



Πολυτεχνείο Κρήτης  
Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος

---

‘ΓΕΩΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΑΘΜΗΣ  
ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΣΤΟ ΥΔΑΤΙΚΟ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ ΚΡΗΤΗΣ’

---

‘Geostatistical Analysis of groundwater level data at the Water District of Crete’

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΤΟΥ  
ΛΕΩΝΙΔΑ ΚΟΥΤΣΕΛΛΗ

ΧΑΝΙΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ, 2020

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού ή ερευνητικού χαρακτήρα, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για άλλη χρήση θα πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης



Πολυτεχνείο Κρήτης  
Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος

---

‘ΓΕΩΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΑΘΜΗΣ  
ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΣΤΟ ΥΔΑΤΙΚΟ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ ΚΡΗΤΗΣ’

---

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΤΟΥ  
ΛΕΩΝΙΔΑ ΚΟΥΤΣΕΛΛΗ

*ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:*

Καθηγητής Καρατζάς Γεώργιος (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)  
Καθηγητής Παρανυχιανάκης Νικόλαος  
Δρ. Βαρουχάκης Εμμανουήλ

## Περίληψη

Το γλυκό νερό αποτελεί παράγοντα ζωτικής σημασίας για την ύπαρξη ζωής στον πλανήτη μας. Το γεγονός ότι δεν βρίσκεται σε αφθονία οδηγεί στην επιτακτική ανάγκη για την εύρεση τρόπων ορθολογικής διαχείρισης του. Στα πλαίσια αυτά κινείται η παρούσα διπλωματική εργασία που αποσκοπεί στον προσδιορισμό των υπογείων υδροφορέων του υδατικού διαμερίσματος Κρήτης οι οποίοι παρουσιάζουν κακή ποσοτική κατάσταση, ώστε να γίνει η λήψη των απαραίτητων μέτρων για την αντιμετώπιση του προβλήματος.

Για τον προσδιορισμό αυτό, έγινε η γεωστατιστική ανάλυση των δεδομένων μέσης στάθμης των υπογείων υδροφορέων από 472 υδροσημεία της Κρήτης και των δεδομένων μέσου ύψους των βροχοπτώσεων, όπως αυτό καταγράφηκε σε 81 μετεωρολογικούς σταθμούς του νησιού. Ακολούθησε η συσχέτιση τους. Η γεωστατιστική μας βοηθά, διότι ασχολείται με την χωρική εκτίμηση φυσικών μεγεθών σε σημεία μιας περιοχής μελέτης όπου δεν υπάρχουν μετρήσεις. Ο στόχος είναι η αναπαραγωγή της χωρικής κατανομής στις περιοχές αυτές βάσει των μετρημένων τιμών στα γνωστά σημεία, όταν είναι γνωστό πως οι μετρήσεις παρουσιάζουν χωρική εξάρτηση μεταξύ τους. Οι πιο γνωστές γεωστατιστικές μέθοδοι είναι οι μέθοδοι Kriging.

Χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα ArcGIS και την μέθοδο Kriging για τέσσερα διαφορετικά μοντέλα (σφαιρικό, εκθετικό, Γκαουσιανό, K-Bessel) για την μέση στάθμη υδροφορέων και τα μέσα ύψη βροχοπτώσεων, έγινε η καταγραφή των σφαλμάτων των μοντέλων αυτών, για να επιλεγεί το βέλτιστο, κατασκευάστηκαν τα αντίστοιχα ημιβαριογράμματα και εν συνεχεία διεξήχθη η χαρτογράφηση της εκτιμώμενης μέσης στάθμης καθώς και η χαρτογράφηση για τα εκτιμώμενα μέσα ύψη βροχοπτώσεων για όλη την έκταση του νησιού. Έπειτα βρέθηκαν ποιες περιοχές με αρκετές γεωτρήσεις έχουν μέγιστη μέση στάθμη υδροφόρου ορίζοντα κάτω από 30 m και δέχονται ετησίως λιγότερο από 600 mm βροχοπτώσεων. Οι υπόγειοι υδροφορείς αυτοί εκτιμώνται πως παρουσιάζουν κακή ποσοτική κατάσταση.

Τέλος έγινε μια αποτίμηση των αποτελεσμάτων αυτών, μία εκτίμηση για την επιρροή των σφαλμάτων σε αυτά και παρατέθηκαν τρόπου αποφυγής τους. Ακολούθησαν προτάσεις για μελλοντικές έρευνες και προτάσεις για μέτρα αντιμετώπισης της υποβάθμισης των υπογείων υδροφορέων Κρήτης.

## **Abstract**

Fresh water is a vital factor in the existence of life on our planet. The fact that it is not abundant leads to the necessity of finding ways to manage it rationally. In this context, this thesis is aiming at identifying the aquifers of Crete that are in poor quantitative condition, in order to take the necessary measures to address the problem.

For this purpose, we applied geostatistical analysis of average groundwater level observations taken from 472 locations at the island of Crete and of average annual rainfall that was recorded at 81 meteorological stations. Then, the correlation between them was explored. Geostatistical analysis helps in estimating physical quantities at points in a study area where there are no measurements by using observations at neighbouring points. The most popular geostatistical methods are the Kriging techniques.

In this work the ArcGIS program was applied in terms of Ordinary Kriging method using four different variogram models (spherical, exponential, Gaussian, K-Bessel/Matern) to determine the spatial variability of the average aquifer level and the average rainfall. Estimation errors and uncertainty of these models were examined in order to compare them and select the optimal one. Maps of estimated average level and estimated average rainfall throughout the island were produced and discussed. Significant areas of the island with maximum average groundwater level below 30 m and less than 600 mm of rainfall per year were identified. These aquifers were assessed for poor quantitative condition.

An evaluation of results was performed as well as an assessment of the impact of the errors. Propositions for future research and for measures to address the degradation of the aquifers of Crete were presented.

## Πρόλογος και ευχαριστίες

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Καρατζά Γεώργιο όπως και τον δρ. Εμμανουήλ Βαρουχάκη για την καθοδήγησή και επίβλεψή τους σε όλα τα στάδια της. Επίσης ευχαριστώ τον κ. Χρήστο Γκούμα για την βοήθεια με το πρόγραμμα ArcGIS και το τρίτο μέλος της τριμελούς επιτροπής κ. Παρανυχιανάκη Νικόλαο.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες στην οικογένεια μου για την οικονομική και ψυχολογική υποστήριξη κατά τη διάρκεια των σπουδών μου και στη φίλη μου Χαρά Σηφάκη.

## Περιεχόμενα

Περίληψη .....	i
Abstract .....	ii
Πρόλογος και ευχαριστίες .....	iii
Περιεχόμενα.....	iv
Κατάλογος χαρτών .....	vi
Κατάλογος σχημάτων .....	vii
Κατάλογος πινάκων .....	viii
1. Εισαγωγή .....	1
1.1. Χαρακτηριστικά περιοχής μελέτης.....	1
1.1.1. Γενικά χαρακτηριστικά για το νησί της Κρήτης .....	1
1.1.2. Υδρογεωλογία της Κρήτης.....	3
1.1.3. Κλιματολογικές συνθήκες .....	8
1.1.4. Υδρολογικά Χαρακτηριστικά .....	8
1.1.5. Χρήσεις γης και υδάτων .....	9
1.1.6. Επιφανειακά νερά.....	11
2. Υπόγεια υδατικά συστήματα.....	12
2.1. Καταγραφή υπογείων υδροφορέων.....	12
2.2. Εκτίμηση της ποσοτικής κατάστασης των υπογείων υδροφορέων του υδατικού διαμερίσματος Κρήτης.....	17
2.3. Ροή υπογείων υδάτων.....	19
2.4. Πτώση στάθμης γύρω από τα φρεάτια άντλησης .....	22
2.5. Υφαλμύριση.....	25
3. Γεωστατιστική ανάλυση.....	29
3.1. Γεωστατιστική .....	29
3.2. Τυχαία πεδία .....	30
3.3. Βασικές έννοιες τυχαίων πεδίων .....	31
3.4. Μέση τιμή.....	32
3.5. Διασπορά.....	33
3.6. Τυπική απόκλιση.....	35
3.7. Διάμεσος.....	35
3.8. Συναρτήσεις διασποράς .....	36
3.9. Στατιστική ομοιογένεια.....	37

3.10. Στατιστική ισοτροπία .....	38
3.11. Ημι-Βαριόγραμμα .....	38
3.11.1. Προσδιορισμός Ημιβαριογράμματος.....	40
3.11.2. Μοντέλα ημιβαριογραμμάτων .....	43
3.12. Χωρική εκτίμηση Kriging .....	45
3.12.1. Κανονικό Kriging .....	49
3.13. Χωρική εκτίμηση Cokriging.....	50
3.14. Αξιολόγηση προβλέψεων .....	51
3.15. Μειονεκτήματα γεωστατικής ανάλυσης.....	52
4. Μεθοδολογία .....	54
5. Συζήτηση .....	63
5.1. Ανάλυση αποτελεσμάτων.....	63
5.1.1. Ημιβαριογράμματα .....	63
5.1.2. Χάρτες.....	63
5.1.3. Συσχέτιση μέσης στάθμης υδροφόρου ορίζοντα με βροχοπτώσεις και εύρεση προβληματικών υπογείων υδροφορέων: .....	64
5.2. Συμπεράσματα:.....	68
Βιβλιογραφία.....	71
Ελληνική Βιβλιογραφία .....	71
Διεθνής βιβλιογραφία .....	72
Παραρτήματα.....	73
Παράρτημα Α: Πίνακας δεδομένων για την μέση στάθμη υδρορέων.....	73
Παράρτημα Β: Πίνακας δεδομένων μέσου ύψους βροχοπτώσεων .....	84



## Κατάλογος χαρτών

Χάρτης 1.1: Κύριες λεκάνες απορροής Υδατικού διαμερίσματος Κρήτης(Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2015) .....	2
Χάρτης 1.2: Τοπογραφικό ανάγλυφο Κρήτης (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2015) .....	2
Χάρτης 1.3: Λιθοσφαιρικές πλάκες Αγαίου (Παπαζάχος, 1989) .....	3
Χάρτης 1.4: Υδρογεωλογικός χάρτης Κρήτης (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2015).....	4
Χάρτης 1.5: Απεικόνιση των κατηγοριών χρήσης γης στο υδατικό διαμέρισμα Κρήτης (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2015) .....	10
Χάρτης 2.1: Απεικόνιση υπογείων υδροφορέων Δυτικής Κρήτης (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2015) .....	15
Χάρτης 2.2: Απεικόνιση υπογείων υδροφορέων κεντρικής Κρήτης (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2015).....	16
Χάρτης 2.3: Απεικόνιση υπογείων υδροφορέων ανατολικής Κρήτης (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2015).....	16
Χάρτης 2.4: Απεικόνιση ποσοτικής κατάστασης υπογείων υδροφορέων υδατικού διαμερίσματος Κρήτης (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2015) .....	17
Χάρτης 4.1: Λεκάνες απορροής και υδροσημεία συλλογής δεδομένων υδατικού διαμερίσματος Κρήτης με τη χρήση ArcGIS. ....	54
Χάρτης 4.2: Γεωλογία της Κρήτης με τη χρήση ArcGIS.....	55
Χάρτης 4.3: Εκτίμηση στάθμης υδροφόρου ορίζοντα υδατικού διαμερίσματος Κρήτης με τη χρήση ArcGIS (οι κλάσεις σε m). ....	57
Χάρτης 4.4: Χάρτης σχετικής αβεβαιότητας μέσης στάθμης υδροφόρου ορίζοντα με τη χρήση ArcGIS (οι κλάσεις σε m). ....	57
Χάρτης 4.5: Σημεία συλλογής βροχομετρικών δεδομένων με χρήση ArcGIS. ....	58
Χάρτης 4.6: Εκτίμηση ύψους βροχοπτώσεων κατά τους χειμερινούς μήνες με τη χρήση ArcGIS. (οι κλάσεις σε mm). ....	60
Χάρτης 4.7: Σχετική αβεβαιότητα βροχοπτώσεων χειμερινής περιόδου με τη χρήση ArcGIS. (οι κλάσεις σε mm). . ....	60
Χάρτης 4.8: Εκτίμηση ύψους βροχοπτώσεων θερινής περιόδου στην έκταση του υδατικού διαμερίσματος Κρήτης με τη χρήση ArcGIS (οι κλάσεις σε mm).....	62
Χάρτης 4.9: Σχετική αβεβαιότητα βροχοπτώσεων θερινής περιόδου με τη χρήση ArcGIS (οι κλάσεις σε mm).....	62
Χάρτης 5.1: Περιοχές με μέση στάθμη υδροφόρου ορίζοντα κάτω από 30 m με χρήση ArcGIS.....	64
Χάρτης 5.2: Περιοχές με ύψος βροχής χειμερινής περιόδου μικρότερος από 600 mm με χρήση ArcGIS.....	65
Χάρτης 5.3: Διορθωμένος χάρτης περιοχών με μέση στάθμη μικρότερη από 30m με χρήση ArcGIS.....	65
Χάρτης 5.4: Εκτιμώμενες περιοχές με προβληματική ποσοτική κατάσταση υπογείων υδροφορέων. ....	66

## Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 2.1: Σχηματική απεικόνιση υδρολογικού ισοζυγίου (Καρατζάς, 2005). ....	19
Σχήμα 2.2: Διάταξη πειραμάτων Darcy (Καρατζάς, 2005) .....	20
Σχήμα 2.3: Σχηματική απεικόνιση πτώσης στάθμης σε φρεάτια άντλησης περιορισμένων υδροφορέων (Καρατζάς, 2005).....	23
Σχήμα 2.4: Σχηματική απεικόνιση πτώσης στάθμης σε φρεάτια άντλησης ελεύθερων υδροφορέων (Καρατζάς, 2005).....	24
Σχήμα 2.5: Σχηματική απεικόνιση πτώσης στάθμης σε πολλαπλά φρεάτια άντλησης (Καρατζάς, 2005).....	25
Σχήμα 2.6: Ισορροπία θαλασσινού και γλυκού νερού στους υπόγειους παράκτιους υδροφορείς (‘Εισαγωγή στην επιστήμη του μηχανικού περιβάλλοντος’, 2008). ....	26
Σχήμα 2.7: Διατάραξη ισορροπίας γλυκού και θαλασσινού νερού στους υπόγειους παράκτιους υδροφορείς λόγω υπεράντλησης (‘Εισαγωγή στην επιστήμη του μηχανικού περιβάλλοντος’, 2008). ....	27
Σχήμα 2.8: Φρεάτια άντλησης-εμπλουτισμού προς παρεμπόδιση διείσδυσης του αλμυρού νερού στους υπόγειους παράκτιους υδροφορείς (‘Εισαγωγή στην επιστήμη του μηχανικού περιβάλλοντος’, 2008). ....	28
Σχήμα 3.1: Γράφημα τάσης τυχαίας μεταβλητής (Βαρουχάκης, 2005).....	33
Σχήμα 3.2: Γράφημα συνημίτονου με εκθετικά μειούμενο πλάτος διακύμανσης (Χριστόπουλος 2004α). ....	34
Σχήμα 3.3: Σχηματικό διάγραμμα μιας περιοχής $B(r)$ γύρω από το διάνυσμα απόστασης (Χριστόπουλος 2004β).....	41
Σχήμα 3.4: Παρουσίαση χαρακτηριστικών στοιχείων ημιβαριογράμματος (Surfer V.8.0.4, 2002). ....	42
Σχήμα 4.1: Ημιβαριόγραμμα σφαιρικού μοντέλου που χρησιμοποιήσαμε για τη μέση στάθμη με τη χρήση ArcGIS. ....	56
Σχήμα 4.2: Ημιβαριόγραμμα σφαιρικού μοντέλου για τις χειμερινές βροχοπτώσεις με τη χρήση ArcGIS.....	59
Σχήμα 4.3: Ημιβαριόγραμμα εκθετικού μοντέλου για τις θερινές βροχοπτώσεις με τη χρήση ArcGIS.....	61

## Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 2.1: Υπόγεια υδατικά συστήματα Κρήτης (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2015).....	15
Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά και σφάλματα ημιβαριογραμμάτων για τη μέση στάθμη. ....	55
Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικά και σφάλματα ημιβαριογράμματος για τις χειμερινές βροχοπτώσεις. ....	58
Πίνακας 4.3: Χαρακτηριστικά και σφάλματα ημιβαριογραμμάτων για τις θερινές βροχοπτώσεις. ....	61

## 1. Εισαγωγή

Το νερό αποτελεί παράγοντα ζωτικής σημασίας για την ύπαρξη της ζωής στον πλανήτη μας, καθώς συντελεί κομβικό ρόλο στις διεργασίες της φωτοσύνθεσης και στη δομή των φυτικών και ζωικών κυττάρων και παίζει ρόλο στη διαμόρφωση του ανάγλυφου της Γης. Εκτιμάται ότι από τη συνολική ποσότητα νερού στον πλανήτη μόνο το 1% βρίσκεται σε μορφή γλυκού νερού, ενώ το υπόλοιπο 99% συναντάται σε μορφή θαλασσινού νερού. Το γλυκό νερό ανακυκλώνεται μέσω του υδρολογικού κύκλου (εξάτμιση, κατακρήμνιση, επιφανειακή και υπόγεια ροή προς τους υδάτινους αποδέκτες κ.οκ.).

Γίνεται επομένως αντιληπτό ότι ένα τόσο πολύτιμο αγαθό για τον άνθρωπο και τα φυσικά οικοσυστήματα που δεν βρίσκεται σε αφθονία, χρήζει ιδιαίτερης διαχείρισης και προστασίας. Πάνω σε αυτό το πλαίσιο κινείται η παρούσα διπλωματική εργασία με σκοπό να προσδιορισθούν οι περιοχές του υδατικού διαμερίσματος Κρήτης που οι υπόγειοι υδροφορείς τους είναι υποβαθμισμένοι, ώστε να ληφθούν απαραίτητα μέτρα αντιμετώπισης του προβλήματος.

### 1.1. Χαρακτηριστικά περιοχής μελέτης

#### 1.1.1. Γενικά χαρακτηριστικά για το νησί της Κρήτης

Η Κρήτη είναι το μεγαλύτερο νησί της Ελλάδας και ένα από τα μεγαλύτερα της Ευρώπης με έκταση  $8.335 \text{ km}^2$ . Είναι το νοτιότερο άκρο της χώρας και της ηπείρου και αποτελεί σύνορο μεταξύ τριών ηπείρων, της Ασίας, της Ευρώπης και της Αφρικής. Περιβάλλεται από μικρά νησιά όπως η Γαύδος που είναι η μόνη που κατοικείται, η Γαυδοπούλα, η Χρυσή κ.α. Έχει έκταση  $8.335 \text{ km}^2$ , μήκος  $260 \text{ km}$ , πλάτος από  $12$  έως περίπου  $57 \text{ km}$  και ακτογραμμή  $1.306 \text{ km}$ . Αποτελείται από 4 νομούς, τον νομό Χανίων, τον νομό Ρεθύμνου, τον νομό Ηρακλείου και τον νομό Λασιθίου ονοματίζοντάς τους από τα δυτικά προς τα ανατολικά. Πρωτεύουσα της είναι το Ηράκλειο. Ο πληθυσμός της σύμφωνα με την απογραφή του 2011 είναι περίπου 620.000 κάτοικοι σύμφωνα με την απογραφή που έλαβε χώρα το 2011.

Το Υδατικό Διαμέρισμα Κρήτης είναι χωρισμένο σε τρεις μεγάλες κύριες λεκάνες απορροής ποταμών, όπως φαίνονται σχηματικά στον χάρτη 1.1:

- Η μία περιλαμβάνει το βόρειο τμήμα του νησιού (GR39), έκτασης  $3.676,06 \text{ km}^2$ .
- Μια του νοτίου τμήματος (GR40), έκτασης  $2.798,2 \text{ km}^2$ .
- Και μία του ανατολικού τμήματος της Κρήτης (GR41), έκτασης  $1.870,28 \text{ km}^2$ .



Χάρτης 1.1: Κύριες λεκάνες απορροής Υδατικού διαμερίσματος Κρήτης(Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2015)

Η Κρήτη χαρακτηρίζεται από έντονο ανάγλυφο όπως απεικονίζεται στον χάρτη 1.2, καθώς σχηματίζονται αρκετά υψηλοί ορεινοί όγκοι κατά μήκος της έκτασής της. Συγκεκριμένα, στα δυτικά υπάρχει η οροσειρά των Λευκών Ορέων με πολλές κορυφές να ξεπερνούν τα 2.200 m ύψος και υψηλότερη τις Πάχνες με υψόμετρο 2.453 m. Στο κέντρο του νησιού βρίσκεται ο ορεινός όγκος του Ψηλορείτη που το μέγιστο υψόμετρο του είναι η κορυφή του Τιμίου Σταυρού στα 2.456m. Ανατολικά βρίσκεται το όρος Δίκη με μέγιστο υψόμετρο 2.148 m.



Χάρτης 1.2: Τοπογραφικό ανάγλυφο Κρήτης (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2015)

Η Κρήτη βρίσκεται στα σύνορα των λιθοσφαιρικών πλακών του Αγαίου όπως φαίνεται στο χάρτη 1.3.



Χάρτης 1.3: Λιθοσφαιρικές πλάκες Αγαίου (Παπαζάχος, 1989)

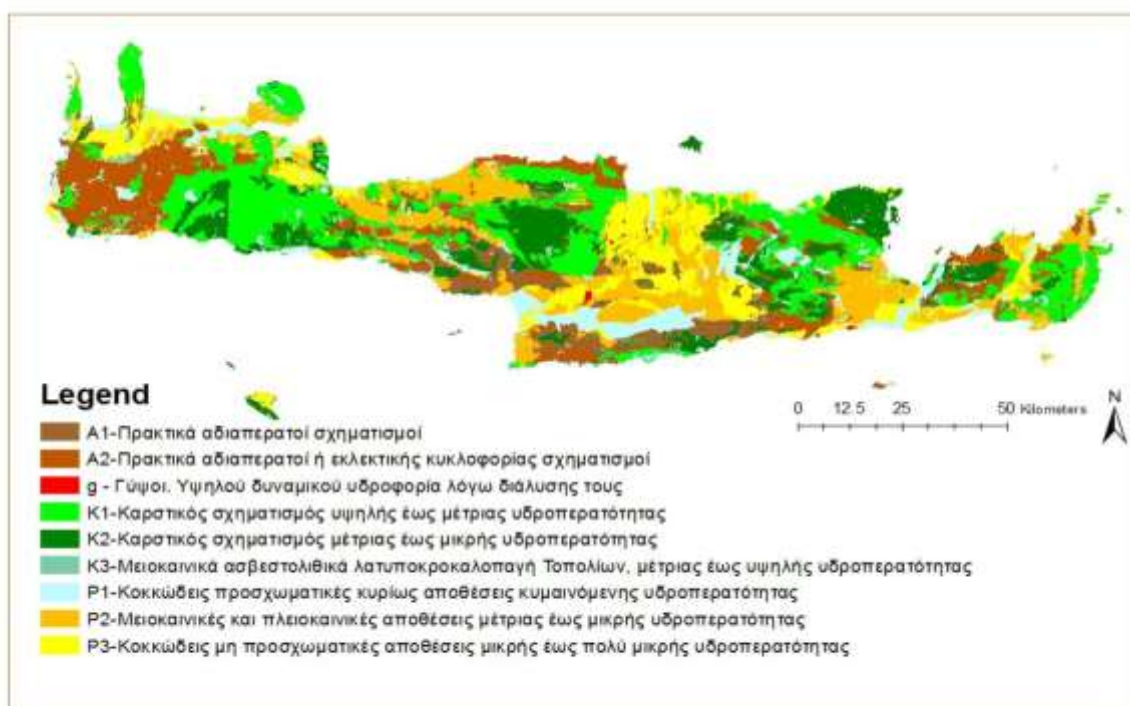
Η ύπαρξη των χαρακτηριστικών αυτών ορεινών όγκων, καθώς και οι κινήσεις των τεκτονικών πλακών με την πάροδο των γεωλογικών χρόνων, συντελούν στην ύπαρξη διαφόρων γεωλογικών σχηματισμών (καρστικοί σχηματισμοί και σπήλαια με καταγεγραμμένα περίπου 5.200 και περίπου 100 καταγεγραμμένα φαράγγια με γνωστότερο αυτό της Σαμαριάς στα Λευκά όρη) και ποικιλία στην μορφολογία του εδάφους. Στην Κρήτη υπάρχουν 25 οροπέδια, όπως είναι το οροπέδιο του Ομαλού στα Λευκά όρη και το οροπέδιο του Λασιθίου, και αρκετές κοιλάδες όπως αυτές του Μυλοποτάμου και της Μεσαράς περιμετρικά του Ψηλορείτη. Τα κύρια ορεινά συγκροτήματα πλαισιώνονται και από άλλα μικρότερα. Στατιστικά, οι ορεινές περιοχές καταλαμβάνουν περίπου το 49,4% της έκτασης της Κρήτης, οι ημιορεινές το 27,9% και οι πεδινές το 22,7%. (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2015)

### 1.1.2. Υδρογεωλογία της Κρήτης

Η ακτογραμμή της Κρήτης απαρτίζεται σε μεγάλα τμήματα από βραχώδεις απότομους σχηματισμούς μεγάλων κλίσεων στους οποίους παρεμβάλλονται παραλίες ποικίλων μεγεθών αποτελούμενες από βότσαλα ή άμμο.

Στα οροπέδια του νησιού ο κύριος τύπος εδάφους που παρατηρείται είναι η ιλύς λόγω του μεγάλου όγκου νερού που καταλήγουν σε αυτά από τους γύρω ορεινούς όγκους. Εκτιμάται ότι περίπου το 45-50% της εδαφικής έκτασης της Κρήτης απαρτίζεται από ανθρακικά πετρώματα, ευρισκόμενα κατά την πλειοψηφία τους στους κύριους ορεινούς όγκους του νησιού. Το γεγονός ότι τα ανθρακικά πετρώματα είναι υδροπερατά και στο φλοιό τους εδάφους παρατηρούνται πολλά ρήγματα και ασυνέχειες, επιτρέπει σε μεγάλο ποσοστό του νερού των κατακρημνίσεων να διηθείται προς τους υπόγειους υδροφορείς.

Η Κρήτη αποτελείται από ένα αυτόχθονο σύστημα πετρωμάτων κυρίως ασβεστολιθικών πλακών και ένα αλλόχθονο επωθημένο πάνω σε αυτό, ιζηματογενούς προέλευσης λόγω των κινήσεων των τεκτονικών πλακών κατά την πάροδο των γεωλογικών χρόνων. Αυτές οι κινήσεις των τεκτονικών πλακών είναι υπεύθυνες για την δημιουργία των μεγάλων οροσειρών της Κρήτης και εξαιτίας των ρηγμάτων δημιουργήθηκαν διάφορες λεκάνες και αύλακες στις οποίες έγινε η εναπόθεση του αλλόχθονου ιζηματογενούς συστήματος στη συνέχεια, όπως κροκάλες, άμμοι, κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι που δημιουργήθηκαν κατά την τερτατογενή και νεογενή απόθεση. Κατά τις αποθέσεις αυτές δημιουργήθηκαν σε πολλές περιπτώσεις στρώσεις γύψου που επηρεάζουν θετικά το υδάτινο δυναμικό ποσοτικά, αλλά όχι ποιοτικά. Στο χάρτη 1.4 απεικονίζονται τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά του νησιού (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2015).



Χάρτης 1.4: Υδρογεωλογικός χάρτης Κρήτης (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2015).

Αναλυτικότερα Το αλλόχθονο σύστημα αποτελείται από αλληπάλληλα τεκτονικά καλύμματα επωθημένα το ένα πάνω στο άλλο με την ακόλουθη σειρά, από το κατώτερο προς το ανώτερο :

- Ανθρακικό κάλυμμα Ομαλού – Τρυπαλίου. Περιλαμβάνει ανακρυσταλλωμένους ασβεστόλιθους έως μάρμαρα, δολομίτες, δολομιτικούς ασβεστόλιθους, ραουβάκες και ανθρακικά κροκαλολατυποπαγή.
- Τεκτονικό κάλυμμα Φυλλιτών – Χαλαζιτών. Περιλαμβάνει φυλλίτες, μεταψαμμίτες, χαλαζίτες και σχιστόλιθους, κροκαλοπαγή, ποικίλης σύστασης.

- Ζώνη Τρίπολης. Περιλαμβάνει τους σχηματισμούς του φλύσχη, μεσοπαχυστρωματώδεις ασβεστόλιθους και δολομίτες.
- Ζώνη Πίνδου. Περιλαμβάνει τους σχηματισμούς του φλύσχη, λεπτοστρωματώδεις ασβεστόλιθους και στρώματα κερατολίθων.
- Οφιολιθικό κάλυμμα. Αποτελεί ένα σύνθετο πολύμεικτο τεκτονικό κάλυμμα με ποικιλία λιθολογικών σχηματισμών (οφιόλιθοι, γνεύσιοι, αμφιβολίτες, φλυσχοειδή ιζήματα, γρανίτες κ.α.)

Τα νεογενή και πλειοπλειστοκαινικά ιζήματα αναπτύσσονται σε μεγάλες εκτάσεις. Αποτελούνται από ιζήματα χερσαίας, ποτάμιας, υφάλμυρης και θαλάσσιας φάσης.

Τα τεταρτογενή ιζήματα είναι τοποθετημένα πάνω σε όλους τους σχηματισμούς τόσο του αλπικού υποβάθρου όσο και των νεογενών αποθέσεων και αποτελούνται από χερσαίες, θαλάσσιες έως λιμνοθαλάσσιες αποθέσεις, άμμων, κροκαλών, αργίλων και χαλίκων ασύνδετων έως ελαφρά συγκολλημένων. (Περλέρος κ.α., 2004).

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που συναντώνται στην νήσο Κρήτη ταξινομούνται με βάση την υδρολιθολογική τους συμπεριφορά και χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

#### Καρστικοί σχηματισμοί Υψηλής έως μέτριας υδροπερατότητας (Κ1)

Ασβεστόλιθοι, δολομίτες, κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι, μάρμαρα υψηλής έως μέτριας υδροπερατότητας. Περιλαμβάνονται οι έντονα καρστικοποιημένοι ανθρακικοί σχηματισμοί αυτούς ζώνης αυτούς Τρίπολης, τα ανθρακικά Τρυπαλίου και οι Τριαδικοί κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι και δολομίτες αυτούς Ιονίου ζώνης. Αυτούς σχηματισμούς αυτούς αναπτύσσονται υψηλού δυναμικού υπόγειες υδροφορίες που εκφορτίζονται μέσω μεγάλων καρστικών πηγών.

#### Μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας (Κ2)

Περιλαμβάνονται οι ασβεστόλιθοι της ζώνης της Πίνδου, οι κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι Ιουραϊκής - Ηωκαινικής ηλικίας της Ιονίου ζώνης και οι μικρότερες ανθρακικές εμφανίσεις των εσωτερικών καλυμμάτων. Η κυκλοφορία του νερού στους σχηματισμούς αυτούς ελέγχεται από τις παρεμβολές πυριτόλιθων, κερατόλιθων και αργιλικών σχιστόλιθων. Στους σχηματισμούς αυτούς αναπτύσσονται μέσου έως μικρού δυναμικού υπόγειες υδροφορίες. Εξαιτίας του έντονου τεκτονισμού τους στις περιπτώσεις εκείνες που παρουσιάζουν και σημαντική επιφανειακή ανάπτυξη συμμετέχουν στην τροφοδοσία σημαντικών καρστικών πηγών.



### Μειοκαινικά ασβεστολιθικά λατυποκροκαλοπαγή Τοπολίων, μέτριας έως υψηλής υδροπερατότητας (Κ3)

Παρουσιάζουν τόσο πρωτογενές όσο και δευτερογενές πορώδες και φιλοξενούν σημαντικές υδροφορίες που εκφορτίζονται μέσω αξιόλογων πηγών.

#### Κοκκώδεις σχηματισμοί

Κοκκώδεις προσχωματικές κυρίως αποθέσεις κυμαινόμενης υδροπερατότητας (Π1).

Στη κατηγορία αυτή ανήκουν οι αλλουβιακές αποθέσεις, οι ποτάμιες και θαλάσσιες αναβαθμίδες, τα κροκαλοπαγή ποτάμιας προέλευσης, τα πλευρικά κορήματα και οι κώνοι κορημάτων όταν έχουν σημαντική εξάπλωση. Αναπτύσσονται, κατά θέσεις, αξιόλογες φρεάτιες υδροφορίες. Κοντά στη θάλασσα οι υδροφορίες αυτές έχουν υποστεί κατά θέσεις, υποβάθμιση εξαιτίας της υφαλμύρισης.

Μειοκαινικές και πλειοκαινικές αποθέσεις μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας (Π2).

Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται τα κροκαλοπαγή και οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι των Νεογενών σχηματισμών που φιλοξενούν επιμέρους υπόγειες υδροφορίες μέσου έως μικρού δυναμικού.

Κοκκώδεις μη προσχωματικές αποθέσεις μικρής έως πολύ μικρής υδροπερατότητας (Π3)

Στη κατηγορία αυτή ανήκουν οι πλειοκαινικές και μειοκαινικές μάργες, καθώς και ο αδιαίρετος σχηματισμός του νεογενούς. Τοπικά στον αδιαίρετο σχηματισμό των νεογενών αναμένεται η ανάπτυξη ασθενών υδροφοριών μέσα σε παρεμβολές κροκαλοπαγών ή μαργαϊκών ασβεστόλιθων. Κατά θέσεις στις νεογενείς αποθέσεις αναπτύσσονται στρώματα γύψου που παρουσιάζουν αξιόλογη υδροφορία εντόνως όμως υποβαθμισμένη εξαιτίας των θειικών ιόντων.

#### Αδιαπέρατοι σχηματισμοί

Πρακτικά αδιαπέρατοι σχηματισμοί μικρής έως πολύ μικρής υδροπερατότητας (Α1)

Περιλαμβάνονται οι σχηματισμοί του φλύσχη και τα ελαφρώς μεταμορφωμένα αργιλικά ιζήματα των διαφόρων ζωνών. Κατά θέσεις εντός των στρωμάτων του φλύσχη αναπτύσσονται τοπικού χαρακτήρα υδροφορίες μικρού έως μέσου δυναμικού.

Πρακτικά αδιαπέρατοι ή εκλεκτικής κυκλοφορίας σχηματισμοί μικρής έως πολύ μικρής διαπερατότητας (Α2)

Συμμετέχουν στην κατηγορία αυτή τα μεταμορφωμένα και πυριγενή πετρώματα των διαφόρων ζωνών και καλυμμάτων. Κατά θέσεις στους σχηματισμούς αυτούς, τόσο εξαιτίας του έντονου κερματισμού τους όσο και εξαιτίας της πετρολογικής σύνθεσης τους (π.χ. εναλλαγές χαλαζιτών, μαρμάρων) αναπτύσσονται επιμέρους, τοπικού χαρακτήρα, υδροφορίες.

## Γύψοι

Στο σχηματισμό των γύψων αναπτύσσεται υψηλού δυναμικού υπόγεια υδροφορία εξαιτίας της διάλυσης τους με υψηλή περιεκτικότητα σε θειικά ιόντα.

