

Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΓΕΩΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΤΗΣ ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΑΣ ΤΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ ΣΕ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΔΙΥΛΙΣΗΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΩΝ. Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ΚΟΥΜΟΥΝΔΟΥΡΟΥ ΑΣΠΡΟΠΥΡΓΟΥ ΑΤΤΙΚΗΣ

Μιμίδης Θ., Ρίζος Σ., Ψυχογιού Μ., Σγουμποπούλου Α.

Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία επιχειρείται η ταυτοποίηση των υδρογονανθράκων (προϊόν) του υδροφόρου ορίζοντα της λίμνης Κουμουνδούρου Ασπροπύργου Αττικής και της γύρω περιοχής των ΕΛ.ΠΕ (Ελληνικά Πετρέλαια) κάνοντας χρήση ισοπαχών καμπύλων τόσο για το προϊόν όσο και για τα υπόγεια νερά, στα πλαίσια της περιβαλλοντικής αναβάθμισής της. Η ταυτοποίηση των υδρογονανθράκων πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο της αέριας χρωματογραφίας/φασματογράφου μάζας. Για τη χάραξη των ισοπαχών καμπύλων του προϊόντος καθώς και των ισοπαχών καμπύλων της συνολικής πιεζομετρίας, έγινε χρήση της χωρικής παρεμβολής (interpolation). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μελέτης, υπάρχει μεγάλη ποικιλία προϊόντων τα οποία συναντώνται στις εγγύτερες γεωτρήσεις των δεξαμενών. Η σύστασή τους δε μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του χρόνου, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι υπάρχει συνεχής διαρροή από την περιοχή εντός των ΕΛ.ΠΕ όπου εντοπίζονται οι δεξαμενές όπου αποθηκεύεται η νέα αμόλυβδη βενζίνη. Η ελεύθερη εποφάνεια του υδροφόρου ορίζοντα εξακολουθεί να ευνοεί τη ροή των πετρελαιοειδών προς τη λίμνη. Ωστόσο, ιδιαίτερο ρόλο στον περιορισμό της ρύπανσης παίζει τόσο η συντήρηση, όσο και η διατήρηση από τα ΕΛ.ΠΕ του ειδικού πλωτού φράγματος κατακράτησης των προϊόντων στο σημείο εκροής τους στη λίμνη.

THE ROLE OF GEOSTATISTICS FOR THE IMPRESSION OF PIEZOMETRIC OF HYDROCARBONS AND UNDERGROUND WATERS IN AREAS OF PETROLEUM REFINEMENT. THE CASE OF LAKE KOUMOUNDOUROU

Mimidis T., Rizos S., Psyhoyou M., Sgoumpopoulou A.

Agricultural University of Athens

Department of Natural Resources Development and Agricultural Engineering

Abstract

In this paper, the fingerprinting of hydrocarbon products of the unconfined aquifer of Lake Koumoundourou, Aspropirgos, in Attica around the area of Greek Petroleum is being attempted making use of iso-thickness curves for the product and the underground waters, in the framework of its environmental upgration. The identification of hydrocarbons was performed making use of aerial chromatography / mass spectrograph. For the drawing of the miscellaneous iso-thickness curves interpolation was employed. The results revealed that there is a great variety of products entering the monitoring boreholes that are closer to the storage tanks. The chemical composition of the products does not change with time, a fact that is due to the continuous leakage from the premises of Greek Petroleum and particularly from the tanks where new unleaded gasoline is stored. The water table of the aquifer is in favor of petroleum products flow towards the lake. However, specific role for the confinement of the pollution plays the maintenance of the tanks parallel with the floating barrage restricting oily products into the lake.

Λέξεις κλειδιά: Λίμνη Κουμουνδούρου, kriging, πετρελαιοειδή, υπόγεια νερά, ταυτοποίηση.

Key words: Lake Koumoundourou, kriging, petroleum products, groundwater, fingerprinting.

1. Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία γίνεται καταγραφή της υφιστάμενης κατάστασης στην ευρύτερη περιοχή των Ελληνικών Διυλιστηρίων Ασπροπύργου, ΕΛ.ΠΕ, όσον αφορά το πάχος των πετρελαιοειδών σε όλο τον υπεδάφιο υδροφόρο, κάνοντας χρήση κλασικών μεθόδων γεωστατιστικής ανάλυσης. Ο υπολογισμός του πάχους των πετρελαιοειδών έγινε με την εφαρμογή των μεθόδων χωρικής παρεμβολής (Simple Kriging). Με τον τρόπο αυτό κατεγράφη το πάχος των πετρελαιοειδών και η συνολική πιεζομετρία.

Τα ΕΛ.ΠΕ. εγκαταστάθηκαν στην περιοχή του Ασπροπύργου Αττικής στα τέλη του 1950 και καταλαμβάνουν έκταση 1,1 km² περίπου. Εντός των εγκαταστάσεων τους αναπτύσσονται 90 δεξαμενές των 10.000 – 50.000 m³ καθώς και μονάδες διύλισης. Η μόλυνση του υπεδάφους από πετρελαιοειδή έγινε φανερή από το 1988 κατά τη διάρκεια εκσκαφής για εγκαταστάσεις νέων μονάδων επεξεργασίας. Ευρείες έρευνες του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ) το 1992 έφεραν στο φως υψηλές συγκεντρώσεις πετρελαιοειδών στο υπέδαφος, υπό μορφή έξι κηλίδων (Σχήμα 1) οι οποίες κάλυπταν το 43% της περιοχής των εγκαταστάσεων τους (Εφημερίδα ΤΑ ΝΕΑ-17/2/95). Οι κηλίδες πετρελαιοειδών οφείλονται στις διαφορικές καθιζήσεις του υπεδάφους τους, οι οποίες εξακολουθούν να λαμβάνουν χώρα ακόμα και σήμερα (έδραση πάνω στη μπαζωμένη λίμνη της Περσεφόνης) σε συνδυασμό με διαβρώσεις μεταλλικών μερών των δεξαμενών αποθήκευσης όσο και των αγωγών μεταφοράς προϊόντων. Αυτή η διαρροή έχει σαν αποτέλεσμα τη ρύπανση όχι μόνο των υπόγειων νερών αλλά και της λίμνης Κουμουνδούρου, διαταράσσοντας κατά αυτόν τον τρόπο το οικοσύστημά της.

