



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, ΑΕΡΟΝΑΥΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ**

ΣΠΟΥΔΑΣΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΕΛΑΦΟΥΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΚΑΙ ΣΕ ΜΙΚΡΑ
ΒΑΘΗ ΓΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ**

Αγγελική Βρεττού

Αριθμός Μητρώου: 1026639

**Επιβλέπουσα:
Παναγιώτα Μιχαλακάκου, Καθηγήτρια**

Σπουδαστική εργασία υποβληθείσα στο Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών του
Πανεπιστημίου Πατρών

ΠΑΤΡΑ, Φεβρουάριος 2025

Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Μηχανολόγων Και Αεροναυπηγών Μηχανικών
Αγγελική Βρεττού
© 2025 – Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας δεν υποδηλοί την αποδοχή των γνωμών του συγγραφέα.
Κατά τη συγγραφή τηρήθηκαν οι αρχές της ακαδημαϊκής δεοντολογίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΕΔΑΦΟΥΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΚΑΙ ΣΕ ΜΙΚΡΑ ΒΑΘΗ ΓΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

ΑΓΓΕΛΙΚΗ ΒΡΕΤΤΟΥ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία εξετάζει τη κατανομή της θερμοκρασία του εδάφους στην επιφάνεια και σε μικρά βάθη για ενεργειακές εφαρμογές.

Στο πρώτο κεφάλαιο αναλύεται η χρήση του εδάφους ως μέσο δροσισμού, μελετώντας τόσο την άμεση ψύξη μέσω υπόσκαφων κτιρίων, τα οποία χρησιμοποιούν το έδαφος για τη φυσική ρύθμιση της θερμοκρασίας, όσο και την έμμεση ψύξη μέσω εναλλακτών εδάφους-αέρα, όπου η θερμοκρασία του αέρα ρυθμίζεται με τη βοήθεια του εδάφους πριν εισέλθει στο κτίριο.

Το δεύτερο κεφάλαιο αναλύει το θερμοκρασιακό προφίλ του εδάφους, εστιάζοντας στη διαφοροποίηση των παραγόντων που επηρεάζουν τη θερμοκρασία επιφανείας του εδάφους σε σχέση με τη θερμοκρασία σε διάφορα βάθη.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται μοντέλα πρόβλεψης των θερμοκρασιών του εδάφους, τα οποία εκτιμούν την επιφανειακή θερμοκρασία και τη θερμοκρασία σε διάφορα βάθη. Τα μοντέλα αυτά βασίζονται σε διάφορες παραμέτρους όπως τα φυσικοθερμικά χαρακτηριστικά του εδάφους.

Τέλος, στο τέταρτο κεφάλαιο παρατίθενται οι εφαρμογές των μοντέλων πρόβλεψης θερμοκρασιών τος εδάφους στον ενεργειακό σχεδιασμό των κτιρίων αλλά και σε άλλους τομείς. Ειδικότερα, αναλύεται το πως οι προβλέψεις αυτές επηρεάζουν τις σχεδιαστικές παραμέτρους των συστημάτων και συνεπώς τη βελτιστοποίηση τους.

Η εργασία συνολικά καταδεικνύει τη σημασία του εδάφους ως εργαλείου για τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης μέσω μεθόδων δροσισμού και θερμικής ρύθμισης, ενισχύοντας τη βιώσιμη ανάπτυξη και την ενεργειακή αποδοτικότητα.

Λέξεις κλειδιά

Δροσισμός Μέσω Εδάφους, Υπόσκαφα Κτίρια, Εναλλάκτης Θερμότητας Εδάφους-Αέρα,
Κατανομή Θερμοκρασίας Εδάφους

ABSTRACT

This thesis examines the distribution of soil temperature at the surface and at shallow depths for applications in the energy sector.

The first chapter analyzes the use of soil as a cooling medium, studying both direct cooling, through earth sheltered buildings that utilize the ground for natural temperature regulation and indirect cooling, through air to earth heat exchangers, where the air temperature is regulated with the help of the soil before entering the building.

The second chapter focuses on the temperature profile of the soil, analyzing the differences in factors affecting surface soil temperature compared to temperatures at various depths.

The third chapter presents predictive models of soil temperatures, which estimate the surface temperature along with the temperature at various depths. These models are based on various parameters such as the thermophysical characteristics of the soil.

Finally, the fourth chapter outlines the applications of soil temperature prediction models in the energy design of buildings as well as in other fields. Specifically, it analyzes how these predictions influence the process design of the systems and consequently their optimization.

The dissertation demonstrates the importance of soil as a tool for reducing energy consumption through cooling and thermal regulation methods, enhancing sustainable development and energy efficiency.

Key words

Ground Cooling, Earth-Sheltered Buildings, Earth to Air Heat Exchanger, Soil Temperature Distribution

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1.1: Υπόσκαφη οικία στο νησί της Σαντορίνης.

Εικόνα 1.1.2: Υπόσκαφος οικισμός στην Καππαδοκία της Τουρκίας.

Εικόνα 1.1.3: Άποψη του Θησαυροφυλακίου της Πέτρας, Ιορδανία.

Εικόνα 1.1.4: Η υπόσκαφη πόλη Vardzia της Γεωργίας.

Εικόνα 1.1.5: Τα «Σάσσι» της Ματέρα, Ιταλία.

Εικόνα 1.1.6: Υπόσκαφη μονολιθική εκκλησία της Lalibela της Αιθιοπίας.

Εικόνα 1.2.1: Σωληνώσεις εναλλάκτη αέρα-εδάφους στη φάση της κατασκευής του εναλλάκτη.

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

α (m ² /s) – Θερμική διαχυτότητα	ρ_a (g/cm ³) – Πυκνότητα αέρα
a – Ανακλαστική ικανότητα (albedo) της επιφάνειας	ρ_w (g/cm ³) – Πυκνότητα νερού
$a(t)$ – Ανακλαστική ικανότητα (albedo) του καλυμμένου εδάφους ως συνάρτηση του χρόνου	σ (cal/(cm ² ·K·day)) – Σταθερά Stefan-Boltzmann
a_c – Ανακλαστική ικανότητα (albedo) της κάλυψης του εδάφους	τ (Pa) – Τανυστής ιξώδους τάσης
a_s – Ανακλαστική ικανότητα (albedo) της επιφάνειας του εδάφους	U (m/s) – Ταχύτητα του θερμικού πλουμίου που οφείλεται σε καθαρή συναγωγή
A (m ²) – Επιφάνεια	φ (J/kg) – Δυναμική ενέργεια ανά μονάδα μάζας ή δυναμικό
A_s (°C) – Εύρος της ετήσιας μέσης θερμοκρασίας του αέρα	ψ (°C/s) – Κλίση της επιφανειακής αύξησης της θερμοκρασίας
γ – Ανακλαστική ικανότητα επιφανείας (albedo) για ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος	ω (1/h ή 1/d) – Γωνιακή συχνότητα της θερμοκρασιακής ταλάντωσης
ΔH_e (cal/(cm ² ·day)) – Συσσώρευση της θερμικής ενέργειας στο στρώμα του εδάφους	A_{PW} – Εμπειρική παράμετρος του μοντέλου Popeil-Wojtkowiak
ΔT (°C) – Βηματική μεταβολή θερμοκρασίας	B_{PW} – Εμπειρική παράμετρος του μοντέλου Popeil-Wojtkowiak
ΔT_m (°C) – Θερμοκρασιακή βαθμίδα	C_{PW} – Εμπειρική παράμετρος του μοντέλου Popeil-Wojtkowiak
E (cm/day) – Γραμμική ταχύτητα εξάτμισης	D_{pw} – Εμπειρική παράμετρος του μοντέλου Popeil-Wojtkowiak
ε – Πορώδες	E_{PW} – Εμπειρική παράμετρος του μοντέλου Popeil-Wojtkowiak
μ (cal/g) – Λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης νερού	C_p (J/(K·kg) ή (cal/(g·°C))) – Ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση
ν (m ³ /kg) – Ειδικός όγκος	C_{pa} (cal/(g·K)) – Ειδική θερμοχωρητικότητα αέρα υπό σταθερή πίεση
ρ (kg/m ³ ή g/cm ³) – Φαινόμενη πυκνότητα	

C_v (J/(K·kg) ή (cal/(g·°C)) – Ειδική
θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο

C_w (J/(K·kg) ή (cal/(g·°C)) – Ειδική
θερμοχωρητικότητα νερού

$C(t)$ – Ποσοστό κάλυψης της επιφάνειας
συναρτήσει του χρόνου

d (cm) – Πάχος λεπτού επιφανειακού
στρώματος

d_1 (cm) – Πάχος του πρώτου εδαφικού
στρώματος

$\underline{D}$ (m) – Μετατόπιση του επιπέδου μηδέν

e_a – Ικανότητα εκπομπής (εκπεμπτότητα) της
ατμοσφαιράρας

e_s – Ικανότητα εκπομπής (εκπεμπτότητα)
υπέρυθρου του εδάφους

$\mathcal{E}$ (J/kg) – Ολική ενέργεια ανά μονάδα μάζας

G_s (cal/(cm²·day)) – Θερμότητας του εδάφους

G (°C/m) – Γεωθερμική βαθμίδα

$\vec{g}$ (m/s²) – Διάνυσμα επιτάχυνσης της
βαρύτητας

H_s (cal/(cm²·day)) – Αισθητή θερμότητα του
αέρα

h (cm/day) – Συντελεστής θερμικής μεταφοράς
στην διεπιφάνεια αέρα-εδάφους

t (s) – Χρόνος

k_v – Παράγοντας σκίασης της βλάστησης

$\mathbb{k}$ (m⁻¹) – Σταθερά θερμικής ταλάντωσης

k (W/(m·K)) – Θερμική αγωγιμότητα

K_1 – Αριθμός του von Karman

LEs (cal/(cm²·day)) – Λανθάνουσα θερμότητα

$\vec{n}$ – Μοναδιαίο διάνυσμα που είναι κάθετο στην
επιφάνεια με κατευθυνση προς τα έξω από τον
όγκο ελέγχου

$\dot{q}''$ (W/m²) – Ρυθμός μεταφοράς θερμότητας
ανά μονάδα επιφανείας

$\dot{q}'''$ (W/m³) – Ρυθμός παραγωγής θερμότητας

q_z (m/s) – Κατακόρυφη ροή Darcy

R_n (cal/(cm²·day)) – Καθαρή ακτινοβολία

R_s (cal/(cm²·day)) – Προσπίπτουσα ηλιακή
ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος

R_{sr} (cal/(cm²·day)) – Ανακλώμενη ηλιακή
ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος

R_{lar} (cal/(cm²·day)) – Ανακλώμενη
ατμοσφαιρική ακτινοβολία μεγάλου κύματος
(cal/(cm²·day))

R_{ls} (cal/(cm²·day)) – Εκπεμπόμενη από το
έδαφος ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος

S_{we} – Κινητός κορεσμός της υγρή φάσης

T_a (°C ή K) – Θερμοκρασία του αέρα

T_g (°C ή K) – Θερμοκρασία εδάφους σε βάθος
κάτω από την ρηχή ζώνη

T_{ma} (°C ή K) – Μέση ετήσια θερμοκρασία αέρα

T_m (°C ή K) – Μέση ετήσια θερμοκρασία στην
επιφάνεια του εδάφους

T_s (°C ή K) – Θερμοκρασία επιφανείας του
εδάφους

T_i, T_{i+1} (°C ή K) – Αντιπροσωπευτική
θερμοκρασία για το επιφανειακό στρώμα σε
δυο διαδοχικά χρονικά σημεία
 T_o (°C ή K) – Αρχική επιφανειακή
θερμοκρασία
 T_1 (°C ή K) – Θερμοκρασία του εδάφους στη
βάση του πρώτου στρώματος της εδαφικής
κατανομής
 T_{5cm} (°C ή K) – Ετήσιο εύρος θερμοκρασία σε
βάθος 5cm
 u (J/kg) – Εσωτερική ενέργεια ανά μονάδα
μάζας
 v (m/s) – Ταχύτητα

 v (m/s) - Ταχύτητα υπόγειου νερού
 V (m³) – Όγκος
 V_z (cm/day) – Ταχύτητα ανέμου
 z (m) – Βάθος
 Z_{ch} (m) – Ύψος τη φυτοκάλυψης
 Z_{RH} (m) – Ύψος αναφοράς στο οποίο
μετρείται η ταχύτητα του ανέμου
 Z_o (m) – Ύψος αεροδυναμικής τραχύτητας,
στο οποίο η ροή γίνεται τυρβώδης

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	V
ABSTRACT.....	VII
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	IX
ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ.....	X
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	XIII
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: GROUND COOLING: ΔΡΟΣΙΣΜΟΣ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΕΛΑΦΟΥΣ.....	5
1.1 ΑΜΕΣΗ ΨΥΞΗ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΕΛΑΦΟΥΣ : ΥΠΟΣΚΑΦΑ ΚΤΗΡΙΑ (EARTH-SHELTERED BUILDINGS).....	7
1.2 ΕΜΜΕΣΗ ΨΥΞΗ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΕΛΑΦΟΥΣ: ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΕΛΑΦΟΥΣ ΑΕΡΑ (EARTH-TO-AIR HEAT EXCHANGERS).....	16
2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΕΛΑΦΟΥΣ.....	21
2.1 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ.....	21
2.1.1 ΚΥΡΙΟΤΕΡΕΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΔΙΑΜΟΡΦΩΝΟΥΝ ΤΗΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΟΥ ΕΛΑΦΟΥΣ.....	22
2.1.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΤΗΝ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΟΥ ΕΛΑΦΟΥΣ.....	22
2.2 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΒΑΘΗ ΚΑΤΩ ΑΠΟΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ	25
3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΕΛΑΦΟΥΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΚΑΙ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΒΑΘΗ.....	27
3.1 ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ	27
3.2 ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΒΑΘΗ.....	33

3.2.1	ΜΟΝΤΕΛΟ FOURIER.....	33
3.2.2	ΜΟΝΤΕΛΟ SUZUKI.....	37
3.2.3	ΜΟΝΤΕΛΑ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ.....	38
3.2.4	ΗΜΙΤΟΝΟΕΙΔΗ ΜΟΝΤΕΛΑ – ΗΜΙΕΜΠΕΙΡΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ	42
4.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	47
4.1.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	47
4.2.	ΑΛΛΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	48
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	50

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με την οικονομική ανάπτυξη και την ταυτόχρονη αύξηση του βιοτικού επιπέδου των τελευταίων δεκαετιών, παρατηρείται παγκοσμίως αύξηση της ζήτησης ενέργειας σε όλους τους τομείς κατανάλωσης. Ένας από τους τομείς με αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις είναι ο κτιριακός τομέας, στον οποίο η ενέργεια χρησιμοποιείται κυρίως για την εξασφάλιση θερμικής και οπτικής άνεσης στους χώρους που ζουν και εργάζονται άνθρωποι.^[1]

Κατά κύριο λόγο η θέρμανση των κτιρίων στηρίζεται στην καύση πετρελαίου και η ψύξη (δροσισμός), όπως και ο φωτισμός, στην ηλεκτρική ενέργεια. Λόγω της κλιματικής κρίσης και του επιταχυνόμενου φαινομένου του θερμοκηπίου τα περισσότερα κράτη έχουν υιοθετήσει πολιτικές για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ). Πιο συγκεκριμένα, ο οδικός χάρτης του εθνικού ενεργειακού σχεδιασμού για το 2050 συμπεριλαμβάνει στους στόχους του την «σημαντικά βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση για το σύνολο του κτιριακού αποθέματος και μεγάλη διείσδυση των εφαρμογών ΑΠΕ στον κτιριακό τομέα».^[1] Η βελτιωμένη αυτή ενεργειακή απόδοση επιτυγχάνεται με την δόμηση των σπιτιών με βάση τις αρχές του ενεργειακού σχεδιασμού (βιοκλιματικός σχεδιασμός).^[2]

Ο ενεργειακός σχεδιασμός στοχεύει στη μείωση της ενέργειας που καταναλώνεται για ψύξη, θέρμανση και φωτισμό (και συνεπώς των αντίστοιχων ρύπων), αλλά και τη μείωση του θερμικού και ψυκτικού φορτίου αιχμής, εξασφαλίζοντας όμως την ίδια στιγμή θερμική και οπτική άνεση μέσα στους χώρους. Επίσης, στόχο του ενεργειακού σχεδιασμού αποτελεί και η αντικατάσταση των συμβατικών μορφών ενέργειας με την πράσινη ενέργεια των ΑΠΕ.^{[2], [3]}

Ο ενεργειακός σχεδιασμός είναι μια προσέγγιση που ακολουθείται εδώ και δεκαετίες για την κατασκευή των κτιρίων σε παγκόσμιο επίπεδο. Είναι σημαντικό να κατανοήσουμε ότι ενεργειακός σχεδιασμός εκπονείται εξατομικευμένα και κατά περίπτωση. Πρέπει να λαμβάνει υπόψη τη γεωγραφική περιοχή, τις κλιματικές συνθήκες, αλλά και το μικρόκλιμα (π.χ. θερμοκρασία, υγρασία, ηλιοφάνεια, άνεμοι), το ανάγλυφο, τον προσανατολισμό του κτιρίου, τη

νομοθεσία που μπορεί να διαφέρει από περιοχή, τα τοπικά υλικά κατασκευής κ.λπ.^[4]. Παρόλα αυτά, οι βασικοί τομείς πάνω στους οποίους εδράζεται ο ενεργειακός σχεδιασμού συνοψίζονται παρακάτω:

- **Θερμομόνωση:** Ίσως το σημαντικότερο στοιχείο του ενεργειακού σχεδιασμού. Μπορεί να εφαρμοστεί και σε υφιστάμενα παλαιά κτίρια. Πρόκειται για την χρήση υλικών με χαμηλή θερμική αγωγιμότητα που περιορίζουν την διαφυγή θερμότητας από το κτίριο το χειμώνα και την είσοδο θερμότητας το καλοκαίρι γεγονός που οδηγεί σε μειωμένες ανάγκες θέρμανσης και ψύξης.^[3]
- **Παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης:** Πρόκειται για δομικά στοιχεία του κτιρίου, που αξιοποιώντας τις αρχές της μεταφοράς θερμότητας συλλέγουν την ηλιακή ενέργεια και τη διανέμουν στο χώρο. Η λειτουργία τους βασίζεται στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Πραγματοποιείται είσοδος της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω του γυαλιού ή άλλου διαφανούς υλικού και εγκλωβίζεται η θερμότητα στο εσωτερικό του χώρου που καλύπτεται από το γυαλί. Για τα κτίρια στο βόρειο ημισφαίριο τα παθητικά ηλιακά συστήματα τοποθετούνται σε όψεις του κτιρίου με νότιο προσανατολισμό (με απόκλιση έως 30° ανατολικά ή δυτικά του νότου), οι οποίες πρέπει να σκιάζονται κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, αλλά όχι κατά τη διάρκεια του χειμώνα.^[3] Τα παθητικά ηλιακά συστήματα ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες:
 - Παθητικά ηλιακά συστήματα άμεσου κέρδους. Αποτελούν τα πιο συνηθισμένα παθητικά ηλιακά συστήματα και βασίζονται στην αξιοποίηση των παραθύρων τα οποία έχουν κατάλληλο προσανατολισμό.^[3]
 - Παθητικά ηλιακά συστήματα έμμεσου κέρδους. Σε αυτή την κατηγορία εμπίπτουν οι ηλιακοί τοίχοι, οι ηλιακοί χώροι-θερμοκήπια και τα ηλιακά αίθρια.^[3]
 - Παθητικά ηλιακά συστήματα απομονωμένου κέρδους. Είναι συστήματα τα οποία εγκαθίστανται εκτός του περιβλήματος του κτιρίου (ηλιακοί συλλέκτες- ηλιακά πάνελ).^[3]
- **Παθητικά συστήματα και τεχνικές φυσικού δροσισμού:** Οι συνηθέστερες μέθοδοι φυσικού δροσισμού είναι:

