντος, δίδεται έμφαση στη διατήρηση της ικανότητας της γης να ευνοεί τη ζωή σε όλη της την ποικιλία, την τήρηση των ορίων των φυσικών πόρων του πλανήτη και την εξασφάλιση υψηλού επιπέδου όσον αφορά στην προστασία και τη βελτίωση της ποιότητας του περιβάλλοντος. Η ενσωμάτωση των περιβαλλοντικών ζητημάτων στον ορισμό και την εφαρμογή των ευρωπαϊκών πολιτικών δεν είναι κάτι που παρουσιάστηκε για πρώτη φορά για την επίτευξη του στόχου της Αειφόρου Ανάπτυξης. Η αρχή της ,προστασίας του περιβάλλοντος παρουσιάστηκε στη συνθήκη του Μάαστριχτ και τη Σύνοδο Κορυφής του Κάρντιφ το 1998, οπότε τέθηκαν τα θεμέλια για μια συντονισμένη δράση σε κοινοτικό επίπεδο για την ενσωμάτωση των περιβαλλοντικών ζητημάτων στις πολιτικές της ΕΕ.

Οι παραπάνω τρεις συνιστώσες (Εικόνα 2-1) της ΑΑ συνυφαίνονται, αλληλοεξαρτώνται και αλληλοεπηρεάζονται, όπως, για παράδειγμα, μια κοινωνία, η





οποία ευημερεί, στηρίζεται σε ένα υγιές περιβάλλον για την παραγωγή τροφίμων και καθαρό νερό και χρησιμοποιεί με σύνεση τους φυσικούς πόρους που είναι απαραίτητοι για τη διαβίωση των πολιτών της.

Την ανησυχία για το φυσικό περιβάλλον και τα φυσικά οικοσυστήματα εκφράζει ένας δεύτερος ορισμός που έχει αποδοθεί στην έννοια της ΑΑ: «Αειφόρο θεωρείται το είδος εκείνο της ανάπτυξης που δεν υπερβαίνει τα όρια της φέρουσας ικανότητας των οικοσυστημάτων που στηρίζουν τη ζωή στον πλανήτη». Ο ορισμός, που δίνεται στην έκθεση Brundtland, αφορά στη διαγενεακή αλληλεγγύη, ενώ ο δεύτερος ορισμός αφορά στην αλληλεγγύη προς τα φυσικά οικοσυστήματα και το περιβάλλον (Φλογαΐτη, 2006).

Όλα τα ζητήματα που αφορούν στην ΑΑ σχετίζονται με τους τρεις πυλώνες που την στηρίζουν. Περιβαλλοντικά ζητήματα, για παράδειγμα, αποτελούν η παραγωγή ενέργειας, η εξάντληση των φυσικών πόρων, η ρύπανση της ατμόσφαιρας και των υδάτων, τα στερεά απορρίμματα και η διαχείρισή τους, η συρρίκνωση της βιοποικιλότητας, η κλιματική αλλαγή, η ερημοποίηση κ.ά. Η κοινωνική διάσταση εξετάζει τα ζητήματα δημοκρατίας, ειρήνης, κοινωνικής ευημερίας και δικαιοσύνης, υπερπληθυσμού, υγείας, πολιτισμού, ισότητας φύλων και φυλών κ.ά. Τα οικονομικά ζητήματα, απ' την άλλη εξετάζουν μοντέλα παραγωγής και κατανάλωσης, αγροτικής παραγωγής, παραγωγής τροφίμων, το δίκαιο εμπόριο (*fair trade*), καθώς και κοινωνικά ζητήματα που σχετίζονται άμεσα με την οικονομία (π.χ. φτώχεια και μετανάστευση).

Η αειφορία αποτελεί έναν μακροπρόθεσμο στόχο. Όλα τα προαναφερθέντα ζητήματα συνδέονται και αλληλοεπηρεάζονται, γι' αυτό και η ΑΑ επιστρατεύει πολλαπλές, σύνθετες οδούς και διαδικασίες που οδηγούν στην επίτευξη των στόχων της. Προϋποθέτει επίσης ανάπτυξη των παραγωγικών δομών της οικονομίας, παράλληλα με τις υποδομές για μία ευαίσθητη στάση απέναντι στο φυσικό περιβάλλον και στα οικολογικά προβλήματα. Στην ουσία οι φυσικοί πόροι πρέπει να υφίστανται εκμετάλλευση με ρυθμό μικρότερο από αυτόν με τον οποίον ανανεώνονται, διαφορετικά λαμβάνει χώρα περιβαλλοντική υποβάθμιση.

Άλλοι συναφείς όροι, οι οποίοι συχνά χρησιμοποιούνται με σχεδόν ταυτόσημη έννοια, είναι η πράσινη ανάπτυξη και η πράσινη οικονομία. Ωστόσο, πρέπει να τονισθεί πως η πράσινη ανάπτυξη δίνει προτεραιότητα στην περιβαλλοντική βιωσιμότητα και μετά στην οικονομική ανάπτυξη. Από την άλλη, η πράσινη οικονομία στοχεύει στη μείωση των περιβαλλοντικών κινδύνων, ενώ είναι στενά συνδεδεμένη με την πολιτική εφαρμογή και εστίαση, έχοντας βέβαια ως στόχο την αειφόρο ανάπτυξη, χωρίς την υποβάθμιση του περιβάλλοντος. Η αειφόρος ανάπτυξη, η πράσινη ανάπτυξη και η πράσινη οικονομία,



ανάμεσα στ' άλλα, μπορούν να αξιοποιούν και τα σύγχρονα τεχνολογικά εργαλεία που παρέχει η επιστήμη για την προστασία του περιβάλλοντος από κάθε ανθρωπογενή δραστηριότητα και την ορθολογική αξιοποίηση των φυσικών πόρων.

### **2.2.2 Η Αειφορία στη Γεωθερμία**

Στο επίκεντρο, λοιπόν, του ζητήματος της αειφόρου ανάπτυξης είναι η αξιοποίηση των φυσικών πόρων που έχουμε στη διάθεσή μας σήμερα, συμπεριλαμβανομένων και όλων των ενεργειακών πόρων της γης. Η αειφορία στην παραγωγή ενέργειας από γεωθερμικούς πόρους είναι ένα θέμα που έχει λάβει περιορισμένη προσοχή, αν και η μακροβιότητα της εκμετάλλευσης ενός γεωθερμικού πεδίου ανησυχούσε για πολύ καιρό τους ερευνητές ([Wright, 1999](#), [Stefansson, 2000](#), [Rybach et al., 2000](#), [Cataldi, 2001](#)). Ωστόσο, συχνά παρατηρείται σύγχυση σχετικά με το ποιοι ενεργειακοί πόροι θεωρούνται ανανεώσιμοι και ποιοι αειφόροι. Η ανανεωσιμότητα αποτελεί ιδιότητα του ενεργειακού πόρου, ενώ η αειφορία περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιείται οποιοσδήποτε φυσικός πόρος και σχετίζεται με την ορθολογική διαχείριση των πόρων, τη διάθεσή τους σε προσιτό κόστος στον άνθρωπο και χαρακτηρίζεται από κάποια μορφή ισορροπίας ([Stefansson and Axelsson, 2005](#)).

**Ανανεωσιμότητα** ενός ενεργειακού πόρου σημαίνει ότι η οποιαδήποτε ποσότητα που λαμβάνεται από το συγκεκριμένο πόρο, η ίδια ποσότητα αναπληρώνεται κατά το ίδιο χρονικό διάστημα. Η γεωθερμική ενέργεια είναι η ενέργεια που προέρχεται από τη θερμότητα του εσωτερικού της Γης και αυτή η θερμότητα είναι βασικά απεριόριστη. Ο ρυθμός και η δυνατότητα πλήρους ενεργειακής επαναφόρτισης ενός γεωθερμικού συστήματος αποτελεί το κρίσιμο κριτήριο στην ταξινόμηση ενός πόρου ως ανανεώσιμου ή όχι. Τα πιο συνηθισμένα γεωθερμικά συστήματα είναι τα υδροθερμικά, όπου τα φυσικά υπόγεια θεριά ρευστά, τα οποία συγκεντρώνονται σε έναν ή περισσότερους ταμιευτήρες, θερμαίνονται από μία εστία θερμότητας και με τη βοήθεια γεωτρήσεων έρχονται στην επιφάνεια και γίνονται αντικείμενο αξιοποίησης. Είναι τα κύρια συστήματα που αξιοποιούνται σήμερα. Κατά την εκμετάλλευση των υδροθερμικών συστημάτων, η επανατροφοδοσία της ενέργειας επιτυγχάνεται με τη φυσική αναπλήρωση του νερού στον ταμιευτήρα, στο ίδιο περίπου χρονικό διάστημα στο οποίο γίνεται η παραγωγή των ρευστών. Αυτό σημαίνει ότι το υπόγειο νερό ή ο ατμός που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή για την κάλυψη θερμικών αναγκών (άμεσες χρήσεις γεωθερμίας), με την κατάλληλη διαχείριση, δεν θα ελαττωθούν, επειδή η κατείσδυση θα συνεχίσει να ανατροφοδοτεί τους γεωθερμικούς ταμιευτήρες. Αρκεί να μη γίνεται





υπεράντληση. Η επαναδιοχέτευση των ρευστών, μετά τη χρήση τους, με άλλες γεωτρήσεις και σε ικανοποιητικές αποστάσεις μπορεί να αντικαταστήσει πλήρως την ποσότητα και την πίεση των ρευστών του ταμιευτήρα. Συνεπώς, οι γεωθερμικοί πόροι μπορεί να θεωρηθούν ως ανανεώσιμοι στην κλίμακα χρόνου των τεχνολογικών και κοινωνικών συστημάτων και δε χρειάζονται μεγάλους γεωλογικούς χρόνους (περιόδους) για αναγέννηση, όπως γίνεται με τα αποθέματα των συμβατικών καυσίμων (Αρβανίτης, 2008).

Για τον όρο της «**αιφόρου παραγωγής** γεωθερμικής ενέργειας από ένα μεμονωμένο γεωθερμικό σύστημα», δίδεται από τους [Axelsson et al. \(2001\)](#) ο παρακάτω επιστημονικός ορισμός, ο οποίος δεν λαμβάνει υπόψη οικονομικές πτυχές, περιβαλλοντικά ζητήματα και τεχνολογικές εξελίξεις, γενικά θέματα που εξελίσσονται και διαφοροποιούνται με την πάροδο του χρόνου. Σύμφωνα, λοιπόν, με τον ορισμό αυτό:

*«Για κάθε γεωθερμικό σύστημα και για κάθε τρόπο παραγωγής υπάρχει ένα ορισμένο επίπεδο μέγιστης παραγόμενης ενέργειας,  $E_0$ , κάτω από το οποίο θα είναι δυνατή η σταθερή διατήρηση της παραγόμενης αυτής ενέργειας από το σύστημα για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα (100-300 χρόνια). Εάν ο ρυθμός παραγωγής είναι μεγαλύτερος από το επίπεδο  $E_0$ , η παραγόμενη ενέργεια δεν θα μπορεί να διατηρηθεί για μεγάλο χρονικό διάστημα. Η γεωθερμική παραγωγή ενέργειας που είναι μικρότερη ή ίση ( $\leq$ ) του  $E_0$ , ονομάζεται βιώσιμη παραγωγή (sustainable production), ενώ αυτή που είναι μεγαλύτερη ( $>$ ) του  $E_0$ , ονομάζεται πλεονάζουσα παραγωγή (excessive production)».*

Αυτός ο ορισμός αφορά στη συνολική ενέργεια που θα παραχθεί από ένα γεωθερμικό σύστημα και εξαρτάται κυρίως από τη φύση του εν λόγω συστήματος και τον τρόπο παραγωγής, στον οποίον, μεταξύ άλλων, συμπεριλαμβάνονται η απώλεια θερμότητας στο εσωτερικό του συστήματος (λόγω π.χ. εισροής «κρύου» νερού), η άντληση, η εισπίεση ή η περιοδική παραγωγή. Η τιμή του  $E_0$  δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων, αλλά μπορεί να εκτιμηθεί μέσω της μοντελοποίησης και με βάση τα δεδομένα της έρευνας και της παραγωγής που γίνονται σταδιακά διαθέσιμα. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι αυτός ο ορισμός ουσιαστικά βασίζεται στον ορισμό του *Brundtland*, τουλάχιστον ως προς την περιβαλλοντική του διάσταση, χωρίς να καλύπτει όμως τη συνιστώσα της οικονομικής βιωσιμότητας, η οποία συνήθως εξετάζεται σε μια πολύ πιο μικρή χρονική κλίμακα, της τάξης των 30ετών. Εάν η παραγωγή ενέργειας από ένα γεωθερμικό σύστημα βρίσκεται εντός του βιώσιμου ορίου της, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, μπορεί να θεωρηθεί ότι η αποθηκευμένη σε αυτό ενέργεια εξαντλείται σχετικά



αργά και η ενέργεια στο εσωτερικό του ταμιευτήρα που απομακρύνεται από αυτόν αναπληρώνεται περίπου με τον ίδιο ρυθμό (ανανεωσιμότητα).

### 2.2.3 Οι επιπτώσεις της παραγωγής σε ένα γεωθερμικό σύστημα

Για να καταλάβει όμως κανείς καλύτερα τον παραπάνω ισχυρισμό, είναι απαραίτητο να κατανοήσει αρχικά τη λειτουργία ενός γεωθερμικού πόρου. Η χρήση ενός γεωθερμικού πόρου για την παραγωγή ενέργειας περιλαμβάνει την εκροή μάζας και θερμότητας από αυτόν. Οι διεργασίες που επιτελούνται για την επίτευξη αυτού του σκοπού είναι ουσιαστικά η μεταφορά μάζας και θερμότητας από το γεωθερμικό σύστημα στην επιφάνεια, διαμέσου των υφιστάμενων γεωτρήσεων. Από τη στιγμή που δημιουργήθηκε ο γεωθερμικός πόρος στο υπέδαφος της γης, οι πιέσεις και οι θερμοκρασίες στο εσωτερικό του ταμιευτήρα θερμών ρευστών σταδιακά εξισορροπήθηκαν με την πάροδο του γεωλογικού χρόνου, ακόμα και στην περίπτωση που το σύστημα είναι ανοιχτό και υπάρχουν εισροές/εκροές μάζας και θερμότητας σε αυτό (π.χ. είσοδος μετεωρικού νερού). Αυτή η κατάσταση του ταμιευτήρα ονομάζεται **Σταθερή ή Φυσική κατάσταση (*steady state or natural state condition*)** και αποτελεί την κατάσταση κατά την οποία οι πιέσεις και οι θερμοκρασίες στο ταμιευτήρα έχουν πλέον εξισορροπηθεί. Όταν όμως ξεκινήσει η εκμετάλλευση του ταμιευτήρα και κατά τη διάρκεια αυτής, η μεταφορά μάζας και θερμότητας από το σύστημα στην επιφάνεια προκαλεί τόσο χωρικές, όσο και χρονικές αλλαγές στην κατάσταση της πίεσης και της θερμοκρασίας του ταμιευτήρα, δημιουργώντας ανισορροπία στη φυσική του κατάσταση (*transient state*). Με την πάροδο του χρόνου και υπό σταθερές συνθήκες παραγωγής, το σύστημα τείνει ξανά να επέλθει σε νέα ισορροπία, που εξαρτάται όμως από τον ρυθμό και τον τρόπο της παραγωγής. Η νέα κατάσταση ισορροπίας θα πρέπει να διασφαλίζει ότι το σύστημα διατηρεί επαρκή πίεση και θερμοκρασία, ώστε να παραμένει οικονομικά βιώσιμη η εκμετάλλευσή του.

Άλλη κρίσιμη παράμετρο μιας γεωθερμικής εκμετάλλευσης αποτελεί το ενεργειακό περιεχόμενο, το οποίο είναι γνωστό είτε ως εσωτερική ενέργεια, είτε ως ενθαλπία. Σε μονοφασικές καταστάσεις (ύπαρξη μόνο υγρού νερού στο ταμιευτήρα), αυτό συνήθως εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία του νερού που εισέρχεται στο σύστημα, μέσω π.χ. κάποιου ρήγματος και θερμαίνει το υπόλοιπο νερό του ταμιευτήρα, ενώ η πίεση και η θερμοκρασία είναι αυτές που καθορίζουν ουσιαστικά την κατάσταση του ίδιου του ταμιευτήρα. Σε καταστάσεις δύο φάσεων (συνύπαρξη νερού και ατμού στο ταμιευτήρα), αντίστοιχα, το ενεργειακό περιεχόμενο εξαρτάται και από την πίεση και τη θερμοκρασία,



ενώ, για τον καθορισμό της κατάστασης του ταμιευτήρα, απαιτείται και μια ακόμα παράμετρος, όπως ο κορεσμός του νερού σε ατμό ή η ενθαλπία.

Η εκροή νερού ή ατμού από έναν γεωθερμικό ταμιευτήρα προκαλεί, σε κάθε περίπτωση, κάποιου είδους πτώση πίεσης στο εσωτερικό αυτού. Μόνη εξαίρεση αποτελεί όταν η παραγωγή (εκροή μάζας) από έναν ταμιευτήρα είναι μικρότερη από την φυσική του επαναφόρτιση. Γενικότερα, οι αλλαγές στην πίεση ενός ταμιευτήρα επηρεάζουν σημαντικά την παραγωγή και προκαλούν με τη σειρά τους αλλαγές όπως:

1. Άμεσες αλλαγές που προκαλούνται από **μειωμένη πίεση του ταμιευτήρα**, όπως:
  - αλλαγές στην επιφανειακή δραστηριότητα (π.χ. καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους κ.α.)
  - μείωση της παροχής των γεωτρήσεων (*well discharge*),
  - πτώση της στάθμης του νερού στις γεωτρήσεις, και
  - αυξημένο επίπεδο βρασμού του νερού σε ταμιευτήρες υψηλής ενθαλπίας.
2. Έμμεσες αλλαγές που προκαλούνται από **αυξημένη επαναφόρτιση** του ταμιευτήρα, όπως:
  - αλλαγές στη χημική σύσταση του ρευστού του ταμιευτήρα,
  - αλλαγές στις συνθήκες θερμοκρασίας του ταμιευτήρα (παρατηρούνται μέσω των θερμοκρασιακών προφίλ των γεωτρήσεων), και
  - αλλαγές στη θερμοκρασία ή την ενθαλπία του ρευστού του ταμιευτήρα.
3. **Επιφανειακή καθίζηση**, η οποία μπορεί να προκαλέσει ζημιά σε επιφανειακές σωληνώσεις και εξοπλισμό.

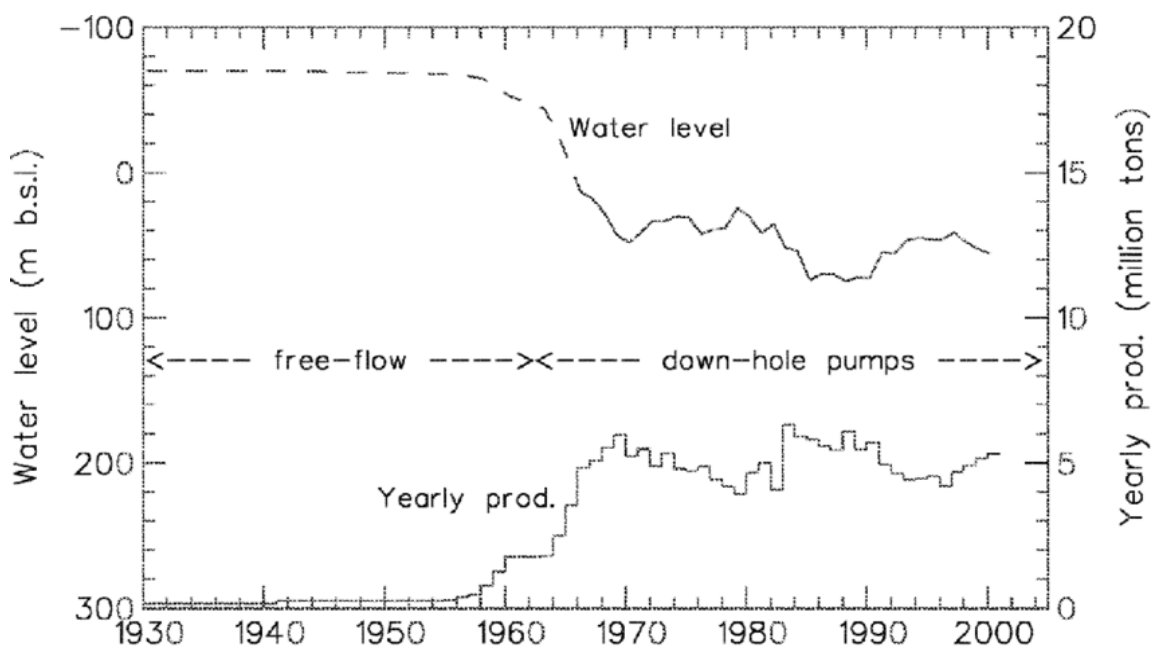
Όπως καταλαβαίνουμε λοιπόν, το γεωθερμικό δυναμικό, είναι συχνά πολύ μεταβλητό. Η πτώση πίεσης, από τη μία πλευρά, καθορίζεται από τον ρυθμό παραγωγής και, από την άλλη, επηρεάζεται από το μέγεθος (έκταση) του συστήματος και τα φυσικά του χαρακτηριστικά, όπως π.χ. η διαπερατότητα των σχηματισμών και όγκος του νερού επανεισαγωγής, κ.α. (*οριακές συνθήκες – boundary conditions*). Στα κλειστά γεωθερμικά συστήματα, ή στα συστήματα με μικρή επαναφόρτιση, η πίεση μειώνεται συνεχώς με τον χρόνο, όσο η παραγωγή συνεχίζεται. Η παραγωγή, επομένως, καταλήγει να περιορίζεται με τον χρόνο, λόγω της πτώσης της πίεσης μέσα στον ταμιευτήρα (που με τη σειρά της συσχετίζεται με τη μειωμένη επαναφόρτιση του ταμιευτήρα), και όχι λόγω περιορισμού της θερμικής ενέργειας στο εσωτερικό του συστήματος. Η φύση όμως των γεωθερμικών συστημάτων είναι τέτοια που η επίδραση της πτώσης της πίεσης του ταμιευτήρα στην παραγωγή είναι περισσότερο περιορισμένη όσο πιο χαμηλή και ελεγχόμενη είναι η



παραγωγή και μάλιστα μπορεί να διατηρηθεί για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα. Η επίπτωση, ωστόσο, της πτώσης της πίεσης του ταμιευτήρα σε μια πιο «μεγάλη» παραγωγή μπορεί να είναι δραματική, με αποτέλεσμα η παραγωγή να μην μπορεί να διατηρηθεί για μεγάλο διάστημα.

Με βάση, λοιπόν, τα παραπάνω, καθώς και από έρευνες και μελέτες, αλλά και τη συσσωρευμένη εμπειρία πολλών δεκαετιών έχει αποδειχθεί ότι, σε πολλές περιπτώσεις, η διατήρηση της παραγωγής σε ένα γεωθερμικό σύστημα κάτω από ένα ορισμένο όριο, οδηγεί το σύστημα σε μία ορισμένη ισορροπία, η οποία μπορεί να διατηρηθεί για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το γεωθερμικό σύστημα *Laugarnes* στη ΝΔ. Ισλανδία, όπου η παραγωγή αυξήθηκε κατά μια τάξη μεγέθους τη δεκαετία του εξήντα, μέσω της εισαγωγής υποβρύχιων αντλιών (*down-hole pumps*) (Axelsson and Gunnlaugsson, 2000) (Διάγραμμα 2-1).



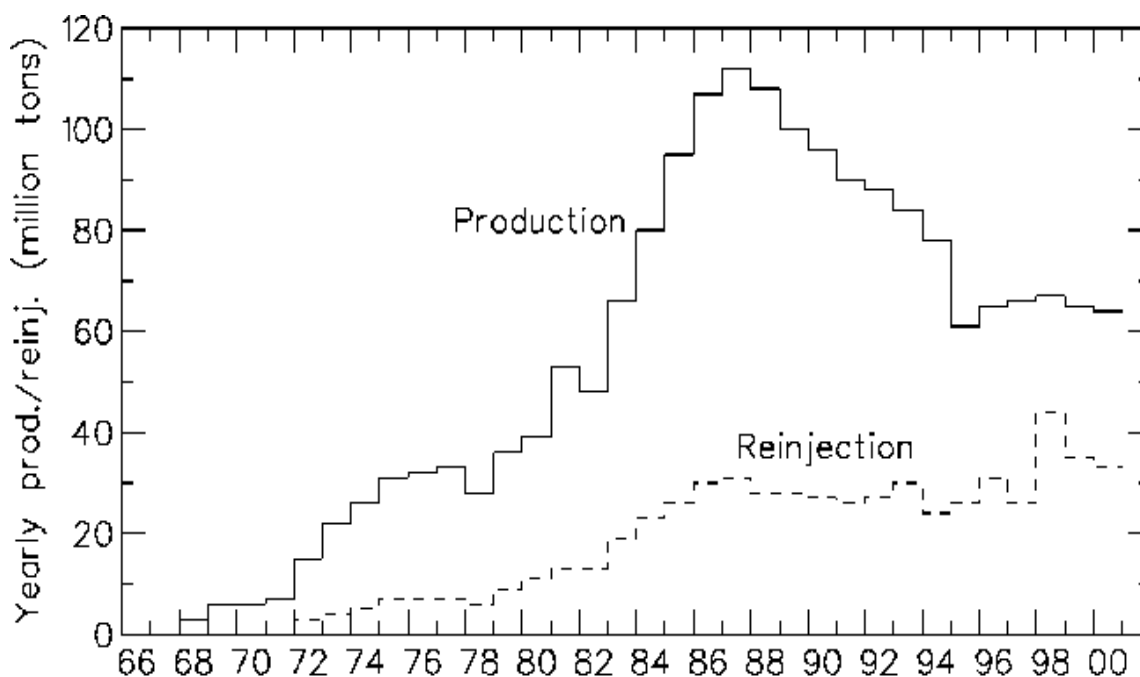
Διάγραμμα 2-1: Ιστορικό παραγωγής και στάθμης νερού του γεωθερμικού συστήματος *Laugarnes* στη ΝΔ. Ισλανδία (Axelsson and Gunnlaugsson, 2000).

Η άνοδος της ετήσιας παραγωγής με φυσική ροή που σημειώθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1950, μετά από σχεδόν 3 δεκαετίες σταθερής παραγωγής, επέφερε μικρή άνοδο της στάθμης του νερού του γεωθερμικού συστήματος. Η εισαγωγή υποβρύχιων αντλιών στις αρχές της δεκαετίας του 1960 είχε ως αποτέλεσμα την περαιτέρω άνοδο της στάθμης του νερού, αλλά και την αύξηση της παραγωγής για τα επόμενα 10 χρόνια. Η παραγωγή και η στάθμη του νερού, ωστόσο, παρέμειναν σχετικά σταθερές τις επόμενες



τρεις δεκαετίες, έως το 2000. Αυτό υποδεικνύει ότι ο ταμιευτήρας μετά την εγκατάσταση των υποβρύχιων αντλιών ανέκτησε μια νέα κατάσταση ισορροπίας στο εσωτερικό του, επιτυγχάνοντας έως και δέκα φορές μεγαλύτερη παραγωγή από την αρχική.

Η ισορροπία που επιτεύχθηκε στην περίπτωση του γεωθερμικού πεδίου του *Laugarnes*, μετά την εγκατάσταση υποβρύχιων αντλιών, αντικατοπτρίζει την ανανεωσιμότητα του γεωθερμικού πόρου στην περιοχή αυτή. Το ανανεώσιμο στοιχείο (ενεργειακό ρεύμα) είναι τόσο μεγαλύτερο όσο περισσότερο εξωθείται το σύστημα να παράγει, με αποτέλεσμα επιπλέον εισροή μάζας και ενέργειας στο εσωτερικό του (Stefansson, 2000).



*Διάγραμμα 2-2: Ιστορικό παραγωγής και επανεισπίεσης του γεωθερμικού συστήματος Geysers στην Καλιφόρνια (Barker, 2000)*

Ένα άλλο καλό παράδειγμα αποτελεί το γεωθερμικό πεδίο *Geysers* στην Καλιφόρνια, στο οποίο είχαν κατασκευαστεί είκοσι γεωθερμικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με συνολική ισχύ πάνω από 2000MW. Η έντονη πτώση πίεσης που προκλήθηκε στον ταμιευτήρα κατά το διάστημα 1985-1995, λόγω της ραγδαίας αύξησης της παραγωγής από το 1980 και μετά, οδήγησε στη μη αποτελεσματική παραγωγή ατμού στους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, με αποτέλεσμα η συνολική παραγωγή να αρχίσει να μειώνεται μετά το 1986, όπως φαίνεται και στο *Διάγραμμα 2-2*. Παρά τη διατήρηση της επανεισπίεσης σταθερής ως το 1995, η παραγωγή μειωνόταν με τον χρόνο. Η μικρή αύξηση της επανεισπίεσης από το 1995 και μετά κατάφερε να διατηρήσει το επίπεδο της παραγωγής σχετικά σταθερό. Το γεγονός αυτό που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η μικρή



μόνο αύξηση της επαναφόρτισης αρκεί σε ορισμένα πεδία για να διατηρήσει την παραγωγή σε σταθερά επίπεδα. Μάλιστα, αυτοί οι όγκοι παραγωγής και επανεισπίεσης είναι τελικά αυτοί που διασφαλίζουν τη βιώσιμη εκμετάλλευση αυτού του πεδίου.

## 2.3 Προϋποθέσεις Βιώσιμης Διαχείρισης Γεωθερμικών Πεδίων

Όπως καθίσταται λοιπόν σαφές, μείζονα απαίτηση για την ορθολογική και βιώσιμη διαχείριση ενός γεωθερμικού ταμιευτήρα αποτελεί η συγκέντρωση πληροφοριών για την κατάστασή του, η οποία με τη σειρά της θα οδηγήσει στην πλήρη κατανόηση της λειτουργίας και της συμπεριφοράς του όλου συστήματος, σε διάφορες καταστάσεις. Η πτώση πίεσης για παράδειγμα, η οποία αποτελεί και κυρίαρχη παράμετρο στον καθορισμό του δυναμικού παραγωγής, ελέγχεται από το μέγεθος του συστήματος, τη διαπερατότητα των σχηματισμών και την αναπλήρωση του νερού, δεδομένα τα οποία πρέπει να είναι γνωστά πριν ξεκινήσει οποιοδήποτε παραγωγή. Το δυναμικό παραγωγής ωφέλιμης ενέργειας κάθε γεωθερμικού συστήματος είναι εξαιρετικά μεταβλητό και επομένως η διαδικασία εκτίμησης της συμπεριφοράς ενός γεωθερμικού συστήματος καθίσταται ιδιαίτερα περίπλοκη.

Βασική παράμετρος για την επίτευξη ορθολογικής και βιώσιμης διαχείρισης ενός γεωθερμικού έργου, είναι ο έλεγχος της ενέργειας που εξάγεται από τον ταμιευτήρα, ώστε να αποφεύγεται η υπερβολική εκμετάλλευση του φυσικού πόρου και να μεγιστοποιούνται τα οφέλη. Η υπερεκμετάλλευση ενός γεωθερμικού πεδίου μπορεί να έχει καταστροφικές επιπτώσεις τόσο στο συνολικό έργο, όσο και στο ίδιο το περιβάλλον. Οι λόγοι για τους οποίους λαμβάνει χώρα μια υπερεκμετάλλευση είναι δύο (Axelsoon, 2003):

1. Η κακή κατανόηση του υπόγειου συστήματος που οφείλεται στην ανεπαρκή παρακολούθηση και συλλογή δεδομένων, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η αξιοπιστία της μοντελοποίησης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα συστήματα αυτά να ανταποκρίνονται με απροσδόκητο τρόπο σε μακροπρόθεσμα παραγωγή, καθιστώντας την παραγόμενη ενέργεια λιγότερο βιώσιμη.
2. Η μαζική χρήση από πολλούς χρήστες του ίδιου γεωθερμικού πόρου/συστήματος, χωρίς κοινή διαχείριση ή έλεγχο. Παραδείγματα τέτοιας χρήσης αποτελεί το πεδίο *Geysers* στην Καλιφόρνια, και οι μεγάλες ιζηματογενείς λεκάνες στην Ευρώπη και τη Κίνα.

Η διαχείριση ενός γεωθερμικού πόρου περιλαμβάνει την επιλογή μεταξύ διαφορετικών σχεδίων δράσης ως προς την εκμετάλλευση του πόρου (Grant et al., 2011).



Σε κάθε περίπτωση, όμως, η διαχείριση των γεωθερμικών πόρων μπορεί να περιλαμβάνει διαφορετικούς **στόχους**, όπως (Stefansson et al., 1995):

- Την ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας ενός δεδομένου γεωθερμικού ταμιευτήρα
- Τη μεγιστοποίηση της εξαγόμενης ενέργειας από έναν δεδομένο πόρο
- Τη διασφάλιση συνεχούς παροχής ενέργειας
- Την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων
- Την αποφυγή των λειτουργικών δυσκολιών, όπως η διάβρωση και η φραγή των σωλήνων των γεωτρήσεων (*scaling*)
- Τη συμμόρφωση με την ενεργειακή πολιτική της αντίστοιχης χώρας

Μία από τις πιο δύσκολες πτυχές, ωστόσο, είναι ο καθορισμός του καταλληλότερου χρονικού διαστήματος λειτουργίας. Για παράδειγμα, υπάρχουν περιπτώσεις όπου η «εξάντληση» ενός δεδομένου ταμιευτήρα σε λίγα χρόνια, είναι πιο συμφέρουσα από οικονομικής πλευράς. Αυτό, βεβαίως είναι μη αποδεκτό τόσο σε πολιτικό, όσο και σε περιβαλλοντικό και κοινωνικό επίπεδο, καθώς δεν συνάδει με τις αρχές της βιώσιμης ανάπτυξης, σύμφωνα με τις οποίες η αξιόπιστη παραγωγή ενέργειας θα πρέπει να διατηρείται για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Το χρονικό διάστημα διατήρησης της παραγωγής συναρτάται επίσης και με την αναμενόμενη διάρκεια ζωής του εξοπλισμού, η οποία κυμαίνεται περίπου από 30 έως 40 χρόνια. Ωστόσο, στο παρελθόν, έχουν αξιοποιηθεί με επιτυχία αρκετοί γεωθερμικοί ταμιευτήρες και για μεγαλύτερες χρονικές περιόδους (Axelsoon, 2003).

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η ορθολογική και βιώσιμη διαχείριση ενός γεωθερμικού ταμιευτήρα βασίζεται στις επαρκείς πληροφορίες που μπορούμε να έχουμε για το εν λόγω γεωθερμικό σύστημα (Stefansson et al., 1995). Οι πληροφορίες που απαιτούνται για ένα επιτυχημένο πρόγραμμα διαχείρισης, μέσα σε γενικά πλαίσια, είναι:

- Πληροφορίες σχετικά με τον όγκο, τη γεωμετρία και τις οριακές συνθήκες του υπόγειου ταμιευτήρα.
- Πληροφορίες σχετικά με τις ιδιότητες της βραχομάζας του ταμιευτήρα, δηλαδή τη διαπερατότητα των σχηματισμών, το πορώδες, την πυκνότητα, τη θερμική ικανότητα και τη θερμική αγωγιμότητα.
- Πληροφορίες σχετικά με τις φυσικές συνθήκες του ταμιευτήρα, οι οποίες καθορίζονται από την χωρική κατανομή της θερμοκρασίας και της πίεσης μέσα σε αυτόν.



Όλα τα παραπάνω δεδομένα συγκεντρώνονται συνεχώς, καθ' όλη τη διάρκεια της έρευνας και συνακόλουθης εκμετάλλευσης ενός γεωθερμικού ταμιευτήρα. Τα αρχικά δεδομένα προέρχονται από την έρευνα που εκτελείται στην επιφάνεια, κατά την οποία συλλέγονται γεωλογικά, γεωχημικά και γεωφυσικά δεδομένα. Στη συνέχεια, μια ερευνητική γεώτρηση μπορεί να παράσχει σημαντικές επιπρόσθετες πληροφορίες, μέσω των διαγραφιών και των δοκιμών που εκτελούνται σε αυτή.

Ωστόσο, τα πιο σημαντικά δεδομένα σχετικά με τη φύση και τις ιδιότητες ενός γεωθερμικού συστήματος συγκεντρώνονται μέσω της συνεχούς **παρακολούθησης και ελέγχου** του πεδίου (**monitoring**), και ιδίως παρακολουθώντας και καταγράφοντας την απόκρισή του κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του. Η προσεκτική, επομένως, παρακολούθηση ενός γεωθερμικού ταμιευτήρα, καθίσταται απαραίτητο μέρος κάθε επιτυχημένου προγράμματος διαχείρισης. Εάν η κατανόηση της λειτουργίας του γεωθερμικού συστήματος είναι επαρκής, η παρακολούθηση του θα επιτρέψει να προβλεφθεί η απόκρισή του σε μελλοντικές ακούσιες ή εκούσιες αλλαγές. Ανεπιθύμητες μελλοντικές αλλαγές μπορεί να είναι η μείωση της παραγωγής, πιθανά λειτουργικά προβλήματα, όπως π.χ. στένωση των σωλήνων γεώτρησης και του επιφανειακού εξοπλισμού λόγω επικαθίσεων (*scaling*) ή η διάβρωση αυτού.

Η **μοντελοποίηση (modeling)**, χρησιμοποιώντας διαφορετικές προσεγγίσεις ανά περίπτωση, αποτελεί το πιο ισχυρό διαθέσιμο εργαλείο στον μηχανικό του ταμιευτήρα, το οποίο εφαρμόζεται για τους διάφορους σκοπούς της διαχείρισης. Μέσω της μοντελοποίησης, η φύση, οι ιδιότητες και η συμπεριφορά ενός γεωθερμικού συστήματος μπορούν πλέον να εκτιμηθούν και να κατανοηθούν σε βάθος, ενώ τα μαθηματικά μοντέλα που αναπτύσσονται με βάση τα δεδομένα αυτά, αποσκοπούν στην ανάλυση και την ερμηνεία τους. Έτσι η πρόβλεψη και η απόκριση του ταμιευτήρα σε μελλοντική παραγωγή εκτιμάται εύκολα από την επίλυση αυτών των μαθηματικών μοντέλων, ενώ ταυτόχρονα μπορεί να εκτιμηθεί επίσης και το δυναμικό παραγωγής του συστήματος, καθώς και τα αποτελέσματα των διαφορετικών δράσεων διαχείρισης.

Τέλος, η **επανεισπίεση (reinjectio)** πρέπει να θεωρείται ως αναπόσπαστο μέρος κάθε σύγχρονης, βιώσιμης, φιλικής προς το περιβάλλον γεωθερμικής χρήσης. Ξεκίνησε ως μέθοδος απόρριψης λυμάτων, για περιβαλλοντικούς λόγους, και πλέον χρησιμοποιείται επιτυχώς σε πολλά γεωθερμικά συστήματα παγκοσμίως. Ο διαχειριστικός της ρόλος έχει πλέον επεκταθεί, καθώς χρησιμοποιείται για την εξουδετέρωση της πτώσης πίεσης στους ταμιευτήρες, δηλαδή ως τεχνητή επαναφόρτιση του ταμιευτήρα με νερό, τόσο για τη διατήρηση τη πίεσης όσο και για την εξαγωγή





περισσότερης θερμικής ενέργειας από το σύστημα, που είναι ενσωματωμένη στη βραχώμαζα του ταμιευτήρα (Stefansson, 1997). Εάν τοποθετηθεί σε σωστό σημείο και εκτελεστεί σωστά, η επανεισπίεση αυξάνει το δυναμικό παραγωγής του γεωθερμικού πεδίου στις περισσότερες των περιπτώσεων. Αποτελεί στην πραγματικότητα απαραίτητο στοιχείο για τη βιώσιμη χρήση των γεωθερμικών συστημάτων, κυρίως όταν αυτά είναι ουσιαστικά κλειστά και, επομένως, διαθέτουν περιορισμένη φυσική επαναφόρτιση.

## 2.4 Παρακολούθηση και Έλεγχος Γεωθερμικών Πεδίων (*Monitoring*)

Η παρακολούθηση των αλλαγών στις βασικές παραμέτρους ενός γεωθερμικού ταμιευτήρα, κατά τη διάρκεια της εκμετάλλευσής του, βασίζεται σε απλές αρχές και περιλαμβάνει ουσιαστικά τη μέτρηση της μεταφοράς μάζας και θερμότητας, της πίεσης και του ενεργειακού περιεχομένου (της θερμοκρασίας στις περισσότερες περιπτώσεις) στο εσωτερικό του γεωθερμικού ταμιευτήρα. Ωστόσο, ότι για την πρόσκτηση ακριβέστερων δεδομένων, οι μετρήσεις πρέπει να ληφθούν κάτω από υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις, ενώ η πρόσβαση στον ταμιευτήρα περιορίζεται μόνο στις υπάρχουσες γεωτρήσεις. Έτσι, καθίσταται σαφές ότι η παρακολούθηση του ταμιευτήρα είναι μία αρκετά περίπλοκη διαδικασία και δεν μπορεί να γίνει άμεσα σ' όλο τον όγκο του ταμιευτήρα (εκεί όπου δεν έχουν διανοιχτεί γεωτρήσεις) (Axelsson and Gunnlaugsson, 2000).

Οι παράμετροι που πρέπει να παρακολουθούνται για να ποσοτικοποιηθεί η απόκριση ενός ταμιευτήρα στην παραγωγή, διαφέρουν σε έναν βαθμό από το ένα γεωθερμικό σύστημα στο άλλο (Kristmannsdottir et al., 1995). Οι μέθοδοι παρακολούθησης καθώς και η συχνότητα παρακολούθησης ενδέχεται να διαφέρουν επίσης. Η παρακολούθηση μπορεί να ταξινομηθεί ως **άμεση** ή **έμμεση**, ανάλογα με το αν οι σχετικές παράμετροι παρατηρούνται άμεσα ή έμμεσα.

### 2.4.1 Άμεση Παρακολούθηση (Direct Monitoring)

Μερικές από τις **άμεσες** μετρήσεις που μπορούν να ληφθούν σε ένα συμβατικό πρόγραμμα παρακολούθησης γεωθερμικού ταμιευτήρα αφορούν στις εξής παραμέτρους:

- Το ιστορικό εκροής μάζας από τις γεωτρήσεις παραγωγής (ή αντλούμενης μάζας σε γεωτρήσεις χαμηλής θερμοκρασίας)
- Την ενθαλπία (στην περίπτωση που το παραγόμενο ρευστό είναι διφασικό) ή την θερμοκρασία του ρευστού που παράγεται



ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΣΕ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ  
ΜΕ ΣΧΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ-ΕΠΑΝΕΙΣΠΙΕΣΗΣ

- Τη στάθμη του νερού ή η πίεση στην κεφαλή της γεώτρησης (που αντανακλά την πίεση στον πυθμένα) των γεωτρήσεων παραγωγής
- Τη χημική περιεκτικότητα του νερού και του ατμού που παράγεται
- Το ιστορικό του ρυθμού εισπίεσης στις γεωτρήσεις εισπίεσης
- Την θερμοκρασία του εισπιεζόμενου νερού
- Την πίεση στην κεφαλή της γεώτρησης ή τη στάθμη νερού των γεωτρήσεων εισπίεσης
- Την πίεση του ταμιευτήρα (στάθμη νερού) στις γεωτρήσεις παρατήρησης (*monitoring wells*)
- Την θερμοκρασία του ταμιευτήρα μέσω καταγραφής της θερμοκρασίας στις γεωτρήσεις παρατήρησης
- Την κατάσταση της γεώτρησης μέσω εκτέλεσης διαγραφιών (*caliper logs*<sup>3</sup>), δοκιμών εισπίεσης (*injectivity tests*) και άλλες μεθόδους

Στη συνέχεια αναλύονται περαιτέρω οι τέσσερις πλέον βασικές παράμετροι (πίεση, θερμική ενέργεια, χημική σύσταση, παραγόμενη μάζα/όγκος) που ρυθμίζουν τη λειτουργία των γεωθερμικών συστημάτων τα γεωθερμικά συστήματα κατά την εκμετάλλευσή τους και πώς οι μετρήσεις που καταγράφονται κατά την άμεση παρακολούθηση μπορούν να συμβάλουν στη βελτίωση της παραγωγικότητας των γεωθερμικών ταμιευτήρων ([Proceedings World Geothermal Congress 2015](#)).

1. Η **πίεση** του ταμιευτήρα καθορίζει και την παραγωγικότητα αυτού. Κατά την παραγωγή, η πίεση του ταμιευτήρα μειώνεται, γεγονός που στη συνέχεια επηρεάζει την παραγωγικότητα του συστήματος. Η πίεση της ταμιευτήρα πρέπει να παρακολουθείται στα γεωθερμικά πεδία υψηλής θερμοκρασίας/ενθαλπίας, ενώ η στάθμη του νερού πρέπει να παρακολουθείται στα γεωθερμικά πεδία χαμηλής θερμοκρασίας. Έτσι, με βάση τα αποτελέσματα του προγράμματος παρακολούθησης, το πρόγραμμα παραγωγής προσαρμόζεται κατάλληλα, ώστε να διατηρείται κατά τον δυνατόν η πίεση του ταμιευτήρα σε ένα επίπεδο, εξισορροπώντας κατάλληλα τους παραγόμενους όγκους με τους επανεισαγόμενους όγκους αναπλήρωσης και τελικά συμβάλλοντας στη βιώσιμη αξιοποίηση του γεωθερμικού πόρου.

---

<sup>3</sup> Ο όρος **Well Logging** αποδίδεται ως διαγραφίες εντός γεωτρήσεων. Τα **Caliper Logs** είναι ένα είδος διαγραφίας το οποίο ουσιαστικά μετράει τη διάμετρο της γεώτρησης με το βάθος.



2. Η συνεχής αξιοποίηση-εκμετάλλευση ενός γεωθερμικού συστήματος οδηγεί στη συνεχή **παροχή θερμικής ενέργειας** από τα βάθη του ταμιευτήρα, έτσι ώστε η γεωθερμική θερμοκρασία εντός του ταμιευτήρα να διατηρείται σχετικά σταθερή. Στην περίπτωση, ωστόσο, αβαθών ταμιευτήρων, η επανεισπίεση ρευστών χαμηλής θερμοκρασίας παράλληλα με την παραγωγή θερμών ρευστών που μεταφέρουν θερμική ενέργεια από τον ταμιευτήρα στην επιφάνεια, αυξάνει τον ρυθμό κατανάλωσης της γεωθερμικής ενέργειας του ταμιευτήρα, με αποτέλεσμα τη μείωση της συνολικής γεωθερμικής του θερμοκρασίας. Η μεταφορά θερμότητας με αγωγή από τους βαθύτερους ορίζοντες στο πέτρωμα του ταμιευτήρα γίνεται με χαμηλό ρυθμό, με αποτέλεσμα και η μείωση της θερμοκρασίας του πετρώματος του ταμιευτήρα να εξελίσσεται επίσης με χαμηλό ρυθμό κατά την παραγωγή. Ωστόσο, για τον ίδιο λόγο, τυχόν μείωση της θερμοκρασίας του πετρώματος του ταμιευτήρα, δεν ανατρέπεται εύκολα και έτσι μπορεί να καταγραφεί απότομη πτώση της θερμοκρασίας των παραγόμενων ρευστών κάποια στιγμή. Συνεπώς, το σύστημα παραγωγής και επανεισπίεσης θα πρέπει να αναπροσαρμοστεί αμέσως. Τέτοιες καταστάσεις αποφεύγονται με τη βοήθεια της παρακολούθησης της θερμοκρασίας του ταμιευτήρα, μέσω συνεχών, με διάφορους τρόπους, καταγραφών των θερμοκρασιακών θερμοκρασίας και της ιστορικής εξέλιξης αυτών.
3. Η **χημική σύσταση** των γεωθερμικών ρευστών αντικατοπτρίζει τις χημικές διεργασίες μεταξύ ρευστού (νερού) και πετρώματος του ταμιευτήρα. Μετريέται χρησιμοποιώντας χημικά γεωθερμόμετρα και συλλέγοντας τακτικά δείγματα γεωθερμικών ρευστών. Η αλλαγή στην ισοτοπική σύσταση του γεωθερμικού ρευστού μπορεί να οδηγήσει στο να διαπιστωθεί εάν ο ταμιευτήρας επαναφορτίζεται φυσικά από κάποια πηγή, ενώ με την ανάλυση του ρευστού επαναφόρτισης μπορεί να εκτιμηθεί ο βαθμός ανάμιξης του με το γεωθερμικό ρευστό στα διαφορετικά βάθη και θερμοκρασίες εντός του γεωθερμικού ταμιευτήρα. Με τη παρακολούθηση όλων των παραπάνω, η αλλαγή της θερμοκρασίας και η χημική αλληλεπίδραση μεταξύ ρευστού και πετρώματος μπορεί να κατανοηθεί πλήρως.
4. Η **ποσότητα των παραγόμενων γεωθερμικών ρευστών** αντικατοπτρίζει την παραγωγικότητα του γεωθερμικού συστήματος. Στην αρχή της εκμετάλλευσης, όταν η πίεση του γεωθερμικού ταμιευτήρα είναι υψηλή, η ποσότητα των παραγόμενων ρευστών είναι επίσης αρκετά υψηλή. Με την πάροδο του χρόνου και τη συνέχιση της παραγωγής, ειδικά όταν η ποσότητα που παράγεται είναι



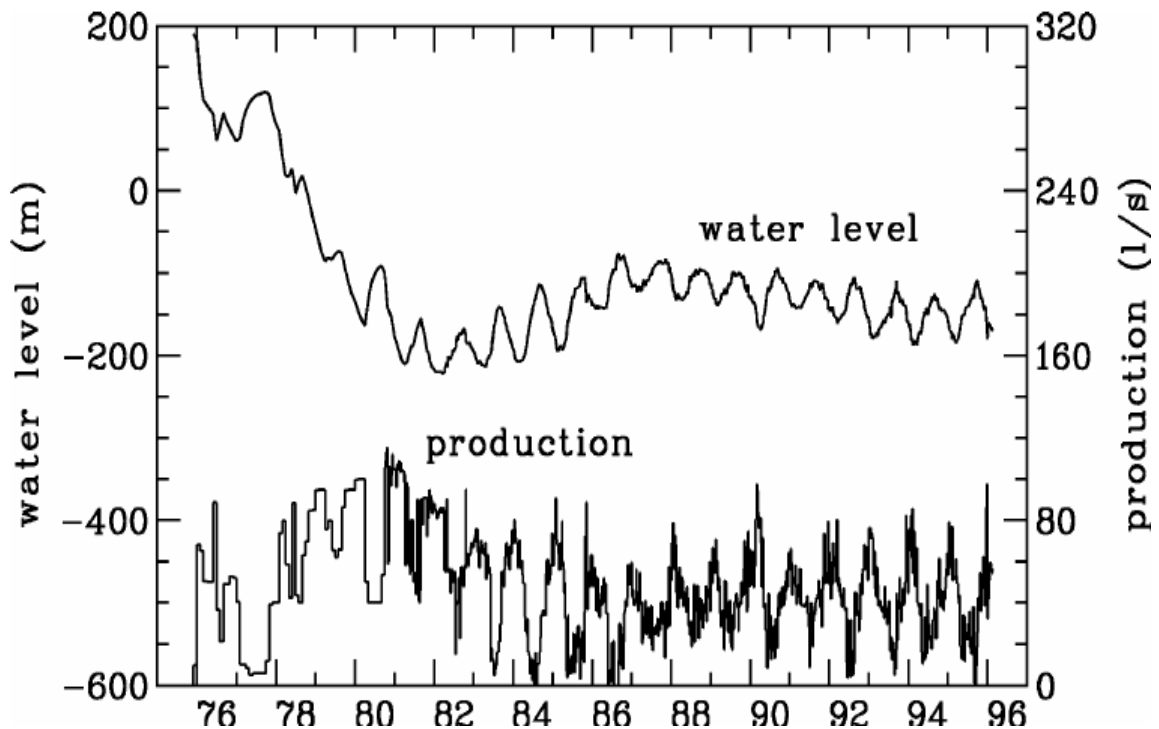
αρκετά μεγαλύτερη από την ποσότητα που απαιτείται για την επαναφόρτιση του ταμιευτήρα (είτε με επανείσπωση, είτε με φυσικό τρόπο), μπορεί να παρατηρηθεί μείωση της πίεσης του ταμιευτήρα. Επιπλέον, κατά την εισροή νερού η χωρητικότητα του γεωθερμικού πεδίου μειώνεται, πράγμα που σημαίνει ότι μειώνεται και η παραγωγικότητά του. Η παραγωγικότητα ενός γεωθερμικού πεδίου, καθώς επηρεάζει άμεσα τις επενδύσεις και τα εισοδήματα του εκάστοτε επενδυτή, θα πρέπει να διατηρείται σε ένα ισορροπημένο επίπεδο. Η υπερεκμετάλλευση ενός γεωθερμικού ταμιευτήρα για σύντομο χρονικό διάστημα, μπορεί να οδηγήσει στην ταχεία εξάντλησή του, με δυσμενείς οικονομικές συνέπειες. Σε αντίθεση όμως τους πόρους των υδρογονανθράκων, οι γεωθερμικοί πόροι είναι ανανεώσιμοι, πράγμα που σημαίνει ότι μπορούν να επαναφορτιστούν σε ορισμένο χρονικό διάστημα. Επομένως, η παρακολούθηση της ποσότητας των παραγόμενων ρευστών, η έγκαιρη προσαρμογή του σχεδίου εκμετάλλευσης και η σωστή διαχείριση του πεδίου, έχουν ως αποτέλεσμα ο γεωθερμικός πόρος να μπορεί να αξιοποιείται συνεχόμενα για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα.

Συμπερασματικά, σχετικά με τα προγράμματα άμεσης παρακολούθησης, αυτά θα πρέπει να είναι ειδικά σχεδιασμένα για κάθε γεωθερμικό ταμιευτήρα, λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών που αυτός παρουσιάζει. Τα προγράμματα παρακολούθησης μπορούν επίσης να αναθεωρούνται με την πάροδο του χρόνου και καθώς αποκτάται περισσότερη εμπειρία για το εν λόγω γεωθερμικό σύστημα, βελτιώνοντας έτσι την αποδοτικότητά τους. Αυτό αφορά, για παράδειγμα, στη συχνότητα παρακολούθησης των διαφορετικών παραμέτρων. Πρακτικά, υπάρχουν άλλα όρια στη συχνότητα με την οποία θα πρέπει να εκτελείται η χειροκίνητη παρακολούθηση, και άλλα όρια για την πλήρως μηχανογραφημένη παρακολούθηση. Στη δεύτερη περίπτωση, στην πραγματικότητα δεν υπάρχει κάποιος άνω περιορισμός στη συχνότητα παρακολούθησης, εκτός από τον διαθέσιμο χώρο μνήμης του εκάστοτε συστήματος καταγραφής που χρησιμοποιείται.