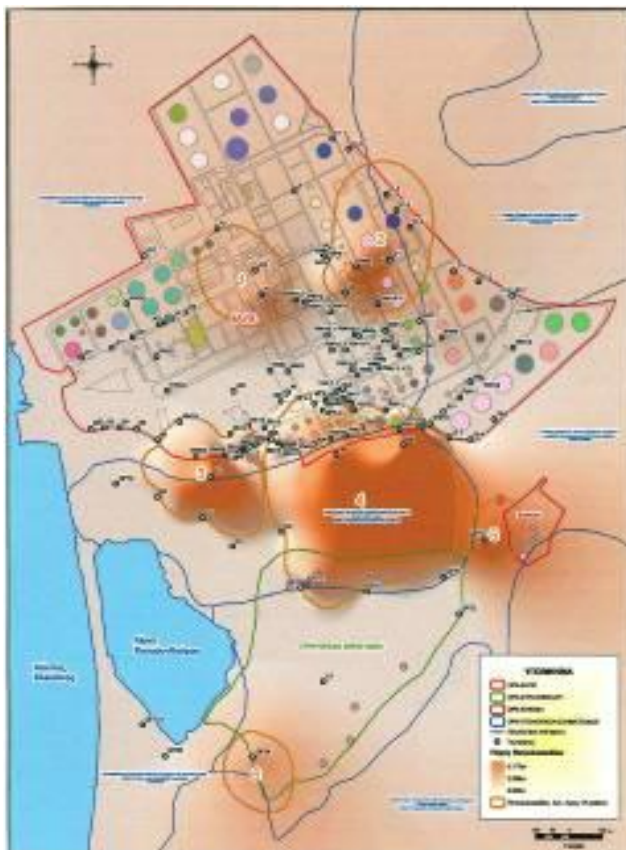
Με βάση το ΦΕΚ 5/8-1-1-1994 ΥΑ 41/1/2-72 η λίμνη Κουμουνδούρου ανακηρύχθηκε αρχαιολογικής σημασίας χώρος και καθορίστηκε προστατευόμενη ζώνη 50 m από την περίμετρό της. Αυτός είναι και ο λόγος που δεν αποστραγγίστηκαν και τα τελευταία στρέμματα που της απέμειναν για την έκταση των εκεί υπαρχόντων βιομηχανικών μονάδων.

Μετά την καταγραφή της ρύπανσης από το ΙΓΜΕ, τα ΕΛ.ΠΕ. ξεκίνησαν ένα πρόγραμμα απορρύπανσης. Με κατάλληλη συντήρηση του δικτύου αποθήκευσης και μεταφοράς, η διαρροή μπορεί να σταματήσει (παρατηρούνται διαφυγές αμόλυβδης βενζίνης) ενώ τα ελαιώδη προϊόντα τα οποία έχουν συσσωρευθεί στο έδαφος αφορούν μεγάλα χρονικά διαστήματα παλαιότερων ετών.

Σε διάφορα σημεία της έκτασης των χιλίων και πλέον στρεμμάτων των ΕΛ.ΠΕ. έχουν πραγματοποιηθεί περισσότερες από 90 γεωτρήσεις (στην παρούσα ανακοίνωση χρησιμοποιήθηκαν 87 από αυτές) για την απόληψη των ρύπων. Η πυκνότητα των διανοιγμένων γεωτρήσεων είναι διαφορετική από περιοχή σε περιοχή και έγινε με γνώμονα την παρεμπόδιση των ρυπαντικών φορτίων προς τη λίμνη Κουμουνδούρου (Σχήμα 1).

Η χρήση λογισμικών πακέτων όπως το Surfer 7.0 και VARIOWIN 2.2, καθώς και η ενσωμάτωση σε Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών κλασικών μεθόδων γεωστατιστικής ανάλυσης, αποτελεί σημαντικό εργαλείο που εφοδιάζει συνεχώς, με τη δυνατότητα επεξεργασίας πολύ μεγάλων πληροφοριών, με δημιουργία Συστημάτων Λήψης Απόφασης (Decision Support Systems-DSS) κλπ., όλους τους εμπλεκόμενους στο σχεδιασμό προγραμμάτων εξυγίανσης του υπόγειου υδροφόρου.

Για τα γεωλογικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής βλ. Μιμίδης και Ρίζος (2007).



Σχήμα 1. Περιοχή μελέτης όπου φαίνονται τα ΕΛ.Π.Ε., οι διάφορες εγκαταστάσεις γύρω από τη Λίμνη Κουμουνδούρου καθώς και η ανάπτυξη των έξι πετρελαιοκηλίδων.

2. Η τύχη των πετρελαιοιδών

Οι πετρελαϊκοί υδρογονάνθρακες εντοπίστηκαν σε:

- ακόρεστα εδάφη, όπου αρχικά ελευθερώνονται,
- στον υδροφόρο ορίζοντα, όπου μεταναστεύουν δια μέσου της ακόρεστης ζώνης,
- στη ζώνη αερισμού (συνεισφέρουν στην αέρια φάση του εδάφους).

Με την απελευθέρωσή τους στο έδαφος, οι χημικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στους υδρογονάνθρακες είναι η προσρόφηση, η αποσύνθεση, η βιοαποικοδόμηση, η διάχυση και η αεριοποίηση.