- Η σκίαση-ηλιοπροστασία του κτιρίου με διάφορα μέσα όπως φυτά, πέργκολες, σκίαστρα, τέντες, ανακλαστικοί υαλοπίνακες κλπ. ^[3]
 - Η θερμική προστασία του κτιριακού περιβλήματος με τεχνικές όπως διπλά τζάμια, ανακλαστικά επιχρίσματα εξωτερικών επιφανειών και αεριζόμενο κέλυφος. ^[3]
 - Ο φυσικός εξαερισμός του κτιρίου που επιτυγχάνεται με κατάλληλα ανοίγματα στο κέλυφος του κτιρίου και θυρίδες πάνω-κάτω στους διαχωριστικούς τοίχους που καθιστούν δυνατή την κίνηση του αέρα μέσα στους χώρους του κτιρίου. ^[3]
 - Ο δροσισμός με απόρριψη της θερμότητας του κτιρίου στη γη. Εφαρμογές αυτής της μεθόδου είναι τα υποσκαφα κτίρια (άμεσος) και οι εναλλάκτες εδάφους-αέρα (έμμεσος). ^[3]
 - Η μείωση των εσωτερικών θερμικών κερδών. Δηλαδή, μείωση της θερμότητας που παράγεται από τις ηλεκτρικές συσκευές. ^[3]
 - Ο δροσισμός με εξάτμιση νερού με τεχνικές όπως πύργος δροσισμού ή ψυκτικές μονάδες εξάτμισης (άμεσης, έμμεσης ή συνδυασμένης εξάτμισης). ^[3]
- **Συστήματα ψύξης, θέρμανσης και αερισμού:** Τα συστήματα HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) που χρησιμοποιούνται είναι υψηλής απόδοσης (άρα χαμηλής κατανάλωσης) όπως οι αντλίες θερμότητας και τα συστήματα ανάκτησης θερμότητας. ^[3]
- **Υλικά κατασκευής:** Τα υλικά κατασκευής που επιλέγεται να χρησιμοποιηθούν πρέπει να ικανοποιούν τουλάχιστον τις παρακάτω συνθήκες.
- **Χαμηλό ενεργειακό αποτύπωμα και βιώσιμη κατασκευή:** Στην ουσία τα υλικά πρέπει να είναι τοπικά παραγόμενα, ώστε να μειώνονται οι ρύποι που οφείλονται στις μεταφορές, να είναι ανακυκλώσιμα ή ανακυκλωμένα και να είναι φυσικά και ανανεώσιμα. ^{[5], [6]}
 - **Ανθεκτικότητα.** Επιλέγονται υλικά με μεγάλη διάρκεια ζωής και με μικρές απαιτήσεις σε συντήρηση. Με αυτόν τον τρόπο ελαχιστοποιούνται οι ανάγκες για επισκευές και αντικαταστάσεις και μειώνεται η κατανάλωση πόρων κατά τη διάρκεια κύκλου ζωής του κτιρίου. ^[6]

- **Φωτισμός:** Σε αυτόν τον τομέα γενική αρχή είναι καταρχάς η μέγιστη εκμετάλλευση του φυσικού φωτός με ανοίγματα (παράθυρα) σε κατάλληλα σημεία και με κατάλληλο προσανατολισμό και έπειτα η χρήση ενεργειακά αποδοτικών συστημάτων φωτισμού (π.χ. LED), ώστε να μειωθεί η ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για τον τεχνητό φωτισμό.^[3]
- **Έξυπνα συστήματα διαχείρισης ενέργειας:** Η ενσωμάτωση έξυπνων συστημάτων στο κτίριο και η χρήση αυτοματισμών και αισθητήρων που παρακολουθούν την κατανάλωση έχει ως επακόλουθο τη βελτιστοποίηση της χρήσης ενέργειας και συνεπώς την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης.^[3]
- **ΑΠΕ:** Η χρήση των ΑΠΕ (αιολική, ηλιακή, γεωθερμική) και η ενσωμάτωση συστημάτων που τις εκμεταλλεύονται στο κτίριο είναι υψίστης σημασίας, ώστε να μειωθεί η εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα και την ηλεκτρική ενέργεια.^[1]

Τα οφέλη τα οποία αποκομίζονται από την εφαρμογή ενεργειακού σχεδιασμού στα κτίρια είναι ποικίλα. Κάποια από αυτά είναι οικονομικά (μείωση του λειτουργικού κόστους του κτιρίου), ενεργειακά (θερμική και οπτική άνεση), περιβαλλοντικά (μείωση ρύπων) και κοινωνικά (βελτίωση δημόσιας υγείας εξαιτίας καθαρότερου αέρα).

1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: GROUND COOLING: ΔΡΟΣΙΣΜΟΣ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Ο δροσισμός των κτιρίων με τη χρήση τους εδάφους, γνωστός επίσης και ως γεωθερμικός δροσισμός, αποτελεί μια μέθοδο ενεργειακού σχεδιασμού των κτιρίων, η οποία εκμεταλλεύεται τη σχεδόν σταθερή θερμοκρασία του εδάφους (σε βάθος κάποιων μέτρων) καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Η τεχνική αυτή θεωρείται υψηλής απόδοσης και περιβαλλοντικά φιλική, καθώς ελαττώνονται οι συνολικές ανάγκες για μηχανικά συστήματα ψύξης. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι εκμετάλλευσης της θερμοκρασίας του εδάφους για φυσικό δροσισμό, οι οποίοι κατηγοριοποιούνται σε άμεσους και έμμεσους.^[7]

- **Άμεση μέθοδοι δροσισμού.** Η κατασκευή εξολοκλήρου του κτίσματος ή τμήματος αυτού κάτω από τη στάθμη του φυσικού εδάφους αποτελεί την πιο παλιά μέθοδο φυσικού δροσισμού, η οποία έχει χρησιμοποιηθεί από αρχαιοτάτων χρόνων σε διάφορα μέρη του πλανήτη. Τα κτίρια αυτά ονομάζονται υπόσκαφα. Τα υποσκαφα κτίρια εκμεταλλεύονται τη θερμική σταθερότητα τους εδάφους (σχεδόν σταθερή θερμοκρασία χειμώνα—καλοκαίρι) για να διατηρούν και αυτά μια σχεδόν σταθερή θερμοκρασία. Επίσης, το έδαφος λειτουργεί ως φυσική μόνωση μειώνοντας της θερμικές απώλειες τον χειμώνα και περιορίζοντας την εισροή θερμότητας το καλοκαίρι.^[7]
- **Έμμεσοι μέθοδοι δροσισμού.**
 - **Εναλλάκτες εδάφους-αέρα:** Αγωγοί τοποθετούνται σε βάθος κάποιων μέτρων κάτω από το έδαφος και διατρέχουν το κτίριο. Ο εξωτερικός αέρας διοχετεύεται σε αυτούς τους αγωγούς πριν εισέλθει στο κτίριο. Το καλοκαίρι, καθώς ο θερμός αέρας κινείται μέσα στις σωληνώσεις ψύχεται με την επαφή του με το ψυχρότερο έδαφος και έπειτα εισέρχεται δροσερός στους εσωτερικούς χώρους. Αντίστοιχα, τον χειμώνα ο ψυχρός αέρας θερμαίνεται από το θερμότερο έδαφος.^[7]
 - **Γεωθερμικές αντλίες θερμότητας.** Σε αυτή την περίπτωση το έδαφος χρησιμοποιείται ως πηγή θερμότητας τον χειμώνα και ως αποθήκη θερμότητας το

καλοκαίρι. Συγκεκριμένα για τον δροσισμό η αντλία θερμότητας μεταφέρει τη θερμότητα από το εσωτερικό του κτιρίου στο έδαφος. Αυτό μπορεί να γίνει είτε με τις αντλίες θερμότητας κλειστού κυκλώματος, στις οποίες τοποθετούνται σωλήνες κάτω από το έδαφος και ένα υγρό (π.χ. νερό ή μείγμα νερού-αντιψυκτικού) που ανακυκλοφορεί μέσω των σωλήνων, απορροφά τη θερμότητα από το κτίριο και τη μεταφέρει στο έδαφος, είτε με τις αντλίες θερμότητας ανοικτού κυκλώματος στις οποίες χρησιμοποιείται νερό από τον υδροφόρο ορίζοντα και το οποίο αντλείται στην επιφάνεια για να απορροφήσει θερμότητα από το κτίριο και ύστερα απορρίπτεται πίσω στο έδαφος.^[8]

Τα πλεονεκτήματα του δροσισμού με τη χρήση του εδάφους περιλαμβάνουν τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Ο γεωθερμικός δροσισμός έχει μεγαλύτερη απόδοση σε σχέση με τα παραδοσιακά συστήματα κλιματισμού, αφού εξορισμού αξιοποιούν τη φυσική θερμοκρασία του εδάφους, μειώνοντας την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.^[9]

Επιπλέον, κατά τη λειτουργία τους αυτά τα συστήματα δεν απαιτούν την καύση ορυκτών καυσίμων, ενώ όταν απαιτούν περιορισμένη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας (π.χ. έμμεσοι μέθοδοι δροσισμού) αυτή μπορεί να προέρχεται από ΑΠΕ που είναι εγκατεστημένες ακόμα και στο ίδιο κτίριο. Αυτό οδηγεί σε μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.^[9]

Ένα ακόμα πλεονέκτημα θεωρείται η χαμηλή στάθμη θορύβου. Τα έμμεσα συστήματα δροσισμού λειτουργούν αθόρυβα συγκριτικά με τα παραδοσιακά κλιματιστικά.^[9] Αντίστοιχα, στα υπόσκαφα κτίρια, η γη λειτουργεί ως ηχομονωτικό μειώνοντας τον θόρυβο από το εξωτερικό περιβάλλον.^[10]

Επιπροσθέτως, τα έμμεσα συστήματα δροσισμού είναι ανθεκτικά με μεγάλη διάρκεια ζωής και χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης.^[9]

Τέλος, ειδικά για τα υπόσκαφα κτίρια στα πλεονεκτήματα τους συγκαταλέγεται η αντοχή στα φυσικά φαινόμενα, καθώς λόγω της ενσωμάτωσής τους στη γη προσφέρουν μεγαλύτερη προστασία από φαινόμενα όπως σεισμούς και τυφώνες.^[11]

Στον αντίποδα ίσως το πιο σημαντικό μειονέκτημα του δροσισμού με τη χρήση του εδάφους είναι το υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης. Η κατασκευή των υποσκαφών κτιρίων είναι δαπανηρή λόγω της ανάγκης των εκσκαφών, της σωστής υδατοστεγανότητας, αλλά και του εξειδικευμένου λεπτομερούς σχεδιασμού που απαιτείται.^[12] Ακόμα και το κόστος αγοράς ενός εναλλάκτη εδάφους-αέρα ή μιας γεωθερμικής αντλίας θερμότητας δεν είναι αμελητέο.^[7]

Συν τοις άλλοις, η αποδοτικότητα του δροσισμού με τη χρήση εδάφους εξαρτάται από τις τοπικές γεωλογικές και εδαφικές συνθήκες. Δεν είναι όλα τα εδάφη κατάλληλα για τη χρήση αυτής της τεχνικής. Για παράδειγμα σε περιοχές με υψηλή υγρασία ή πολύ βραχώδες έδαφος οι κατασκευές υποσκαφών κτιρίων μπορεί να μην είναι τόσο αποδοτικές.^[13]

Μείζονος σημασίας πρόβλημα των υπόσκαφων κτιρίων είναι η ύπαρξη υγρασίας και μούχλας, η οποία απαιτεί ειδικά σύστημα εξαερισμού. Ακόμα, επειδή το μεγάλο μέρος του κτιρίου είναι κάτω από το έδαφος, η φυσική φωτεινότητα μπορεί να περιορίζεται. Αυτά τα θέματα για να λυθούν απαιτείται προσεκτικός σχεδιασμός πριν την κατασκευή του κτιρίου καθώς και τακτική συντήρηση των συστημάτων που εγκαθίσταται.^[13] Ο σχεδιασμός όμως και η κατασκευή υπόσκαφων κτιρίων απαιτεί εξειδικευμένες γνώσεις και εμπειρία, καθώς οι κανονικές αρχιτεκτονικές προσεγγίσεις δεν είναι εφαρμόσιμες.

Από την άλλη μεριά, η εγκατάσταση έμμεσων συστημάτων απαιτεί την ύπαρξη κατάλληλου χώρου για την τοποθέτηση των υπόγειων σωληνώσεων, ο οποίος όμως μπορεί να μην είναι διαθέσιμος σε αστικά ή ημιαστικά περιβάλλοντα.^[7]

1.1 ΑΜΕΣΗ ΨΥΞΗ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΕΛΑΦΟΥΣ : ΥΠΟΣΚΑΦΑ ΚΤΗΡΙΑ (EARTH-SHELTERED BUILDINGS)

Είναι δύσκολο να ειπωθεί με ακρίβεια που και πότε κατασκευάστηκαν οι πρώτες υπόσκαφες οικίες στην ιστορία της ανθρωπότητας. Ωστόσο, η αρχαιολογική σκαπάνη έχει φέρει στο φως προϊστορικούς υπόσκαφους οικισμούς σε Αίγυπτο, Τυνησία, Ιράν, Μέση Ανατολή, Ινδία, Ελλάδα, Κίνα και σε άλλες περιοχές. Τα ανθρώπινα απολιθώματα που βρέθηκαν σε αυτούς τους χώρους υπολογίζονται ότι είναι ηλικίας έως και 120.000 ετών.^{[14],[15]}

Στην Ελλάδα τα περισσότερα προϊστορικά υπόσκαφα κτίρια βρίσκονται στο νησί της Σαντορίνης και υπάρχουν κάποιες μεμονωμένες περιπτώσεις υπόσκαφων κατασκευών στην Κέα, στη Μήλο, στην Ιο, στα Μετέωρα και στην Κρήτη. ^{[14],[15]}

Παρακάτω, παρουσιάζονται παραδείγματα υπόσκαφων κτιρίων και οικισμών που θεωρούνται μεγάλης αρχιτεκτονικής αξίας.

Σαντορίνη – Ελλάδα

Η τόσο έντονη ανάπτυξη των υπόσκαφων οικιών στη Σαντορίνη οφείλεται σε πολλούς λόγους, όπως στο ηφαιστειακό και συνεπώς εύκολα σκαπτόμενο έδαφος, στην έλλειψη ξυλείας, τις απότομες πλαγιές, καθώς και στην ύπαρξη φυσικών σπηλαίων. Οι οικίες είναι λαξευμένες μέσα στα πετρώματα είτε ολόκληρες είτε με πρόσθετα χτιστά τμήματα. Έχουν στενή πρόσοψη και μεγάλο βάθος. Στην πρόσοψη, αριστερά και δεξιά της πόρτας υπάρχουν δύο παράθυρα και από πάνω της υπάρχει φεγγίτης. Αυτά χρησιμεύουν για τον φυσικό αερισμό και φωτισμό της οικίας. Τα περισσότερα σπίτια αποτελούνται από δύο δωμάτια. Το μπροστινό περιλάμβανε το σαλόνι και τη κουζίνα και το πίσω το υπνοδωμάτιο, με έναν ενδιάμεσο διαχωριστικό τοίχο. Στον εσωτερικό τοίχο υπήρχαν αντίστοιχα ανοίγματα με τον εξωτερικό για τη διέλευση του φωτός. ^[16]



Εικόνα 1.1.1: Υπόσκαφη οικία στο νησί της Σαντορίνης. ^[15]

Καππαδοκία - Τουρκία

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα υπόσκαφου οικισμού αποτελεί η περίπτωση της Καππαδοκίας. Οι ηφαιστειακές εκρήξεις δημιούργησαν ένα μοναδικά εντυπωσιακό ανάγλυφο με ποικίλους γεωλογικούς σχηματισμούς π.χ. φαράγγια, κατακόρυφα βράχια. Το ηφαιστιογενές έδαφος ήταν μαλακό και μπορούσε να σκαφτεί εύκολα και έτσι οι πρώτες οικίες χρονολογούνται από τη νεολιθική εποχή, αν και οι περισσότερες χρονολογούνται από το 7^ο αιώνα μ.Χ και τις κατασκεύασαν χριστιανοί για να γλιτώσουν από τους διωγμούς της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας. Τα υπόσκαφα κτίρια της Καππαδοκίας ποικίλουν σε πολυπλοκότητα και σε μέγεθος. Αν το πέτρωμα ήταν ψηλό, σχηματιζόταν ένα είδος «πολυκατοικίας», ενώ αν ήταν πλατύ δημιουργούνταν πολλές κατοικίες στη σειρά. Μέσα σε αυτούς τους χώρους αναπτυσσόταν μια ολόκληρη κοινωνία και για αυτό εκτός από οικίες διασώζονται εκκλησίες, μοναστήρια και πολύωροφα κτίρια. Υπολογίζεται ότι στους υπόσκαφους οικισμούς φιλοξενούνταν 50.000 άνθρωποι.^{[16],[17]}

