



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, ΑΕΡΟΝΑΥΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΣΠΟΥΔΑΣΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΨΥΞΗ ΜΕΣΩ ΕΔΑΦΟΥΣ: ΥΠΟΣΚΑΦΑ ΚΤΗΡΙΑ - ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ
ΕΔΑΦΟΥΣ ΑΕΡΑ

ΠΛΑΤΗ ΒΑΣΙΛΙΚΗ

A.M: 1070997

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: ΜΙΧΑΛΑΚΑΚΟΥ ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ

ΠΑΤΡΑ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2023

Η έγκριση της διατριβής δεν συνεπάγεται αποδοχή των απόψεων του συντάκτη. Κατά τη διάρκεια της συγγραφής, τηρήθηκαν οι αρχές της ακαδημαϊκής δεοντολογίας.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο του προπτυχιακού κύκλου σπουδών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών και Αεροναυπηγών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών. Η παρούσα μελέτη πραγματοποιήθηκε υπό τη συνεχή επίβλεψη της καθηγήτριας κας. Μιχαλακάκου Παναγιώτας, την οποία ευχαριστώ για την πολύτιμη βοήθεια και τις πολύτιμες γνώσεων που μου προσέφερε.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε μία εποχή που ο πληθυσμός αυξάνεται και το προσδόκιμο ζωής μεγαλώνει, οι ενεργειακές ανάγκες πολλαπλασιάζονται εκθετικά. Σε συνδυασμό με τις βλαβερές εκπομπές καυσαερίων και τη ραγδαία κλιματική αλλαγή, πρόκειται για μία πρωτοφανή ενεργειακή κρίση, για την αντιμετώπιση της οποίας μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας λαμβάνονται σε πολλούς τομείς. Στη προσπάθεια αυτή, τα κτήρια με ενεργειακό σχεδιασμό διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο, καθώς μέσω καινοτόμων σχεδιασμών και νέων τεχνολογιών περιορίζουν σημαντικά την ενέργεια που καταναλώνεται για τη θέρμανση και τον κλιματισμό των εσωτερικών χώρων. Τα κτήρια είναι τα μέρη που ο κόσμος περνάει τον περισσότερο χρόνο της ζωής του, και γι' αυτό τον λόγο ευθύνονται τουλάχιστον για ένα μεγάλο μέρος της ενέργειας που καταναλώνεται παγκοσμίως. Στο πλαίσιο του ενεργειακού σχεδιασμού, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η χρήση του εδάφους για τη θέρμανση και τον δροσισμό των κτηρίων. Είτε με άμεσους τρόπους είτε με έμμεσους, όπως τα υπόσκαφα κτήρια και οι εναλλάκτες θερμότητας εδάφους αέρα (ΕΑΗΕ) αντίστοιχα, η θερμοχωρητικότητα και οι φυσικές ιδιότητες του εδάφους εξασφαλίζουν ένα άνετο κλίμα στους ενοίκους και ένα λιγότερο κοστοβόρο ενεργειακά σύστημα έναντι των συμβατικών μεθόδων θέρμανσης/ δροσισμού (air-conditioning). Στο παρόν σύγγραμμα θα περιγραφεί διεξοδικά η χρήση του εδάφους για τον δροσισμό των κτηρίων και συγκεκριμένα με τις μεθόδους των υπόσκαφων κτηρίων και των ΕΑΗΕ. Περαιτέρω θα αναλυθούν διάφορα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί για να υπολογίζουν και προβλέπουν την απόδοση των ΕΑΗΕ και για να εξετάσουν την αποτελεσματικότητά τους.

Λέξεις κλειδιά: Ενεργειακός Σχεδιασμός Κτηρίων, Ψύξη με τη Χρήση Εδάφους, Υπόσκαφα Κτήρια, Εναλλάκτης Θερμότητας Εδάφους-Αέρα

ABSTRACT

At a time when the population is growing and life expectancy is increasing, energy needs are multiplying exponentially. Combined with harmful exhaust emissions and rapid climate change, this is an unprecedented energy crisis, which is being addressed by energy-saving measures in many sectors. Energy-efficient buildings play an important role in this effort, as innovative designs and new technologies significantly reduce the energy consumed for heating and air conditioning of indoor spaces. Buildings are the places where people spend most of their lives, and are therefore responsible for at least a large part of the energy consumed worldwide. In the context of energy planning, the use of soil for heating and cooling buildings plays an important role. Whether by direct or indirect methods, such as underground buildings and ground-to-air heat exchangers (GHE) respectively, the heat capacity and physical properties of soil ensure a comfortable climate for the occupants and a less costly energy system compared to conventional heating/cooling (air-conditioning) methods. In this outline, the use of soil for cooling buildings will be described in detail, in particular by the methods of underground buildings and GHE. Further, various models that have been developed to calculate and predict the performance of EHEs and to examine their effectiveness will be analyzed.

Keywords: Energy Design of Buildings, Ground Source Cooling, Underground Cooling, Underground Buildings, Ground-Air Heat Exchanger

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<u>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</u>	2
<u>ΠΕΡΙΛΗΨΗ:</u>	3
<u>ABSTRACT</u> :	4
<u>ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ:</u>	6
<u>ΛΙΣΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ:</u>	7
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΤΗΡΙΩΝ:</u>	8
1.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΩΝ ΚΤΗΡΙΩΝ.....	8
1.2. ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟΝ ΚΤΗΡΙΑΚΟ ΤΟΜΕΑ.....	8
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΨΥΞΗ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ</u>	10
2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΨΥΞΗ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ.....	10
2.2. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΨΥΞΗΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ.....	11
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΥΠΟΣΚΑΦΑ ΚΤΗΡΙΑ</u>	12
3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΥΠΟΣΚΑΦΑ ΚΤΗΡΙΑ.....	12
3.2. ΙΣΤΟΡΙΑ ΚΑΙ ΑΡΧΕΣ ΤΩΝ ΥΠΟΣΚΑΦΩΝ ΚΤΗΡΙΩΝ.....	12
3.3. ΤΥΠΟΙ ΤΩΝ ΥΠΟΣΚΑΦΩΝ ΚΤΗΡΙΩΝ.....	16
3.4. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΥΠΟΣΚΑΦΩΝ ΚΤΗΡΙΩΝ.....	18
3.5. ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΥΠΟΣΚΑΦΩΝ ΚΤΗΡΙΩΝ.....	19
3.6. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΥΠΟΣΚΑΦΩΝ ΚΤΗΡΙΩΝ.....	21
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΕΔΑΦΟΥΣ-ΑΕΡΑ (ΕΑΗΕ)</u>	22
4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΕΑΗΕ.....	22
4.2. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΕΑΗΕ.....	23
4.3. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΔΑΦΟΥΣ.....	25
4.3.1. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΕΔΑΦΟΥΣ – ΚΥΡΙΟΤΕΡΑ ΜΟΝΤΕΛΑ.....	27
4.4. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΕΔΑΦΟΥΣ-ΑΕΡΑ.....	29
4.4.1. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ.....	30

4.4.2. ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ.....	39
4.4.3. DATA DRIVEN MODELS.....	42
4.5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΕΔΑΦΟΥΣ-ΑΕΡΑ.....	43
<u>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</u>	50
<u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u>	52

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

<u>Εικόνα 1</u> : Γενική όψη του Matmata, ενός υπόγειου οικισμού στη νότια Τυνησία.....	13
<u>Εικόνα 2</u> : Αεροφωτογραφία μιας τυπικής κατοικίας με χωμάτινο καταφύγιο στο Matmata.....	13
<u>Εικόνα 3</u> : Υπόσκαφες δομές στην επαρχία Shanxi- Yao Dong της βόρειας Κίνας.....	14
<u>Εικόνα 4</u> : Καππαδοκία, αρχαία υπόγεια τουρκική πόλη.....	15
<u>Εικόνα 5</u> : Bermed earth shelter.....	16
<u>Εικόνα 6</u> : Envelope or True underground earth shelter.....	17
<u>Εικόνα 7</u> : . Εικόνες του Aloni House (a) θέα από την κορυφή του λόφου, (b) θέα από την κορυφή του σπιτιού, (c) άνοιγμα που οδηγεί στην αυλή, (d) η κεντρική αυλή, (e) εσωτερική άποψη του καθιστικού, (f) εσωτερική άποψη από την κουζίνα.....	21
<u>Εικόνα 8</u> : Σπηλαιώδης κατοικία στη Σαντορίνη, Ελλάδα.....	21
<u>Εικόνα 9</u> : Σύγχρονη υπόσκαφη κατοικία στην περιοχή Therme Vals (Ελβετία).....	22
<u>Εικόνα 10</u> : Σύστημα εναλλάκτη θερμότητας εδάφους αέρα.....	23
<u>Εικόνα 11</u> : ‘open loop’ εναλλάκτης θερμότητας εδάφους αέρα.....	24
<u>Εικόνα 12</u> : ‘closed loop’ εναλλάκτης θερμότητας εδάφους αέρα.....	24
<u>Εικόνα 13</u> : Σχηματικό διάγραμμα της πειραματικής διάταξης.....	46
<u>Εικόνα 14</u> : Σχηματικό διάγραμμα της πειραματικής διάταξης.....	47
<u>Εικόνα 15</u> : Σχέδιο του εγκατεστημένου ΕΑΗΑ.....	48

ΛΙΣΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

<u>Διάγραμμα 1</u> : Μέση μηνιαία επιφανειακή θερμοκρασία του γυμνού και του εδάφους που καλύπτεται με κοντό γρασίδι.....	26
<u>Διάγραμμα 2</u> : Μέση ετήσια επιφανειακή θερμοκρασία του γυμνού και του εδάφους που καλύπτεται με κοντό γρασίδι.....	26
<u>Διάγραμμα 3</u> : Θερμοκρασίες σε διαφορετικά βάθη του ίδιου εδάφους.....	27
<u>Διαγράμμο 4</u> : Σύγκριση των μετρούμενων και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας του αέρα εξόδου για τη θερινή περίοδο.....	35
<u>Διάγραμμα 5</u> : Σύγκριση των μετρούμενων και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας του αέρα εξόδου θερμοκρασίας αέρα για τη χειμερινή περίοδο.....	35
<u>Διάγραμμα 6</u> : Σύγκριση των προβλεπόμενων με τα μετρούμενα δεδομένα.....	41
<u>Διάγραμμα 7</u> : Θερμοκρασία αέρα και περιεκτικότητα σε υγρασία στην είσοδο/έξοδο του ΕΑΗΕ.....	49

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΤΗΡΙΩΝ

1.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΩΝ ΚΤΗΡΙΩΝ

Η ενέργεια είναι βασικός παράγοντας για την ανάπτυξη. Στις πόλεις, η οικοδομική βιομηχανία είναι ο δεύτερος υψηλότερος καταναλωτής ενέργειας μετά τις μεταφορές και απαιτεί μια σταθερή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτά χρησιμοποιούν πάνω από το 75% της παγκόσμιας πρωτογενούς ενέργειας και παράγουν μεταξύ 50% και 60% όλων των αερίων του θερμοκηπίου. Το πετρέλαιο, ο άνθρακας και το φυσικό αέριο αποτελούσαν το 81,3% του παγκόσμιου ενεργειακού εφοδιασμού το 2012, η πυρηνική ενέργεια αντιπροσώπευε το 9,7% αυτού, ενώ το υπόλοιπο 9% προερχόταν από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως η ηλιακή, η αιολική και η βιομάζα. Δυστυχώς, υπάρχει μια σειρά προβλημάτων που προκαλεί αυτή η ευρεία χρήση ορυκτών καυσίμων, κυρίως τις αυξημένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και τη ρύπανση που προκαλείται από την καύση ορυκτών καυσίμων. Συνήθως η κατανάλωση ενέργειας στα κτήρια οφείλεται σε μεγαλύτερο βαθμό στη θέρμανση και ψύξη των χώρων, ακολουθούμενη από φωτισμό ανεξάρτητα από τον τύπο του κτηρίου.[1]

Έτσι, με τις ενεργειακές ανάγκες να αυξάνονται κατακόρυφα, και τις υπάρχουσες πηγές ενέργειας να εξαντλούνται και να επιφέρουν ζημιά στο περιβάλλον, η στροφή προς δομές-κτήρια με ενεργειακό σχεδιασμό αποτελεί φρόνιμη και μάλλον απαραίτητη.

1.2. ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟΝ ΚΤΗΡΙΑΚΟ ΤΟΜΕΑ

Τα κτήρια εξυπηρετούν με διάφορους τρόπους τη σημερινή κοινωνία, προσφέρουν καταφύγιο, προστατεύουν από τις καιρικές συνθήκες και εξυπηρετούν πρωτογενείς ανάγκες των ανθρώπων. Ηλεκτρισμός, φυσικό αέριο, πετρέλαιο και άλλες πηγές παρέχουν την απαραίτητη ενέργεια για φωτισμό, θέρμανση και ψύξη των εσωτερικών χώρων, και για τη λειτουργία άλλων συσκευών, οικιακών ή μη. Δεν προκαλεί έκπληξη λοιπόν, ότι τα κτήρια καταναλώνουν τεράστια ποσά ενέργειας, ιδιαίτερα στις ανεπτυγμένες κοινωνίες.[2], καθώς επίσης ότι επιβαρύνουν τα οικοσυστήματά μας με τις εκπομπές καυσαερίων. Στις μέρες μας, γίνονται σημαντικές προσπάθειες για την ανάπτυξη και τη βελτίωση ενός ενεργειακού σχεδιασμού των κτηρίων, και για την μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης. Ο στόχος του ενεργειακού σχεδιασμού των κτηρίων σχετίζεται με την ελαχιστοποίηση της παροχής ενέργειας που απαιτείται για την επίτευξη των επιθυμητών συνθηκών διαβίωσης εντός του κτηρίου.[3]

Ένας κατάλληλος σχεδιασμός θέρμανσης και ψύξης των κτηρίων αποτελεί μία από τις πιο αποτελεσματικές μεθόδους για την πτώση του ενεργειακού κόστους.

Ωστόσο, υπάρχουν πολλές παράμετροι που καθορίζουν τις ενεργειακές ανάγκες ενός κτηρίου, οι οποίες θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και να αξιοποιούνται με τον βέλτιστο τρόπο. Χωρίζονται σε δύο κατηγορίες και περιλαμβάνουν τα εξής:[4]

1. Περιβαλλοντικοί παράγοντες:
 - A) θερμοκρασία και υγρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος
 - B) ηλιακή ακτινοβολία (άμεση και διάχυτη)
 - Γ) ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου
2. Αρχιτεκτονικοί παράγοντες:
 - A) σχήμα κτηρίου
 - B) διαφανείς επιφάνειες
 - Γ) προσανατολισμός κτηρίου
 - Δ) θερμο-φυσικές ιδιότητες των κατασκευαστικών υλικών
 - E) απόσταση από γειτονικά κτήρια

Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω παραμέτρους και τις γενικότερες ενεργειακές δαπάνες που απαιτούνται για τη κατασκευή ενός κτηρίου, προκύπτουν ορισμένες αρχές που διέπουν τον ενεργειακό σχεδιασμό.[5]

- 1) Κατάλληλος προσανατολισμός: όταν επιλέγεται ένα οικόπεδο για την εγκατάσταση ενός κτηρίου, είναι δόκιμο να τοποθετηθούν οι χώροι διαβίωσης ή οι χώροι που χρησιμοποιούνται τον περισσότερο χρόνο στη βόρεια πλευρά της δομής. Έτσι, θα επωφεληθεί από τον ήλιο του χειμώνα, διατηρώντας αυτά τα δωμάτια ζεστά και φωτεινά. Αποφυγή ή ελαχιστοποίηση των παράθυρων που βλέπουν προς τα δυτικά ή τα ανατολικά και καλή σκίαση τους για το καλοκαίρι. Επίσης, μείωση των παράθυρων που βλέπουν νότια, καθώς δεν λαμβάνουν καθόλου ήλιο το χειμώνα.
- 2) Υλικά κατασκευής: προμήθεια υλικών από τοπικούς προμηθευτές ώστε να μειωθούν οι δαπάνες μεταφοράς του στο σημείο της κατασκευής. Επιλογή υλικών που δεν έχουν τοξικά στοιχεία, μπορούν να ανακυκλωθούν και να επαναχρησιμοποιηθούν.
- 3) Μόνωση και στεγανοποίηση: Έως και το 25% της απώλειας θερμότητας το χειμώνα από τα υπάρχοντα σπίτια προκαλείται από διαρροή αέρα, γνωστή και ως ρεύματα αέρα ή ανεξέλεγκτος αερισμός. Οι κατάλληλες τεχνικές δόμησης, συμπεριλαμβανομένης της σωστής εγκατάστασης μόνωσης και στεγανοποίησης οπών κατά την κατασκευή, οι εξωτερικές πόρτες και παράθυρα καλής ποιότητας θα μειώσουν την ενεργειακή διαφυγή.

-
- 4) Ενεργειακά αποδοτικός φωτισμός: η αξιοποίηση του φυσικού φωτός και η χρήση φωτισμού χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης θα εξοικονομήσουν χρήματα και θα μειώσουν τη κατανάλωση.
 - 5) Ηλιακή ενέργεια : τα φωτοβολταϊκά και οι ηλιακοί θερμοσίφωνες μπορούν να είναι πιο ακριβά για την αγορά και την εγκατάσταση, αλλά το κόστος λειτουργίας θα είναι σημαντικά χαμηλότερο.
 - 6) Εξαερισμός: Η μείωση της διαρροής αέρα (μη ελεγχόμενος αερισμός) πρέπει να συνδυαστεί με καλά ελεγχόμενο αερισμό για να αντικαταστήσει τον χρησιμοποιημένο εσωτερικό αέρα. Τόσο τα παράθυρα όσο και οι ανεμιστήρες εξάτμισης μπορούν να βοηθήσουν στον έλεγχο του αερισμού για τη διατήρηση της ποιότητας του αέρα, ελαχιστοποιώντας παράλληλα τη διαρροή αέρα.
 - 7) Ελαχιστοποίηση των απορριμμάτων: Πάνω από το 75% των οικοδομικών απορριμμάτων είναι καθαρό υλικό από εκσκαφές, όπως σκυρόδεμα, τούβλα και ξυλεία που συχνά μπορούν να ανακυκλωθούν.

Ο στόχος αυτής της εργασίας είναι να εξετάσει τον ενεργειακά αποδοτικό, παθητικό σχεδιασμό ψύξης των κτιρίων. Μεγάλη έμφαση θα δοθεί στην παθητική ψύξη, κυρίως στους άμεσους και έμμεσους τρόπους για την ψύξη των κτηρίων (υπόσκαφα κτήρια και εναλλάκτες θερμότητας αέρα-εδάφους), χρησιμοποιώντας το έδαφος και τις αρχές γεωθερμικής ενέργειας .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΨΥΞΗ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ

2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΨΥΞΗ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ

Ο δροσισμός των κτηρίων με τη χρήση εδάφους έχει προκαλέσει μεγάλο ενδιαφέρον και έχει βρει εφαρμογή σε πολλές περιπτώσεις τα τελευταία χρόνια. Η τεχνική αυτή βασίζεται στην σημαντική θερμοχωρητικότητα του εδάφους, η οποία προσδίδει στο έδαφος την ικανότητα να λειτουργεί ως θερμική πηγή (τον Χειμώνα) ή θερμικός νεροχύτης (το Καλοκαίρι), αναλόγως το επιθυμητό αποτέλεσμα. Επίσης, είναι γνωστό ότι η θερμοκρασία του εδάφους σε βάθος 2.5-3m παραμένει σχετικά σταθερή και χαμηλή κατά τη διάρκεια του χρόνου [6]. Έτσι, σε ζεστό κλίμα, η χαμηλότερη θερμοκρασία του εδάφους μπορεί να αξιοποιηθεί για να δροσίσει το εσωτερικό περιβάλλον ενός κτηρίου, μειώνοντας τις ενεργειακές δαπάνες που απαιτούν οι διάφορες συσκευές δροσισμού των χώρων (air-conditioning systems).

Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες του δροσισμού με τη χρήση εδάφους [7] :

1. Η άμεση ψύξη με τη χρήση εδάφους, που περιλαμβάνει τη μερική ή τη πλήρη τοποθέτηση του κελύφους του κτηρίου σε άμεση επαφή με το έδαφος, όπως συμβαίνει με τα υπόσκαφα κτήρια.

-
2. Η έμμεση ψύξη με τη χρήση εδάφους, που περιλαμβάνει τη χρήση εναλλακτών θερμότητας εδάφους- αέρα, δηλαδή υπόγειων αγωγών-σωλήνων (buried pipelines) στους οποίους κυκλοφορεί αέρας που καταλήγει εντός του κτηρίου.

2.2. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΨΥΞΗΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Υπάρχουν διάφορα πλεονεκτήματα στον δροσισμό με τη χρήση εδάφους [8], [9], όπως:

1. Εξοικονόμηση ενέργειας: καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια από τα συμβατικά συστήματα κλιματισμού, επειδή μπορεί να εκμεταλλεύονται τη σταθερή θερμοκρασία της Γης.
2. Επιπτώσεις στο περιβάλλον: Η λιγότερη χρήση ενέργειας έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου και μικρότερο αποτύπωμα άνθρακα.
3. Σταθερή άνεση: Η ψύξη εδάφους προσφέρει αξιόπιστη παροχή ψύξης, εξασφαλίζοντας μια άνετη εσωτερική ατμόσφαιρα ακόμη και σε περίπτωση έντονων καιρικών συνθηκών.
4. Μειωμένος θόρυβος: Σε σύγκριση με τα παραδοσιακά συστήματα κλιματισμού, τα συστήματα επίγειας ψύξης είναι συνήθως πιο αθόρυβα.
5. Ενσωμάτωση με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας: Για περαιτέρω βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, η ψύξη εδάφους μπορεί να συνδυαστεί με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας.

Παρά τα πλεονεκτήματά της, η ψύξη εδάφους δεν είναι χωρίς προκλήσεις:

1. Γεωγραφική καταλληλότητα: Η απόδοση ποικίλλει ανάλογα με τη γεωγραφική θέση. Περιοχές με μικρότερη διακύμανση θερμοκρασίας στο έδαφος ενδέχεται να παρουσιάσουν μειωμένη αποτελεσματικότητα.
2. Αρχικό κόστος: Η εφαρμογή συστημάτων ψύξης εδάφους μπορεί να συνεπάγεται υψηλότερο αρχικό κόστος σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους ψύξης, κάτι που μπορεί να αποτρέψει ορισμένους ιδιοκτήτες κτιρίων.
3. Πολυπλοκότητα σχεδίασης: Ο σωστός σχεδιασμός και η εγκατάσταση είναι ζωτικής σημασίας για τη βέλτιστη απόδοση του συστήματος. Οι συγκεκριμένοι παράγοντες τοποθεσίας και το μέγεθος του συστήματος πρέπει να λαμβάνονται προσεκτικά υπόψη.
4. Προκλήσεις ολοκλήρωσης: Η ενοποίηση συστημάτων ψύξης εδάφους με άλλα συστήματα κτηρίων, όπως ο εξαερισμός, μπορεί να παρουσιάσει προκλήσεις σχεδιασμού και μηχανικής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΥΠΟΣΚΑΦΑ ΚΤΗΡΙΑ

3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΥΠΟΣΚΑΦΑ ΚΤΗΡΙΑ

Οι ολοένα πιο συχνές και σοβαρές καταιγίδες λόγω κλιματικής αλλαγής καθώς και η πιθανή αύξηση της θερμοκρασίας από 4 έως 6 βαθμούς Κελσίου μέχρι το τέλος του αιώνα, προκαλούν περισσότερο ενδιαφέρον για τον ενεργειακό σχεδιασμό των κτηρίων και για την κατασκευή δομών που προσαρμόζονται στο περιβάλλον[10]. Μία τέτοια δομή αποτελούν τα υπόσκαφα κτήρια, των οποίων περισσότερες από μία επιφάνειες κατασκευάζονται σε επαφή με το έδαφος, κάτω από την επιφάνεια του φυσικού εδάφους και παρουσιάζουν μία ή περισσότερες ορατές όψεις.[11] Η θερμική μάζα που παρέχεται από τη γη λειτουργεί ως θερμική αποθήκη ή θερμική πηγή, η οποία απορροφά ή απελευθερώνει θερμότητα ανάλογα με την διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του χωμάτινου τοίχου και του χώρου. Η θερμική άνεση που προκύπτει μπορεί συχνά να διατηρηθεί χωρίς τη χρήση μηχανικών συστημάτων θέρμανσης ή ψύξης [10] Οι τοίχοι και η οροφή καλύπτονται από χώμα και η δροσιά της μάζας της γης που γειτνιάζει με το κτήριο παρέχουν άμεση παθητική αγωγή για το κτήριο.[12]

3.2. ΙΣΤΟΡΙΑ ΚΑΙ ΑΡΧΕΣ ΤΩΝ ΥΠΟΣΚΑΦΩΝ ΚΤΗΡΙΩΝ

Σύμφωνα με ιστορικά στοιχεία, τα υπόσκαφα κτήρια και οι υπόγειες κατασκευές παρουσιάζονται ως μία τεχνική αρχαίων χρόνων που εξασφάλιζε καταφύγιο, ζεστασιά, προστασία από κακοκαιρίες καθώς και από άγρια ζώα. Τέτοιες δομές έχουν βρεθεί επί το πλείστον σε περιοχές με θερμό και ξηρό κλίμα, στοιχείο που υποδηλώνει ότι εξυπηρετούσαν κυρίως στον δροσισμό των χώρων και στην αποφυγή των υψηλών θερμοκρασιών.[13]

Για να κατανοήσει κανείς καλύτερα τον τρόπο με τον οποίο τα υπόσκαφα κτήρια λειτουργούν, θα ήταν φρόνιμο να εξετάσει το ιστορικό υπόβαθρο αυτών. Από τις πρώτες κατοικήσιμες δομές τέτοιου τύπου βρέθηκε στο Καμιτακαμόρι της Ιαπωνίας, μία κατοικία γνωστή ως Miyagi Prefecture. Η κατοικία αυτή θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως καταφύγιο για ξεκούραση, ως φυλάκιο για το κυνήγι ή ως δωμάτιο για την αποθήκευση εργαλείων ή για τη διεξαγωγή θρησκευτικών τελετών.

Στην Τυνησία, οι κάτοικοι του Matmata ζούσαν σε τεχνητές σπηλιές για αιώνες. Εδώ τα δωμάτια δημιουργήθηκαν με το σκάψιμο ενός μαλακού βράχου για να κατασκευάσουν σπίτια με αίθριο που είχαν πολλά ανασκαμμένα δωμάτια με ύψος έως και 4 έως 10 μέτρα και θολωτές οροφές που άνοιγαν προς τα έξω σε μια ενιαία βυθισμένη αυλή. Ο αρχικός στόχος για να χτίσουν κάτω από το έδαφος ήταν να προστατευθούν οι κάτοικοι από την ακραία ημερήσια βορειοαφρικανική ζέστη και το νυχτερινό κρύο, χαρακτηριστικό αυτής της περιοχής της ερήμου.[14]

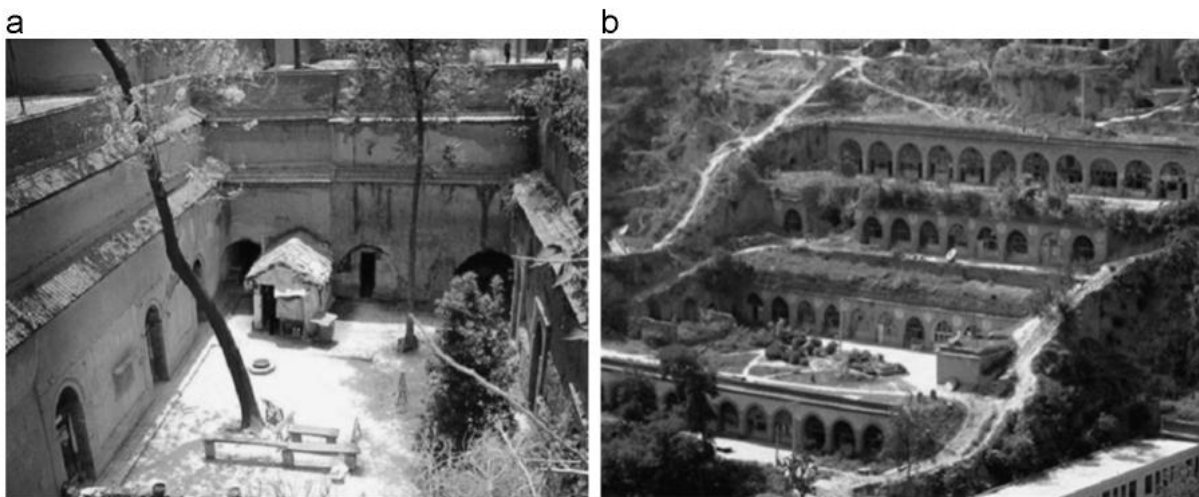


Εικόνα 1: Γενική όψη του Matmata, ενός υπόγειου οικισμού στη νότια Τυνησία[15]



Εικόνα 2: Αεροφωτογραφία μιας τυπικής κατοικίας με χωμάτινο καταφύγιο στο Matmata.[14]

Παρόμοιες υπόγειες δομές όπως αυτές στη Τυνησία έχουν ανακαλυφθεί και σε μία βόρεια κινεζική επαρχία Shanxi γνωστή ως "Yao Dong".



Εικόνα 3: Υπόσκαφες δομές στην επαρχία Shanxi- Yao Dong της βόρειας Κίνας.[13]

Επιπλέον, κάποιες υπόγειες δομές βρέθηκαν χτισμένες με σκοπό ανεξάρτητο της παροχής κατοικίας και αποθήκευσης τροφίμων. Για παράδειγμα, η Καππαδοκία στην Τουρκία, είναι μια αρχαία πόλη και σπηλαιώδης εκκλησία μπορούσε να φιλοξενήσει έως και 50 χιλιάδες ανθρώπους, και έφθανε σε βάθος έντεκα ορόφων κάτω από το έδαφος. Αυτή η υπόγεια πόλη χτίστηκε γύρω στον 7ο αιώνα επειδή οι χριστιανοί έπρεπε να κρυφτούν από τους Ρωμαίους που τους καταδίωκαν. Η Τουρκία είναι γεμάτη από υπόγειες πόλεις και οφείλεται σε ένα μεγάλο βαθμό στο γεγονός ότι τα ηφαιστειακά πετρώματα στην περιοχή είναι εύκολο να σκαλιστούν.[13]



Εικόνα 4: Καππαδοκία, αρχαία υπόγεια

Σημαντικές υπόγειες δομές και οικισμοί κάτω από το έδαφος λοιπόν, σημειώνονται στη Τυνησία, στη βόρεια Κίνα, και στη Τουρκία, σε περιοχές που επικρατεί ένα θερμό και ξηρό κλίμα που χαρακτηρίζεται από μεγάλες ημερήσιες και εποχιακές διακυμάνσεις θερμοκρασίας. Τα οφέλη που έφεραν αυτές οι δομές επί το εν λόγω κλίμα βασίζονται σε τρεις θεμελιώδεις αρχές των υπόσκαφων κτηρίων:

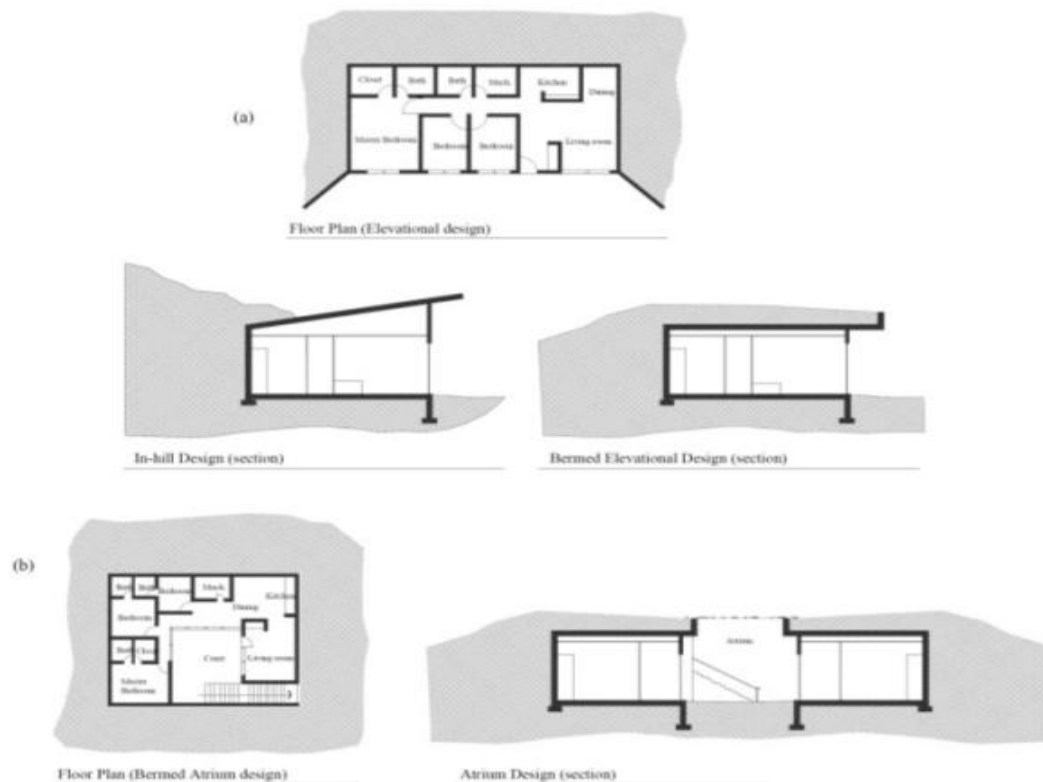
1. Ενίσχυση της θερμοκρασίας εσωτερικού χώρου με βάση τις φυσικές αρχές της ετήσιας αποθήκευσης θερμότητας (PAHS) σύμφωνα με τις οποίες η γη συλλέγει ηλιακή θερμότητα όλο το καλοκαίρι και ψύχεται παθητικά, ενώ θερμαίνει τη γη γύρω της και διατηρεί τη ζεστή το χειμώνα με την ανάκτηση της αποθηκευμένης θερμότητας από το έδαφος. Αυτή η διπλή λειτουργία παρουσιάζει ένα σενάριο που καθιστά την πρακτική των υπόσκαφων κτηρίων αποτελεσματική τόσο σε θερμά όσο και σε ψυχρά κλίματα.
2. Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του εδάφους και του αέρα του εξωτερικού χώρου. Στην περίπτωση αυτή η κανονική θερμοκρασία του εδάφους σπάνια φτάνει τις θερμοκρασίες του εξωτερικού αέρα μιας κανονικής ζεστής ημέρας, με αποτέλεσμα να διοχετεύεται λιγότερη θερμότητα στο σπίτι λόγω της μειωμένης διαφοράς.
3. Προστασία του κτηρίου από την άμεση ηλιακή ακτινοβολία, εξαλείφοντας έτσι το άμεσο θερμικό φορτίο λόγω της θερμικής ακτινοβολίας μέσω του κελύφους του κτηρίου.[14]

3.3. ΤΥΠΟΙ ΤΩΝ ΥΠΟΣΚΑΦΩΝ ΚΤΗΡΙΩΝ

Στο παρελθόν έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες τεχνικές για την κατασκευή υπόσκαφων κτηρίων. Το υλικό κατασκευής των τοίχων ποικίλλουν, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της τοποθεσίας, όπως είναι το έδαφος, το κλίμα και ο σχεδιασμός. Ωστόσο, οι γενικές κατευθυντήριες γραμμές δείχνουν ότι τα σπίτια που είναι βαθύτερα θαμμένα απαιτούν ισχυρότερους και ανθεκτικότερους δομικούς τοίχους, καθώς η πίεση αυξάνεται με το βάθος. Οι τοίχοι πρέπει να έχουν τη κατάλληλη επιφάνεια για αδιαβροχοποίηση και μόνωση, ώστε να αντέχουν την πίεση και την υγρασία του περιβάλλοντος εδάφους. Όταν το έδαφος είναι υγρό ή παγωμένο, η πίεση στους τοίχους και στα δάπεδα αυξάνεται.

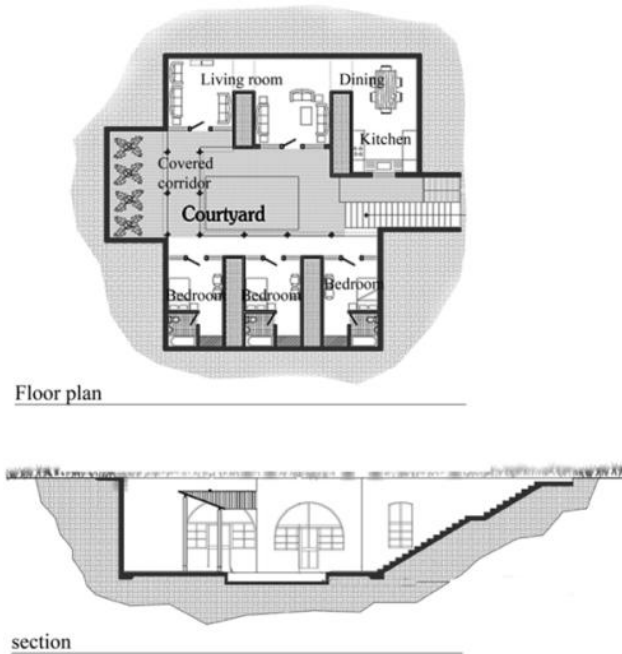
Τα υπόσκαφα κτήρια κατασκευάζονται με γνώμονα την εξοικονόμηση ενέργειας και την εξοικονόμηση πόρων. Αν και οι τεχνικές κατασκευής τους δεν είναι ευρέως γνωστές, δύο είναι οι επικρατέστεροι κατασκευαστικοί τύποι[14]:

- Bermed earth shelter: Σε αυτόν τον τύπο κατασκευής, το χώμα συσσωρεύεται έναντι των εξωτερικών τοίχων και με κλίση προς τα κάτω και μακριά από το σπίτι. Η στέγη μπορεί να είναι πλήρως καλυμμένη με χώμα ή και όχι, και τα παράθυρα/ανοίγματα μπορεί να βρίσκονται σε μία ή περισσότερες πλευρές του σπιτιού.



Εικόνα 5: Bermed earth shelter.[14]

- Envelope or True underground earth shelter: Στην πραγματική υπόγεια κατασκευή, το σπίτι χτίζεται εντελώς κάτω από το έδαφος σε ένα επίπεδο οικόπεδο, με τους κύριους χώρους διαβίωσης τοποθετημένους γύρω από μια κεντρική εξωτερική αυλή ή αίθριο. Τα παράθυρα και οι γυάλινες πόρτες που βλέπουν στο αίθριο παρέχουν φως, ηλιακή θερμότητα, εξωτερική θέα στους αντίστοιχους χώρους. Η πρόσβαση είναι εφικτή μέσω μιας σκάλας από το επίπεδο του εδάφους. Επίσης, το αίθριο καθιστά δυνατό τον φυσικό εξαερισμό των χώρων του κτηρίου.



