



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

**Μοντελοποίηση δικτύου διανομής γεωθερμικών ρευστών
από πεδίο χαμηλής ενθαλπίας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Στέφανος Λεμπέσης

Επιβλέπων: Βασίλειος Γαγάνης, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2022



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

**Μοντελοποίηση δικτύου διανομής γεωθερμικών ρευστών
από πεδίο χαμηλής ενθαλπίας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Στέφανος Λεμπέσης

Επιβλέπων: Βασίλειος Γαγάνης, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις: __/__/2022

Β. Γαγάνης, Επίκουρος Καθηγητής: (Υπογραφή)

Σ. Σταματάκη, Καθηγήτρια: (Υπογραφή)

Α. Καλλιώρας, Αναπληρωτής Καθηγητής: (Υπογραφή)

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2022

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε κατά τη διάρκεια του εαρινού εξαμήνου του Ακαδημαϊκού Έτους 2021-2022, στα πλαίσια του Προγράμματος Προπτυχιακών Σπουδών 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 ανάπτυξη λογισμικού που επιτρέπει το σχεδιασμό και την ανάλυση (υδραυλική και θερμική) ενός δικτύου μεταφοράς γεωθερμικών ρευστών ενός πλήρους, πραγματικού συστήματος παραγωγής, την επίλυσή του και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων πίεσης και θερμοκρασίας σε κάθε κόμβο/κλάδο και στο σημείο της τελικής διάθεσης.

Στο σημείο αυτό, έχοντας ολοκληρώσει τη διπλωματική μου εργασία και κατ' επέκταση τις προπτυχιακές μου σπουδές, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στην εκπόνησή της.

Αρχικά, θα επιθυμούσα να εκφράσω προσωπικά τις θερμές μου ευχαριστίες προς τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, κ. Βασίλειο Γαγάνη για την έμπνευση και την ανάθεση της εργασίας, για την αμέριστη καθοδήγηση και ενθάρρυνση που έδειξε καθόλη τη διάρκεια της εκπόνησής της και για τη διέγερση του ενδιαφέροντος μου για την προσομοίωση και τον προγραμματισμό. Αποτέλεσε πηγή γνώσεων, τόσο σε προπτυχιακό επίπεδο όσο και κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

Επίσης, θα επιθυμούσα να ευχαριστήσω την κα. Ειρήνη Δημητρέλλου, μέλος του Ειδικού Τεχνικού Εργαστηριακού Προσωπικού του Τμήματος Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών Ε.Μ.Π., για την άριστη καθοδήγηση, καθώς και για τις

χρήσιμες υποδείξεις και συμβουλές της κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Οφείλω επίσης να ευχαριστήσω τους διδάσκοντες καθηγητές της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών Ε.Μ.Π. και ιδιαίτερα τους καθηγητές του Τομέα Μεταλλευτικής Τεχνολογίας για τις επιστημονικές και τεχνικές γνώσεις που μου μεταλαμπάδευσαν, οι οποίες είμαι σίγουρος ότι θα αποτελέσουν χρήσιμα εργαλεία στην τριβή μου ως απόφοιτος Μηχανικός.

Καταληκτικά, θα ήθελα να εκφράσω τις βαθύτατες ευχαριστίες μου στο οικογενειακό και φιλικό μου περιβάλλον, οι οποίοι με στήριξαν καθημερινά, πίστεψαν σε εμένα και κατέβαλαν κόπο και προσπάθεια για να φτάσω σε αυτό το στάδιο της ζωής μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία έχει ως αντικείμενο της την ανάπτυξη λογισμικού που επιτρέπει το σχεδιασμό και την ανάλυση (υδραυλική και θερμική) ενός δικτύου μεταφοράς γεωθερμικών ρευστών ενός πλήρους, πραγματικού συστήματος παραγωγής, την επίλυσή του και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων πίεσης και θερμοκρασίας σε κάθε κόμβο/κλάδο και στο σημείο της τελικής διάθεσης.

Στην Ελλάδα τα περισσότερα γεωθερμικά πεδία είναι χαμηλής ενθαλπίας και μάλιστα οι ταμιευτήρες βρίσκονται μακριά από τις μονάδες αξιοποίησης της ενέργειας. Επομένως, απαιτείται ένα δίκτυο το οποίο μεταφέρει το θερμό γεωθερμικό ρευστό από τις κεφαλές των γεωτρήσεων στις μονάδες αξιοποίησης. Στόχος του λογισμικού είναι να λειτουργεί ως ένα εργαλείο που θα βοηθήσει το μηχανικό να σχεδιάσει ένα δίκτυο αγωγών κατά το βέλτιστο τρόπο, παρέχοντάς του μία ξεκάθαρη εικόνα της απώλειας πίεσης και θερμότητας κατά μήκος των σωληνώσεων, η οποία λειτουργεί σαν ένδειξη των αδύναμων σημείων του δικτύου, έτσι ώστε να μπορέσει να τα τροποποιήσει σε μελλοντικές υλοποιήσεις. Η ανάπτυξη του λογισμικού προσομοίωσης έγινε στη γλώσσα προγραμματισμού Python.

Η διπλωματική εργασία είναι διαιρεμένη σε 3 σκέλη. Το 1^ο σκέλος είναι γενικό, αφορά τα γεωθερμικά συστήματα και τα πεδία, δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στη δομή των συστημάτων των γεωθερμικών πεδίων χαμηλής ενθαλπίας και επισημαίνονται οι κυριότερες εφαρμογές της γεωθερμίας χαμηλής ενθαλπίας, με έμφαση τον ελλαδικό χώρο. Στο 2^ο σκέλος αναλύεται η διαδικασία ανάπτυξης του μοντέλου της προσομοίωσης και της βελτιστοποίησης των αβέβαιων παραμέτρων του δικτύου. Στο 3^ο σκέλος της εργασίας, πραγματοποιείται μελέτη περίπτωσης του δικτύου αγωγών ενός υποθετικού γεωθερμικού πεδίου χαμηλής ενθαλπίας, εμπνευσμένο από πραγματικά δεδομένα Ελληνικών πεδίων, πραγματοποιείται έλεγχος αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων της παροχής σε κάθε αγωγό, της πίεσης σε κάθε κόμβο και της θερμοκρασίας στα άκρα των αγωγών, αξιολογούνται τα δεδομένα πτώσης πίεσης και θερμότητας προκειμένου να εντοπιστούν τα αδύναμα σημεία του δικτύου και πραγματοποιείται ένας αντίστοιχος έλεγχος αξιοπιστίας στη μέθοδο βελτιστοποίησης των παραμέτρων μεταφοράς θερμότητας του δικτύου.

ABSTRACT

The thesis focuses on the development of a software that allows the design and analysis (hydraulic and thermal) of a geothermal fluid flow network of a full-scale, real-world production system, its solution and the computation of pressure and temperature results at each node/sector and at the point of the final disposal.

In Greece, most geothermal fields are low enthalpy ones and the reservoirs are usually located far from the energy utilization units. Therefore, a network is required to transport the hot geothermal fluid from the wellheads to the utilization unit (such as a greenhouse). The software aims at acting as a tool that will aid the engineer to design a pipeline network in an optimal way, providing them with a clear picture of pressure and heat loss along the pipelines. The latter act as an indication of the weak points of the network, so that they can be improved in future implementations. The development of the simulation software was done in the Python programming language.

The thesis is divided into 3 parts. The 1st part is generic, it discusses geothermal systems and fields with special emphasis being placed on the structure of low enthalpy geothermal field systems. The main applications of low enthalpy geothermal energy are highlighted, with an emphasis in Greece. In the 2nd part, the development process of the simulation model and of the optimization of the uncertain parameters is analyzed in terms of the governing physics laws and mathematical implementation. In the 3rd part of the thesis, a case study of the pipeline network of a hypothetical low enthalpy geothermal field, inspired by real data from Greek fields, is carried out. Reliability checks on the results of the flow rate at each pipe, the pressure at each node and the temperature at the ends of the pipelines are carried out and the pressure and heat loss data are evaluated in order to identify the weak points of the network. Finally, a reliability check on the optimization method of the network heat transfer parameters is performed.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	iii
ABSTRACT.....	iv
ΕΙΚΟΝΕΣ.....	ix
ΠΙΝΑΚΕΣ.....	xiii
1. Εισαγωγή	1
1.1. Ενεργειακές ανάγκες της σύγχρονης κοινωνίας.....	1
1.2. Περιβαλλοντικά προβλήματα από την καύση ορυκτών πόρων ..	4
1.3. Η γεωθερμία ως μορφή ανανεώσιμης ενέργειας	5
1.4. Η γεωθερμία στην Ελλάδα.....	7
1.4.1. Γεωθερμικά πεδία τοπικού ενδιαφέροντος (χαμηλής ενθαλπίας).....	8
1.4.2. Γεωθερμικά πεδία εθνικού ενδιαφέροντος (υψηλής ενθαλπίας).....	10
1.4.3. Εφαρμογές γεωθερμίας στην Ελλάδα	10
1.5. Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας	10
1.6. Δομή της Διπλωματικής Εργασίας	11
2. Γεωθερμικά συστήματα και πεδία.....	13
2.1. Προέλευση της γήινης θερμότητας	13
2.2. Γεωθερμικοί πόροι	13
2.3. Συμπεριφορά γεωθερμικών ρευστών	14
2.3.1. Μεταβολή θερμοκρασίας νερού	15
2.3.2. Μεταβολή πίεσης νερού.....	16
2.3.3. Μεταβολή ενθαλπίας νερού.....	17

2.3.4.	Χρήση CO ₂ ως ρευστό ανακυκλοφορίας	19
2.4.	Γεωθερμικά συστήματα.....	20
2.5.	Ταξινόμηση γεωθερμικών συστημάτων	22
2.6.	Εφαρμογές της γεωθερμικής ενέργειας.....	26
2.7.	Μαθηματικό ομοίωμα γεωθερμικού συστήματος.....	27
3.	Συστήματα γεωθερμικών πεδίων χαμηλής ενθαλπίας..	30
3.1.	Σύστημα παραγωγής γεωθερμικών ρευστών	31
3.1.1.	Αντλίες παραγωγής.....	32
3.2.	Σωληνώσεις μεταφοράς γεωθερμικών ρευστών	34
3.2.1.	Μεταλλικές σωληνώσεις	36
3.2.1.1.	Σωληνώσεις από χάλυβα	36
3.2.1.2.	Σωληνώσεις από ανοξείδωτο χάλυβα.....	37
3.2.2.	Μη μεταλλικές σωληνώσεις	37
3.2.2.1.	Θερμοπλαστικά	37
3.2.2.2.	Ελαστομερή.....	40
3.2.2.3.	Θερμοσκληρούμενα πλαστικά.....	41
3.2.3.	Μόνωση σωληνώσεων	41
3.2.4.	Εγκατάσταση σωληνώσεων.....	43
3.3.	Εφαρμογές γεωθερμίας χαμηλής ενθαλπίας	44
3.3.1.	Θέρμανση χώρων.....	45
3.3.2.	Αγροτικές χρήσεις	47
3.3.2.1.	Θέρμανση θερμοκηπίων.....	48
3.3.2.2.	Υδατοκαλλιέργειες.....	50
3.3.2.3.	Ξήρανση αγροτικών προϊόντων.....	51
4.	Μοντελοποίηση δικτύου.....	52

4.1.	Προσέγγιση και χαρακτηριστικά υπολογισμού μοντέλου	53
4.2.	Γεωμετρία μοντέλου.....	55
4.3.	Μαθηματική μοντελοποίηση του προβλήματος ροής	56
4.4.	Αποσύζευξη υδραυλικού και θερμικού προβλήματος	57
4.4.1.	Υδραυλικό πρόβλημα.....	57
4.4.2.	Θερμικό πρόβλημα	58
4.4.3.	Επίλυση συνολικού προβλήματος.....	60
4.5.	Ανάπτυξη υδραυλικού μοντέλου	60
4.5.1.	Χαρακτηρισμός ροής	61
4.5.2.	Εξισώσεις στοιχείων	63
4.5.3.	Εξισώσεις εσωτερικών κόμβων.....	67
4.5.4.	Εξισώσεις εξωτερικών κόμβων.....	68
4.5.5.	Επίλυση υδραυλικού μοντέλου με τη μέθοδο Newton – Raphson	69
4.5.6.	Αρχικές συνθήκες (initial conditions).....	73
4.6.	Ανάπτυξη θερμικού μοντέλου.....	76
4.6.1.	Εξισώσεις στοιχείων	77
4.6.2.	Συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας.....	79
4.6.3.	Εξισώσεις εξωτερικών κόμβων.....	80
4.6.4.	Εξισώσεις εσωτερικών κόμβων.....	81
4.6.5.	Συνοριακές συνθήκες (Boundary conditions) θερμικού μοντέλου	82
4.6.6.	Επίλυση θερμικού μοντέλου με τη Μέθοδο Αντιστροφής Μητρώου.	83
4.6.7.	Αρχικές συνθήκες (initial conditions) θερμικού μοντέλου	84
4.7.	Υπολογισμός πυκνότητας και ιξώδους	85
4.8.	Παράδειγμα εφαρμογής μεθοδολογίας επίλυσης	87
4.9.	Σύγκλιση συζευγμένου μοντέλου	93

4.10.	Παραμετρική βελτιστοποίηση.....	94
4.10.1.	Συνάρτηση κόστους.....	95
4.10.2.	Η μέθοδος gradient descent.....	100
4.11.	Παράδειγμα εφαρμογής μεθοδολογίας βελτιστοποίησης.....	104
5.	Μελέτη περίπτωσης τεχνητού δικτύου αγωγών γεωθερμικού πεδίου χαμηλής ενθαλπίας.....	106
5.1.	Κώδικας του λογισμικού προσομοίωσης.....	106
5.1.1.	Στοιχεία ανάπτυξης του κώδικα.....	107
5.1.2.	Εισαγωγή δεδομένων από το χρήστη	108
5.2.	Γεωμετρία του μοντέλου περίπτωσης.....	110
5.3.	Καταχώρηση δεδομένων στο λογισμικό προσομοίωσης	112
5.4.	Αρχικές συνθήκες μοντέλου περίπτωσης	114
5.5.	Επίλυση προβλημάτων και αποτελέσματα μοντέλων περίπτωσης	115
5.6.	Αξιολόγηση αποτελεσμάτων μοντελοποίησης	118
5.6.1.	Συμπεριφορά του δικτύου στους εξωτερικούς κόμβους	118
5.6.2.	Συμπεριφορά του δικτύου στους εσωτερικούς κόμβους.....	119
5.6.3.	Πτώση πίεσης κατά μήκος των στοιχείων του δικτύου	120
5.6.4.	Έλεγχος ορθότητας των αποτελεσμάτων της πτώσης πίεσης του υδραυλικού μοντέλου μέσω σύγκρισής τους με αντίστοιχα από ανάλογο, προϋπάρχον, μοντέλο.....	124
5.6.5.	Συμπεριφορά της θερμοκρασίας στα στοιχεία και τους εσωτερικούς κόμβους του δικτύου	125
5.7.	Αξιολόγηση βελτιστοποίησης δικτύου περίπτωσης.....	129
6.	Συμπεράσματα.....	130
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	134

EΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα 1.1: (α) Παγκόσμιος πληθυσμός από το 1700 έως το 2006. (β) Παγκόσμια ατομική ενεργειακή κατανάλωση από το 1700 έως το 2006 [1].	1
Εικόνα 1.2: Παραγόμενη ενέργεια παγκοσμίως ανά πηγή ενέργειας για το έτος 2020 [2].	2
Εικόνα 1.3: Παραγόμενη ενέργεια στην Ευρώπη ανά πηγή ενέργειας για το έτος 2020 [2].	3
Εικόνα 1.4: Παραγόμενη ενέργεια στην Ελλάδα ανά πηγή ενέργειας για το έτος 2020 [2].	4
Εικόνα 1.5: Εκπομπές CO ₂ από το 1965 έως το 2020 [2].	5
Εικόνα 1.6: Θέσεις μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμικούς πόρους [6].	6
Εικόνα 1.7: Γεωθερμικά πεδία Ελλάδας [9].	8
Εικόνα 2.1: Μεταβολή θερμοκρασίας ως προς όγκο [6].	15
Εικόνα 2.2: Μεταβολή πίεσης ως προς όγκο [6].	16
Εικόνα 2.3: Διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας [6].	17
Εικόνα 2.4: Μεταβολή ενθαλπίας γεωθερμικών ρευστών κατά την παραγωγή τους στην επιφάνεια [6].	19
Εικόνα 2.5: Τυπική δομή ενός γεωθερμικού συστήματος [12].	20
Εικόνα 2.6: Ο ρόλος της θερμοκρασίας και του βάθους στη ροή του νερού στα γεωθερμικά συστήματα [6].	22
Εικόνα 2.7: Τροποποιημένο διάγραμμα Lindal [5].	26
Εικόνα 2.8: Διάφορες εφαρμογές γεωθερμικής ενέργειας, ανάλογα με τις θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού στον ταμιευτήρα και το βάθος του ταμιευτήρα [14].	27
Εικόνα 3.1: Δομή τυπικού συστήματος εκμετάλλευσης ενός γεωθερμικό πεδίου χαμηλής ενθαλπίας.	30

Εικόνα 3.2: Συστήματα ανάκτησης θερμότητας από ένα γεωθερμικό ταμιευτήρα. (α) Σύστημα μονής γεώτρησης. (β) Σύστημα διπλών γεωτρήσεων (γ) διαφορετικά είδη διπλών γεωτρήσεων. [5].....	31
Εικόνα 3.3: (α) Στροβιλαντλία με άξονα. (β) Ηλεκτρική υποβρύχια αντλία. [22].....	33
Εικόνα 3.4: Σχετικό κόστος ανά κατηγορία αγωγού [23].....	35
Εικόνα 3.5: Μέγιστες λειτουργικές θερμοκρασίες για υλικό σωλήνωσης [23].....	35
Εικόνα 3.6: Τυπική δομή ενός θερμομονωμένου σωλήνα [23].....	42
Εικόνα 3.7: Πτώση θερμότητας ως συνάρτηση του μήκους σωλήνα διαμέτρου 450 mm και θερμομονωμένου με πολουρεθάνη πάχους 500 mm, για τιμές παροχής 1.5 m/s και 0.5 m/s [22].....	43
Εικόνα 3.8: Διαφορετικοί τύποι εγκατάστασης σωληνώσεων. (α) Επιφανειακή εγκατάσταση. (β) Υπεδαφική εγκατάσταση. (γ) Πλήρως υπόγεια εγκατάσταση. [22]	44
Εικόνα 3.9: Δομή τυπικού συστήματος εκμετάλλευσης γεωθερμικού πεδίου χαμηλής ενθαλπίας σε σειρά [21].....	44
Εικόνα 3.10: Δίκτυο σωληνώσεων διανομής θερμού αέρα σε κτήριο μεγάλων διαστάσεων [6].....	46
Εικόνα 3.11: Σχηματικό διάγραμμα αερόθερμου με διπλό κύκλωμα [6].....	46
Εικόνα 3.12: Διαδρομή σωληνώσεων ενδοδαπέδιας θέρμανσης [6].....	47
Εικόνα 3.13: Επίδραση της θερμοκρασίας στην ανάπτυξη ορισμένων κηπευτικών. [10]	49
Εικόνα 3.14: Συστήματα θέρμανσης θερμοκηπίων. (α) εναέριοι αγωγοί θέρμανσης. (b) θερμαινόμενοι πάγκοι. (c) επιδαπέδια θέρμανση. (d) Υπεδαφικοί αγωγοί θέρμανσης του χώματος. (e) πλευρικά αερόθερμα. (f) αερόθερμα οροφής. (g) σύστημα αεραγωγών μεταφοράς ζεστού αέρα στην οροφή (h) επιδαπέδιο σύστημα αεραγωγών μεταφοράς ζεστού αέρα [26]	49
Εικόνα 3.15: Επίδραση της θερμοκρασίας στην ανάπτυξη ορισμένων ζωικών ειδών [27].....	50

Εικόνα 3.16: (α) Σχηματικό διάγραμμα μονάδας συνεχούς ξήρανσης με κυλιόμενη ταινία [22]. (β) Σχηματικό διάγραμμα πύργου ξήρανσης ρυζιού [28].	51
Εικόνα 4.1: Σχηματική απεικόνιση ενός δικτύου που αποτελείται από 3 στοιχεία και 4 κόμβους.	56
Εικόνα 4.2: Διάγραμμα ροής διαδικασίας επίλυσης του προβλήματος της μοντελοποίησης.	60
Εικόνα 4.3: Σχηματική απεικόνιση ενός αγωγού που συνδέεται με δύο κόμβους.	63
Εικόνα 4.4: Σχηματική απεικόνιση ενός αγωγού που συνδέεται με δύο κόμβους. (α) η ροή έχει οριστεί από τον κόμβο μικρότερου δείκτη προς τον κόμβο μεγαλύτερου δείκτη. (β) η ροή έχει οριστεί από τον κόμβο μεγαλύτερου δείκτη προς τον κόμβο μικρότερου δείκτη.	64
Εικόνα 4.5: Διαφορετικές περιπτώσεις κατεύθυνσης ροής σε ένα δίκτυο που αποτελείται από 3 στοιχεία και 4 κόμβους.	68
Εικόνα 4.6: Σχηματική απεικόνιση ενός αγωγού που συνδέεται με έναν εξωτερικό κόμβο, στον οποίο έχουν ορισθεί συνοριακές συνθήκες πίεσης και παροχής.	69
Εικόνα 4.7: Διάγραμμα ροής εκτίμησης αρχικών τιμών πίεσης σε κάθε κόμβο, παροχής και θερμοκρασίας σε κάθε στοιχείο από τον αλγόριθμο εκτίμησης αρχικών τιμών.	74
Εικόνα 4.8: Σχηματική απεικόνιση ενός αγωγού, ο οποίος είναι συνδεδεμένος με: (α) τον εξωτερικό κόμβο 2. (β) με τον εξωτερικό κόμβο 3.	81
Εικόνα 4.9: Διάγραμμα σχέσης θερμοκρασίας - ιξώδους νερού.	86
Εικόνα 4.10: Διάγραμμα σχέσης θερμοκρασίας - πυκνότητας νερού.	86
Εικόνα 4.11: Σχηματική απεικόνιση παραδείγματος δικτύου που αποτελείται από 3 στοιχεία και 4 κόμβους.	89
Εικόνα 4.12: Διάγραμμα σχέσης απόλυτης τραχύτητας αγωγού - συντελεστή τραχύτητας αγωγού.	97
Εικόνα 4.13: Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας Gradient descent [33].	100
Εικόνα 4.14: (α) Επιλογή πολύ μικρού ρυθμού εκπαίδευσης. (β) Επιλογή πολύ μεγάλου ρυθμού εκπαίδευσης. [33].	102

Εικόνα 5.1: Το αρχείο κειμένου (txt) που συντάχθηκε για την εισαγωγή των παραμέτρων της προσομοίωσης του δικτύου της μελέτης περίπτωσης.	110
Εικόνα 5.2: Σχηματική απεικόνιση του δικτύου της περίπτωσης που μελετήθηκε...	113
Εικόνα 5.3: Τιμές θερμοκρασίας εισόδου των αγωγών στα διάφορα στάδια της προσομοίωσης.	116
Εικόνα 5.4: Τιμές θερμοκρασίας εξόδου των αγωγών στα διάφορα στάδια της προσομοίωσης.	117
Εικόνα 5.5: Τιμές πίεσης των κόμβων στα διάφορα στάδια της προσομοίωσης.	117
Εικόνα 5.6: Διάγραμμα σχέσης παροχής - πτώσης πίεσης ανά μήκος αγωγού για κάθε αγωγό εσωτερικής διαμέτρου 100 mm.	121
Εικόνα 5.7: Διάγραμμα σχέσης παροχής - πτώσης πίεσης ανά μήκος αγωγού για κάθε αγωγό εσωτερικής διαμέτρου 200 mm.	122
Εικόνα 5.8: Διάγραμμα σχέσης παροχής - πτώσης θερμοκρασίας ανά μήκος αγωγού για κάθε αγωγό εσωτερικής διαμέτρου 100 mm.	126
Εικόνα 5.9: Διάγραμμα σχέσης παροχής - πτώσης θερμοκρασίας ανά μήκος αγωγού για κάθε αγωγό εσωτερικής διαμέτρου 200 mm.	126

ΠΙΝΑΚΕΣ

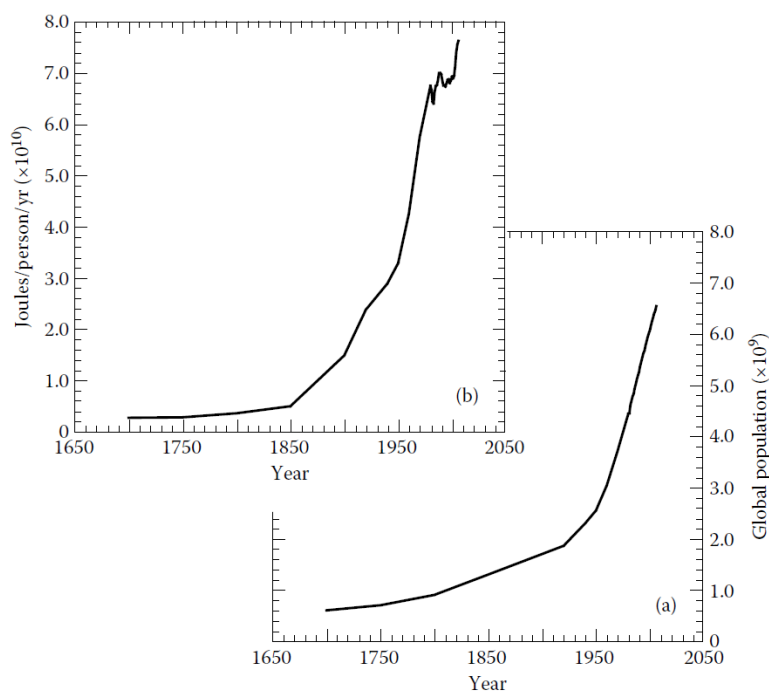
Πίνακας 1.1: Παραγωγή γεωθερμικής ενέργειας ανά χώρα τα έτη 2015 και 2020 [6]. 7	
Πίνακας 3.1: Μέγιστη θερμοκρασία εφαρμογής ανά είδος πλαστικής επένδυσης [5].	37
Πίνακας 3.2: Ποσοστιαία μείωση της αντοχής εφελκυσμού τριών θερμοπλαστικών υλικών που χρησιμοποιούνται στη γεωθερμία, αναφορικά με την αντοχή τους στους 20°C [5].....	38
Πίνακας 3.3: Προσδοκώμενη ζωή αγωγού πολυπροπυλενίου και μέγιστη επιτρεπτή πίεση λειτουργίας ανάλογα με τη θερμοκρασία λειτουργίας [5].....	38
Πίνακας 3.4: Ανώτατη πίεση λειτουργίας τεσσάρων τύπων αγωγών πολυβινυλοχλωριδίου ανάλογα με τη θερμοκρασία λειτουργίας [7].....	39
Πίνακας 3.5: Θερμοκρασιακές απαιτήσεις για διάφορες αγροτικές διεργασίες και οι λειτουργικές θερμοκρασίες των αντίστοιχων εγκαταστάσεων γεωθερμίας στην Ελλάδα και στις Η.Π.Α [5]......	48
Πίνακας 4.1: Τυπικές τιμές συνολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας για υπεδαφικούς και επιφανειακούς χαλύβδινους αγωγούς [31]......	80
Πίνακας 4.2: Τιμές ιξώδους νερού για θερμοκρασιακό εύρος 0-100 °C [32].....	86
Πίνακας 4.3: Τιμές πυκνότητας νερού για θερμοκρασιακό εύρος 0-100 °C [32].....	86
Πίνακας 4.4: Γεωμετρία και συνδεσμολογία αγωγών παραδείγματος δικτύου που αποτελείται από 3 στοιχεία και 4 κόμβους.	88
Πίνακας 4.5: Συνοριακές συνθήκες που έχουν ορισθεί στο παράδειγμα του δικτύου που αποτελείται από 3 στοιχεία και 4 κόμβους.	88
Πίνακας 4.6: Επίδραση της απόλυτης τραχύτητας στο συντελεστή τριβής βάσει της εξίσωσης Colebrook.	97
Πίνακας 4.7: Αριθμοί επαναλήψεων βελτιστοποίησης αβέβαιων παραμέτρων δικτύου για εύρος τιμών ρυθμού εκπαίδευσης 0.01-0.4.....	103
Πίνακας 5.1: Ευρετήριο παραμέτρων για την εισαγωγή δεδομένων στο λογισμικό από το χρήστη.....	109

Πίνακας 5.2: Οι συνοριακές συνθήκες που ορίστηκαν σε κάθε εξωτερικό κόμβο του δικτύου της μελέτης περίπτωσης.	111
Πίνακας 5.3: Η γεωμετρία του μοντέλου περίπτωσης και η συνδεσμολογία των αγωγών του.	113
Πίνακας 5.4: Μετατροπές μονάδων που χρησιμοποιούνται εσωτερικά του κώδικα του λογισμικού.	114
Πίνακας 5.5. Οι αρχικές τιμές που προέκυψαν από τον αλγόριθμο εκτίμησης αρχικών τιμών.....	115
Πίνακας 5.6: Τελικά αποτελέσματα προσομοίωσης δικτύου.....	116
Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα παροχής σε κάθε εσωτερικό κόμβο και σε κάθε στοιχείο που εισέρχονται και εξέρχονται από αυτόν.	120
Πίνακας 5.8: Αποτελέσματα παροχής και πτώσης πίεσης ανά μήκος αγωγού για κάθε στοιχείο του δικτύου.....	121
Πίνακας 5.9: Αποτελέσματα παροχής και πτώσης πίεσης ανά μήκος αγωγού για κάθε αγωγό εσωτερικής διαμέτρου 100 mm και 200 mm, τα οποία προέρχονται από απλούστερο μοντέλο προσομοίωσης [35].	124
Πίνακας 5.10: Αποτελέσματα παροχής και πτώσης θερμοκρασίας ανά μήκος αγωγού για κάθε στοιχείο του δικτύου.	125
Πίνακας 5.11: Παροχή κάθε στοιχείου και σταθμισμένοι μέσοι όροι θερμοκρασίας στοιχείων που εισέρχονται ή εξέρχονται από κάθε εσωτερικό κόμβο.....	128

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

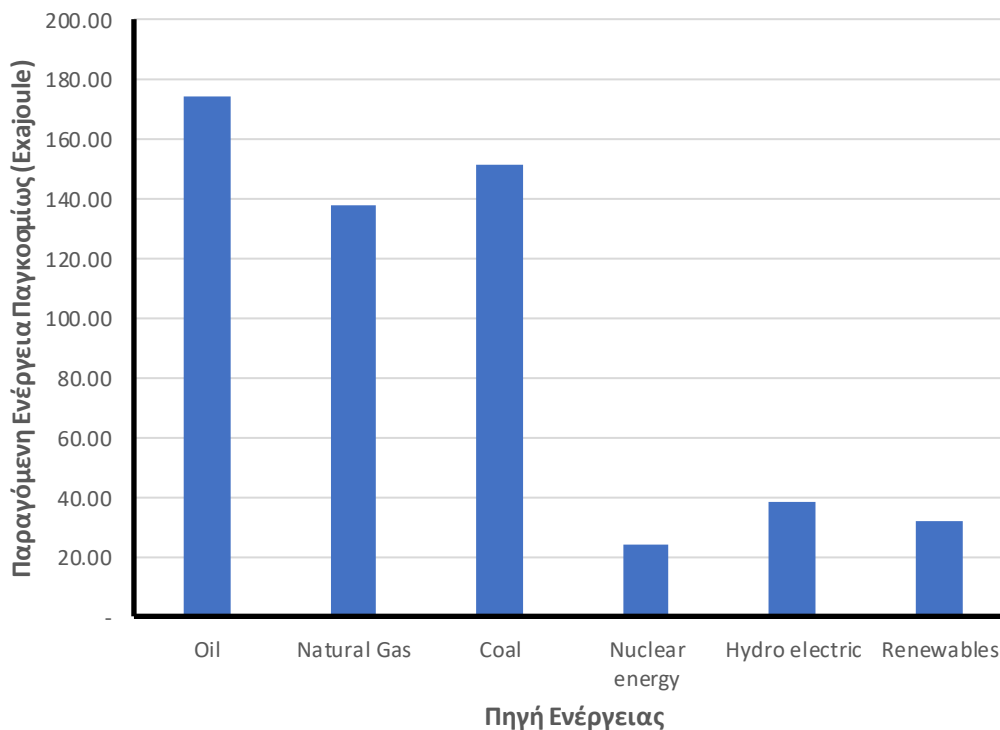
1.1. Ενεργειακές ανάγκες της σύγχρονης κοινωνίας

Η χρήση των ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ενέργειας έχει υπάρξει καθοριστικός παράγοντας για την εξέλιξη της ανθρώπινης κοινωνίας. Η αξιοποίηση του λιγνίτη για την παραγωγή ενέργειας άνοιξε το δρόμο για την 1^η Βιομηχανική Επανάσταση. Τα ορυκτά καύσιμα παρείχαν τη δυνατότητα παραγωγής τεράστιων ποσών ενέργειας, άγνωστων πρότινος στον άνθρωπο. Η ευκολία αυτή αποτέλεσε το εφαλτήριο για την ανάπτυξη της σύγχρονης κοινωνίας, η οποία βασίζεται γύρω από την ενέργεια. Η δυνατότητα πρόσβασης και ελέγχου μιας πηγής ενέργειας είναι προαπαιτούμενοι παράγοντες για τη στήριξη της βιομηχανικής δραστηριότητας και της οικονομικής ανάπτυξης. Όταν η πηγή ενέργειας είναι εύκολα διαθέσιμη και ο πληθυσμός που συναγωνίζεται για αυτήν είναι σχετικά χαμηλός, τότε η έρευνα και η ανάπτυξη δεν περιορίζονται από την πηγή ενέργειας [1]. Η αύξηση του πληθυσμού όμως και η τεχνολογική εξέλιξη έχουν αλλάξει αυτή την κατάσταση.



Εικόνα 1.1: (α) Παγκόσμιος πληθυσμός από το 1700 έως το 2006. (β) Παγκόσμια ατομική ενεργειακή κατανάλωση από το 1700 έως το 2006 [1].

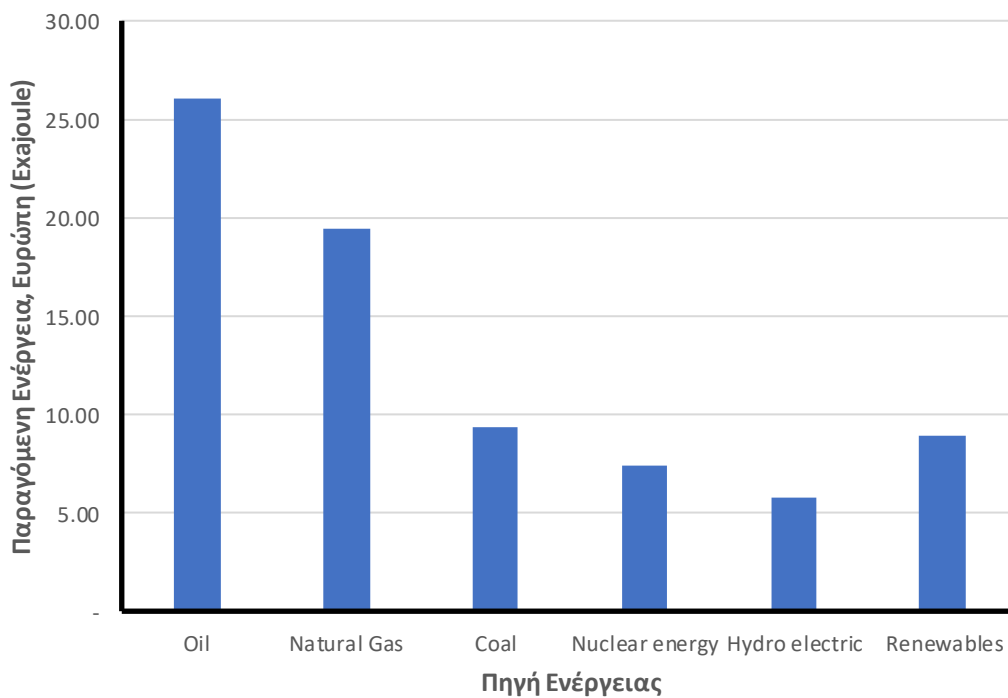
Στα διαγράμματα της Εικόνας 1.1 παρουσιάζεται η αύξηση του πληθυσμού και των ενεργειακών απαιτήσεων του κάθε ατόμου ανά χρονολογία από το 1700 περίπου μέχρι σήμερα. Παρατηρείται ότι ο παγκόσμιος πληθυσμός αυξάνεται εκθετικά. Συγκεκριμένα, στην 1η Βιομηχανική Επανάσταση ο παγκόσμιος πληθυσμός ανερχόταν στα 0.90 δισεκατομμύρια, ενώ σήμερα ο αριθμός αυτός έχει ανέλθει στα 7.96 δισεκατομμύρια, έχει σημειωθεί δηλαδή μία αύξηση της τάξης σχεδόν 800%. Ομοίως, εκθετική αύξηση παρουσιάζει και η παγκόσμια ατομική ενεργειακή κατανάλωση. Συγκεκριμένα, από την περίοδο της 1^{ης} Βιομηχανικής Επανάστασης μέχρι το 2020, η ενεργειακή ανάγκη έχει αυξηθεί από 3.00 Gigajoule σε 7.15 Gigajoule ανά άτομο [2], μία αύξηση της τάξης του 140%. Συνοπτικά, ο παγκόσμιος πληθυσμός αυξάνεται ραγδαία και ταυτόχρονα καταναλώνει σημαντικά μεγαλύτερα ποσά ενέργειας από ότι παλαιότερα.



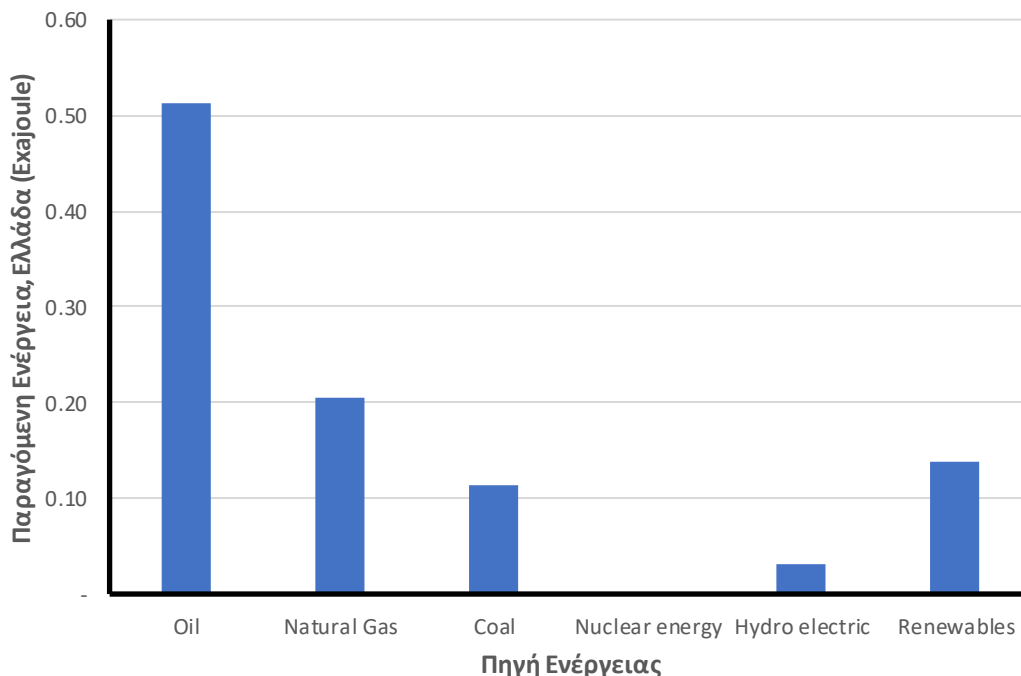
Εικόνα 1.2: Παραγόμενη ενέργεια παγκοσμίως ανά πηγή ενέργειας για το έτος 2020 [2].

Στο διάγραμμα της Εικόνας 1.2 παρουσιάζεται η παραγόμενη ενέργεια σε παγκόσμιο επίπεδο για το έτος 2020 από κάθε πηγή ενέργειας. Η συνολική ενέργεια που παράχθηκε εκείνη τη χρονιά ανήλθε στα 557.10 Exajoules. Είναι προφανές ότι η συντριπτική πλειονότητα της ενέργειας παρήχθη από την καύση ορυκτών καυσίμων

(υδρογονανθράκων και λιγνίτη). Εξετάζοντας τα αντίστοιχα δεδομένα παραγωγής ενέργειας για την Ευρώπη (Εικόνα 1.3), παρατηρείται μία παρόμοια εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα, με μόνη διαφορά το μικρότερο ποσοστό συμμετοχής του λιγνίτη για την παραγωγή ενέργειας σε σύγκριση με τα παγκόσμια δεδομένα. Η ίδια τάση παρατηρείται και σε εγχώριο επίπεδο (Εικόνα 1.4) με την παραγωγή ενέργειας να βασίζεται κατά συντριπτικό βαθμό στην καύση πετρελαίου. Συμπεραίνεται ότι η εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα είναι ένα καθολικό φαινόμενο και ότι οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) έχουν μικρή συμβολή στο ενεργειακό ισοζύγιο του πλανήτη.



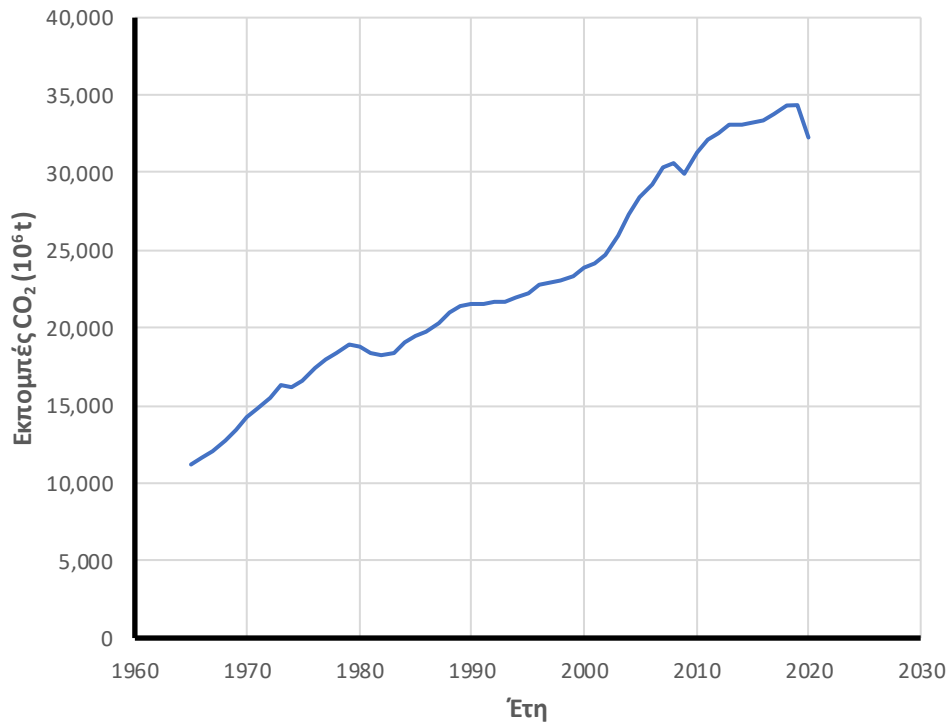
Εικόνα 1.3: Παραγόμενη ενέργεια στην Ευρώπη ανά πηγή ενέργειας για το έτος 2020 [2].



Εικόνα 1.4: Παραγόμενη ενέργεια στην Ελλάδα ανά πηγή ενέργειας για το έτος 2020 [2].

1.2. Περιβαλλοντικά προβλήματα από την καύση ορυκτών πόρων

Είναι καθολικά αποδεκτό ότι η διαδικασία εξόρυξης και καύσης των ορυκτών πόρων έχει σοβαρό περιβαλλοντικό αντίκτυπο στην ατμόσφαιρα και στο κλίμα σε παγκόσμια κλίμακα. Τα ορυκτά καύσιμα σε συνδυασμό με την αυξημένη ανθρώπινη δραστηριότητα οφείλονται για την παραγωγή αερίων, όπως το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), νιτρικών οξειδίων και μεθανίου (CH_4), τα οποία επιδρούν στη δυνατότητα της γήινης ατμόσφαιρας να απορροφήσει ή να εκπέμψει ακτινοβολία, προκαλώντας το φαινόμενο του θερμοκηπίου [1]. Καθώς η συγκέντρωση αυτών των αερίων αυξάνεται στο εσωτερικό της ατμόσφαιρας, τόσο μειώνεται η ικανότητα της Γης να αποβάλλει θερμική ενέργεια. Το αποτέλεσμα είναι η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη. Στο διάγραμμα της Εικόνας 1.5 παρουσιάζεται η αύξηση των εκπομπών CO_2 από το 1965 έως το 2020. Παρατηρείται ότι μέσα σε 55 χρόνια οι εκπομπές αερίων ρύπων αυξήθηκαν από 11,190 εκατομμύρια τόνους σε 32,320 εκατομμύρια τόνους, που σημαίνει ότι εμφανίστηκε μία αύξηση περίπου 190%.



Εικόνα 1.5: Εκπομπές CO₂ από το 1965 έως το 2020 [2].

Πέρα όμως από τα περιβαλλοντικά προβλήματα, η σταθερή μείωση των αποθεμάτων των ορυκτών καυσίμων, λόγω της αύξησης του πληθυσμού και της παγκόσμιας ζήτησης σε ενέργεια, σε συνδυασμό με την άνιση κατανομή του ορυκτού πλούτου, έχει φέρει στην επιφάνεια κοινωνικά και πολιτικά ζητήματα και αποτελεί παράγοντα εθνικών συγκρούσεων για πολλές δεκαετίες [3].

1.3. Η γεωθερμία ως μορφή ανανεώσιμης ενέργειας

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα παγκόσμια προβλήματα, που συζητήθηκαν στην προηγούμενη Ενότητα, η Ευρωπαϊκή Ένωση ενέκρινε μία σειρά προτάσεων, τη λεγόμενη Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία, με σκοπό την προσαρμογή της πολιτικής της Ευρωπαϊκής Ένωσης απέναντι σε μείζονα θέματα περιβάλλοντος, ενέργειας, μεταφορών και φορολογίας. Κύριος στόχος της Συμφωνίας είναι η μείωση των καθαρών εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου κατά τουλάχιστον 55% έως το 2030 και η επίτευξη μηδενικών καθαρών εκπομπών έως το 2050 [4]. Είναι επομένως φανερό ότι καταβάλλεται σημαντική προσπάθεια αποκέντρωσης της παραγωγής ενέργειας από

τα ορυκτά καύσιμα και υποστηρίζεται η στροφή προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, για την κάλυψη του ενεργειακών αναγκών του πλανήτη. Τα είδη των ΑΠΕ είναι η ηλιακή ενέργεια, η αιολική ενέργεια, η υδροηλεκτρική ενέργεια, η βιομάζα και η γεωθερμία.

Η γεωθερμία είναι μία ήπια και σε σημαντικό βαθμό ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, η οποία προέρχεται από το εσωτερικό της Γης [5]. Ως μορφή ΑΠΕ παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς είναι πρακτικά ανεξάντλητη και ανανεώσιμη, είναι ενεργειακά ικανή να αντιμετωπίσει τις ανάγκες της αγοράς, τουλάχιστον σε τοπικό ή και εγχώριο επίπεδο, το κόστος εκμετάλλευσής της είναι ανταγωνιστικό σε σχέση με τις συμβατικές ορυκτές πηγές ενέργειας και η χρήση της μπορεί να μειώσει ή και να εξαλείψει τα αέρια, που προκαλούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου και την ατμοσφαιρική ρύπανση.

Η γεωθερμία κατηγοριοποιείται σε χαμηλής, μέσης και υψηλής ενθαλπίας και αξιοποιείται σε εφαρμογές παραγωγής θερμικής ενέργειας και σε εφαρμογές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ανάλογα με τη θερμότητα του γεωθερμικού ρευστού. Η χρήση της γεωθερμίας είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη σε χώρες που βρίσκονται σε γεωλογικά ενεργές περιοχές, όπως οι ΗΠΑ (συγκεκριμένα η Καλιφόρνια), η Ισλανδία, η Ινδονησία, οι Φιλιππίνες και η Νέα Ζηλανδία. Στον Πίνακα 1.1 παρατίθεται η εγκατεστημένη ισχύς και η παραχθείσα ηλεκτρική ενέργεια για τα έτη 2015 και 2020 [6].



Εικόνα 1.6: Θέσεις μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμικούς πόρους [6].

Πίνακας 1.1: Παραγωγή γεωθερμικής ενέργειας ανά χώρα τα έτη 2015 και 2020 [6].

Χώρα	Εγκατεστημένη ισχύς 2015 (MWe)	Παραχθείσα ενέργεια 2015 (GWh/yr)	Εγκατεστημένη ισχύς 2020 (MWe)	Παραχθείσα ενέργεια 2020 (GWh/yr)
USA	3,098	16,600	3,700	18,366
Indonesia	1,340	9,600	2,289	15,315
Kenya	594	2,848	1,193	9,930
Philippines	1,870	9,646	1,918	9,893
Turkey	397	3,127	1,549	8,168
New Zealand	1,005	7,000	1,064	7,728
Italy	916	5,660	916	6,100
Iceland	665	5,245	755	6,010
Mexico	1,017	6,071	1,006	5,375
Japan	519	2,687	550	2,409
Costa Rica	207	1,511	262	1,559
El Salvador	204	1,442	204	1,442
Nicaragua	159	492	159	492
Russia	82	441	82	441
Chile	0	0	48	400
Honduras	0	0	35	297
Guatemala	52	237	52	237
Portugal	29	196	33	216
China	27	150	35	175
Germany	27	35	43	165
France	16	115	17	136
Papua New Guinea	50	432	11	97
Croatia	0	0	17	76
Ethiopia	7	10	7	58
Hungary	0	0	3	5
Taiwan	0	1	0	3
Austria	1	4	1	2
Belgium	0	0	1	2
Australia	1	1	1	2

1.4. Η γεωθερμία στην Ελλάδα

Η Ελλάδα είναι μία ευνοημένη χώρα από πλευράς γεωθερμικού ενδιαφέροντος, το οποίο κατά κύριο λόγο παραμένει αναξιοποίητο. Η εμφάνιση της γεωθερμίας γίνεται στο ηφαιστειακό τόξο του νοτίου Αιγαίου Πελάγους στην Κεντρική και στην Ανατολική Μακεδονία και στη Θράκη [7]. Τα γεωθερμικά πεδία της Ελλάδας είναι κυρίως χαμηλής ενθαλπίας, ενώ μόνο λίγα είναι υψηλής (Εικόνα 1.7). Διακρίνονται

ανάλογα με τη γεωγραφική περιοχή στην οποία βρίσκονται και επομένως στην αρμόδια αποκεντρωμένη διοίκηση που ανήκουν [8].



Εικόνα 1.7: Γεωθερμικά πεδία Ελλάδας [9].

1.4.1. Γεωθερμικά πεδία τοπικού ενδιαφέροντος (χαμηλής ενθαλπίας)

Αποκεντρωμένη Διοίκηση Μακεδονίας – Θράκης

- Αγκίστρου Σερρών
- Σιδηροκάστρου Σερρών
- Λιθότοπου Ηράκλειας
- Θέρμου Νιγρίτας Σερρών

- Λαγκαδά Θεσσαλονίκης
- Λεκάνης Ανθεμούντα Θεσσαλονίκης
- Ελαιοχωρίου Χαλκιδικής
- Σάνης – Αφύτου Κασσάνδρας
- Αρίστηνου Αλεξανδρούπολης
- Σαπών
- Λίμνης Μητρικού
- Νέας Κεσσάνης Ξάνθης
- Νέου Εράσμιου – Μαγγάνων Ξάνθης
- Ερατεινό – Καβάλας
- Νέας Απολλωνίας Θεσσαλονίκης
- Ακροποτάμου Καβάλας
- Νυμφόπετρας Θεσσαλονίκης

Αποκεντρωμένη Διοίκηση Ηπείρου – Δυτικής Μακεδονίας

- Συκιών Άρτας
- Αετού Φλώρινας

Αποκεντρωμένη Διοίκηση Θεσσαλίας – Στερεάς Ελλάδος

- Δαμάστας Φθιώτιδας
- Λιχάδων – Εύβοιας

Αποκεντρωμένη Διοίκηση Πελοποννήσου, Δυτικής Ελλάδος & Ιονίου

- Σουσακίου Κορινθίας
- Ρίζας – Αντιρρίου

Αποκεντρωμένη Διοίκηση Αιγαίου

- Αργένου Λέσβου
- Στύψης Λέσβου
- Πολιχνίτου Λέσβου

- Νεήτων Χίου
- Σαντορίνης
- Μήλου
- Θυμαίων Χίου

1.4.2. Γεωθερμικά πεδία εθνικού ενδιαφέροντος (υψηλής ενθαλπίας)

Αποκεντρωμένη Διοίκηση Αιγαίου

- Γεωθερμικό πεδίο υψηλής ενθαλπίας νήσου Μήλου
- Γεωθερμικό πεδίο υψηλής ενθαλπίας νήσου Νισύρου

1.4.3. Εφαρμογές γεωθερμίας στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα γίνεται λόγος κυρίως για αξιοποίηση της γεωθερμίας για θερμικές χρήσεις. Η πιο ανεπτυγμένη θερμική εφαρμογή της γεωθερμίας στην Ελλάδα είναι η αξιοποίησή της για τη θέρμανση θερμοκηπίων. Συγκεκριμένα, λειτουργούν περίπου 240 στρέμματα γεωθερμικών θερμοκηπίων στη Νέα Απολλωνία Θεσσαλονίκης, στο Σιδηρόκαστρο και τη Νιγρίτα Σερρών, στο Νέο Εράσμιο Ξάνθης, στον Πολυχίτο Λέσβου και στη Μήλο [5]. Άλλες εφαρμογές στον ελλαδικό χώρο περιλαμβάνουν λουτροθεραπευτικές μονάδες, μονάδες ξήρανσης αγροτικών προϊόντων (ντομάτας), μονάδες αφαλάτωσης νερού και υδατοκαλλιέργειες ψαριών και μικροφύκους (*Spirulina*) [7].

