

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

**ΓΕΩΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ ΣΤΟ ΝΗΣΙ ΤΗΣ**  
**ΚΡΗΤΗΣ**

**MARINA MIZH**

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

Καρατζάς Γεώργιος (Επιβλέπων)

Βαρουχάκης Εμμανουήλ

Τρύφων Δάρας

**ΧΑΝΙΑ 2017**

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας συνέβαλε ένας σημαντικός αριθμός ανθρώπων για τους οποίους είμαι ευγνώμων και θα ήθελα να τους ευχαριστήσω.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος και επιβλέποντα της παρούσας εργασίας κ. Γεώργιο Καρατζά για την ανάθεση της εργασίας. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Βαρουχάκη Εμμανουήλ για την αμέριστη συμπαράσταση, υπομονή και κατανόηση του καθ' όλη την διάρκεια της προσπάθειάς μου. Η συμβολή του ήταν καθοριστική και πολύ σημαντική τόσο στη διαμόρφωση του επιστημονικού υποβάθρου πάνω στο οποίο στηρίχθηκε η εργασία, όσο και στην επίλυση δεκάδων πρακτικών προβλημάτων που προέκυψαν κατά τη διάρκεια της συγγραφής της εργασίας. Τέλος, ευχαριστώ τον κύριο Τρύφων Δάρα, για την συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θέλω να εκφράσω σε όλο το επιστημονικό προσωπικό και τους εξαιρετικούς καθηγητές του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος καθώς οι γνώσεις τους στα πέντε χρόνια σπουδών μου ήταν πολύ σημαντική. Η μακρόχρονη και πολυεπίπεδη τριβή με όλους εσάς τους εξαιρετικούς 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.

Ξεχωριστά, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, για την απεριόριστη αγάπη, στήριξη και φροντίδα που μου παρείχαν καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία ασχολείται με τη στατιστική και γεωστατιστική ανάλυση της βροχόπτωσης και της στάθμης των υπόγειων υδάτων στο νησί της Κρήτης. Η μελέτη των βροχοπτώσεων και της στάθμης των υπογείων υδάτων αποτελεί ένα σημαντικό και χρήσιμο εργαλείο για πολλές επιστημονικές ειδικότητες. Η εξαγωγή συμπερασμάτων που αφορούν τις ποιοτικές και ποσοτικές εκτιμήσεις, ο εντοπισμός των περιοχών που πλήττονται από υπερεκμετάλλευση και υφαλμύριση, η ενδεχόμενη περιοδικότητα στην τάση των βροχοπτώσεων καθώς και οι χάρτες κατανομής της βροχόπτωσης είναι κάποια από τα πιο χρήσιμα εφόδια που προσφέρει η παρούσα διπλωματική εργασία. Η εφαρμογή της στατιστικής και γεωστατιστικής ανάλυσης έγινε βασιζόμενη σε δεδομένα παρατήρησης ογδόντα δύο βροχομετρικών σταθμών που τοποθετούνται διάσπαρτοι στους τέσσερις νομούς της Κρήτης και οι μετρήσεις αφορούν τη χρονική περίοδο 2007-2016.

Η στατιστική ανάλυση βασίστηκε στην κατασκευή διαγραμμάτων για κάθε ένα υδρολογικό έτος καθώς και για την αντίστοιχη υγρή και ξηρή περίοδο των ετών αυτών. Επιπλέον, μελετήθηκε ο μέσος όρος του συνόλου των βροχοπτώσεων για όλα τα έτη καθώς και ο μέσος όρος συνόλου υγρής και ξηρής περιόδου. Εκτός από την κατασκευή διαγραμμάτων για τις βροχοπτώσεις, μελετηθήκανε και οι υπόγειοι υδροφορείς της Κρήτης. Σύμφωνα με στοιχεία που συλλέχθηκαν από 312 υδροσημεία κυρίως από γεωτρήσεις για τα έτη 2007-2014 κατασκευαστήκαν διαγράμματα σχετικά με τη μεταβολή της στάθμης των υπόγειων νερών. Επίσης, μελετήθηκε η πορεία της βροχόπτωσης σε αυτά τα 9 έτη που χρονικά αποτελούν πολύ πρόσφατες μετρήσεις, τόσο για ολόκληρη την Κρήτη όσο και μεμονωμένα για το ανατολικό και δυτικό τμήμα της. Στη συνέχεια, μελετήθηκαν οι σταθμοί με τις πολύ υψηλές ή πολύ χαμηλές βροχομετρικές ενδείξεις και δημιουργήθηκαν τα αντίστοιχα συμπεράσματα. Τέλος, εξετάστηκε η συσχέτιση μεταξύ της βροχόπτωσης και του υψομέτρου στο οποίο βρίσκεται ο κάθε βροχομετρικός σταθμός της παρούσας μελέτης και έγινε φανερό ότι οι σταθμοί που βρίσκονται σε υψόμετρο αρκετά μεγάλο δέχονται και μεγαλύτερη ποσότητα υδατόπτωσης από αυτούς που βρίσκονται σε πολύ χαμηλά υψόμετρα.

Ένας από τους κύριους στόχους της εργασίας, είναι η δημιουργία χωρικής κατανομής της βροχόπτωσης στην επιφάνεια του νησιού αλλά και της στάθμης των υπόγειων υδάτων χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες μεθόδους. Οι μέθοδοι που 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 ημιβαριογραμμάτων, από τα οποία κάθε φορά επιλεγόταν αυτό που προσέδιδε την μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα(μικρότερο σφάλμα), ώστε να κατασκευαστεί ο αντίστοιχος χάρτης απεικόνισης της βροχόπτωσης ή των υπόγειων υδάτων.

Με τη χαρτογράφηση της Κρήτης απεικονίζεται με μεγαλύτερη ακρίβεια η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης και μπορούμε ευκολότερα και πιο παραστατικά να αντλήσουμε τα συμπεράσματά μας.

## **ABSTRACT**

This diploma thesis deals with the statistical and geostatistical analysis of rainfall and groundwater level at the island of Crete. Their study is an important and useful tool for many scientific disciplines. The conclusions on qualitative and quantitative assessments, the identification of areas affected by overexploitation, the potential periodicity of rainfall trends and the rainfall distribution maps are some of the most useful information offered by this diploma thesis. The application of the statistical and geostatistical analysis was based on observation data of eighty two rainfall stations, which are scattered across the four prefectures of Crete and the measurements refer to the period 2007-2016.

The statistical analysis was based on the construction of diagrams for each hydrological year as well as for the respective wet and dry period of these years. In addition, we studied the average of all rainfall for all years as well as the average wet and dry season total. Besides the construction of diagrams for rainfall, the underground aquifers of Crete were also studied. Data from 312 wells for the years 2007-2014, were used to perform a descriptive statistical analysis.

One of the main goals of this work is to create the spatial distribution of the rainfall as well as of groundwater level using the appropriate methods. The methods used for this purpose is the most well known geostatistical methods called Kriging. In particular, the Geostatistical Analyst tool of the ARCGIS software was used, which examined two methods for spatial estimation: the first is the Ordinary Kriging method and the second is the Cokriging method. For the implementation of each method, four semivariograms were applied, while the best one was selected in terms of the highest accuracy (smaller error) to produce the corresponding rain or groundwater level map.

## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	3
ABSTRACT.....	5
1) ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
1.1) ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	7
1.1.1)ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΟΥ ΝΗΣΙΟΥ ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ.....	7
1.1.2)ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ.....	9
1.1.3)ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	9
1.1.4)ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ.....	11
1.1.5)ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ ΥΔΑΤΑ.....	14
2) ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	15
3) ΓΕΩΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	39
3.1) ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	39
3.1.1)ΓΕΩΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ.....	39
3.1.2)ΤΥΧΑΙΑ ΠΕΔΙΑ.....	41
3.1.3)ΗΜΙΒΑΡΙΟΓΡΑΜΜΑ.....	43
3.1.4)ΧΩΡΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ KRIGING.....	48
3.1.5)ΧΩΡΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ COKRIGING.....	55
3.2)ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ KRIGING ΚΑΙ COKRIGING.....	56
3.2.1) ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ KRIGING ΚΑΙ COKRIGING.....	57
3.2.2)ΠΟΙΟΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ.....	79
4) ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	82
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	89

## **1) ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

### **1.1) ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ**

#### **1.1.1)ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΟΥ ΝΗΣΙΟΥ ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ**

Η Κρήτη είναι το μεγαλύτερο και το πιο ορεινό νησί της Ελλάδας καθώς 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.

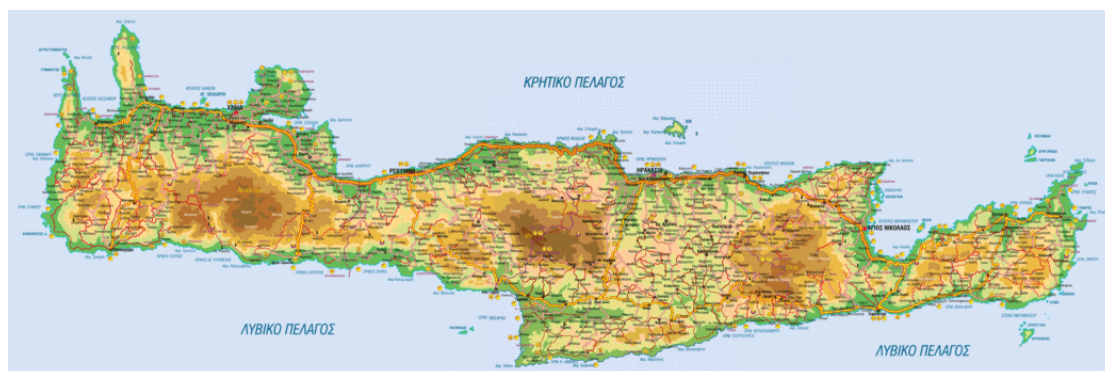
Η Κρήτη αποτελείται από τέσσερις νομούς και συγκεκριμένα, ξεκινώντας από δυτικά και πηγαίνοντας προς τα ανατολικά αυτοί είναι: νομός Χανίων, νομός Ρεθύμνης, νομός Ηρακλείου και νομός Λασιθίου. Χαρακτηρίζεται από έντονο ανάγλυφο και περιβάλλεται από έναν πανέμορφο ορεινό όγκο συμπεριλαμβανομένων των Λευκών 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 Κουιάρης, 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 υπό-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.

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.



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



### **1.1.2)ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ**

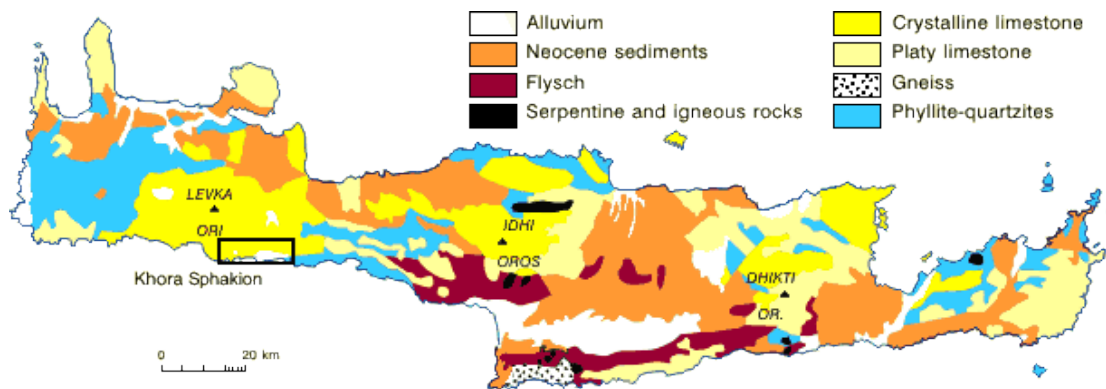
Η Κρήτη ανήκει στη μεσογειακή κλιματολογική ζώνη που προσδίδει τον κύριο κλιματικό χαρακτήρα της, ο οποίος χαρακτηρίζεται ως εύκρατος. Το κλίμα της ποικίλει από τόπο σε τόπο γιατί επηρεάζεται αφενός από τη θάλασσα αφετέρου από τις εσωτερικές εδαφολογικές εναλλαγές και κυρίως το υψόμετρο. Γενικά, το κλίμα είναι υποτροπικό με κύρια χαρακτηριστικά το βροχερό και ήπιο χειμώνα και το ξερό και ζεστό καλοκαίρι καθώς επίσης και τους δυνατούς ανέμους που πλήττουν τόσο το βόρειο όσο και το νότιο τμήμα του νησιού αλλά κυρίως το νότιο (τα λεγόμενα μελτέμια). Επίσης, η Κρήτη χαρακτηρίζεται από μία πολύ σύντομη άνοιξη και ένα εξαιρετικά μεγάλο καλοκαίρι. Έτσι, η άνοιξη ξεκινά από τα τέλη του Μάρτη και διαρκεί ως το Μάιο. Το καλοκαίρι αρχίζει τον Ιούνιο και διαρκεί μέχρι τέλος Σεπτεμβρίου με πιο ζεστούς μήνες τον Ιούλιο και Αύγουστο. Το φθινόπωρο αρχίζει τον Οκτώβρη και διαρκεί ως τα τέλη του Δεκέμβρη. Τέλος ο χειμώνας αρχίζει τέλος Δεκεμβρίου και διαρκεί μέχρι τέλος Μαρτίου.

### **1.1.3)ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ**

Το μεγαλύτερο τμήμα του νησιού είναι ορεινό. Αναλυτικά, η κατανομή του σε κατηγορίες έχει ως εξής: 33% πεδινό, 26% ημιορεινό και 41% ορεινό. Τα βασικά ορεινά συγκροτήματα της Νήσου Κρήτης είναι προς τα δυτικά τα Λευκά όρη (2.454 m), στο «Τρισδιάστατη Γεωλογική προσομοίωση του Πλειο-Τεταρτογενούς της πεδιάδας της Μεσσαράς» κεντρικό τμήμα ο Ψηλορείτης (ή Ίδη, 2.456 m) και προς τα ανατολικά το όρος Δίκτη (2.147m) και τα όρη Σητείας (1.476 m). Προς τα δυτικά και νότια οι υπώρειες των ορέων είναι απότομες και φθάνουν με μεγάλη κλίση προς τη θάλασσα, ενώ προς τα βόρεια του νησιού το ανάγλυφο είναι πιο ήπιο και λοφώδες (πεδιάδες Χανίων, Ρεθύμνου και Μαλίων). Η μεγαλύτερη πεδιάδα του νησιού, η πεδιάδα της Μεσσαράς, βρίσκεται στο νότιο-κεντρικό τμήμα του, ενώ στο νότιο ανατολικό αναπτύσσεται η πεδιάδα της Ιεράπετρας. Υπάρχουν, τέλος, αρκετά οροπέδια τα κυριότερα των οποίων είναι του Λασιθίου και του Ομαλού.

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.

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.



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

#### 1.1.4)ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Η θέση της Κρήτης στη μέση της Μεσογείου, η γεωγραφική της τοποθέτηση με το μεγάλο της άξονα στη διεύθυνση ανατολής-δύσης και η ύπαρξη των ψηλών οροσειρών καθορίζουν και το ύψος των νερών που δέχεται ετησίως. Τα καιρικά συστήματα που επηρεάζουν το χώρο της Ελλάδας κινούνται ως γνωστό από τα βορειοδυτικά προς τα νοτιοανατολικά μεταφέροντας υγρασία από το Ιόνιο πέλαγος.

**Βροχόπτωση:** Μόνο τα νοτιότερα από τα καιρικά συστήματα μπορούν να επηρεάσουν την Κρήτη με αποτέλεσμα οι βροχές να συγκεντρώνονται μόνο στους χειμερινούς μήνες με το μεγαλύτερό τους μέρος να πέφτει στη Δυτική Κρήτη και στα ψηλά βουνά. Παρατηρείται έτσι μια σημαντική ανισοκατανομή των βροχοπτώσεων στο νησί με σταδιακή μείωσή τους από τα βορειοδυτικά προς τα νοτιοανατολικά. Αν το γεγονός αυτό συνδυαστεί με την αντίστοιχη αύξηση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας που παρατηρείται προς τα νοτιοανατολικά, τότε εμφανίζονται σημαντικές διαφοροποιήσεις στο μικροκλίμα των επιμέρους περιοχών του νησιού. Έτσι ο νομός Χανίων είναι περισσότερο υγρός από το νομό Λασιθίου, ενώ οι βόρειες ακτές είναι μερικούς βαθμούς πιο δροσερές από τις νότιες. Ιδιαίτερα οι νότιες ακτές του Ηρακλείου και του Λασιθίου είναι αυτές που αντιμετωπίζουν τα περισσότερα προβλήματα υγρασίας.

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 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 Δίκη. 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. 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. 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.

**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.

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.

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

**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.

**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.

### **1.1.5)ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ ΥΔΑΤΑ**

Στο Υδατικό Διαμέρισμα της Κρήτης εμφανίζονται λίγα ποτάμια μόνιμης ροής, λίγα ποτάμια εφήμερης ροής με πολύ μικρή περίοδο επιφανειακής ροής (3 μήνες περίπου) ενώ τα περισσότερα ποτάμια είναι χείμαρροι περιοδικής ροής. Σε αυτούς διακρίνονται δύο κατηγορίες: αυτοί των οποίων η επιφανειακή ροή διαρκεί 8-9 μήνες την υγρή περίοδο του χρόνου και διατηρούν τέλματα στην κοίτη τους την ξηρή καλοκαιρινή περίοδο και αυτοί των οποίων η επιφανειακή ροή διαρκεί 6-8 μήνες την υγρή περίοδο του χρόνου αλλά δεν διατηρούν τέλματα στην κοίτη τους την ξηρή καλοκαιρινή περίοδο. 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.

Στην Κρήτη συγκεκριμένα 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. 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.

## 2)ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

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 για την ανάλυση των δεδομένων βροχόπτωσης που συλλέχθηκαν από βροχομετρικούς σταθμούς στο νησί της Κρήτης.

Για την παρουσίαση των βροχομετρικών δεδομένων που συνοψίσαμε 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 εύκολη εξαγωγή συμπερασμάτων.

Ο αριθμός των σταθμών που μελετήθηκαν είναι ογδόντα δύο (82) κυρίως από τους διαθέσιμους μετεωρολογικούς σταθμούς (54) και από σταθμούς της ελληνικής μετεωρολογικής υπηρεσίας meteo (28). Επιπλέον, συγκεντρώθηκαν ορισμένα σημαντικά στοιχεία από μετρήσεις της ΝΑΣΑ που βοήθησαν στην συμπλήρωση κενών σε διάφορους μετεωρολογικούς σταθμούς για τις χρονιές μελέτης 2007-2016. Γενικότερα, οι σταθμοί εκτείνονται στους τέσσερις (4) νομούς της Κρήτης, με όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφη κατανομή επιτρέπει η γεωλογία του νησιού. Οι σταθμοί αυτοί βρίσκονται σε διάφορα υψόμετρα αλλά οι περισσότεροι κυμαίνονται μεταξύ 200 και 500 μέτρων. Η χρονική περίοδος της μελέτης μας ξεκινά από την χρονιά 2007 έως 2016, σχεδόν μέχρι σήμερα.