Εικόνα 6: Envelope or True underground earth shelter[14]

Στο παρακάτω πίνακα παρατίθενται ορισμένες διαφορές των δύο διαφορετικών τύπων υπόσκαφων κτηρίων :

Παράγοντας	Τύπος υπόσκαφου κτηρίου	
	<i>Bermed</i>	<i>Envelope/true underground</i>
Παθητική ηλιακή ενέργεια	Εξαιρετική	Λιγότερο αποτελεσματική
Θερμική σταθερότητα	Λιγότερο αποτελεσματική	Εξαιρετική
Δυνατότητα φυσικού φωτισμού	Αποτελεσματική	Λιγότερο αποτελεσματική
Προστασία από τον άνεμο	Λιγότερο αποτελεσματική	Εξαιρετική
Προστασία από τον θόρυβο	Λιγότερο αποτελεσματική	Εξαιρετική
Οπτική άνεση	Εξαιρετική	Φτωχή

Κατάλληλο κλίμα	Εύκρατο	Τροπικό
Κόστος κατασκευής	Μοντέρνος σχεδιασμός: ενδιάμεσο κόστος Παραδοσιακός σχεδιασμός: μεγάλο κόστος	Μοντέρνος σχεδιασμός: μέγιστο κόστος Παραδοσιακός σχεδιασμός: μικρό κόστος

3.4. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΥΠΟΣΚΑΦΩΝ ΚΤΗΡΙΩΝ

Έχει αποδειχθεί από ιστορικά [15],[24], αλλά και σύγχρονα προηγούμενα, ότι τα υπόσκαφα κτήρια και η υπόγεια δόμηση τους είναι μια βιώσιμη εναλλακτική λύση έναντι των συμβατικών-πάνω από το έδαφος-κατοικιών λόγω της συνεπαγόμενης μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας, ιδίως σε κλίματα με δύσκολες περιβαλλοντικές συνθήκες. Προσφέρουν πολλά προτερήματα σε σχέση με τις γνωστές, συμβατικές, πάνω από το έδαφος κατοικίες, ιδίως όσον αφορά την ενεργειακή κατανάλωση. Πιο συγκεκριμένα, πλεονεκτούν με τους παρακάτω τρόπους:

1. Εξοικονομούν ενέργεια: η χρήση της γης ως αποθήκη θερμότητας μεγάλης χωρητικότητας καθιστά δυνατή τη μείωση της ζήτησης ενέργειας θέρμανσης και ψύξης αυτών των κτιρίων.
Το ψυχρότερο έδαφος σε σχέση με τον ζεστό αέρα μιας καλοκαιρινής μέρας μειώνει τη μεταφορά θερμότητας εντός του κτηρίου με αποτέλεσμα να μειώνονται οι ανάγκες χρήσης συσκευών δροσισμού και κατά συνέπεια να μειώνεται και η ενεργειακή κατανάλωση. Είναι αναντίρρητο ότι τα υπόσκαφα κτήρια υπερτερούν ενεργειακά των συμβατικών κτηρίων ανεξαρτήτως σχεδιασμού. Επίσης, η προστασία από την άμεση έκθεση σε ηλιακή ακτινοβολία λόγω του εδάφους επηρεάζει στη διατήρηση χαμηλότερων θερμοκρασιών στους εσωτερικούς χώρους.
2. Δεν διαταράσσουν το μικροπεριβάλλον: τα υπόσκαφα κτήρια έχουν ελάχιστο οπτικό αντίκτυπο στο περιβάλλον. Πρόκειται για τη δημιουργία διακριτικών δομών που επηρεάζουν ελάχιστα τον χώρο στον οποίο βρίσκονται, καθιστώντας τα ιδανικά για περιοχές που μεγάλες επεμβάσεις, όπως μεγάλα κτήρια, επηρεάζουν αρνητικά το μικροπεριβάλλον ή είναι μη επιθυμητά.
3. «πράσινες» οροφές : η ύπαρξη χώματος στις οροφές των υπόσκαφων κτηρίων δίνει τη δυνατότητα για να δημιουργηθούν πράσινοι χώροι, γεμάτοι φυτά που θα ενισχύουν το φυσικό περιβάλλον και θα έχουν θετική επίδραση στους ανθρώπους.

-
4. Μείωση θορύβου και δονήσεων: το έδαφος έχει υψηλή ικανότητα μόνωσης και απόσβεσης των ακουστικών κυμάτων με αποτέλεσμα τη διαμόρφωση ήσυχων δωματίων για τους κατοίκους υπόγειων κτηρίων.
 5. Λιγότερες ανάγκες συντήρησης συγκριτικά με τις συμβατικές κατοικίες: τα υπόσκαφα κτήρια απαιτούν λιγότερη συντήρηση καθώς το έδαφος που περιβάλλει το κέλυφος του κτηρίου έχει προστατευτικό ρόλο. Λόγω αυτού του περιβλήματος, το κέλυφος δεν επηρεάζεται από τα κλιματικά στοιχεία. Δεν έρχεται σε άμεση επαφή με τον άνεμο, τις βροχοπτώσεις, το χαλάζι, το χιόνι, ή άλλα φυσικά αίτια. Επιπλέον, τα υπόσκαφα κτήρια είναι πιο ανθεκτικά σε περίπτωση σεισμών και άλλων φυσικών καταστροφών. Έτσι, αποδεσμεύονται από ζημιές λόγω αυτών των φαινομένων και παρέχουν ένα ασφαλέστερο περιβάλλον στους διαμένοντες.
 6. Μειωμένες θερμικές ρωγμές: η δομή που προστατεύεται από στρώμα γης δεν υπόκειται στις διακυμάνσεις θερμοκρασίας όπως ένα κτήριο πάνω από το έδαφος και με αυτό τον τρόπο υφίσταται μικρότερη διαστολή και συστολή των δομικών υλικών, ελαχιστοποιώντας τις θερμικές τους ρωγμές.
 7. Προστασία από την ηλιακή ακτινοβολία: Τα υπέργεια κτήρια εκτίθενται σε έντονη θερμότητα και υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία σε θερμά κλίματα, η οποία προκαλεί επιφανειακό ξεθώριασμα και αποχρωματισμό της εξωτερικής βαφής. Η υπεριώδης ακτινοβολία υποβαθμίζει επίσης τα υλικά στέγης, όπως τη μεμβράνη στεγανοποίησης. Δεν υπάρχει υπεριώδης εκφύλιση με τις οροφές που καλύπτονται από χώμα. Οι συνθήκες λόγω του εδάφους αυξάνουν τη δομική μακροζωία των δομικών υλικών, τα οποία προστατεύονται στα σκληρά κλίματα και δεν διαβρώνονται.
 8. Ανθεκτικότητα σε περίπτωση πυρκαγιάς: η δομή των υπόγειων κτηρίων εξασφαλίζει μία παραπάνω αντοχή σε περίπτωση πυρκαγιάς συγκριτικά με τα συμβατικά σπίτια.

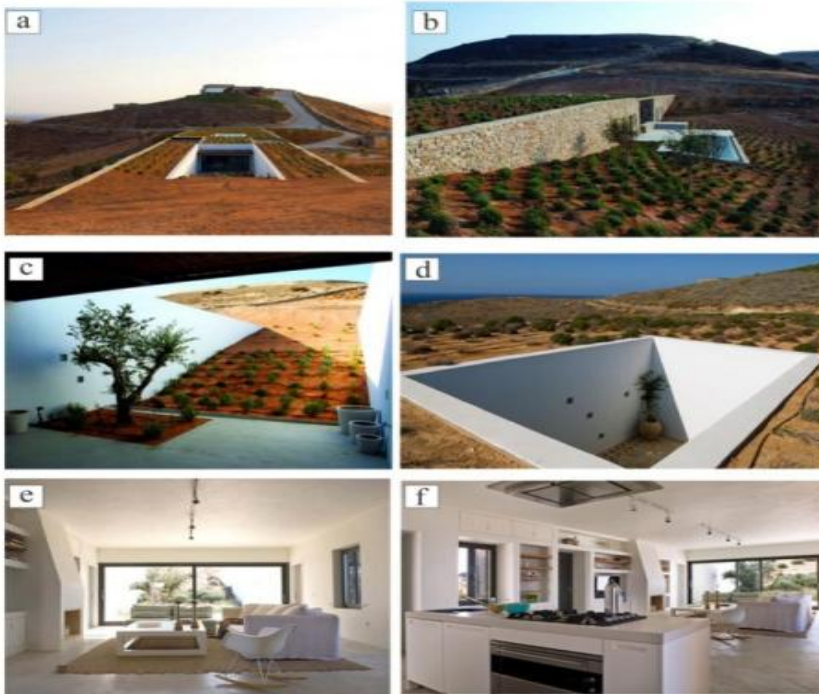
3.5. ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΥΠΟΣΚΑΦΩΝ ΚΤΗΡΙΩΝ

Παρά τα ενεργειακά πλεονεκτήματα και τα υπόλοιπα προτερήματά τους, τα υπόσκαφα κτήρια έχουν κάποιους πιθανούς περιορισμούς και μειονεκτήματα. Αυτά αναφέρονται παρακάτω [15]:

1. Περιορισμένο φυσικό φως: η θέση των υπόσκαφων κτηρίων και η απουσία παραθύρων οδηγεί στην έλλειψη φυσικού φωτισμού εντός του κτηρίου. Αυτή η συνθήκη μπορεί να υποβαθμίσει την ποιότητα ζωής καθώς επηρεάζει τον ψυχισμό των κατοίκων. Η απουσία παραθύρων για άμεση επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον, και η επακόλουθη έλλειψη ερεθισμάτων από τις μεταβαλλόμενες καιρικές συνθήκες και του ηλιακού φωτός, μπορεί να επιτείνει την αίσθηση εγκλεισμού ή κλειστοφοβίας. Ένα κτήριο χωρίς παράθυρα προκαλεί επίσης έλλειψη χωρικού προσανατολισμού όταν τα σημεία εξόδου δεν είναι ορατά, δημιουργώντας φόβο διαφυγής σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης.

-
2. προβλήματα υγρασίας: ιδιαίτερα σε περιοχές με έντονη βροχόπτωση ή υπόγεια νερά
 3. υψηλότερο κόστος κατασκευής: συγκριτικά με ένα συμβατικό above-the-ground κτήριο, ένα υπόσκαφο ίδιου μεγέθους είναι πιο κοστοβόρο. Αυτό οφείλεται κυρίως στα πρόσθετα υλικά που χρησιμοποιούνται για να στηρίξουν το επιπλέον βάρος του εδάφους στα τοιχώματα και ιδίως στην οροφή. Επιπλέον κόστος αποτελεί και η τοποθέτηση εξαερισμού που είναι απαραίτητος σε τέτοιου τύπου δομές.
 4. Χαμηλή ποιότητα αέρα : ο φυσικός εξαερισμός είναι εξαιρετικά μειωμένος στα υπόγεια κτήρια με αποτέλεσμα να υποβαθμίζεται η ποιότητα του αέρα των εσωτερικών χώρων. Ωστόσο αυτή η κατάσταση αντιμετωπίζεται με την εγκατάσταση συστημάτων εξαερισμού.
 5. Περιορισμοί κατασκευής αναλόγως με το έδαφος: Δεν είναι όλοι οι τύποι εδάφους αποτελεσματικοί για την κατασκευή υπόσκαφων κτηρίων. Για λόγους ασφαλείας έναντι κατολισθήσεων και άλλων κινδύνων που προέρχονται από την υγρασία, ο τύπος εδάφους που υπάρχει σε μια συγκεκριμένη γεωγραφική θέση καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την επιλογή του τόπου και του τρόπου κατασκευής. Κατά τη δημιουργία υπόγειων κατασκευών , ορισμένοι τύποι εδάφους είναι καταλληλότεροι από άλλους. Για το επιθυμητό βάθος της κατασκευής κάτω από το επίπεδο του εδάφους, πρέπει να καθοριστεί η αντοχή του εδάφους. Ακόμη και αν θα ήταν επιθυμητές, η εκσκαφή σε εξαιρετικά πυκνό έδαφος μπορεί να είναι δύσκολη υπόθεση, ενώ στην περίπτωση βραχώδους εδάφους μπορεί να είναι ακόμη και αδύνατη. Από την άλλη πλευρά, οι εκσκαφές είναι απλές σε πολύ ασθενή εδάφη[14].

3.6. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΥΠΟΣΚΑΦΩΝ ΚΤΗΡΙΩΝ



Εικόνα 7: . Εικόνες του Aloni House (a) θέα από την κορυφή του λόφου, (b) θέα από την κορυφή του σπιτιού, (c) άνοιγμα που οδηγεί στην αυλή, (d) η κεντρική αυλή, (e) εσωτερική άποψη του καθιστικού, (f) εσωτερική άποψη από την κουζίνα.[14]

Εικόνα 8: Σπηλαιώδης κατοικία στη Σαντορίνη, Ελλάδα.[24]





Εικόνα 9: Σύγχρονη υπόσκαφη κατοικία στην περιοχή Therme Vals (Ελβετία).[24]

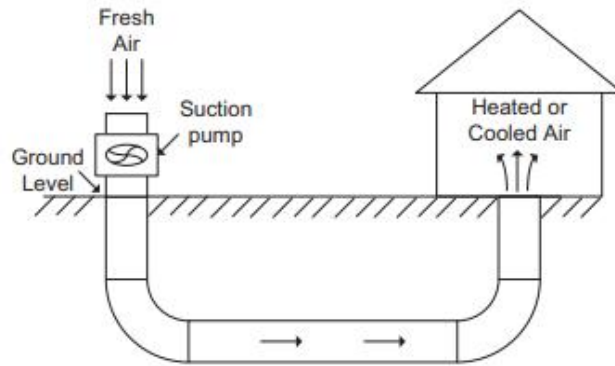
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΕΔΑΦΟΥΣ-ΑΕΡΑ (ΕΑΗΕ)

4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΕΑΗΕ

Η ιδέα της μεταφοράς της περίσσειας θερμότητας από ένα κτήριο σε μια φυσική απορροφητική πηγή, όπως το έδαφος, είναι γνωστή από την αρχαιότητα. Επίσης είναι γνωστό ότι η θερμοκρασία του εδάφους σε βάθος περίπου 2,5 έως 3 μέτρων παραμένει αρκετά σταθερή και χαμηλή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Η πιο συνηθισμένη τεχνική για τη σύζευξη κτηρίων και άλλων κατασκευών με το έδαφος είναι η χρήση υπόγειων σηράγγων αέρα, γνωστών ως εναλλάκτες θερμότητας από εδάφους-αέρα (ΕΑΗΕ). Οι εναλλάκτες θερμότητας αποτελούνται από ένα σύστημα σωλήνων, το οποίο θάβεται στο έδαφος, ενώ ο αέρας κυκλοφορεί μέσω των υπόγειων σωλήνων για απορρόφηση ή εκροή θερμότητας. Ο αέρας διοχετεύεται μέσα στους σωλήνες χρησιμοποιώντας έναν κατάλληλο ανεμιστήρα που εγκαθίσταται στην είσοδο ή την έξοδο αυτών.[16]. Στη συνέχεια αποστέλλεται στα κτήρια για ψύξη ή θέρμανση των εσωτερικών χώρων[17]. Η απόδοση ενός συστήματος ΕΑΗΕ ποικίλλει ως συνάρτηση των χαρακτηριστικών του, όπως το μήκος και η διάμετρος του σωλήνα, η παροχή αέρα, το βάθος στο οποίο θάβεται το σύστημα, τα θερμικά χαρακτηριστικά του εδάφους, το υλικό των σωλήνων κ.ά. [6]. Το καλοκαίρι ο αέρας που παρέχεται σε ένα κτίριο ψύχεται και αφυγραίνεται επειδή η θερμοκρασία του εδάφους γύρω από τον εναλλάκτη θερμότητας είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Κατά τη διάρκεια του

χειμώνα, όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία του εδάφους, η διαδικασία αντιστρέφεται και ο αέρας προθερμαίνεται[18].

Εικόνα 10: Σύστημα εναλλάκτη θερμότητας εδάφους αέρα.[16]



4.2. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΕΑΗΕ

Οι εναλλάκτες θερμότητας εδάφους-αέρα (ΕΑΗΑ) έχουν αρκετά πλεονεκτήματα έναντι άλλων μεθόδων κλιματισμού (air source heat pumps, integral-type solar assisted heat pump - ISAHp, GSHPs). Σε αυτά περιλαμβάνονται τα εξής [19]:

- 1) Καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια για τη λειτουργία τους
- 2) Ελαχιστοποίηση των ατμοσφαιρικών ρύπων
- 3) Σε μεσογειακό και τροπικό κλίμα, δεν απαιτείται συμπληρωματική θέρμανση κατά τη διάρκεια ακραίων χαμηλών θερμοκρασιών
- 4) Δεν χρησιμοποιούν συμπιεστή, CFC ή οποιοδήποτε ψυκτικό μέσο
- 5) Ο αέρας χρησιμοποιείται ως ρευστό(working fluid) σε ΕΑΗΕ
- 6) Έχουν απλούστερο σχεδιασμό και συνεπώς λιγότερη συντήρηση
- 7) Δεν απαιτούν την τοποθέτηση της μονάδας σε σημείο όπου εκτίθεται στις καιρικές συνθήκες
- 8) Έχουν χαμηλότερο αρχικό κόστος από τις μονάδες GSHP και ISAHp

Ωστόσο, υπάρχουν και σημεία στα οποία τα συστήματα των ΕΑΗΑ μειονεκτούν:

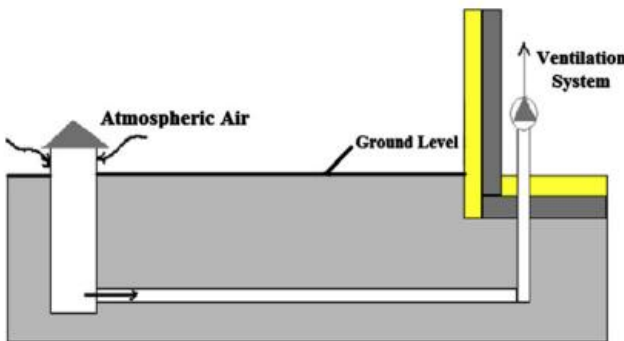
- 1) Στην Τουρκία για παράδειγμα, οι ΕΑΗΕ έχουν υψηλότερο αρχικό κόστος από τα air source units, το οποίο κυμαίνεται από 20 έως 40% περισσότερο. Αυτό οφείλεται στο

γεγονός ότι κοστίζει περισσότερο και απαιτεί περισσότερη εργασία η τοποθέτηση των εναλλακτών θερμότητας στο έδαφος. Μόλις εγκατασταθεί το σύστημα, το ετήσιο κόστος μειώνεται κατά τη διάρκεια της ζωής του, με αποτέλεσμα την καθαρή εξοικονόμηση.

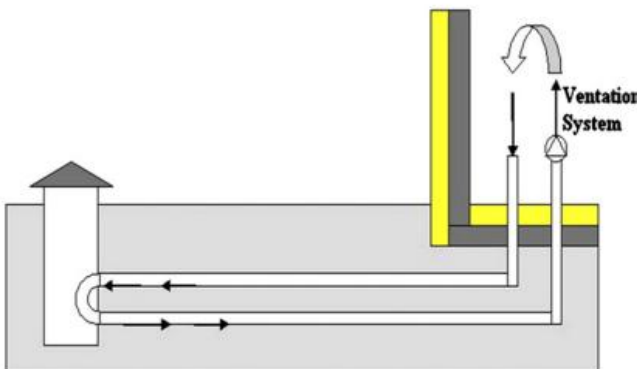
- 2) Σε έναν ΕΑΗΕ ο θόρυβος του ανεμιστήρα μεταφέρεται μέσω των σωλήνων.
- 3) Γίνεται εκροή συμπυκνωμένων υδρατμών. Χρήσιμη λύση για την επίλυση του προβλήματος, είναι ένας τρόπος για την άντληση οποιουδήποτε νερού στο σωλήνα, δηλαδή μια μικρή υποβρύχια αντλία βρίσκεται στο χαμηλότερο σημείο. Ωστόσο, με αυτό τον τρόπο θα αυξήσει η συνολική κατανάλωση ενέργειας του συστήματος.
- 4)
- 5) η ποιότητα του αέρα μειώνεται κατά τη λειτουργία ενός ΕΑΗΕ και η ανάπτυξη παθογόνων μικροοργανισμών πολλαπλασιάζεται. Οπότε πρέπει να χρησιμοποιείται το κατάλληλο φίλτρο και η ποιότητα του αέρα να παρακολουθείται αυστηρά.

