



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

**<< Γεωστατιστική Ανάλυση δεδομένων στάθμης υπόγειων υδάτων στο υδατικό  
διαμέρισμα της Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας >>**

**Διπλωματική εργασία**

ΝΙΚΟΛΑΟΣ-ΣΤΑΥΡΟΣ ΠΕΤΡΟΥ

Εξεταστική επιτροπή:

Επίκουρος Καθ. Βαρουχάκης Εμμανουήλ (Επιβλέπων) ΜΗΧΟΠ

Καθ. Παρτσινέβελος Παναγιώτης ΜΗΧΟΠ

Καθ. Χριστόπουλος Διονύσιος ΗΜΜΥ

Χανιά Φεβρουάριος, 2024

## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιείται γεωστατιστική ανάλυση σε δεδομένα στάθμης υπογείων υδάτων στην περιοχή της Ανατολικής Στέρας Ελλάδας. Η τελική μελέτη γίνεται σε περιοχές μεταλλευτικών δραστηριοτήτων. Οι εκτιμήσεις της χωρικής ανάλυσης είναι ιδιαιτέρως σημαντικές για την πλήρη εικόνα της μεταβλητότητας της στάθμης υπογείων υδάτων στην περιοχή και για την λήψη ενδεχόμενων μέτρων.

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η χωρική ανάλυση και αξιολόγηση της συμπεριφοράς των υπογείων υδάτων στις μεταλλευτικές περιοχές. Για να επιτευχθεί ο σκοπός κατασκευάζονται χάρτες εκτίμησης της χωρικής μεταβλητότητας της στάθμης των υπογείων υδάτων. Η ανάλυση υλοποιήθηκε σε περιβάλλον MATLAB χρησιμοποιώντας ενενήντα τρεις γεωτρήσεις παρακολούθησης στάθμης υπογείων υδάτων. Η εκτίμηση της στάθμης στην περιοχή μελέτης έγινε με τον γραμμικό εκτιμητή Ordinary kriging ακολουθώντας και υλοποιώντας τα ενδεδειγμένα στάδια γεωστατιστικής ανάλυσης: προκαταρκτική ανάλυση δεδομένων, έλεγχος ύπαρξης τάσεων, χωρική συσχέτιση δεδομένων και χωρική εκτίμηση.

Αρχικά για την ποιοτική ανάλυση των δεδομένων εφαρμόστηκε προκαταρκτική ανάλυση των στατιστικών μέτρων και έλεγχος κανονικότητας. Από τον έλεγχο διαπιστώθηκε ότι χρειάζεται μετασχηματισμός των δεδομένων. Για την επίτευξη της κανονικής κατανομής χρησιμοποιείται λογαριθμικός μετασχηματισμός. Στη συνέχεια σχεδιάστηκε το διάγραμμα Voronoi. Επίσης εφαρμόστηκε έλεγχος ύπαρξης τάσεων. Βρέθηκε τάση 1ου βαθμού και κρίθηκε ότι πρέπει να αφαιρεθεί από τα δεδομένα. Έπειτα υπολογίστηκε το εμπειρικό βαριόγραμμα και έγινε προσαρμογή του κατάλληλου θεωρητικού μοντέλου βαριογράμματος. Στο επόμενο βήμα πραγματοποιήθηκαν εκτιμήσεις της στάθμης υπογείων υδάτων στην περιοχή και της αβεβαιότητας των εκτιμήσεων. Τέλος, έγινε η αντιστροφή του λογαριθμικού μετασχηματισμού στην προϋπάρχουσα κλίμακα δεδομένων. Οι χάρτες εκτίμησης που προέκυψαν είχαν ικανοποιητική ακρίβεια ώστε συνδυασμένοι με τον χάρτη χρήσεων γης να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα. Η επισήμανση των περιοχών μεταλλευτικών δραστηριοτήτων ως ένα από τα κύρια ενδιαφέροντα ενισχύει τη σημασία της μελέτης, καθώς οι εκμεταλλεύσεις μεταλλείων μπορεί να επηρεάσουν σοβαρά την υδρογεωλογική ισορροπία μιας περιοχής. Είναι πιθανό να παρατηρηθούν αλλαγές στη

στάθμη υπογείων υδάτων λόγω της εξόρυξης, αποθετικών διαδικασιών, ή ακόμη και ρύπανσης που σχετίζεται με τη μεταλλευτική δραστηριότητα.

Η δομή της διπλωματικής αποτελείται από το 1ο κεφαλαίο στο οποίο αναφέρονται τα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης, ο σκοπός της διπλωματικής και στοιχεία για τα υπόγεια ύδατα. Το 2ο κεφαλαίο πραγματεύεται το θεωρητικό υπόβαθρο της γεωστατιστικής ανάλυσης. Το 3ο κεφαλαίο παρουσιάζει την επεξεργασία των δεδομένων και περιγράφονται εν συντομία τα αποτελέσματα που προκύπτουν. Στο 4ο κεφαλαίο αναλύονται τα κύρια συμπεράσματα και περιγράφονται προτάσεις για περαιτέρω ερευνά που εστιάζουν στην εξέλιξη της παραπάνω διαδικασίας

## Abstract

In this thesis, a geostatistical analysis is conducted on groundwater level data in the region of Eastern Sterea, Greece. The final study focuses on areas with mining activities. The spatial analysis estimations are particularly important for a comprehensive understanding of groundwater level variability in the region and for the implementation of potential measures. The purpose of the thesis is the spatial analysis and evaluation of the behaviour of groundwater in mining areas. To achieve this goal, maps shall be constructed to estimate the spatial variability of groundwater levels. The analysis was implemented in MATLAB using data from ninety-three groundwater monitoring wells. The estimation of the groundwater level in the study area was performed using the Ordinary Kriging interpolation method, following and implementing the recommended steps of geostatistical analysis: preliminary data analysis, trend detection, spatial data correlation, and spatial estimation. Firstly, for the qualitative data analysis, a preliminary analysis of statistical measures and normality checks was applied. The data examination revealed the need for a transformation. To achieve a normal distribution, a logarithmic transformation is employed. Subsequently, a Voronoi diagram was generated, and trend detection was carried out. A first-order trend was identified and considered for removal from the data. The empirical variogram was computed, and an exponential variogram model was fitted. The next step involved the estimation of groundwater levels in the area and the assessment of the uncertainty of the estimates. Finally, the reverse logarithmic transformation was applied to bring the data back to its original scale. As a result, estimation maps showed satisfactory accuracy, allowing useful conclusions when combined with the land use map. Emphasizing on mining areas as one of the main interests enhances the significance of the study, as mining operations can significantly impact the hydrogeological balance of a region. Changes in groundwater levels may be observed due to mining, deposition processes, or pollution related to mining activities. The structure of the thesis consists of the first chapter, which outlines the characteristics of the study area, the purpose of the thesis, and information about groundwater. The second chapter elaborates the theoretical background of geostatistical analysis. The third chapter presents the data processing and briefly describes the results obtained. The fourth chapter analyses the main conclusions and provides recommendations for further research focusing on the development of the above procedure.

## Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου κ. Εμμανουήλ Βαρουχάκη για την μεγάλη ευκαιρία, που χωρίς δισταγμό μου δόθηκε. Ευχαριστώ την επιτροπή μου τον κ. Παρτσινέβελο και τον κ. Χριστόπουλο. Η συνεργασία μας ήταν άψογη, όπως και με τον κ. Ανδρέα Παυλίδη θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την βοήθεια καθόλη την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Στο τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και φίλους που με στήριξαν ο καθένας με τον τρόπο του όλα αυτά τα χρονιά σπουδών στο Πολυτεχνείο.

## Περιεχόμενα

Περίληψη .....	2
Abstract.....	4
Ευχαριστίες.....	4
1 Εισαγωγή .....	10
1.1 Κλιματική Αλλαγή .....	12
1.2 Σκοπός της διπλωματικής .....	12
1.3 Περιοχή Μελέτης.....	13
1.3.1 Φυσικά Χαρακτηριστικά της Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας.....	13
1.3.2 Γεωλογία-Υδρογεωλογία.....	15
1.3.3 Χρήσεις Γης και Υδάτων.....	19
1.3.4 Συστήματα Επιφανειακών Υδάτων .....	21
1.3.5 Συστήματα Υπόγειων Υδάτων .....	23
1.3.6: Καταγραφή Ποσοτικής Κατάστασης των υπόγειων υδάτων .....	24
2: Βασικές Έννοιες Στατιστικής-Γεωστατιστικής .....	25
2.1: Τυχαία Μεταβλητή-Τυχαία Πεδία .....	26
2.1.1 Μέση τιμή.....	26
2.1.2 Διάμεσος.....	27
2.1.3 Διασπορά .....	27
2.1.4 Τυπική απόκλιση .....	28
2.1.5 Ιστόγραμμα.....	28
2.1.6 Συντελεστής Ασυμμετρίας .....	28
2.1.7 Συντελεστής Κύρτωσης.....	29
2.2 Βασικές Έννοιες Τυχαίων Πεδίων .....	29
2.2.1 Διάγραμμα Voronoi.....	30
2.2.2 Τάση .....	31
2.2.3 Διακύμανση .....	31
2.3 Κατηγορίες Σφαλμάτων .....	32
2.3.1 Μέτρα επιβεβαίωσης.....	32
2.4 Συνάρτηση Συνδιασποράς.....	33
2.4.1 Στατιστική Ομοιογένεια .....	34
2.4.2 Στατιστική Ισοτροπία .....	35

2.4.3 Μοντέλα Συνδιασποράς .....	35
2.4.4 Κριτήρια Αποδοχής Συνδιασποράς .....	36
2.5 Βαριογραφία.....	37
2.5.1 Βαριόγραμμα .....	37
2.5.2 Ιδιότητες βαριογράμματος.....	38
2.5.3 Μοντέλα Βαριογράμματος .....	39
2.5.4 Κριτήρια Αποδοχής Βαριογράμματος.....	40
2.6 Εκτίμηση Τυχαίων Πεδίων (Μέθοδος Kriging).....	41
2.6.1 Απλό Kriging .....	43
2.6.2 Κανονικό Kriging .....	44
2.6.3 Regression Kriging.....	45
2.6.4 Διασταυρωμένη επαλήθευση των εκτιμήσεων.....	46
3 Γεωστατιστική Ανάλυση Δεδομένων .....	47
3.1 Περιγραφή των Δεδομένων.....	47
3.2 Στατιστική Ανάλυση .....	49
3.2.1 Στοιχεία και Διαγράμματα Κατανομών Πιθανότητας.....	50
3.2.2 Μάσκα .....	52
3.2.3 Voronoi.....	52
3.2.4 Τάση .....	53
3.2.5 Βαριογραφία .....	54
3.2.6 Κανονικό Kriging στους λογάριθμους των διακυμάνσεων .....	56
3.2.7 Κανονικό Kriging στις εκτιμώμενες τιμές του αντίστροφου μετασχηματισμού .....	59
3.3 Αξιολόγηση υπογείων υδάτων των μεταλλευτικών περιοχών.....	61
4 Συμπεράσματα .....	67
4.1 Προτάσεις για μελλοντική ερευνά .....	69
Παραρτήματα.....	70
Βιβλιογραφία .....	74

## Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1. 1 Μορφολογικός χάρτης, διάκριση λεκανών απορροής (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2017) .....	14
Εικόνα 1. 2 Γεωλογικός χάρτης Αν. Στερεάς Ελλάδας ( Τσιούμας & Ζοράπας , 2010) .....	16
Εικόνα 1. 3 Γεωλογικό υπόβαθρο ( Τσιούμας & Ζοράπας , 2010).....	16
Εικόνα 1. 4 Υδρολιθολογικός χάρτης, διάκριση γεωλογικών σχηματισμών σύμφωνα με το είδος της υδροπερατότητας (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2013).....	17
Εικόνα 1. 5 Χάρτης χρήσεων Γης, διάκριση των χρήσεων γης σύμφωνα με την λεκάνη απορροής (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2017).....	20
Εικόνα 1. 6 Επιφανειακά υδατικά συστήματα Αν. Στερεάς Ελλάδας (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2017) .....	22
Εικόνα 1. 7 Χάρτης υπογείων υδατικών συστημάτων Αν. Στερεάς Ελλάδας (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2017) .....	23
Εικόνα 1. 8 Χάρτης ποσοτικής κατάστασης των υπόγειων υδατικών συστημάτων Αν. Στερεάς Ελλάδας (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2017) .....	<b>Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.</b>
 Εικόνα 2. 1 Παράδειγμα ιστογράμματος κανονικής κατανομής (Wackernagel, 2013).....	28
Εικόνα 2. 2 Παραδείγματα κύρτωσής λεπτοκυρτικών ιστογραμμάτων (δεξί σχήμα) και πλατυκυρτικών ιστογραμμάτων (αριστερό σχήμα) (Wackernagel, 2013) (Χριστόπουλος, “Εφαρμοσμένη Γεωστατιστική”, 2014).....	29
Εικόνα 2. 3 Παράδειγμα διαγράμματος Voronoi πραγματικών δεδομένων .....	31
Εικόνα 2. 4 Διάγραμμα βαριογράμματος που αποτελείται από τα σημεία του εμπειρικού βαριογράμματος και την χάραξη του θεωρητικού μοντέλου που προσαρμόζεται καλύτερα. Επίσης διακρίνονται 3 χαρακτηριστικά ενός θεωρητικού μοντέλου, το φαινόμενο κόκκου(nugget effect), η ακτίνα επιρροής(Range), και το άνω φράγμα(sill) (Biswas & Cheng Si, 2013).....	38
 Εικόνα 3. 1 Θέσεις παρακολούθησης υπόγειων υδάτων στο σύστημα ΕΓΣΑ '87 .....	48
Εικόνα 3. 2 Απεικόνιση χρήσεων γης των μεταλλευτικών περιοχών, όπου ο πάνω αριστερά χάρτης απεικονίζει όλες τις περιοχές των μεταλλείων, ενώ οι άλλες 3 ξεχωριστά τα μεταλλεία σε εμφανέστερη κλίμακα .....	48
Εικόνα 3. 3 Διαγράμματα διασποράς κοινών γεωτρήσεων για τις χρονιές 18-21 με σταθερή μεταβλητή την χρονιά του 18.....	49
Εικόνα 3. 4 Ιστόγραμμα και διάγραμμα κανονικής πιθανότητας σε λογαριθμισμένες τιμές .....	51
Εικόνα 3. 5 Διάγραμμα αθροιστικής κατανομής πιθανότητας λογαριθμισμένων τιμών .....	51
Εικόνα 3. 6 Μάσκα Αν. Στερεάς Ελλάδας.....	52
Εικόνα 3. 7 Απεικόνιση Voronoi με την χρήση μάσκας σε απολογαριθμισμένα δεδομένα .....	53
Εικόνα 3. 8 Απεικόνιση Τάσης με την χρήση μάσκας σε λογαριθμισμένα δεδομένα .....	54
Εικόνα 3. 9 Εκθετικό βαριόγραμμα σε δεδομένα λογαριθμικής διακύμανσης.....	55
Εικόνα 3. 10 Χάρτης εκτίμησης Κανονικού Kriging σε λογαριθμισμένες εκτιμώμενες τιμές στάθμης.....	57
Εικόνα 3. 11 Χάρτης τυπικής απόκλισης σφάλματος.....	58
Εικόνα 3. 12 Ιστόγραμμα της διασταυρωμένης επαλήθευσης των λογαριθμισμένων τιμών .....	59
Εικόνα 3. 13 Χάρτης εκτίμησης Κανονικού Kriging σε απολογαριθμισμένες εκτιμώμενες τιμές στάθμης υδάτων .....	60
Εικόνα 3. 14 Ιστόγραμμα της διασταυρωμένης επαλήθευσης μεταξύ των εκτιμήσεων και των δεδομένων της στάθμης .....	61
Εικόνα 3. 15 Χάρτης εκτίμησης Κανονικού Kriging σε στάθμες υπόγειων νερών και συμπεριλαμβανομένων των μεταλλείων και των κοντινών γεωτρήσεων των δυο μεταλλείων..	63



## Λίστα Πινάκων

Πίνακας 3. 1 Συντελεστές συσχέτισης των δεδομένων με τις άλλες χρονιές .....	50
Πίνακας 3. 2 Στοιχεία κατανομών πιθανότητας σε λογαριθμικές τιμές στάθμης.....	50
Πίνακας 3. 3 Γραμμικοί συντελεστές τάσης σε λογαριθμικά δεδομένα .....	54
Πίνακας 3. 4 Τετραγωνικά σφάλματα προτύπων μοντέλων βαριογράμματος <b>..Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.</b>	
Πίνακας 3. 5 Παράμετροι Βαριογράμματος .....	56
Πίνακας 3. 6 Σφάλματος διασταυρωμένης επαλήθευσης σε λογαριθμικές διακυμάνσεις.....	58
Πίνακας 3. 7 Σφάλματα διασταυρωμένης επαλήθευσης σε απολογαριθμικές τιμές στάθμης....	60
Πίνακας 3. 8 Κοντίνες κοινές γεωτρήσεις παρακολούθησης υπογείων υδάτων των δυο κοντινών ορυχείων της Λάρκο.....	64
Πίνακας 3. 9 Έλεγχος επιρροής των γεωτρήσεων παρακολούθησης σε σχέση με τα μεταλλεία	64
Πίνακας 1. 11 Υπόγεια υδατικά συστήματα της Αν. Στέρας Ελλάδας .....	70
Πίνακας 1. 12 Ποσοτικής κατάστασης υπογείων υδατικών συστημάτων της Αν. Στέρας Ελλάδας.....	72

## 1 Εισαγωγή

Τα υπόγεια ύδατα είναι ένας ευάλωτος φυσικός πόρος που είναι ιδιαίτερα σημαντικός τόσο μεμονωμένα για τον άνθρωπο όσο και για όλο το οικοσύστημα. Κοντά στο ένα τρίτο της παγκόσμιας απόληψης γλυκού νερού χρησιμοποιείται για την κάλυψη αναγκών, γεωργικής, βιομηχανικής και οικιακής χρήσης. Σχεδόν 2 δισεκατομμύρια άνθρωποι παγκοσμίως εξυπηρετούνται από την χρήση των υπογείων υδάτων. Επίσης αναγνωρίζεται από πολλούς φορείς που ασχολούνται με τα υπόγεια ύδατα ότι πολλές περιοχές εμφανίζουν λειψυδρία λόγω της παρατεταμένης χρήσης τους, της κλιματικής αλλαγής, της έλλειψης εμπλουτισμού και των ανθρωπογενών πιέσεων κ.α. Στα επόμενα χρόνια οι προβλέψεις δηλώνουν σταδιακή μείωση των υδατορευμάτων και τεράστιες αλλαγές ως προς διαθεσιμότητα των συστημάτων επιφανειακών υδάτων που είναι άμεσα συνδεδεμένα με τα υπόγεια ύδατα (Shamsudduha & Taylor, 2020), (Varouchakis, Solomatine, Perez, Jomaa, & Karatzas, 2023).

Το υπόγειο νερό (υπόγεια νερά) στον ελληνικό χώρο παίζει σημαντικό ρόλο στην υδρολογία και τη γεωλογία της περιοχής. Είναι σημαντικό για την υποστήριξη της υδρολογικής ισορροπίας και τη διατήρηση του εδάφους και των φυτών. Οι υδρογεωλογικές συνθήκες στην Ελλάδα είναι ποικίλες, καθώς υπάρχουν διάφορα εδαφικά χαρακτηριστικά και γεωλογικές σχηματώσεις. Το υπόγειο νερό συχνά αποτελείται από υδροφορείς στρώσεις, όπως παραδείγματος χάριν παχιές στρώσεις ασβεστολιθικών πετρωμάτων που μπορούν να συγκρατούν μεγάλες ποσότητες νερού. Η διαχείριση του υπογείου νερού είναι σημαντική για την εξισορρόπηση της υδρολογικής κατάστασης και την αποφυγή προβλημάτων όπως η υπερθέρμανση του εδάφους, η ξηρασία, και άλλα περιβαλλοντικά ζητήματα. Επίσης, η ανταλλαγή νερού μεταξύ του υπογείου και επιφανειακού υδάτινου συστήματος επηρεάζει τη διαθεσιμότητα νερού για αρδευτικούς σκοπούς, καταναλώσεις και άλλες ανθρώπινες δραστηριότητες. Η παρακολούθηση, η διαχείριση και η προστασία των υπογείων νερών είναι σημαντικές για τη διατήρηση της βιωσιμότητας του ύδατος σε μια περιοχή.

Η διαχείριση των υπογείων υδάτων σε μεταλλευτικές περιοχές αποτελεί ένα σημαντικό ζήτημα, καθώς η εξόρυξη μεταλλευμάτων μπορεί να έχει σημαντικές επιπτώσεις στον υδρολογικό κύκλο. Οι προκλήσεις περιλαμβάνουν τη μείωση της στάθμης των υπογείων υδάτων, τη ρύπανση λόγω των χημικών που χρησιμοποιούνται στη μεταλλευτική διαδικασία, και την αλλοίωση της ποιότητας του νερού.

Ορισμένα στοιχεία που πρέπει να ληφθούν υπόψη στη διαχείριση των υπογείων υδάτων σε μεταλλευτικές περιοχές περιλαμβάνουν:

- Παρακολούθηση και Έρευνα:
  1. Συστηματική παρακολούθηση της στάθμης υπογείων υδάτων για την καταγραφή των αλλαγών.
  2. Εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων και χημικών αναλύσεων για την αξιολόγηση της ποιότητας του νερού.
- Κανονιστικά Μέτρα:
  1. Θέσπιση κανόνων και κανονισμών για τον περιορισμό των επιπτώσεων της μεταλλευτικής δραστηριότητας στα υπόγεια ύδατα.
  2. Καθορισμός περιοριστικών παραμέτρων για τη χρήση χημικών ουσιών στη μεταλλευτική διαδικασία.
- Συνεργασία με Ενδιαφερόμενους:
  1. Ενθάρρυνση της ενεργού συμμετοχής των ενδιαφερομένων μερών, συμπεριλαμβανομένων των τοπικών κοινοτήτων και μη κυβερνητικών οργανώσεων.
- Εκπαίδευση και Ευαισθητοποίηση:
  1. Εκπαίδευση των εργαζομένων στη μεταλλευτική βιομηχανία για τις βέλτιστες πρακτικές προστασίας του υδάτινου περιβάλλοντος.

Η εφαρμογή αυτών των μέτρων απαιτεί στενή συνεργασία μεταξύ των αρμόδιων αρχών, της βιομηχανίας, και της τοπικής κοινότητας, με στόχο τη διασφάλιση της βιώσιμης διαχείρισης των υπογείων υδάτων στις μεταλλευτικές περιοχές.

Ειδικότερα η παρούσα διπλωματική εργασία εξειδικεύεται σε δεδομένα στάθμης υπογείων υδάτων στο υδατικό διαμέρισμα της Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας. Επομένως συνδυάζεται με την γεωστατιστική ανάλυση ώστε να προκύψουν οι εκτιμήσεις των μελετούμενων τιμών σε όλο το εύρος του χάρτη της Αν. Στερεάς και με βάση τα

μεταλλεία της περιοχής να προσδιοριστεί η συμπεριφορά των υπογείων υδάτων τοπικά και καθολικά.

### 1.1 Κλιματική Αλλαγή

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι η κυρία αιτία της κλιματικής αλλαγής, που προκαλείται μέσω της εκπομπής των αέριων στη γη. Τα βλαβερά αυτά αέρια προέρχονται από την καύση ορυκτών πόρων, την αποψίλωση των δασών και τη γεωργία. Από την εκπομπή των αερίων αυξάνονται οι θερμοκρασίες της γης και δημιουργείται μια σταδιακή απειλή σε όλο το σύστημα της γης. Επίσης επηρεάζονται οι στάθμες των υδάτων και ο υετός. Συγκεκριμένα επηρεάζει τις ιδιότητες των υπογείων υδάτων, όπως την αποθηκευτικότητα των υδροφόρων που είναι άμεσα συνδεδεμένη με την επαναφόρτιση και την βροχόπτωση που απορρέει στα συστήματα υδάτων. Η κλιματική αλλαγή είναι ιδιαίτερα σημαντικό φαινόμενο και πρέπει να περιοριστεί γιατί αποτελεί σημαντικό αίτιο μείωσης της στάθμης των υπογείων υδάτων με αποτέλεσμα την μη ικανοποίηση των υδάτινων αναγκών που παραμένουν ίδιες ή μπορεί και να αυξάνονται (Shamsudduha & Taylor, 2020), (Varouchakis, Perez, , Loaiza, , & Spanoudaki, 2022), (Doran, Ogunbode , Böhm, & Gregersen,, 2023).

### 1.2 Σκοπός της διπλωματικής

Σκοπός της διπλωματικής είναι η αξιολόγηση της συμπεριφοράς της στάθμης των υπογείων νερών από σταθμούς παρακολούθησης της Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας σύμφωνα με κάποιους παραμέτρους που πρέπει να συμπεριληφθούν και ιδανικά να δικαιολογούνται. Οι παράμετροι σχετίζονται άμεσα από την υπό μελέτη περιοχή και είναι οι εξής: οι μετρήσεις, η μεταλλευτική δραστηριότητα και το υπόγεια υδατικά συστήματα. Στην έρευνα αν προσμετρηθούν οι παράμετροι τότε μπορεί να βρεθεί για ποιο λόγο μεταβάλλεται η στάθμη με τον εκάστοτε τρόπο.

Επιπλέον στόχος της διπλωματικής είναι η γεωστατιστική ανάλυση να προσδιορίσει την στάθμη των υπογείων υδάτων. Η μεταλλευτική δραστηριότητα πιθανόν να επηρεάζει την στάθμη των υπογείων υδάτων. Επομένως είναι σημαντικό να εξεταστούν οι μεταλλευτικές περιοχές. Με βάση την κλιματική αλλαγή που προαναφέρθηκε υπάρχει μεταβλητότητα της στάθμης των υδάτων που μπορεί να είναι η αρχή των ανεπιθύμητων καιρικών φαινομένων ( π.χ. πλημμύρες, ξηρασίες κ.α.) στις μεταλλευτικές περιοχές.

### 1.3 Περιοχή Μελέτης

Η περιοχή μελέτης των υπόγειων υδάτων είναι η Ανατολική Στερεά Ελλάδα, η οποία οριοθετείται από τα Βαρδούσια όρη έως και το Αιγαίο πέλαγος και την Εύβοια. Δηλαδή αποτελείται από τους νόμους Φθιώτιδας που καλύπτει το περισσότερο χώρο, τον αμέσως επόμενο σε έκταση είναι ο νομός Φωκίδας και σε μικρότερη έκταση έχει τους νόμους Εύβοιας, Βοιωτίας, Μαγνησίας και Αττικής. Στο μεγαλύτερο της μέρος είναι ορεινή περιοχή με πολλές πεδιάδες που χαρακτηρίζουν το μεγάλο δυναμικό της περιοχής και θα αναλυθούν παρακάτω. Όσον αφορά το υπό μελέτη στοιχείο, πρέπει να τονιστεί πως η υπερεκμεταλλεύση των στάθμων είναι ένα μείζον θέμα. Τα τελευταία χρόνια ο άνθρωπος τείνει να μην γνωρίζει την σωστή διαχείριση αυτού του προστατευόμενου φυσικού πόρου που μπορεί να υποστεί εκτός από την εξάντληση και περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Το παρών υποκεφάλαιο θα ασχοληθεί περισσότερο με τα χαρακτηριστικά των υπόγειων υδάτων (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2017).

#### 1.3.1 Φυσικά Χαρακτηριστικά της Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας

Από θέμα μορφολογίας η Ανατολική Στερεά χαρακτηρίζεται από ορεινή έως ημιορεινή κατάσταση με μια ποικιλία χαρακτηριστικού ανάγλυφου. Απαρτίζεται από τέσσερα κύρια βουνά μεγαλύτερα των 2,000m υψόμετρο την Γκιώνα, τον Παρνασσό, τα Βαρδούσια, την Οίτη και άλλα εννέα μικρότερα, τα οποία βρίσκονται ανάμεσα στα 1,000-2,000m υψόμετρο.