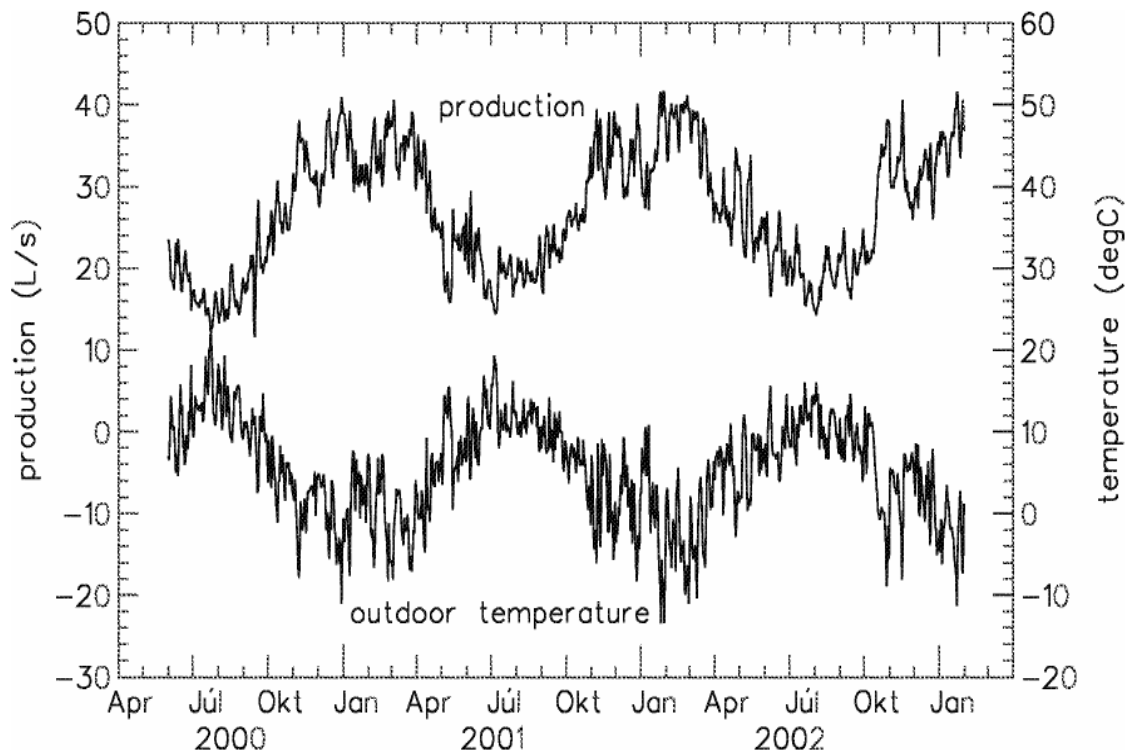
Παρακάτω, το *Διάγραμμα 2-3* και το *Διάγραμμα 2-4*, παρουσιάζουν μερικά παραδείγματα δεδομένων παρακολούθησης γεωθερμικών συστημάτων στην Ισλανδία. Στο *Διάγραμμα 2-3*, τα δεδομένα που καταγράφηκαν αποτυπώνουν την υπερεκμετάλλευση που εφαρμόστηκε στο γεωθερμικό πεδίο χαμηλής θερμοκρασίας *Laugaland* στην κεντρική και βόρεια Ισλανδία κατά τα πρώτα χρόνια της λειτουργίας του. Πιο συγκεκριμένα, σε ένα σχετικά μικρό χρονικό διάστημα (1976-1982) η διατήρηση της παραγωγής σε υψηλά επίπεδα επέφερε η ραγδαία πτώση στάθμης του νερού που ξεκίνησε το 1976 με την έναρξη της παραγωγής και διήρκεσε έως το 1982 περίπου, οπότε η



παραγωγή μετριάστηκε σημαντικά με αποτέλεσμα τη σχετική διατήρηση της στάθμης για αρκετά χρόνια αργότερα, έως το 1996.



Διάγραμμα 2-3: Ιστορικό εικοσαετούς παραγωγής και στάθμης νερού στο γεωθερμικό σύστημα χαμηλής θερμοκρασίας Laugaland στην κεντρική και βόρεια Ισλανδία (Axelsson et al., 2001).



Διάγραμμα 2-4: Παράδειγμα δεδομένων (παραγωγής και εξωτερικής θερμοκρασίας) που συλλέχθηκαν μέσω μηχανογραφημένης παρακολούθησης στο γεωθερμικό σύστημα Urridavatn κοντά στη πόλη Egilsstadir, στην ανατολική Ισλανδία (Axelsson, 1991).



Στο *Διάγραμμα 2-4*, παρουσιάζεται ένα παράδειγμα μηχανογραφικής παρακολούθησης του γεωθερμικού πεδίου χαμηλής θερμοκρασίας, *Urridavatn* στην ανατολική Ισλανδία, που χρησιμοποιείται για τη θέρμανση της πόλης *Egilsstadir*. Σε αυτό το διάγραμμα αποτυπώνονται με σαφήνεια και με συνεχή τρόπο οι αλλαγές στην εξωτερική θερμοκρασία και πως αυτές αντανακλούν στις καθημερινές και εποχιακές διακυμάνσεις της παραγωγής από το πεδίο, προκειμένου να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις θέρμανσης της πόλης.

#### **2.4.2 Έμμεση Παρακολούθηση (Indirect Monitoring)**

Εκτός από τη συμβατική ή την άμεση παρακολούθηση που συζητήθηκε παραπάνω, η **έμμεση** παρακολούθηση περιλαμβάνει την παρακολούθηση των αλλαγών που συμβαίνουν σε βάθος στα γεωθερμικά συστήματα, κυρίως μέσω διαφόρων επιφανειακών παρατηρήσεων και μετρήσεων. Η χρήση της αποσκοπεί στην ανίχνευση των αλλαγών που συμβαίνουν στα υπόγεια γεωθερμικά συστήματα, κατά τη μακροχρόνια εκμετάλλευσή τους, ενώ εφαρμόζεται συχνότερα σε γεωθερμικά πεδία υψηλής ενθαλπίας και σπανιότερα σε πεδία χαμηλής ενθαλπίας. Αυτό συμβαίνει επειδή οι φυσικές αλλαγές στα συστήματα χαμηλής ενθαλπίας, στις περισσότερες των περιπτώσεων, δεν είναι τόσο μεγάλες, όσο στα συστήματα υψηλής ενθαλπίας. Επίσης, οι μέθοδοι έμμεσης παρακολούθησης των γεωθερμικών πεδίων ως περισσότερο δαπανηρές έναντι των μεθόδων άμεσης παρακολούθησης, εφαρμόζονται στα πεδία όπου η παρακολούθηση των αλλαγών στον γεωθερμικό ταμιευτήρα είναι κομβικής σημασίας για τη διατήρηση της παραγωγής.

Ορισμένες από τις μεθόδους έμμεσης παρακολούθησης έχουν καθιερωθεί πλέον σήμερα, ενώ υπάρχουν άλλες που βρίσκονται ακόμα σε πειραματικό στάδιο. Οι βασικές μέθοδοι της έμμεσης παρακολούθησης που εφαρμόζονται πιο συχνά είναι οι εξής:

- 1. Τοπογραφικές μετρήσεις:** Διεξάγονται για την ανίχνευση ανύψωσης - καθίζησης του εδάφους. Η εμφάνιση καθίζησης του εδάφους πάνω από έναν γεωθερμικό ταμιευτήρα που τελεί υπό εκμετάλλευση μπορεί να προκύψει ως αποτέλεσμα της συμπίεσης του πετρώματος του ταμιευτήρα, μετά την ανάκτηση των ρευστών που πληρώνουν τους πόρους του και την μη επαναπλήρωσή τους με νέο ρευστό.
- 2. Γεωφυσικές μετρήσεις μικρο-βαρύτητας:** Η ροή ρευστών στο υπέδαφος ή από το υπέδαφος στην επιφάνεια μπορεί να προκαλέσει μικρές αλλαγές (μικρο-ανωμαλίες) στη βαρύτητα που καταγράφεται σε ένα γεωθερμικό πεδίο. Οι αλλαγές στη βαρύτητα μπορούν να παρέχουν πληροφορίες σχετικά με το καθαρό



ισοζύγιο μάζας ενός γεωθερμικού ταμιευτήρα κατά τη διάρκεια της εκμετάλλευσής του, δηλαδή τη διαφορά μεταξύ της μάζας που παράγεται (απομακρύνεται) από ένα πεδίο και της μάζας που επαναφορτίζει (εισάγεται) τον ταμιευτήρα (Allis and Hunt, 1986).

Οι δύο πρώτες αυτές μέθοδοι συχνά χρησιμοποιούνται συνδυαστικά για να εκτιμήσουν το ισοζύγιο μάζας στον ταμιευτήρα, ήτοι τον λόγο μεταξύ παραγωγής και επαναφόρτισης.

**3. Γεωφυσικές μετρήσεις ηλεκτρικής αντίστασης:** Η γεωφυσική μέθοδος της ηλεκτρικής αντίστασης χρησιμοποιείται ευρέως στην έρευνα για υπόγεια νερά. Επειδή τα στερεά συστατικά ενός πετρώματος δεν είναι γενικά αγωγίμα, η ικανότητα μεταφοράς του ηλεκτρικού ρεύματος σε έναν γεωλογικό σχηματισμό είναι συνάρτηση της παρουσίας νερού μέσα σε αυτόν. Καθώς αλλάζει η περιεκτικότητα σε νερό και η κατανομή του σε έναν υπόγειο ταμιευτήρα, αλλάζουν και οι ηλεκτρικές ιδιότητες του πετρώματος. Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του πετρώματος είναι αντιστρόφως ανάλογη του πορώδους του και του κορεσμού του σε νερό. Και μάλιστα, όσο μεγαλύτερη η αλατότητα του νερού τόσο μικρότερη και η ειδική αντίσταση του πετρώματος. Αυτή η μέθοδος δεν έχει εφαρμοστεί σε πολλά γεωθερμικά πεδία, αλλά γενικά μπορεί να βοηθήσει στον προσδιορισμό της εισροής κρύου, φρέσκου νερού στον γεωθερμικό ταμιευτήρα, και επομένως στον προσδιορισμό της περιοχής του ταμιευτήρα που επηρεάζεται από την επανεισπίεση.

**4. Μετρήσεις θερμοκρασίας εδάφους και ροής θερμότητας από τον ταμιευτήρα:** Η επιφανειακή δραστηριότητα και η ροή της θερμότητας από τον ταμιευτήρα προς την επιφάνεια μπορούν είτε να μειωθούν, είτε να αυξηθούν κατά τη διάρκεια της παραγωγής από ένα γεωθερμικό πεδίο που βρίσκεται σε μικρό βάθος. Ωστόσο, η παρακολούθηση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του εδάφους και της ροής θερμότητας από τον ταμιευτήρα αφορά κυρίως στην παρακολούθηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τη γεωθερμική εκμετάλλευση. Αυτές οι δύο παράμετροι μπορούν να παρακολουθούνται με τη λήψη επαναλαμβανόμενων μετρήσεων της θερμοκρασίας του εδάφους, μετρήσεων από αέρος της υπέρυθρης ακτινοβολίας και παρατηρήσεων ορισμένων θερμικών χαρακτηριστικών (θερμές πηγές, φουμαρόλες, πηγές λάσπης κ.λπ.).

**5. Παρακολούθηση μικρο-σεισμικής δραστηριότητας:** Σημαντική μέθοδος παρακολούθησης, με διττό σκοπό. Πρώτον, να παρέχει πληροφορίες για τις αλλαγές στη σεισμική δραστηριότητα σε μια περιοχή που είναι ήδη σεισμικά



ενεργή. Οι πληροφορίες αυτές, ωστόσο, έχουν ενδιαφέρον για την περιβαλλοντική παρακολούθηση της δραστηριότητας, παρά για την παρακολούθηση της λειτουργίας των γεωθερμικών συστημάτων. Δεύτερον, να παρέχει πληροφορίες για την οριοθέτηση της περιοχής γύρω από έναν γεωθερμικό ταμιευτήρα που επηρεάζεται από την εκμετάλλευσή του. Αυτό συμβαίνει διότι, σε ορισμένες περιπτώσεις, η πίεση και οι θερμικές αλλαγές που σχετίζονται με τη γεωθερμική εκμετάλλευση μπορεί να προκαλέσουν κάποια μικρο-σεισμική δραστηριότητα.

6. **Παρακολούθηση στάθμης νερού στα συστήματα υπόγειων υδάτων:** Χρησιμοποιείται σε ορισμένα γεωθερμικά πεδία, καθώς η μεταβολή της στάθμης του νερού στις γεωτρήσεις αντικατοπτρίζει αντίστοιχες μεταβολές πίεσης στο βάθος του γεωθερμικού ταμιευτήρα.
7. **Μέθοδος φυσικού δυναμικού:** Το φυσικό δυναμικό, που ονομάζεται επίσης και αυτοδυναμικό είναι μια φυσική διαφορά ηλεκτρικού δυναμικού στη Γη, που μετράται από ένα ηλεκτρόδιο σε σχέση με ένα σταθερό ηλεκτρόδιο αναφοράς. Η διαφορά αυτή μπορεί να οφείλεται σε ηλεκτροκινητική δράση (κίνηση νερού) στο υπέδαφος. Ως μέθοδος χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με την αριθμητική μοντελοποίηση για τη μελέτη των αλλαγών στους γεωθερμικούς ταμιευτήρες λόγω της εισροής (εισπίεσης) και της εκροής (παραγωγής) μάζας από αυτούς.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι ένας συνδυασμός έμμεσης παρακολούθησης με αριθμητική προσομοίωση του ταμιευτήρα μπορεί να ενισχύσει την αξιοπιστία της μοντελοποίησης του ταμιευτήρα, καθώς και να βοηθήσει στην καλύτερη κατανόηση του γεωθερμικού συστήματος.

## 2.5 Μοντελοποίηση Γεωθερμικών Συστημάτων (*Modeling*)

Η μοντελοποίηση των γεωθερμικών συστημάτων παίζει και αυτή ουσιαστικό ρόλο στη διαχείριση των γεωθερμικών πόρων. Αυτή μπορεί να είναι είτε μια απλή αναλυτική μοντελοποίηση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από σύντομες δοκιμές και μετρήσεις σε γεωτρήσεις, είτε μια λεπτομερή αριθμητική μοντελοποίηση ενός πολύπλοκου γεωθερμικού συστήματος, που προσομοιώνει το σχέδιο δράσεων προκειμένου να επιτευχθεί κατά το δυνατόν ένα μακροπρόθεσμο πλάνο παραγωγής. Ο σκοπός της γεωθερμικής μοντελοποίησης είναι διπλός:





1. Να προσφέρει εκτιμήσεις σχετικά με τις συνθήκες, τη φύση και τις ιδιότητες ενός γεωθερμικού συστήματος, γεγονός που οδηγεί στη σωστή κατανόηση του τρόπου λειτουργίας του και στην επιτυχή διαχείρισή του.
2. Να προβλέψει την απόκριση του ταμιευτήρα κατά τη μελλοντική εκμετάλλευσή του, να παρέχει εκτιμήσεις του δυναμικού παραγωγής του γεωθερμικού συστήματος, καθώς και των αποτελεσμάτων από τις διάφορες δράσεις διαχείρισης (σχήματα παραγωγής και επανεισαγωγής).

Οι πληροφορίες που είναι απαραίτητες για όλα τα μοντέλα υπόγειων ταμιευτήρων πρέπει να συλλέγονται και να διατηρούνται καθ' όλη διάρκεια της έρευνας, της ανάπτυξης, αλλά και της εκμετάλλευσής ενός γεωθερμικού ταμιευτήρα. Για παράδειγμα, πληροφορίες σχετικά με τη συμπεριφορά του ταμιευτήρα κατά τη χρονική εξέλιξη της παραγωγής, λαμβάνονται συλλέγοντας κυρίως δεδομένα από τις γεωτρήσεις και παρατηρώντας την προκύπτουσα απόκριση του από την επιφάνεια (Grant et al., 1982; Bodvarsson and Witherspoon, 1989). Συνεπώς, αυτά τα δεδομένα που συλλέγονται δεν δίνουν άμεσα τις ιδιότητες του ταμιευτήρα, καθώς αυτές προσδιορίζονται από πληθώρα διαφορετικών παραμέτρων, που όμως δεν μπορούν να μετρηθούν με άμεσο τρόπο. Τα δεδομένα των γεωτρήσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την έμμεση εκτίμηση αρκετών παραμέτρων του ταμιευτήρα. Αυτό επιτυγχάνεται χάρη στην ανάπτυξη των αριθμητικών μοντέλων, μέσω των οποίων όλα αυτά τα δεδομένα ερμηνεύονται και αναλύονται, έτσι ώστε να μπορούν να δώσουν τελικά εκτιμήσεις για αναζητούμενες ιδιότητες/παραμέτρους του γεωθερμικού ταμιευτήρα (μοντελοποίηση).

Καθώς τα γεωθερμικά συστήματα είναι γενικά πολύ πολύπλοκα, παρουσιάζοντας φαινόμενα, όπως ροή εντός πορώδους σχηματισμού, συχνά παρουσία τεκτονισμού (ρήγματα), αλλαγές φάσεων, χημικές αντιδράσεις και θερμικές επιδράσεις. Για τον λόγο αυτό πριν την μοντελοποίηση ενός τέτοιου συστήματος θα πρέπει να αναλυθούν με προσοχή τα δεδομένα των γεωτρήσεων και να εκτιμηθεί το παραγωγικό δυναμικό του συστήματος. Στη συνέχεια, η μοντελοποίηση του συστήματος μπορεί να περιλαμβάνει ένα ή περισσότερα μαθηματικά μοντέλα που ενσωματώνουν μερικώς ή κατά ένα μεγάλο ποσοστό τα διαθέσιμα δεδομένα, ενώ θα πρέπει να αναγνωριστούν και να ενσωματωθούν και οι φυσικές διεργασίες που συμβαίνουν στο σύστημα.

Το αρχικό βήμα στην ανάπτυξη ενός μοντέλου αποτελεί η ανάπτυξη αρχικά ενός καλού εννοιολογικού μοντέλου (*conceptual modeling*) (Bodvarsson et al., 1986). Δηλαδή η ανάπτυξη ενός ποιοτικού ή περιγραφικού μοντέλου το οποίο έχει ως στόχο να



ενσωματώνει όλα τα βασικά χαρακτηριστικά ενός γεωθερμικού συστήματος που προκύπτουν από την ανάλυση των διαθέσιμων δεδομένων και πληροφοριών. Στη συνέχεια, αναπτύσσεται ένα μαθηματικό (αριθμητικό) μοντέλο, που έχει ως στόχο να προσομοιώσει τη φυσική κατάσταση του γεωθερμικού συστήματος, πριν από την έναρξη της παραγωγικής του διαδικασίας. Τελικά, διαμορφώνεται το μοντέλο εκμετάλλευσης, το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως για την προσομοίωση των αλλαγών στη φυσική κατάσταση του γεωθερμικού συστήματος κατά τη διάρκεια μιας μακροπρόθεσμης συνήθως παραγωγής. Το μοντέλο εκμετάλλευσης χρησιμοποιείται επιπλέον και για την πρόβλεψη της μελλοντικής φυσικής κατάστασης του συστήματος, αλλά και για άλλους σκοπούς διαχείρισης, όπως την ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας, τη μεγιστοποίηση της εξαγόμενης ενέργειας, κ.α. (βλ. ενότητα 2.3).

Κατά τη μοντελοποίηση υπάρχουν δύο πολύ σημαντικοί παράγοντες που είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη. Αρχικά, καθώς η μοντελοποίηση αφορά στην εκτίμηση-προσομοίωση των ιδιοτήτων του ταμιευτήρα, τα αποτελέσματα που δίνει αυτή εξαρτώνται σε πολύ μεγάλο βαθμό από το μοντέλο που χρησιμοποιείται. Έτσι, διαφορετικά μοντέλα, λιγότερο ή περισσότερο πολύπλοκα, δίνουν και διαφορετικά αποτελέσματα, ανάλογα με τον σκοπό της μελέτης και τα διαθέσιμα δεδομένα. Επιπλέον, όσο πιο μακροχρόνιες είναι οι εκτιμήσεις που θα πρέπει να παραχθούν, τόσο περισσότερες πληροφορίες χρειάζεται να συγκεντρωθούν για το εν λόγω σύστημα, και επομένως τόσο πιο σημαντική γίνεται η προσεκτική παρακολούθηση του συστήματος (*monitoring*) κατά τη διάρκεια της εκμετάλλευσης. Τα μοντέλα, λοιπόν, παρέχουν εκτιμήσεις σχετικά με τις συνθήκες και τις ιδιότητες ενός πραγματικού γεωθερμικού συστήματος, αλλά αυτές δεν είναι μονοσήμαντες και εξαρτώνται από το εκάστοτε μοντέλο που χρησιμοποιείται κάθε φορά.

### **2.5.1 Μέθοδοι Μοντελοποίησης**

Όπως έχει προαναφερθεί, η πρόβλεψη της μελλοντικής συμπεριφοράς και η εκτίμηση του δυναμικού παραγωγής ενός γεωθερμικού ταμιευτήρα καθιστούν αναγκαία τη χρήση μοντέλων, ενώ η επιδίωξη μεγαλύτερης αξιοπιστίας αυτών των μοντέλων βρίσκεται στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος. Οι κύριοι τύποι μοντέλων που χρησιμοποιούνται σήμερα, η πολυπλοκότητα των οποίων εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιούν τις μαθηματικές εξισώσεις και επεξεργάζονται τα δεδομένα, είναι τρεις:



1. Τα απλά αναλυτικά μοντέλα (*simple analytical models*)
2. Τα μοντέλα συγκεντρωμένων παραμέτρων (*lumped-parameter models*)
3. Τα λεπτομερή αριθμητικά μοντέλα (*detailed numerical models*)

Στα **απλά αναλυτικά μοντέλα** η πραγματική δομή και οι χωρικά μεταβαλλόμενες ιδιότητες του γεωθερμικού συστήματος είναι, σε μεγάλο βαθμό, απλοποιημένες, έτσι ώστε, με τη χρήση των αναλυτικών μαθηματικών εξισώσεων, να μπορούν να περιγράφουν την απόκριση του μοντέλου κατά την παραγωγή. Τα μοντέλα αυτά μπορούν να προσομοιώσουν μόνο μία πτυχή της απόκρισης του γεωθερμικού συστήματος, απαιτούν σχετικά μικρό χρόνο εκτέλεσης και χρησιμοποιούν περιορισμένα δεδομένα για το γεωθερμικό σύστημα. Η χρήση τους είναι αρκετά εκτεταμένη παγκοσμίως και αφορά κυρίως τη μελέτη και τη διαχείριση των γεωθερμικών συστημάτων χαμηλής θερμοκρασίας, ειδικά για την μοντελοποίηση της μακροπρόθεσμης απόκρισής τους κατά την παραγωγή.

Από την άλλη πλευρά, η **αριθμητική μοντελοποίηση** χρησιμοποιεί λεπτομερή και περίπλοκα αριθμητικά μοντέλα που μπορούν να προσομοιώσουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τη δομή, τις συνθήκες και την παραγωγική απόκριση ενός γεωθερμικού συστήματος. Η διάρκεια εκτέλεσής τους, ωστόσο, είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με τα απλά αναλυτικά μοντέλα και επομένως απαιτούν ισχυρότερους υπολογιστές, καθώς και πιο ολοκληρωμένα και λεπτομερή δεδομένα για το εν σύστημα που μελετάται ([O'Sullivan et al., 2001](#)). Η αριθμητική προσομοίωση είναι μια δημοφιλής μέθοδος για τη διερεύνηση της απόκρισης του συστήματος στην παραγωγή και την επανεισαγωγή καθώς και των επιπτώσεών τους, μετά τη λειτουργία ενός γεωθερμικού πεδίου για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Τα **μοντέλα συγκεντρωμένων παραμέτρων**, ή αλλιώς μοντέλα συγκεντρωμένων στοιχείων (*lumped-element models*), χρησιμοποιούνται γενικά για την προσομοίωση κυρίως της στάθμης του νερού και τις μεταβολές των πιέσεων στο εσωτερικό των γεωθερμικών ταμιευτήρων και αποτελούν μία επίσης αποτελεσματική μέθοδο απλής μοντελοποίησης ([Axelsson and Gunnlaugsson, 2000](#)). Τα μοντέλα αυτής της κατηγορίας μπορούν να προσομοιώνουν με περισσότερη ακρίβεια μεγαλύτερα σύνολα δεδομένων μεταβολής πίεσης, ακόμη και για μεγάλα χρονικά διαστήματα (αρκετών δεκαετιών). Στην ουσία αντιμετωπίζουν την προσομοίωση ως ένα αντίστροφο πρόβλημα και προσαρμόζουν αυτόματα τις συναρτήσεις απόκρισής τους στα παρατηρούμενα αρχικά δεδομένα. Τέτοιου είδους μοντέλα έχουν αναπτυχθεί για περίπου 20 γεωθερμικά συστήματα χαμηλής θερμοκρασίας και 3 υψηλής θερμοκρασίας στην Ισλανδία, καθώς



για πολλά γεωθερμικά συστήματα στην Κίνα, την Τουρκία, την Ανατολική Ευρώπη, την Κεντρική Αμερική και τις Φιλιππίνες. Αυτός ο τύπος μοντέλων προσομοίωσης γεωθερμικών συστημάτων παρουσιάζεται στη συνέχεια ως παράδειγμα της χρήσης μοντέλων στη διαχείριση των γεωθερμικών πόρων.

### **2.5.2 Λειτουργία Μοντέλων Συγκεντρωμένων Παραμέτρων (Lumped-Parameter Modeling)**

Το μοντέλο συγκεντρωμένων στοιχείων/παραμέτρων περιγράφει τη δυναμική και τα χαρακτηριστικά του γεωθερμικού συστήματος όπου οι εξαρτώμενες μεταβλητές δεν αλλάζουν με τις συντεταγμένες του χώρου, αλλά είναι συνάρτηση μόνο του χρόνου. Διακρίνονται σε σταθερά και μη σταθερά, γραμμικά και μη γραμμικά. Η μελέτη της προσαρμοσμένης σχέσης μεταξύ παραγωγής/εκφόρτισης (έξοδος) και επανεισαγωγή/επαναφόρτισης (είσοδος) του πεδίου, που αποτελούν και το σύνολο ενός συστήματος, συνήθως δεν αρκούν για τη μοντελοποίησή αυτού. Το μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων, ωστόσο, είναι σε θέση ακόμα και κατά την πρώιμη φάση λειτουργίας ενός γεωθερμικού συστήματος (όπου τα δεδομένα παρακολούθησης του συστήματος είναι ακόμα περιορισμένα), να εντοπίζει τη σχέση μεταξύ της συνολικής παραγωγής του γεωθερμικού ρευστού και των μεταβολών της πίεσης και της θερμοκρασίας στον ταμιευτήρα, με αποτέλεσμα η εκφόρτιση και η επαναφόρτιση του ταμιευτήρα να μπορούν εύκολα να εκτιμηθούν.

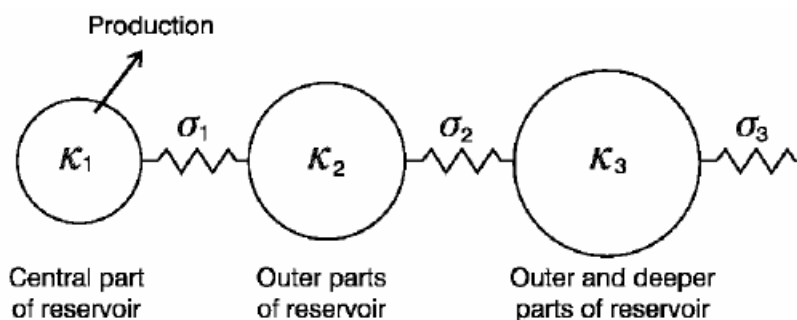
Ο Axelsson (1989) παρουσίασε για πρώτη φορά τη θεωρητική βάση της αυτόματης μεθόδου μοντελοποίησης με συγκεντρωμένες παραμέτρους, ενώ ο υπολογιστικός κώδικας «LUMPFIT» (αυτοματοποιημένη μέθοδος ελέγχου των μεταβολών πίεσης στους υδρογεωλογικούς ταμιευτήρες) η οποία άρχισε να χρησιμοποιείται από το 1986 στις περισσότερες μελέτες τέτοιου είδους (Axelsson and Arason, 1992). Όπως προαναφέρθηκε, η συγκεκριμένη μέθοδος αντιμετωπίζει την προσομοίωση ως ένα αντίστροφο πρόβλημα, προσαρμόζοντας αυτόματα τις συναρτήσεις απόκρισης του συστήματος στα παρατηρούμενα αρχικά δεδομένα, χρησιμοποιώντας μια μη γραμμική, επαναληπτική τεχνική ελάχιστων τετραγώνων για την εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου. Καθώς η διαδικασία αυτή είναι αυτόματη, απαιτείται πολύ λιγότερος χρόνος σε σύγκριση με άλλες μεθόδους μοντελοποίησης, ιδίως συγκριτικά με τη λεπτομερή αριθμητική μοντελοποίηση.

Ένα γενικό μοντέλο με συγκεντρωμένες παραμέτρους και οι σχετικές με αυτό εξισώσεις μπορούν να αναπαρασταθούν με ορισμένο αριθμό δεξαμενών (tanks) και



αντιστάσεων ροής (*flow resistors*) (Σχήμα 2-1). Οι δεξαμενές προσομοιώνουν την αποθηκευτική χωρητικότητα (*storage capacity*) διαφορετικών τμημάτων ενός γεωθερμικού συστήματος, ενώ η στάθμη του νερού ή η πίεση μέσα στις δεξαμενές αυτές προσομοιώνει τη στάθμη του νερού ή την πίεση στα αντίστοιχα μέρη του γεωθερμικού συστήματος. Η πρώτη δεξαμενή του μοντέλου στο Σχήμα 2-1 προσομοιώνει το εσωτερικό (παραγωγικό) τμήμα του γεωθερμικού ταμιευτήρα, ενώ η δεύτερη και η τρίτη δεξαμενή προσομοιώνουν τα εξωτερικά τμήματα του συστήματος.

Μια δεξαμενή έχει συντελεστή αποθήκευσης (*χωρητικότητα*)  $K$ , όταν ανταποκρίνεται σε φορτίο υγρής μάζας (νερό)  $m$  με αύξηση πίεσης  $p = m/K$ . Οι διάφορες ουσιαστικά αντιστάσεις ροής (*αγωγοί*), οι οποίες συσχετίζονται κυρίως με τη διαπερατότητα των πετρωμάτων, προσομοιώνουν την αντίσταση ροής που υπάρχει στον ταμιευτήρα. Η αγωγιμότητα μάζας (*αντίστροφη αντίσταση*) μίας αντίστασης είναι  $\sigma$ , όταν μεταφέρει  $q = \sigma \cdot \Delta p$  μονάδες υγρής μάζας, ανά μονάδα χρόνου (παροχή), σε διαφορικό πίεσης  $\Delta p$ .



Σχήμα 2-1: Γενική αποτύπωση μοντέλου με συγκεντρωμένες παραμέτρους που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της στάθμης του νερού ή των μεταβολών πίεσης στα γεωθερμικά συστήματα (Axelsson and Arason, 1992).

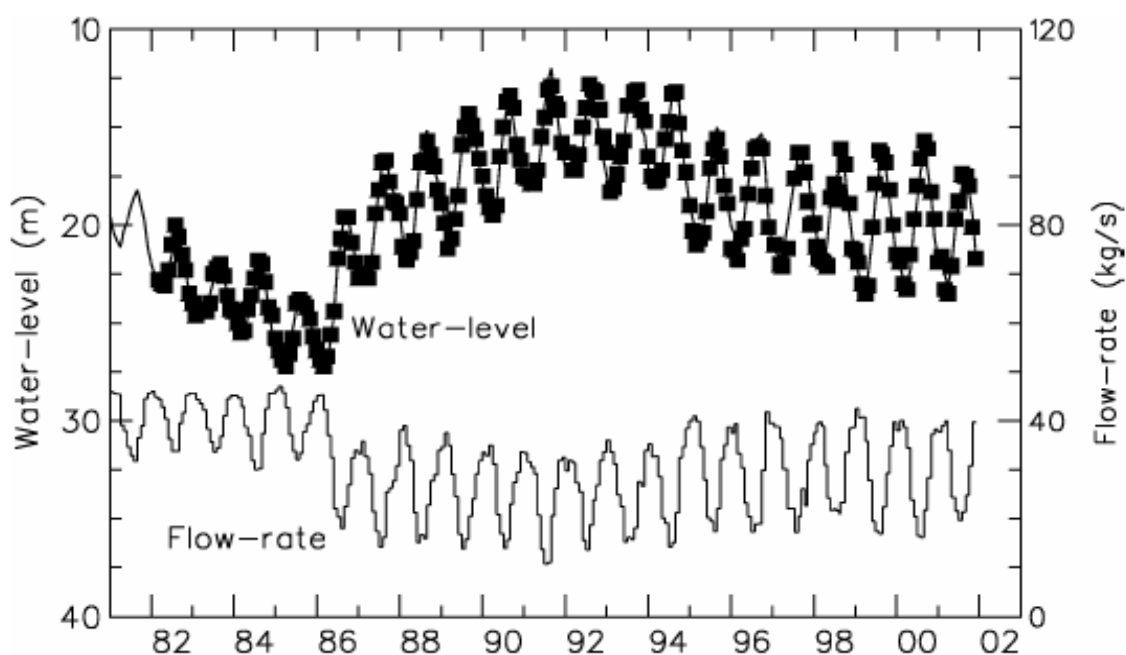
Επιπλέον, τα μοντέλα με συγκεντρωμένες παραμέτρους μπορούν να είναι είτε ανοιχτά, είτε κλειστά, πράγμα που αντιστοιχεί σε οριακές συνθήκες (*boundary conditions*) σταθερής πίεσης ή μηδενικής ροής, αντίστοιχα. Το μοντέλο στο Σχήμα 2-1 είναι ανοιχτό, καθώς η τρίτη δεξαμενή συνδέεται μέσω μιας αντίστασης (*resistor*) σε μια πηγή σταθερής πίεσης (*constant pressure source*), η οποία επαναφορτίζει το γεωθερμικό σύστημα. Χωρίς τη σύνδεση με την πηγή σταθερής πίεσης το μοντέλο θα ήταν κλειστό. Σε ένα ανοιχτό μοντέλο τελικά επιτυγχάνεται μια ισορροπία μεταξύ της παραγωγής και της επαναφόρτισης, κατά τη διάρκεια μιας μακροπρόθεσμης παραγωγής, προκαλώντας έτσι τη σταθεροποίηση της στάθμης του νερού. Σε αντίθεση με το ανοιχτό, σε ένα κλειστό μοντέλο δεν επιτρέπεται κάποιου είδους επαναφόρτιση ή κάποιου είδους φυσική εισροή



μάζας, με αποτέλεσμα, κατά τη διάρκεια μιας μακροπρόθεσμης παραγωγής, η στάθμη του νερού να μειώνεται σταθερά με τον χρόνο. Στις περισσότερες των περιπτώσεων, τα μοντέλα που αποτελούνται από δύο ή τρεις δεξαμενές, θεωρούνται επαρκή για ακριβείς προσομοιώσεις.

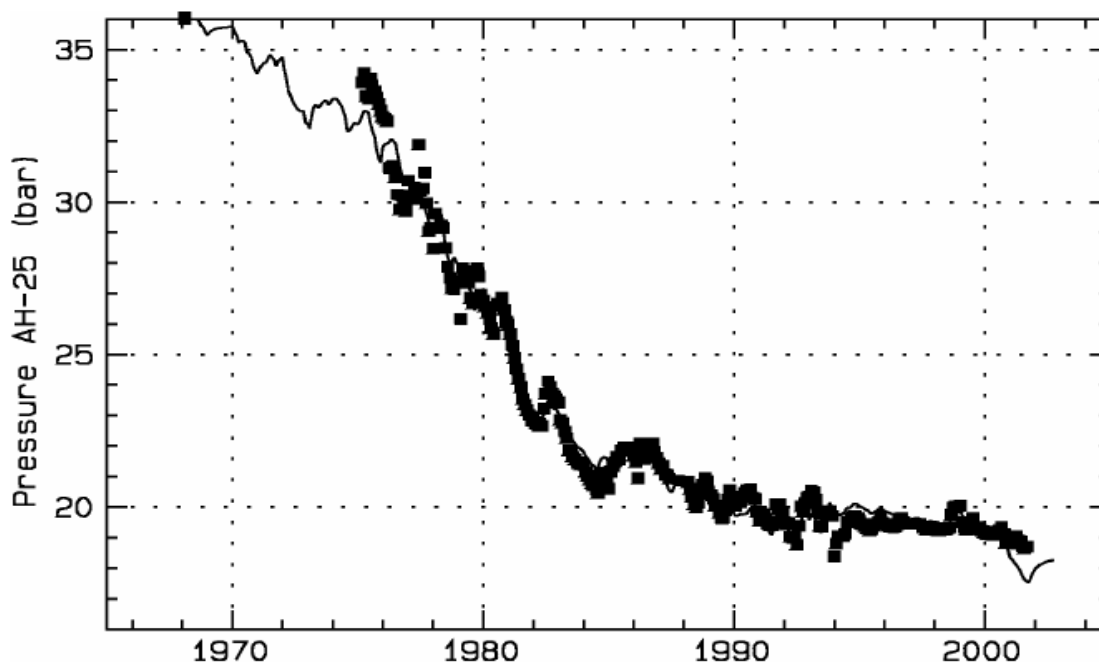
Τα μοντέλα συγκεντρωμένων παραμέτρων ουσιαστικά μελετούν τη σχέση απόκρισης μεταξύ της εκμετάλλευσης και του γεωθερμικού πεδίου ως ένα ενιαίο σύστημα (Xue, 2007), αλλά δεν μπορούν να εκφράσουν εύκολα την συνολική μεταβολή της πίεσης και της θερμοκρασίας σε όλο το γεωθερμικό πεδίο. Για τον υπολογισμό αυτό απαιτείται το υπολογιστικό μοντέλο κατανεμημένης παραμέτρου, το οποίο αναλύεται παρακάτω (ενότητα 2.5.3).

Στο Διάγραμμα 2-5 και στο Διάγραμμα 2-6, παρουσιάζονται κάποια παραδείγματα χρήσης των μοντέλων με συγκεντρωμένες παραμέτρους σε προσομοιώσεις μεταβολών πίεσης σε 2 διαφορετικά γεωθερμικά συστήματα. Και τα δύο διαγράμματα δείχνουν μια πολύ καλή συμφωνία μεταξύ των παρατηρούμενων και των προσομοιωμένων δεδομένων, παρά το μεγάλο σύνολο δεδομένων, γεγονός που αντικατοπτρίζει την ευελιξία αυτού του τύπου μοντελοποίησης.



*Διάγραμμα 2-5: Προσομοίωση με μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων των μεταβολών στάθμης νερού σε πεδίο χαμηλής θερμοκρασίας συναρτήσει του ιστορικού παραγωγής (γεωθερμικό πεδίο Hamar στην Β.-Ισλανδία), για παραγωγής ενέργειας για τηλεθέρμανση (Axelsson, 1991).*





Διάγραμμα 2-6: Προσομοίωση με μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων των μεταβολών πίεσης του γεωθερμικού πεδίου υψηλής θερμοκρασίας Ahuacharan στο Ελ Σαλβαδόρ (Montalvo et al., 1997), για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

### 2.5.3 Μοντέλο Κατανεμημένων Παραμέτρων (Distributed Parameter Modeling)

Το μοντέλο κατανεμημένων παραμέτρων περιγράφει τη δυναμική και τα χαρακτηριστικά ενός γεωθερμικού συστήματος, όπου οι μεταβλητές του, σε αντίθεση με το μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων, εξαρτώνται και από τις συντεταγμένες του χώρου και όχι μόνο από τον χρόνο. Είναι ένα μαθηματικό μοντέλο που εκφράζεται μέσω μιας υδροδυναμικής διαφορικής εξίσωσης σε πορώδες μέσο, η οποία βασίζεται αυστηρά στη ρευστομηχανική και τις ιδιότητές της. Η διαφορική εξίσωση αυτή επιλύεται με οριακές και αρχικές συνθήκες προσδιορίζοντας τα χαρακτηριστικά, το δυναμικό και τη σχέση ή την αριθμητική λύση των μεταβλητών τόσο ως προς τον χώρο (συντεταγμένες), όσο και ως προς τον χρόνο για το υπό μελέτη σύστημα. Τα μοντέλα αυτής της κατηγορίας διακρίνονται, όπως και τα μοντέλα συγκεντρωμένων παραμέτρων, σε σταθερά και μη σταθερά, γραμμικά και μη γραμμικά.

Το μοντέλο κατανεμημένων παραμέτρων απαιτεί λεπτομερή δεδομένα για την κατασκευή του εννοιολογικού και αριθμητικού μοντέλου, όπως π.χ. γεωλογικές και υδρογεωλογικές συνθήκες, προφίλ θερμοκρασίας κ.ά. Στη συνέχεια χρησιμοποιεί τα δεδομένα πίεσης και θερμοκρασίας που καταγράφονται κατά την παρακολούθηση του πεδίου, για τη διόρθωση του μοντέλου, αλλά και για την πρόβλεψη των μεταβολών πίεσης και θερμοκρασίας στις διάφορες θέσεις του πεδίου.



Επειδή η περιγραφή του γεωθερμικού πεδίου καθίσταται πληρέστερη προοδευτικά, το αριθμητικό μοντέλο ενημερώνεται και βελτιώνεται με την ενσωμάτωση των αποτελεσμάτων της έρευνας και της παραγωγής. Το μοντέλο περιγράφει τα χαρακτηριστικά του γεωθερμικού πεδίου με μεγαλύτερη ακρίβεια και σταθερότητα, σε σύγκριση με ένα απλό αριθμητικό μοντέλο υπόγειων υδάτων. Το γεωθερμικό αριθμητικό μοντέλο πρέπει να λάβει ταυτόχρονα υπόψη και τη μετακίνηση-ροή του νερού και τη μεταφορά της θερμότητάς του. Η μεταβολή της πυκνότητας του θερμού νερού, λόγω της μεταβολής της θερμοκρασίας του, προκαλεί τη μεταβολή του όγκου, της ενθαλπίας, καθώς και της φάσης του. Επομένως, προγράμματα που χρησιμοποιούν αριθμητική προσομοίωση υπόγειων υδάτων δεν είναι επαρκή για τη γεωθερμική προσομοίωση.

Προγράμματα προσομοίωσης γεωθερμίας, όπως το «*TOUGH*», αλλά και το «*FEFLOW*», εξετάζουν τη μεταφορά και τη μετατροπή θερμότητας και ενέργειας (π.χ. μεταφορά μάζας) μεταξύ υγρής, αέριας και στερεής φάσης, λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα αυτά στη γεωθερμική μελέτη, καθιστώντας τα έτσι πολύ αξιόπιστα για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με τον τρόπο εκμετάλλευσης ενός γεωθερμικού πεδίου.

## **2.6 Επανεισαγωγή Ρευστών σε ένα Γεωθερμικό Πεδίο (*Reinjection*)**

Η επανεισαγωγή (ή επανεισπίεση ή απλά εισπίεση) ρευστών σε ένα γεωθερμικό πεδίο, αντί της απόρριψής τους σε οποιονδήποτε άλλο αποδέκτη, θεωρείται ουσιαστικό μέρος κάθε σύγχρονης, αειφόρας και φιλικής προς το περιβάλλον γεωθερμικής χρήσης, και σημαντικό μέρος της ορθολογικής διαχείρισης των γεωθερμικών πόρων. Η εισπίεση ρευστών στο υπέδαφος (και όχι σε γεωθερμικούς ταμιευτήρες) ξεκίνησε ως μέθοδος απόρριψης υγρών αποβλήτων για τη κάλυψη κυρίως περιβαλλοντικών λόγων (Stefansson, 1997, Axelsson and Gunnlaugsson, 2000, Pruess and Bodvarsson, 1984). Σήμερα πλέον χρησιμοποιείται για την αντιμετώπιση της πτώσης πίεσης στους γεωθερμικούς ταμιευτήρες, δηλαδή ως τεχνητό μέσο επαναφόρτισης του ταμιευτήρα με νερό, με στόχο την αξιοποίηση περισσότερης θερμικής ενέργειας από τον γεωθερμικό ταμιευτήρα. Στη συντριπτική πλειονότητα των γεωθερμικών πεδίων υψηλής ενθαλπίας, όπου η φυσική επαναφόρτιση του πεδίου δεν αρκεί για τη διατήρηση της πίεσής του κι επομένως την εξασφάλιση μιας αειφόρου παραγωγής, απαιτείται η επανεισαγωγή των παραγόμενων ρευστών, αφού προηγουμένως η περιεχόμενη θερμική τους ενέργεια έχει αποληφθεί και κατευθυνθεί προς τις προβλεπόμενες χρήσεις (ηλεκτροπαραγωγή, θέρμανση, ξήρανση κ.λπ.).





Η επανεισαγωγή, στις περισσότερες των περιπτώσεων, αυξάνει την παραγωγικότητα του γεωθερμικού πεδίου, όπως έχει ήδη διαπιστωθεί μέσα από έρευνες και πειράματα που έγιναν κατά το παρελθόν. Ως μέθοδος ξεκίνησε για πρώτη φορά στο *Ahuacharan* του Ελ Σαλβαδόρ το 1969, και ύστερα στο *Geysers*, στην Καλιφόρνια το 1970, και το *Larderello* της Ιταλίας, το 1974. Πλέον αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα της λειτουργίας σε πάνω από 50 γεωθερμικά πεδία, σε 20 διαφορετικές χώρες. Χωρίς την επανεισαγωγή, η εκροή μάζας, και ως εκ τούτου η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θα ήταν μόνο ένα μικρό μέρος αυτού που έχει επιτευχθεί τώρα σε πολλά από αυτά τα πεδία. Κατά την επανεισαγωγή το ισοζύγιο μάζας στον ταμιευτήρα διατηρείται και ταυτόχρονα εξασφαλίζεται η αναθέρμανση του ανακυκλωμένου ρευστού, επιτρέποντας έτσι τον επόμενο κύκλο παραγωγής/εισπίεσης. Η θέση των γεωτρήσεων και ο ρυθμός εισπίεσης αποτελεί μείζον θέμα ιδιαίτερης δυσκολίας, καθώς έχει άμεση επίπτωση στη διαχείριση του πεδίου.

Το νερό που εισάγεται στους γεωθερμικούς ταμιευτήρες, περιλαμβάνει υγρά απόβλητα και συμπυκνωμένα ύδατα από σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, επιστροφές υδάτων από άμεση χρήση (θέρμανση χώρου, τηλεθέρμανση, κ.λπ.), καθώς και υπόγεια και επιφανειακά ύδατα. Τα λειτουργικά προβλήματα που σχετίζονται με την επανεισαγωγή είναι συνήθως η αύξηση του κόστους επένδυσης και λειτουργίας, η πτώση της θερμοκρασίας των γεωτρήσεων παραγωγής και οι επικαθίσεις αλάτων (*scaling*) είτε στον επιφανειακό εξοπλισμό, είτε στις γεωτρήσεις εισπίεσης (Stefansson, 1997). Επίσης, έχει αποδειχτεί ότι η επανεισαγωγή είναι προβληματική σε ταμιευτήρες με ψαμμιτικά πετρώματα.

### **2.6.1 Δοκιμή Επανεισαγωγής (Reinjection Test)**

Η αποτελεσματική γεωθερμική επανεισαγωγή εγγυάται την ελάχιστη δυνατή κατανάλωση του γεωθερμικού ρευστού στον ταμιευτήρα και την αύξηση της αποδοτικότητας της συνολικής γεωθερμικής εκμετάλλευσης. Ωστόσο, η γεωθερμική επανεισαγωγή είναι πολύ περίπλοκη διαδικασία και επομένως τεχνικές όπως η δοκιμή επανεισαγωγής και η δοκιμή ιχνηλάτησης είναι απαραίτητες πριν από την εκπόνηση οποιουδήποτε σχεδίου επανεισαγωγής μεγάλης κλίμακας.

Ο ρυθμός επανεισαγωγής συνήθως περιορίζεται λόγω της «κακής» διαπερατότητας που υπάρχει σε ορισμένους τύπους γεωθερμικών ταμιευτήρων, ενώ η ικανότητα εισπίεσης μειώνεται δραστικά μετά από μια περίοδο επανεισαγωγής. Επιπλέον οι γεωτρήσεις επανεισαγωγής σε πολλές περιπτώσεις μπορεί και να φράξουν εντελώς λόγω



των επικαθίσεων αλάτων (*scaling*), καθιστώντας ακόμα πιο δύσκολη τη διαδικασία της επανεισαγωγής. Η επανεισαγωγή μεγάλης κλίμακας, προκαλεί ταχεία πτώση της θερμοκρασίας στους ταμιευτήρες με «καλή» διαπερατότητα (Liu, 2003) και επομένως η δοκιμή της θέσης των γεωτρήσεων εισπίεσης κρίνεται απαραίτητη, προκειμένου να επιβεβαιωθεί η διαπερατότητα των πετρωμάτων και η ικανότητα εισπίεσης, δηλαδή πόση μάζα ή όγκο εισπιεζόμενου ρευστού μπορεί να υποδεχτεί ο ταμιευτήρας.

Η δοκιμή επανεισαγωγής συνήθως ξεκινά με διοχέτευση αρχικά χαμηλής σχετικά παροχής και στη συνέχεια η παροχή αυξάνεται σταδιακά, μπορεί να ελεγχθεί η δυναμικότητα αυτής. Η επαναφόρτιση μπορεί να ταξινομηθεί, ανάλογα με πίεση εισπίεσης, σε χωρίς πίεση επανεισαγωγή και σε υπό πίεση επανεισαγωγή:

- Η χωρίς πίεση επανεισαγωγή εκμεταλλεύεται τη βαρύτητα για τη διοχέτευση του ρευστού στον ταμιευτήρα, χωρίς την άσκηση πίεσης στη κεφαλή της γεώτρησης εισπίεσης (*no wellhead pressure*). Με αυτόν τον τρόπο εξοικονομείται ενέργεια και μετριάζεται η επίδραση στη διαπερατότητα των πόρων του γεωθερμικού ταμιευτήρα, που όπως αναφέρθηκε αποτελεί σημαντικό κριτήριο στη δυναμικότητα της επανεισπίεσης.
- Η υπό πίεση επανεισαγωγή προαπαιτεί την άσκηση πίεσης στην κεφαλή της γεώτρησης, έτσι ώστε να ωθήσει το ρευστό πίσω στον γεωθερμικό ταμιευτήρα. Αυτή η μέθοδος καταναλώνει επιπλέον εξωτερική ενέργεια, όπως π.χ. ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται από την αντλία πίεσης. Αν, ωστόσο, υπάρξει υπερβολική πίεση στην κεφαλή της γεώτρησης εισπίεσης επηρεάζεται σημαντικά η διαπερατότητα του ταμιευτήρα, προκαλώντας στροβιλώδης ροή στη γεώτρηση και οδηγώντας τελικά σε μείωση της δυναμικότητας επανεισπίεσης.

Επομένως, απαιτείται η δοκιμή επανεισαγωγής διαφορετικών μεθόδων επανεισαγωγής με διαφορετικούς ρυθμούς, έτσι ώστε να συγκεντρωθούν οι απαραίτητες πληροφορίες για τον σχεδιασμό μιας γεωθερμικής επανεισαγωγής μεγάλης κλίμακας.

### **2.6.2 Δοκιμή Ιχνηλάτησης (Tracer Test)**

Η ικανότητα επαναφόρτισης των γεωθερμικών ταμιευτήρων και η επίδρασή της στην πίεση αυτών, μπορεί να προσδιοριστεί μέσω των δοκιμών επαναφόρτισης, αλλά η επίδραση της θερμοκρασίας του ρευστού επαναφόρτισης στον γεωθερμικό ταμιευτήρα δεν μπορεί να προσδιοριστεί εύκολα. Η δοκιμή ιχνηλάτησης εκτιμά το πεδίο επιρροής της



κάθε γεώτρησης επαναφόρτισης και πώς επηρεάζεται η θερμοκρασία του ταμειυτήρα από διαφορετικά προγράμματα εκμετάλλευσης και επανεισαγωγής.

Οι δοκιμές ιχνηλάτησης χρησιμοποιούνται εκτενώς στην υδρολογία των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων, καθώς και στις μελέτες ρύπανσης υπόγειων υδάτων. Οι δοκιμές ιχνηλάτησης περιλαμβάνουν την εισαγωγή ενός ιχνηθέτη (συνήθως χημικού) σε ένα υδρολογικό σύστημα και την παρακολούθηση της ανάκτησης αυτού σε διάφορα σημεία παρατήρησης. Οι ιχνηθέτες που χρησιμοποιούνται μπορεί να είναι: χημικοί, περιβαλλοντικοί και ραδιενεργοί ιχνηθέτες. Η επιλογή του κατάλληλου ιχνηθέτη βασίζεται στην αρχή της ελάχιστης δοσολογίας που μπορεί να εφαρμοστεί ώστε να βεβαιωθεί η υδραυλική σύνδεση μεταξύ της διαπερατότητας των πόρων και των γεωθερμικών γεωτρήσεων ή/και η επικοινωνία γεωτρήσεων εισπίεσης και γεωτρήσεων παραγωγής. Η βεβαίωση αυτή της υδραυλικής σύνδεσης εξαρτάται και από την ευαισθησία του εκάστοτε ιχνηλάτη. Παρακάτω αναλύονται ξεχωριστά οι ιδιότητες των τριών αυτών τύπων ιχνηθετών:

- Ο χημικός ιχνηθέτης [χημική ένωση όπως π.χ. οι υπερφθοράνθρακες (1,3-υπερφθορο-διμεθυλκυκλο-εξάνιο ή 1,3-PDMCH), (Gluyas, Mathias, 2013)], έχει χαμηλή τιμή μονάδας, χαμηλή ευαισθησία και απαιτεί μεγάλη δοσολογία. Μέχρι σήμερα, αποτελεί τον πιο δημοφιλή ιχνηθέτη. Ταξινομείται σε οργανικό ιχνηθέτη και ανόργανο ιχνηθέτη (Axelsson, Flovenz, et al, 2001). Μεταξύ αυτών, ευρέως χρησιμοποιείται ο οργανικός ιχνηθέτης, λόγω της υψηλής ευαισθησίας και της ευκολίας του στη χρήση.
- Ο περιβαλλοντικός ιχνηθέτης, ιχνηλατεί αλλαγές στα χημικά χαρακτηριστικά του γεωθερμικού ρευστού. Αυτός ο ιχνηθέτης είναι κατάλληλος για δοκιμές μεγάλης κλίμακας σε γεωθερμικά πεδία που καταλαμβάνουν μικρές περιοχές. Η συγκέντρωσή του ποικίλλει ελαφρώς και η ευαισθησία του βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα.
- Ο ραδιενεργός ιχνηθέτης, έχει υψηλή τιμή μονάδας, υψηλή ευαισθησία και χρησιμοποιείται σε μικρή δοσολογία. Η αυστηρότερη πολιτική ελέγχου των ραδιενεργών ουσιών σε πολλές χώρες, σε συνδυασμό με την υψηλή εξειδίκευση που απαιτεί αυτή η διεργασία ιχνηλάτησης, οδηγεί στην περιορισμένη εφαρμογή των ραδιενεργών ιχνηθετών στο πεδίο.

Δεδομένης, ωστόσο, της ετερογένειας των καρστικών σχηματισμών και της ανάπτυξης ρωγματώσεων στους ταμειυτήρες, (ειδικά στους καρστικούς θερμικούς



ταμειυτήρες), η δοκιμή ιχνηλάτησης πρέπει να πραγματοποιείται επανειλημμένα (Wang, S.F., Pang, Z.H., Liu, J.R., 2011), έτσι ώστε αναλυθούν και να κατανοηθούν πλήρως η διαπερατότητα και τα χαρακτηριστικά ρωγματώσεων του ταμειυτήρα και να εκτιμηθεί ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του ταμειυτήρα.

Ο κύριος σκοπός των δοκιμών ιχνηλάτησης στις γεωθερμικές μελέτες και στη διαχείριση των πόρων, είναι η πρόβλεψη της πιθανής πτώσης της θερμοκρασίας στις γεωτρήσεις παραγωγής, λόγω μακροχρόνιας επανεισαγωγής ψυχρότερου νερού, μέσα από τη μελέτη της σύνδεσης μεταξύ των γεωτρήσεων παραγωγής και επανεισαγωγής. Η αποδοτικότητά τους ουσιαστικά έγκειται στο γεγονός ότι ο χρόνος της θερμικής ανάκαμψης του ταμειυτήρα, είναι συνήθως κάποιας τάξης μεγέθους (2-3) μεγαλύτερος από τον χρόνο ανάκαμψης του ιχνηθέτη, δίνοντας έτσι μεγάλη αξιοπιστία στις προβλέψεις που βασίζονται στα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών.

### **2.6.3 Θέσεις και Διάταξη Γεωτρήσεων Επανεισαγωγής ως προς τις Γεωτρήσεις Παραγωγής, σε ένα Γεωθερμικό Πεδίο**

Η πιθανή πτώση της θερμοκρασίας στις γεωτρήσεις παραγωγής ενός γεωθερμικού ταμειυτήρα, ύστερα από ένα διάστημα επανεισαγωγής σχετικά ψυχρότερου από το περιεχόμενο σε αυτόν ρευστό, δεν εξαρτάται μόνο από τον όγκο της επανεισαγωγής, αλλά και από τη σχετική θέση και τη διάταξη των ζευγών των γεωτρήσεων παραγωγής/επανεισαγωγής, μέσα στο γεωθερμικό πεδίο. Η σχετική θέση των γεωτρήσεων επανεισαγωγής ως προς τις γεωτρήσεις παραγωγής είναι ίσως το πιο σημαντικό ζήτημα ίσως το πιο σημαντικό ζήτημα στον σχεδιασμό του συστήματος επανεισαγωγής.

