



**ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΓΕΝΙΚΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ  
ΘΕΤΙΚΕΣ ΕΠΙΣΤΗΜΕΣ ΣΤΗ ΓΕΩΠΟΝΙΑ**

**ΚΛΑΔΟΣ ΙΙ: ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΚΑΙ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΓΙΑ ΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ  
ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία με τίτλο:

**« ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΕΛΑΦΟΥΣ »**

**ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ Σ. ΚΟΥΤΕΛΙΔΑ**  
Γεωπόνος

Επιβλέπων καθηγητής: Τσίρος Ιωάννης

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2010

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία με τίτλο:  
**« ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΕΛΑΦΟΥΣ »**

ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ Σ. ΚΟΥΤΕΛΙΔΑ  
Γεωπόνος

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΤΣΙΡΟΣ Ι., ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Γ.Π.Α.  
ΜΕΛΗ: ΧΡΟΝΟΠΟΥΛΟΥ-ΣΕΡΕΛΗ Α., ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ Γ.Π.Α.  
ΠΑΥΛΟΠΟΥΛΟΣ Α., ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Γ.Π.Α.  
ΑΛΒΕΡΤΟΣ Ν., ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Γ.Π.Α.  
ΨΥΛΟΓΛΟΥ Β., ΚΥΡΙΟΣ ΕΡΕΥΝΗΤΗΣ Ε.Α.Α.

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή ειδίκευσης με θέμα:

*«Ανάλυση και εκτίμηση θερμοκρασιών εδάφους»*

εκπονήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών του Γενικού Τμήματος του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών, «Γεωλογικό και Ατμοσφαιρικό περιβάλλον για το σχεδιασμό έργων υποδομής».

Η εργασία εστιάζει στην κλιματική ανάλυση των θερμοκρασιών εδάφους και συγκεκριμένα στην κλιματολογία των θερμοκρασιών εδάφους σε διάφορα βάθη την περίοδο 1992-2008 του αυτοματοποιημένου σταθμού του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (Ε.Α.Α.) στο Θησείο. Γίνεται επίσης μία προσπάθεια εφαρμογής ενός μοντέλου για την πρόβλεψη θερμοκρασιών επιφάνειας γυμνού εδάφους και θερμοκρασιών εδάφους σε διάφορα βάθη με την χρήση μετεωρολογικών δεδομένων (ύψος βροχής, θερμοκρασία αέρα, ταχύτητα αέρα και ολική ηλιακή ακτινοβολία).

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες προς τον Επίκουρο Καθηγητή Ι. Τσίρο επιβλέποντα της εν λόγω διατριβής ειδίκευσης, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, και για την άριστη συνεργασία και για την καθοδήγηση που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της. Επίσης, ιδιαίτερες ευχαριστίες επιθυμώ να εκφράσω στον ερευνητή του Ε.Α.Α. κ. Β. Ψυλόγλου, Κύριο Ερευνητή του Ινστιτούτου Ερευνών Περιβάλλοντος και Βιώσιμης Ανάπτυξης (Ι.Ε.Π.Β.Α.), του Ε.Α.Α. για την ουσιαστική βοήθειά του και την συμμετοχή του στο τμήμα της κλιματικής ανάλυσης των δεδομένων καθώς επίσης και για την άριστη συνεργασία που είχα μαζί του.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Καθηγήτρια κ. Αικατερίνη Χρονοπούλου-Σερελή, τον Καθηγητή κ. Ανδρέα Παυλόπουλο και τον Επίκουρο Καθηγητή Νίκο Αλβέρτο για την συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή

Αθήνα, Ιούνιος 2010

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η θερμοκρασία εδάφους και οι διακυμάνσεις της επιδρούν στον καθορισμό των φυσικών διεργασιών του εδάφους ενώ ταυτόχρονα αποτελούν, σημαντική παράμετρο για την ύπαρξη και την διατήρηση των δασικών και γεωργικών οικοσυστημάτων, μέσω χημικών και βιολογικών διεργασιών όπως η βλάστηση των σπόρων, η ανάπτυξη των φυταρίων, η αύξηση και η μορφολογία των ριζών, η πρόσληψη θρεπτικών συστατικών και η μικροβιακή δραστηριότητα. Επίσης, στα πλαίσια των περιβαλλοντικών επεκτάσεων της Αγρομετεωρολογίας, η γνώση της θερμοκρασίας εδάφους αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τη διερεύνηση διεργασιών που υφίστανται οι δραστικές ουσίες φυτοπροστατευτικών, καθώς και για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των διαφόρων τεχνικών απολύμανσης των παράσιτων και παθογόνων στα καλλιεργήσιμα εδάφη. Τέλος η θερμοκρασία του εδάφους αποτελεί επίσης, σημαντική παράμετρο για εφαρμογές βιοκλιματικού σχεδιασμού, όπως η παθητική θέρμανση και ψύξη κτιρίων και θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανάλυση και η εκτίμηση των θερμοκρασιών εδάφους. Για την ανάλυση αξιοποιήθηκαν οι διαθέσιμες μετρήσεις της θερμοκρασίας του εδάφους του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, για την περίοδο 1991-2008, για την αξιολόγηση των ακόλουθων θερμοκλιματικών χαρακτηριστικών του εδάφους: το πλάτος των εποχιακών διακυμάνσεων της θερμοκρασίας αυτού μέχρι το βάθος των 1.2 μέτρων, η χρονική επιβράδυνση του θερμοκρασιακού κύματος και η χρονική απόκλιση κατά την εμφάνιση των μεγίστων και ελαχίστων θερμοκρασιών στα διάφορα βάθη.

Η εκτίμηση γίνεται με την χρήση ενός αριθμητικού μοντέλου. Το μοντέλο περιλαμβάνει την προσομοίωση της θερμοκρασίας επιφάνειας για την εκτίμηση του ανώτερου ορίου της, με χρήση της βασικής εξίσωσης του ενεργειακού ισοζυγίου στην διαχωριστική επιφάνεια ατμόσφαιρας-εδάφους και την προσομοίωση της θερμοκρασίας εντός της εδαφικής κατατομής έχοντας ως βάση την μονοδιάστατη μερική διαφορική εξίσωση θερμικής ροής στο έδαφος. Η προσομοίωση γίνεται με χρονικό βήμα 1 ημέρας. Για την εφαρμογή του μοντέλου χρησιμοποιούνται ημερήσια δεδομένα από τον αυτόματο σταθμό του Ε.Α.Α. στο Θησείο και τα οποία χρησιμοποιούνται ως είσοδοι του μοντέλου. Με σκοπό την εκτίμηση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων του μοντέλου, εφαρμόστηκε ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2$ . Λαμβάνοντας υπόψιν τα αποτελέσματα συμπεραίνεται ότι το μοντέλο προσομοιώνει επαρκώς την κατανομή των θερμοκρασιών εδάφους.

## ABSTRACT

Soil temperature and variations affect the determination of natural processes of soil, while at the same time they are considered as an important factor in the existence and conservation of forest and agricultural ecosystems, through chemical and biological processes such as seed germination, seedling growth, roots development and morphology, uptake of nutrients and microbial activity. Concerning the environmental extensions of Agrometeorology, the knowledge of soil temperature is crucial in the investigation of processes undergoing in pesticides and the evaluation of the effectiveness of various temperature is an important parameter for bioclimatic design applications, such as passive heating and cooling of buildings as well as agriculture greenhouses.

The aim of the present study is the analysis and the prediction of soil temperatures. For the purpose of analysis, the available ground temperature measurements of National Observatory of Athens (N.O.A.) for the period 1991 until 2008 were used for the evaluation of the following thermal soil characteristics: the amplitude of the seasonal changes in soil temperatures up to 1.2 m depth, the retardation in time of the temperature wave, and the time lags of the maximum and minimum temperatures for various depths.

For the prediction a numerical model was used. The model simulates the surface temperature in order to estimate its upper boundary, by using the basic equation of energy balance at the atmosphere-soil interface, as well as the temperature in the soil profile, based on the one dimensional differential soil heat flow ground equation. The simulation occurs on a daily time step. The application of the model used daily data from the automatic station E.A.A. at Thissio (Athens Greece), in order to be used as input data to the model. In order to evaluate the reliability of the model's results, the determination coefficient  $R^2$  was used. Considering the results, it is concluded that the model simulates the distribution of soil temperature adequately.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ .....</b>	<b>4</b>
2.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΕΔΑΦΟΥΣ .....	4
2.2 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΕΔΑΦΟΥΣ.....	6
<b>3: ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ .....</b>	<b>11</b>
3.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΕΔΑΦΟΥΣ.....	11
3.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	12
3.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ & ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΔΑΦΙΚΗ ΚΑΤΑΤΟΜΗ.....	18
3.4 ΑΡΧΙΚΕΣ-ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ & ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	19
<b>4. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ.....</b>	<b>21</b>
<b>5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ .....</b>	<b>29</b>
5.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΕΔΑΦΟΥΣ .....	29
5.1 <i>1Ετήσια Διακύμανση Θερμοκρασίας</i> .....	29
5.1.2 <i>Ημερήσια Διακύμανση Θερμοκρασίας</i> .....	45
5.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ .....	59
5.2.1 <i>Εκτίμηση Παραμέτρων Μοντέλου</i> .....	59
5.2.2 <i>Σύγκριση και Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων</i> .....	59
<b>6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>68</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>69</b>

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η θερμοκρασία εδάφους και οι μεταβολές της στο χώρο και το χρόνο είναι πολύ σημαντικές για τον καθορισμό των φυσικών διεργασιών του εδάφους όπως η εξάτμιση και ο αερισμός, των χημικών αντιδράσεων και της ανταλλαγής ενέργειας και μάζας με την ατμόσφαιρα (Luo et al., 1992). Η θερμοκρασία εδάφους αποτελεί σημαντική παράμετρο για την ύπαρξη και την διατήρηση των δασικών και γεωργικών οικοσυστημάτων, μέσω χημικών και βιολογικών διεργασιών όπως η βλάστηση των σπόρων, η ανάπτυξη των φυταρίων, η αύξηση των ριζών και η μικροβιακή δραστηριότητα. (Stathers et al., 1985; Bhatti et al., 2000; Hillel 2004).

Τα φυτά μπορούν να ανταπεξέλθουν σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών εδάφους χωρίς να παρουσιάζουν ζημιές. Όμως οι χρονικά και χωρικά μεταβαλλόμενες θερμοκρασίες του εδάφους είναι υπεύθυνες για τις σημαντικές διαφορές όσον αφορά την ανάπτυξη και την παραγωγικότητα των φυτών (McMichael and Quisenberry, 1993; McMichael and Burke, 1998). Μικρές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του εδάφους επηρεάζουν δυσμενώς την ανάπτυξη και την επιβίωση των νεαρών κωνοφόρων δενδρυλλίων (Stathers et al., 1985; Bakisky and Burton, 1995), την βλαστική ικανότητα των σπόρων και την καταστροφή των σποροφύτων από προσβολές παθογόνων οργανισμών (Oliver et al., 1986; McMichael et al., 1996). Ο χρόνος βλάστησης των σπόρων μειώνεται και η ανάπτυξη των φυτών επιταχύνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του εδάφους (Bowen, 1991). Η επίδραση των μεταβολών της θερμοκρασίας του εδάφους σε σχέση με την ανάπτυξη του ριζικού συστήματος και την μορφολογία του έχει τεκμηριωθεί για ποικίλες καλλιέργειες, συμπεριλαμβανομένων των: κριθάρι, καλαμπόκι, φασόλια, βρώμη και βαμβάκι (Power et al., 1970; Matthews & Hayes, 1982; Kaspar and Bland, 1992; Nabi and Mullins, 2007). Όπως προκύπτει από μελέτες, υφίσταται μια βέλτιστη θερμοκρασία για την μέγιστη αύξηση των ριζών. Γενικά, η ανάπτυξη των ριζών τείνει να αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας εδάφους μέχρι την βέλτιστη τιμή αυτής ενώ, παρατηρείται μείωση για τιμές ανερχόμενες αυτής. Επίσης θετικά σχετίζεται και ο αριθμός των διακλαδώσεων και η δημιουργία ριζιδίων (Barney 1951; Kaspar and Bland, 1992; McMichael and Quisenberry 1993; McMichael et al., 1996). Η ανάπτυξη αυτή επηρεάζει και καθορίζει την ανάπτυξη του υπέργειου τμήματος του φυτού (βιομάζα). Η βιομάζα αυξάνει με την αύξηση της θερμοκρασίας του εδάφους μέχρι να επέλθει στην βέλτιστη θερμοκρασία (Matthews & Hayes, 1982; Clarkson et al., 1986; DeLucia et al., 1992, Domisch et al., 2001, Nabi and Mullins, 2007).

Η θερμοκρασία εδάφους στην ζώνη ανάπτυξης των ριζών εκτός από την ανάπτυξη και την μορφολογία του ριζικού συστήματος και την κατανομή της βιομάζας προκαλεί αλλαγές

και στην φυσιολογία των φυτών, μέσω των διεργασιών της στοματικής αγωγιμότητας και της φωτοσύνθεσης, επηρεαζόμενες από την απορρόφηση του νερού (Barney 1951 ; Xu and Huang, 2000; Boucher et al., 2001). Επιπρόσθετα η πρόσληψη θρεπτικών συστατικών και επομένως και η θρεπτική κατάσταση του φυτού επηρεάζεται από την θερμοκρασία του εδάφους (Power et al., 1970; Clarkson and Warner 1979; Clarkson et al., 1986; White et al., 1987; Karlsson and Nordell 1996; Dong et al., 2001)

Επιπλέον, διαπιστώνεται ότι οι υψηλές τιμές της θερμοκρασία του εδάφους συμβάλουν στην αποτελεσματικότητα των διαφόρων τεχνικών απολύμανσης των παράσιτων και παθογόνων στα καλλιεργήσιμα εδάφη. (Stevenson,1959; Ausher et al. 1975; Katan et al. 1976; Garofalakis et al.,2006)

Επίσης, στα πλαίσια των περιβαλλοντικών επεκτάσεων της Αγρομετεωρολογίας, η γνώση της θερμοκρασίας εδάφους αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τη διερεύνηση διεργασιών που υφίστανται οι δραστικές ουσίες φυτοπροστατευτικών. Τέτοιες διεργασίες είναι κατά κύριο λόγο η εξάτμιση πτητικών και ημιπτητικών ουσιών από το έδαφος καθώς επίσης και η βιοαποδόμηση. Και οι δυο έχουν αποδειχθεί ότι είναι σημαντικές διεργασίες απομάκρυνσης των φυτοφαρμάκων από το έδαφος (USDA, 1992; Hetrick et al., 1989; Brown and Boutwell, 1986 et al).

Τις τελευταίες δεκαετίες η θερμοκρασία του εδάφους αποτελεί επίσης, σημαντική παράμετρο για εφαρμογές βιοκλιματικού σχεδιασμού, όπως η παθητική θέρμανση και ψύξη κτιρίων και θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων. Η γνώση της κατανομής και της διακύμανσης της θερμοκρασίας εδάφους σε διάφορα βάθη απαιτείται για την αξιολόγηση του ενεργειακού δυναμικού του εδάφους, την αποτελεσματικότητα διαφόρων μέσων ανταλλαγής θερμότητας μεταξύ εδάφους και αέρα (π.χ. υπεδάφειες σωληνώσεις) και για τον υπολογισμό της θερμικής συμπεριφοράς των κτιριακών και θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων που βρίσκονται σε άμεση επαφή με το έδαφος (Givoni and Katz, 1985; Stantamouris et al.,1995; Jacovides et al., 1996; Mihalakakou et al., 1997; Mihalakakou, 2002; Florides and Kalogirou, 2004).

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανάλυση και η εκτίμηση των θερμοκρασιών εδάφους.

Για την ανάλυση αξιοποιήθηκαν οι διαθέσιμες μετρήσεις θερμοκρασιών του εδάφους σε διάφορα βάθη, του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών για την εκτίμηση των ακόλουθων θερμικών χαρακτηριστικών του εδάφους: του πλάτους των εποχιακών διακυμάνσεων της θερμοκρασίας αυτού μέχρι το βάθος των 12 m, της χρονικής υστέρησης του θερμοκρασιακού κύματος και της χρονικής απόκλισης κατά την εμφάνιση των μεγίστων και ελαχίστων θερμοκρασιών στα διάφορα βάθη.

Στην περίπτωση της εκτίμησης γίνεται χρήση ενός αριθμητικού μοντέλου. Το μοντέλο περιλαμβάνει την προσομοίωση της θερμοκρασίας επιφάνειας για την εκτίμηση του ανώτερου ορίου της (upper boundary), με χρήση της βασικής εξίσωσης του ενεργειακού



ισοζυγίου στην διαχωριστική επιφάνεια ατμόσφαιρας-εδάφους και την προσομοίωση της θερμοκρασίας εντός της εδαφικής κατατομής έχοντας ως βάση την μονοδιάστατη μερική διαφορική εξίσωση θερμικής ροής στο έδαφος. Η προσομοίωση γίνεται με χρονικό βήμα 1 ημέρας. Το μοντέλο αυτό είναι υπομοντέλο του αγρομετεωρολογικού μοντέλου Pesticide Root Zone Model (PRZM).

Τα κεφάλαια που ακολουθούν αφορούν:

Κεφ. 2: Σύντομη ανασκόπηση της βιβλιογραφίας όσον αφορά στην ανάλυση των θερμοκρασιών εδάφους και στα χαρακτηριστικά μοντέλα θερμοκρασίας εδάφους που αναπτύχθηκαν.

Κεφ. 3: Περιγραφή του αριθμητικού μοντέλου (προσομοίωση της θερμοκρασίας επιφάνειας του εδάφους, παραμετροποίηση, προσομοίωση της ροής θερμότητας και θερμοκρασίας στην εδαφική κατανομή) των αρχικών- οριακών συνθηκών καθώς και της αριθμητικής επίλυσης των εξισώσεων αυτού.

Κεφ. 4: Συνοπτική περιγραφή των αισθητήρων που χρησιμοποιήθηκαν για την λήψη των δεδομένων, καθώς και του λεπτομερειακού ποιοτικού ελέγχου που υπέστησαν για τον εντοπισμό λαθών και την απομάκρυνση τυχόν εσφαλμένων τιμών.

Κεφ. 5: Ανάλυση των θερμοκρασιών εδάφους, παρουσιάζοντας την ετήσια όσο και την ημερήσια διακύμανση των θερμοκρασιών εδάφους για τις δύο ομάδες θερμομέτρων (άμεσης επαφής και σε μεταλλικά κύπελλα). Παρουσίαση των αποτελεσμάτων του αριθμητικού μοντέλου.

Κεφ. 6: Συμπεράσματα της μελέτης.

## 2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

### 2.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΕΛΑΦΟΥΣ

Λαμβάνοντας υπόψη τις τρίωρες παρατηρήσεις (08:00, 14:00 και 21:00 LST) της θερμοκρασίας του εδάφους μιας δεκαπενταετίας (1911-1925), και τις αντίστοιχες της θερμοκρασίας αέρα από το Ε.Α.Α., ο Μαριολόπουλος (1928) έβγαλε τα ακόλουθα συμπεράσματα σχετικά με τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του εδάφους στην επιφάνεια και στα διάφορα βάθη.

- *Γυμνό έδαφος.*

Η μέση ετήσια διακύμανση της θερμοκρασίας του γυμνού εδάφους παρουσιάζει μέγιστη τιμή τον μήνα Ιούλιο και ελάχιστη το μήνα Ιανουάριο. Οι τιμές αυτές παρατηρούνται ακριβώς την περίοδο των αντίστοιχων ακραίων τιμών της θερμοκρασίας του αέρα. Η καμπύλη της ετήσιας πορείας της θερμοκρασίας του γυμνού εδάφους παρακολουθεί αυτή του αέρα, αν και οι τιμές τις τελευταίας είναι χαμηλότερες κυρίως κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.

Η μέση ετήσια θερμοκρασία του γυμνού εδάφους είναι μεγαλύτερη κατά 2.69 °C της αντίστοιχης μέσης του αέρα.

- *Βάθος 0.30 m*

Η ημερήσια μεταβολή της θερμοκρασία στο βάθος αυτό είναι μικρή και δεν ξεπερνά τον 1°C. Το ημερήσιο μέγιστο παρατηρείται τις απογευματινές ώρες, δηλαδή αρκετές ώρες αργότερα του μεγίστου της επιφάνειας, λόγω της βραδύτητας με την οποία η θερμοκρασία προχωρεί προς το εσωτερικό του εδάφους, συμβαίνει τις απογευματινές ώρες, δηλαδή αρκετές ώρες αργότερα του μεγίστου της επιφάνειας. Το ημερήσιο ελάχιστο συμβαίνει επίσης μετά από το αντίστοιχο της επιφάνειας.

Οι μηνιαίες μέσες θερμοκρασίες στο βάθος αυτό είναι ανώτερες εκείνων της επιφάνειας του εδάφους κατά τους μήνες Ιανουάριο, Φεβρουάριο, Οκτώβριο, Νοέμβριο και Δεκέμβριο, ενώ κατά τους σχετικά θερμότερους μήνες είναι κατώτερες.

Η μέση ετήσια θερμοκρασία στο βάθος αυτό είναι μικρότερη εκείνης στην επιφάνεια του γυμνού εδάφους κατά 1.18 °C.

- *Βάθος 0.60 m*

Στο βάθος αυτό η ημερήσια μεταβολή της θερμοκρασίας, μόλις φτάνει τον μισό βαθμό κελσίου.

Το ημερήσιο μέγιστο και ελάχιστο συμβαίνουν αργότερα των αντίστοιχων στο βάθος των 0.30m.

Οι μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες κατά τους μήνες Ιανουάριο, Φεβρουάριο, Μάρτιο, Οκτώβριο, Νοέμβριο και Δεκέμβριο είναι μεγαλύτερες κατά μέσο όρο κατά  $0.84\text{ }^{\circ}\text{C}$  από εκείνες σε βάθος  $0.30\text{m}$ , ενώ κατά τους υπόλοιπους μήνες είναι μικρότερες κατά  $0.91\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Η μέση ετήσια θερμοκρασία στο βάθος αυτό είναι κατώτερη εκείνης του βάθους  $0.30\text{m}$ , κατά  $0.04\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

- *Βάθος 0.90m*

Εδώ η ημερήσια μεταβολή της θερμοκρασίας της θερμοκρασία όπως προκύπτει από τις τριώρες παρατηρήσεις, είναι σχεδόν ανεπαίσθητη και μόλις φτάνει κατά μέσο όρο τους  $0.17^{\circ}\text{C}$ .

Οι μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες κατά τους μήνες Ιανουάριο, Φεβρουάριο, Μάρτιο, Οκτώβριο, Νοέμβριο και Δεκέμβριο είναι μεγαλύτερες κατά μέσο όρο κατά  $0.81\text{ }^{\circ}\text{C}$  από εκείνες σε βάθος  $0.60\text{m}$ , ενώ κατά τους υπόλοιπους μήνες είναι μικρότερες κατά  $1.14\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Η μέση ετήσια θερμοκρασία στο βάθος των  $0.90\text{m}$  είναι μεγαλύτερη εκείνης των  $0.60\text{m}$  κατά  $0.16^{\circ}\text{C}$ .

- *Βάθος 1.20m*

Η ημερήσια μεταβολή της θερμοκρασίας είναι ανεπαίσθητη και οι παρατηρήσεις γίνονται μόνο την 14:00 ώρα. Από το 1931 γίνονται και στο βάθος αυτό τριώρες παρατηρήσεις κάθε μέρα.

Οι μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες διαφέρουν κατά δέκατα του βαθμού Κελσίου από εκείνες στο  $0.90\text{m}$ . κατά τους ψυχρούς μήνες του έτους (Ιανουάριο, Φεβρουάριο, Μάρτιο, Οκτώβριο, Νοέμβριο και Δεκέμβριο) αυτές είναι μεγαλύτερες, ενώ κατά τους υπόλοιπους μήνες μικρότερες από τις αντίστοιχες στο βάθος των  $0.90\text{m}$ .

Η μέση ετήσια θερμοκρασία στο βάθος αυτό είναι μεγαλύτερη της αντίστοιχης στα  $0.90\text{m}$  κατά  $0.10^{\circ}\text{C}$ . Αυτό ίσως οφείλεται στο ότι, αν και ανεπαίσθητη, εν τούτοις η παρατήρηση μόνο στις 14:00 ώρα δεν αρκεί για τον προσδιορισμό της μέση ημερήσια θερμοκρασίας.

Μετά την αυτοματοποίηση του σταθμού του Ε.Α.Α. στα τέλη του 1990, ο Ψυλόγλου (1992) έχοντας τα δεδομένα των θερμομέτρων άμεσης επαφής, εγκατεστημένων στην επιφάνεια του εδάφους καθώς και σε βάθη 2, 5, 10, 15, 20, 30, 40 και 50 cm καθώς και των θερμομέτρων σε μεταλλικά δοχεία, εγκατεστημένων σε βάθη 0.3, 0.6, 0.9, 1.2 m., κατά τον πρώτο χρόνο λειτουργίας τους (1/1/1991-31/12/1991), διατύπωσε τα εξής συμπεράσματα για τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας εδάφους για τα παραπάνω βάθη.

- *Ετήσια διακύμανση*

Η μέση μηνιαία τιμή στο γυμνό έδαφος εμφανίζεται τον Ιανουάριο και η μέγιστη των Ιούλιο. Παράλληλη ετήσια πορεία διαπιστώνει και όλα τα βάθη μέχρι  $0.50\text{m}$  και για τα δύο είδη θερμομέτρων, όπου ο Ιανουάριος ή ο Φεβρουάριος είναι ο ψυχρότερος μήνας του έτους

ενώ ο Ιούλιος είναι ο θερμότερος για βάθη από 0.02 έως 0.40m, ενώ ο Αύγουστος για τα 0.50 m.

- *Ημερήσια διακύμανση*

Η ημερήσια μεταβολή της θερμοκρασίας εδάφους είναι αισθητή μέχρι το βάθος των 0.30m, ενώ από 0.40m και κάτω είναι σχεδόν ανεπαίσθητη (1 °C). Η θερμοκρασία του εδάφους είναι χαμηλότερη από την θερμοκρασία του αέρα κατά τις πρωινές ώρες και αυξάνεται έως τις πρώτες μεσημβρινές και ελαττώνεται τις απογευματινές. Το ελάχιστο της θερμοκρασίας του εδάφους συμβαίνει λίγο μετά την ανατολή του ηλίου όπως περίπου και στον αέρα.

## 2.2 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΕΔΑΦΟΥΣ

Τρεις κατηγορίες μοντέλων θερμοκρασίας εδάφους έχουν αναπτυχθεί. Τα απλούστερα απολύτως εμπειρικά μοντέλα βασίζονται σε στατιστικές σχέσεις μεταξύ της θερμοκρασίας εδάφους σε κάποιο βάθος και κλιματολογικών και μεταβλητών εδάφους (π.χ. Toy et al., 1978). Τα μοντέλα αυτά είναι εύκολα στην σχεδίαση και χρήση τους, αλλά απαιτούν τεράστιες βάσεις δεδομένων από τις οποίες αναπτύσσονται εμπειρικές σταθερές για κάθε συγκεκριμένη τοποθεσία.

Υπάρχουν μεικτά εμπειρικά-μηχανιστικά μοντέλα που προβλέπουν τη θερμοκρασία σε βάθος εδάφους βασισμένα σε φυσικές αρχές της ροής θερμότητας (Gupta et al., 1981; Wierenga and De Wit, 1970). Σε αυτά τα μοντέλα η θερμοκρασία του ανώτερου ορίου πρέπει να δίνεται ή να εκτιμάται εμπειρικά.

Ο τρίτος τύπος μοντέλων εστιάζει σε φυσικές διεργασίες (ενεργειακό ισοζύγιο ακτινοβολίας και ροές αισθητής, λανθάνουσας και αγωγίμης θερμότητας εδάφους) για την πρόβλεψη της θερμοκρασίας ανώτερου ορίου. Οι van Bavel and Hillel (1976) και Stathers et al. (1985), για παράδειγμα, ασχολήθηκαν με το γυμνό έδαφος, οι Bristow et al. (1986) μελέτησαν μια επιφάνεια με ομοιόμορφη υπολειμματική κάλυψη, ενώ οι Manrogiopoulos et al. (2000), Tjamos (1991), Ross et al. (1985) και Liakatas et al. (1986) μοντελοποίησαν επικαλυμμένες με πλαστικό επιφάνειες.

Διάφορα μοντέλα είναι διαθέσιμα για την πρόβλεψη της θερμοκρασίας εδάφους κάτω από διάφορες συνθήκες της επιφάνειας, αλλά υπάρχουν περιορισμοί στην γενική χρήση των μοντέλων αυτών διότι είτε χρειάζονται μεγάλες βάσεις δεδομένων (οι οποίες δεν είναι διαθέσιμες σε πολλές περιοχές), είτε είναι εμπειρικά και συνεπώς εξαρτώμενα από τα στοιχεία της περιοχής. Γενικά, από την άποψη των απαιτούμενων δεδομένων, τα υπάρχοντα μοντέλα θερμοκρασίας εδάφους σχηματίζουν δυο γενικές ομάδες: (1) εκείνα που απαιτούν λεπτομερείς πληροφορίες πάνω στα χαρακτηριστικά εδάφους και επιφάνειας, αρχικές και οριακές συνθήκες και είσοδο δεδομένων και (2) εκείνα τα οποία συχνά χρησιμοποιούν

πληροφορίες από μετεωρολογικούς σταθμούς, και δεδομένα θερμοκρασίας εδάφους σε ένα βάθος για την ανάπτυξη εμπειρικών σχέσεων.

Για τα δυο πιο μηχανιστικά μοντέλα, οι δυο κύριες συνιστώσες είναι η εκτίμηση των θερμοκρασιών της επιφάνειας του εδάφους (ή του ανώτερου ορίου) και της θερμοκρασίας της εδαφικής κατατομής χρησιμοποιώντας την υπολογιζόμενη ή εκτιμώμενη θερμοκρασία επιφάνειας ως συνθήκη του ανώτερου ορίου. Ας σημειωθεί ότι μερικά μοντέλα χρησιμοποιούν την ίδια διαδικασία για τον υπολογισμό του προφίλ θερμοκρασίας εδάφους (π.χ. Wagenet and Hutson, 1987; Gupta et al., 1981) και διαφέρουν μόνο στις διαδικασίες για τον προσδιορισμό της συνθήκης του επιφανειακού ορίου.

Παρακάτω περιγράφονται συνοπτικά χαρακτηριστικά μοντέλα της βιβλιογραφίας:

Οι Hanks et al. (1971) χρησιμοποίησαν αριθμητική προσέγγιση για την μονοδιάστατη εξίσωση ροής θερμότητας εδάφους. Η μέθοδος αυτή απαιτεί την είσοδο δεδομένων αρχικών και οριακών συνθηκών, καθώς επίσης τιμές της θερμικής αγωγιμότητας και της θερμοχωρητικότητας του εδάφους ως συνάρτηση του βάθους και του χρόνου.

