

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**



<<Γεωστατιστική ανάλυση της βροχόπτωσης στο νησί της Κρήτης>>

---

**Φοιτήτρια: Αναστασία Κωτσοπούλου**

**Εξεταστική Επιτροπή:**

Καθηγητής Καρατζάς Γεώργιος

Καθηγητής Νικολαΐδης Νικόλαος

Δρ. Βαρουχάκης Εμμανουήλ

**ΧΑΝΙΑ 2015**

## Ευχαριστίες

Στην ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας συνέβαλε ένας αριθμός ανθρώπων τους οποίους στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς. Καταρχάς τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Καρατζά Γεώργιο για την άψογη συνεργασία, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου την παρούσα εργασία και την ευκαιρία που μου έδωσε να μελετήσω το πεδίο της γεωστατιστικής. Ιδιαίτερες ευχαριστίες στον Δρ. Βαρουχάκη Εμμανουήλ για την αμέριστη συμπαράσταση, υπομονή και κατανόηση του καθ' όλη την διάρκεια της προσπάθειάς μου. Η συμβολή του ήταν καθοριστική, τόσο στη διαμόρφωση του επιστημονικού υποβάθρου πάνω στο οποίο στηρίχθηκε η εργασία, όσο και στην επίλυση δεκάδων πρακτικών προβλημάτων που ανέκυψαν κατά τη διάρκεια της συγγραφής της εργασίας.

Επίσης, ιδιαίτερες ευχαριστίες θέλω να εκφράσω στα υπόλοιπα μέλη της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής.

Η μακρόχρονη και πολυεπίπεδη τριβή με όλους εσάς τους εξαιρετικούς δασκάλους και επιστήμονες, διαμόρφωσε σε μεγάλο βαθμό, όχι μόνο τη δομή και το περιεχόμενο της εργασίας μου αλλά και συνολικά τις γνώσεις, ακόμα και το χαρακτήρα μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, η οποία μου παρείχαν απεριόριστη αγάπη και φροντίδα, καθώς και την απαραίτητη οικονομική και ηθική στήριξη καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου και όχι μόνο.

## Περίληψη

Η συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία ασχολείται με τη στατιστική και γεωστατιστική ανάλυση της βροχόπτωσης στο νησί της Κρήτης. Η μελέτη των βροχοπτώσεων αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο και αντικείμενο μελέτης πολλών ειδικοτήτων. Η εξαγωγή συμπερασμάτων που αφορούν τις ποιοτικές και ποσοτικές εκτιμήσεις, τον εντοπισμό των περιοχών που πλήττονται από ξηρασίες λόγω της γεωγραφικής τους θέσης, την ενδεχόμενη περιοδικότητα στην τάση των βροχοπτώσεων καθώς και οι χάρτες κατανομής της βροχόπτωσης, είναι κάποια από τα πιο χρήσιμα εφόδια που προσφέρει η παρούσα εργασία. Η εφαρμογή της στατιστικής και γεωστατιστικής ανάλυσης έγινε βασιζόμενη σε δεδομένα παρατήρησης πενήντα τεσσάρων βροχομετρικών σταθμών που βρίσκονται διάσπαρτοι στους τέσσερις νομούς της Κρήτης και οι μετρήσεις αφορούν τη χρονική περίοδο 1981 - 2014.

Η στατιστική ανάλυση βασίστηκε στην κατασκευή διαγραμμάτων για τις πιο ενδιαφέρουσες υδρολογικές περιόδους. Πιο αναλυτικά, κατασκευάστηκαν συγκριτικά διαγράμματα για τα βροχομετρικά δεδομένα που καταγράφηκαν σε κάθε νομό του νησιού τόσο κατά τη διάρκεια έκαστου υδρολογικού έτους συνολικά, όσο και κατά τη διάρκεια των αντίστοιχων υγρών και ξηρών περιόδων. Επίσης, μελετήθηκε η διαχρονική πορεία της βροχόπτωσης από το 1981 έως προσφάτως, τόσο για ολόκληρη την Κρήτη όσο και μεμονωμένα για το ανατολικό και το δυτικό τμήμα της, από όπου συμπεραίνεται ότι η πορεία της βροχόπτωσης για την Κρήτη συνολικά είναι ελαφρώς ανοδική. Στη συνέχεια επιλέχθηκαν οι σταθμοί με τις πολύ υψηλές ή πολύ χαμηλές βροχομετρικές ενδείξεις και δημιουργήθηκαν τα αντίστοιχα διαγράμματα. Τέλος, εξετάστηκε η συσχέτιση μεταξύ της βροχόπτωσης και του υψομέτρου στο οποίο βρίσκεται ο κάθε βροχομετρικός σταθμός της παρούσης μελέτης και έγινε φανερό ότι οι σταθμοί που βρίσκονται σε υψόμετρο πάνω από 660 μέτρα δέχονται τριπλάσια ποσότητα υδατόπτωσης από αυτούς που βρίσκονται σε πολύ χαμηλά υψόμετρα.

Ένας από τους κύριους στόχους της εργασίας, είναι η αναπαραγωγή της χωρικής κατανομής της βροχόπτωσης στην επιφάνεια του νησιού χρησιμοποιώντας και βοηθητική πληροφορία από ένα ψηφιακό χάρτη υψομέτρου. Οι μέθοδοι οι οποίες

χρησιμοποιήθηκαν για το σκοπό αυτό είναι οι πιο γνωστές γεωστατιστικές μέθοδοι με την ονομασία Kriging. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο Geostatistical Analyst του λογισμικού ARCGIS με το οποίο εξετάστηκαν δύο μέθοδοι για την χωρική εκτίμηση: η πρώτη είναι η μέθοδος Ordinary Kriging και η δεύτερη η μέθοδος Cokriging. Για την εφαρμογή της κάθε μεθόδου έγινε χρήση τεσσάρων ημι-βαριογραμμάτων, από τα οποία κάθε φορά επιλεγόταν αυτό που προσέδιδε την μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα, ώστε στη συνέχεια να κατασκευαστεί ο αντίστοιχος χάρτης απεικόνισης της βροχόπτωσης. Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε συγκριτική ανάλυση της μεθόδου Kriging με αυτή του Cokriging. Συγκρίνοντας την επίδοση και τα αποτελέσματα της χαρτογράφησης των δύο μεθόδων διαπιστώνεται ότι η μέθοδος Cokriging απεικονίζει με μεγαλύτερη ακρίβεια τη χωρική κατανομή της βροχόπτωσης στο νησί της Κρήτης.

## **Abstract**

This thesis deals with statistical and geostatistical analysis of rainfall on the island of Crete. The study of precipitation patterns is a very useful tool and object of study of many disciplines. The conclusions concerning the qualitative and quantitative assessments, the identification of areas affected by drought due to their geographical position, the investigation of the existence of statistically significant trends in precipitation and the rainfall distribution maps are some of the most useful skills offered by this work. The application of statistical and geostatistical analysis were based on observational datasets, which were measured by 54 rain gauges over the four prefectures of Crete, during the 1981-2014 period.

The statistical analysis was based on diagram construction for the most interesting hydrological periods. More specifically, we have constructed comparative diagrams referring to the total annual rainfall in each prefecture and to the rainfall during the wet and dry season. We also studied the temporal course of precipitation from 1981 to the most recent data, both for the entire island and individually for its eastern and western part. The rainfall trend analysis for the island of Crete provided evidence of a general slight increase in precipitation during the 1981-2014 period. Subsequently, some stations, which are characterized by very high or very low rainfall values were selected and the corresponding diagrams were constructed and discussed. Finally, we have examined the correlation between the rainfall and the altitude in which each rain gauge is located. It became apparent that the stations located at altitudes over 660 meters, receive three times the amount of water in comparison with the stations located at very low altitudes.

One of the main objectives of this thesis is the reproduction of the spatial distribution of precipitation on the surface of the island, based also on data from a digital elevation map of Crete. The methods used for this purpose are the well-known geostatistical methods called Kriging. More specifically, the Geostatistical Analyst tool is used of the ARCGIS software. Two geostatistical spatial interpolation techniques were tested: the first is the Ordinary Kriging method and the second is the Cokriging method which uses secondary information. For the implementation of

each method, four semivariograms were tested and the one that provided the most accurate results was used to build the corresponding rainfall display map. Then, a comparative analysis was performed between the Kriging and Cokriging methods results. The comparison of the aforementioned methods, shows that Cokriging provides the most reliable representation of precipitation spatial variability on the island of Crete.

## Περιεχόμενα

Ευχαριστίες .....	i
Περίληψη .....	ii
Abstract .....	iv
Περιεχόμενα .....	vi
1. Εισαγωγή .....	1
1.1. Χαρακτηριστικά περιοχής μελέτης .....	1
1.1.1. Εισαγωγή για το νησί της Κρήτης .....	1
1.1.2. Κλιματολογικές συνθήκες .....	3
1.1.3. Γεωλογικό υπόβαθρο .....	3
1.1.4. Υδρολογικά χαρακτηριστικά .....	5
1.1.5. Επιφανειακά ύδατα .....	8
2. Στατιστική ανάλυση δεδομένων .....	10
3. Γεωστατιστική ανάλυση .....	30
3.1. Εισαγωγικά .....	30
3.1.1. Γεωστατιστική .....	30
3.1.2. Τυχαία Πεδία .....	32
3.1.3. Ημιβαριόγραμμα .....	34
3.1.4. Χωρική εκτίμηση Kriging .....	41
3.1.5. Χωρική εκτίμηση Cokriging .....	48
3.2. Εφαρμογή και Αποτελέσματα .....	50
3.2.1. Γεωστατιστική ανάλυση με τις μεθόδους Kriging και Cokriging.....	52
4. Συζήτηση .....	68
Βιβλιογραφία .....	72

## **1. Εισαγωγή**

### **1.1. Χαρακτηριστικά περιοχής μελέτης**

#### **1.1.1. Εισαγωγικά για το νησί της Κρήτης:**

Η Κρήτη είναι το μεγαλύτερο και το πιο ορεινό νησί της Ελλάδας και ένα από τα μεγαλύτερα της Μεσογείου. Βρίσκεται στο νότιο τμήμα του Αιγαίου Πελάγους και στο σημείο όπου οι ήπειροι της Ευρώπης, της Αφρικής και της Ασίας συναντιούνται. Η περιοχή της Κρήτης είναι 8.335,9 τετραγωνικά χιλιόμετρα, εκτίνεται σε μήκος 260 χιλιομέτρων περίπου και πλάτος που κυμαίνεται από τα 60 έως τα 12 χιλιόμετρα στο στενότερο σημείο της, στον Ισθμό της Ιεράπετρας. Το μέσο υψόμετρο του νησιού είναι 460 μέτρα, οι ακτές του έχουν μήκος που φτάνει τα 1.065 χιλιόμετρα περίπου και ο συνολικός πληθυσμός είναι περίπου 600.000 άνθρωποι.

Η Κρήτη αποτελείται από τέσσερις νομούς και συγκεκριμένα, ξεκινώντας από δυτικά και πηγαίνοντας προς τα ανατολικά αυτοί είναι: νομός Χανίων, νομός Ρεθύμνης, νομός Ηρακλείου και νομός Λασιθίου. Χαρακτηρίζεται από έντονο ανάγλυφο και περιβάλλεται από έναν πανέμορφο ορεινό όγκο συμπεριλαμβανομένων των Λευκών Ορέων, του Ψηλορείτη και του όρους Δίκτη. Ο Ψηλορείτης ή Ίδη, που είναι και το ψηλότερο ορεινό συγκρότημα του νησιού, με ψηλότερη κορυφή τον Τίμιο Σταυρό στα 2.456 μέτρα, εκτίνεται στο κεντρικό μέρος του νησιού. Η έκταση που καλύπτουν οι ορεινοί όγκοι της Κρήτης ανέρχεται στο 49,4% της συνολικής της έκτασης, σε αντιδιαστολή με της πεδινές εκτάσεις, που καλύπτουν μόλις το 22,7%. Εκτός από τους ορεινούς όγκους η Κρήτη περιλαμβάνει 5.200 σπήλαια και καρστικούς σχηματισμούς, 100 φαράγγια τα οποία ξεκινούν από τους ορεινούς όγκους και καταλήγουν στη θάλασσα και 25 οροπέδια.

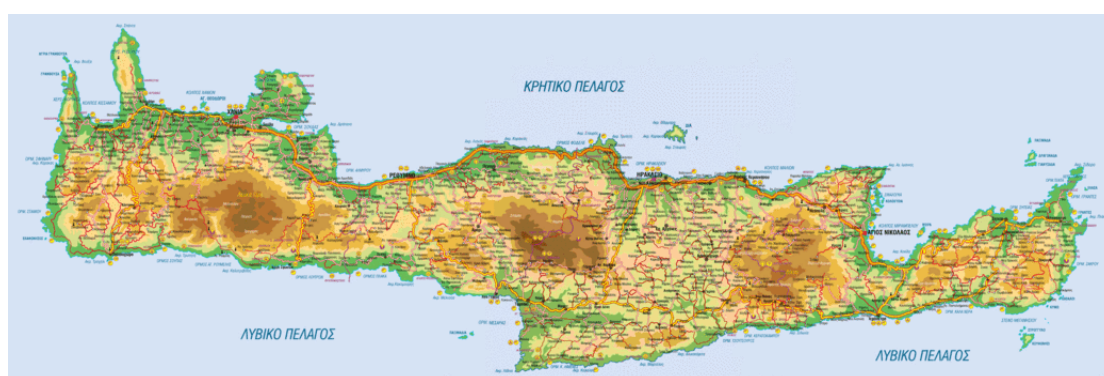
Τα μεγαλύτερα ποτάμια της Κρήτης είναι ο Γεροπόταμος και ο Αναποδιάρης στην περιοχή της Μεσαράς, ο Τυφλός και ο Κολένης στην πεδιάδα των Χανίων και οι Κοιλιάρης, Μέγας Ποταμός και Κουρταλιώτης. Γενικώς το νησί δεν χαρακτηρίζεται από τα μεγάλα του ποτάμια, καθώς διαθέτει μικρό πλάτος. Όσον αφορά τις λίμνες του νησιού, οι περισσότερες χαρακτηρίζονται περισσότερο ως νερόλακκοι οι οποίοι



έχουν νερό ορισμένους μήνες του χρόνου. Μόνο μια λίμνη διαθέτει ουσιαστικά η Κρήτη, τη λίμνη του Κουρνά στην περιοχή του Αποκόρωνα.

Το κλίμα θεωρείται ότι είναι υπο-υγρό μεσογειακό με υγρούς και σχετικά ψυχρούς χειμώνες και ξηρά και θερμά καλοκαίρια. Η μέση ετήσια βροχόπτωση εκτιμάται να είναι 927 χιλιοστά, οι ανανεώσιμοι υδατικοί πόροι είναι 2.650 εκατομμύρια κυβικά μέτρα και η πραγματική ποσότητα νερού που χρησιμοποιείται είναι 384 κυβικά χιλιοστά ανά έτος (Donta et al., 2006).

Η κύρια χρήση του νερού στην Κρήτη είναι για αρδευτικούς σκοπούς που εξυπηρετούν την γεωργία (83,3% της συνολικής κατανάλωσης), ενώ η οικιακή χρήση συμπεριλαμβανομένου του τουρισμού είναι 15,6% και η βιομηχανική χρήση 1%. Η Κρήτη παρουσιάζει σημαντικές περιφερειακές διακυμάνσεις όσον αφορά τη διαθεσιμότητα του νερού, ιδίως στις παράκτιες, ανατολικές και νότιες περιοχές λόγω του τουρισμού και της γεωργίας. Έχει υψηλή κατά κεφαλήν διαθεσιμότητα νερού, η οποία είναι ελαφρώς χαμηλότερη από εκείνη της υπόλοιπης χώρας. Η ζήτηση για νερό άρδευσης είναι υψηλή, ενώ την ίδια στιγμή μόνο το 31% της διαθέσιμης γεωργικής γης αρδεύεται. Οι αυξανόμενες απαιτήσεις σε νερό κάνει την ορθολογική διαχείριση των υδάτινων πόρων εξαιρετικά σημαντική για την βιώσιμη ανάπτυξη και για την προστασία του περιβάλλοντος (Donta et al., 2006).



Χάρτης 1: Γεωφυσικός χάρτης Κρήτης (Πανεπιστήμιο Κρήτης, 2015)

### **1.1.2. Κλιματολογικές συνθήκες**

Το σημερινό κλίμα της Κρήτης είναι ένας μεταβατικός ενδιάμεσος τύπος μεταξύ του χερσαίου Μεσογειακού και του ερημοειδούς Μεσογειακού, στο οποίο υπάγεται κυρίως η νοτιοανατολική Κρήτη. Πιο αναλυτικά, η πεδινή ζώνη αποτελεί κλιματικά μια μετάβαση από το μεσογειακό προς το ημιορημικό κλίμα, ενώ το κλίμα των ορεινών περιοχών λόγω της ύπαρξης των τεσσάρων μεγάλων ορεινών όγκων, παρουσιάζει πολλά κοινά χαρακτηριστικά με εκείνο της ηπειρωτικής Ελλάδας. Σε σύγκριση με τα κλιματολογικά χαρακτηριστικά της Ελλάδας συνολικά, η Κρήτη καλύπτει ένα ευρύ φάσμα βιοκλιματικών ορόφων με σημαντικές διακυμάνσεις από τα ανατολικά της τα δυτικά και από τα πεδινά προς τα ορεινά, ενώ χαρακτηρίζεται και από σχετικά ψυχρούς χειμώνες και ξηρά και ζεστά καλοκαίρια (Περιφέρεια Κρήτης, 2013).

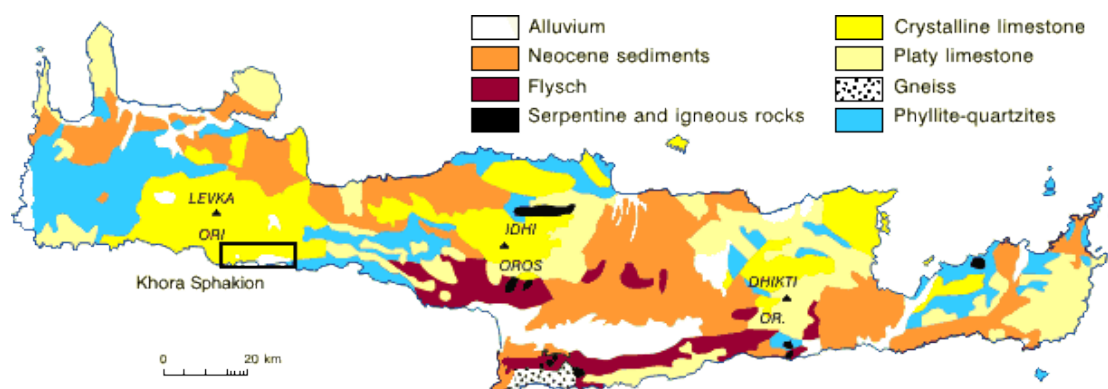
### **1.1.3. Γεωλογικό υπόβαθρο**

Η γεωλογία της Κρήτης μπορεί να περιγραφεί από ένα αυτόχθονο έως παραυτόχθονο σύστημα πετρωμάτων, που περιλαμβάνει την ημιμεταμορφωμένη ενότητα των πλακωδών ασβεστόλιθων και τους υποκείμενους ασβεστόλιθους, δολομίτες, με παρεμβολές σχιστόλιθων, από ένα αλλόχθονο σύστημα επωθημένο πάνω στο αυτόχθονο και από τα νεότερα ιζήματα του Νεογενούς και του Τεταρτογενούς. Το συνολικό πάχος των πετρωμάτων αυτών αγγίζει τα 6,5 χιλιόμετρα. Από γεωτεκτονική άποψη, η Κρήτη βρίσκεται στο κέντρο του Ελληνικού Τόξου και ταυτόχρονα στο νότιο κλάδο του Αλπικού Ορογενούς και πιο συγκεκριμένα εκεί που ο Β.ΒΔ- Ν.ΝΑ διεύθυνσης γενικός άξονας της πτύχωσης κάμπτεται, με αποτέλεσμα η Κρήτη να αποτελεί τη γεωτεκτονική μετάβαση από τις Ελληνίδες στις Ταυρίδες Οροσειρές. Σημαντικό κομμάτι της τεκτονικής της Κρήτης οφείλεται στο θέμα των επωθήσεων και ειδικότερα της επώθησης του ετερόχθονου συστήματος επί του αυτόχθονου που συνέβη κατά το Κάτω έως Μέσο Μειόκαινο. Οι επωθήσεις αυτές οδήγησαν σε αλλοιώσεις της τεκτονικής του αυτόχθονου

συστήματος του προαλπικού και του αλπικού κύκλου και του ετερόχθονου συστήματος. Οι κινήσεις αυτές δημιούργησαν πλήθος από λεπιώσεις και συντέλεσαν στον κατακερματισμό πολλών πετρωμάτων. Οι Μειοκαινικές αποθέσεις αποτελούνται κυρίως από μάργες, μαργαϊκούς ασβεστολίθους, μαργαϊκούς ψαμμίτες και κροκαλοπαγή (Περιφέρεια Κρήτης, 2013).

Η μεγάλη ποικιλία στη διακίνηση του επιφανειακού και του υπόγειου νερού οφείλεται στο έντονο ανάγλυφο του Υδατικού Διαμερίσματος σε συνδυασμό με τη μεγάλη ποσότητα ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, την έκταση του νησιού και την πολύπλοκη γεωλογική δομή του. Εκτιμάται ότι περίπου 20% των υπογείων υδάτινων πόρων του νησιού σχετίζεται με τους νεογενή-τεταρτογενή σχηματισμούς του υδροφόρου ορίζοντα, ενώ το υπόλοιπο 80% αντιπροσωπεύει το δυναμικό των υπογείων υδάτων των καρστικών σχηματισμών. Οι καρστικοί υδροφορείς καταλαμβάνουν έκταση 3.200 τετραγωνικών χιλιομέτρων, δηλαδή καλύπτουν το 39% της συνολικής έκτασης του νησιού και χαρακτηρίζονται από αμελητέα απορροή και υψηλή διείσδυση. Εκτιμάται ότι 40 έως 55% της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης διεισδύει στο έδαφος σε από αυτούς τους σχηματισμούς, δημιουργώντας ένα ανανεώσιμο ετήσιο δυναμικό των υπογείων υδάτων περίπου 1,25 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα. Τα νεογενή και τεταρτογενή ιζήματα καταλαμβάνουν έκταση 3.000 τετραγωνικών μέτρων, δηλαδή το 36% της συνολικής έκτασης του νησιού και χαρακτηρίζονται από ένα πλούσιο δίκτυο ρευμάτων αγγίζοντας ετήσιο δυναμικό υπόγειων υδάτων περίπου 0,25 εκατομμύρια κυβικά μέτρα (Donta et al., 2006).

Οι υδρολογικές λεκάνες της Κρήτης εκτείνονται σε περιοχή της τάξης των 600 τετραγωνικών χιλιομέτρων. Οι μεγαλύτερες υδρολογικές λεκάνες του νησιού βρίσκονται στο νότιο τμήμα της στην περιοχή της Μεσσαράς και είναι η λεκάνη του Γεροπόταμου και η λεκάνη του Αναποδάρη. Οι δύο αυτές λεκάνες αναπτύσσονται κυρίως από νεογενείς και σύγχρονες αποθέσεις. Η συνολική επιφανειακή απορροή που διακινείται ετησίως ανέρχεται σε  $500 \cdot 10^6$  κυβικά μέτρα ανά έτος περίπου. Η απορροή αυτή αποτελείται από τα πηγαία νερά που εκφορτίζονται εντός των αντίστοιχων λεκανών απορροής και από την καθεαυτή επιφανειακή απορροή (Περιφέρεια Κρήτης, 2013).



Χάρτης 2: Γεωλογικός χάρτης Κρήτης (School of Environment, Education and Development, University of Manchester, 2015)

#### 1.1.4. Υδρολογικά χαρακτηριστικά:

**Βροχόπτωση:** Η μέση ετήσια βροχόπτωση ανέρχεται σε 927 χιλιοστά, που αντιστοιχεί σε 7,69 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα κατακρημνισμάτων σε ετήσια βάση. Πιο συγκεκριμένα, η βροχόπτωση κυμαίνεται μεταξύ 300 και 700 χιλιοστών στις χαμηλές περιοχές και στις περιοχές κατά μήκος της ακτής, μεταξύ 700 και 1000 χιλιοστών στις πεδιάδες της ηπειρωτικής χώρας και φτάνει έως τα 2000 χιλιοστά στις ορεινές περιοχές. Επιπλέον, η μέση ετήσια βροχόπτωση στην ανατολική Κρήτη είναι κατά 22% μικρότερη εκείνης της δυτικής. Αυξάνεται από τα ανατολικά στα δυτικά και από τα νότια στα βόρεια, ενώ επίσης οι βροχοπτώσεις είναι αυξημένες σε περιοχές υψηλού υψομέτρου σε σύγκριση με τις πεδινές περιοχές. Περισσότερο από το ένα τρίτο της συνολικής βροχόπτωσης λαμβάνει χώρα κατά μήκος της βόρειας ακτής του νησιού, όπου βρίσκονται και τα Λευκά Όρη, η Ίδη και η Δίκτη. Το νησί παρά του ότι δέχεται υψηλό ποσό κατακρημνισμάτων, εκτιμάται ότι περίπου το 67% χάνεται λόγω εξατμισοδιαπνοής, το 10% χάνεται ως απορροή προς την θάλασσα και μόνο ένα 28% οδηγείται για επαναφόρτιση των υπογείων υδάτων (Mavrommatis, 2007; Περιφέρεια Κρήτης, 2013).

