

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ  
**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
"ΓΕΩΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ"**



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ  
ΓΕΩΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΕΣ  
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΓΙΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗ-ΨΥΞΗ ΚΤΗΡΙΟΥ  
ΓΡΑΦΕΙΩΝ**

**ΑΝΔΡΕΑΣ Ν. ΚΟΥΤΕΛΙΔΑΚΗΣ**

ΑΡΧΙΚΗ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΠΟ ΑΡΧΗ ΕΩΣ 26/03/2021

Επιβλέπων: Καθηγητής **Εμμανουήλ Μανούτσογλου**

Αν. Καθηγητής **Εμμανουήλ Μαθιουδάκης**

Δρ. **Κωνσταντίνος Καρύτσας**

ΤΕΛΙΚΗ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Επιβλέπων: Καθηγητής **Εμμανουήλ Μανούτσογλου**

Δρ. **Κωνσταντίνος Καρύτσας**

Δρ. **Νικόλαος Σπανουδάκης**

**Αφιερώνω τη μεταπτυχιακή μου εργασία στη μνήμη του αγαπημένου μου Καθηγητή και φίλου Εμμανουήλ Μαθιουδάκη**

**Ο Καθηγητής Μαθιουδάκης, ο δικός μου Μανώλης ήταν ο άνθρωπος, ο οποίος πίστεψε στις δυνατότητές μου και με στήριξε με οποιοδήποτε τρόπο τόσο σε επίπεδο προσωπικό όσο και στη μόρφωσή μου και τη γενικότερη εξέλιξή μου ως άνθρωπο. Ήταν, είναι και θα είναι μέσα στην καρδιά μου για πάντα με τα υποστηρικτικά του λόγια «ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΕΙ ΚΑΤΙ ΠΟΥ ΝΑ ΜΗ ΛΥΝΕΤΑΙ», «ΟΛΑ ΜΠΟΡΟΥΜΕ ΝΑ ΤΑ ΦΤΙΑΞΟΥΜΕ», «ΠΑΝΤΑ ΝΑ ΧΑΜΟΓΕΛΑΣ, ΝΑ ΕΙΣΑΙ Η ΧΑΡΑ ΤΗΣ ΖΩΗΣ, «ΝΑ ΑΓΑΠΑΣ ΤΟΥΣ ΓΟΝΕΙΣ ΣΟΥ, ΝΑ ΜΗΝ ΤΟΥΣ ΣΤΕΝΑΧΩΡΕΙΣ», «ΝΑ ΠΙΣΤΕΥΕΙΣ ΣΤΙΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΣΟΥ», «ΝΑ ΠΡΟΣΦΕΡΕΙΣ ΟΠΟΥ ΜΠΟΡΕΙΣ», «ΝΑ ΚΑΝΕΙΣ ΣΤΗ ΖΩΗ ΣΟΥ ΑΥΤΟ ΠΟΥ ΑΓΑΠΑΣ». Εκείνο που με ανακουφίζει είναι το γεγονός ότι όσο ζούσε είχα τη δυνατότητα να του εκφράσω την απέραντη ευγνωμοσύνη που ένιωθα για εκείνον. Χαρακτηριστικά, του είχα πει: «ΑΓΑΛΜΑ ΝΑ ΣΟΥ ΧΤΙΣΩ ΣΤΗΝ ΠΥΛΗ ΤΟΥ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥ, ΝΟΙΩΘΩ ΟΤΙ ΔΕΝ ΦΤΑΝΕΙ ΓΙΑ ΟΛΑ ΟΣΑ ΜΟΥ ΕΧΕΙΣ ΠΡΟΣΦΕΡΕΙ ΣΤΗ ΖΩΗ ΜΟΥ !».**

**Αν είχε δύναμη η ψυχή να βγάλει την κραυγή της,  
Θα σχίζανε Μανώλη μου η τα βουνά της Κρήτης !**

**Δεν έχω λόγια να εκφραστώ, να πω πόσο λυπάμαι,  
Καλόκαρδο και γελαστό, έτσι θα σε θυμάμαι !**

# Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή Εμμανουήλ Μαθιουδάκη ο οποίος δεν βρίσκεται στην ζωή, για την αμέριστη βοήθεια που μου παρείχε τόσο σε επιστημονικό όσο και ψυχολογικό επίπεδο καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επιβλέποντα της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας, Καθηγητή Εμμανουήλ Μανούτσογλου για την καθοδήγηση που μου παρείχε στην επιστημονική περιοχή της Γεωθερμίας σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Ιδιαίτερα θέλω να ευχαριστήσω τα μέλη της Εξεταστικής Επιτροπής Δρ. Κωνσταντίνο Καρύτσα και Δρ. Νικόλαο Σπανουδάκη για την επιστημονική καθοδήγηση και τη πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχαν κατά τη διάρκεια της ερευνητικής διαδικασίας καθώς και τον κύριο Δημήτριο Μενδρινό για την βοήθεια που μου παρείχε για την ολοκλήρωση της εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ τα μέλη της οικογένειας μου, χωρίς την υποστήριξη των οποίων δεν θα μπορούσα να ολοκληρώσω το συγκεκριμένο Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών.



# Περίληψη

Ένας σημαντικός παράγοντας για τον άρτιο σχεδιασμό και την επιτυχή εγκατάσταση ενός συστήματος αβαθούς γεωθερμίας αποτελεί η αξιόπιστη προσομοίωση του συστήματος μαζί με τη διεξαγωγή της δοκιμής θερμικής απόκρισης εδάφους. Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας αποτελεί η μοντελοποίηση, παραμετροποίηση και υλοποίηση προσομοιώσεων συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας χρησιμοποιώντας το λογισμικό ανοικτού κώδικα OpenGeoSys. Το λογισμικό αυτό επιτρέπει την προσομοίωση της λειτουργίας συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας από τους μηχανικούς εφαρμόζοντας σύγχρονες αριθμητικές μεθόδους επίλυσης προβλημάτων αρχικών και συνοριακών τιμών, όπως αυτές έχουν υλοποιηθεί σε σύγχρονες μαθηματικές βιβλιοθήκες. Επίσης η διεξαγωγή των επιστημονικών υπολογισμών των αριθμητικών μεθόδων μπορεί να υλοποιηθεί στα πλέον σύγχρονα υπολογιστικά περιβάλλοντα.

Η μεταπτυχιακή εργασία αποτελείται από τα παρακάτω τέσσερα κεφάλαια :

Στο πρώτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες της γεωθερμίας καθώς και των συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας. Επίσης συνοπτικά περιγράφεται η λειτουργία των αντλιών θερμότητας και ιδιαίτερα των γεωθερμικών αντλιών.

Το δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται στο λογισμικό OpenGeoSys για την προσομοίωση της λειτουργίας συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας. Περιγράφεται η διαδικασία εισαγωγής του προβλήματος διάδοσης θερμότητας κατά τη λειτουργία του γήινου εναλλάκτη θερμότητας καθώς και του συνολικού δικτύου συστήματος αβαθούς γεωθερμίας.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μοντελοποίηση και η διαδικασία προσομοίωσης της δοκιμής θερμικής απόκρισης ενός συστήματος αβαθούς γεωθερμίας για την προσέγγιση

των θερμικών παραμέτρων του εδάφους με την χρήση του λογισμικού OpenGeoSys. Στη συνέχεια περιγράφεται το σύστημα αβαθούς γεωθερμίας του ΚΑΠΕ, του οποίου προσομοιώθηκε η δοκιμή θερμικής απόκρισης των γεωεναλλακτών του καθώς και η συνολική διαδικασία ψύξης θέρμανσης του συστήματος.

Τέλος, στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη χρήση του λογισμικού OpenGeoSys για την προσομοίωση της δοκιμής θερμικής απόκρισης και της λειτουργίας συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας.

# Περιεχόμενα

<b>Ευχαριστίες</b>	<b>iii</b>
<b>Περίληψη</b>	<b>v</b>
<b>Κατάλογος Σχημάτων</b>	<b>ix</b>
<b>1 Γεωθερμία</b>	<b>1</b>
1.1 Κατηγορίες γεωθερμικών συστημάτων . . . . .	2
1.2 Συστήματα αβαθούς γεωθερμίας . . . . .	2
1.3 Χαρακτηριστικά συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας . . . . .	3
1.4 Αντλίες θερμότητας . . . . .	13
<b>2 Λογισμικό OpenGeoSys</b>	<b>19</b>
2.1 Εισαγωγή στη χρήση του λογισμικού OpenGeoSys . . . . .	19
2.2 Παραμετροποίηση για την προσομοίωση της λειτουργίας γεωεναλλακτών. .	20
2.2.1 Προσομοίωση διάδοσης θερμότητας με την χρήση γήινων εναλλακτών . .	20
2.2.2 Προσομοίωση διάδοσης θερμότητας με την χρήση συστοιχίας γήινων εναλ- λακτών . . . . .	27
<b>3 Προσομοίωση δοκιμής θερμικής απόκρισης γήινων εναλλακτών θερμότη- τας (TRT)</b>	<b>33</b>
3.1 Προσομοίωση δοκιμής θερμικής απόκρισης και υπολογισμός θερμικών παραμέτρων του εδάφους . . . . .	33

3.1.1 Δοκιμή θερμικής απόκρισης (TRT) γεωεναλλάκτη τύπου 1U . . . . .	38
3.1.2 Δοκιμή θερμικής απόκρισης (TRT) γεωεναλλάκτη τύπου 2U . . . . .	42
3.1.3 Δοκιμή θερμικής απόκρισης (TRT) γεωεναλλάκτη ομοαξονικού τύπου . .	46
3.1.4 Δοκιμή θερμικής απόκρισης (TRT) γεωεναλλάκτη ελικοειδούς τύπου . . .	50
3.2 Προσομοίωση συστήματος γεωθερμίας σε πραγματικές συνθήκες . . . . .	54
3.2.1 Σύστημα γεωθερμίας σε λειτουργία ψύξης - θέρμανσης . . . . .	60
<b>4 Συμπεράσματα</b>	<b>65</b>
<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>67</b>
<b>Α΄ Προσομοίωση σε λειτουργία θέρμανσης</b>	<b>71</b>
<b>Β΄ Προσομοίωση σε λειτουργία ψύξης</b>	<b>83</b>
<b>Γ΄ Προσομοίωση δοκιμής θερμικής απόκρισης γεωεναλλάκτη τύπου 1U</b>	<b>95</b>
<b>Δ΄ Προσομοίωση δοκιμής θερμικής απόκρισης γεωεναλλάκτη τύπου 2U</b>	<b>113</b>
<b>Ε΄ Προσομοίωση δοκιμής θερμικής απόκρισης γεωεναλλάκτη ομοαξονικού τύπου</b>	<b>129</b>
<b>΄ Προσομοίωση δοκιμής θερμικής απόκρισης γεωεναλλάκτη ελικοειδούς τύπου</b>	<b>143</b>



# Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Συστήματα ανοιχτού βρόχου [24]. . . . .	5
1.2	Συστήματα κλειστού βρόχου [24]. . . . .	6
1.3	Γεωεναλλάκτης τύπου 1U [4]. . . . .	8
1.4	Γεωεναλλάκτης τύπου 2U [4]. . . . .	9
1.5	Γεωεναλλάκτης ομοαξονικού τύπου [4]. . . . .	9
1.6	Γεωεναλλάκτης τύπου ελικοειδούς [4]. . . . .	10
1.7	Βασικά εξαρτήματα αντλίας θερμότητας. . . . .	14
1.8	Γεωθερμική αντλία θερμότητας [24]. . . . .	17
2.1	Παράμετροι εισόδου OpenGeoSys. . . . .	22
2.2	Διαστάσεις γεώτρησης στο OpenGeoSys . . . . .	23
2.3	Διατομές των ειδών των γεωεναλλακτών [1]. . . . .	24
2.4	Ιδιότητες σωλήνων OpenGeoSys . . . . .	24
2.5	Ορισμός μοντέλου στο OpenGeoSys με χρήση TemperatureCurveConstantFlow .	26
2.6	Ορισμός θερμικών ιδιοτήτων του ενέματος στο OpenGeoSys . . . . .	26
2.7	Ορισμός θερμικών ιδιοτήτων ψυκτικού στο OpenGeoSys . . . . .	27
2.8	Λειτουργία PipeNetwork στη διαδικασία HeatTransportBHE . . . . .	28
2.9	Μοντέλο δικτύου αγωγών στο TESPy . . . . .	29
2.10	Ορισμός μεταβλητών του δικτύου. . . . .	29
2.11	Ορισμός στοιχείων δικτύου. . . . .	29
2.12	Παραμετροποίηση στοιχείων. . . . .	30

2.13 Διασυνδέσεις αγωγών. . . . .	31
2.14 Χαρακτηριστικά ρευστού και θερμοκρασία εκροής . . . . .	32
3.1 Διάταξη εξοπλισμού δοκιμής θερμικής απόκρισης (TRT) [25]. . . . .	34
3.2 Γεωεναλλάκτης τύπου 1U σχέδιο ΚΑΠΕ [4]. . . . .	38
3.3 Αρχείο εισόδου για την δημιουργία των πεπερασμένων στοιχείων στο πρόγραμμα BHE SETUP TOOL. . . . .	39
3.4 Γεωμετρία γεωεναλλάκτη τύπου 1U (DataExplorer). . . . .	39
3.5 Διακριτοποίηση γεωεναλλάκτη τύπου 1U (DataExplorer). . . . .	40
3.6 Διάγραμμα θερμοκρασίας εισόδου-εξόδου σε συνάρτηση με τον χρόνο γεωεναλ- λάκτη τύπου 1U . . . . .	40
3.7 Διάγραμμα μέσης θερμοκρασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο σε λογαριθμική κλίμακα γεωεναλλάκτη τύπου 1U . . . . .	41
3.8 Γεωεναλλάκτης τύπου 2U σχέδιο ΚΑΠΕ [4]. . . . .	42
3.9 Αρχείο εισόδου για την δημιουργία των πεπερασμένων στοιχείων στο πρόγραμμα BHE SETUP TOOL. . . . .	43
3.10 Γεωμετρία γεωεναλλάκτη τύπου 2U (DataExplorer). . . . .	43
3.11 Διακριτοποίηση γεωεναλλάκτη τύπου 2U (DataExplorer). . . . .	44
3.12 Διάγραμμα θερμοκρασίας εισόδου-εξόδου σε συνάρτηση με τον χρόνο γεωεναλ- λάκτη τύπου 2U. . . . .	44
3.13 Διάγραμμα μέσης θερμοκρασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο σε λογαριθμική κλίμακα γεωεναλλάκτη τύπου 2U. . . . .	45
3.14 Γεωεναλλάκτης ομοαξονικού τύπου σχέδιο ΚΑΠΕ [4]. . . . .	46
3.15 Αρχείο εισόδου για την δημιουργία των πεπερασμένων στοιχείων στο πρόγραμμα BHE SETUP TOOL. . . . .	47
3.16 Γεωμετρία γεωεναλλάκτη ομοαξονικού τύπου (DataExplorer). . . . .	47
3.17 Διακριτοποίηση γεωεναλλάκτη ομοαξονικού τύπου (DataExplorer). . . . .	48

3.18 Διάγραμμα θερμοκρασίας εισόδου-εξόδου σε συνάρτηση με τον χρόνο γεωεναλλάκτη ομοαξονικού τύπου. . . . .	48
3.19 Διάγραμμα μέσης θερμοκρασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο σε λογαριθμική κλίμακα γεωεναλλάκτη ομοαξονικού τύπου . . . . .	49
3.20 Γεωεναλλάκτης ελικοειδούς τύπου στο ΚΑΠΕ [4]. . . . .	50
3.21 Αρχείο εισόδου για την δημιουργία των πεπερασμένων στοιχείων στο πρόγραμμα BHE SETUP TOOL. . . . .	51
3.22 Γεωμετρία γεωεναλλάκτη τύπου ελικοειδούς (DataExplorer). . . . .	51
3.23 Διακριτοποίηση γεωεναλλάκτη ελικοειδούς τύπου (DataExplorer). . . . .	52
3.24 Διάγραμμα θερμοκρασίας εισόδου-εξόδου σε συνάρτηση με τον χρόνο γεωεναλλάκτη ελικοειδούς τύπου. . . . .	52
3.25 Διάγραμμα μέσης θερμοκρασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο σε λογαριθμική κλίμακα γεωεναλλάκτη ελικοειδούς τύπου . . . . .	53
3.26 Σύστημα γεωεναλλακτών κάτοψη - σχέδιο ΚΑΠΕ [4]. . . . .	55
3.27 Σύστημα γεωεναλλακτών σχέδιο ΚΑΠΕ [4]. . . . .	56
3.28 Αρχείο εισόδου για την δημιουργία των πεπερασμένων στοιχείων στο πρόγραμμα BHE SETUP TOOL. . . . .	57
3.29 Γεωμετρία συστήματος γεωεναλλακτών (DataExplorer). . . . .	57
3.30 Διακριτοποίηση συστήματος γεωεναλλακτών (DataExplorer). . . . .	58
3.31 Χαρακτηριστική καμπύλη φυγοκεντρικής αντλίας συστήματος ΚΑΠΕ [13]. . . . .	60
3.32 Σύστημα γεωθερμικής αντλίας θερμότητας σύμφωνα με το OpenGeoSys [13] . . .	61
3.33 Σύστημα σε λειτουργία ψύξης πραγματικές τιμές θερμοκρασιών. . . . .	62
3.34 Σύστημα σε λειτουργία ψύξης προσομοιωμένες τιμές θερμοκρασιών (OpenGeoSys) .	63
3.35 Σύστημα σε λειτουργία θέρμανσης πραγματικές τιμές θερμοκρασιών. . . . .	63
3.36 Σύστημα σε λειτουργία θέρμανσης προσομοιωμένες τιμές θερμοκρασιών (OpenGeoSys) . . . . .	64



# Κεφάλαιο 1

## Γεωθερμία

Γεωθερμία ή γεωθερμική ενέργεια ορίζεται ως η θερμότητα η οποία προέρχεται από το υπέδαφος. Η ενέργεια αυτή περιλαμβάνεται σε φυσικούς ατμούς, σε επιφανειακά ή υπόγεια θερμά νερά και σε θερμά ξηρά πετρώματα.

Ανάλογα με το θερμοκρασιακό της εύρος η γεωθερμία διακρίνεται στις παρακάτω κατηγορίες [2] :

- Υψηλής ενθαλπίας (θερμοκρασία  $T > 150^{\circ}C$ ), η οποία χρησιμοποιείται κυρίως για ηλεκτροπαραγωγή.
- Μέσης ενθαλπίας (θερμοκρασία  $80^{\circ}C \leq T \leq 150^{\circ}C$ ), όπου συχνά γίνεται χρήση της σε εφαρμογές θέρμανσης ή ξήρανσης ξυλείας και αγροτικών προϊόντων. Επίσης είναι δυνατή η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση κλειστού κυκλώματος με φρέον, το οποίο διαθέτει χαμηλό σημείο ζέσεως.
- Χαμηλής ενθαλπίας (θερμοκρασία  $30^{\circ}C \leq T \leq 80^{\circ}C$ ), όπου χρησιμοποιείται για εφαρμογές θέρμανσης (χώρων, θερμοκηπίων), ιχθυοκαλλιεργειών και για τη παραγωγή γλυκού νερού.

## 1.1 Κατηγορίες γεωθερμικών συστημάτων

Τα συστήματα τα οποία περικλείουν γεωθερμική ενέργεια μπορούν να διακριθούν στις παρακάτω πέντε κατηγορίες [3].

1. Υδροθερμικά : Τα υδροθερμικά συστήματα τα οποία ανήκουν σε δύο βασικές κατηγορίες.
  - Συναγωγής : Περαιοί σχηματισμοί με φυσική κυκλοφορία ρευστών.
  - Αγωγής : Μη περαιοί σχηματισμοί με μεγάλο πορώδες και περατότητα.
2. Θερμά ξηρά πετρώματα : Μη περαιοί σχηματισμοί πετρωμάτων χωρίς φυσική κυκλοφορία ρευστών.
3. Γεωπεπιεσμένα : Έγκλειστα υδροφόρα στρώματα υπό μεγάλη πίεση, παρουσία υδρογονανθράκων.
4. Μαγματικά : Θερμοκρασίας ( $T > 500^{\circ}C$ ) σε μερικά χιλιόμετρα βάθους λόγω μαγματικών διεισδύσεων.
5. Αβαθής γεωθερμία : Από βάθος  $1m$  έως  $400m$  (αναλόγως τον ορισμό της εθνικής νομοθεσίας κάθε χώρας ), με ή χωρίς νερό και θερμοκρασίας ( $T < 40^{\circ}C$ ).

## 1.2 Συστήματα αβαθούς γεωθερμίας

Οι ρηχοί γεωθερμικοί πόροι αποτελούν μία σημαντική και διαρκή πηγή ενέργειας. Μετά τα 15 – 20 μέτρα βάθους τα πάντα ονομάζονται γεωθερμικά. Το εύρος της θερμοκρασίας εξαρτάται από την επίγεια ροή θερμότητας και την τιμή της θερμικής αγωγιμότητας του υπεδάφους της κάθε περιοχής .

Τα ρηχά γεωθερμικά συστήματα βασίζονται κυρίως στη χρήση χαμηλών ή μέτριων θερμοκρασιών για θέρμανση-ψύξη. Αυτές οι θερμοκρασίες απαντώνται στα ανώτερα γεωλογικά στρώματα και βρίσκονται στο ίδιο θερμοκρασιακό επίπεδο με την ετήσια μέση

θερμοκρασία του εξωτερικού χώρου. Η χρήση αυτών των θερμοκρασιών στο γεωθερμικό σύστημα αναφέρεται σε άμεση χρήση, κυρίως ως πηγή θερμότητας. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί άμεσα προσφέροντας άνεση σε διεργασίες ψύξης, ειδικά σε ψυχρότερες κλιματικές ζώνες.

Γενικότερα ως συστήματα αβαθούς γεωθερμίας χαρακτηρίζονται τα συστήματα, τα οποία δεν επιδιώκουν τις υψηλότερες θερμοκρασίες που βρίσκονται συνήθως σε μεγαλύτερο βάθος, αλλά εφαρμόζουν τεχνικές λύσεις για την αξιοποίηση των σχετικά χαμηλών θερμοκρασιών που προσφέρονται σε βάθη άνω των 100 μέτρων ή και περισσότερων του φλοιού της Γης. Για την αβαθή γεωθερμία η αδιατάρακτη θερμοκρασία εδάφους που αποτελεί τη βάση της εξαγωγής ή της έγχυσης θερμότητας, η οποία κυμαίνεται μεταξύ  $2^{\circ}\text{C} < T < 20^{\circ}\text{C}$  ανάλογα με την κλιματική κατάσταση της περιοχής και το βάθος της γεώτρησης. Για την αξιοποίηση των σταθερά χαμηλών θερμοκρασιών του εδάφους υπάρχουν δύο τρόποι :

- Αύξηση ή μείωση της θερμοκρασίας της γεωθερμικής θερμότητας σε επίπεδο ικανοποιητικό για την αξιοποίηση με τη χρήση γεωθερμικής αντλίας θερμότητας.
- Υπόγεια αποθήκευση θερμικής ενέργειας.

### **1.3 Χαρακτηριστικά συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας**

Τα γεωθερμικά συστήματα αβαθούς γεωθερμίας αποτελούνται από τα παρακάτω βασικά μέρη [1]:

#### **Σύστημα γείωσης**

Τα σύστημα γείωσης συνδέει την αντλία θερμότητας με το υπέδαφος και επιτρέπει την εξαγωγή θερμότητας από το έδαφος ή την έγχυση θερμότητας σε αυτό. Τα συστήματα αυτά διακρίνονται σε ανοιχτού ή κλειστού τύπου. Για την επιλογή του κατάλληλου συστήματος πρέπει να ληφθούν υπόψη διάφοροι καθοριστικοί παράγοντες, όπως η γεωλογία και υδρογεωλογία του υπεδάφους (π.χ η επαρκής διαπερατότητα είναι απαραίτητη για τα

ανοιχτού τύπου συστήματα), τη διαθέσιμη περιοχή (π.χ τα οριζόντια κλειστού τύπου συστήματα απαιτούν συγκεκριμένη περιοχή για τοποθέτηση), την ύπαρξη πιθανών πηγών θερμότητας, και η ζήτηση σε θέρμανση και ψύξη του κτηρίου. Κατά την φάση του σχεδιασμού ενός συστήματος, απαιτούνται ακριβή δεδομένα για τις βασικές παραμέτρους, έτσι ώστε να σχεδιαστεί το πιο αποδοτικό σύστημα με το χαμηλότερο δυνατό κόστος. Για την μεταφορά θερμότητας από και προς το έδαφος σε αυτά τα συστήματα περιλαμβάνονται τα ακόλουθα :

- Οριζόντιοι εναλλάκτες θερμότητας εδάφους σε βάθος  $1.2 - 2.0m$  οριζόντια τοποθετημένοι.
- Γεωεναλλάκτες σε βάθος  $10 - 250m$  κατακόρυφα τοποθετημένοι.
- Ενεργειακή συστάδα σε βάθος  $5 - 45m$  κατακόρυφης πολλαπλής τοποθέτησης.
- Πηγάδια υπόγειου νερού.
- Νερό από ορυχεία και σήραγγες.

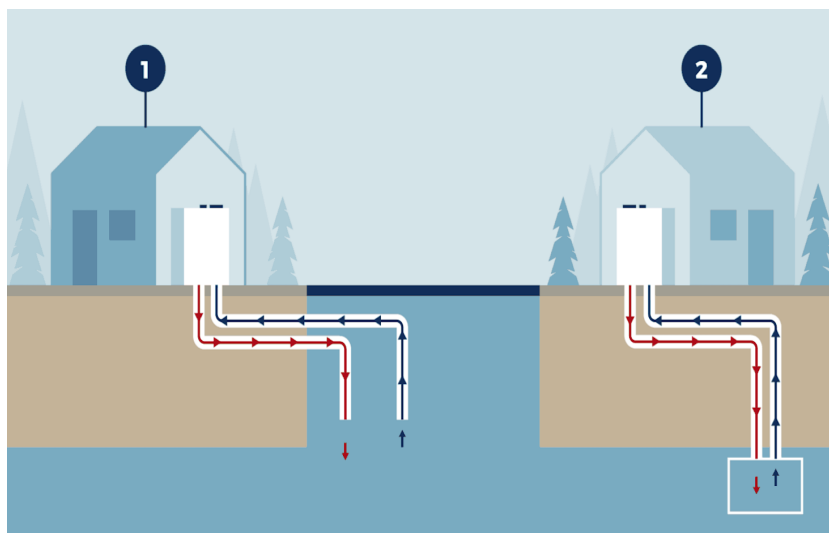
Τα συστήματα της αβαθούς γεωθερμίας (σχήμα 1.1), [24] ,[6], που χρησιμοποιούν εναλλάκτη θερμότητας στο έδαφος ονομάζονται κλειστού βρόχου. Ενώ, εκείνα που παράγουν νερό από το έδαφος και χρησιμοποιούν εναλλάκτη θερμότητας (π.χ εξατμιστής ) στην επιφάνεια ονομάζονται ανοικτού βρόχου.

### **Συστήματα Ανοιχτού βρόχου**

Κύριο τεχνικό χαρακτηριστικό των ανοιχτών συστημάτων είναι τα φρεάτια υπόγειων υδάτων, για την εξαγωγή ή την έγχυση νερού από και προς τα στρώματα που φέρουν νερό στο υπέδαφος (υδροφορείς). Στις περισσότερες περιπτώσεις, απαιτούνται δύο γεωτρήσεις μία για την εξαγωγή των υπόγειων υδάτων και μία για την επανεισαγωγή τους.

Με τα ανοιχτά συστήματα, μία ισχυρή πηγή θερμότητας, μπορεί να αξιοποιηθεί με συγκριτικά χαμηλό κόστος. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα φρεάτια των υπόγειων υδάτων





**Σχήμα 1.1:** Συστήματα ανοιχτού βρόχου [24].

απαιτούν συντήρηση και τα ανοιχτά συστήματα περιορίζονται σε τοποθεσίες με κατάλληλους υδροφορείς. Οι κύριες απαιτήσεις είναι:

- Επαρκής διαπερατότητα ώστε να επιτυγχάνεται η παραγωγή της επιθυμητής ποσότητας υπόγειων υδάτων με μικρή απορρόφηση.
- Καλή χημική σύσταση των υπόγειων υδάτων (π.χ χαμηλή περιεκτικότητα σε σίδηρο (Fe) , για την αποφυγή προβλημάτων όπως αποφράξεις και διαβρώσεις).

Τα συστήματα ανοιχτού βρόχου συστήματα διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

1. Επιφανειακά νερά (π.χ λίμνες,θάλασσες,ποτάμια) τα οποία έχουν τα παρακάτω χαρακτηριστικά :

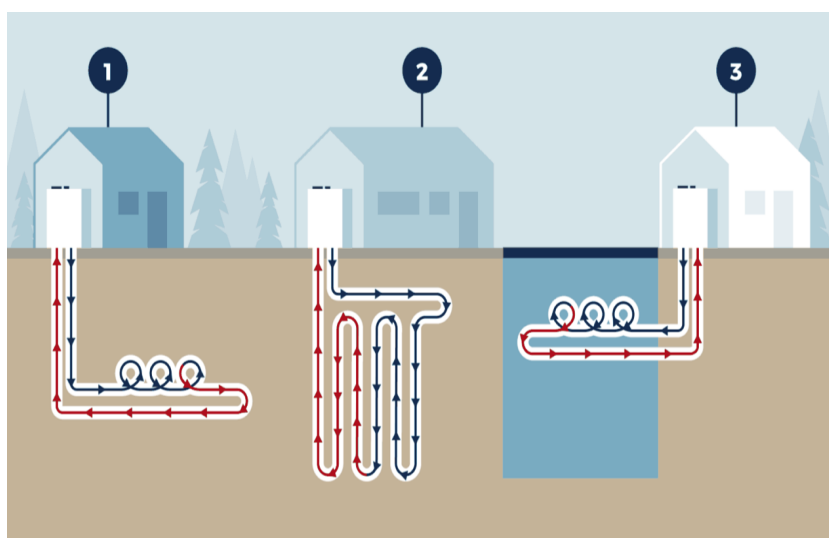
- Είναι εύκολα στην εγκατάσταση.
- Έχουν χαμηλό κόστος.
- Απαιτούν λιγότερη εκσκαφή.
- Είναι επιρρεπείς σε ρύπανση και διάβρωση.
- Δεν είναι πάντα σταθερή η θερμοκρασία του νερού.

2. Πηγάδια τα οποία έχουν τα εξής χαρακτηριστικά :

- Υψηλό κόστος.
- Απαιτούν περισσότερη εκσκαφή ή γεώτρηση.
- Η θερμοκρασία του νερού διατηρείται σταθερή.

### Συστήματα Κλειστού βρόχου

Στα κλειστά συστήματα [24], (σχήμα 1.2) οι εναλλάκτες θερμότητας τοποθετούνται υπογείως (είτε σε κάθετη, οριζόντια ή πλάγια διεύθυνση), και ένα μέσο μεταφοράς θερμότητας (π.χ νερό) που κυκλοφορεί μέσα στους εναλλάκτες θερμότητας μεταφέρει θερμότητα από το έδαφος προς την αντλία θερμότητας ή αντιστρόφως [8] .



**Σχήμα 1.2:** Συστήματα κλειστού βρόχου [24].

Τα κλειστού βρόχου συστήματα διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

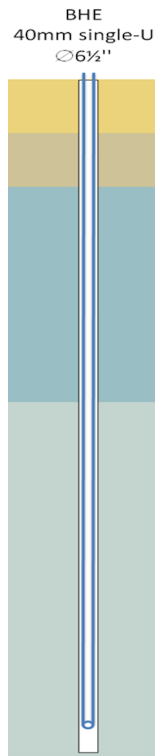
### 1. Οριζόντια συστήματα κλειστού βρόχου

Τα κλειστού τύπου οριζόντια συστήματα είναι ευκολότερα στην εγκατάσταση καθώς και ελεύθερα ως προς την επιλέξιμη γεωμετρία τους (ακόμα και περίπλοκες γεωμετρίες), αναπτύσσονται σε βάθος τουλάχιστον  $1.5m$  κάτω από την επιφάνεια της Γης και η σύνδεση τους γίνεται, είτε παράλληλα, είτε σε σειρά ή και σε σπειροειδής διάταξη (slinky ή Svec). Η μεγαλύτερη απόδοση των οριζόντιων συστημάτων επιτυγχάνεται σε λεπτόκοκκα εδάφη με υψηλή περιεκτικότητα σε νερό, όπως τα αργιλικά και θα πρέπει να αποφεύγεται η εγκατάστασή τους σε εδάφη χονδρόκοκκα (π.χ χαλίκια) .

### 2. Κατακόρυφα κλειστού βρόχου συστήματα

Αυτού του τύπου τα συστήματα εφαρμόζονται σε μονοκατοικίες, αποτελούνται από μία ή περισσότερες γεωτρήσεις στις οποίες είναι εγκατεστημένοι οι γεωεναλλάκτες. Οι γεωτρήσεις συνήθως εκτίνονται σε βάθος έως τα  $200m$  και μπορούν να διατηρηθούν σχεδόν σε κάθε τύπου εδάφους. Ο γεωεναλλάκτης συνδέεται με την αντλία θερμότητας, όπου με την κυκλοφορία του ψυκτικού (π.χ νερό) η θερμότητα εξάγεται από το περιβάλλον της γεώτρησης και μεταφέρεται στην αντλία θερμότητας από την οποία κατανέμεται στο κτήριο θερμότητα με υψηλότερη τιμή θερμοκρασίας. Οι βασικές κατηγορίες γεωεναλλακτών είναι :

- **Τύπος U** (σχήμα 1.3, 1.4), [4] : αποτελείται από ένα ζεύγος ίσων σωλήνων, οι οποίοι συνδέονται με  $180^\circ$  στροφή στο κάτω μέρος. Σε μία γεώτρηση μπορούν να εγκατασταθούν ένας ή και δύο σωλήνες τύπου U . Το πλεονέκτημα του σωλήνα τύπου U είναι το χαμηλό κόστος του υλικού από το οποίο κατασκευάζεται, με αποτέλεσμα οι διπλοί σωλήνες τύπου U να αποτελούν τους πιο συχνά εγκατεστημένους γεωεναλλάκτες στην Ευρώπη.



**Σχήμα 1.3:** Γεωεναλλάκτης τύπου 1U [4].

- **Ομοαξονικός** (σχήμα 1.5), [4]: Συναντώνται είτε ως συνδυασμός δύο σωλήνων διαφορετικής διαμέτρου είτε με περίπλοκες διαμορφώσεις.
- **Ελικοειδής** (σχήμα 1.6), [4]: σπειροειδούς σχήματος σωλήνες μεγάλης διαμέτρου.
- **Ενεργειακές συστάδες** : Τρεις ή και περισσότεροι σωλήνες τύπου U ή δύο και περισσότερες τύπου ελικοειδούς .

Για τον σχεδιασμό των γεωεναλλακτών έχει αναπτυχθεί μεγάλος αριθμός μεθόδων σχεδίασης [7], είτε αριθμητικές, είτε αναλυτικές για την επιλογή του μεγέθους τους και την βελτιστοποίηση της θέσης τους. Τα υπό δοκιμή μοντέλα θερμικής απόκρισης, η επεξεργασία των θερμικών φορτίων των κτηρίων, η εξέταση των θερμικών παρεμβολών και άλλες επιλογές όπου έχουν διαφορετική πολυπλοκότητα και διαφέρουν μεταξύ τους. Παρακάτω παρουσιάζονται οι βασικότερες μέθοδοι κάθετου σχεδιασμού γεωεναλλακτών :



**Σχήμα 1.4:** Γεωεναλλάκτης τύπου 2U [4].



**Σχήμα 1.5:** Γεωεναλλάκτης ομοαξονικού τύπου [4].



**Σχήμα 1.6:** Γεωεναλλάκτης τύπου ελικοειδούς [4].

(α') **Μέθοδος IGSHPA** : Η μέθοδος IGSHPA αποτελεί την πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδο διαστασιολόγησης των γεωεναλλακτών. Υπολογίζει το μήκος των γεωεναλλακτών που απαιτείται για την θέρμανση και την ψύξη φορτίων εφαρμόζοντας τις εξισώσεις

$$L_h = \frac{Q_h \cdot (R_p + R_s \cdot F_n)}{T_o - T_L} \cdot \frac{COP_h - 1}{COP_h}, \quad (1.1)$$

$$L_c = \frac{Q_c \cdot (R_p + R_s \cdot F_c)}{T_H - T_o} \cdot \frac{COP_c + 1}{COP_c}, \quad (1.2)$$

- Όπου ο δείκτης  $h$  αναφέρεται στη λειτουργία θέρμανσης, ενώ ο δείκτης  $c$  στη λειτουργία της ψύξης.
- $L$  : Το απαιτούμενο μήκος σχεδίασης σε μέτρα ( $m$ ).
- $Q$  : Το θερμικό φορτίο σχεδιασμού ή η συνολική χωρητικότητα της μονάδας για στην εισερχόμενη θερμοκρασία του υγρού μετρημένο σε (Watt).
- $F$  : Το κλάσμα λειτουργίας .

- $COP$  : Συντελεστής απόδοσης.
- $R_s$ : Συντελεστής θερμικής αντίστασης εδάφους (Km/W) .
- $R_p$ : Συντελεστής θερμικής αντίστασης σωλήνα (Km/W) .
- $T_L, T_H$ : Αναφέρονται στην καθορισμένη ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία εισόδου του υγρού στην αντλία θερμότητας  $T_{in, hp}$  ( $^{\circ}C$ ) .

(β) **Μέθοδος ASHRAE** : Το εγχειρίδιο της μεθόδου ASHRAE περιλαμβάνει μία εξίσωση σχεδιασμού γεωεναλλακτών θερμότητας κατάλληλη για γρήγορους υπολογισμούς. Αυτή είναι

$$L_h = \frac{Q_a \cdot R_{sa} + Q_h \cdot (R_b + PLF_m \cdot R_{sm} + F_{sc} \cdot R_{sd})}{T_0 - T_p - \frac{T_{in(hp)} + T_{out(hp)}}{2}} \cdot \frac{COP_h - 1}{COP_h}, \quad (1.3)$$

$$L_c = \frac{Q_a \cdot R_{sa} + Q_c \cdot (R_b + PLF_m \cdot R_{sm} + F_{sc} \cdot R_{sd})}{\frac{T_{in(hp)} + T_{out(hp)}}{2} - T_0 - T_p} \cdot \frac{COP_h + 1}{COP_h}, \quad (1.4)$$

- $Q_a$  : Ετήσια μέση μεταφορά θερμικού φορτίου στο έδαφος (Watt).
- $PLF_m$  : Συντελεστής μερικού θερμικού φορτίου για τον μήνα σχεδιασμού.
- $COP$  : Συντελεστής απόδοσης.
- $R_{sa}, R_{sm}, R_{sd}$ : Αναφέρονται στην αποτελεσματική θερμική αντίσταση του εδάφους στην διάρκεια του έτους , του μήνα και του μέγιστου ημερήσιου αντίστοιχα (Km/W).
- $F_{sc}$ : Παράγοντας απώλειας θερμότητας βραχυκυκλώματος .
- $R_p$ : Συντελεστής θερμικής αντίστασης σωλήνα (Km/W) .
- $T_p$ : Είναι η θερμοκρασιακή απώλεια λόγω παρεμβολών από γειτονικές γεωτρήσεις ( $^{\circ}C$ ) .

