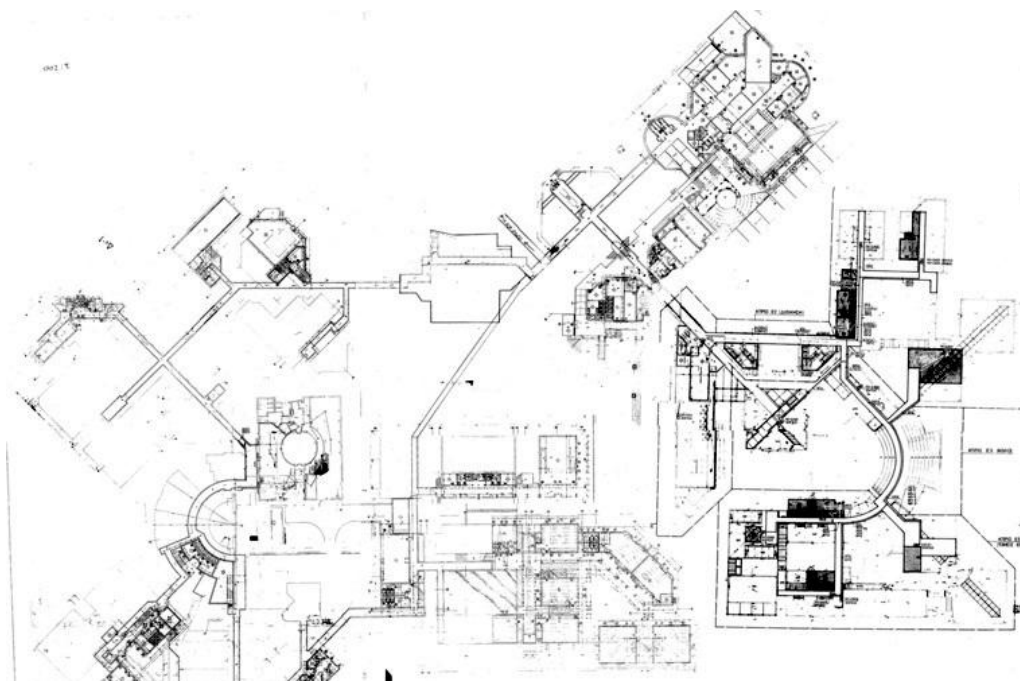


ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

*Ανάλυση συστήματος εναλλάκτη εδάφους – αέρα στα
κτίρια του Πολυτεχνείου Κρήτης*



Λιλλή Κατερίνα

Επιβλέπουσα: Δ. Κολοκοτσά

Χανιά 2016

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ πολύ όλους όσους – με την πολύτιμη βοήθειά τους – συνετέλεσαν ώστε να διεκπεραιωθεί η μεταπτυχιακή αυτή διατριβή και ιδιαίτερα την επιβλέπουσα καθηγήτρια Διονυσία Κολοκοτσά.

Περίληψη

Στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής πραγματοποιήθηκε η ανάλυση ενός συστήματος γεωθερμίας. Το σύστημα αυτό αποτελεί έναν earth to air heat exchanger (εναλλάκτης θερμότητας εδάφους/αέρα) για το οποίο χρησιμοποιήθηκαν ως αγωγοί μεταφοράς θερμότητας τα υπόγεια περάσματα του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η επιλογή της συγκεκριμένης τεχνολογίας στηρίχθηκε στη ύπαρξη δύο σημαντικών παραγόντων, στη συνεχή δίχως διακυμάνσεις παροχή ενέργειας καθ' όλη τη διάρκεια του έτους και στις υφιστάμενες εγκαταστάσεις του Πολυτεχνείου (υπόγεια περάσματα που συνδέουν τα κτίρια μεταξύ τους), γεγονός το οποίο εξασφάλισε μικρό κόστος επένδυσης. Με σκοπό την ορθότερη και πιο ολοκληρωμένη κατανόηση της εργασίας, στο κεφάλαιο 2 αναφέρονται βασικοί ορισμοί της γεωθερμίας και ιστορικά στοιχεία, ενώ επίσης περιγράφονται παρόμοια συστήματα και ο τρόπος λειτουργίας αυτών.

Τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της εργασίας για την μοντελοποίηση του εξεταζόμενου συστήματος είναι το EnergyPlus και το Google SketchUp. Στο Κεφάλαιο 3 παραθέτονται αναλυτικά στοιχεία για τη γεωμετρία και τα ενεργειακά χαρακτηριστικά του κτιρίου K3 του Πολυτεχνείου Κρήτης που μοντελοποιήθηκε, αλλά και για τον τρόπο εισαγωγής των παραμέτρων της μοντελοποίησης στο λογισμικό. Μετά την μοντελοποίηση του κτιρίου, δημιουργήθηκε ένα εικονικό μοντέλο γεωθερμίας, στο οποίο δόθηκαν ως δεδομένα εισόδου τα χαρακτηριστικά των υφιστάμενων υπόγειων αγωγών με σκοπό να υπολογιστούν οι μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες του αέρα μετά τη διέλευσή του από τον αγωγό. Στη συνέχεια οι θερμοκρασίες αυτές δόθηκαν ως δεδομένα εισόδου στον εξωτερικό εναλλάκτη της αντλίας θερμότητας (VRF) με σκοπό να υπολογιστούν τα ενεργειακά κέρδη. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε μέσω τροποποίησης του κώδικα του λογισμικού. Ο ακριβής τρόπος μοντελοποίησης περιγράφεται επίσης στο Κεφάλαιο 3.

Στη συνέχεια κρίθηκε απαραίτητο να εξεταστούν οι διαφοροποιήσεις των εξαγόμενων αποτελεσμάτων (μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες αέρα στους υπόγειους χώρους) μέσω παραμετρικών αναλύσεων. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν είναι το μήκος των αγωγών, το υλικό τους, το βάθος τοποθέτησής τους, οι εδαφικές συνθήκες σε συνδυασμό με την κλιματική ζώνη εφαρμογής του συστήματος και τέλος ο ρυθμός παροχής του αέρα μέσα στους αγωγούς. Τα εξαγόμενα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης περιγράφονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4.

Όπως προέκυψε από την ανάλυση η εφαρμογή του υπό μελέτη συστήματος προτείνεται λόγω του σημαντικού ενεργειακού κέρδους. Το βάθος εγκατάστασης των αγωγών μεταφοράς θερμότητας καθώς επίσης και οι εδαφικές συνθήκες αποτελούν τους δύο καθοριστικότερους παράγοντες τροποποίησης της θερμοκρασίας του αέρα που διέρχεται από τους αγωγούς και γι αυτό η συνεισφορά τους στο ενεργειακό κέρδος είναι σημαντική. Συγκεντρωτικά τα συμπεράσματα, τα οποία προέκυψαν, παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 5.

Abstract

By this master thesis presents the analysis of a geothermal system. This system is an earth to air heat exchanger in which were used the underground TUC passages as heat transfer pipes. The choice of this technology was based on the existence of two important factors; the continuous without fluctuations power supply throughout the year and the existing Polytechnic facilities (underground passages that connect the buildings). The latter secured a small investment costs. The Chapter 2 gives basic definitions of geothermal and historical data, while it describes similar systems and their function.

The software used in this context of modeling the system is the EnergyPlus and Google SketchUp. In Chapter 3 are given details of the geometry and the energy performance of the K3 TUC building. In addition, it describes how to enter the parameters of the modeling software. We created a virtual model of geothermal energy, in which were given as input the characteristics of the existing underground pipelines. Via this modeling we calculated the mean monthly temperatures of the air after passing the drain. These temperature data were given as input in the external heat exchanger of the heat pump (VRF) to calculate the energy gains. This procedure was performed by the modification of the internal software code. The exact modeling procedure is described in Chapter 3.

We examined the differences of the exported results (average monthly air temperatures in underground areas) via parametric analysis. The parameters considered were the length of the pipes, their hardware, their installation depth, the soil conditions in combination with the climate system application zone and the end of the air supply rate in the conduits. The exported results of this analysis are described in detail in Chapter 4.

As a result of this analysis, the application of the system under study is proposed due to its significant energy gain. The installation depth of the heat transfer pipes as well as the soil conditions, are the two decisive air temperature modifying agents passing through the ducts and therefore their contribution to the energy gain is important. Aggregated results have been generated are presented in Chapter 5.

Περιεχόμενα

1.	Εισαγωγή	2
1.1	Βιοκλιματικός σχεδιασμός και εναλλακτικά συστήματα ΑΠΕ	2
1.2	Νομοθεσία.....	4
1.2.1	Διεθνές νομοθετικό πλαίσιο	4
1.2.2	Εθνικό νομοθετικό πλαίσιο	5
2.	Γεωθερμία και εφαρμογές	8
2.1	Ορισμοί και βασικά χαρακτηριστικά	8
2.2	Ιστορικά στοιχεία	10
2.3	Θερμοκρασιακή κατανομή στο υπέδαφος	13
2.4	Εφαρμογές γεωθερμίας στα κτίρια.....	15
2.5	Αντλία θερμότητας.....	16
2.6	Γεωθερμικοί εναλλάκτες.....	18
2.6.1	Γεωεναλλάκτες κλειστού κυκλώματος.....	18
2.6.2	Γεωεναλλάκτες ανοιχτού κυκλώματος	19
3.	Ανάλυση συστήματος.....	22
3.1	Μεθοδολογία	22
3.2	Λογισμικά	23
3.3	Μοντελοποίηση κτιρίου	27
3.3.1	Περιβάλλον εφαρμογής προσομοιώσεων	27
3.3.2	Περιγραφή του υπό μελέτη κτιρίου	28
3.3.3	Μετεωρολογικά δεδομένα περιοχής	31
3.3.4	Εισαγωγή παραμέτρων	31
3.3.5	Τρισδιάστατη απεικόνιση κτιρίου	32
3.3.6	Επαλήθευση μοντέλου προσομοίωσης κτιρίου	34
3.4	Γεωεναλλάκτης εδάφους/αέρα – Earth Tube	35
3.4.1	Λογισμικό CalcSoilSurfTemp	36
3.4.2	Δεδομένα εισόδου	36
3.5	Τροποποίηση υφιστάμενου συστήματος ψύξης - θέρμανσης	41
3.5.1	Energy Management System (EMS)	41
3.5.2	Outdoor Air System Node Conditions	41

4.	Αποτελέσματα	44
4.1	Αποτελέσματα κτιρίου μελέτης	44
4.2	Αποτελέσματα παραμετρικών αναλύσεων.....	49
5.	Συμπεράσματα και προτάσεις	62
5.1	Συμπεράσματα κτιρίου μελέτης	62
5.2	Συμπεράσματα παραμετρικών αναλύσεων.....	63
5.3	Προτάσεις μελλοντικής έρευνας.....	64
6.	Βιβλιογραφία.....	66
7.	Παράρτημα Α.....	68

Περιεχόμενα Σχημάτων

Σχήμα 1.	Ποσοστά καταναλισκόμενης ενέργειας.....	2
Σχήμα 2.	Απλοποιημένη σχηματική απεικόνιση εξεταζόμενου συστήματος.....	3
Σχήμα 3.	Δημόσια λουτρά με χρήση θερμών πηγών στην Αγγλία (1ος αι. μ.Χ.).....	10
Σχήμα 4.	Η μηχανή που χρησιμοποιήθηκε στο Larderello το 1904 κατά την πρώτη πειραματική απόπειρα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμικό ατμό.	12
Σχήμα 5.	Η θερμοκρασία στη γη	13
Σχήμα 6.	Σχηματικό διάγραμμα μιας αντλίας θερμότητας που χρησιμοποιείται για θέρμανση.	16
Σχήμα 7.	Σχηματική απεικόνιση ενός συστήματος αβαθούς γεωθερμίας με κάθετο γεωεναλλάκτη (1) και οριζόντιο γεωεναλλάκτη (2).....	18
Σχήμα 8.	Σχηματική απεικόνιση ενός συστήματος αβαθούς γεωθερμίας με γεωεναλλάκτη ανοιχτού κυκλώματος.	20
Σχήμα 9.	Γενική δομή του Energy Plus	24
Σχήμα 10.	Η Πολυτεχνειούπολη σε σχέση με την πόλη των Χανίων (Συντεταγμένες: 35°31'58''N, 24°4'6''E)	27
Σχήμα 11.	Το περιβάλλον του Πολυτεχνείου.....	28
Σχήμα 12.	Δορυφορική εικόνα, του κτιρίου υπό μελέτη κτιρίου K3	28
Σχήμα 13.	Εγκάρσια τομή του κτιρίου K3 (όψη από ανατολικά).....	29
Σχήμα 14.	Κτίριο K3 και περιβάλλοντας χώρος.	29
Σχήμα 15.	Ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία και δείκτης καθαρότητας	31
Σχήμα 16.	Σχηματική απεικόνιση του συστήματος ψύξης – θέρμανσης (VRF) του εξεταζόμενου κτιρίου.....	32

Σχήμα 17. Τρισδιάστατη απεικόνιση του κτιρίου K3	33
Σχήμα 18. Τρισδιάστατη απεικόνιση του κτιρίου K3	33
Σχήμα 19. Υπόγειοι διάδρομοι πολυτεχνειούπολης.....	35
Σχήμα 20. Σύγκριση της θερμοκρασίας του αέρα του εξωτερικού περιβάλλοντος με τη θερμοκρασία του αέρα που εισέρχεται στο κτίριο μετά τη διέλευσή του από τους υπόγειους αγωγούς (Earth Tubes).....	45
Σχήμα 21. Σύγκριση των απαιτούμενων θερμικών φορτίων της υφιστάμενης κατάστασης (Baseline) με τα αντίστοιχα του υπό μελέτη EarthtoAir HX μοντέλου	46
Σχήμα 22. Σύγκριση των απαιτούμενων ψυκτικών φορτίων της υφιστάμενης κατάστασης (Baseline) με τα αντίστοιχα του υπό μελέτη EarthtoAir HX μοντέλου	46
Σχήμα 23. Εξοικονομούμενα θερμικά και ψυκτικά φορτία μετά την εφαρμογή του υπό μελέτη EarthtoAir HX μοντέλου	48
Σχήμα 24. Ενδεικτικό συγκριτικό διάγραμμα εισερχόμενων θερμοκρασιών αέρα μετά τη διέλευσή του από τους υπόγειους αγωγούς (Earth Tubes), στο υπό μελέτη κτίριο για τους συνδυασμούς (80, Σκ, 1), (120, Σκ, 1), (160, Σκ, 1)	51
Σχήμα 25. Ενδεικτικό συγκριτικό διάγραμμα εισερχόμενων θερμοκρασιών αέρα μετά τη διέλευσή του από τους υπόγειους αγωγούς (Earth Tubes), στο υπό μελέτη κτίριο για τους συνδυασμούς (80, Σκ, 1), (80, Χ, 1), (80, Πλ, 1)	51
Σχήμα 26. Ενδεικτικό συγκριτικό διάγραμμα εισερχόμενων θερμοκρασιών αέρα μετά τη διέλευσή του από τους υπόγειους αγωγούς (Earth Tubes), στο υπό μελέτη κτίριο για τους συνδυασμούς (80, Σκ, 1), (80, Σκ, 2), (80, Σκ, 3)	52
Σχήμα 27. Ενδεικτικό συγκριτικό διάγραμμα εισερχόμενων θερμοκρασιών αέρα μετά τη διέλευσή του από τους υπόγειους αγωγούς (Earth Tubes), στο υπό μελέτη κτίριο για τους συνδυασμούς (A, 1, 0.05), (A, 1, 0.1), (A, 1, 0.15)	54
Σχήμα 28. Ενδεικτικό συγκριτικό διάγραμμα εισερχόμενων θερμοκρασιών αέρα μετά τη διέλευσή του από τους υπόγειους αγωγούς (Earth Tubes), στο υπό μελέτη κτίριο για τους συνδυασμούς (A, 1, 0.05), (A, 2, 0.05), (A, 3, 0.05)	55
Σχήμα 31. Ενδεικτικό συγκριτικό διάγραμμα για την Χειμερινή και τη Θερινή περίοδο των μέσων διαφορών θερμοκρασιών αέρα μετά τη διέλευσή του από τους υπόγειους αγωγούς (Earth Tubes) σε σχέση με τις θερμοκρασίες του αέρα του εξωτερικού περιβάλλοντος. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε για όλες τις κλιματικές ζώνες	56
Σχήμα 29. Συγκριτικό διάγραμμα απαιτούμενων θερμικών φορτίων για τους συνδυασμούς παραμέτρων (A, 1, 0.05), (A, 2, 0.05), (A, 3, 0.05).....	57
Σχήμα 30. Συγκριτικό διάγραμμα απαιτούμενων ψυκτικών φορτίων για τους συνδυασμούς παραμέτρων (A, 1, 0.05), (A, 2, 0.05), (A, 3, 0.05).....	58
Σχήμα 32. Διάγραμμα ετήσιας εξοικονόμησης θερμικών και ψυκτικών φορτίων για κάθε κλιματική ζώνη	60

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1. Ενδεικτικές τιμές των θερμικών ιδιοτήτων ορισμένων υλικών (ΤΕΕ 2011)	14
Πίνακας 2. Αναμενόμενες αποδόσεις των κατακόρυφων γεωθερμικών εναλλακτών	19
Πίνακας 3. Αριθμός και μήκος γεωθερμικών εναλλακτών βάσει της θερμικής αγωγιμότητας του εδάφους (ΤΕΕ 2011)	19
Πίνακας 4. Βασικές κατηγορίες δεδομένων του EnergyPlus	25
Πίνακας 5. Λοιπές κατηγορίες δεδομένων του EnergyPlus	26
Πίνακας 6. Δομικά χαρακτηριστικών του κτιρίου K3 (αναφορά από πάνω προς τα κάτω και από έξω προς τα μέσα).	30
Πίνακας 7. Σύγκριση της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας αέρα του εξωτερικού περιβάλλοντος, με τη μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα που εισέρχεται στο κτίριο μετά τη διέλευσή του από τους υπόγειους αγωγούς (Earth Tubes)	44
Πίνακας 8. Σύγκριση των απαιτούμενων θερμικών και ψυκτικών φορτίων της υφιστάμενης κατάστασης (Baseline) με τα αντίστοιχα του υπό μελέτη EarthtoAir HX μοντέλου	45
Πίνακας 9. Παρουσίαση εξοικονομούμενων θερμικών και ψυκτικών φορτίων μετά την εφαρμογή του υπό μελέτη EarthtoAir HX μοντέλου	47
Πίνακας 10. Παρουσίαση αποτελεσμάτων παραμετρικής ανάλυσης ως προς το μήκος του αγωγού (M), το υλικό του αγωγού (Y) και το βάθος (B) εφαρμογής του από την επιφάνεια του εδάφους (M, Y, B). Τα αποτελέσματα αναφέρονται στις θερμοκρασίες του εισερχόμενου αέρα στο κτίριο, μετά τη διέλευσή του από τους υπόγειους αγωγούς (Earth Tubes) 49	
Πίνακας 11. Παρουσίαση αποτελεσμάτων παραμετρικής ανάλυσης ως προς την κλιματική ζώνη (Z), το βάθος (B) εφαρμογής του αγωγού από την επιφάνεια του εδάφους και την παροχή (Π) αέρα σχεδιασμού (Z, B, Π). Τα αποτελέσματα αναφέρονται στις θερμοκρασίες του εισερχόμενου αέρα στο κτίριο, μετά τη διέλευσή του από τους υπόγειους αγωγούς (Earth Tubes)	53
Πίνακας 12. Σύγκριση των εισερχόμενων θερμοκρασιών αέρα μετά τη διέλευσή του από τους υπόγειους αγωγούς (Earth Tubes), με τη θερμοκρασία του αέρα του εξωτερικού περιβάλλοντος. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε για όλες τις κλιματικές ζώνες	55
Πίνακας 13. Σύγκριση των απαιτούμενων θερμικών και ψυκτικών φορτίων της κλιματικής Ζώνης Α για τους συνδυασμούς (A, 1, 0.05), (A, 2, 0.05), (A, 3, 0.05), με τα αντίστοιχα απαιτούμενα φορτία του Baseline μοντέλου	57
Πίνακας 14. Σύγκριση των απαιτούμενων θερμικών και ψυκτικών φορτίων της κλιματικής Ζώνης Β για τους συνδυασμούς (B, 1, 0.05), (B, 2, 0.05), (B, 3, 0.05), με τα αντίστοιχα απαιτούμενα φορτία του Baseline μοντέλου	58

Πίνακας 15. Σύγκριση των απαιτούμενων θερμικών και ψυκτικών φορτίων της κλιματικής Ζώνης Γ για τους συνδυασμούς (Γ, 1, 0.05), (Γ, 2, 0.05), (Γ, 3, 0.05), με τα αντίστοιχα απαιτούμενα φορτία του Baseline μοντέλου 59

Πίνακας 16. Σύγκριση των απαιτούμενων θερμικών και ψυκτικών φορτίων της κλιματικής Ζώνης Δ για τους συνδυασμούς (Δ, 1, 0.05), (Δ, 2, 0.05), (Δ, 3, 0.05), με τα αντίστοιχα απαιτούμενα φορτία του Baseline μοντέλου 59

1.Εισαγωγή

1.1 Βιοκλιματικός σχεδιασμός και εναλλακτικά συστήματα ΑΠΕ

Η ιδέα των πράσινων κτιρίων έχει εξεγείρει το ενδιαφέρον των ερευνητών, στον τομέα της ενέργειας και των κατασκευών, ανά τον κόσμο. Τα πράσινα κτίρια είναι παραδείγματα εφαρμοσμένης οικολογίας, όπου οι σχεδιαστές αντιλαμβάνονται την οργάνωση και τη δομή των οικοσυστημάτων, ενώ οι επιδράσεις της αρχιτεκτονικής εξετάζονται από μια περιβαλλοντική σκοπιά. Με τη χρήση των εννοιών, των μεθόδων και της γλώσσας της οικολογίας, οι σχεδιαστές μπορούν να δημιουργήσουν αρχιτεκτονήματα, τα οποία εμπλέκονται σκόπιμα με το φυσικό περιβάλλον. Όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας των πράσινων κτιρίων, προτείνεται η μείωση ορυκτών καυσίμων, με κατάλληλη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. [1]

Βάσει της Οδηγίας 2010/31/ΕΕ “Κτίρια με σχεδόν μηδενική κατανάλωση ενέργειας”, ορίζονται τα κτίρια με πολύ υψηλή ενεργειακή απόδοση. Η σχεδόν μηδενική ή πολύ χαμηλή ποσότητα ενέργειας που απαιτείται, πρέπει να συνίσταται σε πολύ μεγάλο βαθμό σε ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές (Α.Π.Ε.), περιλαμβανομένης της παραγόμενης επιτόπου ή πλησίον του κτιρίου. Τα νέα αυτά ευρωπαϊκά δεδομένα τέθηκαν το 2009 όπου το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και Συμβούλιο αποφάσισε ότι όλα τα νέα κτίρια μετά το 2020, θα πρέπει να είναι μηδενικής κατανάλωσης και ορισμένα μάλιστα εξ’ αυτών (τα νέα κτίρια δηλαδή που στεγάζουν δημόσιες αρχές ή είναι ιδιοκτησίας τους) θα πρέπει να είναι ήδη από το 2018 [2].

Με την ολοένα μεγαλύτερη ανάγκη για καλύτερες συνθήκες σε συνδυασμό με τις λάθος πρακτικές του παρελθόντος στην κατασκευή των κτιρίων (διάτρητη μόνωση, κακό προσανατολισμό, έλλειψη σκιάστρων και νέων τεχνολογιών) η κατανάλωση ενέργειας αυξήθηκε με ραγδαίους ρυθμούς. Στην Ευρώπη ο κτιριακός τομέας ευθύνεται για το 40% της τελικής καταναλισκόμενης ενέργειας (Σχήμα 1), το 50% των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και το 35% των αερίων του θερμοκηπίου, με άμεσο αποτέλεσμα το φαινόμενο τις αστικής νησίδας, του φαινομένου του θερμοκηπίου αλλά και βασικός συντελεστής στην οικονομική κατάσταση των νοικοκυριών [3].



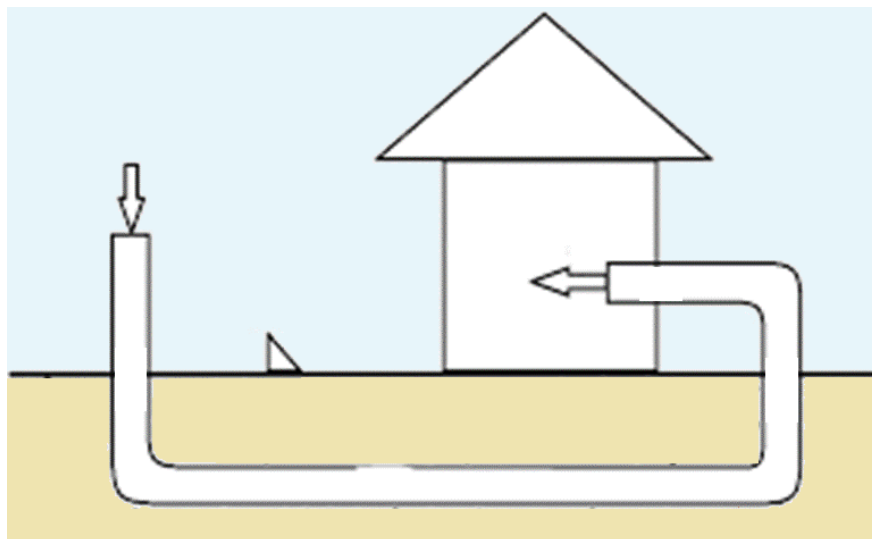
Σχήμα 1. Ποσοστά καταναλισκόμενης ενέργειας

Τα συνεχώς αυξανόμενα προβλήματα που δημιουργούνται από την λάθος διαχείριση των ενεργειακών αποθεμάτων λόγω της χρήσης παλαιών και ενεργοβόρων συσκευών, κακού

Ανάλυση συστήματος εναλλάκτη εδάφους – αέρα στα κτίρια του Πολυτεχνείου Κρήτης

σχεδιασμού συστημάτων ψύξης-θέρμανσης όπως επίσης και η υποβάθμιση του περιβάλλοντος, καθιστούν αναγκαία την λήψη μέτρων. Ο κτιριακός τομέας έχει επιπτώσεις στην κατανάλωση ενέργειας μακροπρόθεσμα και συνεπώς τα νέα κτίρια θα πρέπει να ικανοποιούν τις ελάχιστες απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης προσαρμοσμένες στο τοπικό κλίμα. Οι ορθές πρακτικές στον τομέα αυτόν θα πρέπει να αποσκοπούν στην βέλτιστη χρήση των παραγόντων που έχουν σχέση με τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης. Επειδή εν γένει δεν έχουν αξιοποιηθεί πλήρως οι δυνατότητες εφαρμογής εναλλακτικών συστημάτων ενεργειακού εφοδιασμού θα πρέπει να εξετασθεί η τεχνική, περιβαλλοντική και οικονομική σκοπιμότητα εναλλακτικών συστημάτων [4].

Στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής είναι η μελέτη ενός τέτοιου συστήματος. Πρόκειται για ένα εναλλακτικό σύστημα αβαθούς γεωθερμίας, το οποίο εφαρμόστηκε σε κτίριο του Πολυτεχνείου Κρήτης. Το σύστημα αυτό αποτελεί έναν earth to air heat exchanger (εναλλάκτης θερμότητας εδάφους/αέρα) (Σχήμα 2), για το οποίο χρησιμοποιήθηκαν ως αγωγοί τα υπόγεια περάσματα του Πολυτεχνείου έναντι των συμβατικών αγωγών μεταφοράς θερμότητας. Ουσιαστικά, εξετάστηκε η εκμετάλλευση των υπόγειων περασμάτων για πρόψυξη και προθέρμανση των χώρων. Επί του παρόντος, η τεχνολογία αυτή δεν κατατάσσεται στις πλέον διαδεδομένες, η επιλογή της όμως στηρίχθηκε στη ύπαρξη δύο σημαντικών παραγόντων, στη συνεχή δίχως διακυμάνσεις παροχή ενέργειας καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, βασικό πλεονέκτημα των γεωθερμικών συστημάτων, και στις υφιστάμενες εγκαταστάσεις του Πολυτεχνείου (υπόγεια περάσματα που συνδέουν τα κτίρια μεταξύ τους), γεγονός το οποίο εξασφάλισε μικρό κόστος επένδυσης. Η μελέτη αυτή θα μπορούσε το δίχως άλλο να αποτελέσει πρότυπο σύστημα για κτίρια με παρόμοια χαρακτηριστικά.



Σχήμα 2. Απλοποιημένη σχηματική απεικόνιση εξεταζόμενου συστήματος

1.2 Νομοθεσία

Η Ευρωπαϊκή Ένωση, αναγνωρίζοντας ότι υπάρχει μεγάλο δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας στον κτιριακό τομέα που μπορεί να συμβάλει στην επίτευξη των στόχων του Πρωτοκόλλου του Κιότο για τη μείωση των εκπομπών CO₂, έχει εξελίξει από το 1970 διάφορα μέτρα και πρωτοβουλίες για την Ενεργειακή Απόδοση.

1.2.1 Διεθνές νομοθετικό πλαίσιο

Το πρόγραμμα THERMIE, το 1989, έθεσε την Ενεργειακή Αποδοτικότητα ως υψηλή προτεραιότητα. Με Ψήφισμα του Συμβουλίου της Ευρωπαϊκής Κοινότητας «για την Ενεργειακή Απόδοση στην Ευρωπαϊκή Κοινότητα» [5], το 1998, τέθηκε στόχος η κατά 1% ετησίως βελτίωση της ενεργειακής έντασης τελικής χρήσης και με την «Ευρωπαϊκή στρατηγική για αειφόρο, ανταγωνιστική και ασφαλή ενέργεια» [6] ο στόχος αυτός έγινε 2%. Για τον τομέα των κτιρίων αυτό σημαίνει μείωση κατανάλωσης ενέργειας 55 Mtoe, και αντίστοιχη μείωση εκπομπών CO₂ κατά περίπου 100 Mt/έτος.

Ακολούθησε το «Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα για την Κλιματική Αλλαγή - 2000» που υλοποιείται με σειρά νομοθετημάτων για βελτίωση της Ενεργειακής Απόδοσης στη βιομηχανία, στις μεταφορές και στον κτιριακό τομέα όπως: για την Ηλεκτροπαραγωγή από ΑΠΕ, τα βιοκαύσιμα, τα πρότυπα Ενεργειακής Απόδοσης, την ενεργειακή επισήμανση των ηλεκτρικών συσκευών, τα συστήματα Σ.Η.Θ. (Συστήματα συμπαραγωγής Ηλεκτρικής και Θερμικής ενέργειας), την απόδοση τελικής χρήσης και Ενεργειακών Υπηρεσιών, την αποδοτικότητα των λεβήτων [7], τον περιορισμό των εκπομπών CO₂ μέσω βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων [8], την ποιότητα των δομικών υλικών [9], τον οικολογικό σχεδιασμό προϊόντων, την Ενεργειακή Απόδοση των Κτιρίων [4], την βελτίωση των προτύπων Ενεργειακής Αποδοτικότητας για τα κτίρια, τον ηλεκτρικό εξοπλισμό, τα κλιματιστικά και άλλα προϊόντα, την προώθηση βιώσιμων δημόσιων συμβάσεων για ενεργειακά αποδοτικές τεχνολογίες, τη διενέργεια ενεργειακών λογιστικών ελέγχων, κλπ.

Η Οδηγία 2002/91/EC [4] προωθεί την Ενεργειακή Απόδοση των Κτιρίων λαμβάνοντας υπόψη τις κλιματολογικές συνθήκες της εκάστοτε περιοχής και τις απαιτήσεις ποιότητας των εσωτερικών χώρων χρησιμοποιώντας οικονομικά αποδοτικά μέτρα. Τα βασικά σημεία στα οποία εστιάζει η Οδηγία είναι:

- Η θέσπιση μιας κοινής μεθοδολογίας υπολογισμού της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων
- Ο καθορισμός των απαιτήσεων της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων
- Ο καθορισμός ελάχιστων απαιτήσεων για τα νέα κτίρια και τα υφιστάμενα κτίρια
- Η Ενεργειακή Πιστοποίηση όλων των κτιρίων που θα είναι υποχρεωτική σε όλες τις διαδικασίες δικαιοπραξίας των ακινήτων (κατασκευή, πώληση, ενοικίαση).
- Η Επιθεώρηση και Αξιολόγηση των εγκαταστάσεων θέρμανσης και κλιματισμού των κτιρίων

Καταληκτική προθεσμία εφαρμογής της Οδηγίας ήταν η 4η Ιανουαρίου 2006 με δυνατότητα χρήσης πρόσθετης περιόδου 3 ετών για την πλήρη εφαρμογή των άρθρων 7 (έκδοση πιστοποιητικών), 8 (επιθεώρηση λεβήτων) και 9 (επιθεώρηση συστημάτων κλιματισμού).

