ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ ΔΗΜ. ΣΦΗΚΑΣ

Διπλωματούχος Χημικός Μηχανικός Α.Π.Θ.

M.Sc. in Operational Research and Performance Management, Aston Business School – UK

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΥΔΑΤΙΝΩΝ ΠΟΡΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΠΟΛΥΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΚΟΖΑΝΗ 2015

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ ΔΗΜ. ΣΦΗΚΑΣ

Διπλωματούχος Χημικός Μηχανικός Α.Π.Θ.

M.Sc. in Operational Research and Performance Management, Aston Business School – UK

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΥΔΑΤΙΝΩΝ ΠΟΡΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΠΟΛΥΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών

της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας

Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης: 16 Σεπτεμβρίου 2015

Εξεταστική Επιτροπή

Παντελής Αγγελίδης, Αν. Καθηγητής ΠΔΜ	Επιβλέπων
Πέτρος Σαμαράς, Καθηγητής ΑΤΕΙΘ	Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής
Μιχάλης Γεωργιάδης, Αν. Καθηγητής ΑΠΘ	Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής
Δημήτρης Πετρίδης, Καθηγητής ΑΤΕΙΘ	Μέλος Επταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής
Γιώργος Μαλλίνης, Επ. Καθηγητής ΔΠΘ	Μέλος Επταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής
Αθανάσιος Κούγκολος, Καθηγητής ΑΠΘ	Μέλος Επταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής
Θεόδωρος Ζυγκιρίδης, Επ. Καθηγητής ΠΔΜ	Μέλος Επταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής

ΚΟΖΑΝΗ 2015

© ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ ΔΗΜ. ΣΦΗΚΑΣ

© Π.Δ.Μ.

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΥΔΑΤΙΝΩΝ ΠΟΡΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΠΟΛΥΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Η έρευνα συγχρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους και πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της Πράξης «Ηράκλειτος ΙΙ - Ενίσχυση του ανθρώπινου ερευνητικού δυναμικού μέσω της υλοποίησης διδακτορικής έρευνας – Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας» του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια βίου Μάθηση 2007 – 2013» (Ε.Π.Ε.Δ.Β.Μ.) του Ε.Σ.Π.Α.

Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο

ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ
επένδυση στην κοινωνία της γνώσης
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ
Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

ΕΣΠΑ 2007-2013
πρόγραμμα για την ανάπτυξη
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

«Η έγκριση της παρούσης Διδακτορικής Διατριβής από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνωμών του συγγραφέως»

(Ν. 5343/1932, άρθρο 202, παρ. 2)

Αφιερώνεται στη σύζυγό μου Μαρκέλλα και στις κόρες μου Χρύσα και Έλλη, ελπίζοντας να με συγχωρήσουν για το χρόνο που τους έκλεψα…

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής εγκαταστάθηκε και μελετήθηκε ένα δίκτυο αποτελούμενο από τρία συστήματα πολυπαραμετρικών αισθητήρων για τη συνεχή παρακολούθηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών των υδατικών πόρων εντός της ευρύτερης περιοχής των ορυχείων λιγνίτη Πτολεμαΐδας της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ) Α.Ε. για μια περίοδο περίπου 10 μηνών (Μάρτιος – Δεκέμβριος 2010). Τα αποτελέσματα των φυσικοχημικών παραμέτρων που μετρήθηκαν (θερμοκρασία, pH, αγωγιμότητα, Cl^-, SO_4^{-2}, NO_3^-) αφού πρώτα ελέγχθηκαν για την αξιοπιστία τους, στη συνέχεια υπέστησαν επεξεργασία με βάση συγκεκριμένες στατιστικές τεχνικές και συσχετίσθηκαν τόσο μεταξύ τους όσο και με άλλες παραμέτρους όπως τη βροχόπτωση και τις ογκομετρικές παροχές από τις εκροές των αντλιοστασίων ορυχείων στα επιφανειακά ύδατα (ρέμα Σουλού), με στόχο τη διερεύνηση στατιστικά σημαντικών συσχετίσεων για τον εντοπισμό/πρόβλεψη ενδεχόμενων επεισοδίων ρύπανσης.

Η παρούσα διατριβή φιλοδοξεί να συμβάλλει με άμεσο και έμμεσο τρόπο στην ορθολογική διαχείριση των επιφανειακών και υπόγειων νερών της περιοχής έρευνας.

Η διατριβή εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας στην Κοζάνη υπό την επίβλεψη του Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Παντελή Αγγελίδη τον οποίο ευχαριστώ θερμά για την αμέριστη υποστήριξη και καθοδήγηση καθ’ όλη τη διάρκεια της διδακτορικής διατριβής.

Η παρούσα έρευνα έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) – Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: Ηράκλειτος ΙΙ. Επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου.

Ο μετρητικός εξοπλισμός καθώς και λοιπά βοηθητικά δεδομένα διατέθηκαν από το «Κέντρο Περιβάλλοντος» της Περιφέρειας Δυτικής Μακεδονίας, τη Διοίκηση και το προσωπικό του οποίου ευχαριστώ για την υποστήριξη.

Ευχαριστώ επίσης θερμά τον Καθηγητή του ΑΤΕΙ Θεσσαλονίκης κ. Πέτρο Σαμαρά, μέλος της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής, για το αδιάκοπο ενδιαφέρον του και τις πολύτιμες και ουσιαστικές υποδείξεις του κατά τη διάρκεια της διατριβής.

Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Χημικών Μηχανικών του Α.Π.Θ. κ. Μιχάλη Γεωργιάδη, μέλος της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής, για την υποστήριξή του.

Κατά τη διάρκεια της διατριβής είχα τη σημαντική βοήθεια του Καθηγητή του ΑΤΕΙ Θεσσαλονίκης κ. Δημήτρη Πετρίδη τον οποίο και αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω ολόψυχα για την πολύτιμη συμβολή του.

Ευχαριστίες οφείλω στον Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Δ.Π.Θ. κ. Σταμάτη Ζώρα για το ενδιαφέρον και τη βοήθειά του.

Πολύτιμη ήταν επίσης η βοήθεια της κας Αναστασίας Χαρχαρίδου, Πολιτικού Μηχανικού Α.Π.Θ., σε θέματα επεξεργασίας των δεδομένων, την οποία και ευχαριστώ για τη συνδρομή της.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τις πιο εγκάρδιες ευχαριστίες στην οικογένειά μου για την αμέριστη υποστήριξη, την υπομονή και την αγάπη τους, χωρίς την οποία θα ήταν αδύνατο να ολοκληρώσω την παρούσα διατριβή.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι δραστηριότητες εξόρυξης άνθρακα αποτελούν μια από τις κύριες πηγές ρύπανσης των επιφανειακών υδάτων και περιλαμβάνονται μεταξύ των δραστηριοτήτων που επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό δυσμενώς τα υδατικά οικοσυστήματα. Η συνεχής απορροή αποβλήτων με υψηλό ρυπαντικό φορτίο από περιοχές με ενεργούς και εγκαταλειμμένους χώρους εξόρυξης αλλά και από περιοχές όπου αποτίθενται τα παραπροϊόντα της εξόρυξης συνεισφέρουν στην επιβάρυνση των υδάτινων πόρων, επιφανειακών και υπογείων, επηρεάζοντας με αυτό τον τρόπο άμεσα αλλά και μακροπρόθεσμα την ασφάλεια και την υγεία των οικοσυστημάτων και των εμπλεκόμενων κοινωνιών.

Η περιοχή της Δυτικής Μακεδονίας, είναι η περιφέρεια της χώρας με τους σημαντικότερους υδάτινους πόρους (λίμνες Βεγορίτιδα, Καστοριάς, Πρέσπες, Ζάζαρη, Χειμαδίτιδα, Πολυφύτου κτλ), η οποία είναι ιδιαίτερα επιβαρυμένη περιβαλλοντικά λόγω της λειτουργίας των ορυχείων λιγνίτη που τροφοδοτούν τους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ) Α.Ε.. Η ολοκληρωμένη διαχείριση αυτών των οικοσυστημάτων με προσδιορισμό των περιβαλλοντικών πιέσεων αποτελεί απαίτηση που προκύπτει όχι μόνο από τη νομοθεσία αλλά και από την ανάγκη για τη μείωση των επιπτώσεων από τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες στην περιοχή.

Με βάση τα παραπάνω, προέκυψε η ανάγκη για τη μελέτη και ανάπτυξη ενός συστήματος με στόχο τη συνεχή παρακολούθηση της οικολογικής ποιότητας αλλά και την πρόβλεψη των επιπτώσεων των απορροών από εξορυκτικές δραστηριότητες λιγνίτη στους παρακείμενους υδατικούς πόρους με την χρήση κατάλληλου τεχνολογικού εξοπλισμού για τη μέτρηση, καταγραφή και μετάδοση των αποτελεσμάτων και την ανάπτυξη ενός κατάλληλου εργαλείου για τη διαχείριση του μεγάλου αριθμού δεδομένων, με στόχο την πρόβλεψη πιθανών επεισοδίων ρύπανσης.

Ως εκ τούτου, στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής εγκαταστάθηκε και μελετήθηκε ένα δίκτυο αποτελούμενο από τρία συστήματα πολυπαραμετρικών αισθητήρων για τη συνεχή παρακολούθηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών των υδατικών πόρων εντός της ευρύτερης περιοχής των ορυχείων λιγνίτη Πτολεμαΐδας της ΔΕΗ Α.Ε. για μια περίοδο περίπου 10 μηνών (Μάρτιος – Δεκέμβριος 2010).

Από τους τρεις σταθμούς παρακολούθησης της ποιότητας των υδάτων οι δύο αφορούσαν επιφανειακά και ο ένας υπόγεια ύδατα και οι φυσικοχημικές παράμετροι που καταρχήν επιλέχθηκαν να μετρώνται συνεχώς σε πραγματικό χρόνο ήταν η θερμοκρασία, το pH, η ηλεκτρική αγωγιμότητα, η συγκέντρωση των ιόντων χλωρίου (Cl^-), η συγκέντρωση των θειικών ιόντων (SO_4^{-2}) και η συγκέντρωση των νιτρικών ιόντων (NO_3^-).

Η έρευνα εστιάστηκε ιδιαίτερα στη μελέτη του επιφανειακού ρέματος Σουλού μήκους περίπου 25 km το οποίο διατρέχει την περιοχή των ορυχείων Πτολεμαΐδας και αποτελεί τον αποδέκτη των απορροών επιφανειακών και υπόγειων υδάτων διαφορετικών δραστηριοτήτων που σχετίζονται με την εξορυκτική δραστηριότητα αλλά και τη λειτουργία των ατμοηλεκτρικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην περιοχή. Η σπουδαιότητα του ρέματος αυτού για την περιβαλλοντική ισορροπία της περιοχής είναι μεγάλη, αφού τα νερά του χρησιμοποιούνται για άρδευση, ενώ τελικά εκβάλει σε ένα άλλο περιβαλλοντικά ευαίσθητο αποδέκτη της περιοχής τη λίμνη Βεγορίτιδα. Ως συνέπεια, η συνεχής παρακολούθηση της ποιότητας των υδάτων του ρέματος Σουλού κρίθηκε απαραίτητη, όχι μόνο για τον έλεγχο και περιορισμό πιθανών επεισοδίων ρύπανσης, αλλά και για τη διατήρηση μιας ικανοποιητικής περιβαλλοντικής ισορροπίας στην ευρύτερη περιοχή μελέτης.

Τα αποτελέσματα των φυσικοχημικών παραμέτρων που μετρήθηκαν αφού πρώτα ελέγχθηκαν για την αξιοπιστία τους, στη συνέχεια υπέστησαν επεξεργασία με βάση συγκεκριμένες στατιστικές τεχνικές (box-plot analysis, ECDF, ANOVA, CHAID, πολλαπλή παλινδρόμηση) και συσχετίσθηκαν τόσο μεταξύ τους όσο και με άλλες παραμέτρους όπως τη βροχόπτωση, τις ογκομετρικές παροχές από τις εκροές των αντλιοστασίων ορυχείων Καρδιάς και Νότιου Πεδίου στο ρέμα Σουλού. Με τον τρόπο αυτό έγινε δυνατή η μελέτη της χρονικής μεταβολής των παραμέτρων και η διερεύνηση στατιστικά σημαντικών συσχετίσεων για τον εντοπισμό/πρόβλεψη ενδεχόμενων επεισοδίων ρύπανσης.

Από την παρούσα έρευνα προέκυψε ότι το δίκτυο συστημάτων πολυπαραμετρικών αισθητήρων αποτελεί ένα αποδοτικό και αποτελεσματικό τρόπο για τη συνεχή παρακολούθηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών των υδατικών πόρων μιας ευαίσθητης περιβαλλοντικά περιοχής, εμφανίζοντας σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών μεθόδων (π.χ. ευελιξία, ταχύτητα απόκρισης, αυτοματοποίηση διαχείρισης δεδομένων κτλ). Ωστόσο, ένα τέτοιο σύστημα έχει συγκεκριμένους περιορισμούς (π.χ. ευαισθησία

ηλεκτροδίων, συντήρηση κτλ) που δύναται να οδηγήσουν σε μετρήσεις μειωμένης αξιοπιστίας καθώς επίσης και σε σημαντικές ασυνέχειες στις χρονοσειρές των μετρήσεων.

Εξετάζοντας τις διαχρονικές μεταβολές των συγκεντρώσεων των θειικών ιόντων και του pH και για τους τρεις σταθμούς μέτρησης, δεν προκύπτει το ενδεχόμενο εμφάνισης του φαινομένου όξινων απορροών (Acid Mine Drainage) στην περιοχή μελέτης για το εξεταζόμενο διάστημα.

Γενικά, παρατηρήθηκε θετική συσχέτιση μεταξύ των συγκεντρώσεων των μετρούμενων παραμέτρων και του ύψους της βροχόπτωσης κατά την μελετώμενη περίοδο, γεγονός που υποδηλώνει ενδεχομένως την ύπαρξη φαινομένων έκπλυσης των ιόντων από την περιοχή των ορυχείων και μεταφορά τους στο ρέμα Σουλού.

Από την εξέταση των χρονικών διαστημάτων για τα οποία υπήρχαν διαθέσιμα κοινά δεδομένα, εντοπίστηκαν ενδείξεις σημαντικής θετικής συσχέτισης ανάμεσα στη συγκέντρωση των φυσικοχημικών παραμέτρων σε συγκεκριμένους σταθμούς μέτρησης, γεγονός που οδηγεί στην ανάπτυξη πιθανών αλληλεπιδράσεων στο υδατικό σύστημα της περιοχής μελέτης.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την στατιστική ανάλυση της διακύμανσης (ANOVA) ενός παράγοντα και την κατά ζεύγη σύγκριση των μέσων όρων με βάση τα 95% όρια εμπιστοσύνης του μέσου σφάλματος της διακύμανσης, για την αγωγιμότητα και το pH στους τρεις σταθμούς μέτρησης, παρουσιάζονται ορισμένες ταυτόσημες τάσεις μεταβολής που μπορούν να αποδοθούν σε πιθανά επεισόδια ρύπανσης.

Επιπλέον, από τα αποτελέσματα και την αντίστοιχη στατιστική ανάλυση των δεδομένων προέκυψαν 14 χρονικές περίοδοι όπου έλαβαν χώρα αντίστοιχα επεισόδια ρύπανσης, στο διάστημα από τον Μάιο μέχρι τον Οκτώβριο του 2010. Από το σύνολο των επεισοδίων, 6 αποδόθηκαν στην εκροή υδάτων από το ορυχείο του Νότιου Πεδίου και 8 επεισόδια αποδόθηκαν στην απορροή από το ορυχείο Καρδιάς. Λαμβάνοντας δε υπόψη τη συχνότητα παρουσίασης επεισοδίων ρύπανσης, ο Μάιος, Ιούνιος και Ιούλιος ήταν οι μήνες όπου παρουσιάστηκαν τα περισσότερα επεισόδια.

Από την εφαρμογή της τεχνικής ταξινόμησης CHAID ανιχνεύθηκαν μη αποδεκτές (εκτός ορίων νομοθεσίας) τιμές των μετρούμενων φυσικοχημικών παραμέτρων σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους και σταθμούς μέτρησης, που αποτελούν ένδειξη πιθανών επεισοδίων ρύπανσης.

Με εφαρμογή της πολλαπλής παλινδρόμησης για την ποσοτική εκτίμηση ενός επεισοδίου ρύπανσης, προέκυψε ότι οι μετρούμενες φυσικοχημικές παράμετροι επηρεάζονται από τις τιμές της παροχής στα σημεία εκροής αντλιοστασίων (ορυχείο Καρδιάς και Νότιου Πεδίου) σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα συμβάντων, φυσικών ή άλλης φύσης. Η παροχή στο σημείο εκροής αντλιοστασίου από το ορυχείο Νότιου Πεδίου επηρεάζει αποκλειστικά και θετικά (αυξητικά) μόνο το pH, ενώ η παροχή στο σημείο εκροής αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς είναι υπεύθυνη για τις αποκρίσεις των λοιπών τριών παραμέτρων (αγωγιμότητα, Cl^- και SO_4^{-2}). Τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν ανταποκρίνονται ικανοποιητικά στις προϋποθέσεις θεμελίωσής τους παρουσιάζοντας υψηλούς συντελεστές R^2 και R^2_p. Σε κάποια χρονικά διαστήματα βρέθηκε ότι υπάρχει μια σημαντική συσχέτιση ανάμεσα στις φυσικοχημικές παραμέτρους και επομένως είναι σκόπιμος ο εντοπισμός των ημερών εκείνων μέσα στα διαστήματα αυτά που μπορούν αιτιολογημένα να θεωρηθούν ως πιθανά για την εμφάνιση ρυπογόνου γεγονότος.

Από τον έλεγχο της εγκυρότητας των παραπάνω μοντέλων για την εκτίμηση της συγκέντρωσης των φυσικοχημικών παραμέτρων, με τη χρήση μιας σειράς ανεξάρτητων ασυνεχών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο σε δείγματα που ελήφθησαν σε αντίστοιχα χρονικά διαστήματα του 2011, προέκυψαν πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα που επιβεβαιώνουν την ικανότητα της συγκεκριμένης μεθοδολογίας για την πρόβλεψη πιθανών συμβάντων ρύπανσης. Συγκεκριμένα, από τις 30 συνολικά μετρήσεις του 2011 με τη χρήση των μοντέλων επαληθεύτηκαν οι 25 (ποσοστό 83.3%) καταγράφοντας μόνο μια αστοχία σε 10 μετρήσεις για τα χλωριόντα, 2 αστοχίες σε 8 μετρήσεις για την αγωγιμότητα (εκ των οποίων η μία οριακή), 2 αστοχίες (οριακές) σε 8 μετρήσεις για το pH και καμία αστοχία σε 4 μετρήσεις για τα θειικά ιόντα.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω συμπεράσματα από την παρούσα διδακτορική έρευνα, οι στατιστικές τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν για τον εντοπισμό ενδεχόμενων επεισοδίων ρύπανσης και την πρόβλεψη ρυπογόνων καταστάσεων παρουσιάζουν αρκετά ικανοποιητικό βαθμό αξιοπιστίας και προβλεπτικής ικανότητας, λαμβάνοντας πάντα υπόψη: α) το γεγονός ότι το μελετώμενο υδατικό σύστημα είναι ένα «ανοικτό» σύστημα το οποίο δύναται να επηρεάζεται και από άλλους μη προβλέψιμους εξωγενείς παράγοντες καθώς και β) τους λοιπούς περιορισμούς που εμφανίζει η έρευνα πεδίου (π.χ. ασυνέχεια δεδομένων λόγω προβλημάτων μετρητικού εξοπλισμού κτλ).

SUMMARY

Coal mining activities represent a significant pollution source of surface waters, adversely affecting the aquatic ecosystems. Continuous wastewater runoffs with high loading from areas with active and abandoned mining areas, as well as from areas where by-products from mining activities are disposed, contribute in pollution of surface and groundwater water resources, affecting therefore the safety and the health of ecosystems and the involved communities on a short and long term period.

The region of Western Macedonia is an area characterized by important water resources (lakes Vegoritida, Kastoria, Prespes, Zazari, Cheimaditida, Polyfytos etc.); however, this region is highly polluted due to the operation of coal mines that supply the power stations of Public Power Corporation (PPC). The integrated management of these ecosystems including the identification of environmental pressures is a requirement set up by the EU legislation, aiming to the reduction of the impact of human activities in the area.

As a result, there is a growing and direct interest for the study and the development of a tool aiming to continuous monitoring of the water quality and to the prediction of the impact of runoffs from mining lignite activities in the surrounding water resources; continuous monitoring could be carried out by the installation of suitable technological equipment for measuring, recording and transmission of results associated to the utilization of an appropriate methodology for the management of large number of data, in order to predict potential pollution incidents.

A network of three multi-parametric sensor systems was installed for monitoring the quality characteristics of the water resources in the Ptolemaida lignite mines area of the PPC for a period of about 10 months (March-December 2010).

From the three water quality monitoring stations, two were related to surface and one to groundwater measurement, while the physicochemical parameters chosen to be measured continuously in real time included temperature, pH, electrical conductivity, chloride ions concentration (Cl^-), sulphate ions concentration (SO_4^{-2}) and nitrate ions concentration (NO_3^-).

The investigation was focused particularly on the study of the Soulou surface stream with a length of about 25 km, which runs through the Ptolemaida mines area and receives the

surface and groundwater drainages from areas where various activities have been developed, such as mining and operation of thermoelectric power stations. Soulou stream is very important for the environmental balance of the region; Soulou stream is used for irrigation, and finally it is discharged into another environmentally sensitive aquifer in the region, Lake Vegoritida. As a result, the continuous monitoring of Soulou stream water quality was required, aiming to control and prevention of potential pollution incidents, and to maintain a significant ecological balance in the study area.

The results of the measured physicochemical parameters were preliminary examined for their reliability, and then they were processed using specific statistical techniques (box-plot analysis, ECDF, ANOVA, CHAID, multiple regression); efforts were paid to the evaluation of potential interrelations between the parameters, as well as with other parameters such as rainfall rates and volumetric flows of drainage from Kardia and Notio Pedio lignite mines into Soulou stream. As a result, the time variation of parameters was studied while statistically significant correlations were identified for detecting/predicting potential pollution incidents.

Data handling showed that the multi-parametric sensor network is an efficient and effective method for continuously monitoring the quality characteristics of the water resources in an environmentally sensitive area, with significant advantages over conventional methods (e.g. flexibility, response speed, data management, automation etc.). However, such a system may impose certain constraints (e.g. sensitivity of electrodes, maintenance etc.) which could reduce the reliability of measurements, as well as major inconsistencies in the data measurement.

From the examination of the time variation of sulphate concentration and pH for all three monitoring stations, it was not possible to detect Acid Mine Drainage problems in the study area during the examined period.

In general, a positive correlation was observed between the concentration of the measured parameters and the rainfall rate during the studied period, which may indicate the existence of ions leaching from the mines region and their transport into Soulou stream.

The examination of common periods where data were available for all parameters, showed evidence of significant positive correlations between the physicochemical parameters

concentration, in specific monitoring stations, resulting to the establishment of potential interactions in the water system of the study area.

The results obtained from the statistical analysis of variance (ANOVA) and the pair wise comparison of the averages based on 95% confidence intervals of the mean variance error, for conductivity and pH in the three monitoring stations, showed identical change in the corresponding patterns attributed to potential pollution incidents.

Furthermore, the results and the corresponding statistical data analysis revealed 14 periods in which pollution incidents were recorded, during May to October 2010. From these incidents, 6 were attributed to the volumetric flow of water drained from Notio Pedio lignite mine while 8 incidents were attributed to the volumetric flow of water drained from Kardia lignite mine. Taking into account the frequency of pollution incidents appearance, May, June and July were the months in which most incidents took place.

The implementation of the CHAID technique resulted in the identification of physicochemical parameter values that were not acceptable (higher than the corresponding legislation limits) during specific periods and monitoring stations, indicating thus potential pollution incidents.

The multiple regression analysis for the quantitative assessment of pollution incidents showed that the measured physicochemical parameters were influenced by the volumetric flow drainage from lignite mines (Kardia and Notio Pedio) at specific time periods, of natural or other sources. The volumetric flow drainage from Notio Pedio lignite mine increase only pH values, while volumetric flow drainage from Kardia lignite mine affected the other three parameters (conductivity, Cl^- and SO_4^{-2}). The developed models successfully predicted experimental data, with high coefficients R^2 and R^2_p. During particular time periods, a significant correlation between physicochemical parameters was found and therefore the days that can be reasonably considered as most likely to display pollution incident should be identified among those periods.

The validity of these models in order to estimate the concentration of physicochemical parameters, was verified using a series of independent laboratory tests on water samples collected at corresponding time periods during 2011.The results of the tests were satisfactory confirming the ability of the methodology for predicting potential pollution incidents. Specifically, from a total of 30 laboratory measurements in 2011, 25 were verified against the

model results (percentage 83.3%) with only 1 failure among 10 measurements for chloride ions, 2 failures among 8 measurements for conductivity (one of which marginal), 2 failures (marginal) among 8 measurements for pH and no failure in 4 measurements for sulphate ions.

In conclusion, specific statistical techniques were used to identify potential pollution incidents and to predict polluting situations, presenting quite satisfactory level of reliability and predictive ability; however, utilization of this technique should be carried out by taking into account: a) the fact that the examined aquatic system is an "open" system which can be influenced by other non-predictable external factors and b) other restrictions related to the field research (e.g. discontinuity of data due to measuring equipment problems, etc.).

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 1

1.1 ΓΕΝΙΚΑ 1

1.2 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ 4

2 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΞΟΡΥΞΗ ΛΙΓΝΙΤΗ – ΕΠΙΒΑΡΥΝΣΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ 5

2.1 ΓΕΝΙΚΑ 5

2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΟΡΥΧΕΙΩΝ ΛΙΓΝΙΤΗ 8

2.3 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΠΙΒΑΡΥΝΣΗ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ 11

2.3.1 Γενικά 11

2.3.2 Αέρια ρύπανση 12

2.3.3 Ρύπανση εδάφους 13

2.3.4 Επιβάρυνση επιφανειακών υδάτινων πόρων περιοχής μελέτης 14

2.3.5 Επιφανειακά νερά αντλιοστασίων 22

2.3.6 Υδατικά και άλλα υγρά απόβλητα 22

2.3.7 Όξινες και λοιπές απορροές ορυχείων 23

2.3.8 Υδατικά απόβλητα από ΑΗΣ Αγ. Δημητρίου 25

3 ΣΚΟΠΙΜΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ 26

4 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ 29

4.1 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ – ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΜΕΤΡΗΣΗΣ 29

4.1.1 Περιγραφή πολυπαραμετρικών συστημάτων μέτρησης 29

4.1.2 Στοιχεία λειτουργίας πολυπαραμετρικών συστημάτων μέτρησης 32

4.1.3 Βαθμονόμηση πολυπαραμετρικών συστημάτων μέτρησης 34

4.1.4 Προστασία πολυπαραμετρικών συστημάτων μέτρησης 35

4.1.5 Εργαστηριακός μετρητικός εξοπλισμός 36

4.1.6 Εγκατάσταση δικτύου πολυπαραμετρικών συστημάτων 38

4.1.7 Προέλευση μετρήσεων και λοιπών δεδομένων 39

4.2 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ - ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ 41
4.2.1 Αρχική εγκατάσταση συστημάτων 41
4.2.2 Έναρξη λειτουργίας συστημάτων μέτρησης 41
4.2.3 Ασύρματη σύνδεση και μετάδοση πληροφορίας 41
4.2.4 Στεγανότητα φωρατών 42
4.2.5 Απρόβλεπτα περιστατικά 42
4.2.6 Σύσταση ρεύματος εξόδου ΑΗΣ Αγ. Δημητρίου 43
4.2.7 Βαθμονόμηση συστημάτων 43
4.2.8 Χρόνος ζωής ηλεκτροδίων – Αξιοπιστία μετρήσεων 43
4.2.9 Λοιπά προβλήματα 44

4.3 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ 45
4.3.1 Προκαταρκτική επεξεργασία πρωτογενών μετρήσεων – Αποσφαλμάτωση 46
4.3.2 Διαγραμματική αποτύπωση διαχρονικών μεταβολών παραμέτρων 46
4.3.3 Συσχέτιση μεταβολών παραμέτρων με τη βροχόπτωση 47
4.3.4 Συσχέτιση μεταβολών παραμέτρων μεταξύ των σταθμών μέτρησης 48
4.3.5 Διερεύνηση και ταυτοποίηση ενδεχόμενων επεισοδίων ρύπανσης 50
4.3.6 Ποσοτικοποίηση των μετρούμενων παραμέτρων σε αποδεκτά και μη επίπεδα 52
4.3.7 Μοντέλα εκτίμησης της ρύπανσης στα σημεία εκροής αντλιοστασίων ορυχείων 53

5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ 55

5.1 ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΧΡΟΝΙΚΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ 55
5.1.1 Διαχρονικές μεταβολές μετρούμενων φυσικοχημικών παραμέτρων συνολικά 55
5.1.2 Διαχρονικές μεταβολές ογκομετρικών παροχών εκροών αντλιοστασίων ορυχείων και βροχόπτωσης 61
5.1.3 Διαχρονικές μεταβολές μετρούμενων φυσικοχημικών παραμέτρων ανά σταθμό μέτρησης 65

5.2 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΜΕ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ 69
5.2.1 Συσχέτιση μετρούμενων φυσικοχημικών παραμέτρων με ύψος βροχόπτωσης 69
5.2.2 Συσχέτιση ογκομετρικής παροχής εκροών αντλιοστασίων ορυχείων με ύψος βροχόπτωσης 74

5.3 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΔΑΤΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ 77
5.3.1 Συσχέτιση συγκεντρώσεων μετρούμενων φυσικοχημικών παραμέτρων μεταξύ των σταθμών μέτρησης 77
5.3.2 Δείκτες τεκμηρίωσης της επιβάρυνσης της ποιότητας των υδάτων μεταξύ σταθμών μέτρησης 82

5.4 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΙ ΤΑΥΤΟΠΟΙΗΣΗ ΕΝΔΕΧΟΜΕΝΩΝ ΕΠΕΙΣΟΔΙΩΝ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΥΔΑΤΙΝΩΝ ΠΟΡΩΝ 91
5.4.1 Διαγραμματική απεικόνιση εντοπισμού περιπτώσεων με ενδεχόμενο επεισόδιο ρύπανσης 91

5.4.2 Στατιστική ανίχνευση ενδεχόμενων επεισοδίων ρύπανσης στο ρέμα Σουλού 104
5.4.3 Ποσοτικοποίηση των φυσικοχημικών παραμέτρων σε σύγκριση με αποδεκτά επίπεδα 121

5.5 ΜΟΝΤΕΛΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΡΥΠΟΓΟΝΟΥ ΔΡΑΣΗΣ ΣΤΑ ΣΗΜΕΙΑ ΕΚΡΟΗΣ ΑΝΤΛΙΟΣΤΑΣΙΩΝ ΟΡΥΧΕΙΩΝ ΚΑΡΔΙΑΣ ΚΑΙ ΟΝΠ 131

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ 146

6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 146

6.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ 153

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 154

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ 161

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α 162

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β 164

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ 166

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ 172

ΚΑΤΑΛΟΓΩΝ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1. *Γενικό διάγραμμα κύκλου ζωής της εκμετάλλευσης λιγνιτικού κοιτάσματος και λειτουργίας ατμοηλεκτρικού σταθμού (Καβουρίδης κ.ά., 2005).* *10*

Σχήμα 2. *Σχηματική απεικόνιση μηχανισμού ρηγμάτωσης από υπεράντληση* *21*

Σχήμα 3. *Χωροθέτηση δικτύου σταθμών μέτρησης ποιότητας υδάτων στην περιοχή των ορυχείων λιγνίτη Πτολεμαΐδας* *38*

Σχήμα 4. *Διαχρονική μεταβολή θερμοκρασίας υδάτων στους τρεις σταθμούς μέτρησης* *56*

Σχήμα 5. *Διαχρονική μεταβολή θερμοκρασίας περιβάλλοντος* *57*

Σχήμα 6. *Διαχρονική μεταβολή αγωγιμότητας στους τρεις σταθμούς μέτρησης* *57*

Σχήμα 7. *Διαχρονική μεταβολή θειικών ιόντων στους τρεις σταθμούς μέτρησης* *58*

Σχήμα 8. *Διαχρονική μεταβολή pH στους τρεις σταθμούς μέτρησης* *58*

Σχήμα 9. *Διαχρονική μεταβολή νιτρικών ιόντων στους τρεις σταθμούς μέτρησης* *60*

Σχήμα 10. *Διαχρονική μεταβολή ιόντων χλωρίου στους τρεις σταθμούς μέτρησης* *60*

Σχήμα 11. *Διαχρονική μεταβολή ογκομετρικής παροχής των διοχετευομένων υδάτων από το αντλιοστάσιο ορυχείου Καρδιάς στο ρέμα Σουλού* *61*

Σχήμα 12. *Διαχρονική μεταβολή ογκομετρικής παροχής των διοχετευομένων υδάτων από το αντλιοστάσιο ορυχείου Νοτίου Πεδίου στο ρέμα Σουλού* *62*

Σχήμα 13. *Διαχρονική μεταβολή βροχόπτωσης* *63*

Σχήμα 14. *Διαχρονική εξέλιξη της συνολικής βροχόπτωσης και των ωρών βροχόπτωσης ανά μήνα* *64*

Σχήμα 15. *Διαχρονική μεταβολή αγωγιμότητας, SO_4^{-2}, pH και Cl^- στο σταθμό μέτρησης "Σουλού"* *65*

Σχήμα 16. *Διαχρονική μεταβολή αγωγιμότητας, pH και NO_3^- στο σταθμό μέτρησης "ΑΗΣ Αγ. Δημητρίου"* ... *66*

Σχήμα 17. *Διαχρονική μεταβολή αγωγιμότητας, SO_4^{-2}, pH, NO_3^- και Cl^- στο σταθμό μέτρησης "Γεώτρηση"* .. *67*

Σχήμα 18. *Μεταβολή αγωγιμότητας με τη βροχόπτωση στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" (18/10/2010)* *70*

Σχήμα 19. *Μεταβολή αγωγιμότητας με τη βροχόπτωση στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" (24/12/2010)* *70*

Σχήμα 20. *Μεταβολή αγωγιμότητας με τη βροχόπτωση στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" (27/10/2010)* *71*

Σχήμα 21. *Μεταβολή pH με τη βροχόπτωση στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" (05/06/2010)* *71*

Σχήμα 22. *Μεταβολή pH με τη βροχόπτωση στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" (15/05/2010)* *72*

Σχήμα 23. *Μεταβολή pH με τη βροχόπτωση στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" (25/09/2010)* *72*

Σχήμα 24. *Μεταβολή ιόντων χλωρίου με τη βροχόπτωση στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" (15/05/2010)* *73*

Σχήμα 25. *Μεταβολή ιόντων χλωρίου με τη βροχόπτωση στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" (25/09/2010) 73*

Σχήμα 26. *Μεταβολή ιόντων χλωρίου με τη βροχόπτωση στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" (27/010/2010) 74*

Σχήμα 27. *Εμπειρική αθροιστική κατανομή των μεταβλητών της βροχόπτωσης και των παροχών αντλιοστασίων ορυχείων Καρδιάς και Νότιου Πεδίου (Empirical Cumulative Distribution Function-ECDF). 76*

Σχήμα 28. *Μεταβολή ιόντων χλωρίου στους σταθμούς μέτρησης "Σουλού" και "Γεώτρηση"..... 77*

Σχήμα 29. *Μεταβολή αγωγιμότητας στους σταθμούς μέτρησης "Σουλού" και "Γεώτρηση"..... 78*

Σχήμα 30. *Μεταβολή pH στους σταθμούς μέτρησης "Σουλού" και "Γεώτρηση"..... 78*

Σχήμα 31. *Μεταβολή pH στους σταθμούς μέτρησης "Σουλού" και "ΑΗΣ Αγ, Δημητρίου" 79*

Σχήμα 32. *Εμπειρική αθροιστική κατανομή του pH στους σταθμούς μέτρησης "Σουλού" και "Γεώτρηση"..... 80*

Σχήμα 33. *Εμπειρική αθροιστική κατανομή των ιόντων χλωρίου στους σταθμούς μέτρησης "Σουλού" και "Γεώτρηση"..... 80*

Σχήμα 34. *Εμπειρική αθροιστική κατανομή αγωγιμότητας στους σταθμούς μέτρησης "Σουλού" και "Γεώτρηση"..... 81*

Σχήμα 35. *Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης της διακύμανσης (ANOVA) ενός παράγοντα για την αγωγιμότητα στους τρεις σταθμούς μέτρησης συνολικά για 7 σύγχρονες περιόδους μέτρησης (02/09/2010 - 26/10/2010)..... 83*

Σχήμα 36. *Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης της διακύμανσης (ANOVA) ενός παράγοντα για την αγωγιμότητα στους τρεις σταθμούς μέτρησης ανά ημέρα για 1η σύγχρονη περίοδο μέτρησης (02/09/2010 - 03/09/2010)..... 84*

Σχήμα 37. *Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης της διακύμανσης (ANOVA) ενός παράγοντα για την αγωγιμότητα στους τρεις σταθμούς μέτρησης ανά ημέρα για 2η σύγχρονη περίοδο μέτρησης (08/09/2010 - 09/09/2010)..... 84*

Σχήμα 38. *Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης της διακύμανσης (ANOVA) ενός παράγοντα για την αγωγιμότητα στους τρεις σταθμούς μέτρησης ανά ημέρα για 3η σύγχρονη περίοδο μέτρησης (13/09/2010)..... 85*

Σχήμα 39. *Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης της διακύμανσης (ANOVA) ενός παράγοντα για την αγωγιμότητα στους τρεις σταθμούς μέτρησης ανά ημέρα για 4η σύγχρονη περίοδο μέτρησης (17/09/2010)..... 85*

Σχήμα 40. *Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης της διακύμανσης (ANOVA) ενός παράγοντα για την αγωγιμότητα στους τρεις σταθμούς μέτρησης ανά ημέρα για 5η σύγχρονη περίοδο μέτρησης (22/09/2010-24/09/2010)..... 86*

Σχήμα 41. *Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης της διακύμανσης (ANOVA) ενός παράγοντα για την αγωγιμότητα στους τρεις σταθμούς μέτρησης ανά ημέρα για 6η σύγχρονη περίοδο μέτρησης (14/10/2010-21/10/2010)..... 86*

Σχήμα 42. *Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης της διακύμανσης (ANOVA) ενός παράγοντα για την αγωγιμότητα στους τρεις σταθμούς μέτρησης ανά ημέρα για 7η σύγχρονη περίοδο μέτρησης (25/10/2010-29/10/2010)*..... *87*

Σχήμα 43. *Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης της διακύμανσης (ANOVA) ενός παράγοντα για το pH στους τρεις σταθμούς μέτρησης συνολικά για 1η σύγχρονη περίοδο μέτρησης (02/09/2010 - 03/09/2010)88*

Σχήμα 44. *Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης της διακύμανσης (ANOVA) ενός παράγοντα για το pH στους τρεις σταθμούς μέτρησης συνολικά για 2η σύγχρονη περίοδο μέτρησης (22/09/2010 - 23/09/2010)88*

Σχήμα 45. *Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης της διακύμανσης (ANOVA) ενός παράγοντα για το pH στους τρεις σταθμούς μέτρησης ανά ημέρα για 1η σύγχρονη περίοδο μέτρησης (02/09/2010-03/09/2010)*.. ..... *89*

Σχήμα 46. *Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης της διακύμανσης (ANOVA) ενός παράγοντα για το pH στους τρεις σταθμούς μέτρησης ανά ημέρα για 2η σύγχρονη περίοδο μέτρησης (22/09/2010-23/09/2010)*.. ..... *89*

Σχήμα 47. *Μεταβολή αγωγιμότητας στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" συναρτήσει της παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς (18/10/2010)* *92*

Σχήμα 48. *Μεταβολή αγωγιμότητας στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" συναρτήσει της παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς (23/09/2010)* *93*

Σχήμα 49. *Μεταβολή pH στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" συναρτήσει της παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς (24/09/2010)*..... *93*

Σχήμα 50. *Μεταβολή pH στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" συναρτήσει της παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς (03/06/2010)*..... *94*

Σχήμα 51. *Μεταβολή θειικών ιόντων στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" συναρτήσει της παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς (02/09/2010)* *95*

Σχήμα 52. *Μεταβολή θειικών ιόντων στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" συναρτήσει της παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς (08/08/2010)* *95*

Σχήμα 53. *Μεταβολή θειικών ιόντων στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" συναρτήσει της παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς (19/08/2010)* *96*

Σχήμα 54. *Μεταβολή ιόντων χλωρίου στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" συναρτήσει της παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς (14/10/2010)* *97*

Σχήμα 55. *Μεταβολή ιόντων χλωρίου στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" συναρτήσει της παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς (14/5/2010)* *97*

Σχήμα 56. *Μεταβολή ιόντων χλωρίου στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" συναρτήσει της παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς (21/09/2010)* *98*

Σχήμα 57. *Μεταβολή ιόντων χλωρίου στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" συναρτήσει της παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς (06/07/2010)* *99*

Σχήμα 58. *Μεταβολή ιόντων χλωρίου στο σταθμό μέτρησης Σουλού συναρτήσει της παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς (28/10/2010)* 99

Σχήμα 59. *Μεταβολή αγωγιμότητας στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" συναρτήσει της παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς (06/07/2010)* 100

Σχήμα 60. *Μεταβολή ιόντων χλωρίου στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" συναρτήσει της παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Νοτίου Πεδίου (02/09/2010)* 101

Σχήμα 61. *Μεταβολή θειικών ιόντων στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" συναρτήσει της παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Νοτίου Πεδίου (02/09/2010)* 102

Σχήμα 62. *Μεταβολή θειικών ιόντων στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" συναρτήσει της παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Νοτίου Πεδίου (31/08/2010)* 102

Σχήμα 63. *Μεταβολή pH στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" συναρτήσει της παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Νοτίου Πεδίου (14/05/2010)* 103

Σχήμα 64. *Μεταβολή ιόντων χλωρίου στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" συναρτήσει της παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Νοτίου Πεδίου (18/09/2010)* 103

Σχήμα 65. *Μεταβολή μέσων τιμών pH και των 95% ορίων εμπιστοσύνης τους ανά ημέρα στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" για το διάστημα 07/05/2010-10/05/2010 με κωδικοποιημένη αντιστοίχηση 1 (χαμηλό φορτίο) και 2 (υψηλό φορτίο) για το σημείο παροχής ΟΝΠ* 106

Σχήμα 66. *Μεταβολή μέσων τιμών pH και των 95% ορίων εμπιστοσύνης τους ανά ημέρα στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" για το διάστημα 03/06/2010-08/06/2010 με κωδικοποιημένη αντιστοίχηση 1 (χαμηλό φορτίο) και 2 (υψηλό φορτίο) για το σημείο παροχής ΟΝΠ* 106

Σχήμα 67. *Μεταβολή μέσων τιμών pH και των 95% ορίων εμπιστοσύνης τους ανά ημέρα στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" για το διάστημα 01/07/2010-11/07/2010 με κωδικοποιημένη αντιστοίχηση 1 (χαμηλό φορτίο) και 2 (υψηλό φορτίο) για το σημείο παροχής ΟΝΠ* 107

Σχήμα 68. *Μεταβολή μέσων τιμών pH και των 95% ορίων εμπιστοσύνης τους ανά ημέρα στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" για το διάστημα 28/08/2010-03/09/2010 με κωδικοποιημένη αντιστοίχηση 1 (χαμηλό φορτίο) και 2 (υψηλό φορτίο) για το σημείο παροχής Καρδιάς.* 108

Σχήμα 69. *Μεταβολή μέσων τιμών συγκέντρωσης ιόντων χλωρίου και των 95% ορίων εμπιστοσύνης τους ανά ημέρα στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" για το διάστημα 07/05/2010-10/05/2010 με κωδικοποιημένη αντιστοίχηση 1 (χαμηλό φορτίο) και 2 (υψηλό φορτίο) για το σημείο παροχής ΟΝΠ.* 109

Σχήμα 70. *Μεταβολή μέσων τιμών συγκέντρωσης ιόντων χλωρίου και των 95% ορίων εμπιστοσύνης τους ανά ημέρα στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" για το διάστημα 12/05/2010 με κωδικοποιημένη αντιστοίχηση 1 (χαμηλό φορτίο) και 2 (υψηλό φορτίο) για το σημείο παροχής ΟΝΠ.* 110

Σχήμα 71. *Μεταβολή μέσων τιμών συγκέντρωσης ιόντων χλωρίου και των 95% ορίων εμπιστοσύνης τους ανά ημέρα στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" για το διάστημα 25/09/2010-27/09/2010 με κωδικοποιημένη αντιστοίχηση 1 (χαμηλό φορτίο) και 2 (υψηλό φορτίο) για το σημείο παροχής ΟΝΠ.* 110

Σχήμα 72. *Μεταβολή μέσων τιμών συγκέντρωσης ιόντων χλωρίου και των 95% ορίων εμπιστοσύνης τους ανά ημέρα στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" για το διάστημα 03/06/2010-08/06/2010 με κωδικοποιημένη αντιστοίχηση 1 (χαμηλό φορτίο) και 2 (υψηλό φορτίο) για το σημείο παροχής Καρδιάς. 111*

Σχήμα 73. *Μεταβολή μέσων τιμών συγκέντρωσης ιόντων χλωρίου και των 95% ορίων εμπιστοσύνης τους ανά ημέρα στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" για το διάστημα 01/07/2010-11/07/2010 με κωδικοποιημένη αντιστοίχηση 1 (χαμηλό φορτίο) και 2 (υψηλό φορτίο) για το σημείο παροχής Καρδιάς. 112*

Σχήμα 74. *Μεταβολή μέσων τιμών συγκέντρωσης ιόντων χλωρίου και των 95% ορίων εμπιστοσύνης τους ανά ημέρα στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" για το διάστημα 14/05/2010-16/05/2010 με κωδικοποιημένη αντιστοίχηση 1 (χαμηλό φορτίο) και 2 (υψηλό φορτίο) για το σημείο παροχής Καρδιάς. 112*

Σχήμα 75. *Μεταβολή μέσων τιμών συγκέντρωσης ιόντων χλωρίου και των 95% ορίων εμπιστοσύνης τους ανά ημέρα στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" για το διάστημα 12/07/2010-17/07/2010 με κωδικοποιημένη αντιστοίχηση 1 (χαμηλό φορτίο) και 2 (υψηλό φορτίο) για το σημείο παροχής Καρδιάς 113*

Σχήμα 76. *Μεταβολή μέσων τιμών συγκέντρωσης θειικών ιόντων και των 95% ορίων εμπιστοσύνης τους ανά ημέρα στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" για το διάστημα 01/07/2010-11/07/2010 με κωδικοποιημένη αντιστοίχηση 1 (χαμηλό φορτίο) και 2 (υψηλό φορτίο) για το σημείο παροχής Καρδιάς. 114*

Σχήμα 77. *Μεταβολή μέσων τιμών συγκέντρωσης θειικών ιόντων και των 95% ορίων εμπιστοσύνης τους ανά ημέρα στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" για το διάστημα 14/07/2010-16/07/2010 με κωδικοποιημένη αντιστοίχηση 1 (χαμηλό φορτίο) και 2 (υψηλό φορτίο) για το σημείο παροχής Καρδιάς. 114*

Σχήμα 78. *Μεταβολή μέσων τιμών αγωγιμότητας και των 95% ορίων εμπιστοσύνης τους ανά ημέρα στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" για το διάστημα 25/09/2010-26/09/2010 με κωδικοποιημένη αντιστοίχηση 1 (χαμηλό φορτίο) και 2 (υψηλό φορτίο) για το σημείο παροχής ΟΝΠ. 115*

Σχήμα 79. *Μεταβολή της συγκέντρωσης ιόντων χλωρίου και της παροχής στα σημεία εκροής αντλιοστασίων ορυχείων Καρδιάς και Νότιου Πεδίου επί 24ωρης βάσης και σε διαφορετικές ημέρες ενδεχόμενων επεισοδίων ρύπανσης. 118*

Σχήμα 80. *Μεταβολή του pH και της παροχής στο σημείο εκροής αντλιοστασίου ορυχείου Νότιου Πεδίου επί 24ωρης βάσης και σε διαφορετικές ημέρες ενδεχόμενων επεισοδίων ρύπανσης. 119*

Σχήμα 81. *Μεταβολή της συγκέντρωσης θειικών ιόντων και της παροχής στο σημείο εκροής αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς επί 24ωρης βάσης και σε διαφορετικές ημέρες ενδεχόμενων επεισοδίων ρύπανσης. 120*

Σχήμα 82. *Δενδρική ταξινόμηση των επιπέδων συγκέντρωσης ιόντων χλωρίου (χαμηλό/υψηλό) με 2 επίπεδα τμήσεων και 4 τελικούς κόμβους 123*

Σχήμα 83. *Δενδρική ταξινόμηση των επιπέδων αγωγιμότητας (χαμηλό/μεσαίο) με 2 επίπεδα τμήσεων και 3 τελικούς κόμβους 125*

Σχήμα 84. *Δενδρική παλινδρόμηση της συγκέντρωσης των θειικών ιόντων με 2 επίπεδα τμήσεων και 3 τελικούς κόμβους 127*

Σχήμα 85. *Δενδρική παλινδρόμηση των τιμών pH με 3 επίπεδα τμήσεων και 5 τελικούς κόμβους 129*

Σχήμα 86. *Επίδραση της παροχής (κλίση) και των χρονικών διαστημάτων στην εξέλιξη της αγωγιμότητας 134*

Σχήμα 87. *Επίδραση της παροχής (κλίση) και των χρονικών διαστημάτων στην εξέλιξη του pH 136*

Σχήμα 88. *Επίδραση της παροχής (κλίση) και των χρονικών διαστημάτων στην εξέλιξη της συγκέντρωσης των θειικών ιόντων..... 139*

Σχήμα 89. *Επίδραση της παροχής (κλίση) και των χρονικών διαστημάτων στην εξέλιξη της συγκέντρωσης των ιόντων χλωρίου..... 141*

ΚΑΤΑΛΟΓΩΝ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. *Τεχνικά χαρακτηριστικά φωρατή* *33*

Πίνακας 2. *Χαρακτηριστικά επιλεκτικών ιοντικών ηλεκτροδίων και αισθητήρων φυσικών παραμέτρων* *34*

Πίνακας 3. *Περιοδική βαθμονόμηση ηλεκτροδίων/αισθητήρων* *35*

Πίνακας 4. *Εφαρμοζόμενες πρότυπες μέθοδοι ασυνεχών εργαστηριακών αναλύσεων ανά παράμετρο* *37*

Πίνακας 5. *Συνολικά εντοπισμένα ενδεχόμενα επεισόδια ρύπανσης* *116*

Πίνακας 6. *Επιβεβαίωση εντοπισμένων ενδεχόμενων επεισοδίων ρύπανσης* *117*

Πίνακας 7. *Δενδρική κατανομή των στοιχείων σε επίπεδα συγκέντρωσης ιόντων χλωρίου (χαμηλό-υψηλό) από τη δράση των χρονικών περιόδων* *123*

Πίνακας 8. *Πίνακας καταμερισμού των συχνοτήτων συγκέντρωσης ιόντων χλωρίου με βάση τα επίπεδα χαμηλό-υψηλό* *124*

Πίνακας 9. *Δενδρική κατανομή των στοιχείων σε επίπεδα αγωγιμότητας χαμηλό-μεσαίο από τη δράση των χρονικών περιόδων* *125*

Πίνακας 10. *Πίνακας καταμερισμού των συχνοτήτων αγωγιμότητας με βάση τα επίπεδα χαμηλό-μεσαίο* *126*

Πίνακας 11. *Πίνακας καταμερισμού των συχνοτήτων της συγκέντρωσης των θειικών ιόντων με βάση διαχωρισμού το χρονικό διάστημα και την παροχή ΟΝΠ.* *127*

Πίνακας 12. *Πίνακας καταμερισμού των συχνοτήτων της συγκέντρωσης θειικών ιόντων με βάση τα επίπεδα χαμηλό-υψηλό* *128*

Πίνακας 13. *Πίνακας καταμερισμού των συχνοτήτων των τιμών pH με βάση διαχωρισμού τα διαφορετικά χρονικά διαστήματα* *129*

Πίνακας 14. *Στατιστικές παράμετροι των συντελεστών της παλινδρόμησης επί της αγωγιμότητας* *133*

Πίνακας 15. *Εξισώσεις πολλαπλής παλινδρόμησης για την αγωγιμότητα* *134*

Πίνακας 16. *Στατιστικές παράμετροι των συντελεστών της παλινδρόμησης επί της απόκρισης του pH* *135*

Πίνακας 17. *Εξισώσεις πολλαπλής παλινδρόμησης για το pH* *137*

Πίνακας 18. *Στατιστικές παράμετροι των συντελεστών της παλινδρόμησης επί της συγκέντρωσης των θειικών ιόντων* *138*

Πίνακας 19. *Εξισώσεις πολλαπλής παλινδρόμησης για τη συγκέντρωση των θειικών ιόντων* *139*

Πίνακας 20. *Στατιστικές παράμετροι των συντελεστών της παλινδρόμησης επί της συγκέντρωσης των ιόντων χλωρίου* *140*

Πίνακας 21. *Εξισώσεις πολλαπλής παλινδρόμησης για τη συγκέντρωση ιόντων χλωρίου* *142*

Πίνακας 22. *Αντιστοιχία επικύρωσης των παρατηρούμενων και προβλεπόμενων τιμών συγκέντρωσης χλωριόντων με βάση εκτίμησης τα 95% όρια πρόβλεψης των εξισώσεων παλινδρόμησης (παρατηρούμενες τιμές εκτός των ορίων των μοντέλων δείχνονται με σκίαση)* *143*

Πίνακας 23. *Αντιστοιχία επικύρωσης των παρατηρούμενων και προβλεπόμενων τιμών συγκέντρωσης θειικών ιόντων με βάση εκτίμησης τα 95% όρια πρόβλεψης των εξισώσεων παλινδρόμησης (παρατηρούμενες τιμές εκτός των ορίων των μοντέλων δείχνονται με σκίαση)* *144*

Πίνακας 24. *Αντιστοιχία επικύρωσης των παρατηρούμενων και προβλεπόμενων τιμών αγωγιμότητας με βάση εκτίμησης τα 95% όρια πρόβλεψης των εξισώσεων παλινδρόμησης (παρατηρούμενες τιμές εκτός των ορίων των μοντέλων δείχνονται με σκίαση)*..... *144*

Πίνακας 25. *Αντιστοιχία επικύρωσης των παρατηρούμενων και προβλεπόμενων τιμών* pH *με βάση εκτίμησης τα 95% όρια πρόβλεψης των εξισώσεων παλινδρόμησης (παρατηρούμενες τιμές εκτός των ορίων των μοντέλων δείχνονται με σκίαση)* *145*

ΚΑΤΑΛΟΓΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. *Ορυχεία λιγνίτη στην περιοχή μελέτης* *8*

Εικόνα 2. *Πλήρες σύστημα μέτρησης πολυπαραμετρικών αισθητήρων* *29*

Εικόνα 3. *Απεικόνιση διεπαφής χρήστη λογισμικού συστημάτων μέτρησης* *31*

Εικόνα 4. *Κλωβοί προστασίας πολυπαραμετρικών συστημάτων μέτρησης* *36*

Εικόνα 5. *Εργαστηριακός εξοπλισμός μέτρησης φυσικοχημικών παραμέτρων* *37*

Εικόνα 6. *Αντλιοστάσια ορυχείων Καρδιάς και Νότιου Πεδίου* *63*

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η περιοχή της Δυτικής Μακεδονίας, είναι η περιφέρεια της χώρας με τους σημαντικότερους υδάτινους πόρους - 65% των υδάτινων πόρων στην Ελλάδα συγκεντρώνονται στην περιοχή αυτή (λίμνες Βεγορίτιδα, Καστοριάς, Πρέσπες, Ζάζαρη, Χειμαδίτιδα, Πολυφύτου κτλ). Η ολοκληρωμένη διαχείριση αυτών των οικοσυστημάτων με προσδιορισμό των περιβαλλοντικών πιέσεων αποτελεί απαίτηση που προκύπτει όχι μόνο από τη νομοθεσία αλλά και από την ανάγκη για τη μείωση των επιπτώσεων από τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες στην περιοχή.

Η συνεχής απορροή στους υδατικούς αποδέκτες νερών με υψηλό ρυπαντικό φορτίο από περιοχές με ενεργούς αλλά και εγκαταλειμμένους χώρους εξόρυξης καθώς και από περιοχές όπου αποτίθενται τα παραπροϊόντα της εξόρυξης και των θερμοηλεκτρικών σταθμών (τέφρα) συνεισφέρουν στην επιβάρυνση των υδάτινων πόρων, επιφανειακών και υπογείων, επηρεάζοντας με αυτό τον τρόπο άμεσα αλλά και μακροπρόθεσμα την ασφάλεια και την υγιεινή των οικοσυστημάτων αλλά και των εμπλεκόμενων κοινωνιών.

Ειδικά στην περιοχή της Δυτικής Μακεδονίας, η οποία είναι ιδιαίτερα επιβαρυμένη περιβαλλοντικά λόγω της λειτουργίας των ορυχείων λιγνίτη που τροφοδοτούν τους σταθμούς της ΔΕΗ Α.Ε., πρέπει να σημειωθεί ότι αρκετοί από τους παρακείμενους στα ορυχεία υδάτινους πόρους χρησιμοποιούνται για τροφοδοσία πόσιμου νερού στους κατοίκους της περιοχής. Επιπλέον, η τεχνητή λίμνη Πολυφύτου αποτελεί τον ταμιευτήρα που σήμερα τροφοδοτεί με 150.000 m^3/ημέρα την πόλη της Θεσσαλονίκης.

Στο πλαίσιο λήψης των κατάλληλων προληπτικών ή θεραπευτικών μέτρων από τις αρμόδιες αρχές είναι σημαντική η έγκαιρη και ακριβής πληροφόρηση σχετικά με τη σταθερότητα των αποθέσεων των αποβλήτων εξόρυξης σε σχέση με τα φυσικά φαινόμενα τα οποία μπορεί να προκαλέσουν τη διαφυγή τους στο περιβάλλον, την ποιότητα των υδατικών πόρων και κυρίως αυτών που υπόκεινται σε ρύπανση από εξορυκτικές δραστηριότητες λιγνίτη καθώς και τον εντοπισμό περιπτώσεων αυξημένης εισροής ρύπων.

Με βάση τα παραπάνω, προκύπτει η ανάγκη για τη μελέτη και ανάπτυξη ενός συστήματος με στόχο τη συνεχή παρακολούθηση της οικολογικής ποιότητας αλλά και την πρόβλεψη των επιπτώσεων των απορροών από εξορυκτικές δραστηριότητες λιγνίτη στους παρακείμενους υδατικούς πόρους με τη χρήση κατάλληλου τεχνολογικού εξοπλισμού για τη μέτρηση, καταγραφή και μετάδοση των αποτελεσμάτων και την ανάπτυξη ενός κατάλληλου εργαλείου για την πρόβλεψη πιθανών επεισοδίων ρύπανσης.

Στην κατεύθυνση αυτή η παρούσα διδακτορική έρευνα περιλαμβάνει τα εξής αντικείμενα:

α) Ανάπτυξη ενός αποτελεσματικού συστήματος παρακολούθησης της ποιότητας των απορροών από εξορυκτικές δραστηριότητες του λιγνίτη στην περιοχή των ορυχείων Πτολεμαΐδας, με εγκατάσταση και λειτουργία ενός δικτύου πολυπαραμετρικών αισθητήρων με δυνατότητα αυτόματης τηλεμετάδοσης και επεξεργασίας των πληροφοριών.

β) Ανάπτυξη μοντέλου εντοπισμού επεισοδίων ρύπανσης και πρόβλεψης της επιβάρυνσης των υδάτινων πόρων από τις απορροές, κυρίως κατά την διάρκεια έντονων φυσικών φαινομένων, με σκοπό τον προσδιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Τα αντικείμενο της έρευνας σχετίζεται με τις αρχές που έχουν θεσπιστεί από την πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης (6th Environmental Action Plan, Environmental Health Action Programme, Sustainable Development Strategy) και τις διάφορες ευρωπαϊκές οδηγίες αλλά και με την Οδηγία Πλαίσιο 2000/60/ΕΚ για τη διαχείριση των υδάτινων πόρων, οι οποίες αναφέρονται στην απόρριψη τοξικών και επικίνδυνων ουσιών στο περιβάλλον. Σύμφωνα με τις Οδηγίες αυτές πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην ανάπτυξη δράσεων για την πρόληψη των διαρροών από τεχνικές εγκαταστάσεις (π.χ. απορροές), με εφαρμογή συστημάτων που θα ανιχνεύουν και θα ειδοποιούν για την παρουσία τέτοιων γεγονότων (σύστημα παρακολούθησης της ποιότητας). Η εγκατάσταση ενός συστήματος περιβαλλοντικής παρακολούθησης το οποίο βασίζεται σε τεχνολογίες ασύρματου δικτύου αισθητήρων διευρύνει τη δυνατότητα αξιολόγησης της έκθεσης σε περιβαλλοντικούς κινδύνους και κινδύνους υγείας του πληθυσμού σχετικούς με τις ρυπαντικές απορροές των ορυχείων λιγνίτη.

Στόχος της παρούσας έρευνας είναι η προστασία των περιοχών που επηρεάζονται από τις εξορυκτικές δραστηριότητες μέσω του σχεδιασμού και της ανάπτυξης ενός δικτύου

παρακολούθησης παραμέτρων που σχετίζονται με την ποιοτική κατάσταση του υδατικού δυναμικού της ευρύτερης περιοχής. Η ανάπτυξη ενός εργαλείου για την περιβαλλοντική παρακολούθηση και πρόβλεψη των ενδεχόμενων ρυπαντικών επιπτώσεων των απορροών εκτιμάται ότι θα βοηθήσει σημαντικά την ικανότητα για την εκτίμηση των κινδύνων που σχετίζονται με την κατάσταση των οικοσυστημάτων αλλά και έμμεσα με την ανθρώπινη υγεία. Επιπλέον, η εγκατάσταση και λειτουργία του συστήματος αυτού σε ένα περιβαλλοντικά ευαίσθητο χώρο, όπως είναι ο χώρος της περιοχής μελέτης όπου υπάρχει ένας πλήθος ανθρωπογενών δραστηριοτήτων που σχετίζονται με την παραγωγή ενέργειας, θα συνεισφέρει στην αποκατάσταση της περιβαλλοντικής ισορροπίας. Βέβαια, η εφαρμογή της μεθοδολογίας αυτής στην περιοχή, πέρα από τα άμεσα οφέλη για τη συγκεκριμένη περιοχή, έχει πολλαπλά οφέλη αφού θα επιβεβαιωθεί η αποτελεσματικότητά της και έτσι θα μπορεί να εφαρμοστεί ως ένα εργαλείο πρόβλεψης πιθανών επεισοδίων ρύπανσης και σε άλλες περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές.

Επιπλέον, το σύστημα αυτό θα μπορεί να ενταχθεί σε ένα ευρύτερο σχέδιο για την παρακολούθηση της ποιότητας των υδατικών πόρων, σύμφωνα με τις απαιτήσεις της Οδηγίας Πλαίσιο για τη Διαχείριση των Υδάτων 2000/60/ΕΚ.

1.2 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Στο πρώτο κεφάλαιο της διατριβής αναφέρεται το περιεχόμενο καθώς και κάποια εισαγωγικά στοιχεία, ενώ παρατίθενται και οι στόχοι αλλά και η διάρθρωση της διατριβής.

Στο δεύτερο κεφάλαιο της διατριβής γίνεται μια συνοπτική περιγραφή της λειτουργίας των ορυχείων λιγνίτη και στη συνέχεια αναφέρονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν από αυτή. Επίσης αναλύονται οι περιβαλλοντικές πιέσεις για την περιοχή μελέτης όπου εστιάστηκε η έρευνα, με έμφαση σε αυτές που αφορούν τη ρύπανση των υδατικών πόρων.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται η σκοπιμότητα εκπόνησης της διατριβής και παρουσιάζεται η μέχρι τώρα σχετική με το αντικείμενο μελέτης έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε και τα μέσα που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση της έρευνας. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφεται ο εξοπλισμός και η εγκατάσταση του δικτύου παρακολούθησης της ποιότητας των υδάτων, τα προβλήματα που προέκυψαν κατά την πορεία και ο τρόπος αντιμετώπισής τους καθώς και οι στατιστικές τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία των δεδομένων που συλλέχθηκαν.

Στο πέμπτο κεφάλαιο της διατριβής παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την επεξεργασία των δεδομένων και πραγματοποιείται η σχετική ανάλυση και αξιολόγησή τους με χρήση διαφορετικών μεθόδων, έτσι ώστε να επιβεβαιωθούν οι ενδείξεις που αφορούν σε πιθανά επεισόδια ρύπανσης.

Στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εκπόνηση της διατριβής καθώς και κάποιες ευρύτερες παρατηρήσεις και προοπτικές μελλοντικής έρευνας.

Βοηθητικά και συμπληρωματικά στοιχεία παρατίθενται στα Παραρτήματα.