Στο σύνολο της Κρήτης οι καρστικοί σχηματισμοί καταλαμβάνουν το 37,6% της συνολικής έκτασης της νήσου, οι κοκκώδεις υδροπερατοί σχηματισμοί το 39,6% και οι αδιαπέρατοι σχηματισμοί το 22,58%. Μικρό τέλος ποσοστό καταλαμβάνουν οι γύψοι (0,21%) (Περλέρος κ.α., 2004).

Στο νησί δεν γίνεται να σχηματιστούν μεγάλοι ποταμοί λόγω των μεγάλων κλίσεων, αφού οι ορεινοί όγκοι καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος της έκτασής του και το πλάτος του είναι πολύ μικρό. Εξαιτίας αυτών των μεγάλων κλίσεων όμως, όσα σχηματίζονται είναι αρκετά ορμητικά και εναποθέτουν στις εκβολές τους φερτά υλικά προς την δημιουργία μερικών μικρών δέλτα. Πάνω στα ασβεστολιθικά πετρώματα σχηματίζονται ποτάμια μη συνεχείς ροής (χείμαρροι) που εμφανίζονται κατά τους χειμερινούς και ανοιξιάτικους μήνες που οι βροχοπτώσεις είναι πιο έντονες.

Η ιδιαιτερότητα αυτή του ανάγλυφου της Κρήτης και της γεωλογίας της, δημιουργεί ποικίλους τρόπους ροής των υδάτων τόσο επιφανειακά όσο και υπογείως. Έτσι δημιουργούνται αρκετές υδρολογικές μικρές υπολεκάνες έκτασης το πολύ μέχρι 600 km<sup>2</sup> (χαρακτηριστικότερες αυτές του Γεροποτάμου και του Αναποδάρη στη Μεσσαρά) με μεγάλες διακυμάνσεις στην παροχή νερού λόγω του γεγονότος ότι αυτή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις βροχοπτώσεις μιας και το δίκτυο ποταμιών απαρτίζεται κυρίως από χειμάρρους.

Η συνολική επιφανειακή απορροή, η άμεσα επιφανειακή και η εκφόρτιση πηγαίων υδάτων στις λεκάνες, εκτιμάται σε 500x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/έτος. Τα 450x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/έτος υφάλμυρης φύσης διακινούνται μέσω τριών μεγάλων καρστικών πηγών της Κρήτης που βρίσκονται κοντά ή υπόγεια της θάλασσας (Αλμυρός Γεωργιούπολης, Αλμυρός Ηρακλείου, Αλμυρός Αγίου Νικολάου), ενώ η υπόγεια ροή εκτιμάται 2.233x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/έτος. Αξιόλογες πηγές συναντώνται περιμετρικά των μεγάλων ορεινών όγκων που βρίσκονται συγκεντρωμένα τα ανθρακικά πετρώματα, καθώς και στα καρστικά εδάφη της Σητείας.

Λόγω της ιδιαίτερης στρωματογραφίας υπάρχουν μεγάλες υποθαλάσσιες καρστικές πηγές υφάλμυρης φύσης και καρστικές πηγές υπογείου νερού καλής ποιότητας. Το γεγονός ότι δεν υπάρχουν γεωλογικά εμπόδια στους ανθρακικούς σχηματισμούς κοντά στη θάλασσα, οδηγεί στο φαινόμενο της φυσικής υπαλμύρινσης των υπόγειων υδροφορέων. Αντιθέτως προς το εσωτερικό του νησιού οι υπόγειοι υδροφορείς είναι καλά προστατευμένοι από γεωλογική άποψη, για αυτό και τα ύδατα είναι καλής ποιότητας και αξιοποιήσιμα.

Οι υδρογεωλογικοί σχηματισμοί που αναλύθηκαν παραπάνω καταλαμβάνουν μια έκτασης της τάξεως 6.303 km<sup>2</sup>. Τα υπόλοιπα 2.000 km<sup>2</sup> περίπου που υπολείπονται από την συνολική έκταση του νησιού καλύπτονται από ρωγμώδη συστήματα αποτελούμενα από φυλλίτες, σχιστόλιθους, οφιόλιθους, χαλαζίτες, φλύσχη ή άλλους κοκκώδεις σχηματισμούς που εμφανίζουν ασθενείς υδροφορίες, αλλά πολύ μεγάλης σημασίας μιας και προμηθεύουν με νερό οικισμούς και ποιμνιοστάσια που βρίσκονται σε μεγαλύτερα υψόμετρα (Κριτσωτάκης, 2013).

### 1.1.3. Κλιματολογικές συνθήκες

Το κλίμα της Κρήτης είναι ένας ενδιάμεσος τύπος μεταξύ του χερσαίου Μεσογειακού και του ερημοειδούς Μεσογειακού (κυρίως στην νοτιοανατολική Κρήτη). Παρατηρούνται διακυμάνσεις των χαρακτηριστικών του από ανατολικά προς δυτικά και από τα ορεινά στα πεδινά.

Πεδινά το κλίμα χαρακτηρίζεται από μικρό ύψος βροχοπτώσεων, ήπιους χειμώνες, με ξηρά καλοκαίρια. Το καλοκαίρι (Ιούνιος μέχρι Σεπτέμβρη) χαρακτηρίζεται σχετικά δροσερό λόγω των ανέμων και της γειννίας με την θάλασσα (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2015).

### 1.1.4. Υδρολογικά Χαρακτηριστικά

Βροχοπτώσεις: Η μέση ετήσια βροχόπτωση στο υδατικό διαμέρισμα Κρήτης υπολογίζεται στα 927 mm που αντιστοιχεί σε 7,60 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα νερού κατακρημνίσεων εκ των οποίων το 67% περίπου χάνεται δια μέσου της εξατμισοδιαπνοής. Ανατολικά το ύψος ετήσιας βροχόπτωσης είναι 22% μικρότερο σε σχέση με αυτό της δυτικής Κρήτης, για αυτό το λόγο παρατηρούνται και οι κλιματολογικές διαφορές που αναφέρθηκαν παραπάνω. Αυξημένο ύψος βροχοπτώσεων παρατηρείται και στα βόρεια του νησιού σε σύγκριση με το νότια τμήματα του. Εκτιμάται ότι οι βροχερές μέρες είναι περίπου 90 ανά έτος με τις περισσότερες να λαμβάνουν χώρα τον Δεκέμβρη και τον Γενάρη (15-20 βροχερές μέρες), ενώ σχεδόν καθόλου βροχοπτώσεις δεν παρατηρούνται τον Ιούλιο και τον Αύγουστο (0,3 βροχερές μέρες). (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2015).

Θερμοκρασία: Η μέση ετήσια θερμοκρασία κυμαίνεται μεταξύ 17 °C και 20 °C. Οι θερμότεροι μήνες είναι ο Ιούλιος και ο Αύγουστος, ενώ το χειμώνα η θερμοκρασία σπάνια πέφτει κάτω από τους 0 °C στα πεδινά και οι διακυμάνσεις στις θερμοκρασίες με την εναλλαγή των εποχών είναι ομαλές (Donta et al., 2006).

Αντιθέτως στα ορεινά, οι διακυμάνσεις αυτές παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις. Το κλίμα προσεγγίζει αυτό της ηπειρωτικής Ελλάδας με τους πολύ ψυχρούς χειμώνες που η θερμοκρασία είναι 2-3 °C χαμηλότερη σε σύγκριση με αυτές που συναντά κανείς στα πεδινά. Οι καλοκαιρινές ορεινές θερμοκρασίες δε διαφέρουν από τις καλοκαιρινές. (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2015).

Άνεμοι: Κατά τη διάρκεια του έτους επικρατούν συνήθως βόρειοι και βορειοδυτικοί άνεμοι ενώ στην νότια Κρήτη νότιοι άνεμοι προερχόμενοι από την Αφρική κυρίως κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Στους πεδινούς μετεωρολογικούς σταθμούς παρατηρείται νηνεμία στο 20% περίπου των ημερών ενός έτους, ενώ στους ορεινούς το ποσοστό ανέρχεται γύρω στο 30%. Άνεμοι υψηλής ταχύτητας παρατηρούνται στην δυτική Κρήτη τον Μάρτιο και τον Φεβρουάριο, ενώ στην ανατολική τον Ιούλιο (Donta et al., 2006)

Ηλιοφάνεια: Η ηλιοφάνεια είναι αρκετά υψηλή στην Κρήτη όπως και στο μεγαλύτερο μέρος του ελλαδικού χώρου. Ο μέσος ετήσιος αριθμός ωρών ηλιοφάνειας ανέρχεται στις 2.700 ώρες βόρεια του νησιού και 3.000 ώρες στα νότια (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2015).

Νεφώσεις: Η μέση νέφωση στο νησί κυμαίνεται από 5 όγδοα (Ιανουάριος) με 0,6-1 όγδοα (Ιούλιος). Διακυμάνσεις παρατηρούνται και στον αριθμό των ημερών που δεν παρατηρείται συννεφιά, με 3 περίπου μέρες τον Ιανουάριο και 28 τον Ιούλιο. Στα ορεινά το καλοκαίρι η μέρες αυτές είναι 30% λιγότερες (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2015).

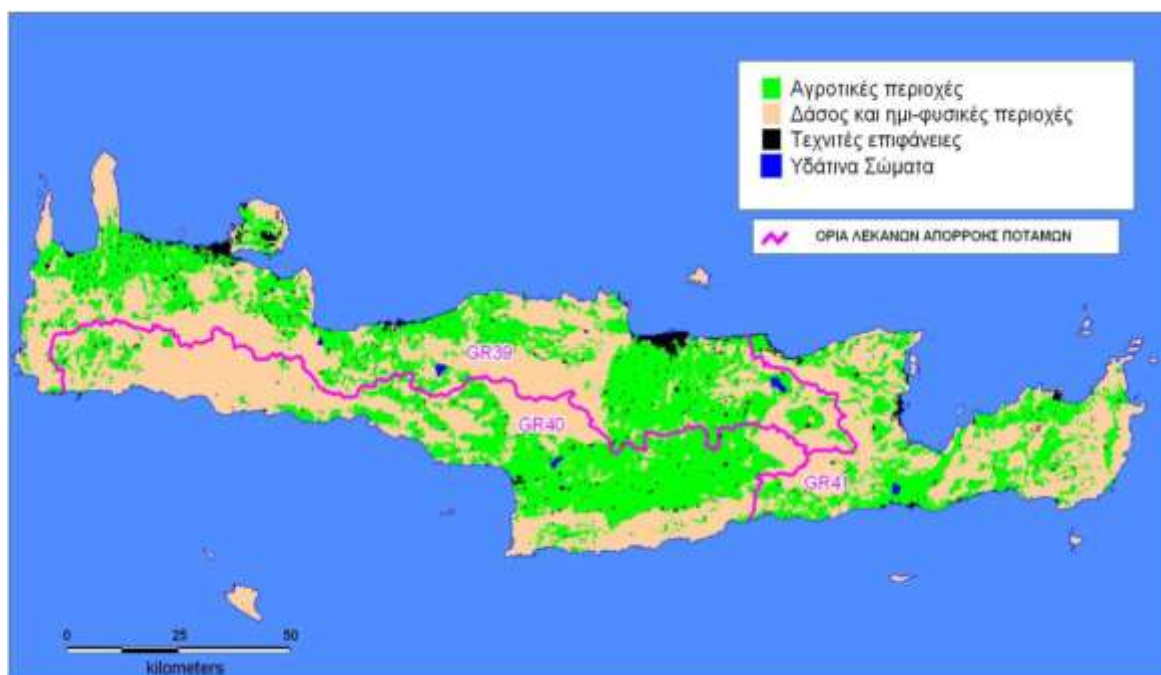
Ομίχλη: Ομίχλη παρατηρείται μόνο μία μέρα το χρόνο στα πεδινά και 15 μέρες στα ορεινά.

Υγρασία: Οι ξηρότεροι μήνες παρατηρούνται τον Ιούνιο και τον Ιούλιο με την σχετική υγρασία να κυμαίνεται μεταξύ 49-60% περίπου. Ο πιο υγρός μήνας είναι ο Δεκέμβριος με την σχετική υγρασία να κυμαίνεται μεταξύ 67-72% (Donta et al., 2006).

Εξατμισοδιαπνοή: Η εξατμισοδιαπνοή κυμαίνεται από 1.370-1570 mm/έτος. (Donta et al., 2006).

#### **1.1.5. Χρήσεις γης και υδάτων**

Η έκταση του υδατικού διαμερίσματος Κρήτης καλύπτεται από δάση και άλλα φυσικά οικοσυστήματα μόνο κατά 3%. Οι καλλιέργειες καλύπτουν το 27%, η γεωργική γη με τα βοσκοτόπια το 67%, οι αστικές περιοχές το 1 % και μόλις το 2% της έκτασης καλύπτεται από τα επιφανειακά νερά. Η χωρική τους κατανομή παρουσιάζεται στον χάρτη 1.5.



Χάρτης 1.5: Απεικόνιση των κατηγοριών χρήσης γης στο υδατικό διαμέρισμα Κρήτης (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2015)

Όπως γίνεται αντιληπτό οι απαιτήσεις σε νερό είναι ιδιαίτερα αυξημένες, ενώ η ιδιαιτερότητα του ανάγλυφου του νησιού που δεν επιτρέπει τη δημιουργία μεγάλων ποταμών σταθερής ροής, οι διακυμάνσεις των κατακρημνίσεων από τα ανατολικά στα δυτικά και από τα πεδινά στα ορεινά, καθιστά την αποθήκευσή και διαχείριση των υδάτων που προέρχονται από τις κατακρημνίσεις αρκετά δύσκολο. Κατά κύριο λόγο, για τις διάφορες χρήσεις νερού, οι υπόγειοι υδροφορείς είναι ζωτικής σημασίας. Για αυτό το λόγο είναι απαραίτητη η μελέτη της κατάστασης των υπόγειων υδροφορέων, ώστε να προληφθούν μέτρα που διασφαλίζουν την επάρκεια τους σε νερό καλής ποιότητας για την κάλυψη των αναγκών μας.

Η Κρήτη δέχεται κατά μέσο όρο 7,5 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα νερού από κατακρημνίσεις. Όπως προαναφέρθηκε το 67% αυτής της ποσότητας, δηλαδή περίπου 5 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα, χάνεται μέσω της εξατμισοδιαπνοής. Τα 2 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα κατεισδύουν προς τους υπόγειους υδροφορείς με το μεγαλύτερο μέρος αυτών (1,8 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα) να καταλήγουν στους καρστικούς υπόγειους υδροφορείς των τριών μεγάλων ορεινών όγκων του νησιού. Τα υπόλοιπα (περίπου 0,4 δισεκατομμύρια κυβικά) σε άλλους υδροφορείς. Περίπου 0,75 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα νερού απορρέουν επιφανειακά. Το συνολικό όμως δυναμικό που μπορεί να αξιοποιηθεί είναι μόλις 857 εκατομμύρια κυβικά μέτρα, αφού στις τρεις μεγάλες πηγές της Κρήτης ρέει υφάλμυρο νερό, εκ των οποίων το 60% αυτών δε χρησιμοποιείται.

Το σύνολο των αναγκών για άρδευση καλλιεργειών υπολογίζεται στα 439 εκατομμύρια κυβικά μέτρα ανά έτος που αποτελεί το 85% των συνολικών αναγκών για το υδατικό διαμέρισμα. Οι ανάγκες νερού για την κτηνοτροφία υπολογίζεται στα 6,2 εκατομμύρια

κυβικά μέτρα ανά έτος. Δηλαδή 1,2 % των συνολικών αναγκών. Μαζί με τις βιομηχανίες και τα ελαιουργία οι συνολικές απαιτήσεις σε νερό ανέρχονται στα περίπου 515 εκατομμύρια κυβικά μέτρα ανά έτος (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2015).

Αξίζει να τονισθεί ότι οι απαιτήσεις νερού είναι πάρα πολύ μεγάλες το καλοκαίρι όχι μόνο λόγω των διακυμάνσεων των βροχοπτώσεων από εποχή σε εποχή και από τις διακυμάνσεις τους από περιοχή σε περιοχή ανάλογα με τη γεωγραφική θέση, αλλά και για το γεγονός ότι η Κρήτη είναι ένα διάσημος τουριστικός προορισμός με εκατομμύρια επισκέπτες κάθε καλοκαίρι που ανεβάζουν τη ζήτηση του νερού κατακόρυφα.

Επομένως, είναι επιτακτική ανάγκη να βρεθούν λύσεις, ώστε οι υδατικοί πόροι να αξιοποιούνται με το βέλτιστο τρόπο για την κάλυψη των αναγκών και οι υπόγειοι υδροφορείς να παραμένουν σε καλή κατάσταση από άποψη επάρκειας νερού.

#### **1.1.6. Επιφανειακά νερά**

Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω οι ποταμοί της Κρήτης είναι κατά κύριο λόγο μικροί και μη συνεχής ροής. Επίσης στο νησί υπάρχουν μόνο δύο φυσικές λίμνες. Η μικρή λίμνη Κουρνά και η ακόμα μικρότερη λίμνη της Αγυιάς, ενώ έχουν δημιουργηθεί μερικές τεχνητές όπως το φράγμα Αποσελέμη, το φράγμα Αμαρίου, το φράγμα Φανερωμένης, το φράγμα Μπραμιανών και τα μικρότερα φράγματα Ινίου, Αμουργελλών και Παρτίρων. (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2015)

## 2. Υπόγεια υδατικά συστήματα

### 2.1. Καταγραφή υπογείων υδροφορέων

Το να γίνει ακριβής καταγραφή των υπόγειων υδροφορέων του νησιού είναι αρκετά δύσκολο, διότι είναι δύσκολο να μελετηθούν επ' ακριβώς τα όρια τους τόσο λόγω της συνολικής έκτασης του νησιού, όσο και λόγω του έντονου ανάγλυφου της Κρήτης.

Η δραστηριότητα των τεκτονικών πλακών επηρεάζει την διαμόρφωση των υπογείων υδροφορέων, καθώς τα ρήγματα ενδέχεται να τους καθιστούν συγκοινωνούντες ή το αντίθετο. Τα ρήγματα από βορρά προς νότο συνήθως διευκολύνουν τη ροή υδάτων στα καρστικά υπόγεια συστήματα, ενώ αυτά από ανατολή προς δύση την εμποδίζουν.

Τα σημαντικότερα συστήματα για την κάλυψη των αναγκών των κατοίκων της Κρήτης είναι τα καρσικά συστήματα των ανθρακικών πετρωμάτων στο αυτόχθονο σύστημα. Σημαντικά επίσης είναι τα υδροπερατά τμήματα των νεογενών και τεταρτογενών αποθέσεων λόγω του μικρού βάθους του υδροφόρου ορίζοντα, αλλά και όσα βρίσκονται σε ρωγμώδη συστήματα, αφού καλύπτουν τις ανάγκες σε μεγαλύτερα υψόμετρα (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2015).

Σύμφωνα λοιπόν με μελέτες του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ) έγινε η καταγραφή των υπόγειων υδροφορέων. Έγινε καταγραφή 91 υδροφορέων, που διακρίνονται σε 47 καρστικούς, 35 πορώδεις και 8 ρωγμώδεις που παρατίθενται στον πίνακα 2.1, ενώ ακολουθεί οι απεικόνισή τους στους χάρτες 2.1 έως 2.3.

A/A	ΚΩΔΙΚΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	ΤΥΠΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ	ΕΚΤΑΣΗ (km <sup>2</sup> )
1	GR1300011	ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΤΟΠΟΛΙΩΝ	Καρστικός	97.19
2	GR1300012	ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΣΦΗΝΑΡΙΟΥ	Καρστικός	7.00
3	GR1300021	ΠΟΡΩΔΕΣ ΚΙΣΣΑΜΟΥ	Πορώδες	38.43
4	GR1300022	ΠΟΡΩΔΕΣ ΚΑΜΠΟΥ ΧΑΝΙΩΝ	Πορώδες	279.78
5	GR1300023	ΠΟΡΩΔΕΣ ΑΠΟΚΟΡΩΝΟΥ	Πορώδες	124.17
6	GR1300031	ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΒΔ. ΛΕΥΚΩΝ ΟΡΕΩΝ (ΑΓΙΑΣ)	Καρστικός	122.92
7	GR1300032	ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΒΟΡΕΙΩΝ ΛΕΥΚΩΝ ΟΡΕΩΝ (ΣΤΥΛΟΥ-ΑΡΜΕΝΩΝ)	Καρστικός	93.23
8	GR1300033	ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΒΑ. ΛΕΥΚΩΝ ΟΡΕΩΝ (ΚΟΥΡΝΑΣ-ΓΕΩΡΓΙΟΥΠΟΛΗΣ)	Καρστικός	125.10
9	GR1300035	ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΓΕΩΡΓΙΟΥΠΟΛΗΣ	Καρστικός	2.04
10	GR1300041	ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΑΡΜΕΝΩΝ-ΜΑΛΑΚΙΟΥ-ΜΟΥΝΤΡΟΥ-ΑΡΓΥΡΟΥΠΟΛΗΣ	Καρστικός	40.86
11	GR1300044	ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΠΑΡΑΚΤΙΟ ΓΕΡΑΝΙΟΥ	Καρστικός	15.13
12	GR1300051	ΠΟΡΩΔΕΣ ΒΔ. ΡΕΘΥΜΝΟΥ	Πορώδες	102.19

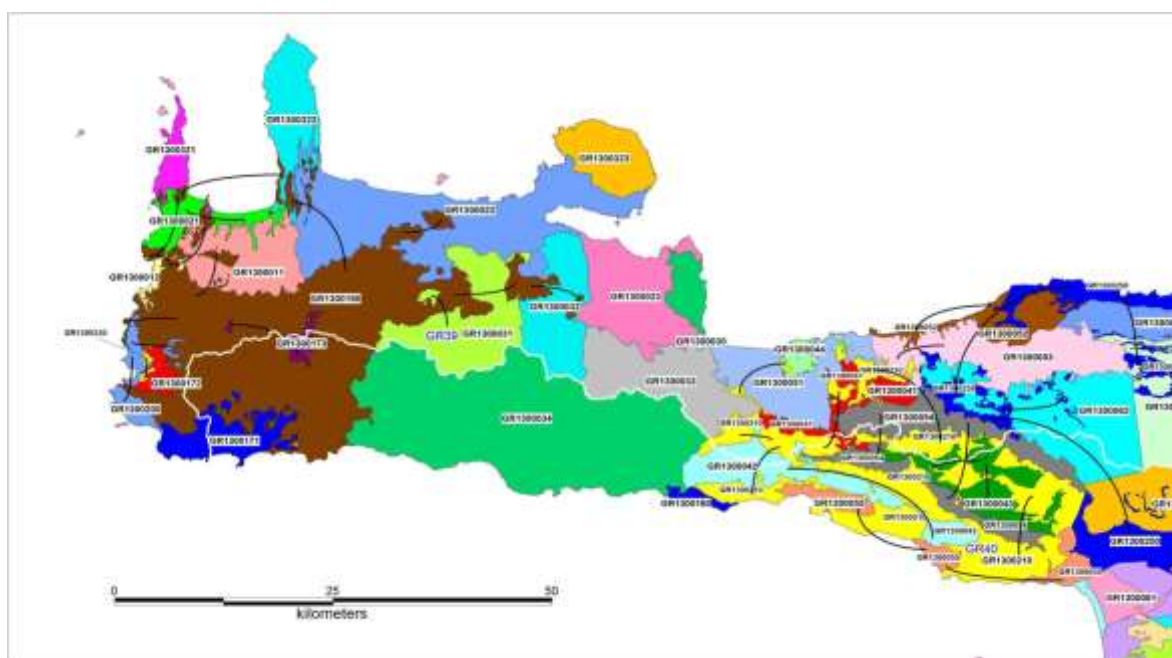
13	GR1300052	ΠΟΡΩΔΕΣ ΒΑ. ΠΑΡΑΚΤΙΟΥ ΡΕΘΥΜΝΟΥ (ΚΑΜΠΟΥ ΡΕΘΥΜΝΟΥ-ΠΡΙΝΟΥ- ΠΕΡΑΜΑΤΟΣ)	Πορώδες	49.25
14	GR1300053	ΠΟΡΩΔΕΣ ΒΑ. ΡΕΘΥΜΝΟΥ	Πορώδες	137.27
15	GR1300054	ΠΟΡΩΔΕΣ ΚΕΝΤΡΙΚΟΥ ΡΕΘΥΜΝΟΥ	Πορώδες	124.09
16	GR1300061	ΚΑΡΣΤΙΚΩΝ ΤΑΛΛΙΩΝ	Καρστικός	83.94
17	GR1300062	ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΒΔ. ΨΗΛΟΡΕΙΤΗ	Καρστικός	173.55
18	GR1300063	ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΒΑ. ΨΗΛΟΡΕΙΤΗ	Καρστικός	218.05
19	GR1300064	ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΚΕΡΗΣ-ΤΥΛΙΣΣΟΥ	Καρστικός	8.27
20	GR1300071	ΠΟΡΩΔΕΣ ΒΟΡΕΙΟ-ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ	Πορώδες	435.00
21	GR1300072	ΠΟΡΩΔΕΣ ΠΑΡΑΚΤΙΟ ΒΟΡΕΙΟΥ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ	Πορώδες	111.70
22	GR1300172	ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΧΡΥΣΟΣΚΑΛΙΤΙΣΣΑΣ	Καρστικός	14.85
23	GR1300190	ΡΩΓΜΩΔΕΣ ΧΑΝΙΩΝ	Ρωγμώδες	582.04
24	GR1300200	ΠΟΡΩΔΕΣ ΧΡΥΣΟΣΚΑΛΙΤΙΣΣΑΣ	Πορώδες	28.00
25	GR1300231	ΠΟΡΩΔΕΣ ΟΡΟΠΕΔΙΟΥ ΛΑΣΙΘΙΟΥ	Πορώδες	27.02
26	GR1300250	ΡΩΓΜΩΔΕΣ ΨΗΛΟΡΕΙΤΗ	Ρωγμώδες	297.61
27	GR1300301	ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΓΙΟΥΧΤΑ	Καρστικός	3.88
28	GR1300311	ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΚΑΙΝΟΥΡΓΙΟΥ ΧΩΡΙΟΥ- ΣΜΑΡΙΟΥ	Καρστικός	69.13
29	GR1300312	ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΠΑΡΑΚΤΙΟ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ- ΓΟΥΒΩΝ-ΧΕΡΣΟΝΗΣΟΥ	Καρστικός	57.68
30	GR1300321	ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΠΑΡΑΚΤΙΟ ΓΡΑΜΒΟΥΣΑΣ	Καρστικός	25.44
31	GR1300322	ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΠΑΡΑΚΤΙΟ ΣΠΑΘΑΣ (ΡΟΔΩΠΟΥ)	Καρστικός	79.29
32	GR1300323	ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΠΑΡΑΚΤΙΟ ΑΚΡΩΤΗΡΙΟΥ (ΣΟΥΔΑΣ)	Καρστικός	69.88
33	GR1300324	ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΠΑΡΑΚΤΙΟ ΑΠΟΚΟΡΩΝΑ	Καρστικός	30.50
34	GR1300101	ΠΟΡΩΔΕΣ ΚΑΣΤΕΛΙΟΥ	Πορώδες	25.07
35	GR1300034	ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΝΟΤΙΩΝ ΛΕΥΚΩΝ ΟΡΕΩΝ	Καρστικός	482.03
36	GR1300042	ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΚΑΛΛΙΚΡΑΤΗ-ΑΣΙΔΕΡΩΤΑ	Καρστικός	93.17
37	GR1300043	ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΚΕΔΡΟΥ	Καρστικός	72.72
38	GR1300055	ΠΟΡΩΔΕΣ ΝΟΤΙΟΥ ΡΕΘΥΜΝΟΥ	Πορώδες	49.46
39	GR1300065	ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΝΑ. ΨΗΛΟΡΕΙΤΗ	Καρστικός	167.56
40	GR1300081	ΠΟΡΩΔΕΣ ΤΥΜΠΑΚΙΟΥ	Πορώδες	28.71
41	GR1300082	ΠΟΡΩΔΕΣ ΠΑΡΑΚΤΙΟ ΤΥΜΠΑΚΙΟΥ	Πορώδες	6.31
42	GR1300083	ΠΟΡΩΔΕΣ ΜΟΙΡΩΝ	Πορώδες	55.93
43	GR1300084	ΠΟΡΩΔΕΣ ΓΑΛΙΑΣ-ΒΑΓΙΩΝΙΑΣ-ΑΣΗΜΙΟΥ	Πορώδες	115.70
44	GR1300085	ΠΟΡΩΔΕΣ ΜΕΣΟΧΩΡΙΟΥ	Πορώδες	51.02
45	GR1300086	ΠΟΡΩΔΕΣ ΜΕΣΑΡΑΣ-ΝΟΤΙΟΥ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ	Πορώδες	508.41
46	GR1300091	ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΠΟΜΠΙΑΣ-ΑΛΗΘΙΝΗΣ	Καρστικός	12.79
47	GR1300092	ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΠΥΡΓΟΥ-ΧΑΡΑΚΑ- ΦΟΥΡΝΟΦΑΡΑΓΓΟΥ	Καρστικός	20.83



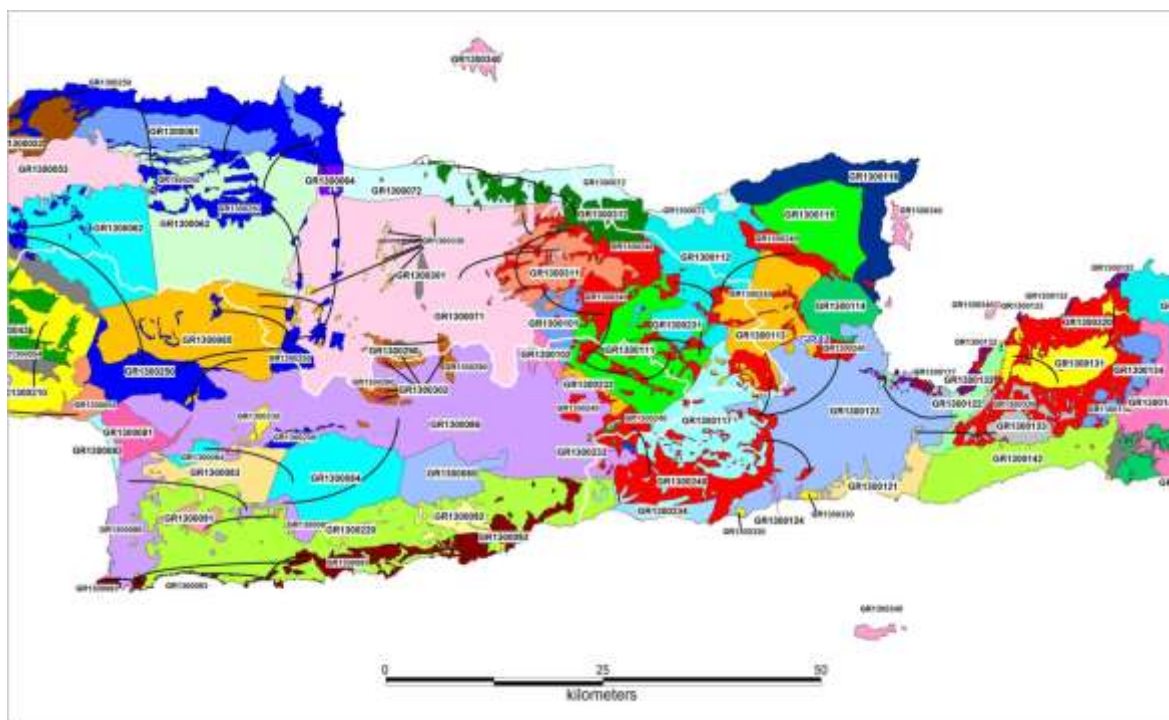
48	GR1300093	ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΑΣΤΕΡΟΥΣΙΩΝ	Καρστικός	69.55
49	GR1300111	ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΔΙΚΤΗΣ	Καρστικός	111.61
50	GR1300171	ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΠΑΛΑΙΟΧΩΡΑΣ	Καρστικός	62.09
51	GR1300173	ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΚΑΝΤΑΝΟΥ	Καρστικός	10.80
52	GR1300180	ΠΟΡΩΔΕΣ ΦΡΑΓΚΟΚΑΣΤΕΛΟΥ	Πορώδες	11.01
53	GR1300210	ΡΩΓΜΩΔΕΣ ΡΕΘΥΜΝΟΥ	Ρωγμώδες	307.87
54	GR1300220	ΡΩΓΜΩΔΕΣ ΑΣΤΕΡΟΥΣΙΩΝ	Ρωγμώδες	281.06
55	GR1300232	ΠΟΡΩΔΕΣ ΕΜΠΑΡΟΥ-ΠΑΝΑΓΙΑΣ	Πορώδες	8.01
56	GR1300270	ΠΟΡΩΔΕΣ ΓΑΥΔΟΥ	Πορώδες	17.27
57	GR1300280	ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΓΑΥΔΟΥ	Καρστικός	14.36
58	GR1300290	ΡΩΓΜΩΔΕΣ ΓΙΟΥΧΤΑΣ-ΟΞΥ ΚΕΦΑΛΙ (ΔΑΜΑΝΙΩΝ-ΛΑΡΑΝΙΟΥ)	Ρωγμώδες	30.97
59	GR1300302	ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΔΑΜΑΝΙΩΝ ΛΑΡΑΝΙΟΥ	Καρστικός	2.08
60	GR1300330	ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΓΥΨΩΝ ΚΡΗΤΗΣ	Γύψοι	17.87
61	GR1300102	ΠΟΡΩΔΕΣ ΡΟΥΣΟΧΩΡΙΩΝ	Πορώδες	9.68
62	GR1300112	ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΜΑΛΙΩΝ-ΣΕΛΕΝΑΣ	Καρστικός	92.51
63	GR1300113	ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΒΑ.ΔΙΚΤΗΣ	Καρστικός	86.75
64	GR1300114	ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΛΑΚΩΝΙΩΝ-ΑΛΜΥΡΟΥ ΑΓ. ΝΙΚΟΛΑΟΥ	Καρστικός	43.57
65	GR1300115	ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΦΟΥΡΝΗΣ-ΕΛΟΥΝΤΑΣ	Καρστικός	80.98
66	GR1300116	ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΠΑΡΑΚΤΙΟ ΣΙΣΙΟΥ-ΜΙΛΑΤΟΥ- ΕΛΟΥΝΤΑΣ	Καρστικός	90.18
67	GR1300117	ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΑΝΑΤΟΛΙΚΗΣ-ΝΟΤΙΑΣ ΔΙΚΤΗΣ	Καρστικός	116.42
68	GR1300122	ΠΟΡΩΔΕΣ ΠΑΧΕΙΑΣ ΑΜΜΟΥ-ΚΑΛΟΥ ΧΩΡΙΟΥ	Πορώδες	27.08
69	GR1300123	ΠΟΡΩΔΕΣ ΙΕΡΑΠΕΤΡΑΣ-ΚΑΛΟΥ ΧΩΡΙΟΥ	Πορώδες	260.97
70	GR1300132	ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΠΑΡΑΚΤΙΟ ΜΑΛΑΥΡΑΣ- ΠΑΧΕΙΑΣ ΑΜΜΟΥ	Καρστικός	15.85
71	GR1300141	ΠΟΡΩΔΕΣ ΣΗΤΕΙΑΣ-ΠΑΠΑΓΙΑΝΝΑΔΩΝ- ΑΓΙΑΣ ΤΡΙΑΔΑΣ	Πορώδες	94.10
72	GR1300142	ΠΟΡΩΔΕΣ ΚΟΥΤΣΟΥΡΑ-ΜΑΚΡΥΓΥΑΛΟΥ	Πορώδες	93.67
73	GR1300143	ΠΟΡΩΔΕΣ ΣΚΟΠΗΣ-ΣΗΤΕΙΑΣ	Πορώδες	52.56
74	GR1300144	ΠΟΡΩΔΕΣ ΓΟΥΔΟΥΡΑ	Πορώδες	2.28
75	GR1300152	ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΒΑ. ΑΠΟΛΗΞΕΩΝ ΟΡΕΩΝ ΖΑΚΡΟΥ	Καρστικός	44.27
76	GR1300153	ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΠΑΡΑΚΤΙΟ ΑΝΑΤΟΛΙΚΩΝ ΑΠΟΛΗΞΕΩΝ ΟΡΕΩΝ ΖΑΚΡΟΥ	Καρστικός	71.83
77	GR1300161	ΠΟΡΩΔΕΣ ΦΟΙΝΙΚΟΔΑΣΟΥΣ ΒΑΪ	Πορώδες	1.66
78	GR1300162	ΠΟΡΩΔΕΣ ΜΟΝΗΣ ΤΟΠΛΟΥ- ΠΑΛΑΙΚΑΣΤΡΟΥ-ΞΗΡΟΚΑΜΠΟΥ	Πορώδες	64.55
79	GR1300233	ΠΟΡΩΔΕΣ ΑΝΩ ΒΙΑΝΝΟΥ	Πορώδες	0.98
80	GR1300234	ΠΟΡΩΔΕΣ ΚΕΡΑΤΟΚΑΜΠΟΥ-ΑΡΒΗΣ	Πορώδες	18.04
81	GR1300240	ΡΩΓΜΩΔΕΣ ΔΙΚΤΗΣ	Ρωγμώδες	269.37
82	GR1300260	ΡΩΓΜΩΔΕΣ ΟΡΕΩΝ ΖΑΚΡΟΥ	Ρωγμώδες	78.25