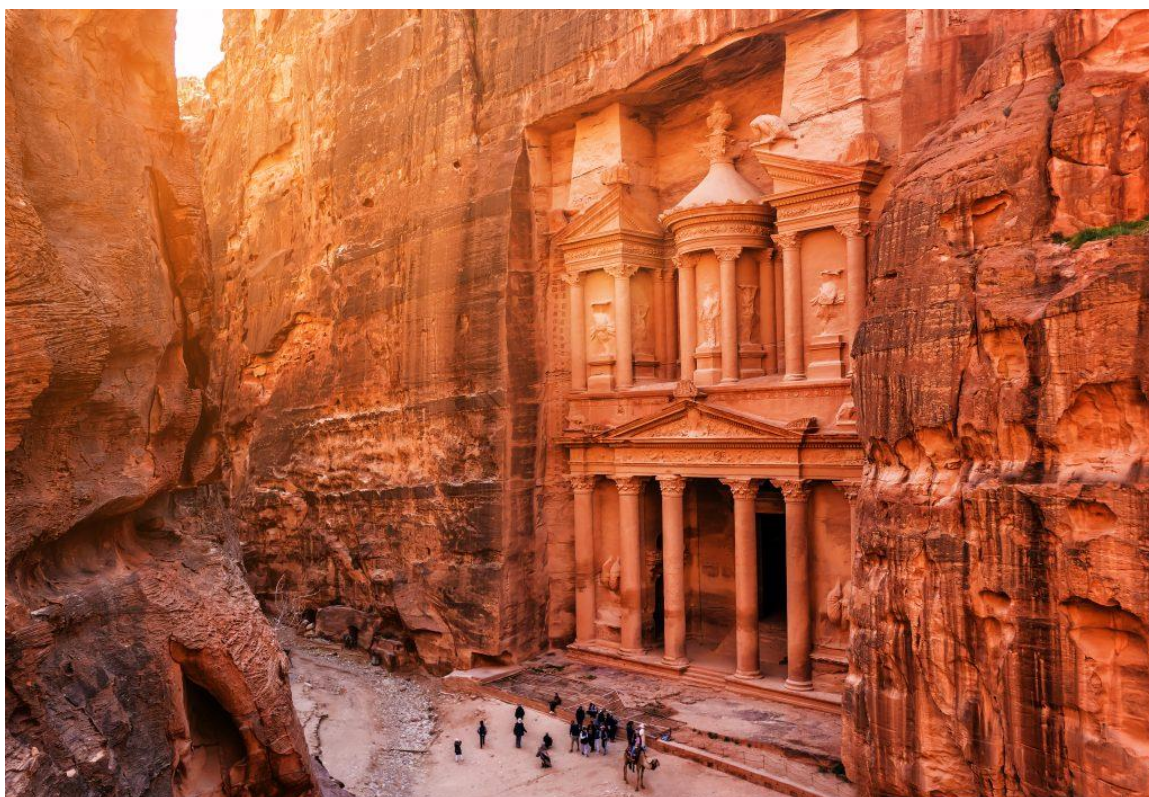


Εικόνα 1.1.2: Υπόσκαφος οικισμός στην Καππαδοκία της Τουρκίας. ^[16]

Πέτρα – Ιορδανία

Η Πέτρα στην Ιορδανία είναι διάσημος αρχαιολογικός χώρος, συγκαταλέγεται στα επτά θαύματα του κόσμου, αποτελεί Μνημείο Παγκόσμιας Πολιτιστικής Κληρονομιάς και είναι

γνωστή για τα εντυπωσιακά υπόσκαφα κτίρια της. Η πόλη δημιουργήθηκε από τους Ναβαταίους που κατοικούσαν στην περιοχή από τον 6^ο αιώνα π.Χ. Όλη η πόλη είναι λαξευμένη πάνω σε μαλακά ψαμμιτικά πετρώματα. Τα πιο διάσημα υπόσκαφα κτίρια της είναι το Θησαυροφυλάκιο, το Μοναστήρι, το Θέατρο και οι βασιλικοί τάφοι.^[18]



Εικόνα 1.1.3: Άποψη του Θησαυροφυλακίου της Πέτρας, Ιορδανία.^[18]

Vardzia – Γεωργία

Η Vardzia είναι μια εντυπωσιακή υπόσκαφη πόλη στη Γεωργία, χτισμένη κατά το 12^ο αιώνα μ.Χ. Λαξευμένη στις απόκρημνες πλαγιές του όρους Ερουσέτι εκτείνεται σε μια έκταση περίπου πεντακοσίων μέτρων κατά μήκος των βράχων με περισσότερα από εξακόσια δωμάτια λαξευμένα σε αυτούς. Η πόλη ήταν θρησκευτικό κέντρο και συνάμα φρούριο ικανό να προστατεύει τον πληθυσμό από επιδρομές. Τα περισσότερα από τα εξακόσια δωμάτια είναι κελιά μονών, εκκλησίες, τραπεζαρίες και αποθήκες. Το πιο διάσημο κτίσμα είναι η Εκκλησία της Κοίμησης της Θεοτόκου. Η Vardzia αποτέλεσε ένα από τα πιο σημαντικά θρησκευτικά και

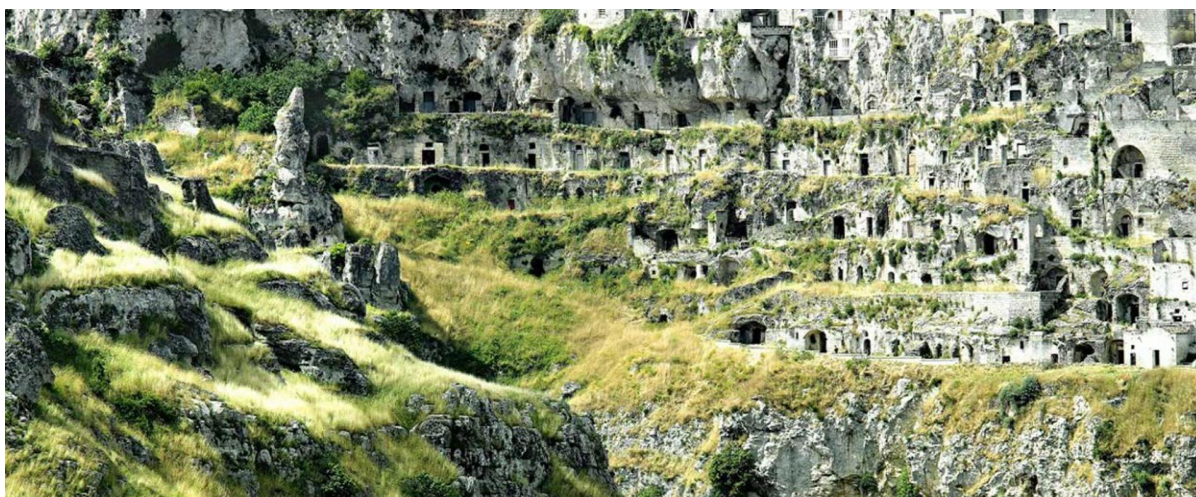
πολιτιστικά κέντρα της μεσαιωνικής Γεωργίας. Παρά τις καταστροφές που υπέστη από τους σεισμούς και τις επιδρομές, παραμένει ένα από τα πιο εντυπωσιακά παραδείγματα υποσκαφής αρχιτεκτονικής σε όλον τον κόσμο.^{[16], [19]}



Εικόνα 1.1.4: Η υπόσκαφη πόλη Vardzia της Γεωργίας.^[20]

Matera – Ιταλία

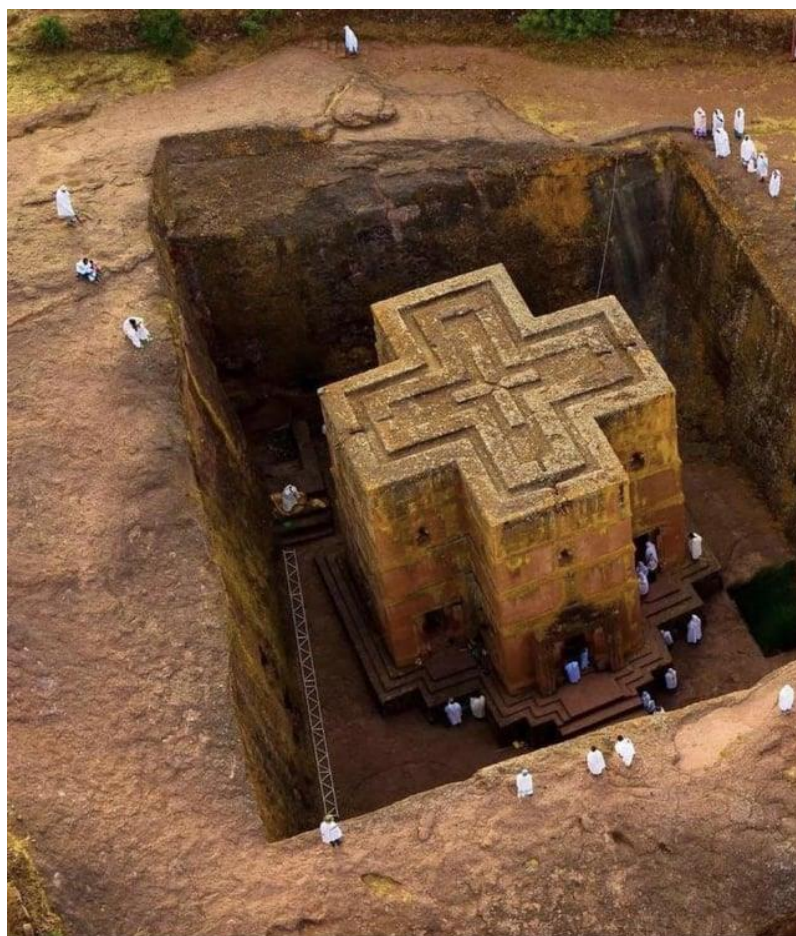
Η πόλη Matera ανακηρύχθηκε μνημείο παγκόσμιας πολιτιστικής κληρονομιάς της UNESCO το 1993. Είναι γνωστή για τις υποσκαφες κατοικίες της που ονομάζονται Σάσσι (Sassi di Matera). Τα Σάσσι είναι αρχαία σπήλαια-κατοικίες λαξευμένα σε ασβεστολιθικά βράχια. Ο συγκεκριμένος ασβεστόλιθος στην περιοχή της Matera είναι γνωστός ως «τόφορο», ένα πορώδες, ελαφρύ, σχετικά εύθραυστο πέτρωμα, που σχηματίζεται από ηφαιστειακή πέτρα. Αρχικά, τα Σάσσι ήταν πρωτόγονες σπηλιές που με την πάροδο του χρόνου επεκτάθηκαν και αναπτύχθηκαν σε πλήρεις κατοικίες με δωμάτια, κουζίνες και αποθηκευτικούς χώρους, λαξευμένα όλα στον βράχο.^{[21],[22]}



Εικόνα 1.1.5: Τα «Σάσσι» της Ματέρα, Ιταλία. ^[23]

Lalibela - Αιθιοπία

Η Lalibela είναι πόλη της Αιθιοπίας διάσημη για τις έντεκα εκκλησίες λαξευμένες στους πορώδεις ηφαιστειακούς βράχους. Οι εκκλησίες είναι μονολιθικές, δηλαδή η κατασκευή έγινε μόνο με αφαίρεση βράχου χωρίς κανένα επιπλέον υλικό. Ο βράχος κόπηκε περιφερειακά κατακόρυφα και σχηματίστηκε μια μεγάλη συμπαγής μάζα εδάφους στο μεσαίο μέρος. Αυτή η μάζα πήρε τη μορφή εκκλησίας αφαιρώντας σιγά σιγά κομμάτια από πάνω προς κάτω. Οι εκκλησίες είναι πολυεπίπεδες και συνδέονται με ένα δίκτυο υπόγειων σιράγγων. ^[16]



Εικόνα 1.1.6: Υπόσκαφη μονολιθική εκκλησία της Lallibela της Αιθιοπίας. ^[24]

Στην Ελλάδα η δόμηση των υπόσκαφων κτιρίων ρυθμίζεται με τον Νέο Οικοδομικό Κανονισμό ν. 4067/12, Φ.Ε.Κ. 79/Α/9-4-12, σύμφωνα με τον οποίο ορίζεται ως υπόσκαφο «το κτίριο ή το τμήμα κτιρίου, που κατασκευάζεται υπό τη στάθμη του φυσικού εδάφους και παρουσιάζει μόνο μια ορατή όψη. Η κατασκευή του γίνεται κάτω από τη στάθμη του φυσικού εδάφους, με επέμβαση σε αυτό και πλήρη επαναφορά στην αρχική του μορφή. Τα υπόσκαφα κτίρια μπορούν να έχουν κύρια ή βοηθητική χρήση.» ^[25]

Για να χαρακτηριστεί ένα κτίριο υπόσκαφο πρέπει να διαθέτει μια όψη με ενιαία επιφάνεια, η οροφή να καλύπτεται με το ίδιο υλικό του φυσικού εδάφους, να μην διαφοροποιείται από το έδαφος και με την ολοκλήρωση του να μην υπάρχει εμφανές ίχνος κατασκευής πάνω από το έδαφος εκτός από τα ανοίγματα για φως και αέρα. ^[25]

Στη διεθνή βιβλιογραφία ωστόσο, τα κριτήρια δεν είναι τόσο καλά ορισμένα και παρατηρείται ότι ένα σπίτι θεωρείται υπόσκαφο ακόμα και να έχει μόνο μια πλευρά καλυμμένη. Τα υποσκαφα κτίρια κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το ποσοστό κάλυψης τους από το έδαφος. Παρακάτω παρατίθενται οι κατηγορίες σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία μέσα από τις οποίες θα φανεί η αυστηρότητα του Νέου Οικοδομικού Κανονισμού.^[26]

Εντός λόφου: Βρίσκονται σε πλαγιές ή σε λόφους. Σε αυτή την κατηγορία κτιρίων, οι τρεις πλευρές ή ακόμα και η οροφή καλύπτεται με έδαφος και η μια πλευρά μένει εκτεθειμένη στο περιβάλλον. Συνήθως, η εκτεθειμένη πλευρά έχει προσανατολισμό προς τον ισημερινό (νότιο προσανατολισμό για το βόρειο ημισφαίριο και βόρειο προσανατολισμό για το νότιο ημισφαίριο) και σε αυτήν τοποθετούνται οι πόρτες και τα παράθυρα για την εκμετάλλευση του ήλιου, τόσο για θέρμανση όσο και για φυσικό φωτισμό. Τα δωμάτια στα οποία υπάρχει έντονη ανθρώπινη δραστηριότητα, όπως το σαλόνι, η κουζίνα και τα υπνοδωμάτια τοποθετούνται στην εκτεθειμένη πλευρά, ενώ αποθηκευτικοί χώροι και λουτρά στο εσωτερικό.^[26]

Σκεπασμένα από χώμα: Μπορεί να βρίσκονται και σε επίπεδες περιοχές, καθώς κτίζονται είτε πάνω από το έδαφος ή μερικώς κάτω από το έδαφος. Σε αυτήν την περίπτωση το χώμα χρησιμοποιείται ως επένδυση των τοίχων ή και της οροφής. Θεωρείται ότι δεν έχουν ιδιαίτερο πρόβλημα με την υγρασία ούτε με τα επίπεδα του φυσικού φωτός.^[26]

Υπόγεια: Βρίσκονται κυρίως σε επίπεδες περιοχές. Το έδαφος σκάβεται και αφαιρείται. Κατά την κατασκευή συνήθως σχηματίζεται ένα κεντρικό αίθριο ή μια αυλή γύρω από την οποία αναπτύσσεται το σπίτι. Από αυτό το αίθριο ή την αυλή ικανοποιούνται οι ανάγκες για φυσικό φωτισμό και φρέσκο αέρα. Τα δωμάτια με έντονη ανθρώπινη δραστηριότητα τοποθετούνται κοντά στο αίθριο, ενώ τα υπόλοιπα δεν έχουν άμεση πρόσβαση σε αυτό. Στις περιπτώσεις που δεν υπάρχει αίθριο τοποθετούνται φωταγωγοί ή παράθυρα στην οροφή. Γενικά, μπορεί να αντιμετωπίσουν πρόβλημα με την υγρασία για αυτό προτιμάται να χτίζονται σε πιο θερμές και στεγνές περιοχές.^[26]

Συνεπώς, είναι κατανοητό ότι σύμφωνα με τον Νέου Οικοδομικού Κανονισμού υπάρχουν αυστηρές προϋποθέσεις για να χαρακτηριστεί ένα κτίριο υπόσκαφο και δεν τηρούν όλες οι παραπάνω διεθνείς κατηγορίες αυτά τα κριτήρια. Αυτή η αυστηρότητα οφείλεται στις ωφέλιμες διατάξεις στις οποίες εμπίπτει το κτίριο αν χαρακτηριστεί υπόσκαφο και στις οποίες

περιλαμβάνονται η δυνατότητα έως και για διπλάσια δόμηση από τη μέγιστη επιτρεπόμενη για χρήση κατοικίας και 20% επιπλέον δόμηση, όταν πρόκειται για άλλες χρήσεις. Επιπροσθέτως, τα υπόσκαφα κτίρια εξαιρούνται από περιορισμούς εκσκαφής, πιθανούς μορφολογικούς κανόνες (μετά από την έγκριση του αρμόδιου συμβούλιου αρχιτεκτονικής) για να εξασφαλιστεί επαρκής αερισμός και φωτισμός και από περιορισμούς δόμησης που προκύπτουν από τις διατάξεις για τα νησιά σε οικόπεδα με κλίση μεγαλύτερη του 40%.^[25]

Αναφέρθηκε στα πλεονεκτήματα των υπόσκαφων κτιρίων η αυξημένη ενεργειακή απόδοση σε σχέση με τα συμβατικά. Η απόδοση αυτή όμως επηρεάζεται από ένα πλήθος παραγόντων. Η ενεργειακή απόδοση των υπόσκαφων κτιρίων επηρεάζεται ισχυρώς από το θερμοκρασιακό προφίλ του εδάφους-υπεδάφους, καθώς καλύπτεται από αυτό και άρα από τις θερμοφυσικές ιδιότητες τους. Συνεπώς, βασική παράμετρος είναι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του εδάφους, ο οποίος επηρεάζεται από το είδος του πετρώματος και από την περιεχόμενη υγρασία στο έδαφος. Επίσης, το θερμοκρασιακό προφίλ επηρεάζει η χλωρίδα που αναπτύσσεται στο έδαφος (π.χ. ψηλά δέντρα, γρασίδι, σκέτο χώμα). Άλλος παράγοντας που επηρεάζει την ενεργειακή απόδοση είναι το εξωτερικό κλίμα. Ο βαθμός στον οποίο την επηρεάζει είναι μάλλον περιορισμένος αλλά εξαρτάται και από την έκταση του κτιρίου πάνω από την στάθμη του εδάφους. Τέλος, η συγκέντρωση σκόνης και υγρασίας εντός του κτιρίου, η οποία επηρεάζει την ανάγκη για τεχνητό εξαερισμό και ο προσανατολισμός του κτιρίου (η οποία ανάγκη επηρεάζει με τη σειρά της το μέγεθος των ανοιγμάτων για φυσικό φωτισμό) παίζει ρόλο στην ενεργειακή κατανάλωση και στις ενεργειακές απώλειες και τελικά στην ενεργειακή απόδοση του κτιρίου.^{[27],[28]}

1.2 ΕΜΜΕΣΗ ΨΥΞΗ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ: ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΕΔΑΦΟΥΣ ΑΕΡΑ (EARTH-TO-AIR HEAT EXCHANGERS)

Η αρχή λειτουργίας των εναλλακτών θερμότητας εδάφους-αέρα βασίζεται στην αξιοποίηση της θερμικής αδράνειας του εδάφους. Η θερμική αδράνεια είναι ένας μέγεθος ενδεικτικό της ικανότητας ενός σώματος-αντικειμένου να αποθηκεύει τη λαμβανόμενη θερμική ενέργεια (θερμότητα), να τη διατηρεί και να την απελευθερώνει σταδιακά. Το έδαφος επειδή έχει μεγάλη θερμική αδράνεια καταφέρει να διατηρεί σχεδόν σταθερή τη θερμοκρασία του (σε βάθος κάποιων μέτρων) όλο χρόνο. Η θερμοκρασία αυτή είναι μικρότερη από του εξωτερικού περιβάλλοντος το καλοκαίρι και μεγαλύτερη το χειμώνα.^[29]