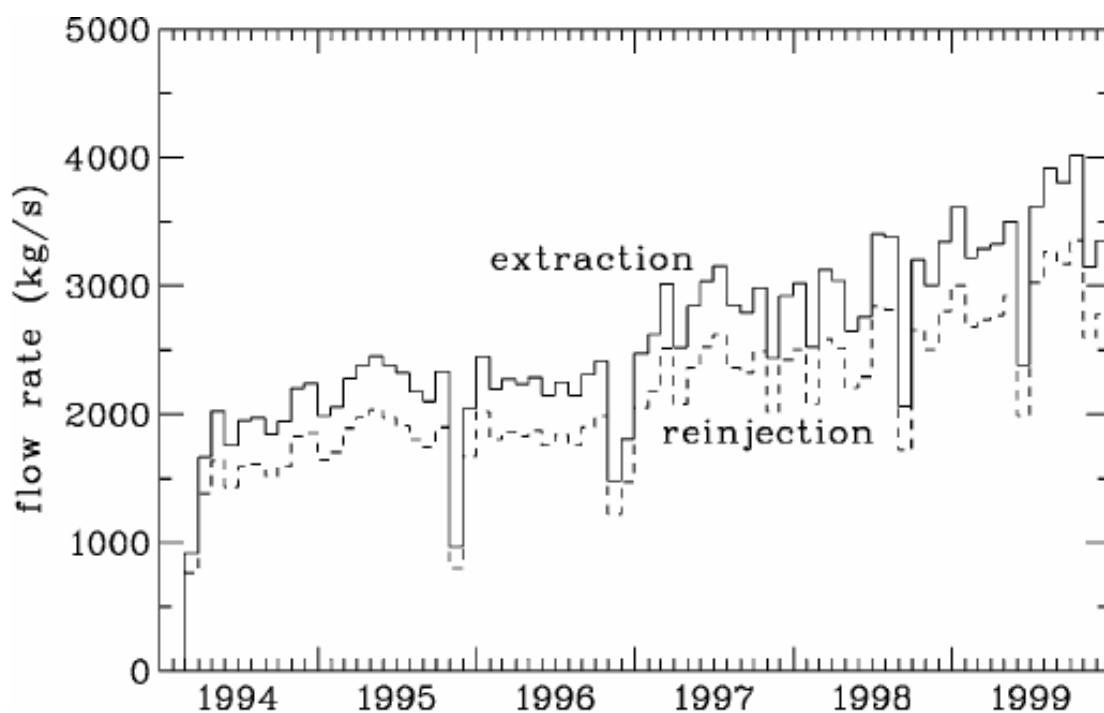
Συνήθως οι γεωτρήσεις επανεισαγωγής είτε τοποθετούνται σχετικά κοντά με τις γεωτρήσεις παραγωγής και εντός της θερμής περιοχής του συστήματος (*infield reinjection*), είτε τοποθετούνται αρκετά μακριά από τις γεωτρήσεις παραγωγής, εκτός της θερμής περιοχής του συστήματος (*outfield reinjection*). Οι παραπάνω ορισμοί σαφώς δεν είναι ακριβείς και δεν ορίζουν ρητά τις αποστάσεις μεταξύ γεωτρήσεων παραγωγής και επανεισαγωγής. Στη βιβλιογραφία καταγράφεται προσπάθεια από ορισμένους ερευνητές να ορίσουν τις θέσεις των γεωτρήσεων επανεισαγωγής *infield & outfield*, ως προς το πόσο καλά συνδέονται μεταξύ τους, βάσει της μετρούμενης πίεσης (*pressure communication*). Ωστόσο, αυτή η διακρίτοποίηση απαιτεί πληροφορίες που συνήθως δεν είναι διαθέσιμες πριν ορυχθούν οι γεωτρήσεις επανεισαγωγής και επομένως δεν είναι πρακτικά χρήσιμη (Kaya, Zarrouk, O'Sullivan, et al, 2011).



Επειδή η απόσταση μεταξύ γεωτρήσεων παραγωγής/επανεισαγωγής στη διάταξη *infield* είναι πιο μικρή έναντι της διάταξης *outfield*, κατά την έναρξη της επαναφόρτισης το νερό που επανεισάγεται μπορεί να διατηρήσει αποτελεσματικά την πίεση του θερμικού ταμιευτήρα. Η επαναφόρτιση γενικά οδηγεί στη μείωση της θερμοκρασίας του ταμιευτήρα. Η πτώση αυτή συμβαίνει σε όλες τις ζώνες (διαφορετικά βάρη) του ταμιευτήρα και σταδιακά εξαπλώνεται σε όλο το γεωθερμικό πεδίο, προκαλώντας έτσι την πτώση της θερμοκρασίας στη γεώτρηση παραγωγής και την επηρεάζοντας έτσι την παραγωγικότητά της.

#### **2.6.4 Παραδείγματα Εφαρμογής της Επανεισαγωγής σε Γεωθερμικά Πεδία**

Το *Διάγραμμα 2-7* παρουσιάζει το ιστορικό παραγωγής του γεωθερμικού πεδίου υψηλής θερμοκρασίας *Miravalles*, στην Κόστα Ρίκα, ως παράδειγμα κατά το οποίο, ήδη από την έναρξη της εκμετάλλευσης του πεδίου, σχεδόν το σύνολο της παραγόμενης μάζας (περίπου 85%) επανεισάγεται στον γεωθερμικό ταμιευτήρα (Mainieri, 2000).

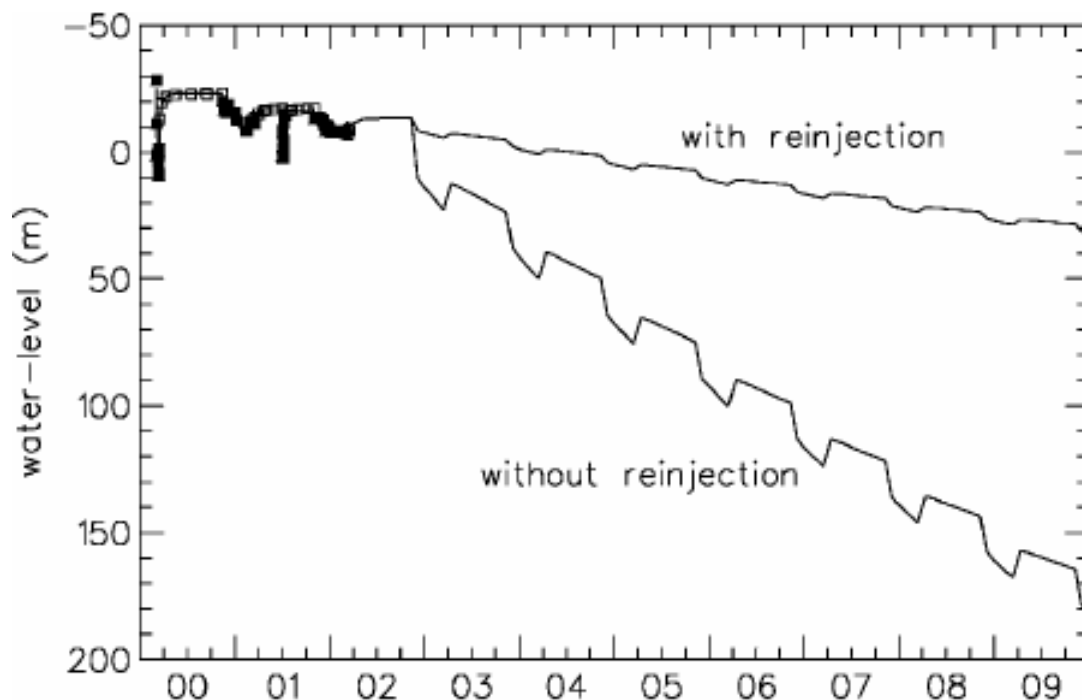


*Διάγραμμα 2-7: Ιστορικό Παραγωγής και Επανεισαγωγής στο γεωθερμικό πεδίο υψηλής θερμοκρασίας Miravalles, στην Κόστα Ρίκα 1994-1999 (Mainieri, 2000).*

Ένα άλλο παράδειγμα αποτελεί το γεωθερμικό πεδίο χαμηλής θερμοκρασίας *Shahe* κοντά στο Πεκίνο, εντός ιζηματογενούς ταμιευτήρας. Για το πεδίο αυτό το μοντέλο απέδειξε ότι, χωρίς τη διαδικασία της επανεισαγωγής, το δυναμικό παραγωγής του



γεωθερμικού συστήματος είναι αρκετά περιορισμένο (Axelsson et al., 2002), όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 2-8.



Διάγραμμα 2-8: Αποτελέσματα μοντελοποίησης του γεωθερμικού πεδίου χαμηλής θερμοκρασίας Shade, στο Πεκίνο της Κίνας (Axelsson et al., 2002). Πρόβλεψη μοντέλου για σενάρια εφαρμογής επανεισαγωγής ή όχι.

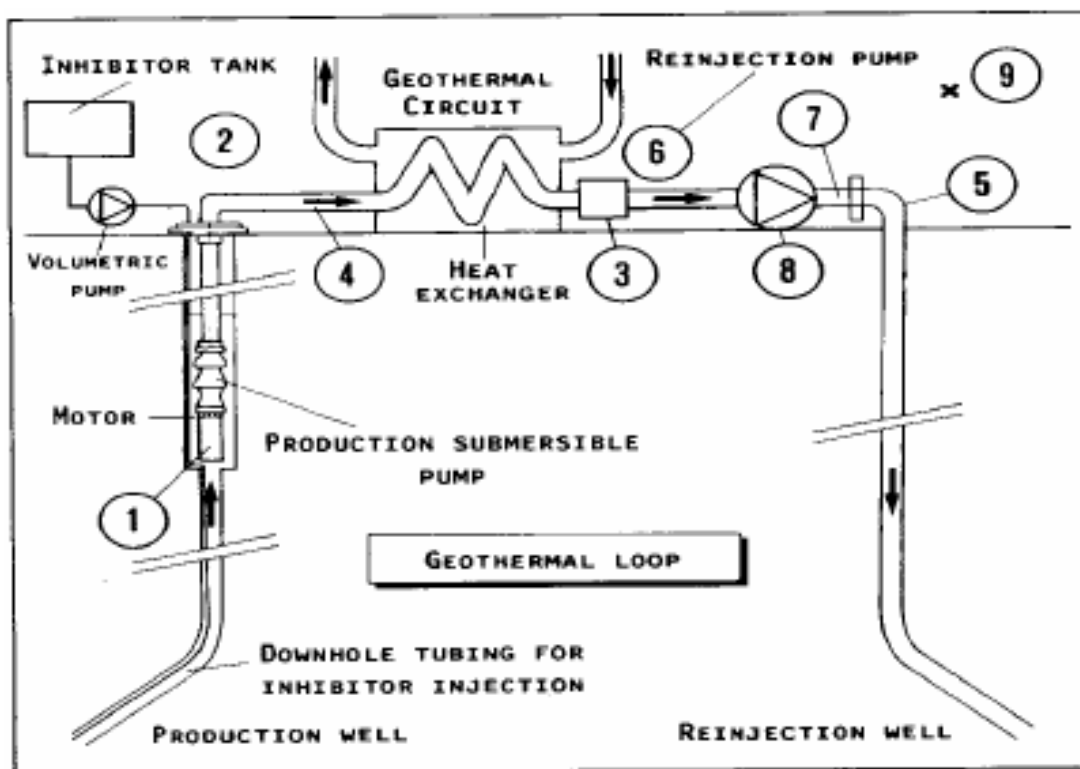
Ένα άλλο παράδειγμα επιτυχημένης διαχείρισης γεωθερμικού πόρου, μέσω της εφαρμογής της επανεισαγωγής, αποτελεί η λεκάνη του Παρισιού (Boisdet et al., 1990, Axelsson and Gunnlaugsson, 2000) (Σχήμα 2-2). Η περιοχή αυτή είναι ουσιαστικά ένας τεράστιος γεωθερμικός πόρος, με έκταση  $15.000 \text{ km}^2$ , που σχετίζεται με τον ασβεστολιθικό σχηματισμό *Dogger*. Η ενέργεια που μπορεί να εξαχθεί από αυτόν τον ταμιευτήρα (γνωστός και ως *Dogger reservoir*), χρησιμοποιείται κυρίως για τη θέρμανση εσωτερικών χώρων (τηλεθέρμανση). Στις περισσότερες των περιπτώσεων γίνεται χρήση ενός σχεδίου εκμετάλλευσης με ζεύγη γεωθερμικών γεωτρήσεων (*geothermal doublets*), και εγκατάσταση εναλλακτών θερμότητας. Η χρήση του γεωθερμικού ταμιευτήρα *Dogger* ξεκίνησε το 1969 και ύστερα από δύο μεγάλες πετρελαϊκές κρίσεις, κατασκευάστηκαν 53 επιπλέον γεωθερμικές εγκαταστάσεις (μονάδες) στη λεκάνη του Παρισιού. Στα τέλη της δεκαετίας του '80, δημιουργήθηκε ένα σύστημα απομακρυσμένης παρακολούθησης της περιοχής της εκμετάλλευσης, που κάλυπτε τα περισσότερα ζεύγη γεωτρήσεων και στο οποίο η συλλογή των δεδομένων γινόταν μέσω του τηλεφωνικού δικτύου, σε μια κεντρική τοποθεσία. Τα ζεύγη των γεωτρήσεων παραγωγής και





ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΣΕ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ  
ΜΕ ΣΧΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ-ΕΠΑΝΕΙΣΠΙΕΣΗΣ

επανεισαγωγής στη λεκάνη του Παρισιού απέχουν μεταξύ τους μια απόσταση περίπου 1km, με σκοπό την ελαχιστοποίηση του κινδύνου ψύξης του ταμιευτήρα, λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας του νερού επανεισαγωγής. Ύστερα από 12 με 30 χρόνια χρήσης και του πεδίου, δεν έχει παρατηρηθεί ακόμη κάποια σημαντική πτώση της θερμοκρασίας σε καμία από τις γεωτρήσεις παραγωγής.



Σχήμα 2-2: Σχεδιάγραμμα απεικόνισης της αρχής λειτουργίας και εγκατάστασης των ζευγών των γεωθερμικών γεωτρήσεων στη λεκάνη του Παρισιού και των σημείων μέτρησης για την απομακρυσμένη πρόσκτηση των δεδομένων παρακολούθησης (Boisdet et al., 1990)



### 3. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ

#### 3.1 Τα πρώτα Βήματα του Σχεδιασμού Εκμετάλλευσης ενός Γεωθερμικού Ταμιευτήρα

Στην αρχή του σχεδιασμού εκμετάλλευσης ενός γεωθερμικού ταμιευτήρα υπάρχει διαθέσιμος ορισμένος όγκος δεδομένων ανάλογα με την έρευνα που έχει προηγηθεί, στον οποίο σίγουρα περιλαμβάνονται η θέση, η έκταση και τα όρια του ταμιευτήρα. Στην περίπτωση δε ταμιευτήρα υψηλής θερμοκρασίας είναι επίσης δεδομένο ότι αυτός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ανάλογα με την έρευνα που έχει προηγηθεί (γεωλογική, γεωφυσική, υδρογεωλογική, γεωτρητική) σε μια περιοχή είναι δυνατό να γνωρίζουμε από ελάχιστες έως αρκετές ιδιότητες και παραμέτρους του υπόγειου ταμιευτήρα. Με βάση αυτές θα πρέπει να γίνει ο αρχικός σχεδιασμός της εκμετάλλευσης ενός γεωθερμικού πόρου υψηλής θερμοκρασίας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Για την έγκριση του σχεδίου εκμετάλλευσης που θα εκπονηθεί από τις αρμόδιες αρχές, οι οποίες αναλαμβάνουν όλη την ευθύνη για τη λήψη της τελικής απόφασης, θα πρέπει αυτό να περιλαμβάνει τη χωροθέτηση του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής, την όδευση των γραμμών μεταφοράς, τις θέσεις των απαραίτητων γεωτρήσεων και τον αρχικό σχεδιασμό όδευσης των διαφόρων αγωγών μεταφοράς ρευστών. Ουσιαστικά θα πρέπει να προσδιοριστεί όλος ο απαραίτητος επιφανειακός εξοπλισμός και η θέση που τοποθετηθεί, ώστε να μπορούν αξιολογηθούν και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις του έργου.

Ο τρόπος λειτουργίας του εξοπλισμού είναι γνωστός λεπτομερώς, ενώ το κάθε στοιχείο του εξοπλισμού έχει περιληφθεί στον σχεδιασμό για συγκεκριμένο σκοπό, με την απόδοσή του να είναι γνωστή από υπολογισμούς και εργαστηριακές δοκιμές. Ένας φυσικός γεωθερμικός πόρος είναι μοναδικός ως προς τη λειτουργία του, παρά το γεγονός ότι σε αυτή συμμετέχουν γνώριμες φυσικές διαδικασίες. Αυτό που θα πρέπει κυρίως να διερευνηθεί και να εκτιμηθεί είναι το πώς κυκλοφορούν τα ρευστά στο εσωτερικό του ταμιευτήρα, ιδιαίτερα κατά τη λειτουργία των γεωτρήσεων παραγωγής και επανεισαγωγής. Κίνδυνοι, όπως ο γεωθερμικός πόρος να μην μπορεί τελικά να παρέχει





την εκτιμώμενη θερμική και ογκομετρική παροχή, εξετάζονται επίσης στα πλαίσια του σχεδιασμού.

Συνοψίζοντας, λοιπόν, τα παραπάνω, ο στόχος της εκμετάλλευσης ενός γεωθερμικού ταμιευτήρα είναι να επιτευχθεί η μέγιστη απόληψη θερμικής ενέργειας που μπορεί να διαθέσει στο πλαίσιο της αιφορίας. Συνήθως, στην πρώτη φάση σχεδιασμού μιας τέτοιας εκμετάλλευσης δεν υπάρχουν διαθέσιμες κάποιες δοκιμές ώστε να είναι πλήρως γνωστή η συμπεριφορά του. Έτσι, ουσιαστικά είναι απαραίτητο ένα εργαλείο που να μπορεί να δώσει εκτιμήσεις σχετικά με το τι θα συμβεί στον ταμιευτήρα σε κάθε πιθανό σενάριο πριν το σενάριο αυτό τεθεί σε εφαρμογή. Με τη βοήθεια του υπολογιστικού εργαλείου αυτού, μπορούν να θεωρητικά τρέξουν άπειρα σενάρια, ώστε να προσδιοριστεί τελικά το βέλτιστο που θα πληροί τόσο την προϋπόθεση της αιφορίας, όσο και της μέγιστης απόληξης θερμικής ισχύος. Όταν αυτό βρεθεί, ξεκινά η υλοποίηση του σεναρίου αυτού στο πεδίο.

Σε αυτή τη φάση ότι το μοντέλο που κατασκευάζεται για τις προσομοιώσεις εμπεριέχει όλες τις πληροφορίες και τα δεδομένα που έχουν συλλεχθεί από την πρότερη έρευνα. Το πρόβλημα είναι, όμως, ότι στα μοντέλα καταναμημένων παραμέτρων, όπως το *FEFLOW* που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, θα πρέπει να εισάγονται επακριβώς όλες οι ιδιότητες του πετρώματος και του ρευστού σε κάθε σημείο του ταμιευτήρα, γεγονός που είναι αδύνατο να πραγματοποιηθεί στην αρχική φάση σχεδιασμού μιας εκμετάλλευσης. Έτσι, αυτό που γίνεται στην πράξη είναι ότι επιλέγεται το βέλτιστο σενάριο βασισμένο στις απαραίτητες παραδοχές όσον αφορά τις τιμές των παραμέτρων του ταμιευτήρα που δεν είναι γνωστές και το σενάριο αυτό τίθεται σε εφαρμογή. Η παραγωγή ξεκινά, αφήνεται να περάσει ορισμένος χρόνος, δοκιμάζοντας διαφορετικές παραμέτρους λειτουργίας του συστήματος, όπως παροχή των γεωτρήσεων παραγωγής, όγκοι επανεισαγωγής, αριθμός και θέσεις των γεωτρήσεων παραγωγής ή/και επανεισπίεσης που λειτουργούν ταυτόχρονα κ.λπ.

Αφού συλλεχθεί ικανός όγκος δεδομένων λειτουργίας, στη συνέχεια τρέχει ξανά ο προσομοιωτής (*simulator*) με στόχο αυτή τη φορά την προσομοίωση του ιστορικού παραγωγής του ταμιευτήρα (*History Matching*). Ο στόχος αυτής της προσομοίωσης είναι να ρυθμιστούν ορισμένες από τις παραμέτρους του ταμιευτήρα που αρχικά είχαν στηριχθεί σε παραδοχές, ώστε στο ο προσομοιωτής να αναπαράγει με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια τα πραγματικά δεδομένα της παραγωγής κατά το χρονικό διάστημα που πέρασε. Χωρίς αυτή τη διαδικασία του *History Matching* τα αποτελέσματα του *simulator* δεν μπορούν να θεωρούνται αξιόπιστα και αντιπροσωπευτικά. Ωστόσο για να υπάρξει



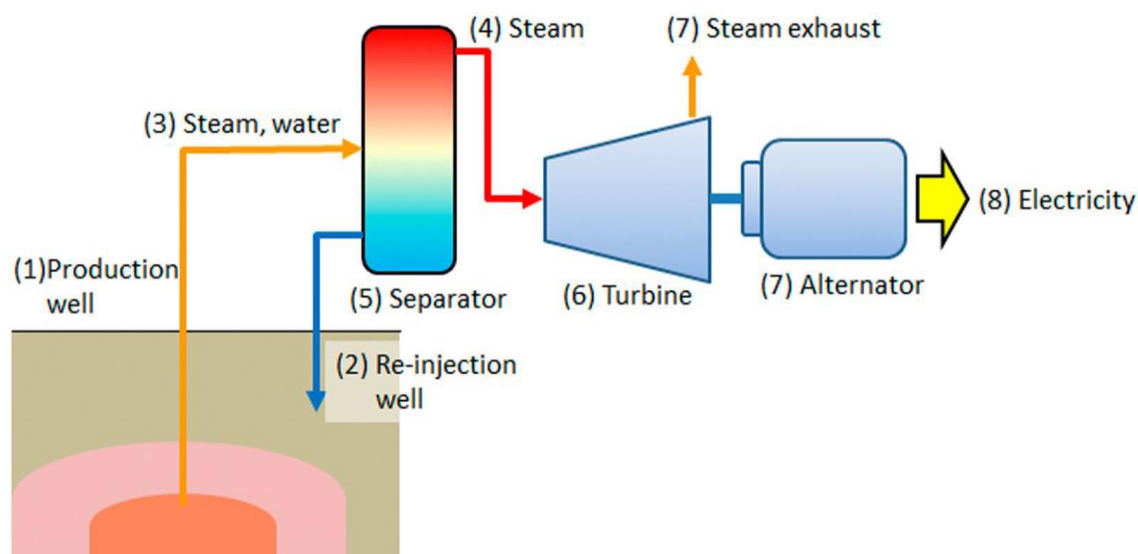
ένα καλό *History Matching*, θα πρέπει να υπάρχουν και πλούσια ιστορικά δεδομένα για τη λειτουργία του ταμιευτήρα.

Συγκεντρωτικά, τα βήματα που ακολουθούνται χρονολογικά για τον αρχικό σχεδιασμό της εκμετάλλευσης ενός γεωθερμικού ταμιευτήρα, συνήθως είναι τα ακόλουθα:

1. Γεωλογική έρευνα στην περιοχή ενδιαφέροντος και η πραγματοποίηση γεωφυσικών μετρήσεων, για την εκτίμηση της δομής και της στρωματογραφίας στο υπέδαφος, περιλαμβανομένων των ορίων του συνολικού συστήματος (*delineation*).
2. Γεωχημική έρευνα των επιφανειακών απορροών, ώστε να προσδιοριστεί η υδρολογία και η κατανομή της θερμοκρασίας του ταμιευτήρα. Αυτό περιλαμβάνει επίσης τον προσδιορισμό της γεωγραφικής θέσης και τον αριθμό των γεωτρήσεων που απαιτούνται για την παροχή επαρκών πληροφοριών στους επιστήμονες και στους μηχανικούς.
3. Κοινωνικο-οικονομική έρευνα της γύρω περιοχής και των χρήσεων σε αυτή, ώστε να προσδιοριστούν οι απαιτήσεις που μπορεί να καλύψει η εκμετάλλευση του γεωθερμικού πόρου.
4. Σχεδιασμός της στρατηγικής για την εξαγωγή του θερμού ρευστού του ταμιευτήρα και την επανεισαγωγή του σε αυτόν σε χαμηλότερη θερμοκρασία, συμπεριλαμβανομένων και των πιθανών σχημάτων-πλάνων για τον τρόπο αντιμετώπισης δυνητικών μειώσεων στην παραγόμενη θερμότητα από τις γεωτρήσεις παραγωγής μελλοντικά. Αυτό είναι το βήμα για την οποία αναπτύχθηκε κυρίως η αριθμητική προσομοίωση ταμιευτήρων, το οποίο είναι εξίσου χρήσιμο και στο βήμα 2.
5. Τελευταίο βήμα αποτελεί η απόφαση για την ισχύ και τον τύπο του σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να υποστηρίξει η αιφόρος εκμετάλλευση του ταμιευτήρα. Οι προσομοιωτές ταμιευτήρων παίζουν σημαντικό ρόλο και σε αυτό το βήμα.

### 3.1.1 Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας με Αξιοποίηση της Γεωθερμικής Ενέργειας

Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, όπως είναι γνωστό, σε όλα τα εργοστάσια χρησιμοποιείται μια ηλεκτρογεννήτρια, η οποία μετατρέπει την περιστροφική κίνηση σε ηλεκτρικό ρεύμα. Για να παραχθεί αυτή η περιστροφική κίνηση χρησιμοποιείται μια μηχανή που ονομάζεται αεριοστρόβιλος (ή τουρμπίνα), η οποία, για να παράγει περιστροφική κίνηση, τροφοδοτείται με ξηρό ατμό. Στα συμβατικά εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ο ξηρός αυτός ατμός παράγεται σε λέβητες που θερμαίνονται, είτε μέσω της καύσης κάποιου ορυκτού καυσίμου (θερμοηλεκτρικοί σταθμοί), είτε μέσω σχάσης πυρηνικού καυσίμου. Στα γεωθερμικά συστήματα ο ατμός λαμβάνεται από το γεωθερμικό πεδίο, είτε απευθείας, αν πρόκειται για ένα πεδίο ξηρού ατμού, είτε μετά από εκτόνωση σε διαχωριστές, αν πρόκειται για πεδίο θερμού νερού, και ύστερα ανακυκλώνεται μέσω των γεωτρήσεων επανεισαγωγής (Εικόνα 3-1).



Εικόνα 3-1: Συνολικό Σχεδιάγραμμα Παραγωγικής Διαδικασίας (Γαγάνης, 2021)

Μετά την έξοδο από τον αεριοστρόβιλο, ο ατμός οδηγείται στον συμπυκνωτή ή εναλλάκτη θερμότητας, προκειμένου να υγροποιηθεί και να μπορεί να διοχετευτεί ξανά στον γεωθερμικό ταμιευτήρα, μέσω των γεωτρήσεων επανεισαγωγής. Κατά τη διαδικασία αυτή, το νερό χάνει κάποια από τη θερμική του ενέργεια και επομένως εισέρχεται στο ταμιευτήρα σε σχετικά ψυχρότερη θερμοκρασία. Αξίζει να σημειωθεί ότι πριν τελικά καταλήξει στον ταμιευτήρα, μέσω των γεωτρήσεων επανεισαγωγής, συνήθως αξιοποιείται περαιτέρω για την θέρμανση π.χ. μικρών πόλεων (τηλεθέρμανση) ή για τη θέρμανση κάποιου θερμοκηπίου. Ύστερα από αυτή τη διαδικασία χάνει και άλλο



ποσοστό από τη θερμική του ενέργεια, με αποτέλεσμα να επανεισάγεται τελικά στον ταμιευτήρα σε πολύ χαμηλότερη θερμοκρασία. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η μοντελοποίηση του ταμιευτήρα να παίζει ουσιαστικό ρόλο ώστε να μην υπάρξει το πρόβλημα της ολοκληρωτικής ψύξης του ταμιευτήρα με την πάροδο της εκμετάλλευσης. Η κατάλληλη χωροθέτηση των γεωτρήσεων παραγωγής/επανεισαγωγής και ο ορθολογικός χρονικός προγραμματισμός της παραγωγής/επανεισαγωγής αποτελούν τα βασικότερα στοιχεία για την αειφόρο διαχείριση του ταμιευτήρα.

### 3.2 Αριθμητική Προσομοίωση Γεωθερμικών Ταμιευτήρων

Για την προσομοίωση ενός γεωθερμικού πόρου, χρησιμοποιείται ένα σύνολο διαφορικών εξισώσεων που τον περιγράφουν, αποτελούμενες από ανεξάρτητες και εξαρτώμενες μεταβλητές. Ως ανεξάρτητες μεταβλητές ορίζονται ο χώρος και ο χρόνος, ενώ ως εξαρτώμενες η πίεση και η θερμοκρασία, ώστε οι εξισώσεις να επιλυθούν για κατάλληλες συνοριακές συνθήκες (*boundary conditions*). Επίσης υπάρχει και μια τρίτη μεταβλητή που αφορά τον κορεσμό σε ατμό του συστήματος. Η μεταβλητή αυτή αφορά μόνο τα διφασικά συστήματα, στα οποία αναπτύσσονται πιέσεις κάτω από αυτήν του κορεσμού σε ατμό. Στην παρούσα εργασία δεν συμπεριλήφθηκε αυτή η μεταβλητή, καθώς το σύστημα το οποίο μοντελοποιήθηκε και προσομοιώθηκε ήταν ένα μονοφασικό γεωθερμικό σύστημα.

Τα γεωθερμικά συστήματα, όπως και όλα τα φυσικά συστήματα, διέπονται από διαφορικές εξισώσεις (που περιγράφουν τη λειτουργία και τη διεργασίες που επιτελούνται σε αυτά με την πάροδο του χρόνου) και όχι αλγεβρικές εξισώσεις. Αυτές οι διαφορικές εξισώσεις όμως δεν λύνονται με τις κλασικές μεθόδους, λόγω της μεγάλης πολυπλοκότητας και συνθετότητάς τους και για την επίλυσή τους χρησιμοποιούνται αριθμητικές μέθοδοι. Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών, για παράδειγμα, μετατρέπει τις διαφορικές εξισώσεις σε ένα μεγάλο σύστημα μη γραμμικών μεν, αλλά αλγεβρικών δε, εξισώσεων. Αυτό επιτυγχάνεται χωρίζοντας τον χώρο και τον χρόνο σε επιμέρους τμήματα (*διακριτοποίηση*). Οι αλγεβρικές εξισώσεις συνήθως λύνονται με τη μέθοδο *Newton-Raphson*, η οποία ουσιαστικά μετατρέπει τις μη γραμμικές αλγεβρικές εξισώσεις σε μια επαναληπτική επίλυση γραμμικών εξισώσεων, για τις οποίες υπάρχουν δεκάδες διαθέσιμες μέθοδοι επίλυσης. Έτσι, με την πολλαπλότητα των γραμμικών, γλιτώνουμε από τη μη γραμμικότητα. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, ως άλλη αριθμητική μέθοδος επίλυσης διαφορικών εξισώσεων, λειτουργεί με αντίστοιχο τρόπο, με τη μόνη διαφορά ότι έχει μια πιο «έξυπνη» μετατροπή των διαφορικών σε μη



γραμμικές αλγεβρικές. Επίσης, όπως οι αρχικές διαφορικές μετατρέπονται σταδιακά σε γραμμικές, το ίδιο συμβαίνει και για τις συνοριακές συνθήκες (boundary conditions). Έτσι, καθώς ο όγκος των γραμμικών συστημάτων που πρέπει να επιλυθούν λαμβάνει τεράστιες διαστάσεις, η χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών καθίσταται πλέον απαραίτητη.

Οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές που είναι σε θέση να εκτελέσουν πολύ γρήγορα αριθμητικές διαδικασίες, έγιναν διαθέσιμοι στους ερευνητές από το 1960 περίπου και μετά. Πριν από τότε η αριθμητική επίλυση για διάφορα σύνολα μερικών διαφορικών εξισώσεων είχε ήδη αναπτυχθεί, αλλά οι υπολογισμοί πραγματοποιούνταν με το χέρι, παρά την ανάπτυξη του αναλογικού υπολογιστή ήδη από το 1930, σε κάποιες εφαρμογές. Οι αριθμητικοί προσομοιωτές για ταμιευτήρες πετρελαίου, και αργότερα για γεωθερμικούς ταμιευτήρες, αναπτύχθηκαν και άρχισαν να χρησιμοποιούνται στις σχετικές μελέτες στο τέλος περίπου της δεκαετίας του 1970. Για την προσομοίωση ταμιευτήρων πετρελαίου, υπόγειων υδροφορέων και γεωθερμικών συστημάτων, οι εξισώσεις που περιγράφουν τη ροή των ρευστών μέσω των διαπερατών (πορώδων) μέσων που φιλοξενεί αυτά τα ρευστά ενσωματώνουν τον νόμο του Ντάρσι (*Darcy's law*) (βλ. ενότητα 3.2.1).

Όπως και σε άλλους αριθμητικούς προσομοιωτές, σε άλλους τομείς της μηχανικής, το σύνολο του προγραμματισμού είναι τόσο μεγάλο και περίπλοκο, που όλες οι διαφορικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται είναι αόρατες στον χρήστη. Ο χρήστης, μέσω συνήθως κάποιου λογισμικού διεπαφής (*interface*) αυτό που κάνει μόνο είναι να εισάγει με κάποιο τρόπο τα δεδομένα που ορίζουν το πρόβλημα, τα οποία ουσιαστικά αποτελούν ένα αρχείο εισόδου για το κύριο υπολογιστικό πρόγραμμα.

Σε ένα λογισμικό προσομοίωσης γεωθερμικών ταμιευτήρων, συνήθως ορίζονται οι αρχικές κατανομές της πίεσης και της θερμοκρασίας, έτσι ώστε να υπολογιστούν οι διάφορες αλλαγές που επέρχονται στις γεωτρήσεις παραγωγής και επανεισπαγωγής στη διάρκεια του χρόνου. Η χωρική κατανομή των μεταβλητών είναι διαθέσιμη κυρίως για επιθεώρηση σε μεταγενέστερες περιόδους, μετά την έναρξη του υπολογισμού που είχε ζητήσει ο χρήστης. Ύστερα από την έναρξη του υπολογισμού, αυτός προχωρά αυτόματα, με χρονικά βήματα που προσαρμόζονται επίσης αυτόματα, έτσι ώστε να διασφαλιστεί η ακρίβεια στην επίλυση. Η χρήση ενός προσομοιωτή ταμιευτήρων βρίσκεται στο επίκεντρο της μελέτης για το πώς θα ανταποκριθεί ένας γεωθερμικός πόρος στην εκροή και εισροή ρευστού. Ένας προσομοιωτής ταμιευτήρων μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης και για την εξέταση κάποιων πιο λεπτομερών διαδικασιών. Παράδειγμα αποτελεί το έργο



του *O'Sullivan* ([O'Sullivan, 1987](#)), ο οποίος διαμόρφωσε τη ροή δύο φάσεων σε έναν σχηματισμό και προσδιόρισε έμμεσα τις ιδιότητες του σχηματισμού αυτού, ερμηνεύοντας τις αλλαγές του στη ρέουσα ενθαλπία.

Το 1979, το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ οργάνωσε διεθνώς τις σύστησε ορισμένες κύριες ερευνητικές ομάδες, στελεχωμένες με επιστήμονες από όλο τον κόσμο, για την επίλυση των προβλημάτων, που αφορούσαν τη μονοφασική και διφασική ροή σε γεωθερμικούς πόρους. Στη συνέχεια κάλεσε τις ομάδες αυτές να λάβουν μέρος σε έναν διαγωνισμό για την εύρεση του καλύτερου προσομοιωτή επίλυσης αυτών των προβλημάτων. Οι *Molloy* και *Sorey* ([Molloy, Sorey, 1981](#)) περιέγραψαν τις διαδικασίες και τα αποτελέσματα αρκετών τέτοιων προσομοιωτών, καταδεικνύοντας ότι υπήρχαν διαθέσιμοι αρκετοί διαφορετικοί και αξιόπιστοι προσομοιωτές. Με άλλα λόγια, κατέδειξαν ότι η γενική εγκυρότητα της «αόρατης» επεξεργασίας είχε ήδη επιτευχθεί σε αρκετά προγράμματα προσομοίωσης.

Ως προς τον τρόπο λειτουργίας των προσομοιωτών, υπάρχουν πολλά εγχειρίδια για την προσομοίωση κυρίως πετρελαϊκών, αλλά και γεωθερμικών ταμιευτήρων (π.χ. [Critchlow, 1977](#)), τα οποία δίνουν αρκετές λεπτομέρειες για τις αριθμητικές διαδικασίες. Ωστόσο, από μελέτες των τελευταίων 30 χρόνων, έχει αναδειχτεί ότι η περισσότερη βιβλιογραφία αφορά σε εφαρμογές τέτοιων προσομοιωτών και όχι στον τρόπο λειτουργίας τους. Στην επόμενη υποενότητα ([3.2.2](#)) παρουσιάζεται μια βασική εισαγωγή στο τρόπο λειτουργίας των μοντέλων προσομοίωσης, βασισμένη στη λεπτομερή περιγραφή από τους [Gelegenis, Lygerou, Koumoutsos, \(1989\)](#) της διαδικασίας υπολογισμού που χρησιμοποιήθηκε στον δικό τους προσομοιωτή γεωθερμικών ταμιευτήρων.

Μεταξύ των εμπορικών προγραμμάτων γεωθερμικών προσομοιώσεων που διατίθενται σήμερα, το «*TOUGH2*» είναι ίσως το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο, ενώ το «*FEFLOW*» (*Finite Element subsurface Flow system*) παρουσιάζει μια πιο ευρεία χρήση τόσο σε γεωθερμικά όσο και σε πετρελαϊκά ζητήματα. Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται χρήση του λογισμικού *FEFLOW*, για την προσομοίωση και τη μελέτη ροής σε ένα εικονικό γεωθερμικό πεδίο υψηλής ενθαλπίας, που θα παρουσιαστεί παρακάτω (βλ. κεφάλαιο 4).

Το *FEFLOW* χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για να επιλύσει τις εξισώσεις ροής των υπόγειων υδάτων, καθώς και αυτές που περιγράφουν τη μεταφορά μάζας και θερμότητας, συμπεριλαμβανομένων των επιπτώσεων της πυκνότητας του γεωθερμικού ρευστού και της χημικής κινητικής σε συστήματα αντίδρασης πολλαπλών



συστατικών. Και τα δύο προγράμματα είναι πανομοιότυπα ως προς τη λειτουργία τους, με το *TOUGH2* να χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών για την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων.

### **3.2.1 Ο Νόμος του Ντάρσι (Darcy's Law)**

Οι υπόγειοι σχηματισμοί που φιλοξενούν ρευστά (υδροφορείς, ταμιευτήρες υδρογονανθράκων και γεωθερμικοί ταμιευτήρες) συχνά στη βιβλιογραφία αναφέρονται ως βραχώμαζες. Ο όρος αυτός δεν είναι ο πλέον κατάλληλος, καθώς οι σχηματισμοί αυτοί δεν είναι τελείως συμπαγείς, αλλά πορώδεις, με κυμαινόμενη διαπερατότητα. Γενικά, η ροή ρευστών μέσα σε διαπερατά υλικά είναι γνωστή ως «ροή σε πορώδη μέσα». Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζεται μια σύντομη ανάλυση του νόμου του Ντάρσι που περιγράφει τη ροή σε πορώδη μέσα και αποτελεί τη μαθηματική βάση προσομοίωσης των γεωθερμικών ταμιευτήρων, η οποία παρουσιάζεται στην επόμενη ενότητα (3.2.2). Επισημαίνεται ότι οποιοδήποτε υλικό αναφέρεται εδώ θεωρείται ότι είναι διαπερατό.

Ο νόμος του Ντάρσι βασίστηκε στα πειράματα που εκτελέστηκαν από τον Ντάρσι (*Henry Darcy*) και αποτελείται από μια εξίσωση που περιγράφει τη ροή ενός ρευστού διαμέσου ενός πορώδους μέσου και, πιο συγκεκριμένα, μπορεί να περιγράψει τη ροή του νερού διαμέσου ενός υπόγειου υδροφορέα. Διατυπώθηκε από τον Ντάρσι ([Darcy, 1856](#)), κυρίως βάσει αποτελεσμάτων ροής νερού διαμέσου στρωμάτων άμμου. Σε συνδυασμό με την εξίσωση διατήρησης της μάζας, απλοποιεί την εξίσωση ροής των υπόγειων υδάτων, η οποία αποτελεί μία από τις πιο βασικές σχέσεις της υδρογεωλογίας. Είναι ανάλογης σημασίας με τον νόμο του *Fourier* στον τομέα της αγωγής θερμότητας, τον νόμο του *Ohm* στον τομέα των ηλεκτρικών δικτύων και τον νόμο του *Fick* στη θεωρία διάχυσης.

Σε μια υποσημείωση των *Bear* και *Cheng* ([Bear, Cheng, 2010](#)), αναφέρεται ότι ο *Darcy* (1856) εισήγαγε τον «νόμο» αφού εξέτασε τις λύσεις των εξισώσεων των *Navier – Stokes* (*Navier-Stokes Equations*), μέσω των μεθόδων ομογενοποίησης ([Whitaker, 1986](#)), καθώς και τις εξισώσεις συνέχειας για σταθερή, στρωτή ροή ασυμπίεστου ιξώδους υγρού διαμέσου ενός σωλήνα, τον οποίο είχε ερευνήσει νωρίτερα ο *Poiseuille* (1838) ([Watson, 2013, Bookmark: 4.6.1](#)). Λύση των εξισώσεων αυτών αποτελεί η παρακάτω εξίσωση (3.1), η οποία δίνει την κατανομή της ταχύτητας στον άξονα  $x$  ( $u$ ), διαμέσου του τριχοειδούς σωλήνα ακτίνας ( $a$ ), που παρουσιάζει διαφορά πίεσης  $dP$  κατά το απειροστό μήκος του σωλήνα  $dx$ :





$$u = -\frac{a^2}{4\mu} \left(1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2\right) \left(\frac{dP}{dx}\right) \quad (3.1)$$

Αντιμέτωπος με το πρόβλημα του βαθμού τυχαιότητας μέσω ενός διαπερατού πορώδους υλικού, αντί για τους τριχοειδείς σωλήνες του *Poiseuille*, ο *Darcy* διατύπωσε την παρακάτω σχέση:

$$q_v = -\frac{k}{\mu} \left(\frac{dP}{dx}\right) \quad (3.2)$$

Όπου  $\mu$  το απόλυτο ιξώδες του ρευστού και  $k$  η διαπερατότητα των πορώδους μέσου, μια πειραματικά προκύπτουσα ιδιότητα, που αντιπροσωπεύει το ισοδύναμο της τριχοειδούς γεωμετρίας για τις διελεύσεις ρευστών από πορώδη υλικά.

Αυτός ο απλός πειραματικός νόμος έχει εκτεταμένη εφαρμογή σε μελέτες ροής των υπόγειων υδάτων, πετρελαίου και φυσικού αερίου εντός πορώδους ταμιευτήρα, καθώς και ροών άλλων ρευστών εντός τεχνικών πορώδων υλικών.

### **3.2.2 Η Μαθηματική Βάση της Προσομοίωσης Γεωθερμικών Ταμιευτήρων**

Όπως προαναφέρθηκε, οι εξισώσεις που περιγράφουν το σύστημα του γεωθερμικού συστήματος και πρέπει να επιλυθούν για την προσομοίωσή του, είναι μερικές διαφορικές εξισώσεις, οι οποίες όμως θα πρέπει να μετατραπούν αρχικά σε μη γραμμικές αλγεβρικές και στη συνέχεια σε γραμμικές, μέσω μιας επαναληπτικής μεθόδου επίλυσής τους ([Watson, 2013, Bookmark: 13.3.1](#)). Για την επίλυση ωστόσο αυτών των εξισώσεων, θα πρέπει να οριστούν στο πρόγραμμα κάποιες αρχικές τιμές ή αρχικές συνθήκες (*initial conditions*) και κάποιες συνοριακές τιμές ή συνοριακές συνθήκες (*boundary conditions*) του συστήματος που μελετάται. Τα δεδομένα αυτά δίνουν τη δυνατότητα στο πρόγραμμα να «κατανοήσει» τις φυσικές ιδιότητες και τα φυσικά χαρακτηριστικά του συστήματος. Με βάση αυτές τις αρχικές και συνοριακές συνθήκες και ορισμένες άλλες παραμέτρους, γίνεται αρχικά διακριτοποίηση του συστήματος σε στοιχειώδη τμήματα (*elements*), δημιουργώντας ένα πλέγμα (*grid*) αποτελούμενο από κόμβους (*nodes*). Με τον τρόπο αυτό είναι πιο εύκολη και πιο ακριβής η επίλυση του συνόλου των διαφορικών εξισώσεων (για κάθε στοιχειώδες τμήμα του συστήματος και για το σύνολο του συστήματος, μέσα από επαναληπτική διαδικασία). Τα αποτελέσματα ελέγχονται ως προς την εγκυρότητά τους και ύστερα αναλύονται και παρουσιάζονται ώστε να διαμορφωθεί το τελικό σχέδιο διαχείρισης αυτού του γεωθερμικού συστήματος.





Στη συνέχεια παρατίθεται το παράδειγμα ενός απλού προβλήματος μονοδιάστατης ροής θερμότητας σε ένα ομογενές μέσο, προκειμένου να παρουσιαστεί η μετατροπή μιας απλής διαφορικής εξίσωσης σε αλγεβρική εξίσωση, μέσω της διαδικασίας της διακριτοποίησης. Το παράδειγμα αφορά μια μακριά μεταλλική, θερμικά μονωμένη ράβδο, με αρχική ομοιόμορφη θερμοκρασία, όταν μια πηγή θερμότητας εφαρμόζεται στο ένα άκρο της, τη χρονική στιγμή  $t=0$ . Το πρόβλημα είναι να προσδιοριστεί η θερμική αγωγή που λαμβάνει χώρα από τη χρονική στιγμή 0 και μετέπειτα, ώστε να μπορεί να προσδιοριστεί η κατανομή της θερμοκρασίας κατά μήκος της ράβδου ανά πάσα στιγμή.

Η γενική μορφή της εξίσωσης που περιγράφει τη θερμική αγωγή που λαμβάνει χώρα σε αυτή τη ράβδο είναι η ακόλουθη (3.3):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \nabla^2 T + \frac{\dot{H}}{\rho C_p} \quad (3.3)$$

Η παραπάνω εξίσωση χωρίς τον όρο που αφορά στην πηγή θερμότητας και μετασχηματισμένη για μονοδιάστατη ράβδο λαμβάνει την ακόλουθη μορφή (3.4):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (3.4)$$

Όπου:  $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial}{\partial r} \right)$ : οι ακτινικές συμμετρικές συντεταγμένες και

$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ : οι ορθογώνιες καρτεσιανές συντεταγμένες

$\kappa$ : ο συντελεστής θερμικής διάχυσης ( $\kappa = \lambda/\rho C_p$ , όπου  $\lambda$  ο συντελεστής ειδικής θερμικής αγωγιμότητας,  $\rho$  η πυκνότητα του ρευστού και  $C_p$  η ειδική θερμότητα σε σταθερή πίεση)

Η επίσημη μέθοδος μετατροπής της εξ. (3.4) σε αλγεβρική μορφή είναι να γραφεί ως επέκταση της σειράς *Taylor* ως προς τη θερμοκρασία  $T$ , με τις αντίστοιχες κλίσεις της (*grad* ή *gradient*) ως προς  $x$ :

$$T' = \frac{\partial T}{\partial t}, T'' = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, T''' = \frac{\partial^3 T}{\partial x^3}, \text{κ. τ. λ.}$$

$$T(x + \Delta x) = T(x) + \Delta x \cdot T'(x) + \frac{1}{2} (\Delta x^2) T''(x) + \frac{1}{6} (\Delta x^3) T'''(x) \dots \quad (3.5)$$



$$T(x - \Delta x) = T(x) - \Delta x \cdot T'(x) + \frac{1}{2}(\Delta x^2)T''(x) - \frac{1}{6}(\Delta x^3)T'''(x) \dots \quad (3.6)$$

Αγνοώντας όλους τους όρους που περιέχουν τον όρο  $\Delta x^3$  και υψηλότερες δυνάμεις αυτού ( $\geq 3$ ), οι υπόλοιποι όροι των δύο παραπάνω εξισώσεων μπορούν να απλοποιηθούν ή να αναδιαταχθούν με τρόπο ώστε να ληφθούν τρεις εκφράσεις για την κλίση (*grad*) της θερμοκρασίας  $T'$  και μία για τη δεύτερη παράγωγο της θερμοκρασίας  $T''$ :

$$T' = \frac{T(x + \Delta x) - T(x)}{\Delta x} \quad \begin{array}{l} \text{Πεπερασμένη Διαφορά} \\ \text{(Forward Difference)} \end{array} \quad (3.7)$$

$$T' = \frac{T(x) - T(x - \Delta x)}{\Delta x} \quad \begin{array}{l} \text{Αντίστροφη Διαφορά} \\ \text{(Backward Difference)} \end{array} \quad (3.8)$$

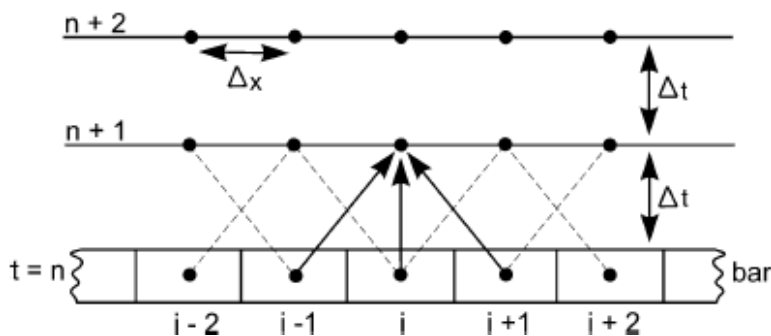
$$T' = \frac{T(x + \Delta x) - T(x - \Delta x)}{\Delta x} \quad \begin{array}{l} \text{Κεντρική Διαφορά} \\ \text{(Central Difference)} \end{array} \quad (3.9)$$

$$T'' = \frac{T(x + \Delta x) + T(x - \Delta x) - 2T(x)}{\Delta x^2} \quad (3.10)$$

Η ίδια προσέγγιση μπορεί να υιοθετηθεί για τις κλίσεις (*grad*) της θερμοκρασίας  $T$  με τον χρόνο. Η εξ. (3.10) μπορεί να αντικατασταθεί από το δεύτερο μέλος της εξ. (3.4), αλλά υπάρχει δυνατότητα επιλογής ως προς τις εκφράσεις, για την πρώτη παράγωγο της θερμοκρασίας ως προς τον χρόνο, ανάλογη των εξ. (3.7) και (3.8). Για την εύρεση της ανάπτυξης της θερμοκρασίας με την πάροδο του χρόνου, χρησιμοποιείται διαισθητικά η μορφή της πεπερασμένης διαφοράς (*forward difference*), για την οποία η διακριτοποιημένη μορφή της εξ. (3.4) είναι:

$$\frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = \kappa \frac{T_{i+1}^n + T_{i-1}^n - 2T_i^n}{\Delta x^2} \quad (3.11)$$

Όπου  $T_i^n$  είναι η θερμοκρασία που έχει ένα σημείο  $i$  τη χρονική στιγμή  $n$ . Οι θέσεις ή τα σημεία στα οποία μπορούμε να γνωρίζουμε τη θερμοκρασία στα μοντέλα, αναφέρονται ως κόμβοι (*nodes*), η απόσταση μεταξύ των κόμβων ως  $\Delta x$  και το χρονικό βήμα από  $n$  σε  $n+1$  ως  $\Delta t$ . Στο Σχήμα 3-1 απεικονίζεται ενδεικτικά η εξέλιξη της επίλυσης της εξίσωσης στον χρόνο.



Σχήμα 3-1: Απεικόνιση της επιρροής των τιμών των κόμβων σε μια επίλυση πεπερασμένων διαφορών μονο-διάστατης μεταβατικής θερμικής αγωγής (Watson, 2013, Bookmark: 13.3.1).

Η φιλοσοφία για την επιλογή των τιμών των μεταβλητών  $\Delta x$  και  $\Delta t$ , βασίζεται κυρίως στην αναδιοργάνωση της εξίσωσης (3.11) στην παρακάτω μορφή:

$$\begin{aligned} T_i^{n+1} &= \left( \frac{\kappa \Delta t}{\Delta x^2} \right) (T_{i+1}^n + T_{i-1}^n - 2T_i^n) + T_i^n \\ &= F \left( T_{i+1}^n + T_{i-1}^n - \left( \frac{1}{F} - 2 \right) T_i^n \right) \end{aligned} \quad (3.12)$$

Η εξίσωση έχει αναδιαταχθεί με αυτόν τον τρόπο επειδή ο όρος  $F$  είναι ο αριθμός *Fourier* της εξ. (3.4), γραμμένος ως:  $F = \frac{\kappa \Delta t}{\Delta x^2}$ .

Η εξ. (3.12) δείχνει ότι αν  $F=1/2$ , η επίδραση της θερμοκρασίας στον κόμβο  $i$  χάνεται, το οποίο είναι σαφώς παράλογο (βλ. Σχήμα 3-1), και έτσι η επίλυση λειτουργεί μόνο για  $F < 1/2$ . Επιπλέον μια αλλαγή του  $\Delta x$  οδηγεί με τη σειρά της σε μια αλλαγή του  $\Delta t$  και αντιστρόφως. Γι' αυτόν τον λόγο γίνεται χρήση κάποιων οριακών συνθηκών. Οι συνοριακές συνθήκες εισάγουν είτε μια σταθερή θερμοκρασία, είτε μια σταθερή κλίση σε έναν κόμβο, δημιουργώντας έτσι ένα «τεχνητό» κόμβο. Αυτή η μέθοδος μπορεί να ρυθμιστεί χρησιμοποιώντας ένα κατάλληλο λογιστικό φύλλο (*spreadsheet*), επειδή είναι προφανές ότι οι τιμές στους επόμενους κόμβους εξαρτώνται μόνο από τις ήδη γνωστές τιμές, και όχι από τις γειτονικές τιμές του επόμενου χρονικού βήματος (*time step*). Οι τιμές των επόμενων χρονικών στιγμών, υπολογίζονται πάντα μεμονωμένα.