1.5. Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας

Στην Ελλάδα τα περισσότερα γεωθερμικά πεδία είναι χαμηλής ενθαλπίας και μάλιστα οι ταμειυτήρες βρίσκονται μακριά από τις μονάδες αξιοποίησης της ενέργειας. Επομένως, απαιτείται ένα δίκτυο το οποίο μεταφέρει το θερμό γεωθερμικό ρευστό από τις κεφαλές των γεωτρήσεων στις μονάδες αξιοποίησης. Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η μοντελοποίηση του δικτύου αγωγών ενός γεωθερμικού πεδίου χαμηλής ενθαλπίας μέσω της ανάπτυξης λογισμικού σε προγραμματιστικό περιβάλλον. Το λογισμικό αποτελεί ένα εργαλείο, που θα βοηθήσει το μηχανικό να σχεδιάσει ένα δίκτυο αγωγών κατά το βέλτιστο τρόπο, παρέχοντάς του μία ξεκάθαρη

εικόνα της απώλειας πίεσης και θερμότητας κατά μήκος των σωληνώσεων, η οποία λειτουργεί σαν ένδειξη των αδύναμων σημείων του δικτύου, έτσι ώστε να μπορέσει να τα τροποποιήσει σε μελλοντικές υλοποιήσεις.

1.6. Δομή της Διπλωματικής Εργασίας

Η ανάπτυξη του λογισμικού έγινε στη γλώσσα προγραμματισμού Python. Το μοντέλο του δικτύου αντιμετωπίστηκε ως ένα δίκτυο μεταφοράς μάζας και θερμότητας νερού και τα φαινόμενα που περιγράφουν τη ροή του νερού μέσα στο δίκτυο προκύπτουν από την αρχή διατήρησης μάζας, την αρχή διατήρησης ορμής και την αρχή διατήρησης ενέργειας. Σημαντικό πλεονέκτημα του λογισμικού, είναι ότι προσφέρει τη δυνατότητα βελτιστοποίησης των αβέβαιων παραμέτρων του δικτύου, όπως ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας των σωληνώσεων.

Το περιεχόμενο της εργασίας επιμερίζεται σε έξι κεφάλαια, όπου, το Κεφάλαιο 2 αφορά τα γεωθερμικά συστήματα και τα πεδία. Παρουσιάζονται πληροφορίες για την προέλευση της γήινης θερμότητας και για τους γεωθερμικούς πόρους, αναλύεται η συμπεριφορά των γεωθερμικών ρευστών και ιδιαίτερα η θερμοδυναμική συμπεριφορά του νερού, ανάλογα με την πίεση και τη θερμοκρασία του, παρουσιάζεται η δομή και ο μηχανισμός λειτουργίας ενός γεωθερμικού συστήματος και η κατηγοριοποίησή τους ανάλογα με διάφορες παραμέτρους. Γίνεται αναφορά στις εφαρμογές της γεωθερμικής ενέργειας και στα μαθηματικά ομοιώματα, που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη των διακριτών τμημάτων του συστήματος.

Στο Κεφάλαιο 3 αναλύεται η δομή των συστημάτων των γεωθερμικών πεδίων χαμηλής ενθαλπίας. Εξετάζεται κάθε υποσύστημα ξεχωριστά και δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην ανάλυση και τον εξοπλισμό του επιφανειακού συστήματος μεταφοράς ρευστών. Τέλος επισημαίνονται οι βασικότερες εφαρμογές της γεωθερμίας χαμηλής ενθαλπίας, με έμφαση τον ελλαδικό χώρο.

Το Κεφάλαιο 4 αφορά τη διαδικασία ανάπτυξης του μαθηματικού μοντέλου του δικτύου αγωγών μεταφοράς γεωθερμικού νερού και της βελτιστοποίησης των αβέβαιων παραμέτρων του. Επεξηγούνται η προσέγγιση και τα χαρακτηριστικά υπολογισμού που εφαρμόστηκαν, περιγράφεται η πολύπλοκη γεωμετρία του μοντέλου και η μαθηματική μοντελοποίηση του προβλήματος ροής. Επεξηγούνται οι λόγοι

ανάγκης αποσύζευξης του μοντέλου σε δύο επιμέρους μοντέλα, ένα υδραυλικό και ένα θερμικό και αναλύεται καθένα από αυτά ξεχωριστά. Παρουσιάζεται η μεθοδολογία της αριθμητικής επίλυσης του συνολικού μοντέλου, μέσω της κυκλικής επίλυσης των επιμέρους, η οποία και επαναφέρει την σύζευξή του. Στη συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικά η ανάπτυξη του υδραυλικού και του θερμικού μοντέλου και οι εξισώσεις που περιγράφουν τη συμπεριφορά της μεταφοράς του νερού κατά μήκος του δικτύου και της θερμότητας από το νερό στο περιβάλλον, ο τρόπος επίλυσης του καθενός προβλήματος ξεχωριστά, καθώς και οι συνοριακές και οι αρχικές συνθήκες που απαιτούνται για αυτό. Η παραπάνω διαδικασία γίνεται κατανοητή με ένα απλό παράδειγμα εφαρμογής. Ακολουθώντας, παρουσιάζονται οι συνθήκες που πρέπει να ικανοποιούνται για τη σύγκλιση του συζευγμένου μοντέλου. Τέλος, αναλύεται η φιλοσοφία και η μεθοδολογία της παραμετρικής βελτιστοποίησης μαζί με ένα παράδειγμα εφαρμογής της.

Το Κεφάλαιο 5 αφορά τη μελέτη περίπτωσης ενός υποθετικού δικτύου αγωγών γεωθερμικού πεδίο χαμηλής ενθαλπίας, εμπνευσμένο από πραγματικά δεδομένα ελληνικών πεδίων. Ορίζεται η γεωμετρία του δικτύου και παρουσιάζεται όλη η διαδικασία μελέτης του, από την εισαγωγή των απαραίτητων δεδομένων για την κατασκευή του και τις αρχικές συνθήκες, που καθορίζουν τη συμπεριφορά του, έως την επίλυση των προβλημάτων της μοντελοποίησης. Στη συνέχεια γίνεται αναλυτική αξιολόγηση όλων των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, η σύγκρισή τους με δεδομένα άλλων απλούστερων προσομοιωτών και ο έλεγχος συνοχής της απώλειας πίεσης και θερμότητας με τις αντίστοιχες εξισώσεις του μοντέλου. Τελικά, πραγματοποιείται αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της μεθόδου βελτιστοποίησης των αβέβαιων παραμέτρων του δικτύου.

Στο κεφάλαιο 6 παρατίθενται όλα τα συμπεράσματα που προέκυψαν κατά την ανάπτυξη του λογισμικού μοντελοποίησης του δικτύου και κατά την διεξαγωγή των προσομοιώσεων για τη μελέτη περίπτωσης του προηγούμενου κεφαλαίου και παρουσιάζονται οι ιδέες που προέκυψαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας για τη μελλοντική βελτίωση του λογισμικού που αναπτύχθηκε.

2. ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΔΙΑ

2.1. Προέλευση της γήινης θερμότητας

Σύμφωνα με την επικρατούσα θεωρία για την προέλευση της γήινης θερμότητας, η θερμική ροή της Γης αφορά τη θερμότητα που ανέρχεται από το εσωτερικό της Γης προς την επιφάνειά της. Η θερμότητα αυτή προέρχεται, μερικώς, από την πρωτογενή θερμότητα, δηλαδή τη θερμότητα που εκλύθηκε κατά τη δημιουργία της Γης και, κατά το υπόλοιπο, από τη θερμότητα που παρήχθη από τη δημιουργία της έως σήμερα, λόγω της μεταστοιχείωσης ραδιοϊσοτόπων που βρίσκονται στο εσωτερικό των πετρωμάτων. Παρόλο που όλα τα ραδιενεργά ισότοπα παράγουν θερμότητα κατά τη μεταστοιχείωσή τους, μόνο ισότοπα τα οποία είναι σχετικά άφθονα και έχουν χρόνους ημιζωής συγκρίσιμους με τη χρονολογία της Γης (4.5 δισεκατομμύρια έτη) παράγουν σημαντικά ποσά θερμότητας καθόλη τη διάρκεια της ζωής της. Για παράδειγμα, η μεταστοιχείωση των ραδιοϊσοτόπων ^{40}K , ^{232}Th , ^{235}U και ^{238}U είχε ως αποτέλεσμα την απόδοση μεγάλων ποσοτήτων θερμότητας στις ηπειρωτικές περιοχές (γρανιτικές) [7],[10].

Σημειώνεται ακόμα ότι το συνολικό θερμικό φορτίο της Γης έχει εκτιμηθεί στα $12.6 \cdot 10^{24}$ MJ, εκ των οποίων τα $5.4 \cdot 10^{21}$ MJ (περίπου) βρίσκονται αποθηκευμένα στο φλοιό [6]. Η θερμότητα αυτή αποτελεί ένα τεράστιο ενεργειακό περιεχόμενο και αποτέλεσε το εφελτήριο για την αξιοποίηση της γεωθερμίας.

2.2. Γεωθερμικοί πόροι

Ως γεωθερμικός πόρος ορίζεται γενικά η ποσότητα της θερμικής ενέργειας που βρίσκεται αποθηκευμένη ανάμεσα στην επιφάνεια της γης και σε κάποιο προσβάσιμο βάθος και μπορεί να ανακτηθεί με έναν οικονομικά βιώσιμο τρόπο, στο παρόν ή στο άμεσο μέλλον (λιγότερο από 100 χρόνια) [5]. Το γεωθερμικό δυναμικό αποτελείται από το σύνολο των γεωθερμικών ρευστών και της θερμότητας των γεωλογικών σχηματισμών. Γεωθερμικά ρευστά καλούνται τα μέσα μεταφοράς της θερμότητας, δηλαδή οι φυσικοί ατμοί και τα ζεστά νερά, που βρίσκονται μέσα στο γεωθερμικό ταμιευτήρα [7]. Σχετικά με τους γεωθερμικούς πόρους, διακρίνονται δύο είδη, οι

ταυτοποιημένοι (γνωστοί και ως αποθέματα) και οι μη-ανακαλυφθέντες. Ως αποθέματα γενικά αναφέρονται οι ποσότητες της γεωθερμικής ενέργειας που είναι γνωστό ότι υπάρχουν, έχουν ερευνηθεί και ταυτοποιηθεί ύστερα από εκτενή γεωλογική, γεωχημική, γεωφυσικά και θερμομετρική και γεωτρητική έρευνα και μπορούν να αξιοποιηθούν με ανταγωνιστικό κόστος σε σχέση με άλλες πηγές ενέργειας. Τα αποθέματα διακρίνονται ακόμα σε δυνατά, πιθανά και βεβαιωμένα (ή βέβαια), ανάλογα με το βαθμό εμπιστοσύνης των εκτιμήσεων και των ερευνών [5].

2.3. Συμπεριφορά γεωθερμικών ρευστών

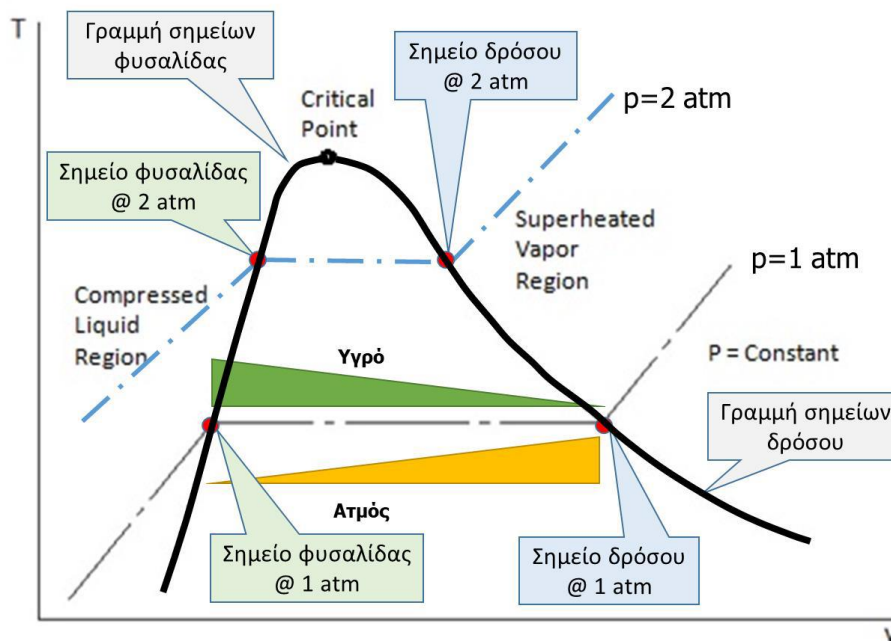
Τα παραγόμενα προϊόντα από μία γεωθερμική γεώτρηση διακρίνονται σε υγρά, αέρια και στερεά. Ως υγρό αναφέρεται το θερμό νερό που περιέχεται στον ταμιευτήρα και προέρχεται από [11]:

- Μετεωρικό νερό, δηλαδή νερό το οποίο πρόσφατα συμμετείχε στην ατμοσφαιρική κυκλοφορία και κατείσδυσε μέχρι το γεωθερμικό ταμιευτήρα.
- Ωκεάνιο νερό, δηλαδή νερό το οποίο εισδύει στο φλοιό στις περιοχές που καταλαμβάνονται από ωκεανούς.
- Νέο νερό, το οποίο προέρχεται από το μάγμα και δεν συμμετείχε προηγουμένως στον ταμιευτήρα.
- Συγγενές νερό, το οποίο είναι απολιθωμένο νερό που εμπεριέχεται σε ιζήματα από το χρόνο εναπόθεσής τους.
- Μαγματικό νερό, δηλαδή νερό, διαφορετικού του νέου, που σε κάποια ορισμένη περίοδο, αποτέλεσε μέρος του μάγματος.
- Μεταφορικό νερό, δηλαδή νερό το οποίο προκύπτει από την ανακρυστάλλωση υδρομεταλλικών ενώσεων κατά τη διαδικασία της μεταμόρφωσης.

Στον όρο παραγόμενο αέριο ανήκει κυρίως ο ατμός και κάποια δευτερεύοντα αέρια, όπως το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και το υδρόθειο (H_2S). Τα παραγόμενα στερεά μπορεί να αποτελούνται από τμήματα του γεωθερμικού ταμιευτήρα τα οποία είναι αδιάλυτα στο γεωθερμικό ρευστό, όπως κόκκοι άμμου ή άλλων σχηματισμών που τον συνθέτουν, και από χημικές ενώσεις διαλυμένες μέσα στο ρευστό, οι οποίες στερεοποιούνται κατά την πορεία τους προς την επιφάνεια [6].

Οι ρευστές φάσεις βέβαια (το υγρό νερό και ο αέριος ατμός) επιδέχονται έντονες μεταβολές κατά τη μεταφορά τους από το εσωτερικό του ταμιευτήρα μέχρι την επιφάνεια, οι οποίες οφείλονται στην έντονη μεταβολή της θερμοκρασίας και της πίεσης. Συνοπτικά η πτώση της πίεσής τους προκαλεί τη διόγκωσή τους, η πτώση της θερμοκρασίας προκαλεί τη συστολή τους και ο όγκος τους μεταβάλλεται ανάλογα με την αλλαγή της φάσης τους. Επιπλέον η ενθαλπία τους, η ολική θερμική ενέργεια δηλαδή που περιέχουν, επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τη μεταβολή της πίεσης και της θερμοκρασίας. Αναλυτικά οι παραπάνω μεταβολές δύναται να εξηγηθούν από τη θερμοδυναμική συμπεριφορά του νερού ανάλογα με τη θερμοκρασία και την πίεσή του.

2.3.1. Μεταβολή θερμοκρασίας νερού



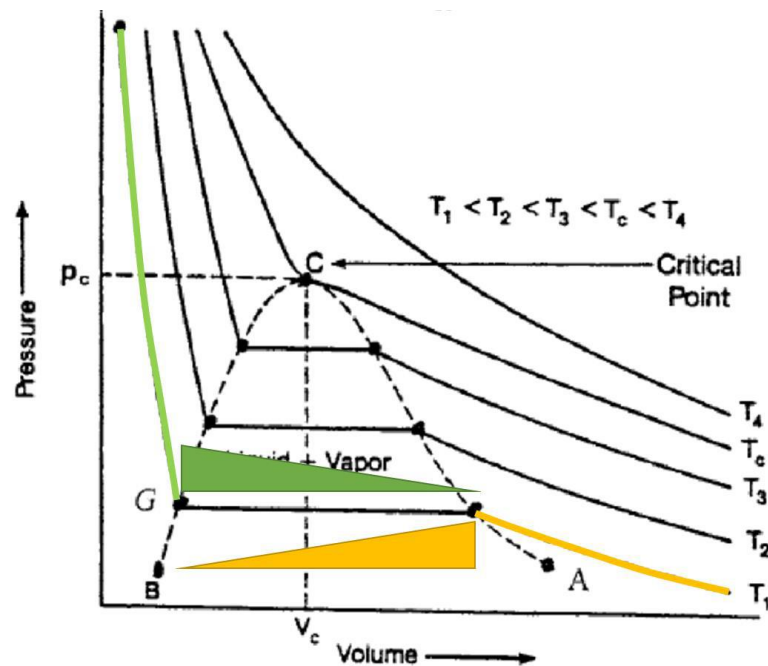
Εικόνα 2.1: Μεταβολή θερμοκρασίας ως προς όγκο [6].

Στην Εικόνα 2.1 παρουσιάζεται το διάγραμμα όγκου – θερμοκρασίας του νερού, στο οποίο διακρίνονται, για δύο θερμοκρασίες, το σημείο φυσαλίδας (bubble point, το σημείο που αντιστοιχεί με τις συνθήκες στις οποίες εμφανίζεται η πρώτη φυσαλίδα κατά τη διαδικασία της θέρμανσης του υγρού νερού), το σημείο δρόσου (το σημείο που αντιστοιχεί με τις συνθήκες στις οποίες όλο το υγρό νερό έχει εξατμιστεί, εκτός από την τελευταία σταγόνα) και δύο τρίγωνα, ένα πράσινο και ένα κίτρινο, που

εκφράζουν τη σύσταση του μίγματος των φάσεων σε ποσοστό νερού και ατμού αντίστοιχα. Ο γεωμετρικός τόπος των σημείων φυσαλίδας και δρόσου σχηματίζουν τη γραμμή που αποκαλείται φάκελος φάσεων (phase envelope).

Από τον παραπάνω φάκελο, γίνεται κατανοητό ότι όταν αυξάνεται η πίεση του νερού, τότε η θερμοκρασία φυσαλίδας και η θερμοκρασία δρόσου αυξάνονται, το οποίο σημαίνει ότι σε μεγαλύτερες πιέσεις απαιτείται περισσότερη ενέργεια για να αλλάξει η φάση του. Οι συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας κατά τις οποίες το σημείο φυσαλίδας ταυτίζεται με το σημείο δρόσου, αποκαλείται κρίσιμο σημείο (critical point).

2.3.2. Μεταβολή πίεσης νερού



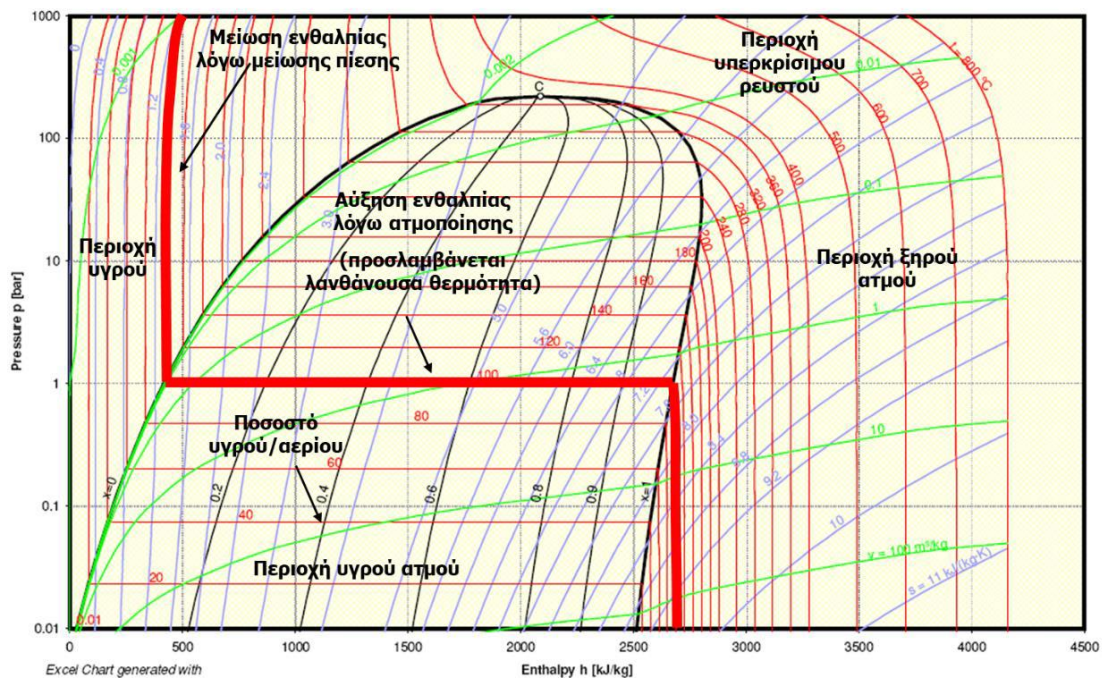
Εικόνα 2.2: Μεταβολή πίεσης ως προς όγκο [6].

Η ίδια συμπεριφορά μπορεί να επιτευχθεί, εάν αντί για την θερμοκρασία, μεταβληθεί η πίεση. Στην Εικόνα 2.2 παρουσιάζεται το διάγραμμα όγκου – πίεσης του νερού. Αναλύοντας τον φάκελο φάσης προκύπτει ότι για διάφορες τιμές θερμοκρασίας, η πίεση μπορεί να μειωθεί με την αύξηση του όγκου. Μειώνοντας την πίεση του νερού, υπό σταθερή θερμοκρασία, το νερό πλησιάζει τις συνθήκες του σημείου της φυσαλίδας. Η πίεση κατά την οποία εμφανίζεται η πρώτη φυσαλίδα ονομάζεται πίεση

φουσαλίδας. Εάν ο όγκος συνεχίσει να αυξάνεται τότε το νερό θα συνεχίσει να εξατμίζεται και το ποσοστό του ατμού στο μίγμα του γεωθερμικού ρευστού θα αυξάνεται, έως ότου ο όγκος φτάσει στις συνθήκες του σημείου δρόσου, όπου η εξάτμιση ολοκληρώνεται και έχει απομείνει μόνο μία σταγόνα.

2.3.3. Μεταβολή ενθαλπίας νερού

Η ενθαλπία αποτελεί το μέγεθος το οποίο εκφράζει τη συνολική θερμοδυναμική ενέργεια ενός ρευστού, δηλαδή το συνδυασμό ενέργειας λόγω της θερμοκρασίας του ρευστού και λόγω της δυναμικής του κατάστασης, δηλαδή της πίεσής του [6]. Η ειδική ενθαλπία ορίζεται ως η ενθαλπία του ρευστού ανά μονάδα μάζας. Στο διάγραμμα της Εικόνας 2.3 παρουσιάζεται η σχέση της ειδικής ενθαλπίας με την πίεση και τη θερμοκρασία.



Εικόνα 2.3: Διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας [6].

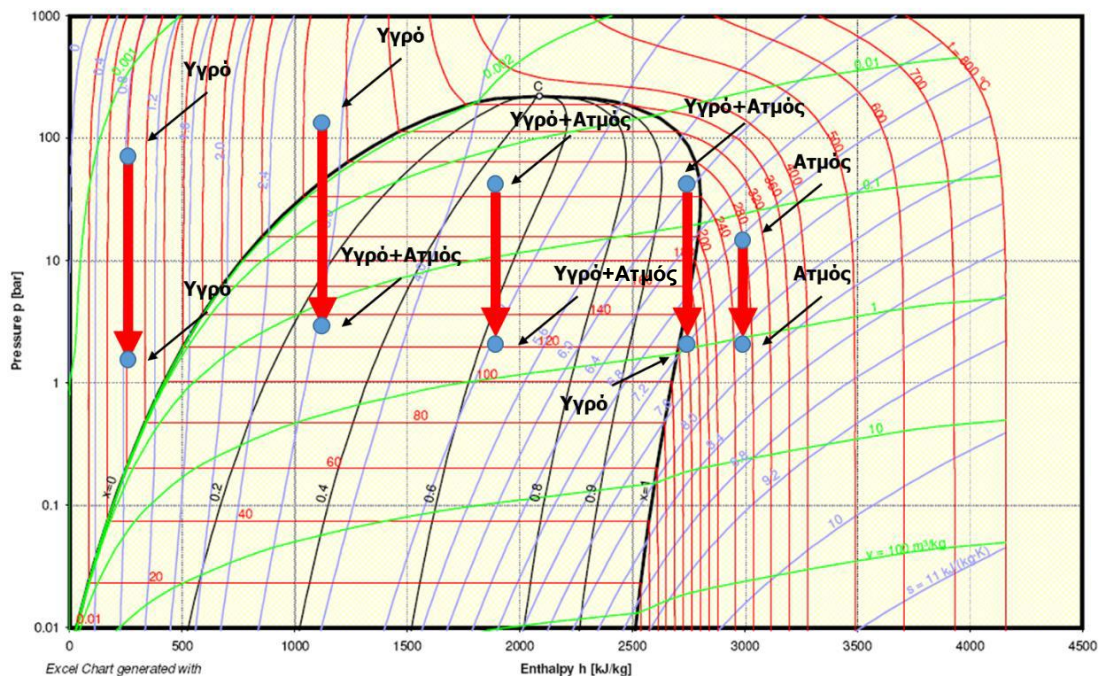
Στο παραπάνω διάγραμμα (Εικόνα 2.3) οι κόκκινες γραμμές αντιστοιχούν σε ισοθερμοκρασιακές καμπύλες σε διάφορες θερμοκρασίες. Η έντονη κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στην ισοθερμοκρασιακή καμπύλη των 100°C. Η έντονη μαύρη γραμμή αντιστοιχεί στο φάκελο φάσης, όπου οι περιοχές υγρού νερού και ξηρού ατμού βρίσκονται αριστερά και δεξιά του αντίστοιχα. Στο εσωτερικό του φακέλου υπάρχουν

τα σημεία διφασικής μορφής του νερού και οι μαύρες γραμμές αντιστοιχούν σε σημεία σταθερής αναλογίας όγκων υγρού – ατμού. Τέλος, το κρίσιμο σημείο αναγράφεται στο διάγραμμα με το γράμμα C.

Εξετάζοντας τη μεταβολή της ενθαλπίας κατά μήκος της ισοθερμοκρασιακής καμπύλης των 100°C, παρατηρείται μία μικρή μείωση, λόγω της πτώσης πίεσης από 1000 bar σε 1 bar. Η πίεση του 1 bar, είναι η πίεση φυσαλίδας για το νερό στους 100°C. Η μείωση της ενθαλπίας προήλθε από την πτώση της πίεσης, καθώς η θερμοκρασία παρέμεινε σταθερή και επομένως δεν συνέβη μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας του ρευστού. Βέβαια, η μικρή συμπίεστικότητα του νερού είναι ο παράγοντας που καθόρισε τη μικρή μεταβολή της ενθαλπίας. Η εξάτμιση του νερού πραγματοποιείται ισοθερμοκρασιακά, από το σημείο φυσαλίδας μέχρι το σημείο δρόσου. Κατά τη διαδικασία αυτή, το υγρό νερό προσλαμβάνει διαρκώς λανθάνουσα θερμότητα (αφού δεν αυξάνεται η θερμοκρασία του), προκειμένου να ατμοποιηθεί. Η πρόσληψη της λανθάνουσας θερμότητας έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της εσωτερικής του ενέργειας και επομένως της ενθαλπίας του. Τέλος, κατά τη μείωση της πίεσης μετά το σημείο δρόσου, η ενθαλπία του νερού εμφανίζει πολύ μικρή αύξηση λόγω της δυναμικής του ενέργειας.

Όπως είναι κατανοητό επομένως, οι μεταβολές της πίεσης και της θερμοκρασίας, που αναλύθηκαν παραπάνω, προκαλούν και τη μεταβολή των φάσεων του γεωθερμικού ρευστού κατά τη μεταφορά του από το εσωτερικό του ταμιευτήρα προς την επιφάνεια. Οι διάφορες περιπτώσεις που προκύπτουν είναι οι ακόλουθες και επισημαίνονται στο διάγραμμα της Εικόνας 2.4:

- Υγρό από τον ταμιευτήρα παράγεται στην επιφάνεια ως υγρό.
- Υγρό από τον ταμιευτήρα παράγεται στην επιφάνεια ως υγρό και ατμός.
- Υγρός ατμός από τον ταμιευτήρα παράγεται στην επιφάνεια ως υγρό και ατμός.
- Υγρός ατμός από τον ταμιευτήρα παράγεται στην επιφάνεια ως ατμός.
- Υπέρθερμος ατμός από τον ταμιευτήρα παράγεται στην επιφάνεια ως ατμός.



Εικόνα 2.4: Μεταβολή ενθαλπίας γεωθερμικών ρευστών κατά την παραγωγή τους στην επιφάνεια [6].

2.3.4. Χρήση CO₂ ως ρευστό ανακυκλοφορίας

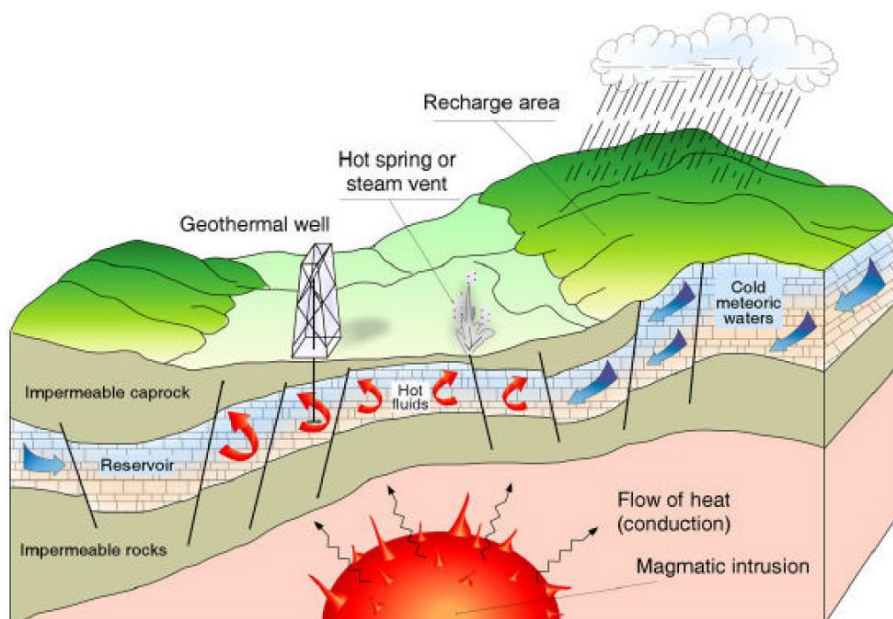
Για την εκμετάλλευση γεωθερμικών συστημάτων που δεν περιέχουν ρευστό (θερμών ξηρών πετρωμάτων, Ενότητα 2.5) απαιτείται η εισπίεση ενός ρευστού μέσα στον ταμιευτήρα, μέσω των γεωτρήσεων, το οποίο θερμαίνεται και ανακτάται θερμό από τις γεωτρήσεις παραγωγής. Κλασσικά η γεωθερμία σε τέτοια συστήματα αξιοποιείται χρησιμοποιώντας μία φάση νερού ως ρευστό ανακυκλοφορίας, προκειμένου να μεταφερθεί η θερμική ενέργεια από τον ταμιευτήρα στην επιφάνεια.

Τα τελευταία χρόνια όμως, ένα εναλλακτικό αέριο που έχει εξεταστεί ως κατάλληλο ρευστό ανακυκλοφορίας είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂). Η ιδέα έγκειται στην εισπίεση του CO₂ μέσα από γεωτρήσεις προκειμένου να λάβει θερμότητα από το σχηματισμό, να αυξήσει την ενθαλπία του και εν τέλει να παραχθεί στην επιφάνεια, μέσω παραγωγικών γεωτρήσεων, έτσι ώστε να αξιοποιηθεί η ενθαλπία του. Το CO₂ αποτελεί μία ενδιαφέρουσα πρόταση για συστήματα στα οποία έχει προκληθεί υδραυλική ρωγμάτωση και δεν υπάρχει φυσικό ρευστό που να κυκλοφορεί στον ταμιευτήρα. Έτσι έχει προταθεί να χρησιμοποιηθεί το CO₂, το οποίο είναι σε αφθονία στη φύση και παράλληλα παρουσιάζει κάποιες ιδιαίτερα ενδιαφέρουσες ιδιότητες για τον κλάδο της γεωθερμίας. Πρόκειται για ένα αέριο που σε σχετικά χαμηλές συνθήκες

πίεσης και θερμοκρασίας βρίσκεται σε συνθήκες υπερκρίσιμου ρευστού, κατά τις οποίες δεν υφίσταται διαχωρισμός μεταξύ υγρών και αερίων. Με αυτό τον τρόπο το CO₂ εμφανίζει ταυτόχρονα ιδιότητες υγρού και αερίου, καθιστώντας το καλύτερο ρευστό για την απαγωγή θερμότητας από τον ταμιευτήρα και τη μεταφορά της στην επιφάνεια, συγκριτικά με το νερό. Επίσης το κρίσιμο σημείο του βρίσκεται σε πίεση 7.38 MPa και σε θερμοκρασία 31.2°C. Ακόμα, θεωρώντας την υδροστατική βαθμίδα, η πίεση στην οποία θα γίνεται υπερκρίσιμο συναντάται περίπου στα 800 m και θεωρώντας τη συνηθισμένη γεωθερμική βαθμίδα τότε στο βάθος των 800 m, η θερμοκρασία του θα είναι υψηλότερη της κρίσιμης. Συνεπώς εάν διοχετευτεί σε οποιοδήποτε ταμιευτήρα βάθους μεγαλύτερο των 800 m, τότε θα βρίσκεται σε υπερκρίσιμη κατάσταση [6].

2.4. Γεωθερμικά συστήματα

Το γεωθερμικό σύστημα χαρακτηρίζεται από ένα γεωλογικό σχηματισμό με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, μέσα στον οποίο είναι αποθηκευμένη η γεωθερμική ενέργεια. Ένα σύστημα αποτελείται από τρία διακριτά μέρη: μία πηγή θερμότητας στο εσωτερικό της Γης, έναν γεωθερμικό ταμιευτήρα και ένα ρευστό που μεταφέρει θερμότητα στην επιφάνεια. Η τυπική δομή ενός γεωθερμικού συστήματος παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.5.



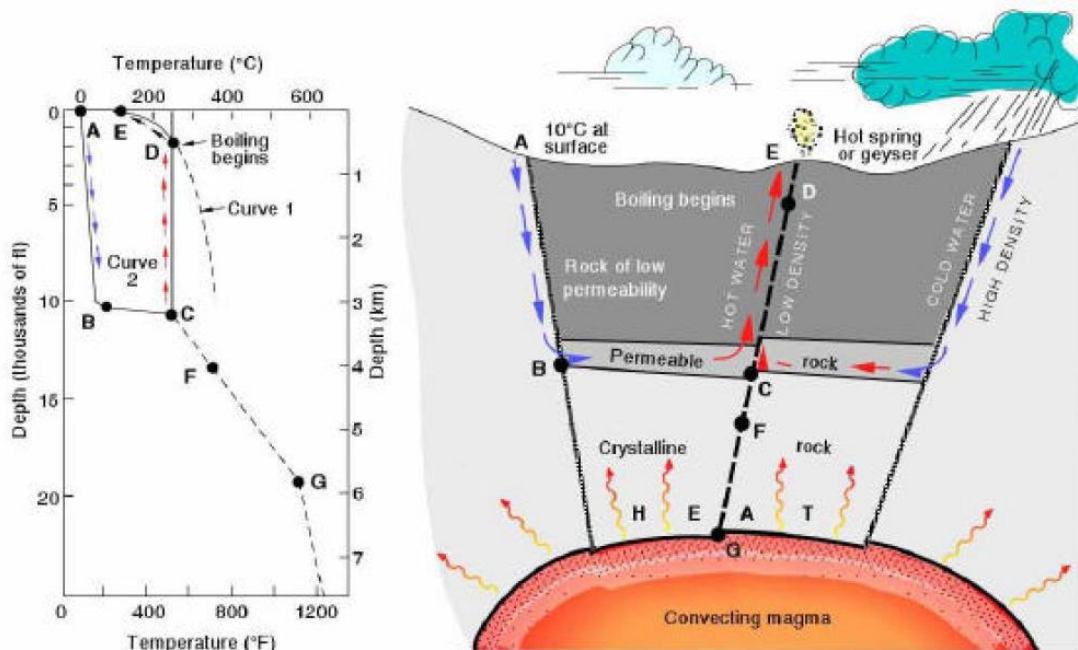
Εικόνα 2.5: Τυπική δομή ενός γεωθερμικού συστήματος [12].

Η κύρια πηγή θερμότητας είναι ένα υπόγειο τμήμα του φλοιού, το οποίο λόγω του αυξημένου βάθους του, σύμφωνα με τη γεωθερμική βαθμίδα, θα εμφανίζει ένα αξιόλογο θερμικό φορτίο [6]. Σημειώνεται επίσης ότι η γεωθερμική βαθμίδα είναι ο ρυθμός με τον οποίο μεταβάλλεται η θερμοκρασία στο εσωτερικό της γης ανά μονάδα μήκους και η μέση τιμή της είναι $3^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$. Ως πηγή θερμότητας όμως θα μπορούσε να χαρακτηριστεί και μία περιοχή η οποία εμφανίζει θερμική ροή μεγαλύτερη της μέσης ($60\text{ mW}/\text{m}^2$ για τον ηπειρωτικό φλοιό), λόγω κάποιας γειτονικής μαγματικής διείδυσης (με θερμοκρασία $600\text{-}1,000^{\circ}\text{C}$) [5]. Οι πηγές με το μεγαλύτερο θερμικό δυναμικό εμφανίζονται κυρίως στα όρια των τεκτονικών πλακών. Στις περιοχές αυτές υπάρχει έντονη γεωθερμική δραστηριότητα με τη μορφή θερμών πηγών, φουρμαρολών θερμών πιδάκων, ατιμίδων ακόμη και ηφαιστείων. Η θερμότητα μεταφέρεται από την πηγή στον ταμιευτήρα μέσω αγωγής.

Ο γεωθερμικός ταμιευτήρας είναι ο όγκος των γεωλογικών σχηματισμών που περιέχει γεωθερμικά ρευστά σε χρήσιμη θερμοκρασία προς αξιοποίηση. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι ο ταμιευτήρας να είναι περατός, είτε μέσω του μεγάλου πορώδους του, είτε λόγω διαμόρφωσης ρωγμών, έτσι ώστε οι μάζες των γεωθερμικών ρευστών να μπορούν να ανεβούν προς την επιφάνεια από τα βαθύτερα και θερμότερα τμήματα του φλοιού, μεταφέροντας έτσι σημαντικές ποσότητες θερμότητας στην επιφάνεια. Διακρίνεται ακόμα η περίπτωση του ταμιευτήρα που βρίσκεται σε κοντινή απόσταση πάνω από μία μαγματική διείδυση, με αποτέλεσμα να θερμαίνεται διαρκώς από αυτή.

Το γεωθερμικό ρευστό είναι το νερό ή ο ατμός που βρίσκεται μέσα στον ταμιευτήρα και έχει ως ρόλο τη μεταφορά της θερμότητας στην επιφάνεια με συναγωγή. Ο ρόλος της θερμοκρασίας και του βάθους στη ροή του γεωθερμικού ρευστού παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.6. Ένα αδιαπέρατο στρώμα βρίσκεται επάνω από τον περατό ταμιευτήρα και εγκλωβίζει το ρευστό στο εσωτερικό του για αρκετό χρόνο ώστε να ζεσταθεί από τη θερμή πηγή. Επομένως, μέσω της διαρκούς κυκλικής του κίνησης θερμαίνεται στα κατώτερα και θερμότερα στρώματα του ταμιευτήρα και στην συνέχεια μετακινείται ανοδικά μέχρι που εμφανίζεται στην επιφάνεια με φυσικό τρόπο, μέσω των μορφών γεωθερμικής δραστηριότητας που προαναφέρθηκαν, ή τεχνητά μέσω γεωτρήσεων. Ο ταμιευτήρας συνορεύει με ψυχρότερα πετρώματα, τα οποία είναι υδραυλικά συνδεδεμένα μαζί του μέσω ρωγματώσεων και ρηγμάτων. Οι σχηματισμοί αυτοί αποτελούν διάυλο για την είσοδο του μετεωρικού νερού στο υπέδαφος και πρακτικά αποτελούν την τροφοδοσία του ταμιευτήρα σε ρευστό. Το κρύο

μετεωρικό νερό, λόγω πυκνότητας, είναι βαρύτερο και καταβυθίζεται προς το εσωτερικό του ταμιευτήρα. Καθώς κινείται προς τις χαμηλότερες ζώνες, θερμαίνεται από αυτές, διογκώνεται και η πυκνότητά του μειώνεται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αρχίσει να κινείται ανοδικά, προς τις υψηλότερες ζώνες, λόγω άνωσης, μεταφέροντας μαζί του τη θερμότητα που συνέλεξε. Ο ίδιος μηχανισμός ισχύει και για τα γεωθερμικά ρευστά που επανεισπιάζονται μέσα στον ταμιευτήρα μετά την αξιοποίηση της θερμικής τους ενέργειας. Παρά την είσοδο ψυχρού νερού από την επιφάνεια, ο ταμιευτήρας διατηρεί τη θερμοκρασία του λόγω της γειννιάσής του με συνορεύοντα θερμά πετρώματα ή λόγω μιας μαγματικής διείσδυσης. [1], [5]



Εικόνα 2.6: Ο ρόλος της θερμοκρασίας και του βάθους στη ροή του νερού στα γεωθερμικά συστήματα [6].

2.5. Ταξινόμηση γεωθερμικών συστημάτων

Τα γεωθερμικά συστήματα μπορούν να ταξινομηθούν με βάση με διάφορα κριτήρια, όπως είναι η θερμοκρασία τους, η κατάσταση του γεωθερμικού ρευστού ή το είδος του γεωθερμικού πόρου.

Καταρχάς ως προς τη θερμοκρασία του περιεχόμενου ρευστού, και κατ' επέκταση το είδος της χρήσης τους χαρακτηρίζονται ως [9]:

- Χαμηλής ενθαλπίας: πεδία θερμοκρασίας 30-90°C, με δυνατότητα αξιοποίησής τους μόνο για θερμικές χρήσεις.

- Μέσης ενθαλπίας: πεδία θερμοκρασίας 90-150°C, με δυνατότητα αξιοποίησής τους για θερμική χρήση και για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Υψηλής ενθαλπίας: πεδία θερμοκρασίας >150°C, με δυνατότητα αξιοποίησής τους κυρίως για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Ο ν.4602/2019 εκσυγχρόνισε το ρυθμιστικό πλαίσιο που θεσπίστηκε με το ν.3175/2003, τροποποιώντας τις ρυθμίσεις που αφορούσαν την αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας χαμηλής ενθαλπίας [8]. Συγκεκριμένα, ο ν.4602/2019 αύξησε την ελάχιστη θερμοκρασία καθορισμού του γεωθερμικού δυναμικού κατά 5°C, μεταβάλλοντάς την από τους 25°C στους 30°C, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα σε πολλές αγροτικές γεωτρήσεις, οι οποίες προηγουμένως βρίσκονταν εντός των ορίων χαρακτηρισμού της χαμηλής ενθαλπίας, να χρησιμοποιηθούν για άρδευση. Επίσης όρισε πως τα πεδία εύρους 30-90°C θα ονομάζονται “τοπικού ενδιαφέροντος” και η έρευνα, η διαχείριση και η εκμετάλλευση του γεωθερμικού δυναμικού σε αυτά υπάγεται στην αρμοδιότητα του συντονιστή Αποκεντρωμένης Διοίκησης, ενώ τα πεδία θερμοκρασίας μεγαλύτερης των 90°C ονομάζονται “εθνικού ενδιαφέροντος” και η έρευνα, η διαχείριση και η εκμετάλλευση του γεωθερμικού δυναμικού τους υπάγεται στην αρμοδιότητα του Υπουργού Περιβάλλοντος και Ενέργειας.

Ως προς την κατάσταση του γεωθερμικού ρευστού (μονοφασικό: ατμός ή υγρό νερό και διφασικό: ατμός και υγρό), τα γεωθερμικά πεδία διακρίνονται σε [13]:

- Πεδία χαμηλής ενθαλπίας, στα οποία το ρευστό εξέρχεται σε μονοφασική υγρή κατάσταση, υπό τη μορφή υγρού νερού.
- Πεδία μέσης και υψηλής ενθαλπίας, στα οποία το ρευστό εξέρχεται σε διφασική κατάσταση, ως μίγμα υγρού και ατμού.
- Πεδία υψηλής ενθαλπίας, στα οποία το ρευστό εξέρχεται σε μονοφασική αέρια κατάσταση, υπό τη μορφή ατμού.
- Πεδία θερμών άνυδρων πετρωμάτων (Hot Dry Rock).

Τα γεωθερμικά συστήματα ανάλογα με το είδος του γεωθερμικού πόρου διακρίνονται σε [5]:

- **Υδροθερμικά συστήματα**

Τα συστήματα αυτά αποτελούν την πλειοψηφία των γεωθερμικών συστημάτων και ορίζονται από τουλάχιστον έναν ταμιευτήρα, το γεωθερμικό

ρευστό που περιέχεται σε αυτόν και μια πηγή θερμότητας. Ο κύριος μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας είναι η συναγωγή, όμως υπάρχουν και ορισμένα συστήματα αγωγής ή στατικά συστήματα. Σε αυτά τα συστήματα το γεωθερμικό νερό θερμαίνεται μέσω αγωγής σε θερμοκρασία 60-150°C [5]. Τα υδροθερμικά συστήματα κατηγοριοποιούνται επιπλέον, βάσει της φάσης του νερού στον ταμιευτήρα, η οποία καθορίζει και τη κατανομή της πίεσης. Επομένως διακρίνονται σε συστήματα στα οποία κυριαρχεί η υγρή φάση και σε συστήματα στα οποία κυριαρχεί η αέρια φάση.

Τα πρώτα, αποτελούν την πλειοψηφία των γνωστών υδροθερμικών συστημάτων και χαρακτηρίζονται από το γεγονός ότι το γεωθερμικό ρευστό είναι, κατά κύριο λόγο, υγρό νερό. Σε ορισμένες περιπτώσεις, είναι δυνατόν να εμφανιστεί στα ανώτερα στρώματα του ταμιευτήρα, όπου η πίεση είναι μικρότερη, και ατμός, με τη μορφή φυσαλίδων, ο οποίος όμως δεν επηρεάζει τη συνέχεια της υγρής φάσης του νερού. Από χημικής άποψης, το γεωθερμικό νερό των υδροθερμικών συστημάτων είναι πλούσιο σε SiO_2 , Na, K, Ca, Mg, Cl, SO_4 [1].

Στον δεύτερο τύπο υδροθερμικών συστημάτων ανήκουν τα συστήματα υψηλής ενθαλπίας, τα οποία παράγουν ξηρό ατμό και για τον λόγο αυτό, ενδείκνυνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το γεωθερμικό ρευστό των ταμιευτήρων των εν λόγω συστημάτων αποτελείται κυρίως από ατμό, ο οποίος καθορίζει και την πίεσή του, αλλά μπορεί να εμφανιστεί και μικρή, σχετικά, ποσότητα υγρού νερού στους πόρους και στα ρήγματα του ταμιευτήρα, χωρίς όμως να επηρεάζει τη συνέχεια της αέριας φάσης. Τα υδροθερμικά συστήματα στα οποία κυριαρχεί η αέρια φάση διακρίνονται επιμέρους σε δύο κατηγορίες, οι ονομασίες των οποίων προέρχονται από τα γεωθερμικά πεδία Larderello και Monte Amiata, στην Ιταλία. Τα πεδία τύπου Larderello είναι τα πιο σπάνια γεωθερμικά πεδία μεν, αλλά και τα πιο αποδοτικά δε. Οι ταμιευτήρες τους βρίσκονται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη των 200°C και σε πίεση 35 bar περίπου. Τέτοια πεδία εκδηλώνονται επιφανειακά με ατμίδες, ηφαίστεια λάσπης και όξινα εδάφη. Από την άλλη τα πεδία τύπου Monte Amiata παρέχουν ατμό μικρότερης θερμοκρασίας (περίπου 150°C) και δεν συνοδεύονται από επιφανειακές εκδηλώσεις [11].

Το λογισμικό σχεδιασμού δικτύου αγωγών που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας βασίστηκε σε ένα υδροθερμικό σύστημα γεωθερμίας χαμηλής ενθαλπίας, με κυρίαρχη φάση, το υγρό νερό.

- **Γεωπιεσμένα συστήματα**

Τα συστήματα αυτά αποτελούνται από ιζηματογενείς λεκάνες, που βρίσκονται σε μεγάλο βάθος (2-6 km) [7] και περιέχουν ζεστό νερό, εγκλωβισμένο στο εσωτερικό τους, λόγω μη περατών πετρωμάτων. Οι συνθήκες πίεσης στα συστήματα αυτά είναι μεγαλύτερες από τις κανονικές (υδροστατική βαθμίδα) και η εκμετάλλευσή τους είναι δύσκολη, εξαιτίας του κόστους που προκύπτει από το μεγάλο βάθος και τη χρονική διάρκεια εκμετάλλευσης.

- **Αβαθής γεωθερμία**

Πρόκειται για μία κατηγορία γεωθερμίας, η οποία αξιοποιεί τις χαμηλές θερμοκρασίες (μέχρι 30°C) που συναντώνται σε μικρά βάθη (μέχρι 150 m) [6]. Σε αυτά τα συστήματα η ενέργεια λαμβάνεται από το υπέδαφος, σε μικρά βάθη, αξιοποιώντας την υψηλή θερμοχωρητικότητα του υπεδάφους, με χρήση γεωθερμικών αντλιών θερμότητας και γεωεναλλακτών. Το έδαφος, σε τόσο μικρά βάθη, διατηρεί μία σταθερή θερμοκρασία της τάξης των 15-20°C, η οποία μπορεί να αξιοποιηθεί για θέρμανση και ψύξη κλειστών χώρων.

- **Συστήματα θερμών ξηρών πετρωμάτων**

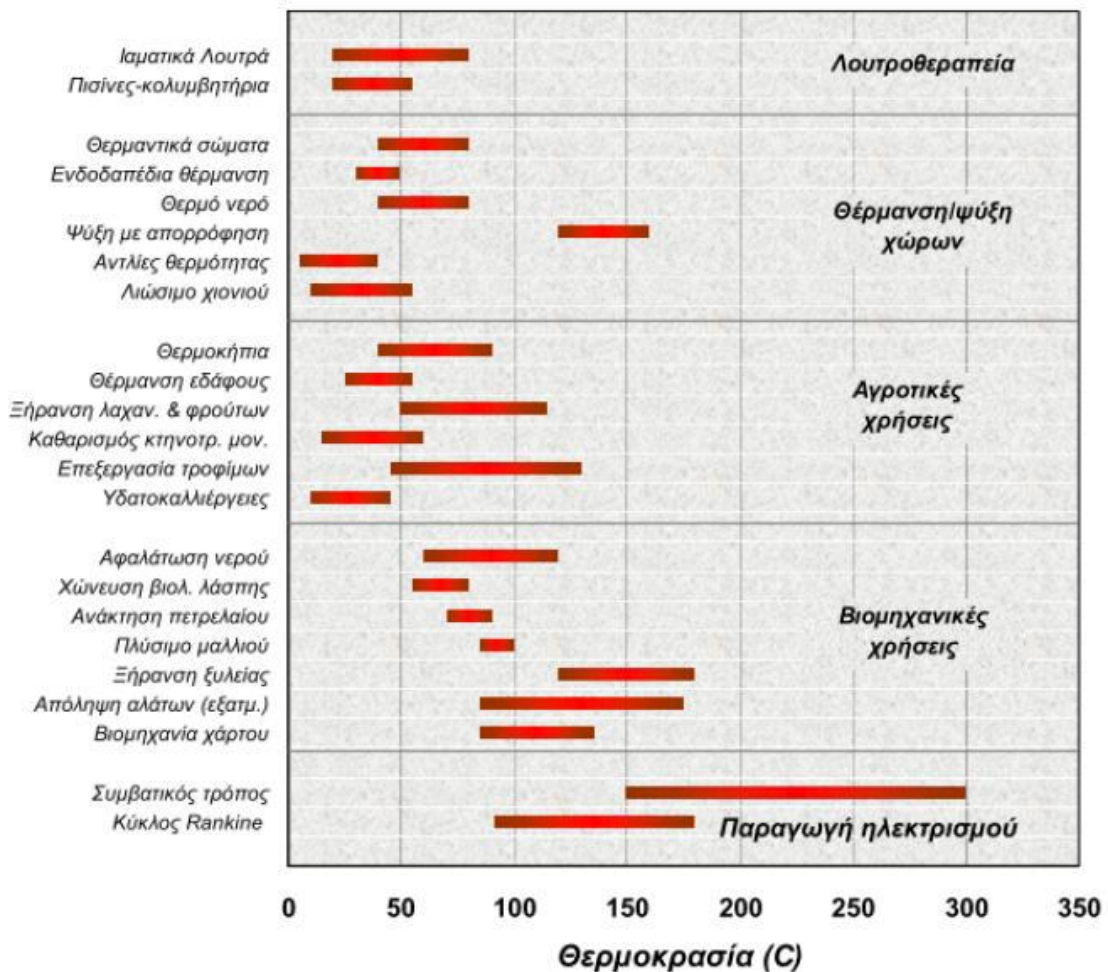
Τα συστήματα αυτά αποτελούνται από θερμά πετρώματα σε μεγάλο βάθος (3-10 km), χωρίς φυσική κυκλοφορία ρευστών, τα οποία εμφανίζουν ιδιαίτερα υψηλή θερμοκρασία και επομένως μπορούν να αξιοποιηθούν για γεωθερμικές εφαρμογές. Το σημαντικότερο πρόβλημα είναι ότι δεν υπάρχει κάποιο ρευστό για να μεταφέρει τα τεράστια ποσά θερμότητας που είναι αποθηκευμένα σε αυτά τα συστήματα. Ο μόνος τρόπος ανάκτησης αυτής της θερμικής ενέργειας είναι μέσω της εισπίεσης νερού (ή CO₂) από την επιφάνεια χρησιμοποιώντας κατάλληλες γεωτρήσεις. Το νερό που διοχετεύεται ανακτάται στη συνέχεια με τη μορφή ζεστού νερού ή ατμών, μεταφέροντας επομένως ένα μέρος από τη θερμότητα του συστήματος [6].

- **Μαγματικά συστήματα**

Τα εν λόγω συστήματα αναφέρονται στην αξιοποίηση της θερμότητας μαγματικών μαζών που βρίσκονται στον φλοιό της Γης, σε σχετικά μικρό βάθος.