Τα περισσότερα από τα πετρελαϊκά προϊόντα (αλκάνια, αρωματικοί υδρογονάνθρακες) είναι μη πολικές ενώσεις κι έχουν περιορισμένη διαλυτότητα στο νερό. Αντίθετα, τα φυσικά ευρισκόμενα στο έδαφος χουμικά οξέα ή στα φυσικά νερά φουλβικά οξέα είναι δυσδιάλυτα στο νερό αλλά μπορούν να προκαλέσουν διάλυση υποστρωμάτων κατόπιν δημιουργίας χειλικών συμπλόκων με δέσμευση οργανικών ενώσεων ή μεταλλικών κέντρων. Επίσης, δέσμευση των οργανικών μορίων μπορεί να επιτευχθεί και από μη οργανικές ενώσεις των χουμικών με ομοιοπολικούς δεσμούς, ή από αργιλικές, πυριτικές, ανθρακικές, φωσφορικές

διαστρώσεις που απαντώνται συχνά εντός των εδαφικών σχηματισμών.

Ο συντελεστής προσρόφησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν μέσο εκτίμησης της κινητικότητας των ρυπαντών. Όσο υψηλότερη η τιμή του, τόσο μικρότερη η κινητικότητα της ένωσης και μεγαλύτερη η πιθανότητα προσρόφησης της.

Το πρόβλημα κατά την εξυγίανση μιας ρυπανθείσας περιοχής από πετρελαιοειδή είναι ότι δεν απαντώνται όλες οι συστατικές ενώσεις αυτών σε κάθε μια από τις τρεις φάσεις που προαναφέρθηκαν και αυτό εξαιτίας της διαφορετικής διαλυτότητας και πτητικότητά τους. Τα μικρής διαλυτότητας και πτητικότητας συστατικά επικρατούν στο έδαφος, τα μεγάλης διαλυτότητας στο νερό και τα πολύ πτητικά στην αέρια φάση του εδάφους.

Οι τρεις μεγαλύτερες κηλίδες από τις προαναφερθείσες στην ευρύτερη περιοχή των ΕΛ.ΠΕ. είναι οι 4, 2 και 3. Η μεγαλύτερη, 4, έχει έκταση 282.000 m² και μεταγγιζόμενη από τον κοκκώδη υδροφορέα υποδοχής πλευρικά στο ρωγματομένο ασβεστόλιθο, εκφορτίζεται ήπια και σχεδόν σημειακά στη λίμνη Κουμουνδούρου, ενώ οι μικρότερες 2 και 3 με έκταση 115.000 m² και 92.000 m² αντίστοιχα, μάλλον δεν ανανεώνονται και πρακτικά παρουσιάζονται παγιδευμένες στον κοκκώδη υδροφορέα. Οι κηλίδες αυτές χαρακτηρίζονται ως υγρά μη υδατικής φάσης (nonaqueous phase liquids-NAPLs). Ο συνολικός όγκος των πετρελαιοειδών των κηλίδων ανήλθε στα επίπεδα των 17.000 m³, 2500 m³ και 2800 m³ αντίστοιχα, στο χρονικό διάστημα της διάρκειας της μελέτης.

Τα NAPLs καθιστούν την εξυγίανση ρυπασμένων υδροφόρων οριζόντων πολύ δύσκολη, διότι η εξάλειψη όλων των υπολειμματικών γαγγλίων NAPL που είναι παγιδευμένοι σε μεμονωμένους πόρους είναι σχεδόν αδύνατη. Μολονότι πολλές τεχνικές αφαίρεσης των NAPLs βρίσκονται σήμερα υπό δοκιμασία, παρ' όλα αυτά δεν έχουν βρεθεί υπαίθριες μέθοδοι ικανές να απομακρύνουν κάθε μορφής NAPL από ένα υδροφόρο και να τον επαναφέρουν σε τέτοια επίπεδα ώστε το νερό να καταστεί πόσιμο (ανώτερη παραδεκτή συγκέντρωση 0.01 mg/l EEC Directive 80/778). Η φάση των NAPL που παραμένει παγιδευμένη εντός της κύριας μάζας του εδάφους-υδροφόρου δρα σαν μια συνεχής πηγή τροφοδοσίας διαλυμένων ρυπαντικών ουσιών προς το υπόγειο νερό. Εξαιτίας αυτής της διαδικασίας συνεχούς απελευθέρωσης ρυπαντικών ουσιών, η εξυγίανση των υδροφόρων είναι ένα πολύπλοκο φαινόμενο και μπορεί να διαρκέσει πολλά χρόνια.

3. Χωρική παρεμβολή

Οι γεωστατιστικές μέθοδοι χωρικής παρεμβολής πρωτοεισθήχθησαν από τους Matheron (1963) και Krige (1951) και στηρίζονται στη διαπίστωση ότι η μεταβολή μιας ιδιότητας στο χώρο είναι αρκετά ακανόνιστη για να μπορεί να περιγραφεί από μια μαθηματική συνάρτηση όπως προσαθούν οι διάφορες προσδιοριστικές μέθοδοι χωρικής παρεμβολής (deterministic interpolation methods).

Οι γεωστατιστικές μέθοδοι (geostatistical methods) χρησιμοποιούν μεθόδους χωρικής αυτοσυσχέτισης (spatial autocorrelation) και ανήκουν στην κατηγορία του 'ακριβή παρεμβολέα'. Αυτές οι μέθοδοι καλούνται γενικώς kriging και απαιτούν την κατανόηση των αρχών που διέπουν τη χωρική αυτοσυσχέτιση των τιμών της εξεταζόμενης ιδιότητας. Δηλαδή, τη συσχέτιση των τιμών με βάση την απόσταση και την κατεύθυνση (προσανατολισμό) που τις διαχωρίζει. Σε αντίθεση με την kriging, οι προηγούμενες μέθοδοι στηρίζονται στην κλασική στατιστική όπου οι τιμές της εξεταζόμενης ιδιότητας είναι ανεξάρτητες και δεν υπάρχει συσχέτιση ανάμεσά τους.