Είναι όμως παράλογο να αναμένουμε ότι η τιμή  $T_i^{n+1}$  δεν επηρεάζεται από τους όρους  $T_{i-1}^{n+1}$  και  $T_{i+1}^{n+1}$ , ενώ με τη διόρθωσή της, η λύση καθίσταται πιο έμμεση. Έτσι οι τιμές για κάθε κόμβο στο επόμενο χρονικό βήμα προσδιορίζονται ταυτόχρονα επειδή εξαρτώνται η μία από την άλλη. Η εξ. (3.4) μπορεί να γραφτεί με όρους τις άγνωστες τιμές των κόμβων στο επόμενο χρονικό βήμα, με την επιρροή του προηγούμενου



χρονικού βήματος να είναι ακόμα παρούσα, μέσω του πλησιέστερου γειτονικού κόμβου,  $T_i^n$ :

$$\frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = \kappa \frac{(T_{i+1}^{n+1} + T_{i-1}^{n+1} - 2T_i^{n+1})}{\Delta x^2} \quad (3.13)$$

και αυτή η εξίσωση μπορεί να γενικευτεί ως εξής:

$$a_{i-1}T_{i-1}^{n+1} + b_iT_i^{n+1} - c_{i+1}T_{i+1}^{n+1} = d_i \quad (3.14)$$

Όπου:  $a$ ,  $b$ ,  $c$  και  $d$  είναι γνωστοί συντελεστές για κάθε κόμβο, ενσωματώνοντας τις προηγούμενες τιμές της θερμοκρασίας ( $T$ ) και του αριθμού *Fourier*. Ένα σύνολο εξισώσεων αυτού του τύπου, με κέντρο τον κάθε κόμβο, μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\begin{aligned} a_{i-1}T_{i-2}^{n+1} + b_{i-1}T_{i-1}^{n+1} + c_{i-1}T_i^{n+1} &= d_{i-1} \\ a_iT_{i-1}^{n+1} + b_iT_i^{n+1} + c_iT_{i+1}^{n+1} &= d_i \\ a_{i+1}T_i^{n+1} + b_{i+1}T_{i+1}^{n+1} + c_{i+1}T_{i+2}^{n+1} &= d_{i+1} \\ &\dots = d_{i+2} \\ \text{κ.τ.λ.} & \end{aligned} \quad (3.15)$$

Για την επίλυση συνόλων εξισώσεων όπως η εξ. (3.15), καθώς και για σύνολα που δεν είναι ακριβώς τόσο συνηθισμένα και αναμενόμενα, όπως οι εξισώσεις που περιγράφουν τη ροή σε έναν γεωθερμικό πόρο, έχουν αναπτυχθεί ειδικές υπολογιστικές τεχνικές, οι οποίες χρησιμοποιούν τριγωνικούς πίνακες προκειμένου να καταλήξουν σε ένα αποτέλεσμα.

Όλη η παραπάνω μαθηματική εισαγωγή ασχολείται με τη λύση μόνο μιας εξίσωσης, αυτής που αφορά το ενεργειακό περιεχόμενο (*energy equation*), επειδή αφορά στερεά υλικά. Για τη ροή σε πορώδη μέσα θα πρέπει να λυθούν δύο εξισώσεις: Μία που αντιπροσωπεύει τη συνέχεια της μάζας και της ορμής, σε συνδυασμό με την ενσωμάτωση του νόμου του Ντάρσι, όπως η εξ. (3.16), και μία που αντιπροσωπεύει το ενεργειακό ισοζύγιο, όπως περιγράφηκε προηγουμένως. Και οι δυο αυτές εξισώσεις πρέπει ωστόσο να γραφτούν για ένα πορώδες μέσο και στη περίπτωση μας για ένα μονοφασικό ρευστό. Για να απεικονίσουμε τις εξισώσεις αυτές με μαθηματικούς όρους σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η εξ. (3.17) που εκφράζει τη διατήρηση της μάζας αποτελεί τη καλύτερη επιλογή:



$$\varphi \mu \frac{\partial \rho}{\partial t} = \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( k \rho \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \rho \frac{\partial P}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \rho \frac{\partial P}{\partial z} \right) \right) \quad (3.16)$$

$$\varphi \frac{\partial \rho}{\partial t} + \left( \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right) = 0 \quad (3.17)$$

Ο ενδιαμέσος όγκος των διαθέσιμων στοιχείων για τη διέλευση του ρευστού ή, αλλιώς, ο όγκος των πόρων, ορίζεται ως  $\varphi \delta y \delta x \delta z$ , όπου  $\varphi$  είναι το πορώδες. Ο πρώτος όρος της ακόλουθης εξ. (3.18) αντιπροσωπεύει τη μάζα του ρευστού ανά μονάδα όγκου που περιέχεται στο όγκο ελέγχου (*block*), και ο δεύτερος όρος αντιπροσωπεύει την καθαρή ροή (ρυθμός ροής μάζας) σε κάθε μια από τις τρεις κατευθύνσεις. Για να συμπεριληφθεί η δυνατότητα παραγωγής ή επανεισαγωγής στη γεωθερμική μοντελοποίηση, θα πρέπει να περιλαμβάνονται οι όροι που θα αντιπροσωπεύουν την απαγωγή ή απομάκρυνση (*sink*) και την παροχή (*source*) του ρευστού, αντίστοιχα. Επομένως έχουμε την εξίσωση:

$$\frac{\partial A_m}{\partial t} + \nabla F_m + \dot{q}_m = 0 \quad (3.18)$$

Όπου:

- $A_m = \varphi(S_v \rho_v + S_l \rho_l)$ : η μάζα του ρευστού ανά μονάδα όγκου στον όγκο ελέγχου
- $S_v$  και  $S_l$ : οι επί τοις εκατό (% v/v) περιεκτικότητες του ταμιευτήρα σε ατμό και σε υγρό αντίστοιχα
- $\nabla$ : ο τελεστής  $\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}$
- $F_m$ : η ροή μάζας (ρυθμός ροής ανά μονάδα επιφάνειας), που διασχίζει τις συνοριακές συνθήκες του όγκου ελέγχου, όταν  $\dot{q}_m$  ο ρυθμός παραγωγής μάζας της πηγής
- $\dot{q}_m$ : ο ρυθμός ροής μάζας (*mass flux*)

Ο νόμος του Ντάρσι εισάγεται στο ζεύγος εξισώσεων διατήρησης της ορμής και συνέχειας της μάζας. Ο πιο σημαντικός όρος στην εξίσωση της ορμής έχει παραμεληθεί, καθώς η κύρια εφαρμογή του μέχρι τώρα ήταν σε οριζόντιους σχηματισμούς μέτριου πάχους. Η ενεργειακή εξίσωση μπορεί να επεξεργαστεί με έναν παρόμοιο τρόπο, χρησιμοποιώντας την εξίσωση της εσωτερικής ενέργειας, αλλά υιοθετώντας τη μορφή της εξ. (3.18). Έτσι προκύπτει η παρακάτω σχέση:



$$\frac{\partial A_e}{\partial t} + \nabla F_e + \dot{q}_e = 0 \quad (3.19)$$

Όπου:  $A_e = (1 - \varphi)\rho_r U_r + \varphi(S_g \rho_g U_g + S_f \rho_f U_f)$  (3.20)

και  $F_e = -\rho_g h_g \frac{k k_{rg}}{\mu_g} (\nabla P - \rho_g g) - \rho_f h_f \frac{k k_{rf}}{\mu_f} (\nabla P - \rho_f g) - \kappa \nabla T$  (3.21)

Ως  $S$  ο κορεσμός των φάσεων ( $S_g$ ,  $S_l$ , οι επί τοις εκατό (% v/v) περιεκτικότητα του ταμειυτήρα σε ατμό και σε υγρό αντίστοιχα),  $h$  το πάχος του σχηματισμού,  $U$  η ειδική εσωτερική ενέργεια,  $\varphi$  το πορώδες,  $\rho$  η πυκνότητα του ρευστού και  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας, για την περιγραφή της ροής ενέργειας  $F_e$  και της ενέργειας του ρευστού ανά μονάδα όγκου  $A_e$ . Όπου  $\dot{q}_e$  ο όρος που περιγράφει την πηγή θερμότητας.

Επόμενο βήμα αποτελεί η διακριτοποίηση των εξισώσεων (3.18) και (3.19), με τέτοιο τρόπο ώστε να αποτελούν ένα ζευγάρι για κάθε όγκο ελέγχου ή κόμβου (*node*) του μοντέλου. Επειδή όμως ο καθορισμός των μεταβλητών είναι συνήθως έμμεσος και μη γραμμικός, με συντελεστές που αποτελούν συναρτήσεις της πίεσης ( $P$ ) και της θερμοκρασίας ( $T$ ), θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια επαναληπτική μέθοδος για την επίλυσή τους. Για τον λόγο αυτό, γράφονται με κατάλοιπα<sup>4</sup> ( $R$ ) (*residuals*) για κάθε κόμβο (*node*) και χρονικό βήμα (*time step*). Έτσι, για τον κόμβο  $i$  κατά το χρονικό βήμα  $n+1$ , θα έχουμε:

$$\left[ \frac{\partial A_m}{\partial t} + \nabla F_m + \dot{q}_m \right]_i^{n+1} = [R_m]_i^{n+1} \quad (3.22)$$

$$\left[ \frac{\partial A_e}{\partial t} + \nabla F_e + \dot{q}_e \right]_i^{n+1} = [R]_i^{n+1} \quad (3.23)$$

Ρυθμίζοντας το χρονικό βήμα, τα κατάλοιπα μπορούν να ελαχιστοποιηθούν μέχρι να φτάσουν κάποιες ικανοποιητικά μικρές τιμές. Η συμπερίληψη ενός αερίου διαλυμένου στο ρευστό του ταμειυτήρα, απαιτεί την εισαγωγή μιας τρίτης μεταβλητής και η ενσωμάτωση του CO<sub>2</sub>, που προστέθηκε από τους Zyvoloski, O'Sullivan, (1980), αυξάνει σημαντικά την αριθμητική πολυπλοκότητα του μοντέλου, και γι' αυτό δεν αναλύεται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

<sup>4</sup> Η διαφορά της παρατηρούμενης τιμής της ανεξάρτητης μεταβλητής που συναντάται εντός του συνόλου δεδομένων από την τιμή που προβλέπει το μοντέλο παλινδρόμησης, για τις ίδιες τιμές των ανεξάρτητων μεταβλητών, καλείται ως κατάλοιπο (**Residual**).



Η μέχρι τώρα περιγραφή της λειτουργίας των αριθμητικών μοντέλων προϋποθέτει τη χρήση ενός κανονικού πλέγματος από κόμβους, που καλύπτουν όλη την περιοχή ενδιαφέροντος. Ένας γεωλογικός πόρος μεγάλου όγκου, διαιρεμένος σε μικρότερα τμήματα, στα σημεία εκείνα όπου η ροή είναι πιο πολύπλοκη, απαιτεί την επίλυση ενός μεγαλύτερου αριθμού εξισώσεων. Οι αριθμητικές σχέσεις που είναι ικανές να διαχειριστούν οποιαδήποτε ακανόνιστη κατανομή κόμβων, εισήχθησαν από τους [Narasimhan, Witherspoon \(1976\)](#) και ονομάζονται: «μέθοδος ολοκληρωμένης πεπερασμένης διαφοράς (*integrated finite difference method*)».

Ο προσομοιωτής του *FEFLOW*, ο οποίος χρησιμοποιεί αυτήν τη μέθοδο αριθμητικής επίλυσης, διακριτοποιεί *blocks* που ορίζονται από τον ίδιο τους τον όγκο, την περιοχή διασύνδεσης με άλλα γειτονικά *blocks* και την απόστασή τους από τον κόμβο που βρίσκεται στη διεπιφάνεια ή τη ζώνη μεταξύ τους. Επιπλέον, ο χρόνος διακρίνεται έμμεσα, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των αντίστροφων διαφορών και το σύνολο μη γραμμικών εξισώσεων έχει συντελεστές, οι οποίοι συχνά αποτελούν πολύπλοκες συναρτήσεις ανεξάρτητων μεταβλητών. Η επαναλαμβανόμενη και ταυτόχρονη επίλυση αποτελεί αναγκαιότητα, με τη μέθοδο *Newton–Raphson* να χρησιμοποιείται συχνότερα. Τέλος, το πρόγραμμα διαθέτει αυτόματο έλεγχο μήκους βημάτων, το οποίο αρχικά ορίζεται από τον χρήστη αλλά έπειτα μεταβάλλεται αυτόματα, για να αποφευχθεί η σπατάλη υπολογιστικού χρόνου και να διατηρηθεί η ακρίβεια, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο αυτής της ενότητας.

### 3.3 Λειτουργία του Προγράμματος Προσομοίωσης *FEFLOW*

Όπως έχουμε ήδη προαναφέρει και στην [ενότητα 3.2](#), το *FEFLOW* (*Finite Element subsurface FLOW system*) (σύστημα πεπερασμένων στοιχείων για υπόγεια ροή), είναι ένα πρόγραμμα υπολογιστή που επικεντρώνεται στην προσομοίωση της ροής των υπόγειων υδάτων, της μεταφοράς μάζας και θερμότητας σε πορώδη και ρηγματώδη μέσα. Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για να επιλύσει την εξίσωση ροής των υπόγειων υδάτων, καθώς και αυτές που περιγράφουν τη μεταφορά μάζας και θερμότητας, συμπεριλαμβανομένων των επιπτώσεων της πυκνότητας του ρευστού και της χημικής κινητικής σε συστήματα πολλαπλών συστατικών. Η ανάπτυξη του προγράμματος ξεκίνησε από τον *Hans-Jörg G. Diersch* το 1979 ([Diersch, 1979](#)), στο Ινστιτούτο Μηχανικής της Γερμανικής Ακαδημίας Επιστημών στο Βερολίνο και συνεχίστηκε έως το 1990.



Η θεωρητική βάση του *FEFLOW* περιγράφεται πλήρως στο περιεκτικό βιβλίο του ή οδηγό χρήσης του *FEFLOW* (Diersch, 1979). Ως λογισμικό καλύπτει ένα ευρύ φάσμα φυσικών και υπολογιστικών θεμάτων στον τομέα της μοντελοποίησης του πορώδους-ρηγματώδους μέσου.

Το *FEFLOW* μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για να περιγράψει τις χωρικές και χρονικές κατανομές των αντιδράσεων των υπόγειων χημικών ρύπων, να προσομοιώσει γεωθερμικές διεργασίες και να προβλέψει τη διάρκεια μεταφοράς χημικών στοιχείων μέσα από υπόγειους υδροφορείς. Επίσης, μπορεί να συμβάλει στην εξυγίανση στρατηγικών πλάνων και σχεδιασμών που θα οδηγήσουν στη μετέπειτα εκμετάλλευση ενός συστήματος, αλλά και στον σχεδιασμό εναλλακτικών και αποτελεσματικών σχημάτων παρακολούθησης (*monitoring schemes*). Όσον αφορά την προσομοίωση γεωθερμικών ταμιευτήρων, που είναι και το αντικείμενο της παρούσας εργασίας, το *FEFLOW* χρησιμοποιεί κάποιες μαθηματικές σχέσεις για την επίλυση των εξισώσεων που περιγράφουν τη ροή και τη μεταφορά θερμότητας σε έναν γεωθερμικό ταμιευτήρα, οι οποίες παρουσιάζονται συνοπτικά στη συνέχεια (βλ. ενότητα 3.3.1).

### **3.3.1 Κυρίαρχες Εξισώσεις Ροής και Μεταφοράς Θερμότητας στο *FEFLOW***

Η ακριβής διατύπωση του συνόλου των εξισώσεων δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις σύμφωνα με το βιβλίο του Diersch (Diersch, 1979).

Υπό συνθήκες σταθερής θερμικής αγωγιμότητας του πορώδους μέσου (σχηματισμού), η εξίσωση της θερμικής ενέργειας απλοποιείται σύμφωνα με την εξίσωση διάχυσης τύπου Poisson (3.24):

$$\nabla(\lambda \nabla T) + S = 0 \quad (3.24)$$

Όπου:  $\lambda$  η θερμική αγωγιμότητα του σχηματισμού ( $W/m \cdot K$ ), και  $S$  η εσωτερική ραδιογενής παραγωγή θερμότητας ( $\mu W/m^3$ ), ως όρος που περιγράφει την πηγή θερμότητας. Κάτω από παρόμοιες παραδοχές, υπό σταθερή δηλαδή πυκνότητα και υπό σταθερή ροή του ρευστού, η ισορροπία της εξίσωσης της μάζας του ρευστού απλοποιείται ως εξής:

$$\nabla(\rho^f q^f) = \rho^f Q \quad (3.25)$$





Όπου:  $\rho^f$  η πυκνότητα του ρευστού,  $Q$  η εισαγωγή/απαγωγή (*Source/Sink*) μάζας ρευστού, και  $q^f$  η τριών διαστάσεων περιγραφή της ταχύτητας του ρευστού μετασχηματισμένη σύμφωνα με τον *Darcy* ως:

$$q^f = -K(\nabla h) \quad (3.26)$$

Όπου:  $K$  ο τανυστής της υδραυλικής διαπερατότητας ( $m/s$ ) και  $h$  το υδραυλικό φορτίο ( $m$ ) (*hydraulic head*).

### 3.3.2 Συνοριακές Συνθήκες και Ρυθμίσεις στο FEFLOW

Για την επίλυση των παραπάνω εξισώσεων, καθώς και όλου του προβλήματος προσομοίωσης ενός γεωθερμικού ταμιευτήρα, πρέπει να εισαχθούν, εκτός από τις αρχικές συνθήκες (*initial conditions*) που επικρατούν στον φυσικό ταμιευτήρα, και κάποιες συνοριακές συνθήκες (*boundary conditions* ή *BC*). Αυτό γίνεται κυρίως για τον καθορισμό της φυσικής ερμηνείας του ταμιευτήρα στο υπολογιστικό πρόγραμμα, έτσι ώστε το τελευταίο να είναι σε θέση να υπολογίσει τη ροή και τη μεταφορά θερμότητας μέσω των ανάλογων διαφορικών εξισώσεων.

Από προεπιλογή, όλα τα όρια ενός μοντέλου στο *FEFLOW* είναι αδιαπέρατα. Αυτό σημαίνει ότι αν δημιουργήσουμε ένα απλό τρισδιάστατο τετραγωνικό ταμιευτήρα (δηλ. ένα «κουτί»), αυτό θα είναι κλειστό, δηλαδή δε θα λαμβάνει χώρα κανένα είδος ροής προς αυτό από το εξωτερικό περιβάλλον. Για να επιτραπούν ροές από μέσα προς τα έξω ή από έξω προς τα μέσα του μοντέλου, θα πρέπει να καθοριστούν οι κατάλληλες συνοριακές συνθήκες. Αυτό συμβαίνει στα περισσότερα μοντέλα προσομοίωσης. Ειδικότερα όμως το *FEFLOW* υποστηρίζει τρεις βασικούς τύπους συνοριακών συνθηκών για τη ροή μάζας, την ηλικία των υπόγειων υδάτων και τη μεταφορά θερμότητας, οι οποίες μπορούν να οριστούν είτε ως σταθερές στον χρόνο, είτε ως χρονικά μεταβαλλόμενες (*varying-time values*). Για τη ροή μάζας και τη μεταφορά θερμότητας, ειδικότερα, διατίθενται έξι επιμέρους τύποι οριακών συνθηκών, οι οποίες ορίζονται από τις 3 κύριες μεταβλητές του συστήματος: την πίεση, τη θερμοκρασία και τον κορεσμό του υγρού σε αέριο ή του αερίου σε υγρό:

- *Dirichlet-type BCs*
- *Neumann-type BCs*
- *Cauchy-type BCs*
- *Nodal source/sink type BCs*



- *Multilayer Well (mass or heat flow)*
- *Borehole Heat Exchanger (heat transport)*

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι 3 πρώτες συνοριακές συνθήκες, ως προς τη χρήση τους στα προγράμματα προσομοίωσης: *Dirichlet*, *Neumann* και *Cauchy*, οι οποίες και αναλύονται περισσότερο παρακάτω ([FEFLOW User's Manual, 2013](#)), με αναφορά στη ροή και τη μεταφορά θερμότητας σε ένα υπόγειο ρευστό. Οι επόμενες 3 συνθήκες [*Nodal source/sink type BCs*, *Multilayer Well (flow)* και *Borehole Heat Exchanger (heat transport)*] αφορούν τον τύπο των γεωτρήσεων που θα περιλαμβάνει το μοντέλο και κυρίως τον τρόπο με τον οποίο θα γίνεται εισροή ή εκροή μάζας από αυτές. Περισσότερες λεπτομέρειες για αυτές δεν θα αναλυθούν στην παρούσα εργασία.

Οριακές Συνθήκες *Dirichlet* (*Dirichlet-type BCs*): Αυτός ο τύπος οριακών συνθηκών ή οριακές συνθήκες 1ου είδους, καθορίζει μια χρονικά σταθερή ή μια χρονικά μεταβαλλόμενη τιμή για την κύρια μεταβλητή που μας απασχολεί (π.χ. πίεση ή θερμοκρασία) σε έναν κόμβο. Αυτή μπορεί να είναι π.χ. το υδραυλικό φορτίο, αν αναφερόμαστε στη ροή ρευστού, ή η θερμοκρασία, αν αναφερόμαστε στη μεταφορά θερμότητας του ρευστού. Η εισροή ή η εκροή προς ή από την υπό εξέταση περιοχή του μοντέλου (*domain*) στον κόμβο, μπορεί να υπολογιστεί κατά την προσομοίωση.

Σε ορισμένους τύπους μοντέλων, όπως κατά τις εξαρτώμενες από την πυκνότητα προσομοιώσεις, είναι δυνατό να ορίσουμε την κύρια μεταβλητή του υδραυλικού φορτίου εισάγοντας ή την πίεση, ή τον κορεσμό, ή την περιεκτικότητα σε υγρασία.

Οριακές Συνθήκες *Neumann* (*Neumann-type BCs*): Οι οριακές συνθήκες τύπου ροής περιγράφουν την εισροή ή εκροή μάζας ή ενέργειας στα άκρα των στοιχείων (*element edges*) (2D) ή στις επιφάνειες των στοιχείων (*element faces*) (3D). Αν και καθορίζονται μέσω των κόμβων, οι συγκεκριμένες συνθήκες για να είναι αποτελεσματικές, πρέπει να εφαρμόζονται σε τουλάχιστον δύο παρακείμενους κόμβους κατά την 2D απεικόνιση, ή σε όλες τις επιφάνειες των κόμβων κατά την 3D απεικόνιση. Οι τιμές στην προσομοίωση ροής δίνονται από την εξίσωση παροχής του *Darcy*.

Οριακές Συνθήκες *Cauchy* (*Cauchy-type BCs*): Αυτού του είδους οι οριακές συνθήκες μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την περιγραφή ποταμών, λιμνών και γνωστών υδραυλικών φορτίων, σε μια απόσταση από το όριο του μοντέλου [μερικές φορές ονομάζονται και όρια «γενικού φορτίου» (*general head boundaries*)]. Οι συνθήκες αυτές χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή ιδιοτήτων μεταφοράς, μεταξύ μιας τιμής αναφοράς για την πρωτεύουσα μεταβλητή (υδραυλικό φορτίο, πίεση ή θερμοκρασία) και μιας πραγματικής τιμής μέτρησης της μεταβλητής αυτής. Η υδραυλική αγωγιμότητα (π.χ. οι



ιδιότητες ενός στρώματος του ταμειυτήρα), η αγωγιμότητα μάζας ή η θερμική αγωγιμότητα ορίζονται ως ιδιότητες υλικού.

Ένα παράδειγμα κατανόησης των τριών αυτών διαφορετικών τύπων οριακών συνθηκών αποτελεί ένα κλειστό σύστημα. Σε ένα κλειστό σύστημα ουσιαστικά δεν έχουμε καμία εναλλαγή μάζας με την εξωτερική του συστήματος περιοχή (*domain*). Αυτό σημαίνει ότι έχουμε μηδενική παροχή και επομένως για να το ορίσουμε αυτό στο πρόγραμμα, θα πρέπει να εισάγουμε στην οριακή συνθήκη τύπου *Neumann* ότι η παροχή είναι ίση με το μηδέν ( $Q=0$ ). Αν στο σύστημα υπάρχει κάποιο ρήγμα, τότε θα πρέπει να εισάγουμε ξανά την οριακή συνθήκη τύπου *Neumann*, αλλά αυτή τη φορά για μια συγκεκριμένη τιμή του  $Q$ . επίσης, αν έχουμε επαφή με ένα ρήγμα σταθερής πίεσης, τότε εισάγουμε την οριακή συνθήκη *Dirichlet*, κ.τ.λ.

Συμπερασματικά, οι βασικοί τρεις τύποι οριακών συνθηκών (*Dirichlet*, *Neumann*, *Cauchy*) αποτελούνται από το κομμάτι που αναφέρεται στη ροή του ρευστού και το κομμάτι που αναφέρεται στη μεταφορά θερμότητας, υπολογίζοντας κάθε φορά την εκάστοτε πίεση και θερμοκρασία σε κάθε κόμβο, αντίστοιχα. Έτσι, έχουμε τρεις διαφορετικές συνοριακές συνθήκες με 2 μεταβλητές η κάθε μία, αντίστοιχα (πίεση και θερμοκρασία), οι οποίες αποτελούν συνάρτηση των 3 διαστάσεων  $x, y, z$  και του χρόνου  $t$ . Ο κορεσμός σε ατμό δεν λαμβάνεται υπόψη, καθώς ασχολούμαστε με μονοφασικά συστήματα.

Ουσιαστικά οι συνοριακές συνθήκες τύπου *Dirichlet* υπολογίζουν την πίεση και τη θερμοκρασία σε ένα συγκεκριμένο σημείο για κάθε χρονική στιγμή. Στις συνοριακές συνθήκες τύπου *Neumann* υπολογίζεται ο ρυθμός μεταβολής της πίεσης (*παροχή*), σύμφωνα με τον νόμο του Ντάρσι, και ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας (*θερμική ενέργεια ή παροχή ενέργειας*) σε ένα σημείο για κάθε χρονική στιγμή. Τέλος, η οριακή συνθήκη τύπου *Cauchy* αποτελεί μια οριακή συνθήκη που βρίσκεται «ανάμεσα» στις άλλες δύο. Ουσιαστικά εδώ ούτε η πίεση, ούτε η θερμοκρασία είναι σταθερές. Η παροχή όμως που εισέρχεται στον ταμειυτήρα είναι ανάλογη του  $\Delta p$ , δηλαδή της διαφοράς πίεσης. Έτσι, η εισροή μάζας ορίζεται από τη διαφορά πίεσης κάθε κόμβου από μια τιμή πίεσης αναφοράς, σε ένα συγκεκριμένο σημείο. Ομοίως και στη μεταφορά θερμότητας (διαφορά θερμοκρασίας). Ανάλογα πόσο μεγάλη είναι αυτή η διαφορά πίεσης ή θερμοκρασίας, αντίστοιχα, τόσο περισσότερη μάζα ή θερμότητα εισάγεται από το πρόγραμμα στο σύστημα.

Εκτός από τις βασικές αυτές συνοριακές συνθήκες θα πρέπει να οριστεί στο πρόγραμμα και το είδος του προβλήματος το οποίο θα προσομοιώσει. Συγκεκριμένα, θα



πρέπει να οριστεί αν στο μοντέλο θα υπάρχει μεταφορά μάζας ή/και μεταφορά θερμότητας. Σε κάθε περίπτωση, το πρόβλημα πρέπει να επιλυθεί για κάθε μια από τις καταστάσεις που βρίσκεται ο ταμιευτήρας: την αρχική σταθερή κατάσταση (*steady state*) και τη μεταβλητή κατάσταση (*transient state*) που παρουσιάζεται μετά την ανθρωπογενή παρέμβαση σε αυτόν (παραγωγή και επανεισπαγωγή). Στη σταθερή κατάσταση, το *FEFLOW* υπολογίζει την κατάσταση ενός μοντέλου με χρονικά σταθερές τις συνοριακές συνθήκες και τις ιδιότητες των υλικών, μετά από θεωρητικά άπειρο χρονικό διάστημα (π.χ. η προσομοίωση των μέσων συνθηκών σε έναν υδροφόρο ορίζοντα πριν την ανθρωπογενή παρέμβαση). Αντίθετα, στη μεταβλητή ή μεταβατική κατάσταση, η προσομοίωση γίνεται για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Το χρονικό διάστημα αυτό χωρίζεται σε χρονικά βήματα (*time-steps*), των οποίων τα αποτελέσματα υπολογίζονται ξεχωριστά (*χρονική διακριτοποίηση*). Ο τρόπος επίλυσης, ωστόσο, μιας κατάστασης σταθερής ροής και μιας μεταβλητής κατάστασης μεταφοράς μάζας ή/και θερμότητας, απαιτεί την επίλυση της σταθερής κατάστασης του μοντέλου ροής ως αρχική συνθήκη για τη μεταβλητή κατάσταση.

Στη συγκεκριμένη ακολουθήθηκε αυτός ο τρόπος επίλυσης. Με βάση το αρχικό μοντέλο εκτελέστηκε προσομοίωση σε κατάσταση *steady state* και, στη συνέχεια, τα αποτελέσματα αυτής της προσομοίωσης αποτέλεσαν τις αρχικές συνθήκες για τη συνακόλουθη προσομοίωση της μεταβλητής κατάστασης. Για να είναι καλύτερα κατανοητός ο τρόπος επίλυσης που ακολουθήθηκε, δίνεται ένα παράδειγμα που αφορά τη παρούσα εργασία, αλλά και γενικότερα αρκετά γεωθερμικά πεδία στη φύση.

Ένας «ανοιχτός» ή «κλειστός» ταμιευτήρας (δηλ. ένας ταμιευτήρας που επικοινωνεί με τα γειτονικό γεωλογικό του περιβάλλον ή είναι απομονωμένος από αυτό, αντίστοιχα), πριν την εκμετάλλευσή του, βρίσκεται, όπως είναι φυσικό, σε θερμοκρασιακή ισορροπία. Πιο συγκεκριμένα, σε έναν «ανοιχτό» γεωθερμικό ταμιευτήρα υπάρχει κάποιο είδος ροής νερού από το γειτονικό γεωλογικό του περιβάλλον προς το εσωτερικό του, ανάλογα με την υδρογεωλογία και τη γεωμορφολογία της περιοχής. Για παράδειγμα, μπορεί να υπάρχει κάποιο είδος ρήγματος μέσω του οποίου εισάγεται θερμό νερό στον υδροφόρο ορίζοντα, με αποτέλεσμα να αυξάνει τη θερμοκρασία του νερού μέσα σε αυτόν. Αντίθετα, στο εσωτερικό των «κλειστών» γεωθερμικών ταμιευτήρων το παγιδευμένο νερό που περιέχουν δεν επικοινωνεί με τα γειτονικά γεωλογικά περιβάλλοντα και δεν υπάρχει κάποιου είδους ροή από και προς αυτό. Η μόνη ροή που μπορεί να παρατηρηθεί εντός του ταμιευτήρα μπορεί να αποδοθεί στη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των ανώτερων και των κατώτερων οριζόντων του



ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΣΕ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ  
ΜΕ ΣΧΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ-ΕΠΑΝΕΙΣΠΙΕΣΗΣ

ταμιευτήρα, εξαιτίας της θέρμανσης συνήθως των κατώτερων οριζόντων από το εσωτερικό της Γης.

Και στις δύο περιπτώσεις, ύστερα από εκατομμύρια χρόνια από τον σχηματισμό των ταμιευτήρων, έχει επέλθει ισορροπία τόσο ως προς τη θερμοκρασία όσο και ως προς την πίεση, η οποία θεωρείται ως σταθερή κατάσταση ή κατάσταση *steady state*. Αυτή η κατάσταση θα πρέπει να υπολογιστεί και να προσομοιωθεί από το μοντέλο, πριν προχωρήσουμε στην εκμετάλλευση του πεδίου. Η εκμετάλλευση του πεδίου αποτελεί κατάσταση μεταβλητή (*transient state*), καθώς τα δεδομένα που αφορούν τις ιδιότητες και τη ροή του ρευστού αλλάζουν με τον χρόνο, ανάλογα με τη διάρκεια της εκμετάλλευσης. Απαραίτητη προϋπόθεση για την εκπόνηση ενός ορθολογικού σχήματος εκμετάλλευσης είναι να προσδιοριστούν, κατά τη φάση αυτή, τα *time-steps* και οι ποσότητες ρευστού που θα παράγονται και θα επανεισάγονται στον ταμιευτήρα, σε κάθε *time-step*.



## 4. ΕΙΔΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΝΟΣ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ

### 4.1 Εισαγωγή

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα αναλυθεί η διαδικασία ανάπτυξης ενός μοντέλου στο υπολογιστικό πρόγραμμα *FEFLOW*. Το μοντέλο για το οποίο γίνεται λόγος, αφορά έναν υποθετικό κλειστό γεωθερμικό ταμιευτήρα, του οποίου τα δεδομένα προήλθαν από βασικά στοιχεία άλλων γεωθερμικών πεδίων (π.χ. θερμοκρασία, βάθος κ.τ.λ.). Πρόκειται για έναν ταμιευτήρα μεγάλου βάθους, υψηλής ενθαλπίας και εσωτερικής θερμοκρασίας, και απότερο σκοπό αποτελεί η εκμετάλλευσή του για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το σχήμα της περιοχής που περιλαμβάνεται στο μοντέλο (*domain*) βασίστηκε στην περιοχή *Friedrichshagen* του νοτιοανατολικού Βερολίνου, στη Γερμανία, η οποία αρχικά μοντελοποιήθηκε για την πρόβλεψη εξέλιξης της ρύπανσης των υπόγειων υδάτων της από συγκεκριμένες πηγές. Βασικά δεδομένα της περιοχής αυτής, που αφορούν κυρίως τη μορφολογία, τη διαπερατότητα και το πορώδες των υπεδαφικών σχηματισμών, διατηρήθηκαν. Άλλα δεδομένα που αφορούν τη θερμοκρασία των ρευστών εντός του ταμιευτήρα, το βάθος, τη δομή και τη θερμοκρασία του κατώτερου ορίζοντα, αλλά και τις θέσεις και τον αριθμό των γεωτρήσεων, προήλθαν από άλλους γεωθερμικούς ταμιευτήρες. Στόχος της μοντελοποίησης και της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να προσομοιωθεί η λειτουργία του ταμιευτήρα κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες παραγωγής και επανεισαγωγής, και τελικά να δοκιμαστεί ως την εκμετάλλευσή του ταμιευτήρα για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και την εκπλήρωση των απαιτήσεων για αιεφορία, για ένα χρονικό διάστημα 100 ετών τουλάχιστον.

Αξίζει να σημειωθεί ότι μια επένδυση που αφορά στην εκμετάλλευσή γεωθερμίας για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας συνήθως σχεδιάζεται για ένα χρονικό διάστημα 25-30 ετών. Ωστόσο, το νόημα των προσομοιώσεων είναι να εξεταστεί κατά πόσο το δυνατόν στη περίοδο των 25-30 ετών, ο ταμιευτήρας λειτουργεί αποδοτικά και υπο ποιο σχήμα παραγωγής/επανεισαγωγής. Θέματα όπως το τι θα συμβεί στο ταμιευτήρα μετά από π.χ. 100 χρόνια μετά την ολοκλήρωση της εκμετάλλευσής ή αν τελικά θα μπορέσει να επανέλθει στις αρχικές του συνθήκες, αφορούν περισσότερο την αιεφορία των γεωθερμικών ταμιευτήρων. Στη παρούσα εργασία, επιλέχτηκε το χρονικό διάστημα των 100 χρόνων ώστε να ερευνηθεί κατά πόσο τελικά επηρεάζεται θερμοκρασιακά ο



ταμιευτήρας, από ένα πρόγραμμα εκμετάλλευσης 16 συνολικών γεωτρήσεων παραγωγής/επανεισαγωγής.

Πριν γίνουν όλα αυτά όμως, θα πρέπει να κατασκευαστεί στο λογισμικό το μοντέλο του ταμιευτήρα. Αρχικό βήμα αποτελεί ο προσδιορισμός της σταθερής κατάστασης (*steady state*) του ταμιευτήρα, πριν καν την όρυξη των πρώτων γεωτρήσεων, ώστε αυτή να αποτελέσει τις αρχικές συνθήκες για τον προσδιορισμό της μεταβατικής κατάστασης (*transient state*) του (βλ. ενότητα 3.3.2).

Για το προσδιορισμό της σταθερής κατάστασης του μοντέλου θα πρέπει αρχικά ανά οριστεί το *domain* της περιοχής. Εφόσον αυτό οριστεί θα πρέπει στη συνέχεια να διαχωριστεί σε επιμέρους κομμάτια (*finite elements*) έτσι ώστε να είναι πιο εύκολος ο τρόπος επεξεργασίας του από το λογισμικό. Η επίλυση των διαφορικών εξισώσεων γίνεται για κάθε ένα από αυτά τα κομμάτια και επομένως η χρήση κάποιων αρχικών και συνοριακών συνθηκών κρίνεται αναγκαία. Εφόσον οριστούν όλοι οι περιορισμοί του στατικού μοντέλου τότε αυτό είναι σε θέση να τρέξει, έτσι ώστε να υπολογιστεί η διακύμανση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του ταμιευτήρα. Η επίλυση του στατικού μοντέλου αποτελεί τη βάση για το στήσιμο του μεταβατικού μοντέλου, μέσω του οποίου θα προσομοιωθεί η λειτουργία του ταμιευτήρα κάτω από ένα σύστημα εκμετάλλευσης μέσω γεωτρήσεων παραγωγής/επανεισαγωγής. Όταν πλέον το στατικό μοντέλο ολοκληρωθεί, ξεκινάει η ανάπτυξη του μεταβατικού σταδίου, κατά το οποίο θα πρέπει πάλι να οριστούν αρχικές και συνοριακές συνθήκες, οι οποίες στη περίπτωση μας αναφέρονται στη λειτουργία και δομή των γεωτρήσεων. Μόλις η διαδικασία αυτή ολοκληρωθεί το μεταβατικό μοντέλο είναι και αυτό σε θέση να τρέξει, ολοκληρώνοντας έτσι το σύνολο της προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης καταγράφονται σε διαφορετικά αρχεία, έτσι ώστε να είναι προσβάσιμη η μετέπειτα ανάλυση τους. Όλα τα παραπάνω αναλύονται με περισσότερες λεπτομέρειες στις παρακάτω ενότητες.



## 4.2 Ανάπτυξη Στατικού Μοντέλου (Steady-state model)

### 4.2.1 Γεωμετρία του Μοντέλου

Αρχικά, για την ανάπτυξη του μοντέλου, εισάγονται στο *FEFLOW* 2 κύριοι χάρτες που δίνουν τις πληροφορίες για τη γεωγραφία και τη γεωμετρία της συγκεκριμένης περιοχή μελέτης. Πρόκειται για αρχεία εικόνων *Raster*<sup>5</sup> (.tif), δηλαδή για αρχεία εικόνων γεωαναφοράς (*georeference*) της περιοχής του μοντέλου για καλύτερο προσανατολισμό και αρχεία γεωγραφικών χαρακτηριστικών, όπως τα *shape-files*<sup>6</sup> (.shp). Τα *shape-files* αποτελούν αρχεία ενός πολυγωνικού χάρτη, τα πολύγωνα του οποίου υποδηλώνουν τις εξωτερικές συνοριακές περιοχές του μοντέλου. Στο *FEFLOW*, ωστόσο, μας ενδιαφέρει κυρίως το σχήμα του ταμιευτήρα και όχι τόσο η γεωγραφική του τοποθεσία.

Στην *Εικόνα 4-1* παρουσιάζεται η έκταση και το σχήμα του ταμιευτήρα σε 2D διαστάσεις, κατά την προβολή *supermesh view*<sup>7</sup> στο *FEFLOW*. Με κόκκινες κουκίδες απεικονίζονται τα δυνητικά σημεία τοποθέτησης των γεωτρήσεων παραγωγής και επανεισαγωγής, ύστερα από μελέτη. Στο στάδιο του *supermesh*, πρόκειται να γίνει η διακριτοποίηση (*discretization*) του χώρου του ταμιευτήρα, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3 (βλ. ενότητα 3.2), για την ευκολότερη μετατροπή των διαφορικών εξισώσεων σε μη γραμμικές και τελικά σε γραμμικές αλγεβρικές εξισώσεις. Η εισαγωγή των δυνητικών θέσεων των γεωτρήσεων γίνεται στο στάδιο του *supermesh* και πριν τη διακριτοποίηση του μοντέλου σε *finite elements*. Ο λόγος για τον οποίο γίνεται αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι γύρω από τις γεωτρήσεις παρατηρείται εντατικότερη ροή ενώ ταυτόχρονα εμφανίζεται και εντονότερη πτώση ή αύξηση της πίεσης. Έτσι λόγω των απότομων αυτών μεταβολών συνήθως συνιστάται μια πιο λεπτομερής διακριτοποίηση στα σημεία αυτά (*point refinement*), καθώς χρειάζεται ένα πιο λεπτομερές πλέγμα για να γίνουν αντιληπτές. Έτσι επιλέγεται να γίνει εντονότερη διακριτοποίηση στα σημεία αυτά

<sup>5</sup> Τα αρχεία εικόνων τύπου Ράστερ (**Raster**) (ή αλλιώς αρχεία γραφικών Ράστερ ή εικόνες *bitmap*), χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση δεδομένων στη μορφή μιας δομής μήτρας κουκίδων, για την αναπαράσταση μιας εικόνας. Με απλά λόγια, αποτελούνται από ένα ορθογώνιο πλέγμα (*pixel*), το καθένα από το οποίο αναπαριστά ένα μεμονωμένο χρώμα. Αποτελούν μια από τις πιο συνηθισμένες μορφές αρχείων για την αποθήκευση δεδομένων εικόνας, με ευρεία συνήθως χρήση σε γραφικά για ιστοσελίδες, ψηφιακές φωτογραφίες και εφαρμογές *GIS*.

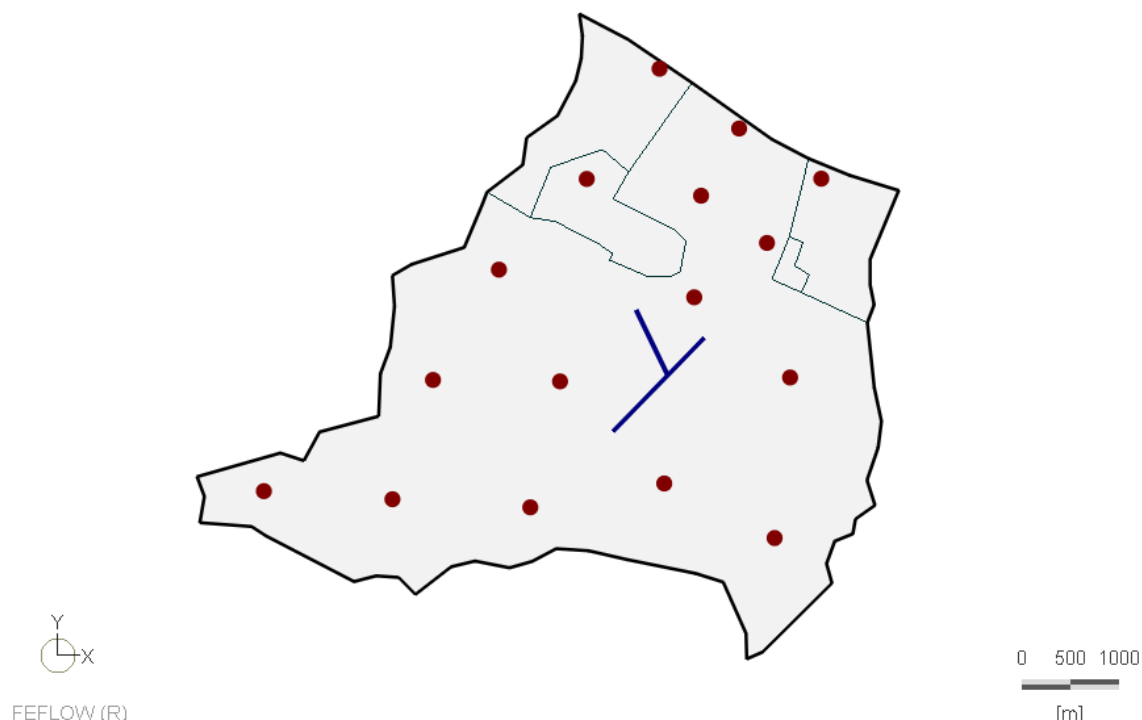
<sup>6</sup> Τα **shape-files** αποτελούν απλά, με μη τοπολογικές μορφές αρχεία, που χρησιμεύουν στην αποθήκευση της γεωμετρικής θέσης και την απόδοση πληροφοριών σχετικά με τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά μιας περιοχής, τα οποία μπορούν να αναπαρασταθούν με σημεία, γραμμές ή πολύγωνα (περιοχές).

<sup>7</sup> Ως **Supermesh View** χαρακτηρίζονται τα παράθυρα προβολής του *FEFLOW* που παρέχουν μια κάτοψη του *domain* του μοντέλου (2D οριζόντια μοντέλα), ή μια πλάγια όψη της 2D διατομής του *domain* του μοντέλου. Η συγκεκριμένη προβολή απεικονίζει επίσης το πλέγμα που δημιουργείται από τη διακριτοποίηση του χώρου. Γενικά ο όρος **supermesh** καθορίζει το πλαίσιο για τη δημιουργία του πλέγματος της διακριτοποίησης του *domain* του μοντέλου. Σε πιο απλουστευμένες περιπτώσεις το *supermesh* αποτελείται μόνο από ένα πολύγωνο, που καθορίζει το εξωτερικό όριο της περιοχής του μοντέλου, ενώ σε πιο σύνθετες μπορεί να περιέχει εκατοντάδες πολύγωνα, γραμμές και σημεία.





από το αντίστοιχο μενού του *FEFLOW* (*meshing panel*). Για το σκεπτικό επιλογής των θέσεων των γεωτρήσεων θα γίνει σχετική αναφορά στην ενότητα 4.4.1, καθώς απαιτήθηκε ιδιαίτερη διερεύνηση.



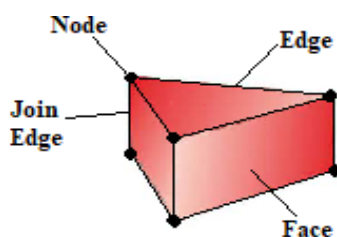
**Εικόνα 4-1: Προβολή supermesh του υποθετικού ταμιευτήρα στο FEFLOW (FEFLOW 7.0, Screenshots).**

Η διακριτοποίηση στο *FEFLOW* γίνεται σε 2 στάδια. Πρώτο στάδιο αποτελεί ο διαχωρισμός του *domain* στις 2D διαστάσεις, ενώ επόμενο βήμα αποτελεί η μετατροπή και απεικόνιση του ταμιευτήρα στη τρισδιάστατη φυσική μορφή του. Θα πρέπει να ολοκληρωθούν και τα 2 βήματα για να έχει ολοκληρωθεί και η διακριτοποίηση. Η μετατροπή του σε 3D γίνεται σε επόμενο στάδιο το οποίο και αναλύεται. Με τη μετατροπή του μοντέλου σε 3D, αποκτάται ο φυσικός όγκος του *domain* και κατά συνέπεια τα τρίγωνα της 2D διακριτοποίησης μετατρέπονται σε πεπερασμένα στοιχεία πρισματικού τριγωνικού σχήματος (Εικόνα 4-2).

Σύμφωνα με το πρώτο στάδιο, το μοντέλο αρχικά διακριτοποιείται στις 2D διαστάσεις. Η διακριτοποίηση γίνεται από το μενού *meshing* του *FEFLOW*, επιλέγοντας τη διακριτοποίηση με μορφή τριγωνικών πρισμάτων (*triangle*) (Εικόνα 4-2). Η διακριτοποίηση αυτού του είδους χωρίζει τη περιοχή σε στοιχειώδη τμήματα (*elements*), οι κορυφές των οποίων ονομάζονται **κόμβοι** (*nodes*). Τα **στοιχεία** (*elements*) είναι οι τριγωνικοί 3D χώροι που προκύπτουν από την ένωση των κόμβων. Οι γραμμές που ενώνουν δύο κορυφές (κόμβους) των στοιχείων, ονομάζονται **πλευρές** (*edges*), ενώ οι

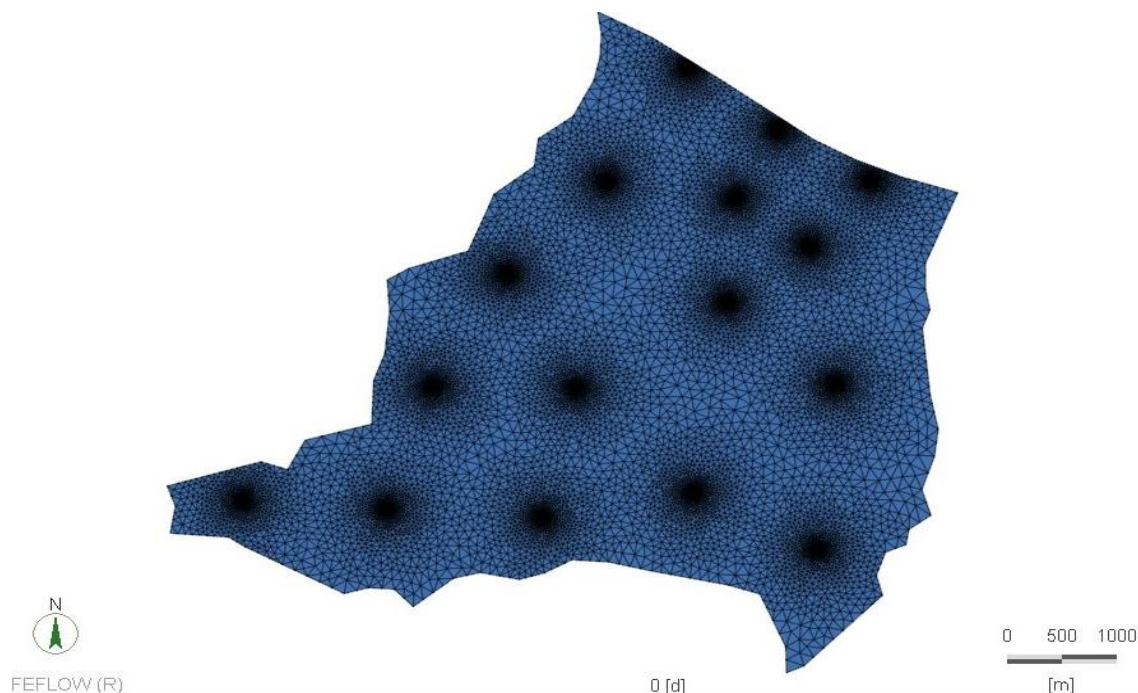


επιφάνειες που ορίζουν οι πλευρές ονομάζονται *faces*. Οι κόμβοι είναι ουσιαστικά οι κορυφές των τριγωνικών πρισματικών (3D) στοιχείων. Πιο συγκεκριμένα κατά την παραμετροποίηση του μοντέλου, οι πληροφορίες υλικού αποδίδονται στα πεπερασμένα στοιχεία. Το σύστημα εξισώσεων για την επίλυση των παραμέτρων διαδικασίας (*process variables*), όπως το υδραυλικό φορτίο, η συγκέντρωση μάζας, η θερμοκρασία, η μέση ηλικία των υπόγειων υδάτων κ.α., βασίζονται σε κάθε κόμβο (*node*) του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων. Όσο πιο πυκνό είναι το πλέγμα, τόσο καλύτερη είναι η αριθμητική ακρίβεια και τόσο μεγαλύτερη είναι η υπολογιστική προσπάθεια. Ουσιαστικά λοιπόν οι κόμβοι φέρουν τις πληροφορίες των αρχικών και συνοριακών συνθηκών καθώς και των διαφόρων άλλων απαραίτητων περιορισμών.



*Εικόνα 4-2: Τριγωνικό πρίσμα (triangular prism - triangle) ή στοιχείο διακριτοποίησης του FEFLOW.*

Στην *Εικόνα 4-3* απεικονίζεται η τελική διακριτοποίηση του πρώτου σταδίου στις 2D διαστάσεις (*slice view* ή *2D-view*) του ταμειυτήρα, ενώ εύκολα παρατηρείται η πύκνωση του πλέγματος των στοιχείων κοντά στις γεωτρήσεις.



*Εικόνα 4-3: Τελική απεικόνιση του αρχικού σταδίου της διακριτοποίησης του υποθετικού ταμειυτήρα στις 2D διαστάσεις (slice view) (FEFLOW 7.0, Screenshots).*



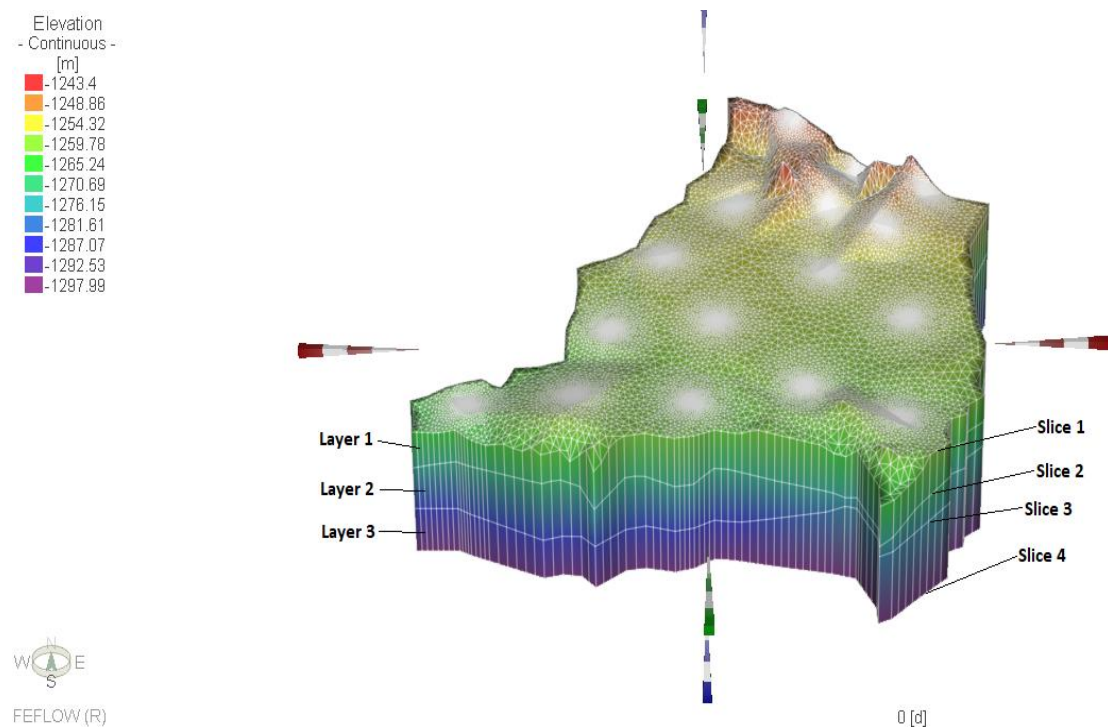
Σε επόμενο στάδιο όπως αναφέρθηκε, ο ταμιευτήρας θα πρέπει να διακριτοποιηθεί και στις 3D διαστάσεις. Μέχρι τώρα έχει δημιουργηθεί μια απλή, επίπεδη επιφάνεια η οποία καθορίζει το όριο του *domain* και τις θέσεις των γεωτρήσεων. Το πραγματικό ανάγλυφο του ταμιευτήρα, δηλαδή το βάθος κάθε σημείου στο εσωτερικό του *domain*, εκλείπει. Αυτό δίνεται σαν σύνολο σημείων ακριβώς πάνω στα οποία το βάθος είναι γνωστό. Αξίζει να αναφερθεί ότι προκειμένου να εκτιμηθεί το βάθος σε οποιοδήποτε τυχαίο σημείο (δηλαδή κόμβο του κανάβου), συνήθως χρησιμοποιούνται γεωστατιστικές μέθοδοι παρεμβολής, κ.λπ.

Ο συγκεκριμένος ταμιευτήρας στη 3D μορφή του, αποτελείται από 3 διαφορετικά γεωλογικά στρώματα (*layers*). Σε κάθε περίπτωση πολυστρωματικού μοντέλου, το *FEFLOW* ανάμεσα στα στρώματα διακρίνει τα λεγόμενα *slices* (ή διεπιφάνειες). Τα **στρώματα** ή *layers* είναι τρισδιάστατα σώματα που τυπικά αντιπροσωπεύουν γεωλογικούς σχηματισμούς, όπως τους υδροφορείς ή τους ημιπερατούς σχηματισμούς. Οι διεπιφάνειες (*interfaces*) μεταξύ των στρωμάτων αυτών, καθώς επίσης και τα πάνω και κάτω όρια του μοντέλου, ονομάζεται *slices* ([FEFLOW 7.0, Introductory Tutorial, 2015](#)).