Οι van Bavel and Hillel (1975, 1976) ανέπτυξαν μια δυναμική αριθμητική διαδικασία με σκοπό την σύζευξη των προσομοιώσεων μεταφοράς θερμότητας στο έδαφος και της κατανομής θερμότητας και ενέργειας στην επιφάνεια του εδάφους. Η θερμοκρασία της επιφάνειας του εδάφους,  $T_0$ , υπολογίστηκε ως μια παράμετρος για την πρόβλεψη της εξάτμισης από γυμνό έδαφος με την ταυτόχρονη επίλυση επτά εξισώσεων με επτά αγνώστους. Χρησιμοποιήθηκε μια επαναληπτική διαδικασία σε κάθε ενημέρωση με τα πιο πρόσφατα δεδομένα, για την εύρεση της κατάλληλης θερμοκρασίας επιφάνειας του εδάφους. Οι θερμοκρασίες του εδάφους, στην συνέχεια, εκτιμήθηκαν με την χρήση αυτών των εκτιμήσεων της  $T_0$ , ως συνθήκης του επιφανειακού ορίου, ενώ δεν έγιναν συγκρίσεις μεταξύ προβλεπόμενων και μετρούμενων θερμοκρασιών εδάφους.

Οι Toy et al. (1978) εφάρμοσαν γραμμικά στατιστικά μοντέλα για την εκτίμηση μέσω ετήσιων, εποχιακών και μηνιαίων θερμοκρασιών εδάφους, χρησιμοποιώντας μόνο δεδομένα θερμοκρασίας αέρος. Κατέληξαν σε μια γενική εξίσωση, βασισμένη σε όλους τους μήνες και σε όλους τους σταθμούς δειγματοληψίας καθώς και σε εποχιακές εξισώσεις, ή ακόμα και σε εξισώσεις για μεμονωμένους σταθμούς. Οι αναλύσεις έδειξαν ότι η πρόβλεψη της θερμοκρασίας εδάφους, με σχετικά καλή ακρίβεια, είναι δυνατή χρησιμοποιώντας απλά γραμμικά μοντέλα που βασίζονται αποκλειστικά στη θερμοκρασία του αέρα.

Βασισμένοι στη μεθοδολογία των Hanks et al. (1971), για την ζώνη του ριζικού συστήματος, οι Gupta et al. (1981, 1982, 1983, 1984), ανέπτυξαν ένα μοντέλο για την εκτίμηση της ωριαίας θερμοκρασίας εδάφους με το βάθος από μετεωρολογικά δεδομένα. Τα δεδομένα εισόδου, που απαιτούνται για το μοντέλο αυτό, περιλαμβάνουν την ωριαία θερμοκρασία αέρος στο ύψος των 2m, ημερήσιες μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες εδάφους, αρχική θερμοκρασία εδάφους με το βάθος και την θερμική διαχυτότητα του

εδάφους. Οι θερμοκρασίες ανώτερου ορίου εκτιμώνται από ημιτονοειδή συνάρτηση το πλάτος της οποίας ισούται με την διαφορά ανάμεσα στις ημερήσιες μέγιστες θερμοκρασίες του αέρα και της επιφάνειας του εδάφους ή των ημερήσιων ελάχιστων θερμοκρασιών του αέρα και της επιφάνειας του εδάφους.

Οι Stathers et al. (1985) ανέπτυξαν ένα αριθμητικό μοντέλο βασισμένο σε φυσικές παραμέτρους, με σκοπό την εκτίμηση της χρονικής πορείας της θερμοκρασίας εδάφους σε δασικές αποψιλωμένες περιοχές, χρησιμοποιώντας τη μετρούμενη ροή ηλιακής ακτινοβολίας, τη θερμοκρασία αέρος και την ταχύτητα του ανέμου. Το μοντέλο βασίζεται στην επίλυση της μονοδιάστατης εξίσωσης ροής θερμότητας του εδάφους με βάση τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών με συνθήκη επιφανειακού ορίου καθορισμένη από την αεροδυναμική μεταφορά θερμότητας και τη θεωρία του ενεργειακού ισοζυγίου, ενώ υπολόγισε με ακρίβεια τις επιφανειακές και υποεπιφανειακές θερμοκρασίες εδάφους.

Στη μελέτη του Thunholm (1990) η θερμοκρασία της επιφάνειας του εδάφους και η ροή θερμότητας εκτιμήθηκαν από τη θερμοκρασία αέρος και το ενεργειακό ισοζύγιο στην επιφάνεια του εδάφους αντίστοιχα, χρησιμοποιώντας ένα αριθμητικό μοντέλο βασισμένο σε φυσικές παραμέτρους. Με βάση το μοντέλο, υπολογίστηκε η θερμοκρασία εδάφους από κλιματικά δεδομένα κατά τη διάρκεια μεγάλων χρονικών περιόδων σε μια απότομη επικλινή αποψιλωμένη δασική περιοχή και προέκυψε επαρκής συμφωνία των μετρούμενων και προσομοιωμένων τιμών. Η ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου έδειξε ότι η ηλιακή ακτινοβολία ήταν ο βασικός παράγοντας επηρεασμού των θερμοκρασιών εδάφους.

Στην εργασία των Luo et al., (1992) παρουσιάζεται ένα μοντέλο που προσομοιώνει την θερμοκρασία εδάφους με μεταβλητές τη φυτική κάλυψη και την υγρασία του. Το μοντέλο βασίζεται στο ενεργειακό ισοζύγιο και τη μεταφορά θερμότητας στο έδαφος. Βρέθηκε ότι το μοντέλο προβλέπει ικανοποιητικά τις ροές ενέργειας και τη θερμοκρασία στην επιφάνεια του εδάφους αλλά και σε διάφορα βάθη μέσα στις καλλιέργειες, με την φυτική κάλυψη και την υγρασία της επιφάνειας του εδάφους να επηρεάζουν σημαντικά το ενεργειακό ισοζύγιο και κατ' επέκταση τη θερμοκρασία του εδάφους.

Οι Jacovides et al., (1996) μελέτησαν στατιστικά χαρακτηριστικά της θερμοκρασίας εδάφους στην Αθήνα, τα οποία καθορίστηκαν μέσω της ανάλυσης Fourier σε ένα 74ετές αρχείο (1917-1990) θερμοκρασιών εδάφους στην επιφάνεια και σε διάφορα βάθη του γυμνού και γλοερού εδάφους. Τα βασικά συμπεράσματα από την ανάλυση αυτή ήταν ότι οι θερμοκρασίες εδάφους καθώς και οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές τους σε οποιοδήποτε βάθος και χρόνο μπορούν να εκτιμηθούν, στη βάση της ετήσιας περιοδικότητάς τους, με την βοήθεια αρμονικών, υπολογισμένων με την τεχνική του Fourier. Ειδικότερα, οι πρώτες τρεις αρμονικές μαζί παρέχουν καλή συμφωνία μεταξύ των παρατηρούμενων και εκτιμώμενων θερμοκρασιών εδάφους στην επιφάνεια αλλά και σε διάφορα βάθη.

Οι Bhatti et al., (2000) εκτίμησαν την ικανότητα ενός υδρολογικού μοντέλου σε ότι αφορά την προσομοίωση αλλαγών της θερμοκρασίας και υγρασίας του εδάφους στη ζώνη του ριζικού συστήματος ενός πευκώνα. Οι προσομοιώσεις του μοντέλου βασίστηκαν στα ημερήσια κατακρημνίσματα (χιόνι και βροχή), τη θερμοκρασία του αέρα και σε μερικά τοπογραφικά και άλλα χαρακτηριστικά της τοποθεσίας, όπως το γεωγραφικό μήκος και πλάτος, το βάθος και τη σύσταση του εδάφους καθώς και το δείκτη της φυλλικής επιφάνειας. Η καλή συμφωνία των αποτελεσμάτων του μοντέλου με μετρήσεις, οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι το μοντέλο μπορεί να εφαρμοστεί για την εκτίμηση της εδαφικής υγρασίας και της θερμοκρασίας σε ποικιλία επεμβάσεων, όπως η απομάκρυνση μέρους του επιφανειακού μεταλλικού χούμου ή η ζιζανιοκτονία.

Οι Beltrami and Kellman (2003) ερευνήσαν τη συσχέτιση της θερμοκρασίας αέρα και εδάφους χρησιμοποιώντας ένα απλό αριθμητικό μοντέλο προσέγγισης της θερμικής αγωγιμότητας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι, κατά τη διάρκεια μιας περιόδου 290 ημερών άνοιξης, καλοκαιριού και φθινόπωρου, το θερμικό καθεστώς του εδάφους σε μια δασική έκταση μπορεί να μοντελοποιηθεί χρησιμοποιώντας δεδομένα θερμοκρασίας αέρα στην επιφάνεια του εδάφους ως συνθήκη ανώτερου ορίου. Σε όλες τις περιοχές όπου εξετάστηκαν δεδομένα μεγαλύτερων χρονικών περιόδων (~30 ετών), οι διαφορές θερμοκρασιών αέρα-εδάφους εμφανίστηκαν χρονικά ασταθείς, υποδεικνύοντας τη δυσκολία παρόμοιων συσχετίσεων σε ανάλογες περιπτώσεις.

Πιο πρόσφατες έρευνες πραγματεύονται επίσης την αξιολόγηση μεθόδων προσομοίωσης και εκτίμησης της ημερήσιας και ετήσιας κύμανσης της θερμοκρασίας επιφάνειας του εδάφους με στόχο εφαρμογές στον βιοκλιματικό σχεδιασμό. Οι δυο μέθοδοι εκτίμησης που εφαρμόστηκαν για το σκοπό αυτό από τη Mihalakakou et al. (1997) και Mihalakakou (2002), είναι ένα προσδιοριστικό ('ντετερμινιστικό') μοντέλο και μια προσέγγιση νευρωνικού δικτύου. Για την εκτίμηση της θερμοκρασίας επιφάνειας εδάφους (χρησιμοποιώντας τη διαφορική εξίσωση μετάδοσης της θερμότητας μέσω αγωγής και την εξίσωση ενεργειακού ισοζυγίου στην επιφάνεια του εδάφους) χρησιμοποιείται αναλυτικό μοντέλο. Η σύγκριση των μετρούμενων με τις εκτιμώμενες τιμές έδειξε ότι το αναλυτικό μοντέλο δίνει καλύτερες εκτιμήσεις κατανομής της θερμοκρασίας εδάφους.

Για την πρόβλεψη διακυμάνσεων της θερμοκρασίας επιφάνειας ομοιογενούς εδάφους ο Swaid (1995) ανέπτυξε απλές δομές για το μοντέλο αποκατάστασης ισχύος (force-restore model). Για την περιγραφή της νυκτερινής ψύξης τυπικών αστικών επιφανειών εδάφους κάτω από ανέφελες συνθήκες, χρησιμοποιήθηκαν ισοδύναμα ηλεκτρικά κυκλώματα. Η επιφανειακή ψύξη ομοιογενών εδαφών κατά τη νύχτα χαρακτηρίστηκε με μια χρονική σταθερά που αναφέρεται ως CTTC (cluster thermal time constant). Η παράμετρος αυτή είναι σταθερή για όλους τους τύπους εδάφους, ανεξαρτήτως των θερμικών ιδιοτήτων του υποστρώματος και ισοδυναμεί με το αντίστροφο κλάσμα της γωνιακής συχνότητας του

θερμικού κύκλου (π.χ. ημερήσιου, ετήσιου). Η ψύξη επιφανειών διπλής στρωμάτωσης χαρακτηρίστηκε επίσης από δυο χρονικές σταθερές, το άθροισμα των οποίων ισούται με την CTTC. Προβλέψεις θερμοκρασιών επιφάνειας εδάφους που παρέχονται από το μοντέλο αποκατάστασης ισχύος, συγκρίθηκαν ικανοποιητικά με τις αριθμητικές προσομοιώσεις που διεξήχθησαν για το ίδιο υπόστρωμα και ισχύ ακτινοβολήσης. Επίσης οι προβλέψεις του μοντέλου βρέθηκαν σε γενική συμφωνία με μια ομάδα δεδομένων θερμοκρασιών επιφάνειας εδάφους στον αγρό.

Με στόχο την ακριβή πρόβλεψη της μετάδοσης της θερμότητας στο έδαφος, της θερμοκρασίας και υγρασίας δωματίου, οι dos Santos and Mendes (2006) ανέπτυξαν ένα συνδυαστικό μοντέλο ταυτόχρονου υπολογισμού της μετάδοσης της θερμότητας και υγρασίας στο έδαφος και στο δάπεδο και των ψυχομετρικών συνθηκών του αέρα εσωτερικών χώρων. Η μεθοδολογία για το έδαφος βασίστηκε στη θεωρία των Philip και De Vries χρησιμοποιώντας μεταβλητές θερμοφυσικές ιδιότητες για διαφορετικά υλικά. Για την περιγραφή των φυσικών φαινομένων της μεταφοράς μάζας και θερμότητας σε υγρά ακόρεστα πορώδη εδάφη και στο δάπεδο, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος πεπερασμένου όγκου και ένα τρισδιάστατο μοντέλο. Τα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν σε σχέση με τη θερμοκρασία, την υγρασία και τη ροή θερμότητας στην διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ του εσωτερικού αέρα του δωματίου και του δαπέδου, δείχνοντας τη σημασία της παρούσας προσέγγισης και την δυναμική του μοντέλου για μακροπρόθεσμες προσομοιώσεις με μεγάλο χρονικό βήμα.



### 3: ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Η πρόγνωση θερμοκρασιών εδάφους σε ημερήσια βάση έγινε στα πλαίσια της εργασίας αυτής με χρήση των αντίστοιχων αλγόριθμων του αγρομετεωρολογικού μοντέλου PRZM 3 (Carsel et al., 1985; Carsel et al., 1984). Σύμφωνα με το συγκεκριμένο μοντέλο, η πρόγνωση της θερμοκρασίας εδάφους περιλαμβάνει:

- α. την προσομοίωση της θερμοκρασίας επιφάνειας εδάφους και
- β. την προσομοίωση της θερμοκρασίας εντός της εδαφικής κατατομής λαμβάνοντας υπόψη την πρόγνωση θερμοκρασίας στο (α) ως θερμοκρασία ανώτερου ορίου (upper boundary).

#### 3.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΕΔΑΦΟΥΣ

Το μοντέλο προσομοίωσης της θερμοκρασίας επιφάνειας εδάφους, που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, προκύπτει από συνδυασμό της εργασίας των van Bavel and Hillel (1976) και Thibodeaux (1979) και στηρίζεται στη μέθοδο του ενεργειακού ισοζυγίου.

Ως γνωστόν, η βασική εξίσωση ενεργειακού ισοζυγίου στην διαχωριστική επιφάνεια αέρα/εδάφους (με όρους που εκφράζονται σε μονάδες  $\text{cal cm}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ) γράφεται ως εξής:

$$\Delta H_{\varepsilon} = R_n - H_s - LE_s - G_s \quad (\text{εξ. 3.1})$$

Όπου όλοι οι όροι αντιπροσωπεύουν ροές :

$\Delta H_{\varepsilon}$  = μεταβολή αποθήκευσης θερμικής ενέργειας στο εδαφικό στρώμα

$R_n$  = καθαρής ακτινοβολίας (θετική προς τα κάτω)

$H_s$  = “αισθητής” θερμότητας αέρα (θετική προς τα πάνω)

$LE_s$  = λανθάνουσας θερμότητας (θετική προς τα πάνω)

$G_s$  = θερμότητας εδάφους (θετική προς τα κάτω)

Ο όρος  $\Delta H_{\varepsilon}$  μπορεί να εκτιμηθεί ως:

$$\Delta H_{\varepsilon} = (\rho_b d) C (T_{i+1} - T_i) \quad (\text{εξ. 3.2})$$

όπου:

$\rho_b$  = φαινόμενη πυκνότητα του εδάφους ( $\text{g cm}^{-3}$ )

$d$  = πάχος λεπτού επιφανειακού εδαφικού στρώματος (cm)

$C$  = ειδική θερμοχωρητικότητα του εδάφους ( $\text{cal g}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ )

$T_i, T_{i+1}$  = αντιπροσωπευτική θερμοκρασία για το επιφανειακό στρώμα σε δυο διαδοχικά χρονικά βήματα που παριστάνεται ως ο μέσος όρος των θερμοκρασιών στην κορυφή και τη βάση του εδαφικού στρώματος

Για την εκτίμηση της θερμότητας ανταλλαγής στη διαχωριστική επιφάνεια αέρα/εδάφους, το πάχος,  $d$ , μπορεί να τεθεί σε μικρή τιμή, ώστε τελικά το  $\Delta H_e$  να μπορεί να παραληφθεί. Ως αποτέλεσμα της παραδοχής αυτής, το δεξιό σκέλος της εξίσωσης 3.1 ισούται με μηδέν.

### 3.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Η ροή καθαρής ακτινοβολίας σε τυχαία επιφάνεια μπορεί να παρασταθεί ως:

$$R_n = (R_s - R_{sr}) + (R_{la} - R_{lar}) - R_{ls} \quad (\text{εξ. 3.4})$$

όπου οι ροές αντιστοιχούν σε :

$R_n$  = καθαρή ακτινοβολία

$R_s$  = προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος

$R_{sr}$  = ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος

$R_{la}$  = προσπίπτουσα ατμοσφαιρική ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος

$R_{lar}$  = ανακλώμενη ατμοσφαιρική ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος

$R_{ls}$  = εκπεμπόμενη από το έδαφος ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος

Όλα τα μεγέθη της (εξ. 3.4) εκφράζονται σε ( $\text{cal cm}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ).

Οι όροι  $R_s$  και  $R_{sr}$ , περιλαμβάνουν την άμεση και τη διάχυτη μικρού ακτινοβόλια μήκους κύματος και συνδέονται με την σχέση:

$$R_{sr} = \alpha R_s \quad (\text{εξ. 3.5})$$

όπου:

$\alpha$  = αντανακλαστικότητα (albedo) της επιφάνειας

Για το λόγο αυτό, η συνιστώσα μικρού μήκους ακτινοβολίας του ενεργειακού ισοζυγίου είναι:

$$R_s - R_{sr} = R_s(1 - \alpha) \quad (\text{εξ. 3.6})$$

Ας σημειωθεί ότι η προσπίπτουσα ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος μπορεί είτε να μετρηθεί άμεσα με πυρανόμετρα ή να υπολογιστεί με εμπειρικές σχέσεις.

Το albedo μιας καλυμμένης γήινης επιφάνειας μπορεί να εκτιμηθεί ως:

$$\alpha(t) = a_c C(t) + a_s (1 - C(t)) \quad (\text{εξ. 3.7})$$

όπου:

$\alpha(t)$  = ανακλαστική ικανότητα στον χρόνο (ημέρα)  $t$

$a_c$  = ανακλαστική ικανότητα της κάλυψης (π.χ. 0.23 τυπική τιμή για βλάστηση)

$C(t)$  = ποσοστό κάλυψης στον χρόνο (ημέρα)  $t$

$a_s$  = ανακλαστική ικανότητα της εδαφικής επιφάνειας

Εφόσον η ανακλαστική ικανότητα της εδαφικής επιφάνειας αλλάζει με την κατάστασή της, καθορίζονται 12 μηνιαίες τιμές που αντιστοιχούν στην πρώτη ημέρα κάθε μήνα. Κατόπιν, η τιμή της ανακλαστικής ικανότητας για κάθε ημέρα παρεμβάλλεται γραμμικά ανάμεσα στις γειτονικές μηνιαίες τιμές.

Η προσπίπτουσα ατμοσφαιρική ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος,  $R_{la}$ , χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η νεφοκάλυψη, εκφράζεται ως:

$$R_{la} = e_a \sigma T_a^4 \quad (\text{εξ. 3.7})$$

όπου:

- $e_a$  = ικανότητα εκπομπής (εκπεμπτικότητα) της ατμόσφαιρας (αδιάστατη)  
 $\sigma$  = σταθερά Stefan-Boltzmann ( $11.7 \times 10^{-8} \text{ cal cm}^{-2} \text{ }^\circ\text{K}^{-4} \text{ day}^{-1}$ )  
 $T_a$  = θερμοκρασία του αέρα ( $^\circ\text{K}$ )

Η ικανότητα εκπομπής (εκπεμπτικότητα) της ατμόσφαιρας μεταβάλλεται από την μικρή τιμή 0.7 έως σχεδόν την μονάδα. Πολυάριθμες εμπειρικές σχέσεις για την εκτίμηση της  $e_a$  έχουν προταθεί (π.χ. Salhotra, 1986). Στη συγκεκριμένη εργασία γίνεται χρήση της έκφρασης :

$$e_a = 0.936x 10^{-5} T_a^2 \quad (\text{εξ. 3.8})$$

Η ανακλώμενη ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος,  $R_{lar}$ , μπορεί να εκφρασθεί ως:

$$R_{lar} = R_{la} \gamma \quad (\text{εξ. 3.9})$$

όπου:

- $\gamma$  = ανακλαστικότητα της επιφάνειας για ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος

Η προκύπτουσα συνιστώσα μεγάλου μήκους κύματος της καθαρής ατμοσφαιρικής ακτινοβολίας εκφράζεται με την:

$$R_{la} - R_{lar} = R_{la} (1 - \gamma) = 0.936x 10^{-5} T_a^6 \sigma (1 - \gamma) \quad (\text{εξ. 3.10})$$

Η συνιστώσα μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας, που εκπέμπεται από την εδαφική επιφάνεια, παριστάνεται σε μια ανάλογη Boltzmann εξίσωση με αυτήν για την ατμοσφαιρική συνιστώσα όπως παρακάτω:

$$R_{ls} = e_s \sigma T_s^4 \quad (\text{εξ. 3.11})$$

όπου:

- $e_s$  = ικανότητα εκπομπής υπέρυθρου του εδάφους (αδιάστατη)

$$\begin{aligned}\sigma &= \text{σταθερά Stefan-Boltzmann (11.7x10}^{-8} \text{ cal cm}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{K}^{-4} \text{ day}^{-1}) \\ T_s &= \text{θερμοκρασία της επιφάνειας του εδάφους (}^{\circ}\text{K)}\end{aligned}$$

Εφόσον η ικανότητα ολικής εκπομπής (εκπεμπτικότητα) και η ανακλαστικότητα του εδάφους συνδέονται με την σχέση  $e_s = 1 - \gamma$ , ο όρος  $(1 - \gamma)$  αντικαθίσταται στην εξίσωση 3.10 με τον όρο  $e_s$ .

Συνδυάζοντας τις συνιστώσες της ακτινοβολίας από τις εξισώσεις 3.5, 3.10, και 3.11, η ροή καθαρής ακτινοβολίας υπολογίζεται ως:

$$R_n = (1 - \alpha)R_s + 0.936 \times 10^{-5} \times e_s \sigma T_a^6 - e_s \sigma T_s^4 \quad (\text{εξ. 3.12})$$

Η ροή λανθάνουσας θερμότητας εξάτμισης,  $LE_s$ , εκτιμάται με βάση τη σχέση:

$$LE_s = \mu E \rho_w \quad (\text{εξ. 3.13})$$

όπου:

$$\begin{aligned}\mu &= \text{λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης (580.0 cal g}^{-1}) \\ E &= \text{γραμμική ταχύτητα εξάτμισης (cm day}^{-1}) \\ \rho_w &= \text{πυκνότητα νερού (1.0 g cm}^{-3})\end{aligned}$$

Η ταχύτητα εξάτμισης  $ET_i$  στο εδαφικό στρώμα  $i$  (υπολογιστικό εδαφικό στρώμα, computational soil layer) υπολογίζεται με βάση την εξής προσέγγιση:

$$ET_i = \min \left[ (SW_i - WP_i) f_{dis}, ET_p - \sum_{i=1}^{i=i-1} ET_i \right] \quad (\text{εξ. 3.14})$$

όπου:

$$SW_i = \text{υγρασία εδάφους (στο στρώμα } i), \text{ η οποία υπολογίζεται με κατάλληλο μοντέλο υδατικού ισοζυγίου, με το οποίο είναι υπολογιστικά συζευγμένο}$$

(computationally linked, coupled) το μοντέλο προσομοίωσης της θερμοκρασίας εδάφους.

$WP_i$  = υγρασία εδάφους στο σημείο μαρασμού, η οποία εξαρτάται από την κοκκομετρική σύσταση και αποτελεί είσοδο του μοντέλου με βάση πειραματικά ή βιβλιογραφικά δεδομένα.

$f_{dis}$  = σταθμικός συντελεστής που χρησιμοποιείται για την κατανάλωση ύδατος από το φυτό σε συνάρτηση με το βάθος.

$ET_p$  = δυναμική εξατμισοδιαπνοή

Στο μοντέλο γίνεται η παραδοχή, ότι η υπολογιζόμενη εξατμισοδιαπνοή από τα ανώτερα 5 cm του εδάφους αντιπροσωπεύει την δυναμική απώλεια ενέργειας για εξάτμιση στην διαχωριστική επιφάνεια αέρα/εδάφους. Ας σημειωθεί, ότι μόνο ένα κλάσμα της απώλειας της εξατμισο-διαπνοής που υπολογίζεται από το μοντέλο συνεισφέρει σε αυτή την ροή θερμότητας. Το κλάσμα αυτό εκτιμάται ως το τμήμα της γήινης επιφάνειας που δεν καλύπτεται από βλάστηση (π.χ., 1.0 – ποσοστό κάλυψης εδάφους).

Η ροή αισθητής θερμότητας του αέρα,  $H_s$ , δίνεται από τη σχέση:

$$H_s = \rho_a C_{pa} h (T_s - T_a) \quad (\text{εξ. 3.15})$$

όπου:

$\rho_a$  = πυκνότητα του αέρα ( $\text{g cm}^{-3}$ ) =  $(-0.0042 T_a + 1.292) \times 10^{-3}$  (Thibodeaux, 1979)

$C_{pa}$  = ειδική θερμοχωρητικότητα του αέρα σε σταθερή πίεση ( $0.2402 \text{ cal g}^{-1} \text{ }^\circ\text{K}^{-1}$ )

$h$  = συντελεστής συναγωγής στην διαχωριστική επιφάνεια αέρα-εδάφους ( $\text{cm day}^{-1}$ )

$T_a$  = θερμοκρασία αέρα ( $^\circ\text{K}$ )

Ο συντελεστής θερμικής μεταφοράς δίνεται από τη σχέση:

$$h = K_1^2 V_z \left[ \ln \left( \frac{Z_{RH} - \underline{D}}{Z_0} \right) \right]^{-2} \quad (\text{εξ. 3.16})$$

όπου:

- $K_1$  = αριθμός του von Karman (0.41)  
 $V_z$  = ταχύτητα ανέμου ( $\text{cm day}^{-1}$ )  
 $Z_{RH}$  = ύψος αναφοράς στο οποίο μετρείται η  $V_z$  (m)  
 $\underline{D}$  = μετατόπιση του επιπέδου μηδέν (m)  
 $Z_o$  = ύψος αεροδυναμικής τραχύτητας (m) όπου η ροή γίνεται τυρβώδης

Ας σημειωθεί ό  $\kappa$  η σχέση 3.61 ισχύει μό  $\nu$  όταν η θερμοκρασία αέρος δεν μεταβάλλεται σημαντικά με το ύψος, όπως π.χ. όταν τα ύψη κάλυψης είναι σχετικά μικρά, παραδοχή που ισχύει γενικά για τις περισσότερες καλλιέργειες. Έχουν αναπτυχθεί συσχετίσεις που συνδέουν τα  $D$  και  $Z_o$  με το ύψος κάλυψης (Arya, 2001):

$$\log Z_o = 0.997 \log Z_{ch} - 0.883 \quad (\text{εξ. 3.17})$$

και

$$\log \underline{D} = 0.9793 \log Z_{ch} - 0.1536 \quad (\text{εξ. 3.18})$$

όπου:

$$Z_{ch} = \text{ύψος φυτού (cm)}$$

Η ροή θερμότητας εδάφους,  $G_s$ , από την θεμελιώδη εξίσωση της θερμικής

$$G_s = \frac{k_1 (T_s - T_1)}{d_1} \quad (\text{εξ. 3.19})$$

αγωγιμότητας, δίνεται από τη σχέση:

όπου:

- $T_1$  = θερμοκρασία του εδάφους στην βάση του πρώτου στρώματος της εδαφικής κατατομής (K)  
 $T_s$  = θερμοκρασία της επιφάνειας του εδάφους ( $^{\circ}\text{K}$ )  
 $k_1$  = θερμική αγωγιμότητα του πρώτου εδαφικού στρώματος ( $\text{cal cm}^{-1} \text{day}^{-1} \text{ } ^{\circ}\text{K}^{-1}$ )  
 $d_1$  = πάχος του πρώτου εδαφικού στρώματος (cm)

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις 3.12, 3.13, 3.15, και 3.19 στην εξίσωση 3.1, προκύπτει η παρακάτω τέταρτης τάξης εξίσωση ως προς  $T_s$ , η οποία και αποτελεί και την τελική εξίσωση πρόγνωσης της θερμοκρασίας επιφάνειας εδάφους.

$$e_s \sigma T_s^4 + \left[ \rho_\alpha C_{pa} h + k_1/d_1 \right] T_s - \left[ (1-\alpha) R_s + 0.936 \times 10^{-5} \times \sigma T_\alpha^6 e_s + \rho_\alpha C_{pa} h T_\alpha - \mu E \rho_w + k_1 T_1/d_1 \right] = 0 \quad (\text{εξ. 3.20})$$

### 3.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ & ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΔΑΦΙΚΗ ΚΑΤΑΤΟΜΗ

Το μοντέλο προσομοίωσης μεταφοράς θερμότητας εντός της εδαφικής κατατομής που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία αυτή αναπτύχθηκε από τους Hanks et al., (1971) και έχει εφαρμοστεί σε διάφορες έρευνες π.χ. Gupta et al., (1981, 1982, 1983), Wagenet and Hutson (1987). Το μοντέλο βασίζεται στην μονοδιάστατη μερική διαφορική εξίσωση που περιγράφει την θερμική ροή στα εδάφη:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (\text{εξ. 3.21})$$

όπου:

$D$  = θερμική διαχυσιμότητα του εδαφικού στρώματος ( $\text{cm}^2 \text{ day}^{-1}$ ) η οποία ως γνωστόν, δίνεται από τη σχέση:

$$D = \frac{k}{C} \quad (\text{εξ. 3.22})$$

όπου:

$k$  = θερμική αγωγιμότητα του εδαφικού στρώματος ( $\text{cal cm}^{-1} \text{ day}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ )

$C$  = θερμοχωρητικότητα ανά μονάδα όγκου του εδαφικού στρώματος ( $\text{cal cm}^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ )

Οι τιμές της θερμικής αγωγιμότητας και της θερμοχωρητικότητας ανά μονάδα όγκου υπολογίζονται από βασικές ιδιότητες του εδάφους: εδαφική υγρασία, κοκκομετρική σύνθεση και θερμική αγωγιμότητα των εδαφικών σωματιδίων, σύμφωνα με τις συναρτησιακές σχέσεις του de Vries (1963).