Οι βροχοπτώσεις δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες στη διάρκεια του έτους. Η μέση μηνιαία βροχόπτωση είναι μέγιστη τον Δεκέμβριο ή τον Ιανουάριο και ελάχιστη τον Ιούλιο ή τον Αύγουστο, οι οποίοι είναι σχεδόν άνομβροι μήνες. Το 25% της ετήσιας βροχόπτωσης συμβαίνει στους περισσότερους σταθμούς της Κρήτης κατά τον πιο βροχερό μήνα και το 60% περίπου κατά την διάρκεια των τριών μηνών της περιόδου Δεκεμβρίου - Ιανουαρίου. Επίσης, ο μηνιαίος αριθμός των ημερών που έχουμε υδατόπτωση κυμαίνεται από 15 ημέρες για της μήνες Δεκέμβριο και Ιανουάριο και 0,3 ημέρες τον Ιούλιο και τον Αύγουστο. Συνολικά, ο αριθμός των ημερών που έχουμε βροχόπτωση είναι περίπου 90 ημέρες ετησίως. Η περίοδος ξηρασίας έχει επεκταθεί σε περισσότερους από 6 μήνες, από τον Μάιο έως τον Οκτώβριο. Όπως παρατηρείται, υπάρχει σημαντική ανισοκατανομή του ετήσιου όγκου βροχόπτωσης τόσο γεωγραφικά όσο και φυσιογραφικά, εμφανίζοντας από τις μεγαλύτερες βροχοβαθμίδες της Ελλάδας. Μακρά σειρά των δεδομένων βροχόπτωσης σε όλη την Κρήτη δείχνουν πως δεν υπάρχει κάποια σημαντική μεταβολή στη βροχόπτωση (Περιφέρεια Κρήτης, 2013).

**Θερμοκρασία:** Η θερμοκρασία στο νησί της Κρήτης παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση και αυξάνεται από τα δυτικά προς τα ανατολικά. Η ορεινή ζώνη εμφανίζει μεγαλύτερες θερμοκρασιακές αποκλίσεις και έχει μέση ετήσια θερμοκρασία 2-3°C χαμηλότερη από την πεδινή ζώνη. Γενικά, η μέση ετήσια θερμοκρασία κυμαίνεται από 17°C έως 20°C. Το νότιο τμήμα του νησιού είναι θερμότερο από το βόρειο και το πιο ζεστό μέρος της Ελλάδος. Ένα παράδειγμα θερμοκρασιακής μεταβολής συμβαίνει στο νομό Λασιθίου όπου η μέση ετήσια θερμοκρασία στο βόρειο τμήμα του νομού είναι 18,7°C, ενώ η μέση ετήσια θερμοκρασία στο νότιο τμήμα του είναι 19,6°C (Donta et al., 2006).

Κατά τη διάρκεια της ψυχρής περιόδου, η θερμοκρασία αυξάνεται όσο μειώνεται το γεωγραφικό πλάτος, ενώ στη διάρκεια της ζεστής περιόδου και κυρίως κατά την περίοδο από το Μάιο έως τον Αύγουστο αυξάνεται η θερμοκρασία από την ακτή προς την ενδοχώρα και ιδιαίτερα στις πεδιάδες.

Στις πεδινές περιοχές της Κρήτης κατά τους θερινούς μήνες η θερμοκρασία αγγίζει της 40°C, ενώ το χειμώνα οι χαμηλότερες θερμοκρασίες σπάνια πέφτουν κάτω από 0°C. Στην Κρήτη γενικότερα, οι υψηλότερες θερμοκρασίες παρατηρούνται μεταξύ Ιουλίου και Αυγούστου και οι χαμηλότερες μεταξύ του Ιανουαρίου και Φεβρουαρίου.

Μελέτη των θερμοκρασιακών τιμών της Κρήτης έχουν δείξει ότι η ετήσια θερμοκρασία έχει αυξηθεί κατά 0,3°C τις τελευταίες δύο δεκαετίες (Donta et al., 2006).

**Εξάτμιση:** Στην Κρήτη γενικότερα, οι υψηλότερες θερμοκρασίες παρατηρούνται μεταξύ Ιουλίου και Αυγούστου και οι χαμηλότερες μεταξύ Ιανουαρίου και Φεβρουαρίου, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω.

Υπάρχουν 24 σταθμοί στην Κρήτη οι οποίοι μετρούν την εξάτμιση. Από τους σταθμούς αυτούς οι 11 βρίσκονται στο νομό Ηρακλείου, οι 3 στο νομό Ρεθύμνου, οι 4 στο νομό Λασιθίου και οι 6 στο νομό Χανίων. Η υψηλότερη μέση ετήσια εξάτμιση παρατηρείται στο σταθμό Καψάλοι στην ενδοχώρα του νομού Ηρακλείου. Ο σταθμός Καψάλοι βρίσκεται σε υψόμετρο 10 μέτρων και παρουσιάζει μια μέση ετήσια εξάτμιση της τάξης των 2.039 χιλιοστών ανά έτος (Donta et al., 2006).

Παρατηρείται ότι η εξάτμιση και η θερμοκρασία ακολουθούν το ίδιο μοτίβο. Οι υψηλότερες τιμές εξάτμισης παρατηρούνται τον Ιούλιο, ενώ οι χαμηλότερες τιμές παρατηρούνται τον Δεκέμβριο και τον Ιανουάριο. Η μέση ετήσια εξάτμιση κυμαίνεται από 40 έως 265 χιλιοστά. Η υψηλότερη διακύμανση των τιμών εξάτμισης μέσα στο χρόνο παρατηρείται στο σταθμό Λευκόγεια στο νομό Ρεθύμνου. Ο σταθμός αυτός βρίσκεται σε υψόμετρο 90 μέτρων και έχει μέση εξάτμιση τον Ιανουάριο 60 χιλιοστά και τον Ιούλιο 341 χιλιοστά (Donta et al., 2006).

**Άνεμοι:** Η κατεύθυνση του ανέμου που επικρατεί είναι βόρεια και βορειοδυτική. Οι βόρειες ακτές επηρεάζονται το καλοκαίρι από της ετήσιους ανέμους (μελτέμια) που

είναι ΒΑ ή ΒΔ, θερμοί και ξηροί. Οι νότιες ακτές επηρεάζονται τον χειμώνα από νότιους ξηρούς και θερμούς ανέμους που προέρχονται από την Αφρική.

Υψηλή ταχύτητα ανέμου μπορεί να συμβεί οποιαδήποτε στιγμή κατά τη διάρκεια του έτους, αλλά παρατηρείται κυρίως τον Φεβρουάριο και τον Μάρτιο στην δυτική Κρήτη και τον Ιούλιο στην ανατολική Κρήτη. Από την άλλη πλευρά, η νηνεμία καλύπτει ετήσιο ποσοστό της τάξης του 20% στους πεδινούς σταθμούς της ανατολικής Κρήτης. Στους ορεινούς σταθμούς το ποσοστό είναι μεγαλύτερο και ανέρχεται σε 30% περίπου (Περιφέρεια Κρήτης, 2013).

**Υγρασία:** Οι ξηρότεροι μήνες του χρόνου είναι ο Ιούνιος για την βόρεια Κρήτη και ο Ιούλιος για την νότια Κρήτη με μέση σχετική υγρασία στο νομό Χανίων να είναι 48,9% και στο νομό Ηρακλείου 59,88%. Ο πιο υγρός μήνας είναι ο Δεκέμβριος, με μέση σχετική υγρασία στο σταθμό των Χανίων 72% και στο νομό Ηρακλείου 67%. Στη βόρεια Κρήτη η μέση σχετική υγρασία μειώνεται από τα ανατολικά προς τα δυτικά (Donta et al., 2006).

#### **1.1.5. Επιφανειακά ύδατα:**

Η συμβολή των επιφανειακών υδάτων στους υδάτινους πόρους της Κρήτης είναι περίπου 40%. Η πραγματική της συμβολή της είναι περίπου 13%, που σημαίνει ότι σχεδόν το σύνολο της ποσότητας του νερού που χρησιμοποιείται στην Κρήτη προέρχεται από υπόγειες πηγές (Donta et al., 2006).

Στην Κρήτη υπάρχουν 25 ρεύματα, 11 στο νομό Ηρακλείου, 5 στο νομό Χανίων, 3 στο νομό Ρεθύμνου και 6 στο νομό Λασιθίου. Δεν υπάρχουν πολυετή ρεύματα στο νησί, ενώ η συνολική μέση ετήσια απορροή εκτιμάται ότι είναι της τάξης του 0,857 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα (Περιφέρεια Κρήτης, 2013).

Το ρεύμα με τη μεγαλύτερη απορροή είναι του Αλμυρού, που βρίσκεται κοντά στο Ηράκλειο. Έχει μια μέση ετήσια απορροή της τάξης των 236 κυβικών χιλιοστών. Το ρεύμα με την υψηλότερη μέση ετήσια απορροή στο νομό Ρεθύμνου είναι ο Πλατύς, με μέση ετήσια απορροή της τάξης των 50 κυβικών χιλιοστών, στο νομό Χανίων ο Σεπρενιώτης με μέση ετήσια απορροή της τάξης των 14,9 κυβικών χιλιοστών και στο νομό Λασιθίου οι Καταβόθρες με μέση ετήσια απορροή 16,6 κυβικά χιλιοστά (Donta et al., 2006).



## 2. Στατιστική Ανάλυση Δεδομένων:

Η στατιστική είναι ένας κλάδος που ασχολείται με τη μελέτη και την κατανόηση φαινομένων ή ιδιοτήτων πολυπληθών ομάδων. Η εφαρμογή της εκτείνεται σε πληθώρα περιπτώσεων, όπως η πολιτική και η οικονομία. Η περιγραφική στατιστική είναι ο κλάδος της στατιστικής που ασχολείται με την οργάνωση, συλλογή και παρουσίαση ενός συνόλου δεδομένων. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος αυτή (Παπάνα, 2015) για την ανάλυση των δεδομένων βροχόπτωσης που συλλέχθηκαν από βροχομετρικούς σταθμούς στο νησί της Κρήτης.

Για την παρουσίαση των δεδομένων μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες γραφικές μέθοδοι, όπως το ραβδόγραμμα, το κυκλικό διάγραμμα και το ιστόγραμμα. Η μέθοδος που επιλέχθηκε είναι αυτή του ραβδογράμματος, καθώς καθίσταται πιο εύκολη η παρατήρηση, η σύγκριση των αποτελεσμάτων και η προσθήκη γραμμής τάσης για πιο εύκολη εξαγωγή συμπερασμάτων.

Ο αριθμός των σταθμών που μελετήθηκαν είναι πενήντα τέσσερις (54) και εκτείνονται στους τέσσερις (4) νομούς του νησιού, με όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφη κατανομή επιτρέπει η γεωλογία του νησιού. Από τους σταθμούς αυτούς είκοσι οκτώ (28) βρίσκονται στο νομό Ηρακλείου, εννέα (9) στο νομό Ρεθύμνου, έντεκα (11) στο νομό Λασιθίου και έξι (6) στο νομό Χανίων. Οι περισσότεροι σταθμοί βρίσκονται σε υψόμετρα μεταξύ 200 και 500 μέτρων, ενώ υπάρχουν μόνο έξι (6) σταθμοί μεταξύ 500 και 800 μέτρων και έντεκα (11) σταθμοί σε υψόμετρα κάτω των 200 μέτρων. Οι σταθμοί αυτοί δεν έχουν ενιαία χρονολογική αρχή καταγραφής δεδομένων ούτε το ίδιο χρονολογικό τέλος καταγραφής, καθώς αρκετοί από αυτούς λειτούργησαν για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Παρότι η παλαιότερη χρονολογία για την οποία έχουμε δεδομένα είναι το 1931, δεν ξεκινάει η στατιστική ανάλυση από τότε. Η χρονική περίοδος μελέτης αφορά την περίοδο από το 1981 και μετά.

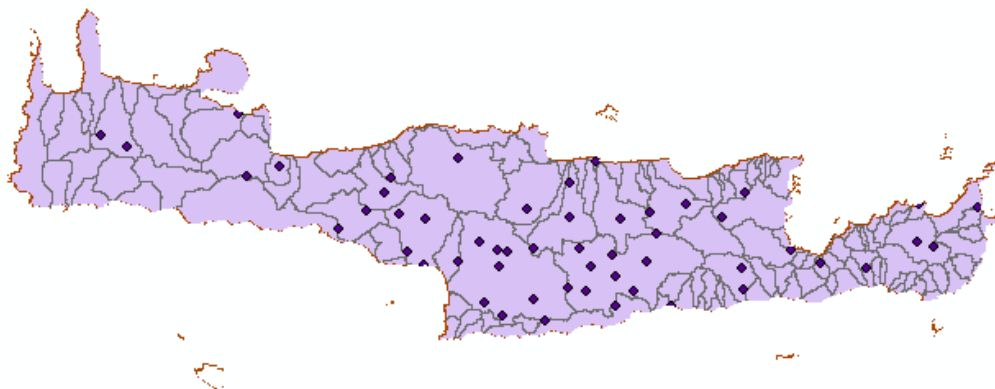
Τα βροχομετρικά δεδομένα τα οποία παρουσιάζονται περιλαμβάνουν αθροιστικές μηνιαίες τιμές ύψους βροχής για τον κάθε μετεωρολογικό σταθμό. Στην παρούσα εργασία ερευνώνται για κάθε σταθμό οι ξηρές ή υγρές περίοδοι σε ετήσια βάση. Το άθροισμα των βροχομετρικών δεδομένων των δώδεκα (12) μηνών έκαστου

σταθμού, ορίζουν την ετήσια βροχόπτωση ενός υδρολογικού έτους. Η υγρή περίοδος περιλαμβάνει τους έξι (6) μήνες του χρόνου κατά τους οποίους σημειώνονται οι υψηλότερες στάθμες βροχόπτωσης (Οκτώβριος έως και Μάρτιος), ενώ η ξηρή περίοδος τους έξι (6) μήνες με μειωμένες στάθμες βροχόπτωσης (Απρίλιος έως και Σεπτέμβριος). Επιπλέον, με βάση το κριτήριο της πιο υγρής χρονιάς και της πιο ξηρής χρονιάς, από τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από τους σταθμούς, επιλέχθηκαν και μελετήθηκαν διεξοδικά ως προς την βροχομετρική συμπεριφορά το υδρολογικό έτος 2002-2003 ως το πιο υγρό και το υδρολογικό έτος 1989-1990 ως το πιο ξηρό.

Τέλος, έγινε συμπλήρωση της μηνιαίας στάθμης της βροχόπτωσης, όπου έλλειπαν δεδομένα λόγω βλάβης του σταθμού είτε απωλειών μέρος των δεδομένων. Για την συμπλήρωση τους χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της γραμμικής παλινδρόμησης. Παρακάτω παρατίθεται ο πίνακας με όλους της σταθμούς που μελετήθηκαν και ο χάρτης με τη γεωγραφική τους θέση.

Πίνακας 1: Συνοπτικός πίνακας υδρολογικών σταθμών Κρήτης, περιλαμβάνει το υψόμετρο των σταθμών και τον μέσο όρο των ετησίων υδρολογικών δεδομένων μεταξύ 1981 έως 2013

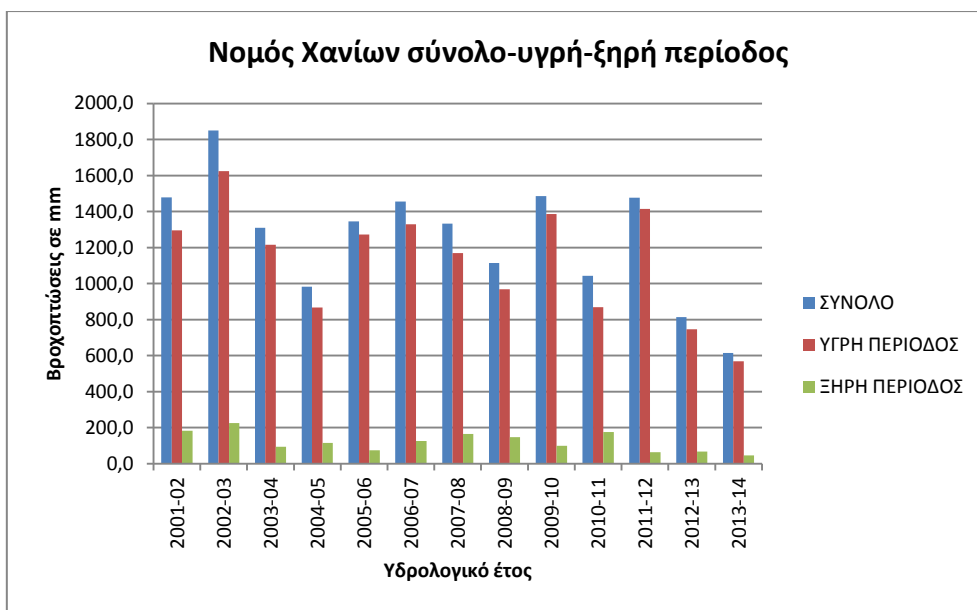
A/A	ΟΝΟΜΑ ΣΤΑΘΜΟΥ	ΥΨΟΜΕΤΡΟ ΣΤΑΘΜΟΥ (m)	ΜΕΣΟ ΕΤΗΣΙΟ ΥΨΟΣ ΒΡΟΧΗΣ (mm)	A/A	ΟΝΟΜΑ ΣΤΑΘΜΟΥ	ΥΨΟΜΕΤΡΟ ΣΤΑΘΜΟΥ (m)	ΜΕΣΟ ΕΤΗΣΙΟ ΥΨΟΣ ΒΡΟΧΗΣ (mm)
1	ΑΒΔΟΥ	230	930,6	28	ΗΡΑΚΛΕΙΟ	39	463,7
2	ΑΓΙΑ ΒΑΡΒΑΡΑ	570	888,3	29	ΚΑΤΣΙΔΟΝΙ	480	820,0
3	ΑΓΙΟΣ ΚΥΡΙΛΛΟΣ	450	528,4	30	ΝΕΑΠΟΛΗ	240	767,4
4	ΑΡΜΑΧΑ	450	778,9	31	ΕΞΩ ΠΟΤΑΜΟΙ	840	1463,8
5	ΑΣΗΜΙ	200	564,3	32	ΚΑΛΟ ΧΩΡΙΟ	20	502,4
6	ΑΧΕΝΤΡΙΑΣ	680	687,0	33	ΜΑΛΛΕΣ	590	726,3
7	ΒΑΓΙΩΝΙΑ	190	520,3	34	ΜΑΡΩΝΙΑ	150	644,7
8	ΒΟΝΗ	330	766,9	35	ΜΥΘΟΙ	200	474,1
9	ΒΟΡΙΖΙΑ	520	1089,5	36	ΠΑΛΑΙΟΚΑΣΤΡΟ	25	546,7
10	ΓΕΡΓΕΡΗ	450	922,3	37	ΠΑΧΕΙΑ ΑΜΜΟΣ	50	615,3
11	ΔΕΜΑΤΙ	210	510,6	38	ΣΗΤΕΙΑ	114	436,0
12	ΖΑΡΟΣ	500	908,3	39	ΣΤΑΥΡΟΧΩΡΙ	325	801,3
13	ΚΑΛΥΒΙΑ	200	545,6	40	ΑΓΙΑ ΓΑΛΗΝΗ	20	605,7
14	ΚΑΠΕΤΑΝΙΑΝΑ	800	663,5	41	ΒΟΛΕΩΝΕΣ	260	1252,2
15	ΚΑΣΣΑΝΟΙ	320	549,4	42	ΒΥΖΑΡΙ	310	700,0
16	ΚΑΣΤΕΛΙ	335	725,7	43	ΓΑΡΑΖΟ	260	1255,9
17	ΚΑΨΑΛΟΙ	10	499,8	44	ΓΕΡΑΚΑΡΙ	660	1271,7
18	ΚΡΟΥΣΩΝΑΣ	500	842,0	45	ΚΑΒΟΥΣΙ	580	1058,7
19	ΛΑΓΟΛΙΟ	140	582,2	46	ΛΕΥΚΟΓΕΙΑ	90	907,5
20	ΜΕΤΑΞΟΧΩΡΙ	430	758,0	47	ΜΕΛΑΜΠΕΣ	560	732,2
21	ΜΟΡΟΝΙ	400	725,2	48	ΣΠΗΛΙ	390	1144,0
22	ΠΑΡΤΗΡΑ	400	691,2	49	ΑΣΚΥΦΟΥ	740	2176,4
23	ΠΟΜΠΙΑ	150	573,2	50	ΓΑΥΔΟΣ	10	605,7
24	ΠΡΑΙΤΩΡΙΑ	225	504,1	51	ΚΑΛΥΒΕΣ	20	691,9
25	ΠΡΟΦΗΤΗΣ ΗΛΙΑΣ	380	852,4	52	ΜΟΥΡΙ	50	1125,9
26	ΤΕΦΕΛΙ	360	741,2	53	ΠΑΛΑΙΑ ΡΟΥΜΑΤΑ	316	1161,1
27	ΦΟΙΝΙΚΙΑ	40	823,8	54	ΠΡΑΣΣΕΣ	520	1740,0



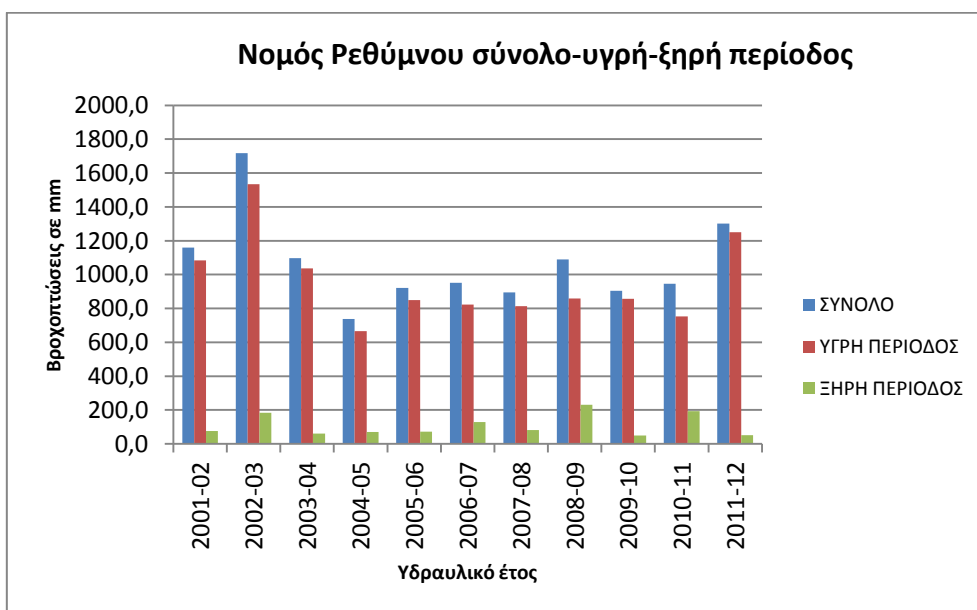
Χάρτης 3: Απεικόνιση των βροχομετρικών σταθμών μελέτης μας

Το Σχήμα 1 παρουσιάζει την συνολική μέση ετήσια βροχόπτωση καθώς και την βροχόπτωση κατά την υγρή και ξηρή περίοδο στο νομό Χανίων για το υδρολογικό έτος 2001-2002 και έπειτα. Ο νομός Χανίων βρίσκεται στο δυτικότερο τμήμα της Κρήτης, για αυτό και όπως είναι αναμενόμενο έχει τις υψηλότερες βροχομετρικές στάθμες. Εύκολα γίνεται διακριτό ότι το πιο υγρό έτος είναι το 2002-2003, ενώ το πιο ξηρό το 2005-2006, βάσει διαθεσιμότητας μετρήσεων.

Το Σχήμα 2 αναφέρεται στις βροχομετρικές μετρήσεις στο νομό Ρεθύμνου. Το Ρέθυμνο ανήκει στο δυτικό μέρος της Κρήτης και έτσι δικαιολογείται η υψηλή στάθμη βροχόπτωσης, η οποία όμως είναι χαμηλότερη σε σύγκριση με αυτή των Χανίων. Το έτος με τις περισσότερες βροχοπτώσεις παραμένει το 2002-2003, ενώ το έτος με τις λιγότερες βροχοπτώσεις για αυτό τον νομό, είναι το 2009-2010.



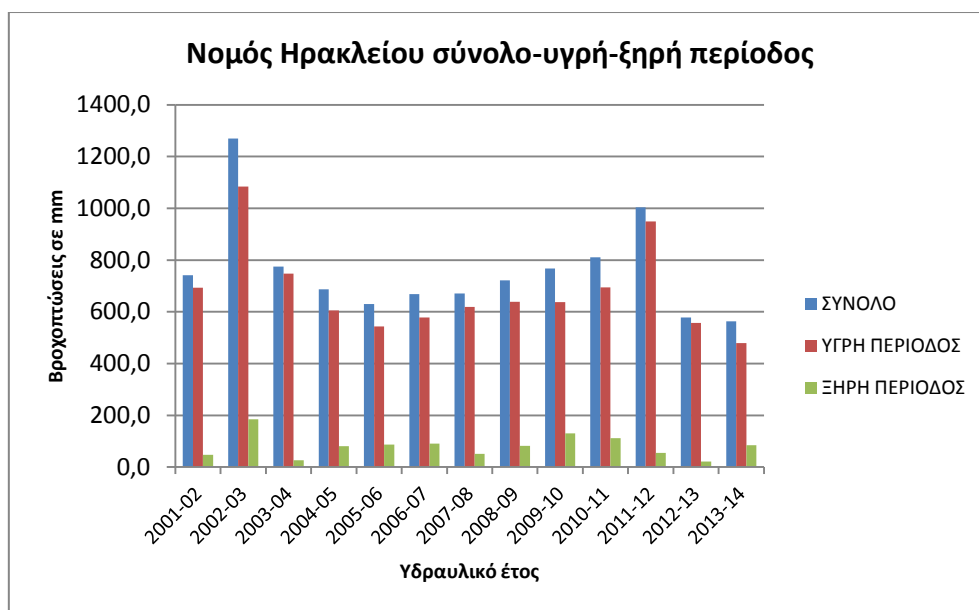
Σχήμα 1: Διάγραμμα συνολικής ετήσιας βροχόπτωσης, υγρής-ξηρής περιόδου  
Νομού Χανίων



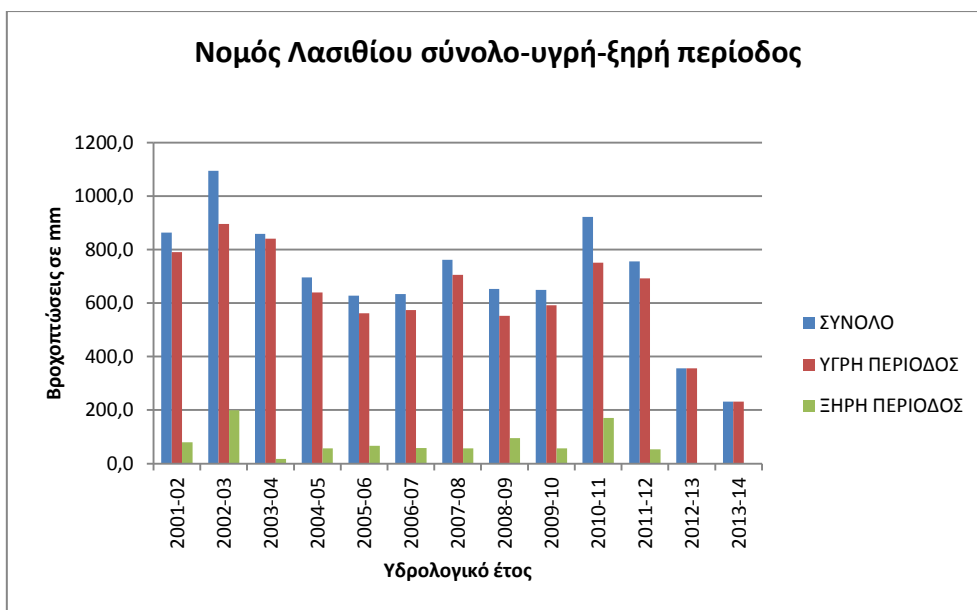
Σχήμα 2: Διάγραμμα συνολικής ετήσιας βροχόπτωσης, υγρής-ξηρής περιόδου  
Νομού Ρεθύμνου

Από τα Σχήματα 3 και 4 είναι εμφανές ότι το ανατολικό τμήμα της Κρήτης δέχεται σημαντικά μικρότερη ποσότητα βροχοπτώσης ετησίως. Στο νομό Ηρακλείου το πιο υγρό υδρολογικό έτος είναι, όπως και στους δύο δυτικούς νομούς της Κρήτης, το 2002-2003 ενώ η πιο ξηρή χρονιά είναι το 2012-2013.