Οι μέθοδοι kriging χρησιμοποιούνται όταν η μεταβολή στο χώρο των τιμών μιας ιδιότητας είναι αρκετά ανώμαλη και όταν ο αριθμός των δειγμάτων είναι περιορισμένος με συνέπεια να είναι πιθανόν οι υπόλοιπες μέθοδοι χωρικής παρεμβολής να οδηγήσουν σε αναξιόπιστες προβλέψεις.

Χωρική παρεμβολή (interpolation) ονομάζεται η μέθοδος πρόβλεψης των τιμών μιας

ιδιότητας ή μεταβλητής σε κάθε σημείο μιας περιοχής από τιμές της ιδιότητας ή της μεταβλητής σε περιορισμένο αριθμό σημείων της ίδιας περιοχής στα οποία έχουν γίνει μετρήσεις.

Στηρίζεται στη διαπίστωση ότι γενικά οι τιμές μιας ιδιότητας σε κοντινά σημεία αναμένεται να είναι παρόμοιες σε μεγαλύτερο βαθμό από ότι αν τα σημεία βρίσκονται απομακρυσμένα μεταξύ τους. Οι διάφορες μέθοδοι χωρικής παρεμβολής στοχεύουν στην όσο το δυνατόν καλύτερη αξιοποίηση της μικρής κλίμακας μεταβολής των τιμών μιας παραμέτρου ώστε να επιτευχθεί πληρέστερη κατανόηση του τρόπου με τον οποίο γίνεται η μεταβολή και ακολούθως η ακριβής πρόβλεψη των τιμών της σε οποιοδήποτε σημείο.

Η χωρική παρεμβολή είναι ευρείας χρήσεως καθώς μπορεί να βοηθήσει τους επιστήμονες να διαχειριστούν σχετικά δεδομένα, να βγάλουν συμπεράσματα και να λάβουν τις κατάλληλες αποφάσεις εκμεταλλευόμενοι μικρό αριθμό δεδομένων. Το παραπάνω στοιχείο παρέχει το σημαντικό πλεονέκτημα εξοικονόμησης χρόνου και χρημάτων που απαιτούνται για τη λήψη μεγάλου όγκου δεδομένων και την ακόλουθη επεξεργασία και αξιολόγησή τους.

Η αναπαράσταση της χωρικής κατανομής των τιμών μιας ιδιότητας με γραμμές γίνεται κυρίως με ισογραμμές (καμπύλες όπου η ιδιότητα έχει την ίδια τιμή), κάθετες τομές (προφίλ) ή κρίσιμες γραμμές όπως κορυφογραμμές, διαδρομές χειμάρρων καθώς και με ψηφιδωτά ή ακανόνιστα πλέγματα.

Η κατηγοριοποίηση των μεθόδων χωρικής παρεμβολής γίνεται με δύο τρόπους: Ο πρώτος αναφέρεται στη σύγκριση των εκτιμώμενων με τις πραγματικές τιμές της ιδιότητας, σε κάθε σημείο όπου υπάρχουν δεδομένα. Ειδικότερα, αν μετά την εκτέλεση της χωρικής παρεμβολής στα σημεία δειγματοληψίας δίνονται οι πραγματικές τιμές τότε αυτή καλείται 'ακριβής παρεμβολέας' (exact interpolator). Στην αντίθετη περίπτωση, όταν δίνονται οι εκτιμώμενες τιμές, τότε η μέθοδος αποτελεί 'μη ακριβή παρεμβολέα' (inexact interpolator). Δείκτης της ακρίβειας των μεθόδων αυτής της κατηγορίας αποτελεί η στατιστική επεξεργασία των διαφορών (residuals) μεταξύ προβλεπόμενων και πραγματικών τιμών στα σημεία δειγματοληψίας.

Ο δεύτερος τρόπος διάκρισης βασίζεται στον αριθμό των δεδομένων που χρησιμοποιούνται για τη διεξαγωγή της διαδικασίας. Οι κατηγορίες που διακρίνονται είναι: οι καθολικές (global methods) και οι τοπικές μέθοδοι (local deterministic methods) χωρικής παρεμβολής. Στις καθολικές χρησιμοποιούνται όλα τα δεδομένα, δηλαδή η πρόβλεψη της τιμής μιας μεταβλητής καθαρίζεται από τις τιμές της μεταβλητής του συνόλου των σημείων όπου έχει γίνει δειγματοληψία. Αντίθετα, στις τοπικές μεθόδους χωρικής παρεμβολής χρησιμοποιείται ένα μέρος των δειγμάτων-των γειτονικότερων δειγμάτων-για τον καθορισμό της τιμής μιας μεταβλητής σε ένα σημείο.

Οι κυριότεροι τύποι kriging είναι οι εξής:

Ordinary kriging: Η κοινή ή σημειακή kriging ανήκει στους ακριβείς παρεμβολείς και εφαρμόζεται όταν στη χωρική μεταβολή μιας τυχαίας εξαρτημένης μεταβλητής δεν υφίσταται σημαντικό μη συσχετισμένο σφάλμα. Συγκεκριμένα για να εφαρμοσθεί γίνεται εκ των προτέρων παραδοχή ότι ισχύει σταθερότητα 2ης τάξεως, δηλαδή στη εξίσωση του βαριογράμματος υπεισέρχεται μόνο το άνωσμα διαχωρισμού (separation vector) και όχι η θέση Nalder and Wein (1998). Για να είναι σωστή αυτή η παραδοχή πρέπει να ισχύει μη ύπαρξη τάσης στα δεδομένα, το οποίο όμως μπορεί να γίνει αποδεκτό όταν η περιοχή από όπου θα αντληθούν τα δεδομένα είναι σχετικά μικρή.