### 3.4 ΑΡΧΙΚΕΣ-ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ & ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Η εξίσωση για την θερμοκρασία της επιφάνειας του εδάφους,  $T_s$ , είναι η 5.34. Στο μοντέλο, η τιμή του  $T_s$  σε κάθε χρονικό βήμα εκτιμάται με την επίλυση της παραπάνω εξίσωσης, χρησιμοποιώντας μια επαναληπτική επίλυση βασισμένη στη γνωστή αριθμητική μέθοδο Newton-Raphson. Η αρχική εκτίμηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας του εδάφους λαμβάνεται ως η αντίστοιχη μετρούμενη θερμοκρασία αέρος, και τα  $R_n$ ,  $LE_s$ ,  $H_s$ , και  $G_s$  υπολογίζονται όπως περιγράφηκε στις προηγούμενες παραγράφους. Η τιμή για το  $T_1$  παρέχεται από το προηγούμενο χρονικό βήμα της προσομοίωσης. Οι υπολογισμοί αυτοί επαναλαμβάνονται έως ότου η διαφορά μεταξύ δυο διαδοχικών εκτιμήσεων για την θερμοκρασία της εδαφικής επιφάνειας να είναι μικρότερη από το κριτήριο σύγκλισης, που στην συγκεκριμένη εφαρμογή έχει τεθεί ως  $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Η κατανομή της θερμοκρασίας μέσα στο εδαφικό προφίλ συνοψίζεται στη Εξίσωση 5.34. Η εξίσωση αυτή επιλύεται αριθμητικά για την εδαφική θερμοκρασία,  $T$ , ως συνάρτηση του βάθους,  $z$  και του χρόνου,  $t$ , με βάση την εισαγωγή δεδομένων διαχυσιμότητας,  $D$ , για κάθε εδαφικό διαμέρισμα και τις παρακάτω αρχικές και οριακές συνθήκες, με βάση τις οποίες υπολογίζεται.

Αρχική συνθήκη:

$$T_{z,0} = T(z) \quad (\text{εξ. 3.23})$$

Οριακές συνθήκες:

$$T_{o,t} = T_s(t) \quad (\text{εξ. 3.24})$$

$$T_{L,t} = T_L(t) \quad (\text{εξ. 3.25})$$

όπου:

$T(z)$  = αρχική θερμοκρασία εδάφους μέσα σε κάθε εδαφικό “διαμέρισμα” ( $^\circ\text{C}$ )

$T_s(t)$  = υπολογιζόμενη θερμοκρασία στην επιφάνεια του εδάφους για κάθε χρονικό βήμα ( $^\circ\text{C}$ )

$T_L(t)$  = θερμοκρασία κατώτερου ορίου στη βάση της εδαφικής κατατομής ( $^\circ\text{C}$ )

Στο συγκεκριμένο λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, οι θερμοκρασίες κατώτερου ορίου ορίζονται από τον χρήστη ως 12 μηνιαίες τιμές που αντιστοιχούν στην πρώτη ημέρα του κάθε μήνα, ενώ η τιμή για οποιαδήποτε ημέρα παρεμβάλλεται μεταξύ των γειτονικών μηνιαίων τιμών.

Τέλος, στο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω αριθμητική προσέγγιση (Hanks et al. 1971):

$$\frac{T_{i,j} - T_{i,j-1}}{\Delta t} = \frac{(T_{i-1/2,j} - T_{i,j})D_{i-1/2,j} - (T_{i,j} - T_{i+1/2,j})D_{i+1/2,j}}{\Delta z^2} \quad (\text{εξ. 3.26})$$

Η εξίσωση 3.26 επιλύεται χρησιμοποιώντας την αριθμητική μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών (finite differences). Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιείται ένα πεπλεγμένο σχήμα, “πίσω” διαφορών (backward-difference, implicit scheme), ενώ τα μητρώα που προκύπτουν επιλύονται με τον αλγόριθμο Thomas.

#### 4. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ

Στο Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών (Ε.Α.Α.), εκτελούνται από το 1911 συστηματικές καταγραφές της θερμοκρασίας του εδάφους σε διάφορα βάθη, τρεις φορές ημερησίως (08:00, 14:00 και 20:00 LST). Ο σταθμός (γ. πλάτος  $37^{\circ} 58' B$ , γ. μήκος  $23^{\circ} 43' A$ , υψόμετρο 107 m από την μέση στάθμη της θάλασσας) (Εικόνα 1) βρίσκεται στις ιστορικές εγκαταστάσεις του Ε.Α.Α. στο Θησείο, σε μικρή απόσταση από την Ακρόπολη, κοντά στο κέντρο της Αθήνας.



**Εικόνα 1:** Σταθμός καταγραφής θερμοκρασιών εδάφους του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, στο Θησείο (πηγή: Google Earth 2007).

Στα τέλη του 1990 έγινε αυτοματοποίηση του σταθμού μέτρησης θερμοκρασιών εδάφους (Εικόνα 2), με αντικατάσταση των κλασσικών υδραργυρικών θερμομέτρων με σύγχρονους αισθητήρες τύπου “thermistor” (τύπος 107-probe, της Campbell Scientific Ltd.) και συνεχή συλλογή των δεδομένων ανά 1 ώρα (δειγματοληψία ανά 1 λεπτό και μέση τιμή, μέγιστη και ελάχιστη ανά ώρα) (Ψυλόγλου, 1992).



**Εικόνα 2:** Απόψεις του αυτοματοποιημένου σταθμού καταγραφής θερμοκρασιών εδάφους στο Ε.Α.Α.

Επιπλέον παρατηρήσεις τυπικών μετεωρολογικών και ακτινομετρικών παραμέτρων που πραγματοποιούνται στο σταθμό του Θησείου είναι η θερμοκρασία αέρα ( $^{\circ}\text{C}$ ) (ωριαίες, μέσες ημερήσιες και μέσες μηνιαίες, μέγιστες και ελάχιστες τιμές), η σχετική υγρασία (%) (ωριαίες, μέσες ημερήσιες και μέσες μηνιαίες τιμές), η ατμοσφαιρική πίεση (hPa) (ωριαίες, μέσες ημερήσιες και μέσες μηνιαίες τιμές), η ταχύτητα ανέμου (m/s) (ωριαίες, μέσες ημερήσιες και μέσες μηνιαίες τιμές), η διεύθυνση ανέμου (deg) (ωριαίες τιμές, ροδόγραμμα), το ύψος και η διάρκεια βροχόπτωσης (mm, hrs), η εξάτμιση (mm), το σημείο

δρόσου ( $^{\circ}\text{C}$ ), το έλλειμμα κορεσμού (mm Hg), η πίεση ατμών (mm Hg), η διάρκεια ηλιοφάνειας (hrs), η νεφοκάλυψη και το είδος νεφών (octals), οι βαθμοημέρες θέρμανσης/ψύξης (degree days) ( $^{\circ}\text{C}$ ), η ολική ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντια επίπεδο ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) (ωριαίες, ημερήσιες και μηνιαίες τιμές με πυρανόμετρο τύπου Erppley), η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντια επίπεδο ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) (ωριαίες, ημερήσιες και μηνιαίες τιμές με πυρανόμετρο τύπου Erppley και στεφάνη σκίασης, δεν έχει γίνει διόρθωση στεφάνης), ο ολικός φωτισμός σε οριζόντια επίπεδο (kLux) (ωριαίες, ημερήσιες και μηνιαίες τιμές), ο διάχυτος σε οριζόντια επίπεδο (kLux) (ωριαίες, ημερήσιες και μηνιαίες τιμές, διορθωμένες έχει γίνει διόρθωση στεφάνης) και η ορατότητα.

Για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν οι διαθέσιμες μετρήσεις της θερμοκρασίας του εδάφους σε διάφορα βάθη του Ε.Α.Α., για την περίοδο 1992-2008.

Οι μετρήσεις προέρχονται από δυο ομάδες οργάνων μέτρησης θερμοκρασιών εδάφους :

- i. θερμομέτρα άμεσης επαφής εγκατεστημένα στην επιφάνεια του εδάφους καθώς και σε βάθη 2, 5, 10, 15, 20, 30, 40 και 50 cm, και
- ii. θερμομέτρα σε μεταλλικά δοχεία, εγκατεστημένα σε βάθη 0.3, 0.6, 0.9, 1.2 m.

Για την εφαρμογή του αριθμητικού μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν επιπλέον το ύψος βροχής, η θερμοκρασία αέρα, η ταχύτητα αέρα και η ολική ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε οριζόντια επιφάνεια, για την ίδια περίοδο 1992-2008.

Η καταγραφή των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων (βροχή, χιόνι, χαλάζι) (η ποσότητα χιονιού ή χαλαζιού καταγράφεται ως ισοδύναμη ποσότητα νερού μετά το λιώσιμό τους) πραγματοποιείται από βροχόμετρο τύπου tipping bucket, με ευαισθησία μέτρησης 0.1 mm/tip, και ακρίβεια  $\pm 2\%$  για ποσά βροχής μέχρι 25 mm/hr και  $\pm 3\%$  για ποσά βροχής μέχρι 50 mm/hr. Η μέτρηση της βροχόπτωσης γίνεται σε ύψος 1.5m περίπου πάνω από το έδαφος.

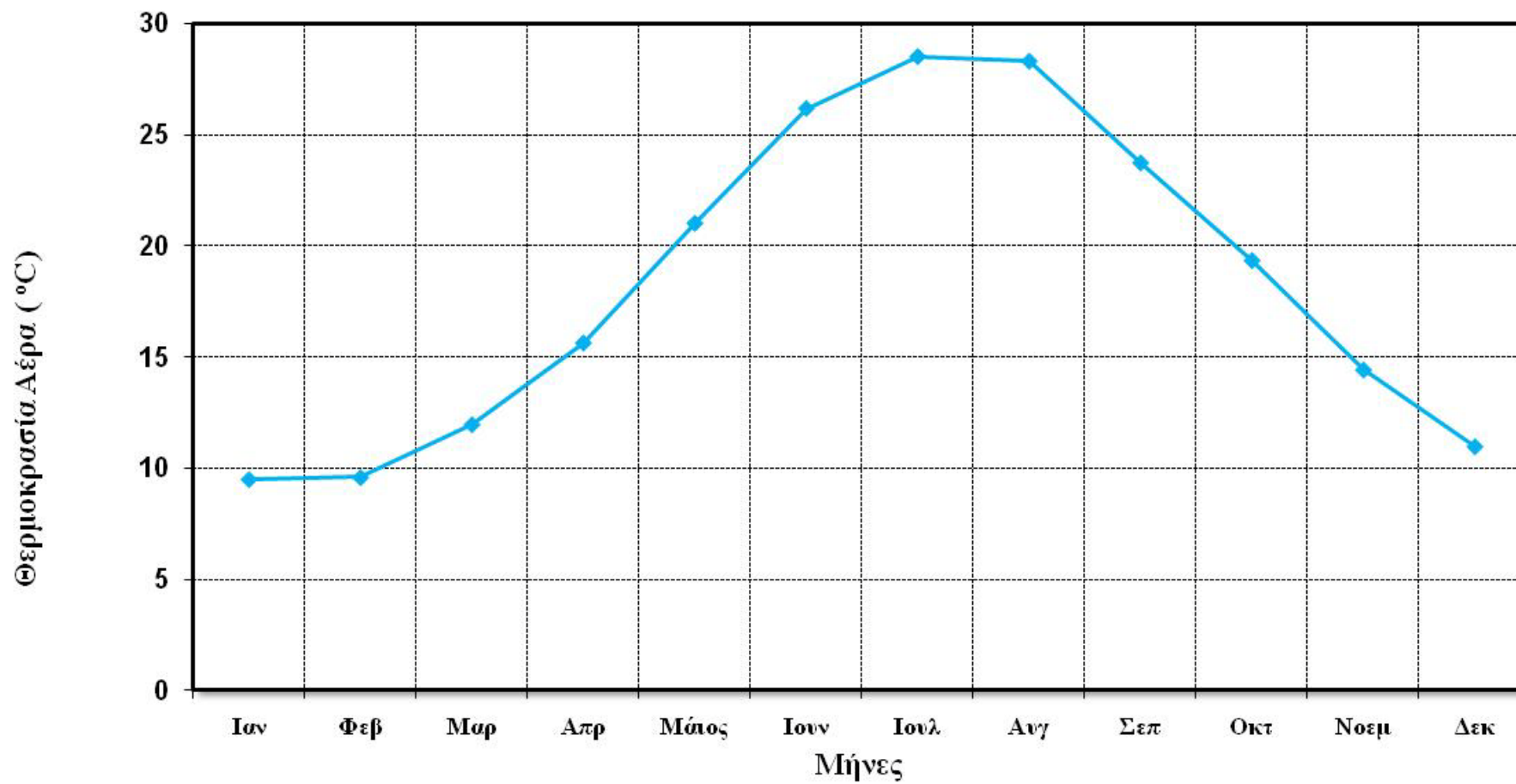
Η ένταση του πνέοντος ανέμου μετράται σε ύψος 10 μέτρων πάνω από το έδαφος, από κυπελλοφόρο ανεμόμετρο, από 0 μέχρι 55 m/s με ακρίβεια μέτρησης της τάξης του  $\pm 2\%$  και κατώφλι λειτουργίας 0.2 m/s. Η ένταση του ανέμου μετράται από ξεχωριστό αισθητήρα από εκείνου της διεύθυνσης ανέμου.

Η καταγραφή της έντασης της ολικής εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της Γης, πραγματοποιείται με την χρήση πυρανομέτρου της εταιρίας Erppley. Ο αισθητήρας του πυρανομέτρου βασίζεται σε ένα πλήθος παθητικών στοιχείων αίσθησης της θερμότητας που καλούνται θερμοζεύγη. Η απορρόφηση της θερμικής ακτινοβολίας που καταφτάνει από τον ήλιο από την μια επαφή του θερμοζεύγους, την καλούμενη ως «ενεργή» ή «θερμή» επαφή, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας της, ενώ η δεύτερη επαφή του, η καλούμενη ως «επαφή αναφοράς» ή «ψυχρή» διατηρείται σε μια χαμηλότερη σταθερή θερμοκρασία στο εσωτερικό του σώματος του οργάνου. Λόγω του θερμοηλεκτρικού φαινομένου, η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο επαφών του θερμοζεύγους (η οποία είναι ανάλογη της έντασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας) οδηγεί στην

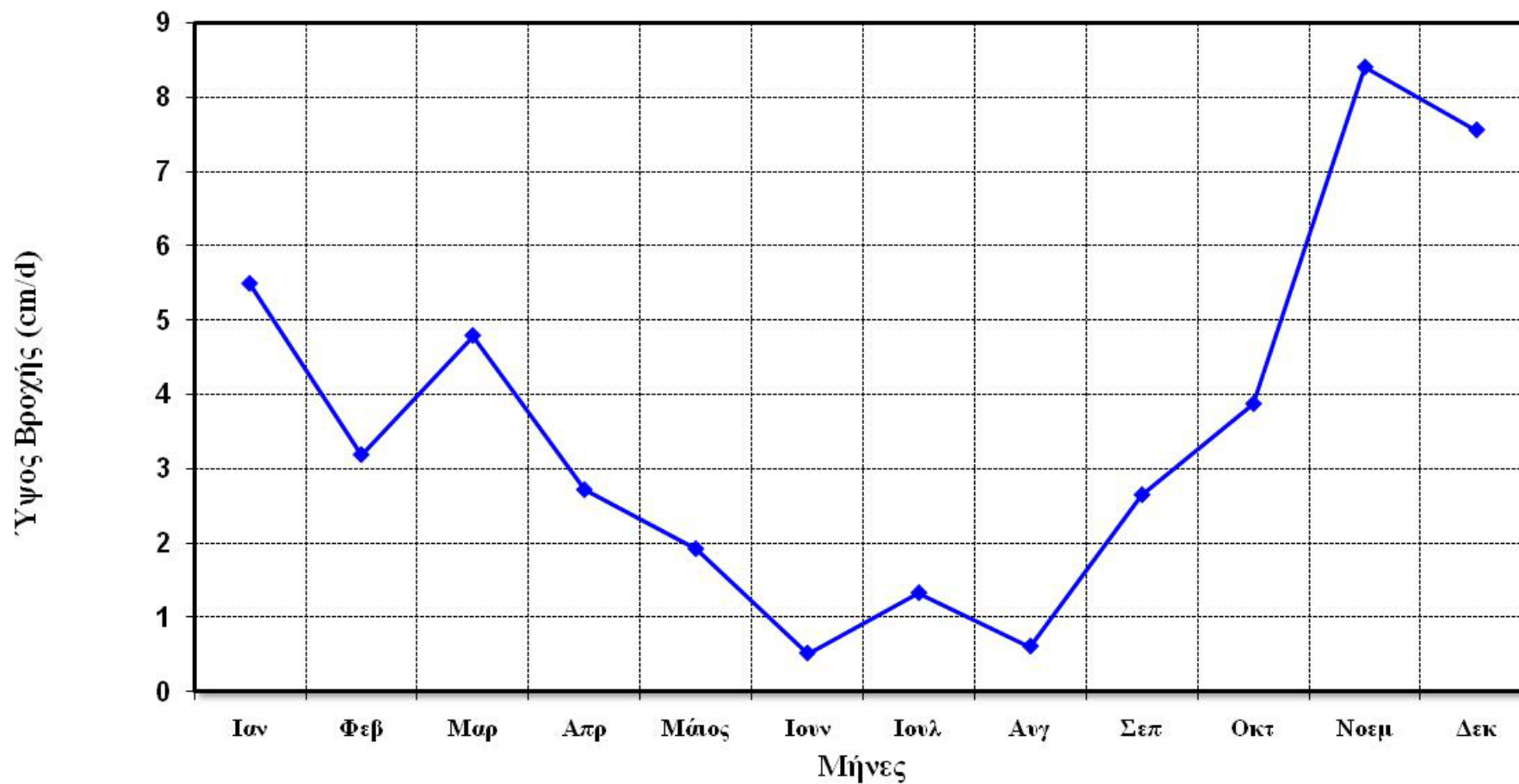
δημιουργία διαφοράς δυναμικού ανάλογης της διαφοράς θερμοκρασίας των δύο επαφών, η οποία με την σειρά της καταγράφεται στο σύστημα συλλογής δεδομένων προς περαιτέρω επεξεργασία.

Για το σκοπό της μελέτης αυτής, αρχικά τα δεδομένα θερμοκρασιών εδάφους σε διάφορα βάθη, υπέστησαν λεπτομερειακό ποιοτικό έλεγχο για τον εντοπισμό λαθών και την απομάκρυνση τυχόν εσφαλμένων τιμών. Κατά τον έλεγχο εντοπίστηκαν κύρια δύο σφάλματα (α) λόγω μη ορθής λειτουργίας των ίδιων των αισθητήρων, για χρονικά διαστήματα μερικών ωρών έως ημερών που ακολουθούσαν μετά από διακοπές τροφοδοσίας του συλλέκτη δεδομένων, ή κατά τις καλοκαιρινές περιόδους όπου παρατηρούνταν έκθεση του συλλέκτη σε ασυνήθιστα υψηλές θερμοκρασίες (π.χ. περιόδους καύσωνα), και (β) λόγω εσφαλμένης επανα-τοποθέτηση των δύο θερμομέτρων άμεσης επαφής στην επιφάνεια του γυμνού και του καλυμμένου με γρασίδι εδάφους, μετά τη πραγματοποίηση εργασιών συντήρησης στον σταθμό καταγραφής θερμοκρασιών εδάφους. Κατά την πρώτη περίπτωση τα δεδομένα αφαιρέθηκαν εντελώς από την βάση δεδομένων, ενώ στην δεύτερη διορθώθηκαν επιμελώς πριν την εισαγωγή τους στην βάση δεδομένων. Στην συνέχεια, υπολογίστηκαν οι μέσες ημερήσιες τιμές καθώς και οι μέσες μηνιαίες τιμές της θερμοκρασίας του αέρα και του εδάφους στα διάφορα βάθη.

Σύμφωνα με τα δεδομένα του Ε.Α.Α. στο σταθμό του Θησείου για την εξεταζόμενη περίοδο 1992-2008, παρουσιάζονται στα διαγράμματα των Σχημάτων 4.1-4.4 με τις μέσες μηνιαίες τιμές της θερμοκρασίας αέρα, του ύψους βροχής, της ταχύτητας του ανέμου και της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας αντίστοιχα.

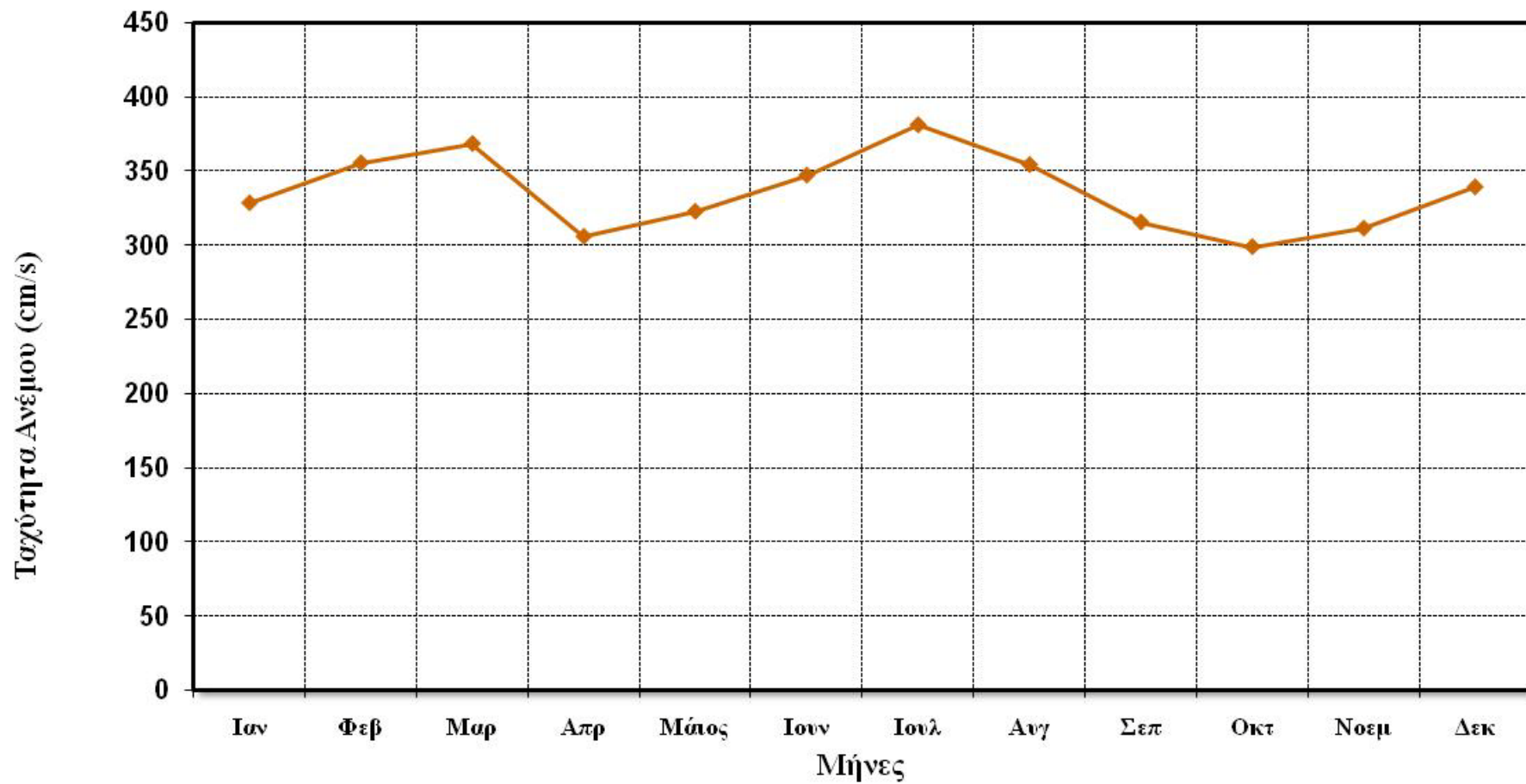


Σχήμα 4.1: Μέσες μηνιαίες τιμές της θερμοκρασίας αέρα, στον σταθμό του Ε.Α.Α. στο Θησείο, για την περίοδο 1992-2008.

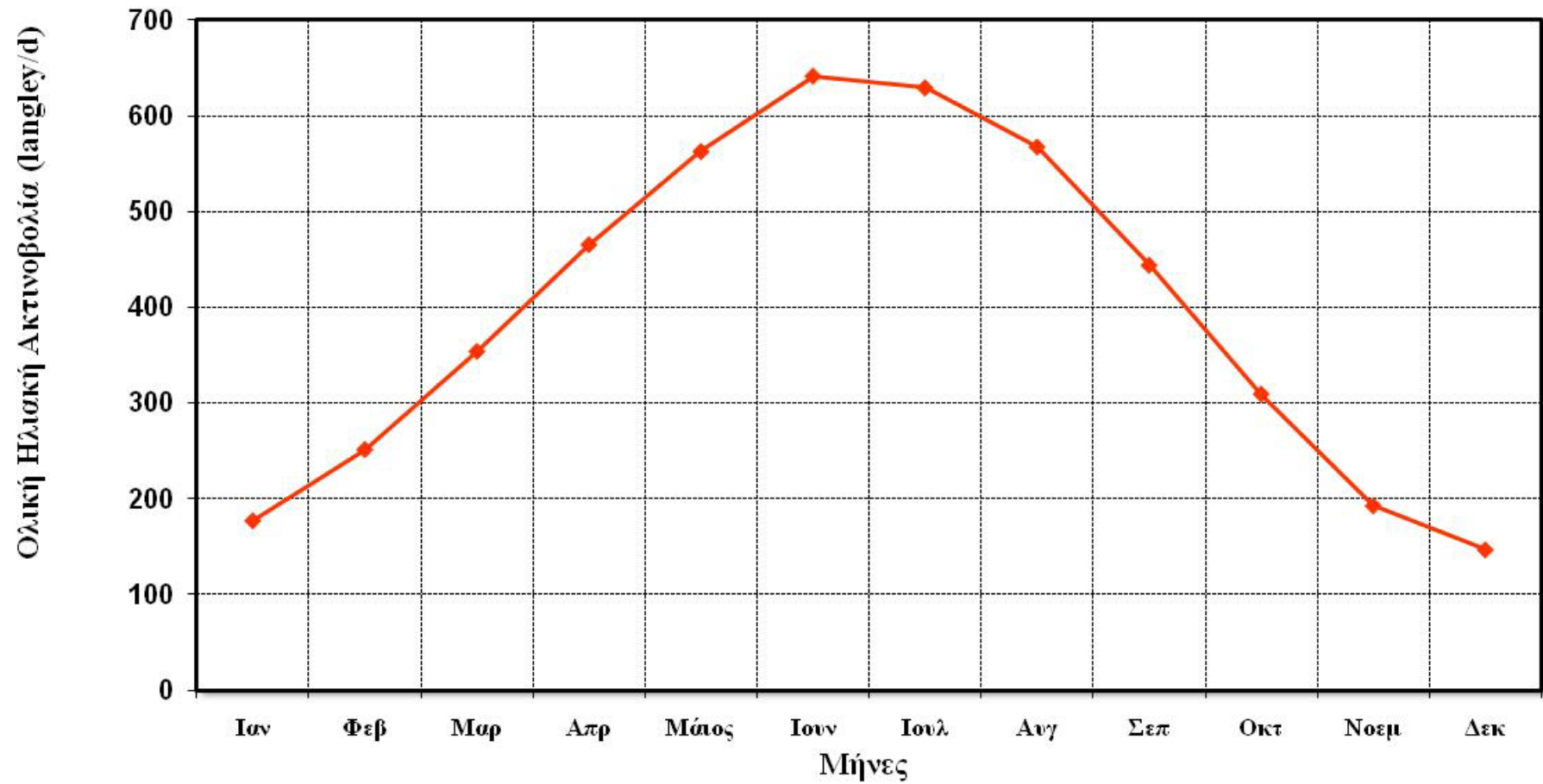


Σχήμα 4.2: Μηνιαίες τιμές του ύψους βροχής, στον σταθμό του Ε.Α.Α. στο Θησείο, για την περίοδο 1992-2008.





Σχήμα 4.3: Μέσες μηνιαίες τιμές της ταχύτητας του ανέμου, στον σταθμό του Ε.Α.Α. στο Θησείο, για την περίοδο 1992-2008.



Σχήμα 4.1: Μέσες μηνιαίες τιμές της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας, στον σταθμό του Ε.Α.Α. στο Θησείο, για την περίοδο 1992-2008.

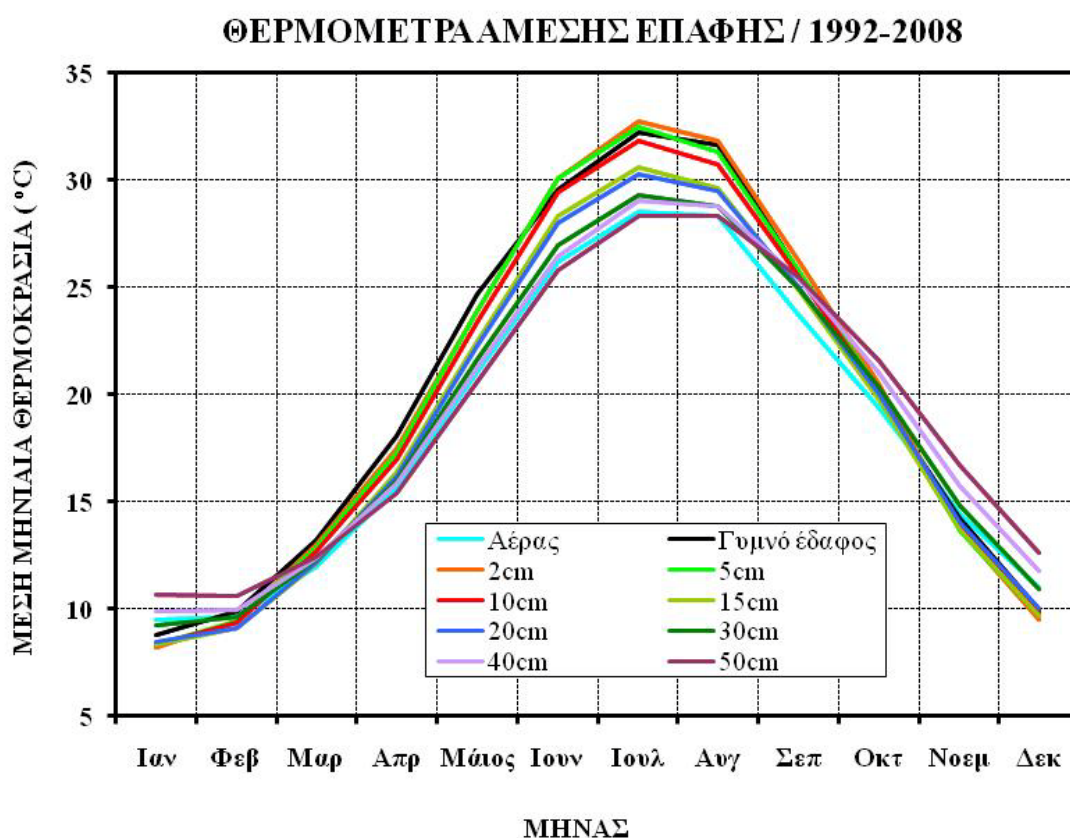
## 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ

### 5.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΕΛΑΦΟΥΣ

Η ανάλυση των θερμοκρασιών εδάφους εστιάζει στην κλιματολογία των θερμοκρασιών εδάφους σε διάφορα βάθη την περίοδο 1992-2008 του αυτοματοποιημένου σταθμού του Ε.Α.Α. στο Θησείο.