2 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΞΟΡΥΞΗ ΛΙΓΝΙΤΗ – ΕΠΙΒΑΡΥΝΣΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Οι δραστηριότητες εξόρυξης άνθρακα συγκαταλέγονται μεταξύ των δραστηριοτήτων που παράγουν σημαντικές ποσότητες αποβλήτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Τα παραπροϊόντα των ορυχείων περιλαμβάνουν εκατομμύρια κυβικά μέτρα αποβλήτων με υψηλή τοξικότητα τα οποία υπόκεινται ανά πάσα στιγμή σε κίνδυνο ξαφνικής διαφυγής στο περιβάλλον ως αποτέλεσμα κάποιου φυσικού φαινομένου, όπως ακραίες καιρικές συνθήκες ή σεισμός. Η διαφυγή αυτών των ουσιών στο περιβάλλον αναμένεται να λαμβάνει χώρα όλο και πιο συχνά στο μέλλον καθώς οι κλιματικές αλλαγές και η υπερθέρμανση του πλανήτη αυξάνουν διαρκώς την συχνότητα εμφάνισης ακραίων μετεωρολογικών φαινομένων.

Εκτός όμως από τους κινδύνους που προέρχονται από ακραία φυσικά φαινόμενα, μακροπρόθεσμα, οι δραστηριότητες εξόρυξης άνθρακα αποτελούν την κύρια πηγή ρύπανσης των επιφανειακών υδάτων και κατατάσσονται στην τέταρτη θέση μεταξύ των δραστηριοτήτων που επηρεάζουν δυσμενώς τα υδατικά οικοσυστήματα. Η συνεχής απορροή αποβλήτων με υψηλό ρυπαντικό φορτίο από περιοχές με ενεργούς και εγκαταλειμμένους χώρους εξόρυξης (όξινες απορροές) αλλά και από περιοχές όπου αποτίθενται τα παραπροϊόντα της εξόρυξης συνεισφέρουν στην επιβάρυνση των υδάτινων πόρων, επιφανειακών και υπογείων, επηρεάζοντας με αυτό τον τρόπο άμεσα αλλά και μακροπρόθεσμα την ασφάλεια και την υγεία των οικοσυστημάτων και των εμπλεκόμενων κοινωνιών. Παρόλα αυτά, δεν υπάρχουν επαρκή αξιόπιστα στοιχεία σχετικά με τις απορροές από τους χώρους εξόρυξης σε ευρωπαϊκό και διεθνές επίπεδο, ειδικά για τα εγκαταλειμμένα ορυχεία. Έτσι, δεκάδες χιλιάδες ενεργά και εγκαταλειμμένα ορυχεία στην Ευρώπη και τον υπόλοιπο κόσμο ρυπαίνουν μεγάλες εκτάσεις υδατικών πόρων, συμπεριλαμβανομένων περίπου 10000 km ρυπασμένων επιφανειακών υδάτινων συστημάτων μόνο στην Ευρωπαϊκή Ένωση.

Στην περιοχή της Δυτικής Μακεδονίας η έκταση του φαινομένου της ρύπανσης των υδάτινων πόρων από την εξόρυξη του λιγνίτη σε μεγάλο βαθμό παραμένει άγνωστη, λόγω έλλειψης σχετικών ερευνητικών μελετών.

Η συνεχής διαφυγή ρυπασμένων απορροών από ορυχεία λιγνίτη στο περιβάλλον παρουσιάζει τόσο οξείες βραχυπρόθεσμες όσο και χρόνιες μακροπρόθεσμες αρνητικές επιπτώσεις τόσο στα οικοσυστήματα όσο και στην οικονομία, την υγεία και ασφάλεια των τοπικών κοινωνιών.

Ειδικά στην περιοχή της Δυτικής Μακεδονίας, η οποία είναι ιδιαίτερα επιβαρυμένη περιβαλλοντικά λόγω της λειτουργίας των ορυχείων λιγνίτη που τροφοδοτούν τους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς της ΔΕΗ Α.Ε., πρέπει να σημειωθεί ότι αρκετοί από τους παρακείμενους στα ορυχεία υδάτινους πόρους χρησιμοποιούνται για τροφοδοσία πόσιμου νερού στους κατοίκους της περιοχής.

Στο πλαίσιο λήψης των κατάλληλων προληπτικών ή θεραπευτικών μέτρων από τις αρμόδιες αρχές είναι σημαντική η έγκαιρη και ακριβής πληροφόρηση σχετικά με:

- Τη σταθερότητα των αποθέσεων των αποβλήτων εξόρυξης και τα φυσικά φαινόμενα τα οποία μπορεί να προκαλέσουν τη διαφυγή τους στο περιβάλλον
- Την ποιότητα των υδατικών πόρων (π.χ. λεκανών απορροής) σύμφωνα με την Οδηγία Πλαίσιο της Ε.Ε. (2000/60/ΕΚ), και ειδικά αυτών που υπόκεινται σε ρύπανση από εξορυκτικές δραστηριότητες λιγνίτη.
- Τον εντοπισμό περιπτώσεων αυξημένης εισροής ρύπων.

Με βάση τα παραπάνω είναι σημαντική η παρακολούθηση της σταθερότητας των αποθέσεων ορυχείων λιγνίτη αλλά και της ποιότητας των υδάτινων πόρων που γειτνιάζουν με εξορυκτικές δραστηριότητες λιγνίτη, με στόχο να αναγνωριστούν σημειακές και διάχυτες πηγές ρύπανσης οι οποίες σχετίζονται με τις όξινες ή άλλες ρυπαντικές απορροές των ορυχείων. Προς την κατεύθυνση αυτή, θεωρείται απαραίτητη η ανάπτυξη ενός μοντέλου για την αναγνώριση και πρόβλεψη πιθανών επεισοδίων ρύπανσης π.χ. σε περιπτώσεις εκδήλωσης εκτάκτων φυσικών φαινομένων με δυνατότητα έγκαιρης ειδοποίησης για την λήψη των κατάλληλων μέτρων.

Ωστόσο, σημαντικό ρόλο στην εκτίμηση των επιπτώσεων από τη λειτουργία των ορυχείων, παίζει η κατανόηση της λειτουργίας ενός ορυχείου. Η περιγραφή της λειτουργίας των ορυχείων αλλά και οι αντίστοιχες επιπτώσεις για την περιοχή μελέτης ακολουθούν στη συνέχεια.

2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΟΡΥΧΕΙΩΝ ΛΙΓΝΊΤΗ

Η εξορυκτική δραστηριότητα του λιγνίτη λαμβάνει χώρα συνήθως με την μέθοδο επιφανειακής εκμετάλλευσης των κοιτασμάτων και την εφαρμογή της συνεχούς εκσκαφής, μεταφοράς και απόθεσης με σύστημα πολλαπλών βαθμίδων. Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται κυρίως στην περιοχή μελέτης (βλ. Εικόνα 1).

Εικόνα 1. Ορυχεία λιγνίτη στην περιοχή μελέτης

Η μέθοδος αυτή συνδυάζει τη χρησιμοποίηση ηλεκτροκίνητων μηχανημάτων μεγάλης δυναμικότητας και συνεχούς λειτουργίας, τόσο κατά την εκσκαφή (καδοφόροι εκσκαφείς), όσο και κατά τη μεταφορά (ταινιόδρομοι) και την απόθεση (αποθέτες) του λιγνίτη και των αγόνων (υπερκειμένων και λιγνιτικών ενδιάμεσων αγόνων ενστρώσεων). Η μέθοδος εφαρμόζεται με επιτυχία για περισσότερα από 50 έτη στη λειτουργία των ορυχείων της περιοχής και από την εφαρμογή της έχει αποκτηθεί σημαντική εμπειρία. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται, επίσης, συστηματικά και σε ευρεία κλίμακα, στις εκμεταλλεύσεις λιγνιτών της Γερμανίας, αλλά και άλλων χωρών της Ευρώπης.

Το πεδίο εφαρμογής της είναι οι επιφανειακές εκμεταλλεύσεις πολυστρωματικών κοιτασμάτων μεγάλης οριζόντιας εξάπλωσης και μεγάλου πάχους που καλύπτονται από νεότερους γεωλογικά υπερκείμενους σχηματισμούς, μεγάλου πάχους, ενώ, παράλληλα, οι σχηματισμοί αυτοί είναι χαλαρά συνδεδεμένοι, έτσι ώστε να είναι δυνατή η εξόρυξή τους με μηχανικά μέσα (καδοφόρους εκσκαφείς συνεχούς λειτουργίας) και η μεταφορά τους με ταινιοδρόμους. Στις περιπτώσεις αυτές τα άγονα υπερκείμενα και ενδιάμεσα μεταφέρονται και αποτίθενται είτε σε εξωτερικό χώρο (εξωτερική απόθεση) κατά τα πρώτα χρόνια λειτουργίας του ορυχείου ή στον κενό χώρο του ορυχείου μετά το τέλος της εκμετάλλευσης

(εσωτερική απόθεση αγόνων σε κοιλότητες, όταν έχει δημιουργηθεί επαρκής χώρος για την υποδοχή τους).

Η παραγωγική διαδικασία της εκμετάλλευσης των ορυχείων συνίσταται από τις εξής δραστηριότητες (ECHMES, 2010):

1. Αποκάλυψη του κοιτάσματος. Η αποκάλυψη του κοιτάσματος γίνεται με την εκσκαφή υπερκειμένων αγόνων κυρίως με πάγιο εξοπλισμό (καδοφόροι εκσκαφείς) και υποβοηθητικά με συμβατικό εξοπλισμό.
2. Διακίνηση των αγόνων προς τους χώρους απόθεσης. Η διακίνηση αυτή από τους καδοφόρους εκσκαφείς προς τους αποθέτες γίνεται με μεταφορικές ταινίες. Όταν η εκσκαφή διενεργείται με συμβατικό εξοπλισμό η διακίνηση αγόνων γίνεται με χωματουργικά αυτοκίνητα.
3. Εκλεκτική εξόρυξη του λιγνίτη από τα ενδιάμεσα άγονα υλικά, ώστε να πληρούνται τα ποιοτικά κριτήρια του καυσίμου.
4. Μεταφορά και αποθήκευση του λιγνίτη σε Υπαίθριες Αποθήκες (Αυλές).
5. Τροφοδοσία των Ατμοηλεκτρικών Σταθμών από τις Αυλές.

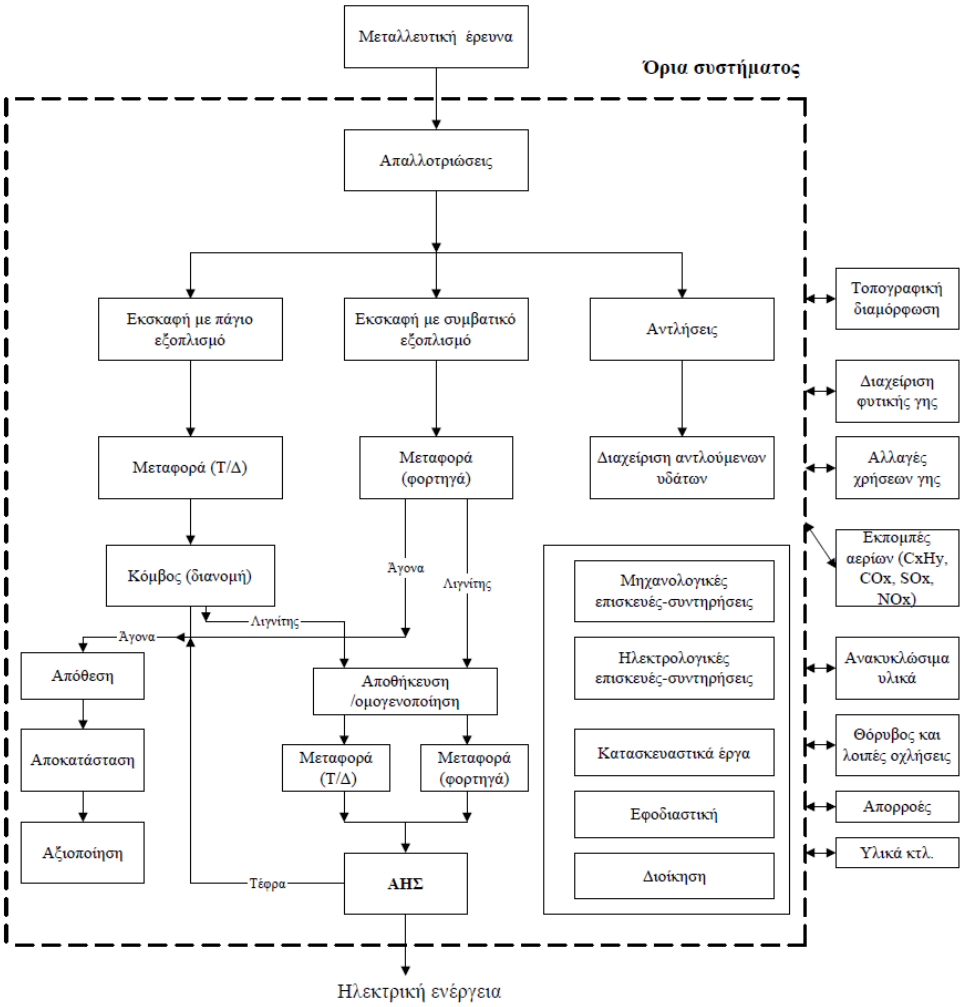
Η απόθεση των αγόνων διενεργείται μέσω των αποθετών, με κατάλληλο σχεδιασμό, έτσι ώστε να εναρμονίζεται με το γενικότερο τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής. Αρχικά, κατά την απόθεση αγόνων εκτός του ορυχείου, επιλέγονται κενοί χώροι (κοιλότητες) άλλων ορυχείων όπου έχει ολοκληρωθεί η εκμετάλλευση ή άλλες κατάλληλες περιοχές, ενώ στη συνέχεια, όταν δημιουργείται κενός χώρος εντός του υπό ανάπτυξη ορυχείου, η απόθεση διενεργείται εσωτερικά, έτσι ώστε η απόσταση μεταξύ εκσκαφής και απόθεσης να είναι η ελάχιστη δυνατή. Η εσωτερική απόθεση αγόνων ακολουθεί τις εκσκαφές του ορυχείου για λόγους ευστάθειας των πρανών, αλλά και για λόγους κατάλληλης περιβαλλοντικής αποκατάστασης παράλληλα με την εξέλιξη της εκμετάλλευσης.

Το 95% της εξορυσσόμενης ποσότητας αγόνων υλικών αποτίθεται εντός των κοιλοτήτων των εξαντλημένων ορυχείων.

Οι κοιλότητες των ορυχείων αποτελούν και χώρους συναπόθεσης των υποπροϊόντων της καύσης του λιγνίτη με τα άγονα. Τα ως άνω υποπροϊόντα αναμιγνύονται με τα άγονα υλικά

της εκσκαφής και αποτίθενται από τους αποθέτες. Στις εσωτερικές αποθέσεις μαζί με τα άγονα για λόγους ενίσχυσης της γεωτεχνικής ευστάθειας και περιορισμού της κατάληψης των αδιατάρακτων περιοχών συναποτίθενται τέφρα, υποπροϊόν καύσης ΑΗΣ, που συνιστά το 1.16% περίπου των αγόνων. Το 5% των παραγομένων αγόνων των Ορυχείων Πτολεμαΐδας αποτίθενται στις εγκαταστάσεις – εξωτερικές αποθέσεις όπου αποτίθενται τα εξορυκτικά απόβλητα (ECHMES, 2010).

Στο παρακάτω Σχήμα 1 παρουσιάζεται διαγραμματικά ο κύκλος ζωής της εκμετάλλευσης λιγνιτικού κοιτάσματος και λειτουργίας ατμοηλεκτρικού σταθμού.



Σχήμα 1. Γενικό διάγραμμα κύκλου ζωής της εκμετάλλευσης λιγνιτικού κοιτάσματος και λειτουργίας ατμοηλεκτρικού σταθμού (Καβουρίδης κ.ά., 2005).

2.3 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΠΙΒΑΡΥΝΣΗ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

2.3.1 Γενικά

Στην εξεταζόμενη περιοχή της Δυτικής Μακεδονίας και ειδικότερα στη λεκάνη Πτολεμαΐδας είναι γνωστή εδώ και πολλές δεκαετίες η ύπαρξη πλούσιων λιγνιτικών κοιτασμάτων. Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στο Νομό Κοζάνης, όπου από τη δεκαετία του 1950 η ΔΕΗ Α.Ε. έχει αναπτύξει ευρεία εξορυκτική δραστηριότητα για την εκμετάλλευση των λιγνιτικών κοιτασμάτων.

Ως εκ τούτου, η ευρύτερη περιοχή της Πτολεμαΐδας (Δυτική Μακεδονία) αποτελεί μία από τις πιο επιβαρημένες περιβαλλοντικά περιοχές της Ελλάδας γεγονός το οποίο επιβεβαιώνεται από πλήθος εκθέσεων και αναφορών των αρμόδιων φορέων, όπου σαν κύρια αιτία αναφέρονται οι εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας που φιλοξενεί η περιοχή και οι σοβαρές επιπτώσεις τους στο περιβάλλον.

Η εξορυκτική δραστηριότητα της ΔΕΗ έχει πάρει τεράστιες διαστάσεις. Χαρακτηριστικό δείγμα της ραγδαίας αύξησης του ρυθμού εξόρυξης αποτελεί το γεγονός ότι από το 1960 μέχρι το 1975 η λιγνιτική παραγωγή διπλασιάζεται κάθε 5 χρόνια, δηλαδή αυξάνεται με ρυθμό 20% ετησίως. Ανάλογη φυσικά είναι και η αύξηση των θερμοηλεκτρικών μονάδων που έχουν φτάσει τις 15, με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 4400 MW και καλύπτουν το 60% των αναγκών όλης της χώρας σε ηλεκτρική ενέργεια (Τσικριτζής, 2011).

Η υπερεκμετάλλευση των λιγνιτικών αποθεμάτων, η υποβάθμιση των φτωχών κοιτασμάτων (“λιγνιτοχωμάτων”), η αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και η απουσία αποτελεσματικών δράσεων στον τομέα εξοικονόμησης ενέργειας, συνεπάγονται την εγκατάσταση και άλλων λιγνιτικών μονάδων στην ευρύτερη περιοχή (μονάδες Φλώρινας), αλλά και ενός υδροηλεκτρικού σταθμού στον ποταμό Αλιάκμονα (ΥΗΣ Ιλαρίωνος), στον οποίο ήδη υπάρχουν και άλλοι τρεις (Πολύφυτος, Σφηκιά και Ασώματα).

Λόγω των ορυχείων του λιγνίτη και των θερμοηλεκτρικών σταθμών της ΔΕΗ αλλοιώνεται και διαταράσσεται σοβαρά η μορφολογία και η αισθητική του τοπίου, δεσμεύονται χιλιάδες στρέμματα γεωργικής γης, ανασκάπτονται εκατομμύρια τόνοι εδάφους (χωρίς ή με μερική

αποκατάσταση), καταστρέφονται οι υδροφόροι ορίζοντες, που κινδυνεύουν και από τη μη ασφαλή διαχείριση ρυπαντικών ουσιών.

Σοβαρές είναι επίσης οι επιπτώσεις στη χλωρίδα και στην πανίδα, στα επιφανειακά νερά, στο κλίμα, στη σεισμικότητα του εδάφους, όπως και οι διαταραχές στη σύνθεση και στην κατανομή του πληθυσμού, στην κοινωνική ζωή και στον πολιτισμό του.

Κυρίαρχο βέβαια πρόβλημα αποτελεί κατά πρώτο λόγο η αέρια ρύπανση, η οποία πλήττει όλο το λεκανοπέδιο Κοζάνης - Πτολεμαΐδας και κατά δεύτερο η εξάντληση των υδάτινων πόρων (π.χ. συρρίκνωση λίμνης Βεγορίτιδας).

2.3.2 Αέρια ρύπανση

Ο κύριος αέριος ρύπος επιβαρύνει για δεκαετίες όλη τη λεκάνη Κοζάνης - Πτολεμαΐδας - Αμυνταίου είναι η ιπτάμενη τέφρα που εκπέμπουν οι Σταθμοί παραγωγής ρεύματος (ΑΗΣ) της ΔΕΗ.

Οι συνολικές εκπομπές των PM10 (αναπνεύσιμα σωματίδια διαμέτρου ≤ 10 μm) κατά καιρούς παρουσιάζονται ιδιαίτερα αυξημένες, με την εκδήλωση συχνών επεισοδίων ρύπανσης. Ειδικά κατά την περίοδο Αυγούστου – Σεπτεμβρίου, όπου οι μετεωρολογικές συνθήκες ή/και οι συγκυρίες είναι δυσμενείς (άπνοια, εκκινήσεις μονάδων με πετρέλαιο, καύση σιτοκαλαμιών, κλπ) παρατηρείται εντονότερη επιβάρυνση της ατμόσφαιρας. Σύμφωνα με στοιχεία του ΤΕΙ Δυτικής Μακεδονίας στην πόλη της Κοζάνης τη διετία 2007-2008 καταγράφηκαν υπερβάσεις των PM10 σε επίπεδα 22 - 40 % (Τσικριτζής, 2011).

Εκτός των συγκεντρώσεων των αιωρουμένων σωματιδίων που αφορούν στην ποιότητα του αέρα και μπορεί μερικές φορές να οφείλονται και σε άλλες αιτίες εκτός της δραστηριότητας της ΔΕΗ Α.Ε., όπως η αστική ρύπανση, οι εκπομπές αιωρούμενων σωματιδίων των καμινάδων της ΔΕΗ Α.Ε. συχνά εμφανίζουν υπερβάσεις σε σχέση με τα επιτρεπόμενα όρια. Με βάση μετρήσεις της ΔΕΗ Α.Ε., την περίοδο 2007 σημειώθηκαν υπερβάσεις σε επίπεδα 22 - 64 %.

Οι αυξημένες εκπομπές τέφρας δύναται να οφείλονται κυρίως :

1. Στην κακή ποιότητα καυσίμου (υψηλό ποσοστό τέφρας).
2. Στην ιδιαίτερη συμπεριφορά που εμφανίζει η τέφρα μέσα στο φίλτρο και στη μεγάλη διακύμανση των χαρακτηριστικών της.
3. Στην παλαιότητα κάποιων φίλτρων (μείωση απόδοσης με το χρόνο), και σχεδιαστικές αστοχίες στη σχεδίαση μερικών καινούριων φίλτρων.
4. Σε υποκειμενικούς λόγους (ανθρώπινος παράγοντας)

Σημειώνεται ότι η αέρια ρύπανση της ευρύτερης περιοχής μπορεί να συνδεθεί και με τη ρύπανση του υδατικού δυναμικού και του εδάφους, καθώς οι αέριοι ρύποι μέσω βροχοπτώσεων/κατακρημνίσεων δύναται να μεταφερθούν τόσο στα ύδατα όσο και στο έδαφος.

2.3.3 Ρύπανση εδάφους

Η εξορυκτική δραστηριότητα της ΔΕΗ, η οποία διακινεί κατ' έτος πάνω από 250.000.000 m^3 εδάφους, (μέση αναλογία: 1 tn λιγνίτη ανά 4 έως 5 m^3 στείρων), σε συνδυασμό με το υψηλό ποσοστό τέφρας του λιγνίτη, ο οποίος καίγεται στις θερμοηλεκτρικές μονάδες σε τεράστιες ποσότητες, (περίπου 50.000.000 tn κάθε χρόνο), προκαλεί σοβαρές διαταράξεις και στα χαρακτηριστικά του εδάφους (Τσικριτζής, 2011).

Η λατομική - μεταλλευτική δραστηριότητα στην ευρύτερη περιοχή της Κοζάνης δεν αφορά μόνο το λιγνίτη, αλλά και την εξόρυξη των μαρμάρων στην περιοχή Σερβίων (αποθέσεις στείρων, υγρά απόβλητα, αποκατάσταση), του λευκόλιθου (σκόνη, οπτική ρύπανση) και τα - κλειστά πλέον - μεταλλεία αμιάντου όπου η αποκατάσταση είναι πολύ δύσκολη (μεγάλα μέτωπα, απότομες κλίσεις).

Ειδικότερα η ανάπτυξη των ορυχείων λιγνίτη προκαλεί σοβαρές γεωμορφολογικές διαταράξεις σε χιλιάδες στρέμματα γης που δεσμεύονται με αναγκαστική απαλλοτρίωση και συνοδεύονται από μετεγκαταστάσεις οικισμών και χωριών.

Η εξορυκτική δραστηριότητα προκαλεί τα λεγόμενα προβλήματα παραγωγής, που αναφέρονται στην απώλεια της παραγωγικής ικανότητας των εδαφών, στο παραγωγικό κενό που θα δημιουργήσει η εξάντληση των λιγνιτικών αποθεμάτων ("μεταλιγνιτική" περίοδος),

αλλά και στις επιπτώσεις στη φυτική και ζωική παραγωγή, (υποβάθμιση ποιότητας, βιοσυσσώρευση τοξικών ρυπαντών μέσω της τροφικής αλυσίδας, κλπ).

Προκαλούνται σημαντικές παρενέργειες στο έδαφος, οι κυριότερες από τις οποίες είναι:

- η καταστροφή της συνέχειας των γεωλογικών επιφανειών
- η καταστροφή του ανάγλυφου του εδάφους
- η καταστροφή των εδαφών που δημιουργήθηκαν με φυσικές διαδικασίες

Κατά την διακίνηση της εξόρυξης τα άγονα υλικά (υπερκείμενα, ενδιάμεσα και μη απολήψιμα λιγνιτικά στρώματα) οδηγούνται σε ειδικούς χώρους μαζί με την λιγνιτική τέφρα.

Οι περιοχές αυτές ονομάζονται αποθέσεις και έχουν ακανόνιστο σχήμα με ύψος που κυμαίνεται από 50-140 μέτρα. Οι νέες αυτές μορφές εδάφους εναποτίθενται η μία στην άλλη με έναν όχι και τόσο ομαλό τρόπο, ενώ η δομή τους (στρωματογραφική, φυσικοχημική, εδαφολογική, κλπ) είναι ακαθόριστη και με μεγάλες διακυμάνσεις από θέση σε θέση .

Η τυχαία ανάμειξη των επιμέρους υλικών στις αποθέσεις έχει ως αποτέλεσμα:

- τον ενταφιασμό και την οριστική καταστροφή ενός πολύτιμου φυσικού πόρου, όπως είναι η φυτική γη (επιφανειακό γόνιμο χώμα).
- την εμφάνιση αυξημένων διαβρώσεων στα τελικά πρανή των αποθέσεων.
- τη δημιουργία εστιών αυτανάφλεξης σε περιοχές αποθέσεων, όπου υπάρχει αυξημένη συγκέντρωση άκαυστων “ λιγνιτοχωμάτων”.

2.3.4 Επιβάρυνση επιφανειακών υδάτινων πόρων περιοχής μελέτης

Ο ποταμός Αλιάκμονας αποτελεί τον μεγαλύτερο σε μήκος και όγκο υδάτων ποταμό της χώρας και συνεπώς και τον κύριο άξονα αποστράγγισης. Τα περισσότερα από τα επιφανειακά ρέματα του 9^{ου} Υδατικού Διαμερίσματος (Δυτικής Μακεδονίας), στο οποίο υπάγεται η περιοχή μελέτης, είναι παραπόταμοι του Αλιάκμονα (Βενέτικος, Τριπόταμος, Γρεβενίτης κ.α.), ενώ το διαμέρισμα αποστραγγίζεται και από τους ποταμούς Αξιό,

Μαυρονέρι και Χελοπόταμο, καθώς και δεκαεννέα ρέματα μεταξύ των οποίων και το ρέμα Σουλού. Σε βυθίσματα των πεδινών εκτάσεων, στα βόρεια του διαμερίσματος, υπάρχουν οι λίμνες Βεγορίτιδα, Πετρών, Χειμαδίτιδα και Ζάζαρη, ενώ στα βορειοδυτικά βρίσκονται, μορφολογικά απομονωμένες από τον γύρο χώρο, οι λίμνες των Πρεσπών (Κουτσογιάννης κ.ά., 2008).

Η λεκάνη Κοζάνης - Πτολεμαΐδας - Αμυνταίου

Η εν λόγω λεκάνη διαθέτει πλούσιο υδάτινο δυναμικό, τόσο υπόγειο όσο και επιφανειακό, (λίμνες Ζάζαρη, Χειμαδίτιδα, Πετρών, Βεγορίτιδα, Νησίου και τεχνητή λίμνη Πολυφύτου). Τα περισσότερα στοιχεία που αφορούν την καταγραφή των υδατικών πόρων, διατίθενται από το ΙΓΜΕ που έχει μελετήσει υδρολογικά και υδρογεωλογικά την περιοχή περισσότερα από οποιονδήποτε άλλον φορέα.

Λίμνη Βεγορίτιδα

Η υδρολογική λεκάνη στην οποία ανήκει η Βεγορίτιδα περιλαμβάνει επιπλέον τις λίμνες Πετρών, Χειμαδίτιδα και Ζάζαρη και επικοινωνεί με τον υδροφορέα του Β.Δ. Βερμίου και νότιου Βόρρα, αποτελώντας ενιαία υδρογεωλογική ενότητα.

Από το 1955 οι διακυμάνσεις της στάθμης οφείλονται κυρίως στις ανθρωπογενείς παρεμβάσεις της ΔΕΗ Α.Ε., που λειτούργησε τον ΥΗΣ Άγρα και στη συνέχεια και τον ΑΗΣ Αμυνταίου, αλλά και στις ανεξέλεγκτες γεωτρήσεις για γεωργικούς σκοπούς.

Η Βεγορίτιδα με βάση μετρήσεις του ΙΓΜΕ το 2001 είχε απολέσει το 76 % του όγκου της, (από τα 3.000.000.000 m^3 μειώθηκε στα 700.000.000 m^3), ενώ η στάθμη της έπεσε κατά 35 m περίπου. Οι τιμές αυτές το 2009 ήταν 65 % και 32 m αντίστοιχα.

Σύμφωνα με πρόσφατα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνεται ότι η λίμνη Βεγορίτιδα, (η τρίτη σε επιφάνεια λίμνη στην Ελλάδα) παρουσιάζει υψηλές συγκεντρώσεις νιτρικών και νιτρωδών ιόντων. Κυριότερη πηγή εισόδου νερού για τη λίμνη αποτελούν τα υπόγεια νερά και οι επιφανειακές απορροές της υδρολογικής λεκάνης της λίμνης, οι οποίες καταλήγουν σε αυτήν μέσω του ρέματος Σουλού, άλλων μικρών χειμάρρων και της σήραγγας που τη συνδέει με τη λίμνη Πετρών. Τα νερά της λίμνης χρησιμοποιούνται για άρδευση, διαβίωση ιχθύων, αλιεία, κολύμβηση και για βιομηχανικές χρήσεις. Η ανάπτυξη των ανθρώπινων

δραστηριοτήτων στην ευρύτερη υδρολογική λεκάνη της λίμνης Βεγορίτιδας (και της λίμνης Πετρών) και κυρίως τα αστικά και βιομηχανικά απόβλητα και η υπέρμετρη χρήση φυτοφαρμάκων και λιπασμάτων αποτελούν τους κυριότερους παράγοντες ρύπανσης των δύο λιμνών. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η λειτουργία του βιολογικού καθαρισμού Πτολεμαΐδας και το κλείσιμο του εργοστασίου λιπασμάτων της ΑΕΒΑΛ έχουν συντελέσει στη βελτίωση των ποιοτικών χαρακτηριστικών της λίμνης Βεγορίτιδας, γεγονός που επιβεβαιώνεται τόσο από τις μετρήσεις του ΥΠΕΧΩΔΕ (2000–2002) όσο και από τις μετρήσεις του Υπουργείου Γεωργίας (1998–2001) όπου η μέγιστη μετρηθείσα τιμή νιτρικών είναι 9.7 mg/L NO_3^- σε σύνολο 33 μετρήσεων.

Σύμφωνα με μετρήσεις μικροοργανικών και μετάλλων που έχουν πραγματοποιηθεί από το Πανεπιστήμιο Αιγαίου φαίνεται ότι οι συγκεντρώσεις των επικίνδυνων ουσιών, όπως αυτές ορίζονται στο άρθρο 7 της Οδηγίας 76/464/ΕΟΚ για τη ρύπανση από απορρίψεις επικίνδυνων ουσιών στο υδάτινο περιβάλλον, βρίσκονται στις περισσότερες περιπτώσεις σε επίπεδα χαμηλότερα από το όριο ανίχνευσης.

Λίμνη Πετρών

Η λίμνη Πετρών ανήκει γεωγραφικά στο Νομό Φλώρινας και δέχεται τις επιφανειακές απορροές μέσω του ρέματος Αμύντα το οποίο μεταφέρει και τα πλεονάζοντα νερά της λίμνης Χειμαδίτιδας. Η λίμνη χρησιμοποιείται ως χώρος αναψυχής, για αλιεία ενώ πραγματοποιούνται και αντλήσεις για την άρδευση του κάμπου (εντατικές καλλιέργειες). Μέσω του ρέματος του Αμύντα εισέρχονται στη λίμνη τα ανεπεξέργαστα λύματα αρκετών οικισμών, καθώς και τα βιομηχανικά απόβλητα των μονάδων της περιοχής. Σύμφωνα με τις μετρήσεις του Υπουργείου Γεωργίας για την περίοδο 1983–1997 οι συγκεντρώσεις νιτρικών και νιτρωδών είναι αρκετά χαμηλές, σε αντίθεση με τις συγκεντρώσεις των αμμωνιακών οι οποίες σε αρκετές περιπτώσεις είναι πολύ υψηλές (ειδικά στη θέση Άκρη), και τις συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου οι οποίες σε επίπεδο μέσων και διάμεσων τιμών είναι ικανοποιητικές, σε αρκετές όμως περιπτώσεις έχουν καταγραφεί ελάχιστες τιμές μέχρι και 2 mg/L. Τα ανωτέρω επιβεβαιώνονται και από πιο πρόσφατα στοιχεία του Υπουργείου Γεωργίας για την περίοδο 1998–2001 και του ΥΠΕΧΩΔΕ για την περίοδο 1998–2002, σύμφωνα με τα οποία καταγράφονται περιστασιακά πολύ χαμηλές τιμές διαλυμένου οξυγόνου της τάξης του 5% της συγκέντρωσης κορεσμού, με τις μέσες τιμές ωστόσο να είναι

αρκετά υψηλότερες και να βρίσκονται κοντά στο 80% της συγκέντρωσης κορεσμού. Επίσης σύμφωνα με περιορισμένες μετρήσεις νιτρικών της ίδιας περιόδου η μέγιστη τιμή τους φτάνει τα 16.3 mg/L NO_3^-.

Λίμνη Χειμαδίτιδα

Σύμφωνα με στοιχεία του Υπουργείου Γεωργίας για την περίοδο 1984–1997 και 1998–2001 στη λίμνη καταγράφονται περιστασιακά πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου (7% της συγκέντρωσης κορεσμού), ενώ επίσης έχουν καταγραφεί τιμές νιτρικών της τάξης των 25 mg/L. Επίσης και στις δυο θέσεις δειγματοληψίας κατά την περίοδο 1998–2001 (Ίτσκος και φράγμα) η μέγιστη τιμή θειικών του 95% των δειγμάτων ανέρχεται σε 13.8 και 13.2 meq/L SO_4^{-2} αντίστοιχα, τιμές υπερδιπλάσιες από τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή της Οδηγίας για την παραγωγή ποσίμου νερού (5.2 meq/L SO_4^{-2}). Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τις υψηλές τιμές αγωγιμότητας που παρατηρούνται στη λίμνη και κυμαίνονται κοντά στα 1600 μS/cm και στις δυο θέσεις (για το 95% των δειγμάτων), καθιστούν τα νερά της λίμνης ακατάλληλα προς πόση ύστερα από επεξεργασία.

Μικρή Πρέσπα

Για τη Μικρή Πρέσπα υπάρχουν μετρήσεις αγρονομικών παραμέτρων κυρίως, του Υπουργείου Γεωργίας για την περίοδο 1998–2001 στο μέσο της λίμνης, καθώς επίσης και επεξεργασμένα στοιχεία μετρήσεων θρεπτικών του ΥΠΕΧΩΔΕ για το έτος 2000 στο χωριό Άγιος Βασίλειος. Σύμφωνα τα διαθέσιμα στοιχεία τα νερά της λίμνης δεν παραβιάζουν τις μέγιστες επιτρεπόμενες συγκεντρώσεις για την πρόσληψη νερού προς πόση μετά από επεξεργασία. Επισημαίνεται ότι περιστασιακά έχουν καταγραφεί αρκετά χαμηλές συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου (2.7 mg/L O_2) και υψηλές τιμές φωσφορικών (0.7 mg/L P_2O_5) με τους μέσους όρους όμως να βρίσκονται σε ικανοποιητικά επίπεδα.

Μεγάλη Πρέσπα

Σύμφωνα με μετρήσεις του Υπουργείου Γεωργίας την περίοδο 1998–2001 καθώς και περιορισμένα στοιχεία του ΥΠΕΧΩΔΕ για το έτος 2002, η λίμνη δε φαίνεται να αντιμετωπίζει προβλήματα ποιότητας.

Λίμνη Καστοριάς

Από μετρήσεις του Υπουργείου Γεωργίας κατά την περίοδο 1998–2001 και του ΥΠΕΧΩΔΕ για την περίοδο 2001–2002, τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της λίμνης φαίνονται να ικανοποιούν τις απαιτήσεις της Οδηγίας για την παραγωγή πόσιμου νερού. Σύμφωνα με τις διαθέσιμες συγκεντρώσεις θρεπτικών (TN=0.6 mg/L N και TP=30 μg/L P), περιοριστικός παράγοντας του ευτροφισμού στη λίμνη είναι ο φώσφορος.

Ως προς την τροφική κατάσταση, εκτός από τις λίμνες Πετρών και Βεγορίτιδα και οι λίμνες Χειμαδίτιδα, Ζάζαρη και Καστοριάς χαρακτηρίζονται ευαίσθητες ως προς το ευτροφισμό, ενώ η Μικρή Πρέσπα και η Μεγάλη Πρέσπα ως λίμνες που δεν αντιμετωπίζουν προβλήματα ευαισθησίας ως προς τον ευτροφισμό. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι περιοριστικός παράγοντας του ευτροφισμού είναι ο φώσφορος για τις λίμνες Βεγορίτιδα, Πετρών, Μικρή Πρέσπα, Μεγάλη Πρέσπα και Καστοριάς, ενώ για τις λίμνες Χειμαδίτιδα και Ζάζαρη το άζωτο.

Τέλος θα πρέπει να σημειωθεί ότι από μετρήσεις μικροοργανικών και μετάλλων που πραγματοποιήθηκαν από το Πανεπιστήμιο Αιγαίου σε διάφορα σημεία των υδάτων των λιμνών Μικρή και Μεγάλη Πρέσπα, φαίνεται ότι στην μεγάλη τους πλειοψηφία οι συγκεντρώσεις των μικροοργανικών και των μετάλλων βρίσκονται κάτω από τα όρια ανίχνευσης.

Ρέμα Σουλού

Το ρέμα Σουλού είναι τεχνητό κανάλι σε τμήμα της διαδρομής του (μέχρι τον ΑΗΣ Καρδιάς) και αποτελεί το φυσικό αποδέκτη που αποστραγγίζει τις επιφανειακές απορροές της κλειστής λεκάνης «Σαριγκιόλ» προς την υδρολογική λεκάνη Πτολεμαΐδας. Σύμφωνα με τη σημερινή του μορφή έχει μήκος περίπου 25 km, αρχίζει από την περιοχή του παλιού έλους Σαριγκιόλ και εκβάλει στη λίμνη Βεγορίτιδα. Κατασκευάστηκε το 1954, όταν έγιναν τα έργα αποξήρανσης της λεκάνης Σαριγκιόλ, δηλαδή του νότιου τμήματος της λεκάνης Πτολεμαΐδας, η οποία πριν την τεχνητή διάνοιξη του Σουλού ήταν έλος και συγκέντρωνε όλες της επιφανειακές απορροές της λεκάνης.

Το ρέμα Σουλού είναι, επίσης, αποδέκτης μέρους των υπόγειων νερών που αντλούνται από το Νότιο Πεδίο και το Πεδίο Καρδιάς με στόχο την προστασία των ορυχείων καθώς και τμήματος των όμβριων υδάτων των λειτουργούντων ορυχείων (Πεδίο Μαυροπηγής,

Ανατολική Επέκταση Κομάνου, Νοτιοδυτικό Πεδίο, Οικισμός Κομάνου και Νότιο Πεδίο), τα οποία συγκεντρώνονται αρχικά στα αντλιοστάσια και στη συνέχεια διατίθενται σε αυτό. Στο ρέμα Σουλού επίσης, καταλήγουν τα κατεργασμένα υδατικά απόβλητα από τις Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων των όμορων Δήμων και των Ορυχείων Πτολεμαΐδας, καθώς και τα νερά ψύξης των ΑΗΣ Αγίου Δημητρίου και Καρδιάς, οι οποίοι καλύπτουν τις ανάγκες τους με νερό που μεταφέρεται με αγωγό από τη λίμνη Πολυφύτου, που βρίσκεται σε γειτονική υδρολογική λεκάνη. Με την ΚΥΑ 19661/1982/1999, το ρέμα Σουλού έχει χαρακτηριστεί ως «ευαίσθητος αποδέκτης» για τη διάθεση αστικών λυμάτων, ενώ η επιθυμητή ποιότητα των νερών του ρέματος Σουλού καθορίζεται από την ΚΥΑ 15782/1849/25.06.2001 (ECHMES, 2010).

Σημειώνεται ότι, κατά μήκος του ρέματος Σουλού οι αγρότες προχωρούν σε απολήψεις ύδατος με σκοπό την άρδευση των παρακείμενων καλλιεργειών τους, εξασφαλίζοντας έτσι την περαιτέρω προστασία της κοίτης του Σουλού κατά την αρδευτική περίοδο. Επιπλέον, στην περίπτωση έντονου πλημμυρικού επεισοδίου, το φαινόμενο εκτονώνεται, κατακλύζοντας τις παρακείμενες καλλιέργειες του ρέματος.

Κατά τις περιόδους 1982–1997 και 1998–2000 πραγματοποιήθηκαν από το Υπουργείο Γεωργίας μετρήσεις 30 παραμέτρων σε τρεις χαρακτηριστικές θέσεις του ρέματος Σουλού: στον ΑΗΣ Καρδιάς, στη γέφυρα Πενταβρύσου και στον ΑΗΣ Αγ. Δημητρίου. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών, φαίνεται ότι στο ρέμα Σουλού παρουσιάζονται υψηλές συγκεντρώσεις νιτρικών, νιτρωδών, αμμωνιακών, φωσφορικών και θειικών, (υψηλότερες από τις συγκεντρώσεις οδηγούς της Οδηγίας 75/440 και τις παραμετρικές τιμές της Οδηγίας 98/83). Είναι χαρακτηριστικό ότι την περίοδο 1998–2001 καταγράφηκαν και στις 3 θέσεις δειγματοληψίας (Κόμανος, ΑΗΣ Αγ. Δημητρίου και Πεντάβρυσσος) τιμές θειικών ιόντων πάνω από τα 5.2 meq/L που είναι το επιτακτικό όριο της Οδηγίας για παραγωγή πόσιμου νερού, ενώ στην τελευταία θέση σύμφωνα με επεξεργασμένα στοιχεία του ΥΠΕΧΩΔΕ για την περίοδο 2001–2002 οι μέγιστες τιμές των αμμωνιακών και των φωσφορικών ανήλθαν στα 8.7 mg/L NH_4^+ και 9.8 mg/L P_2O_5. Το ρέμα Σουλού δέχεται τις επιφανειακές απορροές των γεωργικών εκτάσεων των γύρω περιοχών καθώς και τα απόβλητα των μεγάλων βιομηχανιών της περιοχής Πτολεμαΐδας, των δημοτικών σφαγείων της Πτολεμαΐδας και τα αστικά απόβλητα 40 περίπου οικισμών των Δήμων Βερμίου,

Πτολεμαΐδας, Υψηλάντη, Μουρικίου, Κοζάνης, Αγ. Παρασκευής και Ελλησπόντου. Το ρέμα Σουλού αποτελεί τον σημαντικότερο τροφοδότη ρυπαντικών φορτίων για τη Λίμνη Βεγορίτιδα στην οποία και απορρέει. Το ρέμα Σουλού όπως και οι ποταμοί Γρεβενίτης και Σακουλέβας και η λίμνη Πετρών έχουν χαρακτηριστεί ως ευαίσθητα υδάτινα σώματα σύμφωνα με την ΚΥΑ 19661/1982/31-08-1999 (Κουτσογιάννης κ.ά., 2008).

Παράλληλα για την εναρμόνιση με την Οδηγία 76/464/ΕΟΚ αναφορικά με την ρύπανση από απορρίψεις επικίνδυνων ουσιών στο υδάτινο περιβάλλον, η Ελληνική Κυβέρνηση με την ΚΥΑ 15782/1849/20-06-2001, αποφάσισε την εκπόνηση ειδικού προγράμματος μείωσης της ρύπανσης των υδάτων των λιμνών Βεγορίτιδας, Πετρών και του ρέματος Σουλού από απορρίψεις επικίνδυνων ουσιών. Για το λόγο αυτό έχουν θεσπιστεί οι απαιτούμενοι περιβαλλοντικοί ποιοτικοί στόχοι τόσο για τις δύο λίμνες όσο και για το ρέμα Σουλού. Αξίζει να σημειωθεί πάντως πως από το 1988 έχει αρχίσει να διαφαίνεται μια ελαφριά τάση μείωσης των συγκεντρώσεων των νιτρικών στο ρέμα Σουλού.

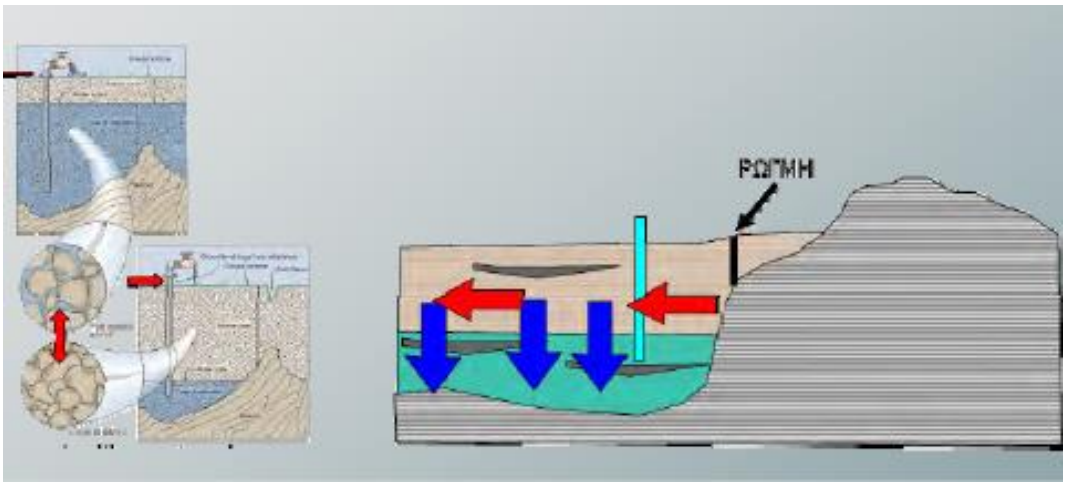
Σύμφωνα με μετρήσεις μικροοργανικών και μετάλλων που έχουν πραγματοποιηθεί από το Πανεπιστήμιο Αιγαίου για λογαριασμό του ΥΠΕΧΩΔΕ την περίοδο Φεβρουαρίου 1999 - Σεπτεμβρίου 1999, φαίνεται ότι οι συγκεντρώσεις των επικίνδυνων ουσιών είναι σημαντικά περιορισμένες και στις περισσότερες περιπτώσεις βρίσκονται σε χαμηλότερα από το όριο ανίχνευσης επίπεδα. Παράλληλα και οι συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων που έχουν μετρηθεί παρόλο που είναι μεγαλύτερες από αυτές της λίμνης Βεγορίτιδας (που είναι και ο αποδέκτης των υδάτων του ρέματος Σουλού), σε κάθε περίπτωση είναι χαμηλότερες από τα όρια που έχουν θεσπιστεί από τους ποιοτικούς στόχους της λίμνης. Αυτό καταδεικνύει ότι οι περισσότερες από τις βιομηχανικές δραστηριότητες της ευρύτερης περιοχής του ρέματος δεν παράγουν σημαντικά τοξικά φορτία.

Η εξορυκτική δραστηριότητα επιδρά στο υδατικό ισοζύγιο της περιοχής με τους εξής τρόπους (Θεοδωρίδης, 2009):

- Με την πτώση της στάθμης των υπόγειων υδάτων, λόγω υπεράντλησης από γεωτρήσεις υδρολογικής προστασίας, για την αποτροπή εισόδου του νερού μέσα στα ορυχεία.

- Με την πιθανή μεταβολή του μικροκλίματος που έχει επέλθει στην περιοχή, όπου παρατηρείται μείωση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων και επομένως μείωση στο υδατικό ισοζύγιο της περιοχής.

- Στην ευρύτερη περιοχή έχουν εμφανιστεί εδαφικές ρωγμώσεις οι οποίες οφείλονται σε μεγάλο βαθμό στην υπεράντληση του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2. Σχηματική απεικόνιση μηχανισμού ρηγμάτωσης από υπεράντληση

Στην πτώση στάθμης της περιοχής του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα συμβάλλει δραματικά η λειτουργία των ορυχείων. Η εκσκαφή των ορυχείων έχει ως αποτέλεσμα την αποκοπή των ιζηματογενών υδροφορέων και της εκφόρτισής τους στα ανοικτά πρανή των ορυχείων, με αποτέλεσμα τη φυσική αποστράγγιση.

Για την προστασία των ορυχείων γίνεται άντληση υδάτων, επειδή το βάθος της εξόρυξης προχωρά χαμηλότερα του υδροφόρου ορίζοντα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εξάντληση του υδροφόρου ορίζοντα και τη ρύπανσή του, λόγω διοχέτευσης νερού από τα ορυχεία. Διάφορα υλικά που είναι προσκολλημένα στα στείρα και τα οποία μετά την εξόρυξη έχουν πολύ λεπτό διαμερισμό, διαλύονται στο νερό και μεταφέρονται μέσω αυτού στους επιφανειακούς και τους υπόγειους αποδέκτες. Επίσης η εξόρυξη του λιγνίτη μπορεί να επηρεάσει την τοπική υδρόσφαιρα σε τέτοιο βαθμό, ώστε να είναι πολύ πιθανό στους νέους χώρους των αποθέσεων να μη σχηματισθούν ποτέ ξανά υδροφόροι ορίζοντες.

2.3.5 Επιφανειακά νερά αντλιοστασίων

Τα νερά που απορρέουν επιφανειακά στους χώρους των ορυχείων αντλούνται μέσω αντλιοστασίων και διατίθενται στο ρέμα Σουλού, έπειτα από διαύγαση σε συστοιχία διαδοχικών δεξαμενών καθίζησης καθώς είναι επιβαρυμένα με αιωρούμενα σωματίδια, τα οποία είναι γαιώδεις ύλες και σκόνη λιγνίτη. Συνολικά, λειτουργούν πέντε αντλιοστάσια επιφανειακών νερών, από ένα στα Πεδία Μαυροπηγής, Κομάνου και Καρδιάς και δύο στο Ορυχείο Νοτίου Πεδίου.

Η αντλούμενη ποσότητα νερού από τα αντλιοστάσια των ορυχείων για την τριετία 2006-2008 κατά μέσο όρο ετησίως ανήλθε σε 7.680.000 m^3. Η εν λόγω ποσότητα αξιοποιήθηκε εν μέρει για την κάλυψη των αναγκών των Ορυχείων Πτολεμαΐδας σε νερό για τη διαβροχή και πρόληψη της δημιουργίας σκόνης, καθώς και για την άρδευση των φυτεύσεων που πραγματοποιούνται στο πλαίσιο του προγράμματος περιβαλλοντικής αποκατάστασης των ορυχείων. Η πλεονάζουσα ποσότητα των αντλούμενων επιφανειακών νερών διατίθεται στο ρέμα Σουλού (ECHMES, 2010).

Σημειώνεται επίσης, ότι τους καλοκαιρινούς μήνες, το διατιθέμενο στο ρέμα Σουλού νερό, χρησιμοποιείται σχεδόν στο σύνολό του για άρδευση των όμορων προς το ρέμα Σουλού Δημοτικών Διαμερισμάτων. Την υπόλοιπη περίοδο, τα διατιθέμενα νερά επηρεάζουν ανάλογα με την ποιότητά τους τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των νερών του ρέματος Σουλού και κατ’ επέκταση την ποιότητα των νερών της λίμνης Βεγορίτιδας, στην οποία αυτό καταλήγει.

2.3.6 Υδατικά και άλλα υγρά απόβλητα

Τα υδατικά και άλλα υγρά απόβλητα των Ορυχείων Πτολεμαΐδας περιλαμβάνουν (ECHMES, 2010):

- Υδατικά αστικά απόβλητα (αστικά λύματα εγκαταστάσεων υγιεινής συγκροτημάτων κτιρίων και συνεργείων και λύματα από τη λειτουργία των συνεργείων που δεν περιέχουν ελαιώδεις και χημικές ουσίες και έχουν χαμηλές συγκεντρώσεις αιωρούμενων στερεών).

- Υδατικά απόβλητα με μεγάλες συγκεντρώσεις αιωρούμενων στερεών, ελαιωδών και χημικών ουσιών.
- Χρησιμοποιημένα ορυκτέλαια και λιπαντικά.

Τα υδατικά αστικά απόβλητα υφίστανται επεξεργασία στις ακόλουθες Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων – Ε.Ε.Λ. (βιολογικοί καθαρισμοί) που βρίσκονται εντός των χώρων των ορυχείων:

- Στο Κύριο Πεδίο λειτουργούν δύο Ε.Ε.Λ. στην περιοχή του Ορυχείου Βόρειου Πεδίου και στην περιοχή του Ορυχείου Κομάνου.
- Στο Πεδίο Καρδιάς, Ορυχείο Νοτιοδυτικού Πεδίου (Υψηλάντη) λειτουργεί μια Ε.Ε.Λ.
- Στο Νότιο Πεδίο λειτουργεί μια Ε.Ε.Λ.

Τα υγρά επεξεργασμένα απόβλητα από τις Ε.Ε.Λ. των Ορυχείων Πτολεμαΐδας διατίθενται μέσω δικτύου σωληνώσεων σε κανάλια και μέσω αυτών οδηγούνται στο ρέμα Σουλού.

Στην κατηγορία των λοιπών υγρών αποβλήτων περιλαμβάνονται τα υγρά απόβλητα που παράγονται κατά τη λειτουργία των ορυχείων και περιέχουν ελαιώδεις ή/και χημικές ουσίες. Αυτά τα υγρά απόβλητα υφίστανται επεξεργασία στην Ειδική Μονάδα Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων (Ε.Μ.Ε.Υ.Α.) των Ορυχείων Πτολεμαΐδας.

2.3.7 Όξινες και λοιπές απορροές ορυχείων

Η κύρια πηγή ρύπανσης επιφανειακών υδάτων παγκοσμίως προέρχεται από την εξορυκτική δραστηριότητα μετάλλων και άνθρακα και τις σχετιζόμενες δραστηριότητες επεξεργασίας, οι οποίες οδηγούν στη δημιουργία όξινων και επιβαρυμένων με βαρέα μέταλλα υδάτων, ως αποτέλεσμα της έκθεσης των αποβλήτων εξόρυξης στο περιβάλλον και της οξείδωσής τους μέσω χημικών και μικροβιολογικών διεργασιών που ελευθερώνουν τα βαρέα μέταλλα που βρισκόταν δεσμευμένα μέσα στα υλικά. Όταν θειούχα ορυκτά, κυρίως πυριτικά, αντιδρούν με αέρα και νερό, δημιουργούν θειικό οξύ το οποίο διαλυτοποιεί βαρέα μέταλλα και μεταλλικά ιόντα από το πέτρωμα. Νερό υψηλής οξύτητας μπορεί να παράγει πολύ υψηλής

συγκέντρωσης ολικά διαλυμένα στερεά (TDS) και να απελευθερώσει ιόντα βαρέων μετάλλων σε πολύ υψηλές συγκεντρώσεις. Η απελευθέρωση αυτού του υψηλά όξινου διαλύματος το οποίο περιέχει μεταλλικά ιόντα είναι γνωστό σαν όξινη απορροή ορυχείων (Acid Mine Drainage) θεωρείται ως ένα από τα μεγαλύτερα περιβαλλοντικά προβλήματα που σχετίζεται με την εξόρυξη άνθρακα, μιας και αποτελεί την κύρια πηγή ρύπανσης και υποβάθμισης των επιφανειακών και υπογείων υδάτινων πόρων (Jachimko, 2012; Jennings et al., 2008; Sfikas et al., 2013).

Επιπλέον, η συνεχής απορροή αποβλήτων με υψηλό ρυπαντικό φορτίο από περιοχές με ενεργούς και εγκαταλειμμένους χώρους εξόρυξης (όξινες απορροές) αλλά και από περιοχές όπου αποτίθενται τα παραπροϊόντα της εξόρυξης συνεισφέρουν στην επιβάρυνση των υδάτινων πόρων, επιφανειακών και υπογείων, επηρεάζοντας με αυτό τον τρόπο άμεσα αλλά και μακροπρόθεσμα την ασφάλεια και την υγεία των οικοσυστημάτων και των εμπλεκόμενων κοινωνιών. Παρόλα αυτά δεν υπάρχουν επαρκή αξιόπιστα στοιχεία σχετικά με τις όξινες απορροές από τους χώρους εξόρυξης σε ευρωπαϊκό αλλά και διεθνές επίπεδο, ειδικά για τα εγκαταλειμμένα ορυχεία.

Στην περιοχή της Δυτ. Μακεδονίας η έκταση του φαινομένου της ρύπανσης των υδάτινων πόρων από την εξόρυξη του λιγνίτη σε μεγάλο βαθμό παραμένει άγνωστη, λόγω έλλειψης σχετικών ερευνητικών μελετών. Επιπλέον, πρέπει να σημειωθεί ότι αρκετοί από τους παρακείμενους στα ορυχεία υδάτινους πόρους χρησιμοποιούνται για τροφοδοσία πόσιμου νερού στους κατοίκους της περιοχής.

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι, σήμερα το ρέμα Σουλού αποτελεί τον αποδέκτη διαφορετικών δραστηριοτήτων που σχετίζονται με την εξορυκτική δραστηριότητα αλλά και τη λειτουργία των ατμοηλεκτρικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην περιοχή. Η σπουδαιότητα του ρέματος αυτού για την περιβαλλοντική ισορροπία της περιοχής είναι μεγάλη, αφού τα νερά του χρησιμοποιούνται για άρδευση, ενώ τελικά εκβάλει σε ένα άλλο περιβαλλοντικά ευαίσθητο λιμναίο αποδέκτη της περιοχής (Βεγορίτιδα). Ως συνέπεια, η συνεχής παρακολούθηση της ποιότητας των υδάτων του ρέματος Σουλού είναι απαραίτητη όχι μόνο για τον έλεγχο και περιορισμό πιθανών επεισοδίων ρύπανσης αλλά και για την διατήρηση μιας ικανοποιητικής περιβαλλοντικής ισορροπίας στην ευρύτερη περιοχή μελέτης.

2.3.8 Υδατικά απόβλητα από ΑΗΣ Αγ. Δημητρίου

Στον ατμοληλεκτρικό σταθμό (ΑΗΣ) Αγ. Δημητρίου της ΔΕΗ Α.Ε. υπάρχουν 4 ανεξάρτητα συστήματα για την επεξεργασία των αποβαλλόμενων υγρών αποβλήτων (Ισμαηλίδης, 2005):

- Συγκρότημα εξουδετέρωσης υγρών βιομηχανικών απόνερων που προέρχονται από τις αναγεννήσεις των ιοντοεναλλακτικών ρητίνων που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή του αφαλατωμένου νερού και τον καθαρισμό του συμπυκνώματος των Μονάδων.

- Συγκρότημα βιολογικού καθαρισμού αστικών λυμάτων, το οποίο περιλαμβάνει δύο κλάδους με ικανότητα επεξεργασίας μέχρι 100 m^3/ ημέρα. Η αρχή λειτουργίας του συστήματος στηρίζεται στη μέθοδο «παρατεταμένου αερισμού ενεργοποιημένης λάσπης». Προ του συγκροτήματος αυτού υπάρχει εγκατάστασης συλλογής των λιπών και λαδιών.

- Συγκρότημα κατεργασίας βιομηχανικών υγρών απονέρων, ικανότητας κατεργασίας 650 m^3/h, στο οποίο γίνεται εξουδετέρωση, κροκίδωση και μερική διαύγαση με καθίζηση, στα βιομηχανικά απόνερα του σταθμού (υπερχείλιση τεφρολεκανών, νερά από την ψύξη των μηχανημάτων, βρόχινα νερά, κλπ).

- Συγκρότημα τελικής επεξεργασίας των υγρών βιομηχανικών αποβλήτων και των νερών της βροχής του σταθμού. Στο συγκρότημα αυτό, που είναι ικανότητας 2000 m^3/h, συγκεντρώνονται όλα τα απόβλητα του σταθμού, δηλαδή τα ήδη κατεργασμένα απόβλητα από τα συστήματα βιολογικού καθαρισμού και από την μονάδα επεξεργασίας των βιομηχανικών υγρών αποβλήτων, τα απόνερα του συστήματος λιγνίτη καθώς και οι υπερχειλίσεις των πύργων ψύξης. Στις εγκαταστάσεις του γίνεται πρωτοβάθμια καθίζηση, κροκίδωση, δευτεροβάθμια καθίζηση και τελική ρύθμιση της οξύτητας των επεξεργασμένων απόνερων (pH), ούτως ώστε τα εξερχόμενα από το σταθμό νερά να είναι κατάλληλα για όλες τις χρήσεις πλην πόσης.

Αποδέκτης των εξερχόμενων ρευμάτων επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων είναι το ρέμα Σουλού.

3 ΣΚΟΠΙΜΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Η κύρια πηγή ρύπανσης επιφανειακών υδάτων παγκοσμίως προέρχεται από την εξορυκτική δραστηριότητα μετάλλων και άνθρακα και τις σχετιζόμενες δραστηριότητες επεξεργασίας, οι οποίες οδηγούν στη δημιουργία όξινων και επιβαρυμένων με βαρέα μέταλλα υδάτων. Διάφοροι ερευνητές έχουν μελετήσει με το φαινόμενο της όξινης απορροής ορυχείων και τις επιπτώσεις του στους υδατικούς πόρους (Balistrieri et al., 2007; Egiebor and Oni, 2007; Tiwary 2001; Chon and Kim, 2001; Johnson and Hallberg, 2005, Valente and Gomes, 2009; Dold et al., 2009; Tutu et al., 2008; Sarmiento et al., 2008, Moncur et al., 2006; Hobbs et al., 2008; Jachimko, 2012; Jennings et al., 2008).

Κάποιοι άλλοι μελετητές έχουν ερευνήσει τη ρύπανση που προκύπτει από τις απορροές ορυχείων σε σχέση με φυσικά φαινόμενα όπως βροχή και πλημμύρες (Lin et al., 2007; Kim and Kim, 2004; Bowen et al., 1998, Razowska, 2001) καθώς και τη συσχέτιση τους με τις κλιματικές αλλαγές (Nordstrom, 2009).

Υδροχημικά, υδρογεωλογικά, γεωχημικά, υδραυλικά και υπολογιστικά μοντέλα τα οποία προσεγγίζουν από διαφορετικές πλευρές το φαινόμενο της συμπεριφοράς της ρύπανσης από την εξορυκτική δραστηριότητα και των απορροών σε υδατικούς αποδέκτες έχουν αναπτυχθεί από ερευνητές (Younger, 2000; Kohfahl et al.; 2004; Kargbo and He, 2004; Aroba et al., 2007; Burke and Younger, 2000; Dumpleton et al., 2001; Wycisk et al., 2009; Hoth et al., 2001; Banwart and Malmstrom, 2001; Schwartz and Kgomanyane, 2007; Norman et al., 2008). Τα περισσότερα μοντέλα έχουν σαν κύριο στόχο την ερμηνεία και πρόβλεψη συγκεκριμένων παραμέτρων της ρύπανσης από ορυχεία σε υδατικούς αποδέκτες.

Συνεχή συστήματα παρακολούθησης για τον χαρακτηρισμό της ποιότητας των υδάτων έχουν εγκατασταθεί σε ένα πλήθος μελετών που πραγματοποιήθηκαν σε περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές και διάφορες μέθοδοι στατιστικής ανάλυσης έχουν χρησιμοποιηθεί για την επεξεργασία των δεδομένων. Μετρήσεις από επιφανειακά ύδατα στη λεκάνη απορροής του ποταμού Νέστου αναλύθηκαν για τον εντοπισμό πιθανών τάσεων με χρήση του μη παραμετρικού κριτηρίου του Spearman (Margoni and Psilovikos, 2010). Οι επιπτώσεις της εξόρυξης λιγνίτη στην ποιότητα των υδάτων στην περιοχή της Πτολεμαΐδας μελετήθηκαν

από άλλους ερευνητές (Psilovikos et al., 2011) με τη χρήση γραμμικών μοντέλων ελαχίστων τετραγώνων για την προσομοίωση των πειραματικών δεδομένων με το χρόνο.

Σε μια άλλη σχετική μελέτη (Bani Hani et al., 2005), χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τον ποταμό Zarka (Ιορδανία) από την περίοδο 1988-2000 για την πρόβλεψη της ποιότητας των υδάτων του ταμιευτήρα King Talal. Το εκθετικό μοντέλο έδωσε το μικρότερο ποσοστό μέσου σφάλματος για την πρόβλεψη της συγκέντρωσης των ολικών αιωρούμενων σωματιδίων (TSS) και του ολικού φωσφόρου (T-P), ενώ το μοντέλο ARIMA έδωσε το μικρότερο ποσοστό μέσου σφάλματος για την πρόβλεψη του BOD_5. Το COD περιγράφηκε καλύτερα από δευτεροβάθμιο μοντέλο, το ολικό άζωτο (T-N) προβλέφθηκε καλύτερα από πρωτοβάθμιο μοντέλο και η μέθοδος της αυτόματης παλινδρόμησης χρησιμοποιήθηκε για την πρόβλεψη της παροχής.

