ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΤΙΤΛΟ:

«Μοντελοποίηση της Υδρολογίας της Λεκάνης Απορροής του ποταμού Γεροπόταμου»

ΜΑΓΔΑΛΗ ΜΑΡΙΑ

Εξεταστική Επιτροπή:

Νικόλαος Νικολαΐδης (Επιβλέπων)

Νικόλαος Παρανυχιανάκης

Ουρανία Τζωράκη

Χανιά, 2012

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνετέλεσαν στην επιτυχή διεκπεραίωσή της.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος και επιβλέποντα στην παρούσα διπλωματική εργασία κ. Νικόλαο Νικολαΐδη για την συνεχή καθοδήγηση και υποστήριξη καθόλη την διάρκεια εκπόνησής της.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κα. Ουρανία Τζωράκη για την άψογη συνεργασία καθώς και την συνεχή υποστήριξη και βοήθεια, όποτε ήταν αναγκαίο.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Διονύσιο Ευσταθίου για τη βοήθεια που μου πρόσφερε στη συλλογή των απαραίτητων δεδομένων για την παρούσα εργασία καθώς και για την υποστήριξή του σε θέματα λογισμικού.

Τέλος, ευχαριστώ τον κ. Νικόλαο Παρανυχιανάκη, Λέκτορα του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος για τη συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή.

Abstract

Geropotamos basin located in the Central-southern part of Crete, Greece, faces a severe groundwater resources problem due to the overexploitation of the aquifer, due to irrigation of 250 Km^2 of agricultural land in Messara Valley. This situation has led to Messara Valley being threatened by desertification. The semi-distributed river basin model, Soil and Water Assessment Tool (SWAT2009), coupled with a GIS interface (ArcSWAT), was applied to the Geropotamos River basin in order to examine the impact of alternative management practices on water quantity. The 596 Km^2 drainage basin was discretized into 31 sub-basins using an automated delineation routine. The multiple hydrologic response unit (HRU) approach was used and the basin was discretized into 150 HRUs. The model was calibrated and verified using continuous meteorological data, from the hydrologic year 1970 – 1971 to 2003 – 2004, obtained from thirty-one precipitation stations and twelve temperature stations as well as runoff measured at five monitoring sites located within the main tributaries of the watershed for the time period between September 1970 and August 1995. Calibration and verification results showed good agreement between simulated and measured data. Model performance was evaluated using several statistical parameters, such as the RMSE, NSE, RSR and PBIAS. The validated model was also used to test the effect of several crop management scenarios in runoff. The study showed that the SWAT model, if properly validated, can be used effectively in testing management scenarios in Mediterranean watersheds. The SWAT model application, supported by GIS technology, proved to be a very flexible and reliable tool for water decision – making as well as an effective solution to the 'Harmonization with the Water Framework Directive' issue especially in view of the due date of the year 2015.

Περίληψη

Η λεκάνη απορροής του ποταμού Γεροπόταμου που εντοπίζεται στο νότιο – κεντρικό τμήμα της Κρήτης, στην Ελλάδα, αντιμετωπίζει σοβαρό πρόβλημα όσον αφορά στους υπόγειους υδατικούς πόρους εξαιτίας της υπερεκμετάλλευσης του υδροφορέα, κυρίως για την άρδευση των 250 Km^2 καλλιεργήσιμης έκτασης στην πεδιάδα της Μεσαράς. Λόγω της κατάστασης αυτής, η πεδιάδα της Μεσαράς αντιμετωπίζει τον κίνδυνο ερημοποίησης. Πραγματοποιήθηκε εφαρμογή του ημι – κατανεμημένου μοντέλου λεκάνης απορροής, Soil and Water Assessment Tool (SWAT2009), σε συνδυασμό με περιβάλλον ΓΣΠ, προκειμένου να εξεταστούν οι επιδράσεις των εναλλακτικών διαχειριστικών πρακτικών στο υδατικό ισοζύγιο. Η λεκάνη απορροής, έκτασης 596 Km^2, διαιρέθηκε σε 31 υπολεκάνες και 150 υδρολογικές μονάδες απόκρισης (HRUs) με αυτοματοποιημένη διαδικασία. Για την βαθμονόμηση και επαλήθευση του μοντέλου, που πραγματοποιήθηκε από το υδρολογικό έτος 1970 – 1971 μέχρι και το υδρολογικό έτος 2003 – 2004, χρησιμοποιήθηκαν ημερήσια και συνεχή μετεωρολογικά δεδομένα από 31 βροχομετρικούς σταθμούς και 12 σταθμούς θερμοκρασίας. Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα παροχής μετρημένα σε πέντε θέσεις παρατήρησης εντός των ορίων της λεκάνης απορροής που καλύπτουν το χρονικό διάστημα από τον Σεπτέμβριο του 1970 μέχρι και τον Αύγουστο του 1995. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης και της επαλήθευσης, συμπεραίνουμε ότι το μοντέλο SWAT κατάφερε να προσομοιώσει ικανοποιητικά την λεκάνη απορροής του ποταμού Γεροπόταμου. Η αποτελεσματικότητα του μοντέλου ελέγχθηκε με χρήση διαφόρων στατιστικών δεικτών, όπως οι RMSE, NSE, RSR και PBIAS. Το βαθμονομημένο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε επίσης για την αξιολόγηση των επιδράσεων διαφόρων διαχειριστικών σεναρίων στο υδατικό ισοζύγιο. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης, το μοντέλο SWAT, εφόσον βαθμονομηθεί σωστά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για την αξιολόγηση διαφόρων διαχειριστικών σεναρίων στις λεκάνες απορροής της Μεσογείου. Το μοντέλο SWAT, υποστηριζόμενο από το περιβάλλον ΓΣΠ, αποδείχθηκε ένα ευέλικτο και αξιόπιστο εργαλείο λήψης αποφάσεων για θέματα υδατικών πόρων καθώς και μια ιδιαίτερα αποτελεσματική λύση προς της κατεύθυνση της ‘Εναρμόνισης με την Ευρωπαϊκή

Οδηγία – Πλαίσιο για τα νερά’ κυρίως υπό το πρίσμα της καταληκτικής ημερομηνίας του 2015.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή

1.1. Γενικά

Αδιαμφισβήτητα, το νερό συγκαταλέγεται στους σημαντικότερους φυσικούς πόρους του πλανήτη και ταυτόχρονα αποτελεί ουσιώδη προϋπόθεση για τη διατήρηση της ζωής. Η συνολική ποσότητα του φρέσκου νερού στον πλανήτη θα επαρκούσε για να ικανοποιήσει το σύνολο των αναγκών του ανθρώπινου πληθυσμού, εφόσον ήταν ισάξια κατανεμημένη και προσβάσιμη (Bobba et al., 2000).

Ωστόσο, η ανισοκατανομή των υδατικών πόρων ευνοεί κάποιες περιοχές του πλανήτη εις βάρος άλλων που αντιμετωπίζουν σοβαρά προβλήματα σχετικά με τη διαθεσιμότητα, τη χρήση και τη διαχείριση των υδάτων που καταλήγουν τελικά να απειλούν τη βιωσιμότητα της ανάπτυξης τους. Η μεγάλη διαφοροποίηση των προβλημάτων που σχετίζονται με τους υδατικούς πόρους οφείλεται αφενός σε φυσικά (κλιματολογικά χαρακτηριστικά, διαθεσιμότητα των υδατικών πόρων) και αφετέρου σε κοινωνικοοικονομικά αίτια (επίπεδο κοινωνικής, οικονομικής και τεχνολογικής ανάπτυξης). Τα προβλήματα αυτά συνδέονται άμεσα με τον τρόπο χρήσης των υδάτων και περιλαμβάνουν προβλήματα που αφορούν τόσο στην ποιότητα (π.χ. Καναδάς) όσο και στην ποσότητα των υδάτων (π.χ. Κίνα ή Ινδία) (Bobba et al., 2000).

Επιπλέον, τις τελευταίες δεκαετίες, οι υδατικοί πόροι υφίστανται ολοένα αυξημένες πιέσεις αφενός λόγω της εντατικής ανάπτυξης που δημιουργεί αυξανόμενη ζήτηση για επαρκές σε ποσότητα και ποιότητα νερό και αφετέρου λόγω της κλιματικής αλλαγής που αναμένεται να επηρεάσει μελλοντικά τον υδρολογικό κύκλο σε τοπικό και σταδιακά σε παγκόσμιο επίπεδο (IPCC, 2001).

Οι επιπτώσεις αναμένεται να είναι δυσμενέστερες στις ξηρές και ημίξηρες περιοχές, όπως είναι οι περιοχές της Μεσογείου που μπορεί να οδηγηθούν σε καταστάσεις ερημοποίησης. Ειδικότερα για την Ελλάδα αξίζει να σημειωθεί ότι παρόλο που είναι μία σχετικά ευνοημένη υδρολογικά χώρα, η αναντιστοιχία της χρονικής και κυρίως χωρικής κατανομής των βροχοπτώσεων με τις χρονικές και χωρικές κατανομές της ζήτησης έχουν δημιουργήσει και εξακολουθούν να δημιουργούν προβλήματα έλλειψης νερού, ιδιαίτερα σε περιόδους ανομβρίας. Λόγω λοιπόν των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του κλίματος οι περιοχές αυτές αντιμετωπίζουν σημαντικές προκλήσεις στην αειφόρο διαχείριση των υδατικών πόρων.

Δεδομένης της σοβαρότητας των προβλημάτων που άπτονται του υδατικού περιβάλλοντος και υπό το πρίσμα της μελλοντικής επιδείνωσής τους, καθίσταται επιτακτική η ανάγκη της άμεσης εφαρμογής βιώσιμων πολιτικών ανάπτυξης και διαχείρισης των υδατικών πόρων, μέσω σχεδιασμού, υλοποίησης και βέλτιστης λειτουργίας έργων υποδομής και παρεμβάσεων διαχείρισης.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση, αναγνωρίζοντας ότι η προστασία και διατήρηση του υδατικού περιβάλλοντος είναι ζωτικής σημασίας, προχώρησε στη διαμόρφωση και εφαρμογή περιβαλλοντικών προγραμμάτων που καθορίζουν τις βασικές αρχές μιας βιώσιμης πολιτικής των υδάτων, όπως η Οδηγία – Πλαίσιο για τα νερά ώστε να επιτευχθεί η καλή ποιότητα τόσο των υπόγειων όσο και των επιφανειακών υδάτινων όγκων (EC, 2000; Rekolainen et al., 2003).

Η Οδηγία 2000/60/ΕΚ ή Οδηγία – Πλαίσιο για τα νερά (Water Framework Directive, WFD), αποτελεί ένα σχετικά πρόσφατο νομοθετικό πλαίσιο που επιχειρεί μια ολοκληρωμένη και συνδυαστική προσέγγιση στη διαχείριση και την προστασία του υδάτινου περιβάλλοντος της Ευρώπης, συνδέοντας το στόχο της επίτευξης της καλής ποιότητας του νερού με τη διαθεσιμότητά του, η οποία μάλιστα προσδιορίζεται από ποσοτικά και διαχειριστικά κριτήρια (Κουτούπα-Ρεγκάκου, 2008).

Η εν λόγω Οδηγία-Πλαίσιο υιοθέτησε την έννοια της λεκάνης απορροής ποταμού (river basin) ως το πλέον κατάλληλο πεδίο για την ολοκληρωμένη διαχείριση και προστασία των υδάτων. Ειδικότερα, προβλέπεται ότι τα κράτη – μέλη θα πρέπει να ορίσουν καταρχάς τα υδατικά διαμερίσματα που χαρακτηρίζονται ως περιοχές λεκάνης απορροής ποταμού (άρθρο 2 παρ. 15 της οδηγίας). Επιπλέον, για κάθε περιοχή λεκάνης απορροής ποταμού καθορίζονται οι απαραίτητες ενέργειες που θα πρέπει να υλοποιηθούν εντός των καθορισμένων προθεσμιών, ώστε ο βασικός στόχος της Οδηγίας που είναι η αποτροπή της περαιτέρω υποβάθμισης όλων των υδάτων και η επίτευξη ‘’καλής κατάστασης’’ να επιτευχθεί μέχρι το 2015, από όλα τα Κράτη - Μέλη. Παράλληλα, προωθείται η αειφόρος και ολοκληρωμένη διαχείριση των διασυνοριακών λεκανών απορροής ποταμών, ενώ δημιουργούνται και εισάγονται νέες προσεγγίσεις στην αντιμετώπιση κινδύνων από τις πλημμύρες και την ξηρασία.

Το μοντέλο της διαχείρισης σε επίπεδο λεκάνης απορροής κρίνεται ως ιδιαίτερα αποτελεσματικό τόσο από οικολογική όσο και από οικονομική άποψη, καθώς καθιστά δυνατή μια ολοκληρωμένη προσέγγιση, στην οποία λαμβάνονται υπόψη οι διαφορετικές μορφές του ύδατος (νερό των ποταμών, νερό από τις πηγές, τις λίμνες), οι διάφορες χρήσεις του, οι επιπτώσεις από τις ανθρώπινες δραστηριότητες καθώς και το σύνολο των σχετικών παραμέτρων στο πλαίσιο μιας υδρογεωλογικής περιοχής που εκτείνεται από την πηγή ως την εκβολή. Το βασικό πλεονέκτημα ενός τέτοιου μοντέλου διαχείρισης σε σχέση με αντίστοιχα που βασίζονται σε προϋπάρχουσες διοικητικές δομές συνίσταται στο γεγονός ότι προσανατολίζεται στα φυσικά δεδομένα και συνθήκες, τα οποία είναι καθοριστικά για τον προσδιορισμό των διοικητικών δομών και όχι αντιστρόφως, απηχώντας τις πλέον σύγχρονες τάσεις και αντιλήψεις για τα μοντέλα διαχείρισης των φυσικών πόρων (Κουτούπα-Ρεγκάκου, 2008).

Για την εκτέλεση της Οδηγίας – Πλαίσιο απαιτείται η μαθηματική προσομοίωση με την εφαρμογή διαφορετικών τύπων μοντέλων ανάλογα με το στάδιο της νομοθετικής διαδικασίας (Dilks et al., 2005; Rekolainen et al., 2004). Ποικίλα εργαλεία μοντελοποίησης, που λαμβάνουν υπόψη τις πιθανές χρήσεις γης και τα διαχειριστικά σενάρια, θα μπορούσαν να εφαρμοστούν για τον καθορισμό μέτρων ώστε να επιτευχθεί το επιδιωκόμενο οικολογικό αποτέλεσμα (Kersebaum et al., 2003; Chaplot et al., 2004; Krause et al., 2008). Το μοντέλο SWAT βρέθηκε να ανταποκρίνεται ικανοποιητικά στις απαιτήσεις που επιβάλλει η Οδηγία – Πλαίσιο για το νερό (Dilks et al., 2003).

1.2. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής διατριβής

Η υπερεκμετάλλευση των περιορισμένων υδατικών πόρων στην περιοχή της Μεσογείου σε συνδυασμό με τις ενδεχόμενες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, έχει προκαλέσει έντονη ανησυχία όσον αφορά στη βιωσιμότητα των πόρων και στον κίνδυνο ερημοποίησης της περιοχής (Fantechi et al., 1995). Ειδικότερα, η νήσος Κρήτη, που εντοπίζεται στην περιοχή της νοτιοανατολικής Μεσογείου, θεωρείται ότι διατρέχει σημαντικότατο κίνδυνο τόσο λόγω των κλιματικών διαφοροποιήσεων όσο και των γεωργικών πρακτικών διαχείρισης. Για το λόγο αυτό, κρίνεται επιτακτική η ανάγκη της κατανόησης του ρόλου των κλιματικών διαφοροποιήσεων και των πρακτικών χρήσης γης στους υδατικούς πόρους της νήσου, εστιάζοντας κυρίως στην υπερεκμετάλλευση των υδατικών πόρων στη μεγαλύτερη και πιο σημαντική αγροτική ζώνη της Κρήτης, την πεδιάδα της Μεσαράς.

Σκοπός λοιπόν της παρούσας διπλωματικής διατριβής είναι η μοντελοποίηση της υδρολογίας της λεκάνης απορροής του ποταμού Γεροπόταμου, ώστε να επιτευχθεί η κατανόηση του υδρολογικού ισοζυγίου της περιοχής και να δημιουργηθεί κατ' επέκταση ένα αξιόπιστο διαχειριστικό εργαλείο. Επιπλέον, πρόκειται να εφαρμοστούν διάφορα διαχειριστικά σενάρια στο ήδη βαθμονομημένο μοντέλο που άπτονται κυρίως του τρόπου κάλυψης των αρδευτικών αναγκών προκειμένου να αξιολογηθούν οι πιθανές επιπτώσεις τους στο υδατικό ισοζύγιο της περιοχής. Απώτερος στόχος είναι η εύρεση της βέλτιστης αρδευτικής πρακτικής που αφενός επιτρέπει την συνέχιση της άρδευσης των καλλιεργειών και αφετέρου θεωρείται βιώσιμη για τη διαθεσιμότητα των υδατικών πόρων της περιοχής.

2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1. Γενικά

Το σύνολο της επιφάνειας της Ελλάδας (131.940 km^2) καλύπτεται με επιφανειακούς υδατικούς πόρους συνολικής επιφάνειας γύρω στα 2200 km^2, δηλαδή ποσοστό κάλυψης 1,6%. Από αυτούς οι φυσικές και οι τεχνητές λίμνες καλύπτουν σε έκταση περίπου 956 km^2, οι λιμνοθάλασσες περίπου 288 Km^2, οι ποταμοί έχουν μήκος περίπου 4268 Km, τα έλη περίπου 58 Km^2, ενώ οι εκβολές και τα δέλτα των ποταμών περίπου 723 Km^2 (Νομαρχιακές Αυτοδιοικήσεις 1970-2002, ΕΚΒΥ 1994). Ακόμη, σε πολλές περιοχές της χώρας απαντώνται υπόγειες υδροφορίες λόγω της γεωμορφολογικής της σύστασης.

2.2. Εφαρμογή περιβαλλοντικών μοντέλων

Η ανάγκη κατανόησης και εκτίμησης των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα σε μια λεκάνη απορροής ποταμού σε συνδυασμό με τη ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστικών συστημάτων οδήγησε στην ανάπτυξη δεκάδων μοντέλων, τα οποία παρέχουν τη δυνατότητα γρήγορης, ακριβούς και ευέλικτης αναπαράστασης και μελέτης του φυσικού συστήματος. Τα μοντέλα μπορεί να είναι εννοιολογικά, λογικά, μαθηματικά ή άλλου τύπου, αλλά σε κάθε περίπτωση συνιστούν αφαίρεση ή απλοποίηση του φυσικού συστήματος. Υπάρχουν δύο κύριες συνιστώσες στις οποίες στηρίζεται η ανάπτυξη όλων των μοντέλων: α) η βελτίωση του βαθμού κατανόησης των πολύπλοκων υδρολογικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στο σύστημα και β) ο έλεγχος της απόκρισης του συστήματος. Γενικά, τα ερευνητικά μοντέλα είναι πιο περίπλοκα από τα μοντέλα ελέγχου και σε πολλές περιπτώσεις εφαρμόζονται επειδή τα δεδομένα του πεδίου ή του εργαστηρίου δεν επαρκούν για την εκτίμηση των σεναρίων ή την αξιολόγηση των πρακτικών διαχείρισης (Starfield and Cundall, 1988; Bobba et al., 2000).

Τα μαθηματικά μοντέλα, που χρησιμοποιούνται ευρέως τα τελευταία 50 χρόνια για να αντιμετωπίσουν προβλήματα ποιότητας των υδάτων, εφαρμόζονται αυτή την στιγμή για να διερευνήσουν και να προσομοιώσουν κάθε τύπο προβλήματος που σχετίζεται με τους υδατικούς πόρους (Friedman et al., 1984; Van Grinsven et al., 1995). Αποτελούν πολύτιμο εργαλείο για τη δημιουργία διαχειριστικών σχεδίων και τη λήψη αποφάσεων καθώς προσφέρουν τη δυνατότητα πρόβλεψης της απόκρισης του συστήματος σε διάφορα σενάρια (πλημμύρες, φωτιές, ρύπανση από αγροβιομηχανικά απόβλητα, χρήσεις φυτοπροστατευτικών, υπεράντληση κ.α.). Βέβαια, τα περιβαλλοντικά μοντέλα ενέχουν αβεβαιότητες κυρίως λόγω της ατελούς κατανόησης των διεργασιών που διέπουν το υδρολογικό σύστημα αλλά και της έλλειψης δεδομένων. Τα κατανεμημένα υδρολογικά μοντέλα και ΓΣΠ αποτελούν έναν αποτελεσματικό συνδυασμό για την εκτίμηση της ποσότητας και της ποιότητας των υδάτων εξαιτίας της πολυπλοκότητας των υδρολογικών διεργασιών (Di Luzio et al., 2004; Tsihrintzis et al., 1996). Σε κάθε περίπτωση, πάντως, αρχικά απαιτείται η προσομοίωση της λεκάνης απορροής ενός ποταμού και εν συνεχεία η επαλήθευση με πραγματικά δεδομένα λόγω της μοναδικότητας και της πολυπλοκότητας της κάθε λεκάνης.

2.3. Υδρολογικά μοντέλα

2.3.1. Ορισμός υδρολογικού μοντέλου και στάδια δημιουργίας

Γενικά, με τον όρο μοντέλο νοείται μια μαθηματική περιγραφή της συμπεριφοράς ενός φυσικού συστήματος. Είναι ένα κατασκεύασμα, το οποίο πιστοποιεί, περιγράφει ή αναπαράγει τη συμπεριφορά και την απόκριση φυσικών, χημικών ή βιολογικών συστημάτων.

Τα υδρολογικά μοντέλα συνιστούν μαθηματικούς μετασχηματισμούς που χρησιμοποιούν δεδομένα πεδίου (υδρολογικά, γεωμορφολογικά, κτλ.) και εύλογες υποθέσεις σχετικά με τους μηχανισμούς του υδρολογικού κύκλου, ώστε να αναπαραστήσουν τις υδρολογικές διεργασίες, σε κατάλληλη χωρική και χρονική κλίμακα.

Έχουν αναπτυχθεί ποικίλα μοντέλα για την προσομοίωση τόσο της επιφανειακής όσο και της υπόγειας υδρολογίας μεταξύ των οποίων συγκαταλέγονται τα ακόλουθα:

- Το ETD (**E**nhanced **T**rickle – **D**own Model) (Schnoor et al., 1984; Nikolaidis et al., 1988), που μπορεί να περιγράψει επαρκώς όλους τους τύπους υδρολογικών συστημάτων σε συστήματα απορροής και αποστράγγισης,
- το SWAT (**S**oil and **W**ater **A**ssessment **T**ool) (Arnold et al., 1998; Neitsch et al., 2002; Gassman et al., 2007; Oeurng et al., 2011), που είναι μοντέλο κατάλληλο για την προσομοίωση δασικών και αγροτικών λεκανών απορροής,
- το HSPF (**H**ydrological **S**imulation **P**rogram - **F**ortran) (Johanson et al., 1980; Bicknell et al., 2001), που επιπλέον μπορεί να προσομοιώσει και αστικές περιοχές,
- το ANSWERS - Continuous (**A**real **N**onpoint **S**ource **W**atershed **E**nvironment **R**esponse **S**imulation – Continuous) (Beasley et al., 1980),
- το MIKE – SHE (European Hydrological System Model) (Refsgaard, 1997; Demetriou and Punthakey, 1998),
- το AGNPS (**AG**ricultural **N**on – **P**oint **S**ource Pollution Model) (Young et al., 1987),
- το SWIM (**S**oil and **W**ater **I**ntegrated **M**odel) (Krysanova et al., 1998),
- το MODFLOW (Modular Three – Dimensional Finite – Difference Ground – Water Flow Model) (Harbaugh and McDonald, 1996),
- το MT3D (Modular 3 – D Multi-Species Transport Model) (Zheng, 1990),
- το SURFER (Golden Software Inc., 1989),
- το TMWAM (**T**urkey – **M**ersey **W**atershed **A**cidification **M**odel) (Lam et al., 1988; Bobba and Lam, 1990),
- το ILWAS (**I**ntegrated **L**ake – **W**atershed **A**cidification **S**tudy) (Chen et al., 1984),
- το RAINS (**R**egional **A**ir Pollution **IN**formation and **S**imulation) (Kamari, 1985) κλπ.

Η δημιουργία ενός μοντέλου περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια:

- Επιλογή τρόπου προσομοίωσης (Conceptualization)
- Κωδικοποίηση – Δημιουργία μοντέλου
- Βαθμονόμηση Μοντέλου (Model Calibration)
- Επαλήθευση Μοντέλου (Verification)
- Αξιοπιστία Μοντέλου (Validation)
- Σύγκριση προβλέψεων με δεδομένα στο μέλλον
- Ανάλυση ευαισθησίας (Sensitivity Analysis)
- Ανάλυση αβεβαιότητας (Uncertainty Analysis)

2.3.2. Κατηγορίες υδρολογικών μοντέλων

Τα υδρολογικά μοντέλα μπορούν να διακριθούν με βάση την χωρική κλίμακα, την χρονική διακριτότητα, την στοχαστική ή όχι δομή των μεταβλητών του μοντέλου και το βαθμό προσέγγισης των φυσικών διεργασιών. Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή των διαφόρων κατηγοριών.

- Κατηγοριοποίηση με βάση την χωρική κλίμακα

Τα υδρολογικά μοντέλα ανάγουν τις σημειακές διεργασίες σε επιφανειακές, με ολοκλήρωση των υδρολογικών μεταβλητών εισόδου και εξόδου (βροχόπτωση, εξατμισοδιαπνοή, απορροή, κατείσδυση), καθώς επίσης και των παραμέτρων που περιγράφουν τα φυσικά χαρακτηριστικά του συστήματος σε πεπερασμένη χωρική κλίμακα. Τα υδρολογικά μοντέλα μπορούν να διακριθούν σε τέσσερις κατηγορίες σχηματοποίησης και παραμετροποίησης με βάση την χωρική τους διακριτότητα που αποτελεί θεμελιώδες χαρακτηριστικό τους (Gupta et al., 2003):

- Αδιαμέριστα μοντέλα (lumped):

Οι χρονοσειρές φόρτισης ολοκληρώνονται σε όλη την επιφάνεια της λεκάνης, για την οποία θεωρούνται ενιαίες τιμές παραμέτρων. Η εκτίμηση της απορροής στην έξοδο της λεκάνης βασίζεται στις κύριες μεταβλητές του υδατικού ισοζυγίου της.

- <u>Ημι-κατανεμημένα μοντέλα (semi-distributed):</u>

Η λεκάνη απορροής διακρίνεται σε επιμέρους υπολεκάνες (φυσικές ή χωρικές ενότητες με κοινά υδρολογικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά) με διαφορετικές χρονοσειρές φόρτισης και τιμές παραμέτρων. Η εκτίμηση της απορροής στην έξοδο της λεκάνης προκύπτει συναρτήσει των υπολογισμών για κάθε υποενότητα.

- <u>Ημι-αδιαμέριστα μοντέλα (semi-lumped):</u>

Συνιστούν μια ενδιάμεση μορφή μεταξύ της αδιαμέριστης και της ημι-κατανεμημένης σχηματοποίησης, στην οποία θεωρούνται διακριτές χωρικές ενότητες που δέχονται διαφορετικές φορτίσεις, ωστόσο οι παράμετροι που εφαρμόζονται είναι κοινές για όλες τις ενότητες (Ajami et al., 2004).

- <u>Πλήρως κατανεμημένα μοντέλα (distributed):</u>

Πραγματοποιείται κατάτμηση του φυσικού συστήματος σε πολύ μικρές χωρικές ενότητες (κύτταρα) που αντιπροσωπεύουν ομοιογενή και ισότροπα εδαφικά τμήματα, στα οποία αντιστοιχούν διαφορετικές χρονοσειρές φόρτισης και τιμές παραμέτρων (ή φυσικών ιδιοτήτων) (Μαμάσης, 2007).

- ❖ Κατηγοριοποίηση με βάση την χρονική διακριτότητα

Η χρονική διακριτότητα είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τον σκοπό του μοντέλου. Σχήματα προσομοίωσης που χρησιμοποιούνται για διαχειριστικούς σκοπούς υιοθετούν την μηνιαία ή σπανιότερα, την ημερήσια κλίμακα, ενώ τα μοντέλα πλημμυρών ή τα συνδυαστικά υδρολογικά – υδροδυναμικά μοντέλα υιοθετούν μικρότερες κλίμακες, με μέγιστη την ημερήσια.

Γενικά, τα υδρολογικά μοντέλα μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες με βάση την χρονική τους διακριτότητα:

- Μοντέλα μεμονωμένου υδρολογικού γεγονότος:

Τα μοντέλα αυτά περιγράφουν μεμονωμένα γεγονότα, όπως ένα υδρογράφημα ή την αιχμή μιας πλημμύρας.

- Συνεχή μοντέλα:

Τα μοντέλα αυτά περιγράφουν την διαχρονική εξέλιξη του ισοζυγίου υδατικών πόρων μιας πεπερασμένης χωρικής ενότητας (Μαμάσης, 2007).

❖ Κατηγοριοποίηση με βάση την στοχαστική δομή των μεταβλητών του μοντέλου

Γενικά, τα υδρολογικά μοντέλα μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες με βάση την στοχαστικότητά τους:

- Στοχαστικά μοντέλα:

Τα μοντέλα αυτά βασίζονται στην πιθανολογική προσέγγιση των υδρολογικών διεργασιών, τις οποίες αντιμετωπίζουν ως τυχαίες μεταβλητές, είτε μεμονωμένες είτε από κοινού. Χρησιμοποιούν μεθόδους επαγωγικής στατιστικής και ενδείκνυνται για περιπτώσεις στις οποίες η πραγματοποίηση ενός υδρολογικού φαινομένου (π.χ. η αιχμή μιας πλημμύρας) είναι ή μπορεί να θεωρηθεί ανεξάρτητη από κάθε άλλη πραγματοποίηση του ίδιου φαινομένου.

Τα μοντέλα αυτά δεν δίνουν μονοσήμαντες προγνώσεις των μεταβλητών που αναπαριστούν, αλλά ποσοτικοποιούν την αβεβαιότητα των προγνώσεων. Αναπαράγοντας τα στατιστικά μεγέθη των παρατηρημένων δειγμάτων, όχι μόνο εξασφαλίζουν στατιστική συνέπεια, αλλά διατηρούν και μια στοιχειώδη, έστω, συνέπεια με τα χαρακτηριστικά του φυσικού συστήματος (Salas et al., 1980).

- <u>Προσδιοριστικά μοντέλα:</u>

Σε καμία μεταβλητή των μοντέλων αυτών δεν υπεισέρχεται στοχαστική δομή των δεδομένων. Τα μοντέλα αυτά μπορούν να προσομοιώνουν πλήρως τον υδρολογικό κύκλο και τις συνιστώσες του, ώστε να αποτελούν μία αξιόπιστη αναπαράσταση της συμπεριφοράς και απόκρισης του φυσικού συστήματος δίνοντας σαφή και μονοσήμαντα αποτελέσματα. Το μειονέκτημά τους έγκειται στην αδυναμία τους να δώσουν πιθανολογική διάσταση στα αποτελέσματα.

❖ Κατηγοριοποίηση με βάση τον βαθμό προσέγγισης των φυσικών διεργασιών

Γενικά, τα υδρολογικά μοντέλα μπορούν να διακριθούν σε τρεις κατηγορίες με βάση τον βαθμό προσέγγισης των φυσικών διεργασιών:

- <u>Μοντέλα φυσικής βάσης (physically-based):</u>

Τα μοντέλα φυσικής βάσης είναι εξ ορισμού κατανεμημένα, καθώς αναπαριστούν τις υδρολογικές διεργασίες μικρής κλίμακας βασιζόμενα στους φυσικούς νόμους που σχετίζονται με την κίνηση του νερού (εξισώσεις ακόρεστης και κορεσμένης ροής), καθώς και σε άλλες εμπειρικές εξισώσεις από πειραματικές λεκάνες. Ωστόσο, στην πράξη έχει αποδειχθεί ότι ένα πολύπλοκο μοντέλο περιγραφής των φυσικών διεργασιών είναι σχεδόν αδύνατον να είναι απόλυτα φυσικής βάσης, απλούστατα, διότι οι ενδιάμεσες διεργασίες του κύκλου του νερού και των θρεπτικών δεν είναι τελείως γνωστές. Η χρήση του ενδείκνυται περισσότερο σε επίπεδο λεκάνης απορροής λόγω της μεγάλης απαίτησής του σε δεδομένα.

- <u>Εννοιολογικά μοντέλα (conceptual):</u>

Τα μοντέλα αυτά διατυπώνουν όχι τους φυσικούς νόμους αλλά παραμετρικές σχέσεις σε υδραυλικά ανάλογα που αναπαριστούν τις κύριες υδρολογικές διεργασίες στην ελάχιστη χωρική ενότητα που υποστηρίζεται από την σχηματοποίηση (λεκάνη, υπολεκάνη). Ειδικότερα, τα επιφανειακά εννοιολογικά μοντέλα αναφέρονται και ως μοντέλα συγκέντρωσης της εδαφικής υγρασίας (soil moisture accounting models), καθώς το υδραυλικό ανάλογο που χρησιμοποιούν είναι μια υποθετική δεξαμενή νερού, η στάθμη της οποίας αναπαριστά το μέσο ύψος υγρασίας στην ακόρεστη ζώνη του εδάφους.

- Μοντέλα μαύρου κουτιού (black-box):

Στην περίπτωση των μοντέλων αυτών, οι εξισώσεις δεν αναπαριστούν τις ενδιάμεσες διεργασίες τον υδρολογικού κύκλου, όπως συμβαίνει με τα εννοιολογικά και τα φυσικής βάσης μοντέλα, αλλά συνιστούν διαδοχικούς μη γραμμικούς μετασχηματισμούς σχέσεων αιτίου – αποτελέσματος. Το πλεονέκτημά τους έγκειται στη δυνατότητα περιγραφής οσοδήποτε πολύπλοκων συστημάτων, με πολύ μικρότερο (σχεδόν αμελητέο) υπολογιστικό φόρτο σε σχέση με τα αναλυτικά μοντέλα προσομοίωσης (Μαμάσης, 2007).

2.3.3. Βαθμονόμηση και επαλήθευση ενός υδρολογικού μοντέλου

2.3.3.1. Ορισμός βαθμονόμησης

Ως βαθμονόμηση (calibration) ορίζεται η συστηματική διαδικασία προσαρμογής των τιμών των παραμέτρων ενός υδρολογικού μοντέλου, έτσι ώστε οι προσομοιωμένες αποκρίσεις του (παροχές, εξατμισοδιαπνοή, στερεοπαροχές, φορτία N και P) να προσεγγίζουν όσο το δυνατόν περισσότερο τις αντίστοιχες παρατηρημένες τιμές. Η βαθμονόμηση ενός μοντέλου προϋποθέτει ένα επαρκές χρονικό διάστημα για το οποίο διατίθενται συστηματικές μετρήσεις (χρονοσειρές) απόκρισης του φυσικού συστήματος, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των ιστορικών με τα προσομοιωμένα δεδομένα. Στο πρόβλημα βαθμονόμησης οι παράμετροι που περιγράφουν τις εσωτερικές διεργασίες δεν είναι πάντοτε γνωστές, οπότε ζητείται ουσιαστικά η βελτιστοποίηση της ίδιας της μαθηματικής δομής του μοντέλου με τρόπο ώστε η προσομοιωμένη απόκριση να προσεγγίζει καλύτερα την παρατηρημένη συμπεριφορά του υδρολογικού συστήματος. Δεδομένου ότι σε ένα μοντέλο φυσικής βάσης όλες οι παράμετροι είναι θεωρητικά μετρήσιμες ιδιότητες του φυσικού συστήματος, μια τέτοια στρατηγική αναιρεί το χαρακτηρισμό του μοντέλου ως φυσικής βάσης, αφού η προσαρμογή έστω και μιας παραμέτρου κατά την διαδικασία της βαθμονόμησης καθιστά την όλη προσέγγιση εννοιολογική (Ευστρατιάδης, 2008). Όσο πιο πολύπλοκο είναι ένα μοντέλο, τόσο πιο δύσκολο είναι να προσομοιωθούν με υψηλό βαθμό βεβαιότητας οι διάφορες φυσικές διεργασίες, κάτι που γίνεται περισσότερο εφικτό όταν διατίθενται πολλά δεδομένα πεδίου, που όμως η συλλογή τους απαιτεί χρόνο και έχει σημαντικό κόστος. Η δυσκολία στη βαθμονόμηση μπορεί να οφείλεται σε εσωτερικές παραμέτρους του μοντέλου που στερούνται πλήρους φυσικής σημασίας και προσαρμόζονται εμπειρικά.

2.3.3.2. Τύποι βαθμονόμησης

Η βαθμονόμηση των μοντέλων μπορεί να είναι χειροκίνητη, αυτόματη ή ημιαυτόματη.

- Χειροκίνητη βαθμονόμηση

Η χειροκίνητη βαθμονόμηση δεν συνιστά μια αυστηρά συστηματική διαδικασία, αλλά βασίζεται στην διερεύνηση εναλλακτικών συνδυασμών παραμέτρων που επιλέγονται από τον χρήστη. Συγκεκριμένα, ο χρήστης ελέγχει πλήρως την διαδικασία αφού μετά από μία αλλαγή στις παραμέτρους ελέγχει εμπειρικά μέσω γραφημάτων ή και στατιστικά με χρήση κάποιου δείκτη τα αποτελέσματα και αποφαίνεται για την επιτυχία της προσομοίωσης. Παρόλο που η διαδικασία είναι ιδιαίτερα επίπονη, ιδιαίτερα όταν το μοντέλο είναι πολυπαραμετρικό, εφαρμόζεται ακόμη και σήμερα δεδομένου ότι ενσωματώνει την υδρολογική εμπειρία, οδηγώντας έτσι σε ρεαλιστικές και αντιπροσωπευτικές τιμές παραμέτρων.

- Αυτόματη βαθμονόμηση

Διατυπώνεται ένα μέτρο καλής προσαρμογής των προσομοιωμένων σε σχέση με τις παρατηρημένες αποκρίσεις της λεκάνης απορροής, το οποίο θεωρείται ως η αντικειμενική συνάρτηση ενός προβλήματος μη γραμμικής βελτιστοποίησης, με μεταβλητές ελέγχου τις παραμέτρους του μοντέλου. Η αυτόματη βαθμονόμηση προσφέρει την δυνατότητα πολλαπλών δοκιμών με τυχαίες αλλαγές στις παραμέτρους με σκοπό τα αποτελέσματα του μοντέλου να παρουσιάζουν την επιθυμητή συνέπεια με τα παρατηρημένα. Η τελική επιλογή των παραμέτρων προκύπτει ως αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης. Αν και η μέθοδος υπόσχεται την εύρεση της βέλτιστης λύσης, χρειάζεται προσοχή ώστε να μην επιτραπεί η ανεξέλεγκτη και χωρίς περιορισμούς μεταβολή παραμέτρων με σκοπό την επίλυση αποκλειστικά ενός μαθηματικού προβλήματος που δεν υπακούει στους νόμους του φυσικού συστήματος.

- Ημιαυτόματη βαθμονόμηση

Η ημιαυτόματη βαθμονόμηση συνιστά μια διαδραστική μέθοδο που συνδυάζει τις δύο προηγούμενες. Στη διαδικασία αυτή ο χρήστης παρακολουθεί την διαδικασία βελτιστοποίησης και επεμβαίνει σ' αυτήν μεταβάλλοντας τα κριτήρια και τις υποθέσεις του προβλήματος, ώστε να οδηγήσει την πορεία αναζήτησης προς την επιθυμητή κατεύθυνση. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται η εγκυρότητα της προσομοίωσης και ταυτόχρονα επιτρέπεται στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης του μοντέλου να επιτύχει το βέλτιστο δυνατό αποτέλεσμα σε μικρό χρόνο. Επομένως, η μέθοδος αυτή θεωρείται ως η πλέον πρόσφορη και ενδεικνυόμενη ιδιαίτερα στην περίπτωση σύνθετων σχημάτων, όπου συναντάται έντονη αβεβαιότητα στην εκτίμηση των παραμέτρων λόγω της ύπαρξης πολλών ισοδύναμα καλών λύσεων.

Για να θεωρηθεί ωστόσο μία προσομοίωση επιτυχής, δεν αρκεί η ικανοποιητική, ρεαλιστική και με φυσικό νόημα μεταβολής των παραμέτρων βαθμονόμηση του μοντέλου. Είναι αναγκαίο να διερευνηθεί αν το μοντέλο διαθέτει επαρκή προγνωστική ικανότητα, δηλαδή αν είναι ικανό να αναπαράγει ένα ευρύ φάσμα των αποκρίσεων της λεκάνης (π.χ. υγρά και ξηρά έτη) και σε περισσότερες της μίας θέσεις ποταμού με ικανοποιητική ακρίβεια. Για το λόγο αυτό, ένα ανεξάρτητο δείγμα παρατηρήσεων που δεν χρησιμοποιήθηκε για σύγκριση κατά την βαθμονόμηση και αναφέρεται σε διαφορετική χρονική περίοδο ή διαφορετική διατομή ποταμού εντός της λεκάνης, συγκρίνεται εκ των υστέρων με το αντίστοιχο προσομοιωμένο δείγμα (Refsgaard, 1997). Αυτή η σύγκριση, που αποτελεί την διαδικασία της επαλήθευσης, κρίνει τελικά την επιτυχία της προσομοίωσης και καθορίζει την προγνωστική ικανότητα, που είναι επιβεβλημένο να είναι ικανοποιητική για ένα μοντέλο που επιχειρείται μετέπειτα να χρησιμοποιηθεί στην προσομοίωση εναλλακτικών διαχειριστικών πρακτικών σε τμήματα της λεκάνης απορροής.

2.3.3.3. Ορισμός επαλήθευσης

Ο όρος επαλήθευση (validation) αναφέρεται σε μια διαδικασία αξιολόγησης μαθηματικών μοντέλων, ώστε να διαπιστωθεί αν αποτελούν αντιπροσωπευτικές αναπαραστάσεις του συστήματος που προσομοιώνουν.

Συνήθως, η επαλήθευση ενός υδρολογικού μοντέλου γίνεται για το βέλτιστο σύνολο παραμέτρων που έχει προκύψει από την βαθμονόμηση, ελέγχοντας το ίδιο κριτήριο προσαρμογής για μια άλλη (κατά κανόνα μεταγενέστερη της βαθμονόμησης) χρονική περίοδο, για την οποία επίσης διατίθενται μετρημένες φορτίσεις και αποκρίσεις της λεκάνης. Η προσέγγιση αυτή είναι γνωστή ως διαχωρισμός δεδομένων (data - split), και για να έχει νόημα θα πρέπει τα χαρακτηριστικά του συστήματος να έχουν διατηρηθεί αμετάβλητα για το σύνολο της περιόδου ελέγχου του μοντέλου (περίοδος βαθμονόμησης και επαλήθευσης μαζί), ώστε να εξασφαλιστεί ότι στη λεκάνη ισχύουν συνθήκες στασιμότητας (stationarity).

2.4. Περιγραφή του μοντέλου SWAT

Το μοντέλο SWAT (Soil and Water Assessment Tool) αναπτύχθηκε από την Υπηρεσία Αγροτικών Ερευνών των ΗΠΑ (USDA – ARS, Agricultural Research Service) με σκοπό να αξιολογήσει τις μακροπρόθεσμες επιπτώσεις των πρακτικών διαχείρισης σε λεκάνες απορροής με μικρό αριθμό σταθμών παρακολούθησης και να προσομοιώσει την επίδρασή τους στον υδρολογικό κύκλο, τον κύκλο των θρεπτικών συστατικών, τα ιζήματα και την παραγωγή χημικών (Arnold et al., 1995; Neitsch et al., 2005). Η αποτελεσματικότητά του, το κατέστησε διεθνώς αποδεκτό ως ένα από τα πλέον κατάλληλα μοντέλα προσομοίωσης μεγάλων και πολύπλοκων λεκανών απορροής με διάφορους τύπους εδάφους, χρήσεων γης και συνθηκών διαχείρισης (Arnold and Fohrer, 2005; Behera and Panda, 2006; Gassman et al., 2007a).

Πρόκειται για ένα κατανεμημένο υδρολογικό μοντέλο λεκάνης απορροής, φυσικής βάσης (physically-based) και συνεχούς χρόνου, που λειτουργεί με ημερήσιο βήμα (Arnold et al., 1998, Neitsch et al., 2001). Λαμβάνει υπόψη δεδομένα σχετικά με το έδαφος, τις χρήσεις γης και το κλίμα σε μια λεκάνη και δίνει αποτελέσματα σχετικά με τις απορροές, τα φερτά υλικά και τις ποιοτικές παραμέτρους του επιφανειακού νερού, χημικές (συγκεντρώσεις ενώσεων N και P) και βιολογικές (BOD, DO), στην έξοδο της λεκάνης αλλά και σε ενδιάμεσα σημεία. Η σχέση μεταξύ των μεταβλητών εισόδου και εξόδου περιγράφεται από εξισώσεις παλινδρόμησης.

Το μοντέλο SWAT δεν σχεδιάστηκε ώστε να προσομοιώσει τα μεμονωμένα γεγονότα πλημμύρας (Neitsch et al., 2002), αλλά τις διεργασίες διαχείρισης στη λεκάνη απορροής καθώς και τις διεργασίες βροχόπτωσης – απορροής με υψηλό βαθμό χωρικής λεπτομέρειας χάρη στη διαίρεση της λεκάνης απορροής σε επιμέρους υπολεκάνες. Το μοντέλο SWAT παρέχει μεταξύ άλλων τη δυνατότητα:

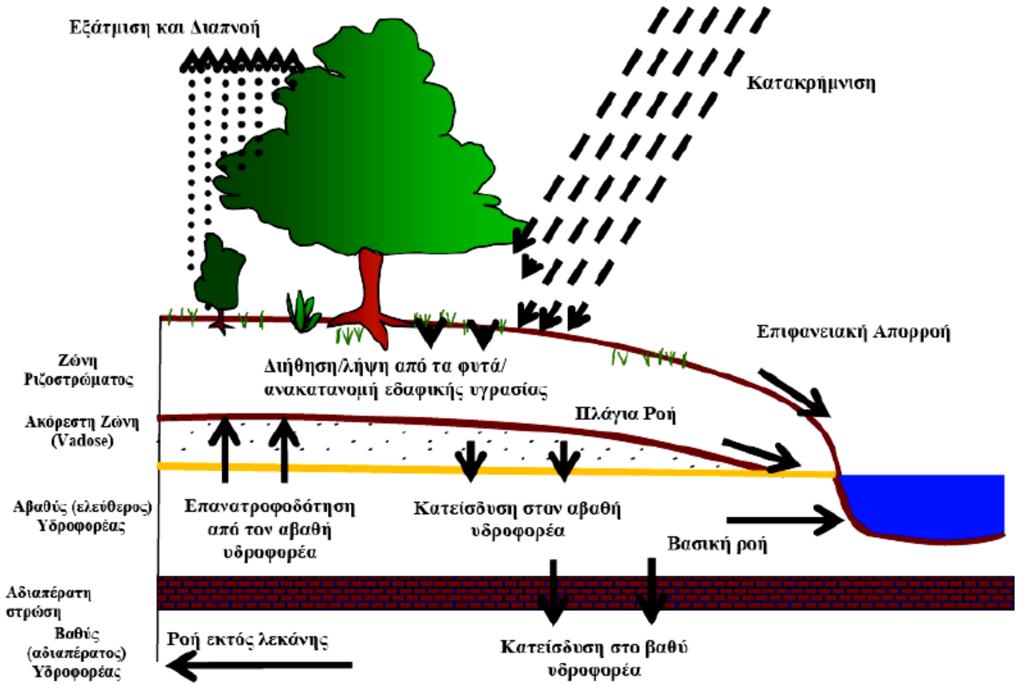
a) προσομοίωσης της βροχόπτωσης και/ή της χιονόπτωσης μέχρι και 10 κλιμάκων υψομέτρου,
b) επαναπροσδιορισμού των εισαχθέντων δεδομένων για προσομοίωση της κλιματικής αλλαγής και
c) πρόβλεψης των μελλοντικών κλιματικών συνθηκών.

2.4.1. Δεδομένα εισόδου του μοντέλου SWAT

Στα δεδομένα εισόδου του μοντέλου συγκαταλέγονται το ανάγλυφο, οι χρήσεις γης, οι τύποι του εδάφους (ιδανικά της ακόρεστης ζώνης), οι χρονοσειρές με τα ημερήσια δεδομένα βροχόπτωσης, μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, ταχύτητας του ανέμου καθώς και ηλιακής ακτινοβολίας (η απαίτηση των τριών τελευταίων εξαρτάται από τη μέθοδο προσομοίωσης της χρονοσειράς δυνητικής εξατμισοδιαπνοής) για όλο το χρονικό διάστημα προσομοίωσης (Gassman et al., 2007b). Ο μέσος όρος της ημερήσιας θερμοκρασίας αέρα που υπολογίζεται από τα δεδομένα που εισήχθησαν, χρησιμοποιείται για να καθοριστεί αν η βροχόπτωση πρέπει να προσομοιωθεί ως χιονόπτωση, ενώ η ελάχιστη και μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία χρησιμοποιούνται για τους υπολογισμούς της ημερήσιας θερμοκρασίας του εδάφους και του νερού. Τα εισαχθέντα δεδομένα χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση του κλίματος της περιοχής μελέτης με τη βοήθεια 13 μηνιαίων κλιματικών μεταβλητών, οι οποίες αναπτύχθηκαν μετά από χρόνια καταγραφή κλιματικών δεδομένων, και είναι καταγεγραμμένες σε πίνακες που διαθέτει το μοντέλο.

2.4.2. Διαδικασία προσομοίωσης του υδρολογικού κύκλου

Ο υδρολογικός κύκλος στο SWAT είναι αυτός που διέπει την ποσότητα νερού, φερτών υλών και θρεπτικών στοιχείων που εγκαταλείπουν το έδαφος και καταλήγουν στο υδρογραφικό δίκτυο στο ημερήσιο χρονικό βήμα προσομοίωσης. Οι συνιστώσες του υδρολογικού κύκλου απεικονίζονται στην Εικόνα 2.1 και προσομοιώνονται από το μοντέλο στη χωρική κλίμακα της Υδρολογικής Μονάδας Απόκρισης όπως αναλύεται ακολούθως.



Εικόνα 2.1 : Ο υδρολογικός κύκλος του SWAT (Πηγή: Neitsch et al., 2005)

Το SWAT δέχεται ημερήσια δεδομένα για τα κατακρημνίσματα που εμφανίζονται στη λεκάνη απορροής. Η κατακρήμνιση εμφανίζεται με τη μορφή βροχόπτωσης ή χιονόπτωσης, ανάλογα με τη μέση ημερήσια θερμοκρασία. Η χιονόπτωση σχηματίζει στρώση χιονιού στο έδαφος, το οποίο τήκεται όταν η εδαφική θερμοκρασία το επιτρέψει. Η δε συμπεριφορά του λιωμένου χιονιού είναι αντίστοιχη με αυτή της βροχόπτωσης (Neitsch et al., 2005).

Το νερό της βροχής, που αναλογεί σε κάθε υπολεκάνη, είναι αυτό που έχει καταγραφεί από εκείνον τον μετεωρολογικό σταθμό (μεταξύ αυτών που ορίζει ο χρήστης), που βρίσκεται πιο κοντά στο κέντρο βάρους της. Το διαθέσιμο νερό, είτε διηθείται στο έδαφος, όπου διοδεύεται στις διαφορετικές στρώσεις (μέχρι 10), είτε απορρέει επιφανειακά. Το ποσοστό του νερού απορροής ρυθμίζεται από τον συντελεστή απορροής, ανάλογα με τον τύπο του εδάφους και τη χρήση γης. Η εκτίμησή του πραγματοποιείται με μια τροποποιημένη μέθοδο του αριθμού καμπύλης CN (Curve Number) κατά SCS (USDA, Soil Conservation Service, 1972). Το εδαφικό νερό προσλαμβάνεται από τη βλάστηση και διαπνέεται, υφίσταται εδαφική εξάτμιση, κατεισδύει στον αβαθή υδροφορέα ή συμβάλλει στην απορροή στην έξοδο της λεκάνης με την ενδιάμεση απορροή (lateral flow). Για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής, το μοντέλο περιλαμβάνει τρεις διαφορετικές μεθόδους (Thornthwaite, Hargreaves και Penman-Monteith), που χρησιμοποιούνται ανάλογα με τα υπάρχοντα δεδομένα. Ένα μέρος του υπόγειου νερού από τον αβαθή υδροφορέα (shallow aquifer) θεωρείται ότι φτάνει στα βαθύτερα στρώματα (deep aquifer) και χάνεται από το σύστημα. Το επιφανειακό νερό κινούμενο στο ποτάμι συναντά πιθανούς ταμιευτήρες και λίμνες, όπου η εξίσωση υδατικού ισοζυγίου διέπει την αποθήκευση και την απελευθέρωση νερού στο εκάστοτε χρονικό βήμα. Το νερό που τελικά καταλήγει στο ποτάμι είναι το άθροισμα της επιφανειακής, ενδιάμεσης και υπόγειας απορροής και διοδεύεται μέχρι τον επόμενο ταμιευτήρα ή λίμνη ή μέχρι την έξοδο της λεκάνης. Το μοντέλο επιτρέπει ακόμα την αφαίρεση νερού από κάθε σημείο του συστήματος (υδατόρρευμα, ταμιευτήρας, λίμνη, αβαθής και βαθύς υδροφορέας) για ανθρωπογενείς χρήσεις (Μιμίκου, 2006).

Η γενική εξίσωση που χρησιμοποιεί το SWAT για την περιγραφή του υδρολογικού κύκλου της Εικόνας 2.1 σε κάθε υδρολογική μονάδα είναι:

$$SW_t = SW_o + \sum_{i=1}^{t} \left(R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw} \right)$$

όπου:

SW_t : η τελική περιεκτικότητα υγρασίας του εδάφους την ημέρα t

SW_o : η αρχική περιεκτικότητα υγρασίας του εδάφους την χρονική στιγμή 0

R_{day} : η ημερήσια κατακρήμνιση την ημέρα i (mm H_2O)

Q_{surf} : η ημερήσια επιφανειακή απορροή την ημέρα i (mm H_2O)

E_a : η ημερήσια εξατμισοδιαπνοή την ημέρα i (mm H_2O)

w_{seep} : η ποσότητα νερού που εξέρχεται από την ζώνη ριζοστρώματος και εισέρχεται στη ζώνη vadose την ημέρα i (mm H_2O)

Q_{gw} : η υπόγεια ροή την ημέρα i (mm H_2O)

2.4.3. Δημιουργία υδρολογικού ισοζυγίου

Το μοντέλο SWAT ενσωματώνει όλες τις σχετικές υδρολογικές διεργασίες συμπεριλαμβανομένης της απορροής, του κύκλου και της μεταφοράς των θρεπτικών, της ανάπτυξης της βλάστησης, των χρήσεων γης καθώς και της διαχείρισης των υδατικών πόρων σε επίπεδο υπολεκάνης.

Συνεπώς, η λεκάνη απορροής υποδιαιρείται σε επιμέρους υπολεκάνες βάσει του αριθμού των παραποτάμων. Ο αριθμός και το μέγεθος των υπολεκανών ποικίλει ανάλογα με το υδρογραφικό δίκτυο και το μέγεθος της λεκάνης απορροής. Η κάθε υπολεκάνη διαχωρίζεται στη συνέχεια περαιτέρω σε υδρολογικές μονάδες απόκρισης (Hydrological Response Units, HRUs), καθεμία από τις οποίες χαρακτηρίζεται σε όλη της την έκταση από ένα μοναδικό συνδυασμό των υποκείμενων γεωγραφικών χαρτών (εδάφη, κλίσεις, χρήσεις γης).

Η προσομοίωση του υδρολογικού ισοζυγίου πραγματοποιείται αρχικά για καθεμία υδρολογική μονάδα απόκρισης ξεχωριστά, στην οποία συνυπολογίζονται το ποσοστό της βροχόπτωσης που συγκρατείται από το φύλλωμα των φυτών και των δέντρων, ο τρόπος καταμερισμού της βροχόπτωσης, το νερό από το λιώσιμο του χιονιού, το νερό άρδευσης μεταξύ της επιφανειακής απορροής και της διήθησης, η αναδιανομή του νερού στο προφίλ του εδάφους, η εξατμισοδιαπνοή, η υπεδάφια απορροή, καθώς και η ροή που επιστρέφει από τους ρηχούς υδροφορείς.

Αφού ολοκληρωθεί ο υπολογισμός της επιφανειακής απορροής, των κύκλων των θρεπτικών, της παραγωγής φερτών υλών και της ανάπτυξης των φυτών για κάθε υδρολογική μονάδα απόκρισης, τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση όλου του ποτάμιου συστήματος συνολικά. Αναλυτικότερα, οι ροές των υδρολογικών μονάδων απόκρισης της κάθε υπολεκάνης αθροίζονται και στη συνέχεια διοδεύονται μέσα στο υδρογραφικό δίκτυο χρησιμοποιώντας είτε τη μέθοδο αποθήκευσης μεταβλητού ρυθμού (Williams, 1969), είτε τη μέθοδο Muskingum (Neitsch et al., 2005), που είναι και οι δύο παραλλαγές της προσέγγισης του κινηματικού κύματος. Επίσης, αθροίζονται τα φορτία ή οι συγκεντρώσεις από τα ιζήματα, τα θρεπτικά, τα φυτοφάρμακα και τα βακτήρια των υδρολογικών μονάδων απόκρισης της κάθε υπολεκάνης (αφού συνυπολογιστεί η απομάκρυνση) και στη συνέχεια διοδεύονται μέσω των καναλιών, των λιμναζόντων νερών, των υγροτόπων και των ρεζερβουάρ για να καταλήξουν στην έξοδο της λεκάνης απορροής. Στους υπολογισμούς λαμβάνονται υπόψη οι διαφοροποιήσεις στη ροή και τα φορτία λόγω των σημειακών πηγών αλλά και των πιέσεων από τις αστικές περιοχές (Gassman et al., 2007b).

2.4.4. Διαχειριστικές πρακτικές στο μοντέλο SWAT

Το μοντέλο SWAT επιτυγχάνει μια πολύ λεπτομερειακή προσομοίωση των Διαχειριστικών Πρακτικών στην αγροτική γη, καθώς οι βασικότερες από αυτές όπως η σπορά, λίπανση, άροση, άρδευση, συγκομιδή, βόσκηση κ.α., μπορούν να οριστούν εύκολα από το χρήστη για κάθε υδρολογική μονάδα. Συγκεκριμένα, παρέχεται η δυνατότητα ορισμού της κατάλληλης ημερομηνίας και εκλογής του επιθυμητού τρόπου με τον οποίο θα πραγματοποιηθεί κάθε πρακτική.

2.5. Εφαρμογές του μοντέλου SWAT

Το μοντέλο SWAT έχει εφαρμοστεί σε διάφορες λεκάνες απορροής στις ΗΠΑ (Arnold and Allen, 1996; Arnold et al., 1998; Srinivasan et al., 1998; Saleh et al., 2000; Shanti et al., 2001; Jha et al., 2004), αλλά και παγκοσμίως για την αξιολόγηση των επιδράσεων των σεναρίων χρήσης γης και των γεωργικών πρακτικών διαχείρισης στην ποιότητα καθώς και την ποσότητα των υδάτων (Vache et al., 2002; Shanti et al., 2003; Chaplot et al., 2004; Pandey et al., 2005; Tripathi et al., 2005; Arabi et al., 2006; Behera and Panda, 2006; Shanti et al., 2006; Rode et al., 2008; Ullrich and Volk, 2009; Volk et al., 2009). Επίσης, διάφορες μελέτες αναλύουν τις μακροπρόθεσμες επιπτώσεις των Βέλτιστων Πρακτικών Διαχείρισης (Best Management Practices – BMP) στην ποιότητα των υδάτων (Kirsch et al., 2002; Chaplot et al., 2004; Tripathi et al., 2005; Pandey et al., 2005 or Behera and Panda, 2006; Bracmort et al., 2006). Οι μελέτες που έχουν γίνει, αποδεικνύουν την αποτελεσματικότητα του μοντέλου κυρίως στην πρόβλεψη των υδρολογικών διεργασιών αλλά και των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα όσον αφορά στα θρεπτικά, σε μικρής και μεγάλης κλίμακας αγροτικές λεκάνες απορροής. Αν και το μοντέλο SWAT θεωρείται ένα πολύ αξιόπιστο μοντέλο για την προσομοίωση των φυσικών διεργασιών σε αγροτικές λεκάνες απορροής σε συνεχή χρόνο (Borah and Bera, 2003), τα αποτελέσματά του είναι περισσότερο αξιόπιστα όταν ανάγονται σε μηνιαίο ή ετήσιο βήμα και όχι τόσο όταν λαμβάνονται σε ημερήσιο (Borah and Bera, 2004).

Πιο συγκεκριμένα, το μοντέλο SWAT έχει χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές για την ποσοτικοποίηση των επιδράσεων της κλιματικής αλλαγής σε έναν αποδέκτη (Stone et al., 2001), την εκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης (Phomcha et al., 2012; Shen et al., 2009), την αξιολόγηση του υδροηλεκτρικού δυναμικού (Kusre et al., 2010), την ανάπτυξη των αποτελεσματικότερων πρακτικών διαχείρισης (Gassman et al., 2007b), τη μεταφορά των φυτοφαρμάκων σε επίπεδο λεκάνης απορροής (Luo and Zhang, 2009) καθώς και την πρόβλεψη της απορροής (Demirel et al., 2009). Ακόμη, το μοντέλο SWAT έχει εφαρμοστεί σε τροπικές λεκάνες απορροής με ελάχιστη διαθεσιμότητα δεδομένων (Ndomba et al., 2008).

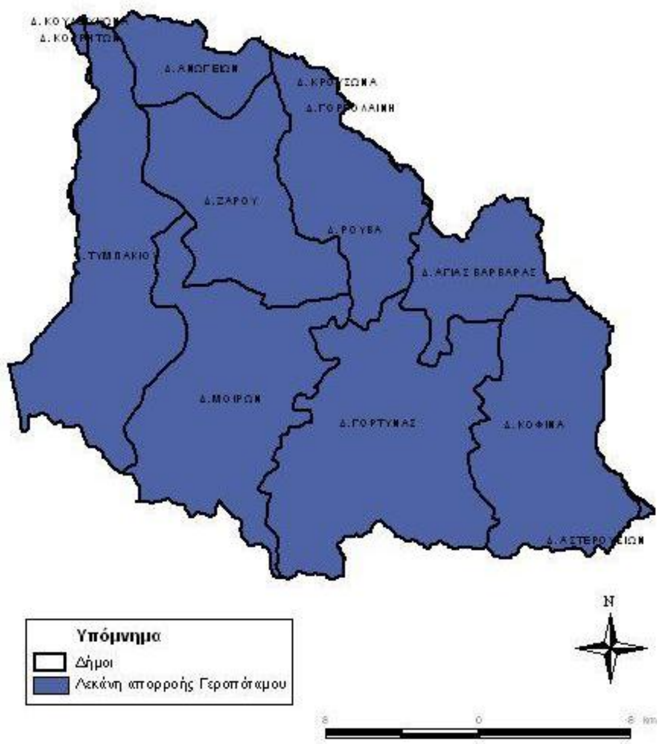
Τέλος, το μοντέλο SWAT έχει εφαρμοστεί σε λεκάνες απορροής στην Ελλάδα για τη μελέτη της υδρολογίας και της χημείας της λεκάνης απορροής του ποταμού Κόσυνθου στη Βορειοανατολική Ελλάδα (Pisinaras et al., 2010) καθώς και για την εκτίμηση της χημικής κατάστασης των υδάτων της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα και την εφαρμογή μέτρων διασφάλισης της οικολογικής του ποιότητας (Κασσωτάκη, 2011). Τα αποτελέσματα και των δύο μελετών έδειξαν ότι το μοντέλο SWAT είναι ένα πολύ ευέλικτο και αξιόπιστο εργαλείο στη λήψη αποφάσεων για τη διαχείριση των υδάτων, ειδικά κάτω από την ανάγκη για εναρμόνιση με την οδηγία πλαίσιο και ότι αν βαθμονομηθεί σωστά, είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό στην εξέταση σεναρίων διαχείρισης λεκανών απορροής στη Μεσόγειο.

3. Περιγραφή της περιοχής μελέτης

3.1. Γενικά

Η περιοχή μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ευρύτερη περιοχή της λεκάνης απορροής της Δυτικής Μεσαράς, η οποία ανήκει στο γεωγραφικό διαμέρισμα της Κρήτης και υπάγεται στο Νομό Ηρακλείου. Η πεδιάδα της Μεσαράς, που είναι η μεγαλύτερη πεδιάδα της Κρήτης και βρίσκεται στο νότιο – κεντρικό τμήμα της, διαιρείται σε δύο μεγάλα τμήματα· το ανατολικό που καλύπτει την επαρχία Μονοφατσίου και διαρρέεται από τον ποταμό Αναποδάρη και το κεντρικό και δυτικό της τμήμα που καλύπτει γεωγραφικά τις επαρχίες Καινούργιου και Πυργιώτισσας και διαρρέεται από τον ποταμό Γεροπόταμο, που εκβάλλει στον κόλπο της Μεσαράς, στο Λυβικό πέλαγος. Ο Γεροπόταμος και ο Αναποδάρης είναι οι μεγαλύτεροι ποταμοί της Κρήτης (Σκουλικίδης, 2006).

Η πεδιάδα της Μεσαράς έχει παραμείνει αγροτική περιοχή με το συνολικό πληθυσμό να ανέρχεται περίπου σε 40000 κατοίκους. Στον Χάρτη 3.1 παρουσιάζονται τα δημοτικά διαμερίσματα που υπάρχουν στην λεκάνη απορροής του ποταμού Γεροπόταμου.



Χάρτης 3.1 : Δημοτικά Διαμερίσματα της Λεκάνης Απορροής του ποταμού Γεροπόταμου

3.2. Περιγραφή της υδρολογικής λεκάνης του ποταμού Γεροπόταμου

3.2.1. Γεωγραφική τοποθέτηση

Η λεκάνη απορροής του ποταμού Γεροποτάμου βρίσκεται στο νοτιοδυτικό τμήμα του Ν. Ηρακλείου, περίπου 50 Km νότια της πόλης του Ηρακλείου και καλύπτει μια έκταση 596 Km^2 (Εικόνα 3.1). Ένα μεγάλο ποσοστό της συνολικής έκτασης της λεκάνης καλύπτεται από την πεδιάδα της δυτικής Μεσαράς, η οποία έχει ανατολικό - δυτικό προσανατολισμό και συνολική έκταση περίπου 100 Km^2 και αποτελεί την σημαντικότερη αγροτική ζώνη της ευρύτερης περιοχής, αλλά και ολόκληρης της Κρήτης.

Εικόνα 3.1 : Γεωγραφική τοποθέτηση της λεκάνης απορροής του ποταμού Γεροπόταμου

3.2.2. Γεωλογία

Η λεκάνη απορροής του ποταμού Γεροπόταμου είναι μια ποταμογενής λεκάνη που καταλαμβάνει το δυτικό τμήμα της ομώνυμης τεκτονικής τάφρου (graben). Αποτελείται από τεταρτογενείς (πλειστοκαινικές) αποθέσεις κροκαλοπαγών και διασχίζεται από μια τάφρο αλλουβιακών ιζημάτων, πλάτους μερικών εκατοντάδων μέτρων και βάθους 100 – 200 m. Τόσο τα πλειστοκαινικά όσο και τα αλλουβιακά ιζήματα περιέχουν σχετικά μεγάλο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού. Μια 'ράχη' στην περιοχή της Φαιστού, χωρίζει την λεκάνη αυτή σε δύο υπολεκάνες· του Τυμπακίου στα ΒΔ και των Μοιρών στα ΝΑ. Η μόνη υδραυλική επικοινωνία μεταξύ των υπολεκανών πραγματοποιείται μέσω του 'υβώματος' της Φαιστού. Στα Β – ΒΑ, η λεκάνη οριοθετείται από μια ρηξιγενή ζώνη, διεύθυνσης Α – Δ, η οποία την χωρίζει από τους μεσοζωϊκούς ανθρακικούς σχηματισμούς του ορεινού όγκου της Ίδης και από τα υπερκείμενα μαργαϊκά μειοκαινικά ιζήματα. Στα Ν – ΝΑ, η λεκάνη ορίζεται από μια ρηξιγενή ζώνη που την χωρίζει από τους σχηματισμούς των ανώτερων τεκτονικών καλυμμάτων (Ενότητα Πίνδου και οφιολιθικό σύμπλεγμα), της οροσειράς των Αστερουσίων, καθώς και από τα υπερκείμενα τους μειοκαινικά ιζήματα (Ο.ΑΝ.Α.Κ. – ΕΜΠ, 1994).

Η γεωλογική δομή της υπό μελέτη λεκάνης συνίσταται από τις ακόλουθες στρωματογραφικές και τεκτονικές ενότητες σχηματισμών (από τις παλαιότερες προς τις νεότερες):

- **Προνεογενείς σχηματισμοί**

Στο νότιο τμήμα της λεκάνης του Γεροπόταμου, τα Αστερούσια όρη, συνίστανται από μεσοζωικά πετρώματα με κυρίαρχους σχηματισμούς τον φλύσχη και τα ανθρακικά της Ζώνης της Τρίπολης. Ακόμη, εντοπίζονται μερικές επιφανειακές εμφανίσεις έντονα ρηγματωμένων, αλλά ελαφρώς καρστικοποιημένων ασβεστόλιθων της Ζώνης της Πίνδου, ενώ σε μεγαλύτερα υψόμετρα απαντώνται πετρώματα των εσωτερικών ζωνών.

Στο ΒΔ τμήμα της λεκάνης του Γεροπόταμου, το όρος Ψηλορείτης, συνίσταται από μεσοζωικά πετρώματα της Ζώνης της Τρίπολης (ασβεστόλιθοι, φλύσχης), πετρώματα της ενότητας Φυλλιτών – Χαλαζιτών και πετρώματα του αυτόχθονου συστήματος (πλακώδεις ασβεστόλιθοι, ασβεστιτικοί σχιστόλιθοι), ενώ στα χαμηλότερα υψόμετρα απαντώνται πλευρικά κορήματα (λατύπες).

- **Νεογενείς σχηματισμοί**

Στους νεογενείς σχηματισμούς συγκαταλέγονται οι ακόλουθοι: Μέσο Μειόκαινο (σχηματισμός Βιάννου που αναπτύσσεται στην περιοχή του Μεταξοχωρίου), Ανώτερο Σερβάλιο (σχηματισμός Σχοινιά με μικρές εμφανίσεις στην περιοχή του οικισμού Βοριά), Τορτόνιο (σχηματισμός Αμπελούζου με μεγάλη ανάπτυξη στις περιοχές Ζαρός – Πανασός), Ανώτερο Τορτόνιο – Μεσσήνιο (σχηματισμός της «Αγ. Βαρβάρας» με μεγάλες εμφανίσεις στην περιοχή Γαλιά – Μορόνι – Άνω Μούλια και με μικρότερες εμφανίσεις στις περιοχές της Φαιστού, του Καστελίου και των Άνω Άκριων), Κατώτερο Πλειόκαινο (σχηματισμός της «Φοινικιάς» με μικρές εμφανίσεις σε μια επιμήκη ζώνη βόρεια του Ασημίου – Γκαγκαλών, ΒΑ των Μοιρών, ΒΑ της Φανερωμένης και ΝΑ των Βασιλικών Ανωγείων).

- **Τεταρτογενείς σχηματισμοί**

Στους τεταρτογενείς σχηματισμούς ανήκουν οι εξής: Ανώτερο Πλειόκαινο – Πλειστόκαινο (σχηματισμός της «Αγ. Γαλήνης» με κύρια εμφάνιση στην περιοχή του Ασημίου – Καγκάλες – Αγ. Δέκα και Μοίρες – Καλυβιανή), Πλειστόκαινο – Ολόκαινο (κροκαλοπαγή ποταμολιμναίας προέλευσης, άμμοι, υλιόλιθοι και αργιλικά στρώματα αποτελούμενα κυρίως από μεταφερμένα υλικά του σχηματισμού Αγ. Γαλήνης που καλύπτουν το κεντρικό πεδινό τμήμα της λεκάνης του Γεροπόταμου), Ολόκαινο (αλλουβιακές αποθέσεις που αποτελούν προϊόντα αποσάθρωσης και έχουν αποτεθεί σε μικρές εσωτερικές λεκάνες και στις κοίτες των υδατορρευμάτων), κώνοι κορημάτων και πλευρικά κορήματα που αναπτύσσονται κυρίως στις παρυφές των Αστερουσίων (μεγάλες εμφανίσεις στην περιοχή της Γέργερης).

Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή των σχηματισμών κάθε ενότητας που συμμετέχει στη γεωλογική δομή της περιοχής μελέτης (Κριτσωτάκης, 2009):

- **Προνεογενείς σχηματισμοί**

Το τεκτονικό κάλυμμα της Ζώνης της Τρίπολης συναντάται επωθημένο είτε απευθείας πάνω στους Πλακώδεις ασβεστόλιθους της Ιονίου Ζώνης είτε κυρίως πάνω σε υπολείμματα της φυλλιτικής – χαλαζιτικής ενότητας με αποτέλεσμα να παρουσιάζει έντονο κερματισμό στη βάση του και περιλαμβάνει τους ακόλουθους σχηματισμούς:

  - Φλύσχης (ft) (Ηώκαινο – Ολιγόκαινο)

Εναλλαγές αργιλικών σχιστόλιθων και ψαμμιτών με ενστρώσεις τεφρών ασβεστολιθικών τουρβιδιτών και παρεμβολές ανθρακικών κυρίως ολισθολίθων. Συνιστά το ανώτερο στρώμα της γεωλογικής ζώνης της Τρίπολης με πάχος που φθάνει τα 100 m.

  - Ανθρακικά Τρίπολης (Τριαδικό – Ηώκαινο)

Τα κατώτερα μέλη τους (Μ. Τριαδικό – Αν. Ιουρασικό) αποτελούνται από δολομίτες και δολομιτικούς ασβεστόλιθους (προς τα πάνω) τεφρούς μέχρι τεφρόλευκους, παχυστρωματώδεις μέχρι άστρωτους, έντονα τεκτονισμένους και καρστικοποιημένους. Τα ανώτερα μέλη τους (Κρητιδικό – Ηώκαινο) αποτελούνται από ασβεστόλιθους τεφρόμαυρους μέχρι μαύρους, μέσο έως παχυστρωματώδεις, κατά θέσεις άστρωτους. Είναι ανακρυσταλλωμένοι με μικροσυγκεντρώσεις υδροξειδίων του σιδήρου. Προς τα πάνω είναι δολομιτιωμένοι, μερικές φορές λατυποπαγείς και έντονα διερρηγμένοι. Αν και το πάχος τους ανέρχεται σε αρκετές εκατοντάδες μέτρα, έχουν κατατμηθεί εξαιτίας των επωθήσεων και των ρηγμάτων και απαντώνται πολλές φορές ως τεκτονικά ράκη πάνω στους υποκείμενους τεκτονικά σχηματισμούς. Η θέση τους ως υπερκείμενοι των φυλλιτών και λεπτοπλακωδών ασβεστόλιθων τους καθιστά καθοριστικής σημασίας για τη διαμόρφωση των υδρογεωλογικών λεκανών της Κρήτης.

  - Ραβδούχα στρώματα (Τριαδικό)

Στη βάση των ανθρακικών σχηματισμών απαντάται κατά θέσεις μια κλαστική αργιλοσχιστολιθική – ανθρακική σειρά, γνωστή ως σειρά Ραβδούχων. Συνίσταται από εναλλαγές ιλυολίθων, ψαμμιτών, σχιστής αργίλου και λεπτοστρωματωδών δολομιτών. Συχνά ο διαχωρισμός των στρωμάτων αυτών από τους υποκείμενους φυλλίτες – χαλαζίτες είναι δύσκολος.

Το τεκτονικό κάλυμμα της Ζώνης της Πίνδου συναντάται επωθημένο είτε κυρίως πάνω στο αντίστοιχο της Τρίπολης είτε τοπικά πάνω στους φυλλίτες με μικρές γενικά ανθρακικές εμφανίσεις και μεγαλύτερα αναπτύγματα του φλύσχη. Συγκεκριμένα περιλαμβάνει τους ακόλουθους σχηματισμούς:

- Φλύσχης (fo) (Κ. Παλαιόκαινο – Ηώκαινο)

Αποτελείται κυρίως από ψαμμίτες, ασβεστολιθικούς ψαμμίτες και ιλυόλιθους και λιγότερο από πηλίτες με λεπτές ανθρακικές ενστρώσεις. Στη βάση του φλύσχη οι ψαμμίτες είναι αδρόκοκκοι με κατά θέσεις παρεμβολές αργιλικών σχιστόλιθων. Τοπικά είναι πλούσιος σε ολισθόλιθους κυρίως ασβεστολιθικής σύστασης αλλά και οφιολιθικής. Το πάχος του κυμαίνεται από μερικές δεκάδες έως μερικές εκατοντάδες μέτρα και αναπτύσσεται σε μεγάλη έκταση κυρίως στις νότιες παρυφές του Ψηλορείτη.

- Ασβεστόλιθοι (K.k) (Αν. Κρητιδικό – Ηώκαινο)

Ασβεστόλιθοι πλακώδεις, κυρίως μικριτικοί με κονδύλους και ενστρώσεις πυριτολίθων και λεπτές ενστρώσεις αργιλικών σχιστόλιθων χρώματος ερυθρού και πράσινου. Κατά θέσεις παρεμβάλλονται στρώματα λατυποπαγών ασβεστόλιθων. Τα ανώτερα μέλη είναι λευκότεφρα, ενώ τα κατώτερα, που μεταπίπτουν σε παχυστρωματώδη, τεφρόμαυρα έως μαύρα. Το πάχος τους φθάνει τα 100 m, ενώ στα ανώτερα τμήματα συναντώνται τα στρώματα μετάβασης προς το φλύσχη.

- 1ος Φλύσχης (K.ft) (Κρητιδικό)

Εναλλαγές λεπτών στρωμάτων από ερυθρές μάργες, κερατόλιθους, μαργαϊκούς ασβεστόλιθους και αργιλομαργαϊκούς σχιστόλιθους. Κατά θέσεις είναι πράσινοι και ερυθροί αδρόκοκκοι ψαμμίτες εναλλασσόμενοι με μικροκλαστικούς ασβεστόλιθους.

- Σχιστοκερατόλιθοι (Jo) (Ιουρασικό)

Πολύχρωμοι κερατόλιθοι – ασβεστόλιθοι. Εναλλαγές κυανών, πράσινων, καστανών, ερυθρών και μαύρων κερατόλιθων. Κατά θέσεις συναντώνται λεπτές ενστρώσεις αργιλοπυριτικού υλικού και λεπτοστρωματώδεις έως παχυστρωματώδεις ασβεστόλιθοι που κατά θέσεις φέρουν κονδύλους κερατόλιθων.

- Ασβεστόλιθοι (Ts-Jo) (Τριαδικό – Σενώνιο)

Ασβεστόλιθοι πλακώδεις, πολύχρωμοι με ιάσπιδες, μεσόκοκκοι μαργαϊκοί κατά θέσεις λατυποπαγείς.

Τα πετρώματα των εσωτερικών ζωνών ανήκουν στην ενότητα των οφιολίθων – κρυσταλλοσχιστωδών που συνιστά ένα σύνθετο πολύμεικτο τεκτονικό κάλυμμα με μεγάλη ποικιλία λιθολογικών σχηματισμών διαφόρου ηλικίας. Στην ενότητα αυτή συμμετέχουν οφιόλιθοι (σερπεντινίτες, βασάλτες, περιδοτίτες, γάβροι κλπ.), μεταμορφωμένα πετρώματα (γνεύσιοι, αμφιβολίτες), ανθρακικά πετρώματα ηλικίας Α. Τριαδικού έως Α. Κρητιδικού, φλυσχοειδή ιζήματα, γρανίτες κ.α. Η ενότητα αυτή περιλαμβάνει διάφορες υποενότητες με χαρακτηριστικές ονομασίες όπως Άρβης, Μιαμού, Βάτου, Αστερουσίων, Οφιολιθικό κάλυμμα που αποτελούνται από τους λιθολογικούς σχηματισμούς που περιγράφονται ακολούθως:

- Τεκτονικό Οφιολιθικό κάλυμμα

Περιλαμβάνει οφιολίθους, σερπεντινίτες, περιδοτίτες, διαβάσες (τεφροπράσινοι τεφροί έως μελανότεφροι), διορίτες και αμφιβολίτες (ο), οφιολιθικό mélange (me) (πολύμικτος, έντονα τεκτονισμένος σχηματισμός που περιλαμβάνει οφιολιθικά σώματα, μάρμαρα και γνευσιοσχιστόλιθους) και εναλλαγές πολύχρωμων λεπτοστρωματωδών ασβεστόλιθων, μαργών, πηλιτών και ψαμμιτών (Α. Ιουρασικό – Κ. Κρητιδικό). Μικρές εμφανίσεις παρατηρούνται στο νότιο τμήμα.

- Κάλυμμα Αστερουσίων

Αποτελείται από σχηματισμούς από πολλούς τύπους μεταμορφωμένων πετρωμάτων που έχουν μεταμορφωθεί σε συνθήκες μέσων και χαμηλών θερμοκρασιών. Περιλαμβάνει κυρίως γνεύσιους, αμφιβολίτες, σχιστόλιθους και χαλαζίτες. Στους σχηματισμούς αυτούς συχνά παρεμβάλλονται ενδιαστρώσεις μαρμάρων και σιπολινών. Απαντώνται επίσης κατά θέσεις μεμονωμένα μικρά τεκτονικά ράκη μαρμάρων.

- Κάλυμμα Βάτου

Περιλαμβάνει οφιολίθους (ο) (Α. Ιουρασικό – Κ. Κρητιδικό), σχιστόλιθους Βάτου (J.fl) (εναλλαγές τεφρών μαργών και πάγκων ψαμμιτικών ασβεστόλιθων ή ψαμμιτών που χαρακτηρίζονται από τον πλούτο θραυσμάτων σερπεντίνη – Ιουρασικό) και μετα-ιζήματα (Ps.Js) που περιλαμβάνουν αμφιβολίτες, μικρολατυποπαγή, ραδιολαρίτες, ασβεστόλιθους και χαλαζίτες (Α. Πέρμιο – Ιουρασικό). Προκαλεί τον σχηματισμό μεγάλων ολισθόλιθων στο εσωτερικό του Φλύσχη της Πίνδου.

- Κάλυμμα Μιαμού

Περιλαμβάνει φλύσχη (Js.f) κυρίως ιλυολιθικό – ψαμμιτικό με ενστρώσεις λατυποπαγών ασβεστόλιθων (Α. Ιουρασικό) και λατυποπαγείς ασβεστόλιθους (Js.br) σε ογκώδεις πάγκους σε ενστρώσεις εντός του φλύσχη (Α. Ιουρασικό).

- Κάλυμμα Άρβης

Περιλαμβάνει βασάλτες σε pillow-lavas μέσα σε ιζήματα, πηλίτες και ερυθρούς μαργαϊκούς ασβεστόλιθους (υποκείμενους ενός φλύσχη πηλιτο-ψαμμιτικού), ιλυόλιθους με διαβάσες (Kk.pl), φλυσχοειδή σειρά (Js.fl) που περιλαμβάνει ασβεστολιθικούς φακούς (Α. Ιουρασικό), μικριτικούς ασβεστόλιθους και ενδοκλαστικά λατυποπαγή (T.k.br), γρανιτικές διεισδύσεις (γ) που περιλαμβάνουν γρανίτες και γρανοδιορίτες που έχουν διεισδύσει τόσο σε γνεύσιους του καλύμματος Αστερουσίων όσο και σε ανθρακικά της ζώνης της Τρίπολης βόρεια της Ιεράπετρας. Pillow-lavas βρίσκονται έκχυτες μέσα στους μαργαϊκούς ασβεστόλιθους πριν από την απόθεση του φλύσχη, ενώ στη βάση του σχηματισμού συναντώνται λευκοί ασβεστόλιθοι (Α. Κρητιδικό).

Τα πετρώματα της ενότητας Φυλλιτών – Χαλαζιτών (ph) περιλαμβάνουν φυλλίτες, μεταψαμμίτες, χαλαζίτες και σχιστόλιθους, κροκαλοπαγή ποικίλης σύστασης (π.χ.

σερικιτικούς – χλωριτικούς, μαρμαρυγιακούς, χαλαζιακούς με σερικίτη και αιματίτη, γραφιτικούς – μαρμαρυγιακούς). Η μεταμόρφωση πραγματοποιήθηκε σε συνθήκες υψηλής πίεσης και χαμηλής έως μέσης θερμοκρασίας HP/LT (Φασουλάς, 2000).

Συχνά παρεμβάλλονται μαύροι λεπτοστρωματώδεις και κατακερματισμένοι κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι (mr), χαλαζιτικές φλέβες (qt), δολομίτες (d), εναλλαγές φυλλιτών, σχιστόλιθων, μαρμάρων (ph/sch/mr). Περιλαμβάνουν επίσης διαβάσες (δ), γύψους (g), ραουβάκες (Rw). Οι παρεμβολές αυτές των μαρμάρων μέσα στο σύστημα των φυλλιτών – χαλαζιτών έχουν ιδιαίτερη υδρογεωλογική σημασία. Ο αδιαπέρατος χαρακτήρας των φυλλιτών – χαλαζιτών συμβάλει καθοριστικά στη διαμόρφωση επιμέρους υδρογεωλογικών λεκανών είτε λειτουργώντας ως υπόβαθρο αυτών (ανθρακικά πετρώματα της Τρίπολης) είτε παρεμποδίζοντας την πλευρική διακίνηση υπόγειων νερών άλλων ανθρακικών ενοτήτων (Τρυπάλι, Ιόνιος κλπ.).

Το πάχος της ενότητας στην περιοχή μελέτης ανέρχεται περίπου στα 200 m, ενώ η ηλικία της υπολογίζεται ως Περμοτριαδική.

Τα πετρώματα του αυτόχθονου συστήματος περιλαμβάνουν ασβεστιτικούς σχιστόλιθους (E.fi) με λεπτές ενδιαστρώσεις ψαμμιτών και κρυσταλλικών ασβεστόλιθων (πρόκειται για τα στρώματα του φλύσχη της Ιονίου που έχουν μεταμορφωθεί) και την ενότητα των πλακωδών ασβεστόλιθων (Jm-E.k) που χαρακτηρίζεται από την λεπτοστρωματώδη ανάπτυξη ισχυρά ανακρυσταλλωμένων ασβεστόλιθων – μαρμάρων, τεφρών έως τεφρόμαυρων και την παρεμβολή σ’ αυτούς πυριτολίθων (κυρίως χαλαζία) με μορφή λεπτών στρώσεων (πάχους μέχρι και 15 cm), κονδύλων ή φακών. Κατά τόπους παρουσιάζουν παρεμβολές σερικιτικών φυλλιτών και μικρολατυποπαγών στρωμάτων μικρού πάχους.

Η ιζηματογένεση των πελαγικών αυτών ιζημάτων της ενότητας αυτής άρχισε κατά το Δογγέριο και έληξε κατά το Ολιγόκαινο (Φυτρολάκης, 1980).

- **Νεογενείς σχηματισμοί**

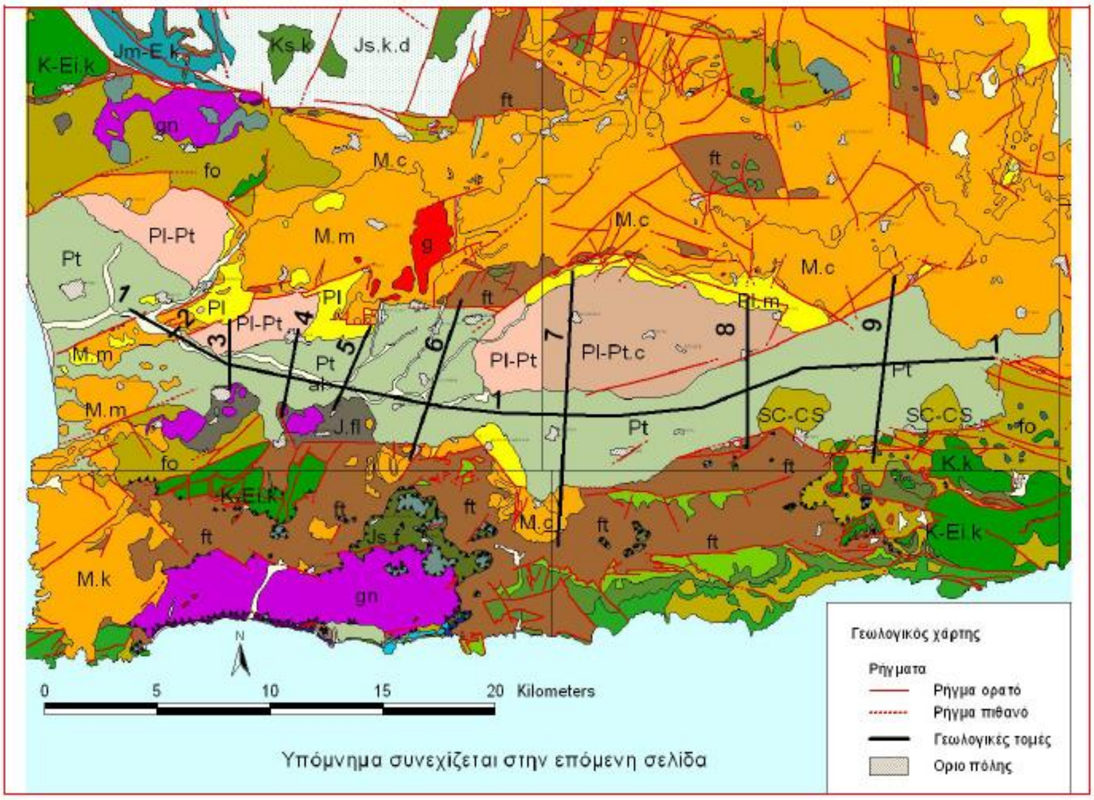
Κατά το κατώτερο Μειόκαινο δημιουργήθηκαν, λόγω μεγάλων ρηγμάτων, μεγάλα βυθίσματα (συμπεριλαμβανομένης της λεκάνης του Ηρακλείου – Μεσαράς) στα οποία άρχισε η εναπόθεση των υλικών της διάβρωσης των αναδυθέντων πετρωμάτων.

Τα νεογενή ιζήματα αποτελούνται από ιζήματα χερσαίας, ποτάμιας, υφάλμυρης και θαλάσσιας φάσης που επικάθονται ασύμφωνα στους αλπικούς σχηματισμούς σε μεγάλες εκτάσεις στο σύνολο της Κρήτης. Παρουσιάζουν ανομοιομορφία τόσο ως προς την ηλικία όσο και ως προς τη λιθολογία τους και ονομάζονται ανάλογα με τη θέση εμφάνισής τους.

- **Τεταρτογενείς σχηματισμοί**

Τα τεταρτογενή ιζήματα υπέρκεινται όλων των σχηματισμών τόσο του αλπικού υποβάθρου όσο και των νεογενών αποθέσεων και αποτελούνται από χερσαίες, θαλάσσιες έως λιμνοθαλάσσιες αποθέσεις άμμων, κροκαλών, αργίλων και χαλίκων ασύνδετων έως ελαφρά συγκολλημένων. Τα ιζήματα αυτά αποτελούνται από τους ακόλουθους σχηματισμούς:

- Παράκτιες αποθέσεις (cd)
- Αλλουβιακές αποθέσεις (al): ασύνδετα υλικά από χαλίκια, άμμους, ιλύ και λοιπά προϊόντα αποσάθρωσης που έχουν αποτεθεί στις παράκτιες πεδιάδες, σε μικρές εσωτερικές λεκάνες και στις κοίτες και τις εκβολές των χειμάρρων.
- Πλευρικά κορήματα και κώνοι κορημάτων (SC-CS) που αναπτύσσονται στα πρανή των λόφων και των ορεινών όγκων.
- Αποθέσεις ερυθρογής (tr) κυρίως εντός των καρστικών εγκοίλων.
- Υλικά ποτάμιων αναβαθμίδων (Pl.t) που απαντώνται στην ευρύτερη κοίτη των χειμάρρων και στις εξόδους των φαραγγιών.
- Χερσαία κοκκινωπά κροκαλοπαγή και άμμοι που εμφανίζονται κυρίως στις νότιες και βόρειες ακτές.
- Υλικά θαλάσσιων αναβαθμίδων (Pl.tm) σε διαφορετικά υψόμετρα.

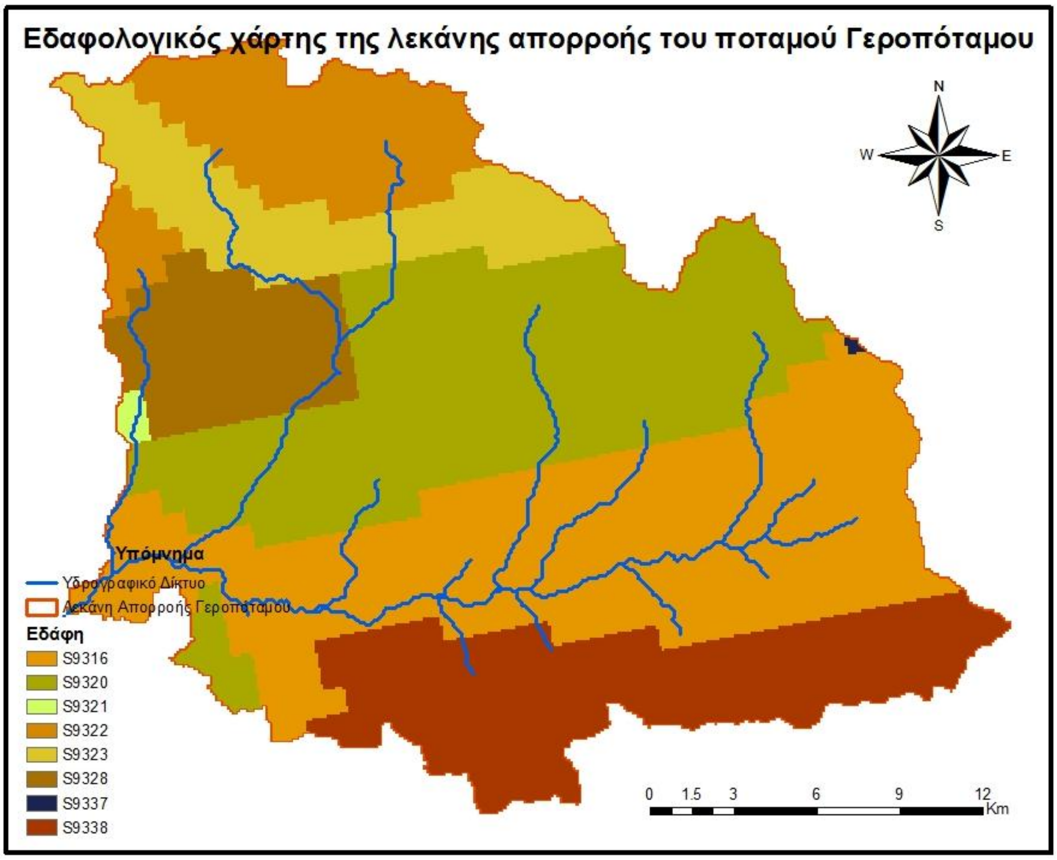


Χάρτης 3.2 : Γεωλογικός χάρτης της ευρύτερης λεκάνης της Μεσαράς (Πηγή : Κριτσωτάκης, 2009)

Οι γεωλογικές τομές στις διάφορες θέσεις (Κριτσωτάκης, 2009) παρατίθενται στο Παράρτημα Α.

Απόσπασμα Υπομνήματος Γεωλογικού Χάρτη

	ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ
cd	Παράκτιες αποθέσεις.
al	Αλλουβιακές αποθέσεις.
SC-CS	Πλευρικά κορήματα και κώνοι κορημάτων.
Pt	Πλειστόκαινο αδιαίρετο (κροκαλολατυποπαγή, άμμοι, μάργες, ψαμμίτες, άργιλοι, βιοκλαστικοί ασβεστόλιθοι).
	ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ – ΝΕΟΓΕΝΕΣ
Pl-Pt	Κυρίως μάργες, αλλά και άμμοι, κροκαλοπαγή κλπ.
Pl-Pt.c	Σχηματισμός Αγ. Γαλήνης. Κροκαλοπαγή, άμμοι, ιλυόλιθοι, άργιλοι.
	ΝΕΟΓΕΝΕΣ
Pl	Πλειοκαινικές αποθέσεις. Κατά θέσεις επικράτηση των μαργών (m), των μαργαϊκών ασβεστόλιθων (k) και των κροκαλοπαγών (c).
M	Μειοκαινικές αποθέσεις. Κατά θέσεις επικράτηση των μαργών (m), των μαργαϊκών ασβεστόλιθων (k) και των κροκαλοπαγών (c).
M.br	Λατυποκροκαλοπαγή Τοπολίων (Μειόκαινο).
	ΑΛΠΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ
o	Οφιόλιθοι. Σερπεντινίτες, περιδοτίτες, διαβάσες, διορίτες και αμφιβολίτες.
	ΚΑΛΥΜΜΑ ΑΣΤΕΡΟΥΣΙΩΝ
gn	Γνεύσιοι, αμφιβολίτες και χαλαζίτες με ενδιαστρώσεις μαρμάρων.
	ΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΚΑΛΥΜΜΑ ΖΩΝΗΣ ΠΙΝΔΟΥ
fo	Φλύσχης.
K-Ei.k	Ασβεστόλιθοι πλακώδεις, με κονδύλους και ενστρώσεις πυριτολίθων και λεπτές ενστρώσεις αργιλικών σχιστόλιθων.
	ΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΚΑΛΥΜΜΑ ΖΩΝΗΣ ΤΡΙΠΟΛΗΣ
ft	Φλύσχης.
E.k, P-E.k, Ks-E.k, Ks.k, Js-K.k,d, Js.k, T-E.k,d, T-Js.k, T.d	Ασβεστόλιθοι (k) και δολομίτες (d).
T.sch	Ασβεστιτικοί μαρμαρυγιακοί σχιστόλιθοι σε εναλλαγές με λεπτοστρωματώδεις ασβεστόλιθους.
	ΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΚΑΛΥΜΜΑ ΦΥΛΛΙΤΩΝ - ΧΑΛΑΖΙΤΩΝ
Ph	Φυλλίτες, χαλαζίτες, σχιστόλιθοι.
	ΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΚΑΛΥΜΜΑ ΟΜΑΛΟΥ - ΤΡΥΠΑΛΙΟΥ
Ts-Ji.mr,d	Ανθρακικά Τρυπαλίου. Περιλαμβάνει ανακρυσταλλωμένους ασβεστόλιθους έως μάρμαρα, δολομίτες.
	ΑΥΤΟΧΘΟΝΗ ΣΕΙΡΑ – ΙΟΝΙΟΣ ΖΩΝΗ
E.fi	Ασβεστιτικοί σχιστόλιθοι με λεπτές ενδιαστρώσεις ψαμμιτών και κρυσταλλικών ασβεστόλιθων.
Jm-E.k	Πλακώδεις ασβεστόλιθοι (Plattenkalk), ανακρυσταλλωμένοι, κατά θέσεις μάρμαρα.
J.sch	Σχιστόλιθοι, ανθρακικοί, χαλαζιακοί, αργιλικοί.
Ts-Ji.k,d	Ασβεστόλιθοι και δολομίτες με λεπτές φυλλιτικές διαστρώσεις και ορίζοντες συνεκτικών λατυποπαγών.
g	Γύψος.



Χάρτης 3.3 : Εδαφολογικός χάρτης της λεκάνης απορροής του ποταμού Γεροπόταμου (SOIL – FAO)

3.2.3. Υδρογεωλογία

Στην περιοχή μελέτης διακρίνονται οι παρακάτω υδρολιθολογικές ενότητες:

- Καρστικοί σχηματισμοί που αποτελούνται από τα ανθρακικά πετρώματα των ενοτήτων της Πίνδου, της Τρίπολης και της Αυτόχθονου σειράς και καταλαμβάνουν τα όρια της λεκάνης του Γεροπόταμου. Βόρεια δομούν την οροσειρά της Ίδης και νότια την οροσειρά των Αστερουσίων ορέων με μικρότερες ωστόσο εμφανίσεις.
- Προσχωματικές αποθέσεις που καταλαμβάνουν το κεντρικό πεδινό τμήμα της λεκάνης του Γεροπόταμου, αποτελώντας το σημαντικότερο υδροφορέα της περιοχής μελέτης. Συνίστανται από ποταμολιμναίες αλλουβιακές αποθέσεις, ενώ συναντώνται και ως μικρού πάχους και έκτασης αποθέσεις κατά μήκος των υδρορευμάτων.
- Πλειστοκαινικές αποθέσεις που καταλαμβάνουν σημαντική έκταση στο βόρειο τμήμα της πεδινής περιοχής.

- Νεογενείς σχηματισμοί που καταλαμβάνουν μεγάλο τμήμα της περιοχής μελέτης βόρεια των προσχωματικών – πλειστοκαινικών αποθέσεων και σχηματίζουν το λοφώδες ανάγλυφο.

Οι σημαντικότεροι υδροφορείς στην περιοχή μελέτης κατά σειρά δυναμικότητας είναι ο αλλουβιακός, ο πλειστοκαινικός και ο νεογενής. Ακόμη, στα περιθώρια της λεκάνης απαντώνται ανθρακικοί σχηματισμοί που φιλοξενούν καρστικές υδροφορίες. Οι καρστικοί υδροφορείς των Αστερουσίων σχηματίζουν λόγω του έντονου τεκτονισμού μικρές αποκομμένες λεκάνες το νερό των οποίων χρησιμοποιείται κυρίως για την ύδρευση των οικισμών. Ποσότητα του υπόγειου δυναμικού του καρστικού συστήματος του Ψηλορείτη απορρέει σε μικρό ποσοστό από τις πηγές της Γέργερης και του Ζαρού με αποδέκτη την υδρολογική λεκάνη του Λιθαίου – Γεροποτάμου και του Τυμπακίου αντίστοιχα, ενώ το μεγαλύτερο ποσοστό απορρέει βόρεια στην υφάλμυρη πηγή του Αλμυρού Ηρακλείου (Kritsotakis and Tsanis, 2009).

3.2.3.1. Αλλουβιακός υδροφορέας

Ο αλλουβιακός υδροφορέας έχει επίμηκες σχήμα, καταλαμβάνει το κεντρικό πεδινό τμήμα της λεκάνης της Μεσαράς και συνίσταται από σύγχρονες ποταμολιμναίες αποθέσεις κροκαλοπαγών, άμμων, ιλυόλιθων και αργίλων. Αν και ο υδροφορέας αυτός αποτελείται από αποθέσεις διαφορετικών υδρογεωλογικών ιδιοτήτων (διαφορετική στρωματογραφική ηλικία, σύσταση και τύπος απόθεσης), σε όλες σχεδόν τις υδρογεωλογικές μελέτες αντιμετωπίζεται ως ενιαίος.

3.2.3.2. Πλειστοκαινικός υδροφορέας

Κατά το τέλος του τριτογενούς σχηματίστηκαν τάφροι ως αποτέλεσμα της ανύψωσης διαφόρων ρηξιτεμάχων λόγω κατακόρυφων κινήσεων και της συνακόλουθης έντονης διάβρωσης που υπέστησαν. Στις τάφρους αυτές πραγματοποιήθηκε η εναπόθεση των πλειστοκαινικών ιζημάτων υπό ηπειρωτικές συνθήκες (ποταμολιμναία φάση). Τα ιζήματα αυτά διατηρούνται σε σχετικά καλή κατάσταση στα κατώτερα (υψομετρικά) ρηξιτεμάχη (π.χ. λεκάνη των Μοιρών και του Χάρακα) σε αντίθεση με εκείνα των ανώτερων υψομέτρων (π.χ. λεκάνη Βαγιονιάς) που σχεδόν διαβρώθηκαν και διατηρούνται μόνο σε μια στρώση πολύ μικρού πάχους. Επιφανειακά απαντώνται στην περιοχή Καλυβιανής και των Γκαγκαλών.

Μετά την εναπόθεση των πλειστοκαινικών σχηματισμών, το επίπεδο της στάθμης της θάλασσας ήταν σε κατώτερο υψόμετρο από το σημερινό με αποτέλεσμα να σχηματιστούν νέες τάφροι (μέγιστου βάθους 75 m κάτω από τη σημερινή στάθμη της θάλασσας στην περιοχή των Μοιρών), όπου εναποτέθηκαν οι τεταρτογενείς αλλουβιακές αποθέσεις, εξαιτίας της διάβρωσης των κύριων υδρορευμάτων του Γεροπόταμου, του Λιθαίου και του Αναποδάρη. Το βάθος της τάφρου στην έξοδο του Γεροπόταμου στη θάλασσα (Τυμπάκι) είναι της τάξης των 100 m και ελαττώνεται προς τα ανάντη και το ύβωμα της Φαιστού στα 60 m από την επιφάνεια του εδάφους.

3.2.3.3. Νεογενής υδροφορέας

Οι νεογενείς σχηματισμοί της λεκάνης της Μεσαράς αποτελούν το υπόβαθρο των τεταρτογενών αποθέσεων και συνίστανται από πετρώματα διαφορετικής σύστασης και στρωματογραφίας (κυρίως από εναλλαγές στρώσεων μεγάλου πάχους ιλυόλιθων, αργίλων και μαργών). Χαρακτηρίζονται από ρηξιγενείς ζώνες που μετακίνησαν κατακόρυφα τα ρηξιτεμάχη σχηματίζοντας διάφορες λεκάνες όπου εναποτέθηκαν οι σύγχρονες αποθέσεις.

Ακόμη, περιλαμβάνουν ενστρώσεις μικρότερου πάχους αποτελούμενες από άμμο, ψαμμίτες, κροκαλοπαγή και μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, οι οποίες όμως είναι μικρού υδρογεωλογικού ενδιαφέροντος καθώς φιλοξενούν ασθενείς υδροφορίες υπό πίεση. Η εκμετάλλευση των υδροφορέων αυτών πραγματοποιείται από αριθμό γεωτρήσεων βάθους 200 - 350 m και μικρής παροχής σε περιοχές όπου υπάρχει έλλειψη άλλων υδατικών πόρων (περιοχή Βαγιωνιάς).

Κατά θέσεις (περιοχή βόρεια των Μοιρών και περιοχή βόρεια των Μοιρών και των Γκαγκαλών) απαντώνται πετρώματα όπως μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι ή και γύψοι αντίστοιχα, που χαρακτηρίζονται από την εμφάνιση μικρής υδροφορίας.

Η υδρογεωλογία μιας περιοχής καθορίζεται από την σύσταση των πετρωμάτων που την καλύπτουν, την στρωματογραφία τους, την τεκτονική της ευρύτερης περιοχής, τη μορφολογία και τις κλιματολογικές συνθήκες. Οι παράγοντες αυτοί αναλύονται ακολούθως.

3.2.4. Σύσταση πετρωμάτων

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που καλύπτουν την περιοχή της λεκάνης απορροής του Γεροπόταμου, όπως έχουν ήδη αναλυθεί στην ενότητα 3.2.2., διακρίνονται σύμφωνα με την σύστασή τους σε τρεις κατηγορίες· περατούς, ημιπερατούς και αδιαπέρατους.

- Περατοί γεωλογικοί σχηματισμοί

Στους περατούς σχηματισμούς ανήκουν οι σχηματισμοί με υψηλό συντελεστή περατότητας και συνεπώς μεγάλη υδραυλική αγωγιμότητα. Δεδομένου ότι ο συντελεστής περατότητας εξαρτάται από το πορώδες, το καρστ ή τις ρωγμές του πετρώματος, ως υδροπερατοί σχηματισμοί μπορούν να χαρακτηριστούν οι τεταρτογενείς αποθέσεις της λεκάνης απορροής (λόγω της κοκκομετρίας του κροκαλοπαγούς, έχουν αυξημένο πορώδες εντός του οποίου αποθηκεύεται το νερό και δημιουργεί υπόγειες υδροφορίες) καθώς και οι προνεογενείς ανθρακικοί σχηματισμοί (εντός του καρστ και των ρωγμών που παρουσιάζουν αναπτύσσονται σημαντικές υπόγειες υδροφορίες).

- Ημιπερατοί γεωλογικοί σχηματισμοί

Στην κατηγορία αυτή, εντάσσονται οι σχηματισμοί των κροκαλοπαγών, ψαμμιτών και άμμων του νεογενούς που, λόγω της κοκκομετρίας τους, παρουσιάζουν μέτριο συντελεστή περατότητας με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται στο πορώδες τους υπόγειες υδροφορίες. Επίσης, στην κατηγορία αυτή ανήκει και ο σχηματισμός της γύψου όπου αναπτύσσονται υπόγειες υδροφορίες εντός του ψευδοκάρστ και των ρωγμών. Η δυναμικότητα των υδροφοριών που αναπτύσσονται, κυμαίνεται από λίγα έως αρκετές δεκάδες κυβικά την ώρα ανάλογα με τον βαθμό του πορώδους, την υδραυλική αγωγιμότητα, το πάχος και την έκταση του σχηματισμού.

- Αδιαπέρατοι γεωλογικοί σχηματισμοί

Στους αδιαπέρατους σχηματισμούς υπάγονται οι αποθέσεις του νεογενούς που, λόγω της σύστασης και της κοκκομετρίας τους, έχουν πολύ μικρό συντελεστή περατότητας με αποτέλεσμα το νερό να μην μπορεί να κατεισδύσει και να αναπτύξει υπόγειες υδροφορίες. Πρόκειται κυρίως για μάργες και αργίλους, καθώς επίσης και για σχηματισμούς του φλύσχη και των καλυμμάτων Αστερουσίων και Βάτου. Συνήθως, εντός των σχηματισμών αυτών, αναπτύσσονται ασθενείς υπόγειες υδροφορίες κυρίως στο σαθρό κάλυμμά τους και στις ρωγμές που έχουν υποστεί λόγω τεκτονισμού.

3.2.5. Τεκτονική

Η τεκτονική της περιοχής σχετίζεται άμεσα με την τεκτονική της ευρύτερης περιοχής των νοτιανατολικών παρυφών του ορεινού όγκου του Ψηλορείτη και του συστήματος Garben της λεκάνης της Μεσαράς. Τα ρήγματα του τεκτονικού αυτού συστήματος έχουν γενική διεύθυνση Α – Δ, χωρίς να απουσιάζουν και ρήγματα Β – Ν. Τα ρήγματα αυτά ευθύνονται για την διαμόρφωση της μορφολογίας της ευρύτερης περιοχής.

Από Βορρά προς Νότο κυριαρχούν οι ρηξιγενείς ζώνες Καμάρες – Ζαρός – Γέργερη, Καλοχωραφίτης – Σκούρβουλα – Λαλουμάς και Φανερωμένη – Αγ. Αντώνιος – Ρουφάς, που βυθίζουν σταδιακά τα πετρώματα τόσο του υποβάθρου όσο και των γεωλογικών ζωνών.

Η ρηξιγενής ζώνη Καμάρες – Ζαρός – Γέργερη οριοθετεί προς βορρά τους ανθρακικούς σχηματισμούς, φέρνοντας τους, σε συνδυασμό με τα ρήγματα Β – Ν, σε τεκτονική επαφή με τους σχηματισμούς του φλύσχη της ζώνης της Πίνδου, του Οφιολιθικού καλύμματος ή με τις νεογενείς αποθέσεις, ενώ παράλληλα βυθίζει προς νότο τους ανθρακικούς σχηματισμούς.

Η ρηξιγενής ζώνη Καλοχωραφίτης – Σκούρβουλα – Λαλουμάς βυθίζει τους σχηματισμούς του φλύσχη και του Οφιολιθικού καλύμματος με αποτέλεσμα οι ανθρακικοί σχηματισμοί να βυθίζονται ακόμα βαθύτερα, ενώ παράλληλα φέρνει τις νεογενείς αποθέσεις σε τεκτονική επαφή.

Η ρηξιγενής ζώνη Φανερωμένη – Αγ. Αντώνιος – Ρουφάς βυθίζει ακόμα περισσότερο τους ανθρακικούς σχηματισμούς.

Εκτός από αυτές τις τρεις ρηξιγενείς ζώνες που αναφέραμε, υπάρχουν και άλλα μικρότερα ρήγματα που έχουν ανεβάσει ή βυθίσει τους γεωλογικούς σχηματισμούς του προνεογενούς. Έτσι, έχουμε την εμφάνιση των ανθρακικών σχηματισμών στην περιοχή Σκούρβουλα και του φλύσχη στην περιοχή νότια της Γαλιάς.

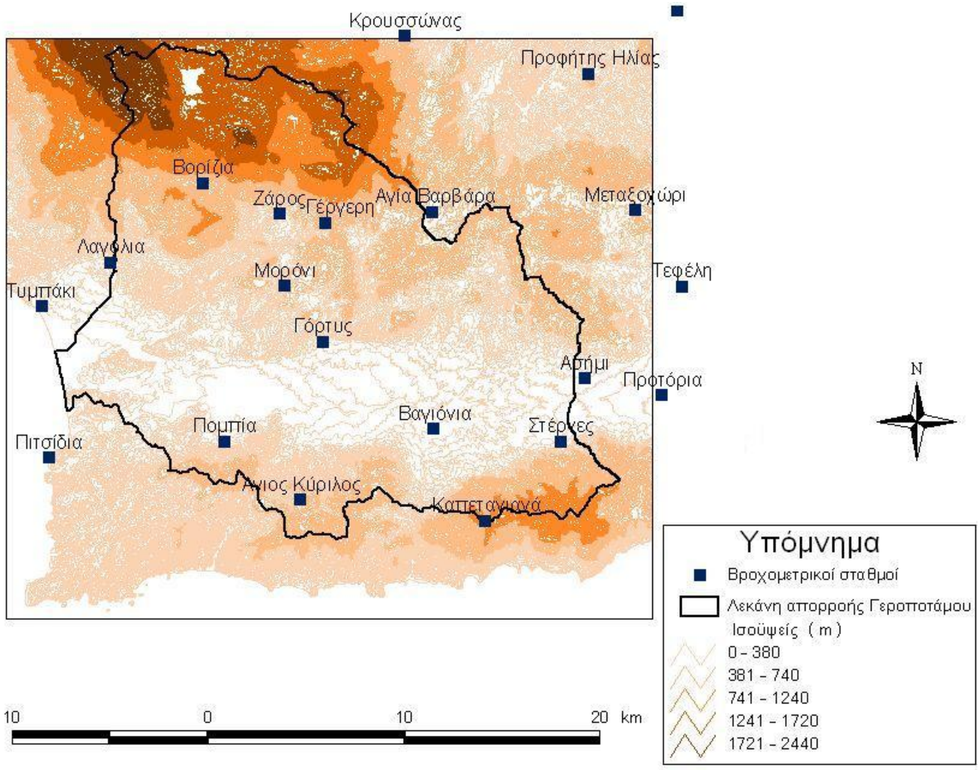
3.2.6. Γεωμορφολογία

Η υδρολογική λεκάνη του Γεροπόταμου έχει μεγάλη διακύμανση τοπογραφικών υψομέτρων, που εκτείνονται από μερικά μέτρα πάνω από το επίπεδο της θάλασσας στον κάμπο της Μεσαράς και ξεπερνούν τα 2000 μέτρα στο βόρειο, βορειοδυτικό υδροκρίτη όπου και το νότιο τμήμα του ορεινού όγκου του Ψηλορείτη (Χάρτης 3.4).

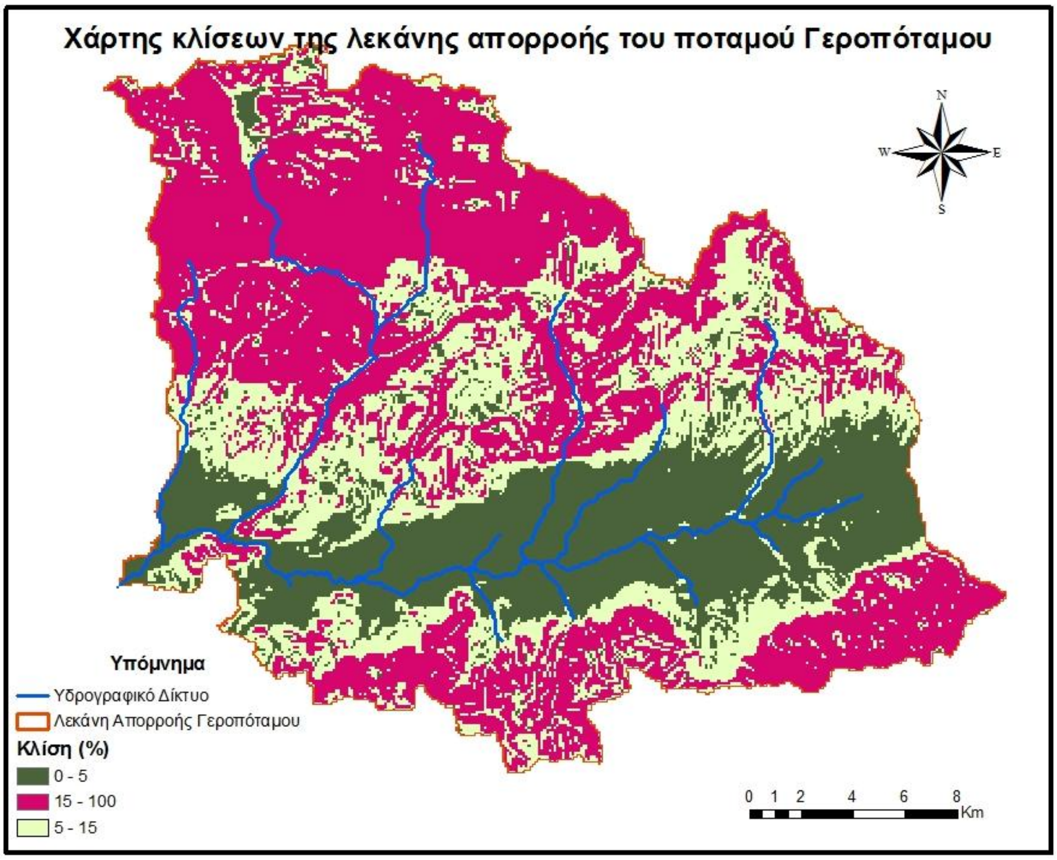
Οι περιοχές που καλύπτονται από προνεογενείς σχηματισμούς έχουν έντονο ανάγλυφο, αυτές με νεογενείς σχηματισμούς λοφώδες και αυτές με τεταρτογενείς πεδινό (Χάρτης 3.5).

Οι περιοχές που καλύπτονται από αδιαπέρατους σχηματισμούς παρουσιάζουν πλούσιο υδρογραφικό δίκτυο, ενώ αυτές με διαπερατούς ασθενές.

Γενικά, η περιοχή της λεκάνης απορροής διακρίνεται στο βόρειο τμήμα το οποίο είναι ορεινό, το πεδινό τμήμα της λεκάνης του Γεροπόταμου και το νότιο τμήμα που είναι ημιορεινό έως ορεινό. Το μέσο υψόμετρο της λεκάνης απορροής εκτιμάται στα 435 m.



Χάρτης 3.4 : Ισοϋψείς καμπύλες της Λεκάνης Απορροής του ποταμού Γεροπόταμου



Χάρτης 3.5 : Χάρτης κλίσεων της λεκάνης απορροής του ποταμού Γεροπόταμου

3.2.7. Κλιματολογικά στοιχεία

Οι κλιματολογικές συνθήκες μιας περιοχής εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες, όπως ο άνεμος, η εξάτμιση, η ηλιοφάνεια, η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία, η βροχόπτωση, η χιονόπτωση κλπ. που επηρεάζουν και το υδατικό δυναμικό της.

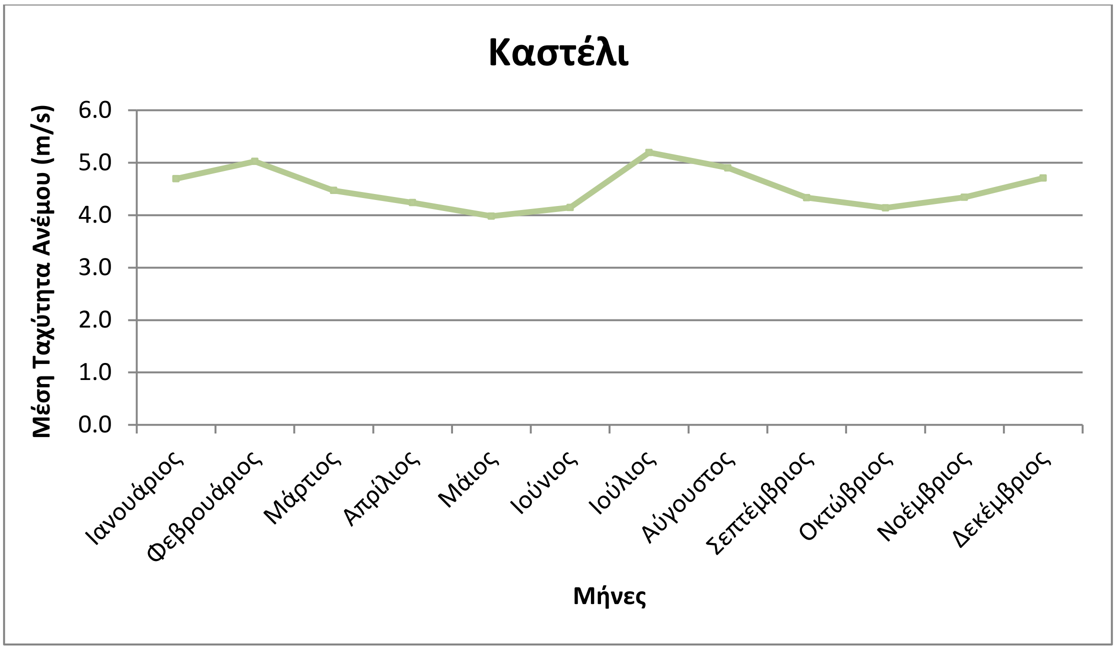
Το κλίμα της νήσου Κρήτης χαρακτηρίζεται ως ξηρό. Η εξατμισοδιαπνοή υπερβαίνει το 60% της βροχόπτωσης, ενώ η επιφανειακή απορροή φθάνει μόλις το 10% (Κριτσωτάκης, 2006).

Για την ευρύτερη περιοχή του Νομού Ηρακλείου διαθέτουμε ημερήσια δεδομένα βροχόπτωσης από το υδρολογικό έτος 1955 – 1956 μέχρι και το υδρολογικό έτος 2003 – 2004 από 31 σταθμούς συνολικά, εκ των οποίων οι 9 εντοπίζονται εντός των ορίων της λεκάνης απορροής του Γεροπόταμου. Όσον αφορά στα διαθέσιμα ημερήσια δεδομένα μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας, αυτά προέρχονται από 12 σταθμούς συνολικά στην ευρύτερη περιοχή του Νομού Ηρακλείου, εκ των οποίων οι 4 εντοπίζονται εντός των ορίων της λεκάνης μελέτης και καλύπτουν το ίδιο χρονικό διάστημα με τα δεδομένα βροχόπτωσης. Επίσης, διαθέτουμε και ημερήσια δεδομένα για την ταχύτητα του ανέμου και την σχετική υγρασία για την χρονική περίοδο 9/1/1976 – 8/31/2004 από τον σταθμό του Καστελίου. Όλα τα προαναφερόμενα μετεωρολογικά δεδομένα προέρχονται από την Υπηρεσία Εγγείων Βελτιώσεων Ηρακλείου (Υ.Ε.Β.). Ακολούθως, παρατίθενται τα συγκεντρωτικά διαγράμματα που κατασκευάστηκαν βάσει των μετεωρολογικών αυτών δεδομένων για το σύνολο των σταθμών παρατήρησης (Διαγράμματα 3.1 – 3.8). Στο Παράρτημα Β παρατίθενται τα αντίστοιχα διαγράμματα βροχόπτωσης και θερμοκρασίας ανά σταθμό.

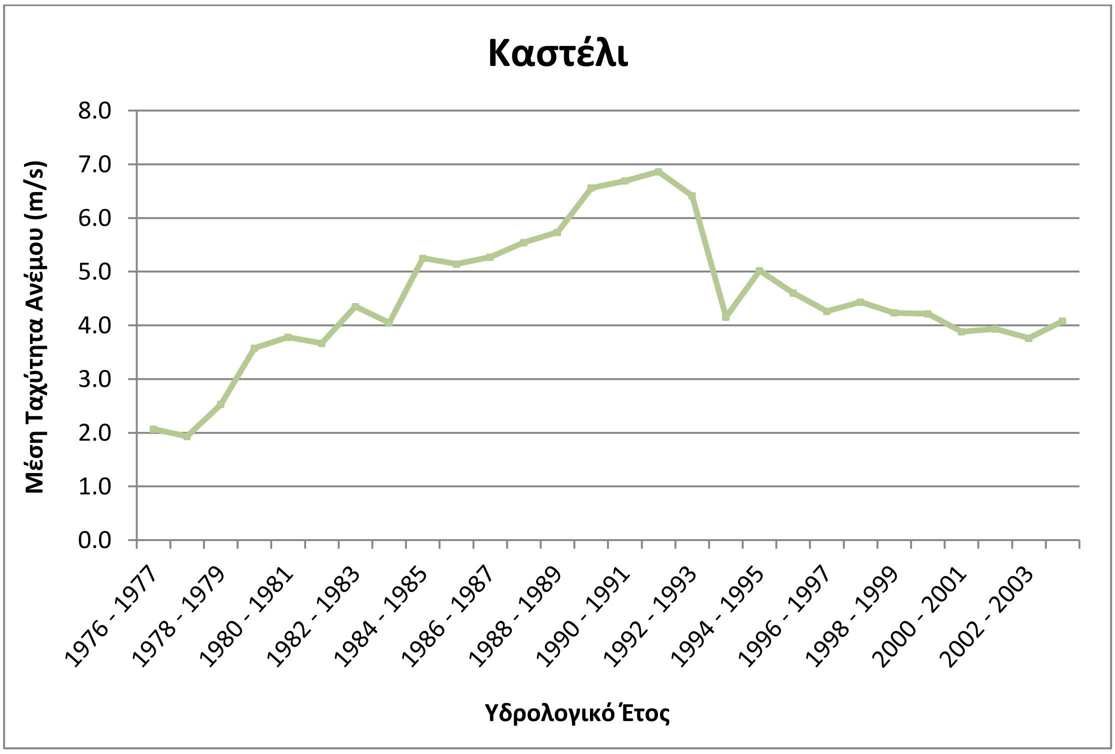
- Άνεμος

Στην Κρήτη, λόγω της γεωγραφικής της θέσης, πνέουν ισχυροί άνεμοι όλων των κατευθύνσεων με επικρατούντες τους βόρειους και βορειοδυτικούς ανέμους. Ακολούθως, παρατίθενται τα διαγράμματα για τη μέση μηνιαία και μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου (m/s) για τον σταθμό του Καστελίου, όπως υπολογίστηκαν βάσει των δεδομένων του συνόλου των ετών.

Όπως προκύπτει από το Διάγραμμα 3.1, η ταχύτητα του ανέμου δεν παρουσιάζει ιδιαίτερες αυξομειώσεις κατά την διάρκεια του έτους και θα μπορούσε να χαρακτηριστεί σχεδόν σταθερή.



Διάγραμμα 3.1 : Μέση μηνιαία ταχύτητα ανέμου για την χρονική περίοδο 1976 – 2004 στον σταθμό Καστελίου

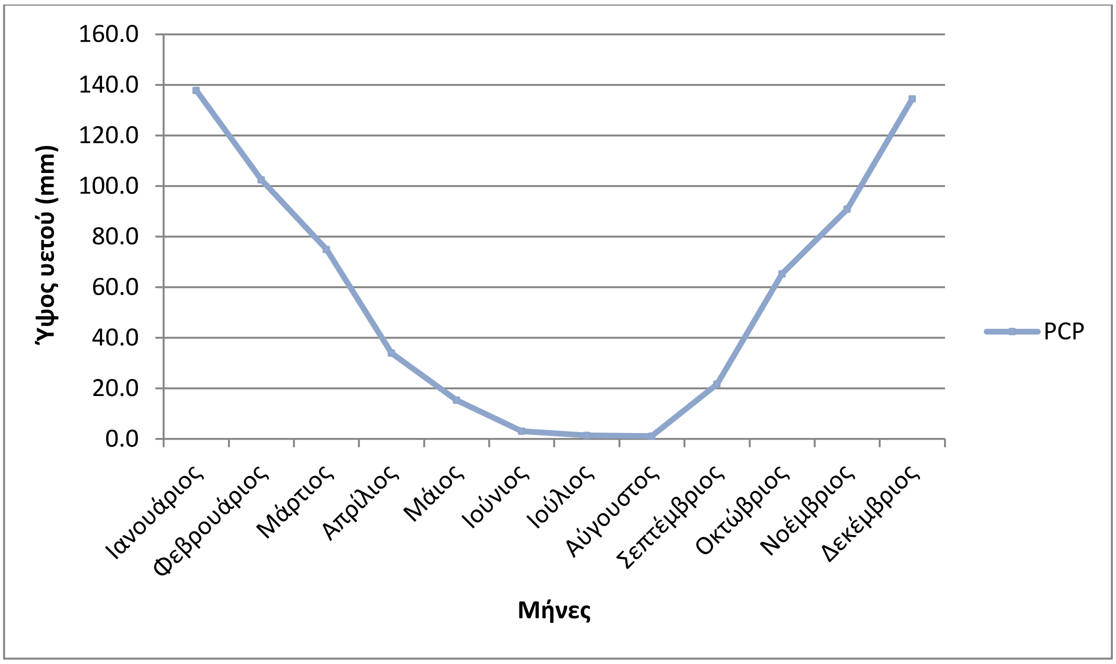


Διάγραμμα 3.2 : Μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου για την χρονική περίοδο 1976 – 2004 στον σταθμό Καστελίου

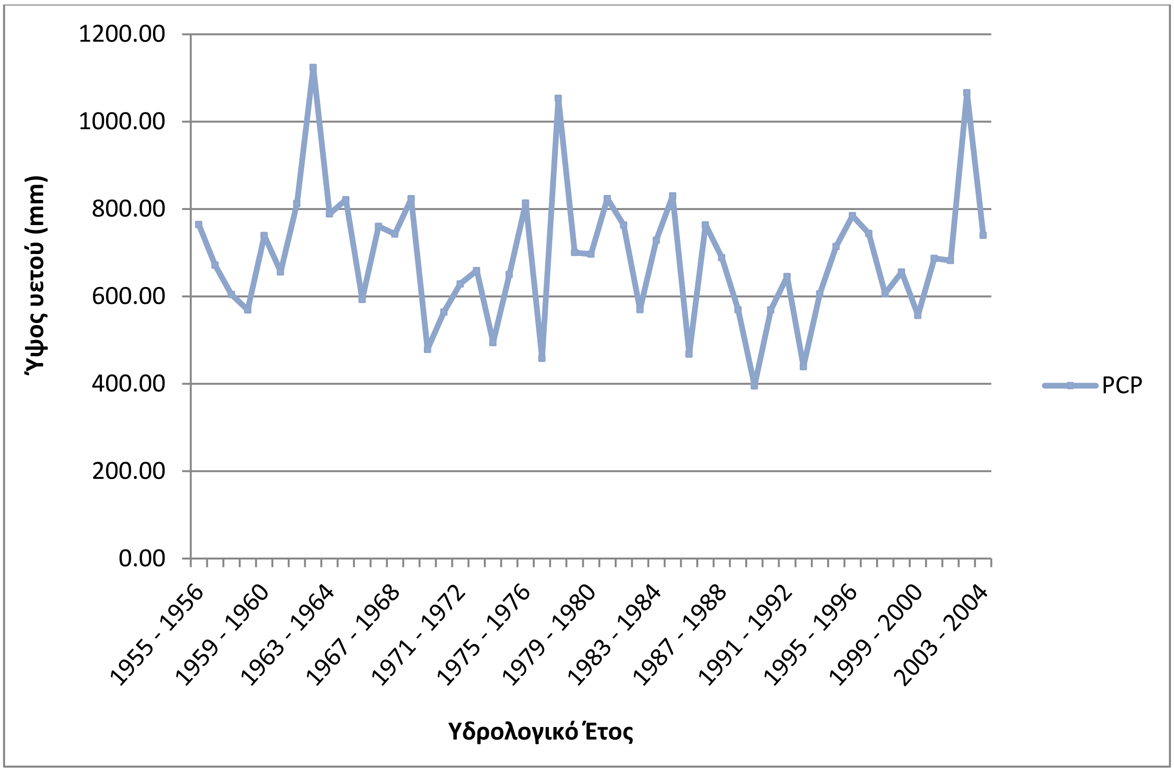
- Βροχόπτωση

Ακολούθως, παρατίθενται τα διαγράμματα για το μέσο μηνιαίο και μέσο ετήσιο ύψος υετού (mm) για το σύνολο των βροχομετρικών σταθμών του Νομού Ηρακλείου, όπως υπολογίστηκαν βάσει των δεδομένων του συνόλου των ετών.

Όπως προκύπτει από το Διάγραμμα 3.3, οι περισσότερες βροχοπτώσεις σημειώνονται κατά τους μήνες Οκτώβριο – Μάρτιο, ενώ σύμφωνα με το Διάγραμμα 3.4, το ετήσιο ύψος υετού σημειώνει διάφορες αυξομειώσεις κατά την διάρκεια της εξεταζόμενης χρονικής περιόδου με ελάχιστη τιμή τα 400 mm και μέγιστη τα 1100 mm.



Διάγραμμα 3.3 : Μέσο μηνιαίο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 - 2004 στον Νομό Ηρακλείου

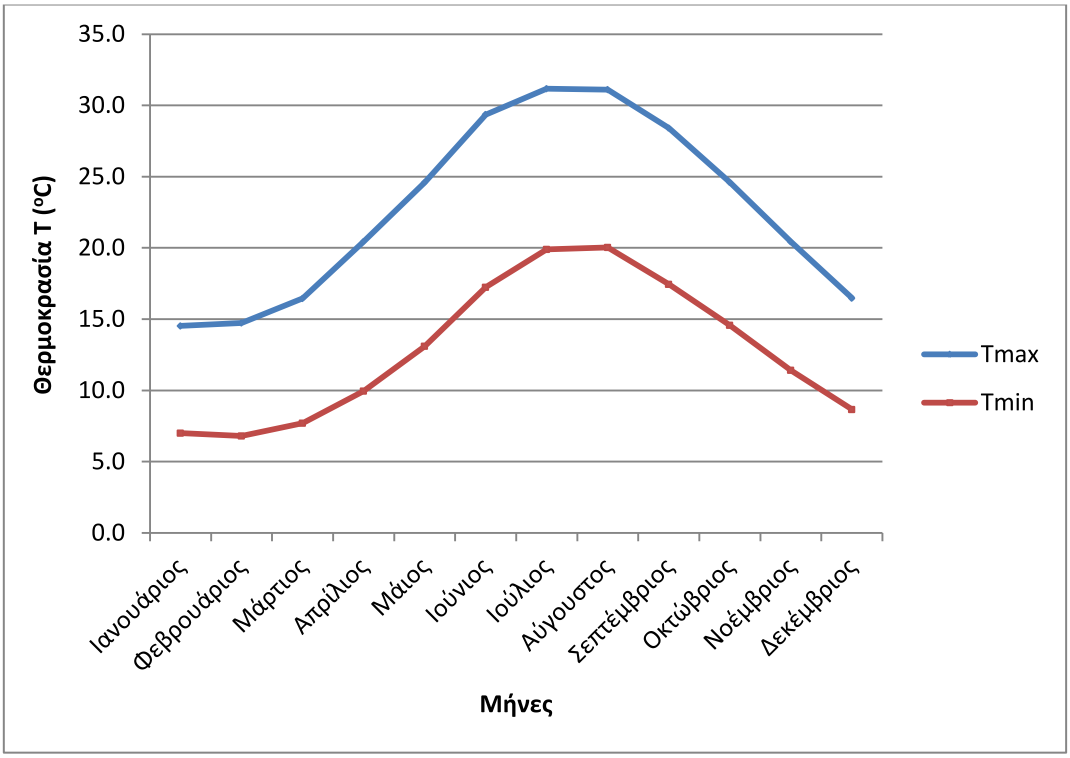


Διάγραμμα 3.4 : Μέσο ετήσιο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 - 2004 στον Νομό Ηρακλείου

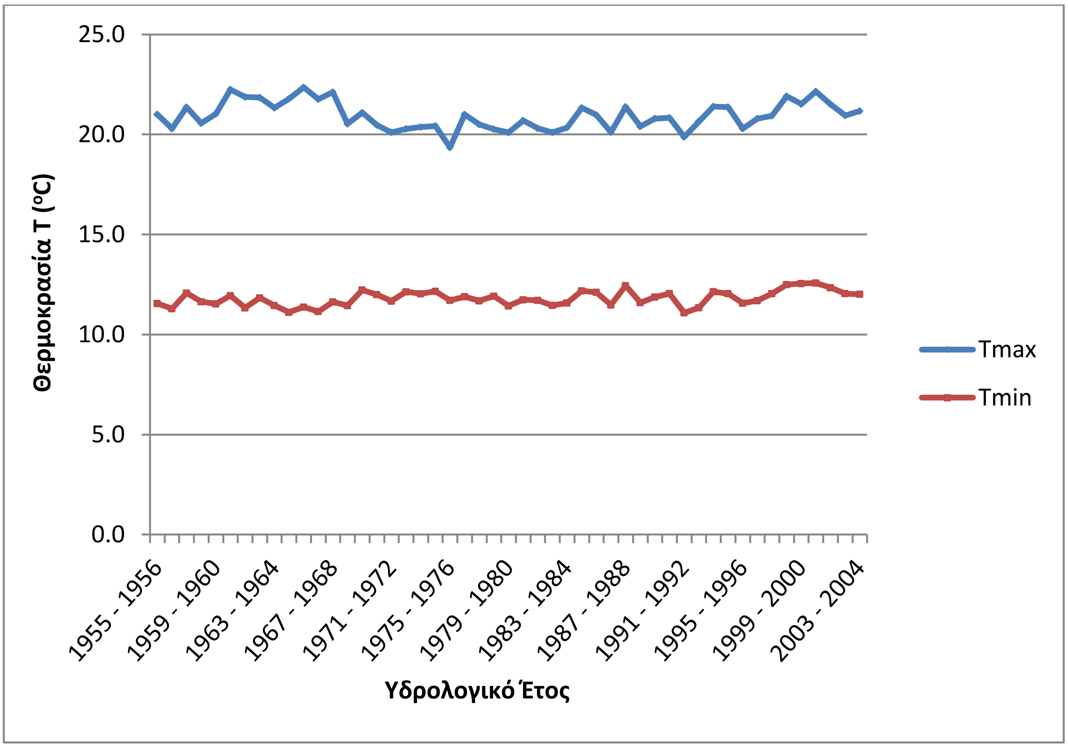
- Θερμοκρασία

Ακολούθως, παρατίθενται τα διαγράμματα για τη μέση μηνιαία και μέση ετήσια μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία (℃) για το σύνολο των σταθμών του Νομού Ηρακλείου, όπως υπολογίστηκαν βάσει των δεδομένων του συνόλου των ετών.

Παρατηρώντας το Διάγραμμα 3.5, συμπεραίνουμε ότι οι μέγιστες θερμοκρασίες σημειώνονται κατά τους μήνες Ιούλιο – Αύγουστο και οι ελάχιστες κατά τους μήνες Δεκέμβριο – Μάρτιο.



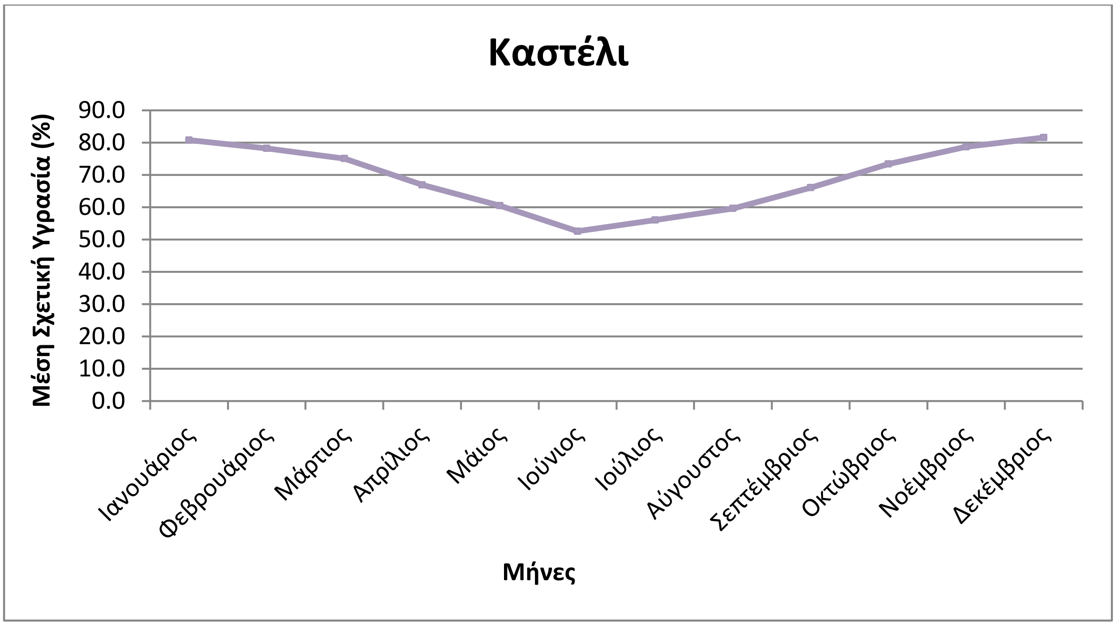
Διάγραμμα 3.5 : Μέση μηνιαία μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον Νομό Ηρακλείου



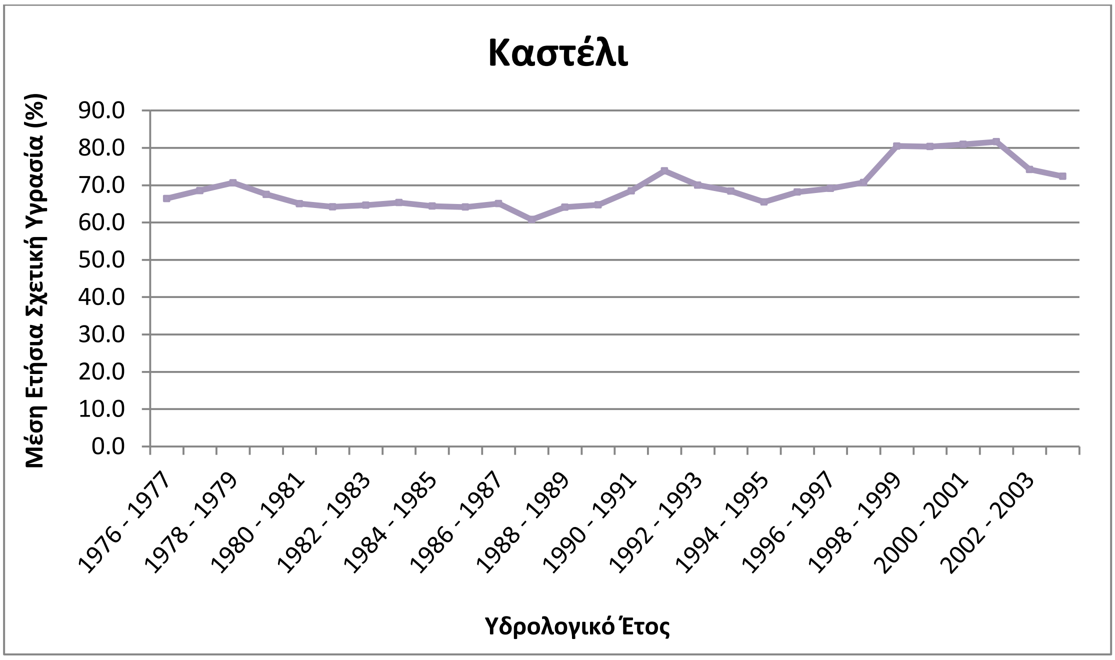
Διάγραμμα 3.6 : Μέση ετήσια μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία για την χρονική περίοδο 1955 - 2004 στον Νομό Ηρακλείου

- Σχετική υγρασία

Στην Κρήτη παρουσιάζονται υψηλές τιμές υγρασίας που υπερβαίνουν το 50%. Ειδικότερα, στην πεδιάδα της Μεσαράς παρατηρούνται αυξημένα ποσοστά υγρασίας. Ακολούθως, παρατίθενται τα διαγράμματα για τη μέση μηνιαία και μέση ετήσια σχετική υγρασία (%) για τον σταθμό του Καστελίου, όπως υπολογίστηκαν βάσει των δεδομένων του συνόλου των ετών.



Διάγραμμα 3.7 : Μέση μηνιαία σχετική υγρασία για την χρονική περίοδο 1976 - 2004 στον σταθμό Καστελίου



Διάγραμμα 3.8 : Μέση ετήσια σχετική υγρασία για την χρονική περίοδο 1976 - 2004 στον σταθμό Καστελίου

- Βροχοβαθμίδα

Η χωρική κατανομή των βροχοπτώσεων εξαρτάται κυρίως από το υψόμετρο, την κλίση, τον προσανατολισμό καθώς και την έκθεση σε σχέση με τη διεύθυνση μετακίνησης των κυριότερων και συχνότερων ατμοσφαιρικών διαταραχών. Σε ορεινές περιοχές με σχετικά ομογενή γεωγραφικά χαρακτηριστικά, το υψόμετρο είναι ο κυριότερος παράγοντας της μεταβολής της κανονικής ετήσιας βροχόπτωσης (Linsley et al, 1988). Για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης υπολογίσθηκε η σχέση βροχόπτωσης - υψομέτρου.