(γ) **Μέθοδος FLSCC** : Με την υπέρθεση λύσεων για πολλαπλές γεωτρήσεις, μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος FLSCC-based- $g$ -function κάνοντας χρήση συναρτήσεων χρονικού βήματος και θερμότητας. Η μέθοδος FLSCC προσεγγίζει

τη θερμοκρασία εισόδου στην αντλία θερμότητας  $T_{in(hp)}$  (ανάλογα και τη θερμοκρασία εξόδου της  $T_{out(hp)}$ ) χρησιμοποιώντας το ισοζύγιο θερμότητας

$$T_{in(hp)} = \sum_{i=1}^n \frac{(q_i - q_{i-1})}{2\pi k_s} \cdot g_c\left(\frac{t_n - t_{n-1}}{t_{ss}}, \frac{r_b}{H}, \frac{B}{H}\right) + q_i R_b + \bar{T}_0 - \frac{q_i H N_b}{2\dot{m} C_f} \quad (1.5)$$

- $q$  : Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας ανά μονάδα μήκους (W/m).
- $g_c$  : Η τιμή της  $g$ -function συνάρτησης στο καθορισμένο σημείο.
- $t$  : Χρόνος (sec).
- $B$ : Απόσταση μεταξύ γεωτρήσεων (m) .
- $r_b$ : Ακτίνα γεώτρησης (m) .
- $H$ : Βάθος γεώτρησης (m) .
- $\bar{T}_0$  : Μέση τιμή αδιατάρακτης θερμοκρασίας εδάφους ( $^{\circ}C$ ) .
- $R_b$ : Θερμική αντίσταση γεώτρησης (mK/W).
- $t_{ss} = \frac{H^2}{9\alpha_s}$  : Χρονικό όριο σταθερής κατάστασης (sec).
- $\alpha_s$  : Συντελεστής θερμικής διάχυσης εδάφους ( $m^2/sec$ ).
- $k_s$ : Θερμική αγωγιμότητα εδάφους (W/mK).
- $N_b$ : Ο αριθμός των γεωτρήσεων .
- $\dot{m}$ : Ρυθμός ροής μάζας (kg/sec) .
- $C_f$ : Ειδική θερμοχωρητικότητα του υγρού (J/kgK) .

Η μέθοδος αυτή καθορίζει ένα μήκος γεώτρησης υποθέτοντας μία τυχαία αρχική τιμή. Στη συνέχεια η μέγιστη και η ελάχιστη θερμοκρασία εισόδου του υγρού στην αντλία θερμότητας μπορεί να υπολογιστεί και να συγκριθεί με τους περιορισμούς του σχεδιασμού μέχρι να επιτευχθεί η απαιτούμενη ακρίβεια.



### 3. Κλειστού βρόχου συστήματα εντός επιφανειακών υδάτων.

Τα συστήματα κλειστού τύπου εντός επιφανειακών υδάτων μπορούν να τοποθετηθούν σε περιπτώσεις όπου το κτήριο βρίσκεται κοντά σε (πισίνα, ποτάμι, λίμνη κ.α). Αποτελεί μία αρκετά συμφέρουσα επιλογή ως προς το κόστος κατασκευής.

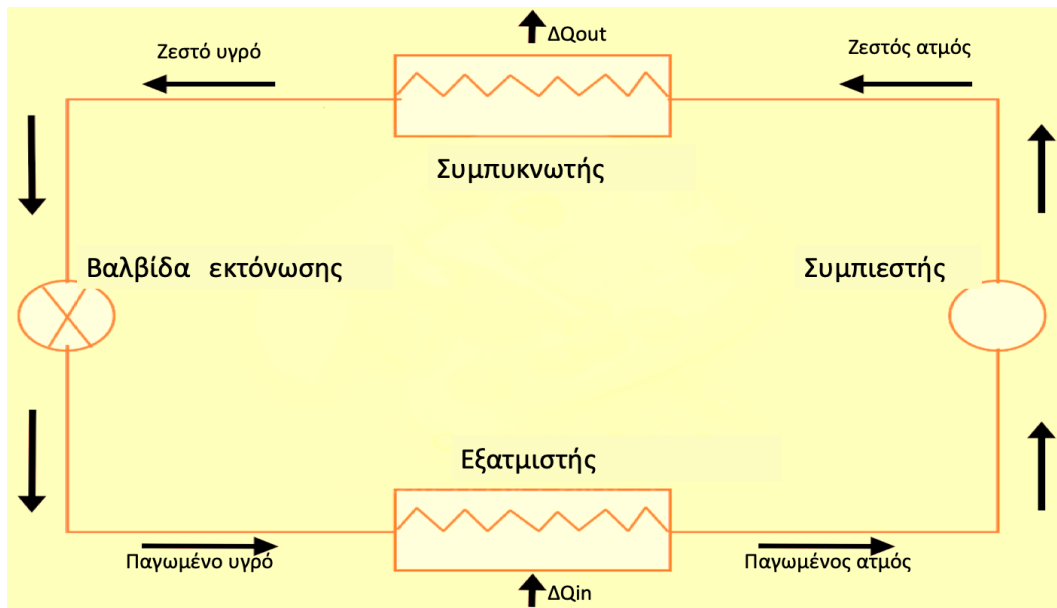
## 1.4 Αντλίες θερμότητας

Αντλία θερμότητας είναι μία συσκευή, η οποία διαθέτει την ικανότητα να μεταφέρει θερμότητα από ένα μέσο χαμηλής θερμοκρασίας σε ένα άλλο υψηλότερης . Αυτό υλοποιείται με την απορρόφηση θερμότητας από μία πηγή χαμηλής θερμοκρασίας (π.χ εξωτερικός αέρας , υπόγειο ή επιφανειακό νερό κ.α) και τη μεταφορά αυτής της θερμότητας σε ένα μέσο με υψηλότερη θερμοκρασία, όπως τον αέρα ή το νερό, το οποίο και χρησιμεύει στην θέρμανση ενός χώρου.

Τα κύρια μέρη της αντλίας θερμότητας είναι τα παρακάτω (σχήμα 1.7):

1. Εξατμιστής : Δέχεται θερμότητα από το έδαφος η οποία διοχετεύεται στο σύστημα μέσω του υγρού το οποίο εξατμίζεται.
2. Συμπιεστής : Συμπιέζει το αέριο αυξάνοντας τη θερμοκρασία του.
3. Συμπυκνωτής : Μεταφέρει θερμότητα στο κύκλωμα θέρμανσης με συμπύκνωση του συμπιεσμένου υγρού.
4. Βαλβίδα εκτόνωσης : Διαστέλλει το συμπυκνωμένο υγρό σε χαμηλότερη πίεση.

Τα τέσσερα παραπάνω εξαρτήματα συνδέονται σε κλειστό κύκλωμα, και το υγρό το οποίο ρέει μέσα σε αυτό είναι συνήθως μία οργανική ένωση με χαμηλή θερμοκρασία βρασμού (π.χ τετραφθοροαιθάνιο  $\text{CH}_2\text{FCF}_3$  ).



**Σχήμα 1.7:** Βασικά εξαρτήματα αντλίας θερμότητας.

Ο συντελεστής απόδοσης μίας αντλίας θερμότητας διακρίνεται αναλόγως την λειτουργία της σε θέρμανση ή ψύξη ως εξής :

- COP (Coefficient Of Performance): Ο συντελεστής απόδοσης χρησιμοποιείται για να εκφράσει την απόδοση ενός συστήματος κατά την διεργασία της θέρμανσης και ο υπολογίζεται ως εξής :

$$COP = \text{Παραγόμενη θερμότητα} / \text{Ενέργεια που καταναλώνεται}$$

- EER (Energy Efficiency Rating): Ο βαθμός ενεργειακής απόδοσης χρησιμοποιείται για να εκφράσει την απόδοση ενός συστήματος κατά την διεργασία της ψύξης και ο υπολογίζεται ως εξής :

$$EER = \text{Απαιτούμενη ενέργεια για ψύξη} / \text{Ενέργεια που εφαρμόζεται} \quad \text{ή} \quad EER = COP * 3.412$$

### **Κατηγορίες αντλιών θερμότητας**

Οι αντλίες θερμότητας αναλόγως την πηγή που τις τροφοδοτεί και τον τρόπο με τον οποίο διοχετεύουν την θερμότητα διακρίνονται στις παρακάτω βασικές κατηγορίες όπου το πρώτο μέρος αντιστοιχεί στην πηγή και το δεύτερο στον τρόπο διοχέτευσης :

- Αέρος-Νερού
- Αέρος-Αέρος
- Νερού-Νερού
- Νερού -Αέρος

Αναλόγως το είδος εγκατάστασης του συστήματος διακρίνονται στις εξής κατηγορίες :

### 1. **Αντλία θερμότητας πηγής αέρος**

Σε αυτή την κατηγορία η θερμότητα εξάγεται από τον ατμοσφαιρικό αέρα,ο οποίος εισέρχεται στον εναλλάκτη θερμότητας. Η θερμοκρασία της πηγής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την θερμοκρασία περιβάλλοντος και διαφέρει σε όλη τη διάρκεια του έτους αναλόγως την γεωγραφική θέση της εγκατάστασης.

### 2. **Αντλία θερμότητας πηγής νερού**

Αυτού του τύπου οι αντλίες θερμότητας χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες :

- Κλειστού τύπου : Κλειστό σύστημα σωληνώσεων πληρωμένο με νερό ή και αντιψυκτικό διάλυμα , το οποίο έχει βυθιστεί σε ποτάμι, λίμνη ή θάλασσα.
- Ανοιχτού τύπου : Το νερό εξάγεται από ένα υπόγειο υδροφόρο και διοχετεύεται μέσω της αντλίας θερμότητας (σε μερικές περιπτώσεις κρίνεται αναγκαία η χρήση προστατευτικού εναλλάκτη θερμότητας νερού -νερού).

### 3. **Αντλία θερμότητας βρόχου νερού**

Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί κλειστό βρόχο νερού για παροχή θέρμανσης ή ψύξης σε ένα κτήριο . Ο βρόχος χρησιμοποιεί διάφορους τρόπους για να θερμανθεί ή να ψυχθεί.

#### 4. **Αντλία θερμότητας εξάτμισης αέρα**

Οι αντλίες θερμότητας εξάτμισης αέρα αντιπροσωπεύουν αυτές του είδους αέρος-νερού. Γίνεται ανάκτηση θερμότητας από τον αέρα εξάτμισης κατά την διάρκεια της θέρμανσης χώρου ή ζεστού νερού, πριν την απομάκρυνση του αέρα στην ατμόσφαιρα.

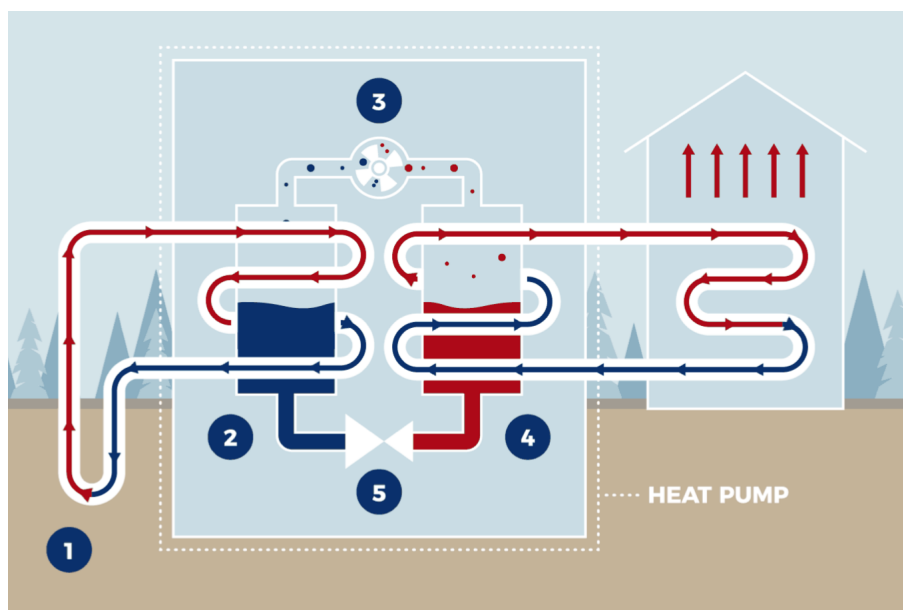
#### 5. **Αντλία θερμότητας πηγής εδάφους ή Γεωθερμική αντλία θερμότητας (ΓΑΘ)**

Τα συστήματα αντλιών θερμότητας εδάφους (ΓΑΘ) (σχήμα 1.8), [24] παρέχουν θέρμανση και ψύξη χώρου καθώς και τη δυνατότητα παροχής ζεστών νερών χρήσης. Η τεχνολογία τους χρησιμοποιεί μια εσωτερική μονάδα αντλίας θερμότητας και ένα βρόχο γείωσης ανταλλαγής θερμότητας στο υπέδαφος για την μεταφορά θερμικής ενέργειας μεταξύ του εδάφους και του κτηρίου, ενώ κατά την λειτουργία σε ψύξη τα συστήματα μεταφέρουν θερμική ενέργεια, από το κτήριο στο έδαφος.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι σχεδιασμού και εγκατάστασης του βρόχου γείωσης στο υπέδαφος οι οποίοι παρατίθενται παρακάτω :

- **Συστήματα κλειστού βρόχου** : Χρησιμοποιούν ένα βρόχο εδάφους (συνήθως κατασκευασμένο από σωλήνες πολυαιθυλενίου ή PVC), μέσω των οποίων κυκλοφορεί το ψυκτικό για να επιτευχθεί η ανταλλαγή θερμότητας με την πηγή ( έδαφος ή τα υπόγεια ύδατα ).
- **Συστήματα ανοιχτού βρόχου** : Τα συστήματα ανοιχτού βρόχου κυκλοφορούν νερό για εξαγωγή θερμότητας καθώς και για απόρριψη απευθείας από τοπικές πηγές υπόγειων υδάτων.
- **Συστήματα απευθείας ανταλλαγής** : Τα απευθείας ανταλλαγής συστήματα χρησιμοποιούν ένα ψυκτικό μέσο, το οποίο ρέει διαμέσου ενός χάλκινου σωλήνα αντί ενός τυπικού βρόχου γείωσης.

Τα πλεονεκτήματα των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας είναι :



**Σχήμα 1.8:** Γεωθερμική αντλία θερμότητας [24].

- Μείωση εκτεθειμένου εξωτερικού εξοπλισμού.
- Προσφέρουν μεγαλύτερη άνεση σε θέρμανση και ψύξη.
- Μείωση κατανάλωσης σε ορυκτά καύσιμα (εκπομπές αέριων του θερμοκηπίου).
- Προσφέρουν την δυνατότητα για ζεστό νερό χρήσης.
- Μεγάλη διάρκεια ζωής.
- Μεγαλύτερη απόδοση από μία απλή αντλία θερμότητας.
- Μείωση σε κατανάλωση φρέσκου νερού (πύργος ψύξης).

1. Το νερό στον βρόχο εδάφους συλλέγει θερμότητα από το έδαφος.
2. Το ψυκτικό απορροφά θερμότητα από τον βρόχο γείωσης και την εξατμίζει.
3. Ο συμπιεστής συμπιέζει το ψυκτικό σε υγρό θερμαίνοντας το.
4. Η θερμότητα από το συμπιεσμένο ψυκτικό μεταφέρεται στον αέρα.
5. Το ψυκτικό αποσυμπιέζεται για να αναθερμανθεί.



## **Κεφάλαιο 2**

### **Λογισμικό OpenGeoSys**

#### **2.1 Εισαγωγή στη χρήση του λογισμικού OpenGeoSys**

Το ανοικτού κώδικα λογισμικό OpenGeoSys υλοποιεί αριθμητικές μεθόδους για τη προσομοίωση θερμο-υδρο-μηχανο-χημικές διαδικασίες σε πορώδη και ρωγμώδη μέσα. Το λογισμικό OpenGeoSys εφαρμόζεται στις επιστημονικές περιοχές της περιφερειακής, της μολυσματικής και της παράκτιας υδρολογίας, των βασικών και γεωθερμικών ενεργειακών συστημάτων, της γεωτεχνικής μηχανικής, της αποθήκευσης ενέργειας, της δέσμευσης/αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) και της διαχείρισης και διάθεσης πυρηνικών αποβλήτων. Η εφαρμογή του λογισμικού OpenGeoSys για την προσομοίωση ενός συστήματος αβαθούς γεωθερμίας περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια :

- Εισαγωγή δεδομένων γεωμετρίας του προβλήματος.
- Εισαγωγή τεχνικών χαρακτηριστικών του συστήματος και επιλογή των αριθμητικών μεθόδων προσομοίωσης.
- Επεξεργασία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης του συστήματος.

Στην έκτη έκδοση του λογισμικού είναι απαραίτητη η εισαγωγή της γεωμετρίας και της πληροφορίας διακριτοποίησης του προβλήματος με την εισαγωγή δύο βασικών αρχείων. Το πρώτο αρχείο γεωμετρίας είναι τύπου *.gml* και το δεύτερο είναι τύπου *.vtu* και περιλαμβάνει την πληροφορία της διακριτοποίησης της περιοχής για την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Τα αρχεία αυτά μπορεί να κατασκευαστούν με τη χρήση της εξειδικευμένης εφαρμογής BHE SETUP TOOL ή για παράδειγμα η οποία συνοδεύεται από το λογισμικό OpenGeoSys ή με τη χρήση γενικών εφαρμογών σχεδιασμού γεωμετρίας και διακριτοποίησης, όπως για παράδειγμα η εφαρμογή gmsh.

## **2.2 Παραμετροποίηση για την προσομοίωση της λειτουργίας γεωεναλλακτών.**

### **2.2.1 Προσομοίωση διάδοσης θερμότητας με την χρήση γήινων εναλλακτών**

#### **Εισαγωγή**

Οι γήινοι εναλλάκτες θερμότητας (ΓΕΘ) εφαρμόζονται σε συστήματα τα οποία χρησιμοποιούν αντλία θερμότητας εδάφους (GSHP) για την εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας. Σήμερα υπάρχει πληθώρα λογισμικών προσομοίωσης με σκοπό την βέλτιστη αξιοποίηση της απόδοσης και του σχεδιασμού αυτών των συστημάτων. Το λογισμικό OpenGeoSys προσφέρει τη δυνατότητα της προσομοίωσης της διάδοσης της θερμότητας στο υπέδαφος, η οποία μεταφέρεται μέσω των γεωεναλλακτών θερμότητας στο υπέδαφος, καθώς και την συνολική απόδοση της λειτουργίας του συστήματος συμπεριλαμβανομένης και της αντλίας θερμότητας.



## Μαθηματική μοντελοποίηση και επίλυση

Το λογισμικό OpenGeoSys εφαρμόζει την αριθμητική μέθοδο των ασυνεχών πεπερασμένων στοιχείων (DC FEM) για την αριθμητική επίλυση του χωρικού προβλήματος της διάδοσης θερμότητας στο υπέδαφος. Η συγκεκριμένη αριθμητική μέθοδος αρχικά προτάθηκε από τους [19] και επεκτάθηκε από τους [20] [21], ενώ εφαρμόστηκε στο λογισμικό OpenGeoSys από τον *Shao et al.* (2016) [22] [23]. Η μοντελοποίηση του προβλήματος βασίστηκε στις παρακάτω παραδοχές:

- Το υπέδαφος θεωρείται συνεχές πεδίο στις τρεις διαστάσεις, ενώ ο γεωεναλλάκτης θερμότητας μοντελοποιείται σε μία διάσταση ως μία συνεχή γραμμή.
- Η μεταφορά θερμότητας από διαφορετικούς γεωεναλλάκτες προσομοιώνεται από το Capacity-Resistance-Model (CARM) σε αναλογία με τα ηλεκτρικά κυκλώματα.
- Στο υπέδαφος, τόσο η μεταφορά θερμότητας, όσο και η θερμική αγωγιμότητα, περιγράφονται από την εξίσωση διατήρησης θερμικής ενέργειας η οποία είναι :

$$H_s = \frac{\partial}{\partial t} [\epsilon \rho_f c_f + (1 - \epsilon) \rho_s c_s] T_s \nabla \cdot (\rho_f c_f \mathbf{v}_f T_s) \nabla \cdot (\Lambda_s \cdot \nabla T_s) \quad (2.1)$$

όπου

- $\Lambda_s$  : Τανυστής της θερμικής και υδροδυναμικής διασποράς .
- $H_s$  : Όρος της πηγής θερμότητας (sink term) .
- Σε κάθε σωλήνα εντός της γεώτρησης αναφέρεται μία εξίσωση για την προσομοίωση της θερμικής μεταφοράς στον αγωγό. Επίσης για κάθε ζώνη ενέματος που περιβάλλει τον αγωγό της γεώτρησης προσομοιώνεται η θερμική αγωγιμότητα του.

Το βασικό αρχείο παραμετροποίησης ενός προβλήματος προσομοίωσης στο λογισμικό OpenGeoSys είναι της κατηγορίας *.prj* και είναι τύπου *xml*. Η δομή του αρχείου περιλαμβάνει τα παρακάτω πεδία :

## Παράμετροι εισόδου

- **'name'** : Όνομα διαδικασίας HeatTransportBHE για προσομοίωση διάδοσης θερμότητας σε γεωεναλλάκτη.
- **'type'** : Τύπος διαδικασίας *HEAT – TRANSPORT – BHE*.
- **'integration order'** : Τάξη ολοκλήρωσης της αριθμητικής μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.
- **'Process variables'** : Βασικές παράμετροι της διαδικασίας (π.χ temperature soil, temperature BHE).

Το σχήμα 2.1 παρουσιάζει ένα παράδειγμα των βασικών παραμέτρων εισόδου του βασικού αρχείου του λογισμικού OpenGeoSys.

Στη συνέχεια εισάγονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά της γεώτρησης.

```
<name>HeatTransportBHE</name>
<type>HEAT_TRANSPORT_BHE</type>
<integration_order>2</integration_order>
<process_variables>
  <process_variable>temperature_soil</process_variable>
  <process_variable>temperature_BHE1</process_variable>
</process_variables>
```

**Σχήμα 2.1:** Παράμετροι εισόδου OpenGeoSys.

## Γεώτρηση

Το βάθος και η διάμετρος της γεώτρησης εισάγονται σε μέτρα. Η εικόνα 2.2 εμφανίζει ένα παράδειγμα γεώτρησης διαμέτρου 0.16 μέτρων και βάθους 20 μέτρων. Στη συνέχεια εισάγεται ο τύπος των γεωεναλλακτών.

### Ορισμός τύπου γεωεναλλάκτη

Στο λογισμικό OpenGeoSys μπορούν να εισαχθούν τέσσερις τύποι γήινων εναλλακτών θερμότητας. Αυτοί είναι:

```
<borehole>
  <length>20.0</length>
  <diameter>0.16</diameter>
</borehole>
```

**Σχήμα 2.2:** Διαστάσεις γεώτρησης στο OpenGeoSys .

1.  $1U$ : Ο γεωεναλλάκτης σε αυτή την περίπτωση διαθέτει ένα σωλήνα τύπου  $U$ .
2.  $2U$ : Ο γεωεναλλάκτης σε αυτή την περίπτωση διαθέτει ένα ζεύγος σωλήνων τύπου  $U$ .
3. CXA: Ομοαξονικού τύπου σωλήνας με δακτυλιοειδή γεωμετρία και είσοδο από τον εξωτερικό σωλήνα και έξοδο από τον εσωτερικό.
4. CXC: Ομοαξονικού τύπου σωλήνας αντίστροφης κατεύθυνση από αυτή του ομοαξονικού (CXA).

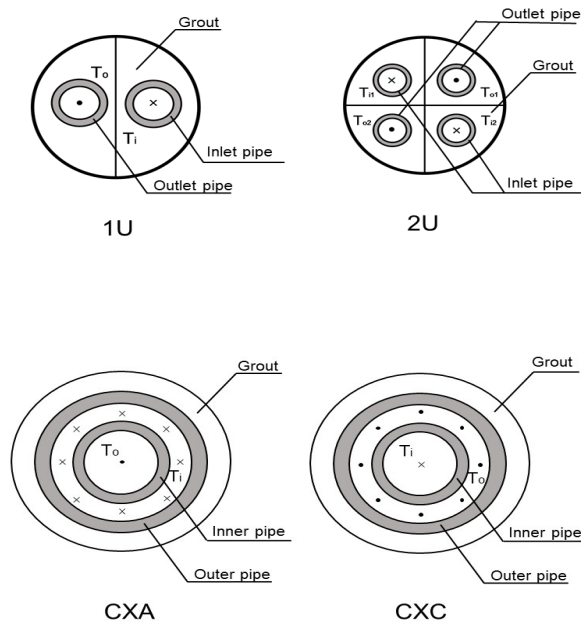
Το σχήμα 2.3,[1] εμφανίζει τα τέσσερα είδη των διαθέσιμων στο λογισμικό γεωεναλλακτών. Στη συνέχεια εισάγονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των γεωεναλλακτών.

### **Ιδιότητες σωλήνων**

Σε αυτό το σημείο γίνεται εισαγωγή των ιδιοτήτων των σωλήνων του γεωεναλλάκτη όπου :

- Για τους ομοαξονικού τύπου γεωεναλλάκτες εισάγεται το μήκος της διαμήκους διασποράς.
- Για τους  $1U, 2U$  τύπους γεωεναλλακτών εκτός από την διαμήκη διασπορά εισάγεται και η απόσταση μεταξύ των σωλήνων.

Στο σχήμα 2.4 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα γεωεναλλάκτη τύπου  $2U$ , όπου οι σωλήνες εισόδου και εξόδου είναι κατασκευασμένοι από υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο HD-PE.



**Σχήμα 2.3:** Διατομές των ειδών των γεωεναλλακτών [1].

Στη συνέχεια εισάγεται το είδος του μοντέλου ροής και ελέγχου θερμότητας της προσομοίωσης.

```
<pipes>
  <inlet>
    <diameter> 0.0378</diameter>
    <wall_thickness>0.0029</wall_thickness>
    <wall_thermal_conductivity>0.42</wall_thermal_conductivity>
  </inlet>
  <outlet>
    <diameter>0.0378</diameter>
    <wall_thickness>0.0029</wall_thickness>
    <wall_thermal_conductivity>0.42</wall_thermal_conductivity>
  </outlet>
  <distance_between_pipes>0.053</distance_between_pipes>
  <longitudinal_dispersion_length>0.001</longitudinal_dispersion_length>
</pipes>
```

**Σχήμα 2.4:** Ιδιότητες σωλήνων OpenGeoSys .

### Επιλογή μοντέλου ροής και ελέγχου θερμοκρασίας

Πέντε τύποι μοντέλων ροής και ελέγχου θερμοκρασίας παρέχονται στο OpenGeoSys, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω :

1. FixedPowerConstantFlow: Ο γεωεναλλάκτης έχει σταθερό θερμικό φορτίο και ο ρυθμός ροής του ψυκτικού μέσου στην γεώτρηση διατηρείται σταθερός. Σε αυτή την περίπτωση ορίζονται η τιμή της ισχύος και ο ρυθμός ροής του ρευστού.

2. **FixedPowerFlowCurve:** Ο γεωεναλλάκτης έχει σταθερό θερμικό φορτίο και ο ρυθμός ροής του ψυκτικού μέσου στην γεώτρηση ακολουθεί μία χρονικά εξαρτώμενη καμπύλη. Σε αυτή την περίπτωση ορίζονται η τιμή της ισχύος και η χρονικά εξαρτώμενη καμπύλη του ρυθμού ροής.
3. **PowerCurveConstantFlow:** Ο γεωεναλλάκτης έχει σταθερό ρυθμό ροής, ενώ η ισχύς ακολουθεί μία χρονικά εξαρτώμενη διακύμανση.
4. **TemperatureCurveConstantFlow:** Ο γεωεναλλάκτης έχει σταθερό ρυθμό ροής, ενώ η θερμοκρασία εισόδου του ρευστού ακολουθεί τιμές που ορίζονται από την χρονικά εξαρτώμενη καμπύλη.
5. **TemperatureCurveFlowCurve:** Στον γεωεναλλάκτη ο ρυθμός ροής, αλλά και οι τιμές της θερμοκρασίας, ακολουθούν τις αντίστοιχες χρονικά εξαρτώμενες διακυμάνσεις.

Έτσι

- Για εφαρμογές θέρμανσης η θερμική ενέργεια εξάγεται από το υπέδαφος οπότε η τιμή ισχύος έχει αρνητικό μέγεθος. Το αντίστροφο ισχύει για εφαρμογές ψύξης, όπου στο υπέδαφος διοχετεύεται η θερμική ενέργεια.
- Για όλες τις επιλογές ελέγχου ροής και θερμοκρασίας στο λογισμικό OpenGeoSys υπολογίζεται η θερμοκρασία εισόδου του κάθε γεωεναλλάκτη.
- Η συνοριακή συνθήκη της διαφορικής εξίσωσης που αναφέρεται στη θερμοκρασία εισόδου του σωλήνα κάθε γεωεναλλάκτη είναι τύπου Dirichlet.
- Ανάλογα με την επιλογή του ελέγχου ροής και θερμοκρασίας η θερμοκρασία εισροής υπολογίζεται δυναμικά σε κάθε χρονικό βήμα και για κάθε επανάληψη, έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι περιορισμοί των τεχνικών χαρακτηριστικών του προβλήματος.

Στο σχήμα 2.5 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα εισαγωγής του μοντέλου TemperatureCurveConstantFlow:

Στη συνέχεια εισάγονται τα χαρακτηριστικά του ενέματος της γεώτρησης.

```
<flow_and_temperature_control>
  <type>TemperatureCurveConstantFlow</type>
  <flow_rate>2.0e-4</flow_rate>
  <temperature_curve>inflow_temperature</temperature_curve>
</flow_and_temperature_control>
```

**Σχήμα 2.5:** Ορισμός μοντέλου στο OpenGeoSys με χρήση TemperatureCurveConstantFlow .

### Ένεμα

Οι θερμικές ιδιότητες του υλικού ενέματος εισάγονται σε αυτό το τμήμα του αρχείου με τον ακόλουθο τρόπο :

- Πυκνότητα
- Πορώδες του ενέματος
- Θερμοχωρητικότητα
- Θερμική αγωγιμότητα

Στο σχήμα 2.6 παρουσιάζεται η εισαγωγή των θερμικών ιδιοτήτων ενός παραδείγματος ενέματος γεώτρησης. Στο επόμενο τμήμα του αρχείου εισάγονται οι θερμικές ιδιότητες του ψυκτικού μέσου του συστήματος.

```
<grout>
  <density>2190.0</density>
  <porosity>0.0</porosity>
  <specific_heat_capacity>1735.1</specific_heat_capacity>
  <thermal_conductivity>0.73</thermal_conductivity>
</grout>
```

**Σχήμα 2.6:** Ορισμός θερμικών ιδιοτήτων του ενέματος στο OpenGeoSys .

## Ψυκτικό

Οι θερμικές ιδιότητες του ψυκτικού υγρού του συστήματος εισάγονται ως εξής:

- Πυκνότητα
- Ιξώδες
- Ειδική θερμοχωρητικότητα
- Θερμική αγωγιμότητα
- Θερμοκρασία υγρού

Το σχήμα 2.7 εμφανίζει την εισαγωγή των θερμικών ιδιοτήτων ενός παραδείγματος ψυκτικού μέσου.

```
<refrigerant>
  <density>998</density>
  <viscosity>0.0011375 </viscosity>
  <specific_heat_capacity>4190</specific_heat_capacity>
  <thermal_conductivity>0.6</thermal_conductivity>
  <reference_temperature>22</reference_temperature>
</refrigerant>
```

**Σχήμα 2.7:** Ορισμός θερμικών ιδιοτήτων ψυκτικού στο OpenGeoSys .

### 2.2.2 Προσομοίωση διάδοσης θερμότητας με την χρήση συστοιχίας γήινων εναλλακτών

Σε μία συστοιχία γήινων εναλλακτών θερμότητας όλοι οι γεωεναλλάκτες συνδέονται μεταξύ τους μέσω ενός δικτύου αγωγών. Οι θερμοκρασίες του ψυκτικού μέσα σε κάθε γεωεναλλάκτη ελέγχονται από το δίκτυο. Επειδή υπάρχει εξισορρόπηση, των ποσοτών θερμικής εξαγωγής μεταξύ των γεωεναλλακτών εμφανίζονται φαινόμενα αλλαγής θερμικού φορτίου γεωεναλλακτών για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Στο λογισμικό OpenGeoSys αυτή η διαδικασία μπορεί να προσομοιωθεί κάνοντας χρήση της λειτουργίας PipeNetwork στη διαδικασία HeatTransportBHE.

```

<flow_and_temperature_control>
  <type>TemperatureCurveConstantFlow</type>
  <flow_rate>0</flow_rate>
  <temperature_curve>inflow_temperature</temperature_curve>
</flow_and_temperature_control>

```

**Σχήμα 2.8:** Λειτουργία PipeNetwork στη διαδικασία HeatTransportBHE .

Στο σχήμα 2.8 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα εισαγωγής του μοντέλου TemperatureCurveConstantFlow για συστοιχία γεωεναλλακτών:

### **Δημιουργία μοντέλου δικτύου αγωγών με το λογισμικό TESPpy**

Το λογισμικό TESPpy (Thermal Engineering Systems in Python ) αποτελείται από μία βιβλιοθήκη διαδικασιών γραμμένες σε κώδικα Python για την προσομοίωση θερμικών διαδικασιών.

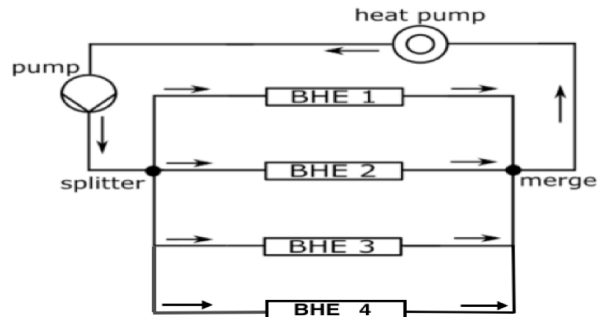
Ένα σύστημα αβαθούς γεωθερμίας αποτελείται από ένα δίκτυο αγωγών συνδεδεμένο με γεωεναλλάκτες θερμότητας, μία αντλία θερμότητας εδάφους (consumer), ένα διαχωριστή (splitter) για την κατανομή της ροής του υγρού της τροφοδοσίας και έναν διακλαδωτή (merge) για την επιστροφή της ροής.

Το σχήμα 2.9 παρουσιάζει σχηματικά ένα κλειστό σύστημα αβαθούς γεωθερμίας, το οποίο αποτελείται από μία συστοιχία γεωεναλλακτών. Στη συνέχεια περιγράφεται η παραμετροποίηση του αρχείου δεδομένων του λογισμικού TESPpy μέσω του οποίου δημιουργούνται τα συμπληρωματικά αρχεία δεδομένων τα οποία αναφέρονται σε μία συστοιχία γεωεναλλακτών του προβλήματος .

### **Δημιουργία δικτύου αγωγών**

Αρχικά εισάγεται η τοπολογία του δικτύου. Αποτελεί το κύριο μέρος του μοντέλου καθώς εισάγονται οι βασικοί παράμετροί του όπως το κυκλοφοριακό υγρό του συστήματος καθώς και τα επιμέρους χαρακτηριστικά του συστήματος. Στο σχήμα 2.10 εμφανίζεται ένα παράδειγμα κατασκευής δικτύου με χρήση νερού ως ψυκτικό μέσο. Οι μεταβλητές του δικτύου εισάγονται ως εξής:





**Σχήμα 2.9:** Μοντέλο δικτύου αγωγών στο TESPy

```
# Execute this file to generate TESPy network csv files
from tespy.networks import network
from tespy.connections import connection, ref
from tespy.components import source, sink, pump, splitter, merge, heat_exchanger_simple, cycle_closer
from tespy.tools import char_line, dc_cc
import numpy as np

# %% network
btes = network(fluids=['water'], T_unit='K', p_unit='bar', h_unit='kJ / kg')
```

**Σχήμα 2.10:** Ορισμός μεταβλητών του δικτύου.

### Στοιχεία δικτύου

Σε αυτό το τμήμα του αρχείου εισάγονται τα διάφορα στοιχεία του δικτύου, όπως η ύπαρξη ανοικτού ή κλειστού κυκλώματος, κυκλοφοριτή, διακλαδωτή, αντλίας θερμότητας και το πλήθος των γεωεναλλακτών. Το σχήμα 2.11 εμφανίζει ένα παράδειγμα κλειστού συστήματος πέντε γεωεναλλακτών. Στη συνέχεια εισάγονται οι παράμετροι κάθε επιμέρους τμήματος του συστήματος.

```
# %% components
fc = cycle_closer('cycle closer')
pu = pump('pump')
sp = splitter('splitter', num_out=5)

# bhe:
bhe1 = heat_exchanger_simple('BHE1')
bhe2 = heat_exchanger_simple('BHE2')
bhe3 = heat_exchanger_simple('BHE3')
bhe4 = heat_exchanger_simple('BHE4')
bhe5 = heat_exchanger_simple('BHE5')

mg = merge('merge', num_in=5)
cons = heat_exchanger_simple('consumer')
```

**Σχήμα 2.11:** Ορισμός στοιχείων δικτύου.

## Παραμετροποίηση στοιχείων

Στη συνέχεια εισάγονται οι παράμετροι κάθε επιμέρους τμήματος του συστήματος.