Η εφαρμογή της Οδηγίας αναμένεται να διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στις εθνικές πολιτικές για την εξοικονόμηση ενέργειας στον κτιριακό τομέα. Απαιτούνται όμως αρκετά χρήματα, ανθρώπινο δυναμικό, διοικητικός συντονισμός, προσαρμογή του νομοθετικού πλαισίου, υιοθέτηση οικονομικών κινήτρων, παροχή τεχνικών εργαλείων, προβολή κλπ, προκειμένου να επιτευχθούν τα αναμενόμενα αποτελέσματα. Η Οδηγία αναμένεται να δώσει μεγάλη ώθηση στην κατασκευαστική αγορά, δημιουργώντας ταυτόχρονα νέες θέσεις εργασίας για εξειδικευμένους μηχανικούς και τεχνίτες.

1.2.2 Εθνικό νομοθετικό πλαίσιο

Στην Ελλάδα η βελτίωση του βιοτικού επιπέδου, η σημαντική αύξηση του αριθμού των κατοικιών και της επιφάνειάς τους, οι ολοένα και μεγαλύτερες εμπορικές εγκαταστάσεις, η αύξηση χρήσης ηλεκτρικών συσκευών και εξοπλισμού και ιδιαίτερα η εντυπωσιακή διείσδυση των κλιματιστικών, οδήγησαν στο διπλασιασμό της καταναλισκόμενης ενέργειας στον τομέα των κτιρίων και των υπηρεσιών (αύξηση 93,5%) σε σχέση με τα επίπεδα του 1974, όταν στο ίδιο διάστημα στις χώρες της ΕΕ παρατηρήθηκε μέση αύξηση της τάξης μόλις του 13%. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι η μέση ετήσια τελική κατανάλωση ενέργειας στα κτίρια του τριτογενή τομέα κυμαίνεται μεταξύ 200 (κτίρια γραφείων) και 450 (νοσοκομεία) Kw/m² ανά έτος.

Το νομοθετικό πλαίσιο σχετικά με το ζήτημα της Ενεργειακής Απόδοσης του κτιριακού τομέα, καλύπτεται από δέσμη μέτρων (κτιριοδομικούς και άλλους κανονισμούς) που εξελίχθηκαν από το 1975 έως σήμερα, ως παρακάτω:

- 1975: «Περί λήψεως μέτρων για την Εξοικονόμηση Ενέργειας» (Νόμος- Πλαίσιο 40/75).
- 1979: «Κανονισμός για τη Θερμομόνωση των Κτιρίων», που έθεσε την υποχρέωση τοποθέτησης θερμομόνωσης σε όλα τα νέα κτίρια (ΠΔ 01.06/04.07.79).
- 1985: «Κίνητρα για Εξοικονόμηση Ενέργειας στα Κτίρια» [10].
- 1989: «Κτιριοδομικός Κανονισμός» [11].
- 1989: «Την προσέγγιση νομοθετικών, κανονιστικών και διοικητικών διατάξεων των Κρατών-Μελών για τα προϊόντα του τομέα δομικών κατασκευών» [12]
- 1992: «Μέτρων για την καταπολέμηση του αστικού νέφους» [13].
- 1992: Σύμβαση-Πλαίσιο ΟΗΕ για την Κλιματική Αλλαγή (Ρίο).
- 1993: Απαιτήσεις τακτικών επιθεωρήσεων των συστημάτων θέρμανσης στα βιομηχανικά κτίρια, θέσπιση επιπέδων εκπομπών και ενεργειακής απόδοσης λεβήτων σε ετήσια βάση, και καθορισμός επιβαλλόμενων προστίμων σε περίπτωση μη συμμόρφωσης [14].
- 1993: «Απαιτήσεων απόδοσης των νέων λεβήτων» σχετικά με ελέγχους αποδοτικότητας στους νέους λέβητες ονομαστικής ισχύος 4-400 kW, καθώς και ενεργειακό χαρακτηρισμό και πιστοποίηση αυτών (εφαρμόζεται από 1/1/1998).
- 1994: «Ενεργειακός χαρακτηρισμός των συσκευών».
- 1995: Εκπόνηση από ΥΠΕΧΩΔΕ και ΚΑΠΕ Σχεδίου Δράσης «Ενέργεια 2001» σχετικά με «Πολιτική Εξοικονόμησης Ενέργειας και χρήση ΑΠΕ στον Οικιστικό τομέα» .
- 1997: Σχεδιασμός Προγράμματος από το ΥΠΕΣΔΔΑ για Εξοικονόμηση Ενέργειας και Ενεργειακή Διαχείριση στα δημόσια κτίρια.
- 1998: «Τον περιορισμό των εκπομπών CO₂ με τον καθορισμό μέτρων και όρων για τη βελτίωση της Ενεργειακής Απόδοσης των κτιρίων».

Η Κοινή Υπουργική Απόφαση ΚΥΑ 21475/4707 σηματοδότησε μια ιδιαίτερα σημαντική στιγμή για τα ενεργειακά ζητήματα που αφορούν στην οικοδομή, καθώς, μεταξύ άλλων, προέβλεπε την αντικατάσταση του Κανονισμού Θερμομόνωσης Κτιρίων με έναν σύγχρονο ενεργειακό Κανονισμό για την Ορθολογική Χρήση και την Εξοικονόμηση Ενέργειας (Κ.Ο.Χ.Ε.Ε.), την εφαρμογή ορίων ενεργειακής κατανάλωσης, την ενεργειακή πιστοποίηση και βαθμονόμηση των κτιρίων, κλπ.

- 1999: Πρόταση οργάνωσης Κεντρικού Γραφείου Ενεργειακής Διαχείρισης
- 1999: «Κανονισμός Ενεργειακών Επιθεωρήσεων» [15].

Ανάλυση συστήματος εναλλάκτη εδάφους – αέρα στα κτίρια του Πολυτεχνείου Κρήτης

- 2000: Τροποποίηση του Γενικού Οικοδομικού Κανονισμού με σκοπό την ενσωμάτωση διατάξεων για την εγκατάσταση θερμομόνωσης, την προσάρτηση παθητικών ηλιακών και άλλων συστημάτων σε υφιστάμενα κτίρια, την κατασκευή βιοκλιματικών κτιρίων και άλλων συστημάτων ΑΠΕ. [16]
- 2002: Κύρωση του Πρωτοκόλλου του Κιότο [17].
- 2003 : Σχέδιο νέου κανονισμού – Κ.Ο.Χ.Ε.Ε.[18]
- 2003: Έγκριση Εθνικού Προγράμματος για την μείωσης εκπομπών των αερίων που συμβάλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου για την χρονική περίοδο 2000-2010 [19].
- 2008: περί «Μέτρων για τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων και άλλων διατάξεων» [20].
- 2008: «Βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και εξοικονόμησης στον δημόσιο και ευρύτερα δημόσιο τομέα» (ΚΥΑ Δ6/Β/14286).

Το νομοθετικό πλαίσιο που αφορά την αξιοποίηση του ελληνικού γεωθερμικού δυναμικού καλύπτεται από το Ν.3175/2003 [21] ' 'Αξιοποίηση του γεωθερμικού δυναμικού, τηλεθέρμανση και άλλες διατάξεις' '. Βάσει της Υ.Α. Δ9ΒΔ/Φ166/οικ18508/5552/207 [20] ορίζονται ακριβώς οι απαιτήσεις και διαδικασίες έκδοσης άδειας εγκατάστασης για την ίδια χρήση ενεργειακών συστημάτων θέρμανσης ή ψύξης μέσω της εκμετάλλευσης της γεωθερμίας. Σχετικά με τον καθορισμό των όρων και των διαδικασιών εκμίσθωσης του δικαιώματος του Δημοσίου για τη διαχείριση των γεωθερμικών πεδίων της χώρας, η Υ.Α. Δ9Β/Φ166/οικ8411/ΓΔΦΠ2373/117 [22] καθορίζει το σχετικό πλαίσιο. Επίσης η κατηγοριοποίηση των γεωθερμικών πεδίων της χώρας βασίζεται στην Υ.Α Δ9Β/Δ/Φ166/12647/ΓΔΦΠ3557/193 [23] [24].

Ως προς τις διαδικασίες παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας, ισχύουν και οι διατάξεις του Ν. 2773/99 (απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, τη ρύθμιση θεμάτων ενεργειακής πολιτικής και λοιπές διατάξεις).

2. Γεωθερμία και εφαρμογές

2.1 Ορισμοί και βασικά χαρακτηριστικά

Η θερμότητα είναι μια μορφή ενέργειας και η γεωθερμική ενέργεια είναι η θερμότητα που περιέχεται στο εσωτερικό της γης, η οποία προκαλεί τη δημιουργία διαφόρων γεωλογικών φαινομένων σε παγκόσμια κλίμακα. Συνήθως όμως, ο όρος «γεωθερμική ενέργεια» χρησιμοποιείται σήμερα για να δηλώσει εκείνο το τμήμα της γήινης θερμότητας που μπορεί να ανακτηθεί και να αξιοποιηθεί από τον άνθρωπο. Η αξιοποίηση αυτή γίνεται μέσω της διάνοιξης ειδικών φρεάτων. Έτσι, προσεγγίζονται οι πηγές θερμότητας και πραγματοποιείται άντληση της ενέργειας και ακολούθως αξιοποίηση της. Στο μεγαλύτερο ποσοστό οι αναδυόμενες θερμοκρασίες είναι υψηλές και η γεωθερμική ενέργεια χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αξίζει να επισημανθεί πως η γεωθερμία δεν είναι ουσιαστικά ανανεώσιμη μορφή ενέργειας, αλλά συμπεριλαμβάνεται στις εναλλακτικές μορφές ενέργειας, καθώς το γεωθερμικό δυναμικό θεωρείται ανεξάντλητο εξαιτίας των τεράστιων αποθεμάτων θερμότητας.

Ένα γεωθερμικό σύστημα σχηματικά μπορεί να περιγραφεί ως «ένα σύστημα» που βρίσκεται σε περιορισμένο χώρο στον ανώτερο φλοιό της γης και αποτελείται από «κινούμενο ρευστό» το οποίο μεταφέρει θερμότητα από μια «πηγή» σε μια «δεξαμενή» θερμότητας, που συνήθως είναι μια ελεύθερη επιφάνεια [25]. Έτσι λοιπόν, ένα γεωθερμικό σύστημα αποτελείται από τρία στοιχεία: την εστία θερμότητας, τον ταμιευτήρα και το ρευστό, το οποίο λειτουργεί ως μέσο μεταφοράς της θερμότητας.

Ο μηχανισμός που διέπει τη λειτουργία των γεωθερμικών συστημάτων εν γένει ελέγχεται από τη μεταφορά θερμότητας μέσω της (συναγωγής/κυκλοφορίας) των ρευστών (fluid convection). Η θερμική συναγωγή λαμβάνει χώρα λόγω της θέρμανσης και, κατ' επέκταση, της θερμικής διαστολής των ρευστών σε ένα πεδίο βαρύτητας. Η ενέργεια που προκαλεί το συγκεκριμένο φαινόμενο είναι ουσιαστικά η θερμότητα που προσφέρεται από την εστία στη βάση του συστήματος κυκλοφορίας. Η πυκνότητα των ρευστών που θερμαίνονται μειώνεται, οπότε αυτά παρουσιάζουν τάσεις ανόδου προς μικρότερα βάθη, ενώ αντικαθίστανται στη συνέχεια από ρευστά μικρότερης θερμοκρασίας και μεγαλύτερης πυκνότητας, που προέρχονται από τα περιθώρια του γεωθερμικού συστήματος. Λόγω της θερμικής συναγωγής προκαλείται λοιπόν θερμοκρασιακή αύξηση στο ανώτερο τμήμα του γεωθερμικού συστήματος, καθώς οι θερμοκρασίες στα κατώτερα τμήματα μειώνονται [26].

Ο γενικός όρος «γεωθερμικός πόρος» αναφέρεται στην προσβάσιμη βασική πηγή (accessible resource base). Η προσβάσιμη βασική πηγή είναι ουσιαστικά όλη η θερμική ενέργεια που βρίσκεται αποθηκευμένη κάτω από συγκεκριμένη περιοχή μεταξύ της επιφάνειας της γης και ενός συγκεκριμένου βάθους στο φλοιό. Αυτή η ενέργεια ξεκινά από την τοπική μέση ετήσια θερμοκρασία. Η προσβάσιμη πηγή περιλαμβάνει τον ωφέλιμο προσβάσιμο πόρο (useful accessible resource base), εκείνο δηλαδή το τμήμα της γεωθερμικής ενέργειας που μπορεί να ανακτηθεί με οικονομικά συμφέροντα και νόμιμο τρόπο, κάποια στιγμή στο σχετικά άμεσο μέλλον. Το πλέον συνηθισμένο κριτήριο για την ταξινόμηση των γεωθερμικών πόρων είναι αυτό που βασίζεται στην ενθαλπία των γεωθερμικών ρευστών, τα οποία λειτουργούν ως ο φορέας «μεταφοράς» της θερμότητας από τα βαθιά και θερμά πετρώματα προς την επιφάνεια. Η ενθαλπία, η οποία σε γενικές γραμμές θεωρείται ότι είναι ανάλογη της θερμοκρασίας, χρησιμοποιείται για να εκφράσει την περιεχόμενη θερμική ενέργεια των ρευστών και δίνει μια γενική εικόνα της ενεργειακής «αξίας» τους. Οι γεωθερμικοί πόροι διακρίνονται σε χαμηλής, μέσης και υψηλής ενθαλπίας (ή θερμοκρασίας), σύμφωνα με το ενεργειακό τους περιεχόμενο και τις πιθανές μορφές αξιοποίησής τους. Βάσει,

Ανάλυση συστήματος εναλλάκτη εδάφους – αέρα στα κτίρια του Πολυτεχνείου Κρήτης

λοιπόν, του θερμοκρασιακού της επιπέδου, η γεωθερμική ενέργεια μπορεί να έχει διάφορες χρήσεις [27]:

A) Η Υψηλής Ενθαλπίας ($>150\text{ }^{\circ}\text{C}$) είναι κατάλληλη για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ο ατμός αντλείται μέσω του εδάφους σε τουρμπίνες που θέτουν σε λειτουργία τις ηλεκτρικές γεννήτριες. Στην Ελλάδα η μεγαλύτερη γεωθερμική εγκατάσταση βρίσκεται στη Μήλο και λειτουργεί υπό την αιγίδα της ΔΕΗ.

B) Η Μέσης Ενθαλπίας ($90\text{-}150\text{ }^{\circ}\text{C}$) χρησιμοποιείται για θέρμανση ή ξήρανση αγροτικών προϊόντων και ξυλείας, ή και για την παραγωγή ηλεκτρισμού.

Γ) Η Χαμηλής Ενθαλπίας ($25\text{-}90\text{ }^{\circ}\text{C}$) είναι κατάλληλη κυρίως για θέρμανση χώρων, μέσω της χρήσης γεωθερμικών αντλιών θερμότητας, θερμοκηπίων, για ιχθυοκαλλιέργειες ή παραγωγή γλυκού νερού.

2.2 Ιστορικά στοιχεία

Η παρουσία ηφαιστειών, θερμών πηγών και άλλων επιφανειακών εκδηλώσεων θερμότητας είναι αυτή που οδήγησε στο συμπέρασμα ότι το εσωτερικό της γης είναι ζεστό. Η γεωθερμική ενέργεια και γενικά τα θερμά νερά ήταν γνωστά στην αρχαιότητα και θεωρούνταν εξαιρετικές οι θεραπευτικές τους ιδιότητες. Τα Ασκληπιεία και πολλοί άλλοι ιεροί χώροι δε βρίσκονταν τυχαία κοντά σε θερμές πηγές. Τα Ομηρικά Έπη καθώς και γραπτά του Ηροδότου, του Πausανία, του Στράβωνα, του Αριστοτέλη κ.α. μαρτυρούν τη σημαντικότητα των θερμών πηγών για τους αρχαίους Έλληνες. Η χρήση του νερού των θερμών πηγών για ιαματικούς και θρησκευτικούς σκοπούς αποτυπώθηκε και σε πολλά αγγεία που έχουν βρεθεί μέχρι σήμερα. Γνωστές ήταν επίσης οι “Θέρμες του Ηρακλή”. Η κατασκευή των πρώτων δημόσιων θερμών λουτρών (Σχήμα 3) με χρήση θερμών πηγών έγινε τον 1ο αιώνα μ.Χ. στη σημερινή πόλη Bath της Αγγλίας. [28]



Σχήμα 3. Δημόσια λουτρά με χρήση θερμών πηγών στην Αγγλία (1ος αι. μ.Χ.).

Όμως, μόνο κατά την περίοδο μεταξύ του 16ου και 17ου αιώνα, όταν δηλαδή κατασκευάστηκαν τα πρώτα μεταλλεία που ανορύχθηκαν σε βάθος μερικών εκατοντάδων μέτρων κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, οι άνθρωποι, με τη βοήθεια κάποιων απλών φυσικών παρατηρήσεων, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η θερμοκρασία της γης αυξάνεται με το βάθος.

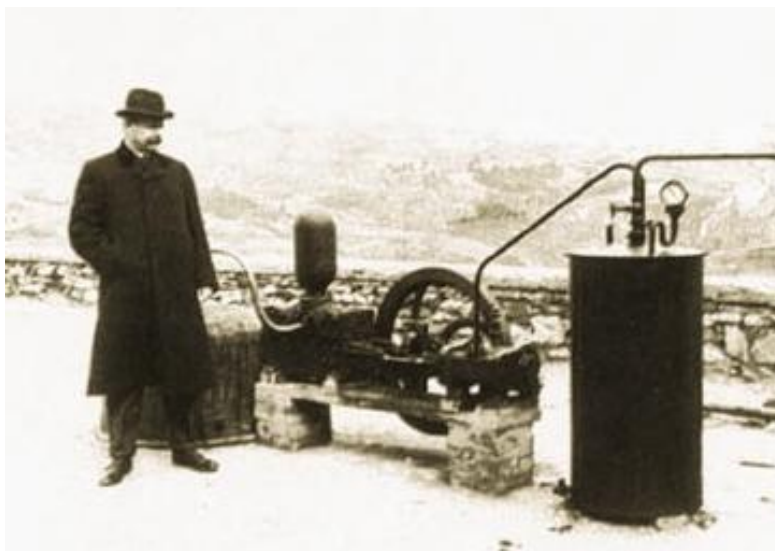
Οι πρώτες μετρήσεις με θερμόμετρο έγιναν κατά πάσα πιθανότητα το 1740, σε ένα ορυχείο κοντά στο Belfort της Γαλλίας [29]. Ήδη από το 1870, για τη μελέτη της θερμικής κατάστασης του εσωτερικού της γης χρησιμοποιούνταν κάποιες προχωρημένες για την εποχή επιστημονικές μέθοδοι, ενώ η θερμική κατάσταση που διέπει τη γη, η θερμική ισορροπία και εξέλιξη της κατανοήθηκαν καλύτερα τον 20ο αιώνα, με την ανακάλυψη του ρόλου της «ραδιενεργής θερμότητας». Πράγματι, σε όλα τα σύγχρονα πρότυπα (μοντέλα) της θερμικής κατάστασης του εσωτερικού της γης πρέπει να συμπεριλαμβάνεται η θερμότητα που συνεχώς παράγεται από τη διάσπαση των μακράς διάρκειας ζωής ραδιενεργών ισοτόπων του ουρανίου (^{238}U , ^{235}U), του θορίου (^{232}Th) και του καλίου (^{40}K), τα οποία βρίσκονται στο εσωτερικό της γης [30]. Εκτός από τη ραδιενεργό θερμότητα, δρουν αθροιστικά, σε απροσδιόριστες όμως ποσότητες, και άλλες δυναμικές πηγές θερμότητας, όπως είναι η «αρχέγονη ενέργεια» από την εποχή δημιουργίας και μεγέθυνσης του πλανήτη. Μέχρι τη δεκαετία του 1980 τα μοντέλα αυτά δεν βασιζόνταν σε κάποιες ρεαλιστικές θεωρίες. Τότε όμως αποδείχθηκε ότι

αφενός δεν υπάρχει ισοζύγιο μεταξύ της ραδιενεργής θερμότητας που δημιουργείται στο εσωτερικό της γης και της θερμότητας που διαφεύγει από τη γη προς στο διάστημα, και αφετέρου ότι ο πλανήτης μας ψύχεται με αργό ρυθμό και στο εσωτερικό του.

Ως μια γενική ιδέα της φύσης και της κλίμακας του εμπλεκόμενου φαινομένου, μπορεί να αναφερθεί η λεγόμενη «θερμική ισορροπία» [31]. Σύμφωνα με αυτήν, η ολική ροή θερμότητας από τη γη (αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία) εκτιμάται ότι ανέρχεται στα 42×10^{12} W. Από αυτά, 8×10^{12} W προέρχονται από το φλοιό, που αντιπροσωπεύει μόνο το 2% του συνολικού όγκου της γης αλλά είναι πλούσιος σε ραδιενεργά ισότοπα, $32,3 \times 10^{12}$ W προέρχονται από το μανδύα, ο οποίος αντιπροσωπεύει το 82% του συνολικού όγκου της γης, και $1,7 \times 10^{12}$ W προέρχονται από τον πυρήνα, ο οποίος αντιπροσωπεύει το 16% του συνολικού όγκου της γης και δεν περιέχει ραδιενεργά ισότοπα. Αφού η ραδιενεργή θερμότητα του μανδύα εκτιμάται σε 32×10^{12} W, η μείωση της θερμότητας στο συγκεκριμένο τμήμα της γης είναι $10,3 \times 10^{12}$ W. Σύμφωνα με πιο πρόσφατες εκτιμήσεις και υπολογισμούς, που βασίζονται σε μεγαλύτερο αριθμό δεδομένων, η ολική θερμική ροή της γης είναι περίπου 6% υψηλότερη από τις τιμές που χρησιμοποίησαν οι Stacey and Loper το 1988. Ούτως ή άλλως όμως, η διαδικασία ψύξης παραμένει αργή. Η θερμοκρασία του μανδύα δεν έχει μειωθεί περισσότερο από $300-350^{\circ}\text{C}$ τα τελευταία 3 δισεκατομμύρια χρόνια, παραμένοντας περίπου στους 4000°C στη βάση του. Έχει υπολογιστεί ότι το συνολικό θερμικό περιεχόμενο της γης (για θερμοκρασίες πάνω από τη μέση επιφανειακή των 15°C) είναι της τάξης των $12,6 \times 10^{24}$ MJ και του φλοιού $5,4 \times 10^{21}$ MJ [32].

Όπως λοιπόν προκύπτει από τα παραπάνω, η θερμική ενέργεια της γης είναι απέραντη, όμως μόνο τμήμα αυτής μπορεί να χρησιμοποιηθεί τελικά από τον άνθρωπο. Μέχρι σήμερα η εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας έχει περιοριστεί σε περιοχές όπου οι γεωλογικές συνθήκες επιτρέπουν σε ένα μέσο (νερό σε υγρή ή αέρια φάση) να «μεταφέρει» τη θερμότητα από τις βαθιές θερμές ζώνες στην επιφάνεια ή κοντά σε αυτήν. Με τον τρόπο αυτό δημιουργούνται οι γεωθερμικοί πόροι (geothermal resources). Πιθανώς, στο άμεσο μέλλον, νέες πρωτοποριακές τεχνικές θα μας προσφέρουν καινούργιες προοπτικές στον τομέα αυτόν.

Σε πολλούς τομείς της ανθρώπινης ζωής οι πρακτικές εφαρμογές προηγούνται της επιστημονικής έρευνας και της τεχνολογικής ανάπτυξης. Η γεωθερμία αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα του φαινομένου αυτού. Αξιοποίηση του ενεργειακού περιεχόμενου των γεωθερμικών ρευστών γινόταν ήδη από τις αρχές του 19ου αιώνα. Στις αρχές του 19ου αιώνα χρησιμοποιήθηκε υπέρθερμος ατμός προς παραγωγή βορικού οξέος και θέρμανση κτιρίων. Στην περιοχή αυτή το 1904 πραγματοποιήθηκε η πρώτη προσπάθεια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της χρήσης φυσικών ατμών και στέφθηκε με επιτυχία (Σχήμα 4). Το 1942, η εγκατεστημένη γεωθερμο-ηλεκτρική ισχύς ανερχόταν στα 127.650 kWe. Σύντομα, πολλές χώρες ακολούθησαν το παράδειγμα της Ιταλίας. Το 1919 κατασκευάστηκαν οι πρώτες γεωθερμικές γεωτρήσεις στο Βερρυ της Ιαπωνίας, ενώ το 1921 ακολούθησαν εκείνες στο The Geysers της Καλιφόρνιας των ΗΠΑ. Το 1958 ένα μικρό εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας τέθηκε σε λειτουργία στη Νέα Ζηλανδία, ένα άλλο στο Μεξικό το 1959, στις ΗΠΑ το 1960 και ακολούθησαν πολλά άλλα σε διάφορες χώρες.



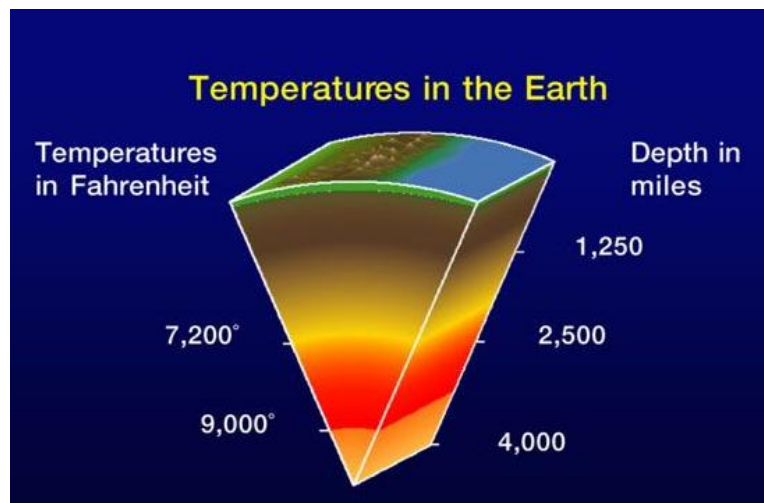
Σχήμα 4. Η μηχανή που χρησιμοποιήθηκε στο Larderello το 1904 κατά την πρώτη πειραματική απόπειρα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμικό ατμό.

Η εκμετάλλευση της μηχανικής ενέργειας του φυσικού ατμού ξεκίνησε περίπου την ίδια περίοδο. Ο γεωθερμικός ατμός χρησιμοποιήθηκε για την ανέλκυση των ρευστών, αρχικά με κάποιους πρωτόγονους αέριους ανυψωτήρες και στη συνέχεια με παλινδρομικές και φυγοκεντρικές αντλίες και βαρούλκα. Ανάμεσα στο 1850 και 1875, οι εγκαταστάσεις του Larderello κατείχαν το μονοπώλιο παραγωγής βορικού οξέος στην Ευρώπη. Μεταξύ του 1910 και του 1940, στην περιοχή αυτή της Τοσκάνης ο χαμηλής πίεσης ατμός άρχισε να χρησιμοποιείται για τη θέρμανση βιομηχανικών κτιρίων, κατοικιών και θερμοκηπίων. Εν τω μεταξύ, ολοένα και περισσότερες χώρες άρχισαν να αναπτύσσουν τους γεωθερμικούς τους πόρους σε βιομηχανική κλίμακα. Το 1892, το πρώτο γεωθερμικό σύστημα τηλε-θέρμανσης (district heating) τέθηκε σε λειτουργία στο Boise του Άινταχο των Η.Π.Α.. Το 1928, μια άλλη πρωτοπόρος χώρα στην εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας, η Ισλανδία, ξεκίνησε επίσης την εκμετάλλευση των γεωθερμικών ρευστών (κυρίως θερμών νερών) για τη θέρμανση κατοικιών.

Μετά το 2^ο Παγκόσμιο Πόλεμο, η αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας έγινε ελκυστική σε πολλές χώρες, επειδή ήταν ανταγωνιστική ως προς άλλες μορφές ενέργειας. Επιπλέον, η ενέργεια αυτή δε χρειαζόταν να εισαχθεί από άλλες χώρες, όπως συμβαίνει με τα ορυκτά καύσιμα ενώ σε πολλές περιπτώσεις αποτελούσε τον μοναδικό διαθέσιμο εγχώριο ενεργειακό πόρο. Η εγκατεστημένη γεωθερμική ηλεκτρική ισχύς στις αναπτυσσόμενες χώρες το 1995 και το 2000 αντιπροσωπεύει αντίστοιχα το 38% και το 47% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος παγκοσμίως. Σήμερα, η γεωθερμική ενέργεια συμμετέχει σημαντικά στο ενεργειακό ισοζύγιο αρκετών περιοχών. Η πιο συνηθισμένη μη-ηλεκτρική χρήση της γεωθερμίας παγκόσμια είναι οι αντλίες θερμότητας (heat-pumps) (34,80%) και ακολουθούν η λουτροθεραπεία (26,2%), η θέρμανση χώρων (21,62%), η θέρμανση θερμοκηπίων (8,22%), οι υδατοκαλλιέργειες (3,93%) και οι βιομηχανικές χρήσεις (3,13%) [33].

2.3 Θερμοκρασιακή κατανομή στο υπέδαφος

Η θερμοκρασία αυξάνεται με το βάθος, και τα ηφαίστεια, οι θερμοπίδακες (geysers), οι θερμές πηγές κλπ., αποτελούν κατά μία έννοια την ορατή εκδήλωση της θερμότητας του εσωτερικού της γης. Η γεωθερμική βαθμίδα ορίζεται ως ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας της γης σε συνάρτηση με το βάθος, μέσα στο γήινο φλοιό (Σχήμα 5). Σε βάθη που είναι προσβάσιμα με τις σύγχρονες γεωτρητικές μεθόδους, δηλαδή μέχρι τα 10.000 m, η μέση γεωθερμική βαθμίδα κυμαίνεται περίπου στους 2,5-3°C/100 m. Για παράδειγμα, εάν η θερμοκρασία στα πρώτα μέτρα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους ανταποκρίνεται κατά μέσο όρο στη μέση ετήσια θερμοκρασία του ατμοσφαιρικού αέρα, δηλ. στους 15°C, τότε μπορούμε να υποθέσουμε ότι η θερμοκρασία στο βάθος των 2000 m θα είναι περίπου 65-75°C, στα 3000 m 90-105°C, κ.ο.κ. για μερικά ακόμα χιλιάδες μέτρα.



Σχήμα 5. Η θερμοκρασία στη γη

Η θερμοκρασιακή κατανομή στο υπέδαφος καθορίζει τις εφαρμογές της κανονικής γεωθερμίας. Τα θερμικά χαρακτηριστικά εδαφών και πετρωμάτων επηρεάζονται από ορισμένες γεωλογικές παραμέτρους, που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στο πλαίσιο της εγκατάστασης συστημάτων θέρμανσης ή ψύξης χώρων μέσω της κανονικής γεωθερμίας. Οι σημαντικότερες εξ' αυτών είναι [34]:

- α) τα φυσικά χαρακτηριστικά των εδαφών και των πετρωμάτων
- β) η πραγματική πυκνότητα ή το ειδικό βάρος
- γ) η φαινόμενη πυκνότητα ή το βάρος ανά μονάδα όγκου
- δ) το πορώδες του εδάφους
- ε) η υγρασία του εδάφους
- ζ) η ογκομετρική περιεκτικότητα σε νερό
- η) η ειδική θερμότητα
- θ) η ειδική θερμική αγωγιμότητα
- ι) η ειδική θερμική διαχυτότητα

Ανάλυση συστήματος εναλλάκτη εδάφους – αέρα στα κτίρια του Πολυτεχνείου Κρήτης

Η μέση ειδική θερμοχωρητικότητα των εδαφών αποτελεί το άθροισμα των θερμοχωρητικοτήτων των συστατικών που αποτελούν το έδαφος. Αν m_s , m_w , m_a και m_o είναι οι μάζες σε kg των στερεών συστατικών του εδάφους, του εδαφικού νερού, του αέρα που περιέχεται στο έδαφος και της οργανικής ύλης αντίστοιχα και c_s , c_w , c_a και c_o η ειδική θερμότητα των προαναφερθέντων τότε [34]:

$$C = m_s \times c_s + m_w \times c_w + m_a \times c_a + m_o \times c_o$$

Ορισμένες ενδεικτικές τιμές των θερμικών ιδιοτήτων ορισμένων υλικών του εδάφους παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα 2.1.