Block kriging: Η συγκεκριμένη μέθοδος βρίσκει εφαρμογή όταν επιθυμούμε τον υπολογισμό της μέσης τιμής μιας μεταβλητής σε μια μικρή μη-σημειακή υποπεριοχή της εξεταζόμενης περιοχής. Ειδικότερα εφαρμογή της μπορεί να γίνει στις περιπτώσεις όπου πρέπει να αγνοηθεί η μεταβολή μιας ιδιότητας σε πολύ μικρές περιοχές επειδή κάτι τέτοιο θα οδηγούσε στο σχηματισμό χαρτών με απότομο ανάγλυφο. Τέτοιες περιπτώσεις αποτελούν

αρκετές φυσικές ιδιότητες όπως πχ. οι εδαφικές. Έτσι καθορίζονται υποπεριοχές στη συνολική έκταση όπου είναι συγκεντρωμένα αρκετά σημεία δειγματοληψίας. Οι τιμές που θα χρησιμοποιηθούν για τη χωρική παρεμβολή είναι οι μέσες τιμές από τα σημεία δειγματοληψίας σε κάθε υποπεριοχή.

Simple kriging: Η απλή kriging επιτυγχάνει την πρόβλεψη των τιμών μιας ιδιότητας μέσω μιας γενικευμένης γραμμικής παλινδρόμησης (generalized linear regression) στην οποία γίνεται η υπόθεση ότι υπάρχει δευτέρου βαθμού σταθερότητα με γνωστή τη μέση τιμή (Goovaerts 1999).

Non-linear kriging: Η κυριότερη εκπρόσωπος της μη-γραμμικής kriging είναι η lognormal kriging, η οποία εφαρμόζεται σε περιπτώσεις μεταβλητών που παρουσιάζουν κανονική λογαριθμική κατανομή. Η διαδικασία πρόβλεψης των τιμών της ιδιότητας η οποία ακολουθείται με την lognormal kriging είναι σε μεγάλο βαθμό ίδια με την κοινή kriging. Οι διαφοροποιήσεις της έγκειται κυρίως στην απαιτούμενη μετατροπή των αρχικών δεδομένων σε φυσικούς λογάριθμους με βάση 10 και την αντίστροφη μετατροπή των εκτιμώμενων τιμών (λογάριθμοι του 10) σε πραγματικούς αριθμούς.

Co-kriging: Παρέχει τη δυνατότητα εκτίμησης της χωρικής μεταβολής των τιμών μιας ιδιότητας για την οποία υπάρχει μικρός αριθμός δεδομένων, από τη χωρική μεταβολή μιας συ-μεταβλητής της για την οποία υπάρχουν επαρκή δεδομένα. Αποτελεί επέκταση της κοινής kriging όπου εκτός των απλών βarioγραμμάτων απαιτείται η γνώση της από κοινού χωρικής συ-μεταβολής των δύο μεταβλητών.

Universal kriging: Η καθολική kriging είναι μια εναλλακτική μέθοδος έναντι της Co-kriging, η οποία αναπτύχθηκε για να βελτιώσει την ακρίβεια εκτίμησης φυσικών ιδιοτήτων που τις χαρακτηρίζει η παρουσία εξωτερικών τάσεων. Η Universal kriging λαμβάνει υπόψη της τις τοπικές τάσεις των δεδομένων, απομακρύνει τις εμφανείς τάσεις 1ης τάξεως και μειώνει, με αυτόν τον τρόπο, το σφάλμα εκτίμησης Ojalvo και Collins (1988). Τα αποτελέσματα παραμένουν ευαίσθητα στην περιοχή από όπου αντλήθηκαν τα δεδομένα αλλά είναι σε σημαντικό βαθμό λιγότερο ευαίσθητα συγκρινόμενα με τα αντίστοιχα από την κοινή kriging Nalder και Wein (1998).

Σύμφωνα με τους Caruso και Quarta (1998) είναι δύσκολος ο καθορισμός κριτηρίων, βάση των οποίων μπορεί να διαπιστωθεί η ανωτερότητα κάποιων μεθόδου χωρικής παρεμβολής έναντι κάποιας άλλης. Η χρήση διαφορετικών κριτηρίων μπορεί να οδηγήσει σε τελείως διαφορετική κατάταξη των μεθόδων και κατά συνέπεια σε αντικρουόμενα συμπεράσματα.

4. Μεθοδολογία

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν 87 γεωτρήσεις από τις συνολικά 90, για τις οποίες υπήρχε πλήρης σειρά μετρήσεων. Οι μετρήσεις γίνονται με συχνότητα μία φορά το μήνα από το προσωπικό ιδιωτικής εταιρίας (Batel) που έχει αναλάβει για λογαριασμό των ΕΛ.ΠΕ. το δύσκολο έργο της απορρύπανσης του υπόγειου υδροφόρου των διυλιστηρίων. Για τη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις της χρονικής περιόδου από 30 Σεπτεμβρίου 1999 έως 2 Ιανουαρίου 2001. Οι μετρήσεις αυτές οι οποίες πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια σταθμογράφου περιλαμβάνουν καταγραφή του ύψους της στάθμης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα καθώς και καταγραφή του μετρούμενου πάχους των πετρελαιοειδών.

Το μετρούμενο πάχος των πετρελαιοειδών χαρακτηρίζεται ως φαινομενικό πάχος των πετρελαιοειδών και διαφέρει από το πραγματικό πάχος γιατί τα πετρελαιοειδή ως υγρά μη υδατικής φάσης παρουσιάζουν μια ιδιαίτερη συμπεριφορά μέσα στο πορώδες μέσο. Για τη χρησιμοποίηση της θεωρητικής εξίσωσης αναγωγής του φαινομενικού πάχους σε πραγματικό $t_g = t(1-sg)-h_a$ (βλ. §4.1), είναι αναγκαίος ο προσδιορισμός του ειδικού βάρους των προϊόντων για κάθε μία από τις γεωτρήσεις.

4.1 Υπολογισμός των υδρολογικών παραμέτρων

Τα απόλυτα υψόμετρα των στομών των γεωτρήσεων προσδιορίστηκαν μέσω του ψηφιακού μοντέλου εδάφους (Digital Elevation Model-DEM), το οποίο κατασκευάστηκε με την βοήθεια Γεωγραφικών Πληροφοριακών Συστημάτων από χάρτες κλίμακας 1:5.000. Οι θέσεις των γεωτρήσεων προσδιορίστηκαν με τη βοήθεια οργάνου εντοπισμού θέσης (Geografic Position System-G.P.S.).