Στο στάδιο αυτό εισάγονται τα στοιχεία που απαιτούνται για την περιγραφή των χαρακτηριστικών κάθε τμήματος του συστήματος όπως το μήκος των γεωεναλλακτών, η διάμετρος τους, ο συντελεστής τραχύτητας, η ισχύς του συστήματος και η χαρακτηριστική καμπύλη της φυγοκεντρικής αντλίας (κυκλοφορητής). Το σχήμα 2.12 παρουσιάζει ένα παράδειγμα εισαγωγής δεδομένων παραμετροποίησης των βασικών στοιχείων του συστήματος. Στο επόμενο τμήμα του αρχείου εισάγεται ο τρόπος διασύνδεσης των αγωγών του συστήματος.

```
## components parameterization
# pump
# flow_char
# provide volumetric flow in m^3 / s
x =
    np.array(
        [2.77778E-06, 5.83333E-05, 0.000113889, 0.000169444, 0.000222222, 0.000283333, 0.000336111, 0.000383333, 0.000422222, 0.000447222, 0.000505556,
         0.000558333, 0.000611111, 0.000669444, 0.000725, 0.000780556, 0.000836111, 0.000891667, 0.00095, 0.001002778, 0.001061111, 0.001119445, 0.001169445,
         0.001227778, 0.001280556, 0.001308333,])

# provide head in Pa
y =
    np.array(
        [3.6081, 3.5672, 3.5058, 3.4854, 3.4445, 3.4036, 3.3628, 3.3014, 3.281, 3.2401, 3.1788, 3.1379, 3.0561, 2.8926, 2.7699, 2.6064, 2.4633, 2.3202, 2.1975,
         2.034, 1.8909, 1.6498, 1.5336, 1.3523, 1.1861, 1.0803,]) * 1e5

char = char_line(x=x, y=y)
pu.set_attr(flow_char=dc_cc(func=char, is_set=True))
pu.set_attr(eta_s=0.9)

# bhes
bhe1.set_attr(D=0.025, L=55, ks=0.00001)
bhe2.set_attr(D=0.032, L=100, ks=0.00001)
bhe3.set_attr(D=0.032, L=242, ks=0.00001)
bhe4.set_attr(D=0.032, L=242, ks=0.00001)
bhe5.set_attr(D=0.040, L=238, ks=0.00001)

# consumer
cons.set_attr(pr=0.32)
# consumer heat demand
cons.set_attr(Q=-19215) # W
```

**Σχήμα 2.12:** Παραμετροποίηση στοιχείων.

## Διασυνδέσεις αγωγών.

Για κάθε αγωγό περιγράφεται η είσοδος και η έξοδός του. Έτσι η συνολική διασύνδεση αποτελείται από μία ακολουθία διασυνδέσεων όλων των αγωγών του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα η ροή του ρευστού που ξεκινάει από την αντλία, στη συνέχεια διαχωρίζεται από τον διακλαδωτή σε πέντε κλάδους έναν για κάθε γεωεναλλάκτη. Ακολούθως η εκροή του υγρού από τους γεωεναλλάκτες συγχωνεύεται και οδηγείται στην αντλία θερμότητας. Η εικόνα 2.13 παρουσιάζει την παραμετροποίηση των διασυνδέσεων των αγωγών. Θα

πρέπει να σημειωθεί ότι οι ιδιότητες του ρευστού εντός της σύνδεσης παραμένουν σταθερές. Αυτό σημαίνει ότι όταν δύο στοιχεία συνδέονται μεταξύ τους, οι ιδιότητες του ρευστού, όπως για παράδειγμα ο ρυθμός ροής μάζας, η πίεση και η θερμοκρασία στην έξοδο του πρώτου στοιχείου θα είναι ίσες με αυτές στην είσοδο του δεύτερου στοιχείου.

```
# %% connections
fc_pu = connection(fc, 'out1', pu, 'in1')
pu_sp = connection(pu, 'out1', sp, 'in1')

sp_bhe1 = connection(sp, 'out1', bhe1, 'in1')
sp_bhe2 = connection(sp, 'out2', bhe2, 'in1')
sp_bhe3 = connection(sp, 'out3', bhe3, 'in1')
sp_bhe4 = connection(sp, 'out4', bhe4, 'in1')
sp_bhe5 = connection(sp, 'out5', bhe5, 'in1')

bhe1_mg = connection(bhe1, 'out1', mg, 'in1')
bhe2_mg = connection(bhe2, 'out1', mg, 'in2')
bhe3_mg = connection(bhe3, 'out1', mg, 'in3')
bhe4_mg = connection(bhe4, 'out1', mg, 'in4')
bhe5_mg = connection(bhe5, 'out1', mg, 'in5')

mg_cons = connection(mg, 'out1', cons, 'in1')
cons_fc = connection(cons, 'out1', fc, 'in1')

btes.add_conns(fc_pu, pu_sp, sp_bhe1, sp_bhe2, sp_bhe3, sp_bhe4, sp_bhe5, bhe1_mg, bhe2_mg,
               bhe3_mg, bhe4_mg, bhe5_mg, mg_cons, cons_fc)
```

**Σχήμα 2.13:** Διασυνδέσεις αγωγών.

Για την υλοποίηση των υπολογισμών απαιτούνται συνοριακές συνθήκες όπως :

- Η πίεση εισροής να είναι σταθερή.
- Μία προσωρινή τιμή θερμοκρασίας εκροής σε κάθε γεωεναλλάκτη.
- Η κατανάλωση θερμότητας στην αντλία θερμότητας να προέρχεται από τους πέντε γεωεναλλάκτες.
- Ο κλειστός κύκλος διασφαλίζει ότι η πίεση και η ενθαλπία στην έξοδο της αντλίας θερμότητας είναι ίσες με αυτές στην είσοδο της.

Το σχήμα 2.14 εμφανίζει τα χαρακτηριστικά του ρευστού και τις θερμοκρασίες εκροής για κάθε γεωεναλλάκτη για παράδειγμα χρήσης νερού πίεση μίας ατμόσφαιρας με θερμοκρασία εξόδου των πέντε γεωεναλλακτών σε βαθμούς Kelvin.

```
## connection parametrization
# system inlet
fc_pu.set_attr(p=1, fluid={'water': 1})

# for BHEs:
# Tout:
bhe1_mg.set_attr(T=289.5)
bhe2_mg.set_attr(T=292)
bhe3_mg.set_attr(T=293)
bhe4_mg.set_attr(T=293)
bhe5_mg.set_attr(T=293)
```

**Σχήμα 2.14:** Χαρακτηριστικά ρευστού και θερμοκρασία εκροής .

## **Κεφάλαιο 3**

# **Προσομοίωση δοκιμής θερμικής απόκρισης γήινων εναλλακτών θερμότητας (TRT)**

Για τον σχεδιασμό ενός συστήματος αβαθούς γεωθερμίας με χρήση γεωεναλλακτών θερμότητας, κρίνεται αναγκαία η γνώση των θερμικών ιδιοτήτων του εδάφους. Οι σημαντικότερες παράμετροι είναι η θερμική αγωγιμότητα και η μέση τιμή της αδιατάρακτης θερμοκρασίας του εδάφους. Αυτές οι παράμετροι είναι ειδικές για κάθε τοποθεσία και εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες, όπως η γεωλογία, η επίδραση των υπόγειων υδάτων και η θερμοκρασία των επιφανειακών εδαφών (υψόμετρο πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας). Επίσης ο συντελεστής θερμικής αντίστασης της γεώτρησης, ο οποίος περιγράφει την θερμική αντίσταση μεταξύ του τοιχώματος της γεώτρησης και του υγρού αποτελεί απαραίτητη παράμετρο στον σχεδιασμό των γεωεναλλακτών θερμότητας.

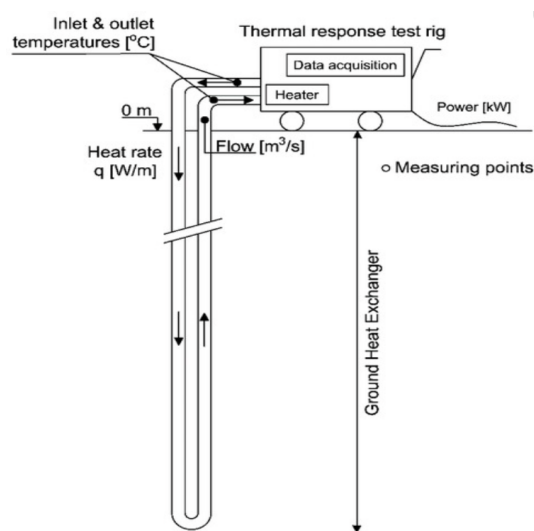
### **3.1 Προσομοίωση δοκιμής θερμικής απόκρισης και υπολογισμός θερμικών παραμέτρων του εδάφους**

Η απευθείας δοκιμή θερμικής απόκρισης (TRT) αντιπροσωπεύει μία μέθοδο αξιολόγησης των θερμικών ιδιοτήτων του υπεδάφους [5], οι οποίες είναι απαραίτητες για τον σχεδιασμό

συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας με χρήση γεωεναλλακτών θερμότητας. Εναλλακτικά οι μετρήσεις της θερμικής αγωγιμότητας μπορούν να πραγματοποιηθούν σε ένα εργαστήριο σε ειδικά διαμορφωμένα δοκίμια ή και απευθείας με ανιχνευτές βελόνας, όταν η σκληρότητα του δείγματος το επιτρέπει. Όμως στο εργαστήριο η τιμή που μετράται διαφέρει από την πραγματική, καθώς οι συνθήκες, όπως ο κορεσμός και η θερμοκρασία που επικρατούν στο εργαστήριο, δεν αντιστοιχούν στις πραγματικές, και τέλος η μέτρηση δεν αντιπροσωπεύει το σύνολο των στρωμάτων του υπεδάφους.

### **Εξοπλισμός δοκιμής θερμικής απόκρισης**

Υπάρχουν δύο τρόποι λειτουργίας [14] του εξοπλισμού στην δοκιμή θερμικής απόκρισης για την έκχυση ή την εκχύλιση θερμότητας από ή προς τον εξεταζόμενο γεωεναλλάκτη. Αυτό πραγματοποιείται με την κυκλοφορία ενός υγρού, μέσω της γεώτρησης το οποίο είναι θερμότερο κατά την διεργασία της έκχυσης και ψυχρότερο κατά την διεργασία της εκχύλισης από το έδαφος το οποίο το περιβάλλει. Η εικόνα (3.1), [25] εμφανίζει μία κλασσική διάταξη εξοπλισμού (TRT).



**Σχήμα 3.1:** Διάταξη εξοπλισμού δοκιμής θερμικής απόκρισης (TRT) [25].

### Αρχή λειτουργίας δοκιμής θερμικής απόκρισης

Αρχικά προσδιορίζεται η αδιατάρακτη θερμοκρασία του εδάφους, με την καταγραφή της θερμοκρασίας στην επιφάνεια της γεώτρησης ή με την αξιολόγηση της θερμοκρασίας του υγρού που κυκλοφορεί στον γεωεναλλάκτη πριν την ενεργοποίηση της ψύξης ή της θέρμανσης [9] . Με τον όρο θερμική απόκριση ορίζεται η μετρούμενη αλλαγή στην μέση θερμοκρασία των θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου του υγρού στην πάροδο του χρόνου. Οι υπερτιθέμενες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας συνήθως εξαρτώνται από την μεταβαλλόμενη θερμοκρασία του αέρα στο περιβάλλον ή τις αντίστοιχες διακυμάνσεις στην παροχή ισχύος στον ηλεκτρικό θερμαντήρα και στην αντλία κυκλοφορίας. Επομένως η θερμοκρασία του αέρα και η κατανάλωση ισχύος μετρώνται συχνά για να διαχωριστούν τέτοιου είδους διαταραχές κατά την αξιολόγηση. Αξίζει να σημειωθεί ότι αρκετοί εξοπλισμοί αντισταθμίζουν αυτές τις διακυμάνσεις χρησιμοποιώντας ένα χειριστήριο για να παρέχουν σταθερή ισχύς.

Η κατανομή της διαφοράς θερμοκρασίας  $\Delta T$  μεταξύ της μέσης θερμοκρασίας του υγρού του γεωεναλλάκτη  $T_f$  και της θερμοκρασίας του τοιχώματος της γεώτρησης  $T_b$  μπορεί να μοντελοποιηθεί από την παρακάτω μαθηματική συνάρτηση ως προς την ακτίνα της γεώτρησης και το χρόνο [15] [16] :

$$\Delta T(r_b, t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \int_{\frac{r_b^2}{4\alpha t}}^{\infty} \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta = \frac{q}{4\pi\lambda} E_1 \left[ \frac{r_b^2}{4\alpha t} \right] \quad (3.1)$$

όπου

- $\Delta T = T_f - T_b$  Διαφορά θερμοκρασίας.
- $\alpha$  : Θερμική διάχυση ( $m^2/sec$ ).
- $\beta$  : Σταθερά ολοκλήρωσης .
- $t$  : Χρόνος ( $sec$ ).
- $\lambda$  : Θερμική αγωγιμότητα ( $W/mK$ ).

- $q$  : Ρυθμός έγχυσης θερμότητας ( $W/m$ ).
- $r_b$  : Ακτίνα γεώτρησης ( $m$ ).

Η συνάρτηση  $E_1$  στην παραπάνω σχέση μπορεί να προσεγγιστεί ως

$$E_1 \left[ \frac{r_b^2}{4\alpha t} \right] = -\gamma - \ln \left[ \frac{r_b^2}{4\alpha t} \right] - \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{\left( \frac{r_b^2}{4\alpha t} \right)^n}{n \cdot n!} \cong \ln \left[ \frac{4\alpha t}{r_b^2} \right] - \gamma \quad (3.2)$$

όπου  $\gamma = 0.5772$  η σταθερά Euler.

Το μέγιστο σφάλμα προσέγγισης της συνάρτησης  $E_1$  θα είναι μικρότερο του 10% για τις χρονικές στιγμές  $t$  που ικανοποιούν τη σχέση  $\frac{\alpha t}{r_b^2} \geq 5$  ενώ μικρότερο του 2.5% για αυτές με  $\frac{\alpha t}{r_b^2} \geq 20$ . Σφάλμα προσέγγισης μικρότερο του 10% είναι συνήθως αποδεκτό, οπότε επιλέγονται οι χρονικές στιγμές που ικανοποιούν τη σχέση [15]

$$\frac{\alpha t}{r_b^2} \geq 5 \quad (3.3)$$

με  $\alpha = \frac{\lambda}{C_p}$  για  $C_p$  την ειδική θερμοχωρητικότητα εδάφους σε  $J/Km^3$ .

Η θερμοκρασία του υγρού που ρέει στο εσωτερικό του γεωεναλλάκτη μπορεί να υπολογιστεί θεωρώντας ότι η γραμμική πηγή θερμότητας βρίσκεται στην ακτίνα της γεώτρησης και προσθέτοντας την επίδραση της θερμικής αντίστασης μεταξύ του τοιχώματος της γεώτρησης και του υγρού αυτού. Οπότε η θερμοκρασία του υγρού ως συνάρτηση του χρόνου μπορεί να περιγραφεί με την παρακάτω εξίσωση :

$$\Delta T(t) = T_f(t) - T_b(t) = R_b \cdot q \Rightarrow T_f(t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \left[ \ln \left( \frac{4\alpha t}{r_b^2} \right) - \gamma \right] + T_g + R_b \cdot q \quad (3.4)$$

όπου  $T_g$  η αδιατάρακτη θερμοκρασία εδάφους,  $R_b$  η θερμική αντίσταση μετρημένη σε  $(K, m/W)$ , για  $T_f$  τον αριθμητικό μέσο όρο των θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου του υγρού του γεωεναλλάκτη, δηλαδή  $T_f = \frac{T_{in} + T_{out}}{2}$ .

Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να γραφτεί σε γραμμική μορφή ως εξής :

$$T_f(t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \cdot \ln(t) + q \left[ \frac{1}{4\pi\lambda} \left( \ln \left( \frac{4\alpha}{r_b^2} \right) - \gamma \right) + R_b \right] + T_g \quad (3.5)$$



και ακόμα σε πιο απλή μορφή ως

$$T_f(t) = k \cdot \ln(t) + m. \quad (3.6)$$

Από το διάγραμμα του μέσου όρου θερμοκρασίας ως προς το λογάριθμο του χρόνου θα έχει κλίση

$$k = \frac{q}{4\pi\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{q}{4\pi k} \quad (3.7)$$

ενώ η παράμετρος

$$m = q \left[ \frac{1}{4\pi\lambda} \left( \ln \left( \frac{4\alpha}{r_b^2} \right) - \gamma \right) + R_b \right] + T_g. \quad (3.8)$$

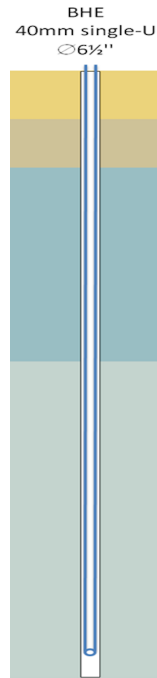
Η εξίσωση (3.6) της ευθείας της μέσης τιμής των θερμοκρασιών γεωεναλλάκτη ως προς τον λογάριθμο του χρόνου εκτέλεσης του TRT μπορεί να κατασκευαστεί ως την ευθεία των ελαχίστων τετραγώνων [16] από το γράφημα των πειραματικών μετρήσεων των θερμοκρασιών γεωεναλλάκτη ως προς τον λογάριθμο του χρόνου εκτέλεσης του TRT . Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η κατασκευή της ευθείας των ελαχίστων τετραγώνων θα κατασκευαστεί με τη χρήση των δεδομένων που ικανοποιούν τη σχέση (3.3). Έτσι με την εύρεση της θερμικής αγωγιμότητας  $\lambda$  [17], ο υπολογισμός της θερμικής αντίστασης  $R_b$  μεταξύ του υγρού του γεωεναλλάκτη και του τοιχώματος της γεώτρησης του θα δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$R_b = \frac{T_f(t) - T_g}{q} - \frac{1}{4\pi\lambda} \left( \ln \left( \frac{4\alpha}{r_b^2} \right) - \gamma \right). \quad (3.9)$$

Οι τέσσερις διαφορετικού τύπου γήινοι εναλλάκτες θερμότητας οι οποίοι αποτελούν το σύστημα γεωεναλλακτών στο ΚΑΠΕ, μελετήθηκαν ξεχωριστά για την προσομοίωση της δοκιμή θερμικής απόκρισης (TRT). Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα το προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν για τον κάθε γεωεναλλάκτη του συστήματος στο ΚΑΠΕ.

### 3.1.1 Δοκιμή θερμικής απόκρισης (TRT) γεωεναλλάκτη τύπου 1U

Ο γήινος εναλλάκτης θερμότητας τύπου 1U όπως φαίνεται στο σχήμα (3.2), [4] προσομοιώθηκε ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία [Παράρτημα Γ]:



**Σχήμα 3.2:** Γεωεναλλάκτης τύπου 1U σχέδιο ΚΑΠΕ [4].

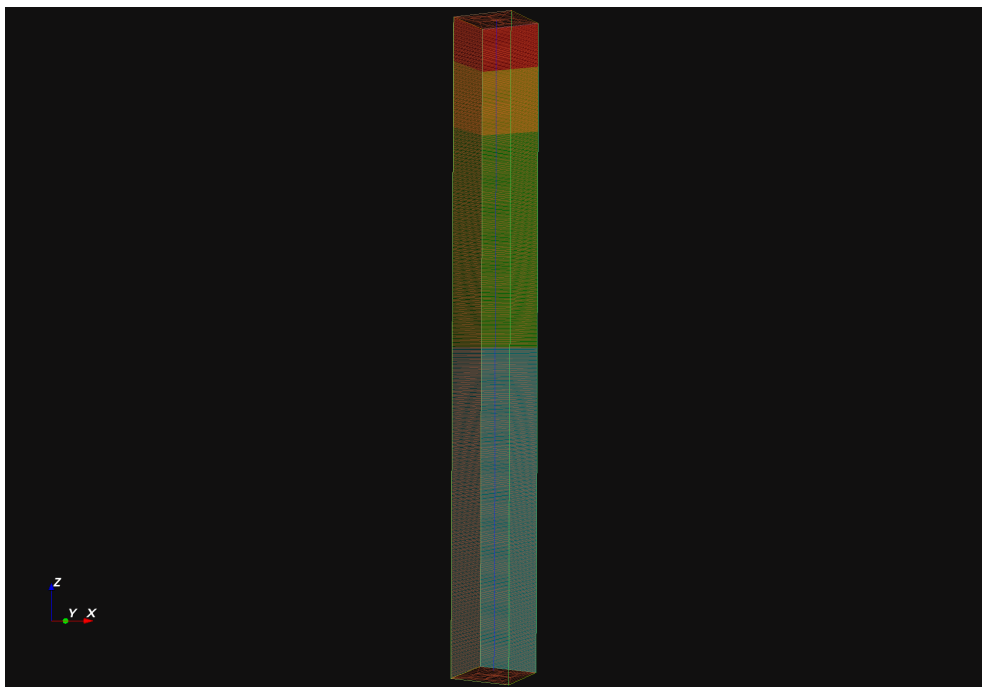
1. Δημιουργία πεπερασμένων στοιχείων με χρήση του προγράμματος (BHE SETUP TOOL) (σχήμα 3.3).
2. Δημιουργία γεωμετρίας και διακριτοποίησης γεωεναλλάκτη με χρήση του λογισμικού DataExplorer (σχήμα 3.4, 3.5).
3. Με χρήση του λογισμικού Matlab [18] κατασκευάστηκαν τα παρακάτω γραφήματα των σχημάτων 3.6 και 3.7 και δημιουργήθηκε το μοντέλο υπολογισμών θερμικών παραμέτρων του εδάφους, όπως περιγράφεται στην προηγούμενη παράγραφο (3.1).
4. Οι τιμές των θερμικών παραμέτρων του εδάφους από την προσομοίωση της δοκιμής θερμικής απόκρισης παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

```

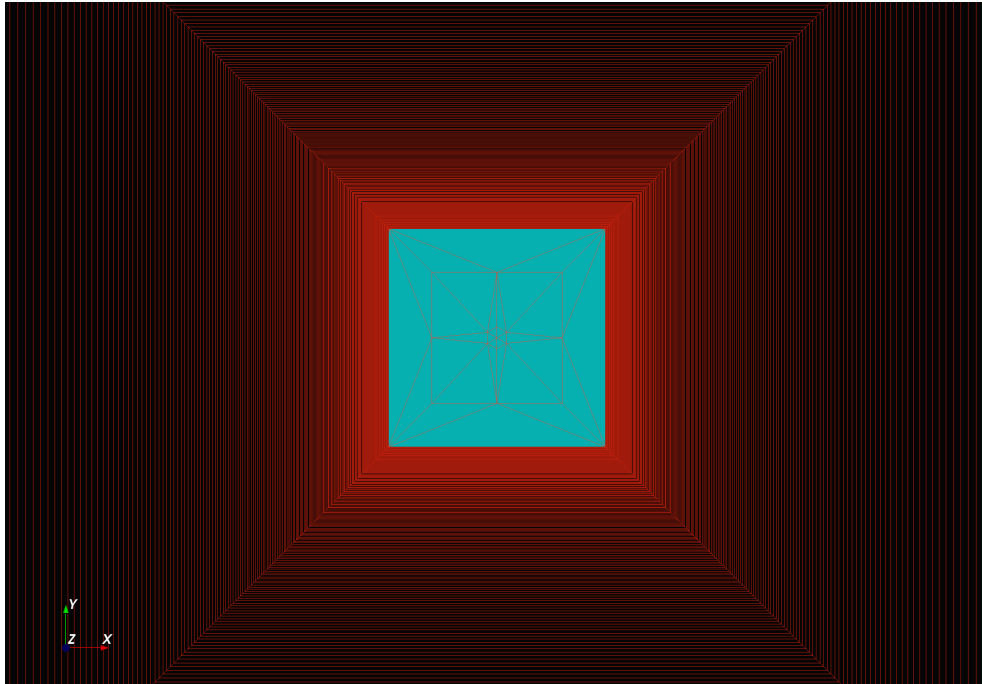
WIDTH 10
LENGTH 10
DEPTH 120
BOX 2 6 6
ELEM_SIZE 5 30
// material_group #_of_elements thickness_of_elements
LAYER 0 32 0.25
LAYER 1 48 0.25
LAYER 2 160 0.25
LAYER 3 240 0.25
// BHE# x y z_top z_bottom radius
BHE 0 0 5 0 -119 0.08255

```

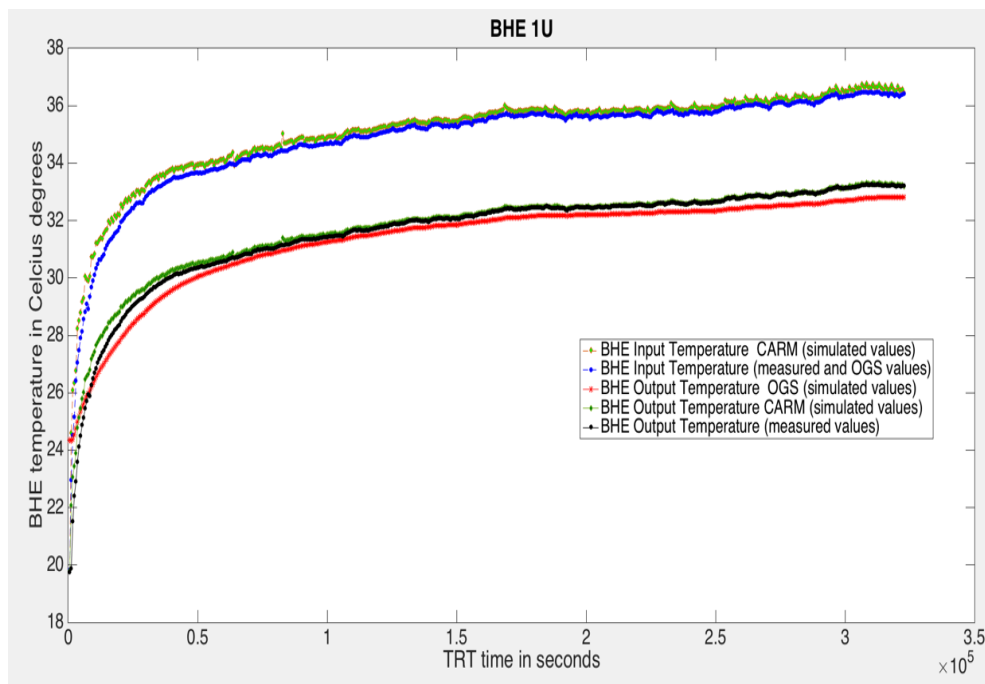
**Σχήμα 3.3:** Αρχείο εισόδου για την δημιουργία των πεπερασμένων στοιχείων στο πρόγραμμα BHE SETUP TOOL.



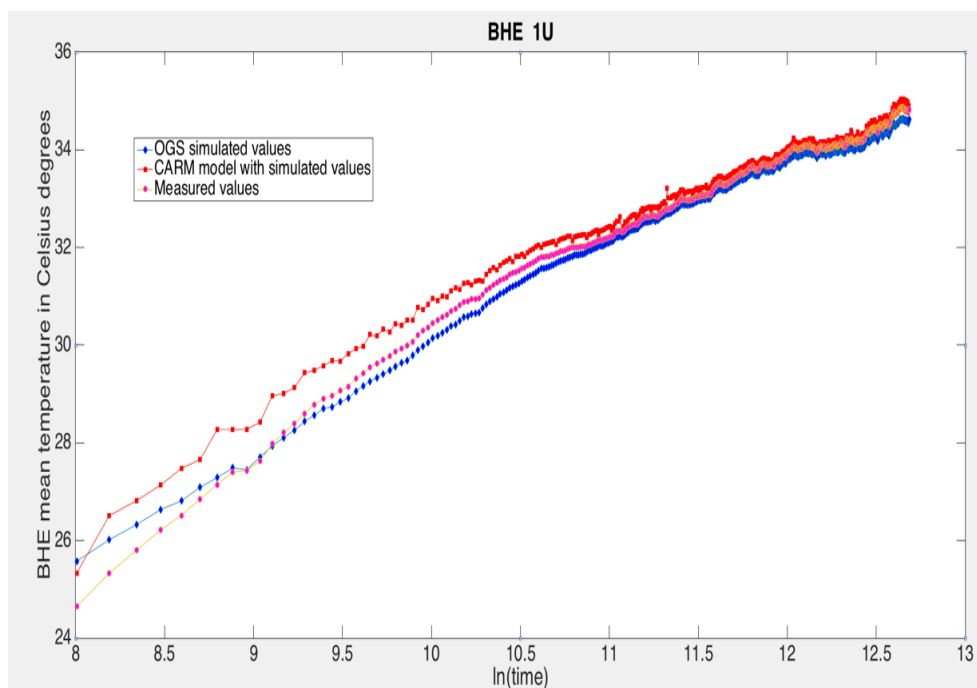
**Σχήμα 3.4:** Γεωμετρία γεωεναλλάκτη τύπου 1U (DataExplorer).



**Σχήμα 3.5:** Διακριτοποίηση γεωεναλλάκτη τύπου 1U (DataExplorer).



**Σχήμα 3.6:** Διάγραμμα θερμοκρασίας εισόδου-εξόδου σε συνάρτηση με τον χρόνο γεωεναλλάκτη τύπου 1U

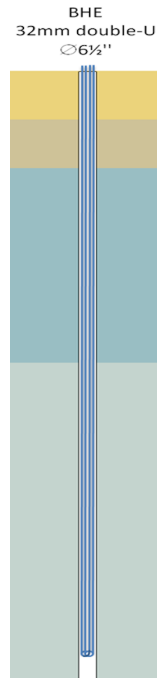


**Σχήμα 3.7:** Διάγραμμα μέσης θερμοκρασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο σε λογαριθμική κλίμακα γεωεναλλάκτη τύπου 1U

Πίνακας θερμικών παραμέτρων εδάφους		
Γεωεναλλάκτης τύπου 1U	Θερμική αγωγιμότητα ( $W/mK$ )	Συντελεστής θερμικής αντίστασης ( $mK/W$ )
ΚΑΠΕ model with measured values	3.1960	0.1300
LS model with measured values	3.1500	0.1191
LS model with CARM simulated values	3.3407	0.1261
LS model with OpenGeoSys simulated values	3.1396	0.1160

### 3.1.2 Δοκιμή θερμικής απόκρισης (TRT) γεωεναλλάκτη τύπου 2U

Ο γήινος εναλλάκτης θερμότητας τύπου 2U όπως φαίνεται στο σχήμα (3.8), [4] προσομοιώθηκε ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία [Παράρτημα Δ'] :



**Σχήμα 3.8:** Γεωεναλλάκτης τύπου 2U σχέδιο ΚΑΠΕ [4].

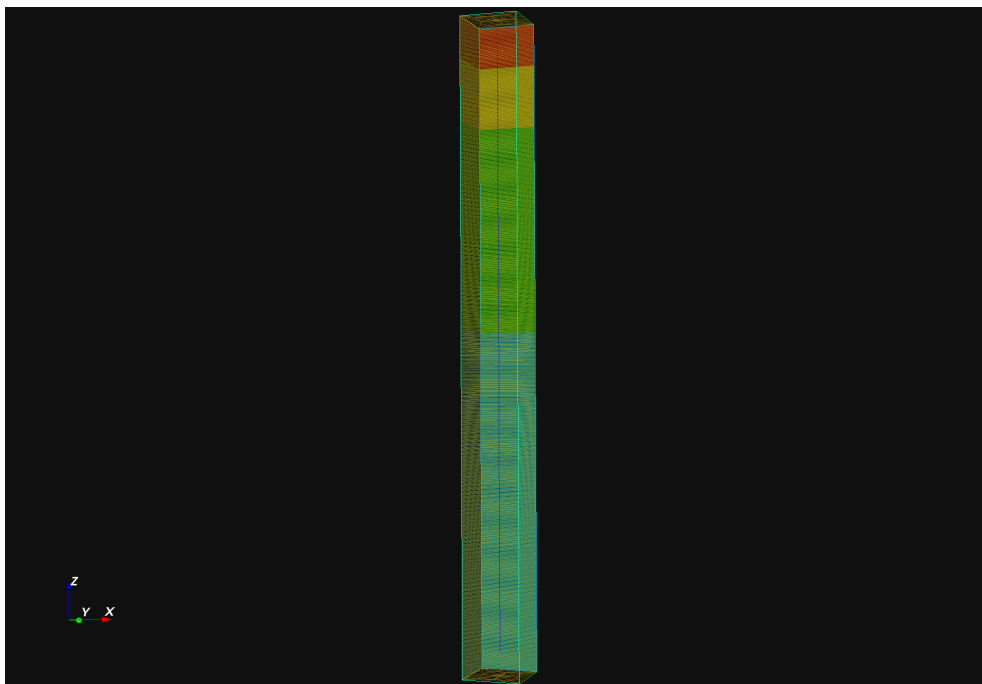
1. Δημιουργία πεπερασμένων στοιχείων με χρήση του προγράμματος (BHE SETUP TOOL) (σχήμα 3.9).
2. Δημιουργία γεωμετρίας και διακριτοποίησης γεωεναλλάκτη με χρήση του λογισμικού DataExplorer (σχήμα 3.10, 3.11).
3. Με χρήση του λογισμικού Matlab κατασκευάστηκαν τα παρακάτω γραφήματα των σχημάτων 3.12 και 3.13 και δημιουργήθηκε το μοντέλο υπολογισμών θερμικών παραμέτρων του εδάφους, όπως ορίζεται στην προηγούμενη παράγραφο (3.1).
4. Οι τιμές των θερμικών παραμέτρων του εδάφους από την προσομοίωση της δοκιμής θερμικής απόκρισης παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

```

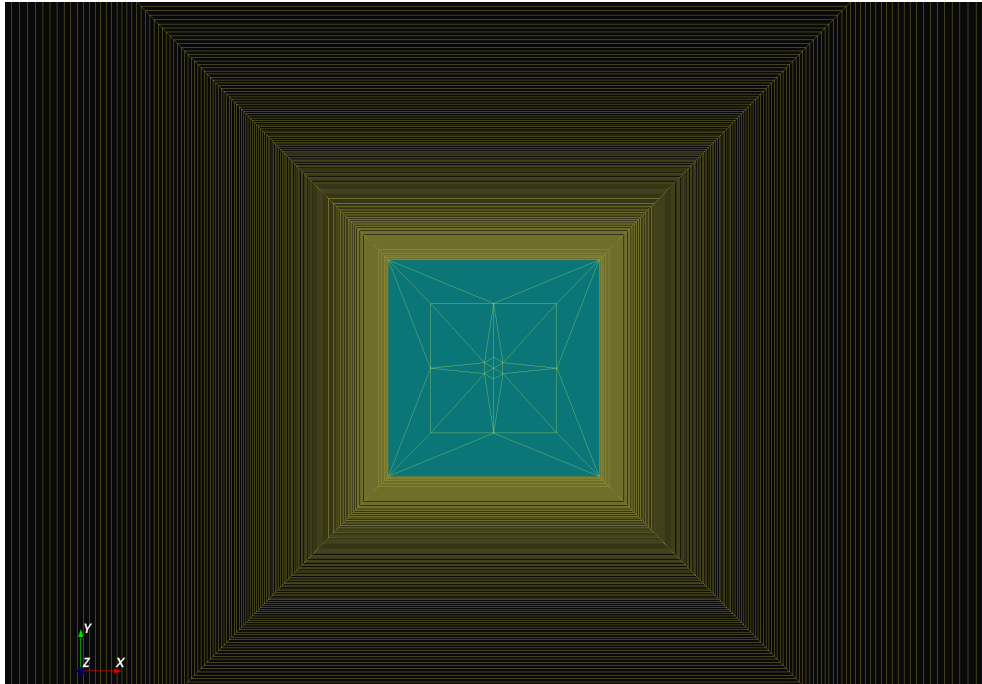
WIDTH 10
LENGTH 10
DEPTH 125.5
BOX 2 6 6
ELEM_SIZE 5 30
// material_group #_of_elements thickness_of_elements
LAYER 0 32 0.25
LAYER 1 48 0.25
LAYER 2 160 0.25
LAYER 3 262 0.25
// BHE# x y z_top z_bottom radius
BHE 0 0 5 0 -121 0.08255

```

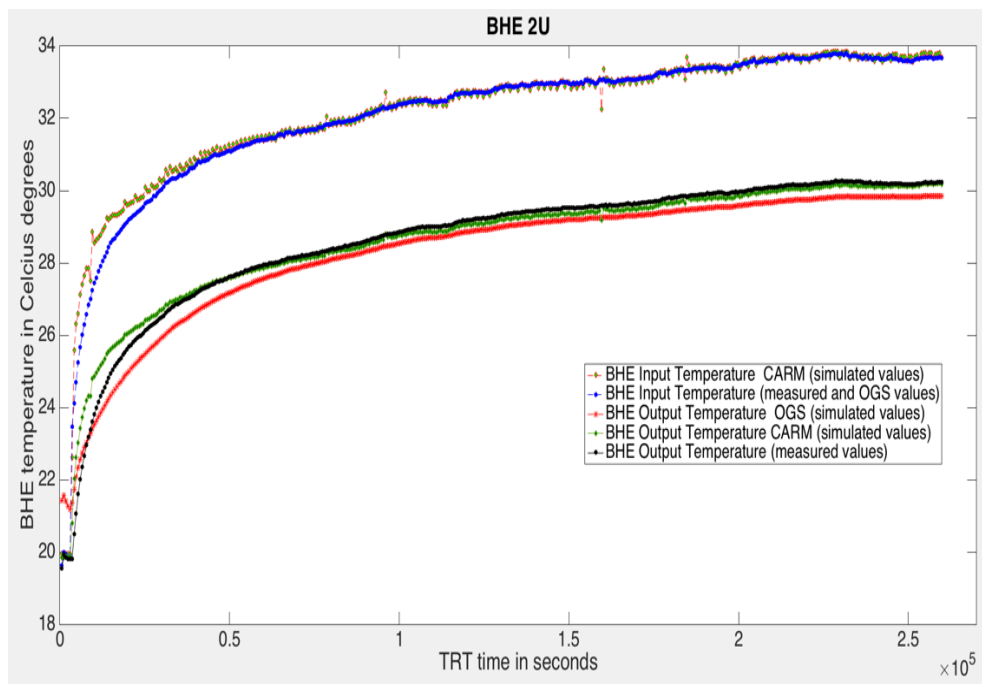
**Σχήμα 3.9:** Αρχείο εισόδου για την δημιουργία των πεπερασμένων στοιχείων στο πρόγραμμα BHE SETUP TOOL.