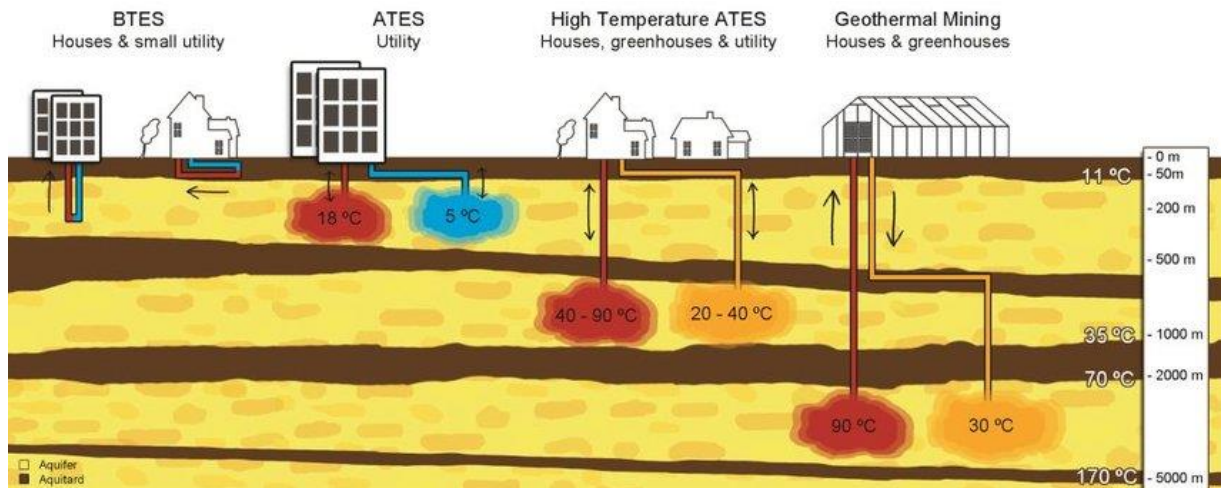
2.6. Εφαρμογές της γεωθερμικής ενέργειας

Οι χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας κατηγοριοποιούνται σε εφαρμογές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και σε εφαρμογές παραγωγής θερμικής ενέργειας. Οι κυριότερες χρήσεις της γεωθερμίας παρουσιάζονται στο διάγραμμα Lindal (Εικόνα 2.7), όπου παρουσιάζονται διαφορετικές εφαρμογές σε συσχέτιση με το εύρος των θερμοκρασιακών τους απαιτήσεων.



Εικόνα 2.7: Τροποποιημένο διάγραμμα Lindal [5].

Οι πιο συνηθισμένες εφαρμογές είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η θέρμανση και η ψύξη χώρων και θερμοκηπίων, οι ιχθυοκαλλιέργειες, η αφαλάτωση του νερού, η ξήρανση γεωργικών και βιομηχανικών προϊόντων και τα ιαματικά λουτρά. Σημειώνεται όμως ότι ταμειυτήρες θερμοκρασίας ανώτερης των 150 °C χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Επίσης, αξίζει να επισημανθεί ότι όσο αυξάνονται οι ενεργειακές απαιτήσεις της εφαρμογής, τόσο αυξάνεται και η ανάγκη για αξιοποίηση θερμότερου γεωθερμικού ρευστού και συνεπώς για εκμετάλλευση βαθύτερου ταμειυτήρα (Εικόνα 2.8).



Εικόνα 2.8: Διάφορες εφαρμογές γεωθερμικής ενέργειας, ανάλογα με τις θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού στον ταμειυτήρα και το βάθος του ταμειυτήρα [14].

2.7. Μαθηματικό ομοίωμα γεωθερμικού συστήματος

Προκειμένου να μελετηθεί πλήρως ένα γεωθερμικό σύστημα, πρέπει να κατασκευαστεί ένα μαθηματικό μοντέλο, ή αλλιώς ομοίωμα, που θα προσομοιώνει τη λειτουργία του. Κάθε γεωθερμικό σύστημα αποτελείται από τρία διακριτά υποσυστήματα στα οποία υπάρχει ροή ρευστών:

1. τον ταμειυτήρα,
2. τις γεωτρήσεις
3. το επιφανειακό δίκτυο μεταφοράς των παραγόμενων ρευστών

Κάθε ένα από αυτά τα επιμέρους συστήματα μοντελοποιείται ξεχωριστά, κοινός παρονομαστής, όμως, των προσομοιώσεων και των τριών επιμέρους συστημάτων είναι η μελέτη των φαινομένων μεταφοράς μάζας και θερμότητας που τα διέπουν. Η προσομοίωση βασίζεται στην επίλυση της αρχής διατήρησης μάζας, της

αρχής διατήρησης ορμής και της αρχής διατήρησης ενέργειας. Οι διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν τις παραπάνω αρχές διέπουν το πρόβλημα ροής και στα τρία περιβάλλοντα, με διαφορετικό τρόπο έκφρασης κάθε φορά. Για παράδειγμα στην προσομοίωση του ταμιευτήρα γίνεται λόγος για πορώδες μέσο, ενώ στις προσομοιώσεις των γεωτρήσεων και του επιφανειακού δικτύου γίνεται λόγος για σωληνώσεις.

Η προσομοίωση των γεωτρήσεων σε ένα γεωθερμικό πεδίο αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο εκτίμησης των χαρακτηριστικών και της μελλοντικής συμπεριφοράς τους. Παρέχει επομένως πληροφορίες, οι οποίες θα ήταν δύσκολο να ληφθούν, δεδομένων των αντίξοων συνθηκών που επικρατούν στο εσωτερικό τους, οι οποίες δυσχεραίνουν ή και αποτρέπουν την εγκατάσταση εξοπλισμού για τη λήψη μετρήσεων πεδίου [15]. Αν και τα περισσότερα μαθηματικά μοντέλα έχουν θεωρούν τη ροή του νερού σταθερή ως προς το χρόνο (steady state flow models), έχουν αναπτυχθεί και κάποια που μπορούν να προσομοιώσουν και μεταβατική ροή (transient flow models), όπως, για παράδειγμα, όταν μελετάται η εκκίνηση της παραγωγής.

Η προσομοίωση της ροής στο εσωτερικό των γεωτρήσεων ως σταθερής επιτρέπει τη μελέτη της απόκρισης του ταμιευτήρα στη μεταβολή της πίεσης της κεφαλής, της εκτίμησης της μέγιστης παροχής στην κεφαλή και την αναλογία υγρού νερού – ατμού στο ρευστό που παράγεται [16]. Η προσομοίωση σταθερής ροής μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή καμπυλών παραγωγής μέσω διαγραμμάτων παροχής – πίεσης [17], καθώς και για την εκτίμηση του τρόπου με τον οποίο αλλαγές σε σχεδιαστικές παραμέτρους, όπως η διάμετρος των σωληνώσεων [18] ή οι συνθήκες του ταμιευτήρα [19], μπορούν να επηρεάσουν την παραγωγή του πεδίου. Η προσομοίωση μεταβατικής ροής μπορεί να εκτιμήσει την καταπόνηση του συστήματος κατά την έναρξη της παραγωγής ή τη συμπεριφορά των σωληνώσεων κατά την έντονη καταπόνηση των δυνατοτήτων τους [20].

Η προσομοίωση ενός ταμιευτήρα αποσκοπεί στη μελέτη των παραμέτρων που περιγράφουν τη ροή του ρευστού στο εσωτερικό του, όπως της πτώσης πίεσης κατά μήκος του πορώδους μέσου, της διαπερατότητας των σχηματισμών, της θερμοκρασίας του ταμιευτήρα και της αναπλήρωσης του νερού, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η καλύτερη δυνατή παροχή γεωθερμικού ρευστού στις κεφαλές των γεωτρήσεων. Η προσομοίωση απαιτεί ένα μαθηματικό ομοίωμα, το οποίο θα περιλαμβάνει

πληροφορίες για τις φυσικές και χημικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό του ταμιευτήρα, τις αρχικές συνθήκες του συστήματος και τις συνοριακές συνθήκες στα όρια του ταμιευτήρα, τις υδρογεωλογικές παραμέτρους του συστήματος, όπως το πορώδες και τη διαπερατότητα, τις ιδιότητες του ρευστού, όπως την πυκνότητα και το ιξώδες του, τις θέσεις των γεωτρήσεων και τις τιμές παροχής τους. Η υδραυλική ροή μέσα στο πορώδες μέσο περιγράφεται από την αρχή διατήρησης μάζας, την αρχή διατήρησης ορμής και την αρχή διατήρησης ενέργειας. Ο κύριος μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας είναι μέσω εξαναγκασμένης συναγωγής, η οποία προκαλείται από τη διαφορά υδραυλικού φορτίου ανάμεσα στις γεωτρήσεις παραγωγής και επανεισπίεσης. Επίσης, σημαντικό ρόλο κατέχει και η επίδραση της θερμικής διασποράς, η οποία είναι αποτέλεσμα της κινηματικής διασποράς, δηλαδή της τοπικής διακύμανσης των συναγωγικών ταχυτήτων στα όρια θερμού – ψυχρού ταμιευτήρα [21].

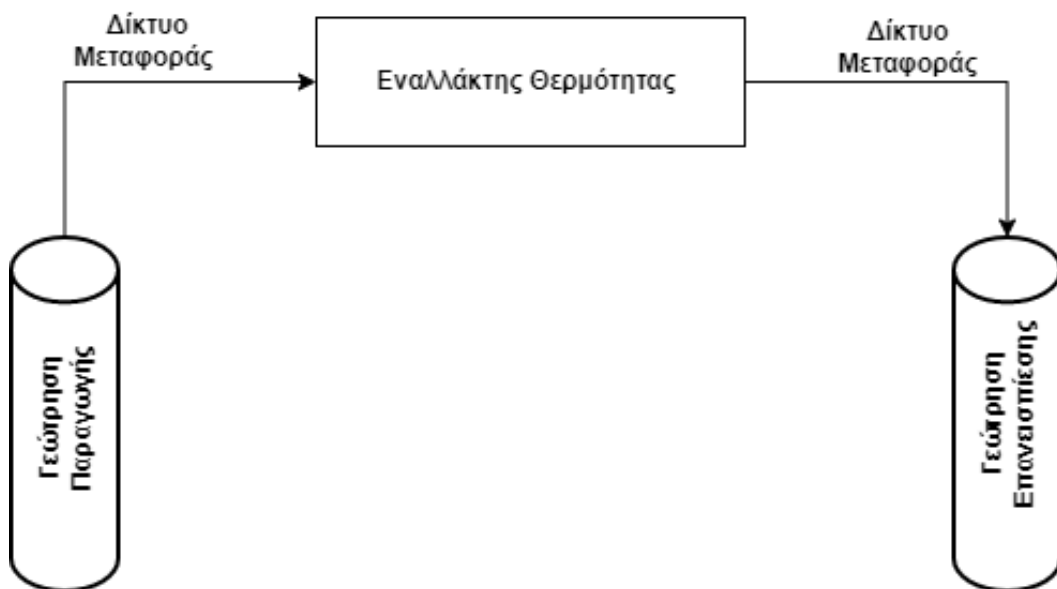
Τελικά, αφού έχει ολοκληρωθεί η μοντελοποίηση του ταμιευτήρα και των γεωτρήσεων, απαιτείται να μελετηθεί το επιφανειακό δίκτυο μεταφοράς των ρευστών, το οποίο και αποτελεί το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Δοθείσης της μετρημένης παροχής, της πίεσης και της θερμοκρασίας στις κεφαλές των γεωτρήσεων, το μοντέλο του δικτύου μεταφοράς ρευστών αποσκοπεί στην εκτίμηση των ιδιοτήτων της ροής του γεωθερμικού ρευστού, κατά μήκος των αγωγών του δικτύου, έως ότου αυτό οδηγηθεί στη μονάδα αξιοποίησης της γεωθερμικής ενέργειας, όπως για παράδειγμα σε ένα θερμοκήπιο. Η κατασκευή του μαθηματικού ομοιώματος βασίζεται στην αρχή διατήρησης μάζας, την αρχή διατήρησης ορμής και την αρχή διατήρησης ενέργειας, έτσι ώστε αρχικά να προσδιοριστεί και στη συνέχεια να ελαχιστοποιηθεί η πτώση πίεσης και η απώλεια θερμότητας, κατά μήκος του δικτύου. Στο Κεφάλαιο 4 θα αναλυθεί η διαδικασία κατασκευής ενός μοντέλου δικτύου μεταφοράς γεωθερμικών ρευστών για ένα γεωθερμικό πεδίο χαμηλής ενθαλπίας και θα περιγραφούν με λεπτομέρεια οι εξισώσεις που εκφράζουν τις τρεις αρχές που διέπουν τη συμπεριφορά του δικτύου.

3. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ ΧΑΜΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ

Τα γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας είναι ικανά να παράγουν στην επιφάνεια ζεστό νερό μέγιστης θερμοκρασίας 90°C. Πρόκειται για τα πεδία με τις χαμηλότερες θερμοκρασίες και ο ταμιευτήρας τους περιέχει μόνο υγρό νερό.

Το τυπικό σύστημα εκμετάλλευσης ενός γεωθερμικού πεδίου χαμηλής ενθαλπίας αποτελείται συνήθως από τέσσερα διακριτά υποσυστήματα (Εικόνα 3.1) [5]:

1. Το σύστημα παραγωγής, που αποτελείται από την παραγωγική γεώτρηση, την αντλία παραγωγής (όπου απαιτείται λόγω έλλειψης αρτεσιανισμού) και τις διατάξεις στην κεφαλή της γεώτρησης.
2. Το σύστημα μεταφοράς των γεωθερμικών ρευστών, που αποτελείται από το δίκτυο αγωγών και βοηθητικών διατάξεων (για παράδειγμα, αντλιών) που μεταφέρουν το ρευστό (νερό ή ατμό) κατά μήκος του δικτύου.
3. Το σύστημα αξιοποίησης και διάθεσης της γεωθερμικής ενέργειας, που αποτελείται από το σύστημα εναλλαγής της θερμότητας μαζί με τους κυκλοφορητές, τα συστήματα ρύθμισης και τις σωληνώσεις.
4. Το σύστημα διάθεσης των ρευστών, το οποίο είναι υπεύθυνο για την επανεισπίεση του ρευστού μέσα στον ταμιευτήρα, μετά τη χρήση.



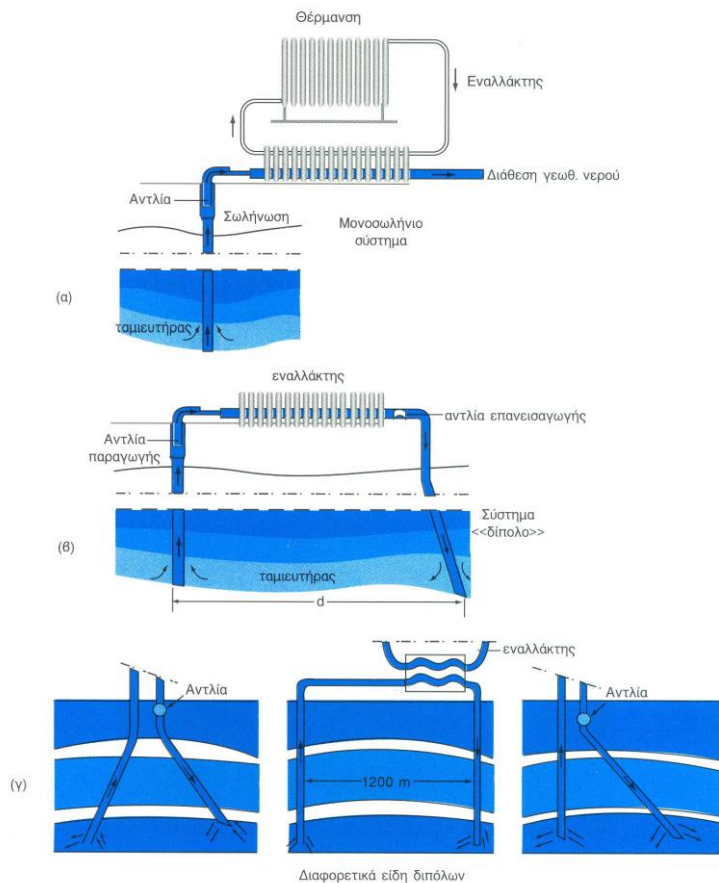
Εικόνα 3.1: Δομή τυπικού συστήματος εκμετάλλευσης ενός γεωθερμικού πεδίου χαμηλής ενθαλπίας.

Η παρούσα εργασία αφορά το δίκτυο μεταφοράς των ρευστών σε ένα πεδίο χαμηλής ενθαλπίας, επομένως θα δοθεί μεγαλύτερη βάση στα πρώτα δύο υποσυστήματα, ενώ τα υπόλοιπα θα αναλυθούν μέσω των εφαρμογών της γεωθερμίας χαμηλής ενθαλπίας.

3.1. Σύστημα παραγωγής γεωθερμικών ρευστών

Η μεταφορά μάζας και ενέργειας αποτελούν τους κυρίαρχους μηχανισμούς που χαρακτηρίζουν τη ροή και την κατάσταση ενός γεωθερμικού πεδίου. Η κινητήριος δύναμη που προκαλεί τη ροή του ρευστού από το εσωτερικό του ταμιευτήρα μέχρι την κεφαλή της γεώτρησης είναι η πτώση πίεσης από τον πυθμένα της γεώτρησης μέχρι την κεφαλή της. Γενικά διακρίνονται δύο συστήματα παραγωγής (Εικόνα 3.2) [5]:

- το σύστημα μονής γεώτρησης, ή αλλιώς μονοσωλήνιο (περίπτωση (α))
- το σύστημα διπλής γεώτρησης, ή αλλιώς διπόλου (περίπτωση (β))



Εικόνα 3.2: Συστήματα ανάκτησης θερμότητας από ένα γεωθερμικό ταμιευτήρα. (α) Σύστημα μονής γεώτρησης. (β) Σύστημα διπλών γεωτρήσεων (γ) διαφορετικά είδη διπλών γεωτρήσεων. [5]

Η μονή γεώτρηση είναι μία οικονομική επιλογή, στην οποία ελλοχεύει ο κίνδυνος πιθανής μείωσης της πίεσης του ταμειυτήρα με το χρόνο, λόγω απώλειας μάζας στον ταμειυτήρα, στην περίπτωση που δεν υπάρχει φυσική επαναφόρτίσή του. Το σύστημα του διπόλου, είναι το πιο διαδεδομένο και αειφόρο. Αποτελείται από δύο γεωτρήσεις, τη γεώτρηση παραγωγής, η οποία μεταφέρει ρευστό από το εσωτερικό του ταμειυτήρα στο περιβάλλον, και τη γεώτρηση εισπίεσης, η οποία επανεισάγει στον ταμειυτήρα το γεωθερμικό ρευστό μετά τη χρήση του. Με αυτόν τον τρόπο το σύνολο της μάζας του γεωθερμικού ρευστού παραμένει σταθερό και το σύστημα είναι βιώσιμο. Οι κεφαλές της γεώτρησης βρίσκονται στην επιφάνεια και στην περίπτωση που οι γεωτρήσεις είναι κεκλιμένες είναι δυνατόν να βρίσκονται στον ίδιο χώρο. Βασική προϋπόθεση είναι οι πυθμένες των δύο γεωτρήσεων να απέχουν μεταξύ τους μία απόσταση της τάξης των 1000 m τουλάχιστον, έτσι ώστε να μην επηρεάζεται το θερμικό δυναμικό του ταμειυτήρα από το ψυχρότερο ρευστό, που επανεισάγεται σε αυτόν. Συχνά όμως απαιτείται η χρήση αντλίας για τη διακίνηση των ρευστών κατά μήκος των σωληνώσεων του δικτύου.

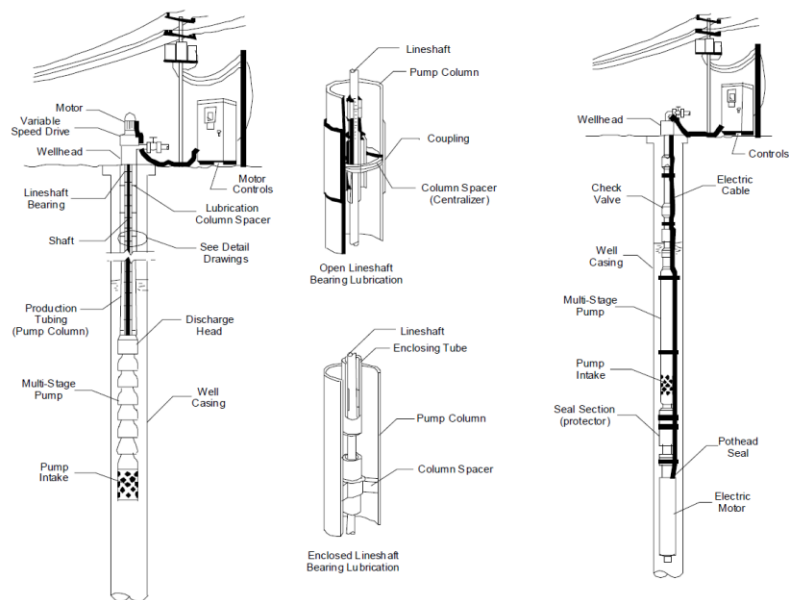
3.1.1. Αντλίες παραγωγής

Οι αντλίες παραγωγής χρησιμοποιούνται για την αύξηση της πίεσης στην κεφαλή της γεώτρησης, στην περίπτωση που το σύστημα δεν είναι αρτεσιανό, δηλαδή όταν η διαφορά πίεσης από τον πυθμένα στην κεφαλή δεν είναι αρκετή για την παραγωγή γεωθερμικού ρευστού στην επιφάνεια. Δεδομένου του μικρού, σχετικά, βάθους των ταμειυτήρων, σε σχέση με τους ταμειυτήρες υδρογονανθράκων, απαιτούνται αντλίες σχετικά μικρής ισχύος. Υπάρχουν δύο είδη αντλιών τα οποία είναι ευρέως διαδεδομένα (Εικόνα 3.3):

- Στροβιλαντλία με άξονα (Lineshaft pump, “πομόνα”). Έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε γεωθερμικές εφαρμογές βάθους μέχρι 250 m και θερμοκρασιών μέχρι 200°C. Αποτελείται από έναν κινητήρα, ο οποίος βρίσκεται στην επιφάνεια και μεταφέρει την κίνηση στις πτερωτές, που βρίσκονται στο εμβλαπτισμένο κυρίως σώμα, μέσω ενός κατακόρυφου άξονα. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα αυτού του τύπου αντλίας είναι η δυναμικότητά της, η οποία καλύπτει ένα μεγάλο εύρος τιμών, καθώς ο κινητήρας της δεν χρειάζεται να υπόκειται σε περιορισμούς μεγέθους και ισχύος. Ακόμα παρουσιάζει μεγάλη

ανθεκτικότητα και δυνατότητα εύκολης επισκευής, εξαιτίας της επιφανειακής εγκατάστασής της. Είναι διαδεδομένη στο εμπόριο και μπορεί να αντλήσει καθαρό και θολό νερό, δηλαδή νερό με αιωρήματα ιλύος. Λόγω κατασκευής του άξονα, απαιτείται η σχεδόν απόλυτη κατακορυφότητα της γεώτρησης, ενώ είναι δυνατή και η εμφάνιση δονήσεων κατά μήκος του. Πάσχει επίσης από μεγάλο λειτουργικό θόρυβο, και περιορισμούς στο βάθος εγκατάστασης των στροβίλων.

- Ηλεκτρική υποβρύχια αντλία (submersible pump). Σε γεωθερμικές εφαρμογές, χρησιμοποιείται σε βάθος που μπορεί να υπερβαίνει τα 250 m και σε θερμοκρασίες μικρότερες των 120°C. Χαρακτηρίζεται από μεγάλη αξιοπιστία και ευελιξία με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται συχνά και για τη διακίνηση θερμών και ψυχρών ρευστών στις επιφανειακές εγκαταστάσεις. Αποτελείται από έναν ηλεκτροκινητήρα που είναι ενσωματωμένος με το κυρίως σώμα και βρίσκεται εμβαπτισμένη εξολοκλήρου μέσα στο νερό της γεώτρησης. Επομένως, απαιτείται ένα σύστημα στεγανοποίησης και η απαραίτητη καλωδίωση τροφοδοσίας. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημά της είναι ότι μπορεί να τοποθετηθεί σε μεγάλα βάθη, τα οποία δεν καλύπτονται από τις στροβιλαντλίες και σε γεώτρηση οποιασδήποτε κλίσης. Ωστόσο, παρουσιάζουν αυξημένο κόστος σε σχέση με τις στροβιλαντλίες και σε περίπτωση βλάβης θα πρέπει να σταματήσει η παραγωγή και να αφαιρεθεί από τη γεώτρηση, προκειμένου να επισκευαστεί.



Εικόνα 3.3: (α) Στροβιλαντλία με άξονα. (β) Ηλεκτρική υποβρύχια αντλία. [22]

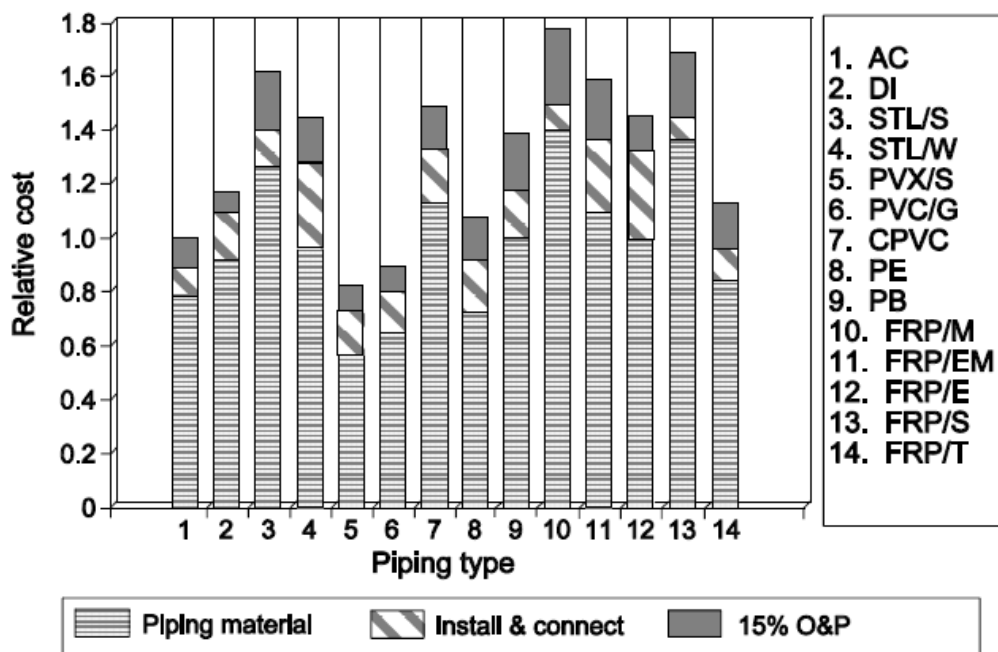
3.2. Σωληνώσεις μεταφοράς γεωθερμικών ρευστών

Το σύστημα μεταφοράς του γεωθερμικού ρευστού ενός γεωθερμικού πεδίου χαμηλής ενθαλπίας εκτείνεται από την κεφαλή της γεώτρησης μέχρι τη μονάδα εφαρμογής και από εκεί μέχρι τη γεώτρηση επανεισαγωγής. Τις περισσότερες φορές η θερμοκρασία είναι τέτοια ώστε το ρευστό να βρίσκεται σε μονοφασική κατάσταση, επομένως πρόκειται για θερμό υγρό νερό. Συνεπώς το δίκτυο μεταφοράς του γεωθερμικού νερού θα μοιάζει αρκετά με ένα τυπικό σύστημα πόσιμου νερού. Σε ένα σύστημα γεωθερμικής ενέργειας χαμηλής ενθαλπίας, το δυναμικό προέρχεται από τη θερμική ενέργεια, η οποία μεταφέρεται μέσω του νερού. Συνεπώς είναι υψίστης σημασίας η επιλογή κατάλληλων σωληνώσεων και θερμομονώσεων, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η απώλεια θερμότητας κατά το δυνατόν οικονομικότερα.

Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν το κόστος είναι η διάμετρος, η αντοχή σε εφελκυσμό, η μόνωση, η έκθεση σε ακτινοβολία UV, η τοποθέτηση των σωληνώσεων επιφανειακά ή υπεδαφικά, η παροχή, η θερμοκρασία του νερού και η χημική σύσταση του νερού και οι αντλιακές απαιτήσεις του συστήματος λόγω πτώσης πίεσης κατά μήκος του δικτύου αγωγών. Γενικά, η θερμοκρασία και η χημική σύσταση του νερού είναι οι κυριότεροι παράγοντες επιλογής ποιότητας αγωγού, με το κόστος να αυξάνεται ανάλογα με τη διάμετρο και τη θερμοκρασία του νερού (λόγω ανάγκης θερμομόνωσης) [5].

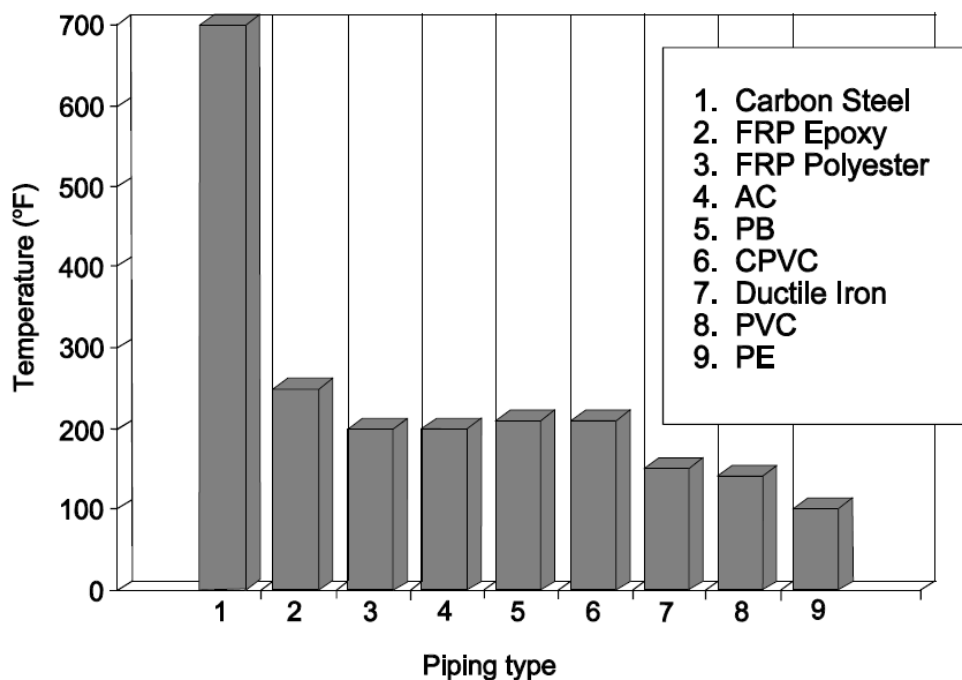
Διακρίνονται δύο βασικές κατηγορίες σωληνώσεων που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα μεταφοράς, με έντονη διαφοροποίηση στο κόστος τους, όπως φαίνεται και από το διάγραμμα της Εικόνας 3.4 [23]:

- Μεταλλικές σωληνώσεις. Παρουσιάζουν καλές μηχανικές αντοχές, αλλά είναι επιρρεπείς στη χημική διάβρωση.
- Μη μεταλλικές σωληνώσεις. Παρουσιάζουν καλές αντιδιαβρωτικές συμπεριφορές, αλλά κάποια είδη εμφανίζουν μικρές μηχανικές αντοχές, ανάλογα με τη θερμοκρασία του ρευστού.



Εικόνα 3.4: Σχετικό κόστος ανά κατηγορία αγωγού [23].

Οι μέγιστες θερμοκρασίες που μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάθε υλικό αγωγού παρατίθενται στο διάγραμμα της Εικόνας 3.5.



Εικόνα 3.5: Μέγιστες λειτουργικές θερμοκρασίες για υλικό σωλήνωσης [23].

3.2.1. Μεταλλικές σωληνώσεις

Για τη μεταφορά γεωθερμικών ρευστών χρησιμοποιούνται δύο τύποι μεταλλικών σωληνώσεων, από κοινό χάλυβα και από ανοξείδωτο χάλυβα. Γενικά οι αγωγοί από χάλυβα παρουσιάζουν καλές μηχανικές αντοχές και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε θερμοκρασίες ανώτερες των 200°C, όμως το μεγαλύτερο μειονέκτημά τους είναι το πρόβλημα της έντονης διάβρωσής τους.

3.2.1.1. Σωληνώσεις από χάλυβα

Ο χάλυβας αποτελεί ένα από τα πιο συνηθισμένα υλικά κατασκευής δικτύων λόγω του χαμηλού του κόστους και της πολύ καλής αντοχής σε εφελκυσμό, σύνθλιψη και εσωτερική πίεση. Είναι αρκετά επιρρεπής όμως σε μηχανική και γαλβανική διάβρωση, τα συμπτώματα των οποίων εντείνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας [7].

Είναι εξαιρετικά διαδεδομένος και οι ονομαστικές διαμέτροι των αγωγών από χάλυβα ποικίλουν από 5 mm, έως και 2,000 mm. Στο εμπόριο μπορούν να βρεθούν σωληνώσεις με ή χωρίς ραφές. Ωστόσο αξίζει να τονισθεί ότι στην περιοχή της ραφής συχνά παρατηρείται μικρότερη αντοχή και μεγαλύτερη διαβρωτική τάση. Από πλευράς συνδεσμολογίας, η συνηθέστερη σύνδεση αγωγών μεγάλης διαμέτρου ($D > 50 \text{ mm}$) είναι μέσω συγκόλλησης, ενώ για μικρότερες διαμέτρους, οι αγωγοί είναι βιδωτοί [5]. Εάν η συγκόλληση δεν γίνει με ηλεκτρόδιο ίδιας ποιότητας με το υλικό του αγωγού, τότε είναι δυνατή η εμφάνιση αυξημένης γαλβανικής διάβρωσης στο σημείο της συγκόλλησης [7].

Στην περίπτωση που οι αγωγοί είναι τοποθετημένοι επιφανειακά, τότε καλύπτονται με ένα στρώμα πίσσας ενισχυμένης με ίνες και υποβάλλονται σε διαδικασία καθοδικής προστασίας, προκειμένου να προστατευτούν από την εξωτερική διάβρωση. Στην περίπτωση που τοποθετούνται υπεδαφικά, τότε επενδύονται εξωτερικά με προστατευτικές επικαλύψεις για την προστασία τους από τη διάβρωση λόγω του υδροφόρου ορίζοντα. Τα γεωθερμικά νερά είναι πλούσια σε ιόντα, τα οποία μπορούν να προκαλέσουν τρηματική διάβρωση, δηλαδή τοπική κατάρρευση του παθητικού προστατευτικού στρώματος της μεταλλικής επιφάνειας [24]. Προκειμένου να προστατευτούν επενδύονται στο εσωτερικό με πλαστικό, τσιμεντοκονία ή με

σκληρυνόμενες ρητίνες. Τα πλαστικά επένδυσης και οι ανώτερες θερμοκρασίες εφαρμογής τους παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 3.1: Μέγιστη θερμοκρασία εφαρμογής ανά είδος πλαστικής επένδυσης [5].

Πλαστική Επένδυση	Μέγιστες Θερμοκρασίες Εφαρμογής (°C)
Πολυπροπυλένιο (PP)	100
Φθοριούχο πολυβινυλιδένιο (PVDF)	135
Πολυτετραφθοροαιθυλένιο (PTFE)	232

3.2.1.2. Σωληνώσεις από ανοξείδωτο χάλυβα

Οι κραματικές προσθήκες του ανοξείδωτου χάλυβα σε χρώμιο, νικέλιο και μολυβδαίνιο προσδίδουν στον αγωγό αντιδιαβρωτικό χαρακτήρα, ενώ παράλληλα τροποποιούν τις μηχανικές και φυσικές του ιδιότητες. Το υψηλό κόστος τον καθιστά όμως απαγορευτικό για εφαρμογή σε δίκτυα γεωθερμικών πεδίων χαμηλής ενθαλπίας [7].

3.2.2. Μη μεταλλικές σωληνώσεις

Τα μη μεταλλικά υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στους αγωγούς των δικτύων γεωθερμίας είναι τα πλαστικά, τα οποία διακρίνονται σε θερμοπλαστικά, θερμοσκληρυνόμενα και ελαστομερή. Έχουν εξαιρετικές αντιδιαβρωτικές ικανότητες, βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή στη μεταφορά γεωθερμικού νερού σε πεδία χαμηλής ενθαλπίας και εφαρμόζονται για λειτουργικές θερμοκρασίες 40-80°C [9].

3.2.2.1. Θερμοπλαστικά

Τα θερμοπλαστικά είναι μια ειδική κατηγορία πολυμερών που περιλαμβάνει το πολυπροπυλένιο (PP), το πολυαιθυλένιο (PE), το πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC) και το πολυβουτυλένιο (PB). Πρόκειται για υλικά με μεγάλη αντοχή στη διάβρωση, αλλά μικρές μηχανικές αντοχές σε εφελκυσμό, σύνθλιψη και εσωτερική πίεση, οι οποίες

ελαττώνονται αισθητά με την αύξηση της θερμοκρασίας και με το πέρασμα του χρόνου [7]. Οι επιπτώσεις της θερμοκρασίας και της γήρανσης του υλικού γίνονται αντιληπτές από τα δεδομένα των πινάκων 3.2, 3.3 και 3.4.

Πίνακας 3.2: Ποσοστιαία μείωση της αντοχής εφελκυσμού τριών θερμοπλαστικών υλικών που χρησιμοποιούνται στη γεωθερμία, αναφορικά με την αντοχή τους στους 20°C [5].

Θερμοκρασία λειτουργίας (°C)	Ποσοστιαία μείωση της αντοχής σε εφελκυσμό		
	PVC	PE	PP
20	1.00	1.00	1.00
30	0.80	0.90	0.95
40	0.56	0.72	0.84
50	0.38	0.58	0.74
60	0.22	0.44	0.64
70	Δεν συνιστάται	0.23	0.52
80	Δεν συνιστάται	Δεν συνιστάται	0.25

Πίνακας 3.3: Προσδοκώμενη ζωή αγωγού πολυπροπυλενίου και μέγιστη επιτρεπτή πίεση λειτουργίας ανάλογα με τη θερμοκρασία λειτουργίας [5].

Θερμοκρασία λειτουργίας (°C)	Διάρκεια ζωής (έτη)	Ανώτατη πίεση λειτουργίας PP (bar)
20	50	25
40	50	21
60	50	15
80	10	7

Πίνακας 3.4: Ανώτατη πίεση λειτουργίας τεσσάρων τύπων αγωγών πολυβινυλοχλωριδίου ανάλογα με τη θερμοκρασία λειτουργίας [7].

Θερμοκρασία λειτουργίας (°C)	Ανώτατη πίεση λειτουργίας (bar)			
	PN4	PN6	PN10	PN16
20	4.0	6.0	10.0	16.0
30	2.5	4.0	6.0	10.0
40	1.6	2.5	4.0	6.0
50	1.0	1.6	2.5	4.0
60	0.6	1.0	1.6	2.5

- Πολυπροπυλένιο (PP). Χρησιμοποιείται κυρίως σε γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας με χαμηλές απαιτήσεις σε πίεση. Η θεωρητική μέγιστη λειτουργία χρήσης του εκτείνεται μέχρι τους 105°C, η βιβλιογραφία όμως προτείνει να μην εφαρμόζεται σε δίκτυα που υπερβαίνουν τους 70-75°C [5], [7], καθώς οι μηχανικές αντοχές σε εφελκυσμό και πίεση σε αυτές τις θερμοκρασίες φθίνουν επικίνδυνα, όπως υποστηρίζεται από τους Πίνακες 3.2 και 3.3. Τα βασικά του πλεονεκτήματα είναι ότι παρουσιάζει χαμηλό βαθμό γήρανσης και υψηλή ανθεκτικότητα σε υπεριώδη ακτινοβολία, που το καθιστά ιδανικό για υπέργεια τοποθέτηση. Ωστόσο δεν διατίθεται εύκολα σε μεγάλες διαμέτρους. Οι ονομαστικές του διαστάσεις στο εξωτερικό κυμαίνονται από 10 mm έως 1,000 mm, στην Ελλάδα όμως κυκλοφορούν σε διαμέτρους μέχρι 64 mm, περιορίζοντας την χρήση του σε κεντρικές θερμάνσεις [5].
- Πολυαιθυλένιο (PE). Πρόκειται για φθινό και εύκαμπτο υλικό, που διατίθεται στην αγορά σε πλήθος μεγεθών. Στην Ελλάδα κυκλοφορεί σε διαμέτρους 16-30 mm και έχει ανώτερη πίεση λειτουργίας τα 32 bar (στους 20°C). Διατίθεται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με την πυκνότητά του: χαμηλής, μέσης και υψηλής πυκνότητας. Μπορεί να εγκατασταθεί υπογείως, υπέργεια και υποθαλάσσια, αλλά αποφεύγεται η τοποθέτησή του σε περιβάλλον που περιέχει υδρογονάνθρακες, καθώς ελλοχεύει ο κίνδυνος εξαλλοίωσης των τοιχωμάτων του αγωγού. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία εφαρμόζεται μέχρι τη λειτουργική θερμοκρασία 50-60°C και δεν αντέχει σε μεγάλες πιέσεις. Για γεωθερμικές

εφαρμογές συνήθως χρησιμοποιείται σωλήνας μικρής διαμέτρου (13-25 mm) για τη θέρμανση θερμοκηπίων [23]. Σε περιβάλλον μεγάλων πιέσεων η μόνη λύση είναι η αύξηση του πάχους της σωλήνωσης, το οποίο εξουδετερώνει το πλεονέκτημα κόστους του PE.

- Πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC). Πρόκειται για ένα σκληρό θερμοπλαστικό υλικό για εφαρμογές χαμηλής θερμοκρασίας, μέχρι 60°C, ενώ ένας ειδικός τύπος πολυβινυλοχλωριδίου, το CPVC, έχει ως μέγιστη θερμοκρασία χρήσης τους 100°C [7]. Το PVC επηρεάζεται δραματικά από την αύξηση της θερμοκρασίας, με την λειτουργική του πίεση να μειώνεται αναλόγως, όπως διαφαίνεται και στον Πίνακα 3.4. Είναι επιρρεπές ακόμα στην επίδραση της ακτινοβολίας UV και απαιτείται η κάλυψή του με προστατευτικά επιστρώματα, προκειμένου να αποφευχθεί η επιφανειακή του οξείδωση. Στο εμπόριο είναι διαθέσιμο σε ένα μεγάλο εύρος διαμέτρων που εκτείνεται από 5 mm έως 1,000 mm [5] και μέχρι 300 mm πάχος [7]. Στην Ελλάδα αποτελεί την κατεξοχήν επιλογή για γεωθερμικούς αγωγούς δικτύων χαμηλής θερμοκρασίας.
- Πολυβουτυλένιο (PB). Πρόκειται για ένα υλικό με αρκετά υψηλή αντοχή σε θερμοκρασία (μέχρι 90°C), το οποίο δεν χρησιμοποιείται συχνά στα δίκτυα γεωθερμικών ρευστών [5].

3.2.2.2. Ελαστομερή

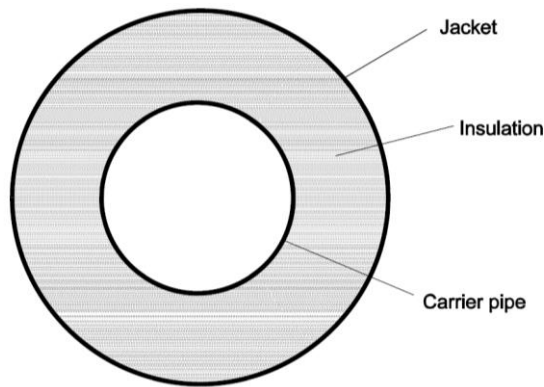
Τα ελαστομερή είναι μία ειδική κατηγορία πολυμερών που στη γεωθερμία χρησιμοποιούνται για την κατασκευή εξαρτημάτων, παρεμβυσμάτων και φλαντζών [5]. Πάσχουν από το πρόβλημα της γήρανσης μεν, αλλά για ορισμένα υψηλά θερμοκρασιακά επίπεδα (σε ορισμένες περιπτώσεις μέχρι και 300°C) δεν εμφανίζουν μεταβολή των φυσικοχημικών τους χαρακτηριστικών. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται και για την προστασία ηλεκτρικών καλωδίων και μεταλλικών σωληνώσεων, με το κόστος τους να αυξάνεται ανάλογα με τις δυνατότητες θερμοκρασιακής αντοχής [25].

3.2.2.3. Θερμοσκληρούμενα πλαστικά

Πρόκειται για σωλήνες από θερμοσκληρούμενη ρητίνη ενισχυμένη με ίνες (RTRP – reinforced thermosetting resin pipe ή αλλιώς FRP – fiberglass reinforced plastic), οι οποίοι θεωρούνται από τους πιο διαδεδομένους μη μεταλλικούς αγωγούς διεθνώς. Ο συνδυασμός εποξικής ρητίνης και ενίσχυσης από ίνες υάλου είναι ιδιαίτερα διαδεδομένος για γεωθερμικές εφαρμογές, καθώς προσφέρει αυξημένη αντιδιαβρωτική συμπεριφορά και τις καλύτερες μηχανικές αντοχές και θερμικές συμπεριφορές από όλες τις μη μεταλλικές σωληνώσεις [23]. Στο εμπόριο κυκλοφορούν σε διαμέτρους μεγαλύτερες των 60 mm. Η μέγιστη πίεση λειτουργίας είναι τα 16 bar για το θερμοκρασιακό εύρος 20-50°C και τα 10 bar για θερμοκρασίες 50-80°C και η ανώτερη θερμοκρασία λειτουργίας είναι οι 120°C [5], [7]. Οι αγωγοί από θερμοσκληρούμενα πλαστικά ωστόσο είναι πιο ακριβοί από τις σωληνώσεις χάλυβα και είναι ευαίσθητη σε φαινόμενα γήρανσης, που εντατικοποιούνται από την παρουσία ατμού, ο οποίος απομακρύνει τη ρητίνες και θραύει τις ίνες στα εσωτερικά τοιχώματα του αγωγού [23].

3.2.3. Μόνωση σωληνώσεων

Το δυναμικό του γεωθερμικού πεδίου προέρχεται από τη θερμότητα που μεταφέρεται μέσω των αγωγών από τον ταμιευτήρα μέχρι την εγκατάσταση της εφαρμογής. Συνεπώς σε κάθε σύστημα καταβάλλεται προσπάθεια να ελαχιστοποιηθεί η απώλεια της θερμότητας από το νερό. Οι κύριοι παράγοντες που συμβάλουν στη διατήρηση της θερμικής ενέργειας είναι η μόνωση και η τοποθέτηση του αγωγού (επιφανειακά ή υπεδαφικά). Δευτερεύοντες παράγοντες είναι η διαφορά της θερμοκρασίας του νερού και του περιβάλλοντος και η παροχή του νερού. Η επιλογή του υλικού και του πάχους της μόνωσης είναι συνάρτηση του κόστους των υλικών. Η μόνωση μπορεί ακόμα και να διπλασιάσει το κόστος μιας σωλήνωσης [5].

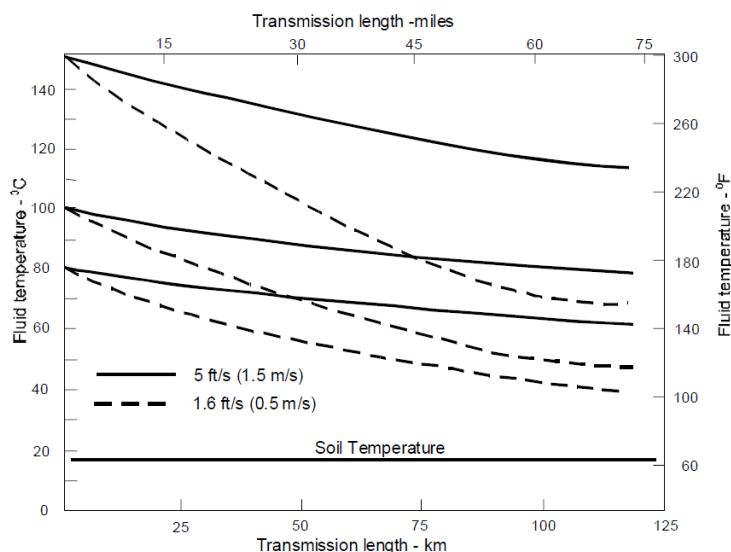


Εικόνα 3.6: Τυπική δομή ενός θερμομονωμένου σωλήνα [23].

Στην Εικόνα 3.6 περιγράφεται η δομή ενός θερμομονωμένου σωλήνα. Στο διάγραμμα, από το εσωτερικό προς το εξωτερικό, διακρίνεται ο αγωγός που μεταφέρει το νερό, η μόνωση και το περίβλημα της μόνωσης. Τα συνηθέστερα υλικά μόνωσης είναι η πολυουρεθάνη και οι υαλοβάμβακες, με το πάχος τους να κυμαίνεται από 25 mm έως 75 mm. Βιβλιογραφικά αναφέρεται ότι η θερμική αγωγιμότητα της πολυουρεθάνης κυμαίνεται στα 0.18 BTU/h/ft²/°F [23]. Για την υπόγεια εγκατάσταση της σωληνώσεως απαιτείται κάλυψη από PVC ή από PE. Το συνηθέστερο εξωτερικό περίβλημα που χρησιμοποιείται με χαλύβδινους και θερμοπλαστικούς αγωγούς είναι το PVC, με ελάχιστο πάχος 120 mm. Επίσης, στην Ευρώπη είναι σύνηθες το περίβλημα της μόνωσης να αποτελείται από πολυαιθυλένιο, ελάχιστου πάχους 125 mm. Συχνά η μόνωση των σωληνώσεων από θερμοσκληρούμενα πλαστικά και από χάλυβα επικαλύπτεται από στρώμα υαλοβάμβακα. Στην περίπτωση υπαίθριας εγκατάστασης των σωληνώσεων συνιστάται η επικάλυψη της μόνωσης με ένα φύλλο PVC και στη συνέχεια με ένα φύλλο αλουμινίου. Τέλος σε όλα τα περιβλήματα εγκαθίσταται μία λαστιχένια φλάντζα, η οποία προστατεύει τη μόνωση από την υγρασία. Σε περιβλήματα από υαλοβάμβακα, η διάμετρος του περιβλήματος σταδιακά μειώνεται στα άκρα, σχηματίζοντας μία κωνική δομή, η οποία απομονώνει την μόνωση από το περιβάλλον. Τα μέτρα αυτά λαμβάνονται για την προστασία της μόνωσης, καθώς η υγρασία καταστρέφει τις μονωτικές ιδιότητες του υλικού και επιτείνει τη διάβρωση των τοιχωμάτων, στην περίπτωση των μεταλλικών αγωγών [5].

Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι για σωλήνα διαμέτρου 150 mm και για ταχύτητα νερού της τάξης των 0.3-1.0 m/s παρατηρούνται απώλειες θερμοκρασίας στο εύρος 0.1-1.0°C/km για μονωμένους αγωγούς και στο εύρος 2-5°C/km για μη

μονωμένους, ενώ για μεγαλύτερες διαμέτρους η απώλεια είναι μικρότερη [22]. Το γράφημα της Εικόνας 3.7 αποδίδει την πτώση θερμότητας ως συνάρτηση του μήκους σωλήνα για συγκεκριμένες τιμές παροχής και για σωλήνα διαμέτρου 450 mm και με μόνωση από πολυουρεθάνη, πάχους 500 mm.



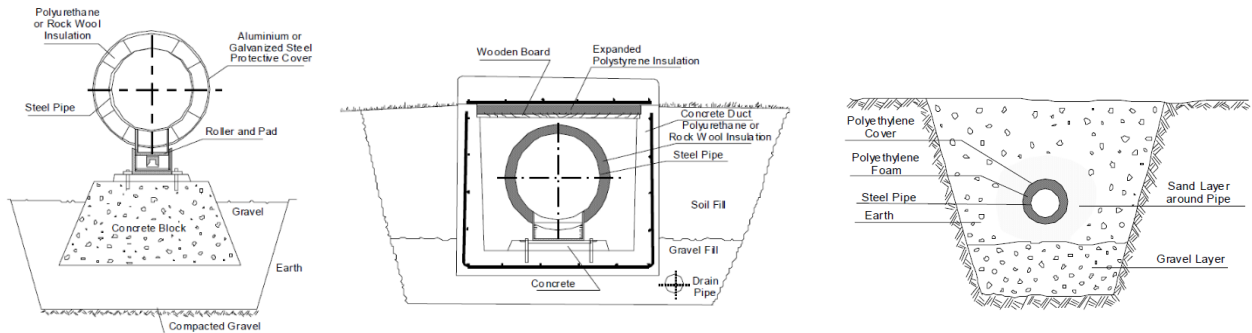
Εικόνα 3.7: Πτώση θερμότητας ως συνάρτηση του μήκους σωλήνα διαμέτρου 450 mm και θερμομονωμένου με πολυουρεθάνη πάχους 500 mm, για τιμές παροχής 1.5 m/s και 0.5 m/s [22].

3.2.4. Εγκατάσταση σωληνώσεων

Η εγκατάσταση των σωληνώσεων επηρεάζει από μόνη της την απώλεια θερμότητας από το σύστημα. Το έδαφος λειτουργεί ως ένας μονωτής, με αποτέλεσμα όταν οι αγωγοί βρίσκονται τοποθετημένοι υπεδαφικά, να παρουσιάζουν μικρότερο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας. Το φαινόμενο αυτό εντείνεται με την ξηρότητα του εδάφους [5]. Φυσικά και η θερμοκρασία του εδάφους επιδρά στο φαινόμενο, η οποία δεν μεταβάλλεται ιδιαίτερος κατά τη διάρκεια του χρόνου και μένει σταθερή στο θερμοκρασιακό εύρος 15-20°C.

Στις υπαίθριες εγκαταστάσεις (Εικόνα 3.8.α) οι σωληνώσεις συνήθως είναι τοποθετημένες πάνω σε χαλύβδινα υποστηρίγματα, τα οποία απέχουν 10 cm μεταξύ τους και εδράζουν πάνω σε εξέδρες από σκυρόδεμα. Τέτοιου είδους εγκαταστάσεις αποφεύγουν τη σύγκρουση με άλλα δίκτυα (λοιποί αγωγοί, καλωδιώσεις) και είναι ευκολότεροι στη συντήρηση. Ωστόσο τέτοιοι αγωγοί είναι πιο επιρρεπείς σε φθορά και σε βανδαλισμούς και πρέπει να ληφθεί υπόψιν το οδικό δίκτυο, ο απαραίτητος χώρος για την εγκατάσταση και οι μελλοντικές επεκτάσεις του δικτύου [23].