Το πιεζομετρικό ύψος του νερού (water pressure) υπολογίζεται με αφαίρεση της μέτρησης του σταθμημέτρου από το απόλυτο υψόμετρο του στομίου της γεώτρησης (Z). Με τον τρόπο αυτό εξάγεται το ύψος της απόλυτης στάθμης του υδροφόρου, το οποίο ισοδυναμεί με την υδροπιεζομετρία του σημείου.

$$\text{Water pressure} = Z - \text{Μέτρηση} \quad (1)$$

Το πάχος των πετρελαιοειδών μετρείται με ειδικό διαφορικό σταθμήμετρο κατασκευασμένο για το σκοπό αυτό. Εάν το σταθμήμετρο συναντήσει στάθμη ελαιώδους προϊόντος (πετρελαιοειδές), τότε δίνει την ένδειξη με διπλό ήχο ή διπλό φλας ενώ συνεχίζοντας την κάθοδο του αισθητήρα του οργάνου δίνει την ένδειξη του μονού ήχου ή μονό φλας, όταν συναντήσει νερό. Η λειτουργία του οργάνου στηρίζεται στη διαφορετική αντίσταση που έχουν τα δύο υγρά. Η διαφορά των δύο αυτών μετρήσεων αποτελεί το φαινομενικό και όχι το πραγματικό πάχος των πετρελαιοειδών που συναντώνται μέσα στη γεώτρηση.

Σύμφωνα με τη γεωμορφολογία των ΕΛ.ΠΕ., η συμπεριφορά του υπεδάφους, το οποίο χαρακτηρίζεται από προαχλωσιγενή κοκκώδη υλικά, μπορεί να συγκριθεί με τη συμπεριφορά ενός υπεδάφους που θα αποτελούνταν από ομοιομόρφη υγρή άμμο. Η παραδοχή αυτή δίνει τη δυνατότητα προσδιορισμού της σχέσης ανάμεσα στο πραγματικό και φαινομενικό πάχος των πετρελαιοειδών.

Σύμφωνα με τον Ballestero et al.(1994), για την εξυγίανση της μόλυνσης από υδρογονάνθρακες πετρελαίου σε πορώδη μέσα είναι αναγκαία η παρακολούθηση και ο υπολογισμός του όγκου του αμιγούς ρευστού υδρογονάνθρακα. Το φαινομενικό ελεύθερο πάχος προϊόντος που προκύπτει ως ένδειξη από μια γεώτρηση είναι αρκετά μεγαλύτερο από το πραγματικό ελεύθερο πάχος προϊόντος στο έδαφος.

Η εξίσωση η οποία προβλέπει το πραγματικό πάχος εξελίχθηκε χρησιμοποιώντας ετερογενή υγρά σε συνθήκες μηχανικής και υδροστατικής ροής και είναι η:

$$tg = t(1 - sg) - ha \quad (2)$$

όπου tg =πραγματικό πάχος σχηματισμού ελευθέρου προϊόντος, t =φαινομενικό (προϊόν τρύπας γεώτρησης) πάχος, sg =ειδικό βάρος των υδρογονανθράκων πετρελαίου (βενζίνη), ha =απόσταση ανάμεσα στον υδροφόρο ορίζοντα και στο ελεύθερο προϊόν του σχηματισμού.

Η εξίσωση αυτή μελετήθηκε εργαστηριακά από τους Blake και Hall (1984), στην περίπτωση που το προϊόν διαρροής είναι βενζίνη. Σύμφωνα με αυτό το πείραμα και δεδομένου ότι το ειδικό βάρος της βενζίνης είναι 0,78, σύμφωνα με τις μετρήσεις που έγιναν με το υδρόμετρο, το ha υπολογίστηκε 30 cm. Το ειδικό βάρος ελέγχθηκε χρησιμοποιώντας την αναλογία της απόστασης της διαχωριστικής επιφάνειας βενζίνης-νερού στη γεώτρηση που ήταν κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα με το συνολικό φαινομενικό πάχος. Το ειδικό βάρος το οποίο καθορίστηκε με αυτήν τη μέθοδο βρέθηκε $0,78 \pm 0,02$.

Στην περιοχή των ΕΛ.ΠΕ. το προϊόν διαρροής ως προς την ποιότητά του διακρίνεται κυρίως σε δύο κατηγορίες. Για ευκολία υπολογισμών και εφόσον η διαφοροποίηση των τιμών των ειδικών βαρών του προϊόντος της κάθε γεώτρησης, δε διαφέρει ουσιαστικά εντός της κάθε κατηγορίας, χρησιμοποιούνται δύο τιμές ειδικών βαρών, μία για κάθε κατηγορία. Οι τιμές αυτές των ειδικών βαρών είναι 0.7489 στη μία κατηγορία και 0.8073 στη δεύτερη.

Σύμφωνα με το πείραμα των Blake και Hall (1984), το πραγματικό πάχος του ελεύθερου προϊόντος των πετρελαιοειδών με ειδικό βάρος $sg=0.7489$ και $sg= 0.8073$ δίνεται αντίστοιχα από τις εξισώσεις:

$$tg = t(1 - 0.7489) - 0.03 \Rightarrow tg = 0.2502 t - 0.03 \quad (3)$$

και

$$tg = t(1 - 0.8073) - 0.03 \Rightarrow tg = 0.1927 t - 0.03 \quad (4)$$

Από τη θεωρητική καμπύλη του πειράματος των Blake και Hall (1984) προέκυψε ότι όταν το φαινομενικό πάχος είναι $t=13$ cm, τότε το πραγματικό πάχος tg είναι μηδέν, δεδομένου ότι το ειδικό βάρος είναι $sg=0.78$.