Γενικά, στην Κρήτη παρατηρείται ελάττωση των βροχοπτώσεων από τα δυτικά προς τα ανατολικά και από το βορρά προς το νότο, ενώ η μέση αύξηση της βροχόπτωσης με το υψόμετρο είναι 61 mm ανά 100 m (Παπαγρηγορίου κ.α., 2001).

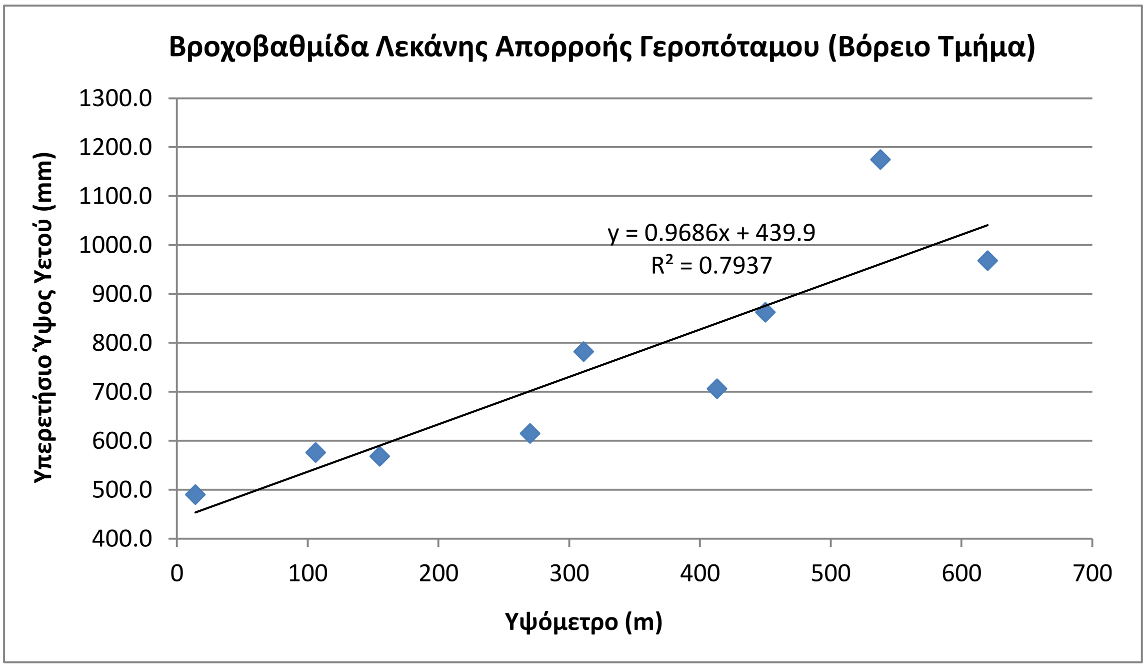
Στην παρούσα μελέτη υπολογίστηκε η βροχοβαθμίδα για την λεκάνη απορροής του Γεροπόταμου, στην οποία υπάρχει ικανοποιητικός αριθμός βροχομετρικών σταθμών (9). Η βροχοβαθμίδα υπολογίστηκε με βάση την μέση ετήσια βροχόπτωση του κάθε σταθμού για τα υδρολογικά έτη 1955 - 1956 έως 2003 – 2004 και το υψόμετρο του σταθμού (Πίνακας 3.1). Συγκεκριμένα, κατασκευάστηκε η καμπύλη μεταβολής του ύψους της βροχής συναρτήσει του υψομέτρου και προσαρμόστηκε η γραμμική παλινδρόμηση δεδομένου ότι η καμπύλη αυτή ερμηνεύει με τον καλύτερο τρόπο το φαινόμενο στη συγκεκριμένη περιοχή. Έτσι, προέκυψε ότι η μέση αύξηση της βροχόπτωσης με το υψόμετρο είναι 97 mm ανά 100 m για την λεκάνη απορροής του Γεροπόταμου (συγκεκριμένα για το Βόρειο τμήμα της) (Πίνακας 3.2 και Διάγραμμα 3.9).

Πίνακας 3.1 : Βροχομετρικοί σταθμοί της λεκάνης απορροής του Γεροπόταμου

Σταθμός	Υψόμετρο (m)	Υπερετήσιο Ύψος Υετού (mm)
Τυμπάκι	14	490.2
Γόρτυς	155	568.5
Λαγολιό	106	576.3
Ασήμι	270	615.2
Μορόνι	413	706.6
Ζαρός	311	782.5
Γέργερη	450	862.9
Αγία Βαρβάρα	620	968.4
Βορίζια	538	1175.0

Πίνακας 3.2 : Βροχοβαθμίδα της λεκάνης απορροής του Γεροπόταμου

	ΒΡΟΧΟΒΑΘΜΙΔΑ	**RMSE, R^2**
Λεκάνη Απορροής Γεροπόταμου (Βόρειο τμήμα)	$y = 0.9686x + 439.9$	0.7937



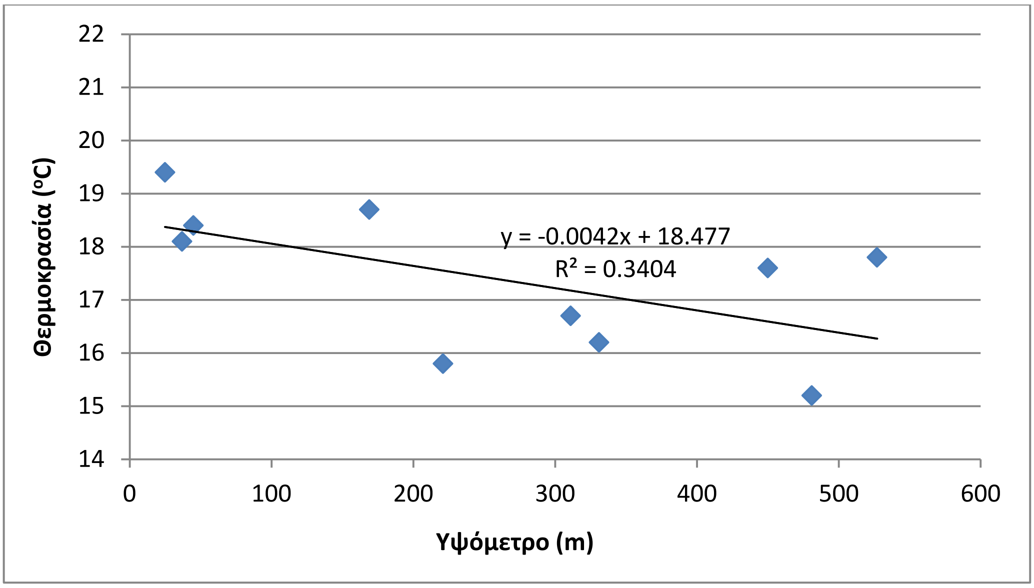
Διάγραμμα 3.9 : Βροχοβαθμίδα της λεκάνης απορροής του Γεροπόταμου (Βόρειο Τμήμα)

- Θερμοβαθμίδα

Στην παρούσα μελέτη υπολογίστηκε η θερμοβαθμίδα για τον Νομό Ηρακλείου, όπου υπάρχει ικανοποιητικός αριθμός σταθμών καταγραφής θερμοκρασίας (10). Η θερμοβαθμίδα υπολογίστηκε με βάση την μέση ετήσια θερμοκρασία του κάθε σταθμού για τα υδρολογικά έτη 1991 - 1992 έως 1994 – 1995 και το υψόμετρο του σταθμού (Πίνακας 3.3). Συγκεκριμένα, κατασκευάστηκε η καμπύλη μεταβολής της θερμοκρασίας συναρτήσει του υψομέτρου και προσαρμόστηκε η γραμμική παλινδρόμηση δεδομένου ότι η καμπύλη αυτή ερμηνεύει με τον καλύτερο τρόπο το φαινόμενο στη συγκεκριμένη περιοχή. Έτσι, προέκυψε ότι η μέση μείωση της θερμοκρασίας με το υψόμετρο είναι $4.2\ ℃$ ανά 1000 m (Διάγραμμα 3.10). Η τιμή αυτή της θερμοβαθμίδας $-4.2\ ℃/1000\ \mathrm{m}$, ταυτίζεται με τη θερμοβαθμίδα της Κρήτης και θεωρείται λογική καθώς όπως γνωρίζουμε από την βιβλιογραφία η θερμοβαθμίδα για αδιαβατικές συνθήκες είναι $-6\ ℃/1000\ \mathrm{m}$.

Πίνακας 3.3 : Σταθμοί θερμοκρασίας Νομού Ηρακλείου

Σταθμός	Υψόμετρο (m)	Μέση ετήσια θερμοκρασία (°C)
Καψάλοι	25	19.4
Αεροδρόμιο Ηρακλείου	37	18.1
Φοινικιά	45	18.4
Πόμπια	169	18.7
Πραιτώρια	221	15.8
Ζαρός	311	16.7
Καστέλι	331	16.2
Γέργερη	450	17.6
Αβδού	481	15.2
Κρουσώνας	527	17.8



Διάγραμμα 3.10 : Θερμοβαθμίδα του Νομού Ηρακλείου

3.2.8. Διαμόρφωση υδρογεωλογικών συνθηκών

Στην ευρύτερη περιοχή του ορεινού όγκου του Ψηλορείτη, που αποτελεί ένα ιδιαίτερα σημαντικό και καθοριστικό τμήμα της εξεταζόμενης λεκάνης, διαμορφώνονται οι παρακάτω υδρογεωλογικές συνθήκες:

- Το νερό της βροχής που κατεισδύει στα έντονα τεκτονισμένα, ρηγματωμένα και καρστικοποιημένα ανθρακικά πετρώματα, κατεισδύει εντός των ρωγμών και του κάρστ διαμορφώνοντας υπόγειες υδροφορίες.
- Ένα μέρος του νερού αυτού, εκφορτίζεται υπό τη μορφή πηγών στο μέτωπο της ρηξιγενούς ζώνης Γέργερη – Ζαρός – Καμάρες, ένα άλλο μέρος τροφοδοτεί υπόγεια και πλευρικά τους ημιπερατούς σχηματισμούς του νεογενούς καθώς και τους ανθρακικούς σχηματισμούς που βρίσκονται βυθισμένοι κάτω από τους σχηματισμούς του φλύσχη της Πίνδου ή κάτω από τις νεογενείς αποθέσεις.

3.2.9. Υπόγειοι υδατικοί πόροι

Τα κύρια υδροφόρα στρώματα στην λεκάνη της Δυτικής Μεσαράς είναι οι τεταρτογενείς αποθέσεις που περιλαμβάνουν: α) κώνους κορημάτων και πλευρικά κορήματα Ολοκαινικής ηλικίας, αποτελούμενα από λατύπες, ανθρακικής κυρίως σύστασης και ποικίλου μεγέθους, συγκολλημένες σε μεγάλο βαθμό με ερυθρογή. Οι κυριότερες εμφανίσεις τους βρίσκονται στις βόρειες πλευρές των Αστερουσίων και στις νότιες παρυφές του Ψηλορείτη και β) ποταμολιμναία, ερυθρά κροκαλοπαγή, άμμους, ιλυολίθους και τεφροκύανα αργιλικά πετρώματα Πλειστοκαινικής – Ολοκαινικής ηλικίας. Οι σχηματισμοί αυτοί παρουσιάζουν πολύ καλή υδρογεωλογική συμπεριφορά, κυρίως κατά μήκος του Γεροπόταμου και των μεγαλύτερων παραποτάμων του.

Οι Νεογενείς αποθέσεις που καταλαμβάνουν μεγάλη έκταση στο κεντρικό τμήμα της τεκτονικής τάφρου (graben) έχουν γενικά περιορισμένη υδρογεωλογική σημασία με μικρή σχετικά δυναμικότητα. Οι σχηματισμοί αυτοί αποτελούνται κυρίως από Πλειο – Πλειστοκαινικά, θαλάσσια, υφάλμυρα, ποτάμια και λιμναία, ερυθρά κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, ερυθρές και κιτρινωπές άμμους, ιλυολίθους, τεφροκύανες μάργες και ερυθρές – κιτρινωπές ή τεφρές ιλυώδεις αργίλους με ενδιαστρώσεις μαργαϊκών ασβεστολίθων. Οι υδροφορίες αναπτύσσονται κυρίως στα κροκαλοπαγή και στις άμμους που επιτρέπουν στο νερό, λόγω του κοκκώδους χαρακτήρα τους, να κατεισδύει σε μεγάλο βάθος και να σχηματίζει υδροφόρους ορίζοντες στις επαφές με το αδιαπέρατο υπόβαθρο. Ακόμη, υδροφόρα στρώματα είναι και οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι που διηθούν το νερό σε βάθος μέσω του πρωτογενούς και δευτερογενούς πορώδους.

Οι υπόγειες υδροφορίες που αναπτύσσονται στα πρακτικώς αδιαπέρατα καλύμματα των οφιολίθων και των Αστερουσίων, είναι μικρές και κατά τους θερινούς μήνες εξασθενούν αφού τροφοδοτούνται μόνο από τα κατεισδύοντα νερά της βροχής. Τοπικό ενδιαφέρον παρουσιάζει ο αποσαθρωμένος μανδύας των σχηματισμών αυτών, όπου μπορεί να αναπτυχθεί φρεάτιος υδροφόρος ορίζοντας.

Το τεκτονικό κάλυμμα της Πίνδου, στην περιοχή της λεκάνης της Δυτικής Μεσαράς, αντιπροσωπεύεται κυρίως από φλύσχη και ασβεστόλιθους. Ο φλύσχης είναι θεωρητικά αδιαπέρατος σχηματισμός αλλά, λόγω της ψαμμιτικής σύστασής του, σχηματίζει αποσαθρωμένο μανδύα, στον οποίο αναπτύσσεται φρεάτιος υδροφόρος ορίζοντας στην επαφή του με το υγιές πέτρωμα. Γενικά, στον σχηματισμό αυτό δεν υπάρχουν αξιόλογες υπόγειες υδροφορίες, ενώ είναι αυξημένη η επιφανειακή απορροή. Οι ασβεστόλιθοι χαρακτηρίζονται γενικά ως υδροπερατοί και οι υπόγειες υδροφορίες τους καθορίζονται από τον βαθμό καρστικοποίησης και κατακερματισμού τους.

Τέλος, στο τεκτονικό κάλυμμα της Τρίπολης επικρατεί ο πρακτικά αδιαπέρατος φλύσχης, κυρίως στις νότιες παρυφές της λεκάνης της Δυτικής Μεσαράς, ο οποίος παρουσιάζει όμως ιδιαίτερο ενδιαφέρον επειδή υπέρκειται των πολύ υδροπερατών ανθρακικών σχηματισμών. Εκτεταμένες εμφανίσεις ασβεστολίθων της ζώνης της Τρίπολης απαντώνται στο βόρειο τμήμα της λεκάνης, όπου μεγάλο μέρος του υδατικού τους δυναμικού εκφορτίζεται στην περιοχή Ζαρού – Γέργερης με πηγές σημαντικών παροχών.

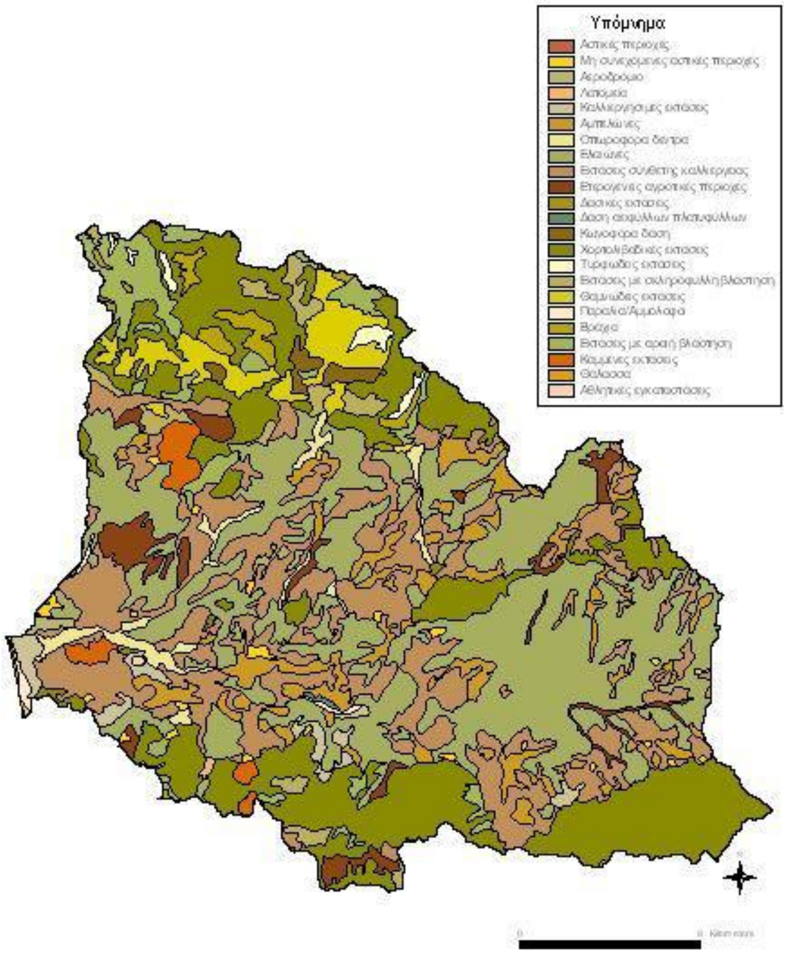
Η περιοχή αυτή των νοτιοανατολικών παρυφών του Ψηλορείτη κυριαρχείται από τρεις μεγάλες ρηξιγενείς ζώνες: Γέργερης – Ζαρού – Καμαρών, Καλοχωραφίτη – Σκουρβούλων – Λαλουμά και Βώρων – Φανερωμένης – Αμπελούζου. Η πρώτη, που είναι και σημαντικότερη, αποτελεί το νότιο όριο των ανθρακικών σχηματισμών και το βόρειο περιθώριο των Νεογενών και Τεταρτογενών αποθέσεων της κυρίως κοιλάδας του Γεροπόταμου.

Οι υδροφορίες του Ψηλορείτη διαπιστώθηκε ότι έχουν υδραυλικές κλίσεις με φορά από Βορρά προς Νότο, αλλά η συνέχειά τους επηρεάζεται από την ρηξιγενή ζώνη Γέργερης – Ζαρού – Καμαρών. Στην περιοχή αυτή δημιουργούνται συνθήκες υπερπλήρωσης, αλλά συγχρόνως διατηρείται η υδραυλική επικοινωνία με το βυθιζόμενο ανθρακικό ρηξιτέμαχος και τους Νεογενείς και Τεταρτογενείς σχηματισμούς. Αποτέλεσμα της υπερπλήρωσης των ανθρακικών πετρωμάτων είναι η εκδήλωση μεγάλων καρστικών πηγών στη Γέργερη (200 – 250 m^3/h) και στο Ζαρό (450 – 500 m^3/h) σε υψόμετρα 500 – 600 m. Παράλληλα όμως με την εκφόρτιση του υπόγειου υδάτινου δυναμικού από τις πηγές, υπάρχει και πιθανή πλευρική τροφοδοσία προς Νότο, τόσο στο βυθιζόμενο ανθρακικό ρηξιτέμαχος όσο και στις Νεογενείς και Τεταρτογενείς αποθέσεις.

Οι πηγές, που διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην περιοχή των νοτιοανατολικών παρυφών του Ψηλορείτη και κατ’ επέκταση στην λεκάνη απορροής του Γεροπόταμου, διαχωρίζονται ανάλογα με την γεωλογική δομή σε τρεις κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι μεγάλες καρστικές πηγές της ρηξιγενούς ζώνης Γέργερης – Ζαρού – Καμαρών. Στην δεύτερη συγκαταλέγονται οι πηγές που σχετίζονται με τα πετρώματα του οφιολιθικού συμπλέγματος και του φλύσχη της ζώνης της Πίνδου και έχουν μικρές παροχές λίγων m^3/h. Τέλος, η τρίτη κατηγορία περιλαμβάνει όσες πηγές σχετίζονται με τα υδροπερατά μέλη και τις γύψους των Νεογενών αποθέσεων (πηγές Πανασού) και παρουσιάζουν παροχές λίγων έως μερικών δεκάδων m^3/h.

3.2.10. Χρήσεις γης

Ένα μεγάλο τμήμα της λεκάνης απορροής, περί τα 250 km^2, αποτελεί καλλιεργήσιμη έκταση με κυριότερες καλλιέργειες τα ελαιόδεντρα (περίπου 175 km^2) και τις αμπέλους (40 km^2). Η υπόλοιπη καλλιεργήσιμη έκταση χρησιμοποιείται για την καλλιέργεια λαχανικών, φρούτων και δημητριακών. Στην Εικόνα 3.2, παρουσιάζεται η κατανομή των χρήσεων γης (CORINE 2003).



Εικόνα 3.2 : Χρήσεις γης της λεκάνης απορροής του ποταμού Γεροπόταμου (CORINE 2003)

4. Η λεκάνη απορροής του ποταμού Γεροπόταμου στο μοντέλο SWAT

4.1. Εισαγωγή

Το μοντέλο SWAT, όπως αναλύθηκε και στην ενότητα 2.4., είναι ιδιαίτερα απαιτητικό σε δεδομένα εισόδου καθώς και στον καθορισμό των παραμέτρων των αρχείων του που καθορίζουν τις συνιστώσες του κύκλου του νερού, των θρεπτικών και της διάβρωσης. Στα βασικά χωρικά δεδομένα εισόδου του μοντέλου συγκαταλέγονται το τοπογραφικό ανάγλυφο, ο χάρτης χρήσεων γης καθώς και ο χάρτης εδάφους. Ο διαχωρισμός σε υπολεκάνες και μετέπειτα σε υδρολογικές μονάδες βασίζεται, μεταξύ άλλων, και στην ανάλυση των διαθέσιμων αυτών δεδομένων και διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην ορθή προσομοίωση των διαχειριστικών πρακτικών που διερευνώνται στη λεκάνη απορροής. Η ποιότητα των ανωτέρω δεδομένων σε συνδυασμό με την πυκνότητα της βροχομετρικής πληροφορίας έχει αποδειχτεί ότι καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την επιτυχία των προβλέψεων του μοντέλου SWAT (Chaplot et al., 2005; Di Luzio et al., 2005; Geza and McCray, 2008; Muleta et al., 2007; Muttiah and Wurbs, 2002; Romanowicz et al., 2005).

Η μοντελοποίηση της υδρολογίας μιας λεκάνης απορροής με τη χρήση του μοντέλου SWAT απαιτεί τον καθορισμό δεκάδων παραμέτρων στα αρχεία εισόδου του. Οι παράμετροι αυτές, άλλοτε τυγχάνουν και άλλοτε στερούνται πλήρους φυσικής σημασίας. Ωστόσο, η έλλειψη στοιχείων καθιστά τον καθορισμό τους μία πολύπλοκη και αβέβαιη διαδικασία, που είναι όμως εφικτή μέσω της διαδικασίας της βαθμονόμησης του μοντέλου με προσομοίωση της μετρηθείσας παροχής του ποταμού.

Δεδομένου ότι τα διαθέσιμα στοιχεία δεν επαρκούν για να καλύψουν το σύνολο των απαιτούμενων δεδομένων ενός μοντέλου σαν το SWAT για την προσομοίωση των διεργασιών μιας λεκάνης απορροής, πάντα απαιτούνται υποθέσεις και απλουστευτικές παραδοχές, θεμελιωμένες όμως στην εμπειρία και στην επιστημονική γνώση. Πολλές φορές, είναι επίσης απαραίτητη η εκτενής επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων, ώστε να παραχθούν δεδομένα εισόδου κατάλληλης μορφής στο μοντέλο.

4.2. Παραμετροποίηση της λεκάνης απορροής του Γεροπόταμου

4.2.1. Σχηματοποίηση λεκάνης

Το πρώτο βήμα της μοντελοποίησης με το SWAT περιλαμβάνει τη σχηματοποίηση της λεκάνης απορροής που θα ορίσει το βασικό χαρακτηριστικό της κλίσης εδάφους στα διάφορα τμήματα της λεκάνης. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται σε περιβάλλον ΓΣΠ (ESRI ArcMap), στο οποίο έχουν ενσωματωθεί οι εργαλειοθήκες της εφαρμογής του μοντέλου SWAT. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η έκδοση SWAT2009 με γραφικό περιβάλλον εργασίας το 'ArcSWAT', ενσωματωμένο στο πρόγραμμα ΓΣΠ, 'ArcMap 9.3 '.

Η σχηματοποίηση της λεκάνης ξεκινά με την εισαγωγή του ψηφιακού μοντέλου εδάφους (Digital Elevation Model – DEM), που αποτελεί το υπόβαθρο με βάση το οποίο τα ΓΣΠ θα σχεδιάσουν το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης. Το αρχείο αυτό διατίθεται σε μορφή καννάβου (grid) με τα κελιά να χαρακτηρίζονται από μία και μοναδική τιμή υψομέτρου. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν STRM 90 δεδομένα με μορφή καννάβου $(90 \times 49\ m\ grid)$ για την ανάπτυξη του ψηφιακού μοντέλου εδάφους (Digital Elevation Model – DEM). Το τοπογραφικό ανάγλυφο της λεκάνης του Γεροπόταμου φαίνεται στον Χάρτη 4.1. Μετά την εισαγωγή του, το πρόγραμμα ArcView μπορεί να σχεδιάσει το υδρογραφικό δίκτυο. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής του υδρογραφικού δικτύου από τον χρήστη ως αρχείο τύπου 'shape'.

Επιπλέον, ζητείται από το πρόγραμμα η τιμή κατωφλίου η οποία αντιπροσωπεύει την ελάχιστη έκταση σε ha, που απαιτείται για τη δημιουργία συγκεντρωτικής ροής ή αλλιώς για δημιουργία τμήματος ποταμού (Di Luzio et al., 2001). Όσο μικρότερη είναι η τιμή αυτή, τόσο πιο πυκνό θα είναι το υδρογραφικό δίκτυο που θα σχεδιαστεί από το πρόγραμμα. Για τη λεκάνη του Γεροπόταμου χρησιμοποιήθηκε μια τιμή κατωφλίου 500 ha, υποδηλώνοντας ότι το υδρογραφικό δίκτυο σχηματίζεται όταν συγκεντρώνεται νερό απορροής από έκταση ίση κατ' ελάχιστον με το 0.84 % της έκτασης της λεκάνης (59579 ha).

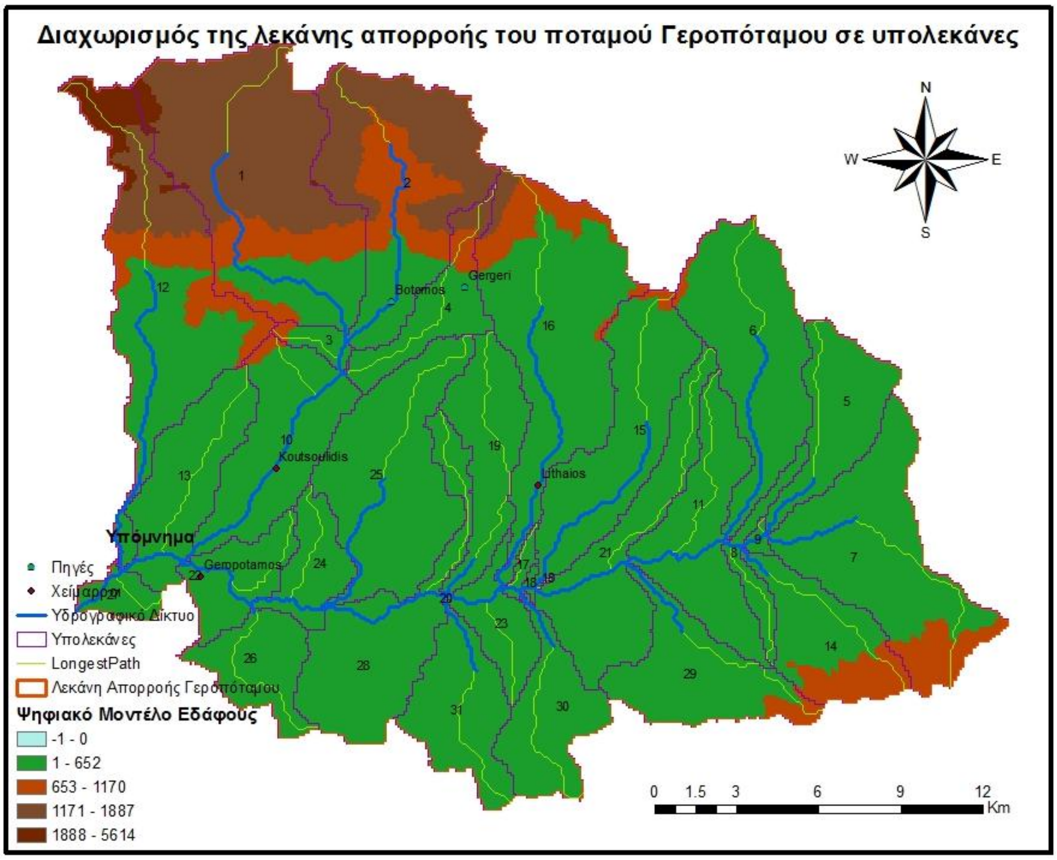
Χάρτης 4.1 : Διαχωρισμός της λεκάνης απορροής του Γεροπόταμου σε υπολεκάνες με βάση το ψηφιακό μοντέλο εδάφους και το υδρογραφικό δίκτυο

Αφού ολοκληρωθούν αυτά τα βήματα, το μοντέλο ορίζει τις εξόδους των υπολεκανών για όλα τα σημεία προ συμβολής υδατορρευμάτων. Ο αριθμός των υπολεκανών στις οποίες θα διαιρεθεί η λεκάνη καθορίζεται από τον χρήστη. Υπενθυμίζεται ότι η κλίση εδάφους στους μετέπειτα υπολογισμούς του μοντέλου αποδίδεται σε επίπεδο υπολεκάνης, γι' αυτό ο εν λόγω διαχωρισμός έχει ιδιαίτερη σημασία. Τελικά, επιλέχθηκαν 31 υπολεκάνες, όπως φαίνεται στον Χάρτη 4.1, ώστε:

- Ο διαχωρισμός να είναι επαρκής για την ακρίβεια των εκτιμήσεων του μοντέλου SWAT (FitzHugh and Mackay, 2000) με τη μέση έκταση υπολεκάνης να είναι περίπου 4% της συνολικής έκτασης που θεωρείται ικανοποιητική για εφαρμογή διαχειριστικών πρακτικών (Arabi et al., 2006).

- Η διαθέσιμη βροχομετρική πληροφορία (πυκνότητα βροχομετρικών σταθμών) να λαμβάνεται εξ ολοκλήρου υπόψη, με δεδομένο ότι η κάθε υπολεκάνη λαμβάνει τη βροχόπτωση του εγγύτερου σταθμού.
- Καίριες θέσεις κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου να αντιπροσωπεύονται από έξοδο υπολεκάνης, ώστε το μοντέλο να δύναται να εξάγει αποτελέσματα σε αυτές.

Οι εν λόγω θέσεις απεικονίζονται στον Χάρτη 4.2 και είναι οι χείμαρροι Λιθαίος, Γεροπόταμος και Κουτσουλίδης (έξοδος υπολεκάνης 16, 22 και 10 αντίστοιχα). Στις τρεις αυτές θέσεις διατίθενται παρατηρημένα δεδομένα παροχών για χρήση κατά την βαθμονόμηση του μοντέλου. Η σχηματοποίηση της λεκάνης ολοκληρώνεται με ορισμό των θέσεων εντός του υδρογραφικού δικτύου, όπου εκβάλλουν πιθανές υδρογεωλογικές πηγές. Η συνεισφορά αυτής της μορφής, που δεν προέρχεται από τον μετασχηματισμό της βροχής σε απορροή εντός της λεκάνης, ορίζεται στο μοντέλο με πηγές σημειακού χαρακτήρα. Στη λεκάνη απορροής του Γεροπόταμου ορίστηκαν δύο υδρογεωλογικές πηγές, οι πηγές του Βότομου – Ζαρού και της Γέργερης, που εκφορτίζονται στο υδρογραφικό δίκτυο (υπολεκάνες 2 και 4 αντίστοιχα).



Χάρτης 4.2 : Υδρομετρικοί σταθμοί της λεκάνης απορροής του ποταμού Γεροπόταμου

4.2.2. Απεικόνιση χρήσεων γης και εδάφους

Για την απεικόνιση των διαφόρων χρήσεων γης της περιοχής μελέτης χρησιμοποιήθηκε η βάση δεδομένων Corine Land Cover 2000 (CLC2000) και συγκεκριμένα οι χάρτες CORINE κλίμακας 1 : 100000.

Όσον αφορά στο έδαφος, τα ζητούμενα χαρακτηριστικά που απαιτούνται από το μοντέλο SWAT μπορούν να προκύψουν από τους εδαφολογικούς χάρτες (Soilmap) που παρέχονται από το Joint Research Centre (JRC).

Η χρονοσειρά των διαθέσιμων δεδομένων ποταμού στη λεκάνη του Γεροπόταμου καλύπτει το χρονικό διάστημα από το υδρολογικό έτος 1971 – 1972 μέχρι και το υδρολογικό έτος 1994 – 1995 για τις ημερήσιες παροχές στους χείμαρρους Γεροπόταμο, Κουτσουλίδη και Λιθαίο. Όσον αφορά στις μηνιαίες παροχές των πηγών Βότομος και Γέργερη, η χρονοσειρά των διαθέσιμων δεδομένων καλύπτει το χρονικό διάστημα από το υδρολογικό έτος 1970 – 1971 μέχρι και το υδρολογικό έτος 1984 – 1985. Τα διαθέσιμα δεδομένα παροχής προέρχονται από την Υπηρεσία Εγγείων Βελτιώσεων (Υ.Ε.Β.) του Νομού Ηρακλείου και τα χαρακτηριστικά τους συνοψίζονται στον Πίνακα 4.1.

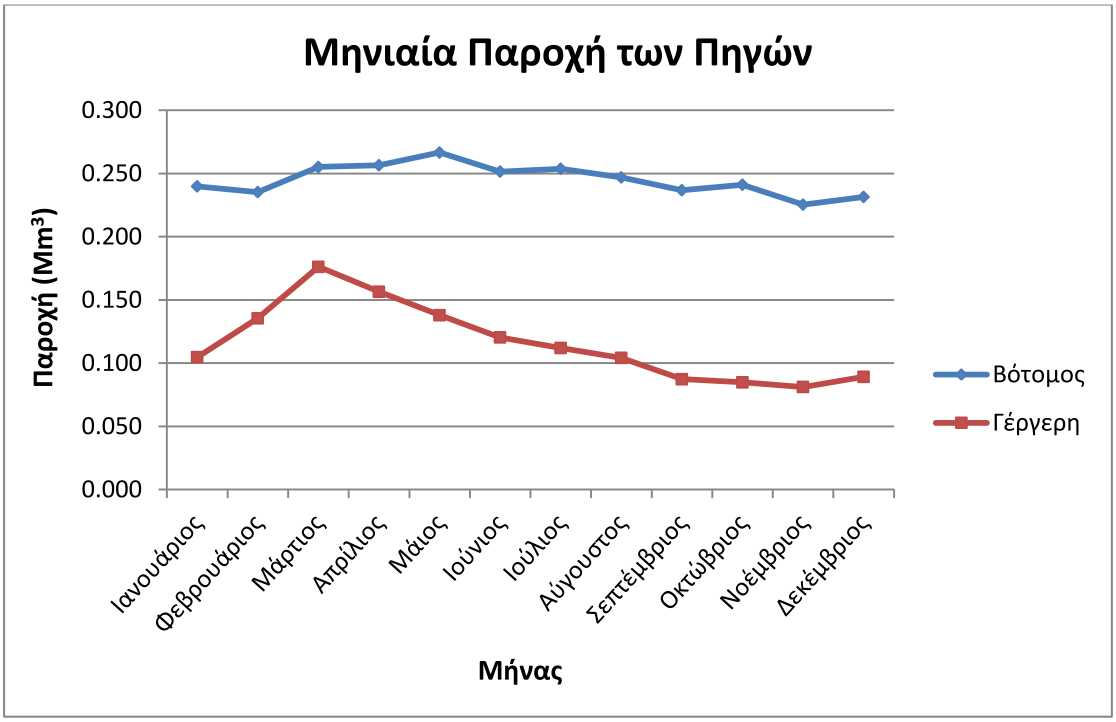
Πίνακας 4.1 : Χαρακτηριστικά δεδομένων παροχής

Θέση	Q_{max} (m^3/s)	Q_{min} (m^3/s)	Q_{med} (m^3/s)	Q_{mean} (m^3/s)	stdev	Διαθεσιμότητα δεδομένων παροχής	
						Παρατηρημένα	Προσομοιωμένα
Βότομος	0.990	0.050	0.095	0.103	0.071	09/1970 - 08/1985	01/1970 - 08/2004
Γέργερη	0.163	0.021	0.039	0.047	0.026	09/1970 - 08/1985	01/1970 - 08/2004
Γεροπόταμος	33.228	0.000	0.230	0.596	1.784	9/1/1971 - 8/31/1995	1/1/1971 - 8/31/2004
Κουτσουλίδης	48.447	0.000	0.126	0.346	1.110	9/1/1971 - 8/31/1995	1/1/1971 - 8/31/2004
Λιθαίος	18.554	0.000	0.052	0.200	0.566	9/1/1971 - 8/31/1995	1/1/1971 - 8/31/2004

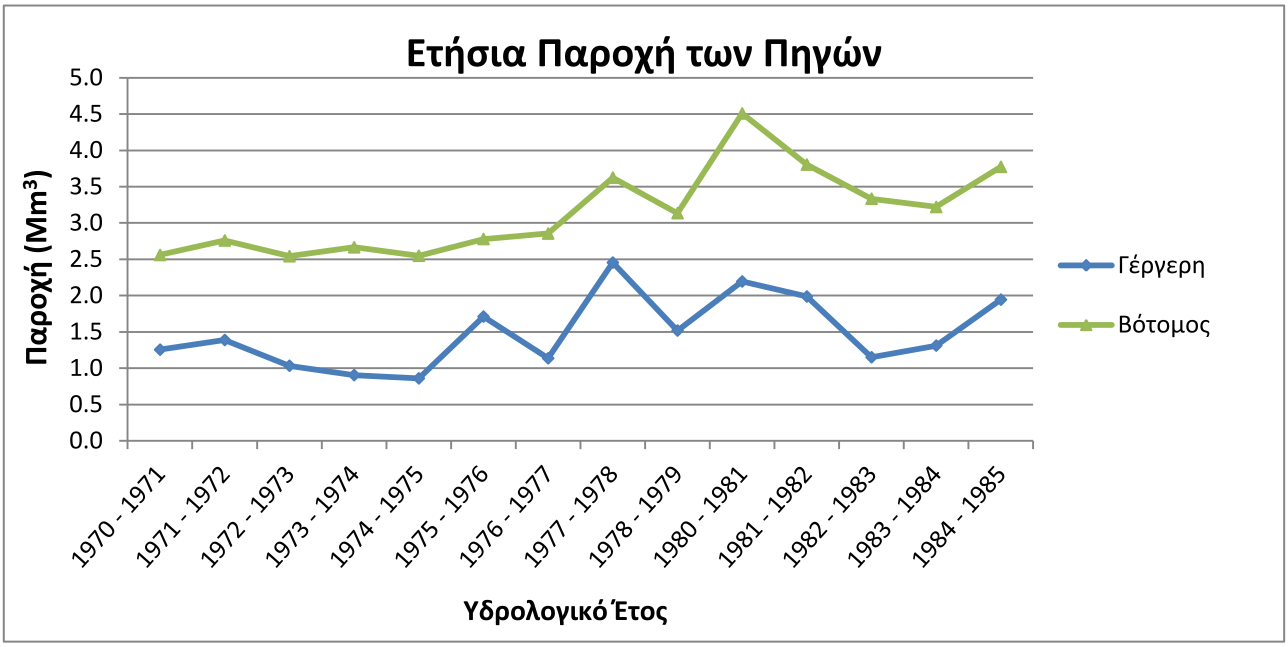
Ακολούθως, παρατίθενται τα συγκεντρωτικά διαγράμματα που κατασκευάστηκαν βάσει των υδρομετρικών αυτών δεδομένων για τους χειμάρρους και τις πηγές (Διαγράμματα 4.1 – 4.4).

Διάγραμμα 4.1 : Μέση μηνιαία παροχή χειμάρρων για την χρονική περίοδο 1971 – 1995

Διάγραμμα 4.2 : Μέση ετήσια παροχή χειμάρρων για την χρονική περίοδο 1971 - 1995



Διάγραμμα 4.3 : Μέση μηνιαία παροχή πηγών για την χρονική περίοδο 1970 - 1985



Διάγραμμα 4.4 : Μέση ετήσια παροχή πηγών για την χρονική περίοδο 1970 – 1985

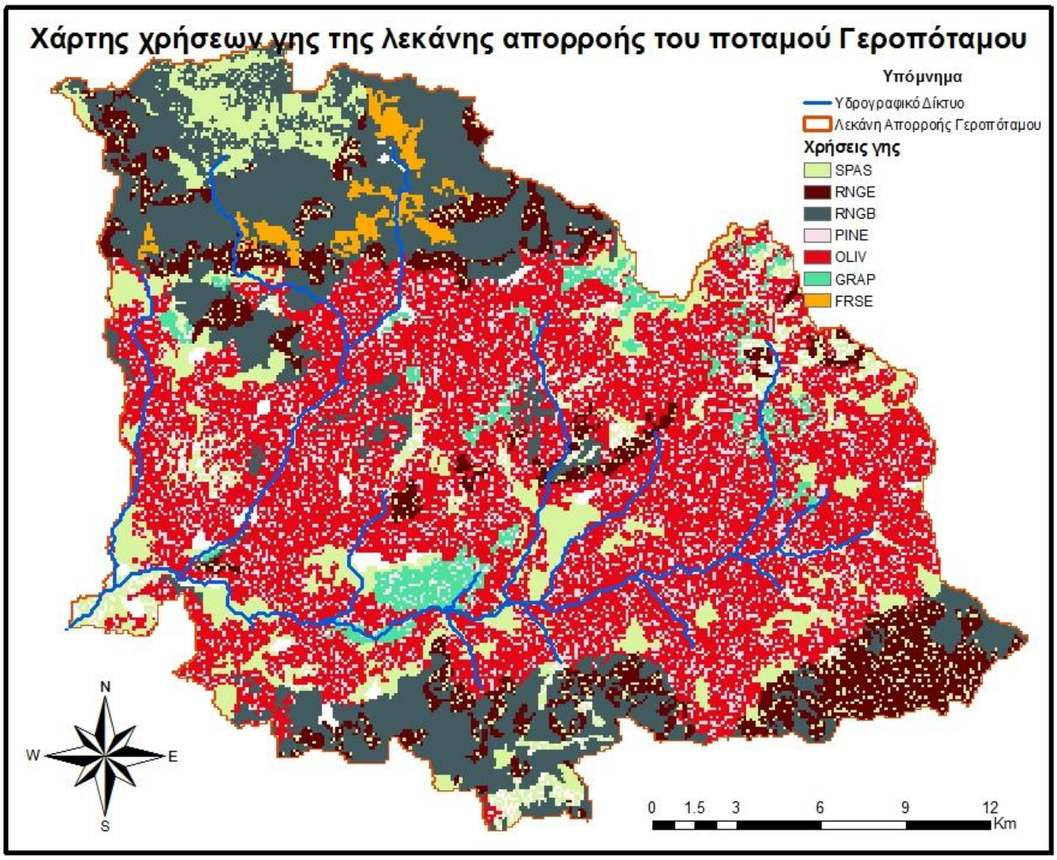
Σε αντίθεση με τη γεωλογία, οι χρήσεις γης υφίστανται μεταβολές, ωστόσο, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας θεωρούνται μηδαμινές και δεν λαμβάνονται υπόψη. Οι κυριότερες καλλιέργειες στη λεκάνη απορροής του Γεροπόταμου, όπως αναλύθηκε και στην ενότητα 3.2.10., είναι τα ελαιόδεντρα και τα αμπέλια που καταλαμβάνουν περίπου το 49 και 9% αντίστοιχα της συνολικής έκτασης της λεκάνης απορροής. Θεωρούμε ότι οι καλλιεργήσιμες εκτάσεις καθώς επίσης και οι τύποι και μέθοδοι καλλιέργειας έχουν παραμείνει αμετάβλητες καθόλο το χρονικό διάστημα μοντελοποίησης.

Οι χάρτες που παρέχονται από το CORINE περιγράφουν τα είδη κάλυψης της γης με διαχωρισμό σε 44 υποκατηγορίες, οι οποίες ομαδοποιούνται σε τρία επίπεδα ονοματολογίας (EEA-ETC/TE, 2002, ETC, 2005). Το SWAT, όμως, δεν μπορεί να λάβει απ' ευθείας υπόψη του την ονοματολογία του CORINE καθότι διαθέτει δικούς του κωδικούς κατηγοριοποίησης των τύπων εδαφοκάλυψης. Οι κατηγορίες του CORINE αντιστοιχήθηκαν σε κατηγορίες της βάσης δεδομένων του μοντέλου και προέκυψαν οι εξής βασικοί τύποι εδαφοκάλυψης στη λεκάνη που απεικονίζονται στον Χάρτη 4.3:

- οι θερινοί βοσκότοποι (SPAS),

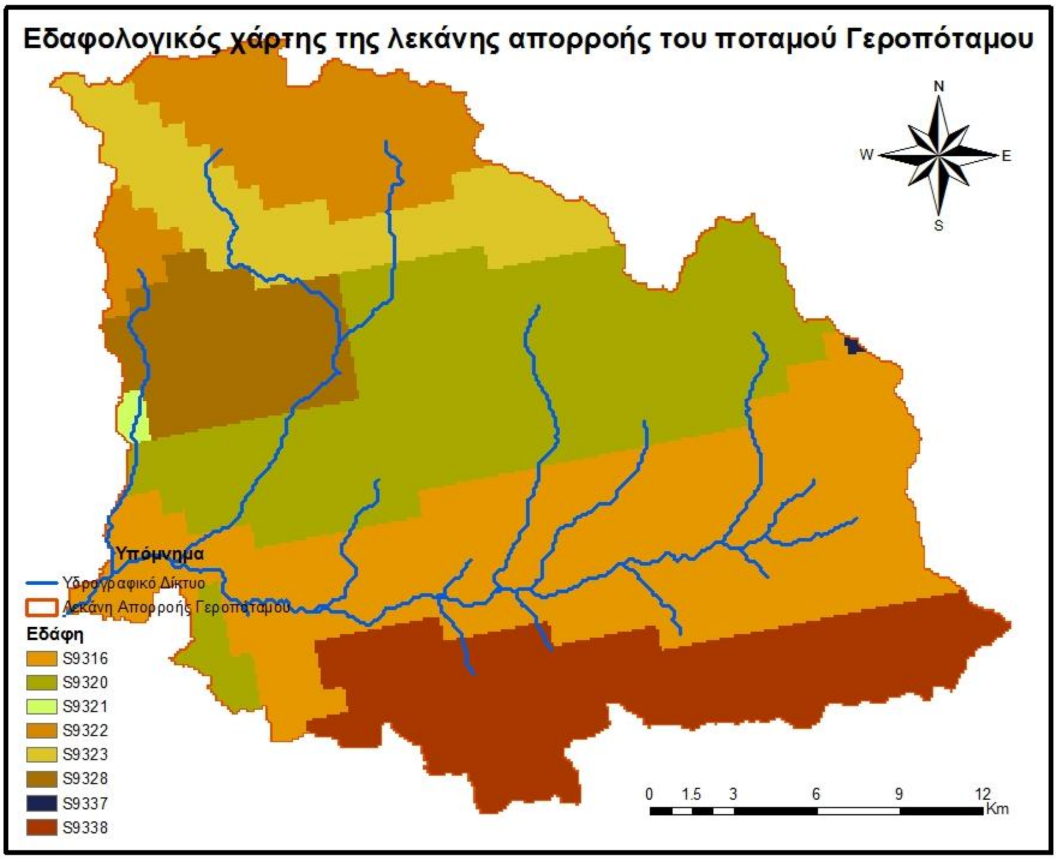
- η αγρωστώδης βλάστηση (RNGE),
- η φρυγανώδης βλάστηση (RNGB) και
- η καλλιεργήσιμη γη που καλύπτει το 58% της λεκάνης και φιλοξενεί τις δύο βασικές καλλιέργειες των ελαιόδεντρων (OLIV) και των αμπελιών (PINE).

Η φρυγανώδης και αγρωστώδης βλάστηση καλύπτουν σε σύνολο το 32%, ενώ οι βοσκότοποι το 10% της συνολικής έκτασης της λεκάνης.



Χάρτης 4.3 : Χάρτης χρήσεων γης της λεκάνης απορροής του ποταμού Γεροπόταμου

Οι τύποι εδάφους της περιοχής μελέτης εξήχθησαν από την βάση δεδομένων SOIL – FAO και συγκεκριμένα από χάρτες κλίμακας 1 : 100000. Η λεκάνη απορροής του Γεροπόταμου διαχωρίζεται σε 6 εδαφολογικούς σχηματισμούς, όπως φαίνεται και στον Χάρτη 4.4. Οι κυριότεροι από αυτούς ανήκουν σε σχηματισμούς φλύσχη, ασβεστόλιθου και αλλουβιακών και καθένας από αυτούς μπορεί να αντιστοιχηθεί, βάσει της γενικότερης γνώσης για την κατείσδυση του νερού, σε ένα αδιαπέρατο, ένα υδροπερατό και ένα ημιδιαπερατό έδαφος αντίστοιχα.



Χάρτης 4.4 : Εδαφολογικός χάρτης της λεκάνης απορροής του ποταμού Γεροπόταμου

4.2.3. Σχηματισμός υδρολογικών μονάδων απόκρισης

Οι υδρολογικές μονάδες απόκρισης (Hydrologic Response Units – HRUs) είναι η γεωγραφική διαίρεση της λεκάνης στην οποία το μοντέλο SWAT πραγματοποιεί όλους τους υπολογισμούς του υδρολογικού κύκλου, της διάβρωσης και του κύκλου των θρεπτικών. Η κλίση εδάφους, η βροχόπτωση και κάποια στοιχεία για τις ιδιότητες των υδατορρευμάτων ορίζονται ωστόσο σε επίπεδο υπολεκάνης. Όλες οι υδρολογικές μονάδες απόκρισης μιας υπολεκάνης έχουν την ίδια κλίση και δέχονται την ίδια βροχόπτωση.

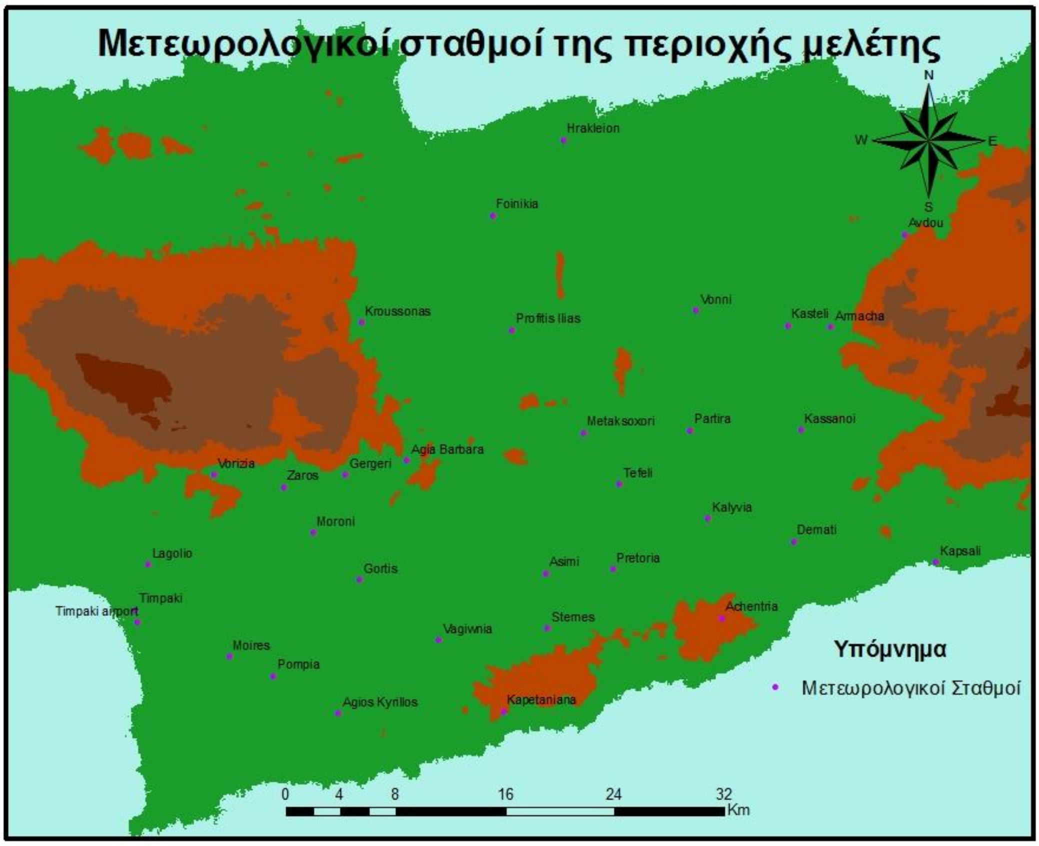
Η υδρολογική μονάδα απόκρισης είναι η έκταση που χαρακτηρίζεται από μοναδικό συνδυασμό τοπογραφικής, εδαφικής και διαχειριστικής πληροφορίας και προσομοιάζει τη χωρική μονάδα αγρού (field), (Muleta and Nicklow, 2005). Ως διαχειριστική πληροφορία εννοείται ο τύπος εδαφοκάλυψης και η διαχείριση που σε συνδυασμό ορίζουν την χρήση γης. Επομένως, η επικάλυψη του χάρτη των υπολεκανών (Χάρτης 4.1), του χάρτη χρήσεων γης (Χάρτης 4.3) και του χάρτη εδάφους (Χάρτης 4.4) παράγει όλους τους συνδυασμούς των ανωτέρω χαρακτηριστικών στη λεκάνη. Τελικά, προέκυψαν 150 υδρολογικές μονάδες απόκρισης.

Υπάρχει, ωστόσο, η δυνατότητα κατά τη δημιουργία των υδρολογικών μονάδων να αγνοηθούν οι χρήσεις γης ή τα εδάφη που καταλαμβάνουν ποσοστό έκτασης της λεκάνης μικρότερο από ένα ποσοστό ορισμένο από τον χρήστη. Τα ποσοστά των εναπομεινάντων τύπων χρήσης γης και εδάφους αυξάνονται αναλογικά ώστε να αθροίσουν σε 100% της ολικής έκτασης της λεκάνης αφού συμπεριλάβουν τους τύπους που αγνοήθηκαν (Di Luzio et al., 2001). Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε κατώφλι για την εν λόγω διαδικασία ίσο με 15%.

4.2.4. Μετεωρολογικά δεδομένα

Η μετεωρολογική πληροφορία στο SWAT αφορά κυρίως στην ημερήσια βροχόπτωση και στην ημερήσια μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία, ενώ στην περίπτωση που απαιτείται ο υπολογισμός της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής με κάποια απαιτητική σε δεδομένα μέθοδο, όπως η Penman - Monteith, απαιτούνται και στοιχεία για την ταχύτητα του ανέμου, την ηλιακή ακτινοβολία και τη σχετική υγρασία. Παρόλο που το μοντέλο SWAT παρέχει την δυνατότητα συμπλήρωσης χρονοσειρών για τις μετεωρολογικές μεταβλητές, στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η εκ των προτέρων και εκτός μοντέλου επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων με συμπληρώσεις χρονοσειρών και στατιστικούς ελέγχους.

Τα διαθέσιμα ημερήσια δεδομένα βροχόπτωσης προέρχονται συνολικά από 31 σταθμούς στην ευρύτερη περιοχή του Νομού Ηρακλείου (Χάρτης 4.5), εκ των οποίων οι 9 εντοπίζονται εντός των ορίων της λεκάνης μελέτης, όπως φαίνεται και στον Χάρτη 4.6. Όσον αφορά στα διαθέσιμα ημερήσια δεδομένα μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας, αυτά προέρχονται από 12 σταθμούς συνολικά στην ευρύτερη περιοχή του Νομού Ηρακλείου (Χάρτης 4.5), εκ των οποίων οι 4 εντοπίζονται εντός των ορίων της λεκάνης μελέτης, όπως φαίνεται και στον Χάρτη 4.6.



Χάρτης 4.5 : Μετεωρολογικοί σταθμοί της ευρύτερης περιοχής του Νομού Ηρακλείου

Χάρτης 4.6 : Μετεωρολογικοί σταθμοί στη λεκάνη απορροής του Γεροπόταμου

Τα στοιχεία των μετεωρολογικών σταθμών της ευρύτερης περιοχής του Νομού Ηρακλείου (συντεταγμένες, υδρολογική λεκάνη, φορέας) παρατίθενται στον Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2 : Μετεωρολογικοί σταθμοί της ευρύτερης περιοχής μελέτης του Νομού Ηρακλείου

Σταθμός	**Υδρολογική Λεκάνη**	**Γ. Μήκος**	**Γ. Πλάτος**	**ΕΓΣΑ 87 - X**	**ΕΓΣΑ 87 - Y**	**Φορέας**
Αβδού	Αποσελέμη	25° 25' 14.70''	35° 13' 01.00''	629109.4	3897623.9	ΥΕΒ/ΑΜ 201
Αγία Βαρβάρα	Δ. Μεσσαράς	25° 00' 00''	35° 08' 05''	590904.2	3888038.3	ΥΕΒ/ΑΜ 204
Άγιος Κύριλλος	Αστερούσια	24° 54' 45''	34° 58' 44''	583090.2	3870679.2	ΥΕΒ/ΑΜ 59
Αρμάχα	Καστελίου	25° 21'	35° 10'	622745.3	3891957.7	ΥΕΒ/ΑΜ 53
Ασήμι	Α. Μεσσαράς	25° 05' 36''	35° 02' 36''	599519.0	3877992.1	ΥΕΒ/ΑΜ 58
Αχεντριά	Α. Μεσσαράς	25° 13' 29''	34° 59' 29''	611574.1	3872370.3	ΥΕΒ/ΑΜ 377
Βαγιωνιά	Δ. Μεσσαράς	25° 00' 03''	35° 00' 50''	591114.6	3874638.0	ΥΕΒ/ΑΜ 375
Βόννη	Καρτερού	25° 14' 48''	35° 11' 42''	613294.5	3894977.3	ΥΕΒ/ΑΜ 202
Βορίζια	Δ. Μεσσαράς	24° 50' 48''	35° 09' 01''	576919.4	3889634.0	ΥΕΒ/ΑΜ 50
Γέργερη	Δ. Μεσσαράς	24° 57'	35° 08'	586350.2	3887839.7	ΥΕΒ/ΑΜ 51
Γόρτυς	Δ. Μεσσαράς	24° 56' 49''	35° 03' 48''	586145.6	3880073.7	ΥΕΒ/ΑΜ 357
Δεμάτι	Α. Μεσσαράς	25° 17' 30''	35° 01' 55''	617626.1	3876945.2	ΥΕΒ/ΑΜ 56
Ζαρός	Δ. Μεσσαράς	24° 54'	35° 08'	581794.6	3887797.4	ΕΜΥ/ΑΜ 761
Ηράκλειο	Ηρακλείου	25° 10' 00''	35° 19' 24''	605843.6	3909122.5	ΕΜΥ/16754
Καλύβια	Α. Μεσσαράς	25° 13' 40''	35° 03' 29''	611762.1	3879767.5	ΥΕΒ/ΑΜ 378
Καπετανιανά	Α. Μεσσαράς	25° 02' 30''	34° 57' 32''	594904.1	3868576.4	ΥΕΒ/ΑΜ 376
Κασσάνοι	Α. Μεσσαράς	25° 18' 46''	35° 06' 13''	619447.4	3884918.8	ΥΕΒ/ΑΜ 57
Καστέλι	Καστελίου	25° 19' 00''	35° 10' 24''	619699.6	3892656.4	ΕΜΥ/16760
Καψάλοι	Βιαννού	25° 24'	35° 00'	627558.8	3873535.5	ΥΕΒ/ΑΜ 633
Κρουσώνας	Δ. Μεσσαράς	24° 58' 58''	35° 13' 50''	589230.0	3898651.3	ΥΕΒ/ΑΜ 200
Λαγολιό	Δ. Μεσσαράς	24° 47'	35° 06'	571194.2	3884010.7	ΥΕΒ/ΑΜ 374
Μεταξοχώρι	Α. Μεσσαράς	25° 08' 32''	35° 07' 48''	603868.2	3887654.0	ΥΕΒ/ΑΜ 366
Μοίρες		24° 50' 04''	35° 01' 47''	575918.0	3876254.5	meteo.gr
Μορόνι	Δ. Μεσσαράς	24° 55'	35° 06'	583347.2	3884114.4	ΥΕΒ/ΑΜ 382
Πάρτηρα	Α. Μεσσαράς	25° 13' 34''	35° 07' 04''	611528.6	3886389.4	ΥΕΒ/ΑΜ 379
Πόμπια	Δ. Μεσσαράς	24° 52'	35° 00' 41''	578875.2	3874246.3	ΥΕΒ/ΑΜ 60
Πραιτώρια	Α. Μεσσαράς	25° 08' 47''	35° 02' 15''	604365.8	3877399.5	ΥΕΒ/ΑΜ 359
Προφήτης Ηλίας	Γιοφύρου	25° 06' 00''	35° 12' 23''	599927.3	3896082.9	ΥΕΒ/ΑΜ 203
Στέρνες	Α. Μεσσαράς	25° 05' 14''	35° 00' 27''	599004.9	3874011.9	ΥΔΕ/ΑΜ Β176
Τεφέλι	Α. Μεσσαράς	25° 09' 46''	35° 05' 31''	605790.4	3883455.0	ΥΕΒ/ΑΜ 54
Τυμπάκι	Δ. Μεσσαράς	24° 46'	35° 04' 20''	569698.8	3880918.2	ΥΕΒ/ΑΜ 480
Φοινικιά	Δ. Μεσσαράς	25° 06'	35° 17'	599832.8	3904616.7	ΥΕΒ/ΑΜ 325
Φορείς :	ΥΕΒ : Υπηρεσία Εγγείων Βελτιώσεων					
	ΕΜΥ : Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία					

Τα στοιχεία των βροχομετρικών σταθμών, καθώς και το μέσο ετήσιο ύψος υετού για το διάστημα προσομοίωσης (1955 – 2004) παρατίθενται στον Πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.3 : Στοιχεία για τους σταθμούς βροχόπτωσης της ευρύτερης περιοχής του Νομού Ηρακλείου

α/α	Βροχομετρικός Σταθμός	Υψόμετρο (m)	Υδρολογικό Έτος	Μέσο Ετήσιο Ύψος Υετού (mm)
1	Αβδού	481	1973 – 1995	826.6
2	Αγία Βαρβάρα	620	1973 – 1995	981.0
3	Άγιος Κύριλλος	446	1973 – 1995	544.9
4	Αρμάχα	439	1973 – 1995	819.2
5	Ασήμι	270	1973 – 1995	610.5
6	Αχεντριά	723	1973 – 2005	715.8
7	Βαγιωνιά	195	1973 – 2005	536.3
8	Βόννη	304	1973 – 1995	763.1
9	Βορίζια	538	1973 – 2005	1182.3
10	Γέργερη	450	1973 – 1995	878.9
11	Γόρτυς	155	1973 – 1995	568.1
12	Δεμάτι	293	1973 – 1995	443.7
13	Ζαρός	311	1973 – 1995	799.2
14	Ηράκλειο	94	1955 – 2004	482.8
15	Καλύβια	207	1973 – 2005	601.3
16	Καπετανιανά	719	1973 – 2005	686.2
17	Κασσάνοι	289	1973 – 1995	585.0
18	Καστέλι	367	1973 – 1995	675.0
19	Καψάλοι	25	1987 – 1995	428.2
20	Κρουσώνας	527	1973 – 1995	1049.0
21	Λαγολιό	106	1973 – 2005	574.7
22	Μεταξοχώρι	441	1973 – 1995	726.3
23	Μορόνι	413	1973 – 2005	709.5
24	Πάρτηρα	426	1973 – 2005	679.3
25	Πόμπια	169	1973 – 1995	504.3
26	Πραιτώρια	221	1973 – 1995	555.3
27	Προφήτης Ηλίας	292	1973 – 1995	770.1
28	Στέρνες	362	1989 – 1993	536.3
29	Τεφέλι	395	1973 – 1995	709.6
30	Τυμπάκι	14	1974 – 1979	488.9
31	Φοινικιά	79	1973 – 1995	718.5

Τα στοιχεία των σταθμών θερμοκρασίας, καθώς και η μέση ετήσια μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία για το διάστημα προσομοίωσης (1955 – 2004) παρατίθενται στους Πίνακες 4.4 και 4.5 αντίστοιχα.

Πίνακας 4.4 : Στοιχεία για τους σταθμούς θερμοκρασίας της ευρύτερης περιοχής του Νομού Ηρακλείου

α/α	Μετεωρολογικός Σταθμός	Υψόμετρο (m)	Χρονοσειρά
1	Αβδού	481	9/1/1991 – 8/31/1995
2	Γέργερη	450	9/1/1991 – 8/31/1995
3	Ζαρός	311	10/1/1976 – 12/31/2004
4	Ηράκλειο	94	7/1/1957 – 2/1/2012
5	Καστέλι	367	1/1/1973 – 2/1/2012
6	Καψάλοι	25	9/1/1991 – 8/31/1995
7	Κρουσώνας	527	9/1/1991 – 8/31/1995
8	Μεταξοχώρι	441	10/1/2008 – 12/31/2011
9	Μοίρες	64	7/1/2009 – 12/31/2011
10	Πόμπια	169	9/1/1991 – 8/31/1995
11	Πραιτώρια	221	9/1/1991 – 8/31/1995
12	Φοινικιά	79	9/1/1991 – 8/31/1995

Πίνακας 4.5 : Μέση ετήσια μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία για τους σταθμούς θερμοκρασίας της ευρύτερης περιοχής του Νομού Ηρακλείου

α/α	Μετεωρολογικός Σταθμός	Μέση Ετήσια T_{max} (^{o}C)	Μέση Ετήσια T_{min} (^{o}C)
1	Αβδού	22.6	8.0
2	Γέργερη	21.7	13.7
3	Ζαρός	22.0	12.5
4	Ηράκλειο	21.9	14.8
5	Καστέλι	20.6	11.4
6	Καψάλοι	23.1	16.6
7	Κρουσώνας	22.4	13.3
8	Μεταξοχώρι	23.1	16.6
9	Μοίρες	23.7	12.0
10	Πόμπια	24.6	13.0
11	Πραιτώρια	22.9	8.8
12	Φοινικιά	23.7	13.2

Δεδομένου ότι το διάστημα προσομοίωσης είναι αρκετά μεγάλο, οι μετεωρολογικοί σταθμοί δεν διέθεταν ολοκληρωμένες χρονοσειρές βροχόπτωσης και θερμοκρασίας για όλο το διάστημα προσομοίωσης (1955 – 2004). Επομένως, πραγματοποιήθηκε συμπλήρωση των δεδομένων τόσο της βροχόπτωσης όσο και της θερμοκρασίας, ώστε να παραχθούν χρονοσειρές που καλύπτουν όλο το χρονικό διάστημα προσομοίωσης (9/1/1955 – 8/31/2004). Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος συμπλήρωσης δεδομένων Normal Ratio Method με έναν σταθμό μέσω της οποίας πραγματοποιήθηκε αναγωγή των δεδομένων σε διαφορετικό υψόμετρο. Η αναγωγή αυτή πραγματοποιήθηκε μέσω της εύρεσης των συσχετίσεων μεταξύ των διαφόρων σταθμών και η συμπλήρωση των χρονοσειρών έγινε βάσει των δεδομένων των σταθμών με την καλύτερη συσχέτιση με χρήση της ακόλουθης εξίσωσης:

$$P_{X_{daily}} = \frac{N_{X\ (annual)}}{N_{A\ (annual)}} \cdot P_{A_{daily}}$$

όπου:

N : η ετήσια βροχόπτωση και

P : η ημερήσια βροχόπτωση

Τέλος, επειδή στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η χρήση της μεθόδου Penman – Monteith για τον υπολογισμό της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, στο μοντέλο SWAT εισήχθησαν και ημερήσια δεδομένα για την ταχύτητα του ανέμου και την σχετική υγρασία για την χρονική περίοδο 9/1/1955 – 8/31/2004 από τον σταθμό του Καστελίου. Η μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου καθώς και η μέση ετήσια σχετική υγρασία για το χρονικό διάστημα προσομοίωσης (1955 – 2004) παρατίθενται στον Πίνακα 4.6.

Πίνακας 4.6 : Στοιχεία μέσης ετήσιας ταχύτητας ανέμου και σχετικής υγρασίας για την ευρύτερη περιοχή μελέτης

α/α	Μετεωρολογικός Σταθμός	Μέση Ετήσια Ταχύτητα Ανέμου (m/s)	Μέση Ετήσια Σχετική Υγρασία (%)
1	Καστέλι	4.5	69.3

4.2.5. Υδρολογική δίαιτα της λεκάνης απορροής

Οι ανθρώπινες επεμβάσεις στη λεκάνη απορροής είναι σημαντικές μετά το 1980, με την απόληψη ποσοτήτων νερού για διάφορες χρήσεις, οι οποίες προκάλεσαν αλλαγές στην υδρολογική της δίαιτα. Για την αποτελεσματικότερη μοντελοποίηση της υδρολογίας στη λεκάνη απορροής, κρίθηκε αναγκαίος ο διαχωρισμός της περιόδου προσομοίωσης σε τρία επιμέρους χρονικά διαστήματα που ανταποκρίνονται στις αλλαγές που έλαβαν χώρα στην υδρολογική δίαιτα της λεκάνης.

Το πρώτο χρονικό διάστημα εκτείνεται από το 1970 έως και το 1980. Κατά την διάρκεια αυτής της περιόδου θεωρούμε ότι οι ανθρώπινες επεμβάσεις δεν είναι τόσο σημαντικές ώστε να επηρεάσουν το υδρολογικό ισοζύγιο της λεκάνης απορροής. Για τον προσδιορισμό του υδατικού ισοζυγίου αυτής της περιόδου λαμβάνονται υπόψη οι ανάγκες άρδευσης των εκτεταμένων καλλιεργειών καθώς και οι απευθείας απολήψεις από τα υδατορρεύματα (δέσεις).

Το δεύτερο χρονικό διάστημα εκτείνεται από το 1980 έως και το 1990. Κατά την διάρκεια αυτής της περιόδου πραγματοποιήθηκε η ανόρυξη πλήθους γεωτρήσεων που οδήγησε στην αύξηση του αντλούμενου όγκου υπόγειου ύδατος και στη συνακόλουθη έντονη πτώση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα. Πριν την ανόρυξη των γεωτρήσεων, το υδρογεωλογικό σύστημα εκφορτιζόταν κυρίως μέσω πηγών, με σημαντικότερες τις καρστικές πηγές του Βότομου και της Γέργερης. Μέρος των πηγαίων εκφορτίσεων, ανατροφοδοτούσαν στη συνέχεια, την υπόγεια υδροφορία μέσω διηθήσεων κατά τη μετέπειτα διαδρομή τους. Ιδιαίτερα, όμως, μετά το έτος 1984 αφότου ξεκίνησε η εντατική αξιοποίηση του υδροφόρου συστήματος, η εκφόρτιση του συστήματος πραγματοποιούνταν κυρίως μέσω των απολήψεων από τις γεωτρήσεις με αποτέλεσμα το βαθμιαίο στέρεμα των πηγών. Για τον προσδιορισμό του υδατικού ισοζυγίου αυτής της περιόδου λαμβάνονται υπόψη οι ανάγκες άρδευσης των εκτεταμένων καλλιεργειών, οι απευθείας απολήψεις από τα υδατορρεύματα (δέσεις) καθώς και η βαθμιαία μείωση της παροχής των πηγών.

Το τρίτο και τελευταίο χρονικό διάστημα εκτείνεται από το 1990 έως και το 2004. Από το έτος 1990 και μετά, οι πηγές στέρεψαν οριστικά. Ενίοτε τοπικά, ακόμα και σήμερα λόγω της στρωματογραφίας, μετά από έντονες βροχοπτώσεις εμφανίζονται εκροές από τον υδροφορέα στα υδατορρεύματα, μέρος των οποίων στη συνέχεια διηθείται σε κατάντη τμήματά του και τον ανατροφοδοτεί. Για τον προσδιορισμό του υδατικού ισοζυγίου αυτής της περιόδου λαμβάνονται υπόψη οι ανάγκες άρδευσης των εκτεταμένων καλλιεργειών, οι απευθείας απολήψεις από τα υδατορρεύματα (δέσεις) καθώς και ο μηδενισμός της παροχής των πηγών.