#### 5.1.1 Ετήσια Διακύμανση Θερμοκρασίας

Οι μέσες μηνιαίες τιμές της θερμοκρασίας του υπερκείμενου αέρα, του γυμνού εδάφους, καθώς και σε βάθη από 2 έως 50 cm, για την εξεταζόμενη χρονική περίοδο 1992-2008, παρουσιάζονται γραφικά στο Σχήμα 5.1.1.



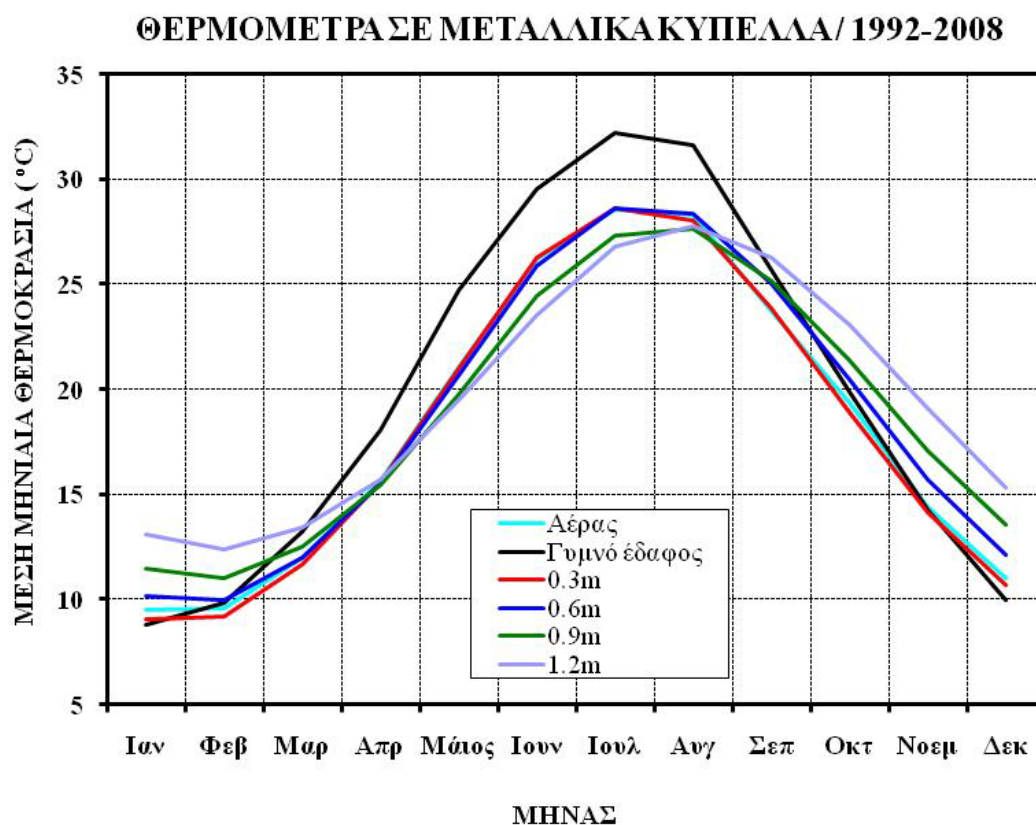
**Σχήμα 5.1.1.:** Ετήσια πορεία της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας του αέρα, του γυμνού εδάφους και σε βάθη από 2 έως 50 cm, κατά την περίοδο 1992-2008.

Από το Σχήμα 5.1.1 φαίνεται ότι ο Ιανουάριος είναι ο ψυχρότερος μήνας του έτους, όχι μόνο στην γυμνή επιφάνεια του εδάφους αλλά και σε όλα τα βάθη μέχρι 40 cm, ενώ ο

Φεβρουάριος για τα 50 cm. Αντίθετα, ο Ιούλιος είναι ο θερμότερος μήνας έως το βάθος των 40 cm, ενώ ο Αύγουστος για τα 50 cm. Τα αποτελέσματα αυτά υποδηλώνουν την ύπαρξη μιας καθυστέρησης στην μεταφορά της θερμότητας μέσα στο έδαφος. Σε ανάλογα συμπεράσματα κατέληξαν οι Livadas και Goutsidou (1974, 1972) για την περιοχή της Θεσσαλονίκης και ο Ψυλόγλου (1992) κατά τον πρώτο χρόνο λειτουργίας του αυτοποιημένου σταθμού του Ε.Α.Α. στο Θησείο του οποίου τα δεδομένα αξιοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.

Αξίζει να σημειωθεί η αύξηση της θερμοκρασίας με το βάθος στην περίοδο Οκτωβρίου-Φεβρουαρίου, δηλαδή για δύο μήνες πριν και δύο μήνες μετά από το Δεκέμβριο, που είναι ο μήνας με την μικρότερη ηλιοφάνεια (Livadas and Flokas 1972).

Οι μέσες μηνιαίες τιμές της θερμοκρασίας του εδάφους με θερμομέτρα μέσα σε κύπελλα, στα βάθη 0.3, 0.6, 0.9 και 1.2 m, κατά την εξεταζόμενη περίοδο, παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.1.2.



**Σχήμα 5.1.2.:** Ετήσια πορεία της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας του αέρα, του γυμνού εδάφους και στα βάθη 0.3, 0.6, 0.9, και 1.2 m, κατά την περίοδο 1992-2008

Με βάση τις μέσες μηνιαίες τιμές του σχήματος 5.1.2, το στρώμα του εδάφους από 0.3 μέχρι 1.2 m παρουσιάζεται σχεδόν ισόθερμο. Το ετήσιο εύρος κύμανσης της θερμοκρασίας

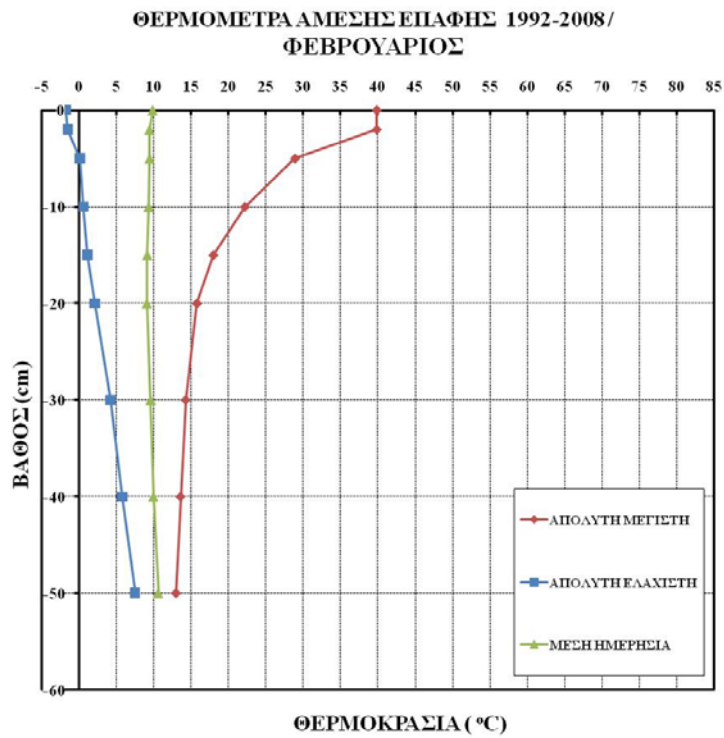
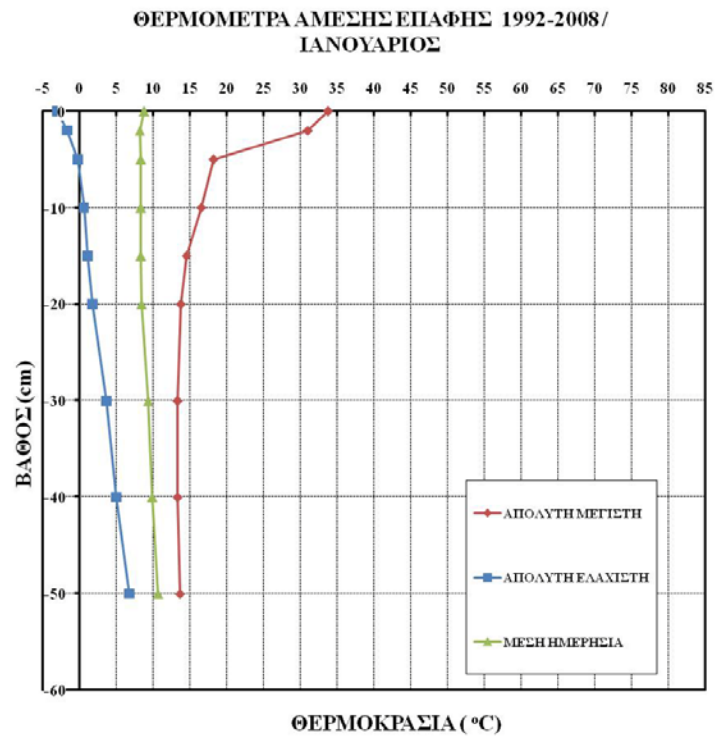
ελαττώνεται με το βάθος με μικρό ρυθμό. Για τα βάθη 0.3 και 0.6 m ο θερμότερος μήνας είναι ο Ιούλιος ενώ για τα βάθη 0.9 και 1.2 m ο Αύγουστος. Το γεγονός αυτό ενισχύει τον κανόνα καθυστέρησης στην μεταφορά θερμότητας μέσα στο έδαφος που παρατηρήθηκε και στην ομάδα θερμομέτρων άμεσης επαφής από 0.2 έως 50 cm. Παρατηρείται επίσης ότι ο ψυχρότερος μήνας σε όλα τα βάθη είναι ο Φεβρουάριος με εξαίρεση το βάθος 0.3 m για το οποίο είναι ο Ιανουάριος. Οι Livadas και Goutsidou (1974) διαπίστωσαν ότι για τα θερμομέτρα σε μεταλλικά κύπελα στα βάθη 0.30, 0.60 και 1.20 m ο θερμότερος μήνας είναι ο Αύγουστος ενώ ο Ψυλόγλου (1992) ότι θερμότερος μήνας είναι ο Ιούλιος για τα βάθη 0.30, 0.60 και 0.90 m και ο Αύγουστος για τα 1.20 m. Αντίθετα ψυχρότερος μήνας κατά τους Livadas και Goutsidou (1974) είναι ο Ιανουάριος για τα βάθη 0.30, 0.6 m και ο Φεβρουάριος για τα 1.20 m και για τον Ψυλόγλου (1992) ο Φεβρουάριος για όλα τα βάθη πλην των 0.30 m που ψυχρότερος μήνας είναι ο Δεκέμβριος. Οι διαφορές που παρατηρούνται είναι πιθανό να οφείλονται όσο αφορά τους Livadas και Goutsidou στην περιοχή μελέτης όπου είναι η Θεσσαλονίκη (βόρεια Ελλάδα) και στην διαφορετική κλιματολογία αυτής, ο Ψυλόγλου (1992) αναφέρεται στα δεδομένα του ίδιου σταθμού αλλά μόνο κατά τον πρώτο χρόνο λειτουργίας του. Τέλος ο Μαριολόπουλος (1928) κατέληξε σε συμπεράσματα που ταυτίζονται με αυτά της παρούσας μελέτης με εξαίρεση τον θερμότερο μήνα στα 0.60 m που είναι ο Αύγουστος. Η ύπαρξη χρονοκαθυστέρησης κατά την μεταφορά της θερμότητας στο έδαφος επιβεβαιώνεται και από τους παραπάνω.

Στα σχήματα 5.1.3-5.1.8., παρουσιάζεται γραφικά η διακύμανση της μέσης μηνιαίας, της απόλυτης μέγιστης και απόλυτης ελάχιστης θερμοκρασίας του εδάφους συναρτήσει του βάθους, με θερμομέτρα άμεσης επαφής, για όλους τους μήνες του έτους, για την εξεταζόμενη περίοδο 1992-2008, ενώ στα σχήματα 5.1.9-5.1.14., παρουσιάζεται αντίστοιχα η διακύμανση της μέσης μηνιαίας, της απόλυτης μέγιστης και απόλυτης ελάχιστης θερμοκρασίας του εδάφους συναρτήσει του βάθους, με θερμομέτρα σε μεταλλικά κύπελλα, για όλους τους μήνες του έτους, για την εξεταζόμενη περίοδο 1992-2008. Από το σύνολο των παραπάνω σχημάτων παρατηρείται ότι η μέγιστη μηνιαία μεταβολή της θερμοκρασίας σημειώνεται στην επιφάνεια του εδάφους, ενώ αυτή μειώνεται καθώς αυξάνει το βάθος. Μεγάλο εύρος των ακραίων τιμών εμφανίζεται στην επιφάνεια του γυμνού εδάφους έως τα 2cm.

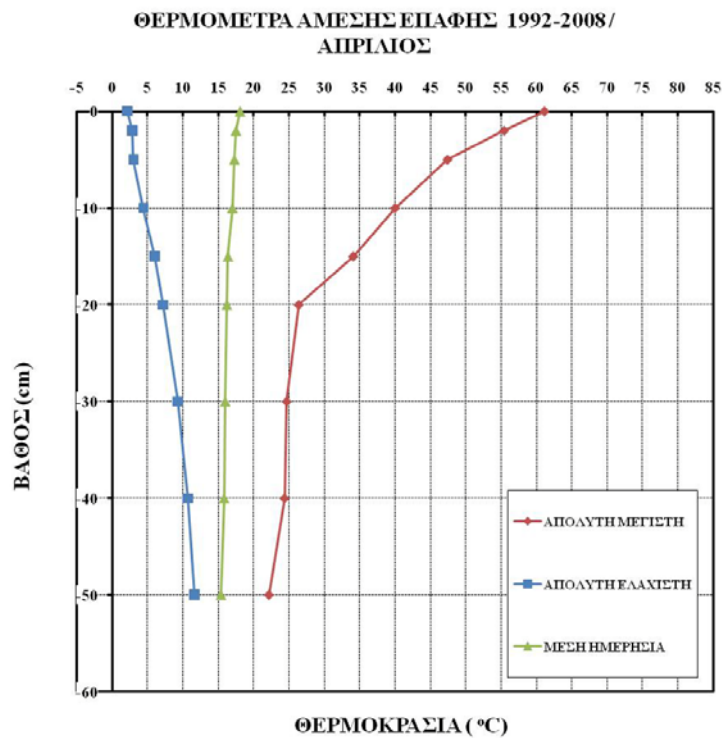
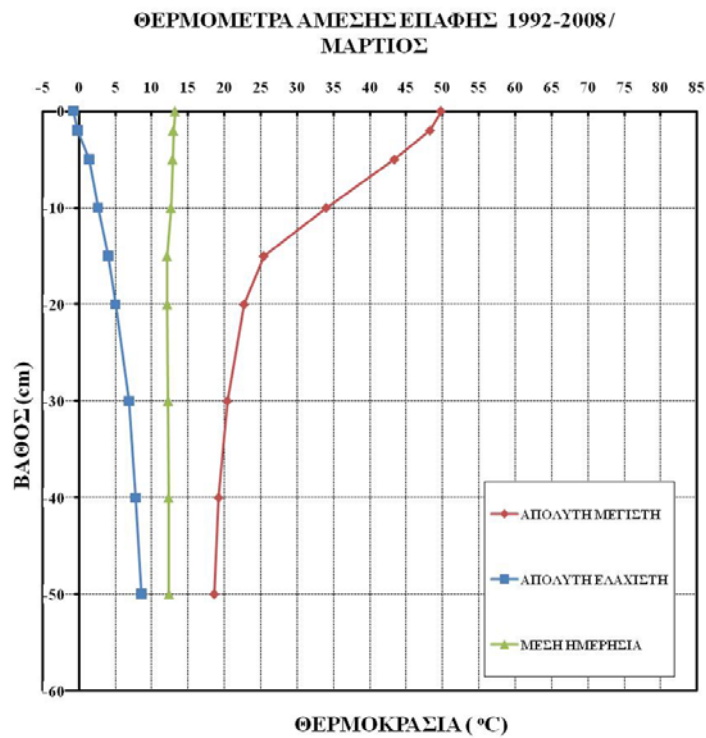
Επίσης παρατηρείται ότι το απόλυτο θερμοκρασιακό εύρος, δηλαδή η διαφορά της απόλυτης μέγιστης από την απόλυτη ελάχιστη μειώνονται σε συνάρτηση με το βάθος, με αξιοσημείωτο ρυθμό στα πρώτα στρώματα του εδάφους. Για το γυμνό έδαφος είναι μεγαλύτερο κατά τους καλοκαιρινούς μήνες Ιούλιος + 55 °C, ενώ τον Ιανουάριο +37 °C

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι για την εξεταζόμενη περίοδο 1992-2008, δεν καταγράφηκαν αρνητικές θερμοκρασίες σε βάθη μεγαλύτερα των 5 cm. Ακόμα και στο βάθος των 5 cm παρατηρήθηκαν μόνο 3-4 τιμές αρνητικών θερμοκρασιών της τάξης των -0.2 °C μόνο. Θερμοκρασίες κάτω των 0 °C καταγράφονται στην επιφάνεια του εδάφους από τον

Δεκέμβριο μέχρι και Φεβρουάριο. Σε βάθος 0.20 m και μεγαλύτερο η διαδοχή των εποχών έχει πολύ μικρή επίδραση στην διακύμανση της θερμοκρασίας

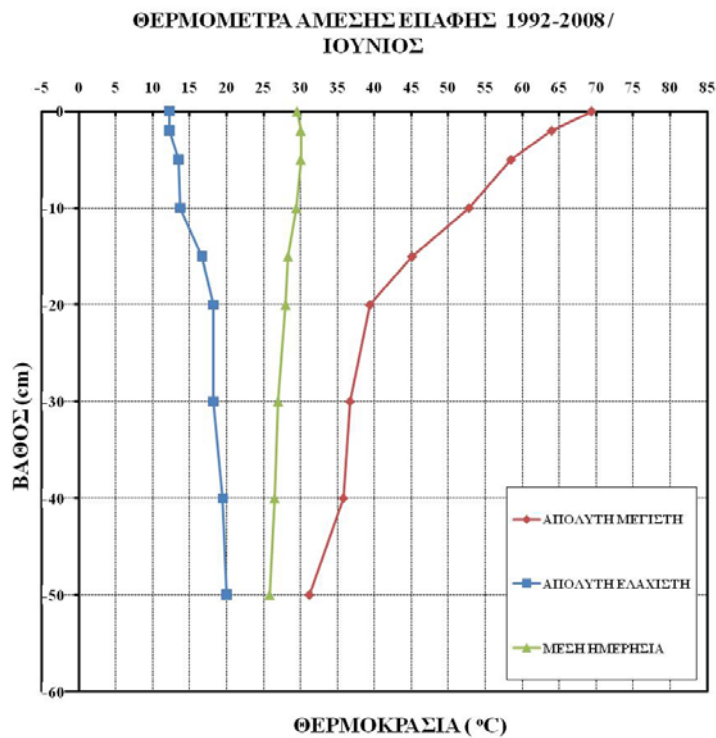
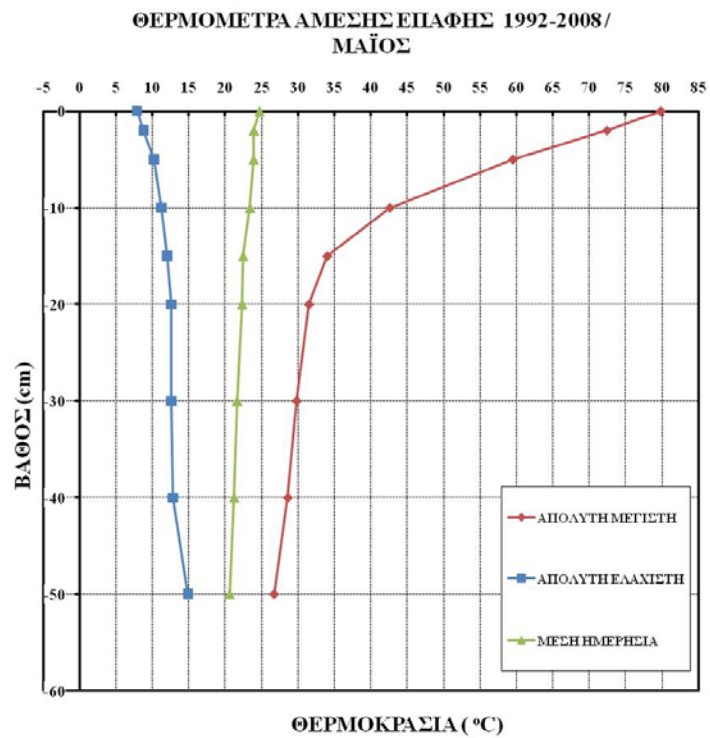


**Σχήμα 5.1.3.:** Διακύμανση της μέσης μηνιαίας, της απόλυτης μέγιστης και απόλυτης ελάχιστης θερμοκρασίας του εδάφους συναρτήσει του βάθους, με θερμομέτρα άμεσης επαφής, για τους μήνες Ιανουάριο και Φεβρουάριο, για την εξεταζόμενη περίοδο 1992-2008

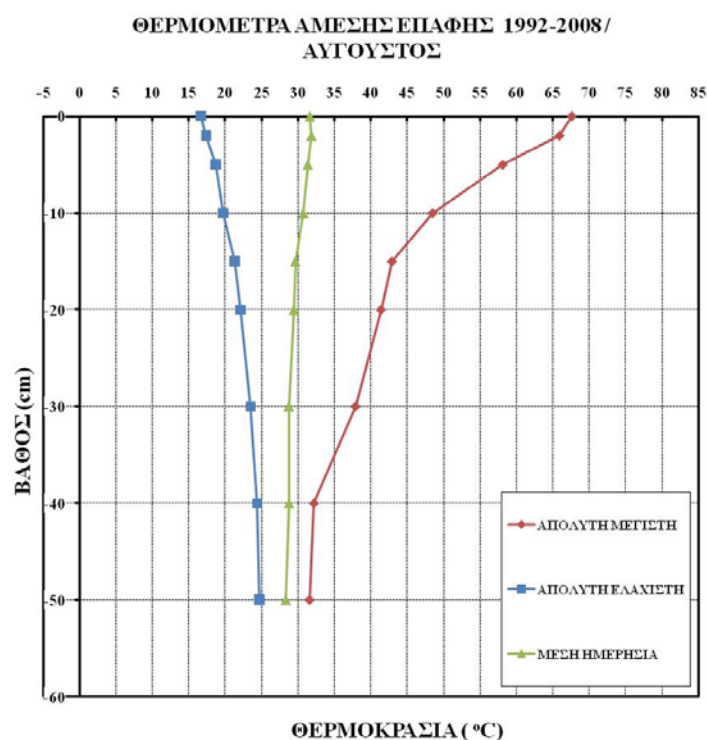
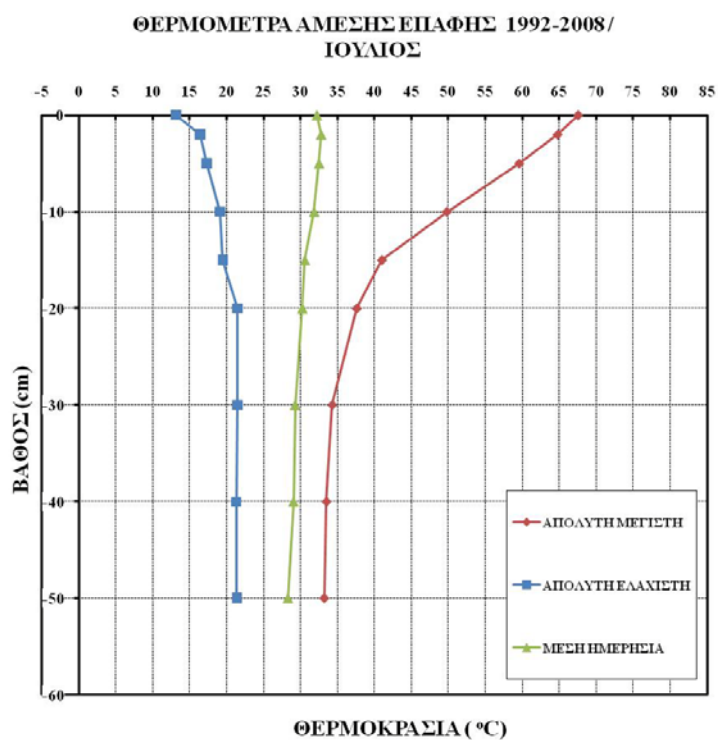


**Σχήμα 5.1.4.:** Διακύμανση της μέσης μηνιαίας, της απόλυτης μέγιστης και απόλυτης ελάχιστης θερμοκρασίας του εδάφους συναρτήσει του βάθους, με θερμομέτρα άμεσης επαφής, για τους μήνες Μάρτιο και Απρίλιο, για την εξεταζόμενη περίοδο 1992-2008

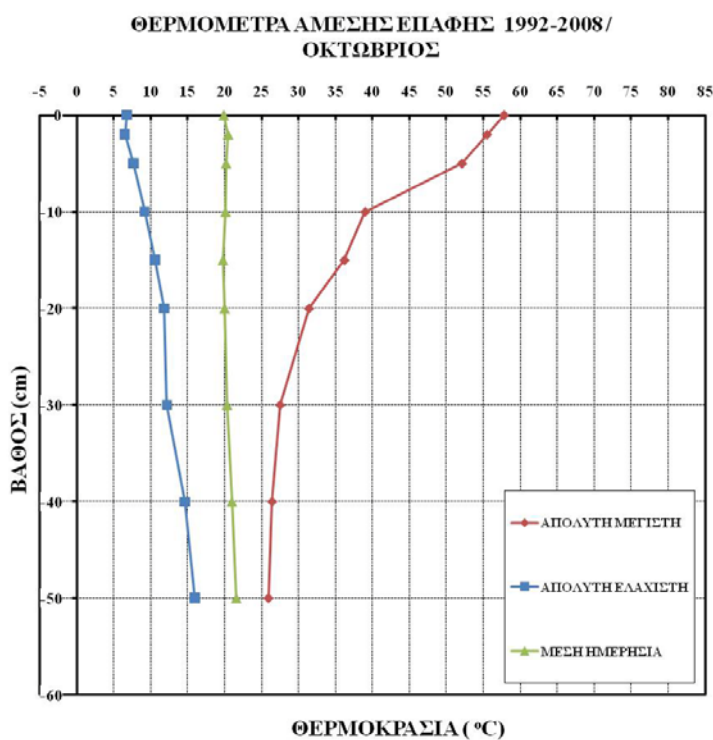
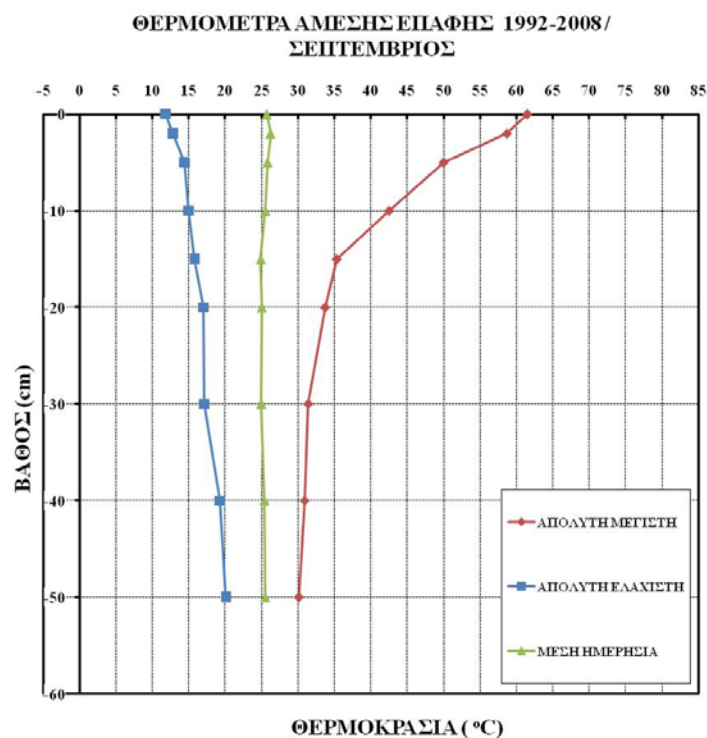




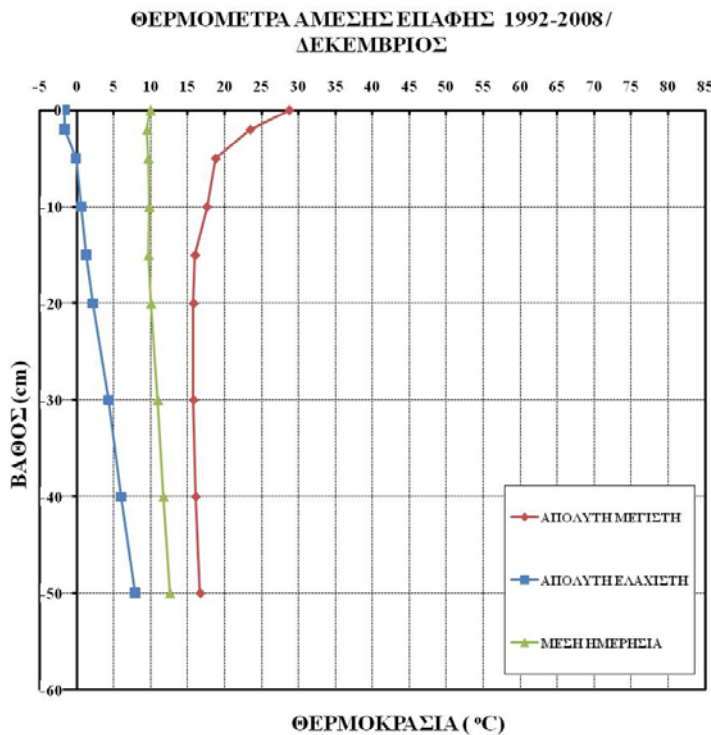
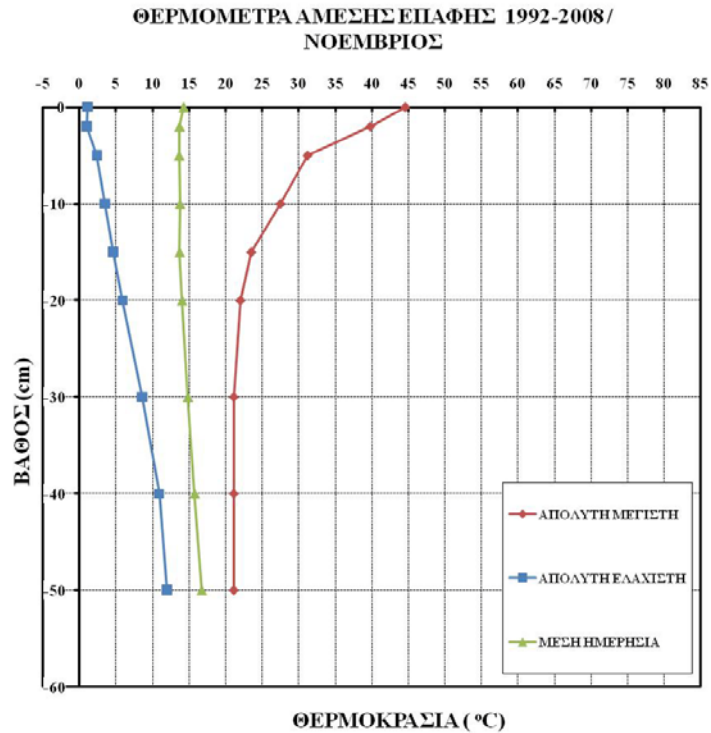
**Σχήμα 5.1.5.:** Διακύμανση της μέσης μηνιαίας, της απόλυτης μέγιστης και απόλυτης ελάχιστης θερμοκρασίας του εδάφους συναρτήσει του βάθους, με θερμομέτρα άμεσης επαφής, για τους μήνες Μάιο και Ιούνιο, για την εξεταζόμενη περίοδο 1992-2008