**Σχήμα 3.10:** Γεωμετρία γεωεναλλάκτη τύπου 2U (DataExplorer).

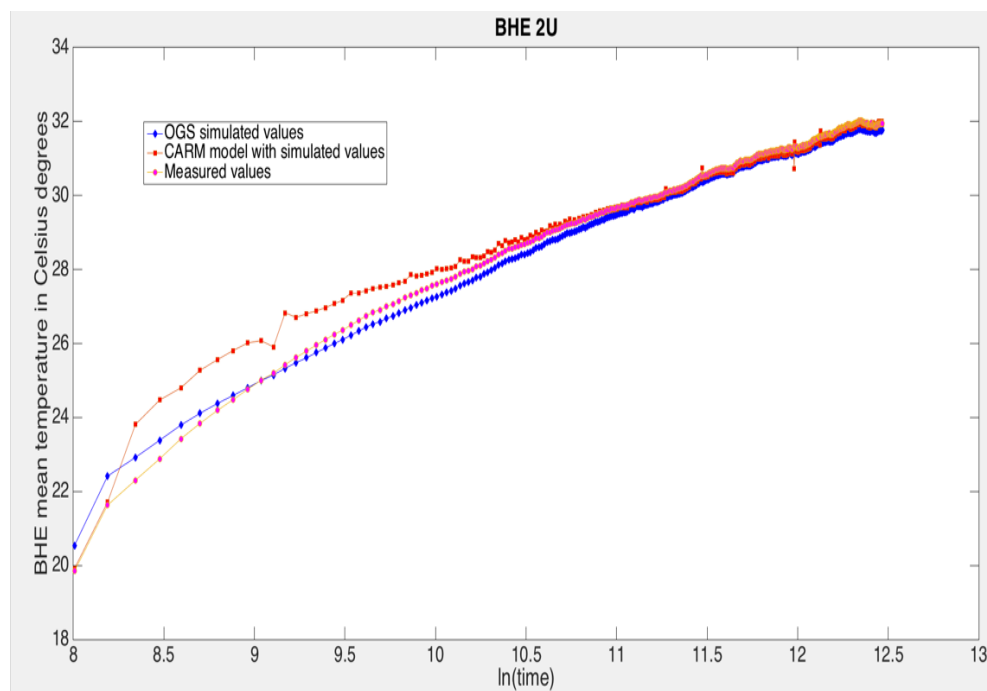


**Σχήμα 3.11:** Διακριτοποίηση γεωεναλλάκτη τύπου 2U (DataExplorer).



**Σχήμα 3.12:** Διάγραμμα θερμοκρασίας εισόδου-εξόδου σε συνάρτηση με τον χρόνο γεωεναλλάκτη τύπου 2U.



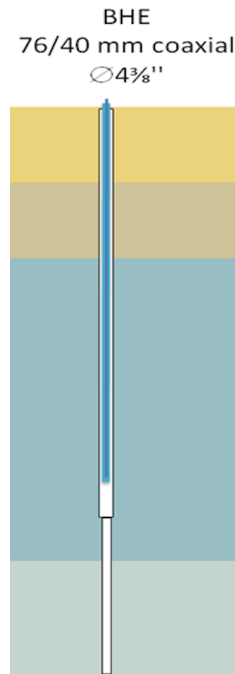


**Σχήμα 3.13:** Διάγραμμα μέσης θερμοκρασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο σε λογαριθμική κλίμακα γεωεναλλάκτη τύπου 2U.

Πίνακας θερμικών παραμέτρων εδάφους (πραγματικότητας-προσομοίωσης)		
Γεωεναλλάκτης τύπου 2U	Θερμική αγωγιμότητα ( $W/mK$ )	Συντελεστής θερμικής αντίστασης ( $mK/W$ )
ΚΑΠΕ model with measured values	2.9650	0.0730
LS model with measured values	2.8524	0.0588
LS model with CARM simulated values	2.9667	0.0615
LS model with OpenGeoSys simulated values	2.8229	0.0549

### 3.1.3 Δοκιμή θερμικής απόκρισης (TRT) γεωεναλλάκτη ομοαξονικού τύπου

Ο γήινος εναλλάκτης θερμότητας ομοαξονικού τύπου όπως φαίνεται στο σχήμα (3.14), [4] προσομοιώθηκε ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία [Παράρτημα Ε'] :



**Σχήμα 3.14:** Γεωεναλλάκτης ομοαξονικού τύπου σχέδιο ΚΑΠΕ [4].

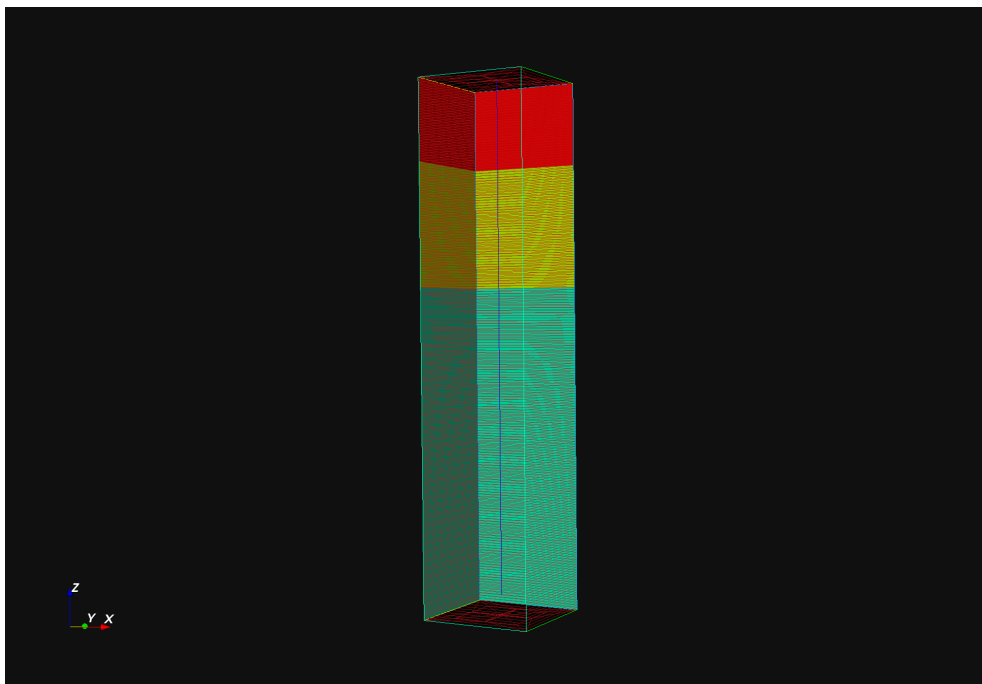
1. Δημιουργία πεπερασμένων στοιχείων με χρήση του προγράμματος (BHE SETUP TOOL) (σχήμα 3.15).
2. Δημιουργία γεωμετρίας και διακριτοποίησης γεωεναλλάκτη με χρήση του λογισμικού DataExplorer (σχήμα 3.16, 3.17).
3. Με χρήση του λογισμικού Matlab κατασκευάστηκαν τα παρακάτω γραφήματα των σχημάτων 3.18 και 3.19 και δημιουργήθηκε το μοντέλο υπολογισμών θερμικών παραμέτρων του εδάφους, όπως ορίζεται στην προηγούμενη παράγραφο (3.1).
4. Οι τιμές των θερμικών παραμέτρων του εδάφους από την προσομοίωση της δοκιμής θερμικής απόκρισης παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

```

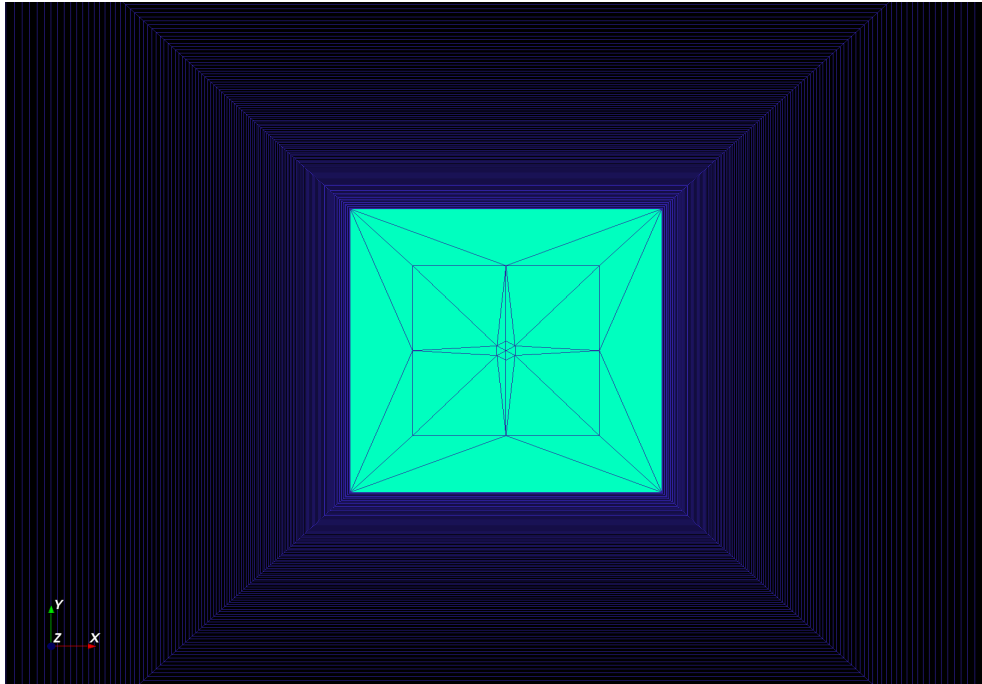
WIDTH 10
LENGTH 10
DEPTH 52
BOX 2 6 6
ELEM_SIZE 5 30
// material_group #_of_elements thickness_of_elements
LAYER 0 32 0.25
LAYER 1 48 0.25
LAYER 2 128 0.25
// BHE# x y z_top z_bottom radius
BHE 0 0 5 0 -50 0.055

```

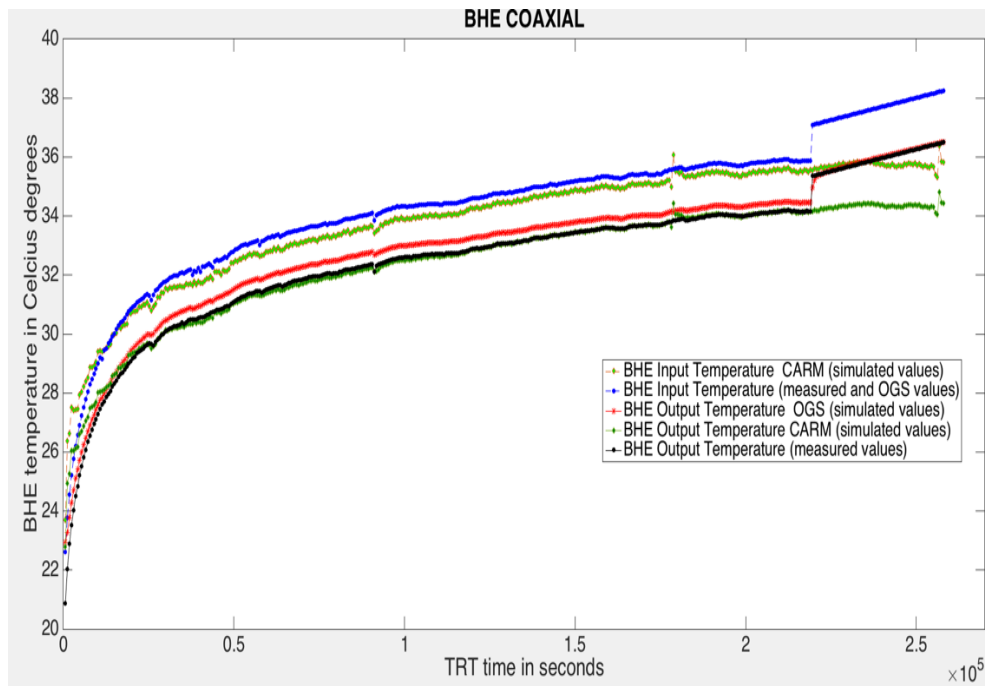
**Σχήμα 3.15:** Αρχείο εισόδου για την δημιουργία των πεπερασμένων στοιχείων στο πρόγραμμα BHE SETUP TOOL.



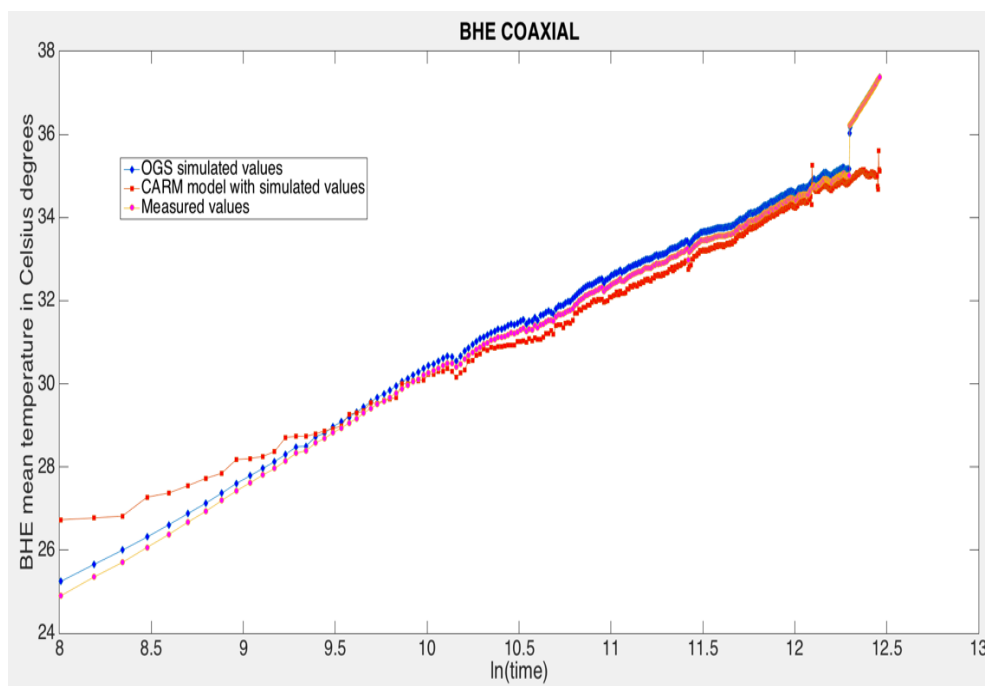
**Σχήμα 3.16:** Γεωμετρία γεωεναλλάκτη ομοαξονικού τύπου (DataExplorer).



**Σχήμα 3.17:** Διακριτοποίηση γεωεναλλάκτη ομοαξονικού τύπου (DataExplorer).



**Σχήμα 3.18:** Διάγραμμα θερμοκρασίας εισόδου-εξόδου σε συνάρτηση με τον χρόνο γεωεναλλάκτη ομοαξονικού τύπου.

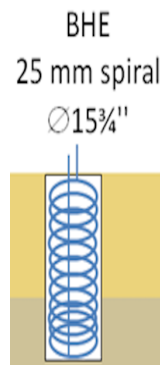


**Σχήμα 3.19:** Διάγραμμα μέσης θερμοκρασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο σε λογαριθμική κλίμακα γεωεναλλάκτη ομοαξονικού τύπου

Πίνακας θερμικών παραμέτρων εδάφους (πραγματικότητας-προσομοίωσης)		
Γεωεναλλάκτης ομοαξονικού τύπου	Θερμική αγωγιμότητα ( $W/mK$ )	Συντελεστής θερμικής αντίστασης ( $mK/W$ )
KAPE model with measured values	2.6430	0.0500
LS model with measured values	2.4568	0.0378
LS model with CARM simulated values	2.4298	0.0336
LS model with OpenGeoSys simulated values	2.5482	0.0392

### 3.1.4 Δοκιμή θερμικής απόκρισης (TRT) γεωεναλλάκτη ελικοειδούς τύπου

Ο γήινος εναλλάκτης θερμότητας τύπου ελικοειδούς όπως φαίνεται στο σχήμα (3.20), [4] προσομοιώθηκε σαν γεωεναλλάκτης τύπου 1U, καθώς το λογισμικό δεν έχει αναπτύξει κώδικα για αυτού του τύπου τον γεωεναλλάκτη με κάποιες παραδοχές και ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία [Παράρτημα ΣΤ] :



**Σχήμα 3.20:** Γεωεναλλάκτης ελικοειδούς τύπου στο ΚΑΠΕ [4].

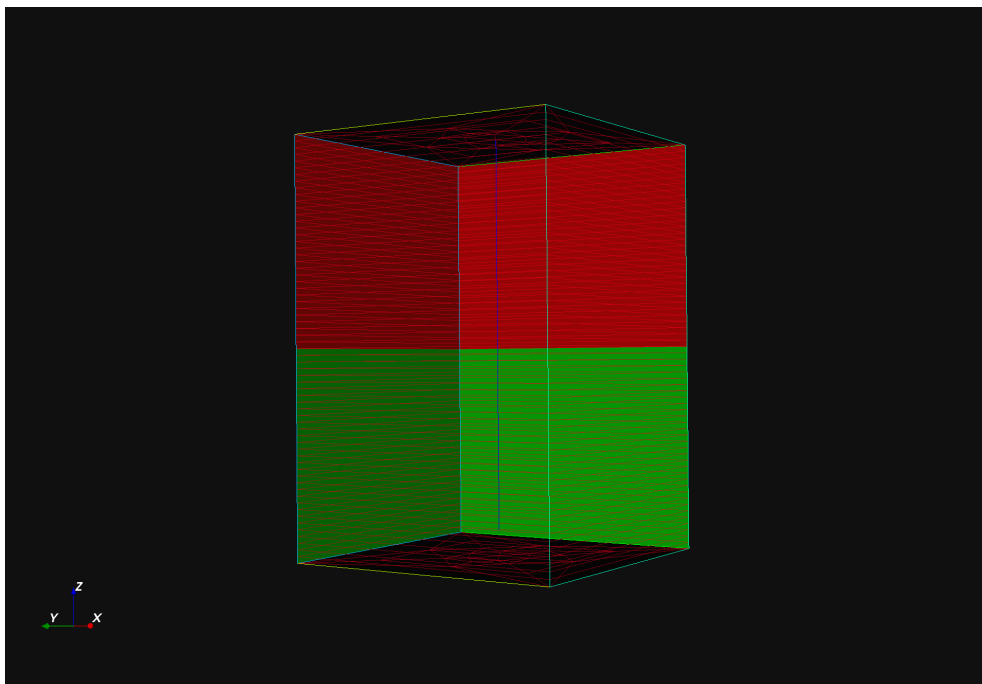
1. Δημιουργία πεπερασμένων στοιχείων με χρήση του προγράμματος (BHE SETUP TOOL) (σχήμα 3.21).
2. Δημιουργία γεωμετρίας και διακριτοποίησης γεωεναλλάκτη με χρήση του λογισμικού DataExplorer (σχήμα 3.22, 3.23).
3. Με χρήση του λογισμικού Matlab κατασκευάστηκαν τα παρακάτω γραφήματα των σχημάτων 3.24 και 3.25 και δημιουργήθηκε το μοντέλο υπολογισμών θερμικών παραμέτρων του εδάφους, όπως ορίζεται στην προηγούμενη παράγραφο (3.1).
4. Οι τιμές των θερμικών παραμέτρων του εδάφους από την προσομοίωση της δοκιμής θερμικής απόκρισης παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

```

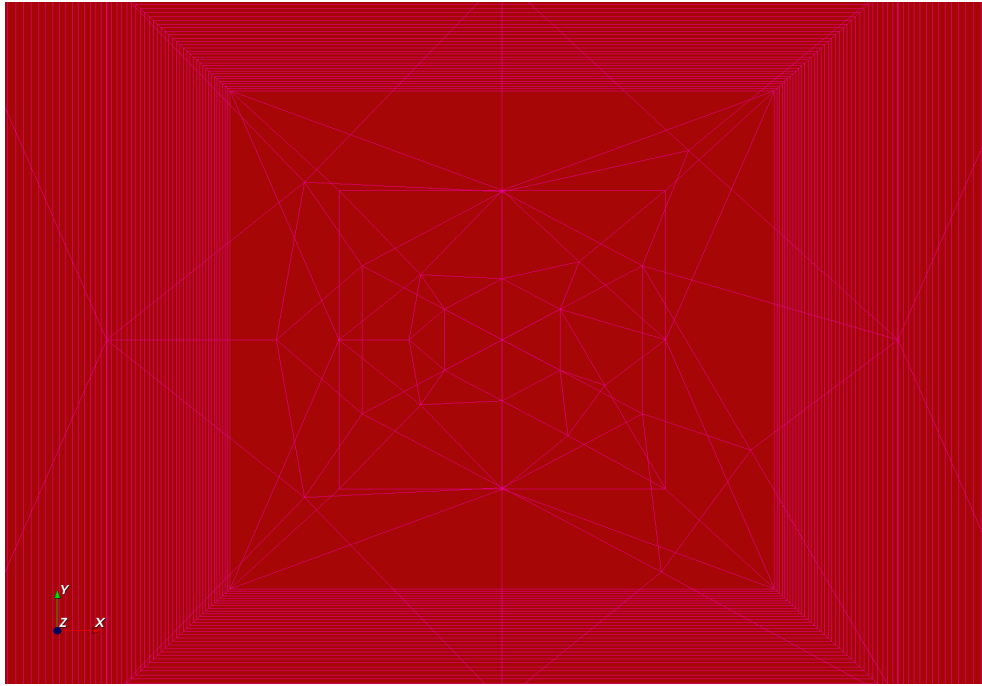
WIDTH 10
LENGTH 10
DEPTH 16
BOX 2 6 6
ELEM_SIZE 5 30
// material_group #_of_elements thickness_of_elements
LAYER 0 32 0.25
LAYER 1 32 0.25
// BHE# x y z_top z_bottom radius
BHE 0 0 5 0 -15 0.20

```

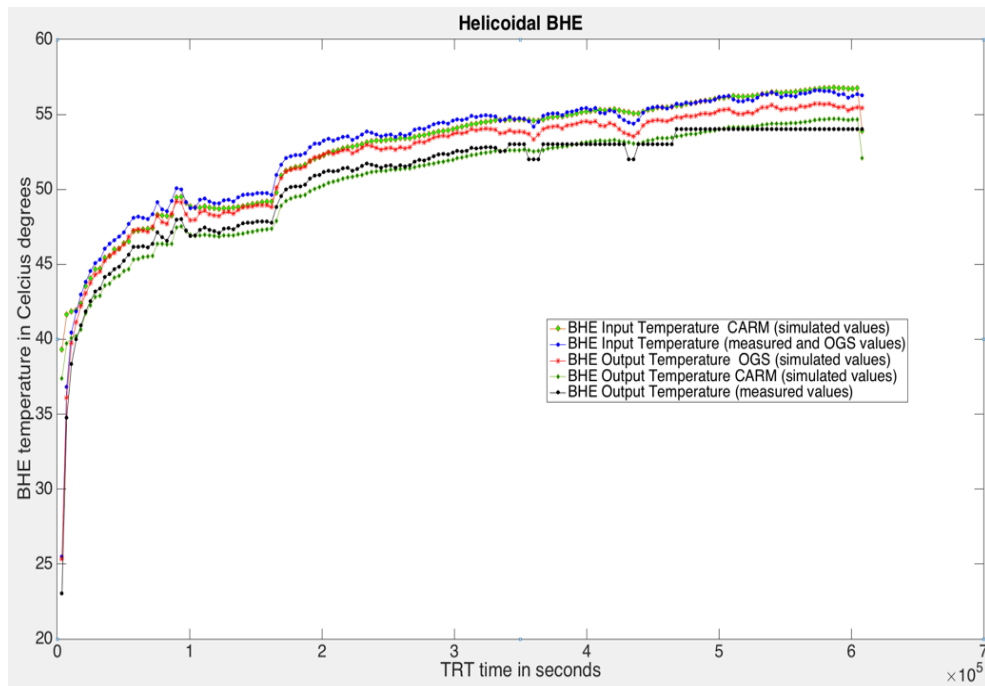
**Σχήμα 3.21:** Αρχείο εισόδου για την δημιουργία των πεπερασμένων στοιχείων στο πρόγραμμα BHE SETUP TOOL.



**Σχήμα 3.22:** Γεωμετρία γεωεναλλάκτη τύπου ελικοειδούς (DataExplorer).

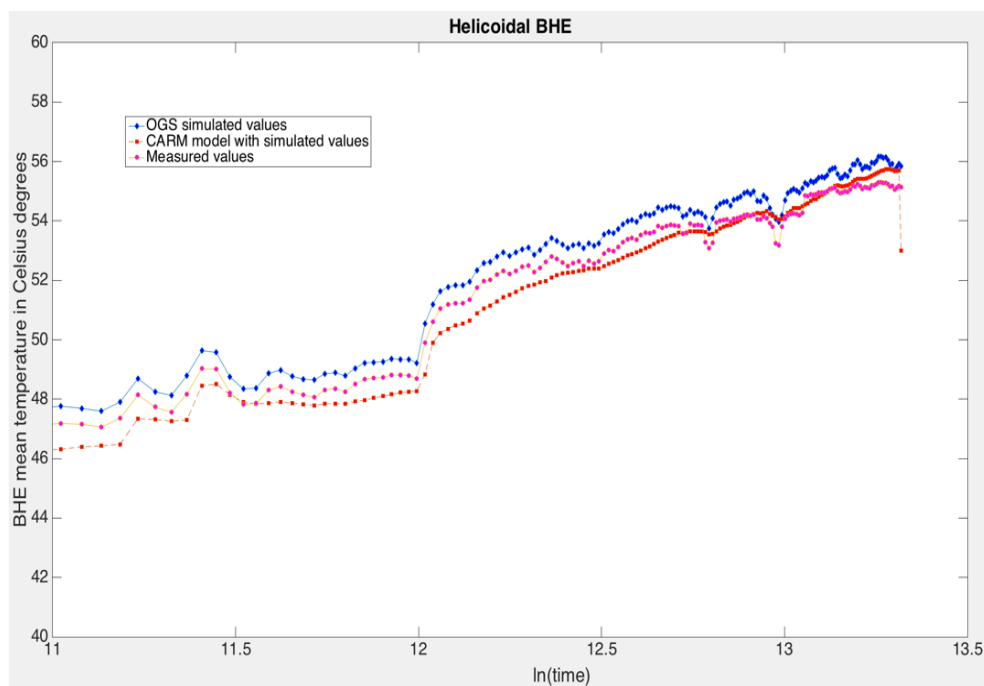


**Σχήμα 3.23:** Διακριτοποίηση γεωεναλλάκτη ελικοειδούς τύπου (DataExplorer).



**Σχήμα 3.24:** Διάγραμμα θερμοκρασίας εισόδου-εξόδου σε συνάρτηση με τον χρόνο γεωεναλλάκτη ελικοειδούς τύπου.





**Σχήμα 3.25:** Διάγραμμα μέσης θερμοκρασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο σε λογαριθμική κλίμακα γεωεναλλάκτη ελικοειδούς τύπου

Πίνακας θερμικών παραμέτρων εδάφους (πραγματικότητας-προσομοίωσης)		
Γεωεναλλάκτης τύπου ελικοειδο- ύς	Θερμική αγωγιμότητα ( $W/mK$ )	Συντελεστής θερμικής αντίστασης ( $mK/W$ )
ΚΑΠΕ model with measured va- lues	3.643	0.108
LS model with measured values	3.2989	0.0986
LS model with CARM simulated values	2.9378	0.0901
LS model with OpenGeoSys si- mulated values	3.2612	0.1016

### 3.2 Προσομοίωση συστήματος γεωθερμίας σε πραγματικές συνθήκες

Για την προσομοίωση του συστήματος αβαθούς γεωθερμίας του κτιρίου γραφείων του ΚΑΠΕ χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τις παρακάτω πηγές :

1. Γεωγραφική θέση γήινων εναλλακτών θερμότητας και αποστάσεις μεταξύ των γεωτρήσεων (σχήμα 3.26), [4].

Πίνακας συντεταγμένων γεωτρήσεων στο Ελληνικό γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς 1987 (ΕΓΣΑ'87)			
ID	X	Y	Z
Γ1(1U)	493398.291	4205377.16	125.92
Γ2(2U)	493397.37	4205387.82	126.37
Γ3(Ομοαξονικός)	493398.31	4205394.61	126.83
Γ4(Ελικοειδής)	493399.14	4205401.29	127.32

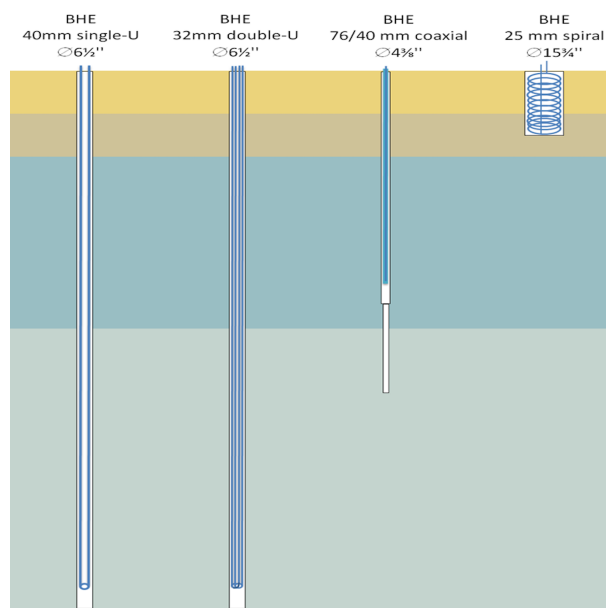
Αποστάσεις μεταξύ των γεωτρήσεων	
Γεωτρήσεις (ID)	Απόσταση(m)
Γ1Γ2	10.6996262
Γ2Γ3	6.85475747
Γ3Γ4	6.73136687

2. Γεωλογικά - εδαφολογικά χαρακτηριστικά [10], τα οποία είναι εισάγονται σε βασικές παραμέτρους του λογισμικού OpenGeoSys (σχήμα 3.27). Ο παρακάτω πίνακας περιλαμβάνει τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά του υπεδάφους.

Εδαφολογικά χαρακτηριστικά περιοχής					
Είδος ε- δάφους	Πάχος στρώματος (m)	Θερμοχωρητικότητα (J/KgK)	Πυκνότητα (Kg/m <sup>3</sup> )	Θερμική α- γωγιμότητα (W/mK)	Πορώδες (%)
Dry Clay	8	1600	2100	1	40
Wet Clay	12	3400	1200	3.4	20
Grey Clay	40	2500	2700	2.6	17
Sandstone	65	750	2680	2.965	10

3. Οι διαστάσεις των γεωτρήσεων οι οποίες κρίνονται απαραίτητες κατά την διαδικασία δημιουργίας της γεωμετρίας και της διακριτοποίησης των γεωεναλλακτών θερμότητας του συστήματος παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.





**Σχήμα 3.27:** Σύστημα γεωεναλλακτών σχέδιο ΚΑΠΕ [4].

Χαρακτηριστικά γεωτρήσεων		
Τύπος γεωεναλλάκτη	Ακτίνα γεώτρησης ( <i>m</i> )	Βάθος γεώτρησης ( <i>m</i> )
1U	0.1651	119
2U	0.1651	121
Ομοαξονικός	0.110	50
Ελικοειδής	0.40005	15

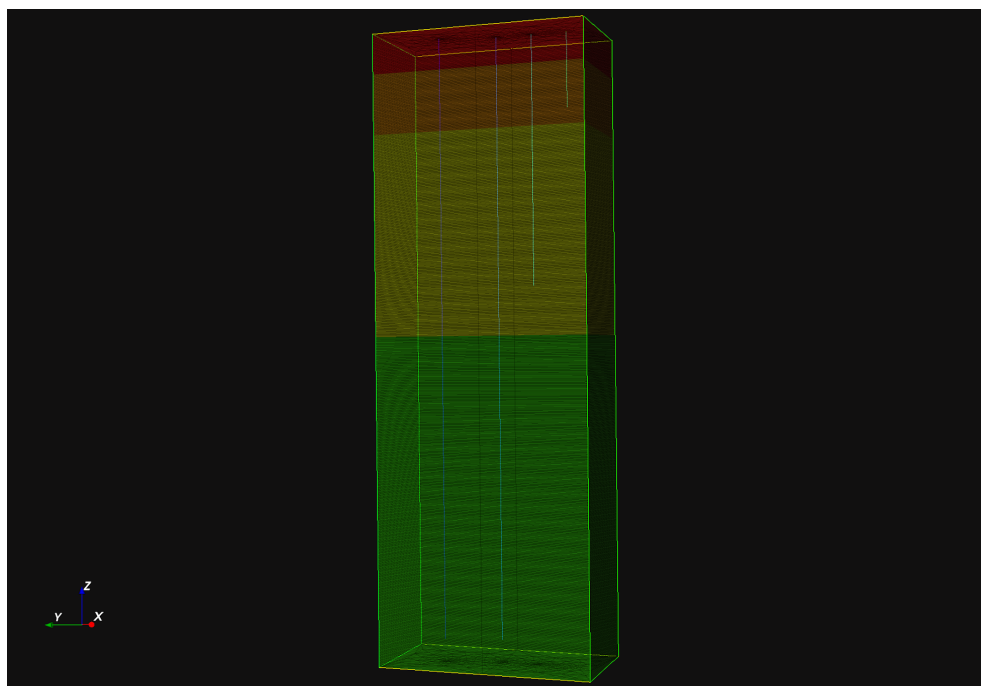
Τα αρχεία γεωμετρίας και διακριτοποίησης τα οποία δημιουργήθηκαν με την χρήση των προγραμμάτων DataExplorer και (BHE SETUP TOOL) παρουσιάζονται στα σχήματα 3.28 – 3.30:

```

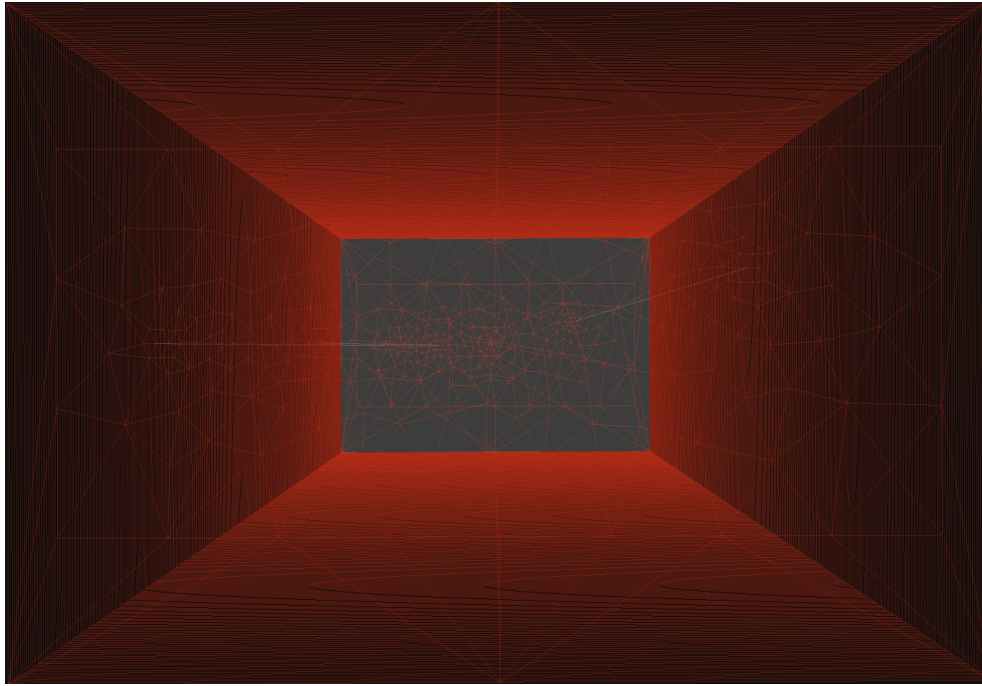
WIDTH 21
LENGTH 40
DEPTH 125.5
BOX 2 36 12
ELEM_SIZE 5 30
// material_group #_of_elements thickness_of_elements
LAYER 0 32 0.25
LAYER 1 48 0.25
LAYER 2 160 0.25
LAYER 3 262 0.25
// BHE# x y z_top z_bottom radius
BHE 0 0 6.023 0 -15 0.200025
BHE 1 0 12.7543 0 -50 0.0555625
BHE 2 0 19.609 0 -121 0.08255
BHE 3 -2.2634 30.0664 0 -121 0.08255

```

**Σχήμα 3.28:** Αρχείο εισόδου για την δημιουργία των πεπερασμένων στοιχείων στο πρόγραμμα BHE SETUP TOOL.



**Σχήμα 3.29:** Γεωμετρία συστήματος γεωεναλλακτών (DataExplorer).



**Σχήμα 3.30:** Διακριτοποίηση συστήματος γεωεναλλακτών (DataExplorer).

4. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των γήινων εναλλακτών θερμότητας [4] παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα :

Χαρακτηριστικά γεωεναλλακτών				
Τύπος γεωεναλλάκτη	Διάμετρος σωλήνα (m)	Πάχος τοιχώματος σωλήνα (m)	Θερμική αγωγιμότητα τοιχώματος σωλήνα ( $W/mK$ )	Απόσταση μεταξύ των σωλήνων(m)
1U	0.040	0.0037	0.49	0.0948
2U	0.032	0.0029	0.49	0.0756
Ομοαξονικός in	0.032	0.0029	0.43	–
Ομοαξονικός out	0.076	0.0045	1.6	–
Ελικοειδής	0.025	0.0037	0.42	0.29247

5. Χαρακτηριστικά υλικών πλήρωσης της γεώτρησης . Στις γεωτρήσεις αβαθούς γεωθερμίας γίνεται χρήση ενεμάτων για την πλήρωση των γεωτρήσεων [11] ,μετά την εγκατάσταση του γεωεναλλάκτη στο εσωτερικό της γεώτρησης. Όπου ενέματα ορίζονται τα υψηλής ρευστότητας αναμίγματα συνδετικής κονίας. Στα γεωθερμικά

συστήματα η πλήρωση των γεωτρήσεων με χρήση κατάλληλου ενέματος [12] αποτελεί ένα πολύ σημαντικό βήμα για την εξασφάλιση της επιτυχημένης γεωθερμικής εγκατάστασης. Στο σύστημα του ΚΑΠΕ τα ενέματα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την πλήρωση των τεσσάρων γεωτρήσεων είχαν τα χαρακτηριστικά τα οποία παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

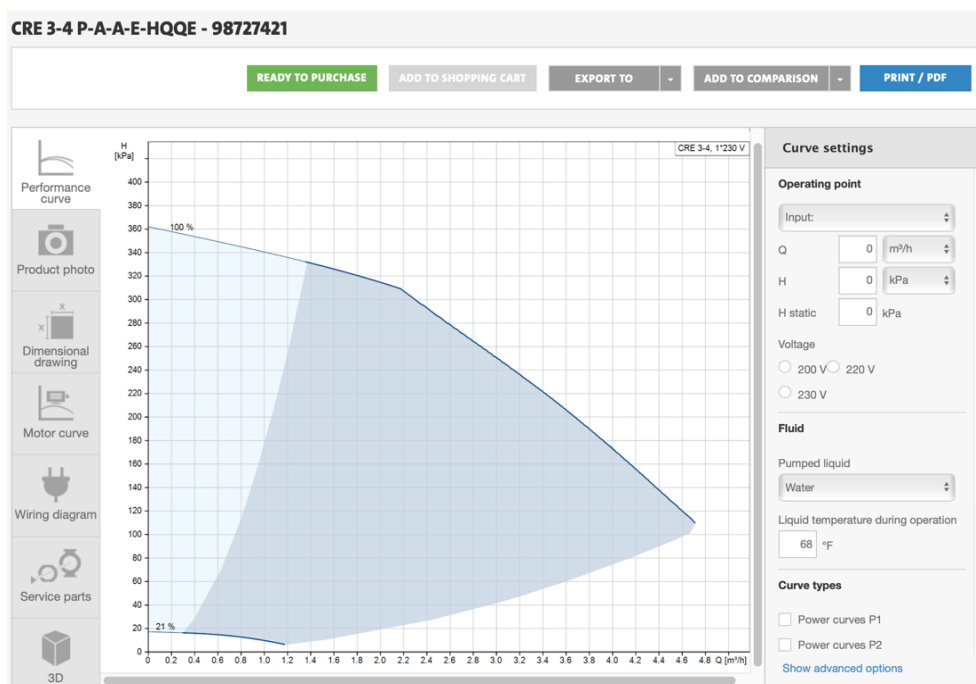
Χαρακτηριστικά ενεμάτων			
Τύπος γεωεναλλάκτη	Πυκνότητα ( $Kg/m^3$ )	Θερμοχωρητικότητα ( $J/KgK$ )	Θερμική αγωγιμότητα ( $W/mK$ )
1U	1655	1460	2
2U	1655	1460	2
Ομοαξονικός	1000	4180	1
Ελικοειδής	1655	920	0.41

#### 6. Χαρακτηριστικά κυκλοφορούντος υγρού στο εσωτερικό του συστήματος .

Χαρακτηριστικά ψυκτικού υγρού					
Είδος	Πυκνότητα ( $Kg/m^3$ )	Ιξώδες ( $C_p$ )	Θερμοχωρητικότητα ( $J/KgK$ )	Θερμική αγωγιμότητα ( $W/mK$ )	Θερμοκρασία ( $^{\circ}C$ )
Νερό	1000	1	4138	0.598	20

7. Χαρακτηριστική καμπύλη της φυγοκεντρικής αντλίας (κυκλοφορητής ) (σχήμα 3.31), [13], η οποία αποτελεί βασικό στοιχείο στην δημιουργία μοντέλου δικτύου αγωγών με το λογισμικό TESPγ όπως αναφέρεται στην ενότητα (2.2.2). Η χαρακτηριστική καμπύλη μίας αντλίας εκφράζει την αλληλεπίδραση μεταξύ δυο μεταβλητών της οι οποίες περιγράφουν την απόδοση της :

- (Head): Η ενέργεια ανά μονάδα μάζας που παρέχει η αντλία στο ρευστό.
- (Flow rate): Η ποσότητα του υγρού που διέρχεται από μία τομή σε μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο.