Το σύστημα εναλλακτών θερμότητας εδάφους-αέρα αποτελείται συνήθως από πλαστικές σωληνώσεις θαμμένες στο έδαφος σε βάθος 2-4 μέτρα από την επιφάνεια του εδάφους. Ο αέρας είναι το ρευστό το οποίο ανταλλάσσει θερμότητα με το έδαφος και μεταφέρεται με τη χρήση ανεμιστήρων μέσω σωληνώσεων. Ο μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας που επικρατεί είναι η συναγωγή μεταξύ του κινούμενου αέρα και των σωληνώσεων και η αγωγή μεταξύ των σωληνώσεων και του εδάφους.^[29]



Εικόνα 1.2.1: Σωληνώσεις εναλλάκτη αέρα-εδάφους στη φάση της κατασκευής του εναλλάκτη.^[30]

Οι εναλλάκτες εδάφους αέρα σε ακραία κλίματα δεν είναι κατάλληλοι για πλήρη θέρμανση ή ψύξη του σπιτιού, καθώς δεν καταφέρνουν να φέρουν το κτίριο σε συνθήκες θερμικής άνεσης. Παρόλα αυτά, επειδή έχουν χαμηλό λειτουργικό κόστος, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προκατεργασία του αέρα (προθέρμανση ή προψύξη). Το λειτουργικό κόστος οφείλεται εξολοκλήρου στους ανεμιστήρες που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά του αέρα.^[30]

Η ενεργειακή απόδοση των εναλλακτών θερμότητας εδάφους-αέρα επηρεάζεται από ποικίλους παράγοντες οι οποίοι μπορεί να διαχωριστούν στις παρακάτω κατηγορίες:

Σχεδιαστικές παράμετροι του εξοπλισμού

Οι εναλλάκτες εδάφους-αέρα όπως και όλοι οι εναλλάκτες έχουν κάποιες σχεδιαστικές παραμέτρους, οι οποίες επηρεάζουν τη μεταφορά θερμότητας και συνεπώς την ενεργειακή τους απόδοση. Για παράδειγμα, η συνολική επιφάνεια επαφής, η οποία εξαρτάται από το μήκος και τον αριθμό των σωλήνων, καθώς και από τη διάμετρο τους, η ταχύτητα του ρευστού (αέρα) που ρέει μέσα στις σωληνώσεις, το υλικό των σωλήνων και η απόσταση μεταξύ τους. Τέλος, το βάθος ταφής των σωληνώσεων επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ενεργειακή απόδοση του εναλλάκτη.^[31]

Με την αύξηση στη διάμετρο των σωλήνων μειώνεται ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή και αρά η ενεργειακή απόδοση.^{[31],[32]} Σε γενικές γραμμές χρησιμοποιούνται σωληνώσεις διαμέτρου από 0.1-0.3m αλλά σε ορισμένες εφαρμογές η διάμετρος φτάνει το 1m.^{[33],[34]}

Μακρύτερες σωληνώσεις οδηγούν σε αύξηση του χρόνου όπου ο αέρας ανταλλάσσει θερμότητα με το έδαφος και άρα αυξάνει η ενεργειακή απόδοση. Η βέλτιστη τιμή του μήκους των σωλήνων είναι 50-70 μέτρα. Επίσης, η αύξηση στον αριθμό των σωλήνων οδηγεί σε αύξηση της επιφάνειας εναλλαγής και επομένως σε αυξημένη ενεργειακή απόδοση.^{[31],[33],[35],[36]}

Η απόσταση που έχουν οι σωλήνες μεταξύ τους επηρεάζει και αυτή την απόδοση, καθώς εάν είναι τοποθετημένες σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους αλληλοεπιδρούν θερμικώς η μια με την άλλη. Συνιστάται ελάχιστη απόσταση μεταξύ των σωληνώσεων περίπου 1 μέτρο.^[34]

Σε γενικές γραμμές με αύξηση της ταχύτητας του αέρα μειώνεται η απόδοση γιατί δίνεται λιγότερος χρόνος στον αέρα να ανταλλάξει θερμότητα με το έδαφος.^{[31],[34]}

Το θερμοκρασιακό προφίλ του εδάφους σταθεροποιείται σε βάθος 3.5-4 μετρά. Το βέλτιστο για την ενεργειακή απόδοση συνεπώς θα ήταν η εγκατάσταση των σωληνώσεων να γίνει σε βάθος τεσσάρων μέτρων ή και πιο βαθιά. Ωστόσο, στα περισσότερα συστήματα το βάθος ταφής που επιλέγεται είναι 2-3 μέτρα εξαιτίας του γεγονότος ότι για πιο βαθιές εγκαταστάσεις αυξάνεται η ποσότητα του εδάφους που εκχωματώνεται και επομένως το κόστος της επένδυσης.^{[33],[34],[37]}

Το υλικό των σωληνώσεων δεν φαίνεται ότι έχει ισχυρή επίδραση στην απόδοση του συστήματος με την προϋπόθεση ότι έχει γίνει σωστός σχεδιασμός, διαστασιολόγηση και εγκατάσταση του. Στα περισσότερα συστήματα χρησιμοποιούνται σωληνώσεις PVC, εξαιτίας του χαμηλού τους κόστους και της ανтимικροβιακής τους δράσης.^{[33],[34],[35]}

Θερμοφυσικές ιδιότητες του εδάφους

Το σώμα με το οποίο ανταλλάσσει θερμότητα ο αέρα είναι το έδαφος. Προφανώς, οι θερμοφυσικές ιδιότητες του εδάφους θα επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος.

Σημαντική παράμετρος του εδάφους είναι η περιεχόμενη υγρασία. Η θερμική αγωγιμότητα του εδάφους αυξάνεται με την αύξηση της υγρασίας. Αυτό το γεγονός συνεπάγεται και αυξημένη απόδοση με την αύξηση της υγρασίας.^{[34],[35]} Επίσης, η θερμική αγωγιμότητα εξαρτάται από τη σύσταση του εδάφους και έτσι υπάρχουν υλικά τα οποία προστίθενται στο έδαφος κατά την κατασκευή του εναλλάκτη για να αυξήσουν την θερμική αγωγιμότητα.^[38]

Όσο μεγαλύτερη η πυκνότητα του εδάφους τόσο μεγαλύτερη η απόδοση του εναλλάκτη, καθώς η σωλήνωση έρχεται σε επαφή με μεγαλύτερη μάζα εδάφους.^[39]

Όσο υψηλότερη είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα του εδάφους, τόσο μεγαλύτερη είναι ποσότητα θερμότητας που μπορεί να αποθηκεύσει ή να απελευθερώσει χωρίς να αλλάξει δραστηκά η θερμοκρασία του.^[40] Αυτό σημαίνει ότι ένα έδαφος με υψηλή θερμοχωρητικότητα δημιουργεί ένα πιο σταθερό θερμοκρασιακό περιβάλλον για τον εναλλάκτη επιτρέποντας του να λειτουργεί στη μέγιστη απόδοση.

Ρόλο ζωτικής σημασία διαδραματίζει και η σχέση μεταξύ των τριών παραπάνω μεγεθών (θερμικής αγωγιμότητας, πυκνότητας και ειδικής θερμοχωρητικότητας) και όχι μόνο η απόλυτη τιμή τους.

Η παράμετρος που συσχετίζει τα τρία παραπάνω μεγέθη είναι η θερμική διαχυτότητα η οποία ορίζεται ως: ^[40]

$$a = \frac{k}{\rho \cdot C_p} \text{ (εξ. 1.2 - 1)}$$

Όπου:

- α : Θερμική διαχυτότητα (m^2/s)
- ρ : Φαινόμενη πυκνότητα (kg/m^3)
- C_p : Ειδική θερμοχωρητικότητα ($\text{J}/(\text{K} \cdot \text{kg})$)
- k : Θερμική αγωγιμότητα ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)

Με την αύξηση της θερμικής διαχυτότητας του εδάφους στα συστήματα εναλλακτών εδάφους-αέρα αυξάνεται και η συνολική απόδοση του συστήματος. Αυτό οφείλεται στο ότι εάν η θερμική διαχυτότητα είναι μικρή, η θερμότητα συσσωρεύεται στα στρώμα κοντά στον σωλήνα και δεν μεταφέρεται γρήγορα σε αυτόν. ^[40]

Περιβάλλον

Όπως και στα υπόσκαφα κτίρια σημαντικότερος παράγοντας είναι η εδαφοκάλυψη από φυτά. Με τη διαφορά ότι υψηλή εδαφοκαλυψη από φυτά βελτιώνει την ψυκτική ικανότητα του συστήματος, ενώ η χαμηλή την θερμική ικανότητα του. ^{[31],[34]}

Η υγρασία του εισερχομένου αέρα επιδρά αρνητικά στην απόδοση του συστήματος ειδικά στην περίπτωση συμπύκνωσης των υδρατμών. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος μπορούν είτε να τοποθετηθούν οι σωλήνες με ελαφριά κλίση είτε να προστεθεί αφυγραντικό μέσο. ^{[33],[34],[35]}

2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΕΛΑΦΟΥΣ

Το έδαφος ανάλογα με τη θερμοκρασία του και κυρίως πως επηρεάζεται αυτή μπορεί να χωριστεί σε τρεις ζώνες.

- Ζώνη επιφανείας: Η ζώνη αυτή ορίζεται από την επιφάνεια έως και βάθος περίπου ένα μέτρο. Η θερμοκρασία της εξαρτάται κυρίως από τις βραχυπρόθεσμες αλλαγές στις καιρικές συνθήκες και χαρακτηρίζεται από σχετικά γρήγορες και συχνές μεταβολές στη θερμοκρασία.^{[41],[42]}
- Ρηχή ζώνη: Η ζώνη αυτή ορίζεται από τα 1-6 μέτρα για ξηρά και ελαφρά εδάφη αλλά το βάθος της μπορεί να φτάσει ακόμα 20 μέτρα σε υγρά ή αμμώδη εδάφη με μεγάλη πυκνότητα. Σε αυτήν τη ζώνη η θερμοκρασία επηρεάζεται από την εποχικές κλιματικές συνθήκες. Στο τέλος της ζώνης η θερμοκρασία είναι σχεδόν σταθερή και πολύ κοντά στον ετήσιο μέσο όρο της θερμοκρασίας του αέρα.^{[41],[42]}
- Βαθιά ζώνη: Κάτω από τη ρηχή ζώνη βρίσκεται η βαθιά ζώνη στην οποία η θερμοκρασία είναι ανεξάρτητη του χρόνου και εξαρτάται μόνο από το βάθος. Η γεωθερμική βαθμίδα (ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας με το βάθος) έχει μέση τιμή από 1-4.5K/100m.^{[41],[42]}

Σε αυτό το Κεφάλαιο παρουσιάζεται ποιοι παράγοντες επηρεάζουν τη θερμοκρασία στην επιφάνεια του εδάφους και ποιοι παράγοντες επηρεάζουν την θερμοκρασία κάτω από το έδαφος.

2.1 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

Αρχικά, θα πρέπει να γίνει μια πολύ σημαντική διάκριση και να διασαφηνιστούν οι όροι θερμοκρασία επιφανείας και θερμοκρασία ζώνης επιφανείας. Η θερμοκρασία επιφανείας είναι η θερμοκρασία ακριβώς στην επιφάνεια του εδάφους, δηλαδή σε ένα μοντέλο που υπολογίζει την θερμοκρασίας ως συνάρτηση του βάθους (z), τότε η θερμοκρασία επιφανείας υπολογίζεται για $z=0$. Η θερμοκρασία ζώνης επιφανείας, όπως ορίστηκε παραπάνω η ζώνη επιφανείας,

υπολογίζεται από μια συνάρτηση για βάθος έως περίπου ένα μέτρο (εξαρτάται από το είδος του εδάφους κλπ)

Είναι πολύ σημαντικό να υπάρχουν πειραματικά-πραγματικά δεδομένα για τη θερμοκρασία επιφανείας, γιατί συνήθως στα μοντέλα πρόβλεψης θεωρείται δεδομένη για να μπορέσουν να υπολογίσουν τη θερμοκρασία σε δεδομένο βάθος. Πρακτικά, η επιφάνεια του εδάφους είναι το πιο εκτεθειμένο μέρος στις καιρικές συνθήκες και η θερμοκρασία της είναι η πιο ευμετάβλητη. Κατά κανόνα, όσο αυξάνεται το βάθος, τόσο σταθεροποιείται η θερμοκρασία και μειώνονται οι διακυμάνσεις της.^[43]

2.1.1 ΚΥΡΙΟΤΕΡΕΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΔΙΑΜΟΡΦΩΝΟΥΝ ΤΗΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Η θερμοκρασία στην επιφάνεια του εδάφους επηρεάζεται από ένα σύνολο αλληλοσυνδεδεμένων μετεωρολογικών παραμέτρων. Κάθε μια από αυτές συνεισφέρει σε διαφορετικό βαθμό και με διαφορετικό τρόπο στην διαμόρφωση της θερμοκρασίας, είτε αυξάνοντας την θερμοκρασία μέσω απορρόφησης της θερμότητας, είτε μειώνοντας μέσω ανάκλασης, είτε μέσω άλλων φυσικών διεργασιών όπως η διαπνοή. Οι πιο σημαντικές παράμετροι είναι που διαμορφώνουν τη θερμοκρασία στην επιφάνεια του εδάφους είναι η ηλιακή ακτινοβολία, η νεφοκάλυψη, ο άνεμος, η υγρασία του αέρα, η ανακλαστικότητα, η τοπογραφία και η φυτοκάλυψη.

2.1.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΤΗΝ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Η ηλιακή ακτινοβολία είναι κύρια παράμετρος που καθορίζει τη θερμοκρασία του εδάφους. Πολλές από τις υπόλοιπες παραμέτρους καθορίζουν το πόση ηλιακή ακτινοβολία θα φτάσει στο έδαφος και εν τέλει θα απορροφηθεί (νεφοκάλυψη, ανακλαστικότητα, προσανατολισμός, φυτοκάλυψη). Εκτός από την ηλιακή ακτινοβολία σημαντικό ρόλο παίζει και ο υπερκείμενος αέρας.^[44] Συγκεντρωτικά οι παράμετροι και το πως επιδρούν στη θερμοκρασία επιφανείας του εδάφους παρουσιάζονται παρακάτω:

- **Ηλιακή ακτινοβολία.** Η ηλιακή ακτινοβολία είναι η βασική πηγή ενέργειας που επηρεάζει τη θερμοκρασία στην επιφάνεια του εδάφους. Όταν η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει στο έδαφος ένα μέρος ανακλάται πίσω στη ατμόσφαιρα και ένα μέρος απορροφάται από αυτό. Όσο μεγαλύτερη η ένταση της ακτινοβολίας, τόσο μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας θα απορροφηθεί από το επιφανειακό στρώμα του εδάφους και συνεπώς θα αυξηθεί και η θερμοκρασία του. Η ένταση εξαρτάται από παράγοντες όπως η ώρα της ημέρας, η εποχή του χρόνου και το γεωγραφικό πλάτος. Τις μεσημβρινές ώρες, η ηλιακή ακτινοβολία είναι εντονότερη και η θερμοκρασία του εδάφους αυξάνεται, ενώ τις βραδινές ώρες είναι έως και ανύπαρκτη και η θερμοκρασία του εδάφους μειώνεται. Τα καλοκαίρια (στο βόρειο ημισφαίριο) ο ήλιος βρίσκεται πιο ψηλά στον ουρανό και η διάρκεια της ημέρας είναι μεγαλύτερη με αποτέλεσμα το έδαφος να είναι εκτεθειμένο για περισσότερο χρόνο στην ηλιακή ακτινοβολία και συνεπώς να αυξάνεται η θερμοκρασία του. Τέλος, οι τροπικές περιοχές λαμβάνουν περισσότερη ακτινοβολία (εξαιτίας της γωνίας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας) σε σχέση με τις πολικές, γεγονός που οδηγεί σε υψηλότερες θερμοκρασίες.^[44]
- **Νεφοκάλυψη.** Η παρουσία νεφών στον ουρανό μπορεί να μπλοκάρει την ηλιακή ακτινοβολία και να επηρεάσει τη θερμοκρασία του εδάφους. Κατά τη διάρκεια της μέρας τα σύννεφα μπλοκάρουν μέρος την προσπίπτουσας ακτινοβολίας, μειώνοντας τη θερμοκρασία στην επιφάνεια της γης, ενώ κατά τη διάρκεια της νύχτας, ειδικά εάν νεφοκάλυψη είναι σε χαμηλό υψόμετρο, εμποδίζει την εκπομπή θερμότητας από το έδαφος με αποτέλεσμα η θερμοκρασία του εδάφους να είναι πιο υψηλή σε σύγκριση με το αν ο ουρανός ήταν ανέφελος.^{[45],[46]}
- **Ανακλαστικότητα (albedo).** Ως ανακλαστικότητα ορίζεται το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που ανακλάται πίσω στην ατμόσφαιρα από την επιφάνεια του εδάφους. Παίρνει τιμές ανάμεσα στο μηδέν και το ένα (αφού είναι ποσοστό). Περιοχές με υψηλό albedo (για παράδειγμα χιονισμένα εδάφη) αντανακλούν περισσότερο φως και θερμαίνονται λιγότερο σε σχέση με περιοχές με χαμηλό albedo, όπως ασφαλτοστρωμένες επιφάνειες ή καλυμμένες με γυμνό χώμα.^{[45],[46]}