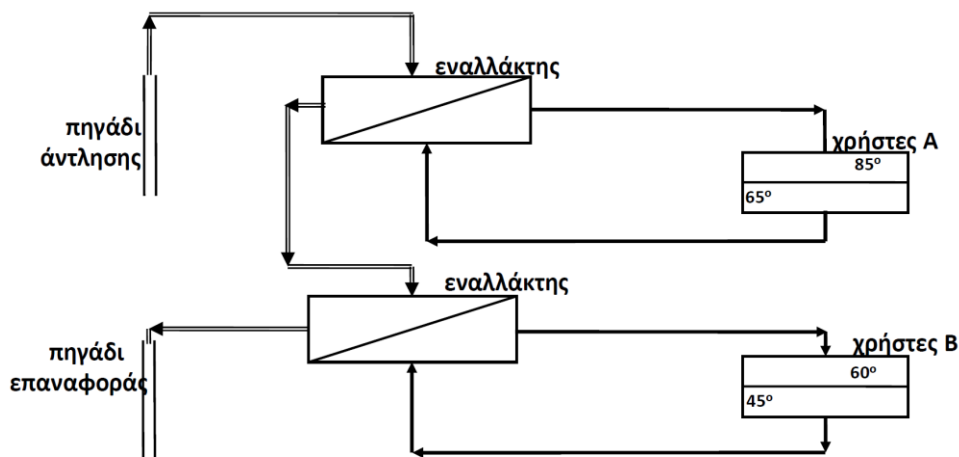
Στις υπεδαφικές εγκαταστάσεις (Εικόνα 3.8.β), οι σωληνώσεις συνήθως τοποθετούνται μέσα σε ειδικά κατασκευασμένα ορύγματα από σκυρόδεμα ή υπογείως σε βάθος 50-100 cm από την επιφάνεια. Οι πλήρως υπόγειες (Εικόνα 3.8.γ) δεν προκαλούν οπτική όχληση και είναι πιο προστατευμένες από ακούσιες ή εκούσιες φθορές. Πλήττονται όμως από αυξημένη εξωτερική διάβρωση και δυσκολία στη συντήρηση και στην επέκταση του δικτύου. Μεγάλη σημασία θα πρέπει να δοθεί κατά την εγκατάστασή τους πάνω στο υλικό βάσης, ειδικά για τους μη μεταλλικούς αγωγούς [23].



Εικόνα 3.8: Διαφορετικοί τύποι εγκατάστασης σωληνώσεων. (α) Επιφανειακή εγκατάσταση. (β) Υπεδαφική εγκατάσταση. (γ) Πλήρως υπόγεια εγκατάσταση. [22]

3.3. Εφαρμογές γεωθερμίας χαμηλής ενθαλπίας

Το γεωθερμικό νερό μεταφέρεται από τον γεωθερμικό ταμιευτήρα μέσω του δικτύου μεταφοράς και καταλήγει στις γεωθερμικές μονάδες, όπου αξιοποιείται η ενθαλπία του νερού για την παραγωγή θερμικής ισχύος. Στις περισσότερες περιπτώσεις η θερμότητα μεταφέρεται από το ρευστό μέσω ενός εναλλάκτη.



Εικόνα 3.9: Δομή τυπικού συστήματος εκμετάλλευσης γεωθερμικού πεδίου χαμηλής ενθαλπίας σε σειρά [21].

Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 2.6, οι διάφορες εφαρμογές της γεωθερμίας απαιτούν διαφορετικές θερμοκρασίες λειτουργίας. Προκειμένου να εξασφαλιστεί μεγαλύτερη απόδοση του συστήματος, συχνά εφαρμόζεται αξιοποίηση της θερμικής ενέργειας σε σειρά, με τις εφαρμογές να ιεραρχούνται κατά σειρά φθίνουσας απαίτησης σε θερμοκρασία. Στην Εικόνα 3.9, παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής μιας τέτοιας διεργασίας. Από τον ταμιευτήρα αντλείται θερμό γεωθερμικό ρευστό, έστω 90°C, το οποίο οδηγείται προς τον πρώτο εναλλάκτη. Εκεί θερμαίνει νερό κυκλοφορίας, το οποίο αποκτά θερμοκρασία 85°C, προκειμένου να αξιοποιηθεί για την πρώτη εφαρμογή, που θα μπορούσε να είναι η θέρμανση ενός θερμοκηπίου. Στη συνέχεια, το γεωθερμικό νερό που κυκλοφορεί στο δίκτυο μεταφοράς έχει χάσει ένα μέρος του θερμικού του φορτίου και πλέον βρίσκεται στη θερμοκρασία των 65°C. Η θερμοκρασία αυτή όμως είναι αρκετά υψηλή για να αξιοποιηθεί σε μία διαφορετική εφαρμογή. Επομένως, οδηγείται σε έναν δεύτερο εναλλάκτη, όπου θερμαίνει νερό κυκλοφορίας στη θερμοκρασία των 60°C, προκειμένου να αξιοποιηθεί σε μία δεύτερη εφαρμογή, όπως για παράδειγμα, για την ενδοδαπέδια θέρμανση ενός κλειστού χώρου. Το γεωθερμικό νερό εξέρχεται από το δεύτερο εναλλάκτη με θερμοκρασία 45°C και μεταφέρεται τελικά στη γεώτρηση επανεισπίεσης.

3.3.1. Θέρμανση χώρων

Η θέρμανση χώρων είναι η πιο συνηθισμένη άμεση χρήση του θερμικού δυναμικού της γεωθερμίας. Η θέρμανση των κτηρίων πραγματοποιείται μέσω της διέλευσης του ζεστού γεωθερμικού νερού από έναν εναλλάκτη θερμότητας αέρα – υγρού. Οι εναλλάκτες που χρησιμοποιούνται είναι διαφόρων ειδών, όπως εναλλάκτες που λειτουργούν με ροή αέρα (κοινώς αερόθερμα), εναλλάκτες που λειτουργούν με φυσική συναγωγή και εναλλάκτες που λειτουργούν με ακτινοβολία [5].

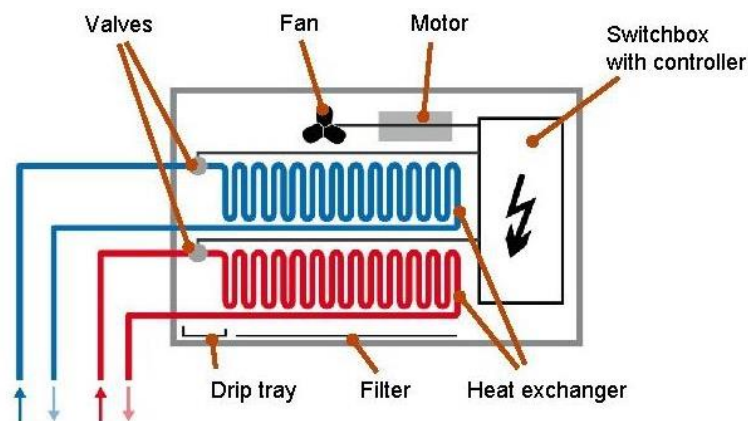
Τα αερόθερμα ενδείκνυνται για θερμοκρασίες γεωθερμικού νερού 35-60°C και λειτουργούν μέσω συναγωγής. Τα συστήματα αυτά αποτελούνται από σειρές χάλκινων σωλήνων σε σχήμα U, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η αύξηση του χρόνου παραμονής του νερού μέσα στο σύστημα και, κατά συνέπεια, η αύξηση της ικανότητάς του να αποδώσει τη θερμότητα που φέρει. Ο κρύος αέρας εξαναγκάζεται να κυκλοφορήσει μέσα από αλουμινένια φύλλα, τα οποία είναι προσκολλημένα πάνω στους χάλκινους αγωγούς και ζεσταίνονται από το γεωθερμικό νερό, με αποτέλεσμα κατά την έξοδό του

να έχει ζεσταθεί. Σε μεγάλα κτήρια η ροή του αέρα προέρχεται από μία κεντρική μονάδα και μεταφέρεται μέσω αγωγών (Εικόνα 3.10). Σε μικρότερης κλίμακας εφαρμογές, ο αέρας μπορεί να προέρχεται από ανεμιστήρα ή από συμπιεστή.



Εικόνα 3.10: Δίκτυο σωληνώσεων διανομής θερμού αέρα σε κτήριο μεγάλων διαστάσεων [6].

Κάποια αερόθερμα, όπως αυτό της Εικόνας 3.11, είναι εφοδιασμένα με διπλό κύκλωμα: ένα για την κυκλοφορία του ζεστού νερού και ένα για την κυκλοφορία του ψυχρού. Τέτοια συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για ψύξη, συνδεόμενα μέσω βαλβίδας, με μία αντλία θερμότητας, η οποία εξασφαλίζει την κυκλοφορία ψυχρού νερού που προέρχεται από μία, ανεξάρτητη με τη γεωθερμία, πηγή [6].



Εικόνα 3.11: Σχηματικό διάγραμμα αερόθερμου με διπλό κύκλωμα [6].

Η θέρμανση με φυσική συναγωγή πραγματοποιείται συνήθως με τη χρήση αγωγών με πτερύγια, τα οποία καταλαμβάνουν μεγαλύτερο χώρο και απαιτούν υψηλότερες θερμοκρασίες γεωθερμικού νερού σε σχέση με τα αερόθερμα. Σε αυτά τα

συστήματα το ζεστό νερό ρέει μέσα σε έναν αγωγό, ο οποίος έχει προσαρτημένα πάνω του μεγάλα πτερύγια. Η θερμοκρασία μεταφέρεται από το νερό στα πτερύγια και αυτά, λόγω της μεγάλης επιφάνειας επαφής τους με τον αέρα, ζεσταίνουν το γειτονικό περιβάλλον. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημά τους είναι ότι λειτουργούν χωρίς κατανάλωση ρεύματος [5].

Η ενδοδαπέδια θέρμανση είναι μία σύγχρονη τεχνολογία θέρμανσης εσωτερικών χώρων, η οποία είναι κατάλληλη για αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες, της τάξης των 30-40°C [6]. Μία σωλήνωση μεγάλου μήκους και μικρής διαμέτρου τοποθετείται σε ένα δάπεδο με τον τρόπο που παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.12, και ο χώρος γύρω από τις σωληνώσεις συμπληρώνεται με θερμομετόν, υψηλού συντελεστή αγωγιμότητας, έτσι ώστε να καλυφθεί όλο το εμβαδόν του πατώματος και στην συνέχεια τοποθετείται μία επένδυση από ξύλο ή πλακάκια. Η θερμότητα μεταφέρεται από το ζεστό νερό των σωληνώσεων στο θερμομετόν, στην επένδυση του πατώματος και τελικά στον ψυχρότερο αέρα του περιβάλλοντος. Στην Ελλάδα τέτοιες εγκαταστάσεις συναντώνται στα κτήρια των λουτρών Τραϊανούπολης και στις εγκαταστάσεις της γεωθερμικής μονάδας στο Νέο Εράσμιο, στην Περιφερειακή Ενότητα Ξάνθης.



Εικόνα 3.12: Διαδρομή σωληνώσεων ενδοδαπέδιας θέρμανσης [6].

3.3.2. Αγροτικές χρήσεις

Η γεωθερμία χαμηλής ενθαλπίας παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την αξιοποίηση του θερμικού της δυναμικού σε αγροτικές εφαρμογές. Στον Πίνακα 3.5 παρουσιάζονται ενδεικτικά δεδομένα για κάποιες από τις συνηθέστερες αγροτικές ασχολίες, οι θερμοκρασιακές τους απαιτήσεις και οι λειτουργικές θερμοκρασίες των

αντίστοιχων εγκαταστάσεων γεωθερμίας για την Ελλάδα και τις Η.Π.Α. Στην Ελλάδα η γεωθερμία έχει εφαρμοστεί σε μεγαλύτερο βαθμό στη θέρμανση θερμοκηπίων, στις υδατοκαλλιέργειες και για την ξήρανση γεωργικών προϊόντων.

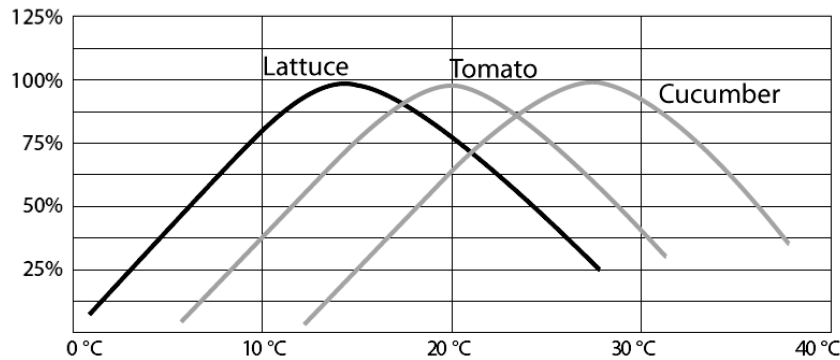
Πίνακας 3.5: Θερμοκρασιακές απαιτήσεις για διάφορες αγροτικές διεργασίες και οι λειτουργικές θερμοκρασίες των αντίστοιχων εγκαταστάσεων γεωθερμίας στην Ελλάδα και στις Η.Π.Α [5].

Διεργασία	Θερμοκρασία (°C)	Θερμοκρασία χρήσεων στην Ελλάδα (°C)	Θερμοκρασία χρήσεων στις Η.Π.Α. (°C)
Ξήρανση λαχανικών και καρπών	60-135	55-70	80-150
Θέρμανση θερμοκηπίων	40-130	38-90	35-100
Θέρμανση χώματος	25-40	35-55	-
Υδατοκαλλιέργεια	15-35	25-40	15-90
Καλλιέργεια μανιταριών	20-60	-	107
Επεξεργασία γάλατος	70-120	-	110

3.3.2.1. Θέρμανση θερμοκηπίων

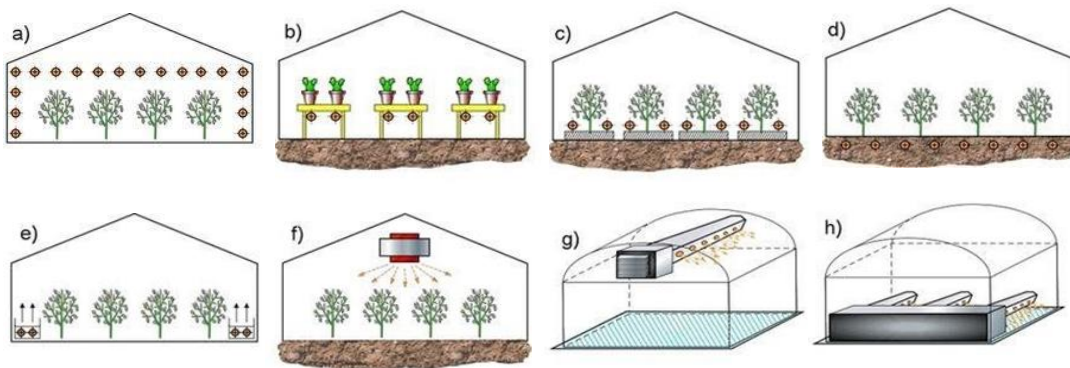
Η θέρμανση θερμοκηπίων αποτελεί την πιο απλή και συνηθισμένη αγροτική εφαρμογή της γεωθερμίας χαμηλής ενθαλπίας, ιδιαίτερα για την περίπτωση της Ελλάδας. Η ρύθμιση της θερμοκρασίας αυξάνει τους ρυθμούς καλλιέργειας των λαχανικών και των φυτών ανεξαρτήτως εποχής ή σε ένα αφιλόξενο για αυτά κλίμα. Έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι για τη βελτιστοποίηση της ανάπτυξης των φυτών και των λαχανικών, που βασίζονται σε αποτελέσματα μελετών, σαν και αυτά που παρουσιάζονται στο διάγραμμα της Εικόνας 3.13. Αξίζει να σημειωθεί ότι η βέλτιστη περιοχή θερμοκρασίας για το μαρούλι, τη ντομάτα και το αγγούρι είναι περίπου 13 °C, 20°C και 27°C αντίστοιχα. Βέβαια η απαιτούμενη θερμότητα για τη λειτουργία ενός θερμοκηπίου εξαρτάται από το μέγεθος και το υλικό της κάλυψης, το οποίο προσδιορίζει και τις θερμικές του απώλειες, από τη διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας

εντός και εκτός του θερμοκηπίου και από τον απαιτούμενο ρυθμό αλλαγής του αέρα εντός του θερμοκηπίου [5].



Εικόνα 3.13: Επίδραση της θερμοκρασίας στην ανάπτυξη ορισμένων κηπευτικών. [10]

Η θέρμανση των θερμοκηπίων μπορεί να επιτευχθεί με παρόμοιες μεθόδους με τη θέρμανση χώρων που αναφέρθηκε σε προηγούμενη υποενότητα. Συνεπώς μπορεί να εφαρμοστεί εξαναγκασμένη ροή αέρα με αερόθερμο, θέρμανση με ακτινοβολία χρησιμοποιώντας υπόγειους πλαστικούς, επίγειους πλαστικούς και υπέργειους μεταλλικούς αγωγούς και φυσική συναγωγή χρησιμοποιώντας θερμαντικά σώματα με πτερύγια.



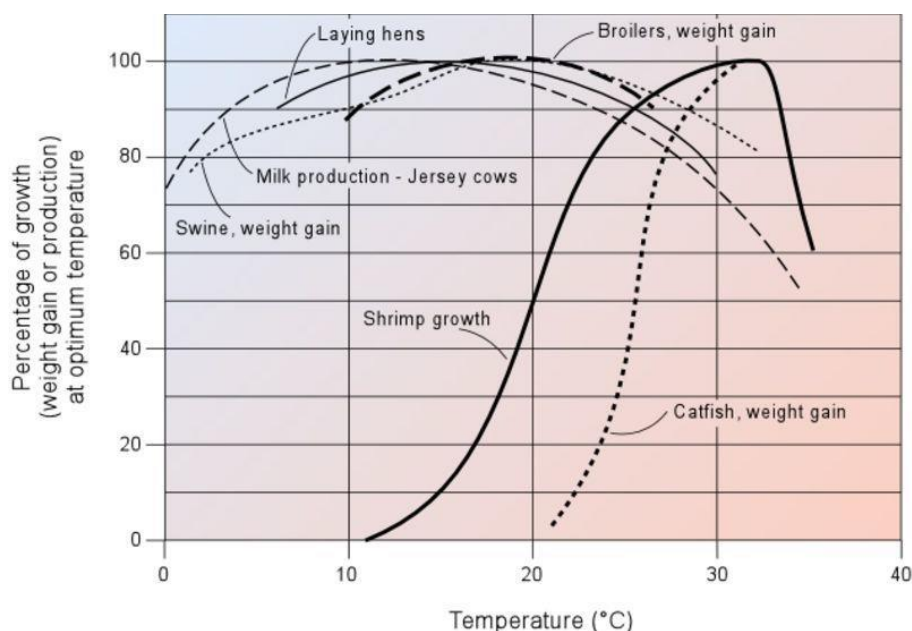
Εικόνα 3.14: Συστήματα θέρμανσης θερμοκηπίων. (a) εναέριοι αγωγοί θέρμανσης. (b) θερμαινόμενοι πάγκοι. (c) επιδαπέδια θέρμανση. (d) Υπεδαφικοί αγωγοί θέρμανσης του χώματος. (e) πλευρικά αερόθερμα. (f) αερόθερμα οροφής. (g) σύστημα αεραγωγών μεταφοράς ζεστού αέρα στην οροφή (h) επιδαπέδιο σύστημα αεραγωγών μεταφοράς ζεστού αέρα [26]

Στην Ελλάδα τα θερμοκήπια που αξιοποιούν τη γεωθερμία της περιοχής βρίσκονται στη Νιγρίτα και το Σιδηρόκαστρο της Περιφερειακής Ενότητας Σερρών, στο Λαγκαδά και την Απολλωνία της Περιφερειακής Ενότητας Θεσσαλονίκης, στο Νέο Εράσμιο της Περιφερειακής Ενότητας Ξάνθης και στη νήσο Λέσβο [7].

3.3.2.2. Υδατοκαλλιέργειες

Οι ιχθυοκαλλιέργειες δύναται να επωφεληθούν από τη γεωθερμία παρόμοια με τις καλλιέργειες λαχανικών και φυτών. Στο σχήμα της Εικόνας 3.14 παρουσιάζεται ότι η αύξηση δύο θαλάσσιων ειδών με εμπορική αξία (στην προκειμένη περίπτωση η γαρίδα και το γατόψαρο), είναι μεγαλύτερη σε θερμοκρασία 20-30°C. Στο ίδιο διάγραμμα φαίνεται επίσης ότι ο έλεγχος του ρυθμού ανάπτυξης των θαλάσσιων ειδών είναι πιο σημαντικός από τον αντίστοιχο για τα θηλαστικά και τα πτηνά, καθώς οι αντίστοιχες καμπύλες δεν μεταβάλλονται σε μεγάλο βαθμό κατά την αύξηση της θερμοκρασίας. Η διατήρηση της ιδανικής θερμοκρασίας, και κατ' επέκταση, η βελτιστοποίηση της παραγωγής καθορίζονται από το μέγεθος της εγκατάστασης, που με τη σειρά του εξαρτάται από τη θερμοκρασία της γεωθερμικής πηγής, από την απαιτούμενη θερμοκρασία της δεξαμενής ή της λίμνης ανάπτυξης του θαλάσσιου είδους καθώς και από την απώλεια θερμότητας από το περιβάλλον ανάπτυξης. Η θέρμανση μπορεί να πραγματοποιηθεί άμεσα, εισάγοντας γεωθερμικό νερό μη τοξικής σύστασης το περιβάλλον ανάπτυξης, είτε έμμεσα θερμαίνοντας γλυκό ή αλμυρό νερό, το οποίο στη συνέχεια εισάγεται στη λίμνη ή τη δεξαμενή [5].

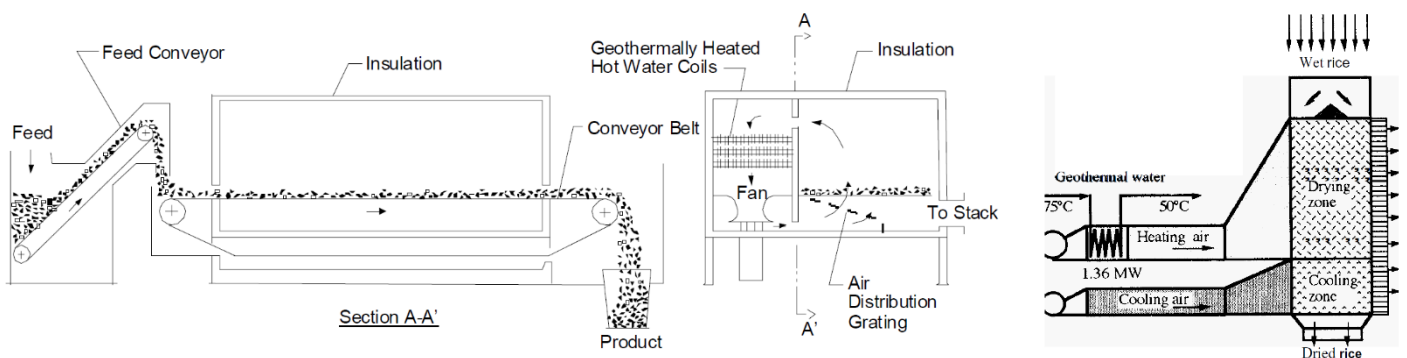
Στην Ελλάδα λειτουργούν μονάδες ιχθυοκαλλιέργειας στις περιοχές της Νέας Κεσσάνης και του Νέου Ερασμίου στην Περιφερειακή Ενότητα Ξάνθης και μονάδα υδατοκαλλιέργειας *Spirulina* στο πεδίο Θερμών Νιγρίτας της Περιφερειακής Ενότητας Σερρών [7].



Εικόνα 3.15: Επίδραση της θερμοκρασίας στην ανάπτυξη ορισμένων ζώικών ειδών [27].

3.3.2.3. Ξήρανση αγροτικών προϊόντων

Η ξήρανση αγροτικών προϊόντων αποτελεί μία από τις ενεργειακά πιο απαιτητικές αγροτικές διεργασίες. Η γεωθερμία δύναται να αντικαταστήσει τα συμβατικά καύσιμα στην ξήρανση ορισμένων φρούτων και λαχανικών χρησιμοποιώντας θαλάμους συνεχούς ξήρανσης με κυλιόμενη ταινία (Εικόνα 3.16.α) ή πύργους ξήρανσης (Εικόνα 3.16.β) και θερμοκρασίες της τάξης των 40-100°C [5]. Ο αέρας οδηγείται από ανεμιστήρες ή φυσητήρες μέσα από έναν εναλλάκτη θερμότητας, προκειμένου να θερμανθεί από το ζεστό γεωθερμικό νερό. Στη συνέχεια, ο ζεστός αέρας ρέει μέσα από τις ταινίες με τα φρούτα και τα λαχανικά ή συμπαρασύρει τα γεωργικά προϊόντα μέσα στους πύργους ξήρανσης. Το αποτέλεσμα είναι η εξάτμιση ενός σημαντικού ποσοστού της υγρασίας του προϊόντος και η ομοιόμορφη ξήρανσή του.



Εικόνα 3.16: (α) Σχηματικό διάγραμμα μονάδας συνεχούς ξήρανσης με κυλιόμενη ταινία [22]. (β) Σχηματικό διάγραμμα πύργου ξήρανσης ρυζιού [28].

Στο Νέο Εράσμιο της Περιφερειακής Ενότητας Ξάνθης λειτουργεί μία από τις πρώτες παγκοσμίως στο είδος της βιομηχανικές μονάδες ξήρανσης ντομάτας με θάλαμο τύπου σήραγγας και αέρα θερμαινόμενο από γεωθερμικό εναλλάκτη. Αναφορικά επισημαίνεται ότι η μονάδα ξηραίνει στους 59°C 14 kg/h ντομάτες και έχει ετήσια παραγωγή 4 τόνους ντομάτας [22]. Επίσης στη Νέα Κεσσάνη της Περιφερειακής Ενότητας Ξάνθης λειτουργεί μία πιλοτική μονάδα ξήρανσης βαμβακιού μέσω πύργου ξήρανσης [7].

4. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ

Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, η ανάπτυξη του συγκεκριμένου λογισμικού μοντελοποίησης έγινε με σκοπό την εφαρμογή του στην προσομοίωση δικτύων αγωγών μεταφοράς γεωθερμικών ρευστών σε ένα γεωθερμικό πεδίο χαμηλής ενθαλπίας. Είναι γνωστό ότι ως γεωθερμικό πεδίο χαμηλής ενθαλπίας ορίζεται ένα πεδίο του οποίου το ρευστό βρίσκεται σε θερμοκρασίες της τάξης των 30°C – 90°C. Το ρευστό του ταμιευτήρα επομένως θα βρίσκεται μόνο σε υγρή φάση. Για να προσδιοριστεί η συνολική συμπεριφορά του ρευστού μέσα στο δίκτυο, έπρεπε να κατασκευαστεί ένα μοντέλο μεταφοράς μάζας και θερμότητας νερού. Λόγω της πολυπλοκότητας του προβλήματος αποφασίστηκε να γίνει ο διαχωρισμός του σε δύο επιμέρους μοντέλα, ένα υδραυλικό, που θα προσομοιώνει τη ροή και την πτώση πίεσης του ρευστού κατά μήκος του κάθε αγωγού και ενός θερμικού μοντέλου, το οποίο θα προσομοιώνει τη μεταβολή της θερμοκρασίας του ρευστού κατά μήκος του κάθε αγωγού.

Η μονοφασική φύση του νερού και η σταθερή ροή του, απλοποιούν τα μαθηματικά μοντέλα που απαιτούνται για την ακριβή προσομοίωση της υδραυλικής και θερμικής συμπεριφοράς του κατά μήκος των αγωγών του δικτύου. Αν και η προσέγγιση που αναπτύχθηκε οδηγεί σε σχετικά απλό, μαθηματικά, μοντέλο, οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν ήταν μη γραμμικές και συνεπώς ο μόνος τρόπος επίλυσης του συστήματός τους ήταν με επαναληπτική αριθμητική μέθοδο. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για το υδραυλικό μοντέλο ήταν η επαναληπτική μέθοδος Newton – Raphson. Η προσέγγιση του θερμικού μοντέλου ήταν πιο απλή, καθώς το σύστημα των εξισώσεων που διέπουν τη μεταφορά θερμότητας αποτελούνταν από γραμμικές εξισώσεις. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος αντιστροφής μητρώου. Η επαναφορά της σύζευξης των δύο επιμέρους προβλημάτων επιτυγχάνεται με διαδοχικές επιλύσεις των επιμέρους μοντέλων, μέχρι την τελική σύγκλιση του συζευγμένου προβλήματος.

Βασικός στόχος του λογισμικού είναι να προσφέρει τη δυνατότητα στο χρήστη να πραγματοποιήσει βελτιστοποίηση των αβέβαιων παραμέτρων του δικτύου, με σκοπό να αναπαράγονται οι πραγματικές μεταβολές πίεσης και θερμοκρασίας, όπως αυτές μετρούνται στο πεδίο. Αποδεικνύεται ότι ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς

θερμότητας επιφέρει τη μεγαλύτερη επίδραση στο δίκτυο. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η συγκεκριμένη διαδικασία απαιτείται η τιμή της θερμοκρασίας στον τερματικό κόμβο του δικτύου, δηλαδή στο σημείο τελικής διάθεσης. Η βελτιστοποίηση πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο καθόδου βασισμένη στην κλίση και τροποποιώντας ένα πολλαπλασιαστή του συνολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας έως ότου ελαχιστοποιηθεί η διαφορά της θερμοκρασίας στο τελικό σημείο διάθεσης που προέκυψε από την προσομοίωση και αυτής που μετρήθηκε πειραματικά.

4.1. Προσέγγιση και χαρακτηριστικά υπολογισμού μοντέλου

Ένα γεωθερμικό πεδίο χαμηλής ενθαλπίας τυπικά βρίσκεται στο θερμοκρασιακό εύρος των τιμών $30^{\circ}\text{C} - 90^{\circ}\text{C}$. Είναι προφανές επομένως ότι το γεωθερμικό ρευστό του ταμιευτήρα, που στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι νερό, για αυτές τις θερμοκρασιακές τιμές θα βρίσκεται σε υγρή κατάσταση. Η υγρή φάση απλοποιεί αρκετά τους υπολογισμούς, καθώς εάν η κατάσταση του νερού ήταν διφασική θα έπρεπε να μπορεί να προσδιοριστεί σε κάθε σημείο του δικτύου ο κορεσμός του ρευστού στις δύο φάσεις του (υγρό νερό και ατμός), αυξάνοντας την πολυπλοκότητα της προσομοίωσης του δικτύου.

Ένα ακόμα στοιχείο που απλοποιεί την προσέγγιση είναι η θεώρηση ότι το μοντέλο χαρακτηρίζεται από χρονικά σταθερή ροή (steady state model). Γενικά η κατάσταση της ροής μπορεί να είναι μεταβατική (transient) ή σταθερή (steady) και οι παράγοντες που καθορίζουν τη συμπεριφορά της είναι η πίεση (p), η παροχή (q) και η θερμοκρασία (T). Σε ένα μεταβατικό μοντέλο οι συνθήκες που καθορίζουν τη φύση του μεταβάλλονται σε κάθε σημείο και σε κάθε χρονικό διάστημα. Αντίθετα, σε ένα μοντέλο σταθερής κατάστασης, οι συνθήκες επηρεάζονται μόνο από χωρικές μεταβολές και παραμένουν σταθερές κατά τη διάρκεια χρονικών μεταβολών.

Οι παραπάνω προσεγγίσεις εκφράζονται μαθηματικά ως:

- Μεταβατική ροή:

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial x} \neq 0 \\ \frac{\partial q}{\partial x} \neq 0 \\ \frac{\partial T}{\partial x} \neq 0 \end{cases} \quad (4.1)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial P}{\partial t} \neq 0 \\ \frac{\partial q}{\partial t} \neq 0 \\ \frac{\partial T}{\partial t} \neq 0 \end{cases} \quad (4.2)$$

- Σταθερή ροή:

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial x} \neq 0 \\ \frac{\partial q}{\partial x} \neq 0 \\ \frac{\partial T}{\partial x} \neq 0 \end{cases} \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (4.4)$$

Η μεταβατική ροή είναι εξαιρετικά χρήσιμη κατά τη μοντελοποίηση δυναμικών φαινομένων, όπου οι συνθήκες μεταβάλλονται με την πάροδο του χρόνου. Αυτό θα ήταν ιδιαίτερα σημαντικό κατά την έναρξη και τη λήξη τη λήξη της λειτουργίας ή κατά τη διάρκεια έκτακτης καταπόνησης των δυνατοτήτων του δικτύου. Η παρούσα εφαρμογή θεωρεί ότι το σύστημα βρίσκεται σε λειτουργία για αρκετό χρονικό διάστημα και ότι πλέον λειτουργεί σε σταθερή κατάσταση.

Τα φαινόμενα που περιγράφουν τη σταθερή ροή του νερού μέσα σε ένα δίκτυο αγωγών προκύπτουν από τρεις θεμελιώδους νόμους της φυσικής, την αρχή διατήρησης μάζας, την αρχή διατήρησης ενέργειας και την αρχή διατήρησης ορμής. Οι παραπάνω αρχές εκφράζονται σε οποιοδήποτε σύστημα επιθυμείται να μοντελοποιηθεί υπό τη μορφή διαφορικών εξισώσεων, οι οποίες πρέπει να επιλυθούν. Στην περίπτωση των δικτύων, όπως θα αναλυθεί παρακάτω, έχει υιοθετηθεί μία προσέγγιση, η οποία επιτρέπει τη μετατροπή των διαφορικών εξισώσεων σε αλγεβρικές, καθώς το δίκτυο διαχωρίζεται σε επιμέρους σωλήνες.

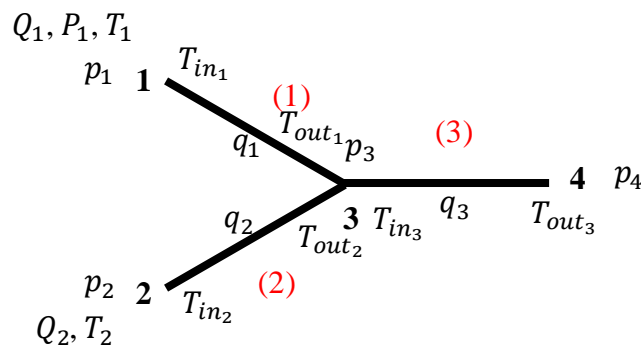
Κατά τα χρόνια σχεδιάστηκαν πολλοί τρόποι μετατροπής των διαφορικών εξισώσεων σε αλγεβρικές. Πρώτος ο Hardy Cross το 1936, στην κλασική εργασία του, ανέπτυξε την ομώνυμη μέθοδο, στην οποία η ανάλυση του συστήματος βασίζεται στην κατασκευή βρόχων και στη ρύθμιση της παροχής σε αυτούς και της πίεσης, ή υδραυλικού ύψους, (head) στους κόμβους, προκειμένου να εξασφαλιστεί η διατήρηση της ενέργειας και μάζας στο δίκτυο [29]. Τέτοιες μέθοδοι εμφανίζουν ορισμένα μειονεκτήματα και για αυτόν τον λόγο απορρίφθηκαν στη συγκεκριμένη εργασία, με σημαντικότερο τη συχνή αδυναμία της μεθόδου να οδηγήσει σε σύγκλιση και την αποτυχία της να φέρει λογικά αριθμητικά αποτελέσματα.

Η παρούσα εργασία βασίστηκε στη μέθοδο που πρότειναν οι M. H. Afshar και A. Afshar στην έκθεσή τους με τίτλο “An element by element algorithm for pipe network analysis”, το 1999 [30]. Σύμφωνα με την παραπάνω εργασία, μία μέθοδος “element by element”, ή αλλιώς μέθοδος από στοιχείο σε στοιχείο, βασίζεται στο διακριτό χαρακτήρα κάθε στοιχείου του συστήματος και διατυπώνει τη συμπεριφορά ολόκληρου του δικτύου αναλύοντας τη συμπεριφορά κάθε τμήματος του δικτύου ξεχωριστά. Το συνεχές σύστημα αντιμετωπίζεται ως ένα σύνολο διακριτών στοιχείων (elements) και κόμβων (nodes), στο οποίο κάθε στοιχείο ή αγωγός διέπεται από μία σχέση υδραυλικής παροχής – πίεσης και από μία θερμικής παροχής – θερμοκρασίας και κάθε κόμβος ή διακλάδωση διέπεται από μία σχέση διατήρησης παροχής, πίεσης και θερμότητας. Η μέθοδος αυτή δίνει τη δυνατότητα ανάπτυξης ενός μοντέλου που αποτελείται από ένα σύστημα εξισώσεων, το οποίο έχει το πλεονέκτημα ότι επιλύεται με τη χρήση υπολογιστικών μεθόδων.

4.2. Γεωμετρία μοντέλου

Η γεωμετρία του δικτύου μπορεί να περιγραφεί από στοιχεία και κόμβους. Έστω ότι το σύστημα αποτελείται από L στοιχεία (elements) και N κόμβους (nodes). Από αυτούς τους κόμβους, E είναι εξωτερικοί - τερματικοί (είτε εισερχόμενοι, είτε εξερχόμενοι του συστήματος) και I από αυτούς είναι εσωτερικοί, δηλαδή δεν είναι τερματικοί.

Για να γίνει κατανοητή η περιγραφή ενός δικτύου παρατίθεται ένα απλό παράδειγμα που αποτελείται από 4 κόμβους και 3 στοιχεία. Η Εικόνα 4.1 αποτυπώνει το σχεδιάγραμμα του δικτύου. Σε αυτό, οι κόμβοι αναγράφονται με μαύρο χρώμα και τα στοιχεία με κόκκινο. Οι κόμβοι 1, 2 και 4 είναι οι εξωτερικοί κόμβοι και ο κόμβος 3 είναι ο εσωτερικός. Στο δίκτυο, οι εξωτερικοί κόμβοι 1 και 2 είναι εισαγωγής νερού στο σύστημα και ο κόμβος 4 είναι ο τερματικός κόμβος εξόδου του νερού από το δίκτυο. Αναγράφεται επίσης η πίεση (p) σε κάθε κόμβο, η παροχή (q) σε κάθε στοιχείο και η θερμοκρασία εισόδου (T_{in}) και εξόδου (T_{out}) στα άκρα κάθε στοιχείου, καθώς και η συνοριακή συνθήκη πίεσης (P) στον κόμβο 1 και οι συνοριακές συνθήκες παροχής (Q) και θερμοκρασίας (T) στους κόμβους 1 και 2



Εικόνα 4.1: Σχηματική απεικόνιση ενός δικτύου που αποτελείται από 3 στοιχεία και 4 κόμβους.

Η γεωμετρία του δικτύου είναι αυτή που καθορίζει τον αριθμό των αγνώστων που πρέπει να προσδιοριστούν. Στο δίκτυο αυτό υπάρχουν τριών ειδών άγνωστοι:

- Η παροχή σε κάθε στοιχείο (L άγνωστοι)
- Η πίεση σε κάθε κόμβο (N άγνωστοι)
- Η θερμοκρασία στην είσοδο και την έξοδο κάθε στοιχείου ($2L$ άγνωστοι)

Επομένως, συνολικά θα υπάρχουν $L + N + 2 \cdot L = 3 \cdot L + N$ άγνωστοι, που πρέπει να προσδιοριστούν.

4.3. Μαθηματική μοντελοποίηση του προβλήματος ροής

Προκειμένου να λυθεί ένα σύστημα $3L + N$ αγνώστων θα πρέπει να υπάρχουν και $3L + N$ εξισώσεις. Προκειμένου να οριστεί και να λυθεί το σύστημα του μοντέλου, απαιτούνται ακόμα συγκεκριμένες συνοριακές συνθήκες. Οι συνοριακές συνθήκες λειτουργούν ως περιορισμοί των μεταβλητών του προβλήματος σε συγκεκριμένα σταθερά όρια. Στο συγκεκριμένο μοντέλο μεταφοράς μάζας και θερμότητας γεωθερμικού νερού υπάρχουν τριών ειδών συνοριακές συνθήκες, οι οποίες περιγράφουν απόλυτα τη συμπεριφορά των εισόδων του δικτύου. Οι συνοριακές συνθήκες του μοντέλου είναι:

- Συνοριακές συνθήκες παροχής
- Συνοριακές συνθήκες πίεσης
- Συνοριακές συνθήκες θερμοκρασίας

Εκτός των εξισώσεων που ορίζονται από τις συνοριακές εξισώσεις υπάρχουν οι εξής:

- Η αρχή διατήρησης της ορμής σε κάθε στοιχείο (L εξισώσεις)
- Η αρχή διατήρησης της θερμικής ορμής σε κάθε στοιχείο (L εξισώσεις)
- Η αρχή διατήρησης της μάζας σε κάθε εσωτερικό κόμβο (I εξισώσεις)
- Η αρχή διατήρησης της ενέργειας σε κάθε εσωτερικό κόμβο (I εξισώσεις)

Επομένως, ο αριθμός των κλασσικών εξισώσεων (εκτός των συνοριακών, δηλαδή) θα είναι $2L + 2I$. Συνολικά οι εξισώσεις θα πρέπει να είναι $3L + N$, άρα ο αριθμός των εξισώσεων που προκύπτουν από τις συνοριακές συνθήκες θα είναι $3L + N - 2L - 2I = E + L - I$. Συνεπώς, προκειμένου να ορισθεί και να λυθεί το σύστημα του μοντέλου, απαιτούνται ακόμα $E + L - I$ συνοριακές συνθήκες. Για τη μοντελοποίηση του παραπάνω απλού παραδείγματος με τα 3 στοιχεία και τους 4 κόμβους θα υπάρχουν 13 άγνωστοι και απαιτούνται 13 εξισώσεις.

Προκειμένου να απλοποιηθεί η συνθετότητα του συστήματος αποφασίστηκε να γίνει αποσύζευξη του μοντέλου σε δύο επιμέρους, ένα υδραυλικό και ένα θερμικό, τα οποία θα επιλύονται κυκλικά μέχρι την τελική σύγκλιση του προβλήματος. Οι επαναλήψεις των επιλύσεων των επιμέρους προβλημάτων είναι αυτές που επαναφέρουν την σύζευξη.

4.4. Αποσύζευξη υδραυλικού και θερμικού προβλήματος

Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 4.1 το συγκεκριμένο θέμα προσομοίωσης αποτελεί ένα πρόβλημα μοντελοποίησης παροχής, πίεσης και θερμοκρασίας νερού σε κατάσταση σταθερής ροής. Πρόκειται συνεπώς για ένα συζευγμένο πρόβλημα, το οποίο διαχωρίζεται σε δύο επιμέρους μοντέλα, ένα υδραυλικό και ένα θερμικό. Επομένως το άθροισμα των αγνώστων των δύο επιμέρους προβλημάτων θα πρέπει να είναι ίσο με $3L + N$.

4.4.1. Υδραυλικό πρόβλημα

Στο υδραυλικό πρόβλημα υπάρχουν οι εξής άγνωστοι:

- Η παροχή σε κάθε στοιχείο (L άγνωστοι)

- Η πίεση σε κάθε κόμβο (N άγνωστοι)

Επομένως, προκύπτουν $L + N$ άγνωστοι για το υδραυλικό μοντέλο. Σε κάθε μοντέλο θα πρέπει ο αριθμός των εξισώσεων που εκφράζουν τη συμπεριφορά τους ισούται με τον αριθμό των αγνώστων. Συνεπώς, για το υδραυλικό θα απαιτούνται $L + N$ εξισώσεις.

Οι συνοριακές συνθήκες του συνολικού προβλήματος θα πρέπει να κατανεμηθούν στα αντίστοιχα επιμέρους μοντέλα που εκφράζονται από αυτές. Στο υδραυλικό μοντέλο, κάθε στοιχείο εκφράζεται από την αρχή διατήρησης της ορμής (σχέση υδραυλικής παροχής – πίεσης) και κάθε εσωτερικός κόμβος από την αρχή διατήρησης της μάζας. Επομένως, οι συνοριακές συνθήκες που καθορίζουν τα όρια του υδραυλικού προβλήματος είναι οι συνθήκες παροχής και πίεσης.

Το υδραυλικό μοντέλο ορίζεται από:

- Μία εξίσωση πίεσης – παροχής για κάθε στοιχείο (σύνολο L εξισώσεις)
- Μία εξίσωση διατήρησης μάζας για κάθε εσωτερικό κόμβο (σύνολο I εξισώσεις)
- Μία εξίσωση για κάθε συνοριακή τιμή παροχής και πίεσης εξωτερικού κόμβου εισόδου στο σύστημα

Ο αριθμός των συνοριακών συνθηκών πίεσης και παροχής για το υδραυλικό πρόβλημα καθορίζεται από τον αριθμό των εξισώσεών του, ο οποίος θα πρέπει να είναι ίσος με τον αριθμό των αγνώστων του προβλήματος. Επομένως, στο σύστημα θα υπάρχουν $L + N - L - I = E$ εξισώσεις εξωτερικών κόμβων και συνεπώς ο αριθμός των συνοριακών συνθηκών παροχής και πίεσης θα πρέπει να είναι E . Τονίζεται ακόμα, ότι από αυτές E_1 είναι οι συνοριακές συνθήκες παροχής και E_2 οι συνοριακές συνθήκες πίεσης.

4.4.2. Θερμικό πρόβλημα

Αντίστοιχα, στο θερμικό πρόβλημα οι άγνωστοι είναι οι η θερμοκρασία στην είσοδο και την έξοδο κάθε στοιχείου, άρα προκύπτουν $2L$ άγνωστοι και επομένως απαιτούνται $2L$ εξισώσεις για την επίλυσή του.

Επιπλέον, κάθε στοιχείο εκφράζεται από την αρχή διατήρησης της θερμικής ορμής (σχέση θερμικής παροχής – θερμοκρασίας) και κάθε εσωτερικός κόμβος από την αρχή διατήρησης της θερμικής ενέργειας. Επομένως, οι συνοριακές συνθήκες που θα καθορίζουν τα όρια του θερμικού προβλήματος είναι οι συνθήκες θερμοκρασίας.

Το θερμικό μοντέλο ορίζεται από:

- Μία εξίσωση θερμοκρασίας - θερμότητας για κάθε στοιχείο (σύνολο L εξισώσεις)
- Μία εξίσωση διατήρησης ενέργειας για κάθε εσωτερικό κόμβο (σύνολο I εξισώσεις)
- Μία εξίσωση για κάθε συνοριακή τιμή θερμοκρασίας εξωτερικού κόμβου (εκτός ενός) εισόδου ή εξόδου του συστήματος

Ο αριθμός των συνοριακών συνθηκών θερμοκρασίας για το θερμικό πρόβλημα καθορίζεται από τον αριθμό των εξισώσεών του, ο οποίος θα πρέπει να είναι ίσος με τον αριθμό των αγνώστων του προβλήματος. Επομένως, στο σύστημα θα υπάρχουν $2L - L - I = L - I = E - 1$ εξισώσεις εξωτερικών κόμβων και συνεπώς ο αριθμός των συνοριακών συνθηκών θερμοκρασίας θα πρέπει να είναι $E - 1$.

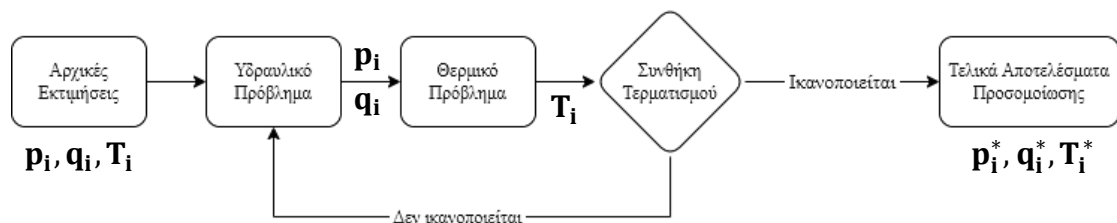
Για το συγκεκριμένο παράδειγμα του δικτύου των 4 κόμβων και 3 στοιχείων οι αριθμοί διαμορφώνονται ως εξής. Για το υδραυλικό πρόβλημα προκύπτουν 4 άγνωστες παροχές (μία για κάθε αγωγό) και 3 άγνωστες πιέσεις (μία για κάθε κόμβο) και για το θερμικό πρόβλημα προκύπτουν 6 άγνωστες θερμοκρασίες (δύο για κάθε άκρο αγωγού). Απαιτούνται 3 συνοριακές συνθήκες πίεσης και παροχής και 2 συνοριακές συνθήκες θερμοκρασίας. Για παράδειγμα, οι συνθήκες πίεσης θα μπορούσαν να τεθούν ως 2 συνοριακές συνθήκες παροχής, στους κόμβους 1 και 2, και 1 συνοριακή συνθήκη πίεσης, στον κόμβο 1. Αντίστοιχα, οι συνθήκες θερμοκρασίας θα μπορούσαν να τεθούν ως συνοριακές συνθήκες θερμοκρασίας στους κόμβους 1 και 2.

Αντίστοιχα με τους αγνώστους, θα υπάρχουν για το υδραυλικό πρόβλημα 3 εξισώσεις στοιχείων (μία για κάθε αγωγό), 1 εξίσωση εσωτερικού κόμβου (για τον κόμβο 3) και 3 εξισώσεις συνοριακών συνθηκών εξωτερικών κόμβων (μία εξίσωση παροχής για κάθε έναν από τους κόμβους 1 και 2 και μία εξίσωση πίεσης για τον κόμβο 1). Για το θερμικό πρόβλημα προκύπτουν 3 εξισώσεις στοιχείων (μία για κάθε αγωγό), 1 εξίσωση εσωτερικού κόμβου (για τον κόμβο 3) και 2 εξισώσεις συνοριακών συνθηκών (μία εξίσωση θερμοκρασίας για κάθε έναν από τους κόμβους 1 και 2).

Συνολικά προκύπτουν για το παραπάνω παράδειγμα 7 υδραυλικοί άγνωστοι και 7 υδραυλικές εξισώσεις και αντίστοιχα 6 θερμικοί άγνωστοι και 6 θερμικές εξισώσεις.

4.4.3. Επίλυση συνολικού προβλήματος

Η σύζευξη των δύο επιμέρους προβλημάτων επιτυγχάνεται με την κυκλική επίλυσή τους, μέχρι την τελική σύγκλιση. Αρχικά λύνεται το υδραυλικό μοντέλο θεωρώντας κάποιες αρχικές τιμές πίεσης σε κάθε κόμβο, πίεσης και θερμοκρασίας σε κάθε στοιχείο του δικτύου. Τα αποτελέσματα του υδραυλικού μοντέλου (ένα διάνυσμα παροχών για κάθε στοιχείο και πιέσεων για κάθε κόμβο, μεγέθους $(L + N) \times 1$ εισάγονται στο θερμικό μοντέλο ως σταθερές τιμές και αυτό επιλύεται μόνο ως προς τις θερμοκρασίες των άκρων κάθε στοιχείου. Το αποτέλεσμα της επίλυσης του θερμικού μοντέλου είναι ένα διάνυσμα θερμοκρασιών εισόδου-εξόδου για κάθε στοιχείο, μεγέθους $2L \times 1$. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται έλεγχος της συνθήκης τερματισμού της κυκλικής διαδικασίας. Εάν ικανοποιείται η συνθήκη τότε το μοντέλο έχει συγκλίνει και η προσομοίωση έχει ολοκληρωθεί, δίνοντας ως αποτέλεσμα ένα τελικό διάνυσμα μεγέθους $(3L + N) \times 1$ (παροχών σε κάθε στοιχείο, πιέσεων σε κάθε κόμβο και θερμοκρασιών εισόδου-εξόδου για κάθε στοιχείο). Αν όχι, γίνεται έναρξη μιας νέας επανάληψης, όπου τα αποτελέσματα του θερμικού μοντέλου εισάγονται εκ νέου ως σταθερές στην επίλυση του υδραυλικού μοντέλου. Η διαδικασία αυτή παρουσιάζεται στο διάγραμμα ροής της Εικόνας 4.2.



Εικόνα 4.2: Διάγραμμα ροής διαδικασίας επίλυσης του προβλήματος της μοντελοποίησης.

4.5. Ανάπτυξη υδραυλικού μοντέλου

Όπως προαναφέρθηκε, το υδραυλικό μοντέλο αντιμετωπίστηκε ως ένα πρόβλημα προσομοίωσης ροής νερού σε δίκτυο αγωγών. Στο δίκτυο οι αγωγοί του

δικτύου θεωρούνται ότι έχουν σταθερή κυκλική διατομή και ότι η ροή είναι σταθερής κατάστασης.

Η πτώση της πίεσης κατά μήκος του αγωγού συγκεκριμένης διαμέτρου οφείλεται σε παράγοντες όπως:

- Τριβή λόγω ιξώδους ροής του νερού
- Κατακόρυφη ή υψομετρική διαφορά των άκρων των αγωγών
- Τριβή λόγω ταχύτητας του εσωτερικού των αγωγών
- Μεταβολή στην κινητική ενέργεια

Η εξίσωση ροής κάθε στοιχείου εκφράζεται ως μία σχέση της μορφής :

$$q = f(\Delta p), \quad (4.5)$$

όπου Δp είναι η διαφορά της πίεσης των άκρων του στοιχείου. Προκειμένου να αναπτυχθεί η εξίσωση αξιοποιείται ο πρώτος, ο δεύτερος και ο τρίτος όρος και αγνοείται ο τέταρτος. Ο πρώτος όρος σχετίζεται με τη δυσρευστότητα του ρευστού, η οποία εκφράζεται από το ιξώδες του. Ο δεύτερος όρος είναι η βαρύτητα, όπου λαμβάνεται υπόψιν η διαφορά στάθμης μεταξύ των δύο άκρων του αγωγού. Ο τρίτος συνεισφέρει στην αύξηση της απώλειας πίεσης και θα ληφθεί υπόψιν μέσω του συντελεστή τριβής του αγωγού λ , όπως θα αναλυθεί στον Ενότητα 4.5.2. Ο τέταρτος όρος αγνοείται επειδή οι ταχύτητες στο εσωτερικού του αγωγού είναι μικρές. Πράγματι, μεταβολή στην κινητική ενέργεια του νερού πραγματοποιείται όταν αυτό επιταχύνεται ή επιβραδύνεται, κάτι που παρατηρείται μόνο από στοιχείο σε στοιχείο όταν αλλάξει η διατομή. Σε αυτή την περίπτωση, αλλαγή της ταχύτητας του νερού προκαλεί μεταβολή της κινητικής του ενέργειας, η οποία με τη σειρά της προκαλεί πτώση της πίεσής του. Πρακτικά όμως, για τέτοια δίκτυα, αυτή η απώλεια της πίεσης είναι ελάχιστη και μπορεί με ασφάλεια να θεωρηθεί αμελητέα.