Όσον αφορά τον νομό Λασιθίου, θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ο πιο ξηρός νομός της Κρήτης. Από το Σχήμα 4 παρατηρείται ότι η πιο υγρή χρονιά είναι ξανά το 2002-2003 και πιο ξηρή χρονιά το 2003-2004, βάσει διαθεσιμότητας δεδομένων.



Σχήμα 3: Διάγραμμα συνολικής ετήσιας βροχόπτωσης, υγρής-ξηρής περιόδου  
Νομού Ηρακλείου



Σχήμα 4: Διάγραμμα συνολικής ετήσιας βροχόπτωσης, υγρής-ξηρής περιόδου  
Νομού Λασιθίου

Στα Σχήματα 5, 6 και 7 παρέχεται μια γενική εικόνα της υδατόπτωσης στην Κρήτη, που αφορά όλη την περίοδο μελέτης, δηλαδή από το 1981 έως το 2013.

Από το Σχήμα 5 φαίνεται ότι η βροχόπτωση στην Κρήτη παρουσιάζει γενικώς μια περιοδικότητα στις τιμές κάθε δύο έως τέσσερα έτη, ενώ στη συνέχεια παρατηρείται μια ελαφρώς ανοδική πορεία. Πιο συγκεκριμένα, στην αρχή της χρονοσειράς και έως το 2001 παρατηρείται η περιοδικότητα των τιμών, ενώ προς το τέλος, δηλαδή μεταξύ των υδρολογικών ετών 2004-2011 παρατηρείται μια ανοδική τάση. Τέλος, εξαίρεση αποτελεί το 2002-2003 που ήταν μια έντονα υγρή χρονιά καθώς και τα έτη από το 2011 και έπειτα, όπου παρατηρείται πτωτική τάση της βροχόπτωσης. Από τη γραμμή τάσης γίνεται φανερό ότι η βροχόπτωση στην Κρήτη για την περίοδο μελέτης παρουσιάζει μια ελαφρώς ανοδική πορεία. Αυτό το επιβεβαιώνει και η κλίση της γραμμής τάσης η οποία είναι 1,8434.

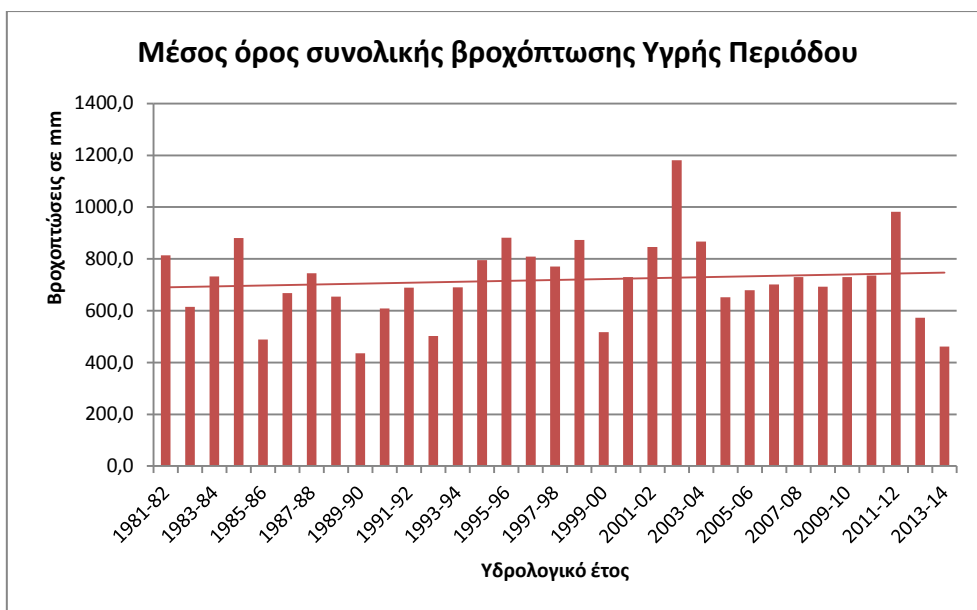
Παρόμοια πορεία της βροχόπτωσης παρατηρείται από το Σχήμα 6 για τις υγρές περιόδους. Η κλίση της γραμμής τάσης είναι 1,7656, δηλαδή πρόκειται για μια ελαφρώς ανοδική τάση.

Η πορεία της βροχόπτωσης κατά τις ξηρές περιόδους του χρονικού διαστήματος που μελετάται, η οποία απεικονίζεται στο Σχήμα 7, χαρακτηρίζεται σταθερή. Η εξίσωση που περιγράφει την γραμμή τάσης είναι  $y=0,0633x+78,19$  και από αυτήν προκύπτει η κλίση της ευθείας που είναι 0,0633.



Σχήμα 5: Διάγραμμα συνολικής ετήσιας βροχόπτωσης Κρήτης





Σχήμα 6: Διάγραμμα ετήσιας βροχόπτωσης Κρήτης Υγρής περιόδου

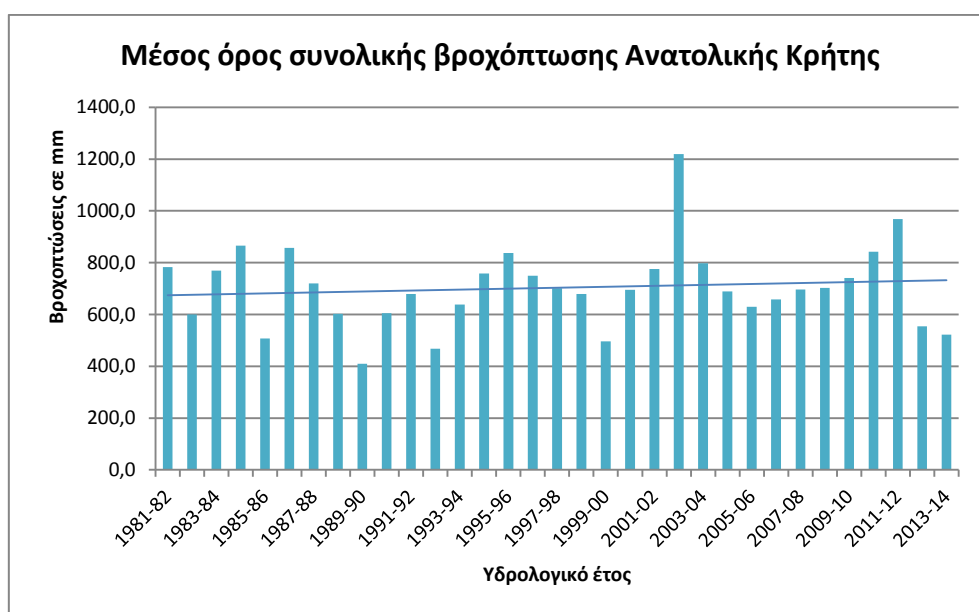


Σχήμα 7: Διάγραμμα ετήσιας βροχόπτωσης Κρήτης Ξηρής περιόδου

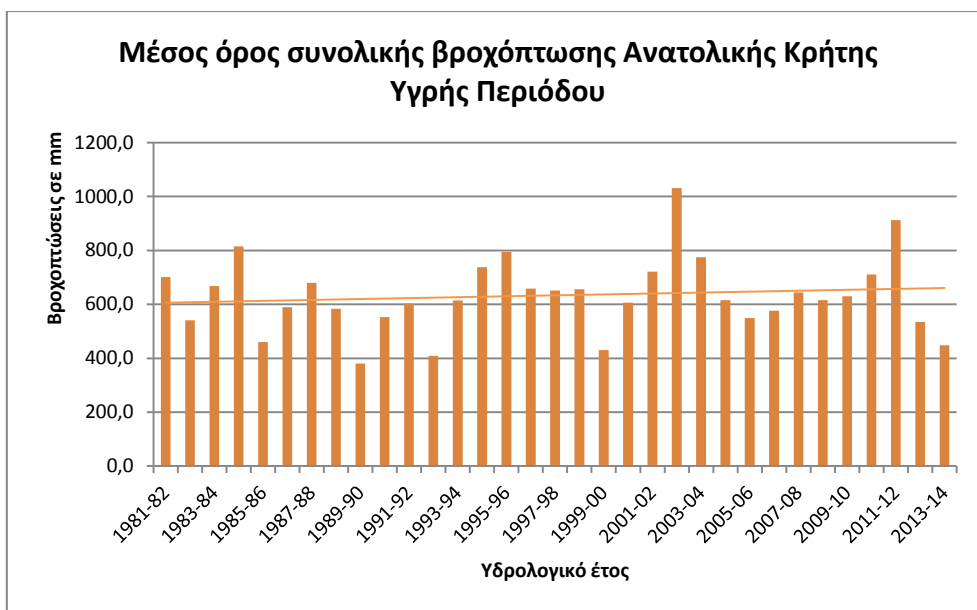
Παρατηρώντας τα Σχήματα 8 έως 13 διαπιστώνεται ότι όπως ήταν αναμενόμενο υπάρχει ισχυρή διαβάθμιση μεταξύ της βροχόπτωσης στο Δυτικό και της βροχόπτωσης στο Ανατολικό μέρος του νησιού. Ιδιαίτερως σε ορισμένα υδρολογικά

έτη, οι στάθμες της βροχόπτωσης στο Δυτικό και Ανατολικό τμήμα του νησιού διαφέρουν σε πολύ μεγάλο βαθμό μεταξύ τους, όπως κατά το έτος 1999-2000 όπου οι στάθμες υπολογίστηκαν στα 830,5 και 496,1 χιλιοστά αντιστοίχως.

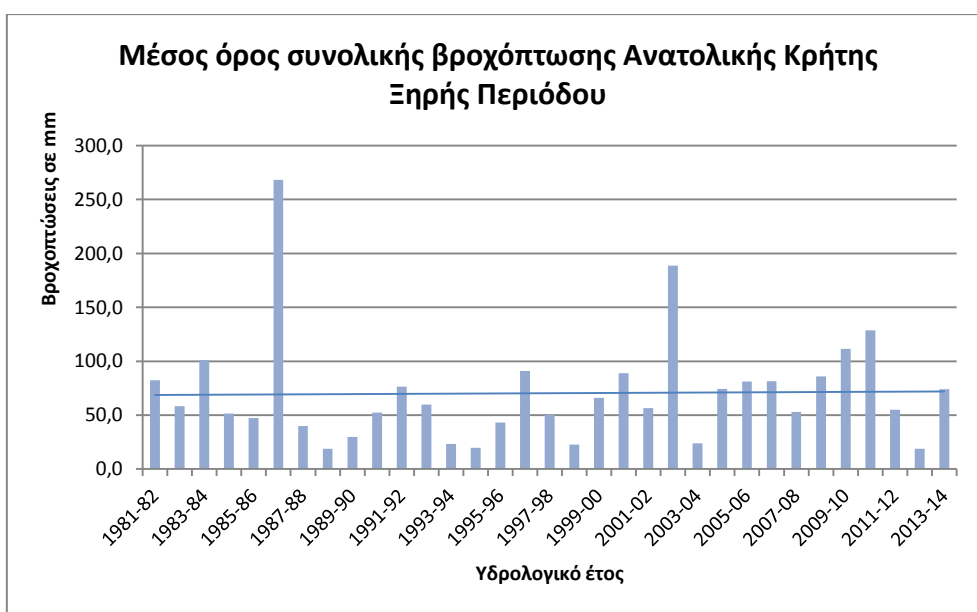
Όσον αφορά την τάση της βροχόπτωσης για την χρονική περίοδο η οποία μελετάται, χαρακτηρίζεται γενικώς ανοδική. Αυτό αποδεικνύεται και από τις κλίσεις των ευθειών των γραμμών τάσης, οι οποίες είναι όλες θετικές και μεγαλύτερες του 1,6917. Εξαίρεση αποτελούν οι ξηρές περίοδοι τόσο της Ανατολικής όσο και της Δυτικής Κρήτης. Η πρώτη έχει κλίση ευθείας ίση με 0,103, δηλαδή σταθερή έως ελαφρώς ανοδική. Η δεύτερη έχει κλίση ευθείας ίση με -0,1727, δηλαδή σταθερή έως ελαφρώς καθοδική.



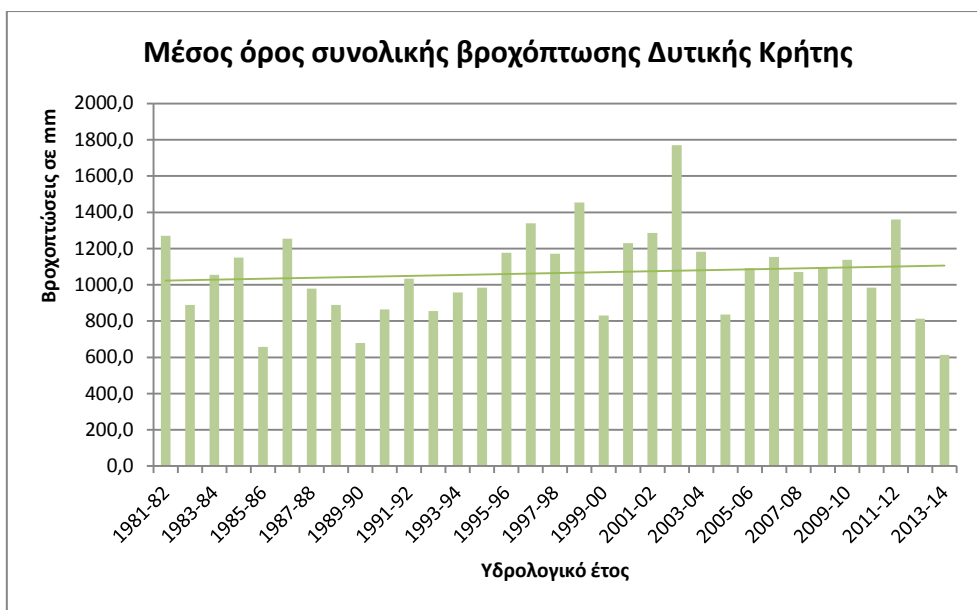
Σχήμα 8: Διάγραμμα συνολικής ετήσιας βροχόπτωσης της Ανατολικής Κρήτης



Σχήμα 9: Διάγραμμα ετήσιας βροχόπτωσης υγρής περιόδου της Ανατολικής Κρήτης



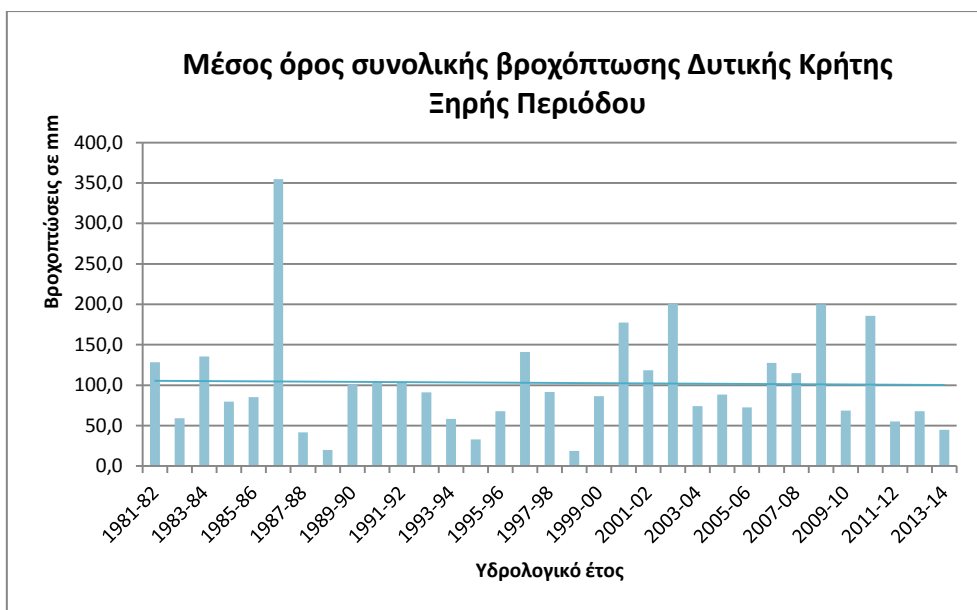
Σχήμα 10: Διάγραμμα ετήσιας βροχόπτωσης ξηρής περιόδου της Ανατολικής Κρήτης



Σχήμα 11: Διάγραμμα συνολικής ετήσιας βροχόπτωσης Δυτικής Κρήτης



Σχήμα 12: Διάγραμμα ετήσιας βροχόπτωσης υγρής περιόδου Δυτικής Κρήτης



Σχήμα 13: Διάγραμμα ετήσιας βροχόπτωσης ξηρής περιόδου Δυτικής Κρήτης

Στα Σχήματα 14, 15, 16 και 17 περιλαμβάνονται για κάθε νομό οι δύο σταθμοί που έχουν τα πιο ακραία βροχομετρικά δεδομένα. Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 14 γίνεται αναφορά στο νομό Χανίων. Για το υδρολογικό έτος 1989-1990 βρέθηκε ότι ο σταθμός των Παλαιών Ρουμάτων έχει τις χαμηλότερες τιμές, σε σύγκριση με τους υπόλοιπους 5 σταθμούς που υπάρχουν στον νομό. Ο σταθμός των Παλαιών Ρουμάτων βρίσκεται σε υψόμετρο 316 μέτρων. Για το κατά κανόνα πιο υγρό έτος 2002-2003, ο σταθμός με της υψηλότερες ενδείξεις βρίσκεται στις Πρασές. Το υψόμετρο του σταθμού αυτού αξιολογείται στα 520 μέτρα.

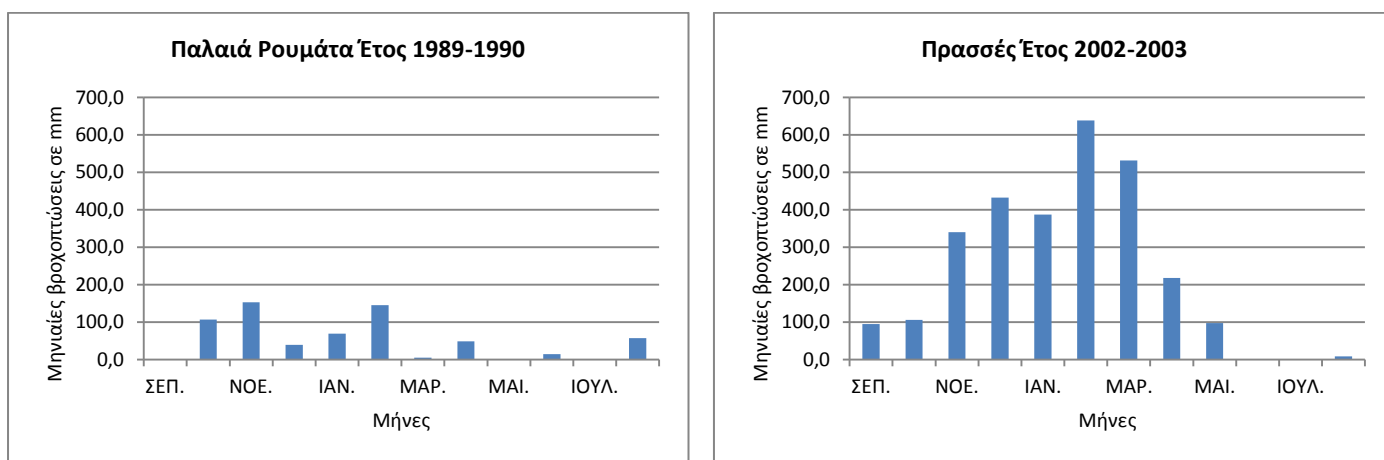
Στο Σχήμα 15 έχουν επιλεγεί ξανά οι 2 σταθμοί με της ακραίες μετρήσεις για το νομό του Ρεθύμνου. Ανάμεσα στους 9 υδρολογικούς σταθμούς που υπάρχουν στο νομό αυτό, στην Αγία Γαλήνη καταγράφηκαν οι χαμηλότερες στάθμες βροχόπτωσης το έτος 1989-1990. Η Αγία Γαλήνη βρίσκεται σε υψόμετρο 20 μέτρων. Για το έτος 2002-2003 στο Γερακάρι υπήρξαν οι πιο υψηλές τιμές βροχόπτωσης. Το υψόμετρο του σταθμού αυτού είναι στα 660 μέτρα.

Στο Σχήμα 16 περιλαμβάνεται ο σταθμός του Δεματίου, στον οποίο πραγματοποιήθηκαν οι χαμηλότερες μετρήσεις στάθμης βροχόπτωσης για το ξηρό έτος 1989-1990 για το νομό Ηρακλείου. Από τους 28 σταθμούς του νομού τα

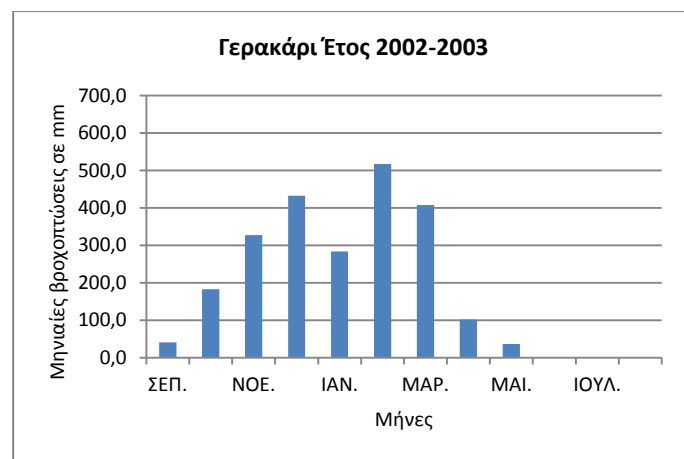
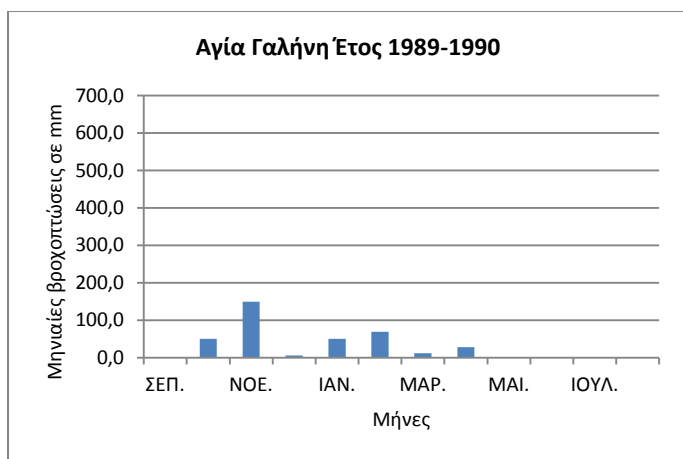
υψηλότερα δεδομένα βροχόπτωσης καταγράφηκαν στο σταθμό της Βορίζιας. Το υψόμετρο των δύο αυτών σταθμών είναι στα 210 και 520 μέτρα αντίστοιχα.

Τέλος, στο Σχήμα 17 για παρόμοιους λόγους με τους άνωθεν επιλέχθηκαν δύο από τους 11 σταθμούς του νομού Λασιθίου. Επιλέχθηκαν οι σταθμοί των Μύθων και των Έξω Ποταμών. Οι Μύθοι βρίσκονται σε υψόμετρο 200 μέτρων, ενώ οι Έξω Ποταμοί σε υψόμετρο 840 μέτρων.