Δύο τύποι εναλλακτών θερμότητας εδάφους αέρα κυριαρχούν [20]:

- “open loop”, σε αυτό τον τύπο γίνεται αναρρόφηση του εξωτερικού αέρα για τον αερισμό του σπιτιού, μέσω των σωλήνων.
- “closed loop”, σε αυτό τον τύπο γίνεται ανακυκλοφορία του αέρα του κτηρίου μέσω των σωλήνων.



Εικόνα 11: ‘open loop’ εναλλάκτης θερμότητας εδάφους αέρα.[20]



Εικόνα 12: ‘closed loop’ εναλλάκτης θερμότητας εδάφους αέρα.[20]

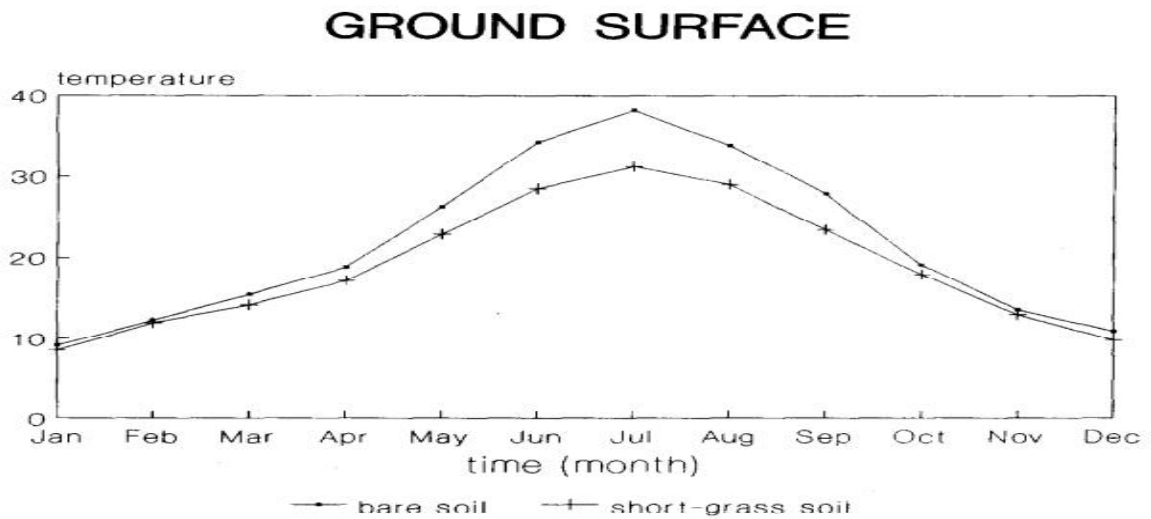
Οι “closed loop” ΕΑΗΕ φαίνεται να εγκαταλείπονται πιθανώς επειδή δεν επαρκούν για την παροχή θέρμανσης στο κτήριο, και λόγω του μειωμένου καθαρού αέρα που δίνουν, καθώς γίνεται ανακύκλωση του ήδη υπάρχοντος αέρα.

4.3. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΔΑΦΟΥΣ

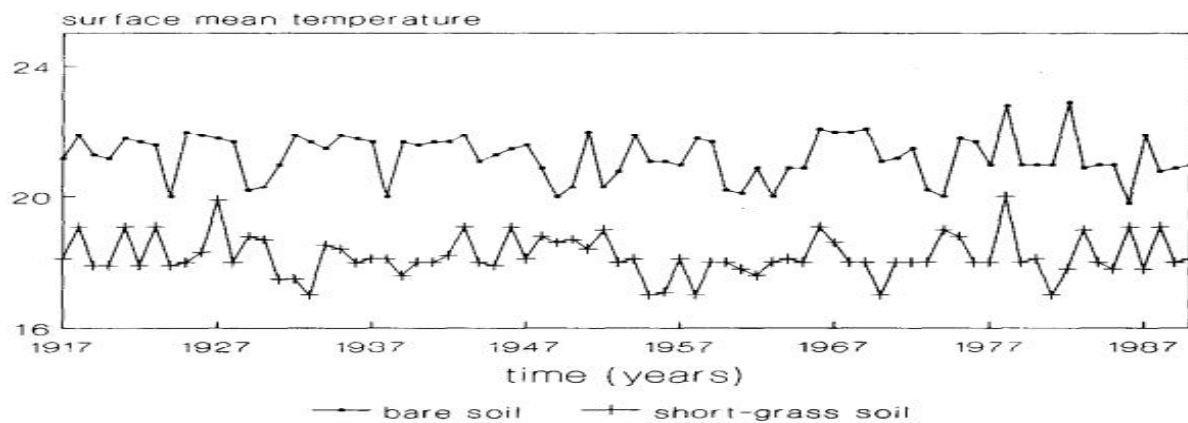
Η βάση για την εκτίμηση της θερμικής απόδοσης των κτηρίων που χρησιμοποιούν το έδαφος, είτε άμεσα (υπόσκαφα κτήρια) είτε έμμεσα (εναλλάκτες εδάφους-αέρα) για τον κλιματισμό των χώρων τους, είναι η γνώση της θερμοκρασίας του υπεδάφους της γης.[12]

Η γνώση των θερμοκρασιών του εδάφους και του υπεδάφους, είναι απαραίτητη για το σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση διαφόρων γεωθερμικών συστημάτων, καθώς και για την κατανόηση της θερμικής συμπεριφοράς της Γης σε διάφορα πλαίσια, όπως στην ενεργειακή απόδοση των κτηρίων. Οι παράμετροι που διαμορφώνουν τη θερμοκρασία παρέχουν κρίσιμα δεδομένα για μηχανικούς, περιβαλλοντολόγους και ερευνητές που εργάζονται σε έργα που αφορούν τη θερμοκρασία του εδάφους και τη μεταφορά θερμότητας.

Πρωταρχικοί παράγοντες για τη διαμόρφωση θερμοκρασίας του εδάφους αποτελούν η γεωλογική σύνθεση και το θερμικό προφίλ του εδάφους. Η σύστασή του, η θερμοχωρητικότητά του και η υγρασία που το διέπει, διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη θερμότητα που άγεται, διαχέεται και αποθηκεύεται σε αυτό. Επίσης, η αλληλεπίδραση με στοιχεία του τρέχοντος κλίματος, όπως η θερμοκρασία και η ταχύτητα του αέρα, η υγρασία του αέρα, η βροχόπτωση καθώς και η ηλιακή ακτινοβολία, επηρεάζουν σημαντικά στη διαμόρφωση θερμοκρασίας, αφού ποσά θερμότητας εισέρχονται και εξέρχονται στο έδαφος[21]. Η θερμότητα λόγω του ήλιου και της ατμόσφαιρας, εξαρτάται από τη προκίπτουσα ακτινοβολία, τον προσανατολισμό της και τη γεωμετρία του εδάφους, καθώς και από το ποσοστό αυτής που ανακλάται με βάση τις ανακλαστικές ιδιότητες του αντίστοιχου εδάφους και της κάλυψής του. Τα καλυμμένα με βλάστηση εδάφη τείνουν να έχουν χαμηλότερες θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια ενός έτους σε σύγκριση με τα γυμνά.

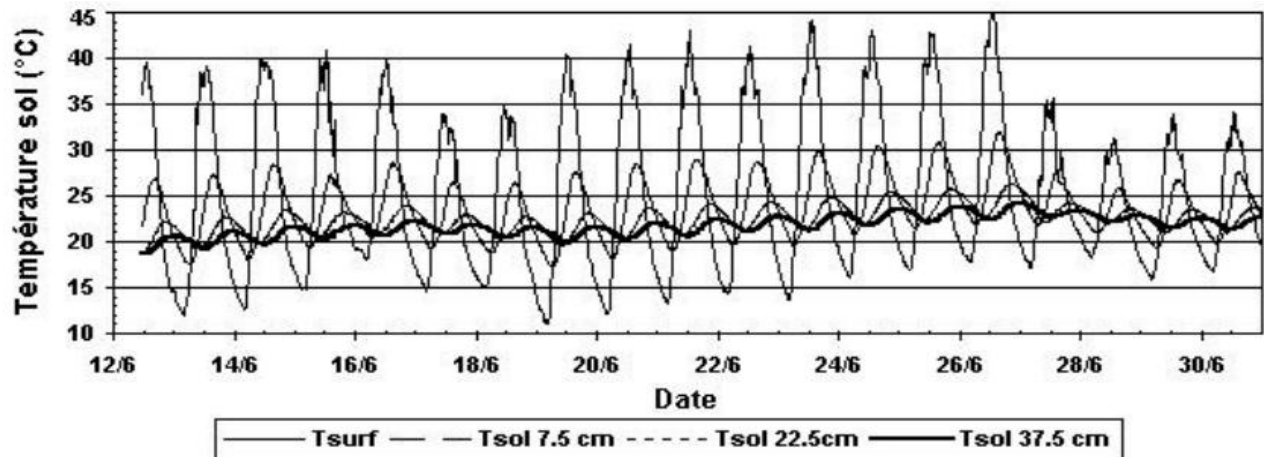


Διάγραμμα 1: Μέση μηνιαία επιφανειακή θερμοκρασία του γυμνού και του εδάφους που καλύπτεται με κοντό γρασίδι. [22]



Διάγραμμα 2: Μέση ετήσια επιφανειακή θερμοκρασία του γυμνού και του εδάφους που καλύπτεται με κοντό γρασίδι. [22]

Τέλος, αξιοσημείωτη είναι η διαφορά θερμοκρασίας που υπάρχει σε διαφορετικά βάθη του ίδιου εδάφους. Η θερμοκρασία της επιφάνειας του εδάφους είναι κατά μέσο όρο μεγαλύτερη από αυτή του αέρα, ωστόσο σε βαθύτερα σημεία η θερμοκρασία του εδάφους μειώνεται σημαντικά, όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα :



Διάγραμμα 3: Θερμοκρασίες σε διαφορετικά βάθη του ίδιου εδάφους.[11]

4.3.1. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΕΔΑΦΟΥΣ – ΚΥΡΙΟΤΕΡΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Η αδιατάρρακτη θερμοκρασία του εδάφους μπορεί να μοντελοποιηθεί χρησιμοποιώντας την εξίσωση μετάδοσης θερμότητας με αγωγή (Carslaw and Jaeger, 1980) [11]:

$$\theta^2 T(z, t) / \theta z^2 = 1/a \theta T / \theta t$$

όπου α η θερμική διαχυτικότητα του εδάφους ($a = k / \rho C_p$)

- T η θερμοκρασία του εδάφους
- z το βάθος
- t ο χρόνος
- k η αγωγιμότητα του εδάφους
- ρ η πυκνότητα
- C_p η ειδική θερμότητα υπό σταθερά πίεση

Για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του εδάφους χρησιμοποιείται το εξής μοντέλο:

$$T(z=0,t) = T_{surface} = T_m + A_s \cos[\omega(t - t_0)]$$

T_m : η μέση ετήσια θερμοκρασία επιφανείας του εδάφους

A_s : πλάτος διακύμανσης της θερμοκρασίας

ω : η συχνότητα του κύματος

t_0 : η σταθερά φάσης

Επίσης, για την επιφάνεια του εδάφους οι Krarti et al. παρουσιάζουν ένα άλλο μοντέλο:

$$k\theta T/\theta z (z=0) = SR+CE-LR-LE$$

όπου:

SR : η ηλιακή ακτινοβολία που απορροφά το έδαφος

CE : η ενέργεια που μεταδίδεται με convection ανάμεσα στον αέρα και στο έδαφος

LR : η μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία που εκπέμπεται από το έδαφος

LE : η λανθάνουσα θερμότητα λόγω εξατμισοδιαπνοής

k : η αγωγιμότητα του εδάφους

Ένα μοντέλο στο οποίο το έδαφος θεωρείται ομοιογενές και με σταθερή θερμική διαχυτότητα, περιγράφεται από τη παρακάτω σχέση:

$$T_{z,t} = T_m - A_s \exp\left(-z\left(\frac{n}{365a}\right)^{0.5}\right) \cos\left[\frac{2\pi}{365}\left(t - t_0 - \frac{z}{2}\left(\frac{365}{\pi a}\right)^{0.5}\right)\right]$$

όπου

T_m : η μέση ετήσια θερμοκρασία επιφανείας του εδάφους

A_s : πλάτος διακύμανσης της θερμοκρασίας

n: ο αριθμός ωρών μετά την δύση του ηλίου

a: συντελεστής χρονικής υστέρησης

z: βάθος

t: χρόνος

t_0 : η διαφορά φάσης

Το έδαφος μπορεί να θεωρηθεί ως ένα ημιπερατό στερεό όταν εξετάζεται η φυσική ροή θερμότητας σε μια ρηχή εδαφική περιοχή και ο νόμος του Fourier μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της αγωγής θερμότητας. Το ετήσιο πλάτος της ημερήσιας μέσης αρμονικής μεταβολής της θερμοκρασίας της επιφάνειας του εδάφους είναι σχεδόν συγκρίσιμο με εκείνο του αέρα. Η εξίσωση η οποία περιγράφει/υπολογίζει την ετήσια υποεπιφανειακή θερμοκρασία του εδάφους με βάση τη θεωρία της θερμικής αγωγιμότητας που εφαρμόζεται σε ένα ημι-περιορισμένο ομογενές στερεό, έχει μοντελοποιηθεί μαθηματικά από τους Kusuda και Achenbach [18] :

$$T_g(z,t) = T_m - A_{surf} \times \exp[-z(\pi/8760\alpha)^{0.5}] \\ \times \cos \left[\frac{2\pi}{8760} \times \left(t - t_0 - \frac{z}{2} \left(\frac{8760}{\pi \times \alpha} \right)^{0.5} \right) \right]$$

Όπου:

t : ο χρόνος που έχει παρέλθει από την αρχή

T_m : μέση ετήσια θερμοκρασία εδάφους

A_{surf} : το εύρος μεταβολής της επιφανειακής θερμοκρασίας

t_0 : η σταθερά φάσης της χαμηλότερης μέσης θερμοκρασίας επιφάνειας του εδάφους σε ώρες από την αρχή του έτους

4.4. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΕΔΑΦΟΥΣ-ΑΕΡΑ

Η μοντελοποίηση και η αξιολόγηση της θερμικής απόδοσης των εναλλακτών θερμότητας εδάφους αέρα προϋποθέτει τη λεπτομερή γνώση της θερμοκρασίας του εδάφους στην επιφάνειά του και σε διάφορα βάθη, καθώς και τις ημερήσιες/ετήσιες διακυμάνσεις της. Λαμβάνοντας υπόψιν αυτή τη σημαντική παράμετρο της εδαφικής θερμοκρασίας και της κατανομής της, έχουν διαμορφωθεί διάφορα μοντέλα που στοχεύουν στην ανάλυση των εναλλακτών. Αυτά τα μοντέλα οργανώνονται σε τρεις κατηγορίες [23]:

- a) Αριθμητικά μοντέλα
- b) Αναλυτικά μοντέλα
- c) Data-driven (τεχνητής νοημοσύνης)

4.4.1. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Τα τελευταία χρόνια έχουν προταθεί διάφορα αριθμητικά μοντέλα που αποβλέπουν στη προσομοίωση και στη πρόβλεψη λειτουργίας των συστημάτων ΕΑΗΕ για τον κλιματισμό (θέρμανση/δροσισμός) των κτηρίων. Τα μοντέλα αυτά βασίζονται σε διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν τις διεργασίες μεταφοράς θερμότητας με αγωγιμότητα και συναγωγή στο έδαφος και στο εσωτερικό των σωλήνων κατά τη λειτουργία του ΕΑΗΕ. Στα περισσότερα μοντέλα έχουν χρησιμοποιηθεί προσεγγίσεις για τη διακριτοποίηση και την επίλυση των εξισώσεων.

Τα αριθμητικά μοντέλα βασίζονται κυρίως σε διεργασίες αγωγιμότητας του εδάφους, που βασίζονται σε:

- 1) οριακές συνθήκες της επιφάνειας του εδάφους που περιγράφονται από την εξίσωση του ενεργειακού ισοζυγίου στην επιφάνεια
- 2) στη παρουσία συστήματος ΕΑΗΕ, καθώς και τα φαινόμενα συναγωγής στο εσωτερικό του σωλήνα.

Ορισμένα από τα μοντέλα που εστιάζουν στην πλήρη περιγραφή των διαδικασιών μεταφοράς θερμότητας στο έδαφος, λαμβάνουν υπόψιν μόνο τις διεργασίες αγωγιμότητας. Εξετάζουν συγκεκριμένες οριακές συνθήκες που περιλαμβάνουν την επιφάνεια του εδάφους, το αδιατάρακτο έδαφος και το σωλήνα, ενώ ταυτόχρονα περιγράφουν τις διεργασίες συναγωγής για τον υπολογισμό της κατανομής της θερμοκρασίας του αέρα στο εσωτερικό του σωλήνα. Επιπλέον, υπάρχουν αριθμητικά μοντέλα που πραγματεύονται τα φαινόμενα συναγωγής θερμότητας που αφορούν τη ροή του αέρα στο εσωτερικό του σωλήνα, και χρησιμοποιούν αρχές της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής.

Μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες:

- a) Μοντέλα που μόνο ένα μέρος της προτεινόμενης γεωμετρίας επηρεάζεται από τη παρουσία σωλήνα
- b) Μοντέλα που ολόκληρη η προτεινόμενη γεωμετρία επηρεάζεται από τη παρουσία σωλήνα

Μερικά από τα πιο σημαντικά μοντέλα θα περιγραφθούν αναλυτικά παρακάτω:

Προτάθηκε από τον Puri [25] ένα αριθμητικό, μεταβατικό μοντέλο που αποτελείται από ένα σύνολο δύο διαφορικών εξισώσεων που εκφράζουν τη συζευγμένη και ταυτόχρονη μεταφορά θερμότητας και υγρασίας στο έδαφος για ένα ενιαίο ΕΑΗΕ. Θεώρησε τη θερμοκρασία και την υγρασία του εδάφους γύρω από τον σωλήνα σταθερές στην αρχή και επέλεξε μία μονοδιάστατη, αξονική γεωμετρία. Επίσης, θεώρησε ότι στο όριο μιας μεγάλης αξονικής απόστασης η κατανομή θερμοκρασίας και υγρασίας δεν επηρεάζονται από την παρουσία του σωλήνα. Έτσι προέκυψαν οι εξής βασικές εξισώσεις μεταφοράς θερμότητας και μάζας (1) και (2) :

$$\rho_d C_s \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r k_s \frac{\partial T}{\partial r} \right) \rho_d C_s \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r k_s \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{1}{r \rho_d} \frac{\partial}{\partial r} \left(\left(r \rho_d D_s \frac{\partial w}{\partial r} \right) \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r K \frac{\partial w}{\partial r} \right) \quad (2)$$

Όπου :

T : η θερμοκρασία εδάφους
W: η υγρασία εδάφους
ρ_d : πυκνότητα εδάφους
ρ_α : πυκνότητα αέρα
C_s : ειδική θερμότητα εδάφους
D_s : συντελεστής διάχυσης υδρατμών εδάφους
k_s : συνολική θερμική αγωγιμότητα εδάφους
K : διαχυτότητα εδαφικής υγρασίας
r : πολική συντεταγμένη
t : χρονική μεταβλητή

Λαμβάνοντας υπόψιν τη θερμική αγωγιμότητα και τη διαχυτότητα του εδάφους, το σύστημα των δύο διαφορικών εξισώσεων με δύο ανεξάρτητες μεταβλητές (αξονική απόσταση και χρόνος) διακριτοποιήθηκε αριθμητικά με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Διαπιστώθηκε ότι το προφίλ της θερμοκρασίας του εδάφους εξελίσσεται πιο γρήγορα από την αντίστοιχη περιεκτικότητα σε υγρασία.