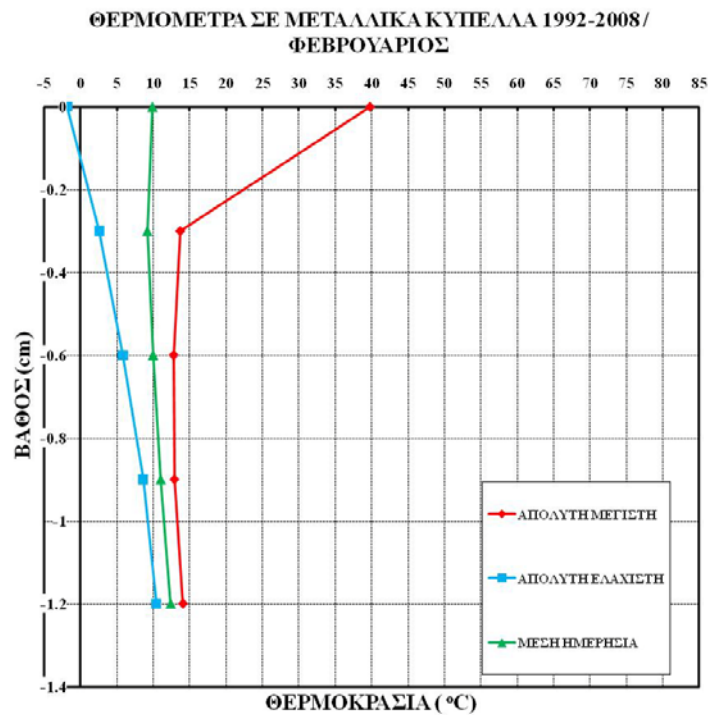
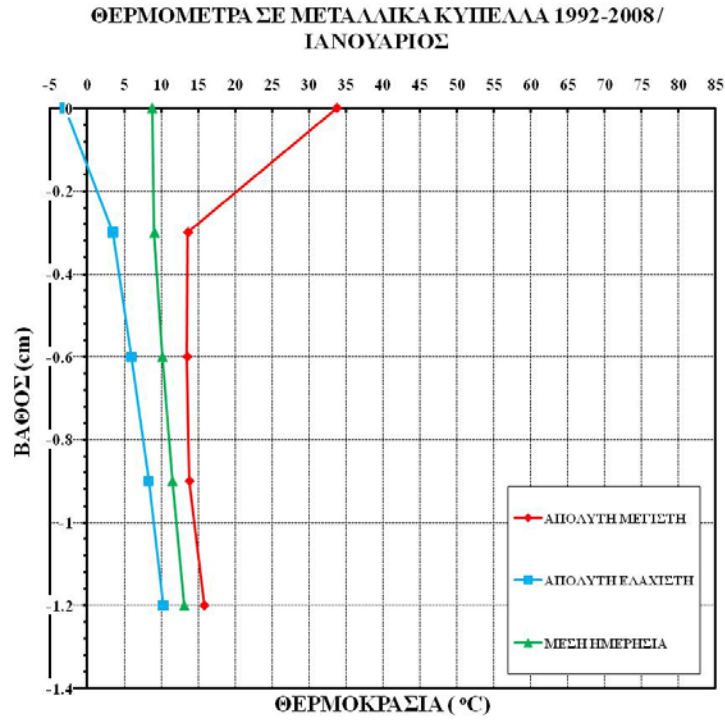
**Σχήμα 5.1.6.:** Διακύμανση της μέσης μηνιαίας, της απόλυτης μέγιστης και απόλυτης ελάχιστης θερμοκρασίας του εδάφους συναρτήσει του βάθους, με θερμομέτρα άμεσης επαφής, για τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο, για την εξεταζόμενη περίοδο 1992-2008



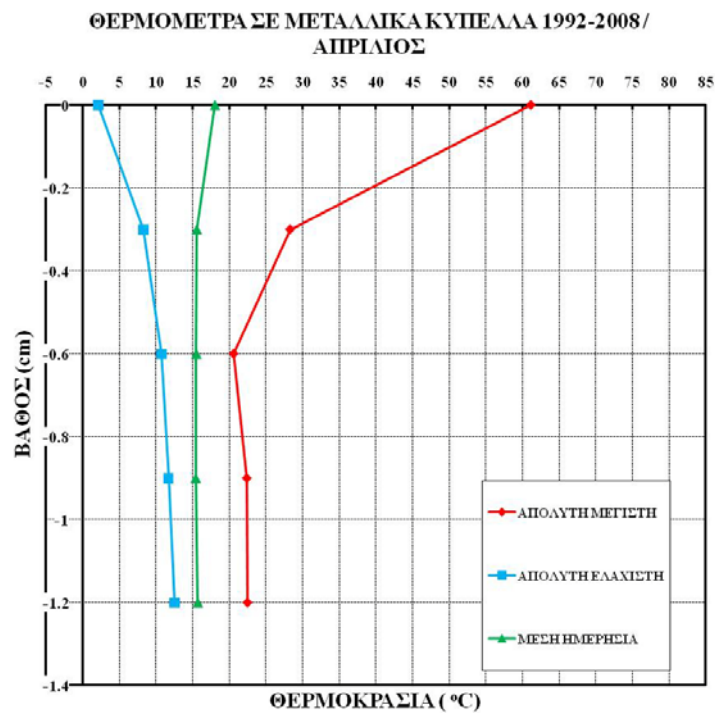
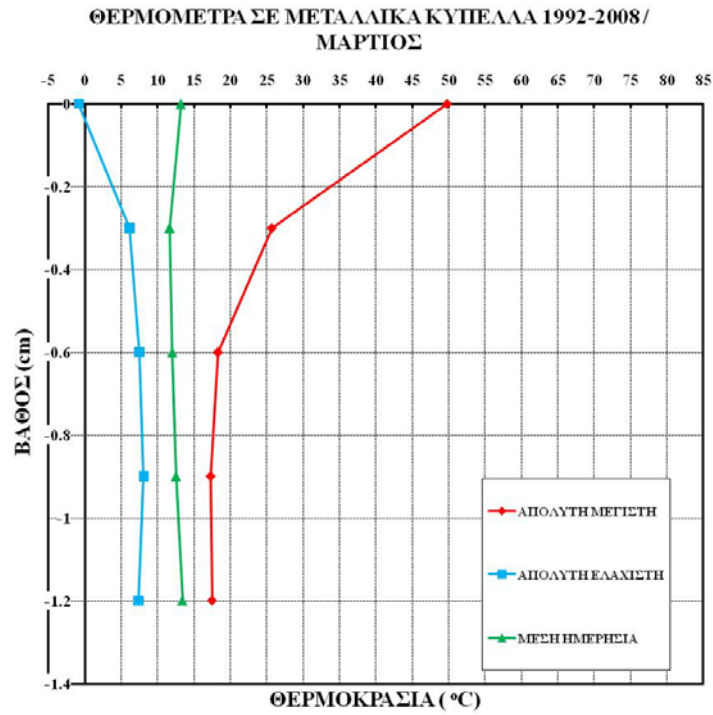
**Σχήμα 5.1.7.:** Διακύμανση της μέσης μηνιαίας, της απόλυτης μέγιστης και απόλυτης ελάχιστης θερμοκρασίας του εδάφους συναρτήσει του βάθους, με θερμομέτρα άμεσης επαφής, για τους μήνες Σεπτέμβριο και Οκτώβριο, για την εξεταζόμενη περίοδο 1992-2008



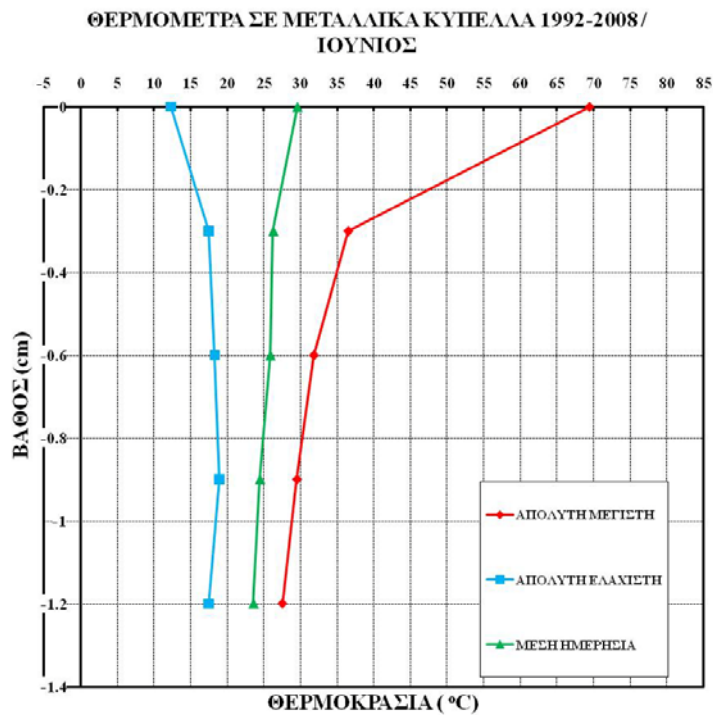
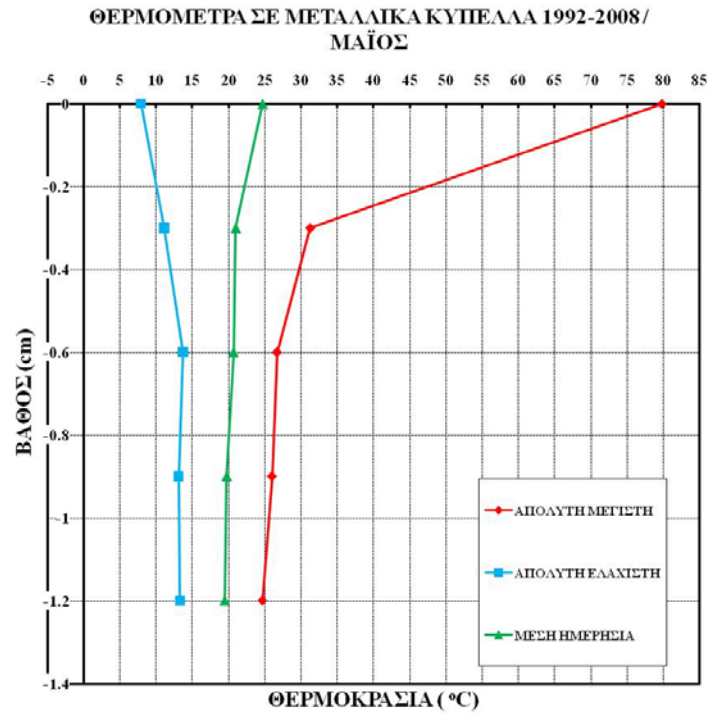
**Σχήμα 5.1.8.:** Διακύμανση της μέσης μηνιαίας, της απόλυτης μέγιστης και απόλυτης ελάχιστης θερμοκρασίας του εδάφους συναρτήσει του βάθους, με θερμομέτρα σε κύπελλα, για τους μήνες Νοέμβριο και Δεκέμβριο, για την εξεταζόμενη περίοδο 1992-2008



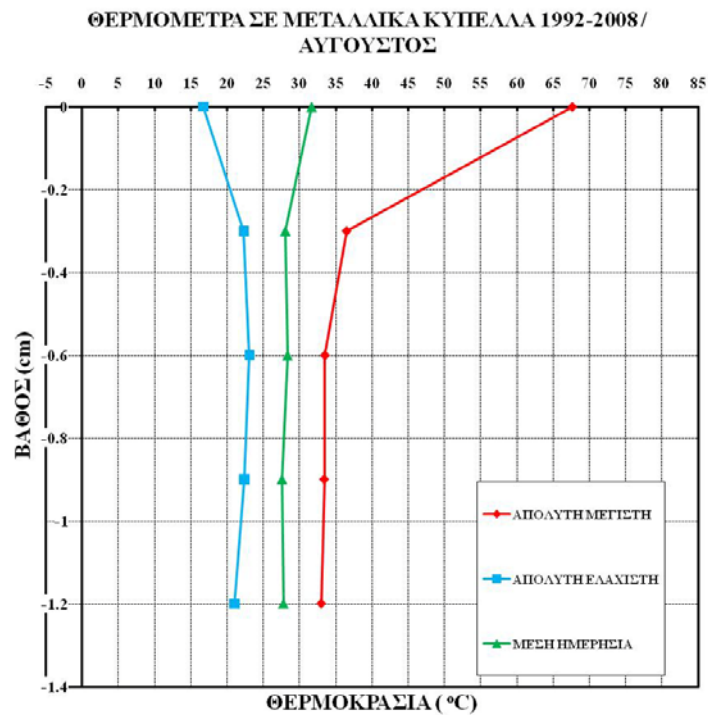
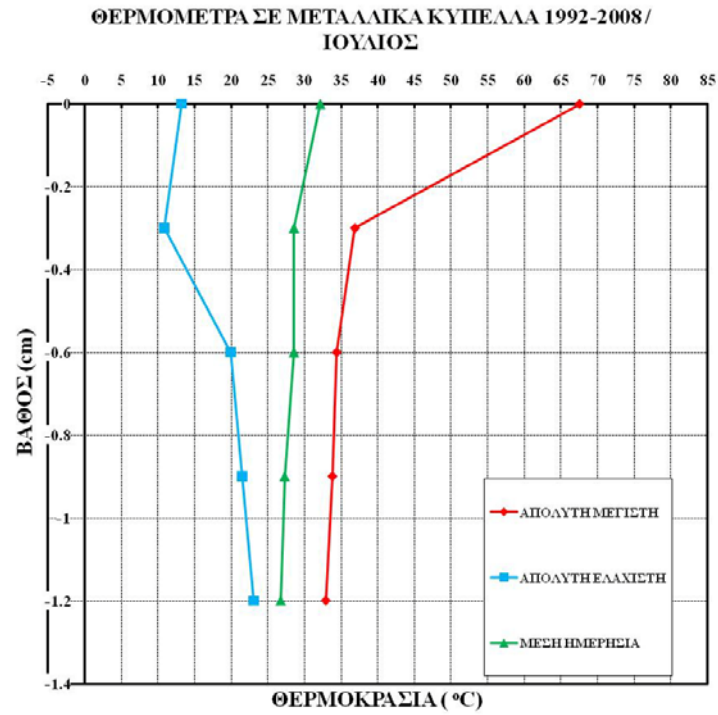
**Σχήμα 5.1.9.:** Διακύμανση της μέσης μηνιαίας, της απόλυτης μέγιστης και απόλυτης ελάχιστης θερμοκρασίας του εδάφους συναρτήσει του βάθους, με θερμομέτρα σε κύπελλα, για τους μήνες Ιανουάριο και Φεβρουάριο, για την εξεταζόμενη περίοδο 1992-2008



**Σχήμα 5.1.10.:** Διακύμανση της μέσης μηνιαίας, της απόλυτης μέγιστης και απόλυτης ελάχιστης θερμοκρασίας του εδάφους συναρτήσει του βάθους, με θερμομέτρα σε κύπελλα, για τους μήνες Μάρτιο και Απρίλιο, για την εξεταζόμενη περίοδο 1992-2008

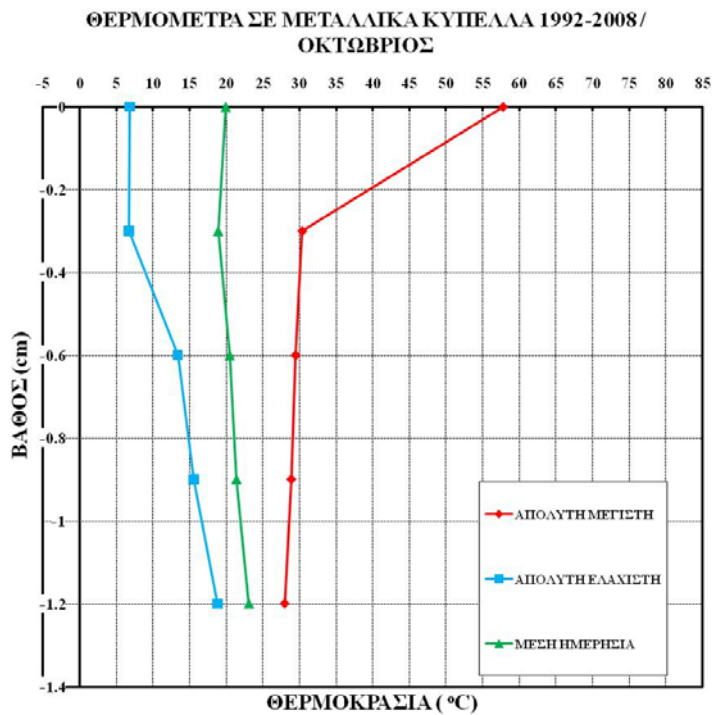
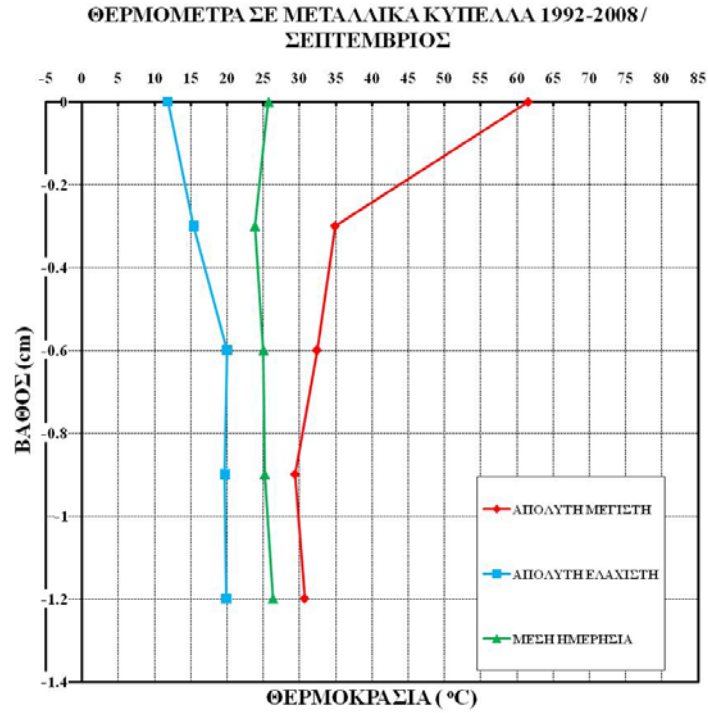


**Σχήμα 5.1.11.:** Διακύμανση της μέσης μηνιαίας, της απόλυτης μέγιστης και απόλυτης ελάχιστης θερμοκρασίας του εδάφους συναρτήσει του βάθους, με θερμομέτρα σε κύπελλα, για τους μήνες Μάιο και Ιούνιο, για την εξεταζόμενη περίοδο 1992-2008

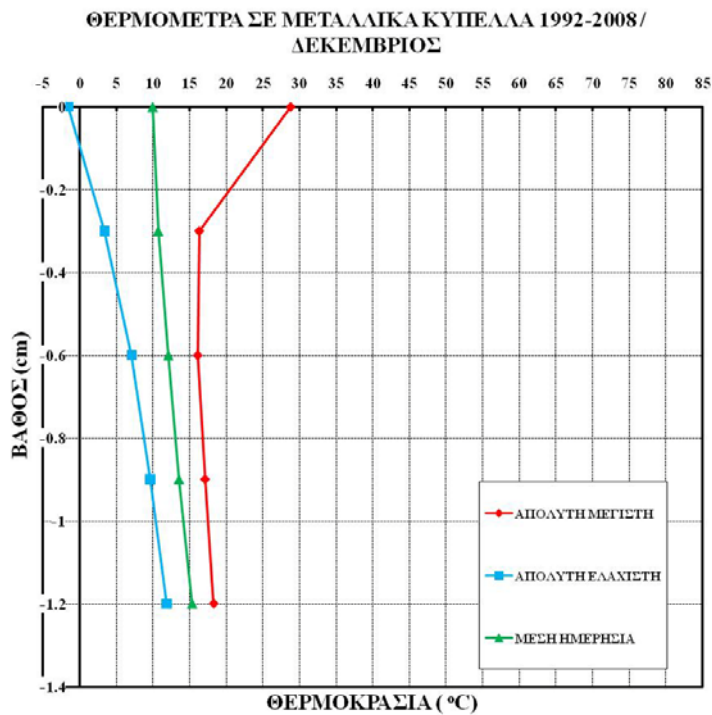
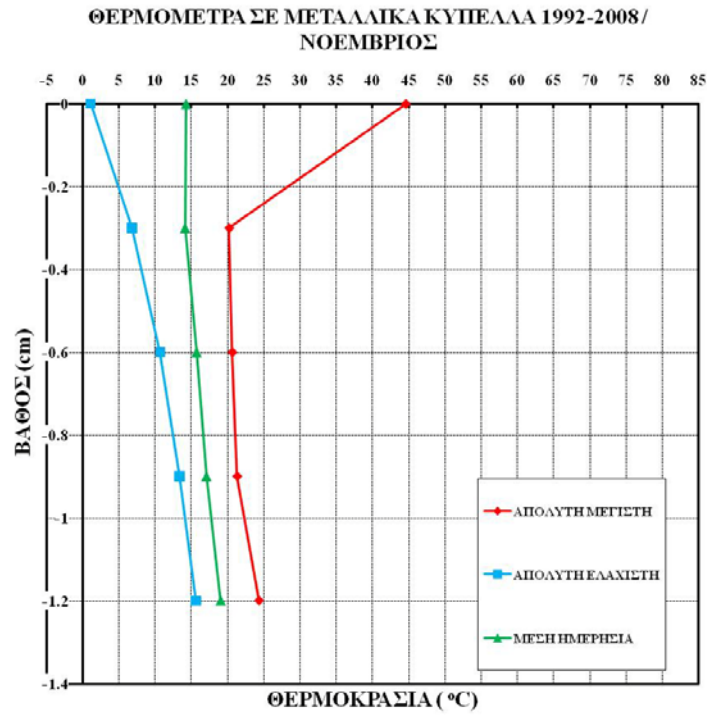


**Σχήμα 5.1.12.:** Διακύμανση της μέσης μηνιαίας, της απόλυτης μέγιστης και απόλυτης ελάχιστης θερμοκρασίας του εδάφους συναρτήσει του βάθους, με θερμομέτρα σε κύπελλα, για τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο, για την εξεταζόμενη περίοδο 1992-2008





**Σχήμα 5.1.13.:** Διακύμανση της μέσης μηνιαίας, της απόλυτης μέγιστης και απόλυτης ελάχιστης θερμοκρασίας του εδάφους συναρτήσει του βάθους, με θερμομέτρα σε κύπελλα, για τους μήνες Σεπτέμβριο και Οκτώβριο, για την εξεταζόμενη περίοδο 1992-2008



**Σχήμα 5.3.14.:** Διακύμανση της μέσης μηνιαίας, της απόλυτης μέγιστης και απόλυτης ελάχιστης θερμοκρασίας του εδάφους συναρτήσει του βάθους, με θερμομέτρα σε κύπελλα, για τους μήνες Νοέμβριο και Δεκέμβριο, για την εξεταζόμενη περίοδο 1992-2008

### 5.1.2 Ημερήσια Διακύμανση Θερμοκρασίας

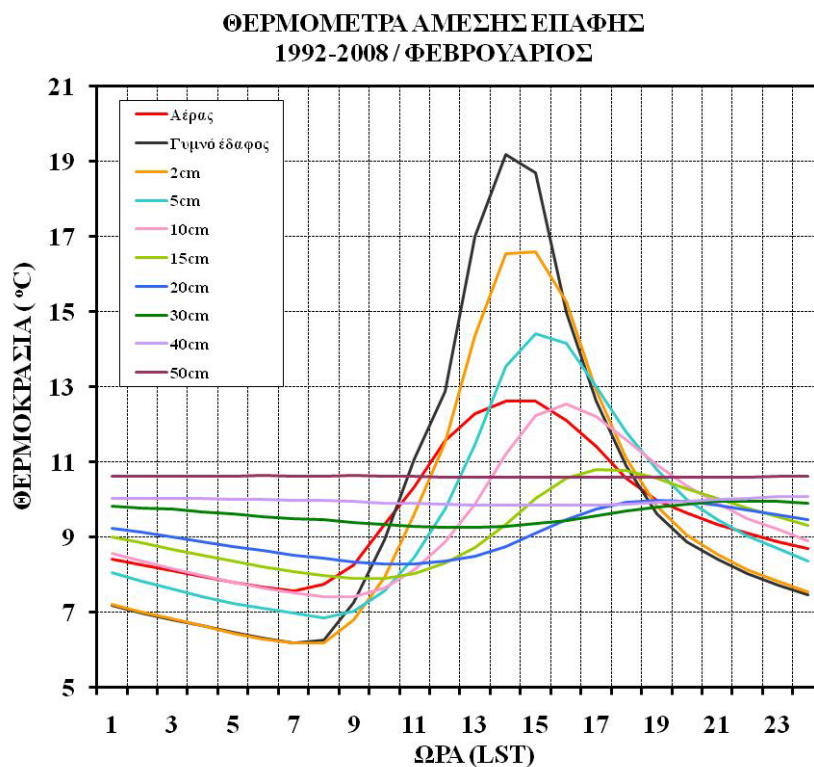
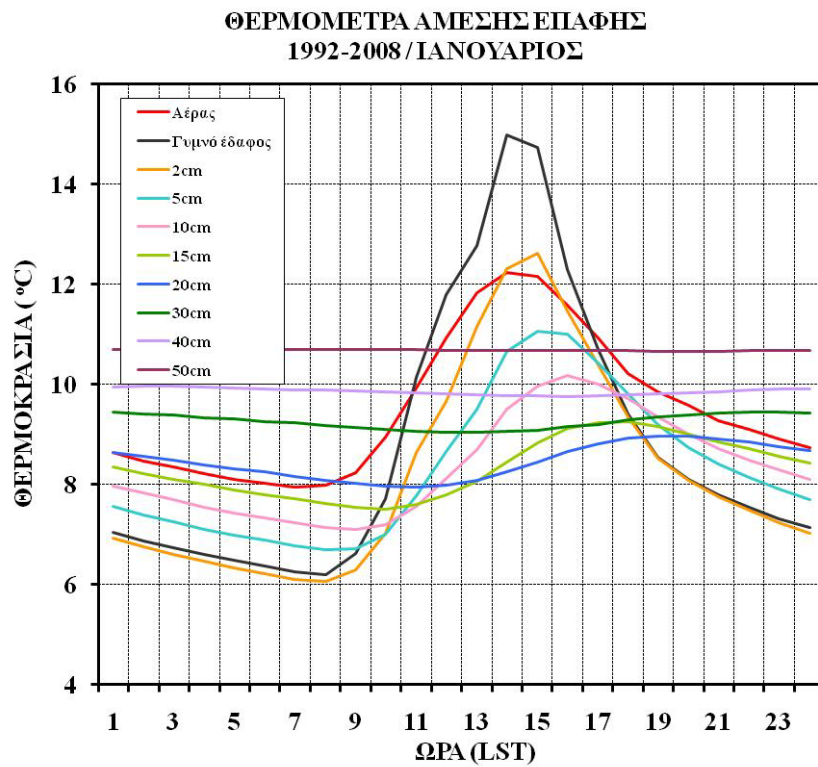
Στα σχήματα 5.1.15-5.1.20., παρουσιάζεται γραφικά η μέση ημερήσια διακύμανση του αέρα, του γυμνού εδάφους καθώς και στα βάθη από 2 έως 50 cm για τα θερμομέτρα άμεσης επαφής, για όλους τους μήνες του έτους, για την περίοδο 1992-2008.

Σύμφωνα με τα σχήματα 5.1.15-5.1.20. η θερμοκρασία της επιφάνειας του εδάφους αυξάνει προοδευτικά από την ανατολή του ήλιου μέχρι τις πρώτες ώρες του απογεύματος, για να ελαττωθεί στην συνέχεια μέχρι την ανατολή του ήλιου την επόμενη ημέρα. Η θερμοκρασία του εδάφους αυξάνει πολύ γρήγορα γύρω στις 09:00 ή 10:00 LST, και ελαττώνεται πάλι γρήγορα μετά την δύση του ήλιου.

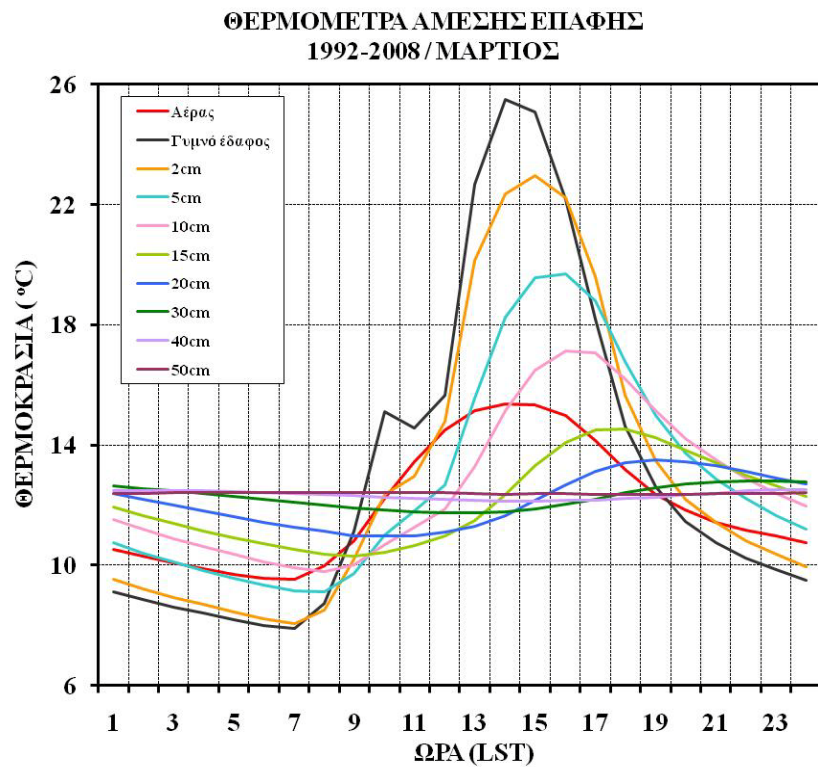
Το ελάχιστο της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του εδάφους κατά τον χειμώνα και το καλοκαίρι, παρουσιάζεται κανονικά την στιγμή της ανατολής (ή λίγο αργότερα), σχεδόν ταυτόχρονα με εκείνο του αέρα των κατώτερων στρωμάτων, όπου έχουμε εξίσωση των δύο αντίθετης φοράς ακτινοβολιών (εισερχόμενης ηλιακής και εξερχόμενης γήινης). Το μέγιστο όμως παρατηρείται γύρω στις 13:00-14:00 LST, 1 ώρα περίπου μετά το μέγιστο της ηλιακής ακτινοβολίας και 1 περίπου ώρα νωρίτερα από το μέγιστο της θερμοκρασίας του αέρα. Σημειώνεται επίσης ότι η μέση θερμοκρασία της επιφάνειας του εδάφους είναι μεγαλύτερη εκείνης του αέρα, ιδίως κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών.