Από τη μελέτη των εξισώσεων (5) και (6), θεωρούμε ότι όταν $sg=0.7489$ το πραγματικό πάχος tg θεωρείται πρακτικώς μηδέν, όταν το φαινομενικό πάχος είναι μικρότερο των 11 cm. Ενώ όταν $sg= 0.8073$ το πραγματικό πάχος tg θεωρείται πρακτικώς μηδέν, όταν το φαινομενικό πάχος είναι μικρότερο των 15 cm.

Η συνολική πιεζομετρία (Total Pressure) υπολογίζεται αν στο πιεζομετρικό ύψος νερού (Water pressure) προστεθεί το πραγματικό πάχος πετρελαιοειδών (Real Thickness Oil) πολλαπλασιασμένο με το αντίστοιχο ειδικό βάρος (Specific Gravity).

$$\text{Total Pressure} = \text{Water pressure} + \text{Real Thickness Oil} * \text{Specific Gravity} \quad (5)$$

4.2 Εφαρμογή μεθόδου χωρικής παρεμβολής

Η μέθοδος χωρικής παρεμβολής η οποία εφαρμόστηκε ήταν η Simple Kriging, καθώς επιτυγχάνει την πρόβλεψη των τιμών μιας ιδιότητας μέσω μιας γενικευμένης γραμμικής παλινδρόμησης, στην οποία γίνεται η υπόθεση ότι υπάρχει δευτέρου βαθμού σταθερότητα με γνωστή τη μέση τιμή Goonaerts (1999). Η ιδιότητά της αυτή την καθιστά πιο φιλική προς το χρήστη, γεγονός που αποτέλεσε κριτήριο επιλογής της.

Μολονότι η ύπαρξη ανισοτροπίας στη χωρική μεταβολή των παραμέτρων είναι πιθανή, έγινε η υπόθεση ότι ισχύει ισοτροπία προς αποφυγή της εκτέλεσης ιδιαίτερα πολύπλοκων και δύσκολων διαδικασιών. Ακόμη η παραδοχή της ισοτροπίας είχε σαν αποτέλεσμα την ευκολότερη προσαρμογή θεωρητικού βαριογράμματος σύμφωνα με τους Martinez και Cod (1996).

Το λογισμικό το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση της χωρικής παρεμβολής Kriging ήταν το πρόγραμμα SURFER 7.0, ενώ η δημιουργία πειραματικών βαριογραμμάτων και η προσαρμογή των θεωρητικών έγινε με τη βοήθεια του VARIOWIN 2.2.

Εξαιτίας του αριθμού των γεωτρήσεων (87) και λόγω του ότι δεν υπήρχαν μετρήσεις σε όλες αυτές τις γεωτρήσεις κάθε μήνα, ο αριθμός των μετρήσεων που υπήρχαν στη διάθεση της παρούσας μελέτης ήταν μικρότερος των 100. Σε ποσότητες μετρήσεων <100, σύμφωνα με τη θεωρία της Kriging, θα έπρεπε να ακολουθηθεί η τεχνική της cross-validation. Δηλαδή σε κάθε σειρά θα πρέπει να αφαιρείται μια μέτρηση, να γίνεται όλη η διαδικασία και τελικά να υπολογίζεται το υπόλοιπο (residual) για αυτό το σημείο της μέτρησης που αφαιρέθηκε. Κάτι τέτοιο όμως θα σήμαινε τεράστιο όγκο υπολογισμών και εγκαταλείφθηκε αυτή η τεχνική. Επιλέχθηκε η μέθοδος που ακολουθείται όταν υπάρχει μεγαλύτερος αριθμός σημείων >100, καθώς αφενός μεν δεν επιφέρει ουσιαστική μείωση στην αξιοπιστία της Kriging, λόγω του ότι οι τιμές που διατίθενται δεν είναι πού λιγότερες των 100 και αφετέρου ήταν η μόνη εφικτή από την πλευρά ότι απαιτούσε λιγότερο χρονοβόρο διαδικασία. Έτσι, απομακρύνθηκε περίπου το 20% των σημείων για κάθε μήνα τα οποία ήταν τα πιο ομοιόμορφα καταμεμημένα στο χώρο. Το ποσοστό του 20% δεν είναι σταθερό αλλά διαφέρει από μήνα σε μήνα γιατί υπήρχε διαφορετικός αριθμός γεωτρήσεων για τις οποίες δεν είχε πραγματοποιηθεί μέτρηση το συγκεκριμένο μήνα και οι οποίες δεν λαμβάνονται υπόψη κατά την απομάκρυνση των