4.5.1. Χαρακτηρισμός ροής

Προτού παρουσιαστεί η ανάπτυξη των επιμέρους εξισώσεων πρέπει πρώτα να γίνει χαρακτηρισμός της ροής σε στρωτή τυρβώδη, καθώς η φύση της ροής επηρεάζει δραματικά τις εξισώσεις των στοιχείων, όπως θα γίνει αντιληπτό στην Ενότητα 4.5.2. Η κατηγοριοποίηση αυτή γίνεται μέσω του υπολογισμού του αριθμού Reynolds, η

κρίσιμη τιμή του οποίου θεωρήθηκε συμβατικά στην παρούσα εργασία ως 2,320 και καθορίζει και τον χαρακτηρισμό της ροής.

Ο αριθμός Reynolds ορίζεται ως ο λόγος της αδράνειας προς το δυναμικό ιξώδες:

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot L}{\mu} \quad (4.6)$$

όπου :

- ρ : πυκνότητα ρευστού (kg/m^3)
- u : ταχύτητα του ρευστού (m/s)
- μ : δυναμικό (απόλυτο) ιξώδες ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)
- L : χαρακτηριστικό μήκος (m)

Σημειώνεται ότι το χαρακτηριστικό μήκος για κυλινδρικό αγωγό είναι η διάμετρος του $L = D$.

Από τον ορισμό της παροχής προκύπτει:

$$q = u \cdot A \rightarrow q = \frac{u \cdot \pi \cdot D^2}{4} \rightarrow u = \frac{q \cdot \pi \cdot D^2}{4} \quad (4.7)$$

όπου A είναι το εμβαδόν της διατομής του αγωγού.

Συνδυάζοντας τις δύο παραπάνω σχέσεις:

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot D}{\mu} \rightarrow Re = \frac{\rho \cdot L}{\mu} \cdot \frac{4 \cdot q}{\pi \cdot D^2} \rightarrow Re = \frac{4 \cdot \rho \cdot q}{\mu \cdot \pi \cdot D} \quad (4.8)$$

Έτσι, εάν ο αριθμός Reynolds είναι μικρότερος από 2,320, τότε η ροή θεωρείται στρωτή. Η στρωτή ροή χαρακτηρίζεται από ομόκεντρα κυλινδρικά στρώματα ρευστού, ομοιόμορφα, διαδοχικά κατανεμημένα. Η ταχύτητα του ρευστού είναι μέγιστη στο κέντρο του αγωγού και μηδενίζεται στα τοιχώματα. Η πτώση πίεσης που προκαλείται από την τριβή λόγω της στρωτής ροής είναι γραμμική ως προς την παροχή και δεν εξαρτάται από την τραχύτητα του αγωγού.

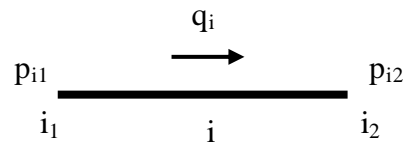
Εάν ο αριθμός Reynolds είναι μεγαλύτερος του 2,320, τότε η ροή θεωρείται τυρβώδης. Η τυρβώδης ροή χαρακτηρίζεται από την ακανόνιστη κίνηση των μορίων του ρευστού σε κατευθύνσεις εγκάρσιες αυτής της βασικής ροής. Η κατανομή της ταχύτητας της τυρβώδους ροής είναι πιο ομοιόμορφη κατά μήκος της διαμέτρου του αγωγού σε σχέση με τη στρωτή. Η πτώση πίεσης που προκαλείται από την τριβή λόγω

της τυρβώδους ροής είναι μη γραμμική ως προς την παροχή και εξαρτάται από την τραχύτητα του αγωγού.

4.5.2. Εξισώσεις στοιχείων

Έχοντας ορίσει τη γεωμετρία του συστήματος και έχοντας θεσπίσει τη μεθοδολογία προσδιορισμού του είδους της ροής του ρευστού που ρέει κατά μήκος του αγωγού, ακολουθεί η περιγραφή της εξίσωσης που χαρακτηρίζει συσχετίζει την παροχή και την πίεση σε κάθε στοιχείο του συστήματος.

Έστω ένας αγωγός κυκλικής διατομής, ένα στοιχείο i του δικτύου, ο οποίος συνδέεται με τους κόμβους i_1 και i_2 :



Εικόνα 4.3: Σχηματική απεικόνιση ενός αγωγού που συνδέεται με δύο κόμβους.

Η ροή σε κάθε στοιχείο διέπεται από την αρχή διατήρησης της ορμής, σύμφωνα με την οποία, σε ένα μηχανικό σώμα η συνισταμένη των δυνάμεων που ασκούνται σε αυτό ισούται με το ρυθμό μεταβολής της ορμής του σώματος. Η αρχή μπορεί να προσαρμοστεί για ένα ρευστό αντικαθιστώντας τη δύναμη με πίεση και την ταχύτητα με παροχή. Η αρχή εκφράζεται σε αυτή την περίπτωση ως μία σχέση παροχής – πίεσης της μορφής:

$$f(q_i, p_{i1}, p_{i2}) = 0, \quad 1 \leq i \leq L, \quad (4.9)$$

Η εξίσωση (4.9) μπορεί να εκφραστεί αναλυτικά από την εξίσωση Darcy – Weisbach:

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot u^2, \quad (4.10)$$

όπου:

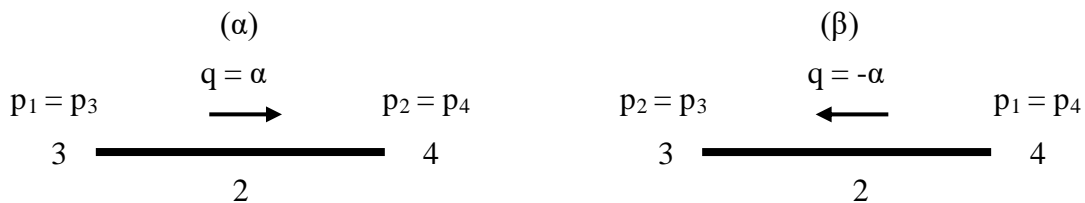
- Δp : πτώση πίεσης (Pa) $\rightarrow \Delta p = p_1 - p_2$, όπου p η πίεση στα άκρα του αγωγού
- λ : συντελεστής τριβής αγωγού
- L : μήκος αγωγού (m)

- D : διάμετρος αγωγού (m)
- ρ : πυκνότητα ρευστού (kg/m^3)
- u : ταχύτητα ρευστού (m/s)

Χρησιμοποιώντας τον ορισμό της παροχής, η εξίσωση Darcy – Weisbach μετασχηματίζεται ως εξής:

$$p_1 - p_2 = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \left(\frac{4 \cdot q}{\pi \cdot D^2} \right)^2, \quad (4.11)$$

Επισημαίνεται ότι η παροχή q θεωρείται αυθαίρετα θετική κατά την κατεύθυνση από τον κόμβο μικρότερου δείκτη προς αυτόν μεγαλύτερου και αρνητική, αντίστοιχα, η ροή από τον κόμβο με το μεγαλύτερο δείκτη προς τον κόμβο με το μικρότερο δείκτη. Για παράδειγμα, έστω το στοιχείο 2 που συνδέεται με τους κόμβους 3 και 4 και α η απόλυτη τιμή της παροχής:



Εικόνα 4.4: Σχηματική απεικόνιση ενός αγωγού που συνδέεται με δύο κόμβους. (α) η ροή έχει οριστεί από τον κόμβο μικρότερου δείκτη προς τον κόμβο μεγαλύτερου δείκτη. (β) η ροή έχει οριστεί από τον κόμβο μεγαλύτερου δείκτη προς τον κόμβο μικρότερου δείκτη.

Έτσι, εάν κατά τη διάρκεια της επίλυσης προκύψει αρνητική τιμή της παροχής, η υδραυλική εξίσωση των στοιχείων συνεχίζει να ισχύει και να εφαρμόζεται, αλλά με την αρνητική τιμή που προσδιορίζεται. Στο σχήμα της Εικόνας 4.4, στην περίπτωση (α) η παροχή είναι θετική και η ροή κινείται από τον κόμβο μεγαλύτερης πίεσης προς τον κόμβο μικρότερης πίεσης, οπότε το ΔP είναι θετικό και κατ' επέκταση οι δύο όροι της εξίσωσης είναι ομόσημοι. Αντίστοιχα, στην περίπτωση (β) η παροχή είναι αρνητική και το ΔP είναι επίσης αρνητικό, που σημαίνει ότι πάλι οι δύο όροι της εξίσωσης θα είναι ομόσημοι. Επιβεβαιώνεται επομένως ότι η εξίσωση (4.11) ισχύει ανεξαρτήτως συνδεσμολογίας του αγωγού και τα αποτελέσματα της επίλυσής της θα είναι τα ίδια, με μόνη διαφορά το πρόσημο της παροχής. Το αρνητικό πρόσημο θα υποδηλώνει ότι η ροή είναι η αντίθετη με αυτή που ορίστηκε αυθαίρετα κατά την εισαγωγή των

δεδομένων της συνδεσμολογίας του αγωγού, στο αρχικό στάδιο της κατασκευής του ολικού μοντέλου.

Η εξίσωση (4.11) ισχύει τόσο για στρωτή όσο και για τυρβώδη ροή, με μόνη διαφορά την έκφραση του συντελεστή τριβής λ . Για τη στρωτή ροή ο συντελεστής τριβής λ εξαρτάται μόνο από τον αριθμό Reynolds και επομένως μπορεί να εκφραστεί αναλυτικά από την εξίσωση:

$$\lambda = \frac{64}{Re}, \quad (4.12)$$

ή αλλιώς

$$\lambda = \frac{16 \cdot \mu \cdot \pi \cdot D}{q \cdot \rho}, \quad (4.13)$$

Για την τυρβώδη ροή ο συντελεστής τριβής λ υπολογίζεται είτε με πειραματικά δεδομένα, είτε με τη βοήθεια διαγραμμάτων, όπως το διάγραμμα Moody, είτε από προσεγγιστικές σχέσεις, ως συνάρτηση του αριθμού Reynolds και της σχετικής τραχύτητας του αγωγού.

Στην παρούσα εργασία για την τυρβώδη ροή ο συντελεστής τριβής προσδιορίστηκε μέσω αριθμητικών υπολογισμών χρησιμοποιώντας την εξίσωση Colebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log \left[\frac{2.51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3.71} \right], \quad (4.14)$$

όπου:

- λ : συντελεστής τριβής αγωγού
- Re : αριθμός Reynolds
- k : σχετική τραχύτητα αγωγού

Για την επίλυση της εξίσωσης (4.14) έγινε χρήση της μεθόδου Newton – Raphson, καθώς η εξίσωση είναι μη γραμμική και πεπλεγμένη ως προς λ . Η αρχική τιμή του συντελεστή τριβής εκτιμήθηκε με βάση τους υπολογισμούς της ροής κατά την προσομοίωση ενός δικτύου με 9 στοιχεία και 10 κόμβους, το οποίο περιγράφεται αναλυτικότερα στο Κεφάλαιο 5. Σύμφωνα με αυτά τα αποτελέσματα, για το εν λόγω δίκτυο, ο συντελεστής τριβής προσδιορίστηκε ίσος με περίπου 0.018 για κάθε αγωγό. Επομένως για αρχική τιμή επιλέχθηκε $\lambda_0 = 0.02$.

Κατά μήκος ενός αγωγού ενδέχεται να υπάρχει μεταβολή της πίεσης λόγω της επίδρασης της βαρύτητας, η οποία θα οφείλεται στην υψομετρική διαφορά μεταξύ των άκρων του. Η επιπρόσθετη αυτή πτώση πίεσης δίνεται από τον υδροστατικό νόμο:

$$\Delta p = \rho \cdot g \cdot \Delta h, \quad (4.15)$$

όπου:

- Δp : πτώση πίεσης (Pa) $\rightarrow \Delta p = p_1 - p_2$, όπου p είναι η πίεση στα άκρα του αγωγού
- ρ : πυκνότητα του νερού (kg/m^3)
- g : επιτάχυνση της βαρύτητας (9.81 m/s^2)
- Δh : υψομετρική διαφορά μεταξύ των άκρων του αγωγού (m) $\rightarrow \Delta H = h_1 - h_2$, όπου h το υψόμετρο του άκρου του αγωγού

Τελικά η συνδυαστική εξίσωση των στοιχείων που λαμβάνει υπόψιν την εξίσωση Darcy – Weisbach και τη εξίσωση της επίδρασης της βαρύτητας εκφράζεται ως εξής:

- Για στρωτή ροή:

$$p_1 - p_2 - \frac{128 \cdot \mu \cdot L \cdot q}{D^4 \cdot \pi} + \rho \cdot g \cdot (h_1 - h_2) = 0, \quad (4.16)$$

- Για τυρβώδη ροή:

$$p_1 - p_2 - \frac{\lambda \cdot L \cdot \rho \cdot q^2}{\pi^2 \cdot D^5} + \rho \cdot g \cdot (h_1 - h_2) = 0, \quad (4.17)$$

ή αλλιώς

$$p_1 - p_2 - \frac{\lambda \cdot L \cdot \rho \cdot q \cdot |q|}{\pi^2 \cdot D^5} + \rho \cdot g \cdot (h_1 - h_2) = 0, \quad (4.18)$$

Παρατηρώντας την εξίσωση 4.16, γίνεται κατανοητό ότι για στρωτή ροή η εξίσωση των στοιχείων είναι γραμμική ως προς την παροχή, η οποία με τη σειρά της σύμφωνα με τον ορισμό της (εξίσωση 4.7), είναι ανάλογη της ταχύτητας του νερού. Η ταχύτητα του νερού, όπως αποδεικνύεται από την αρχή διατήρησης της ορμής σε ένα ρευστό σώμα, σχετίζεται γραμμικά με την πίεση. Συνεπώς προκύπτει ότι η εξίσωση των στοιχείων για στρωτή ροή είναι γραμμική ως προς την πίεση στους κόμβους.

Αντίστοιχα, για την εξίσωση των στοιχείων για τυρβώδη ροή ισχύει ότι ο αριθμός Reynolds είναι ανάλογος της ταχύτητας του νερού, που αποδείχθηκε ότι είναι ανάλογη της πίεσης των κόμβων. Με τη σειρά του επομένως, ο αριθμός Reynolds εξαρτάται γραμμικά από την πίεση. Ο συντελεστής τριβής του αγωγού, η εξίσωση του οποίου είναι μη γραμμική, σχετίζεται με τον αριθμό Reynolds και άρα ο συντελεστής λ εξαρτάται μη γραμμικά από την πίεση των κόμβων. Παρατηρείται ακόμα ότι η παροχή βρίσκεται στο τετράγωνο. Συνεπώς, η εξίσωση των στοιχείων για τυρβώδη ροή είναι μία πολύπλοκη, μη γραμμική εξίσωση ως προς την πίεση στους κόμβους.

Με βάση τα παραπάνω είναι σαφές ότι στη γενική περίπτωση οι εξισώσεις είναι μη γραμμικές και επομένως για την επίλυσή τους απαιτείται η χρήση επαναληπτικών αριθμητικών μεθόδων.

Ολοκληρώνοντας επισημαίνεται ότι οι πυκνότητα και το ιξώδες του νερού που χρησιμοποιούνται για τις εξισώσεις των στοιχείων εξαρτώνται από την πίεση και τη θερμοκρασία του κάθε στοιχείου. Η σχέση αυτή αναλύεται στην Ενότητα 4.7.

4.5.3. Εξισώσεις εσωτερικών κόμβων

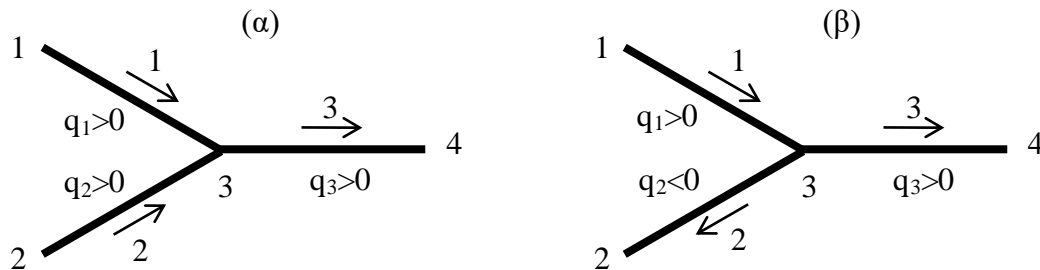
Αξιοποιώντας την αρχή διατήρησης μάζας είναι δεδομένο ότι η μάζα του ρευστού που εξέρχεται από έναν εσωτερικό κόμβο, θα πρέπει να είναι ίση με αυτήν που εισέρχεται σε αυτόν. Έχοντας το παραπάνω ως δεδομένο, είναι δυνατόν να εκφραστεί με μαθηματικό τρόπο η συμπεριφορά του νερού καθώς διέρχεται από έναν εσωτερικό κόμβο. Έστω λοιπόν ότι για κάθε εσωτερικό κόμβο i , υπάρχει ένα σύνολο στοιχείων P_i τα οποία καταλήγουν στο συγκεκριμένο κόμβο ή ξεκινούν από αυτόν. Προκειμένου να ισχύει η αρχή διατήρησης της μάζας, η συνολική παροχή στον κόμβο θα πρέπει να είναι ίση με το 0. Επομένως:

$$\sum_{j \in P_i} \delta_j \cdot q_j = 0, \quad 1 \leq i \leq I \quad (4.19)$$

όπου j το κάθε στοιχείο που ανήκει στο σύνολο P_i και δ_j ένας αριθμός που παίρνει τις τιμές 1 ή -1, εάν το στοιχείο j συνεισφέρει ρευστό στον κόμβο ή απομακρύνει από αυτόν, με βάση τη συνδεσμολογία του.

Υπενθυμίζεται ότι η παροχή q θεωρείται αυθαίρετα θετική κατά την κατεύθυνση από τον κόμβο μικρότερου δείκτη προς αυτόν μεγαλύτερου και αρνητική, αντίστοιχα, η ροή από το μεγαλύτερο προς το μικρότερο κόμβο. Για παράδειγμα, έστω

τα στοιχεία 1, 2 και 3 που συνδέονται με τους κόμβους 1 και 3, 2 και 3, 3 και 4, αντίστοιχα και ο κόμβος 3, ο οποίος είναι εσωτερικός. Έστω ακόμα ότι τα στοιχεία 1, 2 και 3 έχουν παροχές μεγέθους α , β και γ , αντίστοιχα.



Εικόνα 4.5: Διαφορετικές περιπτώσεις κατεύθυνσης ροής σε ένα δίκτυο που αποτελείται από 3 στοιχεία και 4 κόμβους.

Έτσι, εάν κατά τη διάρκεια της επίλυσης προκύψει αρνητική τιμή της παροχής σε κάποιο στοιχείο, η υδραυλική εξίσωση των εσωτερικών κόμβων ισχύει. Στις δύο περιπτώσεις της Εικόνας 4.5, η ροή σε κάθε αγωγό έχει καθοριστεί κατά τη φορά που υποδεικνύει το αντίστοιχο βέλος. Στην περίπτωση (α) τα στοιχεία 1 και 2 καταλήγουν στον εσωτερικό κόμβο 3 οπότε θα έχουν τιμή $\delta_j = 1$ και το στοιχείο 3 ξεκινάει από αυτόν, οπότε θα έχει τιμή $\delta_j = -1$. Οι παροχές όλων των στοιχείων είναι θετικές, επομένως σύμφωνα με την εξίσωση (4.19) θα ισχύει: $q_1 + q_2 - q_3 = 0$, άρα $\alpha + \beta - \gamma = 0$. Στην περίπτωση (β) το στοιχείο 1 καταλήγει στον εσωτερικό κόμβο 3, οπότε $\delta_j = 1$ και τα στοιχεία 2 και 3 ξεκινούν από αυτόν, οπότε $\delta_j = -1$. Οι παροχές των στοιχείων 1 και 3 είναι θετικές, ενώ του στοιχείου 2 είναι αρνητική. Επομένως, σύμφωνα με την εξίσωση (4.19), θα ισχύει: $q_1 - q_3 - q_2 = 0$, άρα $\alpha - \gamma + \beta$, που μετασχηματίζεται σε $\alpha + \beta - \gamma = 0$. Επομένως, επιβεβαιώνεται ότι η εξίσωση των εσωτερικών κόμβων ισχύει σε κάθε περίπτωση, ανεξαρτήτως του πρόσημου της παροχής.

4.5.4. Εξισώσεις εξωτερικών κόμβων

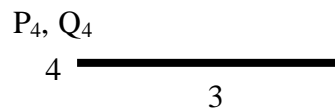
Η συμπεριφορά των εξωτερικών κόμβων είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τις συνοριακές συνθήκες του μοντέλου. Η προσέγγιση των εξισώσεων έγινε με βάση την αρχή διατήρησης της ενέργειας και την αρχή διατήρησης της μάζας, καθώς το ρευστό

εισέρχεται ή εξέρχεται από το σύστημα. Όπως προαναφέρθηκε στην Ενότητα 4.4.1 απαιτούνται E συνοριακές συνθήκες, εκ των οποίων τουλάχιστον μία πρέπει να είναι τιμή πίεσης. Επίσης έχει οριστεί ότι E_1 και E_2 είναι ο αριθμός των συνθηκών πίεσης και παροχής αντίστοιχα στους εξωτερικούς κόμβους. Έστω j ότι είναι το στοιχείο το οποίο συνδέεται με τον εξωτερικό κόμβο i για τον οποίον υπάρχει συνοριακή συνθήκη παροχής (Q_i) και πίεσης (P_i), τότε:

$$p_i - P_i = 0, \quad 1 \leq i \leq E_1, \quad (4.20)$$

$$q_j - Q_i = 0, \quad 1 \leq i \leq E_2, \quad (4.21)$$

Για παράδειγμα έστω ότι ο εξωτερικός κόμβος 4 συνδέεται με το στοιχείο 3 και για τον κόμβο αυτόν υπάρχουν ορισμένες δύο συνοριακές συνθήκες, μία παροχής και μία πίεσης.



Εικόνα 4.6: Σχηματική απεικόνιση ενός αγωγού που συνδέεται με έναν εξωτερικό κόμβο, στον οποίο έχουν ορισθεί συνοριακές συνθήκες πίεσης και παροχής.

Επομένως σύμφωνα με τις εξισώσεις (4.20) και (4.21), θα ισχύει:

$$p_4 - P_4 = 0$$

$$q_3 - Q_4 = 0$$

4.5.5. Επίλυση υδραυλικού μοντέλου με τη μέθοδο Newton – Raphson

Στην Ενότητα 4.5.2 παρουσιάστηκε η μαθηματική ανάπτυξη των εξισώσεων που χαρακτηρίζουν τη ροή και την πίεση σε κάθε στοιχείο. Υπενθυμίζεται ότι όταν η ροή είναι στρωτή, η εξίσωση (4.16) είναι γραμμική ως προς την πίεση και όταν είναι τυρβώδης, η εξίσωση (4.18) είναι μη γραμμική. Επομένως, στη γενική περίπτωση, το σύστημα των εξισώσεων που προκύπτουν από τις εξισώσεις των στοιχείων και των κόμβων για το υδραυλικό μοντέλο είναι ένα σύστημα μη γραμμικών εξισώσεων και επομένως η μόνη επιλογή είναι η επίλυσή του χρησιμοποιώντας μία επαναληπτική υπολογιστική μέθοδο. Βασικά κριτήρια για την επιλογή της μεθόδου ήταν η ικανότητα

της να επιλύσει ένα σύστημα μη γραμμικών εξισώσεων, η αξιοπιστία της και η δυνατότητά εφαρμογής της σε ένα προγραμματιστικό περιβάλλον. Λόγω της πολυπλοκότητας του συστήματος επιλέχθηκε η επαναληπτική μέθοδος Newton – Raphson (N – R). Η εν λόγω μέθοδος αποτελεί την κατεξοχήν επιλογή για την επίλυση πολύπλοκων συστημάτων μη γραμμικών εξισώσεων, καθώς με τη σωστή ρύθμιση των εξισώσεων, των αρχικών τιμών και των συνοριακών συνθηκών προσφέρει γρήγορη και αξιόπιστη σύγκλιση. Από προγραμματιστικής απόψεως, η απλή μορφή της καθιστά ιδιαίτερα εύκολη την ανάπτυξή της σε κώδικα.

Η επαναληπτική μέθοδος N - R χρησιμοποιεί αρχικές τιμές για τους αγνώστους και στη συνέχεια σε κάθε επανάληψη ανανεώνει αυτές τις τιμές, έως ότου να μην παρουσιάζεται καμία ουσιαστική περαιτέρω μεταβολή τους σε δύο συνεχόμενες επαναλήψεις, δηλαδή, έως ότου επέλθει σύγκλιση. Ένα σύστημα n μη γραμμικών εξισώσεων στη γενική του μορφή περιγράφεται παρακάτω:

$$\begin{cases} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0, \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0, \\ \vdots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0, \end{cases}$$

όπου $f_i(x_1, x_2, \dots, x_n), i = 1, \dots, n$, είναι μη γραμμικές συναρτήσεις.

Το σύστημα των εξισώσεων μπορεί να γραφεί ως:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = 0 \quad (4.22)$$

όπου:

$$\bullet \quad \mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} f_1(\mathbf{x}) \\ f_2(\mathbf{x}) \\ \vdots \\ f_n(\mathbf{x}) \end{bmatrix}$$

$$\bullet \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$$

$$\bullet \quad \mathbf{0} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

Δοθείσης μιας αρχικής τιμής για το διάνυσμα \mathbf{x} που περιέχει όλες τις προς προσδιορισμό μεταβλητές, π.χ., $\mathbf{x}^{(0)}$, ισχύει γενικά ότι $\mathbf{f}(\mathbf{x}^{(0)}) \neq 0$. Πρέπει να βρεθεί

επομένως ένα $\Delta \mathbf{x}^{(0)}$ τέτοιο ώστε $\mathbf{f}(\mathbf{x}^{(0)} + \Delta \mathbf{x}^{(0)}) = \mathbf{0}$. Χρησιμοποιώντας την πρώτη τάξη του αναπτύγματος σειράς Taylor, το $\mathbf{f}(\mathbf{x}^{(0)} + \Delta \mathbf{x}^{(0)})$ μπορεί να προσδιοριστεί από την:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}^{(0)} + \Delta \mathbf{x}^{(0)}) \approx \mathbf{f}(\mathbf{x}^{(0)}) + \mathbf{J}^{(0)}\Delta \mathbf{x}^{(0)}, \quad (4.23)$$

όπου \mathbf{J} είναι το $n \times n$ Ιακωβιανό Μητρώο (Jacobian Matrix):

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(\mathbf{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1(\mathbf{x})}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1(\mathbf{x})}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2(\mathbf{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2(\mathbf{x})}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2(\mathbf{x})}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n(\mathbf{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n(\mathbf{x})}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n(\mathbf{x})}{\partial x_n} \end{bmatrix} = \left\{ \frac{\partial f_i(\mathbf{x})}{\partial x_j} \right\}, \quad \begin{matrix} 1 \leq i \leq n \\ 1 \leq j \leq n \end{matrix} \quad (4.24)$$

Οι μερικές παράγωγοι των συναρτήσεων προσδιορίζονται με αριθμητική προσέγγιση, καθώς, ιδιαίτερα για την περίπτωση της επίλυσης του συντελεστή τριβής του αγωγού κατά την τυρβώδη ροή (βλέπε Ενότητα 4.5.2) ο αναλυτικός υπολογισμός της παραγώγου είναι εξαιρετικά σύνθετος.

Γενικά υπάρχουν τρεις μέθοδοι αριθμητικής προσέγγισης των παραγώγων, στις οποίες το Δx , είναι ένα πολύ μικρό διάστημα (σε σχέση πάντα με την τάξη μεγέθους του x σε κάθε περίπτωση):

1. Τύπος εμπρόσθιας διαφοράς:

$$f'(x) \approx \frac{f(x+\Delta x) - f(x)}{\Delta x}, \quad (4.25)$$

2. Τύπος οπίσθιας διαφοράς:

$$f'(x) \approx \frac{f(x) - f(x-\Delta x)}{\Delta x}, \quad (4.26)$$

3. Τύπος κεντρικής διαφοράς:

$$f'(x) \approx \frac{f(x+\Delta x) - f(x-\Delta x)}{2 \cdot \Delta x}, \quad (4.27)$$

Στην παρούσα εργασία εφαρμόστηκε η προσέγγιση της κεντρικής διαφοράς για την εύρεση των παραγώγων καθώς είναι πιο ακριβής σε σύγκριση με αυτές της εμπρόσθιας και της οπίσθιας διαφοράς.

Επιλύοντας την εξίσωση $\mathbf{f}(\mathbf{x}^{(0)} + \Delta \mathbf{x}^{(0)}) = \mathbf{0}$, το $\Delta \mathbf{x}^{(0)}$ ορίζεται ως:

$$\Delta \mathbf{x}^{(0)} \approx -[\mathbf{J}^{(0)}]^{-1} \mathbf{f}(\mathbf{x}^{(0)}), \quad (4.28)$$

Επομένως, το διάνυσμα \mathbf{x} και άρα οι τιμές των ζητούμενων μεταβλητών, μπορεί να ανανεωθεί ως εξής:

$$\mathbf{x}^{(1)} = \mathbf{x}^{(0)} + \Delta\mathbf{x}^{(0)}, \quad (4.29)$$

Στη γενική του μορφή το διάνυσμα $\mathbf{x}^{(v)}$, που έχει προσδιοριστεί κατά τη v -οστή επανάληψη της μεθόδου, ανανεώνεται ως εξής:

$$\mathbf{x}^{(v+1)} = \mathbf{x}^{(v)} - [\mathbf{J}^{(v)}]^{-1}\mathbf{f}(\mathbf{x}^{(v)}), \quad (4.30)$$

όπου v είναι ο αριθμός της επανάληψης.

Με βάση τα παραπάνω, ο αλγόριθμος της μεθόδου Newton – Raphson αναπτύσσεται με τον ακόλουθο τρόπο:

- Βήμα 0: έναρξη των επαναλήψεων ($v = 0$) και ορισμός αρχικών τιμών των μεταβλητών για το διάνυσμα $\mathbf{x}^{(v)}$.
- Βήμα 1: υπολογισμός του Ιακωβιανού Μητρώου.
- Βήμα 2: υπολογισμός του νέου διανύσματος $\mathbf{x}^{(v+1)}$.
- Βήμα 3: έλεγχος της νόρμας των μεταβλητών των διανυσμάτων \mathbf{x} και $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ δύο συνεχόμενων επαναλήψεων, έτσι ώστε αυτές να είναι μικρότερες από μία επιτρεπτή τιμή ε για κάθε διάνυσμα (ε_1 και ε_2 αντίστοιχα), δηλαδή έλεγχος εάν $|\mathbf{x}^{(v+1)} - \mathbf{x}^{(v)}| < \varepsilon_1$ και $|\mathbf{f}(\mathbf{x}^{(v+1)}) - \mathbf{f}(\mathbf{x}^{(v)})| < \varepsilon_2$. Εάν ο έλεγχος ικανοποιείται τότε σημαίνει ότι ο αλγόριθμος έχει έρθει σε σύγκλιση και η λύση του συστήματος είναι το διάνυσμα $\mathbf{x}^{(v+1)}$. Εάν ο έλεγχος δεν ικανοποιείται, τότε ο αλγόριθμος προχωράει στο Βήμα 4.
- Βήμα 4: ανανέωση του αριθμού της επανάληψης ($v \leftarrow v + 1$) και επιστροφή στο Βήμα 2.

Το τελικό αποτέλεσμα της επίλυσης του υδραυλικού μοντέλου είναι το διάνυσμα \mathbf{x}^* , το οποίο περιέχει τις τελικές τιμές παροχής σε όλα τα στοιχεία και πίεσης σε όλους τους κόμβους.

$$\mathbf{x}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_i^* \\ \mathbf{p}_j^* \end{bmatrix}, \quad \begin{matrix} 1 \leq i \leq L \\ 1 \leq j \leq N \end{matrix}, \quad (4.31)$$

Η μέθοδος Newton – Raphson βασίζεται στην κατασκευή και αντιστροφή του Ιακωβιανού Μητρώου. Προκειμένου το Ιακωβιανό Μητρώο να είναι αντιστρέψιμο θα πρέπει να είναι τετραγωνικό, δηλαδή, διαστάσεων $n \times n$. Ένα μητρώο καλείται μη

αντιστρέψιμο, μαθηματικά, όταν η ορίζουσά του είναι ίση με το 0 και πρακτικά όταν το σύστημα δεν έχει μοναδική λύση. Ο περιορισμός αυτός ικανοποιείται με την κατάλληλη θέσπιση συνοριακών συνθηκών παροχής και πίεσης στους εξωτερικούς κόμβους.

Εάν παρόλα αυτά το μητρώο συνεχίζει να εμφανίζει το πρόβλημα κατά την αντιστροφή του, τότε γίνεται λόγος για τεχνική μη αντιστρεψιμότητα, η οποία έχει προκληθεί από ασυμφωνία των τάξεων μεγέθους των μεταβλητών που ταυτόχρονα εμπλέκονται στις εξισώσεις, για παράδειγμα πίεση σε Pa (τάξη μεγέθους 10^6) και παροχή σε m^3/h (τάξη μεγέθους 10^2). Η κακή επιλογή κλίμακας του μητρώου έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας ορίζουσας, διάφορης του μηδενός μεν, αλλά αρκετά μικρής, έτσι ώστε να δυσχεραίνει η λειτουργία του αλγορίθμου αντιστροφής. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να αποφευχθεί εφαρμόζοντας μία από τις παρακάτω μεθόδους:

1. Μέθοδος γενικευμένης κανονικοποίησης: εφαρμόζεται ένας αλγόριθμος, ο οποίος αλλάζει την κλίμακα των μεταβλητών.
2. Αλλαγή μονάδων: επιλέγονται μονάδες κατάλληλης τάξης μεγέθους εσωτερικά του κώδικα, για παράδειγμα Pa σε bar (τάξη μεγέθους 10^2) και παροχή σε m^3/h (τάξη μεγέθους 10^2). Κατά την ολοκλήρωση οι μονάδες μετατρέπονται εκ νέου σε αυτές που είναι επιθυμητές από το χρήστη.
3. Εκτίμηση κατάλληλων αρχικών τιμών μεταβλητών

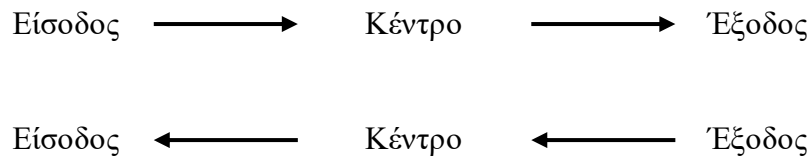
Στην παρούσα εργασία δεν παρατηρήθηκαν προβλήματα στην αντιστρεψιμότητα του Ιακωβιανού Μητρώου, επομένως απλώς ορίστηκαν κατάλληλες αρχικές συνθήκες (initial conditions) παροχής, πίεσης και θερμοκρασίας στο υδραυλικό μοντέλο, χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο, που θα αναλυθεί στην επόμενη Ενότητα.

4.5.6. Αρχικές συνθήκες (initial conditions)

Εκτός από τις συνοριακές συνθήκες, εξαιρετική σημασία για την ορθή επίλυση του υδραυλικού μοντέλου και την αποφυγή μη αντιστρεψιμότητας του Ιακωβιανού Μητρώου κατά την εκτέλεση της μεθόδου Newton – Raphson είναι η επιλογή κατάλληλων αρχικών τιμών. Οι επαναληπτικές μέθοδοι επίλυσης των μοντέλων που χρησιμοποιούνται σε αυτήν την εργασία βασίζονται στην ύπαρξη αρχικών τιμών για

τις παραμέτρους της παροχής, της πίεσης και της θερμοκρασίας. Σημειώνεται ότι παρόλο που το υδραυλικό πρόβλημα δεν λύνει ως προς θερμοκρασίες, οι υφιστάμενες εκτιμήσεις των θερμοκρασιών απαιτούνται για την επίλυσή του, λειτουργούν ως σταθερές και αυτό επιλύεται ως προς τις παροχές των στοιχείων και τις πιέσεις των κόμβων. Στον κώδικα έχει αναπτυχθεί ένας αλγόριθμος εκτίμησης αρχικών τιμών, ο οποίος εκτιμά αρχικές τιμές για τις παραπάνω παραμέτρους που επιτρέπουν στην επίλυση του δικτύου να πραγματοποιείται αξιόπιστα.

Η γενική φιλοσοφία του αλγορίθμου έγκειται στο να ελέγχει τους εξωτερικούς κόμβους εισόδου/εξόδου που διαθέτουν συνοριακές συνθήκες και να τις επιβάλλει στα αντίστοιχα στοιχεία ή κόμβους. Στη συνέχεια, ελέγχει τη συμπεριφορά των τιμών στους εσωτερικούς κόμβους, με μία συγκεκριμένη μεθοδολογία, καταλήγοντας τελικά στους εξωτερικούς κόμβους εξόδου/εισόδου, δηλαδή λειτουργώντας σύμφωνα με το παρακάτω διάγραμμα:



Εικόνα 4.7: Διάγραμμα ροής εκτίμησης αρχικών τιμών πίεσης σε κάθε κόμβο, παροχής και θερμοκρασίας σε κάθε στοιχείο από τον αλγόριθμο εκτίμησης αρχικών τιμών.

Λεπτομερέστερα, αρχικά γίνεται ένας έλεγχος των συνοριακών συνθηκών παροχής (Q), πίεσης (P) και θερμοκρασίας (T) ως προς τη συνδεσμολογία όλων των στοιχείων του συστήματος. Εάν ένα στοιχείο συνδέεται με έναν κόμβο που διαθέτει συνοριακή συνθήκη, τότε η αρχική τιμή της παροχής ή της θερμοκρασίας του στοιχείου τίθεται ίση με την αντίστοιχη συνοριακή συνθήκη του κόμβου. Για τη θερμοκρασία ειδικά, ελέγχεται εάν πρόκειται για τον πρώτο ή το δεύτερο κόμβο στη συνδεσμολογία. Εάν η συνθήκη είναι στον πρώτο κόμβο τότε ορίζεται $T_{in} = T$, ενώ εάν η συνθήκη είναι στον δεύτερο κόμβο τότε ορίζεται $T_{out} = T$. Για την αρχικοποίηση της πίεσης, ελέγχεται κάθε κόμβος του συστήματος, εάν διαθέτει συνοριακή συνθήκη, οπότε η αρχική τιμή πίεσης σε αυτό τον κόμβο τίθεται ίση με την αντίστοιχη συνοριακή συνθήκη.

Στη συνέχεια ο αλγόριθμος αντιγράφει τις γνωστές συνθήκες παροχής στα στοιχεία που συνδέονται με τους εξωτερικούς κόμβους, που δεν είναι ορισμένοι από συνοριακές συνθήκες. Για αυτή τη διαδικασία, πραγματοποιείται έλεγχος κάθε στοιχείου που συνδέεται με έναν εξωτερικό κόμβο εισόδου. Εάν το στοιχείο αυτό έχει ήδη μια συνοριακή συνθήκη παροχής, παραλείπεται από τον έλεγχο και εξετάζεται το επόμενο. Εάν το στοιχείο αυτό δεν έχει τιμή παροχής, τότε ελέγχονται κατά αύξουσα σειρά όλα τα στοιχεία εισόδου του συστήματος. Μόλις βρεθεί ένα στοιχείο εισόδου, το οποίο έχει συνθήκη παροχής, τότε η τιμή του αντιγράφεται στο αρχικό στοιχείο ελέγχου. Η διαδικασία ολοκληρώνεται μόλις όλα τα στοιχεία έχουν ελεγχθεί ή όταν οι εξωτερικοί κόμβοι εισόδου δεν διαθέτουν συνοριακές συνθήκες παροχής. Ο αλγόριθμος λειτουργεί ομοίως για τα στοιχεία που συνδέονται με τους εξωτερικούς κόμβους εξόδου του δικτύου.

Ακολούθως ο αλγόριθμος αντιγράφει τις γνωστές συνθήκες πίεσης στους εξωτερικούς κόμβους που δεν διαθέτουν συνοριακές συνθήκες. Κάθε εξωτερικός κόμβος εισόδου ελέγχεται εάν έχει ήδη αρχική τιμή πίεσης ή όχι. Εάν διαθέτει αρχική τιμή, τότε παραλείπεται από τον έλεγχο και εξετάζεται ο επόμενος. Εάν δεν διαθέτει αρχική τιμή, τότε ελέγχονται κατά αύξουσα σειρά όλοι οι κόμβοι εισόδου του δικτύου. Μόλις βρεθεί ένας κόμβος εισόδου που διαθέτει αρχική τιμή παροχής, τότε αυτή η τιμή αντιγράφεται στον αρχικό κόμβο ελέγχου. Η διαδικασία ολοκληρώνεται μόλις όλοι οι εξωτερικοί κόμβοι εισόδου έχουν ελεγχθεί ή όταν δεν γνωρίζεται η πίεση κανενός. Ο αλγόριθμος λειτουργεί ομοίως για τους εξωτερικούς κόμβους εξόδου του δικτύου.

Η αντιγραφή των συνοριακών συνθηκών θερμοκρασίας στα υπόλοιπα στοιχεία του δικτύου γίνεται με την εξής μεθοδολογία. Διαδοχικά ελέγχεται η είσοδος και η έξοδος κάθε στοιχείου. Εάν η είσοδος έχει αρχική τιμή θερμοκρασίας, τότε παραλείπεται από τον έλεγχο και εξετάζεται η έξοδος. Εάν και η έξοδος έχει αρχική τιμή, τότε παραλείπεται και αυτή και εξετάζεται η είσοδος και η έξοδος του επόμενου στοιχείου. Εάν η θέση δεν έχει ορισμένη τιμή θερμοκρασίας, τότε εξετάζεται κατά αύξουσα σειρά η είσοδος και η έξοδος κάθε στοιχείου. Μόλις βρεθεί μία τιμή, τότε αυτή αντιγράφεται ως η αρχική τιμή του στοιχείου στη θέση που εξετάζεται. Η διαδικασία αυτή ολοκληρώνεται, όταν οι θέσεις εισόδου και εξόδου όλων των στοιχείων έχουν συμπληρωθεί από κάποια αρχική τιμή θερμοκρασίας.

Στο επόμενο βήμα γίνεται ο προσδιορισμός των τιμών που συνδέονται με τους εσωτερικούς κόμβους. Για τις τιμές παροχής, για κάθε εσωτερικό κόμβο, ελέγχονται τα στοιχεία που συνδέονται με αυτόν. Εάν ο εσωτερικός κόμβος βρίσκεται στη δεύτερη θέση της συνδεσμολογίας τους, τότε πρόκειται για στοιχεία εισόδου στον κόμβο. Εάν ο κόμβος βρίσκεται στην πρώτη θέση της συνδεσμολογίας τους, τότε πρόκειται για στοιχεία εξόδου από τον κόμβο. Ο αλγόριθμος ελέγχει τις τιμές παροχής των στοιχείων με τα οποία συνδέεται ο εν λόγω κόμβος. Εάν είναι γνωστές οι τιμές εισόδου, τότε αθροίζει τις παροχές που εισέρχονται σε αυτόν και τις ισοκατανέμει στα στοιχεία εξόδου. Ομοίως εάν είναι γνωστές οι τιμές εξόδου.

Για κάθε εσωτερικό κόμβο ελέγχονται πάλι κατά αύξουσα σειρά τα στοιχεία εισόδου στον κόμβο και εξόδου από αυτόν. Αρχικά εξετάζονται τα στοιχεία εισόδου. Εάν ο πρώτος κόμβος στη συνδεσμολογία αυτού του στοιχείου έχει μία αρχική τιμή πίεσης, τότε η πίεση του εσωτερικού κόμβου ορίζεται ως το 90% του πρώτου κόμβου του στοιχείου. Παρόμοια διαδικασία ισχύει για τα στοιχεία εξόδου. Εάν ο δεύτερος κόμβος στη συνδεσμολογία του στοιχείου έχει μία αρχική τιμή πίεσης, τότε η πίεση του εσωτερικού κόμβου ορίζεται ως το 110% του δεύτερου κόμβου του στοιχείου.

Με την ολοκλήρωση της παραπάνω διαδικασίας, κατασκευάζεται ένα διάνυσμα \mathbf{x}_0 , που περιέχει τις αρχικές τιμές παροχής και πίεσης για κάθε στοιχείο και κόμβο αντίστοιχα και ένα διάνυσμα \mathbf{T}_0 , που περιέχει τις αρχικές τιμές εισόδου και εξόδου κάθε στοιχείου.

$$\mathbf{x}_0 = \begin{bmatrix} q_i \\ p_j \end{bmatrix}, \quad \begin{matrix} 1 \leq i \leq L \\ 1 \leq j \leq N \end{matrix} \quad (4.32)$$

$$\mathbf{T}_0 = \begin{bmatrix} T_{in_i} \\ T_{out_i} \end{bmatrix}, \quad 1 \leq i \leq L, \quad (4.33)$$

4.6. Ανάπτυξη θερμικού μοντέλου

Το θερμικό μοντέλο που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία βασίστηκε πάνω στο αντίστοιχο μοντέλο “Rough Approximation Temperature Model” που χρησιμοποιείται στο λογισμικό PROSPER, για τη μοντελοποίηση ροής ρευστών σε γεωτρήσεις [31]. Αξιοποιώντας την προσέγγιση ανάλυσης “element by element” που

θεσπίστηκε στην Ενότητα 4.1, το σύστημα εξισώσεων που διέπει το θερμικό μοντέλο χωρίζεται σε τρεις επιμέρους κατηγορίες εξισώσεων:

- Εξισώσεις στοιχείων
- Εξισώσεις εξωτερικών κόμβων
- Εξισώσεις εσωτερικών κόμβων

4.6.1. Εξισώσεις στοιχείων

Το μοντέλο που επιλέχθηκε υποθέτει ότι η θερμότητα που μεταφέρεται μεταξύ του ρευστού και του γειτονικού του περιβάλλοντος, πραγματοποιείται αποκλειστικά μέσω του μηχανισμού αγωγής (conduction) και μπορεί να περιγραφεί χρησιμοποιώντας ένα Συνολικό Συντελεστή Μεταφοράς Θερμότητας (Overall Heat Transfer Coefficient) ή αλλιώς συντελεστή U . Το U έχει μονάδες μέτρησης $\text{BTU}/\text{h}/\text{ft}^2/^\circ\text{F}$, όπου το εμβαδόν αναφοράς είναι το εσωτερικό τοίχωμα του αγωγού ή της σωλήνωσης (εξαρτάται από το μέσο στο οποίο ρέει το ρευστό). Αυτό σημαίνει ότι η θερμότητα που μεταφέρεται ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα μήκους σωλήνα (Q_c) είναι ίση με:

$$Q_c = U \cdot A \cdot (\bar{T}_{el} - T_\infty), \quad (4.34)$$

όπου:

- A : εμβαδόν του εσωτερικού του αγωγού ή της σωλήνωσης ($A = \pi \cdot D$), ανά μονάδα μήκους, όπου D η εσωτερική διάμετρος του αγωγού.
- U : συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (μονάδες).
- \bar{T}_{el} : η μέση θερμοκρασία στο εσωτερικό του στοιχείου από το οποίο ρέει το ρευστό. Πρακτικά μπορεί να θεωρηθεί ως ο μέσος όρος της θερμοκρασίας εισόδου και εξόδου από τον αγωγό ($\bar{T}_{el} = (T_{in} + T_{out})/2$).
- T_∞ : η θερμοκρασία του περιβάλλοντος, μπορεί να είναι η θερμοκρασία του αέρα ή του εδάφους, ανάλογα με την κατάσταση του στοιχείου (επιφανειακό ή υπεδαφικό αντίστοιχα).

Η ενέργεια (Q_o) που άγεται προς τα ψυχρότερα περιβλήματα έχει ληφθεί από τη θερμότητα του ρευστού, προκαλεί την πτώση της θερμοκρασίας του νερού και μπορεί να προσδιοριστεί πολλαπλασιάζοντας το ρυθμό ροής μάζας (mass flow rate

\dot{m}_w) του νερού, την ειδική θερμοχωρητικότητα του (specific heat capacity C_p) και τη διαφορά θερμοκρασίας κατά την είσοδο και έξοδο του ρευστού από το στοιχείο:

$$Q_o = \dot{m}_w \cdot C_p \cdot (T_{in} - T_{out}), \quad (4.35)$$

Σημειώνεται ότι εξαιτίας της υψηλής αλατότητας του γεωθερμικού ρευστού και της μονοφασικής κατάστασής του (γεωθερμικό πεδίο χαμηλής ενθαλπίας), επιλέχθηκε η τιμή της ειδικής θερμοχωρητικότητας ίση με 1.02 BTU/lb/°F [31], λίγο μεγαλύτερη από αυτή του καθαρού νερού.

Εξισώνοντας τη θερμότητα που μεταφέρεται με τη θερμότητα που αποδίδεται από την πτώση της θερμοκρασίας και εφαρμόζοντας την εξίσωση σε ένα τμήμα σωλήνα με διαφορικό μήκος dx , προκύπτει η ακόλουθη διαφορική εξίσωση:

$$Q_c = Q_o \rightarrow \frac{dT}{dx} = -\frac{U \cdot \pi \cdot D}{\dot{m}_w \cdot C_p} \cdot (\bar{T}_{el} - T_\infty), \quad (4.36)$$

όπου:

- U : συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (J/s/m²/°K)
- D : διάμετρος αγωγού (m)
- \dot{m}_w : ρυθμός ροής μάζας νερού
- C_p : ειδική θερμοχωρητικότητα νερού (J/kg/°K)
- \bar{T}_{el} : μέση θερμοκρασία στο εσωτερικό του στοιχείου (°K)
- T_∞ : θερμοκρασία του περιβάλλοντος (αέρα ή εδάφους) (°K)

Χρησιμοποιώντας τους ορισμούς της ογκομετρικής παροχής και του ρυθμού ροής μάζας ισχύει ότι:

$$\begin{cases} q = A \cdot u \\ \dot{m} = \rho \cdot \dot{V} = \rho \cdot A \cdot u \end{cases} \rightarrow \dot{m} = \rho \cdot q, \quad (4.37)$$

Αντικαθιστώντας τη μαζική παροχή με την ογκομετρική στην εξίσωση (4.36) προκύπτει για οποιοδήποτε σημείο x του αγωγού:

$$\frac{dT}{dx} = -\frac{U \cdot \pi \cdot D}{\rho \cdot q \cdot C_p} \cdot (T_{(x)} - T_\infty), \quad (4.38)$$

Αλλάζοντας τη μεταβλητή της θερμοκρασίας T στη μετατοπισμένη \bar{T} προκύπτει:

$$\bar{T} = T_{(x)} - T_{\infty} \rightarrow d\bar{T} = dT, \quad (4.39)$$

και ορίζοντας:

$$2 \cdot R = -\frac{U \cdot \pi \cdot D}{\rho \cdot q \cdot C_p} \quad (4.40)$$

Η διαφορική εξίσωση (4.38) μετατρέπεται σε μορφή χωριζομένων μεταβλητών:

$$\frac{d\bar{T}}{dx} = 2 \cdot R \cdot \bar{T}_{(x)} \rightarrow \frac{1}{2 \cdot R} \cdot \frac{1}{\bar{T}_{(x)}} d\bar{T} = dx, \quad (4.41)$$

Επιλύοντας ως προς x , δηλαδή κατά μήκος του μήκος του αγωγού (L) προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση:

$$\begin{aligned} \int_{T_{in}}^{T_{out}} \left(\frac{1}{2 \cdot R} \cdot \ln \bar{T} d\bar{T} \right) &= \int_0^L dx \rightarrow \\ \frac{1}{2 \cdot R} \cdot \ln \bar{T} \Big|_{T_{in}}^{T_{out}} &= L \rightarrow \\ \bar{T}_{in} - \bar{T}_{out} \cdot \exp(2 \cdot R \cdot L) &= 0, \end{aligned} \quad (4.42)$$

όπου:

- L : το μήκος του αγωγού (m)
- \bar{T}_{in} : η μετατοπισμένη θερμοκρασία στο πρώτο άκρο του αγωγού (°K)
- \bar{T}_{out} : η μετατοπισμένη θερμοκρασία στο δεύτερο άκρο του αγωγού (°K)

Αντικαθιστώντας το \bar{T}_{in} και το \bar{T}_{out} σύμφωνα με την εξίσωση (4.39), η τελική εξίσωση του θερμικού μοντέλου για κάθε στοιχείο i εκφράζεται ως:

$$\exp(2 \cdot R_i \cdot L_i) \cdot T_{in_i} - T_{out_i} = [\exp(2 \cdot R_i \cdot L_i) - 1] \cdot T_{\infty_i}, \quad 1 \leq i \leq L, \quad (4.43)$$

4.6.2. Συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας

Ο Συνολικός Συντελεστής Θερμότητας (συντελεστής U , εν συντομία) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της απώλειας θερμότητας κατά μήκος του εξοπλισμού. Ο συντελεστής αυτός δεν θα πρέπει να συγχέεται με τη θερμική αγωγιμότητα ενός αγωγού. Ο Συνολικός Συντελεστής Θερμότητας είναι ένα

διαφορετικό μέγεθος και προσδιορίζει τη ροή της θερμότητας από τον αγωγό και τη μόνωση (εάν υπάρχει) προς το εξωτερικό περιβάλλον (αέρας ή έδαφος, ανάλογα με το αν είναι υπεδαφικός ή όχι ο αγωγός). Ενδεικτικά αναφέρεται ότι μονωμένοι και υπεδαφικοί αγωγοί μπορούν να έχουν πολύ χαμηλούς συντελεστές μεταφοράς θερμότητας, της τάξης των 0.1 BTU/hr/ft²/°F, ενώ μη μονωμένοι ή και επιφανειακοί αγωγοί μπορούν να έχουν υψηλές τιμές της τάξης ακόμα και των 100 BTU/hr/ft²/°F [31].

Πίνακας 4.1: Τυπικές τιμές συνολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας για υπεδαφικούς και επιφανειακούς χαλύβδινους αγωγούς [31].

Είδος αγωγού	Τιμή (BTU/hr/ft ² /°F)
Υπεδαφικοί χαλύβδini αγωγοί	1.0
Επιφανειακοί χαλύβδini αγωγοί	16.0

Τονίζεται ωστόσο ότι οι τιμές αυτές είναι ενδεικτικές και χρησιμοποιούνται ως αρχικές τιμές για τον συντελεστή U . Στη συνέχεια, και εάν φυσικά το επιλέξει ο χρήστης, όταν γίνει η παραμετρική βελτιστοποίηση (βλέπε Ενότητα 4.10) τότε οι τιμές αυτές τροποποιούνται ανάλογα, ώστε να ικανοποιηθούν τα κριτήρια της βελτιστοποίησης.