83	GR1300320	ΡΩΓΜΩΔΕΣ ΟΡΝΟΥ-ΘΡΥΠΤΗΣ	Ρωγμώδες	125.94
84	GR1300340	ΝΗΣΙΔΕΣ ΚΡΗΤΗΣ	Καρστικός	43.42
85	GR1300121	ΠΟΡΩΔΕΣ ΙΕΡΑΠΕΤΡΑΣ-ΚΕΝΤΡΙΟΥ	Πορώδες	27.84
86	GR1300124	ΠΟΡΩΔΕΣ ΜΥΡΤΟΥ	Πορώδες	2.59
87	GR1300151	ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΟΡΕΩΝ ΖΑΚΡΟΥ	Καρστικός	93.20
88	GR1300154	ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΟΡΕΩΝ ΠΗΓΗΣ ΖΟΥ	Καρστικός	15.59
89	GR1300131	ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΟΡΝΟΥ	Καρστικός	51.87
90	GR1300134	ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΠΕΥΚΩΝ-ΜΑΡΩΝΙΑΣ	Καρστικός	28.92
91	GR1300133	ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΘΡΥΠΤΗΣ	Καρστικός	35.42

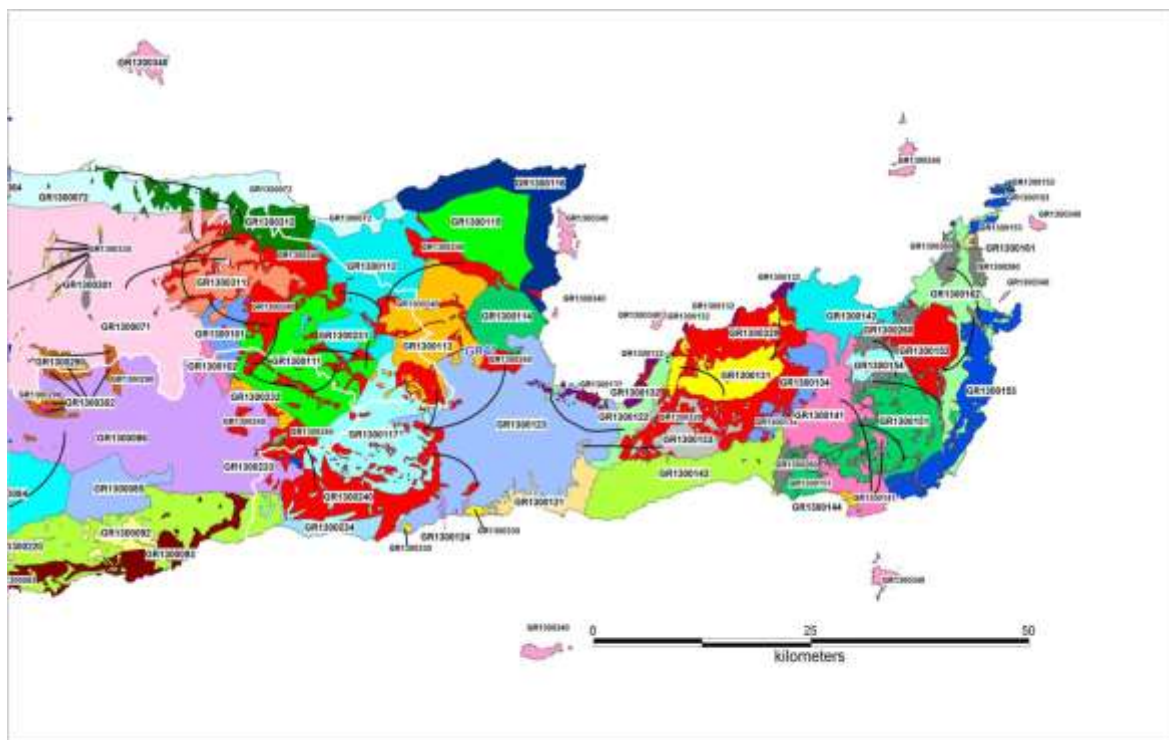
Πίνακας 2.1: Υπόγεια υδατικά συστήματα Κρήτης (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2015).



Χάρτης 2.1: Απεικόνιση υπογείων υδροφορέων Δυτικής Κρήτης (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2015)



Χάρτης 2.2: Απεικόνιση υπογείων υδροφορέων κεντρικής Κρήτης (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2015)



Χάρτης 2.3: Απεικόνιση υπογείων υδροφορέων ανατολικής Κρήτης (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2015)

## 2.2. Εκτίμηση της ποσοτικής κατάστασης των υπόγειων υδροφορέων του υδατικού διαμερίσματος Κρήτης.

Από τους 91 υπόγειους υδροφορείς που μελετήθηκαν, εκτιμήθηκε ότι οι 81 είναι σε καλή κατάσταση με επαρκείς ποσότητες υδάτων, ενώ οι δέκα βρίσκονται σε κακή κατάσταση. Η υδροφορείς που βρίσκονται σε κακή κατάσταση απεικονίζονται στο χάρτη 2.4.



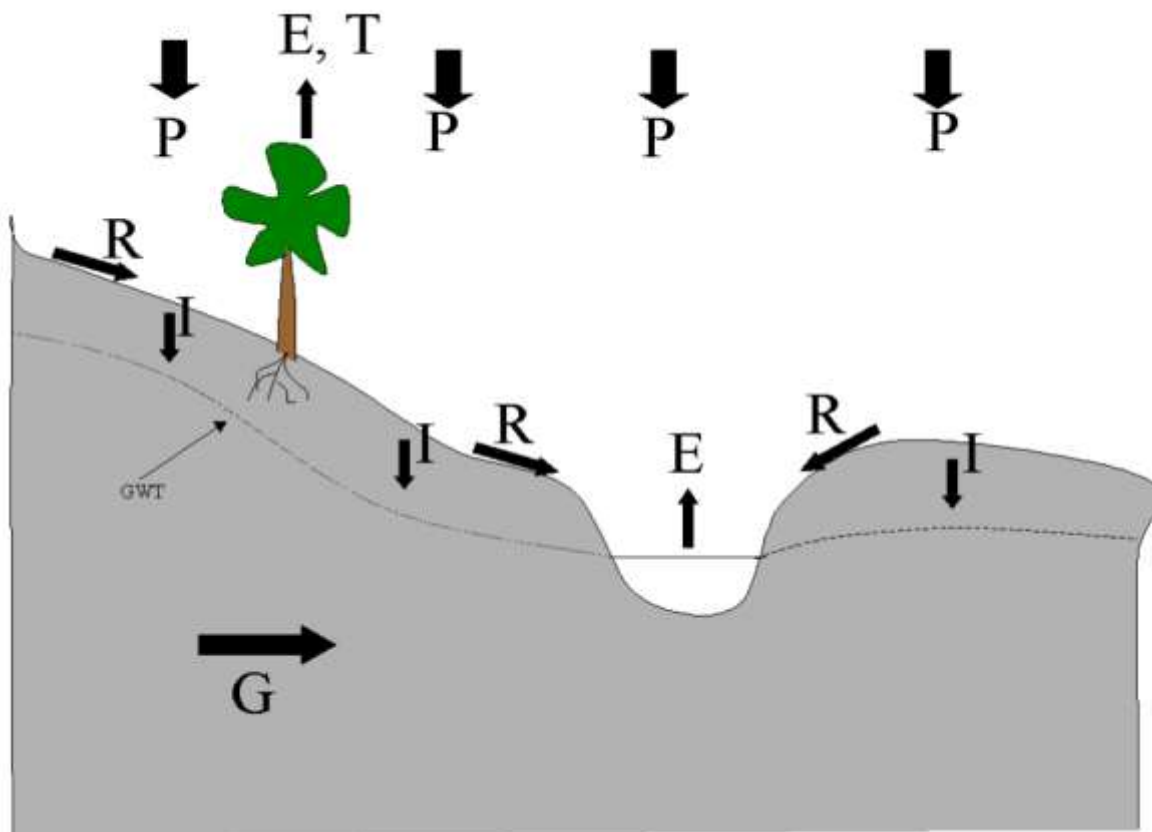
Χάρτης 2.4: Απεικόνιση ποσοτικής κατάστασης υπογείων υδροφορέων υδατικού διαμερίσματος Κρήτης (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2015)

Οι υδροφορείς που εκτιμήθηκε ότι βρέθηκαν σε κακή ποσοτική κατάσταση είναι οι εξής:

1. Καρστικό Κέρης-Τυλισσού (GR300063). Αποτελείται από Τριαδικούς έως Ιουρασικούς ασβεστόλιθους και υπερκείμενα στρώματα Φυλλιτών-Χαλαζιτών πολύ χαμηλής περατότητας. Διαπιστώθηκε ότι ο υδροφορέας έχει υποστεί υπερεκμετάλλευση, καθώς παρατηρήθηκε και το φαινόμενο της υφαλμύρισής του.
2. Πορώδες παράκτιο βορείου Ηρακλείου (GR300072). Η σύσταση του εδάφους είναι Νεογενείς αποθέσεις και υπερκείμενα στρώματα Νεογενών και Τερτατογενών αποθέσεων χαμηλής περατότητας. Παρατηρήθηκαν τα ίδια προβλήματα με αυτά του καρστικού Κέρης Τυλισσού.
3. Καρστικό παράκτιο Ηρακλείου-Γουβών-Χερσονήσου (GR300312). Η Γεωλογία που χαρακτηρίζει των υδροφόρο είναι Τριαδικοί και Κρητιδικοί ασβεστόλιθοι και υπερκείμενα στρώματα ασβεστόλιθων χαμηλής περατότητας. Παρατηρήθηκαν τα ίδια προβλήματα με τους παραπάνω υδροφορείς.
4. Πορώδες Καστελίου (GR300101). Αποτελείται από Νεογενείς και Τερτατογενείς αποθέσεις χαμηλής ή μέτριας περατότητας. Παρατηρήθηκε υπερεκμετάλλευση.
5. Πορώδες παράκτιο Τυμπακίου (GR300082). Αποτελείται από Τερτατογενείς αποθέσεις υψηλής περατότητας. Παρατηρήθηκε υπερεκμετάλλευση και υφαλμύριση.
6. Πορώδες Μοιρών (GR300083). Γεωλογία: Τερτατογενείς αποθέσεις υψηλής περατότητας. Ο υδροφόρος έχει υποστεί υπερεκμετάλλευση.
7. Πορώδες Γαύδου (GR300270). Γεωλογία: Τερτατογενείς και Νεογενείς αποθέσεις μέσης περατότητας. Παρατηρήθηκαν προβλήματα υπερεκμετάλλευσης και υφαλμύρισης.
8. Πορώδες Ρουσοχωρίων (GR300102) αποτελούμενος από Τερτατογενείς και Νεογενείς αποθέσεις μέτριας έως χαμηλής περατότητας. Ο υδροφόρος έχει υποστεί υπερεκμετάλλευση.
9. Πορώδες Σκοπής-Σητείας (GR300143) αποτελούμενος από Τερτατογενείς και Νεογενείς αποθέσεις υψηλής περατότητας. Ο υδροφορέας έχει υποστεί υπερεκμετάλλευση.
10. Πορώδες Γουδουρά (GR300144). Η γεωλογία που τον χαρακτηρίζει είναι τερτατογενείς αποθέσεις υψηλής περατότητας και υφαλμύριση.

### 2.3. Ροή υπογείων υδάτων

Τα απαραίτητα εργαλεία για την εκτίμηση της ποσοτικής κατάστασης ενός υπογείου υδροφορέα είναι το υδρολογικό ισοζύγιο και οι εξισώσεις ροής που προκύπτουν από το νόμο Darcy. Είναι απαραίτητο δηλαδή να γίνει ο υπολογισμός του ρυθμού κατακρημνίσεων (P), του ρυθμού εξάτμισης (E) και διαπνοής (T), τη διαφορά του ρυθμού εισροών και εκροών επιφανειακής ροής ( $\Delta R$ ) στην επιφάνεια πάνω από την έκτασή του και η διαφορά του ρυθμού εισροής υδάτων από τους γειτονικούς υπόγειους υδροφορείς με τον ρυθμό εκροής υδάτων από αυτόν ( $\Delta G$ ). Στη συνέχεια παρατίθεται η σχηματική απεικόνιση του υδρολογικού ισοζυγίου (σχήμα 2.1).



Σχήμα 2.1: Σχηματική απεικόνιση υδρολογικού ισοζυγίου (Καρατζάς, 2005).

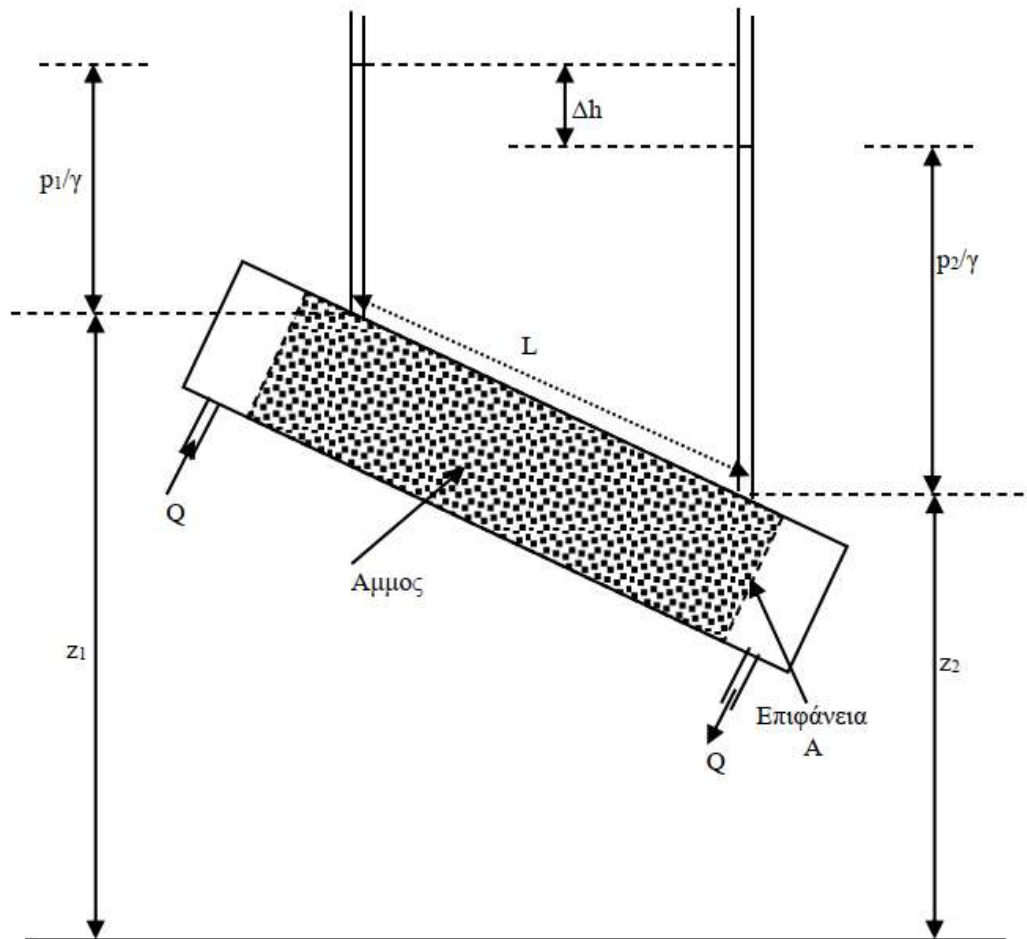
Το υδρολογικό ισοζύγιο περιγράφεται από τη σχέση:

$$P - \Delta R - \Delta G - E - T = \Delta S$$

Εξίσωση 2.1

Όπου  $\Delta S$  η αλλαγή του ρυθμού αποθήκευσης υδάτων. Μονάδες:  $L^3/T$

Ο νόμος Darcy προέκυψε το 1856 από τον μηχανικό Henry Darcy ο οποίος μελέτησε την ροή των υδάτων διαμέσου στρωμάτων άμμου σύμφωνα με τη διάταξη του σχήματος 2.2 και κατέληξε στα συμπεράσματα ότι ο ρυθμός ροής διαμέσου ενός πορώδους  $Q/A$  είναι ανάλογος ενός συντελεστή  $K$  χαρακτηριστικό για το πορώδες μέσο, ανάλογος των απωλειών φορτίου και αντιστρόφως ανάλογος του μήκους πορείας της ροής (Καρατζάς 2005)



Σχήμα 2.2: Διάταξη πειραμάτων Darcy (Καρατζάς, 2005)

Η σχέση του νόμου Darcy είναι:

$$\frac{Q}{A} = -K \frac{\Delta h}{L}$$

εξίσωση 2.2



Όπου:

Q: είναι η παροχή ( $L^3/T$ )

A: είναι η επιφάνεια ( $L^2$ )

K: είναι η υδραυλική αγωγιμότητα ( $L/T$ )

$\Delta h$ : είναι η απώλεια φορτίου που εκφράζεται ως  $(p_1/\gamma + z_1) - (p_2/\gamma + z_2)$  (L)

L: είναι το μήκος της στήλης (L)

Το αρνητικό πρόσημο δείχνει ότι η ταχύτητα της ροής είναι προς την κατεύθυνση που ελαττώνεται το φορτίο.

Η έκφραση  $\Delta h/L$  συνήθως εμφανίζεται στην γενική της μορφή ως  $\Delta h/dl$  και ονομάζεται υδραυλική κλίση.

Η έκφραση  $Q/A$  είναι η ταχύτητα Darcy ή ειδική παροχή και συμβολίζεται με  $q$  ( $L/T$ )

Η ταχύτητα του Darcy θεωρεί ότι η ροή λαμβάνει χώρα δια μέσου της ολικής επιφάνειας, χωρίς όμως να λαμβάνει υπόψη το στερεό υλικό και τους πόρους. Ουσιαστικά όμως σε ένα πορώδες υλικό η ροή περιορίζεται μόνο εντός του χώρου των πόρων και η πραγματική ταχύτητα διήθησης  $q_s$  ορίζεται ως:

$$q_s = \frac{q}{n} \quad \text{εξίσωση 2.3}$$

Όπου  $n$  είναι το πορώδες (αδιάστατος αριθμός)

Ο νόμος του Darcy ισχύει για Reynold numbers,  $Re < 1$ . Έχει όμως παρατηρηθεί ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέχρι και  $Re = 10$  χωρίς να υπάρχει σοβαρό σφάλμα.

Στην περίπτωση των υπογείων υδάτων η ροή συμβαίνει με  $Re < 1$ , πράγμα το οποίο εξασφαλίζει την χρήση του νόμου του Darcy, χωρίς καμία προϋπόθεση, πλην των περιπτώσεων όπου έχουμε μεγάλη υδραυλική κλίση π.χ. κοντά σε ένα φρέαρ άντλησης, και σε περιπτώσεις που έχουμε τυρβώδη ροή π.χ. περιπτώσεις που έχουμε βασάλτη ή ασβεστόλιθο με μεγάλα ανοίγματα (Καρατζάς, 2005).

Οι παραπάνω εξισώσεις ροής του νόμου Darcy προκύπτουν με τις παραδοχές ότι η ροή είναι μονοδιάστατη και ο υδροφορέας ομοιογενής και ισότροπος, δηλαδή ότι αυτός έχει σε κάθε σημείο του και προς όλες τις κατευθύνσεις τις ίδιες υδραυλικές ιδιότητες. Στην πραγματικότητα όμως η ροή των υδάτων λαμβάνει χώρα και στις 3 διαστάσεις του χώρου, οι υδροφορείς δεν είναι ούτε ισότροποι ούτε ομοιογενείς, αφού για παράδειγμα μπορεί να παρατηρηθεί αλλαγή του πορώδους και της υδραυλικής αγωγιμότητας από σημείο σε σημείο μέσα στον ίδιο υδροφόρο.

Επομένως το ρεαλιστικό μοντέλο που περιγράφει την ροή των υπογείων υδάτων είναι η γενικευμένη μορφή του νόμου Darcy που περιγράφεται από τις εξισώσεις:



$$q_x = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} - K_{xy} \frac{\partial h}{\partial y} - K_{xz} \frac{\partial h}{\partial z}$$

εξίσωση 2.4

$$q_y = -K_{yx} \frac{\partial h}{\partial x} - K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} - K_{yz} \frac{\partial h}{\partial z}$$

εξίσωση 2.5

$$q_z = -K_{zx} \frac{\partial h}{\partial x} - K_{zy} \frac{\partial h}{\partial y} - K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}$$

εξίσωση 2.6

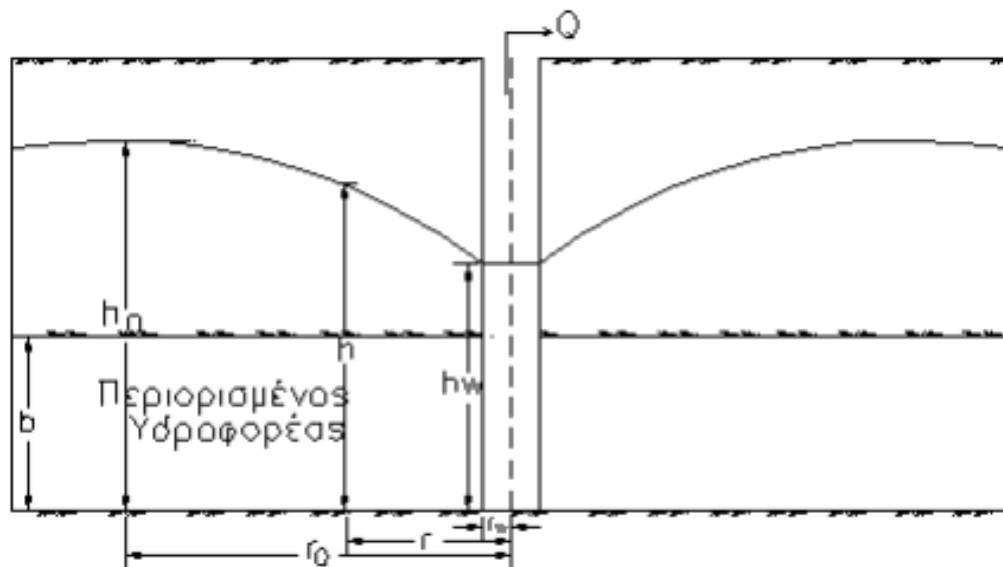
Από όλα τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι η ακριβής περιγραφή της ποσοτικής κατάστασης ενός υδροφορέα είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που απαιτεί μετρήσεις για τις υδραυλικές ιδιότητες που χαρακτηρίζουν έναν υπόγειο υδροφορέα, όπως το πορώδες και η υδραυλική αγωγιμότητα, τον υπολογισμό όλων των εισροών και εκροών από αυτόν και την επίλυση πολύπλοκων μαθηματικών σχέσεων. Για πολύ μεγάλες εκτάσεις, όπως το υδατικό διαμέρισμα Κρήτης που εξετάζουμε, η πρόσβαση σε έναν τόσο μεγάλο όγκο πληροφοριών είναι δύσκολη, καθώς δεν είναι δυνατόν να συλλεχθούν τόσο πολλές μετρήσεις για τις υδραυλικές ιδιότητες ή τις αντλήσεις υδάτων. Επίσης δε γίνεται να υπολογιστεί με ακρίβεια ούτε ο ρυθμός εξατμισοδιαπνοής σε μία μεγάλη έκταση με μεγάλη ποικιλία στη φυτοκάλυψη της επιφάνειας πάνω από τους υδροφορείς, ούτε ο ρυθμός εισροής και εκροής υδάτων μεταξύ των επικοινωνούντων υπογείων υδροφορέων.

Για αυτούς τους λόγους μέθοδοι όπως η γεωστατιστική ανάλυση, που αναλύεται στο επόμενο κεφάλαιο, εμφανίζουν συγκριτικό πλεονέκτημα ως προς την επιλογή τους για μία αρχική εκτίμηση της ποσοτικής κατάστασης ενός υδροφορέα, μιας και δεν απαιτεί τόσο πολλές μετρήσεις.

## 2.4. Πτώση στάθμης γύρω από τα φρεάτια άντλησης

Κατά την άντληση υπογείων υδάτων από φρεάτια άντλησης δημιουργούνται περιμετρικά τους ανάστροφοι κυκλικοί κώνοι πτώση στάθμης. Η ακτίνα επιρροής φρέατος  $r_0$  είναι η μέγιστη απόσταση από το φρεάτιο άντλησης από όπου ξεκινάει να παρατηρείται μεταβολή στη στάθμη του υπογείου ύδατος.

Οι σχέσεις που περιγράφουν την πτώση στάθμης για ελεύθερους (υδροφορέας με την άνω επιφάνεια του υπογείου ύδατος να χαρακτηρίζεται ως μία διεπιφάνεια με ατμοσφαιρικό αέρα), και περιορισμένους υδροφορείς (ύδατα υπό πίεση μεταξύ αδιαπέρατων στρωμάτων) είναι διαφορετικές και παρατίθενται παρακάτω μαζί με τη σχηματική απεικόνιση των δύο περιπτώσεων (σχήματα 2.3 και 2.4)



Σχήμα 2.3: Σχηματική απεικόνιση πτώσης στάθμης σε φρεάτια άντλησης περιορισμένων υδροφορέων (Καρατζάς, 2005).

Η σχέση που περιγράφει την πτώση στάθμης σε αυτήν την περίπτωση είναι:

$$h_w = h_0 + \frac{Q}{2\pi K b} \ln\left(\frac{r_w}{r_0}\right)$$

εξίσωση 2.7

Όπου :

b: το πάχος του περιορισμένου υδροφορέα.

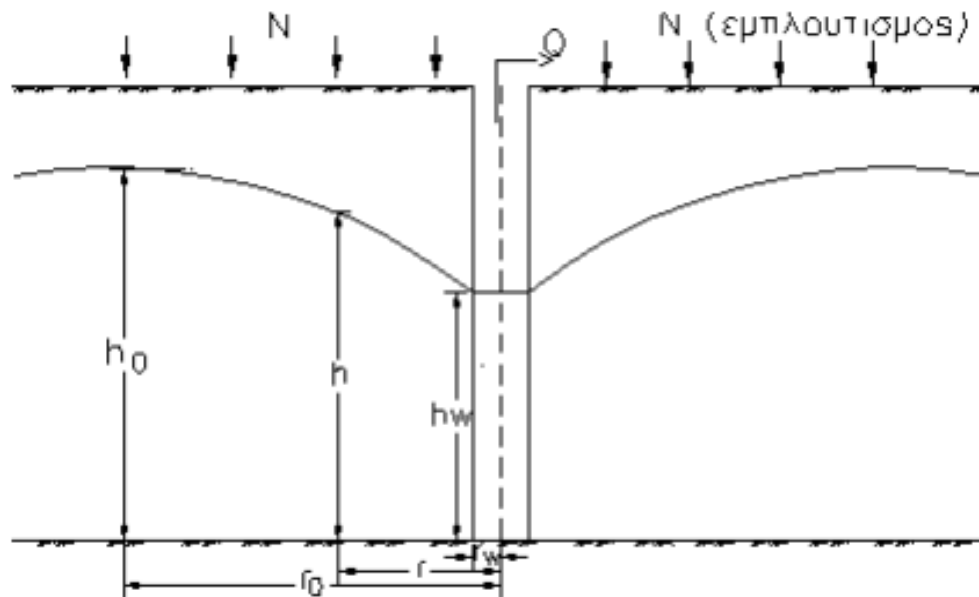
$h_w$ : η στάθμη στο φρεάτιο άντλησης

$r_0$ : η ακτίνα επιρροής φρέατος

Q: η παροχή άντλησης

$h_0$ : το ύψος στάθμης του υδροφορέα πριν από την ακτίνα επιρροής και μετά

$r_w$ : η ακτίνα του φρεατίου.



Σχήμα 2.4: Σχηματική απεικόνιση πτώσης στάθμης σε φρεάτια άντλησης ελεύθερων υδροφορέων (Καρατζάς, 2005).

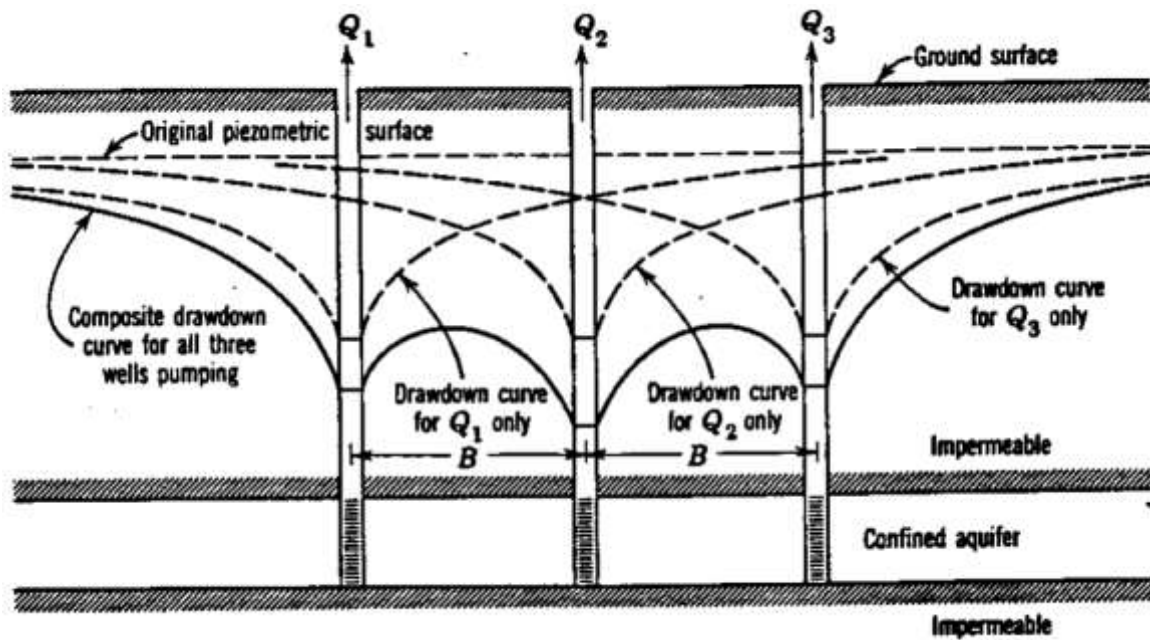
Η σχέση που περιγράφει την πτώση στάθμης σε αυτήν την περίπτωση είναι:

$$h^2 = h_0^2 + \frac{N}{2K} (r_0^2 - r^2) + \frac{Q}{\pi K} \ln \frac{r}{r_0}$$

εξίσωση 2.8

Όπου N ο εμπλουτισμός.

Σε περίπτωση που έχουμε γειτονικά φρεάτια άντλησης που η ακτίνα επιρροής τους επηρεάζει η μία την άλλη όπως φαίνεται στο σχήμα 2.5, τότε η συνολική πτώση στάθμης είναι το άθροισμα των επιμέρους πτώσεων στάθμης από κάθε πηγάδι χωριστά.



Σχήμα 2.5: Σχηματική απεικόνιση πτώσης στάθμης σε πολλαπλά φρεάτια άντλησης (Καρατζάς, 2005).

Η σχέση πτώσης στάθμης σε αυτήν την περίπτωση είναι:

$$h = h_0 + \frac{1}{2\pi T} \sum_{i=1}^n q_i \ln\left(\frac{r_i}{R_i}\right) \quad \text{εξίσωση 2.9}$$

Όπου  $T$  ο συντελεστής μεταβιβασιμότητας που ισούται με το γινόμενο  $K \cdot b$  (Καρατζάς, 2005).

## 2.5. Υφαλμύριση

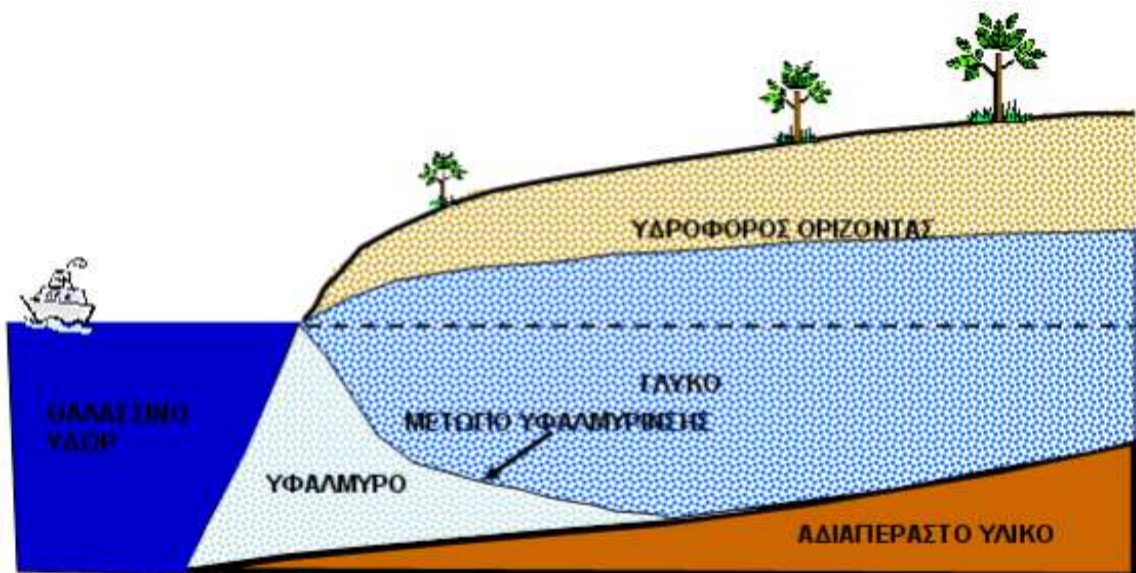
Με τον όρο υφαλμύριση υπόγειων υδροφορέων εννοείται η εισροή σε αυτούς, αλμυρού ύδατος, με παράλληλη αύξηση της αλατότητάς τους σε δεδομένη τοποθεσία και βάθος. Αποτελεί ξεχωριστή κατηγορία της υπόγειας ροής και παρατηρείται τόσο σε ελεύθερους όσο και σε περιορισμένους υδροφορείς.