Το υδατικό διαμέρισμα της υπό μελέτης περιοχής είναι χωρισμένο σύμφωνα με τις λεκάνες απορροής. Οι λεκάνες απορροής αποτελούνται από του Σπερχειού, της Εύβοιας, του βοιωτικού Κηφισού, της Άμφισσας, του Ασωπού, των Σποράδων και της ΒΑ παράλιας Καλλιδρόμου. Η τελευταία εισχωρήθηκε σαν νέα λεκάνη απορροής στη 1<sup>η</sup> αναθεώρηση του σχεδίου διαχείρισης και άλλαξε και η κωδικοποίηση των λεκανών από GR σε EL. Οπου παρουσιάζονται με την εξής εικόνα:



Εικόνα 1. 1 Μορφολογικός χάρτης, διάκριση λεκανών απορροής (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2017)

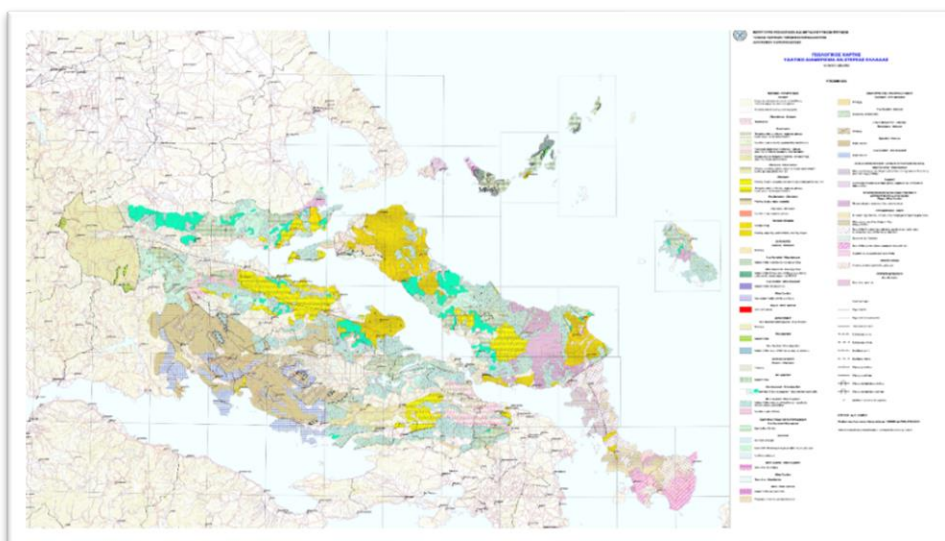
Οι βασικές πεδινές περιοχές με υπολογίσιμη έκταση είναι οι κοιλάδες του Σπερχειού και του Βοιωτικού Κηφισού-Κωπαΐδα. Η ηπειρωτική περιοχή χαρακτηρίζεται από πολυσχιδές ανάγλυφο, αυξημένο κατά την διεύθυνση του μήκους, βυθίσματα και προχωρούν με μεταβαλλόμενες κατά θέσεις διευθύνσεις ως εξής: στα βόρεια η λεκάνη του Σπερχειού με κατά μήκος ροή ανατολικά-δυτικά, στα δυτικά βρίσκεται η λεκάνη Αμφισσας-Ιτέας με μέγιστο άξονα βόρειο-δυτικά, στην μέση βρίσκονται οι λεκάνες Αμφίκλειας-Τιθορέας και Κωπαΐδας με διεύθυνση βορειοδυτικά-νοτιοανατολικά, στα νότια απαντάται η λεκάνη Θηβών-Σχηματαρίου με διεύθυνση ανατολικά-δυτικά. Αυτές οι λεκάνες που θεωρητικά καλύπτουν σχεδόν όλη την περιοχή χαρακτηρίζονται από ταφρογενή βυθίσματα κατά τον Μειόκαινο λόγω των πολλών ασυνεχειών των σχηματισμών του υπόβαθρου. Ιδιαίτερα στα νότια, δυτικά και μεσαία τμήματα των λεκανών περιγράφονται από τμήματα του ευρύτερου συνόλου του Φωκικού-Βοιωτικού βυθίσματος, που δημιουργήθηκαν από καταβυθίσεις ανά τμήματος της χρονολογίας Άνω Πλειόκαινου έως Κάτω Πλειστόκαινου. Η σύνθεση των λεκανών αποτελείται από μεταλλικές ακολουθίες, πιο συγκεκριμένα από Τεταρτογενή ιζήματα, ενώ στις παρυφές

παρουσιάζονται ανά διαστήματα και Τριτογενείς αποθέσεις (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2017), (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2013).

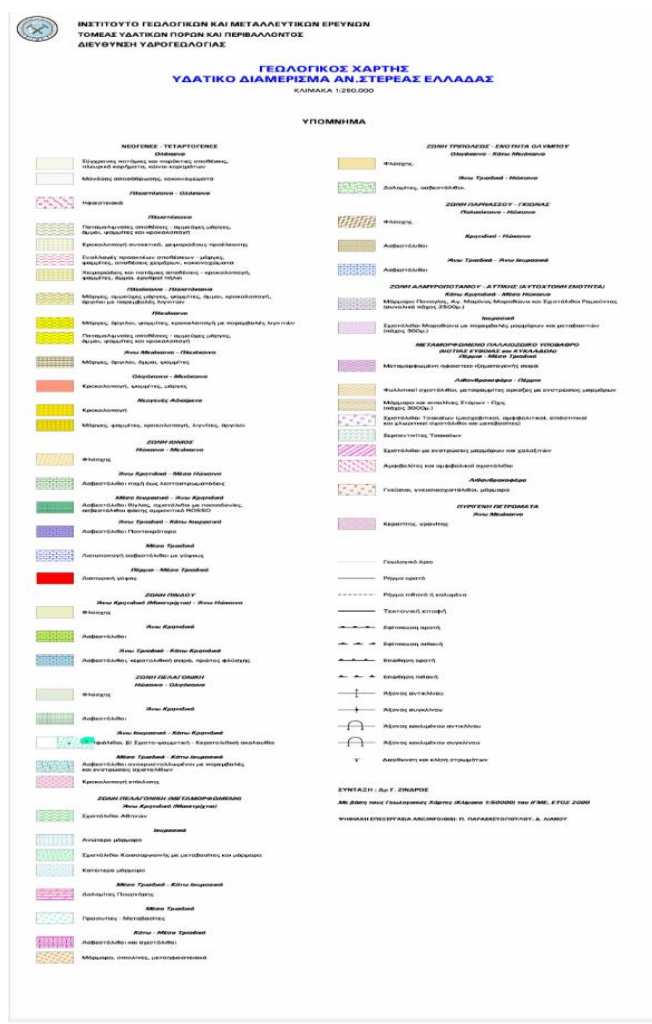
### 1.3.2 Γεωλογία-Υδρογεωλογία

Το γεωλογικό υπόβαθρο ορίζεται κατά το πλείστον σε ορεινές περιοχές, που στο μεγαλύτερο μέρος του αποτελείται από ανθρακικά πετρώματα. Όμως στις πεδινές περιοχές συναντώνται μεταλλικοί σχηματισμοί, όπως Τεταρτογενείς και Νεογενείς. Οι Τεταρτογενείς- Νεογενείς σχηματισμοί αποτελούνται από λιμναίες και χειμαρρώδεις αποθέσεις, αλλουβιακές προσχώσεις, πλευρικά κορήματα και κώνοι κορημάτων. Επίσης σε μεγάλο βαθμό συναντώνται διάφοροι αλπικοί σχηματισμοί, όπως ο φλύσχος, ο σχιστοκερατόλιθος και ο οφιόλιθος. Οι αλπικοί σχηματισμοί που βρίσκονται στις ορεινές περιοχές κατηγοριοποιούνται με την μορφή ζωνών. Οι ζώνες χωρίζονται ανάλογα με τις εναλλαγές υποβάθρων από περιοχή σε περιοχή, με τους διαφορετικούς σχηματισμούς και την χρονολογία γένεσής τους. Οι ζώνες που απαντώνται στην Ανατολική Στερεά είναι η Υποπελαγονικής, Παρνασσού-Γκιώνας, Πίνδου και Βοιωτικής. Στην κύρια μάζα της Υποπελαγονικής ζώνης συναντάται σε μεγαλύτερη ανάπτυξη ο οφιόλιθος που της προσδίδει κάλλιστα χαρακτηριστικό γνώρισμα. Επίσης στην ζώνη υπάρχουν Υπερβασικά πετρώματα, ο φλύσχος και οι σχιστοκερατόλιθοι. Η ζώνη της Πίνδου ορίζεται από τα δυτικά όρια της λεκάνης του Πηνειού μέχρι την οροσειρά της Πίνδου και η μάζα της αναπτύσσεται από λεπτοπλακώδεις ασβεστόλιθους σε εναλλαγές με κερατόλιθους και αναπτυγμένη σειρά φλύσχη με λεπιώσεις. Η ζώνη της Πίνδου χαρακτηρίζεται από διάφορες τεκτονικές επαφές, όπως επιπτεύσεις και επωθήσεις που προκαλούνται λόγω της έντονης και πλαστικής τεκτονικής. Η ζώνη του Παρνασσού-Γκιώνας θεωρείται ως ύβωμα στο σύστημα αυλακώσεων-ράχων, το οποίο βρίσκεται ανάμεσα στο κάτω μέρος της Υποπελαγονικής και της αύλακας της Πίνδου. Στα δυτικά αποτελείται από μεγάλη ανάπτυξη κατά την διεύθυνση του πάχους σε ανθρακικές σειρές, ενώ στα μεσαία προς ανατολικά τμήματα αποκαλύπτονται περίπλοκες εμφανίσεις με επιπτεύσεις και λεπιώσεις τεμαχών και καλυμματικές αποθέσεις οφιολίθων. Η Βοιωτική ζώνη παρεμβάλλεται ανάμεσα στην ζώνη Παρνασσού-Γκιώνας και την Υποπελαγονική. Το βασικό της γνώρισμα είναι ο γεωλογικός και κλαστικός σχηματισμός του Βοιωτικού φλύσχη, όπου αποτελείται από Ραδιολαρίτες, εναλλαγές πηλινών-μαργαϊκών ασβεστόλιθων, ψαμμιτών-πηλινών. Στην εικόνα 1.2 παρουσιάζεται ο γεωλογικός χάρτης της περιοχής και στην εικόνα 1.3, στον ίδιο γεωλογικό χάρτη το γεωλογικό υπόβαθρο που χωρίζεται με τις ζώνες.





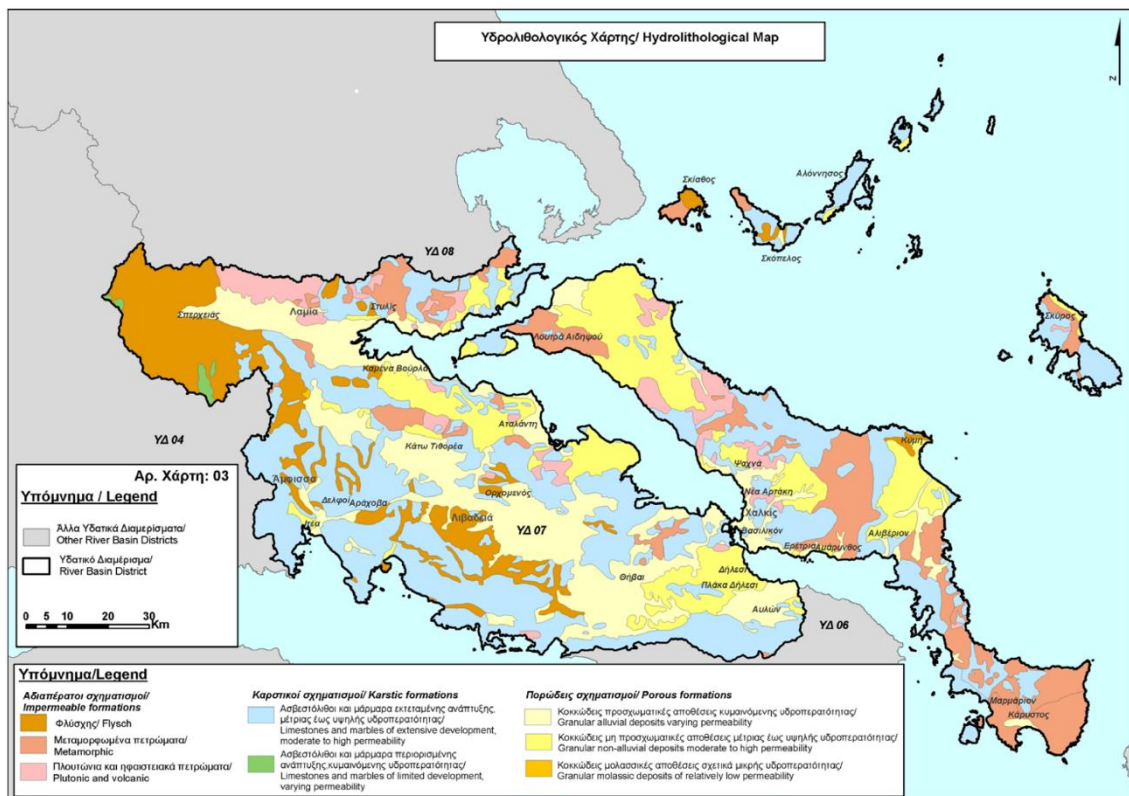
Εικόνα 1. 2 Γεωλογικός χάρτης Αν. Στερεάς Ελλάδας ( Τσιούμας & Ζοράπας , 2010)



Εικόνα 1. 3 Γεωλογικό υπόβαθρο ( Τσιούμας & Ζοράπας , 2010)



Η Ανατολική Στερεά Ελλάδα παρουσιάζει σημαντική υδρογεωλογία, παρόλο που η υδρολογία της κάποιες φορές μπορεί να μην είναι ικανοποιητική, διότι η απορροή μπορεί να μην είναι η επιθυμητή για να αποδοθεί το ισοζύγιο. Αυτό αποδεικνύεται από την ποσότητά της βροχής ετησίως που είναι κύρια πηγή τροφοδότησης, αν και μικρή σχετικά, σημαίνει ότι δεν μπορεί να καλύψει τις ανάγκες των υδροφορέων για την ανανέωση τους. Βεβαίως σε συνδυασμό με τον μεγάλο βαθμό διαπερατότητας των σχηματισμών του γεωλογικού υποβάθρου, που στο μεγαλύτερο μέρος του υπάρχουν ασβεστόλιθοι, το σύστημα υδρογεωλογίας-υδρολογίας αφήνει θετικό αντίκτυπο. Η εικόνα 3.4 απεικονίζει τον υδρολιθολογικό χάρτη, που βοηθάει στην ταξινόμηση των γεωλογικών σχηματισμών σε καινούργιες ενότητες με βάση το είδος της υδροπερατότητας (π.χ. αδιαπέρατοι, ημιπερατοί, υδροπερατοί).



Εικόνα 1. 4 Υδρολιθολογικός χάρτης, διάκριση γεωλογικών σχηματισμών σύμφωνα με το είδος της υδροπερατότητας (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2013)

Η κατηγορία των υδροπερατών χωρίζεται σε δυο υποκατηγορίες σύμφωνα με τις ιδιότητες και την υδροπερατότητα του επικρατού σχηματισμού, τους καρστικούς και

τους πορώδους σχηματισμούς. Οι καρστικοί υδροπερατοί σχηματισμοί χωρίζονται ως εξής:

- Ανθρακικά πετρώματα με εκτεταμένη ανάπτυξη καρστ, που σημαίνει από θέμα υδροπερατότητας ότι κυμαίνεται από μέτρια έως υψηλή και αποτελεσματικότητα υπόγειας ροής πολύ μεγάλων όγκων νερού.
- Ανθρακικά πετρώματα με περιορισμένη ανάπτυξη καρστ που σημαίνει από θέμα υδροπερατότητας ότι είναι σχετικά μειωμένη με τα ανθρακικά με εκτεταμένη ανάπτυξη και βέβαια αντιστοίχως οι όγκοι νερού είναι εξίσου μειωμένοι.

Τα ανθρακικά πετρώματα με εκτεταμένη ανάπτυξη συναντώνται κυρίως στο ηπειρωτικό τμήμα, δηλαδή σχηματίζουν τους ορεινούς όγκους Καλλιδρόμου, Γκιώνας, Παρνασσού, Ελικώνα, Κιθαιρώνα, Βόρειας Πάρνηθας και τα βουνά, Χλωμό, Πτώον, Κτυπάς, που οριοθετούν από ανατολικά τις λεκάνες του Βοιωτικού Κηφισού. Οι εμφανίσεις των ανθρακικών με την περιορισμένη ανάπτυξη λαμβάνουν χώρα στο δυτικό τμήμα του υδατικού διαμερίσματος. Η δυναμικότητα της υδροφορίας αλλάζει με βάση το πάχος, τα όρια του σχηματισμού και τον βαθμό τεκτονισμού στην μάζα τους. Συμπερασματικά, η δυναμικότητα αλλάζει στους ανομοιογενείς σχηματισμούς και στους ομοιογενείς που μπορεί να μεταβάλλεται η υδροπερατότητα σε σχέση με την διεύθυνση (ανισοτροπία). Ομοιογένεια παρουσιάζεται σε ιζηματογενή πετρώματα, διότι οι ιδιότητες μένουν αναλλοίωτες και τα χαρακτηριστικά τους, αλλά μπορεί να υπάρχει το πρόβλημα της ανισοτροπίας, το οποίο το καθιστά ότι δεν είναι κανόνας. Σχεδόν όλα τα υπόλοιπα είδη πετρωμάτων είναι ανομοιογενή, όπως τα πλουτώνια, ηφαιστειογενή και ανθρακικοί σχηματισμοί που παρουσιάζουν την μεγαλύτερη εμφάνιση. Η τροφοδοσία των υπογείων καρστικών συστημάτων υλοποιείται μέσω μετεωρικών νερών κυρίως αλλά υπάρχει επικοινωνία μέσω λιμναίων (π.χ. Υλίκη, Παραλίμνη) και ποταμιών (π.χ. Βοιωτικός, Κηφισός, Ασωπός). Στην συνέχεια οι πορώδεις ή κοκκώδεις υδροπερατοί σχηματισμοί χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες ως εξής:

- Προσχωματικές αποθέσεις που εμφανίζονται χαμηλά στην τοπογραφία των λεκανών, χαρακτηρίζονται από κυμαινόμενη υδροπερατότητα σύμφωνα με την κατά θέσεις κοκκομετρία του υλικού.
- Τριτογενή ιζήματα με στρωσιγενή διάταξη, στα οποία κυριαρχούν κατά βάση λεπτόκοκκα ιζήματα, με αποτέλεσμα είναι η μειωμένη υδροπερατότητα.

- Υπολειπόμενα τριτογενή ιζήματα που αποτελούνται κατά κύρια βάση από αδρόκοκκους ορίζοντες και χαρακτηρίζονται από την αυξημένη υδροπερατότητα.

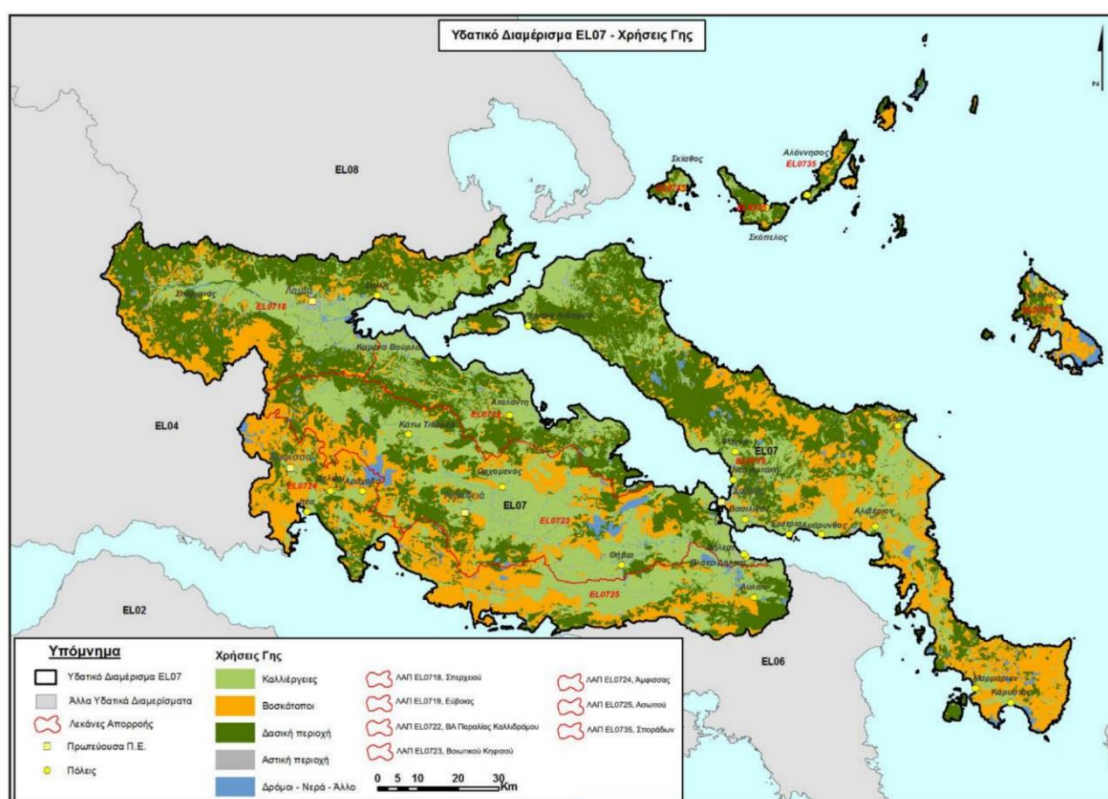
Οι πορώδεις ή κοκκώδεις υδροφορία αποτελείται πάντα από ένα φρεάτιο επιφανειακό υδροφόρο ορίζοντα σε μικρό βάθος και έναν ή περισσότερους υπό πίεση υδροφόρους σε μεγαλύτερο βάθος. Η υπό πίεση υδροφορία δημιουργείται κατά κανόνα από την ύπαρξη διαφορετικών υδρολιθολογικών ενοτήτων του γεωλογικού υπόβαθρου σε οποιαδήποτε ανάπτυξη. Για τους κοκκώδεις σχηματισμούς θεωρείται ενιαία η υδροφορία των υπό πίεση και των φρεατίων υδροφορέων. Η τροφοδοσία των υπογείων πορώδων συστημάτων γίνεται μέσω βροχοπτώσεων, επιφανειακών απορροών και πλευρικών μεταγίσεων υπογείων υδάτων από γειτονικά υπόγεια συστήματα. Επίσης στα μικρότερα κλάσματα κοκκομετρίας όπως η άργιλος που είναι το μικρότερο, είναι δυνατόν να παρεμβάλλεται στο ενεργό δυναμικό της συνολικής υδροφορίας λόγω των μικρών οδών κυκλοφορίας των υπογείων νερών, ώστε τελικά να μικραίνει. Αυτό το ενδεχόμενο λόγω της μείωσης των οδών κυκλοφορίας μπορεί να αυξήσει τον αριθμό των υδροφορέων που επικοινωνούν. Οι αποθέσεις αυτές που απαντώνται στους εκάστοτε υδροφορείς χαρακτηρίζονται από έντονη ανομοιογένεια.

Η τελευταία κατηγορία είναι οι αδιαπέρατοι ρωγματικοί σχηματισμοί με σημαντικότερες εμφανίσεις τον φλύσχη, των μεταμορφωμένων και των πυριγενών πετρωμάτων με υψηλές συνθήκες τεκτονισμού, το οποίο καθιστά δημιουργία δευτερογενούς πορώδους. Το δευτερογενές πορώδες επιτελεί στην διευθέτηση της υπόγειας ρωγματικής υδροφορίας και της χαμηλής δυναμικότητας του. Η τροφοδοσία των αδιαπέρατων ρωγματικών υπόγειων συστημάτων διευθετείται μέσω κατείσδυσης μετεωρικού νερού και η εκφόρτιση στις πηγες, πλευρικά στα ιζήματα και στην θάλασσα (Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων), ( Τσιούμας & Ζοράπας , 2010), (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2017).

### 1.3.3 Χρήσεις Γης και Υδάτων

Για το υδατικό διαμέρισμα Ανατολικής Στέρας Ελλάδας, με μεγαλύτερο ποσοστό απαντώνται οι δασώδεις περιοχές, 36% από την συνολική επιφάνεια που κατέχει. Αμέσως μετά ποσοστό 31% αποτελείται από καλλιέργειες και 27% από βοσκοτόπους. Στην εικόνα 3.5 απεικονίζεται η κατανομή των διάφορων χρήσεων γης για την

εκάστοτε λεκάνη απορροής. Πιο συγκεκριμένα στην λεκάνη απορροής Σπερχειού με ποσοστό 49% αποτελείται από δασώδεις περιοχές. Αμέσως επόμενο μεγαλύτερο ποσοστό σε καλλιέργειες καλύπτει η λεκάνη απορροής του Βοιωτικού Κηφισού, στη συνέχεια με 42% της ΒΑ Παράλιας Καλλιδρόμου και με 36% η λεκάνη απορροής Ασωπού. Οι συνολικές χρήσεις ύδατος ή απολήψιμες ποσότητες εκτιμήθηκαν σε 955,256,755 m<sup>3</sup>, όπου η τιμή αυτή αντιπροσωπεύει την κάλυψη όλων των απαραίτητων δραστηριοτήτων για να είναι βιώσιμο ένα σύστημα. Οι δραστηριότητες είναι η άρδευση, η ύδρευση, η κτηνοτροφία και η βιομηχανία. Σημαντικότερη δραστηριότητα είναι η άρδευση διότι καταναλώνεται η μεγαλύτερη ποσότητα, δηλαδή το 87.9% της συνολικής απολήψιμης ποσότητας, το οποίο είναι 839,670,688m<sup>3</sup>, μετέπειτα διέρχεται η ύδρευση με ποσοστό 8% το οποίο αντιστοιχίζεται σε απόληψη ίση με 76,042,785m<sup>3</sup>, αμέσως μετά η βιομηχανία με 3.1% και απόληψη ίση με 29,143,873m<sup>3</sup> και τελευταία με 1.1% η κτηνοτροφία και απόληψη ίση με 29,143,873m<sup>3</sup>.



Εικόνα 1. 5 Χάρτης χρήσεων Γης, διάκριση των χρήσεων γης σύμφωνα με την λεκάνη απορροής (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2017)

Η άρδευση ως η σημαντικότερη διεργασία από άποψη χρήσεις νερού, καλύπτεται από τα υπόγεια υδατικά συστήματα. Οι αρδευόμενες εκτάσεις καταμετρούνται περίπου σε

1.415 εκατομμύρια στρέμματα. Η ύψιστη κατανάλωση άρδευσης προκύπτει σε καλλιέργειες βαμβακιού, αμέσως μετά υπάρχουν καλλιέργειες μηδικής, αραβοσίτου και κηπευτικών. Επίσης ανάλογη ποσότητα χρησιμοποιείται σε δέντρα.

Από τα επιφανειακά συστήματα εκτιμώνται ότι χρησιμοποιούνται  $232.5 \cdot 10^6 \text{m}^3$  απολήψεις ανά έτος, δηλαδή το 28.5% της συνολικής ετήσιας απόληψης από όλο το υδατικό σύστημα. Όπου το  $14.8 \cdot 10^6 \text{m}^3$  προέρχεται από εξωτερικά υδατικά συστήματα. Όσον αφορά τα υπόγεια υδατικά συστήματα αντλούνται περίπου  $722.7 \cdot 10^6 \text{m}^3$ , δηλαδή το 75.7% των αναγκών δια μέσου γεωτρήσεων και υδρομάστευσης πηγών.

Οι απολήψεις υπογείων νερών κατά την γενική έννοια επηρεάζουν την ποσοτική και ποιοτική κατάσταση και συντελούν στην πίεση των υπογείων υδατικών συστημάτων. Στο υδατικό διαμέρισμα της Αν. Στέρας Ελλάδας απαντώνται δυναμικές υπόγειες υδροφορίες που συνθέτουν αξιοσημείωτα υπόγεια υδατικά συστήματα. Η πίεση των συστημάτων μπορεί να συντελέσει στην αλλαγή των χαρακτηριστικών και των ιδιοτήτων τους. Επίσης η πίεση της απολήψεως με βάση μια σειρά πολυπληθών περιπτώσεων, θεωρείται αντιστρόφως ανάλογη της δυναμικότητας και της ιδιότητας να αναπληρώνει τα αποθέματα της.