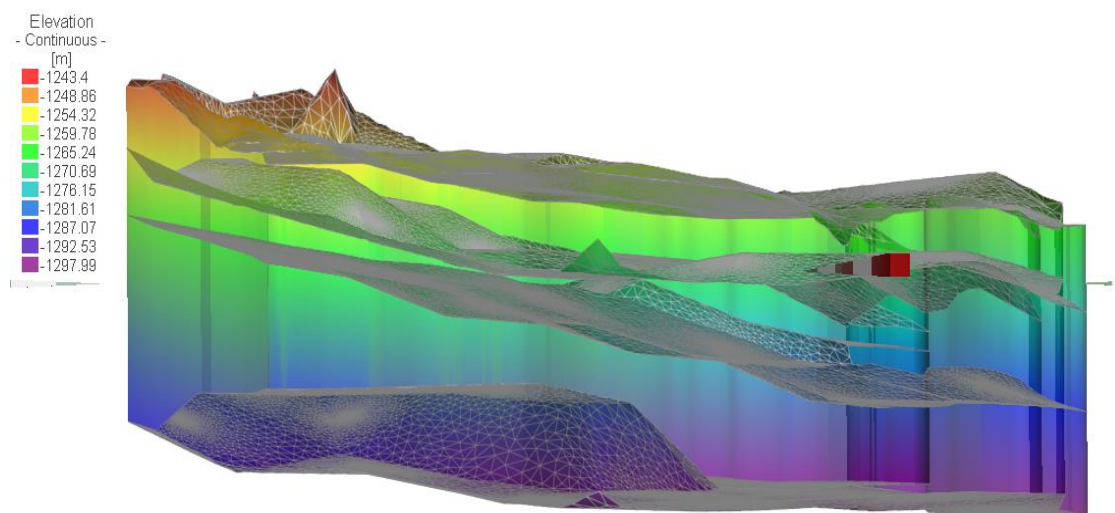
Από το μενού «*View>3D Layer Configuration*», δημιουργείται η τρισδιάστατη, μη πραγματική γεωμετρία των *layers* του ταμιευτήρα. Αυτή η ακατέργαστη γεωμετρία διαμορφώνεται στη πραγματική μορφολογία (ή ανάγλυφο) του εσωτερικού του ταμιευτήρα, μέσω της απόδοσης μιας τιμής υψομέτρου (ως προς το επίπεδο της θάλασσας) σε κάθε κόμβο του κανάβου. Αυτό γίνεται με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία υψομέτρου για δεδομένες θέσεις-σημεία και τη χρήση γεωστατιστικών μεθόδων παρεμβολής (*regionalization*).

Τα δεδομένα περί υψομέτρου για το συγκεκριμένο μοντέλο, προέρχονται από τα αποτελέσματα γεωτρητικών ερευνών που έχουν ενσωματωθεί σε ένα αρχείο *Excel* (.*xlsx*), αποτελούμενο από 4 στήλες: *X*, *Y*, *Elevation*, *Slices*. Όπου *X*, *Y* οι συντεταγμένες του επιπέδου, *Elevation* το υψόμετρο ή βάθος και *Slices* η στήλη στην οποία αναφέρεται το *slice* στο οποίο ανήκει κάθε υψόμετρο της στήλης *Elevation*, σε μορφή αριθμού. Με την εισαγωγή του αρχείου αυτού στο *FEFLOW*, και συσχετίζοντας τις χαρακτηριστικές τιμές του αρχείου με τις αντίστοιχες παραμέτρους του *FEFLOW* (στη συγκεκριμένη περίπτωση με την παράμετρο του *elevation*), δημιουργείται το πραγματικό τρισδιάστατο ανάγλυφο (*3D view*) του μοντέλου (Εικόνα 4-4). Ως μέθοδος γεωστατικής παρεμβολής για την

απόδοση τιμών υψομέτρου σε κάθε κόμβο του μοντέλου (*regionalization method*) χρησιμοποιείται η *Akima Method*<sup>8</sup>, με γραμμική παρεμβολή<sup>9</sup> (*linear interpolation*).



Εικόνα 4-4: Τελική 3D απεικόνιση της μορφολογίας του υποθετικού μοντέλου στο λογισμικό, μαζί με τη χρωματική κλίμακα εξέλιξης του βάθους (FEFLOW 7.0, Screenshots).



Εικόνα 4-5: Τομή τελικής 3D απεικόνισης της μορφολογίας του υποθετικού μοντέλου στο λογισμικό, μαζί με τη χρωματική κλίμακα του βάθους (FEFLOW 7.0, Screenshots).

<sup>8</sup> Στα εφαρμοσμένα μαθηματικά, η παρεμβολή *Akima* αποτελεί έναν τύπο μη ομαλής πολυωνυμικής παρεμβολής (*spline*), που δίνει μια καλή προσαρμογή στις καμπύλες όπου η δεύτερη παράγωγός τους μεταβάλλεται γρήγορα [ALGLIB, (1999-2021)] Είναι μια αποτελεσματική υπολογιστική μέθοδος παρεμβολής με συνεχείς διαφοροποιήσεις, για καλύτερη παραγωγή αποτελεσμάτων.

<sup>9</sup> Στο μαθηματικό πεδίο της αριθμητικής ανάλυσης, η *παρεμβολή (interpolation)* είναι ένας τύπος εκτίμησης, μια μέθοδος κατασκευής νέων σημείων δεδομένων με βάση το εύρος ενός διακριτού συνόλου γνωστών σημείων δεδομένων.





Στην παραπάνω *Εικόνα 4-5* παρουσιάζεται η μορφή των σχηματισμών του ταμιευτήρα, με τα 3 στρώματα που τον αποτελούν (*layers*) και τις 4 επιφάνειες (*slices*) άνω/κάτω και μεταξύ των στρωμάτων αυτών. Στον πυθμένα του ταμιευτήρα παρατηρείται μείωση του βάθους στο βόρειο κομμάτι του. Στο σημείο αυτό εισάγονται οι συνοριακές συνθήκες με την υψηλότερη θερμοκρασία (βλ. [ενότητα 4.2.3](#)).

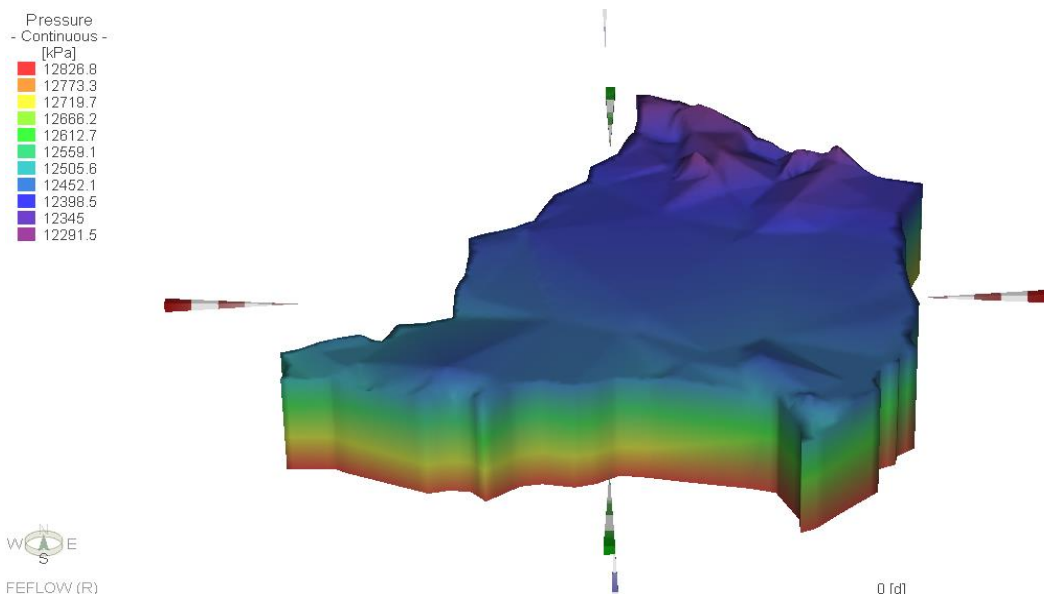
#### **4.2.2 Αρχικές Συνθήκες (Initial Conditions)**

Το *FEFLOW* παρέχει τα μέσα για την προσομοίωση ενός αριθμού διαφορετικών φυσικών διεργασιών σε διαφορετικούς χώρους και χρονικές διαστάσεις, που κυμαίνονται από απλά 2D μοντέλα ροής σταθερής κατάστασης (*steady state*) έως μεταβατικά (*transient state*) μοντέλα.

Στο συγκεκριμένο μοντέλο, όπως αναφέρθηκε στην [ενότητα 3.3.2](#), θα πρέπει να γίνει αρχικά προσομοίωση του ταμιευτήρα σε *steady state* συνθήκες και στη συνέχεια σε *transient state* συνθήκες. Για τον σκοπό αυτό για τις *steady state* συνθήκες επίλυσης, από το μενού «*Edit>Problem Settings>Problem Class*», επιλέγεται η «*Standard (saturated) groundwater flow equation*» ως εξίσωση επίλυσης, καθώς αναφέρεται στην εφαρμογή του νόμου του *Darcy* για την επίλυση της μεταφοράς μάζας. Επιλέγεται επίσης το «*Heat*» για την επίλυση της μεταφοράς θερμότητας στον ταμιευτήρα.

Ως αρχικές συνθήκες για την επίλυση των εξισώσεων που επιλέχθηκαν, θα πρέπει να εισαχθεί και η φυσική θερμοκρασία (*Temperature*) στην οποία βρίσκεται ο ταμιευτήρας, καθώς και το υδραυλικό φορτίο (*Hydraulic Head*) της ροής του ρευστού. Οι αρχικές αυτές συνθήκες ορίζονται για κάθε κόμβο ή ακμή, όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη [ενότητα 4.2.1](#).

Η θερμοκρασία που εισάγεται σε κάθε κόμβο είναι της τάξης των 30°C, τιμή που αποτελεί μια μέση φυσιολογική θερμοκρασία υπόγειων υδροφορέων, ενώ το υδραυλικό φορτίο της τάξης των 10m. Έχοντας εισάγει τα παραπάνω, το λογισμικό υπολογίζει αυτόματα την πίεση του ταμιευτήρα στα διάφορα σημεία του, μέσω της υδροστατικής πίεσης που έχει δοθεί σε αυτά (*Hydraulic Head*). Η διακύμανση της πίεσης αυτής εντός του ταμιευτήρα απεικονίζεται χρωματικά στη παρακάτω *Εικόνα 4-6*.



Εικόνα 4-6: Χρωματική διακύμανση της πίεσης του ταμιευτήρα (FEFLOW 7.0, Screenshots).

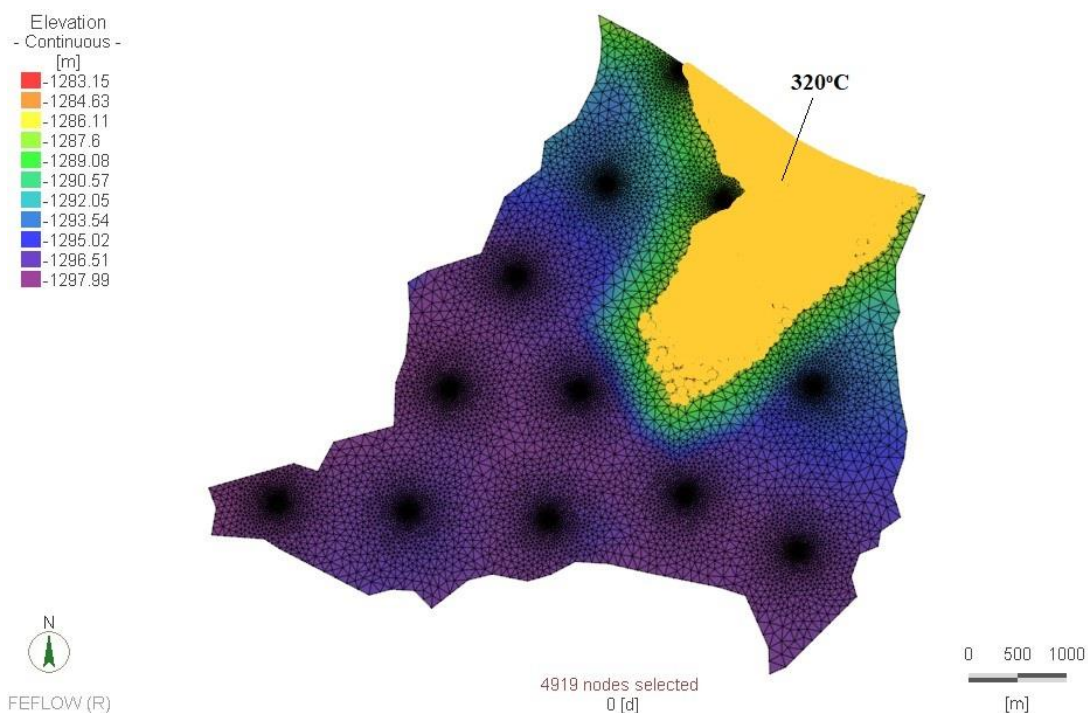
#### 4.2.3 Συνοριακές Συνθήκες (Boundary Conditions)

Στις *steady-state* συνοριακές συνθήκες, ουσιαστικά υπάρχουν μόνο οι συνθήκες εκείνες που ορίζουν την ύπαρξη της θερμικής πηγής στο ταμιευτήρα. Υπενθυμίζουμε ότι ο συγκεκριμένος ταμιευτήρας είναι «κλειστός». Αυτό σημαίνει ότι δεν επικοινωνεί με το γύρω περιβάλλον του, και επομένως ότι ερευνάται συμβαίνει στο εσωτερικό αυτού. Δεν υπάρχει δηλαδή καμία εισροή ή εκροή μάζας από αυτόν, παραμόνο μέσω των γεωτρήσεων που θα ασχοληθούμε σε μεταγενέστερο στάδιο. Ως εκ τούτου, ο μόνος τρόπος για την «θέρμανση» του, είναι μέσω της μεταφοράς θερμότητας με αγωγή, από τα πετρώματα με τα οποία έρχεται σε επαφή στο ρευστό που το διέπει.

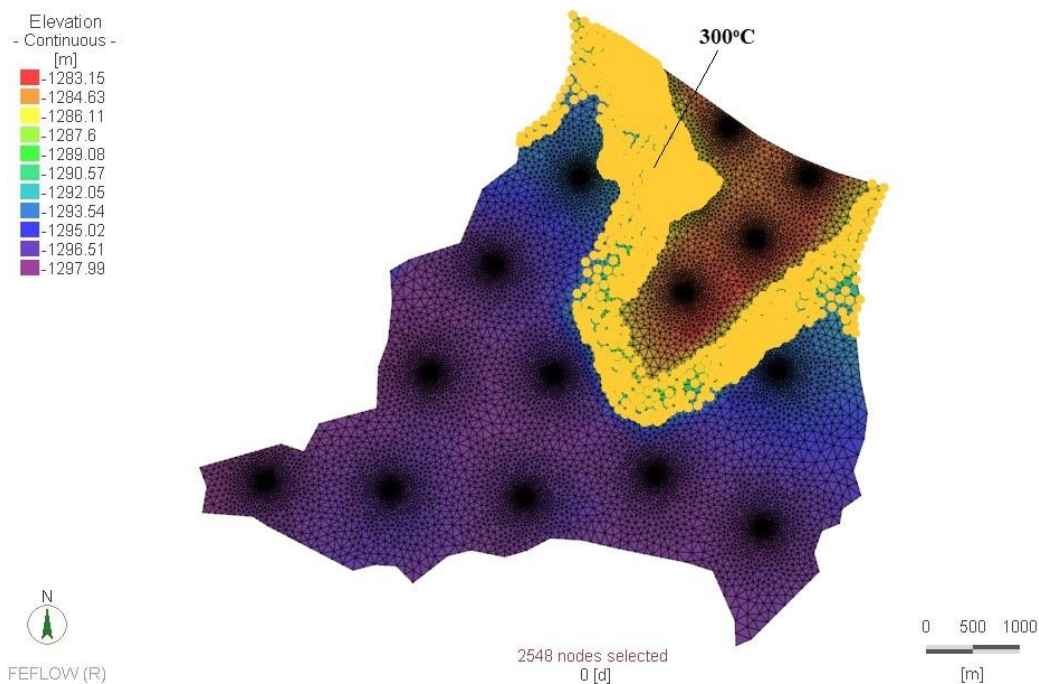
Συγκεκριμένα, λοιπόν έχουμε υποθέσει ότι κάτω από το *slice* 4, που αποτελεί το πυθμένα του ταμιευτήρα, υπάρχει κάποια μαγματική διείσδυση, η οποία θερμαίνει μέσω της μεταφοράς θερμότητας με αγωγή, το πυθμένα του ταμιευτήρα. Συγκεκριμένα, επειδή η γεωμετρία του *slice* 4, δεν είναι ακριβώς επίπεδη, αλλά παρουσιάζει κάποιες διακυμάνσεις ως προς το υψόμετρο της, η κάτω επιφάνεια αυτού διαχωρίστηκε σε 4 επιμέρους ζώνες με κύριο κριτήριο το βάθος τους. Σε κάθε μία από τις ζώνες αυτές αποδόθηκε μια διαφορετική τιμή θερμοκρασίας, με την 1<sup>η</sup> ζώνη να βρίσκεται στους **320°C**, τη 2<sup>η</sup> στους **300°C**, την 3<sup>η</sup> στους **280°C** και τη 4<sup>η</sup> στους **260°C**, έτσι ώστε να είναι πιο αντικειμενικό το μοντέλο στη πραγματικότητα.



Παρακάτω παρατίθενται 4 διαφορετικές εικόνες, στις οποίες απεικονίζονται οι 4 ζώνες που προαναφέρθηκαν (βλ. Εικόνα 4-7 έως 4-10). Οι ζώνες αυτές σχεδιάστηκαν επιλέγοντας κόμβους (*nodes*), από τη διακριτοποίηση του μοντέλου (κίτρινο χρώμα).



**Εικόνα 4-7: Ζώνη 1 συνοριακής συνθήκης Cauchy, θερμοκρασίας 320°C (FEFLOW 7.0, Screenshots).**

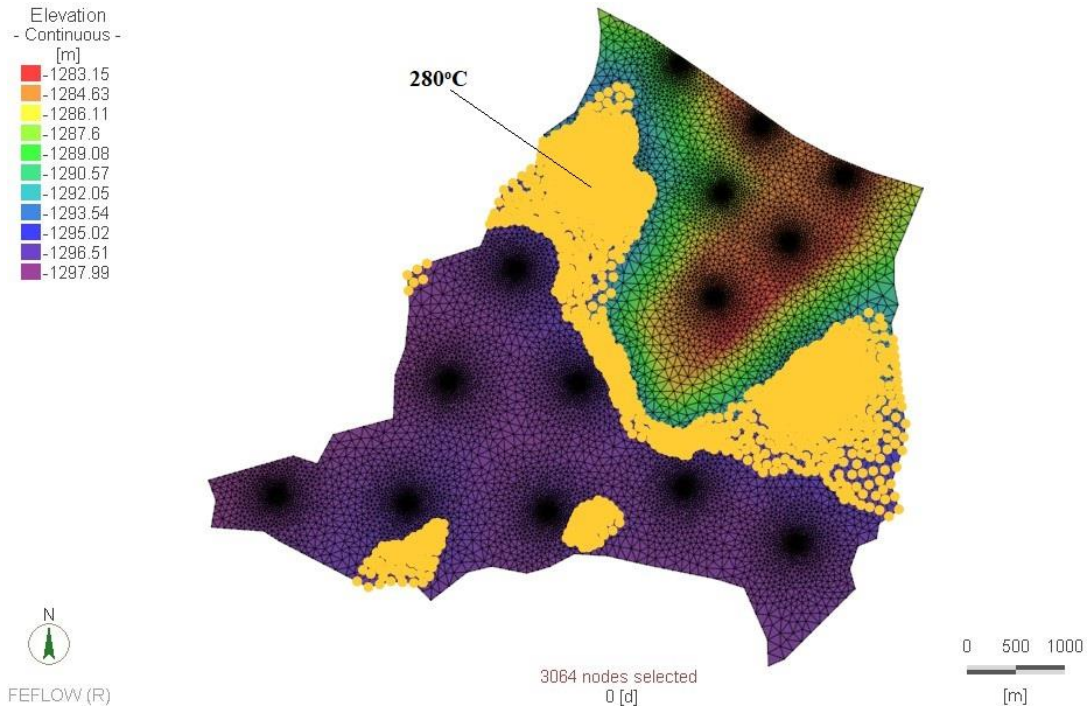


**Εικόνα 4-8: Ζώνη 2 συνοριακής συνθήκης Cauchy, θερμοκρασίας 300°C (FEFLOW 7.0, Screenshots).**

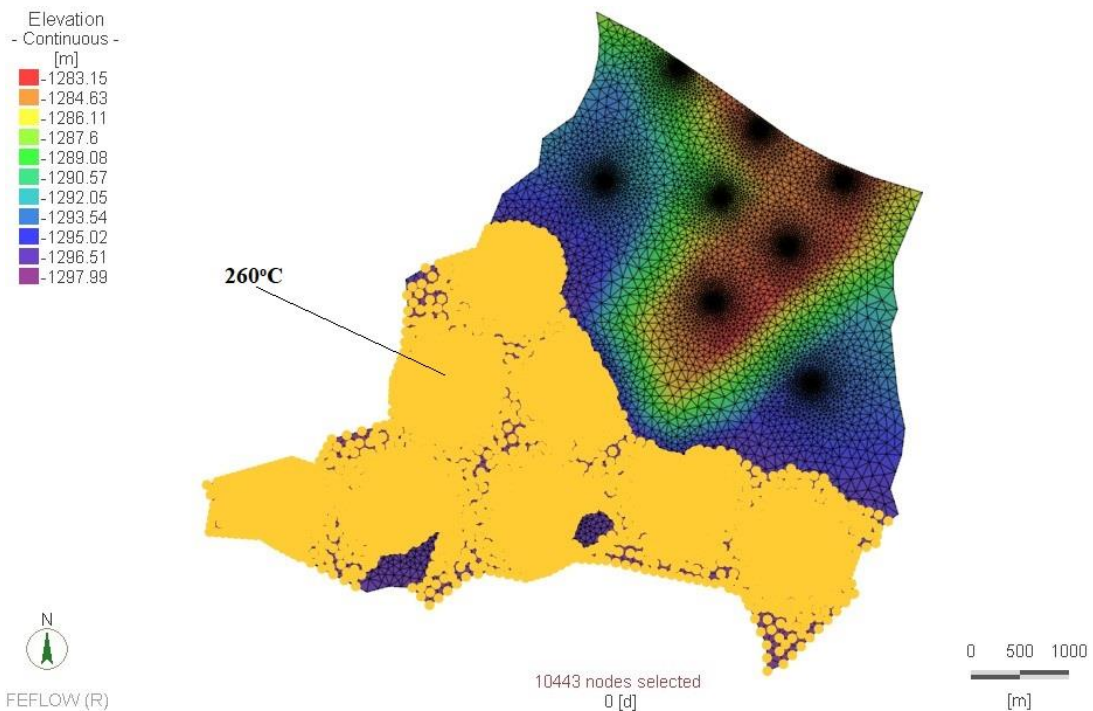




ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΣΕ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ  
ΜΕ ΣΧΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ-ΕΠΑΝΕΙΣΠΙΕΣΗΣ



**Εικόνα 4-9:** Ζώνη 3 συνοριακής συνθήκης Cauchy, θερμοκρασίας 280°C (FEFLOW 7.0, Screenshots).



**Εικόνα 4-10:** Ζώνη 4 συνοριακής συνθήκης Cauchy, θερμοκρασίας 260°C (FEFLOW 7.0, Screenshots).

Αφού επιλεχθούν οι κόμβοι σε κάθε ζώνη, οι θερμοκρασίες εισάγονται με την συνοριακή συνθήκη 3<sup>ου</sup> είδους για μεταφορά θερμότητας, Cauchy, καθώς για να περιγράψουμε τη μαγματική διείσδυση που εμφανίζεται στο πυθμένα του ταμιευτήρα, χρειαζόμαστε αυτή την οριακή συνθήκη. Η συγκεκριμένη συνοριακή συνθήκη μεταφοράς



θερμότητας, εφαρμόζει τη χρήση μιας προκαθορισμένης θερμοκρασίας αναφοράς σε συνδυασμό με μια παράμετρο αγωγιμότητας (*transfer-rate*). Η εισροή/εκροή μιας διαλυμένης ουσίας, υπολογίζεται από τη σχετική επιφάνεια, το ρυθμό μεταφοράς και τη διαφορά μεταξύ της συγκέντρωσης αναφοράς και αυτής των υπόγειων υδροφορέων:

$$Q_{heat} = A \cdot \Phi \cdot (T_{ref} - T) \quad (4.1)$$

Όπου:  $Q_{heat}$  η εισαγωγή/απαγωγή θερμότητας από και προς το μοντέλο σε *Joule [J]*,  $A$  η σχετική επιφάνεια [ $m^2$ ],  $\Phi$  ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας [ $J/m^2/d/K$ ],  $T_{ref}$  η θερμοκρασία αναφοράς και  $T$  η τρέχουσα θερμοκρασία του υδροφόρου ορίζοντα σε *Kelvin [K]*.

Η συνθήκη αυτή ουσιαστικά ελέγχει τη διαφορά θερμοκρασίας που υπάρχει, στη συγκεκριμένη περίπτωση, μεταξύ του πυθμένα του μοντέλου ( $T_{ref}$ ) και του νερού του εσωτερικού του ταμειυτήρα ( $T$ ). Όσο υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας ( $\Delta T$ ) μεταξύ των 2, τόσο μεταφέρεται θερμότητα από το ένα στο άλλο, μέχρι την εξισορρόπηση της θερμοκρασίας τους. Όσο μειώνεται η διαφορά θερμοκρασίας τόσο μειώνεται και το  $Q_{heat}$ , μέχρι σε άπειρο χρόνο να συγκλίνει στη θερμοκρασία ισορροπίας μεταξύ των  $T_{ref}$  και  $T$ .

Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας ( $\Phi$ ) (*transfer rate*), είναι ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας, που περιγράφει τις ιδιότητες του υλικού μεταξύ της θερμοκρασίας αναφοράς και της θερμοκρασίας του υδροφόρου ορίζοντα με βάση τις ιδιότητες του υλικού ή τις ιδιότητες του συνοριακού στρώματος (*boundary layer*) ([FEFLOW Online Help](#)). Με απλά λόγια, στην ουσία ορίζει στο μοντέλο το πόσο εύκολα μεταφέρεται η θερμότητα από τον πυθμένα στο νερό του εσωτερικού του ταμειυτήρα. Για ένα απλό υλικό, ορίζεται ως εξής:

$$\Phi = \frac{\lambda}{d} \quad (4.2)$$

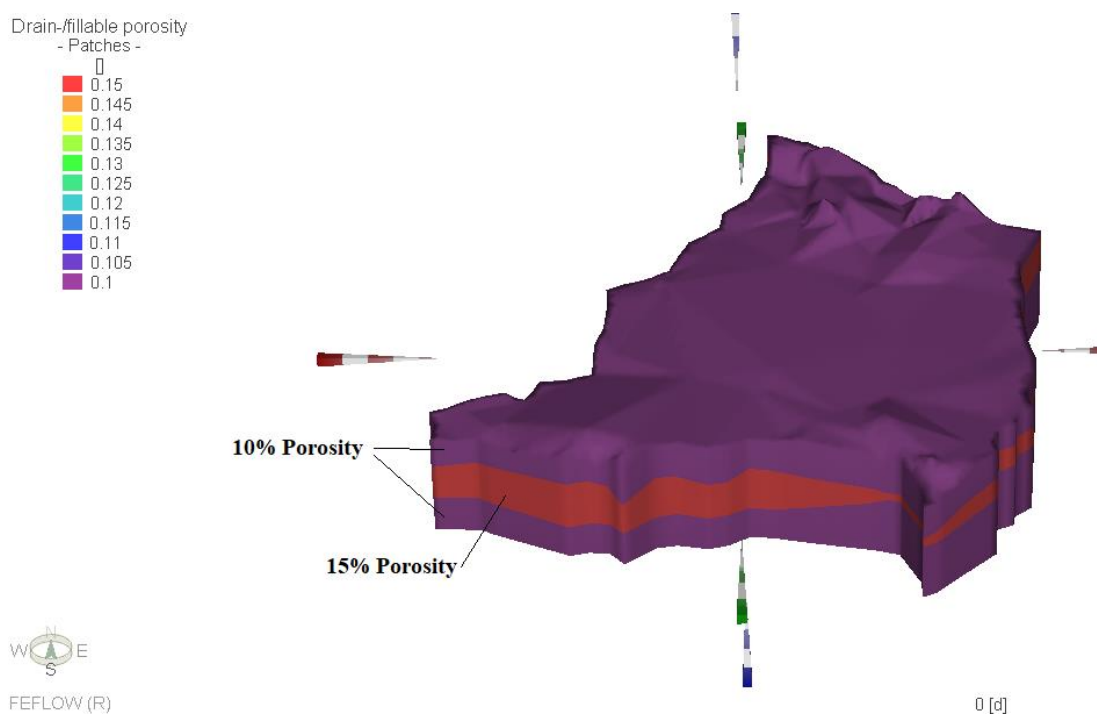
Όπου:  $\lambda$  η θερμική αγωγιμότητα του υλικού και  $d$  το πάχος του στρώματος.

Κατά τη ρύθμιση αυτής της συνοριακής συνθήκης, η θερμοκρασία αναφοράς είναι εκείνη που ορίζεται ως τιμή για την συνοριακή συνθήκη. Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας ( $\Phi$ ) ορίζεται ξεχωριστά στο *FEFLOW*, ως ιδιότητα του υλικού (*Material Property*). Περισσότερες λεπτομέρειες αναφέρονται στην [ενότητα 4.2.4](#).

#### 4.2.4 Ιδιότητες των Υλικών του Ταμιευτήρα (*Material Properties*)

Ιδιότητες των υπόγειων σχηματισμών του ταμιευτήρα απαραίτητες για την επίλυση του προβλήματος ροής μάζας και θερμότητας, αποτελούν η υδραυλική διαπερατότητα (*hydraulic conductivity*) των πετρωμάτων, το πορώδες (*porosity*) και ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας των υλικών (*heat transfer rate*), μιας και εξετάζεται ένα θερμικό μοντέλο. Προκειμένου να εισαχθούν τα δεδομένα αυτά στο μοντέλο, έχουν δημιουργηθεί ειδικά αρχεία πινάκων, τα οποία εισάγονται στο λογισμικό. Με την εισαγωγή αυτών, συσχετίζονται οι χαρακτηριστικές τιμές των αρχείων που αφορούν τις παραπάνω ιδιότητες, με τις αντίστοιχες παραμέτρους του *FEFLOW*, και ύστερα επιλέγονται τα σημεία του ταμιευτήρα του μοντέλου στα οποία θα αποδοθούν με *interpolation* οι τιμές αυτές. Στο *FEFLOW* υπάρχουν αρκετοί τρόποι επιλογής των σημείων του ταμιευτήρα, με μερικές από αυτές να αποτελούν η επιλογή κόμβων (*nodes*), η επιλογή *layers/slices*, η επιλογή στοιχείων (*elements*), η επιλογή επιφανειών (*faces*) κ.ο.κ.

Αφού γίνει η αντιστοίχιση των χαρακτηριστικών τιμών των αρχείων με τις παραμέτρους του *FEFLOW*, εισάγεται η διαπερατότητα και το πορώδες στα χαρακτηριστικά του μοντέλου ([FEFLOW 7.0, Introductory Tutorial, 2015](#)).



**Εικόνα 4-11: Χρωματική απεικόνιση του πορώδους του μοντέλου (*FEFLOW 7.0, Screenshots*).**

Το πορώδες του ταμιευτήρα ορίζεται ως 10% (0,1) στα *layer 1* και *layer 3*, και ως 15% (0,15) στο *layer 2* (Εικόνα 4-11). Εισάγεται από το μενού «*Material*



*Properties>Fluid Flow>Drain-/fillable porosity*» του *data panel*<sup>10</sup>, επιλέγοντας τα αντίστοιχα *layers*.

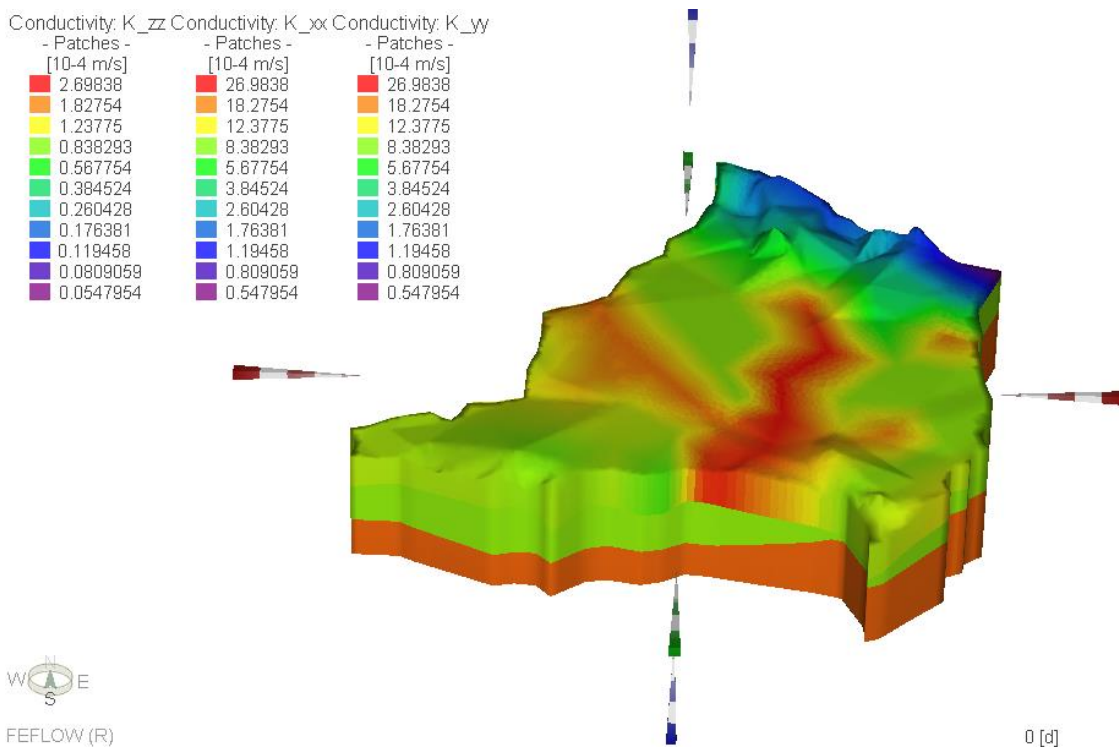
Για την εκχώρηση της υδραυλικής διαπερατότητας χρησιμοποιείται η παρεμβολή των δεδομένων (*interpolation data*) στο μοντέλο από τα δείγματα του πεδίου. Καθώς το μοντέλο εξετάζεται στις 3 διαστάσεις, θα υπάρχουν και 3 μεταβλητές για τη διαπερατότητά του, μια για κάθε άξονα αντίστοιχα:  $K_{xx}$ ,  $K_{yy}$ ,  $K_{zz}$ . Οι 3 μεταβλητές αυτές αποτελούν τις χαρακτηριστικές τιμές της υδραυλικής διαπερατότητας. Η απόδοση των τιμών της διαπερατότητας σε κάθε σημείο του μοντέλου που έχει συντεταγμένες  $x,y,z$  στο χώρο, από το αρχείο μορφής χάρτη (*map-file.trp*), αφορά αρχικά μόνο τη μεταβλητή  $K_{xx}$  για το *layer 1*. Οι μεταβλητές  $K_{yy}$  και  $K_{zz}$ , υπολογίζονται στη συνέχεια ως συνάρτηση του  $K_{xx}$ . Ως μέθοδος παρεμβολής χρησιμοποιείται και πάλι η *Akima*, αλλά με λογαριθμική κλίμακα και γραμμική παρεμβολή (*linear interpolation*). Μονάδα μέτρησης της διαπερατότητας ορίζονται τα  $m/s$ , και για ευκολία χρησιμοποιείται το πολλαπλάσιό του  $10^{-4}m/s$ . Για τη διαπερατότητα  $K_{xx}$  των άλλων δυο *layers* (*layers 2 & 3*), χρησιμοποιείται μια σταθερή (*constant*) τιμή για όλη την έκτασή τους. Συγκεκριμένα, για τα *layer 2* και *layer 3*, θεωρείται διαπερατότητα  $K_{xx}$  ίση με  $9 \cdot 10^{-4} m/s$  και  $20 \cdot 10^{-4} m/s$ , αντίστοιχα. Για τον υπολογισμό των  $K_{yy}$  και  $K_{zz}$ , και των τριών στρωμάτων (*layers*) του μοντέλου χρησιμοποιούνται οι παρακάτω σχέσεις (4.3).

$$K_{yy} = K_{xx} \quad (4.3)$$

$$K_{zz} = 0.1 \cdot K_{xx}$$

Ουσιαστικά το  $K_{zz}$  ορίζεται ως το 10% της διαπερατότητας του  $K_{xx}$  και το  $K_{yy}$  ως ίσο με το  $K_{xx}$ . Στην *Εικόνα 4-12* απεικονίζεται η χρωματική διαβάθμιση της συνολικής διαπερατότητας του μοντέλου. Από την εικόνα αυτή εύκολα παρατηρούνται τα αποτελέσματα της παρεμβολής (*interpolation*) των τιμών της διαπερατότητας που έχουν γίνει στο *layer 1*, ενώ στα *layers 2 & 3* επικρατεί σταθερή διαπερατότητα σε όλη τους την έκταση.

<sup>10</sup> Ο πίνακας δεδομένων ή *Data Panel* στο *FEFLOW*, παρέχει μια επισκόπηση όλων των διαθέσιμων μεταβλητών και παραμέτρων του μοντέλου (αρχικές και συνοριακές συνθήκες και ιδιότητες υλικών). Χρησιμοποιείται επίσης για την επιλογή των παραμέτρων για την εκχώρηση δεδομένων αλλά και για απεικόνιση των δεδομένων αυτών στο μοντέλο.



Εικόνα 4-12: Χρωματική διαβάθμιση της διαπερατότητας και στις 3 διαστάσεις του μοντέλου (FEFLOW 7.0, Screenshots).

Η εισροή/εκροή θερμότητας στις συνοριακές συνθήκες μεταφοράς θερμότητας υπολογίζεται από την εξίσωση (4.1). Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας ( $\Phi$ ) περιγράφει τη μεταφορά θερμότητας από μια (εξωτερική) πηγή με σταθερή θερμοκρασία αναφοράς στον υπόγειο υδροφόρο. Το FEFLOW διακρίνει δύο διαφορετικούς ρυθμούς μεταφοράς για την εισροή θερμότητας από εξωτερική πηγή σταθερής θερμοκρασίας (*heat transfer-in*) και την εκροή θερμότητας προς τα έξω (*heat transfer-out*). Σύμφωνα με την κατεύθυνση κλίσης, το FEFLOW επιλέγει αυτόματα την κατάλληλη τιμή. Η μονάδα μέτρησης του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας είναι  $[J/m^2/d/K]$  και υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (4.2).

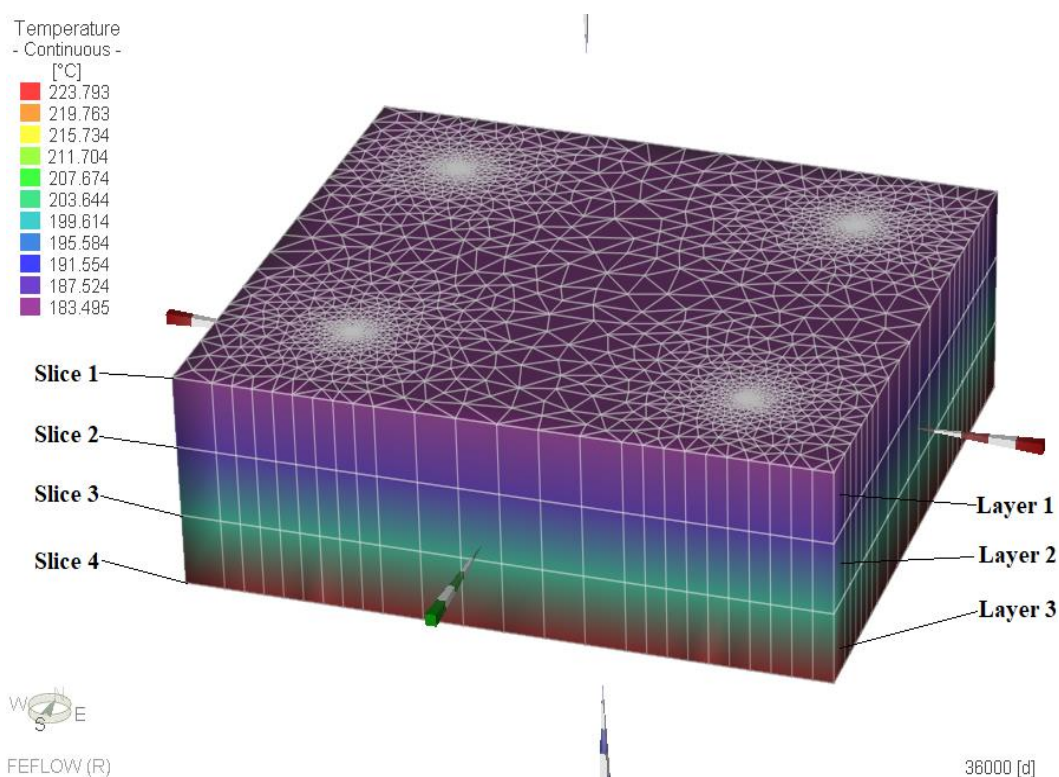
Στο συγκεκριμένο μοντέλο για τον ρυθμό μεταφοράς θερμότητας εισήχθη η τιμή  $10.000 J/m^2/d/K$  στο *in-transfer rate (heat)*, από το μενού «Material Properties» *In-transfer rate* του *data panel*, για όλους τους κόμβους του ταμιευτήρα. Ο λόγος για τον οποίο ο ρυθμός μεταφοράς μάζας εισάγεται σε όλους τους κόμβους του ταμιευτήρα, είναι διότι η μεταφορά θερμότητας λαμβάνει χώρα σε όλο το εσωτερικό τη έκτασης αυτού, και όχι μόνο στους κόμβους του κάτω στρώματος που είναι σε επαφή με τη μαγματική διείσδυση.

Η παραπάνω τιμή των  $10.000 J/m^2/d/K$  για το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας, επιλέχτηκε ύστερα από υπολογιστικές δοκιμές που έγιναν σε νέο υπολογιστικό μοντέλο





του *FEFLOW*. Συγκεκριμένα δημιουργήθηκε ένας απλός κλειστός υδραυλικά τετραγωνικός ταμιευτήρας, με διαστάσεις  $1 \times 1 \text{ km}$ , στον οποίο εισήχθησαν όλες οι αρχικές και συνοριακές συνθήκες και οι ιδιότητες των υλικών του εσωτερικού του ταμιευτήρα, όπως αυτές αναλύθηκαν στις προηγούμενες ενότητες (4.2.2, 4.2.3 και 4.2.4). Η μόνη παράμετρος που δεν εισήχθη ήταν αυτή του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας ( $\Phi$ ), ενώ στο πυθμένα, ο οποίος βρίσκεται πάνω σε μια μαγματική διείσδυση, εισήχθη μία μόνο θερμοκρασιακή ζώνη της τάξεως των  $250^\circ\text{C}$ . Ως αρχική τιμή θερμοκρασίας του εσωτερικού του ταμιευτήρα ορίστηκαν οι  $30^\circ\text{C}$ . Εκτός από την τετραγωνική γεωμετρία του ταμιευτήρα εισήχθησαν 3 ίσα *layers* (επομένως 4 συνολικά *slices*), ενώ η διακριτοποίησή του έγινε χωρίς την χρήση γεωτρήσεων (Εικόνα 4-13)



**Εικόνα 4-13: 3D απεικόνιση της γεωμετρίας του υπολογιστικού ταμιευτήρα για την εύρεση του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας ( $\Phi$ ). Στη συγκεκριμένη εικόνα παρουσιάζεται η διακύμανση της θερμοκρασίας του ταμιευτήρα έπειτα από 100 χρόνια. (Η πύκνωση του πλέγματος της διακριτοποίησης στα 4 σημεία της επιφάνειας, δημιουργήθηκε εκ παραδρομής και δεν επηρεάζει την παρούσα υπολογιστική δοκιμή για την εύρεση του  $\Phi$ ) (FEFLOW 7.0, Screenshots).**

Το σκεπτικό για την εύρεση μιας ομαλής διακύμανσης τη θερμοκρασίας του ταμιευτήρα βασίζεται στη λογική της συνοριακής συνθήκης *Cauchy*, κατά την οποία η διάδοση θερμότητας λαμβάνει χώρα αναλογικά του  $\Delta T$ , με μια σταθερά αναλογίας  $\Phi$  (βλ. ενότητα 4.2.3). Όσο το  $\Delta T$  είναι «μεγάλο» σε τιμή τόσο πιο απότομα αυξάνεται ο ρυθμός διάδοσης της θερμότητας  $\Phi$ , ενώ αντίστοιχα όσο το  $\Delta T$  «μικραίνει» με τη πάροδο του

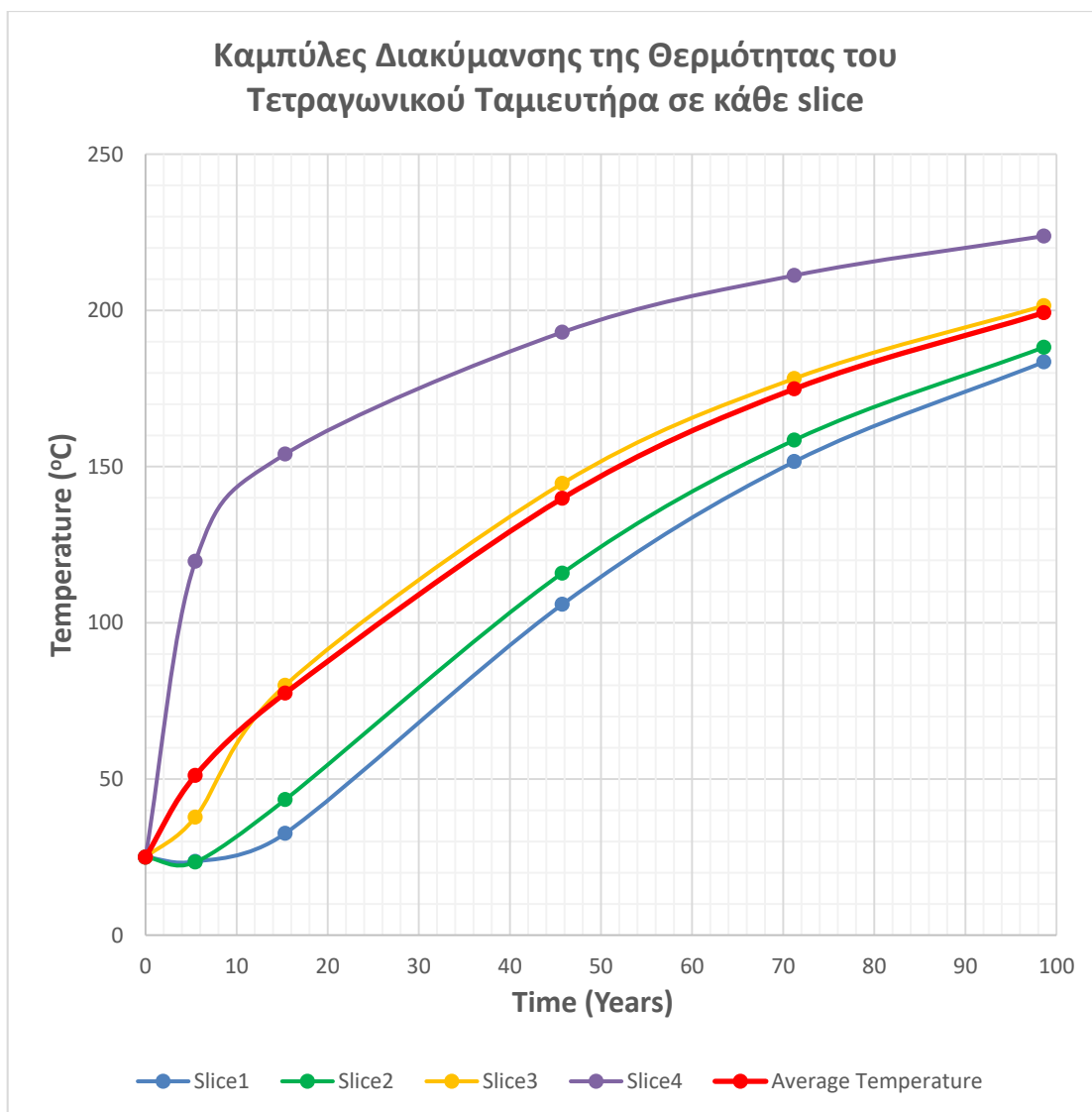


χρόνου το  $\Phi$  ελαττώνεται, και η θερμοκρασία τείνει όλο και πιο «αργά» στη θερμοκρασία ισορροπίας.

Έχοντας, λοιπόν, ορίσει έναν ταμιευτήρα με εσωτερική θερμοκρασία 30°C, ο οποίος βρίσκεται πάνω σε μια μαγματική διείσδυση θερμοκρασίας 250°C, στο συγκεκριμένο σημείο τίθεται το εύλογο ερώτημα για το πόσο χρονικό διάστημα αυτός χρειάζεται, ώστε να «ανεβεί» από τους 30°C στους 250°C. Τρέχοντας, έτσι το μοντέλο σε συνθήκες μεταβατικής (*transient*) κατάστασης για 100 χρόνια, επιλέγοντας κάθε φορά διαφορετικές τιμές στο ρυθμό μεταφοράς θερμότητας  $\Phi$ , παρατηρήθηκε ο ρυθμός με τον οποίο η θερμότητα του πυθμένα μεταφερόταν στην επιφάνεια του κανάβου, ανάλογα τα *time-steps* που χρειαζόταν ο *solver* για την επίλυση των επιμέρους εξισώσεων. Ύστερα από μερικές δοκιμές παρατηρήθηκε ότι η τιμή των 10.000 J/m<sup>2</sup>/d/K, παρουσίαζε μια ομαλή διακύμανση της θερμοκρασίας από το πυθμένα (*slice 4*) στην επιφάνεια (*slice 1*) του ταμιευτήρα σε ένα διάστημα 100 ετών, όπως παρατηρείται και στο παρακάτω Διάγραμμα 4-1.

Το συγκεκριμένο διάγραμμα (Διάγραμμα 4-1) δημιουργήθηκε στο υπολογιστικό φύλλο του *excel*, λαμβάνοντας της τιμές της θερμοκρασίας του κάθε *slice* για κάποια τυχαία χρονικά σημεία. Η κόκκινη καμπύλη αποτελεί την εξέλιξη της καμπύλης της μέσης θερμοκρασίας του ταμιευτήρα στα 100 χρόνια. Σε αυτό το σενάριο μελέτης, ο ρυθμός αύξησης  $\Phi$  της καμπύλης αυτής, κρίθηκε πως είναι αρκετά ρεαλιστικός σύμφωνα με τη συνθήκη του *Cauchy*, οπότε και η συγκεκριμένη τιμή του (10.000 J/m<sup>2</sup>/d/K), χρησιμοποιήθηκε για την μοντελοποίηση του υποθετικού ταμιευτήρα που ερευνάται.





Διάγραμμα 4-1: Εξέλιξη της διακύμανση της θερμοκρασίας του τετραγωνικού ταμιευτήρα σε κάθε slice στα 100 χρόνια.

### 4.3 Προσομοίωση Σταθερής Κατάστασης (Steady-State Simulation)

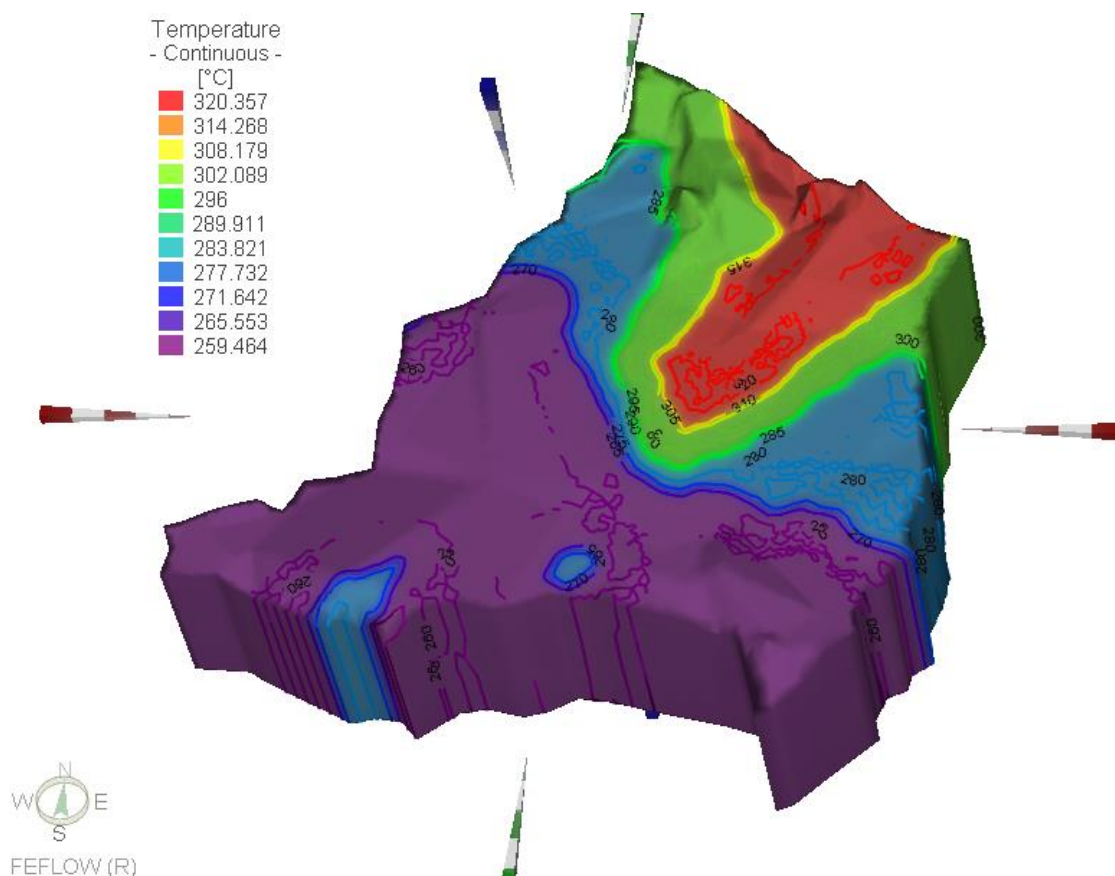
Εφόσον έχουν ρυθμιστεί όλα τα παραπάνω το μοντέλο σταθερής κατάστασης (*steady state*) είναι έτοιμο να τρέξει. Με την εκτέλεση του μοντέλου σταθερής κατάστασης η μεταφορά θερμότητας (*heat transport*) θα υπολογιστεί έτσι ώστε η κατανομή της να λειτουργήσει ως η νέα αρχική συνθήκη για την συνακόλουθη διαδικασία της μεταβατικής προσομοίωσης (*transient state simulation*).

Η έναρξη της προσομοίωσης ξεκινά και παράγεται μια ομαλά μεταβαλλόμενη κατανομή της θερμοκρασίας στον ταμιευτήρα, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 4-14*. Όπως αναφέρθηκε και στην [ενότητα 4.2.3](#), στον πυθμένα του ταμιευτήρα θεωρείται μια συγκεκριμένη κατανομή θερμοκρασιών χωρισμένη σε 4 ζώνες, με διαφορετικές τιμές. Από αυτές τις πιο θερμές ζώνες με την πάροδο του χρόνου, όπως είναι φυσικό,



μεταβιβάζεται θερμική ενέργεια στο ρευστό του ταμιευτήρα. Ύστερα από (θεωρητικά) άπειρο χρονικό διάστημα (*steady-state simulation*) η θερμική ενέργεια αυτή θα πρέπει να έχει κατανεμηθεί όσο το δυνατόν ομοιόμορφα σε όλο το ρευστό του υπόγειου ταμιευτήρα. Αυτός είναι και ο σκοπός της προσομοίωσης σταθερής κατάστασης του μοντέλου: να προσδιοριστεί η κατανομή της θερμοκρασίας σε όλο τον ταμιευτήρα πριν την ανθρώπινη παρέμβαση.

Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 4-14*, εντός του ταμιευτήρα παρατηρείται μια σχεδόν ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας, που απεικονίζεται με τη χρωματική διαβάθμιση στην τρισδιάστατη απεικόνιση του μοντέλου.