Η υφαλμύριση ενός υπόγειου υδροφορέα μπορεί να είναι είτε φυσική, λόγω της ύπαρξης θαλασσινού ύδατος και άλμης που βρίσκεται σε κατώτερα γεωλογικά στρώματα, είτε ανθρωπογενής, λόγω υπεράντλησης υπόγειου ύδατος από παράκτιες περιοχές ή ακόμα λόγω της διείσδυσης στο έδαφος άλατος που χρησιμοποιείται για την τήξη του πάγου και άλατος από τα στραγγίσματα των ΧΥΤΑ.

Όταν σε έναν υδροφορέα εισχωρήσει αλμυρό νερό, μέρος του αλατιού προσροφάται στην επιφάνεια των στερεών, δυσκολεύοντας τη διαδικασία αναστροφής και την αποκατάσταση του υδροφορέα. Η ύπαρξη άλατος είναι επικίνδυνη για την υγεία των

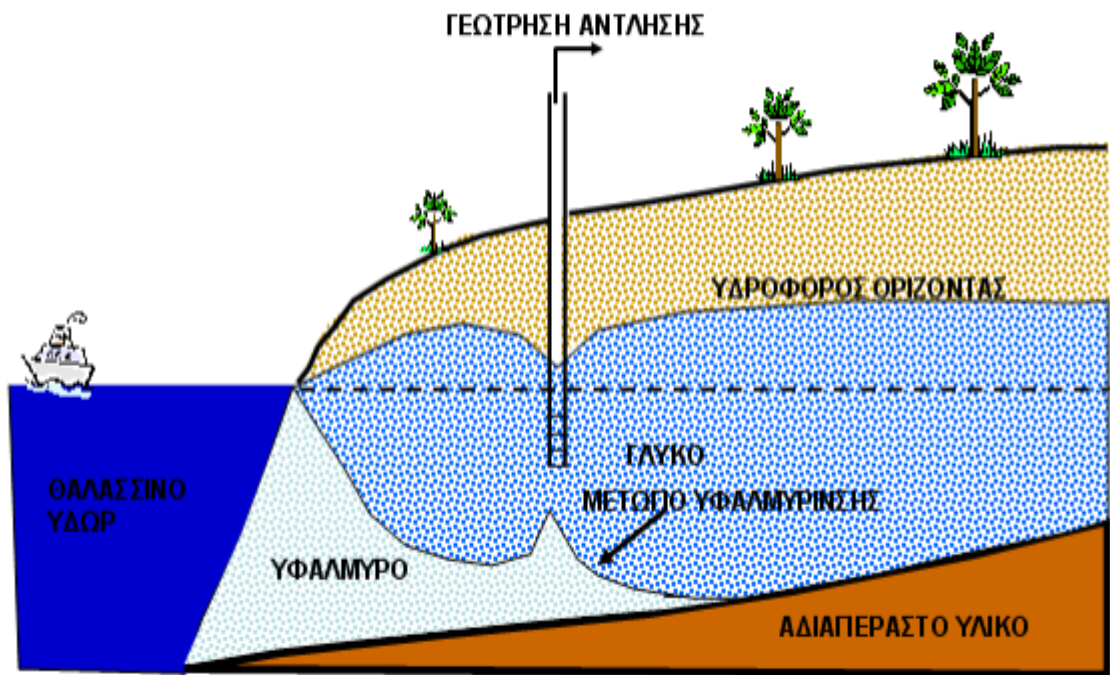
ανθρώπων και των ζώων, καταστρέφει τις καλλιέργειες, διαβρώνει σωλήνες και λέβητες σε βιομηχανικές χρήσεις. Γι' αυτό το λόγο η υφαλμύριση ενός υδροφορέα σημαίνει και την απώλεια αυτού του υδροφορέα ως πηγή ύδατος όχι μόνο ως πόσιμο, αλλά και για πλείστες άλλες ανάγκες (Καρτεράκης, 2005)

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6 επειδή το θαλασσινό νερό είναι βαρύτερο, τείνει να κινείται κάτω από το στρώμα του φρέσκου ύδατος. Οι πιέσεις αυτές αυξάνουν με το βάθος του ύδατος με αποτέλεσμα να έχουμε βαθύτερη εισχώρηση του θαλασσινού ύδατος στα μεγαλύτερα βάθη. Ωστόσο, η υδραυλική κλίση του φρέσκου ύδατος (που οφείλεται στον συνεχή εμπλουτισμό λόγω βροχόπτωσης) μειώνεται προς την ακτή, με αποτέλεσμα να κινείται τελικά προς τη θάλασσα. Χωρίς αυτή τη δύναμη το θαλασσινό ύδωρ θα κινούνταν σταδιακά προς τα ανάντη, τείνοντας να καταλάβει ολόκληρο τον υδροφορέα που βρίσκεται κάτω από τη στάθμη της θάλασσας. Αυτή η ορμή του φρέσκου ύδατος προβάλλει αντίσταση στην κίνηση του θαλασσινού ύδατος λόγω πυκνότητας και ουσιαστικά επιφέρει μία κατάσταση ισορροπίας, που απεικονίζεται στο Σχήμα 6 ως η διεπιφάνεια του μετώπου της υφαλμύρισης με τον υπόγειο υδροφορέα. Η θαλασσινή σφήνα αποτελεί το σημείο μέγιστης διείσδυσης.



Σχήμα 2.6: Ισορροπία θαλασσινού και γλυκού νερού στους υπόγειους παράκτιους υδροφορείς (‘Εισαγωγή στην επιστήμη του μηχανικού περιβάλλοντος’, 2008).

Το πρόβλημα της υφαλμύρισης είναι δυνατό να επιδεινωθεί σε περιπτώσεις όπου έχουμε ανθρωπογενείς παρεμβάσεις σε παράκτιες περιοχές. Η πλέον τυπική ανθρωπογενής παρέμβαση είναι η άντληση υπογείου ύδατος από γεωτρήσεις που ευρίσκονται πλησίον της παράκτιας ζώνης. Ο αφαιρούμενος όγκος υπογείου ύδατος έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση του ύψους του υπογείου ύδατος με αποτέλεσμα να μειώνεται και η αντίσταση διείσδυσης του θαλασσινού ύδατος. Επιπλέον, η άντληση είναι δυνατό να δημιουργήσει ένα κώνο ανύψωσης του αλμυρού ύδατος κάτω από την γεώτρηση άντλησης (Σχήμα 2.7). Η παρατεταμένη άντληση σε μια τέτοια περίπτωση είναι δυνατό να έχει σαν αποτέλεσμα την άντληση αλμυρού ύδατος.

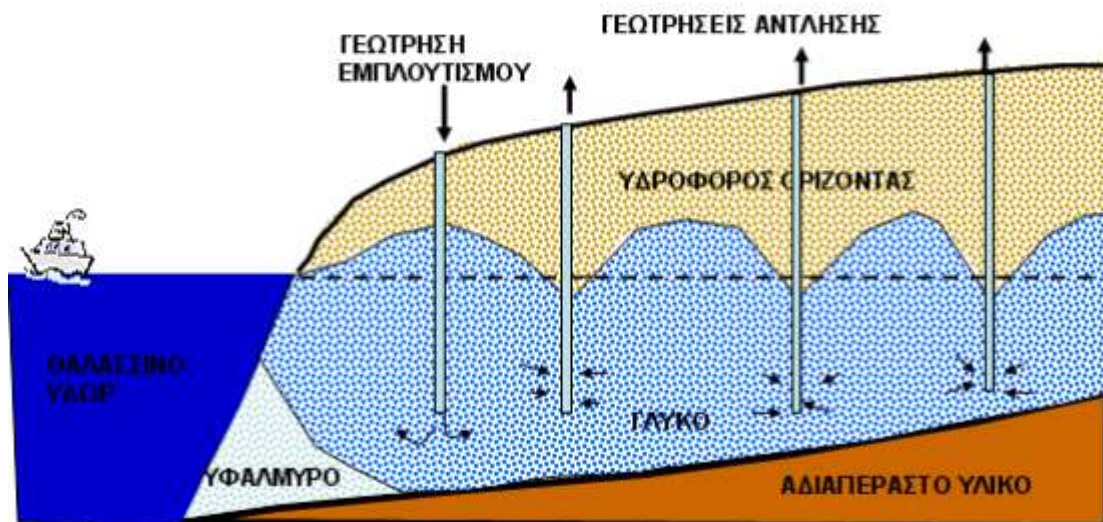


Σχήμα 2.7: Διατάραξη ισορροπίας γλυκού και θαλασσινού νερού στους υπόγειους παράκτιους υδροφορείς λόγω υπεράντλησης (‘Εισαγωγή στην επιστήμη του μηχανικού περιβάλλοντος’, 2008).

Έχει αναπτυχθεί μία πληθώρα μέτρων για την αντιμετώπιση του φαινομένου της υφαλμύρισης, όπως ο εμπλουτισμός με κατάκλιση ή με πλημμύρα, η δημιουργία στεγανοποιημένων υπογείων φραγμάτων που εμποδίζουν την διείσδυση του αλμυρού νερού, η δημιουργία μικρών φραγμάτων στις κοίτες των χειμάρρων για την αποθήκευση γλυκού νερού με σκοπό την μεταφορά του προς διήθηση στις επίφοβες περιοχές (Κουτάντου, 2006).

Η πιο διαδεδομένη είναι η μέθοδος δημιουργίας φρεατίων άντλησης εμπλουτισμού όπως φαίνεται στο σχήμα 2.8.





Σχήμα 2.8: Φρεάτια άντλησης-εμπλουτισμού προς παρεμπόδιση διείσδυσης του αλμυρού νερού στους υπόγειους παράκτιους υδροφορείς (‘Εισαγωγή στην επιστήμη του μηχανικού περιβάλλοντος’, 2008).

Πρέπει να σημειωθεί, ότι για την ακριβή εκτίμηση για τον αν μια περιοχή έχει πληγεί από το φαινόμενο της υφαλμύρινσης, είναι απαραίτητες οι μετρήσεις της συγκέντρωσης χλωριώντων στα υπόγεια ύδατα των παράκτιων περιοχών. Στην παρούσα διπλωματική εργασία δεν έγινε ανάλυση της ποιοτικής κατάστασης των υπογείων υδροφορέων της Κρήτης. Όμως κατά την ποσοτική ανάλυση μπορούμε να διακρίνουμε τις παράκτιες περιοχές με πτώση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, που αποτελεί προπομπό για την δυνητική εμφάνιση του προβλήματος της υφαλμύρινσης στις περιοχές αυτές.

### 3. Γεωστατιστική ανάλυση

#### 3.1. Γεωστατιστική

Η επιστήμη της Γεωστατιστικής έχει γνωρίσει ιδιαίτερη ανάπτυξη τις τελευταίες δύο δεκαετίες. Το πεδίο εφαρμογών της έχει διευρυνθεί και περιλαμβάνει εφαρμογές που έχουν άμεση σχέση με τις ερευνητικές δραστηριότητες ανίχνευσης και εντοπισμού ορυκτών πόρων και περιβαλλοντικών ρύπων. Η γεωστατιστική ανάλυση ασχολείται με κατανομές στις οποίες τα χαρακτηριστικά της χωρικής εξάρτησης παίζουν πρωτεύοντα ρόλο. Οι μέθοδοι γεωστατιστικής ανάλυσης οδηγούν στον προσδιορισμό της χωρικής κατανομής μεταβλητών σε σημεία μιας περιοχής όπου οι μεταβλητές αυτές δεν είναι γνωστές και οι οποίες χαρακτηρίζουν μεγέθη με οικονομική ή περιβαλλοντική σημασία. (Χριστόπουλος 2004β).

Οι κλασικές γεωστατιστικές μέθοδοι οι οποίες χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό χαρακτηρίζονται από ισχυρούς μαθηματικούς περιορισμούς ως προς την εφαρμογή τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, όταν οι περιορισμοί αυτοί δεν ικανοποιούνται από το πειραματικό δείγμα, του υπό μελέτη φαινομένου, η χωρική εκτίμηση των μεταβλητών να περιλαμβάνει υψηλό ποσοστό σφάλματος (Hristopulos, 2003).

Η Γεωστατιστική Περιλαμβάνει ένα σύνολο στατιστικών τεχνικών που αφορούν τυχαίες μεταβλητές οι οποίες μεταβάλλονται στο χώρο (τυχαία πεδία). Οι τεχνικές αυτές βασίζονται στην υπόθεση ότι η χωρική διακύμανση της μεταβλητής εμπεριέχει τυχαίο χαρακτήρα, οπότε χρησιμοποιούν στατιστικές μεθοδολογίες (πχ. Μέση τιμή, διασπορά κ.α.) για οποιαδήποτε εκτίμηση απορρέει από τις σημειακές μετρήσεις της μεταβλητής (Χριστόπουλος 2004β)

Πιο αναλυτικά, η Γεωστατιστική στηρίζεται στην μαθηματική έννοια του τυχαίου πεδίου. Η Γεωστατιστική έχει κοινά σημεία με τη Θεωρία Πιθανοτήτων και τη Στατιστική. Η Θεωρία Πιθανοτήτων ασχολείται με τους 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 (Χριστόπουλος 2004β).

Η Γεωστατιστική αποσκοπεί στην εκτίμηση των στατιστικών παραμέτρων που προσδιορίζουν τη χωρική κατανομή βάσει του υπάρχοντος δείγματος (π.χ. τιμών συγκέντρωσης), καθώς και στη χρήση αυτών των παραμέτρων προκειμένου να εκτιμηθούν οι συγκεντρώσεις σε σημεία όπου δεν υπάρχουν μετρήσεις (Χριστόπουλος 2004β).

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 (Χριστόπουλος 2004β):

- Την έρευνα κοιτασμάτων (π.χ. εκτίμηση έκτασης, βάθος και ποσοτικοποίηση συνολικής περιεκτικότητας κοιτάσματος).
- Την ωκεανογραφία (π.χ. χαρτογράφηση βυθού, ανάλυση κυματισμών).
- Την μορφολογική ανάλυση φυσικών και τεχνολογικών ανομοιογενών (π.χ. πορωδών) υλικών.
- Την χαρτογράφηση και την απεικόνιση συγκεντρώσεων ρυπαντών σε διάφορα περιβαλλοντικά μέσα (αέρας, υπέδαφος, επιφανειακοί-υπόγειοι υδατικοί πόροι).
- Το χαρακτηρισμό της ποιότητας βιομηχανικών προϊόντων (π.χ., προϊόντα χαρτιού, υλικά υψηλής τεχνολογίας όπως ημιαγωγοί).
- Την τοπογραφική ανάλυση και στα γεωγραφικά συστήματα πληροφορίας (GIS).
- Την ανάλυση βροχοπτώσεων σε περιοχές που υπάρχουν λίγοι βροχομετρικοί σταθμοί.
- Το προσδιορισμό γεωλογικών και υδρο-γεωλογικών δεδομένων (π.χ. τύπος υπεδάφους, υδραυλική αγωγιμότητα, πορώδες, αποθηκευτικότητα, εξατμισο-διαπνοή, υδραυλικό ύψος).
- Την εκτίμηση του περιβαλλοντικού κινδύνου και του κινδύνου για την ανθρώπινη υγεία (π.χ. εκτίμηση της περιεκτικότητας των ρυπαντών σε ελεγχόμενη περιοχή, προσδιορισμός των πιθανοτήτων υπέρβασης κρίσιμων ορίων).

Ο κοινός στόχος σε όλες τις 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. Ωστόσο οι μέθοδοι αυτές όπως προαναφέρθηκε χαρακτηρίζονται από μαθηματικούς περιορισμούς οι οποίοι επηρεάζουν την εφαρμογή τους.

### 3.2. Τυχαία πεδία

Ως «τυχαίο πεδίο» μπορεί να θεωρηθεί ένα σύνολο τυχαίων μεταβλητών που περιγράφουν τη χωροχρονική μεταβολή του σχετικού φυσικού μεγέθους (π.χ. τιμές συγκεντρώσεων ρύπων). Σε αντίθεση με τις συναρτήσεις οι οποίες έχουν μια συγκεκριμένη μαθηματική έκφραση, π.χ.  $f(x) = \cos(x)$ , ένα τυχαίο πεδίο που δεν έχει σαφή μαθηματική έκφραση 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. Λόγω της αλληλεξάρτησης των φυσικών μεγεθών σε διαφορετικά σημεία του χώρου, τα τυχαία πεδία έχουν ιδιαίτερες μαθηματικές ιδιότητες που τα ξεχωρίζουν από ένα σύνολο ανεξάρτητων τυχαίων μεταβλητών (Χριστόπουλος 2004α).

Υπάρχουν διάφορες κατηγορίες τυχαίων πεδίων. 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 ενός πλέγματος (κανάβου) ονομάζεται πλεγματοειδές πεδίο.

Τα πλεγματοειδή πεδία χρησιμοποιούνται σε υπολογιστικές (π.χ. προσομοίωση κατανομής ρυπαντών σε υδροφόρο ορίζοντα) αλλά και σε θεωρητικές μελέτες γιατί η συμμετρία του πλέγματος επιτρέπει την χρησιμοποίηση αριθμητικά αποτελεσματικών μεθόδων (π.χ. ταχείς μετασχηματισμούς Fourier). Επιπλέον τα πλεγματοειδή πεδία επιτρέπουν την σύγκριση των επιδόσεων διαφορετικών γεωστατιστικών μεθόδων (Χριστόπουλος 2004α).

Στην πράξη οι μετρήσεις αντιπροσωπεύουν ένα πεπερασμένο πλήθος σημείων, η κατανομή των οποίων στο χώρο δεν έχει κατ' ανάγκη τη συμμετρία ενός κανονικού πλέγματος. Σε αυτές τις περιπτώσεις το δίκτυο των σημείων δειγματοληψίας είναι ανομοιογενές. Επίσης χρησιμοποιείται ο όρος άτακτο πλέγμα (disordered lattice) και ο όρος εξωπλεγματοειδής κατανομή (off lattice). Σε αυτές τις περιπτώσεις, χρειάζονται γεωστατιστικές μέθοδοι που να λειτουργούν ικανοποιητικά με τους περιορισμούς της εκάστοτε χωρικής κατανομής. Αν η κατανομή των δεδομένων είναι εξωπλεγματοειδής, η εκτίμηση ή η προσομοίωση της διαδικασίας πραγματοποιείται πάνω σε ένα πλεγματοειδές υπόβαθρο που καλύπτει την περιοχή ενδιαφέροντος (Χριστόπουλος 2004α).

Η έννοια του τυχαίου πεδίου βασίζεται σε δύο άλλες βασικές έννοιες: την τυχαιότητα και την αλληλεξάρτηση των τιμών φυσικών μεγεθών σε διαφορετικά σημεία του χώρου. Η τυχαιότητα χαρακτηρίζει φαινόμενα στα οποία η γνώση μιας κατάστασης με απόλυτη ακρίβεια είναι αδύνατη λόγω διαφόρων περιορισμών. Τέτοιοι περιορισμοί προέρχονται από την μεταβλητότητα των διαφόρων φυσικών μεγεθών στον χώρο και την αβεβαιότητα που οφείλεται στον περιορισμένο αριθμό μετρήσεων. Σε αυτές τις περιπτώσεις το αποτέλεσμα (η τιμή του φαινομένου) καθορίζεται από μία συνάρτηση κατανομής πιθανότητας, η οποία προσδιορίζει τις πιθανότητες εμφάνισης κάθε κατάστασης.

Η χωρική εξάρτηση (αλληλεξάρτηση) είναι το ιδιαίτερο γνώρισμα των τυχαίων πεδίων και 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 τις τιμές στα γειτονικά σημεία (Χριστόπουλος 2004α).

### 3.3. Βασικές έννοιες τυχαίων πεδίων

Ένα τυχαίο πεδίο συμβολίζεται ως  $X(s)$ , όπου  $s$  ένα διάνυσμα θέσης,  $s=(x, y)$ . Το  $X(s)$  συμβολίζει το σύνολο των δυνατών καταστάσεων του πεδίου, ενώ ως  $x(s)$  συμβολίζονται οι τιμές που αντιστοιχούν σε μια κατάσταση. Η Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας (ΣΠΠ) του πεδίου παριστάνεται ως  $f_X[x(s)]$ . Ο δείκτης  $X$  δηλώνει το πεδίο, ενώ το όρισμα της συνάρτησης είναι οι τιμές της κατάστασης του πεδίου (π.χ. συγκεντρώσεις ρυπαντών).

Ένα παράδειγμα ΣΠΠ η οποία αντιστοιχεί σε τυχαίο πεδίο κανονικής κατανομής δίνεται από την εξίσωση:

$$f_x[x(s)] = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2}} \exp\left[-\frac{(x(s) - m_x(s))^2}{2\sigma_x^2}\right] \quad \text{εξίσωση 3.1}$$

Η Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας τυχαίου πεδίου περιλαμβάνει τις τιμές σε ολόκληρο το χώρο όπου ορίζεται το πεδίο. Επομένως αποτελεί την κοινή ΣΠΠ για ένα οποιοδήποτε πλήθος σημείων. Η μονοδιάστατη η αλλιώς σημειακή ΣΠΠ περιγράφει τις δυνατές καταστάσεις του πεδίου σε ένα συγκεκριμένο σημείο. Είναι δυνατόν η μονοδιάστατη ΣΠΠ να αλλάζει από σημείο σε σημείο και αυτό συμβαίνει όταν το πεδίο είναι ανομοιογενές. Ανάλογα, η δισδιάστατη ΣΠΠ του πεδίου εκφράζει την αλληλεξάρτηση των δυνατών καταστάσεων σε δύο σημεία και η πολυδιάστατη περιγράφει την αλληλεξάρτηση των δυνατών καταστάσεων για ένα σύνολο N σημείων (Χριστόπουλος 2004α).

Ένα άλλο είδος συναρτήσεων το οποίο δίνει πληροφορίες σχετικά με τις ιδιότητες ενός τυχαίου πεδίου είναι οι στατιστικές ροπές. Οι στατιστικές ροπές είναι αιτιοκρατικές συναρτήσεις, οι οποίες αντιπροσωπεύουν μέσες τιμές, ως προς όλες τις δυνατές καταστάσεις. Στην πράξη συνήθως είναι χρήσιμες οι ροπές χαμηλών τάξεων (μέχρι δεύτερης τάξης), όπως η μέση τιμή, η διασπορά, η συνάρτηση συνδιασποράς, και το ημιβαριόγραμμα (Χριστόπουλος 2004α).

### 3.4. Μέση τιμή

Η μέση τιμή ενός τυχαίου πεδίου δίνεται από την παρακάτω σχέση,  $m_x(s) = E[X(s)]$ . Το σύμβολο  $E[X(s)]$  δηλώνει τη μέση τιμή υπολογισμένη ως προς το σύνολο των καταστάσεων του πεδίου, δηλαδή

$$E[X(s)] = \int dx f_x(x; s) x \quad \text{εξίσωση 3.2}$$

όπου x οι τιμές που αντιστοιχούν σε μια κατάσταση.

Τα όρια του ολοκληρώματος εξαρτώνται από τον χώρο στον οποίο ορίζεται το πεδίο X. Αν το πεδίο παίρνει όλες τις θετικές και αρνητικές τιμές το ολοκλήρωμα κυμαίνεται από  $-\infty$  έως  $\infty$ . Αν το πεδίο παίρνει μόνο θετικές τιμές τότε το ολοκλήρωμα κυμαίνεται από το 0 έως το  $\infty$ . Αν είναι γνωστό ότι οι τιμές του πεδίου περιορίζονται σε ένα προκαθορισμένο διάστημα  $[a, b]$ , το ολοκλήρωμα υπολογίζεται σε αυτό το διάστημα.

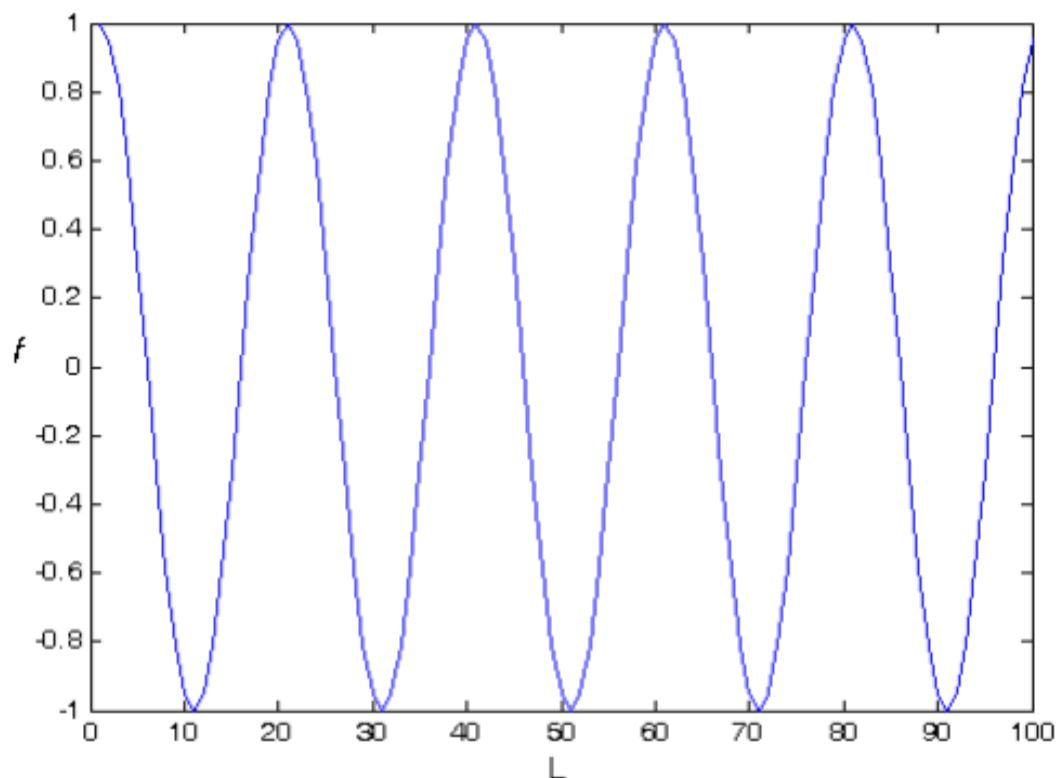
Από την εξίσωση (3.2) παρατηρείται ότι η μέση τιμή μπορεί να έχει εξάρτηση από τη θέση s, η οποία προέρχεται από πιθανή εξάρτηση της μονοδιάστατης συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας από τη θέση. Επειδή η ΣΠΠ δεν είναι πάντα γνωστή εκ των προτέρων η μέση τιμή εκτιμάται από το δείγμα με στατιστικές μεθόδους.

Επειδή η ΣΠΠ δεν είναι πάντα γνωστή εκ των προτέρων η μέση τιμή εκτιμάται από το δείγμα με στατιστικές μεθόδους. Αυτή δίνεται από το μέσο όρο των τιμών που περιλαμβάνονται στο δείγμα, (Χριστόπουλος 2004α),

$$\hat{m}_x(s) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_i(s)$$

εξίσωση 3.3

Η μέση τιμή περιγράφει τις τάσεις μεγάλης εμβέλειας σε ένα τυχαίο πεδίο (π.χ. η τάση μιας τυχαίας μεταβλητής που ορίζεται σε διάστημα  $[0, L]$ , όπου  $L=100$ , και δίνεται από την συνάρτηση  $f = \cos(2\pi L / 20)$  παρουσιάζεται στο σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1: Γράφημα τάσης τυχαίας μεταβλητής (Βαρουχάκης, 2005).

### 3.5. Διασπορά

Η διασπορά ενός τυχαίου πεδίου δίνεται από τη μέση τιμή του τετραγώνου της διακύμανσης σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\sigma_x^2(s) \equiv E\{X(s) - m_x(s)^2\} = E[\chi^2(s)]$$

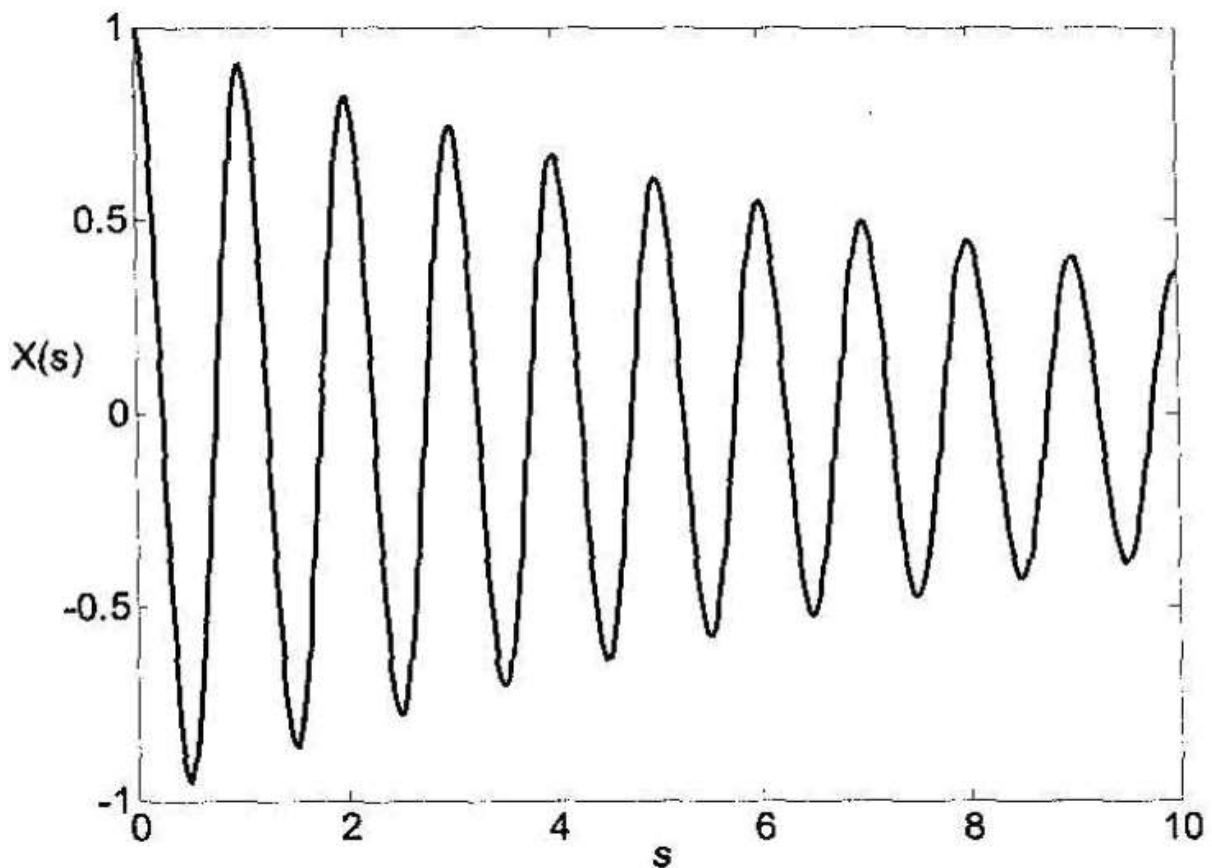
εξίσωση 3.4

Γενικά είναι δυνατόν η διασπορά να μεταβάλλεται από σημείο σε σημείο ενώ διατηρείται σταθερή μόνο όταν το πεδίο είναι στατιστικά ομοιογενές.

Η δειγματική διασπορά δίνεται από την εξής σχέση:

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (x_i - m_x)^2 \quad \text{εξίσωση 3.5}$$

Η μεταβολή της διασποράς ενός τυχαίου πεδίου στον χώρο σημαίνει ότι οι διακυμάνσεις του πεδίου αλλάζουν μέγεθος από σημείο σε σημείο (Isaaks & Srivastava 1989). Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 3.2) φαίνεται το γράφημα μιας απλής συνάρτησης (όχι τυχαίου πεδίου) της οποίας το πλάτος διακύμανσης αλλάζει. Στην περίπτωση ενός τυχαίου πεδίου η μεταβολή των διακυμάνσεων δεν είναι εξίσου κανονική και όχι πάντοτε ορατή με απλή επισκόπηση (Χριστόπουλος 2004α).



Σχήμα 3.2: Γράφημα συνημίτονου με εκθετικά μειούμενο πλάτος διακύμανσης (Χριστόπουλος 2004α).

### 3.6. Τυπική απόκλιση

Η τυπική απόκλιση (standard deviation)  $\sigma_x$  είναι η τετραγωνική ρίζα της διασποράς και προσδιορίζει ποσοτικά την απόκλιση της κατανομής από την μέση τιμή της. Ποιοτικά μπορεί κανείς να πει ότι το εύρος της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας, τουλάχιστον για συμμετρικές κατανομές, είναι ανάλογο προς την τυπική απόκλιση. Η τυπική απόκλιση είναι το στατιστικό μέγεθος που χρησιμοποιείται για να εκφραστεί το πιθανό σφάλμα πειραματικών μετρήσεων και το σφάλμα εκτίμησης παραμέτρων μιας κατανομής πιθανότητας από ένα πεπερασμένο δείγμα.

### 3.7. Διάμεσος

Ο διάμεσος (median),  $x_{med}$  ή  $x_{0.5}$ , είναι η τιμή εκείνη που χωρίζει την κατανομή σε δύο μέρη, έκαστο εκ των οποίων περιέχει το 50% της συνολικής πιθανότητας. Ο υπολογισμός του διαμέσου γίνεται μέσω της εξίσωσης:

$$\int_{-\infty}^{x_{med}} dx f_x(x) = \int_{x_{med}}^{\infty} dx f_x(x) \quad \text{εξίσωση 3.6}$$

Η εξίσωση αυτή ορίζει ότι ο διάμεσος χωρίζει την κατανομή σε δύο ισοεμβαδικά τμήματα.