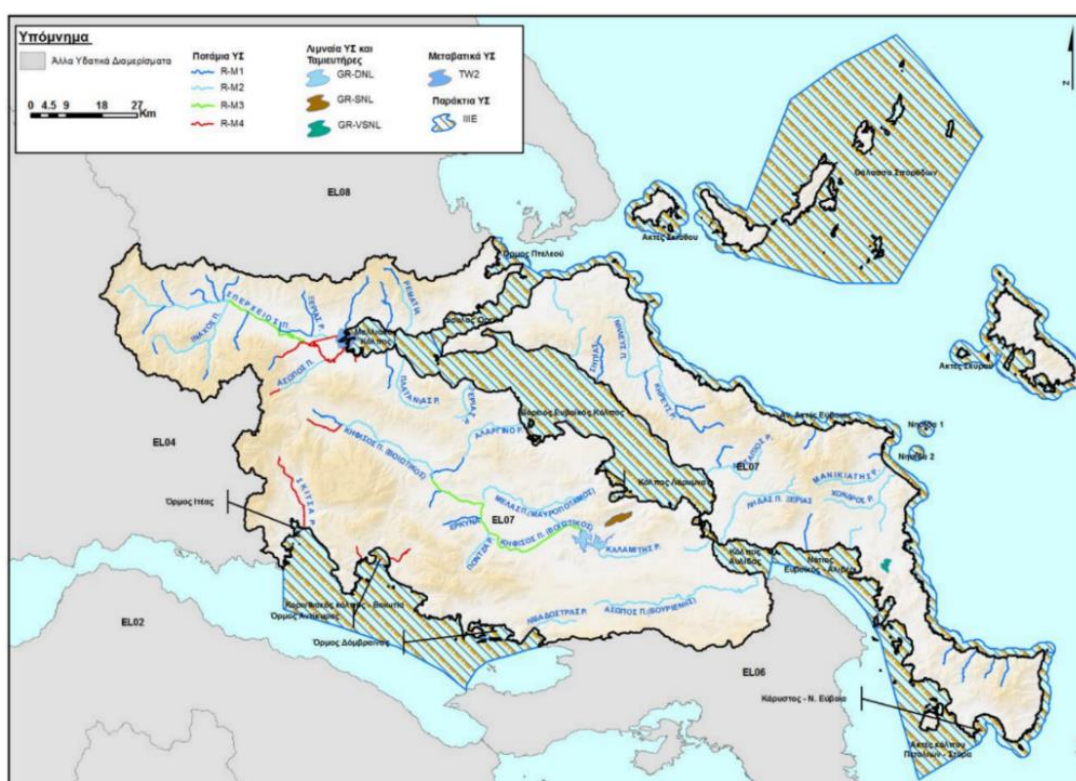
Στα δυτικά τμήματα του διαμερίσματος βρίσκονται ορεινοί όγκοι όπως η Γκιώνα και ο Παρνασσός. Δημιουργούνται τα πιο δυναμικά υπόγεια υδατικά συστήματα επειδή ασκούνται μειωμένες πιέσεις στο σύστημα. Σε αυτές τις περιοχές καλύπτονται από καρστικές υδροφορίες που δέχονται έντονη τροφοδοσία λόγω των βροχοπτώσεων που μπορούν να φτάσουν ως και 1,200mm. Οι μειωμένες πιέσεις επιτυγχάνονται από τις απολήψεις λόγω ανάγλυφου, λόγω του μεγάλου υψομέτρου και λόγω μειωμένων ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Στα ανατολικά τμήματα, τα υπόγεια υδατικά συστήματα συγκροτούνται στις πεδινές περιοχές, όπου η βροχόπτωση είναι μειωμένη περίπου το μισό σε σχέση με τα καρστικά υδατικά συστήματα. Βέβαια η αναπλήρωση είναι δύσκολη και περιορισμένη σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν. Στα συστήματα τους ασκούνται υψηλές πιέσεις από τις απολήψεις νερού, αφού είναι ιδιαίτερα αυξημένη η ζήτηση και καθημερινά καταναλώνονται μεγάλες ποσότητες λόγω γεωργίας και τις ανάγκες των αστικών περιοχών (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2017).

#### 1.3.4 Σύστημα Επιφανειακών Υδάτων

Τα συστήματα επιφανειακών υδάτων χωρίζονται σε κατηγορίες σύμφωνα με την απόθεση τους και της γειτνίασης τους με άλλα συστήματα. Οι Ποταμοί είναι



συστήματα εσωτερικών υδάτων, τα οποία κυρίως ρέουν στην επιφάνεια αλλά μπορεί ένα μικρό μέρος της ροής του να παρεκκλίνει υπογείως. Οι Λίμνες ορίζονται ως συστήματα εσωτερικών υδάτων με κύριο γνώρισμα τους τη στασιμότητα. Μεταβατικά ύδατα λέγονται τα συστήματα επιφανειακών υδάτων, όπου βρίσκονται κοντά στο στόμιο των ποταμών και είναι είτε ρεύματα γλυκού νερού, είτε αλμυρά επειδή γειτνιάζουν με τα Παράκτια ύδατα. Παράκτια ύδατα είναι τα επιφανειακά ύδατα που βρίσκονται στην πλευρά της ξηράς και απέχουν ένα ναυτικό μίλι από το πλησιέστερο σημείο της ξηράς προς την θάλασσα. Στην Εικόνα 1.6 παρουσιάζονται τα επιφανειακά υδατικά συστήματα. Πέρα από τα αρχικά συστήματα, εξειδικεύονται σύμφωνα με τις ανθρώπινες αλλαγές. Τα φυσικά υδατικά συστήματα είναι ένα αναλλοίωτα σε όλη την επιφάνεια, ενώ τα τεχνητά υδατικά συστήματα δημιουργούνται από τους ανθρώπους. Τελευταία κατηγορία είναι τα ιδιαιτέρως τροποποιημένα υδατικά συστήματα που η μορφολογία τους έχει αλλοιωθεί από τις πιέσεις λόγω ανθρωπίνων δραστηριοτήτων, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κράτους μέλους (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2013).

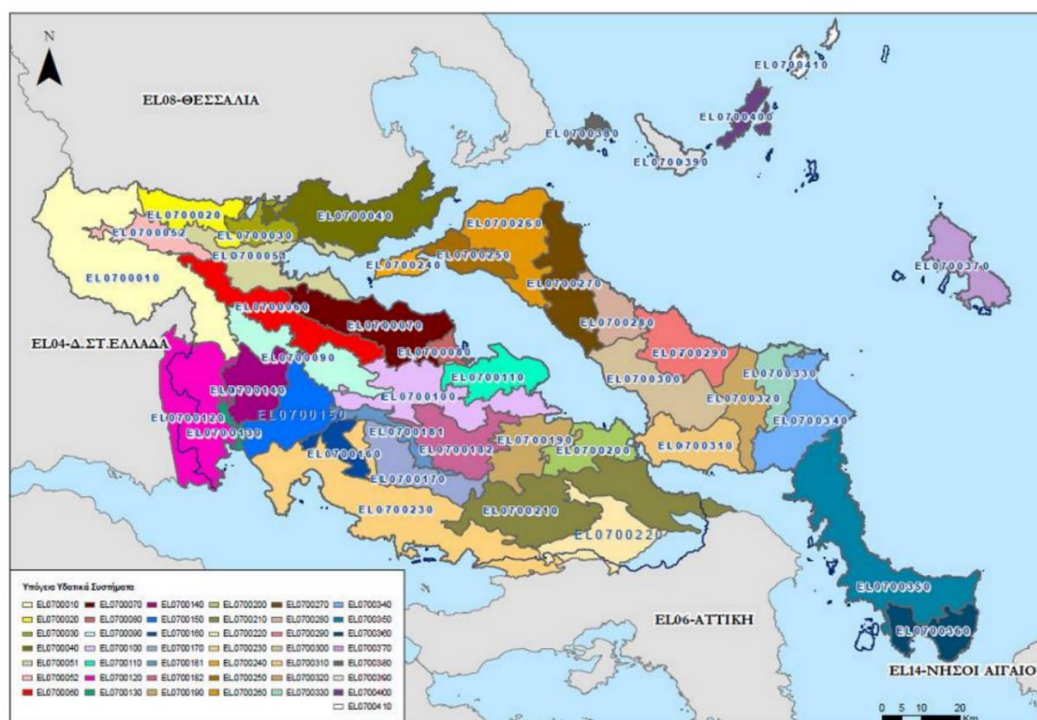


Εικόνα 1. 6 Επιφανειακά υδατικά συστήματα Αν. Στερεάς Ελλάδας (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2017)

### 1.3.5 Συστήματα Υπόγειων Υδάτων

Η οριοθέτηση τους πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τα ακόλουθα αίτια, την υδρογεωλογία της περιοχής και την αναπτυγμένη κίνηση των υπογείων υδροφορέων μέσα στους γεωλογικούς σχηματισμούς. Σύμφωνα με αυτό το επιχείρημα αναπτύχθηκαν τα καρστικά, πορώδη, ρωγμώδη και μικτά υπόγεια υδατικά συστήματα. Η δυναμικότητα των υπογείων υδροφόρων είναι επίσης ακόμα ένα αίτιο, το οποίο χαρακτηρίζεται από την τροφοδοσία, την εκφόρτιση και την εκμετάλλευση του υπογείου δυναμικού. Στην συνέχεια είναι οι χρήσεις του κάθε συστήματος. Την συσχέτιση των επιφανειακών και χερσαίων υδάτων με τα υπόγεια υδατικά συστήματα και τέλος ο διαχωρισμός υποβαθμισμένων περιοχών από ποιοτικής κατάστασης λόγω των υπεραντλήσεων, της υφαλμύρισης, των πιέσεων που προκαλούνται από ανθρώπινες δραστηριότητες κ.α. Στον πίνακα 1.10 (βλέπε παραρτήματα) παρουσιάζονται 23 υπόγεια υδατικά συστήματα της περιοχής μελέτης όπου αφαιρέθηκαν τα συστήματα των Σποράδων και της Εύβοιας. Επίσης στην εικόνα 1.7 απεικονίζονται σε χάρτη τα υπόγεια υδατικά συστήματα (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2013), (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2017).

Πίνακας 1. 10 Υπόγεια υδατικά συστήματα της Αν. Στέρας Ελλάδας



Εικόνα 1. 7 Χάρτης υπογείων υδατικών συστημάτων Αν. Στερεάς Ελλάδας (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2017)

### 1.3.6: Καταγραφή Ποσοτικής Κατάστασης των υπόγειων υδάτων

Η ποσοτική κατάσταση ενός υπογείου υδατικού συστήματος αξιολογείται σύμφωνα με την διακύμανση της στάθμης των υπογείων νερών και αποκαλύπτει τον εναπομείναντα υδατικό πόρο του συστήματος. Για να θεωρηθεί σε καλή ποσοτική κατάσταση ένα υπόγειο υδατικό σύστημα πρέπει σε βάθος χρόνου, οι μέσες ετήσιες απολήψεις και απώλειες να μην είναι μεγαλύτερες από την επαναπλήρωση μείον την μέση απαιτούμενη οικολογική παροχή των συσχετιζόμενων επιφανειακών υδατικών συστημάτων. Για να υπάρχει μια σωστή εκτίμηση της ποσοτικής κατάστασης πρέπει η δειγματοληψία να είναι πυκνή, ώστε η διακύμανση της στάθμης να προκύπτει δίχως σφάλματα. Σημαντικό γνώρισμα για την ποσοτική κατάσταση των υπογείων υδατικών συστημάτων είναι η πίεση από τις απολήψεις που καθορίζει τα χαρακτηριστικά του. Συγκεκριμένα τα υπόγεια υδατικά συστήματα μικρού έως μεσαίου μεγέθους είναι επιρρεπή στις πιέσεις. Επίσης όταν οι συνθήκες αλλάζουν, αλλάζει η θέση, το είδος και το υπόβαθρο της περιοχής των υπογείων συστημάτων, που αυτά συντελούν στις πιέσεις από απολήψεις υπογείου νερού. Στον πίνακα 1.11 (βλέπε παραρτήματα) παρουσιάζονται όλα τα στοιχεία, όπως η τροφοδοσία, οι συνολικές απολήψεις, τα ποιοτικά προβλήματα και οι κύριες πιέσεις, που σχετίζονται άμεσα με την ποσοτική κατάσταση. Επιπρόσθετα στην εικόνα 1.8 απεικονίζεται ο χάρτης της ποσοτικής κατάστασης των υπογείων υδατικών συστημάτων (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2017).

Πίνακας 1. 11 Ποσοτικής κατάστασης υπογείων υδατικών συστημάτων της Αν.

Στέρας Ελλάδας

Από τα 23 υπόγεια υδατικά συστήματα που μελετήθηκαν, εκτιμήθηκαν τα 20 σε καλή ποσοτική κατάσταση και τα υπόλοιπα 3 σε κακή ποσοτική κατάσταση, τα οποία κρίθηκαν με βάση το ισοζύγιο τους. Τα υπόγεια υδατικά συστήματα που παρουσίασαν κακή ποσοτική κατάσταση είναι τα εξής:

- EL0700040 Πελασγίας είναι μικτός υδροφορέας και παρουσιάζει ελλειμματικό ισοζύγιο.
- EL07000110 Μαλεσίνας είναι κοκκώδης και καρστικός υδροφορέας και παρουσιάζει ελλειμματικό ισοζύγιο, υφαλμύριση και παράκτια ζώνη.
- EL07000130 Άμφισσας είναι κοκκώδης υδροφορέας και παρουσιάζει ελλειμματικό ισοζύγιο, πτώση στάθμης, ρύπανση, υφαλμύριση και υπεραντλήσεις.



## 2: Βασικές Έννοιες Στατιστικής-Γεωστατιστικής

Η Γεωστατιστική είναι μια επιστήμη της χωρικής στατιστικής που πραγματεύεται χωρικές αναλύσεις μεταβλητών με την μορφή τυχαίων πεδίων. Οι εφαρμογές της Γεωστατιστικής σχετίζονται με φυσικά φαινόμενα τα οποία με την σειρά τους έχουν διάφορες αυξομειώσεις στον χώρο και για να αναπαρασταθούν καταλληλά, αναμειγνύονται με στοιχεία αιτιοκρατικής εξάρτησης και τυχαίων μεταβολών. Οι πιο σημαντικές εφαρμογές της είναι οι εξής:

- Η ανάλυση επιβλαβών ουσιών σε κάθε μέσο όπως στην ατμόσφαιρα, στο έδαφος, στην θάλασσα κτλ. (Διαμαντοπούλου, 2023).
- Η εύρεση και η εκτίμηση αποθεμάτων ορυκτών πόρων και των περιεκτικότητων του κοιτάσματος (Pavlidis, Hristopoulos, Roumpos, & Agioutantis, 2015).
- Η μελέτη των συσχετιζόμενων μεταβλητών του κλάδου της μετεωρολογίας (θερμοκρασία, βροχόπτωση, κλπ.) (Agou, 2023).
- Η ανάλυση τοπογραφικών απεικονίσεων και γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών (Partsinevelos & Papadakis, 2015).
- Η απεικόνιση των τμημάτων του βυθού και η ανάλυση των κυματισμών της επιστήμης της ωκεανογραφίας (Batsis, Partsinevelos, & Stavrakakis, 2021).
- Η πρόγνωση διαφόρων φυσικών ιδιοτήτων όπως τις μηχανικές ιδιότητες σε πορώδη υλικά.
- Η εύρεση γεωλογικών-υδρογεωλογικών δεδομένων, όπως το υδραυλικό ύψος, η υδραυλική αγωγιμότητα, η αποθηκευτικότητα κ.α. (Varouchakis, Solomatine, Perez, Jomaa, & Karatzas, 2023).

Όλες οι εφαρμογές για να επιτευχθούν, βασίζονται στην θεωρία των πιθανοτήτων και στην θεωρία των τυχαίων πεδίων. Η θεωρία των πιθανοτήτων παρουσιάζει τους κανόνες και τα χαρακτηριστικά των τυχαίων μεταβλητών, ενώ η θεωρία των τυχαίων πεδίων εξειδικεύεται στην συσχέτιση των μεταβλητών στον χώρο που καλείται χωρική συνέχεια.

Επίσης η γεωστατιστική επεξεργάζεται δεδομένα που αναπαριστούν το τυχαίο πεδίο σαν σύνολο, διότι βασίζονται στην δήλωση ότι και η διακύμανση έχει τυχαίο χαρακτήρα, οπότε αναλύονται με βάση τις στατιστικές συναρτήσεις (π.χ. μέση τιμή, διασπορά κλπ.) για να επέλθει η τελική εκτίμησή από τα δεδομένα (Χριστόπουλος, “Εισαγωγή στις Πιθανότητες και τη Στατιστική για Μηχανικούς”, 2016).

## 2.1: Τυχαία Μεταβλητή-Τυχαία Πεδία

Τυχαία μεταβλητή είναι μια μεταβλητή η οποία παίρνει τιμές που αντιστοιχούν σε ένα σύνολο πιθανών καταστάσεων. Επίσης θεωρείται συνάρτηση οπου το πεδίο ορισμού της είναι ο δειγματοληπτικός χώρος και το διάστημα είναι ένα σύνολο πραγματικών αριθμών. Οι τυχαίες μεταβλητές χωρίζονται σε δυο κυρίες κατηγορίες, την διακριτή και την συνεχή. Διακριτή ονομάζεται η τυχαία μεταβλητή που παίρνει ακέραιες τιμές μέσα από ένα ορισμένο διάστημα ενώ στην συνεχή μεταβλητή παίρνει όλες τις εν δυνάμει τιμές σε ένα συνεχές διάστημα (Καπαγερίδης, 2015).

Μια απροσδιόριστη μεταβλητή μπορεί να είναι ανεξάρτητη από τον χώρο και από τον χρόνο και να θεωρηθεί ως τυχαία μεταβλητή. Αυτό συμβαίνει διότι οι τυχαίες μεταβλητές υπακούν στην θεωρία των πιθανοτήτων. Έτσι προκύπτουν τιμές-ενδεχόμενα με μια συχνότητα εμφάνισης που προσδιορίζεται από την κατανομή πιθανότητας. Τα τυχαία πεδία επεκτείνουν τον ορισμό των τυχαίων μεταβλητών σε χρονικά εκτεταμένες ποσότητες. Ένα τυχαίο πεδίο θεωρείται το σύνολο των τυχαίων μεταβλητών στον χώρο που περιγράφουν την χωρική μεταβλητότητα ενός φυσικού φαινομένου, οπου το βασικό γνώρισμα είναι ότι οι τυχαίες μεταβλητές συσχετίζονται μεταξύ τους (Hristopulos, 2020).

Δυο βασικά γνωρίσματα του τυχαίου πεδίου είναι η αλληλεξάρτηση και η τυχειότητα. Για την αλληλεξάρτηση αναφέρθηκαν προηγουμένως. Η τυχειότητα χαρακτηρίζει φαινόμενα για τα οποία δεν είναι δυνατή η γνώση μιας κατάστασης με απόλυτη ακρίβεια. Οι αιτίες οι οποίες έχει νόημα αυτός ο ορισμός είναι Α) εγγενείς (π.χ. χωροχρονική μεταβλητότητα του φαινομένου), Β) προέρχονται από την πειραματική διαδικασία (π.χ. απειρία στην έκτοτε διαδικασία, τυχαία σφάλματα) και Γ) προκαλούνται από διακυμάνσεις περιβαλλοντικών παραγόντων (π.χ. θερμοκρασίας και υγρασίας). Επίσης οι δυο έννοιες αλληλεξάρτηση και τυχειότητα δεν είναι απόλυτα ανόμοιες στην γεωστατιστική διότι οι τιμές ενός τυχαίου φαινομένου εξαρτώνται από την περιοχή μελέτης που καθορίζεται από την ακτίνα επιρροής (Χριστόπουλος, “Εφαρμοσμένη Γεωστατιστική”, 2014), (Χριστόπουλος, “Εισαγωγή στις Πιθανότητες και τη Στατιστική για Μηχανικούς”, 2016).

### 2.1.1 Μέση τιμή

Η γραμμική μέση τιμή ορίζεται ως το κέντρο μιας κατανομής τυχαίας μεταβλητής και συμβολίζεται με  $m_x(s)$ . Ο τύπος που χαρακτηρίζει την μέση τιμή είναι,  $m_x(s) =$

$E[X(\mathbf{s})]$  όπου  $E[ \ ]$  δηλώνει την αναμενόμενη ή μέση τιμή του τυχαίου πεδίου για όλες τις πιθανές καταστάσεις,  $f_x(x; \mathbf{s})$  είναι η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας.

$$E[X(\mathbf{s})] = \int_{-\infty}^{+\infty} dx f_x(x; \mathbf{s}) x \quad (2.1)$$

Ως προς τα όρια του ολοκληρώματος θεωρητικά είναι από  $-\infty$  έως  $+\infty$  αλλά συμβαδίζει ανάλογα με τα όρια των τιμών του τυχαίου πεδίου. Επίσης από την εξίσωση 2.1 της μέσης τιμής συμπεραίνεται ότι μπορεί να υπάρχει συσχέτιση από την θέση  $\mathbf{s}$ , διότι κατά πάσα πιθανότητα υπάρχει αναλογία μεταξύ της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας από την θέση (Χριστόπουλος, “Εισαγωγή στις Πιθανότητες και τη Στατιστική για Μηχανικούς”, 2016). Η αναμενόμενη τιμή ισούται με την μέση τιμή σύμφωνα με κάποιες προϋποθέσεις. Ειδικότερα η αναμενόμενη τιμή είναι το όριο του μέσου των δειγμάτων όταν το μέγεθος τείνει στο άπειρο. Δηλαδή αν το μέγεθος του δείγματος είναι μεγάλο τότε είναι ίση η αναμενόμενη τιμή με την μέση τιμή (Καπαγερίδης, 2015).

### 2.1.2 Διάμεσος

Η διάμεσος  $x_{med}$  είναι μια παράμετρος που χωρίζει ένα διατεταγμένο κατά την αύξουσα σειρά τυχαίο πεδίο στην μέση. Ανάλογα με τον αριθμό των τιμών του τυχαίου πεδίου χωρίζονται σε δυο μέρη. Αν ο αριθμός είναι περιττός τότε η διάμεσος αποτελείται από την μέση τιμή ή ενδιάμεση τιμή, ενώ αν είναι άρτιος η διάμεσος είναι η μέση τιμή των ενδιάμεσων τιμών. Ο προσδιορισμός της διάμεσου ορίζεται με την παρακάτω εξίσωση 2.2 (Χριστόπουλος, “Εισαγωγή στις Πιθανότητες και τη Στατιστική για Μηχανικούς”, 2016).

$$\int_{-\infty}^{x_{med}} dx f_x(x) = \int_{x_{med}}^{+\infty} dx f_x(x) \quad (2.2)$$

### 2.1.3 Διασπορά

Η διασπορά  $\sigma_x^2(\mathbf{s})$  ενός τυχαίου πεδίου αποδίδεται από την μέση τιμή του τετράγωνου της διακύμανσης και δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\sigma_x^2(\mathbf{s}) = E[\{X(\mathbf{s}) - m_x(\mathbf{s})\}^2] = E[X'^2(\mathbf{s})] \quad (2.3)$$

Όπου  $X'(\mathbf{s})$  είναι η διακύμανση του τυχαίου πεδίου. Συνήθως υπάρχει μια μεταβολή της διασποράς στο πεδίο που φαίνεται από σημείο σε σημείο. Εάν το πεδίο είναι στατιστικά ομοιογενές, τότε η διασπορά θα είναι σταθερή σε όλο το πεδίο

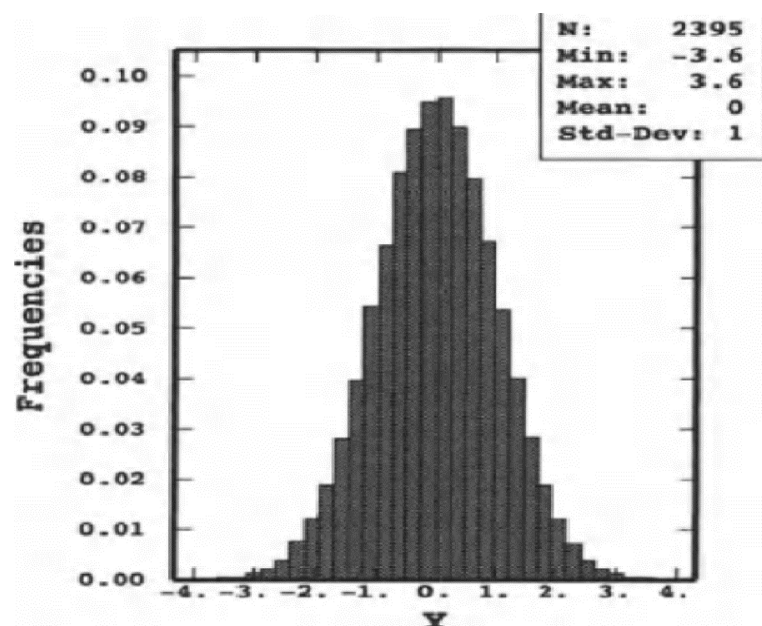
(Χριστόπουλος, “Εισαγωγή στις Πιθανότητες και τη Στατιστική για Μηχανικούς”, 2016), (Χριστόπουλος, “Εφαρμοσμένη Γεωστατιστική”, 2014).

#### 2.1.4 Τυπική απόκλιση

Η τυπική απόκλιση ορίζεται ως η τετραγωνική ρίζα της διασποράς και προσδιορίζει ποσοτικά την απόκλιση της κατανομής από την μέση τιμή της. Εν συνεχεία η τυπική απόκλιση αποτελεί σημαντικό στατιστικό μέγεθος που χρησιμοποιείται για την εύρεση του πιθανού σφάλματος των πειραματικών μετρήσεων και το σφάλμα εκτίμησης παραμέτρων μιας κατανομής πιθανότητας από ένα πεπερασμένο δείγμα (Christakos, 1992).

#### 2.1.5 Ιστόγραμμα

Το ιστόγραμμα είναι ένα γράφημα συχνότητας των δεδομένων που παρουσιάζει την κατανομή που ακολουθούν ως ομαδοποιημένα δεδομένα. Το ιστόγραμμα χρησιμοποιείται για το σκοπό της διάταξης των δεδομένων σε διαστήματα που ονομάζονται κλάσεις. Για την απόδοση μιας κανονικής κατανομής πρέπει να παρουσιάζουν συμμετρία κατάλληλη και η διάμεσος να πλησιάζει σαν τιμή την μέση τιμή (Christakos, 1992).



Εικόνα 2. 1 Παράδειγμα ιστογράμματος κανονικής κατανομής (Wackernagel, 2013)

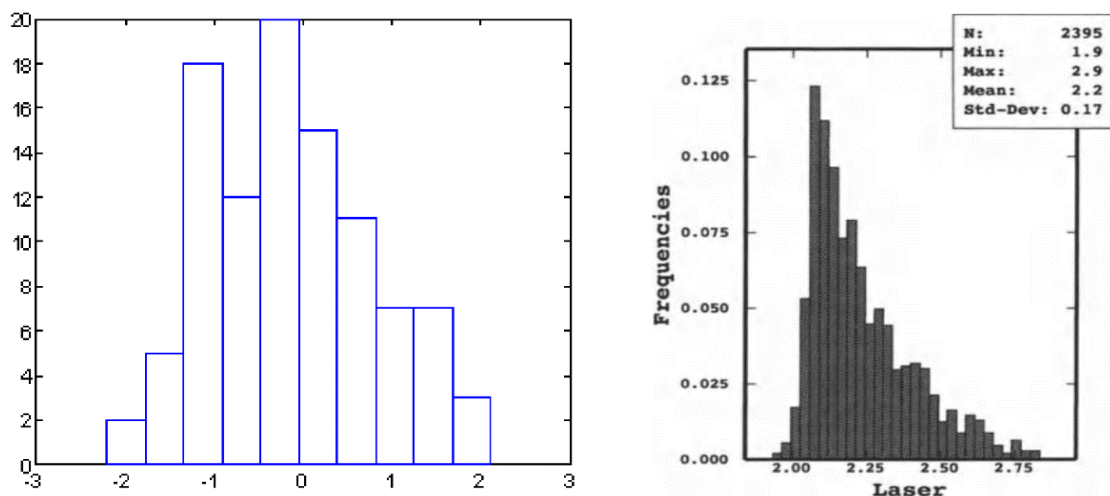
#### 2.1.6 Συντελεστής Ασυμμετρίας

Ο συντελεστής ασυμμετρίας συνδέεται άμεσα με το ιστόγραμμα και δείχνει αν το ιστόγραμμα έχει αρνητική ή θετική ασυμμετρία ανάλογα με την τιμή του. Αρνητική ασυμμετρία μπορεί να παρουσιάζει όταν ο διάμεσος σαν μέγεθος είναι μεγαλύτερο από

την μέση τιμή, το οποίο στο ιστόγραμμα αντιστοιχίζεται από πληθώρα συγκέντρωσης μικρότερων τιμών. Ενώ η θετική συμμετρία εμφανίζεται σε ιστογράμματα με υψηλή συγκέντρωση πυκνότητας στις μεγάλες τιμές, όταν η μέση τιμή είναι μεγαλύτερη από τον διάμεσο (Χριστόπουλος, “Εισαγωγή στις Πιθανότητες και τη Στατιστική για Μηχανικούς”, 2016).

### 2.1.7 Συντελεστής Κύρτωσης

Ο συντελεστής κύρτωσης επηρεάζεται με τον τρόπο που είναι διατεταγμένα στον χώρο τα δεδομένα, ειδικότερα στα άκρα της κατανομής. Παίρνει την τιμή 3 όταν ακολουθεί την κανονική κατανομή. Για τιμές κάτω του 3 οι κατανομές λέγονται πλατυκυρτικές, ενώ για μεγαλύτερες τιμές ονομάζονται λεπτοκυρτικές. Στις πλατυκυρτικές χαρακτηριστικό γνώρισμα αποτελεί η συγκέντρωση των τιμών στο κέντρο, ενώ στις λεπτοκυρτικές, αποθέτουν το βάρος τους στις ουρές (Χριστόπουλος, “Εισαγωγή στις Πιθανότητες και τη Στατιστική για Μηχανικούς”, 2016).