- **Φυτοκάλυψη.** Η βλάστηση έχει σημαντική επίδραση στη θερμοκρασία του εδάφους. Τα φυτά παρέχουν σκίαση και μειώνουν την απευθείας έκθεση της επιφανείας στην ηλιακή ακτινοβολία. Επιπλέον, η διαπνοή, η διαδικασία με την οποία τα φυτά απελευθερώνουν νερό στην ατμόσφαιρα, βοηθά στην ψύξη του αέρα και του εδάφους.^[44]
- **Άνεμος:** Ακόμα μια σημαντική μετεωρολογική παράμετρος είναι ο άνεμος. Όσο μεγαλύτερη η ένταση του ανέμου, τόσο ευνοείται η μεταφορά θερμότητας μέσω συναγωγής. Ο άνεμος μπορεί να προκαλέσει είτε πτώση είτε αύξηση της θερμοκρασίας του εδάφους ανάλογα με τη θερμοκρασία του.^{[45],[46]}
- **Υγρασία αέρα:** Η περιεχόμενη υγρασία στον αέρα παίζει κάπως περίπλοκο ρόλο στην θερμοκρασία του εδάφους. Όταν η υγρασία του αέρα είναι χαμηλή αυξάνεται ο ρυθμός εξάτμισης υγρασίας από την επιφάνεια του εδάφους. Η εξάτμιση είναι ενδόθερμο φαινόμενο που απαιτεί θερμότητα για την αλλαγή φάσης από υγρή σε αέρια. Αυτή η θερμότητα παρέχεται από το έδαφος με αποτέλεσμα η θερμοκρασία του να μειώνεται. Αντίθετα, αυξημένα επίπεδα υγρασίας του αέρα μπορούν να οδηγήσουν σε συμπύκνωση υγρασίας στο έδαφος, ιδιαίτερα τις βραδινές ή πολύ πρωινές ώρες. Κατά τη συμπύκνωση απελευθερώνεται λανθάνουσα θερμότητα πίσω στο περιβάλλον με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του εδάφους.^{[45],[46]}
- **Τοπογραφία.** Η μορφολογία του εδάφους και το υψόμετρο επηρεάζει ισχυρά τη θερμοκρασία. Όσο αυξάνεται το υψόμετρο (ύπαρξη βουνών), τόσο μειώνεται η θερμοκρασία εξαιτίας της χαμηλότερης πίεσης του αέρα και συνεπώς της μικρότερης μάζας που απορροφά τη θερμότητα. Οι κοιλάδες εάν περιτριγυρίζονται από βουνά (λεκανοπέδια) συγκρατούν αέριες μάζες και ανάλογα εάν είναι ψυχρές ή θερμές αλλάζει και η θερμοκρασία του εδάφους. Ακόμα παίζει ρόλο και ο προσανατολισμός. Για παράδειγμα, στο βόρειο ημισφαίριο οι νότιες πλάγιες τείνουν να είναι θερμότερες από τις βόρειες εξαιτίας ότι δέχονται περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία.^{[45],[46]}

2.2 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΒΑΘΗ ΚΑΤΩ ΑΠΟΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ

Η θερμοκρασία του εδάφους σε διάφορα βάθη κάτω από την επιφάνεια παρουσιάζει σημαντικές διαφοροποιήσεις σε σύγκριση με την επιφανειακή θερμοκρασία. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι η θερμοκρασία σε διάφορα βάθη κάτω από την επιφάνεια επηρεάζεται από διαφορετικούς παράγοντες σε σχέση με την επιφανειακή θερμοκρασία. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η θερμοκρασία στην επιφάνεια του εδάφους εμφανίζει έντονες ημερήσιες και εποχιακές διακυμάνσεις καθώς επηρεάζεται πολύ έντονα από την ηλιακή ακτινοβολία, ενώ όσο αυξάνεται το βάθος γίνεται πιο σταθερή. Αντίθετα, ένα διαφορετικό πλήθος παραγόντων επηρεάζει τη θερμοκρασία στα διάφορα βάθη. Οι πιο σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη θερμοκρασία του εδάφους σε διάφορα βάθη είναι σε γενικές γραμμές οι παράγοντες που επηρεάζουν και την απόδοση των εναλλακτών εδάφους-αέρα, αφού η απόδοση τους είναι στενά συνδεδεμένη με τη θερμοκρασία της ρηχής ζώνης του εδάφους.

Οι θερμοφυσικές ιδιότητες του εδάφους διαδραματίζουν ρόλο μείζονος σημασίας. Η σύσταση του εδάφους (άμμος, πηλός, χαλίκι κλπ) και η πυκνότητα του καθορίζουν πόσο εύκολα μεταφέρεται η θερμότητα από την επιφάνεια προς τα βαθύτερα στρώματα. Για παράδειγμα τα εδάφη με μεγάλη περιεκτικότητα σε οργανική ύλη έχουν μεγάλη θερμοχωρητικότητα, δηλαδή μπορούν να αποθηκεύουν περισσότερη θερμότητα, ενώ τα πυκνά εδάφη (π.χ. αργιλικά) μεταφέρουν τη θερμότητα πιο αργά σε σχέση με τα πιο ελαφριά.^[46]

Η περιεκτικότητα σε νερό (υγρασία) αυξάνει τη θερμοχωρητικότητα και τη θερμική αγωγιμότητα του εδάφους. Το υγρό έδαφος αποθηκεύει και μεταφέρει τη θερμότητα πιο αποτελεσματικά σε σχέση με το ξηρό. Το νερό λειτουργεί ως ρυθμιστής της θερμοκρασίας απορροφώντας και αποθηκεύοντας τη θερμότητα κατά τη διάρκεια της ημέρας και αποδίδοντας τη τη νύχτα.^[47]

Στη βαθιά ζώνη η θερμοκρασία του εδάφους επηρεάζεται περισσότερο από την εσωτερική θερμότητα της γης παρά από την επιφανειακή. Η γεωθερμική βαθμίδα κυμαίνεται τυπικά από 1-4.5K/100m. Αυτό σημαίνει ότι σε πολύ μεγάλα βάθη (>1km) η θερμοκρασία μπορεί να αυξηθεί αισθητά.^[48]

Τα υπόγεια ύδατα μπορούν να επηρεάσουν τη θερμοκρασία του εδάφους. Η θερμοκρασία του νερού είναι συνήθως πιο σταθερή από αυτή του αέρα και μπορεί να μεταφέρει θερμότητα ή ψύχος σε άλλα βάθη μέσω της ροής του. Έτσι σε περιοχές με υπόγεια νερά, η θερμοκρασία του εδάφους μπορεί να διαφέρει από την αναμενόμενη.^[48]

Σε βάθη έως και 20 μέτρα, οι εποχιακές μεταβολές της επιφανειακής θερμοκρασίας επηρεάζουν ακόμα τη θερμοκρασία του εδάφους, αλλά με καθυστέρηση αρκετών μηνών. Σε μεγαλύτερα βάθη, οι εποχιακές μεταβολές εξασθενούν σημαντικά και η θερμοκρασία τείνει να παραμένει κοντά στη μέση ετήσια θερμοκρασία της περιοχής.^[49]

3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΕΔΑΦΟΥΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΚΑΙ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΒΑΘΗ

Η μοντελοποίηση της θερμοκρασίας του εδάφους είναι σημαντική για την κατανόηση της θερμικής συμπεριφοράς του εδάφους και βρίσκει πολλές εφαρμογές στο γεωθερμικό-γεωμηχανικό και αγροτικό τομέα (εκτενέστερη αναφορά θα γίνει στο κεφάλαιο 4). Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει τη χρήση μαθηματικών μοντέλων σε συνδυασμό με υπολογιστικά εργαλεία για την εκτίμηση της θερμοκρασίας εδάφους σε συνάρτηση με διάφορα δεδομένα (π.χ. θερμοκρασία-υγρασία αέρα, ηλιακή ακτινοβολία, θερμοφυσικά χαρακτηριστικά τους εδάφους). Οι μοντελοποιήσεις απαιτούν ακριβή δεδομένα για να παραχθούν αξιόπιστα αποτελέσματα, τα οποία όμως δεν είναι πάντα διαθέσιμα.

3.1 ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ

Το πιο διαδεδομένο μοντέλο πρόβλεψης της θερμοκρασίας επιφανείας βασίζεται σε συνδυασμών των μελετών των Van Bavel & Hillel (1976)^[50] και του Thibodeux (1979)^[51] και στηρίζεται στη θεμελιώδη εξίσωση του ισοζυγίου ενέργειας:

$$\Delta \dot{H}_e = \dot{R}_n - \dot{H}_s - L\dot{E}_s - \dot{G}_s \quad (\text{εξ. 3.1} - 1)$$

Όπου:

$\Delta \dot{H}_e$: Συσσώρευση της θερμικής ενέργειας στο στρώμα του εδάφους (cal/(cm²·day))

$\dot{R}_n$: Καθαρή ακτινοβολία (cal/(cm²·day))

$\dot{H}_s$: Αισθητή θερμότητα του αέρα (cal/(cm²·day))

$L\dot{E}_s$: Λανθάνουσα θερμότητα (cal/(cm²·day))

$\dot{G}_s$: Θερμότητα του εδάφους (cal/(cm²·day))

Το σύμβολο * πάνω από τους όρους της εξίσωσης αντιπροσωπεύει την ροή ενέργειας.

Ο πρώτος όρος της εξίσωσής 3.1-1, ΔH_e , μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο:

$$\Delta H_e = \rho \cdot d \cdot C_p (T_{i+1} - T_i) \text{ (εξ. 3.1 - 2)}$$

Όπου:

- ρ : Φαινόμενη πυκνότητα τους εδάφους (g/cm^3)
- d : Πάχος λεπτού επιφανειακού στρώματος (cm)
- C_p : Ειδική θερμοχωρητικότητα του εδάφους ($\text{cal/(g} \cdot ^\circ\text{C)}$)
- T_i, T_{i+1} : Αντιπροσωπευτική θερμοκρασία για το επιφανειακό στρώμα σε δυο διαδοχικά χρονικά σημεία, που παριστάνεται ως ο μέσος όρος των θερμοκρασιών στην κορυφή και στη βάση του εδαφικού στρώματος ($^\circ\text{C}$)

Σε αυτό το σημείο γίνεται η παραδοχή ότι το πάχος d είναι αρκούντως μικρό, ώστε τελικά ο όρος ΔH_e να θεωρείται αμελητέος σε σχέση με τους υπόλοιπους και να μπορεί να παραληφθεί.
Αρα:

$$\Delta H_e = 0 \text{ (εξ. 3.1 - 3)}$$

Η ροή ακτινοβολίας μπορεί να αναλυθεί ως:

$$\dot{R}_n = (\dot{R}_s - \dot{R}_{sr}) + (\dot{R}_{la} - \dot{R}_{lar}) - \dot{R}_{ls} \text{ (εξ. 3.1 - 4)}$$

Όπου:

- $\dot{R}_n$: Καθαρή ακτινοβολία ($\text{cal/(cm}^2 \cdot \text{day)}$)
- $\dot{R}_s$: Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος ($\text{cal/(cm}^2 \cdot \text{day)}$)
- $\dot{R}_{sr}$: Ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος ($\text{cal/(cm}^2 \cdot \text{day)}$)
- $\dot{R}_{la}$: Προσπίπτουσα ατμοσφαιρική ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος ($\text{cal/(cm}^2 \cdot \text{day)}$)
- $\dot{R}_{lar}$: Ανακλώμενη ατμοσφαιρική ακτινοβολία μεγάλου κύματος ($\text{cal/(cm}^2 \cdot \text{day)}$)
- $\dot{R}_{ls}$: Εκπεμπόμενη από το έδαφος ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος ($\text{cal/(cm}^2 \cdot \text{day)}$)

Από τον ορισμό της ανακλαστικότητας (albedo):

$$a = \frac{\dot{R}_{sr}}{\dot{R}_s} \Leftrightarrow \dot{R}_{sr} = a \cdot \dot{R}_s \text{ (εξ. 3.1 - 5)}$$

Όπου:

a : ανακλαστική ικανότητα της επιφάνειας

Συνεπώς:

$$(\dot{R}_s - \dot{R}_{sr}) = \dot{R}_s \cdot (1 - a) \text{ (εξ. 3.1 - 6)}$$

Το albedo του καλυμμένου εδάφους ως συνάρτηση του χρόνου δίνεται από τον τύπο:

$$a(t) = a_c \cdot C(t) + a_s \cdot (1 - C(t)) \text{ (εξ. 3.1 - 7)}$$

Όπου:

$a(t)$: Ανακλαστική ικανότητα του καλυμμένου εδάφους ως συνάρτηση του χρόνου

a_c : Ανακλαστική ικανότητα της κάλυψης του εδάφους (π.χ. 0.23 τυπική τιμή για βλάστηση)

$C(t)$: Ποσοστό κάλυψης της επιφάνειας συναρτήσει του χρόνου (σε ημέρες)

a_s : Ανακλαστική ικανότητα της επιφάνειας του εδάφους

Η ανακλαστική ικανότητα της επιφάνειας του εδάφους, a_s , αλλάζει ανάλογα με την κατάσταση του. Συνήθως, υπολογίζονται 12 μηνιαίες τιμές και η τιμή ανακλαστικής ικανότητας βρίσκεται με γραμμική παρεμβολή.

Η προσπίπτουσα ατμοσφαιρική ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος, R_{la} , αγνοώντας την νεφοκάλυψη μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$\dot{R}_{la} = e_a \cdot \sigma \cdot T_a^4 \text{ (εξ. 3.1 - 8)}$$

Όπου:

e_a : Εκπεμπτότητα της ατμοσφαίρας

σ : Σταθερά Stefan – Boltzmann ($11.7 \cdot 10^{-8} \text{ cal}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{day})$)

T_a : Θερμοκρασία του αέρα (K)

Η εκπεμπτότητα της ατμοσφαίρας υπολογίζεται από την εμπειρική σχέση:

$$e_a = 0.936 \cdot 10^{-5} \cdot T_a^2 \text{ (εξ. 3.1 – 9)}$$

Από τον ορισμό του albedo για την ανακλώμενη ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος:

$$\gamma = \frac{\dot{R}_{lar}}{\dot{R}_{la}} \Leftrightarrow \dot{R}_{lar} = \gamma \cdot \dot{R}_{la} \text{ (εξ. 3.1 – 10)}$$

Όπου:

γ : Ανακλαστικότητα επιφανείας για ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος

Συνεπώς συνδυάζοντας τις εξ. 3.1-8, 3.1-9 και 3.1-10:

$$\dot{R}_{la} - \dot{R}_{lar} = \dot{R}_{la}(1 - \gamma) = 0.936 \cdot 10^{-5} \cdot T_a^6 \cdot \sigma \cdot (1 - \gamma) \text{ (εξ. 3.1 – 11)}$$

Η εκπεμπόμενη από το έδαφος μεγάλου μήκους ακτινοβολία παριστάνεται από την εξίσωση:

$$\dot{R}_{ls} = e_s \cdot \sigma \cdot T_s^4 \text{ (εξ. 3.1 – 12)}$$

Όπου:

e_s : Ικανότητα εκπομπής υπέρυθρου του εδάφους

T_s : Θερμοκρασία επιφανείας του εδάφους (K)

Ισχύει ότι εκπεμπτότητα (ικανότητας ολικής εκπομπής) συνδέεται με την ανακλαστικότητα με την σχέση:

$$e_s = 1 - \gamma \text{ (εξ. 3.1 – 13)}$$

Συνεπώς η ροή καθαρής ακτινοβολίας συνδυάζοντας τις σχέσεις 3.1-4, 3.1-6, 3.1-11, 3.1-12 και 3.1-13 δίνεται από την σχέση:

$$\dot{R}_n = (1 - a) \cdot (\dot{R}_s) + 0.936 \cdot 10^{-5} \cdot T_a^6 \cdot e_s \cdot \sigma - e_s \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (\text{εξ. 3.1 - 14})$$

Η ροή λανθάνουσας θερμότητας εξάτμισης, LE_s , δίνεται από την σχέση:

$$LE_s = \mu \cdot E \cdot \rho_w \quad (\text{εξ. 3.1 - 15})$$

Όπου:

μ : Λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης νερού (~580.0 cal/g)

E : Γραμμική ταχύτητα εξάτμισης (cm/day)

ρ_w : Πυκνότητα νερού (1.0 g/cm³)

Η ροή αισθητής θερμότητας του αέρα υπολογίζεται από την σχέση:

$$H_s = \rho_a \cdot C_{pa} \cdot h \cdot (T_s - T_a) \quad (\text{εξ. 3.1 - 16})$$

Όπου :

ρ_a : Πυκνότητα αέρα (g/cm³)

C_{pa} : Ειδική θερμοχωρητικότητα αέρα υπό σταθερή πίεση (0.2402 cal/(g·K))

h : Συντελεστής θερμικής μεταφοράς στην διεπιφάνεια αέρα-εδάφους (cm/day)

T_a : Θερμοκρασία αέρα (K)

Η πυκνότητα του αέρα εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Η παρακάτω εξίσωση υπολογίζει την πυκνότητα ως συνάρτηση της θερμοκρασίας του αέρα.

$$\rho_a = (-0.0042 \cdot T_a + 1.292) \cdot 10^{-3} \quad (\text{εξ. 3.1 - 17})$$

Ο συντελεστής θερμικής μεταφοράς, h , υπολογίζεται από την σχέση:

$$h = K_1^2 \cdot V_z \cdot \left(\ln \left(\frac{Z_{RH} - \underline{D}}{Z_o} \right) \right)^{-2} \quad (\text{εξ. 3.1} - 18)$$

Όπου :

K_1 : Αριθμός του von Karman (0.41)

V_z : Ταχύτητα ανέμου (cm/day)

Z_{RH} : Ύψος αναφοράς στο οποίο μετριέται η ταχύτητα του ανέμου (m)

$\underline{D}$: Μετατόπιση του επιπέδου μηδέν (m)

Z_o : Ύψος αεροδυναμικής τραχύτητας, στο οποίο η ροή γίνεται τυρβώδης (m)

Η παραπάνω σχέση ισχύει όταν η θερμοκρασία του αέρα δεν μεταβάλλεται σημαντικά σε σχέση με το ύψος. Αυτό ισχύει όταν το ύψος της φυτοκάλυψης είναι σχετικά μικρό.

Το ύψος αεροδυναμικής τραχύτητας και η μετατοπιση τους επιπέδου μηδέν υπολογίζονται από το ύψος της φυτοκάλυψης.

$$\log Z_o = 0.997 \log Z_{ch} - 0.883 \quad (\text{εξ. 3.1} - 19)$$

$$\log \underline{D} = 0.973 \log Z_{ch} - 0.1536 \quad (\text{εξ. 3.1} - 20)$$

Όπου:

Z_{ch} : Ύψος τη φυτοκάλυψης (m)

Η ροή θερμότητας από το έδαφος, G_s , δίδεται από την εξίσωση μεταφοράς θερμότητας μέσω αγωγής:

$$\dot{G}_s = \frac{k_1 \cdot (T_s - T_1)}{d_1} \quad (\text{εξ. 3.1} - 20)$$

Όπου:

k_1 : Θερμική αγωγιμότητα τους πρώτου εδαφικού στρώματος (cal/(cm·day·K))

T_1 : Θερμοκρασία του εδάφους στη βάση του πρώτου στρώματος της εδαφικής κατανομής (K)

d_1 : Πάχος του πρώτου εδαφικού στρώματος (cm)

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις 3.1-1, 3.1-3, 3.1-14, 3.1-15, 3.1-16 και 3.1-20 και αναδιατάσσοντας τους όρους προκύπτει η παρακάτω εξίσωση, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πρόβλεψη της θερμοκρασίας επιφάνειας:

$$e_s \cdot \sigma \cdot T_s^4 + \left(\rho_a \cdot C_{pa} \cdot h + \frac{k_1}{d_1} \right) \cdot T_s - \left((1-a)R_s + 0.936 \cdot 10^{-5} \cdot \sigma \cdot T_a^6 \cdot e_s + \rho_a \cdot C_{pa} \cdot h \cdot T_a - \mu \cdot E \cdot \rho_w + \frac{k_1}{d_1} \cdot T_1 \right) = 0$$

(εξ.3.1 – 21)

3.2 ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΒΑΘΗ

Η γνώση της θερμοκρασίας του εδάφους σε διάφορα βάθη είναι πολύ σημαντική για ένα πλήθος εφαρμογών σε διάφορα επιστημονικά πεδία. Γι' αυτό το λόγο εδώ και πολλές δεκαετίες ερευνητές προσπαθούν να διατυπώσουν εξισώσεις έτσι ώστε να προσεγγίσουν με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια τη θερμοκρασία του εδάφους. Σήμερα, η διεθνής βιβλιογραφία βρίθει από υπολογιστικά μοντέλα. Σε αυτή την εργασία γίνεται μια προσπάθεια να αναφερθούν τα σημαντικότερα. Επιπλέον, τα μοντέλα έχουν χωριστεί ανά κατηγορίες έτσι ώστε να είναι πιο κατανοητό στον αναγνώστη πως προέκυψαν οι τελικές εξισώσεις αλλά και σε ποιες παραδοχές βασίστηκαν.