Τα ημερήσια διαθέσιμα δεδομένα για τις δέσεις προέρχονται από την Υπηρεσία Εγγείων Βελτιώσεων (Υ.Ε.Β.) του Νομού Ηρακλείου και οι αρδευτικές ανάγκες υπολογίζονται βάσει της εμπειρικής άρδευσης (mm/έτος) στη λεκάνη της Μεσαράς και θεωρούνται σταθερές για όλο το διάστημα προσομοίωσης.

Στο μοντέλο SWAT έχουν εισαχθεί δεδομένα για τις αρδευτικές ανάγκες στη λεκάνη απορροής καθώς και για τις απευθείας απολήψεις από τα υδατορρεύματα (δέσεις). Συγκεκριμένα, ο υπολογισμός της μέσης ημερήσιας κατανομής των απαιτήσεων άρδευσης ανά μήνα, πραγματοποιήθηκε σε επίπεδο υπολεκάνης και ανά είδος καλλιέργειας βάσει της ετήσιας εμπειρικής άρδευσης, της αρδευτικής περιόδου και της καλλιεργήσιμης έκτασης ανά υπολεκάνη. Χρησιμοποιήθηκε ο πίνακας εισαγωγής δεδομένων Water Use (.Wus) και συγκεκριμένα τα πεδία WURCH και WUSHAL για τις δέσεις και την άρδευση αντίστοιχα. Θεωρήθηκε ότι το νερό για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών προέρχεται από τον αβαθή υδροφορέα. Στους ακόλουθους πίνακες, Πίνακες 4.7 – 4.11, παρουσιάζονται τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση των ημερήσιων αρδευτικών αναγκών ανά μήνα και είδος καλλιέργειας καθώς και η ετήσια εκτιμώμενη τιμή ανά υπολεκάνη.

Πίνακας 4.7 : Ετήσια εμπειρική άρδευση ανά καλλιέργεια (Χαρτζουλάκης)

Καλλιέργεια	Εμπειρική άρδευση (mm/έτος)	Εμπειρική άρδευση (m/έτος)
Αμπέλι	540	0.54
Ελιά	244	0.244

Πίνακας 4.8 : Αρδευτική περίοδος ανά καλλιέργεια

Καλλιέργεια	Αρδευτική Περίοδος
Αμπέλι	1/04 - 31/08
Ελιά	1/04 - 30/10

Πίνακας 4.9 : Έκταση ελαιώνων ανά υπολεκάνη στη λεκάνη απορροής του Γεροπόταμου

Λεκάνη απορροής Γεροπόταμου	
Υπολεκάνη	Έκταση ελαιώνων (ha)
3 (75.25%)	201.8
4 (61.80%)	738.5
5 (61.94%)	985.5
6 (73.40%)	2254.4
7 (67.86%)	2476
8 (79.63%)	388.7
9 (73.50%)	62.5
10 (76.90%)	1787.65
11 (75.35%)	1651
12 (31.83%)	1395
13 (60.93%)	1156.49
14 (26.06%)	460
17 (66.98%)	95.8
18 (39.03%)	21.5
20 (100%)	4
21 (76.9%)	1760.4
22 (60.22%)	634.1
23 (100%)	855
24 (64.07%)	583.7
26 (56.05%)	692.7
28 (54.87%)	1457.2
29 (46.61%)	947.6
Σύνολο	20609.54

Πίνακας 4.10 : Έκταση αμπελώνων ανά υπολεκάνη στη λεκάνη απορροής του Γεροπόταμου

Λεκάνη απορροής Γεροπόταμου	
Υπολεκάνη	Έκταση αμπελώνων (ha)
4 (17.66%)	211
5 (17.79%)	283
6 (26.60%)	817.3
8 (20.37%)	99.4
9 (26.50%)	22.5
10 (23.10%)	536.82
11 (24.65%)	540.3
13 (18.62%)	353.5
21 (23.1%)	528.1
22 (16.97%)	178.7
24 (16.87%)	153.7
Σύνολο	3724.32

Πίνακας 4.11 : Ετήσιες απαιτήσεις άρδευσης ανά υπολεκάνη και είδος καλλιέργειας

Ετήσιες απαιτήσεις άρδευσης (Mm^3)		
Υπολεκάνη	Αμπελώνες	Ελαιώνες
3	0.000	0.492
4	1.139	1.802
5	1.528	2.405
6	4.413	5.501
7	0.000	6.041
8	0.537	0.948
9	0.122	0.153
10	2.899	4.362
11	2.918	4.028
12	0.000	3.404
13	1.909	2.822
14	0.000	1.122
17	0.000	0.234
18	0.000	0.052
20	0.000	0.010
21	2.852	4.295
22	0.436	1.547
23	0.000	2.086
24	0.830	1.424
26	0.000	1.690
28	0.000	3.556
29	0.000	2.312
Σύνολο	19.582	50.287

4.3. Βαθμονόμηση του μοντέλου της λεκάνης απορροής του Γεροπόταμου

4.3.1. Παράμετροι βαθμονόμησης

Η βαθμονόμηση (calibration) ενός μοντέλου επιτυγχάνεται με μεταβολή των τιμών των παραμέτρων του, ώστε να υπάρχει ικανοποιητική σύγκλιση μεταξύ των προβλέψεων του μοντέλου και των αντίστοιχων παρατηρήσεων. Συνήθως οι μεταβολές αφορούν στις πιο ευαίσθητες παραμέτρους και σε εκείνες που εμπεριέχουν την μεγαλύτερη αβεβαιότητα, δηλαδή στις παραμέτρους για τις οποίες δεν υφίσταται ικανοποιητική φυσική ερμηνεία ή ικανοποιητική μέτρησή τους στη φύση. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η χειροκίνητη βαθμονόμηση του μοντέλου με μεταβολή σε παραμέτρους που παίζουν τον σπουδαιότερο ρόλο στην προσομοίωση των υδρολογικών μεγεθών, ενώ ταυτόχρονα δεν υφίσταται συγκεκριμένη γνώση για το μέγεθός τους. Οι εν λόγω παράμετροι είναι άλλωστε γνωστές για την ευαισθησία τους στην επιστημονική κοινότητα υδρολογικής προσομοίωσης με το SWAT, όπως έχει διερευνηθεί και αποδειχτεί σε πλήθος εργασιών πλέον (π.χ. Arabi et al., 2008; Lenhart et al., 2002; Shanti et al., 2001; Van Griensven et al., 2006). Στη χειροκίνητη βαθμονόμηση συντελείται μία μεταβολή τη φορά που συνοδεύεται από γραφική και στατιστική σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων αποτελεσμάτων στο ποτάμι (trial and error process). Παρόλο που είναι υποκειμενική και χρονοβόρα, η χειροκίνητη βαθμονόμηση αποτελεί έναν αποτελεσματικό τρόπο να ελεγχθεί ο τρόπος μεταβολής των πιο ευαίσθητων και αβέβαιων παραμέτρων (Engel et al., 2007).

Ο αριθμός καμπύλης (Curve Number - CN) που διέπει την επιφανειακή απορροή και η διαθέσιμη υγρασία του εδάφους (Available Water Capacity - AWC), που καθορίζει την χωρητικότητά του σε νερό και έμμεσα διέπει όλες τις συνιστώσες του υδρολογικού κύκλου, έχουν βρεθεί ότι είναι οι πιο ευαίσθητες παράμετροι που καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την απορροή και μετέπειτα τη στερεοπαροχή και τη μεταφορά θρεπτικών.

Οι αρχικές τιμές των αριθμών καμπύλης CN για τους διάφορους συνδυασμούς χρήσης γης και εδαφών, αντλήθηκαν από τους πίνακες της SCS (USDA, Soil

Conservation Service, 1972) και μεταβλήθηκαν κατά την διαδικασία της βαθμονόμησης. Οι παράμετροι της κορεσμένης υδραυλικής αγωγιμότητας (SOL_K) και της διαθέσιμης υγρασίας (SOL_AWC) του εδάφους καθορίστηκαν σε αναλογία με την υδρολογική ομάδα στην οποία ανήκει το κάθε έδαφος. Η αγωγιμότητα αυξάνει με την περατότητα, σε αντίθεση με την διαθέσιμη υγρασία που μειώνεται.

Το SWAT κατηγοριοποιεί το υπόγειο νερό σε αυτό που κινείται στον επιφανειακό, ελεύθερο υδροφορέα (αβαθή) και επανατροφοδοτεί τα επιφανειακά υδατορρεύματα και σε εκείνο που εισέρχεται στον βαθύ υδροφορέα και τροφοδοτεί τα επιφανειακά υδατορρεύματα εκτός λεκάνης απορροής. Στη δεύτερη περίπτωση, το νερό προέρχεται από κατείσδυση μέρους του διαθέσιμου νερού του αβαθούς υδροφορέα, που τελικά δεν επιστρέφει στα επιφανειακά νερά της λεκάνης και χάνεται οριστικά από το σύστημα. Η παράμετρος που εκφράζει αυτό το ποσοστό (RCHRG_DP) μεταβλήθηκε ανάλογα με το είδος του εδάφους, υποδηλώνοντας το ποσοστό του νερού που βρίσκεται στον αβαθή υδροφορέα στο εκάστοτε χρονικό βήμα και εισέρχεται στον βαθύ χωρίς να επιστρέφει στη λεκάνη. Οι ρυθμίσεις των αρχείων υπόγειων νερών, αν και χωρίς ιδιαίτερη φυσική σημασία, επηρεάζουν σε κάποιο βαθμό την υδρολογική και ποιοτική προσομοίωση. Πάνω από τον επιφανειακό υδροφορέα βρίσκεται η ριζική ζώνη και οι παράμετροι που ενδιαφέρουν είναι κυρίως αυτές που ρυθμίζουν την κίνηση και ποσότητα του νερού από τον υδροφορέα στη ζώνη αυτή καθώς και την γενικότερη συνεισφορά του υπόγειου νερού στην παροχή του ποταμού.

Ο παράγοντας 'άλφα' (ALPHA_BF), που είναι η σταθερά ύφεσης της παροχής του υπόγειου νερού, εκφράζει την ανταπόκριση της υπόγειας ροής σε μεταβολές της επαναπλήρωσης και κυμαίνεται από 0 έως 1 με τις μικρές τιμές να εκφράζουν αργή ανταπόκριση.

Δύο ακόμα παράμετροι για τις οποίες κρίνεται σκόπιμο να γίνει μνεία είναι ο συντελεστής επανατροφοδότησης (GW_REVAP) και το όριο επιστρέφουσας ροής (GWQMIN). Η πρώτη είναι ο συντελεστής που ρυθμίζει τη ροή του νερού από τον αβαθή υδροφορέα προς τη ριζική ζώνη λόγω έλλειψης εδαφικής υγρασίας και πρόσληψης νερού από τα φυτά με βαθιές ρίζες. Κυμαίνεται μεταξύ 0.02 και 0.2 και μικρές τιμές περιορίζουν το φαινόμενο. Η δεύτερη εκφράζει το όριο νερού στον αβαθή υδροφορέα (mm) που απαιτείται για ύπαρξη επιστρέφουσας ροής. Όταν το βάθος του νερού στον αβαθή υδροφορέα ξεπεραστεί, επιτρέπεται ροή προς το υδατόρρευμα.

Οι τιμές του Πίνακα 4.12 προέκυψαν εμπειρικά κατά την διάρκεια της βαθμονόμησης, ώστε να αποδοθούν στους διαφόρους τύπους εδάφους ιδιότητες που συνάδουν με την γενικότερη και αναμενόμενη σχετική συμπεριφορά τους και να επιτευχθεί η ικανοποιητική προσομοίωση της συμπεριφοράς ολόκληρης της λεκάνης απορροής.

Πίνακας 4.12 : Παράμετροι βαθμονόμησης του μοντέλου SWAT και τυπικό εύρος στο μοντέλο αλλά και στην εξεταζόμενη λεκάνη απορροής

α/α	Παράμετρος	Περιγραφή	Τυπικό εύρος στο SWAT	Εύρος τιμών στη λεκάνη απορροής
Πίνακας εισαγωγής δεδομένων : Soils (.Sol)				
1	SOL_AWC	Διαθέσιμη υγρασία Available water capacity in soil layer (mm H_2O/mm εδάφους)	0 - 1	0.25 – 0.90
2	SOL_K	Κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα Saturated hydraulic conductivity (mm/h)	0 - 2000	5 - 20
3	SOL_Z	Βάθος εδάφους Soil depth (mm)	0 - 3500	100 - 300
Πίνακας εισαγωγής δεδομένων : Groundwater (.Gw)				
4	GWQMIN	Ελάχιστο βάθος νερού στον αβαθή υδροφορέα για να επιτραπεί η κατείσδυση Threshold depth of water in the shallow aquifer for percolation to occur (mm)	0 - 5000	300 - 5000
5	GW_REVAP	Συντελεστής επανατροφοδότησης υπ. νερού Groundwater revap coefficient	0.02 - 0.2	0.10
6	GW_DELAY	Συντελεστής καθυστέρησης υπ. νερού Groundwater delay (days)	0 - 500	0 - 20
7	RCHRG_DP	Ποσοστό ποσότητας νερού που από τον αβαθή κατεισδύει στον βαθύ υδροφορέα Deep aquifer percolation fraction	0 - 1	0 – 0.6
8	ALPHA_BF	Παράγοντας ύφεσης της παροχής του υπ. νερού Baseflow alpha factor (days)	0 - 1	0.00008 – 0.11
9	REVAPMN	Ελάχιστο βάθος νερού στον αβαθή υδροφορέα για να επιτραπεί η επανατροφοδότηση Threshold depth of water in the shallow aquifer for revap to occur (mm)	0 - 500	10
Πίνακας εισαγωγής δεδομένων : Subbasin (.Sub)				
10	TLAPS	Θερμοβαθμίδα Temperature lapse rate (^oC/km)	0 - 50	4.2
Πίνακας εισαγωγής δεδομένων : HRU (.Hru)				
11	ESCO	Soil evaporation compensation factor	0 - 1	0.6
12	EPCO	Plant uptake compensation factor	0 - 1	0.9
13	HRU_SLP	Average slope steepness (m/m)	0 - 0.6	0.37

Πίνακας εισαγωγής δεδομένων : Management (.Mgt)				
14	CN2	Initial SCS runoff curve number for moisture condition II	35 - 98	35

4.3.2. Αποτελέσματα βαθμονόμησης

Η επιτυχία προσομοίωσης του μοντέλου SWAT ελέγχθηκε τόσο με γραφική όσο και με στατιστική σύγκριση των διαθέσιμων μετρήσεων παροχής με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του μοντέλου καθόλη την διαδικασία της βαθμονόμησης με μεταβολή στις τιμές των παραμέτρων της προηγούμενης ενότητας. Η διαδικασία ξεκίνησε από την ανάντη θέση με διαθέσιμες μετρήσεις (παροχή των πηγών Βότομος και Γέργερη καθώς και των χειμάρρων Κουτσουλίδη και Λιθαίου) και ολοκληρώθηκε στην έξοδο της λεκάνης (παροχή του χειμάρρου Γεροπόταμου). Όπως έχει ήδη αναλυθεί και στην ενότητα 4.2.5., το χρονικό διάστημα προσομοίωσης έχει διαιρεθεί σε τρία επιμέρους χρονικά διαστήματα λόγω των έντονων μεταβολών στην υδρολογική δίαιτα της λεκάνης απορροής που οφείλονται σε ανθρώπινες παρεμβάσεις. Οι διαθέσιμες χρονοσειρές με τις μετρήσεις της παροχής διαιρέθηκαν σε δύο μέρη για καθένα από τα τρία αυτά χρονικά διαστήματα, με το δεύτερο ανεξάρτητο σετ δεδομένων να χρησιμοποιείται για την επαλήθευση του μοντέλου.

Τα διαθέσιμα δεδομένα παροχής προέρχονται από την Υπηρεσία Εγγείων Βελτιώσεων (Υ.Ε.Β.) του Νομού Ηρακλείου. Η χρονοσειρά των διαθέσιμων δεδομένων παροχής στη λεκάνη του Γεροπόταμου καλύπτει το χρονικό διάστημα από το υδρολογικό έτος 1971 – 1972 μέχρι και το υδρολογικό έτος 1994 – 1995 για τις ημερήσιες παροχές στους χείμαρρους Γεροπόταμο, Κουτσουλίδη και Λιθαίο. Όσον αφορά στις μηνιαίες παροχές των πηγών Βότομος και Γέργερη, η χρονοσειρά των διαθέσιμων δεδομένων καλύπτει το χρονικό διάστημα από το υδρολογικό έτος 1970 – 1971 μέχρι και το υδρολογικό έτος 1984 – 1985. Μετά το έτος 1984, οπότε και άρχισε η εντατική αξιοποίηση του υδροφόρου συστήματος, οι πηγές αυτές βαθμιαία στέρευαν, λόγω της ταπείνωσης της υδροστατικής στάθμης του υδροφορέα σε επίπεδα κάτω από την κοίτη των υδρορευμάτων. Μετά το έτος 1990 οι πηγές αυτές στέρεψαν οριστικά. Ενίοτε τοπικά, ακόμα και σήμερα λόγω της στρωματογραφίας, μετά από έντονες βροχοπτώσεις εμφανίζονται εκροές από τον υδροφορέα στα υδατορρεύματα μέρος των οποίων στη συνέχεια διηθείται σε κατάντη τμήματά του και τον ανατροφοδοτεί.

Μεταξύ των διαφόρων στατιστικών δεικτών για την αξιολόγηση της προγνωστικής ικανότητας των μοντέλων συγκαταλέγεται ο δείκτης αποδοτικότητας Nash - Sutcliffe (**N**ash **S**utcliffe **E**fficiency - NSE), η ποσοστιαία απόκλιση (**P**ercent **BIAS** - PBIAS), ο λόγος του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (**R**oot **M**ean **S**quare **E**rror – RMSE) καθώς και ο λόγος του μέσου τετραγωνικού σφάλματος προς την τυπική απόκλιση των μετρήσεων (**R**oot Mean Square Error – **S**tandard deviation of measured data **R**atio - RSR). Οι δείκτες αυτοί υπολογίστηκαν κατά την σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών παροχής στις θέσεις Βότομος, Γέργερη, Γεροπόταμος, Κουτσουλίδης και Λιθαίος.

- Δείκτης NSE

Ο δείκτης NSE είναι μία κανονικοποιημένη στατιστική έκφραση που εκτιμά την σύγκλιση της προσομοιωμένης με την παρατηρημένη χρονοσειρά και εκφράζεται από την εξίσωση (Nash and Sutcliffe, 1970):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Q_{obs,i} - Q_{sim,i}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs}\right)^2}$$

όπου,

Q_{sim} : η προσομοιωμένη χρονοσειρά,

Q_{obs} : η παρατηρημένη χρονοσειρά,

$\bar{Q}_{obs}$: ο αριθμητικός μέσος όρος της παρατηρημένης χρονοσειράς και

n : το μήκος της χρονοσειράς

Η βέλτιστη και ταυτόχρονα μέγιστη τιμή του δείκτη είναι η μονάδα και λαμβάνεται όταν οι παρατηρημένες τιμές ταυτίζονται πλήρως με τις προσομοιωμένες. Ο δείκτης δεν έχει κάτω όριο, δηλαδή λαμβάνει και αρνητικές τιμές. Επίσης, εκτός της απόκλισης των δύο χρονοσειρών, λαμβάνει υπόψη του και τη διασπορά του δείγματος με χρήση της απόκλισης των παρατηρημένων τιμών από το μέσο όρο τους, στον παρονομαστή.

- Δείκτης PBIAS

Ο δείκτης PBIAS μετρά την μέση τάση των προσομοιωμένων τιμών να είναι μεγαλύτερες ή μικρότερες απ' ότι οι αντίστοιχες παρατηρημένες και έχει την δυνατότητα να καταδεικνύει ξεκάθαρα την μικρή αποδοτικότητα ή προγνωστική ικανότητα του μοντέλου (Gupta et al., 1999). Η βέλτιστη τιμή του δείκτη είναι το 0, με κοντινές τιμές σε αυτό να προδίδουν επιτυχή και ακριβή προσομοίωση, ενώ οι θετικές τιμές υποδηλώνουν ότι το μοντέλο έχει την τάση να υποεκτιμά τις πραγματικές τιμές των μεταβλητών και οι αρνητικές το αντίστροφο (Gupta et al., 1999). Ο δείκτης έχει τη μορφή της ακόλουθης εξίσωσης:

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Q_{obs,i} - Q_{sim,i}\right) * 100}{\sum_{i=1}^{n}\left(Q_{obs,i}\right)}$$

όπου,

$PBIAS$: η ποσοστιαία απόκλιση μεταξύ των δεδομένων,

Q_{sim} : η προσομοιωμένη χρονοσειρά και

Q_{obs} : η παρατηρημένη χρονοσειρά

- Δείκτες RMSE και RSR

Το μέσο υπολειμματικό σφάλμα (RMSE) είναι από τους πιο συχνά χρησιμοποιούμενους στατιστικούς δείκτες με τις μικρές τιμές να υποδηλώνουν καλή αποδοτικότητα του μοντέλου (Moriasi et al., 2007). Ωστόσο, οι τιμές που υπολογίζει η στατιστική αυτή φόρμουλα εξαρτώνται από την κλίμακα των μεγεθών στα οποία αναφέρεται. Συνεπώς, η διαίρεση με την τυπική απόκλιση των παρατηρήσεων διαμορφώνει τον δείκτη RSR, που είναι πιο κατατοπιστικός μιας και ενσωματώνει μια διαδικασία κανονικοποίησης. Ο δείκτης RSR μεταβάλλεται από την τιμή 0, η οποία αντιστοιχεί σε μηδενική τιμή του RMSE ή μηδενική απόκλιση των σφαλμάτων και επομένως τέλεια προσομοίωση, έως μία μεγάλη θετική τιμή. Όσο μικρότερο είναι το RSR, τόσο μικρότερο το RMSE, και επομένως τόσο καλύτερη η προγνωστική ικανότητα του μοντέλου. Ο δείκτης RSR υπολογίζεται από τον λόγο του RMSE και της τυπικής απόκλισης των δεδομένων της παρατηρημένης χρονοσειράς ($STDEV_{obs}$), όπως φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Q_{obs,i} - Q_{sim,i}\right)^2}{n}}}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs}\right)^2}{n}}}$$

Ο συντελεστής προσδιορισμού (R^2) εκφράζει τον βαθμό συγγραμικότητας ανάμεσα στην προσομοιωμένη και παρατηρημένη χρονοσειρά. Ο συντελεστής κυμαίνεται από 0 έως 1, με τις υψηλές τιμές να υποδηλώνουν μικρή απόκλιση σφάλματος, ενώ τυπικές τιμές μεγαλύτερες του 0.5 θεωρούνται αποδεκτές (Shanti et al., 2001).

Παρόλο που οι αποδεκτές τιμές των εν λόγω δεικτών εξαρτώνται πάντα από το εκάστοτε πρόβλημα, σύμφωνα με τους Moriasi et al. (2007), η προγνωστική ικανότητα του μοντέλου σε μηνιαίο βήμα μπορεί να κριθεί επιτυχής όταν ο δείκτης NSE είναι μεγαλύτερος από 0.50, ο RSR μικρότερος από 0.70 και ο PBIAS δηλώνει ποσοστιαία απόκλιση μεταξύ αθροίσματος προσομοιωμένων και παρατηρημένων τιμών, ± 25% για την παροχή. Η ιδανική τιμή του δείκτη RMSE είναι το μηδέν.

Οι στατιστικοί δείκτες που υπολογίστηκαν με σύγκριση των μηνιαίων χρονοσειρών παροχής στις θέσεις Βότομος, Γέργερη, Γεροπόταμος, Κουτσουλίδης και Λιθαίος, συνοψίζονται στον Πίνακα 4.13, ενώ οι στατιστικοί δείκτες που υπολογίστηκαν με σύγκριση των ημερήσιων χρονοσειρών παροχής στις θέσεις Γεροπόταμος, Κουτσουλίδης και Λιθαίος, συνοψίζονται στον Πίνακα 4.14.

Πίνακας 4.13 : Στατιστικά κριτήρια σύγκρισης μηνιαίων παρατηρημένων και προσομοιωμένων χρονοσειρών παροχής στις διάφορες θέσεις

Θέση	Μεταβλητή (διάστημα με διαθέσιμα δεδομένα)		Στατιστικοί Δείκτες			
			NSE	PBIAS (%)	RMSE	RSR
Βότομος	1970 - 1980	Περίοδος βαθμονόμησης	0.93	0.7	0.023	0.27
		Περίοδος επαλήθευσης	0.45	-5.0	0.128	0.74
	1980 - 1985	Περίοδος βαθμονόμησης	0.97	10.3	0.015	0.16
		Περίοδος επαλήθευσης	0.53	-3.5	0.023	0.69
Γέργερη	1970 - 1980	Περίοδος βαθμονόμησης	0.83	-7.3	0.023	0.42
		Περίοδος επαλήθευσης	0.56	47.8	0.025	0.66
	1980 - 1985	Περίοδος βαθμονόμησης	0.73	-2.1	0.027	0.52
		Περίοδος επαλήθευσης	0.59	-31.6	0.043	0.64
Γεροπόταμος	1971 - 1980	Περίοδος βαθμονόμησης	0.59	11.4	1.013	0.64
		Περίοδος επαλήθευσης	0.32	53.4	1.268	0.82
	1980 - 1990	Περίοδος βαθμονόμησης	0.84	11.3	0.756	0.40
		Περίοδος επαλήθευσης	0.44	45.4	1.013	0.75
	1990 - 1995	Περίοδος βαθμονόμησης	0.43	23.6	0.509	0.76
		Περίοδος επαλήθευσης	-0.60	-140.8	1.381	1.26
Κουτσουλίδης	1971 - 1980	Περίοδος βαθμονόμησης	0.43	15.9	0.532	0.76
		Περίοδος επαλήθευσης	0.41	39.7	0.812	0.77
	1980 - 1990	Περίοδος βαθμονόμησης	0.34	24.6	0.761	0.81
		Περίοδος επαλήθευσης	0.24	13.3	1.011	0.87
	1990 - 1995	Περίοδος βαθμονόμησης	0.81	-46.1	0.399	0.44
		Περίοδος επαλήθευσης	-0.83	-143.5	1.576	1.35
Λιθαίος	1971 - 1980	Περίοδος βαθμονόμησης	0.48	-32.7	0.569	0.72
		Περίοδος επαλήθευσης	0.33	-43.4	0.757	0.82
	1980 - 1990	Περίοδος βαθμονόμησης	0.53	20.0	0.498	0.68
		Περίοδος επαλήθευσης	0.58	-17.6	0.661	0.65
	1990 - 1995	Περίοδος βαθμονόμησης	0.61	-31.8	0.375	0.63
		Περίοδος επαλήθευσης	0.16	48.5	0.948	0.92

Οι τιμές όλων των στατιστικών δεικτών που εξετάστηκαν για τις μηνιαίες παροχές των πηγών είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικές, καταδεικνύοντας ότι οι προσομοιωμένες τιμές δεν παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση από τις παρατηρημένες. Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις παρατηρούνται για τους στατιστικούς δείκτες NSE, RMSE και RSR κατά την περίοδο επαλήθευσης της χρονοσειράς 1970 – 1980 στη θέση Βότομος καθώς και για τον δείκτη PBIAS κατά την ίδια περίοδο στη θέση Γέργερη. Ωστόσο, οι δείκτες αυτοί αποκλίνουν ελάχιστα από τις αποδεκτές τιμές τους. Όσον αφορά στις τιμές των δεικτών για τους χειμάρρους, αυτές θεωρούνται αρκετά ικανοποιητικές και γενικά αποδεκτές με εξαίρεση τις τιμές που εξήχθησαν για την χρονοσειρά 1990

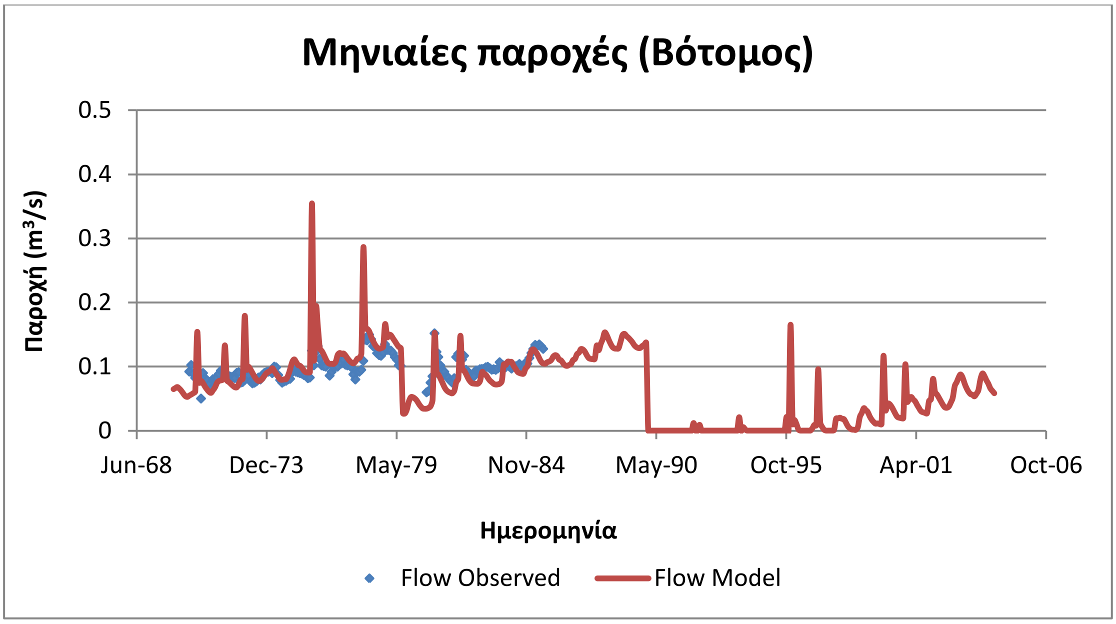
– 1995 και ιδιαίτερα για την περίοδο επαλήθευσης της χρονοσειράς. Οι αποκλίσεις των τιμών των δεικτών από τις αντίστοιχες αποδεκτές τιμές τους, δεν μπορούν σε καμία περίπτωση να θεωρηθούν αμελητέες. Η μεγάλη αυτή απόκλιση των προσομοιωμένων τιμών από τις αντίστοιχες παρατηρημένες αποδίδεται στο μικρό μήκος της χρονοσειράς των διαθέσιμων δεδομένων σε συνδυασμό με τις ραγδαίες αλλαγές που συντελούνται στο σύστημα κατά την διάρκεια αυτής της περιόδου, με αποτέλεσμα το μοντέλο να μην μπορεί να προσομοιώσει ικανοποιητικά την υφιστάμενη κατάσταση.

Πίνακας 4.14 : Στατιστικά κριτήρια σύγκρισης ημερήσιων παρατηρημένων και προσομοιωμένων χρονοσειρών παροχής στις διάφορες θέσεις

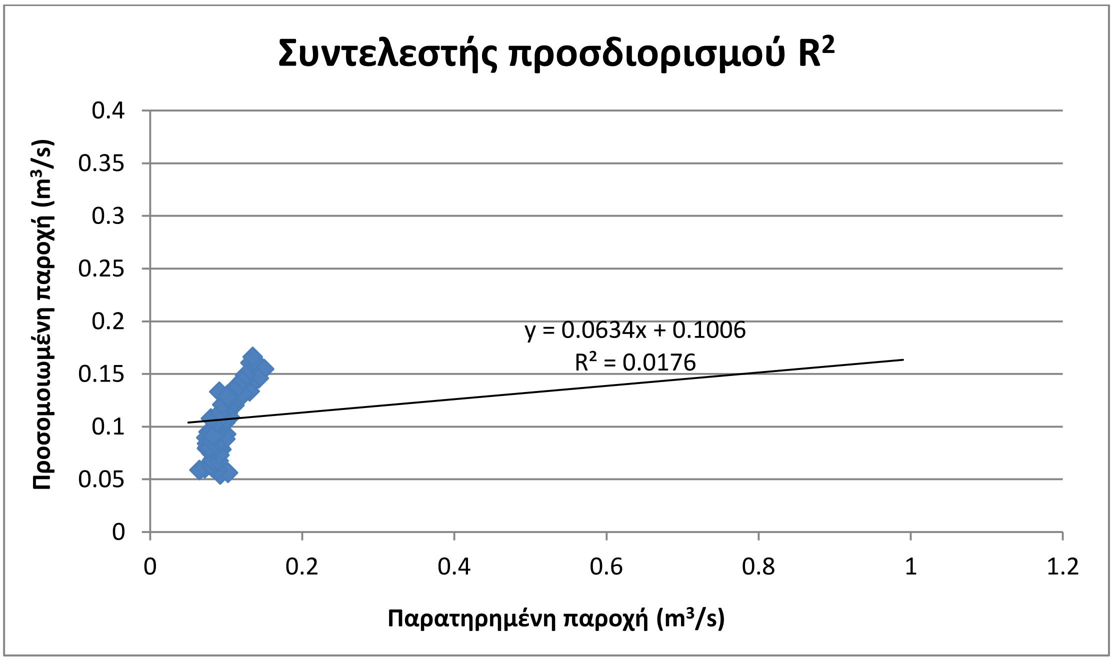
Θέση	**Μεταβλητή (διάστημα με διαθέσιμα δεδομένα)**		**Στατιστικοί Δείκτες**			
			NSE	**PBIAS (%)**	**RMSE**	**RSR**
Γεροπόταμος	1971 - 1980	Περίοδος βαθμονόμησης	0.46	15.1	1.013	0.74
		Περίοδος επαλήθευσης	-0.09	37.1	1.268	1.05
	1980 - 1990	Περίοδος βαθμονόμησης	0.69	11.5	0.756	0.55
		Περίοδος επαλήθευσης	0.32	28.2	1.013	0.83
	1990 - 1995	Περίοδος βαθμονόμησης	0.13	11.6	0.509	0.93
		Περίοδος επαλήθευσης	-0.99	-175.7	1.381	1.41
Κουτσουλίδης	1971 - 1980	Περίοδος βαθμονόμησης	0.48	32.5	0.532	0.72
		Περίοδος επαλήθευσης	0.25	11.1	0.812	0.87
	1980 - 1990	Περίοδος βαθμονόμησης	0.33	4.2	0.761	0.82
		Περίοδος επαλήθευσης	0.22	13.0	1.011	0.88
	1990 - 1995	Περίοδος βαθμονόμησης	0.84	-89.0	0.399	0.40
		Περίοδος επαλήθευσης	0.22	-103.6	1.576	0.88
Λιθαίος	1971 - 1980	Περίοδος βαθμονόμησης	0.67	-9.5	0.569	0.58
		Περίοδος επαλήθευσης	0.55	-28.3	0.757	0.67
	1980 - 1990	Περίοδος βαθμονόμησης	0.62	11.2	0.498	0.61
		Περίοδος επαλήθευσης	0.40	-12.0	0.661	0.77
	1990 - 1995	Περίοδος βαθμονόμησης	0.15	47.6	0.375	0.92
		Περίοδος επαλήθευσης	-0.38	40.2	0.948	1.18

Οι τιμές των στατιστικών δεικτών που εξήχθησαν για την χρονοσειρά 1990– 1995 και ιδιαίτερα για την περίοδο επαλήθευσης της χρονοσειράς, είναι και στην περίπτωση των ημερήσιων χρονοσειρών μη αποδεκτές. Η ανεπάρκεια των διαθέσιμων δεδομένων δεν επιτρέπει ούτε σε αυτήν την περίπτωση την ικανοποιητική προσομοίωση της υφιστάμενης κατάστασης. Γενικά, θα μπορούσαμε να πούμε ότι οι τιμές του δείκτη PBIAS για όλους τους χειμάρρους είναι ικανοποιητικές με εξαίρεση την χρονοσειρά 1990 – 1995. Όσον αφορά στον δείκτη RMSE, οι καλύτερες τιμές του παρατηρούνται για τον χείμαρρο Λιθαίο σε όλες τις χρονοσειρές, ενώ η χειρότερη σημειώνεται κατά την περίοδο επαλήθευσης της χρονοσειράς 1990 – 1995 στον χείμαρρο Κουτσουλίδη. Οι τιμές του δείκτη RSR θεωρούνται γενικά αποδεκτές με εξαίρεση τις τιμές για την χρονοσειρά 1990 – 1995 στους χειμάρρους Γεροπόταμο και Λιθαίο. Οι τιμές του NSE θεωρούνται σε γενικές γραμμές ικανοποιητικές με εξαίρεση τις αρνητικές τιμές που παρατηρούνται για τον χείμαρρο Γεροπόταμο και Λιθαίο. Οι τιμές που αντιστοιχούν στην επαλήθευση είναι πάντα συγκρίσιμες με εκείνες της βαθμονόμησης, γεγονός που επιβεβαιώνει την προγνωστική ικανότητα του μοντέλου σε ανεξάρτητες περιόδους και ενισχύει τις επιλογές ρύθμισης των παραμέτρων του κατά την διαδικασία της βαθμονόμησης.

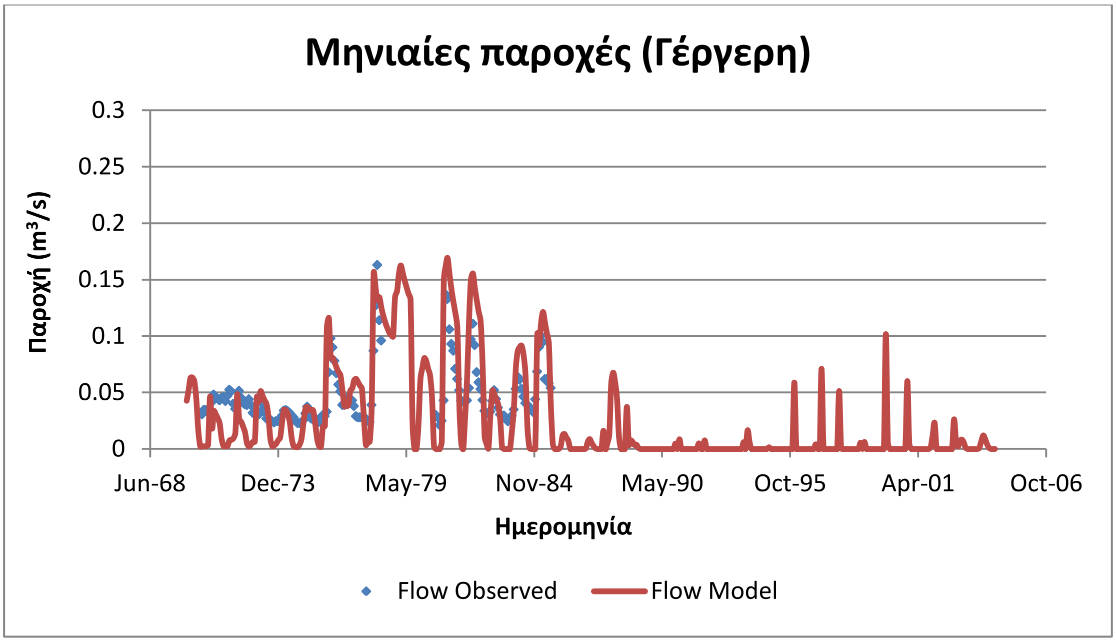
Η γραφική σύγκριση των χρονοσειρών καθώς και ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 παρουσιάζονται στα Διαγράμματα 4.5 - 4.14 για τις θέσεις Βότομος, Γέργερη, Γεροπόταμος, Κουτσουλίδης και Λιθαίος με απεικόνιση της παροχής για ολόκληρο το διάστημα με διαθέσιμα δεδομένα (βαθμονόμηση και επαλήθευση). Η απεικόνιση βοηθά στο να εντοπιστούν πιθανές έντονες αποκλίσεις και διαφορές στις αιχμές και στο γενικότερο σχήμα των κλάδων των παροχογραφημάτων.



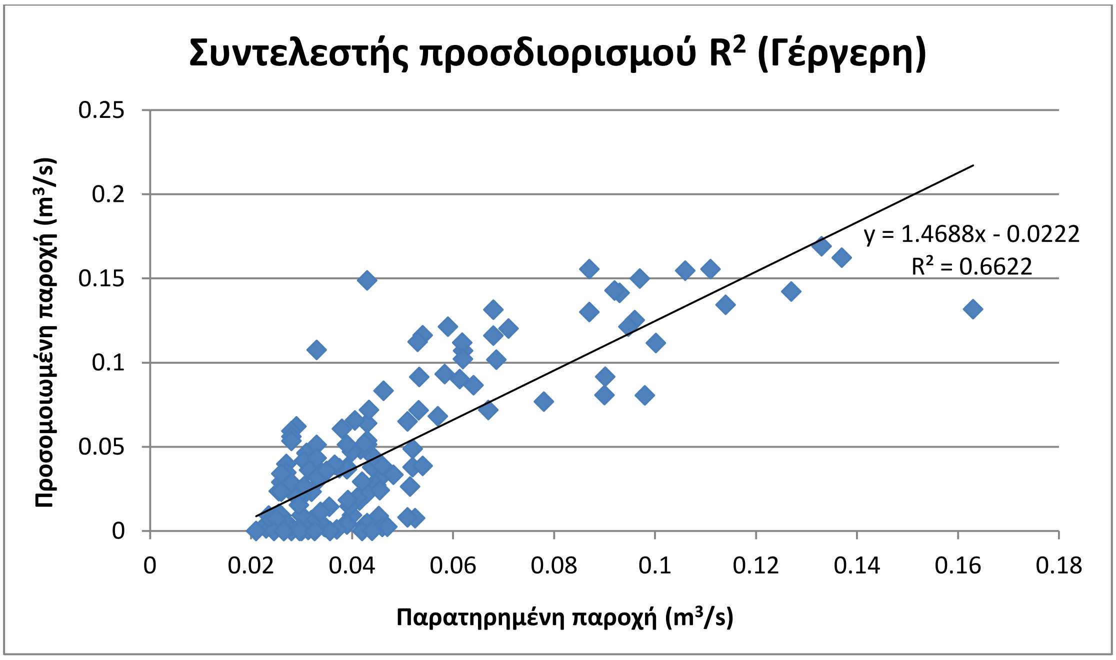
Διάγραμμα 4.5 : Προσομοιωμένες και παρατηρημένες παροχές στη θέση Βότομος για ολόκληρο το διάστημα με διαθέσιμα δεδομένα



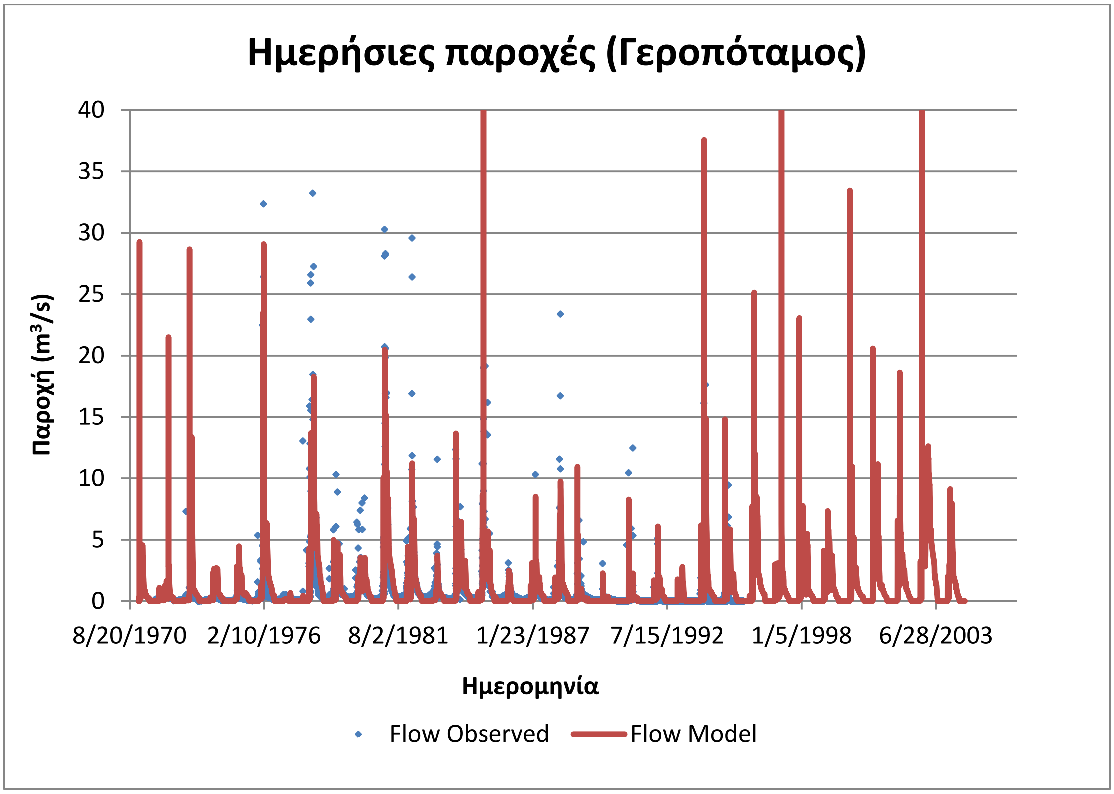
Διάγραμμα 4.6 : Συντελεστής προσδιορισμού στη θέση Βότομος



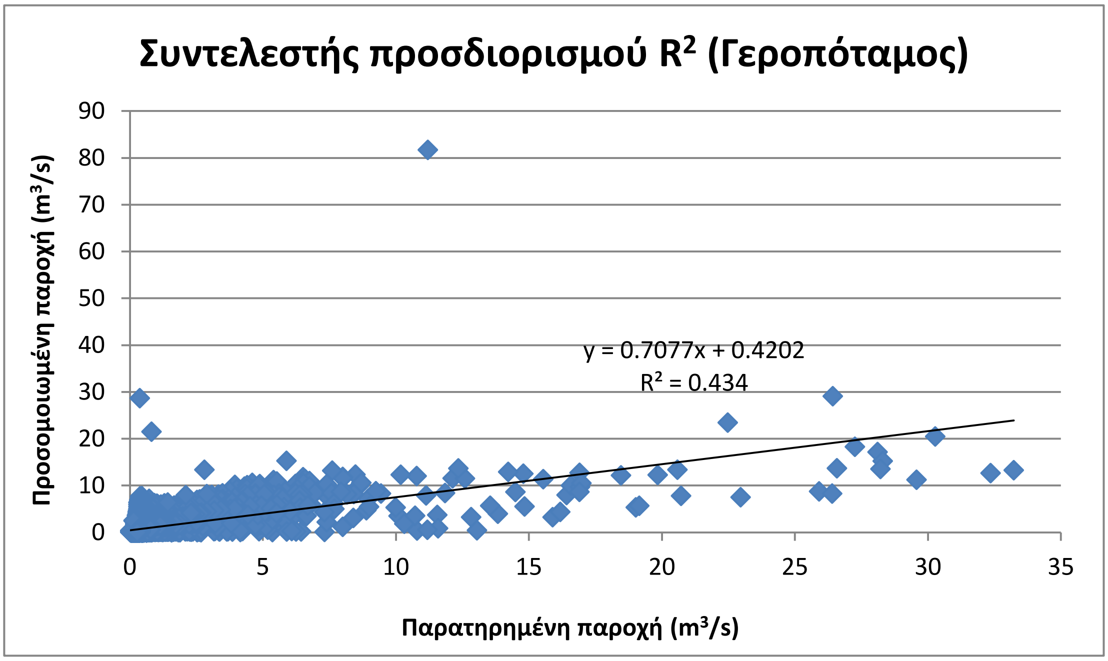
Διάγραμμα 4.7 : Προσομοιωμένες και παρατηρημένες παροχές στη θέση Γέργερη για ολόκληρο το διάστημα με διαθέσιμα δεδομένα



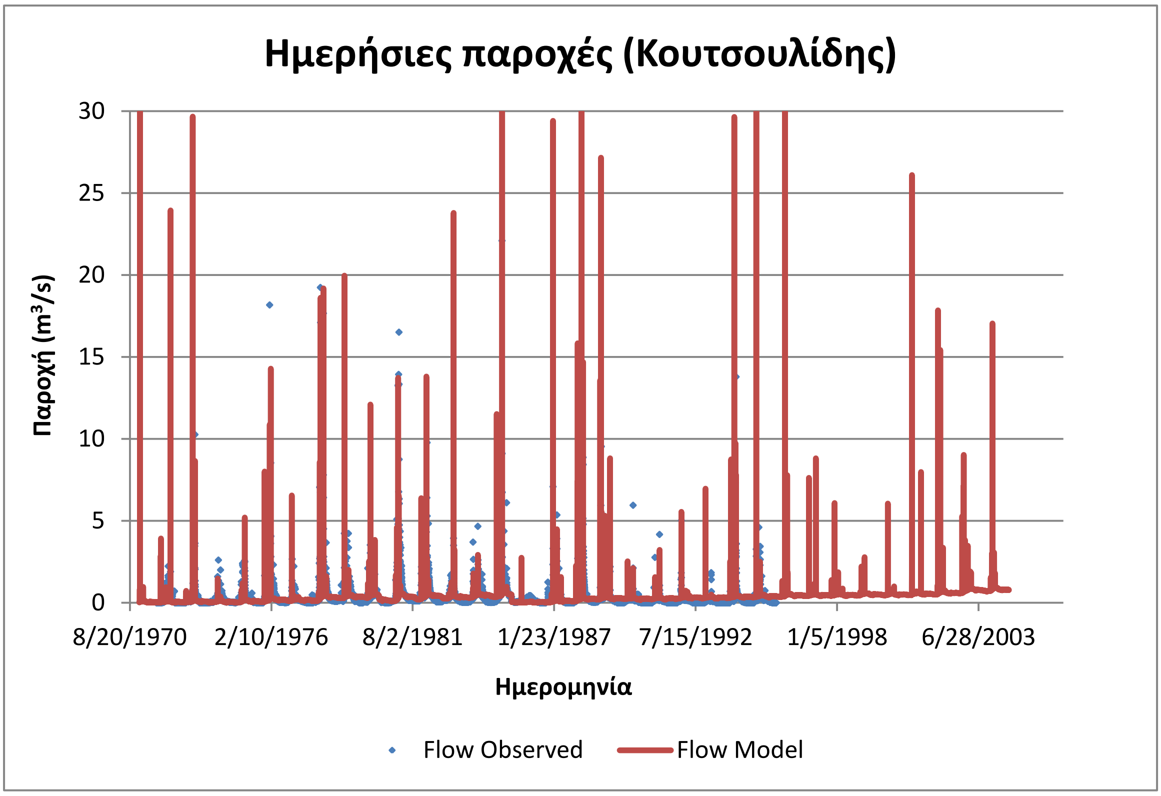
Διάγραμμα 4.8 : Συντελεστής προσδιορισμού στη θέση Γέργερη



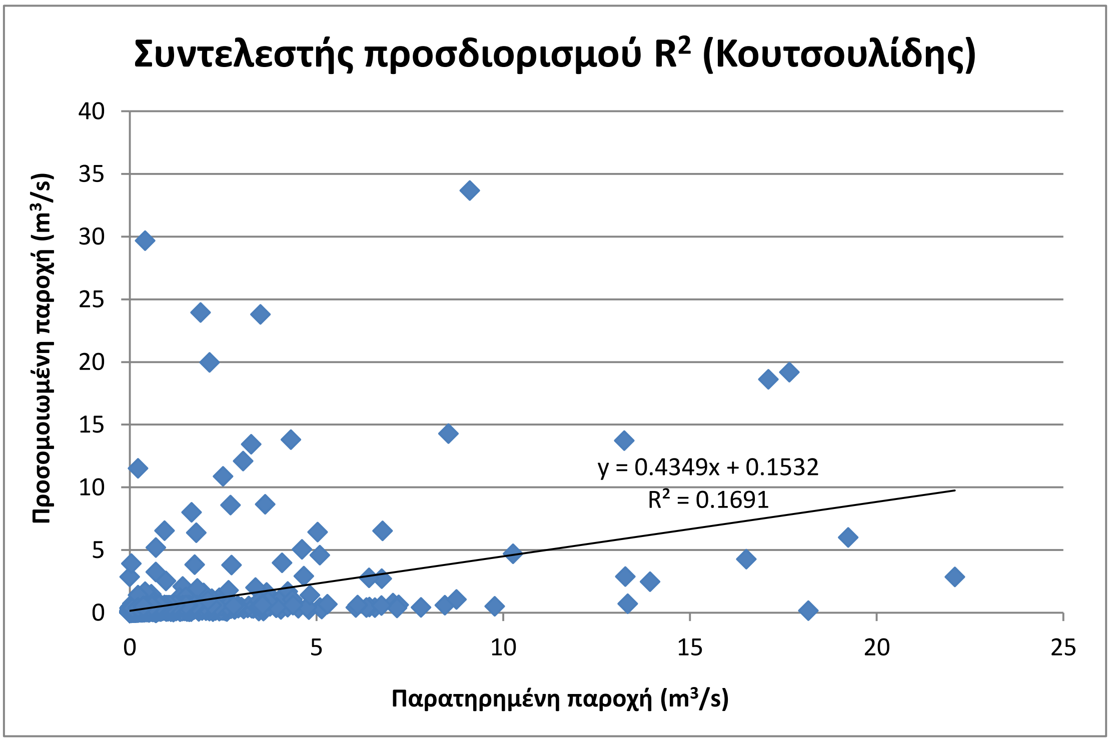
Διάγραμμα 4.9 : Προσομοιωμένες και παρατηρημένες παροχές στη θέση Γεροπόταμος για ολόκληρο το διάστημα με διαθέσιμα δεδομένα



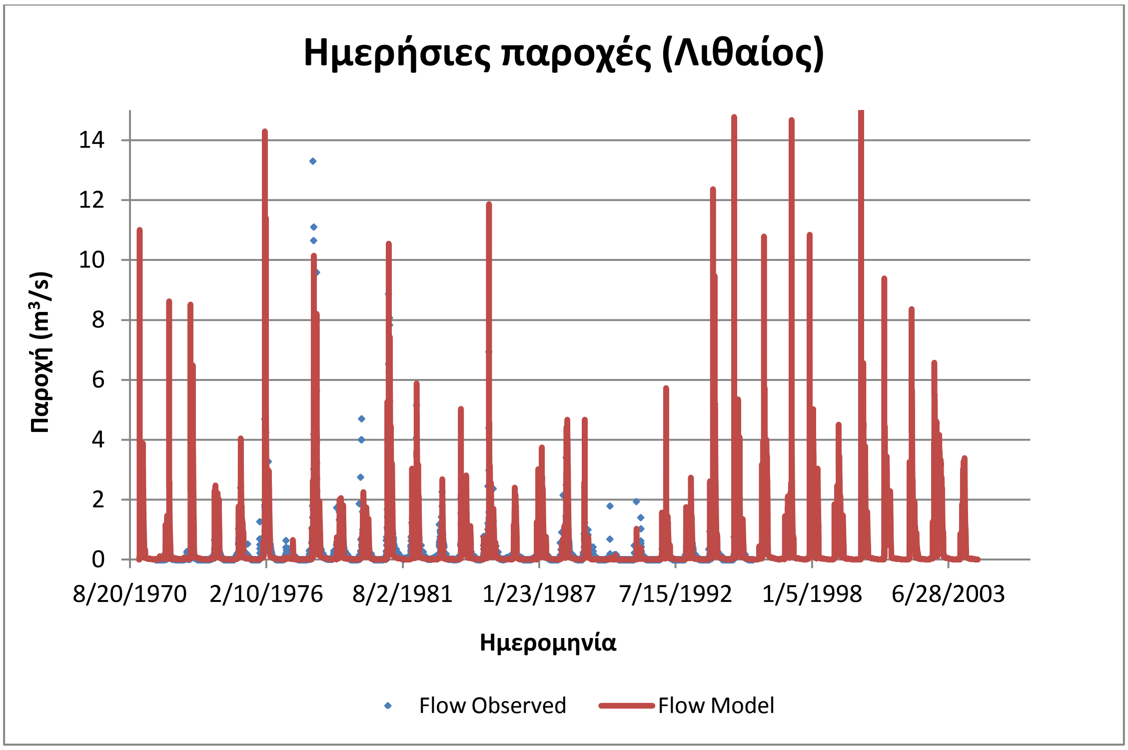
Διάγραμμα 4.10 : Συντελεστής προσδιορισμού στη θέση Γεροπόταμος



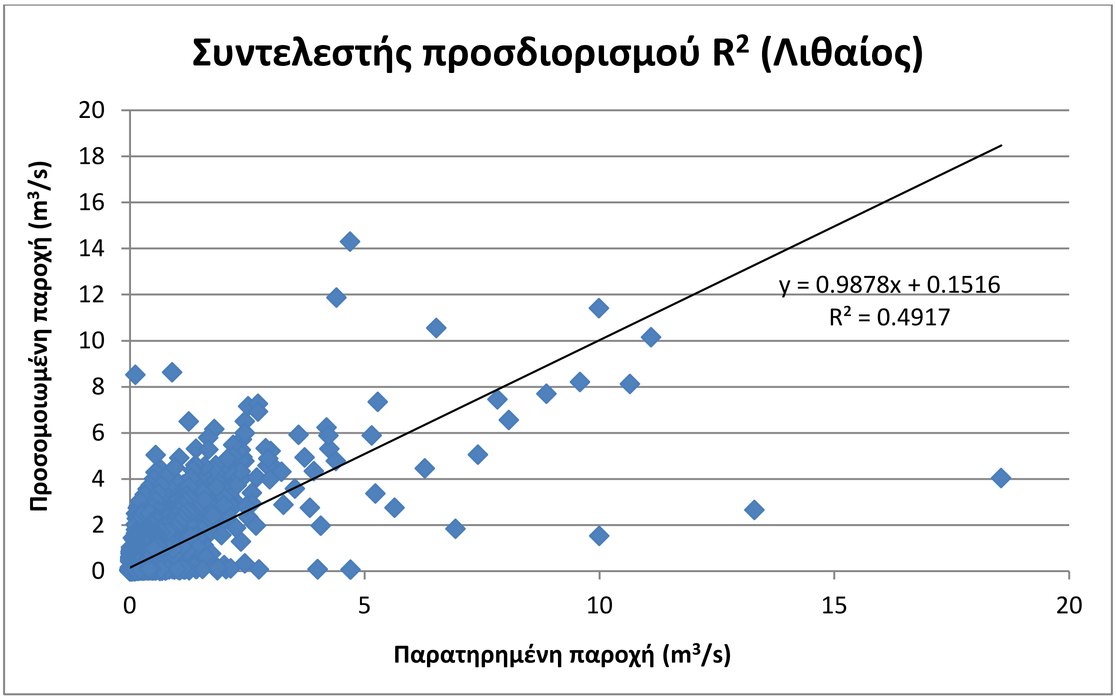
Διάγραμμα 4.11 : Προσομοιωμένες και παρατηρημένες παροχές στη θέση Κουτσουλίδης για ολόκληρο το διάστημα με διαθέσιμα δεδομένα



Διάγραμμα 4.12 : Συντελεστής προσδιορισμού στη θέση Κουτσουλίδης



Διάγραμμα 4.13 : Προσομοιωμένες και παρατηρημένες παροχές στη θέση Λιθαίος για ολόκληρο το διάστημα με διαθέσιμα δεδομένα



Διάγραμμα 4.14 : Συντελεστής προσδιορισμού στη θέση Λιθαίος

Στους ακόλουθους πίνακες, Πίνακες 4.15 – 4.17, παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων του υδατικού ισοζυγίου για την υδρολογική λεκάνη του Γεροπόταμου για τα επιμέρους χρονικά διαστήματα στα οποία πραγματοποιήθηκε η μοντελοποίηση της υδρολογίας της λεκάνης απορροής του ποταμού.

Πίνακας 4.15 : Τιμές των παραμέτρων του υδατικού ισοζυγίου για την λεκάνη απορροής του Γεροπόταμου για το χρονικό διάστημα 1970 – 1980

Υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης απορροής του ποταμού Γεροπόταμου	
Παράμετρος	**Τιμή (mm)**
Επιφανειακή βροχόπτωση PRECIP	729.50
Χιονόπτωση SNOW FALL	3.40
Τήξη χιονιού SNOW MELT	2.46
Εξάχνωση SUBLIMATION	0.94
Επιφανειακή απορροή SURFACE RUNOFF	9.67
Πλάγια ροή LATERAL SOIL	14.22
TILE	0.00
Κατείσδυση στον αβαθή υδροφορέα GROUNDWATER (SHALL AQ)	72.80
Εξάτμιση και Διαπνοή REVAP	115.60
Κατείσδυση στον βαθύ υδροφορέα DEEP AQ RECHARGE	121.53
Συνολική κατείσδυση υδροφορέα TOTAL AQ RECHARGE	443.27
Συνολική απόδοση νερού TOTAL WATER YLD	96.47
Διήθηση PERCOLATION OUT OF SOIL	443.05
Εξατμισοδιαπνοή ET	452.50
Δυνητική εξατμισοδιαπνοή PET	1394.40
Απώλειες μετάδοσης TRANSMISSION LOSSES	0.22

Πίνακας 4.16 : Τιμές των παραμέτρων του υδατικού ισοζυγίου για την λεκάνη απορροής του Γεροπόταμου για το χρονικό διάστημα 1980 – 1990

Υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης απορροής του ποταμού Γεροπόταμου	
Παράμετρος	**Τιμή (mm)**
Επιφανειακή βροχόπτωση PRECIP	782.10
Χιονόπτωση SNOW FALL	5.19
Τήξη χιονιού SNOW MELT	2.88
Εξάχνωση SUBLIMATION	2.31
Επιφανειακή απορροή SURFACE RUNOFF	14.43
Πλάγια ροή LATERAL SOIL	14.92
TILE	0.00
Κατείσδυση στον αβαθή υδροφορέα GROUNDWATER (SHALL AQ)	100.89
Εξάτμιση και Διαπνοή REVAP	122.03
Κατείσδυση στον βαθύ υδροφορέα DEEP AQ RECHARGE	116.48
Συνολική κατείσδυση υδροφορέα TOTAL AQ RECHARGE	462.20
Συνολική απόδοση νερού TOTAL WATER YLD	130.00
Διήθηση PERCOLATION OUT OF SOIL	461.98
Εξατμισοδιαπνοή ET	502.70
Δυνητική εξατμισοδιαπνοή PET	1612.20
Απώλειες μετάδοσης TRANSMISSION LOSSES	0.24

Πίνακας 4.17 : Τιμές των παραμέτρων του υδατικού ισοζυγίου για την λεκάνη απορροής του Γεροπόταμου για το χρονικό διάστημα 1990 – 2004

Υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης απορροής του ποταμού Γεροπόταμου	
Παράμετρος	**Τιμή (mm)**
Επιφανειακή βροχόπτωση PRECIP	726.20
Χιονόπτωση SNOW FALL	5.93
Τήξη χιονιού SNOW MELT	3.82
Εξάχνωση SUBLIMATION	2.11
Επιφανειακή απορροή SURFACE RUNOFF	13.66
Πλάγια ροή LATERAL SOIL	14.24
TILE	0.00
Κατείσδυση στον αβαθή υδροφορέα GROUNDWATER (SHALL AQ)	74.37
Εξάτμιση και Διαπνοή REVAP	121.45
Κατείσδυση στον βαθύ υδροφορέα DEEP AQ RECHARGE	109.62
Συνολική κατείσδυση υδροφορέα TOTAL AQ RECHARGE	440.24
Συνολική απόδοση νερού TOTAL WATER YLD	102.02
Διήθηση PERCOLATION OUT OF SOIL	439.99
Εξατμισοδιαπνοή ET	451.30
Δυνητική εξατμισοδιαπνοή PET	1518.60
Απώλειες μετάδοσης TRANSMISSION LOSSES	0.25

4.4. Αποτελέσματα προσομοίωσης υφιστάμενης κατάστασης

Παρατηρώντας όλα τα παραπάνω διαγράμματα καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το μοντέλο SWAT κατάφερε να προσομοιώσει ικανοποιητικά την υδρολογία της λεκάνης απορροής του ποταμού Γεροπόταμου καθόλη την χρονική περίοδο προσομοίωσης, παρά τις σχετικές αποκλίσεις των τιμών των διαφόρων δεικτών μεταξύ των προσομοιωμένων και παρατηρημένων παροχών σε ορισμένες θέσεις και χρονικά διαστήματα.

Προβλήματα στην προσομοίωση παρουσιάστηκαν κυρίως στην υπολεκάνη 10, όπου εντοπίζεται ο χείμαρρος Κουτσουλίδης. Τα προβλήματα αυτά σχετίζονται κυρίως με την ανεπάρκεια των δεδομένων για τις αρδευτικές ανάγκες της περιοχής καθώς και για την παροχή και την θέση των πολυάριθμων γεωτρήσεων που υπάρχουν στην περιοχή. Για την αντιμετώπιση των παραπάνω προβλημάτων, που εντείνονται από την δεκαετία του 1980 και έπειτα λόγω της υπερεκμετάλλευσης του υπόγειου υδατικού δυναμικού της περιοχής και της εντατικοποίησης των καλλιεργειών, έγιναν ορισμένες παραδοχές που αφορούν στην ποσότητα του νερού που διατίθεται για άρδευση. Συγκεκριμένα, για τις ανάγκες της βαθμονόμησης του μοντέλου υιοθετήθηκαν οι τιμές που αντιστοιχούν στην εμπειρική άρδευση ανά τύπο καλλιέργειας, ενώ δεν ελήφθη υπόψη ο όγκος των αντλήσεων για την κάλυψη άλλων αναγκών πέραν των αρδευτικών. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης θα μπορούσαν ενδεχομένως να είναι πιο ικανοποιητικά, αν υπήρχαν περισσότερα δεδομένα σχετικά με τις γεωτρήσεις και ειδικότερα με την ακριβή θέση τους, την περίοδο λειτουργίας και την παροχή τους.

Επίσης, προβλήματα υπήρξαν και κατά την βαθμονόμηση των θέσεων όπου βρίσκονται οι πηγές και συγκεκριμένα η πηγή της Γέργερης λόγω της ανεπάρκειας των διαθέσιμων δεδομένων. Το μοντέλο SWAT δεν κατάφερε να προσομοιώσει ικανοποιητικά τις μηνιαίες παροχές της πηγής για τα τέσσερα πρώτα χρόνια της μοντελοποίησης, καθώς οι προσομοιωμένες παροχές παρουσιάζουν έντονες διακυμάνσεις κατά την μετάβαση από την χειμερινή στην θερινή περίοδο, ενώ οι αντίστοιχες παρατηρημένες εμφανίζονται σχεδόν αμετάβλητες.

Στις θέσεις Γεροπόταμος και Λιθαίος, όπως φαίνεται και στα Διαγράμματα 4.9 – 4.10 και 4.13 – 4.14 αντίστοιχα, υπάρχει πολύ ικανοποιητική σύγκλιση μεταξύ των ημερήσιων προσομοιωμένων και παρατηρημένων παροχών με μοναδική εξαίρεση κάποια ακραία γεγονότα πλημμύρας που το μοντέλο φύσει αδυνατεί να προσομοιώσει.

Σε κάθε περίπτωση όμως και λόγω των δυσκολιών που προαναφέρθηκαν, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης θεωρούνται αποδεκτά καθώς το μοντέλο αποδεικνύεται ικανό να προσομοιώσει τις εποχιακές διακυμάνσεις που δηλώνουν οι μετρήσεις πεδίου καθόλη την χρονική περίοδο σύγκρισης. Η αναντιστοιχία, ωστόσο, στις λίγες αυτές αιχμές, που άλλωστε είναι κυρίως υπεύθυνη για την εξαγωγή τιμών των στατιστικών δεικτών με οριακή αποδοχή, αποδίδεται περισσότερο σε πιθανές λανθασμένες παρατηρήσεις παρά σε ανεπάρκεια προγνωστικής ικανότητας του μοντέλου.

4.5. Εφαρμογή διαχειριστικών πρακτικών στο βαθμονομημένο μοντέλο του Γεροπόταμου

Το ήδη βαθμονομημένο μοντέλο της λεκάνης απορροής του ποταμού Γεροπόταμου στο SWAT μπορεί να τύχει επιπλέον χρήσης για την διερεύνηση των επιδράσεων που εναλλακτικά σενάρια διαχείρισης μπορεί να έχουν στο υδρολογικό καθεστώς του ποταμού. Έως σήμερα το μοντέλο έχει τύχει ευρείας χρήσης για την εφαρμογή και αξιολόγηση διαχειριστικών πρακτικών σε λεκάνες απορροής.

Σκοπός της ενότητας αυτής είναι η εξέταση τριών διαχειριστικών σεναρίων που αφορούν στον τρόπο άρδευσης των καλλιεργειών και η αξιολόγηση των επιδράσεών τους στο υδατικό ισοζύγιο της υπό μελέτης λεκάνης απορροής. Τα σενάρια αυτά θα εφαρμοστούν στην τελευταία περίοδο προσομοίωσης, δηλαδή κατά το χρονικό διάστημα 1990 – 2004. Ακολούθως, παρουσιάζεται αναλυτικά η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εφαρμογή του κάθε σεναρίου καθώς και τα εξαγόμενα αποτελέσματα.

4.5.1. Ανάπτυξη σεναρίων

4.5.1.1. Σενάριο συμβουλευτικής άρδευσης (Σενάριο 1)

Οι αρδευτικές ανάγκες υπολογίζονται βάσει της συμβουλευτικής άρδευσης (mm/έτος) στη λεκάνη της Μεσαράς και θεωρούνται σταθερές για όλο το διάστημα προσομοίωσης.

Συγκεκριμένα, ο υπολογισμός της μέσης ημερήσιας κατανομής των απαιτήσεων άρδευσης ανά μήνα, πραγματοποιήθηκε, όπως και στην ενότητα 4.2.5., σε επίπεδο υπολεκάνης και ανά είδος καλλιέργειας βάσει της ετήσιας συμβουλευτικής άρδευσης, της αρδευτικής περιόδου και της καλλιεργήσιμης έκτασης ανά υπολεκάνη. Η αρδευτική περίοδος καθώς και η καλλιεργήσιμη έκταση ανά υπολεκάνη θεωρούνται αμετάβλητες και όμοιες με αυτές που παρουσιάζονται στους πίνακες 4.8 – 4.10. Στους ακόλουθους πίνακες, Πίνακες 4.18 – 4.19, παρουσιάζονται τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση των ημερήσιων αρδευτικών αναγκών ανά μήνα και είδος καλλιέργειας καθώς και η ετήσια εκτιμώμενη τιμή ανά υπολεκάνη.

Πίνακας 4.18 : Ετήσια συμβουλευτική άρδευση ανά καλλιέργεια (Χαρτζουλάκης)

Καλλιέργεια	Συμβουλευτική άρδευση (mm/έτος)	Συμβουλευτική άρδευση (m/έτος)
Αμπέλι	452	0.452
Ελιά	228	0.228

Πίνακας 4.19 : Ετήσιες απαιτήσεις άρδευσης ανά υπολεκάνη και είδος καλλιέργειας

Ετήσιες απαιτήσεις άρδευσης (Mm^3)		
Υπολεκάνη	Αμπελώνες	Ελαιώνες
3	0.000	0.460
4	0.954	1.684
5	1.279	2.247
6	3.694	5.140
7	0.000	5.645
8	0.449	0.886
9	0.102	0.143
10	2.426	4.076
11	2.442	3.764
12	0.000	3.181
13	1.598	2.637
14	0.000	1.049
17	0.000	0.218
18	0.000	0.049
20	0.000	0.009
21	2.387	4.014
22	0.407	1.446
23	0.000	1.949
24	0.695	1.331
26	0.000	1.579
28	0.000	3.322
29	0.000	2.161
Σύνολο	16.434	46.990

4.5.1.2. Σενάριο ελλειμματικής άρδευσης (Σενάριο 2)

Οι αρδευτικές ανάγκες υπολογίζονται βάσει της ελλειμματικής άρδευσης (mm/έτος) στη λεκάνη της Μεσαράς και θεωρούνται σταθερές για όλο το διάστημα προσομοίωσης. Ως ελλειμματική θεωρείται η άρδευση που καλύπτει το 75% των αναγκών του φυτού και ως εκ τούτου υπολογίζεται ως το 75% της συμβουλευτικής άρδευσης.

Συγκεκριμένα, ο υπολογισμός της μέσης ημερήσιας κατανομής των απαιτήσεων άρδευσης ανά μήνα, πραγματοποιήθηκε, όπως και στην ενότητα 4.2.5., σε επίπεδο υπολεκάνης και ανά είδος καλλιέργειας βάσει της ετήσιας ελλειμματικής άρδευσης, της αρδευτικής περιόδου και της καλλιεργήσιμης έκτασης ανά υπολεκάνη. Η αρδευτική περίοδος καθώς και η καλλιεργήσιμη έκταση ανά υπολεκάνη θεωρούνται αμετάβλητες και όμοιες με αυτές που παρουσιάζονται στους πίνακες 4.8 – 4.10. Στους ακόλουθους πίνακες, Πίνακες 4.20 – 4.21, παρουσιάζονται τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση των ημερήσιων αρδευτικών αναγκών ανά μήνα και είδος καλλιέργειας καθώς και η ετήσια εκτιμώμενη τιμή ανά υπολεκάνη.