Πίνακας 1. Ενδεικτικές τιμές των θερμικών ιδιοτήτων ορισμένων υλικών (ΤΕΕ 2011)

Υλικό	Φαινόμενη πυκνότητα	Ειδική θερμότητα	Θερμοχωρητικότητα	Θερμική αγωγιμότητα
	[*103 kg/m3]	[J/kg/K]	[*103 J/m3/K]	[W/m/K]
Χαλαζίας	2,65	733	1942	8,4
Εδάφη	2,65	733	1942	2,9
Εδάφη με οργανική ύλη	1,30	1926	2503	0,25
Νερό	1,00	4186	4186	0,6
Πάγος	0,90	2093	1883	2,5
Αέρας	0,0012	1005	1,20	0,026

2.4 Εφαρμογές γεωθερμίας στα κτίρια

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η θερμοκρασία είναι ο βασικός παράγοντας που καθορίζει τις εφαρμογές της γεωθερμικής ενέργειας. Οι σημαντικότερες εξ' αυτών είναι: η ηλεκτροπαραγωγή, η θέρμανση των εσωτερικών χώρων των κτιρίων (μέσω καλοριφέρ, αερόθερμων ή ενδοδαπέδιων συστημάτων), η ψύξη και ο κλιματισμός, η θέρμανση χώρων θερμοκηπίων αλλά και εδαφών λόγω της ταχύτερης ανάπτυξης των φυτών με τη θερμότητα, οιχθυοκαλλιέργειες, τα θερμά λουτρά καθώς και οι εφαρμογές στη βιομηχανία (ξήρανση αγροτικών προϊόντων, αφαλάτωση θαλασσινού νερού κ.α.).

Στον κτιριακό κλάδο, η μέθοδος της γεωθερμίας μπορεί να εφαρμοστεί και να λειτουργήσει με επιτυχία βάσει κατάλληλης μελέτης και σχεδιασμού. Σήμερα, η πλειοψηφία των καταναλωτών αναζητά εναλλακτικές μεθόδους προς εξασφάλιση της απαραίτητης θέρμανσης και ψύξης μιας κατοικίας με το χαμηλότερο δυνατό κόστος. Το γεωθερμικό σύστημα αποτελεί μια αξιόλογη λύση για θέρμανση και ψύξη μιας κατοικίας και εξασφάλιση ζεστού νερού χρήσης (ZNX). Οι στόχοι αυτοί μπορούν να επιτευχθούν μέσω:

- της απορρόφησης της θερμότητας του υπεδάφους και ακολούθως της πρόσδοσης της στο εσωτερικό του κτιρίου για θέρμανση
- της απόρριψης της θερμότητας από το κτίριο προς το υπέδαφος για ψύξη

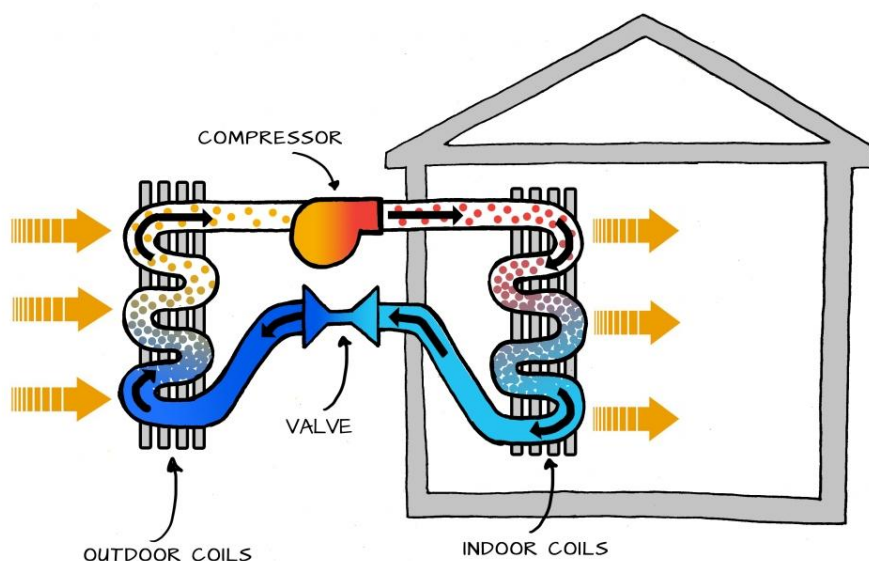
Βέβαια θα πρέπει να σημειωθεί πως στα κτίρια, η μέθοδος της γεωθερμίας πολύ συχνά εφαρμόζεται βάσει της εκμετάλλευσης των διακυμάνσεων θερμοκρασίας μεταξύ εξωτερικού περιβάλλοντος και εδάφους. Κύρια προϋπόθεση είναι η πραγματοποίηση γεώτρησης, καθώς και η τοποθέτηση σωληνώσεων και αντλητικών συστημάτων για τη μεταφορά και συναλλαγή θερμότητας βάσει κλειστού ή ανοιχτού κυκλώματος.

Ένα γεωθερμικό σύστημα αποτελείται από τα ακόλουθα μέρη:

- την αντλία θερμότητας
- τον γεωθερμικό εναλλάκτη (γεωεναλλάκτης - κλειστό ή ανοιχτό κύκλωμα)
- το εσωτερικό σύστημα διανομής της θερμότητας στο κτίριο (αεραγωγοί ή ενδοδαπέδια ή fan coil)
- το ρευστό

2.5 Αντλία θερμότητας

Ο πυρήνας των γεωθερμικών συστημάτων είναι η γεωθερμική αντλία θερμότητας. Όπως είναι γνωστό, οι αντλίες θερμότητας είναι μηχανές που κατευθύνουν τη θερμότητα αντίθετα από τη διεύθυνση που θα ακολουθούσε με φυσικό τρόπο, δηλαδή την εξαναγκάζουν να κατευθυνθεί από ένα ψυχρό μέσο σε ένα άλλο θερμότερο. Οι αντλίες θερμότητας δεν είναι τίποτε περισσότερο από συσκευές που λειτουργούν όπως τα κοινά ψυγεία [35]. Κάθε ψυκτική συσκευή (air-condition, ψυγείο, καταψύκτης κλπ.) παίρνει θερμότητα από ένα χώρο που πρέπει να παραμείνει σε χαμηλή θερμοκρασία και την απελευθερώνει σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Η μόνη διαφορά της αντλίας θερμότητας από μια ψυκτική μονάδα είναι το τελικό αποτέλεσμα, δηλαδή η θέρμανση στην πρώτη περίπτωση και η ψύξη στη δεύτερη. Μια άλλη διαφορά εντοπίζεται στην αντιστρέψιμη λειτουργία πολλών αντλιών θερμότητας, δηλαδή στην ικανότητά τους να παρέχουν τόσο ψύξη όσο και θέρμανση στο χώρο. Το καλοκαίρι, που το κλιματιστικό μηχάνημα καλείται να αποβάλει θερμότητα σε ένα περιβάλλον ήδη κορεσμένο από θερμικό φορτίο καταναλώνοντας μεγάλα ποσά ηλεκτρικής ενέργειας, η γεωθερμική αντλία θερμότητας αποβάλλει θερμότητα στο υπέδαφος, που η θερμοκρασία του δεν ξεπερνά τους 20°C, με αποτέλεσμα η απόδοσή της να είναι σημαντικά μεγαλύτερη. Βέβαια, για τη λειτουργία των αντλιών θερμότητας απαιτείται δαπάνη ενέργειας, ενώ η χρήση τους ενδείκνυται κατά κύριο λόγο σε περιοχές κατάλληλων κλιματικών συνθηκών, οπότε για να είναι θετική η ενεργειακή ισορροπία πρέπει να προηγηθεί ένας σωστός σχεδιασμός (Σχήμα 6).



Σχήμα 6. Σχηματικό διάγραμμα μιας αντλίας θερμότητας που χρησιμοποιείται για θέρμανση.

Ο συντελεστής απόδοσης της Α.Θ. εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία της πηγής θερμότητας και η τιμή του δεν είναι σταθερή. Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία της πηγής θερμότητας (στους 0-300 C) και πλησιάζει τη θερμοκρασία χρήσης, τόσο υψηλότερος είναι και ο COP.

Γενικά σε μια αντλία θερμότητας διακρίνονται:

- ο συντελεστής COP που εκφράζει την απόδοση της αντλίας θερμότητας υπό ορισμένες θερμοκρασιακές συνθήκες περιβάλλοντος και λειτουργίας

Ανάλυση συστήματος εναλλάκτη εδάφους – αέρα στα κτίρια του Πολυτεχνείου Κρήτης

- ο ετήσιος ή εποχιακός συντελεστής SCOP (SEER) που προκύπτει από το λόγο της παραγόμενης θερμικής ενέργειας από την αντλία θερμότητας προς την ενέργεια που κατανάλωσε ετησίως ή σε συγκεκριμένο διάστημα λειτουργία.

Η ετήσια παραγόμενη ενέργεια είναι επίσης κύριος συντελεστής της οικονομικής απόδοσης της αντλίας θερμότητας. Την ποσότητα αυτή επηρεάζουν το ενεργειακό δυναμικό της πηγής, καθώς και το ύψος και το είδος των θερμικών αναγκών του κτιρίου.

Οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας συνδυάζονται με το σύστημα θέρμανσης - κλιματισμού του κτιρίου χαμηλής θερμοκρασίας, είτε με ενδοδαπέδιο σύστημα, είτε με αερόθερμα (fan coil), είτε με παροχή αέρα με χρήση αεραγωγών κ.α. Επίσης μπορούν να παρέχουν ζεστό νερό χρήσης οποιαδήποτε στιγμή. Λόγω του ότι η θερμοκρασία του εδάφους σε λίγα μέτρα βάθους είναι σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, τα προαναφερόμενα γεωθερμικά συστήματα θέρμανσης-κλιματισμού καταναλώνουν περίπου 40-60% λιγότερη ηλεκτρική ενέργεια συγκριτικά με τα κλιματιστικά, παρέχοντας έτσι αποδοτικότερη θέρμανση, κλιματισμό και ZNX στα κτίρια. Συγκεκριμένα, για 100 μονάδες ωφέλιμης θερμικής ενέργειας καταναλώνονται μόνο οι 25 μονάδες ηλεκτρικής ενέργειας και οι υπόλοιπες 75 λαμβάνονται από τη γη.

2.6 Γεωθερμικοί εναλλάκτες

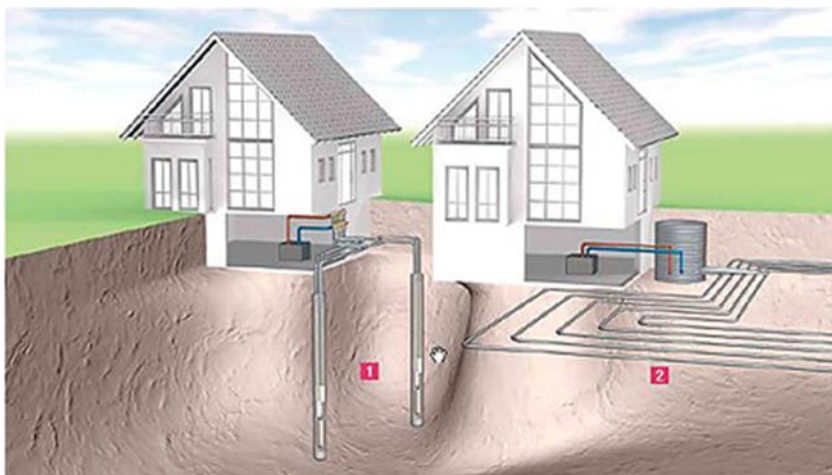
Οι γεωθερμικοί εναλλάκτες αποτελούν συστήματα που αποβάλλουν ή απορροφούν ανάλογα θερμότητα από μια πηγή θερμότητας, μέσω της κυκλοφορίας του νερού ή κάποιου άλλου ρευστού, σε σωληνώσεις που ξεκινούν από τη γη και φτάνουν στο χώρο που πρόκειται να θερμανθεί ή να ψυχθεί. Οι γεωθερμικοί εναλλάκτες διακρίνονται σε ανοικτού και κλειστού κυκλώματος. Οι γεωεναλλάκτες κλειστού κυκλώματος αποτελούν έως και σήμερα μία πιο διαδεδομένη τεχνολογία και συναντώνται σε πλήθος εφαρμογών.

2.6.1 Γεωεναλλάκτες κλειστού κυκλώματος

Ένας γεωεναλλάκτης κλειστού κυκλώματος αποτελείται από ένα κλειστό δίκτυο θαμμένων σωλήνων, συνήθως πολυαιθυλενίου, στο οποίο συνεχώς ανακυκλοφορεί διάλυμα νερού με αντιψυκτικό υπό πίεση και ανταλλάσσει θερμότητα με το έδαφος. Το κλειστό αυτό δίκτυο σωληνώσεων μπορεί να τοποθετηθεί σε οριζόντια ή κατακόρυφη διάταξη.

Για έναν οριζόντιο κλειστό γεωεναλλάκτη (Σχήμα 7) η απαιτούμενη έκταση είναι συνάρτηση των θερμικών και ψυκτικών απαιτήσεων του κτιρίου και τα γεωλογικά στοιχεία του υπεδάφους και η απόδοσή του κυμαίνεται μεταξύ 20-35w/m . Στην περίπτωση που κάποιος ανοικτός υδροφόρος είναι κοντά (πχ λίμνη) μπορεί το δίκτυο σωλήνων να τοποθετηθεί στον πυθμένα της λίμνης, απαλείφοντας έτσι το κόστος εκσκαφής. Βασικά πλεονεκτήματα του οριζόντιου κλειστού εναλλάκτη είναι η εύκολη τοποθέτηση, το μικρό κόστος εγκατάστασης και η ευκολότερη αδειοδότηση, ενώ μειονεκτήματά του θεωρούνται η μεγάλη απαιτούμενη επιφάνεια για το στρώσιμο του γεωεναλλάκτη, η σχετικά μειωμένη απόδοση στην ψύξη και οι περιορισμοί στην φύτευση.

Ο κάθετος γεωεναλλάκτης κλειστού κυκλώματος (Σχήμα 7) εφαρμόζεται σε εγκαταστάσεις με περιορισμένο περιβάλλοντα χώρο και σε περιοχές με αδυναμία πρόσληψης νερού από τον υδροφόρο ορίζοντα. Το κλειστό κύκλωμα σωλήνων τοποθετείται εντός γεωτρήσεων βάθους μεταξύ 60 –120m και στη συνέχεια γίνεται πλήρωση με θερμοαγώγιμο μίγμα (τσιμέντο, μπετονίτης ή με το παράγωγο διάνοιξης της ίδιας της γεώτρησης). Η επιλογή του κατάλληλου μεγέθους τους εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους και τις ενεργειακές απαιτήσεις. Στον ακόλουθο πίνακα 2.2 παραθέτονται αριθμητικά δεδομένα για τις αναμενόμενες αποδόσεις των κατακόρυφων γεωθερμικών εναλλακτών σε διαφόρους τύπους εδάφους προς θέρμανση και ψύξη.



Σχήμα 7. Σχηματική απεικόνιση ενός συστήματος αβαθούς γεωθερμίας με κάθετο γεωεναλλάκτη (1) και οριζόντιο γεωεναλλάκτη (2).

Πίνακας 2. Αναμενόμενες αποδόσεις των κατακόρυφων γεωθερμικών εναλλακτών

Υλικά	Ειδική θερμική απόδοση	
	Για 1800h λειτουργίας	Για 2400h λειτουργίας
	[W/m]	[W/m]
Αμμοχάλικο, άμμος, ξηρό	<25	<20
Αμμοχάλικο, άμμος, υγρό	65-80	55-65
Αμμοχάλικο και άμμος με ισχυρό ρεύμα υπόγειου νερού	80-100	80-100
Άργιλος, loam, υγρασία	35-50	30-40
Ασβεστόλιθος	55-70	45-60
Ψαμμίτης	65-80	55-65
Όξινος βράχος (π.χ. γρανίτης)	65-85	55-70
Όξινος βράχος (π.χ. βασάλτης)	40-65	35-55

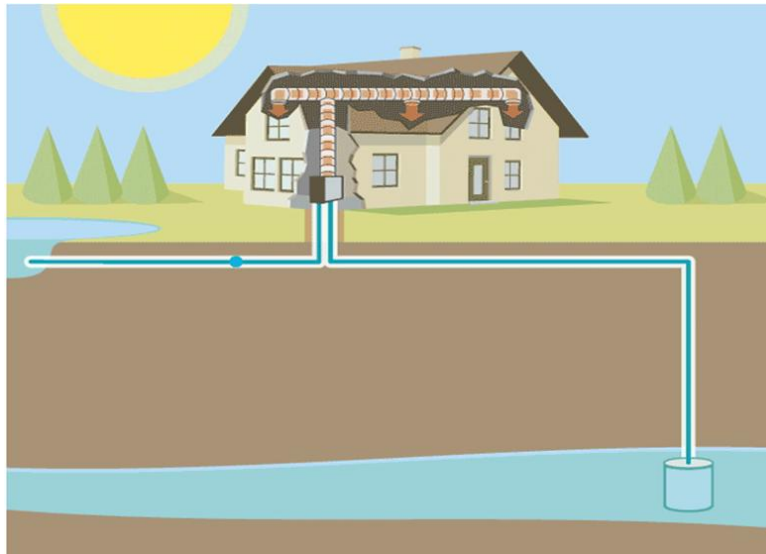
Ο απαιτούμενος αριθμός και το μήκος των γεωθερμικών εναλλακτών βάσει της θερμικής αγωγιμότητας του εδάφους προσδιορίζονται από τους γερμανικούς κανονισμούς DIN. Στον πίνακα 2.3 παρουσιάζονται ορισμένες εκ των τιμών αυτών.

Πίνακας 3. Αριθμός και μήκος γεωθερμικών εναλλακτών βάσει της θερμικής αγωγιμότητας του εδάφους (TEE 2011)

Θερμική αγωγιμότητα	Αριθμός U-tube	Ενεργό μήκος U-tube	Ολικό μήκος
[W/m/K]		[m]	[m]
0,952	16	60,67	970
1,211	15	57,32	860
1,471	14	57,01	798
1,730	12	61,59	739
2,076	12	57,32	688
2,336	12	54,88	659
2,595	10	64,63	646

2.6.2 Γεωεναλλάκτες ανοιχτού κυκλώματος

Οι γεωθερμικοί εναλλάκτες ανοιχτού κυκλώματος συνήθως χρησιμοποιούν υπόγεια ύδατα (από υδρογεωτρήσεις) ή επιφανειακά (από λίμνη, πηγάδι, ποτάμι, ή τη θάλασσα), ως πηγή ενέργειας και χώρους απόθεσης/επιστροφής του νερού (Σχήμα 8). Αντλούν νερό από υπόγειο ταμιευτήρα με χρήση γεώτρησης και ενδιάμεσου εναλλάκτη νερού/νερού που παρεμβάλλεται μεταξύ της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας (ΓΑΘ) και του ανοικτού κυκλώματος, προσδίδουν ή απορροφούν ενέργεια στο σύστημα πριν το νερό επιστρέψει στον ταμιευτήρα από άλλη γεώτρηση. Το σύστημα αυτό ενδείκνυται σε περιοχές με ρηχό βάθος υδροφόρου ορίζοντα, ώστε να απαιτούνται μικρές γεωτρήσεις νερού. Και σε αυτή την περίπτωση αξιοποιείται με γεωτρήσεις η ιδιότητα της σταθερής θερμοκρασίας που έχουν τα νερά του υπόγειου ταμιευτήρα καθ' όλο τον χρόνο ανεξάρτητα από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες που επικρατούν. Στην αβαθή γεωθερμία ανοιχτού κυκλώματος απαιτούνται δύο τουλάχιστον γεωτρήσεις. Από τη μία γεώτρηση γίνεται άντληση νερού από τους υπόγειους υδροφόρους και διοχετεύεται στη γεωθερμική αντλία όπου προσδίδει ή απορροφά ενέργεια στο σύστημα μας πριν το νερό επιστρέψει στον ταμιευτήρα από τη δεύτερη γεώτρηση.



Σχήμα 8. Σχηματική απεικόνιση ενός συστήματος αβαθούς γεωθερμίας με γεωεναλλάκτη ανοιχτού κυκλώματος.

Μία άλλη εφαρμογή γεωεναλλάκτη ανοιχτού κυκλώματος είναι αυτή που χρησιμοποιεί τον αέρα ως ρευστό μεταφοράς, ο οποίος θερμαίνεται ή ψύχεται με την κυκλοφορία του σε υπόγειους αγωγούς (earth tubes). Η τεχνολογία αυτή αποτελεί ένα βιώσιμο σύστημα, το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως για πρόψυξη και προθέρμανση του εισαγόμενου αέρα στο κτίριο. Συγκεκριμένα ο εξωτερικός αέρας οδηγείται στο κτίριο με τη βοήθεια ενός μηχανικού συστήματος μεταφοράς, αφού έχει πρώτα διαπεράσει το δίκτυο αγωγών του γεωθερμικού συστήματος. Λόγω των ιδιοτήτων του εδάφους η θερμοκρασία του αέρα στην έξοδο του αγωγού διατηρεί μέτριες τιμές όλο το χρόνο. Οι τιμές θερμοκρασίας παραμένουν συνήθως σε επίπεδα συνθηκών άνεσης ($15-27^{\circ}\text{C}$). Το υλικό του σωλήνα μπορεί να είναι πλαστικό, μέταλλο ή σκυρόδεμα. Η αποτελεσματικότητα ενός τέτοιου συστήματος σχετίζεται κυρίως με τις ακόλουθες παραμέτρους: μήκος και ακτίνα αγωγού, θερμοκρασία εισαγόμενου αέρα, θερμική αγωγιμότητα αγωγών, ταχύτητα του αέρα, βάθος τοποθέτησης αγωγού. Στη συγκεκριμένη μεταπτυχιακή διατριβή εξετάζεται ένα τέτοιο γεωθερμικό σύστημα. Οι υπόγειοι αγωγοί αποτελούνται από οπλισμένο σκυρόδεμα και στόχος είναι να εξεταστεί η εκμετάλλευσή τους για πρόψυξη και προθέρμανση των χώρων ενός κτιρίου του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε καθώς και οι σχεδιαστικές λεπτομέρειες αναφέρονται εκτενώς στο επόμενο κεφάλαιο.

3. Ανάλυση συστήματος

3.1 Μεθοδολογία

Συνοπτικά, η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την προσέγγιση του προβλήματος είναι η εξής:

- Συλλογή, καταγραφή και επεξεργασία δεδομένων: καταγραφή δεδομένων σχετικά με τον αριθμό και την ισχύ των λαμπτήρων και του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού, με τις ώρες λειτουργίας των χώρων και με τον αριθμό των χρηστών ανά χώρο, τοποθέτηση μετρητών θερμοκρασίας σε διαφορετικές θερμικές ζώνες, εύρεση μετεωρολογικών δεδομένων της περιοχής, καταγραφή δεδομένων σχετικά με τις ιδιότητες των υλικών.
- Μοντελοποίηση κτιρίου, δημιουργία σεναρίου αναφοράς (τριδιάστατος σχεδιασμός και προσομοίωση κτιρίου).
- Δημιουργία ενός συστήματος γεωθερμίας (earth tube) με χαρακτηριστικά αυτά του κτιρίου μελέτης, για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του εξερχομένου από το σύστημα αέρα.
- Συνδυασμός χρήσης earth tube – υπάρχοντος συστήματος ψύξης/θέρμανσης στο κτίριο μελέτης, προκειμένου να εξεταστεί η πιθανή τροποποίηση των συνολικών απαιτούμενων ενεργειακών φορτίων.
- Αριθμητική διερεύνηση παραμέτρων earth-tube.
- Εξαγωγή συμπερασμάτων.

3.2 Λογισμικά

Η μελέτη βασίστηκε σε ένα ευρέως διαδεδομένο λογισμικό μοντέλο το EnergyPlus, το οποίο είναι ένα πλήρες, επεκτάσιμο και εξαιρετικά ευέλικτο λογισμικό ανοιχτού κώδικα (freeware). Η χρήση του λογισμικού, μεταξύ άλλων, έκανε εφικτή την προσομοίωση συστημάτων θέρμανσης - ψύξης, των εσωτερικών θερμικών κερδών (φωτισμός, αερισμός, χρήστες κλπ) και κάθε άλλο είδος ροής ενέργειας σε κτίρια[36].

Το EnergyPlus βασίζεται στα λογισμικά BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics) και DOE-2, τα οποία είναι εργαλεία προσομοίωσης ενεργειακών φορτίων θέρμανσης & ψύξης, το χρονικό διάστημα από 1970 έως 1980 από το Υπουργείο Περιβάλλοντος των Η.Π.Α., και προέκυψε λόγω της ενεργειακής κρίσης της δεκαετίας του '70 και των ιδιαίτερα ενεργοβόρων κτιρίων [36].

Σκοπός του λογισμικού αυτού είναι η διαστασιολόγηση του κατάλληλου συστήματος θέρμανσης & ψύξης, η δημιουργία μελέτης ανάλυσης κύκλου ζωής του συστήματος ή ακόμα η βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης. Το EnergyPlus παρέχει την δυνατότητα υπολογισμού θερμικών & ψυκτικών φορτίων ώστε να καλύπτονται οι θερμικές & ψυκτικές απαιτήσεις, των καταναλώσεων του πρωτογενούς εξοπλισμού, οι θερμοκρασίες των θερμικών ζωνών και γενικότερα όλων των λεπτομερειών με σκοπό να προκύπτει πάντα σωστή και αντιπροσωπευτική προσομοίωση του εκάστοτε κτιρίου [37].

Το EnergyPlus διαθέτει αρκετά καινοτόμες λειτουργίες και χαρακτηριστικά όπως η δυνατότητα υπολογισμού φορτίων σε χρονικά βήματα που ορίζονται από τον χρήστη αλλά και ο υπολογισμός των θερμικών φορτίων από ακτινοβολία και μεταφορά θερμότητας χρησιμοποιώντας μια τεχνική επίλυσης βασισμένη στην θερμική ισορροπία. Επιπλέον, είναι δυνατός ο υπολογισμός θερμικής αγωγιμότητας στα διάφορα δομικά στοιχεία, σύνθετοι υπολογισμοί ανοιγμάτων, ανάλογα με την περίπτωση, με χρήση κάθε είδους τεχνητών ή φυσικών συστημάτων σκίασης που διατίθενται σε αντίστοιχη βιβλιοθήκη καθώς και η εκτίμηση ατμοσφαιρικής ρύπανσης μέσω υπολογισμού αέριων εκπομπών [37].

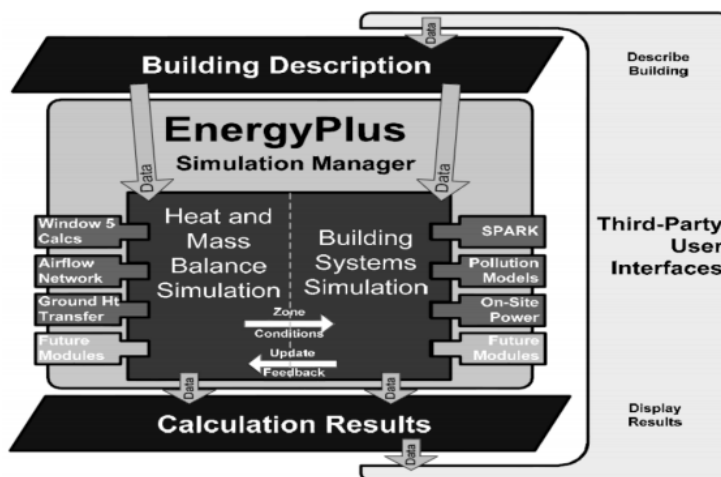
Η προσομοίωση πραγματοποιείται με κάποια εξειδικευμένα, ανά περίπτωση μοντέλα, όπως το μοντέλο θερμικής άνεσης βασισμένο στη θερμοκρασία ξηρού βολβού και την ανθρώπινη δραστηριότητα μέσα στο κτίριο, ένα συνδυασμένο μοντέλο διάδοσης θερμότητας και μάζας για τον υπολογισμό απορρόφησης - αποβολής υγρασίας από κάθε στρώμα επιφάνειας του κτιρίου όπως είναι τα έπιπλα και οι τοιχοποιίες, ένα μοντέλο διάδοσης θερμότητας μέσω εδάφους βασισμένο σε απλές αναλυτικές τεχνικές και τρισδιάστατα μοντέλα εδάφους καθώς επίσης και ένα μοντέλο ανισοτροπικής εκπομπής για τον υπολογισμό της προσπίπτουσας στις επιφάνειες του κτιρίου ηλιακής ακτινοβολίας λόγω διάχυσης [37].

Τα προγράμματα BLAST και DOE-2, στα οποία οφείλεται η ύπαρξη του EnergyPlus είναι γραμμένα σε παλαιότερη έκδοση της γλώσσας προγραμματισμού FORTRAN, γι' αυτό και κάποια χαρακτηριστικά τους θεωρούνται πλέον παρωχημένα. Ένα από αυτά τα χαρακτηριστικά είναι ο λεγόμενος κώδικας «σπαγγέτι» από τον οποίο συνίστανται οι BLAST και DOE-2. Δημιουργήθηκε λόγω αυτού, η ανάγκη να εξαλειφθούν οι αλληλοσυνδέσεις μεταξύ τμημάτων του προγράμματος καθώς και η ανάγκη κατανόησης ολόκληρου του κώδικα με στόχο την προσθήκη απλά κάποιου επιπλέον στοιχείου, σ' ένα μέρος του προγράμματος. Ο στόχος επιτεύχθηκε μέσω της δομής του EnergyPlus ως «διαχειριστής», αποτελούμενη από πολλά τμήματα κώδικα (modules). Αντί λοιπόν, το κάθε τμήμα κώδικα χαμηλού επιπέδου προσομοίωσης να διεισδύει στο υψηλότερο επίπεδο της προσομοίωσης, το κάθε τμήμα ασκεί έλεγχο στο ίδιο όταν καλούνται υποκατηγορίες από αυτό. Αυτή η δομή μοιάζει με οργανόγραμμα όπου η διαχείριση των στελεχών γίνεται ιεραρχικά ξεκινώντας από ένα «γενικό εκτελεστικό διευθυντή» που βρίσκεται στην κορυφή του οργανογράμματος.

Ανάλυση συστήματος εναλλάκτη εδάφους – αέρα στα κτίρια του Πολυτεχνείου Κρήτης

Η υπορουτίνα Manage Simulation αναλαμβάνει τον ρόλο του «γενικού εκτελεστικού διευθυντή» καθώς ελέγχει τέσσερις από τους πέντε βρόχους της προσομοίωσης, οι οποίοι είναι το περιβάλλον, η ημέρα, η ώρα, τα χρονικά υποωριαία βήματα που θέτει ο χρήστης καθώς και τα χρονικά υποωριαία βήματα του συστήματος θέρμανσης -ψύξης που θέτει ο HVAC διαχειριστής. Έτσι το κάθε επιμέρους τμήμα κώδικα καλείται μέσω της υπορουτίνας του διαχειριστή και συνεπώς δεν δυσχεραίνει η έκβαση του προγράμματος εξαιτίας των αλληλοσυνδέσεων που υπάρχουν μεταξύ των υπορουτίνων. Τα χαρακτηριστικό που διαθέτει το EnergyPlus να χωρίζεται σε τμήματα κώδικα αποτελεί βασικό προτέρημα καθώς παρέχει την δυνατότητα προσθήκης στοιχείων αλλά και συνδέσμων (links) στα διάφορα τμήματα του προγράμματος.

Λόγω του τμηματικού προγραμματισμού, κάθε προγραμματιστής μπορεί να κατασκευάσει το δικό του τμήμα - κώδικα παράλληλα με κάποιο άλλο χωρίς να παρεμβαίνει το ένα στο τμήμα - κώδικα του άλλου χωρίς να απαιτείται ιδιαίτερη γνώση της δομής του προγράμματος. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι κρίσιμο για την ευρεία χρήση και ανάπτυξη των μοντέλων των προγραμμάτων γενικά, συνεπώς και του EnergyPlus. Επομένως η τμηματικότητα και η βελτιωμένη του δομή, απλοποιεί κατά πολύ και επιλύει τα προβλήματα που υπήρχαν, περιορίζοντας τόσο την απαίτηση ειδικών για την επεξεργασία του κώδικα, όσο και την μεγάλη απαίτηση σε χρόνο και δαπάνη για εκμάθηση ολόκληρου του κώδικα ώστε να είναι εφικτό να πραγματοποιηθούν προσθήκες σε αυτόν, όταν κρίνεται σκόπιμο. Ο τμηματικός προγραμματισμός ευνοεί επίσης την εγκατάσταση συνδέσμων (links) οι οποίοι επιτρέπουν την αλληλεπίδραση μεταξύ διαφορετικών τμημάτων του κώδικα, όπως για παράδειγμα τμήμα κώδικα ισοζυγίου θερμότητας και μάζας που αλληλοεπιδρά με τμήμα προσομοίωσης κτηρίου (Σχήμα 9).



Σχήμα 9. Γενική δομή του Energy Plus

Το EnergyPlus επιτυγχάνει ολοκληρωμένη προσομοίωση βασισμένη στο πρόγραμμα IBLAST (Integrated Building Loads Analysis and System Thermodynamics), εφόσον έτσι μπορούν τα κύρια μέρη της προσομοίωσης, κτίριο, σύστημα, και μηχανολογική εγκατάσταση, να αλληλοεπιδράσουν ταυτόχρονα μεταξύ τους σε κάθε υποωριαίο χρονικό βήμα που θέτει ο χρήστης, σε συνδυασμό με κάθε βήμα που θέτει ο HVAC διαχειριστής. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι ο κώδικας προγραμματισμού του EnergyPlus είναι πηγαίος για λόγους χρησιμότητας και μεγάλης ακρίβειας, στον οποίο δίνεται πρόσβαση τόσο στο χρήστη όσο και στον προγραμματιστή.