**Σχήμα 3.31:** Χαρακτηριστική καμπύλη φυγοκεντρικής αντλίας συστήματος ΚΑΠΕ [13].

### 3.2.1 Σύστημα γεωθερμίας σε λειτουργία ψύξης - θέρμανσης

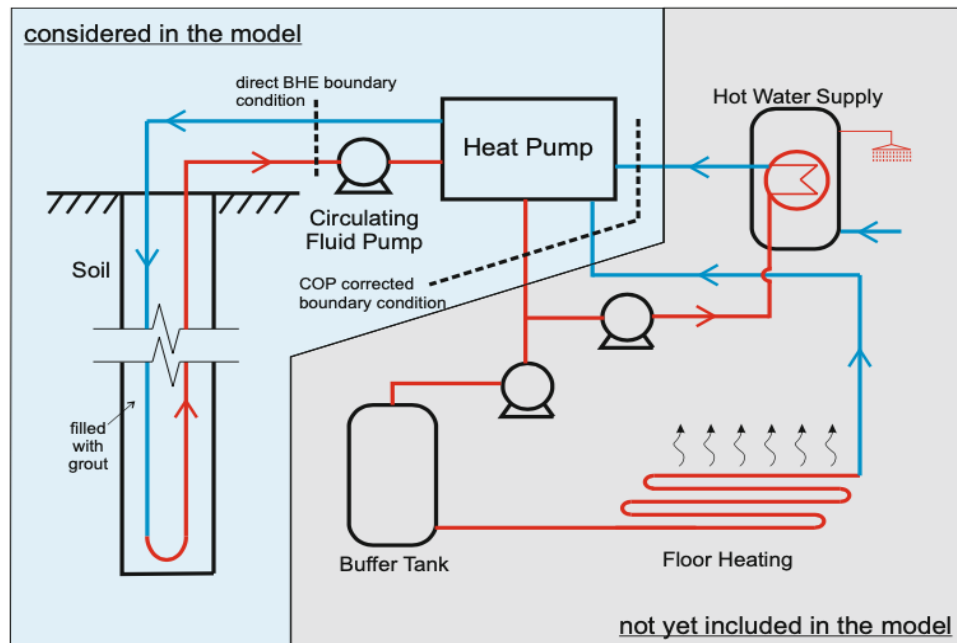
Για την προσομοίωση του συστήματος σε λειτουργία ψύξης -θέρμανσης [Παράρτημα Α'] , [Παράρτημα Β'] χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές των παραμέτρων σε πραγματικές μετρήσεις όπως αυτές παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα :

Τιμές παραμέτρων σε λειτουργία ψύξης		
Τύπος γεωεναλλάκτη	Ισχύς σε ψύξη (W)	ρυθμός ροής ( $m^3/sec$ )
1U	7900	0.30
2U	7100	0.28
Ομοαξονικός	5500	0,27
Ελικοειδής	1100	0.13

Τιμές παραμέτρων σε λειτουργία θέρμανσης		
Τύπος γεωεναλλάκτη	Ισχύς σε ψύξη (W)	ρυθμός ροής ( $m^3/sec$ )
1U	-7900	0.30
2U	-7100	0.28
Ομοαξονικός	-5500	0,27
Ελικοειδής	-1100	0.13



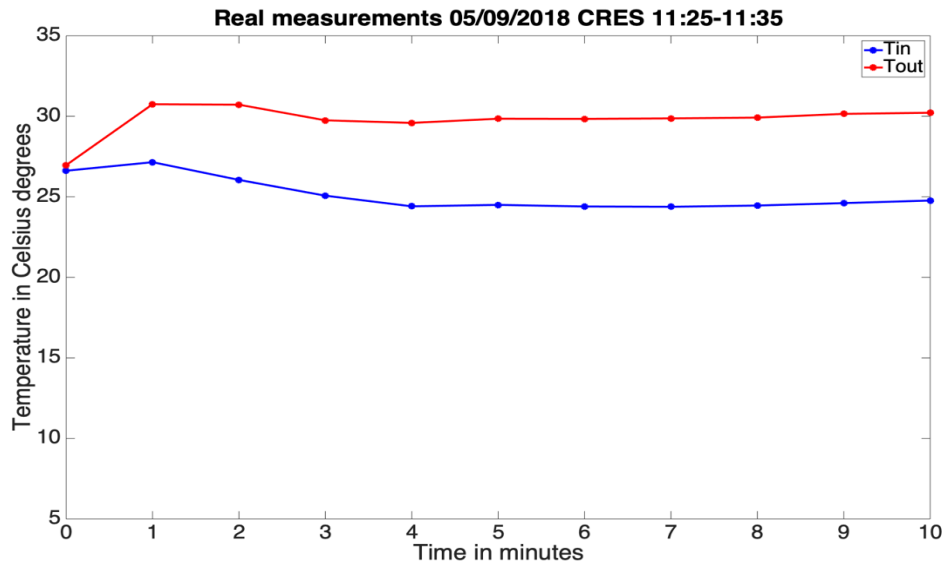
Αξίζει να σημειωθεί ότι το λογισμικό OpenGeoSys προσομοιώνει τη λειτουργία του συστήματος μέχρι και τη γεωθερμική αντλία θερμότητας. Έτσι δεν είναι εφικτό να προσομοιωθεί ο πλήρης κύκλος της αντλίας, επειδή στην παρούσα έκδοση του λογισμικού δεν είναι δυνατή η καταχώρηση πληροφοριών του συστήματος που αφορούν το τμήμα του κτηρίου μετά την αντλία θερμότητας. Οπότε δεν μπορεί να προσομοιωθεί η αλληλεπίδραση του κτηρίου και του συστήματος γεωθερμίας (σχήμα 3.32), [1].



**Σχήμα 3.32:** Σύστημα γεωθερμικής αντλίας θερμότητας σύμφωνα με το OpenGeoSys [13] .

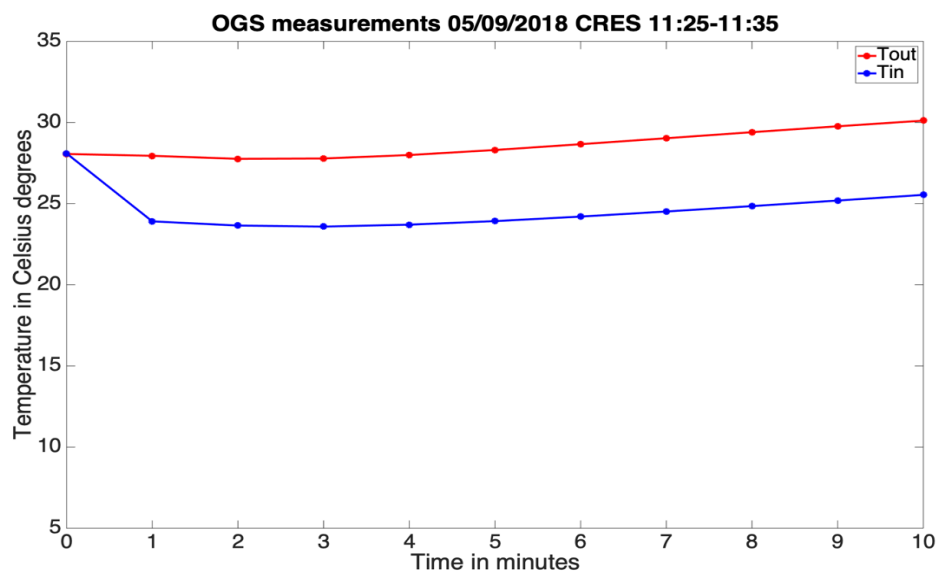
Ο γήινος εναλλάκτης θερμότητας ελικοειδούς τύπου προσομοιώθηκε, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα (3.1.4), σαν γεωεναλλάκτης τύπου 1U. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα απόκλιση από την πραγματική κατάσταση. Έτσι τα παρακάτω αποτελέσματα αφορούν τις θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του βρόγχου γείωσης (Earth Loop system).

Το γράφημα 3.33 εμφανίζει τις πραγματικές τιμές των θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου του συστήματος των γήινων εναλλακτών θερμότητας του ΚΑΠΕ κατά την λειτουργία ψύξης σε συνάρτηση με τον χρόνο στις 5 Σεπτεμβρίου 2018 μεταξύ 11 : 25 – 11 : 35 το πρωί.



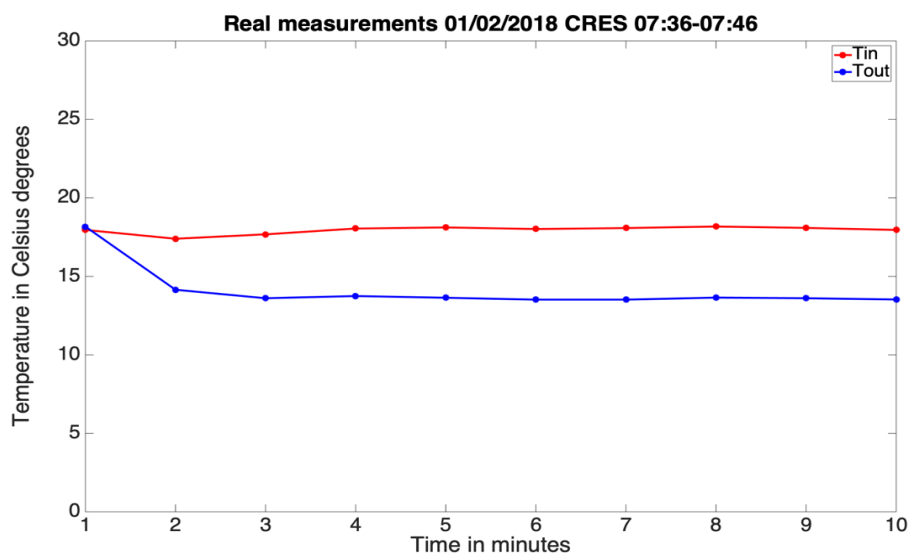
**Σχήμα 3.33:** Σύστημα σε λειτουργία ψύξης πραγματικές τιμές θερμοκρασιών.

Στο γράφημα 3.34 εμφανίζονται οι αντίστοιχες τιμές των θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου του συστήματος των γήινων εναλλακτών θερμότητας με την χρήση του λογισμικού (OpenGeoSys). Όπως προκύπτει από τη σύγκριση των δύο γραφημάτων, τόσο οι τιμές εισόδου, όσο και οι τιμές εξόδου των θερμοκρασιών μετά από τα αρχικά λεπτά λειτουργίας, είναι παραπλήσιες. Επίσης η διαφορά θερμοκρασίας εισόδου και εξόδου είναι μικρότερη του ενός βαθμού.



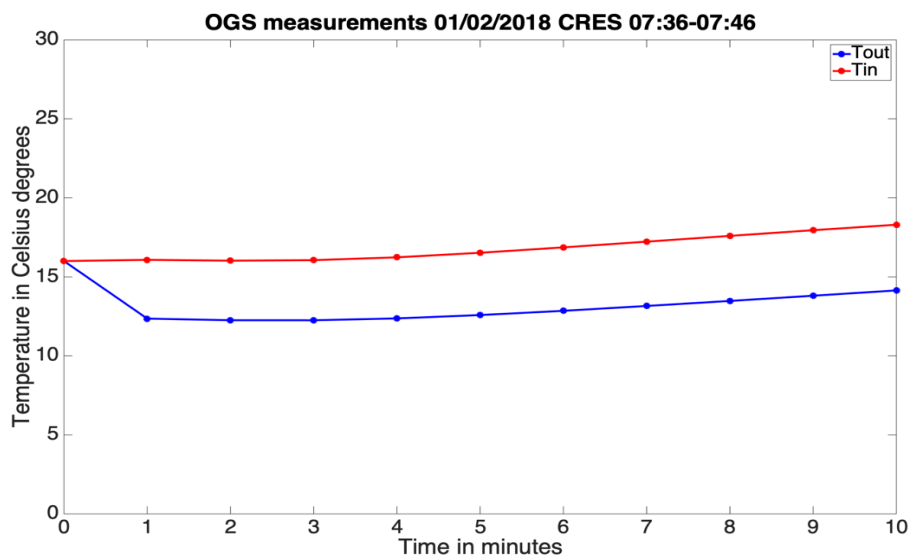
**Σχήμα 3.34:** Σύστημα σε λειτουργία ψύξης προσομοιωμένες τιμές θερμοκρασιών (OpenGeoSys)

Το γράφημα 3.35 εμφανίζει τις πραγματικές τιμές των θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου του συστήματος των γήινων εναλλακτών θερμότητας του ΚΑΠΕ κατά την λειτουργία θέρμανσης σε συνάρτηση με τον χρόνο στις 1 Φεβρουαρίου 2018 μεταξύ 07 : 36 – 07 : 46 το πρωί.



**Σχήμα 3.35:** Σύστημα σε λειτουργία θέρμανσης πραγματικές τιμές θερμοκρασιών.

Στο γράφημα 3.36 εμφανίζονται οι αντίστοιχες τιμές των θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου του συστήματος των γήινων εναλλακτών θερμότητας με την χρήση του λογισμικού (OpenGeoSys). Όπως προκύπτει από τη σύγκριση των δύο γραφημάτων, τόσο οι τιμές εισόδου, όσο και οι τιμές εξόδου των θερμοκρασιών μετά από τα αρχικά λεπτά λειτουργίας, είναι παραπλήσιες. Επίσης η διαφορά θερμοκρασίας εισόδου και εξόδου είναι μικρότερη του μισού βαθμού.



**Σχήμα 3.36:** Σύστημα σε λειτουργία θέρμανσης προσομοιωμένες τιμές θερμοκρασιών (Open-GeoSys) .

## Κεφάλαιο 4

### Συμπεράσματα

Σε αυτή τη μεταπτυχιακή εργασία παρουσιάστηκε η διαδικασία μοντελοποίησης, παραμετροποίησης και επεξεργασίας των αποτελεσμάτων από την προσομοίωση ενός συστήματος αβαθούς γεωθερμίας. Ειδικότερα προσομοιώθηκαν οι δοκιμές θερμικής απόκρισης (TRT) για τα τέσσερα βασικά είδη γεωεναλλακτών θερμότητας, τα οποία συνθέτουν το σύστημα αβαθούς γεωθερμίας του ΚΑΠΕ. Επίσης προσομοιώθηκε σε λειτουργία ψύξης και θέρμανσης το ολοκληρωμένο σύστημα του ΚΑΠΕ με την χρήση του ανοικτού κώδικα λογισμικού OpenGeoSys. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μας οδήγησαν στα παρακάτω συμπεράσματα :

- Το λογισμικό OpenGeoSys στην παρούσα έκτη έκδοση του δεν παρέχει τη δυνατότητα προσομοίωσης του ελικοειδούς τύπου γήινου εναλλάκτη θερμότητας σε κατακόρυφη τοποθέτηση. Επομένως κατά τη προσομοίωση του θεωρήθηκε ως γεωεναλλάκτης τύπου 1U. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την εισαγωγή σφαλμάτων από αυτή την παραδοχή τόσο κατά την προσομοίωση της δοκιμής θερμικής απόκρισης, όσο και κατά την διεξαγωγή της προσομοίωσης του ολοκληρωμένου συστήματος της λειτουργίας θέρμανσης και ψύξης.
- Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του γεωθερμικού συστήματος τόσο σε λει-

τουργία ψύξης όσο και θέρμανσης η μέση θερμοκρασία εισόδου και εξόδου του ρευστού υπολογίστηκε ικανοποιητικά. Πιο συγκεκριμένα οι διαφορές θερμοκρασιών κατά τη προσομοίωση είχαν διαφορά μικρότερη του ενός βαθμού σε σχέση με τις πραγματικές μετρήσεις.

- Η μικρή απόκλιση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων των δοκιμών θερμικής απόκρισης (TRT) μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η προσομοίωση γήινων εναλλακτών θερμότητας με τη χρήση του λογισμικού OpenGeoSys είναι αξιόπιστες και μπορούν να επαληθεύσουν τις πραγματικές μετρήσεις κατά τη διεξαγωγή των δοκιμών θερμικής απόκρισης.
- Η εξαγωγή προσομοιώσεων με τη χρήση του λογισμικού OpenGeoSys απαιτεί βασικές γνώσεις συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας, αριθμητικών μεθόδων επίλυσης προβλημάτων αρχικών τιμών και προγραμματισμού σε γλώσσα python. Οπότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί από μηχανικούς οι οποίοι δεν διαθέτουν ιδιαίτερα εξειδικευμένες γνώσεις.

# Βιβλιογραφία

- [1] Haibing Shao, Philipp Hein, Agnes Sachse and Olaf Kolditz "Geoenergy Modeling II (Shallow Geothermal Systems), <https://www.opengeosys.org/books/geoenergy-modeling-ii/>, 2016.
- [2] Μιχάλης Βραχόπουλος, Μαρία Κούκου και Κωνσταντίνος Καρύτσας " Κανονική γεωθερμία ; αρχές σχεδιασμού γεωθερμικών συστημάτων και εφαρμογές ", <https://www.ebooks4greeks.gr/kanonikh-geothermia-arxes-sxediasmou-geothermikwn-systhmatwn-kai-efarmoges>, 2015.
- [3] Ανδρίτσος, Νικόλαος Β.Φύτικας, Μιχάλης Δ. " Γεωθερμία ", 2004.
- [4] Adriana Bernardi (CNR-ISAC), Doina Cucueteanu (RGS), Giorgia Dalla Santa (UNIPD-DG), " CHEAP AND EFFICIENT APPLICATION OF RELIABLE GROUND SOURCE HEAT EXCHANGERS AND PUMPS", <https://cheap-gshp.eu/wp-content/uploads/2019/05/2019.05.27-Cheap-GSHPs-Training-Manual-ENG-version.pdf>, 2019.
- [5] L.Rybach "Shallow Systems : Geothermal Heat pumps", [https://www.researchgate.net/publication/288164052\\_shallow\\_systems](https://www.researchgate.net/publication/288164052_shallow_systems), 2012.
- [6] Dr. Burkhard Sanner, "SHALLOW GEOTHERMAL ENERGY ", [https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/ISS/2003Germany/II/4\\_1\\_san.pdf](https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/ISS/2003Germany/II/4_1_san.pdf), 2003.

- [7] Xuedan Zhang , Tiantian Zhang , Bingxi Li and Yiqiang Jiang "Comparison of Four Methods for Borehole Heat Exchanger Sizing Subject to Thermal Response Test Parameter Estimation", [https://res.mdpi.com/d\\_attachment/energies/energies-12-04067/article\\_deploy/energies-12-04067.pdf](https://res.mdpi.com/d_attachment/energies/energies-12-04067/article_deploy/energies-12-04067.pdf), 2019.
- [8] Jun Zhaoa, Yang Lia, Junyao Wanga "A review on heat transfer enhancement of borehole heat exchanger", <https://cyberleninka.org/article/n/709238.pdf>, 2016.
- [9] Kyoungbin Lim , Sanghoon Lee , Changhee Lee "An experimental study on the thermal performance of ground heat exchanger", <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0894177706001610>, 2006.
- [10] The Engineering ToolBox, <https://www.engineeringtoolbox.com/material-properties-t24.html>.
- [11] ML. Allan and A.J. Philippacopoulos, "THERMALLY CONDUCTIVE CEMENTITIOUS GROUTS FOR GEOTHERMAL HEAT PUMPS", <https://www.osti.gov/servlets/purl/760977>, 1998.
- [12] Roque Borinaga-Trevino , Pablo Pascual-Munoz , Daniel Castro-Fresno , Juan Jose Del Coz-Diaz "Study of different grouting materials used in vertical geothermal closed-loop heat exchangers", <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431112004000>, 2012.
- [13] Grundfos for Engineers <https://www.grundfos.com/grundfos-for-engineers/project-assistance-search-page/how-to-get-a-pump-curve-quickly.html>.



- [14] Radovan Hajovsky, Jiri Koziorek, Bohumil Horak "TRT system for Heat Pumps Design", <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016324752>, 2009.
- [15] SARAH SIGNORELLI "Geoscientific investigations for the use of shallow low-enthalpy systems", <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431112004000>, Doctoral Thesis, 2004.
- [16] Signhild Gehlin "Thermal Response Test (Method Development and Evaluation)", <https://pdfs.semanticscholar.org/14fe/8cc2a027abb5113d9f61f0000ac5651cc54e.pdf>, Doctoral Thesis, 2002.
- [17] Roland Wagner and Christoph Clauser "Evaluating thermal response tests using parameter estimation for thermal conductivity and thermal capacity", <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-2132/2/4/S08>, 2005.
- [18] DAMIEN CASETTA "Implementation and validation of a Ground Source Heat Pump model in Improving landfill monitoring programs MATLAB", <https://www.semanticscholar.org/paper/Implementation-and-validation-of-a-Ground-Source-in-Casetta/7adebd1ab09a7e4b2c846545bfda07bb77a81fb6?p2df>, 2012.
- [19] Al-Khoury, R., Kolbel, T., Schramedei, R.: Efficient numerical modeling of borehole heat exchangers. *Comput. Geosci.* 36(10), 1301-1315 (2010).
- [20] Diersch, H.-J.G., Bauer, D., Heidemann, W., Ruhaak, W., Schatzl, P.: Finite element modeling of borehole heat exchanger systems: part 1. Fundamentals. *Comput. Geosci.* 37(8), 1122-1135 (2011a).
- [21] Diersch, H.-J.G., Bauer, D., Heidemann, W., Ruhaak, W., Schatzl, P.: Finite element modeling of borehole heat exchanger systems: part 2. Numerical simulation. *Comput. Geosci.* 37(8), 1136-1147 (2011b).

- [22] Hein, P., Kolditz, O., Gorke, U.-J., Bucher, A., Shao, H.: A numerical study on the sustainability and efficiency of borehole heat exchanger coupled ground source heat pump systems. *Appl. Therm. Eng.* 100, 421-433 (2016).
- [23] Shao, Haibing, Philipp Hein, Agnes Sachse, and Olaf Kolditz. *Geoenery modeling II: shallow geothermal systems*. Springer International Publishing, 2016.
- [24] Furnace Compare : <https://www.furnacecompare.com>.
- [25] Ana Vieira, Maria Alberdi-Pagola, Paul Christodoulides."Characterisation of Ground Thermal and Thermo-Mechanical Behaviour for Shallow Geothermal Energy Applications", <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/12/2044/htm>,(2017).
- [26] Jevgeni Fadejev, Raimo Simson, Jarek Kurnitski, Fariborz Haghighat."A review on energy piles design, sizing and modelling": ,[https :  
//www.researchgate.net/figure/Energy – pile – configurationsfig5<sub>3</sub>12875512](https://www.researchgate.net/figure/Energy-pile-configurationsfig5_312875512) ,(2017).

# Παράρτημα Α΄

## Προσομοίωση σε λειτουργία θέρμανσης

- Κύριο εκτελέσιμο αρχείο OpenGeoSys

```
<?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1"?>
<OpenGeoSysProject>
  <mesh>kape.vtu</mesh>
  <geometry>kape.gml</geometry>
  <python_script>bcs_tespy_closedloop.py</python_script>
  <processes>
    <process>
      <name>HeatTransportBHE</name>
      <type>HEAT_TRANSPORT_BHE</type>
      <integration_order>2</integration_order>
      <process_variables>
        <process_variable>temperature_soil</process_variable>
        <process_variable>temperature_BHE1</process_variable>
        <process_variable>temperature_BHE2</process_variable>
        <process_variable>temperature_BHE3</process_variable>
        <process_variable>temperature_BHE4</process_variable>
      </process_variables>
      <borehole_heat_exchangers>
        <borehole_heat_exchanger>
          <type>1U</type>
          <use_bhe_pipe_network>true</use_bhe_pipe_network>
          <flow_and_temperature_control>
            <type>TemperatureCurveConstantFlow</type>
            <flow_rate>0</flow_rate>
            <temperature_curve>inflow_temperature</temperature_curve>
          </flow_and_temperature_control>
          <borehole>
            <length>15</length>
            <diameter>0.40005</diameter>
          </borehole>
          <grout>
            <density>1655.0</density>
            <porosity>0.0</porosity>
            <heat_capacity>920.0</heat_capacity>
            <thermal_conductivity>0.41</thermal_conductivity>
          </grout>
          <pipes>
            <inlet>
              <diameter> 0.025</diameter>
              <wall_thickness>0.0037</wall_thickness>
              <wall_thermal_conductivity>0.42</wall_thermal_conductivity>
            </inlet>
            <outlet>
              <diameter>0.025</diameter>
              <wall_thickness>0.0037</wall_thickness>
              <wall_thermal_conductivity>0.42</wall_thermal_conductivity>
            </outlet>
            <distance_between_pipes>0.29247</distance_between_pipes>
            <longitudinal_dispersion_length>0.001</longitudinal_dispersion_length>
          </pipes>
          <refrigerant>
            <density>1000</density>
            <viscosity>0.001</viscosity>
            <specific_heat_capacity>4138.0</specific_heat_capacity>
            <thermal_conductivity>0.606</thermal_conductivity>
            <reference_temperature>293</reference_temperature>
          </refrigerant>
        </borehole_heat_exchanger>
      </borehole_heat_exchangers>
    </process>
  </processes>
</OpenGeoSysProject>
```

```

<borehole_heat_exchanger>
  <type>CXA</type>
  <use_bhe_pipe_network>true</use_bhe_pipe_network>
  <flow_and_temperature_control>
    <type>TemperatureCurveConstantFlow</type>
    <flow_rate>0</flow_rate>
    <temperature_curve>inflow_temperature</temperature_curve>
  </flow_and_temperature_control>
  <borehole>
    <length>50.0</length>
    <diameter>0.11</diameter>
  </borehole>
  <grout>
    <density>1000</density>
    <porosity>0.0</porosity>
    <heat_capacity>4180</heat_capacity>
    <thermal_conductivity>1</thermal_conductivity>
  </grout>
  <pipes>
    <outer>
      <diameter> 0.076</diameter>
      <wall_thickness>0.0045</wall_thickness>
      <wall_thermal_conductivity>1.6</wall_thermal_conductivity>
    </outer>
    <inner>
      <diameter>0.032</diameter>
      <wall_thickness>0.0029</wall_thickness>
      <wall_thermal_conductivity>0.43</wall_thermal_conductivity>
    </inner>
    <longitudinal_dispersion_length>0.001</longitudinal_dispersion_length>
  </pipes>
  <refrigerant>
    <density>1000</density>
    <viscosity>0.00114</viscosity>
    <specific_heat_capacity>4138.0</specific_heat_capacity>
    <thermal_conductivity>0.598</thermal_conductivity>
    <reference_temperature>293</reference_temperature>
  </refrigerant>
</borehole_heat_exchanger>
<borehole_heat_exchanger>
  <type>2U</type>
  <use_bhe_pipe_network>true</use_bhe_pipe_network>
  <flow_and_temperature_control>
    <type>TemperatureCurveConstantFlow</type>
    <flow_rate>0</flow_rate>
    <temperature_curve>inflow_temperature</temperature_curve>
  </flow_and_temperature_control>
  <borehole>
    <length>121.0</length>
    <diameter>0.1651</diameter>
  </borehole>
  <grout>
    <density>1655.0</density>
    <porosity>0.0</porosity>
    <heat_capacity>1460.0</heat_capacity>
    <thermal_conductivity>2</thermal_conductivity>
  </grout>
  <pipes>
    <inlet>
      <diameter> 0.032</diameter>
      <wall_thickness>0.0029</wall_thickness>
      <wall_thermal_conductivity>0.49</wall_thermal_conductivity>
    </inlet>
    <outlet>
      <diameter>0.032</diameter>
      <wall_thickness>0.0029</wall_thickness>
      <wall_thermal_conductivity>0.49</wall_thermal_conductivity>
    </outlet>
    <distance_between_pipes>0.0756</distance_between_pipes>
    <longitudinal_dispersion_length>0.001</longitudinal_dispersion_length>
  </pipes>
  <refrigerant>
    <density>1000</density>
    <viscosity>0.001</viscosity>
    <specific_heat_capacity>4138.0</specific_heat_capacity>
    <thermal_conductivity>0.606</thermal_conductivity>
    <reference_temperature>293</reference_temperature>
  </refrigerant>
</borehole_heat_exchanger>
<borehole_heat_exchanger>
  <type>1U</type>
  <use_bhe_pipe_network>true</use_bhe_pipe_network>
  <flow_and_temperature_control>
    <type>TemperatureCurveConstantFlow</type>
    <flow_rate>0</flow_rate>
    <temperature_curve>inflow_temperature</temperature_curve>
  </flow_and_temperature_control>
  <borehole>
    <length>119.0</length>
    <diameter>0.1651</diameter>
  </borehole>
  <grout>

```

```

        <density>1655.0</density>
        <porosity>0.0</porosity>
        <heat_capacity>1460.0</heat_capacity>
        <thermal_conductivity>2</thermal_conductivity>
    </grout>
    <pipes>
        <inlet>
            <diameter> 0.040</diameter>
            <wall_thickness>0.0037</wall_thickness>
            <wall_thermal_conductivity>0.49</wall_thermal_conductivity>
        </inlet>
        <outlet>
            <diameter>0.040</diameter>
            <wall_thickness>0.0037</wall_thickness>
            <wall_thermal_conductivity>0.49</wall_thermal_conductivity>
        </outlet>
        <distance_between_pipes>0.0948</distance_between_pipes>
        <longitudinal_dispersion_length>0.001</longitudinal_dispersion_length>
    </pipes>
    <refrigerant>
        <density>1000</density>
        <viscosity>0.001</viscosity>
        <specific_heat_capacity>4138.0</specific_heat_capacity>
        <thermal_conductivity>0.606</thermal_conductivity>
        <reference_temperature>293</reference_temperature>
    </refrigerant>
</borehole_heat_exchanger>
</borehole_heat_exchangers>
</process>
</processes>
<media>
    <medium id="0">
        <phases>
            <phase>
                <type>AqueousLiquid</type>
                <properties>
                    <property>
                        <name>phase_velocity</name>
                        <type>Constant</type>
                        <value>0 0 0</value>
                    </property>
                    <property>
                        <name>specific_heat_capacity</name>
                        <type>Constant</type>
                        <value>0</value>
                    </property>
                    <property>
                        <name>density</name>
                        <type>Constant</type>
                        <value>0</value>
                    </property>
                </properties>
            </phase>
            <phase>
                <type>Solid</type>
                <properties>
                    <property>
                        <name>specific_heat_capacity</name>
                        <type>Constant</type>
                        <value>1600</value>
                    </property>
                    <property>
                        <name>density</name>
                        <type>Constant</type>
                        <value>2100</value>
                    </property>
                </properties>
            </phase>
            <phase>
                <type>Gas</type>
                <properties>
                    <property>
                        <name>specific_heat_capacity</name>
                        <type>Constant</type>
                        <value>718</value>
                    </property>
                    <property>
                        <name>density</name>
                        <type>Constant</type>
                        <value>1292</value>
                    </property>
                </properties>
            </phase>
        </phases>
        <properties>
            <property>
                <name>porosity</name>
                <type>Constant</type>
                <value>0.4</value>
            </property>
            <property>
                <name>thermal_conductivity</name>

```

```

        <type>Constant</type>
        <value>1</value>
    </property>
    <property>
        <name>thermal_longitudinal_dispersivity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>0</value>
    </property>
    <property>
        <name>thermal_transversal_dispersivity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>0</value>
    </property>
</properties>
</medium>
<medium id="1">
    <phases>
        <phase>
            <type>AqueousLiquid</type>
            <properties>
                <property>
                    <name>phase_velocity</name>
                    <type>Constant</type>
                    <value>0 0 0</value>
                </property>
                <property>
                    <name>specific_heat_capacity</name>
                    <type>Constant</type>
                    <value>0</value>
                </property>
                <property>
                    <name>density</name>
                    <type>Constant</type>
                    <value>0</value>
                </property>
            </properties>
        </phase>
        <phase>
            <type>Solid</type>
            <properties>
                <property>
                    <name>specific_heat_capacity</name>
                    <type>Constant</type>
                    <value>3400</value>
                </property>
                <property>
                    <name>density</name>
                    <type>Constant</type>
                    <value>1200</value>
                </property>
            </properties>
        </phase>
        <phase>
            <type>Gas</type>
            <properties>
                <property>
                    <name>specific_heat_capacity</name>
                    <type>Constant</type>
                    <value>718</value>
                </property>
                <property>
                    <name>density</name>
                    <type>Constant</type>
                    <value>1292</value>
                </property>
            </properties>
        </phase>
    </phases>
    <properties>
        <property>
            <name>porosity</name>
            <type>Constant</type>
            <value>0.2</value>
        </property>
        <property>
            <name>thermal_conductivity</name>
            <type>Constant</type>
            <value>3.5</value>
        </property>
        <property>
            <name>thermal_longitudinal_dispersivity</name>
            <type>Constant</type>
            <value>0</value>
        </property>
        <property>
            <name>thermal_transversal_dispersivity</name>
            <type>Constant</type>
            <value>0</value>
        </property>
    </properties>
</medium>
<medium id="2">

```

```

<phases>
  <phase>
    <type>AqueousLiquid</type>
    <properties>
      <property>
        <name>phase_velocity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>0 0 0</value>
      </property>
      <property>
        <name>specific_heat_capacity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>4200</value>
      </property>
      <property>
        <name>density</name>
        <type>Constant</type>
        <value>1000</value>
      </property>
    </properties>
  </phase>
  <phase>
    <type>Solid</type>
    <properties>
      <property>
        <name>specific_heat_capacity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>2500</value>
      </property>
      <property>
        <name>density</name>
        <type>Constant</type>
        <value>2700</value>
      </property>
    </properties>
  </phase>
  <phase>
    <type>Gas</type>
    <properties>
      <property>
        <name>specific_heat_capacity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>718</value>
      </property>
      <property>
        <name>density</name>
        <type>Constant</type>
        <value>1292</value>
      </property>
    </properties>
  </phase>
</phases>
<properties>
  <property>
    <name>porosity</name>
    <type>Constant</type>
    <value>0.17</value>
  </property>
  <property>
    <name>thermal_conductivity</name>
    <type>Constant</type>
    <value>2.6</value>
  </property>
  <property>
    <name>thermal_longitudinal_dispersivity</name>
    <type>Constant</type>
    <value>0</value>
  </property>
  <property>
    <name>thermal_transversal_dispersivity</name>
    <type>Constant</type>
    <value>0</value>
  </property>
</properties>
</medium>
<medium id="3">
  <phases>
    <phase>
      <type>AqueousLiquid</type>
      <properties>
        <property>
          <name>phase_velocity</name>
          <type>Constant</type>
          <value>0 0 0</value>
        </property>
        <property>
          <name>specific_heat_capacity</name>
          <type>Constant</type>
          <value>4157</value>
        </property>
        <property>
          <name>density</name>

```

```

        <type>Constant</type>
        <value>1000</value>
    </property>
</properties>
</phase>
<phase>
    <type>Solid</type>
    <properties>
        <property>
            <name>specific_heat_capacity</name>
            <type>Constant</type>
            <value>750</value>
        </property>
        <property>
            <name>density</name>
            <type>Constant</type>
            <value>2680</value>
        </property>
    </properties>
</phase>
<phase>
    <type>Gas</type>
    <properties>
        <property>
            <name>specific_heat_capacity</name>
            <type>Constant</type>
            <value>1000</value>
        </property>
        <property>
            <name>density</name>
            <type>Constant</type>
            <value>2500</value>
        </property>
    </properties>
</phase>
</phases>
<properties>
    <property>
        <name>porosity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>0.1</value>
    </property>
    <property>
        <name>thermal_conductivity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>2.965</value>
    </property>
    <property>
        <name>thermal_longitudinal_dispersivity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>0</value>
    </property>
    <property>
        <name>thermal_transversal_dispersivity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>0</value>
    </property>
</properties>
</medium>
</media>
<time_loop>
    <processes>
        <process ref="HeatTransportBHE">
            <nonlinear_solver>basic_picard</nonlinear_solver>
            <convergence_criterion>
                <type>DeltaX</type>
                <norm_type>NORM2</norm_type>
                <reltol>1.e-5</reltol>
            </convergence_criterion>
            <time_discretization><type>BackwardEuler</type></time_discretization>
            <time_stepping>
                <type>FixedTimeStepping</type>
                <t_initial> 0.0 </t_initial>
                <!-- use the following for full simulation
                <t_end> 15552000 </t_end>
                -->
                <t_end> 4200 </t_end>
                <timesteps>
                    <!-- use the following for full simulation
                    <pair><repeat>10</repeat><delta_t>720</delta_t></pair>
                    <pair><repeat>4</repeat><delta_t>3600</delta_t></pair>
                    <pair><repeat>1</repeat><delta_t>10800</delta_t></pair>
                    -->
                    <pair>
                        <repeat>70</repeat>
                        <delta_t>60</delta_t>
                    </pair>
                </timesteps>
            </time_stepping>
        </process>
    </processes>
</time_loop>
<output>