Στην περίπτωση δειγμάτων, αν οι τιμές ταξινομηθούν σε αύξουσα σειρά, ο διάμεσος αντιστοιχεί στο κέντρο της κατανομής. Έστω το δείγμα τιμών  $x_i$ ,  $i = 1, \dots, M$ . Το διατεταγμένο δείγμα είναι το σύνολο  $X[M] = (x[1], \dots, x[M])$ , στο οποίο οι τιμές του δείγματος εμφανίζονται κατά αύξουσα σειρά. Δηλαδή οι τιμές  $x[i]$  είναι τέτοιες ώστε  $x[i] \leq x[i+1]$ . Αν το πλήθος καταστάσεων του δείγματος είναι πεπερασμένο ο διάμεσος υπολογίζεται ως εξής:

$$x_{[M+1]/2}, M = 2m+1$$
$$x_{med} \left\{ \begin{array}{l} x_{[M/2]}, M = 2m \\ \frac{1}{2}(x_{[M/2]} + x_{[M/2+1]}), M = 2m \end{array} \right. \quad \text{εξίσωση 3.7}$$

Ανάλογα με τον διάμεσο ορίζονται διάφορα εκατοστιαία σημεία (percentiles). Έτσι ως  $x_{0.25}$  ορίζεται το ποσοστιαίο σημείο αριστερά του οποίου βρίσκεται το 25% της συνολικής πιθανότητας. Προκειμένου να υπολογίσουμε οποιοδήποτε ποσοστιαίο σημείο  $x_p$  από ένα δείγμα διάστασης  $M$  ορίζουμε ένα ακέραιο μέρος και ένα κλασματικό υπόλοιπο με την

βοήθεια της σχέσης:  $p(M + 1) = k + d$ , όπου  $k$  είναι το ακέραιο μέρος και  $0 < d < 1$  είναι το κλασματικό υπόλοιπο (Χριστόπουλος 2013). Τότε το ποσοστιαίο σημείο  $x_p$  προκύπτει ως εξής:

$$x_p = x_{[1]} \quad k=0$$

$$x_p = x_{[k]} + d(x_{[k+1]} - x_{[k]}) \quad 0 < k < M \quad \text{εξίσωση 3.8}$$

$$x_p = x_{[M]} \quad k=M$$

### 3.8. Συναρτήσεις διασποράς

Μια άλλη ιδιότητα η οποία δίνει χρήσιμες πληροφορίες για ένα τυχαίο πεδίο είναι η κεντρική συνάρτηση συνδιασποράς (ΚΣΣ) η οποία ορίζεται με την βοήθεια της εξίσωσης (3.9), (Isaaks & Srivastava 1989),

$$c_x(s_1, s_2) \equiv E[\{X(s_1) - m_x(s_1)\}\{X(s_2) - m_x(s_2)\}] \quad \text{εξίσωση 3.9}$$

Το τυχαίο πεδίο  $\chi(s_1) \equiv X(s_1) - m_x(s_1)$  αντιστοιχεί στην διακύμανση του πεδίου  $X(s_1)$  γύρω από την μέση τιμή στο σημείο  $s_1$ . Η μέση τιμή του πεδίου διακύμανσης είναι ίση με το μηδέν,  $E[\chi(s_1)] = 0$ . Βάσει των προηγούμενων η ΚΣΣ είναι ισοδύναμη με την συνδιακύμανση, δηλαδή  $c_x(s_1, s_2) = E[\chi(s_1)\chi(s_2)]$

Πιο συγκεκριμένα η ΚΣΣ περιγράφει ποσοτικά την εξάρτηση των διακυμάνσεων του πεδίου σε δύο διαφορετικά σημεία. Όταν τα σημεία της συνάρτησης συνδιασποράς συμπίπτουν η τιμή της ισούται με την διασπορά του πεδίου στο συγκεκριμένο σημείο,  $c_x(s_1, s_1) = \sigma_x^2(s_1)$ , όπως προκύπτει από την εξίσωση (3.5) και (3.9). Αντίθετα όταν η απόσταση μεταξύ δύο σημείων μεγαλώνει η εξάρτηση των διακυμάνσεων μειώνεται.

Σε γεωστατιστικές αναλύσεις η πειραματικά προσδιοριζόμενη χωρική εξάρτηση προσαρμόζεται σε ένα βέλτιστο πρότυπο το οποίο επιλέγεται από ένα σύνολο αποδεκτών θεωρητικών προτύπων (π.χ εκθετικό, γκαουσιανό). Επομένως είναι απαραίτητη η ύπαρξη συνθηκών αποδοχής για την συνάρτηση συνδιασποράς.

Οι συνθήκες αποδοχής καθορίζονται από το θεώρημα του Bochner (Bochner 1959). Αυτό εκφράζεται με την βοήθεια της φασματικής πυκνότητας ισχύος της συνδιασποράς η οποία δίνεται από τον μετασχηματισμό Fourier (Press et al 1992), της συνάρτησης συνδιασποράς. Η φασματική πυκνότητα ισχύος ορίζεται από το ολοκλήρωμα,

$$\tilde{c}_X(\mathbf{k}) = \int d\mathbf{r} \exp(-i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) c_X(\mathbf{r}),$$

εξίσωση 3.10

όπου  $\mathbf{r}$  το διάνυσμα απόστασης μεταξύ δύο σημείων,  $\int d\mathbf{r} = \int dx = \int dy$  και  $\mathbf{k}$  είναι το διάνυσμα της χωρικής συχνότητας (κυματάνυσμα).

Μια συνάρτηση  $c_X(\mathbf{r})$  είναι αποδεκτή συνάρτηση συνδιασποράς αν ισχύουν οι παρακάτω τρεις συνθήκες:

- 1) Αν υπάρχει η φασματική πυκνότητα ισχύος  $\tilde{c}_X(\mathbf{k})$  (δηλαδή αν υπάρχει μετασχηματισμός Fourier της συνάρτησης)
- 2) Αν η  $\tilde{c}_X(\mathbf{k})$  είναι μη αρνητική σε όλο το πεδίο συχνοτήτων δηλαδή  $\tilde{c}_X(\mathbf{k}) \geq 0$  για κάθε  $\mathbf{k}$ .
- 3) Αν το ολοκλήρωμα της  $\tilde{c}_X(\mathbf{k})$  σε ολόκληρο το πεδίο συχνοτήτων είναι φραγμένο (δηλαδή αν υπάρχει η διασπορά).

Από πρακτική άποψη για να διαπιστωθεί αν μια συνάρτηση αποτελεί αποδεκτό πρότυπο συνάρτησης συνδιασποράς χρειάζεται να υπολογιστεί ο μετασχηματισμός Fourier της συνάρτησης (Χριστόπουλος 2004α).

### 3.9. Στατιστική ομοιογένεια

Ορισμένες παραδοχές που θέτουν περιορισμούς στις ιδιότητες ενός τυχαίου πεδίου μπορούν να οδηγήσουν σε μια πιο αποτελεσματική γεωστατιστική ανάλυση. Η πιο ευρέως χρησιμοποιημένη απλουστευτική παραδοχή είναι η στατιστική ομοιογένεια, η οποία αποτελεί επέκταση του κλασικού ορισμού της ομοιογένειας. Μια ιδιότητα είναι ομοιογενής αν η αντίστοιχη μεταβλητή έχει σταθερή τιμή στο χώρο. Αντίθετα ένα τυχαίο πεδίο  $X(\mathbf{s})$  είναι στατιστικώς ομοιογενές αν η μέση τιμή είναι σταθερή,  $m_X(\mathbf{s}) = m_X$ , η συνάρτηση συνδιασποράς ορίζεται και εξαρτάται αποκλειστικά από το διάνυσμα απόστασης  $\mathbf{r} = \mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_2$  μεταξύ των δύο σημείων,  $c_X(\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2) = c_X(\mathbf{r})$ , και η διασπορά του πεδίου είναι επίσης σταθερή.

Οι παραπάνω προϋποθέσεις ορίζουν την στατιστική ομοιογένεια κατά την ασθενή έννοια. Ένα τυχαίο πεδίο είναι στατιστικώς ομοιογενές κατά την ισχυρή έννοια όταν η πολυδιάστατη ΣΠΠ για  $N$  σημεία (όπου  $N$  οποιοσδήποτε θετικός ακέραιος) παραμένει αμετάβλητη από μετασχηματισμούς οι οποίοι αλλάζουν την θέση των σημείων χωρίς να αλλάζουν τις μεταξύ τους αποστάσεις.

Επομένως η έννοια της στατιστικής ομοιογένειας είναι ότι οι στατιστικές ιδιότητες ενός τυχαίου πεδίου δεν εξαρτώνται από τις χωρικές συντεταγμένες των σημείων, άρα και από



το σύστημα αναφοράς. Πρακτικά η στατιστική ομοιογένεια προϋποθέτει ότι δεν υπάρχουν συστηματικές τάσεις έτσι ώστε η μεταβολή των τιμών του πεδίου μπορεί να αποδοθεί σε διακυμάνσεις γύρω από μια σταθερή στάθμη ίση με την μέση τιμή (Χριστόπουλος 2004α).

### 3.10. Στατιστική ισοτροπία

Μια άλλη ιδιότητα που μπορεί να φανεί χρήσιμη στην γεωστατιστική ανάλυση ενός τυχαίου πεδίου είναι η στατιστική ισοτροπία. Ένα πεδίο είναι στατιστικώς ισοτροπικό αν είναι στατιστικώς ομοιογενές και συγχρόνως η συνάρτηση συνδιασποράς εξαρτάται μόνο από το μέτρο (ευκλείδεια απόσταση), αλλά όχι από τη κατεύθυνση του διανύσματος απόστασης  $\mathbf{r}$ . Αυτό είναι σημαντικό από πρακτική άποψη επειδή διευκολύνει τον προσδιορισμό της χωρικής εξάρτησης. Αν μια συνάρτηση συνδιασποράς είναι στατιστικώς ισοτροπική είναι και εξ ορισμού στατιστικώς ομοιογενής, αλλά το αντίστροφο δεν ισχύει.

Στην περίπτωση στατιστικώς ισοτροπικών πεδίων οι δύο πιο σημαντικές παράμετροι οι οποίες προσδιορίζουν πολύ βασικά χαρακτηριστικά της συνάρτησης συνδιασποράς είναι η διασπορά  $\sigma_X^2 = c_X(0)$  και το μήκος συσχέτισης  $\xi$ . Η διασπορά αποτελεί μέτρο του πλάτους των διακυμάνσεων του πεδίου. Το μήκος συσχέτισης ορίζει το διάστημα μέσα στο οποίο υπάρχει αλληλεξάρτηση, δηλαδή ορίζει την απόσταση μέσα στην οποία η τιμή του πεδίου σε ένα σημείο επηρεάζει την τιμή σε ένα άλλο σημείο (Χριστόπουλος 2004α).

### 3.11. Ημι-Βαριόγραμμα

Το βαριόγραμμα είναι το βασικό διαγνωστικό εργαλείο για τον χωρικό χαρακτηρισμό μίας χωρομεταβλητής και είναι επίσης κεντρικό στην γεωστατιστική εκτίμηση ή στις μεθόδους παρεμβολής (kriging). Το ημιβαριόγραμμα ενός τυχαίου πεδίου ορίζεται ως εξής:

$$\gamma_X(s, r) = \frac{1}{2} E\{[X(s+r) - X(s)]^2\} \quad \text{εξίσωση 3.11}$$

Δηλαδή το ημιβαριόγραμμα ορίζεται σε σχέση με ένα ζεύγος σημείων με την βοήθεια της μέσης τιμής του τετραγώνου της διαφοράς  $\delta X(\mathbf{s}; \mathbf{r}) \equiv X(\mathbf{s} + \mathbf{r}) - X(\mathbf{s})$ . Το πεδίο της διαφοράς  $\delta X(\mathbf{s}; \mathbf{r})$  αποκαλείται βήμα απόστασης  $\mathbf{r}$ . Αν το πεδίο  $X(\mathbf{s})$  είναι στατιστικώς ομοιογενές το ημιβαριόγραμμα συνδέεται άμεσα με την συνάρτηση συνδιασποράς βάσει της εξίσωσης  $\gamma_X(\mathbf{r}) = \sigma_X^2 - c_X(\mathbf{r})$ .

Για στατιστικώς ομοιογενή πεδία το ημιβαριόγραμμα περιέχει την ίδια πληροφορία με την συνάρτηση συνδιασποράς. Αν η διαφορά  $\delta X(\mathbf{s}; \mathbf{r})$  είναι στατιστικά ομοιογενής, το τυχαίο πεδίο  $X(\mathbf{s})$  ονομάζεται πεδίο με στατιστικώς ομοιογενείς διαφορές. Σε αυτήν την περίπτωση το ημιβαριόγραμμα  $\gamma_X(\mathbf{r})$  εξαρτάται αποκλειστικά από την απόσταση  $\mathbf{r}$  μεταξύ των σημείων και αυτό είναι απόρροια της στατιστικής ομοιογένειας του πεδίου διαφορών.

Αν το πεδίο  $X(\mathbf{s})$  είναι στατιστικά ομοιογενές το ίδιο ισχύει και για τις διαφορές  $\delta X(\mathbf{s};\mathbf{r})$ , το αντίστροφο όμως δεν ισχύει απαραίτητα (Χριστόπουλος 2004β).

Οι παράμετροι του ημιβαριογράμματος καθορίζουν την χωρική εξάρτηση των τιμών του πεδίου σε δύο γειτονικά σημεία. Από τον ορισμό του ημιβαριογράμματος με την βοήθεια της μέσης τιμής του τετραγώνου των διαφορών προκύπτει ότι το ημιβαριόγραμμα είναι ημιθετικά ορισμένο,  $\gamma_X(\mathbf{r}) \geq 0$ . 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  $\gamma_X(\mathbf{r}) = \sigma_X^2 - c_X(\mathbf{r})$  και το γεγονός ότι σε μεγάλες αποστάσεις η τιμή της συνάρτησης συνδιασποράς τείνει προς το μηδέν.

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

Το ημιβαριόγραμμα εν γένει αυξάνεται ανάλογα, όχι κατ' ανάγκη γραμμικά, με την απόσταση μεταξύ των σημείων. Αυτό συμβαίνει επειδή η εξάρτηση των τιμών του πεδίου σε δύο διαφορετικά σημεία του χώρου μειώνεται όσο αυξάνει η απόσταση. Ακολουθώντας οι τιμές του ημιβαριογράμματος αυξάνονται όσο μεγαλώνει η απόσταση, αφού μετρά πόσο διαφέρουν μεταξύ τους οι διακυμάνσεις του πεδίου ως συνάρτηση της απόστασης.

Ευρέως χρησιμοποιημένα μοντέλα ημιβαριογραμμάτων τα οποία είναι επιτρεπτά και σε πρακτικές εφαρμογές 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 σε αντίθεση με το γκαουσιανό το οποίο χαρακτηρίζει ομαλότερες αυξομειώσεις. Το αλγεβρικό μοντέλο χαρακτηρίζει εξάρτηση με μακριά χωρική εμβέλεια ενώ το μοντέλο πυρήνα αντιστοιχεί σε μεταβολές που συντελούνται σε αποστάσεις μικρότερες από τη διακριτική ικανότητα που επιτρέπει το δείγμα (Χριστόπουλος 2004β).

### 3.11.1. Προσδιορισμός Ημιβαριογράμματος

Στην περίπτωση πρακτικών εφαρμογών, όπου τα δεδομένα περιορίζονται συνήθως 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:

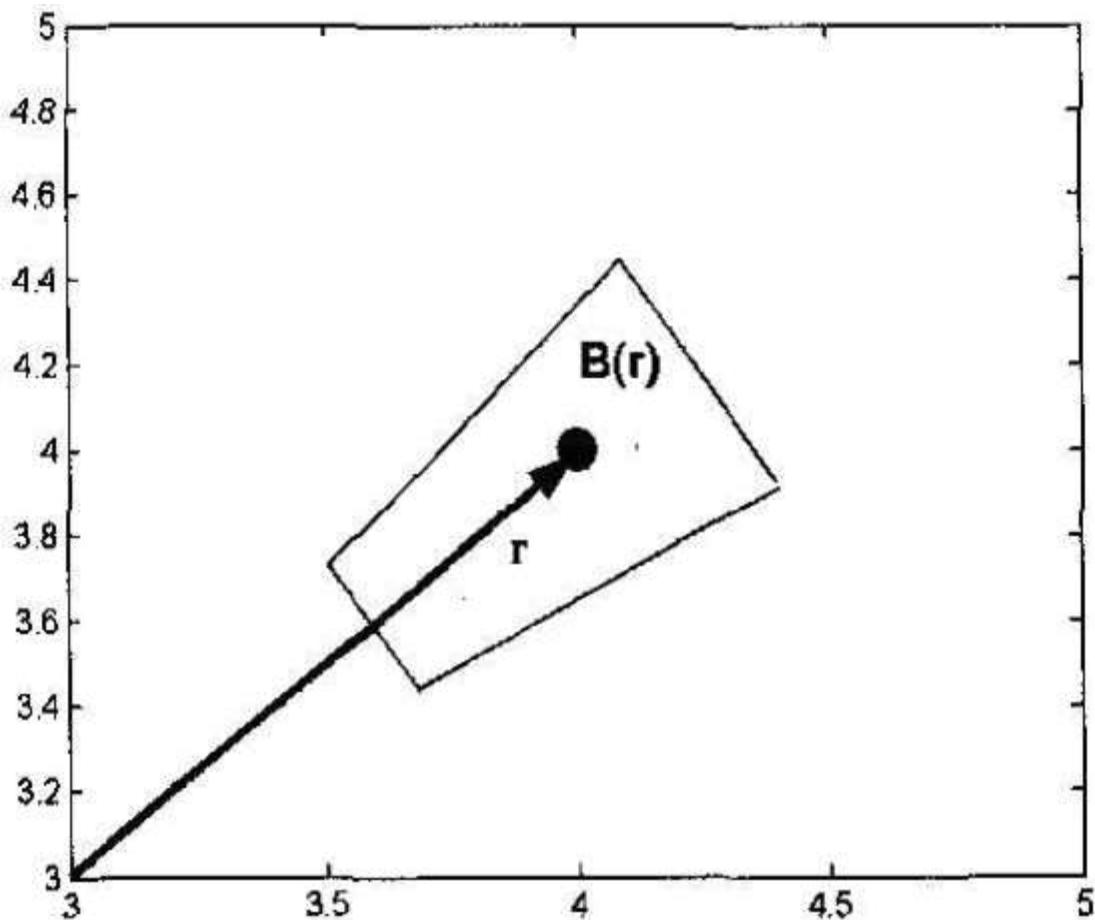
$$\hat{\gamma}_Z(\mathbf{r}_k) = \frac{1}{2N(\mathbf{r}_k)} \sum_{i,j=1}^{N(\mathbf{r}_k)} \left\{ [Z(\mathbf{s}_i) - Z(\mathbf{s}_j)]^2 \right\} \vartheta_{ij}(\mathbf{r}_k), \quad (k=1, \dots, N_c),$$

εξίσωση 3.12

$$\vartheta_{ij}(\mathbf{r}_k) = \begin{cases} 1, & \mathbf{s}_i - \mathbf{s}_j \in B(\mathbf{r}_k) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

εξίσωση 3.13

- Η συνάρτηση τάξης  $\vartheta_{ij}(\mathbf{r}_k)$  ορίζει διαφορετικές ομάδες (τάξεις) διανυσμάτων απόστασης, επιλέγοντας τα διανύσματα εκείνα που βρίσκονται σε μια κλειστή περιοχή  $B(\mathbf{r}_k)$  γύρω από το διάνυσμα  $\mathbf{r}_k$  (Σχήμα 3.3).
- Η μεταβλητή  $N(\mathbf{r}_k)$  είναι ίση με το πλήθος των ζευγών σημείων που περιέχονται μέσα στην τάξη  $B(\mathbf{r}_k)$ .
- Το δειγματικό ημιβαριόγραμμα ορίζεται για ένα διακριτό και πεπερασμένο σύνολο αποστάσεων  $\mathbf{r}_k$ , ( $k=1, \dots, N_c$ ) το πλήθος των οποίων είναι ίσο με τον συνολικό αριθμό τάξεων  $N_c$ .



Σχήμα 3.3: Σχηματικό διάγραμμα μιας περιοχής  $B(r)$  γύρω από το διάνυσμα απόστασης (Χριστόπουλος 2004β).

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

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

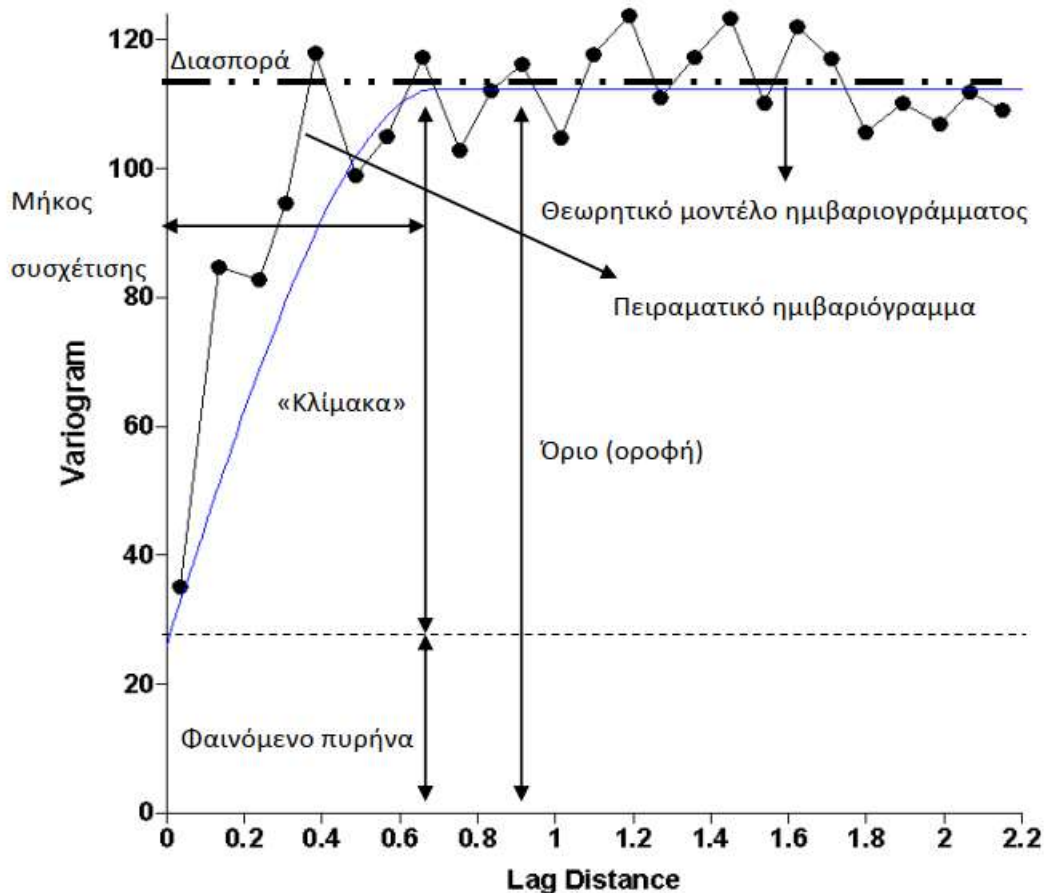
- 1) το πεδίο διαφοράς  $Z(s) - Z(s + \mathbf{r}_k)$  να είναι στατιστικά ομοιογενές,
- 2) το πλήθος ζευγών σε κάθε τάξη να είναι μεγάλο ώστε ο δειγματικός μέσος του τετραγώνου της διαφοράς να υπολογίζεται με καλή στατιστική ακρίβεια και

- 3) ο αριθμός των τάξεων πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος ώστε να επιτρέπει μια πυκνή προσέγγιση της μεταβολής του ημιβαριογράμματος σαν συνάρτηση της απόστασης (Χριστόπουλος 2004β).

Αφού υπολογιστεί το πειραματικό ημιβαριόγραμμα προσαρμόζεται σε ένα θεωρητικό μοντέλο, το οποίο επιτρέπει τον υπολογισμό του ημιβαριογράμματος για οποιαδήποτε απόσταση. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας την αρχή των ελαχίστων τετραγώνων, από την οποία υπολογίζονται και οι βέλτιστες παράμετροι  $\xi$  (μήκος συσχέτισης) και  $\sigma_x^2$  (διασπορά) του θεωρητικού μοντέλου.

Το θεωρητικό πρότυπο χρειάζεται 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 (Βαρουχάκης, 2005).

Το σχήμα 3.4 παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά ενός ημιβαριογράμματος τα οποία εξετάζονται αναλυτικά παρακάτω.



Σχήμα 3.4: Παρουσίαση χαρακτηριστικών στοιχείων ημιβαριογράμματος (Surfer V.8.0.4, 2002).

- Το φαινόμενο πυρήνα (nugget) ποσοτικοποιεί την διασπορά του δειγματικού σφάλματος καθώς και την μικρής κλίμακας μεταβλητότητα, π.χ. την χωρική μεταβλητότητα που υπάρχει σε αποστάσεις μικρότερες από τις αποστάσεις μεταξύ των σημείων του δείγματος.
- Το «όριο» (sill) είναι η τιμή που πλησιάζει ασυμπτωτικά το δειγματικό ημιβαριόγραμμα.
- Η «κλίμακα» (scale ή partial sill) είναι η διαφορά της «οροφής» από το «φαινόμενο πυρήνα» και δηλώνει την μεταβλητότητα των συσχετισμένων διακυμάνσεων.
- Το μήκος συσχέτισης (range) είναι η απόσταση στην οποία το ημιβαριόγραμμα προσεγγίζει πολύ κοντά, π.χ. κατά 95-97%, την τιμή οροφής.
- Η διασπορά είναι η μέση τετραγωνική απόκλιση κάθε τιμής του δείγματος από την μέση τιμή και δηλώνεται από την διακεκομμένη οριζόντια γραμμή στο σχήμα.
- Το πειραματικό ημιβαριόγραμμα παρουσιάζει τις ομάδες των ζευγών με τις αντίστοιχες δειγματικές τιμές του ημιβαριογράμματος.
- Το θεωρητικό μοντέλο ημιβαριογράμματος αποτελεί μια συνεχή θεωρητική καμπύλη που προσαρμόζεται στο πειραματικό.

### 3.11.2. Μοντέλα ημιβαριογραμμάτων

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι εξισώσεις κλασσικών θεωρητικών βαριογραμμάτων που θα χρησιμοποιηθούν στην παρούσα διπλωματική εργασία.  $\sigma_z^2$  είναι η διασπορά,  $|\mathbf{r}|$  η ευκλείδεια απόσταση, και  $\xi$  η ακτίνα συσχέτισης.

$$\text{Exponential: } \gamma_z(\mathbf{r}) = \sigma_z^2 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{|\mathbf{r}|}{\xi}\right) \right]$$

εξίσωση 3.14

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

$$\text{Gaussian: } \gamma_Z(\mathbf{r}) = \sigma_Z^2 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\mathbf{r}^2}{\xi^2}\right) \right]$$

εξίσωση 3.15

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.

$$\text{Spherical: } \gamma_Z(\mathbf{r}) = \sigma_Z^2 \left[ 1.5 |\mathbf{r}| / \xi - 0.5 (|\mathbf{r}| / \xi)^3 \right] \theta(\xi - |\mathbf{r}|) \\ \text{if } \xi - |\mathbf{r}| < 0, \theta = 0, \text{ else if } \xi - |\mathbf{r}| > 0, \theta = 1$$

εξίσωση 3.16

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

$$\text{Power-law: } \gamma_Z(\mathbf{r}) = c |\mathbf{r}|^{2H}, 0 < H < 1$$

$c$  είναι ο συντελεστής και  $H$  ο δείκτης Hurst.

εξίσωση 3.17

$$\text{Linear: } \gamma_Z(\mathbf{r}) = c |\mathbf{r}|$$

εξίσωση 3.18

Οι παραπάνω εξισώσεις αποτελούν τις ισοτροπικές εκδοχές των μοντέλων και περιλαμβάνουν δυο παραμέτρους (Christakos 1991, Cressie 1993). Παρακάτω παρουσιάζονται δυο ακόμα θεωρητικά ημι-βαριογραμμάτα των οποίων οι εξισώσεις περιλαμβάνουν περισσότερες παραμέτρους, οδηγώντας σε πιο ακριβή αποτελέσματα. Το θεωρητικό μοντέλο K-Bessel λόγω της παραμέτρου  $\nu$  εκφράζει καλύτερα την συμπεριφορά της  $\gamma(\mathbf{r})$  για μικρές αποστάσεις.

K-Bessel:

$$\gamma_z(\mathbf{r}) = \sigma_z^2 \left\{ 1 - \frac{2^{1-\nu}}{\Gamma(\nu)} \left( \frac{|\mathbf{r}|}{\xi} \right)^\nu K_\nu \left( \frac{|\mathbf{r}|}{\xi} \right) \right\}$$

εξίσωση 3.19

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.

### 3.12. Χωρική εκτίμηση Kriging

Η χωρική εκτίμηση είναι μια διαδικασία που βοηθά στην αναπαράσταση ενός τυχαίου πεδίου σε σημεία όπου δεν υπάρχουν ακριβείς τιμές με βάση την διαθέσιμη γνώση (π.χ. μετρήσεις σε γειτονικά σημεία, εκτιμήσεις ειδικών, γεωλογικά δεδομένα). Η διαθέσιμη γνώση χρησιμοποιείται για να επιβληθούν στατιστικοί περιορισμοί. Χρησιμοποιώντας στατιστικά πρότυπα χωρικής εξάρτησης (ημιβαριογράμματα) προσδιορίζονται οι άγνωστες τιμές βάσει της συσχέτισης. Η επανάληψη αυτής της διαδικασίας σε όλα τα σημεία ενός υπολογιστικού πλέγματος επιτρέπει τη χαρτογράφηση μιας ολόκληρης περιοχής (Χριστόπουλος 2004β).

Πιο συγκεκριμένα, ο όρος χωρική εκτίμηση περιλαμβάνει όλες τις 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.

Η χωρική εκτίμηση του πεδίου προϋποθέτει την ύπαρξη ενός προτύπου χωρικής εξάρτησης, έτσι ώστε η τιμή της ιδιότητας να επηρεάζεται από τις γειτονικές τιμές του πεδίου. Αυτή η αλληλεξάρτηση επιτρέπει εκτίμηση του πεδίου σε σημεία όπου δεν υπάρχουν μετρήσεις βάσει της συμπεριφοράς σε γειτονικά μετρηθέντα σημεία. Σε πολλές περιπτώσεις, ο τελικός 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 ωστόσο διάφοροι μέθοδοι χωρικής εκτίμησης οι οποίες στηρίζονται σε παρόμοιες αρχές. Η βασική ιδέα είναι πως 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 πλέον 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» (Χριστόπουλος 2004β).

Η θεωρία Kriging προήλθε από την προσπάθεια του μηχανικού μεταλλείων D. G. Krige το 1950 περίπου, ο οποίος υπήρξε πρωτοπόρος στον τομέα της γεωστατιστικής και ανέπτυξε μια σειρά από εμπειρικές τεχνικές για να υπολογίσει αποθέματα κοιτασμάτων χρυσού στη Νότιο Αφρική με βάση δεδομένα δειγματοληψίας περιεκτικότητας χρυσού σε κάρναβο γεωτρήσεων. Γι' αυτό και η θεωρία αυτή αποκαλείται συνήθως «Kriging» προς αναγνώριση του θεμελιωτή της ιδέας αυτής.

Σήμερα πλέον, έχουν αναπτυχθεί διάφορες παραλλαγές της τεχνικής kriging όπως:

- Κανονικό (ordinary) Kriging: βασίζεται στο ημι-βαριόγραμμα για πρόβλεψη της τιμής μιας μεταβλητής σε κάποιο σημείο, χωρίς να είναι γνωστή η μέση τιμή των δειγμάτων. Η μέση τιμή θεωρείται σταθερή μέσα στην περιοχή εκτίμησης. Προϋποθέτει πως το δείγμα ακολουθεί την κανονική κατανομή ενώ, λόγω της συνθήκης αμεροληψίας το άθροισμα των σταθμικών συντελεστών (weights) που υπεισέρχονται στην εξίσωση παρεμβολής είναι ίσο με την μονάδα.
- Simple kriging: Χρησιμοποιείται όταν η μέση τιμή των δειγμάτων είναι γνωστή.
- Universal Kriging: Όταν η μέση τιμή των δεδομένων μεταβάλλεται συναρτήσει των συντεταγμένων.
- Ενδεικτικό (Indicator) Kriging: η μέθοδος αυτή μετασχηματίζει τα αρχικά δεδομένα χρησιμοποιώντας έναν ενδεικτικό (indicator) μετασχηματισμό. Δηλαδή, βάση μίας συγκεκριμένης τιμής (cut off), τα δεδομένα με τιμές μικρότερες αυτής εξισώνονται με το 1, ενώ τα υπόλοιπα με μηδέν. Χρησιμοποιείται για συνάρτηση κατανομής που παρουσιάζει ασυμμετρία με σημαντική πυκνότητα πιθανότητας στις υψηλές τιμές
- Residual Kriging: αυτή η παραλλαγή του kriging, χρησιμοποιείται όταν ο πληθυσμός των δεδομένων παρουσιάζει κάποια «τάση» (trend).
- Probability Kriging: για διακριτά δεδομένα σαν κύρια μεταβλητή και συνεχή δεδομένα σαν δευτερεύουσες μεταβλητές

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 (Goonaerts 1997; Journel 1989).

Η εκτιμώμενη τιμή δίνεται από τον εξής γραμμικό συνδυασμό:

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

εξίσωση 3.20

Ως  $\lambda_a$  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:

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

εξίσωση 3.21

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:

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

εξίσωση 3.22

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

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

εξίσωση 3.23

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:

$$E[\dot{X}(u) - X(u)] = 0$$

εξίσωση 3.24

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 (Goonaerts 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. (Βαρουχάκης, 2005)

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

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

εξίσωση 3.25

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

εξίσωση 3.26

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

εξίσωση 3.27

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

εξίσωση 3.28

Στη συνέχεια περιγράφεται ο τύπος Kriging που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία.

### 3.12.1. Κανονικό Kriging

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

$$\hat{X}(u) = \sum_{a=1}^{n(u)} \lambda_a X(s_a) \quad \text{εξίσωση 3.29}$$

$$\sum_{a=1}^{n(u)} \lambda_a = 1 \quad \text{εξίσωση 3.30}$$

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:

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

εξίσωση 3.30

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

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

εξίσωση 3.31

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

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

εξίσωση 3.32

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

εξίσωση 3.33

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

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

εξίσωση 3.34

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

εξίσωση 3.35

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

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

εξίσωση 3.36

### 3.13. Χωρική εκτίμηση Cokriging

Βοηθητικές πληροφορίες μπορούν να ενσωματωθούν στη διαδικασία παρεμβολής χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Cokriging, η οποία χρησιμοποιεί δευτερεύουσες μεταβλητές στη δομή συνδιασποράς. Η χρήση των βοηθητικών μεταβλητών γενικά βελτιώνει την ακρίβεια της εκτίμησης Kriging (Goovaerts 1997).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία η βοηθητική μεταβλητή είναι το υψόμετρο.

### 3.14. Αξιολόγηση προβλέψεων

Για να αξιολογηθούν οι διαφορετικές μέθοδοι χωρικής παρεμβολής ως προς την ακρίβειά τους χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος cross-validation.

Η μέθοδος cross-validation χρησιμοποιείται για να συγκρίνει μετρούμενες τιμές, με τιμές από παρεμβολή χρησιμοποιώντας μόνο τις διαθέσιμες πληροφορίες στο σύνολο των δεδομένων του δείγματος. Η μέθοδος μπορεί να βοηθήσει στο να επιλέξει κανείς μεταξύ διαφορετικών διαδικασιών στάθμισης, ανάμεσα στις διάφορες στρατηγικές αναζήτησης ή μεταξύ διαφορετικών μεθόδων εκτίμησης. Η τιμή της δειγματοληψίας σε μια συγκεκριμένη θέση απορρίπτεται προσωρινά από το σύνολο των δεδομένων του δείγματος, η τιμή στην ίδια θέση στη συνέχεια υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τα υπόλοιπα δείγματα. Μόλις υπολογιστεί η εκτίμηση, η υπολογιζόμενη τιμή μπορεί να συγκριθεί με τη πραγματική τιμή που είχε αρχικά αφαιρεθεί από το σύνολο των δεδομένων του δείγματος. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλες τις διαθέσιμες τιμές του δείγματος (Kebbloutie et al., 2012).