Πίνακας 4.20 : Ετήσια ελλειμματική άρδευση ανά καλλιέργεια

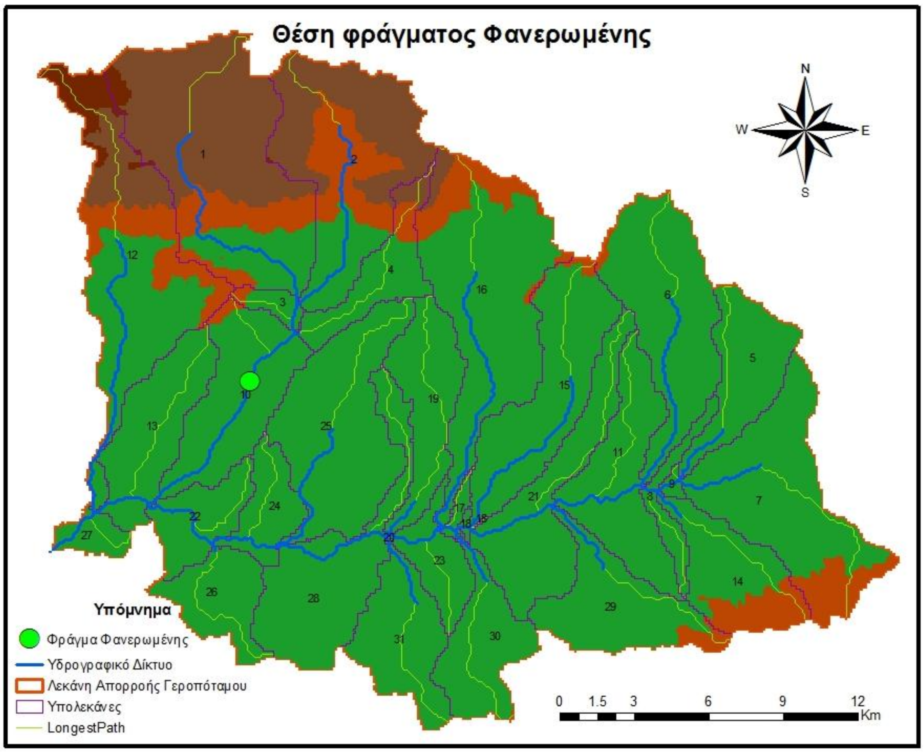
Καλλιέργεια	Συμβουλευτική άρδευση (mm/έτος)	Συμβουλευτική άρδευση (m/έτος)
Αμπέλι	339	0.339
Ελιά	171	0.171

Πίνακας 4.21 : Ετήσιες απαιτήσεις άρδευσης ανά υπολεκάνη και είδος καλλιέργειας

Ετήσιες απαιτήσεις άρδευσης (Mm^3)		
Υπολεκάνη	Αμπελώνες	Ελαιώνες
3	0.000	0.345
4	0.715	1.263
5	0.959	1.685
6	2.771	3.855
7	0.000	4.234
8	0.337	0.665
9	0.076	0.107
10	1.820	3.057
11	1.832	2.823
12	0.000	2.385
13	1.198	1.978
14	0.000	0.787
17	0.000	0.164
18	0.000	0.037
20	0.000	0.007
21	1.790	3.010
22	0.306	1.084
23	0.000	1.462
24	0.521	0.998
26	0.000	1.185
28	0.000	2.492
29	0.000	1.620
Σύνολο	12.325	35.242

4.5.1.3. Σενάριο λειτουργίας φράγματος Φανερωμένης (Σενάριο 3)

Στο σενάριο αυτό, θεωρούμε ότι λειτουργεί το φράγμα της Φανερωμένης, το οποίο εντοπίζεται στη θέση με συντεταγμένες (24^{o} 51’ 6.0’’ E, 35^{o} 5’ 36.0’’ N). Ο ετήσιος απολήψιμος όγκος του φράγματος ανέρχεται στα 8.5 Mm^3 και θεωρούμε ότι ισόποσος όγκος ύδατος συγκρατείται από το εν λόγω φράγμα κατά τους χειμερινούς μήνες (Νοέμβριος – Μάρτιος). Η ακριβής θέση του φράγματος στην εξεταζόμενη λεκάνη απορροής απεικονίζεται στην Εικόνα 4.1 και όπως προκύπτει οι υπολεκάνες που επηρεάζονται από την λειτουργία του φράγματος είναι πέντε (1, 2, 3, 4 και 10). Στον Πίνακα 4.22 παρουσιάζεται η ετήσια εκτιμώμενη τιμή συνεισφοράς στο φράγμα ανά υπολεκάνη. Θεωρούμε ότι όλες οι υπολεκάνες συνεισφέρουν ισόποσα.



Εικόνα 4.1 : Θέση φράγματος Φανερωμένης στην λεκάνη απορροής του ποταμού Γεροπόταμου

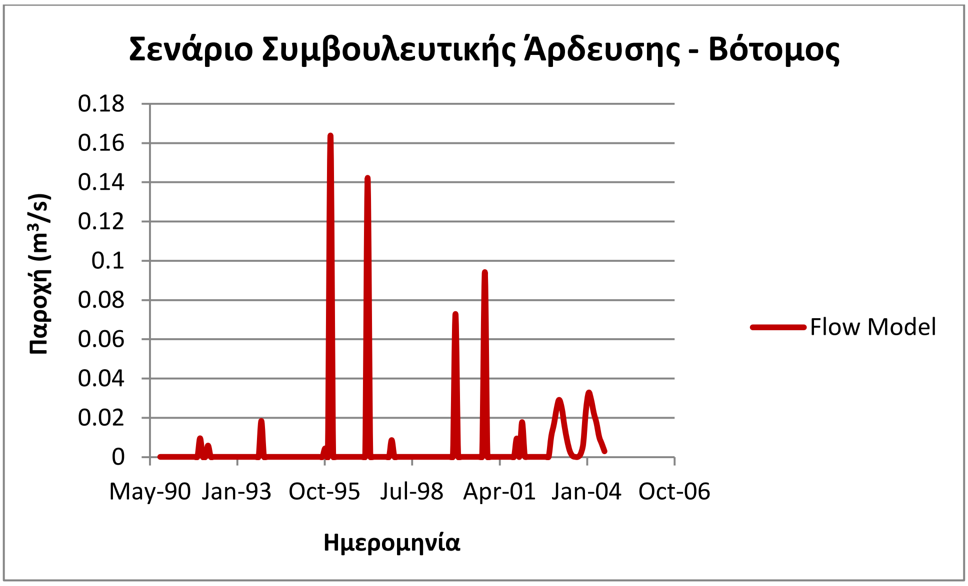
Πίνακας 4.22 : Ετήσιες ποσότητες συνεισφοράς στο φράγμα ανά υπολεκάνη

Ετήσια ποσότητα συνεισφοράς στο φράγμα (Mm^3)	
Υπολεκάνη	Εκτιμώμενη τιμή
1	1.7
2	1.7
3	1.7
4	1.7
10	1.7
Σύνολο	8.5

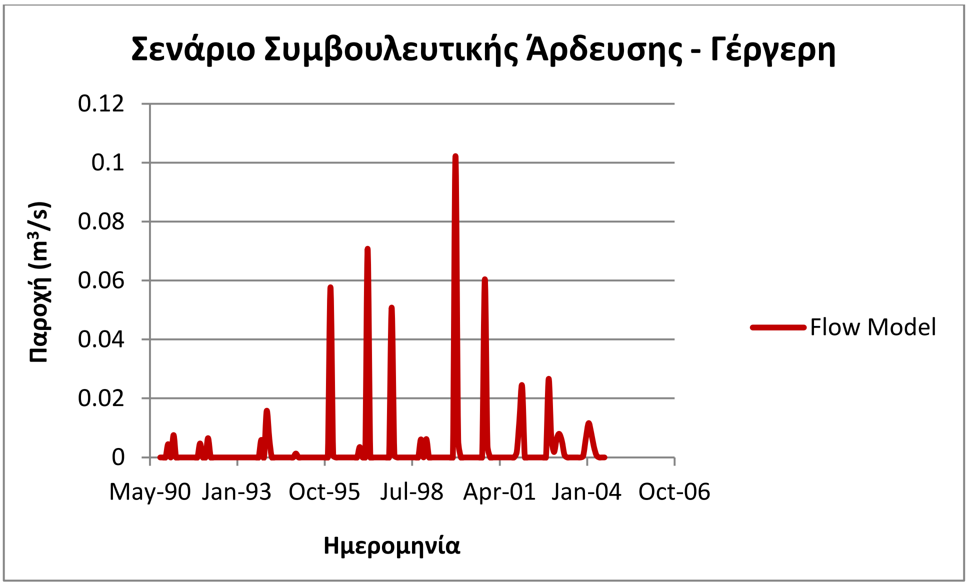
4.5.2. Αποτελέσματα σεναρίων

Η γραφική σύγκριση των χρονοσειρών παρουσιάζεται στα Διαγράμματα 4.15 - 4.29 για τις θέσεις Βότομος, Γέργερη, Γεροπόταμος, Κουτσουλίδης και Λιθαίος με απεικόνιση της παροχής για ολόκληρο το διάστημα με διαθέσιμα δεδομένα (βαθμονόμηση και επαλήθευση). Η απεικόνιση βοηθά στο να εντοπιστούν πιθανές έντονες αποκλίσεις και διαφορές στις αιχμές και στο γενικότερο σχήμα των κλάδων των παροχογραφημάτων.

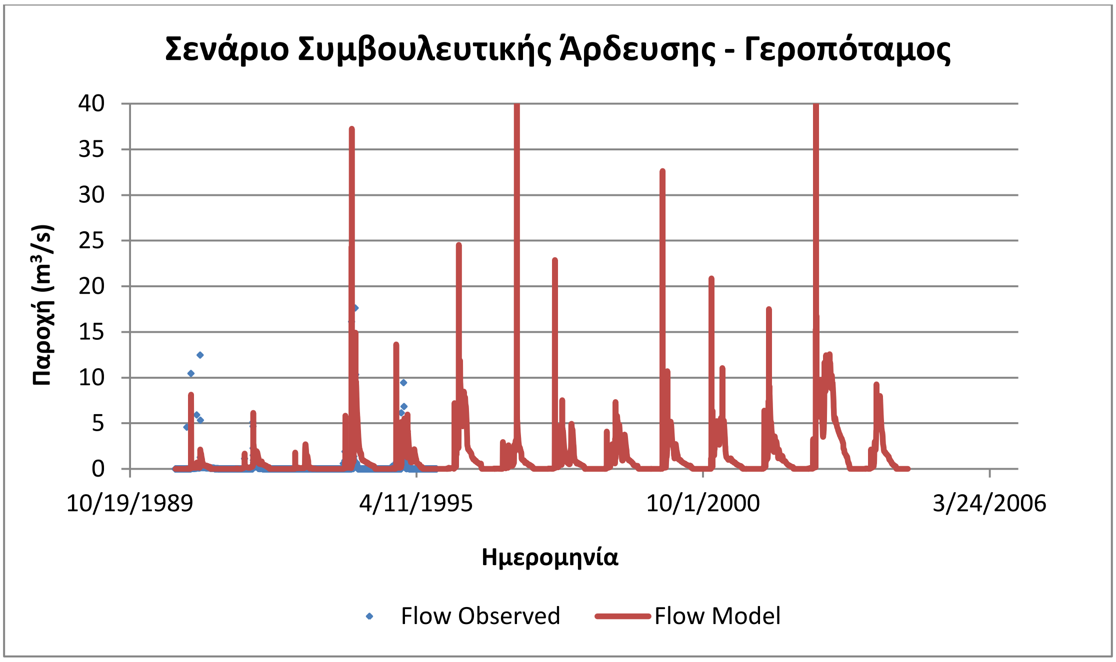
4.5.2.1. Σενάριο συμβουλευτικής άρδευσης



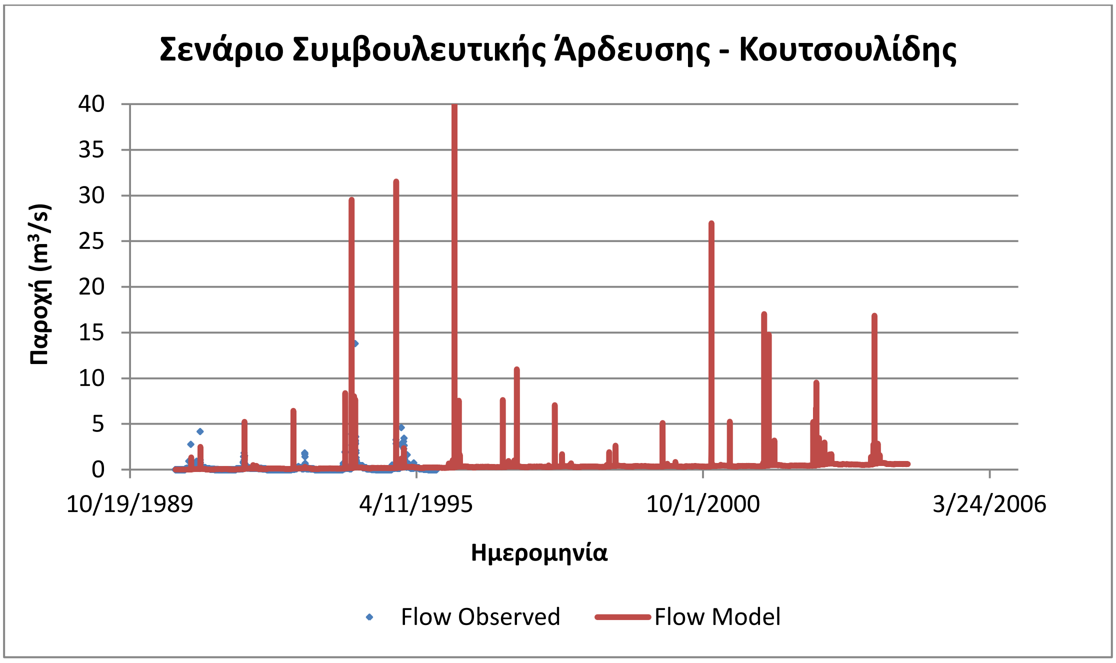
Διάγραμμα 4.15 : Προσομοιωμένες παροχές στη θέση Βότομος για το Σενάριο Συμβουλευτικής Άρδευσης



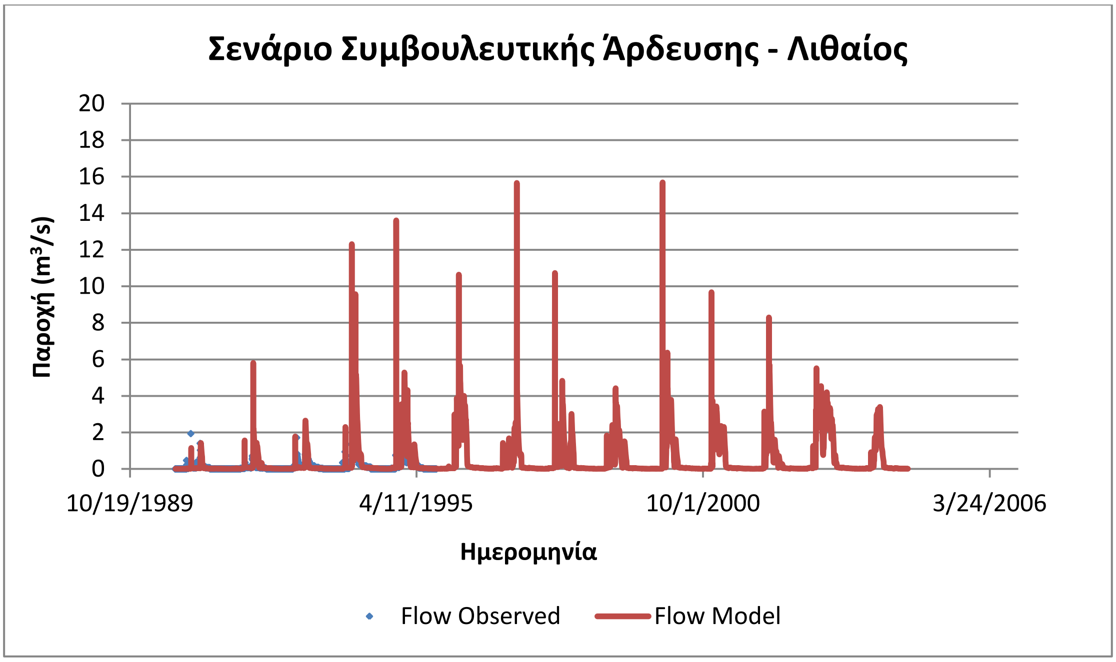
Διάγραμμα 4.16 : Προσομοιωμένες παροχές στη θέση Γέργερη για το Σενάριο Συμβουλευτικής Άρδευσης



Διάγραμμα 4.17 : Προσομοιωμένες παροχές στη θέση Γεροπόταμος για το Σενάριο Συμβουλευτικής Άρδευσης

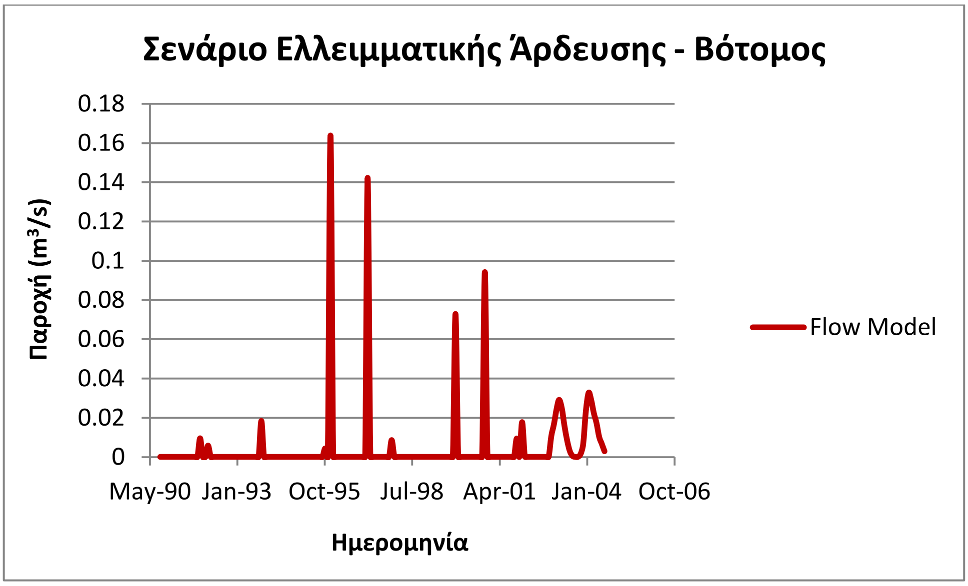


Διάγραμμα 4.18 : Προσομοιωμένες παροχές στη θέση Κουτσουλίδης για το Σενάριο Συμβουλευτικής Άρδευσης

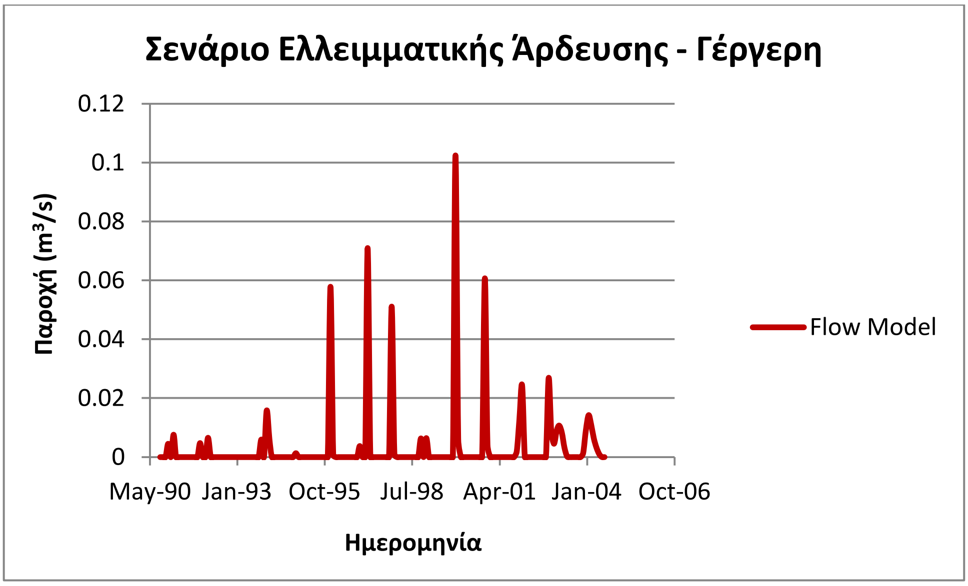


Διάγραμμα 4.19 : Προσομοιωμένες παροχές στη θέση Λιθαίος για το Σενάριο Συμβουλευτικής Άρδευσης

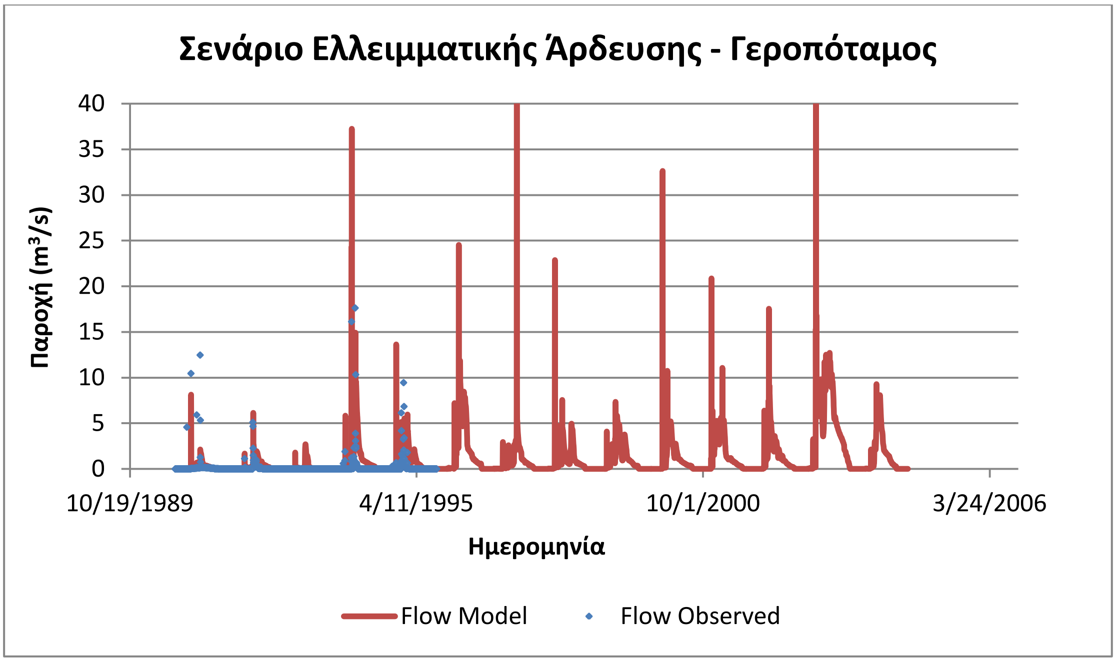
4.5.2.2. Σενάριο ελλειμματικής άρδευσης



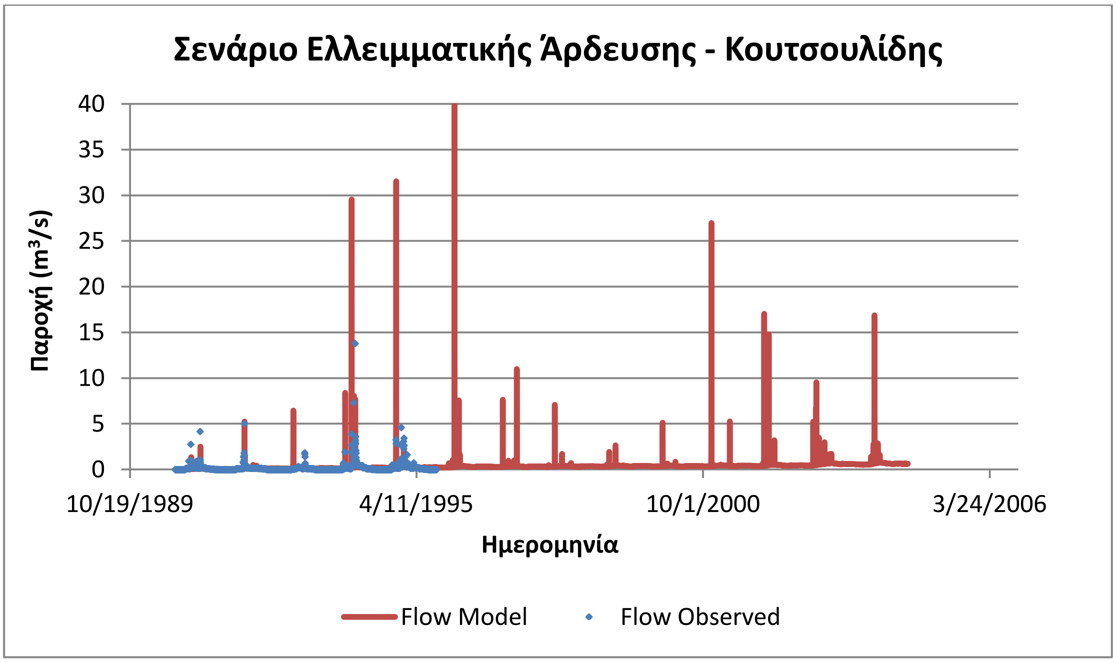
Διάγραμμα 4.20 : Προσομοιωμένες παροχές στη θέση Βότομος για το Σενάριο Ελλειμματικής Άρδευσης



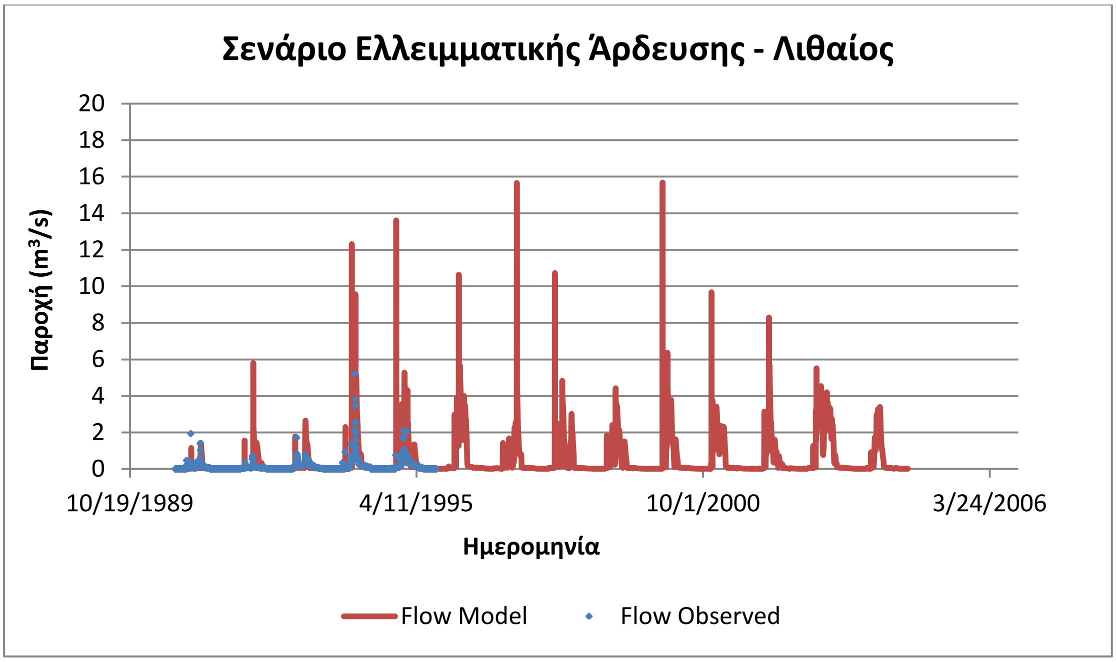
Διάγραμμα 4.21 : Προσομοιωμένες παροχές στη θέση Γέργερη για το Σενάριο Ελλειμματικής Άρδευσης



Διάγραμμα 4.22 : Προσομοιωμένες παροχές στη θέση Γεροπόταμος για το Σενάριο Ελλειμματικής Άρδευσης

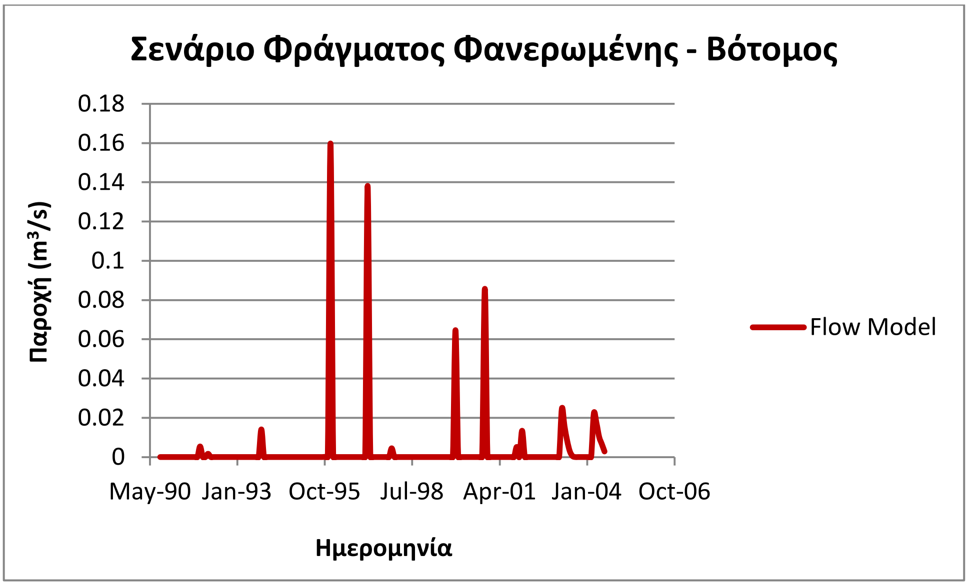


Διάγραμμα 4.23 : Προσομοιωμένες παροχές στη θέση Κουτσουλίδης για το Σενάριο Ελλειμματικής Άρδευσης

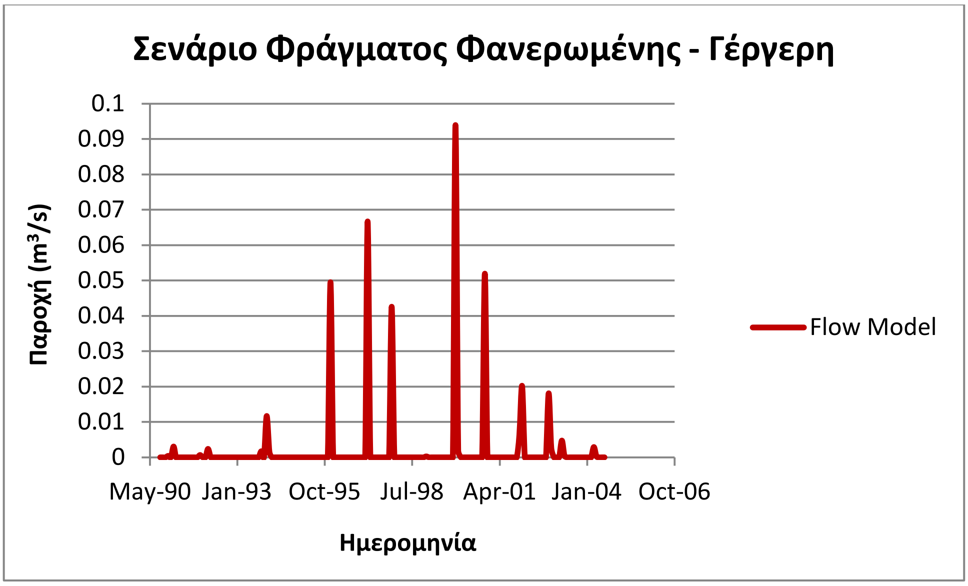


Διάγραμμα 4.24 : Προσομοιωμένες παροχές στη θέση Λιθαίος για το Σενάριο Ελλειμματικής Άρδευσης

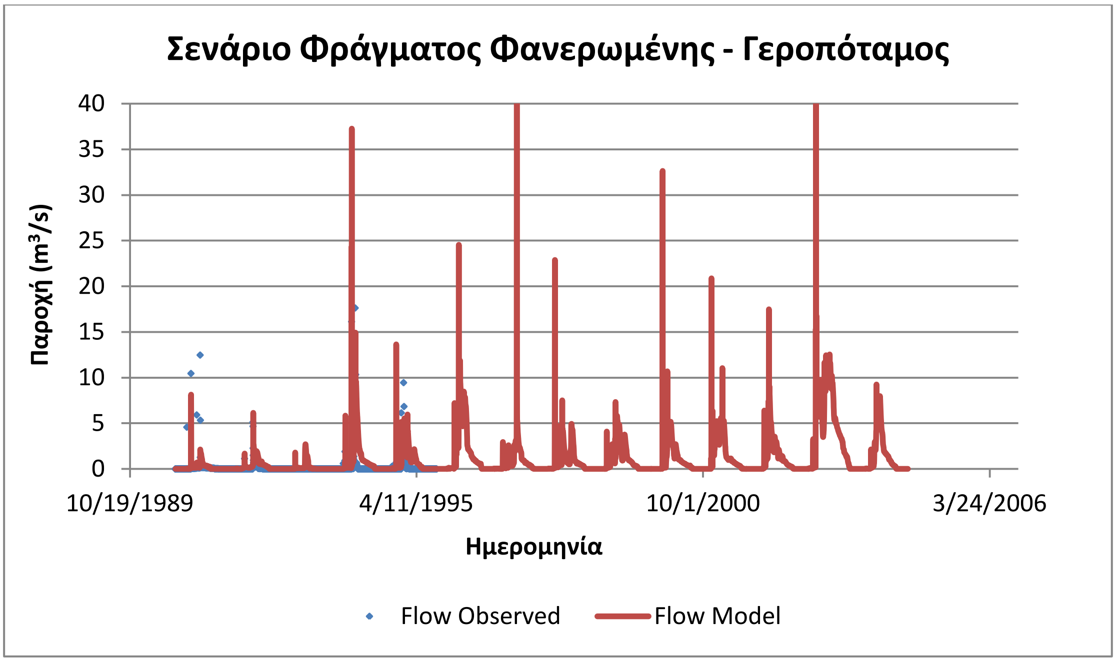
4.5.2.3. Σενάριο λειτουργίας φράγματος Φανερωμένης



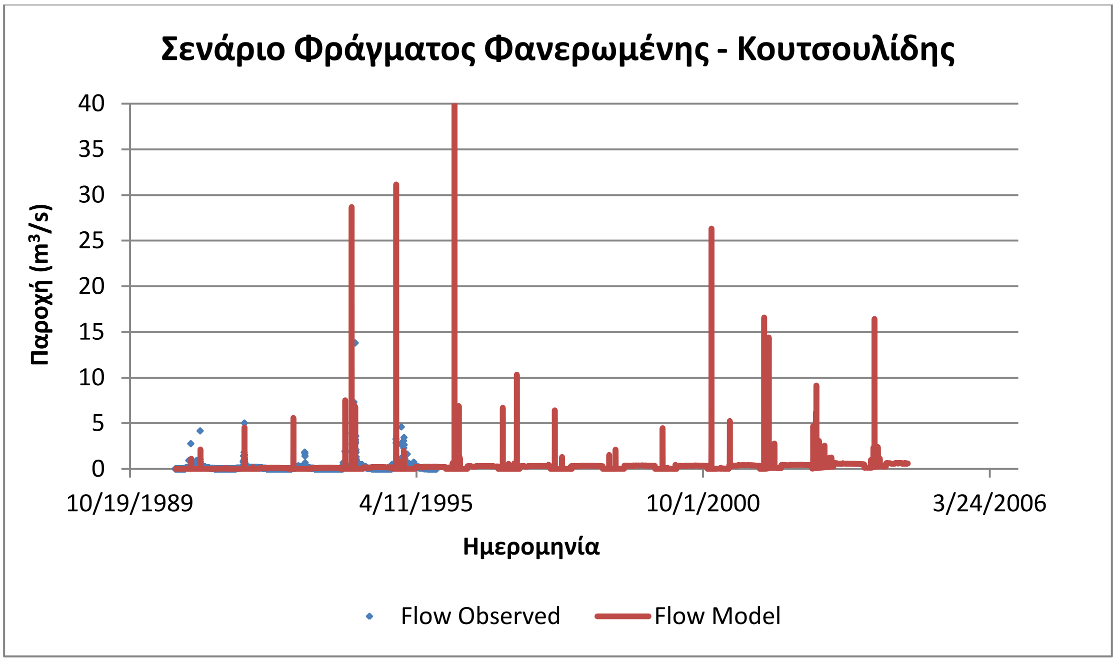
Διάγραμμα 4.25 : Προσομοιωμένες παροχές στη θέση Βότομος για το Σενάριο Λειτουργίας του φράγματος της Φανερωμένης



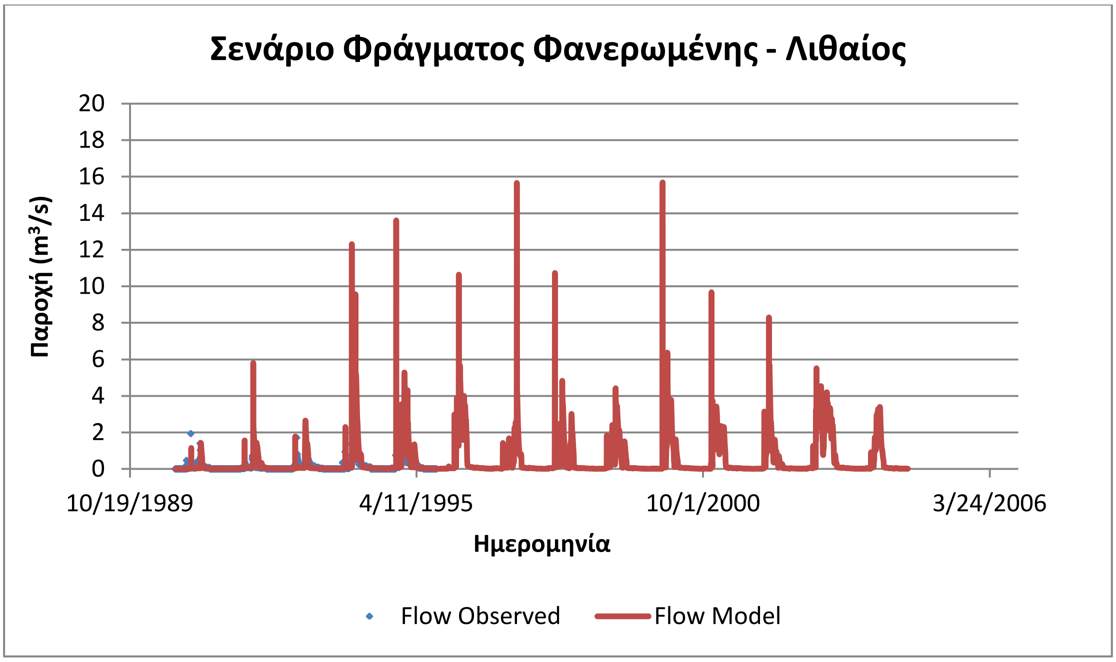
Διάγραμμα 4.26 : Προσομοιωμένες παροχές στη θέση Γέργερη για το Σενάριο Λειτουργίας του φράγματος της Φανερωμένης



Διάγραμμα 4.27 : Προσομοιωμένες παροχές στη θέση Γεροπόταμος για το Σενάριο Λειτουργίας του φράγματος της Φανερωμένης



Διάγραμμα 4.28 : Προσομοιωμένες παροχές στη θέση Κουτσουλίδης για το Σενάριο Λειτουργίας του φράγματος της Φανερωμένης



Διάγραμμα 4.29 : Προσομοιωμένες παροχές στη θέση Λιθαίος για το Σενάριο Λειτουργίας του φράγματος της Φανερωμένης

Στον Πίνακα 4.23 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων του υδατικού ισοζυγίου για την υδρολογική λεκάνη του Γεροπόταμου για το χρονικό διάστημα 1990 - 2004 όπως διαμορφώνονται για τα τρία διαχειριστικά σενάρια καθώς και για την υφιστάμενη κατάσταση.

Πίνακας 4.23 : Τιμές των παραμέτρων του υδατικού ισοζυγίου για την λεκάνη απορροής του Γεροπόταμου για το χρονικό διάστημα 1990 – 2004

Υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης απορροής του ποταμού Γεροπόταμου (1990 – 2004)				
Παράμετρος	**Τιμή (mm)**			
	Υφιστάμενη κατάσταση	**Σενάριο 1**	**Σενάριο 2**	**Σενάριο 3**
Επιφανειακή βροχόπτωση PRECIP	726.20	726.20	726.20	726.20
Χιονόπτωση SNOW FALL	5.93	5.93	5.93	5.93
Τήξη χιονιού SNOW MELT	3.82	3.82	3.82	3.82
Εξάχνωση SUBLIMATION	2.11	2.11	2.11	2.11
Επιφανειακή απορροή SURFACE RUNOFF	13.66	13.66	13.66	13.66
Πλάγια ροή LATERAL SOIL	14.24	14.24	14.24	14.24
TILE	0.00	0.00	0.00	0.00
Κατείσδυση στον αβαθή υδροφορέα GROUNDWATER (SHALL AQ)	74.37	74.74	75.61	74.37
Εξάτμιση και Διαπνοή REVAP	121.45	121.94	123.05	121.45
Κατείσδυση στον βαθύ υδροφορέα DEEP AQ RECHARGE	109.62	109.62	109.62	109.62
Συνολική κατείσδυση υδροφορέα TOTAL AQ RECHARGE	440.24	440.25	440.27	440.24
Συνολική απόδοση νερού TOTAL WATER YLD	102.02	102.39	103.26	102.02
Διήθηση PERCOLATION OUT OF SOIL	439.99	440.00	440.02	439.99
Εξατμισοδιαπνοή ET	451.30	452.00	453.70	451.30
Δυνητική εξατμισοδιαπνοή PET	1518.60	1518.60	1518.60	1518.60
Απώλειες μετάδοσης TRANSMISSION LOSSES	0.25	0.25	0.25	0.25

Με βάση τις τιμές του παραπάνω πίνακα (Πίνακας 4.23) προκύπτει ότι η μεταβολή στις τιμές της συνολικής απόδοσης νερού για τα διάφορα σενάρια σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση είναι πολύ μικρή. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση του σεναρίου 1, η συνολική απόδοση του νερού αυξάνεται κατά 0.4% σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση, ενώ στην περίπτωση του σεναρίου 2 η αντίστοιχη αύξηση είναι της τάξης του 1.2%. Τέλος, στην περίπτωση του σεναρίου 3 δεν παρατηρείται διαφοροποίηση στην τιμή της συνολικής απόδοσης νερού σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση, καθώς θεωρείται ότι το νερό απλά αποθηκεύεται κατά τους χειμερινούς μήνες για να χρησιμοποιηθεί κατά την διάρκεια των ξηρών θερινών.

5. Συμπεράσματα – Προτάσεις

Από την μελέτη της λεκάνης απορροής του ποταμού Γεροπόταμου και την μοντελοποίηση της υδρολογίας του, προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Το υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης απορροής του ποταμού Γεροπόταμου έχει υποστεί σημαντικές μεταβολές κατά την χρονική περίοδο 1970 – 2004. Η αυξημένη ζήτηση σε νερό που παρατηρείται από τις αρχές της δεκαετίας του 1980 λόγω της εντατικοποίησης των καλλιεργειών, έχει οδηγήσει στην υπερεκμετάλλευση του υπόγειου υδατικού δυναμικού της περιοχής.
- Η ανεξέλεγκτη άντληση των υπογείων υδάτων για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών, προκαλεί σε ορισμένες περιπτώσεις την πτώση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα σε σημείο τέτοιο που να μην καθίσταται δυνατή η επαναφορά του στα αρχικά επίπεδα και να παρατηρούνται φαινόμενα στερέματος πηγών. Επιπλέον, η μείωση της επιφανειακής απορροής μπορεί να θέσει σε κίνδυνο τα οικοσυστήματα και να ελαχιστοποιήσει τις απολήψεις επιφανειακού νερού.
- Οι παραδοχές που έγιναν σχετικά με τις αρδευτικές ανάγκες της περιοχής και η υιοθέτηση των τιμών της εμπειρικής άρδευσης ενέχουν μεγάλη αβεβαιότητα, καθώς ο βαθμός προσομοίωσης της παροχής του χειμάρρου Κουτσουλίδη και ιδιαίτερα για την χρονική περίοδο 1990 – 1995 δεν κρίνεται ικανοποιητικός.
- Οι ποσότητες του νερού που χρησιμοποιούνται για την άρδευση των καλλιεργούμενων εκτάσεων υπερβαίνουν σημαντικά τόσο την συμβουλευτική όσο και την εμπειρική άρδευση. Η αλόγιστη εκμετάλλευση των υδατικών πόρων και η εφαρμογή μη ορθολογικών καλλιεργητικών πρακτικών, κυρίως όσον αφορά στην ποσότητα του ύδατος που χρησιμοποιείται για άρδευση, δημιουργεί σοβαρά προβλήματα στην διατήρηση του υδατικού ισοζυγίου της περιοχής, ιδιαίτερα κατά την διάρκεια των θερινών μηνών. Τα προβλήματα αυτά εντείνονται ακόμα περισσότερο τα τελευταία χρόνια (1990 – 1995), καθώς η μη ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων σε συνδυασμό με τις μειωμένες

βροχοπτώσεις, οδηγούν στο μηδενισμό της παροχής των χειμάρρων κατά τους ευαίσθητους θερινούς μήνες.

- Τα συμπεράσματα αυτά επιβεβαιώθηκαν και από το μοντέλο SWAT, το οποίο κατάφερε να προσομοιώσει σε ικανοποιητικό βαθμό την υδρολογία της λεκάνης απορροής του ποταμού Γεροπόταμου και να καταδείξει τις ευαίσθητες χρονικές περιόδους.
- Το μοντέλο SWAT είναι ένα πολύ ευέλικτο και αξιόπιστο εργαλείο στη λήψη αποφάσεων για τη διαχείριση των υδάτων, ειδικά κάτω από την ανάγκη για εναρμόνιση με την οδηγία πλαίσιο και ότι αν βαθμονομηθεί σωστά, είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό στην εξέταση σεναρίων διαχείρισης λεκανών απορροής στη Μεσόγειο.
- Κατά συνέπεια αναδείχθηκε η αναγκαιότητα λήψης μέτρων και εφαρμογής ορθολογικότερων διαχειριστικών πρακτικών στην λεκάνη απορροής του ποταμού Γεροπόταμου.
- Η εφαρμογή των προτεινόμενων διαχειριστικών πρακτικών στο βαθμονομημένο μοντέλο της λεκάνης απορροής του ποταμού Γεροπόταμου κατέδειξε ότι ο περιορισμός των αρδευτικών αναγκών στα επίπεδα της συμβουλευτικής ή ακόμα και της ελλειμματικής άρδευσης, δύναται να οδηγήσει στην αύξηση της αποδιδόμενης ποσότητας νερού.
- Ωστόσο, επειδή, σύμφωνα με τα αποτελέσματα των διαφόρων σεναρίων, η παρατηρούμενη βελτίωση είναι πολύ μικρή έως ανεπαίσθητη, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι απαιτείται η λήψη και άλλων επιπρόσθετων μέτρων, όπως η κατασκευή των κατάλληλων υδραυλικών έργων (π.χ. φράγματα) ώστε να αξιοποιηθούν τα επιφανειακά ύδατα.
- Η βιωσιμότητα των υδατικών πόρων της λεκάνης απορροής του Γεροπόταμου μπορεί να διασφαλιστεί μόνο με την συνδυαστική χρήση των επιφανειακών και υπογείων υδάτων.

Από όλα τα παραπάνω, λοιπόν, γίνεται κατανοητή η αναγκαιότητα ανάπτυξης ελεγκτικών μηχανισμών, ούτως ώστε να μπορέσει να περιοριστεί η ανεξέλεγκτη εκμετάλλευση του υπόγειου υδατικού δυναμικού της περιοχής. Απώτερος στόχος είναι η σταθεροποίηση του υδατικού ισοζυγίου και η σταδιακή επαναφορά του συστήματος σε μια βιώσιμη κατάσταση. Προς την κατεύθυνση αυτή, τα μέτρα που προτείνονται είναι τα εξής:

- Εγκατάσταση μετεωρολογικών σταθμών, για την πλήρη κάλυψη της περιοχής και εξασφάλιση όλων των απαιτούμενων πρωτογενών δεδομένων, καθώς επίσης και εκσυγχρονισμός των υπαρχόντων σταθμών και οργάνων.
- Δημιουργία καλύτερου δικτύου παρακολούθησης, με εγκατάσταση σταθμών καταγραφής της παροχής σε περισσότερες θέσεις εντός της λεκάνης απορροής.
- Εγκατάσταση δικτύου γεωτρήσεων για την εντατική παρακολούθηση της στάθμης του υπόγειου υδροφορέα, ώστε να επιτευχθεί καλύτερη κατανόηση των φυσικών μηχανισμών που λαμβάνουν χώρα.
- Καταγραφή της ακριβούς θέσης των γεωτρήσεων και των χαρακτηριστικών τους (παροχή, περίοδος λειτουργίας).
- Καταγραφή των αρδευόμενων εκτάσεων, καθώς επίσης και της ποσότητας του ύδατος για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών.
- Άμεση παύση της ανεξέλεγκτης άρδευσης και εφαρμογή των προτεινόμενων διαχειριστικών πρακτικών.
- Εξέταση εναλλακτικών σεναρίων αλλαγής χρήσεων γης και εφαρμογή καλλιεργειών με μικρότερες αρδευτικές ανάγκες.
- Μελέτη και κατασκευή υδραυλικών έργων (π.χ. φραγμάτων) σε κατάλληλες θέσεις, ώστε να αξιοποιηθούν τα επιφανειακά ύδατα και να χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη διαφόρων αναγκών, κυρίως αρδευτικών, περιορίζοντας την περαιτέρω επιβάρυνση του υπόγειου υδατικού δυναμικού.
- Ενημέρωση και ευαισθητοποίηση της τοπικής κοινωνίας σχετικά με τα περιβαλλοντικά προβλήματα που έχουν ανακύψει και καλλιέργεια περιβαλλοντικής συνείδησης.

Βιβλιογραφία

Διεθνής Βιβλιογραφία

1. Ajami, N.K., Gupta, H., Wagener, T., Sorooshian, S., 2004. Calibration of a semi-distributed hydrologic model for streamflow estimation along a river system. Journal of Hydrology, 298, 112-135.
2. Arabi, M., Govindaraju, R.S., Hantush, M.M., Engel, B.A., 2006. Role of watershed subdivision on modeling the effectiveness of Best Management Practices with SWAT. JAWRA 42 (2), 513-528.
3. Arabi, M., Frankenberger, J.R., Engel, B.A., Arnold, J.G., 2008. Representation of agricultural conservation practices with SWAT. Hydrological processes 22, 3042-3055.
4. Arnold, J.G., Williams, J.R., Maidment, D.R., 1995. Continuous – time water and sediment-routing model for large basins. Journal of Hydraulic Engineering 121 (2), 171-183.
5. Arnold, J.G., Allen, P.M., 1996. Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds. Journal of Hydrology 176, 57-77.
6. Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., Williams J.R., 1998. Large area hydrologic modeling and assessment: Part I: Model development. J. American Water Resources Assoc. 34 (1), 73-89.
7. Arnold, J.G., Fohrer, N., 2005. SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling. Hydrol. Process. 19, 563-572.
8. Beasley, D.B., Huggins, L.F., Monke, E.J., 1980. ANSWERS-a model for watershed planning. Trans. Am. Soc. Agric. Eng. 23, 938–944.
9. Behera, S., Panda, R.K., 2006. Evaluation of management alternatives for an agricultural watershed in a sub-humid subtropical region using a physical process based model. Agric. Ecosyst. Environ. 113, 62-72.
10. Bicknell, B.R., Imhoff, J.C., Kittle Jr., J.L., Jobes, T.H., Donigan Jr., A.S., 2001. User's Manual for Hydrological Simulation Program-FORTRAN, HSPF, Version 12. User's manual. AQUA TERRA Consultants, Mountain View, California, USA, 873 pp.
11. Bobba, A.G., Lam, D.C.L., 1990. Hydrological modeling of acidified Canadian watersheds. Ecological Modelling 50, 5-32.
12. Bobba, A.G., Singh, V.P., Bengtsson, L., 2000. Application of environmental models to different hydrological systems. Ecological Modeling 125 (2000), 15-49.
13. Borah, D.K. and Bera, M., 2003. Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: Review of mathematical bases. Transactions of the ASAE 46 (6), 1553-1566.
14. Borah, D.K. and Bera, M., 2004. Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: Review of applications. Transactions of the ASAE 47 (3), 789-803.
15. Bracmort, K.S., Arabi, M., Frankenberger, J.R., Engel, B.A., Arnold, J.G., 2006. Modeling long-term water quality impact of structural BMPs. Trans. ASAE 49 (2), 367-374.

16. Chaplot, V., Saleh, A., Jaynes, D.B., Arnold, J.G., 2004. Predicting water, sediment and NO_3-N loads under scenarios of land use and management practices in a flat watershed. Water Air Soil Poll. 154, 271-293.
17. Chaplot, V., Saleh, A., Jaynes, D.B., 2005. Effect of the accuracy of spatial rainfall information on the modeling of water, sediment, and NO_3-N loads at the watershed level. Journal of Hydrology 312 (3), 223-234.
18. Chen, C.W., Gherini, S.A., Dean, J.D., Hudson, R.J.M., Goldstein, R.A., 1984. Hydrologic analysis of acid and alkaline lakes. Water Resour. Res. 20, 1875-1882.
19. Demetriou, C., Punthakey, J.F., 1998. Evaluating sustainable groundwater management options using the MIKE-SHE integrated hydrogeological modelling package. Environmental Modelling & Software 14, (2-3), 129-140.
20. Demirel, M.C., Venancio, A., Kahya, E., 2009. Flow forecast by SWAT model and ANN in Pracana basin, Portugal. Advances in Engineering Software 40 (2009), 467-473.
21. Di Luzio, M., Srinivasan, R., Arnold, J.G., 2001. ArcView Interface for SWAT 2000. Blackland Research Center - Texas.
22. Di Luzio, M., Srinivasan, R., Arnold, J.G., 2004. A GIS-coupled hydrological model system for the watershed assessment of agricultural nonpoint and point sources of pollution. Transactions in GIS 8 (1), 113-136.
23. Di Luzio, M., Arnold, J.G., Srinivasan, R., 2005. Effect of GIS data quality on small watershed streamflow and sediment simulations. Hydrological Processes 19 (3), 629-650.
24. Dilks, C.F., Dunn, S.M., Ferrier, R.C., 2003. Benchmarking models for the Water Framework Directive: evaluation of SWAT for use in the Ythan catchment, UK. In: Arnold, J., et al. (eds.), Condensed Abstracts of the 2nd International SWAT Conference, 1-4 July 2003, Bari, Italy, pp. 63-66.
25. Dilks, C.F., Dunn, S.M., Ferrier, R.C., in: Srinivasan, R., Jacobs, J., Day, D., Abbaspour, K. (Eds.), Evaluation of SWAT for use in Development of a River Basin Management Plan for the Ythan Catchment, UK3rd International SWAT Conference, Zurich, 11-15 July, 2005.
26. EC, 2000. European Parliament and the Council of the European Union. Directive 2000/60/EC establishing a framework for the Community action in the field of water policy. Official Journal of the European Communities L327, pp. 1-72.
27. EEA-ETC/TE, 2002. CORINE Land Cover update. IandCLC 2000 project, Technical Guidelines.
28. Engel, B., Storm, D., White, M., Arnold, J., Arabi, M., 2007. A Hydrologic ⁄ Water Quality Model Application Protocol. Journal of the American Water Resources Association 43 (5), 1223-1236.
29. ETC, European Topic Centre on Terrestrial Environment, 2005. Corine land cover database (Version 05/2005).
30. Fantechi, R., Peter, D., Balabanis, P., Rubio, J.L., 1995. Desertification in a European context: Physical and socio-economic aspects, Final Report EUR 15415 EN 635 pp., European Commission, Brussels.
31. FitzHugh, T.W., Mackay, D.S., 2000. Impacts of input parameter spatial aggregation on an agricultural nonpoint source pollution model. Journal of Hydrology 236 (1-2), 35-53.

32. Friedman, R., Ansell, C.S., Diamond, S., Haimes, Y.Y., 1984. The use of models for water resources management, planning and policy. Water Resour. Res. 20, 793-802.
33. Gassman, P.W., Reyes, M., Green, C.H., Arnold, J.G., 2007a. SWAT peer-reviewed literature: a review. Proceedings. Third International SWAT Conference, 13-15 July 2005, Zurich, Switzerland.
34. Gassman, P.W., Reyes, M.R., Green, C.H., Arnold, J.G., 2007b. The soil and water assessment tool: Historical development, applications, and future research directions. Trans. ASAE 50 (4), 1211–1250.
35. Geza, M., McCray, J.E., 2008. Effects of soil data resolution on SWAT model stream flow and water quality predictions. Journal of Environmental Management 88 (3), 393-406.
36. Golden Software Inc., 1989. Surfer Version 4 Reference Manual: Golden Software Inc., Golden, Colorado, 534 p.
37. Gupta, H.V., Sorooshian, S., Yapo, P.O., 1999. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. Journal of Hydrologic Engineering 4 (2), 135-143.
38. Gupta, H.V., Khodatalab, N., Wagener, T., Sorooshian, S., 2003. Advances in semi-distributed watershed modeling. EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Geophysical Research Abstracts, Vol. 5, European Geophysical Society, American Geophysical Union, Nice.
39. Harbaugh, A.W., McDonald, M.G., 1996. Programmer documentation for MODFLOW-96, an update to the US Geological Survey modular finite-difference groundwater flow model. USGS Open-File Report, pp. 96–486.
40. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis.
41. Jha, M., Pan, Z., Takle, E.S., Gu, R., 2004. Impacts of climate change on stream flow in the Upper Mississippi River Basin: a regional climate model perspective. J. Geophys. Res. 109, D09105, doi: 10.1029/2003JD003686.
42. Johanson, R.C., Imhoff, J.C., Davis, H.H., 1980. Users' Manual for the Hydrologic Simulation Program-Fortran (HSPF) version No. 5.0, EPA-600/9-80-105, US EPA Environmental Research Laboratory, Athens, GA.
43. Kamari, J., 1985. A model for analyzing lake water acidification on a regional scale. Report # CP-85-48. International Institute for Applied Systems Analysis, 2361 Laxenberg, Austria.
44. Kersebaum, K.C., Steidl, J., Bauer, O., Piorr, H.-P., 2003. Modelling scenarios to assess the effects of different agricultural management and land use options to reduce diffuse nitrogen pollution into the river Elbe. Physics and Chemistry of the Earth 28, 537-545.
45. Kirsch, K., Kirsch, A., Arnold, J.G., 2002. Predicting sediment and phosphorus loads in the Rock River Basin using SWAT. Trans. ASAE 45 (6), 1757-1769.
46. Krause, S., Jacobs, J., Voss, A., Bronstert, A., Zehe, E., 2008. Assessing the impact of changes in landuse and management practices on the diffuse pollution and retention of nitrate in a riparian floodplain. Science of the Total Environment 389, 149-164.

47. Kritsotakis, M. and Tsanis, I.K., 2009. An integrated approach for sustainable water resources management of Mesara basin, Crete, Greece. European Water (EWRA) 27/28, 15 – 30.
48. Krysanova, V., Mueller-Wohlfeil, D.I., Becker, A., 1998. Development and test of a spatially distributed hydrological/water quality model for mesoscale watersheds. Ecological Modelling 106, 261-289.
49. Kusre, B.C., Baruah, D.C., Bordoloi, P.K., Patra, S.C., 2010. Assesment of hydropower potential using GIS and hydrological modeling technique in Kopili River basin in Assam (India). Appl. Energy 87, 298-309.
50. Lam, D.C.L., Bobba, A.G., Jeffries, D.S., Craig, D., 1988. Modeling stream chemistry for the Turkey Lakes watershed: comparison with 1981-1984 data. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 45, 72-80.
51. Lenhart, T., Eckhardt, K., Fohrer, N., Frede, H.-G., 2002. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis. Physics and Chemistry of the Earth 27 (9-10), 645-654.
52. Linsley, R.K., Kohler, M.A., Paulhus, J.L.H., 1988. Hydrology for Engineers. SI Metric Edition, McGraw-Hill, N.Y.
53. Luo, Y., Zhang, M., 2009. Management-oriented sensitivity analysis for pesticide transport in watershed-scale water quality modeling using SWAT. Environmental Pollution 157 (2009), 3370-3378.
54. Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., Veith, T.L., 2007. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. Transactions of the ASABE 50 (3), 885-900.
55. Muleta, M.K. and Nicklow, J.W., 2005. Decision Support for Watershed Management Using Evolutionary Algorithms. Journal of Water Resources Planning and Management 131 (1), 35-44.
56. Muleta, M.K., Nicklow, J.W., Bekele, E.G., 2007. Sensitivity of a Distributed Watershed Simulation Model to Spatial Scale. Journal of Hydrologic Engineering 12 (2), 163-172.
57. Muttiah, R.S., Wurbs, R.A., 2002. Scale-dependent soil and climate variability effects on watershed water balance of the SWAT model. Journal of Hydrology 256 (3), 264-285.
58. Nash, J.E. and Sutcliffe, V., 1970. River flow forecasting through conceptual models, I. A discussion of principles. Journal of Hydrology 10 (3), 282-290.
59. Ndomba, P., Mtalo, F., Killingtveit, A., 2008. SWAT model application in a data scarce tropical complex catchment in Tanzania. Physics and Chemistry of the Earth 33 (2008), 626-632.
60. Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R., 2001. Soil and Water Assessment Tool. Theoretical Documentation, Version 2000. Blackland Research Center, Agricultural Research Service, Texas, USA.
61. Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Srinivasan, R., Williams, J.R., 2002. Soil and Water Assessment Tool. User's Manual. Version 2000. Grassland, Soil & Water Research Laboratory, Temple, Texas, GSWRL Report 02-02, Blackland Research and Extension Center, Temple, Texas, BRC Report 02-06, 412pp.

62. Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R., 2005. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation, Version 2005. Grassland, Soil and Water Research Laboratory; Agricultural Research Service 808 East Blackland Road; Temple, Texas 76502; Blackland Research Center; Texas Agricultural Experiment Station 720 East Blackland Road; Temple, Texas 76502, USA.
63. Nikolaidis, N.P., Rajaram, H., Schnoor, J.L., Georgankakos, K.P., 1988. A generalized soft water acidification model. Water Resources Res. 24, 1983-96.
64. Oeurng, C., Sauvage, S., Sánchez-Pérez, J.-M., 2011. Assessment of hydrology, sediment and particulate organic carbon yield in a large agricultural catchment using the SWAT model. Journal of Hydrology 401, (3-4), 145-153.
65. Pandey, V.K., Panda, S.N., Sudhakar, S., 2005. Modeling of an agricultural watershed using Remote Sensing and a Geographic Information System. Biosyst. Eng. 90 (3), 331-347.
66. Phomcha, P., Wirojanagud, P., Vangpaisal, T., Thaveevouthti, T., 2012. Modeling the impacts of alternative soil conservation practices for an agricultural watershed with the SWAT model. Procedia Engineering 32 (2012), 1205-1213.
67. Pisinaras, V., Petalas, C., Gikas, G., Gemitzi, A., Tsihrintzis, V., 2010. Hydrological and water quality modeling in a medium-sized basin using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT). Desalination Volume 250 (2010), 274–286.
68. Refsgaard, J.C., 1997. Parametrisation, calibration and validation of distributed hydrological models. Journal of Hydrology 198 (1-4), 69-97.
69. Rekolainen, S., Kamari, J., Hiltunen, M., 2004. A conceptual framework for identifying the need and role of models in the implementation of the Water Framework Directive, International Journal of River Basin Management 4 (2004), 347-352.
70. Rode, M., Klauer, B., Petry, D., Volk, M., Wenk, G., Wagenschein, D., 2008. Integrated nutrient transport modeling with respect to the implementation of the European WFD: the Weiße Elster case study, Germany. Water SA 34 (4), 490-496.
71. Romanowicz, A.A., Vanclooster, M., Rounsevell, M., Junesse, I.L., 2005. Sensitivity of the SWAT model to the soil and land use data parametrisation: a case study in the Thyle catchment, Belgium. Ecological Modelling 187 (1), 27-39.
72. Salas, J.D., Delleur, J.W., Yevjevich, V., Lane, W.L., 1980. Applied Modeling of Hydrologic Time Series, Water Resources Publications, Littleton, Colorado.
73. Saleh, A., Arnold, J.G., Gassman, P.W., Hauck, L.W., Rosenthal, W.D., Williams, J.R., McFarland, A.M.S., 2000. Application of SWAT for the upper north Bosque watershed. Trans. ASAE 43 (5), 1077-1087.
74. Schnoor, J.L., Palmer, W.D., Jr & Glass, G.E., 1984. Modeling impacts of acid precipitation for northeastern Minnesota. In Modeling of Total Acid Precipitation Impact, ed. J. L. Schnoor. Butterworth, Boston, MA, 155-73.
75. Shanti, C., Arnold, J.G., Williams, J.R., Dugas, W.A., Hauck, L., 2001. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. J. Am. Water Res. Assoc. 37 (5), 1169-1188.
76. Shanti, C., Srinivasan, R., Arnold, J.G., Williams, J.R., 2003. A modeling approach to evaluate the impacts of water quality management plans implemented in the Big

Cypress Creek Watershed. In: Second conference on Watershed Management to Meet Emerging TMDL Environmental Regulations, Albuquerque, NM, pp. 384-394.

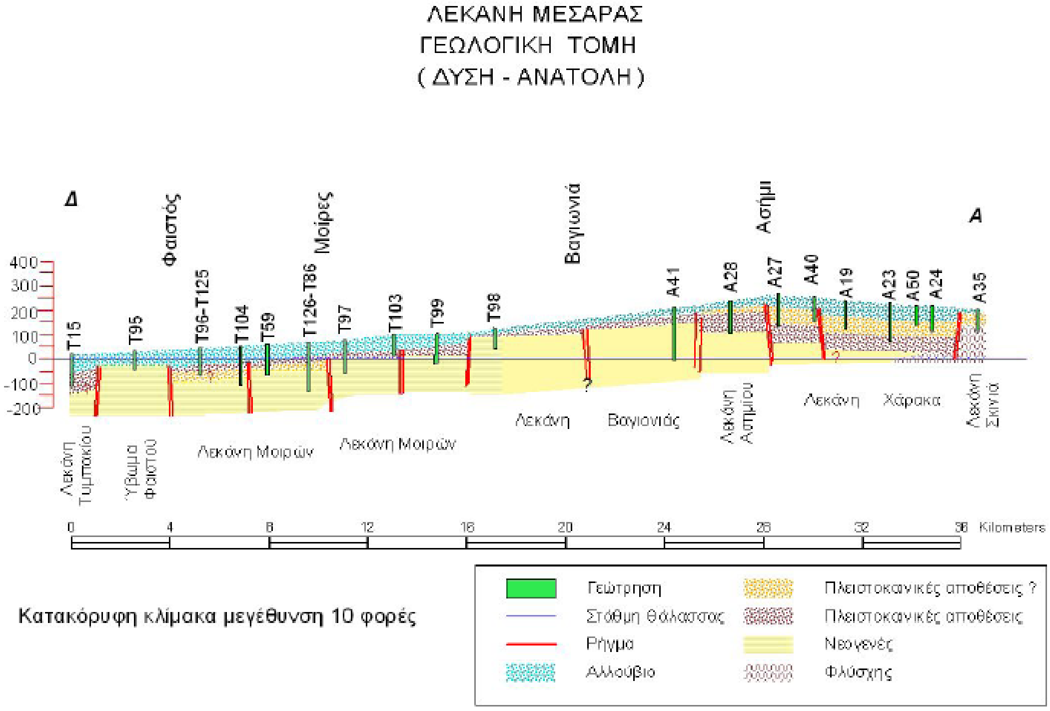
77. Shanti, C., Srinivasan, R., Arnold, J.G., Williams, J.R., 2006. A modeling approach to evaluate the impacts of water quality management plans implemented in a watershed in Texas. Environmental Modeling and Software 21, 1141-1157.
78. Shen, Z.Y., Gong, Y.W., Li, Y.H., Hong, Q., Xu, L., Liu, R.M., 2009. A comparison of WEPP and SWAT for modeling soil erosion of the Zhangjiachong watershed in the three Gorges reservoir area. Ag Water Mgmt 96, 1435-1442.
79. Srinivasan, R., Ramanarayanan, T.S., Arnold, J.G., Bednarz, S.T., 1998. Large area hydrologic modeling and assessment. Part II: Model application. J. American Water Resources Assoc. 34 (1), 91-102.
80. Starfield, A.M., Cundall, P.A., 1988. Towards a methodology for rock mechanics modeling. Internat. J. Rock Mech. Miner. Sci. Geomech. 25, 99-106.
81. Stone, M.C., Hotchkiss, R.H., Hubbard, C.M., Fontaine, T.A., Mearns, L.O., Arnold, J.G., 2001. Impacts of climate change on Missouri River basin water yield. J. Am. Water Resour. Assoc. 37, 1119-1129.
82. Tripathi, M.P., Panda, R.K., Raghuwanshi, N.S., 2005. Development of effective management plan for critical subwatersheds using SWAT model. Hydrol. Process. 19, 809-826.
83. Tsihrintzis, V.A., Fuentes, H.R., Gadipudi, R., 1996. Modeling prevention alternatives for nonpoint source pollution at a wellfield in Florida, Water Resources Bulletin, Journal of the American Water Resources Association (AWRA) 32 (2), 317-331.
84. Ullrich, A., Volk, M., 2009. Application of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to predict the impact of alternative management practices on water quality and quantity. Agricultural Water Management 96 (2009), 1207-1217.
85. USDA, Soil Conservation Service, 1972. Section 4: Hydrology in National Engineering Handbook. SCS.
86. Vache, K.B., Eilers, J.M., Santelmann, M.V., 2002. Water quality modeling of alternative agricultural scenarios in the U.S. Corn Belt. JAWRA 38 (3), 773-787.
87. Van Grinsven, H.J.M., Driscoll, C.T., Tiktak, 1995. Workshop on comparison of forest-soil-atmospheric models: preface. Ecol. Model. 83, 1-6.
88. Van Griensven, A., Meixner, T., Grunwald, S., Bishop, T., Diluzio, M., Srinivasan, R., 2006. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. Journal of Hydrology 324 (1-4), 10-23.
89. Volk, M., Liersch, S., Schmidt, G., 2009. Towards the implementation of the European Water Framework Directive? Lessons learned from water quality simulations in an agricultural watershed. Land Use Policy 26 (3), 580-588.
90. Williams, J.R., 1969. Flood routing with variable travel time or variable storage coefficients. Trans. ASAE 12 (1), 100-103.
91. Young, R.A., Onstad, C.A., Bosch, D.D, Anderson, W.P., 1987. AGNPS – a nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds. Journal of Soil and Water Conservation 44 (2), 169-173.
92. Zheng, C., 1990. MT3D: A modular three-dimensional transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems.