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 μέσες τιμές βροχόπτωσης, οι ξηρές και υγρές περίοδοι σε ετήσια βάση. Το άθροισμα των βροχομετρικών δεδομένων των δώδεκα (12) μηνών έκαστου σταθμού, ορίζουν την ετήσια βροχόπτωση του 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). Κατά την ξηρή περίοδο παρατηρείται μεγάλη μείωση της βροχόπτωσης γενικότερα σε όλη την Ελλάδα αλλά και ιδιαίτερα στην Κρήτη. Επιπλέον, με βάση το κριτήριο της πιο υγρής και της πιο ξηρής χρονιάς, από τα δεδομένα που συλλέχθηκαν, επιλέχθηκαν και μελετήθηκαν διεξοδικά ως προς την βροχομετρική συμπεριφορά, το υδρολογικό έτος 2014-2015 θεωρείται το πιο υγρό και το 2013-2014 ως το πιο ξηρό.

Τέλος, έγινε συμπλήρωση της μηνιαίας στάθμης της βροχόπτωσης σε ορισμένους από της 82 σταθμούς, όπου υπήρχε απουσία δεδομένων είτε λόγω βλάβης του σταθμού είτε λόγω απωλειών μέρους των δεδομένων. Για την συμπλήρωση της χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της γραμμικής παλινδρόμησης. Παρακάτω παρατίθεται ο πίνακας με όλους της σταθμούς που μελετήθηκαν και ο χάρτης με τη γεωγραφική τους θέση.

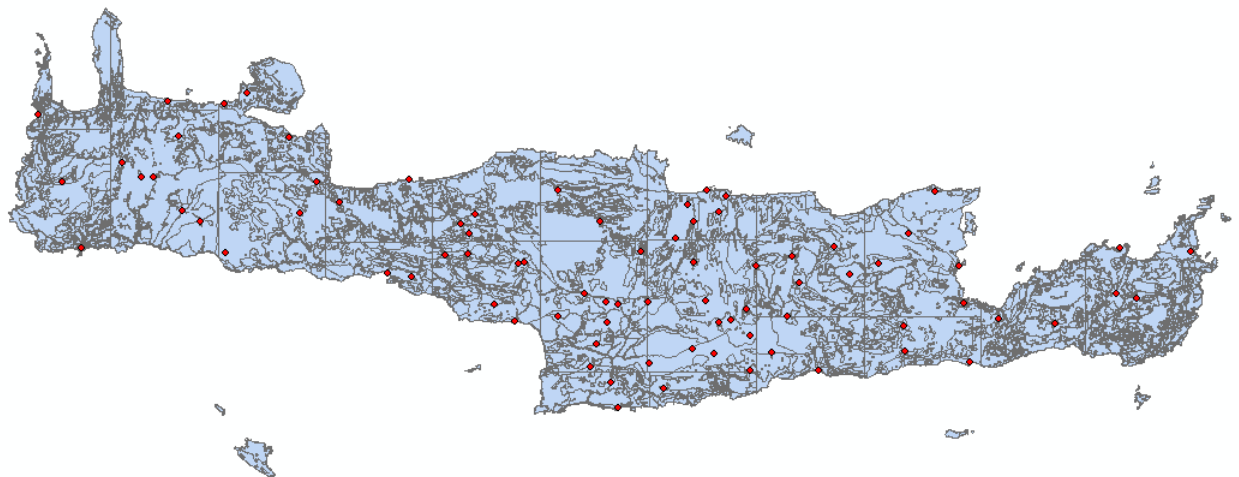
A/A	ΠΕΡΙΟΧΕΣ	Z
1	ΑΒΔΟΥ	230,00
2	ΑΓΙΑ ΒΑΡΒΑΡΑ	570,00
3	ΑΓΙΟΣ ΚΥΡΙΛΛΟΣ	450,00
4	ΑΡΜΑΧΑ	450,00
5	ΑΣΗΜΙ	200,00
6	ΑΧΕΝΤΡΙΑΣ	680,00
7	ΒΑΓΙΩΝΙΑ	190,00
8	ΒΟΝΗ	330,00
9	ΒΟΡΙΖΙΑ	520,00
10	ΓΕΡΓΕΡΗ	450,00
11	ΔΕΜΑΤΙ	210,00
12	ΖΑΡΟΣ	500,00
13	ΚΑΛΥΒΙΑ	200,00
14	ΚΑΠΕΤΑΝΙΑΝΑ	800,00
15	ΚΑΣΣΑΝΟΙ	320,00
16	ΚΑΣΤΕΛΙ	350,00
17	ΚΑΨΑΛΟΙ	10,00
18	ΚΡΟΥΣΩΝΑΣ	500,00
19	ΛΑΓΟΛΙΟ	140,00
20	ΜΕΤΑΞΟΧΩΡΙ	430,00



21	ΜΟΡΟΝΙ	400,00
22	ΠΑΡΤΗΡΑ	400,00
23	ΠΟΜΠΙΑ	150,00
24	ΠΡΑΙΤΩΡΙΑ	225,00
25	ΠΡΟΦΗΤΗΣ ΗΛΙΑΣ	380,00
26	ΤΕΦΕΛΙ	360,00
27	ΦΟΙΝΙΚΙΑ	40,00
28	ΗΡΑΚΛΕΙΟ	39,00
29	ΚΑΤΣΙΔΟΝΙ	480,00
30	ΝΕΑΠΟΛΗ	240,00
31	ΕΞΩ ΠΟΤΑΜΟΙ	840,00
32	ΚΑΛΟ ΧΩΡΙΟ	20,00
33	ΜΑΛΛΕΣ	590,00
34	ΜΑΡΩΝΙΑ	150,00
35	ΜΥΘΟΙ	200,00
36	ΠΑΛΑΙΟΚΑΣΤΡΟ	25,00
37	ΠΑΧΕΙΑ ΑΜΜΟΣ	50,00
38	ΣΗΤΕΙΑ	114,00
39	ΣΤΑΥΡΟΧΩΡΙ	325,00
40	ΑΓΙΑ ΓΑΛΗΝΗ	20,00
41	ΒΟΛΕΩΝΕΣ	260,00
42	ΒΥΖΑΡΙ	310,00
43	ΓΑΡΑΖΟ	260,00
44	ΓΕΡΑΚΑΡΙ	1000,00
45	ΚΑΒΟΥΣΙ	580,00
46	ΛΕΥΚΟΓΕΙΑ	90,00
47	ΜΕΛΑΜΠΕΣ	560,00
48	ΣΠΗΛΙ	390,00
49	ΑΣΚΥΦΟΥ	740,00
50	ΓΑΥΔΟΣ	10,00
51	ΚΑΛΥΒΕΣ	20,00
52	ΜΟΥΡΙ	50,00
53	ΠΑΛΑΙΑ ΡΟΥΜΑΤΑ	316,00
54	ΠΡΑΣΣΕΣ	520,00
55	ΑΓΙΟΣ ΝΙΚΟΛΑΣ	30,00
56	ΑΛΙΚΙΑΝΟΣ	95,00
57	ΑΝΩΓΕΙΑ	801,00
58	ΒΡΥΣΕΣ	58,00
59	ΕΛΟΣ	535,00
60	ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΔΥΤΙΚΑ	85,00
61	ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΑΝΑΤΟΛΙΚΑ	115,00
62	ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΛΙΜΑΝΙ	10,00
63	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	5,00
64	ΛΕΝΤΑΣ	15,00

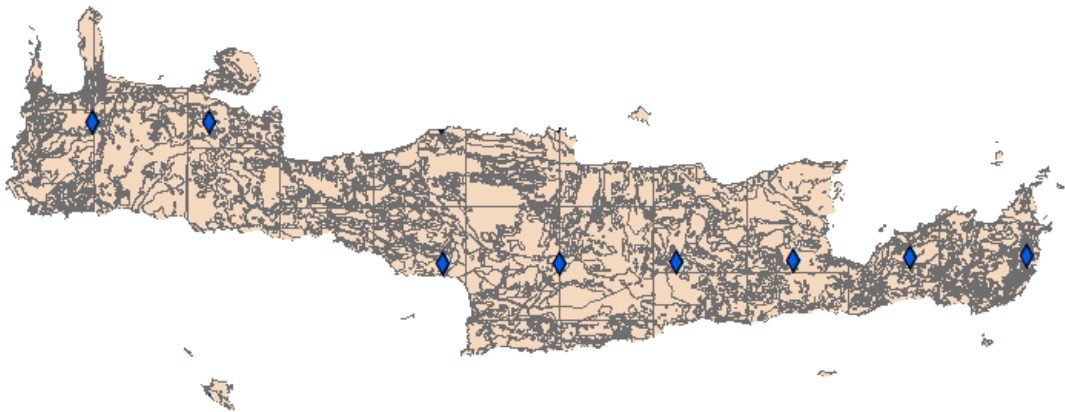
65	ΜΟΙΡΕΣ	54,00
66	ΠΑΛΑΙΟΧΩΡΑ	5,00
67	ΠΛΑΚΙΑΣ	5,00
68	ΠΛΑΤΑΝΙΑΣ	12,00
69	ΠΥΡΑΘΙ	311,00
70	ΡΕΘΥΜΝΟ	39,00
71	ΣΑΜΑΡΙΑ	1250,00
72	ΣΑΜΑΡΙΑ ΦΑΡΑΓΓΙ	349,00
73	ΣΕΜΠΡΩΝΑΣ	640,00
74	ΣΤΑΥΡΑΚΙΑ	245,00
75	ΣΦΑΚΙΑ	770,00
76	ΤΖΕΡΜΙΑΔΩΝ	820,00
77	ΦΑΛΑΣΑΡΝΑ	10,00
78	ΦΙΝΟΚΑΛΙΑ	250,00
79	ΦΟΥΡΦΟΥΡΑΣ	471,00
80	ΦΡΑΓΜΑ ΠΟΤΑΜΩΝ	240,00
81	ΧΑΝΙΑ	137,00
82	ΧΑΝΙΑ ΚΕΝΤΡΟ	7,00

Πίνακας 1: Συνοπτικός πίνακας των 82 υδρολογικών σταθμών της Κρήτης, όπου περιλαμβάνει το υψόμετρο Z του κάθε σταθμού.



Χάρτης 3α: Απεικόνιση των 82 βροχομετρικών σταθμών μελέτης

Επιπρόσθετα, για τη συμπλήρωση των χρονοσειρών χρησιμοποιήθηκαν δορυφορικά δεδομένα από την ιστοσελίδα της ΝΑΣΑ. Τα δεδομένα αυτά συνεισφέρουν στη συμπλήρωση ορισμένων κενών που υπήρχαν σε διάφορες χρονικές περιόδους των ετών μελέτης 2007-2016. Οι θέσεις συλλογής δορυφορικών δεδομένων από τη ΝΑΣΑ στο νησί της Κρήτης αριθμούν του οχτώ (8) και οι περισσότερες από αυτές τις θέσεις βρίσκονται πολύ κοντά σε ήδη υπάρχοντες μετεωρολογικούς σταθμούς που έχουμε μελετήσει. Ο χάρτης που παρατίθεται παρακάτω (χάρτης 3β) παρουσιάζει τις θέσεις συλλογής των δορυφορικών δεδομένων.



Χάρτης 3β : Απεικόνιση των θέσεων συλλογής δορυφορικών δεδομένων από μετρήσεις της ΝΑΣΑ

Σύμφωνα με τα δεδομένα μελέτης παρουσιάζεται με τη βοήθεια διαγράμματος η συνολική μέση ετήσια βροχόπτωση και για τους τέσσερις (4) νομούς της Κρήτης για τα υδρολογικά έτη μελέτης 2007-2016 στο σχήμα 1. Σε αυτό το σχήμα αναφέρονται οι συνολικές μέσες ετήσιες τιμές βροχόπτωσης για τους ογδόντα δύο (82) σταθμούς. Από το σχήμα αυτό διακρίνουμε ότι η υψηλότερη βροχομετρική στάθμη είναι κατά τη περίοδο 2014-2015 με 1059,63mm ενώ η χαμηλότερη κατά τη περίοδο 2015-2016 με 465,51mm. Είναι φανερό ότι η βροχόπτωση μειώθηκε στο μισό κατά την περίοδο 2015-2016. Επίσης πολύ χαμηλή βροχόπτωση έχει και η περίοδος 2013-2014 με 494,31mm με μικρή διαφορά από τη χρονιά 2015-2016.

Στη συνέχεια, έγινε η απεικόνιση για τις συνολικές μέσες ετήσιες τιμές βροχόπτωσης για την υγρή περίοδο των υδρολογικών ετών 2007-2016 σύμφωνα με τις μετρήσεις των ογδόντα δύο (82) σταθμών στο σχήμα 2. Το πιο υγρό έτος εύκολα διακρίνουμε ότι είναι το 2014-2015 με 995,9mm ύψος βροχής ενώ το λιγότερο υγρό 2015-2016 με 444,81mm. Το έτος 2013-2014 παρατηρούμε ότι και σε αυτό το διάγραμμα έχει χαμηλό ύψος βροχόπτωσης κατά την υγρή περίοδο με 455,8mm.

Εφόσον παρατηρήθηκαν οι συνολικές μέσες ετήσιες τιμές βροχόπτωσης για την υγρή περίοδο, ενδιαφέρον παρουσιάζει και το διάγραμμα της ξηρής περιόδου στο σχήμα 3. Διαπιστώνεται ότι τα έτη 2012-2013 και 2015-2016 έχουν πολύ χαμηλή βροχόπτωση την ξηρή περίοδο με 20,05mm και 21,08mm αντίστοιχα. Αυτό σημαίνει ότι κατά την ξηρή περίοδο μέτρησης μας, Απρίλιο με Σεπτέμβρη έβρεξε ελάχιστα τις χρονιές αυτές στην Κρήτη και αρκετές περιοχές αντιμετώπισαν πρόβλημα. Αντίθετα τη χρονιά 2010-2011 παρατηρούμε πως η βροχόπτωση κατά τη διάρκεια της ξηρής περιόδου ήταν αυξημένη σε σχέση με τα υπόλοιπα έτη και έφτασε τα 118,15mm.



Σχήμα 1: Διάγραμμα συνολικής μέσης ετήσιας βροχόπτωσης των 82 σταθμών για περίοδο 2007-2016



Σχήμα 2: Διάγραμμα συνολικής ετήσιας βροχόπτωσης κατά την υγρή περίοδο



Σχήμα 3: Διάγραμμα συνολικής ετήσιας βροχόπτωσης κατά την ξηρή περίοδο

Στη συνέχεια, μελετήθηκε η συνολική μέση ετήσια βροχόπτωση για τους αρχικούς πενήντα τέσσερις (54) βροχομετρικούς σταθμούς της Κρήτης που τοποθετούνται σε διάφορα σημεία του νησιού και εξαπλώνονται στους τέσσερις(4) νομούς. Στο σχήμα 4 γίνεται η απεικόνιση των αποτελεσμάτων αυτών και παρατηρείται ότι υψηλότερη συνολική βροχομετρική στάθμη έχει το υδρολογικό έτος 2014-2015 με 1092,37mm. Σύμφωνα με αυτό το διάγραμμα η χαμηλότερη βροχομετρική στάθμη παρατηρείται κατά τη περίοδο 2013-2014 με 466,64mm.

Στο σχήμα 5 παρουσιάζεται η συνολική μέση ετήσια βροχόπτωση για την υγρή περίοδο των υδρολογικών ετών μελέτης 2007-2016 όπου περιλαμβάνονται οι πενήντα τέσσερις (54) βροχομετρικοί σταθμοί της Κρήτης. Διαπιστώνεται πως το πιο υγρό έτος σύμφωνα με τις μετρήσεις των 54 σταθμών είναι το 2014-2015 με 1058,33mm. Αντίθετα, το λιγότερο υγρό έτος είναι το 2013-2014 με 442,58mm.

Για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της ξηρής περιόδου λήφθηκαν υπόψη οι μετρήσεις των δεδομένων για τους 54 βροχομετρικούς σταθμούς. Σύμφωνα με τα δεδομένα αυτά διαπιστώθηκε ότι τα πιο ξηρά έτη ήταν το 2012-2013 με 10,98mm και το 2015-2016 με 9,38mm. Προκύπτει πως τις περιόδους αυτές η Κρήτη αντιμετώπισε σοβαρά προβλήματα ξηρασίας λόγω έλλειψης νερού. Η χρονιά 2010-2011 εμφανίζεται με αρκετά υψηλή στάθμη βροχόπτωσης όπου φτάνει τα 144,56mm (σχήμα 6). Είναι εμφανές από το συγκεκριμένο διάγραμμα ότι μετά από τη χρονιά του 2010-2011, τα επόμενα χρόνια είναι αρκετά ξηρά με ελάχιστες βροχοπτώσεις κατά την ξηρή περίοδο.



Σχήμα 4: Διάγραμμα συνολικής ετήσιας βροχόπτωσης για της 54 σταθμούς κατά την περίοδο 2007-2016.



Σχήμα 5: Διάγραμμα συνολικής μέσης ετήσιας βροχόπτωσης υγρής περιόδου για της 54 σταθμούς κατά την περίοδο 2007-2016.



Σχήμα 6: Διάγραμμα συνολικής μέσης ετήσιας βροχόπτωσης ξηρής περιόδου για της 54 σταθμούς κατά την περίοδο 2007-2016.



Όσον αφορά τη βροχόπτωση της Ανατολικής Κρήτης εμφανίζονται τριάντα εννιά (39) βροχομετρικοί σταθμοί από της πενήντα τέσσερις (54) που αρχικά εξετάστηκαν. Αυτό αποτελεί μία πολύ σημαντική ένδειξη για την καλύτερη και αποτελεσματικότερη απεικόνιση της κατάστασης που επικρατεί στο ανατολικό τμήμα του νησιού. Παρακάτω παρουσιάζεται η συνολική ετήσια βροχόπτωση της Ανατολικής Κρήτης σύμφωνα με τα δεδομένα των βροχομετρικών σταθμών(σχήμα 7). Σύμφωνα με αυτά τα δεδομένα παρατηρείται και πάλι ότι το έτος 2014-2015 είναι το υψηλότερο βροχομετρικά για αυτούς του σταθμούς με στάθμη 1058,39mm. Αρκετά πιο χαμηλή στάθμη παρουσιάζει η χρονιά 2013-2014 με 463,12mm. Διαπιστώνεται εύκολα πως από τη μία χρονιά στην άλλη διπλασιάστηκε σχεδόν η συνολική στάθμη βροχόπτωσης.