3.2.1 ΜΟΝΤΕΛΟ FOURIER

Στο μοντέλο αυτό θεωρείται ότι η αγωγή είναι ο κυρίαρχος μηχανισμός θερμότητας. Παρακάτω ακολουθεί η ανάλυση-απόδειξη της εξίσωσης κατά Ασημακόπουλο et al^[52] κατά την ανάπτυξη της οποίας αναφέρονται όλες οι παραδοχές.

Το ισοζύγιο μάζας σε έναν όγκο ελέγχου του οποίου η μάζα παραμένει σταθερή παίρνει τη μορφή:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV + \int_A \rho(\vec{v} \cdot \vec{n}) dA = 0 \Leftrightarrow \int_V \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{v} \right] dV = 0 \Leftrightarrow$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{v} = 0 \text{ (εξ. 3.2 - 1)}$$

Όπου:

$\vec{n}$: Μοναδιαίο διάνυσμα που είναι κάθετο στην επιφάνεια με κατεύθυνση προς τα έξω από τον όγκο ελέγχου

$\vec{v}$: Διάνυσμα ταχύτητας (m/s)

V : Όγκος ελέγχου (m³)

A : Επιφάνεια ελέγχου (m²)

Η εξ. 3.2-1 είναι γνωστή και ως εξίσωση συνέχειας.

Οι δυνάμεις που δρουν στον όγκο ελέγχου είναι οι δυνάμεις του πεδίου βαρύτητας, η πίεση και οι ιξώδεις τάσεις. Το ισοζύγιο ορμής διατυπώνεται ως εξής:

$$\int_V \left[\frac{\partial \rho \vec{v}}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{v} \vec{v} + \nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau} - \rho \vec{g} \right] dV = 0 \Leftrightarrow$$

$$\frac{\partial \rho \vec{v}}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{v} \vec{v} + \nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau} - \rho \vec{g} = 0 \text{ (εξ. 3.2 - 2)}$$

Όπου:

$\vec{\tau}$: Τανυστής ιξώδους τάσης (Pa)

$\vec{g}$: Διάνυσμα επιτάχυνσης της βαρύτητας (m/s²)

p : Πίεση (Pa)

Χρησιμοποιώντας την ουσιαστική παράγωγο της ταχύτητας στην εξ. 3.2-2 και την εξ. 3.2-1 προκύπτει:

$$\rho \cdot \frac{D\vec{v}}{Dt} + \nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau} - \rho \vec{g} = 0 \text{ (εξ. 3.2 - 3)}$$

Κάθε όρος στο ισοζύγιο ορμής παριστά δύναμη. Το εσωτερικό γινόμενο κάθε όρου επί το διάνυσμα της ταχύτητας δίνει την ενέργεια στη μονάδα του χρόνου που παράγει η μετατόπιση της δύναμης αυτής. Έτσι, από την εξ. 3.2-3 προκύπτει το ισοζύγιο μηχανικής ενέργειας:

$$\rho \cdot \frac{D}{Dt} \frac{v^2}{2} + \vec{u} \nabla p + \vec{u} (\nabla \cdot \vec{\tau}) - \rho (\vec{u} \cdot \vec{g}) = 0 \quad (\text{εξ. 3.2 - 3})$$

Σε διαφορικό όγκο ελέγχου δεν μπορεί να υπάρξει έργο ατράκτου. Έργο παράγεται μόνο από τις δυνάμεις που ασκούνται στα όρια του συστήματος. Η εξίσωση ενέργειας παίρνει την μορφή:

$$\int_V \left[\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial t} + \nabla \mathcal{E} \vec{u} + \nabla p \vec{u} + \nabla \cdot (\vec{\tau} \cdot \vec{u}) - \dot{q}''' + \nabla \dot{q}'' \right] \cdot dV = 0 \Leftrightarrow$$

$$\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial t} + \nabla \mathcal{E} \vec{u} + \nabla p \vec{u} + \nabla \cdot (\vec{\tau} \cdot \vec{u}) - \dot{q}''' - \nabla \cdot k \nabla T = 0 \quad (\text{εξ. 3.2 - 4})$$

Όπου:

$\mathcal{E}$: Ολική ενέργεια ανά μονάδα μάζας (J/kg)

$\dot{q}''$: Ρυθμός μεταφοράς θερμότητας ανά μονάδα επιφανείας (W/m²)

$\dot{q}'''$: Ρυθμός παραγωγής θερμότητας (W/m³)

Σε όρους ουσιαστικής παραγωγής της $\mathcal{E}$, η εξίσωση ενέργειας (εξ. 3.2-4) έχει τη μορφή

$$\rho \cdot \frac{D\mathcal{E}}{Dt} + \nabla p \vec{u} + \nabla \cdot (\vec{\tau} \cdot \vec{u}) - \dot{q}''' - \nabla \cdot k \nabla T = 0 \quad (\text{εξ. 3.2 - 5})$$

Η ολική ενέργεια ($\mathcal{E}$) μπορεί να θεωρηθεί στις περισσότερες εφαρμογές ότι είναι το άθροισμα της εσωτερικής (u), της κινητικής και της δυναμικής ενέργειας:

$$\mathcal{E} = u + \frac{v^2}{2} + \varphi \quad (\text{εξ. 3.2 - 6})$$

Όπου:

u : Εσωτερική ενέργεια ανά μονάδα μάζας (J/kg)

φ : Δυναμική ενέργεια ανά μονάδα μάζας ή δυναμικό (J/kg)

Η δυναμική ενέργεια ανά μονάδα μάζας ή δυναμικό (φ) συνδέεται με το διάνυσμα της επιτάχυνσης της βαρύτητας ($\vec{g}$) απο τη σχέση:

$$\vec{g} = -\nabla\varphi \text{ (εξ. 3.2 - 7)}$$

Με συνδυασμό των τριών παραπάνω εξισώσεων προκύπτει ότι:

$$\rho \cdot \frac{D}{Dt} \left[u + \frac{v^2}{2} \right] - \rho \cdot (\vec{v} \cdot \vec{g}) + \nabla \cdot p\vec{v} + \nabla \cdot (\vec{\tau} \cdot \vec{v}) - \dot{q}''' - \nabla \cdot k\nabla T = 0 \text{ (εξ. 3.2 - 8)}$$

Συνδυάζοντας την εξ. 3.2-5 με την 3.2-8 και χωρίζοντας το συνολικό έργο των ιξωδών τάσεων $\nabla \cdot (\vec{\tau} \cdot \vec{v})$ σε αντιστρεπτό έργο που αποδίδει το σύστημα με μορφή ελαστικών δυνάμεων παραμόρφωσης $\vec{v} \cdot (\nabla \cdot \vec{\tau})$ και σε αντιστρεπτό έργο που καταναλίσκεται ως έργο τριβών $\vec{\tau} : \nabla \vec{v}$ προκύπτει:

$$\rho \cdot \frac{Du}{Dt} + p\nabla \cdot \vec{v} + \vec{\tau} : \nabla \vec{v} - \nabla \cdot k\nabla T - \dot{q}''' = 0 \text{ (εξ. 3.2 - 9)}$$

Η εξίσωση είναι γνωστή και ως ισοζύγιο θερμικής ενέργειας.

Σε προβλήματα μεταφορά θερμότητας ενδιαφέρει η έκφραση της εσωτερικής ενέργειας ως συνάρτηση της θερμοκρασίας και της ειδικής θερμότητας. Η εσωτερική ενέργεια συνδέεται με τη θερμοκρασία με την εξίσωση:

$$du = \left[-p + T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v \right] dv + C_v dT \text{ (εξ. 3.2 - 10)}$$

Όπου:

v : Ειδικός όγκος (m^3/kg)

C_v : Ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο ($\text{J}/(\text{K} \cdot \text{kg})$ ή ($\text{cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$)

Με συνδυασμό της εξ 3.2-9 με την 3.2-10 προκύπτει:

$$\rho \cdot C_v \cdot \frac{DT}{Dt} + T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v \nabla \cdot \vec{v} + \vec{\tau} : \nabla \vec{v} - \nabla \cdot k\nabla T - \dot{q}''' = 0 \text{ (εξ. 3.2 - 11)}$$

Στην μέχρι τώρα ανάλυση παραπάνω εξίσωση η μόνη παραδοχή είναι ότι το η συνολική ενέργεια είναι το άθροισμα της εσωτερικής, της κινητικής και της δυναμικής.

Στα στερεά όταν δεν υπάρχει εισροή και εκροή μάζας από τον όγκο ελέγχου τότε θεωρείται ότι $\vec{v} = 0$. Επίσης, θεωρούνται ασυμπίεστα. Η παραπάνω εξίσωση παίρνει τη μορφή

$$\rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot k \nabla T + \dot{q}''' \quad (\text{εξ. 3.2} - 12)$$

Ο προσδιορισμός της κατανομής της θερμοκρασίας μέσα στο έδαφος σε κάθε χρονική στιγμή προκύπτει από την επίλυση της παραπάνω εξίσωσης (εξίσωση διατήρησης ενέργειας). Για μονοδιάστατη αγωγή σε καρτεσιάνες συντεταγμένες, χωρίς παραγωγή θερμότητας και θεωρώντας ομοιογενές έδαφος (σταθερή θερμική αγωγιμότητα) η εξίσωση παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho \cdot c_p} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \Leftrightarrow \frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (\text{εξ. 3.2} - 13)$$

Η παραπάνω εξίσωση έχει την ιδιαιτερότητα ότι είναι ευαίσθητη στις οριακές συνθήκες (με μικρή μεταβολή των οριακών συνθηκών υπάρχει μεγάλη μεταβολή το αποτέλεσμα). Επίσης, οι αρχικές οριακές συνθήκες είναι δύσκολο να προσδιορισθούν.

3.2.2 MONTELO SUZUKI

Όταν η μεταφορά θερμότητα με συναγωγή αποτελεί σημαντικό κομμάτι της συνολικής μεταφοράς θερμότητας και δεν μπορεί να αγνοηθεί, για παράδειγμα σε περιοχές με ροή υπόγειων νερών, τότε δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο Fourier. Ο Suzuki^[53] πρότεινε μια μερική διαφορική εξίσωση που περιλαμβάνει όρους που αντιπροσωπεύουν τόσο την αγωγή όσο και τη συναγωγή:

$$\rho \cdot c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - q_z c_w \rho_w \frac{\partial T}{\partial z} \quad (\text{εξ. 3.2} - 14)$$

Όπου:

q_z : Κατακόρυφη ροή Darcy (m/s) $q_z = v \cdot \varepsilon \cdot S_{we}$

v : Ταχύτητα υπόγειου νερού (m/s)

ε: Πορώδες

S_{we} : Κινητός κορεσμός της υγρή φάσης

Το μοντέλο αυτό βασίζεται σε πολλές παραδοχές όπως μονοδιάστατη εναλλαγή θερμότητας και ροή υπόγειων νερών, σταθερή θερμική αγωγιμότητα, σταθερο πορώδες, σταθερή ταχύτητα νερού (χωρικά και χρονικά).

Είναι περισσότερο ακριβές στις περιπτώσεις που η περιεχόμενη υγρασία επηρεάζει σημαντικά τη μεταφορά θερμότητας και είναι κατάλληλο για περιβάλλοντα που συνδυάζουν την αγωγή θερμότητας με τη μεταφορά υγρασίας (π.χ. αγροτικές εφαρμογές).

Από την άλλη τα κύρια μειονεκτήματα του είναι ότι είναι πολύπλοκοτερο από τα άλλα μοντέλα που θα αναφερθούν παρακάτω και εφόσον για τις περισσότερες πραγματικές εφαρμογές δεν μπορούν να γίνουν κάποιες παραδοχές για την απλοποίηση της εξ. 3.2-14, χρειάζεται η χρήση υπολογιστών και προγραμμάτων, όπου εφαρμόζουν αριθμητικές μεθόδους για την επίλυση του. Οι μέθοδοι των πεπερασμένων διαφορών και των πεπερασμένων στοιχείων είναι οι δημοφιλέστερες. Επίσης, απαιτούνται αναλυτικά δεδομένα για την υγρασία του εδάφους.

3.2.3 ΜΟΝΤΕΛΑ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ

Πολλοί ερευνητές έχουν διατυπώσει αναλυτικές λύσεις στην απλουστευμένη εξίσωση θερμότητας οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη ης θερμοκρασίας του εδάφους. Κοινός τόπος αυτών λύσεων είναι ότι περιλαμβάνουν τη συνάρτηση σφάλματος $\text{erf}(z)$. Η συνάρτηση σφάλματος ορίζεται ως εξής

$$\text{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-\tau^2} d\tau \quad (\text{εξ. 3.2} - 15)$$

Αυτή η συνάρτηση εμφανίζεται πολλές φορές κατά τη διαδικασία επίλυσης διαφορικών εξισώσεων σε προβλήματα μεταφοράς θερμότητας, καθώς περιγράφει πως διαχέεται η θερμοκρασία με την πάροδο του χρόνου.

3.2.3.1 Μοντέλο De Paere

Ένα μοντέλο που ξεχωρίσει για την ακρίβεια του στη ζώνη επιφανείας αλλά και για την απλότητα του είναι το μοντέλο του De Paere.^{[54],[55]} Επιλέγεται να γίνει η απόδειξη της εξίσωσης μόνο για αυτό το μοντέλο και όχι για τα υπόλοιπα μοντέλα που περιέχουν τη συνάρτηση σφάλματος, καθώς η λογική είναι παρόμοια απλά αλλάζουν οι αρχικές και οριακές συνθήκες και η μεταβλητή που τίθεται αυθαίρετα κατά το πρώτο βήμα.

- Ορίζεται μία νέα μεταβλητή «η», η οποία ισούται με:

$$\eta = \frac{z}{2\sqrt{at}} \quad (\text{εξ. 3.2} - 16)$$

με αυτόν τον τρόπο πλέον η συνάρτηση είναι μιας μεταβλητής αντί για δύο

- Υπολογίζονται η παρακάτω μερικές παράγωγοι

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{dT}{d\eta} \frac{\partial \eta}{\partial z} = \frac{1}{2\sqrt{at}} \cdot \frac{dT}{d\eta} \quad (\text{εξ. 3.2} - 17)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{d}{dz} \left(\frac{1}{2\sqrt{at}} \cdot \frac{dT}{d\eta} \right) = \left(\frac{1}{2\sqrt{at}} \right)^2 \cdot \frac{d^2 T}{d\eta^2} = \frac{1}{4at} \cdot \frac{d^2 T}{d\eta^2} \quad (\text{εξ. 3.2} - 18)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{dT}{d\eta} \frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{z}{4\sqrt{at^3}} \frac{dT}{d\eta} = -\frac{2\eta\sqrt{at}}{4\sqrt{at^3}} \cdot \frac{dT}{d\eta} = -\frac{\eta}{2t} \frac{dT}{d\eta} \quad (\text{εξ. 3.2} - 19)$$

- Αντικαθιστούμε την εξ. 3.2-18 και την 3.2-19 στην εξ. 3.2-13

$$a \frac{1}{4at} \frac{d^2 T}{d\eta^2} + \frac{\eta}{2t} \frac{dT}{d\eta} = 0 \Rightarrow \frac{d^2 T}{d\eta^2} + 2\eta \frac{dT}{d\eta} = 0 \quad (\text{εξ. 3.2} - 20)$$

- Αυτή είναι μια από τις πιο γνωστές διαφορικές εξισώσεις που η λύση της περιλαμβάνει την συνάρτηση σφάλματος. Η γενική λύση είναι:

$$T(\eta) = C_1 \cdot \text{erf}(\eta) + C_2 \quad (\text{εξ. 3.2} - 21)$$

- Τώρα σε αυτή την εξίσωση εφαρμόζουμε την οριακή και αρχική συνθήκη για να υπολογιστούν οι σταθερές C_1, C_2 .
 - Για $z=0$ τότε ισχύει $\eta=0$ και $T(0,t) = T_s$. Με εφαρμογή στην εξίσωση 3.2-21

$$\text{Προκύπτει } T(0) = C_1 \cdot \text{erf}(0) + C_2 = C_2 \Rightarrow T_s = C_2 \quad (\text{εξ. 3.2} - 22)$$

- Για $z \rightarrow \infty$ τότε ισχύει $\eta \rightarrow \infty$ και $T(\infty) = T_g$. Με εφαρμογή στην εξίσωση 3.2-21

$$\text{Προκύπτει } T(\infty) = C_1 \cdot \text{erf}(\infty) + T_s \Rightarrow T_g = C_1 + T_s \Rightarrow C_1 = T_g - T_s \text{ (εξ. 3.2 - 23)}$$

Αντικαθιστώντας την εξ. 3.2-22 και την εξ. 3.2-23 στην εξ. 3.2-21 προκύπτει:

$$T(\eta) = (T_g - T_s) \cdot \text{erf}(\eta) + T_s \text{ (εξ. 3.2 - 24)}$$

Άρα η τελική εξίσωση για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας συναρτήσει του βάθους και του χρόνου είναι:

$$T(z, t) = T_s + (T_g - T_s) \cdot \text{erf}\left(\frac{z}{2\sqrt{at}}\right) \text{ (εξ. 3.2 - 25)}$$

Όπου:

T_g : Θερμοκρασία εδάφους σε βάθος κάτω από την ρηχή ζώνη ($^{\circ}\text{C}$)

3.2.3.2 Μοντέλο William και Smith

Μια λύση στην εξ. 3.2-13 με μελλοντική βηματική μεταβολή στην θερμοκρασία επιφανείας του εδάφους προτάθηκε από τους Williams και Smith το 1989 ^[56]:

$$\text{Αρχική συνθήκη: } T(z, t = 0) = T_o + Gz \text{ (εξ. 3.2 - 26)}$$

$$\text{Οριακή συνθήκη: } T(z = 0, t) = T_o + \Delta T \text{ (εξ. 3.2 - 27)}$$

$$T(z, t) = T_o + Gz + \Delta T \left[\text{erf}\left(\frac{z}{\sqrt{4a(t - \kappa)}}\right) - \text{erf}\left(\frac{z}{\sqrt{4at}}\right) \right] \text{ (εξ. 3.2 - 28)}$$

Όπου:

T_o : Αρχική επιφανειακή θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$)

ΔT : Βηματική μεταβολή θερμοκρασίας στην επιφάνεια του εδάφους που αρχίζει την χρονική στιγμή $t=0$ και διαρκεί μέχρι την χρονική στιγμή $t=\kappa$ (s)

G : Γεωθερμική βαθμίδα ($^{\circ}\text{C/m}$)

Ο πρώτος όρος της της συνάρτησης σφάλματος περιλαμβάνεται μόνο εάν το t υπερβαίνει το κ . Όπως αναφέρθηκε η εξίσωση αυτή αποτελεί λύση της εξ. 3.2-13, άρα για να εφαρμοστεί πρέπει να ισχύουν οι παραδοχές που ισχύουν για την εξ. 3.2-13.