Στο πεδίο της ανάπτυξης μοντέλων και συστημάτων προειδοποίησης για εκδήλωση ακραίων καιρικών φαινομένων (π.χ. πλημμύρες) για αποφυγή των επιπτώσεων αυτών στους υδάτινους αποδέκτες έχει σημειωθεί πρόοδος από διάφορες ερευνητικές προσπάθειες (Basha et al., 2008; Basha and Rus, 2007; Snell and Gregory, 2002).

Τέλος, σχετική ερευνητική πρόοδος έχει σημειωθεί αναφορικά με την συνεχή παρακολούθηση της ποιότητας υδάτινων πόρων, κυρίως σε ποτάμια και λίμνες, με χρήση αυτογραφικών συστημάτων καθώς και με την ανάπτυξη σχετικών μοντέλων παρακολούθησης (Mariolakos et al., 2007; Tzimopoulos and Ginidi, 2005; Hadjibiros et al., 2005; Leeks et al., 1997; Eatherall et al., 1998).

Θα πρέπει να τονιστεί ότι ο στόχος των ερευνητικών προσπαθειών είναι όχι μόνο η καταγραφή της ποιότητας των νερών σε μια περιοχή, αλλά κυρίως η ανάπτυξη κατάλληλων μαθηματικών εργαλείων για την παρακολούθηση και την πρόβλεψη πιθανών επεισοδίων ρύπανσης, έτσι ώστε στη συνέχεια να υπάρχει δυνατότητα για την πρόληψη αλλά και τη λήψη κατάλληλων μέτρων. Στο πλαίσιο αυτό όμως, σημαντικό περιοριστικό παράγοντα αποτελεί η διαχείριση ενός μεγάλου αριθμού δεδομένων από τα όργανα καταγραφής, που μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένες εκτιμήσεις σχετικά με την τάση που παρατηρείται σε διαφορετικές παραμέτρους ποιότητας.

Ο βασικός στόχος της ερευνητικής αυτής προσπάθειας είναι να παρέχει αποτελεσματική παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο των πηγών ρύπανσης που σχετίζονται με εξορυκτικές δραστηριότητες λιγνίτη αλλά και η ανάπτυξη μιας κατάλληλης μεθοδολογίας για την εκτίμηση πιθανών επεισοδίων ρύπανσης και την πρόβλεψή τους με στόχο την έγκαιρη αντιμετώπιση. Η παρούσα διδακτορική έρευνα εστιάζεται στη μελέτη για την ανάπτυξη ενός συστήματος με στόχο τη συνεχή παρακολούθηση της οικολογικής ποιότητας των απορροών από εξορυκτικές δραστηριότητες λιγνίτη στην περιοχή της Δυτικής Μακεδονίας αλλά και την πρόβλεψη των επιπτώσεών τους στους παρακείμενους υδατικούς πόρους με την χρήση κατάλληλου τεχνολογικού εξοπλισμού μέτρησης, καταγραφής και μετάδοσης των αποτελεσμάτων.

Βασικό στόχο αποτελεί η ανάπτυξη ενός μοντέλου πρόβλεψης για την παρακολούθηση της σταθερότητας των αποθέσεων ορυχείων λιγνίτη και της ποιότητας των υδάτινων πόρων που γειτνιάζουν με εξορυκτικές δραστηριότητες λιγνίτη ώστε να αναγνωριστούν σημειακές και διάχυτες πηγές ρύπανσης οι οποίες σχετίζονται με τις όξινες ή άλλες ρυπαντικές απορροές των ορυχείων σε συγκεκριμένες περιπτώσεις (π.χ. εκδήλωσης εκτάκτων φυσικών φαινομένων).

Η ερευνητική αυτή εργασία βασίζεται στο περιεχόμενο της Οδηγίας Πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης (2000/60/ΕΚ) για τους υδάτινους πόρους καθώς και σε άλλες Οδηγίες της Ε.Ε. σχετικές με τη διαφυγή τοξικών αποβλήτων και επικίνδυνων ουσιών, οι οποίες δηλώνουν την ανάγκη για «λήψη μέτρων πρόληψης σημαντικής διαρροής ρυπαντών από τεχνικές εγκαταστάσεις» (π.χ. όξινες απορροές) με την εγκατάσταση «συστημάτων ανίχνευσης ή ειδοποίησης για τέτοια περιστατικά» (π.χ. ασύρματα δίκτυα αισθητήρων). Η εγκατάσταση ενός συστήματος περιβαλλοντικής παρακολούθησης το οποίο βασίζεται σε τεχνολογίες ασύρματου δικτύου αισθητήρων διευρύνει τη δυνατότητα αξιολόγησης της έκθεσης σε περιβαλλοντικούς κινδύνους και κινδύνους υγείας του πληθυσμού σχετικούς με τις ρυπαντικές απορροές των ορυχείων λιγνίτη.

4 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

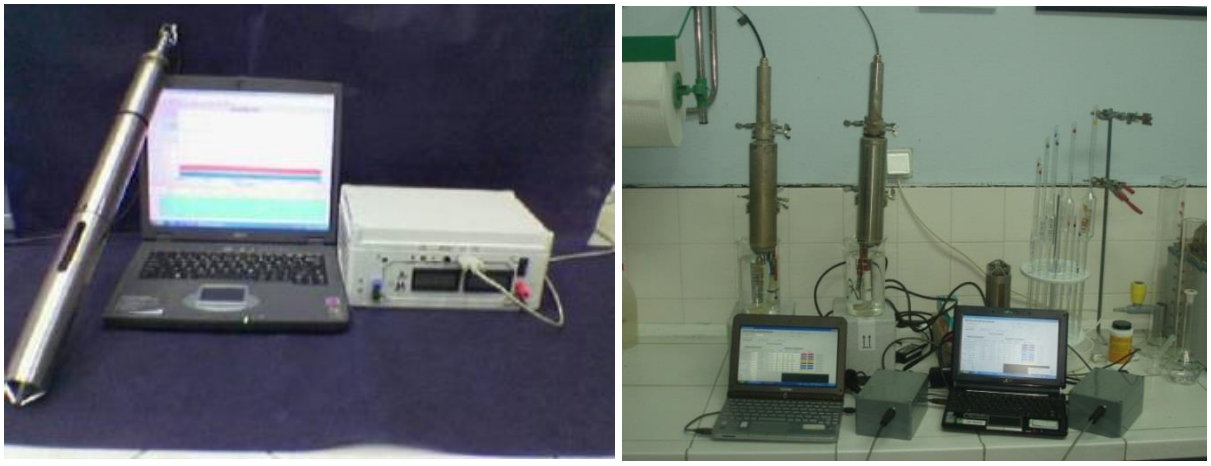
4.1 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ – ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

4.1.1 Περιγραφή πολυπαραμετρικών συστημάτων μέτρησης

Για την παρακολούθηση της ποιότητας των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων στην περιοχή μελέτης χρησιμοποιήθηκαν τρία συστήματα μέτρησης πολυπαραμετρικών αισθητήρων κατασκευασμένα από την εταιρία TerraMentor Ε.Ο.Ο.Σ. (TerraMentor, 2009).

Συγκεκριμένα, κάθε σύστημα μέτρησης αποτελούνταν από τα ακόλουθα στοιχεία (βλ. Εικόνα 2):

- Φωρατή με προσαρμοσμένα ηλεκτρόδια/αισθητήρες
- Καλώδιο πόντισης
- Μονάδα ελέγχου
- Φορητό υπολογιστή
- Ασύρματη σύνδεση διαδικτύου (internet)



Εικόνα 2. Πλήρες σύστημα μέτρησης πολυπαραμετρικών αισθητήρων

Το κάθε σύστημα μπορεί να μετρήσει ταυτόχρονα μέχρι 15 φυσικοχημικές παραμέτρους. Οι συγκεντρώσεις προσδιορίζονται μέσω ιοντικών επιλεκτικών ηλεκτροδίων τα οποία μαζί με τους αισθητήρες προσαρμόζονται στο κάτω άκρο του φωρατή.

Για τις ανάγκες της έρευνας επιλέχθηκαν για μέτρηση, με κριτήρια τα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης καθώς και την τεχνολογική διαθεσιμότητα των συστημάτων μέτρησης, οι εξής παράμετροι:

- pH
- Αγωγιμότητα
- Νιτρικά ιόντα (NO_3^-)
- Χλωριόντα (Cl^-)
- Θειικά ιόντα (SO_4^{-2})
- Θερμοκρασία

Τα ανωτέρω συστήματα εφαρμόστηκαν σε ένα δίκτυο τριών σταθμών παρακολούθησης με ασύρματη τηλεμετρική σύνδεση (3G ADSM) για την μεταφορά δεδομένων μέσω διαδικτύου. Επιπλέον το σύστημα περιλάμβανε ειδικό λογισμικό για την αυτόματη καταγραφή και αποθήκευση μετρήσεων, βαθμονόμηση ηλεκτροδίων, διεξαγωγή διαγνωστικών ελέγχων και επαλήθευση, επεξεργασία και παρουσίαση των δεδομένων. Το λογισμικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα σύστημα προειδοποίησης με αυτόματες ειδοποιήσεις (π.χ. μέσω αποστολής email) όταν οι συγκεντρώσεις του ρυπαντικού φορτίου υπερβούν προκαθορισμένα οριακά επίπεδα (βλ. Εικόνα 3).

Εικόνα 3. Απεικόνιση διεπαφής χρήστη λογισμικού συστημάτων μέτρησης

Το λειτουργικό λογισμικό διαθέτει επιπλέον τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Παραθυρική εφαρμογή 32-bit, πλήρως επεκτάσιμη.
- Μέτρηση/καταγραφή 15 φυσικοχημικών παραμέτρων.
- Ρυθμίσεις άνω και κάτω ορίων συναγερμού για κάθε μετρούμενη παράμετρο.
- Αυτόματη αποστολή email σε περίπτωση υπέρβασης των ορίων συναγερμού για όλους τους αποδέκτες.
- Δυνατότητα αλλαγής ρυθμού καταγραφής (από 3 δείγματα ανά 1 δευτερόλεπτο).
- Αριθμητική και γραφική απεικόνιση των online μετρήσεων.
- Αυτόματη καταγραφή σε αρχεία και δυνατότητα εισαγωγής των σε φύλα Microsoft Excel.
- Δυνατότητα μεταφοράς των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο μέσω δικτύου GSM ή δικτύου ΟΤΕ.
- Ποιοτικό έλεγχο των δεδομένων και των επιμέρους αισθητήρων και ηλεκτροδίων.
- Αυτόματη – ελεγχόμενη έναρξη και τερματισμό λειτουργίας του αισθητήρα.

- Συνεχή ψηφιακή ένδειξη (σε πραγματικό χρόνο) της συγκέντρωσης στην οθόνη και συνεχή αναλογική και ψηφιακή έξοδος σήματος (σε πραγματικό χρόνο).

  Μονάδες ένδειξης: mV, mg/L

  Ακρίβεια ανίχνευσης: ± 1 mV

- Χρόνος πραγματοποίησης μέτρησης: συνεχής μέτρηση (από 3 δείγματα ανά 1 δευτερόλεπτο) σε πραγματικό χρόνο για την δυνατότητα εντοπισμού υπερβάσεων προερχόμενων από μικρής διάρκειας περιστατικά ρύπανσης.
- Δυνατότητα βαθμονόμησης των ηλεκτροδίων και αποθήκευσης του ιστορικού βαθμονόμησης.

4.1.2 Στοιχεία λειτουργίας πολυπαραμετρικών συστημάτων μέτρησης

Η αρχή λειτουργίας του φωρατή μέτρησης φυσικοχημικών παραμέτρων βασίζεται στις ποτενσιομετρικές μετρήσεις (Sotiropoulos et al., 2007).

Η βάση για όλες τις ποτενσιομετρικές μετρήσεις με τη χρήση των Ιοντικών Επιλεκτικών Ηλεκτροδίων είναι η εξίσωση Nernst, που έχει την εμπειρική φόρμουλα:

$$E=E'\pm\theta \lg \alpha_x$$

όπου:

E– η ηλεκτρεγερτική δύναμη emf του ηλεκτροδίου (ηλεκτροχημικού στοιχείου) του κυκλώματος μέτρησης,

E' – *η* ηλεκτρεγερτική δύναμη στο διάλυμα, όπου η ενεργότητα των μετρούμενων ανιόντων ή κατιόντων είναι a_x= 1 ($\lg a_x$= 0),

±θ – ο παράγοντας της θερμοκρασίας (καμπύλη Nernst), η οποία έχει το πρόσημο (+) για τα κατιόντα και το πρόσημο (–) για τα ανιόντα.

Η αρχή των μετρήσεων των ιοντικών ενεργοτήτων (ionactivities) βασίζεται στην άμεση καταγραφή της ηλεκτρεγερτικής δύναμης (emf) μέσω του πολυηλεκτροδιακού φωρατή (multi-electrode electrochemical element - MEE).

Μέσω της άμεσης ποτενσιομετρικής μεθόδου, καθορίζεται η ενεργότητα των ελεύθερων ιόντων (pH, αγωγιμότητα, Cl^-, NO_3^-, SO_4^{-2}) η οποία είναι ανάλογη της συγκέντρωσής τους.

Ο πολυπαραμετρικός αισθητήρας, φωρατής, είναι εξοπλισμένος με ένα πολυκάναλο ποτενσιόμετρο. Η αρχή των μετρήσεων των ιοντικών ενεργοτήτων (ionactivities) βασίζεται στην άμεση καταγραφή της ηλεκτρεγερτικής δύναμης (emf) μέσω του πολυκάναλου φωρατή (multi-electrode electrochemical element -MEE), ο οποίος φέρει από 8 ηλεκτρόδια μέτρησης (measurement electrodes - ME) και ένα Ηλεκτρόδιο Αναφοράς (Reference Electrode - RE), το οποίο είναι κοινό για όλα τα ηλεκτρόδια μέτρησης. Ο φωρατής αποτελείται από μία ποτενσιομετρική κυψέλη διαμέσου της οποίας λαμβάνει χώρα συνεχής τροφοδοσία του δείγματος. Τα ηλεκτρόδια μέτρησης συνδέονται με την είσοδο υψηλής αντίστασης (1013 Ohm) του ποτενσιόμετρου, και το ηλεκτρόδιο αναφοράς συνδέεται με την είσοδο χαμηλής αντίστασης. Το ποτενσιόμετρο παρέχει ακρίβεια μετρήσεων emf ±1 mV και ευαισθησία 0.1 mV.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του φωρατή και των ηλεκτροδίων παρουσιάζονται στους ακόλουθους Πίνακες 1 και 2 (TerraMentor, 2009).

Πίνακας 1. Τεχνικά χαρακτηριστικά φωρατή

Εξωτερική διάμετρος συσκευής	64 mm
Μέγιστο μήκος συσκευής	0.6 m
Μέγιστη πίεση	25 kg/cm^2
Μέγιστη θερμοκρασία	60 C^o
Ελάχιστη διάμετρος γεώτρησης	60 mm
Βάθος πόντισης αισθητήρα	0 – 150 m

Πίνακας 2. Χαρακτηριστικά επιλεκτικών ιοντικών ηλεκτροδίων και αισθητήρων φυσικών παραμέτρων

Παράμετρος	**Εύρος**	**Ακρίβεια**	**Ανάλυση**	**Διαστάσεις (Πολυκάναλο σύστημα: 500 mm x 49 mm)**
Θερμοκρασία	-2 έως +40 ^{o}C	±0.01 ^{o}C	0.001 ^{o}C	95 mm x 9 mm
Αγωγιμότητα	1 - 10 S/m 0.1 - 1 S/m 0.01 - 0.1 S/m	±0.03% του εύρους	0.01% του εύρους	95 mm x 14 mm
pH	0 - 14 μονάδες pH	±0.05 μονάδες pH	0.01 μονάδες pH	175 mm x 8 mm
NO_3^-	6.1 - 50000 mg/L	0.1	0.01	175 mm x 8 mm
Cl^-	3.5 - 30000 mg/L	0.1	0.01	175 mm x 8 mm
SO_4^{-2}	0.3 - 3000 mg/L	0.1	0.01	175 mm x 8 mm

4.1.3 Βαθμονόμηση πολυπαραμετρικών συστημάτων μέτρησης

Για την εύρυθμη λειτουργία των συστημάτων μέτρησης απαιτήθηκε η αποσύνδεση των φωρατών και η μεταφορά τους στο εργαστήριο για βαθμονόμηση των ηλεκτροδίων με μηνιαία περίπου συχνότητα. Η βαθμονόμηση πραγματοποιείται ξεχωριστά για κάθε ένα ηλεκτρόδιο με βάση πρότυπα διαλύματα γνωστής συγκέντρωσης και η διορθωμένη εξίσωση που προκύπτει αποθηκεύεται στο λογισμικό του εκάστοτε συστήματος (βλ. Πίνακα 3).

Πίνακας 3. Περιοδική βαθμονόμηση ηλεκτροδίων/αισθητήρων

Α/Α	**Ηλεκτρόδιο/αισθητήρας προς βαθμονόμηση**	**Μέθοδος βαθμονόμησης/ελέγχου**
1	pH	Πρότυπο διάλυμα (buffer) pH 4 Πρότυπο διάλυμα (buffer) pH 7
2	Νιτρικά ιόντα (NO_3^-)	Πρότυπο διάλυμα $NaNO_3$ 0.001 M Πρότυπο διάλυμα $NaNO_3$ 0.01 M Πρότυπο διάλυμα $NaNO_3$ 0.1 M
3	Χλωριόντα (Cl^-)	Πρότυπο διάλυμα NaCl 0.001 M Πρότυπο διάλυμα NaCl 0.01 M Πρότυπο διάλυμα NaCl 0.1 M
4	Αγωγιμότητα	Πρότυπο διάλυμα KCl 0.002 M Πρότυπο διάλυμα KCl 0.005 M Έλεγχος μέτρησης Βαθμονόμηση από τον προμηθευτή
5	Θειικά ιόντα (SO_4^{-2})	Βαθμονόμηση από τον προμηθευτή
6	Θερμοκρασία	Έλεγχος από τον προμηθευτή

4.1.4 Προστασία πολυπαραμετρικών συστημάτων μέτρησης

Για την εξασφάλιση της εύρυθμης λειτουργίας των συστημάτων μέτρησης μελετήθηκαν, σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν ειδικά στεγανοποιημένοι κλιματιζόμενοι κλωβοί διαστάσεων 1m x 1m x 1m (βλ. Εικόνα 4). Οι κλωβοί παρείχαν την απαραίτητη προστασία των συστημάτων μέτρησης από:

- Έκθεση σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες (βροχή, χιόνι κτλ),
- Έκθεση σε ακραίες θερμοκρασιακές μεταβολές (>40 ^oC κατά το καλοκαίρι ή < -5 ^oC κατά το χειμώνα) που δύναται να επηρεάσουν τη λειτουργία των συστημάτων,
- Βανδαλισμούς, κλοπή εξοπλισμού κτλ

Εικόνα 4. Κλωβοί προστασίας πολυπαραμετρικών συστημάτων μέτρησης

4.1.5 Εργαστηριακός μετρητικός εξοπλισμός

Εκτός των μετρήσεων που καταγράφηκαν από το δίκτυο των πολυπαραμετρικών συστημάτων πραγματοποιήθηκαν επιπλέον και ασυνεχείς αναλύσεις των αντίστοιχων φυσικοχημικών παραμέτρων (pH, αγωγιμότητα, NO_3^-, Cl^- και SO_4^{-2}) σε εργαστηριακή κλίμακα έπειτα από σχετική δειγματοληψία, με σκοπό την επικύρωση των μοντέλων πρόβλεψης που αναπτύχθηκαν.

Οι παραπάνω αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν στο διαπιστευμένο εργαστήριο του Κέντρου Περιβάλλοντος της Περιφέρειας Δυτικής Μακεδονίας στην Πτολεμαΐδα με χρήση του ακόλουθου εργαστηριακού εξοπλισμού (βλ. Εικόνα 5):

- UV/Vis Spectrophotometer HITACHI MODEL U-2001
- Merck NOVA 60 Spectrophotometer
- Πεχάμετρο – αγωγιμόμετρο CRISON MultimeterMM41

Εικόνα 5. Εργαστηριακός εξοπλισμός μέτρησης φυσικοχημικών παραμέτρων

Οι πρότυπες μέθοδοι που εφαρμόστηκαν για την μέτρηση κάθε φυσικοχημικής παραμέτρου στο εργαστήριο παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακα 4.

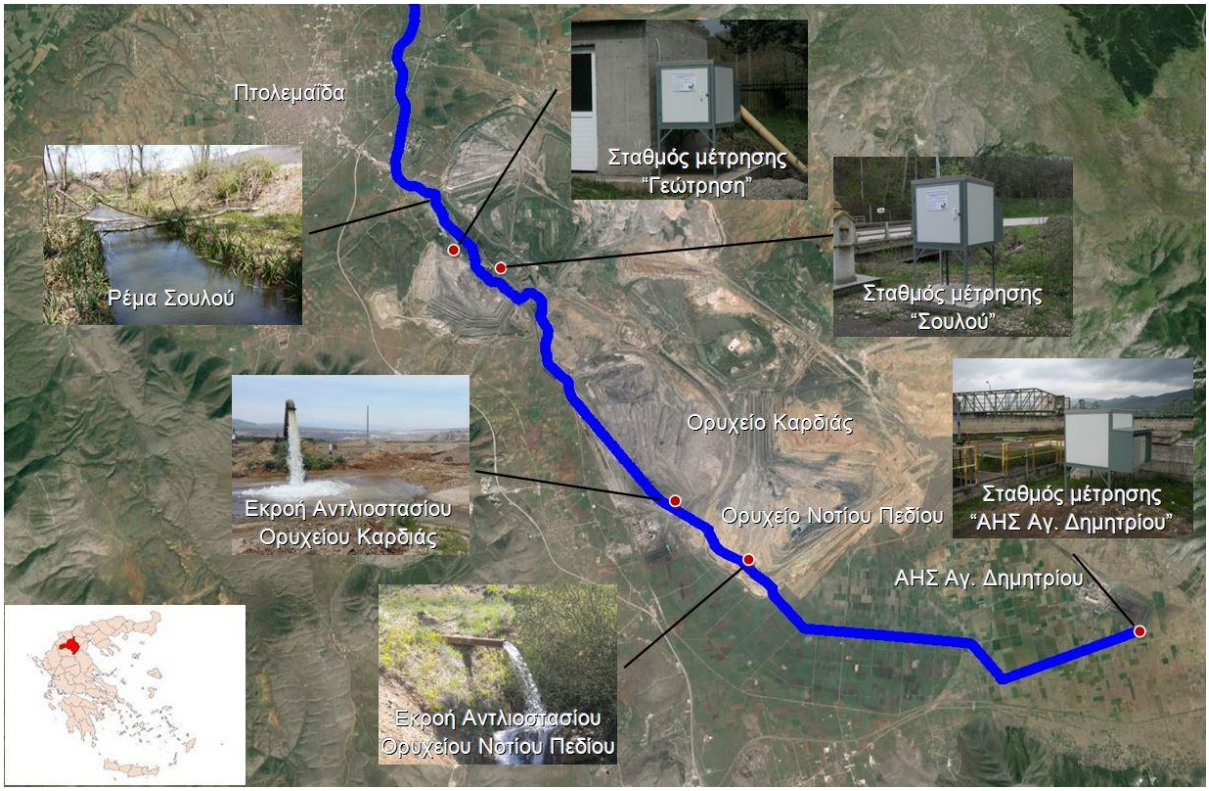
Πίνακας 4. Εφαρμοζόμενες πρότυπες μέθοδοι ασυνεχών εργαστηριακών αναλύσεων ανά παράμετρο

Μετρούμενη φυσικοχημική παράμετρος	**Πρότυπη μέθοδος ανάλυσης**
Αγωγιμότητα	APHA* 2510 B, 22^{η} έκδοση, 2012
pH	APHA* 4500-H^+B, 22^{η} έκδοση, 2012
NO_3^-	APHA* 4500-NO_3^- B,22^{η} έκδοση, 2012
SO_4^{2-}	Merck Method 064 (analogous to EPA 375.4 and APHA 4500-SO_4^{2-} E)
Cl^-	Merck Methods 110 and 063 (analogous to EPA 325.1 and APHA 4500-Cl^- E)

4.1.6 Εγκατάσταση δικτύου πολυπαραμετρικών συστημάτων

Μετά από έρευνα της ευρύτερης περιοχής των λιγνιτικών ορυχείων, μελέτη των διαθέσιμων στοιχείων και διαβούλευση με αρμόδια στελέχη της ΔΕΗ Α.Ε., επιλέχθηκε η εγκατάσταση των μετρητικών σταθμών σε τρία σημεία, όπως αυτά παρουσιάζονται παρακάτω στο Σχήμα 3. Τα σημεία εγκατάστασης των σταθμών μέτρησης είναι τα ακόλουθα:

- Γεφυράκι στο ρέμα Σουλού εντός της περιοχής ορυχείων Πτολεμαΐδας (εφεξής "Σουλού")
- Γεώτρηση εντός της περιοχής ορυχείων Πτολεμαΐδας (εφεξής "Γεώτρηση")
- Έξοδος μονάδας επεξεργασίας υγρών αποβλήτων ΑΗΣ Αγίου Δημητρίου (εφεξής "ΑΗΣ Αγ. Δημητρίου")



Σχήμα 3. Χωροθέτηση δικτύου σταθμών μέτρησης ποιότητας υδάτων στην περιοχή των ορυχείων λιγνίτη Πτολεμαΐδας

Η αρχική εγκατάσταση των συστημάτων μέτρησης στα τρία σημεία πραγματοποιήθηκε εντός του Μαρτίου 2010.

Τα βασικά κριτήρια χωροθέτησης των σταθμών μέτρησης ήταν, μεταξύ άλλων, η εγγύτητα στις περιοχές των λιγνιτικών ορυχείων, η εγγύτητα σε επιφανειακά και υπόγεια νερά, ιστορικό παλιότερων ασυνεχών μετρήσεων, η προσβασιμότητα, η δυνατότητα ηλεκτροδότησης, φύλαξης κτλ.

Στα πλαίσια αυτά δημιουργήθηκαν δύο χάρτες της ευρύτερης περιοχής μελέτης (βλ. Παράρτημα Α) με αποτύπωση των πιθανών πηγών ρύπανσης καθώς και άλλων χρήσιμων περιβαλλοντικών πληροφοριών, με έμφαση στην ρύπανση των υδατικών πόρων. Η χρησιμότητα των παραπάνω χαρτών αφορά αφενός στην κατηγοριοποίηση των πιθανών περιβαλλοντικών πιέσεων από διάφορες πηγές ρύπανσης και αφετέρου στην ορθή χωροθέτηση και επιλογή της εγκατάστασης του δικτύου σταθμών μέτρησης ποιότητας υδάτων (Σφήκας, 2011).

Διευκρινίζεται ότι παρόλο που υπήρχε η δυνατότητα για μετεγκατάσταση ενός ή περισσοτέρων συστημάτων σε άλλες θέσεις, αυτό δεν κρίθηκε σκόπιμο (λαμβάνοντας υπόψη και τις τεχνικές δυσκολίες που αυτό συνεπάγεται) για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής.

4.1.7 Προέλευση μετρήσεων και λοιπών δεδομένων

Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκε ένα πλήθος στοιχείων και δεδομένων μέσα από την κατάλληλη επεξεργασία και αξιοποίηση των οποίων προέκυψαν τα κύρια συμπεράσματα της έρευνας.

Τα βασικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της έρευνας ήταν τα ακόλουθα:

- Μετρήσεις φυσικοχημικών παραμέτρων (θερμοκρασία, pH, αγωγιμότητα, NO_3^-, Cl^- και SO_4^{-2}) καταγεγραμμένες από τα τρία εγκατεστημένα συστήματα πολυπαραμετρικών αισθητήρων συνεχούς καταγραφής (Σουλού, Γεώτρηση, ΑΗΣ Αγ. Δημητρίου) με βήμα καταγραφής μέτρησης ανά 10 λεπτά. Η βάση πρωτογενών (μη επεξεργασμένων) δεδομένων που συγκεντρώθηκε για ένα χρονικό διάστημα

παρακολούθησης της ποιότητας των υδάτων περίπου 10 μηνών (από Μάρτιο έως Δεκέμβριο 2010) αποτελούνταν από περίπου 80.000 τιμές και περιλάμβανε σημαντικές ασυνέχειες (χρονικά διαστήματα χωρίς μετρήσεις) λόγω λειτουργικών προβλημάτων των φωρατών και άλλων απρόβλεπτων θεμάτων που πρόεκυψαν (βλ. επόμενη ενότητα).

- Δεδομένα ογκομετρικών παροχών εκροών των αντλιοστασίων ορυχείων Καρδιάς και Νότιου Πεδίου. Η ογκομετρική παροχή υπολογίστηκε με την εφαρμογή ενός μαθηματικού μοντέλου υπολογισμού με βάση την μετρούμενη στατική πίεση και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγωγού εκροής (Θεόπουλος, 2010). Οι μετρήσεις πίεσης καταγράφηκαν από το σταθμό μέτρησης του Εργαστηρίου Ηλεκτρονικής του Τμήματος Φυσικής του Α.Π.Θ. για λογαριασμό της ΔΕΗ Α.Ε.. Σημειώνεται ότι η χρονοσειρά των δεδομένων ογκομετρικών παροχών για το εξεταζόμενο διάστημα δεν παρουσίασε σημαντικές ασυνέχειες πλην μεμονωμένων περιπτώσεων και αποτελούνταν από περίπου 8.600 τιμές συνολικά και για τα δύο σημεία, με ωριαίο βήμα καταγραφής.
- Ασυνεχείς εργαστηριακές αναλύσεις των αντίστοιχων φυσικοχημικών παραμέτρων που καταγράφηκαν στα συστήματα πολυπαραμετρικών αισθητήρων συνεχούς καταγραφής (pH, αγωγιμότητα, NO_3^-, Cl^- και SO_4^{-2}) έπειτα από σχετική δειγματοληψία, με σκοπό την επικύρωση των μοντέλων πρόβλεψης που αναπτύχθηκαν. Οι παραπάνω αναλύσεις αφορούσαν κυρίως το έτος 2011 πραγματοποιήθηκαν, με μηνιαία περίπου συχνότητα, στο διαπιστευμένο εργαστήριο του Κέντρου Περιβάλλοντος της Περιφέρειας Δυτικής Μακεδονίας στην Πτολεμαΐδα.
- Μετεωρολογικά δεδομένα (ύψος βροχόπτωσης, θερμοκρασία περιβάλλοντος) τα οποία προήλθαν από τον μετεωρολογικό σταθμό Πτολεμαΐδας του δικτύου του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών σε δεκάλεπτο βήμα για την εξεταζόμενη περίοδο (Μάρτιος – Δεκέμβριος 2010). Η χρονοσειρά των μετεωρολογικών δεδομένων ήταν πλήρης και χωρίς ασυνέχειες.

4.2 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ - ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ

Καθ' όλη τη διάρκεια της παρούσας έρευνας, παρουσιάστηκαν διάφορα προβλήματα και δυσκολίες οι οποίες, ανάλογα με τη φύση και το μέγεθός τους, αντιμετωπίστηκαν κατά το δυνατό, καθώς καταβλήθηκε κάθε δυνατή προσπάθεια ώστε να μην έχουν επιπτώσεις στην ομαλή πορεία της έρευνας. Τα προβλήματα αυτά καθώς και ο τρόπος αντιμετώπισής τους περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω.

4.2.1 Αρχική εγκατάσταση συστημάτων

Η επιλογή της χωροθέτησης των συστημάτων μέτρησης εντός της περιοχής των ορυχείων της ΔΕΗ Α.Ε. είχε σαν προϋπόθεση την συνεννόηση και την λήψη κατάλληλης έγκρισης από την ΔΕΗ Α.Ε., γεγονός το οποίο λόγω των σχετικών διαδικασιών που έπρεπε να τηρηθούν προκάλεσε αρκετή χρονική καθυστέρηση στην έναρξη του έργου. Μετά από κατάλληλη επικοινωνία και χειρισμούς το ζήτημα ξεπεράστηκε και η σχετική άδεια λήφθηκε.

Επίσης κατά την εγκατάσταση των κλωβών μέτρησης στα επιλεγμένα σημεία παρουσιάστηκαν διάφορα ζητήματα που αφορούσαν στην υλοποίηση υποστηρικτικών εργασιών υποδομής (π.χ. στερέωση κλωβών στο έδαφος με βάσεις τσιμέντου, ηλεκτροδότηση κτλ) και προκάλεσαν καθυστέρηση, τα οποία όμως σταδιακά ξεπεράστηκαν.

4.2.2 Έναρξη λειτουργίας συστημάτων μέτρησης

Μετά την εγκατάσταση των συστημάτων μέτρησης στα επιλεγμένα σημεία, υπήρξε μια δοκιμαστική περίοδος λειτουργίας των συστημάτων αυτών, όπου προέκυψαν διάφορα ζητήματα ρύθμισης και ορθής λειτουργίας του εξοπλισμού. Τα θέματα αυτά σταδιακά ξεπεράστηκαν μετά από συνεχή παρακολούθηση των συστημάτων μέτρησης και με τη υποστήριξη του προμηθευτή του εξοπλισμού.

4.2.3 Ασύρματη σύνδεση και μετάδοση πληροφορίας

Κατά τη λειτουργία των συστημάτων μέτρησης στα επιλεγμένα σημεία παρουσιάστηκε το φαινόμενο της περιοδικής διακοπής της ασύρματης διαδικτυακής σύνδεσης, γεγονός που προκαλούσε προβλήματα αφενός στην τηλεμετάδοση των μετρήσεων και αφετέρου στην

σύνδεση εξ' αποστάσεως με τα συστήματα μέτρησης μέσω σχετικού λογισμικού (Teamviewer) για λόγους ρύθμισης και παρακολούθησης της ορθής λειτουργίας των συστημάτων.

Κατόπιν διεξοδικής διερεύνησης του προβλήματος και επικοινωνίας με τον πάροχο της ασύρματης διαδικτυακής σύνδεσης, πραγματοποιήθηκαν διάφορες δοκιμές με σκοπό την ενίσχυση του σήματος (αλλαγή δρομολογητή/router, προσθήκη εξωτερικής κεραίας κτλ) χωρίς όμως να λυθεί το πρόβλημα. Τελικά το ζήτημα αντιμετωπίστηκε με την εγκατάσταση στους φορητούς υπολογιστές των συστημάτων ειδικού προγράμματος το οποίο ελέγχει περιοδικά την πιθανή απώλεια σύνδεσης και την επαναφέρει.

4.2.4 Στεγανότητα φωρατών

Το σύστημα μέτρησης που είχε εγκατασταθεί στο ρέμα Σουλού, μετά από σύντομο χρονικό διάστημα λειτουργίας, παρουσίασε πρόβλημα στεγανότητας με εισροή υδάτων στο ηλεκτρονικό κύκλωμα του φωρατή, πιθανώς λόγω κακής συναρμογής των σπειρωμάτων των μεταλλικών μερών του φωρατή. Το σύστημα απεγκαταστάθηκε και στάλθηκε στον προμηθευτή του εξοπλισμού, όπου αφού διαγνώστηκε το πρόβλημα αντικαταστάθηκε με άλλο νέο φωρατή.

4.2.5 Απρόβλεπτα περιστατικά

Κατά τη λειτουργία των συστημάτων μέτρησης στα επιλεγμένα σημεία παρουσιάστηκαν διάφορα απρόβλεπτα περιστατικά τα οποία αν και αντιμετωπίστηκαν άμεσα και αποτελεσματικά, συντέλεσαν στην θέση εκτός λειτουργίας για ορισμένο χρονικό διάστημα κάποιων συστημάτων μέτρησης. Ενδεικτικά, αναφέρονται δύο περιστατικά:

- η απώλεια του μεταλλικού προστατευτικού κελύφους του φωρατή του συστήματος μέτρησης στον ΑΗΣ Αγ. Δημητρίου, το οποίο δεν κατέστη δυνατό να βρεθεί οπότε και αντικαταστάθηκε για λόγους προστασίας των αισθητήρων και ηλεκτροδίων
- η αποκοπή του καλωδίου ηλεκτροδότησης του συστήματος μέτρησης στο ρέμα Σουλού από φορτηγό όχημα το οποίο στάθμευσε σε παρακείμενο χώρο από τον κλωβό μέτρησης

4.2.6 Σύσταση ρεύματος εξόδου ΑΗΣ Αγ. Δημητρίου

Κατά τους πρώτους μήνες λειτουργίας του συστήματος μέτρησης στον ΑΗΣ Αγ. Δημητρίου παρουσιάστηκε πρόβλημα στην λειτουργία του φωρατή πιθανώς λόγω της προσθήκης κροκιδωτικών και άλλων χημικών ουσιών στο ρεύμα εξόδου από τη μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων του ΑΗΣ Αγ. Δημητρίου. Το αποτέλεσμα ήταν να δημιουργηθεί ένα συμπαγές στερεό στρώμα σε όλη την επιφάνεια του φωρατή (τσιμεντοποίηση) και να επηρεαστεί δυσμενώς η λειτουργία των ηλεκτροδίων/αισθητήρων. Για την επίλυση του προβλήματος, αφού πρώτα διερευνήθηκαν τα αίτια, απεγκαταστάθηκε ο φωρατής, καθαρίστηκαν τα ηλεκτρόδια και το σύστημα στάλθηκε στον προμηθευτή για έλεγχο και αποκατάσταση των βλαβών.

4.2.7 Βαθμονόμηση συστημάτων

Κατά τη διαδικασία μηνιαίας βαθμονόμησης των ηλεκτροδίων και αισθητήρων παρουσιάστηκαν διάφορα λειτουργικά θέματα τα οποία και αντιμετωπίστηκαν με τη βοήθεια του προμηθευτή του εξοπλισμού.

4.2.8 Χρόνος ζωής ηλεκτροδίων – Αξιοπιστία μετρήσεων

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του οργάνου από τον κατασκευαστή τα περισσότερα ηλεκτρόδια έχουν χρόνους ζωής από 6 μήνες μέχρι 1 χρόνο από την παραλαβή τους με εγγύηση καλής λειτουργίας. Από εκεί και πέρα και ανάλογα με τις συνθήκες μέτρησης η ποιοτική τους λειτουργία προοδευτικά φθίνει και συνεπώς η αξιοπιστία τους θα πρέπει να επιβεβαιώνεται κατά την περιοδική βαθμονόμηση και έλεγχο καλής λειτουργίας. Λόγω των διαφόρων προβλημάτων που προκάλεσαν καθυστερήσεις στην απρόσκοπτη λειτουργία των συστημάτων, σταδιακά διάφορα ηλεκτρόδια τέθηκαν εκτός λειτουργίας γεγονός που συντέλεσε στην ύπαρξη σημαντικών ασυνεχειών και κενών στη χρονοσειρά δεδομένων μετρήσεων.

4.2.9 Λοιπά προβλήματα

Τα θέματα αυτά είχαν κυρίως να κάνουν:

- Με την έλλειψη δεδομένων μετρήσεων κατά τις περιόδους που παρουσίαζαν προβλήματα τα συστήματα μέτρησης και βρίσκονταν εκτός λειτουργίας.
- Με καθυστερήσεις στην συλλογή στοιχείων και δεδομένων από τρίτους φορείς
- Με θέματα λειτουργίας συνεργαζόμενων στην έρευνα φορέων (ΚΕΠΕ) λόγω των ευρύτερων οργανωτικών αλλαγών στην τοπική αυτοδιοίκηση (Νόμος «Καλλικράτη») μέχρι τελικά την ομαλοποίησή τους, γεγονός που συντέλεσε σε μεγάλες καθυστερήσεις.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η ύπαρξη ασυνεχειών στη χρονοσειρά δεδομένων μετρήσεων εξαιτίας των τεχνικών προβλημάτων που παρουσιάστηκαν στον διαθέσιμο μετρητικό εξοπλισμό κατά τη φάση διεξαγωγής των μετρήσεων απαίτησε την ανάπτυξη και χρήση πρόσθετων αναλυτικών στατιστικών εργαλείων και επεξεργασίας ώστε να καλυφθούν τα κενά μετρήσεων που δεν είχαν προβλεφθεί αρχικά και τελικά οδήγησε στο αίτημα χρονικής επέκτασης του φυσικού αντικειμένου της διδακτορικής έρευνας μέχρι 30/10/2015.

Τελικά τα ζητήματα που είχαν να κάνουν με τη διαχείριση και στατιστική επεξεργασία των δεδομένων λόγω μεγάλου αριθμού (περίπου 80.000 μετρήσεις) και ασυνεχειών αντιμετωπίστηκαν με την χρήση κατάλληλων στατιστικών τεχνικών.

4.3 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι στατιστικές τεχνικές και η γενικότερη μεθοδολογία που εφαρμόστηκε για την επεξεργασία των δεδομένων που καταγράφηκαν από τους τρεις σταθμούς μέτρησης καθώς και η συσχέτισή τους με διαθέσιμα δεδομένα από άλλες πηγές (π.χ. βροχόπτωση, παροχές σημείων εκροής υδάτων αντλιοστασίων ορυχείων στο ρέμα Σουλού κτλ) με στόχο την διερεύνηση στατιστικά σημαντικών συσχετίσεων για τον εντοπισμό/πρόβλεψη ενδεχόμενων επεισοδίων ρύπανσης.

Σημειώνεται ότι για την στατιστική ανάλυση των δεδομένων καθώς και για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της επεξεργασίας τους χρησιμοποιήθηκαν τα στατιστικά προγράμματα STATISTICA 12.0 (StatSoft Inc.) και MINITAB 17.0 (Minitab Inc.).

Επίσης σημειώνεται ότι για την ορθή στατιστική συσχέτιση των δεδομένων εκτιμήθηκαν οι χρονικές υστερήσεις απόκρισης μεταξύ των σημείων εκροής αντλιοστασίων ορυχείων (Καρδιάς, ΟΝΠ) και του σταθμού μέτρησης “Σουλού” οι οποίες υπολογίστηκαν περίπου σε 6 και 9 ώρες αντίστοιχα. Οι υπολογισμοί αυτοί έγιναν προσεγγιστικά, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ρέματος όσο και επί τόπου μετρήσεις ροής στο πεδίο και επιβεβαιώθηκαν βιβλιογραφικά (βλ. Παράρτημα Β). Οι εκτιμώμενες χρονικές υστερήσεις απόκρισης μεταξύ των σημείων εκροής αντλιοστασίων ορυχείων και του σταθμού μέτρησης “Σουλού” λήφθηκαν υπόψη, όπου απαιτήθηκε, κατά την στατιστική επεξεργασία των δεδομένων, με βάση το σκεπτικό ότι λόγω της απόστασης, απαιτείται κάποιο εύλογο χρονικό διάστημα για την μεταφορά τυχόν ρυπαντικού φορτίου από τα σημεία εκροής στο σημείο μέτρησης της ποιότητας των υδάτων.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε περιλαμβάνει μια αλληλουχία διαδοχικών σταδίων στατιστικής επεξεργασίας των δεδομένων και συγκεκριμένα τα εξής:

- Προκαταρκτική επεξεργασία πρωτογενών μετρήσεων – Αποσφαλμάτωση
- Διαγραμματική αποτύπωση διαχρονικών μεταβολών παραμέτρων
- Συσχέτιση μεταβολών παραμέτρων με τη βροχόπτωση
- Συσχέτιση μεταβολών παραμέτρων μεταξύ των σταθμών μέτρησης
- Διερεύνηση και ταυτοποίηση ενδεχόμενων επεισοδίων ρύπανσης

- Ποσοτικοποίηση των μετρούμενων παραμέτρων σε αποδεκτά και μη επίπεδα
- Μοντέλα εκτίμησης της ρύπανσης στα σημεία εκροής αντλιοστασίων ορυχείων

Τα παραπάνω στάδια της στατιστικής μεθοδολογίας αναλύονται στις επόμενες παραγράφους.

4.3.1 Προκαταρκτική επεξεργασία πρωτογενών μετρήσεων – Αποσφαλμάτωση

Τα πρωτογενή δεδομένα μετρήσεων των φυσικοχημικών παραμέτρων όπως ακριβώς αυτά συλλέχθηκαν από τα εγκατεστημένα πολυπαραμετρικά συστήματα παρακολούθησης της ποιότητας των υδάτων περιείχαν και κάποιο αριθμό εσφαλμένων τιμών (π.χ. λόγω λειτουργικών προβλημάτων των φωρατών, φθορά των ηλεκτροδίων ή άλλων έκτακτων εξωγενών παραγόντων), οι οποίες ενδεχομένως δύναται να επηρεάσουν αρνητικά την αξιοπιστία των τελικών αποτελεσμάτων.

Για τον λόγο αυτό, τα πρωτογενή δεδομένα αρχικά ελέγχθηκαν λεπτομερώς ως προς την ποιότητα και τη συνοχή τους με τη χρήση μη παραμετρικών περιγραφικών στατιστικών τεχνικών (box plot analysis) με αποτέλεσμα να εξαιρεθούν οι τιμές που διαπιστώθηκαν ως ακραίες/εσφαλμένες (outliers) από τα δεδομένα μετρήσεων.

4.3.2 Διαγραμματική αποτύπωση διαχρονικών μεταβολών παραμέτρων

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε γραφική απεικόνιση, για το μελετώμενο διάστημα, των διαχρονικών μεταβολών (με βάση τις ημερήσιες μέσες τιμές):

α) των μετρούμενων φυσικοχημικών παραμέτρων συνολικά και στους τρεις σταθμούς μέτρησης,

β) των ογκομετρικών παροχών εκροών αντλιοστασίων ορυχείων,

γ) της βροχόπτωσης,

δ) των μετρούμενων φυσικοχημικών παραμέτρων αναλυτικά για κάθε σταθμό μέτρησης και για κάθε μετρούμενη παράμετρο.

Σημειώνεται ότι καταβλήθηκε προσπάθεια εφαρμογής των απλούστερων πολυωνυμικών εξισώσεων για να εκφραστεί στατιστικά η διαχρονική μεταβολή των μετρούμενων φυσικοχημικών παραμέτρων και τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν έχουν περισσότερο περιγραφικό παρά στατιστικό χαρακτήρα.

4.3.3 Συσχέτιση μεταβολών παραμέτρων με τη βροχόπτωση

Στο στάδιο αυτό διερευνήθηκε τυχόν συσχέτιση των μετρούμενων φυσικοχημικών παραμέτρων και των ογκομετρικών παροχών των εκροών αντλιοστασίων των ορυχείων με το ύψος της βροχόπτωσης με στόχο τον εντοπισμό ενδεχόμενης επίδρασης των καιρικών μεταβολών στις παραμέτρους αυτές.

Η εξέταση των επιπτώσεων της βροχόπτωσης είναι σημαντική καθώς είναι χρήσιμο να προσδιοριστεί σε ποιό βαθμό επηρεάζει την μεταβολή των συγκεντρώσεων των μετρούμενων φυσικοχημικών παραμέτρων καθώς και αν επιδρά θετικά (μείωση συγκεντρώσεων λόγω φαινομένων αραίωσης) ή αρνητικά (αύξηση συγκεντρώσεων λόγω φαινομένων εκπλυσιμότητας) στην ποιοτική κατάσταση των μελετώμενων επιφανειακών υδατικών πόρων.

Αρχικά πραγματοποιήθηκε διερεύνηση της συσχέτισης των μετρούμενων φυσικοχημικών παραμέτρων με το ύψος της βροχόπτωσης με διαγραμματική αποτύπωση ανά ημέρα για το σταθμό μέτρησης "Σουλού" ενδεικτικών μεταβολών των μετρούμενων φυσικοχημικών παραμέτρων σε σχέση με τα παρατηρούμενα επίπεδα βροχόπτωσης που εντοπίστηκαν, για τα χρονικά διαστήματα στα οποία υπήρχαν διαθέσιμες καταγραφές παραμέτρων και σημειώθηκε βροχόπτωση.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε συσχέτιση της ογκομετρικής παροχής των σημείων εκροής υδάτων αντλιοστασίων ορυχείων με την βροχόπτωση με εφαρμογή της εμπειρικής αθροιστικής κατανομής των μεταβλητών (Empirical Cumulative Distribution Function-ECDF).

Εμπειρική αθροιστική κατανομή των μεταβλητών (Empirical Cumulative Distribution Function-ECDF)

Υπό τον όρο εμπειρική αθροιστική κατανομή των μεταβλητών (Empirical Cumulative Distribution Function-ECDF) νοείται η καταρχήν διευθέτηση των τιμών σε αύξουσα τάξη και η διαδοχική άθροισή τους ώστε να σχηματισθεί η στήλη των αθροιστικών τιμών. Ακολούθως δημιουργούνται τα ποσοστημόρια της στήλης με βάση τον τύπο P%(n+1) (Πετρίδης, 2000) και τα οποία αποτυπώνονται διαγραμματικά στον άξονα των Y σε σχέση με τον άξονα των X όπου παρουσιάζονται οι τιμές της εκάστοτε μεταβλητής. Η μέθοδος αυτή εξυπηρετεί την άμεση σύγκριση συχνοτήτων διαφορετικών μεταβλητών προς εξαγωγή σχετικών συμπερασμάτων.

Για συγκριτικούς λόγους διενεργήθηκε καταρχήν αυξητική κατάταξη των τιμών της βροχόπτωσης με πλήρη παράλληλα αντιστοίχιση των τιμών της παροχής στα δύο σημεία (αντλιοστάσιο ορυχείων Καρδιάς και Νοτίου Πεδίου) και ακολούθως απομακρύνθηκαν όλα τα στοιχεία που περιείχαν μηδενικές τιμές της βροχής. Στη συνέχεια τυποποιήθηκαν όλες οι τιμές των μεταβλητών (αφαίρεση από τον μέσο όρο και διαίρεση με την τυπική απόκλιση) και διευθετήθηκαν σε εύρος μεταβολής -1 και +1. Η μετατροπή αυτή επιτρέπει την άμεση σύγκριση μεταβολών ανεξαρτήτως μονάδας μέτρησης των στοιχείων και έτσι προέκυψε η συνάρτηση της αθροιστικής κατανομής των μεταβλητών με κατάλληλη σχηματική απεικόνιση.

4.3.4 Συσχέτιση μεταβολών παραμέτρων μεταξύ των σταθμών μέτρησης

Αρχικά πραγματοποιήθηκε γραφική απεικόνιση (με βάση τις ημερήσιες μέσες τιμές) των συγκεντρώσεων φυσικοχημικών παραμέτρων μεταξύ των σταθμών μέτρησης (για τα χρονικά διαστήματα που υπήρχαν διαθέσιμα κοινά δεδομένα) για εντοπισμό ενδεχόμενων συσχετίσεων και εφαρμόστηκε η τεχνική της εμπειρικής αθροιστικής κατανομής των μεταβλητών (ECDF) με κατάλληλη σχηματική απεικόνιση.

Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα των μετρήσεων, διευθετήθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να συγχρονίζονται με τις ημερομηνίες καταγραφής (κοινά διαστήματα μέτρησης) στους τρεις σταθμούς μέτρησης. Με αυτό τον συγχρονισμό μπορούν να εξαχθούν σχετικά άμεσα

συμπεράσματα για την ύπαρξη ενδεχόμενης επιβάρυνσης της υδάτινης μάζας του περιβάλλοντος χώρου συγκριτικά με τα δεδομένα του σταθμού μέτρησης "Γεώτρηση" ο οποίος λειτουργεί ως σταθμός αναφοράς. Στις σύγχρονες περιόδους λήψης μετρήσεων πραγματοποιήθηκε εφαρμογή της στατιστικής ανάλυσης της διακύμανσης (ANOVA) ενός παράγοντα (σταθμός με τρία επίπεδα) και της κατά ζεύγη σύγκρισης των μέσων όρων με βάση τα 95% όρια εμπιστοσύνης του μέσου σφάλματος της διακύμανσης με σκοπό την διερεύνηση ενδεχόμενων όμοιων τάσεων διακύμανσης των μέσων τιμών στους διαφορετικούς σταθμούς.

Ανάλυση της διακύμανσης ενός παράγοντα ή μιας κατεύθυνσης (one-way ANOVA)

Η μέθοδος της ανάλυσης διακύμανσης χρησιμοποιείται κυρίως για τη σύγκριση τριών ή περισσότερων μέσων όρων δειγμάτων τα οποία διαφέρουν μεταξύ τους ως προς τη μεταχείριση ενός ή και περισσότερων παραγόντων. Η ανάλυση της διακύμανσης ή ο έλεγχος της κατανομής F αναφέρεται διεθνώς ως ANOVA (Analysis of Variance) και μας πληροφορεί αν οι εξεταζόμενοι μέσοι όροι των δειγμάτων της μελετούμενης μεταβλητής είναι ίσοι μεταξύ τους (έχουν κοινό μέσο όρο και άρα προέρχονται από τον ίδιο πληθυσμό) ή διαφέρουν (προέρχονται από διαφορετικούς πληθυσμούς). Η ANOVA μπορεί να εφαρμοστεί και σε σύγκριση των μέσων όρων δύο ανεξάρτητων δειγμάτων και δίνει εφάμιλλα αποτελέσματα με το δίπλευρο έλεγχο t των ανεξάρτητων δειγμάτων.

Η ανάλυση της διακύμανσης F βασίζεται υπολογιστικά στην κατανομή F των μετρήσεων η οποία είναι θετικά ασύμμετρη κατανομή. Για να επαληθεύεται η μηδενική υπόθεση H_o (όλοι οι μέσοι όροι είναι ίσοι) έναντι της εναλλακτικής H_A (όλοι οι μέσοι όροι δεν είναι ίσοι) θα πρέπει μετά την εφαρμογή του ελέγχου της διακύμανσης, το πηλίκο F της διαίρεσης της διακύμανσης (μεταβλητότητας) μεταξύ των ομάδων διά της διακύμανσης μέσα στις ομάδες να ισούται με τη μονάδα (F=GMS/EMS), δηλαδή να αποτελούν και οι δύο διακυμάνσεις κοινή μέτρηση της διακύμανσης των συγκρινόμενων κ ομάδων. Αντίθετα, αν το σφάλμα μεταξύ των ομάδων είναι μεγαλύτερο του σφάλματος μέσα στις ομάδες, τότε η τιμή F θα είναι μεγαλύτερη της μονάδας και τότε μόνο οι μέσοι όροι των ομάδων θα είναι άνισοι μεταξύ τους.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι όταν η τιμή F υποδεικνύει την επαλήθευση της εναλλακτικής υπόθεσης, αυτό σημαίνει ότι υπάρχει διαφορά μεγέθους μεταξύ των μέσων όρων που εξετάζονται και τίποτα παραπάνω. Η τεχνική ANOVA δίνει πληροφορίες απλά αν κάποιοι μέσοι όροι διαφέρουν, αλλά όμως δεν δίνει πληροφορίες που εντοπίζονται οι διαφορές αυτές, δηλαδή ποιοί μέσοι όροι διαφέρουν από ποιούς και με ποια σειρά. Οι υποθέσεις αυτές τεκμηριώνονται με τη χρήση άλλων ελέγχων (Πετρίδης, 2000; Zar, 1999).

4.3.5 Διερεύνηση και ταυτοποίηση ενδεχόμενων επεισοδίων ρύπανσης

Η ανίχνευση συσχετίσεων, η οποία μπορεί να τεκμηριωθεί ως στατιστικά σημαντική, μεταξύ των μεταβολών στις παροχές των εκροών αντλιοστασίων ορυχείων που καταλήγουν στο ρέμα Σουλού και στη συγκέντρωση των μετρούμενων φυσικοχημικών παραμέτρων στον αντίστοιχο σταθμό μέτρησης, δύναται να αποτελέσει ένα έμμεσο τρόπο εκτίμησης και αναγνώρισης της επιβάρυνσης του επιφανειακού υδροφορέα με ρυπαντικό φορτίο.

Αρχικά, εξετάστηκαν τα συνολικά διαγράμματα (μέσες ημερήσιες τιμές) ως προς τις ακραίες τιμές (υψηλές ή χαμηλές) των μετρούμενων φυσικοχημικών παραμέτρων στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" καθώς και των παροχών των εκροών αντλιοστασίων ορυχείων για όλη την εξεταζόμενη περίοδο και κατόπιν δημιουργήθηκαν τα συνδυαστικά διαγράμματα με τις αναλυτικές τιμές των παραμέτρων. Από αυτά ανιχνεύθηκαν εκείνα στα οποία παρουσιαζόταν εμφανείς συσχετίσεις μεταξύ φυσικοχημικών παραμέτρων και παροχών εκροών αντλιοστασίων ορυχείων και αποτυπώθηκαν διαγραμματικά οι εντοπισμένες περιπτώσεις με ενδεχόμενο εμφάνισης επεισοδίου ρύπανσης.

Στη συνέχεια τα στοιχεία της παροχής στα δύο σημεία εκροής υδάτων αντλιοστασίων (ορυχεία Καρδιάς και Νότιου Πεδίου) διαχωρίστηκαν σε δύο κατηγορίες: τιμές παροχής μεγαλύτερες του μέσου όρου (κωδικός 2) και τιμές μικρότερες ή ίσες του μέσου όρου (κωδικός 1). Κατόπιν κατασκευάστηκαν γραφήματα μεταβολής των μέσων τιμών των μεταβλητών και των 95% ορίων εμπιστοσύνης τους ανά ημέρα μεταβολής στο συγκεκριμένο χρονικό περιθώριο υπό έλεγχο και ανά σημείο παροχής το οποίο σημειωνόταν με τους κωδικούς 1 (χαμηλό φορτίο) και 2 (υψηλό φορτίο). Ακολούθως, έγινε επισήμανση όλων των περιπτώσεων εκείνων στις οποίες διαπιστώθηκε στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο συγκρινόμενων μέσων όρων ανά ημέρα και φορτίο παροχής (ακριβής πιθανότητα

σφάλματος $p \leq 0.05$). Αυτή τεκμηριώνεται όταν τα όρια εμπιστοσύνης των δύο μέσων όρων δεν επικαλύπτονται και κατά συνέπεια μέσες τιμές μεταβλητής με φορτίο 2 (δηλαδή επιβαρυμένο) μεγαλύτερες από αντίστοιχες με φορτίο 1 αποτελούν ένδειξη συμβάντος ενός επεισοδίου.

Διευκρινίζεται ότι με βάση αυτή την μεθοδολογία το ζητούμενο δεν είναι η διαπίστωση υψηλών συγκεντρώσεων παραμέτρων αλλά της ύπαρξης σε κάθε εξεταζόμενη χρονική περίοδο (ανεξαρτήτως ύψους συγκεντρώσεων παραμέτρων) έντονων μεταβολών εντός των ημερών τόσο στην παροχή όσο και στη συγκέντρωση των παραμέτρων.

Η κατάταξη των παροχών σε κωδικούς 1 και 2 θα πρέπει να συνδυάζεται με διαφοροποιημένες τιμές των συγκεντρώσεων (κωδ. 2 > κωδ. 1) σε κάθε σημείο εκροής υδάτων (ορυχεία Καρδιάς και Νότιου Πεδίου) για να έχουμε ενδεχόμενο επεισοδίου ρύπανσης.

Όλες οι ημέρες ύποπτες επεισοδίων, που εντοπίστηκαν ακολουθώντας την προαναφερόμενη μεθοδολογία και για τις οποίες τεκμηριώθηκαν τα ενδεχόμενα επεισόδια ρύπανσης ως στατιστικά σημαντικά, εξετάστηκαν αναλυτικά επί εικοσιτετράωρης βάσης και διερευνήθηκε το κατά πόσο σε αυτές σχετίζεται θετικά η συγκέντρωση των μετρούμενων φυσικοχημικών παραμέτρων με τις τιμές της παροχής (όταν αυξάνει η μία αυξάνει και η άλλη). Στις ωριαίες διαχρονικές μεταβλητές εφαρμόστηκαν μοντέλα τάσεων δευτέρου και τρίτου βαθμού, δηλαδή μοντέλα με παρούσες μία και δύο καμπύλες τάσεις αντίστοιχα τόσο στις συγκεντρώσεις όσο και στην παροχή.

Η δευτεροβάθμια εξίσωση είναι της μορφής $\hat{Y} = b_0 + b_1X + b_2X^2$ και η τριτοβάθμια εξίσωση της μορφής $\hat{Y} = b_0 + b_1X + b_2X^2 + \beta_3X^3$.

Η αξιοπιστία των πολυωνυμικών παλινδρομήσεων ελέγχθηκε με τον προσδιοριστικό συντελεστή R^2.

4.3.6 Ποσοτικοποίηση των μετρούμενων παραμέτρων σε αποδεκτά και μη επίπεδα

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ανίχνευση τυχόν μη αποδεκτών (εκτός ορίων) τιμών των μετρούμενων φυσικοχημικών παραμέτρων σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους ή και σταθμούς μέτρησης σε κλίμακα μέτρησης άμεσα κατανοητή (αποδεκτά/μη αποδεκτά όρια).

Τα δεδομένα των μετρούμενων φυσικοχημικών παραμέτρων προσαρμόστηκαν με βάση την ισχύουσα νομοθεσία για την ποιότητα του νερού ανθρώπινης κατανάλωσης (Υ.Α. ΔΥΓ2/Γ.Π. οικ. 38295/2007) σε τιμές - επίπεδα αποδεκτά ή μη αποδεκτά ή αλλιώς σε χαμηλό και υψηλό επίπεδο ανάλογα με το κρίσιμο όριο που προσδιορίζεται για κάθε μία παράμετρο.

Με βάση το παραπάνω σκεπτικό μελετήθηκε η σύνδεση της σχέσης αποδεκτού ή μη αποδεκτού ορίου συγκέντρωσης, με την έννοια της εξαρτημένης μεταβλητής, ως απόρροια της δράσης της παροχής του νερού στους δύο σταθμούς, την ένταση της βροχόπτωσης και των χρονικών διαστημάτων ύποπτων εμφάνισης ρυπογόνων επεισοδίων.

Προς το σκοπό αυτό υιοθετήθηκε η τεχνική CHAID (Chisquared Automatic Interaction Detector) η οποία βασίζεται στη χρήση ενός αλγόριθμου που στοχεύει στην πρόβλεψη μιας ποσοτικής εξαρτημένης μεταβλητής (παλινδρόμηση) αλλά και κατηγορικής (ταξινόμηση), από ένα πλήθος ανεξάρτητων μεταβλητών με τη μορφή δενδρικής ιεραρχίας. Αναπτύσσει δηλαδή δένδρα ταξινόμησης των στοιχείων, με τρόπο παρεμφερή της ανάλυσης συστάδων, και με κυριότερο χαρακτηριστικό τη δημιουργία πολυσχιδών δένδρων και με την εφαρμογή ενός απλού αλγόριθμου, κατάλληλα προσαρμοσμένου για την ανάλυση στοιχείων μεγάλου δειγματοληπτικού μεγέθους και στην οποία ισχύει η λογική “αν-τότε-ειδάλλως”. Η τεχνική βασίζεται στην εξέταση του κριτηρίου χ^2 του Pearson αποσκοπώντας να επικυρώσει την επόμενη άριστη τμήση σε κάθε βήμα δενδροποίησης αν πρόκειται για εξαρτημένη κατηγορική, και σε περίπτωση ποσοτικής εξαρτημένης μεταβλητής, στην εξέταση του κριτηρίου F της ανάλυσης διακύμανσης (Πετρίδης, 2013).

Κάθε μη τελικός κόμβος προσδιορίζει μια ή περισσότερες συνθήκες τμήσης, ευελπιστώντας να επιφέρει μια άριστη πρόβλεψη (σε ποσοτικές εξαρτημένες μεταβλητές) ή ταξινόμηση (σε κατηγορικές), παρέχοντας έτσι λύση σε προβλήματα τύπου παλινδρόμησης ή ταξινόμησης.

4.3.7 Μοντέλα εκτίμησης της ρύπανσης στα σημεία εκροής αντλιοστασίων ορυχείων

Ως μέθοδος ποσοτικής εκτίμησης της ρυπογόνου δράσης των δύο σημείων εκροής υδάτων, της βροχής και του χρονικού διαστήματος, επιλέχθηκε η πολλαπλή παλινδρόμηση στην οποία το ρόλο της εξαρτημένης μεταβλητής αναλαμβάνει η εκάστοτε φυσικοχημική παράμετρος και τη θέση των ανεξάρτητων κατέχουν οι δύο παροχές, η ποσότητα βροχόπτωσης και το χρονικό περιθώριο κάθε δράσης. Η πολλαπλή παλινδρόμηση εκφράζεται με το συγκεκριμένο μοντέλο:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4$$

Όπου $\hat{Y}$ η προσαρμοσμένη φυσικοχημική παράμετρος, b_0 ύψος της $\hat{Y}$ και b οι συντελεστές παλινδρόμησης των X ανεξάρτητων μεταβλητών (παροχή Καρδιάς, παροχή ΟΝΠ, βροχόπτωση και χρονικό διάστημα). Θετικοί συντελεστές προκαλούν αυξητική μεταβολή της $\hat{Y}$ και αρνητικοί τανάπαλιν. Για το χρονικό διάστημα, επειδή είναι κατηγορικής μορφής, υπολογίστηκε ένας συντελεστής χωριστά για κάθε χρονική κατηγορία.

Η αξιοπιστία των εξισώσεων ελέγχθηκε με την εκτίμηση του προσδιοριστικού συντελεστή της παλινδρόμησης R^2 (πόσο ικανοποιητικά τα στοιχεία πλησιάζουν τα προσαρμοσμένα της εξίσωσης, με τιμές από 0 / καμία προσαρμογή έως 100% / άριστη προσαρμογή) και του προβλεπτικού συντελεστή R^2_p (πόσο αξιόπιστα το μοντέλο προβλέπει, όταν νέες τιμές εισάγονται στο σύστημα, επίσης με κλίμακα έντασης από 0-100%). Ένα μοντέλο θεωρείται ικανοποιητικό όταν οι δύο συντελεστές δεν απέχουν περισσότερο από 20% μεταξύ τους και όταν ο προσδιοριστικός συντελεστής εμπειρικά είναι μεγαλύτερος από 50%. Οι έλεγχοι της κανονικότητας των υπολειμμάτων της παλινδρόμησης και της ομοιογένειας επίσης ελήφθησαν σοβαρά υπόψη, έτσι κάθε παραβίαση των προϋποθέσεων διορθωνόταν με τη χρήση κατάλληλων μετασχηματισμών στην εκάστοτε εξαρτημένη μεταβλητή. Επιπρόσθετα προνοήθηκε και ο έλεγχος της πολυσυγγραμμικότητας μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών (VIF) η οποία εμφανίζεται όταν ισχύει VIF≥10. Στα μοντέλα εφαρμόστηκε η βηματική παλινδρόμηση προοδευτικής απόρριψης των ανεξάρτητων μεταβλητών (backward elimination of variables). Σύμφωνα με την τεχνική αυτή, όλοι οι όροι (μεταβλητές) εισάγονται αρχικά στο μοντέλο και ακολούθως απορρίπτονται σταδιακά όλοι εκείνοι που ελέγχονται μη στατιστικά σημαντικοί (Πετρίδης, 2013).