Ανάλυση συστήματος εναλλάκτη εδάφους – αέρα στα κτίρια του Πολυτεχνείου Κρήτης

Αποσκοπώντας στην σωστή προσομοίωση του κάθε κτιρίου, είναι απαραίτητο να εισαχθούν δεδομένα που περιγράφουν εξ' ολοκλήρου τόσο το ίδιο το κτίριο, όσο τις ανάγκες και τις ιδιαιτερότητές του. Για να πραγματοποιηθεί αυτό, τα δεδομένα που πρέπει να εισαχθούν έχουν διαχωριστεί σε επιμέρους κατηγορίες. Σε αυτές, ο χρήστης μπορεί να εισάγει αντικείμενα και να τα περιγράψει με ακρίβεια. Στην διαδικασία αυτή, ο χρήστης έχει την δυνατότητα να ελέγξει τα δεδομένα που εισήγαγε, να τα τροποποιήσει και να τα επεξεργαστεί. Οι βασικότερες κατηγορίες δεδομένων εισαγωγής περιγράφονται στον Πίνακα 4 ενώ στον Πίνακα 5 παρατίθενται και κάποιες επιπρόσθετες κατηγορίες εισαγωγής δεδομένων.

Πίνακας 4. Βασικές κατηγορίες δεδομένων του EnergyPlus

Κατηγορία Δεδομένων	Περιγραφή στοιχείων σχετικά με:
Simulation Parameters	Διαδικασία της προσομοίωσης (περιοχή γύρω από το κτήριο, ηλιακή κατανομή στο κτήριο, έλεγχος προσομοίωσης, χρονικά βήματα εκτέλεσης της προσομοίωσης)
Location and Climate	Κλιματικά δεδομένα της περιοχής μελέτης, χρονική περίοδο της προσομοίωσης
Schedules	Χρονοδιαγράμματα για καθορισμό προγραμματισμού αντικειμένων (π.χ. δραστηριότητα, κίνηση σε χώρο που μελετάται, φωτισμός, εξοπλισμός κτηρίου)
Surface Construction Elements	Φυσικές ιδιότητες δομικών στοιχείων που απαρτίζουν το κτιριακό κέλυφος (εισαγωγή τοιχοποιίας, υαλοστασίων, πορτών που διαθέτει το κτήριο)
Thermal Zones and Surfaces	Θερμικές ζώνες στις οποίες έχει διαχωριστεί το κτήριο
Room Air Models	Εισαγωγή δεδομένων όταν δεν ικανοποιείται η συνθήκη καλά αναμεμιγμένης ζώνης αέρα
Internal Gains	Εσωτερικά θερμικά κέρδη του κτηρίου (π.χ. κέρδη από ανθρώπινη δραστηριότητα, φώτα, ηλεκτρικό εξοπλισμό)
Daylighting	Συσκευές και μέθοδοι ελέγχου των επιπέδων φωτισμού ανάλογα με τα επίπεδα της ηλιακής ακτινοβολίας
Zone Airflow	Ροή αέρα μεταξύ των ζωνών και λόγω φυσικού εξαερισμού (infiltration, ventilation)
Airflow Network	Μηχανικός και φυσικός μηχανισμός αερισμού του υπό μελέτη χώρου, υπολογίζοντας κέρδη - απώλειες θερμότητας του συστήματος αερισμού
HVAC Templates	Προσδιορισμός θερμοστατών των θερμικών ζωνών και των συστημάτων θέρμανσης - ψύξης HVAC (Heating, Ventilating and Air - Conditioning)
HVAC Design Objects	Σχεδιαστικές παράμετροι του HVAC συστήματος, (π.χ. ροή αέρα από το εξωτερικό περιβάλλον)
Zone HVAC Controls and Thermostats	Θερμοστατικός ή και υγροστατικός έλεγχος σε θερμική ζώνη
Zone HVAC Forced Air Units	Μονάδες με κίνηση εξαναγκασμένου αέρα, (π.χ. σύστημα με ιδανική απόδοση, σύστημα FCU (Fan Coil Unit)
Zone HVAC Radiative/ Convective Units	Υπολογισμός ποσού μεταφερόμενης θερμότητας από συστήματα σε ανθρώπους και επιφάνειες του κτηρίου, για υπολογισμούς ισοζυγίων

Ανάλυση συστήματος εναλλάκτη εδάφους – αέρα στα κτίρια του Πολυτεχνείου Κρήτης

	θερμότητας και πρόβλεψη θερμικής άνεσης σε υπό μελέτη χώρο
Zone HVAC Air Loop Terminal Units	Τερματικές μονάδες που συνδέουν τα συστήματα αέρα με τις θερμικές ζώνες
Zone HVAC Equipment Connections	Εξοπλισμός του HVAC συστήματος που διαθέτει μία ζώνη κατά σειρά λειτουργίας ανάλογα με τις απαιτήσεις του θερμοστάτη
Energy Management System (EMS)	Μέθοδος ελέγχου παραμέτρων, λειτουργώντας ως αισθητήρας (π.χ. ενεργοποίηση / απενεργοποίηση σε φώτα, αντλίες, ανεμιστήρες, ηλεκτρικό εξοπλισμό, τμήματα του HVAC συστήματος, τροποποίηση σημείου αναφοράς σε εναλλάκτη)
Economics	Μοντελοποίηση κόστους κατασκευής, λογαριασμών που προκύπτουν από την ενεργειακή κατανάλωση ενός κτηρίου
Output Reporting	Εξαγόμενα αποτελέσματα από το πέρας της μοντελοποίησης

Πίνακας 5. Λοιπές κατηγορίες δεδομένων του EnergyPlus

Κατηγορία Δεδομένων	Περιγραφή στοιχείων σχετικά με:
Exterior Equipment	Εξωτερικός εξοπλισμός (φώτα, καύσιμα, νερό)
Fans	Ανεμιστήρες
Coils	Πηνία
Evaporative Coolers	Σύστημα ψύξης
Humidifier	Υγραντήρας
Desiccant Dehumidifier	Αφυγραντήρας
Heat Recovery	Εναλλάκτης θερμότητας
Controllers	Έλεγχος λειτουργίας μηχανολογικών συστημάτων
Air Distribution	Διανομή αέρα σε ζώνη από HVAC σύστημα
Node Branch Management	Κομβικά σημεία που συνθέτουν ένα HVAC σύστημα
Pumps	Αντλίες
Solar Collectors	Ηλιακοί συλλέκτες
Plant Heating and Cooling Equipment	Εξαρτήματα HVAC συστημάτων (λέβητες, αντλία θερμότητας)
Condenser Equipment and Heat Exchangers	Μηχανολογικός εξοπλισμός (πύργοι ψύξης, εναλλάκτες θερμότητας)
Refrigeration	Σύστημα ψύξης
Demand Limiting Controls	Μέθοδος διαχείρισης ελάχιστης ζήτησης
Water Systems	Συστήματα νερού
Performance Curves	Πολυωνυμικές καμπύλες για χαρακτηρισμό των επιδόσεων του μηχανολογικού εξοπλισμού
Performance Tables	Πίνακες δεδομένων για χαρακτηρισμό των επιδόσεων του μηχανολογικού εξοπλισμού
Fluid Properties	Ιδιότητες ρευστών που υπάρχουν σε μηχανολογική εγκατάσταση

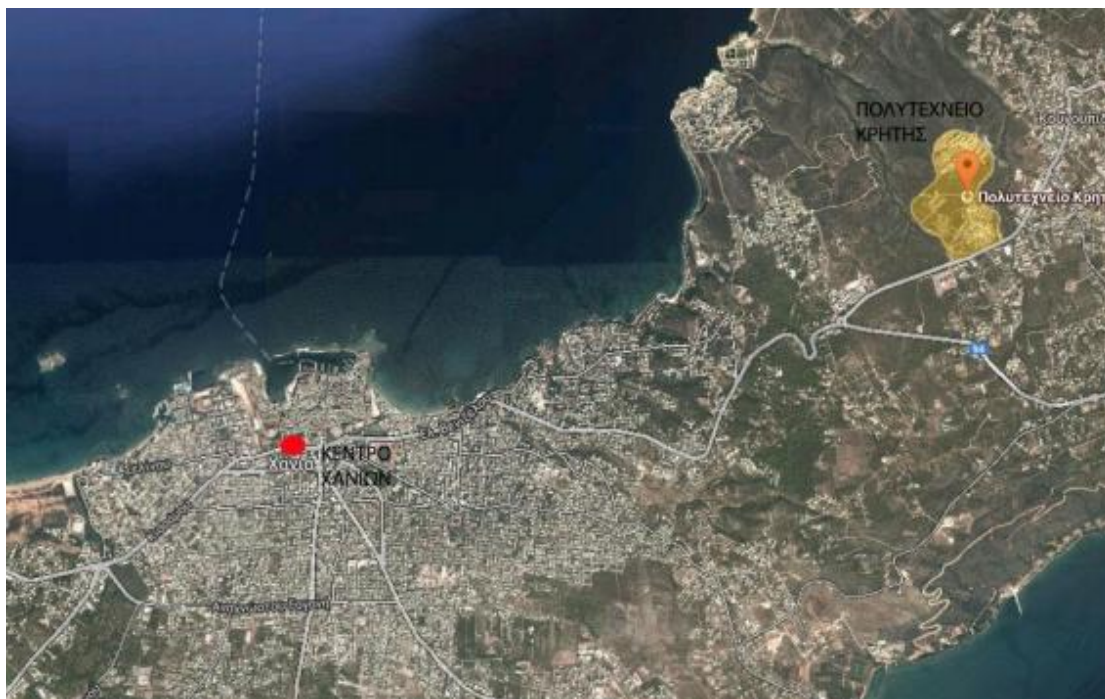
Τέλος, η γεωμετρία του κτιρίου που μελετάται έχει εισαχθεί μέσω της επιπρόσθετης λειτουργίας (plug-in) του προγράμματος Open Studio, του Google SketchUp. Το αρχείο του Google SketchUp περιέχει κάποιες γενικές πληροφορίες για το κτίριο που προσομοιώθηκε.

3.3 Μοντελοποίηση κτιρίου

Στο υπό μελέτη κτίριο χρησιμοποιήθηκε ένα από τα μοντέλα που δημιουργήθηκαν στα πλαίσια του προγράμματος CAMPIT [38]. Οι χώροι οι οποίοι μοντελοποιήθηκαν και στους οποίους εφαρμόστηκαν οι μέθοδοι διαχείρισης ενέργειας στα πλαίσια του εν λόγω προγράμματος είναι τα κτίρια K1 και K2 του Πολυτεχνείου Κρήτης. Στην εν λόγω εργασία χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο του κτιρίου K1 για την προσομοίωση του κτιρίου K3, λόγω κοινών χαρακτηριστικών και λειτουργιών που παρουσιάζουν τα δύο κτίρια. Οι τροποποιήσεις που έγιναν οφείλονται σε κάποια διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δύο κτιρίων. Επίσης, στην προσομοίωση του υπό μελέτη κτιρίου προσομοιώθηκε το σύστημα ψύξης – θέρμανσης των χώρων.

3.3.1 Περιβάλλον εφαρμογής προσομοιώσεων

Οι βασικές εγκαταστάσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης, στις οποίες περιλαμβάνεται το υπό μελέτη κτίριο, βρίσκονται στην ευρύτερη περιοχή της πόλης των Χανίων και συγκεκριμένα σε απόσταση 6 περίπου χιλιομέτρων βορειοανατολικά του κέντρου της πόλης (Σχήμα 10). Η Πολυτεχνειούπολη βρίσκεται σε υψόμετρο 137μ από την επιφάνεια της θάλασσας και καταλαμβάνει έκταση εμβαδού 2.900 m², περίπου.



Σχήμα 10. Η Πολυτεχνειούπολη σε σχέση με την πόλη των Χανίων (Συντεταγμένες: 35°31'58''N, 24°4'6''E)

Ο χώρος του Πολυτεχνείου περιλαμβάνει διαμορφωμένους χώρους, στους οποίους υπάγονται δρόμοι εξυπηρέτησης των οχημάτων, πεζόδρομοι, ανοικτοί χώροι (πλατείες, καθιστικά, parking, κλπ.), χώροι άθλησης και κτιριακές εγκαταστάσεις, αλλά και αδιαμόρφωτοι υπαίθριοι χώροι (Σχήμα 11). Παρά το γεγονός ότι στο συγκεκριμένο χώρο φιλοξενούνται πέντε σχολές, πολυάριθμες υπηρεσίες και άλλα κτίρια, το δομημένο περιβάλλον καταλαμβάνει λιγότερο από το μισό εμβαδό της Πολυτεχνειούπολης.



Σχήμα 11. Το περιβάλλον του Πολυτεχνείου

3.3.2 Περιγραφή του υπό μελέτη κτιρίου

Ο χώρος, ο οποίος μοντελοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, όπως αναφέρθηκε παραπάνω είναι το κτίριο K3 της Πολυτεχνειούπολης. Στις παρακάτω εικόνες (Σχήμα 12) απεικονίζεται το εν λόγω κτίριο σε δορυφορική εικόνα και σχηματική τομή αντίστοιχα, ενώ παρακάτω ακολουθεί η λεπτομερής περιγραφή του.



Σχήμα 12. Δορυφορική εικόνα, του κτιρίου υπό μελέτη κτιρίου K3



Σχήμα 13. Εγκάρσια τομή του κτιρίου K3 (όψη από ανατολικά)

Το κτίριο K3, (Σχήμα 13) βρίσκεται κοντά στο βόρειο άκρο της Πολυτεχνειούπολης, σε απόσταση λίγων χιλιομέτρων από τη θάλασσα. Η όψη προς τη θάλασσα έχει βορειοδυτικό προσανατολισμό, ενώ ο άξονας που διασχίζει το μήκος του κτιρίου στρέφεται δεξιόστροφα από το Βορρά κατά 53ο. Οι συνολικές διαστάσεις του κτιρίου K3 είναι: (μήκος / πλάτος / ύψος) 36,07 / 15,20 / 12,00m.



Σχήμα 14. Κτίριο K3 και περιβάλλοντας χώρος.

Αποτελείται από τρεις ορόφους, το ισόγειο, τον πρώτο και τον δεύτερο όροφο. Το ισόγειο και ο πρώτος όροφος στεγάζει κυρίως γραφεία καθηγητών και εργαστήρια. Ο δεύτερος όροφος περιλαμβάνει μηχανολογικό εξοπλισμό και δε χρησιμοποιείται από το προσωπικό του πολυτεχνείου.

Τα δομικά χαρακτηριστικά του κτιρίου K3 παρουσιάζονται με λεπτομέρεια στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 6). Οι τοίχοι αποτελούνται, από μέσα προς τα έξω, από διπλή γυψοσανίδα πάχους 12mm η μία, μόνωση πάχους 5cm (εξηλασμένη πολυστερόλη) και

Ανάλυση συστήματος εναλλάκτη εδάφους – αέρα στα κτίρια του Πολυτεχνείου Κρήτης

τσιμεντοσανίδα πάχους 12 mm. Η οροφή του ισογείου και του πρώτου ορόφου αποτελείται από μη επιχρισμένο σκυρόδεμα πάχους 2 cm και κεραμικά πλακάκια 10 mm. Η οροφή του δευτέρου ορόφου, που βρίσκεται ο μη θερμαινόμενος χώρος αποτελείται από μη επιχρισμένο σκυρόδεμα πάχους 2 cm, μόνωση πάχους 10 cm και ασφαυτόπανο πάχους 10 mm. Τέλος τα δάπεδα αποτελούνται στη πλειοψηφία τους από μάρμαρο (διάδρομοι και γραφεία), και σε ορισμένους χώρους από βιομηχανικό δάπεδο (εργαστήρια) και κεραμικό πλακάκι (τουαλέτες και γραφεία). Τα παράθυρα αποτελούνται από διπλούς υαλοπίνακες με πλαίσια αλουμινίου και εσωτερικές ρυθμιζόμενες περσίδες.

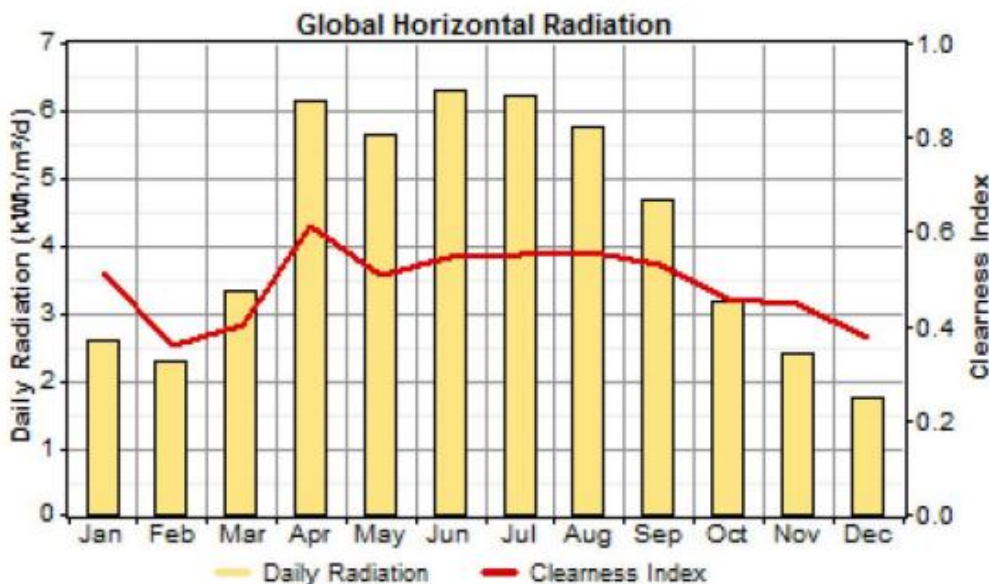
Πίνακας 6. Δομικά χαρακτηριστικών του κτιρίου K3 (αναφορά από πάνω προς τα κάτω και από έξω προς τα μέσα).

Στρώσεις υλικών	Πυκνότητα [kg/m³]	Πάχος [m]	Συντελ.Λ [W/mK]	Θερμοχωρητικότητα [J/(KgK)]
Δάπεδο ισογείου				
Μάρμαρο	2800	0,02	3,48	1000
Τσιμεντοκονίαμα	1800	0,02	0,87	1000
Γαρμπιλόδεμα (B225)	1500	0,05	1,1	1000
Στεγανωτική μεμβράνη	1050	0,01	0,17	1100
Ελαφρά οπλισμένη πλάκα σκυροδέματος	2400	0,2	2,03	1000
Δάπεδο 1ου ορόφου				
Μάρμαρο	2800	0,02	3,48	1000
Τσιμεντοκονίαμα	1800	0,02	0,87	1000
Γαρμπιλόδεμα	2400	0,05	0,64	1000
Πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος	2400	0,15	2,03	1000
Μονωτικό υλικό	50	0,07	0,04	840
Επίχρισμα	1900	0,02	0,87	
Εξωτερικός τοίχος ισογείου				
Γυψοσανίδα	1000	0,012	0,58	1000
Μονωτικό Υλικό	25	0,05	0,04	840
Σκυρόδεμα – Τοιχίο εμφανούς σκυροδέματος (B225)	2400	0,15	2,03	1000
Εξωτερικός τοίχος 1ου ορόφου				
Τσιμεντοσανίδα	1100	0,012	0,58	1000
Μονωτικό υλικό	25	0,05	0,04	840
Γυψοσανίδα	1200	0,012	0,58	1000
Παράθυρα				
Διπλοί υαλοπίνακες	2500	0,01	1,00	750
Πλαίσιο αλουμινίου	2800	0,044	160,0	880

Το υπό μελέτη κτίριο στεγάζει όπως αναφέρθηκε παραπάνω, κυρίως γραφεία, εργαστήρια και αίθουσες υπολογιστών. Στην υπολογιζόμενη ισχύ από τον εξοπλισμό περιλαμβάνονται εξοπλισμός γραφείων, υπολογιστές, scanner, εκτυπωτές, ηλεκτρικές συσκευές και εξοπλισμός εργαστηρίων. Ο φωτισμός των χώρων καλύπτεται από ράβδους φθορισμού τύπου T18 των 18W.

3.3.3 Μετεωρολογικά δεδομένα περιοχής

Η περιοχή των Χανίων χαρακτηρίζεται γενικά από ήπιο μεσογειακό κλίμα με έντονη ηλιοφάνεια καθ' όλη σχεδόν τη διάρκεια του έτους και ειδικότερα την περίοδο από Απρίλιο ως Σεπτέμβριο. Η μέση ετήσια ένταση ηλιακής ακτινοβολίας στα Χανιά είναι 1.533 kWh/m^2 και η μέση μηνιαία 128 kWh/m^2 , ενώ ο δείκτης καθαρότητας του ουρανού παίρνει τιμές από 0.4 μέχρι 0.6 τους περισσότερους μήνες του έτους (Σχήμα 15). Τα μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής καταγράφηκαν από το μετεωρολογικό σταθμό του Πολυτεχνείου Κρήτης.



Σχήμα 15. Ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία και δείκτης καθαρότητας

3.3.4 Εισαγωγή παραμέτρων

Πρώτο βήμα για την προσομοίωση των κτιρίων είναι η δημιουργία μια βάσης δεδομένων με τα φυσικά χαρακτηριστικά των υλικών (πυκνότητα, θερμοχωρητικότητα, θερμική αγωγιμότητα υλικού, ανελαστικότητα και εκπεμπιμότητα κλπ) καθώς και των κατασκευαστικών στοιχείων (π.χ. εξωτερική τοιχοποιία) με τη διαστρωμάτωση των υλικών που τα αποτελούν. Έπειτα εισήχθησαν τα δεδομένα από το αρχείο καιρού. Επίσης τροποποιήθηκε το ημερολόγιο του προγράμματος για να περιλαμβάνει τις Ελληνικές εορτές και αργίες καθώς και τις περιόδους που τα κτίρια δεν θα βρίσκονται σε λειτουργία. Επίσης δημιουργήθηκαν 2 βασικές περίοδοι χρήσης του κτιρίου, μία για το καλοκαίρι και μία για τον χειμώνα. Το καλοκαίρι ορίστηκε από την 1 η Μαΐου έως την 31 Οκτώβριου (weekdayS) με θερμοκρασία εκκίνησης της λειτουργίας των συστημάτων ψύξης στους 26°C . Ο υπόλοιπος χρόνος δηλαδή 1η Ιανουαρίου μέχρι της 30 Απριλίου και 1 Νοεμβρίου μέχρι της 31 Δεκεμβρίου (weekdayW) ορίστηκε σαν χειμώνας με θερμοκρασία εκκίνησης θέρμανσης τους 20°C .

Ένα ακόμη βασικό σημείο της προσομοίωσης αποτέλεσε η σωστή μοντελοποίηση του συστήματος ψύξης – θέρμανσης. Στην προκειμένη περίπτωση το σύστημα που προσομοιώθηκε είναι ένα σύστημα VRF (Variable Refrigerant Flow) (Σχήμα 16). Το σύστημα αυτό αποτελεί ένα σύστημα κλιματισμού μεταβλητού όγκου ψυκτικού μέσου και περιλαμβάνει την εξωτερική μονάδα (αντλία θερμότητας), η οποία συνδέεται με πολλαπλές

Ανάλυση συστήματος εναλλάκτη εδάφους – αέρα στα κτίρια του Πολυτεχνείου Κρήτης

εσωτερικές μονάδες μέσω ενός κεντρικού δικτύου ψυκτικών σωληνώσεων. Στο σύστημα κυκλοφορεί ψυκτικό υπό μορφή αερίου και υγρού, το οποίο χρησιμοποιείται ως μέσο μεταφοράς θερμότητας βάσει του μικτού κύκλου του μοντέλου της αντλίας θερμότητας. Βασικά πλεονεκτήματα των συστημάτων VRF είναι η υψηλή τους απόδοση, η εύκολη εγκατάστασή τους καθώς και ότι μπορούν να εξυπηρετήσουν πολύ αποδοτικά μεταβλητά φορτία.

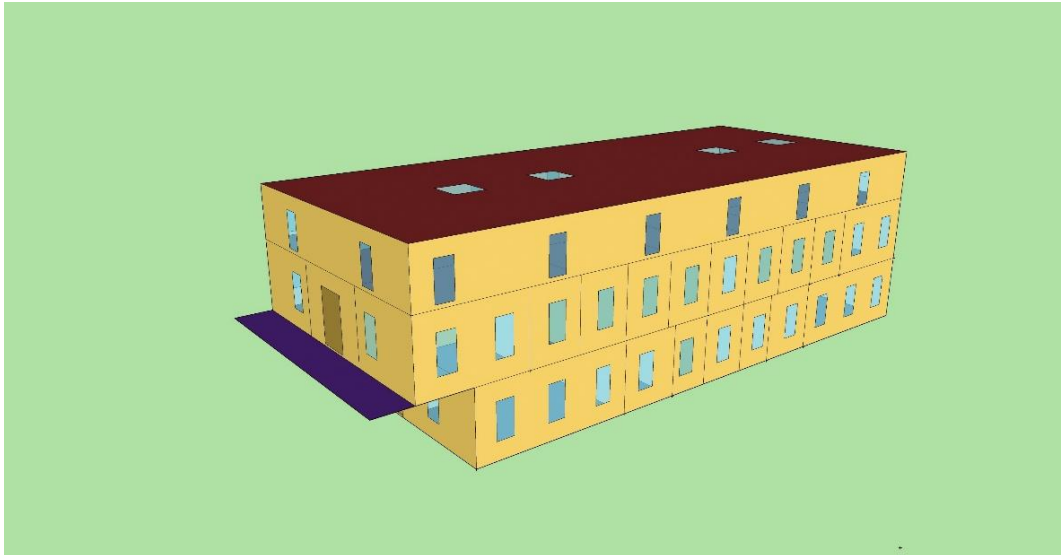


Σχήμα 16. Σχηματική απεικόνιση του συστήματος ψύξης – θέρμανσης (VRF) του εξεταζόμενου κτιρίου.

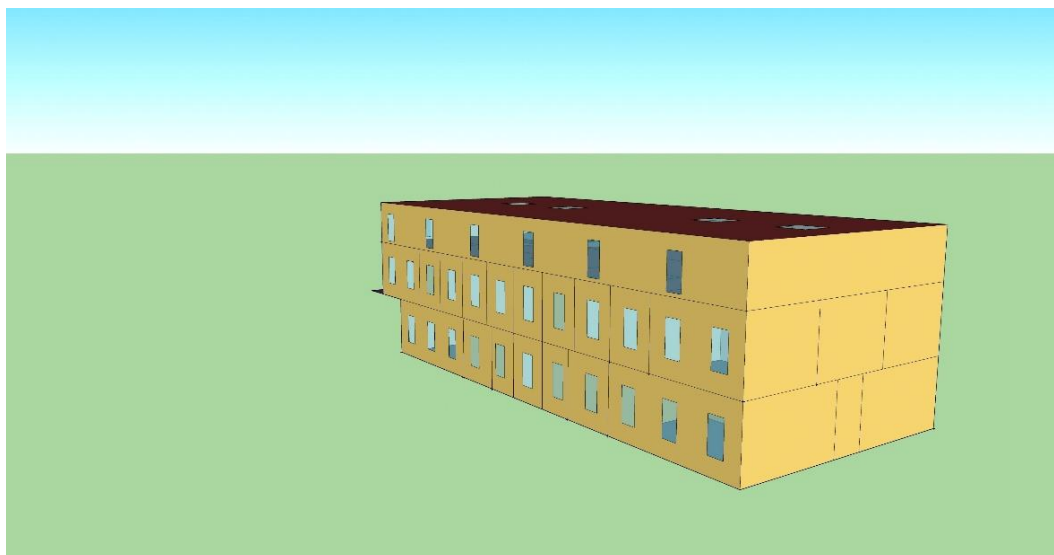
3.3.5 Τρισδιάστατη απεικόνιση κτιρίου

Η προσομοίωση της γεωμετρίας του κτιρίου πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του προγράμματος Google SketchUp Pro Version 8.0.3117. Πρόκειται για ένα ευρέως διαδεδομένο πρόγραμμα με δυνατότητα κατασκευής κάθε είδους τρισδιάστατου σχεδίου. Το σχεδιαστικό αυτό πρόγραμμα είναι φιλικό προς το χρήστη, διαθέτει εύχρηστα εργαλεία σχεδίασης, με αποτέλεσμα την σχετικά εύκολη σχεδίαση και οπτικοποίηση της αρχιτεκτονικής του μοντέλου. Το Google SketchUp δεν είναι τίποτα παραπάνω από μία επιπρόσθετη λειτουργία (plug-in) του προγράμματος Open Studio. Για επέκταση της λειτουργικότητας του προγράμματος Google SketchUp, διατίθενται κάποιες εφαρμογές συμβατές με άλλα λογισμικά προσομοίωσης όπως είναι το TRNSYS ή το Energy Plus.

Με χρήση της επέκτασης του προγράμματος Google Sketch Up στο Energy Plus πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση του κτιρίου (Σχήμα 17). Έτσι σε τρισδιάστατη απεικόνιση δημιουργήθηκαν οι δεκατρείς (13) θερμικές ζώνες. Για το κάθε στοιχείο της ζώνης δηλώθηκε τόσο ο τύπος (τοίχος, δάπεδο, οροφή, πόρτα, παράθυρο) όσο και η κατασκευή του (εξωτερική, ενδιάμεση τοιχοποιία, δάπεδο ή τοιχοποιία επί φυσικού εδάφους, οροφή κτλ).



Σχήμα 17. Τρισδιάστατη απεικόνιση του κτιρίου K3



Σχήμα 18. Τρισδιάστατη απεικόνιση του κτιρίου K3

Ως θερμική ζώνη ορίζεται ένας χώρος με παρόμοια χρήση, ίδιο προφίλ λειτουργίας και κοινά ηλεκτρομηχανολογικά συστήματα. Προτροπή δίνεται κατά την διαδικασία διαχωρισμού κτιρίου σε θερμικές ζώνες, ο αριθμός των ξεχωριστών ζωνών να είναι όσο το δυνατόν μικρότερος, λόγω οικονομίας δεδομένων εισόδου και υπολογιστικού χρόνου. Επιπλέον ένας γενικός κανόνας που πρέπει να ακολουθείται είναι, τμήματα του κτιρίου με όγκο μικρότερο από 10% του συνολικού όγκου του, να μην εξετάζονται ως αυτόνομες θερμικές ζώνες αλλά να είναι ενταγμένα σε άλλες θερμικές ζώνες ακόμη και αν οι συνθήκες λειτουργίας τους δικαιολογούν την θεώρησή τους ως ανεξάρτητες ζώνες [39].

Επιπρόσθετα, υπάρχουν κάποια επιπλέον κριτήρια σύμφωνα με τα οποία, κάποιο υπό μελέτη τμήμα καλό είναι να ληφθεί ως ξεχωριστή θερμική ζώνη σε ένα κτίριο. Συγκεκριμένα, ξεχωριστή θερμική ζώνη πρέπει να ληφθεί:

Ανάλυση συστήματος εναλλάκτη εδάφους – αέρα στα κτίρια του Πολυτεχνείου Κρήτης

Όταν η θερμοκρασία των εσωτερικών χώρων είναι μεγαλύτερη κατά 4°C από την θερμοκρασία σε άλλα τμήματα του κτιρίου τόσο κατά την θερινή όσο και κατά την χειμερινή περίοδο.

- Όταν υπάρχουν χώροι με διαφορετική χρήση, λόγω του ότι η χρήση στα διάφορα τμήματα αλλάζει, τότε αλλάζουν και οι εσωτερικές συνθήκες σχεδιασμού, όπως θερμοκρασία, σχετική υγρασία και νωπός αέρας.
- Όταν υπάρχουν διαφορετικά συστήματα θέρμανσης και ψύξης εφόσον έτσι προκύπτουν διαφορετικές εσωτερικές συνθήκες.
- Όταν υπάρχουν τμήματα που παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές απωλειών ή κερδών ενέργειας (π.χ. ηλιακών, θερμικών) σε σχέση με το υπόλοιπο κτίριο.
- Όταν υπάρχουν χώροι στους οποίους το σύστημα μηχανικού αερισμού (παροχής νωπού αέρα ή κλιματισμού) καλύπτει λιγότερο από 80% της επιφάνειας του χώρου [39].

Σύμφωνα με τα παραπάνω κριτήρια κάθε όροφος χωρίζεται σε διαφορετικό αριθμό θερμικών ζωνών ανάλογα από το προφίλ των ηλιακών κερδών, τον προσανατολισμό, την χρήση του εκάστοτε χώρου καθώς και την επιφάνεια με την οποία συνορεύουν (αέρας, έδαφος κτλ). Πιο συγκεκριμένα το ισόγειο χωρίζεται σε έξι (6) θερμικές ζώνες, ο 1ος όροφος σε έξι (6) και ο 2ος αποτελεί ολόκληρος μία θερμική ζώνη.