Η επόμενη περιοχή μελέτης αφορά τη συνολική τιμή μέσης ετήσιας βροχόπτωσης της Ανατολικής Κρήτης για την υγρή περίοδο των υδρολογικών ετών 2007-2016. Η ανατολική Κρήτη αφορά τους νομούς Ηρακλείου και Λασιθίου όπου παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω του έντονου ανάγλυφου της περιοχής αυτής. Επιπλέον, όπως έχει διαπιστωθεί, η μέση ετήσια βροχόπτωση στην ανατολική Κρήτη είναι μικρότερη από εκείνης της δυτικής. Αυξάνεται από τα ανατολικά καθώς προχωράμε στα δυτικά. Παρατηρείται πως το πιο υγρό έτος είναι το 2014-2015 ενώ το λιγότερο υγρό έτος το 2013-2014(σχήμα 8).

Στη συνέχεια, στο σχήμα 9 παρουσιάζεται το διάγραμμα της συνολικής ετήσιας βροχόπτωσης στην Ανατολική Κρήτη για την ξηρή περίοδο όπου διακρίνεται και πάλι ότι το πιο ξηρό έτος είναι το 2012-2103 με στάθμη βροχόπτωσης 8,72mm και το έτος 2015-2016 με στάθμη 7,14mm.



Σχήμα 7: Διάγραμμα συνολικής μέσης ετήσιας βροχόπτωσης Ανατολικής Κρήτης κατά την περίοδο 2007-2016.



Σχήμα 8: Διάγραμμα συνολικής μέσης ετήσιας βροχόπτωσης Ανατολικής Κρήτης για την υγρή περίοδο των ετών 2007-2016.



Σχήμα 9: Διάγραμμα συνολικής μέσης ετήσιας βροχόπτωσης Ανατολικής Κρήτης για την ξηρή περίοδο των ετών 2007-2016.

Εφόσον μελετήθηκε διεξοδικά με βάση τα βροχομετρικά δεδομένα το ανατολικό τμήμα της Κρήτης, σειρά έχει η μελέτη των βροχοπτώσεων στο δυτικό τμήμα του νησιού και η σύγκριση των αποτελεσμάτων. Στο σχήμα 10 παρουσιάζεται η συνολική ετήσια βροχόπτωση της Δυτικής Κρήτης σύμφωνα με τα δεδομένα των βροχομετρικών σταθμών. Στην Δυτική Κρήτη εμφανίζονται δέκα πέντε (15) βροχομετρικοί σταθμοί από της πενήντα τέσσερις (54) που αρχικά μελετήθηκαν. Συγκριτικά με την Ανατολική Κρήτη που εξετάστηκαν τριάντα εννιά (39) είναι σαφώς λιγότεροι σταθμοί στην Δυτική Κρήτη αλλά με βάση αυτά τα δεδομένα προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα. Σύμφωνα με τα δεδομένα αυτά παρατηρείται πως το έτος 2014-2015 είναι το υψηλότερο βροχομετρικά με μέση ετήσια στάθμη βροχόπτωσης 1180,7mm. Όπως και στην ανατολική Κρήτη, έτσι και στη Δυτική το έτος αυτό είναι το υψηλότερο βροχομετρικά. Παρόλο που στο δυτικό τμήμα υπάρχουν αρκετά λιγότεροι διαθέσιμοι βροχομετρικοί σταθμοί, το ύψος της βροχόπτωσης που συγκεντρώνουν είναι υψηλότερο. Αντίθετα, το έτος με τη χαμηλότερη ετήσια στάθμη είναι το 2013-2014 με 479,38mm. Το έτος 2013-2014 είναι το χαμηλότερο βροχομετρικά και για την ανατολική Κρήτη.

Στη συνέχεια, κατασκευάστηκε το διάγραμμα για τη συνολική τιμή της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης για τη Δυτική Κρήτη κατά την υγρή περίοδο των υδρολογικών ετών μελέτης. Το τμήμα της Δυτικής Κρήτης περιλαμβάνει τους νομούς Χανίων και Ρεθύμνου. Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως ο νομός Χανίων θεωρείται ο πιο υγρός νομός όλης της Κρήτης. Οπότε αναμένουμε οι συνολικές τιμές της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης να είναι υψηλότερες από τις αντίστοιχες τιμές για την ανατολική Κρήτη. Το έτος με την υψηλότερη μέση τιμή βροχόπτωσης είναι το 2014-2015 με στάθμη 1118,7mm ενώ το έτος με τη χαμηλότερη τιμή βροχόπτωσης για την υγρή περίοδο είναι το 2013-2014 με 457,94mm(σχήμα 11).

Επιπλέον, κατασκευάστηκε το διάγραμμα της συνολικής μέσης ετήσιας βροχόπτωσης στην Δυτική Κρήτη για την ξηρή περίοδο. Από το διάγραμμα διακρίνεται πως τα υδρολογικά έτη 2008-2009 και 2010-2011 παρουσιάζουν σημαντική βροχόπτωση με 189,09mm και 185,7m αντίστοιχα. Σε αντίθετη περίπτωση διαπιστώνεται πως αρκετά ξηρές περιόδους με χαμηλή βροχόπτωση έχουμε στα διαστήματα των ξηρών περιόδων 2011-2014 και 2015-2016(σχήμα 12).



Σχήμα 10: Διάγραμμα συνολικής μέσης ετήσιας βροχόπτωσης Δυτικής Κρήτης κατά την περίοδο 2007-2016.



Σχήμα 11: Διάγραμμα συνολικής μέσης ετήσιας βροχόπτωσης Δυτικής Κρήτης για την υγρή περίοδο των ετών 2007-2016.



Σχήμα 12: Διάγραμμα συνολικής μέσης ετήσιας βροχόπτωσης Δυτικής Κρήτης για την ξηρή περίοδο των ετών 2007-2016.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκαν εκτός από τους πενήντα τέσσερις (54) βροχομετρικούς σταθμούς, επιπλέον είκοσι οχτώ(28) σταθμοί από δεδομένα που είναι καταχωρημένα στην ελληνική μετεωρολογική υπηρεσία. Στο σχήμα 13 παρουσιάζεται η συνολική μέση ετήσια βροχόπτωση για τους είκοσι οχτώ (28) βροχομετρικούς σταθμούς της Κρήτης. Αυτοί οι επιπλέον σταθμοί εμφανίζονται σε διάφορα σημεία του νησιού και εξαπλώνονται στους τέσσερις(4) νομούς της Κρήτης. Σύμφωνα με αυτό το διάγραμμα η υψηλότερη βροχόπτωση παρατηρείται κατά τη περίοδο 2014-2015 με 996,48mm και δεύτερη υψηλότερη στάθμη το 2011-2012 με 823,73mm. Η χαμηλότερη τιμή της συνολικής μέσης ετήσιας βροχόπτωσης παρατηρήθηκε το υδρολογικό έτος 2015-2016 με 409,57mm.

Στη συνέχεια της μελέτης, κατασκευάστηκε το διάγραμμα με τη συνολική μέση ετήσια βροχόπτωση για την υγρή περίοδο των υδρολογικών ετών 2007-2016 όπου περιλαμβάνονται οι είκοσι οχτώ (28) βροχομετρικοί σταθμοί της Κρήτης. Είναι εμφανές ότι το πιο υγρό έτος είναι 2014-2015 και δεύτερο με μικρή διαφορά είναι το έτος 2011-2012(σχήμα 14).

Παρακάτω παρουσιάζεται το σχήμα 15 με τη συνολική μέση ετήσια βροχόπτωση κατά την ξηρή περίοδο των υδρολογικών ετών 2007-2016. Το πιο ξηρό έτος σύμφωνα με τους σταθμούς της μετεωρολογικής υπηρεσίας είναι το 2009-2010. Το έτος αυτό παρουσιάζει μέση τιμή συνολικής βροχόπτωσης 11,02mm για την ξηρή περίοδο και συγκριτικά με τα υπόλοιπα έτη είναι με μεγάλη διαφορά το πιο ξηρό. Αντίθετα το έτος 2014-2015 κατά την ξηρή του περίοδο εμφανίζει αρκετά υψηλή συνολική βροχόπτωση με 123,36mm.



Σχήμα 13: Διάγραμμα συνολικής μέσης ετήσιας βροχόπτωσης των 28 σταθμών για περίοδο 2007-2016.



Σχήμα 14: Διάγραμμα συνολικής μέσης ετήσιας βροχόπτωσης υγρής περιόδου για τους 28 σταθμούς κατά την περίοδο 2007-2016.



Σχήμα 15: Διάγραμμα συνολικής μέσης ετήσιας βροχόπτωσης ξηρής περιόδου για τους 28 σταθμούς κατά την περίοδο 2007-2016.



Εφόσον μελετήθηκαν οι 28 σταθμοί της μετεωρολογικής υπηρεσίας για όλη την Κρήτη, στο σχήμα 16 παρουσιάζεται η συνολική ετήσια βροχόπτωση της Ανατολικής Κρήτης ξεχωριστά. Σύμφωνα με τα δεδομένα των βροχομετρικών σταθμών που μελετήθηκαν στα παραπάνω σχήματα 13,14,15, στην Ανατολική Κρήτη εμφανίζονται έντεκα (11) βροχομετρικοί σταθμοί από τους συνολικά είκοσι οχτώ (28) σταθμούς που εξετάστηκαν. Λαμβάνοντας υπόψη αυτά τα δεδομένα παρατηρείται πως το έτος 2011-2012 είναι το υψηλότερο βροχομετρικά με 773,09mm και δεύτερο υψηλό βροχομετρικά με μικρή διαφορά είναι το έτος 2014-2015 με 732,65mm.

Επιπλέον, συνεχίζεται η μελέτη για το ανατολικό τμήμα της Κρήτης που αφορά τους νομούς Ηρακλείου και Λασιθίου. Στο σχήμα 17 παρουσιάζεται η συνολική τιμή μέσης ετήσιας βροχόπτωσης για την υγρή περίοδο των υδρολογικών ετών μελέτης. Προκύπτει πως το πιο υγρό έτος είναι το 2011-2012 και δεύτερο με μικρή διαφορά είναι το έτος 2014-2015.

Εφόσον μελετήθηκε η υγρή περίοδος των ετών 2007-2016 παρακάτω παρουσιάζεται και η ξηρή περίοδος των ετών αυτών για την ανατολική Κρήτη. Από τους 11 σταθμούς της μετεωρολογικής υπηρεσίας προκύπτει το διάγραμμα της συνολικής ετήσιας βροχόπτωσης στην Ανατολική Κρήτη για την ξηρή περίοδο. Διαπιστώνεται πως το πιο ξηρό έτος είναι το 2009-2010 με 11,36mm και δεύτερο με μικρή διαφορά το έτος 2011-2012 με 16,99mm. Το έτος 2014-2015 παρουσιάζει μέση ετήσια βροχόπτωση την ξηρή περίοδο 89,93mm, γεγονός που δηλώνει ότι η χρονιά αυτή δεν ήταν αρκετά ξηρή όσο οι υπόλοιπες (σχήμα 18).



Σχήμα 16: Διάγραμμα συνολικής μέσης ετήσιας βροχόπτωσης Ανατολικής Κρήτης κατά την περίοδο 2007-2016.



Σχήμα 17: Διάγραμμα συνολικής μέσης ετήσιας βροχόπτωσης Ανατολικής Κρήτης για την υγρή περίοδο των ετών 2007-2016.



Σχήμα 18: Διάγραμμα συνολικής μέσης ετήσιας βροχόπτωσης Ανατολικής Κρήτης για την ξηρή περίοδο των ετών 2007-2016.

Όσον αφορά τη δυτική Κρήτη παρουσιάζεται η συνολική ετήσια βροχόπτωση σύμφωνα με τα δεδομένα των βροχομετρικών σταθμών που μελετήθηκαν από την ελληνική μετεωρολογική υπηρεσία. Στην δυτική Κρήτη εμφανίζονται δέκα επτά(17) βροχομετρικοί σταθμοί από τους συνολικά είκοσι οχτώ (28) που εξετάστηκαν. Συγκριτικά με την ανατολικά Κρήτη που μελετήθηκαν έντεκα (11) είναι σαφώς περισσότεροι σταθμοί στην Δυτική Κρήτη. Σύμφωνα με αυτά τα δεδομένα παρατίθεται το παρακάτω διάγραμμα απεικόνισης της συνολικής ετήσιας βροχόπτωσης για το δυτικό τμήμα της Κρήτης(σχήμα19). Προκύπτει ότι το έτος 2014-2015 είναι το υψηλότερο βροχομετρικά ενώ το 2015-2016 το χαμηλότερο βροχομετρικά υδρολογικό έτος.

Για το τμήμα της δυτικής Κρήτης που περιλαμβάνονται οι νομοί Χανίων και Ρεθύμνου μελετήθηκε η απεικόνιση της συνολικής μέσης ετήσιας βροχόπτωσης κατά την υγρή περίοδο. Όπως παρατηρείται στο σχήμα 20 είναι εμφανές ότι το έτος 2014-2015 είναι το πιο υγρό με τιμή 1022,21mm ενώ το λιγότερο υγρό έτος σύμφωνα με το διάγραμμα μελέτης μας είναι το 2015-2016 με 427,79mm.

Στη συνέχεια, στο σχήμα 21 παρατίθεται το διάγραμμα της συνολικής ετήσιας βροχόπτωσης για τη δυτική Κρήτη κατά την ξηρή περίοδο των ετών 2007-2016. Διακρίνεται πως το πιο ξηρό έτος είναι το 2009-2010 με μόλις 10,79mm. Αντίθετα το έτος 2014-2015 εμφανίζεται με υψηλή συνολική βροχόπτωση με μέση τιμή 144,95mm. Αυτή η τιμή είναι αρκετά μεγάλη για την ξηρή περίοδο αν λάβουμε υπόψη τις τιμές που παρουσιάζουν τα υπόλοιπα έτη.



Σχήμα 19: Διάγραμμα συνολικής μέσης ετήσιας βροχόπτωσης Δυτικής Κρήτης κατά την περίοδο 2007-2016.

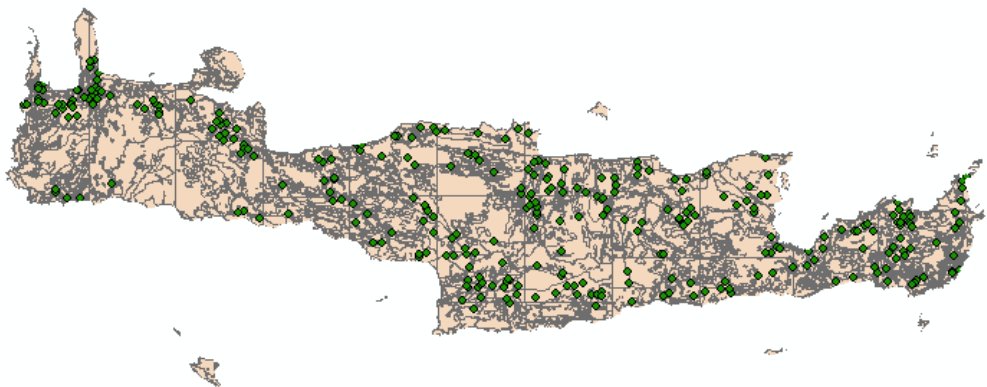


Σχήμα 20: Διάγραμμα συνολικής μέσης ετήσιας βροχόπτωσης Δυτικής Κρήτης για την υγρή περίοδο των ετών 2007-2016.



Σχήμα 21: Διάγραμμα συνολικής μέσης ετήσιας βροχόπτωσης Δυτικής Κρήτης για την ξηρή περίοδο των ετών 2007-2016.

Με την ολοκλήρωση της μελέτης των ογδόντα δύο (82) βροχομετρικών σταθμών που εκτείνονται διάσπαρτοι σε όλη την έκταση του νησιού της Κρήτης, συλλέχθηκαν και μελετήθηκαν στοιχεία για τα υπόγεια νερά του νησιού. Λαμβάνοντας υπόψη τον κωδικό του κάθε υδροσημείου που βρίσκεται στην Κρήτη, συμπληρώνονται συνολικά τριακόσια δώδεκα (312) υδροσημεία. Στη συνέχεια, για το κάθε υδροσημείο καταχωρήθηκαν γεωγραφικές συντεταγμένες Χ,Υ καθώς και το υψόμετρο Ζ. Τα στοιχεία που συλλέχθηκαν είναι η στατική στάθμη των 312 υδροσημείων για τα έτη 2007-2014. Στο χάρτη 4 απεικονίζονται με μεγάλη ακρίβεια η τοποθεσία των υδροσημείων αυτών πάνω στην Κρήτη. Τα διαθέσιμα δεδομένα θα επεξεργαστούν σε γεωστατιστικό περιβάλλον ώστε να προκύψουν συμπεράσματα σχετικά με τη χωρική και τη χρονική μεταβολή της στάθμης των υπόγειων υδάτων στο νησί της Κρήτης. Για τη βέλτιστη επεξεργασία των δεδομένων της στάθμης λόγω υδρογεωλογικών ιδιοτεροτήτων με βάση τον υδροφορέα που βρίσκονται χρησιμοποιείται ως δευτερεύουσα πληροφορία το υψόμετρο και τα όρια των υδρογεωλογικών λεκανών.



Χάρτης 4: Απεικόνιση των υδροσημείων στη περιοχή της Κρήτης.

### **3)ΓΕΩΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ**

#### **3.1) ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ**

##### **3.1.1) ΓΕΩΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ**

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.

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. 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.

Πιο συγκεκριμένα, η ανάλυση αυτή 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.

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. 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 τις εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιείται σήμερα η γεωστατιστική περιλαμβάνουν :

- 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.

### **3.1.2) ΤΥΧΑΙΑ ΠΕΔΙΑ**

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.

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.

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.

Οι δύο άλλες βασικές έννοιες στις οποίες στηρίζεται η έννοια του τυχαίου πεδίου είναι η τυχαιότητα και η αλληλεξάρτηση των τιμών φυσικών μεγεθών σε διαφορετικά σημεία του χώρου. Η τυχαιότητα 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.

### 3.1.3) ΗΜΙΒΑΡΙΟΓΡΑΜΜΑ

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 βαριόγραμματος 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.

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.

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. Ακολούθως, 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.

### ΠΡΟΣΔΙΟΡΟΣΜΟΣ ΗΜΙΒΑΡΙΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

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  $N_c$ .

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  $\hat{g}_\chi(r_k)$  είναι ένας καλός εκτιμητής του  $g_\chi(r_k)$  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 & Hristopoulos 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.

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).

#### ΜΟΝΤΕΛΑ ΗΜΙΒΑΡΙΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ:

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 ευκλείδεια 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.

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

- 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.