Μία νέα ανεξάρτητη εισαγόμενη μέτρηση στο μοντέλο θεωρείται ότι επικυρώνει και επαληθεύει την αντίστοιχη προσαρμοσμένη (προβλεπόμενη) του μοντέλου όταν εμπίπτει μέσα στα 95% όρια πρόβλεψης που εκτιμώνται από το εκάστοτε μοντέλο σύμφωνα με την εξίσωση (Πετρίδης, 2013):

$$\hat{Y}_i \pm t\,(S_{\hat{Y}i})$$

και

$$(S_{\hat{Y}})_1 = \sqrt{EMS\left[1 + \frac{1}{n} + \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m} c_{ij}x_i x_j\right]}$$

Όπου:

$\hat{Y}_i$: η προβλεπόμενη τιμή από μια νέα πρόσθετη σειρά τιμών των μεταβλητών $X_1, X_2 ... X_m$

$(S_{\hat{Y}i})$: το τυπικό σφάλμα της εξίσωσης για τη συγκεκριμένη τιμή και t θεωρητική τιμή που λαμβάνεται από στατιστικούς πίνακες της κατανομής του Student.

m: ο αριθμός των μεταβλητών στο μοντέλο

n: ο αριθμός των παρατηρήσεων και

c_{ij}: οι πολλαπλασιαστές του Gauss εκτός της διαγωνίου του αντίστροφου πίνακα του αθροίσματος των χιαστί γινομένων των τετραγώνων.

5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

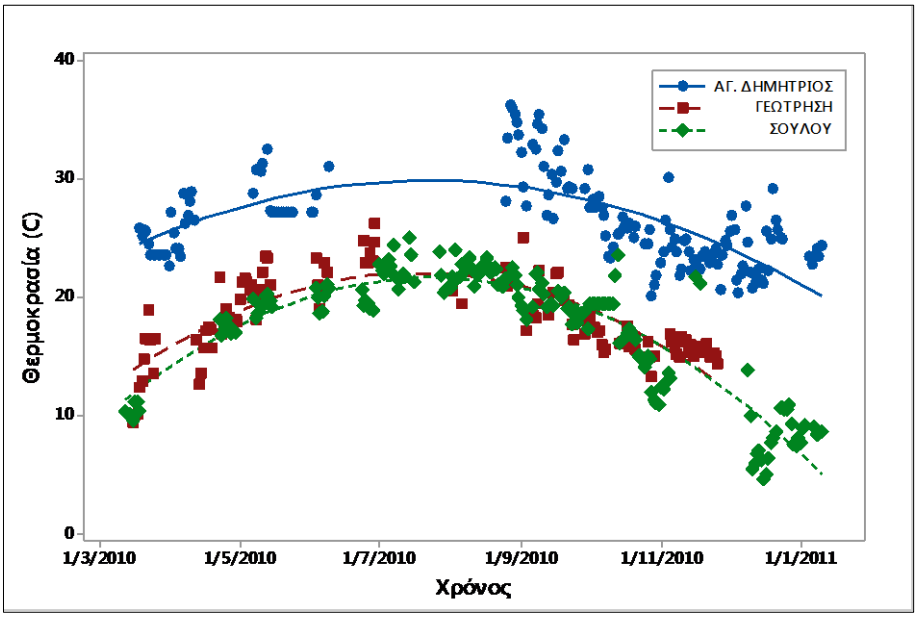
5.1 ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΧΡΟΝΙΚΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Λόγω του μεγάλου αριθμού των μετρήσεων φυσικοχημικών παραμέτρων (περίπου 80.000) που καταγράφηκαν από το δίκτυο παρακολούθησης καθώς και των λοιπών δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της έρευνας, τα οποία εμφανίζουν συχνά ασυνέχειες, προκύπτει η ανάγκη για την αποτελεσματική διαχείριση και στατιστική επεξεργασία τους ώστε να μπορέσουν να προκύψουν αξιοποιήσιμα αποτελέσματα και συμπεράσματα. Στο πλαίσιο αυτό, αρχικά από τα πρωτογενή αναλυτικά δεδομένα υπολογίστηκαν οι μέσες ημερήσιες τιμές για κάθε παράμετρο οι οποίες αποτυπώνονται διαγραμματικά για όλη την περίοδο μελέτης και στους τρεις σταθμούς στην επόμενη παράγραφο με στόχο την απόκτηση μιας πρώτης εποπτικής εικόνας της κατάστασης. Επιπλέον αποτυπώνονται οι διαχρονικές μεταβολές των ογκομετρικών παροχών των εκροών των αντλιοστασίων των ορυχείων στο ρέμα Σουλού καθώς και το αντίστοιχο ύψος βροχόπτωσης για την μελετώμενη περίοδο. Στη συνέχεια παρουσιάζονται διαγραμματικά οι διαχρονικές μεταβολές των φυσικοχημικών παραμέτρων για κάθε σταθμό μέτρησης ξεχωριστά.

5.1.1 Διαχρονικές μεταβολές μετρούμενων φυσικοχημικών παραμέτρων συνολικά

Στα παρακάτω Σχήματα 4 έως 10 παρουσιάζονται, για το μελετώμενο διάστημα, οι διαχρονικές μεταβολές (με βάση τις μέσες ημερήσιες τιμές) των μετρούμενων φυσικοχημικών παραμέτρων (θερμοκρασία, αγωγιμότητα, SO_4^{-2}, pH, NO_3^- και Cl^-) συνολικά και στους τρεις σταθμούς μέτρησης.

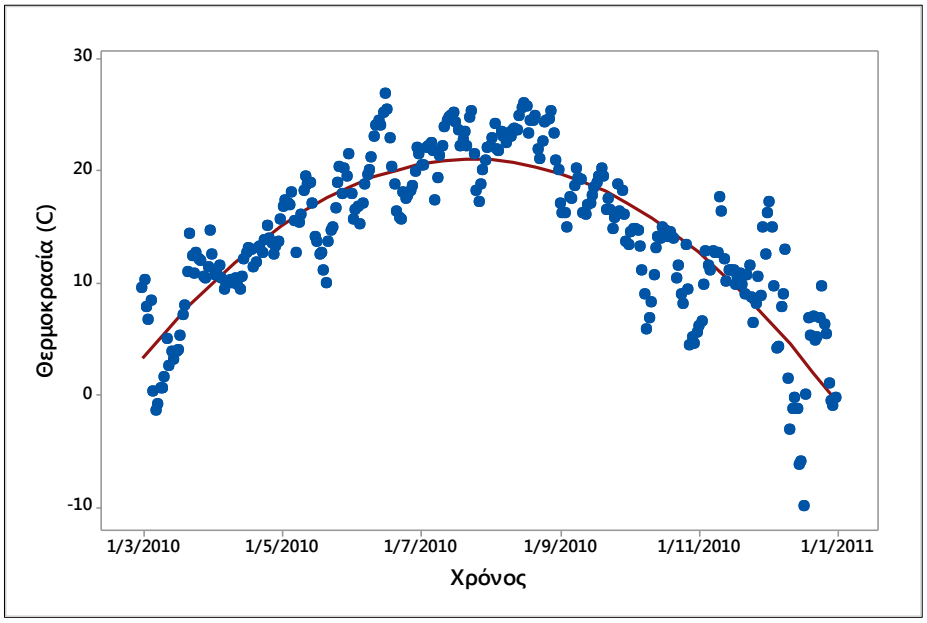
Σημειώνεται ότι σε όλες τις παρακάτω περιπτώσεις καταβλήθηκε προσπάθεια εφαρμογής των απλούστερων πολυωνυμικών εξισώσεων για να εκφραστεί στατιστικά η διαχρονική μεταβολή των μετρούμενων φυσικοχημικών παραμέτρων. Τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν έχουν περισσότερο περιγραφικό παρά στατιστικό χαρακτήρα.



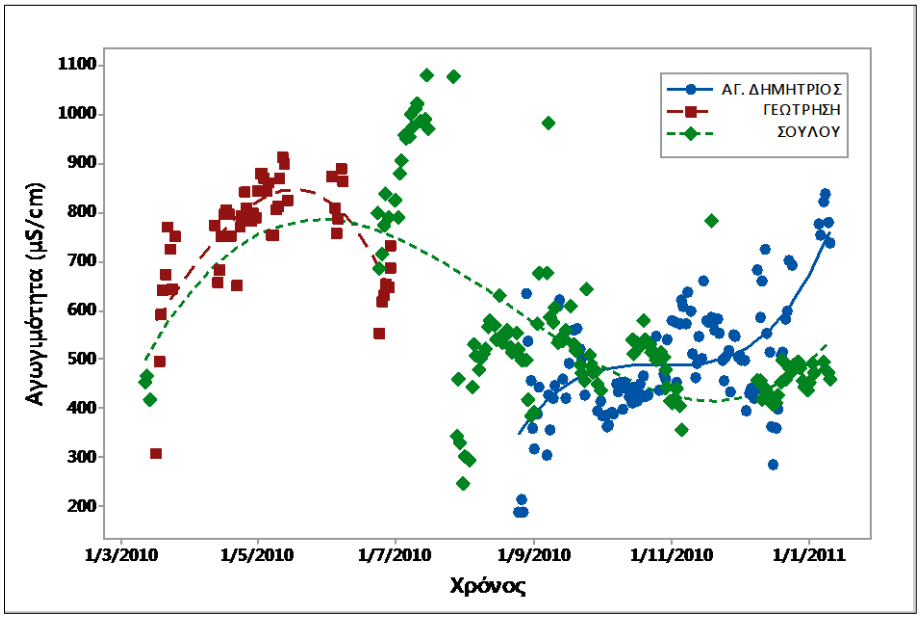
Σχήμα 4. Διαχρονική μεταβολή θερμοκρασίας υδάτων στους τρεις σταθμούς μέτρησης

Σύμφωνα με το παραπάνω Σχήμα 4 παρατηρείται ομοιομορφία στη διαχρονική μεταβολή της θερμοκρασίας για το μελετώμενο χρονικό διάστημα στους τρεις σταθμούς μέτρησης, στην περιοχή από 5 έως 35 ^{0}C, με την επισήμανση ότι η υψηλότερη κορύφωση και γενικά οι μεγαλύτερες μεταβολές εμφανίζονται στον σταθμό μέτρησης "ΑΗΣ Αγ. Δημητρίου". Η αύξηση αυτή κατά περίπου 10 ^{0}C οφείλεται ενδεχομένως στο γεγονός ότι από τον ΑΗΣ Αγ. Δημητρίου εκρέουν ύδατα από τον πύργο ψύξης της μονάδας με υψηλότερη θερμοκρασία, τα οποία καταλήγουν τελικά στο ρέμα Σουλού.

Η μετρούμενη θερμοκρασία και στους τρεις σταθμούς μέτρησης ακολουθεί τη μεταβολή της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας όπως φαίνεται και στο παρακάτω Σχήμα 5, με κορύφωση κατά τους θερινούς μήνες.

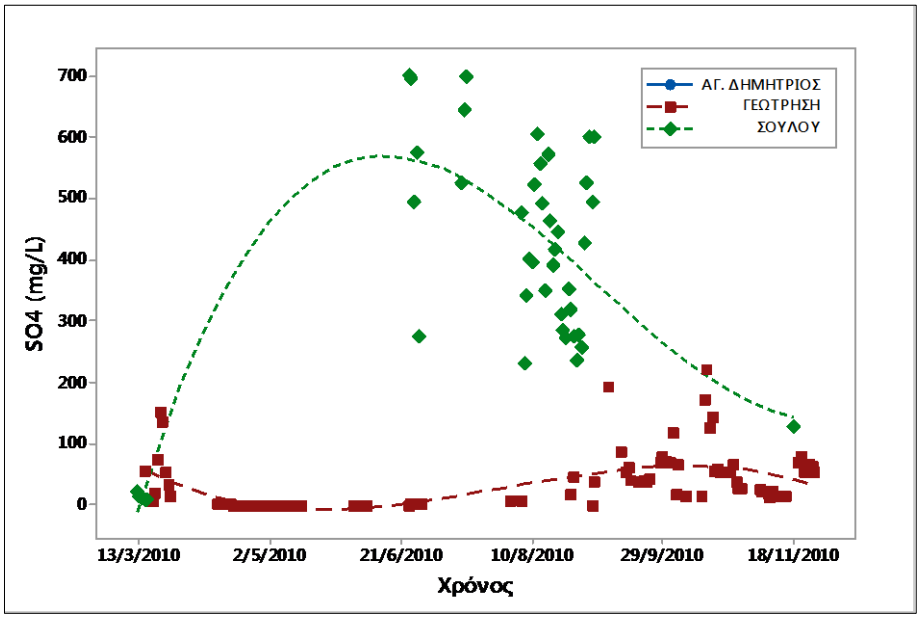


Σχήμα 5. Διαχρονική μεταβολή θερμοκρασίας περιβάλλοντος



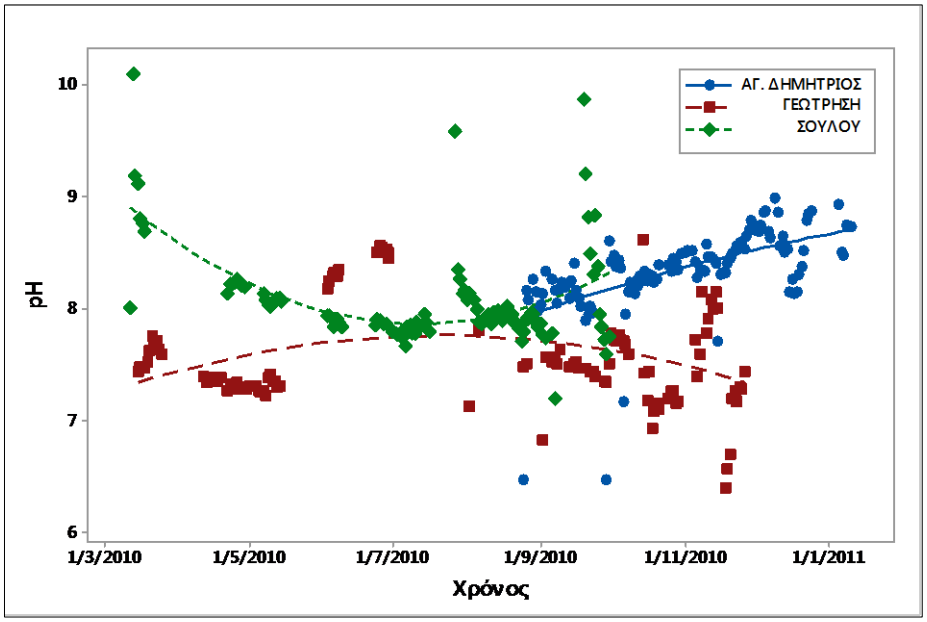
Σχήμα 6. Διαχρονική μεταβολή αγωγιμότητας στους τρεις σταθμούς μέτρησης

Με βάση το παραπάνω Σχήμα 6 παρατηρείται μία σημαντική αύξηση της αγωγιμότητας στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" το καλοκαίρι, αυξητική σιγμοειδής μεταβολή στον σταθμό μέτρησης "ΑΗΣ Αγ. Δημητρίου" και καμπυλοειδής επίσης μεταβολή στο σταθμό μέτρησης "Γεώτρηση" σε διαφορετικούς χρόνους μελέτης.



Σχήμα 7. Διαχρονική μεταβολή θειικών ιόντων στους τρεις σταθμούς μέτρησης

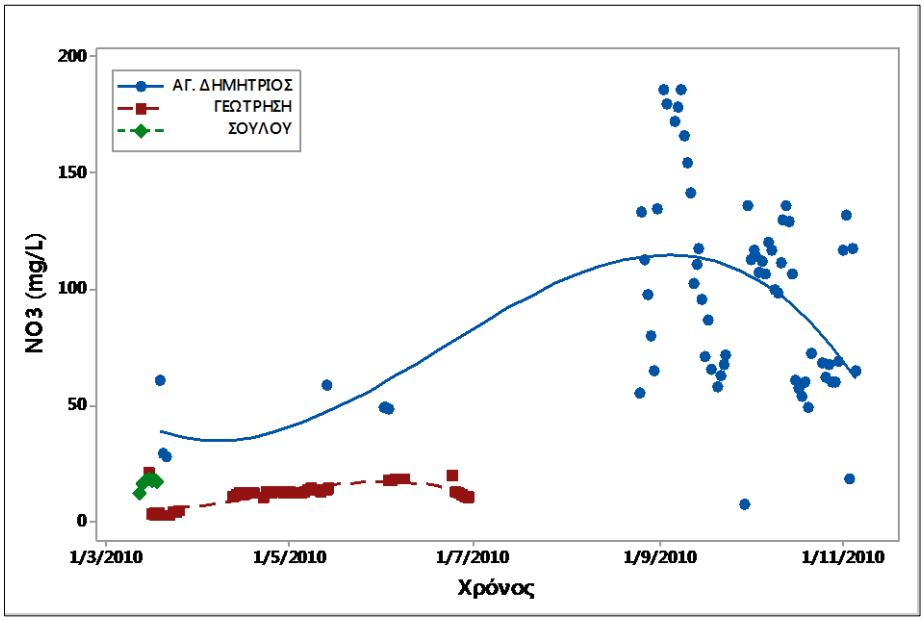
Στο Σχήμα 7 παρατηρείται σταθεροποιητική μεταβολή των θειικών ιόντων στην περιοχή 0-100 mg/L στο σταθμό μέτρησης "Γεώτρηση" και ένα εύρος τιμών μεταξύ 200-700 mg/L τους θερινούς μήνες στο σταθμό μέτρησης "Σουλού".



Σχήμα 8. Διαχρονική μεταβολή pH στους τρεις σταθμούς μέτρησης

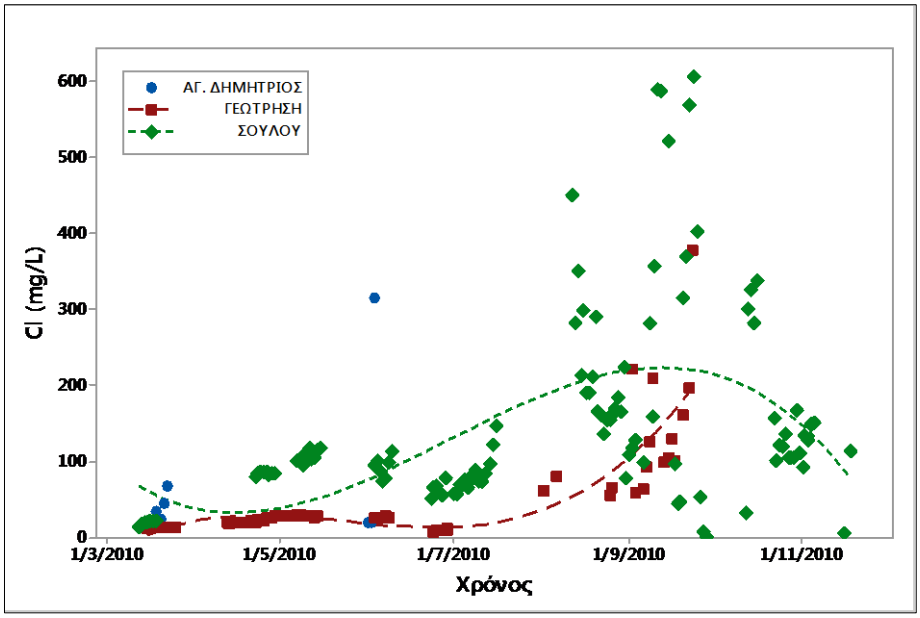
Με βάση το παραπάνω Σχήμα 8, αναπτύσσεται διαφορετική καμπυλοειδούς μορφής τάση μεταβολής μεταξύ του σταθμού μέτρησης "Γεώτρηση" και των λοιπών δύο σταθμών, με την πλειοψηφία των τιμών στην περιοχή 7 έως 9, με την επισήμανση ότι οι τιμές του pH είναι σχεδόν πάντα υψηλότερες στους σταθμούς μέτρησης "Σουλού" και "ΑΗΣ Αγ. Δημητρίου".

Από τις διαχρονικές μεταβολές των συγκεντρώσεων των θειικών ιόντων και του pH που παρουσιάζονται στα παραπάνω Σχήματα 7 και 8 συγκριτικά και για τους τρεις σταθμούς μέτρησης, δεν προκύπτει το ενδεχόμενο εμφάνισης του φαινομένου όξινων απορροών (Acid Mine Drainage) στην περιοχή μελέτης για το εξεταζόμενο διάστημα. Οι παρατηρούμενες τιμές του pH είναι αρκετά υψηλότερες από τα επίπεδα pH που συνήθως συναντώνται σε όξινες απορροές (pH<5) καθώς και η συγκέντρωση των θειικών ιόντων δεν είναι αρκετά υψηλή (π.χ. > 2000 mg/L) ώστε να δικαιολογείται η εμφάνιση αυτού του φαινομένου (Jachimko, 2012; Jennings et al., 2008). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ασβεστιτική σύσταση μεγάλου μέρους των υπερκειμένων και ενδιαμέσων αγόνων υλικών του λιγνιτικού κοιτάσματος επιτρέπει την επιτόπου εξουδετέρωση των όποιων όξινων υδατικών διαλυμάτων που σχηματίζονται τοπικά. Στην εξάλειψη του συγκεκριμένου προβλήματος συμβάλλει θετικά και ο τρόπος σχηματισμού των αποθέσεων των αγόνων υλικών που ακολουθείται από τα ορυχεία της περιοχής. Η ανάμιξη υλικών που όμως έχουν υψηλό ποσοστό οργανικών ουσιών, αποτελώντας εν δυνάμει πηγές σχηματισμού όξινων απορροών, με άγονα υλικά ασβεστιτικής σύστασης και σε πολλές περιπτώσεις ιπτάμενη τέφρα υψηλής περιεκτικότητας ασβεστίου επιφέρει επιτόπου εξουδετέρωση των όξινων απορροών. Οι παραπάνω παρατηρήσεις επαληθεύτηκαν από πειραματικές εκχυλίσεις που διεξήχθησαν από το Λιγνιτικό Κέντρο Δυτικής Μακεδονίας σε τέφρες και εδάφη (Σαχανίδης και Παυλουδάκης, 2001).



Σχήμα 9. Διαχρονική μεταβολή νιτρικών ιόντων στους τρεις σταθμούς μέτρησης

Στο παραπάνω Σχήμα 9 παρατηρούνται υψηλότερες τιμές νιτρικών ιόντων στο σταθμό μέτρησης "ΑΗΣ Αγ. Δημητρίου" σε σχέση με τους άλλους δύο σταθμούς, αν και διαχρονικά δεν είναι εφικτή η σύγκριση.



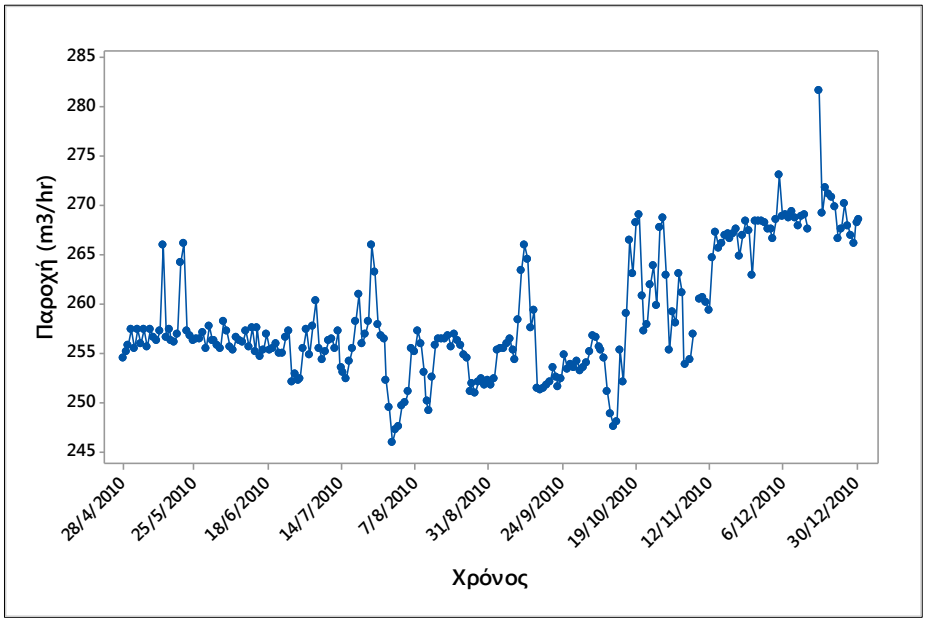
Σχήμα 10. Διαχρονική μεταβολή ιόντων χλωρίου στους τρεις σταθμούς μέτρησης

Σύμφωνα με το παραπάνω Σχήμα 10, παρατηρούνται χαμηλότερες τιμές ιόντων χλωρίου στο σταθμό μέτρησης "Γεώτρηση" από ότι στο σταθμό μέτρησης "Σουλού". Επίσης παρατηρείται σε όλα μια μεγάλη διασπορά των σημείων στο γράφημα γεγονός το οποίο ενδεχομένως υποδηλώνει επίδραση άλλων παραγόντων όπως εξορυκτικές δραστηριότητες, καιρικές μεταβολές κτλ.

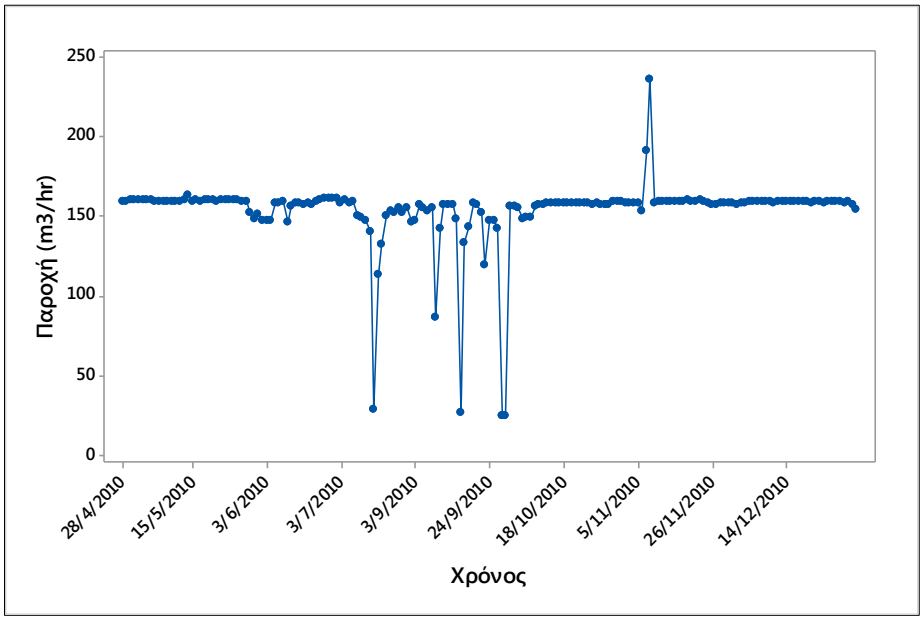
5.1.2 Διαχρονικές μεταβολές ογκομετρικών παροχών εκροών αντλιοστασίων ορυχείων και βροχόπτωσης

Η ποιότητα των υδάτων στην περιοχή μελέτης επηρεάζεται άμεσα από την ποιότητα των εισροών στο σύστημα. Οι κύριες εισροές στο σύστημα περιλαμβάνουν τις εκροές των αντλιοστασίων από τα ορυχεία αλλά και την βροχόπτωση. Για το σκοπό αυτό ήταν σημαντικό να μελετηθεί η ογκομετρική παροχή των αντλιοστασίων αλλά και το ύψος βροχόπτωσης, έτσι ώστε να προσδιοριστούν πιθανοί συσχετισμοί με την ποιότητα των υδάτων στους σταθμούς μέτρησης και να ταυτοποιηθούν ενδεχόμενα συμβάντα ρύπανσης.

Στα παρακάτω Σχήματα 11 και 12 παρουσιάζονται, για το μελετώμενο διάστημα, οι διαχρονικές μεταβολές των ογκομετρικών παροχών των εκροών υδάτων από τα αντλιοστάσια ορυχείων Καρδιάς και Νότιου Πεδίου στο ρέμα Σουλού.



Σχήμα 11. Διαχρονική μεταβολή ογκομετρικής παροχής των διοχετευομένων υδάτων από το αντλιοστάσιο ορυχείου Καρδιάς στο ρέμα Σουλού



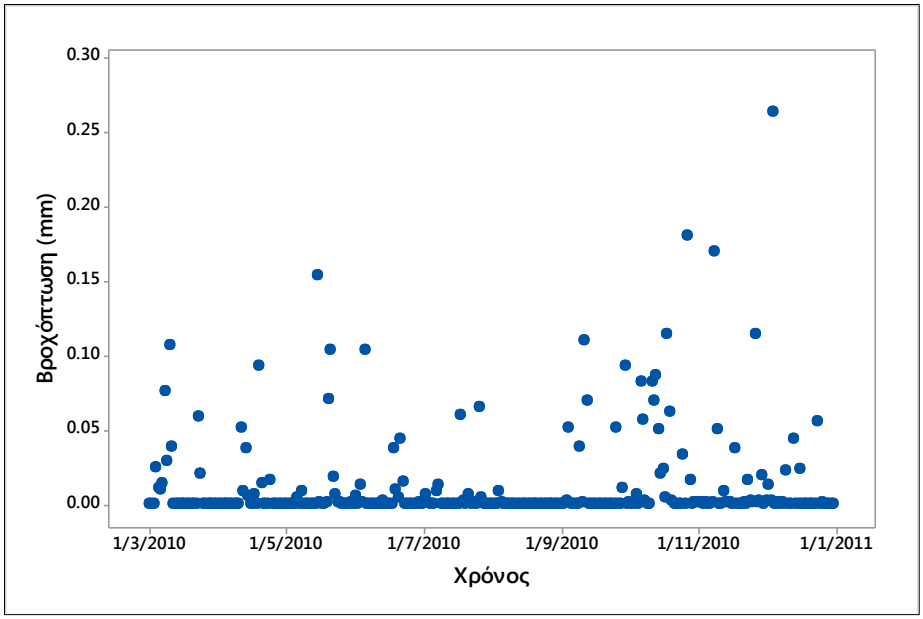
Σχήμα 12. Διαχρονική μεταβολή ογκομετρικής παροχής των διοχετευομένων υδάτων από το αντλιοστάσιο ορυχείου Νοτίου Πεδίου στο ρέμα Σουλού

Και στις δύο παραπάνω περιπτώσεις παρατηρείται σταθεροποιημένη τάση μεταβολής με εύρος τιμών κυμαινόμενο μεταξύ 230-270 m^3/hr για το αντλιοστάσιο ορυχείου Καρδιάς και στην περιοχή των 160 m^3/hr για το αντλιοστάσιο ορυχείου Νότιου Πεδίου με υψηλότερες διακυμάνσεις σε ορισμένα χρονικά διαστήματα.

Η διακύμανση των ανωτέρω παροχών οφείλεται κατά κύριο λόγο στον τρόπο λειτουργίας των αντλιοστασίων των ορυχείων. Πιο συγκεκριμένα, κάθε ορυχείο διαθέτει ένα κεντρικό αντλιοστάσιο, αποτελούμενο από μια ανοιχτή εκσκαφή, στη χαμηλότερη τοπογραφικά θέση και ένα μόνιμο αντλητικό συγκρότημα (βλ. Εικόνα 6). Κάθε αντλιοστάσιο συγκεντρώνει νερά προερχόμενα από τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα και κυρίως από τις εισροές υπόγειου νερού στο όρυγμα του ορυχείου. Τα νερά των αντλιοστασίων των ορυχείων αποβάλλονται στο παρακείμενο ρέμα Σουλού το οποίο διασχίζει την εξεταζόμενη περιοχή από το Νότο προς το Βορά (Σαχανίδης και Παυλουδάκης, 2001). Συνεπώς η παροχή των εκροών υδάτων από τα αντλιοστάσια των ορυχείων στο ρέμα Σουλού παρουσιάζει διακυμάνσεις ανάλογα με την χρήση των αντλιών και την ποσότητα των υδάτων προς απομάκρυνση.

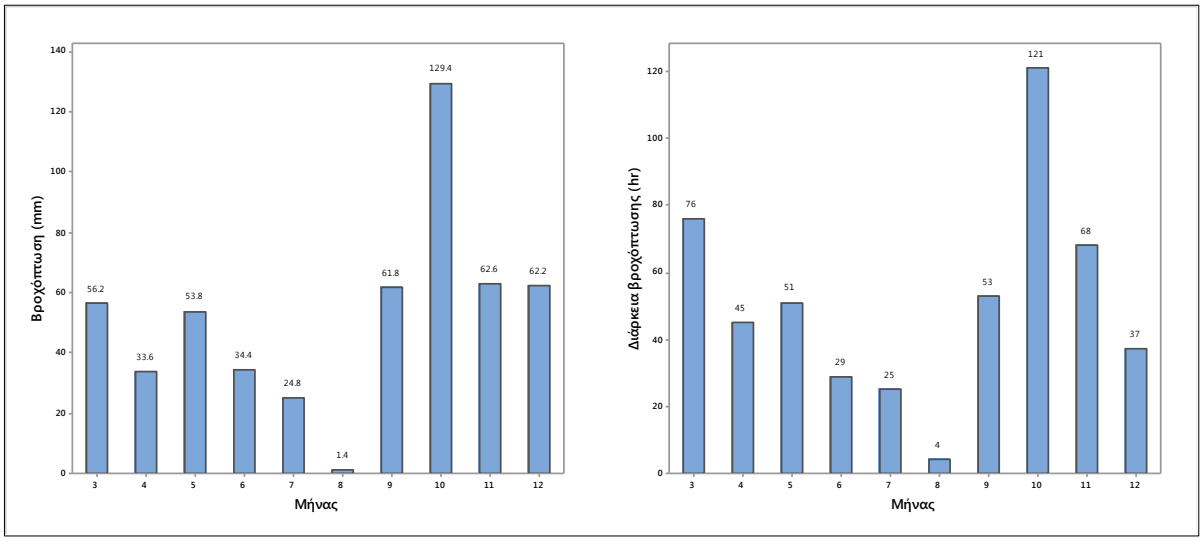
Εικόνα 6. Αντλιοστάσια ορυχείων Καρδιάς και Νότιου Πεδίου

Στα παρακάτω Σχήματα 13 και 14 παρουσιάζεται η διαχρονική μεταβολή της βροχόπτωσης, για το μελετώμενο διάστημα.



Σχήμα 13. Διαχρονική μεταβολή βροχόπτωσης

Με βάση το παραπάνω Σχήμα 13 παρατηρείται αυξημένη συχνότητα βροχόπτωσης το διάστημα 01/09/2010 - 01/01/2011 και ελαφρώς υψηλότερη σε ένταση που φτάνει μέχρι και τα 0.27 mm.



Σχήμα 14. Διαχρονική εξέλιξη της συνολικής βροχόπτωσης και των ωρών βροχόπτωσης ανά μήνα

Σύμφωνα με το παραπάνω Σχήμα 14, τον Αύγουστο επισημαίνεται η σπανιότητα της βροχόπτωσης ενώ ο Οκτώβριος δηλώνεται ως ο κατ' εξοχήν βροχερός μήνας του εξεταζόμενου δεκάμηνου. Διακρίνεται επίσης η ισότητα της ολικής βροχόπτωσης μεταξύ των μηνών Σεπτεμβρίου, Νοεμβρίου και Δεκεμβρίου (περίπου 62 mm) αλλά και η ανισότητά τους ως προς το σύνολο των ωρών βροχόπτωσης που είναι σημαντικά μικρότερο τον Δεκέμβριο.

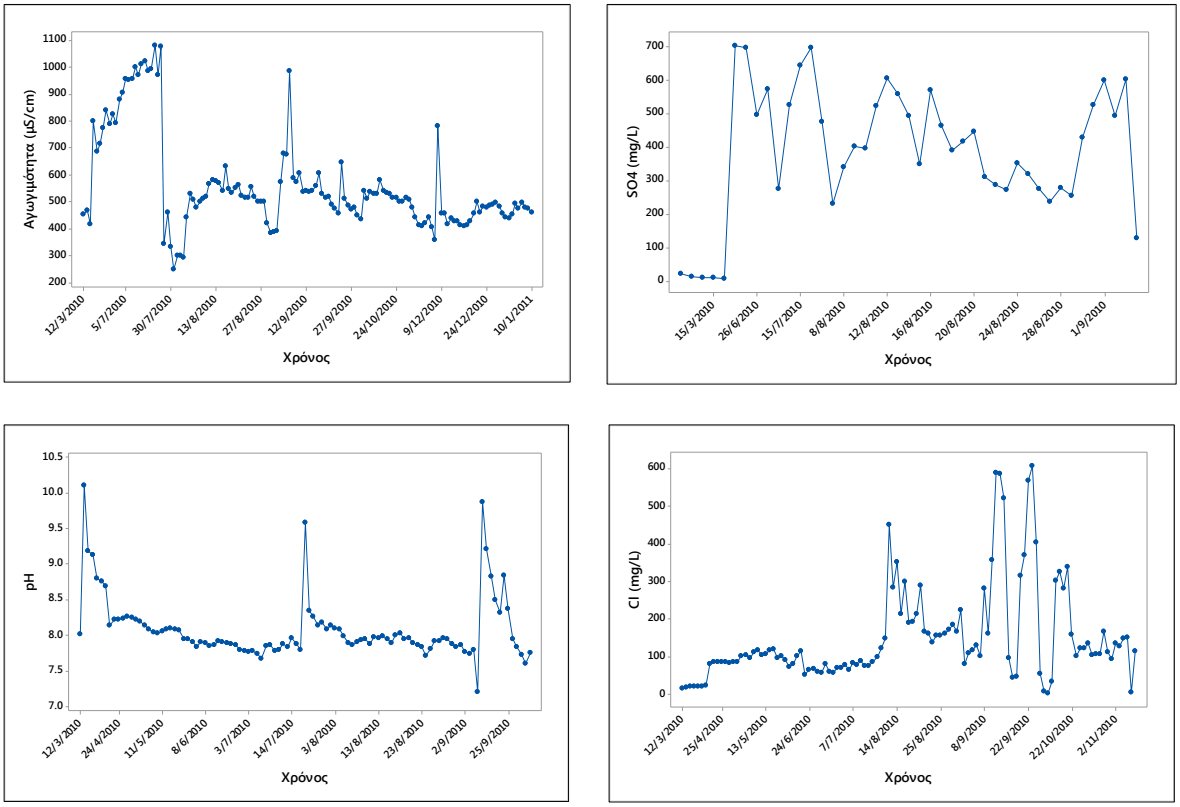
Σημειώνεται ότι τα δεδομένα βροχόπτωσης προήλθαν από τον μετεωρολογικό σταθμό Πτολεμαΐδας του δικτύου του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών σε δεκάλεπτο βήμα για την εξεταζόμενη περίοδο (Μάρτιος – Δεκέμβριος 2010).

Η συνολική παρουσίαση των μετρήσεων για όλους τους σταθμούς δεν επιτρέπει τη λεπτομερή ανάλυση των δεδομένων και τον προσδιορισμό πιθανών συμβάντων ρύπανσης ή συσχετισμών. Για το λόγο αυτό, ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων ανά σταθμό μέτρησης.

5.1.3 Διαχρονικές μεταβολές μετρούμενων φυσικοχημικών παραμέτρων ανά σταθμό μέτρησης

Στα παρακάτω Σχήματα 15 έως 17 παρουσιάζονται, για το μελετώμενο διάστημα, οι διαχρονικές μεταβολές (μέσες ημερήσιες τιμές) αναλυτικά για κάθε σταθμό μέτρησης και για κάθε μετρούμενη παράμετρο. Σημειώνεται ότι στις περιπτώσεις όπου εμφανίστηκαν σημαντικές ασυνέχειες μετρήσεων, λόγω βλάβης του εξοπλισμού ή άλλων προβλημάτων, δεν παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα.

Σταθμός μέτρησης "Σουλού"



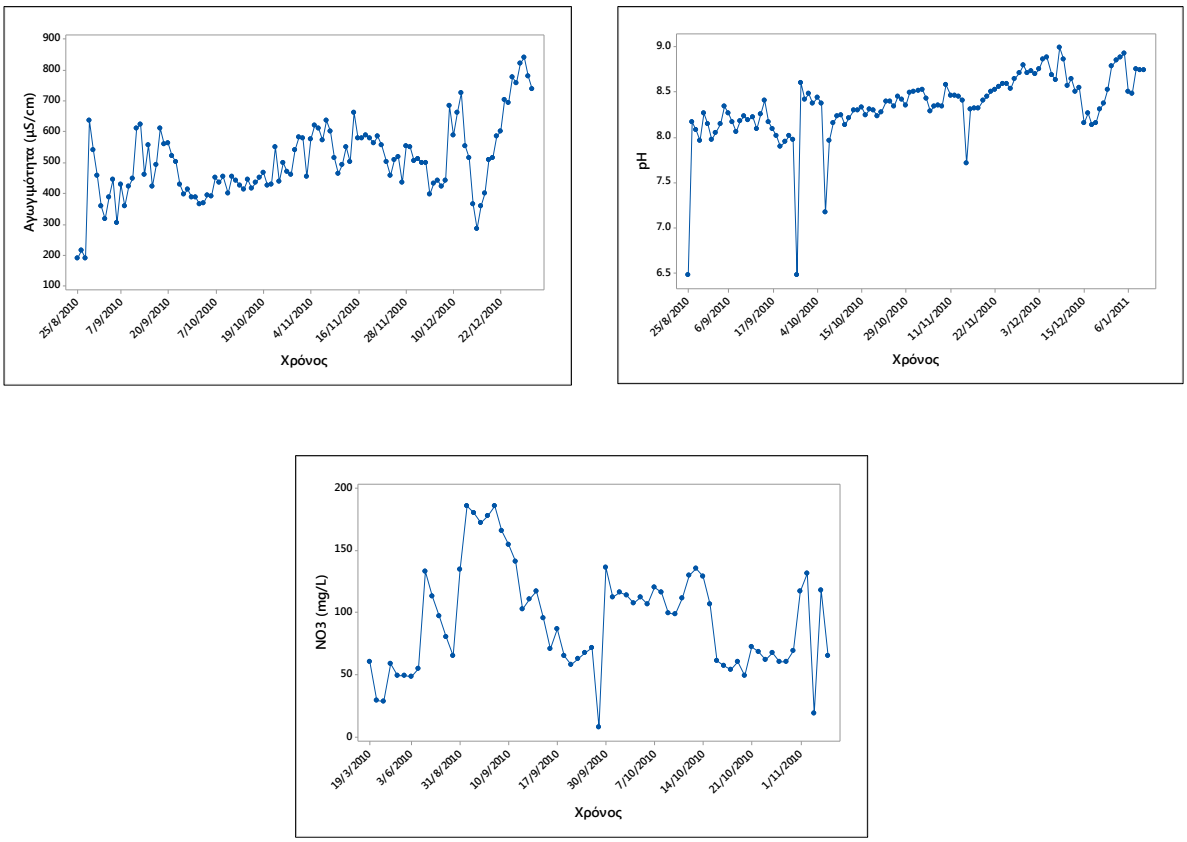
Σχήμα 15. Διαχρονική μεταβολή αγωγιμότητας, SO_4^{-2}, pH και Cl^- στο σταθμό μέτρησης "Σουλού"

Σύμφωνα με το παραπάνω Σχήμα 15, προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

- αυξητική μεταβολή της αγωγιμότητας από 12/03/210 μέχρι 30/07/2010 σε επίπεδα 1100 μS/cm περίπου και στη συνέχεια απότομη πτώση της αγωγιμότητας η οποία σταθεροποιείται σε εύρος μεταβολής 250-600 μS/cm.

- ακανόνιστη (χωρίς διαμόρφωση τάσεων) μεταβολή των θειικών ιόντων μεταξύ 200 - 700 mg/L.
- κορυφώσεις σε τρία χρονικά σημεία και ομαλή διαχρονική μεταβολή του pH.
- σταθεροποιημένη τάση μεταβολής των ιόντων χλωρίου μέχρι 14/08/2010 και στη συνέχεια μια αυξημένη διακύμανση τιμών κατά τόπους.

Σταθμός μέτρησης "ΑΗΣ Αγ. Δημητρίου"



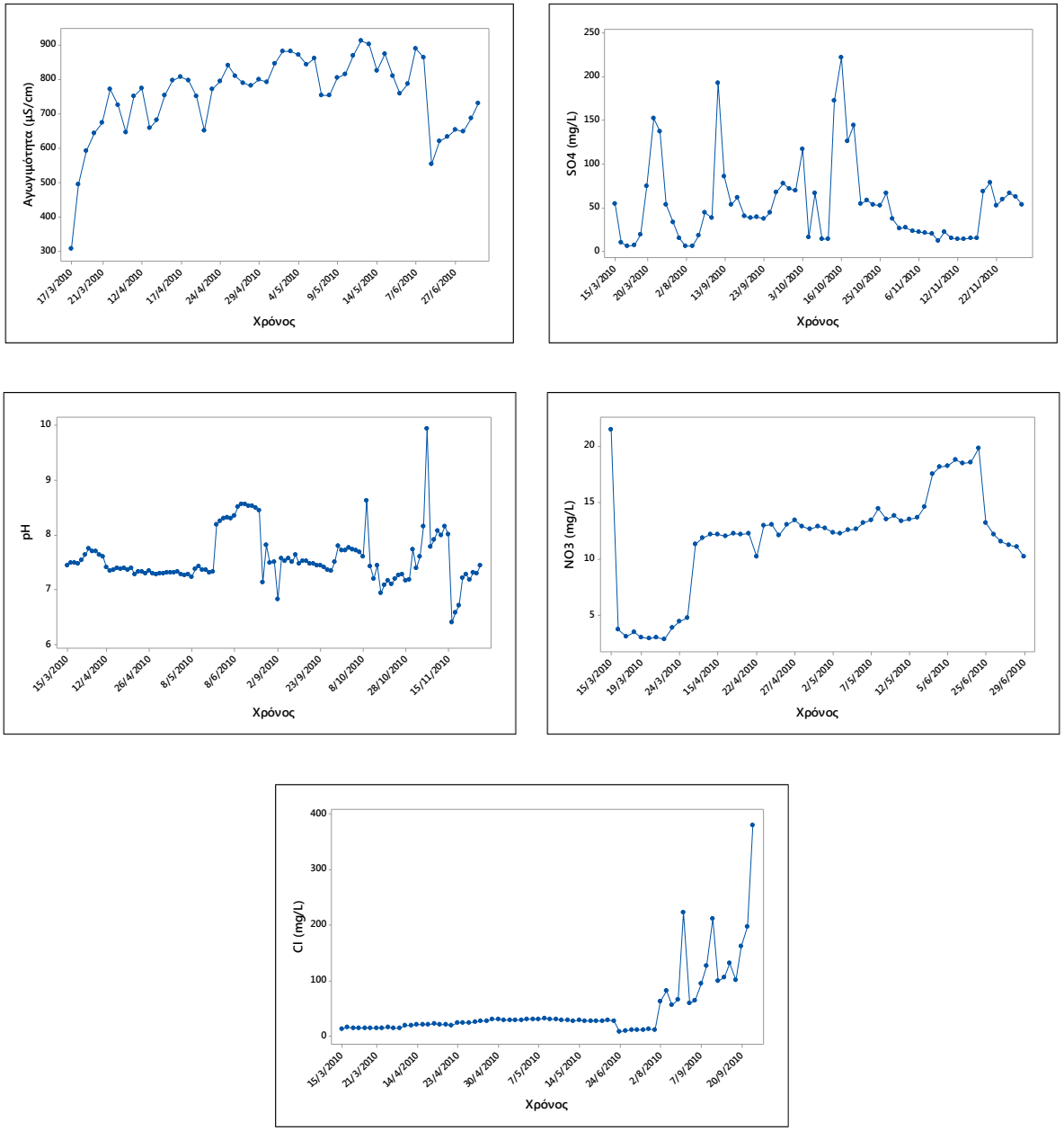
Σχήμα 16. Διαχρονική μεταβολή αγωγιμότητας, pH και NO_3^- στο σταθμό μέτρησης "ΑΗΣ Αγ. Δημητρίου"

Με βάση το παραπάνω Σχήμα 16, προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

- μια ομοιόμορφη σχετικά μεταβολή της αγωγιμότητας διαχρονικά με μικρή διακύμανση τιμών και δύο απότομες κορυφώσεις στην αρχή και τέλος της περιόδου.

- μια διαχρονική βραδεία αυξητική μεταβολή του pH, με μικρές στιγμιαίες πτώσεις των επιπέδων (σε συγκεκριμένες ημερομηνίες).
- σημαντικές διακυμάνσεις των τιμών των νιτρικών ιόντων χωρίς διαμορφωμένη τάση μεταβολής.

Σταθμός μέτρησης "Γεώτρηση"



Σχήμα 17. Διαχρονική μεταβολή αγωγιμότητας, SO_4^{-2}, pH, NO_3^- και Cl^- στο σταθμό μέτρησης "Γεώτρηση"

Με βάση το ανωτέρω Σχήμα 17 παρατηρούνται τα εξής:

- σημαντικές διακυμάνσεις του εύρους τιμών της αγωγιμότητας (500-900 μS/cm) χωρίς διαμορφωμένη τάση μεταβολής.
- ακανόνιστη διαχρονική μεταβολή των θειικών ιόντων.
- σταθεροποιημένη μεταβολή του pH μέχρι 08/06/2010 και απότομη άνοδος η οποία σταθεροποιείται εκ νέου μέχρι 02/09/2010, επάνοδος στην πρότερη κατάσταση μέχρι 08/10/2010 και στη συνέχεια μία κατά το μάλλον ή ήττον μεταβολή με διακυμάνσεις.
- σταθεροποιημένη μεταβολή των νιτρικών ιόντων στην περιοχή των 5 mg/L μέχρι 24/03/2010 η οποία συνεχίζεται με ελαφρά ανοδική τάση με νέο αρχικό επίπεδο έναρξης τη συγκέντρωση των 10 mg/L.
- σταθεροποιημένη μεταβολή της συγκέντρωσης των ιόντων χλωρίου με έναρξη αυξομειώσεων από 02/08/2010 σταθερού αυξητικού χαρακτήρα.

Από τα παραπάνω δεδομένα και τις αντίστοιχες παρατηρήσεις, φαίνεται ότι υπάρχει μια διαφορετική μεταβολή της ποιότητας των υδάτων σε κάθε σταθμό μέτρησης αλλά και για κάθε μετρούμενη παράμετρο ποιότητας. Η μεταβολή αυτή μπορεί να οφείλεται σε διαφορετικούς παράγοντες, με την βροχόπτωση να αποτελεί την κύρια αιτία που επηρεάζει την ποιότητα των υδάτων. Έτσι, στην επόμενη ενότητα έγινε μια προσπάθεια να συσχετιστούν τα δεδομένα ποιότητας με το ύψος βροχόπτωσης.

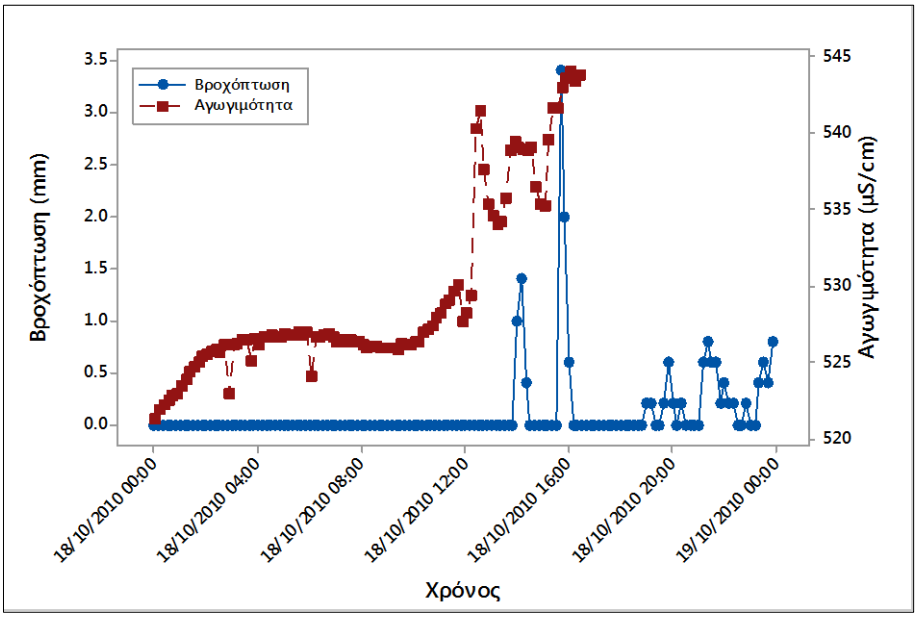
5.2 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΜΕ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ

Στην παρούσα ενότητα διερευνάται τυχόν συσχέτιση των μετρούμενων φυσικοχημικών παραμέτρων και των ογκομετρικών παροχών των εκροών αντλιοστασίων των ορυχείων με το ύψος της βροχόπτωσης με στόχο τον εντοπισμό ενδεχόμενης επίδρασης των καιρικών μεταβολών στις παραμέτρους αυτές.

Οι τυχόν επιπτώσεις της βροχόπτωσης είναι σημαντικό να μελετηθούν, ώστε να προσδιοριστεί σε ποιό βαθμό επηρεάζεται η μεταβολή των συγκεντρώσεων των μετρούμενων φυσικοχημικών παραμέτρων από το ύψος της βροχόπτωσης, καθώς και αν παρουσιάζει θετική (μείωση συγκεντρώσεων λόγω φαινομένων αραίωσης) ή αρνητική (αύξηση συγκεντρώσεων λόγω φαινομένων εκπλυσιμότητας) επίδραση στην ποιότητα των μελετώμενων επιφανειακών υδατικών πόρων.

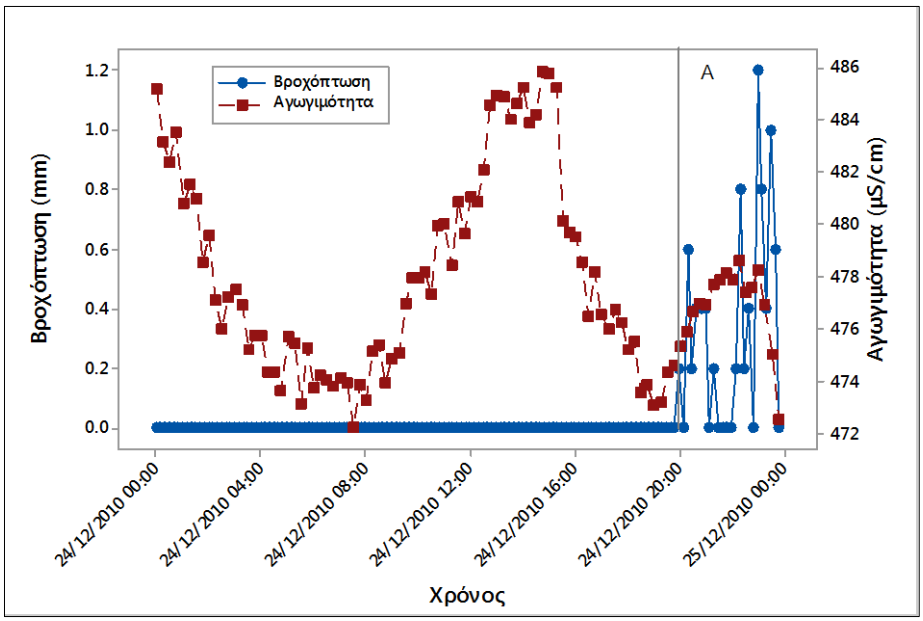
5.2.1 Συσχέτιση μετρούμενων φυσικοχημικών παραμέτρων με ύψος βροχόπτωσης

Στα παρακάτω Σχήματα 18 έως 26 παρουσιάζονται διαγραμματικά ανά ημέρα για το σταθμό μέτρησης "Σουλού" ενδεικτικές μεταβολές των μετρούμενων φυσικοχημικών παραμέτρων σε σχέση με τα παρατηρούμενα επίπεδα βροχόπτωσης που εντοπίστηκαν, για τα χρονικά διαστήματα στα οποία υπήρχαν διαθέσιμες καταγραφές παραμέτρων και σημειώθηκε βροχόπτωση.



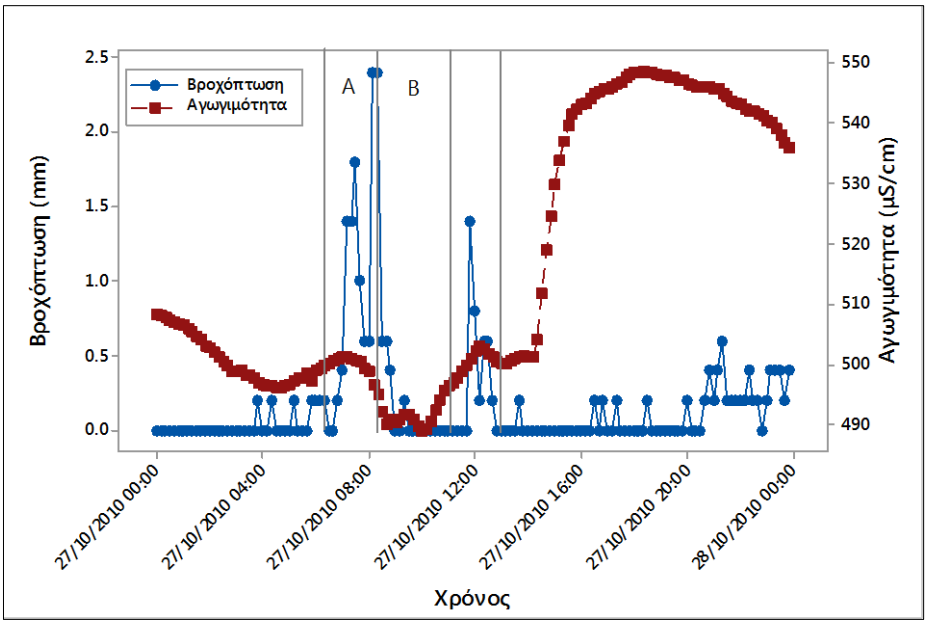
Σχήμα 18. Μεταβολή αγωγιμότητας με τη βροχόπτωση στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" (18/10/2010)

Σύμφωνα με το παραπάνω Σχήμα 18 εμφανίζονται τάσεις αυξημένης αγωγιμότητας με τη βροχόπτωση.



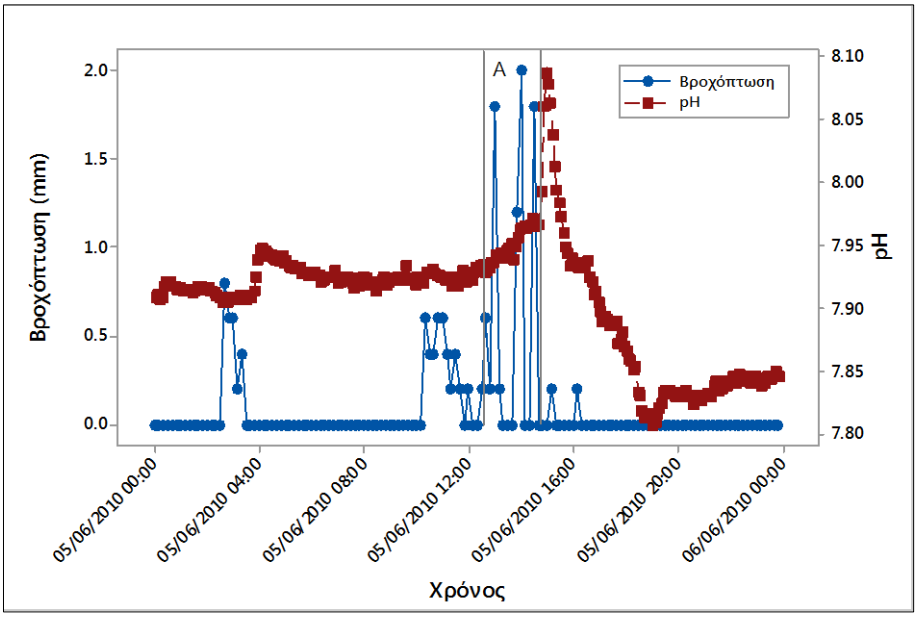
Σχήμα 19. Μεταβολή αγωγιμότητας με τη βροχόπτωση στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" (24/12/2010)

Στο παραπάνω Σχήμα 19 παρουσιάζεται αυξημένη αγωγιμότητα με την εμφάνιση βροχόπτωσης (περιοχή Α).



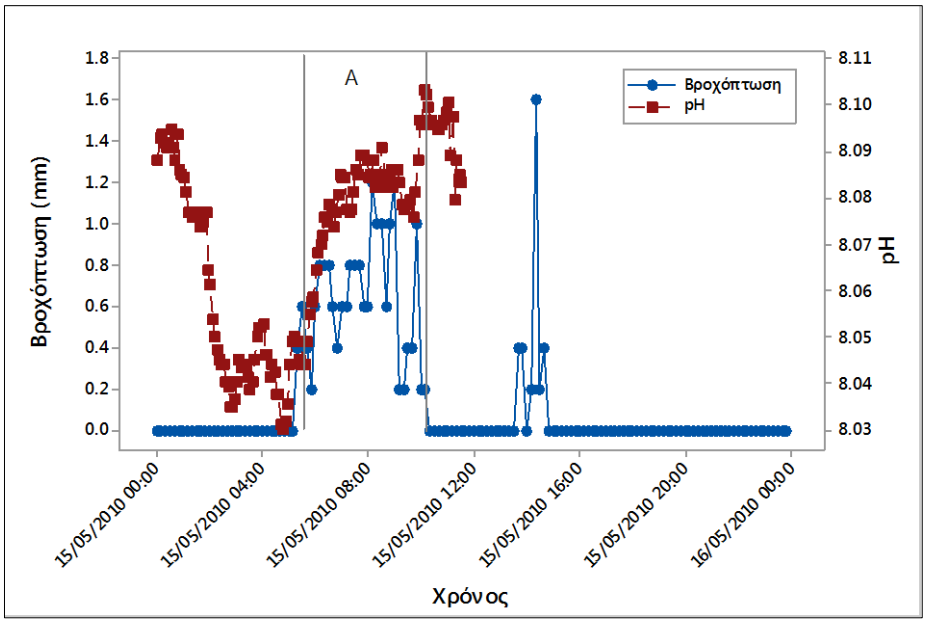
Σχήμα 20. Μεταβολή αγωγιμότητας με τη βροχόπτωση στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" (27/10/2010)

Στο παραπάνω Σχήμα 20 παρατηρείται θετική συσχέτιση μεταξύ αγωγιμότητας και βροχόπτωσης στις περιοχές Α και Β.



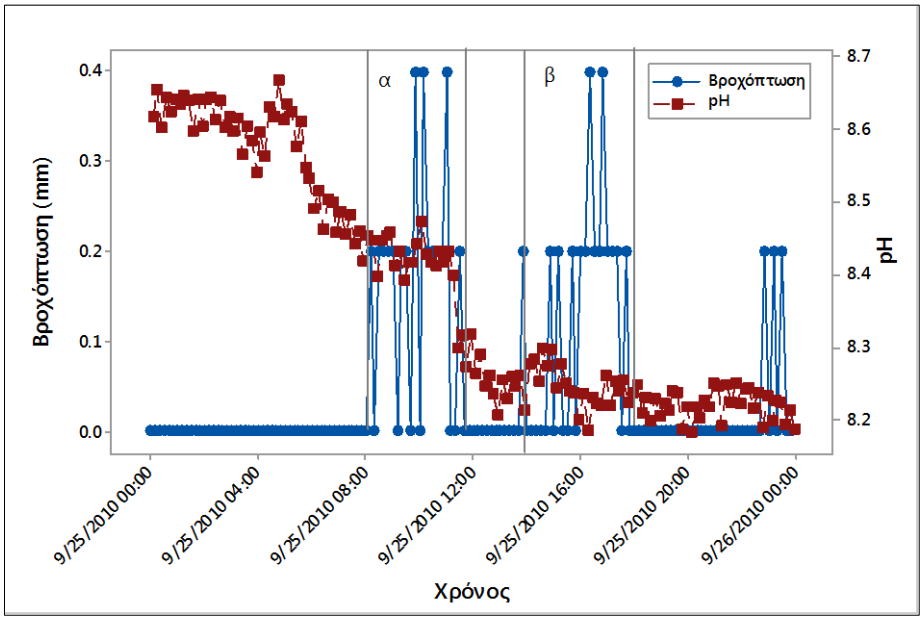
Σχήμα 21. Μεταβολή pH με τη βροχόπτωση στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" (05/06/2010)

Στο παραπάνω Σχήμα 21 εμφανίζεται αυξητική μεταβολή του pH σε έντονη βροχόπτωση στην περιοχή Α.