Εικόνα 2. 2 Παραδείγματα κύρτωσης λεπτοκυρτικών ιστογραμμάτων (δεξί σχήμα) και πλατυκυρτικών ιστογραμμάτων (αριστερό σχήμα) (Wackernagel, 2013) (Χριστόπουλος, “Εφαρμοσμένη Γεωστατιστική”, 2014)

## 2.2 Βασικές Έννοιες Τυχαίων Πεδίων

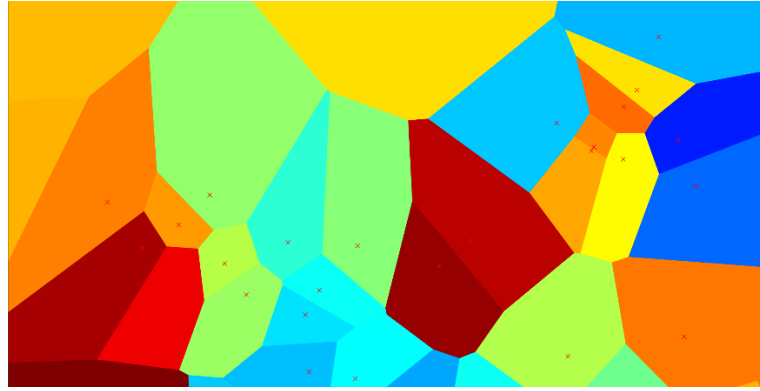
Ένα τυχαίο πεδίο μπορεί να συμβολιστεί ως  $X(s)$ , το  $s$  είναι διάνυσμα θέσης που παίρνει για κάθε δειγματοληπτικό σημείο, ένα ζεύγος καρτεσιανών συντεταγμένων.  $x(s)$  είναι οι τιμές ( $x_1, x_2, \dots, x_N$ ) που αντιστοιχούν σε κάθε ενδεχόμενο ή σε κάθε κατάσταση.  $f_x(X(s))$  συμβολίζεται η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του πεδίου.

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας είναι μια συνάρτηση η οποία ανάλογα με το όρισμα της, έχει τις ανάλογες πληροφορίες, μπορεί να έχει όρισμα μια και μόνο τυχαία μεταβλητή αλλά μπορεί και να έχει και ολόκληρο τυχαίο πεδίο. Για αυτό το λόγο χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες, την μονοδιάστατη, την δισδιάστατη και την πολυδιάστατη. Η μονοδιάστατη ορίζεται σε ένα σημείο  $s_1$  το οποίο δηλώνει όλες τις πιθανές καταστάσεις του πεδίου. Από την άλλη η δισδιάστατη ορίζεται ο συσχετισμός των δυο σημείων  $s_1, s_2$  κάτω από όλες τις πιθανές καταστάσεις. Τέλος η πολυδιάστατη εκφράζει την αλληλεξάρτηση όλων των πιθανών καταστάσεων για πολυπληθές σημεία σε ένα δειγματοληπτικό χώρο, η οποία απεικονίζεται στην σχέση 2.4. Οπου  $C_x$  είναι η συνδιακύμανση του πεδίου (Χριστόπουλος, “Εφαρμοσμένη Γεωστατιστική”, 2014), (Χριστόπουλος, “Εισαγωγή στις Πιθανότητες και τη Στατιστική για Μηχανικούς”, 2016).

$$f_x(X(s)) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{N}{2}}} (\det \|C_x\|)^{-\frac{1}{2}} \exp[-\frac{1}{2}(X(s) - m_x)^T C_x^{-1} (X(s) - m_x)] \quad (2.4)$$

### 2.2.1 Διάγραμμα Voronoi

Το διάγραμμα Voronoi απαρτίζεται από μια σειρά κυρτών πολυγώνων. Επομένως το διάγραμμα διαιρεί το επίπεδο σε περιοχές και κάθε σημείο του εξαρτάται από την τιμή του πλησιέστερου σημείου των δεδομένων. Κάθε πολύγωνο που σχηματίζεται, ανάλογα με το εμβαδόν του βρίσκεται η σχετική επιρροή που έχει στο σύνολο, δηλαδή όσο μεγαλύτερο είναι το εμβαδόν τόσο μεγαλύτερη η βαρύτητα που δίνει. Επίσης κάθε κυψελίδα προϋποθέτει ότι στο κέντρο της έχει μια και μοναδική τιμή του τυχαίου πεδίου. Τα όρια των περιοχών των πολυγώνων αποτελούνται από ακμές και κορυφές, όπου οι ακμές κατά την μαθηματική έννοια είναι μέγιστα ανοικτά ευθύγραμμα τμήματα και οι κορυφές είναι τα ακραία σημεία τους. Κάθε σημείο ακμής απέχει την ίδια απόσταση από δυο σημεία, ενώ η κορυφή για τουλάχιστον τρία σημεία. Εν συντομία οι διαιρούμενες περιοχές οριοθετούνται από άκρη σε άκρη και από κορυφή σε κορυφή, σχηματίζοντας μια πολυγωνική αλληλουχία, που είναι άρτια συνδεδεμένες με τις τιμές του επιπέδου (Aurenhammer, 1991).



Εικόνα 2. 3 Παράδειγμα διαγράμματος Voronoi πραγματικών δεδομένων

### 2.2.2 Τάση

Η τάση είναι μια αιτιοκρατική συνάρτησή που αποδίδει τις μελετώμενες τιμές εν συναρτήσει την θέση των σημείων και αντικατοπτρίζει την χωρική διακύμανση στο πεδίο. Η τάση περιγράφεται ακριβώς από πρότυπα εξισώσεων και χωρίζεται σε διαφορά μοντέλα. Το κατάλληλο μοντέλο επιλέγεται σύμφωνα με την κατανομή της τάσης των δεδομένων στον χώρο. Η γραμμική τάση είναι ένα από αυτά, η οποία υποδεικνύει την σταθερή κλίση κατά την αύξουσα πορεία της. Η τάση χρησιμοποιείται για την ανάλυση της μεταβλητότητας ενός γεωλογικού φαινομένου σε μεγάλη κλίμακα. Περιγράφεται από την εξίσωση 2.5.

$$m_x(s) = m_0 + b s \quad (2.5)$$

Άλλο ένα μοντέλο είναι η πολυωνυμική τάση η οποία συνήθως εμφανίζεται κατά την δευτεροβάθμια συνάρτηση. Αποδίδεται με την εξίσωση 2.6.

$$m_x(s) = m_0 + b_1 s_1 + b_2 s_2 + c_1 s_1^2 + c_2 s_2^2 + c_{12} s_1 s_2 \quad (2.6)$$

Αφού επιλεγθεί το κατάλληλο μοντέλο τάσεων, και τα δεδομένα παρουσιάζουν τάση σύμφωνα με κάποια μετρά επιβεβαίωσης, τότε αφαιρείται και το πεδίο είναι μόνο διακύμανση ώστε να επιτευχθεί ο στόχος της στασιμότητας του πεδίου (Hristopulos, 2020), (Χριστόπουλος, “Εφαρμοσμένη Γεωστατιστική”, 2014), (Harding & Deutsch, 2021).

### 2.2.3 Διακύμανση

Η διακύμανση είναι μια στοχαστική μεταβλητή ενός τυχαίου πεδίου και παίρνει τυχαίες τιμές που προσδιορίζονται μέσω κατανομών πιθανοτήτων. Επομένως η διακύμανση αντικατοπτρίζει διακυμάνσεις μικρότερης κλίμακας γύρω από μια αιτιοκρατική τάση. Η



εξίσωση 2.7 της διακύμανσης αποτελείται από τις τιμές του τυχαίου πεδίου μειωμένες κατά την τάση.

$$X'(s) = X(s) - m_x(s) \quad (2.7)$$

Ανάλογα με την διάσπαση του πεδίου αποδίδεται σε διαφορετικές περιπτώσεις. Αν η διακύμανση είναι μηδενική τότε το πεδίο ταυτίζεται με την αιτιοκρατική τάση και δεν παρουσιάζει στοχαστικό κομμάτι. Σε άλλη περίπτωση υπάρχει πιθανότητα η τάση να είναι αρκετά μικρή ώστε να θεωρείται αμελητέα. Τότε το πεδίο είναι μόνο στοχαστικό (Hristopulos, “Random Fields for Spatial Data Modelling. A Primer for Scientists and Engineers”, 2020).

### 2.3 Κατηγορίες Σφαλμάτων

Τα σφάλματα των μετρήσεων χωρίζονται σε δυο κατηγορίες ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν (π.χ. απειρία στην διαδικασία της δειγματοληψίας κ.α.) και την φύση των μετρήσεων (π.χ. τυχαίες διακυμάνσεις). Η πρώτη κατηγορία είναι τα τυχαία σφάλματα, τα οποία επηρεάζουν τις μετρήσεις με ακανόνιστο τρόπο λόγω του τυχαίου θορύβου που προκαλείται και όχι με μεθοδικά επαναλαμβανόμενους τρόπους. Αυτή η ανακρίβεια που προβάλλεται από τα τυχαία σφάλματα, έγκειται σε τυχαίες διακυμάνσεις στις μετρούμενες τιμές. Ενώ η δεύτερη κατηγορία τα συστηματικά σφάλματα, τα οποία εμπίπτουν σε επαναλαμβανόμενες και συνεχείς ατέλειες, που τελικά οι μετρήσεις προκύπτουν ανακριβείς. Επίσης δημιουργούνται από μια ντετερμινιστική διαταραχή ενός όργανου μέτρησης (Hristopulos, “Random Fields for Spatial Data Modelling. A Primer for Scientists and Engineers”, 2020), (Χριστόπουλος, “Εισαγωγή στις Πιθανότητες και τη Στατιστική για Μηχανικούς”, 2016).

#### 2.3.1 Μέτρα επιβεβαίωσης

Το μέσο σφάλμα υπολογίζει την διαφορά της αναμενομένης τιμής με την πραγματική τιμή που εκφράζεται ως μεροληψία της εκτίμησης. Υπολογίζεται με την παρακάτω εξίσωση :

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\hat{x}(s_i) - x(s_i)] \quad (2.8)$$

Το μέσο απολυτό σφάλμα ορίζεται από την απολυτή τιμή της μεροληψίας, το οποίο σημαίνει ότι το σφάλμα αυτό αποδίδει το μέγεθος ανάμεσα σε αυτές τις τιμές, χωρίς να



μας ενδιαφέρει ιδιαίτερα η μεταξύ τους διαφορά. Όπως αναγράφεται παρακάτω υπό την μορφή εξίσωσης.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\hat{x}(s_i) - x(s_i)| \quad (2.9)$$

Η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος δίνει την επιβεβαίωση ποσό καλή προσαρμογή έχει ένα γραμμικό μοντέλο πάνω στα δεδομένα. Επίσης τα σφάλματα υψώνονται στο τετράγωνο, πράγμα που σημαίνει ότι η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος δίνει υψηλότερο βάρος στα μεγαλύτερα σφάλματα (Tianfeng Chai et al., 2014). Η εξίσωση (RMSE) γράφεται ως :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\hat{x}(s_i) - x(s_i)]^2} \quad (2.10)$$

Ο συντελεστής συσχέτισης του Pearson μετρά την σχέση ποσοτικά μεταξύ δυο μεταβλητών, ο οποίος γράφεται ως εξής :

$$\rho = \frac{\sum_{n=1}^N [x_n^* - \bar{x}_n^*] [\hat{x}_n - \bar{\hat{x}}_n]}{\sqrt{\sum_{n=1}^N [x_n^* - \bar{x}_n^*]^2} \sqrt{\sum_{n=1}^N [\hat{x}_n - \bar{\hat{x}}_n]^2}} \quad (2.11)$$

Το (ρ) παίρνει τιμές από -1 έως 1, ανάλογα με τις τιμές υπάρχουν διαφορετικές περιπτώσεις. Για ρ=1, υπάρχει τέλεια γραμμική συσχέτιση. Γενικά για θετικές τιμές, αυξάνουν μαζί οι δυο μεταβλητές, ενώ για αρνητικές τιμές, η συσχέτιση των δυο μεταβλητών είναι αντιστρόφως ανάλογη. Αν το ρ=0, τότε θεωρητικά οι μεταβλητές είναι ασυσχέτιστες (Καπαγερίδης, 2015).

#### 2.4 Συνάρτηση Συνδιασποράς

Η συνάρτηση συνδιασποράς εκφράζει την συσχέτιση των διακυμάνσεων του πεδίου σε δυο διαφορετικά σημεία, με βάση αυτή την εξίσωση 2.12.

$$\begin{aligned} c_x(s_1, s_2) &= E[X(s_1)X(s_2)] - E[X(s_1)]E[X(s_2)] \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow c_x(s_1, s_2) &= E[\{X(s_1) - m_x(s_1)\}\{X(s_2) - m_x(s_1)\}] \end{aligned} \quad (2.12)$$

Σε ένα τυχαίο σημείο  $s_1$  η τιμή του τυχαίου πεδίου αντιστοιχεί στην διακύμανση, το οποίο συνεπάγεται ότι η αναμενόμενη τιμή της συνδιακύμανσης είναι μηδενική. Επομένως προκύπτει στην παρακάτω εξίσωση 2.13 ότι η κεντρική συνάρτηση της συνδιασποράς είναι ίση με την συνάρτηση συνδιασποράς διακύμανσης.

$$c_x(\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2) = E[X'(\mathbf{s}_1)X'(\mathbf{s}_2)] \quad (2.13)$$

Εάν δυο σημεία του τυχαίου πεδίου αλληλεπικαλύπτονται, τότε η τιμή της συνδιασποράς συμπίπτει με την διασπορά του πεδίου, όπως δείχνει στην εξίσωση 2.14 (Χριστόπουλος, “Εφαρμοσμένη Γεωστατιστική”, 2014).

$$c_x(\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_1) = \sigma_x^2(\mathbf{s}_1) \quad (2.14)$$

#### 2.4.1 Στατιστική Ομοιογένεια

Κάποιες υποθέσεις δημιουργούν ανακρίβειες και ανομοιογένεια. Για πιο αποτελεσματικές μεθόδους γεωστατιστικής ανάλυσης πρέπει να τεθούν περιορισμοί ως προς τα χαρακτηριστικά του τυχαίου πεδίου. Η πιο κοινώς αποδεκτή και απλή υπόθεση είναι η στατιστική ομοιογένεια. Η στατιστική ομοιογένεια παρουσιάζεται σαν εξειδίκευση του ορισμού της ομοιογένειας, όπου μια μεταβλητή για να είναι ομοιογενής σημαίνει ότι είναι αναλλοίωτη στο χώρο. Επομένως σε ένα τυχαίο πεδίο που είναι στατιστικά ομοιογενές ισχύει πως η μέση τιμή είναι ομοιόμορφη και αμετάβλητη  $m_x(\mathbf{s}) = m_x$ , η συνάρτηση της συνδιασποράς εξαρτάται μόνο από την απόσταση των σημείων  $\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2$ ,  $c_x(\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2) = c_x(\mathbf{r})$  και τέλος η διασπορά πρέπει να είναι σταθερή, το οποίο συνεπάγεται από την προηγούμενη παραδοχή για κάθε υποσύνολο πεδίου.

Για την ακρίβεια, οι παραδοχές οι οποίες μόλις αναλυθήκαν αντικατοπτρίζουν την ασθενή έννοια της στατιστικής ομοιογένειας. Διαφορετικά κατά την ισχυρή έννοια, ένα τυχαίο πεδίο για να θεωρείται στατιστικά ομοιογενές, πρέπει η πολυδιάστατη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας να μένει σταθερή από μετασχηματισμούς οι οποίοι μεταβάλλουν την θέση των δεδομένων χωρίς να μεταβάλλουν τις μεταξύ τους αποστάσεις. Εν κατακλείδι η στατιστική ομοιογένεια θέτει ως αναγκαίο γνώρισμα ότι δεν υπάρχουν χωρικές τάσεις για να μπορεί να παρουσιαστεί η μεταβολή των τιμών σε διακυμάνσεις γύρω από μια σταθερή στάθμη ίση με την μέση τιμή.

Για τα στατιστικά ομοιογενή πεδία παρατηρούνται δυο σημαντικές παράμετροι, πρώτον η διασπορά  $\sigma_x^2 = c_x(0)$  και δεύτερον το μήκος συσχέτισης  $\xi$ . Η διασπορά ισούται με το μέτρο του πλάτους των μεταβολών του πεδίου. Το μήκος συσχέτισης ή ακτίνα επιρροής είναι το διάστημα που παρουσιάζουν συσχέτιση τα δεδομένα και κανονικοποιεί την

απόσταση (Χριστόπουλος, “Εφαρμοσμένη Γεωστατιστική”, 2014) (Wackernagel, 2013).

#### 2.4.2 Στατιστική Ισοτροπία

Η στατιστική ισοτροπία είναι μια συγγενική ιδιότητα με την στατιστική ομοιογένεια, την οποία καθιστά ως προϋπόθεση για τον ορισμό της. Ένα τυχαίο πεδίο για να είναι στατιστικό ισοτροπικό αναγκαστικά πρέπει να έχει στατιστικά ομοιογενές χαρακτήρα και η συνάρτηση συνδιασποράς να εξαρτάται αποκλειστικά από το μέτρο της απόστασης  $\|r\|$  και όχι από την κατεύθυνση του διανύσματος της απόστασης. Επίσης αν τυχόν μια συνάρτηση συνδιασποράς είναι στατιστικά ισοτροπική απαραίτητως είναι και στατιστικά ομοιογενής, ενώ το αντίστροφο δεν είναι εφικτό. Όσον αφορά την ανισοτροπία, τα κυρία χαρακτηριστικά της ανισοτροπίας είναι ότι παρουσιάζουν διαφορετικές τιμές σε διαφορετικές κατευθύνσεις. Κυρίως η συνδιασπορά ενός ανισότροπου τυχαίου πεδίου επηρεάζεται από την απόσταση και από την κατεύθυνση του διανύσματος της απόστασης. Η ανισοτροπία χωρίζεται σε δυο κατηγορίες, την γεωμετρική και την ζωνική (Χριστόπουλος, “Εφαρμοσμένη Γεωστατιστική”, 2014).

#### 2.4.3 Μοντέλα Συνδιασποράς

Στην γεωστατιστική ανάλυση χρησιμοποιούνται ευρέως μοντέλα συνδιασποράς, τα οποία διακατέχουν την υπόσταση των ισοτροπικών μοντέλων όπως αναφέρθηκε παραπάνω και για αυτό το λόγο εξαρτώνται μόνο από την απόσταση και ιδιαίτερα από το μέτρο της. Τα ισοτροπικά μοντέλα είναι τα εξής:

##### 1. Εκθετικό

$$c_x(r) = \sigma_x^2 \exp\left(-\frac{\|r\|}{\xi}\right) \quad (2.15)$$

##### 2. Σφαιρικό

$$c_x(r) = \sigma_x^2 \left[ 1 - 1.5 * \left(\frac{\|r\|}{\xi}\right) + 0.5 * \left(\frac{\|r\|}{\xi}\right)^3 \right] \theta(\xi - \|r\|) \quad (2.16)$$

##### 3. Γκαουσιανό

$$c_x(r) = \sigma_x^2 * \exp\left(-\frac{r^2}{\xi^2}\right) \quad (2.17)$$

#### 4. Γενικευμένο εκθετικό

$$c_x(r) = \sigma_x^2 \exp\left(-\frac{||r||^\nu}{\xi^\nu}\right), 0 < \nu < 2 \quad (2.18)$$

#### 5. Matern

$$c_x(r) = \frac{\sigma_x^2}{2^{\nu-1} \Gamma(\nu)} \left(\frac{2^* \sqrt{\nu}}{R} ||r||\right)^\nu K_\nu \left(\frac{2^* \sqrt{\nu}}{R} * ||r||\right) \quad (2.19)$$

#### 6. Φαινόμενο Πυρήνα ή κόκκου

$$c_x(r) = c_0, ||r|| = 0 \text{ και } c_x(||r||) = 0, ||r|| \neq 0 \quad (2.20)$$

#### 7. Δυναμονονικό-αλγεβρικό

$$\lim_{||r|| \rightarrow \infty} c_x(r) \sim ||r||^{2\alpha}, -1 < \alpha < 0 \quad (2.21)$$

#### 2.4.4 Κριτήρια Αποδοχής Συνδιασποράς

Η συνάρτηση συνδιασποράς είναι μια αιτιοκρατική συνάρτηση δυο σημείων, η οποία αποδίδει την συσχέτιση των τιμών στον χώρο. Επομένως γεννάται το ερώτημα αν κάθε αιτιοκρατική συνάρτηση αντιστοιχίζεται με μια συνάρτηση συνδιασποράς ή η συνάρτηση της συνδιασποράς πρέπει να πληρεί κάποιες προϋποθέσεις. Αυτό το ερώτημα λύνεται με το θεώρημα του Bochner, διότι απαραίτητη προϋπόθεση είναι οι συνθήκες που ορίζουν τα μοντέλα συνδιασποράς. Το θεώρημα Bochner δίνει τις συνθήκες αποδοχής για την συνάρτηση συνδιασποράς, με την βοήθεια της φασματικής πυκνότητας συνδιασποράς. Ο μαθηματικός τύπος της φασματικής πυκνότητας συνδιασποράς αποδίδεται από τον μετασχηματισμό Fourier εν συναρτήσει του κυματαριθμού  $k$ , όπως φαίνεται στην εξίσωση 2.22 (Χριστόπουλος, “Εφαρμοσμένη Γεωστατιστική”, 2014).

$$\tilde{c}_x(k) = \int dr e^{-i*k*r} c_x(r) \quad (2.22)$$

## 2.5 Βαριογραφία

Η μέθοδος της βαριογραφίας αποσκοπεί στην ανάλυση της μεταβολής μιας χωρικής μεταβλητής. Επίσης επιτελεί βασική αρχή για την μοντελοποίηση του βαριογράμματος και της παρεμβολής των χωρικών γεωστατιστικών δεδομένων.

### 2.5.1 Βαριόγραμμα

Το μοντέλο της χωρικής ανάλυσης καλείται βαριόγραμμα, το οποίο αναπαριστά την μεταβολή του μέσου ρυθμού του εξεταζόμενου στοιχείου με την απόσταση. Ειδικότερα το γράφημα του βαριογράμματος παρουσιάζει πως μεταβάλλονται οι τιμές σε σχέση με την αύξηση της απόστασης. Το πειραματικό ή εμπειρικό βαριόγραμμα ορίζεται ως το μισό της μέση τιμής του τετράγωνου της διαφοράς ενός ζεύγους σημείων, το οποίο απεικονίζεται ως συνάρτηση του  $\gamma_x$  και εμφανίζεται με την παρακάτω εξίσωση.

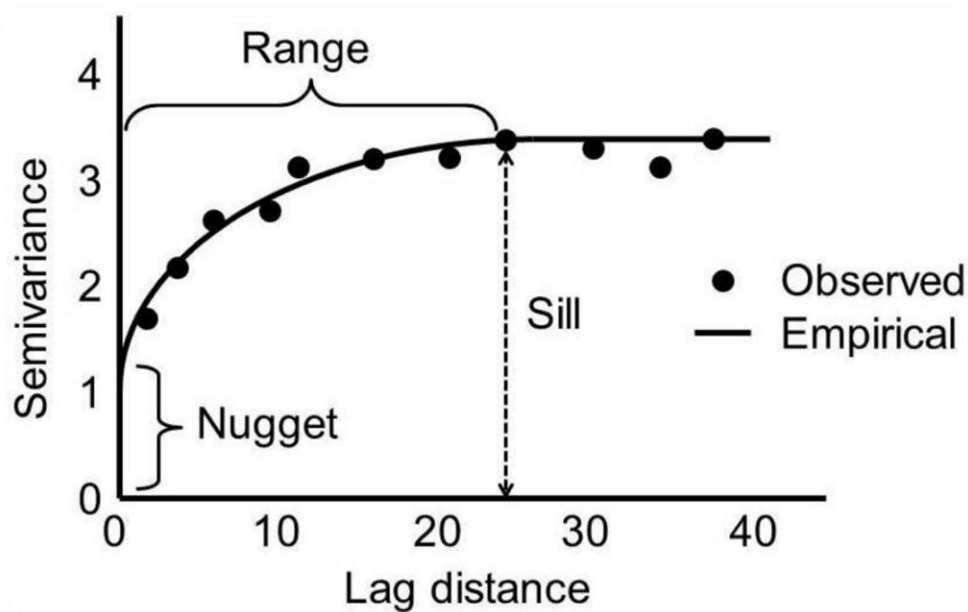
$$\gamma_x(\mathbf{s}, \mathbf{r}) = \frac{1}{2} E\{[X(\mathbf{s} + \mathbf{r}) - X(\mathbf{s})]^2\} \quad (2.23)$$

Από την εξίσωση 2.23 προκύπτει ότι για  $\mathbf{r} = 0$  η τιμή του βαριογράμματος μηδενίζεται και προκύπτει ότι το βαριόγραμμα είναι ημιτελικά ορισμένο,  $\gamma_x \geq 0$ . Για την μοντελοποίηση του βαριογράμματος βρίσκεται η τετραγωνική διαφορά μεταξύ των ζευγών των δειγματικών τιμών. Οπου σχηματίζεται το παραγοντικό διάγραμμα με τις διαφορές που προέκυψαν σε σχέση με τα ζεύγη των δειγμάτων στο χώρο. Το παραγοντικό διάγραμμα χωρίζεται σύμφωνα με την μέγιστη απόσταση αποκοπής και σχηματίζει κλάσεις, όπου σε κάθε κλάση έχει μια και μοναδική τιμή την μέση τιμή των διαφορών που εν τελεί ισούνται με την τιμή του εμπειρικού βαριογράμματος. Επιπρόσθετα εάν ένα τυχαίο πεδίο είναι στατιστικά ομοιογενές τότε συνδυάζεται το βαριόγραμμα με την συνάρτηση της συνδιασποράς στην εξίσωση 2.24 (Wackernagel, 2013).

$$\gamma_x(r) = \sigma_x^2 - c_x(r) \quad (2.24)$$

Η τιμή του βαριογράμματος αυξάνεται όσο αυξάνεται η απόσταση και τείνει να σταθεροποιηθεί και σε αυτό το στάδιο ισούνται με την διακύμανση στο τετράγωνο ή διασπορά του πεδίου. Αντίστροφα γίνεται στην συνάρτηση συνδιασποράς με την απόσταση το οποίο αποδεικνύεται από την εξίσωση 2.24. Επίσης ένα άλλο στοιχείο είναι η ακτίνα επιρροής, η οποία είναι η απόσταση που είναι συσχετισμένα τα σημεία

και ανάλογα με τον τύπο του θεωρητικού βαριογράμματος υπολογίζεται και το μήκος συσχέτισης. Επιπρόσθετα ένα ακόμα βασικό στοιχείο του βαριογράμματος είναι το φαινόμενο κόκκου, το οποίο έχει μονάδες ίδιες με την διασπορά και θεωρείται ένα μέρος της διασποράς το οποίο αποδίδεται στα τυχαία σφάλματα και στην μεταβλητότητα που παρουσιάζει μικρότερη απόσταση από την ελάχιστη απόσταση μεταξύ των μετρήσεων. Εμφανίζεται στην αρχή του βαριογράμματος και θεωρείται σαν ασυνέχεια του πεδίου (Καπαγερίδης, 2015), (Χριστόπουλος, “Εφαρμοσμένη Γεωστατιστική”, 2014).



Εικόνα 2. 4 Διάγραμμα βαριογράμματος που αποτελείται από τα σημεία του εμπειρικού βαριογράμματος και την χάραξη του θεωρητικού μοντέλου που προσαρμόζεται καλύτερα. Επίσης διακρίνονται 3 χαρακτηριστικά ενός θεωρητικού μοντέλου, το φαινόμενο κόκκου(nugget effect), η ακτίνα επιρροής(Range), και το άνω φράγμα(sill) (Biswas & Cheng Si, 2013)

#### 2.5.2 Ιδιότητες βαριογράμματος

Οι περιπτώσεις στασιμότητας του τυχαίου πεδίου είναι ικανές να διαφοροποιήσουν τα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες του ημιβαριογράμματος ή βαριογράμματος. Στην πρώτη εκδοχή σε ένα τυχαίο πεδίο με στατιστικά ομοιογενές χαρακτήρα που παρουσιάζει ισοτροπική εξάρτηση, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, παρατηρείται ενδιαφέρον σε δυο παραμέτρους το άνω φράγμα και το μήκος συσχέτισης. Η τιμή του βαριογράμματος για πολύ μεγάλες αποστάσεις τείνει εξ επαφής προς το άνω φράγμα, το οποίο ισούται με την διασπορά και το φαινόμενο κόκκου του πεδίου, εφόσον

υπάρχει. Επίσης σε ένα ιστροπικό βαριόγραμμα, οι ισοϋψείς καμπύλες (ο τόπος των διανυσμάτων απόστασης όπου προκύπτει  $\gamma_x(r) = c_i$  είναι κυκλικές. Στην δεύτερη εκδοχή το πεδίο είναι ανιστροπικό, όπου αλλάζουν οι ιδιότητες του πεδίου σε διαφορετικές κατευθύνσεις. Η γεωμετρική ανιστροπία, ένα είδος από τα δυο της ανιστροπίας, όπου το άνω φράγμα είναι ανεξάρτητο της κατεύθυνσης και το μήκος συσχέτισης εξαρτάται από την διεύθυνση. Στην ανιστροπία ζώνης το άνω φράγμα εξαρτάται από την χωρική κατεύθυνση (Χριστόπουλος, “Εφαρμοσμένη Γεωστατιστική”, 2014).