Περαιτέρω, με βάση τα Σχήματα 5.1.15-5.1.20 παρατηρείται ότι σε μεγαλύτερα βάθη, παρουσιάζεται διαδοχικά μείωση του εύρους ημερήσιας κύμανσης της θερμοκρασίας. Επίσης παρατηρείται όλο και μεγαλύτερη χρονική υστέρηση κατά την εμφάνιση της μέγιστης θερμοκρασίας στο εκάστοτε βάθος, σε σχέση πάντα με την χρονική στιγμή εμφάνισης του μεγίστου στην επιφάνεια του εδάφους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα στο βάθος των 50 cm, η θερμοκρασία να συνεχίζει να ανέρχεται έως τις βραδινές ή ακόμα και τις πρώτες πρωινές ώρες. Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξαν ο Μαριολόπουλος (1928) και ο Ψυλόγλου (1992).

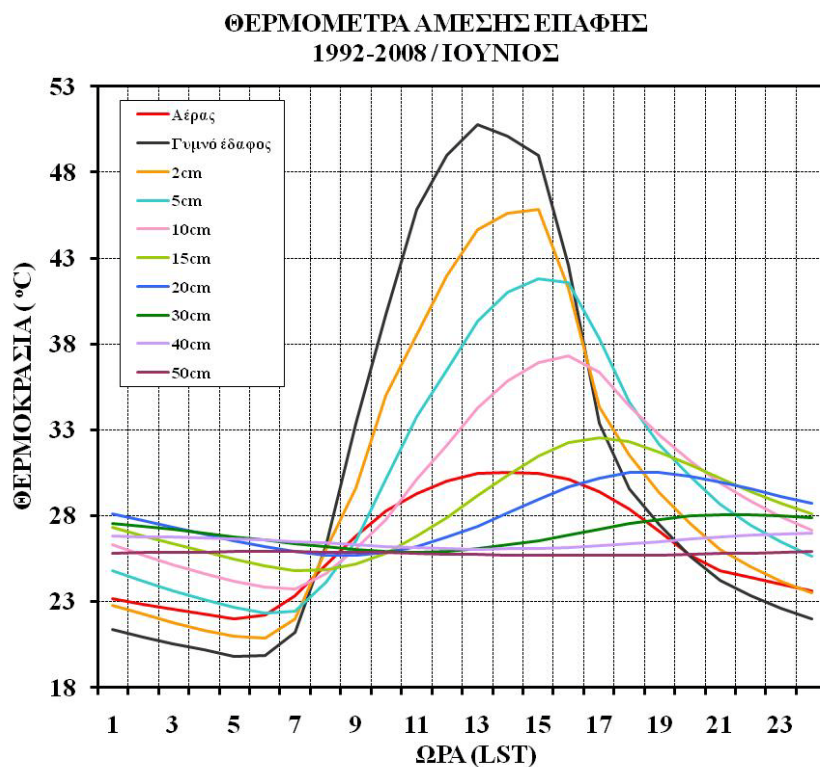
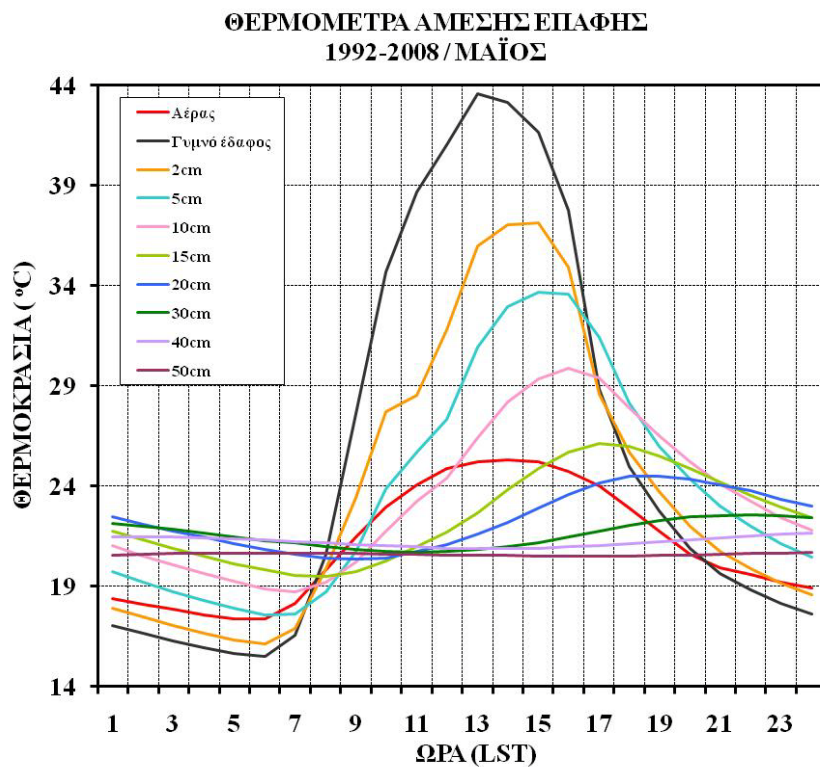
Όσον αφορά την επίδραση την οποία ασκούν οι εποχιακές μεταβολές του καιρού στην διαμόρφωση της μέσης μηνιαίας ημερήσιας πορείας της θερμοκρασίας του εδάφους στα διάφορα βάθη, παρατηρείται την σταδιακή μείωση με την αύξηση του βάθους καταγραφής της θερμοκρασίας. Παρόλα αυτά η διακύμανση της θερμοκρασίας του εδάφους είναι μικρότερη τον Ιανουάριο και μεγαλύτερη τον Ιούλιο.



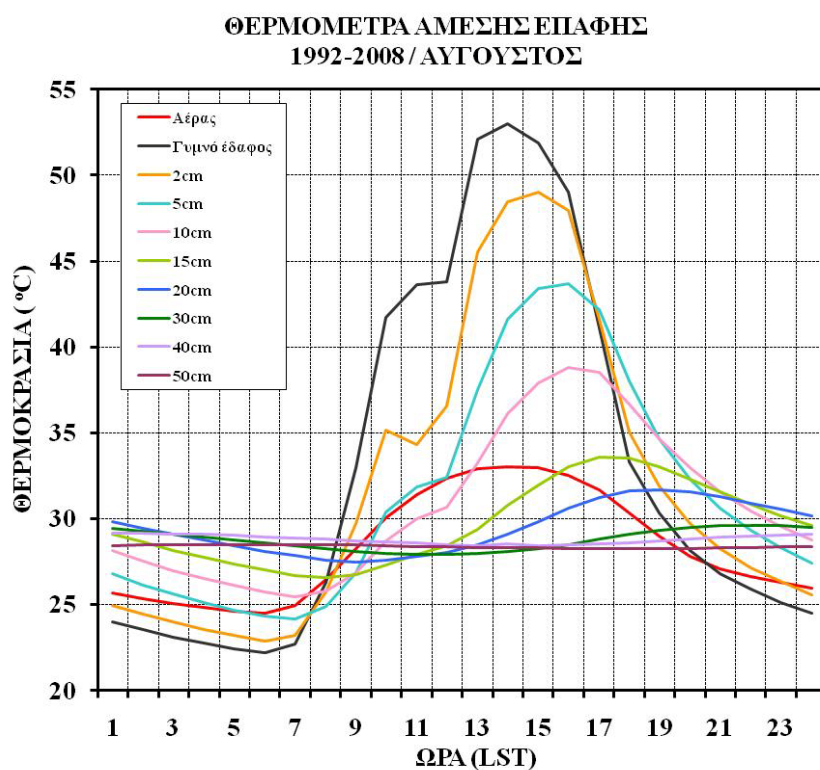
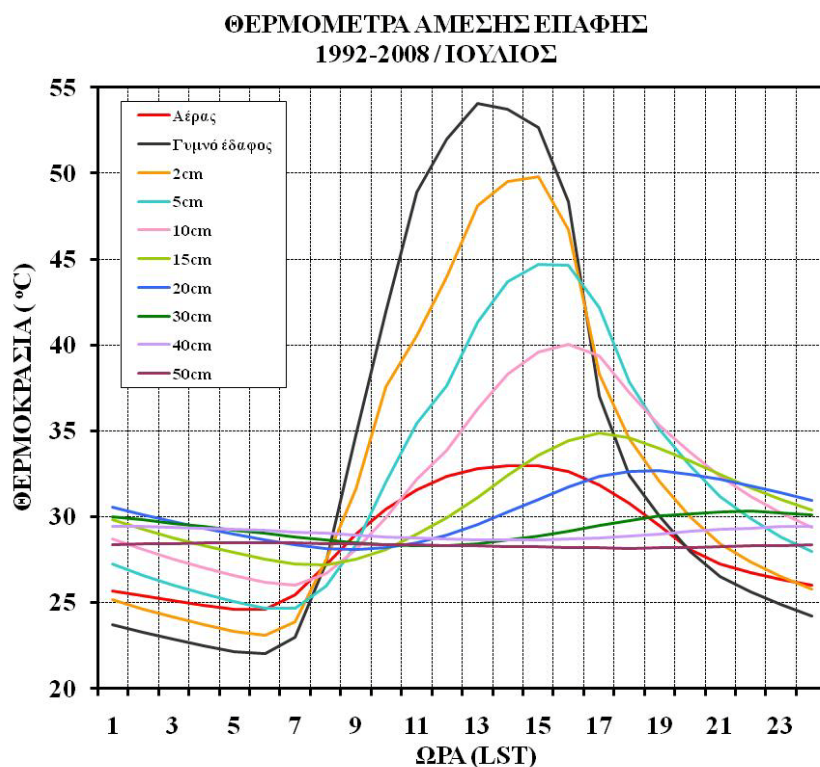
**Σχήμα 5.1.15.:** Μέση ημερήσια διακύμανση της θερμοκρασίας του αέρα, του γυμνού εδάφους και σε βάθη από 2 έως 50 cm, για τους μήνες Ιανουάριο και Φεβρουάριο, για την εξεταζόμενη περίοδο 1992-2008.



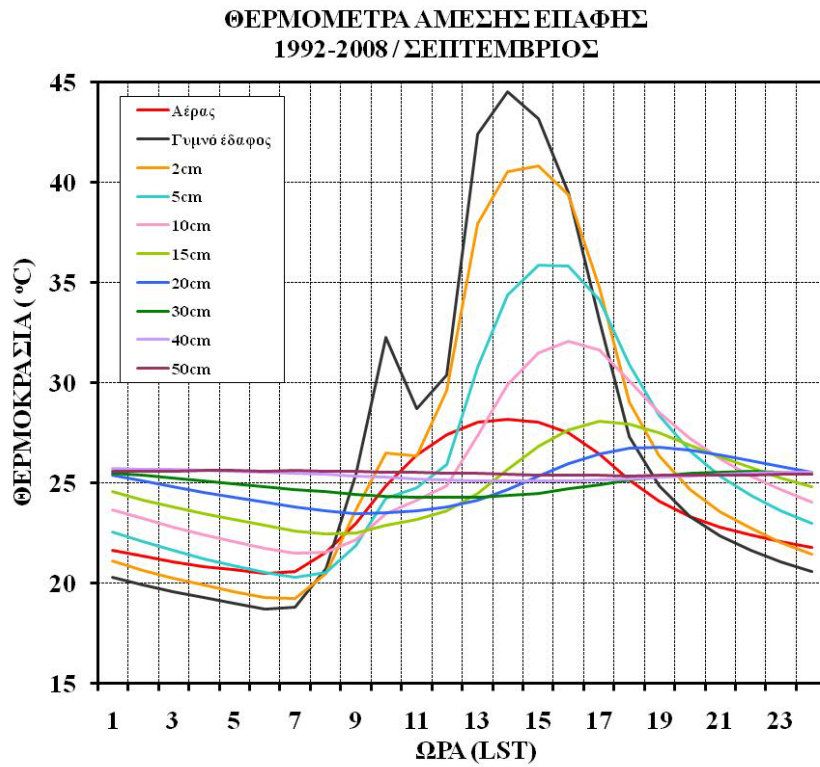
**Σχήμα 5.1.16.:** Μέση ημερήσια διακύμανση της θερμοκρασίας του αέρα, του γυμνού εδάφους και σε βάθη από 2 έως 50 cm, για τους μήνες Μάρτιο και Απρίλιο, για την εξεταζόμενη περίοδο 1992-2008.



**Σχήμα 5.1.17.:** Μέση ημερήσια διακύμανση της θερμοκρασίας του αέρα, του γυμνού εδάφους και σε βάθη από 2 έως 50 cm, για τους μήνες Μάιο και Ιούνιο, για την εξεταζόμενη περίοδο 1992-2008.

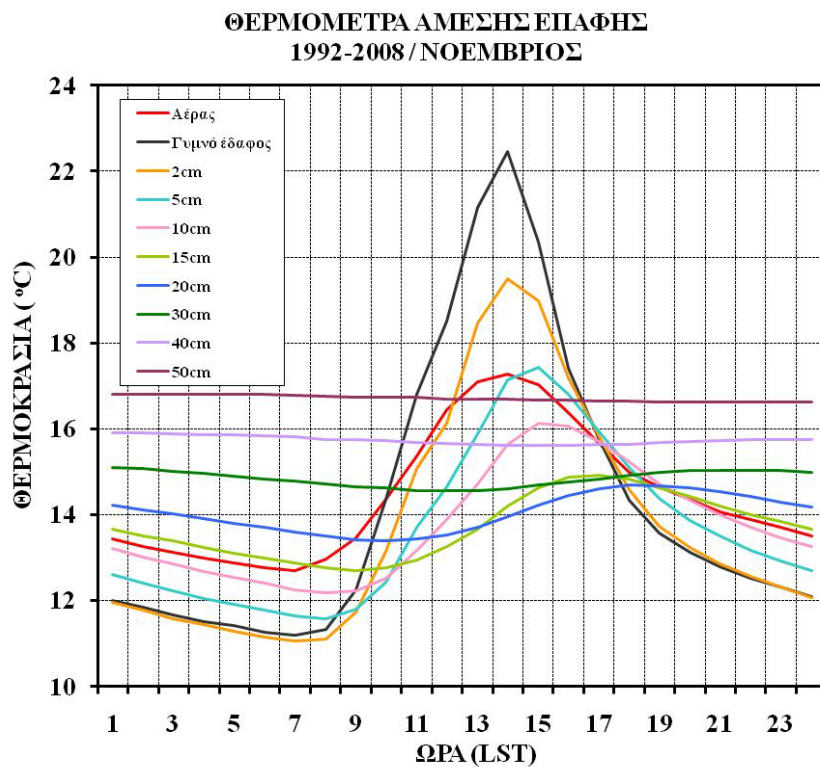


**Σχήμα 5.1.18.:** Μέση ημερήσια διακύμανση της θερμοκρασίας του αέρα, του γυμνού εδάφους και σε βάθη από 2 έως 50 cm, για τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο, για την εξεταζόμενη περίοδο 1992-2008.



**Σχήμα 5.1.19.:** Μέση ημερήσια διακύμανση της θερμοκρασίας του αέρα, του γυμνού εδάφους και σε βάθη από 2 έως 50 cm, για τους μήνες Σεπτέμβριο και Οκτώβριο, για την εξεταζόμενη περίοδο 1992-2008.

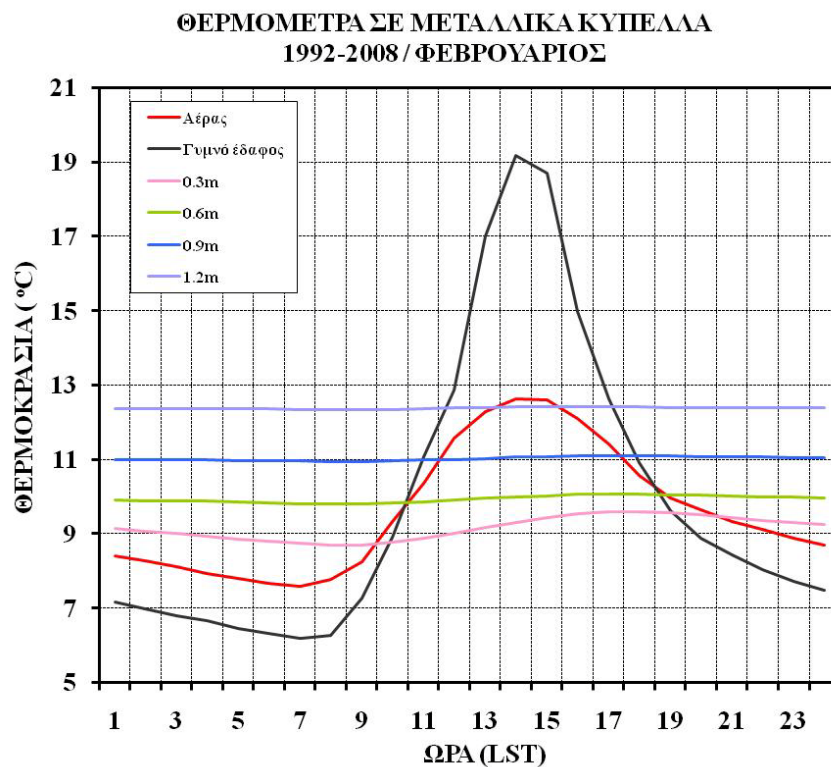
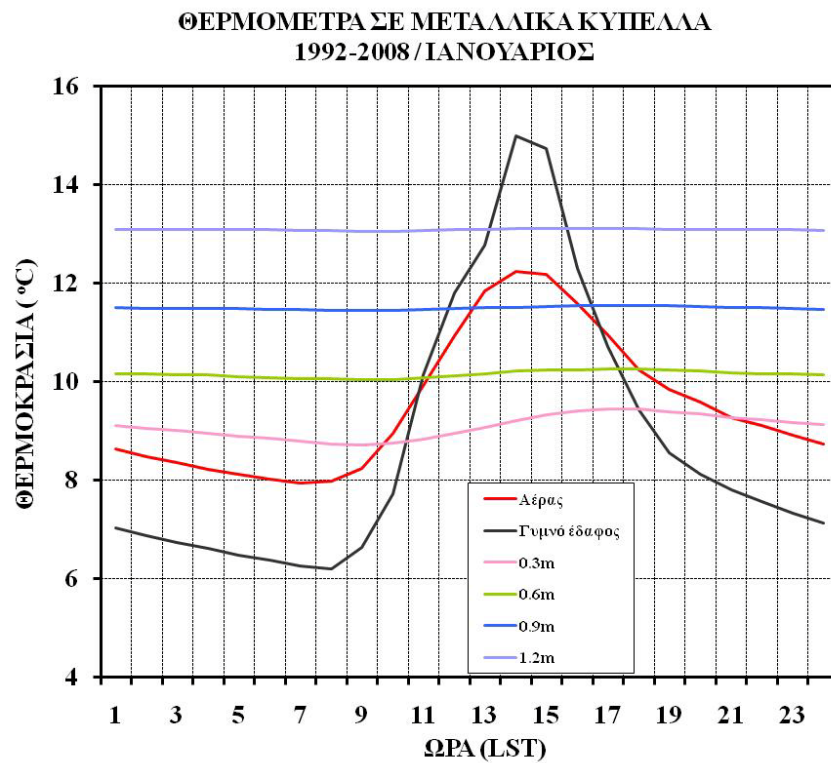




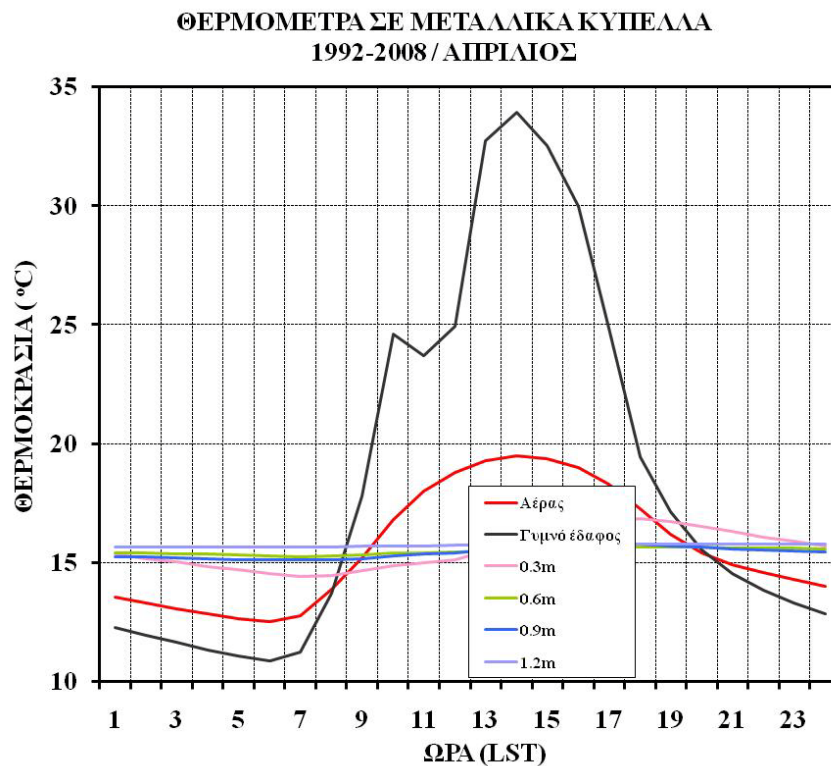
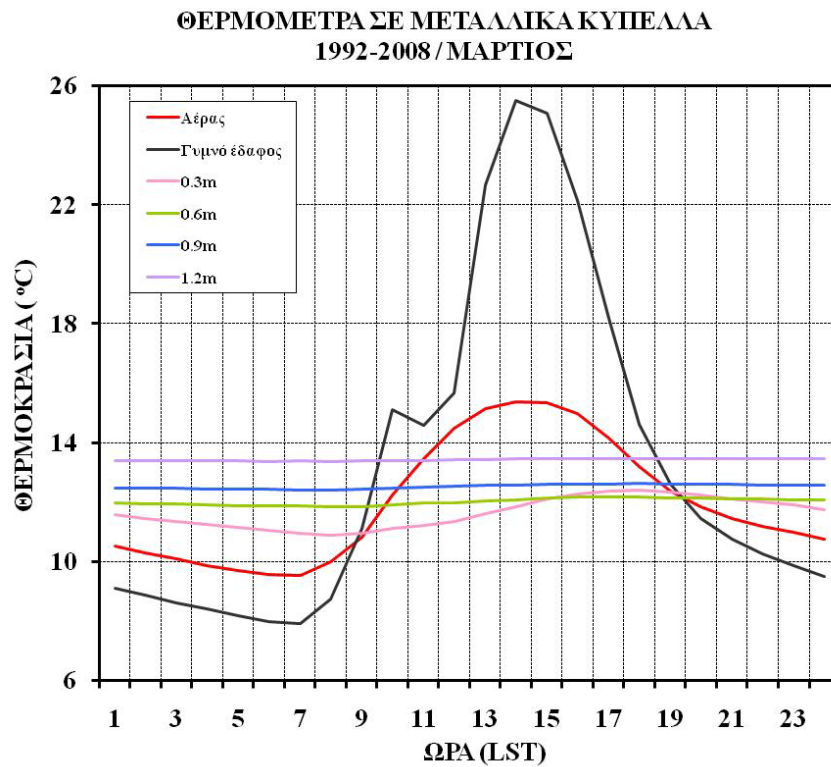
**Σχήμα 5.1.20.:** Μέση ημερήσια διακύμανση της θερμοκρασίας του αέρα, του γυμνού εδάφους και σε βάθη από 2 έως 50 cm, για τους μήνες Νοέμβριο και Δεκέμβριο, για την εξεταζόμενη περίοδο 1992-2008.

Στα σχήματα 5.1.21-5.1.26, δίνεται γραφικά η μέση ημερήσια διακύμανση του αέρα, του γυμνού εδάφους καθώς και στα βάθη από 0.3, 0.6, 0.9 και 1.2 m, για τα θερμόμετρα που είναι εγκατεστημένα σε μεταλλικά κύπελλα, για όλους τους μήνες του έτους, για την περίοδο 1992-2008.

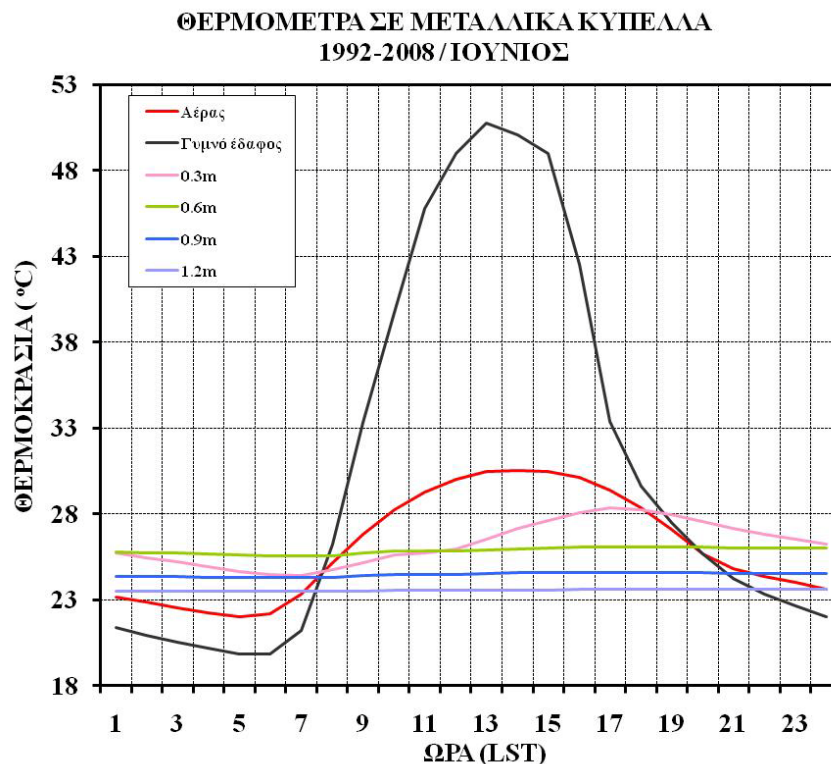
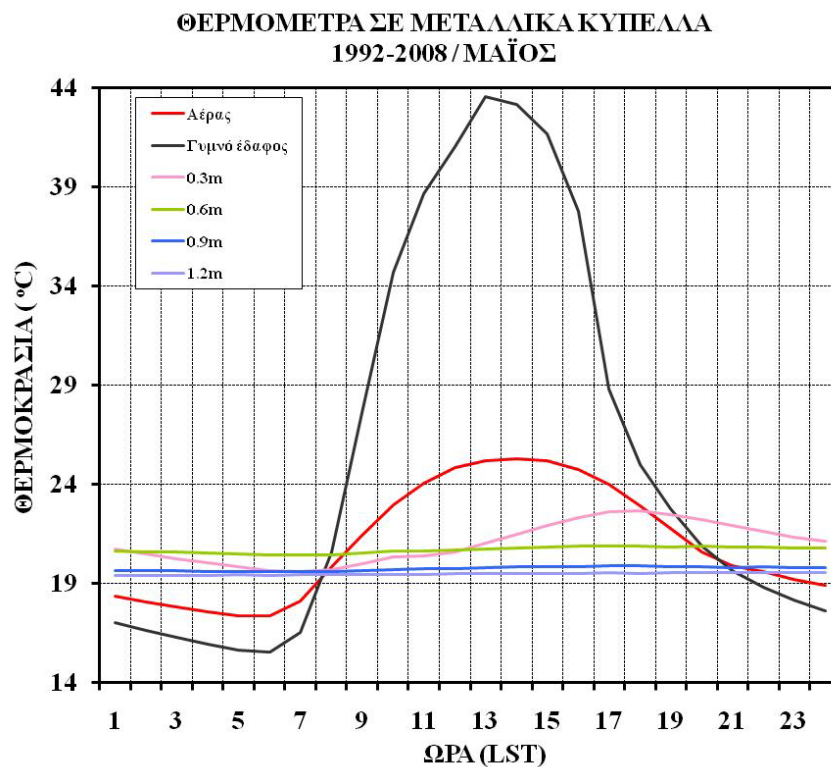
Από τα σχήματα 5.1.21-5.1.26 είναι φανερό ότι η ημερήσια μεταβολή της θερμοκρασίας στα μεγαλύτερα βάθη δεν είναι ιδιαίτερη σημαντική, και το εύρος αυτής της διακύμανσης μικραίνει με την αύξηση του βάθους. Επίσης αποδεικνύεται ότι κατά την διάρκεια του χειμώνα, η θερμοκρασία του εδάφους αυξάνεται όσο προχωρούμε σε μεγαλύτερα βάθη, ενώ το αντίστροφο λαμβάνει χώρα κατά την καλοκαιρινή περίοδο. Οι περίοδοι της άνοιξης και του φθινοπώρου θεωρούνται μεταβατικές περίοδοι. Σε ανάλογα συμπεράσματα κατέληξαν ο Μαριολόπουλος (1928) και ο Ψυλόγλου (1992).