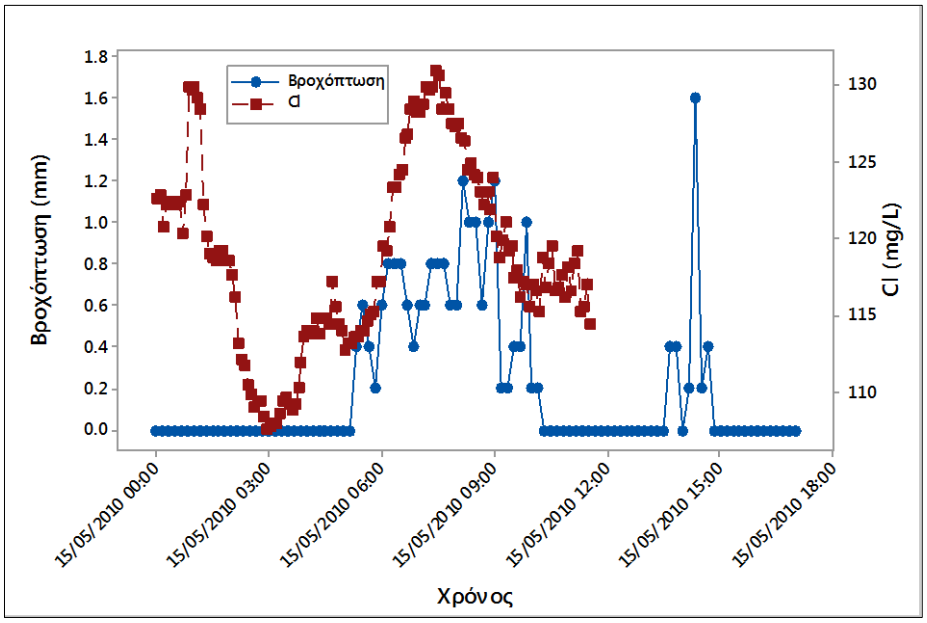
Σχήμα 22. Μεταβολή pH με τη βροχόπτωση στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" (15/05/2010)

Στο παραπάνω Σχήμα 22 εμφανίζεται αυξητική μεταβολή του pH σε έντονη βροχόπτωση στην περιοχή Α.



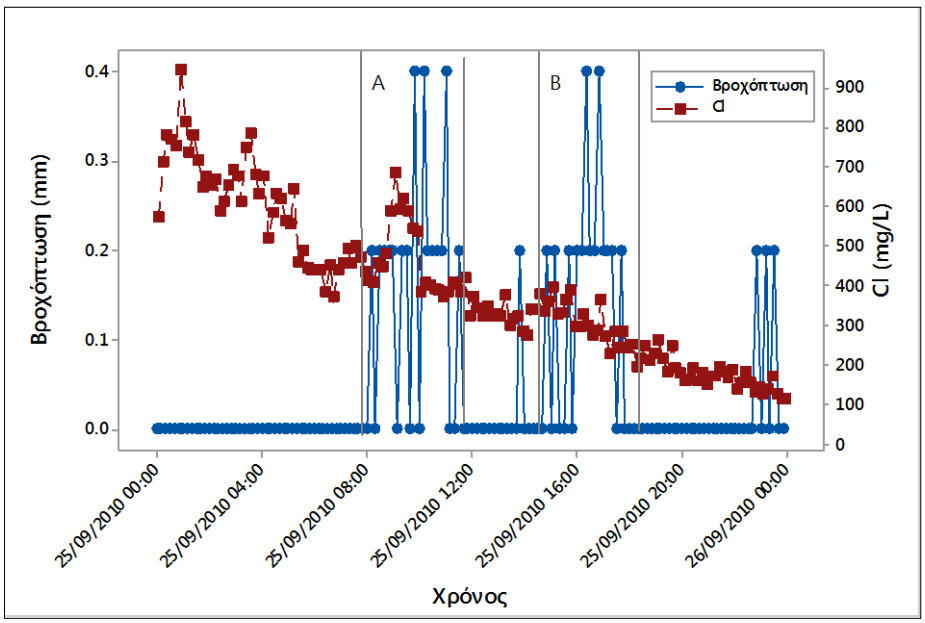
Σχήμα 23. Μεταβολή pH με τη βροχόπτωση στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" (25/09/2010)

Στο παραπάνω Σχήμα 23 παρατηρούνται ενδείξεις πρόσκαιρης αύξησης του φθίνοντος pH σε εμφάνιση βροχόπτωσης (περιοχές A και B).



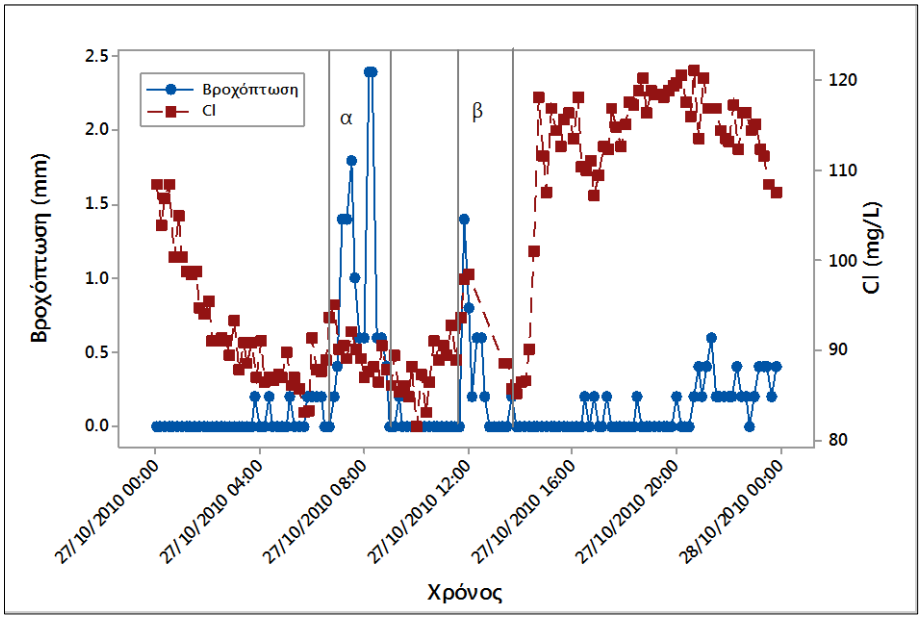
Σχήμα 24. Μεταβολή ιόντων χλωρίου με τη βροχόπτωση στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" (15/05/2010)

Στο παραπάνω Σχήμα 24 παρατηρείται θετική συσχέτιση μεταξύ βροχόπτωσης και συγκέντρωσης ιόντων χλωρίου.



Σχήμα 25. Μεταβολή ιόντων χλωρίου με τη βροχόπτωση στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" (25/09/2010)

Στο παραπάνω Σχήμα 25, παρατηρείται ανάσχεση της πτωτικής τάσης της συγκέντρωσης των ιόντων χλωρίου στις περιοχές Α και Β με την εκδήλωση της βροχόπτωσης, γεγονός το οποίο υποδηλώνει πιθανή θετική συσχέτιση μεταξύ τους.



Σχήμα 26. Μεταβολή ιόντων χλωρίου με τη βροχόπτωση στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" (27/010/2010)

Σύμφωνα με το παραπάνω Σχήμα 26, παρατηρείται ένδειξη θετικής συσχέτισης μεταξύ βροχόπτωσης και συγκέντρωσης ιόντων χλωρίου στις περιοχές Α και Β.

Γενικά, παρατηρείται θετική συσχέτιση μεταξύ των συγκεντρώσεων των μετρούμενων παραμέτρων και της βροχόπτωσης γεγονός που ενδεχομένως υποδηλώνει την ύπαρξη φαινομένων έκπλυσης των ιόντων και μεταφορά τους στο ρέμα Σουλού.

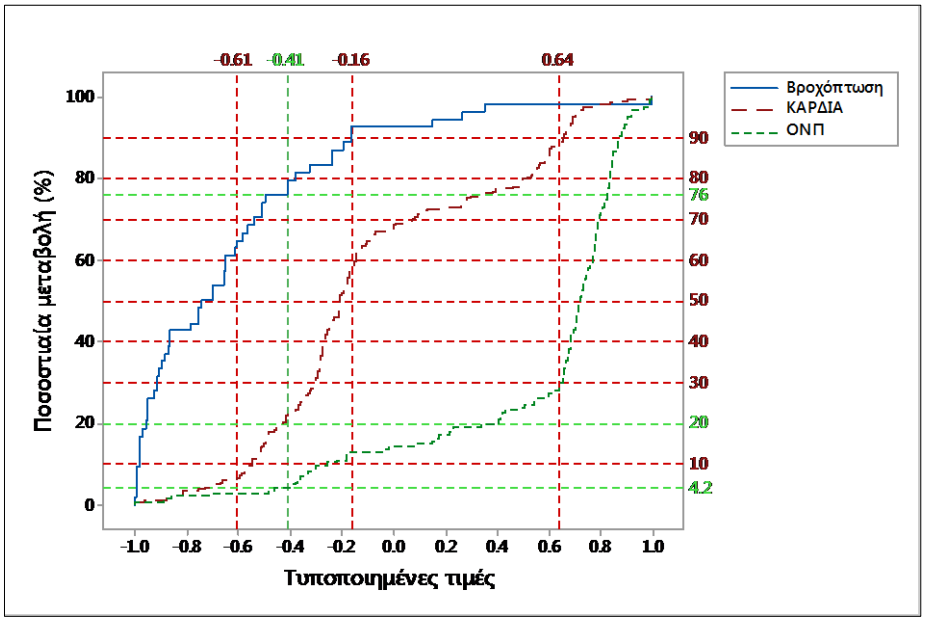
5.2.2 Συσχέτιση ογκομετρικής παροχής εκροών αντλιοστασίων ορυχείων με ύψος βροχόπτωσης

Η έντονη βροχόπτωση επηρεάζει την λειτουργία των αντλιοστασίων των ορυχείων, καθώς κάθε αντλιοστάσιο συγκεντρώνει νερά προερχόμενα από τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα και τις εισροές υδάτων στο όρυγμα του ορυχείου και συνεπώς είναι σκόπιμη η συγκριτική διερεύνηση της μεταβολής των ογκομετρικών παροχών των εκροών αντλιοστασίων των ορυχείων κατά τη διάρκεια των βροχοπτώσεων.

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο της μεθοδολογίας, για λόγους σύγκρισης αρχικά ταξινομήθηκαν αυξητικά οι τιμές της βροχόπτωσης με παράλληλη πλήρη αντιστοίχιση των τιμών της παροχής στα δύο σημεία (αντλιοστάσιο ορυχείων Καρδιάς και Νοτίου Πεδίου). Στη συνέχεια απομακρύνθηκαν όλα τα δεδομένα που περιείχαν μηδενικές τιμές της βροχής και κατόπιν τυποποιήθηκαν όλες οι τιμές των μεταβλητών (αφαίρεση από τον μέσο όρο και διαίρεση με την τυπική απόκλιση) και διευθετήθηκαν σε εύρος μεταβολής -1 και +1. Η μετατροπή αυτή επιτρέπει την άμεση σύγκριση μεταβολών ανεξαρτήτως μονάδας μέτρησης των στοιχείων και έτσι προέκυψε η συνάρτηση της αθροιστικής κατανομής των μεταβλητών (βλ. παρακάτω Σχήμα 27) με τις εξής παρατηρήσεις:

Όταν η βροχόπτωση υπερβεί το 60% του όγκου της τότε ενεργοποιείται η ενίσχυση της παροχής στα δύο σημεία εκροής υδάτων σε επίπεδο τυποποιημένων τιμών -0,61. Διακριτή ενίσχυση της παροχής παρατηρείται όταν η βροχόπτωση προσεγγίζει το 76% της ολοκλήρωσής της, όπου η παροχή του νερού στο σημείο εκροής αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς ανέρχεται στο 20% ενώ στο σημείο εκροής αντλιοστασίου ορυχείου Νότιου Πεδίου (ΟΝΠ) μόλις στο 4.2% (επίπεδο τυποποίησης: -0.41). Όταν η βροχόπτωση φτάσει το 90% του όγκου της παρατηρείται αντιστοίχως και θεαματική άνοδος της παροχής κατά 60% στο σημείο εκροής αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς και κατά 13% στο σημείο εκροής αντλιοστασίου ορυχείου Νότιου Πεδίου.

Εξυπακούεται, ότι η ανοδική τάση της παροχής στο σημείο εκροής αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς ακολουθεί αρκετά ικανοποιητικά το ρυθμό της βροχόπτωσης (με μία αρχική υστέρηση) ενώ το έναυσμα αυξητικής μεταβολής στο σημείο εκροής αντλιοστασίου ορυχείου Νότιου Πεδίου παραμένει επί μακρόν αρκετά αδρανές.



Σχήμα 27. Εμπειρική αθροιστική κατανομή των μεταβλητών της βροχόπτωσης και των παροχών αντλιοστασίων ορυχείων Καρδιάς και Νότιου Πεδίου (Empirical Cumulative Distribution Function-ECDF).

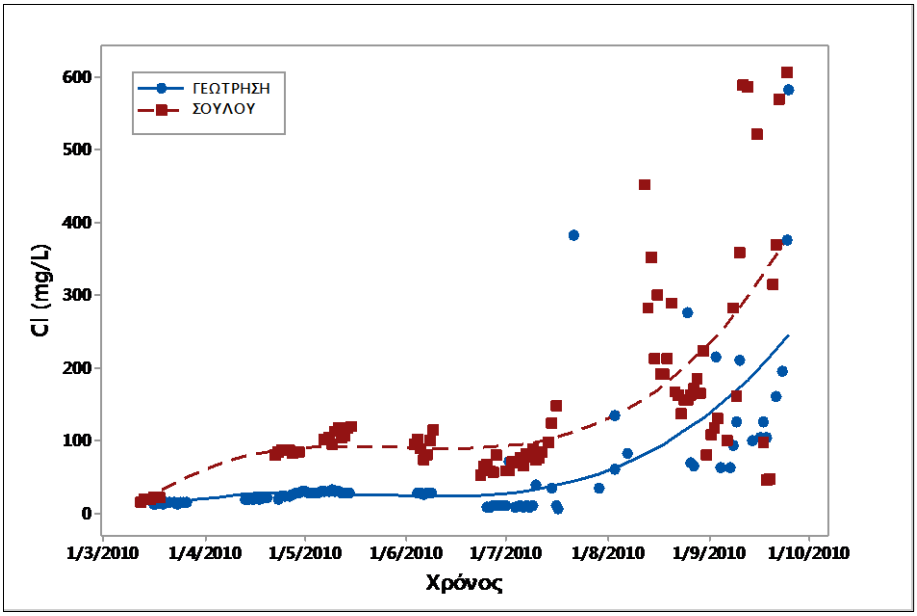
Η αντιστοίχηση των τυποποιημένων τιμών με τις μετρούμενες περιλαμβάνεται αναλυτικά σε σχετικό πίνακα στο Παράρτημα Γ.

5.3 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΔΑΤΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

5.3.1 Συσχέτιση συγκεντρώσεων μετρούμενων φυσικοχημικών παραμέτρων μεταξύ των σταθμών μέτρησης

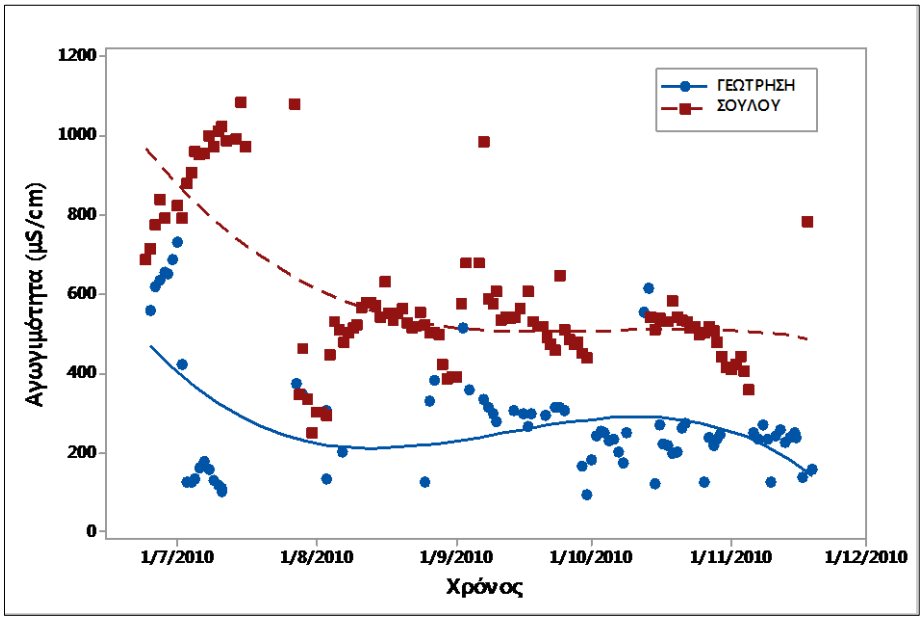
Στα πλαίσια της παρούσας έρευνας κρίθηκε σκόπιμη η διερεύνηση της συσχέτισης μεταξύ των σταθμών μέτρησης για την ίδια μετρούμενη φυσικοχημική παράμετρο με στόχο να εντοπιστεί ενδεχόμενη κοινή απόκριση ή τυχόν αλληλεπιδράσεις.

Ενδεικτικά, στα παρακάτω Σχήματα 28 έως 30 παρουσιάζεται διαγραμματικά (μέσες ημερήσιες τιμές), όπου εντοπίστηκε θετική συσχέτιση των συγκεντρώσεων φυσικοχημικών παραμέτρων μεταξύ των σταθμών μέτρησης (για τα χρονικά διαστήματα για τα οποία υπήρχαν διαθέσιμα κοινά δεδομένα).



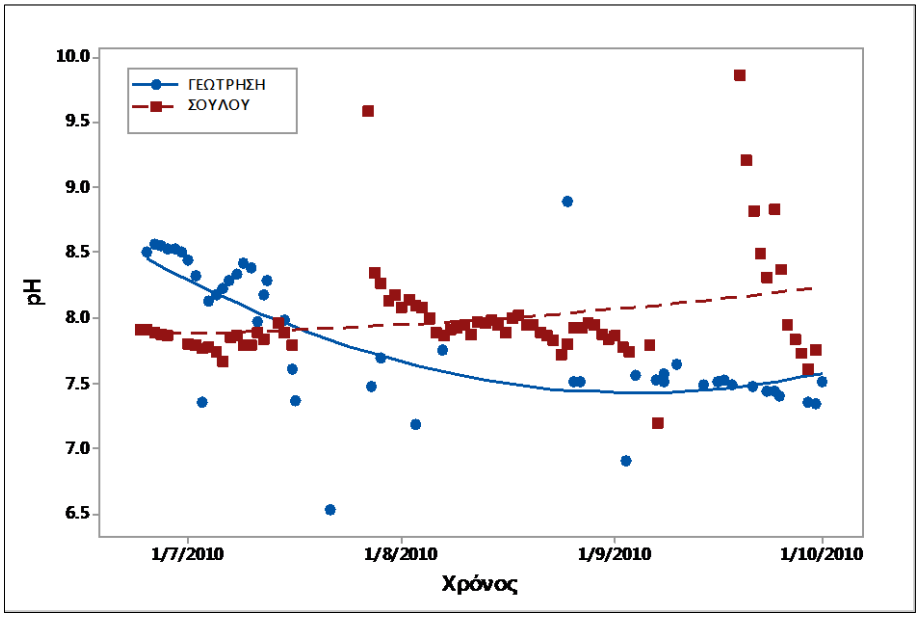
Σχήμα 28. Μεταβολή ιόντων χλωρίου στους σταθμούς μέτρησης "Σουλού" και "Γεώτρηση"

Με βάση το παραπάνω Σχήμα 28, παρατηρείται ίδια τάση μεταβολής και συνεπώς υπάρχει θετική συσχέτιση μεταξύ των ιόντων χλωρίου στους δύο σταθμούς μέτρησης για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.



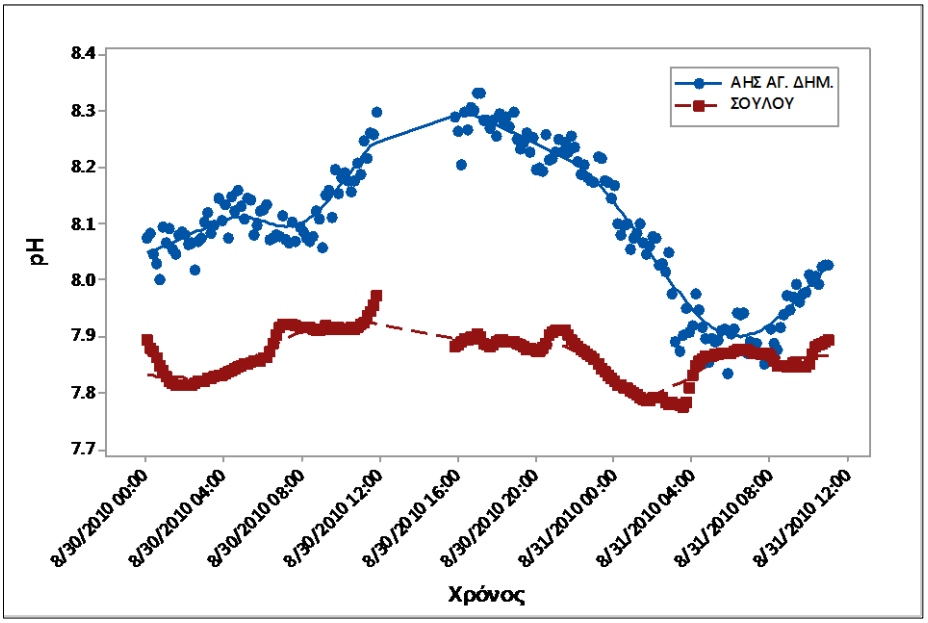
Σχήμα 29. Μεταβολή αγωγιμότητας στους σταθμούς μέτρησης "Σουλού" και "Γεώτρηση"

Με βάση το παραπάνω Σχήμα 29, παρατηρείται ίδια τάση μεταβολής και συνεπώς υπάρχει θετική συσχέτιση μεταξύ της αγωγιμότητας στους δύο σταθμούς μέτρησης για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.



Σχήμα 30. Μεταβολή pH στους σταθμούς μέτρησης "Σουλού" και "Γεώτρηση"

Σύμφωνα με το παραπάνω Σχήμα 30, δεν παρατηρείται συσχέτιση των τάσεων διαχρονικά, όμως αναπτύσσεται παρόμοια τάση μεταβολής από 01/09/2010 μέχρι 01/10/2010 μολονότι είναι μικρό το χρονικό διάστημα καταγραφής.

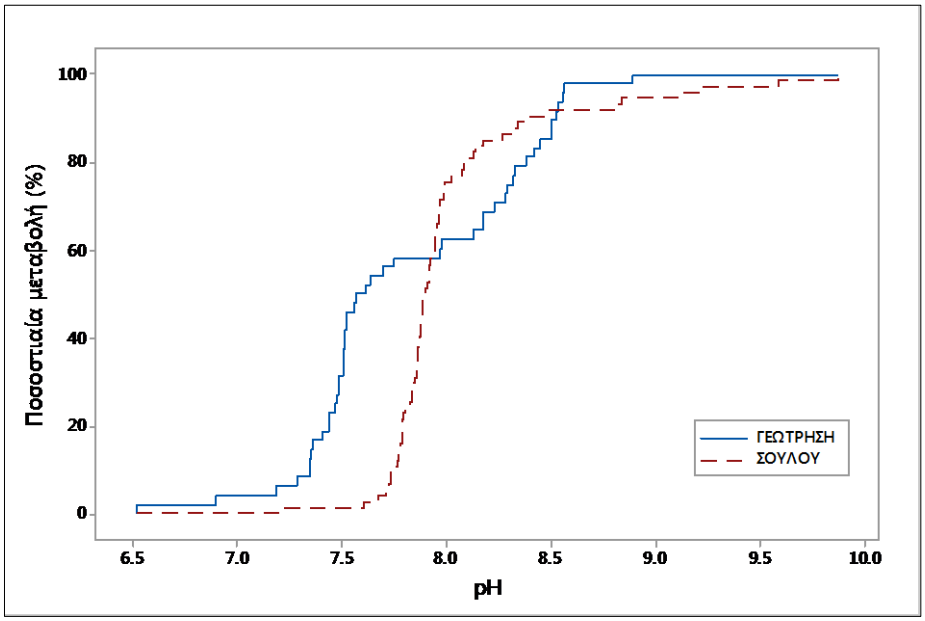


Σχήμα 31. Μεταβολή pH στους σταθμούς μέτρησης "Σουλού" και "ΑΗΣ Αγ, Δημητρίου"

Με βάση το παραπάνω Σχήμα 31 παρατηρούνται ενδείξεις παρόμοιας (θετικής) τάσης μεταβολής του pH στους δύο σταθμούς με υψηλότερες τιμές στον σταθμό μέτρησης "ΑΗΣ Αγ, Δημητρίου".

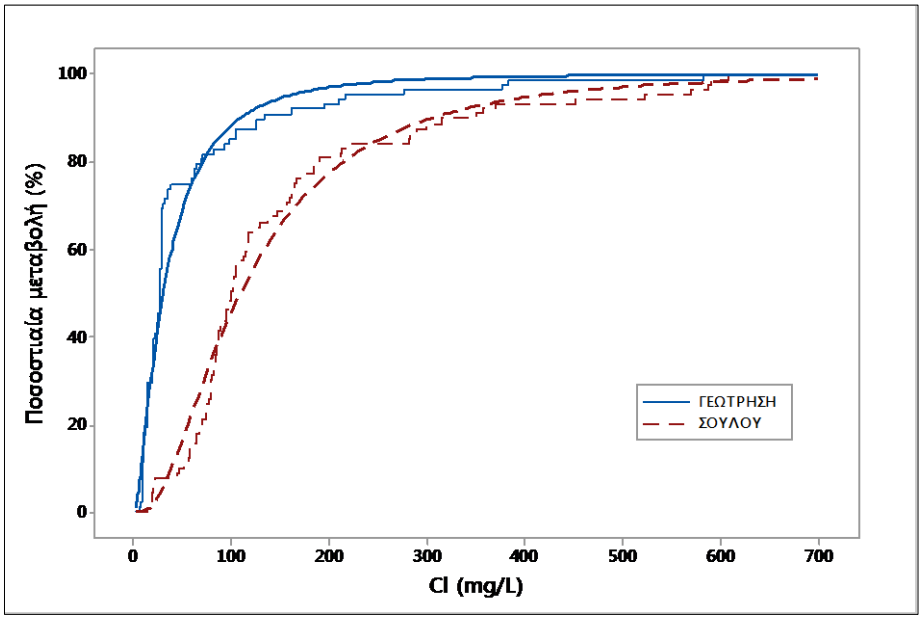
Στη συνέχεια για λόγους σύγκρισης εφαρμόστηκε η εμπειρική αθροιστική κατανομή (Empirical Cumulative Distribution Function - ECDF) των μεταβλητών για κάθε διαθέσιμη μετρούμενη φυσικοχημική παράμετρο μεταξύ των σταθμών μέτρησης. Στην περίπτωση αυτή δεν προηγήθηκε τυποποίηση των τιμών καθώς οι μεταβλητές αναφέρονται στην ίδια κλίμακα.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την διαδικασία αυτή παρουσιάζονται διαγραμματικά στα παρακάτω Σχήματα 32 έως 34.



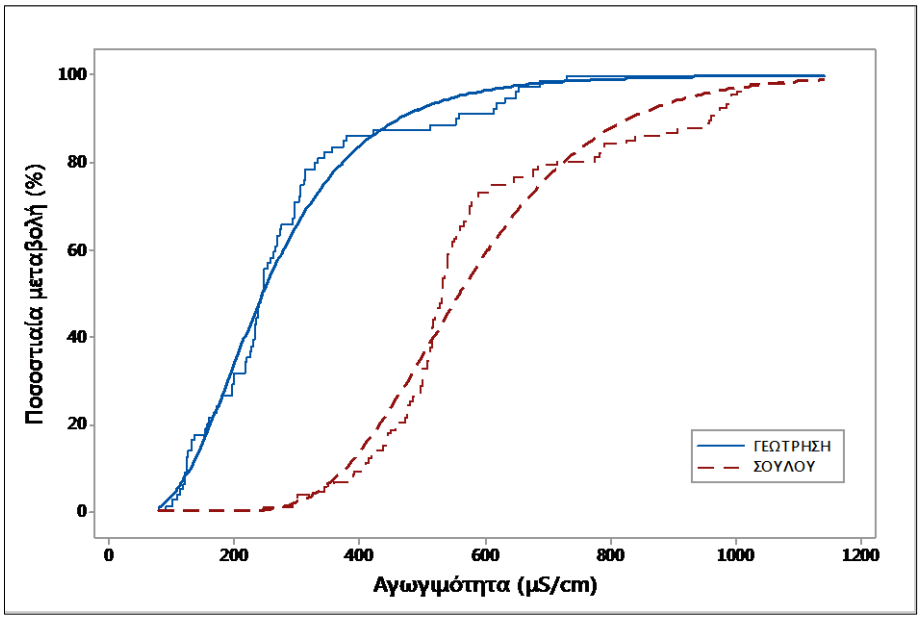
Σχήμα 32. Εμπειρική αθροιστική κατανομή του pH στους σταθμούς μέτρησης "Σουλού" και "Γεώτρηση"

Σύμφωνα με το παραπάνω Σχήμα 32, παρατηρείται ότι το 60% των τιμών του pH στο σταθμό μέτρησης "Γεώτρηση" κυμαίνεται μεταξύ 6.5 και 7.75, ενώ στο διάστημα αυτό δεν διαπιστώνεται καμία τιμή στο σταθμό μέτρησης "Σουλού", γεγονός που υποδηλώνει ότι οι τιμές pH είναι σαφώς μικρότερες στο σταθμό μέτρησης "Γεώτρηση". Στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" το 90% των τιμών κυμαίνεται μεταξύ 7.25 και 8.25.



Σχήμα 33. Εμπειρική αθροιστική κατανομή των ιόντων χλωρίου στους σταθμούς μέτρησης "Σουλού" και "Γεώτρηση"

Με βάση το παραπάνω Σχήμα 33, παρατηρείται ομοιόμορφη μεταβολή της συγκέντρωσης ιόντων χλωρίου μεταξύ των σταθμών μέτρησης "Σουλού" και "Γεώτρηση" ανεξαρτήτως χρονικής μεταβολής όπως φαίνεται στο γράφημα ECDF (της λογαριθμικής κανονικής αθροιστικής κατανομής μέσω της οποίας επιτυγχάνεται η κανονικότητα των τιμών), γεγονός που οδηγεί σε θετική συσχέτιση μεταξύ τους. Η βασική τους διαφορά έγκειται στη διαφορετική συγκέντρωση ιόντων χλωρίου που εμφανίζει μέσες αντιλογαριθμημένες τιμές 31 και 110 mg/L αντίστοιχα στους δυο σταθμούς.



Σχήμα 34. Εμπειρική αθροιστική κατανομή αγωγιμότητας στους σταθμούς μέτρησης "Σουλού" και "Γεώτρηση"

Παρατηρείται ομοιόμορφη μεταβολή της αγωγιμότητας μεταξύ σταθμών μέτρησης "Σουλού" και "Γεώτρηση" ανεξαρτήτως χρονικής μεταβολής όπως δείχνεται στο γράφημα ECDF (της λογαριθμικής κανονικής αθροιστικής κατανομής μέσω της οποίας επιτυγχάνεται η κανονικότητα των τιμών) στο Σχήμα 32, γεγονός που οδηγεί σε θετική συσχέτιση μεταξύ τους. Η βασική τους διαφορά έγκειται στη διαφορετική αγωγιμότητα που εμφανίζει μέσες αντιλογαριθμημένες τιμές 247 και 560 μS/cm αντίστοιχα στους δυο σταθμούς, δηλαδή υπερδιπλάσια διαφορά.

5.3.2 Δείκτες τεκμηρίωσης της επιβάρυνσης της ποιότητας των υδάτων μεταξύ σταθμών μέτρησης

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων διευθετήθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να συγχρονίζονται με τις ημερομηνίες καταγραφής (κοινά διαστήματα μέτρησης) στους σταθμούς μέτρησης "Σουλού" (ΣΟΥΛΟΥ), "ΑΗΣ Αγ. Δημητρίου" (ΑΗΣ) και "Γεώτρηση" (ΓΕΩΤΡΗΣΗ). Με αυτό τον συγχρονισμό μπορούν να εξαχθούν σχετικά άμεσα συμπεράσματα για την ύπαρξη ενδεχόμενης επιβάρυνσης της υδάτινης μάζας του περιβάλλοντος χώρου συγκριτικά με τα δεδομένα του σταθμού μέτρησης "Γεώτρηση" (ΓΕΩΤΡΗΣΗ), ο οποίος θεωρείται ως σημείο αναφοράς.

Από την παραπάνω διευθέτηση των μετρήσεων, προέκυψε επαρκής αριθμός διαστημάτων καταγραφής ταυτόχρονα και στους τρεις σταθμούς μέτρησης ώστε να μπορεί να πραγματοποιηθεί αποδοτική στατιστική ανάλυση, μόνο για την αγωγιμότητα και το pH.

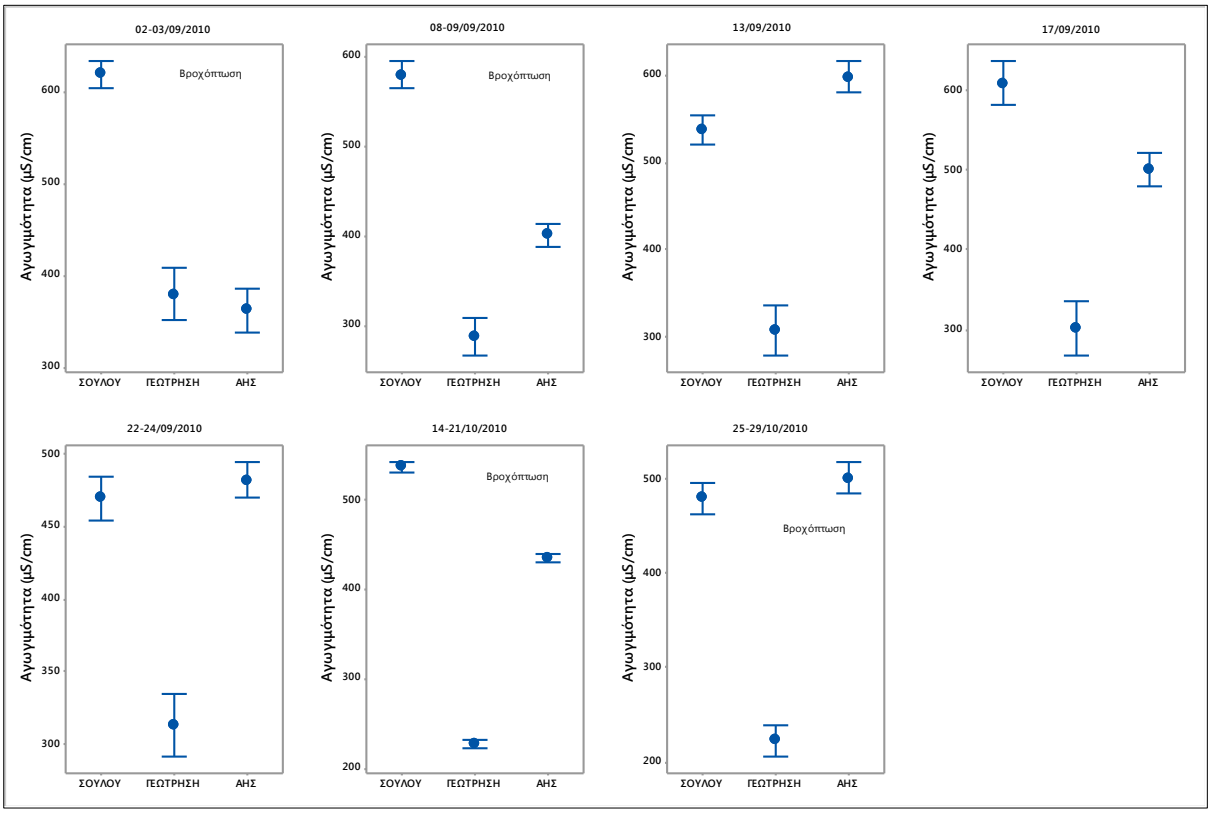
Α) Αγωγιμότητα

Από τις συνολικά 7 σύγχρονες περιόδους λήψης μετρήσεων αγωγιμότητας προέκυψαν ορισμένες όμοιες τάσεις διακύμανσης των μέσων τιμών στους διαφορετικούς σταθμούς, που παρουσιάζονται στη συνέχεια. Οι τάσεις αυτές προέκυψαν από την στατιστική ανάλυση της διακύμανσης (ANOVA) ενός παράγοντα (σταθμός με τρία επίπεδα) και την κατά ζεύγη σύγκριση των μέσων όρων με βάση τα 95% όρια εμπιστοσύνης του μέσου σφάλματος της διακύμανσης.

Συγκρίσεις μέσων όρων					**n**
ΣΟΥΛΟΥ	>	ΑΗΣ	>	ΓΕΩΤΡΗΣΗ	3
ΣΟΥΛΟΥ	=	ΑΗΣ	>	ΓΕΩΤΡΗΣΗ	2
ΣΟΥΛΟΥ	>	ΑΗΣ	=	ΓΕΩΤΡΗΣΗ	1
ΑΗΣ	>	ΣΟΥΛΟΥ	>	ΓΕΩΤΡΗΣΗ	1

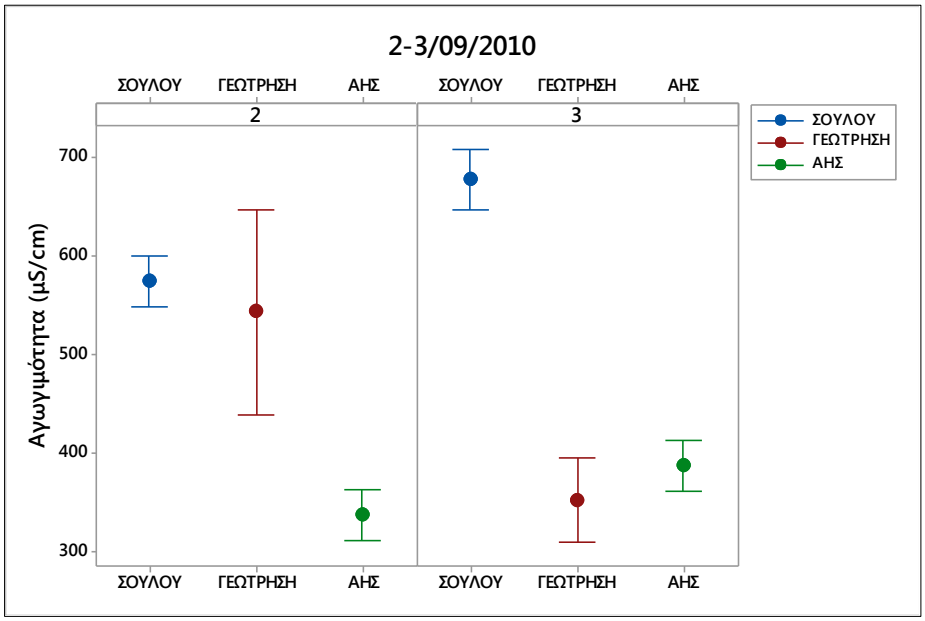
Έτσι, σύμφωνα με το παρακάτω Σχήμα 35, σε τρεις περιπτώσεις η αγωγιμότητα εμφανίζει υψηλότερες τιμές στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" (ΣΟΥΛΟΥ) και μετά στο σταθμό μέτρησης "ΑΗΣ Αγ. Δημητρίου" (ΑΗΣ) και σε μία περίπτωση οι υψηλές τιμές

εναλλάσσονται μεταξύ σταθμού μέτρησης "Σουλού" και σταθμού μέτρησης "ΑΗΣ Αγ. Δημητρίου". Συμπερασματικά, η αγωγιμότητα φέρεται μακράν με υψηλότερες τιμές στους δύο σταθμούς "Σουλού" και "ΑΗΣ Αγ. Δημητρίου" από ότι στο σταθμό μέτρησης "Γεώτρηση" (ΓΕΩΤΡΗΣΗ) και δικαίως αποτελεί ένδειξη επιβάρυνσης της ποιότητας του νερού (όχι όμως απαραίτητα και ένδειξη επεισοδίου ρύπανσης).

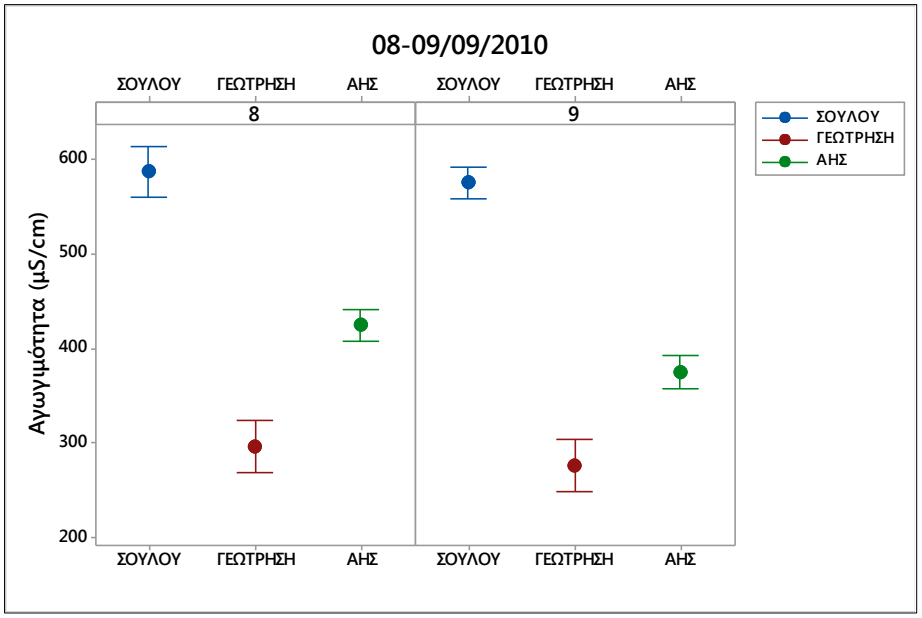


Σχήμα 35. Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης της διακύμανσης (ANOVA) ενός παράγοντα για την αγωγιμότητα στους τρεις σταθμούς μέτρησης συνολικά για 7 σύγχρονες περιόδους μέτρησης (02/09/2010 - 26/10/2010)

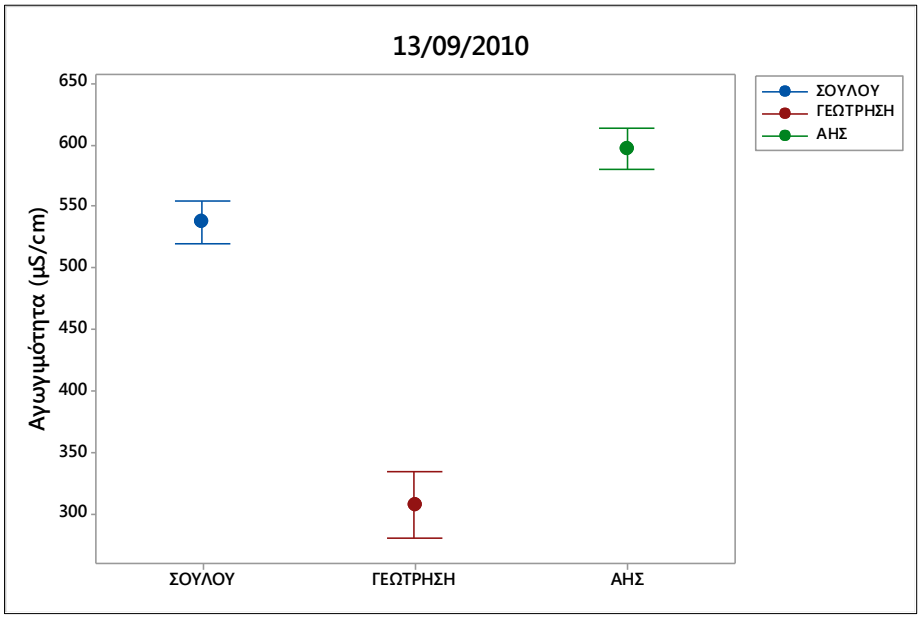
Στα επόμενα Σχήματα 36 έως 42 παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των επιμέρους ημερήσιων καταγραφών για κάθε σύγχρονη περίοδο μέτρησης, όπου παρατηρούνται απόλυτα διασαφηνισμένες οι μειωμένες τιμές αγωγιμότητας στο σταθμό μέτρησης "Γεώτρηση" συγκριτικά με τους άλλους δύο σταθμούς, πλην βέβαια μίας ημέρας (02/09/10) στην οποία ο σταθμός μέτρησης "Γεώτρηση" εμφανίζει υψηλότερη μέση αγωγιμότητα.



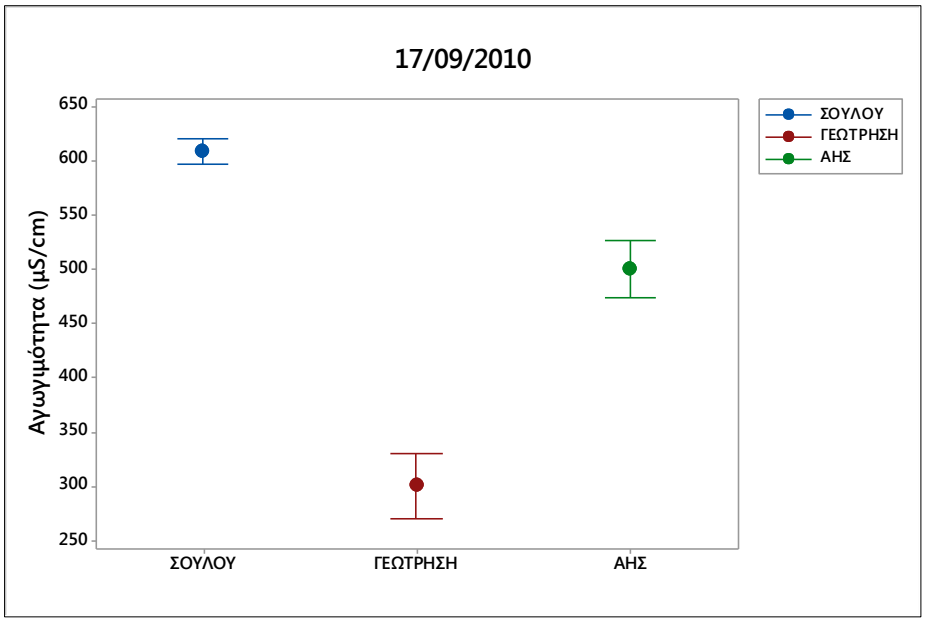
Σχήμα 36. Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης της διακύμανσης (ANOVA) ενός παράγοντα για την αγωγιμότητα στους τρεις σταθμούς μέτρησης ανά ημέρα για 1η σύγχρονη περίοδο μέτρησης (02/09/2010 - 03/09/2010)



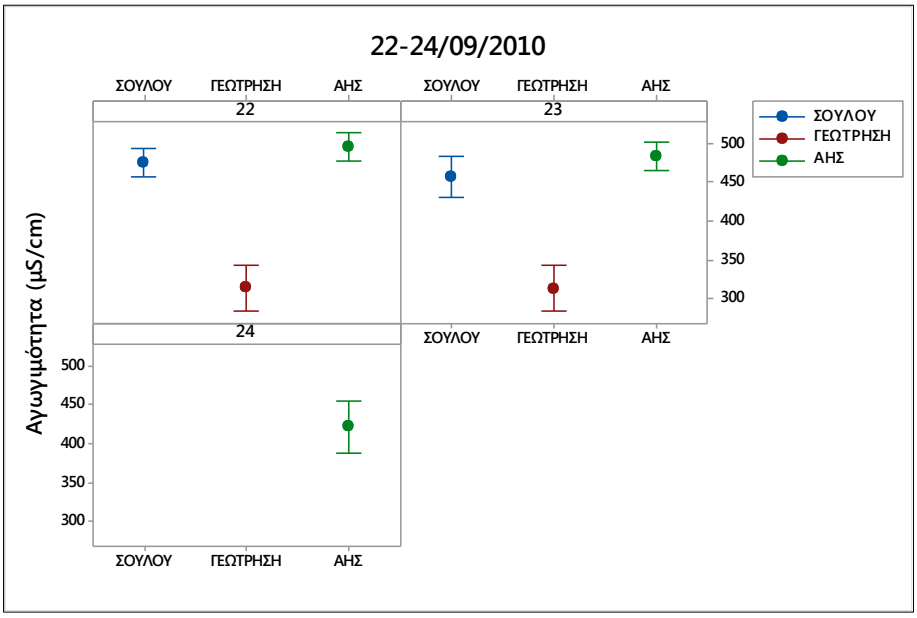
Σχήμα 37. Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης της διακύμανσης (ANOVA) ενός παράγοντα για την αγωγιμότητα στους τρεις σταθμούς μέτρησης ανά ημέρα για 2η σύγχρονη περίοδο μέτρησης (08/09/2010 - 09/09/2010)



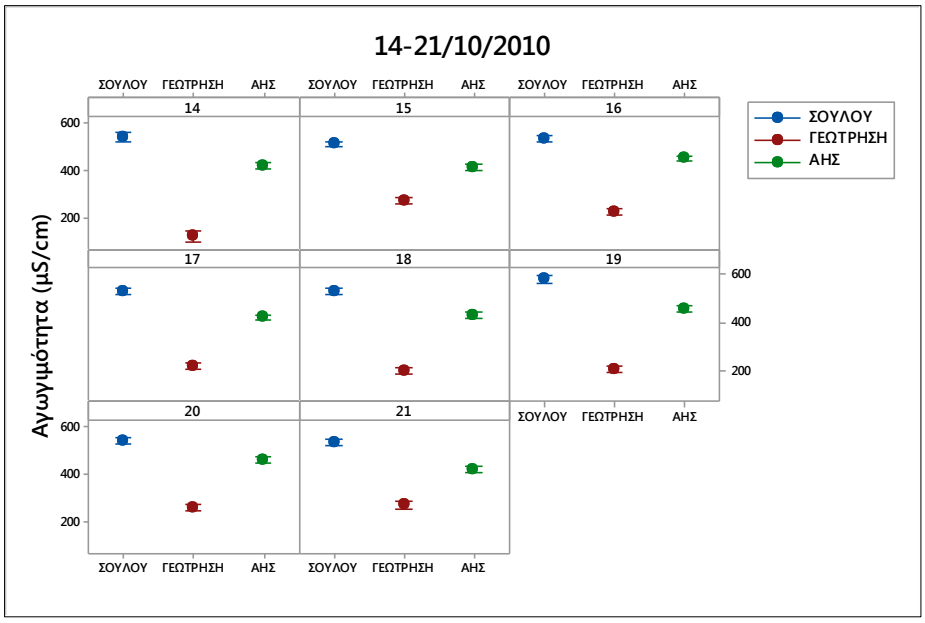
Σχήμα 38. Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης της διακύμανσης (ANOVA) ενός παράγοντα για την αγωγιμότητα στους τρεις σταθμούς μέτρησης ανά ημέρα για 3η σύγχρονη περίοδο μέτρησης (13/09/2010)



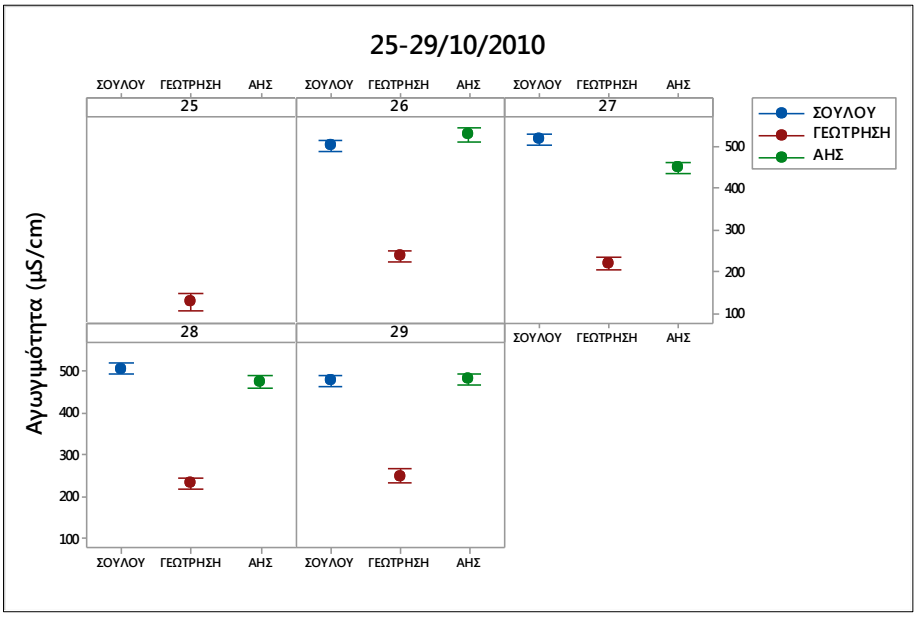
Σχήμα 39. Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης της διακύμανσης (ANOVA) ενός παράγοντα για την αγωγιμότητα στους τρεις σταθμούς μέτρησης ανά ημέρα για 4η σύγχρονη περίοδο μέτρησης (17/09/2010)



Σχήμα 40. Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης της διακύμανσης (ANOVA) ενός παράγοντα για την αγωγιμότητα στους τρεις σταθμούς μέτρησης ανά ημέρα για 5η σύγχρονη περίοδο μέτρησης (22/09/2010-24/09/2010)



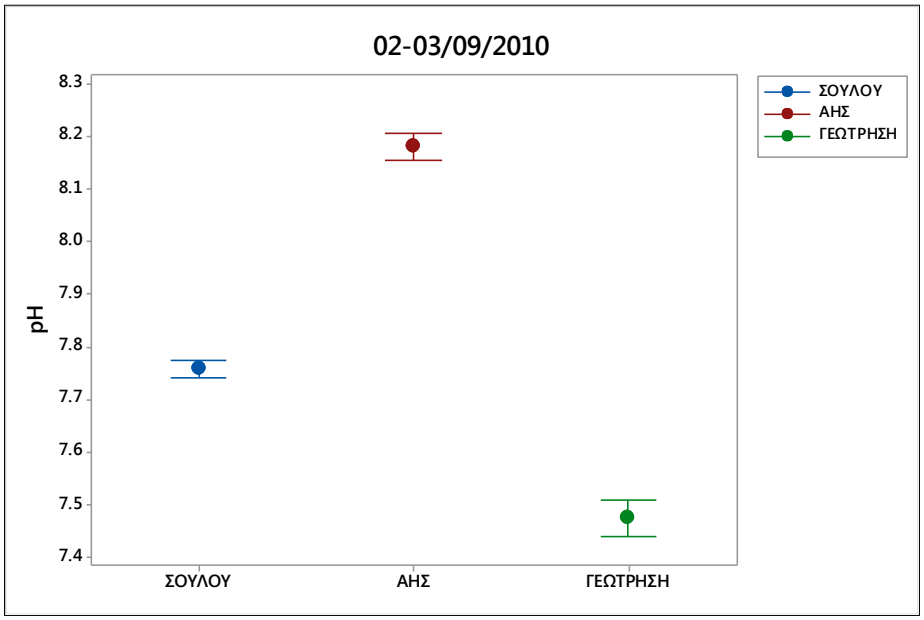
Σχήμα 41. Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης της διακύμανσης (ANOVA) ενός παράγοντα για την αγωγιμότητα στους τρεις σταθμούς μέτρησης ανά ημέρα για 6η σύγχρονη περίοδο μέτρησης (14/10/2010-21/10/2010)



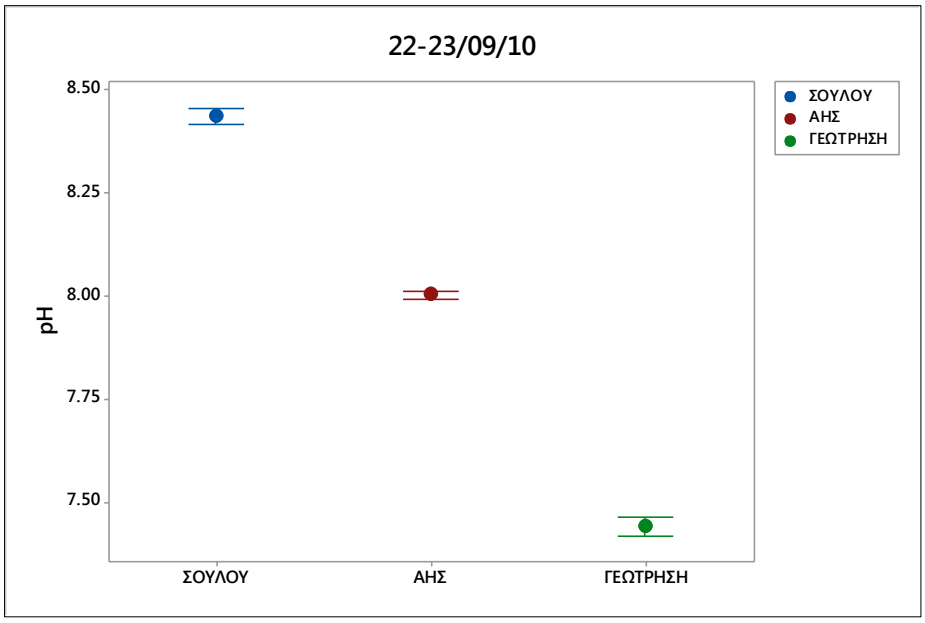
Σχήμα 42. Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης της διακύμανσης (ANOVA) ενός παράγοντα για την αγωγιμότητα στους τρεις σταθμούς μέτρησης ανά ημέρα για 7η σύγχρονη περίοδο μέτρησης (25/10/2010-29/10/2010)

Β) pH

Όπως φαίνεται στα παρακάτω Σχήματα 43 και 44, το pH παρουσιάζει όμοιες τάσεις μεταβολής το μήνα Σεπτέμβριο όπως και η αγωγιμότητα με χαμηλές τιμές στο σταθμό μέτρησης "Γεώτρηση" και με υψηλές τιμές και εναλλασσόμενες σε μέγεθος στους δύο άλλους σταθμούς, παρέχοντας ένδειξη επιβάρυνσης του υδάτινου συστήματος.

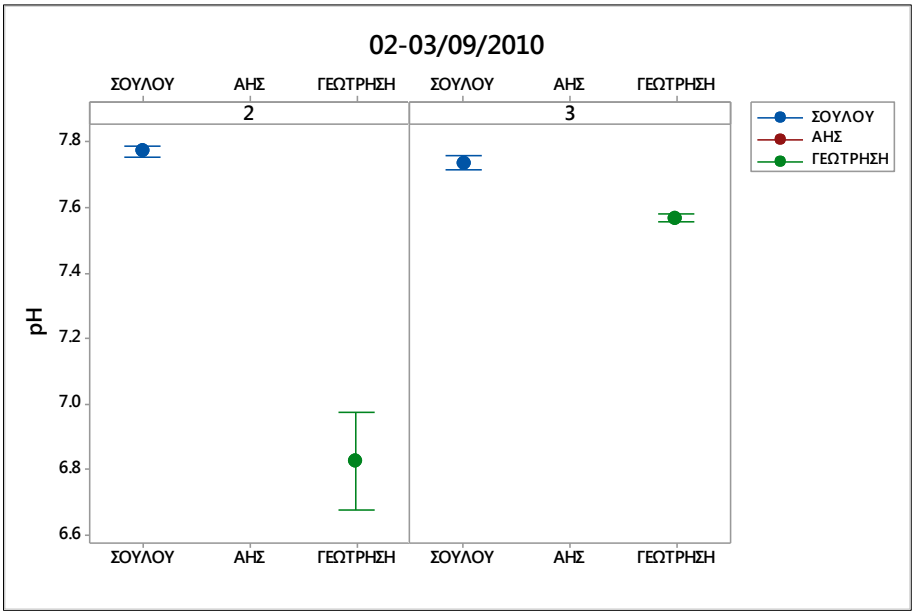


Σχήμα 43. Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης της διακύμανσης (ANOVA) ενός παράγοντα για το pH στους τρεις σταθμούς μέτρησης συνολικά για 1η σύγχρονη περίοδο μέτρησης (02/09/2010 - 03/09/2010)

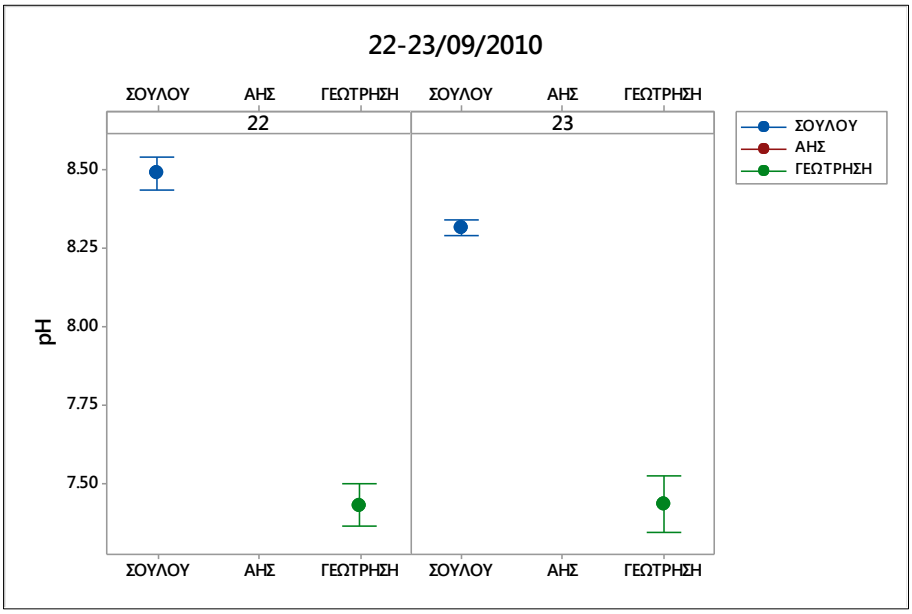


Σχήμα 44. Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης της διακύμανσης (ANOVA) ενός παράγοντα για το pH στους τρεις σταθμούς μέτρησης συνολικά για 2η σύγχρονη περίοδο μέτρησης (22/09/2010 - 23/09/2010)

Με βάση τα παρακάτω Σχήματα 45 και 46, όσον αφορά τις ημερήσιες διακυμάνσεις του pH, και μόνο για τους σταθμούς μέτρησης "Σουλού" και "Γεώτρηση", είναι εμφανής η απόσταση των μέσων τιμών μεταξύ των δύο σταθμών σε όλες τις ημέρες δειγματοληψίας.



Σχήμα 45. Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης της διακύμανσης (ANOVA) ενός παράγοντα για το pH στους τρεις σταθμούς μέτρησης ανά ημέρα για 1η σύγχρονη περίοδο μέτρησης (02/09/2010-03/09/2010)



Σχήμα 46. Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης της διακύμανσης (ANOVA) ενός παράγοντα για το pH στους τρεις σταθμούς μέτρησης ανά ημέρα για 2η σύγχρονη περίοδο μέτρησης (22/09/2010-23/09/2010)

Σημειώνεται ότι λόγω της έλλειψης μετρήσεων στα συνδυασμένα επίπεδα που αφορούν τον σταθμό μέτρησης "ΑΗΣ Αγ. Δημητρίου" σε σχέση με τους άλλους δύο σταθμούς, δεν απεικονίζονται οι μέσοι όροι των τιμών για τον συγκεκριμένο σταθμό στα παραπάνω Σχήματα 45 και 46.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα διακυμάνσεων της αγωγιμότητας και του pH στους σταθμούς μέτρησης, είναι φανερό ότι παρουσιάζονται ορισμένες τάσεις μεταβολής που μπορούν να αποδοθούν σε πιθανά επεισόδια ρύπανσης. Η ταυτοποίηση των επεισοδίων αυτών μπορεί να γίνει με κατάλληλη ανάλυση και επεξεργασία δεδομένων που παρουσιάζεται στην επόμενη ενότητα.

5.4 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΙ ΤΑΥΤΟΠΟΙΗΣΗ ΕΝΔΕΧΟΜΕΝΩΝ ΕΠΕΙΣΟΔΙΩΝ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΥΔΑΤΙΝΩΝ ΠΟΡΩΝ

Από την διαγραμματική αποτύπωση της διαχρονικής μεταβολής των παραμέτρων στην περιοχή μελέτης (βλ. ενότητα 5.1) συνολικά για την εξεταζόμενη περίοδο αποκομίζεται μια εποπτική εικόνα της συμπεριφοράς του συστήματος, αλλά δεν προκύπτουν σαφείς συσχετισμοί μεταξύ των παραμέτρων οι οποίοι να επιτρέπουν την εξαγωγή συμπερασμάτων και εκτιμήσεων για ενδεχόμενη επιβάρυνση των υδάτινων πόρων σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές. Συνεπώς απαιτείται επιπλέον ανάλυση των διαθέσιμων δεδομένων και συγκριτική αξιολόγησή τους με τη βοήθεια κατάλληλων στατιστικών τεχνικών ώστε να προκύψουν αξιοποιήσιμα αποτελέσματα.

Ο εντοπισμός μιας εμφανούς και ενδεχομένως επαναλαμβανόμενης συσχέτισης (μη συγκυριακής), η οποία μπορεί να τεκμηριωθεί ως στατιστικά σημαντική, μεταξύ των μεταβολών στις παροχές των εκροών αντλιοστασίων ορυχείων που καταλήγουν στο ρέμα Σουλού και στη συγκέντρωση των μετρούμενων φυσικοχημικών παραμέτρων στον αντίστοιχο σταθμό μέτρησης, δύναται να αποτελέσει μια τεχνική για την εκτίμηση και αναγνώριση της επιβάρυνσης του επιφανειακού υδροφορέα με ρυπαντικό φορτίο.