*Εικόνα 4-14: Χρωματική διαβάθμιση της κατανομή των θερμοκρασιών του μοντέλου μετά την επίλυση της steady-state κατάστασης (FEFLOW 7.0, Screenshots).*

Η κατανομή της θερμοκρασίας εντός του ταμιευτήρα μετά την προσομοίωση *steady-state* θα μπορούσε να είναι περισσότερο ομοιόμορφη, αν κατά τη ρύθμιση του μοντέλου (συνοριακές συνθήκες) διακρίνονταν περισσότερες των 4 ζώνες σταθερής θερμοκρασίας στον πυθμένα του ταμιευτήρα. Για να γίνει ωστόσο κάτι τέτοιο θα έπρεπε να υπάρχουν διαθέσιμα περισσότερα δεδομένα θερμοκρασίας σε διαφορετικά σημεία του πυθμένα, ώστε με τη μέθοδο γραμμικής παρεμβολής *Akima* και την εξίσωση ροής



θερμότητας *Cauchy* να αποδοθούν οι κατάλληλες τιμές θερμοκρασίας σε κάθε κόμβο του μοντέλου. Ωστόσο, παρά την απλοποιημένη προσέγγιση που ακολουθήθηκε με τη διάκριση μόνο 4 ζωνών διαφορετικής θερμοκρασίας στον πυθμένα του ταμιευτήρα, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης θεωρούνται επαρκώς αξιόπιστα. Το μόνο πρόβλημα είναι οι απότομες διακυμάνσεις στα αποτελέσματα, τα λεγόμενα «σκαλοπάτια», πράγμα που αντανακλά στα φυσικά φαινόμενα αυτού του τύπου, τα οποία είναι πάντα πιο ομαλά. Το πρόβλημα αυτό θα οδηγήσει σε μεγαλύτερο χρόνο επίλυσης κατά την προσομοίωση της μεταβατικής κατάστασης, και κυρίως στα σημεία όπου το ρευστό θα «μεταπηδά» από τη μία ζώνη στην άλλη, καθώς στις θέσεις αυτές θα δυσκολεύεται να συγκλίνει.

Στην *Εικόνα 4-15* απεικονίζεται το *Rate Budget*<sup>11</sup> της σταθερής κατάστασης. Οι ποσότητες ισορροπίας για τη ροή θερμότητας μπορούν να υπολογιστούν και να εμφανιστούν στα *panel* των *budgets* του *FEFLOW*, είτε κατά τη διάρκεια είτε κατά το πέρας της προσομοίωσης. Η ισορροπία έχει επέλθει για τη συνοριακή συνθήκη *Cauchy*.

Τα *Rate Budget* δείχνουν με πράσινο χρώμα τις εισροές και με κόκκινο χρώμα τις εκροές θερμότητας για τους διάφορους τύπους συνοριακών συνθηκών, καθώς και την εκροή ή απομάκρυνση (*sink*) και την παροχή/εισροή (*source*) ρευστού. Η τιμή της ανισορροπίας (*Imbalance*) δείχνει το αριθμητικό σφάλμα που δημιουργείται κατά την επίλυση του *solver*. Το σφάλμα αυτό στο *transient-state* θα είναι πιο λογικό σε σχέση με το *steady-state* καθώς υπάρχει ροή στο εσωτερικό του ταμιευτήρα μέσω των γεωτρήσεων.

Domain of Interest (DOI)	
Domain	
<input checked="" type="checkbox"/> Active	[J/d]
Dirichlet BCs	
Neumann BCs	
Cauchy BCs	
-3.0776e+10	+3.0776e+10
Point-Source BCs	
Distributed Sink(-)/Source(+)	
Storage Capture(-)/Release(+)	
Imbalance	
-329.37	

*Εικόνα 4-15: Steady-State Rate Budget (FEFLOW 7.0, Screenshots).*

Σε κάθε άλλη περίπτωση λόγω διαφορετικών ρυθμίσεων στις συνοριακές και τις αρχικές συνθήκες θα μπορούσε να μην επιτευχθεί ισορροπία στην κατανομή των θερμοκρασιών, με αποτέλεσμα ο ταμιευτήρας να μην «έπιανε» ποτέ συνθήκες σταθερής κατάστασης. Αυτό σημαίνει ότι κάποιο λάθος θα είχε γίνει στις ρυθμίσεις των παραμέτρων του λογισμικού, καθώς ένα τέτοιο

<sup>11</sup> Οι ποσότητες ισορροπίας για τη ροή του ρευστού, της μάζας και της θερμότητας, μπορούν να υπολογιστούν και να εμφανιστούν στα *Budget Panels* του *FEFLOW*, είτε κατά τη διάρκεια, είτε κατά το πέρας μιας προσομοίωσης. Το παράθυρο διαλόγου των *Rate Budgets* στο *FEFLOW* εμφανίζει τον προϋπολογισμό των ρυθμών ροής του ρευστού, της μάζας και της θερμότητας, στο τρέχον χρονικό βήμα της προσομοίωσης. Αυτή η διαδικασία προϋπολογισμού είναι διαθέσιμη για ολόκληρο το *domain* μοντέλου ή για κάποιο επιλεγμένο αριθμό κόμβων ή στοιχείων, που καθορίζουν το *domain* ενδιαφέροντος.



γεωθερμικό μοντέλο δεν μπορεί να υπάρξει στην φύση. Γενικότερα, οι ταμιευτήρες που συναντώνται στη φύση βρίσκονται σε κάποια ισορροπία, η οποία μελετάται κατά πόσο θα διατηρηθεί ύστερα από την όποια εκμετάλλευσή τους.

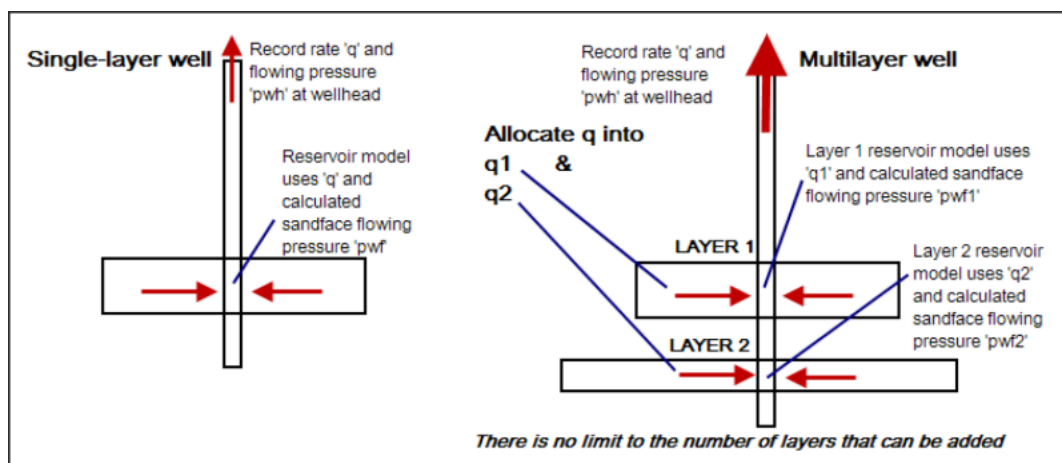
#### **4.4 Ανάπτυξη Μοντέλου Μεταβατικής Κατάστασης (*Transient-State Model*)**

Αφού έχει δημιουργηθεί το μοντέλο σταθερής κατάστασης και έχει προσδιοριστεί μια σχετικά ομοιόμορφη κατανομή των θερμοκρασιών στο ρευστό του ταμιευτήρα, επόμενο βήμα αποτελεί η κατασκευή του μοντέλου μεταβατικής κατάστασης. Για τον σχεδιασμό του ως αρχικές συνθήκες θα θεωρηθούν τα αποτελέσματα του μοντέλου σταθερής κατάστασης (κατανομή θερμοκρασίας στον ταμιευτήρα). Έτσι τα αποτελέσματα του *steady-state model* εισάγονται ως αρχικές συνθήκες σε ένα νέο αρχείο του *FEFLOW*. Καθώς έτσι έχουν οριστεί οι αρχικές συνθήκες του μοντέλου μεταβατικής κατάστασης, θα πρέπει να οριστούν επίσης και οι νέες συνοριακές συνθήκες. Αυτές υπαγορεύονται από τις γεωτρήσεις, οι οποίες εισάγονται στο λογισμικό ως *multilayer wells*. Πρόκειται για γεωτρήσεις που διέρχονται από διαφορετικούς ορίζοντες του ταμιευτήρα.

Για την ολοκλήρωση του μοντέλου, αφού εισαχθούν σε αυτό οι γεωτρήσεις, θα πρέπει να δοθούν τα χαρακτηριστικά και ο ρυθμός άντλησης και επανεισαγωγής ρευστών στο ταμιευτήρα με τη μορφή χρονοσειρών (*time-series*). Ως μέγιστο χρονικό διάστημα εκμετάλλευσης του ταμιευτήρα κι επομένως της προσομοίωσης μεταβατικής κατάστασης ορίζονται τα 100 χρόνια (βλ. ενότητα 4.1)

##### **4.4.1 Συνοριακές Συνθήκες Βάσει Γεωτρήσεων που Διέρχονται από Διαφορετικούς Ορίζοντες (*Multilayer Wells Boundary Conditions*)**

Υπάρχουν 2 τρόποι για να εισαχθούν οι οριακές συνθήκες που ορίζονται από τις γεωτρήσεις στο *FEFLOW*: είτε οι γεωτρήσεις να είναι απλές (δηλ. γεωτρήσεις που μπορούν να παράγουν μόνο από έναν ορίζοντα), είτε οι γεωτρήσεις να είναι σύνθετες και να μπορούν να παράγουν από περισσότερους του ενός ορίζοντες του ταμιευτήρα. Στην πρώτη περίπτωση ορίζεται η τιμή του προκαθορισμένου ρυθμού άντλησης ή επανεισαγωγής σε έναν μόνο κόμβο ή σε μια μόνο ομάδα κόμβων του μοντέλου. Η ρύθμιση των οριακών συνθηκών σε μια γεώτρηση που διέρχεται από περισσότερους του ενός παραγωγικούς ορίζοντες (*multilayer wells*) είναι πιο σύνθετη (*Εικόνα 4-16*).



Εικόνα 4-16: Λειτουργική διαφορά των απλών Well BC, και των Multilayer Well BC σε γεωτρήσεις παραγωγής. Στη πρώτη περίπτωση (αριστερά), το μοντέλο χρησιμοποιεί μία ποσότητα παροχής 'q' για να υπολογίσει την αντίστοιχη πίεση, ενώ στη δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιεί το σύνολο των 'q<sub>1</sub>' και 'q<sub>2</sub>' (IHS Markit, 2020).

Στις *multilayer* γεωτρήσεις η άντληση ή/και η επανεισαγωγή νερού αναπαρίσταται μέσω μιας κατακόρυφης ή κεκλιμένης γεώτρησης που εκτείνεται σε μια σειρά στρώσεων (*layers*) ή ομάδων στοιχείων (*element groups*) του μοντέλου ([FEFLOW Online Help](#)). Με αυτόν τον τρόπο η συγκεκριμένη γεώτρηση μπορεί να παράγει είτε μόνο από έναν από αυτούς τους ορίζοντες (οποιονδήποτε), είτε από δύο ή και περισσότερους, ταυτόχρονα. Αυτή η συνδυασμένη παραγωγή από περισσότερους του ενός παραγωγικούς ορίζοντες ονομάζεται και *commingled production*.

Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, οι συνθήκες άντλησης/επανεισαγωγής των *multilayer wells* λαμβάνουν χώρα στον κατώτερο κόμβο της γεώτρησης, όπως δηλαδή και στις απλές γεωτρήσεις, με τη διαφορά όμως ότι χρησιμοποιούν ειδικά στοιχεία (*discrete feature elements*), κατά μήκος του εσωτερικού της γεώτρησης, σύμφωνα με τη γεωμετρία αυτής. Για τον υπολογισμό της ροής κατά μήκος της γεώτρησης εφαρμόζεται ο νόμος *Hagen-Poiseuille* και οι απαραίτητες παράμετροι ρυθμίζονται με βάση την ακτίνα της γεώτρησης. Η κατανομή του συνολικού ρυθμού άντλησης ή εισαγωγής στα διάφορα *layers/slices* προκύπτει ως αποτέλεσμα της προσομοίωσης, εξασφαλίζει την υδραυλική ισορροπία και εξαρτάται από τις ιδιότητες του περιβάλλοντος υλικού και τη κατανομή του υδραυλικού φορτίου στα διαφορετικά *slices* ([FEFLOW Online Help](#)).

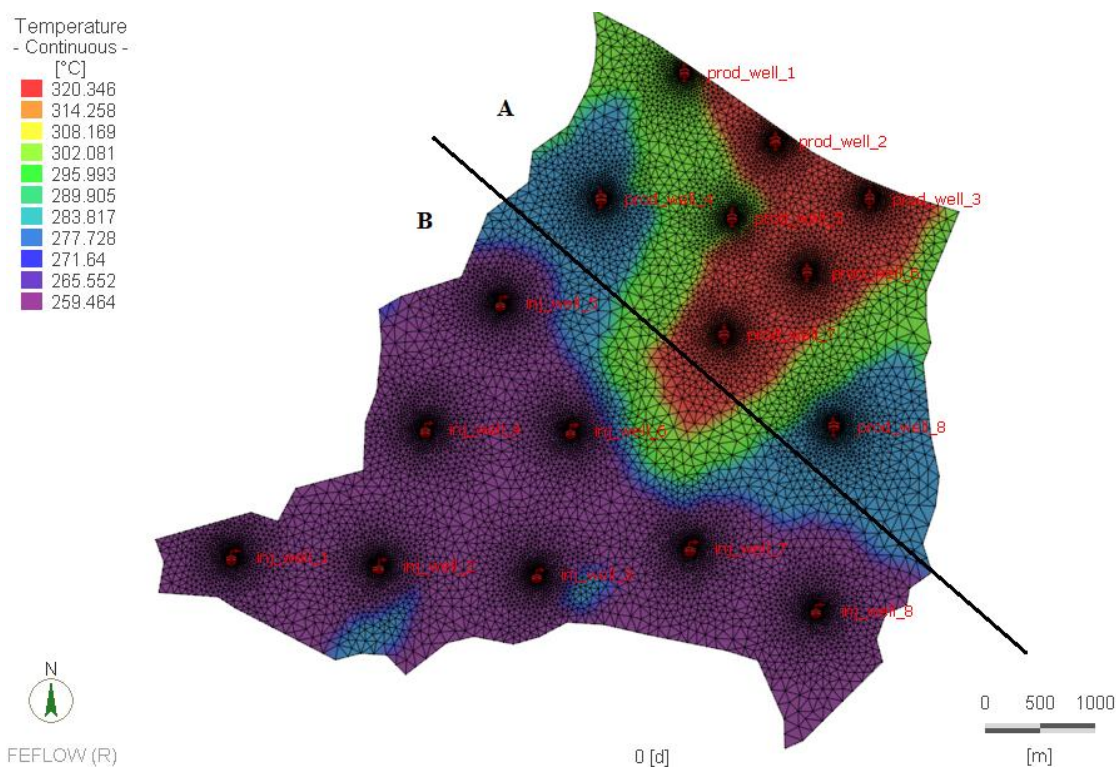
Συνολικά για την προσομοίωση του υπό έρευνα υποθετικού ταμιευτήρα, θεωρήθηκαν 16 συνολικά γεωτρήσεις, από τις οποίες οι 8 είναι γεωτρήσεις παραγωγής και οι άλλες 8 γεωτρήσεις επανεισαγωγής. Για τη χωροθέτηση των γεωτρήσεων καταρχάς ο ταμιευτήρας χωρίζεται περίπου στη μέση (Εικόνα 4-17) και προκύπτουν 2 τμήματα, τα





Α και Β, στα οποία τοποθετούνται οι γεωτρήσεις παραγωγής και επανεισαγωγής, αντίστοιχα. Αυτός ο τρόπος διαχωρισμού έγινε διότι στο τμήμα Α, παρατηρείται μεγαλύτερη συνολική θερμοκρασία του ρευστού του ταμιευτήρα συγκριτικά με το τμήμα Β. Όπως είναι λογικό οι γεωτρήσεις άντλησης θα πρέπει να μπουν στα σημεία εκείνα που έχουμε μεγαλύτερες θερμοκρασίες ρευστού. Αντίστοιχα, οι γεωτρήσεις επανεισαγωγής θα πρέπει να μπουν στα σημεία εκείνα όπου έχουμε χαμηλότερες θερμοκρασίες, και μάλιστα σε επαρκή απόσταση από τις γεωτρήσεις παραγωγής έτσι ώστε το ρευστό που επανεισάγεται να παραμείνει αρκετό χρονικό διάστημα ώστε να θερμανθεί επαρκώς, κατά τη διαδρομή του από τις γεωτρήσεις επανεισαγωγής στις γεωτρήσεις παραγωγής.

Τα ακριβή σημεία χωροθέτησης των γεωτρήσεων επιλέχτηκαν έτσι ώστε να καλύπτουν όσο το δυνατόν καλύτερα την έκταση του ταμιευτήρα, μεγιστοποιώντας τις μεταξύ τους αποστάσεις και αξιοποιώντας περισσότερο την «κόκκινη» περιοχή του ταμιευτήρα (περιοχή υψηλότερης θερμοκρασίας, *Εικόνα 4-17*).



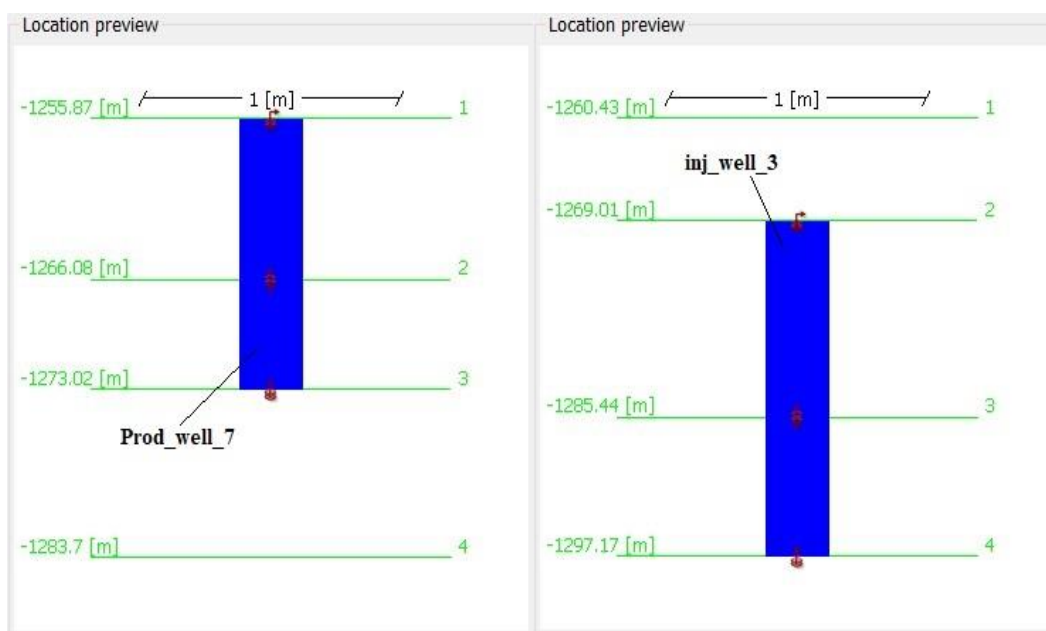
**Εικόνα 4-17:** Απεικόνιση των σημείων χωροθέτησης των γεωτρήσεων του μοντέλου στο slice 2. Ως prod\_well έχουν ονομαστεί οι γεωτρήσεις παραγωγής και ως inj\_well οι γεωτρήσεις επανεισαγωγής. Η κόκκινη περιοχή αποτελεί την «καρδιά» του θερμικού ταμιευτήρα λόγω του ότι έχει τις μεγαλύτερες θερμοκρασίες που προκαλούνται από τη μαγματική διείσδυση στον πυθμένα του (FEFLOW 7.0, Screenshots).

Ο συνολικός αριθμός των 16 γεωτρήσεων, επιλέχτηκε ύστερα από διάφορες υπολογιστικές δοκιμές με λιγότερες γεωτρήσεις. Από τις δοκιμές αυτές φάνηκε πως ο ταμιευτήρας δεν επηρεάζεται εύκολα από τον όγκο της παραγωγής και επομένως



αποφασίστηκε η τοποθέτηση περισσότερων γεωτρήσεων, οι οποίες σε κάθε περίπτωση θα μπορούν να ελεγχθούν από τα *time-series*, είτε ως προς την παροχή τους, είτε ως προς τον χρόνο λειτουργίας τους (βλ. επόμενη ενότητα 4.4.2).

Για την εισαγωγή των *multilayer wells* στο *FEFLOW*, θα πρέπει αρχικά να επιλέξουμε τις κάθετες ακμές (*join edges*<sup>12</sup>) των στοιχείων της διακριτοποίησης, στα σημεία όπου υπάρχει πύκνωση του *grid*. Οι κοινές ακμές που επιλέγονται για τις γεωτρήσεις παραγωγής βρίσκονται στα 2 πάνω *layers* του ταμιευτήρα (μεταξύ των *slices* 1, 2 & 3, βλ. Εικόνα 4-19), ενώ για τις γεωτρήσεις επανεισαγωγής επιλέγονται οι κοινές ακμές που βρίσκονται μεταξύ των 2 κάτω *layers* του ταμιευτήρα (μεταξύ των *slices* 2, 3 & 4, βλ. Εικόνα 4-20). Αυτό γίνεται ώστε το κρύο νερό που εισέρχεται στο ταμιευτήρα να έρχεται γρηγορότερα σε επαφή με τον πυθμένα ο οποίος έχει υψηλή θερμοκρασία και να αυξάνεται ο ρυθμός θέρμανσής του. Αντίστοιχα, οι γεωτρήσεις παραγωγής δεν τοποθετούνται στο χαμηλότερο *layer*, ώστε να υπάρχει περισσότερος χρόνος στο νερό να θερμανθεί από τα πετρώματα του ταμιευτήρα πριν αντληθεί. Στην παρακάτω Εικόνα 4-18 απεικονίζεται μια προεπισκόπηση της γεώτρησης παραγωγής 7 και της γεώτρησης επανεισπίεσης 3.

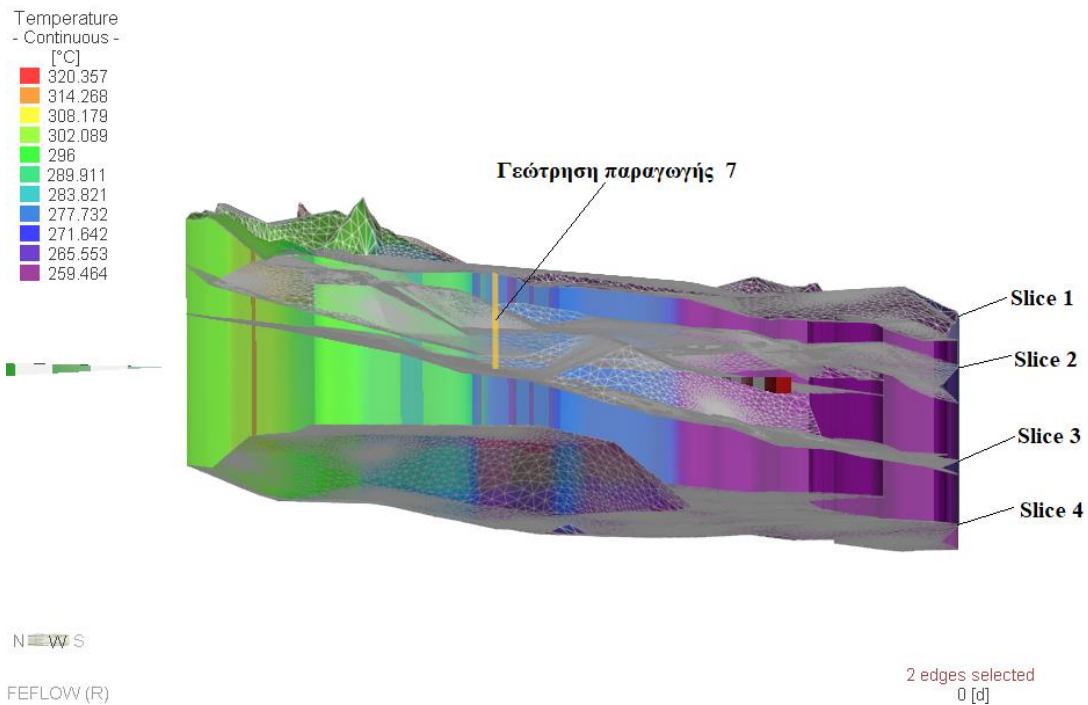


**Εικόνα 4-18: Προεπισκόπηση της μορφής των γεωτρήσεων στις θέσεις παραγωγής (αριστερά) και επανεισπίεσης (δεξιά), αντίστοιχα. Ενδεικτικά παρουσιάζεται η γεώτρηση παραγωγής 7 (*prod\_well\_7*) και η γεώτρηση επανεισαγωγής 3 (*inj\_well\_3*), που απεικονίζονται και στη 3D προβολή τους παρακάτω (Εικόνα 4-19 και Εικόνα 4-20, αντίστοιχα) (FEFLOW 7.0, Screenshots).**

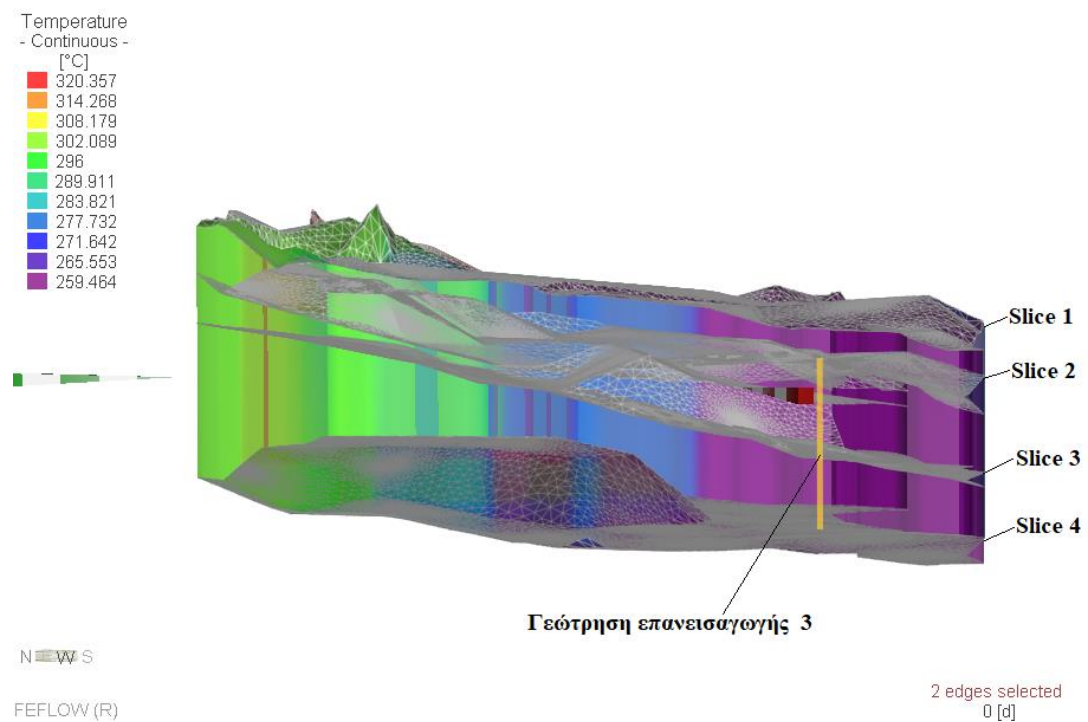
<sup>12</sup> Οι κοινές ακμές μεταξύ των στοιχείων κατά τον άξονα z, ονομάζονται **Join Edges** και ενώνουν τους κόμβους που έχουν τις ίδιες X-Y συντεταγμένες (Εικόνα 4-2, σελ. 73). Εμφανίζονται μόνο στη 3D προβολή και αποτελούν την επιλογή για την εισαγωγή των δεδομένων στα *multilayer wells*.



ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΣΕ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ  
ΜΕ ΣΧΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ-ΕΠΑΝΕΙΣΠΙΕΣΗΣ



**Εικόνα 4-19:** Ενδεικτική απεικόνιση μιας γεώτρησης παραγωγής (*prod\_well\_7*) (*FEFLOW 7.0, Screenshots*).



**Εικόνα 4-20:** Ενδεικτική απεικόνιση μιας γεώτρησης επανεισαγωγής (*inj\_well\_3*) (*FEFLOW 7.0, Screenshots*).

Από την *Εικόνα 4-20* εύλογα μπορεί να παρατηρηθεί πως η γεώτρηση επανεισαγωγής (*inj\_well\_3*) δεν φτάνει μέχρι την επιφάνεια. Το γεγονός αυτό δεν συμβαίνει στην πραγματικότητα, αλλά αφορά μόνο την μοντελοποίηση. Οι γεωτρήσεις στη πραγματικότητα φτάνουν μέχρι την επιφάνεια. Αυτό που φαίνεται και έχει





κατασκευαστεί στο λογισμικό αφορά το γεγονός ότι οι γεωτρήσεις παραγωγής και οι γεωτρήσεις επανεισαγωγής αντλούν από τα 2 πάνω *layers*, και επανεισάγουν νερό από τα 2 κάτω *layers* αντίστοιχα. Αυτό γίνεται για το λόγω του ότι το νερό του ταμιευτήρα παρουσιάζει διαφορετική πυκνότητα ανάλογα τη θερμοκρασία που βρίσκεται. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται μια πιο ομαλή ροή του εισαγόμενου και εξαγόμενου νερού. Το κρύο νερό εισάγεται στο πυθμένα του ταμιευτήρα, καθώς είναι βαρύτερο, ενώ το θερμό νερό λαμβάνεται από τις πιο επιφανειακές στρώσεις, καθώς είναι ελαφρύτερο. Αυτό το σκεπτικό εφαρμόζεται σε όλα τα γεωθερμικά πεδία. Το ίδιο συμβαίνει και σε πετρελαϊκούς ταμιευτήρες με τη διαφορά ότι εκεί υπάρχουν διαφορετικές πυκνότητες λόγω των διαφορετικών ρευστών που συνυπάρχουν.

Επόμενο βήμα αποτελεί ο καθορισμός της θερμοκρασίας του νερού που επανεισάγεται στον ταμιευτήρα από τις γεωτρήσεις επανεισαγωγής. Η θερμοκρασία αυτή αποτελεί συνοριακή συνθήκη για την εξίσωση μεταφοράς θερμότητας τύπου *Dirichlet* (βλ. ενότητα 3.3.2), και εφαρμόζεται στους κόμβους (κορυφές ή *nodes*) των κοινών ακμών (*join edges*) των γεωτρήσεων επανεισαγωγής που περνούν από κάθε *slice*. Η θερμοκρασία του νερού άντλησης που οδηγείται στις γεωτρήσεις παραγωγής δεν ορίζεται ως κάποια συνθήκη, καθώς αυτή προκύπτει από την επίλυση του προβλήματος.

Ως θερμοκρασία εισόδου του νερού στον ταμιευτήρα από τις γεωτρήσεις επανεισαγωγής δεν θεωρήθηκε η θερμοκρασία εξόδου του νερού από τον αμοστρόβιλο, η οποία παραμένει ιδιαίτερα υψηλή. Θεωρήθηκε ότι ακολουθεί δευτερεύουσα χρήση που απομαστεύει ακόμη περισσότερη θερμότητα από το νερό επιστροφής του αμοστροβίλου (βλ. ενότητα 3.1.1). Συγκεκριμένα, θεωρήθηκε ότι κατά την έξοδο του αμοστροβίλου, η θερμοκρασία του νερού πέφτει στους **150°C**. Λόγω των δευτερευόντων όμως χρήσεων, για τις λειτουργίες ενός θερμοκηπίου, η θερμοκρασία αυτή μειώνεται περισσότερο και τελικά φτάνει τους **80°C**. Επομένως επιλέγοντας τα *nodes* των *slices* για όλες τις γεωτρήσεις επανεισαγωγής εισάγεται τιμή θερμοκρασίας ίση με 80°C. Τέλος, η ακτίνα των σωληνώσεων των γεωτρήσεων ορίστηκε στα 0,25 m.

#### **4.4.2 Χρονοσειρά Λειτουργίας των Γεωτρήσεων (Time-Series)**

Κάθε χρονοσειρά (*time-series*) στο *FEFLOW* χαρακτηρίζεται από ένα μοναδικό αναγνωριστικό αριθμό ταυτοποίησης (*ID*) και έναν αυθαίρετο αριθμό ζεύγους δεδομένων: χρόνος και τιμή κάποιας παραμέτρου (π.χ. παροχή, πίεση κ.λπ.). Σκοπός της ρύθμισης των χρονοσειρών είναι ο χρονικός έλεγχος της τιμής αυτής της παραμέτρου.



ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΣΕ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ  
ΜΕ ΣΧΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ-ΕΠΑΝΕΙΣΠΙΕΣΗΣ

Το σκεπτικό του σχεδιασμού των *time-series*, για το μοντέλο που μελετήθηκε, βασίζεται στη σταδιακή έναρξη λειτουργίας των γεωτρήσεων, ώστε να παρακολουθείται η σταδιακή απόκριση του ταμιευτήρα στις διάφορες μεταβολές που λαμβάνουν χώρα. Ουσιαστικά, σε μία πραγματική εγκατάσταση, οι γεωτρήσεις δεν ξεκινούν να αντλούν και να εισάγουν νερό ταυτόχρονα την ίδια χρονική στιγμή, αλλά αντίθετα ελέγχονται από ένα πρόγραμμα παρακολούθησης του ταμιευτήρα (*monitoring*). Το πρόγραμμα ή το σύστημα αυτό καθορίζει πότε θα ενεργοποιούνται η κάθε μια από αυτές, προκειμένου να επιτυγχάνεται πάντα η ισορροπία των θερμοκρασιών στο εσωτερικό του ταμιευτήρα.

Όσο ο ταμιευτήρας δεν επηρεάζεται αρνητικά από την παραγωγή και την επανεισαγωγή, τόσο αυξάνεται ο όγκος παροχής ρευστού κι επομένως η απολαμβανόμενη ισχύς. Κατ' επέκταση, όσο μεγαλύτερη παροχή ρευστού με υψηλή θερμοκρασία, τόσο μεγαλύτερη η απόδοση ισχύος του εργοστασίου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Το πρόβλημα, ωστόσο, το οποίο θα πρέπει να διερευνηθεί κατά την προσομοίωση του μοντέλου, είναι αν με την αύξηση της παροχής ρευστού από τον ταμιευτήρα, αυτός μπορεί να διατηρήσει σταθερή και σε σχετικά υψηλά επίπεδα (200-300°C) τη θερμοκρασία του νερού που αντλείται.

Η ογκομετρική παροχή για κάθε γεώτρηση παραγωγής του μοντέλου επιλέχτηκε να είναι της τάξης των  $1.500 \text{ m}^3/\text{d}$  για τα πρώτα 5 χρόνια. Μετά την πάροδο των 5 χρόνων, κι εφόσον διαπιστωθεί η ομαλή λειτουργία του ταμιευτήρα (βλ. ενότητα 5.2.1), η παροχή αυτή διπλασιάζεται και γίνεται  $3.000 \text{ m}^3/\text{d}$ . Ο διπλασιασμός αυτός επιλέχτηκε ώστε να αυξηθεί περαιτέρω η συνολική παροχή άντλησης, αφού ελεγχθεί πρώτα η συμπεριφορά του ταμιευτήρα στα πρώτα 5 χρόνια, με μια μικρότερη παροχή. Οι παροχές αυτές αποτελούν συνήθεις τιμές που εφαρμόζονται σε γεωτρήσεις παραγωγής διαφόρων ταμιευτήρων.

Για τις γεωτρήσεις επανεισαγωγής, αντίστοιχα, η τιμή της ογκομετρικής παροχής που εισέρχεται στο ταμιευτήρα θα είναι 10% μικρότερη της παροχής των γεωτρήσεων παραγωγής. Η μείωση αυτή οφείλεται στο ότι υπάρχουν διάφορες απώλειες (περίπου 10-15%) κατά την κυκλοφορία του ρευστού στους σωλήνες της συνολικής εγκατάστασης. Έτσι, τα πρώτα 5 χρόνια οι τιμές παροχής των γεωτρήσεων επανεισαγωγής θα είναι  $1.350 \text{ m}^3/\text{d}$ , ενώ έπειτα από τα 5 χρόνια θα αυξηθούν και αυτές σε  $2.700 \text{ m}^3/\text{d}$  (δηλαδή κατά 10% μικρότερη από αυτή της γεώτρησης εισπίεσης).

Ο παρακάτω Πίνακας 4-1 (σελ. 97) παρουσιάζει το αναλυτικό χρονικό πρόγραμμα έναρξης λειτουργίας της κάθε γεώτρησης με την ογκομετρική παροχή που προστίθεται ή αφαιρείται κάθε χρόνο. Οι θετικές τιμές αντιπροσωπεύουν την παροχή άντλησης και οι



αρνητικές τιμές την παροχή επανεισαγωγής του νερού στο ταμειυτήρα. Ως *prod\_wells* έχουν ονομαστεί οι γεωτρήσεις παραγωγής και ως *inj\_wells* οι γεωτρήσεις επανεισαγωγής, σύμφωνα με την *Εικόνα 4-17* (σελ. 91). Τα νούμερα δείχνουν τον αριθμό της γεώτρησης που ενεργοποιείται (πχ. *prod\_well\_2, 7* = οι γεωτρήσεις παραγωγής 2 και 7, αντίστοιχα).

Αναλυτικότερα, τον 1<sup>ο</sup> χρόνο ενεργοποιείται η γεώτρηση παραγωγής 6, ενώ τον το 2<sup>ο</sup> χρόνο ξεκινά και η γεώτρηση επανεισαγωγής 3. Τον 3<sup>ο</sup> χρόνο ξεκινάει την παραγωγή οι γεωτρήσεις 2 και 7, ενώ ταυτόχρονα επανεισάγουν νερό οι γεωτρήσεις 1 και 4. Γενικότερα, προτιμάται η έναρξη πρώτα των γεωτρήσεων παραγωγής που βρίσκονται στην «καρδιά» της υψηλότερης θερμοκρασίας, λόγω της μαγματικής διείσδυσης (βλ. κόκκινη περιοχή στην *Εικόνα 4-17*) και έπειτα η έναρξη των γεωτρήσεων επανεισαγωγής που βρίσκονται μακρύτερα από την περιοχή αυτή. Ακολουθεί ο 4<sup>ος</sup> και 5<sup>ος</sup> χρόνος κατά τον οποίο ξεκινούν την παραγωγή οι γεωτρήσεις 1, 3, 5 και 4, 8, αντίστοιχα, και την επανεισαγωγή οι γεωτρήσεις 2, 6, 7 και 5, 8, αντίστοιχα. Τον 5<sup>ο</sup> χρόνο, ωστόσο, οι γεωτρήσεις παραγωγής που λειτουργούσαν μέχρι και τον 4<sup>ο</sup> χρόνο (1, 2, 3, 5, 6, 7) διπλασιάζουν τη ογκομετρική τους παροχή. Το ίδιο συμβαίνει και με τις γεωτρήσεις επανεισαγωγής (1, 2, 3, 4, 6, 7). Από τον 5<sup>ο</sup> χρόνο, επομένως, και μετά έχουμε διπλασιασμό της ογκομετρικής παροχής σε όλες τις γεωτρήσεις, εκτός από τις γεωτρήσεις παραγωγής 4 και 8 και τις γεωτρήσεις επανεισαγωγής 5 και 8. Αυτή η διαδικασία κρατάει μέχρι και τον 10<sup>ο</sup> χρόνο, όπου τελικά διπλασιάζουν τις τιμές παροχής και αυτές, με αποτέλεσμα να έχουμε συνολική άντληση  $24.000 \text{ m}^3/\text{d}$  και συνολική επανεισαγωγή  $21.600 \text{ m}^3/\text{d}$  (*Διάγραμμα 4-2*).

Στο παραπάνω *Διάγραμμα 4-2* παρατηρείται ότι όσο νερό αντλείται, τόσο επανεισάγεται στο ταμειυτήρα, με μία γενική απόκλιση της τάξης του 10%, λόγω απωλειών. Οι δύο καμπύλες είναι σχεδόν αντίστροφες γεγονός που επιβεβαιώνει αυτόν τον ισχυρισμό. Κατά την εισαγωγή των *multilayer wells* (*ενότητα 4.4.1*) και αφού έχει διαμορφωθεί σύμφωνα με τα παραπάνω το χρονοδιάγραμμα λειτουργίας, από το αντίστοιχο μενού των *time-series* στο *FEFLOW*, θα πρέπει να εφαρμοστούν τα δεδομένα λειτουργίας της κάθε μίας γεώτρησης. Αυτό γίνεται από το μενού του «*multilayer well editor*», από το οποίο εισάγεται για κάθε μία γεώτρηση το αντίστοιχο πρόγραμμά της σύμφωνα με το *ID* των αντίστοιχων *time-series*.

Επόμενο βήμα αποτελεί η έναρξη της προσομοίωσης του μοντέλου μεταβατικής προσομοίωσης (*Transient Model Simulation*), καθώς έχουν εισαχθεί όλα τα απαραίτητα *boundaries*, καθώς και το πρόγραμμα λειτουργίας μέσω των *time-series* που

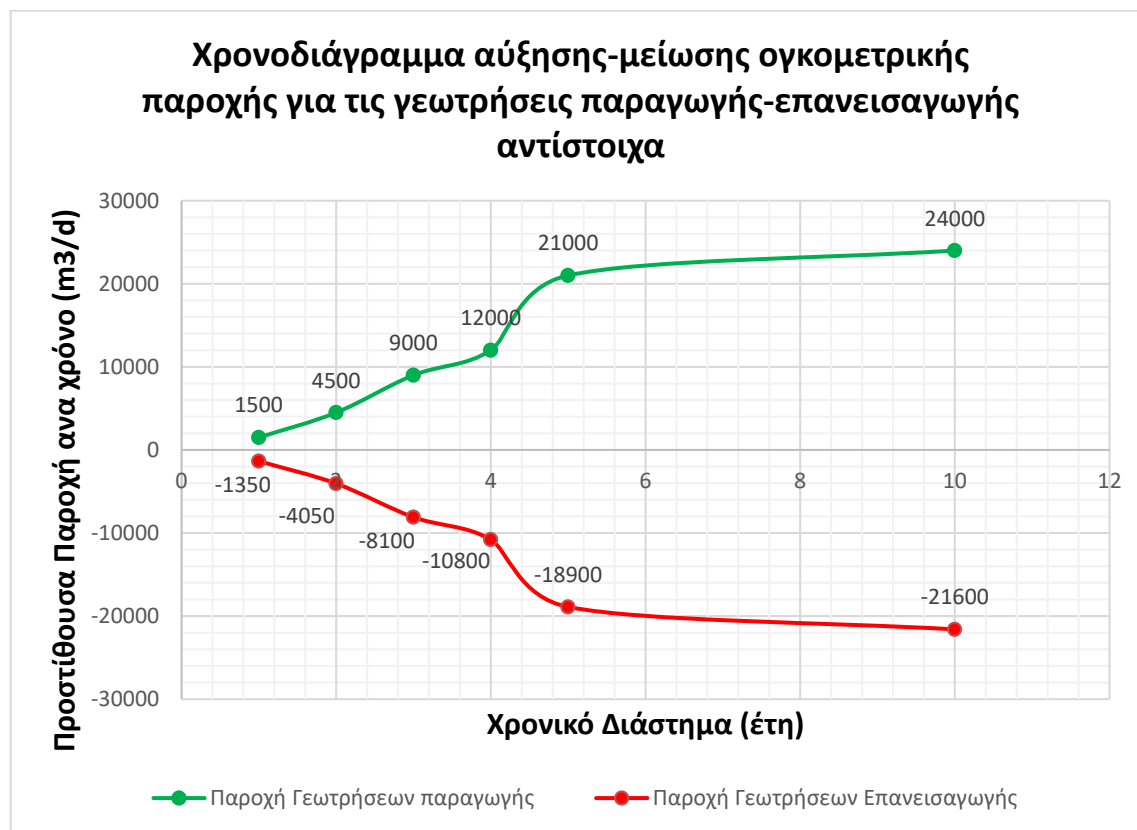


ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΣΕ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ  
ΜΕ ΣΧΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ-ΕΠΑΝΕΙΣΠΙΣΗΣ

περιλαμβάνουν όλα τα βασικά χαρακτηριστικά μιας κανονικής γεωθερμικής εγκατάστασης υψηλής ενθαλπίας.

*Πίνακας 4-1: Πίνακας αποτύπωσης χρονολογικής έναρξης λειτουργίας των γεωτρήσεων και υπολογισμού των ογκομετρικών παροχών ανά έτος.*

Έτος	Γεώτρηση παραγωγής	Γεώτρηση επανεισαγωγής	Ογκομετρική Παροχή (m <sup>3</sup> /d)	Αθροιστική Ογκομετρική Παροχή ανά έτος (m <sup>3</sup> /d)
1 <sup>ο</sup>	prod_well_6	-	+1500	+1500
2 <sup>ο</sup>	-	inj_well_3	-1350	-1350
3 <sup>ο</sup>	prod_wells_2,7	-	(+1500*2=) +3000	+4500
	-	inj_wells_1,4	(-1350*2=) -2700	-4050
4 <sup>ο</sup>	prod_wells_1,5,3	-	(+1500*3=) +4500	+9000
	-	inj_wells_2,6,7	(-1350*3=) -4050	-8100
5 <sup>ο</sup>	prod_wells_4,8	-	(+1500*2=) +3000	+12000
	-	inj_wells_5,8	(-1350*2=) -2700	-10800
	prod_wells_1,2,3,5,6,7	-	(+1500*6=) +9000	+21000
	-	inj_wells_1,2,3,4,6,7	(-1350*6=) -8100	18900
10 <sup>ο</sup>	prod_well_4,8	-	(+1500*2=) +3000	+24000
	-	inj_wells_5,8	(-1350*2=) -2700	-21600



*Διάγραμμα 4-2: Χρονοδιάγραμμα αύξησης και μείωσης της ογκομετρικής παροχής ανά έτος, για τις γεωτρήσεις παραγωγής και επανεισαγωγής, αντίστοιχα.*



## 5. ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

### 5.1 Προσομοίωση Μοντέλου Μεταβατικής Κατάστασης (*Transient Model Simulation*)

Εφόσον εισαχθούν όλες οι απαραίτητες ρυθμίσεις στο λογισμικό, όπως αυτές περιεγράφηκαν στο κεφάλαιο 4, μπορεί να ξεκινήσει η επίλυση των διαφορικών εξισώσεων του μοντέλου, ώστε τελικά να προσομοιωθεί η λειτουργία του ταμιευτήρα μετά την έναρξη της παραγωγής. Πριν την έναρξη της προσομοίωσης βέβαια θα πρέπει να ρυθμιστούν κατάλληλα τα *Problem Settings*<sup>13</sup> (μενού «*Edit>Problem Settings>Problem Class*»). Κατά την προσομοίωση της μεταβατικής κατάστασης του ταμιευτήρα (*transient*) θα πρέπει να οριστεί το χρονικό διάστημα για το οποίο θα προσομοιωθεί η συμπεριφορά του ταμιευτήρα. Έτσι, από το μενού «*Edit>Problem Settings>Simulation-Time Control*», ορίζουμε ως *final simulation time* τα 100 χρόνια (ή 365.000 μέρες).

Κατά την προσομοίωση του μοντέλου μεταβατικής κατάστασης θα υπολογιστεί η διακύμανση της θερμοκρασίας του ταμιευτήρα, όταν αυτός βρίσκεται υπό εκμετάλλευση για 100 χρόνια. Το πρόγραμμα λειτουργίας (παραγωγή/επανεισπίεση) των γεωτρήσεων ορίζεται κατευθείαν από τα *time-series* (βλ. ενότητα 4.4.2) και, επομένως, στον αρχικά κλειστό ταμιευτήρα δημιουργείται ροή νερού, το οποίο αντλείται από τις γεωτρήσεις παραγωγής, οδηγείται στο εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω σωληνώσεων, και επιστρέφει με μειωμένη θερμοκρασία στον ταμιευτήρα, από τις γεωτρήσεις επανεισαγωγής. Από τις γεωτρήσεις επανεισαγωγής κυκλοφορεί στο εσωτερικό του ταμιευτήρα, κινούμενο προς τις γεωτρήσεις παραγωγής θερμαίνεται από τον πυθμένα του ταμιευτήρα, κάτω από τον οποίο υπάρχει η μαγματική διείδυση, και τελικά αντλείται θερμότερο από τις γεωτρήσεις παραγωγής.

Αυτός ο κύκλος ροής μελετάται κατά την προσομοίωση της μεταβατικής κατάστασης, προκειμένου να γίνει αντιληπτό αν με την πάροδο του χρόνου το νερό που

---

<sup>13</sup> Το παράθυρο διαλόγου των *Problem Settings* του *FEFLOW* παρέχει μια επισκόπηση των ιδιοτήτων του μοντέλου έχοντας πρόσβαση σε όλες τις βασικές του ρυθμίσεις. Είναι προσβάσιμο μέσω του μενού «*Edit*». Οργανώνεται χρησιμοποιώντας μια προβολή «δέντρου» στην αριστερή πλευρά με τις ακόλουθες πιθανές καταχωρήσεις. Οι πραγματικές καταχωρήσεις εξαρτώνται από την τάξη προβλήματος και την διάσταση του μοντέλου. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί μια σωστή μοντελοποίηση, οι απαραίτητοι περιορισμοί ρυθμίζονται εδώ, πριν την έναρξη της προσομοίωσης.



επανεισάγεται στον ταμιευτήρα «προλαβαίνει» να θερμανθεί από τον πυθμένα του ταμιευτήρα, πριν αντληθεί από τις γεωτρήσεις παραγωγής. Αν η θερμοκρασία του παραγόμενου νερού πέσει σημαντικά, τότε προκαλείται αντίστοιχα πτώση της ισχύος στο εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

### 5.1.1 Διακριτοποίηση του Χρόνου

Για την επίλυση των μοντέλων μεταβατικής κατάστασης (*transient models*), πρέπει να καθοριστούν εκ των προτέρων οι ρυθμίσεις για τον έλεγχο του χρόνου της προσομοίωσης. Αυτές οι ρυθμίσεις καθορίζουν τη χρονική διακριτοποίηση για την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων στο *FEFLOW*. Όπως αναφέρθηκε και στην [ενότητα 3.2](#), όπως διακριτοποιείται η ανεξάρτητη μεταβλητή του χώρου του ταμιευτήρα, έτσι διακριτοποιείται και η μεταβλητή του χρόνου. Η διακριτοποίηση του χρόνου στο *FEFLOW* ορίζεται με βάση τον αριθμό των χρονικών βημάτων επίλυσης (*time-steps*). Ανάλογα, δηλαδή, με τον αριθμό και το μήκος των χρονικών βημάτων επίλυσης (*time-step length*), η μεταβλητή του χρόνου διαχωρίζεται και σε ανάλογα «κομμάτια». Όσο πιο μικρό μήκος έχουν τα χρονικά βήματα επίλυσης, τόσο καλύτερη ποιότητα προσομοίωσης αποκτάται, ενώ απαιτείται όλο και μεγαλύτερος συνολικός χρόνος επίλυσης.

Υπάρχουν τρεις διαφορετικές επιλογές χρονικής διακριτοποίησης για τα μοντέλα μεταβατικής κατάστασης στο *FEFLOW*:

- τα σταθερά χρονικά βήματα (*Constant time steps*),
- τα μεταβαλλόμενα χρονικά βήματα (*Varying time steps*) και
- ο αυτόματος έλεγχος των χρονικών βημάτων (*Automatic time-step control*).

Καθώς η πιο δυναμική στιγμή που αναμένεται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης ελέγχει το χρονικό βήμα για ολόκληρη την προσομοίωση, τα μεταβαλλόμενα χρονικά βήματα προσφέρουν περισσότερη ευελιξία έναντι των σταθερών χρονικών βημάτων. Ωστόσο, αυτή η επιλογή απαιτεί τον εκ των προτέρων ορισμό του μήκους κάθε χρονικού βήματος. Έτσι, στις περισσότερες περιπτώσεις, οι προσομοιώσεις στο *FEFLOW* χρησιμοποιούν ένα αυτόματο σχέδιο ελέγχου του χρονικού βήματος, σύμφωνα με το οποίο καθορίζεται το κατάλληλο μήκος των χρονικών βημάτων με βάση την αλλαγή στις κύριες μεταβλητές (φορτίο, συγκέντρωση μάζας και θερμοκρασία) ([FEFLOW Online Help](#)). Για τους λόγους αυτούς, η προσομοίωση του μοντέλου αυτής της εργασίας έγινε με τη ρύθμιση των αυτόματων χρονικών βημάτων. Η ρύθμιση αυτή επιλέγεται από το





μενού «*Edit>Problem Settings>Problem Class>Simulation-Time Control>Automatic Time-Step Control*».

Συνήθως, λοιπόν, κατά τη μέθοδο των αυτόματων χρονικών βημάτων, στην αρχή του υπολογισμού μιας παραμέτρου εφαρμόζονται περισσότερα «μικρά» χρονικά βήματα, καθώς υπάρχει αυξημένος όγκος πληροφοριών, ενώ με την πάροδο του χρόνου εφαρμόζονται όλο και πιο «μεγάλα» ή «αραιά» χρονικά βήματα. Ουσιαστικά το λογισμικό μειώνει και αυξάνει τη ταχύτητα επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων, προκειμένου να αναλύσει με λεπτομέρεια τα κρίσιμα σημεία.

Για την κατανόηση των παραπάνω, ένα καλό παράδειγμα αποτελεί το πρόγραμμα λειτουργίας (χρονοσειρά) των γεωτρήσεων (*time-series*) που έχουμε ορίσει στο μοντέλο για τα πρώτα 10 χρόνια της εκμετάλλευσης (βλ. ενότητα 4.4.2). Κάθε φορά που αλλάζει κάποιο δεδομένο των κύριων μεταβλητών, όπως η παροχή των γεωτρήσεων ή η έναρξη λειτουργίας κάποιας νέας γεώτρησης παραγωγής, το σύστημα δέχεται μια ξαφνική «διαταραχή» και το πρόγραμμα επίλυσης (*solver*) του λογισμικού δημιουργεί περισσότερα «μικρά» χρονικά βήματα επίλυσης προκειμένου να πετύχει λύση.

Η επιτυχής απόδοση του κατάλληλου χρονικού βήματος βασίζεται στην ισορροπία των ισοζυγίων μάζας και ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, όταν τίθεται ένα «τεράστιο» χρονικό διάστημα, τότε το πρόγραμμα επίλυσης (*solver*) θα λύσει μεν τις αλγεβρικές εξισώσεις, όμως η λύση που θα δώσει θα παραβιάζει τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας. Από ένα χρονικό βήμα όμως και κάτω η παραβίαση αυτή γίνεται ανεκτή, λόγω του ότι το πρόγραμμα επίλυσης μπορεί να επιλύσει τις αλγεβρικές εξισώσεις ευκολότερα υπο μικρότερα χρονικά βήματα. Έτσι, τελικά επιταχύνεται η διαδικασία επίλυσης με μεγαλύτερα χρονικά βήματα, μέχρι κάποια επόμενη αλλαγή σε κάποια μεταβλητή όπου επιβραδύνεται και πάλι κ.ο.κ.

### **5.1.2 Αποτελέσματα Προσομοίωσης Μεταβατικής Κατάστασης**

Το μοντέλο πλέον είναι έτοιμο να τρέξει. Επιλέγοντας το κουπί «*simulation run*», το λογισμικό ξεκινάει την επίλυση των συνόλων των εξισώσεων, διακριτοποιώντας τον χρόνο σε βήματα, όπως περιγράφηκε παραπάνω. Οι γεωτρήσεις ξεκινάνε να παράγουν και να επανεισάγουν ρευστό σύμφωνα με τη χρονοσειρά λειτουργίας τους (βλ. ενότητα 4.4.2). Η διαδικασία επίλυσης καταλαμβάνει κάποιο χρονικό διάστημα, ενώ ταυτόχρονα εμφανίζονται οι αλλαγές στη θερμοκρασία στο εσωτερικό του ταμειυτήρα κατά τη 3D προβολή του μοντέλου στο *FEFLOW*.