### 2.5.3 Μοντέλα Βαριογράμματος

Τα παρακάτω μοντέλα που θα αποτυπωθούν, είναι τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα μοντέλα βαριογράμματος τα οποία ως θεωρητικά μοντέλα πρέπει να συμβαδίζουν με τα πειραματικά δεδομένα. Τα μοντέλα είναι τα εξής:

#### 1. Εκθετικό

$$\gamma_x(r) = \sigma_x^2 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\|r\|}{\xi}\right) \right] \quad (2.25)$$

#### 2. Γκαουσιανό

$$\gamma_x(r) = \sigma_x^2 \left[ 1 - \exp(-\|r\|^2/\xi^2) \right] \quad (2.26)$$

#### 3. Σφαιρικό

$$\gamma_x(r) = \begin{cases} \sigma_x^2 \left[ 1.5 \left( \frac{\|r\|}{\xi} \right) - 0.5 \left( \frac{\|r\|}{\xi} \right)^3 \right], & \|r\| \leq \xi \\ \sigma_x^2, & \|r\| \geq \xi \end{cases} \quad (2.27)$$

#### 4. Γενικευμένο εκθετικό

$$\gamma_x(r) = \sigma_x^2 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\|r\|^\nu}{\xi^\nu}\right) \right], 0 < \nu < 2 \quad (2.28)$$

#### 5. Δυναμονονικό

$$\gamma_x(r) = a ||r||^{2H}, 0 < H < 1, \alpha > 0 \quad (2.29)$$

#### 6. Γραμμικό

$$\gamma_x(r) = \alpha ||r||, \alpha > 0 \quad (2.30)$$

#### 7. Φαινόμενο Πυρήνα ή Κόκκου

$$\gamma_x(r) = \begin{cases} 0, r = 0 \\ c_0, r \neq 0 \end{cases} \quad (2.31)$$

#### 8. Βαριόγραμμα Matern

$$\gamma_x(r) = \sigma_x^2 \left[ 1 - \frac{1}{2^{\nu-1} \Gamma(\nu)} \left( \frac{2\sqrt{\nu}}{R} ||r|| \right)^{\nu} K_{\nu} \left( \frac{2\sqrt{\nu}}{R} ||r|| \right) \right] \quad (2.32)$$

Το σφαιρικό, το γκαουσιανό και το εκθετικό χρησιμοποιούνται περισσότερο από τα υπόλοιπα και για αυτό το λόγο θα αναφερθούν παρακάτω κάποια χαρακτηριστικά που είναι αναγνωριστικά για το κάθε ένα. Το σφαιρικό χρησιμοποιείται συχνά με ένα μοντέλο του φαινομένου κόκκου και είναι πολύ ομαλή η καμπυλότητα του. Το Γκαουσιανό χαρακτηρίζεται από ομαλότερες μεταβολές και ειδικά στην αρχή υιοθετεί συνεχή συμπεριφορά. Το εκθετικό σε αντίθεση με το γκαουσιανό έχει πιο απότομες μεταβολές και με αποτέλεσμα να φτάνει πιο γρηγορά στο άνω φράγμα (Καπαγερίδης, 2015).

#### 2.5.4 Κριτήρια Αποδοχής Βαριογράμματος

Για να είναι αποδεκτό ένα βαριόγραμμα πρέπει να ικανοποιεί μια συνθήκη που περιγράφεται από την εξίσωση (2.33) για κάθε γραμμικό συντελεστή  $w_a$  και συγχρόνως μια ανισότητα (2.34), που όλα αυτά για να ισχύουν, το βαριόγραμμα οφείλει να είναι υπό συνθήκη αρνητικά ορισμένο.

Συνθήκη



$$\sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha} = 0 \quad (2.33)$$

Ανισότητα

$$-\sum_{\alpha=1}^n \sum_{\beta=1}^n w_{\alpha} w_{\beta} \gamma_x(s_{\alpha} - s_{\beta}) \geq 0 \quad (2.34)$$

Είναι αδύνατο να γίνει σωστά ο έλεγχος της ανισότητας, χωρίς την βοήθεια του θεωρήματος του Bochner το οποίο δουλεύει ως κριτήριο αποδοχής. Σύμφωνα με το θεώρημα, έχει τις εξής συνθήκες:

- $\gamma_x(0) = 0$
- Υπάρχει ο γενικευμένος μετασχηματισμός Fourier  $\gamma_x(k)$
- $\gamma_x(k)$  ικανοποιεί την ανισότητα :  $-k^2 \gamma_x(k) \geq 0$
- $\lim_{r \rightarrow \infty} \frac{\gamma_x(r)}{r^2} = 0$

Αμα το τυχαίο πεδίο είναι στατιστικά ομοιογενές είναι πιο εύκολο να αποδειχθεί η εγκυρότητα ως βαριόγραμμα χρησιμοποιώντας την εξίσωση  $\sigma_x^2 - \gamma_x(r)$ . Εφόσον η  $\gamma_x(r)$  απεικονίζει ένα αποδεκτό βαριόγραμμα, τότε από την εξίσωση που συνδέει το ημιβαριόγραμμα με την συνάρτηση της συνδιασποράς αποκαλύπτει, ότι η συνάρτηση συνδιασποράς είναι αποδεκτή και το αντίστροφο (Χριστόπουλος, “Εφαρμοσμένη Γεωστατιστική”, 2014).

## 2.6 Εκτίμηση Τυχαίων Πεδίων (Μέθοδος Kriging)

Κατά την έννοια του τυχαίου πεδίου μεταβλητών αποτυπώνεται η μεταβολή μιας ιδιότητας στο χώρο. Ο ορός ‘εκτίμηση’ αποτελεί τις μαθηματικές διεργασίες που αποσκοπούν στην εύρεση τιμών του πεδίου σε σημεία που δεν βρίσκονται μετρήσεις της ιδιότητας. Η εκτίμηση μπορεί να είναι σημειακή, όταν πρόκειται για τιμή του πεδίου σε συγκεκριμένο σημείο και γενική όταν για μια ολόκληρη περιοχή χαρακτηρίζεται μια ομότιμη τιμή. Γενικά οι μέθοδοι εκτίμησης βασίζονται σε μια αλληλουχία γραμμικών ή μη γραμμικών γειτονικών τυχαίων μεταβλητών και τις παραμέτρους τύπου σφάλματος για την γενικότερη ελαχιστοποίηση του σφάλματος της εκτίμησης.

Η πιο γνωστή μέθοδος εκτίμησης είναι αυτή του Kriging. Το Kriging είναι ο βέλτιστος αμερόληπτος γραμμικός συντελεστής της υπό μελέτη ιδιότητας. Στην εκτίμηση προσθέτονται βάρη, τα οποία δημιουργούν μια τελική εκτίμηση με ελάχιστο

τετραγωνικό σφάλμα. Το κύριο πλεονέκτημα του Kriging που το κάνει να είναι τελείως διαφορετικό σε σχέση με τις άλλες μεθόδους, είναι ότι το kriging είναι ένας ζυγισμένος μέσος που θέτει την συνδιασπορά ή το βαριόγραμμα ως συνάρτησης του βάρους. Τα βάρη στο δειγματοληπτικό χώρο οριοθετούνται σε μια καθορισμένη περιοχή μελέτης, δηλαδή μια γειτονιά η οποία επιφέρει το αποτέλεσμα της βέλτιστης τελικής εκτίμησης με μικρές διακυμάνσεις. Η γειτονιά συσχέτισης  $\omega(u)$  αποτελείται  $n(u) \leq N$  σημεία από τα  $s_i$  ( $i=1, \dots, N$ ) και το μέγεθος της υπολογίζεται σύμφωνα με το μήκος ή τα μήκη συσχέτισης ανάλογα το είδος του τυχαίου πεδίου. Η διακύμανση του τυχαίου πεδίου στο σημείο εκτίμησης υπολογίζεται ως:

$$\hat{X}(u) - m_x(u) = \sum_{\alpha=1}^{n(u)} w_{\alpha} [X(s_{\alpha}) - m_x(s_{\alpha})] \quad (2.35)$$

Επίσης η εξίσωση 2.35 αποδίδει τη διακύμανση στο σημείο εκτίμησης σαν συνάρτηση της διακύμανσης στα εναπομείναντα σημεία της γειτονιάς εκτίμησης. Επομένως η εκτιμώμενη τιμή του τυχαίου πεδίου αντικατοπτρίζεται από την εξίσωση (2.36).

$$\hat{X}(u) = m_x(u) + \sum_{\alpha=1}^{n(u)} w_{\alpha} [X(s_{\alpha}) - m_x(s_{\alpha})] \quad (2.36)$$

Η εκτιμώμενη τιμή  $\hat{X}(u)$  είναι μια μεταβλητή η οποία συμβαδίζει με την θεωρία των τυχαίων πεδίων διότι απαρτίζεται από ένα γραμμικό συνδυασμό τιμών ενός τυχαίου πεδίου. Έτσι προκύπτει ότι το σφάλμα εκτίμησης  $\varepsilon(u) = X(u) - \hat{X}(u)$  είναι και αυτό τυχαία μεταβλητή. Η μέθοδος kriging χωρίζεται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο προσέγγισης ανάλυσης του πεδίου σε τάση και διακυμάνσεις. Οι κατηγορίες είναι οι εξής:

- Simple Kriging: χρησιμοποιείται όταν η μέση τιμή του τυχαίου πεδίου είναι γνωστή σε όλη την περιοχή του δειγματοληπτικού χώρου.
- Ordinary Kriging: χρησιμοποιείται όταν η μέση τιμή του τυχαίου πεδίου είναι αμετάβλητη στην γειτονιά  $\omega(u)$  του σημείου εκτίμησης. Η τιμή της μέσης τιμής σε μια συγκεκριμένη γειτονιά μπορεί να διαφέρει σε μια άλλη γειτονιά.
- Universal Kriging: χρησιμοποιείται όταν η μέση τιμή του πεδίου διαφέρει εντός της γειτονιάς συσχέτισης.
- Indicator Kriging: χρησιμοποιείται όταν η συνάρτηση κατανομής της πιθανότητας δεν έχει καθόλου συμμετρία και συγκεκριμένα εμφανίζει πιο μεγάλη πυκνότητα σε μεγαλύτερες τιμές.

- Co-Kriging: χρησιμοποιείται για να ενσωματωθούν νέοι παράμετροι συσχετισμένοι με το υπό μελέτη στοιχείο (Καπαγερίδης, 2015), (Χριστόπουλος, “Εφαρμοσμένη Γεωστατιστική”, 2014).

### 2.6.1 Απλό Kriging

Το Απλό kriging (Simple kriging) είναι ένα παρακλάδι της μεθόδου kriging το οποίο εφαρμόζεται στην περιοχή μελέτης όταν η τιμή της μέσης τιμής του πεδίου είναι γνωστή και σταθερή σε όλο το εύρος του πεδίου. Η εκτιμώμενη τιμή παριστάνεται από την εξίσωση (2.37) :

$$\hat{X}(u) = \sum_{\alpha=1}^{n(u)} w_{\alpha} X(s_{\alpha}) - m_x [\sum_{\alpha=1}^{n(u)} w_{\alpha} - 1] \quad (2.37)$$

Εάν ικανοποιείται η συνθήκη ελαχιστοποίησης του τετραγωνικού σφάλματος τότε υπολογίζονται οι συντελεστές των γραμμικών βαρών  $w_{\alpha}$ . Για την διασπορά του σφάλματος εκτίμησης χρησιμοποιούνται δυο εξισώσεις για την αποτύπωση της τελικής της μορφής. Από τον συνδυασμό της εξίσωσης της διασποράς (2.3) με την εξίσωση της διακύμανσης (2.35) απορρέει τελικά την παρακάτω εξίσωση (2.38).

$$\sigma_{E,SK}^2(u) = \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \sum_{\beta=1}^{n(u)} w_{\alpha} w_{\beta} c_x(s_{\alpha} - s_{\beta}) + \sigma_x^2 - 2 \sum_{\alpha=1}^{n(u)} w_{\alpha} c_x(s_{\alpha} - u) \quad (2.38)$$

Οι εξισώσεις των γραμμικών βαρών

$$\sum_{\beta=1}^{n(u)} w_{\beta} c_x(s_{\alpha} - s_{\beta}) = c_x(s_{\alpha} - u), \quad \alpha = 1, \dots, n(u) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow C_{\alpha,\beta} * w_{\beta} = C_{\alpha,u} \quad (2.39)$$

Όπου  $C_{\alpha,\beta}$  αντιστοιχεί στον πίνακα συνδιασποράς των στοιχείων  $\alpha, \beta$   $C_{\alpha,\beta} = c_x(s_{\alpha} - s_{\beta})$  και το  $C_{\alpha,u}$  αντιστοιχεί στις τιμές της συνδιασποράς ανάμεσα όλων των τυχαίων σημείων με το σημείο εκτίμησης  $C_{\alpha,u} = c_x(s_{\alpha} - u)$ .

Η εξίσωση 2.39 γράφεται και ως γραμμικό σύστημα υπό την μορφή πινάκων:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \cdots & \cdots & c_x(s_1 - s_n) \\ c_x(s_2 - s_1) & \cdots & \cdots & c_x(s_2 - s_n) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_x(s_n - s_1) & \cdots & \cdots & \sigma_x^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_x(s_1 - u) \\ c_x(s_2 - u) \\ \vdots \\ c_x(s_n - u) \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

Καθένα από αυτά τα στοιχεία του πίνακα της συνδιασποράς υπολογίζονται με βάση τη βέλτιστη συνάρτηση του βαριογράμματος, δηλαδή συνδέονται με την εξίσωση 2.41.

$$c_x(\mathbf{s}_\alpha, \mathbf{s}_\beta) = \sigma_x^2 - \gamma_x(\mathbf{s}_\alpha, \mathbf{s}_\beta) \quad (2.41)$$

Συμπερασματικά η λύση του γραμμικού συστήματος είναι τα γραμμικά βάρη  $w_\beta$ , μόνο εάν η συνάρτηση συνδιασποράς είναι ημιθετικά ορισμένη και μονοσήμαντη σε όλο το εύρος των τιμών. Επίσης τα στοιχεία της στήλης των γραμμικών βαρών δεν πρέπει να έχουν καμία συσχέτιση με το άνω φράγμα του βαριογράμματος, αλλά να εξαρτώνται από το πρότυπο της συνδιασποράς. Τέλος, η εκτίμηση του kriging πρέπει να είναι ακριβής, δηλαδή κάθε σημείο που αντιστοιχεί σε μια τιμή και η εκτίμηση να ταυτίζεται με αυτή την τιμή. Για την εξασφάλιση των ορθών αποτελεσμάτων χρησιμοποιείται η τετραγωνική ρίζα της διασποράς του σφάλματος εκτίμησης.

$$\sigma_{E,SK}^2 = \sigma_x^2 - \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \sum_{\beta=1}^{n(u)} C_{u,\alpha} C_{\alpha,\beta}^{-1} C_{\beta,u} \quad (2.42)$$

Από την εξίσωση 2.42 απορρέει ότι το σφάλμα εκτίμησης αυξάνεται με αναλογία ως προς την τυπική απόκλιση. Εφόσον τα γραμμικά βάρη είναι θετικά ορισμένα, το σφάλμα αυξάνεται όσο μειώνεται η ποσότητα  $|u - \mathbf{s}_\alpha|$ , η οποία ορίζεται ως η απόσταση του σημείου εκτίμησης και των σημείων που βρίσκονται διατεταγμένα στο δειγματοληπτικό χώρο (Goovaerts, 1997), (Χριστόπουλος, “Εφαρμοσμένη Γεωστατιστική”, 2014).

### 2.6.2 Κανονικό Kriging

Είναι η πιο πολυσύχναστη και αξιόπιστη μέθοδος kriging. Σε αντίθεση με το Απλό kriging που θεωρεί ότι η μέση τιμή είναι και γνωστή και σταθερή σε όλο το εύρος τιμών, το Κανονικό kriging χρησιμοποιεί τον όρο ‘γειτονιά’ αντί για όλη την περιοχή μελέτης. Επομένως η μέση τιμή είναι σταθερή σε κάθε γειτονιά μελέτης χωρίς να είναι απαραίτητα γνωστή και μπορεί να διαφοροποιείται από γειτονιά σε γειτονιά. Άρα για να βρεθεί η βέλτιστη μέση τιμή απαραίτητη προϋπόθεση θεωρείται η γνώση της συνάρτησης διασποράς και για να έχεις αυτή τη γνώση εξίσου θεωρείται δεδομένη η μέση τιμή. Το ‘αναδρομικό πρόβλημα’ που προκαλείται, λύνεται με την χρήση του Κανονικού kriging. Οπότε η εκτίμηση αποδίδεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\hat{X}(u) = \sum_{\alpha=1}^{n(u)} w_\alpha X(\mathbf{s}_\alpha) \quad (2.43)$$

$$\sum_{\alpha=1}^{n(u)} w_\alpha = 1 \quad (2.44)$$

Η εξίσωση 2.44 αποτελεί την συνθήκη της αμεροληψίας. Σύμφωνα με τον περιορισμό της συνθήκης αμεροληψίας υπολογίζεται το ελάχιστο μέσο τετραγωνικό σφάλμα. Οι εξισώσεις εύρεσης των γραμμικών βαρών είναι οι παρακάτω:

$$\sum_{\beta=1}^{n(u)} w_{\beta} * c_x(s_{\alpha} - s_{\beta}) + \mu = c_x(s_{\alpha} - u), \alpha = 1, \dots, n(u) \quad (2.45)$$

$$\sum_{\alpha=1}^{n(u)} w_{\alpha} = 1 \quad (2.46)$$

Μπορούν να γραφτούν και ως μορφή πινάκων. Όπως φαίνεται στην εξίσωση 2.47

$$\begin{bmatrix} \sigma_x^2 & c_x(s_1 - s_2) & \dots & c_x(s_1 - s_n) & 1 \\ c_x(s_2 - s_1) & \sigma_x^2 & \dots & c_x(s_2 - s_n) & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ c_x(s_n - s_1) & c_x(s_n - s_2) & \vdots & \sigma_x^2 & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_x(s_1 - u) \\ c_x(s_2 - u) \\ \vdots \\ c_x(s_n - u) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

Για την εκτίμηση του σφάλματος αποτυπώνεται το ελάχιστο μέσο σφάλμα εκτίμησης, το οποίο αποδίδεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\sigma_{E,OK}^2(u) = \sigma_x^2 - \sum_{\alpha=1}^{n(u)} w_{\alpha} c_x(u, s_{\alpha}) - \mu \quad (2.48)$$

Συμπερασματικά ο συντελεστής lagrange  $\mu$  είναι πάντα αρνητικός διότι η αβεβαιότητα είναι υψηλότερη λόγω της άγνοιας της μέσης τιμής του πεδίου στο Κανονικό kriging. Στο Απλό kriging που αποτυπώνεται με τον ίδιο τύπο χωρίς τον συντελεστή  $\mu$  συμπεραίνεται ότι είναι μικρότερο το σφάλμα διότι υπάρχει έντονη στασιμότητα με αυτή την μέθοδο ενώ με το Κανονικό kriging είναι πιο αβέβαια η εκτίμηση (Goonaerts, 1997), (Χριστόπουλος, “Εφαρμοσμένη Γεωστατιστική”, 2014).

### 2.6.3 Regression Kriging

Αλλιώς λέγεται kriging με παλινδρόμηση είναι παρόμοια μέθοδος παρεμβολής με το Κανονικό kriging, μόνο που η παλινδρόμηση προσθέτει περισσότερες πληροφορίες όσον αφορά τα σημεία δειγματοληψίας ώστε να εμπλουτίσει τις εκτιμώμενες τιμές παρεμβολής με μικρότερη αβεβαιότητα από το Κανονικό kriging. Γενικά οι εκτιμώμενες τιμές χωρίζονται σε αιτιοκρατική συνάρτηση τάσης και ένα υπολειμματικό πεδίο. Η συνάρτηση τάσης υπολογίζεται ως υπέρθεση συναρτήσεων βάσης που βασίζεται πάνω σε φυσικούς νόμους ή βοηθητικών μεταβλητών. Βασίζεται στην παρακάτω εξίσωση όπου  $f_k(s)$  με  $k=1,2,\dots,K$  είναι η συνάρτησης βάσης και  $X'(s; \omega)$

είναι το πεδίο διακύμανσης,  $\beta_k$  είναι οι συντελεστές τάσης. Στην προκειμένη περίπτωση εκτιμώνται με γραμμική παλινδρόμηση (Hristopulos, 2020).

$$X(\mathbf{s}; \omega) = \sum_{k=1}^K \beta_k f_k(\mathbf{s}) + X'(\mathbf{s}; \omega) \quad (2.49)$$

#### 2.6.4 Διασταυρωμένη επαλήθευση των εκτιμήσεων

Για να υπάρχει αξιοπιστία όσον αφορά τους μεθόδους χωρικής παρεμβολής πρέπει να εξεταστούν οι εκτιμώμενες τιμές που προκύπτουν από τα δεδομένα μέσω της μεθόδου Leave-one-out Cross-Validation. Η μέθοδος Leave-one-out Cross-Validation, η οποία εξετάζει σημείο προς σημείο την επαλήθευση των εκτιμωμένων τιμών με των πραγματικών τιμών. Συγκεκριμένα αφαιρεί ένα γνωστό σημείο και υπολογίζει την εκτιμώμενη τιμή σε εκείνο το σημείο σύμφωνα με την γειτονιά συσχέτισης και αν υπάρχει διαφορά σημαντική στις μετρήσεις αυτές αποσύρονται και δημιουργείται νέο γεωστατιστικό μοντέλο. Αυτό υλοποιείται με την βοήθεια των μέτρων επιβεβαίωσης που έχουν αναφερθεί παραπάνω, το μέσο σφάλμα (Mean Error), το μέσο απόλυτο σφάλμα (Mean Absolute Error), η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Root Mean Square Error) και ο συντελεστής συσχέτισης του Pearson (βλέπε κεφ. 2.1.3).

### 3 Γεωστατιστική Ανάλυση Δεδομένων

Η Γεωστατιστική ανάλυση διεκπεραιώθηκε με πραγματικά δεδομένα στάθμης υπόγειων υδάτων στην υπό μελέτη περιοχή. Τα δεδομένα συλλέχθηκαν από την Ελληνική Αρχή Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ε.Α.Γ.Μ.Ε.), επεξεργάστηκαν στην πλατφόρμα προγραμματισμού MATLAB και υλοποιήθηκαν τα εξής στατιστικά και γεωστατιστικά στοιχεία με βάση το θεωρητικό υπόβαθρο. Πραγματοποιήθηκαν με την σειρά, στατιστική ανάλυση, Voronoi, δημιουργία τάσης και αφαίρεσης, βαριογραφία και υλοποίηση της μεθόδου Κανονικού Kriging.

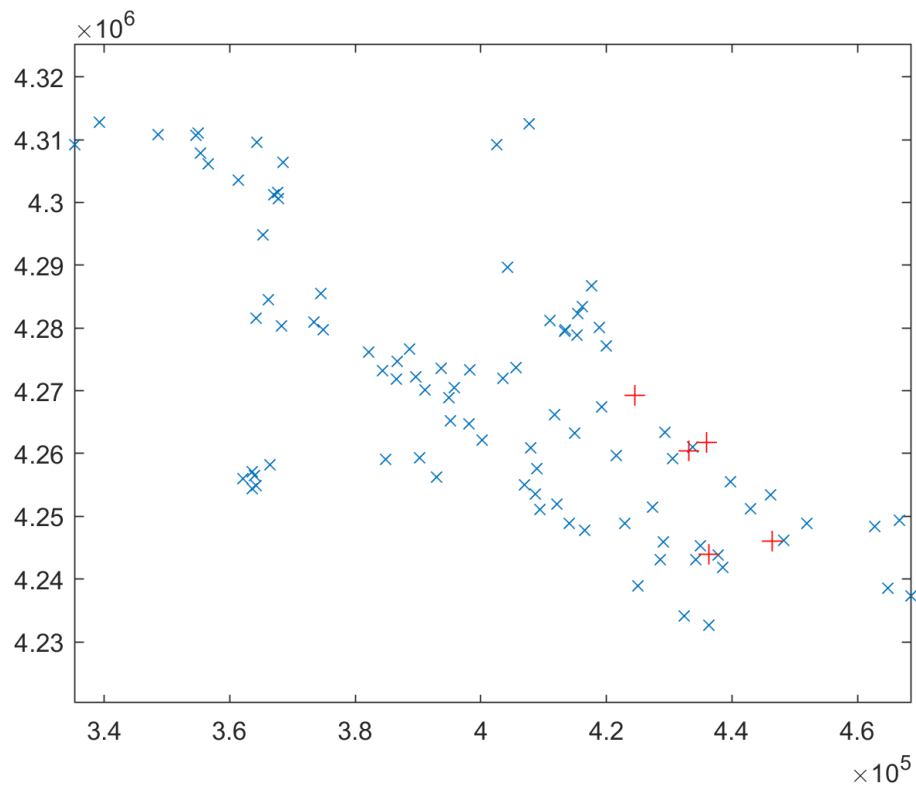
#### 3.1 Περιγραφή των Δεδομένων

Στην Αν. Στέρεα Ελλάδα υπάρχουν 1,190 τιμές παρατήρησης των υπογείων νερών σε βάθος χρόνου από γεωτρήσεις. Από τις τιμές αυτές μπορείς να αντλήσεις διάφορες πληροφορίες, για την συμπεριφορά των υπόγειων νερών όπως το pH, την αγωγιμότητα, την στάθμη των υπογείων νερών και την δυναμική στάθμη υπογείων νερών.

Η εργασία αυτή ασχολείται με τις στάθμες των υπογείων νερών όπου έχουν ληφθεί μετρήσεις για 4 χρονιά (2018-2019-2020-2021) ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Οι μετρήσεις της στάθμης των γεωτρήσεων δεν έχουν πραγματοποιηθεί για όλα τα χρονικά διαστήματα, με αποτέλεσμα να υπάρχουν 793 τιμές της στάθμης των γεωτρήσεων. Στο προγραμματιστικό περιβάλλον της MATLAB πραγματοποιήθηκε εισαγωγή των δεδομένων και διαχωρίστηκαν σε χρονιές, όπου και επιλέχθηκαν τα δεδομένα του '18 διότι τα στατιστικά τους στοιχεία και το πλήθος τους συμβάδιζαν καλύτερα με τον στόχο και τις απαιτήσεις μιας γεωστατιστικής ανάλυσης.

Τελικά χρησιμοποιήθηκαν 93 γεωτρήσεις, όπου θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα για ποιο λόγο (βλέπε ενότητα 3.2.2). Στην εικόνα 3.1 παρουσιάζονται στον χάρτη με συμβολισμό 'x' οι γεωτρήσεις σύμφωνα με τις καρτεσιανές συντεταγμένες μετρημένες στο σύστημα ΕΓΣΑ'87. Επίσης, προστέθηκαν στο χάρτη και τα σημεία ενδιαφέροντος-Μεταλλεία με συμβολισμό '+'. Όπως φαίνεται στην εικόνα 3.1 το βορειότερο μεταλλείο είναι το μεταλλείο Τσούκκας, τα ενδιαμέσα είναι τα μεταλλεία της Λάρκου και τα νοτιότερα είναι λατομεία αδρανών στην Θήβα. Στον χάρτη των γεωτρήσεων παρατηρείται ένα ακανόνιστο πλέγμα αλλά κατά τόπους πυκνή δειγματοληψία. Επίσης στην εικόνα 3.2 παρουσιάζονται οι χρήσεις γης της περιοχής των μεταλλείων.