3.2.3.3 Μοντέλο Taniguchi

Οι υποεπιφανειακές θερμικές επιπτώσεις της αλλαγής θερμοκρασίας και της ροής των υπόγειων υδάτων μπορούν να υπολογιστούν από την αναλυτική λύση της εξ. 3.2-14 (που όπως αναφέρθηκε λαμβάνει υπόψη της τη μεταφορά ενέργειας με συναγωγή. Οι Taniguchi et al^[57] τροποποίησαν την εξίσωση που προτάθηκε από τους Carslaw and Jaeger^[58] και την εφάρμοσαν για να διερευνήσουν το θερμοκρασιακό προφίλ με κάθετη κίνηση του υπόγειου νερού και βαθμιαία αύξηση της επιφανειακής θερμοκρασίας. Οι εξισώσεις που περιγράφουν το παραπάνω σύστημά είναι οι:

$$\text{Αρχική συνθήκη: } T(z, t = 0) = T_o + Gz \text{ (εξ. 3.2 - 29)}$$

$$\text{Οριακή συνθήκη: } T(z = 0, t) = T_o + \psi t \text{ (εξ. 3.2 - 30)}$$

$$T(z, t) = T_o + G(z - Ut) + \frac{1}{2U}(\psi + UG) \cdot \left[(Ut - z) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{z - Ut}{2\sqrt{at}}\right) + (Ut + z) e^{\left(\frac{Uz}{a}\right)} \operatorname{erfc}\left(\frac{z + Ut}{2\sqrt{at}}\right) \right] \text{ (εξ. 3.2 - 31)}$$

Όπου:

U : Ταχύτητα του θερμικού πλουμίου που οφείλεται σε καθαρή συναγωγή (m/s)

$$U = \frac{q_z C_w \rho_w}{c_p \rho} \text{ (εξ. 3.2 - 32)}$$

Erfc : Συμπληρωματική συνάρτηση σφάλματος για την οποία ισχύει
 $\operatorname{Erfc} = 1 - \operatorname{erf}$

ψ : Κλίση της επιφανειακής αύξησης της θερμοκρασίας ($^{\circ}\text{C/s}$)

Η εξίσωση μπορεί να εφαρμοστεί για τον προσδιορισμό των ροών των υπόγειων υδάτων από τα προφίλ θερμοκρασίας σε περιοχές που μετράται η αύξηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας. Παρομοίως, εάν οι ροές των υπόγειων υδάτων και οι θερμοκρασίες τους είναι γνωστές, τη εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βρεθεί η θερμοκρασία επιφάνειας εάν υποθεθεί ότι μεταβάλλεται γραμμικά.

3.2.4 ΗΜΙΤΟΝΟΕΙΔΗ ΜΟΝΤΕΛΑ – ΗΜΙΕΜΠΕΙΡΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Ένα από τα μειονεκτήματα των μοντέλων Fourier και Suzuki είναι ότι η λύση τους υπάρχει πιθανότητα να απαιτήσει τη χρήση υπολογιστικών εργαλείων για την εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων. Σε εποχές όπου η χρήση των υπολογιστών δεν ήταν τόσο διαδεδομένη, αρκετοί ερευνητές έκαναν προσπάθειες να διατυπώσουν απλές εξισώσεις που θα προσδιόριζαν τη θερμοκρασία εδάφους σε διάφορα βάθη.

Τα ημιτονοειδή μοντέλα προέρχονται από τη λύση της διαφορικής εξίσωσης του Fourier, κάνοντας ορισμένες παραδοχές και ακολουθώντας κάποια συγκεκριμένα βήματα.

1. Αρχικά για να ισχύει η εξίσωση Fourier γίνεται αποδεκτό ότι η μεταφορά θερμότητας γίνεται με αγωγή και σε μια μόνο διάσταση.
2. Αναζητάτε μια εξίσωση στην οποία η θερμοκρασία είναι συνάρτηση δυο μεταβλητών (χρόνου και βάθους) και μεταβάλλεται ημιτονοειδώς με τον χρόνο και εκθετικά με το βάθος (αφού οι θερμοκρασιακές ταλαντώσεις φθίνουν όσο αυξάνεται το βάθος). Μια εξίσωση αυτού του τύπου είναι η:

$$T(z, t) = T_o + Ae^{-kz} \cos(\omega t - kz) \quad (\text{εξ. 3.2} - 33)$$

Επίσης η οριακή συνθήκη στην επιφάνεια ($z=0$)

$$T(0, t) = T_o + A \cos(\omega t) \quad (\text{εξ. 3.2} - 34)$$

3. Υπολογίζονται οι μερικές παράγωγοι της παραπάνω εξίσωσης

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -Ae^{-kz} \cdot \omega \cdot \sin(\omega t - kz) \quad (\text{εξ. 3.2} - 35)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = Ae^{-kz} \cdot k^2 \cdot \cos(\omega t - kz) \quad (\text{εξ. 3.2} - 36)$$

4. Αντικαθίσταται οι μερικές παραγωγοί στην εξίσωση Fourier

$$-Ae^{-\mathbb{k}z} \cdot \omega \cdot \sin(\omega t - \mathbb{k}z) = -2 \cdot a \cdot A \cdot e^{-\mathbb{k}z} \cdot \mathbb{k}^2 \cdot \sin(\omega t - \mathbb{k}z) \quad (\text{εξ. 3.2} - 37)$$

5. Για να ισχύει η παραπάνω εξίσωση πρέπει:

$$\omega = 2\alpha \cdot \mathbb{k}^2 \Leftrightarrow \mathbb{k} = \sqrt{(\omega/2\alpha)} \quad (\text{εξ. 3.2} - 38)$$

6. Αντικαθιστώντας την εξ 3.2-38 στην 3.2-33 παραπάνω εξίσωση

$$T(z, t) = T_o + Ae^{-\sqrt{(\omega/2\alpha)} \cdot z} \cdot \cos(\omega t - \sqrt{(\omega/2\alpha)} \cdot z) \quad (\text{εξ. 3.2} - 39)$$

Όλα τα ημιτονοειδή μοντέλα ακολουθούν την ίδια λογική. Υποθέτουν μια λύση στην οποία η θερμοκρασία είναι συνάρτηση δυο μεταβλητών (χρόνου και βάθους) και μεταβάλλεται ημιτονοειδώς με τον χρόνο και εκθετικά με το βάθος. Σε αυτό το σημείο ο κάθε ερευνητής μεταβάλλει ελαφρώς αυτή την εξίσωση, ωστόσο πρέπει η εξίσωση να επαληθεύει την εξίσωση Fourier. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτει μια σχέση μεταξύ της θερμικής διαχυτότητας και της σταθεράς $\mathbb{k}$ της θερμικής ταλάντωσης.

Πάνω στα ημιτονοειδή μοντέλα βασίζονται και τα ημιεμπειρικά μοντέλα. Στην ουσία στο ημιτονοειδές μοντέλο προσαρμόζονται κάποιες εμπειρικές παράμετροι. Τα ημιεμπειρικά μοντέλα εν γένει χαρακτηρίζονται από τη μαθηματική τους απλότητα, αλλά και από τη δυσκολία προσδιορισμού των εμπειρικών παραμέτρων, οι οποίες προσδιορίζονται μέσα από επίπονες μελέτες που απαιτούν πληθώρα πειραματικών δεδομένων. Παρακάτω παρουσιάζονται τα πιο γνωστά ημιεμπειρικά μοντέλα. Τα περισσότερα αυτά διατυπώθηκαν αρκετές δεκαετίες, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι δεν υπάρχουν και σύγχρονα εμπειρικά μοντέλα.

3.2.4.1 Μοντέλο Carslaw και Jaeger

Η εξίσωση που διατυπώθηκε παραπάνω (§ 3.2.3) ως λύση στην εξίσωση Fourier δεν ήταν τυχαία. Προτάθηκε το 1959 από τους Carslaw και Jaeger ^[58] και είναι ίσως το πιο γνωστό ημιτονοειδές μοντέλο.

$$T(z, t) = T_m + A_s e^{-\sqrt{(\omega/2\alpha)} \cdot z} \cdot \cos(\omega t - \sqrt{(\omega/2\alpha)} \cdot z) \quad (\text{εξ. 3.2} - 40)$$

Όπου:

T_m : Μέση ετήσια θερμοκρασία στην επιφάνεια

A_s : Εύρος της ετήσιας μέσης θερμοκρασίας του αέρα (με βάση τον μηνιαίο μέσο όρο για τη μέγιστη και ελάχιστη τιμή)

3.2.4.2 Μοντέλο Moreland

Σε περίπτωση που είναι γνωστή η μέση ετήσια θερμοκρασία στην επιφάνεια και η μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία σε πέντε εκατοστά βάθος, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο του Moreland^[59] που βασίστηκε στην εργασία του Fluker^[60]:

$$T(z, t) = T_m + T_{5cm} e^{-\sqrt{(\omega/2\alpha)z}} \sin(\omega t - \sqrt{(\omega/2\alpha)z} - \frac{2\pi D}{364}) \quad (\text{εξ. 3.2 - 41})$$

Όπου:

$$\omega = \frac{2\pi}{364} \text{ days}^{-1}$$

T_{5cm} : Ετήσιο εύρος θερμοκρασία σε βάθος 5cm

D: Οι ημέρες που μεσολαβούν από την 31^η Δεκεμβρίου μέχρι τη στιγμή που η θερμοκρασία επιφανείας του εδάφους για πρώτη φορά θα ισούται με τον μέσο όρο του έτους

Αυτή η εξίσωση είναι μια λύση του ισοζυγίου ενέργειας για ημιάπειρο στερεό του οποίου η θερμοκρασία επιφανείας ποικίλλει ημιτονοειδώς.

Οι ημερήσιες διακυμάνσεις στην θερμοκρασία έχουν αγνοηθεί, αφού για τις συνήθεις τιμές θερμικής διαχυτότητας του εδάφους θεωρούνται αμελητέες. Επίσης, γίνεται η παραδοχή ότι η μεταφορά θερμότητας γίνεται κατά βάση με αγωγή και δεν γίνεται αλλαγή φάσης του νερού.

Στα πλεονεκτήματα αυτού του μοντέλου είναι ότι ξεχωρίζει για την μαθηματική απλότητα του και περιγράφει πολύ αποτελεσματικά την περιοδικότητα στις μεταβολές θερμοκρασίας.

Μειονέκτημα αυτού του μοντέλου θεωρείται η εξάρτηση από την γνώση των θερμοκρασιών στην επιφάνεια και κοντά σε αυτή. Δεδομένα που είναι δύσκολα διαθέσιμα.

Τέλος, υποθέτει ομογενές έδαφος με σταθερές φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους και αγνοεί την υγρασία η οποία μπορεί να τις επηρεάσει ισχυρώς.

Οι Yener et al ^[61] στην μελέτη τους υπολόγισαν τις παραμέτρους του μοντέλου για εφτά διαφορετικές περιοχές της Τουρκίας (περιοχή Αιγαίου, περιοχή Μαύρης Θάλασσας, περιοχή Κεντρικής Ανατολίας, περιοχή Ανατολικής Ανατολίας, περιοχή Νοτιοανατολική Ανατολίας, περιοχή Μαρμαρά) και υπολόγισαν την εξίσωση για κάθε μια από αυτές τις περιοχές. Επίσης, διατύπωσαν μια γενική εξίσωση για το έδαφος της Τουρκίας (χρησιμοποιώντας το μέσο όρο των παραμέτρων) η οποία παρατίθεται παρακάτω:

$$T(z, t) = 13.63 + 2.003 e^{-0.0189z} \sin\left(\frac{2\pi}{8760}t - 0.0189z - \frac{\pi}{2}\right) \quad (\text{εξ. 3.2 - 42})$$

3.2.4.3 Μοντέλο Kusuda - Achenbach

Το 1965 οι Kusuda και Achenbach κατέληξαν σε μια εξίσωση για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του εδάφους που λαμβάνει υπόψιν την ετήσια μέση θερμοκρασία του εδάφους στην επιφάνεια, το εύρος της θερμοκρασιακής διαφοράς στην επιφάνεια και τα θερμοφυσικά χαρακτηριστικά του εδάφους (μέσω του συντελεστή θερμικής διαχυτότητας).

$$T(z, t) = T_m + A_s \cdot e^{-z \cdot \left(\frac{\pi}{8760a}\right)^{0.5}} \cdot \cos\left[\frac{2\pi}{8760} \cdot (t - t_0) - \frac{z}{2} \left(\frac{8769}{\pi a}\right)^{0.5}\right] \quad (\text{εξ. 3.2 - 43})$$

Όπου:

t_0 : Υστέρηση φάσης θερμοκρασιακού κυματος (s ή day)

3.2.4.4 Μοντέλο Baggs

Το 1983 ο Baggs^[63] ερευνώντας τους τρόπους υπολογισμού της θερμοκρασίας για τα εδάφη της Αυστραλίας κατέληξε σε μια ημιεμπειρική εξίσωση η οποία περιλαμβάνει τον ημιτονοειδή όρο που προκύπτει ως λύση της εξίσωσης Fourier αλλά και διάφορες εμπειρικές παραμέτρους όπως ο παράγοντας σκίασης.

$$T(z, t) = (T_m \pm \Delta T_m) + 1.07 \cdot k_v \cdot A_s e^{\left(-0.000316 \cdot z \cdot \sqrt{\frac{1}{a}}\right)} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365} \left(t - t_0 - 0.01834 \cdot z \cdot \sqrt{\frac{1}{a}}\right)\right) \quad (\text{εξ. 3.2 - 44})$$

Όπου:

T_{ma} : Μέση ετήσια θερμοκρασία αέρα (°C)

ΔT_m : Θερμοκρασιακή βαθμίδα $\Delta T_m = T_{ma} - T_g$

k_v : Παράγοντας σκίασης της βλάστησης

Σε γυμνό έδαφος με ηλιοφάνεια η παράμετρος ισούται με $k_v=1$ και για έδαφος όπου καλύπτεται 100% με σκιά η παράμετρος ισούται με $k_v=0.22$

3.2.4.5 Μοντέλο Popiel-Wojtkowiak

Οι Popeil et al^[64] τροποποίησαν ελαφρώς της εξίσωσης του Bags, ώστε να περιγράφει καλύτερα τα πειραματικά δεδομένα του βόρειου ημισφαιρίου

$$T(z, t) = (T_m + \Delta T_m) - 1.07 \cdot k_v \cdot A_s e^{\left(-0.000315625 \cdot z \cdot \sqrt{\frac{1}{a}}\right)} \cos\left(\frac{2\pi}{365} \left(t - t_0 - 0.018335 \cdot z \cdot \sqrt{\frac{1}{a}}\right)\right) \quad (\text{εξ. 3.2 - 45})$$

Αργότερα, ο Popiel και ο Wojtkowiak^[65] διατύπωσαν μια εξίσωση για τον υπολογισμό του παράγοντα σκίασης της βλάστησης, k_v , για γυμνό έδαφος.

$$k_v = A_{PW} + B_{PW} \cdot e^{\left(-0.5 \frac{|t - C_{PW}|}{D_{PW}}\right)^{E_{PW}}} \quad (\text{εξ. 3.2 - 46})$$

Όπου:

$A_{PW}, B_{PW}, C_{PW}, D_{PW}, E_{PW}$: Εμπειρικές παράμετροι του μοντέλου Popeil-Wojtkowiak

t: Η μέρα του έτους

Αυτή η εξίσωση είναι δομημένη έτσι ώστε να δίνει μεγαλύτερες τιμές κατά τη διάρκεια των μηνών με υψηλή ηλιακή ακτινοβολία (Ιούνιο με Οκτώβριο).

4. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

4.1. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα μοντέλα πρόβλεψης θερμοκρασίας εδάφους κρίνονται απαραίτητα στον ενεργειακό σχεδιασμό κτιρίων, καθώς επιτρέπουν την βέλτιστη αξιοποίηση της θερμότητας του εδάφους για θέρμανση και ψύξη, οδηγώντας σε αυξημένη ενεργειακή απόδοση.

Οι εναλλάκτες εδάφους-αέρα και οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας εκμεταλλεύονται τη σταθερή θερμοκρασία τους εδάφους. Πριν την εγκατάσταση τους γίνεται η μελέτη και η διαστασιολόγηση τους. Ίσως το πιο βασικό δεδομένο για τον σχεδιασμό αυτών των συστημάτων είναι η θερμοκρασία τους εδάφους. Αυτή προσεγγίζεται μέσα από τα μοντέλα πρόβλεψης και τελικά βοηθά στον υπολογισμό όλων των σημαντικών σχεδιαστικών παραμέτρων του συστήματος όπως βάθος τοποθέτησης των σωληνώσεων, συνολικό μήκος σωληνώσεων, βαθμός απόδοσης και εν τέλει προσδιορίζει την ανάγκη και το μέγεθος των εφεδρικών συστημάτων.^[66]

Τα μοντέλα πρόβλεψης θερμοκρασίας του εδάφους βοηθούν στον σχεδιασμό των συστημάτων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας στο έδαφος κατά τους θερινούς μήνες και την ανάκτηση τους κατά τους χειμερινούς μήνες, επιτρέποντας τον υπολογισμό του βάθους αποθήκευσης και της χωρητικότητας.^[67]

Στα υπόσκαφα κτίρια, η υπολογιζόμενη θερμοκρασία του εδάφους χρησιμοποιείται για τον σχεδιασμό της γενικής διάταξης του κτιρίου στο έδαφος, της διάταξης των δωματίων και την επιλογή υλικών κατασκευής και τεχνικών για βέλτιστη θερμομόνωση και εκμετάλλευση της θερμότητας.^[68]

Τέλος, τα μοντέλα θερμοκρασίας εδάφους χρησιμοποιούνται στο σχεδιασμό και την ανάπτυξη δικτύων τηλεθέρμανσης σε περιοχές με αυξημένο γεωθερμικό δυναμικό. Αυτά τα μοντέλα επιτρέπουν την εκτίμηση της καταλληλότητας του εδάφους για την εκμετάλλευση της γεωθερμίας και βοηθούν στη σχεδίαση δικτύων (π.χ. βάθος εγκατάσταση σωλήνων, πάχος μόνωσης) που μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες μεγάλων κτιριακών συγκροτημάτων ή ακόμα και ολόκληρων πόλεων με αποδοτικό τρόπο.^[69] Ακόμα τα μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση διαρροών στις σωληνώσεις των δικτύων τηλεθέρμανσης.^[70]

4.2. ΑΛΛΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Τα μοντέλα πρόβλεψης θερμοκρασίας εδάφους βρίσκουν ποικίλες εφαρμογές και εκτός του ενεργειακού τομέα, επηρεάζοντας τη γεωργία, την κατασκευή υποδομών τη γεωτεχνική μηχανική και την αρχαιολογία.