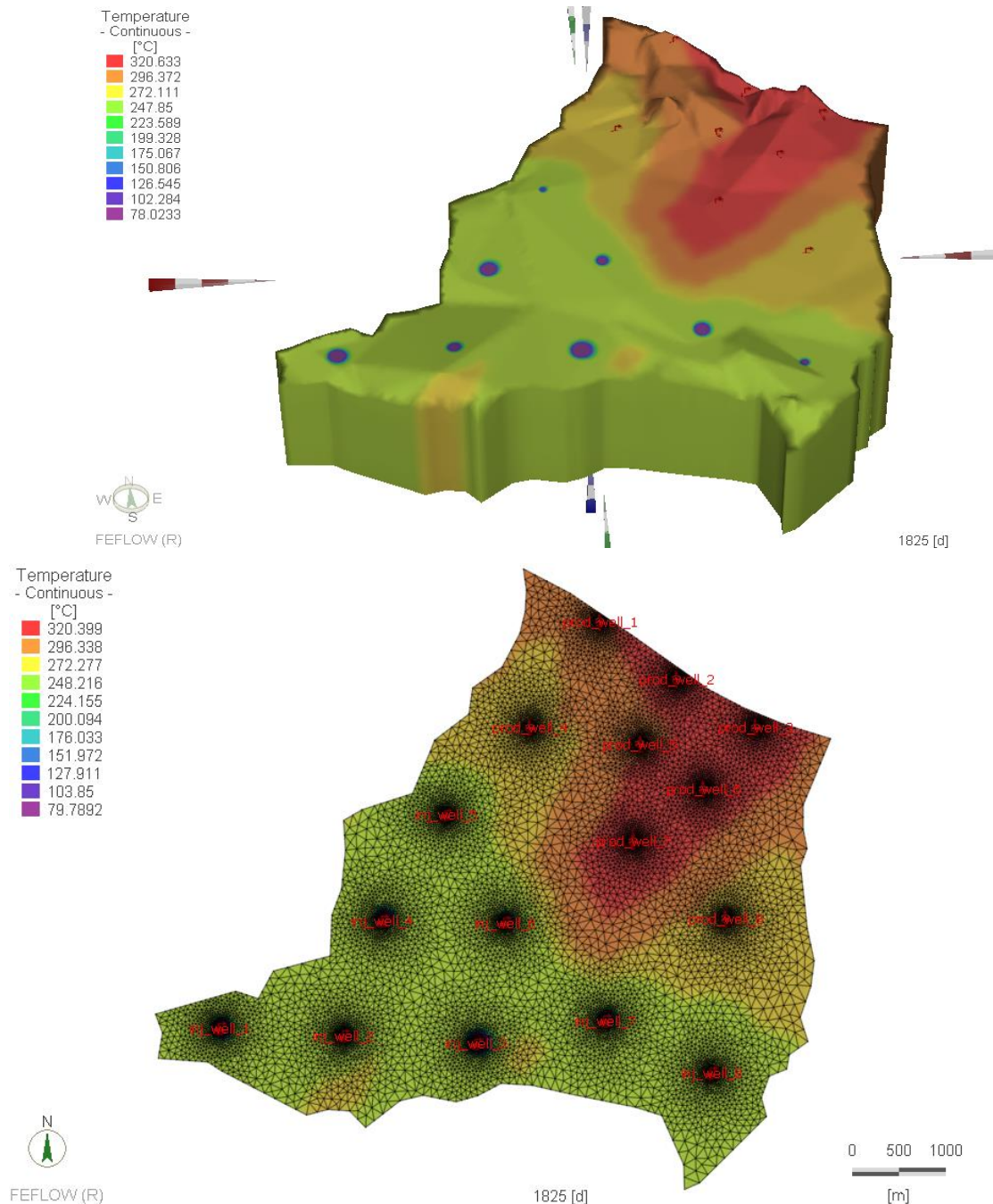
Στο τέλος της επίλυσης κάθε χρονικό βήμα που χρησιμοποιήθηκε είναι προσβάσιμο από το σχετικό μενού του *FEFLOW*, έτσι ώστε να υπάρχει η δυνατότητα μετάβασης σε οποιαδήποτε χρονικό σημείο και αξιολόγησης της κατάστασης του ταμιευτήρα, όπως αυτή προσδιορίστηκε από την επίλυση. Με άλλα λόγια, δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να ανατρέξει σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή της προσομοίωσης της εκμετάλλευσης του ταμιευτήρα και να αναλύσει τα αποτελέσματα αυτής. Ενδεικτικά, παρουσιάζονται στη συνέχεια 5 εικόνες οι οποίες αναφέρονται σε 5 διαφορετικές χρονικές στιγμές κατά την εκμετάλλευση του ταμιευτήρα που αναλύθηκε, προκειμένου να εξεταστεί η εξέλιξη στη διακύμανση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό αυτού. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η εξέλιξη της εκμετάλλευσης κατά τον 5°, 10°, 25°, 50° και 100° χρόνο από την έναρξη της αξιοποίησης του ταμιευτήρα (βλ. *Εικόνα 5-1* έως *5-5*, σελ. 102-106). Οι σχετικές εικόνες περιλαμβάνουν την 3D απεικόνιση του ταμιευτήρα και από τη 2D απεικόνιση του *slice 2* (όπου *slice 2* η κάτω διεπιφάνεια του 1<sup>ου</sup> *layer* ή η πάνω διεπιφάνεια του 2<sup>ου</sup> *layer* του ταμιευτήρα, βλ. *Εικόνα 4-4*, σελ. 75).

Για τη 2D απεικόνιση επιλέχτηκε το *slice 2*, καθώς αποτελεί την χαμηλότερου βάθους διεπιφάνεια στην οποία συνυπάρχει άντληση και επανεισαγωγή ρευστού. Για την παρακολούθηση της εξέλιξης της θερμοκρασίας στον ταμιευτήρα, συνήθως επιλέγονται οι οριζόντες που βρίσκονται πιο μακριά από την πηγή θερμότητας (μαγματική διείδυση στον πυθμένα του ταμιευτήρα) και, ως εκ τούτου, πιο κοντά στην επιφάνεια. Τη συγκεκριμένη αυτή παραδοχή καλύπτει το *slice 2*. Επίσης, για την εύρεση των θερμοκρασιών μιας γεώτρησης που παράγει/επανεισάγει σε διαφορετικούς οριζόντες (*multilayer well*), θα πρέπει να υπολογιστεί ο μέσος όρος των θερμοκρασιών σε κάθε οριζόντα (*layer/slice*) από τον οποίο παράγει/επανεισάγει. Στη συγκεκριμένη προσομοίωση οι θερμοκρασίες αναλύονται αποκλειστικά για το *slice 2*, καθώς οι τιμές της θερμοκρασίας στα υπόλοιπα *slices* για την ίδια γεώτρηση, παρατηρήθηκε πως είναι πολύ κοντά η μία με την άλλη (με διαφορές της τάξεως του 1 με 2 βαθμών). Σε κάθε άλλη περίπτωση θα έπρεπε να υπολογιστεί ο μέσος όρος των επιμέρους *slices* για κάθε μια γεώτρηση.

Επιλέχτηκε η παρουσίαση των συγκεκριμένων ετών, καθώς αυτά παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον τόσο από άποψη βέλτιστης διαχείρισης του προγράμματος εκμετάλλευσης, όσο και από άποψη εξασφάλισης της αειφορίας του ταμιευτήρα. Το 5° και το 10° έτος δεν είναι τόσο αντιπροσωπευτικά, καθώς μέχρι και τον 10° χρόνο περίπου η εκμετάλλευση θεωρείται ότι βρίσκεται ακόμα σε σχετικά πρώιμο στάδιο, όπου ακόμα διερευνώνται διάφορα σχήματα παραγωγής/επανεισπίεσης. Ωστόσο, επιλέχτηκαν για την παρατήρηση της συμπεριφοράς του ταμιευτήρα κατά τον διπλασιασμό της ογκομετρικής



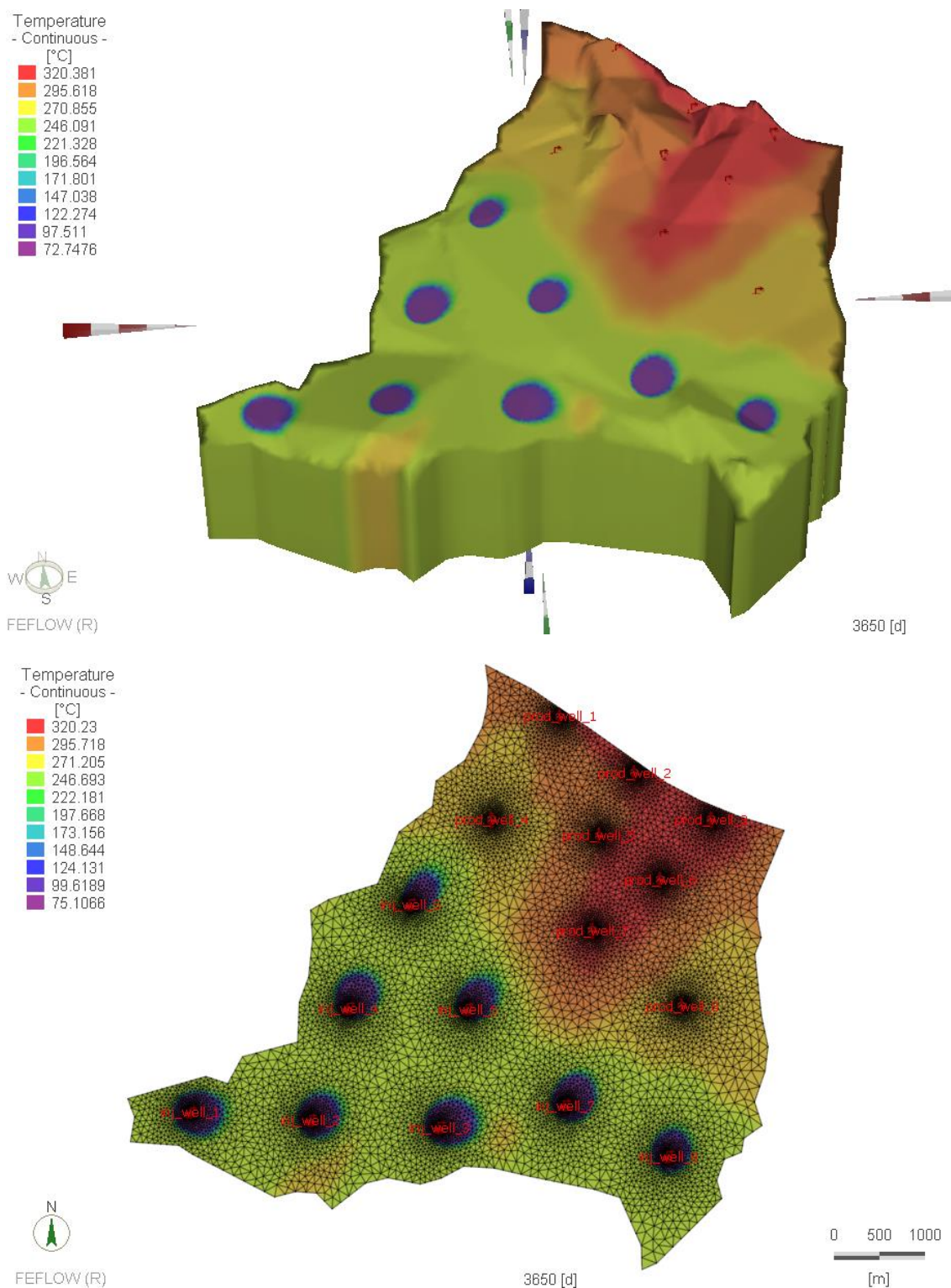
παροχής των 6 εκ των 8 γεωτρήσεων στο 5<sup>ο</sup> έτος και του διπλασιασμού της παροχής και των υπόλοιπων 2 γεωτρήσεων παραγωγής κατά το 10<sup>ο</sup> έτος (βλ. ενότητα 4.4.2). Το 25<sup>ο</sup> έτος συνήθως ορίζει τον χρονικό ορίζοντα βάσει του οποίου αξιολογείται μια επένδυση για την παραγωγή ηλεκτρική ενέργεια με αξιοποίηση γεωθερμικών ρευστών, ενώ η κατανόηση της συμπεριφοράς του ταμιευτήρα κατά το 50<sup>ο</sup> και το 100<sup>ο</sup> έτος συμβάλουν στη διερεύνηση τήρησης της συνθήκης της αιφορίας κατά την εκμετάλλευση του γεωθερμικού ταμιευτήρα (βλ. ενότητα 4.1).



**Εικόνα 5-1: Διακύμανση θερμοκρασίας στο εσωτερικό του ταμιευτήρα κατά το 5<sup>ο</sup> έτος της εκμετάλλευσής του. Πάνω: 3D απεικόνιση, Κάτω: 2D απεικόνιση (slice 2) (FEFLOW 7.0, Screenshots).**



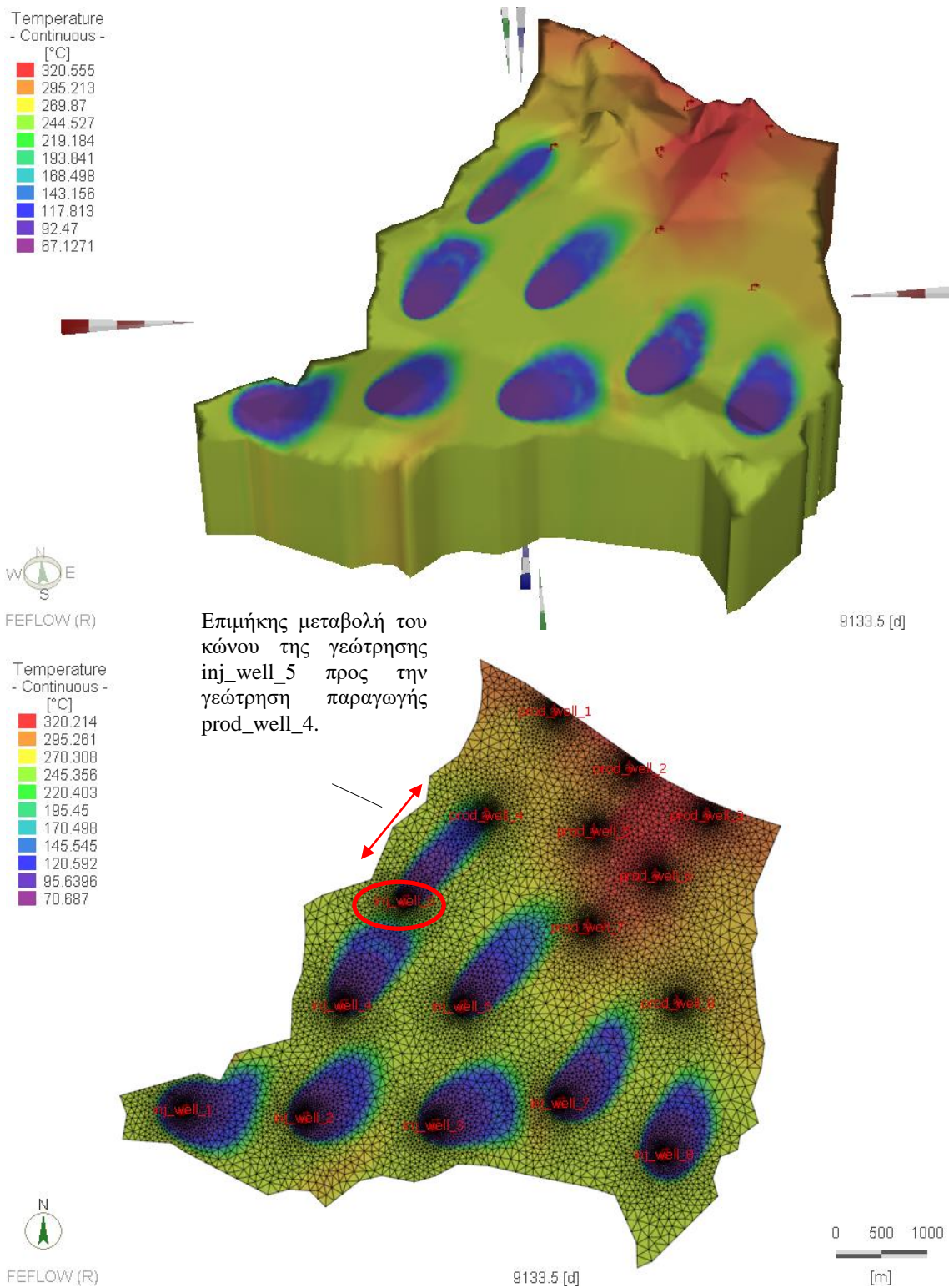
ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΣΕ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ  
ΜΕ ΣΧΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ-ΕΠΑΝΕΙΣΠΙΣΗΣ



**Εικόνα 5-2: Διακύμανση θερμοκρασίας στο εσωτερικό του ταμιευτήρα κατά το 10<sup>ο</sup> έτος της εκμετάλλευσής του. Πάνω: 3D απεικόνιση, Κάτω: 2D απεικόνιση (slice 2) (FEFLOW 7.0, Screenshots).**



ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΣΕ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ  
ΜΕ ΣΧΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ-ΕΠΑΝΕΙΣΠΙΕΣΗΣ

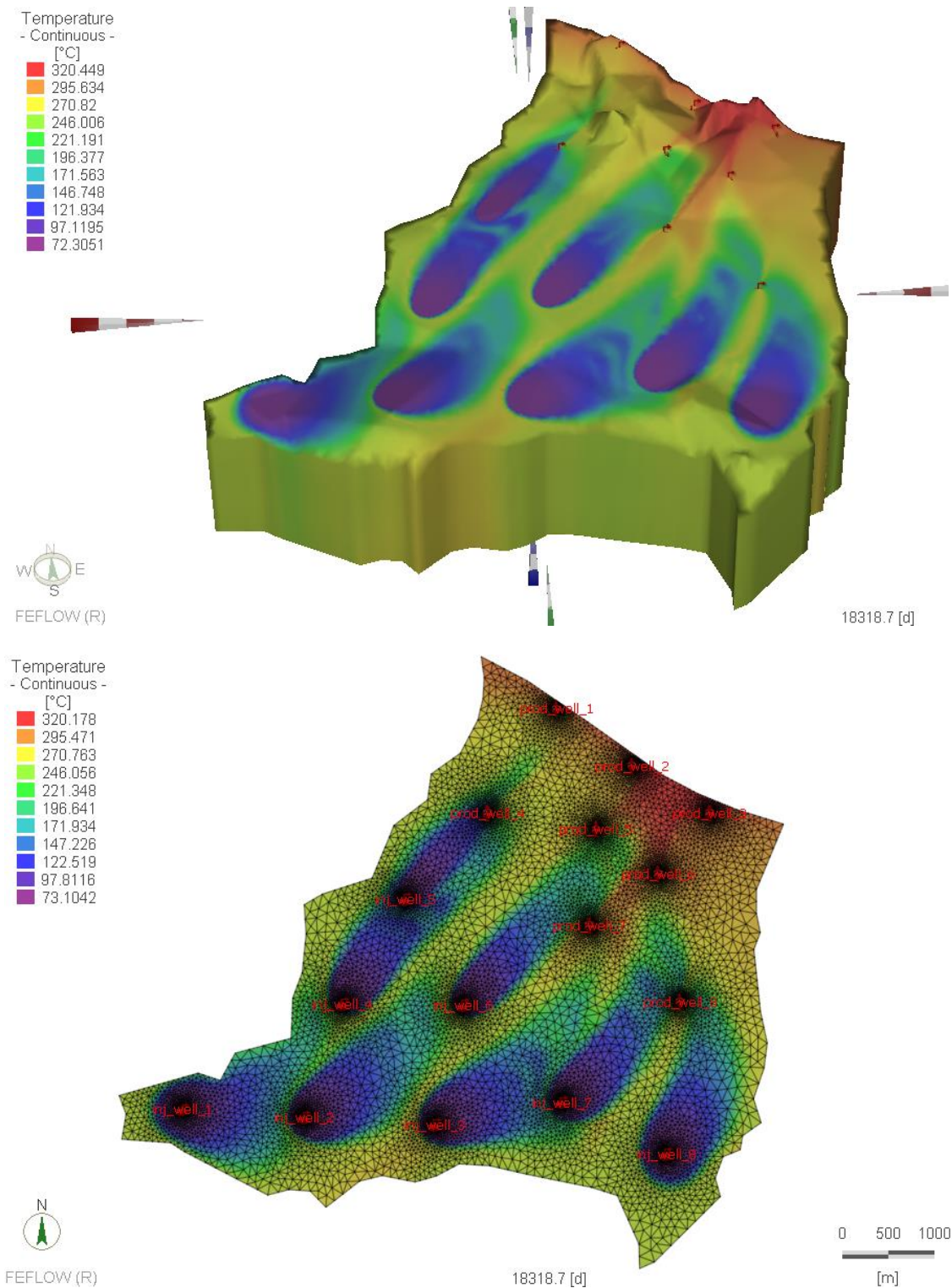


**Εικόνα 5-3: Διακύμανση θερμοκρασίας στο εσωτερικό του ταμιευτήρα κατά το 25<sup>ο</sup> έτος της εκμετάλλευσής του. Πάνω: 3D απεικόνιση, Κάτω: 2D απεικόνιση (slice 2) (FEFLOW 7.0, Screenshots).**





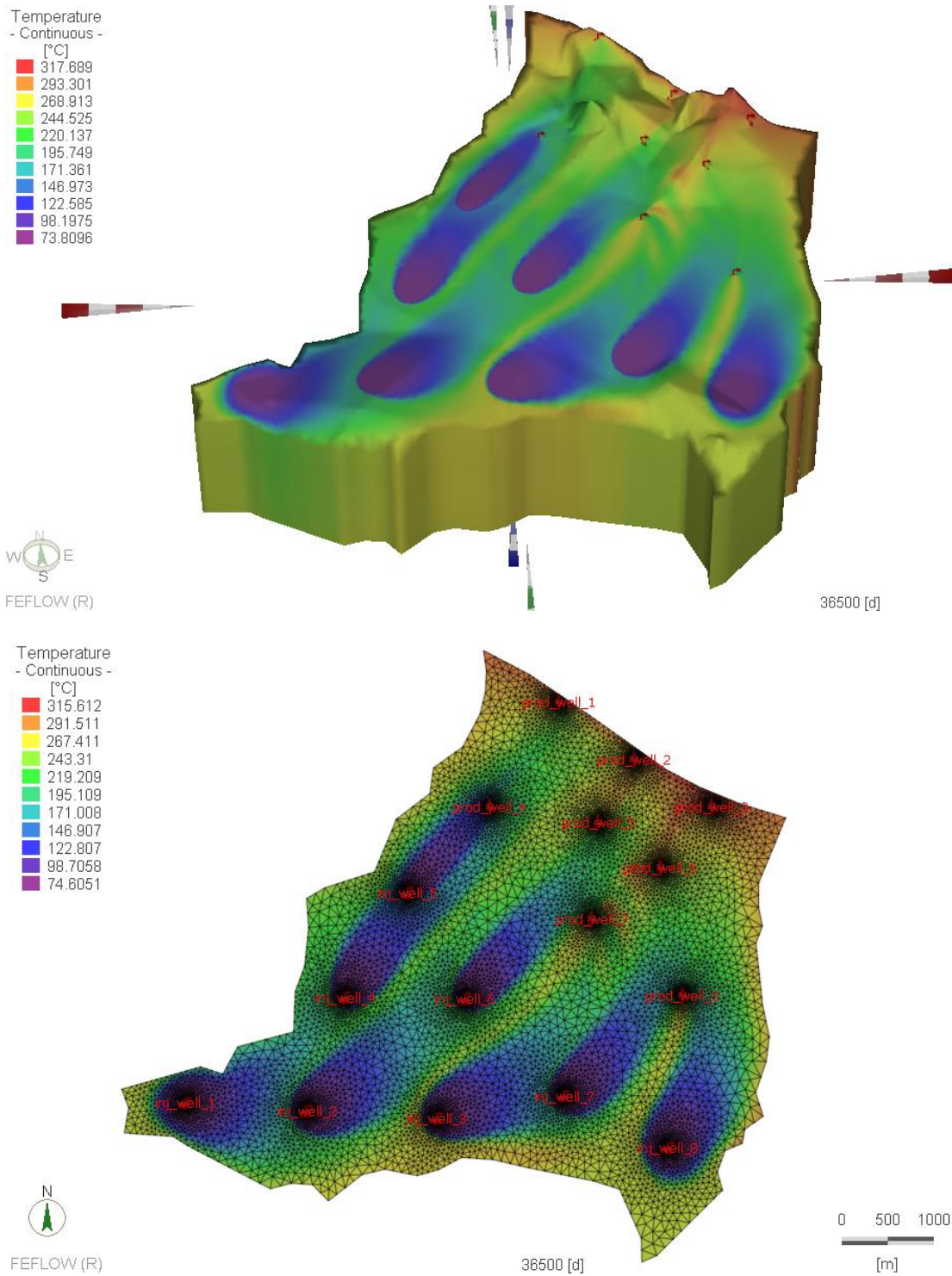
ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΣΕ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ  
ΜΕ ΣΧΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ-ΕΠΑΝΕΙΣΠΙΕΣΗΣ



Εικόνα 5-4: Διακείμευση θερμοκρασίας στο εσωτερικό του ταμιευτήρα κατά το 50<sup>ο</sup> έτος της εκμετάλλευσής του. Πάνω: 3D απεικόνιση, Κάτω: 2D απεικόνιση (slice 2) (FEFLOW 7.0, Screenshots).



ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΣΕ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ  
ΜΕ ΣΧΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ-ΕΠΑΝΕΙΣΠΙΕΣΗΣ



Εικόνα 5-5: Διακόμανση θερμοκρασίας στο εσωτερικό του ταμιευτήρα κατά το 100<sup>ο</sup> έτος της εκμετάλλευσής του. Πάνω: 3D απεικόνιση, Κάτω: 2D απεικόνιση (slice 2) (FEFLOW 7.0, Screenshots).



## 5.2 Ανάλυση Αποτελεσμάτων Προσομοίωσης Μεταβατικής Κατάστασης (*Transient*) – Συμπεράσματα

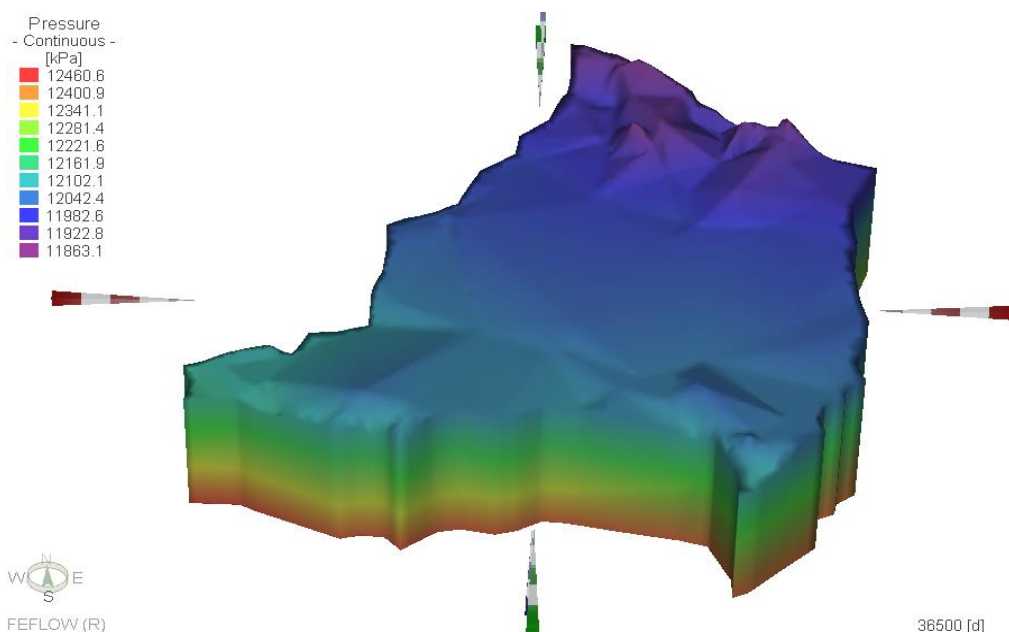
### 5.2.1 Ανάλυση της Μεταφοράς Μάζας (Υδραυλικού Περιεχομένου) της Προσομοίωσης

Πριν την ανάλυση των παραπάνω εικόνων της ενότητας 5.1.2, που αφορούν στη μεταφοράς θερμότητας μέσα στον ταμιευτήρα, αξίζει να διερευνηθεί και η υδραυλική συμπεριφορά του ταμιευτήρα καθ' όλη τη χρονική διάρκεια της εκμετάλλευσής του. Ο στόχος της ανάλυσης του υδραυλικού περιεχομένου του ταμιευτήρα είναι για να κατανοηθεί καλύτερα ο λόγος για τον οποίο επιλέχθηκε η επανεισαγωγή του νερού στο πεδίο της εκμετάλλευσης. Σημαντικό κριτήριο στην εκμετάλλευση ενός γεωθερμικού πεδίου είναι να διασφαλίζεται κάποιου είδους φυσική αναπλήρωση του νερού στο εσωτερικό του ταμιευτήρα π.χ. μέσω κάποιου ρήγματος κοντά στη μαγματική διείσδυση στον πυθμένα, μέσω του οποίου θα μπορούσε να εισάγεται στον ταμιευτήρα θερμό νερό. Αν συνέβαινε κάτι τέτοιο, ίσως να μην ήταν απαραίτητη η επανεισαγωγή νερού σε αυτόν μέσω γεωτρήσεων, γεγονός που συνεπάγεται προβλήματα όπως το μεγαλύτερο κόστος των γεωτρήσεων επανεισαγωγής και το θερμικό πρόβλημα που δημιουργείται με την πάροδο του χρόνου στον ταμιευτήρα, καθώς εισάγεται «κρύο» νερό σε αυτόν. Όταν δεν υπάρχει αυτό του είδους η φυσική αναπλήρωση ρευστού, ή ακόμα κι αν υπάρχει δεν είναι επαρκής, τότε η λύση της επανεισαγωγής με χρήση γεωτρήσεων αποτελεί μονόδρομο.

Η αρχική υπόθεση για τη μοντελοποίηση ενός «κλειστού» ταμιευτήρα στο *FEFLOW*, επιβεβαιώνεται σε αυτό το στάδιο. Σύμφωνα με αυτή η άντληση ρευστού, από έναν κλειστό γεωθερμικό ταμιευτήρα μέσω των γεωτρήσεων παραγωγής αναμένεται να προκαλέσει πτώση πίεσης περίξ της κάθε γεώτρησης. Στην περίπτωση «ανοιχτού» συστήματος με τη φυσική εισροή θερμού νερού σε αυτό, η πίεση περίξ των γεωτρήσεων παραγωγής είτε θα διατηρούνταν λιγότερο ή περισσότερο σταθερή, είτε θα αυξανόταν σε ένα βαθμό με την πάροδο του χρόνου. Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά την ανάλυση του υδραυλικού περιεχομένου του ταμιευτήρα εξετάζεται η τοπική πίεση σε ορισμένο σημείο κοντά σε κάποια γεώτρηση επανεισαγωγής και όχι η μέση (συνολική) πίεση του ταμιευτήρα (Εικόνα 5-6), καθώς αυτή μειώνεται σε κάθε περίπτωση με την πάροδο του χρόνου, λόγω της μειωμένης (κατά 10%) από απώλειες επανεισαγωγής (βλ. ενότητα 4.4.2).



Σημειώνεται, επίσης, ότι η συγκεκριμένη διαδικασία ανάλυσης οδήγησε στη διαπίστωση ότι το σύστημα που εξετάζεται είναι «κλειστό», κάτι που ήταν γνωστό εκ των προτέρων, καθώς πρόκειται για υποθετικό μαθηματικό μοντέλο. Ωστόσο, σε μια πραγματική εκμετάλλευση ενός αγνώστου ταμιευτήρα θα ακολουθούσαν ακριβώς η παρακάτω διαδικασία, προκειμένου να ελεγχθεί κατά πόσο το σύστημα που εξετάζεται είναι «κλειστό» ή δέχεται κάποιου είδους επαναφόρτιση.



**Εικόνα 5-6:** Χρωματική διαβάθμιση της πίεσης του ταμιευτήρα κατά το 100<sup>ο</sup> έτος της εκμετάλλευσής του (FEFLOW 7.0, Screenshots).

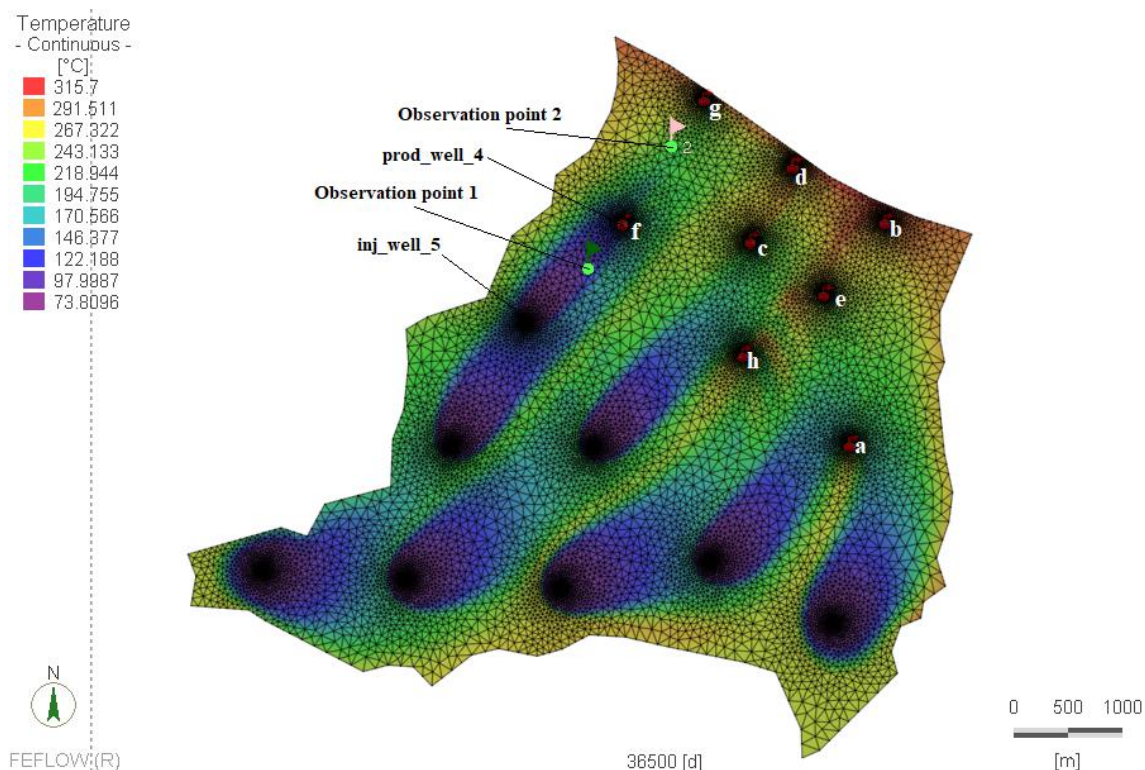
Για την έναρξη της ανάλυσης του υδραυλικού περιεχομένου του ταμιευτήρα θα πρέπει να γίνει για κάποιο χρονικό διάστημα μια «δοκιμή» άντλησης νερού από αυτόν, έτσι ώστε να διαπιστωθεί αν θα υπάρξει ή όχι πτώση πίεσης σε αυτόν. Έτσι, ακολουθώντας τη χρονοσειρά λειτουργίας των γεωτρήσεων παραγωγής (ενότητα 4.4.2) εξετάστηκε η γεώτρηση *well\_prod\_6* ως η πρώτη γεώτρηση παραγωγής που θα λειτουργεί μόνη της για έναν χρόνο. Κατά τον χρόνο αυτόν εξετάστηκε υδραυλικά το μοντέλο έτσι ώστε να κατανοηθεί η συμπεριφορά του στη διακύμανση της τοπικής πίεσης που θα δημιουργηθεί λόγω άντλησης ρευστού από τη γεώτρηση αυτή.

Κατά τη προσομοίωση της μεταβατικής κατάστασης (*transient*) του μοντέλου, παρατηρώντας την καμπύλη εξέλιξης της τοπικής πίεσης στη γεώτρηση *well\_prod\_6* (η οποία συμβολίζεται ως “e” στην Εικόνα 5-7) στο Διάγραμμα 5-2 (βλ. σελ. 120), επιβεβαιώνεται η αρχική υπόθεση του κλειστού ταμιευτήρα. Από την πρώτη κιόλας μέρα άντλησης καταγράφεται η πρώτη κατακόρυφη πτώση πίεσης, από το σημείο Α στο Β (από 12.462 kPa σε 12.450 kPa). Για τις επόμενες 400 ημέρες, η πίεση στη γεώτρηση συνεχίζει





τη πτώση της με σχετικά ταχύ ρυθμό, από το σημείο Β στο Γ (από 12.450 kPa σε 12.447 kPa), ενώ μετά τις 400 και ως τις 600 ημέρες η πίεση τείνει να σταθεροποιηθεί από το σημείο Γ στο Δ (από 12.447 kPa σε 12.446,5 kPa περίπου).



**Εικόνα 5-7: Θέσεις τοποθέτησης των σημείων παρατήρησης (observation points) 1 και 2, στο slice 1 του ταμιευτήρα του μοντέλου. Με τα γράμματα a, b, c, d, e, f, g, h απεικονίζονται οι θέσεις των γεωτρήσεων παραγωγής (FEFLOW 7.0, Screenshots).**

Στο σημείο Γ που αντιστοιχεί περίπου στις 400 ημέρες από την έναρξη της άντλησης από τη γεώτρηση 6, σύμφωνα με τη χρονοσειρά λειτουργίας των γεωτρήσεων ξεκινά η επανεισαγωγή από τη γεώτρηση *inj\_well\_3*. Για τον λόγο αυτό, η καμπύλη της πίεσης μέχρι και το σημείο Δ, όπως παρατηρείται, παραμένει σχεδόν σταθερή για τις επόμενες 200 ημέρες (σημείο Δ), γεγονός που αποδεικνύει ότι η αναπλήρωση νερού στον ταμιευτήρα είναι απαραίτητη για τη διατήρηση της πίεσης. Ωστόσο, μετά το σημείο Δ η πίεση βαίνει και πάλι μειούμενη, γεγονός που αποδίδεται στην επανεισαγωγή μάζας ρευστού κατά 10% μικρότερης από την παραγόμενη, λόγω απωλειών, όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 4 και συγκεκριμένα στην [ενότητα 4.4.2](#).

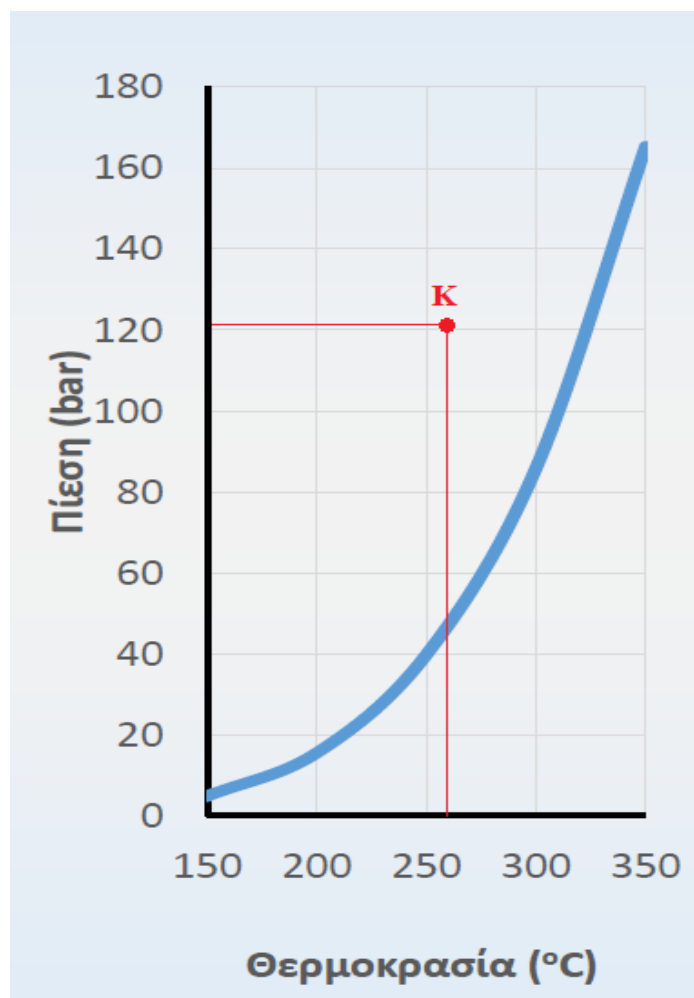
Από τα παραπάνω, εύκολα συνάγεται το συμπέρασμα ότι το σύστημα του ταμιευτήρα που μελετάται είναι «κλειστό», διότι όσο εφαρμόζεται άντληση χωρίς επαναφόρτιση, η πίεση διαρκώς μειώνεται. Το γεγονός αυτό οδηγεί στη συνήθη τακτική ανάπτυξης ενός σχεδίου ζευγών γεωτρήσεων παραγωγής/επανεισαγωγής για την εκμετάλλευση του γεωθερμικού πεδίου.



Τα σημεία Ε, Ζ, Η, Θ, του διαγράμματος της σελίδας 120 (Διάγραμμα 5-2), αποτελούν σημεία αλλαγής του σχήματος παραγωγής/επανεισαγωγής σύμφωνα με τη χρονοσειρά λειτουργίας των γεωτρήσεων, γεγονός που δικαιολογεί και την αλλαγή της κλίσης της καμπύλης μεταξύ αυτών των σημείων. Συγκεκριμένα, το σημείο Η αντιστοιχεί περίπου στο 5<sup>ο</sup> έτος από την έναρξη της εκμετάλλευσης, κατά το οποίο διπλασιάζεται η παροχή στις 6 από τις 8 γεωτρήσεις παραγωγής και επανεισαγωγής, αντίστοιχα (βλ. ενότητα 4.4.2). Αποτέλεσμα αυτού είναι η αρχικά κατακόρυφη πτώση πίεσης (λόγω της αύξησης της παραγωγής) στο σημείο αυτό και στη συνέχεια η σταθεροποίησή της (λόγω της αύξησης της παροχής επανεισαγωγής). Τέλος, στο σημείο Θ (περίπου κατά τον 10<sup>ο</sup> χρόνο), ξεκινά πλέον η σταθεροποίηση της κατάστασης του ταμειυτήρα, καθώς μετά από αυτή τη στιγμή η πίεση μειώνεται με σταθερό ρυθμό μέχρι και τον 100<sup>ο</sup> χρόνο (βλ. Διάγραμμα 5-3, σελ. 121). Αυτή η πτώση της πίεσης οφείλεται στον διπλασιασμό των παροχών και των υπόλοιπων γεωτρήσεων παραγωγής/επανεισαγωγής.

Διαπιστώνεται, λοιπόν, ότι ο ταμειυτήρας έχει την τάση να αποδυναμώνεται υδραυλικά με την πάροδο του χρόνου, όπως φαίνεται και από το συνολικό Διάγραμμα 5-3 των 100 χρόνων λειτουργίας του, καθώς το σύστημα δεν επαναφορτίζεται με φυσικό τρόπο, παρά μόνο με τεχνητό, κατά τον οποίο συστηματικά δεν επιστρέφει σε αυτόν το 10% της μάζας που παράγεται. Παρόλα αυτά σε όλο το διάστημα των 100 ετών η κατώτερη πίεση που φτάνει η γεώτρηση παραγωγής “e” είναι 12.120 kPa, έναντι της αρχικής πίεσης των 12.460 kPa. Η συγκεκριμένη διαφορά πίεσης θεωρείται αμελητέα με βάση το Διάγραμμα 5-1, όπως αναλύεται και στη επόμενη παράγραφο.

Όπως έχει αναφερθεί, το συγκεκριμένο πεδίο που μοντελοποιείται θεωρείται μονοφασικό, που σημαίνει ότι δεν παρατηρείται κορεσμός του νερού σε ατμό στο εσωτερικό του ταμειυτήρα ή έστω σε τμήματα αυτού. Ωστόσο, πρέπει να διερευνηθεί κατά πόσο υπό τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που θα επικρατούν κατά τον 100<sup>ο</sup> χρόνο στη γεώτρηση *prod\_well\_6* αν το ρευστό του ταμειυτήρα παραμένει κάτω από την πίεση βρασμού (σημείο φουσαλίδας). Πράγματι, λαμβάνοντας υπόψη ότι η θερμοκρασία στη γεώτρηση αυτή θα είναι 263°C (Πίνακας 5-1, σελ. 116), και η τελική πίεση της 12.120 kPa ή 121,2 bar, σύμφωνα με το παρακάτω Διάγραμμα 5-1 (σημείο K) διαπιστώνεται ότι βρισκόμαστε πάνω από την καμπύλη ισορροπίας των φάσεων. Επομένως, το νερό παραμένει στην υγρή του μορφή στο εσωτερικό του ταμειυτήρα, ακόμη και όταν η πίεση του ταμειυτήρα φτάσει την ελάχιστη τιμή της μετά από 100 χρόνια εκμετάλλευσης, με αποτέλεσμα η γενικότερη διακύμανση της πίεσης να μην επηρεάζει τη κατάσταση φάσης του συστήματος.



*Διάγραμμα 5-1: Διάγραμμα φάσης του νερού συναρτήσει της θερμοκρασίας και της πίεσης. Τα σημεία πάνω από την καμπύλη αφορούν την υγρή φάση, ενώ τα σημεία κάτω από την καμπύλη την αέρια (Γαγάνης, 2021).*

Αξίζει να σημειωθεί, το γεγονός ότι η πτώση πίεσης του εσωτερικού του ταμιευτήρα δεν συνεπάγεται και τη μείωση της παροχής των γεωτρήσεων παραγωγής. Οι συγκεκριμένες γεωτρήσεις παρουσιάζουν το λεγόμενο φαινόμενο του «Αυτόματου Αρτεσιανισμού», σύμφωνα με τον οποίο το ρευστό αλλάζει φάση στο εσωτερικό της γεώτρησης, λόγω της διαφοράς πίεσης της άντλησης εισόδου και εξόδου από τη γεώτρηση. Επομένως, η παροχή άντλησης της εκάστοτε γεώτρησης παραμένει σταθερή, ανεξάρτητα με τη συμπεριφορά της εσωτερικής πίεσης του ταμιευτήρα του γεωθερμικού συστήματος.



## 5.2.2 Ανάλυση της Μεταφοράς Θερμότητας (Θερμικού Περιεχομένου) της Προσομοίωσης

Από τις παραπάνω εικόνες της ενότητας 5.1.2 (βλ. *Εικόνα 5-1* έως 5-5, σελ. 102-106) παρατηρούνται εύκολα τα σημεία των γεωτρήσεων από τα οποία γίνεται η άντληση (παραγωγή) και η επανεισαγωγή. Στο τμήμα Α του ταμιευτήρα (βλ. *Εικόνα 4-17*, σελ. 91), βρίσκονται οι γεωτρήσεις παραγωγής, ενώ στο τμήμα Β οι γεωτρήσεις επανεισαγωγής.

Ήδη από τα 5 πρώτα χρόνια (*Εικόνα 5-1*, σελ. 102) παρατηρείται από τη χρωματική διαβάθμιση η πτώση της θερμοκρασίας του νερού σε μια μικρή σχετικά ακτίνα γύρω από τις γεωτρήσεις επανεισαγωγής (μοβ χρώμα), με αποτέλεσμα τη δημιουργία των λεγόμενων «θερμικών κώνων» στα σημεία αυτά λόγω της επανεισαγωγής του ψυχρού νερού. Η πτώση της θερμοκρασίας στις γεωτρήσεις επανεισαγωγής οφείλεται στο γεγονός ότι εισάγουμε από αυτές νερό θερμοκρασίας 80°C. Τέτοιου είδους κώνοι, οι λεγόμενοι «υδραυλικοί κώνοι», δημιουργούνται και στις γεωτρήσεις παραγωγής λόγω της άντλησης και της πτώσης πίεσης που αυτή συνεπάγεται. Ωστόσο, λόγω της σχετικά χαμηλής παροχής άντλησης, τέτοιου τύπου υδραυλικού κώνοι δεν παρατηρούνται έντονα στην προσομοίωση του ταμιευτήρα που εξετάστηκε στο *FEFLOW*.

Στο 5<sup>ο</sup> έτος γίνεται διπλασιασμός των ογκομετρικών παροχών των 6 εκ των 8 γεωτρήσεων παραγωγής/επανεισπίεσης (βλ. ενότητα 4.4.2), με αποτέλεσμα να παρατηρείται η δημιουργία θερμικών κώνων μεγαλύτερης ακτίνας γύρω από τις γεωτρήσεις κατά το 10<sup>ο</sup> έτος λειτουργίας του ταμιευτήρα (*Εικόνα 5-2*, σελ.103). Ωστόσο, ακόμα και σε αυτό το στάδιο παρατηρείται ότι η συνολική θερμοκρασία του ταμιευτήρα παραμένει σε υψηλά επίπεδα στις περιοχές των γεωτρήσεων παραγωγής (κόκκινο και κίτρινο χρώμα). Αυτό δείχνει πως ο ταμιευτήρας προς το παρόν δεν επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από το ψυχρότερο νερό που εισάγεται από τις γεωτρήσεις επανεισαγωγής. Αυτός είναι και ο λόγος που αποφασίστηκε ο διπλασιασμός των ογκομετρικών παροχών των υπόλοιπων 2 γεωτρήσεων παραγωγής/επανεισαγωγής. Η θερμοκρασία του νερού που εξέρχεται από τον ταμιευτήρα μέσω των γεωτρήσεων παραγωγής, για να οδηγηθεί στο εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, είναι ζωτικής σημασίας, καθώς θα πρέπει να είναι αρκετά υψηλή (>200°C) έτσι ώστε να μπορεί να παραχθεί η απαιτούμενη ισχύς.

Όπως παρατηρείται και στα επόμενα έτη της εκμετάλλευσης οι θερμικοί κώνοι των γεωτρήσεων συνεχίζουν να επεκτείνονται με την πάροδο του χρόνου. Αυτό αποτελεί ένδειξη ότι υπό τις παρούσες συνθήκες παραγωγής, ο ταμιευτήρας δεν μπορεί να ανταπεξέλθει επ' άπειρον στην απομάκρυνση θερμικού φορτίου από αυτόν, αλλά έχει



συγκεκριμένο χρόνο ζωής, τουλάχιστον σε ό,τι αφορά τη θερμική του συμπεριφορά. Προφανώς, οι κώνοι αυτοί μπορούν να αναταχθούν, αν απαιτηθεί, κλείνοντας τις γεωτρήσεις επανεισαγωγής για κάποιο διάστημα, ώστε ο ταμιευτήρας να θερμανθεί εκ νέου από τη μαγματική διείσδυση. Μετά τα 10 χρόνια λειτουργίας η συνολική ογκομετρική παροχή των γεωτρήσεων παραγωγής/επανεισαγωγής, σύμφωνα με τη χρονοσειρά λειτουργίας των γεωτρήσεων, βρίσκεται στη μέγιστη τιμή της, με συνολικά 24.000 [m<sup>3</sup>/d] και 21.600 [m<sup>3</sup>/d], αντίστοιχα (Πίνακας 4-1, σελ. 97). Η επέκταση επομένως των θερμικών κώνων θεωρείται λογική.

Παρόλα αυτά όμως κατά το 25<sup>ο</sup> έτος της εκμετάλλευσης (Εικόνα 5-3, σελ. 104), ενώ έχουν αυξηθεί κατά πολύ οι όγκοι των θερμικών κώνων στις γεωτρήσεις επανεισαγωγής, η θερμοκρασία του νερού στις γεωτρήσεις παραγωγής παραμένει σε υψηλά επίπεδα, στους 283°C περίπου, κατά μέσο όρο (Πίνακας 5-1, σελ. 116). Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η γεώτρηση επανεισαγωγής *inj\_well\_5* (Εικόνα 5-3), καθώς σε αυτήν παρατηρείται μια απότομη επιμήκης μεταβολή του κώνου της προς τη μεριά της γεώτρησης παραγωγής *prod\_well\_4*, μέσα σε ένα χρονικό διάστημα 15 χρόνων. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται όχι μόνο στο γεγονός ότι οι γεωτρήσεις αυτές βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους (κι επομένως αλληλοεπιδρούν έντονα), αλλά και στο γεγονός ότι και οι δύο βρίσκονται αρκετά κοντά στο όριο του ταμιευτήρα. Αυτό σημαίνει ότι δημιουργείται μια σχεδόν μονοδιάστατη ροή του νερού από τη μία στην άλλη, καθώς το νερό δεν μπορεί να απλωθεί προς τα άλλες κατευθύνσεις (βόρεια και δυτικά) λόγω των ορίων του ταμιευτήρα. Επομένως, κινείται υποχρεωτικά προς τα βορειοανατολικά οδηγούμενο προς τη γεώτρηση παραγωγής *prod\_well\_4*. Για την αποφυγή αυτού του προβλήματος είτε θα πρέπει να αλλαχθεί η σχετική θέση των γεωτρήσεων αυτών, είτε να μειωθεί η ογκομετρική παροχή με την οποία αντλείται και επανεισάγεται νερό στον ταμιευτήρα, είτε ακόμα και να μηδενιστεί.

Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά το στήσιμο του μοντέλου μεταβατικής κατάστασης (βλ. ενότητα 4.4), εισήχθησαν κάποια σημεία παρατήρησης σε διάφορες θέσεις της επιφάνειας (*slice 1*) και του πυθμένα του ταμιευτήρα (*slice 4*) (κυρίως σε θέσεις ενδιάμεσα των γεωτρήσεων παραγωγής/επανεισαγωγής), τα λεγόμενα «*observation points*». Η χρήση αυτών των σημείων δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να ελέγξει τη συμπεριφορά του ταμιευτήρα σε συγκεκριμένα σημεία ενδιαφέροντος μέσω σχετικών διαγραμμάτων.

Το Διάγραμμα 5-4, στη σελίδα 122, απεικονίζει τη χρονική εξέλιξη της τοπικής θερμοκρασίας στα σημεία παρατήρησης (*observation points*) 1 και 2, κοντά στις



γεωτρήσεις *inj\_well\_5* και *prod\_well\_4* (βλ. *Εικόνα 5-7*, σελ. 109). Σύμφωνα με το διάγραμμα αυτό παρατηρείται ότι στο *observation point 2*, που βρίσκεται σε μια καλή σχετικά περιοχή στην επιφάνεια του ταμιευτήρα, καθώς η θερμοκρασία της μαγματικής διείσδυσης στον πυθμένα στο σημείο αυτό ανέρχεται στους 300°C (βλ. *Εικόνα 4-8*, σελ. 78), η θερμοκρασία του νερού έχει πέσει μόνο κατά 75°C περίπου (από 300°C σε 225°C) μετά από 100 χρόνια λειτουργίας. Στο *observation point 1* όμως, που βρίσκεται ενδιάμεσα των προαναφερόμενων γεωτρήσεων *inj\_well\_5* και *prod\_well\_4*, παρατηρείται ραγδαία πτώση της θερμοκρασίας του νερού από τα πρώτα κιόλας 11 περίπου χρόνια (4.250 μερες), η οποία τείνει στη θερμοκρασία των 100°C (από τους 280°C που ξεκίνησε). Όμως μέχρι να φτάσει στη γεώτρηση *prod\_well\_4*, το εισπιεζόμενο νερό θερμοκρασίας 80°C θερμαίνεται και προσεγγίζει την τιμή των 100°C στη μέση της διαδρομής του από τη γεώτρηση *inj\_well\_5* στη *prod\_well\_4*.