Οι παραπάνω εξισώσεις αποτέλεσαν βάση για την ανάπτυξη ενός μεταβατικού αριθμητικού μοντέλου που εξετάζει έναν ενιαίο ΕΑΗΑ, λαμβάνοντας υπόψιν την ταυτόχρονη μεταφορά θερμότητας και μάζας στο έδαφος και στον σωλήνα. Εκφράζεται σε πολικές συντεταγμένες με τρεις ανεξάρτητες μεταβλητές (α-ξονική απόσταση, γ-συντεταγμένη και χρόνος) και με δύο εξαρτημένες (θερμότητα και υγρασία). Αυτό το μοντέλο εκφράζεται με αυτές τις παρακάτω εξισώσεις (3) και (4) :

$$\rho_d C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{d}{dy} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) - l_g \rho_w \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_{U,vap} r \frac{\partial h}{\partial r} \right) - l_g \rho_w \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{U,vap} \frac{\partial h}{\partial y} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial h}{\partial y} = \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_T r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_T \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right] + \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_U r \frac{\partial h}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_U \frac{\partial h}{\partial y} \right) \right] \quad (4)$$

Όπου:

T: θερμοκρασία εδάφους

h: υγρασία εδάφους

k: θερμική αγωγιμότητα εδάφους

D_T : θερμική διαχυτότητα υγρασίας

D_U : ισοθερμική διαχυτότητα υγρασίας

$D_{U,var}$: ισοθερμική διαχυτότητα υγρασίας σε μορφή ατμών

ρ : πυκνότητα εδάφους

ρ_w : πυκνότητα υγρασίας

r: πολική συντεταγμένη, υποδηλώνει την ακτινική απόσταση από τον άξονα του σωλήνα

γ : πολική συντεταγμένη, υποδηλώνει την αξονική απόσταση από είσοδο του σωλήνα

t: χρόνος

Για αυτό το μοντέλο λήφθηκαν υπόψιν θερμοφυσικές παράμετροι του εδάφους και του σωλήνα. Τέθηκαν οριακές συνθήκες αξονικά σε μεγάλη απόσταση από τον σωλήνα όπου θεωρήθηκε ότι η θερμοκρασία και η υγρασία δεν επηρεάζονται από τη παρουσία και τη γειτνίαση με τον σωλήνα. Εκεί η μεταφορά θερμότητας εξαρτάται από τις απώλειες θερμότητας από τον σωλήνα προς το έδαφος. Η μετανάστευση υγρασίας λόγω του εναλλάκτη είναι μηδενική δεδομένου ότι ο σωλήνας θεωρείται αδιαπέραστος. Έπειτα από τη διακριτοποίηση και την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων, τα αποτελέσματα αποδείχθηκαν ακριβή με βάση εκτεταμένα πειραματικά δεδομένα.

Ένα άλλο μεταβατικό, αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης της θερμικής συμπεριφοράς ενός ΕΑΗΑ εκφράζεται με τη παρακάτω διαφορική εξίσωση (5) και περιγράφει τη κίνηση της ενέργειας στο έδαφος σε τρεις διαστάσεις (x, y, z) :

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S \quad (5)$$

Όπου :

C: ογκομετρική θερμοχωρητικότητα

T: θερμοκρασία εδάφους

t: χρονική μεταβλητή

k: θερμική αγωγιμότητα

S: source term (όρος πηγής)

x, y, z : συντεταγμένες του χώρου

Ορισμένες παραδοχές αυτού του μοντέλου, κυρίως όσον αφορά τις θερμικές ιδιότητες του εδάφους, ήταν ότι η κλίση θερμοκρασίας δεν επηρεάζεται από τη κλίση της εδαφικής υγρασίας. Επίσης, λήφθηκαν υπόψιν οι θερμικές διεργασίες και η εξάτμιση/συμπύκνωση στον αυλό των σωλήνων. Η αριθμητική μέθοδος των πεπερασμένων χρησιμοποιήθηκε για τη διακριτοποίηση και το μοντέλο επαληθεύτηκε με πειραματικά δεδομένα.

Το επόμενο μοντέλο περιγράφεται από ένα δισδιάστατο σύνολο διαφορικών εξισώσεων μεταφοράς θερμότητας και μάζας που περιγράφει τις θερμικές διεργασίες ενός ΕΑΗΑ. Εκφράζεται μαθηματικά από την εξίσωση (6) :

$$(\rho c)_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial y_i} \left(\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial y_i} \right) + q_{i,z} + q_{i,p} \quad (i=1, \dots, 22) \quad (6)$$

Όπου :

ρ : πυκνότητα εδάφους
 c : ειδική θερμοχωρητικότητα
 λ : θερμική αγωγιμότητα
 T_i : θερμοκρασία εδάφους
 x_i, y_i : συντεταγμένες χώρου
 $q_{i,z}$: θερμική ποσότητα
 $q_{i,p}$: θερμική ποσότητα
 t : χρονική μεταβλητή

Ορίστηκαν οριακές συνθήκες η αδιατάρακτη θερμοκρασία του εδάφους σε μεγάλη απόσταση από τον σωλήνα και η εξίσωση του ενεργειακού ισοζυγίου στην επιφάνεια του εδάφους. Η τελευταία περιλαμβάνει διάφορες παραμέτρων, όπως η ηλιακή ακτινοβολία, η ακτινοβολία μεγάλων κυμάτων, οι ροές θερμότητας συναγωγής και λανθάνουσας θερμότητας στην επιφάνεια του εδάφους κι άλλα. Όλες οι παράμετροι καθορίστηκαν ενώ οι εξισώσεις θερμικού ισοζυγίου και η θεωρία της συναγωγής χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της κατανομής θερμοκρασίας του αέρα εντός του σωλήνα.

Το επόμενο μοντέλο παρουσιάστηκε από τους Yoon et al. [26] και επρόκειτο για ένα μεταβατικό, αριθμητικό μοντέλο που βασίζεται σε εξισώσεις αγωγής θερμότητας στο έδαφος, στην εξίσωση του ενεργειακού ισοζυγίου της εδαφικής επιφάνειας, και στη παρουσία σωλήνων για τη περιγραφή της θερμικής συμπεριφοράς ενός ΕΑΗΑ. Η εξίσωση (7) διαμορφώνεται ως εξής :

$$c_s \rho_s \frac{\partial \theta_s}{\partial t} = \lambda_s \left(\frac{\partial^2 \theta_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta_s}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta_s}{\partial z^2} \right) \quad (7)$$

Όπου

c_s : ειδική θερμοχωρητικότητα
 ρ_s : πυκνότητα εδάφους
 x, y, z : συντεταγμένες χώρου
 θ_s : θερμοκρασία εδάφους
 t : χρονική μεταβλητή

Τα αποτελέσματα επαληθεύτηκαν με τις μετρήσεις που έγιναν.

Έπειτα οι Trzaski and Zawada [27] πρότειναν ένα οιονεί-τρισδιάστατο αριθμητικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που περιγράφει τις διαδικασίες μεταφοράς θερμότητας στο έδαφος και στους σωλήνες. Βασίζεται στη παρακάτω αγωγήμη δισδιάστατη εξίσωση (8) :

$$\frac{\partial}{\partial t}(C \cdot \rho \cdot T) = \frac{1}{\lambda} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (8)$$

Όπου:

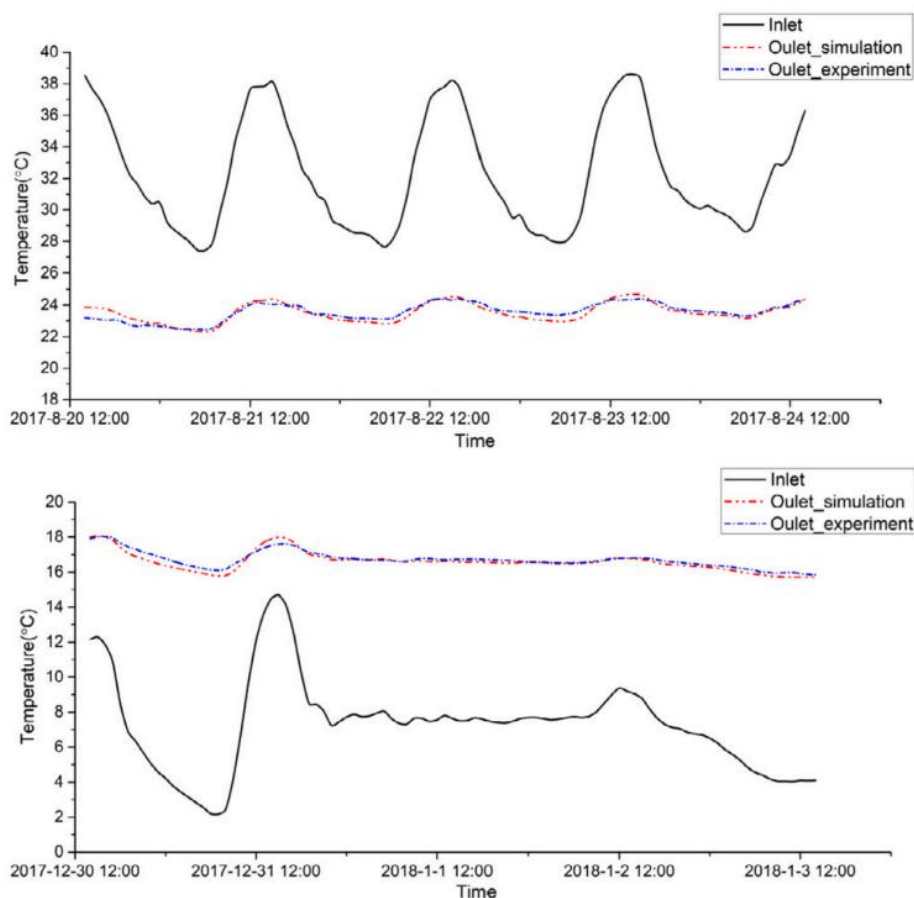
c : ειδική θερμοχωρητικότητα εδάφους
 ρ : πυκνότητα εδάφους
 λ : θερμική αγωγιμότητα εδάφους
 T : θερμοκρασία
 x, y : συντεταγμένες χώρου
 t : χρόνος

Το έδαφος χωρίστηκε σε ξεχωριστές διατομές και έτσι διαμορφώθηκε το εν λόγω οιονεί τρισδιάστατο μοντέλο. Η θερμοκρασία του αέρα στην έξοδο του σωλήνα είναι μόνο ένα από τα πολλά στοιχεία του μοντέλου που έχουν αντίκτυπο στον τρόπο με τον οποίο το σύστημα συμπεριφέρεται θερμικά. Για την κατηγοριοποίηση αυτών των παραμέτρων χρησιμοποιήθηκαν τρεις κύριες κατηγορίες: α) γεωμετρία του συστήματος (μήκος σωλήνων, βάθος ταφής, αριθμός σωλήνων κ.λπ.)- β) κατάσταση της επιφάνειας του εδάφους (βλάστηση, σκίαση του εδάφους, ηλιακή ακτινοβολία κ.λπ.)- και γ) θερμοφυσικές παράμετροι του εδάφους (πυκνότητα, περιεκτικότητα σε υγρασία, ειδική θερμοχωρητικότητα κ.λπ.). Εκτελέστηκαν πολυάριθμες προσομοιώσεις για διάφορες τιμές των προαναφερόμενων παραμέτρων και εξετάστηκε η επίδρασή τους στην αποτελεσματικότητα του συστήματος. Τα αποτελέσματα του μοντέλου επικυρώθηκαν επιτυχώς με τη χρήση πειραματικών δεδομένων.

Ένα αριθμητικό μοντέλο δημιουργήθηκε από τους Liu et al. [28] για την πρόβλεψη της θερμικής απόδοσης ενός κατακόρυφου συστήματος ΕΑΗΕ. Οι κατανομές των θερμοκρασιών του εδάφους και του αέρα υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις μεταφοράς θερμότητας με αγωγιμότητα και συναγωγή. Για τη διαδικασία διακριτοποίησης χρησιμοποιήθηκε μια διατύπωση όγκου ελέγχου και δημιουργήθηκαν τρία μοντέλα για τα τρία διαφορετικά μέσα: αέρα, σωλήνες και έδαφος. Το μοντέλο βρέθηκε να είναι επαρκώς ακριβές, αφού δημιουργήθηκε ο κώδικας στο περιβάλλον MATLAB/Simulink και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με πειραματικά δεδομένα. Η πειραματική διάταξη περιελάμβανε έναν σωλήνα

από ανοξείδωτο χάλυβα σε σχήμα U (σωλήνας U) διαμέτρου 0,219 m που ήταν θαμμένος σε ένα λάκκο βάθους 16,5 m γεμάτο με χώμα. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν τόσο το χειμώνα όσο και το καλοκαίρι.

Συγκεκριμένα, στα διαγράμματα 4 και 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης μεταξύ των θεωρητικών και πειραματικών τιμών για τις περιόδους του καλοκαιριού και του χειμώνα, αντίστοιχα :



Διαγράμμα 4 : Σύγκριση των μετρούμενων και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας του αέρα εξόδου για τη θερινή περίοδο.

Διάγραμμα 5: Σύγκριση των μετρούμενων και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας του αέρα εξόδου θερμοκρασίας αέρα για τη χειμερινή περίοδο. [23]

Το επίκεντρο τώρα μετατοπίζεται σε ερευνητικές έρευνες που ενσωμάτωσαν αριθμητικά μοντέλα για διάφορα πρότυπα ροής αέρα στο εσωτερικό ενός σωλήνα, τα οποία

επικεντρώνονταν κυρίως σε διεργασίες συναγωγής. Η εντατική χρήση λογισμικού προσομοίωσης υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) είναι το πιο χαρακτηριστικό γνώρισμα αυτών των μοντέλων.

Ένα αριθμητικό μοντέλο που δημιουργήθηκε από τους Hollmuller και Lachal [29] λαμβάνει υπόψη τις ροές και τις ανταλλαγές αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας και βασίζεται κυρίως στις διαδικασίες μεταφοράς θερμότητας και μάζας μεταξύ του αέρα και του σωλήνα. Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του αέρα και του σωλήνα εκφράστηκε στην ακόλουθη εξίσωση (9), η οποία προσδιόρισε τη μεταφορά θερμότητας για αισθητές ροές:

$$P_{sbl} = S_{tub} h(T_{air} - T_{tub}) \quad (9)$$

Όπου

P_{sbl} : η αισθητή ανταλλαγή θερμότητας του σωλήνα αέρα

S_{tub} : η συνολική πλευρική επιφάνεια ανταλλαγής θερμότητας του σωλήνα

h : η ανταλλαγή θερμότητας με συναγωγή αέρα/σωλήνα.

T_{air} : θερμοκρασία αέρα

T_{tub} : θερμοκρασία σωλήνα

Η αισθητή θερμότητα υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας την εξίσωση μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή και η λανθάνουσα θερμότητα υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας τους τύπους μεταφοράς νερού για εξάτμιση ή συμπύκνωση. Οι σωλήνες χωρίστηκαν σε κόμβους από την είσοδο έως την έξοδο. Σε όλους τους κόμβους των σωλήνων έγιναν υπολογισμοί του ισοζυγίου ενέργειας και νερού, και στη συνέχεια εκτιμήθηκε η μεταφορά θερμότητας στους κόμβους του εδάφους. Τέσσερις πειραματικές τοποθεσίες χρησιμοποιήθηκαν για την ενδελεχή επικύρωση των αριθμητικών αποτελεσμάτων και το μοντέλο επιβεβαιώθηκε ότι είναι επαρκώς ακριβές.

Οι Wu et al. [30] αξιοποίησαν το λογισμικό PHOENICS (πρόγραμμα προσομοίωσης CFD-Computational Fluid Dynamics- που προβλέπει ποσοτικά τις ροές ρευστών και τις διαδικασίες μεταφοράς μάζας σε πολλές εφαρμογές) για την ανάπτυξη ενός μεταβατικού, τρισδιάστατου αριθμητικού μοντέλου που περιγράφει τη θερμική απόδοση των εναλλακτών θερμότητας εδάφους – αέρα. Το αριθμητικό μοντέλο συνέδεσε τη μεταφορά θερμότητας και μάζας στο έδαφος με τη δυναμική συναγωγής ρευστών της τυρβώδους ροής στο εσωτερικό του σωλήνα και χρησιμοποίησε έμμεσες μεθόδους που βασίζονται στις ταυτόχρονες διεργασίες μεταφοράς θερμότητας και μάζας στο έδαφος και στο σωλήνα καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος. Χρησιμοποιήθηκε μια τρισδιάστατη, μεταβατική εξίσωση αγωγής θερμότητας για την περιγραφή της μεταφοράς θερμότητας στο έδαφος, ενώ χρησιμοποιήθηκαν δισδιάστατες κυλινδρικές συντεταγμένες για την προσομοίωση των διαδικασιών μεταφοράς θερμότητας και

μάζας στο σύστημα εδάφους-αέρα-σωλήνα. Η εξίσωση (10) μεταφοράς θερμότητας στο σύστημα έδαφος-αέρας-σωλήνας ως εξής:

$$\rho_a c_{p,a} \frac{\partial T_a}{\partial t} + \text{div}(\rho_a c_{p,a} u_a T_a) = \text{div}(a_a \cdot \text{grad } T_a) + s_\varphi \quad (10)$$

Όπου:

ρ_a : η πυκνότητα

$c_{p,a}$: η ειδική θερμοχωρητικότητα

T_a : η θερμοκρασία του αέρα εντός των υπόγειων σωλήνων

u_a : η ταχύτητα του αέρα εντός των υπόγειων σωλήνων

a_a : η ικανότητα μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή του αέρα σε υπόγειο σωλήνα

φ : γενική μεταβλητή

S_φ : το στοιχείο πηγής (source item) της γενικής μεταβλητής

t : χρονική μεταβλητή

Και $\text{div}\varphi$ ορίζεται από την εξίσωση (11) ως:

$$\text{div}\varphi = \frac{1}{r} \frac{\partial(r \cdot \varphi r)}{\partial r} + \frac{\partial \varphi_x}{\partial x} \quad (11)$$

Όπου r συντεταγμένη.

Η εξίσωση διατήρησης της μάζας για τον αέρα στους υπόγειους σωλήνες δίνεται από την εξίσωση (12):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_a u_a) + \text{div}(\rho_a u_a) = 0 \quad (12)$$

Όπου: ρ_a είναι η πυκνότητα, u_a η ταχύτητα του αέρα στους σωλήνες και t είναι η χρονική μεταβλητή.

Τα αποτελέσματα του μοντέλου δοκιμάστηκαν και επαληθεύτηκαν με τα πειραματικά δεδομένα.