3.3.6 Επαλήθευση μοντέλου προσομοίωσης κτιρίου

Η επαλήθευση των αποτελεσμάτων του μοντέλου αναφοράς έγινε στα πλαίσια του προγράμματος CAMPIT και δεν αποτελεί μέρος της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής. Για την επαλήθευση του μοντέλου του κτιρίου έγινε προσομοίωση στο ESPr και διερευνήθηκαν διαφορετικές τιμές φυσικού αερισμού, πάχους μόνωσης, πάχους δομικών στοιχείων και εσωτερικών κερδών για ζώνες διαφορετικού προσανατολισμού και σε διαφορετικούς ορόφους. [38]

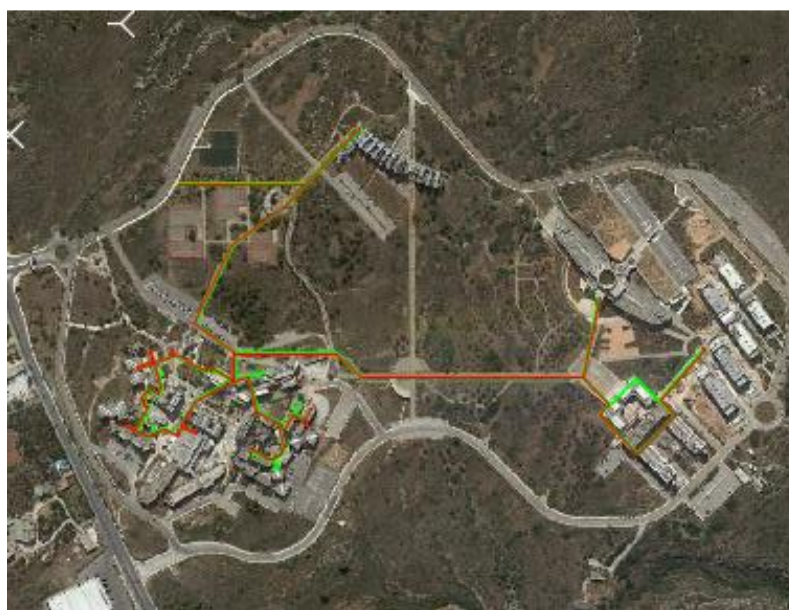
3.4 Γεωεναλλάκτης εδάφους/αέρα – Earth Tube

Στο σημείο αυτό δημιουργήθηκε ένα εικονικό σύστημα γεωθερμίας (earth tube) με σκοπό τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του αέρα στους υπόγειους χώρους [40]. Στο σύστημα αυτό ως δεδομένα δόθηκαν τα πραγματικά χαρακτηριστικά των αγωγών και του εδάφους, όπως παρουσιάζονται αναλυτικότερα παρακάτω. Τα εξαγόμενα αποτελέσματα που ζητήθηκαν είναι οι μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες αέρα που εισέρχονται στο κτίριο.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω ένας αγωγός γεωθερμίας (earth tube) είναι συνήθως ένας μακρύς, υπόγειος μεταλλικός ή πλαστικός σωλήνας μέσω του οποίου διέρχεται αέρας. Στην περίπτωση μας το υλικό του αγωγού είναι το οπλισμένο σκυρόδεμα και το μήκος αγωγού που επιλέχθηκε λόγω των κατόψεων της πολυτεχνειούπολης είναι 80m (Σχήμα 19). Κατά τη διάρκεια της περιόδου ψύξης, καθώς ο αέρας διέρχεται διαμέσου του αγωγού, μεταδίδει κάποια από τη θερμότητά του στο περιβάλλον έδαφος και έτσι εισέρχεται στο χώρο ψυχρότερος. Ομοίως κατά τη διάρκεια της περιόδου θέρμανσης, ο αέρας ταξιδεύοντας μέσω του σωλήνα, λαμβάνει θερμότητα από το έδαφος και εισέρχεται στο χώρο θερμότερος. Στο EnergyPlus οι earth tubes μπορούν να ελέγχονται από ένα πρόγραμμα λειτουργίας καθορίζοντας συγκεκριμένες ελάχιστες, μέγιστες θερμοκρασίες και διαφορές θερμοκρασίας όπως περιγράφεται παρακάτω. Η πραγματική ροή αέρα μέσω του αγωγού μπορεί να τροποποιηθεί από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος αλλά και την ταχύτητα του ανέμου. Η βασική εξίσωση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό ρυθμού ροής αέρα του αγωγού στο EnergyPlus είναι:

$$\begin{aligned} \text{EarthTubeFlowRate} &= (E_{\text{design}}) \times (F_{\text{schedule}}) \\ &\times [A + B \times |T_{\text{zone}} - T_{\text{odb}}| + C \times (\text{WindSpeed}) + D \times (\text{WindSpeed}^2)] \end{aligned}$$

Για την προσομοίωση των earth tubes, αρχικά είναι απαραίτητο ένα αρχείο δεδομένων καιρού. Τα υποχρεωτικά πεδία εισόδου για την προσομοίωση των earth tubes περιλαμβάνουν τη μέση θερμοκρασία στην επιφάνεια του εδάφους, τη διακύμανση της θερμοκρασίας της επιφάνειας του εδάφους, και τη σταθερά αλλαγής φάση της θερμοκρασίας της επιφάνειας του εδάφους. Αυτά τα πεδία θα πρέπει να υπολογιστούν εκ των προτέρων με τη χρήση ενός ξεχωριστού αυτόνομου λογισμικού (CalcSoilSurfTemp) και στη συνέχεια θα πρέπει να εισαχθούν στον earth tube.



Σχήμα 19. Υπόγειοι διάδρομοι πολυτεχνειούπολης

3.4.1 Λογισμικό CalcSoilSurfTemp

Το πρόγραμμα CalcSoilSurfTemp απαιτεί μόνο δύο πεδία εισαγωγής: την κατάσταση του εδάφους και την κατάσταση της επιφάνειας του εδάφους εκτός από ένα έγκυρο αρχείο καιρικών συνθηκών. Για την κατάσταση του εδάφους, ο χρήστης θα πρέπει να επιλέξει τον αριθμό που αντιστοιχεί στην πραγματική κατάσταση του εδάφους που περιβάλλει τον earth tube. Οι επιλογές είναι οι ακόλουθες:

1. Κορεσμένο έδαφος,
2. Υγρό έδαφος,
3. Ελαφρώς υγρό έδαφος
4. Ξηρό έδαφος.

Στην δεδομένη μοντελοποίηση επιλέχθηκε το ξηρό έδαφος.

Αυτός ο παράγοντας καθορίζει τη θερμική διάχυση και τη θερμική αγωγιμότητα του περιβάλλοντος εδάφους. Για τις συνθήκες της επιφάνειας του εδάφους, ο χρήστης θα πρέπει να επιλέξει τον αριθμό που αντιστοιχεί στην πραγματική κατάσταση της επιφάνειας του εδάφους πάνω από τον αγωγό. Οι επιλογές είναι οι οκτώ ακόλουθες:

1. ακάλυπτο και υγρό έδαφος,
2. ακάλυπτο και ελαφρώς υγρό έδαφος,
3. ακάλυπτο και άγονο έδαφος,
4. ακάλυπτο και άνυδρο έδαφος,
5. καλυμμένο και υγρό έδαφος,
6. καλυμμένο και ελαφρώς υγρό έδαφος,
7. καλυμμένο και άγονο έδαφος και
8. καλυμμένο και ξηρό έδαφος.

Αυτός ο παράγοντας καθορίζει το συντελεστή απορρόφησης και το ποσοστό εξάτμισης στην επιφάνεια του εδάφους. Στη δεδομένη μοντελοποίηση επιλέχθηκε το καλυμμένο και ξηρό έδαφος.

3.4.2 Δεδομένα εισόδου

Ο χρήστης αρχικά πρέπει να προσθέσει τις παραπάνω παραμέτρους στο EnergyPlus και στη συνέχεια να εισάγει δεδομένα σε κάποια ακόμη πεδία. Η πλήρης περιγραφή αυτών των δεδομένων εισόδου, που απαιτούνται για την δημιουργία των earth tubes στο EnergyPlus, δίνεται παρακάτω.

- Όνομα ζώνης (Zone Name):

Αυτό το πεδίο περιέχει το όνομα της θερμικής ζώνης στην οποία πραγματοποιείται προσάρτηση του γεωθερμικού συστήματος earth tube .

- Όνομα προγράμματος λειτουργίας (Schedule Name):

Αυτό το πεδίο είναι το όνομα του προγράμματος λειτουργίας, το οποίο τροποποιεί τον μέγιστο όγκο σχεδίασης του ρυθμού ροής. Αυτό το κλάσμα μεταξύ 0.0 και 1.0 σημειώνεται ως Fschedule στην παραπάνω εξίσωση.

- Ρυθμός ροής αέρα σχεδιασμού (Design Flow Rate):

Ο αριθμός αυτός (σημειώνεται ως Edesignn στην παραπάνω εξίσωση) είναι το μέγιστο ποσό ρυθμού ροής της μάζας του αέρα του αγωγού, που αναμένεται σε συνθήκες σχεδιασμού. Ο ρυθμός ροής εκφράζεται σε μονάδες m³/s. Η τιμή σχεδιασμού έχει τροποποιηθεί (προηγούμενο πεδίο) και από τους συντελεστές που ορίζει ο χρήστης (τέσσερα τελευταία πεδία). . Η τιμή σχεδιασμού έχει τροποποιηθεί (προηγούμενο πεδίο)

και από τους συντελεστές που ορίζει ο χρήστης (τέσσερα τελευταία πεδία). Στο εξεταζόμενο σύστημα δόθηκε ως τιμή $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$.

- Ελάχιστη θερμοκρασία ζώνης κατά την ψύξη (Minimum Zone Temperature when Cooling):

Αυτή είναι η εσωτερική θερμοκρασία (σε βαθμούς Κελσίου) κάτω από την οποία απενεργοποιείται ο earth tube. Αυτό το χαμηλότερο όριο θερμοκρασίας έχει ως στόχο να αποφευχθεί η υπερβολική ψύξη ενός χώρου και έτσι να οδηγήσει σε φορτίο θέρμανσης. Για παράδειγμα, εάν ο χρήστης καθορίζει μια ελάχιστη θερμοκρασία 20°C , ο earth tube υποτίθεται ότι είναι διαθέσιμος εάν η θερμοκρασία αέρα ζώνης είναι άνω των 20°C . Εάν η θερμοκρασία του αέρα της ζώνης πέφτει κάτω από τους 20°C , τότε απενεργοποιείται αυτόματα. Ως τιμή στη για το συγκεκριμένο σύστημα δόθηκαν οι -10°C .

- Μέγιστη θερμοκρασία ζώνης κατά τη θέρμανση (Maximum Zone Temperature when Heating):

Αυτή είναι η εσωτερική θερμοκρασία (σε βαθμούς Κελσίου) πάνω από την οποία απενεργοποιείται ο earth tube. Αυτό το υψηλότερο όριο θερμοκρασίας έχει ως στόχο να αποφευχθεί η υπερθέρμανση και έτσι να οδηγήσει σε ψυκτικό φορτίο. Παραδείγματος χάριν, εάν ο χρήστης καθορίζει μια μέγιστη θερμοκρασία 20°C , ο earth tube υποτίθεται ότι είναι διαθέσιμος εάν η θερμοκρασία του αέρα της ζώνης είναι κάτω των 20°C . Εάν η θερμοκρασία του αέρα της ζώνης αυξάνεται πάνω από τους 20°C , τότε ο earth tube απενεργοποιείται αυτόματα. Εδώ χρησιμοποιήθηκε ως μέγιστη θερμοκρασία ζώνης κατά τη θέρμανση 30°C .

- Διαφορά θερμοκρασίας (Delta Temperature):

Αυτή είναι η διαφορά θερμοκρασίας (σε βαθμούς Κελσίου) μεταξύ των θερμοκρασιών ξηρού εσωτερικού και εξωτερικού αέρα κάτω από την οποία απενεργοποιείται το σύστημα. Αυτό γίνεται για να επιτραπεί στον αγωγό να σταματήσει τη λειτουργία του είτε αν η εξωτερική θερμοκρασία είναι πολύ υψηλή και θα μπορούσε δυνητικά να θερμάνει το χώρο είτε εάν η θερμοκρασία στο εξωτερικό περιβάλλον είναι πάρα πολύ χαμηλή και θα μπορούσε δυνητικά να ψύξει το χώρο. Για παράδειγμα, αν ο χρήστης καθορίσει μία διαφορά θερμοκρασίας 2°C , ο earth tube είναι διαθέσιμος εάν η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας είναι τουλάχιστον 2°C . Εάν η διαφορά θερμοκρασίας του εξωτερικού και του εσωτερικού αέρα είναι μικρότερη από 2°C , τότε το σύστημα αυτομάτως απενεργοποιείται. Το εξεταζόμενο σύστημα απενεργοποιείται για διαφορά θερμοκρασίας $0,1^\circ \text{C}$.

- Τύπος earthtube (Earthtube Type):

Αυτή η παράμετρος ορίζει τον τύπο του αγωγού σαν μία από τις ακόλουθες επιλογές: φυσικός, εξαναγκασμένης εξαγωγής ή εξαναγκασμένης εισαγωγής. Ένας φυσικός αγωγός θεωρείται ότι είναι ο αγωγός εκείνος, στον οποίο για την κυκλοφορία του αέρα δεν καταναλώνεται καθόλου ενέργεια από τους ανεμιστήρες καθώς είναι το αποτέλεσμα της φυσικής ροής του αέρα μέσω του σωλήνα και στο κτίριο. Οι τιμές για την πίεση του ανεμιστήρα και της αποτελεσματικότητας ενός σωλήνα φυσικής ροής αγνοούνται. Οι τιμές για την πίεση του ανεμιστήρα και της αποτελεσματικότητας του συστήματος, είτε για την περίπτωση των αγωγών εξαναγκασμένης εξαγωγής, είτε για την περίπτωση των αγωγών εξαναγκασμένης εισαγωγής, καθορίζουν την κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος ανεμιστήρα. Για τις δύο πρώτες κατηγορίες αγωγών, οι συνθήκες του αέρα που εισέρχεται στο χώρο θεωρούνται ότι είναι ισοδύναμες με τον αέρα που ψύχεται ή

θερμαίνεται περνώντας κατά μήκος του σωλήνα. Όσον αφορά την τρίτη κατηγορία, μια κατάλληλη ποσότητα θερμότητας από τον ανεμιστήρα προστίθεται στο ρεύμα αέρα. Ο τύπος του αγωγού που εξετάζεται είναι εξαναγκασμένης εισαγωγής.

- **Αύξηση της πίεσης του ανεμιστήρα (Fan Pressure Rise):**

Αυτή η παράμετρος είναι η αύξηση της πίεσης που παρατηρείται κατά μήκος του ανεμιστήρα σε Pascals (N / m²). Είναι μια λειτουργία του ανεμιστήρα και παίζει ρόλο στον καθορισμό του ποσού της ενέργειας που καταναλώνεται από τον ανεμιστήρα. Η τιμή αυτής της παραμέτρου στο εξεταζόμενο σύστημα θεωρήθηκε 400 Pa.

- **Συνολική απόδοση ανεμιστήρα (Fan Total Efficiency):**

Η συνολική απόδοση του ανεμιστήρα (ένας δεκαδικός αριθμός μεταξύ 0,0 και 1,0) είναι μια λειτουργία, η οποία παίζει ρόλο στον καθορισμό του ποσού της ενέργειας που καταναλώνεται από τον ανεμιστήρα. Η τιμή αυτής της παραμέτρου στο εξεταζόμενο σύστημα θεωρήθηκε 0,9.

- **Ακτίνα αγωγού (Pipe Radius):**

Η ακτίνα του αγωγού (σε μέτρα) παίζει ρόλο στον καθορισμό του ύψους της θερμότητας που μεταφέρεται από το περιβάλλον έδαφος στον αέρα που περνά κατά μήκος του αγωγού. Εάν ο σωλήνας είναι μη κυκλικής διατομής, ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει την έννοια της υδραυλικής διαμέτρου ως εξής.

$$D = 4 \times \frac{Area}{Perimeter}$$

Ωστόσο, δεδομένου ότι αυτό το πεδίο απαιτεί την ακτίνα του αγωγού, η υδραυλική διάμετρος πρέπει να διαιρείται δια δύο. Η ακτίνα του αγωγού στο εξεταζόμενο σύστημα είναι 1m.

- **Πάχος αγωγού (Pipe Thickness):**

Το πάχος του τοιχώματος του σωλήνα (σε μέτρα) καθορίζει το ποσό της θερμότητας που μεταφέρεται από το περιβάλλον έδαφος στον αέρα που διέρχεται κατά μήκος του σωλήνα. Το πάχος του εξεταζόμενου αγωγού είναι 0,1m.

- **Μήκος αγωγού (Pipe Length):**

Το συνολικό μήκος του σωλήνα (σε μέτρα) παίζει επίσης σημαντικό ρόλο στον καθορισμό του ποσού της θερμότητας μεταφέρεται από το περιβάλλον έδαφος στον αέρα που περνά κατά μήκος του σωλήνα. Όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος του αγωγού, το μεγαλύτερο είναι το ποσό της μεταφοράς θερμότητας. Λαμβάνοντας υπόψιν τα αρχιτεκτονικά σχέδια των υπόγειων διαδρόμων εξετάστηκε το σύστημα για μήκος αγωγού 80 m.

- **Θερμική αγωγιμότητα αγωγού (Pipe Thermal Conductivity):**

Η θερμική αγωγιμότητα του σωλήνα (σε W/m*K) καθορίζει την ποσότητα της θερμότητας που μεταφέρεται από το περιβάλλον έδαφος στον αέρα που περνά κατά μήκος του αγωγού. Η θερμική αγωγιμότητα του σκυροδέματος, η οποία χρησιμοποιήθηκε είναι 1,73 W/m*K.

- **Βάθος αγωγού από την επιφάνεια του εδάφους (Pipe Depth Under Ground Surface):**

Η παράμετρος αυτή αφορά το βάθος του αγωγού από την επιφάνεια του εδάφους (σε μέτρα) και καθορίζει τη θερμοκρασία του εδάφους που περιβάλλει τον αγωγό. Η τιμή που δόθηκε είναι 3,2 m λόγω περιορισμού του λογισμικού, το οποίο επιτρέπει ως δεδομένο εισαγωγής της παραμέτρου κατ' ελάχιστον 3m.

- Κατάσταση εδάφους (Soil Condition):

Η πραγματική κατάσταση του εδάφους γύρω από τον αγωγό μπορεί να είναι μία από τις ακόλουθες επιλογές: βαρύ και κορεσμένο, βαρύ και υγρό, βαρύ και ξηρό, ελαφρύ και ξηρό. Αυτό καθορίζει τη θερμική διάχυση και τη θερμική αγωγιμότητα του περιβάλλοντος εδάφους, τα οποία παίζουν ρόλο στον καθορισμό του ποσού της θερμότητας που μεταφέρεται από το περιβάλλον έδαφος στον αέρα που διέρχεται κατά μήκος του σωλήνα. Στην συγκεκριμένη περίπτωση το έδαφος θεωρήθηκε ξηρό βάση κλιματικών συνθηκών της περιοχής.

- Μέση θερμοκρασία επιφάνειας εδάφους (Average Soil Surface Temperature):

Η μέση ετήσια θερμοκρασία της επιφάνειας του εδάφους πάνω από τον αγωγό προσδιορίζει ως ένα βαθμό τη θερμοκρασία του εδάφους που περιβάλλει το σωλήνα. Αυτό το πεδίο θα πρέπει να υπολογίζεται εκ των προτέρων, χρησιμοποιώντας το ξεχωριστό λογισμικό CalcSoilSurfTemp. Η εξαγόμενη τιμή από το λογισμικό CalcSoilTemp είναι 18.

- Εύρος επιφανειακής θερμοκρασίας εδάφους (Amplitude of Soil Surface Temperature):

Το εύρος της επιφανειακής θερμοκρασίας εδάφους παίζει ρόλο στον καθορισμό της θερμοκρασίας του εδάφους που περιβάλλει το σωλήνα. Αυτή είναι η διαφορά μεταξύ της μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας της επιφάνειας του εδάφους για το σύνολο του έτους διαιρούμενο δια δύο. Αυτό το πεδίο θα πρέπει να υπολογιστεί εκ των προτέρων χρησιμοποιώντας το ξεχωριστό λογισμικό CalcSoilSurfTemp. Η εξαγόμενη τιμή από το λογισμικό CalcSoilTemp είναι 7,454.

- Σταθερά αλλαγής φάσης επιφανειακής θερμοκρασίας εδάφους (Phase Constant of Soil Surface Temperature) :

Με τον ορισμό αυτής της παραμέτρου προσδιορίζεται η θερμοκρασία του εδάφους που περιβάλλει το σωλήνα κατά τη συγκεκριμένη στιγμή. Αποτελεί το χρόνο που έχει παρέλθει από την αρχή του έτους έως ότου η θερμοκρασία της επιφάνειας του εδάφους φθάνει την ελάχιστη ετήσια τιμή της. Αυτό το πεδίο θα πρέπει να υπολογιστεί εκ των προτέρων χρησιμοποιώντας το ξεχωριστό λογισμικό CalcSoilSurfTemp. Η εξαγόμενη τιμή από το λογισμικό CalcSoilTemp είναι 27.

- Συντελεστής σταθερής ροής (Constant Term Flow Coefficient):

Ο αριθμός αυτός είναι η παράμετρος "A" στην παραπάνω εξίσωση και καθορίζεται τροποποιώντας τις παραμέτρους που είναι συνάρτηση των περιβαλλοντικών παραγόντων. Αυτή η παράμετρος είναι μια σταθερά η οποία δεν έχει τροποποιηθεί από οποιαδήποτε επίδραση στο περιβάλλον. Ως αποτέλεσμα, είναι αδιάστατη. Η τιμή που εισήχθη είναι 0.606.

- Συντελεστής θερμοκρασίας ροής (Temperature Term Flow Coefficient):

Ο αριθμός αυτός είναι η παράμετρος "B" στην παραπάνω εξίσωση και καθορίζεται τροποποιώντας τις παραμέτρους που είναι συνάρτηση των περιβαλλοντικών παραγόντων. Αυτή η παράμετρος τροποποιείται με τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των εξωτερικών και εσωτερικών θερμοκρασιών αέρα. Οι μονάδες για την παράμετρο αυτή είναι αντίστροφη των βαθμών Κελσίου. Η τιμή που εισήχθη είναι 0,02.

- Συντελεστής ταχύτητας ροής (Velocity Term Flow Coefficient):

Ο αριθμός αυτός είναι η παράμετρος "C" στην παραπάνω εξίσωση και καθορίζεται τροποποιώντας τις παραμέτρους που είναι συνάρτηση των περιβαλλοντικών παραγόντων. Αυτή η παράμετρος τροποποιείται με τη ταχύτητα του ανέμου. Οι μονάδες της είναι s/m. Στη δεδομένη μοντελοποίηση ο συντελεστής αυτός θεωρήθηκε 0,0006.

Ανάλυση συστήματος εναλλάκτη εδάφους – αέρα στα κτίρια του Πολυτεχνείου Κρήτης

- Συντελεστής τετραγώνου ταχύτητας ροής (Velocity Squared Term Flow Coefficient):
Ο αριθμός αυτός είναι η παράμετρος "D" στην παραπάνω και καθορίζεται τροποποιώντας τις παραμέτρους που είναι συνάρτηση των περιβαλλοντικών παραγόντων. Αυτή η παράμετρος τροποποιείται με το τετράγωνο της ταχύτητας του ανέμου. Οι μονάδες για αυτή την παράμετρο είναι s^2 / m^2 . Η τιμή του συντελεστή τετραγώνου ταχύτητας ροής θεωρήθηκε 0.

Οι παραπάνω τιμές επιλέχθηκαν είτε λόγω των υφιστάμενων γεωμετρικών και τεχνικών χαρακτηριστικών είτε λόγω προτεινόμενων τιμών από το εγχειρίδιο του EnergyPlus, από την υπάρχουσα βιβλιογραφία και από τεχνικά φυλλάδια. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης μεταπτυχιακής διατριβής κρίθηκε απαραίτητο να εξεταστούν οι διαφοροποιήσεις των εξαγόμενων αποτελεσμάτων (μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες αέρα στους υπόγειους χώρους) μέσω μίας παραμετρικής ανάλυσης. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν αρχικά είναι:

1. το μήκος των αγωγών
2. το υλικό των αγωγών συνδυαστικά με το πάχος του υλικού και την ακτίνα της διατομής του αγωγού
3. το βάθος τοποθέτησης των αγωγών από την επιφάνεια του εδάφους.

Στη συνέχεια, λόγω των τιμών των εξαγόμενων αποτελεσμάτων κρίθηκε απαραίτητο να γίνει μία ακόμη παραμετρική ανάλυση. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν στα πλαίσια αυτής της παραμετρικής ανάλυσης είναι:

1. η κλιματική ζώνη σε συνδυασμό με τις εδαφικές συνθήκες της εκάστοτε υπό μελέτη περιοχής
2. το βάθος τοποθέτησης των αγωγών από την επιφάνεια του εδάφους
3. η παροχή του αέρα στον αγωγό

Αναλυτικά στοιχεία για τους συνδυασμούς που έγιναν στα πλαίσια της κάθε παραμετρικής ανάλυσης καθώς και τα αποτελέσματα αυτών παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

3.5 Τροποποίηση υφιστάμενου συστήματος ψύξης - θέρμανσης

Η τροποποίηση (πρόψυξη - προθέρμανση των χώρων μέσω earth tube) της θερμοκρασίας του αέρα στον εξωτερικό εναλλάκτη (αέρας-ψυκτικό υγρό) της αντλίας θερμότητας, προσομοιώθηκε βάση μιας μεθόδου ελέγχου παραμέτρων, την οποία διαθέτει το EnergyPlus και αναλύεται παρακάτω.

3.5.1 Energy Management System (EMS)

Το EnergyPlus παρέχει τη δυνατότητα τροποποίησης υπαρχουσών μοντέλων καθώς και ανάπτυξης νέων, μέσω του συστήματος Συστήματος Διαχείρισης Ενέργειας (EMS). Πρόκειται για ένα σύστημα, το οποίο παρέχει έναν τρόπο για την ανάπτυξη προσαρμοσμένου ελέγχου ρουτίνες (προγραμματιστικές συναρτήσεις) μοντελοποίησης για EnergyPlus μοντέλα. Αυτό το χαρακτηριστικό του EnergyPlus είναι προηγμένο γι' αυτό η χρήση του καθίσταται δύσκολη από αρχάριους. Το EMS είναι μια πολύπλοκη λειτουργία με πολλαπλές δυνατότητες που περιγράφονται αρκετά αναλυτικά στον οδηγό EMS [41] όπου και παρέχεται μια συνολική περιγραφή για το πώς να χρησιμοποιηθεί το EMS σαν σύστημα Εισόδου/Εξόδου.

Το EMS παρέχει υψηλού επιπέδου εποπτικό έλεγχο για να παρακαμφθούν τμήματα και λειτουργικότητες μοντελοποίησης του EnergyPlus. Αυτό γίνεται μέσω της γλώσσας προγραμματισμού EnergyPlus Runtime Language (Erl) που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τους αλγορίθμους ελέγχου. Το EnergyPlus ερμηνεύει και εκτελεί το πρόγραμμά της Erl, όπως το μοντέλο που τρέχει. Στη μελέτη αυτή έγιναν τροποποιήσεις μέσω της γλώσσας Erl ώστε να αλλάξουμε τη λειτουργικότητα του ενεργειακού μοντέλου που αναπτύξαμε. Ουσιαστικά, παρεμβαίνοντας στον κόμβο εισαγωγής αέρα στο σύστημα VRF (εξωτερικός εναλλάκτης της αντλίας θερμότητας) τροποποιήθηκε η μέση μηνιαία θερμοκρασία του αέρα εισαγωγής. Ως τιμές για τις μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες δόθηκαν τα εξαγόμενα αποτελέσματα της διαδικασίας που αναλύθηκε στην υποενότητα 3.4. Οι τροποποιήσεις του κώδικα που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της μοντελοποίησης παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α.

Παρακάτω περιγράφονται κάποιοι τύποι δεδομένων, οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν στην Erl για να πετύχουμε τη ζητούμενη λειτουργικότητα. Για την περιγραφή τους θα διατηρήσουμε την αγγλική σημασιολογία ώστε να είναι εύκολη η αντιστοίχιση στον αναγνώστη των τμημάτων που χρησιμοποιήσαμε με τα αντίστοιχα του EMS οδηγού. [41]

3.5.2 Outdoor Air System Node Conditions

Οι Actuators είναι τύποι δεδομένων της κατηγορίας "Outdoor Air System Node" και είναι διαθέσιμοι με τους τύπους ελέγχου που ονομάζονται "Drybulb Temperature " και "Wetbulb Temperature.", των οποίων οι μονάδες είναι βαθμοί Κελσίου. Αυτές οι μονάδες (actuators) είναι διαθέσιμες για όλους τους κόμβους του συστήματος που είναι της κατηγορίας/τύπου είτε «OutdoorAir:Node» ή «OutdoorAir:NodeList» αντικείμενο εισόδου. Μέσω αυτών των αντικειμένων θα εξασφαλιστεί η τροποποίηση της εξωτερικής θερμοκρασίας του κόμβου που διοχετεύει στο σύστημα τον αέρα. [42]

Το σύστημα του αέρα πολλές φορές απαιτεί τροποποίηση από τον χρήστη ώστε να οριστεί ένας κόμβος ως εξωτερικός κόμβος αέρα για να ληφθούν τιμές για τις εξωτερικές συνθήκες. Για παράδειγμα, οι εξωτερικοί κόμβοι αέρα χρησιμοποιούνται στην είσοδο ενός εξωτερικού εναλλάκτη αέρα. Συνήθως αυτές είναι τιμές των δεδομένων καιρού για εξωτερικές συνθήκες. Ωστόσο, οι τοπικές διαφοροποιήσεις στο μικροκλίμα μπορεί να μετατοπίσει την τοπική εξωτερική θερμοκρασία του αέρα ώστε να διαφέρουν ελαφρώς από τα στοιχεία καιρού που παρέχει αυτόματα το EnergyPlus κατά την μοντελοποίηση των συστημάτων. (Επί

Ανάλυση συστήματος εναλλάκτη εδάφους – αέρα στα κτίρια του Πολυτεχνείου Κρήτης

του παρόντος, στο EnergyPlus το μόνο τοπικό μοντέλο διακύμανσης στις εξωτερικές συνθήκες του αέρα είναι βάσει του ύψους.) Στο εξεταζόμενο μοντέλο ωστόσο, το ζητούμενο ήταν να δώσουμε σταθερές τιμές στις εξωτερικές συνθήκες του αέρα. Αυτή η λειτουργικότητα αναπτύχθηκε μέσω του EMS actuator ώστε να παρακαμφθεί η εξωτερική θερμοκρασία σε ένα συγκεκριμένο κόμβο του συστήματος. Τυπικά παραδείγματα για ανάλογες περιπτώσεις, στις οποίες θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ο εν λόγω EMS actuator είναι η εξέταση των ενεργειακών επιπτώσεων των θερμότερων εξωτερικών θερμοκρασιών του αέρα που υπάρχουν σε μια ταράτσα με σύστημα HVAC πάνω σε μια μαύρη οροφή ή τις ψυχρότερες συνθήκες για μονάδες που βρίσκονται στη σκιερή πλευρά ενός κτιρίου. Τα αποτελέσματα αυτών των τροποποιημένων μοντέλων θα μπορούσαν να τροφοδοτήσουν το υπόλοιπο σύστημα του EnergyPlus. [42]

4. Αποτελέσματα

4.1 Αποτελέσματα κτιρίου μελέτης

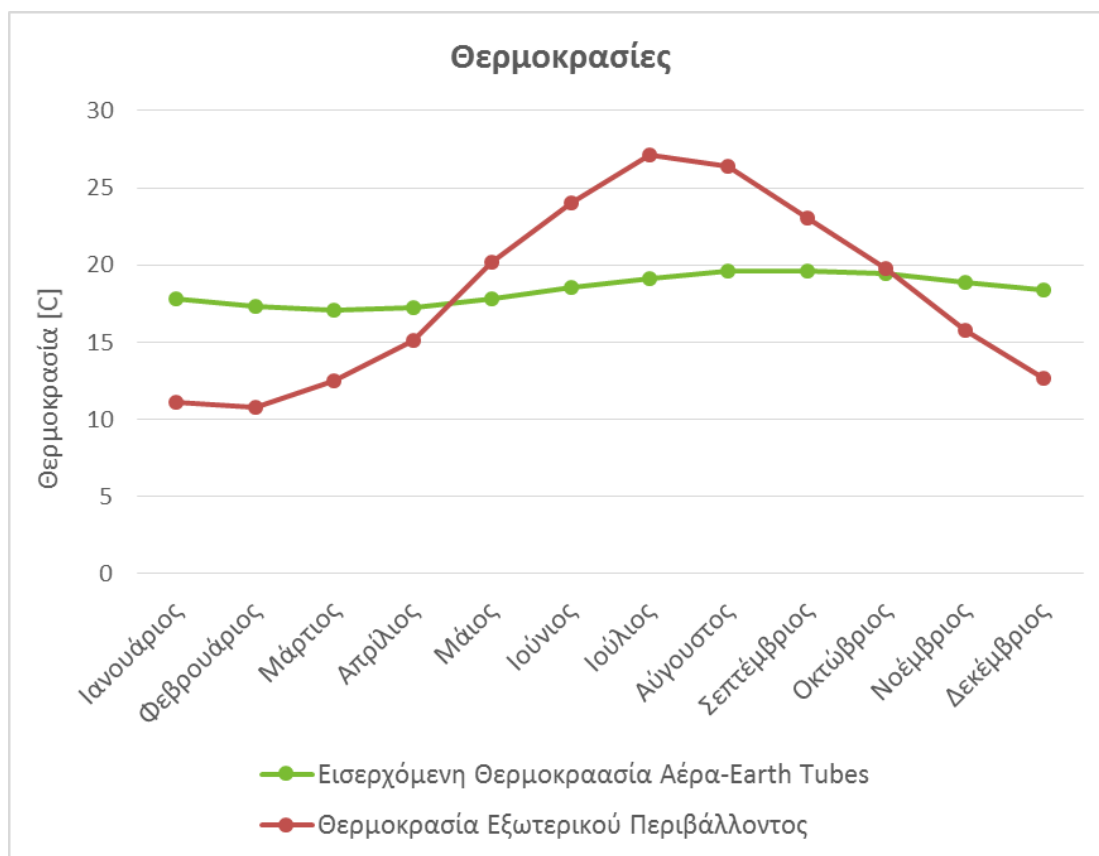
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης που μελετήθηκε στα πλαίσια της συγκεκριμένης μεταπτυχιακής διατριβής. Στο εξής, χάριν συντομίας, η κατάσταση του υφιστάμενου κτιρίου στους παρακάτω πίνακες χαρακτηρίζεται ως *Baseline*, ενώ η μοντελοποίηση του κτιρίου με την προσθήκη των αγωγών (Earth Tubes) χαρακτηρίζεται ως *EarthtoAir HX*. Στα διαγράμματα αντιστοίχως παρουσιάζονται ως *Baseline* και *HX*. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 7) παρουσιάζονται οι μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες αέρα του εξωτερικού περιβάλλοντος σε σχέση με τις μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες αέρα μετά τη διέλευσή του από τους υπόγειους αγωγούς (Earth Tubes) για την περιοχή μελέτης.