```



```

<type>VTK</type>
<prefix>4bhesKAPE</prefix>
<timesteps>
  <!-- use the following for full simulation
  <pair><repeat> 1</repeat><each_steps> 92 </each_steps></pair>
  <pair><repeat> 1</repeat><each_steps> 80 </each_steps></pair>
  -->
  <pair>
    <repeat> 1 </repeat>
    <each_steps> 1 </each_steps>
  </pair>
</timesteps>
<variables>
  <variable>temperature_soil</variable>
  <variable>temperature_BHE1</variable>
  <variable>temperature_BHE2</variable>
  <variable>temperature_BHE3</variable>
  <variable>temperature_BHE4</variable>
</variables>
<suffix>_ts_{:timestep}_t_{:time}</suffix>
</output>
</time_loop>
<parameters>
  <parameter>
    <name>T0</name>
    <type>Constant</type>
    <values>303</values>
  </parameter>
  <parameter>
    <name>T0_BHE1</name>
    <type>Constant</type>
    <values>289 289 289 289</values>
  </parameter>
  <parameter>
    <name>T0_BHE2</name>
    <type>Constant</type>
    <values>289 289 289</values>
  </parameter>
  <parameter>
    <name>T0_BHE3</name>
    <type>Constant</type>
    <values>289 289 289 289 289 289 289 289</values>
  </parameter>
  <parameter>
    <name>T0_BHE4</name>
    <type>Constant</type>
    <values>289 289 289 289</values>
  </parameter>
</parameters>
<process_variables>
  <process_variable>
    <name>temperature_soil</name>
    <components>1</components>
    <order>1</order>
    <initial_condition>T0</initial_condition>
    <boundary_conditions>
      <boundary_condition>
        <geometrical_set>adrikos.gli</geometrical_set>
        <geometry>top</geometry>
        <type>Dirichlet</type>
        <parameter>T0</parameter>
      </boundary_condition>
    </boundary_conditions>
  </process_variable>
  <process_variable>
    <name>temperature_BHE1</name>
    <components>4</components>
    <order>1</order>
    <initial_condition>T0_BHE1</initial_condition>
  </process_variable>
  <process_variable>
    <name>temperature_BHE2</name>
    <components>3</components>
    <order>1</order>
    <initial_condition>T0_BHE2</initial_condition>
  </process_variable>
  <process_variable>
    <name>temperature_BHE3</name>
    <components>8</components>
    <order>1</order>
    <initial_condition>T0_BHE3</initial_condition>
  </process_variable>
  <process_variable>
    <name>temperature_BHE4</name>
    <components>4</components>
    <order>1</order>
    <initial_condition>T0_BHE4</initial_condition>
  </process_variable>
</process_variables>
<nonlinear_solvers>
  <nonlinear_solver>
    <name>basic_picard</name>

```

```

        <type>Picard</type>
        <max_iter>100</max_iter>
        <linear_solver>general_linear_solver</linear_solver>
    </nonlinear_solver>
</nonlinear_solvers>
<linear_solvers>
    <linear_solver>
        <name>general_linear_solver</name>
        <lis>-i cg -p jacobi -tol 1e-16 -maxiter 10000</lis>
        <eigen>
            <solver_type>BiCGSTAB</solver_type>
            <precon_type>ILUT</precon_type>
            <max_iteration_step>1000</max_iteration_step>
            <error_tolerance>1e-16</error_tolerance>
        </eigen>
        <petsc>
            <prefix>gw</prefix>
            <parameters>-gw_ksp_type cg -gw_pc_type bjacobi -gw_ksp_rtol 1e-16 -gw_ksp_max_it 10000</parameters>
        </petsc>
    </linear_solver>
</linear_solvers>
<curves>
    <curve>
        <name>inflow_temperature</name>
        <coords>0 4200
        </coords>
        <values>289 289
        </values>
    </curve>
</curves>
</OpenGeoSysProject>

```

## • Αρχείο συντοριακών συνθηκών Python

```

###
# Copyright (c) 2012-2020, OpenGeoSys Community (http://www.opengeosys.org)
# Distributed under a Modified BSD License.
# See accompanying file LICENSE.txt or
# http://www.opengeosys.org/project/license
###

import sys
print(sys.version)
import os
import numpy as np
from pandas import read_csv
import OpenGeoSys
from tespy.networks import load_network

# User setting ++++++
# parameters
# refrigerant density
rho_f = 1000 # kg/m3
# switch for special boundary conditions
# switch of the function for manually specified dynamic flowrate
switch_dyn_flowrate = 'off' # 'on', 'off'
# switch of the function for manually specified dynamic thermal demand
switch_dyn_demand = 'on' # 'on', 'off'
if switch_dyn_demand == 'on':
    # give the consumer name defined by user in the network model
    consumer_name = 'consumer'

# network status setting
def network_status(t):
    nw_status = 'on'
    # month for closed network
    timerange_nw_off_month = [] # No month for closed network
    # t-1 to avoid the calculation problem at special time point,
    # e.g. t = 2592000.
    t_trans = int((t - 1) / 86400 / 30) + 1
    t_trans_month = t_trans
    if t_trans_month > 12:
        t_trans_month = t_trans - 12 * (int(t_trans / 12))
    if t_trans_month in timerange_nw_off_month:
        nw_status = 'off'
    return nw_status

# dynamic consumer thermal load
def consumer_demand(t): # dynamic thermal demand from consumer
    # time conversion
    t_trans = int((t - 1) / 86400 / 30) + 1
    if t_trans > 12:
        t_trans = t_trans - 12 * (int(t_trans / 12))
    # thermal demand in each month (assumed specific heat extraction rate*
    # length of BHE* number of BHE)
    month_demand = [
        -63 * 305, -63 * 305, -63 * 305, -63 * 305, -63 * 305,
        -63 * 305, -63 * 305, -63 * 305, -63 * 305, -63 * 305,
        -63 * 305, -63 * 305,
    ]

```

```

    ]
    return month_demand[t_trans - 1]

# dynamic hydraulic flow rate at the network inlet
def dyn_frate(t):
    # time conversion
    t_trans = int((t - 1) / 86400 / 30) + 1
    if t_trans > 12:
        t_trans = t_trans - 12 * (int(t_trans / 12))
    # flow rate in kg / s time curve in month
    month_frate = []
    return month_frate[t_trans - 1]

# End User setting+*****

# create network dataframe
def create_dataframe():
    # return dataframe
    df_nw = read_csv('./pre/bhe_network.csv',
                     delimiter=';',
                     index_col=0,
                     dtype={'data_index': str})

    return (df_nw)

# TESPpy calculation process
def get_tespy_results(t):
    # bhe network boundary conditions re parametrization
    # if network exist dynamic flowrate
    if switch_dyn_frate == 'on':
        cur_frate = dyn_frate(t)
        localVars['inlet_name'].set_attr(m=cur_frate)
    # if network exist dynamic thermal demand
    if switch_dyn_demand == 'on':
        # consumer thermal load:
        cur_month_demand = consumer_demand(t)
        nw.components[consumer_name].set_attr(Q=cur_month_demand)
    # T_out re parametrization:
    for i in range(n_BHE):
        localVars['outlet_BHE' + str(i + 1)].set_attr(T=df.loc[data_index[i],
                                                                'Tout_val'])

    # solving network
    nw.solve(mode='design')
    # get Tin_val and flow rate
    for i in range(n_BHE):
        # get Tin_val
        df.loc[df.index[i],
                'Tin_val'] = localVars['inlet_BHE' +
                                       str(i + 1)].get_attr('T').val

        # get flowrate
        df.loc[df.index[i],
                'flowrate'] = localVars['inlet_BHE' +
                                       str(i + 1)].get_attr('m').val / rho_f

    return df['Tin_val'].tolist(), df['flowrate'].tolist()

# OGS setting
# Dirichlet BCs
class BC(OpenGeoSys.BHENetwork):
    def initializeDataContainer(self):
        # initialize network and get data from the network
        nw.solve(mode='design')
        get_tespy_results(0)
        # convert dataframe to column list
        t = 0 # 'initial time'
        data_col_1 = df['Tin_val'].tolist() # 'Tin_val'
        data_col_2 = df['Tout_val'].tolist() # 'Tout_val'
        data_col_3 = df['Tout_node_id'].astype(int).tolist() # 'Tout_node_id'
        data_col_4 = df['flowrate'].tolist() # 'BHE flow rate'
        return (t, data_col_1, data_col_2, data_col_3, data_col_4)

    def tespySolver(self, t, Tin_val, Tout_val):
        # network status:
        nw_status = network_status(t)
        # if network closed:
        if nw_status == 'off':
            df.loc[:, 'flowrate'] = 0
            cur_flowrate = df['flowrate'].tolist()
            return (True, True, Tout_val, cur_flowrate)
        else:
            # read Tout_val to dataframe
            for i in range(n_BHE):
                df.loc[df.index[i], 'Tout_val'] = Tout_val[i]
            # TESPpy solver
            cur_Tin_val, cur_flowrate = get_tespy_results(t)
            # check norm if network achieves the converge
            if_success = False
            pre_Tin_val = Tin_val
            norm_dx = np.linalg.norm(

```

```

        abs(np.asarray(pre_Tin_val) - np.asarray(cur_Tin_val)))
    norm_x = np.linalg.norm(np.asarray(cur_Tin_val))
    if norm_dx/norm_x < 1e-6:
        if_success = True
    # return to OGS
    return (True, if_success, cur_Tin_val, cur_flowrate)

# main
# initialize the tespy model of the bhe network
# load path of network model:
# loading the TESPpy model
project_dir = os.getcwd()
print("Project dir is: ", project_dir)
nw = load_network('./pre/tespy_nw_closedloop')
# set if print the network iteration info
nw.set_attr(iterinfo=False)

# create bhe dataframe of the network system from bhe_network.csv
df = create_dataframe()
n_BHE = np.size(df.iloc[:, 0])

# create local variables of the components label and connections label in
# network
localVars = locals()
data_index = df.index.tolist()
for i in range(n_BHE):
    for c in nw.conns.index:
        # bhe inlet and outlet conns
        if c.target.label == data_index[i]: # inlet conns of bhe
            localVars['inlet_BHE' + str(i + 1)] = c
        if c.source.label == data_index[i]: # outlet conns of bhe
            localVars['outlet_BHE' + str(i + 1)] = c

# time depended flowrate
if switch_dyn_frate == 'on':
    # import the name of inlet connection from the network csv file
    inlet_name = read_csv('./pre/tespy_nw/connections.csv',
                          delimiter=';',
                          index_col=[0]).iloc[0,0]
    for c in nw.conns.index:
        # bhe inflow conns
        if c.source.label == inlet_name: # inlet conns of bhe
            localVars['inlet_name'] = c

# instantiate BC objects referenced in OpenGeoSys
bc_bhe = BC()

```

## • Αρχείο δημιουργίας δικτύου Python

```

###
# Copyright (c) 2012-2020, OpenGeoSys Community (http://www.opengeosys.org)
# Distributed under a Modified BSD License.
# See accompanying file LICENSE.txt or
# http://www.opengeosys.org/project/license
###

# Execute this file to generate TESPpy network csv files
from tespy.networks import network
from tespy.connections import connection, ref
from tespy.components import source, sink, pump, splitter, merge, heat_exchanger_simple, cycle_closer
from tespy.tools import char_line, dc_cc
import numpy as np

# %% network
btes = network(fluids=['water'], T_unit='K', p_unit='bar', h_unit='kJ / kg')

# %% components
fc = cycle_closer('cycle closer')
pu = pump('pump')
sp = splitter('splitter', num_out=5)

# bhe:
bhe1 = heat_exchanger_simple('BHE1')
bhe2 = heat_exchanger_simple('BHE2')
bhe3 = heat_exchanger_simple('BHE3')
bhe4 = heat_exchanger_simple('BHE4')
bhe5 = heat_exchanger_simple('BHE5')

mg = merge('merge', num_in=5)
cons = heat_exchanger_simple('consumer')

## components parameterization
# pump
# flow_char
# provide volumetric flow in m^3 / s
x = np.array([2.77778E-06,
              5.83333E-05,

```

```

0.000113889,
0.000169444,
0.000222222,
0.000283333,
0.000336111,
0.000383333,
0.000422222,
0.000447222,
0.000505556,
0.000558333,
0.000611111,
0.000669444,
0.000725,
0.000780556,
0.000836111,
0.000891667,
0.00095,
0.001002778,
0.001061111,
0.001119445,
0.001169445,
0.001227778,
0.001280556,
0.001308333,
])

# provide head in Pa
y = np.array([3.6081,
3.5672,
3.5058,
3.4854,
3.4445,
3.4036,
3.3628,
3.3014,
3.281,
3.2401,
3.1788,
3.1379,
3.0561,
2.8926,
2.7699,
2.6064,
2.4633,
2.3202,
2.1975,
2.034,
1.8909,
1.6498,
1.5336,
1.3523,
1.1861,
1.0803,
]) * 1e5

char = char_line(x=x, y=y)
pu.set_attr(flow_char=dc_cc(func=char, is_set=True))
pu.set_attr(eta_s=0.9)

# bhes
bhe1.set_attr(D=0.025, L=55, ks=0.00001)
bhe2.set_attr(D=0.032, L=100, ks=0.00001)
bhe3.set_attr(D=0.032, L=242, ks=0.00001)
bhe4.set_attr(D=0.032, L=242, ks=0.00001)
bhe5.set_attr(D=0.040, L=238, ks=0.00001)

# consumer
cons.set_attr(pr=0.32)
# consumer heat demand
cons.set_attr(Q=-19215)
) # W

# %% connections
fc_pu = connection(fc, 'out1', pu, 'in1')
pu_sp = connection(pu, 'out1', sp, 'in1')

sp_bhe1 = connection(sp, 'out1', bhe1, 'in1')
sp_bhe2 = connection(sp, 'out2', bhe2, 'in1')
sp_bhe3 = connection(sp, 'out3', bhe3, 'in1')
sp_bhe4 = connection(sp, 'out4', bhe4, 'in1')
sp_bhe5 = connection(sp, 'out5', bhe5, 'in1')

bhe1_mg = connection(bhe1, 'out1', mg, 'in1')
bhe2_mg = connection(bhe2, 'out1', mg, 'in2')
bhe3_mg = connection(bhe3, 'out1', mg, 'in3')
bhe4_mg = connection(bhe4, 'out1', mg, 'in4')
bhe5_mg = connection(bhe5, 'out1', mg, 'in5')

mg_cons = connection(mg, 'out1', cons, 'in1')
cons_fc = connection(cons, 'out1', fc, 'in1')

```

```

btes.add_conns(fc_pu, pu_sp, sp_bhe1, sp_bhe2, sp_bhe3, sp_bhe4, sp_bhe5, bhe1_mg, bhe2_mg,
               bhe3_mg, bhe4_mg, bhe5_mg, mg_cons, cons_fc)

## connection parametrization
# system inlet
fc_pu.set_attr(p=1, fluid={'water': 1})

# for BHEs:
# Tout:
bhe1_mg.set_attr(T=289.5)
bhe2_mg.set_attr(T=292)
bhe3_mg.set_attr(T=293)
bhe4_mg.set_attr(T=293)
bhe5_mg.set_attr(T=293)

# %% solve
btes.solve('design')
#btes.print_results()

# %% save to csv:
btes.save('tespy_nw_closedloop')

```

# Παράρτημα Β΄

## Προσομοίωση σε λειτουργία ψύξης

- Κύριο εκτελέσιμο αρχείο OpenGeoSys

```
<?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1"?>
<OpenGeoSysProject>
  <mesh>kape.vtu</mesh>
  <geometry>kape.gml</geometry>
  <python_script>bcs_tespy_closedloop.py</python_script>
  <processes>
    <process>
      <name>HeatTransportBHE</name>
      <type>HEAT_TRANSPORT_BHE</type>
      <integration_order>2</integration_order>
      <process_variables>
        <process_variable>temperature_soil</process_variable>
        <process_variable>temperature_BHE1</process_variable>
        <process_variable>temperature_BHE2</process_variable>
        <process_variable>temperature_BHE3</process_variable>
        <process_variable>temperature_BHE4</process_variable>
      </process_variables>
      <borehole_heat_exchangers>
        <borehole_heat_exchanger>
          <type>1U</type>
          <use_bhe_pipe_network>true</use_bhe_pipe_network>
          <flow_and_temperature_control>
            <type>TemperatureCurveConstantFlow</type>
            <flow_rate>0</flow_rate>
            <temperature_curve>inflow_temperature</temperature_curve>
          </flow_and_temperature_control>
          <borehole>
            <length>15.0</length>
            <diameter>0.404</diameter>
          </borehole>
          <grout>
            <density>1655.0</density>
            <porosity>0.0</porosity>
            <heat_capacity>920.0</heat_capacity>
            <thermal_conductivity>0.41</thermal_conductivity>
          </grout>
          <pipes>
            <inlet>
              <diameter> 0.025</diameter>
              <wall_thickness>0.0037</wall_thickness>
              <wall_thermal_conductivity>0.42</wall_thermal_conductivity>
            </inlet>
            <outlet>
              <diameter>0.025</diameter>
              <wall_thickness>0.0037</wall_thickness>
              <wall_thermal_conductivity>0.42</wall_thermal_conductivity>
            </outlet>
            <distance_between_pipes>0.29247</distance_between_pipes>
            <longitudinal_dispersion_length>0.001</longitudinal_dispersion_length>
          </pipes>
          <refrigerant>
            <density>1000</density>
            <viscosity>0.001</viscosity>
            <specific_heat_capacity>4138.0</specific_heat_capacity>
            <thermal_conductivity>0.606</thermal_conductivity>
            <reference_temperature>293</reference_temperature>
          </refrigerant>
        </borehole_heat_exchanger>
      </borehole_heat_exchangers>
      <borehole_heat_exchanger>
        <type>CXA</type>
        <use_bhe_pipe_network>true</use_bhe_pipe_network>
        <flow_and_temperature_control>
          <type>TemperatureCurveConstantFlow</type>

```

```

        <flow_rate>0</flow_rate>
        <temperature_curve>inflow_temperature</temperature_curve>
    </flow_and_temperature_control>
    <borehole>
        <length>50.0</length>
        <diameter>0.11</diameter>
    </borehole>
    <grout>
        <density>1000</density>
        <porosity>0.0</porosity>
        <heat_capacity>4180</heat_capacity>
        <thermal_conductivity>1</thermal_conductivity>
    </grout>
    <pipes>
        <outer>
            <diameter> 0.076</diameter>
            <wall_thickness>0.0045</wall_thickness>
            <wall_thermal_conductivity>1.6</wall_thermal_conductivity>
        </outer>
        <inner>
            <diameter>0.032</diameter>
            <wall_thickness>0.0029</wall_thickness>
            <wall_thermal_conductivity>0.43</wall_thermal_conductivity>
        </inner>
        <longitudinal_dispersion_length>0.001</longitudinal_dispersion_length>
    </pipes>
    <refrigerant>
        <density>1000</density>
        <viscosity>0.00114</viscosity>
        <specific_heat_capacity>4138.0</specific_heat_capacity>
        <thermal_conductivity>0.598</thermal_conductivity>
        <reference_temperature>293</reference_temperature>
    </refrigerant>
</borehole_heat_exchanger>
<borehole_heat_exchanger>
    <type>2U</type>
    <use_bhe_pipe_network>true</use_bhe_pipe_network>
    <flow_and_temperature_control>
        <type>TemperatureCurveConstantFlow</type>
        <flow_rate>0</flow_rate>
        <temperature_curve>inflow_temperature</temperature_curve>
    </flow_and_temperature_control>
    <borehole>
        <length>121.0</length>
        <diameter>0.1651</diameter>
    </borehole>
    <grout>
        <density>1655.0</density>
        <porosity>0.0</porosity>
        <heat_capacity>1460.0</heat_capacity>
        <thermal_conductivity>2</thermal_conductivity>
    </grout>
    <pipes>
        <inlet>
            <diameter> 0.032</diameter>
            <wall_thickness>0.0029</wall_thickness>
            <wall_thermal_conductivity>0.49</wall_thermal_conductivity>
        </inlet>
        <outlet>
            <diameter>0.032</diameter>
            <wall_thickness>0.0029</wall_thickness>
            <wall_thermal_conductivity>0.49</wall_thermal_conductivity>
        </outlet>
        <distance_between_pipes>0.0756</distance_between_pipes>
        <longitudinal_dispersion_length>0.001</longitudinal_dispersion_length>
    </pipes>
    <refrigerant>
        <density>1000</density>
        <viscosity>0.001</viscosity>
        <specific_heat_capacity>4138.0</specific_heat_capacity>
        <thermal_conductivity>0.606</thermal_conductivity>
        <reference_temperature>293</reference_temperature>
    </refrigerant>
</borehole_heat_exchanger>
<borehole_heat_exchanger>
    <type>1U</type>
    <use_bhe_pipe_network>true</use_bhe_pipe_network>
    <flow_and_temperature_control>
        <type>TemperatureCurveConstantFlow</type>
        <flow_rate>0</flow_rate>
        <temperature_curve>inflow_temperature</temperature_curve>
    </flow_and_temperature_control>
    <borehole>
        <length>119.0</length>
        <diameter>0.1651</diameter>
    </borehole>
    <grout>
        <density>1655.0</density>
        <porosity>0.0</porosity>
        <heat_capacity>1460.0</heat_capacity>
        <thermal_conductivity>2</thermal_conductivity>
    </grout>

```



```

        <pipes>
          <inlet>
            <diameter> 0.040</diameter>
            <wall_thickness>0.0037</wall_thickness>
            <wall_thermal_conductivity>0.49</wall_thermal_conductivity>
          </inlet>
          <outlet>
            <diameter>0.040</diameter>
            <wall_thickness>0.0037</wall_thickness>
            <wall_thermal_conductivity>0.49</wall_thermal_conductivity>
          </outlet>
          <distance_between_pipes>0.0948</distance_between_pipes>
          <longitudinal_dispersion_length>0.001</longitudinal_dispersion_length>
        </pipes>
        <refrigerant>
          <density>1000</density>
          <viscosity>0.001</viscosity>
          <specific_heat_capacity>4138.0</specific_heat_capacity>
          <thermal_conductivity>0.606</thermal_conductivity>
          <reference_temperature>293</reference_temperature>
        </refrigerant>
      </borehole_heat_exchanger>
    </borehole_heat_exchangers>
  </process>
</processes>
<media>
  <medium id="0">
    <phases>
      <phase>
        <type>AqueousLiquid</type>
        <properties>
          <property>
            <name>phase_velocity</name>
            <type>Constant</type>
            <value>0 0 0</value>
          </property>
          <property>
            <name>specific_heat_capacity</name>
            <type>Constant</type>
            <value>0</value>
          </property>
          <property>
            <name>density</name>
            <type>Constant</type>
            <value>0</value>
          </property>
        </properties>
      </phase>
      <phase>
        <type>Solid</type>
        <properties>
          <property>
            <name>specific_heat_capacity</name>
            <type>Constant</type>
            <value>1600</value>
          </property>
          <property>
            <name>density</name>
            <type>Constant</type>
            <value>2100</value>
          </property>
        </properties>
      </phase>
      <phase>
        <type>Gas</type>
        <properties>
          <property>
            <name>specific_heat_capacity</name>
            <type>Constant</type>
            <value>718</value>
          </property>
          <property>
            <name>density</name>
            <type>Constant</type>
            <value>1292</value>
          </property>
        </properties>
      </phase>
    </phases>
    <properties>
      <property>
        <name>porosity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>0.4</value>
      </property>
      <property>
        <name>thermal_conductivity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>1</value>
      </property>
      <property>
        <name>thermal_longitudinal_dispersivity</name>

```

```

        <type>Constant</type>
        <value>0</value>
    </property>
    <property>
        <name>thermal_transversal_dispersivity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>0</value>
    </property>
</properties>
</medium>
<medium id="1">
    <phases>
        <phase>
            <type>AqueousLiquid</type>
            <properties>
                <property>
                    <name>phase_velocity</name>
                    <type>Constant</type>
                    <value>0 0 0</value>
                </property>
                <property>
                    <name>specific_heat_capacity</name>
                    <type>Constant</type>
                    <value>0</value>
                </property>
                <property>
                    <name>density</name>
                    <type>Constant</type>
                    <value>0</value>
                </property>
            </properties>
        </phase>
        <phase>
            <type>Solid</type>
            <properties>
                <property>
                    <name>specific_heat_capacity</name>
                    <type>Constant</type>
                    <value>3400</value>
                </property>
                <property>
                    <name>density</name>
                    <type>Constant</type>
                    <value>1200</value>
                </property>
            </properties>
        </phase>
        <phase>
            <type>Gas</type>
            <properties>
                <property>
                    <name>specific_heat_capacity</name>
                    <type>Constant</type>
                    <value>718</value>
                </property>
                <property>
                    <name>density</name>
                    <type>Constant</type>
                    <value>1292</value>
                </property>
            </properties>
        </phase>
    </phases>
    <properties>
        <property>
            <name>porosity</name>
            <type>Constant</type>
            <value>0.2</value>
        </property>
        <property>
            <name>thermal_conductivity</name>
            <type>Constant</type>
            <value>3.5</value>
        </property>
        <property>
            <name>thermal_longitudinal_dispersivity</name>
            <type>Constant</type>
            <value>0</value>
        </property>
        <property>
            <name>thermal_transversal_dispersivity</name>
            <type>Constant</type>
            <value>0</value>
        </property>
    </properties>
</medium>
<medium id="2">
    <phases>
        <phase>
            <type>AqueousLiquid</type>
            <properties>
                <property>

```

```

        <name>phase_velocity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>0 0 0</value>
    </property>
    <property>
        <name>specific_heat_capacity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>4200</value>
    </property>
    <property>
        <name>density</name>
        <type>Constant</type>
        <value>1000</value>
    </property>
</properties>
</phase>
<phase>
    <type>Solid</type>
    <properties>
        <property>
            <name>specific_heat_capacity</name>
            <type>Constant</type>
            <value>2500</value>
        </property>
        <property>
            <name>density</name>
            <type>Constant</type>
            <value>2700</value>
        </property>
    </properties>
</phase>
<phase>
    <type>Gas</type>
    <properties>
        <property>
            <name>specific_heat_capacity</name>
            <type>Constant</type>
            <value>718</value>
        </property>
        <property>
            <name>density</name>
            <type>Constant</type>
            <value>1292</value>
        </property>
    </properties>
</phase>
</phases>
<properties>
    <property>
        <name>porosity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>0.17</value>
    </property>
    <property>
        <name>thermal_conductivity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>2.6</value>
    </property>
    <property>
        <name>thermal_longitudinal_dispersivity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>0</value>
    </property>
    <property>
        <name>thermal_transversal_dispersivity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>0</value>
    </property>
</properties>
</medium>
<medium id="3">
    <phases>
        <phase>
            <type>AqueousLiquid</type>
            <properties>
                <property>
                    <name>phase_velocity</name>
                    <type>Constant</type>
                    <value>0 0 0</value>
                </property>
                <property>
                    <name>specific_heat_capacity</name>
                    <type>Constant</type>
                    <value>4157</value>
                </property>
                <property>
                    <name>density</name>
                    <type>Constant</type>
                    <value>1000</value>
                </property>
            </properties>
        </phase>
    </phases>

```

```

    <phase>
      <type>Solid</type>
      <properties>
        <property>
          <name>specific_heat_capacity</name>
          <type>Constant</type>
          <value>750</value>
        </property>
        <property>
          <name>density</name>
          <type>Constant</type>
          <value>2680</value>
        </property>
      </properties>
    </phase>
    <phase>
      <type>Gas</type>
      <properties>
        <property>
          <name>specific_heat_capacity</name>
          <type>Constant</type>
          <value>1000</value>
        </property>
        <property>
          <name>density</name>
          <type>Constant</type>
          <value>2500</value>
        </property>
      </properties>
    </phase>
  </phases>
  <properties>
    <property>
      <name>porosity</name>
      <type>Constant</type>
      <value>0.1</value>
    </property>
    <property>
      <name>thermal_conductivity</name>
      <type>Constant</type>
      <value>2.965</value>
    </property>
    <property>
      <name>thermal_longitudinal_dispersivity</name>
      <type>Constant</type>
      <value>0</value>
    </property>
    <property>
      <name>thermal_transversal_dispersivity</name>
      <type>Constant</type>
      <value>0</value>
    </property>
  </properties>
</medium>
</media>
<time_loop>
  <processes>
    <process ref="HeatTransportBHE">
      <nonlinear_solver>basic_picard</nonlinear_solver>
      <convergence_criterion>
        <type>DeltaX</type>
        <norm_type>NORM2</norm_type>
        <reitol>1.e-5</reitol>
      </convergence_criterion>
      <time_discretization><type>BackwardEuler</type></time_discretization>
      <time_stepping>
        <type>FixedTimeStepping</type>
        <t_initial> 0.0 </t_initial>
        <!-- use the following for full simulation
        <t_end> 15552000 </t_end>
        -->
        <t_end> 4200 </t_end>
        <timesteps>
          <!-- use the following for full simulation
          <pair><repeat>10</repeat><delta_t>720</delta_t></pair>
          <pair><repeat>4</repeat><delta_t>3600</delta_t></pair>
          <pair><repeat>1</repeat><delta_t>10800</delta_t></pair>
          -->
          <pair>
            <repeat>70</repeat>
            <delta_t>60</delta_t>
          </pair>
        </timesteps>
      </time_stepping>
    </process>
  </processes>
  <output>
    <type>VTK</type>
    <prefix>4bhesKAPE</prefix>
    <timesteps>
      <!-- use the following for full simulation
      <pair><repeat> 1</repeat><each_steps> 92 </each_steps></pair>

```

```

        <pair><repeat> 1</repeat><each_steps> 80 </each_steps></pair>
        -->
        <pair>
            <repeat> 1 </repeat>
            <each_steps> 1 </each_steps>
        </pair>
    </timesteps>
    <variables>
        <variable>temperature_soil</variable>
        <variable>temperature_BHE1</variable>
        <variable>temperature_BHE2</variable>
        <variable>temperature_BHE3</variable>
        <variable>temperature_BHE4</variable>
    </variables>
    <suffix>_ts_{:timestep}_t_{:time}</suffix>
</output>
</time_loop>
<parameters>
    <parameter>
        <name>T0</name>
        <type>Constant</type>
        <values>303</values>
    </parameter>
    <parameter>
        <name>T0_BHE1</name>
        <type>Constant</type>
        <values>301 301 301 301</values>
    </parameter>
    <parameter>
        <name>T0_BHE2</name>
        <type>Constant</type>
        <values>301 301 301</values>
    </parameter>
    <parameter>
        <name>T0_BHE3</name>
        <type>Constant</type>
        <values>301 301 301 301 301 301 301 301</values>
    </parameter>
    <parameter>
        <name>T0_BHE4</name>
        <type>Constant</type>
        <values>301 301 301 301</values>
    </parameter>
</parameters>
<process_variables>
    <process_variable>
        <name>temperature_soil</name>
        <components>1</components>
        <order>1</order>
        <initial_condition>T0</initial_condition>
        <boundary_conditions>
            <boundary_condition>
                <geometrical_set>adrikos.gli</geometrical_set>
                <geometry>top</geometry>
                <type>Dirichlet</type>
                <parameter>T0</parameter>
            </boundary_condition>
        </boundary_conditions>
    </process_variable>
    <process_variable>
        <name>temperature_BHE1</name>
        <components>4</components>
        <order>1</order>
        <initial_condition>T0_BHE1</initial_condition>
    </process_variable>
    <process_variable>
        <name>temperature_BHE2</name>
        <components>3</components>
        <order>1</order>
        <initial_condition>T0_BHE2</initial_condition>
    </process_variable>
    <process_variable>
        <name>temperature_BHE3</name>
        <components>8</components>
        <order>1</order>
        <initial_condition>T0_BHE3</initial_condition>
    </process_variable>
    <process_variable>
        <name>temperature_BHE4</name>
        <components>4</components>
        <order>1</order>
        <initial_condition>T0_BHE4</initial_condition>
    </process_variable>
</process_variables>
<nonlinear_solvers>
    <nonlinear_solver>
        <name>basic_picard</name>
        <type>Picard</type>
        <max_iter>100</max_iter>
        <linear_solver>general_linear_solver</linear_solver>
    </nonlinear_solver>
</nonlinear_solvers>

```

```

<linear_solvers>
  <linear_solver>
    <name>general_linear_solver</name>
    <lis>-i cg -p jacobi -tol 1e-16 -maxiter 10000</lis>
    <eigen>
      <solver_type>BiCGSTAB</solver_type>
      <precon_type>ILUT</precon_type>
      <max_iteration_step>1000</max_iteration_step>
      <error_tolerance>1e-16</error_tolerance>
    </eigen>
    <petsc>
      <prefix>gw</prefix>
      <parameters>-gw_ksp_type cg -gw_pc_type bjacobi -gw_ksp_rtol 1e-16 -gw_ksp_max_it 10000</parameters>
    </petsc>
  </linear_solver>
</linear_solvers>
<curves>
  <curve>
    <name>inflow_temperature</name>
    <coords>0 4200
    </coords>
    <values>301 301
    </values>
  </curve>
</curves>
</OpenGeoSysProject>

```

## • Αρχείο συντομικών συνθηκών Python

```

###
# Copyright (c) 2012-2020, OpenGeoSys Community (http://www.opengeosys.org)
# Distributed under a Modified BSD License.
# See accompanying file LICENSE.txt or
# http://www.opengeosys.org/project/license
###

import sys
print(sys.version)
import os
import numpy as np
from pandas import read_csv
import OpenGeoSys
from tespy.networks import load_network

# User setting ++++++
# parameters
# refrigerant density
rho_f = 1000 # kg/m3
# switch for special boundary conditions
# switch of the function for manually specified dynamic flowrate
switch_dyn_frate = 'off' # 'on','off'
# switch of the function for manually specified dynamic thermal demand
switch_dyn_demand = 'on' # 'on','off'
if switch_dyn_demand == 'on':
    #give the consumer name defined by user in the network model
    consumer_name = 'consumer'

# network status setting
def network_status(t):
    nw_status = 'on'
    # month for closed network
    timerange_nw_off_month = [] # No month for closed network
    # t-1 to avoid the calculation problem at special time point,
    # e.g. t = 2592000.
    t_trans = int((t - 1) / 86400 / 30) + 1
    t_trans_month = t_trans
    if t_trans_month > 12:
        t_trans_month = t_trans - 12 * (int(t_trans / 12))
    if t_trans_month in timerange_nw_off_month:
        nw_status = 'off'
    return nw_status

# dynamic consumer thermal load
def consumer_demand(t): # dynamic thermal demand from consumer
    # time conversion
    t_trans = int((t - 1) / 86400 / 30) + 1
    if t_trans > 12:
        t_trans = t_trans - 12 * (int(t_trans / 12))
    # thermal demand in each month (assumed specific heat extraction rate*
    # length of BHE* number of BHE)
    month_demand = [
        68 * 305, 68 * 305, 68 * 305, 68 * 305, 68 * 305,
        68 * 305, 68 * 305, 68 * 305, 68 * 305, 68 * 305,
        68 * 305, 68 * 305,
    ]
    return month_demand[t_trans - 1]

# dynamic hydraulic flow rate at the network inlet

```

```

def dyn_frate(t):
    # time conversion
    t_trans = int((t - 1) / 86400 / 30) + 1
    if t_trans > 12:
        t_trans = t_trans - 12 * (int(t_trans / 12))
    # flow rate in kg / s time curve in month
    month_frate = []
    return month_frate[t_trans - 1]

# End User setting++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++

# create network dataframe
def create_dataframe():
    # return dataframe
    df_nw = read_csv('./pre/bhe_network.csv',
                    delimiter=';',
                    index_col=0,
                    dtype={'data_index': str})

    return (df_nw)

# TESPpy calculation process
def get_tespy_results(t):
    # bhe network boundary conditions re parametrization
    # if network exist dynamic flowrate
    if switch_dyn_frate == 'on':
        cur_frate = dyn_frate(t)
        localVars['inlet_name'].set_attr(m=cur_frate)
    # if network exist dynamic thermal demand
    if switch_dyn_demand == 'on':
        # consumer thermal load:
        cur_month_demand = consumer_demand(t)
        nw.components[consumer_name].set_attr(Q=cur_month_demand)
    # T_out re parametrization:
    for i in range(n_BHE):
        localVars['outlet_BHE' + str(i + 1)].set_attr(T=df.loc[data_index[i],
                                                                'Tout_val'])

    # solving network
    nw.solve(mode='design')
    # get Tin_val and flow rate
    for i in range(n_BHE):
        # get Tin_val
        df.loc[df.index[i],
                'Tin_val'] = localVars['inlet_BHE' +
                                      str(i + 1)].get_attr('T').val

        # get flowrate
        df.loc[df.index[i],
                'flowrate'] = localVars['inlet_BHE' +
                                      str(i + 1)].get_attr('m').val / rho_f

    return df['Tin_val'].tolist(), df['flowrate'].tolist()

# OGS setting
# Dirichlet BCs
class BC(OpenGeoSys.BHENetwork):
    def initializeDataContainer(self):
        # initialize network and get data from the network
        nw.solve(mode='design')
        get_tespy_results(0)
        # convert dataframe to column list
        t = 0 # 'initial time'
        data_col_1 = df['Tin_val'].tolist() # 'Tin_val'
        data_col_2 = df['Tout_val'].tolist() # 'Tout_val'
        data_col_3 = df['Tout_node_id'].astype(int).tolist() # 'Tout_node_id'
        data_col_4 = df['flowrate'].tolist() # 'BHE flow rate'
        return (t, data_col_1, data_col_2, data_col_3, data_col_4)

    def tespySolver(self, t, Tin_val, Tout_val):
        # network status:
        nw_status = network_status(t)
        # if network closed:
        if nw_status == 'off':
            df.loc[:, 'flowrate'] = 0
            cur_flowrate = df['flowrate'].tolist()
            return (True, True, Tout_val, cur_flowrate)
        else:
            # read Tout_val to dataframe
            for i in range(n_BHE):
                df.loc[df.index[i], 'Tout_val'] = Tout_val[i]
            # TESPpy solver
            cur_Tin_val, cur_flowrate = get_tespy_results(t)
            # check norm if network achieves the converge
            if_success = False
            pre_Tin_val = Tin_val
            norm_dx = np.linalg.norm(
                abs(np.asarray(pre_Tin_val) - np.asarray(cur_Tin_val)))
            norm_x = np.linalg.norm(np.asarray(cur_Tin_val))
            if norm_dx/norm_x < 1e-6:
                if_success = True
            # return to OGS