Η εφαρμογή της μεθόδου πραγματοποιείται με τον υπολογισμό διαφορών των πραγματικών και εκτιμημένων τιμών. Οι δείκτες αυτοί είναι:

- Mean Error (ME)

$$\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Z}(s_i) - z(s_i))}{n}$$

εξίσωση 3.37

Είναι ο μέσος όρος της διαφοράς μεταξύ τις μετρούμενης και τις προβλεπόμενης τιμές.

- Root Mean Square Error (RMSE)

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Z}(s_i) - z(s_i))^2}{n}}$$

εξίσωση 3.38

Δείχνει πόσο καλά το μοντέλο προβλέπει τις μετρούμενες τιμές. Όσο μικρότερο είναι το σφάλμα αυτό, τόσο το καλύτερο.

- Average Standard Error (ASE)

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \hat{\sigma}^2(s_i)}{n}}$$

εξίσωση 3.39

Μέσος όρος των τυποποιημένων σφαλμάτων πρόβλεψης.

- Mean Standardized Error (MSE)

$$\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Z}(s_i) - z(s_i))}{\hat{\sigma}(s_i)} \quad \text{εξίσωση 3.40}$$

Ο μέσος όρος των τυποποιημένων σφαλμάτων. Αυτή η τιμή πρέπει να είναι κοντά στο μηδέν.

- Root Mean Square Standardized Error (RMSSE)

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{(\hat{Z}(s_i) - z(s_i))^2}{\hat{\sigma}(s_i)} \right]}{n}} \quad \text{εξίσωση 3.41}$$

Αυτό θα πρέπει να είναι κοντά στο ένα αν τα τυπικά σφάλματα πρόβλεψης είναι έγκυρα. Αν η τετραγωνική ρίζα του μέσου τυποποιημένου σφάλματος είναι μεγαλύτερη από ένα, είναι υποεκτιμημένη η μεταβλητότητα στις προβλέψεις. Αν όμως είναι μικρότερη του ενός, τότε είναι υπερεκτιμημένη η μεταβλητότητα στις προβλέψεις.

Θα πρέπει το ME να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στο μηδέν και το RMSE να είναι όσο πιο μικρό γίνεται πράγμα που σημαίνει ότι οι προβλέψεις είναι αμερόληπτες και κοντά στις πραγματικές τιμές. Το ASE χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της μεταβλητότητας των προβλέψεων από τις μετρημένες τιμές. Άρα θα πρέπει να είναι ίδιο με το RMSE προκειμένου να αξιολογηθεί σωστά η μεταβλητότητα των προβλέψεων. Αν η τιμή του είναι μεγαλύτερη του RMSE, τότε οι τιμές των προβλέψεων είναι υπερεκτιμημένες. Αντίθετα, αν είναι η τιμή μικρότερη, τότε οι τιμές είναι υποεκτιμημένες. Οι τιμές του RMSSE θα πρέπει να είναι κοντά στο ένα, ενώ αυτές του MSE να είναι όσο το δυνατόν μικρότερες.

### 3.15. Μειονεκτήματα γεωστατικής ανάλυσης

Οι κλασικές γεωστατιστικές μέθοδοι που εφαρμόζονται ευρέως υστερούν σε δύο τουλάχιστον σημεία: Στον υπολογισμό του δειγματικού ημιβαριογράμματος και στην απουσία φυσικών μοντέλων (π.χ. διαφορικές εξισώσεις συνέχειας) από τον προσδιορισμό της χωρικής εξάρτησης. Όπως προαναφέρθηκε το ημιβαριόγραμμα είναι μία συνάρτηση δύο σημείων, ανάλογη της συνάρτησης συσχέτισης, που εκφράζει πως μεταβάλλεται η εξάρτηση δύο μεταβλητών ως συνάρτηση της μμεταξύ τους απόστασης.

Η τυπική διαδικασία προσδιορισμού περιλαμβάνει αρχικά τον υπολογισμό του πειραματικού ημιβαριογράμματος και έπειτα την (μη γραμμική) προσαρμογή του

ημιβαριογράμματος σε κάποιο από τα ευρέως χρησιμοποιούμενα θεωρητικά μμοντέλα. Τα μμοντέλα αυτά συνήθως προσδιορίζονται από  $d + 1$  παραμέτρους, όπου  $d$  είναι ο αριθμός των διευθύνσεων ανισοτροπίας.

Οποιαδήποτε φυσική γνώση (π.χ. νόμοι διατήρησης μάζας, ενέργειας) σχετικά με το φαινόμενο δεν λαμβάνεται υπόψη, αλλά θεωρείται ότι οι σχετικές πληροφορίες περιέχονται ήδη στο πειραματικό ημιβαριόγραμμα. Ωστόσο, η διαδικασία προσαρμογής δεν εξασφαλίζει ότι τα θεωρητικά μμοντέλα ημιβαριογράμματος διατηρούν τη φυσική πληροφορία. Το ημιβαριόγραμμα αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για την ανάλυση της χωρικής εξάρτησης, όμως υπάρχουν διάφορα προβλήματα σχετικά με τον προσδιορισμό και την χρήση του όπως:

- 1) Η υπολογιστική πολυπλοκότητα αυξάνεται με το τετράγωνο του αριθμού των σημείων. Αυτή η συμπεριφορά συνεπάγεται μμεγάλο χρόνο υπολογισμού για δείγματα που περιέχουν μετρήσεις σε πολλά σημεία. Για να επιλυθεί αυτό το πρόβλημα χρησιμοποιείται συχνά ο υπολογισμός του ημιβαριογράμματος κατά μήκος συγκεκριμένων κατευθύνσεων. Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση προϋποθέτει γνώση των κυρίων αξόνων στατιστικής ανισοτροπίας, η οποία δεν είναι συνήθως εκ των προτέρων γνωστή.
- 2) Η χωρική εξάρτηση φυσικών μεταβλητών είναι συχνά ανισοτροπική. Ωστόσο, οι υπάρχουσες μμέθοδοι για τον προσδιορισμό της ανισοτροπίας του ημιβαριογράμματος βασίζονται συνήθως στη μμέθοδο δοκιμής και σφάλματος.
- 3) Απαιτείται ο υπολογισμός ενός σημαντικού αριθμού «στατιστικών περιορισμών» για να γίνει δυνατή η προσαρμογή του ημιβαριογράμματος σε ένα συνεχές θεωρητικό πρότυπο. Για παράδειγμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.6, οι τιμές του ημιβαριογράμματος υπολογίζονται σε όλα τα σημεία που συμβολίζονται με κύκλους.
- 4) Το σφάλμα εκτίμησης των τιμών του ημιβαριογράμματος είναι σημαντικό.
- 5) Τα φυσικά πρότυπα δεν λαμβάνονται υπόψη στη διαδικασία προσδιορισμού της χωρικής εξάρτησης, ακόμα και όταν αυτές οι εξισώσεις είναι γνωστές (Hristopulos 2003).



#### 4. Μεθοδολογία

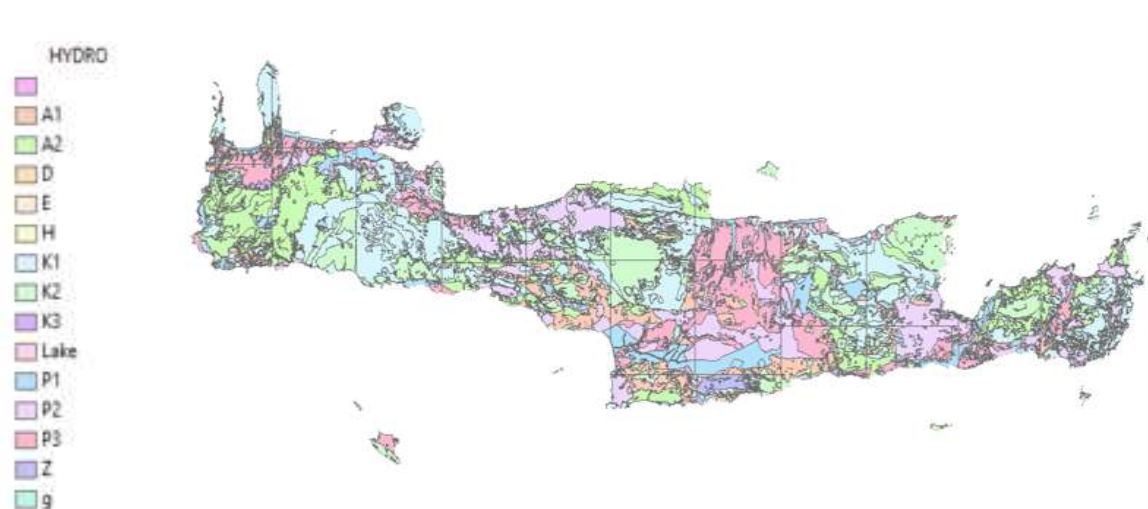
Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν οι χάρτες στάθμης των υπογείων υδάτων και οι χάρτες ύψους βροχοπτώσεων για το υδατικό διαμέρισμα Κρήτης, που σχεδιάστηκαν με την χρήση του προγράμματος ArcGIS και τη μέθοδο ordinary kriging/cokriging.

Συλλέχθηκαν δεδομένα από 478 υδροσημεία (Παράρτημα Α) από το Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ) για την πραγματοποίηση της χαρτογράφησης στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα για τα έτη 2007-2014. Εισήχθησαν τα δεδομένα των υδροσημείων (συντεταγμένες-μέση στάθμη) στο ArcGIS. Φτιάξαμε ένα χάρτη των λεκανών απορροής (watersheds) και εμφανίσαμε τα υδροσημεία πάνω του (χάρτης 4.1).



Χάρτης 4.1: Λεκάνες απορροής και υδροσημεία συλλογής δεδομένων υδατικού διαμερίσματος Κρήτης με τη χρήση ArcGIS.

Στη συνέχεια κατασκευάστηκε ο χάρτης 4.2 που απεικονίζει την γεωλογία της Κρήτης.



Χάρτης 4.2: Γεωλογία της Κρήτης με τη χρήση ArcGIS.

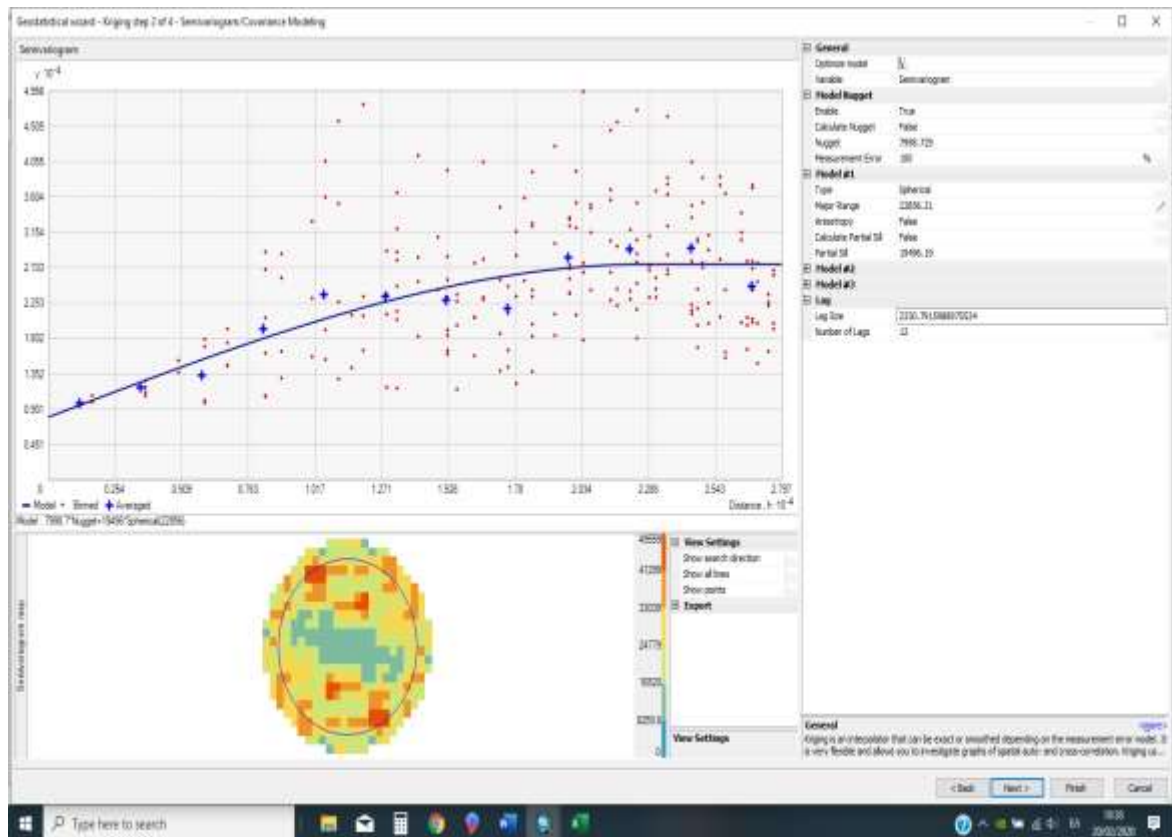
Με βάση αυτούς τους χάρτες προχωρήσαμε στη διαδικασία ordinary kriging/cokriging ώστε να γίνει η εκτίμηση της μέσης στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα για όλη την έκταση του νησιού.

Επαναλάβαμε τη διαδικασία 4 φορές δοκιμάζοντας τα μοντέλα: Σφαιρικό, εκθετικό, Γκαουσσιανό και K-Bessel, ώστε συγκρίνοντας τα σφάλματα να επιλέξουμε το βέλτιστο. Στον πίνακα 4.2 συγκεντρώθηκαν τα χαρακτηριστικά των ημιβαριογραμμάτων και τα σφάλματα από τη διαδικασία cross validation κατά την εκτέλεση της διαδικασίας για τα 4 διαφορετικά μοντέλα.

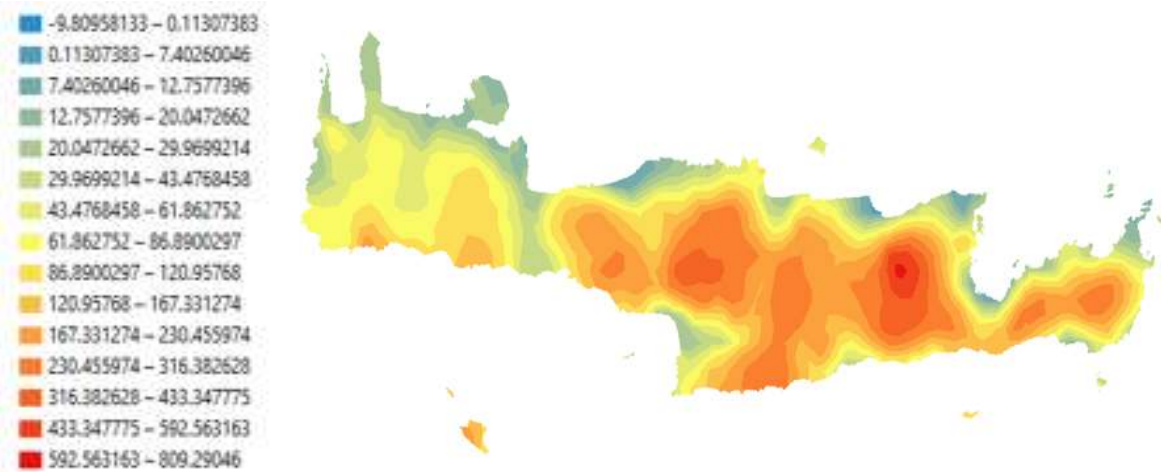
Μέση στάθμη				
	Σφαιρικό	Exponential	Gaussian	K-Bessel
Nugget	7,998.729	6,378.981	9,571.361	9,239.496
Major Range	22,856.213	27,969.499	16,958.590	19,861.370
Partial Sill	19,496.188	22,211.374	17,394.410	18,265.476
Mean	0.7044917	0.9315984	0.7212107	0.7097732
Root Mean Square	114.2182	115.5781	112.8171	112.4101

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά και σφάλματα ημιβαριογραμμάτων για τη μέση στάθμη.

Παρόλο που το Root mean square στο σφαιρικό μοντέλο δεν ήταν το μικρότερο από τα υπόλοιπα, επιλέγουμε αυτό το μοντέλο, διότι έχει το μικρότερο σφάλμα (mean) που τον θεωρούμε σημαντικότερο παράγοντα. Έτσι δημιουργήθηκαν οι χάρτες 4.3 και 4.4 εκτίμησης της μέσης στάθμης υδροφορέα και σχετικής αβεβαιότητας αντίστοιχα, προσαρμοσμένους στη γεωλογία της Κρήτης, καθώς και το ημιβαριόγραμμα (σχήμα 4.1) για το σφαιρικό μοντέλο που προσεγγίζει σε ικανοποιητικό επίπεδο τη μορφή του θεωρητικού.



Σχήμα 4.1: Ημιβαριόγραμμα σφαιρικού μοντέλου που χρησιμοποιήσαμε για τη μέση στάθμη με τη χρήση ArcGIS.



Χάρτης 4.3: Εκτίμηση στάθμης υδροφόρου ορίζοντα υδατικού διαμερίσματος Κρήτης με τη χρήση ArcGIS (οι κλάσεις σε m).



Χάρτης 4.4: Χάρτης σχετικής αβεβαιότητας μέσης στάθμης υδροφόρου ορίζοντα με τη χρήση ArcGIS (οι κλάσεις σε m).

Συλλέχθηκαν δεδομένα από 81 μετεωρολογικούς σταθμούς της Κρήτης (παράρτημα Β) , τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για την δημιουργία χαρτών με την χρήση του ArcGIS με την μέθοδο ordinary kriging/cokriging, ώστε να γίνει εκτίμηση του ύψους βροχοπτώσεων σε όλη την έκταση του νησιού. Χρησιμοποιήθηκε ένας μέσος όρος ύψους βροχής για την χειμερινή περίοδο (Οκτώβρη-Μάρτη) και ένας για την θερινή (Απρίλη-Σεπτέμβρη) για την χρονική περίοδο 2007-2016.

Στον χάρτη 4.5 που ακολουθεί αποτυπώνονται τα σημεία από όπου πήραμε τα βροχομετρικά δεδομένα πάνω στο χάρτη των λεκανών απορροής.



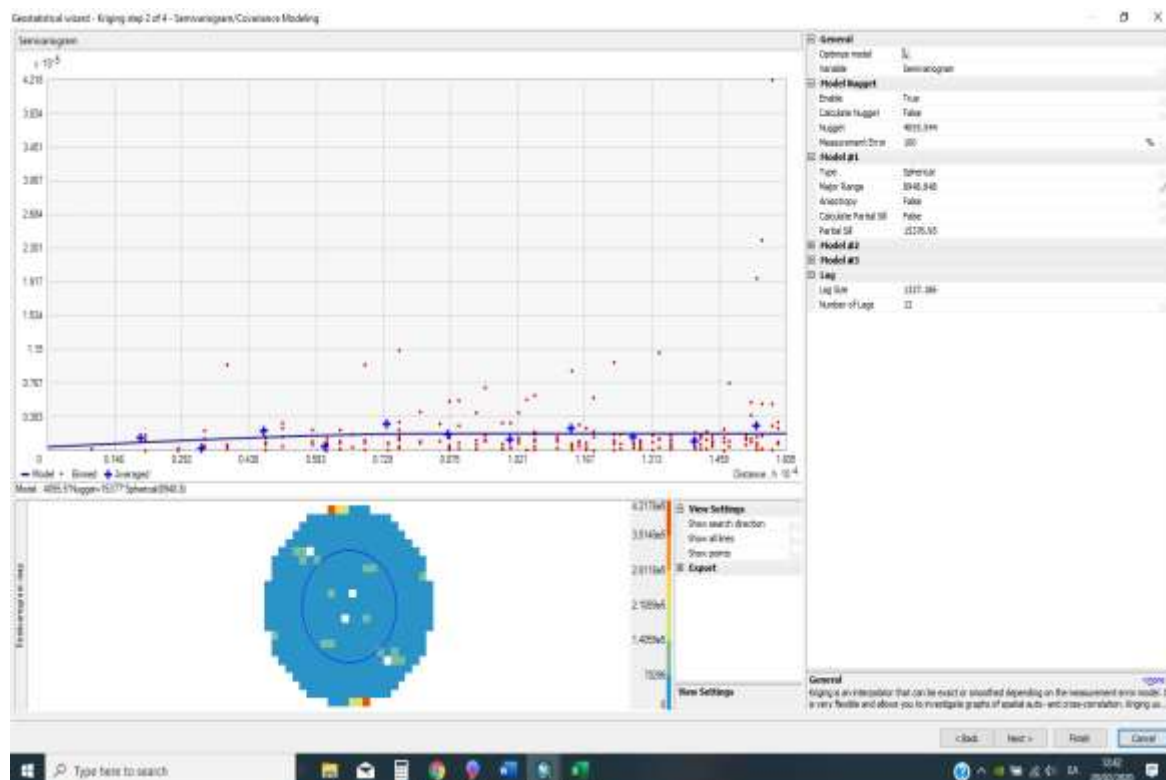
Χάρτης 4.5: Σημεία συλλογής βροχομετρικών δεδομένων με χρήση ArcGIS.

Με βάση αυτά τα δεδομένα προχωρήσαμε στη διαδικασία ordinary cokriging/kriging και τη δημιουργία χαρτών για τις βροχοπτώσεις των χειμερινών περιόδων. Στον πίνακα 4.4 παρατίθενται τα χαρακτηριστικά των ημιβαριογραμμάτων και τα σφάλματα από τη διαδικασία cross validation για τα 4 μοντέλα που εξετάστηκαν.

Βροχοπτώσεις χειμερινών περιόδων				
	Σφαιρικό	Exponential	Gaussian	K-Bessel
Nugget	4,055.544	0.000	8,765.433	0.000
Major Range	8,948.848	9,469.121	8,781.856	8,864.959
Partial Sill	15,376.953	19,960.883	10,836.219	19,803.641
Mean	10.15404	10.66940	10.69167	10.58585
Root Mean Square	184.7713	180.9112	182.5817	181.5079

Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικά και σφάλματα ημιβαριογράμματος για τις χειμερινές βροχοπτώσεις.

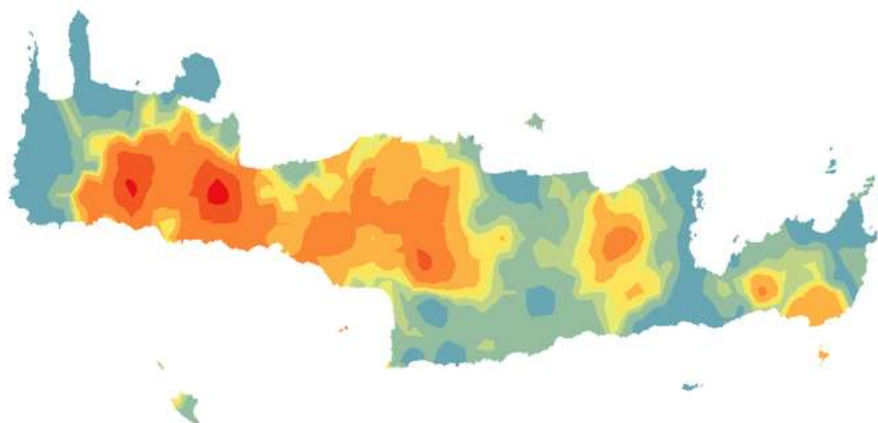
Και εδώ επιλέγουμε το σφαιρικό μοντέλο που έχει το μικρότερο σφάλμα, παρόλο που δεν έχει το μικρότερο Root mean square. Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν το ημιβαριόγραμμα σφαιρικού μοντέλου (σχήμα 4.2) καθώς και οι χάρτες 4.6 και 4.7 της εκτίμησης ύψους βροχής στην έκταση του υδατικού διαμερίσματος Κρήτης για τη χειμερινή περίοδο και της σχετικής αβεβαιότητας αντίστοιχα, προσαρμοσμένοι στη γεωλογία της Κρήτης.



Σχήμα 4.2: Ημιβαριόγραμμα σφαιρικού μοντέλου για τις χειμερινές βροχοπτώσεις με τη χρήση ArcGIS.

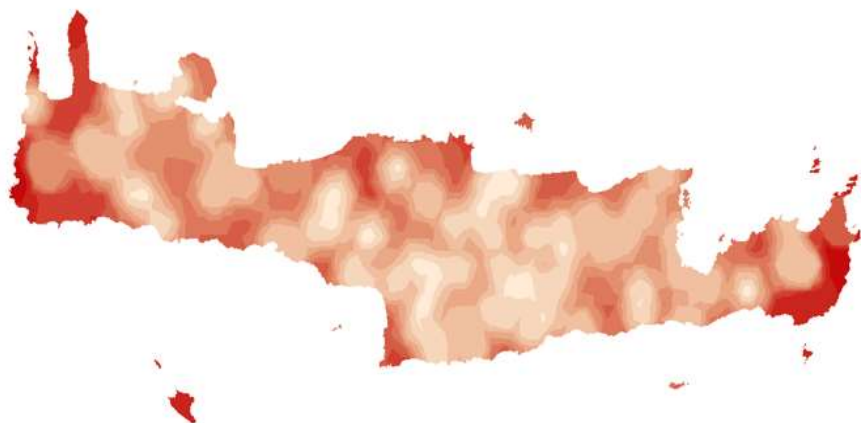


282.28 – 493.305149  
 493.305149 – 594.03395  
 594.03395 – 642.114907  
 642.114907 – 665.065428  
 665.065428 – 676.020418  
 676.020418 – 698.970939  
 698.970939 – 747.051896  
 747.051896 – 847.780697  
 847.780697 – 1,058.80585  
 1,058.80585 – 1,500.9



Χάρτης 4.6: Εκτίμηση ύψους βροχοπτώσεων κατά τους χειμερινούς μήνες με τη χρήση ArcGIS. (οι κλάσεις σε mm).

63.8718785 – 94.9031514  
 94.9031514 – 113.357773  
 113.357773 – 124.332929  
 124.332929 – 130.859969  
 130.859969 – 134.741667  
 134.741667 – 137.050154  
 137.050154 – 138.423035  
 138.423035 – 140.731522  
 140.731522 – 144.61322  
 144.61322 – 151.14026



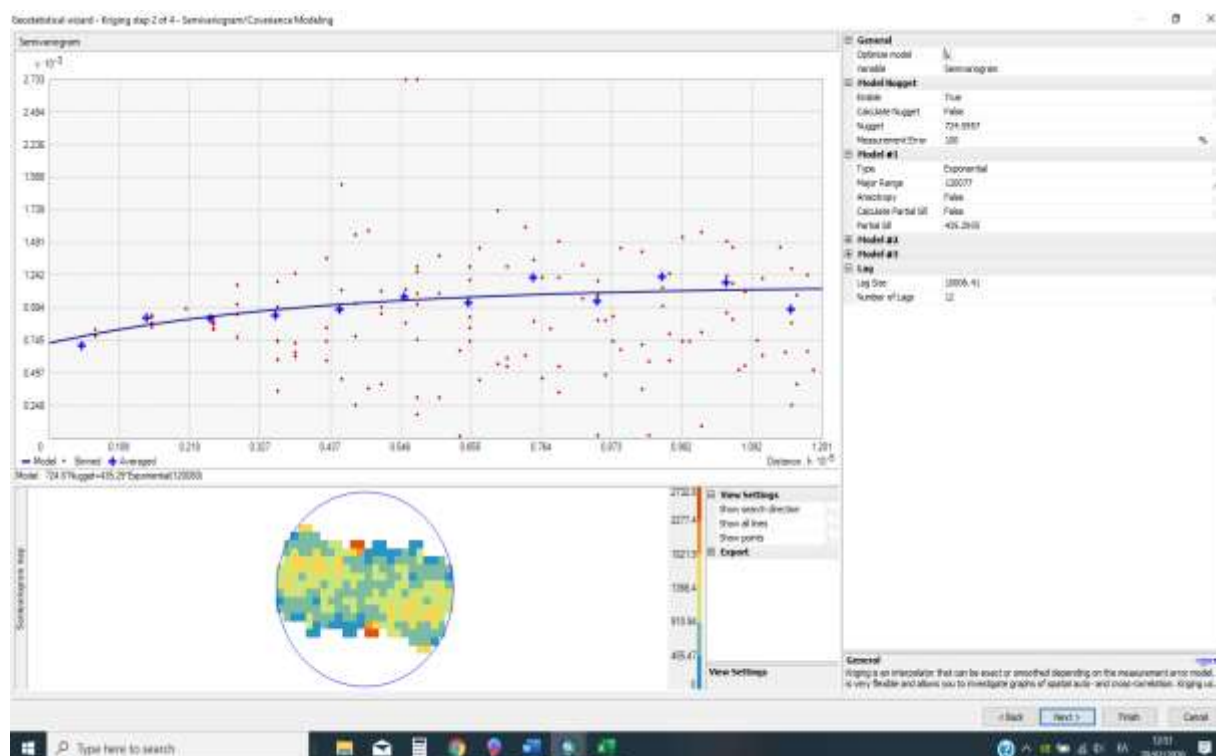
Χάρτης 4.7: Σχετική αβεβαιότητα βροχοπτώσεων χειμερινής περιόδου με τη χρήση ArcGIS. (οι κλάσεις σε mm). .

Ακολουθούμε την ίδια διαδικασία για τις θερινές περιόδους. Ακολουθεί ο πίνακας 4.5 με τα χαρακτηριστικά των ημιβαριογραμμάτων και τα σφάλματα από τη διαδικασία cross validation για τα 4 μοντέλα που εξετάστηκαν.

Βροχοπτώσεις θερινών περιόδων				
	Σφαιρικό	Exponential	Gaussian	K-Bessel
Nugget	783.842	724.596	840.070	838.141
Major Range	98,890.954	120,076.956	87,480.751	92,537.131
Partial Sill	351.064	435.293	301.636	307.955
Mean	1.296389	1.183038	1.370159	1.254663
Root Mean Square	30.13166	30.07829	30.2863	30.28764

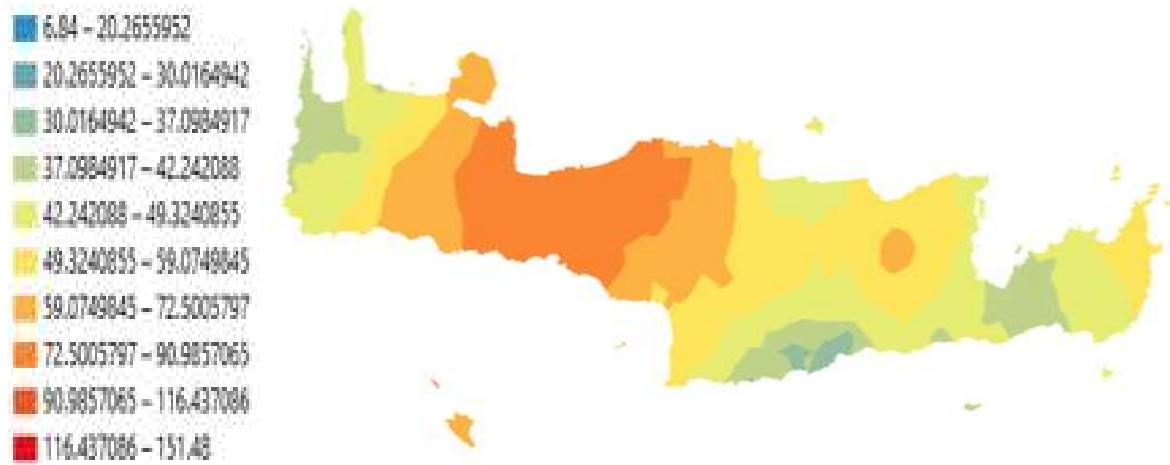
Πίνακας 4.3: Χαρακτηριστικά και σφάλματα ημιβαριογραμμάτων για τις θερινές βροχοπτώσεις.

Εδώ επιλέγουμε το εκθετικό μοντέλο που έχει το μικρότερο σφάλμα και ας μην έχει το μικρότερο root mean square. Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν το ημιβαριόγραμμα εκθετικού μοντέλου (σχήμα 4.3) καθώς και οι χάρτες 4.8 και 4.9 της εκτίμησης ύψους βροχής στην έκταση του υδατικού διαμερίσματος Κρήτης για τη θερινή περίοδο και της σχετικής αβεβαιότητας αντίστοιχα, προσαρμοσμένοι στη γεωλογία της Κρήτης.

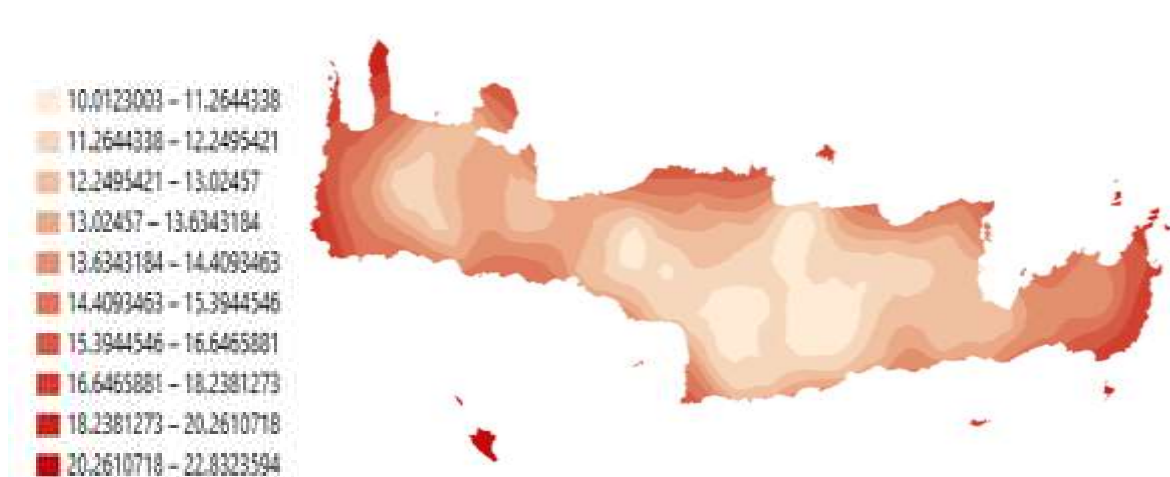


Σχήμα 4.3: Ημιβαριόγραμμα εκθετικού μοντέλου για τις θερινές βροχοπτώσεις με τη χρήση ArcGIS.





Χάρτης 4.8: Εκτίμηση ύψους βροχοπτώσεων θερινής περιόδου στην έκταση του υδατικού διαμερίσματος Κρήτης με τη χρήση ArcGIS (οι κλάσεις σε mm).



Χάρτης 4.9: Σχετική αβεβαιότητα βροχοπτώσεων θερινής περιόδου με τη χρήση ArcGIS (οι κλάσεις σε mm).