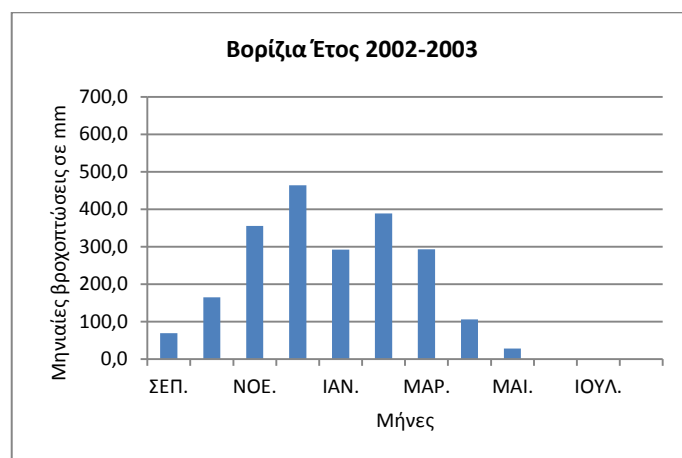
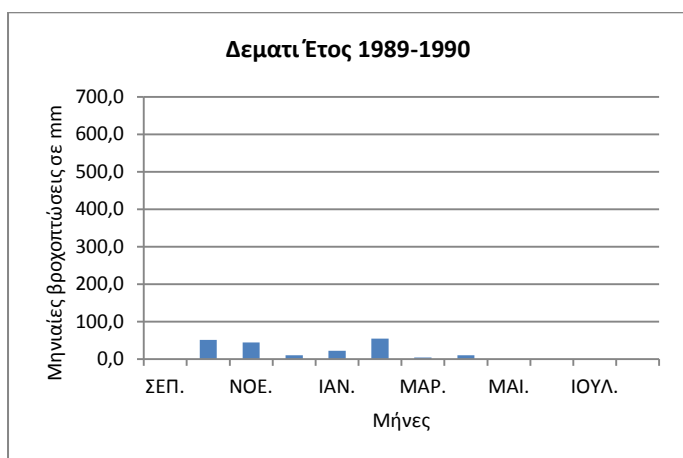
Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι η διαβάθμιση στην βροχόπτωση παρατηρείται έντονα, εκτός από τα δυτικά προς τα ανατολικά και από τα υψηλά υψόμετρα προς τα χαμηλότερα. Είναι εμφανές ότι οι σταθμοί που βρίσκονται σε υψόμετρο έως 300 μέτρων περίπου δέχονται λιγότερη ποσότητα βροχών ετησίως. Αντιθέτως, οι σταθμοί που είναι τοποθετημένοι σε υψόμετρο άνω των 300 μέτρων χαρακτηρίζονται από περισσότερες βροχοπτώσεις.



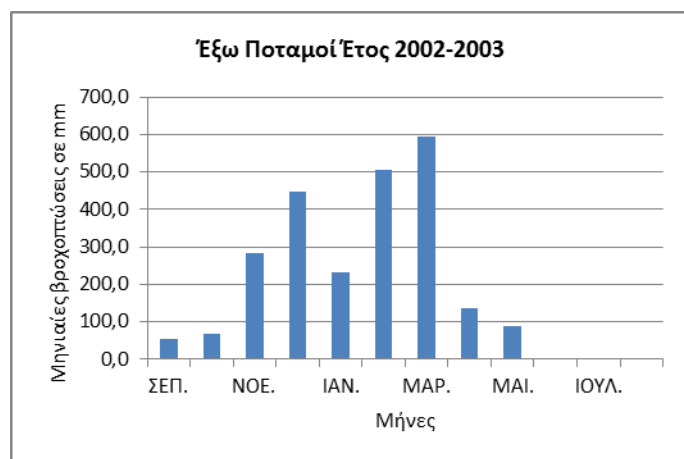
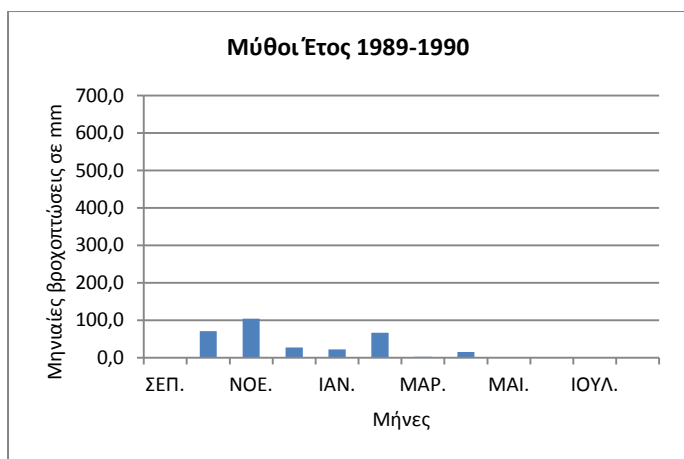
Σχήμα 14: Δύο σταθμοί με ακραίες βροχομετρικές ενδείξεις του Νομού Χανίων



Σχήμα 15: Δύο σταθμοί με ακραίες βροχομετρικές ενδείξεις του Νομού Ρεθύμνου

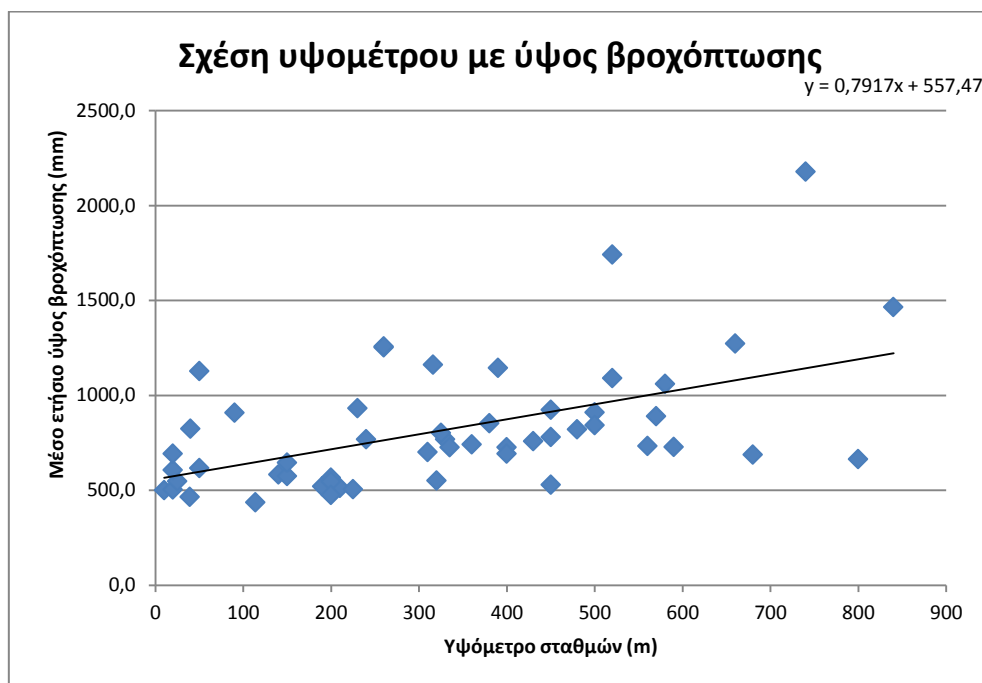


Σχήμα 16: Δύο σταθμοί με ακραίες βροχομετρικές ενδείξεις του Νομού Ηρακλείου



Σχήμα 17: Δύο σταθμοί με ακραίες βροχομετρικές ενδείξεις του Νομού Λασιθίου

Μελετώντας τη συσχέτιση που υπάρχει μεταξύ των υψομέτρων στα οποία βρίσκονται οι σταθμοί και των αντίστοιχων τιμών βροχόπτωσης (Σχήμα 18) παρατηρείται αύξηση της βροχόπτωσης συναρτήσει του υψομέτρου.



Σχήμα 18: Σχέση υψομέτρου έκαστου σταθμού με τον μέσο όρο της στάθμης της βροχόπτωσης μεταξύ των υδρολογικών ετών 1981-2013



Βάσει των παραπάνω, θα εξεταστούν οι στάθμες της βροχόπτωσης των σταθμών που βρίσκονται σε πολύ υψηλό και πολύ χαμηλό υψόμετρο. Από τον πίνακα 1 και από το διάγραμμα 18, επιλέχθηκαν να μελετηθούν οι στάθμες από 10 σταθμούς. Θεωρήθηκε ότι οι σταθμοί σε υψηλό υψόμετρο είναι όσοι βρίσκονται άνω των 660 μέτρων, ενώ σε χαμηλό υψόμετρο όσοι βρίσκονται κάτω των 20 μέτρων. Βάσει των δεδομένων αυτών προκύπτει ο παρακάτω πίνακας:

Πίνακας 2: Ο μέσος όρος της βροχόπτωσης των πέντε σταθμών που βρίσκονται στο υψηλότερο υψόμετρο και των πέντε που βρίσκονται στο χαμηλότερο υψόμετρο

Σταθμός	Υψόμετρο (m)	Μέση ετήσια βροχόπτωση (mm)	Σταθμός	Υψόμετρο (m)	Μέση ετήσια βροχόπτωση (mm)
Έξω Ποταμοί	840	2406,0	Αγία Γαλήνη	20	365,4
Καπετανιανά	800	663,5	Καλό Χωριό	20	502,4
Ασκυφού	740	2176,4	Καλύβες	20	691,9
Αχεντριάς	680	687,0	Γαύδος	10	605,7
Γερακάρι	660	2330,0	Καψάλοι	10	499,8
<b>Μέσος όρος</b>		<b>1652,58</b>	<b>Μέσος όρος</b>		<b>533,04</b>

Από τον πίνακα 2 παρατηρείται ότι ο μέσος όρος της ετήσιας βροχόπτωσης στην πρώτη περίπτωση είναι 1652,58 χιλιοστά, ενώ στην δεύτερη περίπτωση 533,04 χιλιοστά. Δηλαδή η υψομετρική διαφορά μεταξύ των σταθμών οδηγεί σε τελείως διαφορετικά βροχομετρικά δεδομένα για την ίδια χρονική περίοδο. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η ετήσια βροχόπτωση σε σταθμούς που βρίσκονται σε υψηλό υψόμετρο, είναι 3 φορές μεγαλύτερη από αυτήν σε χαμηλό.

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3) χρησιμοποιήθηκαν οι οκτώ σταθμοί (δύο από κάθε νομό της Κρήτης) που μελετήθηκαν προηγουμένως, λόγω των ακραίων υδρολογικών δεδομένων τα οποία συλλέχθηκαν από αυτούς. Στην πρώτη στήλη του πίνακα περιέχονται τα ονόματα των οκτώ σταθμών, ενώ στην δεύτερη και τρίτη στήλη περιέχονται οι συντεταγμένες Χ και Υ των σταθμών αυτών πάνω στο χάρτη. Στην επόμενη στήλη υπάρχει το υψόμετρο σε μέτρα στο οποίο βρίσκεται έκαστος σταθμός. Στη συνέχεια καταγράφηκαν οι ετήσιες στάθμες βροχόπτωσης σε χιλιοστά, ενώ στις επόμενες δύο στήλες καταγράφονται οι στάθμες για την υγρή και ξηρή περίοδο αντίστοιχα. Τέλος, στην τελευταία στήλη του πίνακα έχει υπολογιστεί το ποσοστό της συνολικής ετήσιας βροχόπτωσης που έχει προέλθει από τις βροχοπτώσεις κατά την υγρή περίοδο. Για τον υπολογισμό χρησιμοποιήθηκε η εξής σχέση:

$$\text{Ποσοστό (\%)} = \frac{\text{Βροχόπτωση υγρής περιόδου (mm)}}{\text{Ετήσια βροχόπτωση (mm)}} * 100\%$$

Πίνακας 3: Υδρολογικά δεδομένα οκτώ σταθμών της Κρήτης (συνολικής μέσης ετήσιας βροχόπτωσης, υγρής περιόδου και ξηρής περιόδου)

Σταθμός	Συντεταγμένη X	Συντεταγμένη Y	Υψόμετρο Z (m)	Ετήσια βροχόπτωση (mm)	Υγρή περίοδος (mm)	Ξηρή περίοδος (mm)	Ποσοστό (%) βροχόπτωσης υγρής περιόδου
Παλαιά Ρουμάτα (Χανιά)	479746,3	3917260	316	639,7	518,9	120,8	81%
Πράσες (Χανιά)	486286,5	3914250	520	2855,3	2437,0	418,3	85%
Αγία Γαλήνη (Ρέθυμνο)	562696,3	3883780	20	365,4	337,2	28,2	92%
Γερακάρι (Ρέθυμνο)	556336,3	3897010	660	2330,0	2151,0	179,0	92%
Δεμάτι (Ηράκλειο)	617026,3	3877270	210	196,0	185,5	10,5	94,5%
Βορίζια (Ηράκλειο)	577227,7	3889597	520	2162,0	1959,6	202,4	90,5%
Μύθοι (Λασιίθι)	645166,3	3877390	200	310,9	293,5	17,4	94%
Έξω Ποταμοί (Λασιίθι)	639586,3	3895960	840	2406,0	2128,0	278,0	88%

Επομένως, παρατηρώντας τα ποσοστά στην τελευταία στήλη του άνωθεν πίνακα, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι πάνω από το 80% των βροχομετρικών δεδομένων των σταθμών προέρχονται από τις βροχοπτώσεις κατά τους υγρούς μήνες. Η συνεισφορά της βροχόπτωσης που πραγματοποιείται κατά τους ξηρούς μήνες είναι πολύ μικρή, κάτω από 20% επί του συνόλου. Τα αποτελέσματα αυτά έρχονται να επιβεβαιώσουν και τα Σχήματα 1 έως 13. Από τα Σχήματα αυτά γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι οι στάθμες της βροχόπτωσης κατά την ξηρή περίοδο είναι πάρα πολύ χαμηλές σε σύγκριση με αυτές της υγρής περιόδου.

Εξαίρεση στο παραπάνω συμπέρασμα αποτελεί το έτος 1986, κατά το οποίο οι βροχοπτώσεις κατά τους ξηρούς μήνες ξεπέρασαν το 20% της συνολικής βροχόπτωσης. Αυτό γίνεται φανερό και από τα Σχήματα 7, 10 και 13 όπου η στάθμη της βροχόπτωσης της ξηρής περιόδου για το έτος αυτό, ξεπερνάει κατά πολύ τις υπόλοιπες ξηρές περιόδους.

### **3. Γεωστατιστική ανάλυση**

#### **3.1. Εισαγωγικά**

##### **3.1.1. Γεωστατιστική**

Η επιστήμη της Γεωστατιστικής κατά τις τελευταίες δύο δεκαετίες έχει γνωρίσει ιδιαίτερη άνθιση. Η γεωστατιστική ανάλυση ασχολείται με κατανομές στις οποίες τα χαρακτηριστικά της χωρικής εξάρτησης παίζουν πρωτεύοντα ρόλο. Οι μέθοδοι γεωστατιστικής ανάλυσης οδηγούν στον προσδιορισμό της χωρικής κατανομής μεταβλητών σε σημεία μιας περιοχής όπου οι μεταβλητές αυτές δεν είναι γνωστές και οι οποίες χαρακτηρίζουν μεγέθη με οικονομική ή περιβαλλοντική σημασία. (Χριστόπουλος 2004β).

Οι κλασικές γεωστατιστικές μέθοδοι περιέχουν περίπλοκους μαθηματικούς περιορισμούς που αφορούν την εφαρμογή τους, με αποτέλεσμα όταν οι περιορισμοί αυτοί δεν ικανοποιούνται από το πειραματικό δείγμα του υπό μελέτη φαινομένου, η χωρική εκτίμηση των μεταβλητών να περιλαμβάνει υψηλό ποσοστό σφάλματος (Hristopulos 2003).

Η Γεωστατιστική περιλαμβάνει ένα σύνολο στατιστικών τεχνικών που αφορούν τυχαίες μεταβλητές οι οποίες μεταβάλλονται στο χώρο (τυχαία πεδία). Η βασική υπόθεση στην οποία στηρίζονται οι στατιστικές αυτές τεχνικές είναι ότι η χωρική διακύμανση της μεταβλητής εμπεριέχει τυχαίο χαρακτήρα, οπότε χρησιμοποιούνται στατιστικές μεθοδολογίες (π.χ. μέση τιμή, διασπορά κ.α.) για οποιαδήποτε εκτίμηση απορρέει από της σημειακές μετρήσεις της μεταβλητής (Χριστόπουλος 2004β).

Πιο συγκεκριμένα, η Γεωστατιστική βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην μαθηματική έννοια του τυχαίου πεδίου. Η Γεωστατιστική παρουσιάζει κοινά σημεία με τη Θεωρία Πιθανοτήτων και τη Στατιστική. Η Θεωρία Πιθανοτήτων ασχολείται με της νόμους και τις ιδιότητες που διέπουν τις τυχαίες μεταβλητές. Η Στατιστική περιλαμβάνει το σύνολο των μεθόδων οι οποίες επιτρέπουν τον προσδιορισμό των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν τις τυχαίες μεταβολές βάσει των δεδομένων. Η

Θεωρία των Τυχαίων Πεδίων αποτελεί μια γενίκευση της Θεωρίας Πιθανοτήτων που εφαρμόζεται σε τυχαίες μεταβλητές με χωρική εξάρτηση (Βαρουχάκης, 2005).

Στόχος της Γεωστατιστικής είναι η εκτίμηση των στατιστικών παραμέτρων που προσδιορίζουν τη χωρική κατανομή βάσει του υπάρχοντος δείγματος (π.χ. στάθμη βροχόπτωσης), καθώς και η χρήση αυτών των παραμέτρων προκειμένου να εκτιμηθούν οι στάθμες σε σημεία όπου δεν υπάρχουν μετρήσεις (Χριστόπουλος 2004b).

Η ανάγκη της εκτίμησης φυσικών μεγεθών σε σημεία όπου δεν υπάρχουν μετρήσεις δεν είναι καινούρια. Στατιστικοί επιστήμονες, μηχανικοί μεταλλείων, μηχανικοί πετρελαίων, υδρολόγοι και γεωλόγοι οι οποίοι ασχολήθηκαν με το πρόβλημα ανέπτυξαν την επιστήμη της Γεωστατιστικής. Αρχικά η Γεωστατιστική εφαρμόστηκε κυρίως στην γεωλογία, στην μεταλλειολογία και στην υδρολογία. Στην συνέχεια βρήκε εφαρμογές και σε άλλα επιστημονικά και τεχνολογικά πεδία (Myers 2005). Μερικές από της εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιείται σήμερα η γεωστατιστική περιλαμβάνουν (Χριστόπουλος 2004β):

- Την έρευνα κοιτασμάτων.
- Την ωκεανογραφία.
- Την μορφολογική ανάλυση φυσικών και τεχνολογικών ανομοιογενών υλικών.
- Την χαρτογράφηση και την απεικόνιση συγκεντρώσεων ρυπαντών σε διάφορα περιβαλλοντικά μέσα (αέρας, υπέδαφος, επιφανειακοί-υπόγειοι υδατικοί πόροι).
- Το χαρακτηρισμό της ποιότητας βιομηχανικών προϊόντων.
- Την τοπογραφική ανάλυση και στα γεωγραφικά συστήματα πληροφορίας (GIS).

- Την ανάλυση βροχοπτώσεων σε περιοχές που υπάρχουν λίγοι βροχομετρικοί σταθμοί.
- Τον προσδιορισμό γεωλογικών και υδρογεωλογικών δεδομένων.
- Την εκτίμηση του περιβαλλοντικού κινδύνου και του κινδύνου για την ανθρώπινη υγεία.

Ο κοινός στόχος στις εφαρμογές της Γεωστατιστικής είναι ο προσδιορισμός και ο έλεγχος της χωρικής κατανομής μεταβλητών που χαρακτηρίζουν μεγέθη με οικονομική ή περιβαλλοντική σημασία.

Οι πιο δημοφιλείς και διαδεδομένες μέθοδοι γεωστατιστικής ανάλυσης είναι γνωστές με την ονομασία Kriging. Το όνομα της μεθόδου δόθηκε προς τιμή του Νοτιοαφρικανού μεταλλειολόγου μηχανικού D.G.Krige, που είναι πρωτοπόρος στην εφαρμογή στατιστικών μεθόδων στη διερεύνηση των κοιτασμάτων ορυκτών (Αντωνάκος, 2012).

### **3.1.2. Τυχαία Πεδία:**

Ως «τυχαίο πεδίο» μπορεί να θεωρηθεί ένα σύνολο τυχαίων μεταβλητών που περιγράφουν τη χωροχρονική μεταβολή του σχετικού φυσικού μεγέθους (π.χ. στάθμες βροχοπτώσεων) και αντιπροσωπεύει ένα σύνολο δυνατών καταστάσεων.

Κάθε κατάσταση αποτελεί ένα δείγμα του πεδίου και χαρακτηρίζεται από μια πιθανότητα πραγματοποίησης που καθορίζεται από την πολυδιάστατη Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας του πεδίου. Επομένως, ένα τυχαίο πεδίο μπορεί να θεωρηθεί ως μία πολυδιάστατη τυχαία μεταβλητή και η αλληλεξάρτηση των

φυσικών μεγεθών σε διαφορετικά σημεία του χώρου, κάνει τα τυχαία πεδία να ξεχωρίζουν από ένα σύνολο ανεξάρτητων τυχαίων μεταβλητών (Βαρουχάκης, 2005).

Υπάρχουν οι εξής κατηγορίες τυχαίων πεδίων: τα πεδία διακριτών τιμών, τα πεδία συνεχών τιμών, τα πεδία συνεχούς χώρου και τα πλεγματικά πεδία. Πιο συγκεκριμένα, αν το πεδίο λαμβάνει τιμές μόνο από ένα μετρήσιμο σύνολο αριθμών ονομάζεται πεδίο διακριτών τιμών. Αν οι τιμές του πεδίου προέρχονται από ένα συνεχές διάστημα πραγματικών αριθμών, το πεδίο ονομάζεται πεδίο συνεχών τιμών. Όταν η μεταβολή ορίζεται σε ένα συνεχή χώρο, όπως π.χ. στα φυσικά πεδία, δημιουργείται ένα πεδίο συνεχούς χώρου. Αντίθετα όταν ορίζεται στις θέσεις του πλέγματος (καννάβου) ονομάζεται πλεγματικό πεδίο.

Όσον αφορά τα πλεγματικά πεδία, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε υπολογιστικές αλλά και σε θεωρητικές μελέτες, γιατί η συμμετρία του πλέγματος επιτρέπει την χρησιμοποίηση αριθμητικά αποτελεσματικών μεθόδων. Με τα πλεγματικά πεδία παρέχεται επιπλέον η σύγκριση των επιδόσεων διαφορετικών γεωστατιστικών μεθόδων (Χριστόπουλος 2004α).

Το ανομοιογενές δίκτυο σημείων δειγματοληψίας, συμβαίνει όταν οι μετρήσεις αντιπροσωπεύουν ένα πεπερασμένο πλήθος σημείων, η κατανομή των οποίων στο χώρο δεν έχει κατ' ανάγκη τη συμμετρία ενός κανονικού πλέγματος. Τότε χρησιμοποιείται ο όρος άτακτο πλέγμα (disordered lattice) και ο όρος εξωπλεγματική κατανομή (off lattice), τα οποία απαιτούν γεωστατιστικές μεθόδους που να λειτουργούν ικανοποιητικά με τους περιορισμούς της εκάστοτε χωρικής κατανομής. Αν η κατανομή των δεδομένων είναι εξωπλεγματική, η εκτίμηση ή η προσομοίωση της διαδικασίας πραγματοποιείται πάνω σε ένα πλεγματικό υπόβαθρο που καλύπτει την περιοχή ενδιαφέροντος (Χριστόπουλος 2004α).

Οι δύο άλλες βασικές έννοιες στις οποίες στηρίζεται η έννοια του τυχαίου πεδίου είναι η τυχειότητα και η αλληλεξάρτηση των τιμών φυσικών μεγεθών σε διαφορετικά σημεία του χώρου. Η τυχειότητα συμβαίνει σε περιπτώσεις κατά τις οποίες η γνώση μιας κατάστασης με απόλυτη ακρίβεια είναι αδύνατη λόγω διαφόρων περιορισμών. Οι περιορισμοί προέρχονται από την μεταβλητότητα των διαφόρων φυσικών μεγεθών στον χώρο και την αβεβαιότητα που οφείλεται στον



περιορισμένο αριθμό μετρήσεων. Σε αυτές της περιπτώσεις το αποτέλεσμα (η τιμή του φαινομένου) καθορίζεται από μία συνάρτηση κατανομής πιθανότητας, η οποία προσδιορίζει της πιθανότητες εμφάνισης κάθε κατάστασης.

Το βασικό χαρακτηριστικό των τυχαίων πεδίων είναι η χωρική εξάρτηση (αλληλεξάρτηση), η οποία περιγράφει την εξάρτηση των τιμών του πεδίου σε διαφορετικά σημεία του χώρου μεταξύ τους. Η κατανομή πιθανότητας του πεδίου εμπερικλείει συσχετίσεις μεταξύ διαφορετικών σημείων, έτσι ώστε η πιθανότητα παρατήρησης μιας τιμής σε ένα σημείο να εξαρτάται από της τιμές στα γειτονικά σημεία (Βαρουχάκης, 2005).

### 3.1.3. Ημιβαριόγραμμα:

Το ημιβαριόγραμμα εκφράζει μαθηματικά τον τρόπο που η διακύμανση μιας ιδιότητας μεταβάλλεται καθώς μεταβάλλεται η απόσταση και η κατεύθυνση που χωρίζει δύο σημεία. Αποτελεί ένα βασικό διαγνωστικό εργαλείο για τον χωρικό χαρακτηρισμό μιας χωρομεταβλητής. Η κατασκευή του βαριογράμματος από το σύνολο των δεδομένων, αποτελεί τη βασική διεργασία πριν την εφαρμογή της γεωστατιστικής μεθόδου Kriging (Γκριτζάπη, 2011). Το ημιβαριόγραμμα ενός τυχαίου πεδίου ορίζεται ως εξής:

$$\gamma_X(s, r) = \frac{1}{2} E\{[X(s + r) - X(s)]^2\} \quad (3.1)$$

Δηλαδή το ημιβαριόγραμμα ορίζεται σε σχέση με ένα ζεύγος σημείων με την βοήθεια της μέσης τιμής του τετραγώνου της διαφοράς:

$\delta X(s; r) \equiv X(s + r) - X(s)$ . Το πεδίο της διαφοράς  $\delta X(s; r)$  αποκαλείται βήμα απόστασης  $r$ . Αν το πεδίο  $X(s)$  είναι στατιστικώς ομοιογενές, δηλαδή αν η μέση

τιμή του είναι σταθερή, το ημιβαριόγραμμα συνδέεται άμεσα με την συνάρτηση συνδιασποράς  $c_X(r)$  βάσει της εξίσωσης:  $\gamma_X(r) = \sigma_X^2 - c_X(r)$ .