### 3.1.4) ΧΩΡΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ 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:

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

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:

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

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

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

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

**KANONΙΚΟ 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:

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

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

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:

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

Η σταθερά  $2\mu$  είναι ο συντελεστής Lagrange για την συνθήκη αμεροληψίας και κάνοντας χρήση της συνάρτησης συνδιασποράς η παραπάνω σχέση εκφράζεται ως εξής:

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

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,

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

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

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) ΧΩΡΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ COKRIGING

Βοηθητικές πληροφορίες μπορούν να ενσωματωθούν στη διαδικασία παρεμβολής χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Cokriging, η οποία χρησιμοποιεί δευτερεύουσες μεταβλητές στη δομή συνδιασποράς. Μια τέτοια δευτερεύουσα μεταβλητή είναι το υψόμετρο Z που λάβαμε υπόψη καθώς και η γεωλογία της κάθε υπολεκάνης.

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 τις 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 ημι-βαριογράμματος (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) ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ KRIGING ΚΑΙ COKRIGING**

Αρχικά, 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 του arc map. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν τα ημιβαριογράμματα που διακρίνονται σε (4) τέσσερις τύπους: το σφαιρικό, το εκθετικό, το γκαουσιανό και το K-bessel.

Στη συνέχεια, η μέθοδος Cokriging παρουσιάζει ενδιαφέρον για την γεωστατιστική μελέτη των υδρολογικών στοιχείων, καθώς αποτελεί μια πιο σύνθετη εκδοχή της απλής μεθόδου Kriging όπου λαμβάνει υπόψη ορισμένες δευτερεύουσες μεταβλητές. Η μέθοδος Cokriging χρησιμοποιεί και μια δεύτερη παράμετρο για τους υπολογισμούς, που στην περίπτωση της παρούσας εργασίας είναι το υψόμετρο Z. Το υψόμετρο αποτελεί βασικό παράγοντα που σχετίζεται άμεσα 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 με την



εφαρμογή του εργαλείου Arcmap. Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις τύποι ημιβαριογραμμάτων: το σφαιρικό, το εκθετικό, το γκαουσιανό και το K-Bessel. Επιπλέον, κατά τη μελέτη των υπόγειων νερών χρησιμοποιήθηκε το υψόμετρο Z και τα όρια των υδρολογικών λεκανών ώστε να προκύψουν οι χάρτες προσδιορισμού της στατικής στάθμης του υπόγειου υδροφορέα.

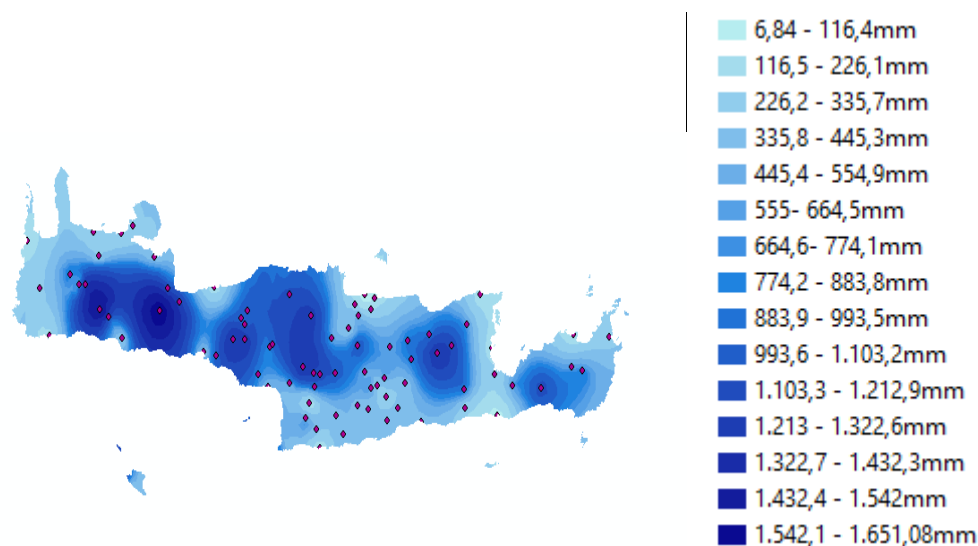
### **3.2.1) ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ KRIGING ΚΑΙ COKRIGING**

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται 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 για το κάθε υδρολογικό έτος η μεταβολή της βροχόπτωσης καθώς και οι αλλαγές στην υγρή και ξηρή περίοδο 2007-2016.

Ο κάθε ένας τύπος ημιβαριογράμματος σφαιρικός, εκθετικός, γκαουσιανός και K-Bessel δίνουν ένα σφάλμα για κάθε χρονιά ή περίοδο (ξηρή, υγρή) μελέτης μας. Αυτό το σφάλμα μπορεί να διαφέρει αρκετά από τον ένα τύπο στον άλλον. Για να διαπιστώσουμε ποιος τύπος σε κάθε μέτρησή μας είναι ο καλύτερος, αρκεί μόνο να συγκρίνουμε το σφάλμα του κάθε ενός από τους τέσσερις (4) τύπους και να κρατήσουμε τον τύπο ημιβαριογράμματος με το μικρότερο σφάλμα.

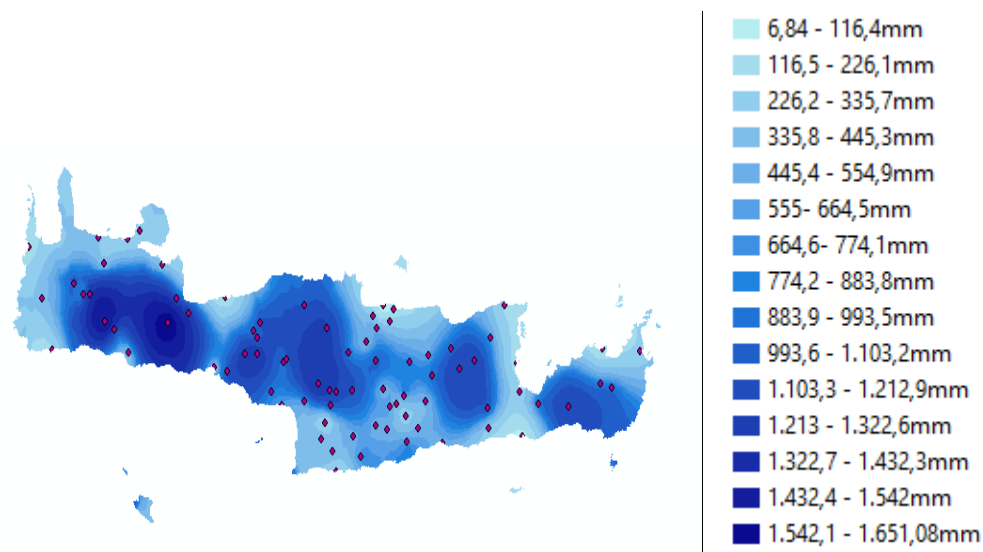
## **ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ**

Σύμφωνα με τη χρήση της γεωστατιστικής ανάλυσης πραγματοποιήθηκε το βέλτιστο θεωρητικό μοντέλο ημιβαριογράμματος που προσδιορίστηκε για κάθε περίπτωση μελέτης. Αρχικά, μελετήθηκε ο μέσος όρος της συνολικής βροχόπτωσης στο νησί της Κρήτης όπως φαίνεται στο χάρτη 5. Ο τύπος που χρησιμοποιήθηκε με το μικρότερο σφάλμα είναι ο εκθετικός (τάξη σφάλματος 7.3mm) συγκριτικά με τον σφαιρικό (σφάλμα 7.6mm), το γκαουσιανό (σφάλμα -50.8mm) και τον k-bessel (σφάλμα 9.3mm).



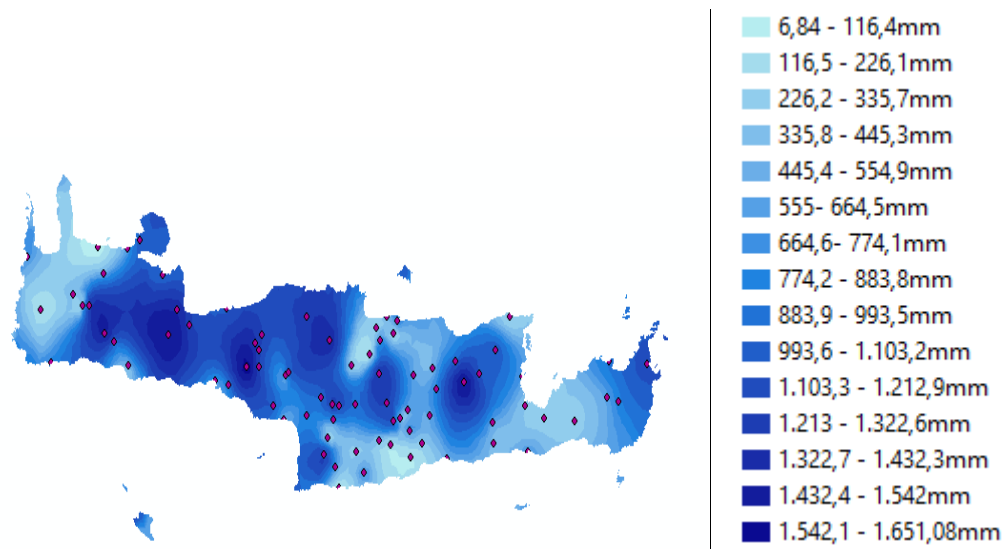
Χάρτης 5: Σχηματική απεικόνιση της Κρήτης όπου εμφανίζεται η χωρική κατανομή του μέσου όρου της συνολικής βροχόπτωσης(mm) που προέκυψε με τη μέθοδο Ordinary Kriging κατά την περίοδο 2007-2016.

Στη συνέχεια, έγινε απεικόνιση του μέσου όρου της βροχόπτωσης(mm) κατά την υγρή περίοδο για τα έτη 2007-2016(χάρτης 6). Ο τύπος που χρησιμοποιήθηκε με το μικρότερο σφάλμα είναι ο σφαιρικός (τάξη σφάλματος 7.5mm) συγκριτικά με τον εκθετικό (σφάλμα 7.9mm), το γκαουσιανό (σφάλμα -39.3mm) και τον k-bessel (σφάλμα 8.5mm).



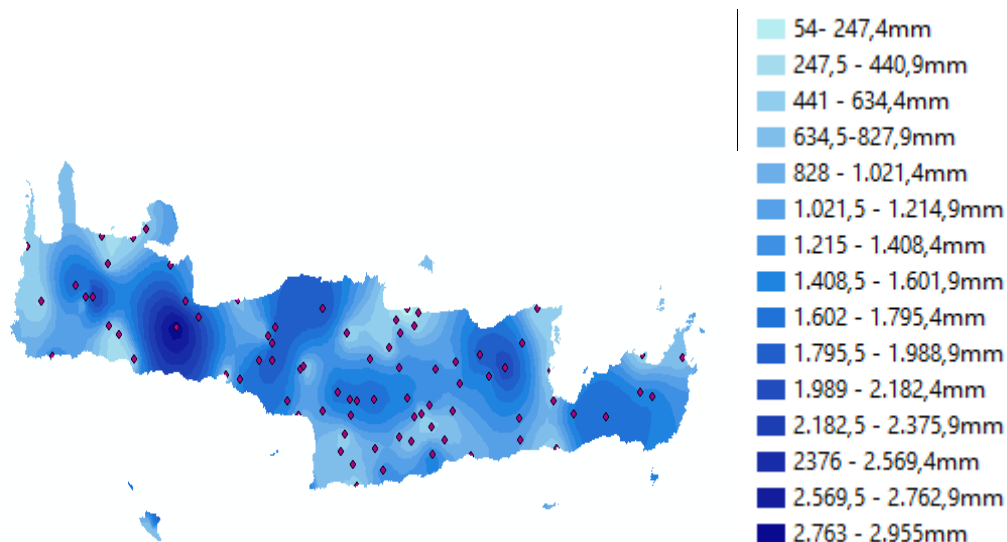
Χάρτης 6: Σχηματική απεικόνιση της Κρήτης όπου παρουσιάζεται η χωρική κατανομή του μέσου όρου της συνολικής βροχόπτωσης(mm) κατά την υγρή περίοδο που προέκυψε με τη μέθοδο Ordinary Kriging για τα έτη 2007-2016.

Επιπλέον, στο χάρτη 7 παρουσιάζεται ο μέσος όρος του συνόλου της βροχόπτωσης(mm) κατά την ξηρή περίοδο για τα έτη μελέτης 2007-2016. Ο κατάλληλος τύπος που χρησιμοποιήθηκε είναι ο σφαιρικός (τάξη σφάλματος 0.18mm) συγκριτικά με τον εκθετικό (σφάλμα 0.48mm), το γκαουσιανό (σφάλμα - 9.4mm) και τον k-bessel (σφάλμα 1.01mm).



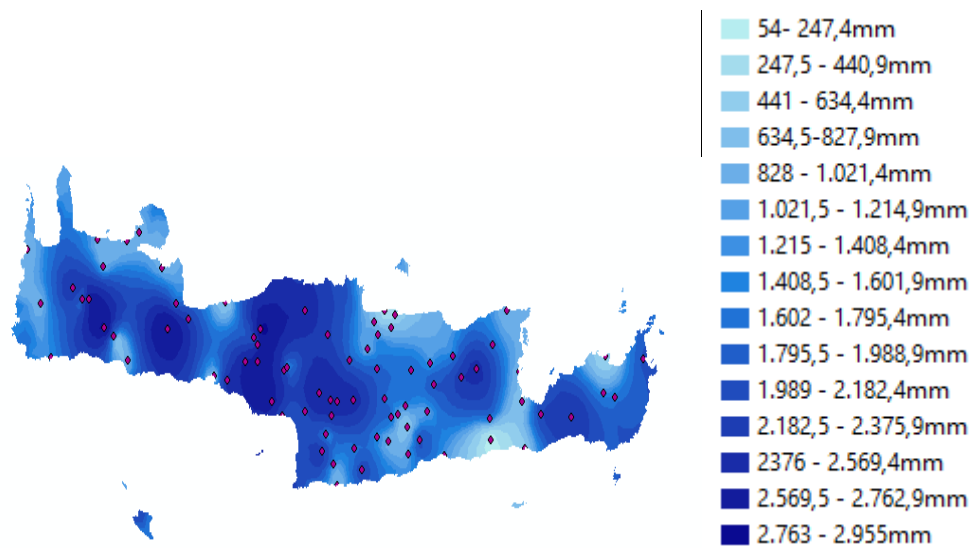
Χάρτης 7: Σχηματική απεικόνιση της Κρήτης, όπου παρουσιάζεται η χωρική κατανομή του μέσου όρου της συνολικής βροχόπτωσης(mm) κατά την ξηρή περίοδο που προέκυψε με τη μέθοδο Ordinary Kriging για τα έτη 2007-2016.

Στο σημείο αυτό, παρουσιάζεται η σχηματική απεικόνιση της Κρήτης για κάθε ένα από τα υδρολογικά έτη 2007-2016 όσον αφορά τη συνολική βροχόπτωση κάθε χρονιάς. Στο χάρτη 8 εμφανίζεται η συνολική βροχόπτωση κατά την περίοδο 2007-2008. Ο τύπος ημιβαριογράμματος που χρησιμοποιήθηκε με το μικρότερο σφάλμα είναι ο εκθετικός (τάξη σφάλματος 0.29mm) συγκριτικά με τον σφαιρικό (σφάλμα - 4.5mm), το γκαουσιανό (σφάλμα -232.7mm) και το k-bessel (σφάλμα 6.6mm).



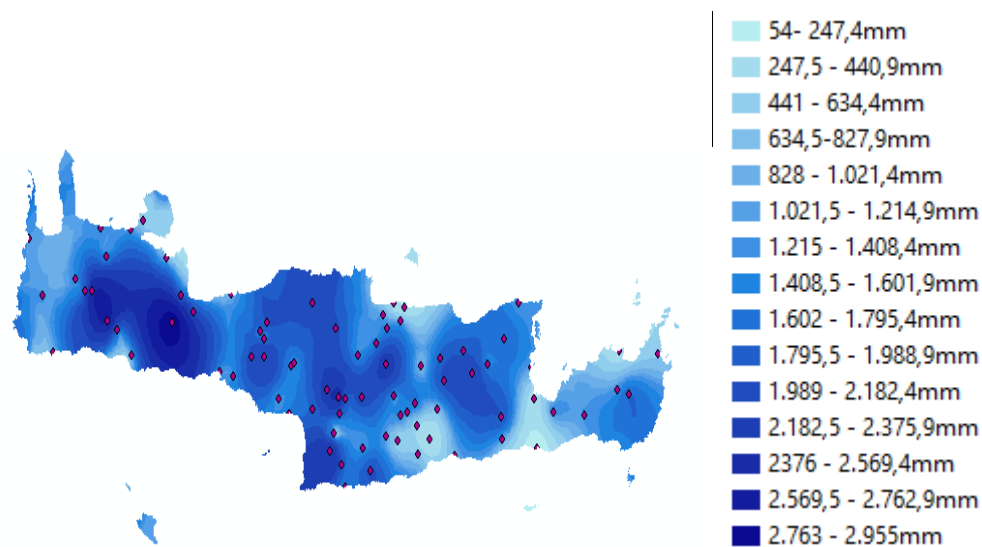
Χάρτης 8: Σχηματική απεικόνιση της Κρήτης όπου εμφανίζεται η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης για το έτος 2007-2008.

Στο χάρτη 9 απεικονίζεται η συνολική βροχόπτωση της Κρήτης κατά την περίοδο 2008-2009. Ο τύπος που χρησιμοποιήθηκε με το μικρότερο σφάλμα είναι ο εκθετικός (τάξη σφάλματος 1.4mm) συγκριτικά με τον σφαιρικό (σφάλμα -3.8mm), το γκαουσιανό (σφάλμα -164.3mm) και τον k-bessel (σφάλμα 8.8mm).



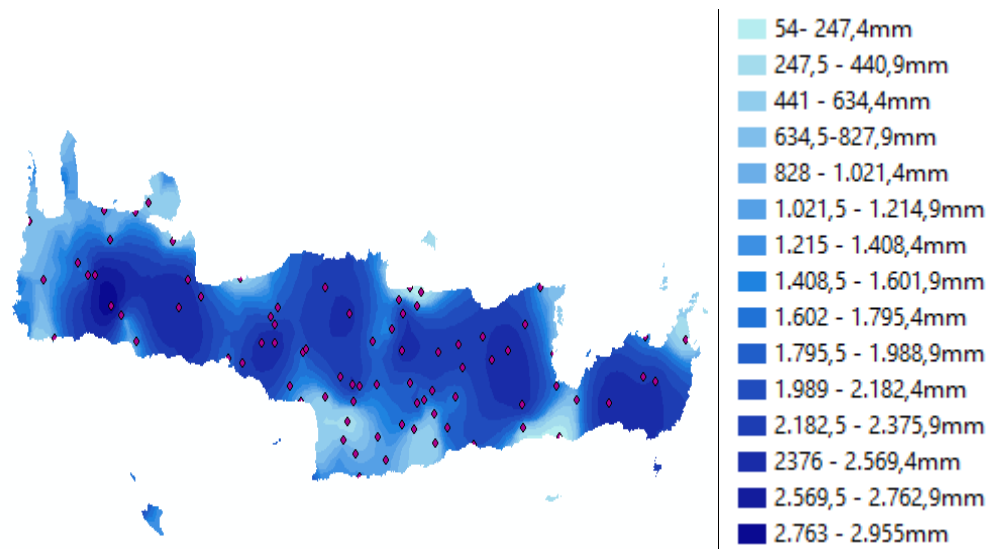
Χάρτης 9: Σχηματική απεικόνιση της Κρήτης όπου εμφανίζεται η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης για το έτος 2008-2009.