Μέχρι και τη γεώτρηση παραγωγής τελικά ανεβαίνει στη θερμοκρασία των 155°C (αύξηση θερμοκρασίας κατά 55°C) ακόμα και κατά τον 100<sup>ο</sup> χρόνο της εκμετάλλευσης (*Πίνακας 5-1*, σελ. 116). Υπενθυμίζεται ότι στην περιοχή της γεώτρησης *prod\_well\_4*, ο πυθμένας του ταμιευτήρα βρίσκεται στη θερμοκρασία των 280°C, σύμφωνα με τη συνοριακή συνθήκη τύπου *Cauchy* που έχει εισαχθεί (*Εικόνα 4-9* και *4-10*, σελ. 79). Ομοίως η γεώτρηση *inj\_well\_5* βρίσκεται στη θερμοκρασία των 260°C στον πυθμένα. Επομένως, αν και η θερμοκρασία του πυθμένα του ταμιευτήρα στη θέση της γεώτρησης *inj\_well\_5* είναι κατά 20 βαθμούς μικρότερη από την αντίστοιχη στη θέση της γεώτρησης *prod\_well\_4* (280-260 = 20°C), κινούμενο από την 1<sup>η</sup> γεώτρηση προς τη 2<sup>η</sup>, το ρευστό καταφέρνει να αυξήσει τη θερμοκρασία του κατά 55°C. Αυτό συμβαίνει διότι το νερό που επανεισάγεται γενικά από τις γεωτρήσεις επανεισαγωγής «απλώνεται» γύρω από τη γεώτρηση αυξάνοντας έτσι την επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας με τον πυθμένα του ταμιευτήρα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση το νερό δεν προλαβαίνει να «απλωθεί» γύρω από τη γεώτρηση *inj\_well\_5* και αντλείται σχεδόν κατευθείαν από τη γεώτρηση *prod\_well\_4* λόγω της σχεδόν μονοδιάστατης ροής του από τη μια γεώτρηση στην άλλη.

Ωστόσο, φαίνεται ότι ο ταμιευτήρας έχει τη δυνατότητα να θερμάνει το νερό ακόμα και σε αυτή τη δυσμενή περίπτωση. Η γρήγορη όμως μεταφορά μάζας του ρευστού από τη μία γεώτρηση στην άλλη δεν αφήνει περιθώρια για περαιτέρω θέρμανσή του. Η απότομη πτώση της θερμοκρασίας της γεώτρησης *prod\_well\_4* συγκρινόμενη και με τις υπόλοιπες γεωτρήσεις παραγωγής αποτυπώνεται και στο *Διάγραμμα 5-5* της σελίδας 123.

Στο διάγραμμα αυτό (σελ. 123), απεικονίζονται όλες οι καμπύλες της θερμοκρασίας των γεωτρήσεων παραγωγής και επανεισαγωγής κατά την προσομοίωση του ταμιευτήρα





για 100 χρόνια λειτουργίας. Συγκεκριμένα, οι γεωτρήσεις επανεισαγωγής, ονομαζόμενες με τα γράμματα  $i, j, k, l, m, n, o$  &  $p$ , επανεισάγουν νερό στους  $80^{\circ}\text{C}$ , με αποτέλεσμα να εμφανίζονται στο διάγραμμα ως μια οριζόντια σταθερή γραμμή στους  $80^{\circ}\text{C}$ . Αντίστοιχα, οι γεωτρήσεις παραγωγής, ονομαζόμενες με τα γράμματα  $a, b, c, d, e, f, g$  &  $h$ , παρουσιάζουν μια σταδιακή πτώση της θερμοκρασίας τους. Εξαιρέση σε μεγάλο βαθμό αποτελεί η γεώτρηση “ $f$ ”, που αντιστοιχεί στη γεώτρηση  $well\_prod\_4$ , όπου, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ο ρυθμός παραγωγής της ίσως χρειάζεται να ελαττωθεί ή ακόμα και να διακοπεί, ανάλογα με τις επιπτώσεις που επιφέρει στην παραγωγή ενέργειας. Επίσης, επιρροή στην παραγωγή ενέργειας ίσως παρουσιάζει σε μικρότερο βαθμό και η καμπύλη “ $a$ ”, η οποία αντιστοιχεί στη γεώτρηση παραγωγής  $well\_prod\_8$ .

Κατά τα επόμενα έτη εκμετάλλευσης ( $50^{\circ}$  και  $100^{\circ}$  έτος) παρατηρείται η εντονότερη εξέλιξη των θερμικών κώνων των γεωτρήσεων επανεισαγωγής, οι οποίοι τείνουν συνεχώς προς τις γεωτρήσεις παραγωγής επιμηκύνοντας συνεχώς το σχήμα τους (βλ. *Εικόνα 5-4* και *5-5*, σελ. 105-106). Αυτό συμβαίνει για τον εξής απλό λόγο του ότι δεδομένου του σχήματος του ταμιευτήρα η ροή είναι κατά κύριο λόγο προς τη βορειανατολική κατεύθυνση, γεγονός που δικαιολογεί το σχήμα των θερμικών κώνων προς αυτή την κατεύθυνση.

Από τις εικόνες που παρουσιάζουν το  $50^{\circ}$  και  $100^{\circ}$  έτος εκμετάλλευσης του ταμιευτήρα παρατηρείται ότι ο ταμιευτήρας δεν έχει πιάσει κάποιο *steady state* ή αλλιώς μια σταθερή κατάσταση ισορροπίας, όπως θα αναμενόταν σε ένα ιδανικό σύστημα εκμετάλλευσης, αλλά ψύχεται συνεχώς από τις γεωτρήσεις επανεισαγωγής (βλ. *Διάγραμμα 5-5*, σελ.123). Αντίθετα, σε ιδανικές συνθήκες, όταν ένα μοντέλο αποκτήσει μια σταθερή κατάσταση, ουσιαστικά δεν εμφανίζει αλλαγές ή μεταβολές στους κώνους των γεωτρήσεων, καθώς αυτοί παραμένουν σταθεροί με τον χρόνο σε μια μόνιμη κατάσταση. Έτσι η «εικόνα» του ταμιευτήρα στα 10 και 20 χρόνια, για παράδειγμα, θα παρέμενε αμετάβλητη. Το ψυχρό νερό που εισέρχεται στο ταμιευτήρα θα θερμαινόταν και θα αποκτούσε την ιδανική θερμοκρασία κάπου στη μέση της απόστασης μεταξύ γεωτρήσεων παραγωγής και επανεισαγωγής, με αποτέλεσμα να μπορεί να λειτουργεί με τον ίδιο τρόπο αέναα. Στην πραγματικότητα, ωστόσο, για να γίνει αυτό θα πρέπει να εισάγεται τόσο νερό στον ταμιευτήρα, ώστε η θερμότητα που μπορεί να αποδώσει η μαγματική διείσδυση στον πυθμένα του να αρκεί για να την επαναθέρμανσή του.

Παρακάτω παρουσιάζεται ο *Πίνακας 5-1* υπολογισμού των μέσων όρων των θερμοκρασιών των γεωτρήσεων παραγωγής κατά τα έτη 25, 50 και 100 της



εκμετάλλευσης από τον οποίο φαίνεται ότι η θερμοκρασία στον πυθμένα των γεωτρήσεων φθίνει, παραμένοντας, ωστόσο, σε επαρκώς υψηλά για την ηλεκτροπαραγωγή επίπεδα.

*Πίνακας 5-1: Διακύμανση και μέσος όρος των θερμοκρασιών των γεωτρήσεων παραγωγής κατά το 25<sup>ο</sup>, 50<sup>ο</sup> και 100<sup>ο</sup> έτος εκμετάλλευσης του ταμιευτήρα. Οι θερμοκρασίες για κάθε γεώτρηση λήφθηκαν από το slice 2, στο FEFLOW*

Γεωτρήσεις Παραγωγής	Θερμοκρασία 25 <sup>ο</sup> έτους (slice2)	Θερμοκρασία 50 <sup>ο</sup> έτους (slice2)	Θερμοκρασία 100 <sup>ο</sup> έτους (slice2)
	(°C)	(°C)	(°C)
prod_well_1	295	288	270
prod_well_2	309	303	284
prod_well_3	313	305	296
prod_well_4	184	165	155
prod_well_5	298	254	244
prod_well_6	310	293	263
prod_well_7	286	270	249
prod_well_8	270	228	220
<b>Μέσος όρος θερμοκρασιών</b>	<b>283 °C</b>	<b>263 °C</b>	<b>248 °C</b>

### **5.2.3 Συμπεράσματα**

Συνολικά για την εκμετάλλευση των 100 χρόνων τα αποτελέσματα που αναλύθηκαν στην [ενότητα 5.2.1](#) δείχνουν μια πολύ καλή απόδοση του ταμιευτήρα στις συνθήκες άντλησης και επανεισαγωγής που σχεδιάστηκαν. Το γεγονός αυτό διαπιστώνεται από τον μέσο όρο της θερμοκρασίας του ρευστού από τις γεωτρήσεις παραγωγής (*Πίνακας 5-1*), ο οποίος θεωρείται επαρκής για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Όσον αφορά την συνολική τελική ισχύ που μπορεί να έχει το υποθετικό εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, αυτή υπολογίζεται στην επόμενη [ενότητα 5.3](#).

Πιο συγκεκριμένα, ενώ παρατηρείται συνεχής αύξηση των θερμικών κώνων των γεωτρήσεων επανεισαγωγής που συνεπάγονται διαρκή μείωση της θερμοκρασίας του ταμιευτήρα, ακόμα και μετά από 100 χρόνια εκμετάλλευσης η θερμοκρασία του νερού που εξέρχεται από τις γεωτρήσεις παραγωγής βρίσκεται στους 248°C κατά μέσο όρο, ενώ στα 50 χρόνια στους 263°C (*Πίνακας 5-1*). Επομένως, στα 100 χρόνια ο ταμιευτήρας δείχνει ότι αν και ψύχεται σταδιακά, μπορεί ωστόσο να διατηρεί σε επαρκώς υψηλή θερμοκρασία το αντλούμενο νερό, χωρίς να μειώνεται σημαντικά η απόδοσή του (περίπου 250°C η μέση θερμοκρασία των γεωτρήσεων παραγωγής στα 100 χρόνια).



Επίσης, γίνεται αντιληπτό ότι η ογκομετρική παροχή είναι μεγαλύτερη από ό,τι μπορεί να »διαχειριστεί» η μαγματική διείσδυση, γεγονός που δικαιολογεί τη σταδιακή ψύξη του ταμιευτήρα με την πάροδο του χρόνου. Αυτό σημαίνει ότι η υπό το σχήμα αυτό εκμετάλλευση του ταμιευτήρα δεν έχει και δε πρόκειται να αποκτήσει αιεφορία, με την πλέον αυστηρή έννοια του όρου. Για να επιτευχθεί αιεφορία, θα πρέπει να μειωθούν οι ογκομετρικές παροχές των γεωτρήσεων, έτσι ώστε αυτός να επέλθει μια σταθερή κατάσταση ισορροπίας, γεγονός όμως που σημαίνει και ελάττωση της συνολικής ισχύος του εργοστασίου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Σε αυτό το σημείο κρίνεται ζωτικής σημασία η πολιτική απόφαση που θα ληφθεί για το σχέδιο λειτουργίας που θα εφαρμοστεί στην εκμετάλλευση. Συγκεκριμένα πρέπει να αποφασιστεί αν θα επιλεγεί μια εντατική εκμετάλλευση, αντλώντας και επανεισάγοντας μεγαλύτερη ποσότητα νερού για μικρότερο χρονικό διάστημα, και προκαλώντας την μακροπρόθεσμη ψύξη του ταμιευτήρα, ή θα επιλεγεί μια πιο ήπια εκμετάλλευση. Στην πρώτη περίπτωση θα υπάρξει αυξημένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά για μικρότερο χρονικό διάστημα λειτουργίας, καθώς ο ταμιευτήρας θα «κρυώνει», ενώ στη δεύτερη περίπτωση θα υπάρξει χαμηλότερη ηλεκτροπαραγωγή που θα διατηρηθεί όμως να διατηρηθεί για πολλά περισσότερα χρόνια.

Ωστόσο όπως παρατηρείται από το *Διάγραμμα 5-5* (σελ. 123) και την *Εικόνα 5-5* (σελ. 106), στα 100 χρόνια εκμετάλλευσης οι γεωτρήσεις που βρίσκονται στο βορειοανατολικό όριο του ταμιευτήρα *prod\_well\_1,2,3* (ή αλλιώς οι γεωτρήσεις *g, d, b*, αντίστοιχα), έχουν υψηλές θερμοκρασίες (κοντά στους 280°C κατά μέσο όρο). Επιπλέον οι γεωτρήσεις παραγωγής *prod\_well\_5, 6, 7* (ή αλλιώς οι γεωτρήσεις *c, e, h*, αντίστοιχα) έχουν και αυτές υψηλή θερμοκρασία (κοντά στους 250°C). Τη μόνη εξαίρεση αποτελούν οι γεωτρήσεις *prod\_well\_4, 8* (ή αλλιώς οι γεωτρήσεις *f και a*, αντίστοιχα) που βρίσκονται και πιο κοντά στις γεωτρήσεις επανεισπαγωγής *inj\_well\_5* και *inj\_well\_7, 8*, αντίστοιχα. Ωστόσο, από αυτές τις δύο ιδιαίτερο πρόβλημα ίσως μπορεί να δημιουργήσει η *prod\_well\_4*, η οποία έχει θερμοκρασία 155°C (βλ. *Διάγραμμα 5-5*). Χαμηλότερη θερμοκρασία από αυτήν μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά προβλήματα στην ηλεκτροπαραγωγή.

Επομένως, όσον αφορά την αιεφορία του ταμιευτήρα, συμπεραίνεται ότι όταν η απομάστευση του ταμιευτήρα πραγματοποιηθεί με το σενάριο που αναπτύχθηκε, αναμένεται μια σχετικά «αργή» ψύξη του ταμιευτήρα σε ένα διάστημα 100 χρόνων, με αποτέλεσμα να μπορεί να θεωρηθεί ότι εκμεταλλεύεται με επαρκή αιεφορία.



Ο σχεδιασμός ωστόσο του μοντέλου θα μπορούσε να βελτιωθεί χρησιμοποιώντας καλύτερο πρόγραμμα λειτουργίας των γεωτρήσεων. Σε ένα ρεαλιστικότερο μοντέλο, η οργάνωση του προγράμματος λειτουργίας των γεωτρήσεων από τα *time-series* μπορεί να διαμορφώσει ένα καλύτερο τελικό σχέδιο προσομοίωσης. Έτσι, κρίνοντας από το Διάγραμμα 5-5 για τη γεώτρηση παραγωγής *prod\_well\_4* (ή “f”) προτείνεται είτε η μείωση στο μισό, είτε ο πλήρης μηδενισμός της παροχής της ώστε να αποφευχθεί το πρόβλημα που δημιουργεί στο ταμιευτήρα. Το εκλειπόμενο φορτίο της ογκομετρικής παροχής της προτείνεται να επιμεριστεί στις υπόλοιπες 7 γεωτρήσεις παραγωγής. Ειδικότερα, το περισσότερο φορτίο θα μπορούσαν να αναλάβουν οι 4 πρώτες γεωτρήσεις (*g, d, b, e*), σύμφωνα με το Διάγραμμα 5-5, που αντιστοιχούν στις γεωτρήσεις *prod\_well\_1, 2, 3* και 6, αντίστοιχα. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να γίνει κατά το 50<sup>ο</sup> έτος της εκμετάλλευσης, αφήνοντας έτσι λίγο περισσότερο περιθώριο στον ταμιευτήρα να ανακάμψει από τη συνεχόμενη πτώση της θερμοκρασίας του.

### 5.3 Υπολογισμός Συνολικής Ισχύος της Παραγόμενης Ενέργειας

Ο υποθετικός ταμιευτήρας που προσομοιώθηκε ενδείκνυται να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω αξιοποίησης της θερμικής ενέργειας που θα μεταφέρεται από το θερμό νερό των γεωτρήσεων παραγωγής στον αεριοστρόβιλο του εργοστασίου. Επομένως, κρίνεται ζωτικής σημασίας ο υπολογισμός των παραμέτρων που αφορούν τη θερμοκρασία του παραγόμενου ρευστού και την τελική ισχύ που μπορεί να παραχθεί από το σύνολο των 8 γεωτρήσεων παραγωγής.

Οι παράμετροι αυτές αφορούν κυρίως τον υπολογισμό του απόλυτου θερμοκρασιακού περιεχομένου για κάθε γεώτρηση ( $\dot{Q}$ ), και στη συνέχεια το άθροισμα των επιμέρους θερμοκρασιακών περιεχομένων όλων των γεωτρήσεων, για τον υπολογισμό της συνολικής ισχύος της παραγόμενης από τις γεωτρήσεις ενέργειας. Το απόλυτο θερμοκρασιακό περιεχόμενο που αποδίδεται στον ατμοστρόβιλο υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (5.1)$$

Όπου:

- $\dot{m} = \rho \cdot q$  ο ρυθμός παροχής μάζας, με  $\rho$  την πυκνότητα του ρευστού [ $kg/m^3$ ] και  $q$  την παροχή [ $m^3/d$ ] του ρευστού που αντλείται από κάθε γεώτρηση παραγωγής
- $C_p$  η ειδική θερμοκρασιακή ιδιότητα του ρευστού [ $kJ/kg/K$ ] και



- $\Delta T$  η διαφορά θερμοκρασίας [K] μεταξύ της θερμοκρασίας εισόδου στον αεριοστρόβιλο και εξόδου από αυτόν, αντίστοιχα

Από τα παραπάνω η σχέση (5.1) γράφεται ως εξής:

$$\dot{Q} = \rho \cdot q \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (5.2)$$

Η παραπάνω σχέση (5.2) χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της συνολικής ισχύος των γεωτρήσεων παραγωγής. Για τον σκοπό αυτό αρχικά υπολογίζεται η πυκνότητα του νερού για κάθε γεώτρηση παραγωγής, ανάλογα με τη θερμοκρασία του ρευστού (Πίνακας 5-1, σελ. 116). Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και για τη θερμοκρασιακή ιδιότητα του νερού  $C_p$ , καθώς και η πυκνότητα ( $\rho$ ) και η θερμοκρασιακή ιδιότητα ( $C_p$ ) είναι ανάλογες της θερμοκρασίας ( $T$ ). Υπενθυμίζεται ότι η θερμοκρασία εξόδου του νερού από τον αεριοστρόβιλο ανέρχεται στους 150°C (βλ. [τελευταία παράγραφο ενότητας 4.4.1](#)). Αφαιρώντας τη θερμοκρασία αυτή, από την θερμοκρασία άντλησης του νερού κάθε γεώτρησης υπολογίζεται η διαφορά θερμοκρασίας  $\Delta T$ . Όλοι οι υπολογισμοί έγιναν σε υπολογιστικό φύλλο του *Excel* (Πίνακας 5-2 και Πίνακας 5-3, σελ. 124-125).

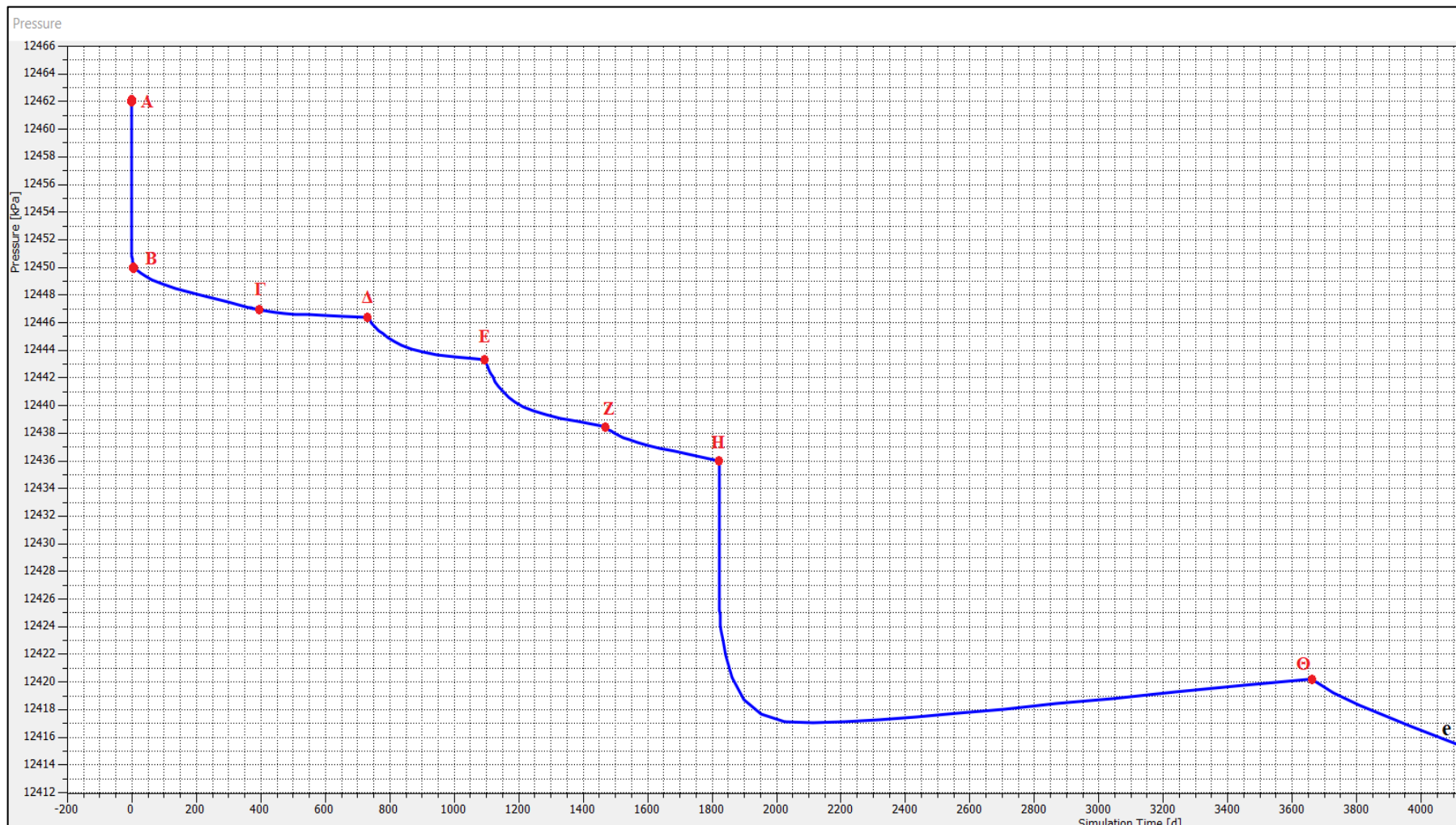
Το απόλυτο θερμοκρασιακό περιεχόμενο σύμφωνα με τη σχέση (3.31) υπολογίζεται σε  $kJ/d$ , οπότε για να μετατραπεί σε  $kJ/s$  ή  $KW$ , διαιρείται με 86.400  $sec/d$ . Τελικά, για τη μετατροπή του σε  $MW$  διαιρείται περαιτέρω με το 1,000. Αυτό που προκύπτει από τους υπολογισμούς είναι ότι η θερμική ενέργεια του ταμιευτήρα κατά τα πρώτα 25 χρόνια λειτουργίας είναι **150MW** (Πίνακας 5-2, σελ. 124), ενώ μετά από 100 χρόνια εκμετάλλευσης μπορεί να φτάσει τα **107MW** (Πίνακας 5-3, σελ. 125). Με την ίδια παροχή των γεωτρήσεων παραγωγής η συνολική ισχύς μειώνεται με την πάροδο του χρόνου, καθώς αλλάζουν οι θερμοκρασίες στο εσωτερικό του ταμιευτήρα.

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι σε 100 χρόνια εκμετάλλευσης έχει δημιουργηθεί ένα βέλτιστο πλάνο ή πρόγραμμα εκμετάλλευσης, το οποίο εγγυάται τη παραγωγή ενέργειας τουλάχιστον της τάξης των 100MW, χωρίς αυτό να συνεπάγεται την υδραυλική και θερμική καταστροφή του ταμιευτήρα. Σημειώνεται, επίσης, ότι στους παραπάνω υπολογισμούς δεν έχουν ληφθεί υπόψιν οι απώλειες ισχύος στο ίδιο το σύστημα παραγωγής ενέργειας, λόγω διαφυγής θερμικής ενέργειας, τριβών στα έδρανα, απώλειες στο μαγνητικό πεδίο των γεννητριών κ.λπ.



ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΣΕ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ  
ΜΕ ΣΧΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ-ΕΠΑΝΕΙΣΠΙΕΣΗΣ

Διάγραμμα 5-2: Καμπύλη διακύμανσης της τοπικής πίεσης στην γεώτρηση παραγωγή “e” (prod\_well\_6). Τα σημεία A, B, Γ, Δ, E, Z, H, Θ αντιστοιχούν σε χαρακτηριστικά σημεία αλλαγής κλίσης της καμπύλης (FEFLOW 7.0, Screenshots).







ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΣΕ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ  
ΜΕ ΣΧΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ-ΕΠΑΝΕΙΣΠΙΕΣΗΣ

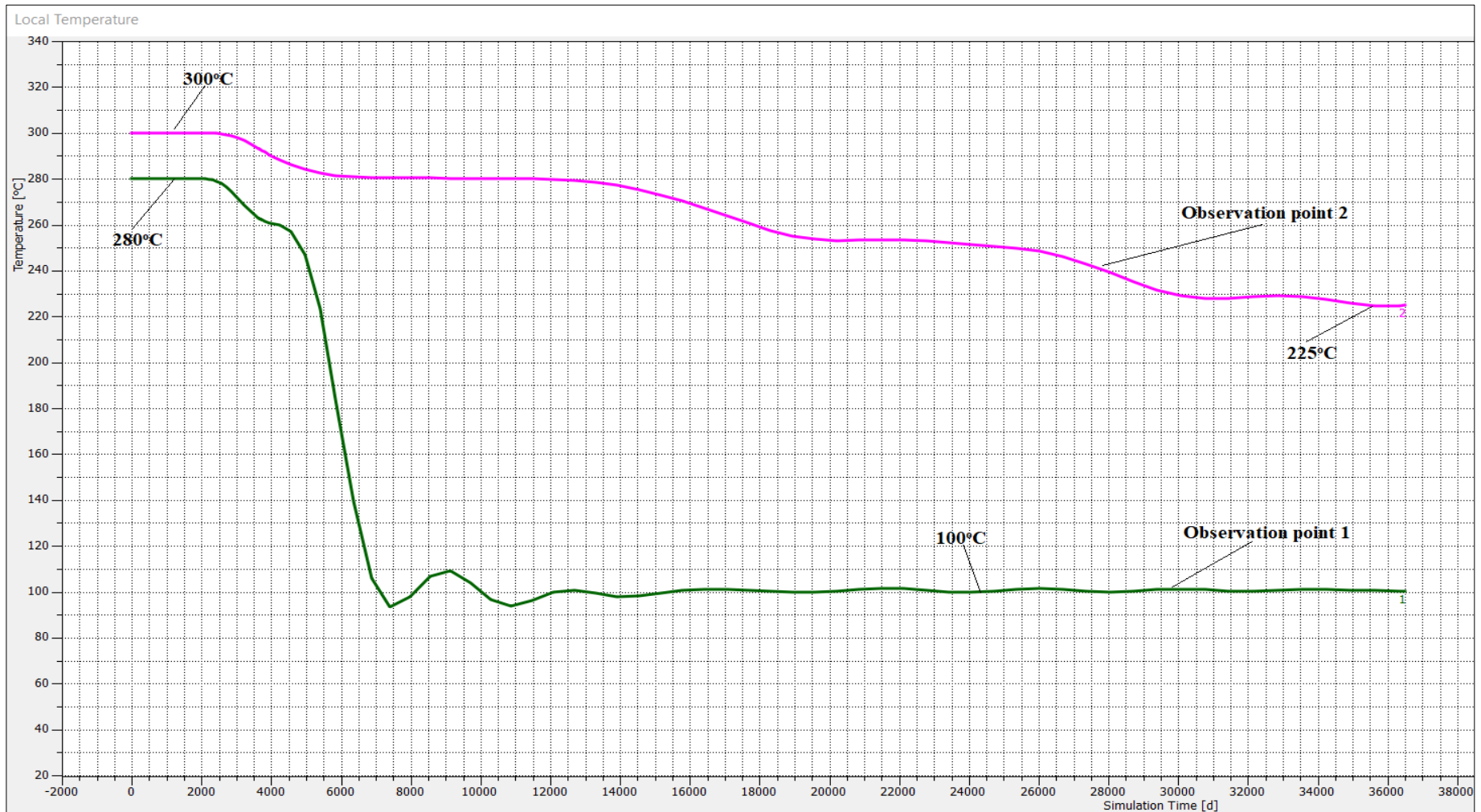
Διάγραμμα 5-3: Συνολική καμπύλη διακύμανσης της τοπική πίεσης της γεώτρησης παραγωγής “e” (prod\_well\_6) στα 100 χρόνια (FEFLOW 7.0, Screenshots).





ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΣΕ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ  
ΜΕ ΣΧΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ-ΕΠΑΝΕΙΣΠΙΕΣΗΣ

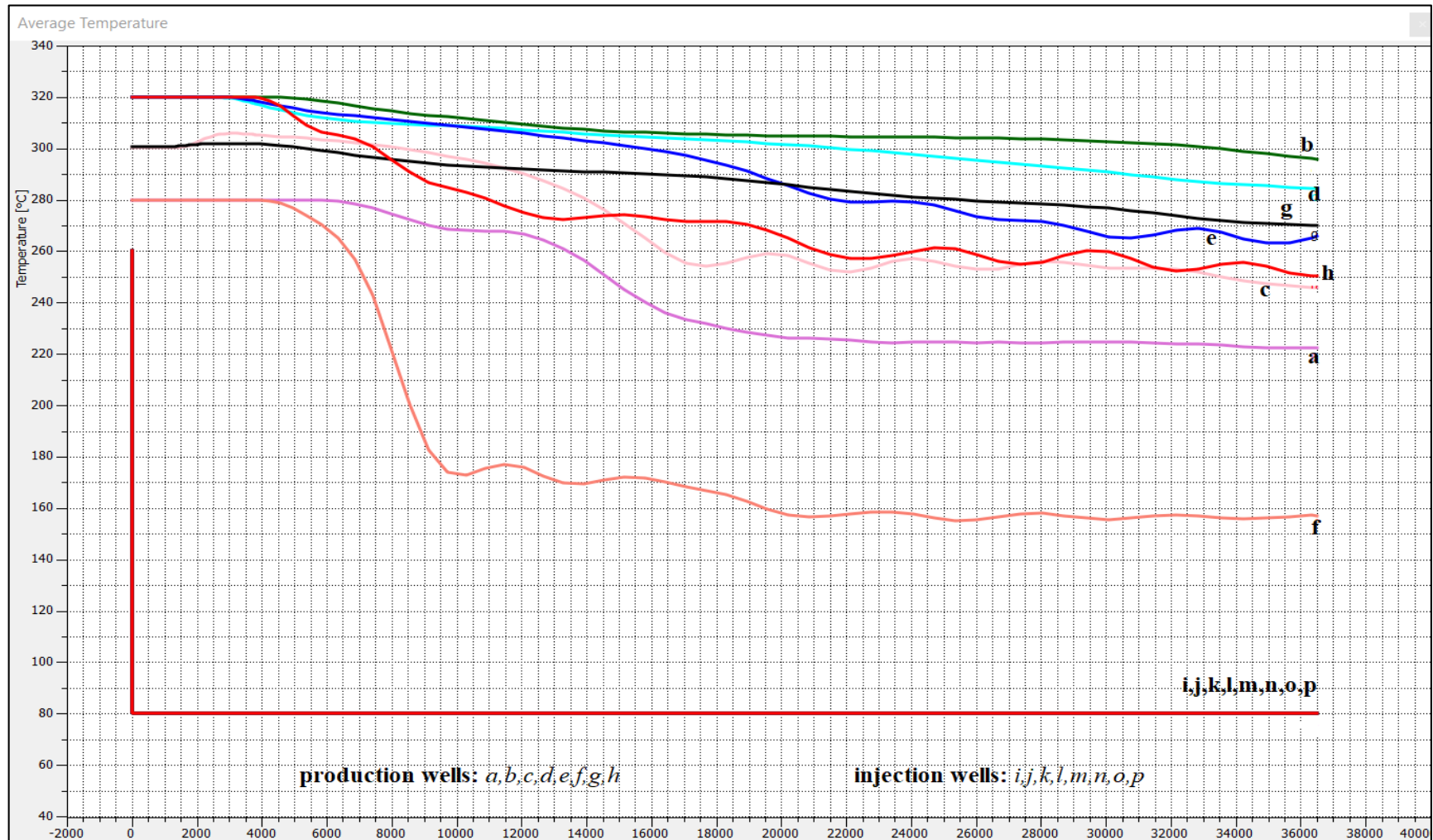
Διάγραμμα 5-4: Καμπύλες διακύμανσης της τοπικής θερμοκρασίας (Local Temperature [°C]) των observation points 1 και 2 του ταμιευτήρα του μοντέλου, συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης (Simulation Time [d]) (FEFLOW 7.0, Screenshots).





ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΣΕ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ  
ΜΕ ΣΧΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ-ΕΠΑΝΕΙΣΠΙΕΣΗΣ

Διάγραμμα 5-5: Καμπύλες διακύμανσης του μέσου όρου των θερμοκρασιών (Average Temperature [°C]) των γεωτρήσεων παραγωγή/επανεισαγωγής συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης (Simulation Time [d]) (FEFLOW 7.0, Screenshots).





ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΣΕ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ  
ΜΕ ΣΧΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ-ΕΠΑΝΕΙΣΠΙΕΣΗΣ

Πίνακας 5-2: Υπολογισμός συνολικής ισχύος των γεωτρήσεων παραγωγής στα 25 χρόνια εκμετάλλευσης.

Γεώτρηση Παραγωγής	Παροχή Γεώτρησης στα 25 χρόνια (q) (m <sup>3</sup> /d)	Ποκνότητα νερού στη θερμ. Γεώτρησης (ρ) (kg/m <sup>3</sup> )		Cp (kJ/kg/K)		Θερμ. Εισόδου (slice2)		Θερμ. Εξόδου		ΔΤ	Απόλυτο Θερμοκρασιακό Περιεχόμενο του νερού που βγαίνει στην επιφάνεια(Q) (kJ/s)	MW
		Θερμ. εισ.	Θερμ. εξ.	Θερμ. εισ.	Θερμ. εξ.	°C	K	°C	K			
1	3000	727,4	916,7	5,62	4,3	295	568	150	423	145	18650	18,6
2	3000	693,5		6,07		309	582			159	23261	23,3
3	3000	684,6		6,22		313	586			163	24115	24,1
4	3000	882,8		4,42		184	457			34	4639	4,6
5	3000	716,5		5,71		298	571			148	21092	21,1
6	3000	691,3		6,10		310	583			160	23381	23,4
7	3000	739,2		5,41		286	559			136	18937	18,9
8	3000	767,0		5,11		270	543			120	16347	16,3
<b>Σύνολο:</b>											<b>150</b>	



ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΣΕ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ  
ΜΕ ΣΧΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ-ΕΠΑΝΕΙΣΠΙΕΣΗΣ

Πίνακας 5-3: Υπολογισμός συνολικής ισχύος των γεωτρήσεων παραγωγής στα 100 χρόνια εκμετάλλευσης.

Γεώτρηση Παραγωγής	Παροχή Γεώτρησης στα 100 χρόνια (q) (m <sup>3</sup> /d)	Πυκνότητα νερού στη θερμ. της Γεώτρησης (ρ) (kg/m <sup>3</sup> )		Cp (kJ/kg/K)		θερμ. Εισόδου slice 2		θερμ. Εξόδου		ΔΤ	Απόλυτο Θερμοκρασιακό Περιεχόμενο του νερού που βγαίνει στην επιφάνεια(Q) (kJ/s)	MW
		Θερμ. εισ.	Θερμ. εξ.	Θερμ. εισ.	Θερμ. εξ.	οC	K	οC	K			
1	3000	767	916,7	5,11	4,3	270	543	150	423	120	16280	16,3
2	3000	742,9		5,36		284	557			134	18473	18,5
3	3000	720,4		5,65		296	569			146	20586	20,6
4	3000	911,9		4,32		155	428			5	748	0,7
5	3000	807,5		4,81		244	517			94	12722	12,7
6	3000	778,4		5,02		263	536			113	15345	15,3
7	3000	800,1		4,85		249	522			99	13307	13,3
8	3000	840,5		4,62		220	493			70	9384	9,4
<b>Σύνολο:</b>											<b>107</b>	



## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Έχοντας φτάσει πλέον στο πέρας των προσομοιώσεων, όπως αυτές περιγράφηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, στο σημείο αυτό αξίζει να συνοψιστούν τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα Διπλωματική Εργασία, τόσο τα γενικά σχετικά με την απόδοση του συνολικού γεωθερμικού συστήματος, όσο και τα ειδικά σχετικά με τη μετάδοση θερμότητας και τα υδραυλικά φαινόμενα που εξελίσσονται στο εσωτερικό του ταμιευτήρα.

Αναλυτικότερα, ο συγκεκριμένος «κλειστός», όπως εύκολα απεδείχθη, ταμιευτήρας ξεκίνησε να εκμεταλλεύεται βάσει της συνήθους τακτικής ανάπτυξης που περιλαμβάνει ζεύγος γεωτρήσεων παραγωγής/επανεισαγωγής. Σύμφωνα με αυτό το σχήμα παραγωγής/επανεισπίεσης που του επιβλήθηκε, διαπιστώθηκε η τάση μείωσης της θερμοκρασίας του με την πάροδο του χρόνου. Αυτό αποδίδεται στην ογκομετρική παροχή των γεωτρήσεων, η οποία φαίνεται να είναι μεγαλύτερη από ό,τι μπορεί να «διαχειριστεί» η μαγματική διείδυση στον πυθμένα του ταμιευτήρα. Αυτό σημαίνει ότι η παροχή περισσότερου ρευστού για την παραγωγή ενέργειας και η επανεισαγωγή του στον ταμιευτήρα μετά την χρήση, προκαλεί την μη επαρκή θέρμανση του στο εσωτερικό του ταμιευτήρα, με αποτέλεσμα τη συνολική σταδιακή πτώση της θερμοκρασίας του. Η παρατήρηση της χρονικής εξέλιξης των θερμικών «κώνων» στις γεωτρήσεις επανεισαγωγής επιβεβαιώνει τον παραπάνω ισχυρισμό. Υπενθυμίζεται ότι η αρχική μορφή των «κώνων» είχε σχήμα κυκλικό, ενώ σταδιακά εξελίχτηκε σε επίμηκες σχήμα, όταν άρχισε να συνδυάζεται με την αντίστοιχη γεώτρηση παραγωγής.

Παρά την παραπάνω απόκριση του ταμιευτήρα, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι αυτή η σταδιακή μείωση της συνολικής θερμοκρασίας του, φαίνεται να μην επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την απόδοση των γεωτρήσεων. Πιο συγκεκριμένα, ακόμα και στα 100 χρόνια λειτουργίας, παρατηρείται ότι η πίεση του ταμιευτήρα παραμένει πάνω από το σημείο κορεσμού, με αποτέλεσμα να μη δημιουργείται το πρόβλημα σχηματισμού αερίου (ατμού) στο εσωτερικό του ταμιευτήρα. Η αναπόφευκτη απώλεια μάζας στην επιφάνεια του ταμιευτήρα οδηγεί με τη σειρά της στη σταδιακή αποφόρτιση αυτού, με αποτέλεσμα η αρχική πίεση να πέσει μεν, αλλά να διατηρηθεί πάνω από το επίπεδο κορεσμού του νερού σε αέριο. Μετριασμός αυτού του φαινομένου θα μπορούσε να επιτευχθεί αν εισαγόταν νερό από εξωτερική πηγή.

Επιπλέον παρατηρείται ότι το «παραγόμενο» νερό, το οποίο οδηγείται στον αεριοστρόβιλο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, παραμένει σε υψηλά επίπεδα





ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΣΕ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ  
ΜΕ ΣΧΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ-ΕΠΑΝΕΙΣΠΙΕΣΗΣ

θερμοκρασίας, της τάξεως των 250°C και 280°C περίπου για τις γεωτρήσεις που βρίσκονται πιο κοντά στη βορειοανατολικό όριο του ταμιευτήρα. Η μέση θερμοκρασία του νερού των γεωτρήσεων παραγωγής ανέρχεται στους 248°C, η οποία θεωρείται ικανοποιητική θερμοκρασία για την απόδοση του ταμιευτήρα στα 100 χρόνια λειτουργίας, μιας και αποδίδει συνολική παραγόμενη ισχύ 107MW. Αν αυτό συγκριθεί με τη μέση θερμοκρασία που εξασφαλίζει η μαγματική διείσδυση στο κάτω μέρος του ταμιευτήρα (περίπου 300°C), προκύπτει ότι, παρά την ιδιαίτερα αυξημένη παροχή (24.000 m<sup>3</sup>/d), η μετάδοση θερμότητας από τη μαγματική διείσδυση λειτουργεί ιδιαίτερα αποδοτικά θερμαίνοντας το επανεισαγόμενο νερό.

Ιδιαίτερο πρόβλημα δημιουργεί η γεώτρηση παραγωγής *prod\_well\_4*, καθώς αυτή βρίσκεται αρκετά κοντά στη γεώτρηση επανεισαγωγής *inj\_well\_5*, με αποτέλεσμα την μη επαρκή θέρμανση του νερού. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το νερό που επανεισάγεται δεν προλαβαίνει να θερμανθεί επαρκώς κινούμενο κατά μήκος της μικρής απόστασης ως τη γεώτρηση παραγωγής, με αποτέλεσμα το αντλούμενο νερό να φτάνει τη θερμοκρασία 155°C στα 100 χρόνια. Χαμηλότερη θερμοκρασία από αυτήν μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά προβλήματα στην ηλεκτροπαραγωγή. Για τη διόρθωση του προβλήματος αυτού προτείνεται ο μηδενισμός ή η μείωση στο μισό της παροχής αυτής της γεώτρησης παραγωγής.

Επομένως, όσον αφορά την αιφορία του ταμιευτήρα, αρχικά θα μπορούσε να ειπωθεί ότι το σχήμα παραγωγής/επανεισαγωγής που επιβλήθηκε στον ταμιευτήρα τον οδηγεί στη συνεχή θερμοκρασιακή υποβάθμισή του, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να επιτευχθεί μια σταθερή κατάσταση λειτουργίας. Υπό αυτό το αυστηρό πλαίσιο, δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι η εκμετάλλευση εξασφαλίζει την πλήρη αιφορία του. Ωστόσο, το γεγονός ότι ακόμα και στα 100 χρόνια η θερμοκρασία του νερού που παράγεται δεν πέφτει σε σημαντικό βαθμό, με εξαίρεση μόνο τη γεώτρηση *prod\_well\_4*, δικαιολογεί ότι τελικά επέρχεται μια σχετικά «αργή» ψύξη του ταμιευτήρα, με αποτέλεσμα να μπορεί να θεωρηθεί ότι το προτεινόμενο πλάνο εκμετάλλευσης εξασφαλίζει επαρκή αιφορία.

Το σχήμα παραγωγής/επανεισαγωγής που εφαρμόστηκε, η χρονοσειρά λειτουργίας των γεωτρήσεων, καθώς και ο συνολικός σχεδιασμός του μοντέλου, θα μπορούσε να διαμορφωθεί με διαφορετικό, ίσως και πιο αποδοτικό τρόπο. Ωστόσο, για τα περιορισμένα δεδομένα που ήταν διαθέσιμα, καθώς και λόγω των δυνατοτήτων που προσφέρει το λογισμικό του *FEFLOW*, διαμορφώθηκε και ερμηνεύτηκε ένα πλάνο λειτουργίας το οποίο εγγυάται την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας τουλάχιστον της τάξης των 100MW, σε διάστημα 100 χρόνων, χωρίς αυτό να συνεπάγεται έντονη υδραυλική και θερμική υποβάθμιση του γεωθερμικού ταμιευτήρα.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αρβανίτης ΓΓΜΕ (2008). «Μύθοι και Πραγματικότητα για τη Γεωθερμία».
- Γαγάνης Β., Επικ. Καθ. ΕΜΠ (2021). *The Power Plant. Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, Μάθημα Επιστήμης και Τεχνολογίας Γεωθερμικών Πεδίων.*
- Καρυδάκης Γ. Ι. (2005). «Γεωθερμική Ενέργεια», Εκδόσεις Αθλότυπο, Αθήνα 2005.
- ΓΓΜΕ (2007). «Τα γεωθερμικά πεδία της χώρας». Τομέας Υδάτινων Πόρων και Περιβάλλοντος. Διεύθυνση Γεωθερμίας και Θερμομεταλλικών Υδάτων. Αθήνα 2007.
- Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης (2006). Θέμα: «Επανεξέταση της στρατηγικής της ΕΕ για την αειφόρο ανάπτυξη - Ανανεωμένη στρατηγική». Βρυξέλλες, 26 Ιουνίου 2006.
- Φλογαΐτη, Ε. (2006). «Εκπαίδευση για το Περιβάλλον και την Αειφορία», Αθήνα. Ελληνικά Γράμματα.
- Φυτίκας Μ., Ανδρίτσος Ν.(2004). «Γεωθερμία». Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2004.
- Φυτίκας Μ. & Ανδρίτσος Ν. (2008). «Γεωθερμικές εφαρμογές στις Κυκλάδες και εφαρμογές υψηλής ενθαλπίας». Συνέδριο IENE, Σύρος 2008.
- Ademovic Naida, (2018): “Sustainable Development and Concrete Bridges”. University of Sarajevo, Faculty of Civil Engineering .
- ALGLIB, Numerical Analysis Library, (1999-2021): “Spline interpolation and fitting–ALGLIB, C++ and C# library”. {<http://www.alglib.net/interpolation/spline3.php#header5>}.
- Allis, G., and Hunt, T. (1986). “Analysis of exploitation-induced gravity changes at Wairakei geothermal field”. *Geophysics*, 51, 1647-1660pp.
- Axelsson, G. (1989). “Simulation of pressure response data from geothermal reservoirs by lumped parameter models”. *Proceedings 14th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, USA, 257-263pp.*
- Axelsson, G. (1991). “Reservoir engineering studies of small low-temperature hydrothermal systems in Iceland”. *Proceedings 16th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, USA, 143-149pp.*
- Axelsson, G. and Arason T. (1992). “LUMPFIT, Automated simulation of pressure changes in hydrological reservoirs”. *User's Guide, version 3.1, September 1992, 32p.*
- Axelsson, G., Bjornsson, G., Flovenz, O.G., Kristmannsdottir H., and Sverrisdottir, G. (1995). “Injection experiments in low-temperature geothermal areas in Iceland”. *Proceedings of the World Geothermal Congress, Florence, Italy, May 1995, 1991-1996.*



ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΣΕ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ  
ΜΕ ΣΧΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ-ΕΠΑΝΕΙΣΠΙΕΣΗΣ

- Axelsson, G. and E. Gunnlaugsson (convenors), (2000). "Long-term Monitoring of High- and Low-enthalpy Fields under Exploitation". *International Geothermal Association, World Geothermal Congress 2000 Short Course, Kokonoe, Kyushu District, Japan, May 2000, 226p.*
- Axelsson, G., A. Gudmundsson, B. Steingrímsson, G. Palmason, H. Armannsson, H. Tulinius, O.G. Flovenz, S. Björnsson and V. Stefánsson, (2001). "Sustainable production of geothermal energy". Suggested definition. *IGA-News, Quarterly No. 43, January-March 2001.*
- Axelsson Gudni, Iceland GeoSurvey (2003). "Essence of geothermal resource management". *Geothermal Training Programme, The United Nations University.*
- Barker, B., (2000). "The Geysers: Past and Future". *Geothermal Resources Council Bulletin, 29, 163-171pp.*
- Bear J, Cheng AH-D (2010): *Theory and applications of transport in porous media, vol 23. Springer, Heidelberg.*
- Bodvarsson, G.S., Pruess, K., and Lippmann, M.J. (1986). "Modeling of geothermal systems". *J. Pet. Tech., 38, 1007-1021pp.*
- Boisdet, A., Ferrandes, R., Fouillac, C., Jaudin, F., Lemale, J., Menjoz, A., and Rojas, J. (1990). "Current state of exploitation of low-enthalpy geothermal energy in France". *Geothermal Resources Council, Transactions, 14(1), 55-61pp.*
- Cataldi, R., (2001). "Sustainability and renewability of geothermal energy". *Proceedings of the International Scientific Conference on Geothermal Energy in Underground Mines, Ustron, Poland, November 2001.*
- Critchlow HB (1977). "Modern reservoir engineering: a simulation approach". *Prentice-Hall.*
- Darcy, H. (1856). "Les fontaines publiques de la ville de Dijon". *Paris: Dalmont.*
- Diersch Hans- Jörg G., (1979). "FEFLOW – Finite Element Modelling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media". *Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014.*
- Diersch, H. J. G.; Kolditz, O. (2002). "Variable-density flow and transport in porous media: approaches and challenges". *Adv. Water Resour. 2002, 25, (8), 899-944pp.*
- FEFLOW Online Help: {<http://www.feflow.info/html/help/default.htm>}.
- FEFLOW 6.2: "Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System - User's Manual" (2013). *DHI-WASY Software, Germany, 2013.*
- FEFLOW 7.0, Screenshots: *Finite-Element Simulation System for Subsurface Flow and Transport Processes. Software ©1979-2016, DHI. All rights reserved. v. 7.0 64-bit.*
- FEFLOW 7.0, Introductory Tutorial (2015). "Finite-Element Simulation System for Subsurface Flow and Transport Processes".



ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΣΕ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ  
ΜΕ ΣΧΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ-ΕΠΑΝΕΙΣΠΙΕΣΗΣ

- Gluyas J., Mathias S. (2013). "Geological Storage of Carbon Dioxide (CO<sub>2</sub>)".
- Grant, M.A., Donaldson, I.G., and Bixley, P.F. (1982). "Geothermal Reservoir Engineering". Academic Press, New York, 369pp.
- Grant, M.A. and Bixley, P.F. (2011). "Geothermal Reservoir Engineering". Academic Press, New York.
- Gelegenis JJ, Lygerou VA, Koumoutsos NG (1989). "A numerical method for the solution of geothermal reservoir model equations". *Geothermics* 18(3): 377–391pp.
- Gudni, A., Olafur, G.F., et al. (2001). "Analysis of tracer test data, and injection-induced cooling". *Laugaland Geothermal Field, N-Iceland, Geothermics*, 30(6), (2001), 697-125pp.
- IHS Markit, S&P Global (2020), "Multilayer wells": [https://www.ihsenergy.ca/support/documentation\\_ca/Harmony/content/html\\_files/reference\\_material/general\\_concepts/multilayered\\_wells.htm](https://www.ihsenergy.ca/support/documentation_ca/Harmony/content/html_files/reference_material/general_concepts/multilayered_wells.htm).
- Huttrer, G.W. (2001). "The status of world geothermal power generation" 1995-2000. *Geothermics*, 30, 1-27pp.
- Kaya, E., Zarrouk, S.J., O'sullivan, M.J., et al (2011). "Reinjection in geothermal fields: A review of worldwide experience, *Renewable and sustainable energy reviews*", 15(1), (2011), 47-68pp.
- Kristmannsdottir, H., Armannsson, H., Axelsson, G., Olafsson, M., Hakonarson S., and Thorhallsson, S. (1995). "Monitoring of Icelandic geothermal fields during production". *Proceedings of the World Geothermal Congress 1995, Florence, Italy, May 1995*.
- Liu, J.R. (2003). "Development Status of Geothermal Reinjection, *Hydrogeology and Engineering Geology*".
- Lund, J.W., and Freeston, D.H. (2001). "World-wide direct uses of geothermal energy". *Geothermics*, 30, 29-68pp.
- Mahler, A. (1998). "Geothermal energy in Denmark and Klaipeda, Lithuania". Paper presented at a Seminar on Transfer of Geothermal Technology and Knowledge, Reykjavik, November 1998, 13pp.
- Mainieri, A. (2000). "Costa Rica country update". *Proceedings of the World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan, May-June 2000*, 313-318pp.
- Magri, F.; Bayer, U.; Maiwald, U.; Otto, R.; Thomsen, C. (2009). "Impact of transition zones, variable fluid viscosity and anthropogenic activities on coupled fluid-transport processes in a shallow salt-dome environment". 2009, 9, (3), 182-194pp.



ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΣΕ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ  
ΜΕ ΣΧΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ-ΕΠΑΝΕΙΣΠΙΕΣΗΣ

- Magri, F.; Akar, T.; Gemici, U.; Pekdeger, A. (2010). "Deep geothermal groundwater flow in the Seferihisar– Balçova area, Turkey: results from transient numerical simulations of coupled fluid flow and heat transport processes". 2010, 10, (3), 388-405pp.
- Molloy MW, Sorey MJ (1981). "Code comparison project - a contribution to confidence in geothermal reservoir simulators". *Geoth Res Counc Trans* 5:189–192pp.
- Montalvo, F., D'Amore, D., Tenorio, J., and Martinez, M. (1997). "Twenty years of exploitation at Ahuachapan geothermal field. An assessment of the chemical and physical reservoir parameters". *Proceedings 22nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, USA*, 45-53pp.
- Narasimhan TN, Witherspoon PA (1976). "An Integrated Finite Difference Method for Analyzing Fluid Flow in Porous Media". *Water Resources Research* 12(1):57–64pp.
- O'Sullivan MJ (1987). "Modeling of enthalpy transients for geothermal wells". In *Proceedings of the 9th New Zealand geothermal workshop*.
- O'sullivan, M.J., Pruess, K., Lippmann, M. J., et al (2001). "State of the art geothermal reservoir simulation". *Geothermics*, 30(4), (2001), 359-429pp.
- Pang, J.M., Wang, S.F., et al. (2011). "Interpretation and Analysis of tracer test in Xiongxi Geothermal field". *Urban Geology*, 6(2), (2011), 12-17pp.
- Proceedings World Geothermal Congress* (2015). "Effective and Sustainable Utilization of Geothermal Resources". Melbourne, Australia, 19-25pp, April 2015. (Cui Yu, Wang Shufang, Liu Jiurong, Chen Zhezhou, Han Zheng, Lin Pei, Li Haikui, Yin Ming, Pang Jumei).
- Pruess, K., and Bodvarsson, G. (1984). "Thermal effects of reinjection in geothermal reservoirs with major vertical fractures". *Journal of Petroleum Technology*, 36, 1567-1578.
- Rosalyn McKeown, Ph.D et al (2002). *Education of sustainable development toolkit, Version 2, July 2002*.
- Rybach, L., T. Megel and W.J. Eugster, (2000). "At what scale are geothermal resources renewable?" *Proceedings of the World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan, May-June 2000*, 867-872pp.
- Stefansson, V., Axelsson, G., Sigurdsson, O., and Kjaran, S.P. (1995). "Geothermal reservoir management in Iceland". *Proceedings of the World Geothermal Congress 1995, Florence, Italy, May 1995*, 1763-1768pp.
- Stefansson, V. (1997). "Geothermal reinjection experience". *Geothermics*, 26, 99-130pp.
- Stefansson, V., (2000). "The renewability of geothermal energy". *Proceedings of the World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan, May-June 2000*, 883-888pp.



ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΣΕ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ  
ΜΕ ΣΧΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ-ΕΠΑΝΕΙΣΠΙΕΣΗΣ

- Stefansson and Axelsson, (2005). "Sustainable utilization of geothermal resources through stepwise development". Submitted to World Geothermal Congress 2005.
- Stefansson, V., (2005). "World Geothermal Assessment, Proceedings", World Geothermal Congress, Antalya, Turkey 2005.
- Wang, S.F., Pang, Z.H., Liu, J.R. (2011). "Karst Reservoir Reinjection Test in Xiongxi County". 26th Chinese geophysical society annual meeting, proceedings, Changshan, Hunan province, 2011, 221p.
- Watson Arnold (2013). "Geothermal Engineering – Fundamentals and Applications". Springer Science and Business Media, New York 2013.
- Waweru Mwaura D., Berlin (2018). "Exploration and Optimized Siting of Geothermal Wells Using a Web-Based Spatial Decision Support System. A Case Study of the Olkaria Geothermal Field".
- Whitaker, S. (1986). "Flow in porous media I: A theoretical derivation of Darcy's law". Transport in Porous Media.
- World Commission on Environment and Development (1987). "Our Common Future". Oxford University Press, Oxford, 400p.
- Wright, P.M., (1999): "The sustainability of production from geothermal resources". Lectures presented at the United Nations University Geothermal Training Programme, Reykjavik, September 1999, 42p.
- Xue, Y.Q., Xie, C.H., (2007). "Groundwater Numerical Simulation". Beijing, Science Press, 2007.
- Zyvoloski GA, O'Sullivan MJ (1980). "Simulation of a gas dominated two-phase geothermal reservoir". Soc Pet Eng J 20:52–58pp.