Για στατιστικώς ομοιογενή πεδία το ημιβαριόγραμμα περιέχει την ίδια πληροφορία με την συνάρτηση συνδιασποράς. Αν η διαφορά  $\delta X(s; r)$  είναι στατιστικά ομοιογενής, το τυχαίο πεδίο  $X(s)$  ονομάζεται πεδίο με στατιστικώς ομοιογενείς διαφορές. Σε αυτήν την περίπτωση το ημιβαριόγραμμα  $\gamma_X(r)$  εξαρτάται αποκλειστικά από την απόσταση  $r$  μεταξύ των σημείων και αυτό είναι απόρροια της στατιστικής ομοιογένειας του πεδίου διαφορών. Αν το πεδίο  $X(s)$  είναι στατιστικά ομοιογενές το ίδιο ισχύει και για της διαφορές  $\delta X(s; r)$ , το αντίστροφο όμως δεν ισχύει απαραίτητα (Χριστόπουλος 2004β).

Οι παράμετροι του ημιβαριογράμματος καθορίζουν την χωρική εξάρτηση των τιμών του πεδίου σε δυο γειτονικά σημεία. Από τον ορισμό του ημιβαριογράμματος με την βοήθεια της μέσης τιμής του τετραγώνου των διαφορών προκύπτει ότι το ημιβαριόγραμμα είναι ημιθετικά ορισμένο  $\gamma_X(r) \geq 0$ . Ωστόσο το αντίστροφο δεν ισχύει πάντοτε καθώς μια ημιθετικά ορισμένη συνάρτηση δεν είναι κατ' ανάγκη αποδεκτή ως ημιβαριόγραμμα.

Σε περίπτωση στατιστικά ομοιογενούς πεδίου, αν η χωρική εξάρτηση είναι ισοτροπική, το ημιβαριόγραμμα προσδιορίζεται από δύο παραμέτρους: το όριο και το μήκος συσχέτισης. Η τιμή του ημιβαριογράμματος για πολύ μεγάλες αποστάσεις  $r$  τείνει ασυμπτωτικά προς ένα όριο ίσο με την διασπορά  $\sigma_X^2$  του τυχαίου πεδίου. Αυτή η ιδιότητα βασίζεται στην σχέση  $\gamma_X(r) = \sigma_X^2 - c_X^2(r)$  και στο γεγονός ότι σε μεγάλες αποστάσεις η τιμή της συνάρτησης συνδιασποράς τείνει προς το μηδέν.

Η ύπαρξη σημαντικών τάσεων μεγάλης εμβέλειας σημαίνει ότι η προϋπόθεση της στατιστικής ομοιογένειας δεν ισχύει. Στην περίπτωση αυτή, το ημιβαριόγραμμα δεν προσεγγίζει κάποια τιμή ισορροπίας όταν η απόσταση τείνει προς το άπειρο (Χριστόπουλος 2004β).

Το ημιβαριόγραμμα αυξάνεται ανάλογα αλλά όχι κατ' ανάγκη γραμμικά με την απόσταση μεταξύ των σημείων. Η εξάρτηση των τιμών του πεδίου σε δύο διαφορετικά σημεία του χώρου μειώνεται, όσο αυξάνει η απόσταση. Ακολουθώς, οι

τιμές του ημιβαριογράμματος αυξάνονται όσο μεγαλώνει η απόσταση, αφού μετρά πόσο διαφέρουν μεταξύ της οι διακυμάνσεις του πεδίου συναρτήσει της απόστασης.

Τα πιο γνωστά μοντέλα ημιβαριογραμμάτων είναι το εκθετικό, το γκαουσιανό, το σφαιρικό, το γενικευμένο, το δυναμονομικό ή αλγεβρικό και το φαινόμενο πυρήνα. Το εκθετικό μοντέλο χαρακτηρίζει κατανομές με απότομες χωρικές μεταβολές, το γκαουσιανό χαρακτηρίζεται από ομαλότερες αυξομειώσεις, το αλγεβρικό μοντέλο χαρακτηρίζει εξάρτηση με μακριά χωρική εμβέλεια και το μοντέλο πυρήνα αντιστοιχεί σε μεταβολές που συντελούνται σε αποστάσεις μικρότερες από τη διακριτική ικανότητα που επιτρέπει το δείγμα (Βαρουχάκης, 2005).

#### Προσδιορισμός ημιβαριογράμματος:

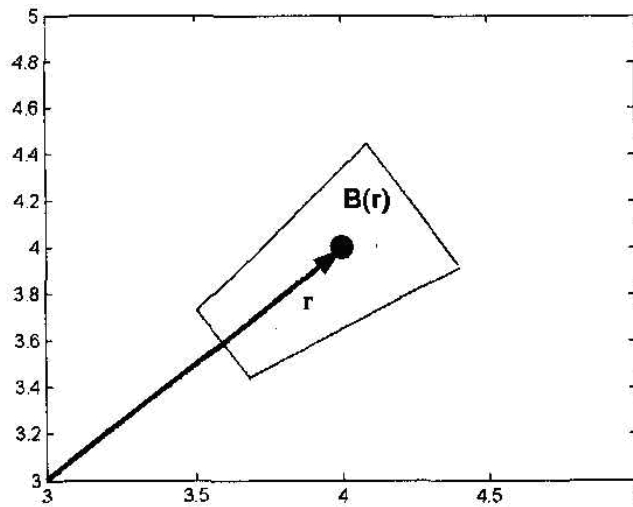
Όταν τα δεδομένα μας περιορίζονται σε ένα μοναδικό δείγμα, επιχειρείται να προσδιοριστεί μια εκτίμηση του πραγματικού ημιβαριογράμματος από αυτό. Η εκτίμηση αυτή ονομάζεται δειγματικό ημιβαριόγραμμα και υπολογίζεται βάσει των τιμών του δείγματος ως εξής:

$$\hat{g}_\chi(r_k) = \frac{1}{2n(r_k)} \sum_{i,j=1}^{N(r_k)} \{[X(s_i) - X(s_j)]^2\} \vartheta_{i,j}(r_k), \quad (k = 1, \dots, N_c), \quad (3.2)$$

$$\vartheta_{i,j}(r_k) = \begin{cases} 1, & s_i - s_j \in B(r_k) \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (3.3)$$

- Η συνάρτηση τάξης  $\vartheta_{i,j}(r_k)$  ορίζει διαφορετικές ομάδες (τάξεις) διανυσμάτων απόστασης, επιλέγοντας τα διανύσματα εκείνα που βρίσκονται σε μια κλειστή περιοχή  $B(r_k)$  γύρω από το διάνυσμα  $r_k$ .

- Η μεταβλητή  $N(r_k)$  είναι ίση με το πλήθος των ζευγών σημείων που περιέχονται μέσα στην τάξη  $B(r_k)$ .
- Το δειγματικό ημιβαριόγραμμα ορίζεται για ένα διακριτό και πεπερασμένο σύνολο αποστάσεων  $r_k$ , ( $k = 1, \dots, N_c$ ) το πλήθος των οποίων είναι ίσο με τον συνολικό αριθμό τάξεων  $N_c$ .



Εικόνα 1: Σχηματικό διάγραμμα μιας περιοχής  $B(r)$  γύρω από το διάνυσμα απόστασης (Χριστόπουλος 2004β)

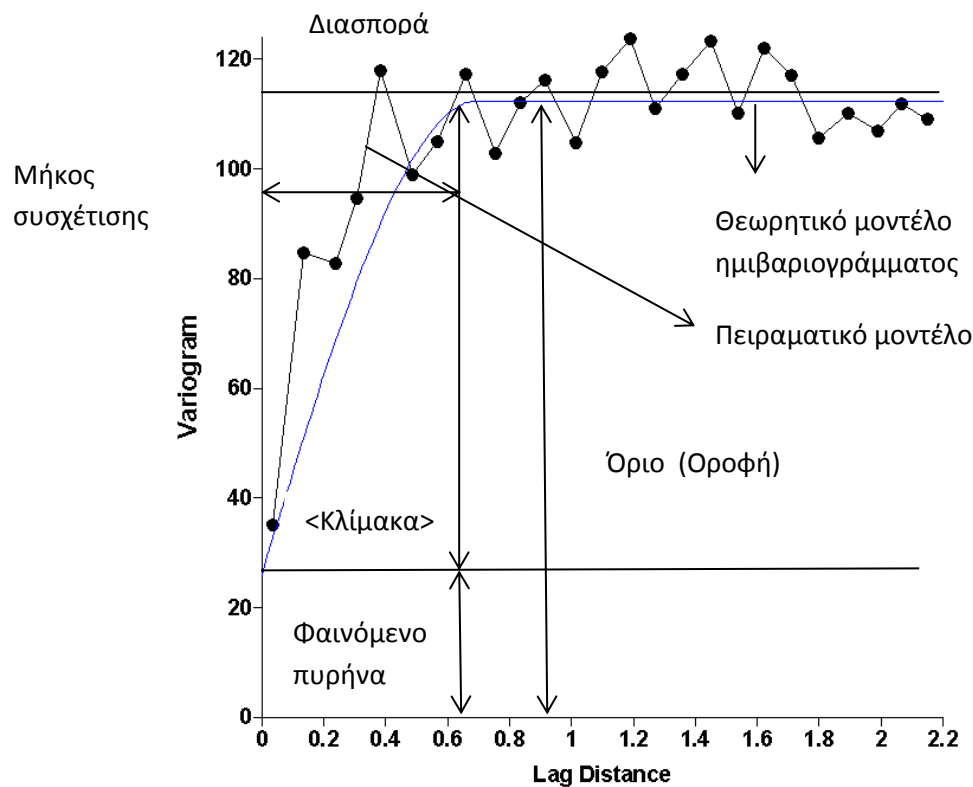
Επομένως, ο υπολογισμός αυτός προσδιορίζει μια τιμή του δειγματικού ημιβαριογράμματος για κάθε  $r_k$  βάσει του μέσου όρου των διαφορών  $[X(s_i) - X(s_j)]^2$  σε όλα τα ζεύγη σημείων, το διάνυσμα απόστασης των οποίων ανήκει στην περιοχή  $B(r_k)$ . Το  $\hat{g}_X(r_k)$  είναι ένας καλός εκτιμητής του  $g_X(r_k)$  όταν ο μέσος όρος των διαφορών στην τάξη του  $r_k$  προσεγγίζει με ακρίβεια την μέση τιμή  $E[X(s) - X(s + r_k)]^2$  (Χριστόπουλος 2004β).

Αυτό ισχύει όταν εκπληρώνεται η εργοδική υπόθεση (Christakos & Hristopulos 1998) η οποία επιτρέπει την εναλλαγή του στοχαστικού με τον δειγματικό μέσο. Στον υπολογισμό του ημιβαριογράμματος για να ισχύει η εργοδική ιδιότητα πρέπει να εκπληρώνονται κάποιες προϋποθέσεις, όπως:

1. Το πεδίο διαφοράς  $X(s_i) - X(s + r_k)$  είναι στατιστικά ομοιογενές.
2. Το πλήθος ζευγών σε κάθε τάξη να είναι μεγάλο ώστε ο δειγματικός μέσος του τετραγώνου της διαφοράς να υπολογίζεται με καλή στατιστική ακρίβεια.
3. Ο αριθμός των τάξεων πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος ώστε να επιτρέπει μια πυκνή προσέγγιση της μεταβολής του ημιβαριογράμματος σαν συνάρτηση της απόστασης (Χριστόπουλος 2004β).

Όταν υπολογιστεί το πειραματικό ημιβαριόγραμμα προσαρμόζεται σε ένα από τα θεωρητικά μοντέλα, το οποίο επιτρέπει τον υπολογισμό του ημιβαριογράμματος για οποιαδήποτε απόσταση. Αυτό πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας την αρχή των ελαχίστων τετραγώνων, βάσει της οποίας υπολογίζονται και οι βέλτιστες παράμετροι  $\xi$  (μήκος συσχέτισης) και  $\sigma_\chi^2$  (διασπορά) του θεωρητικού μοντέλου.

Η χρήση των θεωρητικών μοντέλων είναι απαραίτητη για την εκτίμηση των τιμών του πεδίου σε σημεία όπου δεν υπάρχουν μετρήσεις. Στην συνέχεια για να γίνει αποδεκτό το ημιβαριόγραμμα και να χρησιμοποιηθεί στην γεωστατική ανάλυση ελέγχεται σύμφωνα με τις συνθήκες αποδοχής ημιβαριογράμματος (Χριστόπουλος 2004b).



Εικόνα 2: Παρουσίαση χαρακτηριστικών στοιχείων ημιβαριογράμματος (Surfer V.8.0.4, 2002)

- Το φαινόμενο πυρήνα ποσοτικοποιεί την διασπορά του δειγματικού σφάλματος καθώς και την μικρής κλίμακας μεταβλητότητα, π.χ. την χωρική μεταβλητότητα που υπάρχει σε αποστάσεις μικρότερες από της αποστάσεις μεταξύ των σημείων του δείγματος.
- Το «όριο» (οροφή) είναι η τιμή που πλησιάζει ασυμπτωτικά το δειγματικό ημιβαριόγραμμα.
- Η «κλίμακα» (scale) είναι η διαφορά της «οροφής» από το «φαινόμενο πυρήνα» και δηλώνει την μεταβλητότητα των συσχετισμένων διακυμάνσεων.

- Το μήκος συσχέτισης είναι η απόσταση στην οποία το ημιβαριόγραμμα προσεγγίζει πολύ κοντά, π.χ. κατά 95-97%, την τιμή οροφής.
- Η διασπορά είναι η μέση τετραγωνική απόκλιση κάθε τιμής του δείγματος από την μέση τιμή και δηλώνεται από την διακεκομμένη οριζόντια γραμμή στο σχήμα.
- Το πειραματικό ημιβαριόγραμμα παρουσιάζει της ομάδες των ζευγών με της αντίστοιχες δειγματικές τιμές του ημιβαριογράμματος.
- Το θεωρητικό μοντέλο ημιβαριογράμματος αποτελεί μια συνεχή θεωρητική καμπύλη που προσαρμόζεται στο πειραματικό. (Βαρουχάκης, 2005)

#### **Μοντέλα ημιβαριογραμμάτων:**

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν τα εξής θεωρητικά μοντέλα ημιβαριογραμμάτων: το εκθετικό, το γκαουσιανό, το σφαιρικό και το K-Bessel. Οι εξισώσεις για τα μοντέλα αυτά δίνονται παρακάτω, όπου  $\sigma_Z^2$  είναι η διασπορά,  $|r|$  είναι η ευκλείδια απόσταση και  $\xi$  είναι η ακτίνα συσχέτισης.

- Εκθετικό: Χρησιμοποιείται όταν παρατηρείται μια βαθμιαία μετάβαση προς τη μέγιστη τιμή της ζώνης επιρροής, με σαφώς οριοθετημένο κατώφλι και nugget.

$$\gamma_X(r) = \sigma_X^2 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{r}{\xi}\right) \right] \quad (3.4)$$

- Γκαουσιανό: Χρησιμοποιείται όταν οι διαφοροποιήσεις είναι ομαλές (π.χ. στοιχεία για το υψόμετρο) και η διασπορά nugget είναι πολύ μικρή, σε σχέση με τη χωρική συσχετισμένη τυχαία διασπορά.

$$\gamma_{\chi}(r) = \sigma_{\chi}^2 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{r^2}{\xi^2}\right) \right] \quad (3.5)$$

- Σφαιρικό: Χρησιμοποιείται στην περίπτωση που η διασπορά nugget είναι σημαντική, αλλά όχι ιδιαίτερα μεγάλη και παρατηρείται ένα ξεκάθαρο κατώφλι και ζώνη επιρροής.

$$\gamma_Z(r) = \sigma_Z^2 \left[ \frac{1,5|r|}{\xi} - \frac{0,5|r|}{\xi^3} \right] \vartheta(\xi - |r|) \quad (3.6)$$

Όπου για  $\xi - |r| < 0$ ,  $\vartheta = 0$

Ενώ για  $\xi - |r| > 0$ ,  $\vartheta = 1$

- K-Bessel:

$$\gamma_Z(r) = \sigma_Z^2 \left\{ 1 - \frac{2^{1-\nu}}{\Gamma(\nu)} \left( \frac{|r|}{\xi} \right)^{\nu} K_{\nu} \left( \frac{|r|}{\xi} \right) \right\} \quad (3.7)$$

Όπου  $\nu > 0$  είναι το shape coefficient (συντελεστής σχήματος),  $\Gamma(\cdot)$  η συνάρτηση gamma και  $K_{\nu}(\cdot)$  η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel. Για  $\nu = 0,5$  έχουμε το εκθετικό μοντέλο, ενώ όταν το  $\nu$  τείνει στο άπειρο έχουμε το γκαουσιανό (Αντωνάκος, 2012; Christakos 1991; Cressie 1993).

### 3.1.4. Χωρική εκτίμηση Kriging:

Η παρεμβολή Kriging συνιστά μια γεωστατιστική μέθοδο εκτίμησης που στηρίζεται στις υπολογιζόμενες παραμέτρους των στατιστικών μοντέλων (ημιβαριογράμματα) για την αμερόληπτη και βέλτιστη εκτίμηση των τοπικών μεταβλητών σε θέσεις που δεν υπάρχουν δεδομένα, χρησιμοποιώντας το σύνολο των τιμών και τις πληροφορίες που της παρέχει το ημιβαριόγραμμα (Burrough & McDonnell, 1998).



Πιο συγκεκριμένα, στην έννοια χωρική εκτίμηση περιλαμβάνονται οι μαθηματικές διαδικασίες που επιτρέπουν τον υπολογισμό των τιμών του πεδίου σε σημεία στα οποία δεν υπάρχουν μετρήσεις μιας ιδιότητας. Η χωρική εκτίμηση μπορεί να είναι είτε σημειακή, αν αναφέρεται στην τιμή του πεδίου σε ένα συγκεκριμένο σημείο, είτε γενική, οπότε αποσκοπεί στον υπολογισμό μιας χαρακτηριστικής τιμής που περιγράφει ολόκληρη την περιοχή.

Για την χωρική εκτίμηση του πεδίου είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός προτύπου χωρικής εξάρτησης, έτσι ώστε η τιμή της ιδιότητας να επηρεάζεται από τις γειτονικές τιμές του πεδίου. Αυτή η αλληλεξάρτηση επιτρέπει την εκτίμηση του πεδίου σε σημεία όπου δεν υπάρχουν μετρήσεις βάσει της συμπεριφοράς σε γειτονικά μετρηθέντα σημεία. Σε πολλές περιπτώσεις, στόχος είναι η εκτίμηση σε ένα σύνολο σημείων και όχι σε ένα μεμονωμένο σημείο. Αυτό μπορεί να γίνει με επανάληψη της σημειακής εκτίμησης σε όλα τα σημεία ενδιαφέροντος.

Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι χωρικής εκτίμησης οι οποίες στηρίζονται σε παρόμοιες αρχές. Όλες οι μέθοδοι στηρίζονται στο ότι η τιμή στο σημείο εκτίμησης δίνεται από ένα συνδυασμό, γραμμικό ή μη γραμμικό των γειτονικών τιμών. Η εκτιμώμενη τιμή προκύπτει από την βελτιστοποίηση κάποιου στατιστικού μέτρου, π.χ. από την μεγιστοποίηση της πιθανότητας ή από την ελαχιστοποίηση του σφάλματος της εκτίμησης. Οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι βασίζονται στη γραμμική παρεμβολή σε συνδυασμό με την ελαχιστοποίηση του τετραγωνικού σφάλματος της εκτίμησης. Αυτό το σύνολο των μεθόδων είναι γνωστό ως «Kriging» (Βαρουχάκης, 2005).

Το λογισμικό ARC GIS παρέχει τη δυνατότητα για την χρησιμοποίηση διαφόρων παραλλαγών της τεχνικής Kriging.

- Ordinary Kriging, για δεδομένα με άγνωστη σταθερή μέση τιμή
- Simple Kriging, για δεδομένα με γνωστή μέση τιμή
- Universal Kriging, για δεδομένα με μέση τιμή που μεταβάλλεται συναρτήσει συντεταγμένων

- Indicator Kriging, για συνάρτηση κατανομής που παρουσιάζει ασυμμετρία με σημαντική πυκνότητα πιθανότητας στις υψηλές τιμές
- Probability Kriging, για διακριτά δεδομένα σαν κύρια μεταβλητή και συνεχή δεδομένα σαν δευτερεύουσες μεταβλητές
- Disjunctive Kriging, για μη γραμμικές προβλέψεις

Η σημειακή εκτίμηση με μεθόδους Kriging εκφράζεται συνήθως βάσει ενός δείγματος  $X(s_i)$ ,  $i = 1, \dots, N$  εντός μιας περιοχής  $\Omega$ . Η εκτιμώμενη τιμή του πεδίου στο σημείο εκτίμησης  $u \in \Omega$ , το οποίο δεν συμπίπτει με κανένα από τα σημεία  $s_i$ ,  $i = 1, \dots, N$ , δίνεται από το  $\hat{X}(u)$ . Στην εκτίμηση με μεθόδους Kriging καθορίζεται μια γειτονία  $\omega(u)$  του σημείου  $u$ , η οποία περιλαμβάνει  $n(u)$  σημεία από τα  $s_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ). Σε ισοτροπική περίπτωση η γειτονία αποτελείται από τα σημεία εντός ενός κύκλου ακτίνας  $r_s(u)$ . Η ακτίνα της γειτονιάς (ακτίνα επίδρασης)  $\omega(u)$  είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με το μήκος συσχέτισης του πεδίου.

Στην περίπτωση που η ακτίνα της γειτονιάς υπερβαίνει κατά πολύ το μήκος συσχέτισης, το οποίο έχει προσδιοριστεί από το ημιβαριόγραμμα, η εκτίμηση γίνεται με μετρήσεις οι οποίες δεν έχουν σημαντική επίδραση στο σημείο εκτίμησης. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται το αριθμητικό κόστος επίλυσης του συστήματος Kriging. Επίσης, η χρήση μικρών γειτονιών βοηθά στο να διακρίνονται καλύτερα τοπικές μεταβολές της μέσης τιμής από γειτονιά σε γειτονιά (Goovaerts 1997; Journel 1989).

Η εκτιμώμενη τιμή δίνεται από τον εξής γραμμικό συνδυασμό:

$$\hat{X}(u) - m_X(u) = \sum_{s_a \in \omega(u)} \lambda_\alpha [X(s_a) - m_X(s_a)] = \sum_{a=1}^{n(u)} \lambda_\alpha [X(s_a) - m_X(s_a)] \quad (3.8)$$

Ως  $\lambda_\alpha$  ορίζονται τα γραμμικά βάρη της εκτίμησης. Η παραπάνω εξίσωση εκφράζει τη διακύμανση στο σημείο εκτίμησης ως συνάρτηση της διακύμανσης στα υπόλοιπα σημεία της γειτονιάς εκτίμησης. Η εκτιμώμενη τιμή του πεδίου αντίστοιχα δίνεται από την εξίσωση:

$$\hat{X}(u) = m_\chi(u) + \sum_{a=1}^{n(u)} \lambda_\alpha [X(s_a) - m_\chi(s_a)] \quad (3.9)$$

Η ακριβής τιμή του πεδίου  $X(u)$ , η εκτίμηση  $\hat{X}(u)$  και το σφάλμα εκτίμησης  $X(u) - \hat{X}(u)$  είναι τυχαίες μεταβλητές. Οι μέθοδοι Kriging υπολογίζουν την βέλτιστη τιμή  $\hat{X}(u)$  χρησιμοποιώντας τα βάρη που ελαχιστοποιούν την διασπορά του σφάλματος εκτίμησης. Οι εκτιμήτριες που βασίζονται στη μέθοδο Kriging είναι γνωστές ως BLUE από τα αρχικά των λέξεων Best Linear Unbiased Estimator, δηλαδή Βέλτιστη Γραμμική Αμερόληπτη Εκτιμήτρια.

Το σφάλμα εκτίμησης είναι μια τυχαία μεταβλητή που ορίζεται ως εξής:

$$\varepsilon(u) \equiv X(u) - \hat{X}(u) \quad (3.10)$$

Οι μέθοδοι Kriging προσδιορίζουν την τιμή  $\hat{X}(u)$  βάσει του κριτηρίου ελαχιστοποίησης της διασποράς του σφάλματος εκτίμησης η οποία ορίζεται ως εξής:

$$\sigma_E^2(u) \equiv Var\{X(u) - \hat{X}(u)\} \quad (3.11)$$

Η ελαχιστοποίηση της διασποράς πραγματοποιείται υπό συνθήκη αμεροληψίας, δηλαδή όταν η τιμή του σφάλματος είναι μηδέν. Σε περίπτωση που αυτή η συνθήκη

δεν ικανοποιείται αυτόματα υπό την εξίσωση της γραμμικής παρεμβολής δημιουργεί ένα πρόσθετο περιορισμό για τα γραμμικά βάρη. Η συνθήκη αμεροληψίας εκφράζεται ως:

$$E[\hat{X}(u) - X(u)] = 0 \quad (3.12)$$

Η ελαχιστοποίηση της διασποράς οδηγεί στη δημιουργία ενός γραμμικού συστήματος εξισώσεων ως προς τα γραμμικά βάρη. Τα γνωστά στοιχεία του συστήματος αποτελούν τα δεδομένα (τιμές του πεδίου στα σημεία μέτρησης) και οι τιμές της συνάρτησης συνδιασποράς (ή του ημιβαριογράμματος) στις αποστάσεις που αντιστοιχούν στα ζεύγη των μετρημένων σημείων, καθώς και στα ζεύγη που περιλαμβάνουν ένα μετρημένο σημείο και το σημείο εκτίμησης (Goovaerts 1997; Journel 1989).

Η πρακτική εφαρμογή των μεθόδων Kriging βασίζεται σε ορισμένες παραδοχές.

1. Υποθέτουμε ότι το τυχαίο πεδίο είναι δυνατό να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες. Η πρώτη εκφράζει την τάση, δηλαδή μια αργά μεταβαλλόμενη εξάρτηση, ή μια περιοδική μεταβολή και η δεύτερη την διακύμανση του πεδίου γύρω από την τάση.
2. Υποθέτουμε ότι η διακύμανση περιγράφεται από ένα στατιστικά ομοιογενές πεδίο μηδενικής μέσης τιμής.
3. Μια εκτίμηση που βασίζεται στην ελαχιστοποίηση της διασποράς του σφάλματος είναι ακριβής, αν η συνάρτηση κατανομής πιθανότητας είναι συμμετρική και κατά προτίμηση Γκαουσιανή.