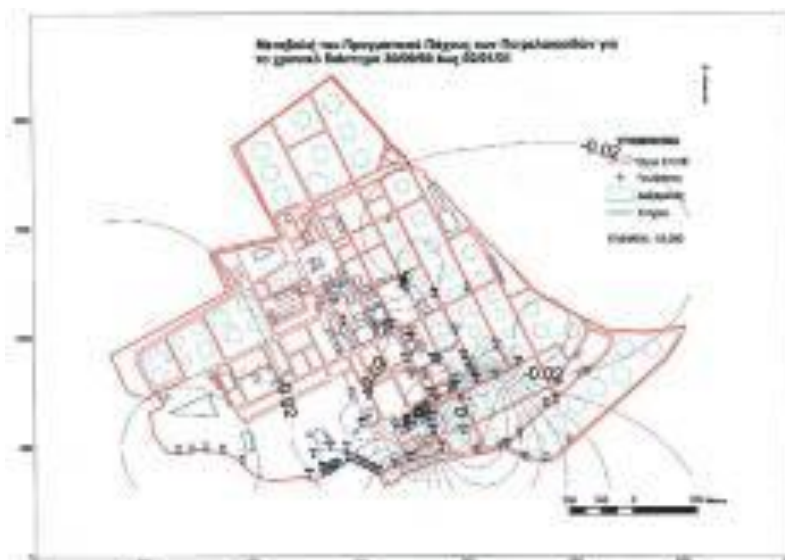
σημείων που

Για να εξασφαλιστεί η ομοιομορφία της κατανομής των σημείων, κατηγοριοποιήθηκε το σύνολο των σημείων για τα οποία υπήρχε μέτρηση το συγκεκριμένο μήνα σε πέντε κλάσεις ανάλογα με τη διακύμανση των τιμών της κάθε μιας από τις δύο παραμέτρους που μελετήθηκαν. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε αφαίρεση του 20% των σημείων από κάθε μια από τις πέντε κλάσεις. Τα σημεία τα οποία αφαιρέθηκαν βρίσκονταν στην ίδια ή παραπλήσια κλάση. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίστηκε η δυνατότητα πιο ακριβής πρόβλεψης της τιμής της μεταβλητής που αφαιρέθηκε. Επειδή σύμφωνα με τη βασική αρχή της χωρικής παρεμβολής οι τιμές μιας ιδιότητας σε κοντινά σημεία αναμένεται να είναι παρόμοιες σε μεγαλύτερο βαθμό από ότι αν τα σημεία βρίσκονται απομακρυσμένα μεταξύ τους.

Τα σημεία τα οποία απομακρύνθηκαν, χρησιμοποιήθηκαν για τη στατιστική ανάλυση των διαφορών (residuals). Τα σημεία τα οποία απέμειναν χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή της χωρικής παρεμβολής. Με αυτόν τον τρόπο, δόθηκε η δυνατότητα να καταγραφούν τα χαρακτηριστικά για κάθε ένα από τα δύο μοντέλα όπως το sill, range, nugget, scale τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή της χωρικής παρεμβολής στο λογισμικό πρόγραμμα SURFER 7.0. Τα grid αρχεία (αρχεία καννάβου) τα οποία παρήχθησαν με αυτόν τον τρόπο χρησιμοποιήθηκαν μαζί με τα αρχεία επαλήθευσης που είχαν αποθηκευτεί προηγουμένως για τον υπολογισμό των διαφορών, της πραγματικής τιμής της εξεταζόμενης παραμέτρου και της εκτιμώμενης σε κάθε σημείο.

Ο έλεγχος της αξιοπιστίας της μεθόδου χωρικής παρεμβολής που εφαρμόστηκε καθώς και η σύγκριση των μοντέλων μεταξύ τους βασίστηκε στη στατιστική ανάλυση των διαφορών της πραγματικής τιμής της εξεταζόμενης παραμέτρου και της εκτιμώμενης σε κάθε σημείο.

Τέλος, δημιουργήθηκαν θεματικοί χάρτες, οι οποίοι απεικονίζουν τη μεταβολή των παραμέτρων συνολική πιεζομετρία και πραγματικό πάχος περτελαιοειδών για τα χρονικά διαστήματα ενός μήνα, ενός εξαμήνου και από την αρχή μέχρι το τέλος της χρονικής περιόδου που εξετάζεται, δηλαδή 09/1999-01/2001. Ακολουθούν δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα θεματικών χαρτών (Σχήματα 2 και 3).



Σχήμα 2. Μεταβολή του πραγματικού πάχους περτελαιοειδών για το χρονικό διάστημα από 31/03/99 έως 26/09/00

συνολικός όγκος των πετρελαιοειδών που είχαν συσσωρευτεί στο υπέδαφος κατά τη χρονική διάρκεια της διεξαγωγής της μελέτης, ανέρχεται περίπου στα 203-253 m³.

Βιβλιογραφία

Μιμίδης Θ. και Ρίζος Σ., 2007: Υδρογεωλογία της Λίμνης Κουμουνδούρου Ασπροπύργου Αττικής, Παρουσιάστηκε προφορικά στο ίδιο Συνέδριο, Βλέπε Πρακτικά.

Νίκα Κ., 2002: Καταγραφή της Πιεζομετρίας των Υδρογονανθράκων και του Υπόγειου Νερού της Στενής Περιοχής της ΕΛ.Π.Ε. της Λίμνης Κουμουνδούρου. Πτυχιακή Μελέτη στα Πλαίσια του ΠΠΣ του Τμήματος ΑΦΠ & ΓΜ του ΓΠΑ

Μελέτη ΓΠΑ 1998-1999:Υδρογεωλογία της λίμνης Κουμουνδούρου, Πηγές Ρύπανσης της και Προστασίας της, Φάση 1 – Φάση 2, Αθήνα.

Μελέτη Ι.Γ.Μ.Ε., 1992: Έρευνα και Μελέτη Ρύπανσης Υπεδάφους ΕΛ.Δ.Α., Αθήνα.

Ballesterio P. T., Fiedler R. F. and Kinner E. N 1994.: An Investigation of the Relationship between Actual and Apparent Gasoline Thickness in a Uniform Sand Aquifer, 32, 708-718.

Blake, S.B. and R.A. Hall, 1984: Monitoring petroleum spills with wells: some problems and solutions, Proceedings, Fourth National Symposium on Aquifer Restoration and Groundwater Monitoring, National Water Well Association, Columbus, OH, 305-310.

Caruso C. and Quarta F., 1998: Interpolation methods comparison, Computers Math. Applic., 35, 109-126.

Goovaerts P., 1999: Geostatistics in Soil Science, State-of-the-art and perspectives, Geoderma, 89, 1-45.

Krige, D.G., 1951: A Statistical Approach to Some Basic Mine Evaluation Problems on the Witwatersrand, J. Chem. Metall. Min. Soc. South Africa, 52, 119-39.

Martinez-Cob A., 1996: Multivariate geostatistical analysis of evapotranspiration and precipitation in mountain terrain, Journal of Hydrology, 174, 19-35.

Matheron ., 1963: Principles of geostatistics. Economic Geology, 58, 1246-1266.

Nalder I.A. and Wein R. W., 1998: Spatial interpolation of climatic normals: test of a new method in the Canadian boreal forest. Agricultural and Forest Meteorology, 92, 211-225.

Ovalles F.A. and Collins M.E., 1988: Evaluation of soil variability in northwest Florida using geostatistics. Soil Sci. Soc. Am. J., 52, 1702-1708.