Όσον αφορά τη σχηματική απεικόνιση της συνολικής βροχόπτωσης κατά την περίοδο 2009-2010 στο νησί της Κρήτης παρουσιάζεται ο χάρτης 10. Ο τύπος ημιβαριογράμματος που χρησιμοποιήθηκε με το μικρότερο σφάλμα είναι ο σφαιρικός (τάξη σφάλματος 1.9mm) συγκριτικά με τον εκθετικό (σφάλμα 5.5mm), το γκαουσιανό (σφάλμα -190.1mm) και το k-bessel (σφάλμα 11.2mm).



Χάρτης 10: Σχηματική απεικόνιση της Κρήτης όπου εμφανίζεται η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης για το έτος 2009-2010.

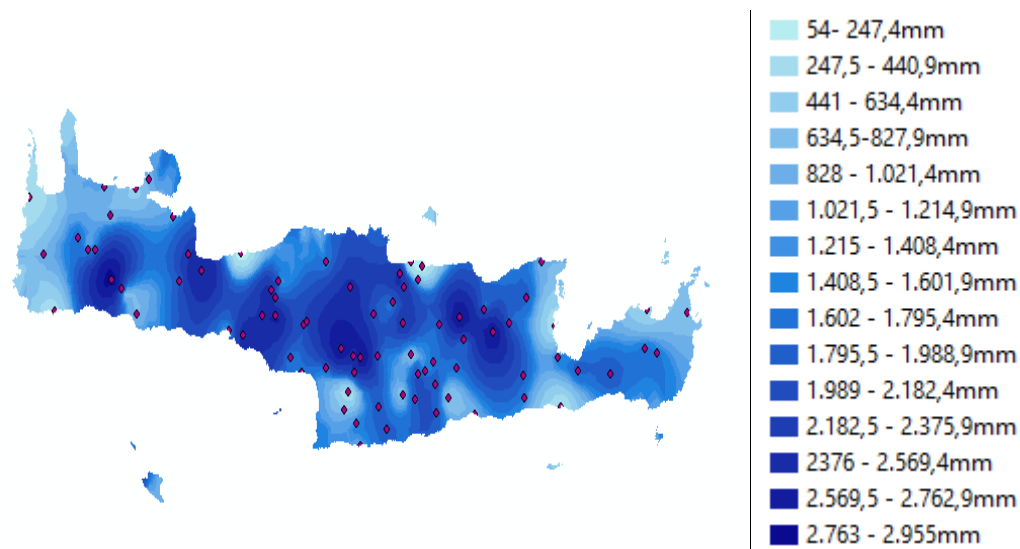
Η απεικόνιση της συνολικής βροχόπτωσης κατά την περίοδο 2010-2011 παρουσιάζεται στον παρακάτω χάρτη (χάρτης 11). Το ημιβαριόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε με το μικρότερο σφάλμα είναι το σφαιρικό (τάξη σφάλματος 10.4mm) συγκριτικά με το εκθετικό (σφάλμα 15.4mm), το γκαουσιανό (σφάλμα - 189.9mm) και το k-bessel (σφάλμα 17.1mm).



Χάρτης 11: Σχηματική απεικόνιση της Κρήτης όπου εμφανίζεται η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης για το έτος 2010-2011.

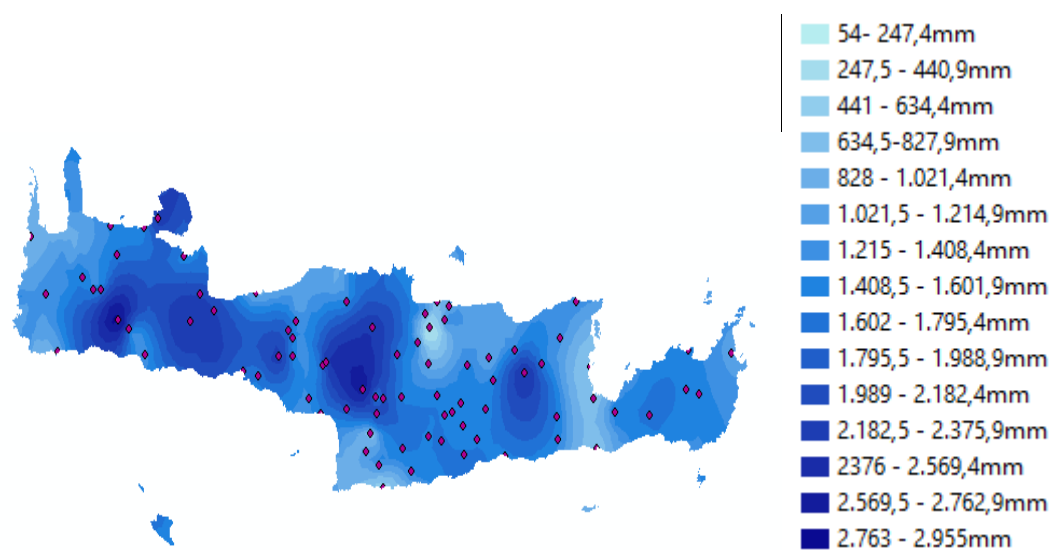


Στη συνέχεια αυτής της διπλωματικής, προκύπτει με τη βοήθεια της χρήση του Arc Map ο χάρτης 12 όπου εμφανίζεται η συνολική βροχόπτωση κατά την περίοδο 2011-2012. Ο τύπος ημιβαριογράμματος που χρησιμοποιήθηκε με το μικρότερο σφάλμα είναι ο εκθετικός (τάξη σφάλματος 17.7mm) συγκριτικά με τον σφαιρικό (σφάλμα 18.5mm), το γκαουσιανό (σφάλμα 181.9mm) και το k-bessel (σφάλμα 23.8mm).



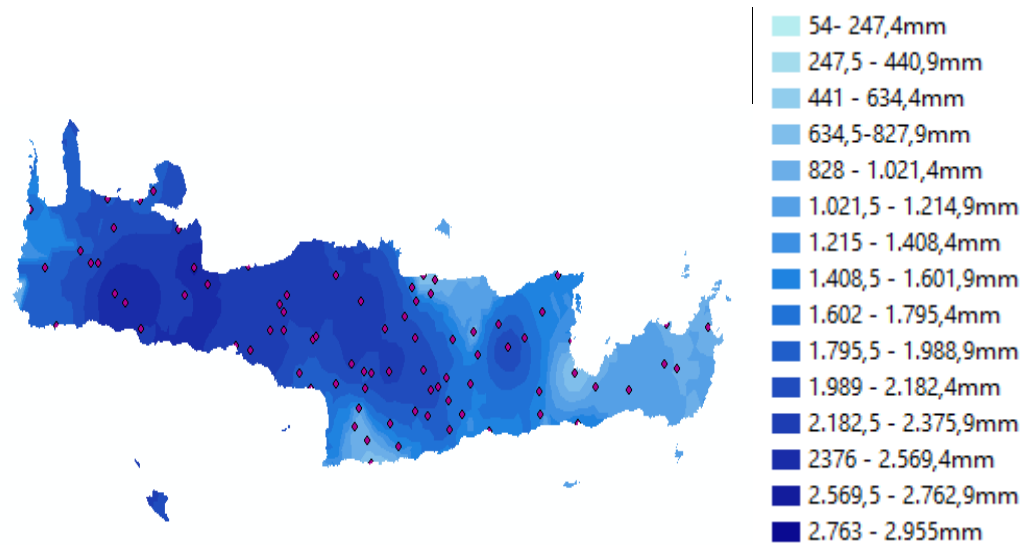
Χάρτης 12: Σχηματική απεικόνιση της Κρήτης όπου εμφανίζεται η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης για το έτος 2011-2012.

Για την απεικόνιση της συνολικής βροχόπτωσης κατά την περίοδο 2012-2013 στο Υδατικό διαμέρισμα της Κρήτης παρουσιάζεται ο εξής χάρτης(χάρτης 13). Ο τύπος ημιβαριογράμματος που χρησιμοποιήθηκε με το μικρότερο σφάλμα είναι ο σφαιρικός (τάξη σφάλματος 3.8mm) συγκριτικά με τον εκθετικό (σφάλμα 4mm), το γκαουσιανό (σφάλμα 40.3mm) και το k-bessel (σφάλμα 8.4mm).



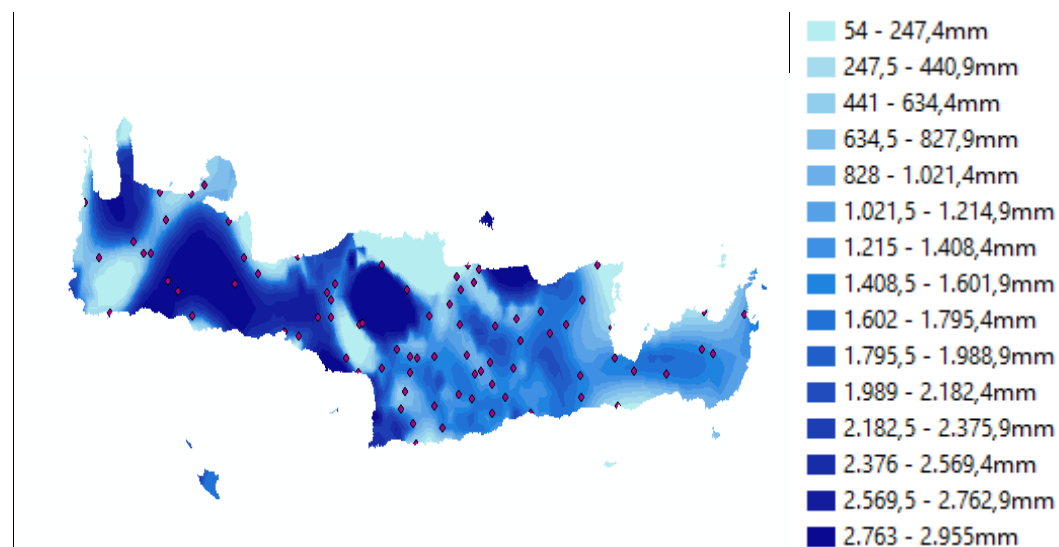
Χάρτης 13: Σχηματική απεικόνιση της Κρήτης όπου εμφανίζεται η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης για το έτος 2012-2013.

Ο χάρτης 14 παρουσιάζει τη συνολική βροχόπτωση κατά την περίοδο 2013-2014. Ο βέλτιστος τύπος ημιβαριογράμματος που χρησιμοποιήθηκε είναι ο k-bessel (σφάλμα 6.4mm), συγκριτικά με το σφαιρικό (σφάλμα 8.7mm), το γκαουσιανό (σφάλμα 63mm) και τον εκθετικό (τάξη σφάλματος 6.8mm).



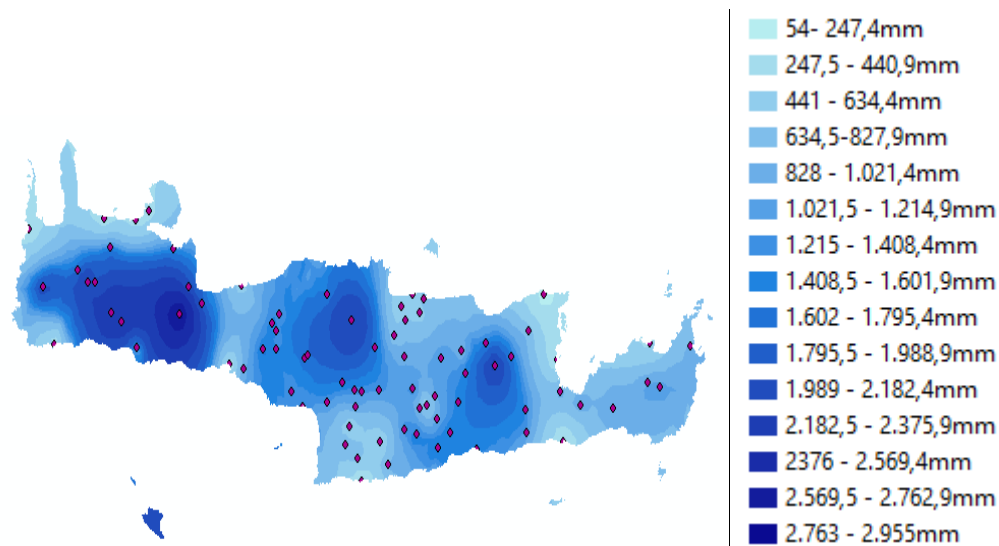
Χάρτης 14: Σχηματική απεικόνιση της Κρήτης όπου εμφανίζεται η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης για το έτος 2013-2014.

Στο χάρτη 15 παρουσιάζεται η συνολική βροχόπτωση κατά την περίοδο 2014-2015. Το ημιβαριόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε με το μικρότερο σφάλμα είναι το γκαουσιανό (σφάλμα -3.5mm), συγκριτικά με το σφαιρικό (σφάλμα 19.9mm), το k-bessel (σφάλμα 12.9mm) και το εκθετικό (τάξη σφάλματος 16.8mm).



Χάρτης 15: Σχηματική απεικόνιση της Κρήτης όπου εμφανίζεται η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης για το έτος 2014-2015.

Στη συνέχεια, στο χάρτη 16 απεικονίζεται η συνολική βροχόπτωση κατά την περίοδο 2015-2016. Ο τύπος που χρησιμοποιήθηκε με το μικρότερο σφάλμα είναι ο k-bessel (σφάλμα -7.6mm), συγκριτικά με τον σφαιρικό (σφάλμα 13.7mm), το γκαουσιανό (σφάλμα 37.5mm) και τον εκθετικό (τάξη σφάλματος 10.5mm).



Χάρτης 16: Σχηματική απεικόνιση της Κρήτης όπου εμφανίζεται η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης για το έτος 2015-2016.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω αποτελέσματα της βροχόπτωσης για τη σχηματική απεικόνιση στο νησί της Κρήτης, δημιουργήθηκε ο πίνακας 2. Στον πίνακα 2 αναφέρεται το σφάλμα που υπολογίστηκε σε κάθε τύπο ημιβαριογράμματος για κάθε μία περίοδο μελέτης 2007-2016 ξεχωριστά.

## ΜΕΘΟΔΟΣ KRIGING

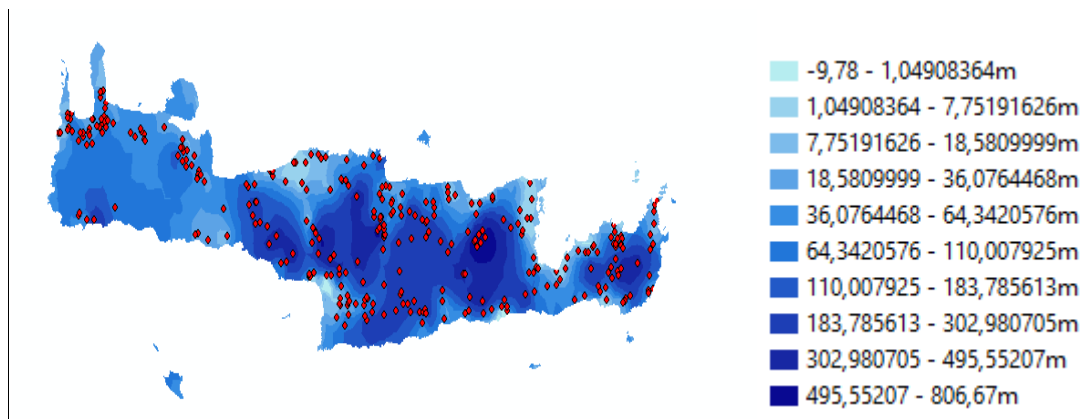
ΤΥΠΟΣ ΗΜΙΒΑΡΙΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ	Συνολικά 2007- 2016	Συνολικά υγρή 2007- 2016	Συνολικά ξηρή 2007- 2016	Συνολικά 2007- 2008	Συνολικά 2008- 2009	Συνολικά 2009- 2010
Spherical	7,6mm	7,5mm	0,18mm	-4,5mm	-3,8mm	1,9mm
Exponential	7,3mm	7,9mm	0,48mm	0,29mm	1,4mm	5,5mm
Gaussian	-50,8mm	-39,3mm	-9,4mm	-	-	-
K-Bessel	9,3mm	8,5mm	1,01mm	6,6mm	8,8mm	11,2mm

Συνολικά 2010-2011	Συνολικά 2011-2012	Συνολικά 2012-2013	Συνολικά 2013-2014	Συνολικά 2014-2015	Συνολικά 2015-2016
10,4mm	18,5mm	3,8mm	8,7mm	19,9mm	13,7mm
15,4mm	17,7mm	4mm	6,8mm	16,8mm	10,5mm
-189,9mm	181,9mm	40,3mm	63mm	-3,5mm	37,5mm
17,1mm	23,8mm	8,4mm	6,4mm	12,9mm	-7,6mm

Πίνακας 2: Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων της μεθόδου kriging για κάθε ένα τύπο ημιβαριογράμματος.

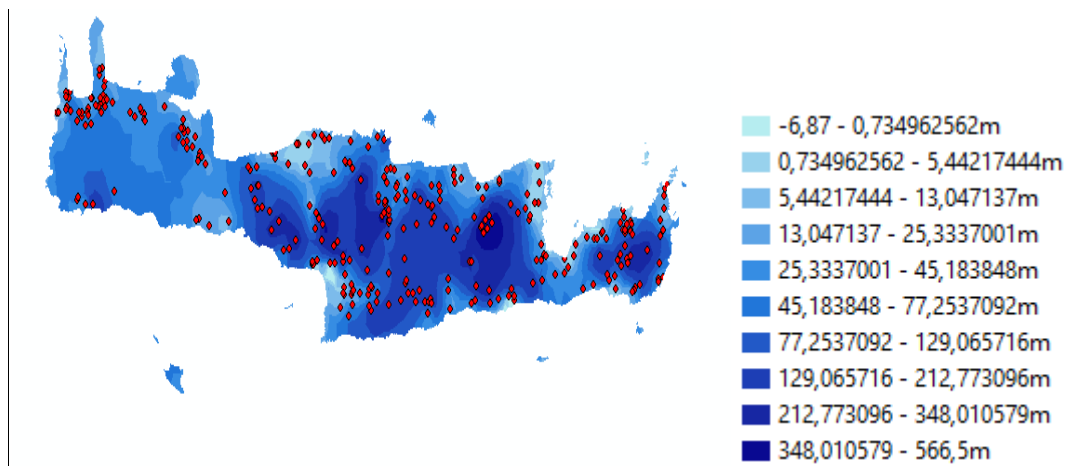
## ΥΠΟΓΕΙΑ ΝΕΡΑ

Εκτός από τη γεωστατιστική ανάλυση των βροχοπτώσεων στο νησί της Κρήτης, έγινε και χαρτογράφηση των διαθέσιμων υπόγειων νερών του νησιού σύμφωνα με τα διαθέσιμα δεδομένα. Αρχικά, απεικονίζεται ο μέσος όρος των συνολικών τιμών για τα υπόγεια νερά και αφορά τα έτη 2007-2014. Ο τύπος ημιβαριογράμματος που χρησιμοποιήθηκε με το μικρότερο σφάλμα είναι ο εκθετικός (τάξη σφάλματος - 1.80m) συγκριτικά με τον σφαιρικό (σφάλμα -1.9m), το γκαουσιανό (σφάλμα - 33.4m) και το k-bessel (σφάλμα -1.88m). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο χάρτη 17.