Για τρεις πόλεις του Μεξικού, οι Ramirez-Davila et al. [31] κατασκεύασαν ένα αριθμητικό μοντέλο βασισμένο στη ρευστομηχανική για να προσδιορίσουν τη θερμική απόδοση των ΕΑΗΕ. Οι τρισδιάστατες διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν την ενέργεια, τη συνέχεια και την ορμή στο εσωτερικό του σωλήνα και του εδάφους διακριτοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας μια διατύπωση πεπερασμένου όγκου. Οι εξισώσεις (14) έως (17) παρέχουν τις εξισώσεις διατήρησης της συνέχειας, της ορμής και της ενέργειας που εφαρμόστηκαν σε αυτό το μοντέλο:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vu)}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right] \quad (15)$$

$$\frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right] \quad (16)$$

$$\frac{\partial(\rho uT)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vT)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial T}{\partial y} \right] \quad (17)$$

Όπου:

P : η πίεση

T : η θερμοκρασία

ρ : η πυκνότητα

λ : η θερμική αγωγιμότητα

u, v : η οριζόντια και κατακόρυφη ταχύτητα

x, y : οι διαστατικές συντεταγμένες

μ : το ιξώδες

Οι οριακές συνθήκες καθορίστηκαν στην επιφάνεια του εδάφους, όπου λήφθηκε υπόψιν ένας μεγάλος αριθμός σχετικών χαρακτηριστικών, συμπεριλαμβανομένου του σωλήνα και της αδιατάρακτης θερμοκρασίας του εδάφους. Η υπολογιστική ρευστοδυναμική και η ροή μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας του αέρα στην είσοδο και την έξοδο του σωλήνα. Οι τιμές της θερμοκρασίας υπολογίστηκαν ως συνάρτηση του αριθμού Reynolds σε οποιαδήποτε θέση στο εσωτερικό του σωλήνα και στην έξοδο, χρησιμοποιώντας έναν κώδικα CFD και μια μεθοδολογία πεπερασμένων στοιχείων για να επιτευχθεί η διακριτοποίηση. Η τεχνική μπορεί να είναι αποτελεσματική για τη θέρμανση και την ψύξη κτιρίων, εάν το μοντέλο επικυρωθεί με δεδομένα.

Ένα ακόμη αριθμητικό μοντέλο δημιουργήθηκε από τους Serageldin et al. [32] για την πρόβλεψη της θερμικής απόδοσης ενός συστήματος ΕΑΗΕ για θέρμανση/ψύξη χώρων στην Αίγυπτο. Το μοντέλο βασίστηκε σε μια μονοδιάστατη εξίσωση διατήρησης της ενέργειας και περιελάμβανε πολλές παραδοχές, κυρίως σχετικά με τη θερμική κατάσταση και τα χαρακτηριστικά του εδάφους και την κίνηση του αέρα στο εσωτερικό του σωλήνα. Η εξίσωση

(18) περιγράφει τη διατήρηση της ενέργειας, η οποία λαμβάνει υπόψη τις διαδικασίες συναγωγής και διάχυσης:

$$\frac{\partial \rho T}{\partial t} + \underset{\text{ConvectionTerm}}{\text{div}(\rho T u)} = \underset{\text{DiffusionTerm}}{\text{div}(k \text{grad} T)} + \underset{\text{SourceTerm}}{Q_{Air}^{Soil}} \quad (18)$$

Όπου:

ρ : η πυκνότητα του υγρού

T : η θερμοκρασία του αέρα ροής

k : η κινητική ενέργεια της τυρβώδους ροής

Q_{Air}^{Soil} : η ροή θερμότητα από/προς το υπέδαφος

u, y, w είναι οι συνιστώσες ταχύτητας στη διεύθυνση x, y και z

t : χρονική μεταβλητή

Τα αποτελέσματα του μοντέλου επικυρώθηκαν πλήρως με πειραματικά δεδομένα.

4.4.2. ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Στην επιστημονική βιβλιογραφία, εκτός από τα αριθμητικά μοντέλα, περιγράφονται και μοντέλα που χρησιμοποιούν αναλυτικές μεθόδους, τα αναλυτικά μοντέλα. Η πλειονότητά τους λαμβάνει υπόψιν τις διεργασίες μεταφοράς θερμότητας και μάζας κατά τη λειτουργία ενός ΕΑΗΑ, και για να αξιολογηθεί η απόδοσή του βασίζονται στην αναλυτική επίλυση της διαφορικής εξίσωσης αγωγής θερμότητας στην επιφάνεια του εδάφους και σε διάφορα βάθη η οποία εκφράζεται ως εξής:

$$T_{z,t} = T_m - A_s \exp \left(-z \left(\frac{n}{365a} \right)^{0.5} \right) \cos \left[\frac{2\pi}{365} \left(t - t_0 - \frac{z}{2} \left(\frac{365}{\pi a} \right)^{0.5} \right) \right] \quad (19)$$

Όπου:

T_m : η μέση ετήσια θερμοκρασία της γης

A_s : το πλάτος της θερμοκρασίας

n : είναι ο αριθμός των ωρών μετά τη δύση του ηλίου

a : είναι ο συντελεστής υστέρησης

z : το βάθος

t : μεταβλητή του χρόνου

Για την πρόβλεψη της θερμικής συμπεριφοράς ενός εναλλάκτη θερμότητας εδάφους-αέρα που χρησιμοποιείται για τη θέρμανση ή την ψύξη ενός νοσοκομειακού κτηρίου στην

Ινδία, κατασκευάστηκε ένα απλό, μονοδιάστατο αναλυτικό μοντέλο με βάση τη θερμότητα που μεταφέρεται στο εσωτερικό ενός σωλήνα. Η ακόλουθη εξίσωση ενεργειακού ισοζυγίου (20), που κατασκευάστηκε για ένα μικροσκοπικό στοιχείο του ΕΑΗΑ στην κατεύθυνση της ροής, χρησίμευσε ως βάση του μοντέλου:

$$mC_a \frac{\partial T_a}{\partial y} dy = Qb dy \quad (20)$$

Όπου:

m : ο ρυθμός ροής μάζας του αέρα

C_a : η ειδική θερμότητα του αέρα

T_a : η θερμοκρασία του αέρα του σωλήνα

Q : η ποσότητα θερμότητας που μεταφέρεται ανά μονάδα επιφάνειας του σωλήνα

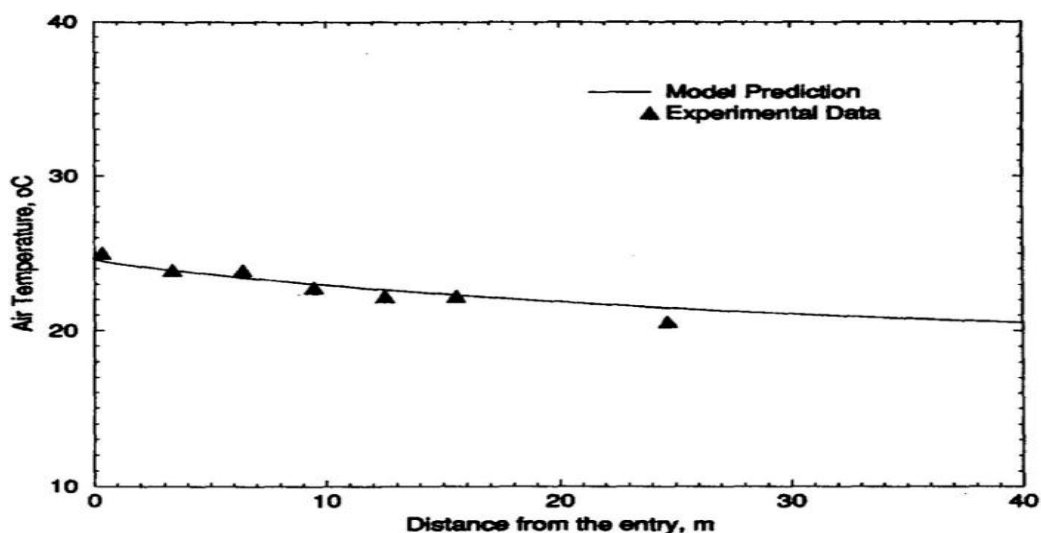
b : η περίμετρος της επιφάνειας της σήραγγας

y : η συντεταγμένη θέσης

Χρησιμοποιήθηκαν πειραματικά δεδομένα για την επικύρωση του μοντέλου, το οποίο διαπιστώθηκε ότι είναι επαρκώς ακριβές.

Για την πρόβλεψη της θερμικής συμπεριφοράς ενός συστήματος ΕΑΗΕ, αναφορά [33] κατασκευάστηκε ένα αναλυτικό παραμετρικό μοντέλο. Η ανάλυση παλινδρόμησης χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία και την έκφραση του μοντέλου, το οποίο βασίστηκε σε μια συστηματική αναλυτική παραμετρική προσέγγιση. Για την ανάλυση λήφθηκαν υπόψη οι ακόλουθες τέσσερις μεταβλητές που επηρεάζουν τη θερμική απόδοση του συστήματος: (α) μήκος σωλήνα, (β) ακτίνα σωλήνα, (γ) ταχύτητα αέρα στο εσωτερικό του σωλήνα και (δ) βάθος ταφής κάτω από το έδαφος. Το αποτέλεσμα του μοντέλου επικυρώθηκε με επιτυχία χρησιμοποιώντας ακριβή αριθμητικά δεδομένα καθώς και πειραματικά δεδομένα και διαπιστώθηκε ότι είναι ακριβές.

Ένα απλουστευμένο, μεταβατικό αναλυτικό μοντέλο για την πρόβλεψη της θερμικής απόδοσης των ΕΑΗΕ παρουσιάστηκε από τους Krarti και Kreider [34]. Το σύστημα υποτίθεται ότι φθάνει σε μια οιονεί σταθερή κατάσταση λειτουργίας μετά από μερικές ημέρες λειτουργίας. Το μοντέλο, το οποίο ήταν σε θέση να προβλέψει τη θερμοκρασία του αέρα στην έξοδο του σωλήνα ανά πάσα στιγμή, βασίστηκε σε εξισώσεις μεταφοράς θερμότητας για αγωγή και συναγωγή. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 6, το μοντέλο δοκιμάστηκε με επιτυχία σε σύγκριση με τις μετρήσεις.



Διάγραμμα 6: Σύγκριση των προβλεπόμενων με τα μετρούμενα δεδομένα.[23]

Για την εκτίμηση της κατανομής της θερμοκρασίας του αέρα στην έξοδο του σωλήνα ενός συστήματος ΕΑΗΕ που χρησιμοποιείται για την ψύξη ενός οικιστικού κτηρίου σε κλίμα ερήμου, ένα αναλυτικό, μονοδιάστατο μοντέλο σταθερής κατάστασης παρουσιάστηκε στην [23]. Η εξίσωση αγωγής θερμότητας στο έδαφος επιλύθηκε αναλυτικά και οι θερμικές αντιστάσεις υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας τη θερμική ανάλυση σταθερής κατάστασης και τη ροή συναγωγής στο εσωτερικό του σωλήνα. Για στρωτή και τυρβώδη ροή, ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή υπολογίστηκε σε συνάρτηση των αριθμών Reynolds και Nusselt. Το μοντέλο επαληθεύτηκε αποτελεσματικά με παραμετρικές έρευνες που ήταν τόσο θεωρητικές όσο και πειραματικές.

Η προσομοίωση των Do et al. [35] ενός “closed-loop” ΕΑΗΕ για την ψύξη οικιστικών χώρων σε θερμό και με υγρασία κλίμα, χρησιμοποίησε ένα αναλυτικό μονοδιάστατο μοντέλο σταθερής κατάστασης. Χρησιμοποίησαν ένα απλό μοντέλο που βασίστηκε στην αναλυτική επίλυση των εξισώσεων μεταφοράς θερμότητας αγωγιμότητας στο έδαφος και στις θερμικές αντιστάσεις των στοιχείων του συστήματος. Το μοντέλο επικυρώθηκε αποτελεσματικά με τη χρήση πειραματικών δεδομένων από έρευνες που έχουν δημοσιευτεί.

Ένα μεταβατικό, μονοδιάστατο, αναλυτικό μοντέλο δημιουργήθηκε από τους Cucumo et al. [36] για την πρόβλεψη της θερμικής συμπεριφοράς ενός συστήματος ΕΑΗΕ. Το μοντέλο, το οποίο λάμβανε υπόψη τη λανθάνουσα ροή θερμότητας στο εσωτερικό του σωλήνα, βασίστηκε στις ροές θερμικής αγωγιμότητας για ένα ημι-άπειρο(semi-infinite) σώμα καθώς και στη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή. Το μοντέλο επαληθεύτηκε με πειραματικά δεδομένα.

Στο πλαίσιο του προγράμματος προσομοίωσης EnergyPlus, οι Lee et al. [37] παρείχαν ένα αναλυτικό μεταβατικό μοντέλο, που βασίζεται στην κατανομή της θερμοκρασίας του εδάφους και στις εξισώσεις θερμικής αντίστασης λόγω των γεγονότων συναγωγής που προκαλούνται από την παρουσία του σωλήνα. Τα αποτελέσματα του μοντέλου επαληθεύτηκαν ικανοποιητικά έναντι πειραματικών και θεωρητικών δεδομένων.

Στην αναφορά [38] παρουσιάζεται μια μεταβατική, αναλυτική μέθοδο για τη μοντελοποίηση της θερμικής συμπεριφοράς ενός συστήματος ΕΑΗΕ. Οι αρμονικές μεταβολές της θερμοκρασίας των εξαρτημάτων του συστήματος και του θερμικού περιβάλλοντος που προκαλούνται από τις διαδικασίες αγωγής και συναγωγής αποτέλεσαν τη βάση του μοντέλου. Τα αποτελέσματα του μοντέλου ελέγχθηκαν με επιτυχία σε σύγκριση με θεωρητικές πληροφορίες που προέκυψαν από επαληθευμένα αριθμητικά μοντέλα. Ένα μεταβατικό, μονοδιάστατο, ημι-αναλυτικό μοντέλο χρησιμοποιήθηκε από τους Rouag et al. [39] για την προσομοίωση του προφίλ θερμοκρασίας του εδάφους που περιβάλλει ένα σύστημα ΕΑΗΕ. Οι διεργασίες αγωγής θερμότητας στο έδαφος κοντά στον σωλήνα αποτέλεσαν τη βάση για την εν λόγω ιδέα. Το μοντέλο επικυρώθηκε με επιτυχία με τη χρήση δεδομένων από τη βιβλιογραφία.

4.4.3. DATA DRIVEN MODELS

Αντί να χρησιμοποιούν τις μαθηματικές και φυσικές διατυπώσεις και εξισώσεις των ντετερμινιστικών μοντέλων, τα data-driven μοντέλα είναι υπολογιστικά συστήματα που βασίζονται σε ιστορικά δεδομένα. Αυτά τα μοντέλα περιλαμβάνουν μοντέλα ασαφούς λογικής και μοντέλα τεχνητών νευρωνικών δικτύων (ANN), τα οποία προσομοιώνουν βιολογικούς νευρώνες. Η απόδοση, η απλότητα, η χρηστικότητα και η ευελιξία των data-driven μοντέλων είναι οι βασικές τους ιδιότητες, καθώς επιτρέπουν την ακριβή μοντελοποίηση πολύπλοκων μη γραμμικών συστημάτων και διαδικασιών βασίζοντας την ανάλυση σε ιστορικά δεδομένα που είναι άμεσα διαθέσιμα. Λόγω της απλότητάς τους και του γεγονότος ότι απαιτούν μόνο εκπαίδευση και δοκιμή με χρήση παρελθοντικών δεδομένων, συχνά προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των ντετερμινιστικών μοντέλων. Ωστόσο θα πρέπει να είναι καλά προγραμματισμένα ώστε να επιτυγχάνουν ένα αποδεκτό επίπεδο σφάλματος μεταξύ στόχου και του συνόλου δεδομένων δοκιμής. Τότε το σύστημα θα μπορεί να αξιοποιηθεί και να χρησιμοποιηθεί.

Η Μιχαλακάκου[23] προκειμένου να εκτιμήσει τη θερμοκρασία του αέρα στην έξοδο του σωλήνα ενός εναλλάκτη θερμότητα εδάφους-αέρα χρησιμοποίησε μια προσέγγιση ANN. Για τον σκοπό αυτό απαιτείται η δημιουργία μιας αρχιτεκτονικής νευρωνικού δικτύου, η εκμάθηση-εκπαίδευση του συστήματος και η δοκιμή του. Η αρχιτεκτονική του δικτύου

αποτελείται από ένα δίκτυο τροφοδότησης πολλαπλών στρωμάτων που βασίζεται σε έναν αλγόριθμο οπισθοδιάδοσης (backpropagation), ο οποίος είναι μια βαθμωτή κάθοδος του μέσου τετραγωνικού σφάλματος ως συνάρτηση των βαρών. Εάν το μέσο τετραγωνικό σφάλμα υπερβεί κάποια μικρή προκαθορισμένη τιμή, ξεκινάει ένας νέος κύκλος παρουσίασης εκπαιδευτικών δεδομένων μετά τον τερματισμό του τρέχοντος κύκλου (epoch). Μία από τις κύριες παραμέτρους του αλγορίθμου οπισθοδιάδοσης είναι ο ρυθμός μάθησης, ο οποίος καθορίζει το μέγεθος των αλλαγών που γίνονται στα βάρη και στις φορές (*biases*) σε κάθε epoch. Η αρχιτεκτονική του εν λόγω ANN αποτελείται από ένα κρυφό στρώμα 16 με 21 λογαριθμο-σιγμοειδών (log-sigmoid) νευρώνων, που ακολουθείται από ένα στρώμα εξόδου ενός γραμμικού νευρώνα με ρυθμό μάθησης 0,5, ενώ ο αριθμός των epochs κυμαίνεται από 3000 έως 5000. Το σύνολο δεδομένων εισόδου περιλαμβάνει τη θερμοκρασία του αέρα, τη σχετική υγρασία, τη θερμοκρασία της επιφάνειας του εδάφους και τη θερμοκρασία του υπεδάφους στο βάθος του σωλήνα, ενώ η παράμετρος εξόδου είναι η θερμοκρασία του αέρα στην έξοδο του σωλήνα. Το μοντέλο εκπαιδεύτηκε εκτενώς και τα αποτελέσματά του επικυρώθηκαν με επιτυχία έναντι των αποτελεσμάτων ενός ακριβούς ντετερμινιστικού μοντέλου, αποδεικνύοντας την αποτελεσματικότητά του στην πρόβλεψη της θερμικής συμπεριφοράς ενός συστήματος ΕΑΗΕ.

Ένα μοντέλο νευρωνικού δικτύου που σχεδιάστηκε, εκπαιδεύτηκε και δοκιμάστηκε για την εκτίμηση της κατανομής της θερμοκρασίας του αέρα στην έξοδο ΕΑΗΕ παρουσιάστηκε από τους Kumar et al. [40]. Το μοντέλο αυτό είχε μια τυπική αρχιτεκτονική πολλαπλών επιπέδων feed-forward βασισμένη στη μέθοδο οπισθοδιάδοσης, ενώ επιλέχθηκε σημαντικός αριθμός παραμέτρων εισόδου. Έτσι, το κρυφό στρώμα του ANN αποτελούνταν από 15 tan-sigmoid νευρώνες ακολουθούμενοι από ένα στρώμα εξόδου ενός γραμμικού νευρώνα, με ρυθμό εκμάθησης 0,5 ενώ ο αριθμός των epochs κυμαινόταν μεταξύ 100 και 300. Έξι παράμετροι εισόδου που επηρεάζουν τη θερμική απόδοση ΕΑΗΕ χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση και τη δοκιμή του δικτύου:

- 1) μήκος σωλήνα,
- 2) υγρασία αέρα περιβάλλοντος,
- 3) θερμοκρασία περιβάλλοντος αέρα,
- 4) θερμοκρασία επιφάνειας εδάφους,
- 5) θερμοκρασία εδάφους στο βάθος ταφής
- 6) ρυθμός ροής μάζας αέρα ενώ η έξοδος ήταν θερμοκρασία αέρα στην έξοδο του σωλήνα.

Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αυτά ενός πειραματικά επικυρωμένου αριθμητικού μοντέλου [2^ο μοντελο], και το νευρικό μοντέλο βρέθηκε ακριβές και κατάλληλο για χρήση.