Πίνακας 7. Σύγκριση της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας αέρα του εξωτερικού περιβάλλοντος, με τη μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα που εισέρχεται στο κτίριο μετά τη διέλευσή του από τους υπόγειους αγωγούς (Earth Tubes)

	Εισερχόμενη Θερμοκρασία Αέρα-Earth Tubes [C]	Θερμοκρασία Εξωτερικού Περιβάλλοντος [C]
Ιανουάριος	17.79	11.15
Φεβρουάριος	17.32	10.77
Μάρτιος	17.1	12.54
Απρίλιος	17.2	15.09
Μάιος	17.78	20.18
Ιούνιος	18.55	24.06
Ιούλιος	19.14	27.09
Αύγουστος	19.64	26.42
Σεπτέμβριος	19.6	23.03
Οκτώβριος	19.46	19.75
Νοέμβριος	18.86	15.73
Δεκέμβριος	18.39	12.64

Όπως διακρίνεται οι θερμοκρασιακές διαφορές είναι σημαντικές τόσο τους χειμερινούς όσο και τους θερινούς μήνες, γεγονός που εξασφαλίζει ένα αρκετά μεγάλο ενεργειακό κέρδος. Οι μεγαλύτερες θερμοκρασιακές διαφορές παρατηρούνται τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο, ενώ εξίσου σημαντικές είναι και οι διαφορές θερμοκρασίας τον Ιανουάριο και τον Φεβρουάριο. Αντίθετα, μικρότερο εύρος παρατηρείται τον Οκτώβριο, τον Απρίλιο και τον Μάιο. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει πως το εξεταζόμενο σύστημα συμβάλει στην εξοικονόμηση ενέργειας κυρίως τους μήνες του έτους, στους οποίους έχουμε μεγαλύτερες ενεργειακές απαιτήσεις. Οι παραπάνω πληροφορίες παρουσιάζονται για λόγους ευκρίνειας και στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 20).

Ανάλυση συστήματος εναλλάκτη εδάφους – αέρα στα κτίρια του Πολυτεχνείου Κρήτης

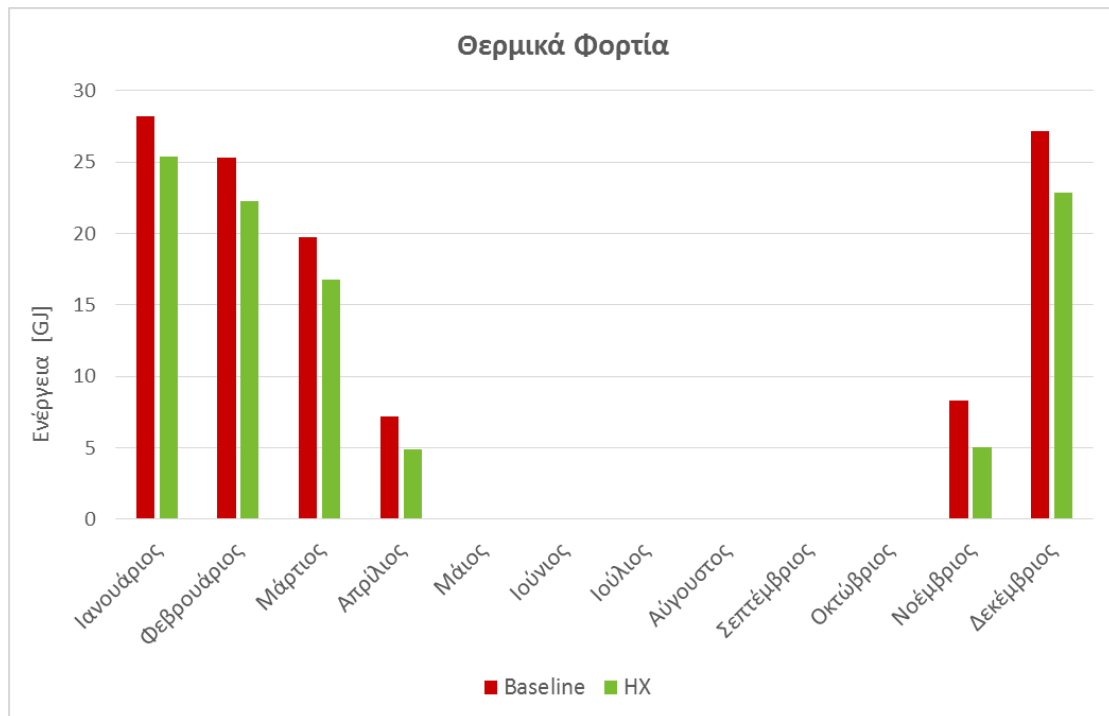


Σχήμα 20. Σύγκριση της θερμοκρασίας του αέρα του εξωτερικού περιβάλλοντος με τη θερμοκρασία του αέρα που εισέρχεται στο κτίριο μετά τη διέλευσή του από τους υπόγειους αγωγούς (Earth Tubes)

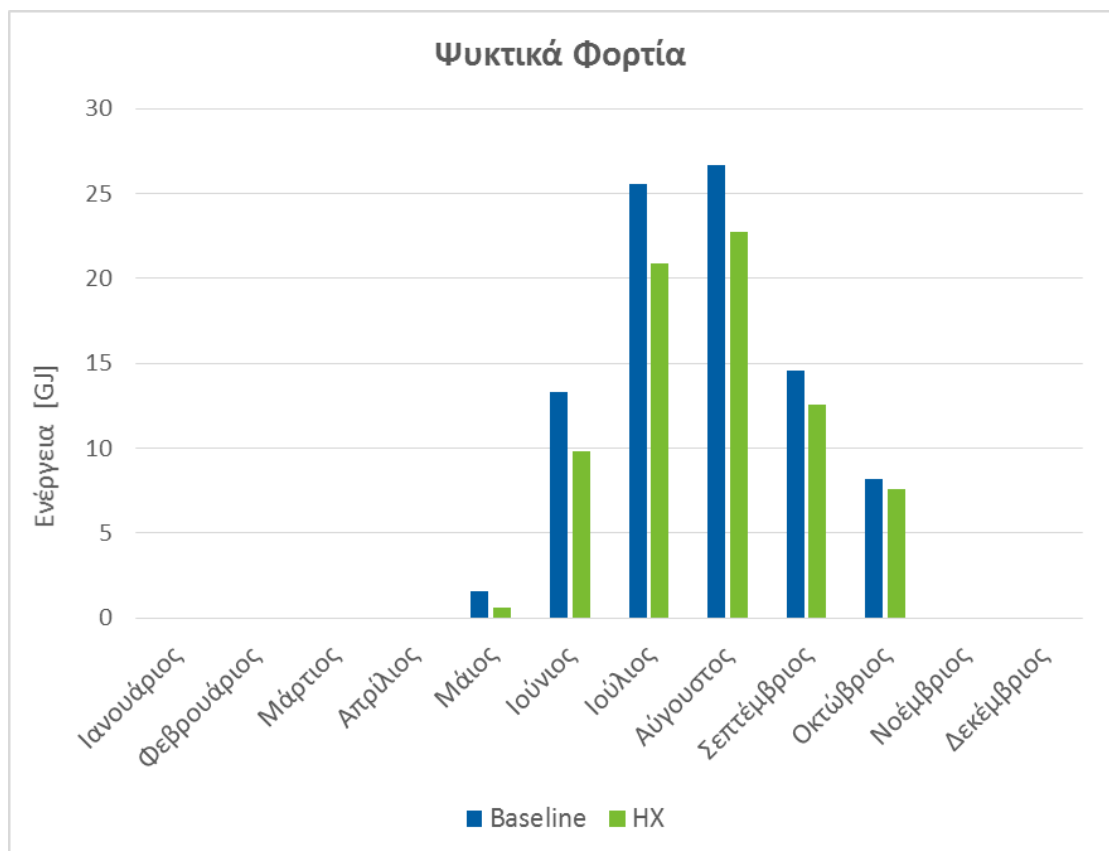
Τα απαιτούμενα θερμικά και ψυκτικά φορτία της υφιστάμενης κατάστασης (Baseline) καθώς και τα απαιτούμενα θερμικά και ψυκτικά φορτία του κτιρίου μετά την μοντελοποίηση των υπόγειων αγωγών φαίνονται στο παρακάτω πίνακα (Πίνακας 8). Προς διευκόλυνση της σύγκρισης αυτής δημιουργήθηκαν τα παρακάτω διαγράμματα (Σχήμα 21) (Σχήμα 22).

Πίνακας 8. Σύγκριση των απαιτούμενων θερμικών και ψυκτικών φορτίων της υφιστάμενης κατάστασης (Baseline) με τα αντίστοιχα του υπό μελέτη EarthtoAir HX μοντέλου

	<i>Baseline</i>		<i>EarthtoAir HX</i>	
	Θερμικά Φορτία [J]	Ψυκτικά Φορτία [J]	Θερμικά Φορτία [J]	Ψυκτικά Φορτία [J]
Ιανουάριος	2.82E+10	0	2.54E+10	0
Φεβρουάριος	2.53E+10	0	2.23E+10	0
Μάρτιος	1.97E+10	0	1.68E+10	0
Απρίλιος	7.15E+09	0	4.86E+09	0
Μάιος	0	1.58E+09	0	6.10E+08
Ιούνιος	0	1.33E+10	0	9.85E+09
Ιούλιος	0	2.55E+10	0	2.09E+10
Αύγουστος	0	2.67E+10	0	2.27E+10
Σεπτέμβριος	0	1.45E+10	0	1.25E+10
Οκτώβριος	0	8.17E+09	0	7.57E+09
Νοέμβριος	8.30E+09	0	5.05E+09	0
Δεκέμβριος	2.72E+10	0	2.29E+10	0
Μέσο Ετήσιο Φορτίο	1.16E+11	8.98E+10	1.02E+11	7.80E+10



Σχήμα 21. Σύγκριση των απαιτούμενων θερμικών φορτίων της υφιστάμενης κατάστασης (Baseline) με τα αντίστοιχα του υπό μελέτη EarthtoAir HX μοντέλου



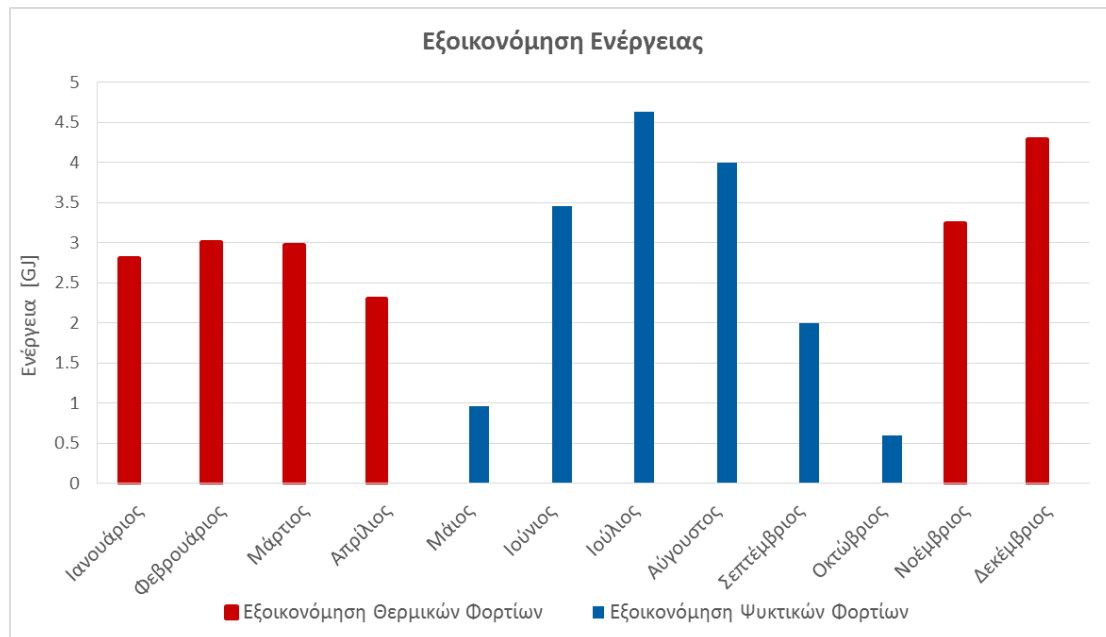
Σχήμα 22. Σύγκριση των απαιτούμενων ψυκτικών φορτίων της υφιστάμενης κατάστασης (Baseline) με τα αντίστοιχα του υπό μελέτη EarthtoAir HX μοντέλου

Ανάλυση συστήματος εναλλάκτη εδάφους – αέρα στα κτίρια του Πολυτεχνείου Κρήτης

Από τα παραπάνω προκύπτει πως η μέση μηνιαία εξοικονόμηση ενέργειας είναι περίπου στα 2.86 GJ. Η μικρότερη εξοικονόμηση παρατηρείται τον μήνα Μάιο ενώ η μεγαλύτερη τον Ιούλιο, όπως ήταν αναμενόμενο σύμφωνα με τις τιμές της θερμοκρασίας που εισήχθησαν κατά τη μοντελοποίηση. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 9) καθώς και στο αντίστοιχο διάγραμμα (Σχήμα 23) παρουσιάζονται αναλυτικά οι τιμές των εξοικονομούμενων θερμικών και ψυκτικών φορτίων. Όπως διακρίνεται η εξοικονόμηση κατά τους θερινούς μήνες έχει σχετικά μεγαλύτερες τιμές από αυτές των χειμερινών μηνών. Παρ'όλα αυτά τους χειμερινούς μήνες φαίνεται να υπάρχει μία πιο σταθερή ποσοστιαία εξοικονόμηση ενέργειας. Η συνολική ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας στο υπό μελέτη κτίριο (Κ3) υπολογίστηκε στις 9518 kWh. Το κύριο περιβαλλοντικό όφελος που προέρχεται από την ετήσια παραγωγή 9518 kWh, είναι η μείωση των αέριων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα κατά 5.74 τόνους. Για τον υπολογισμό αυτό θεωρήθηκε ότι οι πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από υδρογονάνθρακες εκπέμπουν 0.603kg CO₂ ανά kWh [43].

Πίνακας 9. Παρουσίαση εξοικονομούμενων θερμικών και ψυκτικών φορτίων μετά την εφαρμογή του υπό μελέτη EarthtoAir HX μοντέλου

	<i>Εξοικονόμηση Θερμικών Φορτίων [J]</i>	<i>Εξοικονόμηση Ψυκτικών Φορτίων [J]</i>	<i>Συνολική Εξοικονόμηση Ενέργειας [J]</i>	<i>Συνολική Εξοικονόμηση Ενέργειας [kWh]</i>
Ιανουάριος	2.80E+09	0	2.80E+09	778
Φεβρουάριος	3.01E+09	0	3.01E+09	837
Μάρτιος	2.98E+09	0	2.98E+09	827
Απρίλιος	2.30E+09	0	2.30E+09	638
Μάιος	0	0.96E+09	9.65E+08	268
Ιούνιος	0	3.45E+09	3.45E+09	958
Ιούλιος	0	4.64E+09	4.64E+09	1290
Αύγουστος	0	4.00E+09	4.00E+09	1110
Σεπτέμβριος	0	2.00E+09	2.00E+09	555
Οκτώβριος	0	0.60E+09	5.95E+08	165
Νοέμβριος	3.24E+09	0	3.24E+09	901
Δεκέμβριος	4.29E+09	0	4.29E+09	1190
Ετήσια Συν. Ενέργεια	1.86E+10	1.56E+10	3.43E+10	9518



Σχήμα 23. Εξοικονομούμενα θερμικά και ψυκτικά φορτία μετά την εφαρμογή του υπό μελέτη EarthtoAir HX μοντέλου

4.2 Αποτελέσματα παραμετρικών αναλύσεων

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο κρίθηκε απαραίτητο να εξεταστούν οι διαφοροποιήσεις των εξαγόμενων αποτελεσμάτων (μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες αέρα στους υπόγειους χώρους) μέσω μίας παραμετρικής ανάλυσης. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν αρχικά είναι:

1. το μήκος των αγωγών. Οι τιμές του μήκους που εξετάστηκαν είναι 80m, 120m και 160m.

2. το υλικό των αγωγών συνδυαστικά με το πάχος του υλικού και την ακτίνα της διατομής του αγωγού. Τα υλικά που εξετάστηκαν είναι το σκυρόδεμα (Σκ) ακτίνας 0,3m και πάχους αγωγού 0,05m, χαλκός (Χ) ακτίνας 0,08m και πάχους αγωγού 0,001m και το πλαστικό (Πλ) ακτίνας 0,15m και πάχους αγωγού 0,01m. Η επιλογή των υλικών και των γεωμετρικών τους χαρακτηριστικών έγινε βάση των ενδεικτικών υπαρχόντων υλικών της αγοράς.

3. το βάθος τοποθέτησης των αγωγών από την επιφάνεια του εδάφους. Τα εξεταζόμενα βάθη είναι 1m, 2m και 3m.

Η κωδικοποίηση των συνδυασμών περιλαμβάνει 3 στοιχεία διαχωρισμένα με κόμμα μεταξύ τους. Το πρώτο αντιπροσωπεύει το μήκος των αγωγών, το δεύτερο το υλικό και το τρίτο το βάθος. Για παράδειγμα, ο πρώτος συνδυασμός (80, Σκ, 1) αναφέρεται σε μήκος αγωγού 80m, υλικό αγωγού σκυρόδεμα και βάθος τοποθέτησής του 1m. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 10) παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης για τους 27 συνδυασμούς. Τα αποτελέσματα αναφέρονται στις θερμοκρασίες του εισερχόμενου αέρα στο κτίριο, μετά τη διέλευσή του από τους υπόγειους αγωγούς (Earth Tubes).

Πίνακας 10. Παρουσίαση αποτελεσμάτων παραμετρικής ανάλυσης ως προς το μήκος του αγωγού (Μ), το υλικό του αγωγού (Υ) και το βάθος (Β) εφαρμογής του από την επιφάνεια του εδάφους (Μ, Υ, Β). Τα αποτελέσματα αναφέρονται στις θερμοκρασίες του εισερχόμενου αέρα στο κτίριο, μετά τη διέλευσή του από τους υπόγειους αγωγούς (Earth Tubes)

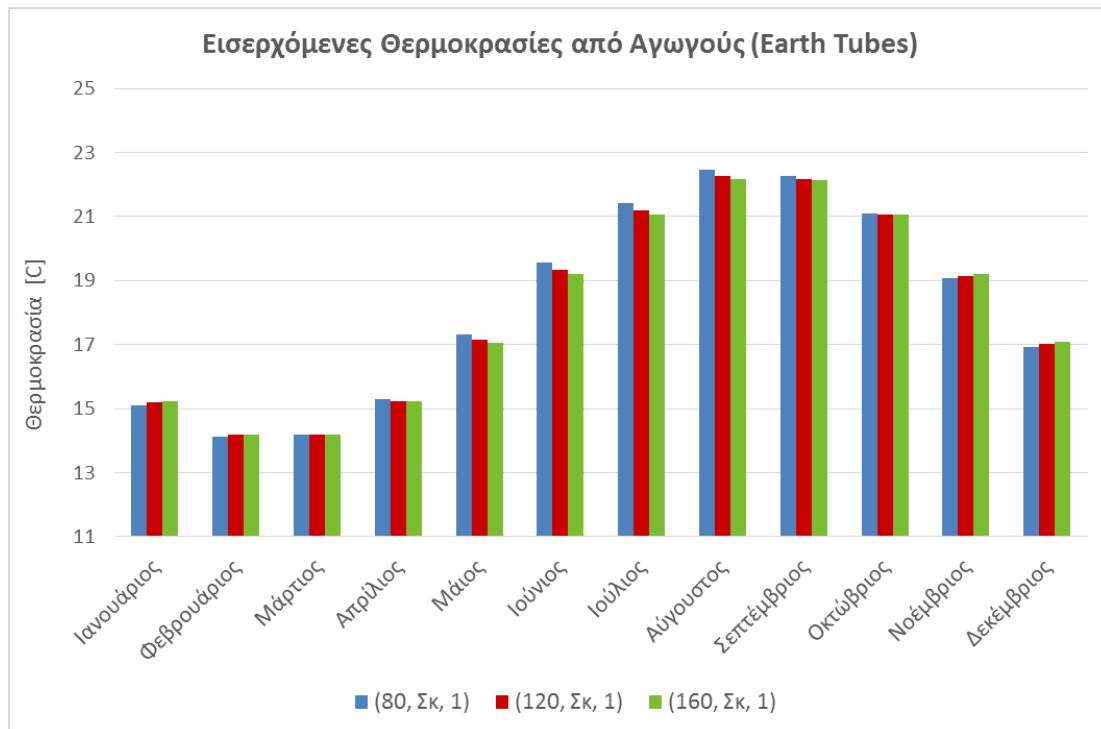
Εισερχόμενη Θερμοκρασία Αέρα-Earth Tubes [C] (Συνδυασμός 1 – Συνδυασμός 9)									
	(80, Σκ, 1)	(80, Σκ, 2)	(80, Σκ, 3)	(80, Χ, 1)	(80, Χ, 2)	(80, Χ, 3)	(80, Πλ, 1)	(80, Πλ, 2)	(80, Πλ, 3)
Ιανουάριος	15.09	17.18	17.84	15.17	17.54	18.41	15.13	17.46	18.32
Φεβρουάριος	14.11	16.26	17.3	14.17	16.55	17.82	14.14	16.48	17.73
Μάρτιος	14.19	15.86	17.01	14.2	15.99	17.32	14.2	15.96	17.27
Απρίλιος	15.3	16.07	17.05	15.24	15.98	17.02	15.28	16	17.04
Μάιος	17.31	16.99	17.57	17.16	16.61	17.1	17.24	16.7	17.18
Ιούνιος	19.56	18.28	18.32	19.34	17.66	17.46	19.45	17.8	17.6
Ιούλιος	21.41	19.49	18.96	21.19	18.83	17.98	21.29	18.98	18.14
Αύγουστος	22.45	20.48	19.55	22.26	19.88	18.61	22.36	20.01	18.77
Σεπτέμβριος	22.27	20.73	19.64	22.18	20.41	19.07	22.23	20.48	19.17
Οκτώβριος	21.09	20.48	19.57	21.07	20.39	19.35	21.08	20.41	19.39
Νοέμβριος	19.06	19.57	19.04	19.17	19.76	19.29	19.14	19.72	19.26
Δεκέμβριος	16.93	18.42	18.51	17.02	18.73	18.96	16.98	18.66	18.89

Ανάλυση συστήματος εναλλάκτη εδάφους – αέρα στα κτίρια του Πολυτεχνείου Κρήτης

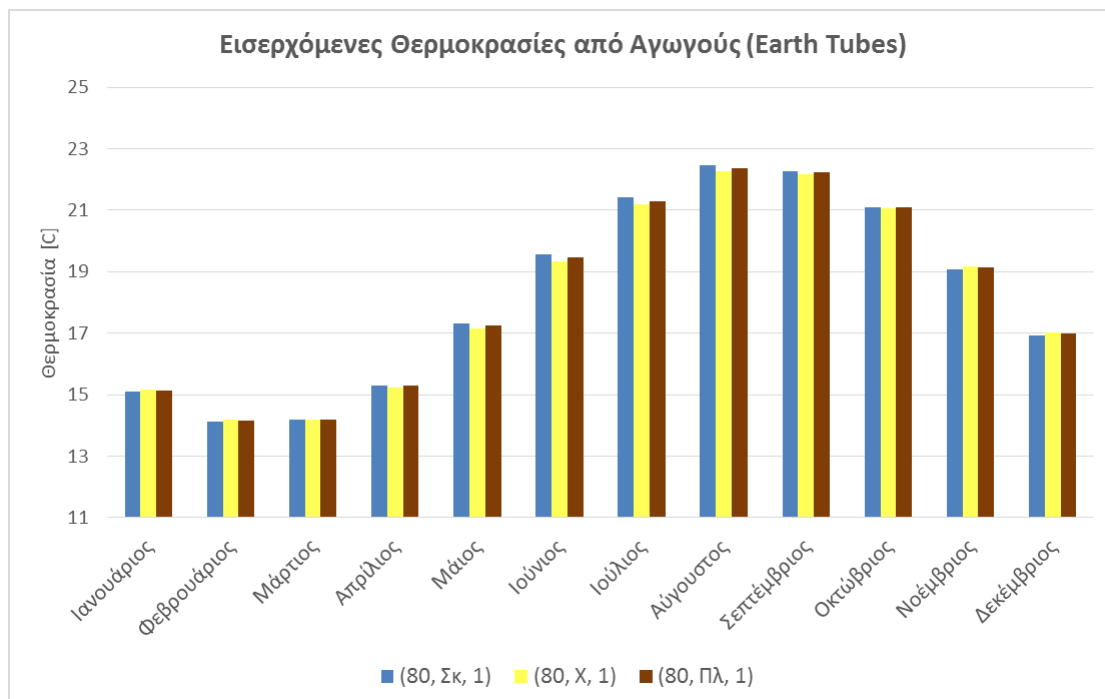
Εισερχόμενη Θερμοκρασία Αέρα-Earth Tubes [C] (Συνδυασμός 10 – Συνδυασμός 18)									
	(120, Σκ, 1)	(120, Σκ, 2)	(120, Σκ, 3)	(120, Χ, 1)	(120, Χ, 2)	(120, Χ, 3)	(120, Πλ, 1)	(120, Πλ, 2)	(120, Πλ, 3)
Ιανουάριος	15.18	17.37	18.05	15.24	17.65	18.55	15.21	17.6	18.49
Φεβρουάριος	14.17	16.41	17.49	14.21	16.65	17.94	14.19	16.6	17.89
Μάρτιος	14.19	15.93	17.12	14.2	16.03	17.4	14.2	16.02	17.37
Απρίλιος	15.24	16.02	17.05	15.21	15.95	17.02	15.23	15.96	17.03
Μάιος	17.16	16.79	17.39	17.05	16.49	16.99	17.1	16.54	17.04
Ιούνιος	19.33	17.96	17.99	19.18	17.47	17.26	19.25	17.56	17.35
Ιούλιος	21.18	19.15	18.59	21.03	18.63	17.76	21.09	18.71	17.86
Αύγουστος	22.26	20.16	19.2	22.13	19.7	18.4	22.19	19.78	18.5
Σεπτέμβριος	22.18	20.56	19.43	22.12	20.31	18.94	22.15	20.35	19
Οκτώβριος	21.07	20.43	19.49	21.06	20.36	19.3	21.07	20.38	19.32
Νοέμβριος	19.15	19.67	19.13	19.22	19.82	19.34	19.2	19.79	19.32
Δεκέμβριος	17.03	18.58	18.68	17.09	18.83	19.07	17.06	18.79	19.02

Εισερχόμενη Θερμοκρασία Αέρα-Earth Tubes [C] (Συνδυασμός 19 – Συνδυασμός 27)									
	(160, Σκ, 1)	(160, Σκ, 2)	(160, Σκ, 3)	(160, Χ, 1)	(160, Χ, 2)	(160, Χ, 3)	(160, Πλ, 1)	(160, Πλ, 2)	(160, Πλ, 3)
Ιανουάριος	15.22	17.49	18.21	15.26	17.7	18.6	15.25	17.67	18.56
Φεβρουάριος	14.2	16.51	17.63	14.22	16.68	17.99	14.21	16.66	17.96
Μάρτιος	14.19	15.97	17.21	14.2	16.05	17.43	14.2	16.04	17.41
Απρίλιος	15.22	15.99	17.04	15.19	15.94	17.02	15.2	15.95	17.03
Μάιος	17.07	16.66	17.26	17.01	16.45	16.95	17.04	16.48	16.98
Ιούνιος	19.22	17.75	17.76	19.13	17.4	17.19	19.16	17.45	17.23
Ιούλιος	21.06	18.92	18.32	20.97	18.55	17.68	21	18.6	17.73
Αύγουστος	22.16	19.96	18.94	22.08	19.63	18.32	22.11	19.67	18.37
Σεπτέμβριος	22.13	20.45	19.27	22.1	20.27	18.9	22.11	20.29	18.93
Οκτώβριος	21.06	20.4	19.43	21.06	20.35	19.28	21.06	20.36	19.29
Νοέμβριος	19.2	19.73	19.2	19.23	19.84	19.36	19.22	19.83	19.35
Δεκέμβριος	17.08	18.69	18.8	17.12	18.87	19.11	17.1	18.85	19.08

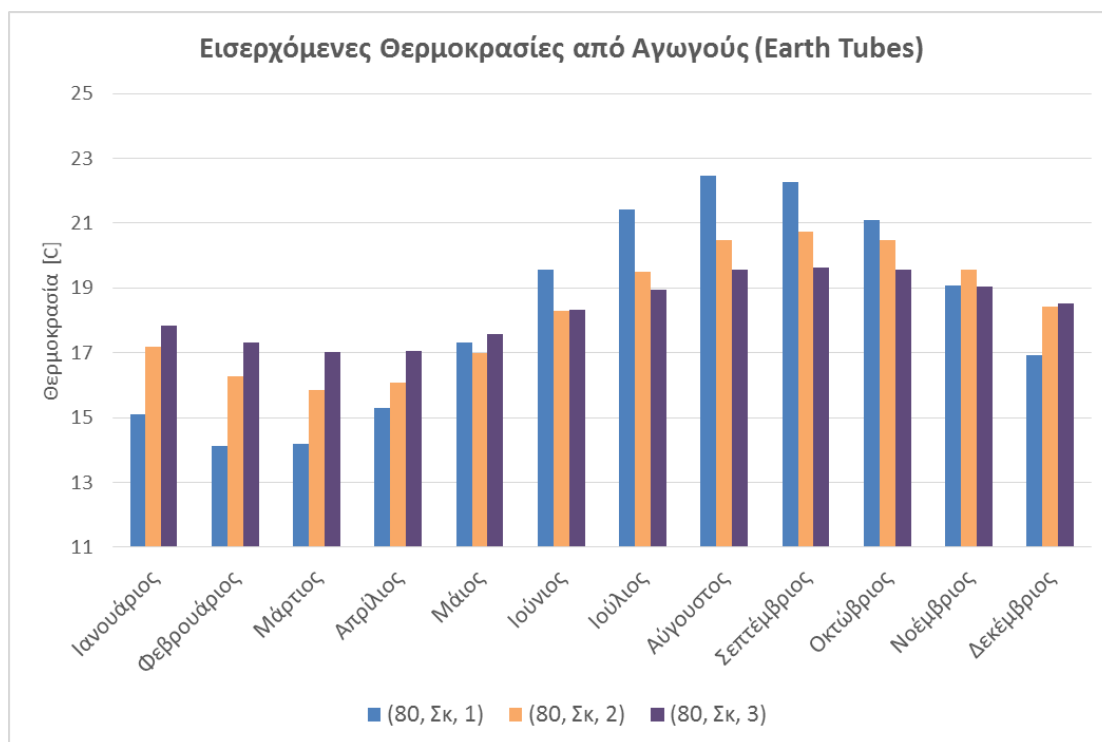
Ενδεικτικά παρακάτω παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικά διαγράμματα (Σχήμα 24, Σχήμα 25, Σχήμα 26) που επιλέχθηκαν καθώς συγκεντρώνουν την απαραίτητη πληροφορία για τη διεξαγωγή συμπερασμάτων. Από αυτά καθώς και από τις τιμές του παραπάνω πίνακα παρατηρείται ότι τόσο το μήκος των αγωγών όσο και το υλικό του αγωγού δεν επηρεάζει σημαντικά τη θερμοκρασία εισόδου σε αντίθεση με το βάθος το οποίο αποτελεί καθοριστικό παράγοντα. Η τάξη μεγέθους στην αυξομείωση της θερμοκρασίας του αέρα στο εσωτερικό του αγωγού για τις δύο παραμέτρους (μήκος και υλικό) είναι πρακτικά αμελητέα (περίπου $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$).