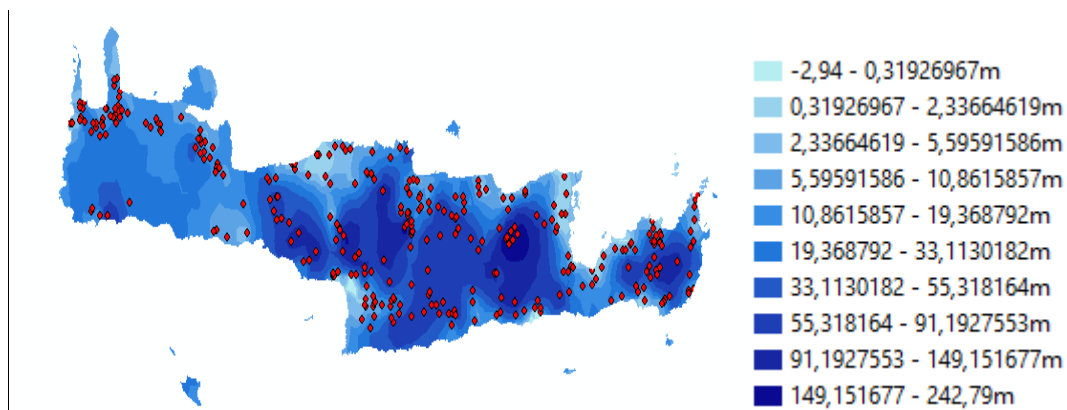


Χάρτης 17: Σχηματική απεικόνιση της Κρήτης όπου εμφανίζεται η χωρική κατανομή του μέσου όρου των υπόγειων νερών που προέκυψε με τη μέθοδο Cokriging για την περίοδο 2007-2014.

Για τη σχηματική απεικόνιση του μέσου όρου των υπόγειων νερών κατά την υγρή περίοδο των ετών 2007-2014 παρουσιάζεται ο χάρτης 18. Το ημιβαριόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε με το μικρότερο σφάλμα είναι το εκθετικό (τάξη σφάλματος - 1.2m) συγκριτικά με το σφαιρικό (σφάλμα -1.3m), το γκαουσιανό (σφάλμα -23.4m) και το k-bessel (σφάλμα -1.3m). Στο χάρτη 19 παρουσιάζεται ο μέσος όρος του συνόλου των υπόγειων νερών για την ξηρή περίοδο. Ο κατάλληλος τύπος στην περίπτωση αυτή είναι ο εκθετικός (τάξη σφάλματος -0.54m) συγκριτικά με τον σφαιρικό (σφάλμα -0.55m), το γκαουσιανό (σφάλμα -10m) και το k-bessel (σφάλμα -0.56m).



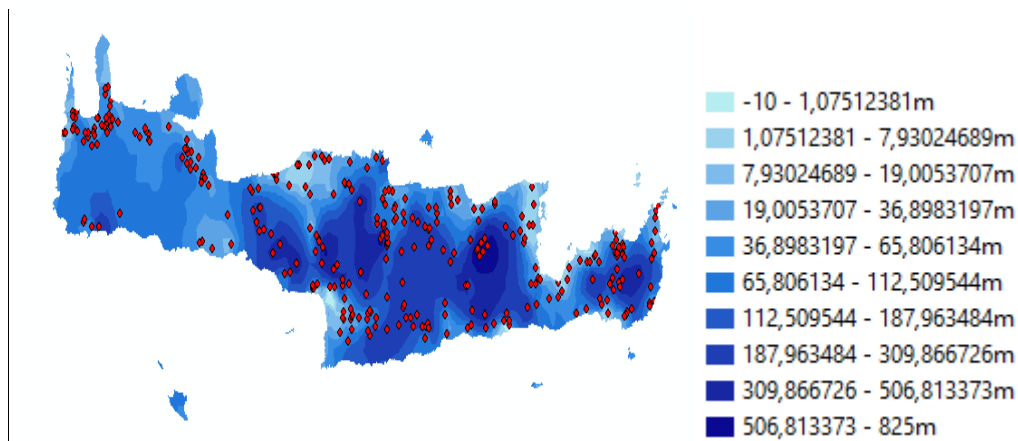
Χάρτης 18: Σχηματική απεικόνιση της Κρήτης όπου εμφανίζεται η χωρική κατανομή του μέσου όρου των υπόγειων νερών για την υγρή περίοδο των ετών 2007-2014.



Χάρτης 19: Σχηματική απεικόνιση της Κρήτης όπου εμφανίζεται η χωρική κατανομή του μέσου όρου των υπόγειων νερών για την ξηρή περίοδο των ετών 2007-2014.

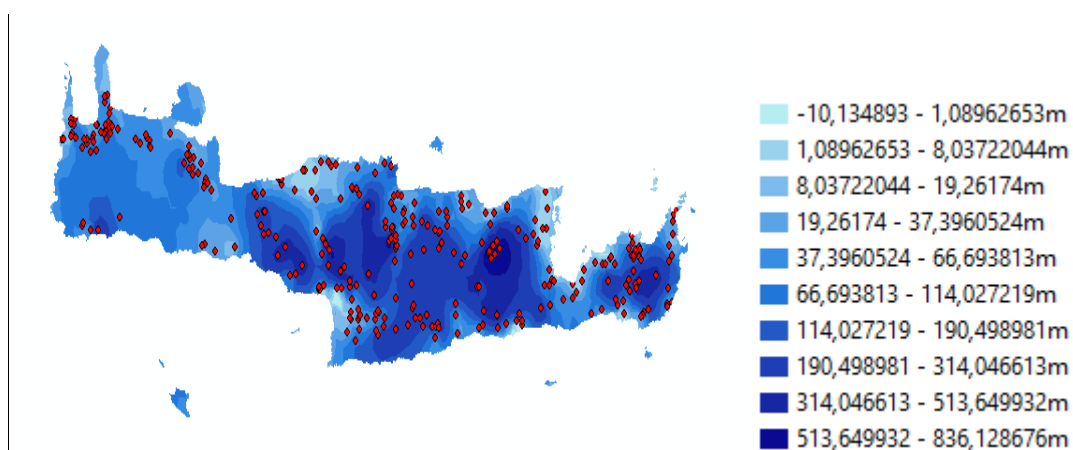
Όσον αφορά τη σχηματική απεικόνιση των υπόγειων νερών για κάθε ένα από τα υδρολογικά έτη 2007-2014, παρουσιάζεται παρακάτω η συνολική ποσότητα νερού κάθε χρονιάς. Στο χάρτη 20 εμφανίζεται η συνολική ποσότητα υπόγειων νερών κατά την περίοδο 2007-2008. Ο τύπος που χρησιμοποιήθηκε με το μικρότερο σφάλμα είναι ο εκθετικός (τάξη σφάλματος -1.6m) συγκριτικά με τον σφαιρικό (σφάλμα - 1.7m), το γκαουσιανό (σφάλμα -33.8m) και το k-bessel (σφάλμα -1.7m).





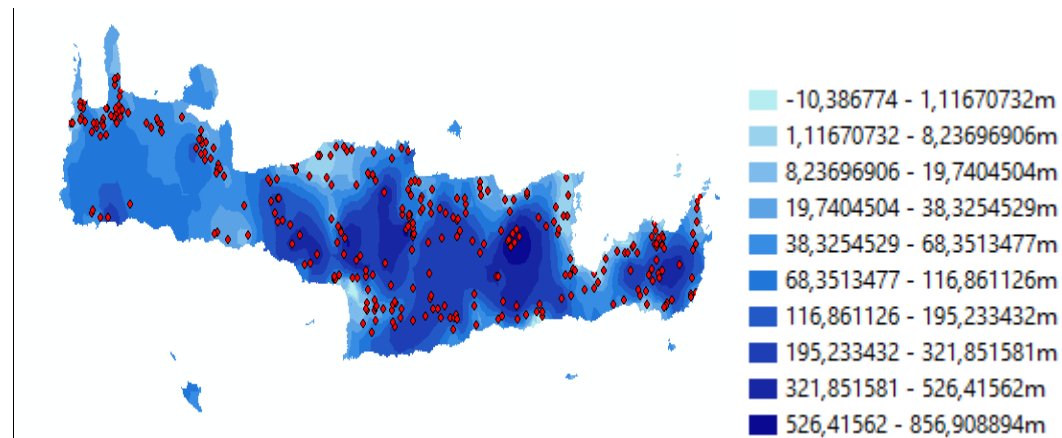
Χάρτης 20: Σχηματική απεικόνιση της Κρήτης όπου εμφανίζεται η χωρική κατανομή υπόγειων νερών για το έτος 2007-2008.

Παρακάτω διακρίνεται η συνολική ποσότητα υπόγειων νερών κατά την περίοδο 2008-2009(χάρτης 21) . Το ημιβαριόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε με το μικρότερο σφάλμα είναι το εκθετικό (τάξη σφάλματος -1.8m) συγκριτικά με το σφαιρικό (σφάλμα -1.9m), το γκαουσιανό (σφάλμα -34.6m) και το k-bessel (σφάλμα -1.9m).



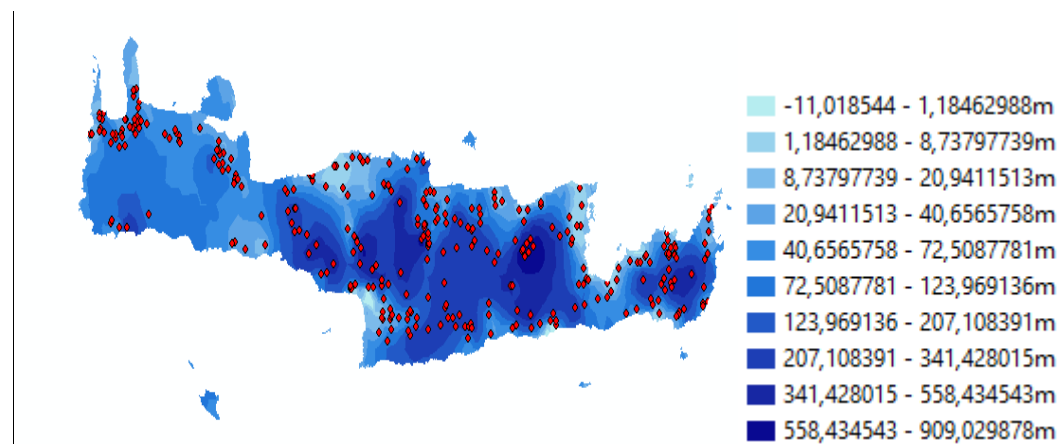
Χάρτης 21: Σχηματική απεικόνιση της Κρήτης όπου εμφανίζεται η χωρική κατανομή υπόγειων νερών για το έτος 2008-2009.

Επιπλέον, στο χάρτη 22 παρουσιάζεται η συνολική ποσότητα υπόγειων νερών κατά την περίοδο 2009-2010. Το ημιβαριόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε με το μικρότερο σφάλμα είναι το εκθετικό (τάξη σφάλματος -1.9m) συγκριτικά με το σφαιρικό (σφάλμα -2m), το γκαουσιανό (σφάλμα -35.4m) και το k-bessel (σφάλμα -2m).



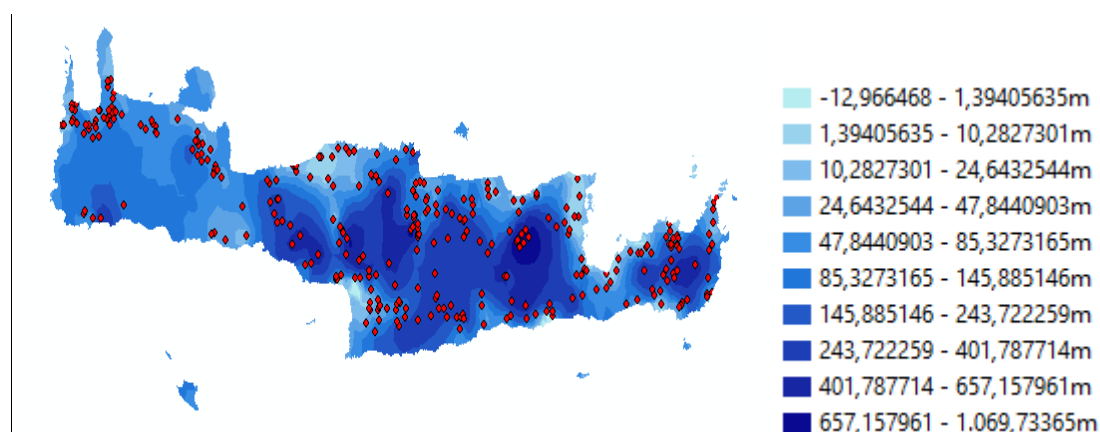
Χάρτης 22: Σχηματική απεικόνιση της Κρήτης όπου διακρίνεται η χωρική κατανομή υπόγειων νερών για το έτος 2009-2010.

Για τη συνολική ποσότητα υπόγειων νερών κατά την περίοδο 2010-2011 σχηματίστηκε ο χάρτης των δεδομένων αυτών στο χάρτη 23 που παρατίθεται παρακάτω. Ο κατάλληλος τύπος ημιβαριογράμματος από τους 4, που χρησιμοποιήθηκε με το μικρότερο σφάλμα είναι ο εκθετικός (τάξη σφάλματος -2m) συγκριτικά με το σφαιρικό (σφάλμα -2.1m), το γκαουσιανό (σφάλμα -37.6m) και το k-bessel (σφάλμα -2.1m).



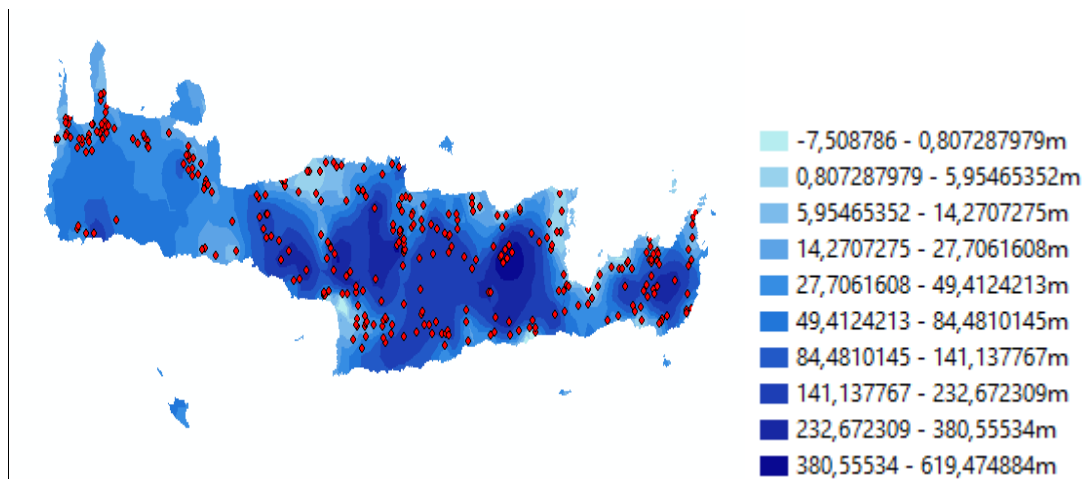
Χάρτης 23: Σχηματική απεικόνιση της Κρήτης όπου παρουσιάζεται η χωρική κατανομή υπόγειων νερών για το έτος 2010-2011.

Στον χάρτη 24 εμφανίζεται η συνολική ποσότητα υπόγειων νερών κατά την περίοδο 2011-2012 σύμφωνα με τα δεδομένα που συλλέχθηκαν τη χρονιά αυτή. Το ημιβαριόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε με το μικρότερο σφάλμα είναι το εκθετικό (τάξη σφάλματος -2.3m) συγκριτικά με το σφαιρικό (σφάλμα -2.5m), το γκαουσιανό (σφάλμα -44.2m) και το k-bessel (σφάλμα -2.5m).



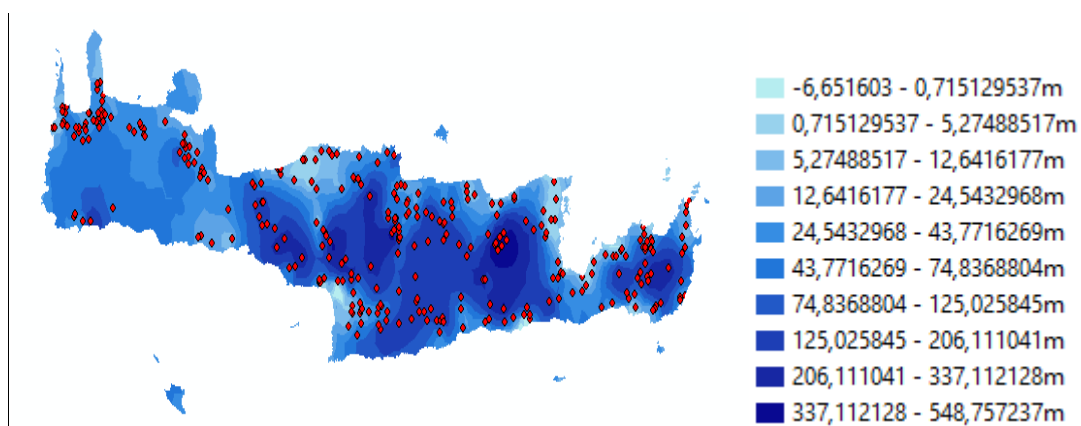
Χάρτης 24: Σχηματική απεικόνιση της Κρήτης όπου διακρίνεται η χωρική κατανομή υπόγειων νερών για το έτος 2011-2012.