Οι παραδοχές (1) και (2) συνοψίζοντας με τη βοήθεια των παρακάτω εξισώσεων:

$$X(s) = m_{\chi}(s) + \chi(s), \quad s \in \Omega \quad (3.13)$$

$$E[X(s)] = m_{\chi}(s) \quad (3.14)$$

$$E[\chi(s)] = 0 \quad (3.15)$$

$$E[\chi(s+r)\chi(s)] = c_{\chi}(r) \quad (3.16)$$

**Κανονικό Kriging:** Στο κανονικό Kriging, όπως προαναφέρθηκε, έχουμε μια άγνωστη σταθερή μέση τιμή. Χρησιμοποιώντας την βασική εξίσωση του Kriging, η εκτίμηση με τη μέθοδο του κανονικού Kriging δίνεται από τις εξής εξισώσεις:

$$\hat{X}(u) = \sum_{a=1}^{n(u)} \lambda_a X(s_a) \quad (3.17)$$

$$\sum_{a=1}^{n(u)} \lambda_a = 1 \quad (3.18)$$

Η δεύτερη εξίσωση εκφράζει την συνθήκη αμεροληψίας. Η διακύμανση εφαρμόζεται με τη βοήθεια της εξίσωσης  $\chi(s) = X(s) - m_{\chi}(s)$ , όπου το  $m_{\chi}(s)$  είναι σταθερό μέσα σε κάθε γειτονιά. Στην συνέχεια πρέπει να υπολογιστεί το ελάχιστο σφάλμα με τον περιορισμό που επιβάλλει η συνθήκη αμεροληψίας στις τιμές των βαρών. Επομένως, χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος των συντελεστών Lagrange. Η διασπορά του σφάλματος υπολογίζεται σε αυτή την περίπτωση ως εξής:

$$\sigma_E^2(u) = Var[X(u)] + \sum_{a=1}^{n(u)} \sum_{\beta=1}^{n(u)} \lambda_a \lambda_\beta E[\chi(s_a) \chi(s_\beta)] - 2 \sum_{a=1}^{n(u)} \lambda_a E[\chi(s_a) \chi(u)] + 2\mu \sum_{\beta=1}^{n(u)} \lambda_\alpha - 1) \quad (3.19)$$

Η σταθερά  $2\mu$  είναι ο συντελεστής Lagrange για την συνθήκη αμεροληψίας.

Κάνοντας χρήση της συνάρτησης συνδιασποράς η παραπάνω σχέση εκφράζεται ως εξής:

$$\sigma_E^2(u) = Var[X(u)] + \sum_{a=1}^{n(u)} \sum_{\beta=1}^{n(u)} \lambda_a \lambda_\beta c_\chi(s_a, s_\beta) - 2 \sum_{a=1}^{n(u)} \lambda_a c_\chi(s_a, u) + 2\mu \sum_{\beta=1}^{n(u)} (\lambda_\alpha - 1) \quad (3.20)$$

Για τον υπολογισμό του ελαχίστου σφάλματος εκτίμησης, απαιτείται ο μηδενισμός των παραγώγων του σφάλματος ως προς τα βάρη και την παράμετρο  $\mu$  και έχουμε:

$$\frac{\partial \sigma_E^2(u)}{\partial \lambda_\alpha} = 0, \quad \alpha = 1, \dots, n(u) \quad (3.21)$$

$$\frac{\partial \sigma_E^2(u)}{\partial \mu} = 0 \quad (3.22)$$

Αυτές οι συνθήκες οδηγούν στις επόμενες εξισώσεις για τα γραμμικά βάρη,

$$\sum_{\beta=1}^{n(u)} \lambda_\beta c_\chi(s_a - s_\beta) + \mu = c_\chi(s_a - u), \quad a = 1, \dots, n(u) \quad (3.23)$$

$$\sum_{a=1}^{n(u)} \lambda_\alpha = 1 \quad (3.24)$$

Το μέσο παραγωγικό σφάλμα εκτίμησης δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση (Goovaerts 1997; Journel 1989).

$$\sigma_E^2(u) = \sigma_\chi^2 - \sum_{a=1}^{n(u)} \lambda_a c_\chi(u, s_a) - \mu \quad (3.25)$$

### 3.1.5. Χωρική εκτίμηση Cokriging

Βοηθητικές πληροφορίες μπορούν να ενσωματωθούν στη διαδικασία παρεμβολής χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Cokriging, η οποία χρησιμοποιεί δευτερεύουσες μεταβλητές στη δομή συνδιασποράς. Η χρήση των βοηθητικών μεταβλητών γενικά βελτιώνει την ακρίβεια της εκτίμησης Kriging (Goovaerts 1997). Το Cokriging ασχολείται με την εκτίμηση της χωρικής κατανομής μιας μεταβλητής (predictand) αλλά λαμβάνει υπόψη την δευτερεύουσες μεταβλητές (covariables), οι οποίες είναι στατιστικά σημαντικά συσχετισμένες με την κύρια μεταβλητή (Stein et al., 1988). Ως εκ τούτου, αναμένεται το εκτιμώμενο σφάλμα να είναι μειωμένο, εφόσον χρησιμοποιούνται περισσότερες πληροφορίες για την εκτίμηση της κύριας μεταβλητής (Tsiknia et al., 2014). Το Cokriging αποτελεί δηλαδή έναν σταθμισμένο μέσο όρο της κύριας μεταβλητής και των συσχετισμένων δευτερευουσών μεταβλητών. Η χωρική συσχέτιση μεταξύ δύο ή περισσότερων μεταβλητών για κάθε σημείο της δειγματοληψίας εκφράζεται μέσω του διασταυρωμένου ημιβαριογράμματος (cross-semi-variogram) (Kitanidis, 1997). Στην παρούσα διπλωματική έχει εφαρμοστεί το υψόμετρο ως βοηθητική μεταβλητή.

Το κύριο μειονέκτημα της Cokriging είναι ο προσδιορισμός του πειραματικού ημιβαριογράμματος. Το Cokriging γίνεται επίσης δύσκολο και χρονοβόρο αν εμπλέκονται πολλές δευτερεύουσες μεταβλητές (Deutsch and Journel 1992). Το διασταυρωμένο ημιβαριόγραμμα ορίζει την κοινή χωρική εξάρτηση μεταξύ των συσχετιζόμενων μεταβλητών. Το θεωρητικό μοντέλο ημιβαριογράμματος το οποίο

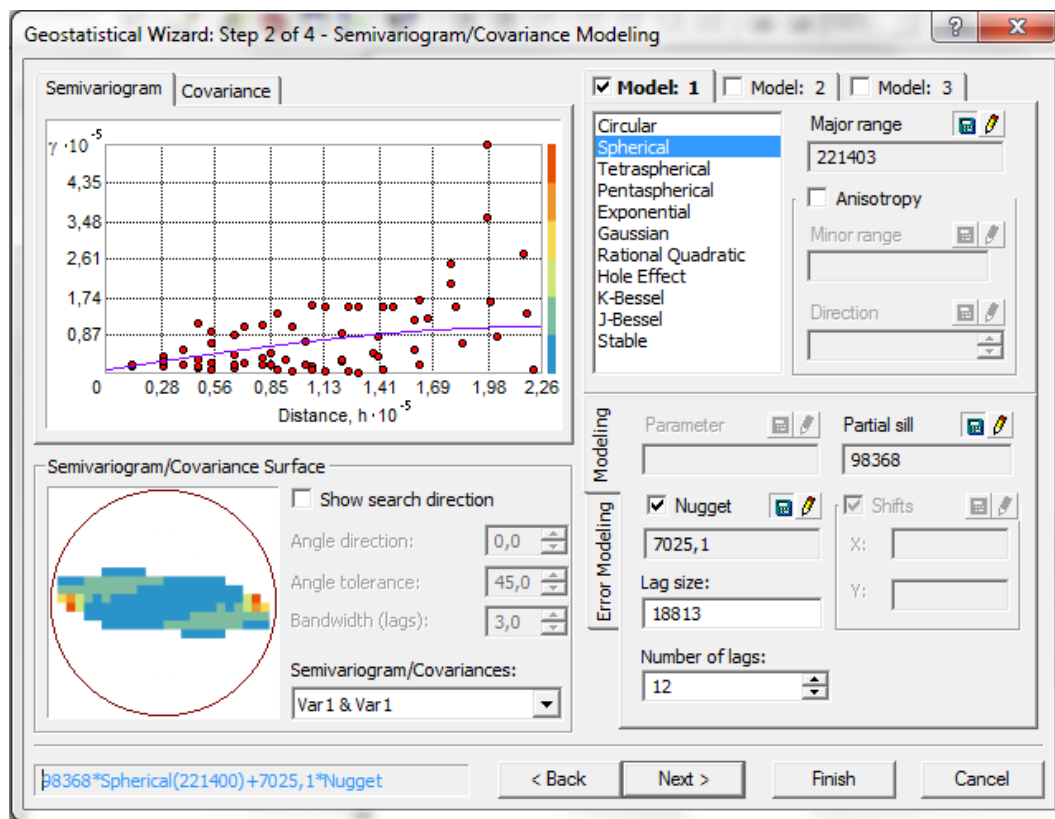
προσαρμόζεται στο πειραματικό ημιβαριόγραμμα είναι το κύριο χαρακτηριστικό της παρεμβολής Cokriging.

Στην παρούσα εργασία, για την εφαρμογή των μεθόδων παρεμβολής και για τη δημιουργία χαρτών εκτίμησης της χωρικής μεταβολής της βροχόπτωσης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ARCGIS και συγκεκριμένα το εργαλείο Geostatistical Analyst. Το βέλτιστο θεωρητικό μοντέλο ημιβαριογράμματος επιλέχθηκε χρησιμοποιώντας τα παρεχόμενα μέτρα εκτίμησης σφάλματος.



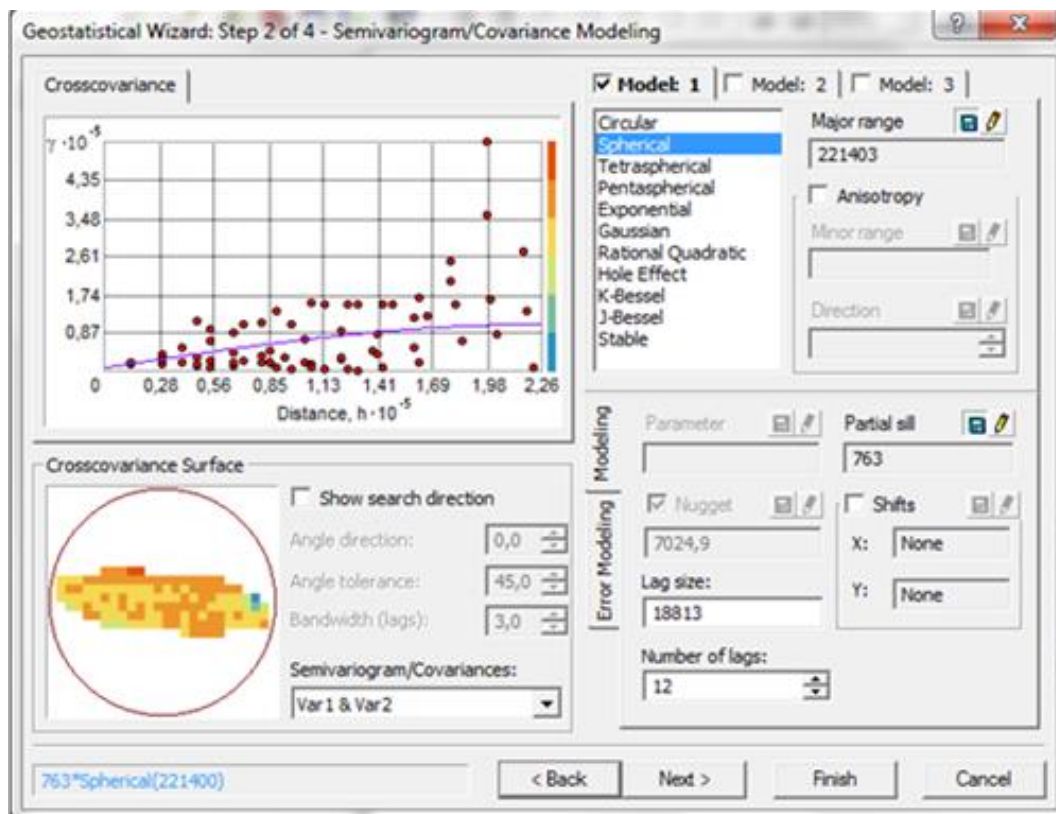
### 3.2. Εφαρμογή και Αποτελέσματα

Η πρώτη εφαρμογή της μεθόδου Kriging για την περιοχή έρευνας έγινε με την πιο απλή εκδοχή της μεθόδου, δηλαδή την μέθοδο Ordinary Kriging, επιλέγοντας τα χαρακτηριστικά που προσδιορίζονται από το Geostatistical Analyst tool (Εικόνα 3). Τα ημιβαριογράμματα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τέσσερα: το σφαιρικό, το εκθετικό, το γκαουσιανό και το K-bessel.



Εικόνα 3: Χαρακτηριστικά προσδιορισμού ημιβαριογράμματος για τη μέθοδο Ordinary Kriging, που προέκυψαν από την παρούσα εργασία

Η μέθοδος Cokriging όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, παρουσιάζει ενδιαφέρον για την γεωστατιστική μελέτη των υδρολογικών μεταβλητών, καθώς χρησιμοποιεί και μια δεύτερη παράμετρο για τους υπολογισμούς, που στην περίπτωση της παρούσας εργασίας είναι το υψόμετρο. Το υψόμετρο παρουσιάζει σημαντική συσχέτιση με τη στάθμη της βροχόπτωσης και είναι γνωστό για το σύνολο της περιοχής έρευνας. Η εφαρμογή της μεθόδου Cokriging πραγματοποιήθηκε επιλέγοντας τα χαρακτηριστικά που προσδιορίζονται από το Geostatistical Analyst tool (Εικόνα 4). Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις τύποι ημιβαριογραμμάτων: το σφαιρικό, το εκθετικό, το γκαουσιανό και το K-Bessel.



Εικόνα 4: Χαρακτηριστικά προσδιορισμού ημιβαριογράμματος για τη μέθοδο Ordinary Cokriging, που προέκυψαν από την παρούσα εργασία

### 3.2.1. Γεωστατιστική Ανάλυση με τις μεθόδους Ordinary Kriging και Cokriging

Η παρούσα παράγραφος παρουσιάζει τα αποτελέσματα της γεωστατιστικής ανάλυσης της βροχόπτωσης στο νησί της Κρήτης χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία Ordinary Kriging και Cokriging. Στα πλαίσια της χωρικής απεικόνισης της μεταβολής των βροχοπτώσεων μελετώνται εκτός του πιο ξηρού και πιο υγρού υδρολογικού έτους και το έτος με τα πιο πρόσφατα πλήρη δεδομένα βροχόπτωσης (2010-2011).

Τα σφάλματα εκτίμησης των μεθόδων περιέχονται στους παρακάτω πίνακες 4, 5 και 6. Πιο αναλυτικά, ο Πίνακας 4 παρέχει πληροφορίες για τα σφάλματα εκτίμησης των 2 μεθόδων, που αφορούν το υδρολογικό έτος 1989-1990. Και στις 3 περιόδους μελέτης (συνολική, υγρή, ξηρή) του έτους 1989-1990, είναι εμφανές ότι η μέθοδος Cokriging υπερτερεί σε ακρίβεια. Αυτό ήταν αναμενόμενο, καθώς λαμβάνεται υπόψιν και ο παράγοντας του υψομέτρου ο οποίος έχει σημαντική συσχέτιση με το ύψος της στάθμης της βροχόπτωσης. Εξετάζοντας τις διαφορές στα εκτιμώμενα σφάλματα των δύο μεθόδων, διαπιστώνεται ότι δεν ξεπερνούν τα 10 χιλιοστά.

Πίνακας 4: Πίνακας σφαλμάτων για τις μεθόδους Kriging και Cokriging για το έτος 1989-1990

Περίοδος μελέτης	Μέθοδος Kriging			Μέθοδος Cokriging		
	Επιλεγόμενη μέθοδος	Μέσο απόλυτο σφάλμα (mm)	Μέσο ποσοστιαίο σφάλμα (%)	Επιλεγόμενη μέθοδος	Μέσο απόλυτο σφάλμα (mm)	Μέσο ποσοστιαίο σφάλμα (%)
1989 Συνολικά	Spherical	125,5	23,0	Exponential	116,1	21,6
1989 Υγρή Περίοδος	Spherical	100,5	23,4	Exponential	95,4	20,9
1989 Ξηρή Περίοδος	Gaussian	28,6	21,0	Gaussian	25,1	19,6

Όσον αφορά τα σφάλματα εκτίμησης των μεθόδων, τα οποία απεικονίζονται στον Πίνακα 5 που αφορά το υδρολογικό έτος 2002-2003, παρατηρείται ότι η μέθοδος Cokriging έχει τα μικρότερα σφάλματα και για τις τρεις περιόδους. Όπως και για το προηγούμενο υδρολογικό έτος, ήταν αναμενόμενο η μέθοδος Cokriging να έχει μικρότερο σφάλμα εκτίμησης από τη μέθοδο Ordinary Kriging, λόγω του ότι λαμβάνεται υπόψη ο παράγοντας του υψομέτρου. Στην περίπτωση αυτή όμως, οι διαφορές μεταξύ των σφαλμάτων των δύο μεθόδων είναι μεγαλύτερες από ότι για το έτος 1989-1990 και κυμαίνονται από τα 9,4 χιλιοστά έως τα 20,4 χιλιοστά.

Πίνακας 5: Πίνακας σφαλμάτων για τις μεθόδους Kriging και Cokriging για το έτος 2002-2003

Περίοδος μελέτης	Μέθοδος Kriging			Μέθοδος Cokriging		
	Επιλεγόμενη μέθοδος	Μέσο απόλυτο σφάλμα (mm)	Μέσο ποσοστιαίο σφάλμα (%)	Επιλεγόμενη μέθοδος	Μέσο απόλυτο σφάλμα (mm)	Μέσο ποσοστιαίο σφάλμα (%)
2002 Συνολικά	Exponential	285,4	25,4	Spherical	265	20,4
2002 Υγρή Περίοδος	Exponential	254,3	23,7	Spherical	244	19,0
2002 Ξηρή Περίοδος	Gaussian	50,2	22,5	K-Bessel	40,8	17,0

Από τον Πίνακα 6, παρατηρείται ότι τα εκτιμώμενα σφάλματα της μεθόδου Cokriging για το υδρολογικό έτος 2010-2011 είναι και στην περίπτωση αυτή μικρότερα από ότι της μεθόδου Kriging, όπως αναμενόταν. Οι διαφορές στα σφάλματα των δύο μεθόδων είναι σημαντική, όπως ήταν και για το έτος 2002-2003 και κυμαίνονται από 6,7 χιλιοστά έως 19,5 χιλιοστά.

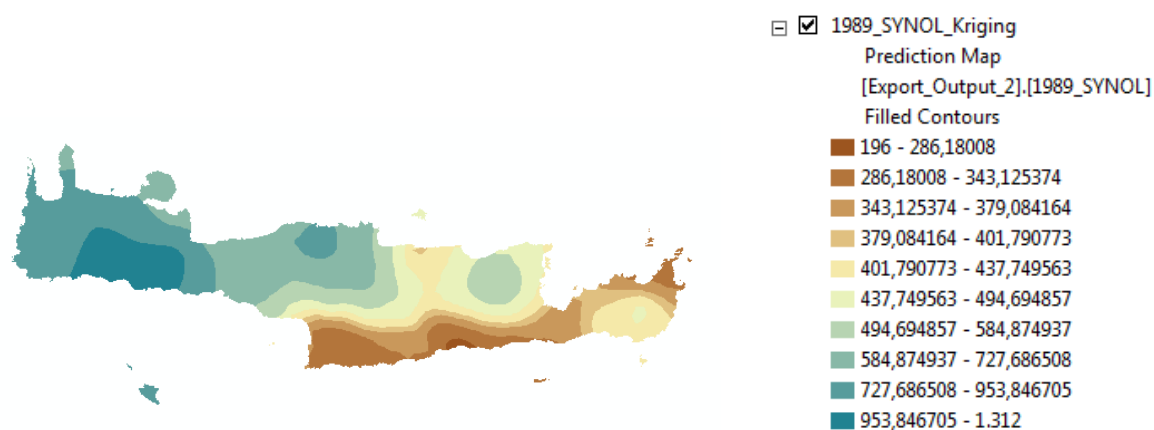
Πίνακας 6: Πίνακας σφαλμάτων για τις μεθόδους Kriging και Cokriging για το έτος 2010-2011

Περίοδος μελέτης	Μέθοδος Kriging			Μέθοδος Cokriging		
	Επιλεγόμενη μέθοδος	Μέσο απόλυτο σφάλμα (mm)	Μέσο ποσοστιαίο σφάλμα (%)	Επιλεγόμενη μέθοδος	Μέσο απόλυτο σφάλμα (mm)	Μέσο ποσοστιαίο σφάλμα (%)
2010 Συνολικά	Spherical	164,0	22,1	Gaussian	144,5	19,3
2010 Υγρή Περίοδος	Gaussian	134,8	20,5	K-Bessel	115,8	18,6
2010 Ξηρή Περίοδος	Gaussian	60,9	22,2	K-Bessel	54,2	20,0

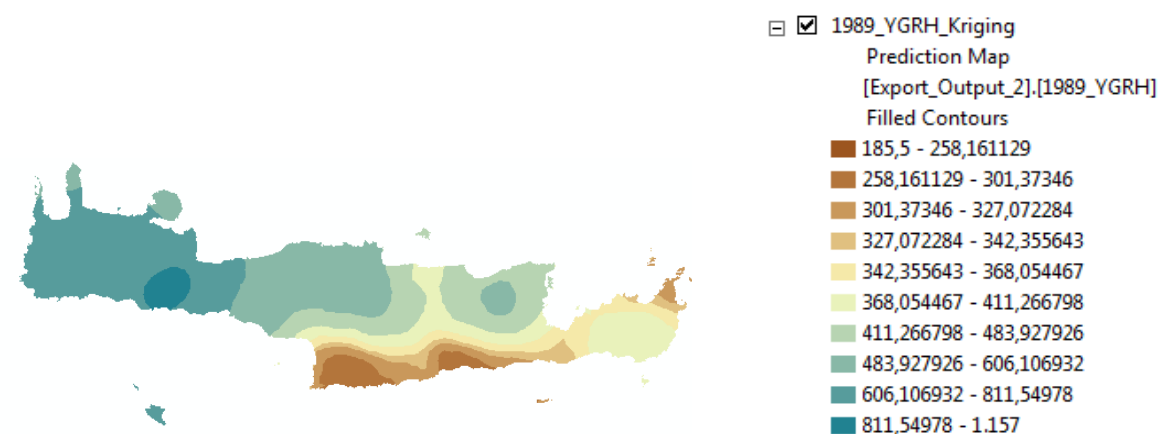
Όσον αφορά την χρήση των θεωρητικών μοντέλων στον προσδιορισμό του βέλτιστου ημιβαριογράμματος, από τους Πίνακες 4, 5 και 6 συμπεραίνεται ότι το βέλτιστο μοντέλο είναι το γκαουσιανό, αφού εμφανίζει το μικρότερο σφάλμα εκτίμησης τις περισσότερες φορές σε σύγκριση με τα υπόλοιπα μοντέλα. Ικανοποιητικά αποτελέσματα έχει και το σφαιρικό μοντέλο, ενώ στη συνέχεια ακολουθεί το εκθετικό μοντέλο.

Στη συνέχεια παρατίθενται οι χάρτες απεικόνισης της βροχόπτωσης με τις μεθόδους Ordinary Kriging (Σχήματα 19 έως 21) και Cokriging (Σχήματα 22 έως 24) για τα τρία υδρολογικά έτη μελέτης.

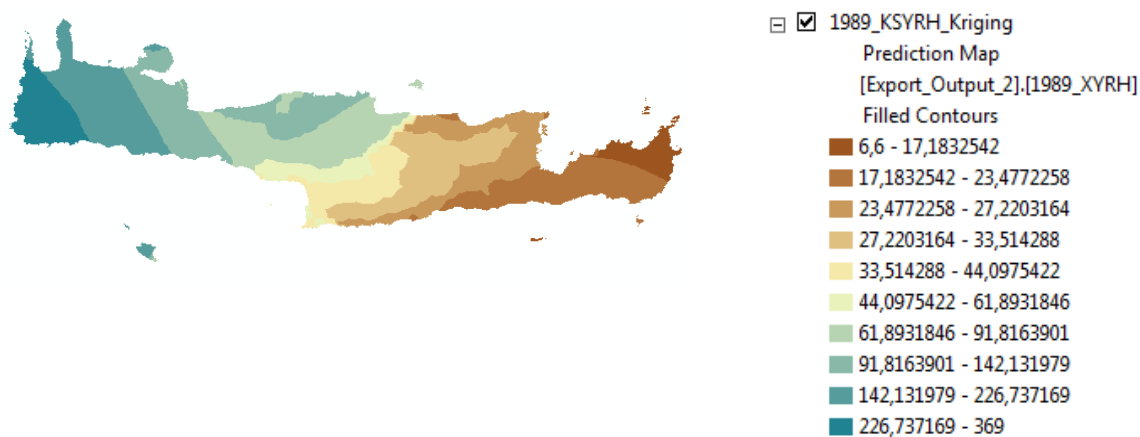
Ο σχηματισμός των χαρτών που περιέχονται στα Σχήματα 19α, β και γ που αφορούν το υδρολογικό έτος 1989-1990, πραγματοποιήθηκε με χρήση του βέλτιστου θεωρητικού μοντέλου ημιβαριογράμματος που προσδιορίστηκε για κάθε περίπτωση (Πίνακας 4).