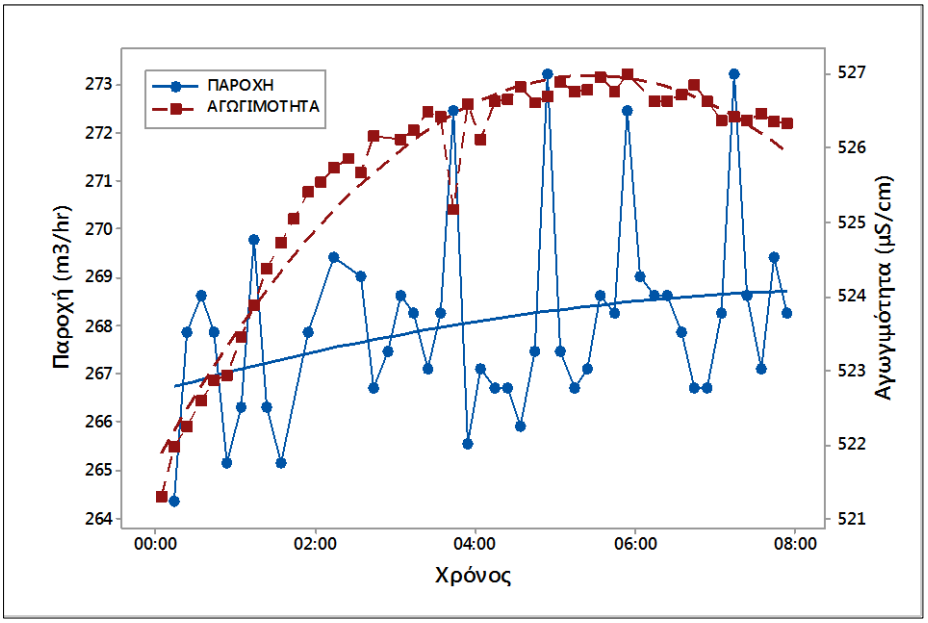
5.4.1 Διαγραμματική απεικόνιση εντοπισμού περιπτώσεων με ενδεχόμενο επεισόδιο ρύπανσης

Εξετάζοντας τα συγκεντρωτικά διαγράμματα που προέκυψαν από τις μέσες ημερήσιες τιμές των παραμέτρων όπως αυτά παρουσιάστηκαν στην ενότητα 5.1 για την συνολική περίοδο μελέτης, αρχικά εντοπίστηκαν οι ακραίες (υψηλές ή χαμηλές) τιμές τόσο των μετρούμενων φυσικοχημικών παραμέτρων στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" όσο και των παροχών των εκροών από τα αντλιοστάσια ορυχείων Καρδιάς και Νότιου Πεδίου. Για τις συγκεκριμένες ημερομηνίες που αντιστοιχούσαν στις ακραίες τιμές δημιουργήθηκαν τα συνδυαστικά διαγράμματα με τις αναλυτικές τιμές των παραμέτρων και κατόπιν εντοπίστηκαν οι περίοδοι όπου παρουσιαζόταν εμφανείς συσχετίσεις μεταξύ φυσικοχημικών παραμέτρων και παροχών.

Στα παρακάτω Σχήματα 45 έως 62 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τις περιόδους όπου υπάρχει μεγάλη πιθανότητα για ενδεχόμενο εμφάνισης επεισοδίου ρύπανσης, λαμβάνοντας υπόψη τη συσχέτιση των συγκεντρώσεων φυσικοχημικών παραμέτρων στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" και των παροχών των εκροών αντλιοστασίων ορυχείων Καρδιάς και Νότιου Πεδίου.

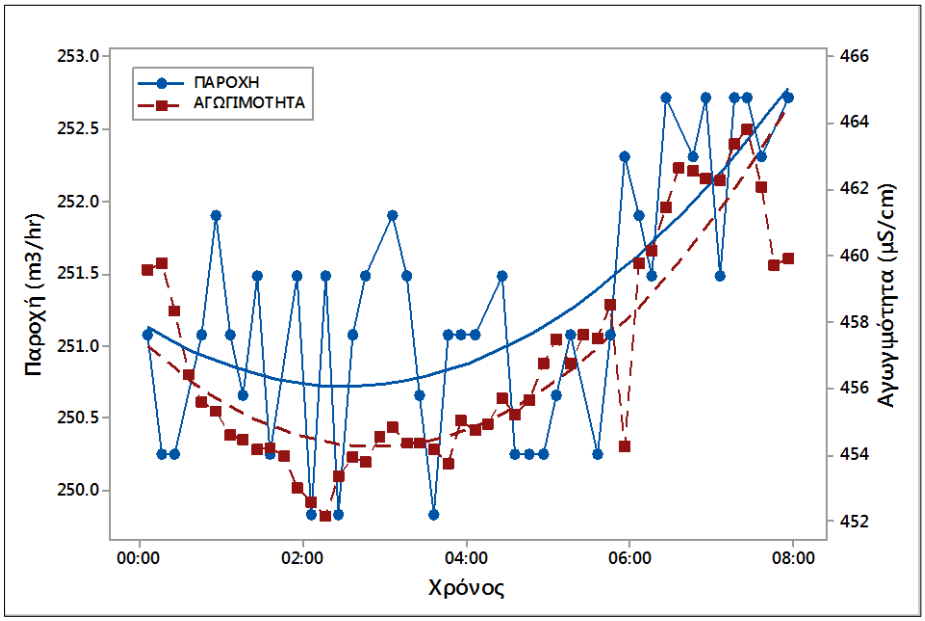
Σε όλες τις παρακάτω περιπτώσεις καταβλήθηκε προσπάθεια εφαρμογής πολυωνυμικών εξισώσεων δευτέρου ($\hat{Y}=b_0+b_1X+b_2X^2$) και τρίτου βαθμού ($\hat{Y}=b_0+b_1X+b_2X^2+b_3X^3$) για να αποτυπωθεί η καλύτερη δυνατή προσαρμογή των μεταβλητών με το χρόνο (Πετρίδης, 2000; Zar, 1999). Τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν έχουν περισσότερο περιγραφικό παρά στατιστικό χαρακτήρα.

Α) Παροχή εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς με συγκέντρωση φυσικοχημικών παραμέτρων σταθμού μέτρησης "Σουλού"



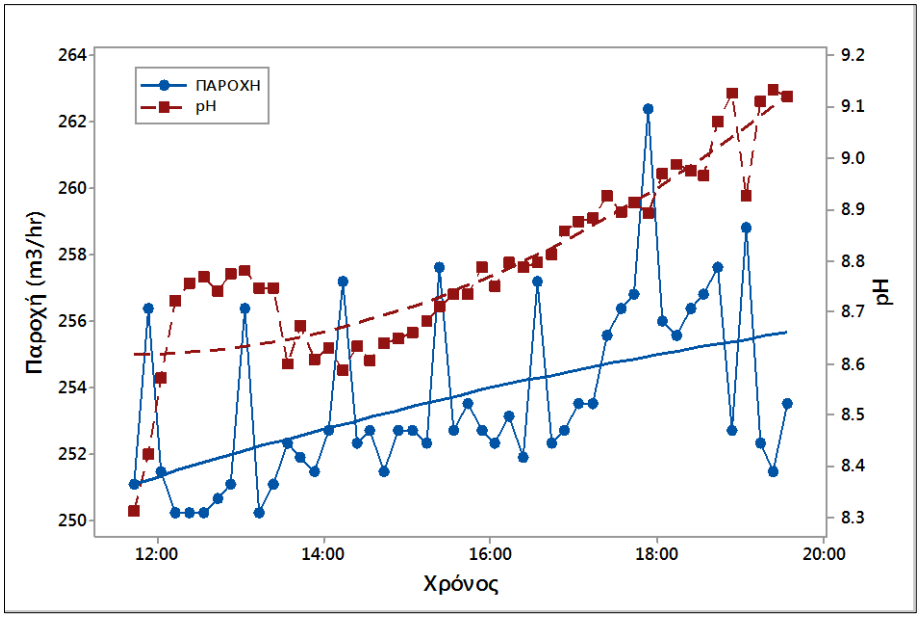
Σχήμα 47. Μεταβολή αγωγιμότητας στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" συναρτήσει της παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς (18/10/2010)

Σύμφωνα με το παραπάνω Σχήμα 47, παρατηρείται ένδειξη αυξητικής μεταβολής μεταξύ αγωγιμότητας στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" και παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς.



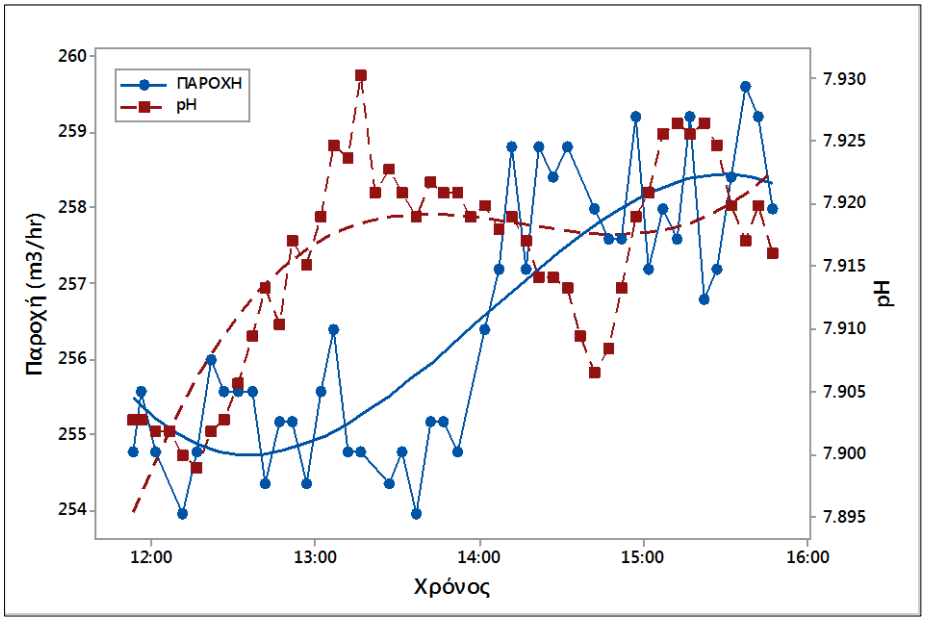
Σχήμα 48. Μεταβολή αγωγιμότητας στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" συναρτήσει της παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς (23/09/2010)

Με βάση το παραπάνω Σχήμα 48, παρατηρείται θετική συσχέτιση λόγω ομοιόμορφης αυξητικής καμπυλοειδούς τάσης μεταξύ αγωγιμότητας στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" και παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς.



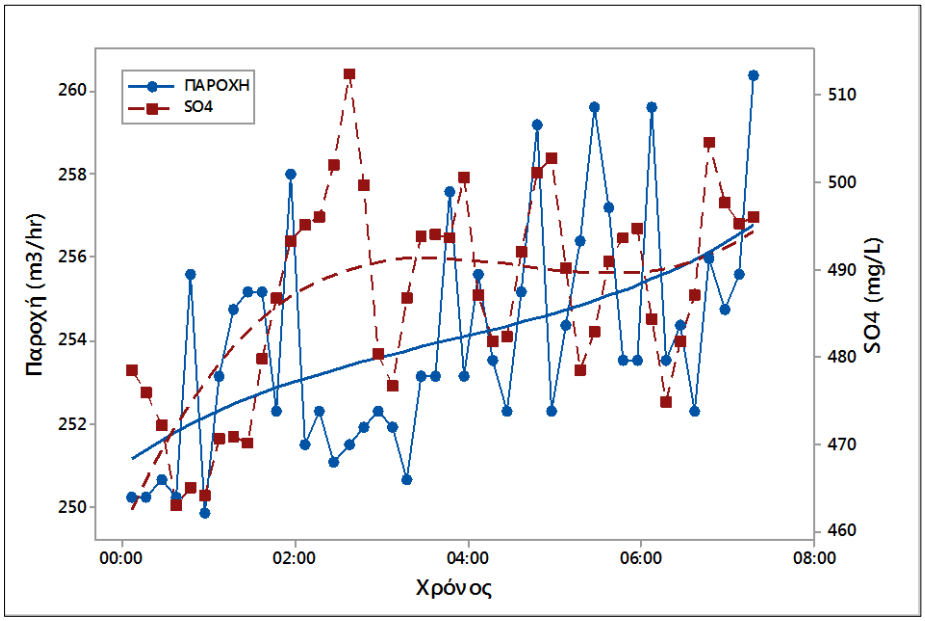
Σχήμα 49. Μεταβολή pH στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" συναρτήσει της παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς (24/09/2010)

Σύμφωνα με το παραπάνω Σχήμα 49, παρατηρείται αυξητική μεταβολή στην αγωγιμότητα στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" και στην παροχή εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς, χωρίς όμως ομοιόμορφη τάση (ανάπτυξη διαφορετικής φύσης καμπυλών).



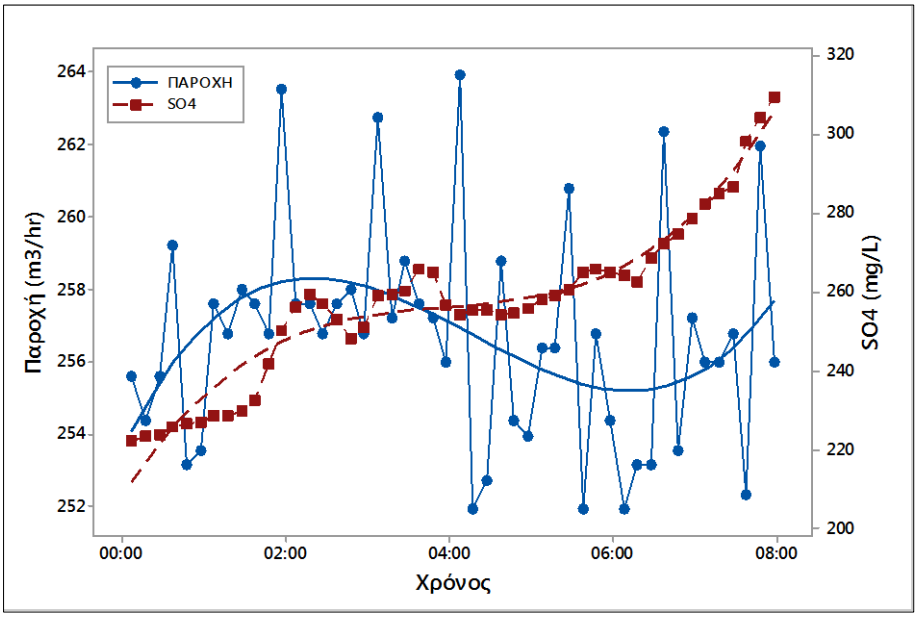
Σχήμα 50. Μεταβολή pH στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" συναρτήσει της παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς (03/06/2010)

Με βάση το παραπάνω Σχήμα 50, παρατηρείται αυξητική μεταβολή στο pH στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" και στην παροχή εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς, χωρίς όμως ομοιόμορφη τάση (ανάπτυξη διαφορετικής φύσης καμπυλών).



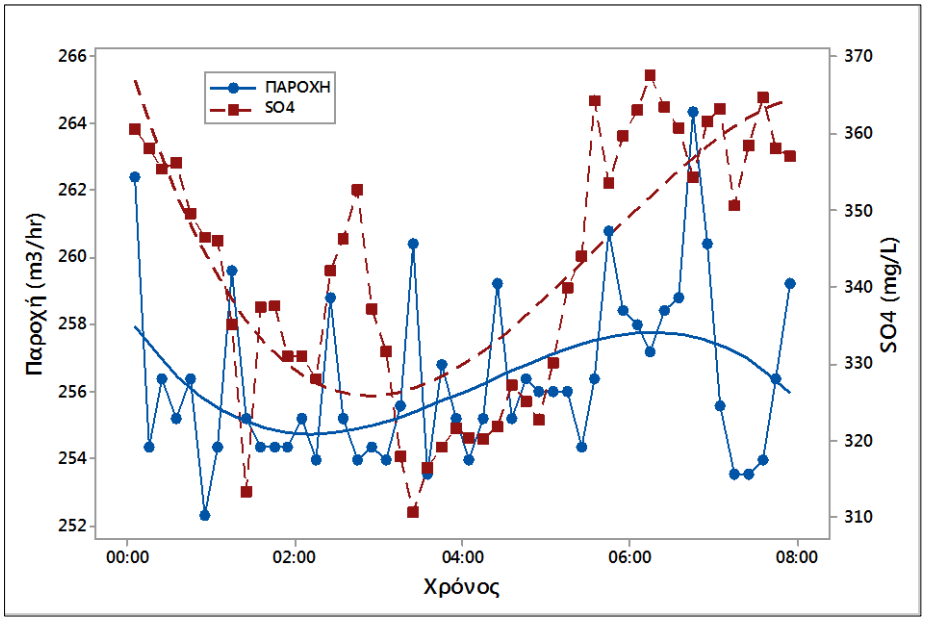
Σχήμα 51. Μεταβολή θειικών ιόντων στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" συναρτήσει της παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς (02/09/2010)

Σύμφωνα με το παραπάνω Σχήμα 51, παρατηρείται αυξητική μεταβολή στα θειικά ιόντα στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" και στην παροχή εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς, χωρίς όμως ομοιόμορφη τάση (ανάπτυξη διαφορετικής φύσης καμπυλών).



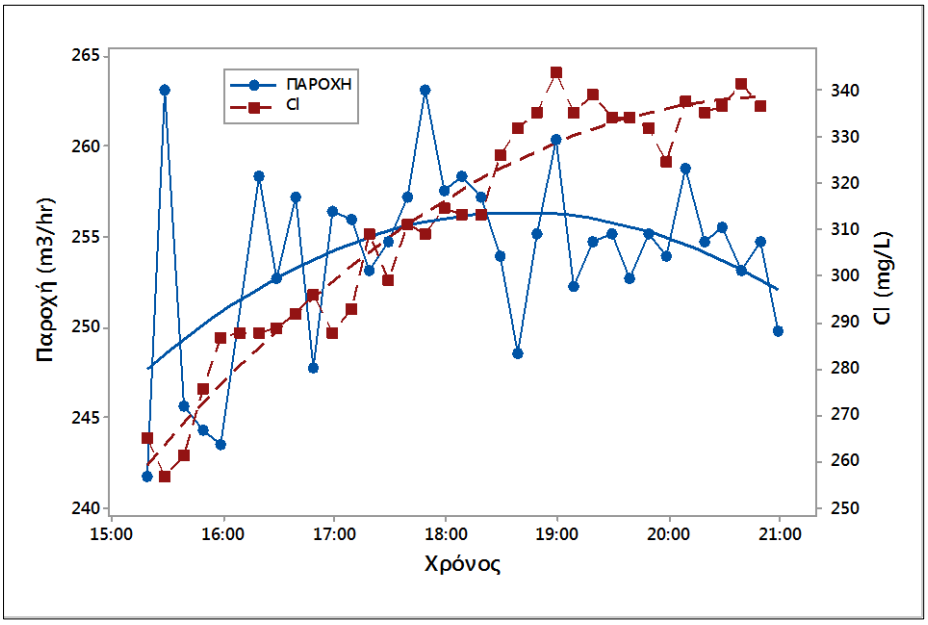
Σχήμα 52. Μεταβολή θειικών ιόντων στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" συναρτήσει της παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς (08/08/2010)

Με βάση το παραπάνω Σχήμα 52, παρατηρείται ομοιόμορφη τάση μεταβολής των θειικών ιόντων στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" και της παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς όχι κατ' ανάγκη αυξητική στο αρχικό δεύτερο μισό του σχήματος για την παροχή.



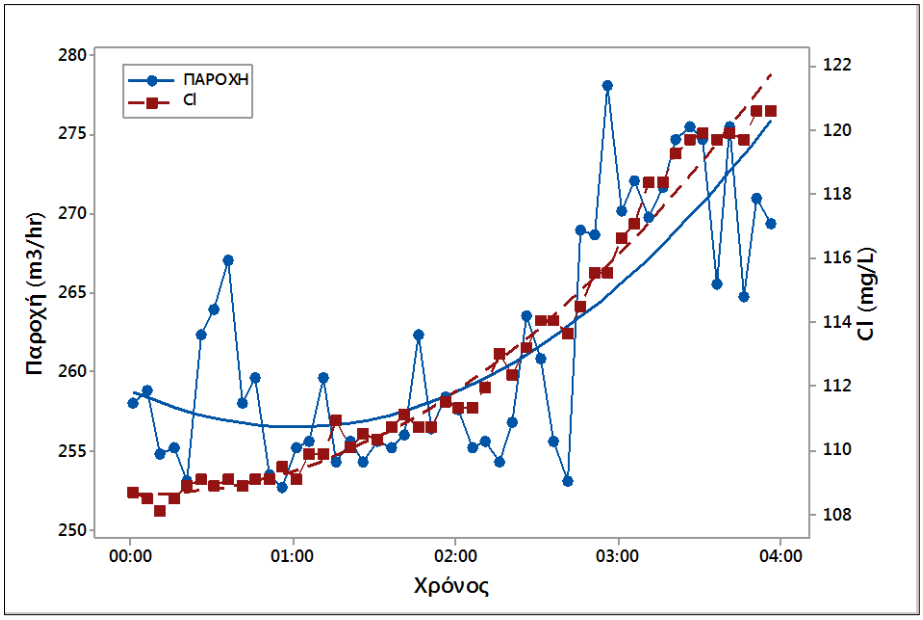
Σχήμα 53. Μεταβολή θειικών ιόντων στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" συναρτήσει της παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς (19/08/2010)

Σύμφωνα με το παραπάνω Σχήμα 53, παρατηρείται ομοιόμορφη τάση μεταβολής των θειικών ιόντων στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" και της παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς όχι κατ' ανάγκη αυξητική στο τελευταίο δεύτερο μισό του σχήματος για την παροχή.



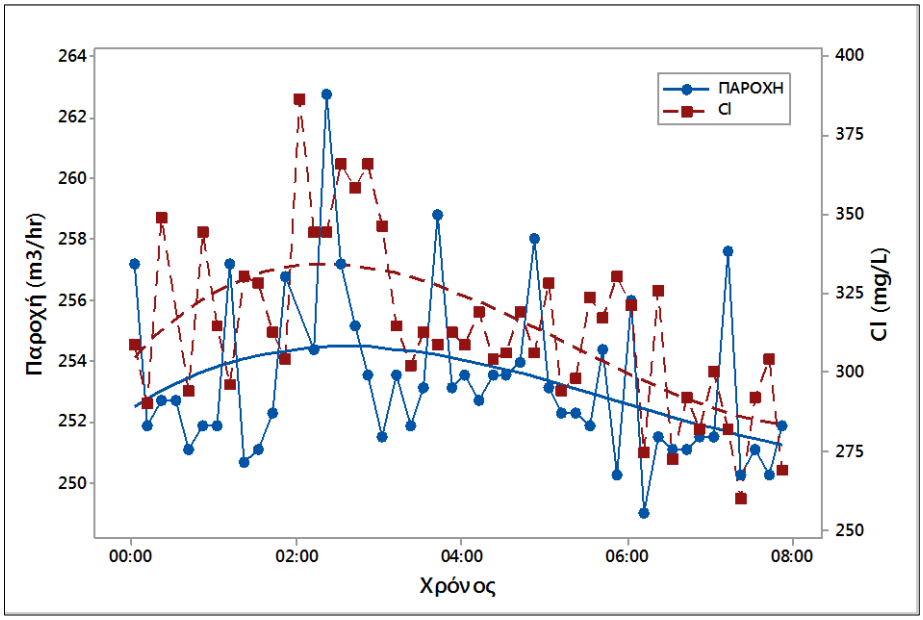
Σχήμα 54. Μεταβολή ιόντων χλωρίου στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" συναρτήσει της παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς (14/10/2010)

Με βάση το παραπάνω Σχήμα 54, παρατηρείται ομοιόμορφη τάση μεταβολής των ιόντων χλωρίου στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" και της παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς μόνο στο πρώτο μισό του σχήματος για την παροχή.



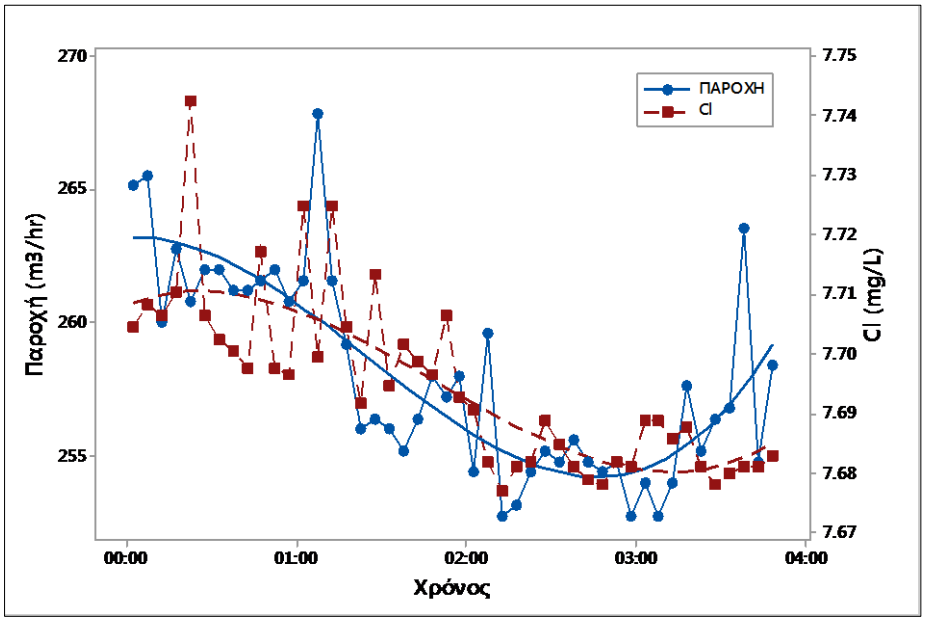
Σχήμα 55. Μεταβολή ιόντων χλωρίου στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" συναρτήσει της παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς (14/5/2010)

Σύμφωνα με το παραπάνω Σχήμα 55, παρατηρείται πολύ καλή προσαρμογή των δεδομένων ιόντων χλωρίου στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" και παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς με καλή θετική συσχέτιση.



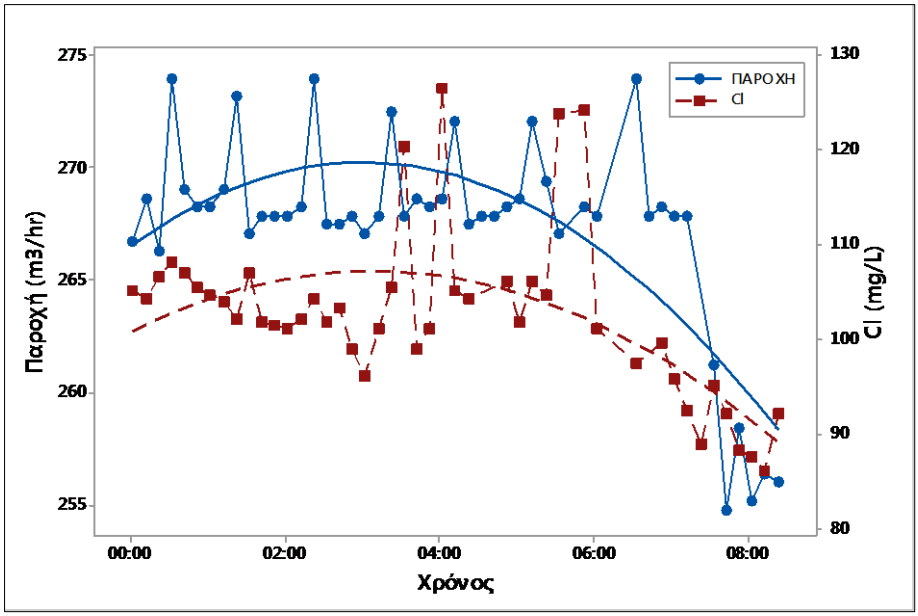
Σχήμα 56. Μεταβολή ιόντων χλωρίου στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" συναρτήσει της παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς (21/09/2010)

Με βάση το παραπάνω Σχήμα 56, παρατηρείται καλή προσαρμογή των δεδομένων ιόντων χλωρίου στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" και παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς, ένδειξη θετικής συσχέτισης.



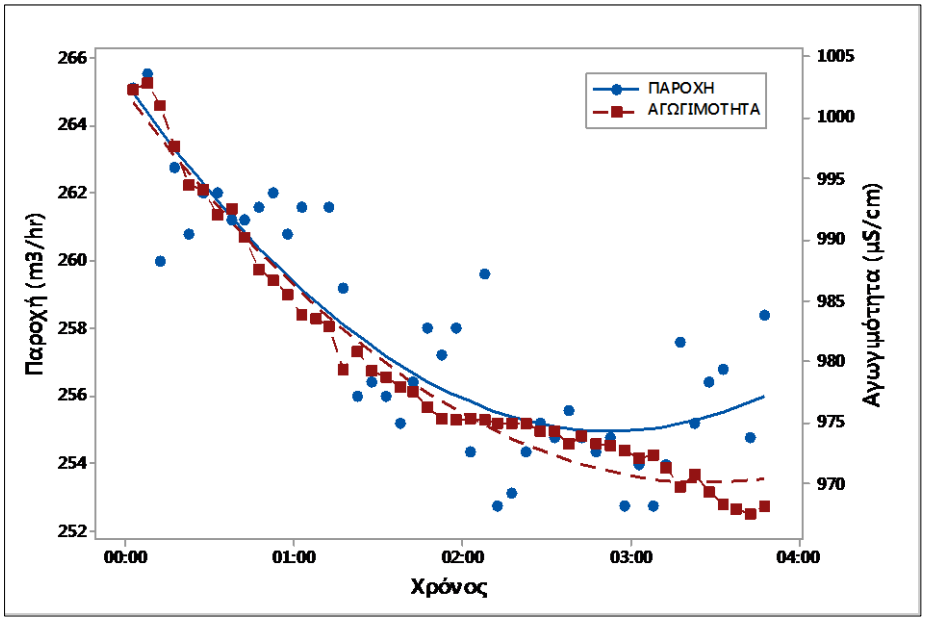
Σχήμα 57. Μεταβολή ιόντων χλωρίου στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" συναρτήσει της παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς (06/07/2010)

Σύμφωνα με το παραπάνω Σχήμα 57, παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά μεταξύ της μεταβολής ιόντων χλωρίου στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" και παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς.



Σχήμα 58. Μεταβολή ιόντων χλωρίου στο σταθμό μέτρησης Σουλού συναρτήσει της παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς (28/10/2010)

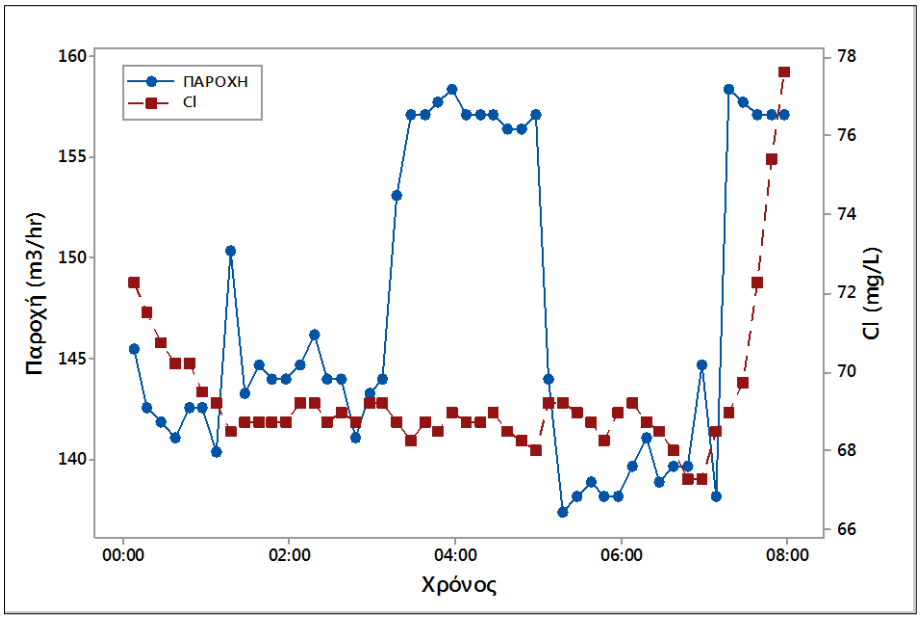
Με βάση το παραπάνω Σχήμα 58, παρατηρείται ομοιόμορφη τάση μεταβολής των ιόντων χλωρίου στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" και της παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς.



Σχήμα 59. Μεταβολή αγωγιμότητας στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" συναρτήσει της παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς (06/07/2010)

Σύμφωνα με το παραπάνω Σχήμα 59, παρατηρείται πολύ καλή θετική συσχέτιση στη συμπεριφορά των δεδομένων αγωγιμότητας στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" και παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς.

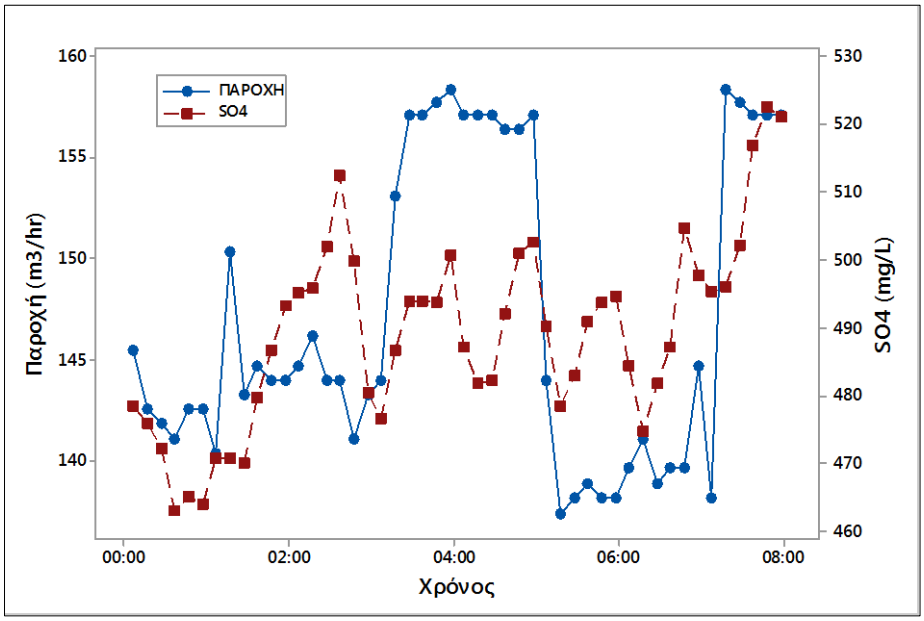
Β) Παροχή εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Νότιου Πεδίου με συγκέντρωση φυσικοχημικών παραμέτρων σταθμού μέτρησης "Σουλού"



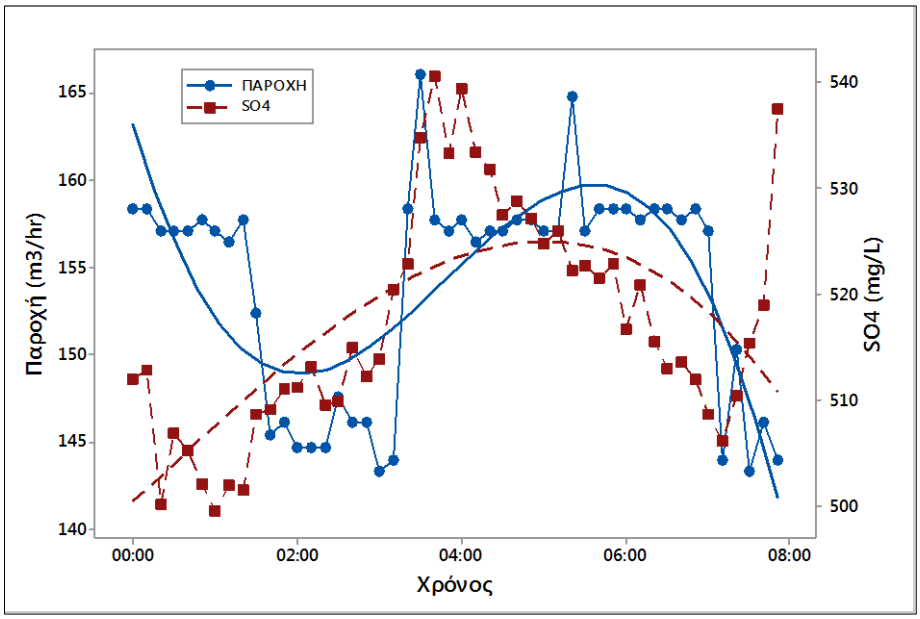
Σχήμα 60. Μεταβολή ιόντων χλωρίου στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" συναρτήσει της παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Νοτίου Πεδίου (02/09/2010)

Με βάση το παραπάνω Σχήμα 60, παρατηρούνται ασθενείς ενδείξεις ομοιόμορφης συμπεριφοράς της μεταβολής ιόντων χλωρίου στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" και παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Νότιου Πεδίου.

Με βάση το παρακάτω Σχήμα 61, παρατηρούνται ασθενείς ενδείξεις ομοιόμορφης συμπεριφοράς της μεταβολής θειικών ιόντων στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" και παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Νότιου Πεδίου.

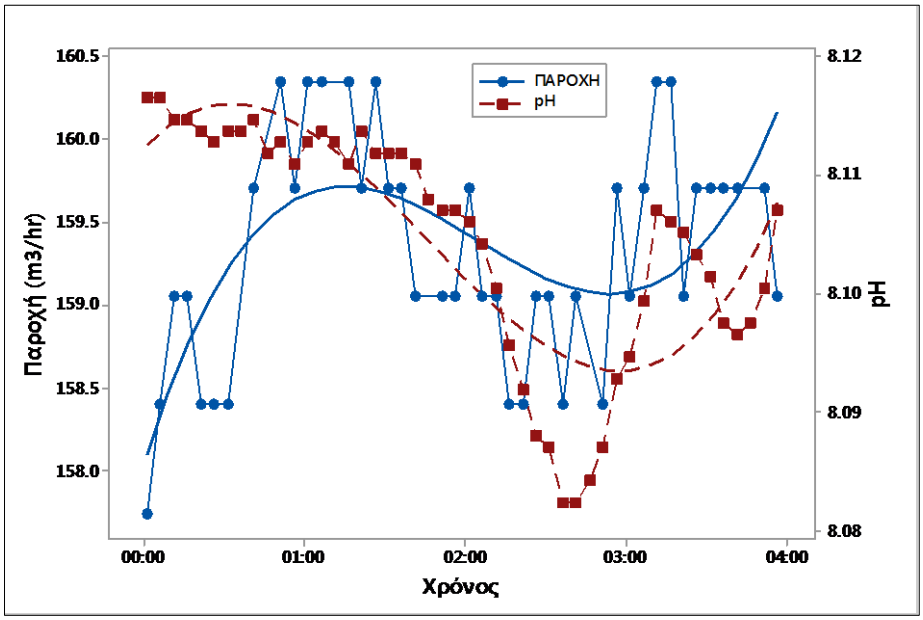


Σχήμα 61. Μεταβολή θειικών ιόντων στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" συναρτήσει της παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Νοτίου Πεδίου (02/09/2010)



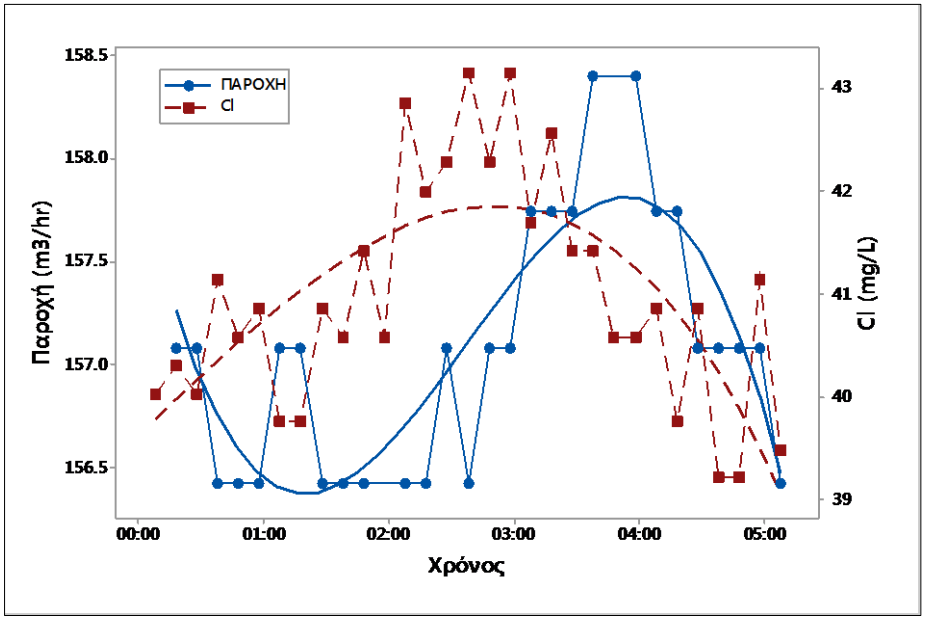
Σχήμα 62. Μεταβολή θειικών ιόντων στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" συναρτήσει της παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Νοτίου Πεδίου (31/08/2010)

Με βάση το παραπάνω Σχήμα 62, παρατηρούνται ενδείξεις ομοιόμορφης συμπεριφοράς της μεταβολής θειικών ιόντων στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" και παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Νότιου Πεδίου.



Σχήμα 63. Μεταβολή pH στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" συναρτήσει της παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Νοτίου Πεδίου (14/05/2010)

Σύμφωνα με το Σχήμα 63, παρατηρείται ομοιόμορφη τάση μεταβολής του pH στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" και της παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Νοτίου Πεδίου.



Σχήμα 64. Μεταβολή ιόντων χλωρίου στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" συναρτήσει της παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Νοτίου Πεδίου (18/09/2010)

Με βάση το παραπάνω Σχήμα 64, παρατηρούνται ενδείξεις ομοιόμορφης συμπεριφοράς της μεταβολής ιόντων χλωρίου στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" και παροχής εκροών αντλιοστασίου ορυχείου Νότιου Πεδίου, ιδιαίτερα στο δεύτερο ήμισυ του σχήματος.

Γενικά, σε όλα τα παραπάνω σχήματα, εντοπίστηκαν ενδείξεις ομοιόμορφης τάσης στην μεταβολή των συγκεντρώσεων των μετρούμενων φυσικοχημικών παραμέτρων στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" και των παροχών εκροών αντλιοστασίων ορυχείων Καρδιάς και Νοτίου Πεδίου, γεγονός που υποδηλώνει θετική συσχέτιση στη συμπεριφορά των δεδομένων και κατά συνέπεια ύπαρξη περιστατικών ρυπαντικής επίδρασης στην ποιότητα των υδάτων του ρέματος Σουλού.

5.4.2 Στατιστική ανίχνευση ενδεχόμενων επεισοδίων ρύπανσης στο ρέμα Σουλού

Προκειμένου να ταυτοποιηθούν πλήρως οι περίοδοι εκείνοι που εμφανίζονταν επεισόδια ρύπανσης, εφαρμόστηκε μια στατιστική αναλυτική τεχνική, σύμφωνα με την παρακάτω μεθοδολογία. Αρχικά η μελετώμενη περίοδος η οποία περιελάμβανε το σύνολο των διαθέσιμων μετρήσεων που καταγράφηκαν, διαχωρίστηκε σε μικρότερα διαλείποντα χρονικά διαστήματα τα οποία αποτελούνταν από συνεχή αρχεία μετρήσεων με διαθέσιμες όλες τις παραμέτρους σε κοινή χρονική βάση. Πιο συγκεκριμένα, από αυτά τα χρονικά διαστήματα με κοινές μετρήσεις, δώδεκα αφορούσαν το pH, δεκαέξι τη συγκέντρωση των ιόντων χλωρίου, τέσσερα τη συγκέντρωση των θειικών ιόντων και δέκα την αγωγιμότητα. Δυστυχώς, λόγω λειτουργικών προβλημάτων που παρουσιάστηκαν στον μετρητικό εξοπλισμό, οι μετρήσεις της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων ήταν πολύ περιορισμένες αριθμητικά και συνεπώς δεν λήφθηκαν υπόψη στην παρακάτω ανάλυση.

Ακολούθως, τα δεδομένα της παροχής στα δύο σημεία εκροής υδάτων αντλιοστασίων (ορυχεία Καρδιάς και Νότιου Πεδίου) κατηγοριοποιήθηκαν σε τιμές παροχής μεγαλύτερες του μέσου όρου (κωδικός 2) και τιμές μικρότερες ή ίσες του μέσου όρου (κωδικός 1). Στη συνέχεια κατασκευάστηκαν γραφήματα μεταβολής των μέσων τιμών των μεταβλητών και των 95% ορίων εμπιστοσύνης τους, ανά ημέρα μεταβολής στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και ανά σημείο παροχής (με κωδικό 1 ή 2 ανάλογα με τις αντίστοιχες τιμές παροχής). Κατόπιν, επισημάνθηκαν όλες οι περιπτώσεις εκείνες στις οποίες διαπιστώθηκε

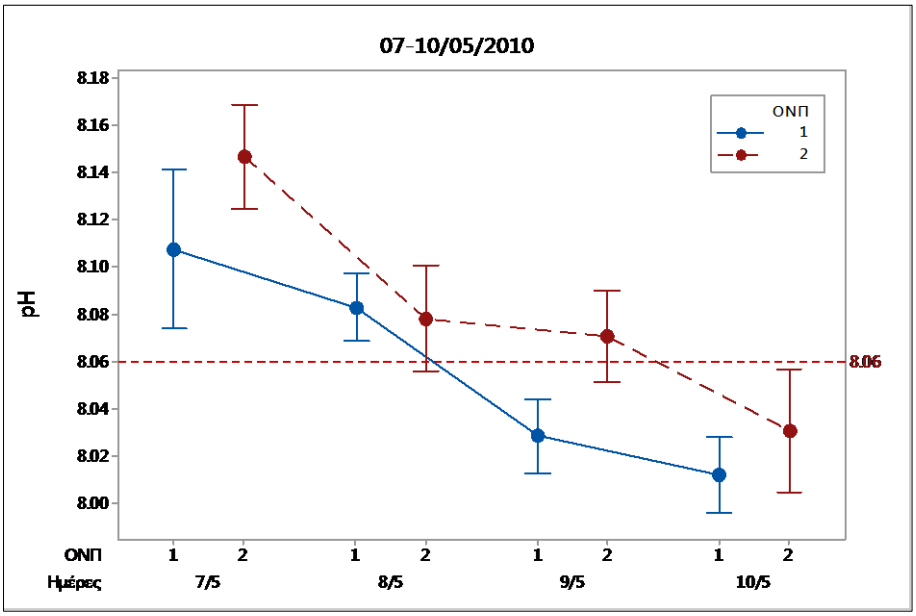
στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο συγκρινόμενων μέσων όρων ανά ημέρα και φορτίο παροχής (ακριβής πιθανότητα σφάλματος $p \leq 0.05$). Στατιστικά σημαντική διαφορά τεκμηριώνεται όταν τα όρια εμπιστοσύνης των δύο μέσων όρων δεν επικαλύπτονται και κατά συνέπεια η περίοδος όπου οι μέσες τιμές μιας μεταβλητής στην παροχή με κωδικό 2 (αυξημένη παροχή) ήταν μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές της μεταβλητής στην παροχή με κωδικό 1 (μειωμένη παροχή) ταυτοποιήθηκε ως περίοδος όπου έλαβε χώρα επεισόδιο ρύπανσης.

Το ζητούμενο δεν είναι ο προσδιορισμός υψηλών συγκεντρώσεων παραμέτρων, αλλά η αναγνώριση σε κάθε εξεταζόμενη χρονική περίοδο έντονων μεταβολών τόσο στην παροχή όσο και στη συγκέντρωση των παραμέτρων εντός του χρονικού διαστήματος μιας ημέρας, ανεξάρτητα πάντα από τις απόλυτες τιμές των συγκεντρώσεων.

Με βάση την παραπάνω μεθοδολογία δεκατρία μόνο από τα προαναφερόμενα χρονικά διαστήματα παρουσίασαν στατιστικά σημαντικές ενδείξεις ενδεχόμενων επεισοδίων ρύπανσης. Τα χρονικά αυτά διαστήματα παρουσιάζονται στα παρακάτω Σχήματα 65 έως 78 και συνοψίζονται στον Πίνακα 5.

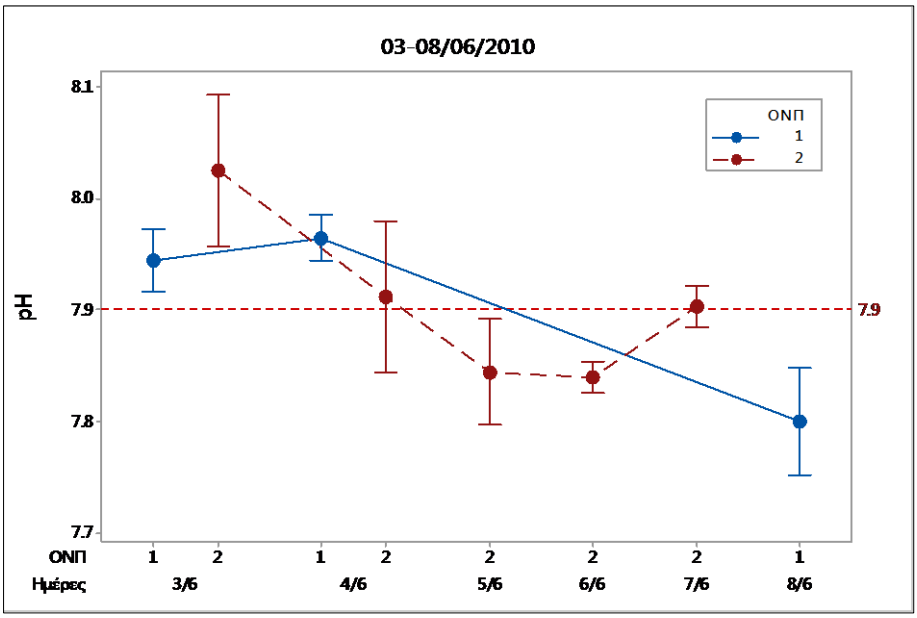
Α) Αναφορικά με τη μεταβολή του pH σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα ύποπτα για ρυπαντική επιβάρυνση, παρατηρήθηκαν τα εξής:

1) Το χρονικό διάστημα 07/05/2010-10/05/2010 παρατηρήθηκε αύξηση του pH στο σημείο εκροής υδάτων ορυχείου Νότιου Πεδίου (ΟΝΠ) στις 09/05/2010. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω Σχήμα 65, τα όρια εμπιστοσύνης δεν επικαλύπτονται.



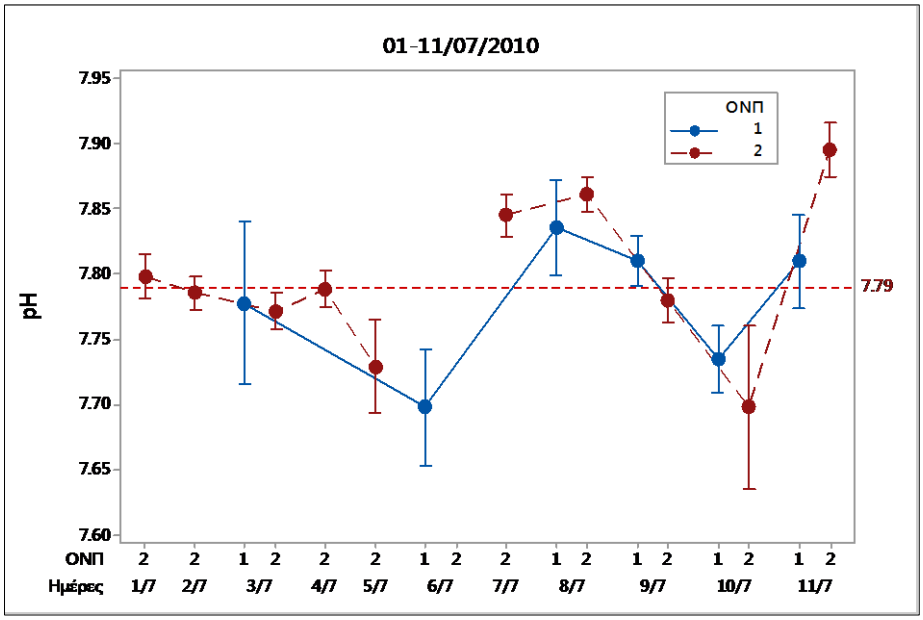
Σχήμα 65. Μεταβολή μέσων τιμών pH και των 95% ορίων εμπιστοσύνης τους ανά ημέρα στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" για το διάστημα 07/05/2010-10/05/2010 με κωδικοποιημένη αντιστοίχηση 1 (χαμηλό φορτίο) και 2 (υψηλό φορτίο) για το σημείο παροχής ΟΝΠ

2) Το χρονικό διάστημα 03/06/2010-08/06/2010 εμφανίζονται αυξημένες τιμές pH στις 03/06/2010 για το σημείο εκροής αντλιοστασίου ορυχείου Νότιου Πεδίου (ΟΝΠ). Όπως φαίνεται και στο παρακάτω Σχήμα 66, υπάρχει μικρή κάλυψη των ορίων εμπιστοσύνης.



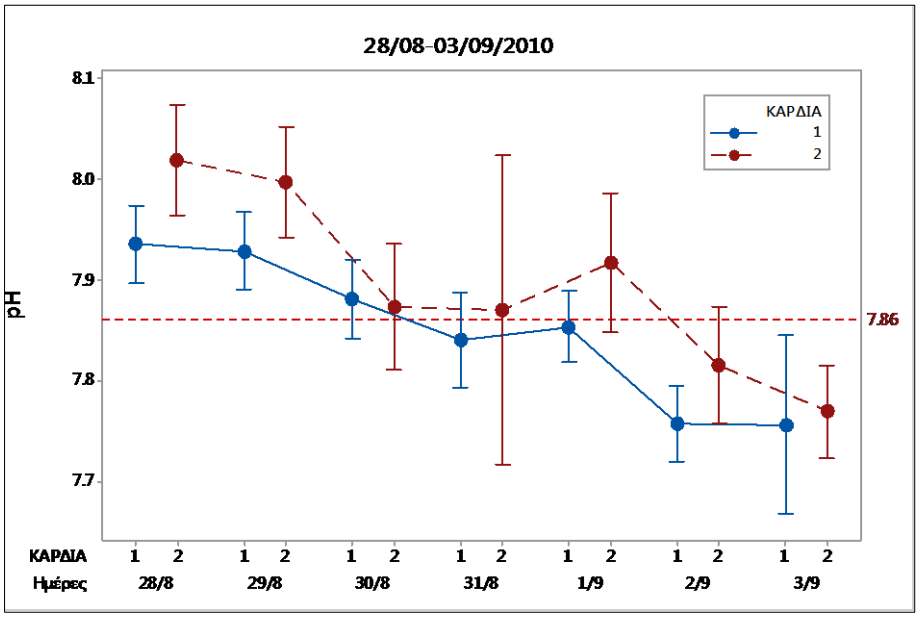
Σχήμα 66. Μεταβολή μέσων τιμών pH και των 95% ορίων εμπιστοσύνης τους ανά ημέρα στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" για το διάστημα 03/06/2010-08/06/2010 με κωδικοποιημένη αντιστοίχηση 1 (χαμηλό φορτίο) και 2 (υψηλό φορτίο) για το σημείο παροχής ΟΝΠ

3) Ισχυρή αύξηση του pH διαπιστώνεται το χρονικό διάστημα 01/07/2010-11/07/2010 την τελευταία μέρα, καθότι η τιμή αυτή κείται υψηλότερα όλων των υπολοίπων σε όλη την κλίμακα μεταβολής του pH με το χρόνο (βλ. ακόλουθο Σχήμα 67).



Σχήμα 67. Μεταβολή μέσων τιμών pH και των 95% ορίων εμπιστοσύνης τους ανά ημέρα στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" για το διάστημα 01/07/2010-11/07/2010 με κωδικοποιημένη αντιστοίχηση 1 (χαμηλό φορτίο) και 2 (υψηλό φορτίο) για το σημείο παροχής ΟΝΠ

4) Το χρονικό διάστημα 28/08/2010-03/09/2010 παρατηρούνται αυξημένες τιμές pH για το σημείο εκροής αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς τις ημέρες 28/08/2010 και 29/08/2010, με ελαφρά επικάλυψη των ορίων εμπιστοσύνης. Επιπρόσθετα, η τάση αυτή της υπεροχής των τιμών του pH εξακολουθεί να τηρείται και στις ημέρες 01/09/2010 και 02/09/2010, αν και στατιστικά μη σημαντικά ίσως λόγω της μεγαλύτερης σχετικά κάλυψης των ορίων (βλ. ακόλουθο Σχήμα 68).

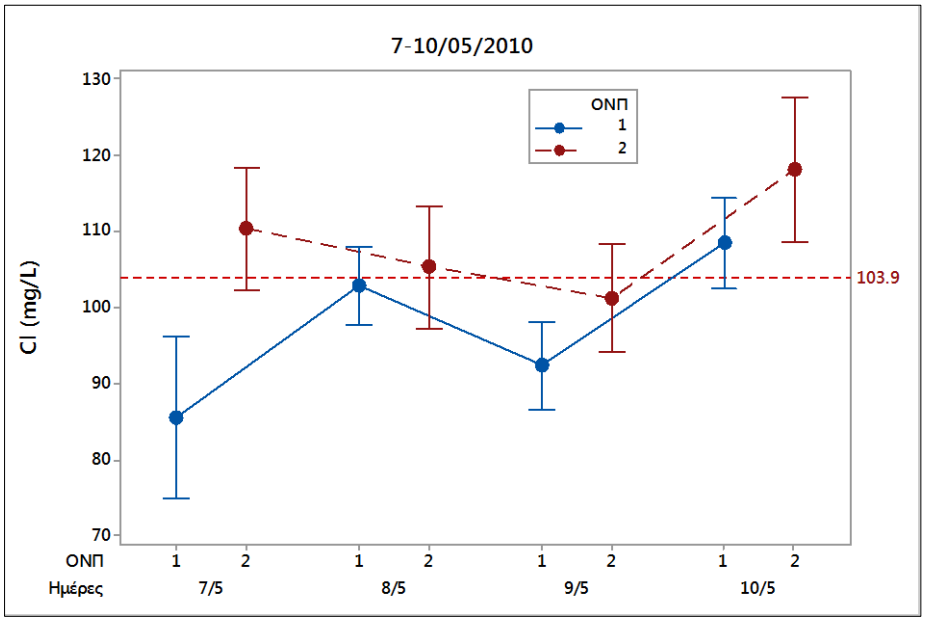


Σχήμα 68. Μεταβολή μέσων τιμών pH και των 95% ορίων εμπιστοσύνης τους ανά ημέρα στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" για το διάστημα 28/08/2010-03/09/2010 με κωδικοποιημένη αντιστοίχηση 1 (χαμηλό φορτίο) και 2 (υψηλό φορτίο) για το σημείο παροχής Καρδιάς.

Συμπερασματικά, προκύπτει ότι στο σημείο εκροής αντλιοστασίου ορυχείου Νότιου Πεδίου (ΟΝΠ) αποδίδονται τρία ενδεχόμενα επεισόδια ρύπανσης και ένα επεισόδιο αποδίδεται στο σημείο εκροής υδάτων ορυχείου Καρδιάς. Οι μέσες τιμές του pH στα τέσσερα διαστήματα κυμάνθηκαν μεταξύ 7.79 και 8.06.

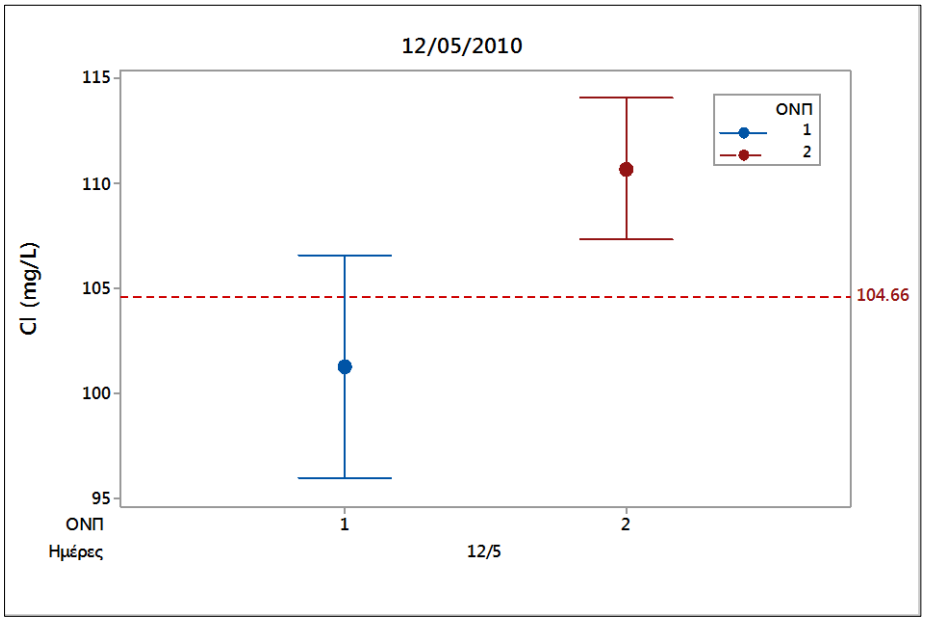
Β) Περισσότερα ενδεχόμενα επεισόδια ρύπανσης ανιχνεύτηκαν στη διαχρονική παρακολούθηση των ιόντων χλωρίου, εκ των οποίων τρία αποδίδονται στο σημείο εκροής αντλιοστασίου ορυχείου Νότιου Πεδίου (ΟΝΠ) και τέσσερα επεισόδια αποδίδονται στο σημείο εκροής αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς.

Συγκεκριμένα στις 07/05/2010 διαπιστώθηκε άνοδος των ιόντων χλωρίου στο σημείο εκροής αντλιοστασίου ορυχείου Νότιου Πεδίου (κωδικός 2), όπως αποτυπώνεται στο παρακάτω Σχήμα 69.

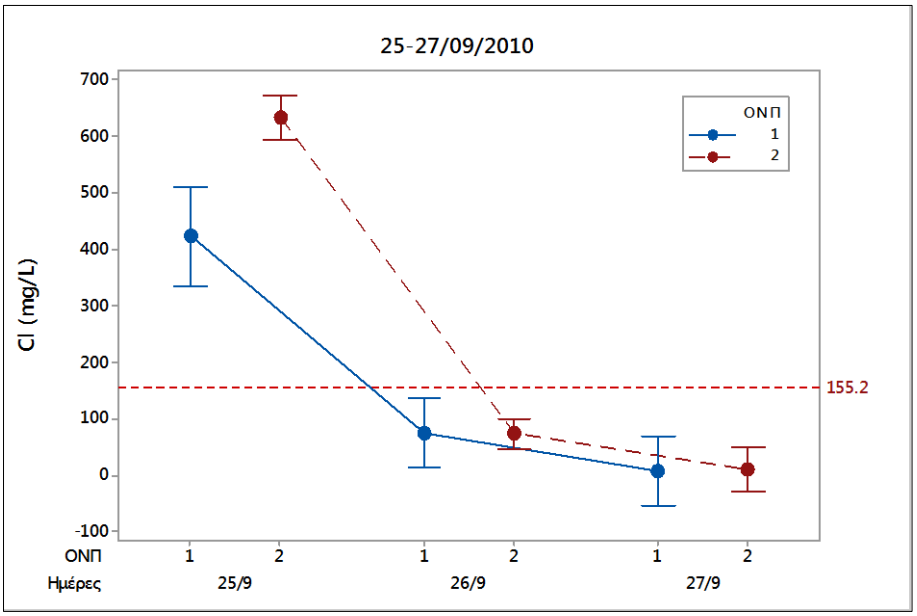


Σχήμα 69. Μεταβολή μέσων τιμών συγκέντρωσης ιόντων χλωρίου και των 95% ορίων εμπιστοσύνης τους ανά ημέρα στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" για το διάστημα 07/05/2010-10/05/2010 με κωδικοποιημένη αντιστοίχηση 1 (χαμηλό φορτίο) και 2 (υψηλό φορτίο) για το σημείο παροχής ΟΝΠ.

Στις 12/05/2010 επίσης διαπιστώθηκε αύξηση των ιόντων χλωρίου για το σημείο εκροής αντλιοστασίου ορυχείου Νότιου Πεδίου (κωδικός 2), όπως αποτυπώνεται στο παρακάτω Σχήμα 70.



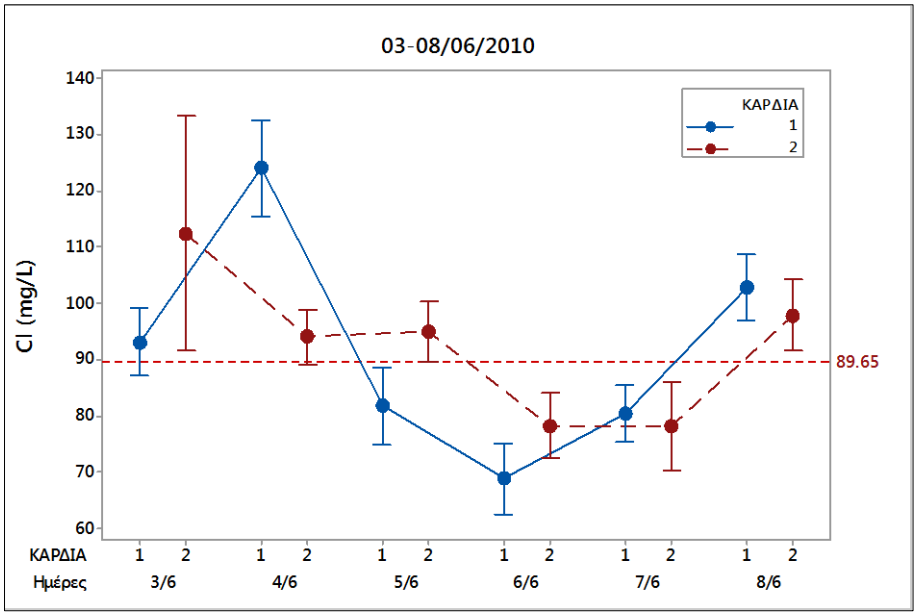
Σχήμα 70. Μεταβολή μέσων τιμών συγκέντρωσης ιόντων χλωρίου και των 95% ορίων εμπιστοσύνης τους ανά ημέρα στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" για το διάστημα 12/05/2010 με κωδικοποιημένη αντιστοίχηση 1 (χαμηλό φορτίο) και 2 (υψηλό φορτίο) για το σημείο παροχής ΟΝΠ.