## 5. Συζήτηση

### 5.1. Ανάλυση αποτελεσμάτων

#### 5.1.1. Ημιβαριογράμματα

Το ημιβαριόγραμμα μας δηλώνει την χωρική εξάρτηση που μπορεί να έχει μια μέτρηση από μια γειτονική συναρτήσε της απόστασής τους. Η διακύμανση της διαφοράς αυξάνεται όσο αυξάνεται η απόσταση, αρά το ημιβαριόγραμμα είναι μια συνάρτηση ανομοιότητας. Από την απόσταση που φτάνουμε στο κατώφλι (range) του ημιβαριογράμματος και μετά τα δεδομένα δεν παρουσιάζουν χωρική εξάρτηση. Θεωρητικά δύο μετρήσεις στην ίδια τοποθεσία θα έπρεπε να έχουν ίδια τιμή, οπότε το nugget θα ήταν 0. Όμως αυτό πρακτικά δύσκολα συμβαίνει και αυτό οφείλεται σε σφάλματα που υπεισέρχονται στις μετρήσεις κατά τη δειγματοληψία και σε μικρής κλίμακας μεταβλητότητα. Έτσι εξηγείται για ποιο λόγο το nugget και στα τρία ημιβαριογράμματα που κατασκευάστηκαν δεν είναι μηδενικό. Το nugget θα μπορούσε να τείνει στο 0 αν μπορούσαμε να έχουμε πολλές μετρήσεις για μια δεδομένη απόσταση και με τη μείωση των σφαλμάτων κατά τις μετρήσεις.

#### 5.1.2. Χάρτες

Όσον αφορά τους χάρτες παρατηρούμε πως η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα έχει υψηλές τιμές στις περιοχές των ορεινών όγκων του νησιού με μέγιστη τιμή τα περίπου 810m στο όρος Δίκη (κόκκινη απόχρωση), ενώ μειώνεται προς το μηδέν καθώς κινούμαστε προς τις πεδινές και παράκτιες περιοχές όπως αναμενόταν (μετάβαση προς τις γαλάζιες αποχρώσεις. Αναμενόμενη και η χαρτογράφηση για το ύψος βροχοπτώσεων. Τη χειμερινή περίοδο το ύψος βροχοπτώσεων είναι υψηλότερο στους ορεινούς όγκους του νησιού σε σχέση με τις πεδινές περιοχές. Οι υψηλότερες τιμές φτάνουν τα περίπου 1500 mm στις κορυφές των Λευκών Ορέων και οι χαμηλότερες τιμές τα 450 mm στο ανατολικό άκρο του νησιού. Το καλοκαίρι οι βροχοπτώσεις είναι λίγες σε όλη την έκταση του νησιού με το μεγαλύτερο ύψος βροχής να παρατηρείται σε μεγάλο τμήμα του νομού Ρεθύμνου στα 150 mm περίπου και το μικρότερο ύψος βροχοπτώσεων τα 30 mm. Επίσης από τους χάρτες επιβεβαιώνεται πως οι βροχοπτώσεις στο δυτικό τμήμα του νησιού είναι περισσότερες.

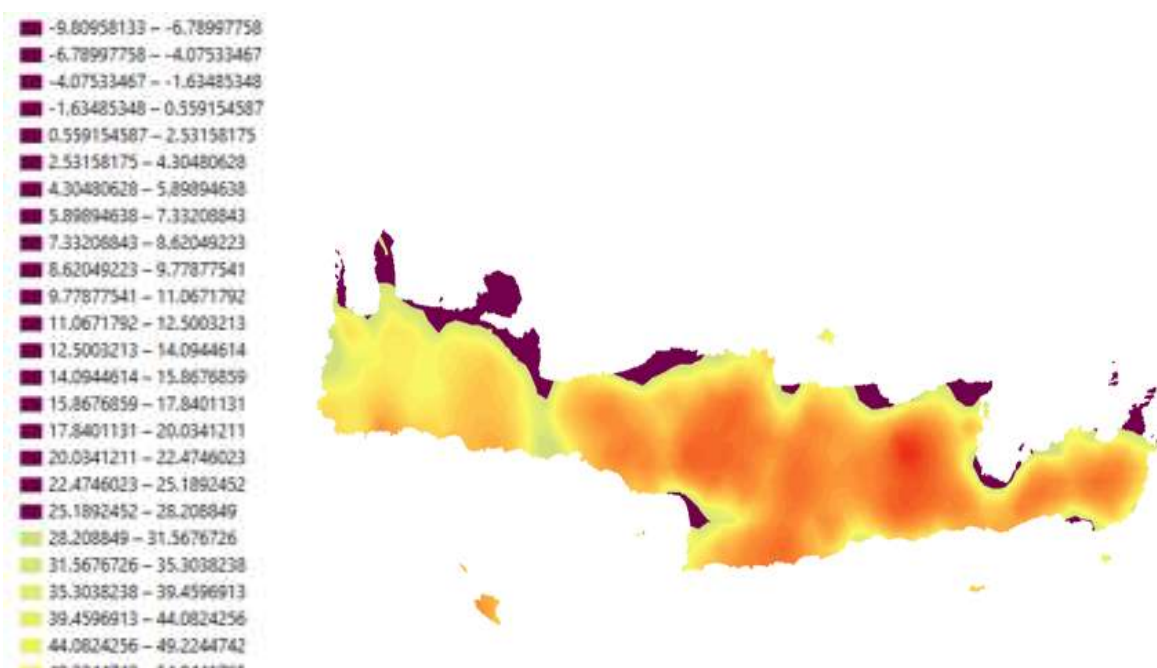
Οι χάρτες αβεβαιότητας απεικονίζουν το τυπικό σφάλμα των μετρήσεων της μεθόδου που χρησιμοποιήσαμε. Στις περιοχές που έχουμε τα πιο πολλά και πυκνά σημεία που πάρθηκαν οι μετρήσεις οι αβεβαιότητες είναι η μικρότερη (αποχρώσεις προς το άσπρο), ενώ σε περιοχές που δεν υπάρχουν μετρήσεις (όπως π.χ. στο φαράγγι της Σαμαριάς, τη Γαύδο, το Ακρωτήρι Χανίων στο χάρτη μέσης στάθμης) η αβεβαιότητα είναι μεγάλη (κόκκινες αποχρώσεις). Η ελάχιστη αβεβαιότητα στο χάρτη μέσης στάθμης κυμαίνεται στα 42,8-52,8m περίπου ενώ η μέγιστη 172,3-185,2 m. Για τις βροχοπτώσεις χειμερινής περιόδου η μέγιστη αβεβαιότητα κυμαίνεται από 144,6-151,1 mm και η ελάχιστη από 63,9-94,9 mm.

Για τις βροχοπτώσεις θερινής περιόδου η μέγιστη αβεβαιότητα κυμαίνεται από 20,3-22,8 mm και η ελάχιστη από 10-11,3 mm περίπου.

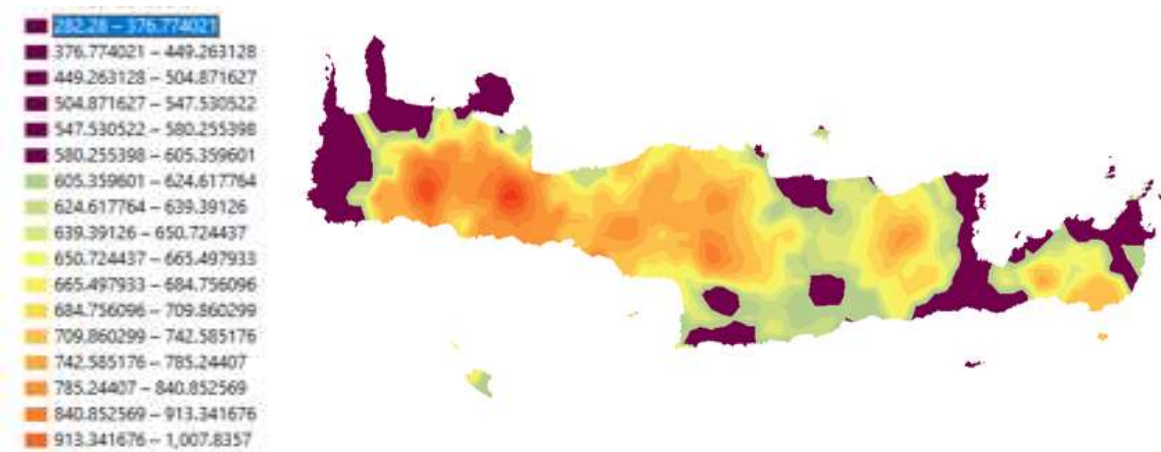
### 5.1.3. Συσχέτιση μέσης στάθμης υδροφόρου ορίζοντα με βροχοπτώσεις και εύρεση προβληματικών υπογείων υδροφορέων:

Για να γίνει η εκτίμηση για τους υπόγειους υδροφορείς που παρουσιάζουν προβληματική ποσοτική κατάσταση πρέπει να γίνει συσχέτιση της μέγιστης μέσης στάθμης των υπογείων υδροφορέων με το μέσο ύψος βροχοπτώσεων για όλη την έκταση του υδατικού διαμερίσματος της Κρήτης. Εξετάζουμε τις περιοχές με σχετικά χαμηλή μέγιστη μέση στάθμη (τιμές μικρότερες από 30 m) και περιοχές με μέσο όρο ύψους βροχοπτώσεων μικρότερη από 600 mm, που θέτουμε ως όριο για το αν ένας υπόγειος υδροφορέας μπορεί να τροφοδοτηθεί επαρκώς μέσω της διήθησης. Τα 600 mm καθιστούν το όριο για να χαρακτηριστεί ένα έτος ξηρό (μικρότερη τιμή από το μέσο όρο ετήσιας βροχόπτωσης στο νησί σύμφωνα με τη βιβλιογραφία που είναι τα 927mm). Το ύψος των θερινών βροχοπτώσεων θεωρείται μικρό και το μεγαλύτερο μέρος χάνεται μέσω της εξατμισοδιαπνοής (υψηλές θερμοκρασίες), για να έχει κάποια θετική επίπτωση στους υπόγειους υδροφορείς. Κάνοντας αυτήν την παραδοχή δουλεύουμε με βάση τα δεδομένα χειμερινών βροχοπτώσεων.

Για να είναι ευδιάκριτες οι περιοχές που βρίσκονται κάτω από τα όρια αυτά, έγινε αλλαγή του χρώματος απεικόνισης των αντίστοιχων κλάσεων και προέκυψαν ο χάρτης 5.1 και ο χάρτης 5.2.

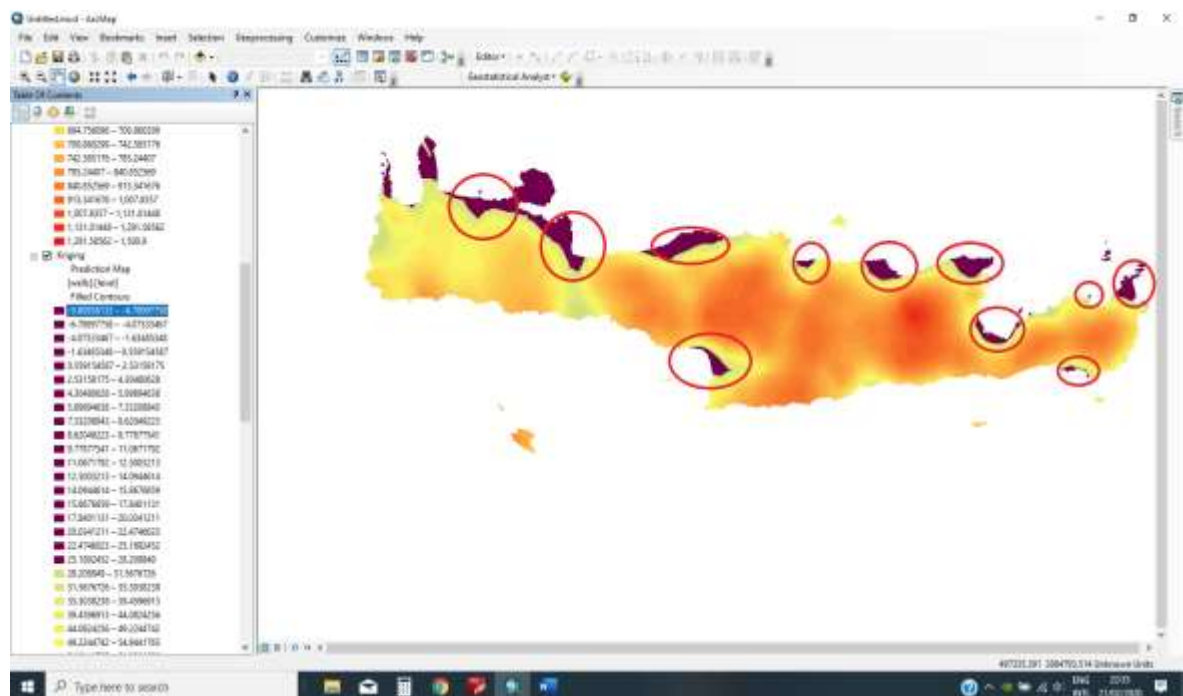


Χάρτης 5.1: Περιοχές με μέση στάθμη υδροφόρου ορίζοντα κάτω από 30 m με χρήση ArcGIS.



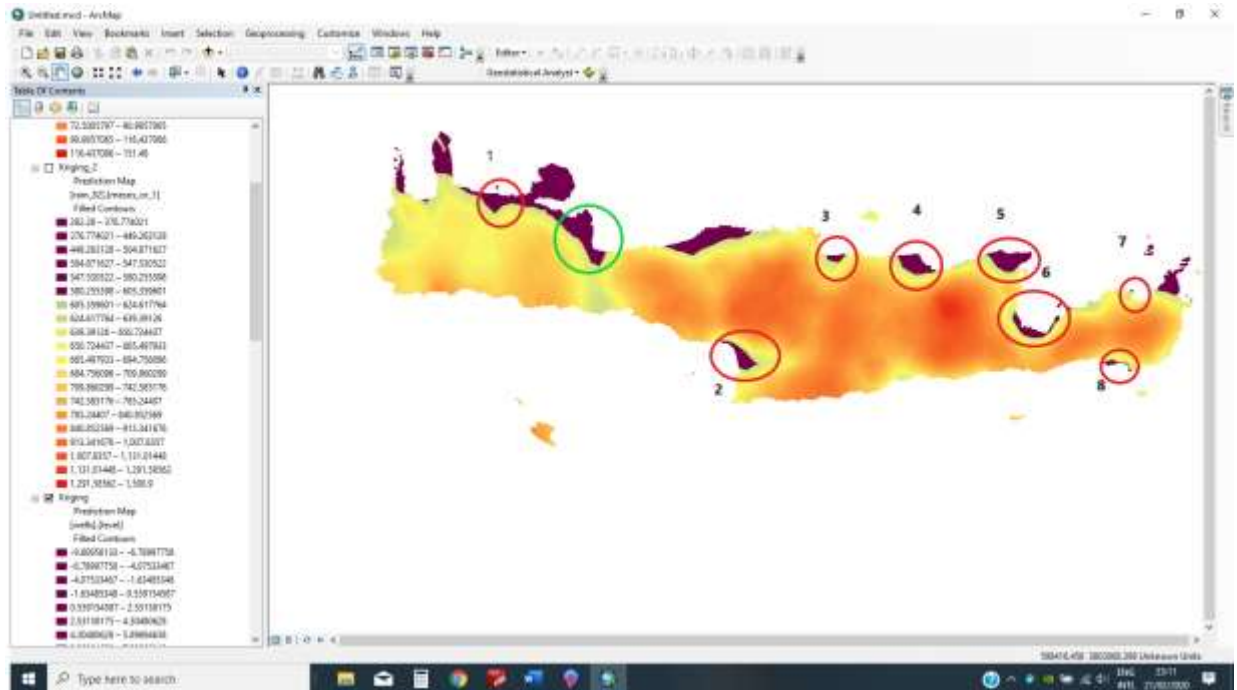
Χάρτης 5.2: Περιοχές με ύψος βροχής χειμερινής περιόδου μικρότερος από 600 mm με χρήση ArcGIS.

Στη συνέχεια απορρίψαμε τις περιοχές που παρουσίαζαν μεγάλη αβεβαιότητα σύμφωνα με το χάρτη 4.4, διότι δε θα μπορούσαμε να βγάλουμε συμπέρασμα με ελάχιστες ή καθόλου μετρήσεις στις περιοχές αυτές. Προκύπτει ο διορθωμένος χάρτης 5.3 μέσης στάθμης υδροφόρου ορίζοντα με τις περιοχές που εξετάζουμε (κυκλωμένες με κόκκινο).



Χάρτης 5.3: Διορθωμένος χάρτης περιοχών με μέση στάθμη μικρότερη από 30m με χρήση ArcGIS.

Στη συνέχεια απορρίπτουμε τις περιοχές όπου υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα για το ύψος βροχοπτώσεων σύμφωνα με το χάρτη 4.7, γιατί δε μπορούμε να γνωρίζουμε αν οι βροχοπτώσεις επαρκούν για την τροφοδότηση του υδροφόρου ορίζοντα με ελάχιστες η καθόλου μετρήσεις για αυτές τις περιοχές. Έτσι προκύπτει ο χάρτης 5.4 με τις περιοχές που εκτιμώνται ότι έχουν προβληματική ποσοτική κατάσταση (κυκλωμένες με κόκκινο και αριθμημένες από το 1-8).



Χάρτης 5.4: Εκτιμώμενες περιοχές με προβληματική ποσοτική κατάσταση υπογείων υδροφορέων.

Η περιοχή που είναι κυκλωμένη με πράσινο χρώμα, και δεν πληροί το κριτήριο για το όριο μέγιστης μέσης στάθμης, αλλά είναι μια περιοχή που το ύψος βροχοπτώσεων κρίνεται ικανοποιητικό, για να τροφοδοτεί τους υδροφορείς με ύψη που κυμαίνονται από 600-780 mm. Επομένως απορρίφθηκε από τις επικίνδυνες περιοχές.

Πρέπει να σημειωθεί ότι έγινε σύγκριση των περιοχών που αποκλείστηκαν σύμφωνα με τους χάρτες αβεβαιότητας με τον χάρτη 1.5 χρήσεων γης και προέκυψε ότι όσες περιοχές αποκλείστηκαν (δυτικά ακρωτήρια, δυτικό τμήμα Κρήτης, Ακρωτήριο Χανίων, ανατολικό άκρο του νησιού, φαράγγι της Σαμαριάς) χαρακτηρίζονται ως δασώδης ή ημι-φυσικές περιοχές. Επομένως θεωρείται φυσιολογική η έλλειψη μετρήσεων και δεν υπάρχει πρόβλημα στο να απορρίψουμε τις περιοχές αυτές από την μελέτη. Δεν αναμένεται η ύπαρξη πολλών γεωτρήσεων στις περιοχές αυτές, επομένως οι υδροφορείς δεν δέχονται πιέσεις από ανθρωπογενείς παράγοντες.

Εξετάζουμε τις 8 περιοχές που εκτιμήθηκαν ως προβληματικές και κάνουμε μια σύγκριση με τους υπόγειους υδροφορείς που είναι προβληματικοί σύμφωνα με το διαχειριστικό σχέδιο, για να δούμε αν τα αποτελέσματα συμπίπτουν.

Βρέθηκαν οι εξής υδροφορείς που θεωρούνται προβληματικοί και σύμφωνα με την παρούσα εργασία και σύμφωνα με το διαχειριστικό σχέδιο:

Στην περιοχή 2:

Πορώδες παράκτιο Τυμπακίου και πορώδες Μοιρών: Η μέγιστη μέση στάθμη κυμαίνεται από 22-25 m για τον υδροφόρο Τυμπακίου και από 22-35 m για αυτόν των Μοιρών. Το ύψος βροχοπτώσεων κυμαίνεται από 545-625 mm περίπου.

Στην περιοχή 3:

Πορώδες παράκτιο βορείου Ηρακλείου: Η μέγιστη μέση στάθμη κυμαίνεται από 22,5-35,3 m. Το ύψος βροχοπτώσεων κυμαίνεται από 580-605 mm.

Περιοχή 4:

Καρστικό παράκτιο Ηρακλείου-Γουβών-Χερσονήσου: Η μέγιστη μέση στάθμη κυμαίνεται από 15,8-35,3 m, ενώ οι βροχοπτώσεις από 580-624 mm.

Περιοχή 7:

Πορώδες Σκοπής-Σητείας: Εκ πρώτης όψεως φαίνεται πως ο υδροφορέας είναι σε καλή κατάσταση, αφού η μέγιστη μέση στάθμη του κυμαίνεται από 25,2-68,4 m, αλλά στην περιοχή καταγράφονται από τα χαμηλότερα μέσα ύψη βροχοπτώσεων που κυμαίνονται από 449,2-580,3 mm.

Περιοχή 8:

Πορώδες Γουδουρά: Η μέγιστη μέση στάθμη του κυμαίνεται από 15,9-28,2 m. Όσον αφορά τις βροχοπτώσεις, με τη μέθοδο που ακολουθήσαμε, κυμαίνονται από 742,6-785,2 mm, αλλά επικρατεί μεγάλη αβεβαιότητα για την περιοχή αυτή καθώς δεν υπάρχουν επαρκείς μετρήσεις. Δε μπορούμε να βγάλουμε ασφαλές συμπέρασμα.

Από τους δέκα υπόγειους υδροφορείς που είναι προβληματικοί σύμφωνα με το σχέδιο διαχείρισης, συμπίπτουν οι 6 με τη μέθοδο που ακολουθήσαμε. Οι 4 που δεν εντωπίσαμε να έχουν ποσοτικό πρόβλημα είναι οι: πορώδες Γαύδου, καρστικό Κέρης-Τυλισσού, πορώδες Καστελίου, Πορώδες Ρουσοχωρίων. Όσον αφορά την περίπτωση της Γαύδου, δεν είχαμε καμία μέτρηση από εκεί και τα πιο κοντινά γειτονικά υδροσημεία απείχαν μεγάλες αποστάσεις οπότε η μέθοδος Kriging δε μπορούσε να δείξει τη χωρική εξάρτηση με

ακρίβεια. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τους χάρτες αβεβαιότητας. Για τις υπόλοιπες 3 περιπτώσεις ενδεχομένως να οφείλεται σε μικρό πλήθος μετρήσεων και σφάλματα κατά τη δειγματοληψία.

Πέρα όμως από τους 10 υδροφορείς που αναφέρονται στο διαχειριστικό σχέδιο εντοπίστηκαν και υδροφορείς που δεν αναφέρονται σε αυτό (περιοχές 1,5,6). Πρόκειται για τους:

Καρστικό κάμπου Χανίων (GR1300022) στην περιοχή 1: Η γεωλογία του είναι Τεταρτογενείς και Νεογενείς αποθέσεις μέτριας ως υψηλής περατότητας. Εκτιμάται ύψος βροχοπτώσεων από 449,3-624,6 mm και η μέγιστη μέση στάθμη από 15,9-35,3 m. Λόγω του γεγονότος ότι αυτός ο υδροφόρος είναι πολύ μεγάλης έκτασης και σε μεγάλο τμήμα του προσπίπτουν ικανοποιητικές βροχοπτώσεις και λόγω του γεγονότος ότι τα πετρώματα που τον αποτελούν είναι υψηλής περατότητας δεν τον κατατάσσουμε σε υδροφορείς κακής κατάστασης. Ομοίως και για το πορώδες Ιεράπετρας-Καλού χωριού (GR1300123) στην περιοχή 6, με γεωλογία νεογενείς αποθέσεις μέτριας/χαμηλής περατότητας, που λόγω έκτασης θεωρούμε ότι υπάρχει η δυνατότητα τροφοδοτείται επαρκώς από τα τμήματα του που δέχονται υψηλές βροχοπτώσεις.

Καρστικό παράκτιο Σισίου-Μιλάτου-Ελούντας (GR1300116) στην περιοχή 5: Η γεωλογία του είναι Ιουρασικοί έως Ηωκαινικοί ασβεστόλιθοι ζωνών Τρίπολης και Ιονίου με υπερκείμενα στρώματα ασβεστόλιθων μέτριας περατότητας. Εκτιμάται μέγιστη μέση στάθμη 11,1-25,2 m και ύψος βροχοπτώσεων από 449,2-547,5 m.

Για τον τελευταίο υδροφόρο χρειάζονται περεταίρω μετρήσεις για να βγουν ασφαλέστερα συμπεράσματα.

## **5.2. Συμπεράσματα:**

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2.3 χρησιμοποιήσαμε την γεωστατική μέθοδο χωρικής εκτίμησης ordinary cokriging/kriging λόγω του γεγονότος ότι παρουσιάζεται μεγάλη δυσκολία στην συλλογή πληροφοριών για τα υδραυλικά χαρακτηριστικά των υδροφορέων της Κρήτης καθώς και για τις παροχές που χρειάζονται για την εφαρμογή του υδρολογικού ισοζυγίου.

Σε αυτήν την ενότητα θα αναφερθούν οι αδυναμίες κατά την εκπόνηση της εργασίας, θα προταθούν παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη για μελλοντικές έρευνες και μια σειρά από λύσεις αντιμετώπισης του προβλήματος της ποσοτικής υποβάθμισης των υπογείων υδροφορέων.

Κατά την εκπόνηση της εργασίας προέκυψαν κάποιες δυσκολίες που είχαν να κάνουν κυρίως με τη συλλογή δεδομένων. Σε αρκετές περιπτώσεις τα δεδομένα που ήταν διαθέσιμα ήταν ελλιπή, όπως για παράδειγμα κάποιες χρονιές δεν υπήρχαν δεδομένα για την μέση στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα από τα υδροσημεία που εκτελούνταν οι μετρήσεις. Επίσης, ο αριθμός των σημείων που εκτελούνταν οι μετρήσεις, τόσο για τη μέση στάθμη όσο και για τις βροχοπτώσεις, θα μπορούσε να είναι μεγαλύτερος και μεγαλύτερης πυκνότητας για μια τόσο μεγάλη έκταση όπως το νησί της Κρήτης, ώστε να γίνουν πιο ακριβείς εκτιμήσεις και οι εσφαλμένες τιμές να μην επηρεάζουν σημαντικά τα αποτελέσματα. Η διαδικασία αυτή είναι χρονοβόρα. Στην εξαγωγή των αποτελεσμάτων μεγάλο ρόλο έπαιξε η οπτική σύγκριση ενός παρατηρητή με αποτέλεσμα να υπεισέρχονται και τέτοιους είδους σφάλματα στην διαδικασία. Καλό θα ήταν να πραγματοποιηθεί αυτή η διαδικασία με περισσότερους παρατηρητές, ώστε να ελαχιστοποιηθούν τα σφάλματα αυτά. Επίσης η πτώση στάθμης ενός παράκτιου υπόγειου υδροφορέα δε συνεπάγεται αυτόματα πως υπάρχει το πρόβλημα της υπαλμύρισης, καθώς ο υδροφορέας αυτός μπορεί να είναι θωρακισμένος από αδιαπέρατους γεωλογικούς σχηματισμούς. Το αν το νερό είναι υπάλμυρο καθορίζεται από τις συγκεντρώσεις χλωριώντων που είναι ένα ποιοτικό χαρακτηριστικό. Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά δεν αποτέλεσαν αντικείμενο της συγκεκριμένης εργασίας.

Με βάση όλα αυτά προτείνεται να εμπλουτιστούν τα παραπάνω δεδομένα με παραπάνω μετρήσεις, μιας και σύμφωνα με στοιχεία έχουν εκδοθεί πάνω από 2.000 άδειες γεωτρήσεων στην επικράτεια του νησιού. Θα ήταν ωφέλιμο να μελετηθεί και η ποιοτική κατάσταση των υπογείων υδροφορέων, πέρα από την ποσοτική, με μετρήσεις για χημικά στοιχεία και ενώσεις, όπως τα χλωριώντα και τα νιτρικά (μιας και το νησί στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό στην γεωργία) και ενδεχομένως οι υδροφορείς να επηρεάζονται από τη χρήση φυτοφαρμάκων, ή τα βαρέα μέταλλα βιομηχανιών και τα υποπροϊόντα των ελαιοεργείων. Επιπλέον θα μπορούσε να εφαρμοστεί και να συγκριθεί η παρούσα μεθοδολογία και με άλλες μεθόδους Kriging, ώστε να βρεθεί η βέλτιστη μέθοδος για τις εκτιμήσεις.

Πιο συγκεκριμένα χρειάζονται παραπάνω μετρήσεις για τις περιοχές που δεν ήμασταν σίγουροι για την κατάσταση ενός υδροφορέα, όπως για τον υδροφορέα της Γαύδου, τον υδροφορέα Κέρης-Τυλισσού, τον υδροφορέα Καστελίου, τον υδροφορέα Ρουσχωριών και τον υδροφορέα Σισίου-Μιλάτου-Ελούντας.

Τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής κρίνονται ικανοποιητικά. Η μέθοδος αυτή μπορεί να αποτελέσει το προκαταρκτικό αρχικό στάδιο μίας μεγάλης έρευνας εκτίμησης της ποσοτικής κατάστασης των υδροφορέων για μια μεγάλη περιοχή όπως το υδατικό διαμέρισμα Κρήτης, καθώς με το ελάχιστο κόστος και με τη χρήση μόνο του ArcGIS μπορούν να αποκλειστούν οι περιοχές που δεν εμφανίζουν κάποιο πρόβλημα. Στη συνέχεια μπορούμε να δώσουμε βαρύτητα στις περιοχές που είτε εκτιμώνται προβληματικές είτε υπάρχει μια κάποια αβεβαιότητα, χρησιμοποιώντας στοχευμένα όλα τα διαθέσιμα μέσα και πόρους για μετρήσεις που θα οδηγήσουν στην ακριβή αποτίμηση και στην επιστημονική θωράκιση της μελέτης.

Τέλος, παρατίθενται μια σειρά από μέτρα αντιμετώπισης του προβλήματος της ποσοτικής υποβάθμισης των υπογείων υδροφορέων:



- Περιορισμός των αδειοδοτήσεων για νέες γεωτρήσεις στις περιοχές που έχουν αναγνωριστεί ως περιοχές με κακή ποσοτική κατάσταση υδροφορέων.
- Αποκατάσταση και συντήρηση του αρδευτικού και υδρευτικού δικτύου του υδατικού διαμερίσματος, ώστε να μειωθούν οι απώλειες ύδατος και να απαιτείται μικρότερη ποσότητα νερού για την κάλυψη των αναγκών.
- Σε αυτή τη λογική ευαισθητοποίηση των πολιτών, ώστε να χρησιμοποιούν νέες οικιακές τεχνολογίες που στοχεύουν στην ελάττωση των απωλειών και ευαισθητοποίηση, ώστε να αποφεύγονται οι άσκοπες σπατάλες.
- Κατασκευή έργων συλλογής και αποθήκευσης όμβριων υδάτων με σκοπό την χρησιμοποίησή τους σε διάφορες ανάγκες.
- Ενθάρρυνση του αγροτικού δυναμικού του νησιού, ώστε να καλλιεργεί μη υδροβόρες ποικιλίες καλλιεργειών. Ενημέρωσή του για την αποφυγή ποτίσματος τις ώρες που οι θερμοκρασίες είναι υψηλές (μέγιστοι ρυθμοί εξατμισοδιαπνοής) και θέσπιση ημερήσιου ανώτατου ορίου χρήσης νερού στις προβληματικές περιοχές για τις καλοκαιρινές ημέρες.
- Συστημική παρακολούθηση της κατάστασης της κατάστασης των υπογείων υδροφορέων.
- Εκπόνηση μελετών για να καθοριστούν οι διεργασίες που χρειάζονται τα λύματα εξόδου των βιολογικών καθαρισμών, με στόχο την επαναχρησιμοποίησή τους, είτε για άρδευση είτε για εμπλουτισμό των υπόγειων υδροφορέων.
- Εμπλουτισμός των υδροφορέων.
- Εκπόνηση μελετών για τις ανάγκες σε νερό σε κάθε περιοχή, υπολογισμός των ελλείψεων και εκπόνηση μελέτης για την δυνατότητα κατασκευής φραγμάτων που θα καλύπτει αυτές τις ανάγκες σε βάθος 30 χρόνων.
- Μέριμνα για τον έλεγχο τήρησης των μέτρων.

## Βιβλιογραφία

### Ελληνική Βιβλιογραφία

- 1) Βαρουχάκης Ε., 2005, *‘Εφαρμογή της μεθόδου των Σπαρτιάτικων Τυχαίων Πεδίων στην γεωστατιστική ανάλυση της χωρικής κατανομής περιβαλλοντικών ρύπων’*, Μεταπτυχιακή διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- 2) Ειδική γραμματεία υδάτων, 2015, *Σχέδιο διαχείρισης των λεκανών απορροής ποταμών του υδατικού διαμερίσματος Κρήτης (GR13)*.
- 3) Καρατζάς Γ., 2008, *‘Εισαγωγή στην επιστήμη του μηχανικού περιβάλλοντος’*, Κεφάλαιο 10, 198-212, Τμήμα μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- 4) Καρατζάς Γ., 2005, *‘Ροή υπόγειων υδάτων και μεταφορά ρύπων’*, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- 5) Καρτεράκης Σ., 2005, *‘Διαχείριση των υπογείων υδάτων με μεθόδους προσομοίωσης και βελτιστοποίησης’*, Μεταπτυχιακή διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- 6) Κουτάντου Π., 2006, *‘Καρστικοί υδροφορείς – αναχαίτιση φαινομένου υφαλμύρωσης στην περιοχή Χερσονήσου Ηρακλείου Κρήτης προσομοιώνοντας τη μέθοδο του τεχνητού εμπλουτισμού’*, Μεταπτυχιακή διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- 7) Κριτσωτάκης Μ., Παυλίδου Σ., 2013, *‘Κατάσταση υπογείων υδροφορέων Κρήτης’*.
- 8) Παπαζάχος Β., Παπαζάχου Κ., 1989, *‘Οι σεισμοί της Ελλάδας’*, Εκδόσεις Ζήτη.
- 9) Περλέρος Β., Παπαμαστοράκης Δ., Κριτσωτάκης Μ., Δρακοπούλου Ε. και Παναγόπουλος Α., 2004, *‘Υπόγειο υδατικό δυναμικό Κρήτης. Προβλήματα και προοπτικές’*.
- 10) Χριστόπουλος Δ., 2003, *‘Εισαγωγή Στην Γεωστατιστική’*, Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- 11) Χριστόπουλος Δ., 2004α, *‘Ανάλυση Δεδομένων’*, Μεταπτυχιακές σημειώσεις, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- 12) Χριστόπουλος Δ., 2004β, *‘Εισαγωγή Στην Έρευνα Κοιτασμάτων’*, Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.

## Διεθνής βιβλιογραφία

- 1) Christakos G., 1991, '*Random field models in earth sciences*', Academic press, San Diego.
- 2) Christakos, G., & Hristopulos, D. T., 1998, '*Spatiotemporal Environmental Modelling*', Kluwer Academic Publishers, Boston.
- 3) Cressie N., 1993, '*Statistics for spatial data* (revised ed.), Wiley, New York.
- 4) 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.
- 5) Goovaerts, P., 1997, '*Geostatistics for Natural Resources Evaluation*', Oxford university Press, New York.
- 6) Hristopulos, D. T., 2003, '*Spartan Gibbs Random Field Models for Geostatistical Applications*', SIAM Journal on Scientific Computing, Vol. 24, no. 6, pp. 2125-2162.
- 7) Issaks, E. & Srivastava R.M., 1989, '*An Introduction to Applied Geostatistics*', Oxford University Press, New York.
- 8) Journel, A., 1989, '*Fundamentals of Geostatistics in Five Lessons*', American Geophysical Union, Washington, D.C.
- 9) Keblouti, M., Ouerdachi, L., & Boutaghane, H. (2012). '*Spatial interpolation of Annual Precipitation in Annaba-Algeria-Comparison and Evaluation of Methods*', Energy Procedia, 468-475.
- 10) 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.
- 11) Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., and Flannery, B. P., 1992, '*Numerical Recipes in Fortran*', Vol. 1, 2nd ed., Cambridge University Press, New York.
- 12) Surfer, 2002, '*Surface Mapping System*, Version 8.04, Golden Software, Inc.