Ελληνική Βιβλιογραφία

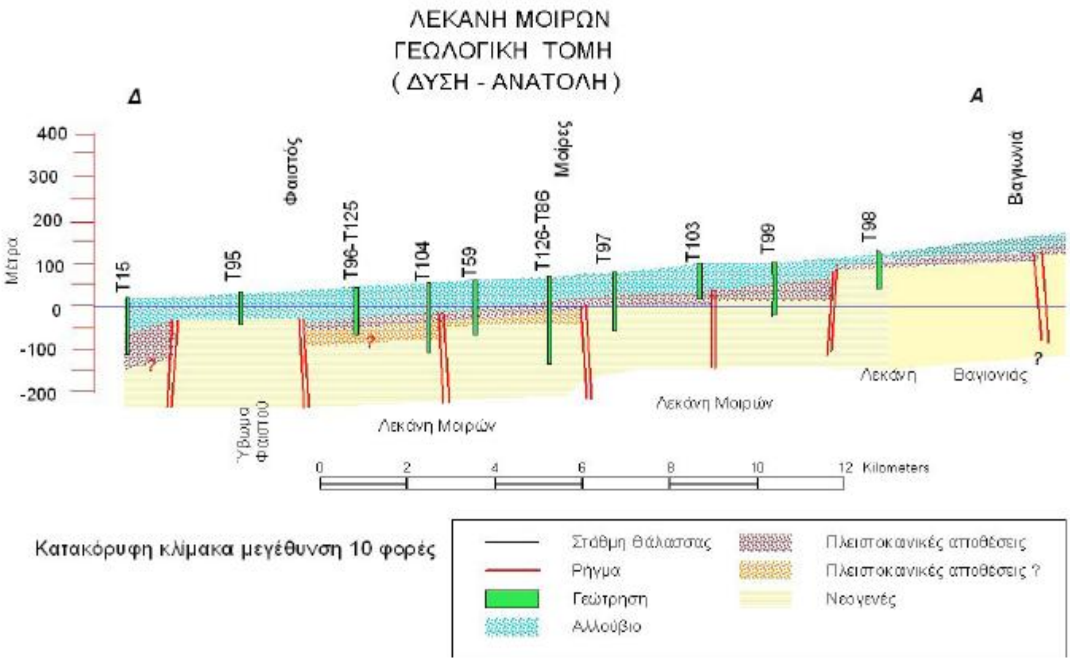
1. Ευστρατιάδης, Α., 2008. Μη γραμμικές μέθοδοι σε πολυκριτηριακά προβλήματα βελτιστοποίησης υδατικών πόρων, με έμφαση στη βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων. Διδακτορική Διατριβή. Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υδατικών πόρων και Περιβάλλοντος, ΕΜΠ. Αθήνα, Φεβρουάριος, 2008.
2. Κασσωτάκη, Ε., 2011. Ανάπτυξη μεθοδολογίας υπολογισμού ολικών μέγιστων ημερήσιων φορτίων με τη χρήση στατιστικής υδρολογίας και σύνθετων υδρολογικών μοντέλων προσομοίωσης λεκάνης απορροής. Μεταπτυχιακή Διατριβή. Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος. Χανιά, 2011.
3. Κουτούπα-Ρεγκάκου, Ε., 2008. Δίκαιο του Περιβάλλοντος. Γ’ έκδοση επαυξημένη, Εκδόσεις Σάκκουλα, Αθήνα – Θεσσαλονίκη, 2008.
4. Κριτσωτάκης, Μ., 2006. Διαχείριση του νερού στη Κρήτη. Το σύστημα υποστήριξης λήψης αποφάσεων (DSS). Παράδειγμα Εφαρμογής. Ορθολογική Διαχείριση Υδάτων. Ελληνική Εταιρεία για την Προστασία του Περιβάλλοντος και της Πολιτιστικής Κληρονομιάς, Αθήνα, 13/3/2006.
5. Κριτσωτάκης, Μ., 2009. Διαχείριση υδατικών πόρων Μεσαράς Κρήτης. Διδακτορική Διατριβή. Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Έλεγχος ποιότητας και διαχείριση περιβάλλοντος», Πολυτεχνείο Κρήτης. Χανιά, Μάιος, 2009.
6. Μαμάσης, Ν., 2007. Παρουσιάσεις στο μάθημα «Προχωρημένη Υδρολογία» του ΔΠΜΣ «Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», ΕΜΠ.
7. Μιμίκου, Μ.Α., 2006. Τεχνολογία Υδατικών Πόρων. Γ' έκδοση, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2006.
8. Ο.ΑΝ.Α.Κ. – ΕΜΠ, 1994. Ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης υδατικών πόρων Ανατολικής Κρήτης, Αθήνα, 1994.
9. Παπαγρηγορίου, Σ., Καϊμάκη, Σ., Νιάδας, Ι., Γκουβάτσου, Ε., Περλέρος, Β., 2001. Μελέτη Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Πόρων Κρήτης, Αθήνα.
10. Σκουλικίδης, Ν. και Γκρίτζαλης, Κ., 2006. Μελέτη πιλοτικής εφαρμογής της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ σε λεκάνη απορροής διαλείπουσας ροής - Εκτίμηση της οικολογικής κατάστασης του ποταμοχειμάρρου Αναποδάρη με βιολογικά και υδροχημικά κριτήρια. Τελική Τεχνική Έκθεση, ΕΛΚΕΘΕ, σελ. 135.
11. Φασουλάς, Χ., 2000. Οδηγός Υπαίθρου για τη Γεωλογία της Κρήτης. Εκδόσεις Μουσείου Φυσικής Ιστορίας Παν/μιου Κρήτης, (ελληνική σε τρίτη και αγγλική σε δεύτερη έκδοση), Ηράκλειο, 2000.
12. Φυτρολάκης, Ν., 1980. Η γεωλογική δομή της Κρήτης. Προβλήματα, παρατηρήσεις και συμπεράσματα. Θέση επί υφηγεσία Ε.Μ.Π. Αθήνα, 1980.
13. Χαρτζουλάκης, Κ.,. Συμβουλευτικό σύστημα τηλε – ενημέρωσης των αγροτών για την άρδευση των καλλιεργειών. Ινστιτούτο Ελιάς και Υποτροπικών Φυτών Χανίων.

Παραρτήματα

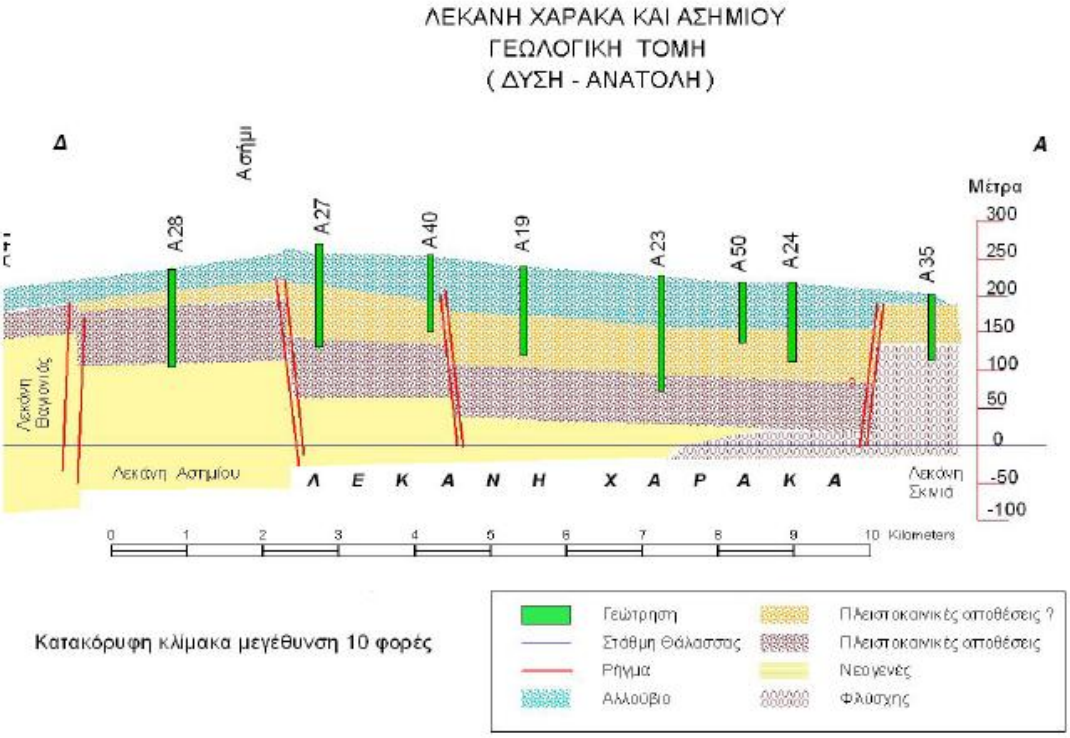
Παράρτημα Α – Γεωλογικές τομές



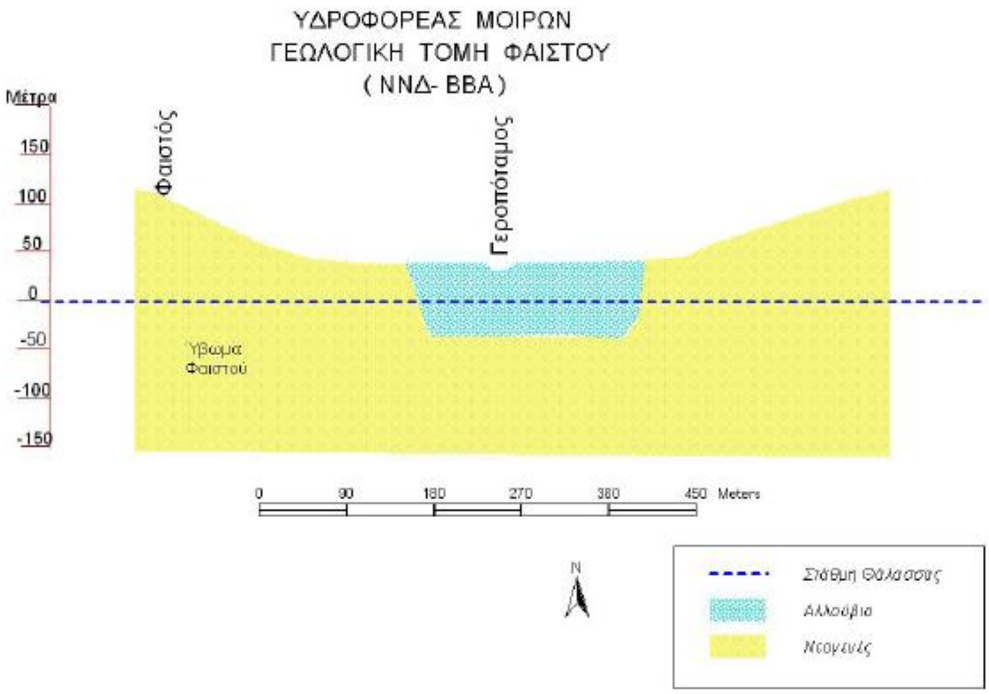
Εικόνα Π1 : Γεωλογική τομή Φαιστός – Χάρακας (Ανατολή – Δύση), η θέση της ενδείκνυται ως 1



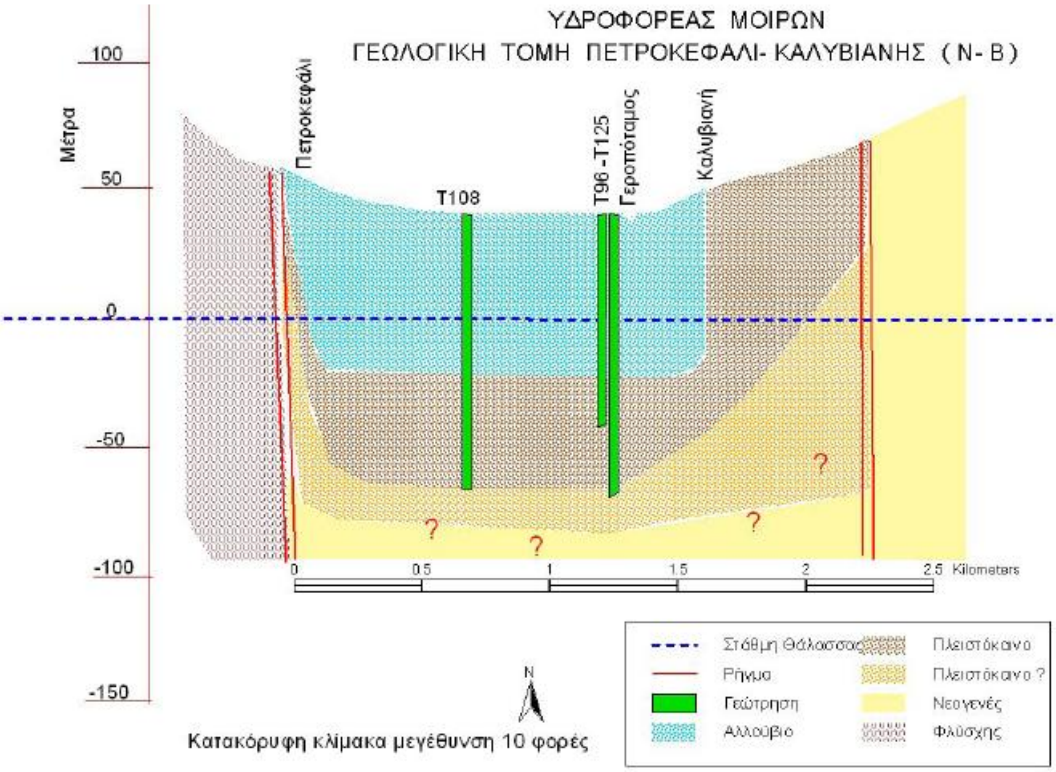
Εικόνα Π2 : Γεωλογική τομή λεκάνης Μοιρών (Ανατολή – Δύση), μεγέθυνση τομής Π1



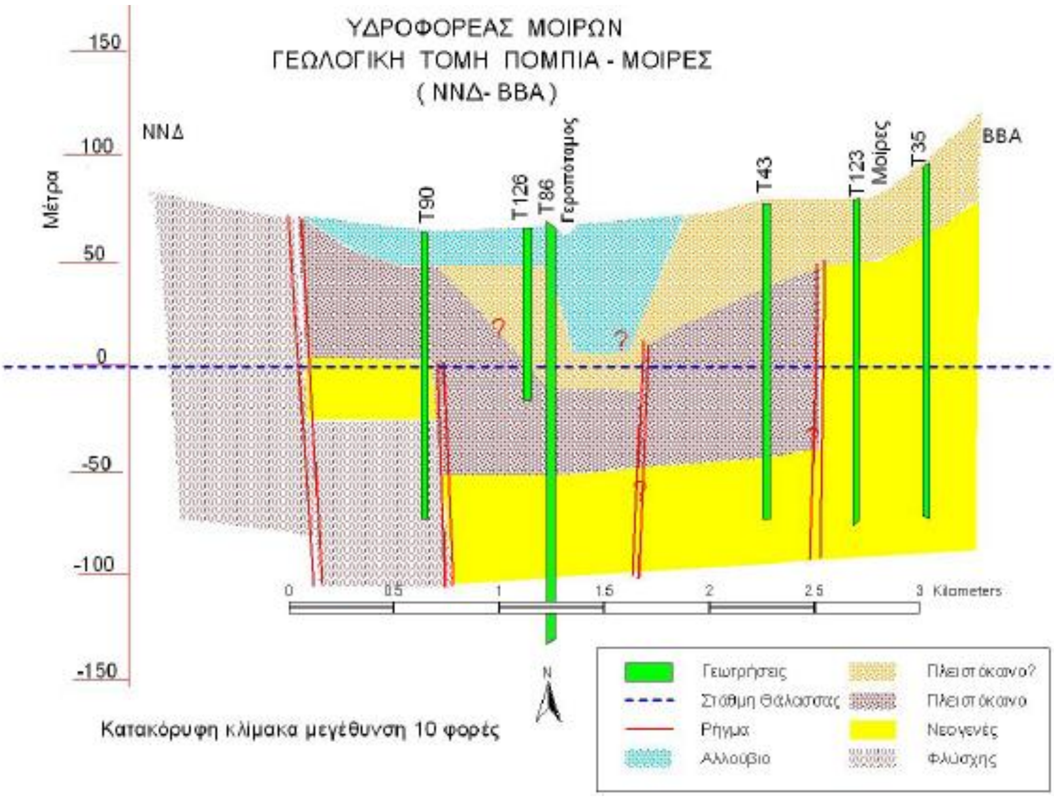
Εικόνα Π3 : Γεωλογική τομή λεκανών Ασημίου – Χάρακα (Ανατολή – Δύση), μεγέθυνση τομής Π1



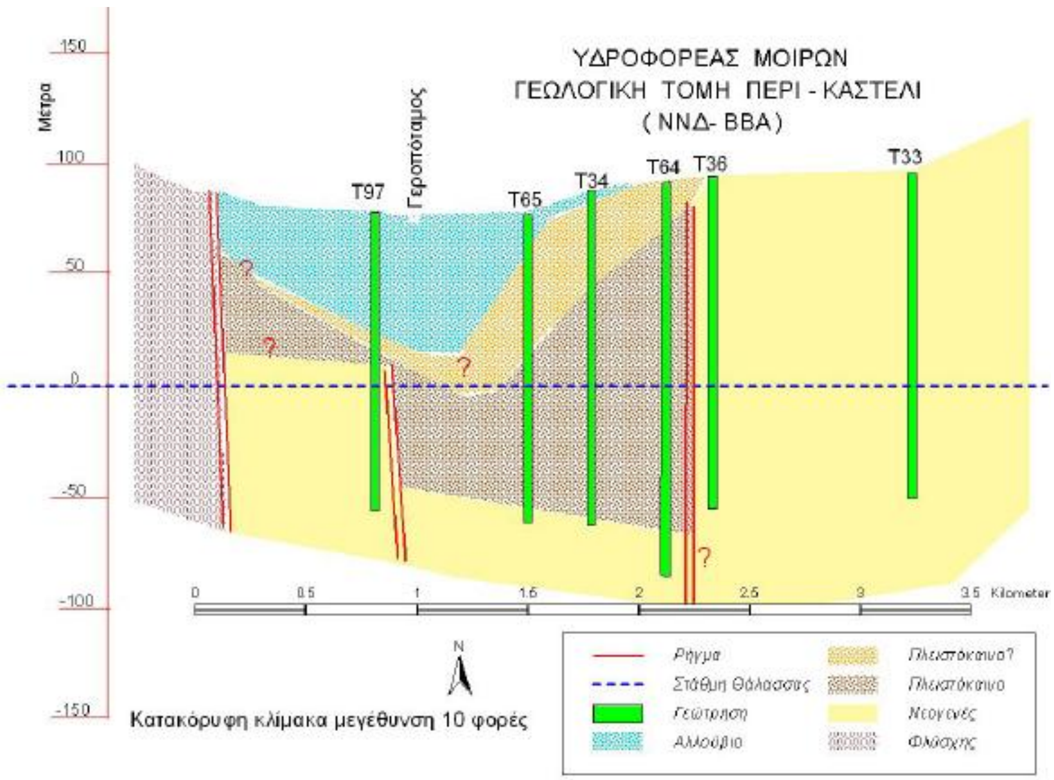
Εικόνα Π4 : Γεωλογική τομή Φαιστός (ΒΒΑ - ΝΝΔ), η θέση της ενδείκνυται ως 2



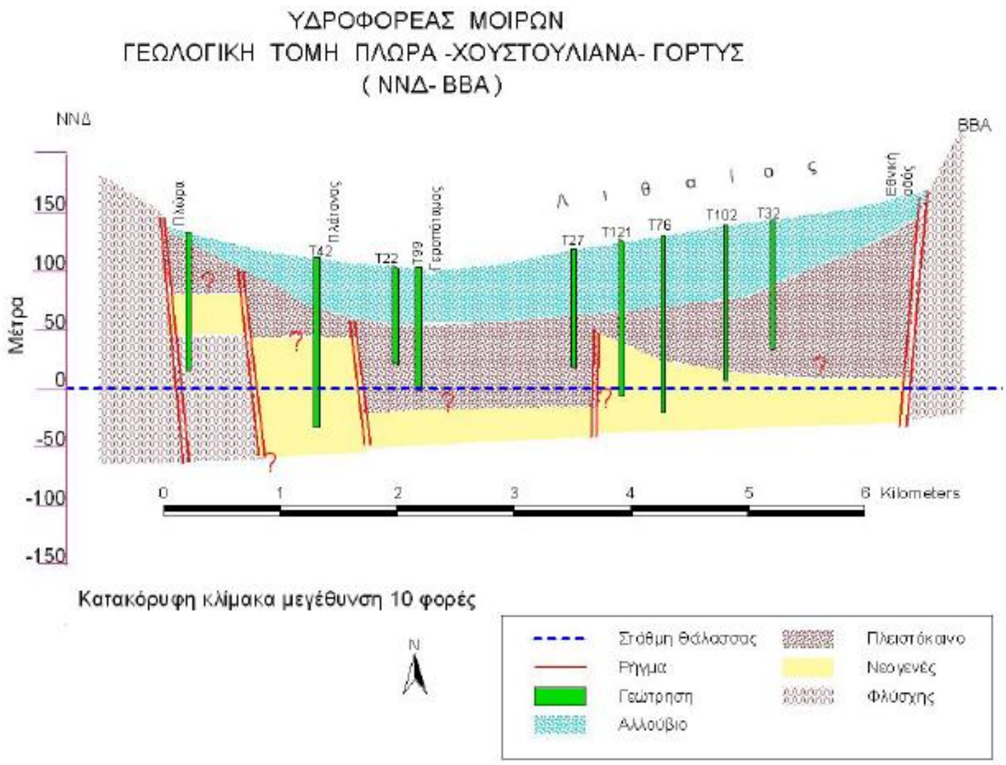
Εικόνα Π5 : Γεωλογική τομή Πετροκεφάλι – Καλυβιανή (Β - Ν), η θέση της ενδείκνυται ως 3



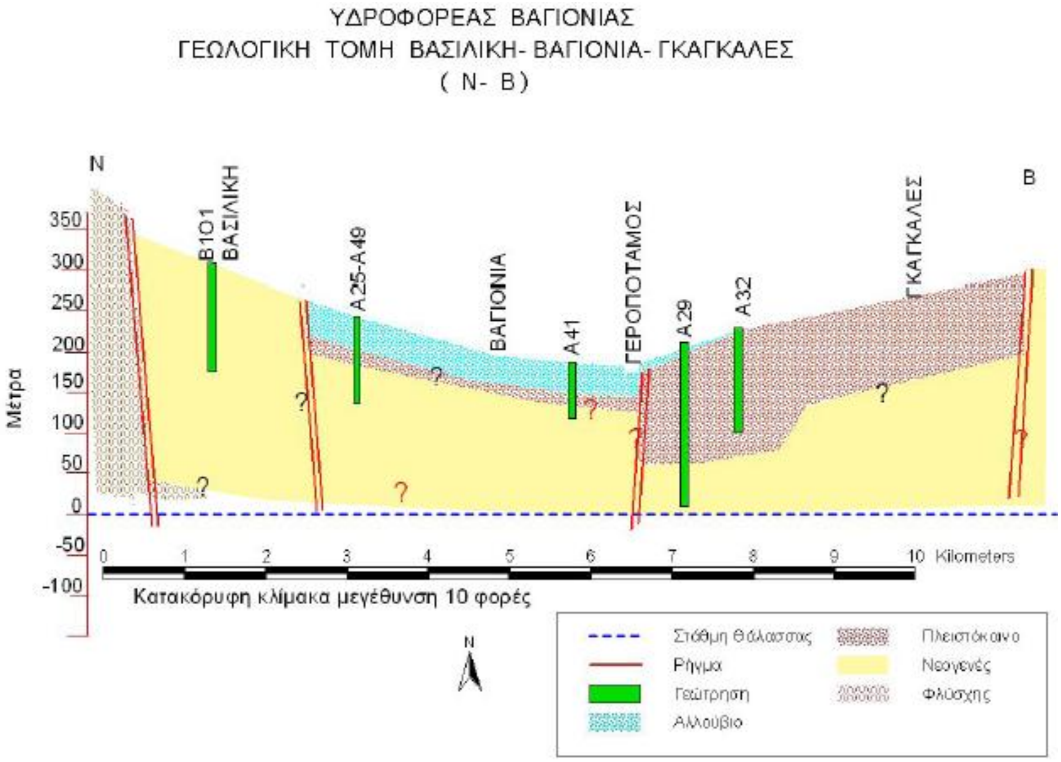
Εικόνα Π6 : Γεωλογική τομή Πόμπια – Μοίρες (ΒΒΑ - ΝΝΔ), η θέση της ενδείκνυται ως 4



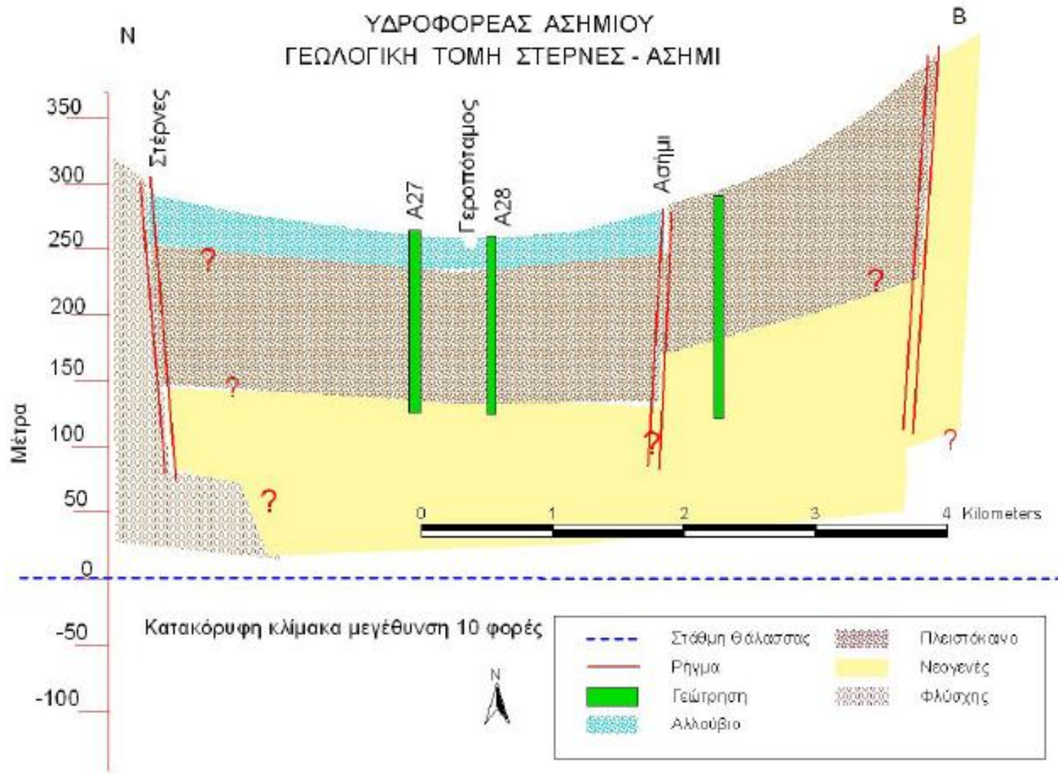
Εικόνα Π7 : Γεωλογική τομή λεκάνης Μοιρών Πέρι – Καστέλι (ΝΝΔ - ΒΒΑ), η θέση της ενδείκνυται ως 5



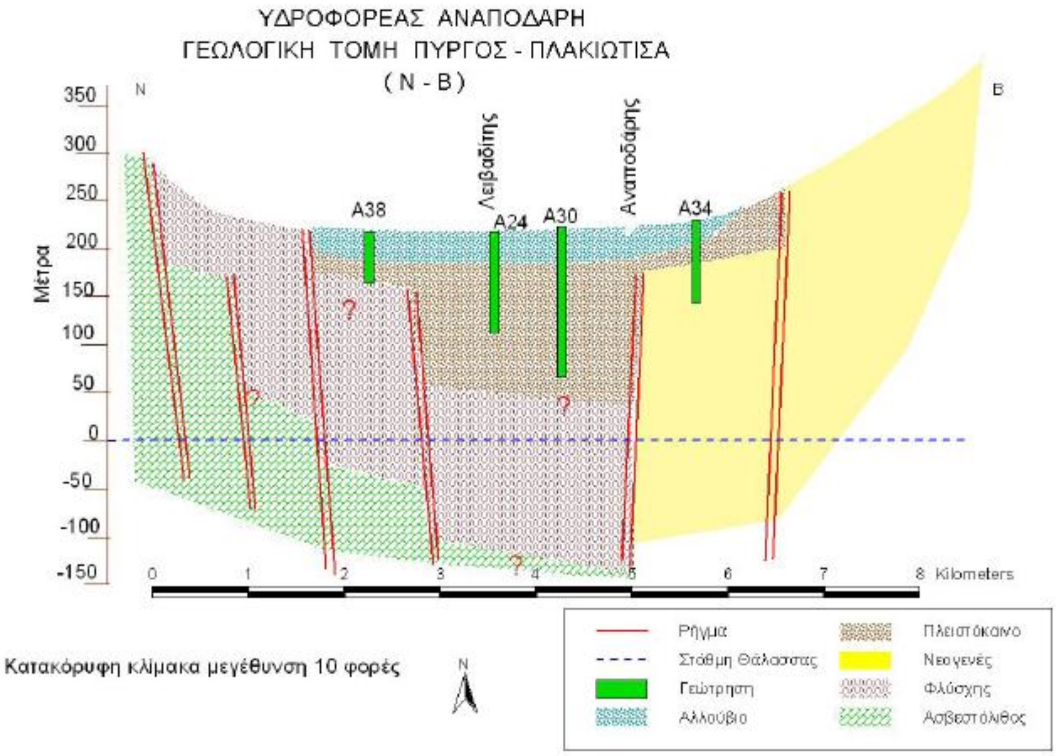
Εικόνα Π8 : Γεωλογική τομή λεκάνης Μοιρών Πλώρα – Χουστουλιανά – Γόρτυς (ΝΝΔ - ΒΒΑ), η θέση της ενδείκνυται ως 6



Εικόνα Π9 : Γεωλογική τομή Βασιλική – Βαγιωνιά – Γκαγκάλες (Β - Ν), η θέση της ενδείκνυται ως 7

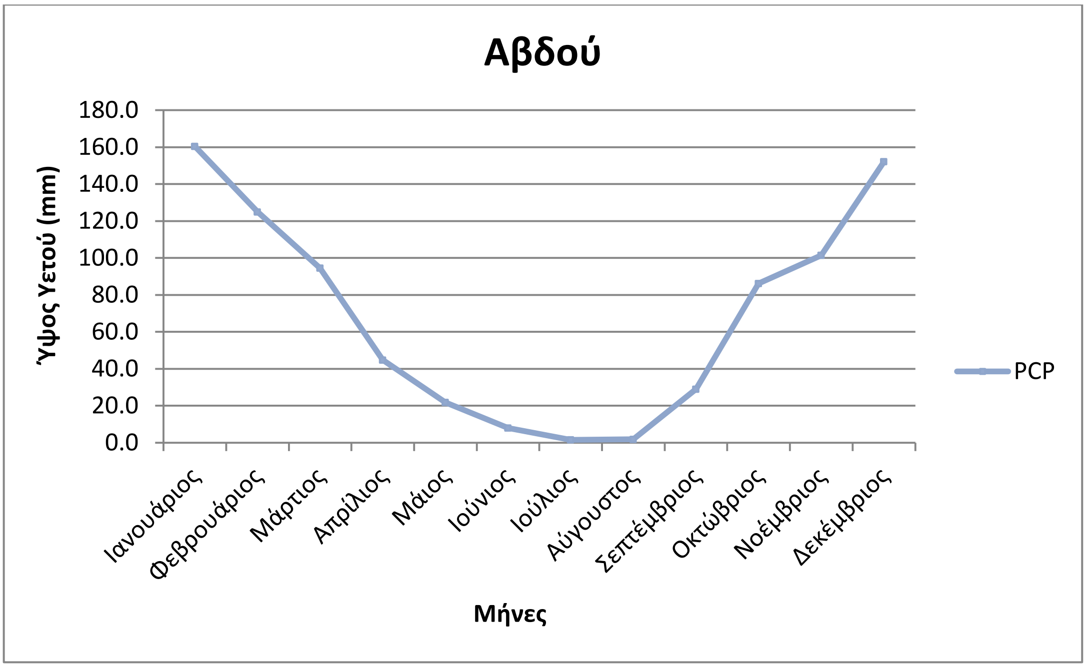


Εικόνα Π10 : Γεωλογική τομή Στέρνες – Ασήμι (Β - Ν), η θέση της ενδείκνυται ως 8

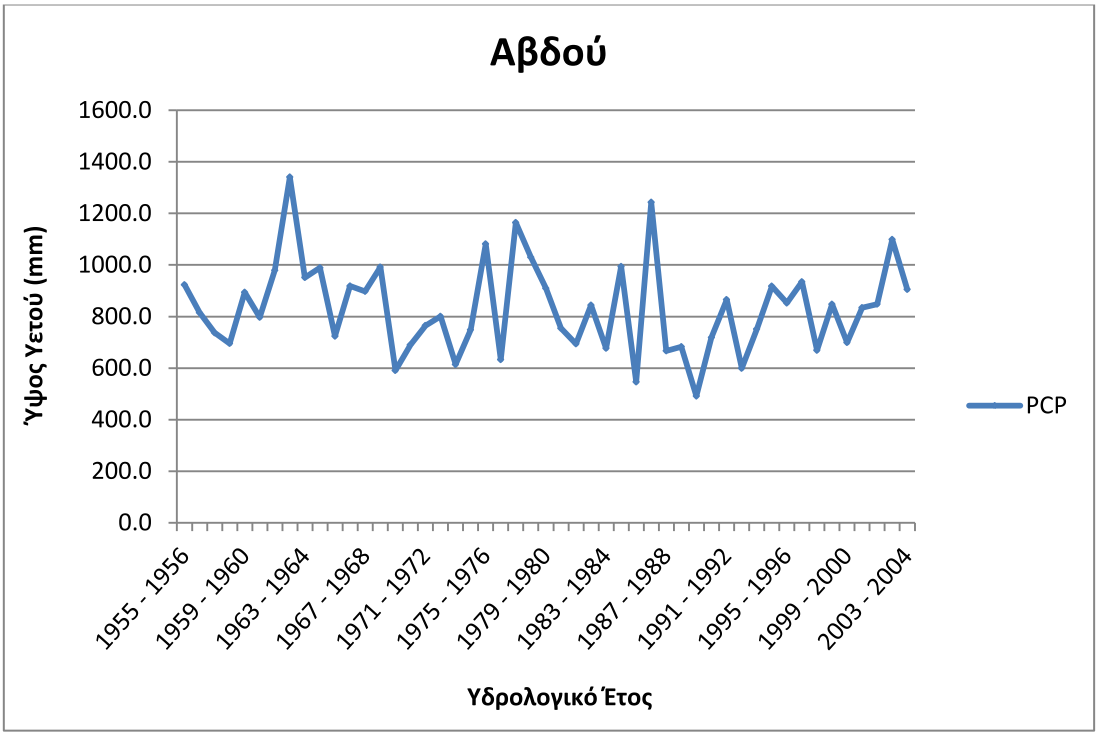


Εικόνα Π11 : Γεωλογική τομή Πύργος – Πλακιώτισα (Β - Ν), η θέση της ενδείκνυται ως 9

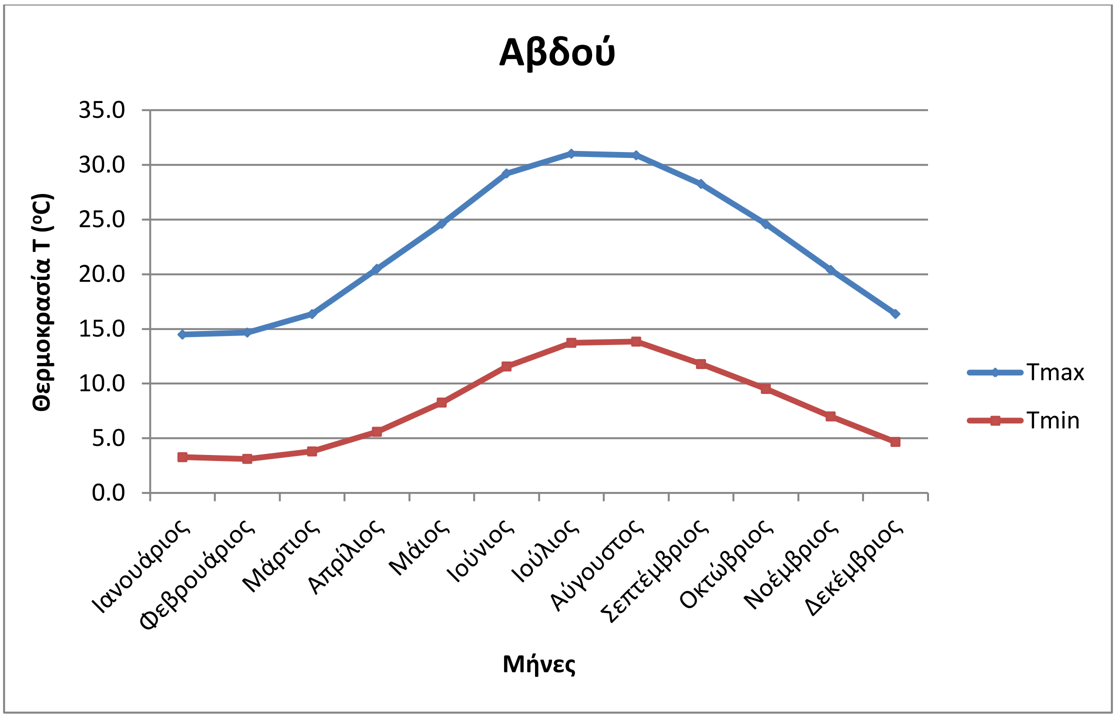
Παράρτημα Β – Μετεωρολογικά δεδομένα



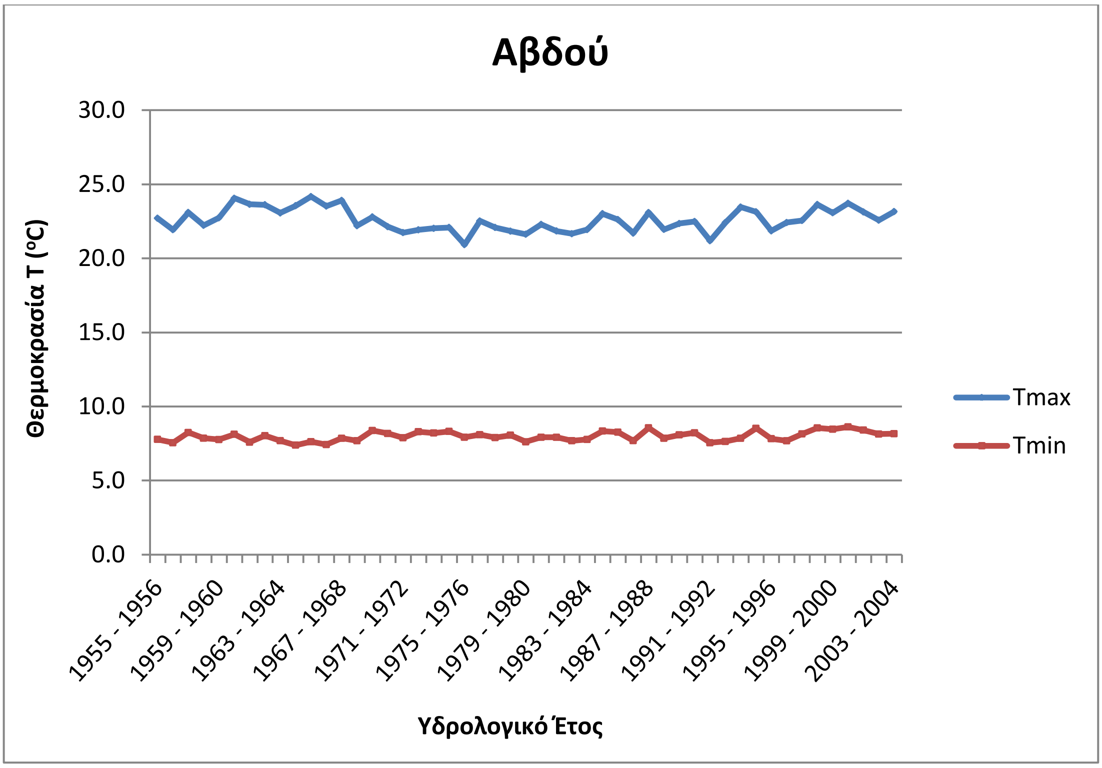
Διάγραμμα Π1 : Μέσο μηνιαίο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Αβδού



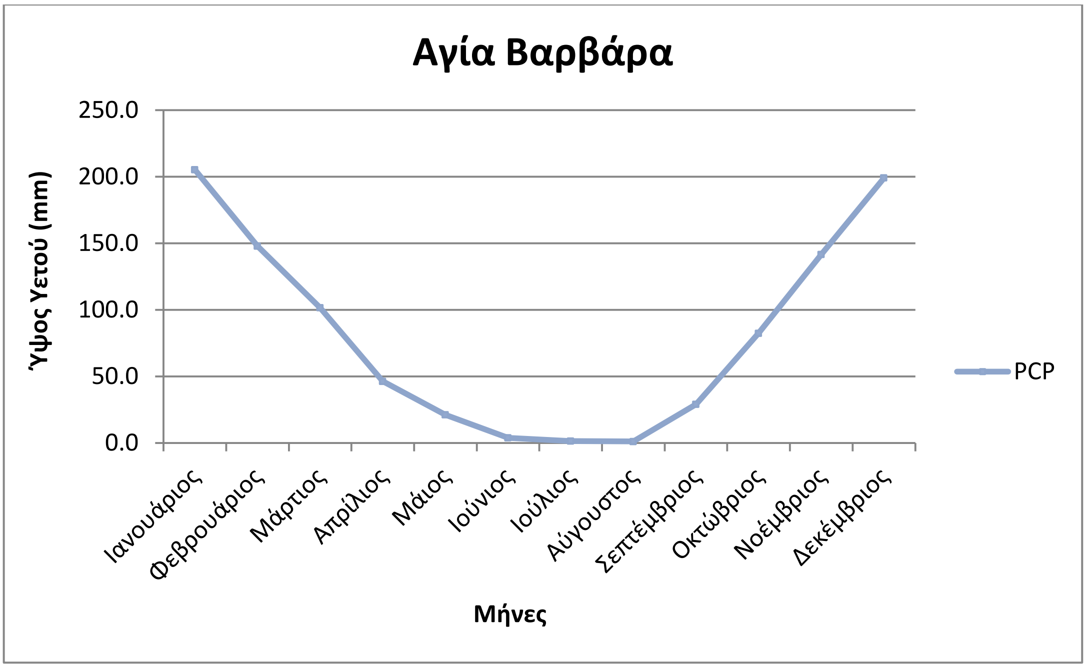
Διάγραμμα Π2 : Μέσο ετήσιο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Αβδού



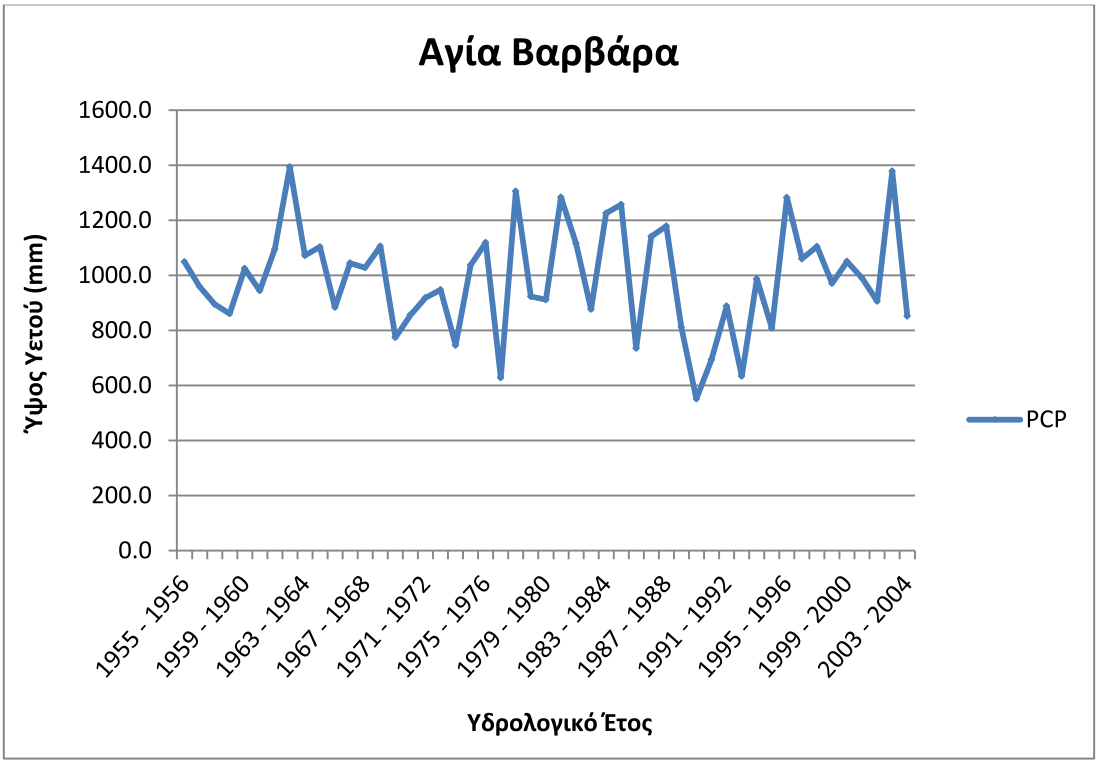
Διάγραμμα Π3 : Μέση μηνιαία μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Αβδού



Διάγραμμα Π4 : Μέση ετήσια μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Αβδού



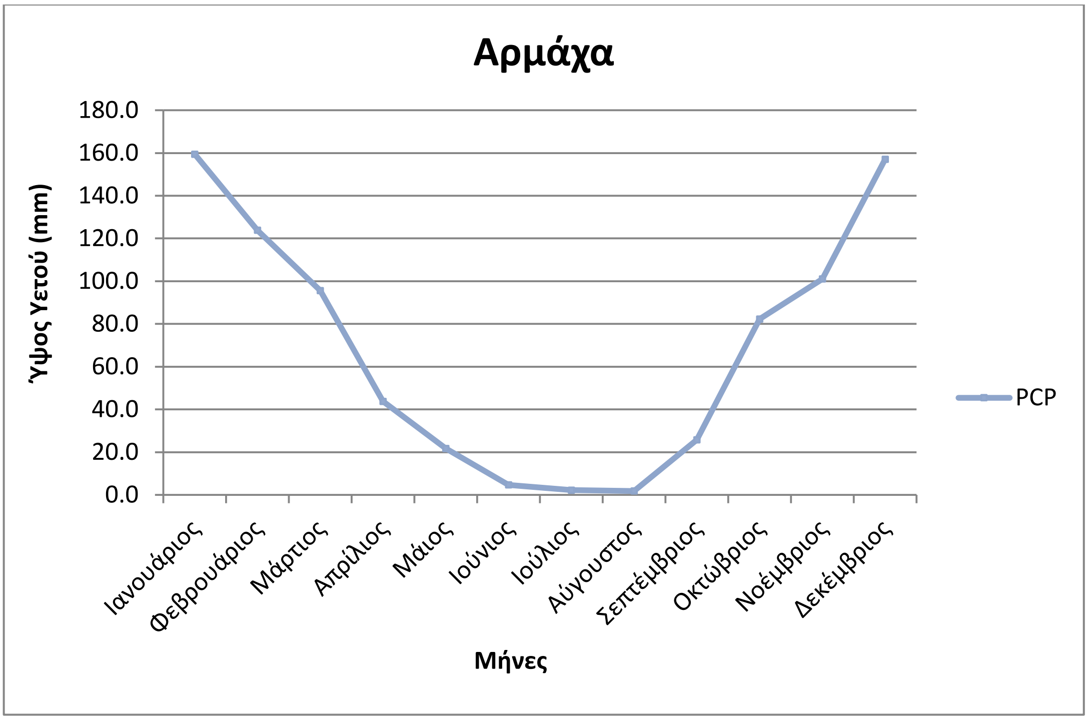
Διάγραμμα Π5 : Μέσο μηνιαίο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Αγία Βαρβάρα



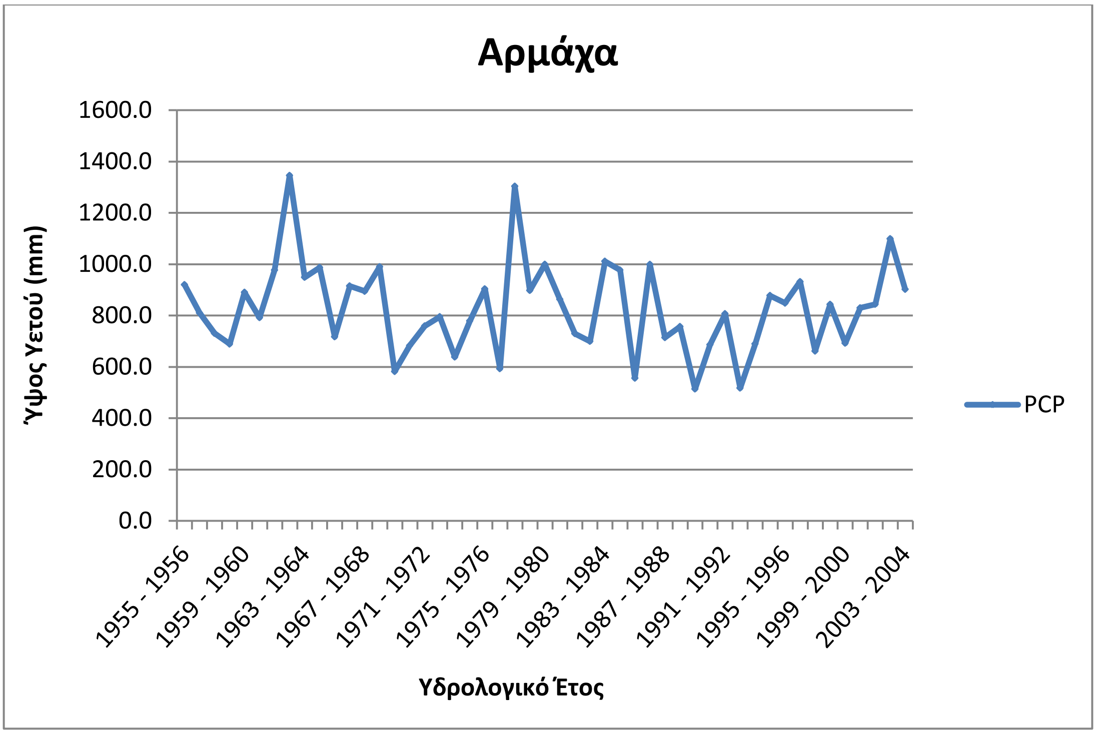
Διάγραμμα Π6 : Μέσο ετήσιο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Αγία Βαρβάρα

Διάγραμμα Π7 : Μέσο μηνιαίο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Άγιος Κύριλλος

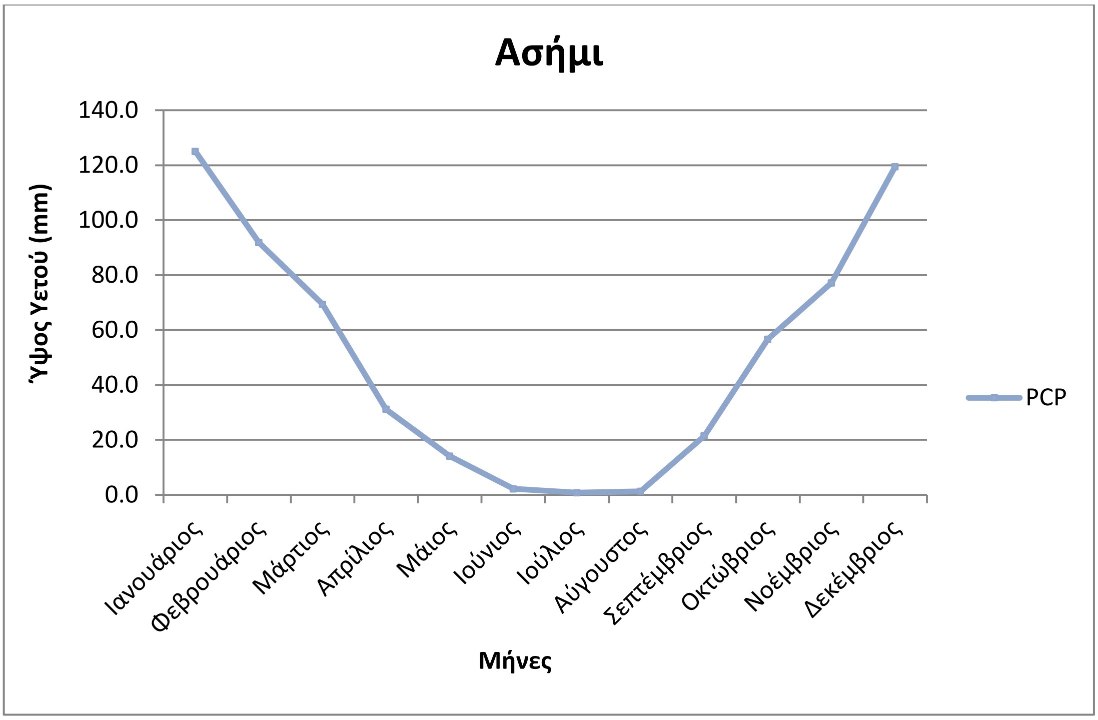
Διάγραμμα Π8 : Μέσο ετήσιο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Άγιος Κύριλλος



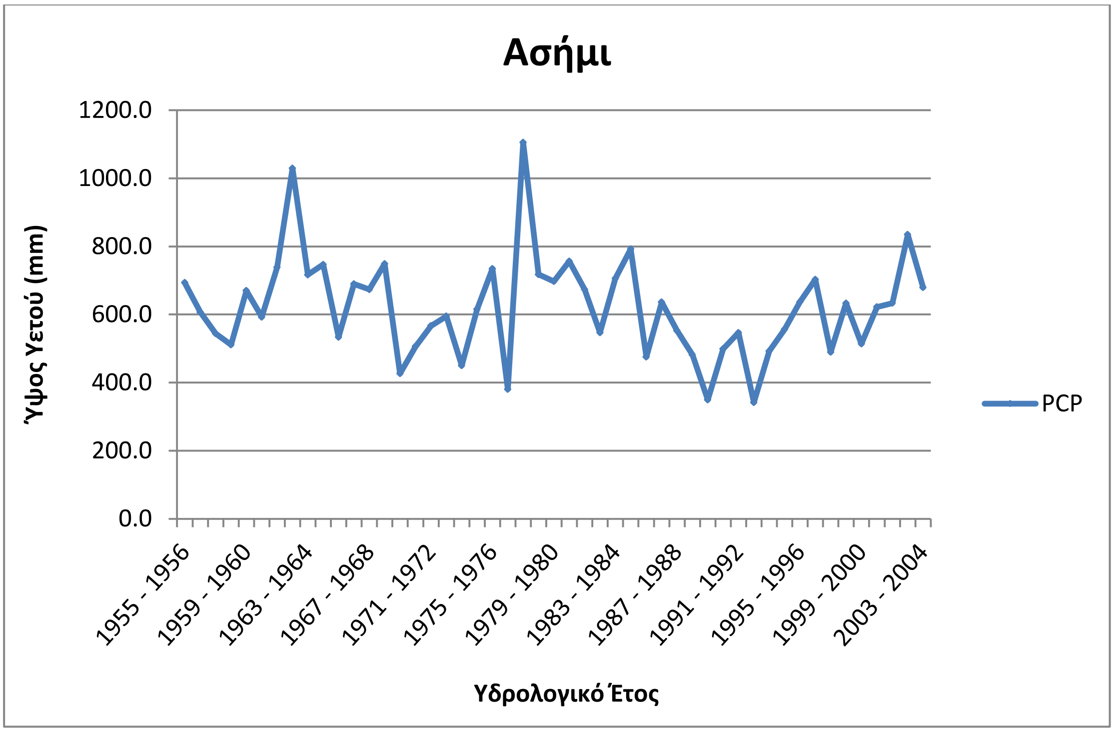
Διάγραμμα Π9 : Μέσο μηνιαίο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Αρμάχα



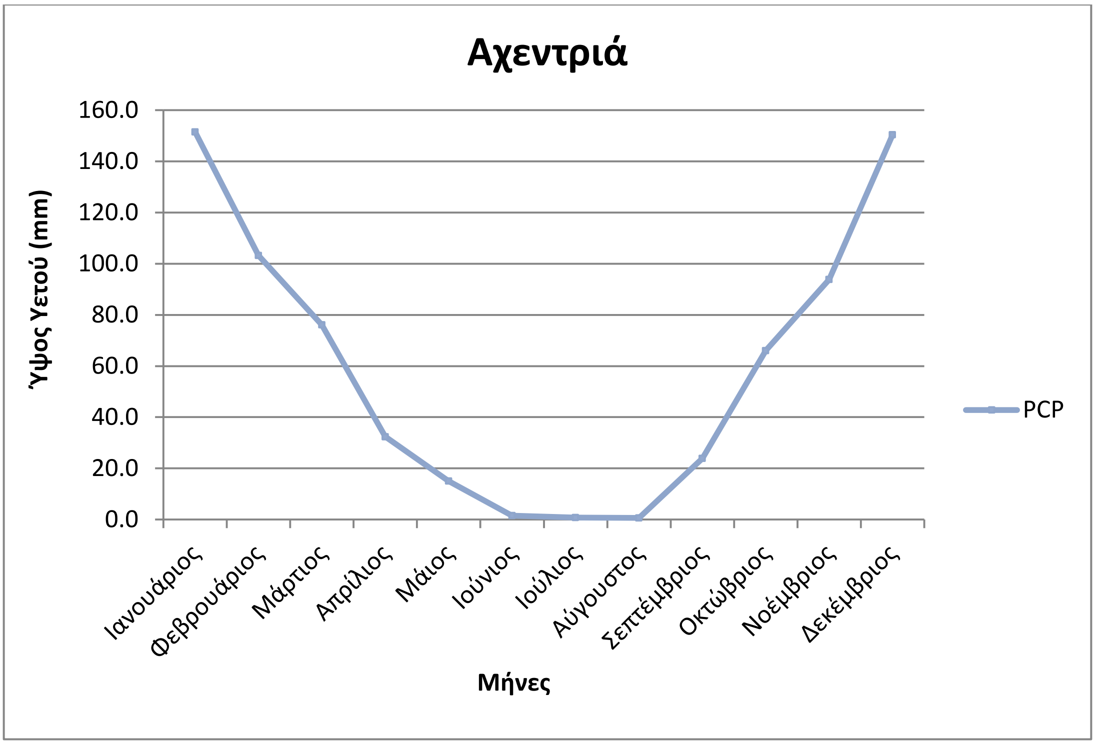
Διάγραμμα Π10 : Μέσο ετήσιο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Αρμάχα



Διάγραμμα Π11 : Μέσο μηνιαίο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Ασήμι

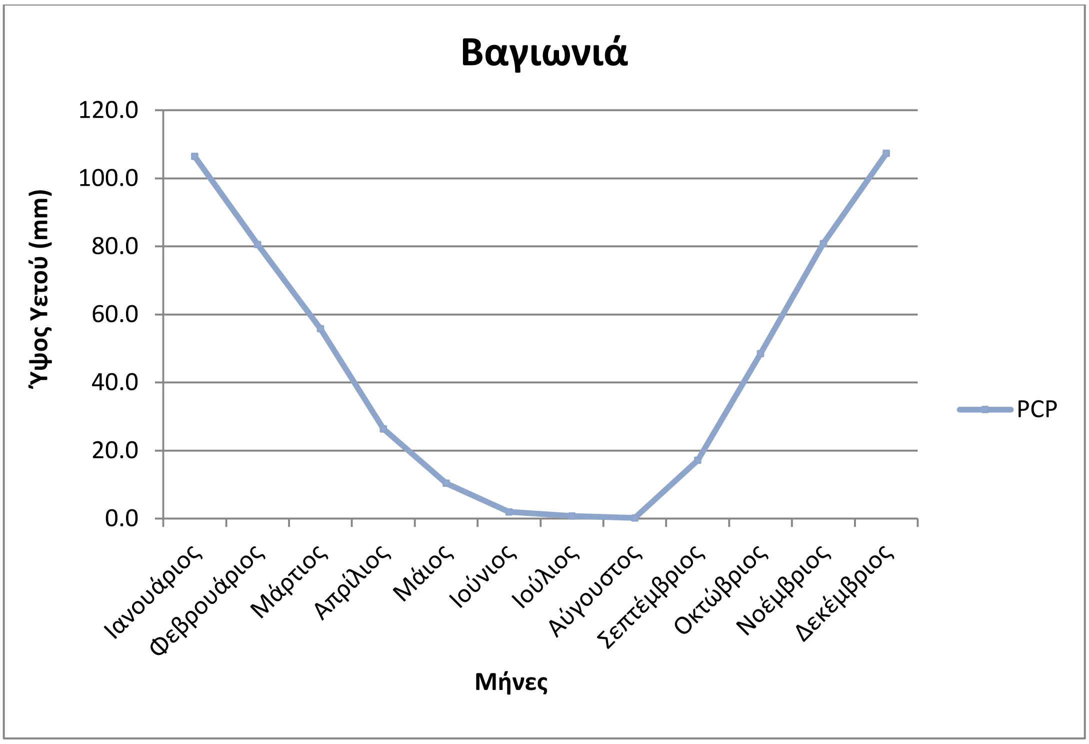


Διάγραμμα Π12 : Μέσο ετήσιο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Ασήμι



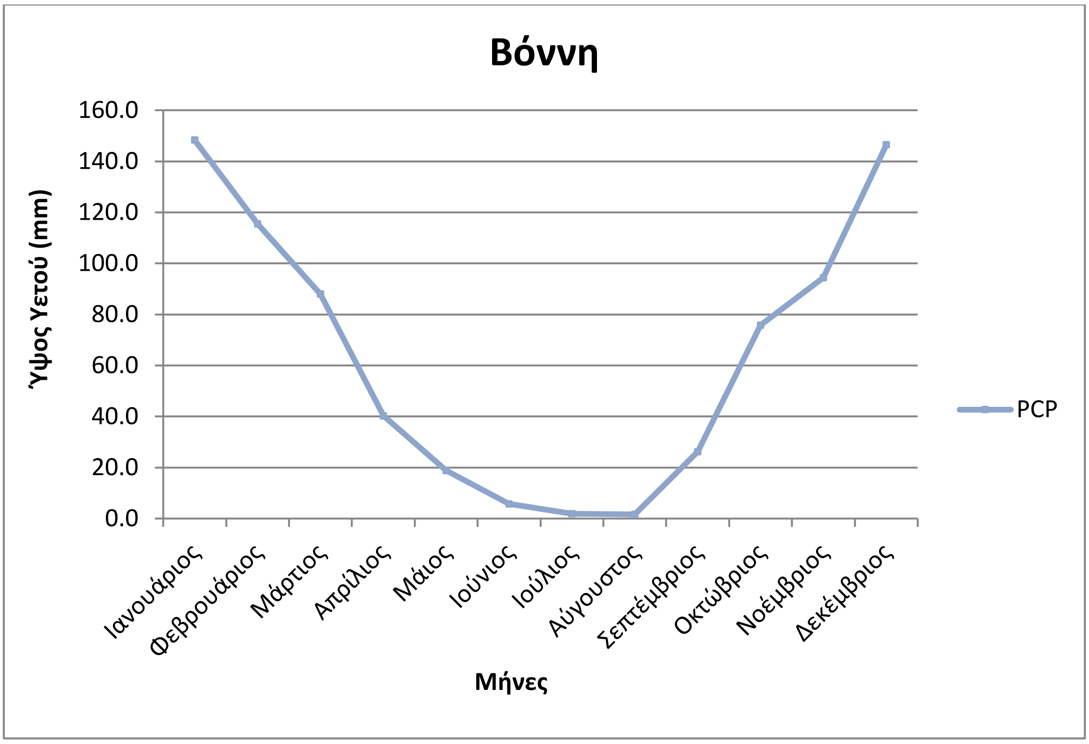
Διάγραμμα Π13 : Μέσο μηνιαίο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Αχεντριά

Διάγραμμα Π14 : Μέσο ετήσιο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Αχεντριά

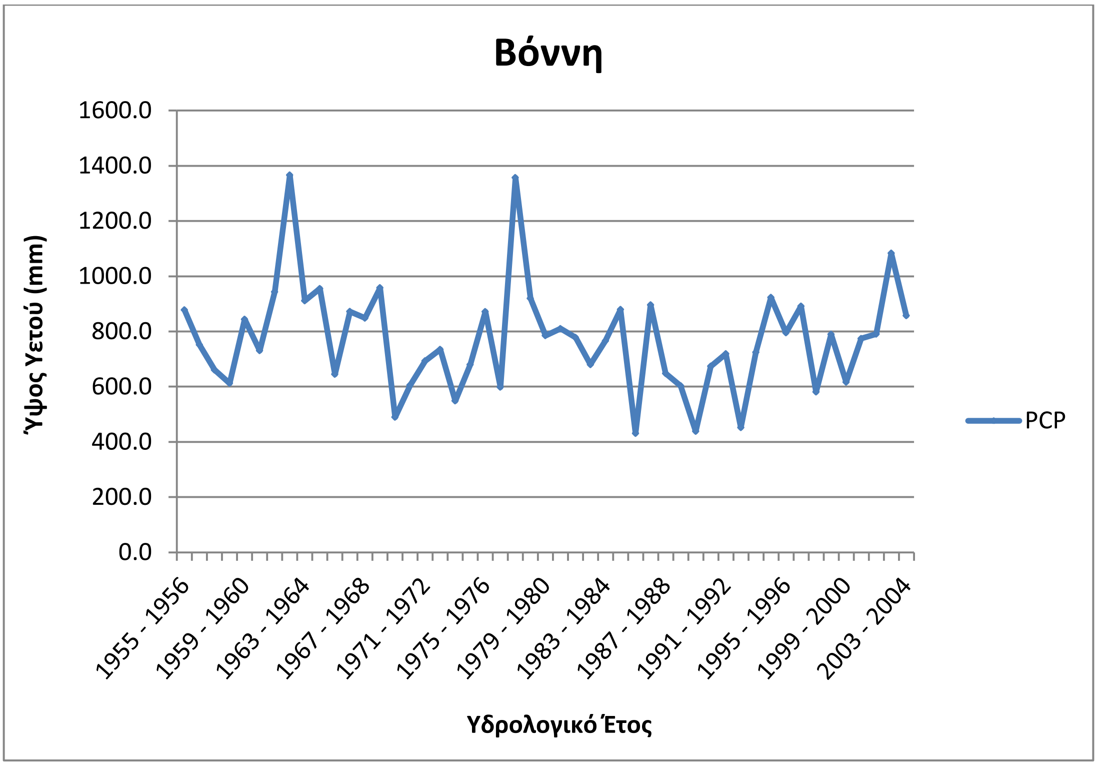


Διάγραμμα Π15 : Μέσο μηνιαίο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Βαγιωνιά

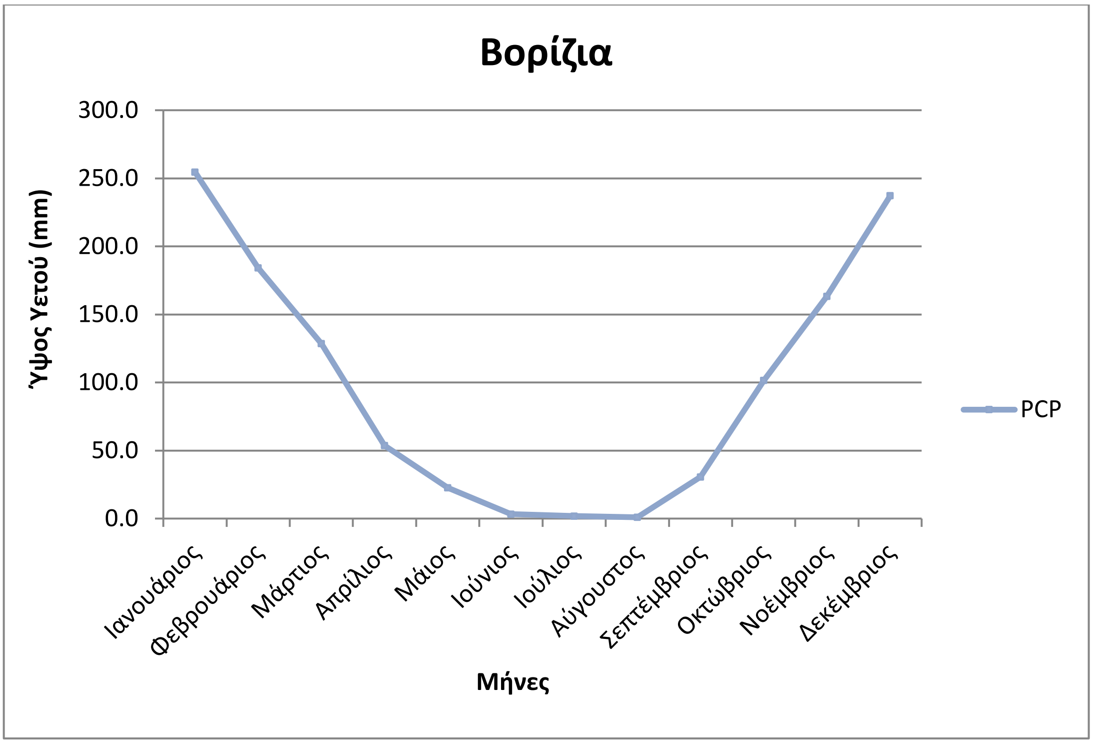
Διάγραμμα Π16 : Μέσο ετήσιο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Βαγιωνιά



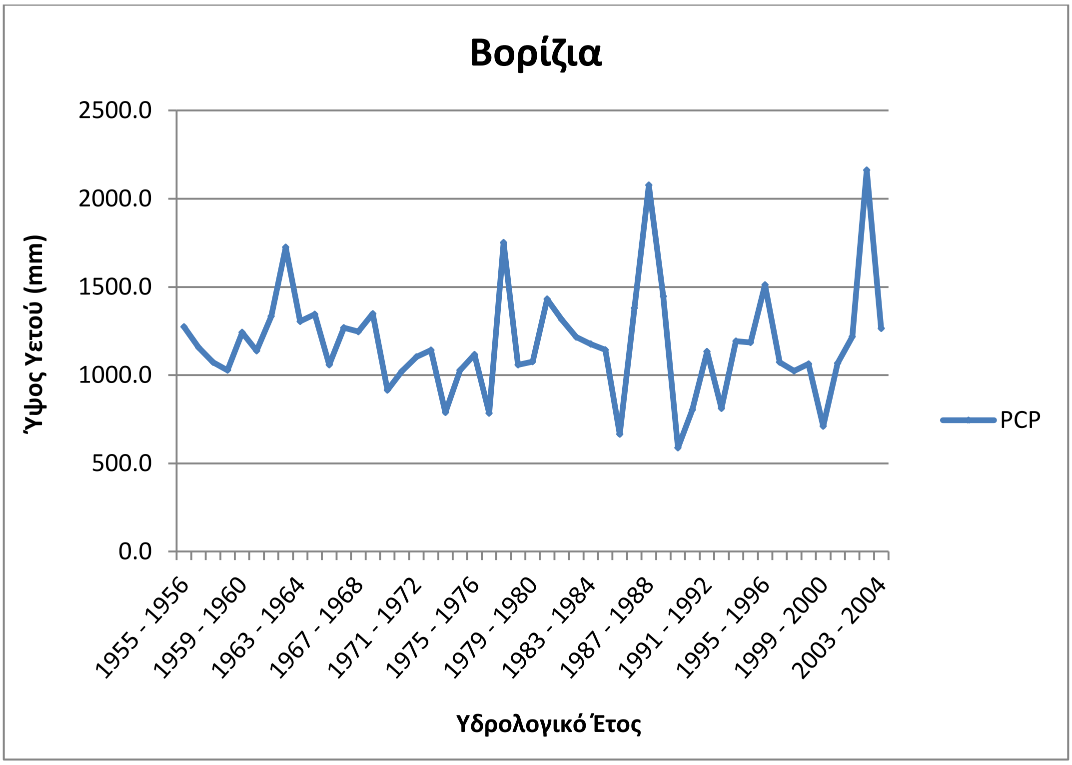
Διάγραμμα Π17 : Μέσο μηνιαίο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Βόννη



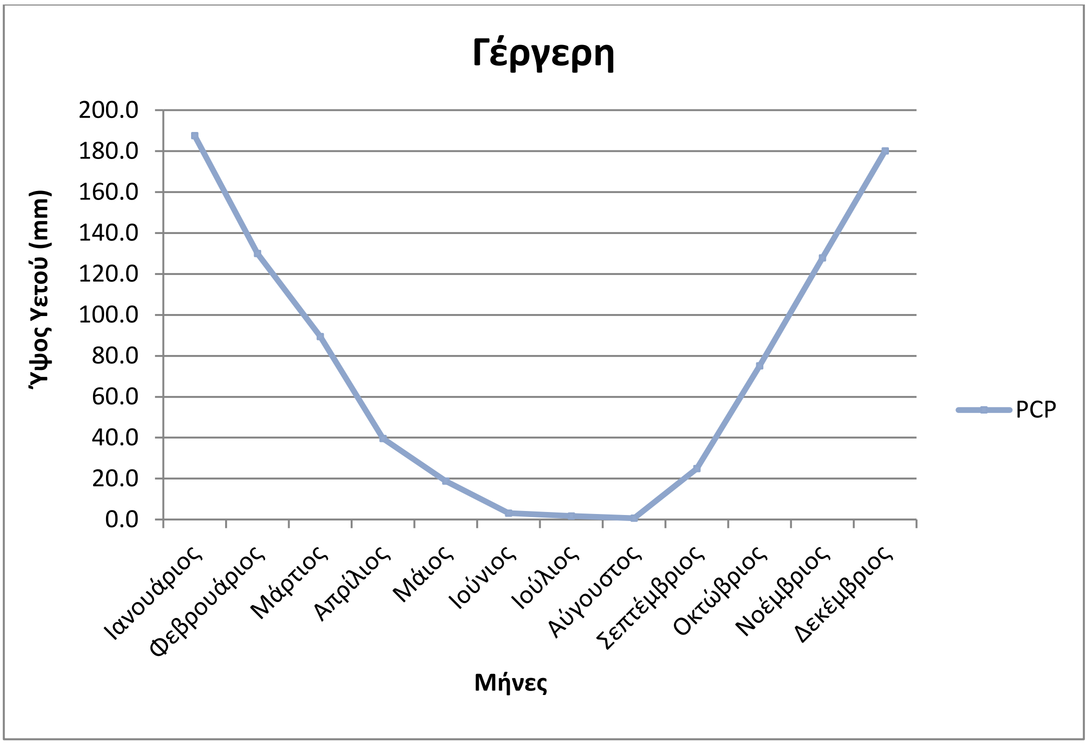
Διάγραμμα Π18 : Μέσο ετήσιο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Βόννη