4.6.3. Εξισώσεις εξωτερικών κόμβων

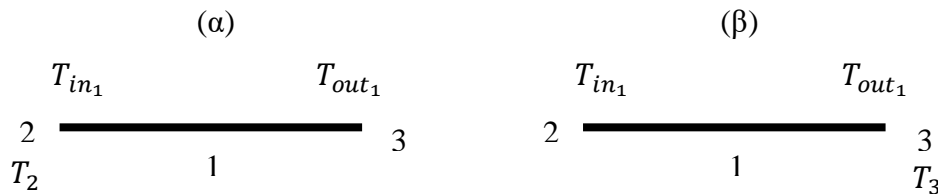
Έχοντας κατανοήσει πλήρως τη δομή του δικτύου, είναι σαφές ότι κάθε εξωτερικός κόμβος συνδέεται με ένα στοιχείο. Εάν ο κόμβος αυτός είναι εισόδου στο σύστημα, τότε θα είναι και κόμβος εισόδου στο στοιχείο, ενώ αντίστοιχα, εάν πρόκειται για κόμβο εξόδου για το σύστημα, τότε θα αποτελεί την έξοδο για το στοιχείο με το οποίο ενώνεται. Συνεπώς, η θερμοκρασία στον εκάστοτε κόμβο θα πρέπει να ισούται με τη θερμοκρασία εισόδου ή εξόδου του στοιχείου με το οποίο ο εξωτερικός κόμβος συνδέεται, ανάλογα με τη θέση που έχει ο κόμβος στη συνδεσμολογία του στοιχείου. Αυθαίρετα θεωρείται ότι η θερμοκρασία στον κόμβο με το μικρότερο δείκτη ότι είναι η θερμοκρασία εισόδου T_{in} και ότι η θερμοκρασία σε αυτόν με το μεγαλύτερο δείκτη ότι είναι η θερμοκρασία εξόδου T_{out} .

Αξιοποιώντας τις συνοριακές συνθήκες θερμοκρασίας (T) που έχουν εφαρμοστεί για κάθε εξωτερικό κόμβο, μπορεί να κατασκευαστεί μία εξίσωση που να περιγράφει την παραπάνω θερμική συμπεριφορά στους κόμβους με συνοριακές συνθήκες, εφαρμόζοντας την αρχή διατήρησης της ενέργειας, όπως αναφέρθηκε. Επομένως οι εξισώσεις που περιγράφουν το θερμικό μοντέλο για κάθε εξωτερικό κόμβο i :

$$\begin{cases} T_{in_j} = T_i & 1 \leq i \leq E \\ T_{out_j} = T_i & 1 \leq j \leq L \end{cases} \quad (4.44)$$

όπου i είναι ο εξωτερικός κόμβος και j το στοιχείο με το οποίο συνδέεται ο κόμβος.

Για παράδειγμα, έστω το στοιχείο 1, το οποίο συνδέεται με τους κόμβους 2 και 3. Στο σχήμα της Εικόνας 4.8 παρουσιάζονται δύο διακριτές περιπτώσεις:



Εικόνα 4.8: Σχηματική απεικόνιση ενός αγωγού, ο οποίος είναι συνδεδεμένος με: (α) τον εξωτερικό κόμβο 2. (β) με τον εξωτερικό κόμβο 3.

Στην περίπτωση (α) ο κόμβος 2 είναι ένας εξωτερικός κόμβος. Επειδή ο κόμβος βρίσκεται στην πρώτη θέση της συνδεσμολογίας του στοιχείου, είναι εξωτερικός κόμβος εισόδου του δικτύου και η θερμοκρασία του στοιχείου σε εκείνο το άκρο θα είναι η T_{in_1} . Επομένως, σύμφωνα με την εξίσωση (4.44), θα ισχύει ότι $T_{in_1} = T_2$. Αντίστοιχα, στην περίπτωση (β), ο κόμβος 2 είναι ένας εξωτερικός κόμβος. Επειδή βρίσκεται στη δεύτερη θέση της συνδεσμολογίας του στοιχείου είναι εξωτερικός κόμβος εξόδου του δικτύου και η θερμοκρασία του στοιχείου σε εκείνο το άκρο θα είναι η T_{out_1} . Επομένως σύμφωνα με την εξίσωση (4.44), θα ισχύει ότι $T_{out_1} = T_3$.

4.6.4. Εξισώσεις εσωτερικών κόμβων

Καθώς το νερό ρέει μέσα στο δίκτυο, είτε εισέρχεται είτε εξέρχεται από κάποιον εξωτερικό κόμβο, μεταφέρεται μέσω των στοιχείων. Σε κάθε εσωτερικό κόμβο

εκβάλλει και αναχωρεί ένα σύνολο στοιχείων το οποίο μεταφέρει στο εσωτερικό του νερό, που βρίσκεται σε διαφορετικές συνθήκες παροχής και θερμοκρασίας.

Εφαρμόζοντας την αρχή διατήρησης της ενέργειας, η θερμοκρασία αναχώρησης στον εκάστοτε εσωτερικό κόμβο θα εξαρτάται από το σταθμισμένο μέσο όρο του γινομένου της μάζας του νερού (εκφρασμένης μέσω της παροχής) με τη θερμοκρασία του που εισέρχονται (I_1) ή εξέρχονται (I_2) από τον κόμβο. Τονίζεται ότι χρησιμοποιείται η αλγεβρική τιμή της παροχής και ότι T_{in} θεωρείται η θερμοκρασιακή τιμή του πρώτου κόμβου με τον οποίο συνδέεται το στοιχείο και T_{out} η τιμή του δεύτερου κόμβου.

Η εξίσωση επομένως που εκφράζει το θερμικό μοντέλο για κάθε εσωτερικό κόμβο i :

$$\begin{aligned} \sum_{j \in I_1} Q_{c_j} - \sum_{j \in I_2} Q_{c_j} &= 0 \rightarrow \\ \sum_{j \in I_1} (q_j \cdot Cp \cdot T_{out_j}) - \sum_{j \in I_2} (q_j \cdot Cp \cdot T_{in_j}) &= 0 \rightarrow \\ \sum_{j \in I_1} (q_j \cdot T_{out_j}) - \sum_{j \in I_2} (q_j \cdot T_{in_j}) &= 0 \end{aligned} \quad (4.45)$$

όπου:

- Q_{c_j} : η θερμική ενέργεια που μεταφέρεται από το νερό που ρέει στο στοιχείο j
- I_1 : το σύνολο των στοιχείων j που εκβάλλουν στον κόμβο i
- T_{out_j} : οι θερμοκρασίες των στοιχείων που ανήκουν στο I_1 , επειδή εκβάλλουν στον κόμβο i , τότε αυτός θα βρίσκεται δεύτερος στη συνδεσμολογία τους και άρα θα βρίσκεται στη θέση εξόδου
- I_2 : το σύνολο των στοιχείων j που αναχωρούν από τον κόμβο i
- T_{in_j} : οι θερμοκρασίες των στοιχείων που ανήκουν στο I_2 , επειδή αναχωρούν από τον κόμβο i , τότε αυτός θα βρίσκεται πρώτος στη συνδεσμολογία τους και άρα θα βρίσκεται στη θέση εισόδου

4.6.5. Συνοριακές συνθήκες (Boundary conditions) θερμικού μοντέλου

Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 4.4.2, προκειμένου να κατασκευαστεί και να επιλυθεί το θερμικό μοντέλο, χρειάζεται να ορισθούν οι συνοριακές συνθήκες που

περιγράφουν τη συμπεριφορά του μοντέλου στα όριά του. Οι συνοριακές συνθήκες θερμοκρασίας στους κόμβους καθορίζουν τη θερμοκρασία εισόδου ή εξόδου από το δίκτυο. Σύμφωνα με την ανάλυση που έγινε στην Ενότητα 4.4.2, το σύστημα των L στοιχείων και N κόμβων, πρέπει να έχει $E - 1$ συνοριακές συνθήκες θερμοκρασίας. Δηλαδή, όλοι οι εξωτερικοί κόμβοι, πλην ενός, θα πρέπει να είναι θερμοκρασιακά ορισμένοι. Ο αριθμός των συνοριακών συνθηκών θερμοκρασίας καθορίζεται από τις απαιτήσεις του μοντέλου, προκειμένου να μπορεί να επιλυθεί. Βασική απαίτηση είναι ο αριθμός των αγνώστων του θερμικού μοντέλου να είναι ίσος με τον αριθμό των εξισώσεων. Ο περιορισμός αυτός εξηγεί την ανάγκη ύπαρξης $E - 1$ συνοριακών συνθηκών θερμοκρασίας. Ο αριθμός πρέπει να είναι αυτός, έτσι ώστε ο συνολικός αριθμός των θερμικών εξισώσεων να είναι $2L$, δηλαδή ίσος με τον αριθμό των αγνώστων για το θερμικό μοντέλο.

4.6.6. Επίλυση θερμικού μοντέλου με τη Μέθοδο Αντιστροφής Μητρώου

Η επίλυση του θερμικού μοντέλου είναι πιο απλή από την επίλυση του υδραυλικού μοντέλου, καθώς το θερμικό μοντέλο διέπεται από ένα σύστημα εξισώσεων γραμμικά εξαρτώμενων από τη θερμοκρασία και επομένως δεν απαιτείται επαναληπτική μέθοδος για την επίλυσή του. Αντίθετα επιλέχθηκε μία πιο απλή και άμεση μέθοδος, η λεγόμενη Μέθοδος Αντιστροφής Μητρώου.

Έστω ότι υπάρχει ένα σύστημα n γραμμικών εξισώσεων με n αγνώστους:

$$\begin{cases} \alpha_{11} \cdot x_1 + \alpha_{12} \cdot x_2 + \dots + \alpha_{1n} \cdot x_n = b_1, \\ \alpha_{21} \cdot x_1 + \alpha_{22} \cdot x_2 + \dots + \alpha_{2n} \cdot x_n = b_2, \\ \vdots \\ \alpha_{n1} \cdot x_1 + \alpha_{n2} \cdot x_2 + \dots + \alpha_{nn} \cdot x_n = b_n, \end{cases} \quad (4.46)$$

$$\text{Ορίζοντας: } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \dots & \alpha_{1n} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \dots & \alpha_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{n1} & \alpha_{n2} & \dots & \alpha_{nn} \end{bmatrix}, \mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \text{ και } \mathbf{b} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix}$$

Τότε οι άγνωστοι είναι το διάνυσμα \mathbf{x} , ενώ το μητρώο \mathbf{A} (μητρώο συντελεστών) και το διάνυσμα \mathbf{b} είναι ήδη γνωστά. Η εξίσωση εκφράζεται στη γενική της μορφή ως:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b} \quad (4.47)$$

Πολλαπλασιάζοντας και τα δύο μέλη της εξίσωσης με το αντίστροφο μητρώο του \mathbf{A} , προκύπτει:

$$\mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{b} \quad (4.48)$$

Ωστόσο ισχύει ότι: $\mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{A} = \mathbf{I}$, δηλαδή το μοναδιαίο μητρώο. Επιπλέον ισχύει ότι: $\mathbf{I} \cdot \mathbf{X} = \mathbf{X}$, επειδή ο πολλαπλασιασμός οποιουδήποτε μητρώου με το μοναδιαίο μητρώο ιδίων διαστάσεων δεν επηρεάζει το μητρώο. Επομένως προκύπτει ότι:

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{b} \quad (4.49)$$

Αυτό το αποτέλεσμα σημαίνει ότι για να επιλυθεί ένα σύστημα εξισώσεων με τη Μέθοδο Αντιστροφής Μητρώου, το μόνο που χρειάζεται είναι να εκφραστούν οι εξισώσεις σε μορφή μητρώων, να υπολογιστεί το αντίστροφο του μητρώου συντελεστών και τελικά να πραγματοποιηθεί ένας πολλαπλασιασμός μητρώων.

Το τελικό αποτέλεσμα της επίλυσης του υδραυλικού μοντέλου είναι το διάνυσμα \mathbf{T}^* , το οποίο περιέχει τις τελικές τιμές θερμοκρασίας εισόδου και εξόδου όλων των στοιχείων.

$$\mathbf{T}^* = \begin{bmatrix} T_{in_i} \\ T_{out_i} \end{bmatrix}, \quad 1 \leq i \leq L \quad (4.50)$$

Η μέθοδος αντιστροφής μητρώου, όπως και η μέθοδος Newton – Raphson, βασίζονται στην κατασκευή και αντιστροφή ενός μητρώου. Προκειμένου το μητρώο συντελεστών της μεθόδου να είναι αντιστρέψιμο θα πρέπει, όπως ισχύει και με το Ιακωβιανό Μητρώο, να είναι τετραγωνικό. Θα πρέπει να είναι, δηλαδή, διαστάσεων $n \times n$. Ο περιορισμός αυτός ικανοποιείται με την κατάλληλη θέσπιση συνοριακών συνθηκών θερμοκρασίας, όπως αναφέρθηκε στις προηγούμενες παραγράφους.

4.6.7. Αρχικές συνθήκες (initial conditions) θερμικού μοντέλου

Ως αρχικές θερμοκρασιακές τιμές κάθε στοιχείου τίθενται αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στο υδραυλικό πρόβλημα και που προέκυψαν από τον αλγόριθμο εκτίμησης αρχικών τιμών, που αναλύθηκε στην Ενότητα 4.5.6.

$$\mathbf{T}_0 = \begin{bmatrix} T_{in_i} \\ T_{out_i} \end{bmatrix}, \quad 1 \leq i \leq L$$

Για τις θερμικές εξισώσεις ενδιαφέρον παρουσιάζουν μόνο οι τιμές της θερμοκρασίας.

Λόγω της αποσύζευξης του συνολικού προβλήματος, για την επίλυση του θερμικού απαιτούνται μόνο αρχικές τιμές παροχής για κάθε στοιχείο και πίεσης για κάθε κόμβο, τα οποία θα πρέπει να προκύψουν από την επίλυση του προηγούμενου υδραυλικού προβλήματος. Όπως είχε αναφερθεί στην Ενότητα 4.4.3, το διάνυσμα \mathbf{x}_1 , που περιέχει τα αποτελέσματα παροχής σε κάθε στοιχείο και πίεσης σε κάθε κόμβο, από την υδραυλική προσομοίωση, εισάγεται στο θερμικό μοντέλο. Στο θερμικό πρόβλημα, όμως, οι παροχές όλων των στοιχείων λειτουργούν ως σταθερές και αυτό επιλύεται μόνο ως προς τις θερμοκρασίες των άκρων κάθε στοιχείου.

$$\mathbf{x}_0 = \mathbf{x}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_i \\ \mathbf{p}_j \end{bmatrix} = \text{σταθερά}, \quad \begin{matrix} 1 \leq i \leq L \\ 1 \leq j \leq N \end{matrix}$$

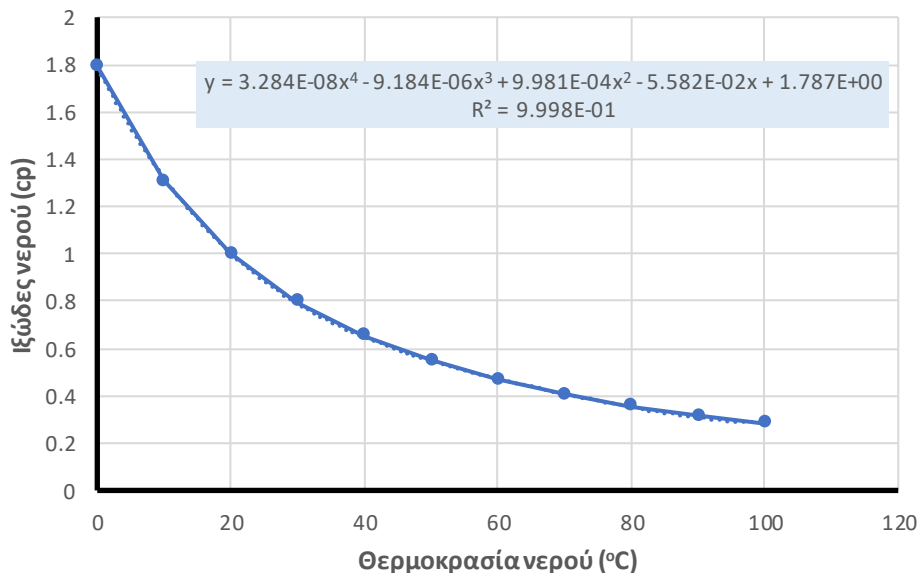
4.7. Υπολογισμός πυκνότητας και ιξώδους

Έως τώρα η πυκνότητα και το ιξώδες του νερού στην ανάλυση των εξισώσεων των μοντέλων είχαν θεωρηθεί γνωστές. Οι ιδιότητες αυτές όμως δεν είναι σταθερές αλλά μεταβάλλονται με την πίεση και τη θερμοκρασία. Δεδομένης της εφαρμογής του μοντέλου για ένα γεωθερμικό πεδίο χαμηλής ενθαλπίας, είναι γνωστό ότι το ρευστό που θα μεταφέρεται μέσα στους αγωγούς θα είναι μονοφασικό νερό, το οποίο θεωρείται πρακτικά ασυμπίεστο. Το δεδομένο αυτό είναι αρκετό για να θεωρηθεί η επίδραση της πίεσης αρκετά ασθενής, σε βαθμό που να είναι δυνατή η παραδοχή ότι η επιρροή της είναι αμελητέα. Επομένως η πυκνότητα και το ιξώδες θα πρέπει να εκφραστούν ως συνάρτηση της θερμοκρασίας του νερού και κατά συνέπεια θα πρέπει να οριστούν οι σχέσεις $\mu(\bar{T}_{el})$ και $\rho(\bar{T}_{el})$.

Παρακάτω παρατίθενται πειραματικά δεδομένα μετρήσεων του ιξώδους και της πυκνότητας (Πίνακες 4.2 και 4.3) για συγκεκριμένη πίεση. Σημειώνεται ότι η θερμοκρασία ενός γεωθερμικού πεδίου δεν ξεπερνά τους 90°C.

Πίνακας 4.2: Τιμές ιξώδους νερού για θερμοκρασιακό εύρος 0-100 °C [32].

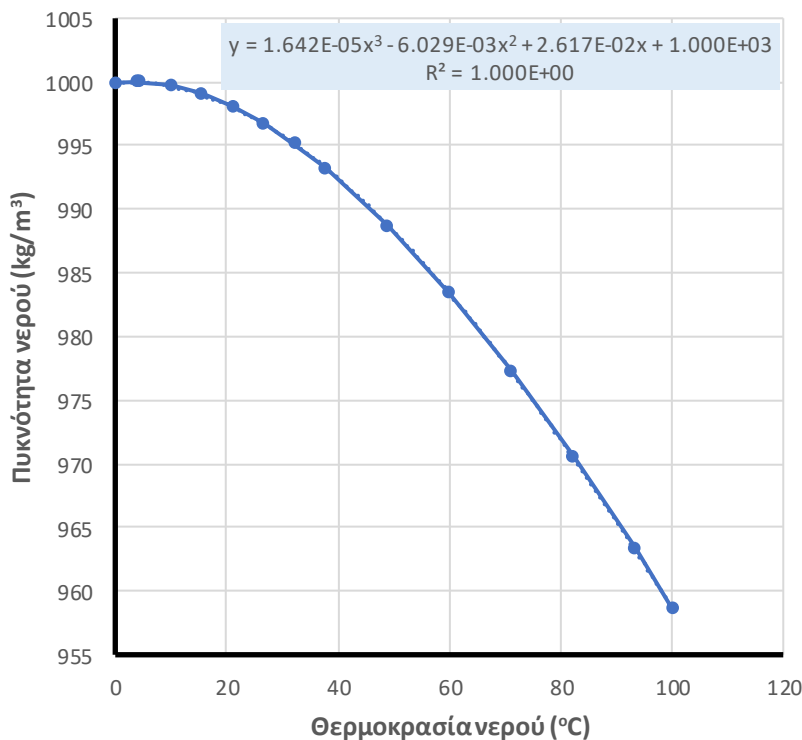
Θερμοκρασία °C	Ιξώδες cp
0	1.793
10	1.308
20	1.002
30	0.7978
40	0.6531
50	0.5471
60	0.4658
70	0.4044
80	0.355
90	0.315
100	0.2822



Εικόνα 4.9: Διάγραμμα σχέσης θερμοκρασίας - ιξώδους νερού.

Πίνακας 4.3: Τιμές πυκνότητας νερού για θερμοκρασιακό εύρος 0-100 °C [32].

Θερμοκρασία °C	Πυκνότητα kg/m ³
0	999.87
4	1000.00
4.4	999.99
10	999.75
15.6	999.07
21	998.02
26.7	996.69
32.2	995.10
37.8	993.18
48.9	988.70
60	983.38
71.1	977.29
82.2	970.56
93.3	963.33
100	958.65



Εικόνα 4.10: Διάγραμμα σχέσης θερμοκρασίας - πυκνότητας νερού.

Προσαρμόζοντας μια πολυωνυμική συνάρτηση στο διάγραμμα σχέσης ιξώδους – θερμοκρασίας προκύπτει η ακόλουθη:

$$\mu(\bar{T}_{el}) = 3.284 \cdot 10^{-8} \bar{T}_{el}^4 - 9.184 \cdot 10^{-6} \bar{T}_{el}^3 + 9.981 \cdot 10^{-4} \bar{T}_{el}^2 - 5.582 \cdot 10^{-2} \bar{T}_{el} + 1.787, \quad (4.51)$$

όπου:

- μ : το ιξώδες του νερού στις συνθήκες που επικρατούν στο εσωτερικό του αγωγού (cp)
- \bar{T}_{el} : η μέση θερμοκρασία στο εσωτερικό του αγωγού (°C)

Αντίστοιχα για το διάγραμμα σχέσης πυκνότητας – θερμοκρασίας προκύπτει η πολυωνυμική εξίσωση:

$$\rho(\bar{T}_{el}) = 1.642 \cdot 10^{-5} \cdot \bar{T}_{el}^3 - 6.029 \cdot 10^{-3} \cdot \bar{T}_{el}^2 + 2.617 \cdot 10^{-2} \cdot \bar{T}_{el} + 10^3, \quad (4.52)$$

όπου:

- ρ : η πυκνότητα του νερού στις συνθήκες που επικρατούν στο εσωτερικό του αγωγού (kg/m³)
- \bar{T}_{el} : η μέση θερμοκρασία στο εσωτερικό του αγωγού (°C)

4.8. Παράδειγμα εφαρμογής μεθοδολογίας επίλυσης

Στην ενότητα αυτή παρατίθεται ένα παράδειγμα για να γίνει αντιληπτή η περιγραφή της γεωμετρίας ενός απλού δικτύου και η ανάπτυξη των εξισώσεων που διέπουν τη μοντελοποίησή του.

Έστω το απλό δίκτυο, που περιγράφηκε στην Ενότητα 4.2, το οποίο αποτελείται από 4 κόμβους και 3 στοιχεία. Οι κόμβοι 1, 2 και 4 είναι οι εξωτερικοί κόμβοι και ο κόμβος 3 είναι ο εσωτερικός. Στο δίκτυο, οι εξωτερικοί κόμβοι 1 και 2 είναι κόμβοι εισόδου νερού στο σύστημα και ο κόμβος 4 είναι ο τερματικός κόμβος εξόδου από το δίκτυο. Η ροή στο εσωτερικό του δικτύου καθορίζεται από τη συνδεσμολογία του κάθε στοιχείου (από τον 1^ο στο 2^ο κόμβο). Στον Πίνακα 4.4 παρατίθενται οι κόμβοι και οι συνδεσμολογία των στοιχείων.

Πίνακας 4.4: Γεωμετρία και συνδεσμολογία αγωγών παραδείγματος δικτύου που αποτελείται από 3 στοιχεία και 4 κόμβους.

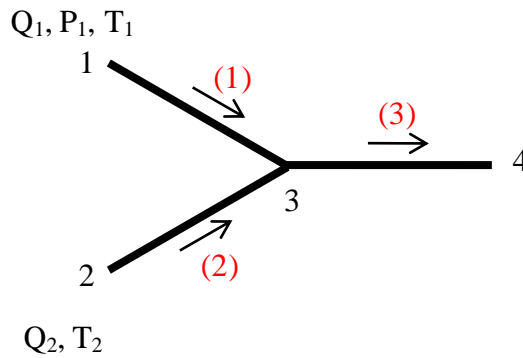
Κόμβοι	Είδος κόμβου	Συνδεσμολογία		
		Στοιχεία	1ος Κόμβος	2ος Κόμβος
1	Εξωτερικός (Εισόδου)			
2	Εξωτερικός (Εισόδου)	1	1	3
3	Εσωτερικός	2	2	3
4	Εξωτερικός (Εξόδου)	3	3	4

Στο δίκτυο υπάρχουν 3 εξωτερικοί κόμβοι, οπότε σύμφωνα με τη γεωμετρία του μοντέλου, όπως αυτή περιγράφηκε στην ενότητα Γεωμετρία μοντέλου απαιτούνται 3 συνοριακές συνθήκες παροχής (Q) και πίεσης (P), εκ των οποίων η μια πρέπει να είναι οπωσδήποτε πίεσης, καθώς και 2 συνοριακές συνθήκες θερμοκρασίας (T) (Πίνακας 4.5).

Πίνακας 4.5: Συνοριακές συνθήκες που έχουν ορισθεί στο παράδειγμα του δικτύου που αποτελείται από 3 στοιχεία και 4 κόμβους.

Κόμβος	Συνοριακή συνθήκη
1	Q_1
2	Q_2
1	P_1
1	T_1
2	T_2

Στην Εικόνα 4.11 αποτυπώνεται το σχεδιάγραμμα του δικτύου, στο οποίο οι κόμβοι αναγράφονται με μαύρο χρώμα, τα στοιχεία με κόκκινο και τα βέλη υποδηλώνουν τη φορά της ροής, όπως αυτή ορίστηκε από τη συνδεσμολογία.



Εικόνα 4.11: Σχηματική απεικόνιση παραδείγματος δικτύου που αποτελείται από 3 στοιχεία και 4 κόμβους.

Υδραυλικό μοντέλο

Για το υδραυλικό πρόβλημα υπάρχουν οι εξής άγνωστοι:

- ❖ Μία παροχή για κάθε στοιχείο (3 άγνωστοι)
- ❖ Μία πίεση για κάθε κόμβο (4 άγνωστοι)

Οπότε απαιτείται ένα διάνυσμα \mathbf{x}_0 , μεγέθους 7×1 που περιέχει τις αρχικές τιμές παροχής για κάθε στοιχείο και πίεσης για κάθε κόμβο:

$$\mathbf{x}_0 = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{bmatrix}$$

Για το υδραυλικό πρόβλημα προκύπτουν οι εξής εξισώσεις:

- Εξισώσεις στοιχείων:

$$p_1 - p_3 - \lambda_1 \cdot \frac{L_1}{D_1} \cdot \frac{\rho(\bar{T}_1)}{2} \cdot \left(\frac{4 \cdot q_1}{\pi \cdot D_1^2} \right)^2 + \rho(\bar{T}_1) \cdot g \cdot (h_1 - h_3) = 0$$

$$p_2 - p_3 - \lambda_2 \cdot \frac{L_2}{D_2} \cdot \frac{\rho(\bar{T}_2)}{2} \cdot \left(\frac{4 \cdot q_2}{\pi \cdot D_2^2} \right)^2 + \rho(\bar{T}_2) \cdot g \cdot (h_2 - h_3) = 0$$

$$p_3 - p_4 - \lambda_3 \cdot \frac{L_3}{D_3} \cdot \frac{\rho(\bar{T}_3)}{2} \cdot \left(\frac{4 \cdot q_3}{\pi \cdot D_3^2} \right)^2 + \rho(\bar{T}_3) \cdot g \cdot (h_3 - h_4) = 0$$

όπου:

- λ_i : ο συντελεστής τριβής κάθε αγωγού
- L_i : το μήκος του κάθε στοιχείου
- \bar{T}_i : η μέση θερμοκρασία στο εσωτερικό του αγωγού

- q_i : η παροχή σε κάθε στοιχείο
- p_i : η πίεση των κόμβων με τους οποίους συνδέεται κάθε στοιχείο
- g : η επιτάχυνση της βαρύτητας
- h_i : το υψόμετρο του άκρου του αγωγού

- Εξισώσεις εσωτερικών κόμβων:

$$q_1 + q_2 - q_3 = 0$$

όπου q_i οι παροχές των στοιχείων που εκβάλλουν και αναχωρούν από τον εσωτερικό κόμβο

- Εξισώσεις εξωτερικών κόμβων:

- Παροχές:

$$q_1 - Q_1 = 0$$

$$q_2 - Q_2 = 0$$

όπου q_i οι παροχές των στοιχείων που συνδέονται με τους εξωτερικούς κόμβους που διαθέτουν συνοριακές συνθήκες παροχής και Q_i η συνοριακή συνθήκη παροχής στους αντίστοιχους εξωτερικούς κόμβους

- Πιέσεις:

$$p_1 - P_1 = 0$$

όπου p_i η πίεση των εξωτερικών κόμβων που διαθέτουν συνοριακές συνθήκες πίεσης και P_i η συνοριακή συνθήκη πίεσης στους αντίστοιχους κόμβους

Επομένως για το υδραυλικό πρόβλημα προκύπτουν 7 άγνωστοι και 7 εξισώσεις και η εφαρμογή της πρώτης επανάληψης της $N - R$ σε μητρική μορφή εκφράζεται ως:

$$\mathbf{x}_1 = \mathbf{x}_0 - \begin{bmatrix} \frac{\partial f(q_1, p_1, p_3)}{\partial q_1} & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & \frac{\partial f(q_2, p_2, p_3)}{\partial q_2} & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial f(q_3, p_3, p_4)}{\partial q_3} & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} f(\mathbf{x}_0)$$

Η νέα εκτίμηση της λύσης του υδραυλικού προβλήματος θα είναι ένα διάνυσμα \mathbf{x}_1 , μεγέθους 7×1 που περιέχει τις ανανεωμένες τιμές παροχής για κάθε στοιχείο και πίεσης για κάθε κόμβο:

$$\mathbf{x}_1 = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{bmatrix}$$

Θερμικό μοντέλο

Οι άγνωστοι του θερμικού προβλήματος είναι οι θερμοκρασίες στα άκρα όλων των στοιχείων ($2 \cdot 3$ άγνωστοι) και επομένως αποθηκεύονται σε ένα διάνυσμα \mathbf{T}_0 , μεγέθους 6×1 που περιέχει τις αρχικές τιμές θερμοκρασίας των δύο άκρων κάθε αγωγού:

$$\mathbf{T}_0 = \begin{bmatrix} T_{in_1} \\ T_{out_1} \\ T_{in_2} \\ T_{out_2} \\ T_{in_3} \\ T_{out_3} \end{bmatrix}$$

Για το θερμικό πρόβλημα προκύπτουν οι εξής εξισώσεις:

- Εξισώσεις στοιχείων:

$$\exp(2R_1L_1)T_{in_1} - T_{out_1} = \exp[(2R_1L_1) - 1]T_{\infty_1}$$

$$\exp(2R_2L_2)T_{in_2} - T_{out_2} = \exp[(2R_2L_2) - 1]T_{\infty_2}$$

$$\exp(2R_3L_3)T_{in_3} - T_{out_3} = \exp[(2R_3L_3) - 1]T_{\infty_3}$$

όπου:

- T_{in_i} : η θερμοκρασία στο πρώτο άκρο κάθε αγωγού
- T_{out_i} : η θερμοκρασία στο δεύτερο άκρο κάθε αγωγού
- T_{∞_i} : η θερμοκρασία περιβάλλοντος για κάθε αγωγό
- L_i : το μήκος κάθε αγωγού
- $2R_i = -\frac{U_i \cdot \pi \cdot D_i}{\rho(\bar{T}_i) \cdot q_i \cdot Cp}$

όπου:

- ❖ U_i : ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας για κάθε στοιχείο
 - ❖ D_i : η εσωτερική διάμετρος κάθε αγωγού
 - ❖ q_i : η παροχή σε κάθε αγωγό
 - ❖ $\rho(\bar{T}_i)$: η πυκνότητα του νερού για τις συνθήκες μέσης θερμοκρασίας \bar{T}_i κάθε αγωγού
 - ❖ Cp : η ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού
- Εξισώσεις εσωτερικών κόμβων:

$$q_1T_{out_1} + q_2T_{out_2} - q_3T_{in_3} = 0$$

όπου q_i οι παροχές των στοιχείων που εκβάλουν ή αναχωρούν από τον εσωτερικό κόμβο, T_{out_i} η θερμοκρασία του δεύτερου κόμβου με τον οποίο συνδέονται τα στοιχεία που εκβάλουν στον εσωτερικό κόμβο και T_{in_i} η θερμοκρασία του πρώτου κόμβου με τον οποίο συνδέονται τα στοιχεία που αναχωρούν από τον εσωτερικό κόμβο.

- Εξισώσεις εξωτερικών κόμβων

$$T_{in_1} = T_1$$

$$T_{in_2} = T_2$$

όπου T_{in_i} η θερμοκρασία του πρώτου κόμβου στην συνδεσμολογία κάθε στοιχείου που συνδέεται με έναν εξωτερικό κόμβο εισόδου που διαθέτει

συνοριακή συνθήκη θερμοκρασίας και T_i η συνοριακή συνθήκη θερμοκρασίας σε αυτόν τον εξωτερικό κόμβο

Επομένως για το θερμικό πρόβλημα προκύπτουν 6 άγνωστοι και 6 εξισώσεις και σε μητρική μορφή εκφράζεται ως:

$$\begin{bmatrix} \exp(2R_1L_1) & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \exp(2R_2L_2) & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \exp(2R_3L_3) & -1 \\ 0 & q_1 & 0 & q_2 & -q_3 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{in_1} \\ T_{out_1} \\ T_{in_2} \\ T_{out_2} \\ T_{in_3} \\ T_{out_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \exp[(2R_1L_1) - 1]T_{\infty_1} \\ \exp[(2R_1L_1) - 1]T_{\infty_1} \\ \exp[(2R_1L_1) - 1]T_{\infty_1} \\ 0 \\ T_1 \\ T_2 \end{bmatrix}$$

Επομένως η λύση του θα είναι ένα διάνυσμα \mathbf{T}^* , μεγέθους 6 x 1 που περιέχει τις τελικές τιμές θερμοκρασίας για τα άκρα όλων των στοιχείων:

$$\mathbf{T}^* = \begin{bmatrix} T_{in_1} \\ T_{out_1} \\ T_{in_2} \\ T_{out_2} \\ T_{in_3} \\ T_{out_3} \end{bmatrix}$$

4.9. Σύγκλιση συζευγμένου μοντέλου

Το συζευγμένο μοντέλο που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία, διαχωρίζεται σε δύο επιμέρους μοντέλα, ένα υδραυλικό και ένα θερμικό, προκειμένου να είναι πιο εύκολη η επίλυσή του. Στην Ενότητα 4.4.3 έγινε κατανοητό ότι η επαναφορά της σύζευξης γίνεται με τις αλληπάλληλες επαναληπτικές επιλύσεις των δύο μοντέλων, μέχρι την τελική σύγκλιση του συζευγμένου προβλήματος.

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η σύγκλιση του ενιαίου, συζευγμένου προβλήματος, θα πρέπει είτε η λύση να σταματήσει να βελτιώνεται μεταξύ των διαδοχικών επαναλήψεων, είτε όλες οι εξισώσεις να ικανοποιούνται με επαρκή ακρίβεια. Οι συνθήκες αυτές υλοποιούνται ως εξής:

1. Για το υδραυλικό πρόβλημα: η νόρμα των διανυσμάτων \mathbf{x} ή $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ δύο συνεχόμενων επαναλήψεων πρέπει να είναι μικρότερες από μία επιτρεπτή τιμή ε για κάθε διάνυσμα, δηλαδή $|\mathbf{x}^{(v+1)} - \mathbf{x}^{(v)}| < 10^{-6}$ και $|\mathbf{f}(\mathbf{x}^{(v+1)}) - \mathbf{f}(\mathbf{x}^{(v)})| < 10^{-6}$.

2. Για το θερμικό πρόβλημα: η νόρμα του διανύσματος \mathbf{T} δύο διαδοχικών επαναλήψεων πρέπει να είναι μικρότερη από μία επιτρεπτή τιμή ε , δηλαδή:
- $$|\mathbf{T}^{(v+1)} - \mathbf{T}^{(v)}| < 10^{-2}.$$

4.10. Παραμετρική βελτιστοποίηση

Ένα δίκτυο μεταφοράς νερού σε ένα γεωθερμικό πεδίο χαμηλής ενθαλπίας είναι ένα σύνθετο σύστημα με πολλές παραμέτρους. Τα μόνα ασφαλή δεδομένα σε ένα τέτοιο δίκτυο είναι η παροχή, η πίεση και η θερμοκρασία στους κόμβους εισόδου και εξόδου από αυτό, δεδομένου ότι μετρούνται στο πεδίο. Οι συνοριακές συνθήκες είναι οι μοναδικές अपαράβατες τιμές που υπάρχουν και καθορίζουν τις συνθήκες που επικρατούν στο δίκτυο, καθώς είναι αυτές που μπορούν να μετρηθούν με ευκολία στο πεδίο. Σε ένα δίκτυο μεταφοράς γεωθερμικού νερού, όμως, μείζονος σημασίας είναι το θερμικό περιεχόμενό του και επομένως παρουσιάζεται μεγαλύτερη ανάγκη βελτιστοποίησης της θερμικής απώλειάς του. Αντίθετα, όπως θα αποδειχθεί και στην Ενότητα 5.6.3, σε ένα γεωθερμικό πεδίο χαμηλής ενθαλπίας δεν παρουσιάζεται ιδιαίτερα υψηλή πτώση πίεσης κατά μήκος των αγωγών του δικτύου του. Από την άλλη πλευρά το ίδιο το δίκτυο αποτελείται από αγωγούς διαφορετικών υδραυλικών και θερμικών χαρακτηριστικών και προδιαγραφών, γεγονός που προσδίδει ένα βαθμό αβεβαιότητας στα χαρακτηριστικά των στοιχείων που το συνθέτουν, ο οποίος δυσχεραίνει τη μοντελοποίηση του δικτύου με ακρίβεια. Δημιουργείται επομένως η ανάγκη τροποποίησης των αβέβαιων παραμέτρων του ενιαίου μοντέλου, έτσι ώστε αυτό να προσομοιώνει το δίκτυο με έναν τρόπο που να είναι κατά το δυνατόν πιο κοντά στην πραγματικότητα. Η ανάγκη αυτή ικανοποιείται με το τελικό τμήμα της ανάπτυξης ενός λογισμικού προσομοίωσης, που είναι η παραμετρική βελτιστοποίηση (Tuning).

Με τον όρο παραμετρική βελτιστοποίηση γενικά ορίζονται οι μέθοδοι, οι οποίες προσφέρουν έναν τρόπο αξιολόγησης και τροποποίησης συγκεκριμένων παραμέτρων με σκοπό την τελική δημιουργία ενός ακριβέστερου μοντέλου για τα δεδομένα μιας εφαρμογής. Η διαδικασία αυτή γίνεται με την “εκπαίδευση” του μοντέλου χρησιμοποιώντας κάποια πραγματικά δεδομένα αναφοράς και οι αβέβαιοι παράμετροι του μοντέλου τροποποιούνται έτσι ώστε το μοντέλο να προβλέπει τιμές κατά το δυνατόν πιο κοντά στα δεδομένα αναφοράς που έχουν μετρηθεί στο πεδίο. Στην παρούσα εργασία η βελτιστοποίηση προϋποθέτει την εκπαίδευση του μοντέλου

τροποποιώντας το συνολικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας των σωληνώσεων και χρησιμοποιώντας δεδομένα θερμότητας από τους κόμβους εξόδου του πεδίου. Το μοντέλο που προκύπτει από αυτή τη διαδικασία είναι εκπαιδευμένο να ανταποκρίνεται στις πραγματικές συνθήκες που επικρατούν στο συγκεκριμένο πεδίο για το οποίο βελτιστοποιήθηκε έτσι ώστε, εάν στο μέλλον αποφασιστεί να πραγματοποιηθεί οποιαδήποτε αλλαγή στο ήδη υπάρχον δίκτυο, τότε το λογισμικό της προσομοίωσης να μπορεί να εκτιμήσει με ακρίβεια τις μεταβολές που θα προκληθούν.

Η μαθηματική μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη εργασία για την “εκπαίδευση” του μοντέλου ήταν η μέθοδος καθόδου βασισμένη στην κλίση (gradient descent method). Η μέθοδος αυτή αποτελεί την απλούστερη μέθοδο βελτιστοποίησης και μπορεί να διατυπωθεί ως ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης μιας συνάρτησης σφάλματος ως προς ένα διάλυμα παραμέτρων. Προκειμένου να γίνει πλήρως κατανοητή η μεθοδολογία πρέπει να ορισθεί η συνάρτηση κόστους (cost function) και να εξηγηθεί η φιλοσοφία της μεθόδου και τα βήματα που πρέπει να ακολουθήσει ο αλγόριθμος έως ότου συγκλίνει μετά από τις απαραίτητες επαναλήψεις.

4.10.1. Συνάρτηση κόστους

Με τον όρο συνάρτηση κόστους εννοείται μία συνάρτηση, η οποία ποσοτικοποιεί το σφάλμα μεταξύ τιμών υπολογισμένων από το μοντέλο και καθορισμένων, μετρημένων στο πεδίο, τιμών και το αποδίδει με τη μορφή ενός πραγματικού αριθμού. Με σκοπό την ελαχιστοποίηση της συνάρτησης κόστους, οι αβέβαιες παράμετροι τροποποιούνται με τη χρήση του αλγορίθμου gradient descent. Όταν η συνάρτηση κόστους λάβει την ελάχιστη τιμή της, τότε οι αβέβαιες παράμετροι, στην προκειμένη περίπτωση ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας των αγωγών, θα έχουν λάβει κατάλληλες τιμές, έτσι ώστε η πρόβλεψη του μοντέλου για τη θερμοκρασία εξόδου του νερού από το δίκτυο να είναι κατά το δυνατόν πιο κοντά στην αντίστοιχη τιμή μετρούμενη στο πεδίο.

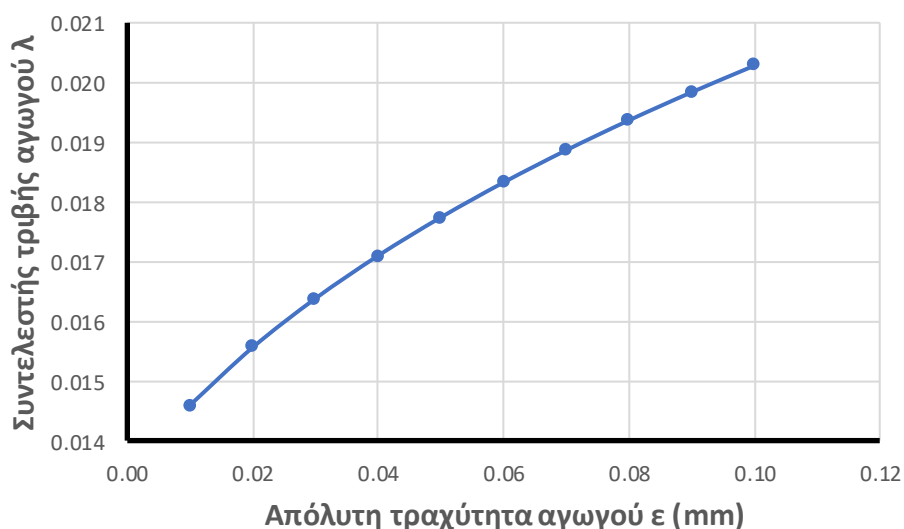
Προκειμένου να κατασκευαστεί η συνάρτηση κόστους για το ενιαίο μοντέλο (υδραυλικό και θερμικό), έτσι ώστε να γίνει η βελτιστοποίησή του, έπρεπε πρώτα να γίνει η επιλογή των παραμέτρων, που θα τροποποιούνται, και των πειραματικών δεδομένων, που θα χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση του μοντέλου. Όπως προαναφέρθηκε, τα πειραματικά δεδομένα που μπορούν να αξιοποιηθούν είναι αυτά

της πίεσης και της θερμοκρασίας στους τερματικούς εξωτερικούς κόμβους του δικτύου. Η επιλογή των παραμέτρων (υδραυλικών – θερμικών) πραγματοποιήθηκε μέσω του βαθμού συμβολής τους στη μεταβολή της πίεσης και της θερμοκρασίας στους κόμβους. Οι παράμετροι για τις οποίες υπήρχε αμφιβολία ήταν ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, η θερμοκρασία του εδάφους, η τραχύτητα του αγωγού, η μείωση της εσωτερικής διαμέτρου του αγωγού (λόγω ύπαρξης αλάτων) και η ειδική θερμοχωρητικότητα του ρευστού.

Η μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας του νερού κυμαίνεται στο εύρος 1-1.02 BTU/lb/°F και επομένως θεωρήθηκε αμελητέας σημασίας. Η μεταβολή της διατομής των σωληνώσεων κρίθηκε αδύνατο να προσομοιωθεί, λόγω απαίτησης μετρήσεων σε κόμβους του δικτύου, δεδομένων δηλαδή τα οποία δεν είναι διαθέσιμα. Η τραχύτητα των αγωγών εξαρτάται από την κατάσταση και τον βαθμό διάβρωσης του αγωγού και επηρεάζει το συντελεστή τριβής του αγωγού λ , που χρησιμοποιείται στην υδραυλική εξίσωση των στοιχείων. Προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδραση της τραχύτητας του αγωγού στο συντελεστή τριβής, ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία. Έστω ένας αγωγός εσωτερικής διαμέτρου 0.1 m, στον οποίο ρέει νερό παροχής 50 m³/h. Ο αριθμός Reynolds για τον εν λόγω αγωγό προκύπτει ίσος με 454894. Εξετάζεται ένα εύρος τιμών απόλυτης τραχύτητας 0.01 mm – 0.10 mm και κατασκευάζεται ο Πίνακας 4.6 και το διάγραμμα της Εικόνας 4.12, με βάση την εξίσωση Colebrook (4.14)

Πίνακας 4.6: Επίδραση της απόλυτης τραχύτητας στο συντελεστή τριβής βάσει της εξίσωσης Colebrook.

Απόλυτη τραχύτητα ϵ (mm)	Σχετική τραχύτητα k	Συντελεστής τριβής λ	Αριστερό Μέλος Εξίσωσης	1 ^{ος} προσθετός ΔME	2 ^{ος} προσθετός ΔME	Δεξί Μέλος Εξίσωσης
0.010	0.0001	0.01459	8.28	0.00005	0.00027	8.28
0.020	0.0002	0.01556	8.02	0.00004	0.00054	8.02
0.030	0.0003	0.01638	7.81	0.00004	0.00081	7.81
0.040	0.0004	0.01710	7.65	0.00004	0.00108	7.65
0.050	0.0005	0.01774	7.51	0.00004	0.00135	7.51
0.060	0.0006	0.01832	7.39	0.00004	0.00162	7.39
0.070	0.0007	0.01886	7.28	0.00004	0.00189	7.28
0.080	0.0008	0.01937	7.19	0.00004	0.00216	7.19
0.090	0.0009	0.01984	7.10	0.00004	0.00243	7.10
0.100	0.0010	0.02028	7.02	0.00004	0.00270	7.02



Εικόνα 4.12: Διάγραμμα σχέσης απόλυτης τραχύτητας αγωγού - συντελεστή τραχύτητας αγωγού.

Παρατηρείται ότι για αύξηση της τραχύτητας του αγωγού από 0.01 mm σε 0.1 mm ο συντελεστής τριβής μεταβάλλεται από 0.0145 σε 0.0200, δηλαδή αυξάνεται κατά

40%. Ο πρώτος προσθετός του δεξιού μέλους της εξίσωσης, που αντιπροσωπεύει την επίδραση του αριθμού Reynolds στον υπολογισμό του συντελεστή τριβής, παραμένει σταθερός σε όλο το εύρος τιμών τραχύτητας. Αντίθετα, ο δεύτερος προσθετός, που αντιπροσωπεύει την επίδραση της απόλυτης τραχύτητας στον υπολογισμό του συντελεστή τριβής, παρατηρείται ότι αυξάνεται ανάλογα με την αύξηση του ε . Ωστόσο όμως, η τιμή του λ μεταβάλλεται με λιγότερο ραγδαίο ρυθμό, που σημαίνει ότι η επίδραση του αριθμού Reynolds είναι ο κυρίαρχος παράγοντας που καθορίζει την τιμή του συντελεστή τριβής, ενώ η συμβολή της τραχύτητας είναι μικρότερη.

Ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας παρουσιάζει ένα μεγάλο εύρος τιμών, το οποίο, όπως είχε προαναφερθεί στην Ενότητα 4.6.2 κυμαίνεται από 0.1 BTU/hr/ft²/°F για υπεδαφικούς και μονωμένους αγωγούς, έως 100 BTU/hr/ft²/°F για μη μονωμένους και επιφανειακούς. Ο συντελεστής U είναι εξαιρετικά σημαντικός για τους υπολογισμούς των θερμοκρασιών στα άκρα των αγωγών και κατ' επέκταση για τον υπολογισμό της πυκνότητας και του ιξώδους του νερού. Επομένως η συμβολή του είναι καθοριστική τόσο για την ακριβή επίλυση του θερμικού, όσο και του υδραυλικού προβλήματος. Η θερμοκρασία του εδάφους, είναι μία άλλη παράμετρος που παρουσιάζει έναν βαθμό αβεβαιότητας, της τάξης των 3 – 5 °C, και επηρεάζει την θερμική εξίσωση των στοιχείων. Συνολικά, παρατηρήθηκε ότι ο συντελεστής U , είχε μεγαλύτερη επίδραση στο πρόβλημα της προσομοίωσης του δικτύου, ενώ ταυτόχρονα, οι τιμές του έφεραν το μεγαλύτερο βαθμό αβεβαιότητας.

Όπως θα αναλυθεί σε επόμενη Ενότητα, ο αλγόριθμος μπορεί να τροποποιεί έναν αριθμό παραμέτρων ίσο ή μικρότερο με το αριθμό των παρατηρούμενων δεδομένων πεδίου που έχει λάβει για την κατασκευή της συνάρτησης κόστους. Επομένως, δεδομένου ότι ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό την πίεση και τη θερμοκρασία στους κόμβους, αποφασίστηκε να επιλεγεί η βελτιστοποίησή του ως προς την τιμή της θερμοκρασίας στον τερματικό κόμβο εξόδου του νερού. Σε μελλοντική εξέλιξη του προγράμματος προσομοίωσης μπορεί να αναπτυχθεί περαιτέρω ο αλγόριθμος, έτσι ώστε να τροποποιείται και η τιμή της θερμοκρασίας εδάφους και τα πειραματικά δεδομένα πεδίου να περιλαμβάνουν και την τιμή της πίεσης στον τερματικό κόμβο καθώς και σε οποιονδήποτε άλλο κόμβο του δικτύου. Προκειμένου επομένως να υπάρχει μόνο μία παράμετρος, ορίστηκε ένας συντελεστής καθολικής τροποποίησης σ , ο οποίος μεταβάλλει ομοιόμορφα τις τιμές των U . Έτσι, εάν η αρχικά ορισμένη τιμή του συνολικού συντελεστή μεταφοράς

θερμότητας είναι ίση με U , τότε η χρησιμοποιούμενη από το λογισμικό θα ισούται με $\sigma \cdot U$. Κατά συνέπεια, εάν η αρχική τιμή του U οδηγεί σε υπολογιζόμενη θερμοκρασία εξόδου του νερού μεγαλύτερη από τη μετρημένη, αυτό σημαίνει ότι το λογισμικό εκτιμά ότι οι θερμικές απώλειες του δικτύου είναι μικρότερες από τις πραγματικές και επομένως ο πολλαπλασιαστής σ θα πρέπει να λάβει τιμή μεγαλύτερη της μονάδας.

Στη γενική περίπτωση θεωρείται η παρακάτω συνάρτηση, η οποία εκφράζει το ολικό μοντέλο που έχει κατασκευαστεί:

$$h(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{x}), \quad (4.53)$$

η οποία έχει ως μεταβλητές το διάνυσμα $\boldsymbol{\theta}$, το οποίο περιέχει τις παραμέτρους προς βελτιστοποίηση, δηλαδή το συντελεστή τροποποίησης σ , και \mathbf{x} , που περιέχει τα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του μοντέλου, τα οποία δεν επηρεάζονται από τη μεταβολή του συντελεστή τροποποίησης και επομένως παραμένουν σταθερά κατά της διάρκεια της βελτιστοποίησης.

Η συνάρτηση κόστους, συχνά συμβολίζεται ως J , έχει μεταβλητές το διάνυσμα $\boldsymbol{\theta}$ και τυπικά είναι της μορφής:

$$J(\boldsymbol{\theta}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1} (h(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{x}_i) - y_i)^2, \quad (4.54)$$

όπου y είναι η παρατηρούμενες τιμές, όπως η τιμή της θερμοκρασίας στον τερματικό κόμβο. Η άθροιση αναφέρεται στην περίπτωση που υπάρχουν διαθέσιμες περισσότερες από μία μετρήσεις, όπως, για παράδειγμα, επανειλημμένες μετρήσεις της θερμοκρασίας εξόδου του νερού y_i για διάφορες συνθήκες λειτουργίας του δικτύου \mathbf{x}_i . Προφανώς ο στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης κόστους, έτσι ώστε το μοντέλο $h(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{x}_i)$ να παράγει εκτιμήσεις κατά το δυνατόν πιο κοντά στις πειραματικά μετρημένες y_i . Μαθηματικά αυτό εκφράζεται ως:

$$\boldsymbol{\theta}^* = \arg \min_{\boldsymbol{\theta}} J(\boldsymbol{\theta}), \quad (4.55)$$

όπου $\boldsymbol{\theta}^*$ η βέλτιστη τιμή των παραμέτρων, δηλαδή του συντελεστή τροποποίησης, έτσι ώστε η συνάρτηση κόστους να ελαχιστοποιείται.