## Παραρτήματα

### Παράρτημα Α: Πίνακας δεδομένων για την μέση στάθμη υδρορέων

A/A	ΚΩΔΙΚΟΣ ΥΔΡΟΣΗΜΕΙΟΥ	Χ	Υ	Υψόμετρο Z (m)	Μέσος όρος μέσης στάθμης από 2007-2014 (m)
1	366001	577811.00	3871239.00	308.00	127.52
2	359008	608455.00	3874876.00	345.00	240.33
3	368005	618805.00	3873185.00	54.00	34.33
4	368006	618105.00	3877887.00	217.00	0.00
5	359009	604673.00	3875140.00	228.00	210.91
6	358017	579508.00	3874365.00	174.00	19.62
7	366002	586976.00	3872702.00	335.00	313.91
8	358018	574573.00	3873460.00	156.00	0.00
9	359010	609922.00	3875156.00	350.00	294.29
10	367002	609565.00	3872191.00	734.00	0.00
11	359011	610933.00	3875664.00	368.00	255.05
12	359012	611089.00	3874489.00	527.00	338.43
13	362005	664901.00	3886302.00	109.00	1.96
14	362006	679764.00	3893011.00	354.00	6.87
15	362007	680233.00	3893393.00	351.00	6.87
16	362008	681689.00	3891320.00	358.00	6.87
17	363010	688666.00	3897289.00	96.60	9.81
18	363011	688203.00	3898870.00	95.00	0.98
19	363012	687067.00	3895696.00	113.00	58.86
20	363013	688233.00	3893907.00	220.00	196.19
21	362009	664564.00	3882680.00	103.00	49.05
22	363014	689044.00	3893034.00	292.30	191.29
23	363015	689080.00	3893694.00	206.20	63.76
24	363016	689886.00	3895221.00	92.70	44.14
25	363017	691212.00	3895813.00	21.00	9.81
26	363018	691649.00	3895283.00	33.40	19.62
27	363019	691358.00	3893729.00	45.20	44.14
28	363020	691441.00	3893485.00	140.70	78.48
29	363021	692056.00	3892440.00	301.60	176.57
30	363022	689116.00	3889582.00	251.00	176.57
31	362010	666335.00	3883911.00	64.00	0.00
32	363023	687114.00	3887325.00	307.00	264.86
33	363024	689823.00	3886394.00	400.70	343.34

34	363025	691467.00	3886984.00	562.80	470.86
35	363026	690080.00	3885148.00	602.60	412.00
36	363027	686169.00	3885718.00	200.00	191.29
37	363028	687688.00	3884544.00	287.70	206.00
38	363029	685136.00	3881686.00	211.60	5.89
39	362011	679049.00	3886946.00	439.00	392.38
40	362012	669128.00	3889930.00	75.00	4.90
41	362013	682109.00	3882248.00	299.70	225.62
42	363030	682882.00	3880602.00	45.00	9.81
43	363031	698249.00	3888363.00	647.50	431.62
44	355001	705097.00	3904676.00	16.90	9.81
45	355002	704926.00	3902850.00	27.20	14.71
46	364001	704904.00	3899267.00	115.40	19.62
47	363032	703354.00	3896208.00	88.20	9.81
48	363033	704328.00	3893862.00	155.00	24.52
49	363034	703349.00	3892126.00	220.00	196.19
50	362014	668602.00	3886906.00	160.00	4.90
51	363035	703025.00	3885000.00	130.00	117.71
52	363036	704358.00	3881198.00	38.00	4.41
53	363037	702431.00	3880958.00	101.00	0.00
54	363038	702453.00	3880443.00	59.60	3.92
55	363039	695129.00	3879494.00	329.00	264.86
56	363040	693043.00	3878627.00	178.00	0.00
57	363041	692683.00	3878049.00	180.00	9.81
58	363042	692039.00	3877687.00	74.60	0.98
59	363043	685492.00	3878272.00	123.00	0.98
60	362015	673742.00	3891901.00	220.00	9.81
61	362016	676506.00	3879637.00	25.10	9.81
62	362017	672174.00	3878472.00	100.60	73.57
63	362018	660808.00	3882175.00	139.00	49.05
64	362019	676823.00	3891455.00	226.00	0.00
65	362020	677852.00	3891398.00	289.00	0.00
66	359013	634327.00	3897541.00	933.00	210.91
67	360011	591516.00	3897647.00	279.00	696.48
68	354004	597109.00	3901865.00	131.00	73.57
69	354005	597201.00	3905689.00	82.00	70.63
70	361012	653934.00	3910723.00	87.80	1.96
71	369009	643231.52	3878364.97	255.20	209.93
72	369010	642135.00	3876514.00	289.00	0.00
73	369011	644673.50	3875401.63	26.20	0.00
74	361013	654457.00	3905950.00	298.70	2.45
75	369012	644541.21	3876340.91	21.60	3.92
76	369013	651904.00	3879776.00	384.00	353.14

77	369014	655627.00	3880667.00	69.00	58.86
78	360012	633031.00	3896265.00	830.60	804.39
79	361014	648976.79	3899218.43	260.70	34.33
80	361015	649594.00	3902958.00	289.80	3.92
81	360013	631188.00	3894475.00	835.80	804.39
82	360014	632232.00	3893150.00	894.90	804.39
83	361016	643019.85	3900325.43	353.10	201.10
84	361017	646116.00	3898097.00	404.50	269.76
85	360015	620295.00	3909438.00	49.60	3.92
86	360016	620287.00	3907980.00	139.20	2.94
87	361018	655346.00	3890090.00	116.70	19.62
88	360017	620414.00	3906179.00	154.80	2.94
89	360018	623291.00	3907368.00	133.10	9.81
90	360019	630006.13	3904867.00	94.10	9.81
91	360020	631867.00	3902010.00	375.90	19.62
92	360021	628312.79	3896969.46	379.00	98.10
93	360022	621660.00	3893730.00	369.00	98.10
94	368007	627188.31	3874704.73	244.00	9.81
95	368008	628799.00	3875290.00	220.00	73.57
96	368009	634885.00	3874675.00	140.00	53.95
97	369015	638013.00	3875690.00	351.00	53.95
98	368010	634252.70	3877998.80	631.00	559.15
99	368011	629212.38	3879176.20	407.00	387.48
100	360023	626540.08	3885420.38	432.00	402.19
101	360024	614387.00	3901540.00	315.00	166.76
102	360025	614714.00	3903668.00	205.00	24.52
103	361019	638434.00	3905973.00	131.20	3.92
104	361020	650617.21	3896294.77	154.20	9.81
105	361021	638386.00	3906964.00	50.00	0.00
106	361022	650701.00	3897356.00	145.80	9.81
107	360026	633229.00	3905096.00	75.50	5.89
108	361023	656605.00	3887538.00	22.60	2.94
109	361024	654264.00	3901000.00	283.10	8.83
110	361025	652709.00	3900847.00	302.30	1.96
111	361026	657399.00	3886844.00	21.30	16.68
112	360027	634377.00	3897594.00	937.00	721.00
113	360028	627108.94	3885407.15	493.00	93.19
114	361027	655233.00	3885915.00	240.00	166.76
115	361028	653685.00	3885756.00	351.00	0.00
116	346006	479765.00	3932850.00	70.00	36.30
117	346007	478945.00	3928824.00	117.00	39.24
118	346008	479943.00	3928263.00	40.00	19.62
119	346009	479610.00	3925969.00	116.00	75.53

120	346010	478888.00	3927536.00	89.40	60.82
121	346011	478046.00	3926559.00	171.00	75.53
122	346012	478398.00	3924518.00	165.10	103.98
123	346013	477955.00	3928277.00	158.00	87.31
124	346014	477204.00	3926030.00	187.00	42.18
125	345002	475941.00	3926356.00	235.00	67.69
126	348003	474306.00	3921370.00	211.00	96.13
127	346015	478759.00	3935981.00	121.70	4.90
128	345003	473099.00	3925580.00	106.40	15.70
129	348004	472486.00	3924321.00	56.20	20.60
130	345004	472773.00	3924613.00	51.20	18.64
131	348005	473051.00	3923581.00	69.80	21.58
132	348006	471953.00	3921044.00	86.00	83.38
133	348007	470494.00	3923243.00	133.10	124.58
134	345005	470444.00	3924471.00	117.50	67.69
135	348008	468604.00	3922381.00	166.00	74.55
136	345006	469354.00	3924617.00	84.60	75.53
137	345007	465347.00	3929752.00	19.30	5.89
138	346016	477398.00	3934154.00	192.00	95.15
139	345008	465131.00	3928303.00	74.00	61.80
140	345009	464181.00	3929525.00	88.90	21.58
141	345010	464134.00	3928737.00	107.00	11.77
142	345011	464237.00	3926068.00	179.00	131.45
143	348009	460267.00	3924379.00	52.10	0.49
144	345012	461013.00	3924518.00	44.20	7.85
145	345013	465745.00	3924746.00	172.00	127.52
146	345014	463895.00	3925205.00	211.00	2.94
147	346017	477446.00	3935761.00	250.00	12.75
148	345015	474394.00	3928137.00	15.90	13.73
149	345016	474246.00	3928178.00	19.20	12.75
150	346018	482683.00	3926895.00	48.00	27.47
151	346019	480509.00	3927753.00	101.00	84.36
152	346020	479522.00	3931026.00	110.00	43.16
153	350006	521760.00	3894781.00	33.20	20.60
154	347007	515006.00	3915464.00	138.10	38.26
155	347008	512759.00	3917078.00	140.10	41.20
156	347009	511259.00	3916410.00	329.10	53.95
157	350007	512586.00	3915041.00	245.00	91.72
158	347010	513055.00	3919514.00	112.50	18.64
159	347011	511610.00	3919169.00	103.70	51.01
160	347012	509321.00	3918119.00	323.00	187.36
161	347013	511300.00	3920447.00	45.80	27.47
162	347014	510615.00	3920143.00	157.10	30.41

163	347015	511164.00	3922419.00	34.90	15.70
164	350008	517560.00	3896583.00	172.90	28.45
165	347016	515922.00	3918214.00	214.20	16.19
166	347017	503760.00	3925781.00	62.20	21.58
167	349004	495568.00	3924127.00	121.20	45.12
168	346021	494486.00	3924713.00	88.70	47.09
169	346022	493941.00	3925568.00	42.20	46.60
170	349005	495593.00	3922694.00	222.00	26.49
171	349006	495686.00	3922028.00	161.00	32.37
172	346023	489792.00	3924499.00	56.30	51.99
173	349007	491754.00	3923470.00	45.00	17.66
174	350009	516295.00	3896468.00	166.60	27.47
175	350010	517831.00	3913979.00	80.40	69.65
176	351011	527934.00	3903609.00	216.00	43.16
177	350011	520303.00	3910933.00	351.10	21.58
178	350012	517742.00	3912939.00	171.20	20.11
179	350013	518837.00	3912712.00	162.30	29.43
180	350014	517036.00	3911797.00	185.20	77.50
181	359014	612381.00	3897226.00	244.00	215.81
182	359015	600121.38	3894231.02	412.00	358.05
183	359016	600334.00	3886331.00	495.00	412.00
184	359017	605189.00	3895321.00	333.00	274.67
185	360029	614244.00	3905427.00	191.00	156.95
186	354006	604613.00	3902666.00	322.00	296.25
187	358019	570412.00	3884980.00	67.00	-9.81
188	358020	586177.00	3873800.00	160.00	98.10
189	358021	582531.00	3877315.00	72.00	24.52
190	358022	575999.00	3878771.00	26.00	0.00
191	358023	589367.00	3877106.00	137.00	93.19
192	359018	600537.00	3879872.00	283.00	274.67
193	359019	600895.00	3880474.00	396.00	343.34
194	359020	599015.00	3875388.00	274.00	245.24
195	359021	603759.00	3877296.00	221.00	196.19
196	359022	593957.00	3874318.00	277.00	240.33
197	358024	576469.00	3882238.00	91.00	34.33
198	359023	606182.00	3878119.00	207.00	191.29
199	359024	601925.00	3877204.00	235.00	206.00
200	358025	587146.00	3878754.00	34.00	19.62
201	358026	578852.00	3877008.00	43.00	19.62
202	358027	579134.00	3879506.00	70.00	34.33
203	358028	588983.00	3874915.00	186.00	156.95
204	358029	579403.00	3877722.00	53.00	24.52
205	358030	576052.00	3876704.00	58.00	39.24



206	358031	575630.00	3877172.00	38.00	19.62
207	358032	579755.00	3878002.00	59.00	34.33
208	358033	585619.00	3876792.00	97.00	49.05
209	358034	586136.00	3878492.00	115.00	44.14
210	358035	586788.00	3879145.00	131.00	63.76
211	359025	594114.00	3895763.00	302.00	255.05
212	358036	585329.00	3883413.00	318.00	284.48
213	360030	620216.53	3891492.58	360.00	309.00
214	360031	617196.00	3894492.00	328.00	289.38
215	358037	572383.00	3885242.00	132.00	24.52
216	359026	593998.00	3882575.00	311.00	137.33
217	354007	597882.00	3902797.00	98.00	93.19
218	359027	594110.00	3896225.00	304.00	274.67
219	354008	601315.00	3907611.00	17.00	9.81
220	354009	600648.00	3903998.00	38.00	23.54
221	354010	600903.00	3901567.00	46.00	34.33
222	359028	611247.00	3895714.00	283.00	220.72
223	359029	609839.00	3900378.00	312.00	206.00
224	359030	611140.00	3899663.00	211.00	196.19
225	359031	611460.00	3900154.00	308.00	206.00
226	354011	596924.00	3904974.00	79.00	0.00
227	354012	606814.00	3901589.00	358.00	328.62
228	354013	611156.00	3905302.00	156.00	5.89
229	368012	617883.00	3880968.00	169.00	142.24
230	354014	592769.00	3901141.00	212.00	161.86
231	359032	592322.00	3900397.00	185.00	163.82
232	359038	591079.00	591079.00	274.00	0.00
233	354015	592539.00	3901385.00	140.00	127.52
234	354016	593325.00	3906015.00	169.00	113.79
235	348010	474881.00	3900295.00	378.00	348.24
236	348011	471713.00	3900295.00	34.00	24.52
237	348012	468413.00	3901661.00	72.00	63.76
238	348013	468718.00	3902197.00	81.00	78.48
239	349008	483312.00	3903900.00	79.00	63.76
240	352007	563912.00	3918420.00	25.00	14.71
241	352008	567116.00	3918320.00	70.00	29.43
242	357013	564538.00	3894302.00	196.00	34.33
243	357014	563441.00	3884928.00	22.20	2.94
244	357015	563467.00	3884867.00	10.00	4.90
245	357016	563310.00	3885482.00	9.80	4.90
246	357017	563286.00	3885390.00	12.00	4.90
247	357018	556364.00	3891166.00	557.00	470.86
248	357019	551471.00	3888488.00	315.00	0.00

249	357020	546940.00	3893731.00	460.00	431.62
250	357021	549835.00	3896088.00	449.70	421.81
251	357022	546207.00	3898533.00	343.00	156.95
252	356004	543117.00	3899873.00	300.00	196.19
253	356005	540996.00	3899432.00	280.00	196.19
254	351012	540076.00	3901769.00	349.00	204.04
255	351013	541273.00	3905163.00	327.60	215.81
256	356006	529482.00	3895967.00	52.00	0.00
257	352009	548204.00	3912623.00	20.00	9.81
258	351014	538699.00	3904628.00	233.60	206.98
259	351015	540719.00	3910244.00	271.00	0.00
260	351016	538148.00	3909401.00	213.00	156.95
261	351017	537261.00	3910260.00	192.00	117.71
262	351018	541474.00	3905411.00	353.00	261.92
263	357023	565205.00	3886019.00	85.00	7.85
264	357024	553773.00	3888686.00	408.00	264.86
265	352010	553667.00	3910805.00	152.00	0.00
266	352011	557696.00	3916253.00	78.90	4.90
267	352012	557039.00	3916341.00	67.00	4.90
268	352013	561658.00	3916032.00	69.00	0.00
269	359033	594270.00	3896191.00	298.00	34.33
270	354017	596262.00	3909301.00	35.00	4.90
271	354018	594561.00	3909878.00	143.00	4.90
272	354019	591975.00	3917165.00	270.00	196.19
273	353006	589340.00	3918186.00	75.00	3.92
274	353007	585885.00	3915503.00	103.00	68.67
275	358038	582949.00	3889010.00	402.00	392.38
276	358039	573342.00	3890868.00	526.00	142.24
277	359034	593544.00	3892332.00	313.00	34.33
278	358040	578217.00	3885948.00	242.00	63.76
279	357025	567263.00	3895195.00	657.00	627.81
280	357026	567041.00	3891035.00	483.00	397.29
281	358041	571934.00	3889747.00	575.00	519.91
282	357027	565349.00	3897554.00	496.00	451.24
283	357028	565760.00	3896663.00	555.00	0.00
284	357029	564763.00	3898289.00	488.00	0.00
285	359035	594068.00	3897868.00	253.00	58.86
286	357030	561970.00	3900025.00	420.00	0.00
287	352014	560408.00	3910520.00	354.00	0.00
288	352015	562288.00	3908869.00	360.00	34.33
289	353008	571760.00	3908539.00	428.00	0.00
290	353009	576785.00	3911415.00	218.00	78.48
291	353010	568032.00	3917321.00	130.00	9.81

292	353011	570172.00	3917831.00	128.00	14.71
293	353012	578631.00	3916915.00	76.00	19.62
294	359036	592093.00	3898156.00	330.00	274.67
295	353013	578150.00	3911211.00	279.00	98.10
296	353014	579272.00	3909989.00	386.00	0.00
297	353015	582734.00	3906908.00	577.00	553.26
298	353016	576278.00	3911688.00	198.00	78.48
299	358042	575665.00	3885403.00	330.00	279.57
300	358043	575576.00	3886974.00	475.00	441.43
301	359037	593802.00	3899098.00	389.00	34.33
302	353017	589888.00	3901184.00	363.00	19.62
303	353018	590019.00	3902788.00	336.00	19.62
304	354020	593292.00	3909310.00	132.00	19.62
305	354021	591947.00	3907490.00	205.00	9.81
306	355003	706052.00	3905626.00	4.00	3.92
307	360032	635355.00	3895637.00	827.70	809.29
308	360033	631351.00	3894909.00	812.10	794.58
309	360034	633582.00	3894245.00	824.60	809.29
310	352016	547188.00	3913880.00	8.00	2.94
311	352017	547690.00	3914468.00	6.50	2.94
312	352018	548398.00	3914133.00	7.90	3.92
313	13/Г1	637911.06	3905252.00	130.0	128.49
314	13/Г2	605606.00	3877603.00	210.0	27.77
315	13/Г3	608919.81	3874622.00	300.0	62.53
316	13/Г4	578671.00	3873843.00	200.0	158.09
317	13/Г5	613966.00	3904473.00	170.0	170.41
318	13/Г7	562198.25	3908534.50	360.0	326.46
319	AKD12	688172.31	3892638.75	220.0	26.29
320	AKLY9	690125.00	3883824.00	570.0	186.09
321	F10	650601.00	3896848.00	140.0	140.25
322	F31	653748.63	3900519.75	307.7	273.41
323	F80	645145.00	3899370.00	355.0	123.67
324	IP33	559474.06	3890003.50	350.0	127.20
325	P18	563441.67	3884929.24	22.2	23.06
326	АЛ14	685400.00	3895171.00	189.0	124.20
327	АЛ16	688833.29	3897810.96	114.3	108.67
328	АЛ27	692188.00	3892421.00	174.0	117.20
329	АЛ30	688550.00	3888794.00	272.0	194.50
330	АЛ62	674899.00	3884270.00	577.0	421.00
331	АЛ63	670966.00	3882013.00	456.0	418.20
332	АЛ64	669168.00	3880854.00	517.0	411.20
333	АЛ7	675043.81	3891498.16	185.0	202.49
334	AM	593830.94	3898618.75	420.0	360.82

335	Γ128	570155.63	3913810.00	137.0	42.20
336	Γ3	579079.38	3877192.75	65.0	35.40
337	ΓΑΣ2	604449.94	3874091.50	270.0	17.46
338	ΓΚΠΣ5	654615.00	3904865.00	346.5	24.50
339	ΓΜΑ1	632806.44	3904539.00	80.0	74.44
340	Δ12	643152.15	3885918.84	884.0	245.50
341	Δ30	630956.00	3894604.00	930.0	241.50
342	Δ32	630597.00	3893699.00	859.8	254.60
343	Δ34	631947.00	3893241.00	826.2	241.60
344	Δ37	645475.00	3900839.00	351.6	214.30
345	Δ43	634027.00	3900208.00	600.0	224.60
346	Δ47	628078.00	3888816.00	1004.0	231.40
347	Δ48	621017.15	3890660.95	359.0	266.20
348	Δ5	657226.00	3886963.00	17.9	8.40
349	Δ6	657003.00	3887188.00	24.9	9.10
350	Δ65	655314.00	3893400.00	0.5	-1.20
351	ΖΑ	581361.81	3884475.00	350.0	54.16
352	ΖΓ6	223771.00	4190354.00	1.5	12.82
353	ΖΓ90	219997.60	4192459.00	4.3	2.50
354	ΖΓ93	221897.10	4191215.00	5.0	3.07
355	ΙΗ2	591783.19	3907436.50	236.5	228.55
356	ΙΗ21	621671.00	3893672.00	380.0	264.71
357	ΙΗ27	589906.38	3902178.75	420.0	362.69
358	ΙΡ1	541321.44	3904662.25	327.0	121.11
359	ΙΡ20	562175.44	3894247.00	204.0	166.01
360	ΙΡ41	544007.50	3905288.25	400.0	377.13
361	ΙΧ2	525876.63	3908293.00	180.0	2.92
362	Κ38	474226.00	3928483.00	12.4	7.20
363	ΚΓ2	617194.31	3893875.50	340.0	30.26
364	Λ32	524227.00	3912945.00	2.8	1.10
365	Λ33	523675.00	3913879.00	5.0	2.40
366	Λ5	525320.00	3909336.00	28.0	2.65
367	Μ14	587776.24	3878964.26	64.0	62.83
368	Μ25	574312.69	3880606.32	80.0	77.84
369	ΝΗ13	590304.00	3887344.00	560.0	110.50
370	ΝΗ23	607866.00	3895452.00	429.0	120.40
371	ΝΗ24	610771.72	3896769.30	315.0	113.75
372	ΝΗ26	611607.00	3894985.00	360.0	118.60
373	ΝΗ6	589487.00	3895679.00	500.0	135.60
374	Π1	655304.38	3893446.25	1.0	0.80
375	Π34	582476.19	3888914.00	430.0	145.30
376	Π40	529757.75	3904423.25	186.0	139.40
377	Π5	522857.44	3913035.75	5.0	2.40

378	П50	701331.00	3887774.25	280.0	123.40
379	П51	561188.00	3918467.50	20.0	9.40
380	П90	542262.56	3895158.25	135.1	111.20
381	ПАЛМ	595199.44	3910178.75	7.0	4.60
382	Р10	561159.00	3918925.00	27.6	18.40
383	Р13	552766.00	3900818.00	459.0	147.50
384	Р14	557775.00	3899955.00	587.0	154.60
385	Р15	557777.00	3895766.00	566.0	143.40
386	Р16	556479.00	3901087.00	449.0	127.60
387	Р23	555430.00	3890853.00	405.0	136.40
388	Р26	552692.00	3891822.00	584.0	142.60
389	Р30	548818.00	3897160.00	397.0	123.40
390	Р36	542658.00	3895278.00	135.1	95.40
391	Р37	537237.00	3897660.00	208.0	105.20
392	Р39	531951.00	3905649.00	175.0	99.40
393	Р40	531095.00	3904845.00	185.0	106.70
394	Р47	551949.00	3897794.00	569.0	264.50
395	Т101	653032.86	3899682.41	283.1	273.50
396	Ф31	547252.38	3913076.50	10.0	5.93
397	Ψ14	587251.00	3915177.00	37.0	22.40
398	Ψ16	578405.00	3890621.00	870.0	345.10
399	Ψ17	582974.00	3888979.00	402.0	324.60
400	Ψ20	575102.00	3892238.00	1300.0	346.40
401	Ψ23	566779.00	3892296.00	464.0	324.50
402	Ψ26	565213.00	3895396.00	510.0	317.90
403	Ψ34	574413.00	3908345.00	443.0	305.80
404	Ψ35	576109.00	3907774.00	431.0	294.60
405	Ψ44	586651.00	3888243.00	551.0	319.00
406	Ψ45	586170.00	3888208.00	484.0	334.00
407	Ψ48	575317.00	3887618.00	452.0	329.40
408	Ψ49	595123.00	3910481.00	2.0	1.50
409	Ψ50	582567.00	3889253.00	388.0	295.40
410	13/Г10	516116.59	3896155.25	165.0	148.46
411	А10	616266.00	3871174.00	11.0	5.40
412	А4	597704.00	3871240.00	730.0	432.50
413	АЛ33	690742.00	3886907.00	291.0	156.40
414	АЛ50	702169.00	3888859.00	262.0	145.30
415	Δ10	650603.00	3880608.00	650.0	324.60
416	Δ11	650216.53	3882942.27	488.0	317.00
417	Δ13	643244.75	3883749.26	527.0	332.10
418	Δ14	642649.44	3883616.46	504.0	341.20
419	Δ15	643231.52	3878364.97	255.2	224.20
420	Δ16	642084.00	3878661.00	705.0	346.10

421	Δ18	641502.00	3876135.00	258.0	219.40
422	Δ19	644673.50	3875401.63	26.2	14.20
423	Δ21	650851.61	3878794.09	331.0	127.24
424	Δ23	651565.91	3880071.54	445.0	301.50
425	Δ53	634252.70	3877998.80	631.0	319.40
426	Δ54	635588.85	3880446.20	1135.0	431.50
427	Δ55	632863.64	3879797.97	859.0	429.70
428	Δ56	629450.50	3881332.56	735.0	405.40
429	ΙΧ3	513852.13	3913358.50	300.0	112.44
430	Κ39	460272.00	3919204.00	3.0	1.20
431	Λ34	518243.00	3914769.00	56.3	24.60
432	Λ35	517022.00	3913019.00	57.0	26.80
433	Λ36	512398.00	3919991.00	38.0	22.40
434	Λ37	512366.00	3919937.00	38.0	23.40
435	Λ38	511439.00	3921200.00	18.0	14.90
436	Λ39	514058.00	3920742.00	22.9	18.40
437	Λ40	499183.00	3924213.00	103.0	65.40
438	Λ41	493948.00	3925666.00	39.8	26.70
439	Λ42	493545.00	3925852.00	19.0	14.90
440	Λ43	496280.00	3917236.00	202.0	63.40
441	Π1	513936.19	3920472.50	25.0	19.60
442	Π2	517376.22	3914378.75	50.0	25.60
443	Π2	471713.00	3900295.00	34.0	10.79
444	Π3	493797.19	3925512.25	60.0	34.80
445	Π4	495771.03	3917240.75	350.0	62.70
446	ΣΠΓ1	479252.72	3930730.75	180.0	54.63
447	ΤΟΓ2	471631.41	3920464.50	250.0	9.33
448	Χ1	485540.31	3927292.04	86.0	43.10
449	Γ188	491511.00	3923474.00	50.0	13.20
450	Γ122	493910.00	3925268.00	41.0	6.25
451	Γ227	502049.00	3926569.00	31.3	6.54
452	Γ154	495227.73	3923859.86	121.1	74.92
453	Γ157	495534.00	3921840.00	181.2	132.77
454	Γ493	489775.00	3924323.00	52.5	9.08
455	Γ451	494353.00	3927936.00	75.0	2.20
456	Γ3	460861.00	3924219.00	43.2	36.20
457	Γ464	464446.50	3926001.50	181.4	159.76
458	Γ20	463810.00	3927971.00	124.6	110.64
459	Γ706	466630.77	3929314.23	29.0	8.62
460	Γ83	474246.00	3927850.00	14.0	3.16
461	Γ710	508581.00	3937470.00	26.0	18.33
462	Γ108	479603.00	3932566.00	69.3	27.60
463	Γ509	484699.00	3922293.00	140.0	119.30

464	Γ610	478591.00	3921467.00	455.0	27.20
465	Γ68	477058.00	3925728.00	178.3	113.20
466	Γ42	517067.00	3920006.00	96.1	5.23
467	Γ449	469188.00	3924340.00	79.7	12.02
468	Γ463	509878.00	3896043.00	418.0	183.20
469	Γ459	517351.00	3896261.00	183.0	154.22
470	Γ418	521616.00	3894503.00	31.0	16.43
471	Γ704	518602.78	3912387.98	162.0	159.40
472	Γ442	512908.00	3919224.00	107.6	101.10
473	Γ565	457675.00	3912993.00	50.0	12.70
474	Γ430	459786.00	3905117.00	132.5	129.31
475	Γ481	483306.00	3903905.00	101.0	19.70
476	Γ453	468420.00	3901668.00	80.0	16.40
477	Γ657	482114.00	3931926.00	13.0	6.74
478	M25	574312.69	3880606.32	80.0	77.84

## Παράρτημα Β: Πίνακας δεδομένων μέσου ύψους βροχοπτώσεων

A/A	Ονομασία	x	y	Υψόμετρο z (m)	Μέσος όρος βροχοπτώσεων χειμερινής περιόδου 2007-2016 (mm)	Μέσος όρος βροχοπτώσεων θερινής περιόδου 2007-2016 (mm)
1	Avdou	630233	3899448	230	699.03	59.36
2	Ag.Varvara	590910.3	3887874	570	759.5	59.54
3	Ag. Kurillos	583036.3	3870700	450	609.27	43.83
4	Armata	622749.8	3891949	450	693.41	51.61
5	Asimi	600049.1	3877943	200	608.89	30.52
6	Axedrias	612351.9	3873325	680	656.08	14.12
7	Vagwnia	591039.6	3874936	190	612.07	26.5
8	Voni	613595.2	3895526	330	664.01	42
9	Vorizia	577227.7	3889597	520	978.73	59.83
10	Gergeri	584536.3	3887230	450	779.32	76.92
11	Demati	617026.3	3877270	210	613.07	28.42
12	Zaros	581798.6	3887788	500	791.85	84.33
13	Kaluvia	612261.3	3880719	200	507.13	52.07
14	Kapetaniana	594138.4	3869421	800	664.15	50.59
15	Kassanoi	620116.3	3884740	320	593.61	40.4
16	Kasteli	621157.8	3897473	350	626.98	37.31

17	Kapsaloi	626716.3	3873280	10	613.75	39.55
18	Krouswnas	589276.3	3898390	500	661.86	23.4
19	Lagolio	571666.3	3884860	140	632.14	54.47
20	Metaksoxwri	603058.3	3888005	430	596.33	80.42
21	Moroni	582134	3883486	400	735.93	45.82
22	Partira	611476.3	3886360	400	666.37	40.74
23	Pompia	578536.3	3874150	150	650.08	93.95
24	Praitwria	604704.6	3876931	225	610.58	14.87
25	Prof. Hlias	600316.3	3896140	380	727.97	104.07
26	Tefeli	605866.3	3883420	360	664.51	81.66
27	Foinikia	600526.3	3904810	40	635.11	61.93
28	Hrakleio	607349.8	3910240	39	437.46	51.28
29	Katsidoni	694096.3	3888550	480	699.13	51.96
30	Neapoli	645796.3	3902380	240	645.84	72.07
31	Eksw potamoi	639586.3	3895960	840	806.15	62
32	Kalo xwrio	657492.4	3887454	20	538.24	31.54
33	Malles	644896.3	3882850	590	734.41	39.72
34	Marwnia	689776.3	3889690	150	666.6	41.55
35	Mythoi	645166.3	3877390	200	538.47	33.89
36	Palaiokastro	705496.3	3898540	25	518.38	74.65
37	Paxeia ammos	664846.3	3884170	50	694.41	25.23
38	Siteia	690436.3	3899320	114	416.98	56.71
39	Stauroxwri	676876.3	3883150	325	840.58	28.24
40	Ag.Gallini	562696.3	3883780	20	633.73	36.99
41	Volewnes	552861.2	3902359	260	696.64	78.96
42	Vuzari	563266.3	3895810	310	670.91	34.21
43	Garazo	571668.1	3911363	260	736.01	87.48
44	Gerakari	552778.2	3897950	1000	898.62	76.57
45	Kavousi	554179.6	3906323	580	759.54	77.87
46	Leukogeia	540774.3	3893055	90	753.59	48.58
47	Melampes	558436.3	3887380	560	667.42	68.69
48	Spuli	547996.3	3897760	390	859.87	151.48
49	Askufou	517156.3	3906520	740	1500.9	150.18
50	Kaluves	514926.6	3922549	20	567.39	56.8
51	Mouri	525676.3	3908980	50	829.16	80.21
52	Palaia Roumata	479746.3	3917260	316	739.69	39.62
53	Prasses	486286.5	3914250	520	933.14	104.82
54	Ag.Nikolaos	656527	3895336	30	447.75	45.03
55	Alikianos	491677	3922838	95	563.89	40.4
56	Anwgeia	580729	3904913	801	835.19	110.24
57	Vruses	520709	3913179	58	732.77	104.49
58	Elos	467012	3913188	535	590.92	17.64
59	Hrakleio Dutika	599180	3908328	85	579.61	22.13



60	Hrakleio knwssos	605660	3906728	115	539.68	18.94
61	Hrakleio Port	603223	3911426	10	282.28	38.5
62	Ierapetra	658659	3875047	5	349.92	45.78
63	Lentas	584331	3865440	15	477.56	13.55
64	Moiros	579929	3878902	54	441.64	21.1
65	Palaioxwra	471152	3899138	5	478.76	50.91
66	Plakias	535708	3893985	5	571.14	43.21
67	Platanias	489424	3930137	12	569.46	6.84
68	Purathi	608295	3884042	311	552.78	23.59
69	Rethumno	540246	3913770	39	426.24	64.69
70	Samaria	492305	3907050	1250	1339.81	121.46
71	Samaria Faraggi	496086	3904694	349	731.08	56.96
72	Semprwnas	483626	3914272	640	615.18	13.42
73	Staurakia	596528	3901374	245	578.33	9.98
74	Sfakia	501479	3898285	770	561.79	33.06
75	Tzermiadwn	633519	3893713	820	859.22	140.37
76	Falassarna	461939	3927443	10	464.65	46.35
77	Finokalia	651369	3911236	250	486.97	20.33
78	Fourfouras	564537	3896312	471	737.15	69.47
79	Fragma potamwn	551245	3904357	240	694.21	102.01
80	Chania	506047	3931907	137	503.17	67.53
81	Chania Center	501193	3929650	7	508.85	42.26