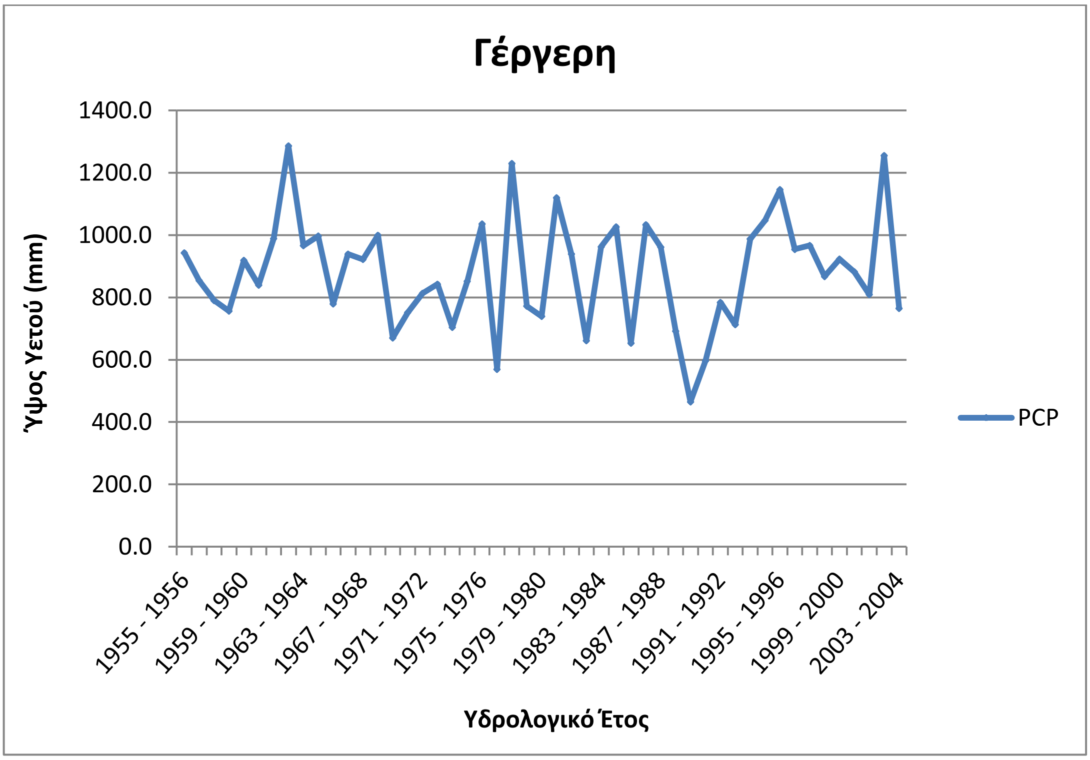
Διάγραμμα Π19 : Μέσο μηνιαίο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Βορίζια



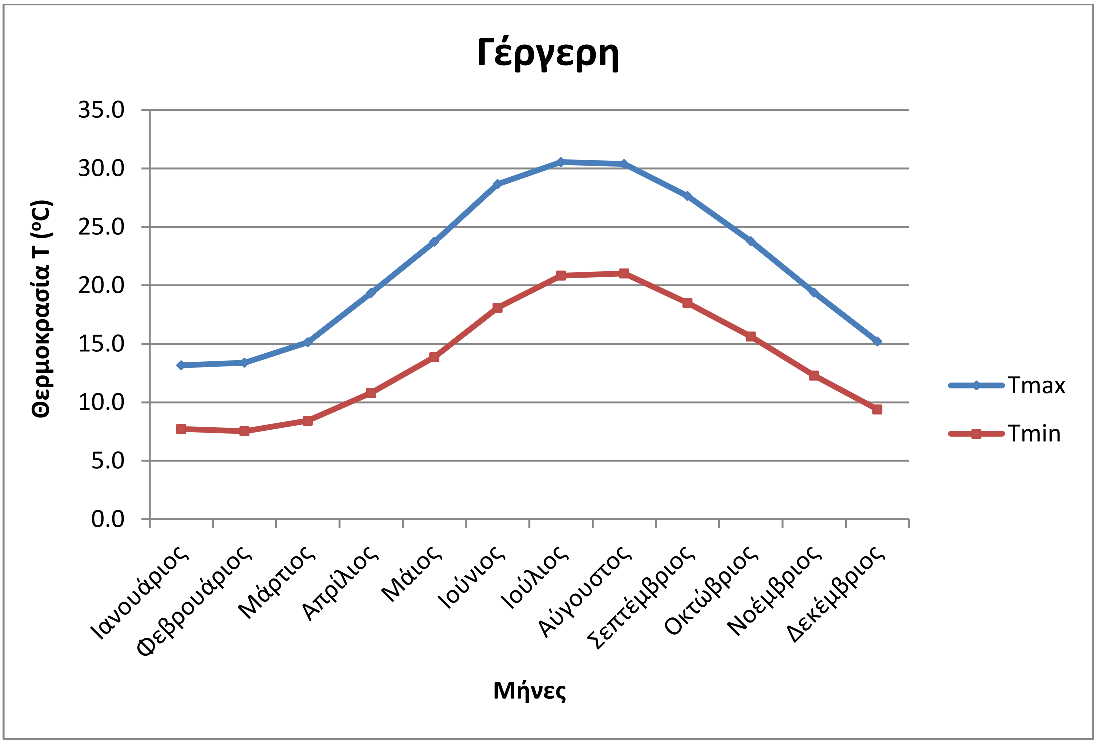
Διάγραμμα Π20 : Μέσο ετήσιο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Βορίζια



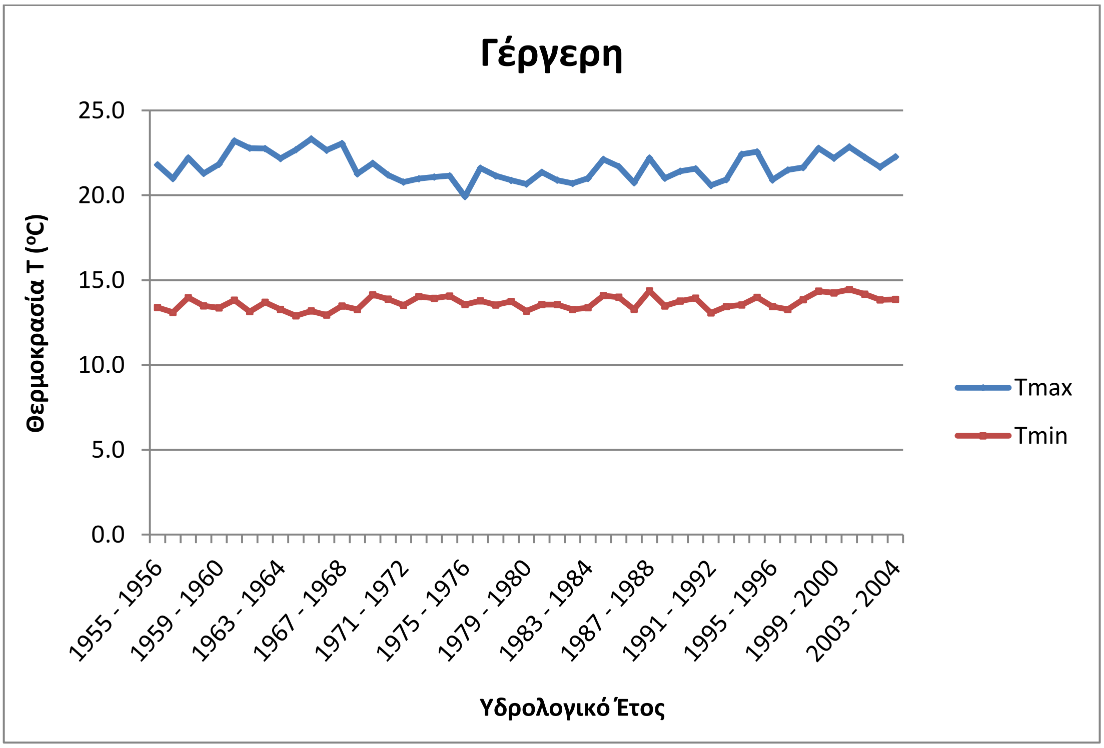
Διάγραμμα Π21 : Μέσο μηνιαίο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Γέργερη



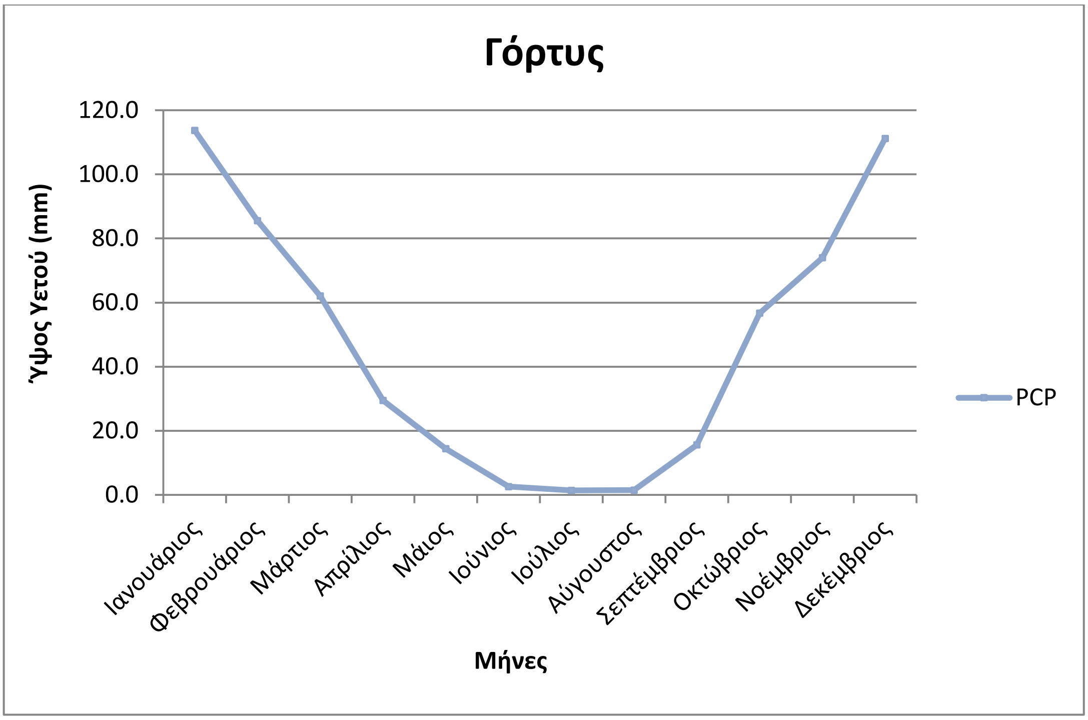
Διάγραμμα Π22 : Μέσο ετήσιο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Γέργερη



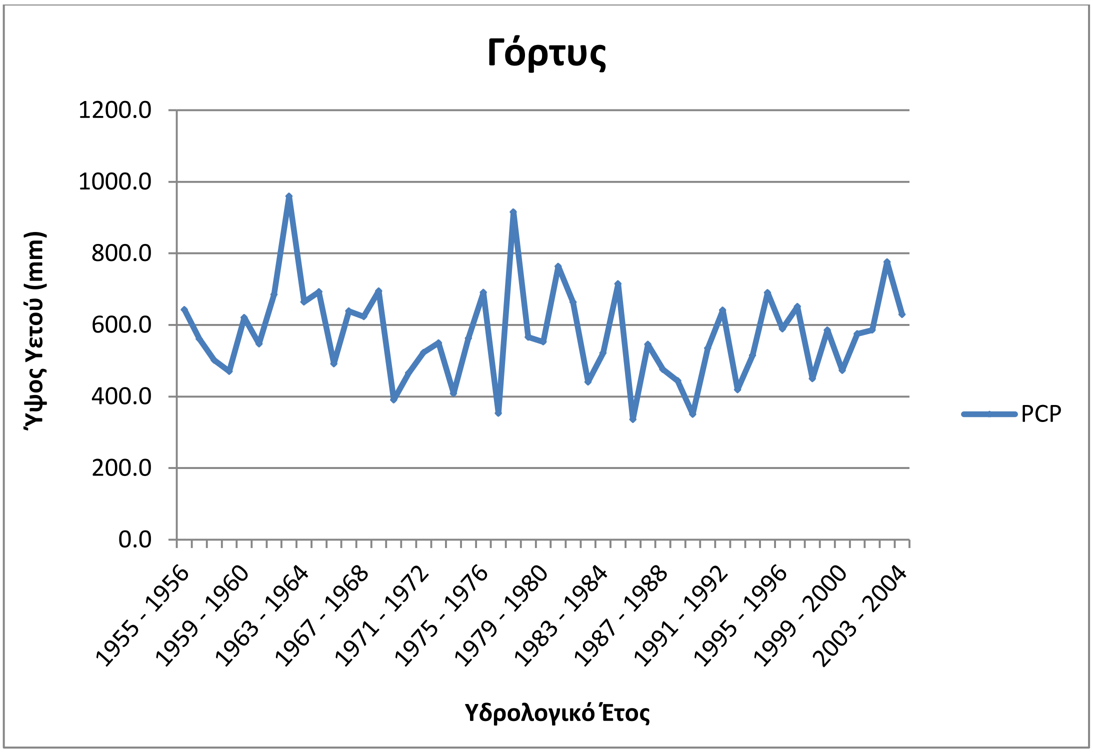
Διάγραμμα Π23 : Μέση μηνιαία μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Γέργερη



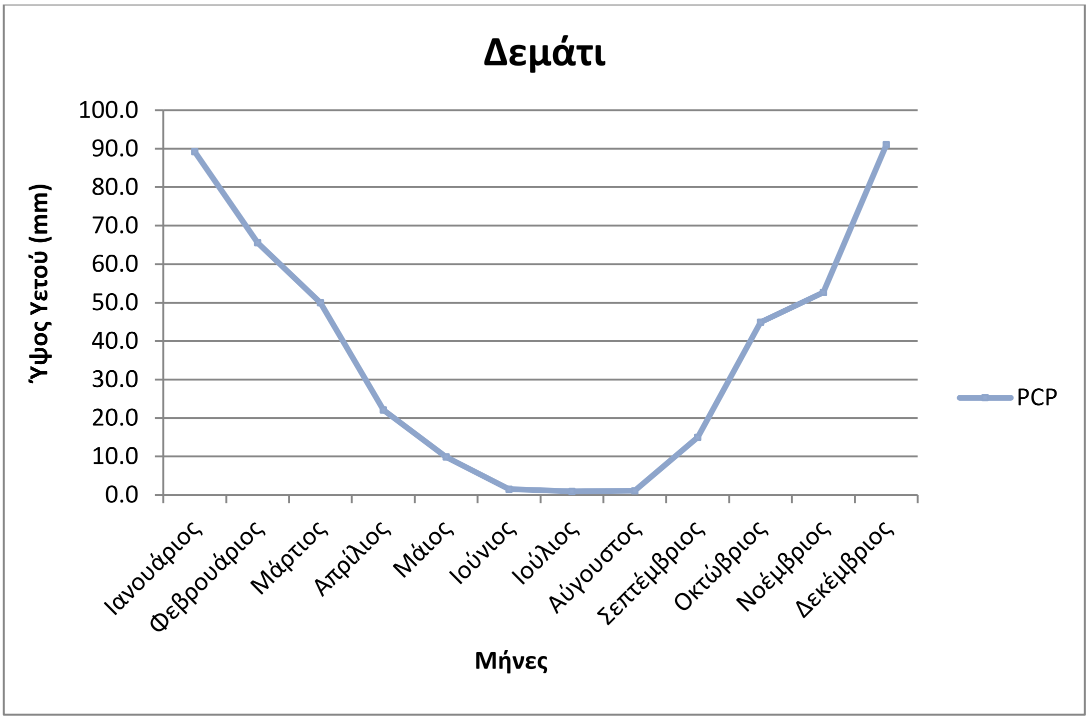
Διάγραμμα Π24 : Μέση ετήσια μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Γέργερη



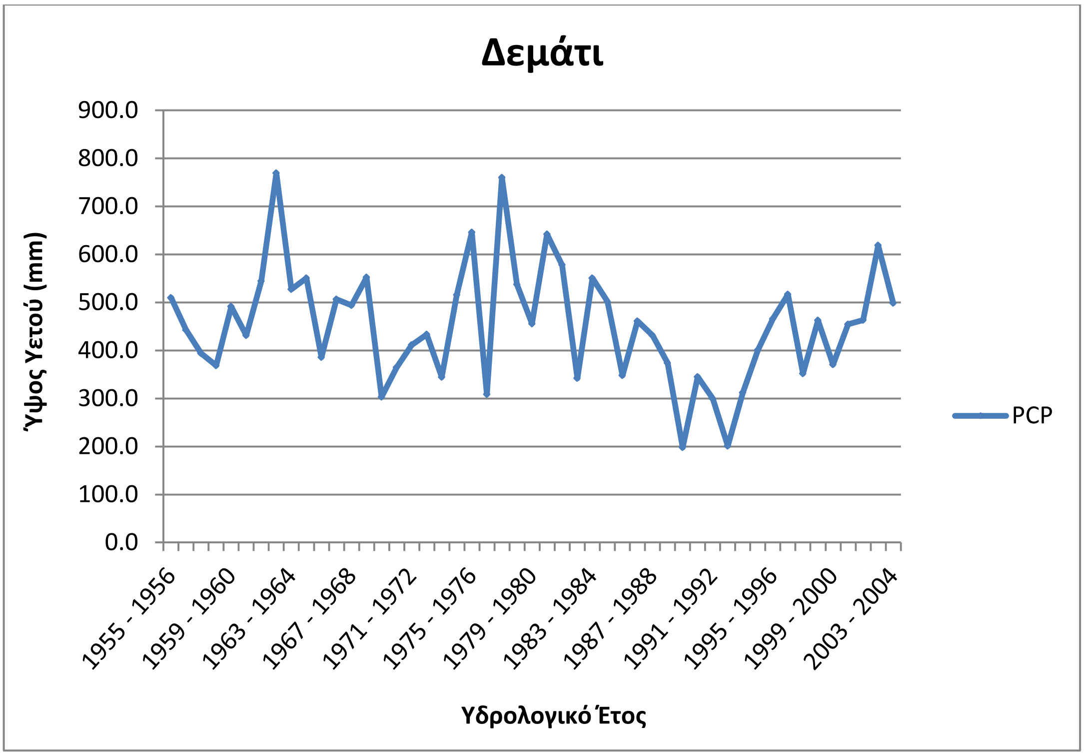
Διάγραμμα Π25 : Μέσο μηνιαίο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Γόρτυς



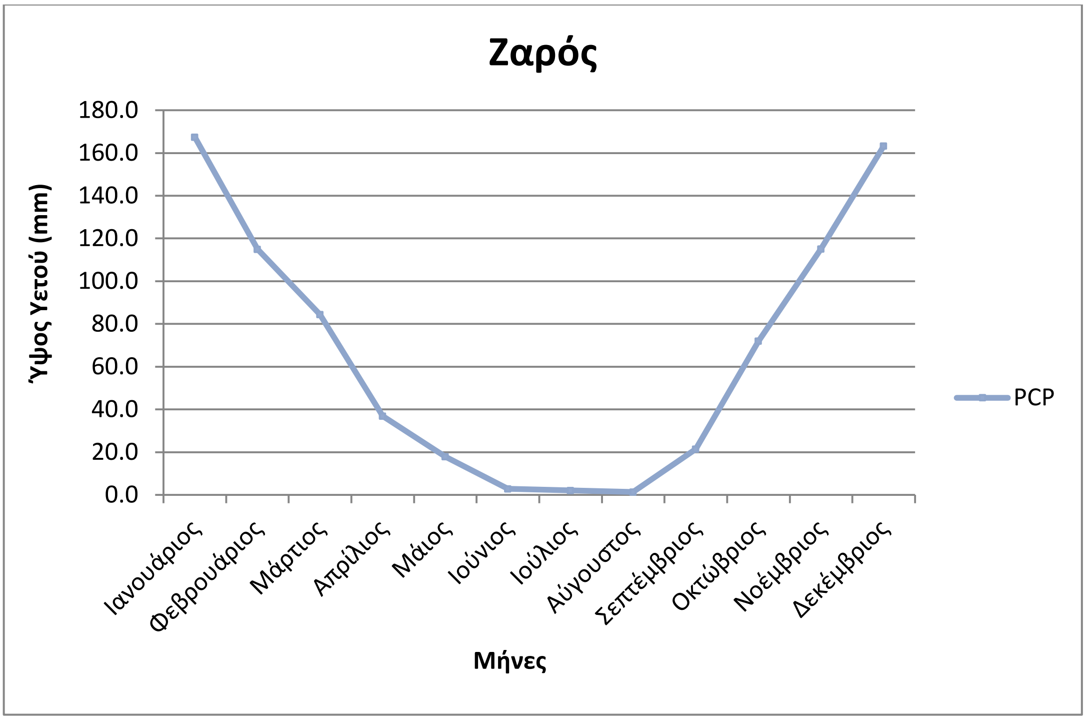
Διάγραμμα Π26 : Μέσο ετήσιο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Γόρτυς



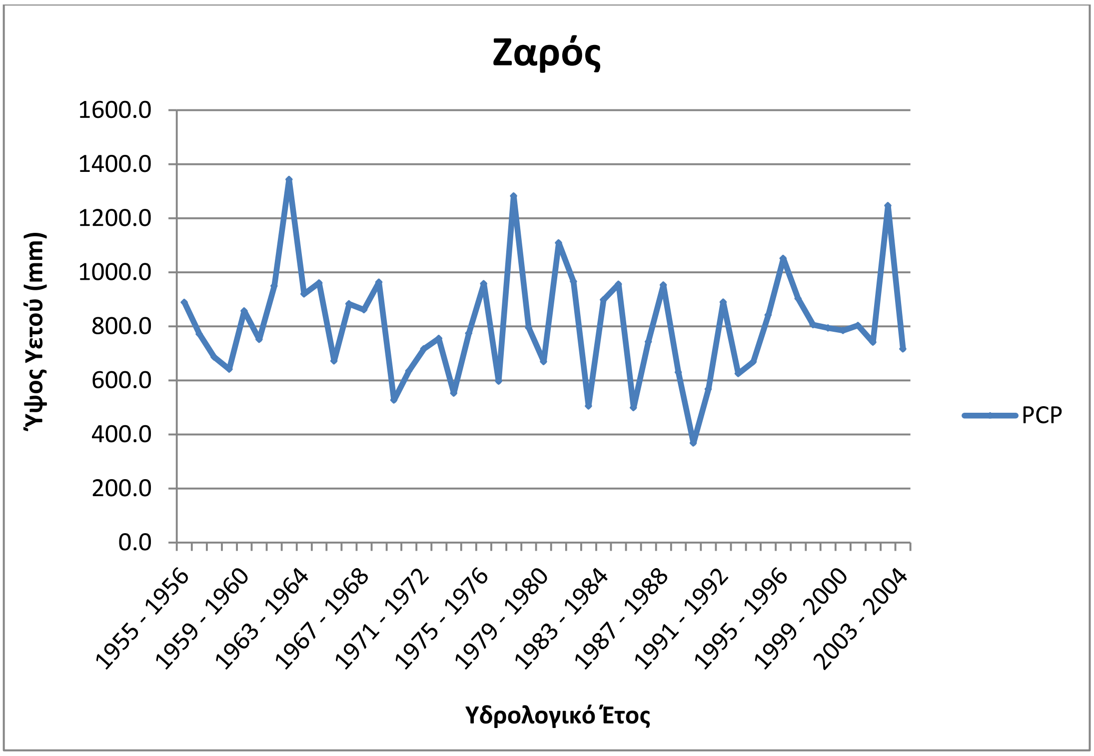
Διάγραμμα Π27 : Μέσο μηνιαίο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Δεμάτι



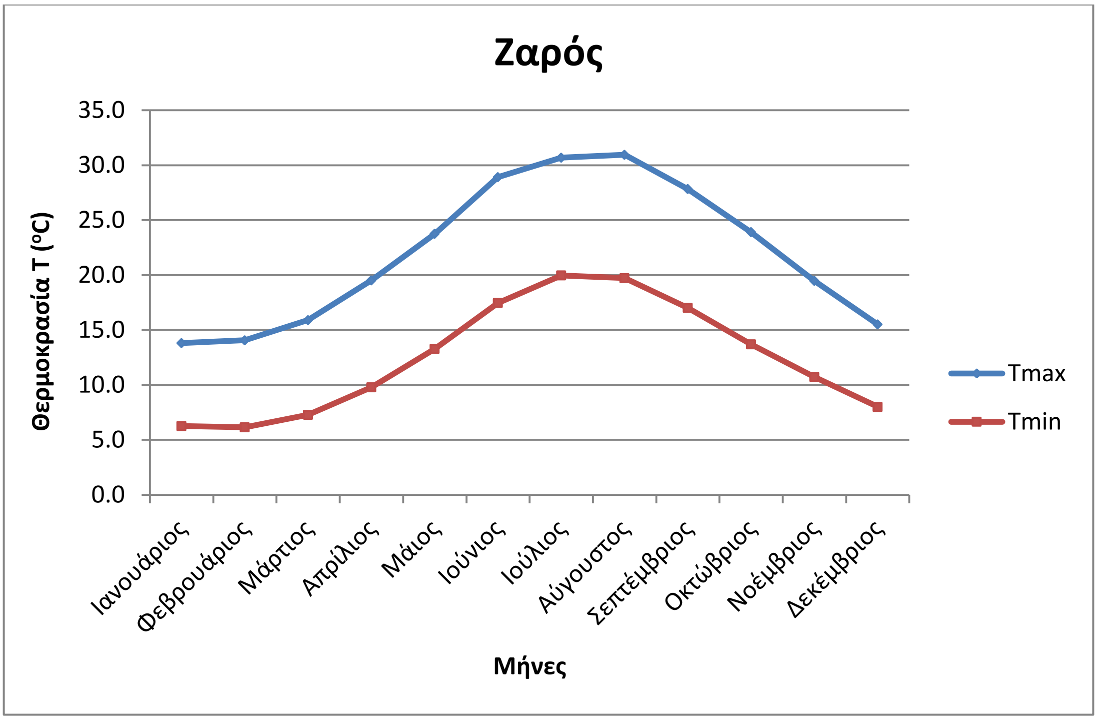
Διάγραμμα Π28 : Μέσο ετήσιο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Δεμάτι



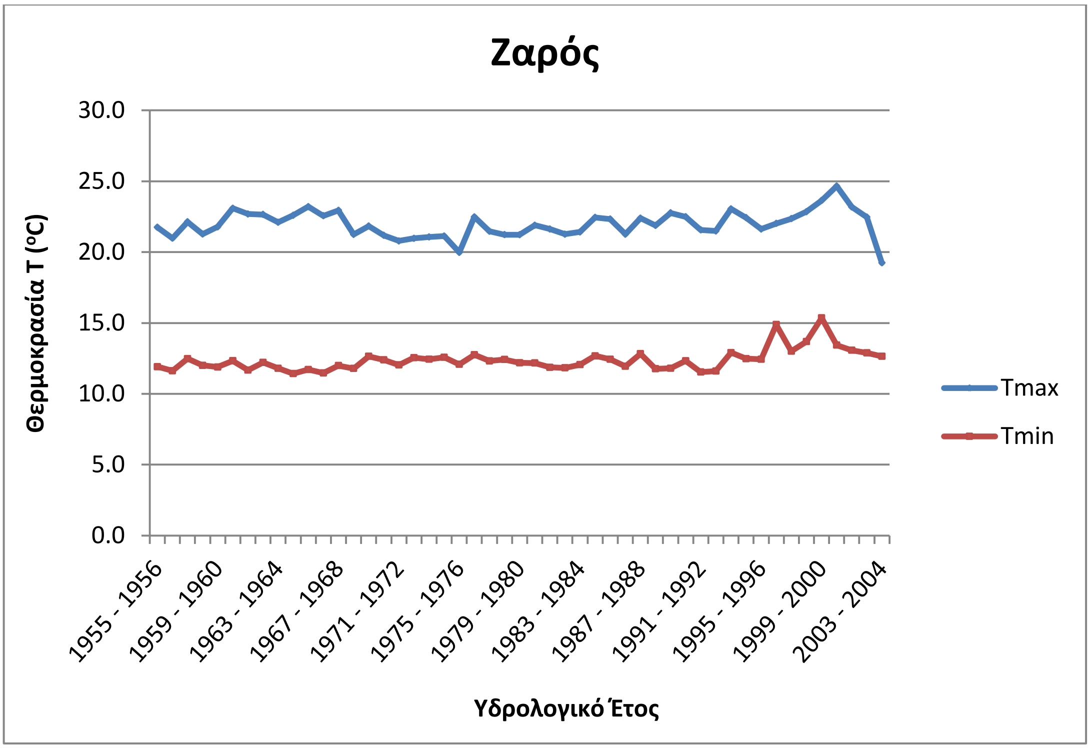
Διάγραμμα Π29 : Μέσο μηνιαίο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Ζαρός



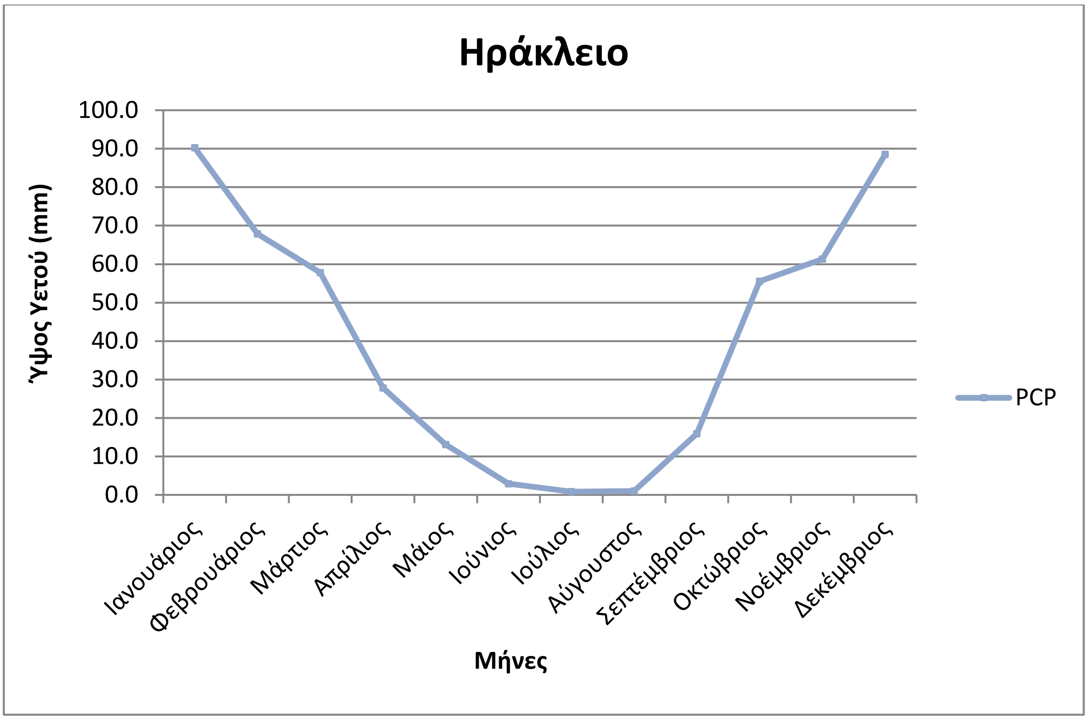
Διάγραμμα Π30 : Μέσο ετήσιο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Ζαρός



Διάγραμμα Π31 : Μέση μηνιαία μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Ζαρός

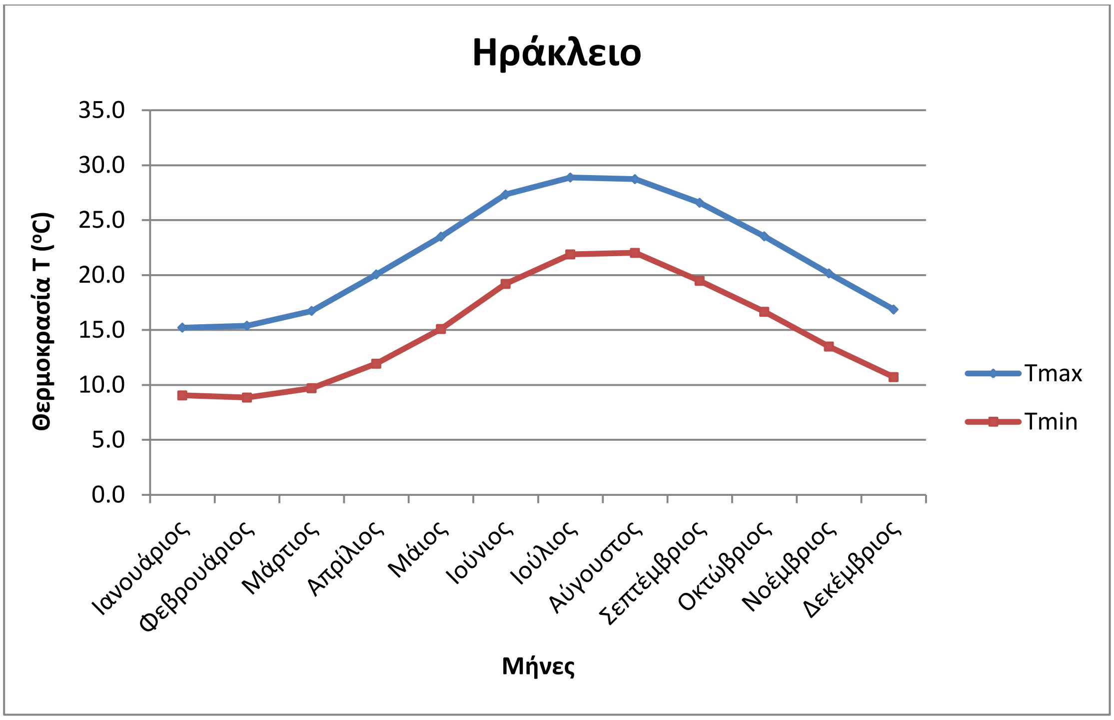


Διάγραμμα Π32 : Μέση ετήσια μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Ζαρός

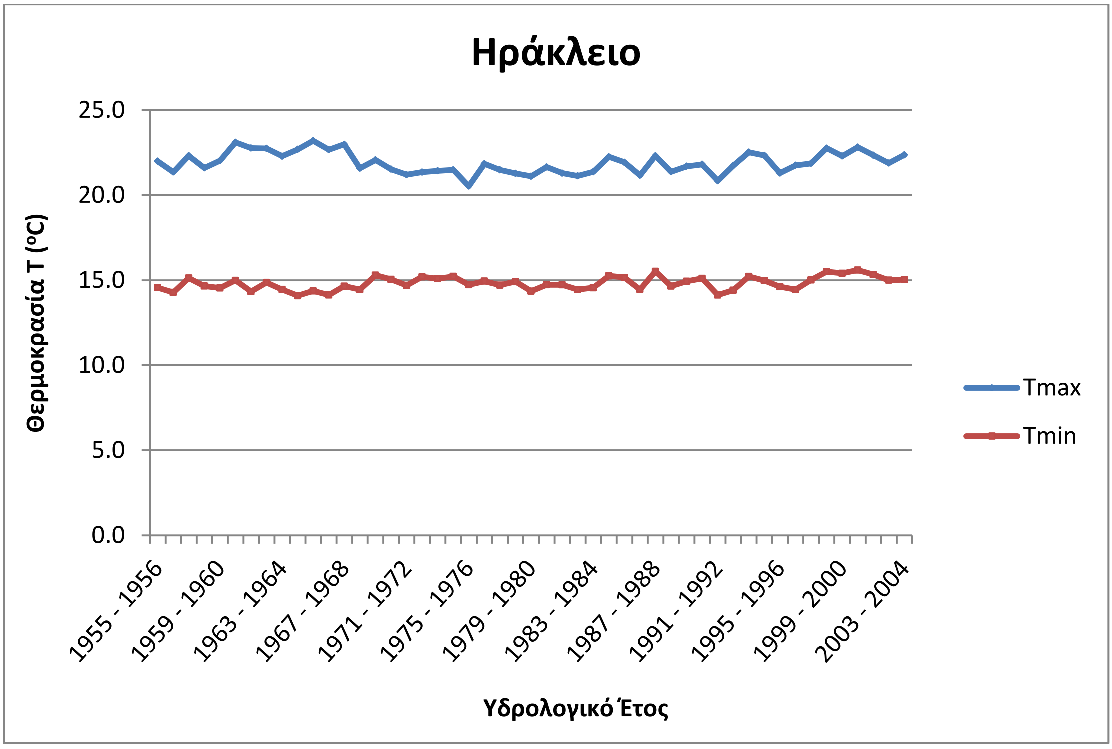


Διάγραμμα Π33 : Μέσο μηνιαίο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Ηράκλειο

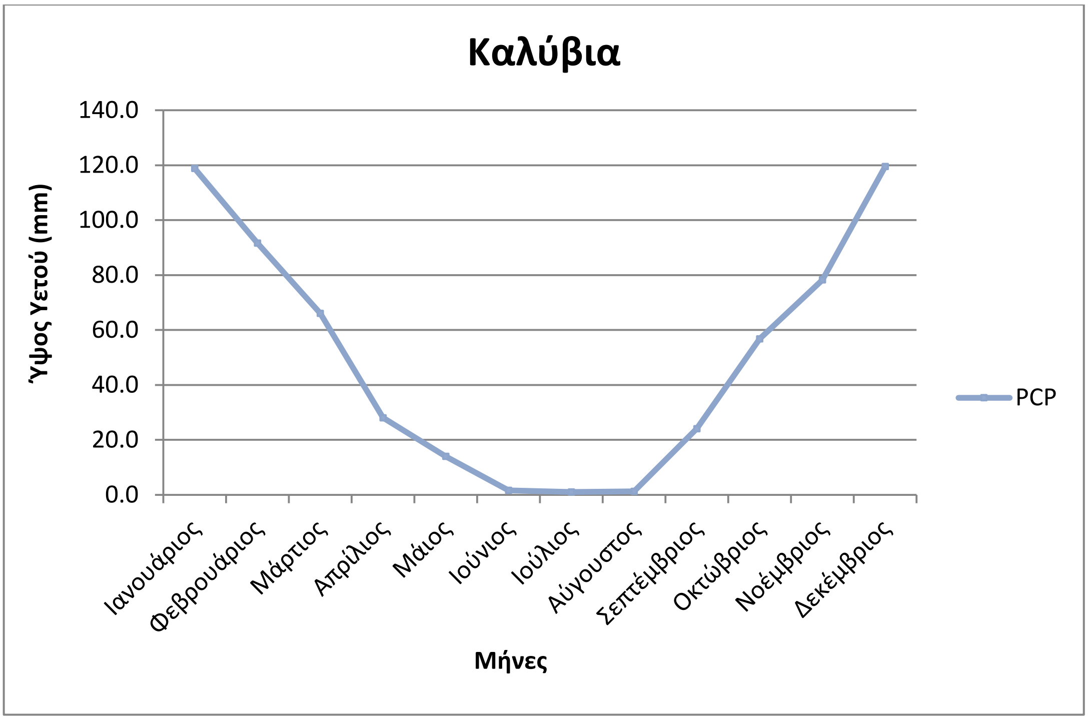
Διάγραμμα Π34 : Μέσο ετήσιο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Ηράκλειο



Διάγραμμα Π35 : Μέση μηνιαία μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Ηράκλειο

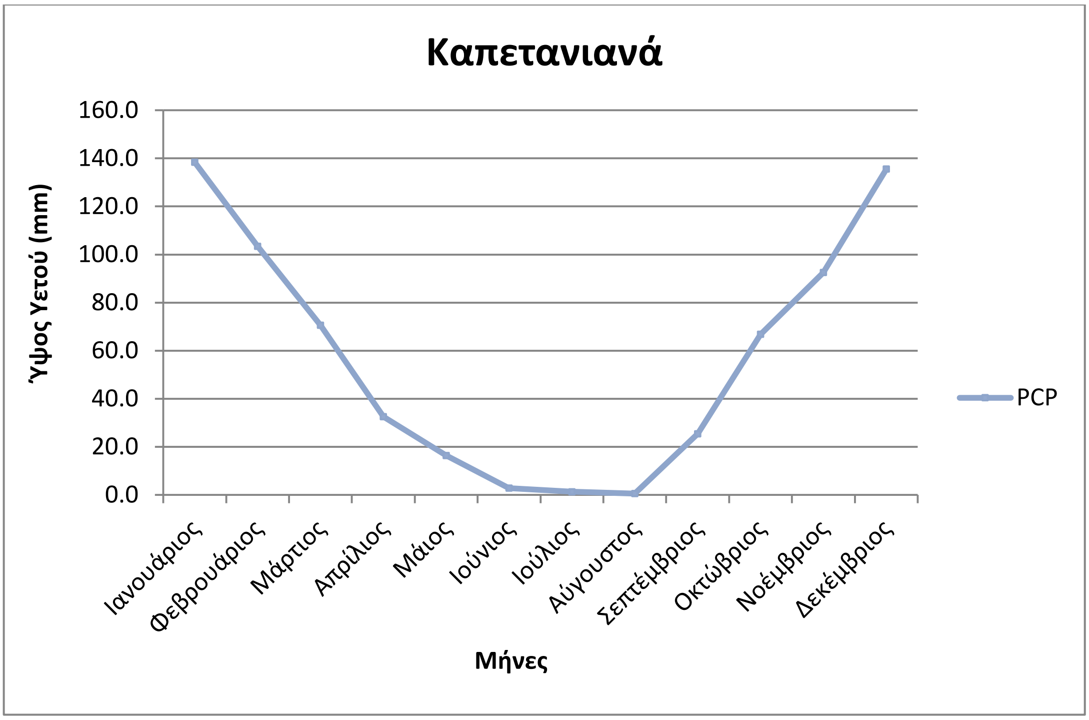


Διάγραμμα Π36 : Μέση ετήσια μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Ηράκλειο



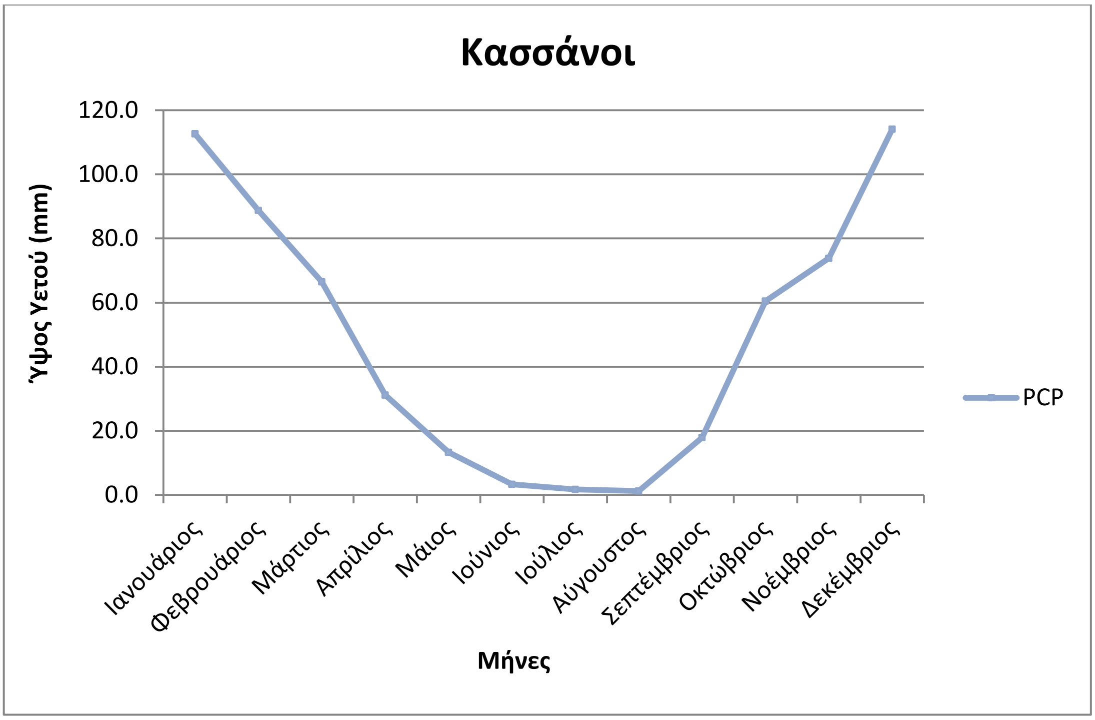
Διάγραμμα Π37 : Μέσο μηνιαίο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Καλύβια

Διάγραμμα Π38 : Μέσο ετήσιο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Καλύβια



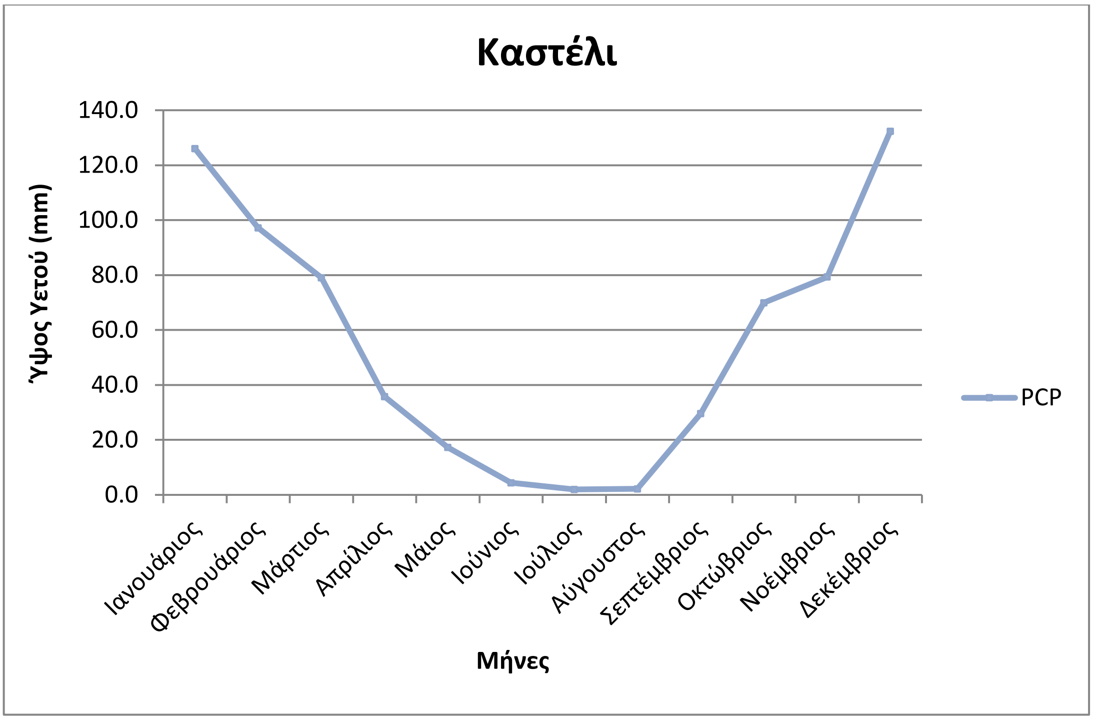
Διάγραμμα Π39 : Μέσο μηνιαίο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Καπετανιανά

Διάγραμμα Π40 : Μέσο ετήσιο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Καπετανιανά



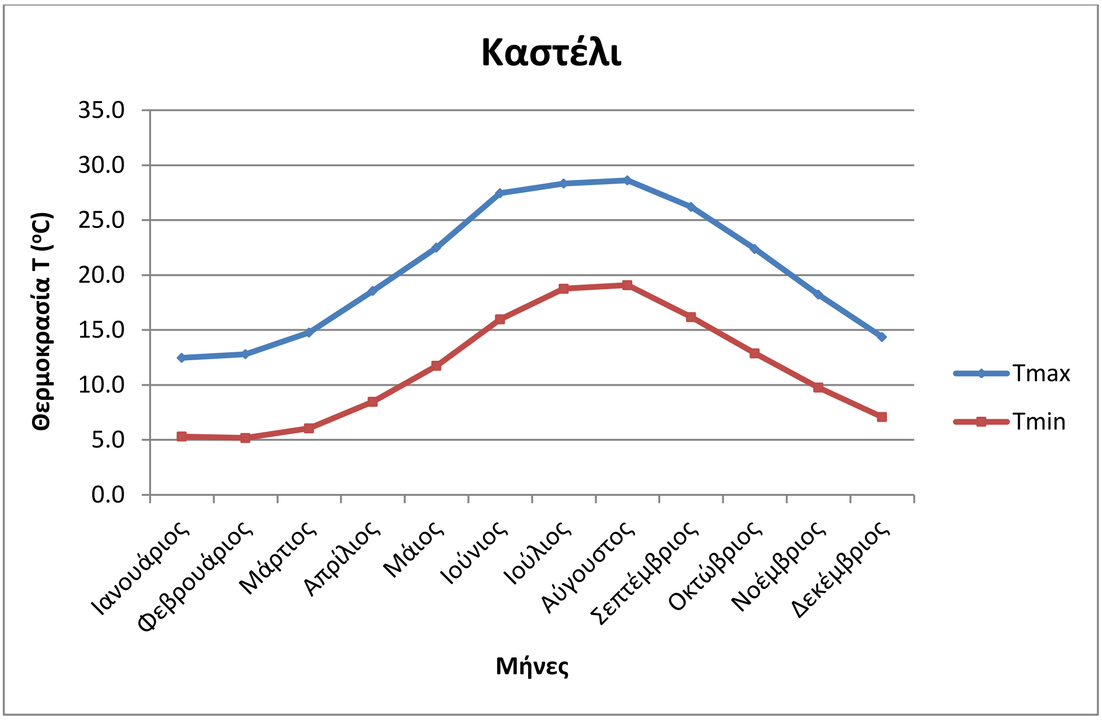
Διάγραμμα Π41 : Μέσο μηνιαίο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Κασσάνοι

Διάγραμμα Π42 : Μέσο ετήσιο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Κασσάνοι

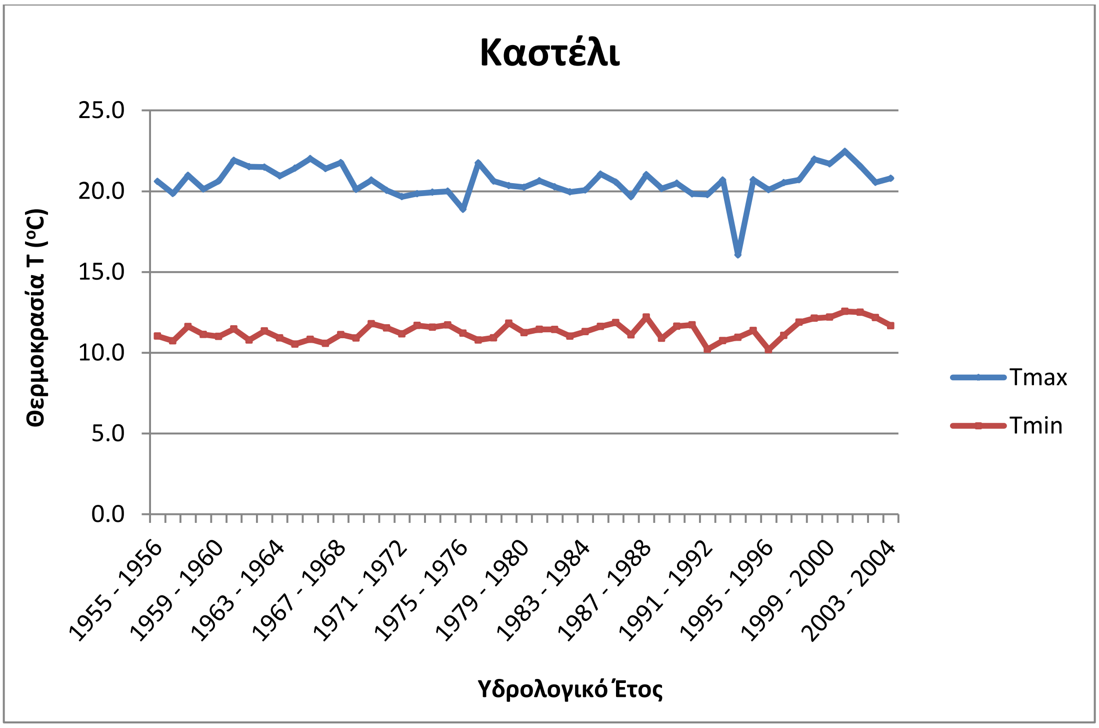


Διάγραμμα Π43 : Μέσο μηνιαίο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Καστέλι

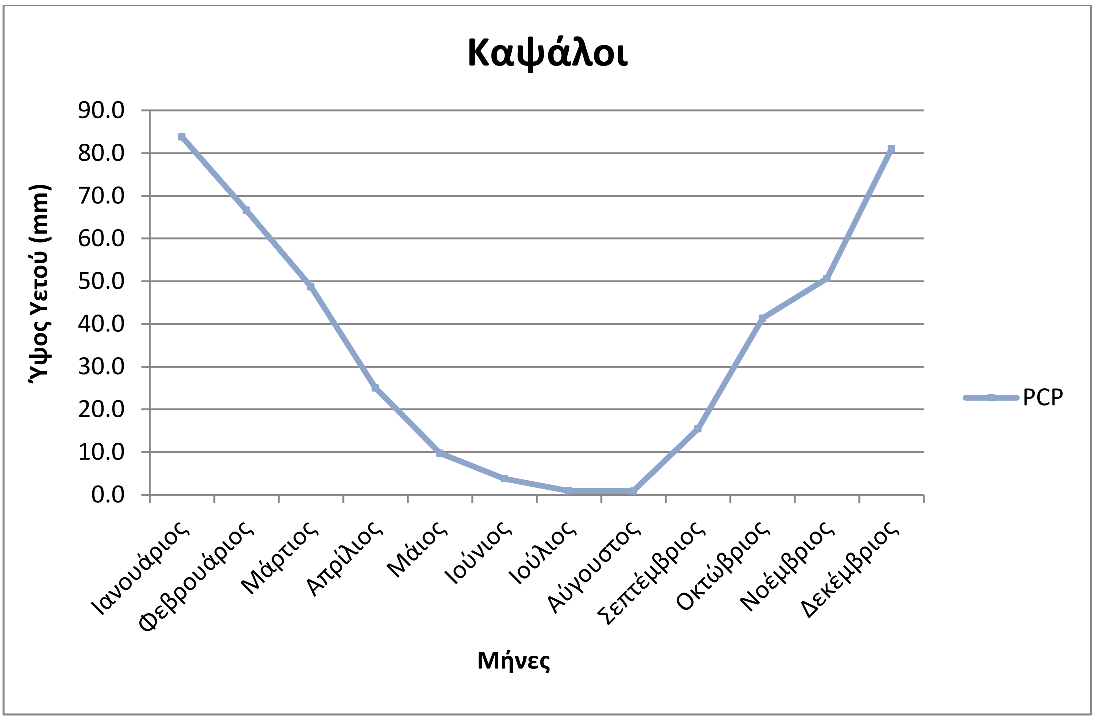
Διάγραμμα Π44 : Μέσο ετήσιο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Καστέλι



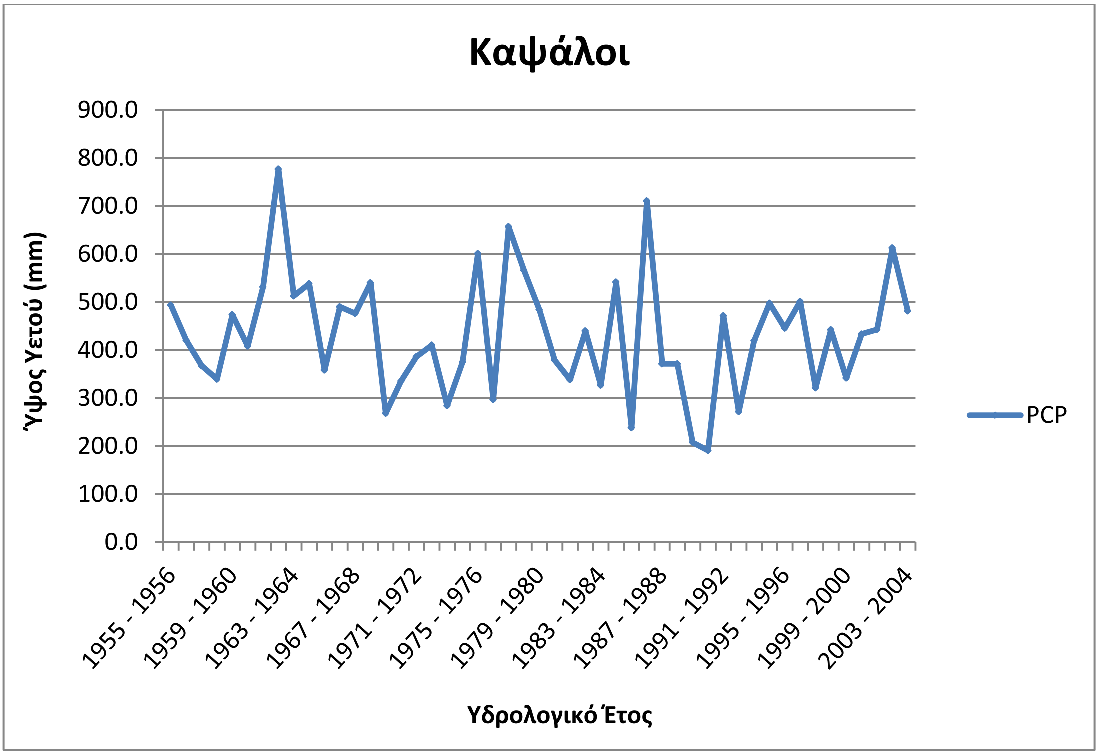
Διάγραμμα Π45 : Μέση μηνιαία μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Καστέλι



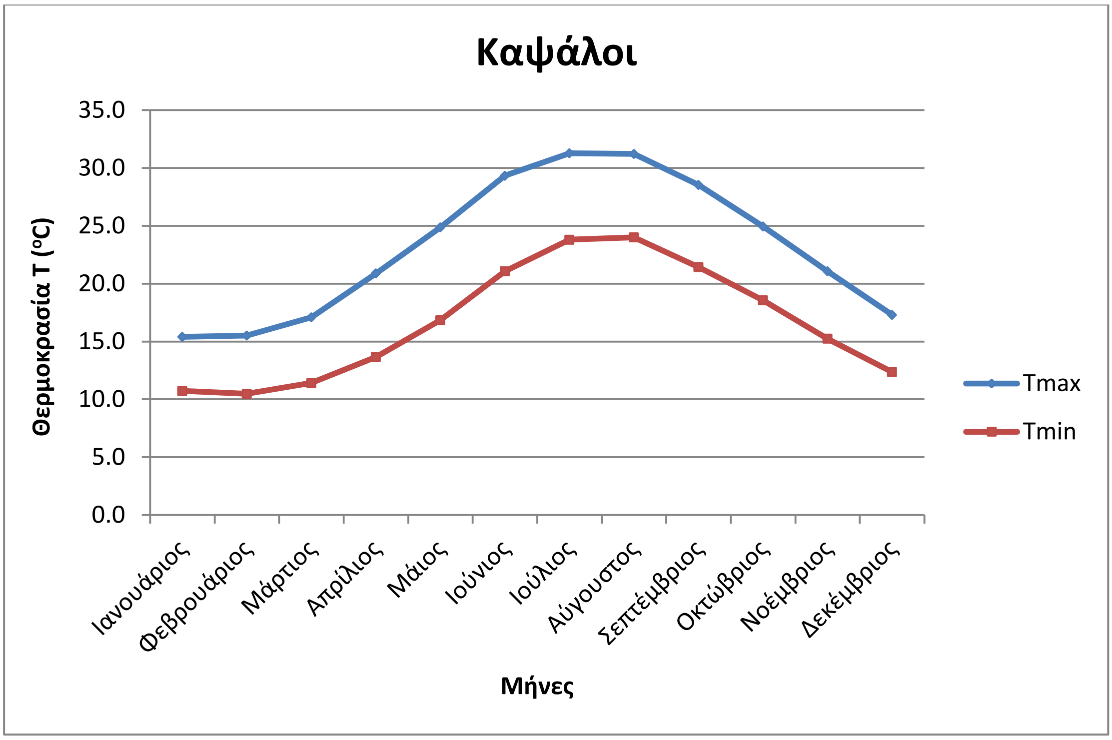
Διάγραμμα Π46 : Μέση ετήσια μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Καστέλι



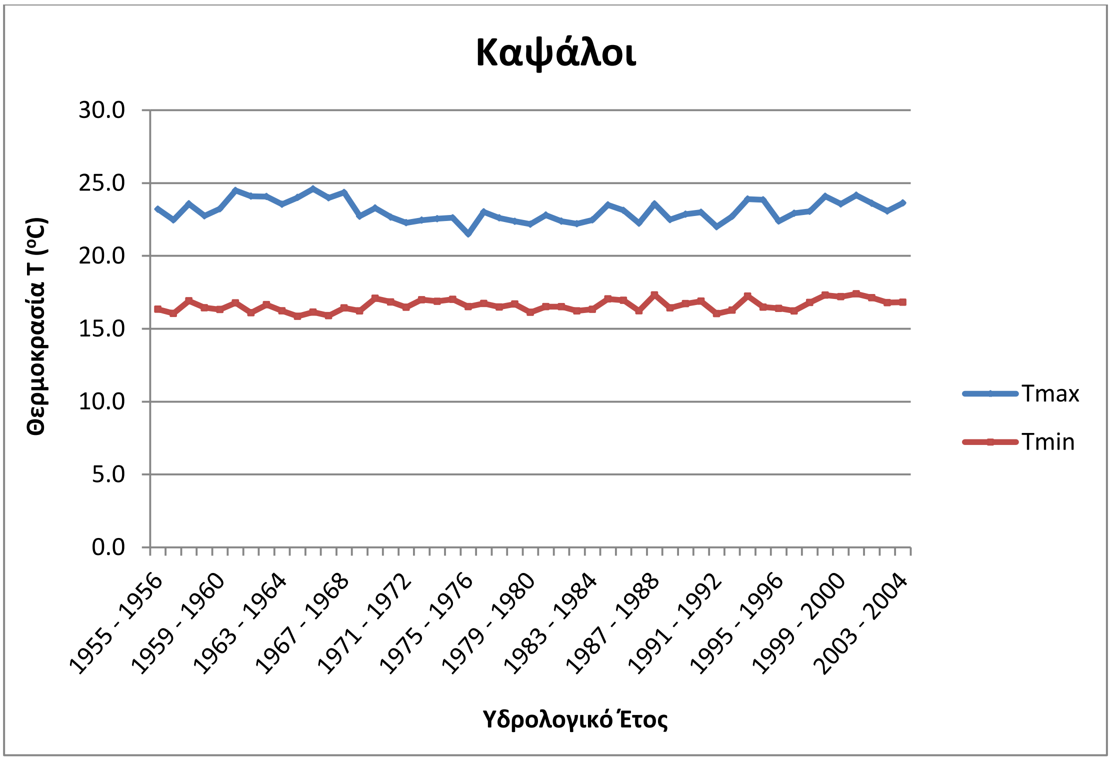
Διάγραμμα Π47 : Μέσο μηνιαίο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Καψάλοι



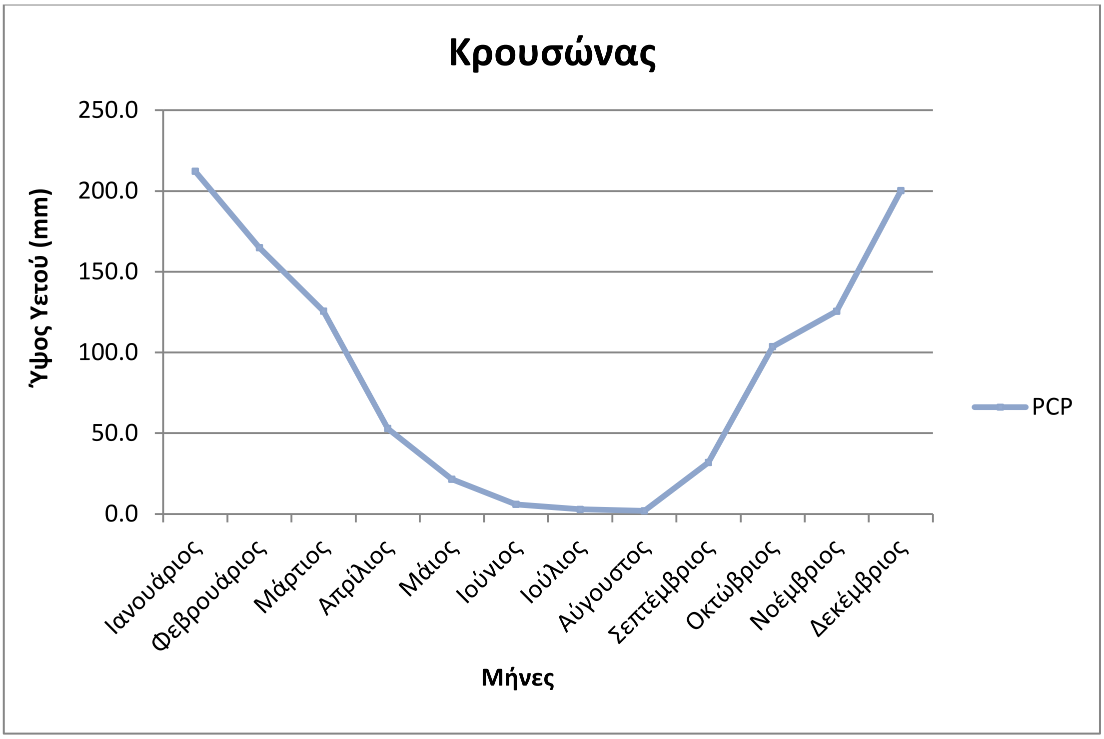
Διάγραμμα Π48 : Μέσο ετήσιο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Καψάλοι



Διάγραμμα Π49 : Μέση μηνιαία μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Καψάλοι

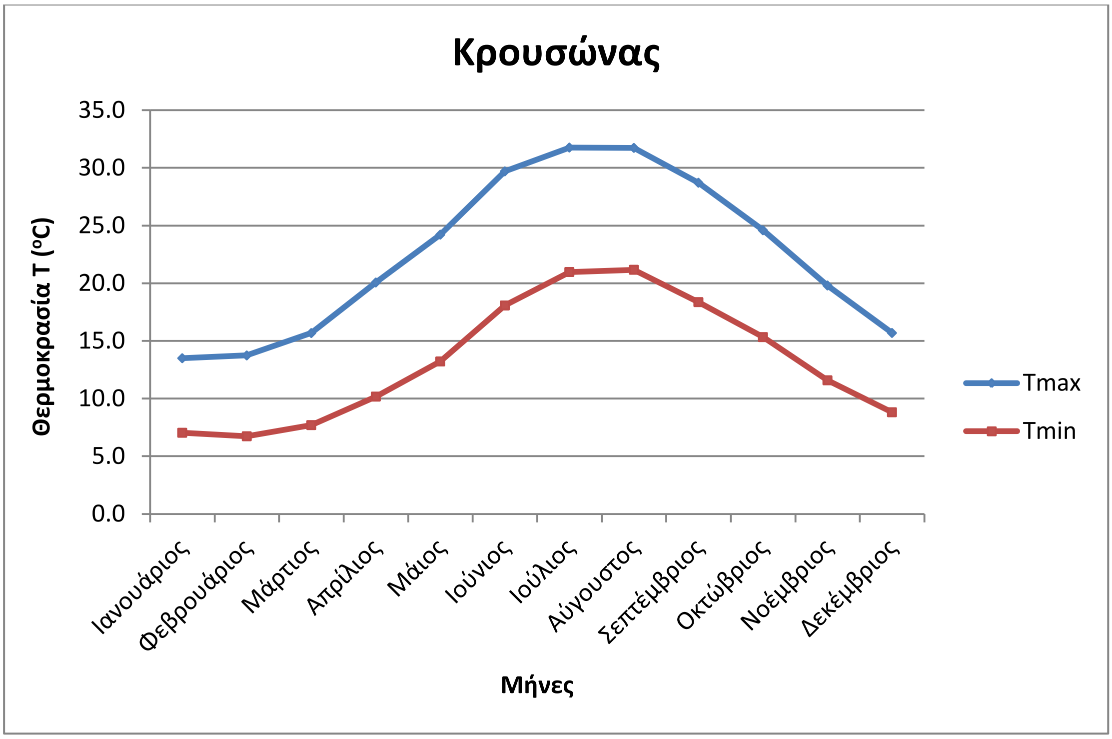


Διάγραμμα Π50 : Μέση ετήσια μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Καψάλοι

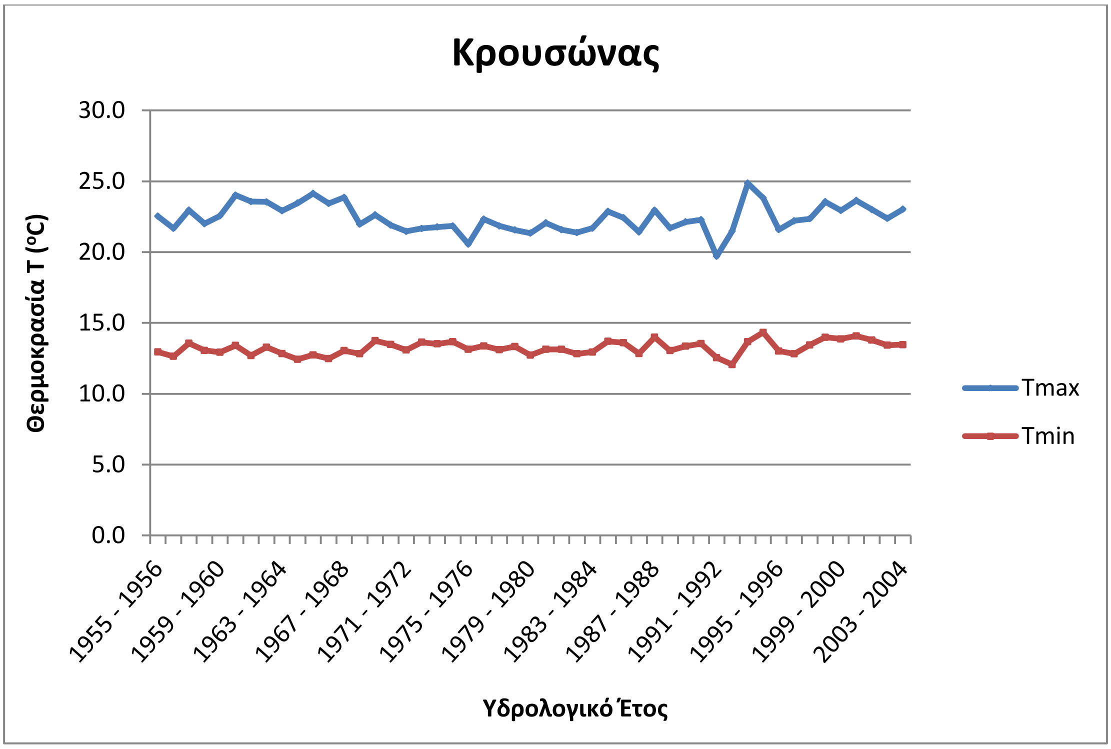


Διάγραμμα Π51 : Μέσο μηνιαίο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Κρουσώνας