4.5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΕΔΑΦΟΥΣ-ΑΕΡΑ

Τα συστήματα των εναλλακτών θερμότητας εδάφους έχουν εφαρμοστεί σε πολλές δομές, όπως κτήρια και θερμοκήπια, ώστε να ρυθμίσουν τη θέρμανση και τον δροσισμό/ψύξη τους. Μια από τις πρώτες πειραματικές διερευνήσεις για τα συστήματα ΕΑΗΑ πραγματοποιήθηκε από τους Trompe et al. [41] στη νότιο Γαλλία., οι οποίοι συνέκριναν δύο παρόμοιες κατοικίες, στη μία εκ των οποίων είχε εγκαθιδρυθεί εναλλάκτης. Τα κύρια χαρακτηριστικά του σωλήνα ήταν τα εξής:

- a) υλικό PVC
- b) διάμετρος 0,2m και πάχος 5mm
- c) βάθος ταφής 2,5m
- d) μήκος 42 m
- e) παροχή αέρα ίση με 0-45 m³/h.

Πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας του αέρα στην είσοδο και την έξοδο του σωλήνα. Οι μετρήσεις γίνονταν κάθε ώρα. Το κύριο εύρημα ήταν ότι για μια περίοδο 8 ημερών, η θερμοκρασία του αέρα στην είσοδο του σωλήνα κυμαινόταν μεταξύ 18 και 36 °C, ενώ η διακύμανση της θερμοκρασίας του αέρα στην έξοδο κυμαινόταν μεταξύ 18 και 25 °C, αναδεικνύοντας έτσι τις δυνατότητες του συστήματος.

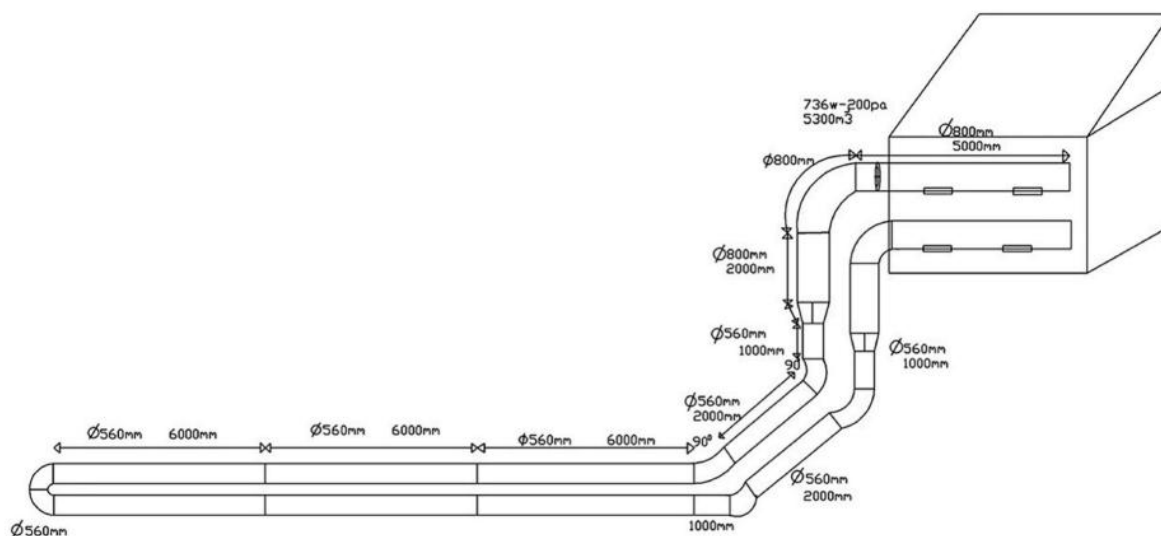
Οι Sawhney et al. [42] χρησιμοποίησαν ένα σύστημα εναλλακτών θερμότητας εδάφους-αέρα για να ρυθμίσουν τον κλιματισμό οκτώ δωματίων σε ένα διώροφο κτήριο στην Ινδία. Επρόκειτο για ένα “closed-loop” τύπου σύστημα, το οποίο εξετάστηκε ως προς την απόδοση παροχής δροσισμού. Σε βάθος 2,5m τοποθετήθηκαν αρκετοί εναλλάκτες θερμότητας παράλληλα ο ένας με τον άλλο, με διάστημα 1m μεταξύ γειτονικών σωλήνων. Οι εναλλάκτες κατασκευάστηκαν από σκυρόδεμα, με μήκος 85m και διάμετρο 0,5m. Η μέση ταχύτητα του αέρα στο εσωτερικό των σωλήνων ήταν 6,3 m/s. Επί ένα μήνα, γίνονταν κάθε δύο ώρες μετρήσεις της θερμοκρασίας του αέρα του περιβάλλοντος, της χωρικής ταχύτητας ροής του αέρα στα ανοίγματα των αγωγών, της χωρικής θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα και της σχετικής υγρασίας των κλιματιζόμενων και μη κλιματιζόμενων χώρων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η θερμοκρασία του αέρα του περιβάλλοντος κυμαινόταν μεταξύ 22,5 και 44,2 °C με σχετική υγρασία μεταξύ 9,4 και 75,8%. Η θερμοκρασία του αέρα του κλιματιζόμενου δωματίου κυμαινόταν μεταξύ 25,3 και 28,4 °C, ενώ η θερμοκρασία του αέρα του μη κλιματιζόμενου δωματίου ήταν 2-5 °C υψηλότερη. Η εσωτερική σχετική υγρασία ήταν 40,7- 48% για το μη κλιματιζόμενο δωμάτιο και 40,8-70,3% για το κλιματιζόμενο δωμάτιο, παρέχοντας ένα αποδεκτό επίπεδο άνεσης.

Επίσης στην Ινδία, συγκεκριμένα στο Δελχί, διεξήχθησαν δύο πειραματικές μελέτες για τους ΕΑΗΑ αγροτικών θερμοκηπίων.[43, 44] Για τη θέρμανση το χειμώνα και την ψύξη το

καλοκαίρι, εγκαταστάθηκαν ΕΑΗΕ και συνδέθηκαν με το θερμοκήπιο. Το κλίμα της περιοχής είναι τυπικό τροπικό κλίμα, με τις τιμές της απόλυτης ελάχιστης και της μέσης ελάχιστης θερμοκρασίας του αέρα του περιβάλλοντος για το χειμώνα να είναι περίπου 4 και 9 °C και 45 και 39 °C για το καλοκαίρι, αντίστοιχα. Πολλαπλοί σωλήνες PVC με διάμετρο 0,06 m και μήκος 39 m αποτέλεσαν το χρησιμοποιούμενο σύστημα ΕΑΗΕ. Ο βάθος ταφής των σωλήνων ήταν 1,2 μέτρα κάτω από το επίπεδο του εδάφους και περιβαλλόταν από άγονο έδαφος. Στο χώμα, οι σωλήνες τοποθετήθηκαν σε σχήμα φιδιού. Καταγράφηκαν οι τιμές της θερμοκρασίας του εδάφους και του εσωτερικού αέρα και προέκυψε το συμπέρασμα ότι η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα αυξήθηκε κατά μέσο όρο 6-7 °C κατά τη διάρκεια του χειμώνα για το [44], και έως 4 °C για το [43], ενώ το καλοκαίρι οι μειώθηκαν κατά 3-4 °C κατά μέσο όρο για το [44], και έως 8 °C για το [43].

Στην αναφορά [45] παρουσιάζεται μια ανάλυση της ενεργειακής αποτελεσματικότητας διαφόρων συστημάτων ΕΑΗΕ που χρησιμοποιούνται για θέρμανση και ψύξη χώρων σε κτήρια γραφείων. Περιγράφονται τρία πειραματικά έργα, όλα στη Γερμανία. Τα συστήματα ΕΑΗΕ είχαν αρκετούς (από 2 έως 26) σωλήνες με διαστάσεις διαμέτρου 0,2 έως 0,35 μέτρα, βάθος ταφής 2 έως 4 μέτρα, ταχύτητα αέρα 1,6 έως 5,6 m/s και τύπους εδάφους ξηρό-πετρώδες, ξηρό-χαλικώδες και υγρό-πηλώδες. Για τα τρία πειραματικά έργα, η διάρκεια των μετρήσεων ήταν ένα έτος. Το ετήσιο ειδικό ενεργειακό κέρδος θέρμανσης κυμάνθηκε μεταξύ 16,2 και 51,3 kWh/m² και το ετήσιο ειδικό ενεργειακό κέρδος ψύξης κυμάνθηκε μεταξύ 12,1 και 23,8 kWh/m² σύμφωνα με τα πειραματικά ευρήματα.

Για την πειραματική μελέτη ενός συστήματος ΕΑΗΕ χρησιμοποιήθηκε ένα ηλιακό θερμοκήπιο που δημιουργήθηκε στη Σμύρνη της Τουρκίας [46]. Ένα οριζόντιο σύστημα ΕΑΗΕ τύπου U-bend (closed loop) που αποτελείται από έναν γαλβανισμένο σωλήνα μήκους 47m και διαμέτρου 0,56m , θάφτηκε οριζόντια σε βάθος 3 μέτρων, και από έναν γαλβανισμένο σωλήνα μήκους 15 μέτρων και διαμέτρου 0,8 μέτρων που συνδέθηκε με το θερμοκήπιο, αποτέλεσε την πειραματική διάταξη, όπως φαίνεται στο Εικόνα 13. Δεδομένων των όποιων κτηριακών περιορισμών, η επιλογή των διαφόρων πλατών σωλήνων στο σύστημα που χρησιμοποίησαν οι συγγραφείς της εν λόγω μελέτης, πιθανώς υποδήλωνε μια προσπάθεια αύξησης της αποδοτικότητας του συστήματος. Το έδαφος αποτελούνταν από μικροσκοπικά πετρώματα, άργιλο και άμμο.



Εικόνα 13: Σχηματικό διάγραμμα της πειραματικής διάταξης.

Η είσοδος και η έξοδος του συστήματος, ο περιβάλλον χώρος, το εσωτερικό θερμοκήπιο κ.λπ. ήταν μόνο μερικά από τα σημεία όπου οι συγγραφείς έλαβαν μετρήσεις θερμοκρασίας και υγρασίας. Χρησιμοποιώντας τα παρατηρηθέντα δεδομένα και την ανάλυση ενέργειας και εξέργειας της μελέτης, εξετάσαμε την εξεργειακή απόδοση του συστήματος. Το 60,7% προσδιορίστηκε ως η συνολική απόδοση του συστήματος εξέργειας.

Οι Vaz et al. [47] επίλυσαν αριθμητικά ένα σύνολο διαφορικών εξισώσεων που αποτελούνται από:

- α) τις εξισώσεις Navier-Stokes που περιγράφουν τη διατήρηση της ροής μάζας του ρευστού στο εσωτερικό του σωλήνα
- β) την εξίσωση διατήρησης της ενέργειας, καθώς το ρευστό δημιουργεί επίσης μεταφορά θερμότητας στο εσωτερικό του σωλήνα

Κατάφεραν να υπολογίσουν με αυτό το μοντέλο τη θερμοκρασία σε κάθε σημείο του σωλήνα και το απέδειξαν και πειραματικά. Η πειραματική διερεύνηση έλαβε χώρα σε μία κατοικία στη Βραζιλία και το σύστημα ΕΑΗΕ αποτελούνταν από τρεις σωλήνες: Α, Β, και C κατασκευασμένοι όλοι τους από PVC. Ο Α και ο Β είχαν διάμετρο 0.11 και τοποθετήθηκαν σε βάθος 2 μέτρων, ενώ ο C είχε διάμετρο 0.10 και ήταν σε βάθος 0.5 μέτρων. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι για βάθος 2 μέτρων η θερμοκρασία του αέρα, που ρέει στο εσωτερικό του σωλήνα, είχε τη δυνατότητα να αυξηθεί περισσότερο από 8 °C ή να μειωθεί κατά περίπου 4 °C. Περαιτέρω έρευνα πραγματοποιήθηκε σε αυτό το κτήριο, στην οποία πάλι χρησιμοποιήθηκαν τρεις σωλήνες (Α, Β, C), αλλά τοποθετήθηκαν σε διαφορετικά βάθη:

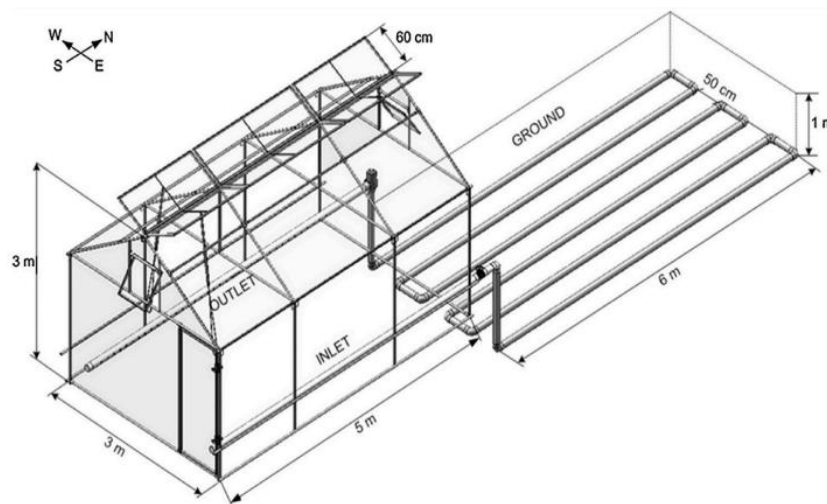
Α_____ 1.60m

Β_____ 0.60m

C_____ 0.50m.

Η ικανότητα θέρμανσης/ψύξης του συστήματος, σύμφωνα με τους εν λόγω συγγραφείς, ήταν σημαντική και μπορούσε να βελτιώσει σημαντικά τα επίπεδα θερμικής άνεσης στο εσωτερικό του κτηρίου. Επιπλέον, τα δεδομένα έδειξαν ότι οι βέλτιστες εποχές για τη χρήση του συστήματος ήταν ο Φεβρουάριος για ψύξη και ο Μάιος για θέρμανση.

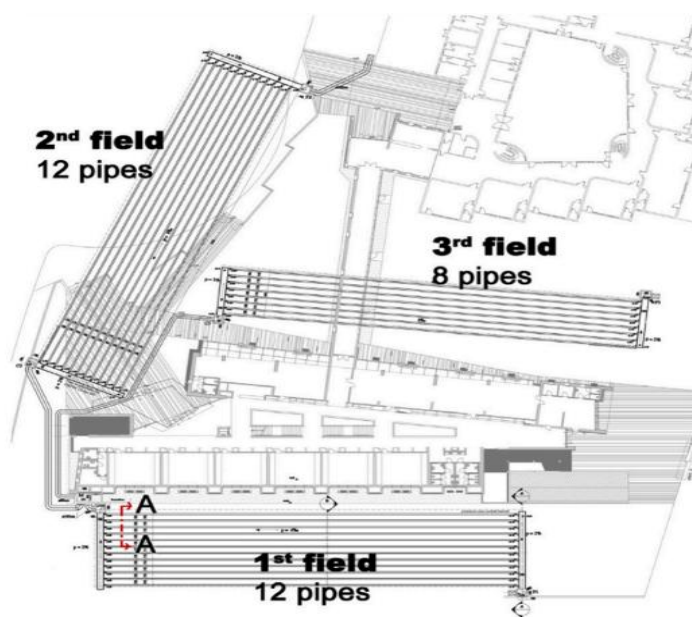
Οι Mongkon et al. [48] διεξήγαγαν μια πειραματική διερεύνηση σε ένα οριζόντιο σύστημα ΕΑΗΕ για την παροχή ψύξης σε ένα αγροτικό θερμοκήπιο στην Ταϊλάνδη. Το σύστημα ΕΑΗΕ θάφτηκε σε βάθος 1 μέτρου κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, η οποία ήταν καλυμμένη με σύντομο γκαζόν. Το σύστημα αποτελούνταν από ένα σιδερένιο σωλήνα, τοποθετημένο σε έξι σειρές φιδωτού σχήματος, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 14. Οι σωλήνες εισόδου και εξόδου ήταν κατασκευασμένοι από PVC και είχαν διάμετρο 0,08 m. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι το σύστημα είχε σημαντική ψυκτική αποτελεσματικότητα για τροπικά κλίματα.



Εικόνα 14: Σχηματικό διάγραμμα της πειραματικής διάταξης.

Μια μελέτη παρακολούθησης της απόδοσης ενός μεγάλου συστήματος ΕΑΗΕ που παρέχει θέρμανση και ψύξη χώρου σε ένα σχολικό κτήριο στην Ίμολα της Ιταλίας, παρέχεται από τους Chiesa et al. [49]. Τα τρία σύνολα σωλήνων που αποτελούσαν το σύστημα ΕΑΗΕ ήταν θαμμένα σε τρία διαφορετικά πεδία. Καθένα από τα δύο πρώτα σύνολα διέθετε δώδεκα σωλήνες, αλλά το τρίτο σύνολο είχε μόνο οκτώ. Οι σωλήνες είχαν διάμετρο 0,25 m και μήκος

70 m. Ενώ η απόσταση μεταξύ διαδοχικών σωλήνων στο ίδιο πεδίο ήταν 1,10 m, το μέσο βάθος ταφής κάτω από την επιφάνεια ήταν 2,61 m. Στο εσωτερικό των σωλήνων, ο αέρας κινούνταν με μέση ταχύτητα 2 m/s. Οι εν λόγω συγγραφείς παρουσίασαν τα αποτελέσματα μιας περιόδου παρακολούθησης 12 μηνών για κάθε ένα από τα τρία πεδία του ΕΑΗΕ, τα οποία αποδείχθηκαν αξιοσημείωτα αποτελεσματικά για τις λειτουργίες ψύξης και προθέρμανσης. Ο σχεδιασμός του ΕΑΗΕ παρουσιάζεται στη παρακάτω εικόνα:



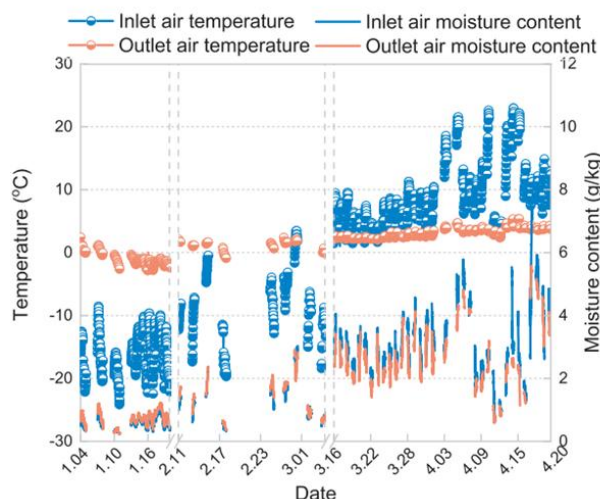
Εικόνα 15: Σχέδιο του εγκατεστημένου ΕΑΗΑ.

Οι Serageldin et al. [32] διεξήγαγαν πειραματική μελέτη για να επικυρώσουν το αριθμητικό τους μοντέλο που βασίζεται στην υπολογιστική ρευστοδυναμική και παρουσιαστική παραγωγή. Ένας οριζόντιος PVC σωλήνας ΕΑΗΕ μήκους 5,5 m με διάμετρο 0,05 m θάφτηκε σε σχήμα φιδιού σε βάθος 2 m. Ο αέρας κυκλοφορούσε στο εσωτερικό του σωλήνα με ταχύτητα 1-3,9 m/s, ενώ επιλέχθηκε έδαφος από αργιλώδη άμμο. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν χειμώνα και καλοκαίρι και τα αποτελέσματα έδειξαν σημαντική δυνατότητα θέρμανσης/ψύξης, η οποία εξαρτιόταν σε μεγάλο βαθμό από τις παραμέτρους σχεδιασμού του συστήματος.