Σχήμα 24. Ενδεικτικό συγκριτικό διάγραμμα εισερχόμενων θερμοκρασιών αέρα μετά τη διέλευσή του από τους υπόγειους αγωγούς (Earth Tubes), στο υπό μελέτη κτίριο για τους συνδυασμούς (80, Σκ, 1), (120, Σκ, 1), (160, Σκ, 1)



Σχήμα 25. Ενδεικτικό συγκριτικό διάγραμμα εισερχόμενων θερμοκρασιών αέρα μετά τη διέλευσή του από τους υπόγειους αγωγούς (Earth Tubes), στο υπό μελέτη κτίριο για τους συνδυασμούς (80, Σκ, 1), (80, Χ, 1), (80, Πλ, 1)



Σχήμα 26. Ενδεικτικό συγκριτικό διάγραμμα εισερχόμενων θερμοκρασιών αέρα μετά τη διέλευσή του από τους υπόγειους αγωγούς (Earth Tubes), στο υπό μελέτη κτίριο για τους συνδυασμούς (80, Σκ, 1), (80, Σκ, 2), (80, Σκ, 3)

Λόγω των παραπάνω εξαγόμενων αποτελεσμάτων κρίθηκε απαραίτητο να εξεταστούν και κάποιες άλλες παράμετροι. Πιο συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα έδειξαν πως το βάθος επηρεάζει καθοριστικά τις τιμές της θερμοκρασίας του αέρα που εισέρχεται στο κτίριο. Για τον λόγο αυτόν πραγματοποιήθηκε μία ακόμη παραμετρική ανάλυση κατά την οποία κρατήθηκε αυτή η παράμετρος του βάθους ως έχει και εξετάστηκαν δύο ακόμη παράμετροι. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν είναι:

1. κλιματική ζώνη σε συνδυασμό με τις εδαφικές τις συνθήκες. Εξετάστηκαν οι τέσσερις κλιματικές ζώνες της Ελλάδας. Από την κάθε ζώνη επιλέχθηκε μία αντιπροσωπευτική περιοχή με βάση την οποία προσαρμόστηκε και το αρχείο καιρού. Έτσι, επιλέχθηκαν τα Χανιά (Ζώνη Α), η Αθήνα (Ζώνη Β), η Θεσσαλονίκη (Ζώνη Γ) και η Κοζάνη (Ζώνη Δ). Οι εδαφικές συνθήκες που εισήχθησαν αντίστοιχα είναι: ξηρό έδαφος για τα Χανιά, ελαφρώς υγρό έδαφος για την Αθήνα, υγρό έδαφος για τη Θεσσαλονίκη και κορεσμένο έδαφος για την Κοζάνη. Η επιλογή αυτή έγινε σύμφωνα με τα κλιματολογικά χαρακτηριστικά της εκάστοτε περιοχής.

2. το βάθος τοποθέτησης των αγωγών από την επιφάνεια του εδάφους. Τα εξεταζόμενα βάθη είναι 1m, 2m και 3m.

3. ο ρυθμός παροχής του αέρα που διέρχεται από τον αγωγό. Οι τιμές που εξετάστηκαν είναι: 0.05 m³/sec, 0.1 m³/sec, 0.15 m³/sec. Οι τιμές αυτές επιλέχθηκαν βάσει τεχνικών χαρακτηριστικών υπαρχόντων συστημάτων.

Η κωδικοποίηση των συνδυασμών περιλαμβάνει 3 στοιχεία διαχωρισμένα με κόμμα μεταξύ τους. Το πρώτο αντιπροσωπεύει την κλιματική ζώνη, το δεύτερο το βάθος από την επιφάνεια του εδάφους και το τρίτο τον ρυθμό παροχής του αέρα. Για παράδειγμα, ο πρώτος συνδυασμός (Α, 1, 0.05) αναφέρεται στην κλιματική Ζώνη Α (Χανιά), βάθος τοποθέτησης 1m και ρυθμό παροχής αέρα 0.05 m³/sec. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 11) παρουσιάζονται

Ανάλυση συστήματος εναλλάκτη εδάφους – αέρα στα κτίρια του Πολυτεχνείου Κρήτης

αναλυτικά τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης για τους 36 συνδυασμούς. Τα αποτελέσματα αναφέρονται στις θερμοκρασίες του εισερχόμενου αέρα στο κτίριο, μετά τη διέλευσή του από τους υπόγειους αγωγούς (Earth Tubes).

Πίνακας 11. Παρουσίαση αποτελεσμάτων παραμετρικής ανάλυσης ως προς την κλιματική ζώνη (Ζ), το βάθος (Β) εφαρμογής του αγωγού από την επιφάνεια του εδάφους και την παροχή (Π) αέρα σχεδιασμού (Ζ, Β, Π). Τα αποτελέσματα αναφέρονται στις θερμοκρασίες του εισερχόμενου αέρα στο κτίριο, μετά τη διέλευσή του από τους υπόγειους αγωγούς (Earth Tubes)

Εισερχόμενη Θερμοκρασία Αέρα-Earth Tubes [C] (Συνδυασμός 1 – Συνδυασμός 9)									
	(Α, 1, 0.05)	(Α, 1, 0.1)	(Α, 1, 0.15)	(Α, 2, 0.05)	(Α, 2, 0.1)	(Α, 2, 0.15)	(Α, 3, 0.05)	(Α, 3, 0.1)	(Α, 3, 0.15)
Ιανουάριος	15.09	14.98	14.91	17.38	17.18	17.05	18.23	17.99	17.84
Φεβρουάριος	14.11	14.04	13.99	16.42	16.26	16.15	17.65	17.44	17.3
Μάρτιος	14.19	14.19	14.19	15.93	15.86	15.81	17.22	17.1	17.01
Απρίλιος	15.3	15.39	15.44	16	16.07	16.09	17.05	17.06	17.07
Μάιος	17.31	17.5	17.63	16.78	16.99	17.13	17.25	17.44	17.57
Ιούνιος	19.56	19.83	20.01	17.94	18.28	18.5	17.74	18.09	18.32
Ιούλιος	21.41	21.69	21.88	19.13	19.5	19.74	18.3	18.7	18.96
Αύγουστος	22.45	22.69	22.84	20.15	20.48	20.69	18.92	19.3	19.55
Σεπτέμβριος	22.27	22.39	22.46	20.55	20.73	20.85	19.26	19.49	19.64
Οκτώβριος	21.09	21.12	21.13	20.43	20.48	20.52	19.42	19.51	19.57
Νοέμβριος	19.06	19.02	18.93	19.67	19.57	19.5	19.22	19.14	19.08
Δεκέμβριος	16.93	16.82	16.75	18.59	18.42	18.3	18.82	18.63	18.52

Εισερχόμενη Θερμοκρασία Αέρα-Earth Tubes [C] (Συνδυασμός 10 – Συνδυασμός 18)									
	(Β, 1, 0.05)	(Β, 1, 0.1)	(Β, 1, 0.15)	(Β, 2, 0.05)	(Β, 2, 0.1)	(Β, 2, 0.15)	(Β, 3, 0.05)	(Β, 3, 0.1)	(Β, 3, 0.15)
Ιανουάριος	12.66	12.64	12.63	14.78	14.71	14.65	16.2	16.09	16.01
Φεβρουάριος	12.54	12.49	12.44	14.06	13.96	13.89	15.4	15.26	15.16
Μάρτιος	13.73	13.72	13.7	14.27	14.23	14.21	15.17	15.11	15.07
Απρίλιος	15.86	15.91	15.93	15.24	15.3	15.33	15.47	15.51	15.55
Μάιος	18.36	18.43	18.49	16.75	16.86	16.95	16.23	16.36	16.46
Ιούνιος	20.65	20.82	20.95	18.48	18.71	18.88	17.36	17.62	17.82
Ιούλιος	21.93	22.11	22.25	19.79	20.02	20.2	18.36	18.62	18.83
Αύγουστος	22.07	22.28	22.45	20.55	20.81	21.01	19.21	19.5	19.73
Σεπτέμβριος	20.78	20.91	21.02	20.28	20.43	20.55	19.39	19.57	19.7
Οκτώβριος	18.6	18.68	18.74	19.26	19.32	19.37	19.06	19.13	19.18
Νοέμβριος	16.04	16.04	16.05	17.69	17.63	17.6	18.23	18.16	18.11
Δεκέμβριος	13.83	13.76	13.72	16.01	15.89	15.8	17.14	17	16.89

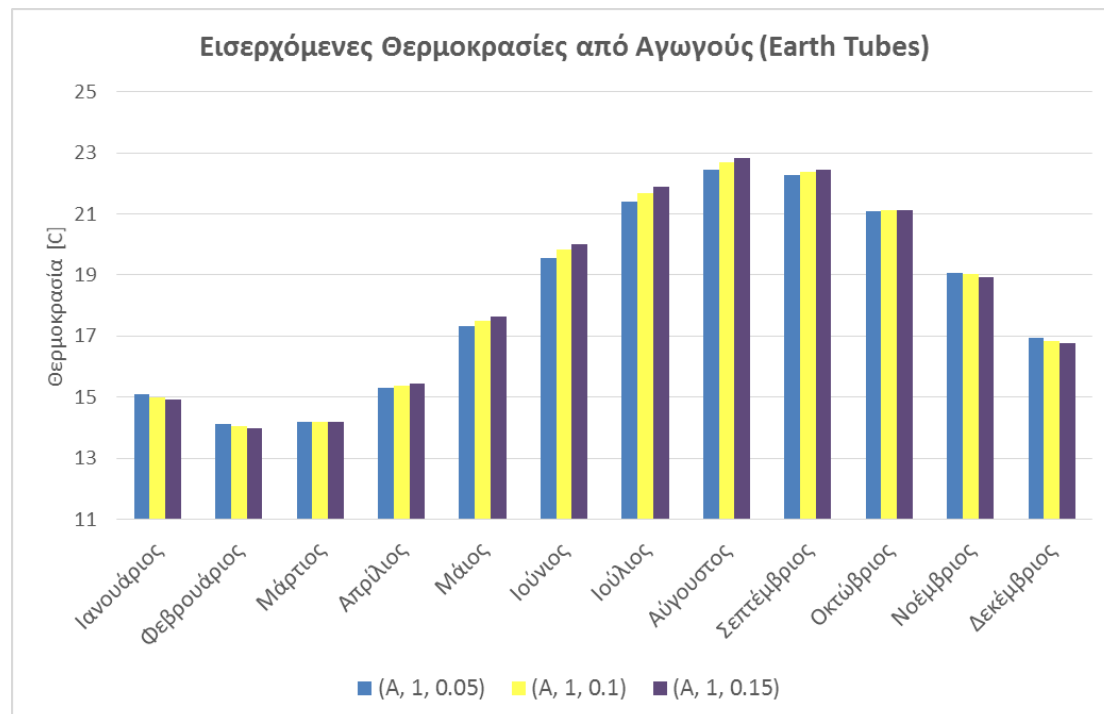
Εισερχόμενη Θερμοκρασία Αέρα-Earth Tubes [C] (Συνδυασμός 19 – Συνδυασμός 27)									
	(Γ, 1, 0.05)	(Γ, 1, 0.1)	(Γ, 1, 0.15)	(Γ, 2, 0.05)	(Γ, 2, 0.1)	(Γ, 2, 0.15)	(Γ, 3, 0.05)	(Γ, 3, 0.1)	(Γ, 3, 0.15)
Ιανουάριος	11.73	11.66	11.6	13.84	13.73	13.65	15.11	14.99	14.88
Φεβρουάριος	9.99	9.97	9.95	12.17	12.11	12.06	13.74	13.66	13.59
Μάρτιος	9.59	9.61	9.63	11.27	11.26	11.25	12.75	12.71	12.68
Απρίλιος	10.67	10.73	10.78	11.4	11.45	11.49	12.39	12.42	12.45
Μάιος	13.07	13.2	13.3	12.66	12.79	12.89	12.88	13.01	13.11
Ιούνιος	16.07	16.22	16.35	14.62	14.8	14.94	14.03	14.21	14.37
Ιούλιος	18.83	18.97	19.08	16.73	16.9	17.04	15.48	15.66	15.82
Αύγουστος	20.73	20.84	20.93	18.56	18.71	18.83	16.98	17.15	17.3

Ανάλυση συστήματος εναλλάκτη εδάφους – αέρα στα κτίρια του Πολυτεχνείου Κρήτης

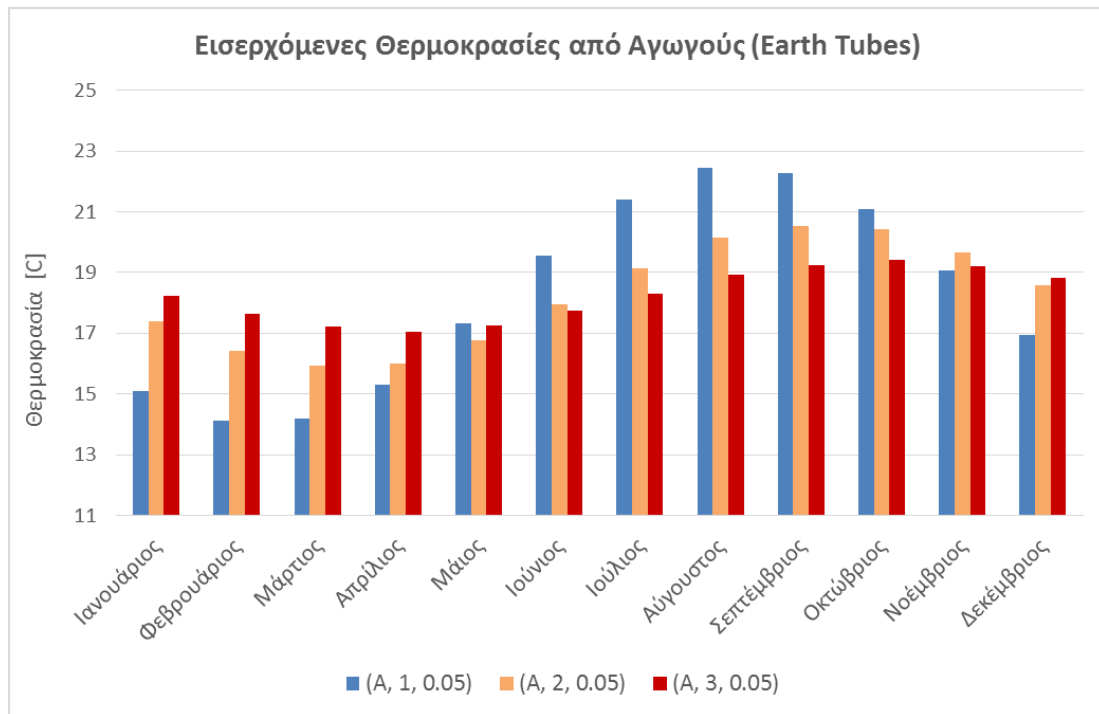
Σεπτέμβριος	21.06	21.1	21.12	19.4	19.46	19.51	17.93	18.02	18.09
Οκτώβριος	19.87	19.84	19.81	19.18	19.15	19.13	18.22	18.21	18.2
Νοέμβριος	17.45	17.35	17.28	17.9	17.8	17.72	17.7	17.6	17.52
Δεκέμβριος	14.51	14.42	14.34	15.99	15.87	15.78	16.61	16.48	16.38

Εισερχόμενη Θερμοκρασία Αέρα-Earth Tubes [C] (Συνδυασμός 28 – Συνδυασμός 36)									
	(Δ, 1, 0.05)	(Δ, 1, 0.1)	(Δ, 1, 0.15)	(Δ, 2, 0.05)	(Δ, 2, 0.1)	(Δ, 2, 0.15)	(Δ, 3, 0.05)	(Δ, 3, 0.1)	(Δ, 3, 0.15)
Ιανουάριος	9.33	9.26	9.19	11.49	11.38	11.29	13.15	13.01	12.9
Φεβρουάριος	9.35	9.3	9.26	10.83	10.76	10.7	12.26	12.17	12.09
Μάρτιος	10.85	10.83	10.82	11.29	11.26	11.24	12.11	12.07	12.04
Απρίλιος	13.52	13.54	13.55	12.76	12.79	12.81	12.76	12.78	12.8
Μάιος	16.69	16.74	16.77	14.94	15.01	15.07	14.1	14.19	14.26
Ιούνιος	19.49	19.58	19.65	17.22	17.34	17.44	15.77	15.92	16.04
Ιούλιος	21.11	21.2	21.27	18.92	19.04	19.14	17.26	17.4	17.52
Αύγουστος	21.19	21.27	21.35	19.7	19.81	19.9	18.28	18.41	18.52
Σεπτέμβριος	19.58	19.61	19.63	19.18	19.21	19.24	18.37	18.42	18.46
Οκτώβριος	16.85	16.85	16.84	17.65	17.63	17.62	17.68	17.67	17.65
Νοέμβριος	13.65	13.58	13.52	15.42	15.33	15.25	16.29	16.18	16.09
Δεκέμβριος	10.9	10.81	10.73	13.18	13.05	12.95	14.64	14.49	14.37

Ενδεικτικά παρακάτω παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικά διαγράμματα (Σχήμα 27, Σχήμα 28) που επιλέχθηκαν καθώς συγκεντρώνουν την απαραίτητη πληροφορία για τη διεξαγωγή συμπερασμάτων.



Σχήμα 27. Ενδεικτικό συγκριτικό διάγραμμα εισερχόμενων θερμοκρασιών αέρα μετά τη διέλευσή του από τους υπόγειους αγωγούς (Earth Tubes), στο υπό μελέτη κτίριο για τους συνδυασμούς (A, 1, 0.05), (A, 1, 0.1), (A, 1, 0.15)



Σχήμα 28. Ενδεικτικό συγκριτικό διάγραμμα εισερχόμενων θερμοκρασιών αέρα μετά τη διέλευσή του από τους υπόγειους αγωγούς (Earth Tubes), στο υπό μελέτη κτίριο για τους συνδυασμούς (A, 1, 0.05), (A, 2, 0.05), (A, 3, 0.05)

Από τα παραπάνω διαγράμματα καθώς και από τις τιμές του παραπάνω πίνακα παρατηρείται ότι ο ρυθμός παροχής αέρα στον αγωγό δεν επηρεάζει σημαντικά τη θερμοκρασία εισόδου σε αντίθεση με το βάθος, το οποίο αποτελεί καθοριστικό παράγοντα όπως παρατηρήθηκε και στα αποτελέσματα της προηγούμενης παραμετρικής ανάλυσης. Στα παραπάνω αποτελέσματα δεν συγκρίναμε κλιματικές ζώνες μεταξύ τους καθώς θα ήταν άστοχη σύγκριση λόγω διαφορετικών αρχείων καιρού.

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 12) συγκριθήκαν οι εισερχόμενες θερμοκρασίες αέρα μετά τη διέλευσή του από τους υπόγειους αγωγούς (Earth Tubes), με τις θερμοκρασίες του αέρα του εξωτερικού περιβάλλοντος. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε για όλες τις κλιματικές ζώνες.

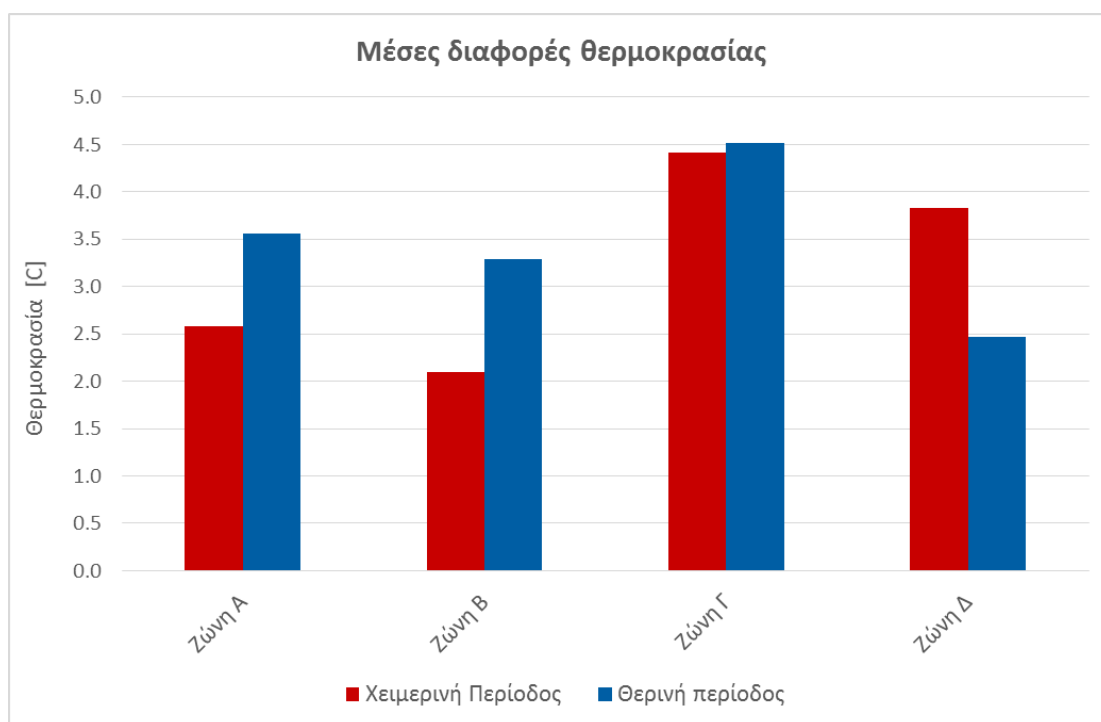
Πίνακας 12. Σύγκριση των εισερχόμενων θερμοκρασιών αέρα μετά τη διέλευσή του από τους υπόγειους αγωγούς (Earth Tubes), με τη θερμοκρασία του αέρα του εξωτερικού περιβάλλοντος. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε για όλες τις κλιματικές ζώνες

	Εξωτερική Θερμοκρασία Περιβάλλοντος [C]				Εισερχόμενη Θερμοκρασία Αέρα-Earth Tubes [C]			
	Ζώνη Α	Ζώνη Β	Ζώνη Γ	Ζώνη Δ	Ζώνη Α	Ζώνη Β	Ζώνη Γ	Ζώνη Δ
Ιανουάριος	11.15	10.7	6.15	3.18	15.09	12.66	11.73	9.33
Φεβρουάριος	10.77	9.58	6.61	4.18	14.11	12.54	9.99	9.35
Μάρτιος	12.54	11.39	9.5	7.98	14.19	13.73	9.59	10.85
Απρίλιος	15.09	15.06	13.22	11.85	15.3	15.86	10.67	13.52
Μάιος	20.18	19.61	18.44	17.76	17.31	18.36	13.07	16.69
Ιούνιος	24.06	24.61	23.33	22.44	19.56	20.65	16.07	19.49
Ιούλιος	27.09	27.3	25.79	25.59	21.41	21.93	18.83	21.11
Αύγουστος	26.42	27.59	25.45	25.21	22.45	22.07	20.73	21.19

Ανάλυση συστήματος εναλλάκτη εδάφους – αέρα στα κτίρια του Πολυτεχνείου Κρήτης

Σεπτέμβριος	23.03	23.88	21.29	19.41	22.27	20.78	21.06	19.58
Οκτώβριος	19.75	19.15	15.95	14.61	21.09	18.6	19.87	16.85
Νοέμβριος	15.73	14.51	11.08	8.4	19.06	16.04	17.45	13.65
Δεκέμβριος	12.64	10.86	7.37	3.77	16.93	13.83	14.51	10.9

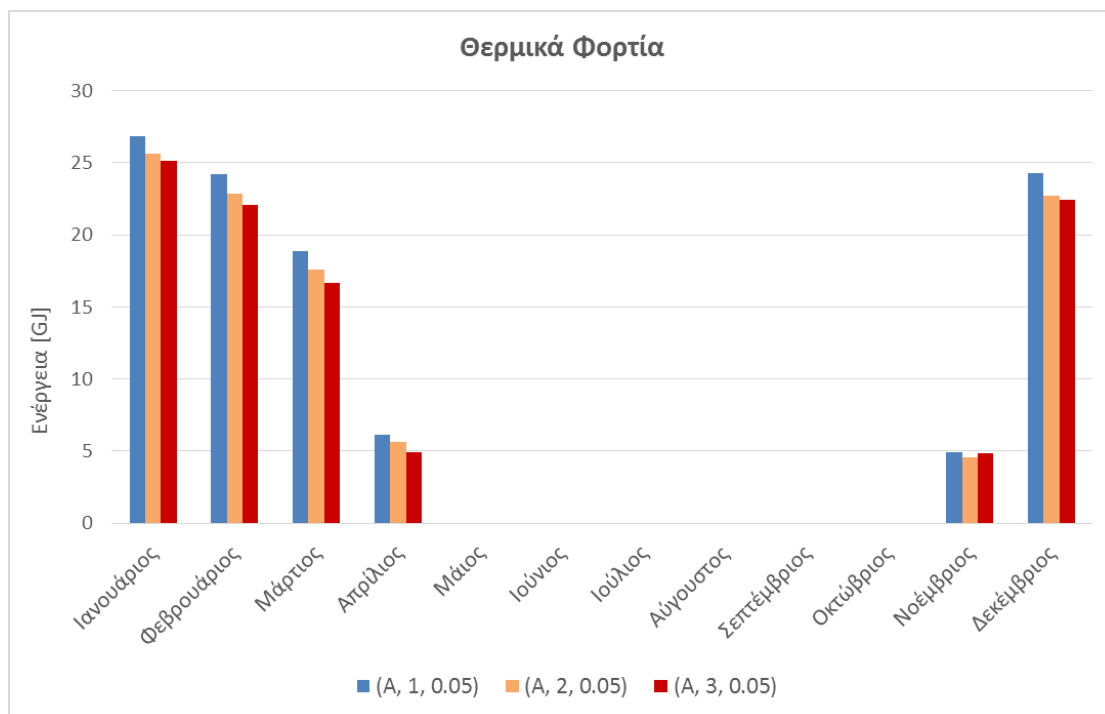
Από τις τιμές του πίνακα παρατηρείται πως στη Ζώνη Γ & Δ η διαφορά θερμοκρασίας του εισερχόμενου αέρα μετά τη διέλευσή του από τους αγωγούς (EarthTubes) σε σχέση με τη θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα, είναι μεγαλύτερη από τη διαφορά θερμοκρασίας στη Ζώνη Α & Β. Προς διευκόλυνση της σύγκρισης στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 29) παρουσιάζονται οι μέσες διαφορές θερμοκρασιών αέρα μετά τη διέλευσή του από τους υπόγειους αγωγούς (Earth Tubes), σε σχέση με τις θερμοκρασίες του αέρα του εξωτερικού περιβάλλοντος. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε για όλες τις κλιματικές ζώνες.



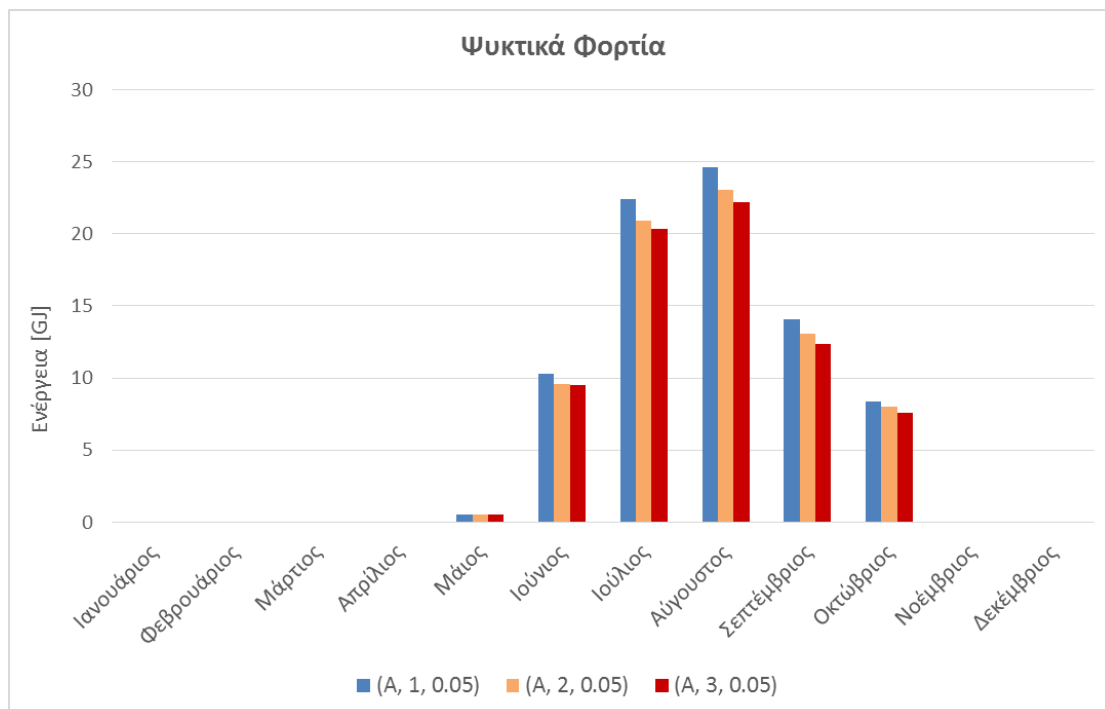
Σχήμα 29. Ενδεικτικό συγκριτικό διάγραμμα για την Χειμερινή και τη Θερινή περίοδο των μέσων διαφορών θερμοκρασιών αέρα μετά τη διέλευσή του από τους υπόγειους αγωγούς (Earth Tubes) σε σχέση με τις θερμοκρασίες του αέρα του εξωτερικού περιβάλλοντος. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε για όλες τις κλιματικές ζώνες

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, δεν συγκρίναμε κλιματικές ζώνες μεταξύ τους καθώς θα ήταν άτοπη η σύγκριση λόγω διαφορετικών αρχείων καιρού. Για τον λόγο αυτό δημιουργήθηκαν τέσσερα επιπρόσθετα μοντέλα Baseline, στα οποία εφαρμόστηκε το αρχείο καιρού της κάθε περιοχής. Με τον τρόπο αυτόν παρουσιάστηκαν συγκριτικά αποτελέσματα του εκάστοτε Baseline σεναρίου με τα αποτελέσματα των αντίστοιχων συνδυασμών. Τα αποτελέσματα αυτά φαίνονται στους παρακάτω πίνακες (Πίνακας 13,

Στη συνέχεια, δημιουργήθηκαν ενδεικτικά συγκριτικά διαγράμματα, τα οποία δείχνουν τα απαιτούμενα θερμικά και ψυκτικά φορτία των συνδυασμών (Α, 1, 0.05), (Α, 2, 0.05) και (Α, 3, 0.05) ώστε να ερευνηθεί η επιρροή του βάθους καθώς κρίθηκε προηγουμένως ως ο καθοριστικότερος παράγοντας.



Σχήμα 30. Συγκριτικό διάγραμμα απαιτούμενων θερμικών φορτίων για τους συνδυασμούς παραμέτρων (A, 1, 0.05), (A, 2, 0.05), (A, 3, 0.05)



Σχήμα 31. Συγκριτικό διάγραμμα απαιτούμενων ψυκτικών φορτίων για τους συνδυασμούς παραμέτρων (A, 1, 0.05), (A, 2, 0.05), (A, 3, 0.05)

Από τα διαγράμματα διακρίνεται μια αναλογική μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων καθώς αυξάνεται το βάθος. Επίσης φαίνεται και σε αυτό το σημείο πως στους μήνες με τις μεγαλύτερες ενεργειακές απαιτήσεις το σύστημα είναι πιο αποδοτικό.