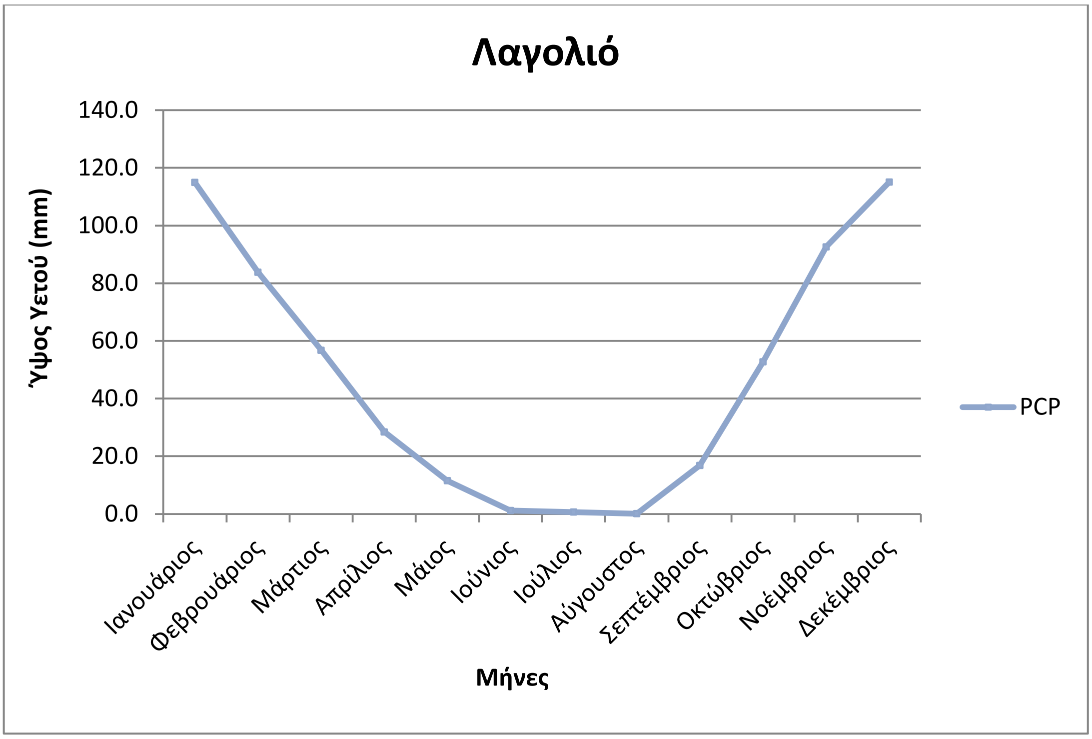
Διάγραμμα Π52 : Μέσο ετήσιο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Κρουσώνας



Διάγραμμα Π53 : Μέση μηνιαία μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Κρουσώνας



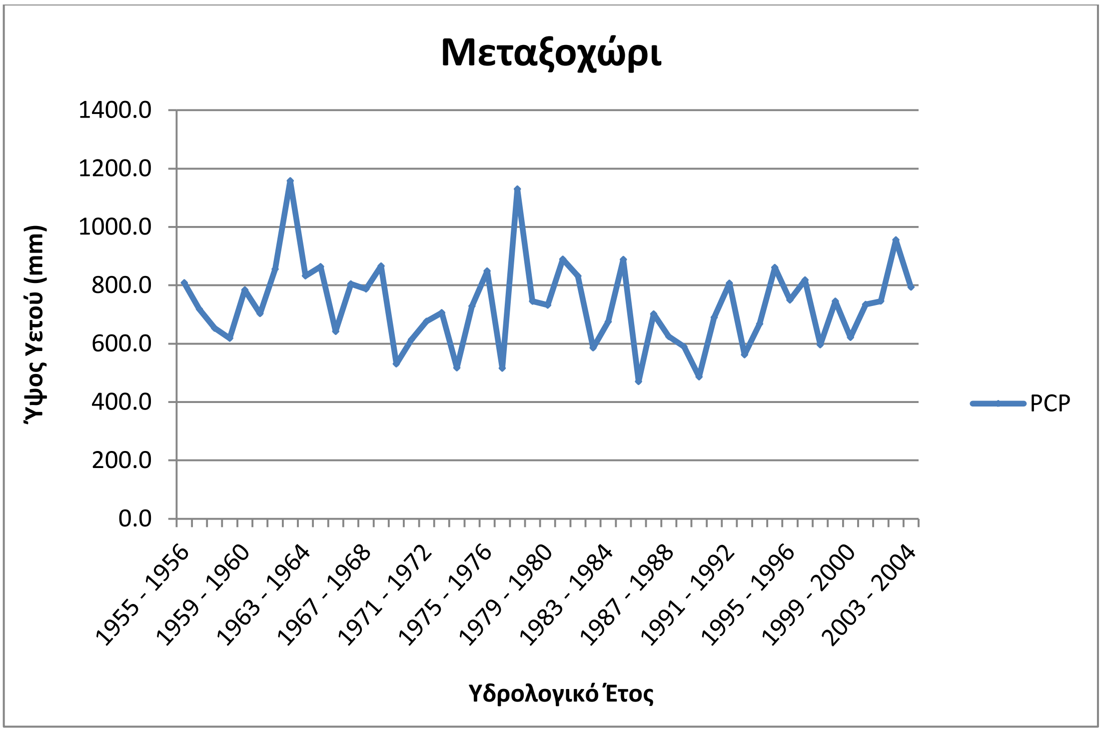
Διάγραμμα Π54 : Μέση ετήσια μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Κρουσώνας



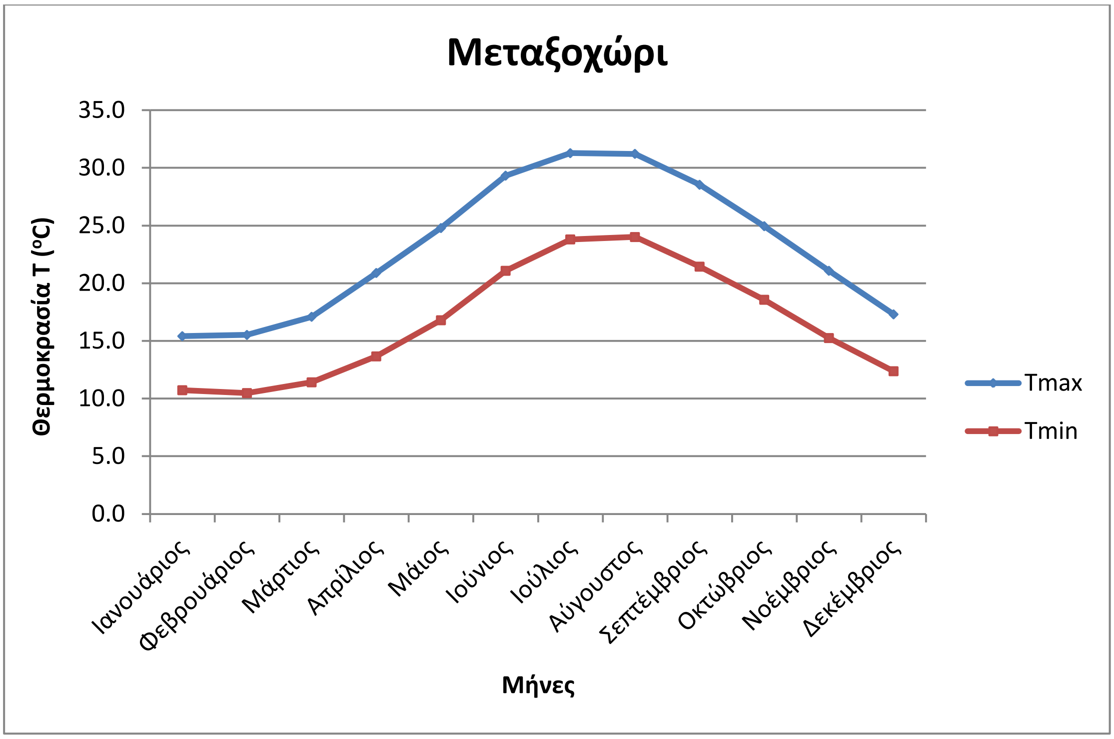
Διάγραμμα Π55 : Μέσο μηνιαίο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Λαγολιό

Διάγραμμα Π56 : Μέσο ετήσιο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Λαγολιό

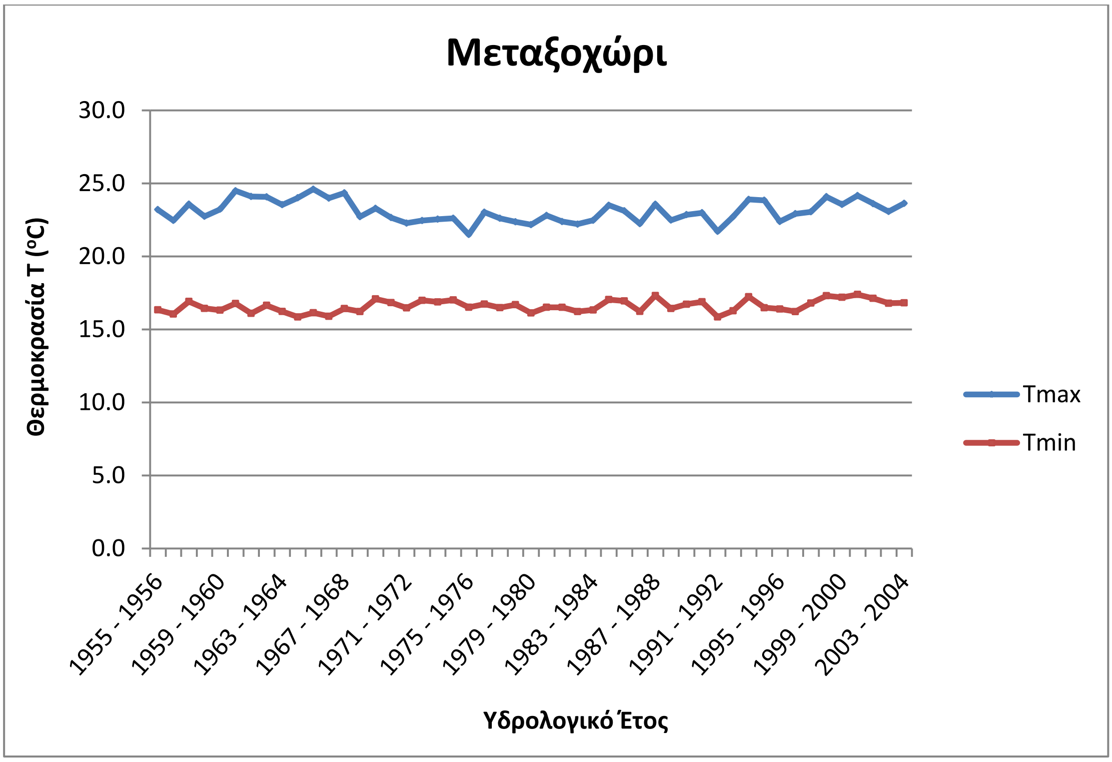
Διάγραμμα Π57 : Μέσο μηνιαίο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Μεταξοχώρι



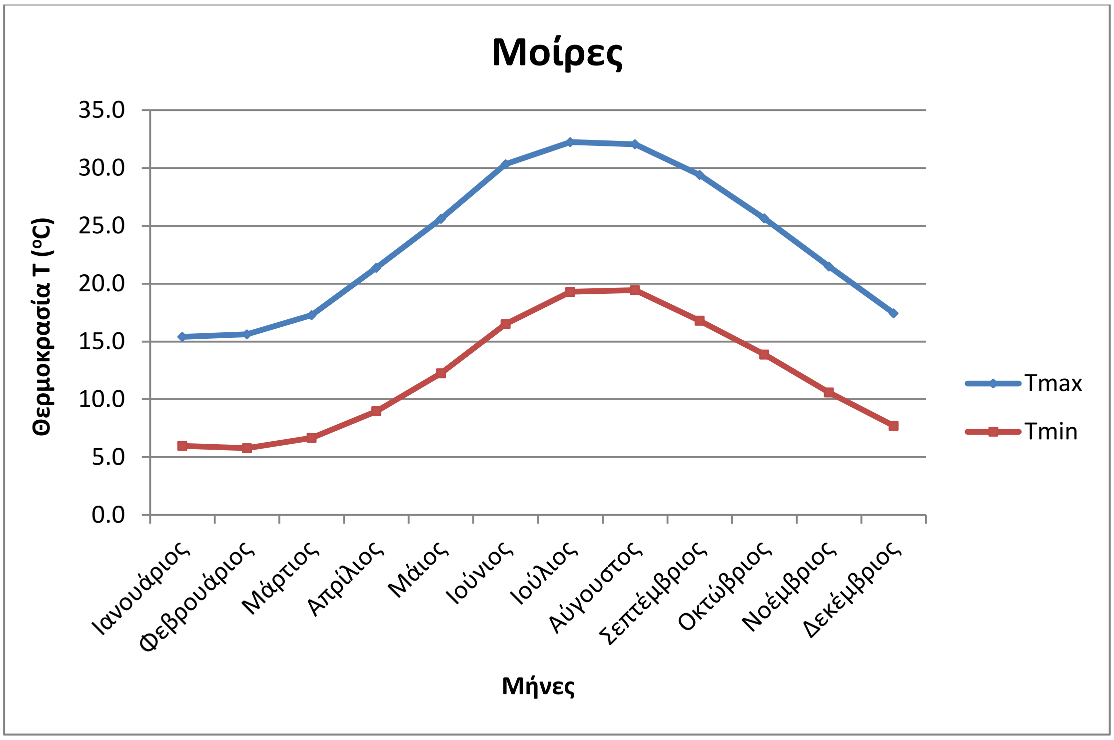
Διάγραμμα Π58 : Μέσο ετήσιο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Μεταξοχώρι



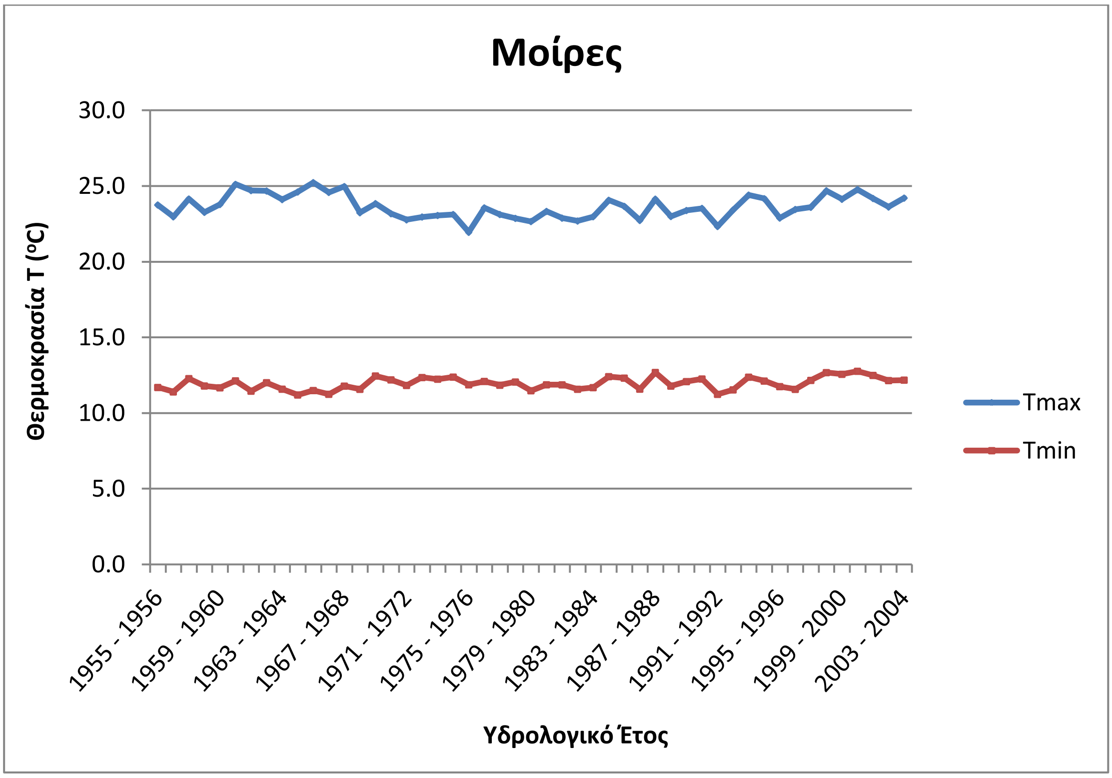
Διάγραμμα Π59 : Μέση μηνιαία μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Μεταξοχώρι



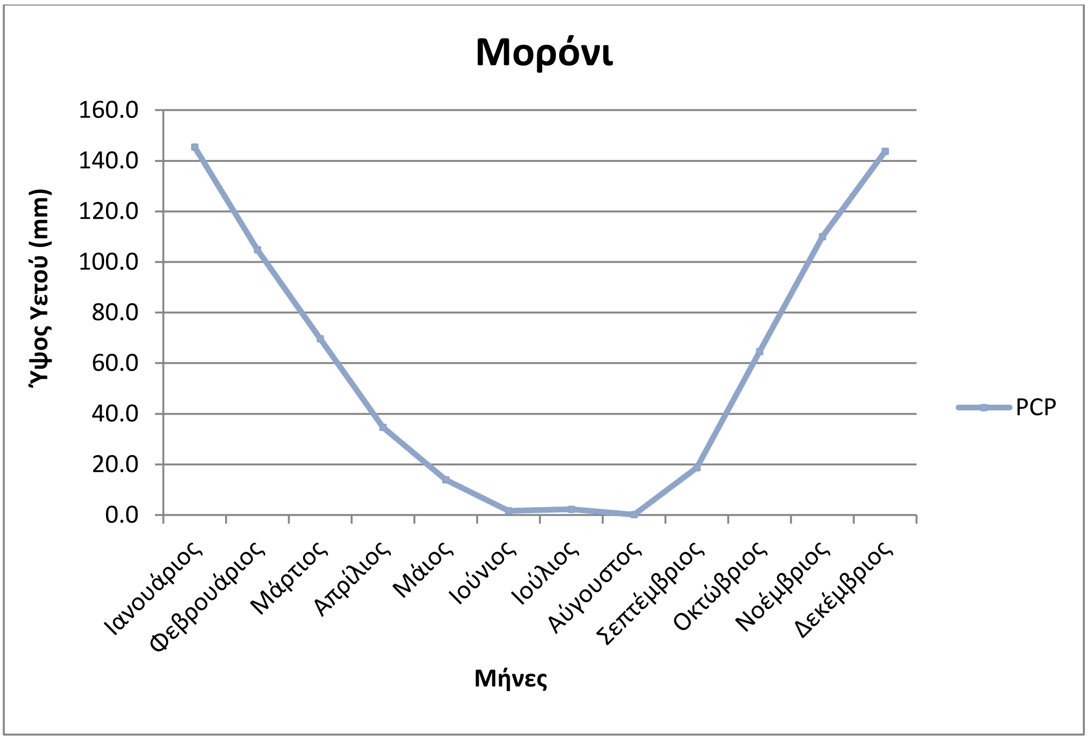
Διάγραμμα Π60 : Μέση ετήσια μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Μεταξοχώρι



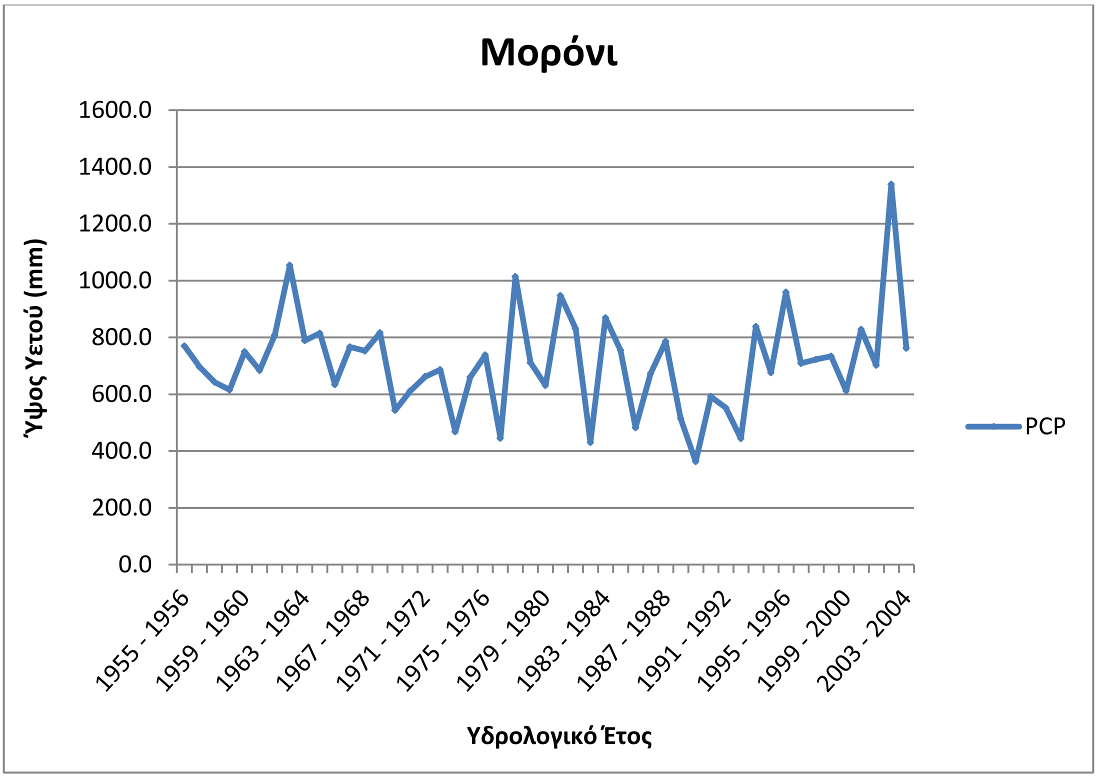
Διάγραμμα Π61 : Μέση μηνιαία μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Μοίρες



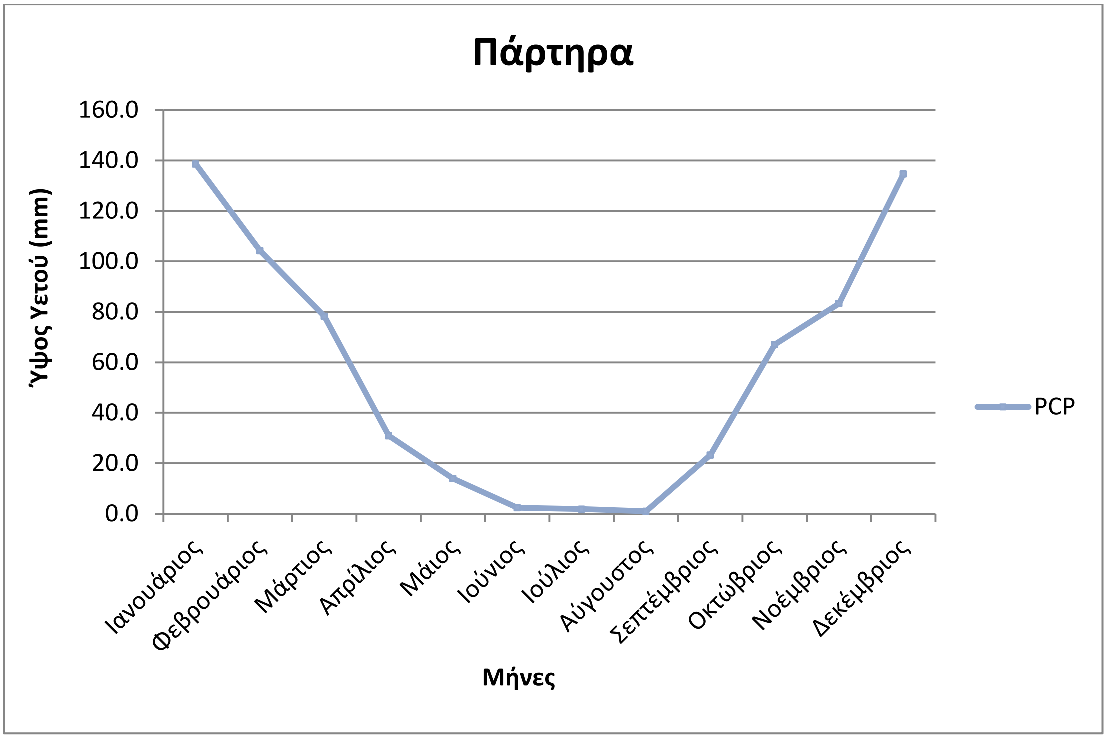
Διάγραμμα Π62 : Μέση ετήσια μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Μοίρες



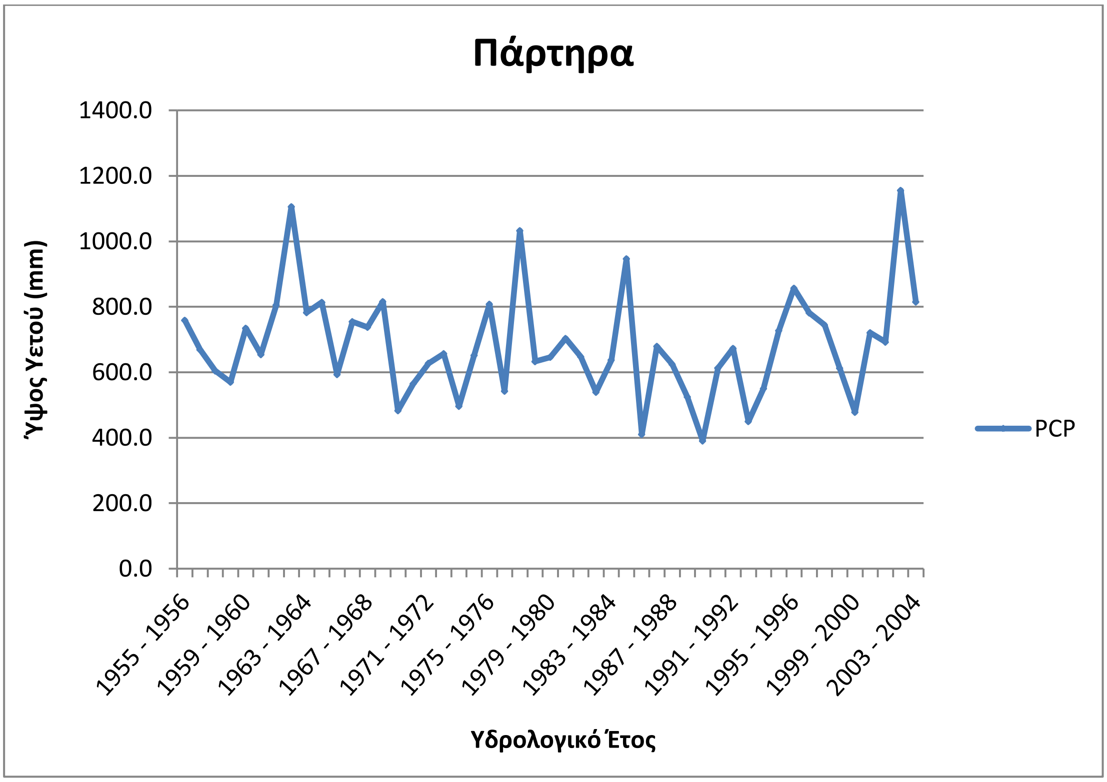
Διάγραμμα Π63 : Μέσο μηνιαίο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Μορόνι



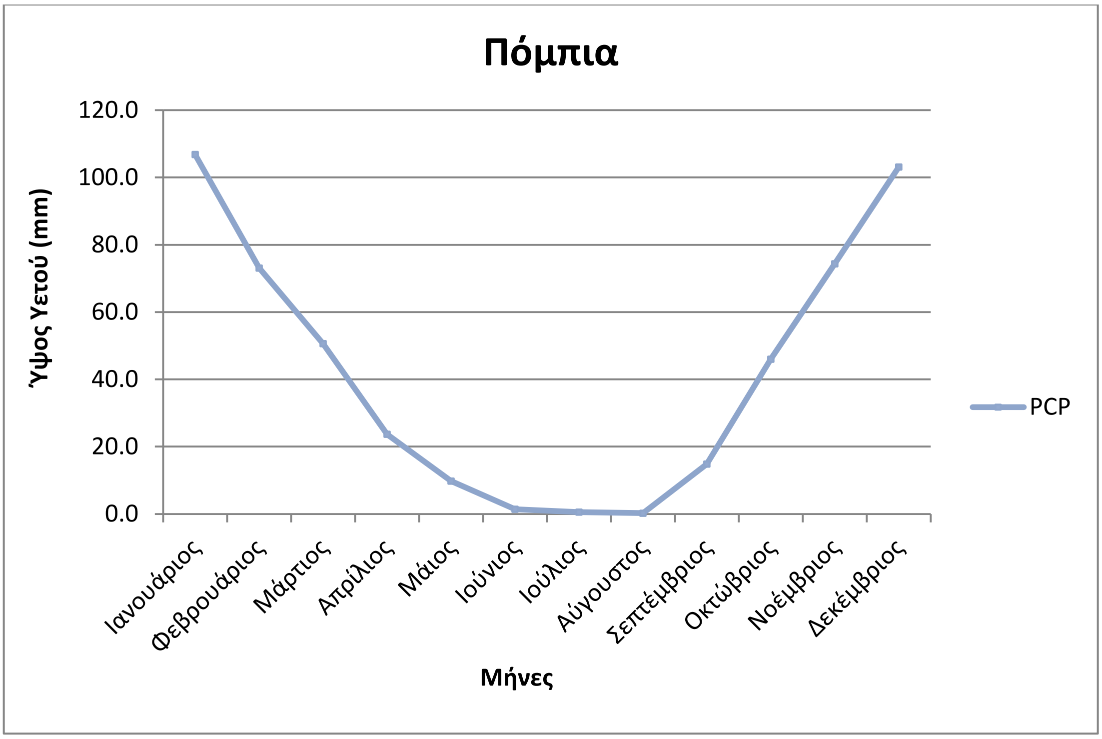
Διάγραμμα Π64 : Μέσο ετήσιο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Μορόνι



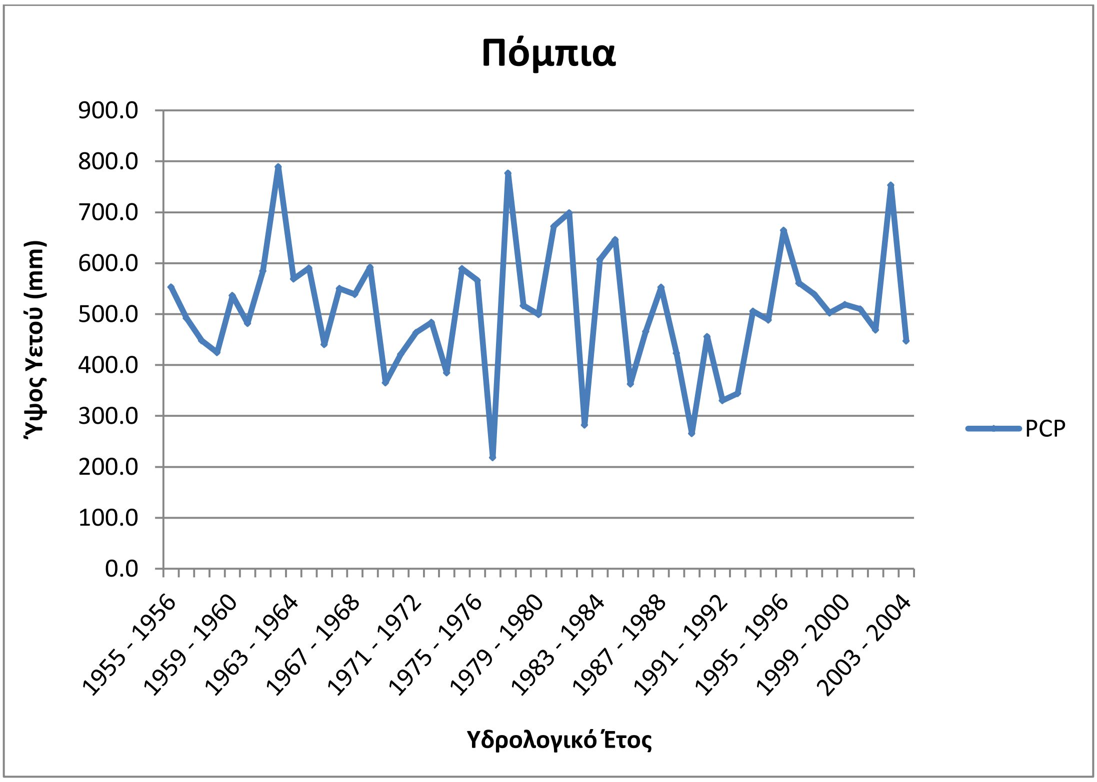
Διάγραμμα Π65 : Μέσο μηνιαίο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Πάρτηρα



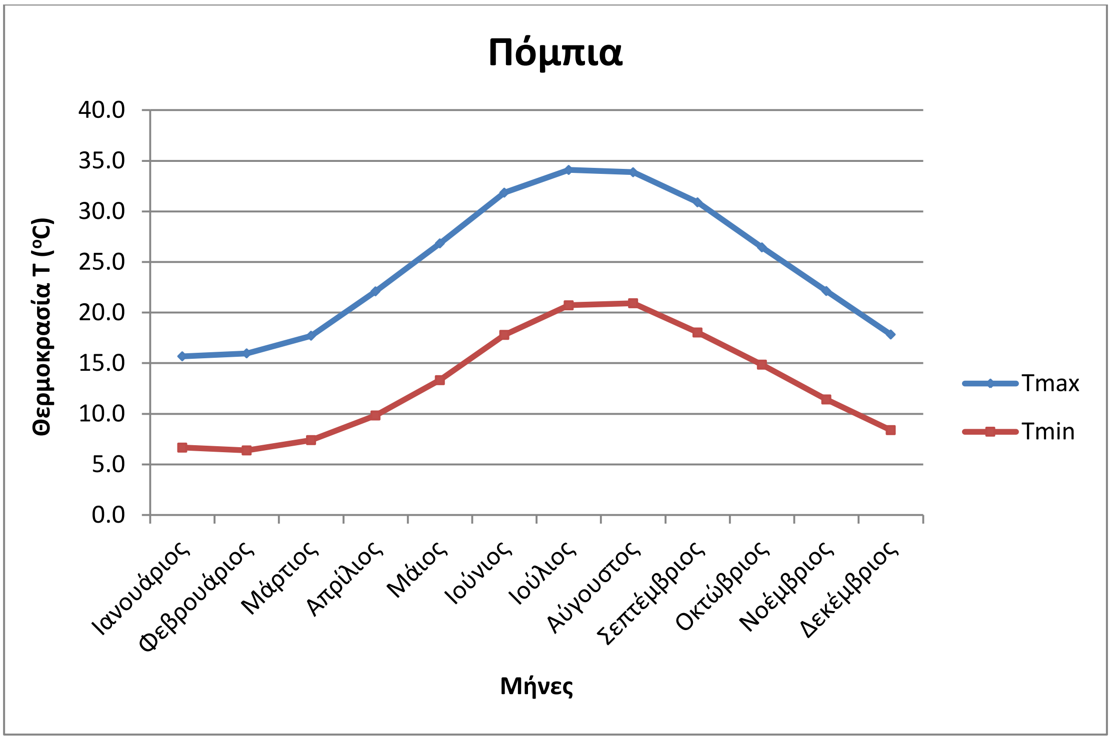
Διάγραμμα Π66 : Μέσο ετήσιο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Πάρτηρα



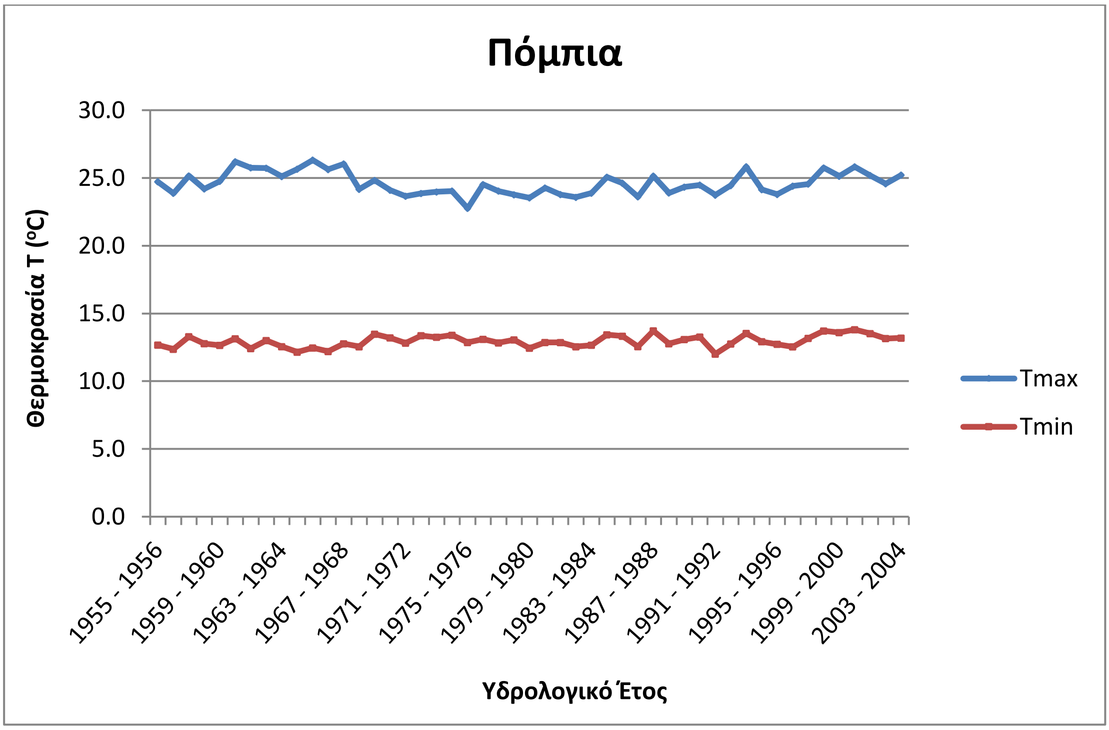
Διάγραμμα Π67 : Μέσο μηνιαίο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Πόμπια



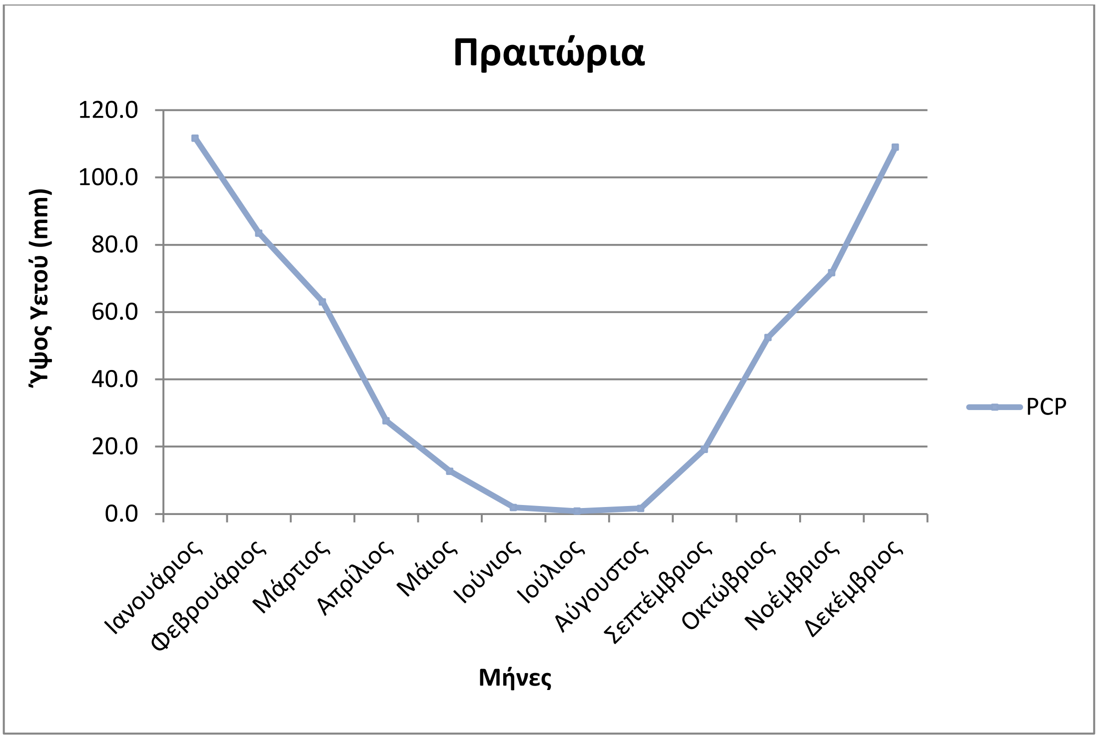
Διάγραμμα Π68 : Μέσο ετήσιο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Πόμπια



Διάγραμμα Π69 : Μέση μηνιαία μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Πόμπια

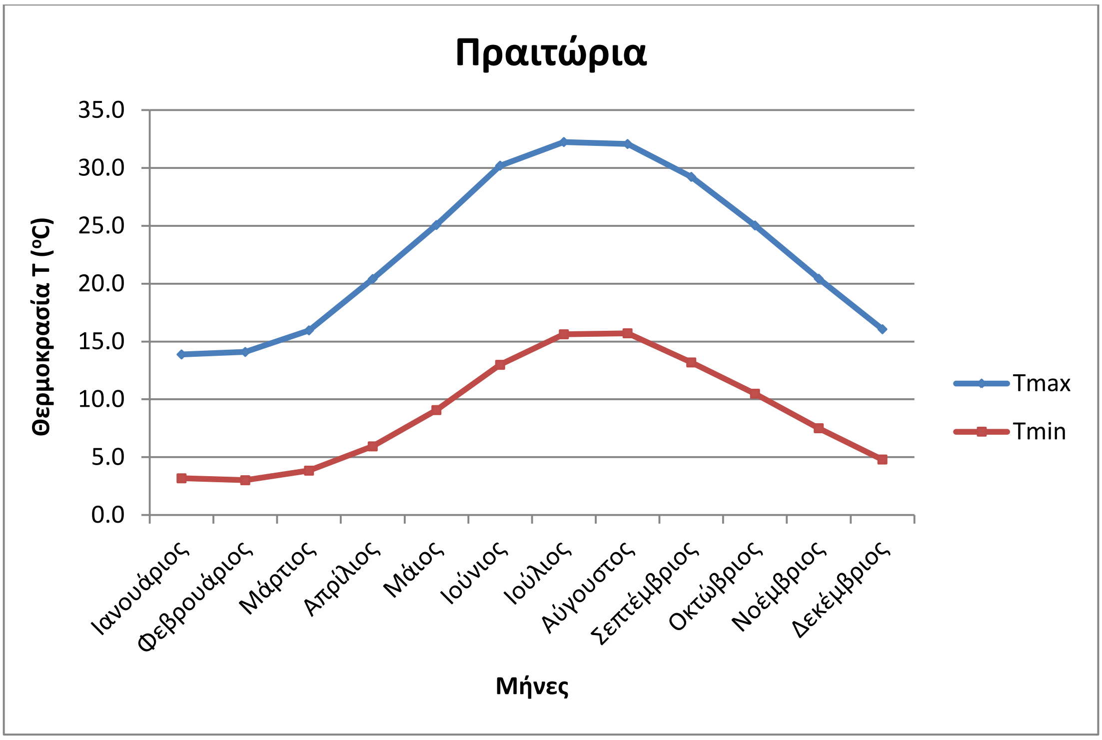


Διάγραμμα Π70 : Μέση ετήσια μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Πόμπια

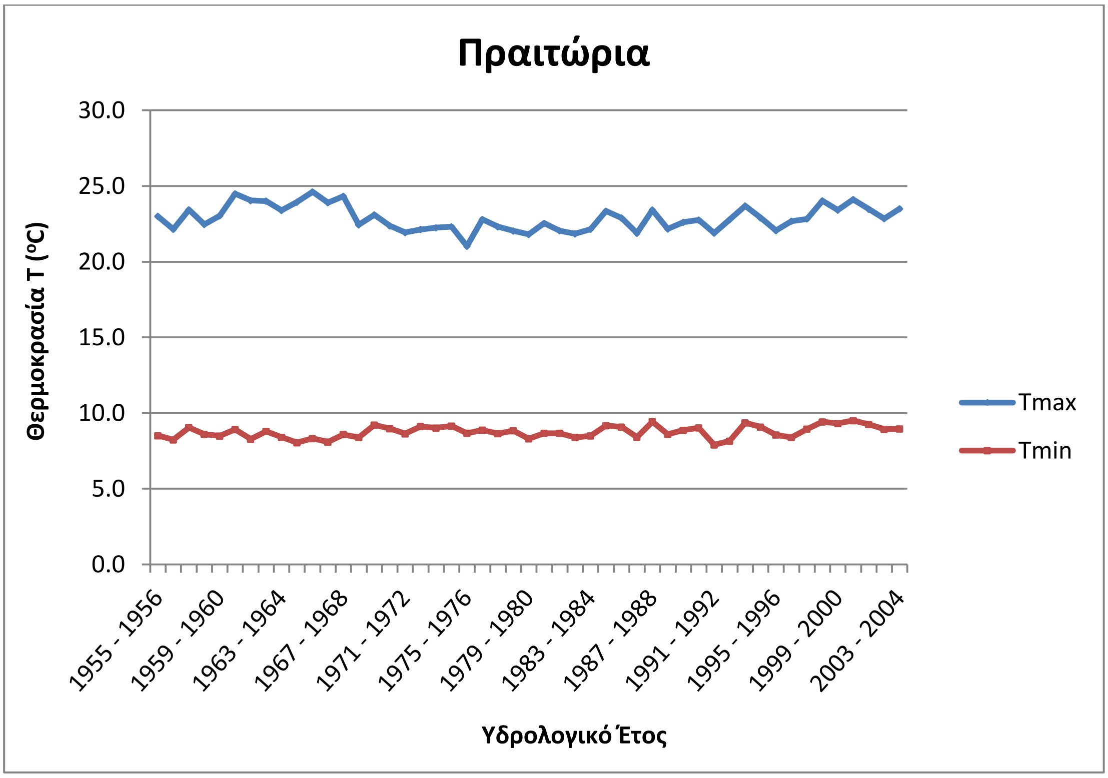


Διάγραμμα Π71 : Μέσο μηνιαίο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Πραιτώρια

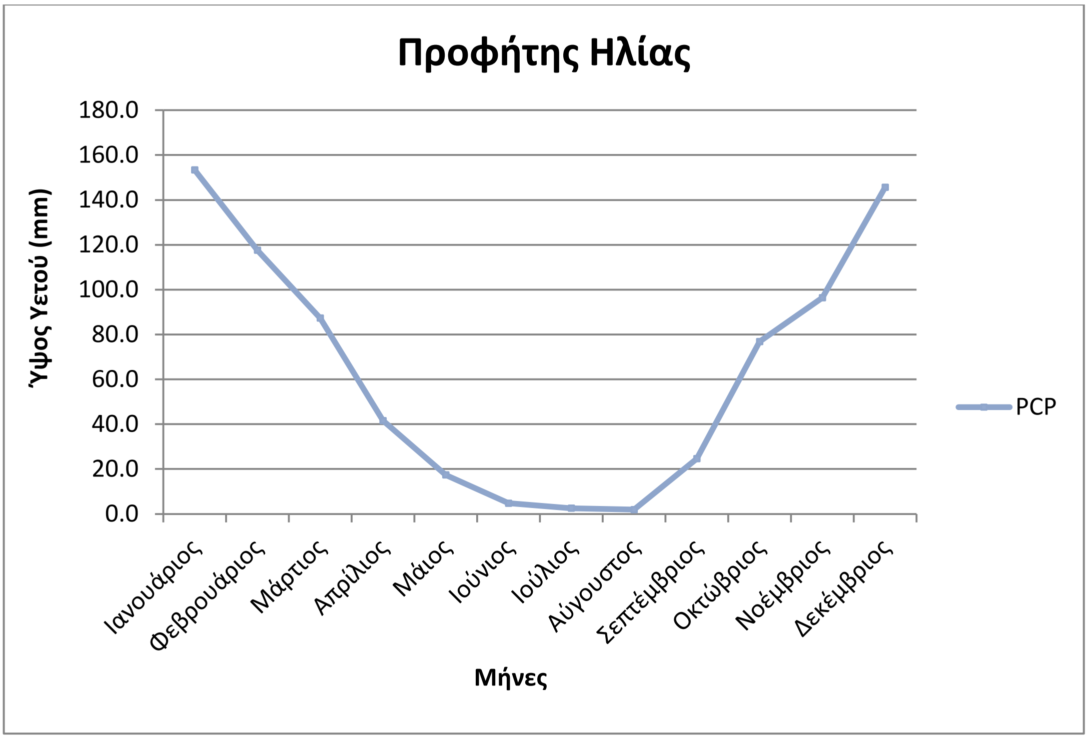
Διάγραμμα Π72 : Μέσο ετήσιο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Πραιτώρια



Διάγραμμα Π73 : Μέση μηνιαία μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Πραιτώρια

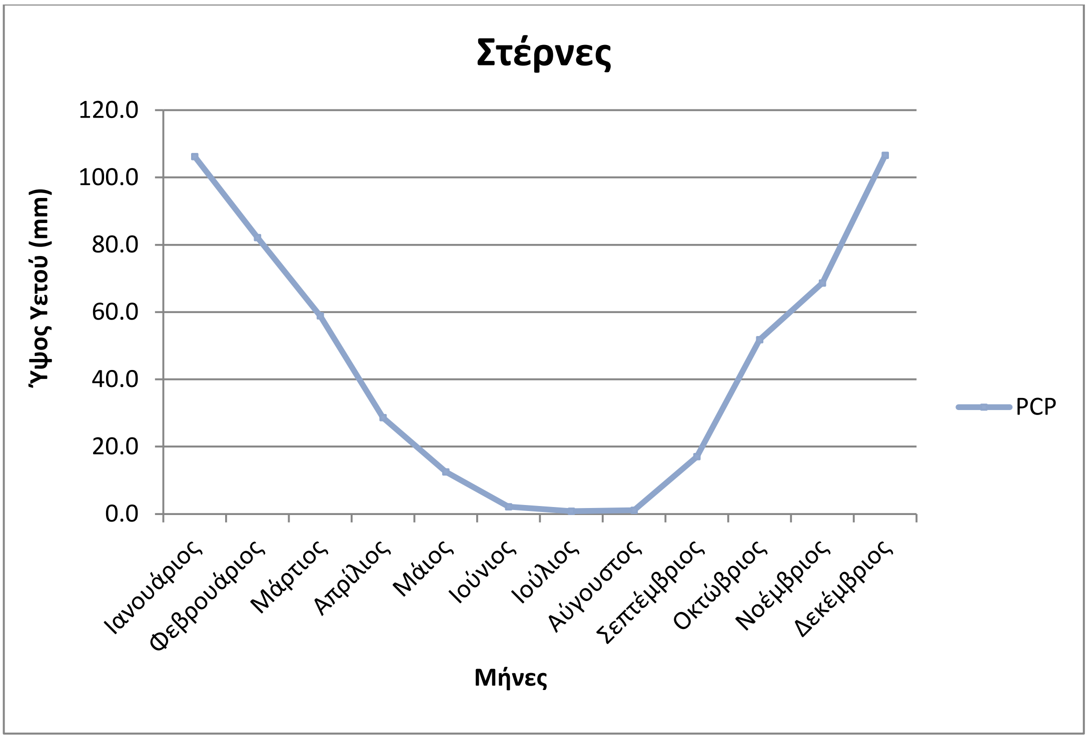


Διάγραμμα Π74 : Μέση ετήσια μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Πραιτώρια



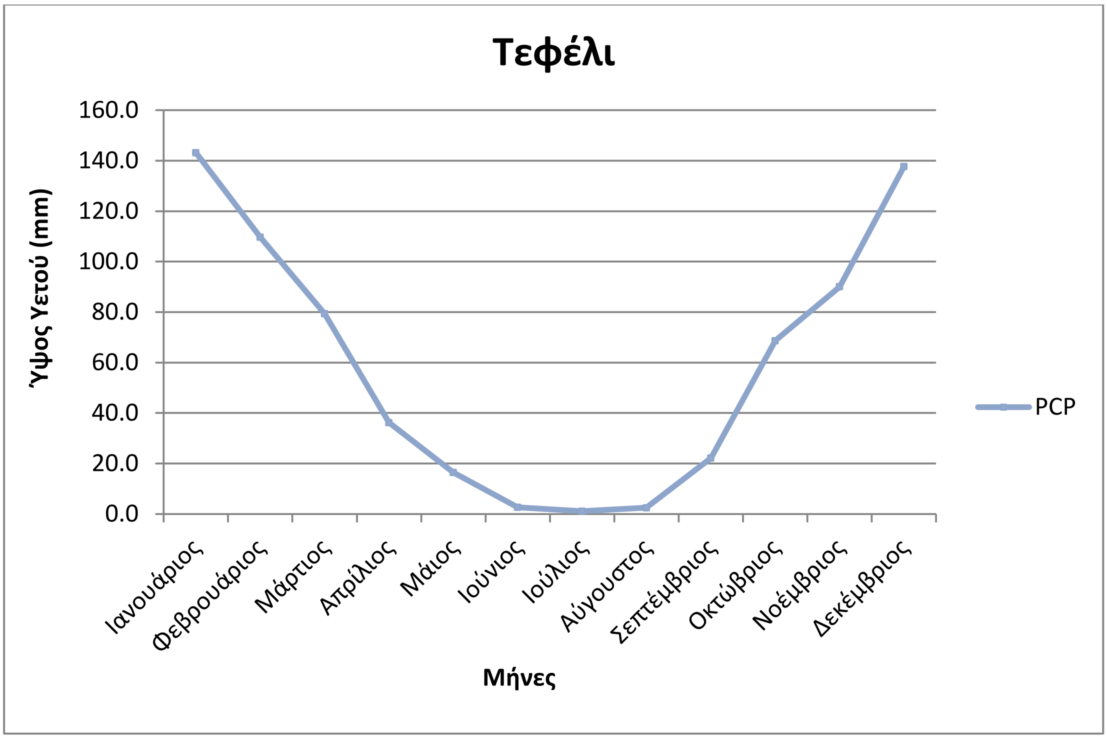
Διάγραμμα Π75 : Μέσο μηνιαίο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Προφήτης Ηλίας

Διάγραμμα Π76 : Μέσο ετήσιο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Προφήτης Ηλίας

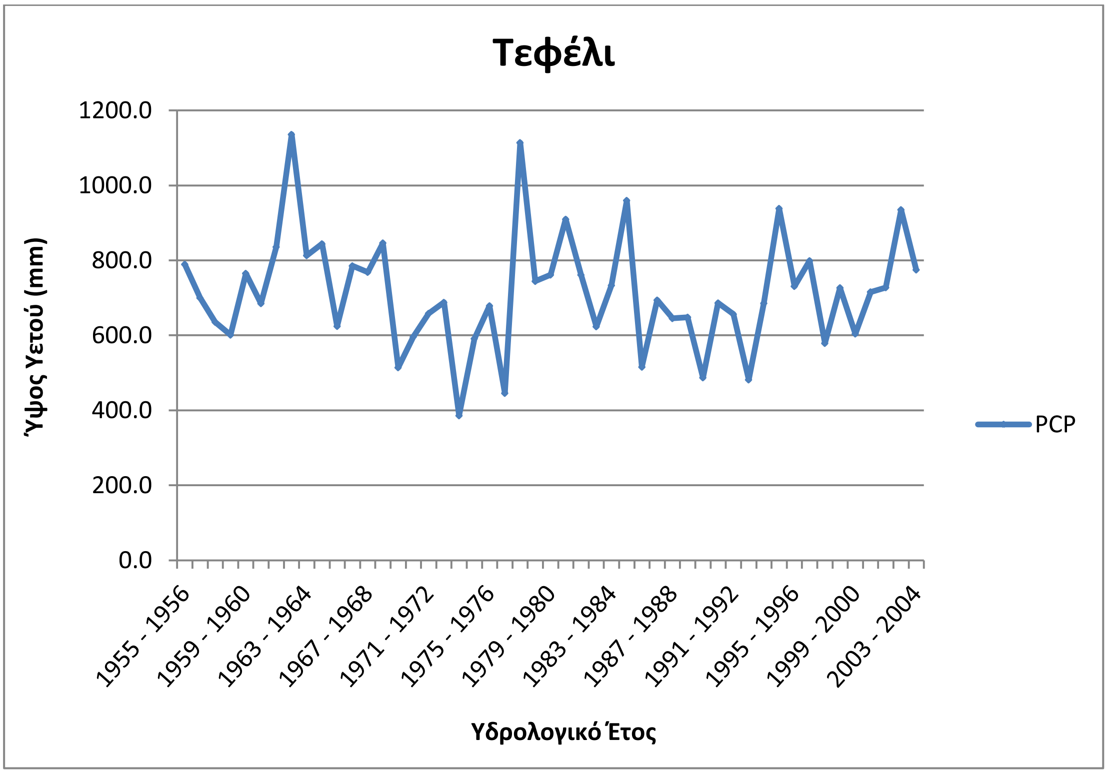


Διάγραμμα Π77 : Μέσο μηνιαίο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Στέρνες

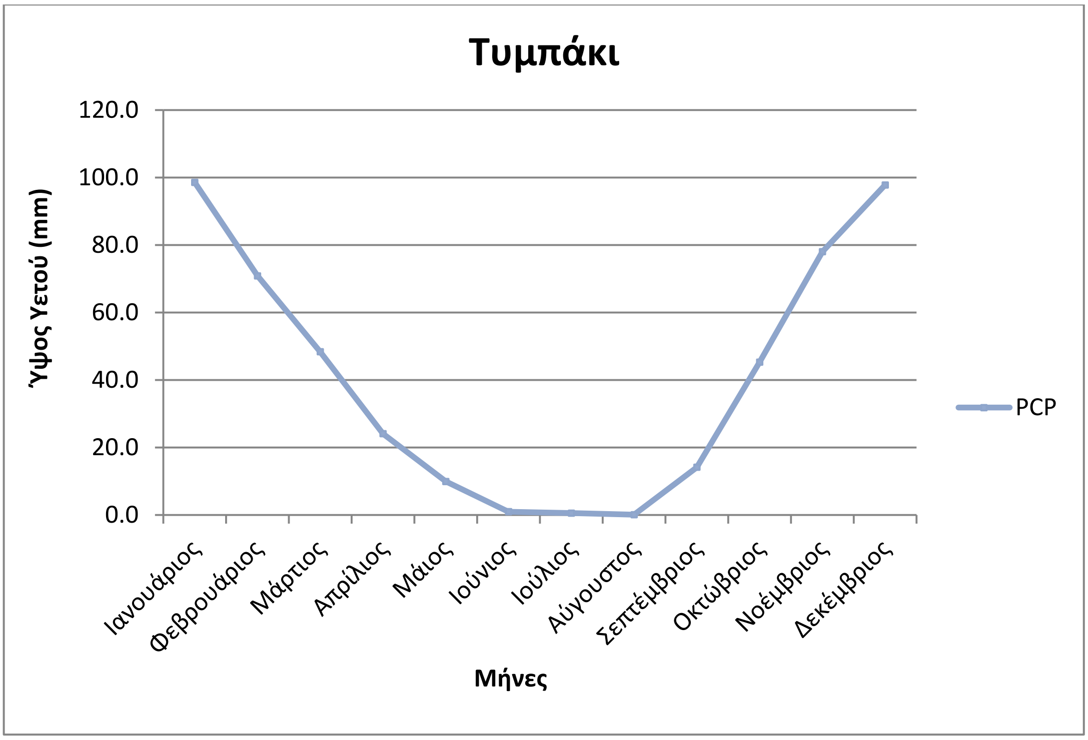
Διάγραμμα Π78 : Μέσο ετήσιο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Στέρνες



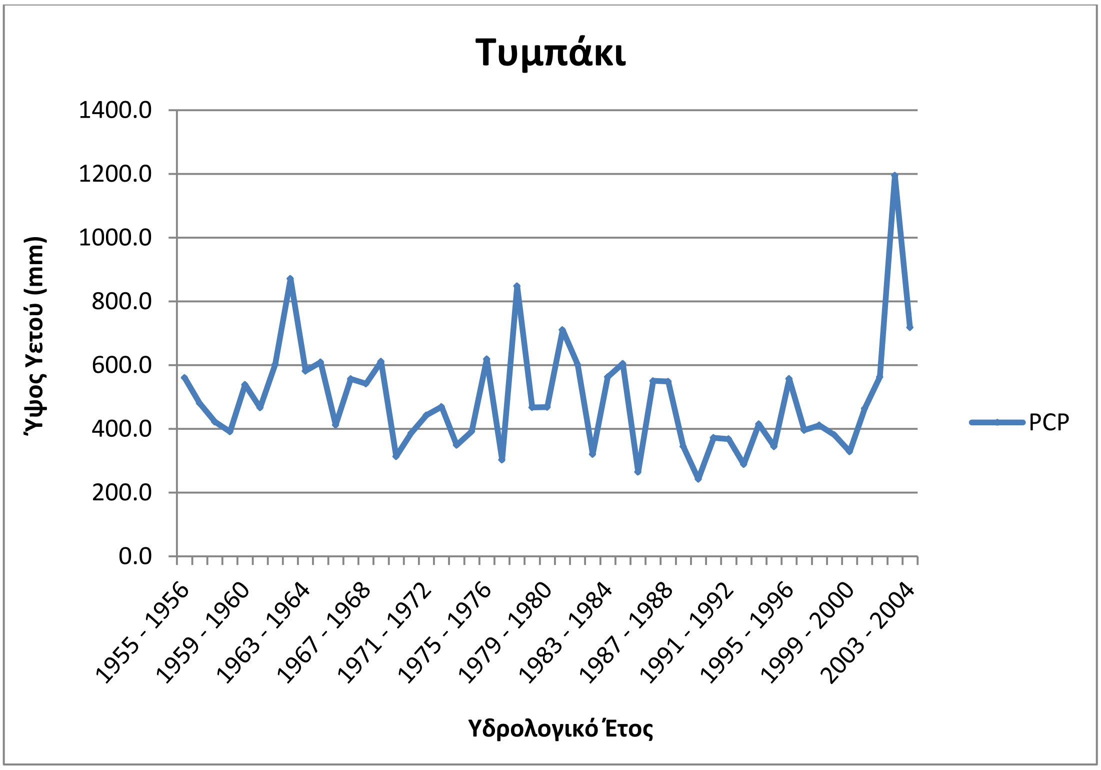
Διάγραμμα Π79 : Μέσο μηνιαίο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Τεφέλι



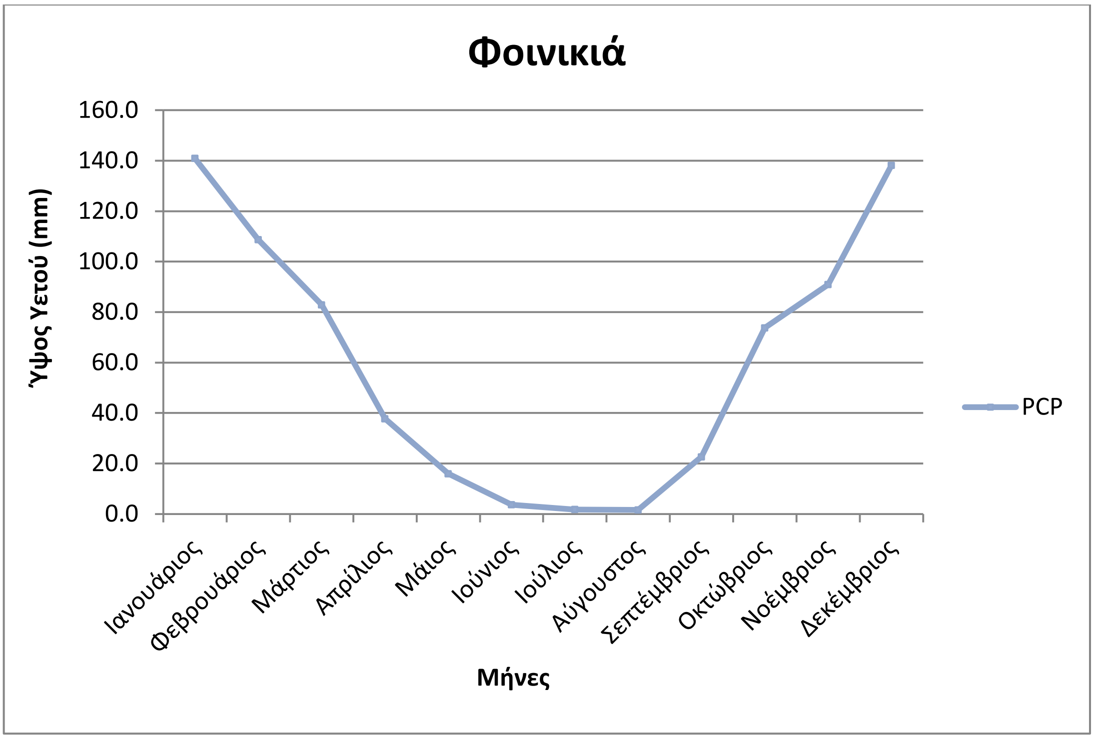
Διάγραμμα Π80 : Μέσο ετήσιο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Τεφέλι



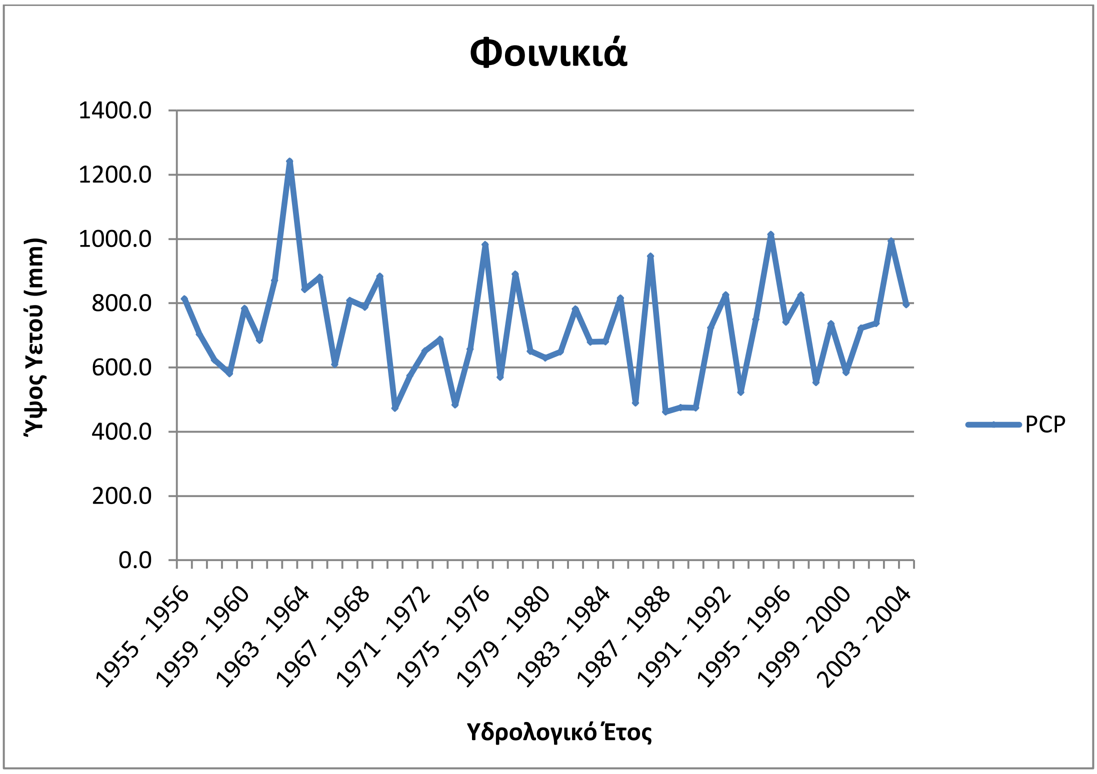
Διάγραμμα Π81 : Μέσο μηνιαίο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Τυμπάκι



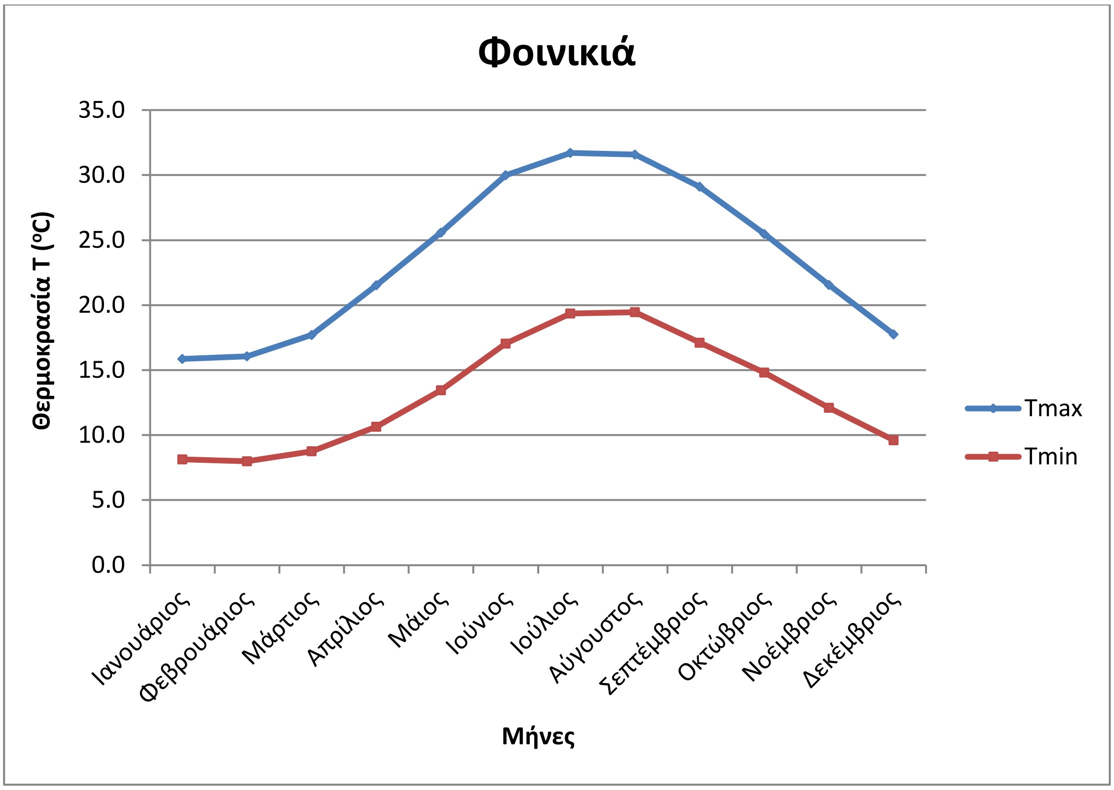
Διάγραμμα Π82 : Μέσο ετήσιο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Τυμπάκι



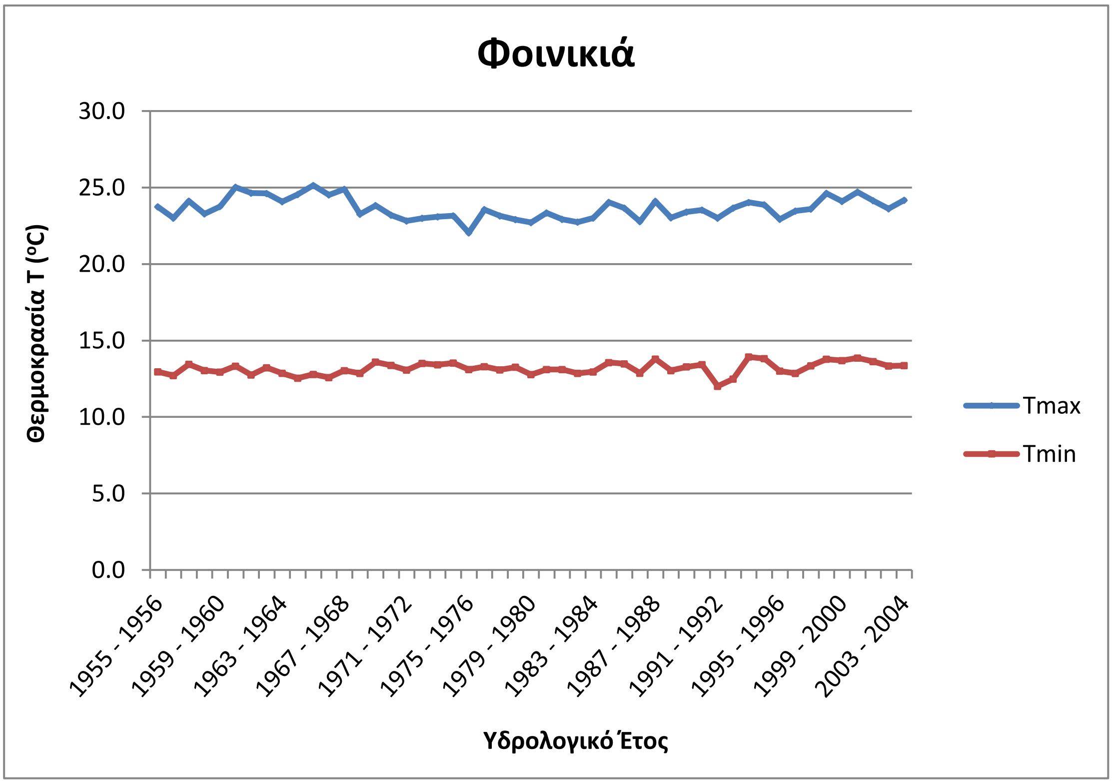
Διάγραμμα Π83 : Μέσο μηνιαίο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Φοινικιά



Διάγραμμα Π84 : Μέσο ετήσιο ύψος υετού για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Φοινικιά



Διάγραμμα Π85 : Μέση μηνιαία μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Φοινικιά



Διάγραμμα Π86 : Μέση ετήσια μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία για την χρονική περίοδο 1955 – 2004 στον σταθμό Φοινικιά