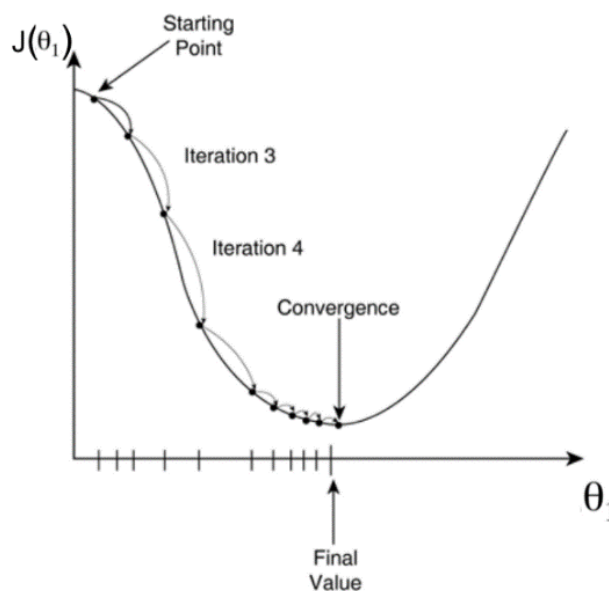
Ακόμα επισημαίνεται ότι γενικά το αποτέλεσμα της συνάρτησης κόστους είναι το άθροισμα των τετραγώνων της διαφοράς των εκτιμήσεων του μοντέλου και των πειραματικών δεδομένων από το πεδίο. Για μαθηματικούς λόγους, εάν οι διαθέσιμες πειραματικές μετρήσεις είναι n , τότε οι παράμετροι που βελτιστοποιούνται,

προκειμένου το μοντέλο να επιβεβαιώσει τις μετρήσεις κατά το δυνατόν καλύτερα, θα πρέπει να είναι n ή λιγότερες. Εάν αυτό δεν ισχύει, τότε το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης θα ήταν μία τυχαία, εκ των άπειρων μετρήσεων.

4.10.2. Η μέθοδος gradient descent

Η μέθοδος gradient descent είναι ένας επαναληπτικός αλγόριθμος ο οποίος χρησιμοποιεί την κλίση της συνάρτησης κόστους $J(\theta)$ ως προς τις παραμέτρους θ του μοντέλου, με απώτερο σκοπό την ελαχιστοποίηση της συνάρτησης κόστους. Προκειμένου να βρεθεί το τοπικό ελάχιστο με τη μέθοδο του gradient descent, ο αλγόριθμος ξεκινά από ένα σημείο θ_0 καθορισμένο από το χρήστη. Στην παρούσα εργασία θεωρήθηκε αρχική τιμή συντελεστή τροποποίησης $\sigma = 1$, έτσι ώστε οι τιμές U να είναι αυτές που ορίστηκαν αρχικά από τον χρήστη κατά την κατασκευή του μοντέλου. Στη συνέχεια ο αλγόριθμος εκτελεί βήματα προς την αντίθετη κατεύθυνση της κλίσης (gradient) της συνάρτησης κόστους, ακολουθώντας την παρακάτω μεθοδολογία (Εικόνα 4.13):

- Βήμα 1: υπολογισμός της κλίσης της συνάρτησης κόστους, δηλαδή της πρώτης παραγώγου της συνάρτησης κόστους ($\frac{\partial J(\theta)}{\partial \theta}$)
- Βήμα 2: μετακίνηση κατά ένα βήμα προς την κατεύθυνση αντίθετη της κλίσης
- Βήμα 3: έλεγχος σύγκλισης και επιστροφή στο Βήμα 1



Εικόνα 4.13: Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας Gradient descent [33].

Η πρώτη παράγωγος της συνάρτησης είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του ελάχιστου σημείου. Η παράγωγος είναι μία έννοια από τον απειροστικό λογισμό και αναφέρεται στην κλίση της συνάρτησης σε οποιοδήποτε σημείο. Η κλίση είναι απαραίτητη προκειμένου να βρεθεί η κατεύθυνση στην οποία θα μεταβληθεί ο συντελεστής τροποποίησης σ των συντελεστών U , έτσι ώστε η συνάρτηση κόστους να λάβει μικρότερη τιμή στην επόμενη επανάληψη.

Η πρώτη παράγωγος της συνάρτησης κόστους, όπως αυτή ορίστηκε από την εξίσωση (4.54), είναι:

$$\frac{\partial J(\boldsymbol{\theta})}{\partial \boldsymbol{\theta}} = \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{\theta}} \frac{1}{2} \sum_{i=1} (h(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{x}_i) - y_i)^2, \quad (4.56)$$

Εφαρμόζοντας τον κανόνα της αλυσίδας στην παραπάνω παράγωγο (4.56) προκύπτει:

$$\frac{\partial J(\boldsymbol{\theta})}{\partial \boldsymbol{\theta}} = \sum_{i=1} (h(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{x}_i) - y_i) \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{\theta}} h(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{x}_i), \quad (4.57)$$

Η παράγωγος $\frac{\partial J(\boldsymbol{\theta})}{\partial \boldsymbol{\theta}}$, στην παρούσα περίπτωση ως προς το συντελεστή τροποποίησης σ των τιμών U δείχνει την ευαισθησία της συνάρτησης κόστους σε σχέση με την παράμετρο $\boldsymbol{\theta}$, ή αλλιώς, τον τρόπο με τον οποίο αυτή επηρεάζει το αποτέλεσμα της συνάρτησης. Η παράγωγος $\frac{\partial}{\partial \boldsymbol{\theta}} h(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{x}_i)$ υπολογίζεται αριθμητικά μέσω της προσέγγισης της κεντρικής διαφοράς, σύμφωνα με την εξίσωση (4.27):

$$\frac{\partial}{\partial \boldsymbol{\theta}} h(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{x}_i) = \frac{h(\boldsymbol{\theta} + \delta \boldsymbol{\theta}, \mathbf{x}_i) - h(\boldsymbol{\theta} - \delta \boldsymbol{\theta}, \mathbf{x}_i)}{2\delta \boldsymbol{\theta}}, \quad (4.58)$$

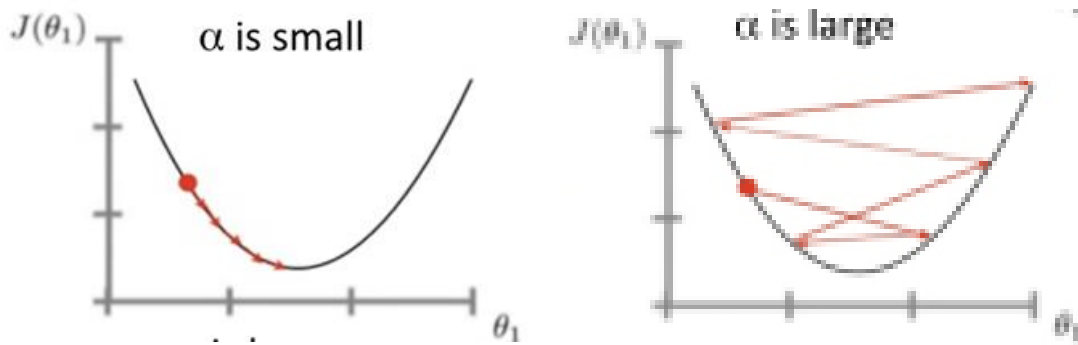
όπου $\delta \boldsymbol{\theta}$ ένα πολύ μικρό διάστημα.

Έχοντας προσδιορίσει την παράγωγο $\frac{\partial}{\partial \boldsymbol{\theta}} h(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{x}_i)$ και επομένως την κλίση της συνάρτησης κόστους $\frac{\partial J(\boldsymbol{\theta})}{\partial \boldsymbol{\theta}}$, σε κάθε επανάληψη της gradient descent οι τιμές των αβέβαιων παραμέτρων, στην προκειμένη περίπτωση, του συντελεστή σ , ενημερώνονται με βάση τη σχέση:

$$\boldsymbol{\theta}^{(v+1)} = \boldsymbol{\theta}^v - \alpha \cdot \frac{\partial J(\boldsymbol{\theta})}{\partial \boldsymbol{\theta}}, \quad (4.59)$$

όπου v η επανάληψη της gradient descent και α ο ρυθμός εκπαίδευσης (learning rate) του αλγορίθμου. Το μέγεθος των βημάτων με τα οποία ανανεώνεται η τιμή των

παραμέτρων ονομάζεται ρυθμός εκπαίδευσης (α). Η τιμή του ρυθμού εκπαίδευσης δίνει στον χρήστη έλεγχο του ρυθμού με τον οποίο αλλάζουν τα βήματα.



Εικόνα 4.14: (α) Επιλογή πολύ μικρού ρυθμού εκπαίδευσης. (β) Επιλογή πολύ μεγάλου ρυθμού εκπαίδευσης. [33]

Ένας πολύ μεγάλος ρυθμός εκπαίδευσης (Εικόνα 4.14.β) καλύπτει μεγαλύτερο εύρος της συνάρτησης με κάθε βήμα, αλλά κρύβει τον κίνδυνο υπερπήδησης του τοπικού ελαχίστου, επειδή η κλίση της καμπύλης της συνάρτησης κόστους αλλάζει διαρκώς. Από την άλλη πλευρά, ένας πολύ μικρός ρυθμός εκπαίδευσης (Εικόνα 4.14.α), δίνει την ικανότητα στον αλγόριθμο να κινηθεί με ασφάλεια προς την αντίθετη κατεύθυνση της κλίσης, καθώς γίνονται διαρκώς υπολογισμοί σε πολύ μικρά $\delta\theta$. Γενικά μιλώντας μία μικρή τιμή α είναι ασφαλέστερη και προτιμότερη από μία μεγάλη. Ο υπολογισμός της κλίσης όμως κάθε φορά είναι μία χρονοβόρα διαδικασία, επομένως με μικρό ρυθμό θα χρειαστεί περισσότερος χρόνος υπολογισμού, προκειμένου να συγκλίνει ο αλγόριθμος. Η χρυσή τομή είναι η επιλογή ενός α που να συνδυάζει μια καλή ακρίβεια υπολογισμών και έναν ικανοποιητικό χρόνο ολοκλήρωσης των υπολογισμών. Τυπικές τιμές του ρυθμού εκπαίδευσης είναι: 0.001, 0.003, 0.01, 0.03, 0.1, 0.3. Φυσικά επιλέγεται κάθε φορά η τιμή που λειτουργεί πιο αρμονικά με το εκάστοτε μοντέλο.

Στην συγκεκριμένη εργασία εξετάστηκε ένα εύρος τιμών α : 0.01 – 0.4 και καταγράφηκαν οι αντίστοιχες επαναλήψεις για τη βελτιστοποίηση ενός δικτύου με 9 στοιχεία και 10 κόμβους, το οποίο περιγράφεται αναλυτικότερα στο Κεφάλαιο 5. Στον Πίνακα 4.7 παρατίθενται τα αποτελέσματα:

Πίνακας 4.7: Αριθμοί επαναλήψεων βελτιστοποίησης αβέβαιων παραμέτρων δικτύου για εύρος τιμών ρυθμού εκπαίδευσης 0.01-0.4.

Ρυθμός εκπαίδευσης (α)	Αριθμός επαναλήψεων
0.01	Αποτυχία σύγκλισης, λόγω υπερβολικά αργής εκπαίδευσης
0.05	52
0.1	25
0.2	11
0.3	6
0.4	3

Παρατηρείται επομένως ότι ο ελάχιστος αριθμός επαναλήψεων σημειώθηκε με τιμή $\alpha = 0.4$. Ωστόσο σε αυτή την τιμή ο ρυθμός εκπαίδευσής ήταν ήδη μεγάλος και υπήρχε ο κίνδυνος να μην επιτευχθεί η σύγκλιση. Επίσης αξίζει να δοθεί σημασία στην τιμή 0.01, η οποία έφτασε το επιτρεπτό όριο, από το πρόγραμμα, των 100 επαναλήψεων χωρίς να επιτευχθεί σύγκλιση. Το όριο αυτό έχει τεθεί προκειμένου να αποτραπούν υπερβολικά μικροί ρυθμοί εκπαίδευσης, που θα οδηγούσαν σε εξαιρετικά αργούς υπολογισμούς. Σε κάθε περίπτωση αδυναμίας σύγκλισης (ακραίες τιμές α) ο αλγόριθμος ενημερώνει τον χρήστη και προτείνει την τροποποίηση του ρυθμού εκπαίδευσης. Ως βέλτιστη τιμή θεωρήθηκε η επιλογή $\alpha = 0.1$, καθώς ήταν αρκετά μικρή για να μην κινδυνεύσει να χαθεί η σύγκλιση, αλλά και ικανοποιητικά γρήγορη υπολογιστικά.

Ο αλγόριθμος της μεθόδου gradient descent λειτουργεί επαναληπτικά, έως ότου υπάρξει σύγκλιση. Η σύγκλιση γίνεται όταν ικανοποιηθεί τουλάχιστον μία από τις παρακάτω συνθήκες:

- Η διαφορά δύο διαδοχικών τιμών των παραμέτρων, στην προκειμένη περίπτωση του πολλαπλασιαστή σ , είναι πολύ μικρή.
- Το αποτέλεσμα της συνάρτησης κόστους λάβει τιμή ικανοποιητικά κοντά στο 0, στην συγκεκριμένη εργασία η τιμή αυτή ορίστηκε ως 10^{-5} .
- Ο αριθμός των επαναλήψεων έχει φτάσει μία καθορισμένη τιμή (αρκετά υψηλή για να δικαιολογεί την παρουσία σφάλματος). Αυτό θα μπορούσε να γίνει είτε

όταν το α είναι υπερβολικά μικρό και ο αλγόριθμος αργεί να φτάσει σε σύγκλιση, είτε επειδή το α είναι υπερβολικά μεγάλο και ο αλγόριθμος αστοχεί να εντοπίσει το τοπικό ελάχιστο. Στην συγκεκριμένη εργασία ο μέγιστος αριθμός των επαναλήψεων ορίστηκε σε 100.

4.11. Παράδειγμα εφαρμογής μεθοδολογίας βελτιστοποίησης

Στην Ενότητα αυτή παρατίθεται ένα παράδειγμα προκειμένου να γίνει καλύτερα αντιληπτή η μεθοδολογία της βελτιστοποίησης ενός απλού δικτύου και η ανάπτυξη της μεθόδου gradient descent για τις συνθήκες του παραδείγματος.

Έστω το απλό δίκτυο που περιγράφηκε στην Ενότητα 4.2 και χρησιμοποιήθηκε ως το παράδειγμα της μεθοδολογίας επίλυσης του προβλήματος της μοντελοποίησης, στην Ενότητα 4.8. Χρησιμοποιείται η ίδια ακριβώς γεωμετρία, θεωρείται ότι έχει γίνει η αρχική προσομοίωσή του και τώρα απαιτείται να βελτιστοποιηθούν οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας των τριών αγωγών του δικτύου ως προς τη θερμοκρασία εξόδου του συστήματος, στον τερματικό κόμβο 4. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η βελτιστοποίηση απαιτείται μία μέτρηση πεδίου της θερμοκρασίας T_m για τον κόμβο 4, η οποία πρόκειται για πραγματικό δεδομένο, μετρούμενο στο υποθετικό πεδίο του παραδείγματος. Επομένως, σύμφωνα με τη σχέση (4.53) προκύπτει:

$$h(\sigma) = T_s(\sigma), \quad (4.60)$$

όπου:

- σ : ο συντελεστής τροποποίησης των τιμών U
- $T_s(\sigma)$: η εκτίμηση του συνολικού μοντέλου για τη θερμοκρασία στον κόμβο 4

Η συνάρτηση κόστους που πρέπει να ελαχιστοποιηθεί είναι η ακόλουθη:

$$J(\sigma) = \frac{1}{2} (T_s(\sigma) - T_m)^2$$

όπου T_m η τιμή της θερμοκρασίας του τερματικού κόμβου 4 που μετρήθηκε πειραματικά στο πεδίο.

Σύμφωνα με την εξίσωση (4.56) η παράγωγος της συνάρτησης κόστους θα είναι:

$$\frac{\partial J(\sigma)}{\partial \sigma} = (T_s(\sigma) - T_m) \frac{\partial}{\partial \sigma} T_s(\sigma),$$

στην οποία η παράγωγος $\frac{\partial}{\partial \sigma} T_s(\sigma)$ υπολογίζεται με βάση την εξίσωση (4.58) ως εξής:

$$\frac{\partial}{\partial \sigma} T_s(\sigma) = \frac{\partial}{\partial \theta} h(\sigma) = \frac{h(\sigma+\delta\sigma)-h(\sigma-\delta\theta)}{2\delta\sigma},$$

όπου $\delta\sigma = 0.01$.

Επομένως οι τιμές του συντελεστή ενημερώνονται με βάση τη σχέση (4.59), δηλαδή:

$$\sigma^{(v+1)} = \sigma^v - a \cdot \frac{\partial J(\sigma)}{\partial \sigma},$$

όπου v η επανάληψη της βελτιστοποίησης και a ο ρυθμός εκπαίδευσης (με τιμή 0.01).

Όταν ο αλγόριθμος της μεθόδου gradient descent φθάσει σε σύγκλιση, τότε θα έχει προσδιοριστεί η βέλτιστη τιμή του συντελεστή σ και η συνάρτηση του κόστους θα έχει ελαχιστοποιηθεί, δηλαδή θα ισχύει ότι

$$\sigma^v = \sigma^* = \arg \min_{\sigma} J(\sigma)$$

5. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΑΓΩΓΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΧΑΜΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ

Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάζεται η μελέτη περίπτωσης του δικτύου αγωγών ενός υποθετικού γεωθερμικού πεδίου χαμηλής ενθαλπίας, εμπνευσμένο από πραγματικά δεδομένα Ελληνικών πεδίων. Θα παρουσιαστεί όλη η διαδικασία κατασκευής του μοντέλου από το χρήστη και θα αξιολογηθούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και της βελτιστοποίησης του δικτύου, έτσι ώστε να γίνει αντιληπτός ο βαθμός αξιοπιστίας του λογισμικού. Για να κατασκευαστεί το δίκτυο απαιτείται η εισαγωγή απαραίτητων δεδομένων από τον χρήστη. Οι καταχωρήσεις αυτές περιλαμβάνουν πληροφορίες για τη γεωμετρία του δικτύου αλλά και για τα χαρακτηριστικά των αγωγών που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτό. Αφού έχουν οριστεί όλα τα απαραίτητα δεδομένα το επόμενο βήμα είναι η επίλυση των υδραυλικών και θερμικών προβλημάτων που καθορίζουν τη συμπεριφορά ροής και θερμοκρασίας του νερού, καθώς αυτό ρέει μέσα στο δίκτυο. Μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία της προσομοίωσης, παρουσιάζονται τα αποτελέσματά της και ακολουθεί η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της παροχής σε κάθε στοιχείο και κόμβο, της πίεσης σε κάθε κόμβο και της θερμοκρασίας σε κάθε κόμβο και στα άκρα των στοιχείων. Μόλις έχει ολοκληρωθεί και η διαδικασία της αξιολόγησης της μοντελοποίησης, πραγματοποιείται ένας αντίστοιχος έλεγχος αξιοπιστίας στη μέθοδο βελτιστοποίησης των παραμέτρων μεταφοράς θερμότητας του δικτύου.

5.1. Κώδικας του λογισμικού προσομοίωσης

Το λογισμικό της παρούσας εργασίας αναπτύχθηκε στο ολοκληρωμένο περιβάλλον (integrated development environment, IDE) Spyder 5.1.5, το οποίο είναι μέρος του πακέτου Anaconda 2.1.1, και είναι γραμμένο στη γλώσσα προγραμματισμού Python 3.9.7. Η επιλογή της γλώσσας Python έγινε εξαιτίας των δυνατοτήτων που προσφέρει για εφαρμογές μηχανικών και ιδιαίτερα για εφαρμογές προσομοίωσης. Είναι μία αντικειμενοστρεφής (object oriented) γλώσσα προγραμματισμού, που σημαίνει ότι όλες οι μεταβλητές αντιμετωπίζονται ως αντικείμενα (objects). Το χαρακτηριστικό αυτό καθιστά τα μαθηματικά μοντέλα εύκολα εφαρμόσιμα και τη

διαδικασία εντοπισμού και εξάλειψης σφαλμάτων απλή και γρήγορη. Το Spyder πρόκειται για ένα ελαφρύ IDE, που δεν καταναλώνει πολλούς πόρους του συστήματος του υπολογιστή και είναι κατασκευασμένο με πρωταρχικό σκοπό την ανάπτυξη επιστημονικών εφαρμογών. Ως εκ τούτου, οι βιβλιοθήκες (libraries) της Python που χρειάστηκαν για την ανάπτυξη του λογισμικού ήταν ήδη προεγκατεστημένες. Επίσης, η ανάπτυξη σε Spyder, κατέστησε τη διαδικασία ιδιαίτερα εύκολη και ευχάριστη, καθώς το συγκεκριμένο IDE προσφέρει μία πληθώρα εύχρηστων εργαλείων, όπως ένα ενσωματωμένο εργαλείο εύρεσης συντακτικών σφαλμάτων σε πραγματικό χρόνο και την δυνατότητα εξερεύνησης των μεταβλητών και των τιμών τους κατά την εκτέλεση του κώδικα.

5.1.1. Στοιχεία ανάπτυξης του κώδικα

Συνολικά το λογισμικό που αναπτύχθηκε αποτελείται από 1400 γραμμές κώδικα. Το πρόβλημα της μοντελοποίησης του δικτύου είναι εκφρασμένο με τη μορφή συνάρτησης, περιλαμβάνει συναρτήσεις για τον υπολογισμό της πυκνότητας, του ιξώδους, του αριθμού Reynolds και του συντελεστή τριβής του αγωγού, συναρτήσεις που εκφράζουν τις εξισώσεις σε κάθε στοιχείο, εξωτερικό και εσωτερικό κόμβο για το υδραυλικό και το θερμικό πρόβλημα, καθώς και τις μερικές παραγώγους των παραπάνω εξισώσεων. Για τη διαδικασία της βελτιστοποίησης των αβέβαιων παραμέτρων, η συνάρτηση κόστους και οι μερικές της παράγωγοι είναι επίσης εκφρασμένες με τη μορφή συναρτήσεων. Διακρίνεται επίσης ο αλγόριθμος ανάγνωσης δεδομένων από το αρχείο txt του χρήστη, που θα αναλυθεί παρακάτω, ο αλγόριθμος εκτίμησης αρχικών τιμών που παρουσιάστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο καθώς και διαγνωστικοί έλεγχοι που αναγνωρίζουν ελλιπή ή υπερβολικό αριθμό δεδομένων και σφάλμα λόγω μη αντιστρεψιμότητας μητρώου κατά την επίλυση του υδραυλικού ή του θερμικού προβλήματος. Χρησιμοποιείται κυρίως η βιβλιοθήκη NumPy (Numerical Python) για τις δυνατότητές της στη διαχείριση πινάκων (arrays), μητρώων (matrices) και γραμμικής άλγεβρας που απαιτούνται για την εφαρμογή του μαθηματικού ομοιώματος που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4. Χρησιμοποιείται επίσης το άρθρωμα (module) sys, το οποίο παρέχει μία επιλογή συναρτήσεων και μεταβλητών που χρησιμοποιούνται για το χειρισμό του περιβάλλοντος λειτουργίας της Python. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή γίνεται χρήση της συνάρτησης exit() από το άρθρωμα sys, η

οποία χρησιμοποιείται για τον άμεσο τερματισμό της εκτέλεσης σε περίπτωση εύρεσης σφάλματος, κατά τη διάρκεια διαγνωστικών ελέγχων που αναπτύχθηκαν στο εσωτερικό του κώδικα.

5.1.2. Εισαγωγή δεδομένων από το χρήστη

Η εισαγωγή των δεδομένων που καθορίζουν τη γεωμετρία και τα χαρακτηριστικά του δικτύου, καθώς και οι τιμές των συνοριακών συνθηκών πίεσης, παροχής και θερμοκρασίας των κόμβων, που καθορίζουν τη συμπεριφορά του, πραγματοποιείται μέσω ενός αρχείου txt που συντάσσεται από τον χρήστη (Εικόνα 5.1). Η διαδικασία καταχώρησης των παραμέτρων είναι απλή και εύκολη στη χρήση. Διακρίνονται δύο είδη δεδομένων, τα γενικά και τα μεμονωμένα. Ως γενικά χαρακτηρίζονται τα δεδομένα που αφορούν όλο το δίκτυο ή το περιβάλλον, όπως ο αριθμός των κόμβων και των στοιχείων ή η θερμοκρασία του αέρα και του εδάφους. Ως μεμονωμένα ορίζονται τα δεδομένα που αφορούν ένα συγκεκριμένο χαρακτηριστικό στοιχείου ή κόμβου. Η μεθοδολογία σύνταξης της παραμέτρου είναι ανάλογη του είδους του δεδομένου καταχώρησης. Επισημαίνεται όμως ότι κάθε καταχώρηση ολοκληρώνεται με τον χαρακτήρα “ ; “ και ότι δίνεται στο χρήστη η δυνατότητα εισαγωγής κάποιου σχόλιου, το οποίο δεν θα αναγνωσθεί από το λογισμικό, με το χαρακτήρα “ # “. Κάθε δεδομένο αναγράφεται με μία συγκεκριμένη ονομασία παραμέτρου του προβλήματος, όπως για παράδειγμα “nodes” ή “boundary_q”. Αναλυτικά οι ονομασίες των παραμέτρων και οι ερμηνείες τους παρατίθενται στον Πίνακα 5.1.

Επομένως, η εισαγωγή ενός γενικού δεδομένου πραγματοποιείται πληκτρολογώντας το όνομα της παραμέτρου και την αντίστοιχη τιμή της. Για παράδειγμα η καταχώρηση του αριθμού κόμβων του δικτύου είναι: “nodes 10 ;”. Η γενική μορφή σύνταξης της εισαγωγής ενός μεμονωμένου δεδομένου ακολουθεί τη δομή: όνομα παραμέτρου, δείκτης στοιχείου/κόμβου, χαρακτήρας “ --> “ και τιμή παραμέτρου. Για παράδειγμα, η καταχώρηση της συνοριακής συνθήκης παροχής του 1^{ου} κόμβου είναι: “ boundary_q 1 --> 50 ;”. Εξαιρέση αποτελούν οι συντεταγμένες των κόμβων, οι οποίες διαθέτουν τρεις τιμές παραμέτρων, μία για κάθε άξονα x , y και z και η συνδεσμολογία των αγωγών, που διαθέτει ως τιμές παραμέτρους τους δείκτες των δύο κόμβων, με τους οποίους συνδέεται. Σημειώνεται επίσης ότι η συμπλήρωση

του txt με δεδομένα μπορεί να γίνει ανεξαρτήτως σειράς, με μόνο περιορισμό τη διατήρηση της προκαθορισμένης σύνταξης.

Πίνακας 5.1: Ευρετήριο παραμέτρων για την εισαγωγή δεδομένων στο λογισμικό από το χρήστη.

Παράμετρος	Επεξήγηση
nodes	Ο αριθμός των κόμβων που απαρτίζουν το δίκτυο
elements	Ο αριθμός των στοιχείων που απαρτίζουν το δίκτυο
air_temperature	Η θερμοκρασία του αέρα (°C)
ground_temperature	Η θερμοκρασία του εδάφους (°C)
node_coordinates	Οι συντεταγμένες (x, y, z) του κόμβου σε γεωγραφικό σύστημα αναφοράς
boundary_q	Η συνοριακή συνθήκη παροχής (m ³ /h) στους κόμβους εισόδου
boundary_p	Η συνοριακή συνθήκη πίεσης (bar) στους κόμβους εισόδου
boundary_t	Η συνοριακή θερμοκρασία (°C) στους κόμβους εισόδου
connectivity	Η συνδεσμολογία του στοιχείου με τους δύο κόμβους
roughness_factor	Ο συντελεστής τραχύτητας του αγωγού (mm)
pipe_d	Η εσωτερική διάμετρος του αγωγού (m)
pipe_status	Η κατάσταση του αγωγού (1 → επιφανειακός, 0 → υπεδαφικός)
U_coefficient	Ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (BTU/h/ft ² /°F)
observed_T	Η παρατηρούμενη στο πεδίο θερμοκρασία (°C) εξόδου του συστήματος

Η εισαγωγή των παραμέτρων του προβλήματος της μοντελοποίησης στο λογισμικό πραγματοποιείται μέσω ενός αλγορίθμου που αναπτύχθηκε με βάση τη φιλοσοφία των επαγγελματικών προσομοιωτών της αγοράς. Ο αλγόριθμος αυτός διαβάζει γραμμή προς γραμμή το αρχείο txt και αναγνωρίζει τις παραμέτρους του

προβλήματος. Στη συνέχεια αντιγράφει την τιμή της παραμέτρου, για την περίπτωση ενός γενικού δεδομένου, ή το σύνολο δείκτη και τιμής παραμέτρου, για την περίπτωση ενός μεμονωμένου, στην αντίστοιχη λίστα στη βάση δεδομένων στο εσωτερικό του κώδικα λογισμικού.

```

case_study.txt - Σημειωμα...
Arχείο Επεξεργασία Μορφή Προβολή Βοήθεια
nodes 10 ;

elements 9 ;

ground_temperature 20 ;

node_coordinates 1 --> 0 0 0 ;
node_coordinates 2 --> 500 500 0 ;
node_coordinates 3 --> 1000 500 0 ;
node_coordinates 4 --> 1000 500 0 ;
node_coordinates 5 --> 1500 500 0 ;
node_coordinates 6 --> 1500 500 0 ;
node_coordinates 7 --> 500 0 0 ;
node_coordinates 8 --> 1000 0 0 ;
node_coordinates 9 --> 1500 0 0 ;
node_coordinates 10 --> 2000 0 0 ;

boundary_q 1 --> 50 ;
boundary_q 2 --> 51 ;
boundary_q 3 --> 52 ;
boundary_q 4 --> 53 ;
boundary_q 5 --> 54 ;
boundary_q 6 --> 55 ;

boundary_p 1 --> 20 ;

boundary_t 1 --> 75 ;
boundary_t 2 --> 74 ;
boundary_t 3 --> 73 ;
boundary_t 4 --> 72 ;
boundary_t 5 --> 71 ;
boundary_t 6 --> 70 ;

connectivity 1 --> 1 7 ;
connectivity 2 --> 2 7 ;
connectivity 3 --> 7 8 ;
connectivity 4 --> 3 8 ;
connectivity 5 --> 4 8 ;
connectivity 6 --> 8 9 ;
connectivity 7 --> 5 9 ;
connectivity 8 --> 6 9 ;
connectivity 9 --> 9 10 ;

roughness_factor 1 --> 0.061 ;
roughness_factor 2 --> 0.061 ;
roughness_factor 3 --> 0.061 ;
roughness_factor 4 --> 0.061 ;
roughness_factor 5 --> 0.061 ;

case_study.txt - Σημειωμα...
Arχείο Επεξεργασία Μορφή Προβολή Βοήθεια
connectivity 5 --> 4 8 ;
connectivity 6 --> 8 9 ;
connectivity 7 --> 5 9 ;
connectivity 8 --> 6 9 ;
connectivity 9 --> 9 10 ;

roughness_factor 1 --> 0.061 ;
roughness_factor 2 --> 0.061 ;
roughness_factor 3 --> 0.061 ;
roughness_factor 4 --> 0.061 ;
roughness_factor 5 --> 0.061 ;
roughness_factor 6 --> 0.061 ;
roughness_factor 7 --> 0.061 ;
roughness_factor 8 --> 0.061 ;
roughness_factor 9 --> 0.061 ;

pipe_d 1 --> 0.1 ;
pipe_d 2 --> 0.1 ;
pipe_d 3 --> 0.2 ;
pipe_d 4 --> 0.1 ;
pipe_d 5 --> 0.1 ;
pipe_d 6 --> 0.2 ;
pipe_d 7 --> 0.1 ;
pipe_d 8 --> 0.1 ;
pipe_d 9 --> 0.2 ;

pipe_status 1 --> 0 ;
pipe_status 2 --> 0 ;
pipe_status 3 --> 0 ;
pipe_status 4 --> 0 ;
pipe_status 5 --> 0 ;
pipe_status 6 --> 0 ;
pipe_status 7 --> 0 ;
pipe_status 8 --> 0 ;
pipe_status 9 --> 0 ;

U_coefficient 1 --> 1 ;
U_coefficient 2 --> 1 ;
U_coefficient 3 --> 1 ;
U_coefficient 4 --> 1 ;
U_coefficient 5 --> 1 ;
U_coefficient 6 --> 1 ;
U_coefficient 7 --> 1 ;
U_coefficient 8 --> 1 ;
U_coefficient 9 --> 1 ;

observed_T 10 --> 70.92 ;

```

Εικόνα 5.1: Το αρχείο κειμένου (txt) που συντάχθηκε για την εισαγωγή των παραμέτρων της προσομοίωσης του δικτύου της μελέτης περίπτωσης.

5.2. Γεωμετρία του μοντέλου περίπτωσης

Η διαδικασία κατασκευής του συζευγμένου μοντέλου (υδραυλικού και θερμικού) και η επίλυση των εξισώσεων που προκύπτουν ακολουθεί τη φιλοσοφία που

αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 4. Αρχικά πρέπει να οριστεί η γεωμετρία του μοντέλου. Το δίκτυο που κατασκευάστηκε αποτελείται από 10 κόμβους και 9 στοιχεία (Εικόνα 5.2). Συγκεκριμένα, το δίκτυο αποτελείται από 7 εξωτερικούς κόμβους, εκ των οποίων οι 6 είναι εισόδου και ο 1 είναι εξόδου, και από 3 εσωτερικούς κόμβους. Ως εκ τούτου, προκύπτει ένα πρόβλημα που έχει ως αγνώστους:

- Την παροχή σε κάθε στοιχείο (σύνολο 9 παροχές)
- Την πίεση σε κάθε κόμβο (σύνολο 10 πιέσεις)
- Τη θερμοκρασία εισόδου και εξόδου σε κάθε στοιχείο (σύνολο 18 παροχές)

Συνολικά το πρόβλημα που μελετάται έχει 37 αγνώστους, εκ των οποίων οι 19 είναι του υδραυλικού προβλήματος (παροχές και πιέσεις στα στοιχεία και στους κόμβους, αντίστοιχα) και οι 18 είναι του θερμικού (θερμοκρασίες στα άκρα των στοιχείων).

Απαιτείται ακόμα να ορισθούν 13 συνοριακές συνθήκες: 7 συνοριακές συνθήκες παροχής και πίεσης, εκ των οποίων πρέπει τουλάχιστον μία να είναι πίεσης, και 6 συνοριακές συνθήκες θερμοκρασίας. Ορίστηκε επομένως η παροχή και η θερμοκρασία σε κάθε έναν από τους εξωτερικούς κόμβους εισόδου και η πίεση στον κόμβο 1. Οι τιμές των συνθηκών παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 5.2: Οι συνοριακές συνθήκες που ορίστηκαν σε κάθε εξωτερικό κόμβο του δικτύου της μελέτης περίπτωσης.

Εξωτερικός Κόμβος Εισόδου	Συνοριακή Συνθήκη		
	Παροχή (m ³ /h)	Πίεση (bar)	Θερμοκρασία (°C)
1	50	20	70
2	51	-	71
3	52	-	72
4	53	-	73
5	54	-	74
6	55	-	75

Αντίστοιχα, το συζευγμένο πρόβλημα θα ορίζεται από τις εξής εξισώσεις:

- Για το υδραυλικό μοντέλο:
 - Μία εξίσωση πίεσης – παροχής για κάθε στοιχείο (σύνολο 9 εξισώσεις)
 - Μία εξίσωση διατήρησης μάζας για κάθε εσωτερικό κόμβο (σύνολο 3 εξισώσεις)
 - Μία εξίσωση για κάθε συνοριακή συνθήκη παροχής και πίεσης στους εξωτερικούς κόμβους εισόδου (σύνολο 7 εξισώσεις)

Συνολικά υπάρχουν 19 εξισώσεις για το υδραυλικό πρόβλημα.

- Για το θερμικό μοντέλο:
 - Μία εξίσωση θερμότητας - θερμοκρασίας για κάθε στοιχείο (σύνολο 9 εξισώσεις)
 - Μία εξίσωση διατήρησης ενέργειας για κάθε εσωτερικό κόμβο (σύνολο 3 εξισώσεις)
 - Μία εξίσωση για κάθε συνοριακή συνθήκη θερμοκρασίας στους εξωτερικούς κόμβους (σύνολο 6 εξισώσεις)

Συνολικά υπάρχουν 18 εξισώσεις για το θερμικό πρόβλημα.

Εν τέλει, για το συνολικό πρόβλημα της περίπτωσης, προκύπτουν 37 εξισώσεις, δηλαδή, με τον αριθμό των αγνώστων.

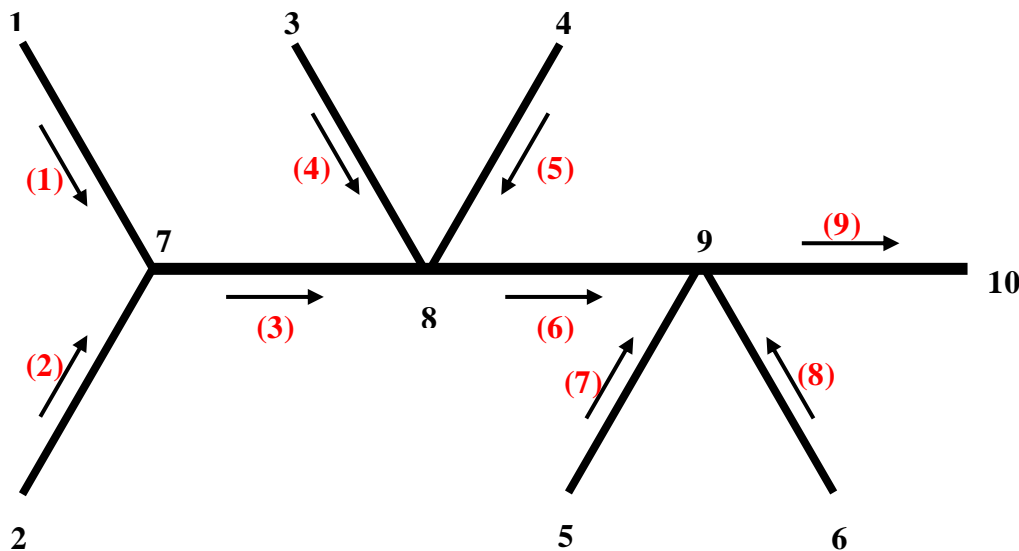
5.3. Καταχώρηση δεδομένων στο λογισμικό προσομοίωσης

Οι συντεταγμένες του κάθε κόμβου εισήχθησαν έτσι ώστε να βρίσκονται όλοι στο ίδιο υψόμετρο (θεωρώντας ότι γίνεται λόγος για οριζόντιο ανάγλυφο εδάφους) και κατά τέτοιο τρόπο ώστε το μήκος όλων των στοιχείων να είναι 500 m. Στη συνέχεια, ορίστηκε η συνδεσμολογία των στοιχείων και των κόμβων, η οποία παρατίθεται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 5.3: Η γεωμετρία του μοντέλου περίπτωσης και η συνδεσμολογία των αγωγών του.

Κόμβοι	Είδος κόμβου	Συνδεσμολογία			
		Στοιχεία	Είδος Στοιχείου	1 ^{ος} Κόμβος	2 ^{ος} Κόμβος
1	Εξωτερικός (Εισόδου)				
2	Εξωτερικός (Εισόδου)	1	Είσοδος	1	7
3	Εσωτερικός	2	Είσοδος	2	7
4	Εξωτερικός (Εισόδου)	3	Κορμός	7	8
5	Εξωτερικός (Εισόδου)	4	Είσοδος	3	8
6	Εσωτερικός	5	Είσοδος	4	8
7	Εξωτερικός (Εισόδου)	6	Κορμός	8	9
8	Εξωτερικός (Εισόδου)	7	Είσοδος	5	9
9	Εσωτερικός	8	Είσοδος	6	9
10	Εξωτερικός (Εξόδου)	9	Έξοδος	9	10

Το δίκτυο της περίπτωσης παρουσιάζεται στο σχήμα της Εικόνας 5.2, στο οποίο οι κόμβοι αναγράφονται με μαύρο χρώμα, τα στοιχεία με κόκκινο και τα βέλη υποδηλώνουν τη φορά της ροής, όπως αυτή ορίστηκε από τη συνδεσμολογία (από τον κόμβο με μικρότερη αρίθμηση προς αυτόν με μεγαλύτερη).



Εικόνα 5.2: Σχηματική απεικόνιση του δικτύου της περίπτωσης που μελετήθηκε.

Η διάμετρος των αγωγών επιλέχθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε το δίκτυο να μην καταπονείται από τις αυξημένες παροχές στον κορμό του. Επομένως όλοι οι κόμβοι εισόδου ορίστηκαν με εσωτερική διάμετρο 100 mm, ενώ οι αγωγοί κορμού και ο αγωγός εξόδου ορίστηκαν με εσωτερική διάμετρο 200 mm. Ακόμα, θεωρήθηκε ότι όλοι οι αγωγοί είναι κατασκευασμένοι από το ίδιο υλικό και ότι είναι υπεδαφικοί. Επιλέχθηκαν χαλύβδινοι αγωγοί, συγκολλημένοι και χωρίς ραφές, κατηγορίας ASME/ANSI B36.10/19, ο οποίοι έχουν τραχύτητα 0.061 mm [34]. Επειδή πρόκειται για υπεδαφικούς χαλύβδινους αγωγούς ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ορίστηκε στα 1.0 BTU/h/ft²/°F. Το νερό που μεταφέρεται στο εσωτερικό των σωλήνων είναι υψηλής αλατότητας, επομένως η ειδική θερμοχωρητικότητα του ορίστηκε στα 1.02 BTU/lb/°F. Σχετικά με τις συνθήκες του περιβάλλοντος καθορίστηκε ότι η θερμοκρασία του εδάφους είναι στους 20°C.

5.4. Αρχικές συνθήκες μοντέλου περίπτωσης

Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 4.4.3, η επίλυση του συνολικού προβλήματος απαιτεί την εισαγωγή μιας αρχικής τιμής για την παροχή και τις θερμοκρασίες κάθε στοιχείου, καθώς και για την πίεση κάθε κόμβου. Αρχικά, οι τιμές παροχής, πίεσης και θερμοκρασίας των συνοριακών συνθηκών, του συνολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας των αγωγών και της ειδικής θερμοχωρητικότητας του νερού, που εισήχθησαν ως δεδομένα του μοντέλου, έπρεπε να μετατραπούν σε μονάδες SI, έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι εξισώσεις του υδραυλικού και θερμικού μοντέλου. Οι μετατροπές των μονάδων έγιναν σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 5.4: Μετατροπές μονάδων που χρησιμοποιούνται εσωτερικά του κώδικα του λογισμικού.

Παροχή	1 m ³ /h	0.0002778 m ³ /s
Πίεση	1 bar	100,000 Pa
Θερμοκρασία	1 °C	°C + 273 °K
Συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας	1 BTU/h/ft ² /°F	5.68 W/m ² /°K
Ειδική θερμοχωρητικότητα νερού	1.02 BTU/lb/°F	4,270.536 J/kg/°K

Χρησιμοποιώντας τις τιμές των συνοριακών συνθηκών και τον αλγόριθμο εκτίμησης αρχικών τιμών, που περιγράφηκε στην Ενότητα 4.5.6, κατασκευάστηκαν δύο διάνυσματα. Το διάνυσμα \mathbf{x}_0 περιείχε τις αρχικές τιμές παροχής των στοιχείων και πίεσης στους κόμβους και το διάνυσμα \mathbf{T}_0 περιείχε τις αρχικές τιμές θερμοκρασίας στα άκρα κάθε στοιχείου. Οι αρχικές τιμές παρατίθενται αναλυτικά στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 5.5. Οι αρχικές τιμές που προέκυψαν από τον αλγόριθμο εκτίμησης αρχικών τιμών.

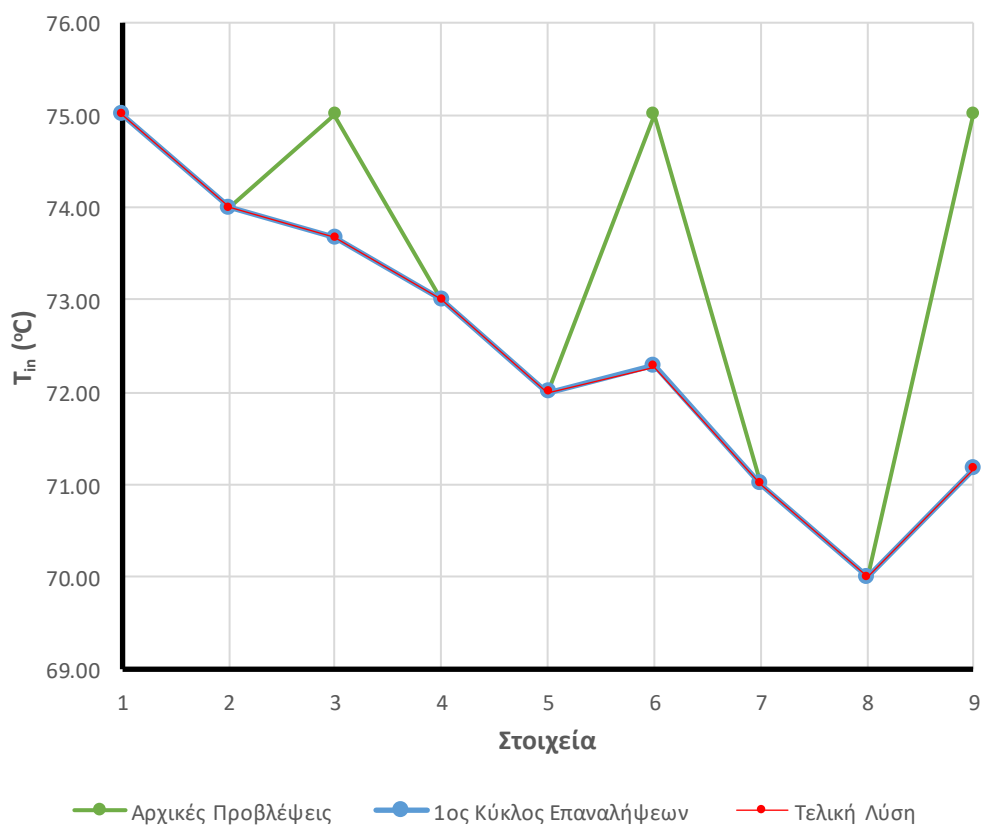
Κόμβοι	Αρχική τιμή Πίεσης (bar)	Στοιχεία	Αρχική τιμή Παροχής (m ³ /h)	Αρχική τιμή Θερμοκρασίας (°C)	
				T_{in}	T_{out}
1	20.000				
2	20.000	1	50	75	75
3	20.000	2	51	74	75
4	20.000	3	101	75	75
5	20.000	4	52	73	75
6	20.000	5	53	72	75
7	18.000	6	206	75	75
8	16.200	7	54	71	75
9	14.580	8	55	70	75
10	13.122	9	315	75	75

5.5. Επίλυση προβλημάτων και αποτελέσματα μοντέλων περίπτωσης

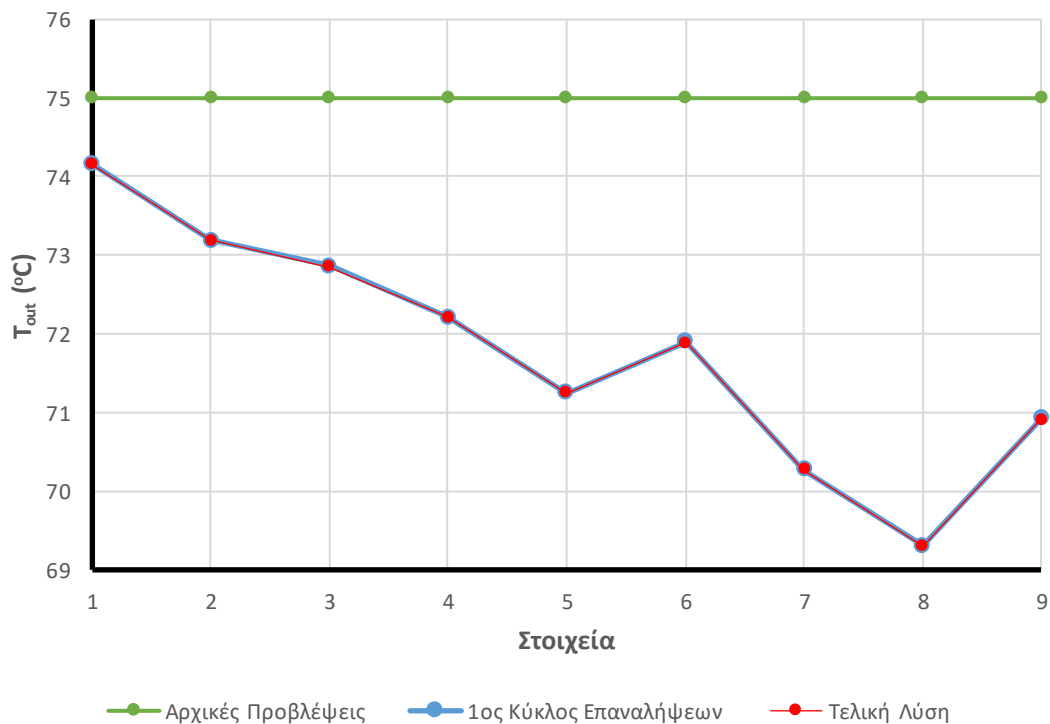
Όπως επεξηγήθηκε στην Ενότητα 4.9, η μοντελοποίηση του δικτύου της παρούσας μελέτης περίπτωσης ολοκληρώνεται με την τελική σύγκλιση του συζευγμένου προβλήματος, μέσω της κυκλικής επίλυσης των επιμέρους υδραυλικών και θερμικών προβλημάτων. Σημειώνεται ότι το συζευγμένο (υδραυλικό και θερμικό) πρόβλημα έφτασε σε σύγκλιση μετά από 2 κύκλους επαναλήψεων. Στον Πίνακα 5.6 που ακολουθεί επισυνάπτονται τα τελικά αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Πίνακας 5.6: Τελικά αποτελέσματα προσομοίωσης δικτύου.

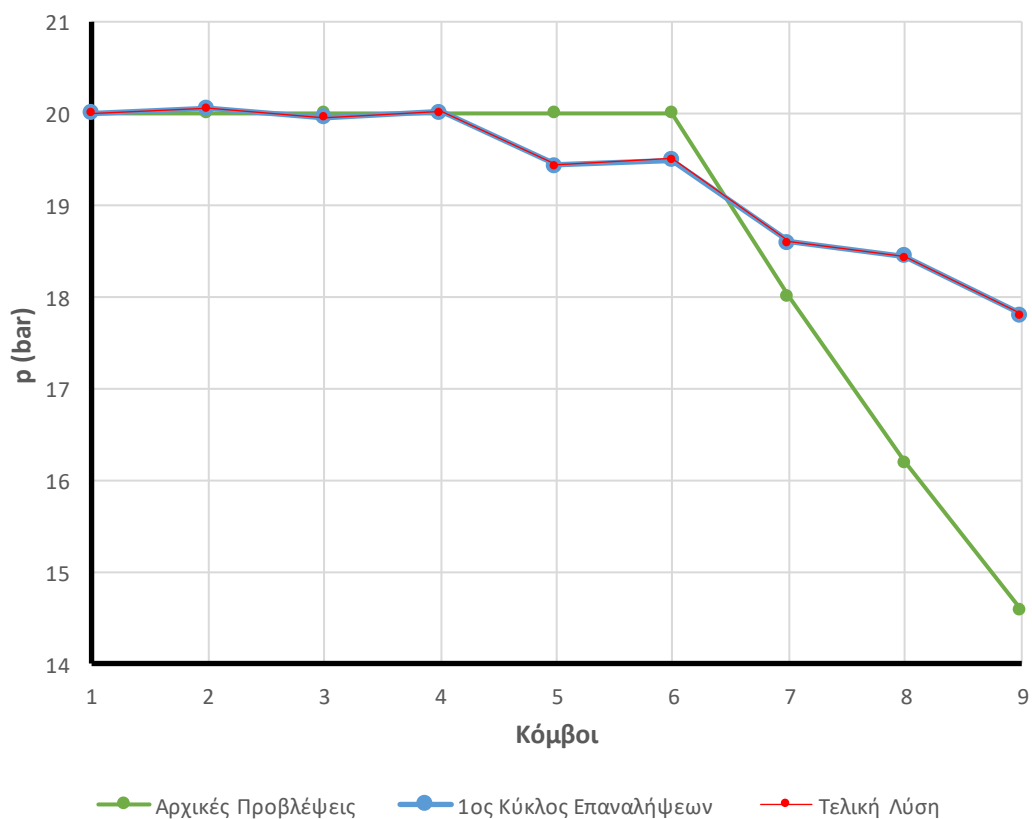
Κόμβοι	Πίεση (bar)	Παροχή (m ³ /h)	Θερμοκρασία (°C)	Στοιχεία	Παροχή (m ³ /h)	Θερμοκρασία (°C)	
						T_{in}	T_{out}
1	20.00	50.00	75.00				
2	20.06	51.00	74.00	1	50.00	75.00	74.15
3	19.96	52.00	73.00	2	51.00	74.00	73.19
4	20.02	53.00	72.00	3	101.00	73.67	72.85
5	19.44	54.00	71.00	4	52.00	73.00	72.22
6	19.50	55.00	70.00	5	53.00	72.00	71.25
7	18.60	101.00	73.67	6	206.00	72.28	71.89
8	18.44	206.00	72.28	7	54.00	71.00	70.28
9	17.80	315.00	71.16	8	55.00	70.00	69.30
10	16.33	315.00	70.91	9	315.00	71.16	70.91



Εικόνα 5.3: Τιμές θερμοκρασίας εισόδου των αγωγών στα διάφορα στάδια της προσομοίωσης.



Εικόνα 5.4: Τιμές θερμοκρασίας εξόδου των αγωγών στα διάφορα στάδια της προσομοίωσης.



Εικόνα 5.5: Τιμές πίεσης των κόμβων στα διάφορα στάδια της προσομοίωσης.

Στα διαγράμματα των Εικόνων 5.3 και 5.4 παρουσιάζεται η μεταβολή των θερμοκρασιών για τα δύο άκρα όλων των αγωγών και της πίεσης για όλους τους κόμβους (Εικόνα 5.5), σε κάθε κύκλο επαναλήψεων των επιλύσεων του συζευγμένου προβλήματος. Παρατηρείται ότι και στα 3 διαγράμματα οι αρχικές τιμές, που προέκυψαν από τον αλγόριθμο εκτίμησης, απείχαν αρκετά από την τελική λύση, ενώ με την πρώτη επανάληψη τόσο οι θερμοκρασιακές τιμές όσο και οι τιμές πίεσης έχουν βρεθεί πολύ κοντά στις λύσεις του προβλήματος, σε βαθμό που οι γραφικές παραστάσεις τους σχεδόν ταυτίζονται με τις αντίστοιχες της τελικής επίλυσης. Είναι προφανές, επομένως, ότι ο αλγόριθμος συγκλίνει πολύ αποδοτικά και γρήγορα με διαδοχικούς κύκλους επαναλήψεων.

5.6. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων μοντελοποίησης

Σημαντική είναι η αξιολόγηση της λύσης στην οποία συνέκλινε η διαδικασία επίλυσης του μοντέλου προκειμένου να καθοριστεί η ακρίβειά του και η ικανότητά του να προσομοιώνει λογικά την υδραυλική και θερμική συμπεριφορά ενός δικτύου αγωγών.