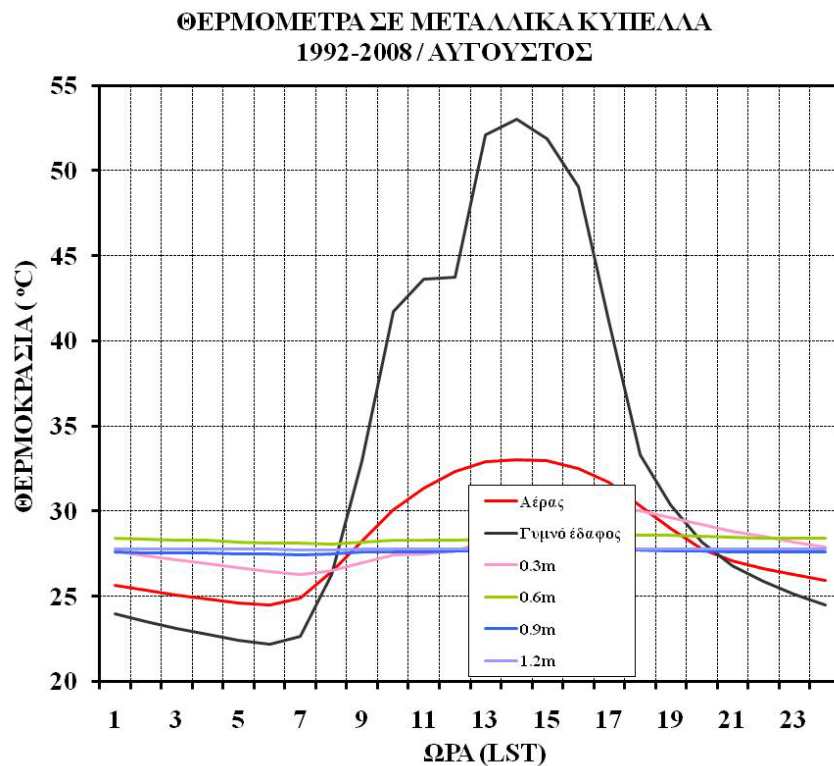
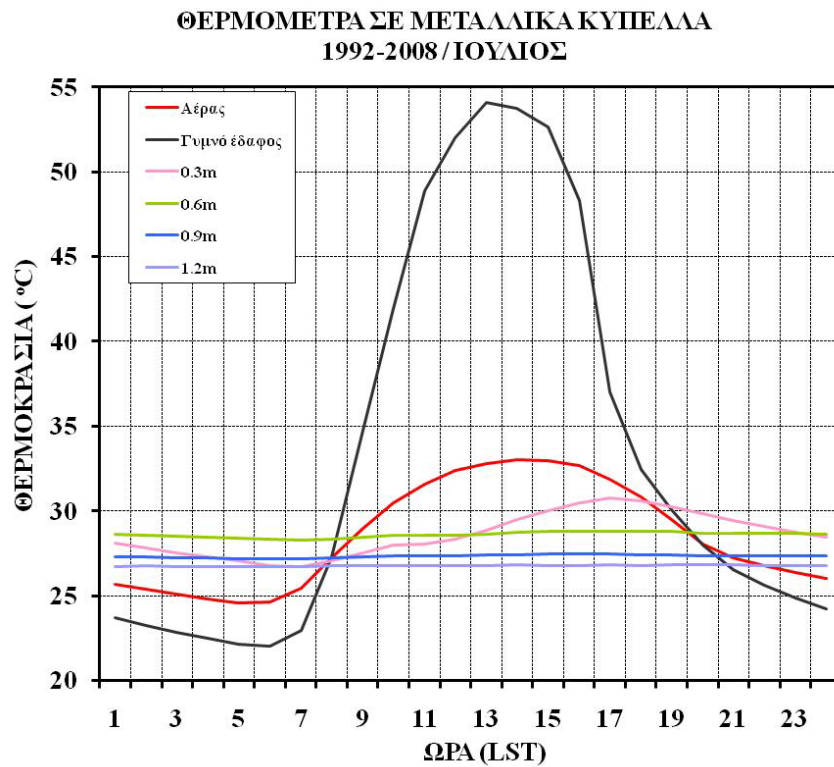
**Σχήμα 5.1.21.:** Μέση ημερήσια διακύμανση της θερμοκρασίας του αέρα, του γυμνού εδάφους και σε βάθη 0.3, 0.6, 0.9 και 1.2 m, για τους μήνες Ιανουάριο και Φεβρουάριο, για την εξεταζόμενη περίοδο 1992-2008.



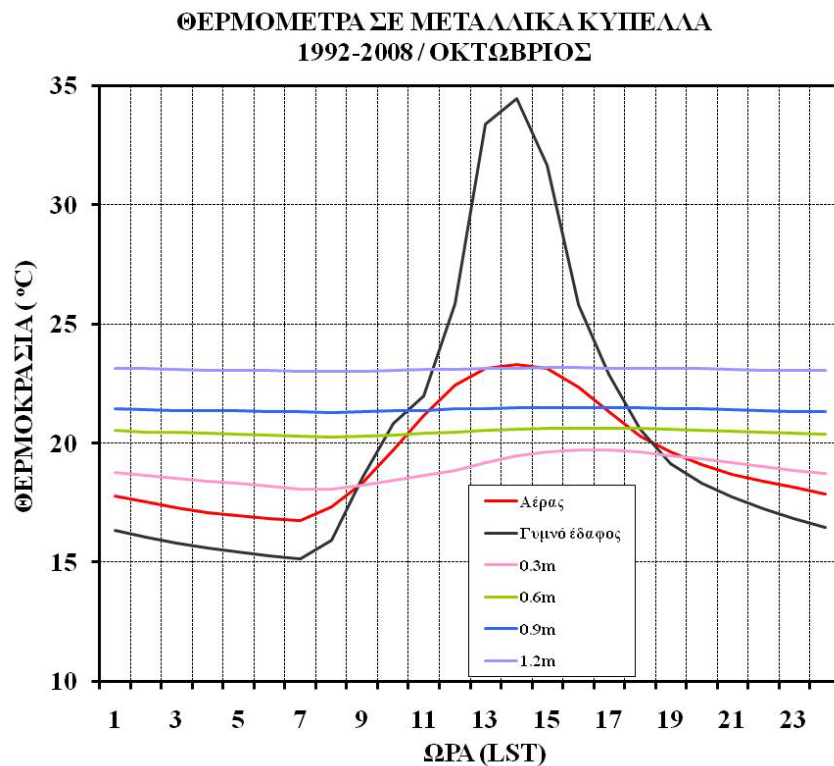
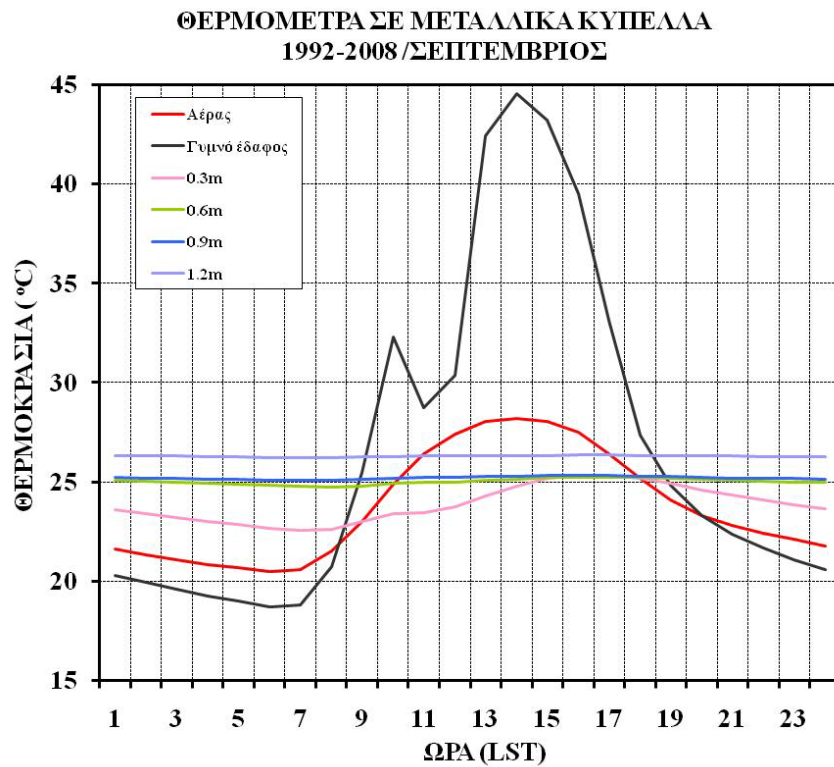
**Σχήμα 5.1.22.:** Μέση ημερήσια διακύμανση της θερμοκρασίας του αέρα, του γυμνού εδάφους και σε βάθη 0.3, 0.6, 0.9 και 1.2 m, για τους μήνες Μάρτιο και Απρίλιο, για την εξεταζόμενη περίοδο 1992-2008.



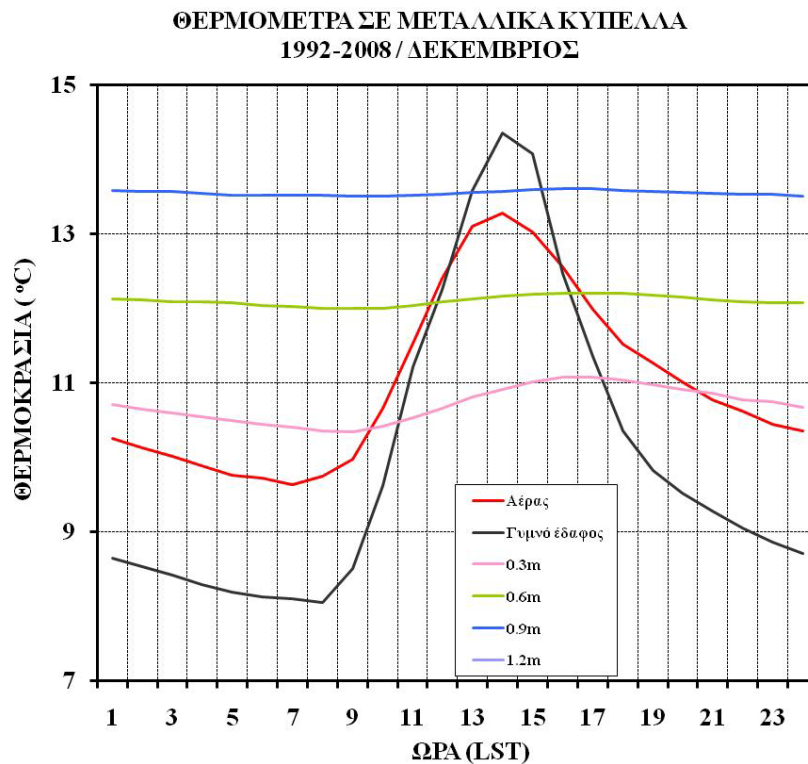
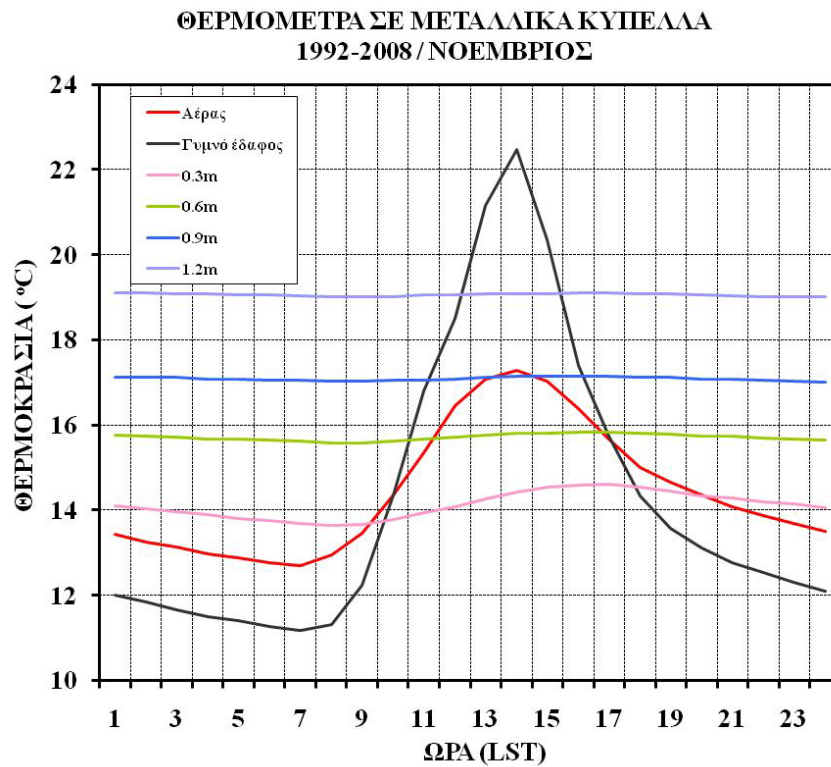
**Σχήμα 5.1.23.:** Μέση ημερήσια διακύμανση της θερμοκρασίας του αέρα, του γυμνού εδάφους και σε βάθη 0.3, 0.6, 0.9 και 1.2 m, για τους μήνες Μάιο και Ιούνιο, για την εξεταζόμενη περίοδο 1992-2008.



**Σχήμα 5.1.24.:** Μέση ημερήσια διακύμανση της θερμοκρασίας του αέρα, του γυμνού εδάφους και σε βάθη 0.3, 0.6, 0.9 και 1.2 m, για τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο, για την εξεταζόμενη περίοδο 1992-2008.



**Σχήμα 5.1.25.:** Μέση ημερήσια διακύμανση της θερμοκρασίας του αέρα, του γυμνού εδάφους και σε βάθη 0.3, 0.6, 0.9 και 1.2 m, για τους μήνες Σεπτέμβριο και Οκτώβριο, για την εξεταζόμενη περίοδο 1992-2008.



**Σχήμα 5.1.26.:** Μέση ημερήσια διακύμανση της θερμοκρασίας του αέρα, του γυμνού εδάφους και σε βάθη 0.3, 0.6, 0.9 και 1.2 m, για τους μήνες Νοέμβριο και Δεκέμβριο, για την εξεταζόμενη περίοδο 1992-2008



## 5.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Για την εφαρμογή του μοντέλου χρησιμοποιούνται δεδομένα από τον αυτόματο σταθμό του Ε.Α.Α. στο Θησείο που αναφέρονται σε θερμοκρασία αέρα, βροχόπτωση, ταχύτητα ανέμου και ηλιακή ακτινοβολία και τα οποία χρησιμοποιούνται ως είσοδοι του μοντέλου. Χρησιμοποιήθηκαν επίσης και δεδομένα θερμοκρασιών εδάφους σε 4 βάθη για τη σύγκριση μετρημένων και προσομοιωμένων τιμών.

### 5.2.1 Εκτίμηση Παραμέτρων Μοντέλου

Η σύσταση του εδάφους και ο χαρακτηρισμός του ως προς αυτή παρουσιάζεται στον πίνακα 1. Επίσης θεωρούμε πως δεν υπάρχει επίδραση της παρουσίας νερού στις εδαφικές θερμοκρασίες.

Η ανάπτυξη του μοντέλου βασίστηκε στις μετρήσεις των περιόδων: Απρίλιος 1995 έως Μάρτιος 1996 και Απρίλιος 2000 έως Μάρτιος 2001. Για την εφαρμογή του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν ημερήσιες μέσες τιμές των απαιτούμενων μετεωρολογικών και ακτινομετρικών παραμέτρων εισόδου.

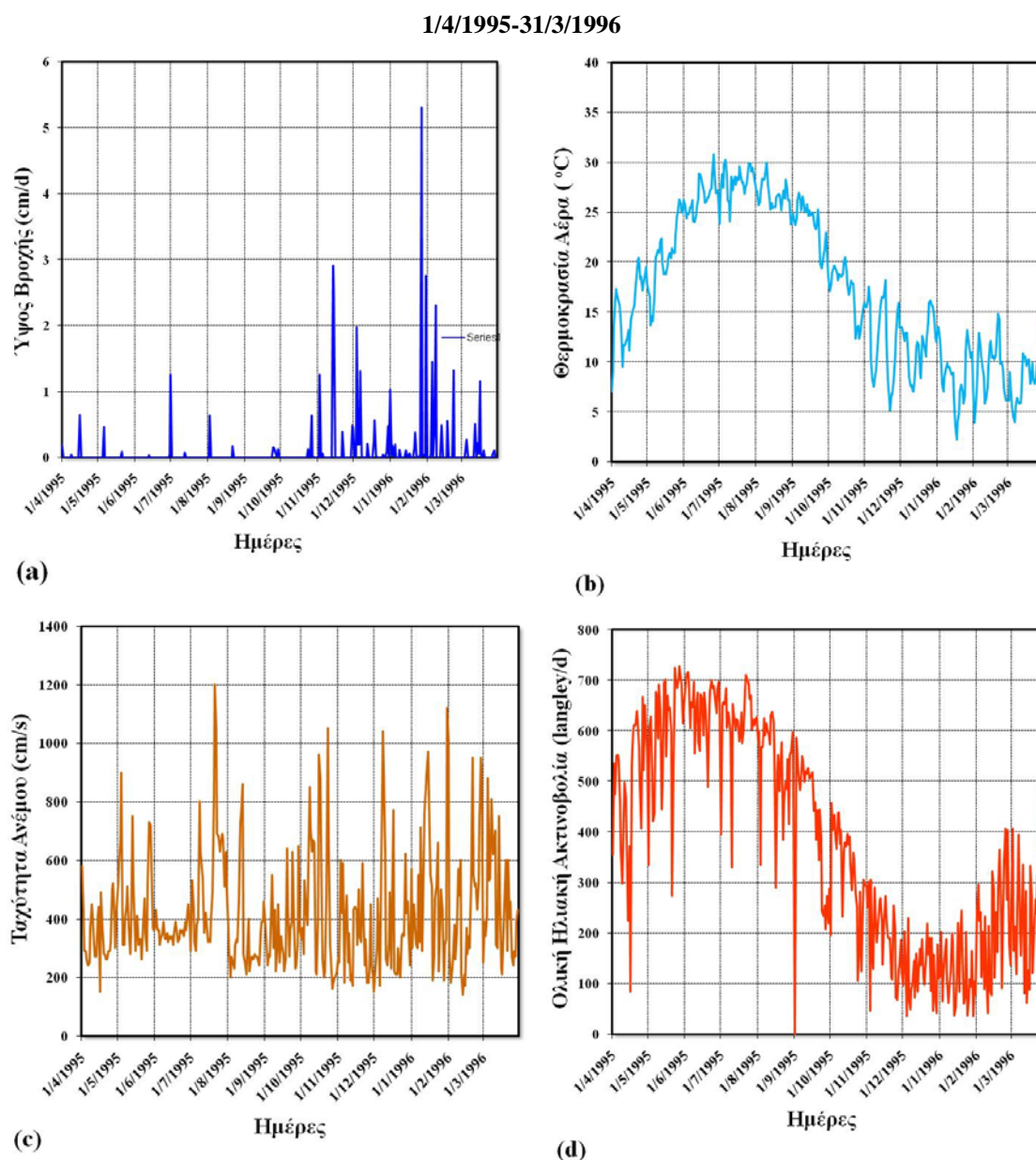
**Πίνακας 1:** Σύσταση εδάφους στον σταθμό καταγραφής θερμοκρασιών εδάφους του ΕΑΑ στο Θησείο

<i>Βάθος (cm)</i>	<i>Άμμος (%)</i>	<i>Ιλύς (%)</i>	<i>Άργιλος (%)</i>	<i>Χαρακτηρισμός</i>
<b>0</b>	48.65	36.51	14.84	Πηλώδες
<b>5</b>	52.92	34.52	12.56	Αμμοπηλώδες
<b>10</b>	49.54	37.06	13.40	Πηλώδες
<b>20</b>	53.17	32.42	14.41	Αμμοπηλώδες
<b>30</b>	52.97	33.69	13.34	Αμμοπηλώδες
<b>50</b>	50.72	33.58	15.70	Πηλώδες
<b>60</b>	54.86	32.75	12.39	Αμμοπηλώδες

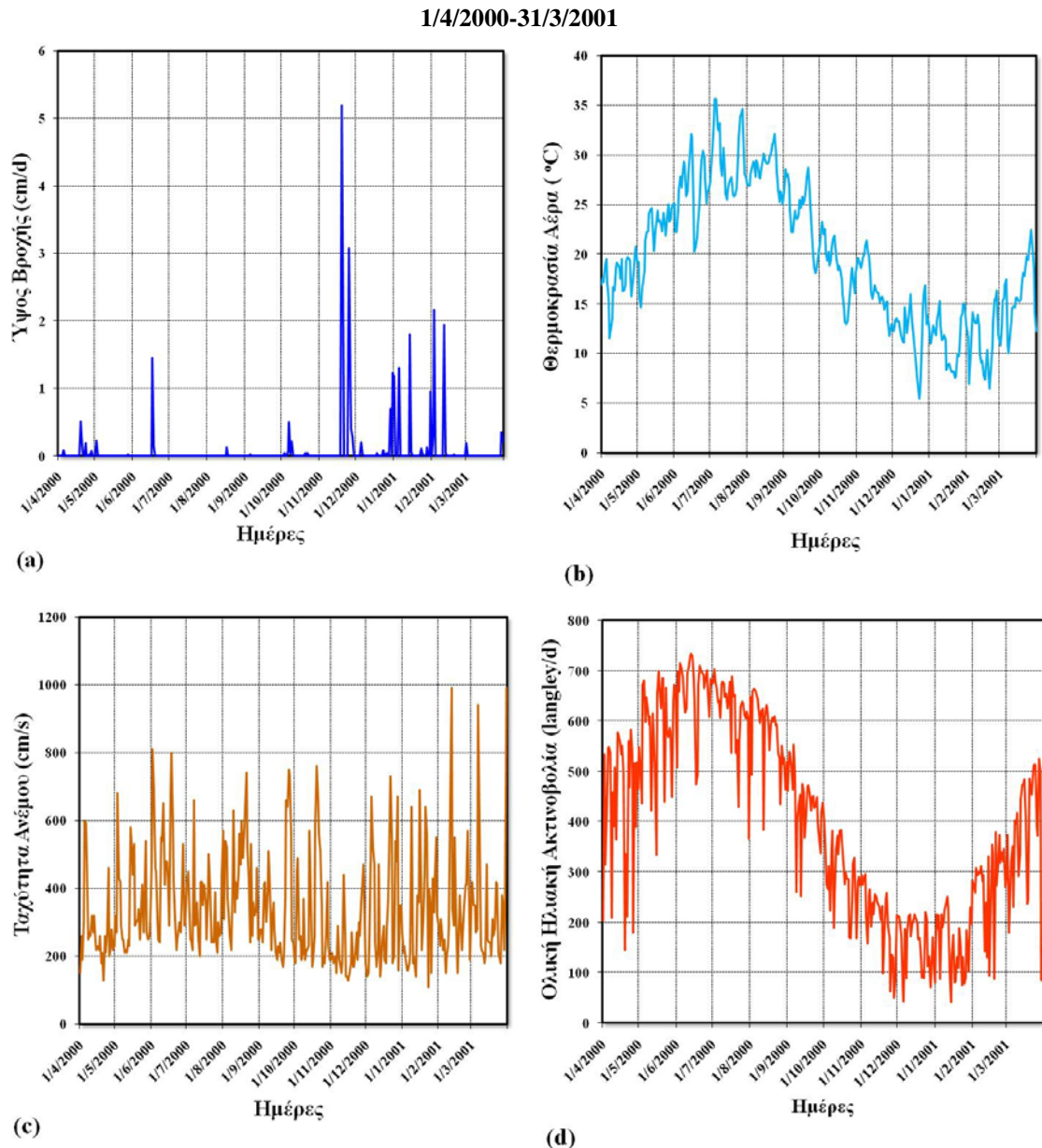
Πηγή: «Προσωπική επικοινωνία με τον Δρ. Β. Ψυλόγλου, Ι.Ε.Π.Β.Α./ΕΑΑ, Απρίλιος 2010.»

### 5.2.2 Σύγκριση και Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

Στα σχήματα 5.2.1 και 5.2.2. παρουσιάζονται τα διαγράμματα των δεδομένων εισόδου για το μοντέλο: ύψος βροχής (a) , θερμοκρασία αέρα (b), ταχύτητα ανέμου (c) και ολική ηλιακή ακτινοβολία (d), για την χρονική περίοδο 1/4/1995-31/3/1996 και 1/4/2000-31/3/2001 αντίστοιχα.



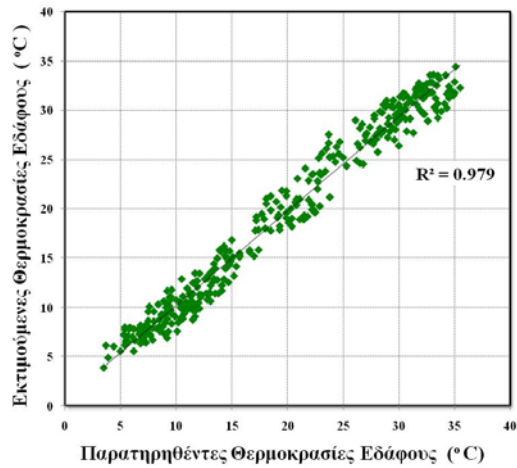
**Σχήμα 5.2.1.:** Μέσες ημερήσιες τιμές που χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου για το μοντέλο: ύψος βροχής (a) , θερμοκρασία αέρα (b), ταχύτητα ανέμου (c) και ολική ηλιακή ακτινοβολία (d), για την χρονική περίοδο 1/4/1995-31/3/1996.



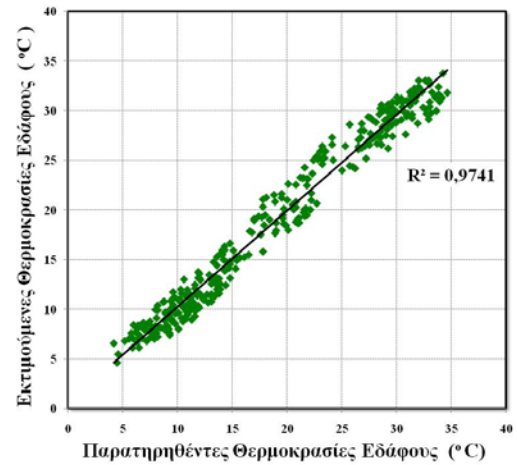
**Σχήμα 5.2.2.:** Μέσες ημερήσιες τιμές που χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου για το μοντέλο: ύψος βροχής (a) , θερμοκρασία αέρα (b), ταχύτητα ανέμου (c) και ολική ηλιακή ακτινοβολία (d), για την χρονική περίοδο 1/4/2000-31/3/2001.

Τα διαγράμματα διασποράς μεταξύ παρατηρηθέντων και εκτιμώμενων από το μοντέλο ημερήσιων τιμών θερμοκρασίας εδάφους σε βάθη 2 cm, 5cm, 10 cm, 20cm για την χρονική περίοδο 1/4/1995-31/3/1996 και οι αντίστοιχοι συντελεστές προσδιορισμού  $R^2$  παρουσιάζονται στο σχήμα 5.2.3.. Το σχήμα 5.2.4. είναι το αντίστοιχο για την χρονική περίοδο 1/4/2000-31/3/2001

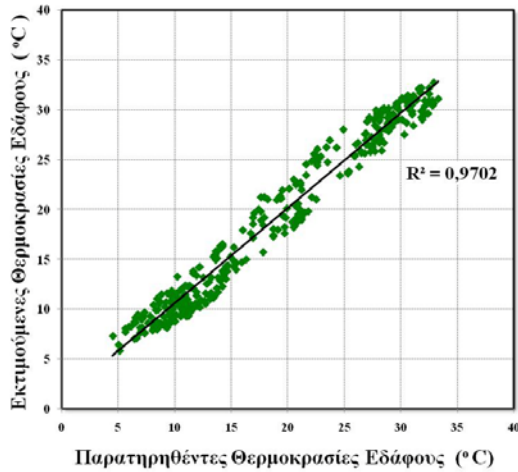
1/4/1995-31/3/1996



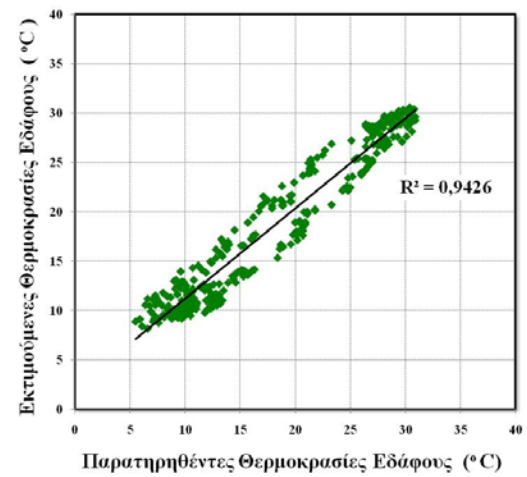
Βάθος: 2 cm



Βάθος: 5 cm



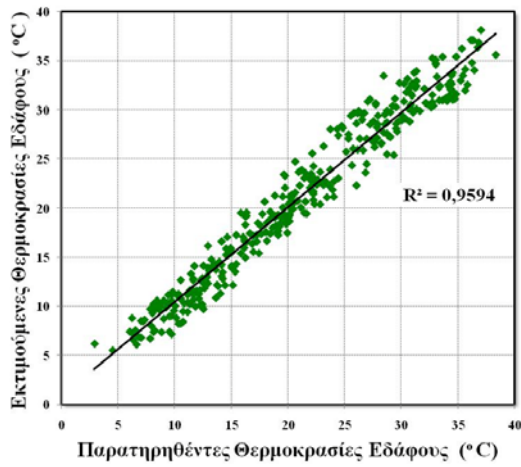
Βάθος: 10 cm



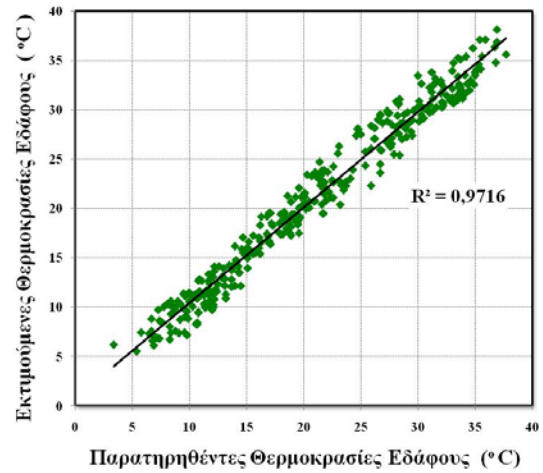
Βάθος: 20 cm

**Σχήμα 5.2.3.:** Διαγράμματα διασποράς μεταξύ παρατηρηθέντων και εκτιμώμενων από το μοντέλο ημερήσιων τιμών θερμοκρασίας εδάφους σε βάθη 2 cm, 5cm, 10 cm και 20cm για την χρονική περίοδο 1/4/1995-31/3/1996.

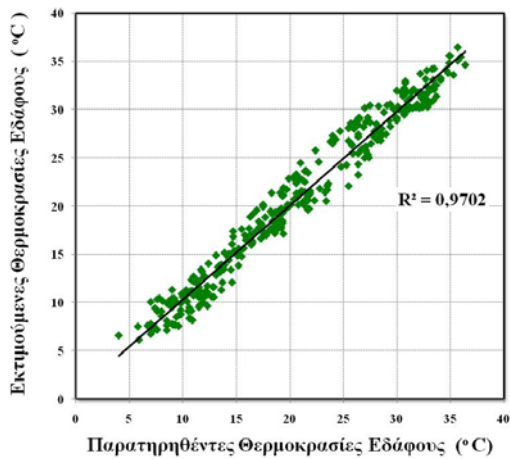
1/4/2000-31/3/2001



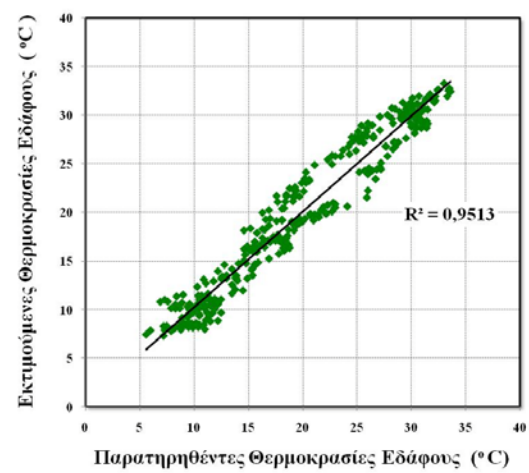
Βάθος: 2 cm



Βάθος: 5 cm



Βάθος: 10 cm



Βάθος: 20 cm

**Σχήμα 5.2.4.:** Διαγράμματα διασποράς μεταξύ παρατηρηθέντων και εκτιμώμενων από το μοντέλο ημερήσιων τιμών θερμοκρασίας εδάφους σε βάθη 2 cm, 5cm, 10 cm και 20cm για την χρονική περίοδο 1/4/2000-31/3/2001.