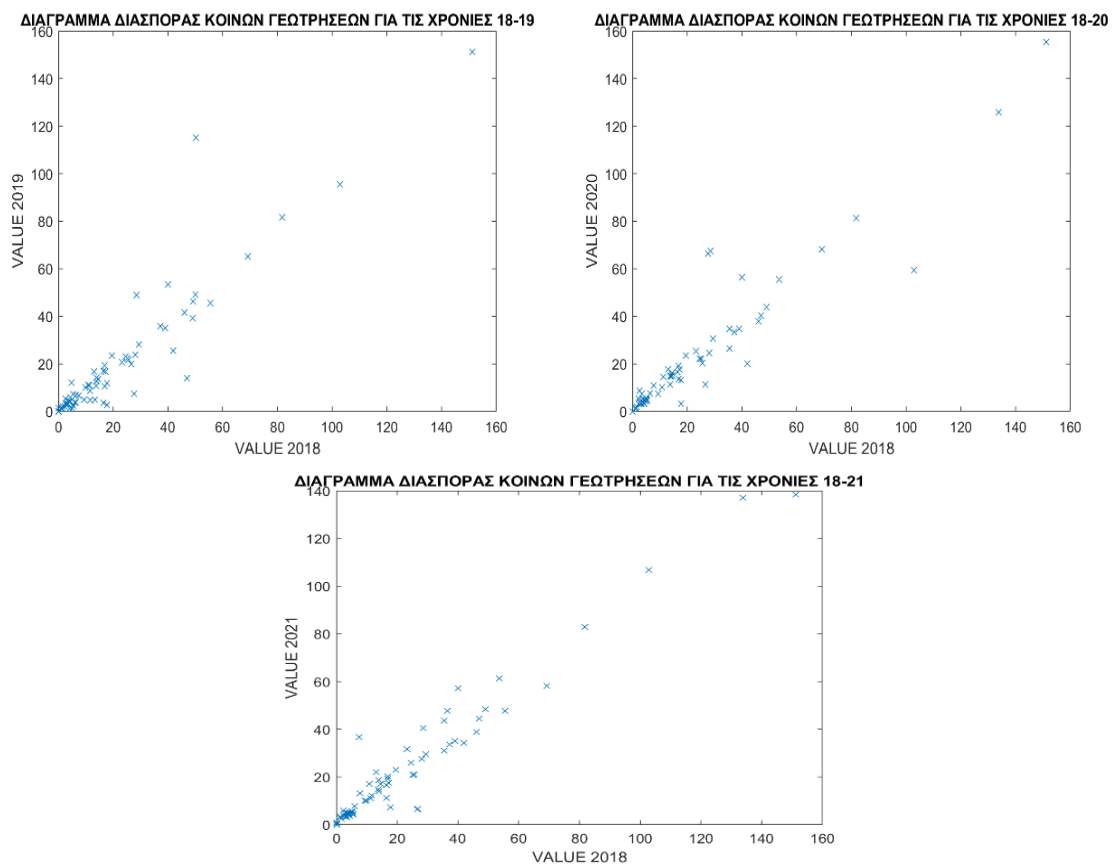
Εικόνα 3. 1 Θέσεις παρακολούθησης υπόγειων υδάτων στο σύστημα ΕΓΣΑ '87



Εικόνα 3. 2 Απεικόνιση χρήσεων γης των μεταλλευτικών περιοχών, όπου ο πάνω αριστερά χάρτης απεικονίζει όλες τις περιοχές των μεταλλείων, ενώ οι άλλες 3 ξεχωριστά τα μεταλλεία σε εμφανέστερη κλίμακα

### 3.2 Στατιστική Ανάλυση

Στο μέρος αυτό αναλύεται τα βασικά στατιστικά στοιχεία (βλέπε ενότητα 2.1), που σχετίζονται με την κατανομή της πιθανότητας και εν συνεχεία τον έλεγχο κανονικότητας των δεδομένων. Στον έλεγχο κανονικότητας παρατηρείται αν τα δεδομένα προσεγγίζουν την κανονική κατανομή. Στα δεδομένα της στάθμης πραγματοποιήθηκε λογαριθμικός μετασχηματισμός για την καλύτερη δυνατή κατανομή, που να προσομοιάζει την κανονική κατανομή. Η εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε για τον λογαριθμικό μετασχηματισμό είναι  $X^*(s) \equiv \log(X(s) + 1)$ . Η αλλαγή από τον βασικό μετασχηματισμό πραγματοποιήθηκε διότι οι τιμές ξεκινάν από το 0 και ο λογάριθμος δεν ορίζεται σε αυτή την τιμή. Επίσης στον πίνακα 3.1 βρέθηκαν οι συντελεστές συσχέτισης των δεδομένων με τις άλλες χρονιές. Συγκεκριμένα οι τιμές των συντελεστών συσχέτισης είναι υψηλές και κοντά στο 1, άρα έχουν ισχυρή συσχέτιση. Στην εικόνα 3.3 παρουσιάζεται το διάγραμμα διασποράς των τιμών του '18 με τις άλλες χρονιές (19-20-21) με μονάδες μετρήσεις τα m στον άξονα x και y, αντίστοιχα κάθε διάγραμμα και διαφορετική χρονιά.



Εικόνα 3. 3 Διαγράμματα διασποράς κοινών γεωτρήσεων για τις χρονιές 18-21 με σταθερή μεταβλητή την χρονιά του 18

Πίνακας 3. 1 Συντελεστές συσχέτισης των δεδομένων με τις άλλες χρονιές

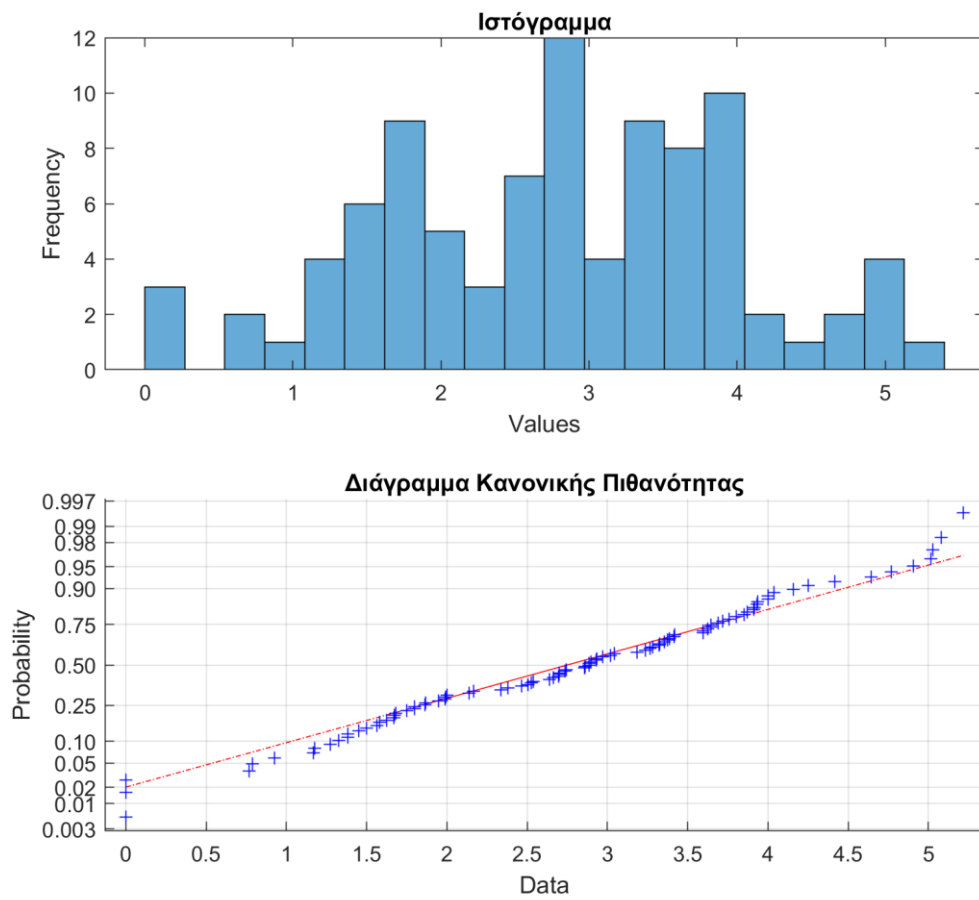
Συντελεστής συσχέτισης ( $\rho$ )	2019	2020	2021
2018	0.9248	0.9390	0.9701

### 3.2.1 Στοιχεία και Διαγράμματα Κατανομών Πιθανότητας

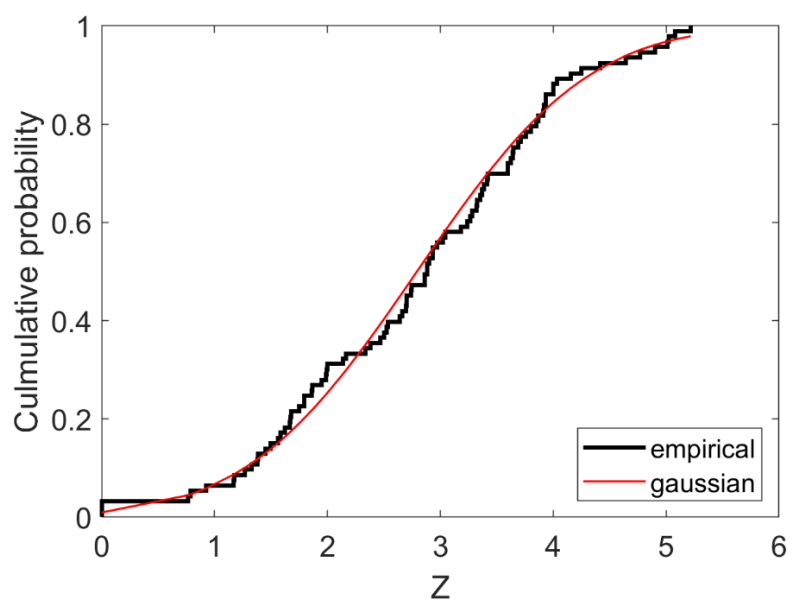
Τα στοιχεία υπολογίζονται από τις τιμές της στάθμης και περιγράφουν την κατανομή πιθανότητας. Τα στοιχεία αυτά παρουσιάζονται στον πίνακα 3.2. Σύμφωνα με τις τιμές που προέκυψαν, οι τιμές είναι θετικές με μεγάλη διακύμανση. Ειδικότερα η τιμή της διάμεσου υποδηλώνει, ότι το μέσο της κατανομής είναι κοντά στο 3. Επίσης οι τιμές της διάμεσου και της μέσης τιμής είναι αρκετά κοντά, που υποδεικνύει ότι η διασπορά των τιμών παρουσιάζει μια καλή συμμετρία και ότι τα δεδομένα προσομοιάζουν την κανονική κατανομή. Ο συντελεστής ασυμμετρίας είναι αρνητικός αλλά κοντά στο μηδέν, που σημαίνει πως δεν είναι εμφανής η αρνητική ασυμμετρία. Η κύρτωση με τιμή κάτω του 3, υποδηλώνει ότι η συγκέντρωση των περισσότερων τιμών βρίσκεται στο κέντρο της κατανομής. Στην εικόνα 3.4 απεικονίζεται το Ιστόγραμμα και το διάγραμμα Κανονικής Πιθανότητας. Στον έλεγχο κανονικότητας συμπεριλαμβάνεται και το διάγραμμα της Κανονικής Πιθανότητας. Στο διάγραμμα αυτό φαίνονται αν τα δεδομένα προσεγγίζουν την αθροιστική κατανομή πιθανότητας της κανονικής κατανομής. Τα περισσότερα δεδομένα φαίνεται πως προσεγγίζουν την γραμμή αναφοράς (κόκκινη ευθεία γραμμή), μόνο που στα αρχικά και στα τελικά σημεία απέχουν από την κανονικότητα. Επιπρόσθετα στην εικόνα 3.5 παρουσιάζεται το διάγραμμα αθροιστικής κατανομής πιθανότητας, ακόμα ένα κριτήριο κανονικότητας. Από το διάγραμμα αυτό αντλείς την πληροφορία, ποια είναι η πιθανότητα να έχεις το διάστημα από μια τιμή μέχρι την ελάχιστη τιμή των δεδομένων.

Πίνακας 3. 2 Στοιχεία κατανομών πιθανότητας σε λογαριθμισμένες τιμές στάθμης

Στοιχεία Κατανομών Πιθανότητας	Στάθμη υπογείου νερού
Ελάχιστη Τιμή ( $\ln(m)$ )	0
Μέγιστη Τιμή ( $\ln(m)$ )	5.22
Μέση Τιμή ( $\ln(m)$ )	2.79
Διάμεσος ( $\ln(m)$ )	2.89
Τυπική Απόκλιση ( $\ln(m)$ )	1.19
Συντελεστή Ασυμμετρίας	-0.18
Κύρτωση	2.59



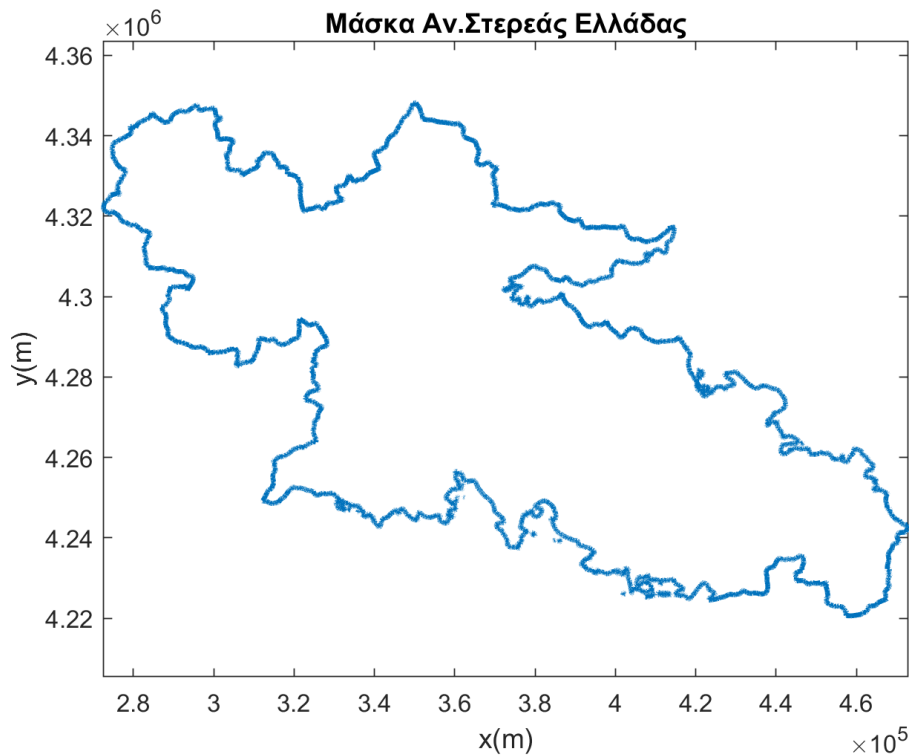
Εικόνα 3. 4 Ιστόγραμμα και διάγραμμα κανονικής πιθανότητας σε λογαριθμισμένες τιμές



Εικόνα 3. 5 Διάγραμμα αθροιστικής κατανομής πιθανότητας λογαριθμισμένων τιμών

### 3.2.2 Μάσκα

Η μάσκα είναι ένα επίπεδο που αποτελείται από μια πληθώρα συντεταγμένων  $x, y$  και συνολικά δημιουργούν τον χάρτη της υπό μελέτης περιοχής. Χρησιμοποιείται για την αντιστοίχιση των δεδομένων πάνω στο επίπεδο και την επαναξιολόγηση τους σύμφωνα με τα όρια της μάσκας. Επομένως όπως αναφέρθηκε παραπάνω τα δεδομένα μειωθήκαν με σκοπό την σωστή αξιολόγηση της στάθμης εντός της περιοχής μελέτης.

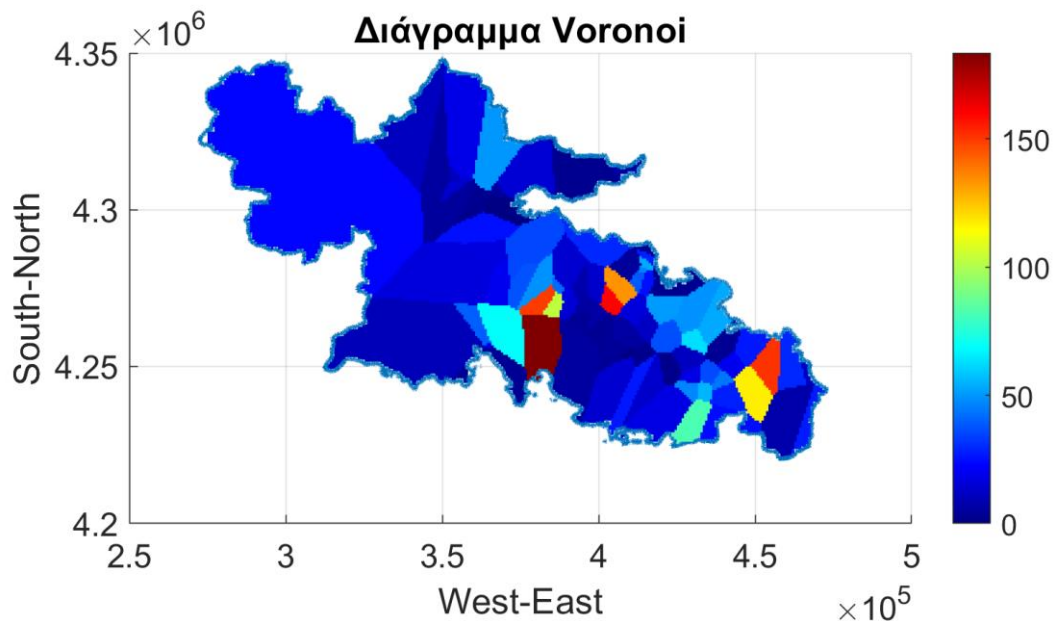


Εικόνα 3. 6 Μάσκα Αν. Στερεάς Ελλάδας

### 3.2.3 Voronoi

Στο διάγραμμα Voronoi απεικονίζονται οι θέσεις των γεωτρήσεων με τις τιμές τους στην αρχική κλίμακα, να εμφανίζονται με πολύχρωμα πολύγωνα ανάλογα με την τιμή τους. Κάθε πολύγωνο έχει μια τιμή, που αντιπροσωπεύει όλη την επιφάνειά του. Στην εικόνα 3.7 παρουσιάζεται το διάγραμμα Voronoi με την χρήση μάσκας σε απολογριθμισμένα δεδομένα και οι άξονες μετριοούνται σε μετρά, στο σύστημα ΕΓΣΑ '87. Παρατηρείται έντονη διακύμανση τιμών τοπικά, αλλά γενικά σε όλο το εύρος του χάρτη αποτελούνται από μικρές τιμές. Οι υψηλές τιμές γύρω από μικρές τιμές μεταφράζονται, ότι τα δεδομένα δεν έχουν στασιμότητα. Η μη στασιμότητα μπορεί να

οφείλεται σε διαφορετικά υδρογεωλογικά υπόβαθρα ή σε υδρολογικές διαδικασίες που επηρεάζουν την στάθμη.



Εικόνα 3. 7 Απεικόνιση Voronoi με την χρήση μάσκας σε απολογαριθμισμένα δεδομένα

### 3.2.4 Τάση

Η τάση του πεδίου αποτυπώνεται με 1<sup>ο</sup> βαθμού πρότυπο μοντέλο. Σύμφωνα με την εξίσωση της γραμμικής τάσης  $m_x = a_0 + a_1 x + a_2 y$  υπολογίζονται οι γραμμικοί συντελεστές στον πίνακα 3.3.

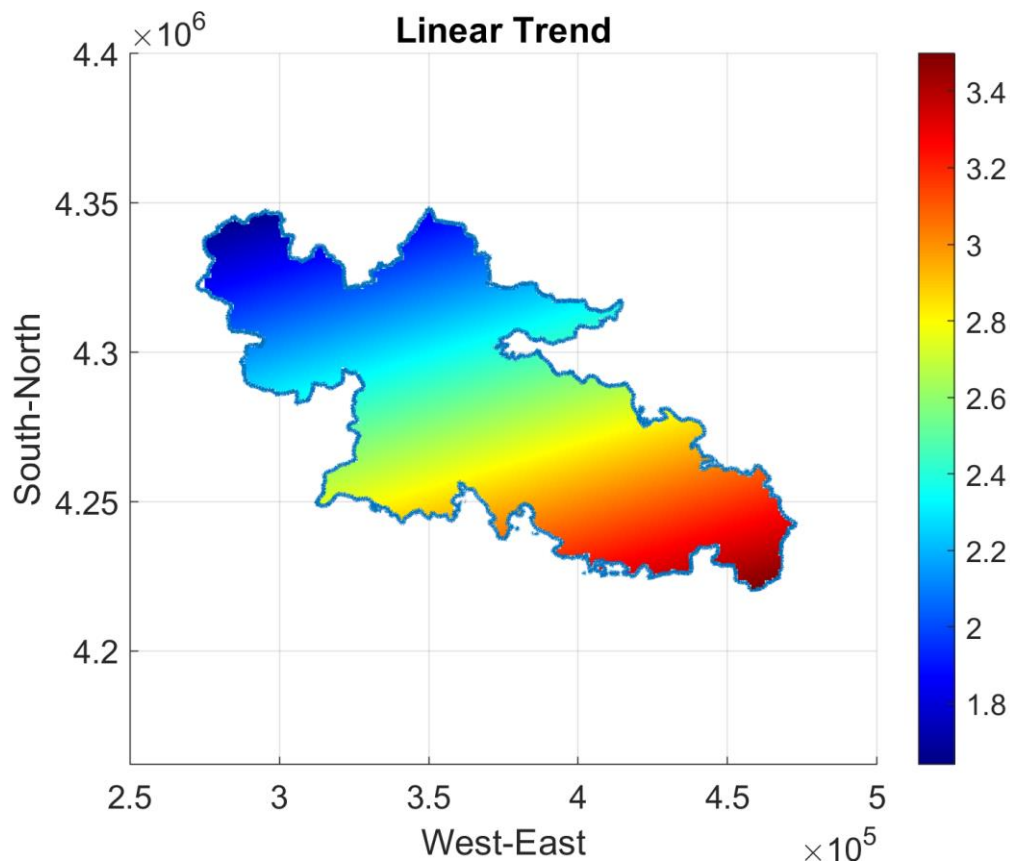
Η τάση έχει κάποιες ομοιότητες με το διάγραμμα Voronoi λόγω της αιτιοκρατικής τους μορφής, απλά η βασική διαφορά τους είναι ότι η τάση είναι ένα επίπεδο, οπού φαίνεται πως διατάσσονται οι τιμές με πολυχρωματική απεικόνιση.

Στην εικόνα 3.8 παρουσιάζεται η γραμμική τάση με την χρήση της μάσκας. Οι τιμές εξελίσσονται με κατεύθυνση από βορειά-δυτικά προς νότιο-ανατολικά και παρουσιάζουν διακυμάνσεις σε μικρές αποστάσεις. Το μεγαλύτερο μέρος της απεικόνισης έχει μικρότερες τιμές του 2.8. Οι τιμές αλλάζουν κατά πολύ σε μικρές αποστάσεις, όπως φαίνεται στην συμπεριφορά των χρωμάτων και υποδεικνύει την μη στασιμότητα. Επίσης βρέθηκε ο συντελεστής συσχέτισης να είναι ίσος με 0.2565, που θεωρείται ασθενή συσχέτιση, αλλά η τάση μπορεί να χρησιμοποιηθεί και να αφαιρεθεί.

Η αφαίρεση της τάσης πραγματοποιείται για τον σκοπό της στασιμότητας και για την εφαρμογή της μεθόδου kriging.

Πίνακας 3. 3 Γραμμικοί συντελεστές τάσης σε λογαριθμισμένα δεδομένα

Γραμμικοί συντελεστές	
$\alpha_0$	46.44
$\alpha_1$	$3.14 \cdot 10^{-6}$
$\alpha_2$	$-1.05 \cdot 10^{-5}$



Εικόνα 3. 8 Απεικόνιση Τάσης με την χρήση μάσκας σε λογαριθμισμένα δεδομένα

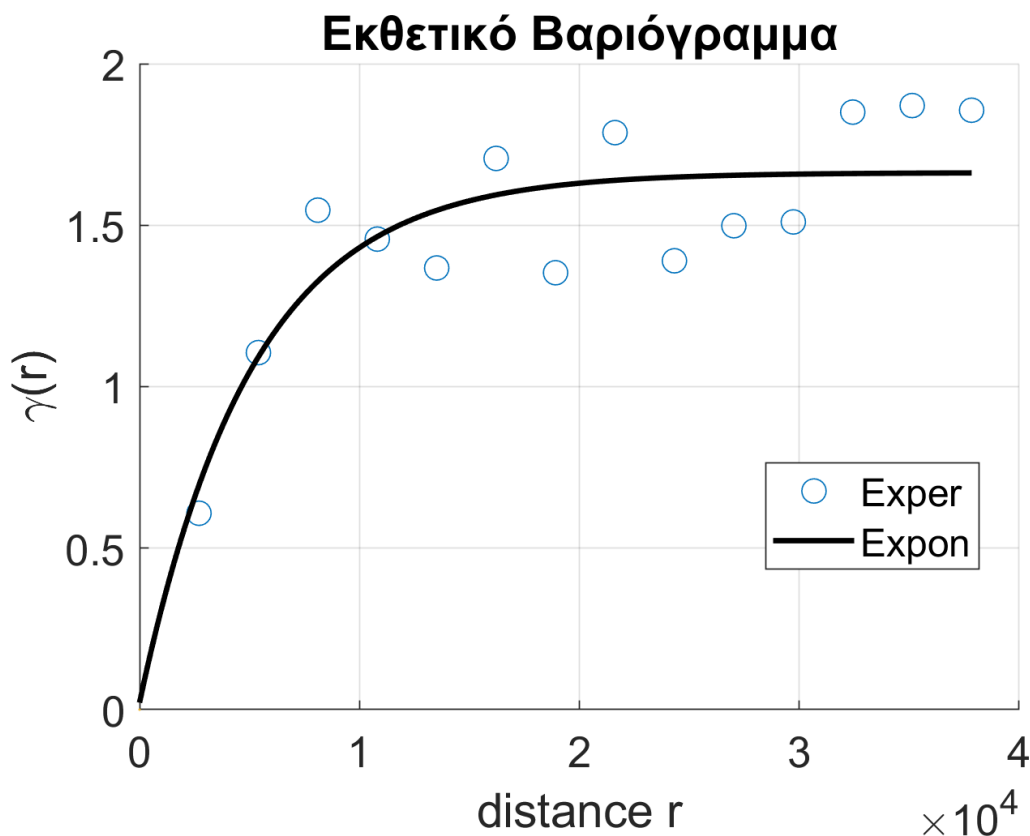
### 3.2.5 Βαριογραφία

Από την υλοποίηση της βαριογραφίας αντλούνται πληροφορίες σχετικά με την χωρική εξάρτηση των τιμών σε σχέση με την απόσταση. Αφού από τα δεδομένα έχει αφαιρεθεί η τάση, τότε τα δεδομένα αποτελούνται από την λογαριθμική διακύμανση.



Αρχικά για την κατασκευή του ημιβαριογράμματος υπολογίζεται το εμπειρικό βαριόγραμμα με τα δεδομένα. Σε επόμενο στάδιο πρέπει να βρεθεί το κατάλληλο μοντέλο, δηλαδή την καλύτερη προσαρμογή του μοντέλου με βάση τα σημεία του εμπειρικού ημιβαριογράμματος. Η καλύτερη προσαρμογή κρίνεται σύμφωνα με τον υπολογισμό του τετραγωνικού σφάλματος, το οποίο βρέθηκε πως το εκθετικό μοντέλο είναι το επικρατέστερο από τα υπόλοιπα. Στον πίνακα 3.4 παρουσιάζονται τα τετραγωνικά σφάλματα των μοντέλων, όπου φαίνεται πως το εκθετικό έχει την μικρότερη τιμή.

Στην εικόνα 3.9 παρουσιάζεται το εκθετικό ημιβαριόγραμμα, το οποίο προσαρμόζεται καταλλήλα με την διάταξη των εμπειρικών σημείων. Η τιμή του φαινομένου κόκκου είναι πολύ μικρότερη από την διασπορά. Η ακτίνα επιρροής ενός εκθετικού μοντέλου βρίσκεται στο 95% της οροφής του και ισούται με τρεις φορές το μήκος συσχέτισης ( $\xi$ ). Άρα το μήκος συσχέτισης είναι ίσο με 5,115.33 m.