Για τη σχηματική απεικόνιση της συνολικής ποσότητας υπόγειων νερών κατά την περίοδο 2012-2013 συλλέχθηκαν τα δεδομένα της χρονιάς αυτής και παρουσιάζονται στον χάρτη 25. Ο κατάλληλος τύπος που χρησιμοποιήθηκε με το μικρότερο σφάλμα είναι ο εκθετικός (τάξη σφάλματος -1.3m) συγκριτικά με το σφαιρικό (σφάλμα -1.4m), το γκαουσιανό (σφάλμα -25.6m) και το k-bessel (σφάλμα -1.4m).



Χάρτης 25: Σχηματική απεικόνιση της Κρήτης όπου παρουσιάζεται η χωρική κατανομή υπόγειων νερών για το έτος 2012-2013.

Στη συνέχεια της παρουσίασης χαρτών για το νησί της Κρήτης, εμφανίζεται ο χάρτης 26 που απεικονίζει τη συνολική ποσότητα υπόγειων νερών κατά την περίοδο 2013-2014. Ο τύπος ημιβαριογράμματος που χρησιμοποιήθηκε με το μικρότερο σφάλμα είναι ο εκθετικός (τάξη σφάλματος -1.22m) συγκριτικά με το σφαιρικό (σφάλμα - 1.29m), το γκαουσιανό (σφάλμα -22.7m) και το k-bessel (σφάλμα -1.28m).



Χάρτης 26: Σχηματική απεικόνιση της Κρήτης όπου παρουσιάζεται η χωρική κατανομή υπόγειων νερών για το έτος 2013-2014.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω αποτελέσματα των υπόγειων νερών για τη σχηματική απεικόνιση στο νησί της Κρήτης, δημιουργήθηκε ο πίνακας 3. Στον πίνακα 3 αναφέρεται το σφάλμα που υπολογίστηκε σε κάθε ένα τύπο ημιβαριογράμματος για συνδυασμό με την περίοδο μελέτης 2007-2014.

#### ΜΕΘΟΔΟΣ COKRIGING

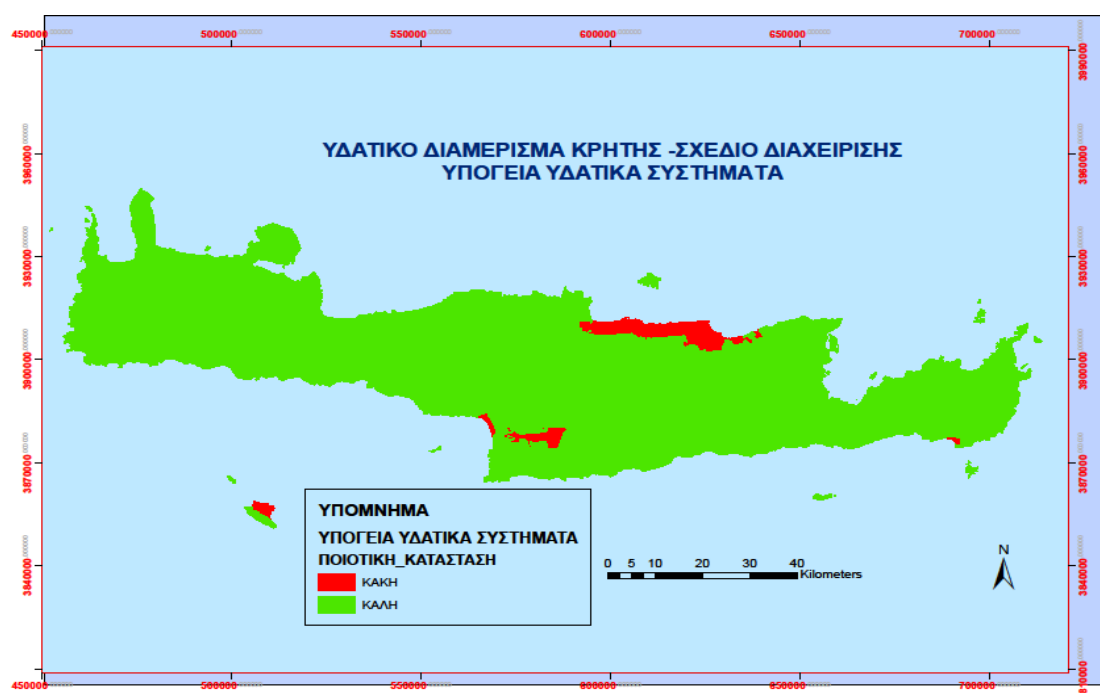
ΤΥΠΟΣ ΗΜΙΒΑΡΙΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ	Μέσος όρος 2007-2014	Μέσος όρος υγρή 2007-2014	Μέσος όρος ξηρή 2007-2014	Μέσος όρος 2007- 2008	Μέσος όρος 2008- 2009
Spherical	-1,9	-1,3	-0,55	-1,7	-1,9
Exponential	1,8	-1,2	-0,54	-1,6	-1,8
Gaussian	-33,4	-23,4	-10	-33,8	-34,6
K-Bessel	-1,88	-1,3	-0,56	-1,7	-1,9

Μέσος όρος 2009-2010	Μέσος όρος 2010-2011	Μέσος όρος 2011-2012	Μέσος όρος 2012-2013	Μέσος όρος 2013-2014
-2	-2,1	-2,5	-1,4	-1,29
-1,9	-2	-2,3	-1,3	-1,22
-35,4	-37,6	-44,2	-25,6	-22,7
-2	-2,1	-2,5	-1,4	-1,28

Πίνακας 3: Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων της μεθόδου cokriging για κάθε ένα τύπο ημιβαριογράμματος.

### 3.2.2)ΠΟΙΟΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ

Στο υδατικό διαμέρισμα της Κρήτης σύμφωνα με το σχέδιο διαχείρισης των υπόγειων υδατικών συστημάτων προκύπτει η αξιολόγηση της κατάστασης του τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά. Αυτές οι μελέτες βοηθούν στην αξιολόγηση των υπόγειων συστημάτων σε καλή ή κακή κατάσταση και κρίνουν τις περιοχές που χρειάζονται άμεση αποκατάσταση. Στο χάρτη 26 παρουσιάζεται η αξιολόγηση της ποσοτικής κατάστασης στο νησί της Κρήτης όπου με χαρακτηριστικό χρώμα διακρίνονται οι περιοχές με σοβαρό πρόβλημα. Στο χάρτη 27 αξιολογείται συνολικά η κατάσταση στην Κρήτη και διακρίνονται οι περιοχές που παρουσιάζει πρόβλημα ο υδροφόρος ορίζοντας.

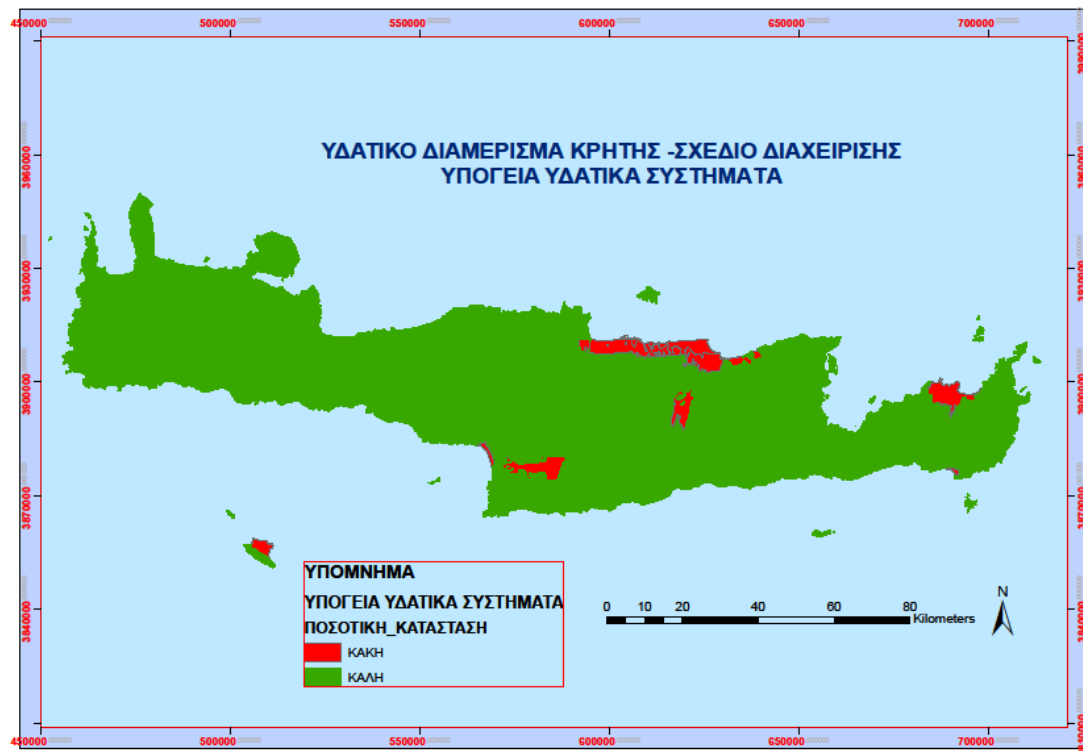


Χάρτης 27 :Αξιολόγηση της ποιοτικής κατάστασης στο υδατικό διαμέρισμα της Κρήτης(Σχέδιο Διαχείρισης Υδατικών Πόρων-Υδατικό Διαμέρισμα Κρήτης, 2013)

Οι περιοχές της Κρήτης που παρουσιάζουν ποιοτικό πρόβλημα είναι οι εξής:

- Περιοχή Κέρης-Τυλισσού με γεωλογία τριαδικοί έως ιουρασικοί ασβεστόλιθοι Ζώνης Τρίπολης και τύπο υδροφορέα καρστικό. Ποιοτική κατάσταση κακή λόγω υπερεκμετάλλευσης και υφαλμύρισης.
- Παράκτια περιοχή βόρειου Ηρακλείου με γεωλογία τεταρτογενείς αποθέσεις και τύπο υδροφορέα πορώδες. Κακή ποιοτική κατάσταση λόγω υπερεκμετάλλευσης και υφαλμύρισης.
- Παράκτιο Τυμπάκι με γεωλογία τεταρτογενείς αποθέσεις και τύπο υδροφορέα πορώδες. Κακή ποιοτική κατάσταση λόγω υπερεκμετάλλευσης και υφαλμύρισης.
- Περιοχή Μοιρών με γεωλογία τεταρτογενείς αποθέσεις και τύπο υδροφορέα πορώδες. Ποιοτική κατάσταση κακή λόγω υπερεκμετάλλευσης. Επιπλέον τοπικά καταγράφεται υπέρβαση σε νιτρικά και θειικά ιόντα.
- Περιοχή Γουδουρά με γεωλογία τεταρτογενείς αποθέσεις και υδροφορέα τύπου πορώδες. Ποιοτική κατάσταση κακή λόγω υπερεκμετάλλευσης και υφαλμύρισης.
- Περιοχή Γαύδου με γεωλογία τεταρτογενείς και νεογενείς αποθέσεις και τύπο υδροφορέα πορώδες. Ποιοτική κατάσταση κακή λόγω υπερεκμετάλλευσης και τοπικής υφαλμύρισης.
- Παράκτια περιοχή Ηρακλείου-Γουβών-Χερσονήσου με γεωλογία τριαδικοί έως κρητιδικοί ασβεστόλιθοι ζώνης Τρίπολης και τύπο υδροφορέα καρστικό. Ποιοτική κατάσταση κακή λόγω υπερεκμετάλλευσης και υφαλμύρισης.





Χάρτης 28 :Αξιολόγηση της ποσοτικής κατάστασης στο υδατικό διαμέρισμα της Κρήτης(Σχέδιο Διαχείρισης Υδατικών Πόρων-Υδατικό Διαμέρισμα Κρήτης, 2013)

Οι περιοχές της Κρήτης που παρουσιάζουν ποσοτικό πρόβλημα είναι οι εξής:

- Περιοχή Κέρης-Τυλισσού με γεωλογία τριαδικοί έως ιουρασικοί ασβεστόλιθοι ζώνης Τρίπολης και τύπο υδροφορέα καρστικό. Κακή ποιοτική κατάσταση, κακή ποσοτική κατάσταση, όχι καλή κατάσταση υδροφορέα λόγω υπερεκμετάλλευσης και υφαλμύρισης.
- Παράκτια περιοχή βόρειου Ηρακλείου με γεωλογία τεταρτογενείς αποθέσεις και τύπο υδροφορέα πορώδες. Κακή ποιοτική κατάσταση, κακή ποσοτική κατάσταση, όχι καλή κατάσταση υδροφορέα λόγω υπερεκμετάλλευσης και υφαλμύρισης.
- Παράκτιο Τυμπάκι με γεωλογία τεταρτογενείς αποθέσεις και τύπο υδροφορέα πορώδες. Κακή ποιοτική και ποσοτική κατάσταση, όχι καλή κατάσταση υδροφορέα λόγω υπερεκμετάλλευσης και υφαλμύρισης.

- Περιοχή Μοιρών με γεωλογία τεταρτογενείς αποθέσεις και τύπο υδροφορέα πορώδες. Κακή ποιοτική και ποσοτική κατάσταση, κακή κατάσταση υδροφορέα λόγω υπερεκμετάλλευσης. Επιπλέον, τοπικά καταγράφεται υπέρβαση σε νιτρικά και θειικά ιόντα.
- Περιοχή Καστελιού με γεωλογία τεταρτογενείς και νεογενείς αποθέσεις και τύπο υδροφορέα πορώδες. Καλή ποιοτική κατάσταση, κακή ποσοτική κατάσταση και κακή κατάσταση υδροφορέα λόγω υπερεκμετάλλευσης. Επιπλέον, τοπικά καταγράφεται υπέρβαση σε νιτρικά ιόντα.
- Περιοχή Σκοπής-Σητείας-Ρουσσάς Εκκλησίας με γεωλογία τεταρτογενείς και νεογενείς αποθέσεις και τύπο υδροφορέα πορώδες. Καλή ποιοτική κατάσταση, κακή ποσοτική κατάσταση και κακή κατάσταση υδροφορέα λόγω υπερεκμετάλλευσης.
- Περιοχή Γουδουρά με γεωλογία τεταρτογενείς αποθέσεις και τύπο υδροφορέα πορώδες. Κακή ποιοτική κατάσταση, κακή ποσοτική κατάσταση και γενικά κακή κατάσταση υδροφορέα λόγω υπερεκμετάλλευσης και υφαλμύρισης.
- Περιοχή Γαύδου με γεωλογία τεταρτογενείς και νεογενείς αποθέσεις και τύπο υδροφορέα πορώδες. Κακή ποιοτική κατάσταση, κακή ποσοτική κατάσταση και γενικότερα κακή κατάσταση υδροφορέα λόγω υπερεκμετάλλευσης και τοπικής υφαλμύρισης.
- Παράκτια περιοχή Ηρακλείου-Γουβών-Χερσονήσου με γεωλογία τριαδικοί έως κρητιδικοί ασβεστόλιθοι ζώνης Τρίπολης και τύπο υδροφορέα καρστικό. Κακή ποιοτική κατάσταση, κακή ποσοτική κατάσταση και γενικά κακή κατάσταση υδροφορέα λόγω υπερεκμετάλλευσης και υφαλμύρισης.

#### 4) ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με την στατιστική και γεωστατιστική μελέτη των βροχοπτώσεων στο νησί της Κρήτης για τα υδρολογικά δεδομένα των ετών 2007-2016 καθώς και με τη μελέτη του υπόγειου υδροφορέα από δεδομένα που συλλέχθηκαν για τα υδρολογικά έτη 2007-2014.

Από την στατιστική μελέτη των βροχοπτώσεων που έγινε για την χρονική περίοδο που μελετήθηκε, επιβεβαιώθηκε το γεγονός ότι υπάρχει σημαντική διαβάθμιση της βροχόπτωσης από τα δυτικά προς τα ανατολικά. Αρχικά, ο νομός Χανίων εμφανίζεται να είναι με διαφορά ο πιο υγρός, ενώ ο πιο άνυδρος είναι ο νομός Λασιθίου. Επιπλέον, παρατηρείται μια ελαφρώς ανοδική πορεία στον ετήσιο ρυθμό

βροχόπτωσης από το 2007 έως το 2012 (Σχήμα 1) αλλά στα επόμενα δύο (2) έτη παρατηρείται σημαντική μείωση της βροχόπτωσης 20012-2014. Στη συνέχεια, το έτος 2014-2015 εμφανίζεται το πιο υγρό έτος μελέτης μας, ενώ στο έτος 2015-2016 εμφανίζεται αρκετά μειωμένος ο ρυθμός της βροχόπτωσης. Πάνω από το 70% της συνολικής βροχόπτωσης ενός υδρολογικού έτους πραγματοποιείται κατά την υγρή περίοδο, ενώ ένα ποσοστό μικρότερο του 30% αντιστοιχεί στην ξηρή περίοδο (Σχήμα 2,3). 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. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως μπορεί να υπάρχει έντονη βροχόπτωση για 4-5 ημέρες ενός χειμερινού μήνα και τις υπόλοιπες η βροχόπτωση να είναι ελάχιστη έως και καθόλου. Η μέση ετήσια βροχόπτωση της Κρήτης για το χρονικό διάστημα μελέτης προκύπτει από τον μέσο όρο της ετήσιας βροχόπτωσης των 82 σταθμών μελέτης και είναι 714,6 χιλιοστά. Η μέση ετήσια βροχόπτωση του νησιού είχε αξιολογηθεί στα 927 χιλιοστά (Περιφέρεια Κρήτης, 2013), επομένως πρόκειται για μια διαφορά της τάξης των 212,4 χιλιοστών, σύμφωνα με τα υδρολογικά δεδομένα των σταθμών της Κρήτης. Λαμβάνοντας υπόψη τη μέση τιμή ετήσιας βροχόπτωσης του νησιού κατά τη διάρκεια της περιόδου 2007-2016, παρατηρήθηκαν σε κάθε χρονιά χαρακτηριστικές υγρές και ξηρές περιόδους. 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 μεγάλη υγρή περίοδος διήρκεσε για 5 χρόνια, από το 2007-2012 και η δεύτερη για 1 χρόνο από το 2014-2015 καθώς οι μέσες ετήσιες τιμές βροχόπτωσης βρίσκονται πάνω από τη μέση τιμή. Αντίθετα, η πρώτη ξηρή περίοδος διήρκεσε για 2 χρόνια, από το 2012-2014 και η δεύτερη για 1 χρόνο 2015-2016.