```

```

        return (True, if_success, cur_Tin_val, cur_flowrate)

# main
# initialize the tespy model of the bhe network
# load path of network model:
# loading the TESPpy model
project_dir = os.getcwd()
print("Project dir is: ", project_dir)
nw = load_network('./pre/tespy_nw_closedloop')
# set if print the network iteration info
nw.set_attr(iterinfo=False)

# create bhe dataframe of the network system from bhe_network.csv
df = create_dataframe()
n_BHE = np.size(df.iloc[:, 0])

# create local variables of the components label and connections label in
# network
localVars = locals()
data_index = df.index.tolist()
for i in range(n_BHE):
    for c in nw.conns.index:
        # bhe inlet and outlet conns
        if c.target.label == data_index[i]: # inlet conns of bhe
            localVars['inlet_BHE' + str(i + 1)] = c
        if c.source.label == data_index[i]: # outlet conns of bhe
            localVars['outlet_BHE' + str(i + 1)] = c

# time depended flowrate
if switch_dyn_frate == 'on':
    # import the name of inlet connection from the network csv file
    inlet_name = read_csv('./pre/tespy_nw/connections.csv',
                          delimiter=';',
                          index_col=[0]).iloc[0,0]
    for c in nw.conns.index:
        # bhe inflow conns
        if c.source.label == inlet_name: # inlet conns of bhe
            localVars['inlet_name'] = c

# instantiate BC objects referenced in OpenGeoSys
bc_bhe = BC()

```

## • Αρχείο δημιουργίας δικτύου Python

```

##
# Copyright (c) 2012-2020, OpenGeoSys Community (http://www.opengeosys.org)
# Distributed under a Modified BSD License.
# See accompanying file LICENSE.txt or
# http://www.opengeosys.org/project/license
###

# Execute this file to generate TESPpy network csv files
from tespy.networks import network
from tespy.connections import connection, ref
from tespy.components import source, sink, pump, splitter, merge, heat_exchanger_simple, cycle_closer
from tespy.tools import char_line, dc_cc
import numpy as np

# %% network
btes = network(fluids=['water'], T_unit='K', p_unit='bar', h_unit='kJ / kg')

# %% components
fc = cycle_closer('cycle closer')
pu = pump('pump')
sp = splitter('splitter', num_out=5)

# bhe:
bhe1 = heat_exchanger_simple('BHE1')
bhe2 = heat_exchanger_simple('BHE2')
bhe3 = heat_exchanger_simple('BHE3')
bhe4 = heat_exchanger_simple('BHE4')
bhe5 = heat_exchanger_simple('BHE5')

mg = merge('merge', num_in=5)
cons = heat_exchanger_simple('consumer')

## components parameterization
# pump
# flow_char
# provide volumetric flow in m^3 / s
x = np.array([2.77778E-06,
5.83333E-05,
0.000113889,
0.000169444,
0.000222222,
0.000283333,
0.000336111,

```



```

0.000383333,
0.000422222,
0.000447222,
0.000505556,
0.000558333,
0.000611111,
0.000669444,
0.000725,
0.000780556,
0.000836111,
0.000891667,
0.00095,
0.001002778,
0.001061111,
0.001119445,
0.001169445,
0.001227778,
0.001280556,
0.001308333,
])

# provide head in Pa
y = np.array([3.6081,
3.5672,
3.5058,
3.4854,
3.4445,
3.4036,
3.3628,
3.3014,
3.281,
3.2401,
3.1788,
3.1379,
3.0561,
2.8926,
2.7699,
2.6064,
2.4633,
2.3202,
2.1975,
2.034,
1.8909,
1.6498,
1.5336,
1.3523,
1.1861,
1.0803,
]) * 1e5

char = char_line(x=x, y=y)
pu.set_attr(flow_char=dc_cc(func=char, is_set=True))
pu.set_attr(eta_s=0.9)

# bhes
bhe1.set_attr(D=0.025, L=55, ks=0.00001)
bhe2.set_attr(D=0.032, L=100, ks=0.00001)
bhe3.set_attr(D=0.032, L=242, ks=0.00001)
bhe4.set_attr(D=0.032, L=242, ks=0.00001)
bhe5.set_attr(D=0.040, L=238, ks=0.00001)

# consumer
cons.set_attr(pr=0.32)
# consumer heat demand
cons.set_attr(Q=21800) # W

# %% connections
fc_pu = connection(fc, 'out1', pu, 'in1')
pu_sp = connection(pu, 'out1', sp, 'in1')

sp_bhe1 = connection(sp, 'out1', bhe1, 'in1')
sp_bhe2 = connection(sp, 'out2', bhe2, 'in1')
sp_bhe3 = connection(sp, 'out3', bhe3, 'in1')
sp_bhe4 = connection(sp, 'out4', bhe4, 'in1')
sp_bhe5 = connection(sp, 'out5', bhe5, 'in1')

bhe1_mg = connection(bhe1, 'out1', mg, 'in1')
bhe2_mg = connection(bhe2, 'out1', mg, 'in2')
bhe3_mg = connection(bhe3, 'out1', mg, 'in3')
bhe4_mg = connection(bhe4, 'out1', mg, 'in4')
bhe5_mg = connection(bhe5, 'out1', mg, 'in5')

mg_cons = connection(mg, 'out1', cons, 'in1')
cons_fc = connection(cons, 'out1', fc, 'in1')

btes.add_conns(fc_pu, pu_sp, sp_bhe1, sp_bhe2, sp_bhe3, sp_bhe4, sp_bhe5, bhe1_mg, bhe2_mg,
bhe3_mg, bhe4_mg, bhe5_mg, mg_cons, cons_fc)

## connection parametrization
# system inlet
fc_pu.set_attr(p=1, fluid={'water': 1})

```

```
# for BHEs:
# Tout:
bhe1_mg.set_attr(T=299)
bhe2_mg.set_attr(T=299)
bhe3_mg.set_attr(T=299)
bhe4_mg.set_attr(T=299)
bhe5_mg.set_attr(T=299)

# %% solve
btes.solve('design')
#btes.print_results()

# %% save to csv:
btes.save('tespy_nw_closedloop')
```

# Παράρτημα Γ'

## Προσομοίωση δοκιμής θερμικής απόκρισης γεωεναλλάκτη τύπου 1U

- Κύριο εκτελέσιμο αρχείο OpenGeoSys

```
<?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1"?>
<OpenGeoSysProject>
  <mesh>TRT1.vtu</mesh>
  <geometry>TRT1.gml</geometry>
  <processes>
    <process>
      <name>HeatTransportBHE</name>
      <type>HEAT_TRANSPORT_BHE</type>
      <integration_order>2</integration_order>
      <process_variables>
        <process_variable>temperature_soil</process_variable>
        <process_variable>temperature_BHE0</process_variable>
      </process_variables>
      <borehole_heat_exchangers>
        <borehole_heat_exchanger>
          <type>1U</type>
          <flow_and_temperature_control>
            <type>TemperatureCurveConstantFlow</type>
            <flow_rate>4.9333e-4</flow_rate>
            <temperature_curve>inflow_temperature</temperature_curve>
          </flow_and_temperature_control>
          <borehole>
            <length>119.0</length>
            <diameter>0.1651</diameter>
          </borehole>
          <grout>
            <density>1655.0</density>
            <porosity>0.0</porosity>
            <heat_capacity>1460.0</heat_capacity>
            <thermal_conductivity>2</thermal_conductivity>
          </grout>
          <pipes>
            <inlet>
              <diameter> 0.040</diameter>
              <wall_thickness>0.0037</wall_thickness>
              <wall_thermal_conductivity>0.49</wall_thermal_conductivity>
            </inlet>
            <outlet>
              <diameter>0.040</diameter>
              <wall_thickness>0.0037</wall_thickness>
              <wall_thermal_conductivity>0.49</wall_thermal_conductivity>
            </outlet>
            <distance_between_pipes>0.0948</distance_between_pipes>
            <longitudinal_dispersion_length>0.001</longitudinal_dispersion_length>
          </pipes>
          <refrigerant>
            <density>1000</density>
            <viscosity>0.001</viscosity>
            <specific_heat_capacity>4138.0</specific_heat_capacity>
            <thermal_conductivity>0.606</thermal_conductivity>
            <reference_temperature>20</reference_temperature>
          </refrigerant>
        </borehole_heat_exchanger>
      </borehole_heat_exchangers>
    </process>
  </processes>
  <media>
    <medium id="0">
```

```

<phases>
  <phase>
    <type>AqueousLiquid</type>
    <properties>
      <property>
        <name>phase_velocity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>0 0 0</value>
      </property>
      <property>
        <name>specific_heat_capacity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>0</value>
      </property>
      <property>
        <name>density</name>
        <type>Constant</type>
        <value>0</value>
      </property>
    </properties>
  </phase>
  <phase>
    <type>Solid</type>
    <properties>
      <property>
        <name>specific_heat_capacity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>1600</value>
      </property>
      <property>
        <name>density</name>
        <type>Constant</type>
        <value>2100</value>
      </property>
    </properties>
  </phase>
  <phase>
    <type>Gas</type>
    <properties>
      <property>
        <name>specific_heat_capacity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>718</value>
      </property>
      <property>
        <name>density</name>
        <type>Constant</type>
        <value>1292</value>
      </property>
    </properties>
  </phase>
</phases>
<properties>
  <property>
    <name>porosity</name>
    <type>Constant</type>
    <value>0.4</value>
  </property>
  <property>
    <name>thermal_conductivity</name>
    <type>Constant</type>
    <value>1</value>
  </property>
  <property>
    <name>thermal_longitudinal_dispersivity</name>
    <type>Constant</type>
    <value>0</value>
  </property>
  <property>
    <name>thermal_transversal_dispersivity</name>
    <type>Constant</type>
    <value>0</value>
  </property>
</properties>
</medium>
<medium id="1">
  <phases>
    <phase>
      <type>AqueousLiquid</type>
      <properties>
        <property>
          <name>phase_velocity</name>
          <type>Constant</type>
          <value>0 0 0</value>
        </property>
        <property>
          <name>specific_heat_capacity</name>
          <type>Constant</type>
          <value>0</value>
        </property>
        <property>
          <name>density</name>

```

```

        <type>Constant</type>
        <value>0</value>
    </property>
</properties>
</phase>
<phase>
    <type>Solid</type>
    <properties>
        <property>
            <name>specific_heat_capacity</name>
            <type>Constant</type>
            <value>3400</value>
        </property>
        <property>
            <name>density</name>
            <type>Constant</type>
            <value>1200</value>
        </property>
    </properties>
</phase>
</phases>
<properties>
    <property>
        <name>porosity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>0.2</value>
    </property>
    <property>
        <name>thermal_conductivity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>3.5</value>
    </property>
    <property>
        <name>thermal_longitudinal_dispersivity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>0</value>
    </property>
    <property>
        <name>thermal_transversal_dispersivity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>0</value>
    </property>
</properties>
</medium>
<medium id="2">
    <phases>
        <phase>
            <type>AqueousLiquid</type>
            <properties>
                <property>
                    <name>phase_velocity</name>
                    <type>Constant</type>
                    <value>0 0 0</value>
                </property>
                <property>
                    <name>specific_heat_capacity</name>
                    <type>Constant</type>
                    <value>4200</value>
                </property>
                <property>
                    <name>density</name>
                    <type>Constant</type>
                    <value>1000</value>
                </property>
            </properties>
        </phase>
        <phase>
            <type>Solid</type>
            <properties>
                <property>
                    <name>specific_heat_capacity</name>
                    <type>Constant</type>
                    <value>2500</value>
                </property>
                <property>
                    <name>density</name>
                    <type>Constant</type>

```

```

        <value>2700</value>
      </property>
    </properties>
  </phase>
  <phase>
    <type>Gas</type>
    <properties>
      <property>
        <name>specific_heat_capacity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>718</value>
      </property>
      <property>
        <name>density</name>
        <type>Constant</type>
        <value>1292</value>
      </property>
    </properties>
  </phase>
</phases>
<properties>
  <property>
    <name>porosity</name>
    <type>Constant</type>
    <value>0.17</value>
  </property>
  <property>
    <name>thermal_conductivity</name>
    <type>Constant</type>
    <value>2.6</value>
  </property>
  <property>
    <name>thermal_longitudinal_dispersivity</name>
    <type>Constant</type>
    <value>0</value>
  </property>
  <property>
    <name>thermal_transversal_dispersivity</name>
    <type>Constant</type>
    <value>0</value>
  </property>
</properties>
</medium>
<medium id="3">
  <phases>
    <phase>
      <type>AqueousLiquid</type>
      <properties>
        <property>
          <name>phase_velocity</name>
          <type>Constant</type>
          <value>0 0 0</value>
        </property>
        <property>
          <name>specific_heat_capacity</name>
          <type>Constant</type>
          <value>4157</value>
        </property>
        <property>
          <name>density</name>
          <type>Constant</type>
          <value>1000</value>
        </property>
      </properties>
    </phase>
    <phase>
      <type>Solid</type>
      <properties>
        <property>
          <name>specific_heat_capacity</name>
          <type>Constant</type>
          <value>750</value>
        </property>
        <property>
          <name>density</name>
          <type>Constant</type>
          <value>2680</value>
        </property>
      </properties>
    </phase>
    <phase>
      <type>Gas</type>
      <properties>
        <property>
          <name>specific_heat_capacity</name>
          <type>Constant</type>
          <value>1000</value>
        </property>
        <property>
          <name>density</name>
          <type>Constant</type>
          <value>2500</value>
        </property>
      </properties>
    </phase>
  </phases>

```

```

        </property>
      </properties>
    </phase>
  </phases>
  <properties>
    <property>
      <name>porosity</name>
      <type>Constant</type>
      <value>0.1</value>
    </property>
    <property>
      <name>thermal_conductivity</name>
      <type>Constant</type>
      <value>2.965</value>
    </property>
    <property>
      <name>thermal_longitudinal_dispersivity</name>
      <type>Constant</type>
      <value>0</value>
    </property>
    <property>
      <name>thermal_transversal_dispersivity</name>
      <type>Constant</type>
      <value>0</value>
    </property>
  </properties>
</medium>
</media>
<time_loop>
  <processes>
    <process ref="HeatTransportBHE">
      <nonlinear_solver>basic_picard</nonlinear_solver>
      <convergence_criterion>
        <type>DeltaX</type>
        <norm_type>NORM2</norm_type>
        <reitol>1e-10</reitol>
      </convergence_criterion>
      <time_discretization>
        <type>BackwardEuler</type>
      </time_discretization>
      <time_stepping>
        <type>FixedTimeStepping</type>
        <t_initial> 0.0 </t_initial>
        <t_end> 322800</t_end>
        <timesteps>
          <pair>
            <repeat>538</repeat>
            <delta_t>600</delta_t>
          </pair>
        </timesteps>
      </time_stepping>
    </process>
  </processes>
  <output>
    <type>VTK</type>
    <prefix>beierlU</prefix>
    <timesteps>
      <pair>
        <repeat> 1</repeat>
        <each_steps> 1 </each_steps>
      </pair>
    </timesteps>
    <variables>
      <variable>temperature_soil</variable>
      <variable>temperature_BHE0</variable>
    </variables>
  </output>
</time_loop>
<parameters>
  <parameter>
    <name>T0</name>
    <type>Constant</type>
    <value>24.65</value>
  </parameter>
  <parameter>
    <name>T0_BHE0</name>
    <type>Constant</type>
    <values>27.06 23.6 25.33 25.33</values>
  </parameter>
</parameters>
<process_variables>
  <process_variable>
    <name>temperature_soil</name>
    <components>1</components>
    <order>1</order>
    <initial_condition>T0</initial_condition>
    <boundary_conditions>
    </boundary_conditions>
  </process_variable>
  <process_variable>
    <name>temperature_BHE0</name>
    <components>4</components>

```

```

        <order>1</order>
        <initial_condition>T0_BHE0</initial_condition>
    </process_variable>
</process_variables>
<nonlinear_solvers>
    <nonlinear_solver>
        <name>basic_picard</name>
        <type>Picard</type>
        <max_iter>100</max_iter>
        <linear_solver>general_linear_solver</linear_solver>
    </nonlinear_solver>
</nonlinear_solvers>
<linear_solvers>
    <linear_solver>
        <name>general_linear_solver</name>
        <lis>-i cg -p jacobi -tol 1e-16 -maxiter 10000</lis>
        <eigen>
            <solver_type>BiCGSTAB</solver_type>
            <precon_type>ILUT</precon_type>
            <max_iteration_step>1000</max_iteration_step>
            <error_tolerance>1e-16</error_tolerance>
        </eigen>
        <petsc>
            <prefix>gw</prefix>
            <parameters>-gw_ksp_type cg -gw_pc_type bjacobi -gw_ksp_rtol 1e-16 -gw_ksp_max_it 10000</parameters>
        </petsc>
    </linear_solver>
</linear_solvers>
<curves>
    <curve>
        <name>inflow_temperature</name>
        <coords>600
1200
1800
2400
3000
3600
4200
4800
5400
6000
6600
7200
7800
8400
9000
9600
10200
10800
11400
12000
12600
13200
13800
14400
15000
15600
16200
16800
17400
18000
18600
19200
19800
20400
21000
21600
22200
22800
23400
24000
24600
25200
25800
26400
27000
27600
28200
28800
29400
30000
30600
31200
31800
32400
33000
33600
34200
34800
35400
36000
36600

```



37200  
37800  
38400  
39000  
39600  
40200  
40800  
41400  
42000  
42600  
43200  
43800  
44400  
45000  
45600  
46200  
46800  
47400  
48000  
48600  
49200  
49800  
50400  
51000  
51600  
52200  
52800  
53400  
54000  
54600  
55200  
55800  
56400  
57000  
57600  
58200  
58800  
59400  
60000  
60600  
61200  
61800  
62400  
63000  
63600  
64200  
64800  
65400  
66000  
66600  
67200  
67800  
68400  
69000  
69600  
70200  
70800  
71400  
72000  
72600  
73200  
73800  
74400  
75000  
75600  
76200  
76800  
77400  
78000  
78600  
79200  
79800  
80400  
81000  
81600  
82200  
82800  
83400  
84000  
84600  
85200  
85800  
86400  
87000  
87600  
88200  
88800  
89400  
90000  
90600  
91200  
91800

92400  
93000  
93600  
94200  
94800  
95400  
96000  
96600  
97200  
97800  
98400  
99000  
99600  
100200  
100800  
101400  
102000  
102600  
103200  
103800  
104400  
105000  
105600  
106200  
106800  
107400  
108000  
108600  
109200  
109800  
110400  
111000  
111600  
112200  
112800  
113400  
114000  
114600  
115200  
115800  
116400  
117000  
117600  
118200  
118800  
119400  
120000  
120600  
121200  
121800  
122400  
123000  
123600  
124200  
124800  
125400  
126000  
126600  
127200  
127800  
128400  
129000  
129600  
130200  
130800  
131400  
132000  
132600  
133200  
133800  
134400  
135000  
135600  
136200  
136800  
137400  
138000  
138600  
139200  
139800  
140400  
141000  
141600  
142200  
142800  
143400  
144000  
144600  
145200  
145800  
146400  
147000

147600  
148200  
148800  
149400  
150000  
150600  
151200  
151800  
152400  
153000  
153600  
154200  
154800  
155400  
156000  
156600  
157200  
157800  
158400  
159000  
159600  
160200  
160800  
161400  
162000  
162600  
163200  
163800  
164400  
165000  
165600  
166200  
166800  
167400  
168000  
168600  
169200  
169800  
170400  
171000  
171600  
172200  
172800  
173400  
174000  
174600  
175200  
175800  
176400  
177000  
177600  
178200  
178800  
179400  
180000  
180600  
181200  
181800  
182400  
183000  
183600  
184200  
184800  
185400  
186000  
186600  
187200  
187800  
188400  
189000  
189600  
190200  
190800  
191400  
192000  
192600  
193200  
193800  
194400  
195000  
195600  
196200  
196800  
197400  
198000  
198600  
199200  
199800  
200400  
201000  
201600  
202200

202800  
203400  
204000  
204600  
205200  
205800  
206400  
207000  
207600  
208200  
208800  
209400  
210000  
210600  
211200  
211800  
212400  
213000  
213600  
214200  
214800  
215400  
216000  
216600  
217200  
217800  
218400  
219000  
219600  
220200  
220800  
221400  
222000  
222600  
223200  
223800  
224400  
225000  
225600  
226200  
226800  
227400  
228000  
228600  
229200  
229800  
230400  
231000  
231600  
232200  
232800  
233400  
234000  
234600  
235200  
235800  
236400  
237000  
237600  
238200  
238800  
239400  
240000  
240600  
241200  
241800  
242400  
243000  
243600  
244200  
244800  
245400  
246000  
246600  
247200  
247800  
248400  
249000  
249600  
250200  
250800  
251400  
252000  
252600  
253200  
253800  
254400  
255000  
255600  
256200  
256800  
257400

258000  
258600  
259200  
259800  
260400  
261000  
261600  
262200  
262800  
263400  
264000  
264600  
265200  
265800  
266400  
267000  
267600  
268200  
268800  
269400  
270000  
270600  
271200  
271800  
272400  
273000  
273600  
274200  
274800  
275400  
276000  
276600  
277200  
277800  
278400  
279000  
279600  
280200  
280800  
281400  
282000  
282600  
283200  
283800  
284400  
285000  
285600  
286200  
286800  
287400  
288000  
288600  
289200  
289800  
290400  
291000  
291600  
292200  
292800  
293400  
294000  
294600  
295200  
295800  
296400  
297000  
297600  
298200  
298800  
299400  
300000  
300600  
301200  
301800  
302400  
303000  
303600  
304200  
304800  
305400  
306000  
306600  
307200  
307800  
308400  
309000  
309600  
310200  
310800  
311400  
312000  
312600

```

313200
313800
314400
315000
315600
316200
316800
317400
318000
318600
319200
319800
320400
321000
321600
322200
322800</coords>
      <values>19.84
22.95
24.54
25.15
26.41
27.06
27.48
27.92
28.14
28.56
28.82
29.09
28.93
29.35
29.68
29.91
30.1
30.33
30.49
30.64
30.63
30.74
30.82
31.03
31.14
31.24
31.32
31.38
31.45
31.55
31.61
31.65
31.78
31.94
31.99
32.07
32.19
32.23
32.27
32.34
32.42
32.44
32.53
32.61
32.6
32.63
32.61
32.61
32.73
32.83
32.89
32.95
32.99
33.06
33.05
33.1
33.15
33.19
33.19
33.21
33.27
33.28
33.33
33.36
33.4
33.42
33.47
33.51
33.48
33.48
33.49
33.52
33.53
33.55
33.58

```

33.6  
33.59  
33.61  
33.64  
33.64  
33.65  
33.67  
33.66  
33.65  
33.66  
33.65  
33.66  
33.68  
33.72  
33.71  
33.75  
33.76  
33.77  
33.8  
33.79  
33.78  
33.8  
33.82  
33.84  
33.85  
33.87  
33.89  
33.95  
34  
33.98  
33.98  
33.95  
33.95  
34  
34.05  
34.07  
34.12  
34.12  
34.13  
34.12  
34.12  
34.11  
34.2  
34.24  
34.26  
34.27  
34.3  
34.28  
34.26  
34.28  
34.29  
34.32  
34.3  
34.25  
34.28  
34.25  
34.31  
34.36  
34.36  
34.39  
34.41  
34.45  
34.43  
34.42  
34.43  
34.43  
34.48  
34.5  
34.52  
34.55  
34.55  
34.56  
34.62  
34.65  
34.66  
34.62  
34.63  
34.62  
34.6  
34.59  
34.61  
34.59  
34.61  
34.61  
34.62  
34.64  
34.66  
34.66  
34.66  
34.68  
34.68  
34.69

34.69  
34.72  
34.69  
34.68  
34.73  
34.7  
34.7  
34.68  
34.68  
34.75  
34.81  
34.87  
34.85  
34.91  
34.93  
34.93  
34.98  
34.95  
34.94  
34.96  
34.91  
34.9  
34.9  
34.9  
34.9  
34.93  
34.95  
34.97  
34.98  
34.98  
35.01  
35.03  
35.05  
35.05  
35.08  
35.08  
35.11  
35.11  
35.13  
35.15  
35.21  
35.15  
35.13  
35.14  
35.16  
35.17  
35.17  
35.19  
35.22  
35.26  
35.28  
35.27  
35.3  
35.3  
35.33  
35.27  
35.24  
35.23  
35.2  
35.2  
35.22  
35.18  
35.19  
35.27  
35.29  
35.35  
35.33  
35.35  
35.36  
35.35  
35.33  
35.3  
35.26  
35.31  
35.29  
35.3  
35.27  
35.31  
35.31  
35.29  
35.34  
35.27  
35.27  
35.31  
35.39  
35.39  
35.41  
35.42  
35.41  
35.4  
35.39



35.34  
35.46  
35.46  
35.45  
35.48  
35.5  
35.48  
35.51  
35.47  
35.47  
35.55  
35.58  
35.58  
35.61  
35.59  
35.6  
35.6  
35.64  
35.66  
35.67  
35.7  
35.68  
35.74  
35.68  
35.68  
35.65  
35.66  
35.61  
35.63  
35.63  
35.66  
35.67  
35.66  
35.65  
35.66  
35.66  
35.69  
35.71  
35.74  
35.73  
35.71  
35.7  
35.72  
35.71  
35.71  
35.68  
35.73  
35.76  
35.69  
35.67  
35.66  
35.64  
35.64  
35.65  
35.69  
35.64  
35.63  
35.61  
35.59  
35.56  
35.49  
35.57  
35.61  
35.65  
35.6  
35.67  
35.66  
35.71  
35.65  
35.64  
35.63  
35.61  
35.63  
35.67  
35.67  
35.63  
35.55  
35.6  
35.62  
35.64  
35.65  
35.67  
35.62  
35.6  
35.61  
35.64  
35.65  
35.61  
35.63  
35.67  
35.69  
35.72

35.67  
35.68  
35.7  
35.7  
35.68  
35.69  
35.65  
35.65  
35.66  
35.66  
35.67  
35.69  
35.7  
35.72  
35.74  
35.75  
35.72  
35.68  
35.65  
35.66  
35.65  
35.65  
35.61  
35.62  
35.69  
35.73  
35.76  
35.85  
35.78  
35.79  
35.76  
35.71  
35.73  
35.77  
35.8  
35.78  
35.81  
35.83  
35.75  
35.76  
35.74  
35.7  
35.71  
35.69  
35.67  
35.73  
35.71  
35.71  
35.8  
35.78  
35.79  
35.77  
35.77  
35.76  
35.72  
35.75  
35.76  
35.71  
35.78  
35.77  
35.74  
35.75  
35.72  
35.77  
35.8  
35.78  
35.78  
35.82  
35.85  
35.88  
35.9  
35.94  
35.95  
35.94  
35.98  
35.95  
35.99  
35.9  
35.91  
35.93  
35.94  
35.94  
35.99  
35.99  
36.03  
36.03  
36.02  
36.03  
36.02  
36.02  
36.06  
36.06

36.04  
36.04  
36.01  
35.99  
35.99  
35.97  
35.96  
35.9  
35.94  
36.05  
36.07  
36.1  
36.1  
36.11  
36.12  
36.13  
36.11  
36.07  
36.04  
36.01  
36.02  
36.05  
36.09  
36.1  
36.11  
36.15  
36.14  
36.16  
36.14  
36.15  
36.14  
36.16  
36.09  
36.13  
36.07  
36.07  
36.02  
36.11  
36.12  
36.13  
36.15  
36.18  
36.22  
36.26  
36.3  
36.31  
36.31  
36.36  
36.38  
36.38  
36.42  
36.36  
36.28  
36.31  
36.3  
36.31  
36.33  
36.34  
36.35  
36.35  
36.37  
36.35  
36.37  
36.42  
36.43  
36.45  
36.45  
36.47  
36.47  
36.48  
36.48  
36.45  
36.46  
36.46  
36.45  
36.45  
36.48  
36.46  
36.46  
36.42  
36.4  
36.42  
36.41  
36.42  
36.35  
36.41  
36.42  
36.4  
36.35  
36.4  
36.38  
36.31

```
36.36
36.4
36.43</values>
      </curve>
    </curves>
  </OpenGeoSysProject>
```

# Παράρτημα Δ΄

## Προσομοίωση δοκιμής θερμικής απόκρισης γεωεναλλάκτη τύπου 2U

- Κύριο εκτελέσιμο αρχείο OpenGeoSys

```
<?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1"?>
<OpenGeoSysProject>
  <mesh>TRT.vtu</mesh>
  <geometry>TRT.gml</geometry>
  <processes>
    <process>
      <name>HeatTransportBHE</name>
      <type>HEAT_TRANSPORT_BHE</type>
      <integration_order>2</integration_order>
      <process_variables>
        <process_variable>temperature_soil</process_variable>
        <process_variable>temperature_BHE0</process_variable>
      </process_variables>
      <borehole_heat_exchangers>
        <borehole_heat_exchanger>
          <type>2U</type>
          <flow_and_temperature_control>
            <type>TemperatureCurveConstantFlow</type>
            <flow_rate>2.375e-4</flow_rate>
            <temperature_curve>inflow_temperature</temperature_curve>
          </flow_and_temperature_control>
          <borehole>
            <length>121.0</length>
            <diameter>0.1651</diameter>
          </borehole>
          <grout>
            <density>1655.0</density>
            <porosity>0.0</porosity>
            <heat_capacity>1460.0</heat_capacity>
            <thermal_conductivity>2</thermal_conductivity>
          </grout>
          <pipes>
            <inlet>
              <diameter> 0.032</diameter>
              <wall_thickness>0.0029</wall_thickness>
              <wall_thermal_conductivity>0.49</wall_thermal_conductivity>
            </inlet>
            <outlet>
              <diameter>0.032</diameter>
              <wall_thickness>0.0029</wall_thickness>
              <wall_thermal_conductivity>0.49</wall_thermal_conductivity>
            </outlet>
            <distance_between_pipes>0.0756</distance_between_pipes>
            <longitudinal_dispersion_length>0.001</longitudinal_dispersion_length>
          </pipes>
          <refrigerant>
            <density>1000</density>
            <viscosity>0.001</viscosity>
            <specific_heat_capacity>4138.0</specific_heat_capacity>
            <thermal_conductivity>0.606</thermal_conductivity>
            <reference_temperature>20</reference_temperature>
          </refrigerant>
        </borehole_heat_exchanger>
      </borehole_heat_exchangers>
    </process>
  </processes>
  <media>
    <medium id="0">
```

```

<phases>
  <phase>
    <type>AqueousLiquid</type>
    <properties>
      <property>
        <name>phase_velocity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>0 0 0</value>
      </property>
      <property>
        <name>specific_heat_capacity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>0</value>
      </property>
      <property>
        <name>density</name>
        <type>Constant</type>
        <value>0</value>
      </property>
    </properties>
  </phase>
  <phase>
    <type>Solid</type>
    <properties>
      <property>
        <name>specific_heat_capacity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>1600</value>
      </property>
      <property>
        <name>density</name>
        <type>Constant</type>
        <value>2100</value>
      </property>
    </properties>
  </phase>
  <phase>
    <type>Gas</type>
    <properties>
      <property>
        <name>specific_heat_capacity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>718</value>
      </property>
      <property>
        <name>density</name>
        <type>Constant</type>
        <value>1292</value>
      </property>
    </properties>
  </phase>
</phases>
<properties>
  <property>
    <name>porosity</name>
    <type>Constant</type>
    <value>0.4</value>
  </property>
  <property>
    <name>thermal_conductivity</name>
    <type>Constant</type>
    <value>1</value>
  </property>
  <property>
    <name>thermal_longitudinal_dispersivity</name>
    <type>Constant</type>
    <value>0</value>
  </property>
  <property>
    <name>thermal_transversal_dispersivity</name>
    <type>Constant</type>
    <value>0</value>
  </property>
</properties>
</medium>
<medium id="1">
  <phases>
    <phase>
      <type>AqueousLiquid</type>
      <properties>
        <property>
          <name>phase_velocity</name>
          <type>Constant</type>
          <value>0 0 0</value>
        </property>
        <property>
          <name>specific_heat_capacity</name>
          <type>Constant</type>
          <value>0</value>
        </property>
        <property>
          <name>density</name>

```

```

        <type>Constant</type>
        <value>0</value>
    </property>
</properties>
</phase>
<phase>
    <type>Solid</type>
    <properties>
        <property>
            <name>specific_heat_capacity</name>
            <type>Constant</type>
            <value>3400</value>
        </property>
        <property>
            <name>density</name>
            <type>Constant</type>
            <value>1200</value>
        </property>
    </properties>
</phase>
</phases>
<properties>
    <property>
        <name>porosity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>0.2</value>
    </property>
    <property>
        <name>thermal_conductivity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>3.5</value>
    </property>
    <property>
        <name>thermal_longitudinal_dispersivity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>0</value>
    </property>
    <property>
        <name>thermal_transversal_dispersivity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>0</value>
    </property>
</properties>
</medium>
<medium id="2">
    <phases>
        <phase>
            <type>AqueousLiquid</type>
            <properties>
                <property>
                    <name>phase_velocity</name>
                    <type>Constant</type>
                    <value>0 0 0</value>
                </property>
                <property>
                    <name>specific_heat_capacity</name>
                    <type>Constant</type>
                    <value>4200</value>
                </property>
                <property>
                    <name>density</name>
                    <type>Constant</type>
                    <value>1000</value>
                </property>
            </properties>
        </phase>
        <phase>
            <type>Solid</type>
            <properties>
                <property>
                    <name>specific_heat_capacity</name>
                    <type>Constant</type>
                    <value>2500</value>
                </property>
                <property>
                    <name>density</name>
                    <type>Constant</type>

```

```

        <value>2700</value>
      </property>
    </properties>
  </phase>
  <phase>
    <type>Gas</type>
    <properties>
      <property>
        <name>specific_heat_capacity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>718</value>
      </property>
      <property>
        <name>density</name>
        <type>Constant</type>
        <value>1292</value>
      </property>
    </properties>
  </phase>
</phases>
<properties>
  <property>
    <name>porosity</name>
    <type>Constant</type>
    <value>0.17</value>
  </property>
  <property>
    <name>thermal_conductivity</name>
    <type>Constant</type>
    <value>2.6</value>
  </property>
  <property>
    <name>thermal_longitudinal_dispersivity</name>
    <type>Constant</type>
    <value>0</value>
  </property>
  <property>
    <name>thermal_transversal_dispersivity</name>
    <type>Constant</type>
    <value>0</value>
  </property>
</properties>
</medium>
<medium id="3">
  <phases>
    <phase>
      <type>AqueousLiquid</type>
      <properties>
        <property>
          <name>phase_velocity</name>
          <type>Constant</type>
          <value>0 0 0</value>
        </property>
        <property>
          <name>specific_heat_capacity</name>
          <type>Constant</type>
          <value>4157</value>
        </property>
        <property>
          <name>density</name>
          <type>Constant</type>
          <value>1000</value>
        </property>
      </properties>
    </phase>
    <phase>
      <type>Solid</type>
      <properties>
        <property>
          <name>specific_heat_capacity</name>
          <type>Constant</type>
          <value>750</value>
        </property>
        <property>
          <name>density</name>
          <type>Constant</type>
          <value>2680</value>
        </property>
      </properties>
    </phase>
    <phase>
      <type>Gas</type>
      <properties>
        <property>
          <name>specific_heat_capacity</name>
          <type>Constant</type>
          <value>1000</value>
        </property>
        <property>
          <name>density</name>
          <type>Constant</type>
          <value>2500</value>
        </property>
      </properties>
    </phase>
  </phases>

```



```

        </property>
      </properties>
    </phase>
  </phases>
  <properties>
    <property>
      <name>porosity</name>
      <type>Constant</type>
      <value>0.1</value>
    </property>
    <property>
      <name>thermal_conductivity</name>
      <type>Constant</type>
      <value>2.965</value>
    </property>
    <property>
      <name>thermal_longitudinal_dispersivity</name>
      <type>Constant</type>
      <value>0</value>
    </property>
    <property>
      <name>thermal_transversal_dispersivity</name>
      <type>Constant</type>
      <value>0</value>
    </property>
  </properties>
</medium>
</media>
<time_loop>
  <processes>
    <process ref="HeatTransportBHE">
      <nonlinear_solver>basic_picard</nonlinear_solver>
      <convergence_criterion>
        <type>DeltaX</type>
        <norm_type>NORM2</norm_type>
        <reitol>1e-10</reitol>
      </convergence_criterion>
      <time_discretization>
        <type>BackwardEuler</type>
      </time_discretization>
      <time_stepping>
        <type>FixedTimeStepping</type>
        <t_initial> 0.0 </t_initial>
        <!-- use the following for full simulation
        <t_end> 186420 </t_end>
        -->
        <t_end> 259800</t_end>
        <timesteps>
          <!-- use the following for full simulation
          <pair><repeat>3107</repeat><delta_t>60</delta_t></pair>
          -->
          <pair>
            <repeat>433</repeat>
            <delta_t>600</delta_t>
          </pair>
        </timesteps>
      </time_stepping>
    </process>
  </processes>
  <output>
    <type>VTK</type>
    <prefix>beier2u</prefix>
    <timesteps>
      <pair>
        <repeat> 1</repeat>
        <each_steps> 1 </each_steps>
      </pair>
    </timesteps>
    <variables>
      <variable>temperature_soil</variable>
      <variable>temperature_BHE0</variable>
    </variables>
  </output>
</time_loop>
<parameters>
  <parameter>
    <name>T0</name>
    <type>Constant</type>
    <value>21.63</value>
  </parameter>
  <parameter>
    <name>T0_BHE0</name>
    <type>Constant</type>
    <values> 24.12 24.12 20.49 20.49 22.3 22.3 22.3 22.3</values>
  </parameter>
</parameters>
<process_variables>
  <process_variable>
    <name>temperature_soil</name>
    <components>1</components>
    <order>1</order>
    <initial_condition>T0</initial_condition>
  </process_variable>

```

```

        <boundary_conditions>
        </boundary_conditions>
    </process_variable>
    <process_variable>
        <name>temperature_BHE0</name>
        <components>8</components>
        <order>1</order>
        <initial_condition>T0_BHE0</initial_condition>
    </process_variable>
</process_variables>
<nonlinear_solvers>
    <nonlinear_solver>
        <name>basic_picard</name>
        <type>Picard</type>
        <max_iter>100</max_iter>
        <linear_solver>general_linear_solver</linear_solver>
    </nonlinear_solver>
</nonlinear_solvers>
<linear_solvers>
    <linear_solver>
        <name>general_linear_solver</name>
        <lis>-i cg -p jacobi -tol 1e-16 -maxiter 10000</lis>
        <eigen>
            <solver_type>BiCGSTAB</solver_type>
            <precon_type>ILUT</precon_type>
            <max_iteration_step>1000</max_iteration_step>
            <error_tolerance>1e-16</error_tolerance>
        </eigen>
        <petsc>
            <prefix>gw</prefix>
            <parameters>-gw_ksp_type cg -gw_pc_type bjacobi -gw_ksp_rtol 1e-16 -gw_ksp_max_it 10000</parameters>
        </petsc>
    </linear_solver>
</linear_solvers>
<curves>
    <curve>
        <name>inflow_temperature</name>
        <coords>600
1200
1800
2400
3000
3600
4200
4800
5400
6000
6600
7200
7800
8400
9000
9600
10200
10800
11400
12000
12600
13200
13800
14400
15000
15600
16200
16800
17400
18000
18600
19200
19800
20400
21000
21600
22200
22800
23400
24000
24600
25200
25800
26400
27000
27600
28200
28800
29400
30000
30600
31200
31800
32400
33000