Εικόνα 3. 9 Εκθετικό βαριόγραμμα σε δεδομένα λογαριθμικής διακύμανσης



*Πίνακας 3. 4 Τετραγωνικά σφάλματα προτύπων μοντέλων βαριογράμματος*

Θεωρητικό Μοντέλο	Τετραγωνικό σφάλμα
Εκθετικό	0.4262
Σφαιρικό	0.4492
Γκαουσιανό	0.4439

*Πίνακας 3. 5 Παράμετροι Βαριογράμματος*

Παράμετροι Βαριογράμματος	
$\sigma^2$ (m <sup>2</sup> )	1.64
h (m)	15,345.59
c <sub>0</sub> (m <sup>2</sup> )	0.02

#### 3.2.6 Κανονικό Kriging στους λογάριθμους των διακυμάνσεων

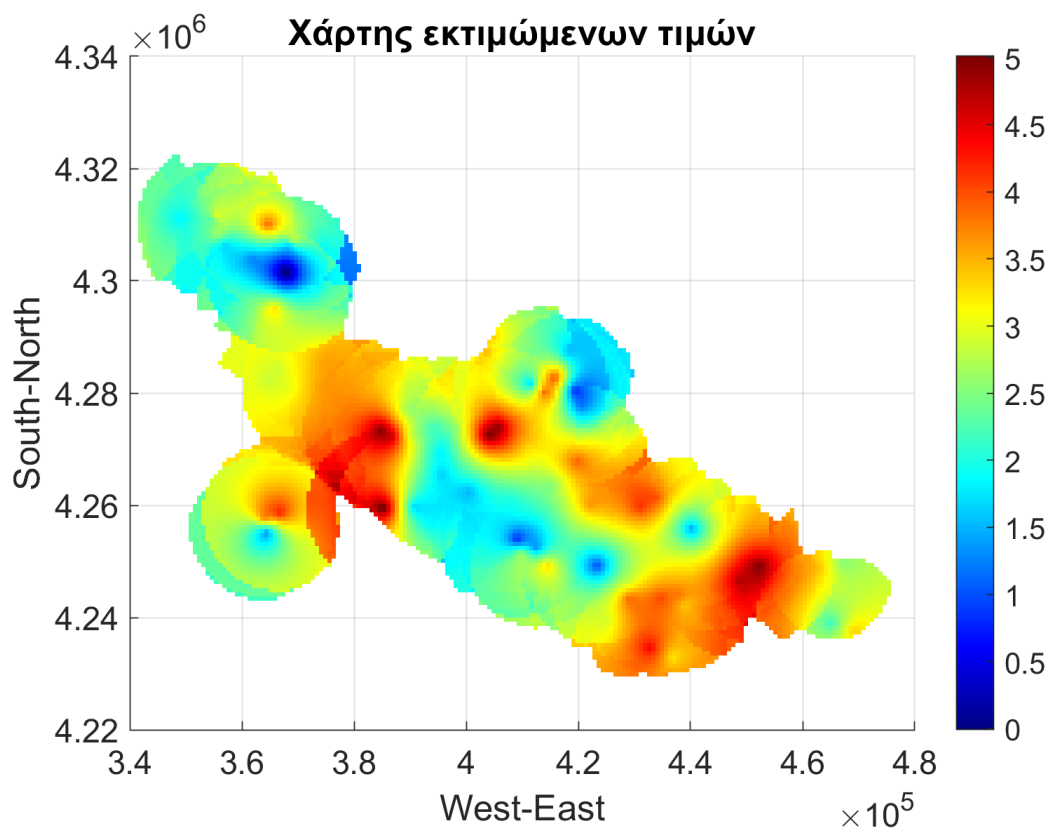
Η μέθοδος του Κανονικού kriging υλοποιήθηκε με βάση το εκθετικό μοντέλο βαριογράμματος και τους παραμέτρους του και όχι από την συνδιασπορά. Δεν θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η συνδιασπορά διότι στο Κανονικό kriging δεν γνωρίζεται η τάση.

Από τους παραμέτρους χρησιμοποιείται η ακτίνα επιρροής, ώστε να οριστεί η γειτονιά. Η ακτίνα γειτονιάς, ο όρος που χρησιμοποιείται για την ποιότητα της εκτίμησης στο kriging, επηρεάζεται με βάση την ακτίνα επιρροής, δηλαδή με την απόσταση που παρουσιάζουν συσχέτιση τα δεδομένα. Σαν μέγεθος η ακτίνα επιρροής είναι μικρή, το οποίο παρουσιάζει προβλήματα με την αξιοπιστία των χωρικών συσχετίσεων, καθώς η μεταβολή των τιμών είναι υψηλή σε μικρές αποστάσεις.

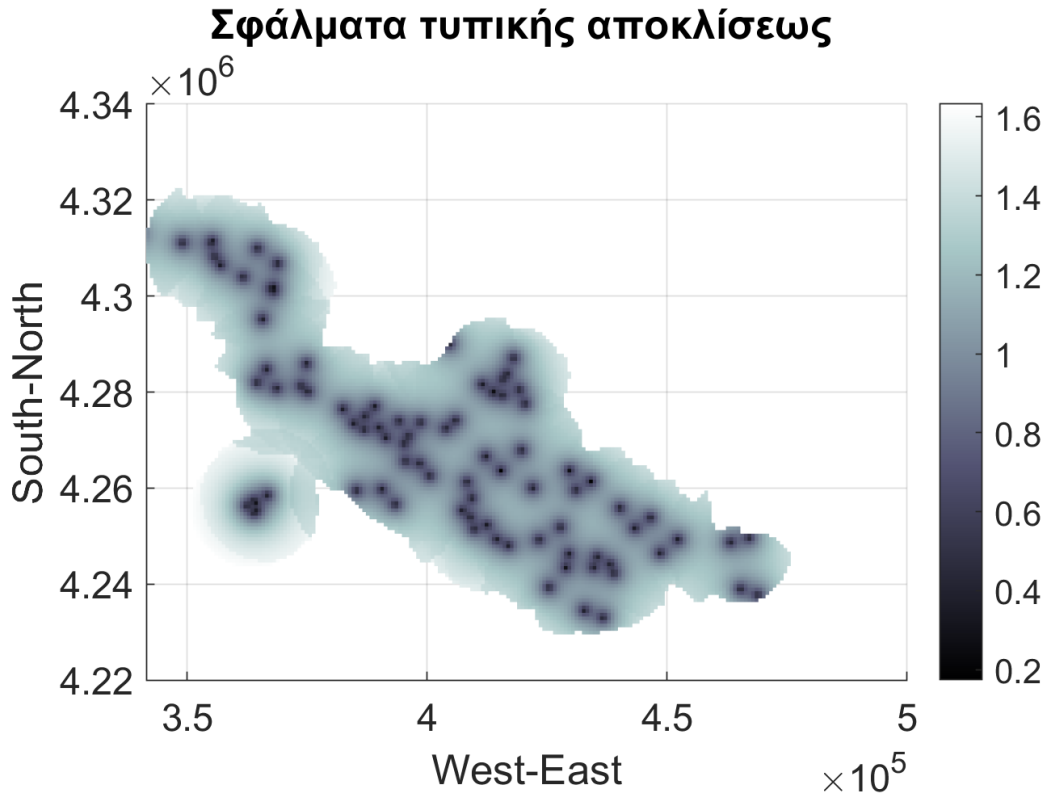
Για καλύτερη ακρίβεια της απεικόνισης των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε 90% της ακτίνας της επιρροής και υποχρεωτικά 3 γείτονες ανά κελί για να εκτιμηθούν όλα τα κελιά στο εύρος του πλέγματος. Όπως φαίνεται στην εικόνα 3.10, το Κανονικό kriging χρησιμοποιεί πλέγμα με διαστάσεις 269x339 κελιά και κάθε κελί είναι 750 m. Σε πολλές περιοχές του χάρτη παρουσιάζονται έντονες διακυμάνσεις και απότομες αλλαγές στις τιμές.

Μετέπειτα σχηματίστηκε ο χάρτης τυπικής απόκλισης σφάλματος που αποδίδει την μεταβολή της εκτίμησης και την αβεβαιότητα του στον χώρο. Στην εικόνα 3.11 με μαύρες αποχρώσεις απεικονίζονται οι τιμές 0.2-0.6, που είναι κοντά στις γεωτρήσεις, ενώ όσο αυξάνεται το σφάλμα υπάρχει μεγαλύτερη αβεβαιότητα και απεικονίζεται με γκρι προς άσπρες αποχρώσεις. Συμπερασματικά όσον αφορά τις τιμές του σφάλματος έχουν μεγάλο εύρος τιμών.

Επίσης χρησιμοποιείται η μέθοδος διασταυρωμένης επαλήθευσης (CV errors) για να βρεθούν τα σφάλματα ανάμεσα στα λογαριθμισμένα δεδομένα και τις εκτιμώμενες τιμές. Στον πίνακα 3.6 παρουσιάζονται τα σφάλματα, μέσο απολυτό σφάλμα (MAE), ριζά του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE), μέγιστο απολυτό σφάλμα (MAXAE), συντελεστής συσχέτισης ( $\rho$ ).



Εικόνα 3. 10 Χάρτης εκτίμησης Κανονικού Kriging σε λογαριθμισμένες εκτιμώμενες τιμές στάθμης



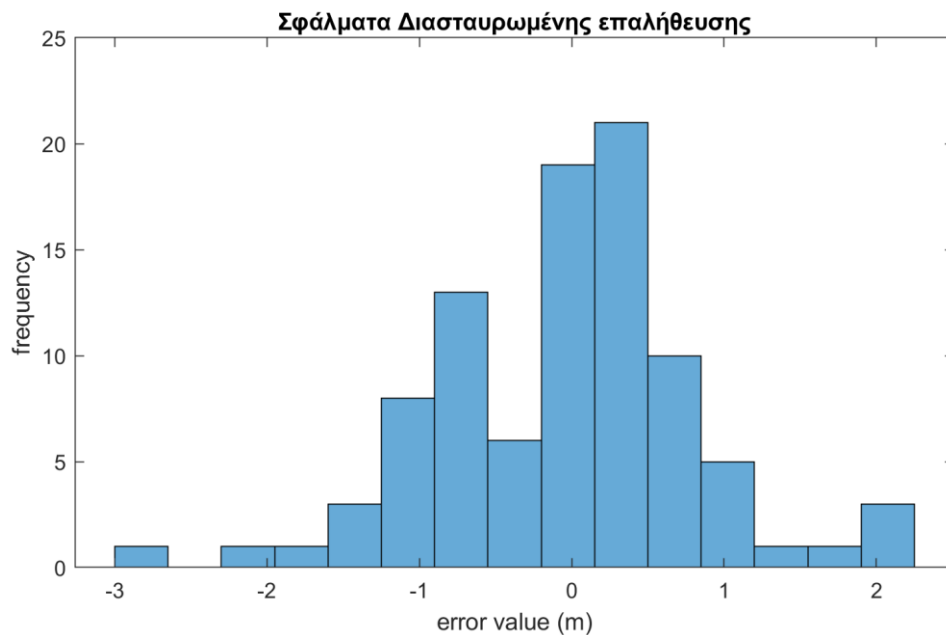
*Εικόνα 3. 11 Χάρτης τυπικής απόκλισης σφάλματος*

*Πίνακας 3. 6 Σφάλματος διασταυρωμένης επαλήθευσης σε λογαριθμικές διακυμάνσεις*

Μέτρα Επιβεβαίωσης	
MAE (ln(m))	0.65
RMSE (ln(m))	0.85
MAXAE (ln(m))	2.84
$\rho$	0.67

Από τα σφάλματα του πίνακα 3.6 παρατηρείται ότι το MAE είναι κοντά στο RMSE, το οποίο σημαίνει ότι τα δεδομένα έχουν μικρή διασπορά και τα σφάλματα παρουσιάζουν ομοιόμορφη κατανομή. Επίσης το MAXAE είναι περίπου τέσσερις φορές μεγαλύτερο από το MAE. Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε το ιστόγραμμα της διασταυρωμένης επαλήθευσης, όπου στην εικόνα 3.12 παρατηρείται στον άξονα x η διαφορά της εκτιμωμένης τιμής με τα λογαριθμισμένα δεδομένα και στον άξονα y η συχνότητα. Σύμφωνα με το ιστόγραμμα οι τιμές του σφάλματος κυμαίνονται από το -3 έως 3 περίπου. Τα μέτρα επιβεβαίωσης σε συνδυασμό με το ιστόγραμμα υποδεικνύουν

ισχυρή συσχέτιση και καλή ακρίβεια, που έχουν οι εκτιμώμενες σε σχέση με τις πραγματικές διακυμάνσεις.

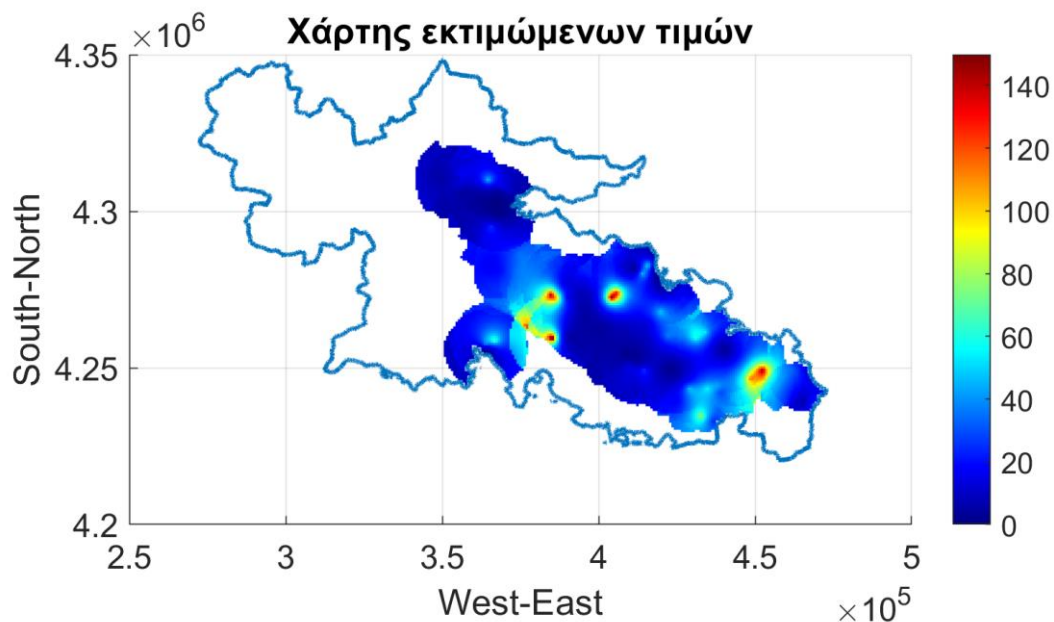


Εικόνα 3. 12 Ιστόγραμμα της διασταυρωμένης επαλήθευσης των λογαριθμισμένων τιμών

### 3.2.7 Κανονικό Kriging στις εκτιμώμενες τιμές του αντίστροφου μετασχηματισμού

Για να απεικονιστούν τα εκτιμώμενα δεδομένα της στάθμης στην αρχική κλίμακα σε ένα χάρτη Κανονικού kriging χρησιμοποιείται η αντιστροφή του μετασχηματισμού. Η αντιστροφή του μετασχηματισμού προϋποθέτει την πρόσθεση της γραμμικής τάσης. Κατά τη διαδικασία της απολογαρίθμησης, η εκθετική συνάρτηση υψώνεται στην λογαριθμική εκτιμωμένη τιμή. Αυτά που αναφέρθηκαν περιγράφονται με την παρακάτω εξίσωση 3.1.  $M(s)$  η γραμμική τάση,  $X'^*(s)$  είναι η λογαριθμική διακύμανση. Στην εικόνα 3.13 απεικονίζεται ο χάρτης kriging στην αρχική κλίμακα των εκτιμώμενων τιμών. Επιπρόσθετα για τον έλεγχο των εκτιμήσεων σε σχέση με τα πραγματικά δεδομένα, λαμβάνει χώρα ξανά η διασταυρωμένη επαλήθευση. Στον πίνακα 3.7 παρουσιάζονται τα μέτρα επιβεβαίωσης για την αξιολόγηση της εκτίμησης και παρακάτω στην εικόνα 3.14 παρουσιάζονται σε μορφή ιστογράμματος, την συχνότητα των σφάλματων των τιμών ανάμεσα στις εκτιμώμενες και στις πραγματικές τιμές.

$$\hat{X}(s) = \exp \left( X'^*(s) + M(s) \right) - 1 \quad (3.1)$$



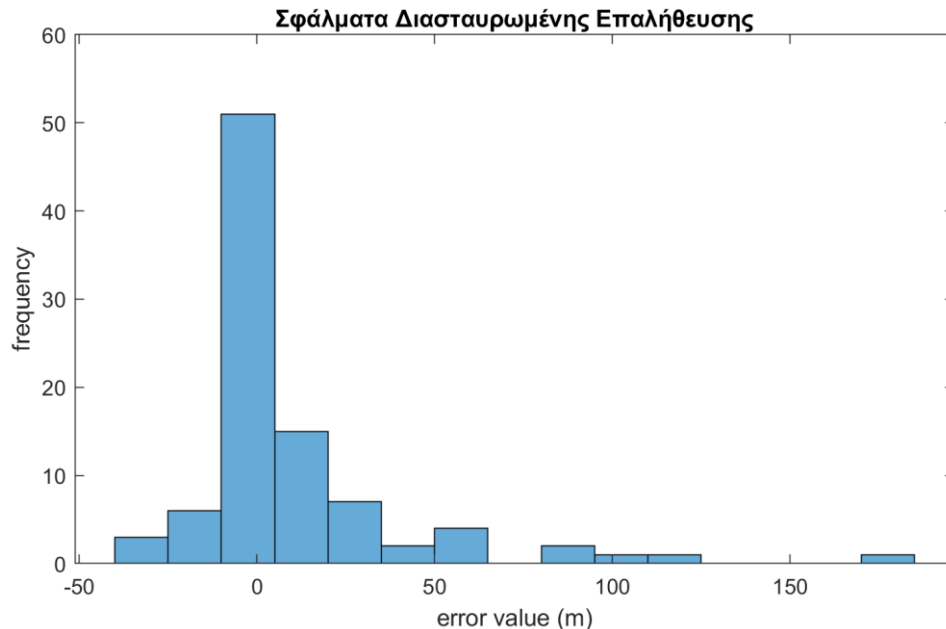
Εικόνα 3. 13 Χάρτης εκτίμησης Κανονικού Kriging σε απολογαριθμισμένες εκτιμώμενες τιμές στάθμης υδάτων

Στα μέτρα επιβεβαίωσης είναι αναμενόμενο να εμφανιστούν μεγάλες τιμές όταν τα γειτονικά δεδομένα έχουν μεγάλη διαφορά τιμής. Πέρα από την μια μεγάλη απόκλιση μεν λόγω των ακραίων τιμών δεν επηρεάζει και τόσο τον συντελεστή συσχέτισης. Ο συντελεστής συσχέτισης αποδίδει ισχυρή συσχέτιση. Επιπλέον παρατηρείται ότι το RMSE είναι περίπου δυο φορές το MAE. Το MAXAE θεωρείται λογική η αυξημένη τιμή του λόγω των ακραίων τιμών.

Πίνακας 3. 7 Σφάλματα διασταυρωμένης επαλήθευσης σε απολογαριθμισμένες τιμές στάθμης

Μέτρα Επιβεβαίωσης	
MAE(m)	17.17
RMSE(m)	32.47
MAXAE(m)	173.66
$\rho$	0.59

Από το ιστόγραμμα σφαλμάτων συμπεραίνεται πως τα μικρότερα σε τιμή σφάλματα καλύπτουν το μεγαλύτερο πλήθος, αλλά υπάρχει μια τιμή που είναι ακραία και οφείλεται στην μεγάλη διαφορά εκτιμωμένης και πραγματικής τιμής.



Εικόνα 3. 14 Ιστόγραμμα της διασταυρωμένης επαλήθευσης μεταξύ των εκτιμήσεων και των δεδομένων της στάθμης

### 3.3 Αξιολόγηση υπογείων υδάτων των μεταλλευτικών περιοχών

Στην εικόνα 3.15 εμφανίζεται ο χάρτης εκτίμησης kriging με τις απολογαριθμισμένες στάθμες, προσθέτοντας μεταλλεία για τον έλεγχο της συμπεριφοράς των υπογείων υδάτων και τις πιέσεις που ενδεχομένως προκαλούνται σε εκείνες τις περιοχές.

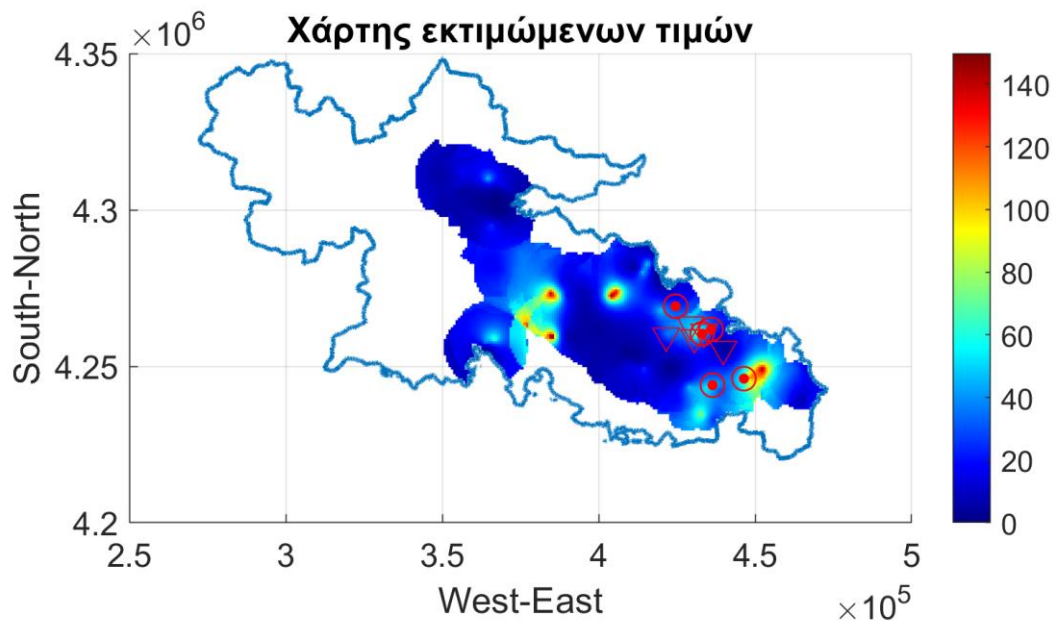
Για την συμπεριφορά των υπογείων υδάτων θα διεξαχθεί ερευνά συνολικά και τοπικά στον χάρτη. Η συλλογική ερμηνεία θα αποφανθεί μέσα από το υδρογραφικό δίκτυο λόγω της ιδιαίτερης σημασίας του. Το υδρογραφικό δίκτυο αποτελεί το σύνολο των περιοχών του γλυκού νερού όπως Ποταμιά και Λίμνες και αποτυπώνει την κίνηση των υπογείων νερών στην λεκάνη απορροής και συλλογικά στον τοπογραφικό χάρτη.

Η κίνηση των ποτάμιων σε τοπογραφικό χάρτη ερμηνεύεται γεωλογικά με τον σχηματισμό κοιλάδας όπου οι ισοϋψείς σχηματίζουν ένα 'ν' και υποδεικνύει την κατεύθυνση των υπογείων υδάτων προς το μικρότερο υψόμετρο.

Επίσης η λεκάνη απορροής έχει ρυθμιστικό ρολό διότι όλο το νερό που πέφτει μέσω βροχοπτώσεων και χιονιού αποθηκεύεται και κινείται μέσω του υδρογραφικού δικτύου σε όλη την λεκάνη απορροής και τροφοδοτεί, εμπλουτίζει όλο τα συστήματα που την απαρτίζουν. Το υδρογραφικό δίκτυο πολλές φορές αποτελείται από ένα σύνολο κυρίων ποταμών, λιμνών και ρεμάτων που αυτά επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω ενός ρεύματος, που διακλαδίζεται σε παραποτάμους και λίμνες. Επιπρόσθετα το υδρογραφικό δίκτυο καταλήγει πάντα στην έξοδο της λεκάνης απορροής, όπου μπορούν να σχηματιστούν ποταμιά, λίμνες και εκβολές θαλασσών.

Όλα αυτά μπορούν να συσχετιστούν με το απόλυτο υψόμετρο, διότι εκεί που το απόλυτο υψόμετρο έχει μικρές τιμές βρίσκονται τα ποταμιά, λίμνες και οι εκβολές θαλασσών και η στάθμη των υπογείων υδάτων παρουσιάζει εξίσου μικρές τιμές. Στις υψηλές υψομετρικά περιοχές υπάρχουν πολύ μεγαλύτερες στάθμες, το οποίο αποδεικνύεται με τον σχηματισμό κοιλάδας και ότι συγκρατείται μεγαλύτερη ποσότητα κατακρημνισμάτων στα βουνά. Επομένως ανάλογα με την τοπογραφία υπάρχουν και οι ανάλογες τιμές στάθμης. Εκτός από την τοπογραφία η στάθμη μπορεί να μεταβληθεί σύμφωνα με τις χρήσεις γης, διότι οποιαδήποτε χρήση επιβαρύνει τον υδροφορέα με μείωση της στάθμης τόσο τοπικά όσο και συνολικά διότι επικοινωνούν και με άλλους υδροφορείς.

Συγκεκριμένα οι μεταλλευτικές περιοχές επικεντρώνονται στις λεκάνες απορροής ΒΑ Παράλιας Καλλιδρόμου (EL 0722), Βοιωτικού Κηφισού (EL 0723) και Ασωπού (EL 0725), όπου στις περιοχές αυτές το υδρογραφικό δίκτυο αποτελείται από τον ποταμό Κηφισό Π. (Βοιωτικός) και τον ποταμό-παραπόταμο Μέλας Π. (Μαυροπόταμος) (βλέπε εικόνα 1.6). Ο Κηφισός είναι ένα πολύπλοκο υδρογραφικό δίκτυο παραπόταμων-λιμνών και κυμαίνεται από την λίμνη Υλική όπου κατευθύνεται δυτικά μέχρι και σχεδόν το τέλος της λεκάνης απορροής. Από την εικόνα 3.2, στις ζητούμενες λεκάνες απορροής παρατηρείται περισσότερη χρήση γης, διότι υπάρχουν πολλοί βοσκότοποι, καλλιέργειες, δασικές περιοχές και πόλεις όπου κατεβάζουν την στάθμη συνολικά. Το σύστημα όμως δεν τείνει προς την μείωση των χρήσεων γης, γιατί παρουσιάζει υδρογραφικό δίκτυο με μεγάλο δυναμικό.



Εικόνα 3. 15 Χάρτης εκτίμησης Κανονικού Kriging σε στάθμες υπόγειων νερών και συμπεριλαμβανομένων των μεταλλείων και των κοντινών γεωτρήσεων των δυο μεταλλείων

Για να διεκπεραιωθεί ο τοπικός έλεγχος, επιλέχθηκαν οι 5 κοντινότερες γεωτρήσεις του κάθε μεταλλείου. Συγκεκριμένα σε δυο κοντινά μεταλλεία της εταιρείας Λάρκο στον δήμο του Ορχομενού υπάρχει διαφορά στάθμης σε μικρή απόσταση και δηλώνει την ύπαρξη περισσότερων του ενός υδροφορέων. Οι 5 κοντινότερες γεωτρήσεις για κάθε ένα από τα δυο μεταλλεία ήταν κοινές, επομένως έχουν τις ίδιες τιμές στάθμης.

Στον παρακάτω πίνακα 3.8 παρουσιάζονται οι 5 γεωτρήσεις με τις τιμές τους και στον πίνακα 3.9 έγινε έλεγχος, ποιες γεωτρήσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο ανάλογα με την επιρροή που έχουν σε σχέση με τα μεταλλεία. Ο έλεγχος έγινε σύμφωνα με τον λόγο απόσταση προς μήκος συσχέτισης, για να καθοριστεί η συσχέτιση των δεδομένων με τα μεταλλεία.



*Πίνακας 3. 8 Κοντινές κοινές γεωτρήσεις παρακολούθησης υπογείων υδάτων των δυο κοντινών ορυχείων της Λάρκο*

Γεώτρηση 1		Γεώτρηση 2		Γεώτρηση 3		Γεώτρηση 4		Γεώτρηση 5	
Μήνας	Στάθμη	Μήνας	Στάθμη	Μήνας	Στάθμη	Μήνας	Στάθμη	Μήνας	Στάθμη
1/3/18	52.36	5/3/18	2.78	1/3/18	47.68	1/3/18	61.48	1/3/18	31.98
24/10/18	54.97	7/11/18	3.18	29/6/18	48.13	24/10/18	64.19	24/10/18	42.49
30/9/20	55.46			24/10/18	51.73			21/10/19	35.77
29/9/21	61.30			21/10/19	46.40			8/7/20	30.50
								30/9/20	36.34
								9/7/21	21.00
								29/9/21	46.20

*Πίνακας 3. 9 Έλεγχος επιρροής των γεωτρήσεων παρακολούθησης σε σχέση με τα μεταλλεία*

	X (m)	Y (m)	Απόσταση S (m)	Ακτίνα Επιρροής h (m)	Μήκος Συσχέτισης ξ (m)	S/ξ
Δυτ. Μεταλλείο	433,091	4,260,410.00		15,346	5,115.33	
Γεώτρηση 1	433,733	4,261,019	884.90			0.17
Γεώτρηση 2	439,796	4,255,451	8,339.59			1.63
Γεώτρηση 3	429,304	4,263,314	4,772.27			0.93
Γεώτρηση 4	430,578.53	4,259,185.29	2,795.07			0.55
Γεώτρηση 5	421,597	4,259,698	11,516.03			2.25
Αν. Μεταλλείο	435,949	4,261,830		15,346	5,115.33	
Γεώτρηση 1	433,733	4,261,019	2,359.74			0.46
Γεώτρηση 2	439,796	4,255,451	7,449.23			1.46

Γεώτρηση 3	429,304	4,263,314	6,808.69			1.33
Γεώτρηση 4	430,578.53	4,259,185.29	5,986.36			1.17
Γεώτρηση 5	421,597	4,259,698	14,509.49			2.84

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα για το δυτικό μεταλλείο οι γεωτρήσεις 1,3,4 επηρεάζουν σημαντικά τα υπόγεια ύδατα του μεταλλείου, οπότε είναι αξιόπιστες για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς των υπόγειων υδάτων των ορυχείων. Ενώ για το ανατολικό ορυχείο μόνο η γεώτρηση 1 έχει καλή συσχέτιση. Η αξιολόγηση γίνεται με την χρήση χρονοσειρών στις γεωτρήσεις που αναφέρθηκαν, αλλά στην προκείμενη περίπτωση δεν υπάρχει ο κατάλληλος αριθμός δεδομένων για την κατασκευή τους. Παρατηρείται όμως σύμφωνα με τις γεωτρήσεις 1,3,4 η μεταβολή της στάθμης είναι παρόμοια αλλά και σαν μέγεθος αυξάνεται, το οποίο δηλώνει μια τάση αναπλήρωσης του υδροφορέα.