Στη συνέχεια, η υψηλότερη βροχόπτωση παρατηρείται στον σταθμό Σπήλι με μέσο όρο ετήσιας βροχόπτωσης 1651χιλ, που βρίσκεται στο νότιο τμήμα του νομού Ρεθύμνου, σε υψόμετρο 390 μέτρων. Το μέρος εκεί είναι αρκετά ορεινό και αποτελεί νοτιοδυτική προέκταση του Ψηλορείτη. Η δεύτερη υψηλότερη βροχόπτωση εμφανίζεται στο σταθμό της πόλης του Ρεθύμνου με μέσο όρο ετήσιας βροχόπτωσης 1461χιλ. Η χαμηλότερη βροχόπτωση παρατηρείται στο σταθμό της

Λέντας σε υψόμετρο 15 μέτρων με μέση ετήσια βροχόπτωση 462 χιλιοστά που βρίσκεται στο νότιο τμήμα του νομού Ηρακλείου. Ο σταθμός με το μεγαλύτερο υψόμετρο στην Κρήτη είναι ο σταθμός της Σαμαριάς σε υψόμετρο 1250 μέτρων και έχει μια μέση ετήσια βροχόπτωση 788 χιλιοστά. Ο σταθμός της Σαμαριάς αλλά και άλλοι κοντινοί σταθμοί όπως Παλαιά Ρουματά και Μούρι παρουσιάζουν αρκετά υψηλή ετήσια βροχόπτωση καθώς βρίσκονται σε κοντινή απόσταση από την οροσειρά των Λευκών Όρων, η οποία εκτείνεται στη δυτική Κρήτη. Τα Λευκά Όρη είναι υπεύθυνα για τις περισσότερες βροχοπτώσεις στους νομούς δυτικά της Κρήτης όπως Χανίων και Ρεθύμνου. Επιπλέον, όσον αφορά την σχέση μεταξύ της στάθμης της βροχόπτωσης και του υψομέτρου στο οποίο βρίσκεται ο κάθε σταθμός, εκτιμάται ότι οι σταθμοί που βρίσκονται σε υψόμετρο πάνω από τα 400-500 μέτρα δέχονται αρκετά μεγαλύτερη ποσότητα υδατόπτωσης από τους σταθμούς που είναι τοποθετημένοι σε υψόμετρο έως και 20 μέτρα. Σταθμοί που βρίσκονται τοποθετημένοι σε χαμηλά υψόμετρα είναι της Αγία Γαλήνης, του Παλαιόκαστρου, της Φοινικιάς και της Γαύδου.

Όσον αφορά τα υπόγεια νερά παρατηρήθηκε ότι το έτος 2011-2012 η στάθμη των υπόγειων νερών είναι η υψηλότερη ενώ για τη χρονιά 2013-2014 η στάθμη είναι η χαμηλότερη.

Από τη γεωστατιστική μέθοδο ordinary Kriging κατασκευάστηκαν χάρτες για τη βροχόπτωση και τα υπόγεια νερά στο διαμέρισμα της Κρήτης. Για κάθε ένα υδρολογικό έτος 2007-2016 παρουσιάζεται η χωρική ανάλυση των βροχοπτώσεων και για τα έτη 2007-2014 η χωρική ανάλυση των υπόγειων υδροφορέων. Μια συνολική εκτίμηση της κατάστασης είναι ότι, όπως αναφέρθηκε και στο κομμάτι της στατιστικής ανάλυσης, η βροχόπτωση στο δυτικό μέρος του νησιού είναι μεγαλύτερη 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 κάθε φορά κατά τα έτη αυτά. Υπάρχουν και χρονιές όπως το 2012-2014 και 2015-2016 που η βροχόπτωση είναι αρκετά χαμηλή σε όλο το νησί της Κρήτης. Η χαρτογράφηση παρουσιάζεται με την κατάλληλη κλίμακα και υπόμνημα για κάθε χρονιά ώστε να διακρίνονται οι διαφορές της βροχόπτωσης. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η χωρική μεταβολή του μέσου όρου της

συνολικής βροχόπτωσης των ετών μελέτης καθώς και του υπόγειου υδροφορέα με τις αντίστοιχες ξηρές και υγρές περιόδους.

Πιο συγκεκριμένα, για τη δημιουργία χαρτών χωρικής μεταβολής της βροχόπτωσης μελετήθηκε για κάθε χρονιά με τη μέθοδο Ordinary Kriging τέσσερις τύποι ημιβαριογραμμάτων: το σφαιρικό, το εκθετικό, το γκαουσιανό και το K-Bessel. Για κάθε έναν τύπο ημιβαριογράμματος συγκρίναμε το σφάλμα και γινόταν χαρτογράφηση σύμφωνα με το μικρότερο σφάλμα. Ως επί το πλείστον, η χαρτογράφηση έγινε με τον εκθετικό και τον σφαιρικό τύπο καθώς διαπιστωνόταν μικρότερο σφάλμα συγκριτικά με τους υπόλοιπους τύπους. Το πιο σκούρο μπλε χρώμα παρουσιάζει τις περιοχές με έντονη βροχόπτωση ενώ με πιο αχνό μπλε χρώμα τις περιοχές με μικρότερη στάθμη βροχόπτωσης. Σύμφωνα με τους χάρτες 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 που αποτελεί τη μεγαλύτερη οροσειρά, αλλά διαφοροποιείται σε σύγκριση με τα γειτονικά του τμήματα τα οποία έχουν σημαντικά χαμηλότερες στάθμες βροχόπτωσης. Τέλος, 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 αλλά και βόρειο τμήμα του νομού Λασιθίου.

Επιπλέον, για τη δημιουργία χαρτών χωρικής μεταβολής των υπόγειων νερών μελετήθηκε για κάθε χρονιά οι διάφορες διακυμάνσεις στον υπόγειο υδροφορέα. Παρατηρείται ότι οι παράκτιες περιοχές έχουν πολύ χαμηλή στάθμη που σε πολλές περιπτώσεις φτάνουν κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας π.χ. περιοχή Τυμπακίου.

Σύμφωνα με την ποιοτική και ποσοτική αξιολόγηση που έγινε για το νησί της Κρήτης παρατηρήθηκαν ορισμένες περιοχές με προβλήματα νερού λόγω υφαλμύρινσης και υπερεκμετάλλευσης. Οι περιοχές με ποιοτικό πρόβλημα είναι η παράκτια περιοχή

του βόρειου Ηρακλείου, το Τυμπάκι, οι Μοίρες, η Γαύδος, η περιοχή του Τυλίσσου και η Γουδουρά. Σύμφωνα με τα βροχομετρικά δεδομένα από 82 σταθμούς στην Κρήτη συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα των βροχοπτώσεων των περιοχών αυτών για να διαπιστωθεί αν μπορεί να ανέβει η στάθμη του υδροφορέα στις παραπάνω περιοχές. Διαπιστώθηκε ότι συγκριτικά με τη μέση ετήσια βροχόπτωση όλων των σταθμών στην Κρήτη που είναι 714,6mm , οι περιοχές με ποσοτικό πρόβλημα παρουσιάζουν μέση ετήσια βροχόπτωση μικρότερη από την ενδεικτική τιμή των 714,6mm. Πιο συγκεκριμένα, η παράκτια περιοχή του βόρειου Ηρακλείου έχει μέση ετήσια βροχόπτωση 395,7mm, οι Μοίρες 529,67mm και η Γαύδος 624,19mm. Αυτό σημαίνει ότι η βροχόπτωση στις περιοχές αυτές είναι πιο χαμηλή οπότε δεν είναι μπορεί να πραγματοποιηθεί μεγάλη αύξηση της στάθμης του υπόγειου υδροφορέα σε βαθμό ώστε να λυθεί το πρόβλημα της υφαλμύρινσης και της υπερεκμετάλλευσης. Μπορεί σίγουρα ο υδροφορέας να ενισχυθεί από τις εκάστοτε βροχοπτώσεις. Επιπλέον, βάση των δεδομένων των υπόγειων νερών η περιοχή του Ηρακλείου έχει μέσο όρο στατικής στάθμης 10m περίπου, η περιοχή των Μοιρών σύμφωνα με τα υδροσημεία 34m, το Τυμπάκι 7,8m και η περιοχή Γουδουρά 24,4m. Οι τιμές αυτές είναι αρκετά χαμηλότερες συγκριτικά με το μέσο όρο των στατικών σταθμών των 312 υδροσημείων της Κρήτης που είναι 117,1m. Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει αρκετή ποσότητα διαθέσιμου υπόγειου νερού στις περιοχές με ποσοτικό πρόβλημα.

Στη συνέχεια, οι περιοχές με ποσοτικό πρόβλημα είναι οι περιοχές που αναφέρθηκαν και προηγουμένως όπως η Γαύδος, το βόρειο Ηράκλειο της Κρήτης, οι Μοίρες, η περιοχή Γουδουρά, το παράκτιο Τυμπάκι, η Τυλίσσου και επιπλέον η περιοχή Σητείας, Σκοπής. Η περιοχή της Σητείας παρουσιάζει καλή ποιοτική κατάσταση όμως κακή ποσοτική κατάσταση καθώς και κακή κατάσταση υδροφορέα. Η Σητεία σύμφωνα με τα βροχομετρικά δεδομένα των τελευταίων 9 χρόνων έχει μέσο όρο συνολικής βροχόπτωσης 480,74mm, λίγο μικρότερη τιμή από τη μέση ετήσια βροχόπτωση όλων των σταθμών της Κρήτης. Αυτό σημαίνει ότι η βροχόπτωση της περιοχής αυτής δεν μπορεί να προκαλέσει αύξηση στη στάθμη του υπόγειου υδροφορέα σε βαθμό ώστε να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της υφαλμύρινσης και της υπερεκμετάλλευσης. Οπότε ο υδροφορέας στη Σητεία δεν

θα ενισχυθεί σημαντικά από τις εκάστοτε βροχοπτώσεις ώστε να λυθεί το πρόβλημα. Από τα δεδομένα των υδροσημείων της γύρω περιοχής παρατηρήθηκε ότι η στάθμη του υπόγειου νερού στην πιο κοντινή μέτρηση φτάνει τα 0,98m ενώ μία λίγο πιο μακρινή μέτρηση τα 9,78m. Οι τιμές αυτές είναι πολύ χαμηλές συγκριτικά με το μέσο όρο των στατικών σταθμών των υδροσημείων της Κρήτης που είναι 117,1m. Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχουν αρκετά αποθέματα υπόγειων νερών στη περιοχή της Σητείας οπότε η ποσοτική κατάσταση μπορεί να βελτιωθεί μόνο από τις βροχοπτώσεις της περιοχής.

Η υπερεκμετάλλευση και η υφαλμύριση είναι προβλήματα που παρατηρούνται σε παράκτιες περιοχές όπως η Κρήτη. Όσο αφορά, την εκμετάλλευση του παράκτιου, υπόγειου ύδατος, αυτή είναι απόρροια της ιδιαίτερα αυξημένης πυκνότητας σε ανθρώπινο δυναμικό, της παράκτιας ζώνης. Η παραθαλάσσια ζώνη ανέκαθεν, αποτελούσε πόλο έλξης για τον άνθρωπο, εξαιτίας των πολλαπλών δυνατοτήτων που προσφέρει (ανάπτυξη γεωργίας, αλιείας, τουριστικών δραστηριοτήτων κ.α.). Από το σύνολο του νερού που χρησιμοποιείται στην ύδρευση και άρδευση, το 1 /3 προέρχεται από υπόγειους υδροφορείς. Το ποσοστό αυτό αυξάνει συνεχώς, ανάλογα με την απαίτηση σε νερό, καθώς, διαθέτει υψηλή ποιότητα σε σχέση με το νερό των επιφανειακών υδροφορέων και ταυτόχρονα τα αποθέματα του είναι μεγαλύτερα. Απ' την άλλη πλευρά, τα υπόγεια ύδατα, παρουσιάζουν πολύ συχνά υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα, ενώ η εξόρυξη τους, πέρα από το υψηλό κόστος που έχει, εμπεριέχει και τον κίνδυνο της καθίζησης του εδάφους. Στην περίπτωση δε, των παράκτιων, υπόγειων υδροφορέων, η άντληση νερού συνδέεται με την ανάπτυξη φαινομένων υφαλμύρισης. Σύμφωνα με όλα όσα έχουν αναφερθεί ως τώρα, από τους υπόγειους υδροφορείς, αυτοί που βρίσκονται πλησίον της παράκτιας ζώνης, φαίνεται να δέχονται, τις περισσότερες και ταυτόχρονα μεγαλύτερες πιέσεις. Αποτελούν, δηλαδή, το τμήμα της υπόγειας ροής ύδατος, που εμφανίζει τη μεγαλύτερη ευαισθησία. Σε περιπτώσεις υπερεκμετάλλευσης των υδροφορέων ο φυσικός εμπλουτισμός μπορεί να χρειασθεί δεκαετίες για την φυσική τους αναπλήρωση . Οπότε για την ενίσχυση του υδατικού ισοζυγίου των υπόγειων νερών εφαρμόζεται ο τεχνητός εμπλουτισμός. Ο τεχνητός εμπλουτισμός των υδροφόρων στοχεύει, κυρίως στην αποθήκευση πλεονασμάτων επιφανειακών

νερών ή στην ενίσχυση των αποθεμάτων νερού του υδροφορέα και προστασία τους από την υπεράντληση ή ρύπανση, που πολλές φορές οφείλεται στη διείσδυση θαλάσσιου νερού σε παράκτιους υδροφορείς. Ο εμπλουτισμός των υπόγειων υδροφόρων εφαρμόζεται για: α) την ελάττωση της πτώσης του υδροφόρου ορίζοντα β) την προστασία του υπόγειου νερού σε παράκτιους υδροφορείς από τη διείσδυση και την ανάμειξή του με θαλάσσιο νερό και γ) στην αποθήκευση νερού που ανακτάται κατά την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων (τριτοβάθμια επεξεργασία) ή άλλων επιφανειακών νερών. Ως εκ τούτου, η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση νερού απαιτεί μεγαλύτερη αποθήκευσή του κατά τις περιόδους που παρατηρείται πλεόνασμα νερού για να μπορεί αυτό να χρησιμοποιείται κατά τις περιόδους ζήτησής του. Μέχρι σήμερα αυτό έχει επιτευχθεί μερικώς με την κατασκευή των φραγμάτων. Παρ' όλα αυτά, τα φράγματα έχουν περιορισμένη περίοδο ζωής εξ αιτίας των κατά περίπτωση κατασκευαστικών αστοχιών τους και της πιθανής συσσώρευσης ιζημάτων στις ανάντη λίμνες τους. Εάν το νερό δεν μπορεί να αποθηκευτεί επιφανειακά τότε πρέπει να αποθηκεύεται υπόγεια αυξάνοντας έτσι τις διαθέσιμες ποσότητες του υπόγειου νερού κυρίως με διαδικασίες εφαρμογής τεχνητού εμπλουτισμού (Boywer,1995a)

Συνοψίζοντας της παρούσα εργασία, με τη βοήθεια της στατιστικής και γεωστατιστική ανάλυσης των βροχοπτώσεων στο νησί της Κρήτης για τις περιόδους μελέτης μας 2007-2016 παρουσιάζεται μία πιο αποτελεσματική προσέγγιση των πρόσφατων βροχομετρικών δεδομένων. Εκτός από τα δεδομένα βροχόπτωσης, προσεγγίστηκαν αποτελεσματικά και δεδομένα του υπόγειου υδροφορέα της Κρήτης με τη χρήση χαρτών και διαγραμμάτων. Οι χάρτες πρόσφεραν μία παραστατική απεικόνιση της κατάστασης του νησιού ώστε να προκύψουν συμπεράσματα για τις περιοχές με υψηλή και χαμηλή βροχόπτωση καθώς και τις περιοχές με υψηλή στάθμη υπόγειου νερού και χαμηλή. Αναλύθηκαν εκτενώς στο κομμάτι της συζήτησης παραπάνω, οι περιοχές που αντιμετωπίζουν σοβαρότερο πρόβλημα υφαλμύρινσης και υπερεκμετάλλευσης του υδάτινου ορίζοντα και προτάθηκαν ορισμένες λύσεις εμπλουτισμού του υδροφόρου ορίζοντα ή καλύτερης διαχείρισης σε περιόδους πλεονάσματος.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### Ελληνική Βιβλιογραφία

- 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
- 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
- Γκριτζάπη Α., 2011, Ανάπτυξη ΓΠΣ και Χωρική Ανάλυση Μετεωρολογικών Δεδομένων στον Ελλαδικό Χώρο, Μεταπτυχιακή διατριβή, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών
- Μπουλουκάκης Ηρακλής, 2007, Τεχνητός εμπλουτισμός στον διεθνή και ελλαδικό χώρο. Παραδείγματα στην Κρήτη, Μεταπτυχιακή εργασία, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης
- Περιφέρεια Κρήτης, *Σχέδιο Διαχείρισης Υδατικών Πόρων-Υδατικό Διαμέρισμα Κρήτης*, 2013
- Χριστόπουλος Δ., 2004α, *Μεταπτυχιακές Σημειώσεις Ανάλυσης Δεδομένων*, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά
- Χριστόπουλος Δ., 2004β, *Πανεπιστημιακές Σημειώσεις Εισαγωγής στην Έρευνα Κοιτασμάτων*, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά

## Διεθνής Βιβλιογραφία

- Christakos G. & Hristopulos D., (1998), *Spatiotemporal Environmental Modelling*, Kluwer Academic Publisher, Boston
- Christakos G., 1991, *Random field models in earth sciences*, Academic press, San Diego
- Deutsch C. & Journel A., 1992, *GSLIB, Geostatistical software library and user's guide*, New York, Oxford University Press
- 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
- Goovaerts P., 1997, *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*, Oxford University Press, New York
- Hristopulos D., 2003a, *Introduction to Geostatistics-course notes (in Greek)*, Chania, Crete, Greece, Technical University of Crete, pp. 200
- Journel A., 1989, *Fundamentals of Geostatistics in Five Lessons*, American Geophysical Union, Washington, D.C.
- Kitanidis P., 1997, *Introduction to geostatistics*, Cambridge, University Press
- Mavrommatis T. & Voudouris K., 2007, *Relationships between hydrological parameters using correlation and trend analysis*, Journal of environmental hydrology
- 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.
- Surfer, 2002, *Surface Mapping System*, Version 8.04, Golden Software, Inc
- Tsanis I., Koutroulis I., Daliakopoulos N. & Jacob D., 2011, *Severe climate-induced water shortage and extremes in Crete*, Climatic Change

- 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

#### Διαδικτυακές πηγές

- Γεωλογία Κρήτης: <http://www.cretanbeaches.com>
- Ελληνική μετεωρολογική υπηρεσία: <http://www.meteo.gr/meteoplus/index.cfm>
- Πανεπιστήμιο Κρήτης 2015, Τμήμα Μαθηματικών: <http://www.math.uoc.gr:1080/syndesmoi/topikou/>
- Περιοχή Κρήτης : <https://el.wikipedia.org/wiki/Κρήτη>
- Υδρολογικά χαρακτηριστικά: <http://frontoffice-147.dev.edu.uoc.gr/natural-environment/rivers/rivers-2.html>
- School of Environment, , 2015, *Education and Development*, University of Manchester: <http://www.seed.manchester.ac.uk/>