Σχήμα 19α: Χάρτης της Κρήτης όπου απεικονίζεται η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης(mm) που προέκυψε με τη μέθοδο Ordinary Kriging για την περίοδο 1989-1990

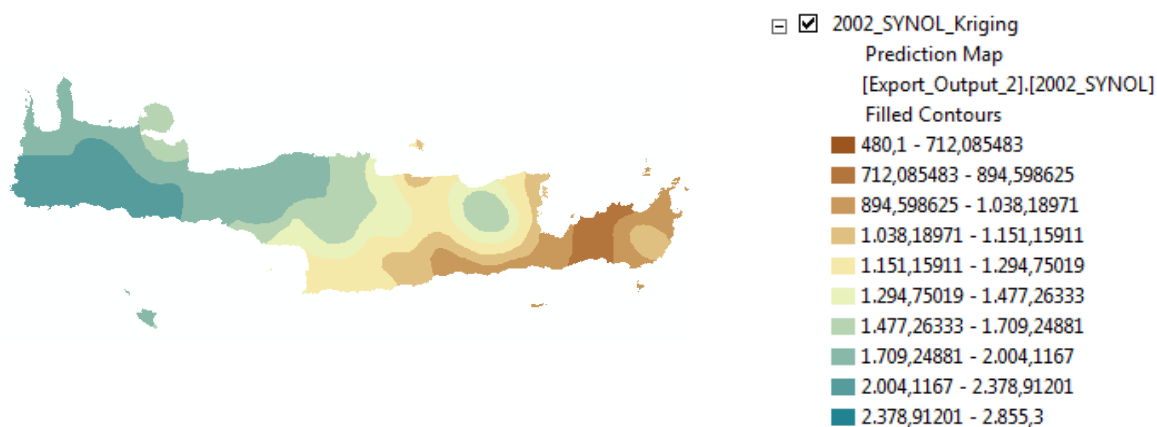


Σχήμα 19β: Χάρτης της Κρήτης όπου απεικονίζεται η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης(mm) που προέκυψε με τη μέθοδο Ordinary Kriging για την υγρή περίοδο του έτους 1989-1990

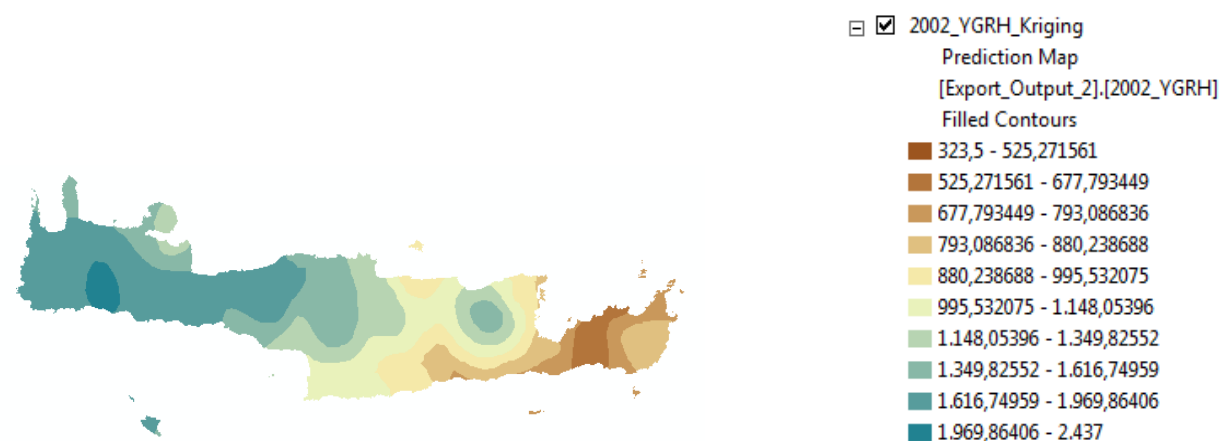


Σχήμα 19γ: Χάρτης της Κρήτης όπου απεικονίζεται η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης(mm) που προέκυψε με τη μέθοδο Ordinary Kriging για την ξηρή περίοδο του έτους 1989-1990

Στους χάρτες 20α, β και γ απεικονίζεται η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης στο νησί της Κρήτης για το υδρολογικό έτος 2002-2003 συνολικά, για την υγρή περίοδο του έτους αυτού και για την ξηρή περίοδο. Οι χάρτες κατασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας τα αντίστοιχα βέλτιστα θεωρητικά μοντέλα ημιβαριογράμματος (Πίνακας 5). Ωστόσο, κατά την ξηρή περίοδο του υδρολογικού έτους 2002-2003, το γκαουσιανό μοντέλο είναι η βέλτιστη επιλογή, αλλά με μικρή διαφορά από τα υπόλοιπα μοντέλα, της τάξης των 0,6 χιλιοστών.

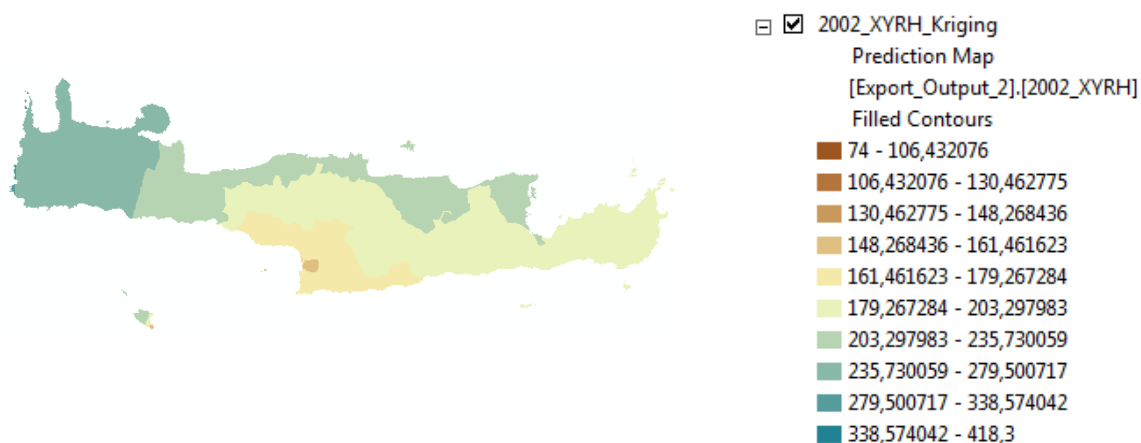


Σχήμα 20α: Χάρτης της Κρήτης όπου απεικονίζεται η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης(mm) που προέκυψε με τη μέθοδο Ordinary Kriging για την περίοδο 2002-2003



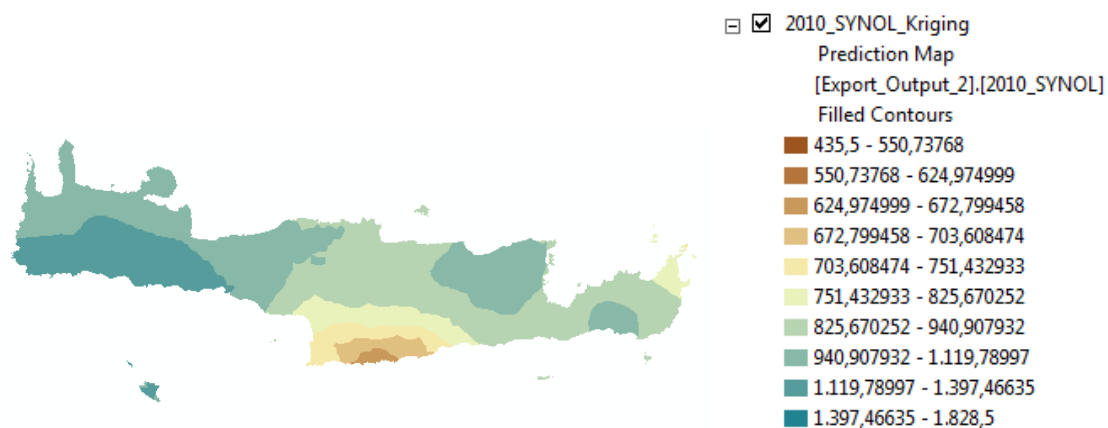
Σχήμα 20β: Χάρτης της Κρήτης όπου απεικονίζεται η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης(mm) που προέκυψε με τη μέθοδο Ordinary Kriging για την υγρή περίοδο του έτους 2002-2003



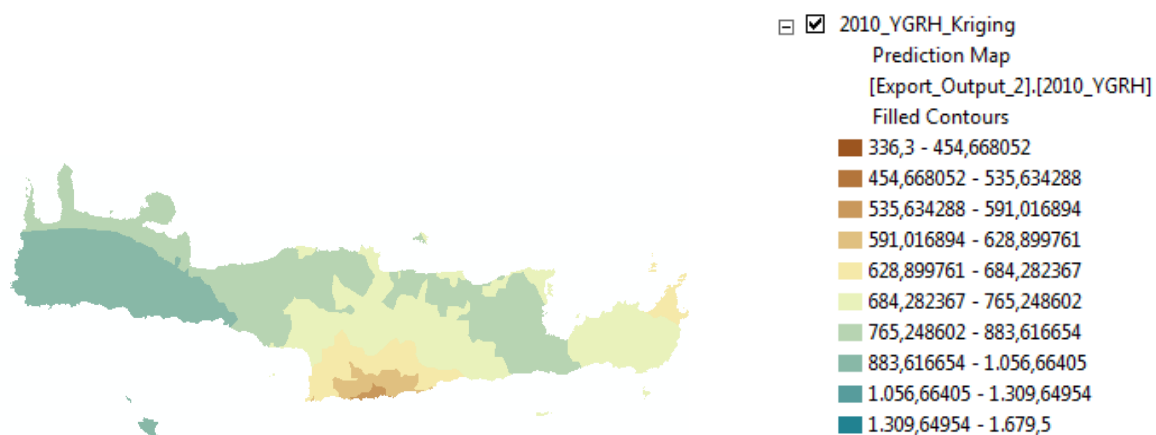


Σχήμα 20γ: Χάρτης της Κρήτης όπου απεικονίζεται η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης(mm) που προέκυψε με τη μέθοδο Ordinary Kriging για την ξηρή περίοδο του έτους 2002-2003

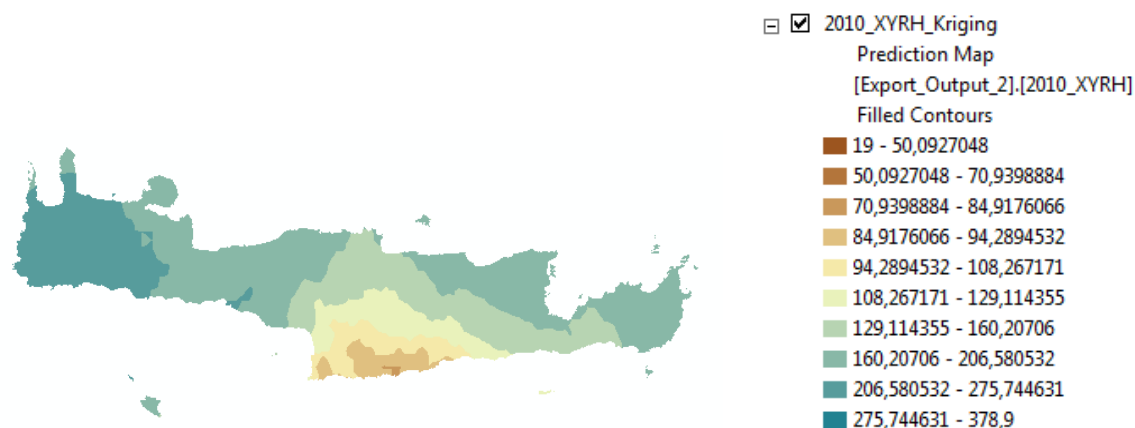
Τα Σχήματα 21α, β και γ παρουσιάζουν τη χωρική κατανομή της βροχόπτωσης για το υδρολογικό έτος 2010-2011 και κατασκευάστηκαν βάσει του βέλτιστου θεωρητικού μοντέλου ημιβαριογράμματος (Πίνακας 6). Για την κατασκευή του χάρτη που αφορά τη συνολική ετήσια βροχόπτωση του υδρολογικού έτους χρησιμοποιήθηκε το σφαιρικό μοντέλο, ενώ για την υγρή και ξηρή περίοδο χρησιμοποιήθηκε το γκαουσιανό μοντέλο, καθώς παρείχαν τα βέλτιστα αποτελέσματα. Ωστόσο, το εκτιμώμενο σφάλμα των μοντέλων αυτών παρουσιάζει μικρή διαφορά συγκρινόμενο με τα σφάλματα εκτίμησης των υπόλοιπων τριών μοντέλων που εξετάστηκαν.



Σχήμα 21α: Χάρτης της Κρήτης όπου απεικονίζεται η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης(mm) που προέκυψε με τη μέθοδο Ordinary Kriging για την περίοδο 2010-2011



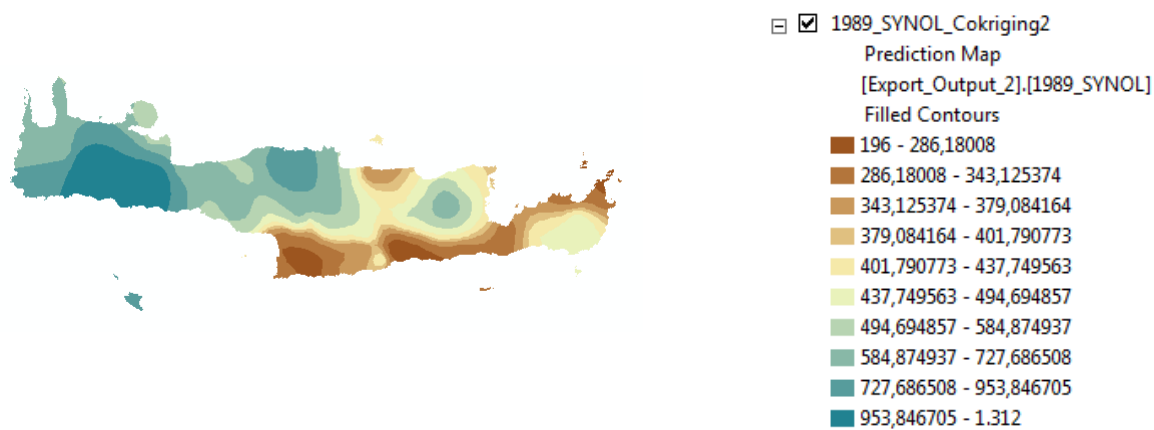
Σχήμα 21β: Χάρτης της Κρήτης όπου απεικονίζεται η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης(mm) που προέκυψε με τη μέθοδο Ordinary Kriging για την υγρή περίοδο του έτους 2010-2011



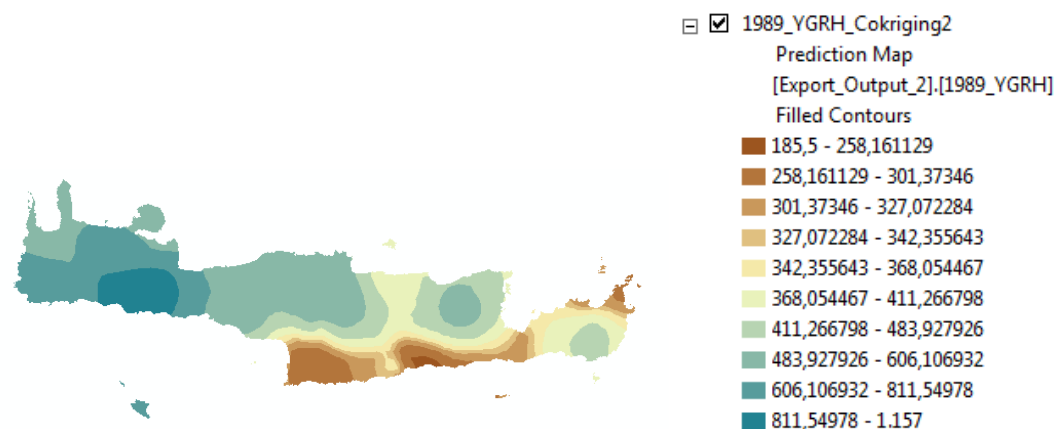
Σχήμα 21γ: Χάρτης της Κρήτης όπου απεικονίζεται η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης(mm) που προέκυψε με τη μέθοδο Ordinary Kriging για την ξηρή περίοδο του έτους 2010-2011

Οι χάρτες 22α, β και γ περιλαμβάνουν την χωρική κατανομή της βροχόπτωσης στο νησί της Κρήτης για το υδρολογικό έτος 1989-1990 χρησιμοποιώντας την μεθοδολογία Cokriging. Σε κάθε περίπτωση επιλέχθηκε το θεωρητικό μοντέλο ημιβαριογράμματος που παρέχει το μικρότερο σφάλμα εκτίμησης (Πίνακας 4). Για την ξηρή περίοδο ωστόσο, τα μοντέλα που εξετάστηκαν έδωσαν παρόμοιο σφάλμα εκτίμησης, με αυτά του γκαουσιανού να υπερτερούν κατά μόλις 0,2 χιλιοστά.

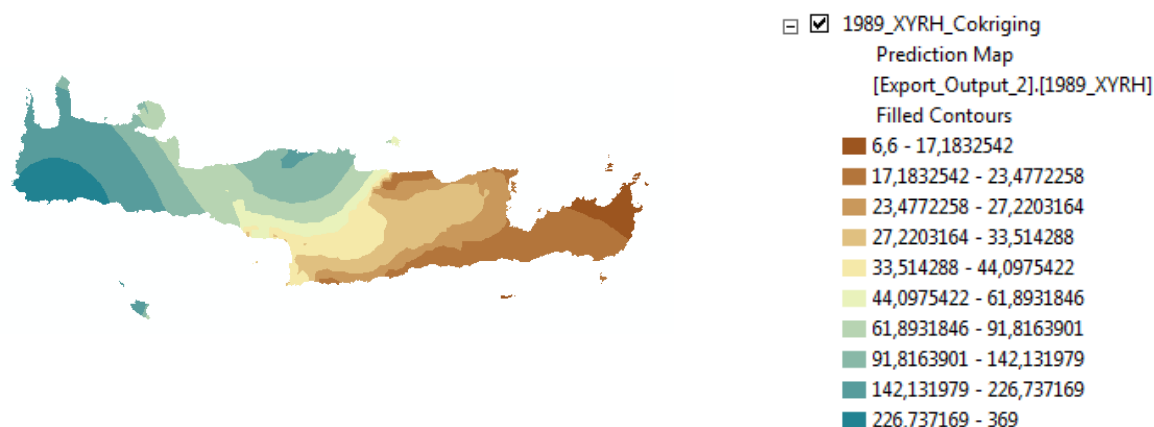
Συγκρίνοντας τα Σχήματα 19α, β και γ που έχουν κατασκευαστεί με τη μέθοδο Ordinary Kriging με τα 22α, β και γ που έχουν κατασκευαστεί με τη μέθοδο Cokriging, παρατηρείται ότι παρέχουν ποιοτικά παρόμοια πληροφορία. Πιο συγκεκριμένα, είναι εμφανές ότι και στις 3 περιόδους (συνολική, υγρή, ξηρή) του έτους 1989-1990 κατά τις οποίες εφαρμόστηκαν οι δύο μέθοδοι, ποιοτικά τα αποτελέσματα είναι παρόμοια. Οι διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται οφείλονται στο ότι η μέθοδος Cokriging οδηγεί σε πιο ακριβή αποτελέσματα χρησιμοποιώντας ως βοηθητική πληροφορία το υψόμετρο, για αυτό με την μέθοδο αυτή παρατηρούνται περισσότερες ισοδυναμικές καμπύλες. Πιο αναλυτικά, για την συνολική και για την υγρή περίοδο παρατηρούνται χαρακτηριστικές διαφοροποιήσεις σε 4 τμήματα του νησιού. Στο νομό Χανίων στα Λευκά Όρη, έπειτα στο νομό Ρεθύμνου στο όρος Βρύσινα και στο νομό Λασιθίου στο όρος Δίκη και στο φαράγγι της Ζάκρου.



Σχήμα 22α: Χάρτης της Κρήτης όπου απεικονίζεται η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης(mm) που προέκυψε με τη μέθοδο Cokriging για την περίοδο 1989-1990



Σχήμα 22β: Χάρτης της Κρήτης όπου απεικονίζεται η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης(mm) που προέκυψε με τη μέθοδο Cokriging για την υγρή περίοδο του έτους 1989-1990

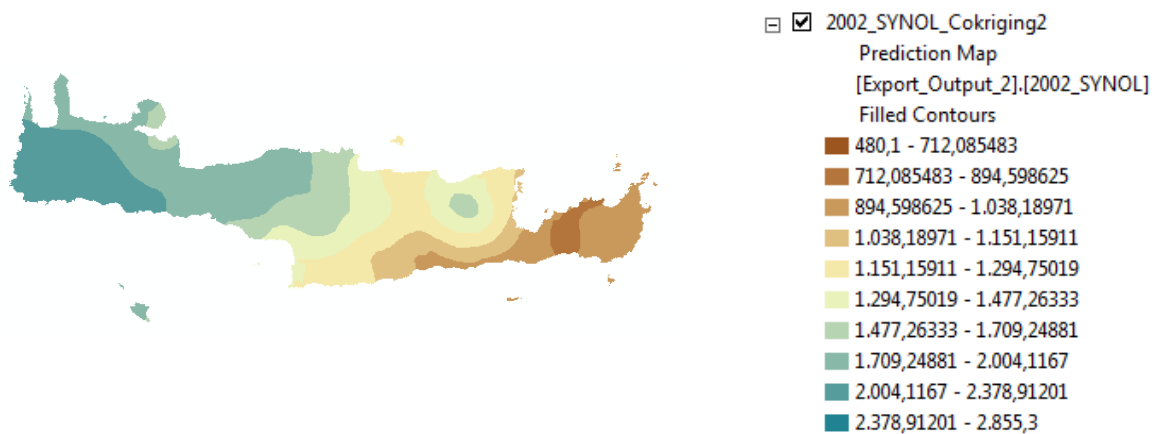


Σχήμα 22γ: Χάρτης της Κρήτης όπου απεικονίζεται η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης(mm) που προέκυψε με τη μέθοδο Cokriging για την ξηρή περίοδο του έτους 1989-1990

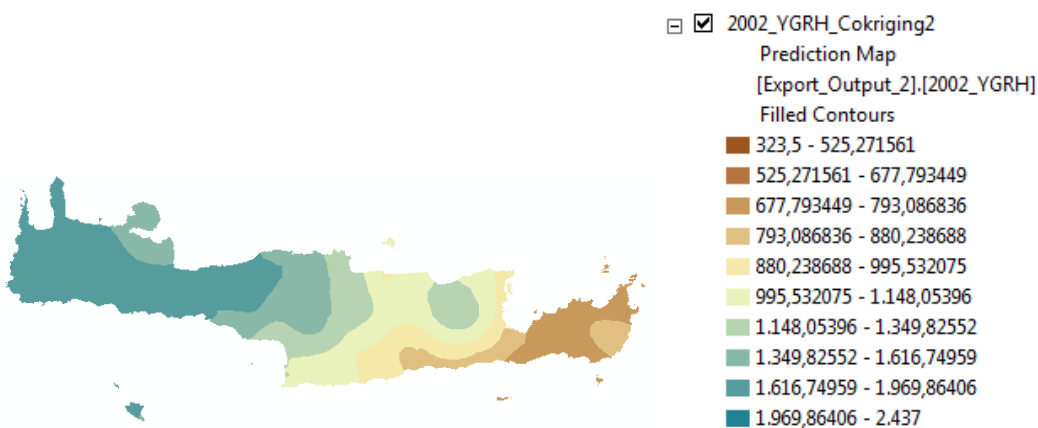
Παρακάτω παρατίθενται τα Σχήματα 23α, β και γ που απεικονίζουν την χωρική κατανομή της βροχόπτωσης που προέκυψε με τη μέθοδο Cokriging για το υδρολογικό έτος 2002-2003, επιλέγοντας για κάθε περίπτωση το βέλτιστο θεωρητικό μοντέλο ημιβαριογράμματος (Πίνακας 5). Αξίζει να σημειωθεί ότι ο βροχομετρικός χάρτης που αφορά την ξηρή περίοδο δημιουργήθηκε χρησιμοποιώντας το μοντέλο K-Bessel, ωστόσο η διαφορά των σφαλμάτων των τεσσάρων θεωρητικών μοντέλων στην περίπτωση αυτή είναι επίσης πολύ μικρή.

Για το υδρολογικό έτος 2002-2003 οι διαφορές στους χάρτες που προέκυψαν από τις δύο μεθόδους (Σχήματα 20α, β, γ και Σχήματα 23α, β, γ) είναι ακόμα λιγότερες από ότι για το έτος 1989-1990. Παρατηρείται ότι η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης παρέχει αρκετά κοινά χαρακτηριστικά κατά την εφαρμογή των μεθόδων Kriging και Cokriging. Για την συνολική περίοδο μελέτης και για την υγρή περίοδο του υδρολογικού έτους 2002-2003 οι διαφοροποιήσεις στους χάρτες χωρικής απεικόνισης των δύο μεθόδων εντοπίζονται σε τρεις περιοχές του νησιού όπου υπάρχουν όρη. Στο νομό των Χανίων στην περιοχή που εκτείνονται τα Λευκά Όρη παρατηρείται ότι οι ισοδυναμικές καμπύλες της μεθόδου Cokriging είναι πιο τραχιές σε σύγκριση με αυτές της μεθόδου Kriging. Επίσης συγκρίνοντας τις δύο μεθόδους παρατηρούνται αλλαγές στο νομό Λασιθίου στο όρος Δίκη καθώς και στο φαράγγι της Ζάκρου, όπου οι ισοδυναμικές καμπύλες της μεθόδου Cokriging

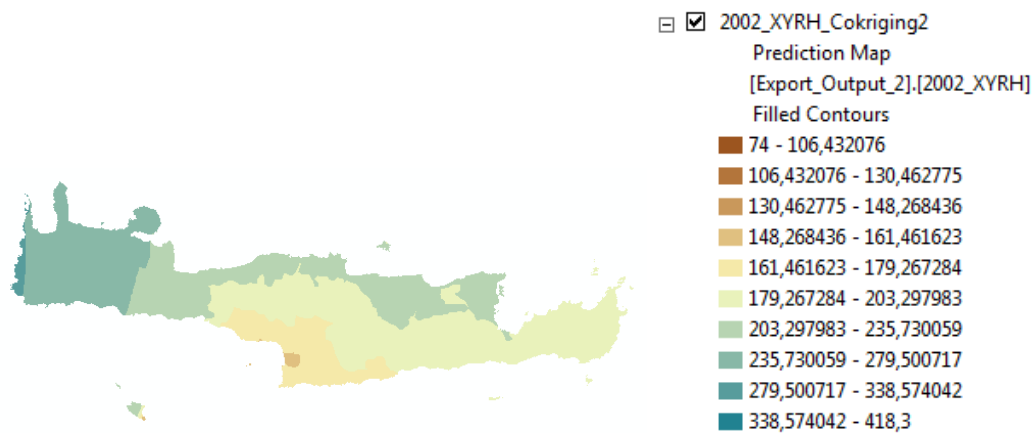
είναι πιο πολλές. Η εφαρμογή των δύο μεθόδων κατά την ξηρή περίοδο του υδρολογικού έτους μελέτης οδηγεί στο σχηματισμό δύο χαρτών με κοινά χαρακτηριστικά, με μόνη μικρή διαφοροποίηση τους στο δυτικότερο μέρος του νομού Χανίων και στο όρος Δίκτη του νομού Λασιθίου.