Σύμφωνα με τις τιμές των κοντινών γεωτρήσεων η τόση μεγάλη διαφορά τιμών από γεώτρηση σε γεώτρηση υποδηλώνει διαφορετικό υδρογεωλογικό υπόβαθρο, το οποίο επαληθεύεται με την ταύτιση των δυο χαρτών του kriging και του χάρτη υπόγειων υδάτων (βλέπε εικόνα 1.7). Από την εικόνα 1.7 προκύπτει ότι τα μεταλλεία της Λάρκου βρίσκονται στα όρια αναμεσα σε δύο υπόγεια υδατικά συστήματα, το σύστημα Κάτω Ρου Βοιωτικού Κηφισού και το σύστημα Υλίκης–Παραλίμνης, όπου έχουν λεκάνες απορροής βοιωτικού Κηφισού-Ασωπού και λεκάνη απορροής βοιωτικού Κηφισού αντίστοιχα.

Σύμφωνα με την εικόνα 3.15 στην περιοχή των μεταλλείων της Λάρκου φαίνεται πως μειώνονται οι τιμές κατά την νότια διεύθυνση. Η μείωση αυτή δικαιολογείται, διότι βόρεια υπάρχουν περιοχές με μεγαλύτερο υψόμετρο και νότια βρίσκονται οι δυο λίμνες, η Υλίκη και η Παραλίμνη.

Από τον πίνακα 1.10 το είδος του υδροφορέα είναι κοκκώδης από το σύστημα Κάτω Ρου Βοιωτικού Κηφισού και ουσιαστικά περιλαμβάνει προσχωματικά κοιτάσματα κυμαινόμενης υδροπερατότητας. Από το δεύτερο σύστημα το είδος είναι καρστικός, το οποίο περιλαμβάνει ασβεστόλιθους εκτεταμένης ανάπτυξης μέτριας έως υψηλής υδροπερατότητας. Σύμφωνα με την εικόνα 3.2 οι χρήσεις γης απεικονίζουν πολλές

καλλιέργειες, βοσκοτόπια και δασικές περιοχές που υποβαθμίζουν τον υδροφορέα αλλά περιμετρικά υπάρχει ένα μεγάλο σύστημα οροσειρών που το ανεβάζουν. Πάρα τις πιέσεις των αντλήσεων και των μεταλλείων, ποσοτικά και τα δυο συστήματα θεωρούνται καλά, λόγω ότι το ισοζύγιο τους είναι πλεονασματικό, πράγμα που σημαίνει ότι η μέση ετήσια τροφοδοσία τους ξεπερνά τις μέσες ετήσιες απολήψεις (βλέπε πίνακα 1.11).

Τα λατομεία αδρανών της Θήβας που φαίνονται στην εικόνα 3.15 είναι τα νοτιότερα σημεία ενδιαφέροντος. Στο ανατολικό λατομείο παρουσιάζεται μεγάλη διακύμανση τιμών σε μικρή απόσταση, που υποδεικνύει διαφορετικό γεωλογικό υπόβαθρο, όπως και για το δυτικό. Όσον αφορά τις χρήσεις γης εμφανίζεται κυρίως αστικοποίηση και καλλιέργειες ενδιάμεσα στα δυο αυτά λατομεία. Περιμετρικά δεν υπάρχουν ιδιαίτερες χρήσεις και αυξάνεται ραγδαία το υψόμετρο, για αυτό και παρουσιάζουν διακυμάνσεις τιμών. Η περιοχή των μεταλλείων είναι κατά το πλείστον κοκκώδης, όπου αποτελείται από προσχωματικές αποθέσεις κυμαινόμενης υδροπερατότητας, που απαντώνται στο δυτικό μεταλλείο και μη προσχωματικές αποθέσεις μέτριας έως υψηλής υδροπερατότητας στο ανατολικό μεταλλείο.

Το μεταλλείο Τσούκκας που είναι το βορειότερο μεταλλείο στην εικόνα 3.15 δεν παρουσιάζει έντονες μεταβολές. Οι τιμές της περιοχής αυξάνονται κατά την νότια διεύθυνση. Στα βόρεια υπάρχουν επιφανειακές εκφορτίσεις, για αυτό είναι λογικό να παρουσιάζουν μικρές τιμές ενώ στα νότια παρουσιάζονται περιοχές με μεγαλύτερο υψόμετρο.

Στον χάρτη χρήσεων γης δεν παρουσιάζονται τόσο έντονες πιέσεις που να κατεβάζουν την στάθμη αλλά και το μεγάλο υψόμετρο που επικρατεί, θα έπρεπε να ανεβάζει κατά πολύ την στάθμη σε όλη την περιοχή. Η περιοχή του μεταλλείου από το υδρολιθολογικό χάρτη παρουσιάζει πετρώματα διαφορετικής υδροπερατότητας, όπως αδιαπέρατα πλουτώνια και ηφαιστειακά. Επίσης εμφανίζονται κοκκώδεις μη προσχωματικές αποθέσεις μέτριας έως υψηλής υδροπερατότητας και ασβεστόλιθοι μέτριας έως υψηλής υδροπερατότητας.

## 4 Συμπεράσματα

Αυτή η εργασία εκπονήθηκε με σκοπό την μελέτη και την γεωστατιστική ανάλυση της ποσότητας των υπογείων υδάτων με έμφαση στην μεταλλευτική δραστηριότητα. Τα δεδομένα συλλέχθηκαν από την Ελληνική Αρχή Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ε.Α.Γ.Μ.Ε), που παρέχει πολλούς σταθμούς παρακολούθησης των υπογείων υδάτων, ώστε να εξαχθούν χρήσιμα αποτελέσματα. Στην Ανατολική Στερεά Ελλάδα υπάρχουν πολλές μεταλλευτικές περιοχές, οι οποίες επηρεάζουν ως ένα βαθμό τα υπόγεια ύδατα. Επιλέγονται πέντε μεταλλεία για περαιτέρω έρευνα, το μεταλλείο Τσούκκας, δύο μεταλλεία της εταιρείας Λάρκο που βρίσκονται στον Ορχομενό και δύο λατομεία αδρανών στην περιοχή της Θήβας.

Συγκεκριμένα τα μεταλλεία της Λάρκο βρίσκονται αναμεσά σε δυο υπόγεια υδατικά συστήματα, το σύστημα Υλίκης-Παραλίμνης και το σύστημα Κάτω Ρου Βοιωτικού Κηφισού. Επίσης για την απόδειξη διαφορετικού υδρογεωλογικού υποβάθρου πραγματοποιήθηκε έλεγχος συσχέτισης δεδομένων με τα μεταλλεία. Οι γεωτρήσεις που είχαν καλή συσχέτιση σε σχέση με τα μεταλλεία, έδειξαν μια τάση αναπλήρωσης του υδροφορέα. Οι κυρίες πιέσεις στα συστήματα υπόγειων υδάτων είναι η γεωργία και τα μεταλλεία. Στον χάρτη των χρήσεων γης απεικονίζεται έντονη πίεση στα βορειοδυτικά, που κατεβάζει την στάθμη αλλά περιμετρικά υπάρχει μεγάλο υψόμετρο, που ανεβάζει την στάθμη. Οι εκτιμώμενες τιμές της περιοχής μειώνονται κατά την νότιο ανατολική διεύθυνση, που απαντάται η λίμνη Παραλίμνη.

Εν συνεχεία τα λατομεία της Θήβας βρίσκονται αναμεσά σε δυο υπόγεια υδατικά συστήματα, το σύστημα Θηβών-Ασωπού-Σχηματαρίου και το σύστημα Υπάτου. Στον χάρτη χρήσεων γης παρουσιάζεται έντονη πίεση ενδιάμεσα των δυο μεταλλείων, το οποίο υποδηλώνει μείωση της στάθμης. Ενώ περιμετρικά δεν παρουσιάζεται ιδιαίτερη πίεση και αυξάνεται το υψόμετρο, το οποίο σημαίνει αύξηση της στάθμης. Οι εκτιμώμενες τιμές της περιοχής αυξάνονται εξωτερικά των μεταλλείων κατά την ανατολή και την δύση.

Επιπροσθέτως, το μεταλλείο Τσούκκας βρίσκεται αναμεσά σε δυο υπόγεια υδατικά συστήματα, το σύστημα Μαλεσίνας και το σύστημα Καλαποδίου-Κάστρου-Ορχομενού-Βασιλικών. Στον χάρτη χρήσεων γης δεν παρουσιάζονται έντονες πιέσεις που να κατεβάζουν την στάθμη όπως τα αλλά μεταλλεία. Επίσης το μεγάλο υψόμετρο που επικρατεί σε όλη την περιοχή υποδηλώνει την αύξηση της στάθμης. Οι εκτιμώμενες τιμές της περιοχής παρουσιάζουν μικρές τιμές, που αυξάνονται κατά την νοτιά διεύθυνση. Οπότε οι εκτιμήσεις δεν συμβαδίζουν με τον χάρτη χρήσεων γης λόγω των ελάχιστων δεδομένων εκείνης της περιοχής και η απόσταση των περισσότερων δεδομένων από το μεταλλείο είναι μεγαλύτερη από το μήκος συσχέτισης, άρα το σφάλμα της εκτίμησης έχει μεγάλη διασπορά (βλέπε εικόνα 3.1). Οι μονές εκτιμήσεις που δικαιολογούνται λόγω της μικρής τους τιμής, είναι κατά την βόρεια διεύθυνση της περιοχής κοντά στην περιοχή Τραγανά όπου βρίσκεται επιφανειακή εκφόρτιση του ποταμού Κηφισού.

Επομένως δεν παρατηρείται κάποια επιβάρυνση λόγω εξόρυξης, σύμφωνα με τα δεδομένα που παρουσιάζουν οι υδροφόροι. Μόνο στην περιοχή των μεταλλείων της Λάρκου, το υπόγειο υδατικό σύστημα Υλίκης-Παραλίμνης έχει κυριά πίεση τα μεταλλεία. Σαν σύστημα όμως το ισοζύγιο του πλεονασματικό κατά πολλές μονάδες, οπότε δεν υπάρχει ουσιαστική επιβάρυνση του υδροφορέα για να ληφθούν μέτρα (βλέπε παράρτημα πίνακα 1.10-1.11).

Αρχικά στην προκαταρκτική ανάλυση προσδιοριστήκαν και εξετάστηκαν σύμφωνα με τον έλεγχο κανονικότητας οι παράμετροι κατανομής πιθανότητας των διαθέσιμων δεδομένων. Ο λογαριθμικός μετασχηματισμός των δεδομένων αποδόθηκε αποτελεσματικά, εφόσον οι λογαριθμισμένες τιμές πλησιάζουν στην κανονική κατανομή. Στην συνέχεια βρέθηκαν τα μετρά επιβεβαίωσης της 1<sup>ου</sup> βαθμού τάσης και συγκεκριμένα ο συντελεστής συσχέτισης παρουσίασε ασθενή συσχέτιση με τα λογαριθμισμένα δεδομένα. Οι τιμές της τάσης αυξάνονται κατά την νοτιοανατολική διεύθυνση και συμβάλουν στην αύξηση των εκτιμήσεων του kriging.

Μέσω της βαριογραφίας υπολογίζεται το εμπειρικό βαριόγραμμα με βάση το στοχαστικό πεδίο της διακύμανσης στον λογαριθμικό μετασχηματισμό. Η επιλογή του θεωρητικού μοντέλου έγινε βάση του ελέγχου του τετραγωνικού σφάλματος προσαρμογής με το εμπειρικό βαριόγραμμα. Η βέλτιστη προσαρμογή πραγματοποιήθηκε με το εκθετικό μοντέλο. Στο πλαίσιο της χωρικής παρεμβολής

χρησιμοποιείται η μέθοδος εκτίμησης Ordinary Kriging σε λογαριθμισμένα δεδομένα, όπου δεν απέδωσε τόσο καλά όσο στην αρχική κλίμακα. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μεθόδου kriging αναλύθηκε η χωρική αβεβαιότητα και βρέθηκε ύπαρξη ακραίων τιμών στα δεδομένα. Οι έντονες διακυμάνσεις των εκτιμήσεων της μεθόδου kriging οφείλονται κυρίως σε διαφορετικό υδρογεωλογικό υπόβαθρο.

Σύμφωνα με την μέθοδο της διασταυρωμένης επαλήθευσης (LOOCV) οι εκτιμήσεις της στάθμης που προέκυψαν, βρίσκονται κοντά στις πραγματικές τιμές. Επομένως και οι εκτιμήσεις σε μη δειγματοληπτικά σημεία αποδοθήκαν το ίδιο ορθά. Οι εκτιμήσεις των δεδομένων επηρεάζονται από την ακτίνα γειτονίας που έχει οριστεί από το μήκος συσχέτισης. Το μήκος συσχέτισης το οποίο αποδίδεται μέσω της βαριογραφίας, δηλώνει ότι η διαδικασία προσαρμογής του βαριογράμματος είναι ικανοποιητική. Εν συνεχεία ο χάρτης της τυπικής απόκλισης kriging παρουσιάζει λίγες γειτονίες για εκτίμηση των δεδομένων χωρίς μεγάλη αβεβαιότητα. Συνεπώς, το τυχαίο πεδίο παρουσιάζει ανεπάρκεια δεδομένων δειγματοληψίας. Ειδικά στην περιοχή του μεταλλείου Τσούκκας χρειάζεται πυκνότερη κατανομή δεδομένων.

#### 4.1 Προτάσεις για μελλοντική ερευνά

Για την βελτίωση του θέματος θα μπορούσε να συνδυαστεί με την εκτίμηση κινδύνου μόλυνσης των μεταλλευτικών περιοχών. Σκοπός της έρευνας είναι η αξιολόγηση της τρωτότητας των υπογείων υδάτων στις μεταλλευτικές περιοχές που παρουσιάζουν υψηλό κίνδυνο μόλυνσης. Σύμφωνα με τις μεθόδους DRASTIC και GOD υπολογίζεται η τρωτότητα στην μόλυνση (Campoverde Muñoz, et al., 2023). Επίσης ο κίνδυνος μόλυνσης βρίσκεται με βάση τον δείκτη τρωτότητας και τον δείκτη επικινδυνότητας. Εφόσον συνδυαστούν ο χάρτης τρωτότητας μαζί με τους χάρτες χρήσης γης, θα μπορούν να βρεθούν οι μεταλλευτικές περιοχές, που παρουσιάζουν υψηλό κίνδυνο τρωτότητας με σκοπό την προστασία των υπόγειων υδάτων (Campoverde Muñoz, et al., 2023). Μια άλλη προσέγγιση είναι το Indicator kriging το οποίο βοηθά στον περιορισμό τιμών σύμφωνα με ένα ορισμένο κατώφλι, που εξασφαλίζει την ασφαλή ποσοτική κατάσταση των υπογείων υδάτων και βρίσκει τις περιοχές που χρειάζονται περισσότερη προσοχή. Σε μια τέτοια έρευνα είναι πολύ σημαντικό να οριστούν όρια τα όποια αποσκοπούν στην αποτελεσματικότερη διαχείριση των υπόγειων υδάτων (Theodoridou, Varouchakis, & Karatzas, 2017).

## Παραρτήματα

Πίνακας 1. 10 Υπόγεια υδατικά συστήματα της Αν. Στέρας Ελλάδας

A/A	ΛΑΠ	Όνομα ΥΥΣ	Κωδικός ΥΥΣ	Είδος Υδροφορέα	Έκταση (km <sup>2</sup> )
1	EL 0718 EL 0724	Ανατολικού Τυμφρηστού- Βίστριτσας- Οίτης	EL0700010	Καρστικός & Ρωγματικός	944
2	EL 0718	Ζηλευτού- Μοσχοκαρυάς	EL0700020	Καρστικός & Ρωγματικός	200
3	EL 0718	Λαμίας-Στυλίδας	EL0700030	Καρστικός	128
4	EL 0718	Πελασγίας	EL0700040	Μικτός	505
5	EL 0718	Σπερχειού (α) Σπερχειού (β)	EL0700051 EL0700052	Κοκκώδης	322 140
6	EL 0718 EL 0722 EL 0723	Υπάτης- Καλλίδρομου	EL0700060	Καρστικός	340
7	EL 0722	Κνημίδας	EL0700070	Καρστικός & Κοκκώδης	404
8	EL 0722	Αταλάντης	EL0700080	Κοκκώδης	50
9	EL 0723	Άνω και Μέσο Ρου Βοιωτικού Κηφισού	EL0700090	Κοκκώδης	291
10	EL 0722 EL 0723	Καλαποδίου- Κάστρου- Ορχομενού- Βασιλικών	EL0700100	Καρστικός	439
11	EL 0722	Μαλεσίνας	EL0700110	Κοκκώδης	219

	EL 0723			& Καρστικός	
12	EL 0724 EL 0723	Γκιώνας	EL0700120	Καρστικός	553
13	EL 0724	Άμφισσας	EL0700130	Κοκκώδης	30
14	EL 0723 EL 0724	Γραβιάς	EL0700140	Καρστικός	235
15	EL 0723 EL 0724	Παρνασσού	EL0700150	Καρστικός	299
16	EL 0723 EL 0725	Διστόμου	EL0700160	Καρστικός	108
17	EL 0723 EL 0725	Ελικώνα	EL0700170	Καρστικός	256
18	EL 0723 EL 0725	Κάτω Ρου Βοιωτικού Κηφισού (α) Κάτω Ρου Βοιωτικού Κηφισού (β)	EL0700181     EL0700182	Κοκκώδης	91     297
19	EL 0723	Υλίκης- Παραλίμνης	EL0700190	Καρστικός	248
20	EL 0723	Υπάτου	EL0700200	Μικτός	194
21	EL 0723 EL 0725	Θηβών-Ασωπού- Σχηματαρίου	EL0700210	Κοκκώδης	772
22	EL 0725	Σκούρτων-Αγ. Θωμά	EL0700220	Καρστικός	309
23	EL 0723 EL 0724 EL 0725	Αντίκυρας- Κιθαιρώνα	EL0700230	Καρστικός	900



Πίνακας 1. 11 Ποσοτικής κατάστασης υπογείων υδατικών συστημάτων της Αν. Στέρας  
Ελλάδας

Κωδικός ΥΥΣ	Τροφοδοσία (m <sup>3</sup> /έτος)	Συνολικές Απολήψεις (m <sup>3</sup> /έτος)	Ποιοτικά Προβλήματα	Κύριες Πιέσεις	Ποσοτική Κατάσταση
EL0700010	60	26.99		Βιομηχανία, Μεταλλεία	ΚΑΛΗ
EL0700020	15	9.55		Βιομηχανία	ΚΑΛΗ
EL0700030	35	9.13		Βιομηχανία	ΚΑΛΗ
EL0700040	35	46.78	Ελλειμματικό Ισοζύγιο	Ελλειμματικό ισοζύγιο	ΚΑΚΗ
EL0700051 EL0700052	85	31.06	Νιτρικά (γεωργία)	Γεωργία, Λύματα, Βιομηχανία, Αστικοποίηση	ΚΑΛΗ
EL0700060	130	27.67	Πτώση Στάθμης	Μεταλλεία, Πτώσης στάθμης	ΚΑΛΗ
EL0700070	45	44.32	Τοπικά Υφαλμύριση	Γεωργία	ΚΑΛΗ
EL0700080	10	6.36	Τοπικά Υφαλμύριση	Γεωργία, Βιομηχανία	ΚΑΛΗ
EL0700090	130	23.51	Νιτρικά	Γεωργία, Βιομηχανία, Αστικοποίηση	ΚΑΛΗ
EL07000100	150	44.87		Γεωργία, Βιομηχανία	ΚΑΛΗ
EL07000110	15	27.28	Ελλειμματικό Ισοζύγιο, Υφαλμύριση, Παράκτιας ζώνης	Ελλειμματικό ισοζύγιο, Γεωργία, Βιομηχανία, Αστικοποίηση	ΚΑΚΗ
EL07000120	200	6.38	Τοπικά Υφαλμύριση	Γεωργία, Μεταλλεία	ΚΑΛΗ

EL07000130	3	0.54	Υφαλμύρινη, Υπεραντλήσεις, Πτώση Στάθμης, Μέταλλα (βιομηχανική δραστηριότητα)	Γεωργία, Υπεραντλήσεις, Πτώση στάθμης, Ελλειμματικό ισοζύγιο	ΚΑΚΗ
EL07000140	100	5.37	Πτώση Στάθμης	Μεταλλεία, Πτώση στάθμης	ΚΑΛΗ
EL07000150	150	16.20	Τοπικά Υφαλμύρινη	Γεωργία, Βιομηχανία, Αστικοποίηση	ΚΑΛΗ
EL07000160	30	5.97		Μεταλλεία	ΚΑΛΗ
EL07000170	75	20.87		Γεωργία, Αστικοποίηση, Βιομηχανία	ΚΑΛΗ
EL07000181 EL07000182	60	31.59	Νιτρικά (γεωργία)	Γεωργία	ΚΑΛΗ
EL07000190	330	20.87		Γεωργία, Μεταλλεία	ΚΑΛΗ
EL07000200	30	16.04	Τοπικά Υφαλμύρινη	Γεωργία, Βιομηχανία	ΚΑΛΗ
EL07000210	130	27.44	Νιτρικά, Μέταλλα (βιομηχανική δραστηριότητα)	Γεωργία, Λύματα, Βιομηχανία, Αστικοποίηση	ΚΑΛΗ
EL07000220	100	9.78		Γεωργία, Αστικοποίηση, Βιομηχανία	ΚΑΛΗ
EL07000230	200	9.51	Τοπικά Υφαλμύρινη Βιομηχανική δραστηριότητα	Γεωργία, Βιομηχανία	ΚΑΛΗ

## Βιβλιογραφία

- Τσιούμας, Β., & Ζοράπας, Β. (2010). “Υδρογεωλογική Μελέτη στο Υδατικό Διαμέρισμα Αν. Στέρας Ελλάδος”. Τεχνική Έκθεση, Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών.
- Abzalov, M. (2016). Introduction to Geostatistics. In M. Abzalov, *Applied Mining Geology* (12 ed., pp. 233–237). Springer, Cham. doi:[https://doi.org/10.1007/978-3-319-39264-6\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-319-39264-6_17)
- Agou, V. (2023). *Space-time analysis of meteorological parameters with geostatistical and machine learning methods (Doctoral dissertation)*. Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων.
- Aurenhammer, F. (1991). “Voronoi diagrams—a survey of a fundamental geometric data structure”. In F. Aurenhammer, *ACM Computing Surveys* (pp. 345–405). doi:10.1145/116873.116880
- Batsis, G., Partsinevelos, P., & Stavrakakis, G. (2021). *A deep learning and GIS approach for the optimal positioning of wave energy converters*.
- Biswas, A., & Cheng Si, B. (2013). “Model Averaging for Semivariogram Model Parameters”. In *Advances in Agrophysical Research*. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.5772/52339>
- Campoverde Muñoz, P. A., Aguilar Salas, L., Romero-Crespo, P., Valverde-Armas, P., Villamar-Marazita, K., Jiménez-Oyola, S., & Garcés-León, D. (2023). Risk Assessment of Groundwater Contamination in the Gala, Tenguel, and Siete River Basins, Ponce Enriquez Mining Area—Ecuador. *Sustainability*. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/su15010403>
- Chai, T., & Draxler, R. R. (2014). “Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE).”. In *Geoscientific Model Development Discussions* 7 (pp. 1525–1534).
- Chiles, J.-P., & Delfiner, P. (2012). *Geostatistics Modelling spatial uncertainty* (2 ed.).
- Christakos, G. (1992). *“Random Field Models in Earth Sciences”*. San Diego: Academic Press.
- Doran, R., Ogunbode, C. A., Böhm, G., & Gregersen, T. (2023). "Exposure to and learning from the IPCC special report on 1.5° C global warming, and public support for climate protests and mitigation policies. ". *Climate Action*.
- Goovaerts, P. (1997). *“Geostatistics for Natural Resources Evaluation”*. New York: Oxford University Press. Retrieved from <https://books.google.gr/books?id=CW-7tHAaVR0C>
- Harding, B. E., & Deutsch, C. V. (2021). *geostatisticslessons*. Retrieved from [geostatisticslessons: http://www.geostatisticslessons.com/lessons/trendmodeling](http://www.geostatisticslessons.com/lessons/trendmodeling)
- Hristopulos, D. T. (2020). Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1007/978-94-024-1918-4>
- Hristopulos, D. T. (2020). *“Random Fields for Spatial Data Modelling. A Primer for Scientists and Engineers”*. Springer Dordrecht. doi:10.1007/978-94-024-1918-4

- Partsinevelos, P., & Papadakis, K. (2015). *Spatially constrained clustering over GIS generated suitability maps*.
- Pavlidis, A., Hristopulos, D. T., Roumpos, C., & Agioutantis, Z. (2015). Spatial modeling of lignite energy reserves for exploitation planning and quality control. *Energy*, 112(93), 1906-1917.
- Shamsudduha, M., & Taylor, R. G. (2020). Groundwater storage dynamics in the world's large aquifer systems from GRACE: uncertainty and role of extreme precipitation. *Earth System Dynamics*, 10, 755-774.
- Theodoridou, P. G., Varouchakis, E. A., & Karatzas, G. P. (2017). Spatial analysis of groundwater levels using Fuzzy Logic and geostatistical tools. *Journal of Hydrology*, pp. 242-252. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.10.027>
- Varouchakis, E. A., Perez, G. C., Loaiza, M. D., & Spanoudaki, K. (2022). Sustainability of mining activities in the European Mediterranean region in terms of a spatial groundwater stress index. *Spatial Statistics*.
- Varouchakis, E., Solomatine, D., Perez, G., Jomaa, S., & Karatzas, G. (2023). "Combination of geostatistics and self-organizing maps for the spatial analysis of groundwater level variations in complex hydrogeological systems". *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, pp. 1-12.
- Wackernagel, H. (2013). *Multivariate Geostatistics* (3 ed.). Springer Berlin, Heidelberg. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-662-05294-5>
- Διαμαντοπούλου, Ε. (2023). *Γεωστατιστική ανάλυση δεδομένων υπόγειων. Πολυτεχνείο Κρήτης, Μηχανικών Ορυκτών Πόρων*.
- Ειδική Γραμματεία Υδάτων. (2013). “Σχέδιο Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Στέρας Ελλάδας”.
- Ειδική Γραμματεία Υδάτων. (2017). “1η Αναθεώρηση Σχέδιου Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Στέρας Ελλάδας”.
- Καπαγερίδης, Ι. (2015). “Εισαγωγή στην Γεωστατιστική”. ΙΩΝ.
- Λαμπράκης, Ν. (2019). “Μαθήματα Εφαρμοσμένης και Περιβαλλοντικής Υδρογεωλογίας”. Liberal Books.
- Προγκάκη, Β. (2007). “Κινηματική της παραμόρφωσης της ζώνης Βοιωτίας στο ορός ελίκων”. Διπλωματική Εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Γεωλογίας, Εργαστήριο Τεκτονικής και Στρωματογραφίας.
- Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων. (χ.χ.). “Έλεγχος Χημικής Ποιότητας Αρδευτικών Υδάτων (Επιφανειακών ΚΑΙ Υπογείων) σε Κλίμακα Λεκανών Απορροής Ποταμών Μακεδονίας - Θράκης και Θεσσαλίας, Αποτελέσματα Ευρύτερης Λεκάνης Πηνειού Υδρογεωλογικά Στοιχεία”. Τεχνική Έκθεση. Ανάκτηση από [http://ardeftika.decentral.minagric.gr/files/results/hydro/14.%20HYDRO\\_PINIOU.pdf](http://ardeftika.decentral.minagric.gr/files/results/hydro/14.%20HYDRO_PINIOU.pdf)
- Χριστόπουλος, Δ. (2014). “Εφαρμοσμένη Γεωστατιστική”. Ανάκτηση από <https://www.eclass.tuc.gr/modules/document/file.php/MHXOP178/Applied%20Geostats%202020.pdf>
- Χριστόπουλος, Δ. (2016). “Εισαγωγή στις Πιθανότητες και τη Στατιστική για Μηχανικούς”. Ανάκτηση από

[https://www.eclass.tuc.gr/modules/document/file.php/MHXOP139/Probability\\_Statistics\\_2016.pdf](https://www.eclass.tuc.gr/modules/document/file.php/MHXOP139/Probability_Statistics_2016.pdf)