```

33600  
34200  
34800  
35400  
36000  
36600  
37200  
37800  
38400  
39000  
39600  
40200  
40800  
41400  
42000  
42600  
43200  
43800  
44400  
45000  
45600  
46200  
46800  
47400  
48000  
48600  
49200  
49800  
50400  
51000  
51600  
52200  
52800  
53400  
54000  
54600  
55200  
55800  
56400  
57000  
57600  
58200  
58800  
59400  
60000  
60600  
61200  
61800  
62400  
63000  
63600  
64200  
64800  
65400  
66000  
66600  
67200  
67800  
68400  
69000  
69600  
70200  
70800  
71400  
72000  
72600  
73200  
73800  
74400  
75000  
75600  
76200  
76800  
77400  
78000  
78600  
79200  
79800  
80400  
81000  
81600  
82200  
82800  
83400  
84000  
84600  
85200  
85800  
86400  
87000  
87600  
88200

88800  
89400  
90000  
90600  
91200  
91800  
92400  
93000  
93600  
94200  
94800  
95400  
96000  
96600  
97200  
97800  
98400  
99000  
99600  
100200  
100800  
101400  
102000  
102600  
103200  
103800  
104400  
105000  
105600  
106200  
106800  
107400  
108000  
108600  
109200  
109800  
110400  
111000  
111600  
112200  
112800  
113400  
114000  
114600  
115200  
115800  
116400  
117000  
117600  
118200  
118800  
119400  
120000  
120600  
121200  
121800  
122400  
123000  
123600  
124200  
124800  
125400  
126000  
126600  
127200  
127800  
128400  
129000  
129600  
130200  
130800  
131400  
132000  
132600  
133200  
133800  
134400  
135000  
135600  
136200  
136800  
137400  
138000  
138600  
139200  
139800  
140400  
141000  
141600  
142200  
142800  
143400

144000  
144600  
145200  
145800  
146400  
147000  
147600  
148200  
148800  
149400  
150000  
150600  
151200  
151800  
152400  
153000  
153600  
154200  
154800  
155400  
156000  
156600  
157200  
157800  
158400  
159000  
159600  
160200  
160800  
161400  
162000  
162600  
163200  
163800  
164400  
165000  
165600  
166200  
166800  
167400  
168000  
168600  
169200  
169800  
170400  
171000  
171600  
172200  
172800  
173400  
174000  
174600  
175200  
175800  
176400  
177000  
177600  
178200  
178800  
179400  
180000  
180600  
181200  
181800  
182400  
183000  
183600  
184200  
184800  
185400  
186000  
186600  
187200  
187800  
188400  
189000  
189600  
190200  
190800  
191400  
192000  
192600  
193200  
193800  
194400  
195000  
195600  
196200  
196800  
197400  
198000  
198600

199200  
199800  
200400  
201000  
201600  
202200  
202800  
203400  
204000  
204600  
205200  
205800  
206400  
207000  
207600  
208200  
208800  
209400  
210000  
210600  
211200  
211800  
212400  
213000  
213600  
214200  
214800  
215400  
216000  
216600  
217200  
217800  
218400  
219000  
219600  
220200  
220800  
221400  
222000  
222600  
223200  
223800  
224400  
225000  
225600  
226200  
226800  
227400  
228000  
228600  
229200  
229800  
230400  
231000  
231600  
232200  
232800  
233400  
234000  
234600  
235200  
235800  
236400  
237000  
237600  
238200  
238800  
239400  
240000  
240600  
241200  
241800  
242400  
243000  
243600  
244200  
244800  
245400  
246000  
246600  
247200  
247800  
248400  
249000  
249600  
250200  
250800  
251400  
252000  
252600  
253200  
253800



31.11  
31.08  
31.12  
31.16  
31.18  
31.21  
31.25  
31.23  
31.26  
31.29  
31.29  
31.32  
31.35  
31.36  
31.38  
31.38  
31.4  
31.41  
31.41  
31.43  
31.45  
31.47  
31.45  
31.46  
31.53  
31.57  
31.55  
31.52  
31.61  
31.61  
31.62  
31.58  
31.56  
31.62  
31.64  
31.62  
31.63  
31.67  
31.65  
31.66  
31.69  
31.69  
31.69  
31.69  
31.75  
31.75  
31.74  
31.8  
31.82  
31.83  
31.83  
31.87  
31.86  
31.87  
31.9  
31.88  
31.89  
31.91  
31.92  
31.92  
31.92  
31.95  
31.97  
31.99  
32.01  
32.05  
32.07  
32.11  
32.12  
32.13  
32.13  
32.17  
32.2  
32.24  
32.24  
32.28  
32.32  
32.28  
32.27  
32.31  
32.31  
32.33  
32.34  
32.37  
32.4  
32.4  
32.41  
32.42  
32.43  
32.45  
32.46  
32.47



32.46  
32.5  
32.48  
32.5  
32.49  
32.49  
32.47  
32.47  
32.44  
32.45  
32.46  
32.46  
32.47  
32.47  
32.47  
32.47  
32.57  
32.59  
32.6  
32.67  
32.65  
32.67  
32.7  
32.7  
32.69  
32.69  
32.67  
32.7  
32.72  
32.72  
32.71  
32.71  
32.71  
32.71  
32.7  
32.72  
32.73  
32.76  
32.79  
32.83  
32.79  
32.83  
32.86  
32.87  
32.9  
32.87  
32.89  
32.87  
32.86  
32.87  
32.88  
32.91  
32.94  
32.91  
32.89  
32.9  
32.89  
32.95  
32.94  
32.96  
32.95  
32.95  
32.95  
32.94  
32.95  
32.95  
32.95  
32.97  
32.96  
32.95  
32.93  
32.96  
33.01  
33  
33  
33  
32.96  
32.94  
32.97  
32.93  
32.97  
32.95  
33  
32.96  
33.06  
33.05  
33.05  
33.01  
33  
32.95  
32.97  
33.06  
33.06

33.08  
33.03  
33.04  
33.04  
33  
33  
32.99  
33.05  
33.05  
33.05  
33.06  
33.06  
33.08  
33.08  
33.06  
33.07  
33.08  
33.09  
33.11  
33.11  
33.11  
33.12  
33.14  
33.13  
33.15  
33.18  
33.2  
33.27  
33.27  
33.24  
33.27  
33.22  
33.25  
33.26  
33.29  
33.31  
33.3  
33.35  
33.33  
33.34  
33.32  
33.33  
33.35  
33.34  
33.36  
33.38  
33.38  
33.39  
33.39  
33.38  
33.39  
33.41  
33.41  
33.41  
33.42  
33.41  
33.43  
33.34  
33.41  
33.37  
33.37  
33.39  
33.38  
33.39  
33.46  
33.46  
33.45  
33.47  
33.5  
33.53  
33.5  
33.54  
33.56  
33.56  
33.62  
33.55  
33.55  
33.56  
33.57  
33.6  
33.63  
33.58  
33.58  
33.58  
33.6  
33.64  
33.68  
33.65  
33.64  
33.66  
33.7  
33.66

```

33.68
33.7
33.65
33.65
33.65
33.64
33.66
33.65
33.64
33.65
33.67
33.68
33.71
33.69
33.72
33.72
33.74
33.73
33.75
33.77
33.75
33.78
33.79
33.76
33.78
33.78
33.75
33.8
33.74
33.71
33.73
33.72
33.72
33.7
33.69
33.65
33.67
33.72
33.65
33.69
33.62
33.66
33.67
33.66
33.63
33.64
33.62
33.65
33.66
33.73
33.64
33.64
33.64
33.61
33.63
33.59
33.58
33.61
33.59
33.57
33.59
33.63
33.65
33.64
33.66
33.67
33.68
33.66
33.68
33.65
33.66
33.67
33.68
33.67</values>
  </curve>
</curves>
</OpenGeoSysProject>

```



# Παράρτημα Ε΄

## Προσομοίωση δοκιμής θερμικής απόκρισης γεωεναλλάκτη ομοαξονικού τύπου

- Κύριο εκτελέσιμο αρχείο OpenGeoSys

```
<?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1"?>
<OpenGeoSysProject>
  <mesh>TRT2.vtu</mesh>
  <geometry>TRT2.gml</geometry>
  <processes>
    <process>
      <name>HeatTransportBHE</name>
      <type>HEAT_TRANSPORT_BHE</type>
      <integration_order>2</integration_order>
      <process_variables>
        <process_variable>temperature_soil</process_variable>
        <process_variable>temperature_BHE0</process_variable>
      </process_variables>
      <borehole_heat_exchangers>
        <borehole_heat_exchanger>
          <type>CXA</type>
          <flow_and_temperature_control>
            <type>TemperatureCurveConstantFlow</type>
            <flow_rate>5.7778e-4</flow_rate>
            <temperature_curve>inflow_temperature</temperature_curve>
          </flow_and_temperature_control>
          <borehole>
            <length>50.0</length>
            <diameter>0.11</diameter>
          </borehole>
          <grout>
            <density>1000</density>
            <porosity>0.0</porosity>
            <heat_capacity>4180</heat_capacity>
            <thermal_conductivity>1</thermal_conductivity>
          </grout>
          <pipes>
            <outer>
              <diameter> 0.076</diameter>
              <wall_thickness>0.0045</wall_thickness>
              <wall_thermal_conductivity>1.6</wall_thermal_conductivity>
            </outer>
            <inner>
              <diameter>0.032</diameter>
              <wall_thickness>0.0029</wall_thickness>
              <wall_thermal_conductivity>0.43</wall_thermal_conductivity>
            </inner>
            <longitudinal_dispersion_length>0.001</longitudinal_dispersion_length>
          </pipes>
          <refrigerant>
            <density>1000</density>
            <viscosity>0.00114</viscosity>
            <specific_heat_capacity>4138.0</specific_heat_capacity>
            <thermal_conductivity>0.598</thermal_conductivity>
            <reference_temperature>20</reference_temperature>
          </refrigerant>
        </borehole_heat_exchanger>
      </borehole_heat_exchangers>
    </process>
  </processes>
</OpenGeoSysProject>
```

```

</processes>
<media>
  <medium id="0">
    <phases>
      <phase>
        <type>AqueousLiquid</type>
        <properties>
          <property>
            <name>phase_velocity</name>
            <type>Constant</type>
            <value>0 0 0</value>
          </property>
          <property>
            <name>specific_heat_capacity</name>
            <type>Constant</type>
            <value>0</value>
          </property>
          <property>
            <name>density</name>
            <type>Constant</type>
            <value>0</value>
          </property>
        </properties>
      </phase>
      <phase>
        <type>Solid</type>
        <properties>
          <property>
            <name>specific_heat_capacity</name>
            <type>Constant</type>
            <value>1600</value>
          </property>
          <property>
            <name>density</name>
            <type>Constant</type>
            <value>2100</value>
          </property>
        </properties>
      </phase>
      <phase>
        <type>Gas</type>
        <properties>
          <property>
            <name>specific_heat_capacity</name>
            <type>Constant</type>
            <value>718</value>
          </property>
          <property>
            <name>density</name>
            <type>Constant</type>
            <value>1292</value>
          </property>
        </properties>
      </phase>
    </phases>
    <properties>
      <property>
        <name>porosity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>0.4</value>
      </property>
      <property>
        <name>thermal_conductivity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>1</value>
      </property>
      <property>
        <name>thermal_longitudinal_dispersivity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>0</value>
      </property>
      <property>
        <name>thermal_transversal_dispersivity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>0</value>
      </property>
    </properties>
  </medium>
  <medium id="1">
    <phases>
      <phase>
        <type>AqueousLiquid</type>
        <properties>
          <property>
            <name>phase_velocity</name>
            <type>Constant</type>
            <value>0 0 0</value>
          </property>
          <property>
            <name>specific_heat_capacity</name>
            <type>Constant</type>
            <value>0</value>
          </property>
        </properties>
      </phase>
    </phases>
  </medium>
</media>

```

```

        </property>
        <property>
            <name>density</name>
            <type>Constant</type>
            <value>0</value>
        </property>
    </properties>
</phase>
<phase>
    <type>Solid</type>
    <properties>
        <property>
            <name>specific_heat_capacity</name>
            <type>Constant</type>
            <value>3400</value>
        </property>
        <property>
            <name>density</name>
            <type>Constant</type>
            <value>1200</value>
        </property>
    </properties>
</phase>
<phase>
    <type>Gas</type>
    <properties>
        <property>
            <name>specific_heat_capacity</name>
            <type>Constant</type>
            <value>718</value>
        </property>
        <property>
            <name>density</name>
            <type>Constant</type>
            <value>1292</value>
        </property>
    </properties>
</phase>
</phases>
<properties>
    <property>
        <name>porosity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>0.2</value>
    </property>
    <property>
        <name>thermal_conductivity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>3.5</value>
    </property>
    <property>
        <name>thermal_longitudinal_dispersivity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>0</value>
    </property>
    <property>
        <name>thermal_transversal_dispersivity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>0</value>
    </property>
</properties>
</medium>
<medium id="2">
    <phases>
        <phase>
            <type>AqueousLiquid</type>
            <properties>
                <property>
                    <name>phase_velocity</name>
                    <type>Constant</type>
                    <value>0 0 0</value>
                </property>
                <property>
                    <name>specific_heat_capacity</name>
                    <type>Constant</type>
                    <value>4200</value>
                </property>
                <property>
                    <name>density</name>
                    <type>Constant</type>
                    <value>1000</value>
                </property>
            </properties>
        </phase>
        <phase>
            <type>Solid</type>
            <properties>
                <property>
                    <name>specific_heat_capacity</name>
                    <type>Constant</type>
                    <value>2500</value>
                </property>
            </properties>
        </phase>
    </phases>

```

```

        <property>
          <name>density</name>
          <type>Constant</type>
          <value>2700</value>
        </property>
      </properties>
    </phase>
    <phase>
      <type>Gas</type>
      <properties>
        <property>
          <name>specific_heat_capacity</name>
          <type>Constant</type>
          <value>718</value>
        </property>
        <property>
          <name>density</name>
          <type>Constant</type>
          <value>1292</value>
        </property>
      </properties>
    </phase>
  </phases>
  <properties>
    <property>
      <name>porosity</name>
      <type>Constant</type>
      <value>0.17</value>
    </property>
    <property>
      <name>thermal_conductivity</name>
      <type>Constant</type>
      <value>2.6</value>
    </property>
    <property>
      <name>thermal_longitudinal_dispersivity</name>
      <type>Constant</type>
      <value>0</value>
    </property>
    <property>
      <name>thermal_transversal_dispersivity</name>
      <type>Constant</type>
      <value>0</value>
    </property>
  </properties>
</medium>
</media>
<time_loop>
  <processes>
    <process ref="HeatTransportBHE">
      <nonlinear_solver>basic_picard</nonlinear_solver>
      <convergence_criterion>
        <type>DeltaX</type>
        <norm_type>NORM2</norm_type>
        <reitol>1e-10</reitol>
      </convergence_criterion>
      <time_discretization>
        <type>BackwardEuler</type>
      </time_discretization>
      <time_stepping>
        <type>FixedTimeStepping</type>
        <t_initial> 0.0 </t_initial>
        <!-- use the following for full simulation
        <t_end> 186420 </t_end>
        -->
        <t_end> 258600</t_end>
        <timesteps>
          <!-- use the following for full simulation
          <pair><repeat>3107</repeat><delta_t>60</delta_t></pair>
          -->
          <pair>
            <repeat>431</repeat>
            <delta_t>600</delta_t>
          </pair>
        </timesteps>
      </time_stepping>
    </process>
  </processes>
  <output>
    <type>VTK</type>
    <prefix>beierCXA</prefix>
    <timesteps>
      <pair>
        <repeat> 1</repeat>
        <each_steps> 1 </each_steps>
      </pair>
    </timesteps>
    <variables>
      <variable>temperature_soil</variable>
      <variable>temperature_BHE0</variable>
    </variables>
  </output>

```



```

</time_loop>
<parameters>
  <parameter>
    <name>T0</name>
    <type>Constant</type>
    <value>22.91</value>
  </parameter>
  <parameter>
    <name>T0_BHE0</name>
    <type>Constant</type>
    <values>23.78 22.04 22.91</values>
  </parameter>
</parameters>
<process_variables>
  <process_variable>
    <name>temperature_soil</name>
    <components>1</components>
    <order>1</order>
    <initial_condition>T0</initial_condition>
    <boundary_conditions>
      </boundary_conditions>
    </process_variable>
  <process_variable>
    <name>temperature_BHE0</name>
    <components>3</components>
    <order>1</order>
    <initial_condition>T0_BHE0</initial_condition>
  </process_variable>
</process_variables>
<nonlinear_solvers>
  <nonlinear_solver>
    <name>basic_picard</name>
    <type>Picard</type>
    <max_iter>100</max_iter>
    <linear_solver>general_linear_solver</linear_solver>
  </nonlinear_solver>
</nonlinear_solvers>
<linear_solvers>
  <linear_solver>
    <name>general_linear_solver</name>
    <lis>-i cg -p jacobi -tol 1e-16 -maxiter 10000</lis>
    <eigen>
      <solver_type>BiCGSTAB</solver_type>
      <precon_type>ILUT</precon_type>
      <max_iteration_step>1000</max_iteration_step>
      <error_tolerance>1e-16</error_tolerance>
    </eigen>
    <petsc>
      <prefix>gw</prefix>
      <parameters>-gw_ksp_type cg -gw_pc_type bjacobi -gw_ksp_rtol 1e-16 -gw_ksp_max_it 10000</parameters>
    </petsc>
  </linear_solver>
</linear_solvers>
<curves>
  <curve>
    <name>inflow_temperature</name>
    <coords>600
1200
1800
2400
3000
3600
4200
4800
5400
6000
6600
7200
7800
8400
9000
9600
10200
10800
11400
12000
12600
13200
13800
14400
15000
15600
16200
16800
17400
18000
18600
19200
19800
20400
21000
21600

```

22200  
22800  
23400  
24000  
24600  
25200  
25800  
26400  
27000  
27600  
28200  
28800  
29400  
30000  
30600  
31200  
31800  
32400  
33000  
33600  
34200  
34800  
35400  
36000  
36600  
37200  
37800  
38400  
39000  
39600  
40200  
40800  
41400  
42000  
42600  
43200  
43800  
44400  
45000  
45600  
46200  
46800  
47400  
48000  
48600  
49200  
49800  
50400  
51000  
51600  
52200  
52800  
53400  
54000  
54600  
55200  
55800  
56400  
57000  
57600  
58200  
58800  
59400  
60000  
60600  
61200  
61800  
62400  
63000  
63600  
64200  
64800  
65400  
66000  
66600  
67200  
67800  
68400  
69000  
69600  
70200  
70800  
71400  
72000  
72600  
73200  
73800  
74400  
75000  
75600  
76200  
76800

77400  
78000  
78600  
79200  
79800  
80400  
81000  
81600  
82200  
82800  
83400  
84000  
84600  
85200  
85800  
86400  
87000  
87600  
88200  
88800  
89400  
90000  
90600  
91200  
91800  
92400  
93000  
93600  
94200  
94800  
95400  
96000  
96600  
97200  
97800  
98400  
99000  
99600  
100200  
100800  
101400  
102000  
102600  
103200  
103800  
104400  
105000  
105600  
106200  
106800  
107400  
108000  
108600  
109200  
109800  
110400  
111000  
111600  
112200  
112800  
113400  
114000  
114600  
115200  
115800  
116400  
117000  
117600  
118200  
118800  
119400  
120000  
120600  
121200  
121800  
122400  
123000  
123600  
124200  
124800  
125400  
126000  
126600  
127200  
127800  
128400  
129000  
129600  
130200  
130800  
131400  
132000

132600  
133200  
133800  
134400  
135000  
135600  
136200  
136800  
137400  
138000  
138600  
139200  
139800  
140400  
141000  
141600  
142200  
142800  
143400  
144000  
144600  
145200  
145800  
146400  
147000  
147600  
148200  
148800  
149400  
150000  
150600  
151200  
151800  
152400  
153000  
153600  
154200  
154800  
155400  
156000  
156600  
157200  
157800  
158400  
159000  
159600  
160200  
160800  
161400  
162000  
162600  
163200  
163800  
164400  
165000  
165600  
166200  
166800  
167400  
168000  
168600  
169200  
169800  
170400  
171000  
171600  
172200  
172800  
173400  
174000  
174600  
175200  
175800  
176400  
177000  
177600  
178200  
178800  
179400  
180000  
180600  
181200  
181800  
182400  
183000  
183600  
184200  
184800  
185400  
186000  
186600  
187200

187800  
188400  
189000  
189600  
190200  
190800  
191400  
192000  
192600  
193200  
193800  
194400  
195000  
195600  
196200  
196800  
197400  
198000  
198600  
199200  
199800  
200400  
201000  
201600  
202200  
202800  
203400  
204000  
204600  
205200  
205800  
206400  
207000  
207600  
208200  
208800  
209400  
210000  
210600  
211200  
211800  
212400  
213000  
213600  
214200  
214800  
215400  
216000  
216600  
217200  
217800  
218400  
219000  
219600  
220200  
220800  
221400  
222000  
222600  
223200  
223800  
224400  
225000  
225600  
226200  
226800  
227400  
228000  
228600  
229200  
229800  
230400  
231000  
231600  
232200  
232800  
233400  
234000  
234600  
235200  
235800  
236400  
237000  
237600  
238200  
238800  
239400  
240000  
240600  
241200  
241800  
242400

```

243000
243600
244200
244800
245400
246000
246600
247200
247800
248400
249000
249600
250200
250800
251400
252000
252600
253200
253800
254400
255000
255600
256200
256800
257400
258600</coords>
                                <values>22.62
23.78
24.57
25.22
25.77
26.21
26.57
26.91
27.23
27.52
27.78
28.04
28.29
28.47
28.65
28.82
29.01
29.2
29.16
29.45
29.5
29.68
29.79
29.91
30.02
30.16
30.28
30.39
30.45
30.55
30.66
30.76
30.84
30.92
30.97
31.07
31.13
31.17
31.23
31.3
31.35
31.29
31.15
31.32
31.47
31.54
31.62
31.69
31.76
31.79
31.84
31.9
31.93
31.97
31.97
31.99
32.05
32.08
32.06
32.1
32.15
32.18
32.02
32.13
32.11
32.24

```

32.12  
32.28  
32.29  
32.34  
32.38  
32.33  
32.26  
32.46  
32.51  
32.5  
32.52  
32.57  
32.61  
32.6  
32.68  
32.76  
32.8  
32.86  
32.9  
32.94  
32.99  
33.01  
33.04  
33.03  
33.06  
33.1  
33.13  
33.15  
33.18  
33.01  
33.14  
33.17  
33.21  
33.26  
33.27  
33.31  
33.3  
33.35  
33.38  
33.29  
33.35  
33.38  
33.41  
33.44  
33.45  
33.48  
33.49  
33.51  
33.52  
33.55  
33.55  
33.58  
33.61  
33.63  
33.64  
33.64  
33.64  
33.67  
33.71  
33.72  
33.75  
33.7  
33.75  
33.74  
33.75  
33.75  
33.78  
33.8  
33.83  
33.87  
33.89  
33.9  
33.91  
33.92  
33.93  
33.94  
33.97  
34.01  
34.01  
34.03  
34.04  
34.05  
34.09  
34.1  
33.85  
34.02  
34.07  
34.1  
34.15  
34.17  
34.21

34.22  
34.24  
34.27  
34.29  
34.32  
34.31  
34.32  
34.32  
34.32  
34.31  
34.34  
34.33  
34.33  
34.35  
34.36  
34.37  
34.38  
34.39  
34.39  
34.4  
34.41  
34.41  
34.41  
34.41  
34.41  
34.39  
34.39  
34.43  
34.42  
34.42  
34.44  
34.43  
34.43  
34.44  
34.46  
34.48  
34.48  
34.52  
34.54  
34.56  
34.58  
34.61  
34.62  
34.62  
34.6  
34.64  
34.64  
34.65  
34.67  
34.71  
34.71  
34.76  
34.77  
34.77  
34.77  
34.79  
34.78  
34.76  
34.79  
34.81  
34.79  
34.82  
34.83  
34.84  
34.85  
34.86  
34.87  
34.9  
34.91  
34.94  
34.97  
34.98  
34.99  
34.98  
34.98  
35  
35.01  
35.01  
35.05  
35.08  
35.06  
35.07  
35.05  
35.09  
35.09  
35.11  
35.12  
35.15  
35.13  
35.16  
35.17  
35.19



35.2  
35.21  
35.21  
35.21  
35.22  
35.24  
35.25  
35.25  
35.25  
35.28  
35.31  
35.3  
35.33  
35.33  
35.33  
35.35  
35.31  
35.31  
35.3  
35.29  
35.28  
35.27  
35.28  
35.31  
35.35  
35.38  
35.38  
35.41  
35.39  
35.38  
35.4  
35.42  
35.41  
35.43  
35.43  
35.4  
35.4  
35.4  
35.39  
35.43  
35.42  
35.42  
35.47  
35.51  
35.53  
35.56  
35.58  
35.59  
35.61  
35.61  
35.65  
35.65  
35.6  
35.58  
35.59  
35.62  
35.64  
35.63  
35.66  
35.66  
35.7  
35.7  
35.73  
35.71  
35.76  
35.76  
35.78  
35.8  
35.78  
35.8  
35.79  
35.77  
35.77  
35.76  
35.74  
35.74  
35.71  
35.72  
35.7  
35.7  
35.71  
35.7  
35.74  
35.75  
35.78  
35.79  
35.8  
35.8  
35.82  
35.83  
35.83  
35.83

```

35.83
35.84
35.85
35.88
35.9
35.87
35.88
35.9
35.9
35.92
35.91
35.92
35.88
35.86
35.85
35.86
35.85
35.85
35.86
35.87
35.86
35.87
35.88
37.09213187
37.11013573
37.1281396
37.14614346
37.16414733
37.18215119
37.20015506
37.21815892
37.23616278
37.25416665
37.27217051
37.29017438
37.30817824
37.32618211
37.34418597
37.36218984
37.3801937
37.39819757
37.41620143
37.43420529
37.45220916
37.47021302
37.48821689
37.50622075
37.52422462
37.54222848
37.56023235
37.57823621
37.59624008
37.61424394
37.6322478
37.65025167
37.66825553
37.6862594
37.70426326
37.72226713
37.74027099
37.75827486
37.77627872
37.79428259
37.81228645
37.83029031
37.84829418
37.86629804
37.88430191
37.90230577
37.92030964
37.9383135
37.95631737
37.97432123
37.9923251
38.01032896
38.02833282
38.04633669
38.06434055
38.08234442
38.10034828
38.11835215
38.13635601
38.15435988
38.17236374
38.1903676
38.20837147
38.22637533
38.2443792</values>
  </curve>
</curves>
</OpenGeoSysProject>

```

# Παράρτημα '

## Προσομοίωση δοκιμής θερμικής απόκρισης γεωεναλλάκτη ελικοειδούς τύπου

- Κύριο εκτελέσιμο αρχείο OpenGeoSys

```
<?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1"?>
<OpenGeoSysProject>
  <mesh>TRT3.vtu</mesh>
  <geometry>TRT3.gml</geometry>
  <processes>
    <process>
      <name>HeatTransportBHE</name>
      <type>HEAT_TRANSPORT_BHE</type>
      <integration_order>2</integration_order>
      <process_variables>
        <process_variable>temperature_soil</process_variable>
        <process_variable>temperature_BHE0</process_variable>
      </process_variables>
      <borehole_heat_exchangers>
        <borehole_heat_exchanger>
          <type>1U</type>
          <flow_and_temperature_control>
            <type>TemperatureCurveConstantFlow</type>
            <flow_rate>2.797e-4</flow_rate>
            <temperature_curve>inflow_temperature</temperature_curve>
          </flow_and_temperature_control>
          <borehole>
            <length>15</length>
            <diameter>0.40005</diameter>
          </borehole>
          <grout>
            <density>1655.0</density>
            <porosity>0.0</porosity>
            <heat_capacity>920.0</heat_capacity>
            <thermal_conductivity>0.41</thermal_conductivity>
          </grout>
          <pipes>
            <inlet>
              <diameter> 0.025</diameter>
              <wall_thickness>0.0037</wall_thickness>
              <wall_thermal_conductivity>0.42</wall_thermal_conductivity>
            </inlet>
            <outlet>
              <diameter>0.025</diameter>
              <wall_thickness>0.0037</wall_thickness>
              <wall_thermal_conductivity>0.42</wall_thermal_conductivity>
            </outlet>
            <distance_between_pipes>0.29247</distance_between_pipes>
            <longitudinal_dispersion_length>0.001</longitudinal_dispersion_length>
          </pipes>
          <refrigerant>
            <density>1000</density>
            <viscosity>0.001</viscosity>
            <specific_heat_capacity>4138.0</specific_heat_capacity>
            <thermal_conductivity>0.606</thermal_conductivity>
            <reference_temperature>20</reference_temperature>
          </refrigerant>
        </borehole_heat_exchanger>
      </borehole_heat_exchangers>
    </process>
  </processes>
</OpenGeoSysProject>
```

```

</processes>
<media>
  <medium id="0">
    <phases>
      <phase>
        <type>AqueousLiquid</type>
        <properties>
          <property>
            <name>phase_velocity</name>
            <type>Constant</type>
            <value>0 0 0</value>
          </property>
          <property>
            <name>specific_heat_capacity</name>
            <type>Constant</type>
            <value>0</value>
          </property>
          <property>
            <name>density</name>
            <type>Constant</type>
            <value>0</value>
          </property>
        </properties>
      </phase>
      <phase>
        <type>Solid</type>
        <properties>
          <property>
            <name>specific_heat_capacity</name>
            <type>Constant</type>
            <value>1600</value>
          </property>
          <property>
            <name>density</name>
            <type>Constant</type>
            <value>2100</value>
          </property>
        </properties>
      </phase>
      <phase>
        <type>Gas</type>
        <properties>
          <property>
            <name>specific_heat_capacity</name>
            <type>Constant</type>
            <value>718</value>
          </property>
          <property>
            <name>density</name>
            <type>Constant</type>
            <value>1292</value>
          </property>
        </properties>
      </phase>
    </phases>
    <properties>
      <property>
        <name>porosity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>0.4</value>
      </property>
      <property>
        <name>thermal_conductivity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>1</value>
      </property>
      <property>
        <name>thermal_longitudinal_dispersivity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>0</value>
      </property>
      <property>
        <name>thermal_transversal_dispersivity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>0</value>
      </property>
    </properties>
  </medium>
  <medium id="1">
    <phases>
      <phase>
        <type>AqueousLiquid</type>
        <properties>
          <property>
            <name>phase_velocity</name>
            <type>Constant</type>
            <value>0 0 0</value>
          </property>
          <property>
            <name>specific_heat_capacity</name>
            <type>Constant</type>
            <value>0</value>
          </property>
        </properties>
      </phase>
    </phases>
  </medium>
</media>

```

```

        </property>
        <property>
            <name>density</name>
            <type>Constant</type>
            <value>0</value>
        </property>
    </properties>
</phase>
<phase>
    <type>Solid</type>
    <properties>
        <property>
            <name>specific_heat_capacity</name>
            <type>Constant</type>
            <value>3400</value>
        </property>
        <property>
            <name>density</name>
            <type>Constant</type>
            <value>1200</value>
        </property>
    </properties>
</phase>
<phase>
    <type>Gas</type>
    <properties>
        <property>
            <name>specific_heat_capacity</name>
            <type>Constant</type>
            <value>718</value>
        </property>
        <property>
            <name>density</name>
            <type>Constant</type>
            <value>1292</value>
        </property>
    </properties>
</phase>
</phases>
<properties>
    <property>
        <name>porosity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>0.2</value>
    </property>
    <property>
        <name>thermal_conductivity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>3.5</value>
    </property>
    <property>
        <name>thermal_longitudinal_dispersivity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>0</value>
    </property>
    <property>
        <name>thermal_transversal_dispersivity</name>
        <type>Constant</type>
        <value>0</value>
    </property>
</properties>
</medium>
</media>
<time_loop>
    <processes>
        <process ref="HeatTransportBHE">
            <nonlinear_solver>basic_picard</nonlinear_solver>
            <convergence_criterion>
                <type>DeltaX</type>
                <norm_type>NORM2</norm_type>
                <reitol>1e-10</reitol>
            </convergence_criterion>
            <time_discretization>
                <type>BackwardEuler</type>
            </time_discretization>
            <time_stepping>
                <type>FixedTimeStepping</type>
                <t_initial> 0.0 </t_initial>
                <!-- use the following for full simulation
                <t_end> 186420 </t_end>
                -->
                <t_end> 608400</t_end>
            <timesteps>
                <!-- use the following for full simulation
                <pair><repeat>3107</repeat><delta_t>60</delta_t></pair>
                -->
                <pair>
                    <repeat>169</repeat>
                    <delta_t>3600</delta_t>
                </pair>
            </timesteps>
        </time_stepping>
    </processes>

```

```

        </process>
    </processes>
    <output>
        <type>VTK</type>
        <prefix>beier_sandHeliCoidal</prefix>
        <timesteps>
            <pair>
                <repeat> 1</repeat>
                <each_steps> 1</each_steps>
            </pair>
        </timesteps>
        <variables>
            <variable>temperature_soil</variable>
            <variable>temperature_BHE0</variable>
        </variables>
    </output>
</time_loop>
<parameters>
    <parameter>
        <name>T0</name>
        <type>Constant</type>
        <value>22.18</value>
    </parameter>
    <parameter>
        <name>T0_BHE0</name>
        <type>Constant</type>
        <values>22.18 22.18 22.18 22.18 </values>
    </parameter>
</parameters>
<process_variables>
    <process_variable>
        <name>temperature_soil</name>
        <components>1</components>
        <order>1</order>
        <initial_condition>T0</initial_condition>
        <boundary_conditions>
            </boundary_conditions>
        </process_variable>
    <process_variable>
        <name>temperature_BHE0</name>
        <components>4</components>
        <order>1</order>
        <initial_condition>T0_BHE0</initial_condition>
    </process_variable>
</process_variables>
<nonlinear_solvers>
    <nonlinear_solver>
        <name>basic_picard</name>
        <type>Picard</type>
        <max_iter>100</max_iter>
        <linear_solver>general_linear_solver</linear_solver>
    </nonlinear_solver>
</nonlinear_solvers>
<linear_solvers>
    <linear_solver>
        <name>general_linear_solver</name>
        <lis>-i cg -p jacobi -tol 1e-16 -maxiter 10000</lis>
        <eigen>
            <solver_type>BiCGSTAB</solver_type>
            <precon_type>ILUT</precon_type>
            <max_iteration_step>1000</max_iteration_step>
            <error_tolerance>1e-16</error_tolerance>
        </eigen>
        <petsc>
            <prefix>gw</prefix>
            <parameters>-gw_ksp_type cg -gw_pc_type bjacobi -gw_ksp_rtol 1e-16 -gw_ksp_max_it 10000</parameters>
        </petsc>
    </linear_solver>
</linear_solvers>
<curves>
    <curve>
        <name>inflow_temperature</name>
        <coords>3600
7200
10800
14400
18000
21600
25200
28800
32400
36000
39600
43200
46800
50400
54000
57600
61200
64800
68400
72000

```

75600  
79200  
82800  
86400  
90000  
93600  
97200  
100800  
104400  
108000  
111600  
115200  
118800  
122400  
126000  
129600  
133200  
136800  
140400  
144000  
147600  
151200  
154800  
158400  
162000  
165600  
169200  
172800  
176400  
180000  
183600  
187200  
190800  
194400  
198000  
201600  
205200  
208800  
212400  
216000  
219600  
223200  
226800  
230400  
234000  
237600  
241200  
244800  
248400  
252000  
255600  
259200  
262800  
266400  
270000  
273600  
277200  
280800  
284400  
288000  
291600  
295200  
298800  
302400  
306000  
309600  
313200  
316800  
320400  
324000  
327600  
331200  
334800  
338400  
342000  
345600  
349200  
352800  
356400  
360000  
363600  
367200  
370800  
374400  
378000  
381600  
385200  
388800  
392400  
396000  
399600  
403200

```

406800
410400
414000
417600
421200
424800
428400
432000
435600
439200
442800
446400
450000
453600
457200
460800
464400
468000
471600
475200
478800
482400
486000
489600
493200
496800
500400
504000
507600
511200
514800
518400
522000
525600
529200
532800
536400
540000
543600
547200
550800
554400
558000
561600
565200
568800
572400
576000
579600
583200
586800
590400
594000
597600
601200
604800
608400</coords>
      <values>25.49
36.8
40.44
41.85
42.97
43.83
44.55
45.09
45.3
46.04
46.36
46.6
46.85
47.14
47.68
48.11
48.19
48.11
48.01
48.33
49.13
48.67
48.54
49.23
50.08
50.01
49.16
48.75
48.78
49.29
49.4
49.18
49.08
49.05
49.27

```



49.3  
49.19  
49.45  
49.63  
49.65  
49.67  
49.76  
49.75  
49.75  
49.62  
50.97  
51.64  
52.08  
52.22  
52.27  
52.27  
52.39  
52.79  
53.04  
53.07  
53.25  
53.39  
53.26  
53.39  
53.5  
53.55  
53.3  
53.47  
53.67  
53.87  
53.77  
53.65  
53.52  
53.62  
53.67  
53.51  
53.69  
53.59  
53.69  
53.98  
54.07  
54.03  
54.17  
54.33  
54.44  
54.48  
54.4  
54.59  
54.68  
54.63  
54.69  
54.9  
54.82  
54.9  
54.93  
54.91  
54.87  
54.59  
54.65  
54.82  
54.68  
54.74  
54.69  
54.55  
54.17  
54.52  
54.89  
55.01  
55.07  
55.08  
54.94  
55.15  
55.19  
55.26  
55.37  
55.42  
55.32  
55.43  
55.1  
55.08  
55.28  
55.18  
54.85  
54.63  
54.48  
54.38  
54.61  
55.12  
55.37  
55.45  
55.5  
55.45

```
55.39
55.52
55.71
55.65
55.78
55.73
55.79
55.89
55.92
55.89
55.98
56.14
56.19
56.22
56
55.87
55.89
56
55.93
56.13
56.34
56.33
56.49
56.34
56.17
56.26
56.25
56.21
56.4
56.38
56.46
56.59
56.59
56.55
56.57
56.47
56.33
56.36
56.13
56.24
56.34
56.27</values>
  </curve>
</curves>
</OpenGeoSysProject>
```