Σχήμα 23α: Χάρτης της Κρήτης όπου απεικονίζεται η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης(mm) που προέκυψε με τη μέθοδο Cokriging για την περίοδο 2002-2003



Σχήμα 23β: Χάρτης της Κρήτης όπου απεικονίζεται η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης(mm) που προέκυψε με τη μέθοδο Cokriging για την υγρή περίοδο του έτους 2002-2003



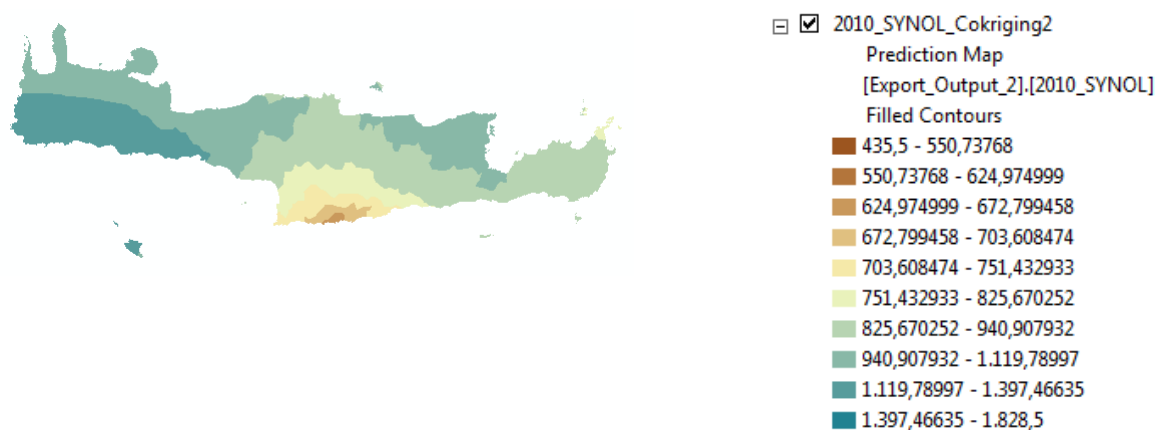
Σχήμα 23γ: Χάρτης της Κρήτης όπου απεικονίζεται η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης(mm) που προέκυψε με τη μέθοδο Cokriging για την ξηρή περίοδο του έτους 2002-2003

Τα Σχήματα 24α, β και γ απεικονίζουν την χωρική κατανομή της βροχόπτωσης όπως προκύπτει με την μέθοδο Cokriging για το υδρολογικό έτος 2010-2011. Ο χάρτης 24α κατασκευάστηκε βάσει του γκαουσιανού μοντέλου ημιβαριογράμματος, ενώ οι χάρτες 24β και 24γ κατασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας το μοντέλο K-Bessel (Πίνακας 6). Ωστόσο, τα σφάλματα εκτίμησης των τεσσάρων μοντέλων ημιβαριογράμματος που εξετάστηκαν και για τις τρεις περιπτώσεις χαρακτηρίζονται από μικρές διαφορές.

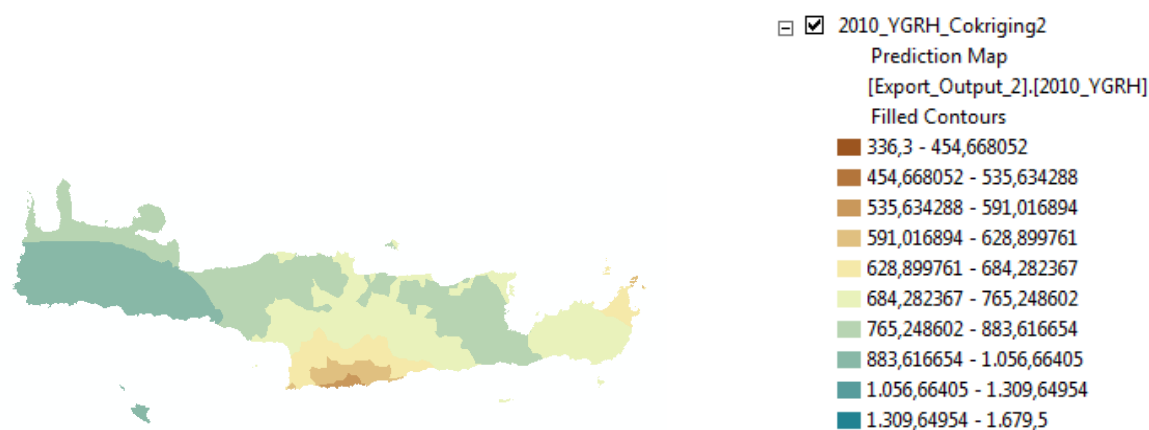
Συγκρίνοντας τους παραγόμενους χάρτες με τις δύο μεθόδους παρατηρούνται ομοιότητες και διαφοροποιήσεις οι οποίες σχολιάζονται παρακάτω. Οι χάρτες 21α και β συγκρινόμενοι με τους χάρτες 24α και β παρουσιάζουν παρόμοια ποιοτικά πληροφoρία. Πιο συγκεκριμένα, για την συνολική περίοδο του υδρολογικού έτους 2010-2011 παρατηρείται ότι η εφαρμογή των μεθόδων Kriging και Cokriging οδηγούν σε χωρική κατανομή βροχόπτωσης με κοινά χαρακτηριστικά, αλλά η διαφοροποίηση των μεθόδων έγκειται στο ότι οι καμπύλες στάθμης βροχόπτωσης για το Cokriging εμφανίζονται πιο τραχιές. Για την υγρή περίοδο ωστόσο του ίδιου έτους, οι χάρτες 21β και 24β παρουσιάζουν περισσότερα κοινά χαρακτηριστικά.

Τέλος, οι χάρτες 21γ και 24γ που αφορούν την χωρική κατανομή της βροχόπτωσης κατά την ξηρή περίοδο του υδρολογικού έτους 2010-2011 δεν εμφανίζουν τόσα κοινά χαρακτηριστικά μεταξύ τους όσο οι προηγούμενοι χάρτες. Πιο συγκεκριμένα, μόνο το ανατολικό μέρος του νομού Λασιθίου φαίνεται να παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες από την εφαρμογή των δύο διαφορετικών μεθόδων. Ενώ το υπόλοιπο νησί εμφανίζει αρκετές διαφοροποιήσεις. Πιο αναλυτικά, οι σημαντικότερες διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται είναι στο νότιο τμήμα του νομού Ρεθύμνου στην περιοχή Σιβρίτου και στο βόρειο τμήμα του νομού Ηρακλείου στο όρος Γιούχτα. Επιπλέον, στον χάρτη όπου απεικονίζεται η μέθοδος Cokriging παρατηρείται ότι στο δυτικό μέρος του νησιού στο νομό Χανίων η κατανομή των ισοδυναμικών καμπυλών διαφέρει από τις αντίστοιχες του Kriging.

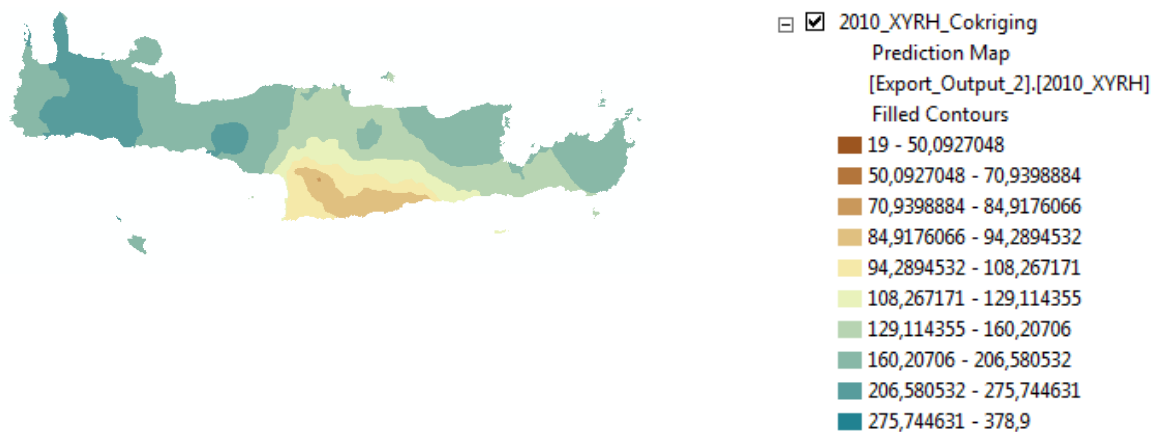




Σχήμα 24α: Χάρτης της Κρήτης όπου απεικονίζεται η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης(mm) που προέκυψε με τη μέθοδο Cokriging για την περίοδο 2010-2011



Σχήμα 24β: Χάρτης της Κρήτης όπου απεικονίζεται η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης(mm) που προέκυψε με τη μέθοδο Cokriging για την υγρή περίοδο του έτους 2010-2011



Σχήμα 24γ: Χάρτης της Κρήτης όπου απεικονίζεται η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης(mm) που προέκυψε με τη μέθοδο Cokriging για την ξηρή περίοδο του έτους 2010-2011

Οι δύο μέθοδοι μελέτης που χρησιμοποιήθηκαν έχουν παρόμοια λειτουργία και οδηγούν στην δημιουργία χαρτών με αρκετά κοινά χαρακτηριστικά. Όμως, η μέθοδος Cokriging βελτιώνει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων, αφού χρησιμοποιεί ως βοηθητική πληροφορία τη μεταβολή του υψομέτρου στην περιοχή μελέτης. Ωστόσο, υπάρχει αβεβαιότητα της χωρικής κατανομής της βροχόπτωσης και για τις δύο μεθόδους, σε περιοχές όπου δεν υπάρχουν επαρκή δεδομένα. Παρατηρώντας την κατανομή των βροχομετρικών σταθμών στην Κρήτη (Χάρτης 3) είναι εμφανές ότι η πυκνότητα τους είναι ιδιαίτερα αραιή στο νομό Χανίων και σχετικώς αραιή στο νομό Λασιθίου. Η ύπαρξη περισσότερων σταθμών στα σημεία αυτά θα βοηθούσε για μια καλύτερη απεικόνιση της χωρικής μεταβολής της βροχόπτωσης στο νησί της Κρήτης.

#### 4. Συζήτηση:

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με την στατιστική και γεωστατιστική μελέτη της βροχόπτωσης στο νησί της Κρήτης.

Από την στατιστική μελέτη των βροχοπτώσεων για την χρονική περίοδο που μελετήθηκε, επιβεβαιώθηκε η πληροφορία ότι υπάρχει ισχυρή διαβάθμιση της βροχόπτωσης από τα δυτικά προς τα ανατολικά (Σχήμα 1, 2, 3 και 4). Ο νομός των Χανίων εμφανίζεται να είναι με διαφορά ο πιο υγρός, ενώ ο πιο άνυδρος είναι ο νομός Λασιθίου. Επίσης, παρατηρείται μια ελαφρώς ανοδική πορεία στον ετήσιο ρυθμό βροχόπτωσης από το 1981 έως το 2014 (Σχήμα 5, 8 και 11). Πάνω από το 80% της συνολικής βροχόπτωσης ενός υδρολογικού έτους πραγματοποιείται κατά την υγρή περίοδο, ενώ ένα ποσοστό μικρότερο του 20% αντιστοιχεί στην ξηρή περίοδο (Πίνακας 3). Από την επεξεργασία των μετρήσεων ωστόσο παρατηρείται ότι μεγάλο ποσοστό των μηνιαίων βροχοπτώσεων κατά τη χειμερινή περίοδο λαμβάνει χώρα σε σύντομα χρονικά διαστήματα με πολύ έντονο ρυθμό.

Η μέση ετήσια βροχόπτωση της Κρήτης για το χρονικό διάστημα μελέτης προκύπτει από τον μέσο όρο της ετήσιας βροχόπτωσης των 54 σταθμών μελέτης και είναι 816,2 χιλιοστά. Η μέση ετήσια βροχόπτωση του νησιού είχε αξιολογηθεί στα 927 χιλιοστά (Περιφέρεια Κρήτης, 2013), επομένως πρόκειται για μια διαφορά της τάξης των 110,8 χιλιοστών, η οποία οφείλεται σε διαφορετική περίοδο μελέτης. Λαμβάνοντας υπόψη τη μέση τιμή ετήσιας βροχόπτωσης του νησιού κατά τη διάρκεια της περιόδου 1981-2014, παρατηρήθηκαν χαρακτηριστικές υγρές και ξηρές περιόδους (Σχήμα 5). Στο σημείο αυτό, ως ξηρή χαρακτηρίζεται η περίοδος κατά την οποία όλες οι μέσες ετήσιες βροχοπτώσεις βρίσκονται κάτω από την μέση τιμή, ενώ ως υγρές χαρακτηρίζονται όσες βρίσκονται πάνω από αυτή. Η πρώτη υγρή περίοδος διήρκεσε για 5 χρόνια, από το 1994-1999 και η δεύτερη για 4 χρόνια από το 2000-2004. Αντίθετα, η πρώτη ξηρή περίοδος διήρκεσε για 7 χρόνια, από το 1987-1994 και η δεύτερη 5 χρόνια από το 2004-2009.

Η υψηλότερη βροχόπτωση παρατηρείται στον σταθμό Πρασσές, που βρίσκεται στο κέντρο του νομού Χανίων, σε υψόμετρο 520 μέτρων με μέση ετήσια βροχόπτωση γύρω στα 1.740 χιλιοστά, ενώ η χαμηλότερη βροχόπτωση παρατηρείται στο σταθμό

της Σητείας σε υψόμετρο 114 μέτρων με μέση ετήσια βροχόπτωση 436 χιλιοστά. Ο σταθμός με το μεγαλύτερο υψόμετρο στην Κρήτη είναι ο σταθμός των Έξω Ποταμών σε υψόμετρο 840 μέτρων και έχει μια μέση ετήσια βροχόπτωση 1463,8 χιλιοστά. Ο σταθμός Πρασσές εμφανίζει υψηλότερη βροχόπτωση από το σταθμό των Έξω Ποταμών, ο οποίος έχει μεγαλύτερο υψόμετρο και βρίσκεται στο δυτικό τμήμα του νομού Λασιθίου. Αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί από το γεγονός ότι ο σταθμός Πρασσές είναι ο πιο κοντινός σταθμός στα Λευκά Όρη.

Όσον αφορά την σχέση μεταξύ της στάθμης της βροχόπτωσης και του υψομέτρου στο οποίο βρίσκεται έκαστος σταθμός, εκτιμάται ότι οι σταθμοί που βρίσκονται σε υψόμετρο πάνω από τα 660 μέτρα δέχονται την τριπλάσια ποσότητα υδατόπτωσης από τους σταθμούς που είναι τοποθετημένοι σε υψόμετρο έως και 20 μέτρα (Πίνακας 2).

Για την χωρική ανάλυση της βροχόπτωσης χρησιμοποιήθηκαν οι γεωστατιστικές μέθοδοι Ordinary Kriging και Cokriging και κατασκευάστηκαν οι αντίστοιχοι χάρτες. Επιλέχθηκαν τρία χαρακτηριστικά υδρολογικά έτη για τη χωρική ανάλυση των βροχοπτώσεων. Το πιο ξηρό (1989-1990), το πιο υγρό (2002-2003) και το πιο πρόσφατο για το οποίο διατίθενται πλήρεις χρονοσειρές (2010-2011). Μια συνολική εκτίμηση είναι ότι, όπως αναφέρθηκε και στο κομμάτι της στατιστικής ανάλυσης, η βροχόπτωση στο δυτικό μέρος του νησιού είναι περισσότερη από ότι στο ανατολικό. Ωστόσο, η χωρική μεταβολή της βροχόπτωσης για όλα τα υδρολογικά έτη που μελετήθηκαν διαφέρει και εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της βροχόπτωσης κατά τα έτη αυτά. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε όλους τους χάρτες οι υψηλότερες στάθμες βροχόπτωσης βρίσκονται πάντα σε μεγαλύτερη αναλογία στο δυτικό μέρος του νησιού.

Συγκρίνοντας τους χάρτες χωρικής μεταβολής της βροχόπτωσης που κατασκευάστηκαν με τις μεθόδους Kriging και Cokriging, παρατηρούνται πιο έντονες διαβαθμίσεις με τη χρήση του Cokriging, καθώς με τη μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται ως βοηθητική πληροφορία το υψόμετρο, το οποίο επηρεάζει σημαντικά την χωρική κατανομή της βροχόπτωσης. Από τους χάρτες (Σχήμα 22β και 23β) που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθόδου Cokriging

για τις υγρές περιόδους των ετών 1989-1990 και 2002-2003, εντοπίζονται συγκεκριμένες περιοχές με σημαντικό ύψος βροχόπτωσης. Συγκρίνοντας με έναν τοπογραφικό χάρτη της Κρήτης παρατηρείται ότι πρόκειται για περιοχές που βρίσκονται σε υψηλό υψόμετρο. Πιο συγκεκριμένα, στο δυτικό μέρος του νησιού, εκεί όπου βρίσκονται τα Λευκά Όρη παρατηρείται υψηλή στάθμη βροχόπτωσης. Επίσης, αντίστοιχη συμπεριφορά εντοπίζεται στο κεντρικό τμήμα του νησιού όπου βρίσκεται το όρος Ίδη όπως και στο κεντρικό προς ανατολικό τμήμα του νησιού όπου βρίσκεται το Όρος Δίκη. Οι στάθμες κοντά στο όρος αυτό δεν είναι τόσο αυξημένες όσο στα Λευκά Όρη, αλλά διαφοροποιείται σε σύγκριση με τα γειτονικά του τμήματα τα οποία έχουν σημαντικά χαμηλότερες στάθμες βροχόπτωσης. Τέλος, στις ορεινές περιοχές της Σητείας καθώς και στο φαράγγι της Ζάκρου εμφανίζονται αυξημένες βροχοπτώσεις, σε σύγκριση με τις γειτονικές τους περιοχές. Όσον αφορά χαρακτηριστικές χαμηλές στάθμες βροχόπτωσης, αυτές συναντώνται σε όλους τους χάρτες κυρίως στο νότιο τμήμα του νομού Ηρακλείου και πιο συγκεκριμένα στην πεδιάδα της Μεσσαράς.

Η συγκριτική ανάλυση των μεθόδων Ordinary Kriging και Cokriging, όσον αφορά το μέσο απόλυτο σφάλμα και το μέσο ποσοστιαίο σφάλμα εκτίμησης παρατίθεται στους Πίνακες 4, 5 και 6. Είναι φανερό ότι η μέθοδος Cokriging παρουσιάζει μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα της, για όλες τις περιόδους μελέτης. Η μέγιστη διαφορά μεταξύ του μέσου απόλυτου σφάλματος εκτίμησης των δύο μεθόδων είναι της τάξης των 20,4 χιλιοστών και εντοπίζεται στην συνολική μέση βροχόπτωση του υδρολογικού έτους 2002-2003, ενώ η μέγιστη διαφορά του μέσου ποσοστιαίου σφάλματος εντοπίζεται για την ίδια περίοδο και είναι 5%. Αντίστοιχα, η ελάχιστη διαφορά μεταξύ των σφαλμάτων εντοπίζεται κατά την ξηρή περίοδο του υδρολογικού έτους 1989-1990, όπου η διαφορά του μέσου απόλυτου σφάλματος εκτίμησης των δύο μεθόδων είναι της τάξης των 3,5 χιλιοστών, ενώ η διαφορά του μέσου ποσοστιαίου σφάλματος της ίδιας περιόδου είναι 1,4%. Τέλος, από τα θεωρητικά ημιβαριογράμματα, αυτό που χρησιμοποιήθηκε σε μεγαλύτερο βαθμό για την εκπόνηση της γεωστατιστικής ανάλυσης είναι το γκαουσιανό και στη συνέχεια το σφαιρικό μοντέλο.

Συνοψίζοντας, η γεωστατιστική μέθοδος Cokriging, χρησιμοποιώντας ως βοηθητική πληροφορία το υψόμετρο, παρουσιάζει με μεγαλύτερη ακρίβεια τη χωρική μεταβολή της βροχόπτωσης στο νησί της Κρήτης, καθώς σε όλους τις περιόδους μελέτης εμφανίζει το μικρότερο σφάλμα εκτίμησης.

## Βιβλιογραφία:

### Ελληνική Βιβλιογραφία

1. Αντωνάκος Α., 2012, Χρήση γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών (G.I.S.) για επίλυση προβλημάτων περιβαλλοντικής υδρογεωλογίας στο νομό Κορινθίας, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας του Πανεπιστημίου Πατρών
2. Βαρουχάκης Ε., 2005, *Ανάλυση Χωρικής Κατανομής Συγκέντρωσης Χρωμίου (Cr)*, Μεταπτυχιακή εργασία στα πλαίσια του μαθήματος "Γεωστατιστική & Ρύπανση Περιβάλλοντος", Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά
3. Γκριτζάπη Α., 2011, Ανάπτυξη ΓΠΣ και Χωρική Ανάλυση Μετεωρολογικών Δεδομένων στον Ελλαδικό Χώρο, Μεταπτυχιακή διατριβή, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών
4. Περιφέρεια Κρήτης, *Σχέδιο Διαχείρισης Υδατικών Πόρων-Υδατικό Διαμέρισμα Κρήτης*, 2013
5. Χριστόπουλος Δ., 2004α, *Μεταπτυχιακές Σημειώσεις Ανάλυσης Δεδομένων*, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά
6. Χριστόπουλος Δ., 2004β, *Πανεπιστημιακές Σημειώσεις Εισαγωγής στην Έρευνα Κοιτασμάτων*, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά

## Διεθνής Βιβλιογραφία

1. Christakos G. & Hristopulos D., (1998), *Spatiotemporal Environmental Modelling*, Kluwer Academic Publisher, Boston
2. Christakos G., 1991, *Random field models in earth sciences*, Academic press, San Diego
3. Cressie N., 1993, *Statistics for spatial data (revised ed.)*, Wiley, New York
4. Deutsch C. & Journel A., 1992, *GSLIB, Geostatistical software library and user's guide*, New York, Oxford University Press
5. Donta A., Lange A. & Herrmann A., 2006, *Water on Mediterranean islands: Current conditions and prospects for sustainable management*, Project No EVK1-CT-2001-00092-Funded by the European Commission, ISBN 3-9808840-7-4. Muenster, Centre for Environment Research (CER), University of Muenster
6. Goovaerts P., 1997, *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*, Oxford University Press, New York
7. Hristopulos D., 2003a, *Introduction to Geostatistics-course notes (in Greek)*, Chania, Crete, Greece, Technical University of Crete, pp. 200
8. Hristopulos D., 2003b, *Spartan Gibbs random field models for geostatistical applications*, SIAM Journal on Scientific Computing, 24 (6), 2125-2162
9. Journel A., 1989, *Fundamentals of Geostatistics in Five Lessons*, American Geophysical Union, Washington, D.C.
10. Kitanidis P., 1997, *Introduction to geostatistics*, Cambridge, University Press



11. Mavrommatis T. & Voudouris K., 2007, *Relationships between hydrological parameters using correlation and trend analysis*, Journal of environmental hydrology
12. Myers D. E., 2005, Spatial interpolation comparison exercise 2004: a real problem or an academic exercise. In: G. Dubois ed. *Automatic mapping algorithms for routine and emergency monitoring data*. EUR 21595 EN – *Scientific and technical research series*, ISBN 92-894-9400-X (pp. 79-88). EUR, 2005 ed. Luxembourg: Office for official publications of the European Communities.
13. Stein A., W. van Dooremolen, Bouma J. & Bregt A., 1988, *Cokriging point data on moisture deficit*, Soil Science Society of American Journal
14. Surfer, 2002, *Surface Mapping System*, Version 8.04, Golden Software, Inc
15. Tsanis I., Koutroulis I., Daliakopoulos N. & Jacob D., 2011, *Severe climate-induced water shortage and extremes in Crete*, Climatic Change
16. Tsiknia M., Paranychianakis N., Varouchakis E., Moraetis D. & Nikolaidis N., 2014, *Environmental drivers of soil microbial community distribution at the Koiliaris Critical Zone Observatory*, FEMS Microbiology Ecology

#### Δια-δικτυακές πηγές

1. Παπάνα Α., 2015, *Στατιστική-Ποσοτική ανάλυση δεδομένων*, Τμήμα Τυποποίησης και Διακίνησης Προϊόντων, Α.Τ.Ε.Ι. Θεσσαλονίκης  
<<http://users.auth.gr/~agpapana/StatLogistics>>

2. Πανεπιστήμιο Κρήτης, 2015, Τμήμα Μαθηματικών  
<<http://www.math.uoc.gr:1080/syndesmoi/topikou/>>
  
3. School of Environment, , 2015, *Education and Development*, University of Manchester  
<<http://www.sed.manchester.ac.uk/geography/undergraduate/fieldwork/create/maps/geology.htm>>