5.6.1. Συμπεριφορά του δικτύου στους εξωτερικούς κόμβους

Αρχικά πρέπει να αξιολογηθεί η συμπεριφορά του δικτύου στους εξωτερικούς κόμβους. Οι τιμές της πίεσης, της παροχής και της θερμοκρασίας στους εξωτερικούς κόμβους εισόδου (κόμβοι 1, 2, 3, 4, 5, 6) (Πίνακας 5.6) θα πρέπει να είναι ίσες με τις συνοριακές συνθήκες που ορίστηκαν για αυτούς τους κόμβους από το χρήστη (Πίνακας 5.2). Πράγματι παρατηρείται πλήρης τάυτιση των αποτελεσμάτων του μοντέλου με τις συνοριακές συνθήκες για τους εν λόγω κόμβους.

Στη συνέχεια, πρέπει να ελεγχθεί η τιμή της παροχής των στοιχείων που είναι συνδεδεμένα με τους προαναφερθέντες κόμβους. Η λογική ορίζει ότι η παροχή σε αυτά τα στοιχεία θα πρέπει να είναι ίση με τη παροχή των κόμβων και επομένως με τις συνοριακές συνθήκες παροχής που εισήχθησαν για την κατασκευή του μοντέλου. Όντως επιβεβαιώνεται ότι τα στοιχεία 1, 2, 4, 5, 7 και 8 έχουν ίδια τιμή παροχής με τους κόμβους 1, 2, 3, 4, 5 και 6 αντίστοιχα.

Ανάλογη διαδικασία αξιολόγησης ακολουθείται και για τη θερμοκρασία των παραπάνω στοιχείων. Η θερμοκρασία στο άκρο του αγωγού που συνδέεται με τον εξωτερικό κόμβο εισόδου θα πρέπει να είναι η ίδια με αυτή του κόμβου. Στη συνδεσμολογία των παραπάνω αγωγών, η πρώτη θέση σύνδεσης καταλαμβάνεται από τους εξωτερικούς αγωγούς που προαναφέρθηκαν. Επομένως, η θερμοκρασία των στοιχείων που πρέπει να εξεταστεί είναι η T_{in} . Πράγματι, αποδεικνύεται ότι για όλα τα στοιχεία, η T_{in} είναι ίση με τη θερμοκρασία του εξωτερικού κόμβου, με τον οποίον συνδέονται. Προφανώς ο κόμβος 10, που είναι ο εξωτερικός κόμβος εξόδου του δικτύου, θα έχει τις τιμές παροχής και θερμοκρασίας εξόδου (T_{out}) που προκύπτουν από το μοναδικό στοιχείο με το οποίο είναι συνδεδεμένος, δηλαδή με το στοιχείο 9.

5.6.2. Συμπεριφορά του δικτύου στους εσωτερικούς κόμβους

Στη συνέχεια αξιολογήθηκε η συμπεριφορά της παροχής στους εσωτερικούς κόμβους. Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης μάζας, η παροχή που εισέρχεται μέσα στον κόμβο θα πρέπει να ισούται με αυτήν που εξέρχεται από αυτόν. Έχοντας ορίσει τη ροή του νερού στο δίκτυο, ήταν δυνατόν να αξιολογηθούν τα στοιχεία εισόδου και εξόδου του κάθε εσωτερικού κόμβου. Το άθροισμα των παροχών των στοιχείων που εισέρχονται στον κόμβο θα πρέπει να είναι ίσο με την παροχή στον κόμβο και με το άθροισμα της παροχής των στοιχείων που εξέρχονται από τον κόμβο. Ο Πίνακας 5.7 επιβεβαιώνει ότι η συμπεριφορά της παροχής κατά τη ροή του νερού στους εσωτερικούς κόμβους είναι η αναμενόμενη.

Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα παροχής σε κάθε εσωτερικό κόμβο και σε κάθε στοιχείο που εισέρχονται και εξέρχονται από αυτόν.

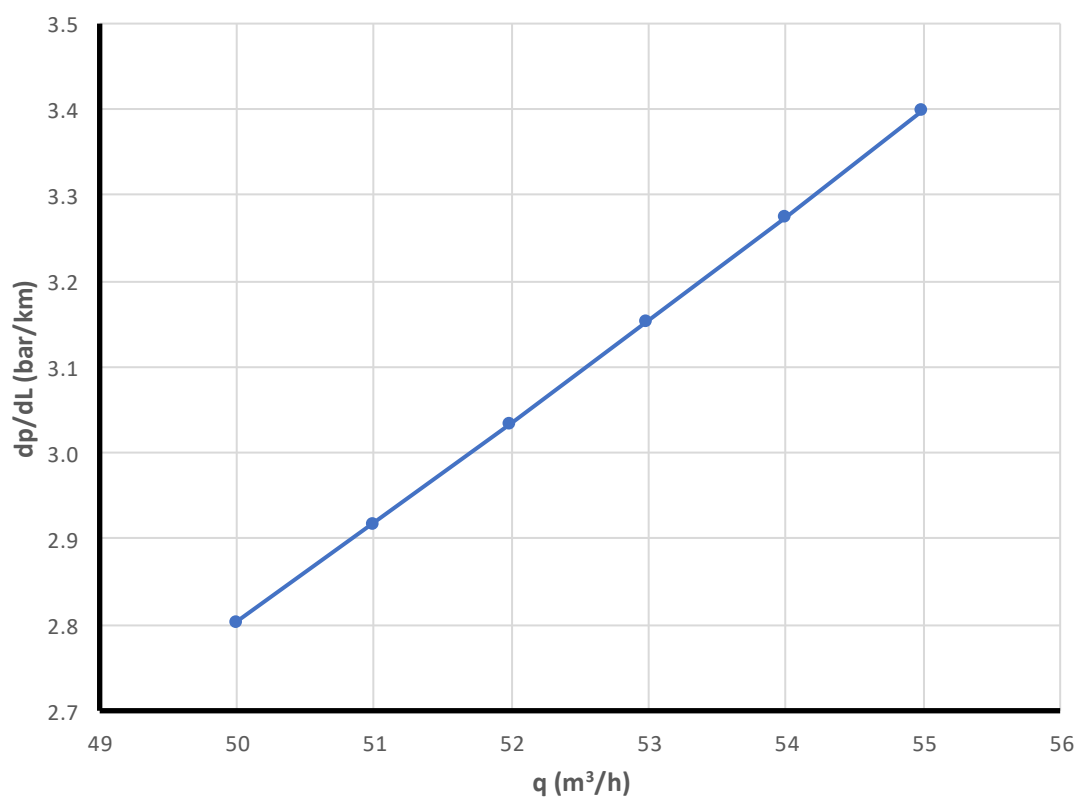
Εσωτερικός Κόμβος	Παροχή κόμβου (m ³ /h)	Στοιχείο	Κατάσταση Στοιχείου	Παροχή Στοιχείου (m ³ /h)	Συνολική Παροχή (m ³ /h)
7	101.00	1	Είσοδος	50.00	101.00
		2	Είσοδος	51.00	
		3	Έξοδος	101.00	101.00
8	206.00	3	Είσοδος	101.00	206.00
		4	Είσοδος	52.00	
		5	Είσοδος	53.00	
		6	Έξοδος	206.00	206.00
9	315.00	6	Είσοδος	206.00	315.00
		7	Είσοδος	54.00	
		8	Είσοδος	55.00	
		9	Έξοδος	315.00	315.00

5.6.3. Πτώση πίεσης κατά μήκος των στοιχείων του δικτύου

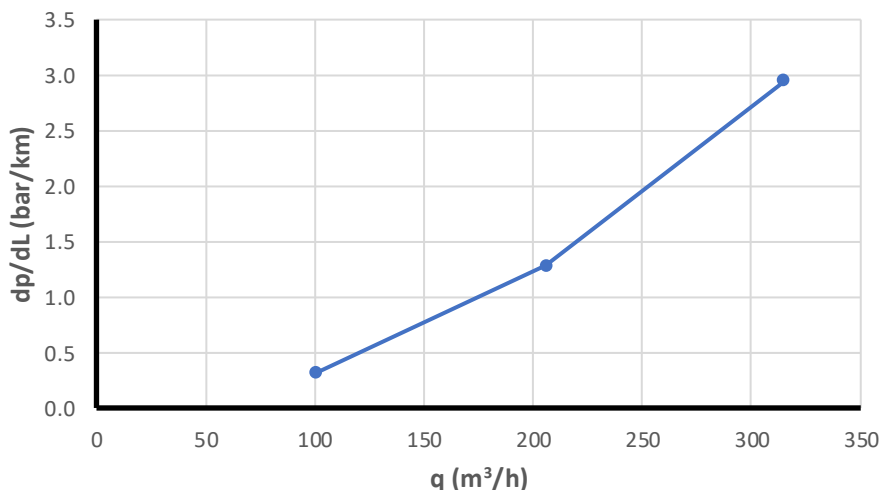
Ακολούθως, αξιολογήθηκε ο συμπεριφορά της πτώσης πίεσης κατά μήκος των στοιχείων του δικτύου. Ο Πίνακας που παρατίθεται περιέχει αναλυτικά τη συνδεσμολογία του κάθε αγωγού, τη διάμετρό του και την πτώση της πίεσής του από το ένα άκρος του, έως το άλλο, ανηγμένη στο χιλιόμετρο μήκους του αγωγού. Σύμφωνα με τον Πίνακα 5.8, κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα των εικόνων 5.6 και 5.7, στα οποία παρουσιάζεται η σχέση της παροχής με τη πτώση πίεσης ανηγμένη στο χιλιόμετρο μήκους του αγωγού, για διάμετρο 100 mm και 200 mm.

Πίνακας 5.8: Αποτελέσματα παροχής και πτώσης πίεσης ανά μήκος αγωγού για κάθε στοιχείο του δικτύου.

Στοιχείο	Παροχή Στοιχείου (m ³ /h)	Συνδεσμολογία (Θέση 1 → 2)	Πίεση (bar) Θέση 1	Πίεση (bar) Θέση 2	Διάμετρος Αγωγού (mm)	Δp/ΔL (bar/km)
1	50.00	1 → 7	20.00	18.60	100	2.804
2	51.00	2 → 7	20.06	18.60	100	2.918
3	101.00	7 → 8	18.60	18.44	200	0.320
4	52.00	3 → 8	19.96	18.44	100	3.035
5	53.00	4 → 8	20.02	18.44	100	3.154
6	206.00	8 → 9	18.44	17.80	200	1.278
7	54.00	5 → 9	19.47	17.80	100	3.275
8	55.00	6 → 9	19.50	17.80	100	3.399
9	315.00	9 → 10	17.80	16.33	200	2.943



Εικόνα 5.6: Διάγραμμα σχέσης παροχής - πτώσης πίεσης ανά μήκος αγωγού για κάθε αγωγό εσωτερικής διαμέτρου 100 mm.



Εικόνα 5.7: Διάγραμμα σχέσης παροχής - πτώσης πίεσης ανά μήκος αγωγού για κάθε αγωγό εσωτερικής διαμέτρου 200 mm.

Συγκρίνοντας τα δεδομένα των Πινάκων 5.7 και 5.8 αξίζει να τονιστεί ότι η ροή νερού μέσα στο δίκτυο ακολουθεί την φυσιολογική του πορεία από μία περιοχή υψηλής πίεσης σε μία περιοχή χαμηλής πίεσης.

Παρατηρώντας τον Πίνακα 5.8, διαπιστώνεται ότι η πτώση πίεσης από το ένα άκρο του αγωγού έως το άλλο είναι ανάλογη της παροχής του όταν η διάμετρος διατηρείται σταθερή. Αυτό σημαίνει ότι όταν αυξάνεται η παροχή σε έναν αγωγό, σταθερής διατομής, τότε αυξάνεται και η πτώση της πίεσης κατά μήκος του. Η αναλογία αυτή μεταβάλλεται με την εσωτερική διάμετρο του αγωγού.

Για παράδειγμα, εάν εξεταστούν οι αγωγοί 1 και 8, που έχουν την ίδια διατομή (0.1 m) και παροχές 50 m³/h και 55 m³/h, παρατηρείται ότι εμφανίζουν πτώση πίεσης 2.804 bar/km και 3.399 bar/km. Δηλαδή για μία αύξηση παροχής της τάξης του 10% υπάρχει μία αύξηση της πτώσης πίεσης κατά 20%. Ομοίως, εάν εξεταστούν οι αγωγοί 1 και 2, οι οποίοι έχουν πάλι την ίδια διάμετρο (0.1 m) και παροχές 50 m³/h και 51 m³/h, παρατηρείται ότι εμφανίζουν πτώση πίεσης 2.804 bar/km και 2.918 bar/km. Δηλαδή για μία αύξηση παροχής της τάξης του 2% υπάρχει μία αύξηση της πτώσης πίεσης κατά 4%. Τα παραπάνω δεδομένα οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η αύξηση της πτώσης της πίεσης είναι ανάλογη με το διπλάσιο της αύξηση της παροχής για δύο αγωγούς ίδιας διατομής.

Εάν εξεταστούν, όμως, οι αγωγοί 8 και 9, οι οποίοι έχουν εσωτερική διάμετρο 0.1 m και 0.2 m, παροχή 55 m³/h και 315 m³/h και πτώση πίεσης 3.399 bar/km και

2.943 bar/km, αντίστοιχα, παρατηρείται ότι μία αύξηση παροχής της τάξης του 470% οδηγεί σε μία μείωση της πτώσης πίεσης της τάξης του 10%, αντί για αύξηση της τάξης του 940% που θα αναμενόταν εάν οι αγωγοί είχαν ίσες διαμέτρους. Αυτό υποδηλώνει και τη συμβολή της εσωτερικής διατομής του αγωγού στη σχέση παροχής – πτώσης πίεσης. Χαρακτηριστικό, επίσης είναι το γεγονός ότι οι αγωγοί του κορμού, οι οποίοι έχουν μεγαλύτερη διάμετρο, εμφανίζουν σαφώς μικρότερη απώλεια πίεσης σε σχέση με τους υπόλοιπους, παρόλο που έχουν αυξημένη παροχή σε σχέση με αυτούς. Τα φαινόμενα αυτά είναι απολύτως λογικά και εκφράζονται επακριβώς από την υδραυλική εξίσωση που διέπει τη συμπεριφορά κάθε στοιχείου.

Οι παραπάνω παρατηρήσεις φαίνονται και στα διαγράμματα των εικόνων 5.6 και 5.7, που παρουσιάζεται γραφικά η σχέση $q - \Delta p / \Delta L$, για τους αγωγούς ίδιας διατομής. Στο διάγραμμα της Εικόνας 5.6, η σχέση παροχής – πτώσης πίεσης απεικονίζεται γραφικά ως μία γραμμή, η οποία έχει πολύ μικρή καμπυλότητα, που οφείλεται στην τυρβώδη ροή και κατ' επέκταση, στη μη γραμμικότητα της εξίσωσης (4.18). Εάν η γραφική παράσταση ήταν ευθεία γραμμή, θα σήμαινε ότι, για σταθερή διάμετρο, η πτώση πίεσης εξαρτάται γραμμικά από την παροχή, που συμβαίνει μόνο κατά τη στρωτή ροή, το οποίο προκύπτει από την εξίσωση (4.16):

$$p_1 - p_2 = \frac{128 \cdot \mu \cdot L \cdot q}{D^4 \cdot \pi} - \rho \cdot g \cdot (h_1 - h_2)$$

Παρατηρείται όμως είναι ότι η καμπυλότητα της γραφικής παράστασης είναι τόσο μικρή που σχεδόν ταυτίζεται με ευθεία. Επομένως, το υδραυλικό πρόβλημα προκύπτει ότι είναι μη γραμμικό, αλλά εμφανίζει μικρή απόκλιση από τη γραμμικότητα, που υποστηρίζεται και από τις λίγες επαναλήψεις που χρειάστηκαν για την τελική σύγκλιση του συζευγμένου προβλήματος. Τονίζεται ότι εάν το πρόβλημα ήταν πλήρως γραμμικό, τότε θα απαιτούνταν μόνο μία επανάληψη για να επιλυθεί. Φυσικά η παρατήρηση αυτή ισχύει μόνο όταν το ρευστό του δικτύου είναι υγρό νερό. Σε διφασική κατάσταση ή για μονοφασικό ατμό, δεν θα παρατηρούνταν αυτή η συμπεριφορά και η πτώση της πίεσης θα ήταν μεγαλύτερη. Επίσης επισημαίνεται ότι, για τις ίδιες παροχές, η ελάττωση της διατομής θα επέφερε μία αύξηση της καμπυλότητας, καθώς το σύστημα θα βρισκόταν σε μεγαλύτερη καταπόνηση.

Ομοίως για το διάγραμμα της Εικόνας 5.7, στο οποίο υπάρχουν 3 σημεία, τα σημεία θα ήταν συννευθιακά εάν η ροή ήταν στρωτή. Παρατηρείται αντίστοιχα ότι η καμπυλότητα της γραφικής παράστασης είναι μικρή. Συνεπώς ότι ακόμα και για τους

αγωγούς του κορμού του δικτύου, στους οποίους η παροχές είναι μεγάλες, το πρόβλημα είναι μη γραμμικό, αλλά συνεχίζει να αποκλίνει ελαφρώς από τη γραμμικότητα.

Το μέγεθος $\Delta p/\Delta L$ δηλώνει με ποιοτικό τρόπο την υδραυλική καταπόνηση του δικτύου στο συγκεκριμένο σημείο. Είναι πρακτικά ένας δείκτης υδραυλικής απόδοσης του αγωγού. Πρέπει να εξετάζεται σε σχέση με τους υπόλοιπους αγωγούς ίδιας διατομής. Γενικά, οι υψηλότερες τιμές υποδεικνύουν μεγαλύτερη καταπόνηση. Πρακτικά μία υψηλή τιμή του δείκτη δηλώνει ότι η πτώση πίεσης σε εκείνο τον αγωγό είναι μεγάλη για τη διατομή που έχει χρησιμοποιηθεί και επομένως πρέπει να αντικατασταθεί από έναν άλλον μεγαλύτερης διατομής.

5.6.4. Έλεγχος ορθότητας των αποτελεσμάτων της πτώσης πίεσης του υδραυλικού μοντέλου μέσω σύγκρισής τους με αντίστοιχα από ανάλογο, προϋπάρχον, μοντέλο

Τα αποτελέσματα του υδραυλικού μοντέλου του προγράμματος προσομοίωσης, αξιολογήθηκαν επίσης βάσει των αποτελεσμάτων άλλου, ήδη υπάρχοντος, μοντέλου προσομοίωσης ροής νερού, κατασκευασμένο για ένα παρόμοιο δίκτυο και χρησιμοποιώντας την ίδια μεθοδολογία επίλυσης [35]. Τα αποτελέσματα από αυτό το απλούστερο μοντέλο παρατίθενται αναλυτικά στον Πίνακα 5.9,

Πίνακας 5.9: Αποτελέσματα παροχής και πτώσης πίεσης ανά μήκος αγωγού για κάθε αγωγό εσωτερικής διαμέτρου 100 mm και 200 mm, τα οποία προέρχονται από απλούστερο μοντέλο προσομοίωσης [35].

Διάμετρος Αγωγού $D = 100 \text{ mm}$ (4")		Διάμετρος Αγωγού $D = 200 \text{ mm}$ (8")	
Παροχή (m^3/h)	$\Delta p/\Delta L$ (bar/km)	Παροχή (m^3/h)	$\Delta p/\Delta L$ (bar/km)
50.4	2.8730	108	0.4324
54	3.2981	216	1.6386
57.6	3.7525	324	3.4821

Συγκρίνοντας τα δεδομένα της πτώσης πίεσης του Πίνακα 5.9 με τα αντίστοιχα που προέκυψαν από το μοντέλο της εργασίας (Πίνακας 5.8), γίνεται εύκολα αντιληπτή η ομοιότητα των τιμών. Οι διαφορές των αποτελεσμάτων μπορούν να ερμηνευτούν

λόγω της χρήσης ελαφρώς διαφορετικών μεθοδολογιών υπολογισμού του συντελεστή τριβής. Το μοντέλο σύγκρισης χρησιμοποιεί τη σχετική τραχύτητα του αγωγού, η οποία ορίζεται ως $k = e/D$, όπου e η απόλυτη τραχύτητα, D η εσωτερική διάμετρος και k η σχετική τραχύτητα του αγωγού, με τιμή $k = 4.5 \cdot 10^{-5}$. Συνεπώς:

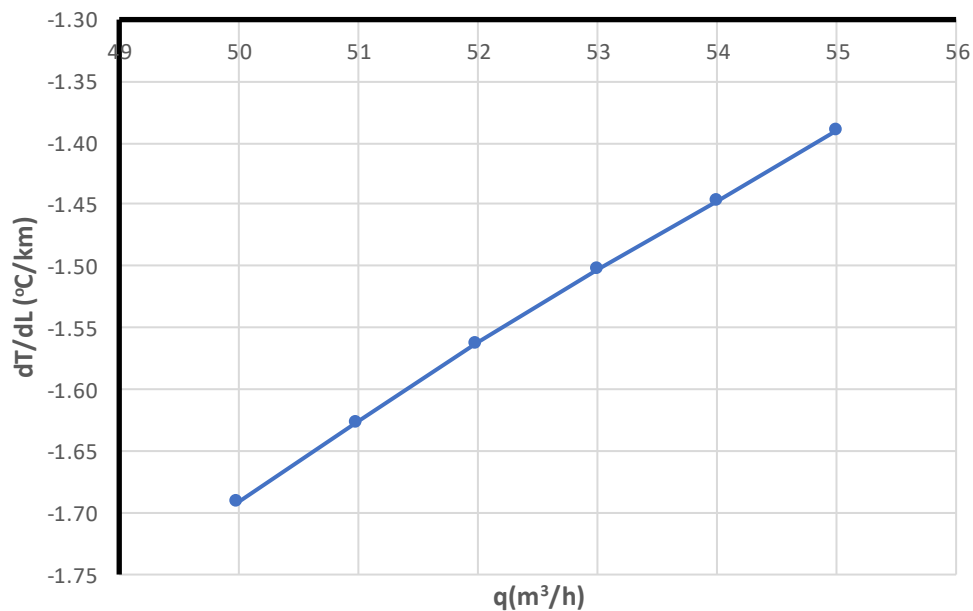
- Για $D = 100$ mm προκύπτει $e = 0.0045$ mm < 0.061 mm
- Για $D = 200$ mm προκύπτει $e = 0.0090$ mm < 0.061 mm

5.6.5. Συμπεριφορά της θερμοκρασίας στα στοιχεία και τους εσωτερικούς κόμβους του δικτύου

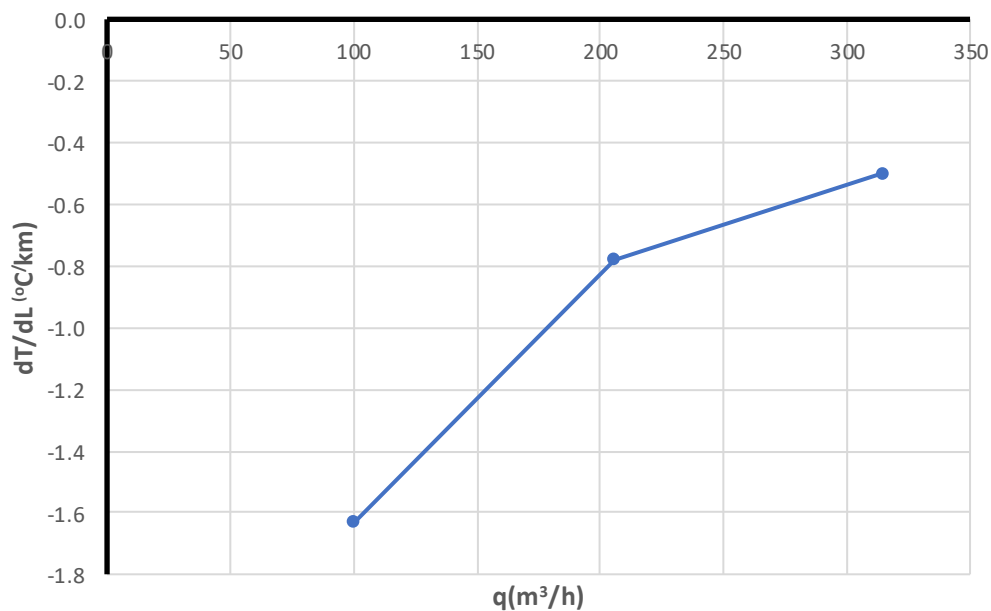
Στη συνέχεια, αξιολογείται η συμπεριφορά της θερμοκρασίας κατά μήκος των αγωγών και της θερμοκρασίας στους εσωτερικούς κόμβους. Ο Πίνακας 5.10 περιέχει τις πληροφορίες για τη θερμοκρασία σε κάθε άκρο στοιχείου καθώς και την πτώση της θερμοκρασίας από το ένα άκρο του, έως το άλλο, ανηγμένη στο χιλιόμετρο.

Πίνακας 5.10: Αποτελέσματα παροχής και πτώσης θερμοκρασίας ανά μήκος αγωγού για κάθε στοιχείο του δικτύου.

Στοιχείο	Παροχή Στοιχείου (m ³ /h)	Συνδεσμολογία (Θέση 1 → 2)	Θερμοκρασία στη θέση 1 T _{in} (°C)	Θερμοκρασία στη θέση 2 T _{out} (°C)	Διάμετρος Αγωγού (mm)	ΔT/ΔL (°C/km)
1	50.00	1 → 7	75.00	74.15	100	-1.691
2	51.00	2 → 7	74.00	73.19	100	-1.626
3	101.00	7 → 8	73.67	72.85	200	-1.626
4	52.00	3 → 8	73.00	72.22	100	-1.562
5	53.00	4 → 8	72.00	71.25	100	-1.502
6	206.00	8 → 9	72.28	71.89	200	-0.778
7	54.00	5 → 9	71.00	70.28	100	-1.447
8	55.00	6 → 9	70.00	69.30	100	-1.390
9	315.00	9 → 10	71.16	70.91	200	-0.498



Εικόνα 5.8: Διάγραμμα σχέσης παροχής - πτώσης θερμοκρασίας ανά μήκος αγωγού για κάθε αγωγό εσωτερικής διαμέτρου 100 mm.



Εικόνα 5.9: Διάγραμμα σχέσης παροχής - πτώσης θερμοκρασίας ανά μήκος αγωγού για κάθε αγωγό εσωτερικής διαμέτρου 200 mm.

Παρατηρώντας τα δεδομένα των πιέσεων και των μεταβολών της θερμοκρασίας για τους αγωγούς ίδιας διαμέτρου, διαπιστώνεται ότι η πτώση της θερμοκρασίας από το ένα άκρο του αγωγού στο άλλο είναι αντιστρόφως ανάλογη της

παροχής του νερού που ρέει στο εσωτερικό του. Πρακτικά παρατηρείται ότι, για σταθερή διατομή, όταν αυξάνεται η παροχή του νερού, τότε η μεταβολή της θερμοκρασίας μειώνεται. Παρατηρώντας τα διαγράμματα των Εικόνων 5.8 και 5.9, διαπιστώνεται ότι σχέση παροχής – πτώσης θερμοκρασίας απεικονίζεται γραφικά με μία γραμμή μικρής καμπυλότητας. Από φυσική άποψης, το εν λόγω συμπέρασμα είναι λογικό, καθώς όταν αυξηθεί η ταχύτητα με την οποία μία σταθερή μάζα νερού διαρρέει έναν σωλήνα, τότε ταυτόχρονα μειώνεται ο χρόνος επαφής της με τα τοιχώματα του σωλήνα και επομένως λιγότερη θερμότητα μεταφέρεται από το νερό στο περιβάλλον παρατηρείται ακόμα ότι η αύξηση της διατομής του αγωγού προκαλεί μείωση της μεταβολής της θερμοκρασίας από το ένα άκρο στο άλλο. Μαθηματικά, τα φαινόμενα αυτά συνάδουν απόλυτα με την αρχή διατήρησης της θερμικής ορμής που εκφράζεται από τις εξισώσεις του θερμικού μοντέλου για κάθε στοιχείο του δικτύου.

Το μέγεθος $\Delta T / \Delta L$ δηλώνει με ποιοτικό τρόπο τη θερμική καταπόνηση του δικτύου στο συγκεκριμένο σημείο και πρακτικά αποτελεί έναν δείκτης θερμική απόδοσης του αγωγού. Όσο πιο κοντά στο 0 είναι οι τιμές του δείκτη, τόσο καλύτερη διατήρηση της θερμοκρασίας του νερού από τον αγωγό. Πολύ χαμηλές τιμές υποδεικνύουν αυξημένη απώλεια θερμότητας από το εσωτερικό του αγωγού στο περιβάλλον και για να αντιμετωπιστεί αυτό, θα πρέπει να επιλεγθεί ένας αγωγός μικρότερου συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, εάν είναι επιφανειακός να γίνει υπεδαφικός, ή να αυξηθεί η παροχή του νερού στο εσωτερικό του.

Προκειμένου να εξεταστεί η συμπεριφορά της θερμικής προσομοίωσης στους εσωτερικούς κόμβους, κατασκευάστηκε ο Πίνακας 5.11, που περιέχει αναλυτικά τους υπολογισμούς που οδήγησαν στην αξιολόγηση τη θερμοκρασίας των εσωτερικών κόμβων. Όπως έχει γίνει κατανοητό έως τώρα, η συμπεριφορά του θερμικού μοντέλου στους εσωτερικούς κόμβους θα πρέπει να συνάδει με την αρχή της διατήρησης της ενέργειας. Σε αυτή την περίπτωση η ενέργεια είναι η θερμότητα και η αρχή εκφράζεται από τις εξισώσεις του θερμικού προβλήματος για τους εσωτερικούς κόμβους. Σύμφωνα με την εξίσωση, το άθροισμα του γινομένου της παροχής και της θερμοκρασίας εξόδου κάθε στοιχείου που εισέρχεται στον εσωτερικό κόμβο θα πρέπει να ισούται με το άθροισμα του γινομένου της παροχής και της θερμοκρασίας εισόδου κάθε στοιχείου που εξέρχεται από τον εσωτερικό κόμβο. Αυτό σημαίνει ότι η θερμοκρασία το κόμβου θα εξαρτάται κυρίως από τη μάζα του νερού και την θερμότητα που περιέχει καθώς εισέρχεται ή εξέρχεται από τον κόμβο. Μαθηματικά το παραπάνω εκφράζεται με την

έννοια του σταθμισμένου μέσου όρου (Μ.Ο.), σύμφωνα με τον οποίο, η θερμοκρασία του κόμβου επηρεάζεται ανάλογα με τη βαρύτητα που δίνει η παροχή στη θερμοκρασία του άκρου του αγωγού που εισέρχεται ή εξέρχεται από αυτόν.

Παρατηρώντας τον Πίνακα 5.11, γίνεται κατανοητή η συμβολή της παροχής. Πράγματι η θερμοκρασία του εσωτερικού κόμβου καθορίζεται σε μεγαλύτερο βαθμό από την μεγαλύτερη παροχή κατά την είσοδο στον κόμβο. Αξίζει να σημειωθεί ότι στο εν λόγω δίκτυο, και οι τρεις εσωτερικοί κόμβοι είχαν μόνο ένα στοιχείο εξόδου, επομένως ο σταθμισμένος μέσος όρος της θερμοκρασίας υπολογίστηκε για κάθε περίπτωση από τα στοιχεία εισόδου και στη συνέχεια επιβεβαιώθηκε από τη θερμοκρασία του στοιχείου της εξόδου. Σε κάθε περίπτωση, ο σταθμισμένος μέσος όρος ταυτίζεται με τη θερμοκρασία του στοιχείου εξόδου, επιβεβαιώνοντας την αρχή διατήρησης της ενέργειας.

Πίνακας 5.11: Παροχή κάθε στοιχείου και σταθμισμένοι μέσοι όροι θερμοκρασίας στοιχείων που εισέρχονται ή εξέρχονται από κάθε εσωτερικό κόμβο.

Κόμβος	Στοιχείο	Κατάσταση Στοιχείου	Παροχή (m ³ /h)	Θερμοκρασία (°C)	Βάρος (%)	Σταθμισμένη Θερμοκρασία (°C)	Σταθμισμένος Μ.Ο. Θερμοκρασίας
7 Εσωτερικός	1	Είσοδος	50.00	74.15	T _{out}	49.5	73.67
	2	Είσοδος	51.00	73.19	T _{out}	50.5	
	3	Έξοδος	101.00	73.67	T _{in}	100.0	73.67
8 Εσωτερικός	3	Είσοδος	101.00	72.85	T _{out}	49.0	72.28
	4	Είσοδος	52.00	72.22	T _{out}	25.2	
	5	Είσοδος	53.00	71.25	T _{out}	25.7	
	6	Έξοδος	206.00	72.28	T _{in}	100.0	72.28
9 Εσωτερικός	6	Είσοδος	206.00	71.89	T _{out}	65.4	71.17
	7	Είσοδος	54.00	70.28	T _{out}	17.1	
	8	Είσοδος	55.00	69.30	T _{out}	17.5	
	9	Έξοδος	315.00	71.16	T _{in}	100.0	71.16

5.7. Αξιολόγηση βελτιστοποίησης δικτύου περίπτωσης

Στην Ενότητα 4.10 εξεξηγήθηκε η διαδικασία βελτιστοποίησης της μοντελοποίησης του δικτύου αγωγών. Στην Ενότητα αυτή αναλύεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα της μεθόδου βελτιστοποίησης. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η διαδικασία απαιτείται μία τιμή θερμοκρασίας εξόδου από το σύστημα, έτσι ώστε να τροποποιηθούν ομοιόμορφα οι τιμές του συνολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας (U). Το εν λόγω τεχνητό σύστημα διαθέτει μόνο έναν κόμβο εξόδου, τον εξωτερικό κόμβο 10. Επομένως για τη βελτιστοποίηση θα χρησιμοποιηθεί η θερμοκρασία του κόμβου 10.

Η αξιολόγηση της αξιοπιστίας της βελτιστοποίησης κατασκευάστηκε με την εξής φιλοσοφία. Το πρόγραμμα της προσομοίωσης αυτή τη στιγμή προβλέπει στον κόμβο 10, μία θερμοκρασία 70.92 °C. Εάν τροποποιηθεί ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας σε μία τιμή διαφορετική του 1.0 BTU/h/ft²/°F και πραγματοποιηθεί μία βελτιστοποίηση για θερμοκρασία εξόδου του συστήματος ίση με 70.92 °C, τότε το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης θα πρέπει να είναι η μετατροπή του συντελεστή τροποποίησης των συντελεστών U (σ) στην τιμή 1, έτσι ώστε οι τιμές U να είναι ίδιες με αυτές που εισήχθησαν αρχικά κατά την κατασκευή του δικτύου.

Ο έλεγχος αποφασίστηκε να πραγματοποιηθεί αποδίδοντας την τιμή 2 στον συντελεστή σ , έτσι ώστε όλοι οι συνολικοί συντελεστές μεταφοράς θερμότητας να έχουν την τιμή 2 BTU/h/ft²/°F. Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης ήταν να μεταβληθεί η τιμή θερμοκρασίας του κόμβου 10 στους 69.43 °C.

Θέτοντας ως μετρούμενη θερμοκρασία του κόμβου στο πεδίο την τιμή 70.92°C, ίση δηλαδή με τη θερμοκρασία που προβλέφθηκε από το μοντέλο κατά την αρχική προσομοίωση, προκύπτει ότι μετά από 25 επαναλήψεις της μεθόδου gradient descent, με ρυθμό εκπαίδευσης $\alpha = 0.1$, ο συντελεστής σ έχει λάβει την τιμή 0.999. Η τιμή αυτή θεωρείται αποδεκτή, καθώς παρουσιάζει απόκλιση μόλις 0.1%, σε σχέση με την αρχική του ($\sigma = 1$).

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Έχοντας φτάσει πλέον στην ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, πρέπει να γίνει μία σύνοψη των βασικών συμπερασμάτων που προέκυψαν κατά την ανάπτυξη του λογισμικού μοντελοποίησης του δικτύου αγωγών μεταφοράς γεωθερμικού ρευστού για ένα γεωθερμικό πεδίο χαμηλής ενθαλπίας και κατά την διεξαγωγή των προσομοιώσεων για τη μελέτη περίπτωσης που εξετάστηκε, δηλαδή το τεχνητό δίκτυο αγωγών γεωθερμικού ρευστού χαμηλής ενθαλπίας. Ακόμα, αξίζει να καταγραφούν κάποιες προτάσεις για τη μελλοντική βελτίωση του λογισμικού που αναπτύχθηκε, όπως αυτές προέκυψαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Τα φαινόμενα που προκαλούνται κατά τη ροή του μονοφασικού υγρού θερμού νερού μέσα σε ένα δίκτυο αγωγών περιγράφονται από σύνθετες διαφορικές εξισώσεις. Η μοντελοποίηση τους με τη μέθοδο “element by element” επιτυγχάνει τη μετατροπή των δυσεπίλυτων διαφορικών εξισώσεων σε σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων, επιλύσιμο με τη χρήση υπολογιστικών μεθόδων.

Το μαθηματικό πρόβλημα της μοντελοποίησης που προκύπτει από τη γεωμετρία του δικτύου είναι ιδιαίτερα σύνθετο, καθώς αποτελείται από μεγάλο αριθμό αγνώστων και επομένως για την επίλυσή του απαιτεί ένα ισάριθμο με τους αγνώστους σύστημα εξισώσεων. Η αποσύζευξη του προβλήματος σε δύο επιμέρους, ένα υδραυλικό και ένα θερμικό, η κυκλική επίλυσή τους μέχρι την τελική σύγκλιση/σύζευξη, μετά από αριθμό επαναλήψεων αποδείχθηκε επιτυχής.

Ο αλγόριθμος εισαγωγής των παραμέτρων της μοντελοποίησης στο λογισμικό, με τη μορφή αρχείου κειμένου (txt), αποδείχθηκε απόλυτα αξιόπιστος, καθώς λειτούργησε επιτυχώς σε κάθε δοκιμή που διεξήχθη και αρκετά εύελκτος και εύχρηστος, αφού δίνει την δυνατότητα στο χρήστη να εισάγει τα δεδομένα με οποιαδήποτε σειρά, διατηρώντας φυσικά την προκαθορισμένη μορφολογία που απαιτείται για την ανάγνωση, και να προσθέσει οποιοδήποτε σχόλιο της αρεσκείας του, μετά από το χαρακτήρα “ # “. Ακόμα, ο κώδικας του λογισμικού αναπτύχθηκε κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να αναγνωρίσει ελλιπή ή υπερβολικό αριθμό δεδομένων,

να σταματήσει την εκτέλεση του κώδικα και να ενημερώσει το χρήστη για το οποιοδήποτε σφάλμα, έτσι ώστε η προσομοίωση να επιτελεσθεί με ομαλό τρόπο.

Η επίλυση του υδραυλικού προβλήματος μέσω της επαναληπτικής μεθόδου Newton – Rapshon (N – R), η οποία προϋποθέτει την κατασκευή και αντιστροφή του Ιακωβιανού Μητρώου, δύναται να παρουσιάσει δυσχέρειες κατά την αντιστροφή του Μητρώου. Για την αποφυγή τους, στην παρούσα εργασία δεν έγινε κανονικοποίηση των μεταβλητών, αλλά αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος εκτίμησης αρχικών τιμών, ο οποίος εκτιμά επιτυχώς αρχικές τιμές για τις παραμέτρους πίεσης των κόμβων, παροχής και θερμοκρασίας των στοιχείων. Ο αλγόριθμος εκτιμά ασφαλείς αρχικές τιμές για την επίλυση του προβλήματος, με αποτέλεσμα η μέθοδος N – R να λειτουργεί για όλες τις δοκιμές που έγιναν με τη χρήση του λογισμικού προσομοίωσης που αναπτύχθηκε.

Τα αποτελέσματα της πίεσης σε κάθε κόμβο, της παροχής και των θερμοκρασιών σε κάθε στοιχείο του υδραυλικού και του θερμικού προβλήματος, που προέκυψαν από τη μελέτη περίπτωσης που εξετάστηκε, αξιολογήθηκαν ως λογικά, δεδομένων των παραμέτρων. Επίσης, η σχέση της πτώσης πίεσης με την παροχή και η σχέση της απώλειας θερμότητας για κάθε αγωγό συμβαδίζουν απόλυτα με τις εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των μοντέλων. Ακόμα, αποδείχθηκε ότι τα αποτελέσματα πίεσης και παροχής της προσομοίωσης συμβαδίζουν με αντίστοιχα δεδομένα, που προήλθαν από απλούστερα λογισμικά προσομοίωσης παρόμοιων δικτύων.

Η αξιολόγηση της σχέσης της πτώσης πίεσης ανά μονάδα μήκους του αγωγού με την παροχή επιβεβαίωσε ότι για περιπτώσεις τυρβώδους ροής νερού σε δίκτυα γεωθερμικών πεδίων χαμηλής ενθαλπίας παρατηρείται μη γραμμικότητα του προβλήματος. Απέδειξε ωστόσο, ότι είναι περιορισμένη, με αποτέλεσμα, όταν εφαρμόζονται μέθοδοι για μη γραμμικά προβλήματα, αυτές να συγκλίνουν πολύ γρήγορα. Φυσικά η παραπάνω παρατήρηση ισχύει μόνο όταν το ρευστό είναι υγρό νερό και η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στην χαμηλή συμπιεστότητά του. Προφανώς σε ένα δίκτυο μεταφοράς διφασικού ρευστού ή μονοφασικού ατμού, η συμπεριφορά θα ήταν διαφορετική και η πτώση της πίεσης θα ήταν μεγαλύτερη.

Το λογισμικό προσφέρει ακόμα στο χρήστη τη δυνατότητα να πραγματοποιήσει βελτιστοποίηση των αβέβαιων παραμέτρων του δικτύου, ούτως ώστε αυτό να

αναπαράγει τις πραγματικές μεταβολές πίεσης και θερμοκρασίας, όπως αυτές μετρούνται στο πεδίο. Η βελτιστοποίηση των παραμέτρων γίνεται μέσω της τροποποίησης ενός πολλαπλασιαστή του συνολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, ο οποίος αποδείχθηκε ότι επιφέρει τη μεγαλύτερη επίδραση στο δίκτυο. Βέβαια προκειμένου να πραγματοποιηθεί η συγκεκριμένη διαδικασία απαιτείται η τιμή της θερμοκρασίας στον τερματικό κόμβο του δικτύου, όπως αυτή μετρήθηκε στο πεδίο, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η διαφορά της θερμοκρασίας σε αυτόν τον κόμβο, που προέκυψε από την προσομοίωση και αυτής που μετρήθηκε πειραματικά. Η ταύτιση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και των μετρήσεων του πεδίου, σημαίνει ότι η προσομοίωση είναι πλέον ρυθμισμένη να αναπαράγει με ακρίβεια την πραγματικότητα, επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ακριβή προσομοίωση κάθε άλλου σεναρίου λειτουργίας του δικτύου, παρέχοντας στο χρήστη του λογισμικού τη δυνατότητα να βελτιστοποιήσει το δίκτυο για διαφορετικές, μελλοντικές, σχεδιάσεις.

Συνολικά το λογισμικό που αναπτύχθηκε πέτυχε τον σκοπό του, ως ένα εργαλείο που θα βοηθήσει το μηχανικό να σχεδιάσει ένα δίκτυο αγωγών κατά το βέλτιστο τρόπο. Στο τέλος της προσομοίωσης παρέχεται μία ξεκάθαρη εικόνα των αγωγών στους οποίους εμφανίζεται μεγάλη απώλεια πίεσης ή θερμότητας ανά μονάδα μήκους των σωληνώσεων, που λειτουργεί ως ένδειξη για το σχεδιαστή προκειμένου να εντοπίσει τα αδύναμα σημεία του δικτύου και σε μελλοντικές υλοποιήσεις να μπορέσει να τα τροποποιήσει, έτσι ώστε να βελτιστοποιηθεί η λειτουργία και η απόδοση του δικτύου.

Κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, προέκυψαν ορισμένες ιδέες για τη μελλοντική ανάπτυξη του λογισμικού. Η βασικότερη από αυτές ήταν η ανάπτυξη ενός Γραφικού Περιβάλλοντος Χρήστη (Graphical User Interface, GUI), το οποίο θα καθιστά το λογισμικό περισσότερο φιλικό προς το χρήστη. Το GUI θα δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να εισάγει όλα τα απαραίτητα δεδομένα για την προσομοίωση του δικτύου με μεγαλύτερη ευκολία, δίνοντάς του παράλληλα συμβουλές για τη σωστή καταχώρηση τιμών στις διάφορες παραμέτρους, καθώς και οδηγίες για τη συμπλήρωση των εκάστοτε πεδίων. Μελλοντικός στόχος επίσης είναι η δυνατότητα γραφικής οπτικοποίησης του δικτύου ύστερα από την εισαγωγή των συντεταγμένων των κόμβων και η εξαγωγή της γραφικής αναπαράστασης του δικτύου σε αρχείο kml, έτσι ώστε να μπορεί να εισαχθεί στο

πρόγραμμα Google Earth. Τέλος, το GUI θα παρουσιάζει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για κάθε αγωγό και για κάθε κόμβο στο χρήστη, θα κατασκευάζει με αυτά αυτόματα τα διαγράμματα σχέσης $q - \Delta p/\Delta L$ και $q - \Delta T/\Delta L$, τα οποία στην παρούσα εργασία κατασκευάστηκαν χειροκίνητα, και θα δίνει στο χρήστη σαφή ένδειξη των αδύναμων σημείων του δικτύου, υπογραμμίζοντας τις σωληνώσεις με τις μεγαλύτερες απώλειες πίεσης και θερμότητας ανά μονάδα μήκους τους.

Για μαθηματικούς λόγους και για να εξασφαλιστεί η υπό οποιοσδήποτε συνθήκες σύγκλιση των αριθμητικών μεθόδων που χρειάζεται, θα έπρεπε οι μεταβλητές να κανονικοποιηθούν. Επομένως, θα πρέπει μελλοντικά να εφαρμοστεί κάποιος αλγόριθμος γενικευμένης κανονικοποίησης.

Σημαντική βελτίωση των δυνατοτήτων του λογισμικού και των περιπτώσεων εφαρμογής του, θα είναι η ανάπτυξη του κώδικά του, έτσι ώστε να μπορεί να προσομοιώνει διφασική ροή ρευστού, επεκτείνοντάς τη χρησιμότητά του και στη μελέτη δικτύων γεωθερμικών πεδίων μέσης και υψηλής ενθαλπίας. Επίσης, ο κώδικας μπορεί να αναπτυχθεί κατά τέτοιον τρόπο, ώστε να καλύπτει την ύπαρξη καμπύλων στους αγωγούς, επιφανειακών αντλιών, διαχωριστήρων και βαλβίδων στο δίκτυο, επεκτείνοντας τη δυνατότητα προσομοίωσης δικτύων με επιπρόσθετο βαθμό πολυπλοκότητας και βοηθητικού εξοπλισμού.

Τέλος, μία άλλη σημαντική τροποποίηση που αξίζει να γίνει μελλοντικά, είναι η περαιτέρω ανάπτυξη του κώδικα της βελτιστοποίησης, έτσι ώστε να μπορεί να τροποποιεί τη θερμοκρασία του εδάφους, το θερμικό συντελεστή κάθε αγωγού ξεχωριστά ή οποιαδήποτε άλλη αβέβαιη παράμετρο, με σκοπό να αναπαραγάγει τα πειραματικά δεδομένα του πεδίου, τα οποία θα περιλαμβάνουν και την τιμή της πίεσης στον τερματικό κόμβο και οποιαδήποτε άλλη μέτρηση διατεθεί.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] W. E. Glassley, *Geothermal energy: renewable energy and the environment*. Boca Raton: CRC Press, 2010.
- [2] ‘Statistical Review of World Energy | Energy economics | Home’, *bp global*. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html> (ημερομηνία πρόσβασης 8 Ιούλιος 2022).
- [3] R. Kothari, V. V. Tyagi, και A. Pathak, ‘Waste-to-energy: A way from renewable energy sources to sustainable development’, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, τ. 14, τχ. 9, σσ. 3164–3170, Δεκεμβρίου 2010, doi: 10.1016/j.rser.2010.05.005.
- [4] European Commission. Directorate General for Communication., *European green deal: delivering on our targets*. LU: Publications Office, 2021. Ημερομηνία πρόσβασης: 8 Ιούλιος 2022. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://data.europa.eu/doi/10.2775/595210>
- [5] Μ. Φυτίκας και Ν. Ανδρίτσος, *Γεωθερμία*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα, 2004.
- [6] Β. Γαγάνης, *Μηχανική Γεωθερμικών Συστημάτων, Σημειώσεις για το μάθημα «Επιστήμη και Τεχνολογία Γεωθερμικών Πεδίων»*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2021.
- [7] Γ. Ι. Καρυδάκης, *Γεωθερμική Ενέργεια*. Αθήνα: Εκδόσεις Αθλότυπο, 2005.
- [8] Ν. 4602/2019, *Εφημερίδα της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας*. 2019.
- [9] Μ. Φυτίκας, ‘Το γεωθερμικό δυναμικό της Ελλάδας’, Αθήνα, 2020.
- [10] A. Manzella, ‘Geothermal energy’, *EPJ Web Conf.*, τ. 148, σ. 00012, 2017, doi: 10.1051/epjconf/201714800012.
- [11] Κ. Α. Κατσιφαράκης, ‘Ενότητα 3: Η Γεωθερμική Ενέργεια’, στο *Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα, Γεωθερμία*, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2013, σ. 30.
- [12] E. Barbier, ‘Geothermal energy technology and current status: an overview’, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, τ. 6, τχ. 1–2, σσ. 3–65, Ιανουαρίου 2002, doi: 10.1016/S1364-0321(02)00002-3.
- [13] D. K. Todd και L. W. Mays, *Groundwater hydrology*, 3rd ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2005.
- [14] B. Godschalk, M. Henssen, και G. Bakema, *Aquifer Thermal Energy Storage in the Netherlands, a research programme (2010-2012) Archiving More With Underground Thermal Energy Storage. Extended English summary*. 2019.
- [15] R. A. Tonkin, M. J. O’Sullivan, και J. P. O’Sullivan, ‘A review of mathematical models for geothermal wellbore simulation’, *Geothermics*, τ. 97, σ. 102255, Δεκεμβρίου 2021, doi: 10.1016/j.geothermics.2021.102255.
- [16] G. Bjornsson, ‘A multi-feedzone geothermal wellbore simulator’, LBL-23546, 6569407, Μαΐου 1987. doi: 10.2172/6569407.

- [17] T. L. Gould, ‘Vertical Two-Phase Steam-Water Flow in Geothermal Wells’, *J. Pet. Technol.*, τ. 26, τχ. 08, σσ. 833–842, Αυγούστου 1974, doi: 10.2118/4961-PA.
- [18] T. R. King, D. H. Freeston, και R. L. Winmill, ‘A Case Study of Wide Diameter Casing for Geothermal Systems’, *UNT Digital Library*, 1 Ιανουάριος 1995. <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc888492/> (ημερομηνία πρόσβασης 8 Ιούλιος 2022).
- [19] A. Battistelli, J. Rivera, και C. Ferragina, ‘The modelling of flow in geothermal wells applied to the reservoir engineering study of the Asal field: Republic of Djibouti’, Αυγούστου 1992.
- [20] J. Rutqvist, Q. Zhou, L. Pan, N. Spycher, P. Dobson, και M. Hu, ‘Coupled Processes Analysis of Flexible Geothermal Production from Steam- and Liquid-dominated Systems: Impact on Wells’, σ. 17.
- [21] Κ. Α. Κατσιφάρκης, ‘Ενότητα 5: Γεωθερμική ενέργεια χαμηλής ενθαλπίας’, στο *Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα, Γεωθερμία*, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2013, σ. 36.
- [22] J. W. Lund, ‘Direct Heat Utilization of Geothermal Resources Worldwide 2005’, *ASEG Ext. Abstr.*, τ. 2006, τχ. 1, σσ. 1–15, Δεκεμβρίου 2006, doi: 10.1071/ASEG2006ab099.
- [23] J. W. Lund, Επιμ., *Geothermal direct use engineering and design guidebook*, 3. ed. Klamath Falls, Oregon: Geo-Heat Center, Oregon Institute of Technology, 1998.
- [24] G. S. Frankel, ‘Pitting Corrosion of Metals: A Review of the Critical Factors’, *J. Electrochem. Soc.*, τ. 145, τχ. 6, σσ. 2186–2198, Ιουνίου 1998, doi: 10.1149/1.1838615.
- [25] E. M. Redline, M. C. Celina, T. Sugama, και T. Pyatina, ‘Evaluation of High Temperature Elastomers for Geothermal Wells’, SAND--2015-9580, 1504859, Σεπτεμβρίου 2015. doi: 10.2172/1504859.
- [26] S. G. A. Gouda, ‘Using of Geothermal Energy in Heating and Cooling of Agricultural Structures’, Master Thesis, Moshtohor Benha University, Moshtohor, 2015.
- [27] S. E. Beall και G. Samuels, ‘USE OF WARM WATER FOR HEATING AND COOLING PLANT AND ANIMAL ENCLOSURES.’, ORNL-TM--3381, 4710463, Ιανουαρίου 1971. doi: 10.2172/4710463.
- [28] K. Dimitrov και J. Dimitrova, ‘Industrial Uses of Geothermal Energy in Kocani’.
- [29] H. Cross, ‘Analysis of flow in networks of conduits or conductors’, *Univ. Ill. Eng. Exp. Stn.*, τ. 286, σ. 34, 1936.
- [30] M. H. Afshar και A. Afshar, ‘An Element By Element Algorithm For Pipe Network Analysis’, *Trans. Ecol. Environ.*, τ. 30, σ. 10, 1999.
- [31] *IPM PROSPER User Manual*. Petroleum Experts Limited, 2018.
- [32] ‘Water - Density Viscosity Specific Weight’. https://www.engineersedge.com/physics/water__density__viscosity__specific_weight_13146.htm (ημερομηνία πρόσβασης 8 Ιούλιος 2022).

- [33] ‘5 Concepts You Should Know About Gradient Descent and Cost Function | Talking Machines’. <https://www.thetalkingmachines.com/article/5-concepts-you-should-know-about-gradient-descent-and-cost-function> (ημερομηνία πρόσβασης 8 Ιούλιος 2022).
- [34] ‘Pipe Roughness Coefficients Table Charts | Hazen-Williams Coefficient | Manning Factor’. https://www.engineersedge.com/fluid_flow/pipe-roughness.htm (ημερομηνία πρόσβασης 8 Ιούλιος 2022).
- [35] ‘Steel Pipes Schedule 40 - Pressure Loss’. https://www.engineeringtoolbox.com/pressure-loss-steel-pipes-d_307.html (ημερομηνία πρόσβασης 8 Ιούλιος 2022).