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον καθορισμό και την ανάπτυξη στρατηγικών προσαρμογής και μετριασμού της κλιματικής αλλαγής, καθώς η θερμοκρασία του εδάφους επηρεάζει το μικροκλίμα. Η συνεχής παρακολούθηση και πρόβλεψη της θερμοκρασίας του εδάφους βοηθά στην πρόβλεψη αλλαγών στα οικοσυστήματα.^[71]

Η γνώση και η πρόβλεψη της θερμοκρασίας εδάφους μπορεί να βοηθήσει στην επιλογή κατάλληλων φυτών που θα έχουν υψηλή καρποφορία στις συγκεκριμένες συνθήκες, καθώς η θερμοκρασία του εδάφους επηρεάζει την ανάπτυξη φυτών και την απόδοση των καλλιεργειών. Επίσης, βοηθούν στον προσδιορισμό της βέλτιστης περιόδου σποράς, αφού οι σπόροι έχουν ελάχιστη θερμοκρασία στην οποία φυτρώνουν. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγονται καθυστερήσεις. Επίσης, βοηθούν στον προγραμματισμό της άρδευσης σε ώρα με την ελάχιστη θερμοκρασία εδάφους προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί και η απώλεια λόγω εξάτμισης. Επιπλέον, σε περιοχές που πλήττονται από δασικές πυρκαγιές τα μοντέλα χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη φυσική αποκατάστασης του περιβάλλοντος.^[72]

Σε περιοχές με ψυχρό κλίμα όπως ο Καναδάς, τα μοντέλα πρόβλεψης θερμοκρασίας εδάφους χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό ανθεκτικών οδοστρωμάτων. Το πάγωμα και το λιώσιμο του πάγου προκαλεί μεγάλες τάσεις οδηγώντας σε ρωγμές και καταστροφές της ασφάλτου. Χρησιμοποιώντας τα μοντέλα προσδιορισμού της θερμοκρασίας εδάφους οι μηχανικοί μπορούν να υπολογίσουν το βάθος του παγετού και να σχεδιάσουν κατάλληλα το οδόστρωμα.^[73] Επιπλέον, το αλάτι το οποίο ρίχνεται στους δρόμους προκειμένου να λιώσει τον πάγο διαβρώνει το οδόστρωμα. Τα μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτιστοποίηση ρίψης αλατιού μειώνοντας την συνολική του ποσότητα.^[74] Επίσης σε ορεινές βραχώδεις περιοχές όταν το έδαφος θερμαίνεται ή ψύχεται, ο πάγος μπορεί να λιώσει ή το νερό να παγώσει, μεταβάλλοντας την αντοχή του εδάφους. Η πρόβλεψη της θερμοκρασίας του εδάφους είναι κρίσιμη για τη σταθεροποίηση των πλαγιών και τον σχεδιασμό των υποδομών που βρίσκονται σε πλαγιές προς αποφυγή κατολισθήσεων.^[75]

Υπάρχουν σημαντικοί αρχαιολογικοί χώροι στους οποίους χρησιμοποιούνται τα μοντέλα πρόβλεψης θερμοκρασίας για τη διατήρηση των αρχαιολογικών ευρημάτων. Η θερμοκρασία του εδάφους επηρεάζει τη ταχύτητα φθοράς αυτών των ευρημάτων και η πρόβλεψη της βοηθά στη λήψη μέτρων για την προστασία τους (π.χ. προστατευτικές κατασκευές, χρήση υλικών συντήρησης).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Εθνικός Ενεργειακός Σχεδιασμός - Οδικός χάρτης για το 2050 (2012), retrieved from: <http://www.opengov.gr/minenv/wp-content/uploads/downloads/2012/04/energeiakos-sxediasmos.pdf>
2. Αξαρχή, Κ., (2009), Ενεργειακός σχεδιασμός και ενεργειακή απόδοση κτιρίων - Γενικές αρχές του βιοκλιματικού σχεδιασμού, Σημειώσεις για το μικρής διάρκειας σεμινάριο του Τμήματος Κεντρικής Μακεδονίας του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας με γενικό τίτλο «Ενεργειακός σχεδιασμός νέων και υφιστάμενων κτιρίων»
3. ΚΑΠΕ - Εξοικονόμηση Ενέργειας Ενεργειακή αποδοτικότητα και ορθολογική χρήση ενέργειας (n.d.), retrieved from: <http://www.cres.gr/services/istos.chtm?prnbr=25338&locale=el>
4. Ιωάννου, Θ., (2010), Αειφόρος και οικιστική ανάπτυξη: η συμβολή του περιβαλλοντικού σχεδιασμού: εφαρμογή σε πρότυπο οικισμό, Διδακτορική Διατριβή, σελ. 139-141
5. Esau, R., Jungclaus, M., Olgyay V., Rempher A., (2021), Reducing Embodied Carbon in Buildings: Low-Cost, High-Value Opportunities, RMI
6. Chen, L., Huang, L., Hua, J. et al., (2021), Green construction for low-carbon cities: a review, Environmental Chemistry Letters 21, pp. 1627-1657
7. Santamouris, M., Asimakopoulos, D., (1996). Passive Cooling of Buildings, James & James, pp. 360-392
8. Γεωθερμικές Αντλίες Θερμότητας (n.d.), retrieved from: <https://www.idealklima.gr/katoikia/antlies-thermotitas-geothermikes/>
9. 8 Benefits of a Geothermal Heating & Cooling System - Indoor Air Quality, Inc. (n.d.), retrieved from <https://iaqcolorado.com/blog/8-benefits-geothermal-heating-cooling-system/>
10. Omićević, N. , Zaninović T. et al, (2024), Integrating Underground Space into the Landscape Resilience Concept Buildings 2024, 14(8), pp. 2406
11. Dong, X., Soebarto, V., & Griffith, M. (2014). Achieving thermal comfort in naturally ventilated rammed earth houses, Building and Environment, 82, pp. 588–598.

12. Everett Jaeger, Earth-Sheltered Home: An Eco-Friendly, Passive Housing Alternative • Insteading (2023, 5 Σεπτεμβρίου) retrieved from: <https://insteading.com/blog/earth-sheltered-homes/>
 13. Efficient Earth-Sheltered Homes, (n.d.), retrieved from: <https://www.energy.gov/energysaver/efficient-earth-sheltered-homes>
 14. Jingwen, X., (1998), A Comparative Study Between Excavated Dwellings In China and Greece, Ph.D Thesis, pp. 1-30
 15. Papada, L., Katsoulakos, N., Kaliampakos D., (2016), Fighting Energy Poverty by Going Underground, Procedia Engineering, Volume 165, pp. 49-57
 16. Καστανίδου Π., (2017), Φυσικό φως, αρχιτεκτονική και υπόσκαφα κτίρια, ερευνητική εργασία
 17. Alkaff, S., Sim, S.C., Efzan, E., (2016), A review of underground building towards thermal energy efficiency and sustainable development, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 60, pp. 692-713
 18. We're Tourist Jordan, the Jordan tours & travel experts, (n.d.), retrieved from: <https://www.touristjordan.com/>
 19. Vardzia, (n.d.), retrieved from: <https://www.enjoy-georgia.com/en/georgia/samtskhe-javakheti/vardzia.html>
 20. About Attraction Vardzia Historical-Architectural Museum-Reserve,(n.d.), retrieved from: <https://www.georgianholidays.com/attraction/museums-in-regions/vardzia-architectural-museum-reserve>
 21. Negro, E., Cardinale, T., Cardinale, N., Rospi, G., (2016), Italian Guidelines for Energy Performance of Cultural Heritage and Historical Buildings: The Case Study of the Sassi of Matera, Energy Procedia, Volume 97, pp. 7-14
 22. Matera, a UNESCO World Heritage Site: the city of stones and rock churches, (n.d.), retrieved from: <https://www.italia.it/en/basilicata/matera/things-to-do/matera-the-sassi>
 23. I Sassi di Matera “Habitation Experience“, (n.d.), retrieved from: <https://www.sextantio.it/en/legrottedellacivita/matera-typical-cave-dwellings/>
 24. The Church of St. George in Lalibela, Ethiopia (n.d.), retrieved from: <https://www.reddit.com/media?url=https%3A%2F%2Fpreview.redd.it%2Fthe-church-of-st->
- Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Τομέας Ενέργειας, Αερονautικής και Περιβάλλοντος 51

- george-in-lalibela-ethiopia-v0-wbc6z9orza1c1.jpg%3Fwidth%3D640%26crop%3Dsmart%26auto%3Dwebp%26s%3D4b4db4ebdfd26d1ca6ac0640c4274bdfdf3777ba&rdt=52489
25. Νέος Οικοδομικός Κανονισμός ν. 4067/12, Φ.Ε.Κ. 79/Α/9-4-12
26. Earth Shelter, (n.d.), retrieved from <https://dahp.wa.gov/historic-preservation/historic-buildings/architectural-style-guide/earth-shelter>
27. Jidefor, A., (2012), Earth Shelters; A Review of Energy Conservation Properties in Earth Sheltered Housing. Energy Conservation. InTech.
28. Hassan, H., & Sumiyoshi, D. (2018). Earth-sheltered buildings in hot-arid climates: Design guidelines. Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences, 7(4), 397–406.
29. Agrawal, K. K., Misra, R., Das Agrawal, G., Bhardwaj, M., Jamuwa, D. K., (2019), The state of art on the applications, technology integration, and latest research trends of earth-air-heat exchanger system, Geothermics, Volume 82, pp. 34-50.
30. Γεωεναλλάκτης εδάφους – αέρα (2019, 13 Δεκεμβρίου 2023), retrieved from <https://nikolaospsarras.com/geoenallaktis-edafos-aera/>
31. Mihalakakou, G., Souliotis, M., Papadaki, M., Halkos, G., Paravantis, J., Makridis, S., Papaefthimiou, S., (2022), Applications of earth-to-air heat exchangers: A holistic review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 155, 111921.
32. Ahmed, S. F., Amanullah, M. T. O., Khan, M. M. K., Rasul, M. G., & Hassan, N. M. S. (2016). Parametric study on thermal performance of horizontal earth pipe cooling system in summer. Energy Conversion and Management, 114, pp. 324–337.
33. Kaushal, M. (2017). Geothermal cooling/heating using ground heat exchanger for various experimental and analytical studies: Comprehensive review. Energy and Buildings, 139, pp. 634–652.
34. Peretti, C., Zarrella, A., de Carli, M., & Zecchin, R. (2013). The design and environmental evaluation of earth-to-air heat exchangers (EAHE). A literature review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 28, pp. 107–116
35. Agrawal, K. K., Agrawal, G. das, Misra, R., Bhardwaj, M., & Jamuwa, D. K. (2018). A review on effect of geometrical, flow and soil properties on the performance of Earth air tunnel heat exchanger, Energy and Buildings, 176, pp. 120–138.

36. Singh, R., Sawhney, R. L., Lazarus, I. J., & Kishore, V. V. N. (2018). Recent advancements in earth air tunnel heat exchanger (EATHE) system for indoor thermal comfort application: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, pp. 2162–2185.
37. Mihalakakou, G., Santamouris, M., & Asimakopoulos, D. (1994). Use of the ground for heat dissipation, *Energy*, 19(1), pp 17–25.
38. Khachine, H., Ouahabi, M. H., Taoukil, D., (2024), Improvement of earth-to-air heat exchanger performance by adding cost-efficient soil. *Energy Exploration & Exploitation*, vol 42(2), pp. 589–602
39. Abbaspour-Fard, M. H., Gholami, A., & Khojastehpour, M. (2011). Evaluation of an Earth-to-Air Heat Exchanger for the North-East of Iran with Semi-Arid Climate, *International Journal of Green Energy*, 8(4), pp. 499–510.
40. Ali, M. H., Kurjak, Z., Beke J., (2024), Estimating the impact of the thermo-physical properties of the multilayer soil on earth-air heat exchanger system performance, *International Journal of Thermofluids*, Volume 23, 100722
41. Popiel, C.O., Wojtkowiak, J., Biernacka B., (2001) Measurements of temperature distribution in ground, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Volume 25, Issue 5, pp. 301-309
42. Popiel, C.O., Wojtkowiak, J., Temperature distributions of ground in the urban region of Poznan City, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Volume 51, 2013, pp. 135-148,
43. Singh, B., Cattle, S.R., Field, D.J., (2014), *Edaphic Soil Science*, Introduction to, *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*, Academic Press, pp. 35-58
44. Onwuka B, Mang B., (2018), Effects of soil temperature on some soil properties and plant growth, *Adv Plants Agric Res*, 8(1), 34-37
45. Rattan Lal, Manoj K. Shukla, (2004), *Principles of Soil Physics*, Marcel Decker
46. Hillel, D., (2003), *Introduction to Environmental Soil Physics*, Academic Press
47. Smits, K.M., Sakaki, T., Limsuwat, A., Illangasekare, T. H., (2010), Thermal conductivity of sands under varying moisture and porosity in drainage-wetting cycles, *Vadose Zone journal*, 9(1), pp. 172-180
48. Kukkonen, I.T., Peltoniemi, S., (1998), Relationships between thermal and other properties of rocks in Finland, *Physics and Chemistry of the Earth*, 23(3), pp. 341-349

49. Smerdon, J.E., Stieglitz, M., (2006), Simulating heat transport of harmonic temperature signals in the Earth's shallow subsurface: Lower-boundary sensitivities, *Geophysical Research Letters*, 33(14), American Geophysical Union (AGU)
50. Van Bavel, C.H.M., Hillel, D.I., (1976), Calculating potential and actual evaporation from a bare soil surface by simulation of Concurrent flow of water and heat, *Agricultural Meteorology*, Volume 17, Issue 6, Pages 453-476,
51. Thibodeaux L.J, (1979), *Chemodynamics: Environmental Movement of Chemicals in Air, Water and soil*, John Wiley & Sons, New York
52. Ασημακόπουλος, Δ. Κ., Λυγερού, Β. Ι., Αραμπατζής Γ. Κ., (2012), Μεταφορά μάζας και θερμότητας, *Παπασωτηρίου*
53. Suzuki, S., (1960), Percolation measurements based on heat flow through soil with special reference to paddy fields, *J. Geophys. Res* 65(9), pp. 2883-2885
54. A. Michopoulos, K.T. Papakostas, Th. Mavrommatis, N. Kyriakis, Comparative assessment of eight models predicting the ground temperature, *JP Journal of Heat and Mass Transfer* 4 (2) (2010) 119–135
55. De Paepe M., (2001), Earth-air heat exchangers in the Belgian climate: analysis of the potential with a 3D modeling technique, in: *International Energy Agency, Energy Conservation in Buildings & Community Systems Programme, 22nd Annual Conference*, Bath, UK
56. Williams, P.J., Smith M.W., (1989) *The frozen earth: Fundamentals of geocryology*. Cambridge University Press; New York
57. Taniguchi, M., Shimada, J., Tanaka, T, Kayane, I., Sakura, Y., Shimano, Y., Dapaah-Siakwan S., Kawashima, S., (1999), Disturbances of temperature-depth profiles due to surface climate change and subsurface water flow: 1. An effect of linear increase in surface temperature caused by global warming and urbanization in the Tokyo Metropolitan Area, Japan, *Water Resources Research*, Volume 35, Issue 5, pp. 1507-1517
58. Carslaw, H.S., Jaeger, J.C., (1959). *Conduction of heat in solids*. Clarendon Press, Oxford, pp. 520

-
59. Moreland, F. L., An alternative to suburbia, Proc. of Conf. on Alternatives in Energy Conservation: The Use of Earth-covered Buildings, Fort Worth, Texas, July 9 - 12, 1975, U.S. Govt. Printing Office, 1976, pp. 203 - 204.
60. Fluker, B.J., (1958), Soil temperatures, Soil Sci., (July/Dec.), pp. 35 - 46.
61. Yener, D., Ozgener, O., Ozgener, L., (2017), Prediction of soil temperatures for shallow geothermal applications in Turkey, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 70, pp. 71-77
62. Kusuda, T., Achenbach, P., (1965), Earth temperature and thermal diffusivity on at selected stations in the united states. ASHRAE Trans, 71, pp. 61–75.
63. S. Baggs, (1983), Remote prediction of ground temperature in Australian soils and mapping its distribution, Solar Energy, 30, 351–366.
64. Popiel, C.O., Wojtkowiak, J., Biernacka, B., (2001), Measurements of temperature distributions in ground, Experimental Thermal and Fluid Science, 25, pp. 301–309
65. Popiel C.O., Wojtkowiak J., (2013), Temperature distributions of ground in the urban region of Poznan City, Experimental Thermal and Fluid Science, Volume 51, pp. 135-148
66. Florides, G, Kalogirou, S., (2007). "Ground heat exchangers - A review of systems, models and applications," Renewable Energy, vol. 32(15), pp. 2461-2478.
67. Pinel, P., Cruickshank, C.A., Beausoleil-Morrison, I., Wills, A., (2011), A review of available methods for seasonal storage of solar thermal energy in residential applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 15, Issue 7, pp 3341-3359
68. Grzegorz, N., Sokołowski, P., (2019). Building–Soil Thermal Interaction: A Case Study. Energies. 12. 2922
69. Perpar M., Rek Z., Bajric S., Zun I., (2012), Soil thermal conductivity prediction for district heating pre-insulated pipeline in operation, Energy, Volume 44, Issue 1, pp 197-210
70. Perpar, M.; Rek, Z. The Ability of a Soil Temperature Gradient-Based Methodology to Detect Leaks from Pipelines in Buried District Heating Channels. Energies 2021, 14, 5712
71. García-García, A., Cuesta-Valero, F.J., Miralles, D.G. et al, (2023), Soil heat extremes can outpace air temperature extremes. Nat. Clim. Chang. 13, 1237–1241

-
72. Kandasamy, J., Xue, Y., Houser, P., Maggioni, V, (2023), Performance of Different Crop Models in Simulating Soil Temperature, *Sensors*, 23, 2891
73. Dempsey, B.J., & Thompson, M.R. (1970). A Heat Transfer Model For Evaluating Frost Action And Temperature-Related Effects In Multilayered Pavement Systems. *Highway Research Record*.
74. Tabrizi S. E., Xiao K., Van Griensven Thé. J., Saad. M.,. Farghaly. H, Yang S. X., Gharabaghi B., (2021), Hourly road pavement surface temperature forecasting using deep learning models, *Journal of Hydrology*, Volume 603, Part A, 126877
75. Kelishadi, H., Mosaddeghi, M.R., Ayoubi, S., Mamedov, A.I., (2018), Effect of temperature on soil structural stability as characterized by high energy moisture characteristic method, *CATENA*, Volume 170, p H. Kelishadi, M.R. Mosaddeghi, S. Ayoubi, A.I. Mamedov,
76. Hollesen, J., Matthiesen, H., Elberling, B., (2017). The Impact of Climate Change on an Archaeological Site in the Arctic, *Archaeometry*, 59.