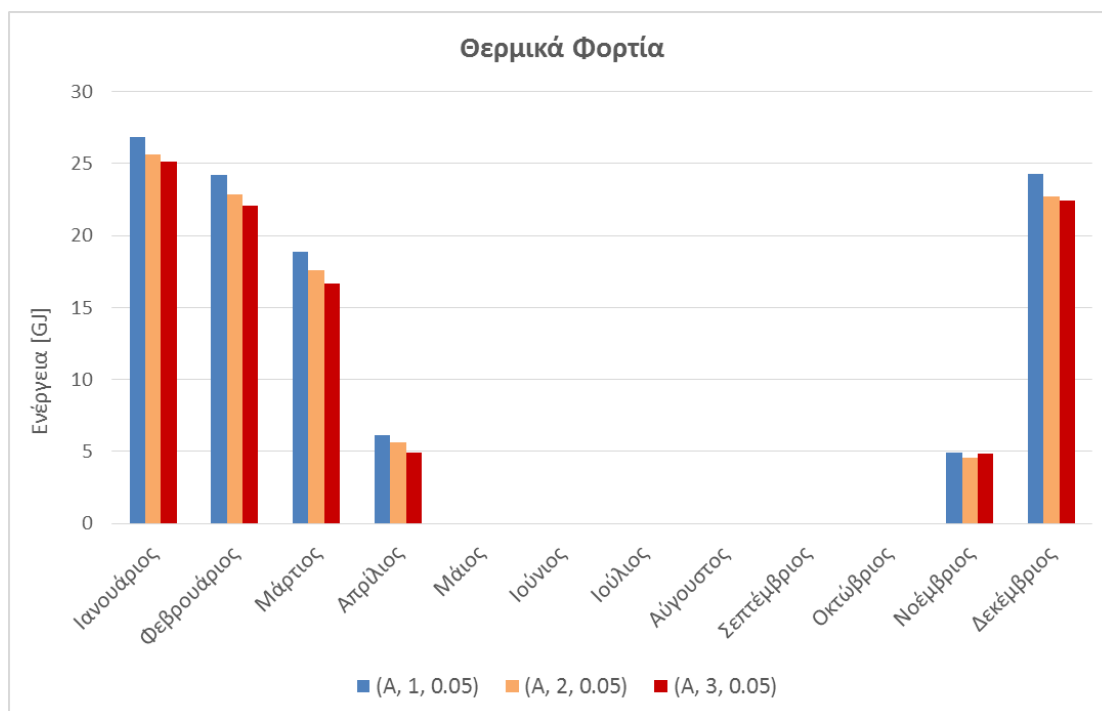
Πίνακας 14, Πίνακας 15, Πίνακας 16).

Πίνακας 13. Σύγκριση των απαιτούμενων θερμικών και ψυκτικών φορτίων της κλιματικής Ζώνης Α για τους συνδυασμούς (Α, 1, 0.05), (Α, 2, 0.05), (Α, 3, 0.05), με τα αντίστοιχα απαιτούμενα φορτία του Baseline μοντέλου

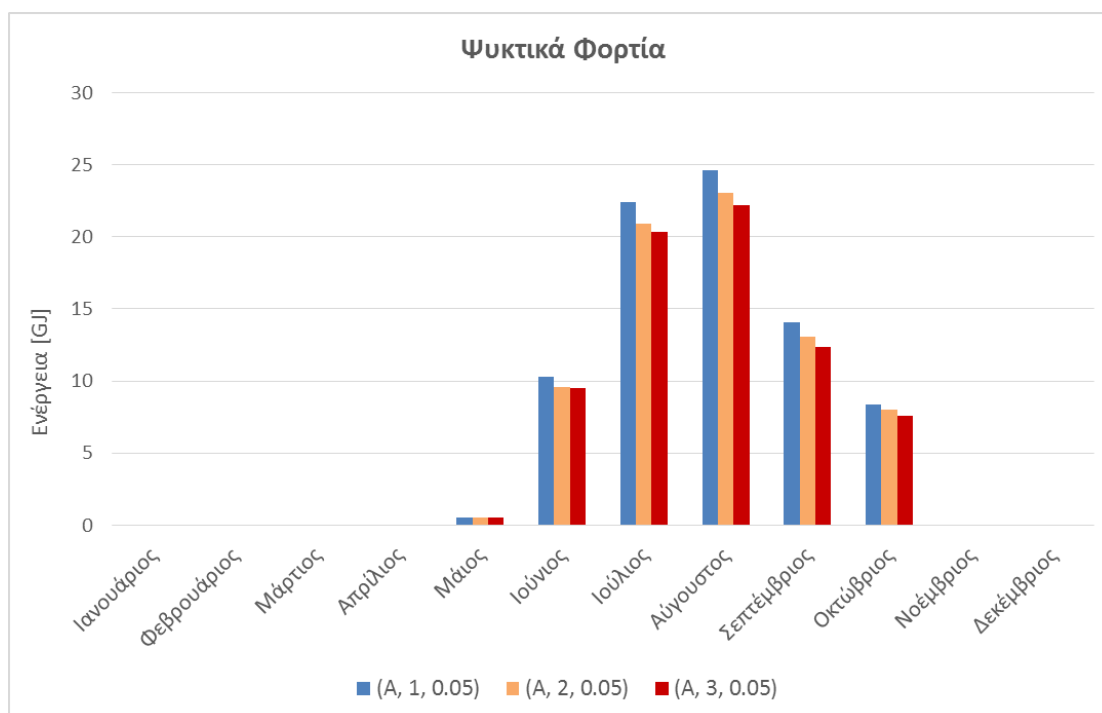
Θερμικά και Ψυκτικά Φορτία (Ζώνη Α) [J]				
	Baseline	(Α, 1, 0.05)	(Α, 2, 0.05)	(Α, 3, 0.05)
Ιανουάριος	2.82E+10	2.68E+10	2.57E+10	2.51E+10
Φεβρουάριος	2.53E+10	2.42E+10	2.28E+10	2.21E+10
Μάρτιος	1.97E+10	1.89E+10	1.76E+10	1.67E+10
Απρίλιος	7.15E+09	6.11E+09	5.63E+09	4.95E+09
Μάιος	1.58E+09	5.67E+08	5.23E+08	5.62E+08
Ιούνιος	1.33E+10	1.03E+10	9.56E+09	9.48E+09
Ιούλιος	2.55E+10	2.24E+10	2.09E+10	2.04E+10
Αύγουστος	2.67E+10	2.46E+10	2.30E+10	2.22E+10
Σεπτέμβριος	1.45E+10	1.40E+10	1.31E+10	1.24E+10
Οκτώβριος	8.17E+09	8.36E+09	8.03E+09	7.55E+09
Νοέμβριος	8.30E+09	4.91E+09	4.57E+09	4.84E+09
Δεκέμβριος	2.72E+10	2.43E+10	2.27E+10	2.25E+10
Ετήσια Ενέργεια	2.06E+11	1.85E+11	1.74E+11	1.69E+11

Στη συνέχεια, δημιουργήθηκαν ενδεικτικά συγκριτικά διαγράμματα, τα οποία δείχνουν τα απαιτούμενα θερμικά και ψυκτικά φορτία των συνδυασμών (Α, 1, 0.05), (Α, 2, 0.05) και (Α, 3, 0.05) ώστε να ερευνηθεί η επιρροή του βάθους καθώς κρίθηκε προηγουμένως ως ο καθοριστικότερος παράγοντας.

Ανάλυση συστήματος εναλλάκτη εδάφους – αέρα στα κτίρια του Πολυτεχνείου Κρήτης



Σχήμα 30. Συγκριτικό διάγραμμα απαιτούμενων θερμικών φορτίων για τους συνδυασμούς παραμέτρων (A, 1, 0.05), (A, 2, 0.05), (A, 3, 0.05)



Σχήμα 31. Συγκριτικό διάγραμμα απαιτούμενων ψυκτικών φορτίων για τους συνδυασμούς παραμέτρων (A, 1, 0.05), (A, 2, 0.05), (A, 3, 0.05)

Από τα διαγράμματα διακρίνεται μια αναλογική μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων καθώς αυξάνεται το βάθος. Επίσης φαίνεται και σε αυτό το σημείο πως στους μήνες με τις μεγαλύτερες ενεργειακές απαιτήσεις το σύστημα είναι πιο αποδοτικό.

Πίνακας 14. Σύγκριση των απαιτούμενων θερμικών και ψυκτικών φορτίων της κλιματικής Ζώνης Β για τους συνδυασμούς (Β, 1, 0.05), (Β, 2, 0.05), (Β, 3, 0.05), με τα αντίστοιχα απαιτούμενα φορτία του Baseline μοντέλου

Θερμικά και Ψυκτικά Φορτία (Ζώνη Β) [J]				
	Baseline	(Β, 1, 0.05)	(Β, 2, 0.05)	(Β, 3, 0.05)
Ιανουάριος	3.26E+10	3.19E+10	3.09E+10	3.02E+10
Φεβρουάριος	3.07E+10	2.95E+10	2.89E+10	2.84E+10
Μάρτιος	2.68E+10	2.60E+10	2.56E+10	2.49E+10
Απρίλιος	9.74E+09	8.45E+09	8.81E+09	8.67E+09
Μάιος	4.04E+08	8.37E+07	4.49E+07	3.75E+07
Ιούνιος	1.51E+10	1.23E+10	1.11E+10	1.05E+10
Ιούλιος	2.70E+10	2.42E+10	2.29E+10	2.21E+10
Αύγουστος	3.17E+10	2.83E+10	2.72E+10	2.63E+10
Σεπτέμβριος	1.55E+10	1.33E+10	1.30E+10	1.25E+10
Οκτώβριος	1.70E+09	1.08E+09	1.19E+09	1.15E+09
Νοέμβριος	2.06E+10	1.95E+10	1.80E+10	1.75E+10
Δεκέμβριος	3.81E+10	3.69E+10	3.61E+10	3.56E+10
Ετήσια Ενέργεια	2.50E+11	2.32E+11	2.24E+11	2.18E+11

Πίνακας 15. Σύγκριση των απαιτούμενων θερμικών και ψυκτικών φορτίων της κλιματικής Ζώνης Γ για τους συνδυασμούς (Γ, 1, 0.05), (Γ, 2, 0.05), (Γ, 3, 0.05), με τα αντίστοιχα απαιτούμενα φορτία του Baseline μοντέλου

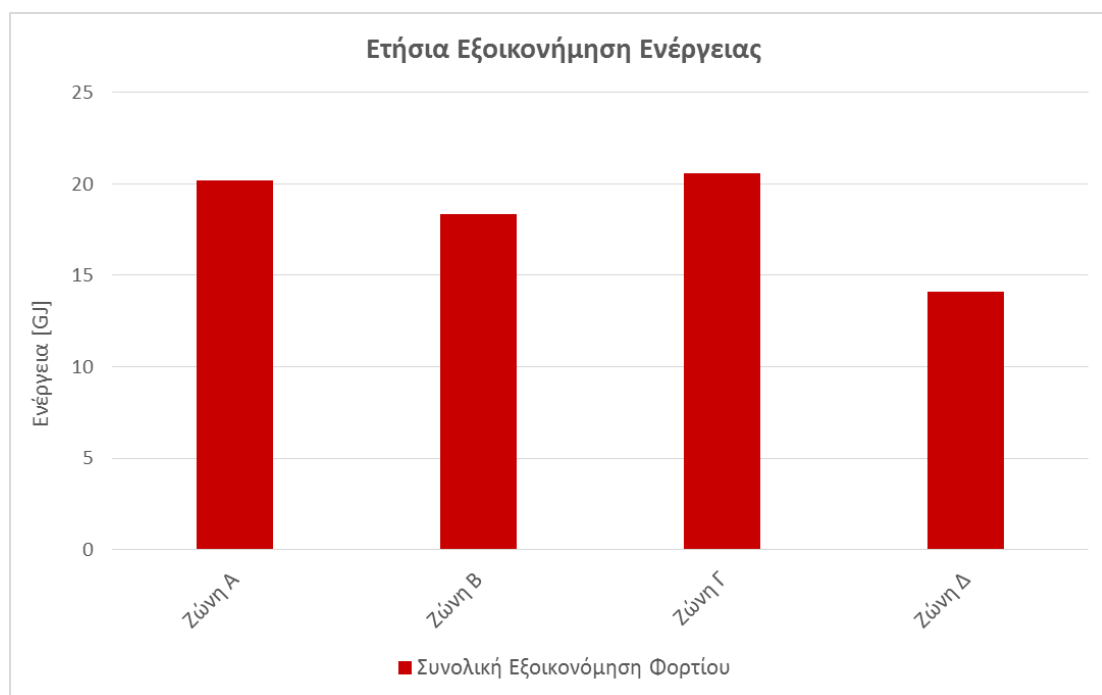
Θερμικά και Ψυκτικά Φορτία (Ζώνη Γ) [J]				
	Baseline	(Γ, 1, 0.05)	(Γ, 2, 0.05)	(Γ, 3, 0.05)
Ιανουάριος	4.15E+10	3.98E+10	3.90E+10	3.84E+10
Φεβρουάριος	3.31E+10	3.22E+10	3.15E+10	3.10E+10
Μάρτιος	3.17E+10	3.24E+10	3.16E+10	3.08E+10
Απρίλιος	1.84E+10	2.02E+10	1.97E+10	1.90E+10
Μάιος	1.17E+09	1.35E+08	1.26E+08	1.31E+08
Ιούνιος	9.50E+09	4.69E+09	4.03E+09	3.78E+09
Ιούλιος	2.09E+10	1.65E+10	1.52E+10	1.45E+10
Αύγουστος	2.24E+10	1.92E+10	1.77E+10	1.66E+10
Σεπτέμβριος	6.05E+09	5.33E+09	4.58E+09	3.95E+09
Οκτώβριος	5.15E+08	3.90E+08	3.19E+08	2.36E+08
Νοέμβριος	3.45E+10	3.10E+10	3.08E+10	3.09E+10
Δεκέμβριος	4.65E+10	4.38E+10	4.31E+10	4.29E+10
Ετήσια Ενέργεια	2.66E+11	2.46E+11	2.38E+11	2.32E+11

Πίνακας 16. Σύγκριση των απαιτούμενων θερμικών και ψυκτικών φορτίων της κλιματικής Ζώνης Δ για τους συνδυασμούς (Δ, 1, 0.05), (Δ, 2, 0.05), (Δ, 3, 0.05), με τα αντίστοιχα απαιτούμενα φορτία του Baseline μοντέλου

Θερμικά και Ψυκτικά Φορτία (Ζώνη Δ) [J]				
	Baseline	(Δ, 1, 0.05)	(Δ, 2, 0.05)	(Δ, 3, 0.05)
Ιανουάριος	4.17E+10	4.10E+10	4.06E+10	4.02E+10
Φεβρουάριος	3.52E+10	3.45E+10	3.42E+10	3.38E+10
Μάρτιος	3.24E+10	3.21E+10	3.19E+10	3.16E+10
Απρίλιος	1.38E+10	1.29E+10	1.33E+10	1.33E+10
Μάιος	1.05E+09	3.91E+08	2.73E+08	2.30E+08
Ιούνιος	1.17E+10	9.31E+09	8.15E+09	7.50E+09
Ιούλιος	2.11E+10	1.86E+10	1.73E+10	1.65E+10

Αύγουστος	2.12E+10μμ	1.89E+10	1.81E+10	1.73E+10
Σεπτέμβριος	6.01E+09	5.41E+09	5.28E+09	5.03E+09
Οκτώβριος	3.33E+08	1.82E+08	2.17E+08	2.18E+08
Νοέμβριος	3.92E+10	3.74E+10	3.65E+10	3.61E+10
Δεκέμβριος	4.81E+10	4.68E+10	4.61E+10	4.56E+10
Ετήσια Ενέργεια	2.72E+11	2.58E+11	2.52E+11	2.47E+11

Από τους παραπάνω πίνακες παρατηρείται πως η εφαρμογή του συστήματος είναι αποδοτικότερη στη Ζώνη Γ. Ακολουθεί η Ζώνη Α και η Ζώνη Β με παρόμοιες τιμές εξοικονόμησης και τέλος η Ζώνη Δ. Για την ευκρινέστερη παρουσίαση των αποτελεσμάτων αυτών, στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 32) φαίνονται οι ετήσιες εξοικονομήσεις ενέργειας ανάλογα με την κλιματική ζώνη στην οποία εφαρμόζεται το εξεταζόμενο σύστημα.



Σχήμα 32. Διάγραμμα ετήσιας εξοικονόμησης θερμικών και ψυκτικών φορτίων για κάθε κλιματική ζώνη

5. Συμπεράσματα και προτάσεις

5.1 Συμπεράσματα κτιρίου μελέτης

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την μοντελοποίηση του εξεταζόμενου συστήματος στο κτίριο μελέτης (Κ3) είναι τα εξής:

- η συνολική ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας στο υπό μελέτη κτίριο (Κ3) υπολογίστηκε στις 9518 kWh. Συνεπώς η εφαρμογή του υπό μελέτη συστήματος κρίνεται αποδοτική τόσο εξαιτίας του ενεργειακού κέρδους όσο και του χαμηλού κόστους εγκατάστασης
- η μέση μηνιαία εξοικονόμηση ενέργειας είναι περίπου στα 2.86 GJ
- η μικρότερη εξοικονόμηση παρατηρείται τον μήνα Μάιο ενώ η μεγαλύτερη τον Ιούλιο
- το κύριο περιβαλλοντικό όφελος που προέρχεται από την ετήσια παραγωγή 9518 kWh, είναι η μείωση των αέριων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα κατά 5.74 τόνους.
- οι μεγαλύτερες θερμοκρασιακές διαφορές παρατηρούνται τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο, ενώ εξίσου σημαντικές είναι και οι διαφορές θερμοκρασίας τον Ιανουάριο και τον Φεβρουάριο. Αντίθετα, μικρότερο εύρος παρατηρείται τον Οκτώβριο, τον Απρίλιο και τον Μάιο.
- η μεγαλύτερη διαφορά θερμοκρασίας που παρατηρείται σε σχέση με τη θερμοκρασία του αέρα περιβάλλοντος είναι 7.95°C ενώ η μικρότερη 0,3°C

5.2 Συμπεράσματα παραμετρικών αναλύσεων

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τις παραμετρικές αναλύσεις που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο είναι τα εξής:

- το βάθος τοποθέτησης του αγωγού από την επιφάνεια του εδάφους αποτελεί τον πιο καθοριστικό παράγοντα επιρροής από όσους μελετήθηκαν. Η συνεισφορά του στην αλλαγή της θερμοκρασίας του εξωτερικού αέρα είναι σημαντική καθώς παρατηρούνται τροποποιήσεις της τάξης των $\pm 2^{\circ}\text{C}$. Με την αύξηση του βάθους παρατηρείται μια αναλογική μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων (1GJ εξοικονόμηση ενέργειας ανά μέτρο βάθους)
- η εφαρμογή του συστήματος είναι αποδοτικότερη στην κλιματική Ζώνη Γ (21 GJ), ακολουθεί η Ζώνη Α και η Ζώνη Β με παρόμοιες τιμές εξοικονόμησης (18.5-20 GJ) και τέλος η Ζώνη Δ (14GJ).
- το μήκος και το υλικό του αγωγού δεν επηρεάζουν σημαντικά τη θερμοκρασία του εξαγόμενου από τον αγωγό αέρα. Η επιρροή των παραμέτρων αυτών στην τροποποίηση της θερμοκρασίας του εξωτερικού αέρα είναι πρακτικά αμελητέα (περίπου $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$).
- ο ρυθμός παροχής αέρα στον αγωγό δεν επηρεάζει σημαντικά την τροποποίηση της θερμοκρασίας του εξερχόμενου από τον αγωγό αέρα. Η επιρροή αυτής της παραμέτρου είναι πρακτικά αμελητέα (περίπου $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$)

5.3 Προτάσεις μελλοντικής έρευνας

Βάση των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας θα μπορούσαμε να προτείνουμε τα παρακάτω θέματα προς μελλοντική ανάπτυξη:

- περαιτέρω έρευνα γύρω από την επίδραση του ρυθμού παροχής
- περαιτέρω έρευνα σχετικά με την επίδραση του βάθους και ειδικά για πολύ μεγαλύτερα βάθη
- προσπάθεια υλοποίησης πιλοτικού συστήματος για πραγματοποίηση μετρήσεων σε πραγματικά δεδομένα
- διερεύνηση άλλων μεθόδων εκμετάλλευσης των υπόγειων περαμάτων.

6. Βιβλιογραφία

1. Olgyay V., Herdt J. *The application of ecosystems services criteria for green building assessment*. *Sol Energy* , 77, 4, 389–398. (2004).
2. Κολοκοτσά, Δ. *Κτίρια μηδενικής κατανάλωσης διεθνής εμπειρία και μελέτες περίπτωσης*. (2010).
3. Τζανακάκη Ε., *Βιοκλιματικά και Ενεργειακά Αποδοτικά κτίρια στην Ελλάδα, Ημερίδα Ε.Δ.Ε.Μ., Κ.Α.Π.Ε.* (2006).
4. Οδηγία 2002/91/ΕΚ του Ευρωπαϊκού κοινοβουλίου και του συμβουλίου της 16ης Δεκεμβρίου 2002 για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων. (2002).
5. (98/С 394/01), Ψήφισμα του συμβουλίου της 7ης Δεκεμβρίου 1998, για την ενεργειακή απόδοση στην Ευρωπαϊκή Κοινότητα. *Εφημερίδα Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων*. (1998).
6. Πράσινη Βίβλος, *Ευρωπαϊκή στρατηγική για αειφόρο, ανταγωνιστική και ασφαλή ενέργεια*. Επιτροπή των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων 105. (2006)
7. Οδηγία Λεβήτων, 92/42/EC. (92AD).
8. Οδηγία SAVE, 93/76/EC. (93AD).
9. Οδηγία, 89/106/EC του Συμβουλίου της 21ης Δεκεμβρίου 1988 για την προσέγγιση των νομοθετικών, κανονιστικών και διοικητικών διατάξεων των κρατών μελών όσον αφορά τα προϊόντα του τομέα των δομικών κατασκευών. (1988).
10. Πρόεδρος, Ε. Δ. ΝΟΜΟΣ: 1577/85 Γενικός, Γενικός Οικοδομικός Κανονισμός (ΦΕΚ 210/Α/18-12-1985). Άρθρο 6. (1985).
11. ΦΕΚ 59Δ/3.2.1989 -Αναθεώρηση με την ΥΑ 49977/3068. *Εφημερίς της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας*. (1989).
12. Οδηγία 89/106/ΕΟΚ αναθεώρηση από την Οδηγία 93/68/ΕΟΚ. (1989).
13. Ν. 2052/92. *Εφημερίς της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας* 94, 24. (1992).
14. ΥΠΟΥΡΓΙΚΗ ΑΠΟΦΑΣΗ: 11294/93. Οι Υπουργοί Περιβάλλοντος, Χωροταξίας Δημοσίων Έργων Βιομηχανίας Ενέργειας Τεχνολογίας 5–8. (1993).
15. ΚΥΑ 11038. *Εφημερίς της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας* 1122. (2008).
16. Γενικός Οικοδομικός Κανονισμός . Διατάξεις του ν.2831/2000. *Εφημερίς της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας*. (2000).
17. Ν.3017/2002. *Εφημερίς της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας* 117, 1781–1816. (2002).
18. ΠΥΣ 5/2003. *Εφημερίς της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας* 58, 9–12. (2003).
19. ΦΕΚ 207/Α/29.8.2003. *Εφημερίς της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας*. (2003).
20. ΦΕΚ1595/25.10.2004. *Εφημερίς της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας*. (2004).
21. Ν. 3661/2008. *Εφημερίς της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας* 89. (2008).
22. ΦΕΚ 635/Β/12.5.2005. *Εφημερίς της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας*. (2005).
23. ΦΕΚ 1012/Β/8.7.2005. *Εφημερίς της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας*. (2005).
24. ΤΕΕ. *Τεχνολογίες Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Θεματική Ενότητα: ΔΕ4. Επιθεώρηση κτιρίων. Κατάρτιση Ενεργειακών Επιθεωρητών*. Αθήνα. (2011).
25. Hochstein, M.P. *Classification and assessment of geothermal resources*. In: Dickson, M.H. and Fanelli, M., eds., *Small Geothermal Resources: A Guide to Development and*

- Utilization*, UNITAR, New York, 31—57. (1990).
26. White, D. E. *Characteristics of geothermal resources*. In: Kruger, P. and Otte, C., eds., *Geothermal Energy*, Stanford University Press, Stanford, 69-94. (1973).
 27. Muffler, P. and Cataldi, R. *Methods for regional assessment of geothermal resources*. *Geothermics* , 7, 53—89. (1978).
 28. Τσιλιγκιρίδης, Γ. *Ανανεώσιμες πηγές Ενέργειας*. Α.Π.Θ. (2007).
 29. Bullard, E.C. *Historical introduction to terrestrial heat flow*. In : Lee, W.H.K., ed. *Terrestrial Heat Flow*, Amer. Geophys. Un., Geophys. Mon. Ser., 8, 1-6.(1965).
 30. Lubimova, E.A.. *Thermal history of the Earth*. In: *The Earth's Crust and Upper Mantle*, Amer. Geophys. Un., Geophys. Mon. Ser., 13, 63—77. (1968).
 31. Stacey, F.D. and Loper, D.E. *Thermal history of the Earth: a corollary concerning non-linear mantle rheology*. *Phys. Earth. Planet. Inter.* 53, 167 - 174. (1988).
 32. Armstead, H.C.H. *Geothermal Energy*. E. & F. N. Spon, London, 404. (1983).
 33. Lund, J. W., and Freeston, D. *World-wide direct uses of geothermal energy 2000*. *Geothermics* 30, 29- 68. (2001).
 34. ΤΕΕ. *Εισαγωγή στον τομέα της ενέργειας*. Θεματική Ενότητα ΔΕ1. Επιθεώρηση κτιρίων. *Κατάρτιση Ενεργειακών Επιθεωρητών*. Αθήνα. (2011).
 35. Rafferty, K. *An information survival kit for the prospective residential geothermal heat pump owner*. *Bull. Geo-Heat Center* , 18, 2, 1—11. (1997).
 36. EnergyPlus, *Input Output Reference Version 8.6*, The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output, U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, Office of Building Technologies.
 37. EnergyPlus, *Getting Started Version 8.6*, Basic Concepts Manual - Essential Information You Need about Running EnergyPlus, U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, Office of Building Technologies.
 38. Kolokotsa D., Gobakis K., Papantoniou S., Georgatou C, Kampelis N., Kalaitzakis K., Vasilakopoulou K., Santamouris M., *Development of a web based energy management system for University Campuses: The CAMP-IT platform*, *Energy and Buildings*, Volume 123, 119-13, ISSN 0378-7788. (2016)
 39. Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1 , *Τεχνική οδηγία του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος 20701-1/2010, Αναλυτικές εθνικές προδιαγραφές παραμέτρων για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων και την έκδοση του πιστοποιητικού ενεργειακής απόδοσης*. (2010).
 40. EnergyPlus, *Input Output Reference Version 8.6*, Zone Earth Tube (Earth Tube), 605-609.
 41. Energy Plus, *EMS Application Guide Version 8.6*, Introduction, 7.
 42. Energy Plus, *EMS Application Guide Version 8.6*, Outdoor Air System Node Conditions, 37-38.
 43. Τσούτσος Θ. *Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, Περιβαλλοντική ανάλυση ΑΠΕ*. (2005).

7. Παράρτημα Α

```
EnergyManagementSystem:Program
Earth_Temp_EPlus_HX
IF (Month == 1),
SET Zn_1=17.79,
SET Zn_2=17.79,
SET Zn_3=17.79,
SET Zn_4=17.79,
SET Zn_5=17.79,
SET Zn_6=17.79,
SET Zn_7=17.79,
SET Zn_8=17.79,
SET Zn_9=17.79,
SET Zn_10=17.79,
SET Zn_11=17.79,
SET Zn_12=17.79,
ELSEIF (Month == 2),
SET Zn_1=17.32,
SET Zn_2=17.32,
SET Zn_3=17.32,
SET Zn_4=17.32,
SET Zn_5=17.32,
SET Zn_6=17.32,
SET Zn_7=17.32,
SET Zn_8=17.32,
SET Zn_9=17.32,
SET Zn_10=17.32,
SET Zn_11=17.32,
SET Zn_12=17.32,
ELSEIF (Month == 3),
SET Zn_1=17.1,
SET Zn_2=17.1,
SET Zn_3=17.1,
SET Zn_4=17.1,
SET Zn_5=17.1,
SET Zn_6=17.1,
SET Zn_7=17.1,
SET Zn_8=17.1,
SET Zn_9=17.1,
SET Zn_10=17.1,
SET Zn_11=17.1,
SET Zn_12=17.1,
ELSEIF (Month == 4),
SET Zn_1=17.2,
```


Ανάλυση συστήματος εναλλάκτη εδάφους – αέρα στα κτίρια του Πολυτεχνείου Κρήτης

```
SET Zn_2=17.2,  
SET Zn_3=17.2,  
SET Zn_4=17.2,  
SET Zn_5=17.2,  
SET Zn_6=17.2,  
SET Zn_7=17.2,  
SET Zn_8=17.2,  
SET Zn_9=17.2,  
SET Zn_10=17.2,  
SET Zn_11=17.2,  
SET Zn_12=17.2,  
ELSEIF (Month == 5),  
SET Zn_1=17.78,  
SET Zn_2=17.78,  
SET Zn_3=17.78,  
SET Zn_4=17.78,  
SET Zn_5=17.78,  
SET Zn_6=17.78,  
SET Zn_7=17.78,  
SET Zn_8=17.78,  
SET Zn_9=17.78,  
SET Zn_10=17.78,  
SET Zn_11=17.78,  
SET Zn_12=17.78,  
ELSEIF (Month == 6),  
SET Zn_1=18.55,  
SET Zn_2=18.55,  
SET Zn_3=18.55,  
SET Zn_4=18.55,  
SET Zn_5=18.55,  
SET Zn_6=18.55,  
SET Zn_7=18.55,  
SET Zn_8=18.55,  
SET Zn_9=18.55,  
SET Zn_10=18.55,  
SET Zn_11=18.55,  
SET Zn_12=18.55,  
ELSEIF (Month == 7),  
SET Zn_1=19.14,  
SET Zn_2=19.14,  
SET Zn_3=19.14,  
SET Zn_4=19.14,  
SET Zn_5=19.14,  
SET Zn_6=19.14,  
SET Zn_7=19.14,  
SET Zn_8=19.14,
```

Ανάλυση συστήματος εναλλάκτη εδάφους – αέρα στα κτίρια του Πολυτεχνείου Κρήτης

```
SET Zn_9=19.14,  
SET Zn_10=19.14,  
SET Zn_11=19.14,  
SET Zn_12=19.14,  
ELSEIF (Month == 8),  
SET Zn_1=19.64,  
SET Zn_2=19.64,  
SET Zn_3=19.64,  
SET Zn_4=19.64,  
SET Zn_5=19.64,  
SET Zn_6=19.64,  
SET Zn_7=19.64,  
SET Zn_8=19.64,  
SET Zn_9=19.64,  
SET Zn_10=19.64,  
SET Zn_11=19.64,  
SET Zn_12=19.64,  
ELSEIF (Month == 9),  
SET Zn_1=19.6,  
SET Zn_2=19.6,  
SET Zn_3=19.6,  
SET Zn_4=19.6,  
SET Zn_5=19.6,  
SET Zn_6=19.6,  
SET Zn_7=19.6,  
SET Zn_8=19.6,  
SET Zn_9=19.6,  
SET Zn_10=19.6,  
SET Zn_11=19.6,  
SET Zn_12=19.6,  
ELSEIF (Month == 10),  
SET Zn_1=19.46,  
SET Zn_2=19.46,  
SET Zn_3=19.46,  
SET Zn_4=19.46,  
SET Zn_5=19.46,  
SET Zn_6=19.46,  
SET Zn_7=19.46,  
SET Zn_8=19.46,  
SET Zn_9=19.46,  
SET Zn_10=19.46,  
SET Zn_11=19.46,  
SET Zn_12=19.46,  
ELSEIF (Month == 11),  
SET Zn_1=18.86,  
SET Zn_2=18.86,
```

Ανάλυση συστήματος εναλλάκτη εδάφους – αέρα στα κτίρια του Πολυτεχνείου Κρήτης

```
SET Zn_3=18.86,  
SET Zn_4=18.86,  
SET Zn_5=18.86,  
SET Zn_6=18.86,  
SET Zn_7=18.86,  
SET Zn_8=18.86,  
SET Zn_9=18.86,  
SET Zn_10=18.86,  
SET Zn_11=18.86,  
SET Zn_12=18.86,  
ELSEIF (Month == 12),  
SET Zn_1=18.39,  
SET Zn_2=18.39,  
SET Zn_3=18.39,  
SET Zn_4=18.39,  
SET Zn_5=18.39,  
SET Zn_6=18.39,  
SET Zn_7=18.39,  
SET Zn_8=18.39,  
SET Zn_9=18.39,  
SET Zn_10=18.39,  
SET Zn_11=18.39,  
SET Zn_12=18.39,  
ENDIF;
```