Οι στατιστικοί δείκτες που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της απόδοσης του μοντέλου είναι το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE: Root Mean Square Error) και το μέσο σφάλμα (MBE: Mean Bias Error) και υπολογίζονται σύμφωνα με τις εξισώσεις 5.1 και 5.2 (Willmott, 1982).

$$\text{RMSE} = [N^{-1} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2]^{0.5} \quad (\text{εξ 5.1})$$

$$\text{MBE} = N^{-1} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i) \quad (\text{εξ 5.2})$$

Όπου:

$P_i$  = οι εκτιμώμενες τιμές

$O_i$  = οι παρατηρούμενες τιμές

$N$  = ο αριθμός των παρατηρήσεων

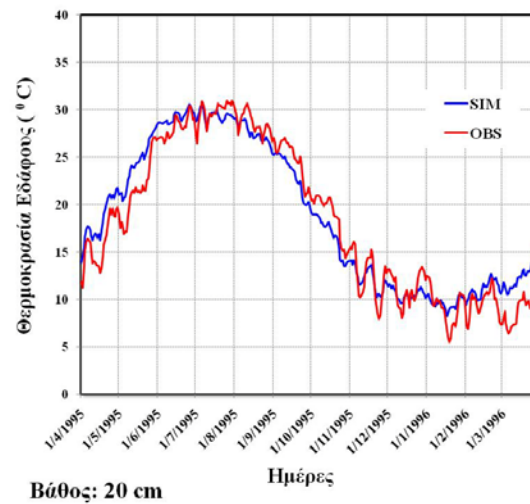
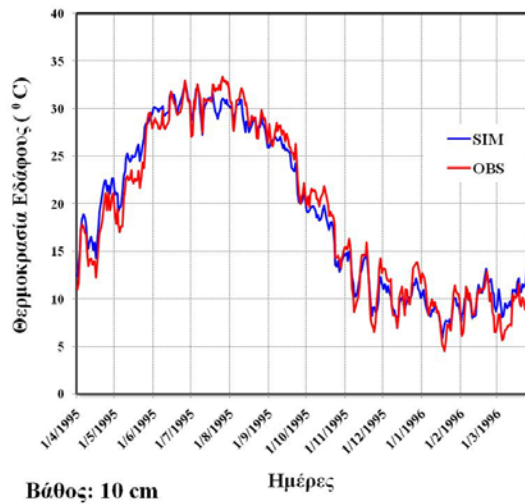
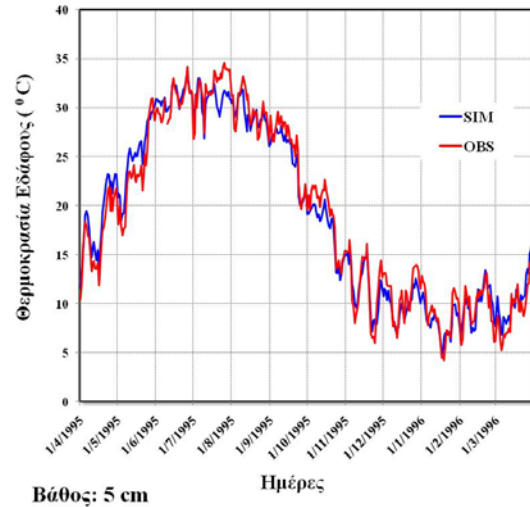
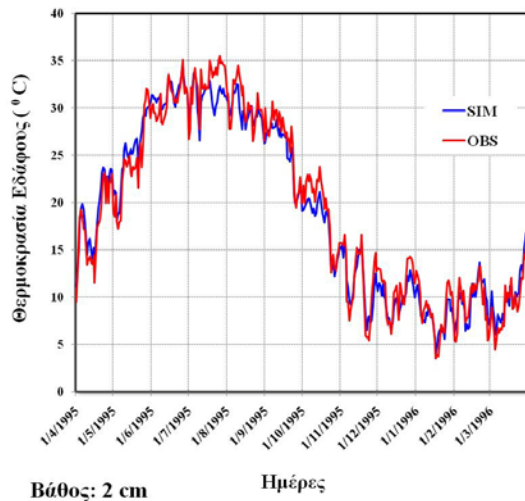
Στον πίνακα 3. Δίδονται οι τιμές των RSME και MBE, όπως προέκυψαν με βάση τις παρατηρούμενες και εκτιμώμενες από το μοντέλο θερμοκρασίες εδάφους για τις δύο εξεταζόμενες περιόδους 1/4/1995-31/3/1996 και 1/4/2000-31/3/2001 στα 2, 5, 10 και 20 cm.

**Πίνακας 3:** Τιμές των RSME και MBE για την θερμοκρασία εδάφους για τις περιόδους 1/4/1995-31/3/1996 και 1/4/2000-31/3/2001 για βάθη τα 2 cm, 5cm, 10 cm και 20cm.

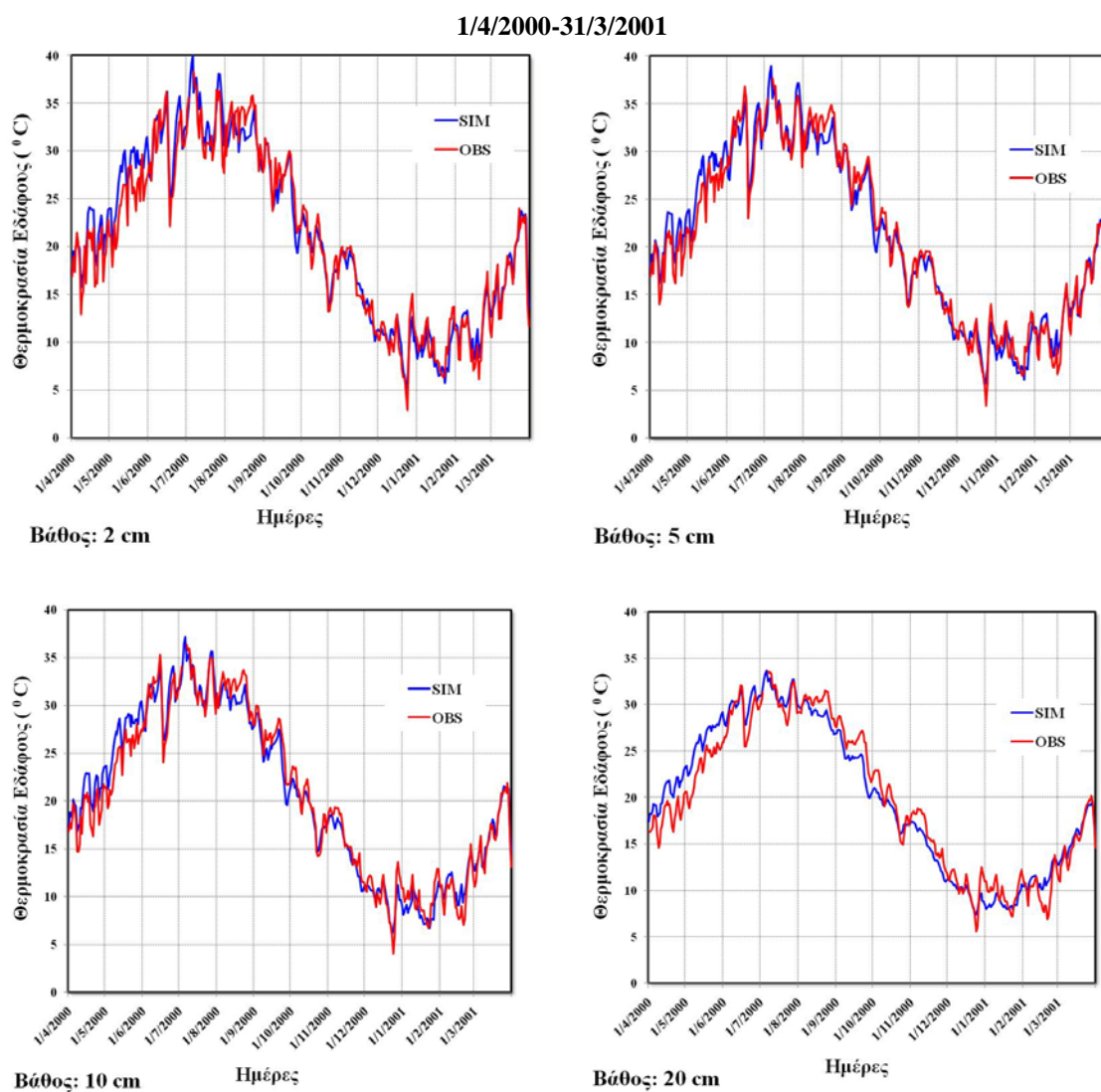
	<i>Βάθος (cm)</i>			
	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>20</b>
<b>1/4/1995-31/3/1996</b>				
<b>RMSE (C<sup>0</sup>)</b>	1,5	1,5	1,5	2,0
<b>MBE (C<sup>0</sup>)</b>	-0,21	-0,06	0,16	0,46
<b>1/4/2000-31/3/2001</b>				
<b>RMSE (C<sup>0</sup>)</b>	1,7	1,5	1,5	1,7
<b>MBE (C<sup>0</sup>)</b>	0,28	0,05	0,06	0,09

Στα σχήματα 5.2.5. και 5.2.6. παρουσιάζονται τα συγκριτικά διαγράμματα μεταξύ παρατηρηθέντων και εκτιμώμενων από το μοντέλο ημερήσιων τιμών θερμοκρασίας εδάφους σε βάθη 2 cm, 5cm, 10 cm, 20cm, 30cm για την χρονική περίοδο 1/4/1995-31/3/1996 και 1/4/2000-31/3/2001.

1/4/1995-31/3/1996



**Σχήμα 5.2.5.:** Συγκριτικά διαγράμματα μεταξύ παρατηρηθέντων και εκτιμώμενων από το μοντέλο ημερήσιων τιμών θερμοκρασίας εδάφους σε βάθη 2 cm, 5cm, 10 cm και 20cm για την χρονική περίοδο 1/4/1995-31/3/1996.



**Σχήμα 5.2.6.:** Συγκριτικά διαγράμματα μεταξύ παρατηρηθέντων και εκτιμώμενων από το αριθμητικό μοντέλο ημερήσιων τιμών θερμοκρασίας εδάφους σε βάθη 2 cm, 5cm, 10 cm και 20cm για την χρονική περίοδο 1/4/2000-31/3/2001.

Σύμφωνα με τα σχήματα 5.2.3-5.2.6. καθώς και τον υπολογισμό των RMSE διαπιστώνεται ότι οι εκτιμήσεις των θερμοκρασιών εδάφους με το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε είναι καλύτερη για τα βάθη από 2, 5 και 10 cm σε αντίθεση με τα 20 cm, ενώ σύμφωνα με τις τιμές των MBE παρουσιάζεται υπερεκτίμηση του μοντέλου. Το αριθμητικό μοντέλο χρησιμοποιήθηκε από την Δρούλια (2006) για δεδομένα του σταθμού του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών κατά την εκπόνηση της μεταπτυχιακής διατριβή της όπου κατέληξε στο συμπέρασμα ότι οι εκτιμήσεις του μοντέλου είναι καλύτερες από τα μεγαλύτερα προς τα μικρότερα βάθη. Τέλος στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξαν οι Tsiros και Dimopoulos (2007) οι



οποίοι εφάρμοσαν το μοντέλο για τον ίδιο σταθμό στο Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών. Παρόλα αυτά όμως, από τους συντελεστές προσδιορισμού  $R^2$  για κάθε βάθος καθώς και για τις δύο εξεταζόμενες χρονικές περιόδους διαπιστώθηκε πολύ καλή συσχέτιση των παρατηρηθέντων και των εκτιμώμενων τιμών τις θερμοκρασίας εδάφους σε όλα τα βάθη. Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξε και η Δρούλια (2006) και οι Tsiros και Dimopoulos (2007)

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την ανάλυση των δεδομένων του σταθμού καταγραφής θερμοκρασιών εδάφους του Ε.Α.Α. στο Θησείο για την περίοδο 1992-2008 και από την εκτίμηση των θερμοκρασιών εδάφους με την εφαρμογή του αριθμητικού αγρομετεωρολογικού μοντέλου για τις δύο περιόδους που εξετάστηκαν και την αξιολόγηση του, προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα :

- Το ετήσιο θερμοκρασιακό εύρος, δηλ. η διαφορά της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας του θερμότερου μήνα από την αντίστοιχη του ψυχρότερου μήνα, μειώνεται ως συνάρτηση του βάθους, με ένα αρκετά αξιοσημείωτο ρυθμό στα πρώτα στρώματα του εδάφους. Αυτό αποδίδεται κυρίως στο γεγονός ότι ένα μεγάλο ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας καταναλίσκεται για την θέρμανση των επιφανειακών στρωμάτων του εδάφους.
- Η μείωση της ετήσιας διακύμανσης της θερμοκρασίας ως συνάρτηση του βάθους. Στην διάρκεια του χειμώνα, η μέση θερμοκρασία των βαθύτερων στρωμάτων είναι υψηλότερη από την θερμοκρασία των στρωμάτων που βρίσκονται σε μικρότερα βάθη. Επομένως, τον χειμώνα 'μετακινούνται' ποσά θερμότητας από τα βαθύτερα στρώματα προς την επιφάνεια, ενώ το αντίθετο συμβαίνει κατά τους θερινούς μήνες.
- Η μέση ετήσια θερμοκρασία του εδάφους σε οποιοδήποτε βάθος είναι μεγαλύτερη από την μέση ετήσια θερμοκρασία του αέρα της ατμόσφαιρας. Επίσης το γυμνό έδαφος ανταποκρίνεται θερμοκρασιακά πολύ ταχύτερα στις καιρικές μεταβολές απ' ό,τι τα μεγαλύτερα βάθη, τα οποία παρουσιάζουν όλο και μεγαλύτερη χρονική υστέρηση στην απόκρισή τους στους ατμοσφαιρικούς παράγοντες.
- Το μοντέλο μπορεί να περιγράψει πολύ ικανοποιητικά την πορεία των ημερήσιων θερμοκρασιών στα διάφορα βάθη κατά τη διάρκεια του έτους. Η συμφωνία μετρημένων και προσομοιωμένων τιμών κρίνεται πολύ καλή αφού ο συντελεστής προσδιορισμού κυμάνθηκε μεταξύ 0.95 και 0.98. Συμπεραίνεται συνεπώς ότι το μοντέλο μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο 'εργαλείο' σε αγρομετεωρολογικές εφαρμογές που υπεισέρχεται η θερμοκρασία εδάφους.'

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Arya, S.P., 2001. *Introduction to Micrometeorology*. Academic Press, Inc., California, USA, 46-60 pp.
2. Ausher, R.; Katan, J. and Ovadia, S., 1975. An improved selective medium for the isolation of *verticillium dahliae*. *Phytoparasitica*, 3(2): 133-137
3. Bakisky, A. and Burton, P.J., 1995. Root-zone soil temperature variation associated with microsite characteristics in high-elevation forest openings in the interior of British Columbia. *Agricultural Forest Meteorology*, 77:31-54.
4. Barney, C.W., 1951. Effects of soil temperature and light intensity on root growth of loblolly pine seedling, *Plant Physiology*, Vol. 26, No. 1 (Jan., 1951), pp. 146-163.
5. Beltrami, H. and Kellman, L., 2003. An examination of short- and long-term air-ground temperature coupling. *Global and Planetary Change*, 38:291-303.
6. Bhatti, J.S.; Flemming, R.L.; Foster, N.W.; Meng, F.-R.; Bourque, C.P.A. and Arp, P.A., 2000. Simulations of pre- and post-harvest soil temperature, soil moisture, and snowpack for jack pine: comparison with field observations. *Forest Ecology and Management*, 138:413-426
7. Boucher, J.-F.; Bernier, P. Y. and Munson, A. D., 2001. Radiation and soil temperature interactions on the growth and physiology of eastern white pine (*Pinus strobus* L.) seedlings. *Plant and Soil* 236: 165-174.
8. Bowen, GD. 1991. Soil temperature, root growth and plant function. In: Waisel A, Eshel A, Kafkafi U, eds. *Plant Roots: The Hidden Half*. New York: Marcel Dekker, Inc., 309-330 pp.
9. Bristow, K.L.; Campbell, G.S.; Papendick, R.I. and Elliott, L.F., 1986. Simulation of heat and moisture transfer through a surface residue-soil system. *Agric. For. Meteorol.*, 36:193-214.
10. Brown, S.M., and Boutwell, S.H., 1986. Chemical Spill Exposure Assessment. *Risk Analysis*, Volume 6 Issue 3: 291 – 299.
11. Carsel, R.F.; Smith, C.N.; Mulkey, L.A.; Dean, J.D. and Jowise, P., 1984. User's Manual for the Pesticide Root Zone Model (PRZM): Release 1. U.S. Environmental Protection Agency, Environmental Research Laboratory, Athens, GA. EPA-600/3-84-109.
12. Carsel, R.F.; Mulkey, L.A.; Lorber, M.N. and Baskin, L.B., 1985. The Pesticide Root Zone Model (PRZM): A Procedure for Evaluating Pesticide Leaching Threats to Ground Water. *Ecological Modeling*, 30:49-69.

13. Clarkson, DT and Warner, AJ. 1979. Relationships Between Root Temperature and the Transport of Ammonium and Nitrate Ions by Italian and Perennial Ryegrass (*Lolium-Multiflorum* and *Lolium-Perenne*). *Plant physiology* 64: 557-561.
14. Clarkson, DT; Hopper, MJ and Jones, L.H.P., 1986. The Effect of Root Temperature on the Uptake of Nitrogen and the Relative Size of the Root-System in *Lolium-Perenne* .1. Solutions Containing Both  $NH_4^+$  and  $NO_3^-$ . *Plant Cell and Environment* 9: 535-545.
15. de Vries, D.A., 1963 Thermal Properties of Soils. In: *Physics of the Plant Environment*, W.R. van Wijk, (ed.). J. Wiley and Sons, Inc., New York.
16. DeLucia, E.H.; Heckathorn, S.A. and Day, T.A., 1992. Effects of Soil-Temperature on Growth, Biomass Allocation and Resource Acquisition of *Andropogon-Gerardii* Vitman. *New Phytologist*, 120: 543-549.
17. Domisch, T.; Finer, L and Lehto, T., 2001. Effects of soil temperature on biomass and carbohydrate allocation in Scots pine (*Pinus sylvestris*) seedlings at the beginning of the growing season. *Tree Physiology*, 21: 465-472
18. Dong, Shufu; Scagel, Carolyn F.; Cheng, Lailiang; Fuchigami, L. H. and Rygiewicz, Paul T. 2001. Soil temperature and plant growth stage influence nitrogen uptake and amino acid concentration of apple during early spring growth. *Tree physiology*, 21: 524-547.
19. dos Santos, G.H. and Mendes, N., 2006. Simultaneous heat and moisture transfer in soils combined with building simulation. *Energy and Buildings*, 38:303-314.
20. Δρούλια, Φ., 2006. Μεταπτυχιακή Διατριβή. Πρόγνωση θερμοκρασιών εδάφους. Αθήνα
21. Florides, G. and Kalogirou, S., 2004. Measurements of Ground Temperature at Various Depths. *Proceedings of the 3rd International Conference on Sustainable Energy Technologies*, Nottingham, UK.
22. Garofalakis, I.; Tsiros, I.; Frangoudakis, A.; Chronopoulos, K. and Flouri, F. , 'An Experimental Study of Soil Temperature Regimes Associated with Solar Disinfestation Techniques Under Greenhouse Conditions in Greece', *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 41:4, 621 - 630
23. Givoni, B. and Katz, L., 1985. Earth temperatures and underground buildings. *Energy and Buildings*, 8: 15-25.
24. Gupta, S.C.; Radke, J.K. and Larson, W.E., 1981. Predicting Temperature of Bare and Residue-Covered Soils with and without a Corn Crop. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45:405-412.

25. Gupta, S.C.; Radke, J.K; Larson, W.E. and Shaffer, M.J., 1982. Predicting Temperature of Bare and Residue-Covered Soils from Daily Maximum and Minimum Air Temperatures. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46:372-376.
26. Gupta, S.C.; Larson, W.E. and Linden, D.R., 1983. Tillage and Surface Residue Effects on Soil Upper Boundary Temperatures. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47:1212-1218.
27. Gupta, S.C.; Larson, W.E. and Allmaras, R.R., 1984. Predicting Soil Temperature and Soil Heat Flux under Different Tillage-Surface Residue Conditions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48:223-232.
28. Hanks, R.J.; Austin, D.D. and Ondrechen, W.T., 1971. Soil Temperature Estimation by a Numerical Method. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 35:665-667.
29. Hetrick, D.M.; Travis, C.C.; Leonard, S.K. and Kinerson, R.S., 1989. Qualitative Validation of Pollutant Transport components of an unsaturated soil zone model (SESOIL). ORNL/TM-10672. Oak Ridge National Laboratory.
30. Hillel, D., 2004. *Introduction to Soil Physics*. Academic Press. pp 215-234.
31. Jacovides, C.P.; Mihalakakou, G.; Santamouris, M. and Lewis, J.O., 1996. On the ground temperature profile for passive cooling applications in buildings. *Solar Energy*, 57(3):167-175.
32. Karlsson, P.S and Nordell, K.O., 1996. Effects of soil temperature on the nitrogen economy and growth of mountain birch seedlings near its presumed low temperature distribution limit. *Ecoscience* 3 (2): 183-189.
33. Kaspar, T.C., and Bland, W.L., 1992. Soil temperature and root growth. *Soil Science*, 154(4), 290-299.
34. Katan, J.; Greenberger, A.; Alon, H. and Grienstein, A., 1976. Solar heating by polyethylene mulching for the control of diseases caused by soil-borne pathogens. *Phytopathology*, 66: 683-688.
35. Liakatas, A.; Clarke, J.A. and Monteith, J.L., 1986. Measurements of the heat balance under plastic mulches. Part I. Radiation balance and soil heat flux. *Agric. For. Meteorol.*, 36:227-239.
36. Livadas, G.C. and Goutsidou Y.A., 1972. Earth surface temperature. Part I. Bare-soil surface. *Sci. Annals, Fac. Phys. & Mathem., Univ. Thessaloniki*.12:243-258.
37. Livadas, G.C. and Goutsidou Y.A., 1974. Soil temperature in Thessaloniki-Greece. *Sci. Annals, Fac. Phys. & Mathem., Univ. Thessaloniki*.14:207-223.
38. Livadas, G.C. and Flokas A.A., 1972. Sunshine duration in Thessaloniki. Greece (III). *Sci. Annals, Fac. Phys. & Mathem., Univ. Thessaloniki*.12:228-241.
39. Luo, Y., Loomis, R.S. and Hsiao, T.C., 1992. Simulation of soil temperature in crops. *Agric. For. Meteorol.*, 61:23-38.

40. Matthews, DJ and Hayes, P., 1982. Effect of Root Zone Temperature on Early, Nodulation and Nitrogen-Fixation in Soya Beans. *Journal of Agricultural Science* 98: 371-376.
41. Μαριολόπουλος Ηλίας, 1928. Επί της θερμοκρασίας του εδάφους εν Αθήναις. Πρακτικά της Ακαδημίας Αθηνών, συνεδρία της 23 Μαΐου 1928.
42. Mavrogianopoulos, G.N.; Frangoudakis, A. and Pandelakis, J., 2000. Energy Efficient Soil Disinfestation by Microwaves. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 75:149-153.
43. McMichael, BL and Burke, JJ. 1998. Soil temperature and root growth. *Hortscience* 33: 947-951.
44. McMichael, BL and Quisenberry, JE. 1993. The Impact of the Soil Environment on the Growth of Root Systems. *Environmental and experimental botany* 33: 53-61.
45. McMichael, B.L.; Upchurch, D.R. and Burke, J.J., 1996. Soil temperature derived prediction of root density in cotton. *Environmental and Experimental Botany*, 36, 303-312
46. Mihalakakou, G., 2002. On estimating soil surface temperature profiles. *Energy and Buildings*, 34:251-259.
47. Mihalakakou, G.; Santamouris, M.; Lewis, J.O. and Asimakopoulos, D., 1997. On the application of the energy balance equation to predict ground temperature profiles. *Solar Energy*, 60(3/4), 181-190.
48. Nabi, G., and Mullins, C.E., 2007. Soil temperature dependent growth of cotton seedlings before emergence. *Pedosphere*, 18(1): 54-59.
49. Oliver, S.A.; Oliver, H.R.; Wallace, J.S. and Roberts, A.M., 1987. Soil heat and temperature variation with vegetation, soil type and climate. *Agricultural Forest Meteorology*, 39: 257-269.
50. Parton, W.J. and Logan, J.A., 1981. A model for diurnal variation in soil and air temperature. *Agricultural Meteorology*, 23, 205-216.
51. Power, JF; Grunes, DL; Reichman, GA and Willis, WO. 1970. Effect of Soil Temperature on Rate of Barley Development and Nutrition. *Agronomy Journal* 62: 567-&.
52. Ross, P.J.; Williams, J. and McCowen, R.L., 1985. Soil temperature and the energy balance of vegetative mulch in the semi-arid tropics. II. Dynamic analysis of the total energy balance. *Aust. J. Soil. Res.*, 23:515-532.
53. Salhotra, A.M. 1986. A Coupled Heat, Salt and Water Balance Model of Evaporation and Stratification in Saline Terminal Lakes: An Application to the Dead Sea. Ph.D. Dissertation. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.

54. Santamouris, M. 2007. *Advances In Passive Cooling (Buildings, Energy and Solar Technology Series)*. Earthscan Publications Ltd., pp. 340.
55. Santamouris, M.; Mihalakakou, G.; Balaras, C.A.; Argiriou, A.; Asimakopoulos, D. And Vallindras, M., 1995. Use of buried pipes for energy conservation in cooling of agriculture greenhouses. *Solar Energy*, 55(2), 111-124
56. Sikora, E.; Gupta, S.C. and Kossowski, J., 1990. Soil temperature predictions from a numerical heat-flow model using variable and constant thermal diffusivities. *Soil & Tillage Research*, 18, 27-36.
57. Smerdon, J.E.; Pollack, H.N.; Cermak, V.; Enz, J.W.; Kresl, M.; Safanda, J. and Wehmler, J.F., 2006. Daily, seasonal, and annual relationships between air and subsurface temperatures. *Journal of Geophysical Research*, 111, D07101, doi: 10.1029/2004JD005578.
58. Stathers, R.J.; Black, T.A. and Novak, M.D., 1985. Modelling soil temperature in forest clearcuts using climate station data. *Agricultural Forest Meteorology*. 36: 153-164.
59. Stevenson, I.L., 1959. Dehydrogenase activity in soils. *Can. J. Microbiol.* 5: 229-235.
60. Swaid H, 1995: Urban climate related aspects of the force-restore method, *Atmospheric Environment* 29 (23) 3401-3409.
61. Swaid, H. and Hoffman, M. E., 1989. Prediction of impervious ground surface temperature by the Surface Thermal Time Constant (STTC) model. *Energy and Buildings* 13, 149-157.
62. Thibodeaux, L.J., 1979. *Chemodynamics: Environmental Movement of Chemicals in Air, Water, and Soil*. John Wiley & Sons, New York.
63. Thunholm, B., 1990. A comparison of measured and simulated soil temperature using air temperature and soil surface energy balance as boundary conditions. *Agric. For. Meteorol.*, 53:59-72.
64. Tjamos, E.C., 1991. Soil Solarization in Greece. In: *Soil Solarization*, J. Katan, J.E. DeVay, (ed.). CRC Press Inc., Boca Raton, FL, USA, 206-214 pp.
65. Toy, T.J.; Kuhaida, A.J. and Munson, B.E., 1978. The prediction of mean monthly soil temperature from mean monthly air temperature. *Soil Sci.*, 126(3):181-189.
66. Tsiros, J.X.; Elmaloglou, S. and Ambrose, S., 1998. A comparative study of two methods for modeling soil water regime in agricultural fields. *Water Resources Management*, 12:285-293.
67. Tsiros, I.X. and Dimopoulos I.F. (2007). An evaluation of the performance of the soil temperature simulation algorithms used in the PRZM model. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 42: 661–670

68. United States Department of Agriculture, 1992. Opus: An integrated simulation model for transport of Nonpoint-source pollutants at the field scale. ARS-98. United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service.
69. van Bavel, CHM and Hillel, DI, 1976: A Simulation Study of Soil Heat and Moisture Dynamics as Affected by a Dry Mulch. In: Proceedings of 1975 Summer Computer Simulation Conference, San Francisco, California. Simulation Councils, Inc., La Jolla, CA., 815-821 pp.
70. van Bavel, CHM and Hillel, DI, 1975. Calculating Potential and Actual Evaporation from a Bare Soil Surface by Simulation of Concurrent Flow of Water and Heat. Agri. Meteorol., 17:453-476.
71. Wagenet, R.J. and Hutson, J.L., 1987. Leaching Estimation and Chemistry Model. Cornell University, Ithaca, NY.
72. White, P.J.; Clarkson, D.T and Earnshaw, M.J., 1987. Acclimation of potassium influx in rye (*Secale cereale*) to low root temperatures. *Planta*, Volume 171, Number 3: 377-385.
73. Wierenga, P.J. and de Wit, C.T., 1970. Simulation of heat flow in soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 34:845-848.
74. Willmott, C.J., 1982, Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin American Meteorological Society*, **63**, 1309-1313.
75. World Meteorological Organization, 1975. Intercomparison of conceptual models used in operational hydrological forecasting. Operational Hydrology Report No 7, World Meteorological Organization, Geneva.
76. Xu, Qingzhang and Huang, Bingru, 2000. Effects of Differential Air and Soil Temperature on Carbohydrate Metabolism in Creeping Bentgrass. Published in *Crop Sci.* 40:1368–1374.
77. Yang, C.-C.; Prasher, S.O. and Mehuys, G.R., 1997. An artificial neural network to estimate soil temperature. *Canadian Journal of Soil Science*, 77, 421-429.
78. Yuan, Y.; Ji, H.; Du, Y. and Cheng, B., 2008. Semi-analytical solution for steady-periodic heat transfer of attached underground engineering envelope. *Building and Environment*, 43, 1147-1152.
79. Ψυλόγλου, Β., 1992. Μεταπτυχιακή Διατριβή. Ανάλυση των καταγραφών θερμοκρασίας εδάφους κατά τον πρώτο χρόνο λειτουργίας του αυτοματοποιημένου σταθμού στο Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών.
80. Ψυλόγλου, Β., 2010. Προσωπική/Τηλεφωνική επαφή με τον κ. Β.Ψυλόγλου, Ερευνητή Ι.Ε.Π.Β.Α./ΕΑΑ, Απρίλιος 2010.