Ένα κτήριο στο Μαρακές του Μαρόκου ελέγχθηκε πειραματικά για την απόδοση του εναλλάκτη που του είχε εγκατασταθεί. Εξετάστηκε ως προς την ψυκτική του λειτουργία. Τρεις παράλληλοι σωλήνες σχήματος U μήκους 77,7 μέτρων και διαμέτρου 0,15 μέτρων αποτελούσαν το σύστημα, το οποίο ήταν θαμμένο μεταξύ 2,2 και 3,5 μέτρων κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Ο πρώτος όροφος του κτηρίου συνδεόταν με δύο από τους σωλήνες και ο δεύτερος όροφος με τον τρίτο. Όταν η θερμοκρασία του αέρα του περιβάλλοντος ήταν πάνω από 40°C, τα ευρήματα έδειξαν εκπληκτική απόδοση του συστήματος, παρέχοντας σχεδόν σταθερή θερμοκρασία αέρα εξόδου από τους σωλήνες στους 25°C.

Οι Liu et al. [28] πραγματοποίησαν μια πειραματική μελέτη για την επικύρωση του μεταβατικού αριθμητικού τους μοντέλου που προβλέπει τη θερμική απόδοση ενός κατακόρυφου συστήματος ΕΑΗΕ. Το πείραμα διεξήχθη στην Changsha (Κίνα), η οποία έχει υποτροπικό κλίμα (θερμό καλοκαίρι και ψυχρό χειμώνα). Το σύστημα αποτελούνταν από έναν σωλήνα σχήματος U (σωλήνας U), κατασκευασμένο από ανοξείδωτο χάλυβα, ο οποίος είχε διάμετρο 0,219 m και ήταν θαμμένος σε μια οπή βάθους 16,5 και διαμέτρου 1 m, γεμάτη με χώμα. Οι μετρήσεις συλλέχθηκαν τόσο κατά τη διάρκεια του χειμώνα όσο και κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Τα πειραματικά αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν για την επικύρωση του μοντέλου τους.

Σε μια πόλη της νοτιοδυτικής Κίνας, που χαρακτηρίζεται από θερμό και υγρό κλίμα, διεξήχθη μια πειραματική μελέτη πλήρους κλίμακας για την αξιολόγηση της ψυκτικών δυνατοτήτων ενός συστήματος εναλλάκτη θερμότητας εδάφους-αέρα. Η πειραματική διάταξη αποτελούνταν από τέσσερις θαμμένους σωλήνες PVC διαφορετικού σχεδιασμού (διάμετρος 0,16, 0,11, 0,11 και 0,075 m αντίστοιχα). Όλοι οι σωλήνες είχαν μια κατακόρυφη είσοδο, ένα οριζόντιο τμήμα όπου συμβαίνει η διαδικασία μεταφοράς θερμότητας και μια κατακόρυφη έξοδο. Το βάθος ταφής για τους τρεις σωλήνες ήταν 3 μέτρα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους και 2 μέτρα για τον τέταρτο. Οι γειτονικοί σωλήνες που θάφτηκαν στα 3 m απέχουν μεταξύ τους 0,7 m. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι το σύστημα ΕΑΗΕ παρουσίασε αξιοσημείωτη ικανότητα δροσισμού και μπορούσε να ψύξει και να αφυγρανίσει σημαντικά τον αέρα του περιβάλλοντος. Η θερμοκρασία και η υγρασία του αέρα εξόδου παρουσίασαν σημαντική σταθερότητα, παρόλο που η θερμοκρασία και η υγρασία του αέρα εισόδου κυμάνθηκαν μεταξύ 21,5 και 41,2 °C και από 11,2 έως 20,5 g/kg. Η επιτευχθείσα μέγιστη μείωση της θερμοκρασίας του αέρα για τον θαμμένο σωλήνα διαμέτρου 0,075 m που θάφτηκε σε βάθος 3 m, ήταν 22,1 °C, ενώ για την υγρασία η μείωση ήταν 7,41 g/kg. Η ικανότητα μεταφοράς αισθητής θερμότητας κυμάνθηκε στο εύρος 60-83%, ενώ η ικανότητα ψύξης για τη λανθάνουσα μεταφορά θερμότητας κυμάνθηκε μεταξύ 17 και 40%.



Διάγραμμα 7: Θερμοκρασία αέρα και περιεκτικότητα σε υγρασία στην είσοδο/έξοδο του ΕΑΗΕ. [50]

Συμπερισματικά από την ανάλυση της εργασίας [23]:

Τα συστήματα ΕΑΗΕ είναι πολυπαραμετρικά. Η απόδοση των συστημάτων που μελετήθηκαν εξαρτιόταν άμεσα από τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τον μηχανολογικό σχεδιασμό και τα συμπεράσματά τους ήταν σχετικά μόνο για συγκεκριμένες συνθήκες και σχεδιασμούς. Ωστόσο, οι προαναφερθείσες μελέτες, που αφορούν τις πειραματικές μελέτες όπως περιγράφονται στην [23], διεξήχθησαν σε διαφορετικά μέρη σε όλο τον κόσμο με διαφορετικές θερμοφυσικές ιδιότητες και μηχανικές επιλογές. Παρά το γεγονός ότι τα συμπεράσματα από μεμονωμένες ερευνητικές εργασίες δεν μπορούν να γενικευτούν, υπάρχει κάποιο κοινό έδαφος και τα ευρήματά τους συγκλίνουν στα ακόλουθα τρία γεγονότα:

- 1) απέδειξαν ότι οι θαμμένοι σωλήνες επηρεάζουν κυρίως τις καλοκαιρινές θερμοκρασίες των εσωτερικών χώρων (τροπική ψύξη)
- 2) όλες οι τιμές απόδοσης του συστήματος ΕΑΗΑ κυμάνθηκαν γύρω στο 60%
- 3) η θερμοκρασία του αέρα εξόδου δεν εγγυάται αύξηση της εσωτερικής θερμοκρασίας το χειμώνα, αλλά φάνηκε να μειώνει αποτελεσματικά τις καλοκαιρινές εσωτερικές θερμοκρασίες.

Έτσι, οι παραπάνω μελέτες φαίνεται να υποδηλώνουν ότι οι ΕΑΗΕ είναι πιο αποτελεσματικοί ως μέσο ψύξης παρά ως μέθοδος θέρμανσης.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συνοψίζοντας, η εργασία αυτή πραγματεύεται τη χρήση και την αξιοποίηση του εδάφους για τη διαμόρφωση κτηρίων με ενεργειακό σχεδιασμό. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται αναφορά στην ικανότητα του εδάφους να μειώνει την ενεργειακή κατανάλωση για τις ανάγκες δροσισμού ενός κτηρίου, αξιοποιώντας τη σχετικά σταθερή θερμοκρασία του υπεδάφους. Έτσι, μειώνεται η εξάρτηση από τα συμβατικά συστήματα κλιματισμού, εξοικονομείται ενέργεια, ενώ παράλληλα ελαχιστοποιούνται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Περιγράφονται δύο βασικές μέθοδοι παθητικού δροσισμού με τη χρήση του εδάφους, ο άμεσος και ο έμμεσος δροσισμός, οι οποίες περιλαμβάνουν τα υπόσκαφα κτήρια και τους εναλλάκτες θερμότητας εδάφους – αέρα, αντίστοιχα. Τα υπόσκαφα κτήρια είναι κατασκευές που έχουν σχεδιαστεί για να ενσωματώνουν τις φυσικές ιδιότητες της γης για ενεργειακή απόδοση και περιβαλλοντική βιωσιμότητα, προσφέροντας πολλά οφέλη όπως τη βελτιωμένη ρύθμιση της θερμοκρασίας, το μειωμένο κόστος κοινής ωφέλειας και την αυξημένη αντοχή σε ακραίες καιρικές συνθήκες. Οι ΕΑΗΑ εκμεταλλεύονται τη σταθερή θερμοκρασία της γης για να προκλιματίζουν τον εισερχόμενο φρέσκο αέρα, μειώνοντας την ανάγκη για συμβατικά συστήματα θέρμανσης και ψύξης, και βελτιώνοντας την ποιότητα του αέρα. Πολλά μοντέλα έχουν προταθεί για να υπολογίσουν και να εκτιμήσουν την αποδοτικότητα αυτών των συστημάτων, τα οποία έχουν διερευνηθεί πειραματικά και έχουν επαληθευτεί επιτυχώς. Αυτά θα μπορούσαν να χωριστούν

σε τρεις κατηγορίες: α) αριθμητικά, (β) αναλυτικά και γ) βασιζόμενα σε δεδομένα μοντέλα. Ο δροσισμός με τη χρήση εδάφους λοιπόν, δηλαδή τα υπόσκαφα κτήρια και οι εναλλάκτες θερμότητας εδάφους – αέρα, είναι βιώσιμες τεχνικές δόμησης που αξιοποιούν τις θερμικές ιδιότητες της γης για να ελαχιστοποιήσουν τις ενεργειακές δαπάνες και το περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Οι προσεγγίσεις αυτές αποκτούν ολοένα και μεγαλύτερη σημασία στο πλαίσιο της κλιματικής αλλαγής και με τα μοντέλα που αναπτύσσονται, δίνεται η δυνατότητα για τη βέλτιστη αξιοποίησή τους, καθιστώντας τις οικολογικές, οικονομικές και αποδοτικές λύσεις δομής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ:

1. [Energy Efficiency and Thermal Comfort in Heritage Buildings Anjali K Sharma, School of Planning and Architecture, Delhi, India](#)
2. [Energy Buildings and Urban Environment DJ Sailor, Portland State University, Portland, OR, USA](#)
3. [Energy efficient design of building: A review R. Pacheco, J. Ordóñez ~ *, G. Martínez Department of Construction & Project Engineering, University of Granada, Spain](#)
4. [Ekici BB, Aksoy UT. Prediction of building energy needs in early stage of design by using ANFIS. Expert Systems with Applications](#)
5. Key principles of energy-efficient design retrieved in <https://www.sustainability.vic.gov.au/energy-efficiency-and-reducing-emissions/building-or-renovating/key-principles-of-energy-efficient-design>
6. [Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures: The state of the art Mattheos Santamouris a, Dionysia Kolokotsa b,* a Group Building Environmental Studies, Physics Department, University Athens, Athens, Greece b Technical University of Crete, Environmental Engineering Department, GR 73100, Crete, Greece](#)
7. [Modelling the earth temperature using multiyear measurements G. Mihalakakou, M. Santamouris* and D. Asimakopoulos Laboratory of Meterology, Physics Department, University of Athens, Ippokratous 33, 105 80 Athens \(Greece\)](#)
8. New Geothermal Cooling – Heating System for Buildings, Pawel Lech, 2012
9. Geothermal Air Cooling System, Laswinder Singh
10. [Thermal behaviour of an earth-sheltered autonomous building – The Brighton Earthship Kenneth Ip*, Andrew Miller Centre for Sustainability of the Built Environment, School of Environment and Technology, University of Brighton, Brighton BN2 4GJ, East Sussex, United Kingdom](#)
11. Εκπαιδευτικό υλικό από E-class.
12. [Earth Temperatures and Underground Buildings BARUCH GIVONI and LEON KATZ Institute for Desert Research, Ben-Gurion University, Kiryat Sede Boqer \(Israel\) \(Received in revised form June 16, 1983\)](#)
13. [A review of underground building towards thermal energy efficiency and sustainable development Saqaff A. Alkaff, S.C. Sim n , M.N. Ervina Efzan Faculty of Engineering and Technology, Multimedia University, Malaysia](#)
14. [Earth Shelters; A Review of Energy Conservation Properties in Earth Sheltered Housing Akubue Jideofor Anselm](#)
15. [A guideline for assessing the suitability of earth-sheltered mass-housing in hot-arid climates A.A. Al-Temeemi a, D.J. Harris b,* a Department of Civil Engineering Technology, School for Technological Studies, Shuwaikh, Kuwait b School of the Built Environment, Heriot-Watt University, Riccarton, EH14 4AS Edinburgh, UK](#)

-
16. [Ground coupled heat exchangers: A review and applications Suresh Kumar Soni a,n , Mukesh Pandey a , Vishvendra Nath Bartaria b a Department of Energy Technology, RGPV, Bhopal, India b Department of Mechanical Engineering, LNCT, Bhopal, India](#)
 17. [Ground heat exchangers: Applications, technology integration and potentials for zero energy buildings Jiajia Gao, Anbang Li, Xinhua Xu, Wenjie Gang* , Tian Yan Department of Building Environment & Energy Application Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, China](#)
 18. [The design and environmental evaluation of earth-to-air heat exchangers \(EAHE\). A literature review Clara Peretti n , Angelo Zarrella, Michele De Carli, Roberto Zecchin Department of Industrial Engineering, University of Padova, Venice Street 1, 35131 Padova, Italy](#)
 19. [A review on the experimental and analytical analysis of earth to air heat exchanger \(EAHE\) systems in Turkey Leyla Ozgener * Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Celal Bayar University, TR-45140 Muradiye, Manisa, Turkey](#)
 20. [Experimental and analytical studies of earth–air heat exchanger \(EAHE\) systems in India: A review Trilok Singh Bisoniya n , Anil Kumar, Prashant Baredar Department of Energy, Maulana Azad National Institute of Technology, Bhopal 462051, India](#)
 21. [Ground-source pump system for heating and cooling: Review and thermodynamic approach Umberto Luciaa,* , Marco Simonettia , Giacomo Chiesab , Giulia Grisoliaa a Dipartimento Energia, Energia, Politecnico di Torino, Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino, Italy b Dipartimento di Architettura e Design, Politecnico di Torino, Viale Mattioli 39, 10125 Torino, Italy](#)
 22. [ON THE GROUND TEMPERATURE PROFILE FOR PASSIVE COOLING APPLICATIONS IN BUILDINGS C. P. JACOVIDES,* G. MIHALAKAKOU,**† M. SANTAMOURIS* and J. O. LEWIS** *University of Athens, Laboratory of Meteorology, Department of Applied Physics, 33 Ippokratous Street, Athens 10680, Athens, Greece and **Energy Research Group, University College Dublin, Richview, Clonskeagh Drive, Dublin 14, Ireland \(Received 21 November 1995; revised version accepted 29 April 1996\)](#)
 23. [Applications of earth-to-air heat exchangers: A holistic review Giouli Mihalakakou a , Manolis Souliotis b,* , Maria Papadaki a , George Halkos c , John Paravantis d , Sofoklis Makridis a , Spiros Papaefthimiou e a Department of Environmental Engineering, University of Patras, Greece b Department of Chemical Engineering, University of Western Macedonia, Greece c Department of Economics, University of Thessaly, Greece d Department of International and European Studies, University of Piraeus, Greece e School of Production Engineering and Management, Technical University of Crete, Greece](#)
 24. [Fighting energy poverty by going underground Lefkothea Papada a,* , Nikolas Katsoulakos a , Dimitris Kaliampakos b a Metsovia Interdisciplinary Research Center, National Technical University of Athens, Patission 42, Athens, 10682, Greece b National Technical University of Athens, Patission 42, Athens, 10682, Greece](#)

-
25. [Puri VM. Heat and mass transfer analysis and modeling in unsaturated ground soils for buried tube systems. Energy Agric 1987;6\(3\):179–93](#)
 26. [Yoon G, Tanaka H, Okumiya M. Study on the design procedure for a multi-cool/ heat tube system. Sol Energy 2009;83\(8\):1415–24.](#)
 27. [Trzaski A, Zawada B. The influence of environmental and geometrical factors on air-ground tube heat exchanger energy efficiency. Build Environ 2011;46\(7\): 1436–44.](#)
 28. [Liu Z, et al. Numerical modeling and parametric study of a vertical earth-to-air heat exchanger system. Energy 2019;172:220–31.](#)
 29. [Hollmuller P, Lachal B. Cooling and preheating with buried pipe systems: monitoring, simulation and economic aspects. Energy Build 2001;33\(5\):509–18.](#)
 30. [Wu H, Wang S, Zhu D. Modelling and evaluation of cooling capacity of earth-airpipe systems. Energy Convers Manag 2007;48\(5\):1462–71.](#)
 31. [Ramírez-D´avila L, Xaman´ J, Arce J, Alvarez´ G, Hernandez-P´´erez I. Numerical study of earth-to-air heat exchanger for three different climates. Energy Build 2014;76:238–48.](#)
 32. [Serageldin AA, Abdelrahman AK, Ookawara S. Earth-Air Heat Exchanger thermal performance in Egyptian conditions: experimental results, mathematical model, and Computational Fluid Dynamics simulation. Energy Convers Manag 2016;122: 25–38.](#)
 33. [Mihalakakou G, Santamouris M, Asimakopoulos D, Tselepidaki I. Parametric prediction of the buried pipes cooling potential for passive cooling applications. Sol Energy 1995;55\(3\):163–73.](#)
 34. [Krarti M, Kreider JF. Analytical model for heat transfer in an underground air tunnel. Energy Convers Manag 1996;37\(10\):1561–74.](#)
 35. [Do SL, Baltazar JC, Haberl J. Potential cooling savings from a ground-coupled return-air duct system for residential buildings in hot and humid climates. Energy Build 2015;103:206–15.](#)
 36. [Cucumo M, Cucumo S, Montoro L, Vulcano A. A one-dimensional transient analytical model for earth-to-air heat exchangers, taking into account condensation phenomena and thermal perturbation from the upper free surface as well as around the buried pipes. Int J Heat Mass Tran 2008;51\(3–4\):506–16.](#)
 37. [Lee KH, Strand RK. The cooling and heating potential of an earth tube system in buildings. Energy Build 2008;40\(4\):486–94.](#)
 38. [Yang D, Guo Y, Zhang J. Evaluation of the thermal performance of an earth-to-air heat exchanger \(EAHE\) in a harmonic thermal environment. Energy Convers Manag 2016;109:184–94.](#)
 39. [Rouag A, Benchabane A, Mehdid CE. Thermal design of Earth-to-Air Heat Exchanger. Part I a new transient semi-analytical model for determining soil temperature. J Clean Prod 2018;182:538–44.](#)
 40. [Kumar R, Kaushik SC, Garg SN. Heating and cooling potential of an earth-to-air heat exchanger using artificial neural network. Renew Energy 2006;31\(8\): 1139–55.](#)
 41. [Trombe A, Pettit M, Bourret B. Air cooling by earth tube heat exchanger: experimental approach. Renew Energy 1991;1\(5–6\):699–707.](#)

-
42. [Sawhney RL, Buddhi D, Thanu NM. An experimental study of summer performance of a recirculation type underground airpipe air conditioning system. Build Environ 1998;34\(2\):189–96.](#)
 43. [Tiwari GN, Akhtar MA, Shukla A, Emran Khan M. Annual thermal performance of greenhouse with an earth-air heat exchanger: an experimental validation. Renew Energy 2006;31\(15\):2432–46.](#)
 44. [Ghosal MK, Tiwari GN, Srivastava NSL, Sodha MS. Thermal modelling and experimental validation of ground temperature distribution in greenhouse. Int J Energy Res 2004;28\(1\):45–63.](#)
 45. [Pfafferott J. Evaluation of earth-to-air heat exchangers with a standardised method to calculate energy efficiency. Energy Build 2003;35\(10\):971–83.](#)
 46. [Ozgener L, Ozgener O. An experimental study of the exergetic performance of an underground air tunnel system for greenhouse cooling. Renew Energy 2010;35\(12\):2804–11.](#)
 47. [Vaz J, Sattler MA, Dos Santos ED, Isoldi LA. Experimental and numerical analysis of an earth-air heat exchanger. Energy Build 2011;43\(9\):2476–82.](#)
 48. [Mongkon S, Thepa S, Namprakai P, Pratinthong N. Cooling performance and condensation evaluation of horizontal earth tube system for the tropical greenhouse. Energy Build 2013;66:104–11.](#)
 49. [Chiesa G, Simonetti M, Grosso M. A 3-field earth-heat-exchange system for a school building in Imola, Italy: monitoring results. Renew Energy 2014;62: 563–70.](#)
 50. [Li H, Ni L, Liu G, Yao Y. Performance evaluation of Earth to Air Heat Exchange \(EAHE\) used for indoor ventilation during winter in severe cold regions. Appl Therm Eng 2019;160:114111.](#)