Σχήμα 71. Μεταβολή μέσων τιμών συγκέντρωσης ιόντων χλωρίου και των 95% ορίων εμπιστοσύνης τους ανά ημέρα στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" για το διάστημα 25/09/2010-27/09/2010 με κωδικοποιημένη αντιστοίχηση 1 (χαμηλό φορτίο) και 2 (υψηλό φορτίο) για το σημείο παροχής ΟΝΠ.

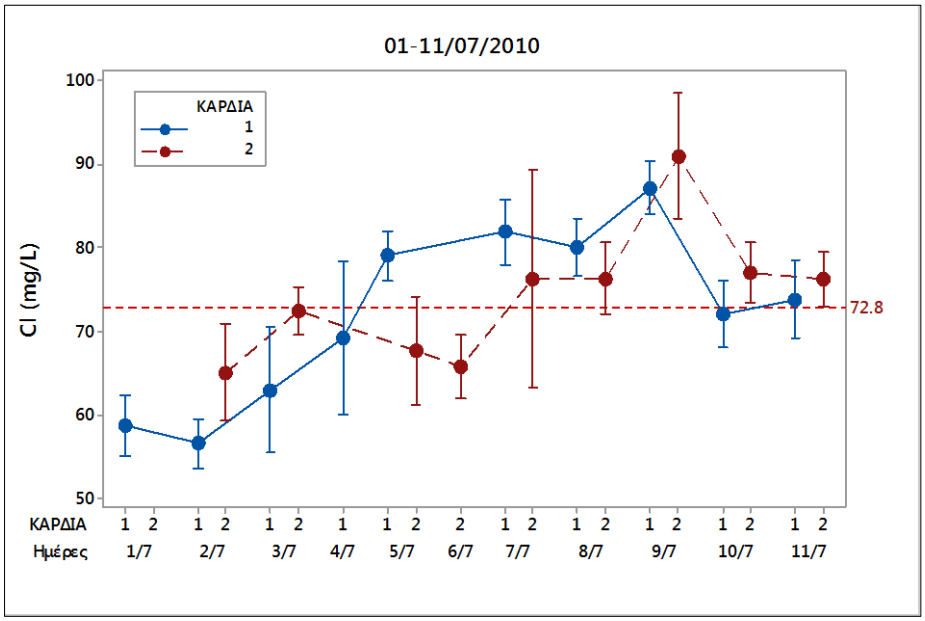
Στις 25/09/2010 διαπιστώθηκε αύξηση των ιόντων χλωρίου για το σημείο εκροής αντλιοστασίου ορυχείου Νότιου Πεδίου (κωδικός 2), όπως αποτυπώνεται στο παραπάνω Σχήμα 71. Την περίοδο αυτή, οι τιμές των ιόντων χλωρίου αυξήθηκαν κατά περίπου 50% συγκριτικά με τις προηγούμενες περιόδους (155 mg/L έναντι 105 mg/L κατά προσέγγιση).

Στο σημείο εκροής αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς αποδίδεται ένα ενδεχόμενο ημερήσιο επεισόδιο ρύπανσης την 05/06/2010 για τα ιόντα χλωρίου, καθώς τα όρια εμπιστοσύνης δεν επικαλύπτονται όπως φαίνεται και στο παρακάτω Σχήμα 72.

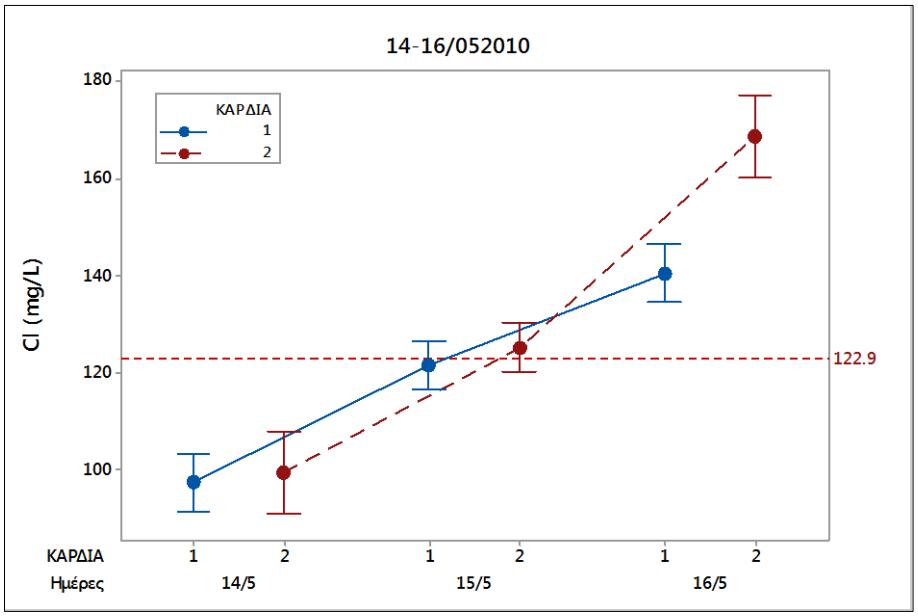


Σχήμα 72. Μεταβολή μέσων τιμών συγκέντρωσης ιόντων χλωρίου και των 95% ορίων εμπιστοσύνης τους ανά ημέρα στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" για το διάστημα 03/06/2010-08/06/2010 με κωδικοποιημένη αντιστοίχηση 1 (χαμηλό φορτίο) και 2 (υψηλό φορτίο) για το σημείο παροχής Καρδιάς.

Στο σημείο εκροής αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς επίσης αποδίδονται και δύο ενδεχόμενα ημερήσια επεισόδια ρύπανσης στις 02/07/2010 και 3/07/210 αλλά και μία ανάδρομη εμφάνιση υψηλών τιμών ιόντων χλωρίου στις 05/06/2010, γεγονός που μπορεί να ερμηνευθεί ως αποδρομή της διάρκειας των δύο προηγούμενων επεισοδίων. Τα γεγονότα ενδεχόμενων επεισοδίων σε αμφότερα τα χρονικά διαστήματα (βλ. σχήματα 70 και 71) αντιστοιχούν σε χαμηλά επίπεδα ιόντων χλωρίου τους μήνες αυτούς, χαμηλότερα και από τα γεγονότα στο σημείο εκροής αντλιοστασίου ορυχείου Νοτίου Πεδίου (ΟΝΠ).



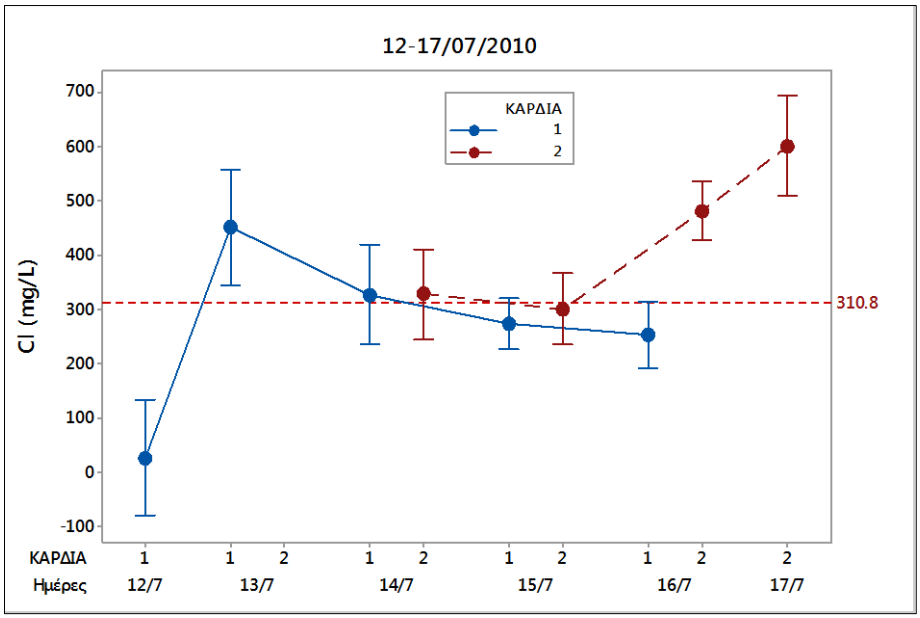
Σχήμα 73. Μεταβολή μέσων τιμών συγκέντρωσης ιόντων χλωρίου και των 95% ορίων εμπιστοσύνης τους ανά ημέρα στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" για το διάστημα 01/07/2010-11/07/2010 με κωδικοποιημένη αντιστοίχηση 1 (χαμηλό φορτίο) και 2 (υψηλό φορτίο) για το σημείο παροχής Καρδιάς.



Σχήμα 74. Μεταβολή μέσων τιμών συγκέντρωσης ιόντων χλωρίου και των 95% ορίων εμπιστοσύνης τους ανά ημέρα στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" για το διάστημα 14/05/2010-16/05/2010 με κωδικοποιημένη αντιστοίχηση 1 (χαμηλό φορτίο) και 2 (υψηλό φορτίο) για το σημείο παροχής Καρδιάς.

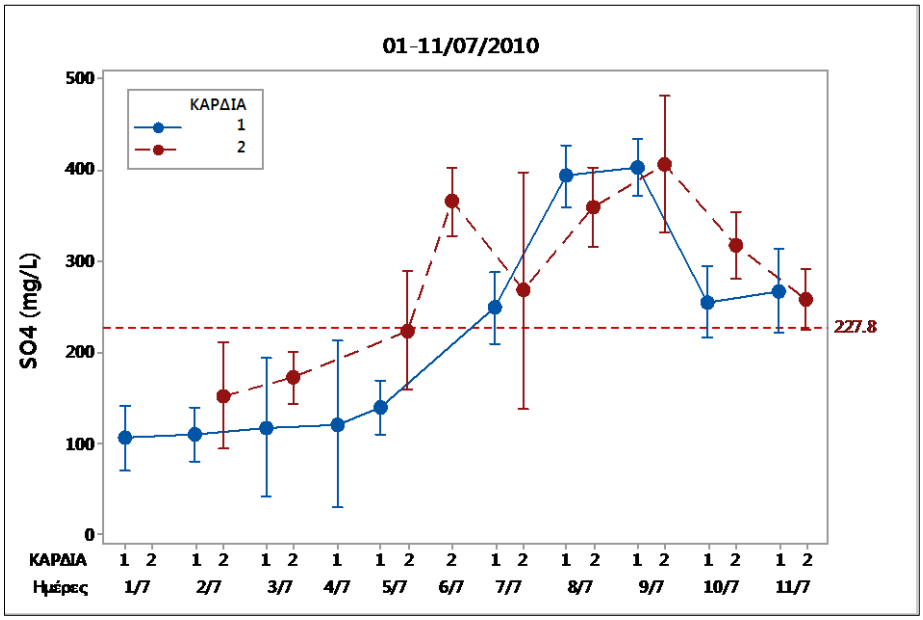
Στο παραπάνω Σχήμα 74 παρατηρούνται υψηλότερα επίπεδα συγκεντρώσεων ιόντων χλωρίου στο ενδεχόμενο επεισόδιο της 16/07/2010 με μέγιστη τιμή 168.5 mg/L το οποίο αποδίδεται στο σημείο εκροής αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς.

Ακόμη υψηλότερα επίπεδα συγκεντρώσεων ιόντων χλωρίου παρατηρούνται στο ακόλουθο Σχήμα 75 στο ενδεχόμενο επεισόδιο της 16/10/2010, με μέγιστη τιμή 481 mg/L, το οποίο αποδίδεται επίσης στο σημείο εκροής αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς.

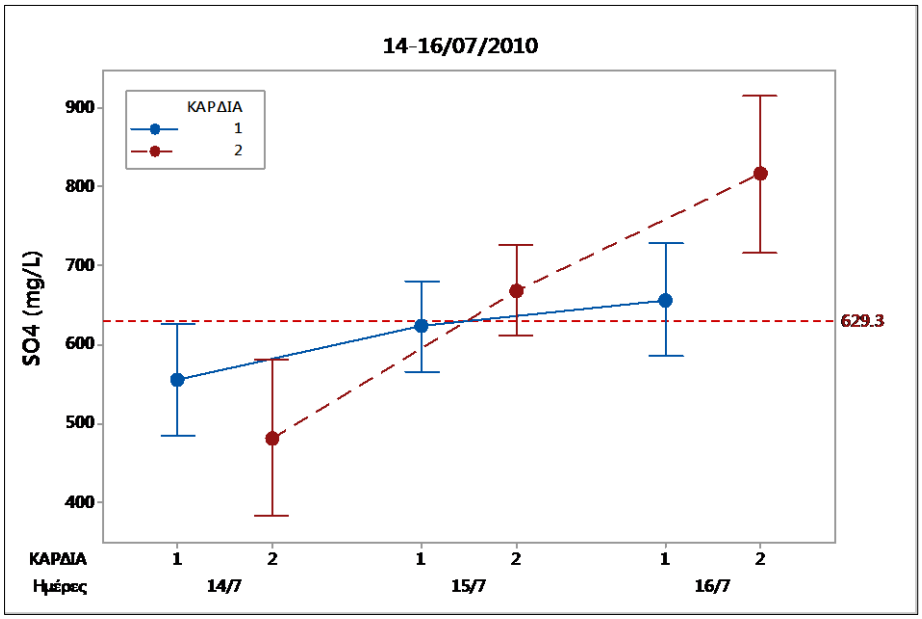


Σχήμα 75. Μεταβολή μέσων τιμών συγκέντρωσης ιόντων χλωρίου και των 95% ορίων εμπιστοσύνης τους ανά ημέρα στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" για το διάστημα 12/07/2010-17/07/2010 με κωδικοποιημένη αντιστοίχηση 1 (χαμηλό φορτίο) και 2 (υψηλό φορτίο) για το σημείο παροχής Καρδιάς

Γ) Οι επιβαρυντικές συγκεντρώσεις θειικών ιόντων αποτελούν γνώρισμα μόνο του σημείου εκροής αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς και για το μήνα Ιούλιο. Συγκεκριμένα, υψηλότερες τιμές εμφανίστηκαν στις 05/07/2010 και 16/07/2010, τη δε πρώτη περίοδο, τα επίπεδα θειικών ιόντων προσέγγισαν μέση τιμή εμφάνισης στο πρώτο 10ήμερο 228 mg/L, τρεις περίπου φορές χαμηλότερη συγκριτικά με τη δεύτερη περίοδο (629 mg/L). Τα προαναφερόμενα αποτελέσματα παρουσιάζονται διαγραμματικά στα επόμενα Σχήματα 76 και 77.

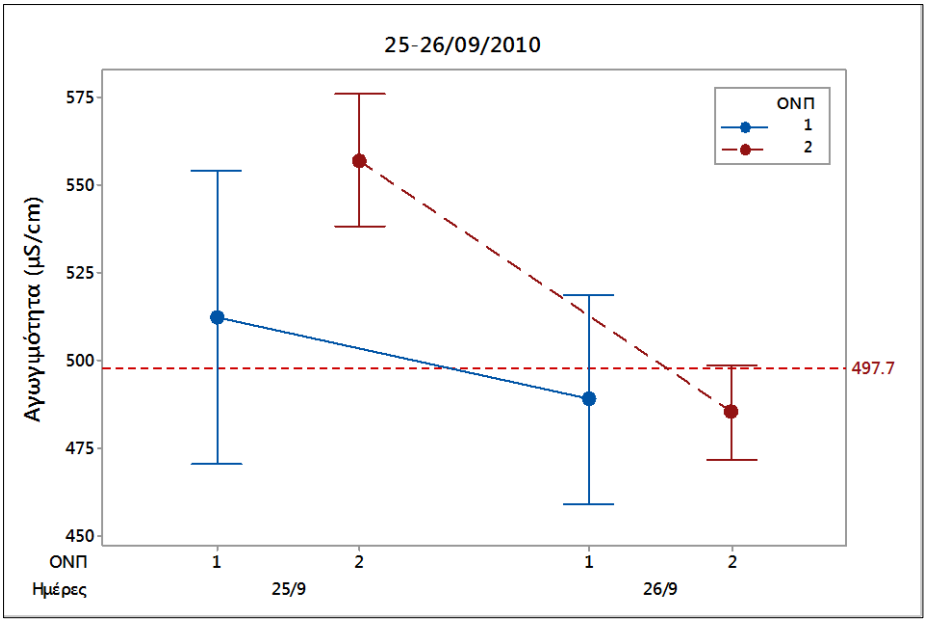


Σχήμα 76. Μεταβολή μέσων τιμών συγκέντρωσης θειικών ιόντων και των 95% ορίων εμπιστοσύνης τους ανά ημέρα στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" για το διάστημα 01/07/2010-11/07/2010 με κωδικοποιημένη αντιστοίχηση 1 (χαμηλό φορτίο) και 2 (υψηλό φορτίο) για το σημείο παροχής Καρδιάς.



Σχήμα 77. Μεταβολή μέσων τιμών συγκέντρωσης θειικών ιόντων και των 95% ορίων εμπιστοσύνης τους ανά ημέρα στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" για το διάστημα 14/07/2010-16/07/2010 με κωδικοποιημένη αντιστοίχηση 1 (χαμηλό φορτίο) και 2 (υψηλό φορτίο) για το σημείο παροχής Καρδιάς.

Δ) Από τις μετρήσεις αγωγιμότητας, δεν παρατηρήθηκαν εμφανή σημάδια επιβάρυνσης της υδάτινης μάζας στα χρονικά διαστήματα παρακολούθησης και συνεπώς δεν μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστος δείκτης ενδεχόμενου επεισοδίου ρύπανσης. Οι μέσες τιμές συγκέντρωσης στους κωδικούς 1 και 2 (απουσία και παρουσία ενδεχόμενου επεισοδίου) ανά χρονικό διάστημα δεν διέφεραν στατιστικά σημαντικά όπως ενδεικτικά περιγράφεται στο παρακάτω Σχήμα 78 για το χρονικό διάστημα 25-26/09/2010.



Σχήμα 78. Μεταβολή μέσων τιμών αγωγιμότητας και των 95% ορίων εμπιστοσύνης τους ανά ημέρα στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" για το διάστημα 25/09/2010-26/09/2010 με κωδικοποιημένη αντιστοίχηση 1 (χαμηλό φορτίο) και 2 (υψηλό φορτίο) για το σημείο παροχής ΟΝΠ.

Στον παρακάτω Πίνακα 5 περιλαμβάνονται συγκεντρωτικά τα ενδεχόμενα επεισόδια ρύπανσης τα οποία εντοπίστηκαν ανά μετρούμενη φυσικοχημική παράμετρο και σημείο εκροής υδάτων αντλιοστασίου ορυχείου, ακολουθώντας την προαναφερόμενη μεθοδολογία.

Πίνακας 5. Συνολικά εντοπισμένα ενδεχόμενα επεισόδια ρύπανσης

Α/Α	**Εξεταζόμενη χρονική περίοδος**	**Ημερομηνία με εντοπισμένο ενδεχόμενο επεισόδιο ρύπανσης**	**Παράμετρος**	**Σημείο εκροής υδάτων αντλιοστασίου ορυχείου**
1	07-10/05/2010	09/05/2010	pH	ΟΝΠ
2	03-08/06/2010	03/06/2010	pH	ΟΝΠ
3	01-11/07/2010	11/07/2010	pH	ΟΝΠ
4	28/08-03/09/2010	28/08/2010	pH	ΚΑΡΔΙΑ
5	07-10/05/2010	07/05/2010	Cl^-	ΟΝΠ
6	12/05/2010	12/05/2010	Cl^-	ΟΝΠ
7	03-08/06/2010	05/06/2010	Cl^-	ΚΑΡΔΙΑ
8a	01-11/07/2010	02/07/2010	Cl^-	ΚΑΡΔΙΑ
8b	01-11/07/2010	03/07/2010	Cl^-	ΚΑΡΔΙΑ
9	14-16/07/2010	16/07/2010	Cl^-	ΚΑΡΔΙΑ
10	25-27/09/2010	25/09/2010	Cl^-	ΟΝΠ
11	12-17/10/2010	16/10/2010	Cl^-	ΚΑΡΔΙΑ
12	01-11/07/2010	05/07/2010	SO_4^{-2}	ΚΑΡΔΙΑ
13	14-16/07/2010	16/07/2010	SO_4^{-2}	ΚΑΡΔΙΑ

Όλες οι ημέρες ύποπτες επεισοδίων, που αναφέρθηκαν στον ανωτέρω Πίνακα 5 για τις οποίες τεκμηριώθηκαν τα ενδεχόμενα επεισόδια ρύπανσης ως στατιστικά σημαντικά, εξετάστηκαν αναλυτικά επί εικοσιτετράωρης βάσης και διερευνήθηκε εάν σε αυτές η συγκέντρωση των μετρούμενων φυσικοχημικών παραμέτρων σχετίζεται θετικά με τις τιμές της παροχής (δηλαδή όταν αυξάνει μια παράμετρος αυξάνει και η παροχή). Στις ωριαίες διαχρονικές μεταβλητές εφαρμόστηκαν μοντέλα τάσεων δευτέρου και τρίτου βαθμού, δηλαδή μοντέλα με παρούσες μία και δύο καμπύλες τάσεως αντίστοιχα τόσο στις συγκεντρώσεις όσο και στην παροχή.

Η δευτεροβάθμια εξίσωση είναι της μορφής $\hat{Y} = b_0 + b_1X + b_2X^2$ και η τριτοβάθμια εξίσωση της μορφής $\hat{Y} = b_0 + b_1X + b_2X^2 + \beta_3X^3$.

Η αξιοπιστία των πολυωνυμικών παλινδρομήσεων ελέγχθηκε με τον προσδιοριστικό συντελεστή R^2 και τα αντίστοιχα αποτελέσματα για κάθε εξίσωση παρουσιάζονται στον Πίνακα 5. Τιμές του R^2 που προσεγγίζουν το 100% αντιστοιχούν σε σημεία κοντά στην πολυωνυμική γραμμή προσαρμογής, παρέχοντας εξισώσεις με χαμηλή διακύμανση.

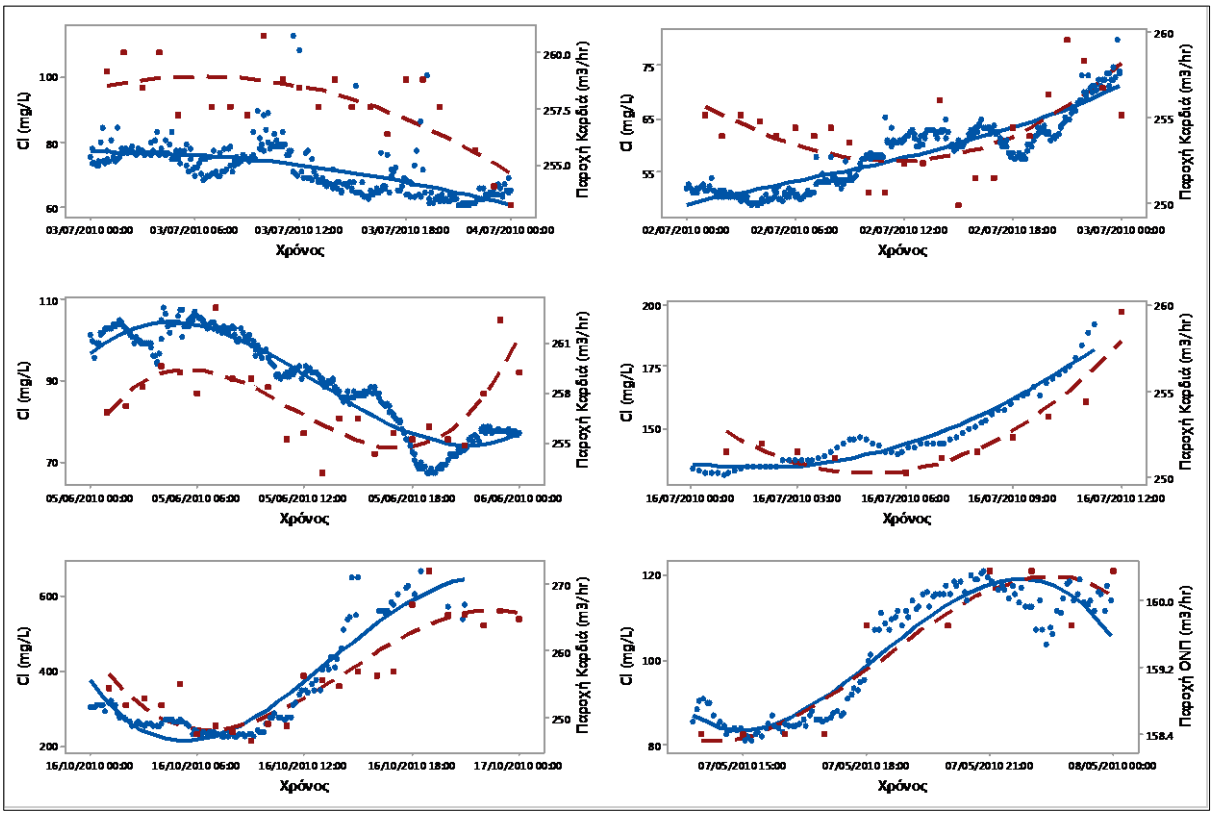
Οι στατιστικές αναλύσεις των τάσεων επιβεβαίωσαν την εμφάνιση ρυπογόνου συμβάντος στις 12 από τις 14 παραπάνω περιπτώσεις, όπως αυτές παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακα 6.

Πίνακας 6. Επιβεβαίωση εντοπισμένων ενδεχόμενων επεισοδίων ρύπανσης

Α/Α	**Ημερομηνία με εντοπισμένο ενδεχόμενο επεισόδιο ρύπανσης**	**Παράμετρος**	**Επιβεβαίωση ενδεχόμενου επεισοδίου ρύπανσης**	**R^2 (%) Παράμετρος**	**R^2 (%) Παροχή**
1	09/05/2010	pH	ΝΑΙ	39.5	76.5
2	03/06/2010	pH	ΝΑΙ	67.5	29.6
3	11/07/2010	pH	ΝΑΙ	74.5	65.8
4	28/08/2010	pH	ΝΑΙ	93.0	52.8
5	07/05/2010	Cl^-	ΝΑΙ	89.1	86.0
6	12/05/2010	Cl^-	ΟΧΙ	-	-
7	05/06/2010	Cl^-	ΝΑΙ	92.2	59.9
8	02/07/2010	Cl^-	ΝΑΙ	83.0	45.2
9	03/07/2010	Cl^-	ΝΑΙ	41.7	55.0
10	16/07/2010	Cl^-	ΝΑΙ	94.3	87.8
11	25/09/2010	Cl^-	ΟΧΙ	-	-
12	16/10/2010	Cl^-	ΝΑΙ	88.8	82.9
13	05/07/2010	SO_4^{-2}	ΝΑΙ	84.5	41.1
14	16/07/2010	SO_4^{-2}	ΝΑΙ	98.1	87.8

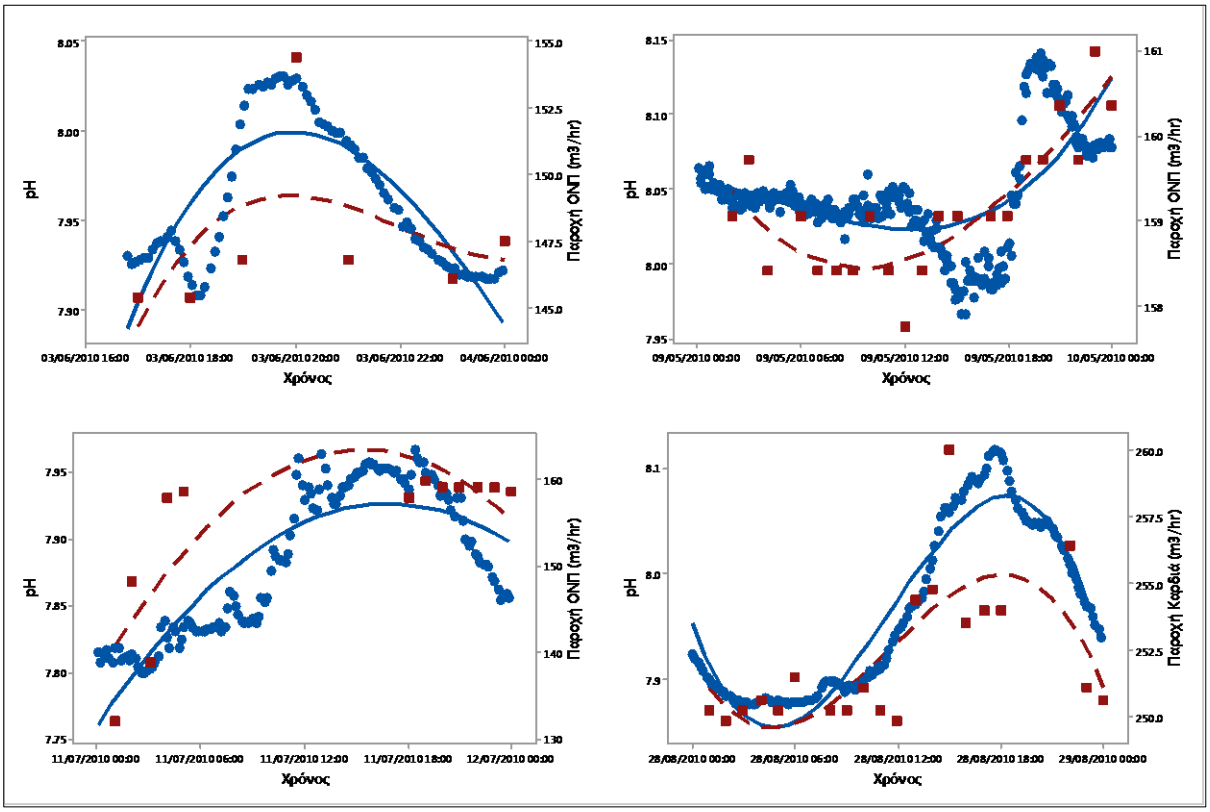
Αναλυτικότερα, οι συγκεντρώσεις των ιόντων χλωρίου ακολουθούν παρόμοια τάση μεταβολής με τις τιμές της παροχής διαχρονικά-ωριαία (βλ. Σχήμα 79), σηματοδοτώντας έτσι την ύπαρξη θετικής συσχέτισης. Από τις οκτώ περιπτώσεις εμφάνισης ενδεχόμενου

επεισοδίου ρύπανσης ως προς τη συγκέντρωση των χλωριόντων (σύμφωνα με τον Πίνακα 6) ταυτοποιήθηκαν έξι επεισόδια, εφαρμόζοντας τρεις δευτεροβάθμιες και τρεις τριτοβάθμιες εξισώσεις. Σε όλα τα γραφήματα, οι καμπύλες γραμμές διαγράφουν μία κατά το μάλλον ή ήττον ομοειδούς μεταβολής πορεία, ένδειξη μίας συνακόλουθης εξέλιξης των τάσεων.



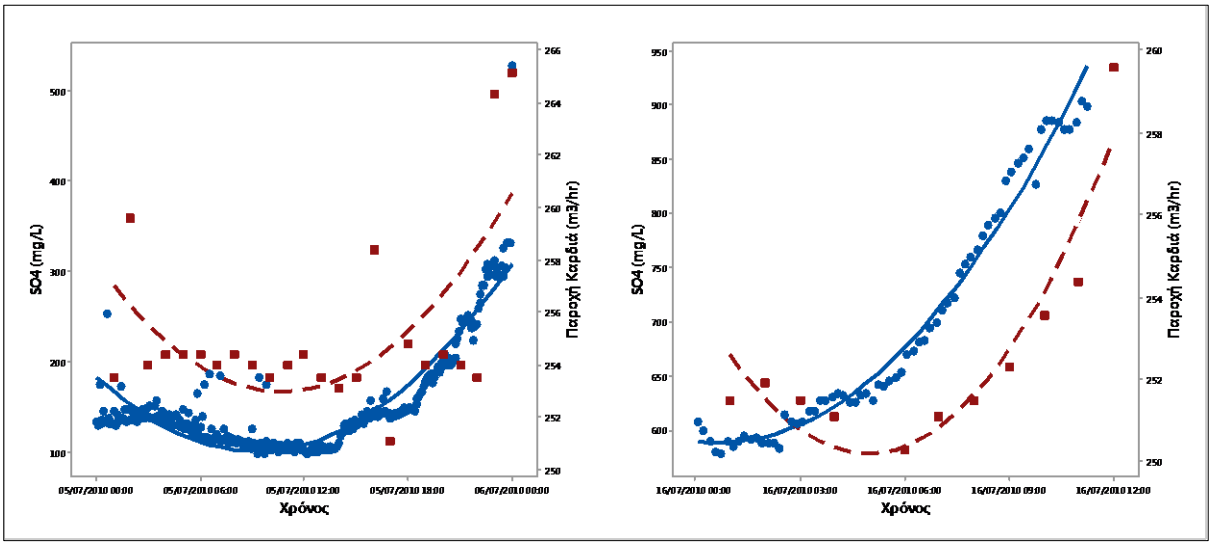
Σχήμα 79. Μεταβολή της συγκέντρωσης ιόντων χλωρίου και της παροχής στα σημεία εκροής αντλιοστασίων ορυχείων Καρδιάς και Νότιου Πεδίου επί 24ωρης βάσης και σε διαφορετικές ημέρες ενδεχόμενων επεισοδίων ρύπανσης.

Ενδεχόμενο επεισόδιο ρύπανσης ως προς τη μεταβολή των τιμών του pH διαπιστώθηκε σε όλες τις ημέρες που τεκμηριώθηκαν στατιστικά (βλ. Σχήμα 80). Τρεις δευτεροβάθμιες εξισώσεις και μία τριτοβάθμια χρησιμοποιήθηκαν για την προσαρμογή των τάσεων στα δεδομένα της μελέτης, με την επισήμανση ότι για τις τιμές pH παρουσιάζεται μεγαλύτερο μέγεθος διασποράς συγκριτικά με αυτό που εμφανίστηκε στα χλωριόντα (χαμηλότερες τιμές R^2).



Σχήμα 80. Μεταβολή του pH και της παροχής στο σημείο εκροής αντλιοστασίου ορυχείου Νότιου Πεδίου επί 24ωρης βάσης και σε διαφορετικές ημέρες ενδεχόμενων επεισοδίων ρύπανσης.

Θετική συσχέτιση ως προς την τάση μεταβολής μεταξύ της συγκέντρωσης των θειικών ιόντων και της παροχής παρατηρήθηκε στις δύο ημέρες εμφάνισης ενδεχόμενων επεισοδίων (βλ. Πίνακα 6) και μάλιστα με ισχυρή προσαρμογή των μοντέλων και με εξαιρετικά όμοια τάση μεταβολής (βλ. Σχήμα 81). Στα συγκεκριμένα δεδομένα προσαρμόστηκε το δευτεροβάθμιο μοντέλο.



Σχήμα 81. Μεταβολή της συγκέντρωσης θειικών ιόντων και της παροχής στο σημείο εκροής αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς επί 24ωρης βάσης και σε διαφορετικές ημέρες ενδεχόμενων επεισοδίων ρύπανσης.

Συνοψίζοντας, από τα παραπάνω αποτελέσματα και την αντίστοιχη στατιστική ανάλυση προέκυψαν 14 περίοδοι όπου έλαβαν χώρα επεισόδια ρύπανσης, στο διάστημα από τον Μάιο μέχρι τον Οκτώβριο του 2010. Από το σύνολο των επεισοδίων, 6 αποδίδονται στην εκροή υδάτων από το ορυχείο του Νότιου Πεδίου και 8 επεισόδια αποδόθηκαν στην απορροή από το ορυχείο Καρδιάς. Λαμβάνοντας δε υπόψη τη συχνότητα παρουσίασης επεισοδίων ρύπανσης, ο Μάιος, Ιούνιος και Ιούλιος ήταν οι μήνες όπου παρουσιάστηκαν τα περισσότερα επεισόδια: επεισόδια ρύπανσης που αποδόθηκαν σε μεταβολές του pH και των ιόντων χλωρίου παρατηρήθηκαν τον Μάιο και Ιούνιο, επεισόδια λόγω μεταβολών των συγκεντρώσεων στα ιόντα χλωρίου και στα θειικά τον Ιούλιο, ενώ μεταβολές και των τριών παραμέτρων παρατηρήθηκαν των πρώτο δεκαήμερο του Ιουλίου. Κατά τη διάρκεια της περιόδου μέτρησης δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές μεταβολές και συσχετισμοί με την αγωγιμότητα. Η αναλυτική διερεύνηση των περιόδων όπου παρατηρήθηκαν επεισόδια ρύπανσης φανέρωσε παρόμοιες τάσεις στη μεταβολή των ογκομετρικών παροχών από τα αντλιοστάσια και στις φυσικοχημικές παραμέτρους, επιβεβαιώνοντας την ανάπτυξη επεισοδίων ρύπανσης. Παράλληλα, οι πολυωνυμικές εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τη βέλτιστη προσαρμογή έδειξαν σημαντικά ισχυρές αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στη μεταβολή των pH, Cl^- και SO_4^{-2} και των ογκομετρικών παροχών από τα αντλιοστάσια. Με τη μεθοδολογία αυτή επιβεβαιώθηκε η ανάπτυξη 12 επεισοδίων ρύπανσης από τα 14 που είχαν

παρατηρηθεί και τεκμηριώνεται η χρήση της τεχνικής αυτής για την ταυτοποίηση πιθανών επεισοδίων ρύπανσης.

5.4.3 Ποσοτικοποίηση των φυσικοχημικών παραμέτρων σε σύγκριση με αποδεκτά επίπεδα

Στην ενότητα αυτή επιδιώκεται η ανίχνευση τυχόν μη αποδεκτών (εκτός ορίων) τιμών των μετρούμενων φυσικοχημικών παραμέτρων σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους ή και σταθμούς μέτρησης, εφαρμόζοντας μια κλίμακα μέτρησης άμεσα κατανοητή (αποδεκτά/μη αποδεκτά όρια).

Τα δεδομένα των μετρούμενων φυσικοχημικών παραμέτρων προσαρμόστηκαν με βάση την ισχύουσα νομοθεσία για την ποιότητα του νερού ανθρώπινης κατανάλωσης (Υ.Α. ΔΥΓ2/Γ.Π. οικ. 38295/2007) σε τιμές - επίπεδα αποδεκτά ή μη αποδεκτά ή αλλιώς σε χαμηλό και υψηλό επίπεδο ανάλογα με το κρίσιμο όριο που προσδιορίζεται για κάθε μία παράμετρο. Τα κρίσιμα όρια για κάθε παράμετρο δίνονται κάτωθι:

pH

αποδεκτό: 6.5 - 9.5

μη αποδεκτό: 0 - 6.5 ή 9.5 - 14

SO_4^{-2} & Cl^-

αποδεκτό: 0 - 250 mg/L

μη αποδεκτό: >250 mg/L

Αγωγιμότητα

αποδεκτό: 0 - 2500 μS/cm

μη αποδεκτό: >2500 μS/cm

ή/και

χαμηλά: 0 - 750 μS/cm

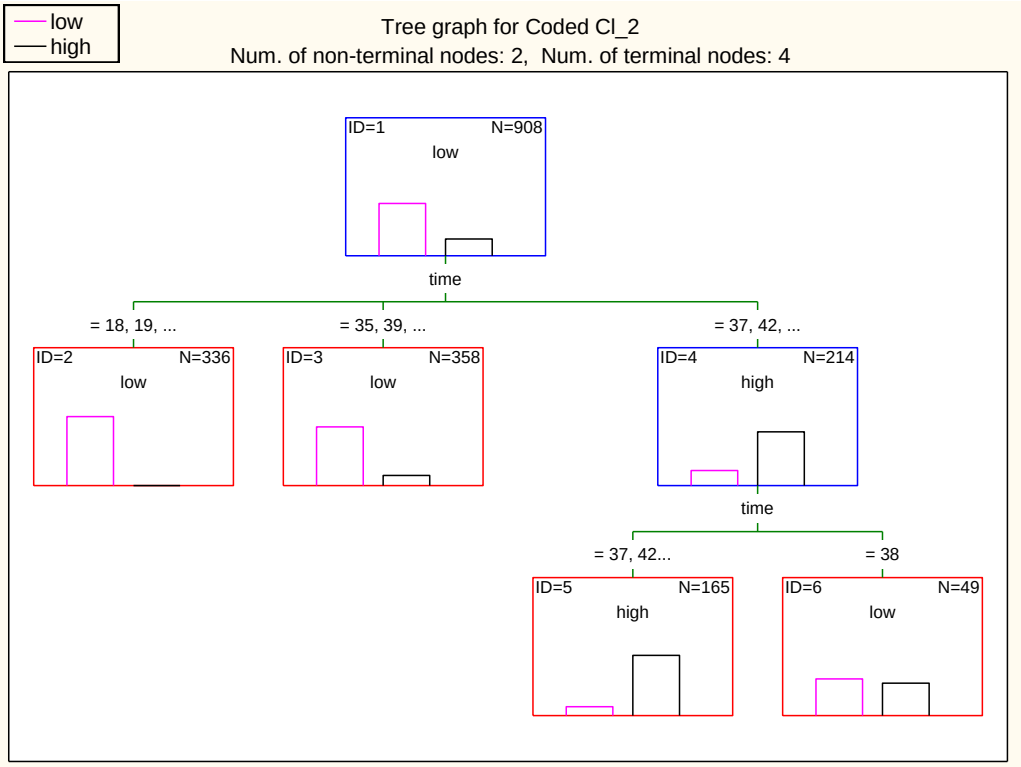
μεσαία: 750 - 2000 μS/cm

υψηλά: >2000 μS/cm

Με βάση το παραπάνω σκεπτικό μελετήθηκε η σύνδεση της σχέσης αποδεκτού ή μη αποδεκτού ορίου συγκέντρωσης, με την έννοια της εξαρτημένης μεταβλητής, ως απόρροια της δράσης της παροχής του νερού στα δύο σημεία εκροής των αντλιοστασίων, την ένταση της βροχόπτωσης και των χρονικών διαστημάτων ύποπτων εμφάνισης ρυπογόνων επεισοδίων.

Στην κατεύθυνση αυτή χρησιμοποιήθηκε η τεχνική CHAID (Chisquared Automatic Interaction Detector) η οποία, όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο της μεθοδολογίας, βασίζεται στη χρήση ενός αλγόριθμου που στοχεύει στην πρόβλεψη μιας ποσοτικής εξαρτημένης μεταβλητής (παλινδρόμηση) αλλά και κατηγορικής (ταξινόμηση), από ένα πλήθος ανεξάρτητων μεταβλητών με τη μορφή δενδρικής ιεραρχίας. Κάθε μη τελικός κόμβος προσδιορίζει μια ή περισσότερες συνθήκες τμήσης, ευελπιστώντας να επιφέρει μια άριστη πρόβλεψη (σε ποσοτικές εξαρτημένες μεταβλητές) ή ταξινόμηση (σε κατηγορικές), παρέχοντας έτσι λύση σε προβλήματα τύπου παλινδρόμησης ή ταξινόμησης.

Η τεχνική CHAID εφαρμόστηκε στα δεδομένα της συγκέντρωσης των ιόντων χλωρίου και ανέδειξε τέσσερις τελικούς κόμβους (ομάδες στοιχείων), στον κόμβο 5 (ID=5) των οποίων διακρίνεται σχεδόν πλήρης διαχωρισμός των χλωριόντων στο υψηλό επίπεδο (βλ. Σχήμα 90). Παρατηρώντας τον Πίνακα 7, εύκολα προκύπτει ότι η ομάδα αυτή κυριαρχείται από δύο χρονικά διαστήματα, τις ημερολογιακές εβδομάδες 37 και 42. Με αντίστροφη σκέψη, σαφής διαχωρισμός των στοιχείων σε ομάδα αποκλειστικά με χαμηλά επίπεδα συγκέντρωσης ιόντων χλωρίου παρατηρείται στον κόμβο 2 (βλ. Σχήμα 82), στον οποίο 336 παρατηρήσεις σε σύνολο 908 κατανέμονται στις ημερολογιακές εβδομάδες 18, 19, 20, 23, 36, 27, 29 και 47 (βλ. Πίνακα 7). Συμπερασματικά, τα νερά στις χρονικές περιόδους αυτές κρίνονται χωρίς ρυπαντική επιβάρυνση.



Σχήμα 82. Δενδρική ταξινόμηση των επιπέδων συγκέντρωσης ιόντων χλωρίου (χαμηλό/υψηλό) με 2 επίπεδα τμήσεων και 4 τελικούς κόμβους

Πίνακας 7. Δενδρική κατανομή των στοιχείων σε επίπεδα συγκέντρωσης ιόντων χλωρίου (χαμηλό-υψηλό) από τη δράση των χρονικών περιόδων

	N κόμβων	**Μέγεθος κόμβου**	**N - χαμηλό**	**N - υψηλό**	**Επιλεγείσα κατηγορία**	**Μεταβλητή τμήσης**	**Κριτήριο 1**	**Κριτήριο 2**	**Κριτήριο 3**	**Κόμβος Κριτ. 1**	**Κόμβος Κριτ. 2**	**Κόμβος Κριτ. 3**
1	3	908	688	220	low	time	18, 19, 20, 23, 26, 27, 29, 47	35, 39, 43	37, 42, 38	2	3	4
2		336	336	0	low							
3		358	305	53	low							
4	2	214	47	167	high	time	37, 42	38		5	6	
5		165	21	144	high							
6		49	26	23	low							

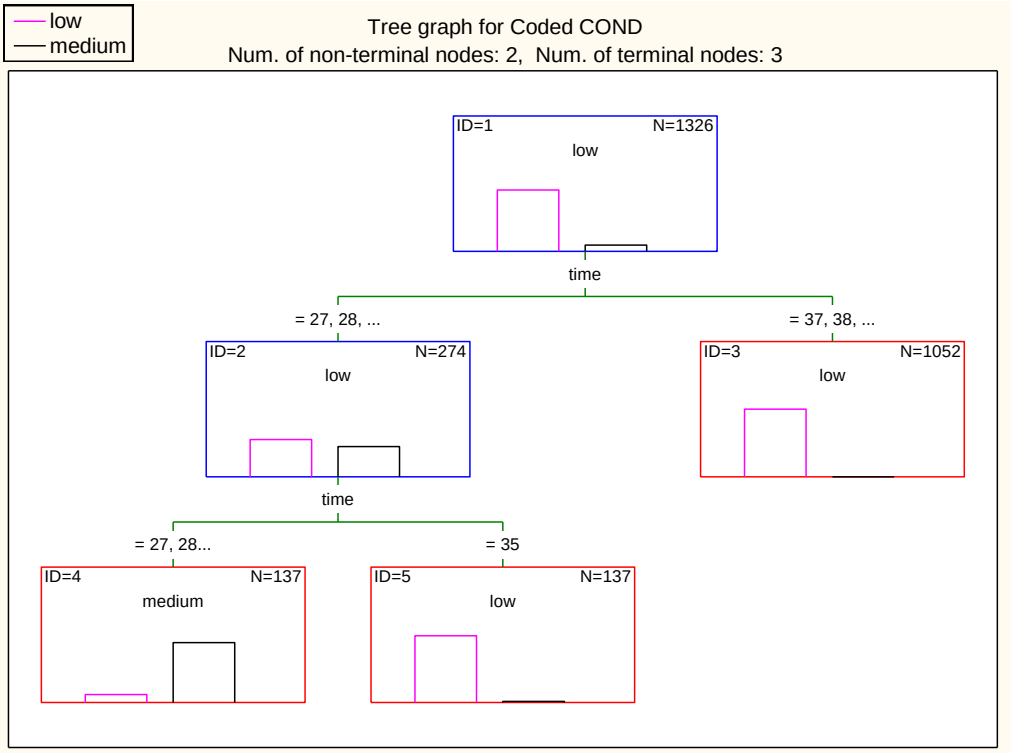
Η εκτίμηση κινδύνου ή αλλιώς το ποσοστό λανθασμένης ταξινόμησης (αστοχία) της παραπάνω δενδρικής ταξινόμησης ανέρχεται στο 10.68%, ποσοστό το οποίο θεωρείται αρκετά ικανοποιητικό από άποψης αξιοπιστίας της τεχνικής. Όπως διαφαίνεται από τον πίνακα εσφαλμένης ταξινόμησης (Πίνακας 8), τα στοιχεία στις δύο κατηγορίες (χαμηλό-υψηλό) κατανέμονται ορθώς (συμπίπτουν) στο χαμηλό επίπεδο σε 667 περιπτώσεις από ένα σύνολο 743 τιμών και στο υψηλό επίπεδο σε 144 από 165 περιπτώσεις.

Πίνακας 8. Πίνακας καταμερισμού των συχνοτήτων συγκέντρωσης ιόντων χλωρίου με βάση τα επίπεδα χαμηλό-υψηλό

Συχνότητες	**Παρατηρούμενο χαμηλό**	**Παρατηρούμενο υψηλό**
Προβλέψιμο χαμηλό	667	76
Προβλέψιμο υψηλό	21	144

Σχετικά με την αγωγιμότητα, δεν καταγράφηκαν τιμές >2000 μS/cm, δηλαδή υψηλό επίπεδο δεν ορίζεται και έτσι οι τιμές προσαρμόστηκαν σε χαμηλού επιπέδου (<750) και μεσαίου (751-2000). Η αγωγιμότητα διαχωρίστηκε με υψηλό βαθμό αξιοπιστίας σε τρεις τελικούς κόμβους με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά (βλ. Σχήμα 91 και Πίνακα 9):

Στις εβδομάδες 37, 38, 39, 42, 47, 52, 50 και επίσης την 35, παρατηρούνται χαμηλά επίπεδα αγωγιμότητας και μόνο τις εβδομάδες 27 και 28 εμφανίζονται μεσαίας κλίμακας τιμές. Η εκτίμηση του κινδύνου αστοχίας είναι εξαιρετικά μικρή (1.36%) όπως αυτή αποτυπώνεται στο δενδρόγραμμα του Σχήματος 83 (πολύ ευκρινείς διαχωρισμοί των δύο επιπέδων στις τρεις ομάδες) και στον πίνακα λανθασμένης ταξινόμησης (Πίνακας 10) στον οποίο εμφανίζονται μόνο 2 αστοχίες στο χαμηλό επίπεδο σε σύνολο 1189 παρατηρήσεων και 16 αστοχίες στο μεσαίο επίπεδο σε σύνολο 137 τιμών.



Σχήμα 83. Δενδρική ταξινόμηση των επιπέδων αγωγιμότητας (χαμηλό/μεσαίο) με 2 επίπεδα τμήσεων και 3 τελικούς κόμβους

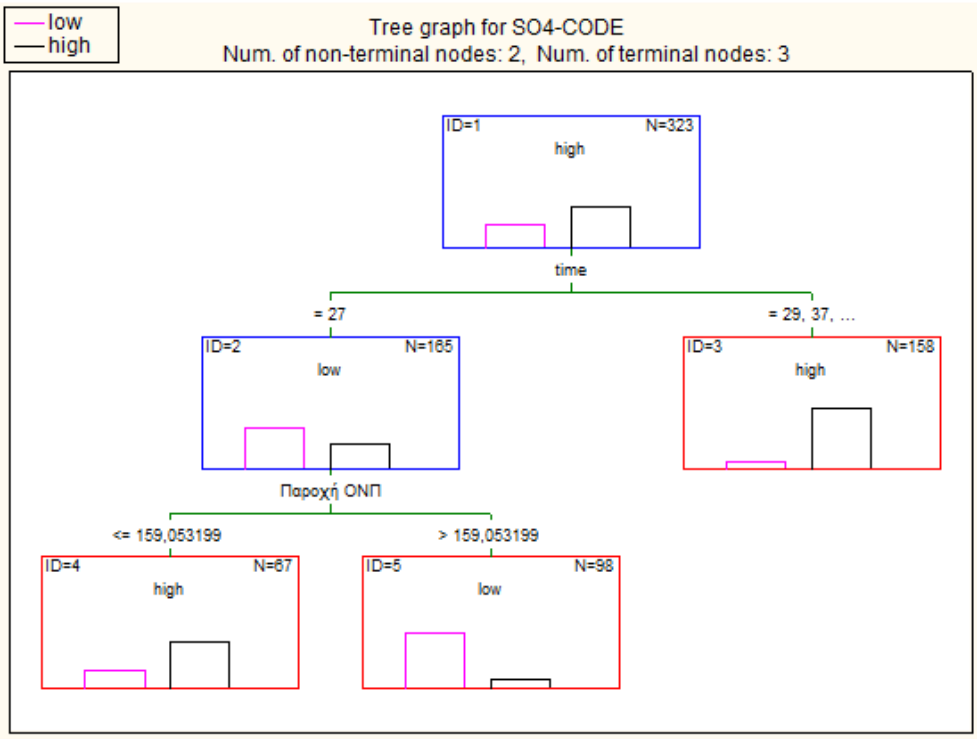
Πίνακας 9. Δενδρική κατανομή των στοιχείων σε επίπεδα αγωγιμότητας χαμηλό-μεσαίο από τη δράση των χρονικών περιόδων

	N κόμβων	**Μέγεθος κόμβου**	**N - χαμηλό**	**N - υψηλό**	**Επιλεγείσα κατηγορία**	**Μεταβλητή τμήσης**	**Κριτήριο 1**	**Κριτήριο 2**	**Κόμβος Κριτ. 1**	**Κόμβος Κριτ. 2**
1	2	1326	1203	123	low	time	27, 28, 35	37, 38, 39, 42, 47, 52, 50	2	3
2	2	274	151	123	low	time	27, 28	35	4	5
4		137	16	121	medium					
5		137	135	2	low					
3		1052	1052	0	low					

Πίνακας 10. Πίνακας καταμερισμού των συχνοτήτων αγωγιμότητας με βάση τα επίπεδα χαμηλό-μεσαίο

Συχνότητες	Παρατηρούμενο χαμηλό	Παρατηρούμενο μεσαίο
Προβλέψιμο χαμηλό	1187	2
Προβλέψιμο μεσαίο	16	121

Τα δεδομένα συγκέντρωσης των θειικών ιόντων επίσης διαχειρίστηκαν ως κατηγορικής μορφής (χαμηλό - υψηλό επίπεδο) με την τεχνική ταξινόμησης CHAID, η οποία απέδωσε τρεις τελικούς κόμβους (βλ. Σχήμα 84 και Πίνακα 11). Η κατανομή των κόμβων αυτών πραγματοποιήθηκε αρχικά με διαχωρισμό του υψηλού επιπέδου της συγκέντρωσης των θειικών ιόντων στο δεξιό σκέλος της διακλάδωσης σε σύνολο 158 μετρήσεων (συνθήκη τμήσης των εβδομάδων 29, 37 και 35) και με ενδιάμεσο διαχωρισμό των υπόλοιπων 165 μετρήσεων στο αριστερό σκέλος με βάση διαχωρισμού το χαμηλό επίπεδο της συγκέντρωσης των θειικών ιόντων και αποκλειστικά την 27^{η} εβδομάδα. Για τη συγκεκριμένη εβδομάδα παρατηρείται ένας νέος διαχωρισμός των τιμών της συγκέντρωσης των θειικών ιόντων λόγω της δράσης της ογκομετρικής παροχής στο σημείο εκροής αντλιοστασίου ΟΝΠ. Έτσι, 67 μετρήσεις παρουσιάζουν υψηλό επίπεδο συγκέντρωσης θεϊκών ιόντων σε τιμή τμήσης της παροχής ≤159 m^3/hr και 98 μετρήσεις σε χαμηλό επίπεδο (≤250mg/L) όταν η παροχή στο σημείο εκροής αντλιοστασίου ΟΝΠ υπερβαίνει τα 159 m^3/hr.



Σχήμα 84. Δενδρική παλινδρόμηση της συγκέντρωσης των θειικών ιόντων με 2 επίπεδα τμήσεων και 3 τελικούς κόμβους

Πίνακας 11. Πίνακας καταμερισμού των συχνοτήτων της συγκέντρωσης των θειικών ιόντων με βάση διαχωρισμού το χρονικό διάστημα και την παροχή ΟΝΠ.

	N κόμβων	**Μέγεθος κόμβου**	**N - χαμηλό**	**N - υψηλό**	**Επιλεγείσα κατηγορία**	**Μεταβλητή τμήσης**	**Κριτήριο 1**	**Κριτήριο 2**	**Κόμβος Κριτ. 1**	**Κόμβος Κριτ. 2**
1	2	323	117	206	high	time	27	29, 37, 35	2	3
2	2	165	102	63	low	Παροχή ΟΝΠ	x ≤159 m^3/hr	x > 159 m^3/hr	4	5
4		67	19	48	high					
5		98	83	15	low					
3		158	15	143	high					

Η αξιοπιστία τμήσης του δενδρογράμματος ανήλθε σε ικανοποιητικά επίπεδα (εκτίμηση ποσοστού αστοχίας: 15.2%) η οποία αποτυπώνεται στον παρακάτω Πίνακα 12. Σε σύνολο 323 τιμών συγκέντρωσης θειικών ιόντων, 15 μετρήσεις ταξινομούνται λανθασμένα ως υψηλού επιπέδου και 34 μετρήσεις ως χαμηλού επιπέδου (49/323=0.152).

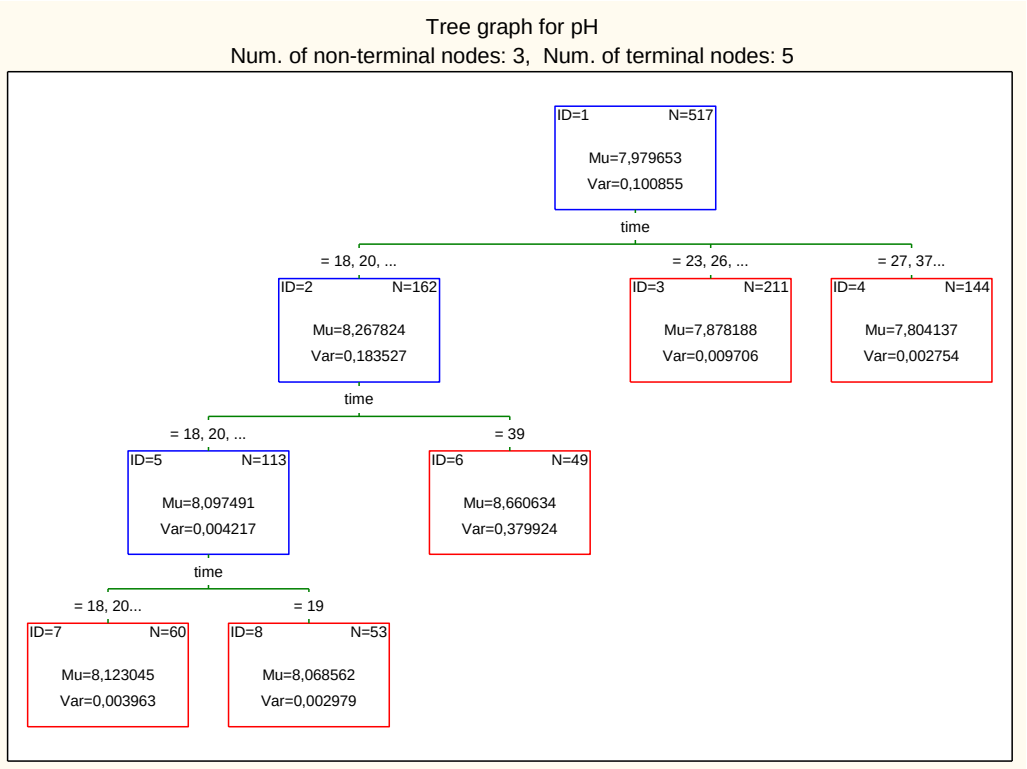
Πίνακας 12. Πίνακας καταμερισμού των συχνοτήτων της συγκέντρωσης θειικών ιόντων με βάση τα επίπεδα χαμηλό-υψηλό

Συχνότητες	**Παρατηρούμενο χαμηλό**	**Παρατηρούμενο μεσαίο**
Προβλέψιμο χαμηλό	83	34
Προβλέψιμο μεσαίο	15	191

Τέλος, οι τιμές του pH κυμάνθηκαν εντός των φυσιολογικών ορίων (6,5-9,5), κατά συνέπεια οι παράμετροι αυτές εισήχθησαν στο μοντέλο CHAID ως ποσοτικές, σε αντίθεση με τις προηγούμενες περιπτώσεις όπου ήταν κατηγορικές (χαμηλό-υψηλό), διαμορφώνοντας έτσι τη στατιστική διαδικασία σε δενδρική παλινδρόμηση.

Το pH διαχωρίστηκε σε πέντε διαφορετικές περιόδους με τις εξής διαπιστώσεις (Σχήμα 85 και Πίνακας 12):

Τα μέσα επίπεδα τιμών 7.88 και 7.80 καταγράφηκαν τις εβδομάδες 23, 26, 29, 35 και 27, 37 αντίστοιχα. Σε υψηλότερα επίπεδα της τάξης 8.27 επήλθε μία πρώτη τμήση στις εβδομάδες 18, 20 και 19 και 39 με την τελευταία να αποδίδει τελική τιμή pH 8.66 σε 49 παρατηρήσεις. Οι λοιπές εβδομάδες διαχωρίζονται αρχικά σε τιμή pH=8.10, η οποία διαμοιράζεται ακολούθως χαμηλότερα την εβδομάδα 19 (pH=8.07 με 53 παρατηρήσεις) και υψηλότερα τις εβδομάδες 18 και 20 (pH=8.12 με 60 παρατηρήσεις). Ο τελευταίος αυτός διαχωρισμός κρίνεται χωρίς μεγάλη σημασία εξαιτίας των πολύ κοντινών μέσων τιμών του pH στις δυο τμήσεις. Οι παραπάνω διαχωρισμοί αν και διαθέτουν υψηλό βαθμό αξιοπιστίας (ποσοστό εσφαλμένων ταξινομήσεων 4.07%) θα πρέπει να αιτιολογηθούν με μεγάλη επιφύλαξη καθότι κυμαίνονται ουσιαστικά σε φυσιολογικά επίπεδα διακύμανσης του pH με χρονικές ιδιαιτερότητες.



Σχήμα 85. Δενδρική παλινδρόμηση των τιμών pH με 3 επίπεδα τμήσεων και 5 τελικούς κόμβους

Πίνακας 13. Πίνακας καταμερισμού των συχνοτήτων των τιμών pH με βάση διαχωρισμού τα διαφορετικά χρονικά διαστήματα

	N κόμβων	**Μέγεθος κόμβου**	**Μέση τιμή**	**Διακύμανση**	**Μεταβλητή τμήσης**	**Κριτήριο 1**	**Κριτήριο 2**	**Κριτήριο 3**	**Κόμβος Κριτ. 1**	**Κόμβος Κριτ. 2**	**Κόμβος Κριτ. 3**
1	3	517	7.979653	0.100855	time	18, 20, 19, 39	23, 26, 29, 35	27, 37	2	3	4
2	2	162	8.267824	0.183527	time	18, 20, 19	39		5	6	
5	2	113	8.097491	0.004217	time	18, 20	19		7	8	
7		60	8.123045	0.003963							
8		53	8.068562	0.002979							
6		49	8.660634	0.379924							
3		211	7.878188	0.009706							
4		144	7.804137	0.002754							

Θέτοντας σε πλήρη αντιστοίχιση συγκερασμού όλων των εβδομάδων που μελετήθηκαν σε όλα τα χρονικά διαστήματα και απομονώνοντας μόνο τις περιπτώσεις ανεύρεσης μη αποδεκτών ορίων, προκύπτουν οι ακόλουθες επισημάνσεις:

- Την εβδομάδα 27 (28/06-04/07/2010) εντοπίστηκαν υψηλά επίπεδα συγκέντρωσης θειικών ιόντων (>250 mg/L) ιδιαίτερα όταν η παροχή στο σημείο εκροής υδάτων ΟΝΠ είναι μικρότερη από 159.7 m^3/hr, μεσαία επίπεδα αγωγιμότητας (751-2000 μS/cm), ενώ πολύ χαμηλά παρέμειναν το pH (7.8) και τα χλωριόντα (<250 mg/L).
- Την εβδομάδα 29 (12-18/07/2010) εντοπίστηκαν υψηλά επίπεδα συγκέντρωσης θειικών ιόντων (>250 mg/L).
- Η εβδομάδα 39 (20-26/09/2010) υπήρξε η μοναδική με τις υψηλότερες τιμές pH (8.66) σε όλο το μελετώμενο υδατικό σύστημα ενώ εμφάνισε χαμηλά επίπεδα αγωγιμότητας (<750 μS/cm).
- Την εβδομάδα 37 (06-12/09/2010) παρατηρήθηκαν υψηλά επίπεδα ιόντων χλωρίου (>250 mg/L), το χαμηλότερο pH (7.8), υψηλά επίπεδα συγκέντρωσης θειικών ιόντων (>250 mg/L) και χαμηλή αγωγιμότητα (<750 μS/cm).
- Την εβδομάδα 42 (11-17/10/2010) σημειώθηκαν υψηλά επίπεδα συγκέντρωσης ιόντων χλωρίου (>250 mg/L) και χαμηλή αγωγιμότητα (<750 μS/cm).
- Η εβδομάδα 28 (05-11/07/2010) εμφανίζεται στο σύστημα μία μόνο φορά και ειδοποιεί για παρουσία μεσαίων επιπέδων αγωγιμότητας (751-2000 μS/cm).

5.5 ΜΟΝΤΕΛΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΡΥΠΟΓΟΝΟΥ ΔΡΑΣΗΣ ΣΤΑ ΣΗΜΕΙΑ ΕΚΡΟΗΣ ΑΝΤΛΙΟΣΤΑΣΙΩΝ ΟΡΥΧΕΙΩΝ ΚΑΡΔΙΑΣ ΚΑΙ ΟΝΠ

Η αύξηση των συγκεντρώσεων των φυσικοχημικών παραμέτρων του μελετώμενου υδάτινου συστήματος (ρέμα Σουλού) ενδεχομένως να σχετίζεται με την αύξηση της παροχής στα δύο σημεία εκροής υδάτων (αντλιοστάσια ορυχείων Καρδιάς και Νοτίου Πεδίου) αλλά και τη δράση της βροχόπτωσης. Επιπρόσθετα, στις διαφορετικές ημερομηνίες λήψης μετρήσεων είναι αυτονόητη η παρουσία διακυμάνσεων στις μετρούμενες συγκεντρώσεις των παραμέτρων για διάφορους λόγους, μεταξύ των οποίων, ένα ρυπογόνο γεγονός (π.χ. λόγω της εξορυκτικής δραστηριότητας), φυσικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις επαναλαμβανόμενες (π.χ. εξαιτίας γεωργικών δραστηριοτήτων) ή ακανόνιστες (π.χ. απότομη και ακατάσχετη νεροποντή, πλημμυρικά φαινόμενα) κ.ά.. Ενέργεια η οποία θα μπορούσε να στηρίξει την εμφάνιση μίας ρυπογόνου δράσης θεωρείται η αύξηση της παροχής στα δύο σημεία εκροής υδάτων και η εντόπιση χρονικών διαστημάτων στα οποία θα μπορούσε να αποδοθεί με σχετική ευκρίνεια ή να απομονωθεί το φαινόμενο του επεισοδίου ρύπανσης σε συνδυασμό με άλλα συγκαιρινά ευρήματα.

Ως μέθοδος ποσοτικής εκτίμησης της ρυπογόνου δράσης των δύο σημείων εκροής υδάτων, της βροχής και του χρονικού διαστήματος, επιλέχθηκε η πολλαπλή παλινδρόμηση στην οποία το ρόλο της εξαρτημένης μεταβλητής αναλαμβάνει η εκάστοτε φυσικοχημική παράμετρος και τη θέση των ανεξάρτητων κατέχουν οι δύο παροχές, η ποσότητα βροχόπτωσης και το χρονικό περιθώριο κάθε δράσης. Η πολλαπλή παλινδρόμηση εκφράζεται με το συγκεκριμένο μοντέλο:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4$$

Όπου $\hat{Y}$ η προσαρμοσμένη φυσικοχημική παράμετρος, b_0 ύψος της $\hat{Y}$ και b οι συντελεστές παλινδρόμησης των X ανεξάρτητων μεταβλητών (παροχή Καρδιάς, παροχή ΟΝΠ, βροχόπτωση και χρονικό διάστημα). Θετικοί συντελεστές προκαλούν αυξητική μεταβολή της $\hat{Y}$ και αρνητικοί τανάπαλιν. Για το χρονικό διάστημα, επειδή είναι κατηγορικής μορφής, υπολογίστηκε ένας συντελεστής χωριστά για κάθε χρονική κατηγορία.

Με την μέθοδο της πολλαπλής παλινδρόμησης μετρούμε την ύπαρξη γραμμικών αποκρίσεων των φυσικοχημικών παραμέτρων από τη δράση των ανεξάρτητων μεταβλητών (παροχή, χρόνοι δειγματοληψίας, βροχόπτωση) σύμφωνα με τις τρέχουσες τιμές και διαπιστώνουμε αν υπάρχει στατιστικά σημαντική επίδραση και πως αυτή καταγράφεται στις αποκρίσεις των παραμέτρων. Με την μέθοδο που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα 5.4 (δενδρική παλινδρόμηση/ταξινόμηση) μετρούμε την κατανομή φυσιολογικών ή μη τιμών των παραμέτρων στους σταθμούς μέτρησης και ερευνούμε πώς τα επίπεδα αυτά μπορούν να ερμηνευτούν ποσοτικοποιημένα από τη δράση των ανεξάρτητων μεταβλητών. Οι δύο αυτές μέθοδοι συμπληρώνουν η μία την άλλη και η χρήση παράλληλα και των δύο μας δίνει ολοκληρωμένη εικόνα για την ύπαρξη επεισοδίων ρύπανσης στην περιοχή μελέτης.

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο της μεθοδολογίας, η αξιοπιστία των εξισώσεων ελέγχθηκε με την εκτίμηση του προσδιοριστικού συντελεστή της παλινδρόμησης R^2 και του προβλεπτικού συντελεστή R^2_p. Ένα μοντέλο θεωρείται ικανοποιητικό όταν οι δύο συντελεστές δεν απέχουν περισσότερο από 20% μεταξύ τους και όταν ο προσδιοριστικός συντελεστής εμπειρικά είναι μεγαλύτερος από 50%. Οι έλεγχοι της κανονικότητας των υπολειμμάτων της παλινδρόμησης και της ομοιογένειας επίσης ελήφθησαν σοβαρά υπόψη, έτσι κάθε παραβίαση των προϋποθέσεων διορθωνόταν με τη χρήση κατάλληλων μετασχηματισμών στην εκάστοτε εξαρτημένη μεταβλητή. Επιπρόσθετα, προνοήθηκε και ο έλεγχος της πολυσυγγραμμικότητας μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών (VIF) η οποία εμφανίζεται όταν ισχύει VIF≥10. Στα μοντέλα εφαρμόστηκε η βηματική παλινδρόμηση προοδευτικής απόρριψης των ανεξάρτητων μεταβλητών (backward elimination of variables).

Εφαρμόζοντας πιστά την παραπάνω διαδικασία προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

1. Η αγωγιμότητα υπέστη το μετασχηματισμό της τετραγωνικής ρίζας (λ=0.5) σύμφωνα με την τεχνική των Box – Cox (Πετρίδης, 2000) προς συμμόρφωση με τους όρους της κανονικότητας των υπολειμμάτων και ομοιογένειας των διακυμάνσεων και με βάση τα αποτελέσματα της προοδευτικής απόρριψης των μη σημαντικών μεταβλητών προέκυψε ότι αυτή επηρεάζεται μόνο από την ογκομετρική παροχή του σημείου εκροής υδάτων ορυχείου Καρδιάς και τα χρονικά διαστήματα με πολύ υψηλό ποσοστό αξιοπιστίας του μοντέλου (R^2 = 87%).

Ο συντελεστής της παροχής είναι θετικός (0.00868) πιστοποιώντας έτσι ότι η αύξηση της παροχής αυξάνει την αγωγιμότητα στην υδάτινη μάζα. Αυξητική μεταβολή προκαλεί επίσης και το χρονικό διάστημα έναρξης 01/07-06/07/2010 (2.607), ενώ οι λοιποί συντελεστές είναι αρνητικοί με αποτέλεσμα να μειώνουν την απόκριση της αγωγιμότητας (ο συντελεστής της πρώτης κατηγορίας δεν περιγράφεται στον παρακάτω Πίνακα 14 παρά μόνο στο Σχήμα 84). Επισημαίνεται η ισχυρή στατιστική σημαντικότητα των χρονικών κατηγοριών στον Πίνακα 14 (τιμές t πολύ υψηλές).

Πίνακας 14. Στατιστικές παράμετροι των συντελεστών της παλινδρόμησης επί της αγωγιμότητας

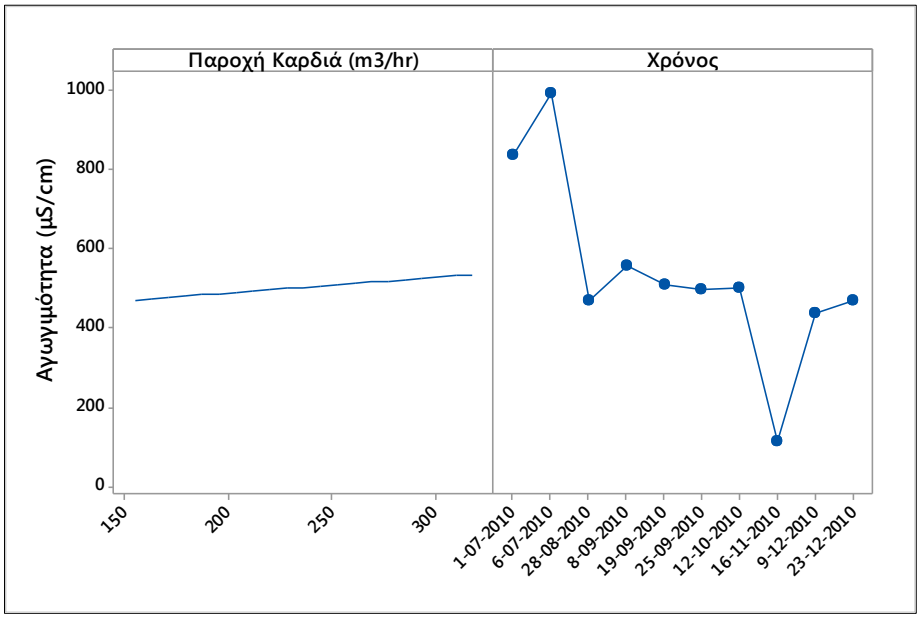
Βαθμός αξιοπιστίας παλινδρόμησης

R^2	R^2_p
86.99%	86.82%

Συντελεστές παλινδρόμησης

Όρος	Συντελεστής	SE	Τιμή t	p	VIF
Σταθερά (bo)	26.670	0.510	52.29	0.000	
Παροχή Καρδιά	0.00868	0.00192	4.53	0.000	1.08
Χρονικό διάστημα					
06-07-10	2.607	0.182	14.34	0.000	2.62
08-09-10	-5.306	0.174	-30.46	0.000	3.09
09-12-10	-7.971	0.162	-49.26	0.000	4.51
12-10-10	-6.560	0.157	-41.71	0.000	5.62
16-11-10	-18.219	0.497	-36.68	0.000	1.09
19-09-10	-6.314	0.200	-31.49	0.000	2.04
23-12-10	-7.279	0.169	-42.99	0.000	3.74
25-09-10	-6.581	0.223	-29.57	0.000	1.71
28-08-10	-7.278	0.176	-41.41	0.000	2.96

Οι παραπάνω διαπιστώσεις αποτυπώνονται στο Σχήμα 86, στο οποίο η αύξηση της παροχής στο σημείο εκροής υδάτων ορυχείου Καρδιάς αυξάνει και την αγωγιμότητα στο νερό και παράλληλα δύο χρονικά περιθώρια εμφανίζουν αποτέλεσμα αγωγιμότητας μεγαλύτερο του μέσου της.



Σχήμα 86. Επίδραση της παροχής (κλίση) και των χρονικών διαστημάτων στην εξέλιξη της αγωγιμότητας

Οι εξισώσεις που προκύπτουν από την παραπάνω στατιστική ανάλυση για την αγωγιμότητα για κάθε χρονικό διάστημα παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακα 15.

Πίνακας 15. Εξισώσεις πολλαπλής παλινδρόμησης για την αγωγιμότητα

Α/Α	Κωδικός	Χρονικό διάστημα	Εξίσωση
1	1-07-2010	01-04/07/2010	COND = (26.670 + 0.00868*Παροχή Καρδιά)^2
2	6-07-2010	06-11/07/2010	COND = (29.277 + 0.00868*Παροχή Καρδιά)^2
3	28-08-2010	28/08-03/09/2010	COND = (19.392 + 0.00868*Παροχή Καρδιά)^2
4	8-09-2010	08-15/09/2010	COND = (21.364 + 0.00868*Παροχή Καρδιά)^2
5	19-09-2010	19-21/09/2010	COND = (20.356 + 0.00868*Παροχή Καρδιά)^2
6	25-09-2010	25-26/09/2010	COND = (20.088 + 0.00868*Παροχή Καρδιά)^2
7	12-10-2010	12/10-05/11/2010	COND = (20.109 + 0.00868*Παροχή Καρδιά)^2
8	16-11-2010	16/11/2010	COND = (8.451 + 0.00868*Παροχή Καρδιά)^2
9	9-12-2010	09-21/12/2010	COND = (18.699 + 0.00868*Παροχή Καρδιά)^2
10	23-12-2010	23/12-31/12/2010	COND = (19.391 + 0.00868*Παροχή Καρδιά)^2

2. Η παροχή στο σημείο εκροής αντλιοστασίου ορυχείου Νότιου Πεδίου (ΟΝΠ) και τα χρονικά περιθώρια αποτελούν τις βασικές παραμέτρους που επηρεάζουν την απόκριση του pH στο υδάτινο σύστημα (σε λογαριθμική κλίμακα τιμών). Η εξίσωση παλινδρόμησης εμφανίζει πολύ υψηλό ποσοστό αξιοπιστίας (R^2 = 90%) και επισημαίνεται η θετική δράση που ασκεί η παροχή στο σημείο εκροής αντλιοστασίου ΟΝΠ στο pH (0.000156). Θετικά επηρεάζουν την εξέλιξη του pH όλα τα χρονικά διαστήματα (εκτός από δύο που έχουν μη στατιστικά σημαντική δράση, $p>0.05$) και το συνολικό μοντέλο δίνεται στο Σχήμα 87.

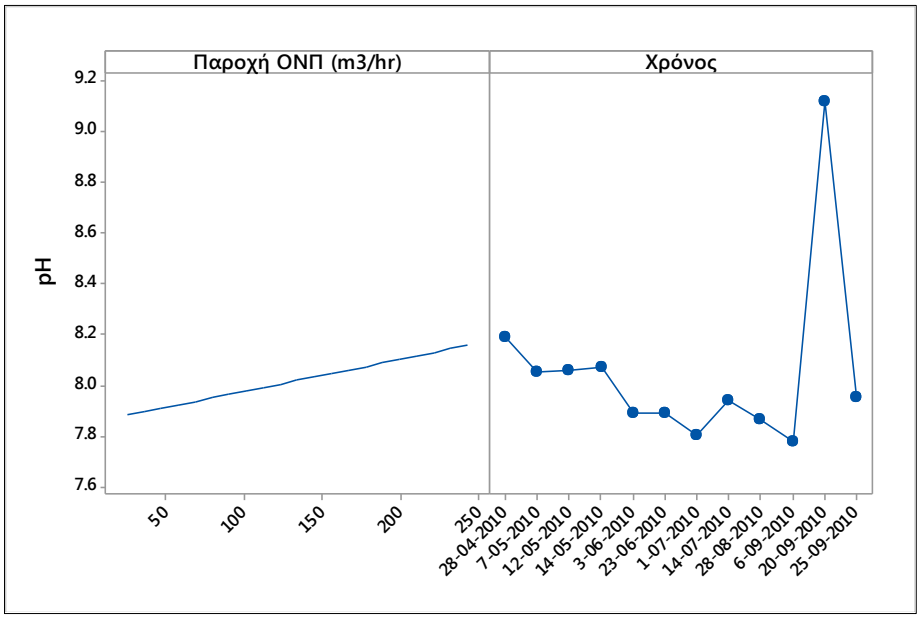
Πίνακας 16. Στατιστικές παράμετροι των συντελεστών της παλινδρόμησης επί της απόκρισης του pH

Βαθμός αξιοπιστίας παλινδρόμησης

R^2	R^2_p
90.53%	90.05%

Συντελεστές παλινδρόμησης

Όρος	Συντελεστής	SE	Τιμή t	p	VIF
bo	2.03004	0.00544	373.43	0.000	
Παροχή ΟΝΠ	0.000156	0.000034	4.56	0.000	1.20
Χρονικό διάστημα					
03-06-10	0.01137	0.00169	6.73	0.000	1.23
06-09-10	-0.00256	0.00567	-0.45	0.652	1.02
07-05-10	0.03216	0.00156	20.57	0.000	1.27
12-05-10	0.03247	0.00278	11.67	0.000	1.08
14-05-10	0.03422	0.00207	16.54	0.000	1.15
14-07-10	0.01789	0.00340	5.26	0.000	1.17
20-09-10	0.15637	0.00224	69.81	0.000	1.14
23-06-10	0.01173	0.00797	1.47	0.141	1.01
25-09-10	0.01957	0.00275	7.12	0.000	1.11
28-04-10	0.04850	0.00254	19.06	0.000	1.09
28-08-10	0.00844	0.00129	6.52	0.000	1.43



Σχήμα 87. Επίδραση της παροχής (κλίση) και των χρονικών διαστημάτων στην εξέλιξη του pH

Δύο ευρήματα επισημαίνονται στο μοντέλο αυτό:

α) οι τιμές του pH επηρεάζονται θετικά από την ένταση της παροχής στο σημείο εκροής υδάτων ΟΝΠ, σε αντίθεση με την αγωγιμότητα που εκεί επηρεάζεται από την παροχή στο σημείο εκροής υδάτων ορυχείου Καρδιάς

β) το εξαιρετικά υψηλό μέγεθος της δράσης που προκαλείται στην αύξηση του pH στο χρονικό διάστημα 20/09/10 όπως αποκαλύπτεται και από τη μεγάλη στατιστική σημαντικότητα (t=69.81).

Οι εξισώσεις που προκύπτουν από την παραπάνω στατιστική ανάλυση για το pH για κάθε χρονικό διάστημα παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακα 17.

Πίνακας 17. Εξισώσεις πολλαπλής παλινδρόμησης για το pH

Α/Α	Κωδικός	Χρονικό διάστημα	Εξίσωση
1	28-04-10	28-29/04/2010	ln(pH) = 2.07853 + 0.000156* Παροχή ΟΝΠ
2	07-05-10	07-10/05/2010	ln(pH) = 2.06220 + 0.000156* Παροχή ΟΝΠ
3	12-05-10	12/05/2010	ln(pH) = 2.06251 + 0.000156* Παροχή ΟΝΠ
4	14-05-10	14-15/05/2010	ln(pH) = 2.06425 + 0.000156* Παροχή ΟΝΠ
5	03-06-10	03-08/06/2010	ln(pH) = 2.04141 + 0.000156* Παροχή ΟΝΠ
6	23-06-10	23/06/2010	ln(pH) = 2.04177 + 0.000156* Παροχή ΟΝΠ
7	01-07-10	01-11/07/2010	ln(pH) = 2.03004 + 0.000156*Παροχή ΟΝΠ
8	14-07-10	14-16/07/2010	ln(pH) = 2.04793 + 0.000156* Παροχή ΟΝΠ
9	28-08-10	28/08-03/09/2010	ln(pH) = 2.03848 + 0.000156* Παροχή ΟΝΠ
10	06-09-10	06/09/2010	ln(pH) = 2.02748 + 0.000156* Παροχή ΟΝΠ
11	20-09-10	20-21/09/2010	ln(pH) = 2.18641 + 0.000156* Παροχή ΟΝΠ
12	25-09-10	25-26/09/2010	ln(pH) = 2.04961 + 0.000156* Παροχή ΟΝΠ

3. Η συγκέντρωση των θειικών ιόντων, σε λογαριθμική κλίμακα σύμφωνα με την τεχνική του μετασχηματισμού των Box – Cox προς επίτευξη κανονικότητας των τιμών (Πετρίδης, 2001), βρέθηκε να επηρεάζεται θετικά από τη δράση της παροχής στο σημείο εκροής υδάτων ορυχείου Καρδιάς (συντελεστής 0.03432) και αρνητικά από τη δράση των χρονικών διαστημάτων παρέχοντας μοντέλο με ικανοποιητικό βαθμό αξιοπιστίας (R^2 = 77%).

Πίνακας 18. Στατιστικές παράμετροι των συντελεστών της παλινδρόμησης επί της συγκέντρωσης των θειικών ιόντων

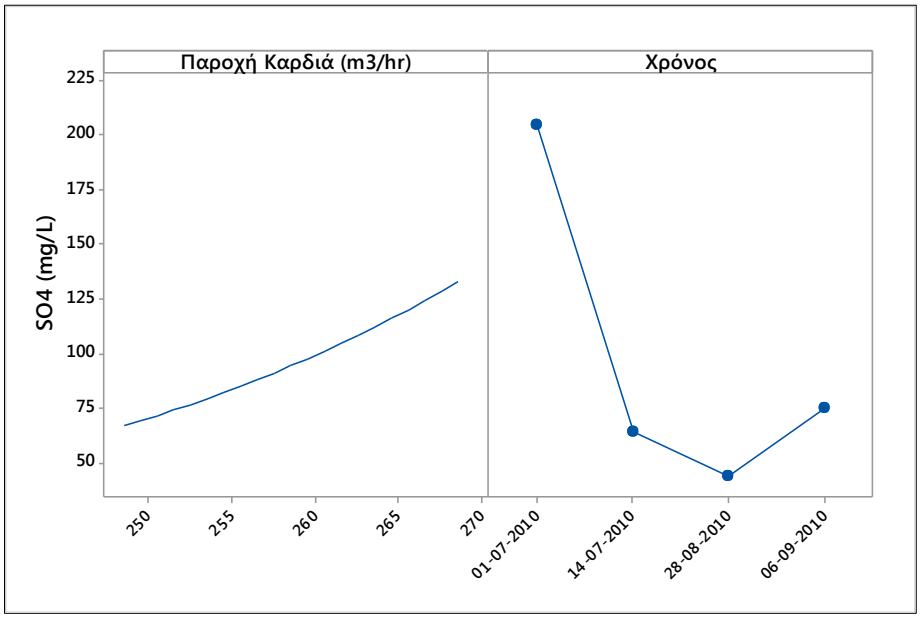
Βαθμός αξιοπιστίας παλινδρόμησης

R^2	R^2_p
77,20%	76,81%

Συντελεστές παλινδρόμησης

Όρος	Συντελεστής	SE	Τιμή t	p	VIF
bo	-3.41	1.74	-1.96	0.051	
Παροχή Καρδιά	0.03432	0.00679	5.05	0.000	1.30
Χρονικό διάστημα					
14-07-10	-1.1534	0.0718	-16.07	0.000	1.16
28-08-10	-1.5310	0.0533	-28.72	0.000	1.39
06-09-10	-1.0010	0.2180	-4.59	0.000	1.01

Η μεταβολή των θειικών ιόντων από τη δράση της παροχής πραγματοποιείται σε εύρος διακύμανσης μεταξύ 60 και 130 mg/L ενώ σημαντικό αποτέλεσμα καταγράφεται από τη δράση που δημιουργείται στο χρονικό διάστημα 01/07/2010 στο οποίο παρατηρείται μέγιστη συγκέντρωση των θειικών ιόντων 200 mg/L περίπου. Επισημαίνεται ότι εξαιτίας του τρόπου υπολογισμού των συντελεστών για τα χρονικά διαστήματα, η πρώτη κατηγορία εκλαμβάνεται αναγκαστικά ως κατηγορία αναφοράς με αποτέλεσμα να μην αναφέρεται η δράση τους στον πίνακα των συντελεστών παρά μόνο στο Σχήμα 88 ως άθροισμα της σταθεράς συν το γινόμενο b*(Παροχή).



Σχήμα 88. Επίδραση της παροχής (κλίση) και των χρονικών διαστημάτων στην εξέλιξη της συγκέντρωσης των θειικών ιόντων

Οι εξισώσεις που προκύπτουν από την παραπάνω στατιστική ανάλυση για τη συγκέντρωση των θειικών ιόντων για κάθε χρονικό διάστημα παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακα 19.

Πίνακας 19. Εξισώσεις πολλαπλής παλινδρόμησης για τη συγκέντρωση των θειικών ιόντων

Α/Α	Κωδικός	Χρονικό διάστημα	Εξίσωση
1	01-07-2010	01-11/07/2010	$\ln(SO_4)$ = -3.41 + 0.03432*Παροχή Καρδιά
2	14-07-2010	14-16/07/2010	$\ln(SO_4)$ = -4.56 + 0.03432*Παροχή Καρδιά
3	28-08-2010	28/08-03/09/2010	$\ln(SO_4)$ = -4.94 + 0.03432*Παροχή Καρδιά
4	06-09-2010	06/09/2010	$\ln(SO_4)$ = -4.41 + 0.03432*Παροχή Καρδιά

4. Η συγκέντρωση των ιόντων χλωρίου, μετασχηματισμένη σε λογαριθμική κλίμακα προς επίτευξη κανονικότητας των τιμών, έδειξε να αποκρίνεται θετικά στην αύξηση της παροχής στο σημείο εκροής υδάτων ορυχείου Καρδιάς (b=0.01088) και με αμφίδρομο αποτέλεσμα στη δράση των χρονικών διαστημάτων. Επισημαίνονται συγκεκριμένα, η υψηλή θετική δράση που προκαλείται στο διάστημα 08/09/2010 (t=26.25), 12/10/2010 (t=15.45) και

19/09/2010 (t=13.24), και το αρνητικό αποτέλεσμα την περίοδο 16/11/2010 (t=-11.96). Η αξιοπιστία του μοντέλου της παλινδρόμησης κρίνεται σχετικά ικανοποιητική (54%) και η απόκριση της συγκέντρωσης των ιόντων χλωρίου περιγράφεται στο Σχήμα 89 στο οποίο τα χρονικά σημεία ενδιαφέροντος κάνουν αισθητή τη δράση τους.

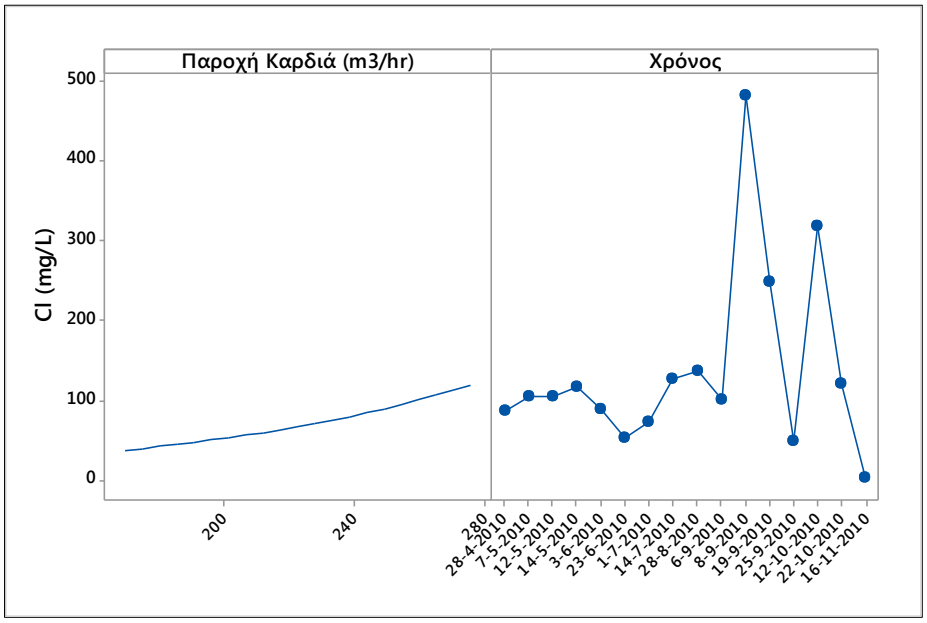
Πίνακας 20. Στατιστικές παράμετροι των συντελεστών της παλινδρόμησης επί της συγκέντρωσης των ιόντων χλωρίου

Βαθμός αξιοπιστίας παλινδρόμησης

R^2	R^2_p
54.23%	52.97%

Συντελεστές παλινδρόμησης

Όρος	Συντελεστής	SE	Τιμή t	p	VIF
Βο	1.498	0.767	1.95	0.051	
Παροχή Καρδιά	0.01088	0.00299	3.64	0.000	1.29
Χρονικό διάστημα					
03-06-10	0.1909	0.0735	2.60	0.009	1.48
06-09-10	0.317	0.332	0.95	0.341	1.02
07-05-10	0.3692	0.0987	3.74	0.000	1.22
08-09-10	1.8848	0.0718	26.25	0.000	1.59
12-05-10	0.365	0.237	1.54	0.124	1.03
12-10-10	1.4685	0.0951	15.45	0.000	1.25
14-05-10	0.462	0.114	4.06	0.000	1.16
14-07-10	0.550	0.106	5.19	0.000	1.20
16-11-10	-2.862	0.239	-11.96	0.000	1.05
19-09-10	1.2223	0.0923	13.24	0.000	1.28
22-10-10	0.4979	0.0684	7.28	0.000	1.78
23-06-10	-0.328	0.224	-1.46	0.144	1.04
25-09-10	-0.3954	0.0905	-4.37	0.000	1.28
28-04-10	0.179	0.142	1.26	0.208	1.10
28-08-10	0.6232	0.0727	8.57	0.000	1.54



Σχήμα 89. Επίδραση της παροχής (κλίση) και των χρονικών διαστημάτων στην εξέλιξη της συγκέντρωσης των ιόντων χλωρίου

Οι εξισώσεις που προκύπτουν από την παραπάνω στατιστική ανάλυση για τη συγκέντρωση ιόντων χλωρίου για κάθε χρονικό διάστημα παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακα 21.

Πίνακας 21. Εξισώσεις πολλαπλής παλινδρόμησης για τη συγκέντρωση ιόντων χλωρίου

Α/Α	Κωδικός	Χρονικό διάστημα	Εξίσωση
1	28-04-10	28-29/04/2010	ln(Cl) = 1.678 + 0.01088*Παροχή Καρδιά
2	07-05-10	07-10/05/2010	ln(Cl) = 1.868 + 0.01088*Παροχή Καρδιά
3	12-05-10	12/05/2010	ln(Cl) = 1.864 + 0.01088* Παροχή Καρδιά
4	14-05-10	14-15/05/2010	ln(Cl) = 1.961 + 0.01088*Παροχή Καρδιά
5	03-06-10	03-08/06/2010	ln(Cl) = 1.689 + 0.01088*Παροχή Καρδιά
6	23-06-10	23/06/2010	ln(Cl) = 1.170 + 0.01088*Παροχή Καρδιά
7	01-07-10	01-11/07/2010	ln(Cl) = 1.498 + 0.01088* Παροχή Καρδιά
8	14-07-10	14-16/07/2010	ln(Cl) = 2.048 + 0.01088*Παροχή Καρδιά
9	28-08-10	28/08-03/09/2010	ln(Cl) = 2.122 + 0.01088*Παροχή Καρδιά
10	06-09-10	06/09/2010	ln(Cl) = 1.815 + 0.01088*Παροχή Καρδιά
11	08-09-10	08-15/09/2010	ln(Cl) = 3.383 + 0.01088* Παροχή Καρδιά
12	19-09-10	19-21/09/2010	ln(Cl) = 2.721 + 0.01088*Παροχή Καρδιά
13	25-09-10	25-27/09/2010	ln(Cl) = 1.103 + 0.01088*Παροχή Καρδιά
14	12-10-10	12-17/10/2010	ln(Cl) = 2.967 + 0.01088*Παροχή Καρδιά
15	22-10-10	22/10-05/11/2010	ln(Cl) = 1.996 + 0.01088*Παροχή Καρδιά
16	16-11-10	16/11/2010	ln(Cl) = -1.364 + 0.01088*Παροχή Καρδιά

Εν κατακλείδι, όλες οι προαναφερόμενες φυσικοχημικές παράμετροι επηρεάζονται (ρυθμίζονται) από τις τιμές της παροχής στα σημεία εκροής αντλιοστασίων (ορυχείο Καρδιάς και Νότιου Πεδίου) και από συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα συμβάντων, φυσικών ή άλλης φύσης. Η παροχή στο σημείο εκροής αντλιοστασίου ΟΝΠ επηρεάζει αποκλειστικά και θετικά (αυξητικά) μόνο το pH στο νερό, ενώ η παροχή στο σημείο εκροής αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς είναι υπεύθυνη για τις αποκρίσεις των λοιπών τριών παραμέτρων. Τα μοντέλα ανταποκρίνονται ικανοποιητικά έως πάρα πολύ στις προϋποθέσεις θεμελίωσής τους.

Κάποια χρονικά διαστήματα ασκούν πολύ ισχυρή δράση στις φυσικοχημικές παραμέτρους και επομένως είναι επιτακτική ανάγκη η ανεύρεση των ημερών εκείνων μέσα στα διαστήματα αυτά που μπορούν αιτιολογημένα να θεωρηθούν ως πιθανά για την εμφάνιση κάποιου γεγονότος.

Η εγκυρότητα των παραπάνω μοντέλων (εξισώσεων παλινδρόμησης) για την εκτίμηση της συγκέντρωσης των φυσικοχημικών παραμέτρων ελέγχθηκε με τη χρήση μιας σειράς ανεξάρτητων ασυνεχών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο σε δείγματα που ελήφθησαν σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα το 2011 (σε αντιστοιχία με εκείνα του 2010 βάση των οποίων προέκυψαν οι εξισώσεις παλινδρόμησης).

Μία νέα ανεξάρτητη εισαγόμενη μέτρηση στο μοντέλο θεωρείται ότι επικυρώνει και επαληθεύει την αντίστοιχη προσαρμοσμένη (προβλεπόμενη) του μοντέλου όταν εμπίπτει μέσα στα 95% όρια πρόβλεψης που εκτιμώνται από το εκάστοτε μοντέλο.

Τα αποτελέσματα της επικύρωσης των εξισώσεων παλινδρόμησης παρουσιάζονται στους ακόλουθους Πίνακες 22 έως 25.

Πίνακας 22. Αντιστοιχία επικύρωσης των παρατηρούμενων και προβλεπόμενων τιμών συγκέντρωσης χλωριόντων με βάση εκτίμησης τα 95% όρια πρόβλεψης των εξισώσεων παλινδρόμησης (παρατηρούμενες τιμές εκτός των ορίων των μοντέλων δείχνονται με σκίαση)

Ημερομηνία	**Παροχή Καρδιά**	**Συγκέντρωση χλωριόντων (mg/L)**		**Όρια εμπιστοσύνης**	
		Παρατηρούμενη	**Προβλεπόμενη**	**-95%**	**+95%**
28/4/2011	256.87	71	87.6	23.4	327.4
9/5/2011	264.31	98	114.9	31.2	423.1
7/6/2011	259.16	81	90.9	24.9	332.3
14/7/2011	259.16	107	130.1	35.3	480.2
29/8/2011	224.80	106	96.3	26.1	355.7
6/9/2011	256.59	87	100.2	23.6	424.7
12/9/2011	259.88	371	498.3	136.4	1821.1
25/9/2011	254.23	59	47.9	13.1	176.0
26/10/2011	256.99	103	120.7	33.0	440.6
16/11/2011	251.90	23	4.0	1.0	15.6

Πίνακας 23. Αντιστοιχία επικύρωσης των παρατηρούμενων και προβλεπόμενων τιμών συγκέντρωσης θειικών ιόντων με βάση εκτίμησης τα 95% όρια πρόβλεψης των εξισώσεων παλινδρόμησης (παρατηρούμενες τιμές εκτός των ορίων των μοντέλων δείχνονται με σκίαση)

Ημερομηνία	**Παροχή Καρδιά**	**Συγκέντρωση θειικών ιόντων (mg/L)**		**Όρια εμπιστοσύνης**	
		Παρατηρούμενη	**Προβλεπόμενη**	**-95%**	**+95%**
2/7/2011	256.67	489	222.0	94.7	520.5
14/7/2011	259.16	111	76.4	32.2	180.7
29/8/2011	224.80	17	16.1	6.3	40.6
6/9/2011	256.59	142	81.4	31.4	210.3

Πίνακας 24. Αντιστοιχία επικύρωσης των παρατηρούμενων και προβλεπόμενων τιμών αγωγιμότητας με βάση εκτίμησης τα 95% όρια πρόβλεψης των εξισώσεων παλινδρόμησης (παρατηρούμενες τιμές εκτός των ορίων των μοντέλων δείχνονται με σκίαση)

Ημερομηνία	**Παροχή Καρδιά**	**Αγωγιμότητα (μS/cm)**		**Όρια εμπιστοσύνης**	
		Παρατηρούμενη	**Προβλεπόμενη**	**-95%**	**+95%**
2/7/2011	256.67	867	835.1	707.6	973.1
10/7/2011	256.47	938	992.5	853.5	1141.9
29/8/2011	224.80	568	455.6	363.1	558.5
12/9/2011	259.88	607	557.9	455.1	671.1
25/9/2011	254.23	542	497.1	399.7	605.1
26/10/2011	256.99	574	499.1	402.4	606.3
16/11/2011	251.90	478	113.2	66.8	171.6
17/12/2011	260.76	539	468.9	375.2	573.1

Πίνακας 25. Αντιστοιχία επικύρωσης των παρατηρούμενων και προβλεπόμενων τιμών pH με βάση εκτίμησης τα 95% όρια πρόβλεψης των εξισώσεων παλινδρόμησης (παρατηρούμενες τιμές εκτός των ορίων των μοντέλων δείχνονται με σκίαση)

Ημερομηνία	**Παροχή ΟΝΠ**	**pH**		**Όρια εμπιστοσύνης**	
		Παρατηρούμενη	**Προβλεπόμενη**	**-95%**	**+95%**
28/4/2011	156.56	8.3	8.2	8.0	8.4
9/5/2011	141.46	7.9	8.0	7.9	8.2
7/6/2011	147.42	7.7	7.9	7.7	8.1
2/7/2011	145.79	8.1	7.8	7.6	8.0
14/7/2011	143.86	7.9	7.9	7.7	8.1
29/8/2011	144.36	7.9	7.9	7.7	8.0
6/9/2011	140.06	7.5	7.8	7.6	8.0
25/9/2011	142.41	7.8	7.9	7.8	8.1

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των παραπάνω Πινάκων 22 έως 25 προκύπτουν οι ακόλουθες διαπιστώσεις:

1. Από την είσοδο 10 διαφορετικών τιμών συγκέντρωσης ιόντων χλωρίου την περίοδο 2011 επαληθεύτηκαν οι 9 μετρήσεις, καθότι πέραν της μεγάλης προσέγγισης των παρατηρούμενων τιμών με τις προβλεπόμενες από το μοντέλο, οι πραγματικά ληφθείσες (παρατηρούμενες) ενέπιπταν στα 95% όρια πρόβλεψης του μοντέλου. Συγκεκριμένα, παρουσιάστηκε μία μόνο τιμή εκτός των προβλεπόμενων ορίων στις 16/11/2011, δηλαδή μία αστοχία σε σύνολο 10 μετρήσεων.
2. Από τις εισαγόμενες 4 νέες μετρήσεις συγκέντρωσης των θειικών ιόντων το 2011 δεν παρατηρείται καμία αστοχία.
3. Η αγωγιμότητα προβλέφθηκε με επιτυχία στις 6 από τις 8 νεοεισαχθείσες τιμές και μάλιστα η προβλεπόμενη τιμή 455.6 μS/cm για το χρονικό διάστημα 29/8/2011 αστόχησε οριακά να προβλέψει την παρατηρούμενη τιμή 568 μS/cm (λίγο μεγαλύτερη από το ανώτερο όριο των 558.5 μS/cm).
4. Αναφορικά με τις τιμές του pH, δύο μόνο αστοχίες παρατηρήθηκαν σε σύνολο 8 νέων μετρήσεων και είναι αξιοσημείωτο ότι αυτές δεν επαληθεύτηκαν απολύτως οριακά.

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, με βάση την μελέτη και την εμπειρία που αποκτήθηκε από την εγκατάσταση και λειτουργία του δικτύου συστημάτων πολυπαραμετρικών αισθητήρων παρακολούθησης της ποιότητας των υδάτων εντός της περιοχής των ορυχείων Πτολεμαΐδας, προέκυψαν οι ακόλουθες διαπιστώσεις:

- Το δίκτυο συστημάτων πολυπαραμετρικών αισθητήρων αποτελεί ένα αποδοτικό και αποτελεσματικό τρόπο για τη συνεχή παρακολούθηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών των υδατικών πόρων μιας περιοχής, με σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών μεθόδων, μεταξύ των οποίων: η ταυτόχρονη μέτρηση διάφορων φυσικοχημικών παραμέτρων με τον ίδιο φωρατή, η ταχύτητα απόκρισης των μετρήσεων (σε πραγματικό χρόνο χωρίς να προηγηθεί δειγματοληψία), η συχνότητα μέτρησης, η ευελιξία στην επιλογή/διαφοροποίηση των μετρούμενων φυσικοχημικών παραμέτρων, η αυτοματοποιημένη μετάδοση/επεξεργασία/διαχείριση των δεδομένων κτλ.
- Μεταξύ των βασικών περιορισμών που εμφανίζει το εν λόγω δίκτυο συστημάτων πολυπαραμετρικών αισθητήρων συγκαταλέγονται: η ευαισθησία των συστημάτων μέτρησης και ιδιαίτερα των ηλεκτροδίων/αισθητήρων σε εξωγενείς παράγοντες, η φθορά των ηλεκτροδίων/αισθητήρων με το χρόνο, η ανάγκη περιοδικής συντήρησης και βαθμονόμησης των συστημάτων κτλ. Οι παραπάνω περιορισμοί, εφόσον δεν ληφθούν σοβαρά υπόψη, δύναται να οδηγήσουν σε μετρήσεις μειωμένης αξιοπιστίας καθώς επίσης και σε σημαντικές ασυνέχειες στις χρονοσειρές των μετρήσεων.
- Οι διαλείπουσες χρονοσειρές μετρήσεων (π.χ. λόγω εμφάνισης προβλημάτων των συστημάτων μέτρησης) σε μια μελετώμενη περίοδο, μπορούν να προκαλέσουν σοβαρά προβλήματα στην στατιστική επεξεργασία των δεδομένων για την εξαγωγή αξιοποιήσιμων αποτελεσμάτων και ως εκ τούτου να απαιτηθεί η εφαρμογή εξειδικευμένων στατιστικών τεχνικών για την εξομάλυνση και κανονικοποίηση των δεδομένων. Επιπλέον, κατά την εγκατάσταση και λειτουργία ενός τέτοιου

συστήματος λαμβάνεται ένας πολύ μεγάλος αριθμός δεδομένων, ανάλογα βέβαια με τη συχνότητα μέτρησης και τον αριθμό των παραμέτρων που καταγράφονται. Με τον τρόπο όμως αυτό δεν είναι εφικτή η διαπίστωση συσχετισμών μεταξύ παραμέτρων αλλά και η αναγνώριση πιθανών επεισοδίων ρύπανσης, έτσι ώστε η ανάπτυξη ενός κατάλληλου εργαλείου για τη διαχείριση του μεγάλου όγκου πληροφοριών να αποτελεί απαραίτητη ενέργεια για μια ολοκληρωμένη εικόνα σχετικά με την ποιότητα των υδάτων και των διαχρονικών μεταβολών.

Επίσης, ολοκληρώνοντας την παρουσίαση των αποτελεσμάτων από την παρούσα διδακτορική έρευνα προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Εξετάζοντας τις διαχρονικές μεταβολές των συγκεντρώσεων των θειικών ιόντων και του pH και για τους τρεις σταθμούς μέτρησης, δεν προκύπτει το ενδεχόμενο εμφάνισης του φαινομένου όξινων απορροών (Acid Mine Drainage) στην περιοχή μελέτης για το εξεταζόμενο διάστημα. Οι παρατηρούμενες τιμές του pH είναι αρκετά υψηλότερες από τα επίπεδα pH που συνήθως συναντώνται σε όξινες απορροές (pH<5) καθώς και η συγκέντρωση των θειικών ιόντων δεν είναι αρκετά υψηλή (π.χ. > 2000 mg/L) ώστε να δικαιολογείται η εμφάνιση αυτού του φαινομένου. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι η υψηλή περιεκτικότητα σε ασβέστιο μεγάλου μέρους των υπερκειμένων και ενδιαμέσων αγόνων υλικών του λιγνιτικού κοιτάσματος καθώς και η αλκαλική ιπτάμενη τέφρα στις αποθέσεις, συντελούν στην επιτόπου εξουδετέρωση των όξινων υδατικών διαλυμάτων που σχηματίζονται.

2. Γενικά, παρατηρήθηκε θετική συσχέτιση μεταξύ των συγκεντρώσεων των μετρούμενων παραμέτρων και του ύψους της βροχόπτωσης κατά την μελετώμενη περίοδο, γεγονός που υποδηλώνει ενδεχομένως την ύπαρξη φαινομένων έκπλυσης των ιόντων στην περιοχή των ορυχείων και μεταφορά τους στο ρέμα Σουλού.

   Το ύψος της βροχόπτωσης φαίνεται ότι εμφανίζει καλύτερη θετική συσχέτιση με την ογκομετρική παροχή στο σημείο εκροής του αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς από ότι στο σημείο εκροής του αντλιοστασίου ορυχείου Νότιου Πεδίου στο ρέμα Σουλού. Με εφαρμογή της συνάρτησης εμπειρικής αθροιστικής κατανομής τυποποιημένων μεταβλητών προκύπτει ότι η ογκομετρική παροχή στο σημείο εκροής αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς εμφανίζει ανοδική τάση, η οποία ακολουθεί αρκετά ικανοποιητικά

το ρυθμό της βροχόπτωσης (με μία αρχική υστέρηση), ενώ το έναυσμα αυξητικής μεταβολής στο σημείο εκροής αντλιοστασίου ορυχείου Νότιου Πεδίου παραμένει επί μακρόν αρκετά αδρανές.

3. Γενικά, από την εξέταση των χρονικών διαστημάτων για τα οποία υπήρχαν διαθέσιμα κοινά δεδομένα, εντοπίστηκαν ενδείξεις σημαντικής θετικής συσχέτισης ορισμένων συγκεντρώσεων φυσικοχημικών παραμέτρων μεταξύ συγκεκριμένων σταθμών μέτρησης, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα σχετικά με την ανάπτυξη πιθανών αλληλεπιδράσεων στο υδατικό σύστημα της περιοχής μελέτης.

   Συγκεκριμένα, διαπιστώθηκε διαχρονικά ομοιόμορφη μεταβολή της αγωγιμότητας καθώς και της συγκέντρωσης ιόντων χλωρίου μεταξύ των σταθμών μέτρησης "Σουλού" και "Γεώτρηση", γεγονός που οδηγεί σε θετική συσχέτιση μεταξύ τους, για το εξεταζόμενο χρονικό διάστημα. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώθηκε και από την εφαρμογή της εμπειρικής αθροιστικής κατανομής μεταβλητών, ανεξαρτήτως χρονικής μεταβολής. Για το pH αναπτύχθηκε παρόμοια τάση μεταβολής μεταξύ των δύο σταθμών κατά το μήνα Σεπτέμβριο, ενώ το υπόλοιπο διάστημα δεν παρατηρήθηκε εμφανής συσχέτιση των τάσεων.

   Επίσης, παρατηρήθηκε ότι οι καταγεγραμμένες τιμές του pH, της αγωγιμότητας και των χλωριόντων στο σταθμό μέτρησης "Γεώτρηση" συγκριτικά είναι σαφώς μικρότερες από τις αντίστοιχες τιμές στο σταθμό μέτρησης "Σουλού".

   Μεταξύ των σταθμών μέτρησης "Σουλού" και "ΑΗΣ Αγ. Δημητρίου" παρατηρήθηκαν ενδείξεις παρόμοιας (θετικής) τάσης μεταβολής του pH, με υψηλότερες τιμές στον σταθμό μέτρησης "ΑΗΣ Αγ. Δημητρίου".

4. Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την στατιστική ανάλυση της διακύμανσης (ANOVA) ενός παράγοντα και την κατά ζεύγη σύγκριση των μέσων όρων με βάση τα 95% όρια εμπιστοσύνης του μέσου σφάλματος της διακύμανσης, για την αγωγιμότητα και το pH στους τρεις σταθμούς μέτρησης, παρουσιάζονται ορισμένες τάσεις μεταβολής που μπορούν να αποδοθούν σε πιθανά επεισόδια ρύπανσης.

Συγκεκριμένα, η αγωγιμότητα εμφανίζει σημαντικά υψηλότερες τιμές στους δύο σταθμούς μέτρησης "Σουλού" και "ΑΗΣ Αγ. Δημητρίου" από ότι στο σταθμό μέτρησης "Γεώτρηση" ο οποίος θεωρήθηκε σαν σημείο αναφοράς. Το γεγονός αυτό αποτελεί ένδειξη επιβάρυνσης της ποιότητας των υδάτων (όχι όμως απαραίτητα και ένδειξη επεισοδίου ρύπανσης).

Επιπλέον, το pH παρουσιάζει όμοιες τάσεις μεταβολής το μήνα Σεπτέμβριο όπως και η αγωγιμότητα με χαμηλές τιμές στο σταθμό μέτρησης "Γεώτρηση" και με υψηλές τιμές και εναλλασσόμενες σε μέγεθος στους δύο άλλους σταθμούς "Σουλού" και "ΑΗΣ Αγ. Δημητρίου", παρέχοντας ένδειξη επιβάρυνσης του υδάτινου συστήματος.

5. Κατά την αναλυτική μελέτη της διαχρονικής μεταβολής των συγκεντρώσεων των μετρούμενων φυσικοχημικών παραμέτρων στη διάρκεια μιας ημέρας στο σταθμό μέτρησης "Σουλού" και των παροχών εκροών αντλιοστασίων ορυχείων Καρδιάς και Νοτίου Πεδίου, εντοπίστηκαν ενδείξεις ομοιόμορφης τάσης, γεγονός που υποδηλώνει θετική συσχέτιση των δεδομένων και κατά συνέπεια ύπαρξη περιστατικών ρυπαντικής επίδρασης στην ποιότητα των υδάτων του ρέματος Σουλού.

   Με βάση τα αποτελέσματα και την αντίστοιχη στατιστική ανάλυση προέκυψαν 14 χρονικές περίοδοι όπου έλαβαν χώρα αντίστοιχα επεισόδια ρύπανσης, στο διάστημα από τον Μάιο μέχρι τον Οκτώβριο του 2010. Από το σύνολο των επεισοδίων, 6 αποδόθηκαν στην εκροή υδάτων από το ορυχείο του Νότιου Πεδίου και 8 επεισόδια αποδόθηκαν στην απορροή από το ορυχείο Καρδιάς. Λαμβάνοντας δε υπόψη τη συχνότητα παρουσίασης επεισοδίων ρύπανσης, ο Μάιος, Ιούνιος και Ιούλιος ήταν οι μήνες όπου παρουσιάστηκαν τα περισσότερα επεισόδια: επεισόδια ρύπανσης που αποδόθηκαν σε μεταβολές του pH και των ιόντων χλωρίου παρατηρήθηκαν τον Μάιο και Ιούνιο, επεισόδια λόγω μεταβολών των συγκεντρώσεων στα ιόντα χλωρίου και στα θειικά τον Ιούλιο, ενώ μεταβολές και των τριών παραμέτρων παρατηρήθηκαν των πρώτο δεκαήμερο του Ιουλίου.

   Κατά τη διάρκεια της περιόδου μέτρησης δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές μεταβολές και συσχετισμοί με την αγωγιμότητα. Η αναλυτική διερεύνηση των περιόδων όπου παρατηρήθηκαν επεισόδια ρύπανσης φανέρωσε παρόμοιες τάσεις στη μεταβολή των

ογκομετρικών παροχών από τα αντλιοστάσια και στις φυσικοχημικές παραμέτρους, επιβεβαιώνοντας την ανάπτυξη επεισοδίων ρύπανσης. Παράλληλα, οι πολυωνυμικές εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τη βέλτιστη προσαρμογή έδειξαν σημαντικά ισχυρές αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στη μεταβολή των pH, Cl^- και SO_4^{-2} και των ογκομετρικών παροχών από τα αντλιοστάσια. Με τη μεθοδολογία αυτή επιβεβαιώθηκε η ανάπτυξη 12 επεισοδίων ρύπανσης από τα 14 που είχαν παρατηρηθεί και τεκμηριώνεται η χρήση της τεχνικής αυτής για την ταυτοποίηση πιθανών επεισοδίων ρύπανσης.

6. Από την ανίχνευση τυχόν μη αποδεκτών (εκτός ορίων νομοθεσίας) τιμών των μετρούμενων φυσικοχημικών παραμέτρων σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους ή και σταθμούς μέτρησης, με εφαρμογή της τεχνικής ταξινόμησης CHAID και λαμβάνοντας υπόψη ως ανεξάρτητες μεταβλητές τις παροχές στα δύο σημεία εκροής των ορυχείων, το ύψος βροχόπτωσης και τα χρονικά διαστήματα (ως ημερολογιακές εβδομάδες), απομονώνοντας μόνο τις περιπτώσεις υπέρβασης αποδεκτών ορίων, προέκυψαν οι ακόλουθες επισημάνσεις:

   - Την 27η εβδομάδα (28/06-04/07/2010) εντοπίστηκαν οι υψηλά επίπεδα συγκέντρωσης θειικών ιόντων (>250 mg/L) ιδιαίτερα όταν η παροχή στο σημείο εκροής υδάτων ΟΝΠ είναι μικρότερη από 159 m^3/hr, μεσαία επίπεδα αγωγιμότητας (751-2000 μS/cm), ενώ πολύ χαμηλά παρέμειναν το pH (7.8) και τα χλωριόντα (<250 mg/L).
   - Την 29η εβδομάδα (12-18/07/2010) εντοπίστηκαν υψηλά επίπεδα συγκέντρωσης θειικών ιόντων (>250 mg/L).
   - Η 39η εβδομάδα (20-26/09/2010) υπήρξε η μοναδική με τις υψηλότερες τιμές pH (8.66) σε όλο το μελετώμενο υδατικό σύστημα ενώ εμφάνισε χαμηλά επίπεδα αγωγιμότητας (<750 μS/cm).
   - Την 37η εβδομάδα (06-12/09/2010) παρατηρήθηκαν υψηλά επίπεδα ιόντων χλωρίου (>250 mg/L), το χαμηλότερο pH (7.8), υψηλά επίπεδα συγκέντρωσης θειικών ιόντων (>250 mg/L) και χαμηλή αγωγιμότητα (<750 μS/cm).

- Την 42η εβδομάδα (11-17/10/2010) σημειώθηκαν υψηλά επίπεδα συγκέντρωσης ιόντων χλωρίου (>250 mg/L) και χαμηλή αγωγιμότητα (<750 μS/cm).
- Η 28η εβδομάδα (05-11/07/2010) εμφανίζεται στο σύστημα μία μόνο φορά και ειδοποιεί για παρουσία μεσαίων επιπέδων αγωγιμότητας (751-2000 μS/cm).

7. Με εφαρμογή της πολλαπλής παλινδρόμησης για την ποσοτική εκτίμηση ενός επεισοδίου ρύπανσης, προέκυψε ότι οι μετρούμενες φυσικοχημικές παράμετροι επηρεάζονται από τις τιμές της παροχής στα σημεία εκροής αντλιοστασίων (ορυχείο Καρδιάς και Νότιου Πεδίου) σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα συμβάντων, φυσικών ή άλλης φύσης. Η παροχή στο σημείο εκροής αντλιοστασίου ΟΝΠ επηρεάζει αποκλειστικά και θετικά (αυξητικά) μόνο το pH στα ύδατα, ενώ η παροχή στο σημείο εκροής αντλιοστασίου ορυχείου Καρδιάς είναι υπεύθυνη για τις αποκρίσεις των λοιπών τριών παραμέτρων (αγωγιμότητα, Cl^- και SO_4^{-2}). Τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν ανταποκρίνονται ικανοποιητικά στις προϋποθέσεις θεμελίωσής τους παρουσιάζοντας υψηλούς συντελεστές R^2 και R^2_p. Κάποια χρονικά διαστήματα βρέθηκε ότι ασκούν πολύ ισχυρή δράση στις φυσικοχημικές παραμέτρους και επομένως είναι σκόπιμη η ανεύρεση των ημερών εκείνων μέσα στα διαστήματα αυτά που μπορούν αιτιολογημένα να θεωρηθούν ως πιθανά για την εμφάνιση κάποιου ρυπογόνου γεγονότος.

   Από τον έλεγχο της εγκυρότητας των παραπάνω μοντέλων για την εκτίμηση της συγκέντρωσης των φυσικοχημικών παραμέτρων, με τη χρήση μιας σειράς ανεξάρτητων ασυνεχών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο σε δείγματα που ελήφθησαν σε αντίστοιχα χρονικά διαστήματα του 2011, προέκυψαν πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα και πιο συγκεκριμένα:

   - Από την είσοδο 10 διαφορετικών τιμών συγκέντρωσης ιόντων χλωρίου την περίοδο 2011 επαληθεύτηκαν οι 9 μετρήσεις, καθότι πέραν της μεγάλης προσέγγισης των παρατηρούμενων τιμών με τις προβλεπόμενες από το μοντέλο, οι πραγματικά ληφθείσες (παρατηρούμενες) ενέπιπταν στα 95% όρια πρόβλεψης του μοντέλου. Συγκεκριμένα, παρουσιάστηκε μία μόνο τιμή εκτός των προβλεπόμενων ορίων, δηλαδή μία αστοχία σε σύνολο 10 μετρήσεων.

- Από τις εισαγόμενες 4 νέες μετρήσεις συγκέντρωσης των θειικών ιόντων το 2011 δεν παρατηρήθηκε καμία αστοχία.
- Η αγωγιμότητα προβλέφθηκε με επιτυχία στις 6 από τις 8 περιπτώσεις (με μία αστοχία πρόβλεψης να είναι οριακή).
- Αναφορικά με τις τιμές του pH, δύο μόνο αστοχίες παρατηρήθηκαν σε σύνολο 8 νέων μετρήσεων και είναι αξιοσημείωτο ότι αυτές δεν επαληθεύτηκαν απολύτως οριακά.

Εν κατακλείδι, συνοψίζοντας τα παραπάνω συμπεράσματα από την παρούσα διδακτορική έρευνα, οι στατιστικές τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν για τον εντοπισμό ενδεχόμενων επεισοδίων ρύπανσης και την πρόβλεψη ρυπογόνων καταστάσεων παρουσιάζουν αρκετά ικανοποιητικό βαθμό αξιοπιστίας και προβλεπτικής ικανότητας, λαμβάνοντας πάντα υπόψη: α) το γεγονός ότι το μελετώμενο υδατικό σύστημα είναι ένα «ανοικτό» σύστημα το οποίο δύναται να επηρεάζεται και από άλλους μη προβλέψιμους εξωγενείς παράγοντες καθώς και β) τους λοιπούς περιορισμούς που εμφανίζει η έρευνα πεδίου (π.χ. ασυνέχεια δεδομένων λόγω προβλημάτων μετρητικού εξοπλισμού κτλ).

6.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Από τα αποτελέσματα της πορείας των εργασιών που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της διδακτορικής έρευνας, προκύπτουν κάποιες γενικότερες προτάσεις και ερευνητικά ερωτήματα για μελλοντική διερεύνηση.

Έτσι, κρίνεται ότι θα ήταν χρήσιμη η επέκταση του δικτύου πολυπαραμετρικών αισθητήρων με εγκατάσταση επιπλέον σταθμών παρακολούθησης της ποιότητας των υδάτων με δυνατότητα μέτρησης επιπλέον φυσικοχημικών παραμέτρων. Ειδικότερα, θα ήταν σκόπιμη η εγκατάσταση ενός τουλάχιστον σταθμού μέτρησης στον αποδέκτη του ρέματος Σουλού που είναι η Λίμνη Βεγορίτιδα και ο συσχετισμός των αποτελεσμάτων μέτρησης με βάση την προτεινόμενη μεθοδολογία.

Επιπλέον μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η δημιουργία ενός λογισμικού, το οποίο να ενσωματώνει τις εξισώσεις παλινδρόμησης και γενικά την στατιστική μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στην παρούσα διδακτορική διατριβή. Με τον τρόπο αυτό θα καταστεί δυνατή η περαιτέρω διερεύνηση πιθανών επεισοδίων ρύπανσης, με εύκολο και φιλικό προς τον χρήστη τρόπο, γεγονός το οποίο θα μπορούσε να αποτελέσει ένα πραγματικά χρήσιμο εργαλείο για τις αρμόδιες αρχές.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΕΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Aroba J., Grande J. A., Andujar J. M., de la Torre M. L. and Riquelme J. C., 2007. Application of fuzzy logic and data mining techniques as tools for qualitative interpretation of acid mine drainage processes. Environ Geol, 53, 135-145.

Balistrieri L. S., Seal R. R. II, Piatak N. M. and Paul B., 2007. Assessing the concentration, speciation and toxicity of dissolved metals during mixing of acid-mine drainage and ambient river water downstream of the Elizabeth Copper Mine, Vermont, USA. Applied Geochemistry, 22, 930-952.

Bani Hani A., Jamrah A. and Tarawneh S., 2005. A Statistical Approach for the Analysis and Forecasting of Water Quantity and Quality in King Talal Reservoir, Dirasat. Engineering Sciences, 32, 166-184.

Banwart S. and Malmstrom A., 2001. Hydrochemical modeling for preliminary assessment of minewater pollution. Journal of Geochemical Exploration, 74, 73-79.

Basha E., and Rus D., 2007. Design of Early Warning Flood Detection Systems for Developing Countries. Proceedings of the Conference on Information and Communication Technologies and Development, December, Bangalore, India.

Basha E., Ravela S. and Rus D., 2008. Model-Based Monitoring for Early Warning Flood Detection. Proceedings of the 6th ACM Conference on Embedded network sensor systems, November 5-7, Raleigh, North Carolina, USA, 295-308.

Bowen G.G., Dussek C. and Hamilton R. M., 1998. Pollution resulting from the abandonment and subsequent flooding of Wheal Jane Mine in Cornwall, UK. Groundwater Contaminants and their Migration, Geological Society, 128, 93-99.

Burke S. P. and Younger P. L., 2000. Groundwater rebound in the South Yorkshire coalfield: a first approximation using the GRAM model. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 33, 149-160.

Dold B., Wade C. and Fontbote L., 2009. Water management for acid mine drainage control at the polymetallic Zn-Pb-(Ag-Bi-Cu) deposit Cerro de Pasco, Peru. Journal of Geochemical Exploration, 100, 133-141.

Dumpleton S., Robins N. S., Walker J. A. and Merrin P.D., 2001. Mine water rebound in South Nottinghamshire: risk evaluation using 3-D visualization and predictive modeling. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 34, 307-319.

Eatherall A., Boorman D. B., Williams R. J. and Kowe R., 1998. Modelling in-stream water quality in LOIS. The Science of the Total Environment, 210/211, 499-517.

Egiebor N. O. and Oni B., 2007. Acid rock drainage formation and treatment: A review. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, 2(1), 47-62.

Hadjibiros K., Katsiri A., Andreadakis A., Koutsoyiannis D., Stamou A., Christofides A., Efstratiadis A. and Sargentis G., 2005. Multi-criteria reservoir water management. Global NEST Journal, 7, 3, 386-394, 2005.

Hobbs P., Oelofse S. and Rascher J., 2008. Management of Environmental Impacts from Coal Mining in the Upper Olifants River Catchment as a Function of Age and Scale. Water Resources Development, 24 (3), 417-431.

Hoth N., Wagner S. and Hafner F., 2001. Predictive modeling of dump water impact on the surroundings of the lignite dump site Janschwalde (Eastern Germany). Journal of Geochemical Exploration, 73, 113-121.

Jachimko B., 2012. The Influence of Lignite Mining on Water Quality, Water Quality Monitoring and Assessment. Dr. Voudouris (Ed.), InTech. Available from: http://www.intechopen.com/books/water-quality-monitoring-and-assessment/the-influence-of-lignite-mining-onwater-quality

Jennings S.R., Neuman D.R.. Blicker P.S., 2008. Acid Mine Drainage and Effects on Fish Health and Ecology: A Review. Reclamation Research Group Publication, Bozeman, MT.

Johnson D. B. and Hallberg K. B., 2005. Acid mine drainage remediation options: a review. Science of the Total Environment, 338, 3-14.

Kargbo D. M. and He J., 2004. A simple accelerated rock weathering method to predict acid generation kinetics. Environmental Geology, 46, 775-783.

Kim J. J. and Kim S. J., 2004. Seasonal factors controlling mineral precipitation in the acid mine drainage at Donghae coal mine, Korea. Science of the Total Environment, 325, 181-191.

Kim J.-Y. and Chon H.-T., 2001. Pollution of a water course impacted by acid mine drainage in the Imgok creek of the Gangreung coal field, Korea. Applied Geochemistry, 16, 1387-1396.

Kohfahl C., Hamann E. and Pekdeger A., 2004. Estimating the effect of water table oscillations on acidification using a hydraulic model. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section B: Applied Earth Science, 113 (1), B11-B20.

Leeks G. J. L., Neal C., Jarvie H. P., Casey H. and Leach D. V., 1997. The LOIS river monitoring network: strategy and implementation. The Science of the Total Environment, 194/195, 101-109.

Lin C., Wu Y., Lu W., Chen A. and Liu Y., 2007. Water chemistry and ecotoxicity of an acid mine drainage-affected stream in subtropical China during a major flood event. Journal of Hazardous Materials, 142, 199-207.

Margoni S. and Psilovikos A., 2010. Sustainable management of Agiasma Lagoon – River Nestos delta – Using R.E.M.O.S. daily monitoring data of water quality and quantity parameters. Trends, assessments and natural hazards for the years 200-2002, Desalination, 250, 287-296.

Mariolakos I., Fountoulis I., Andreadakis E. and Kapourani E., 2007. Real –time monitoring on Evrotas River (Laconia, Greece): dissolved oxygen as a critical parameter for environmental status classification and warning. Desalination, 213, 72-80.

Moncur M. C., Ptacek C. J., Blowes D. W., and Jambor J. L., 2006. Spatial variations in water composition at a northern Canadian lake impacted by mine drainage. Applied Geochemistry, 21, 1799-1817.

Nordstrom D. K., 2009. Acid rock drainage and climate change. Journal of Geochemical Exploration, 100, 97-104.

Norman L., Gray F., Guertin D. P., Wissler C. and Bliss J. D., 2008. Tracking acid mine drainage in Southeast Arizona using GIS and sediment delivery models. Environ Monit Assess, 145, 145-157.

Psilovikos A., Sentas A., Sahanidis C. and Laopoulos T., 2011. Trend analysis and assessment of water quality and quality monitoring data in lignite mines of Western Macedonia, Greece. Desalination and Water Treatment, 33, 44-52.

Razowska L., 2001. Changes of groundwater chemistry caused by the flooding of iron mines (Czestochowa Region, Southern Poland). Journal of Hydrology, 244, 17-32.

Sarmiento A. M., Nieto J. M., Olias M. and Canovas C. R., 2009. Hydrochemical characteristics and seasonal influence on the pollution by acid mine drainage in the Odiel river Basin (SW Spain). Applied Geochemistry, doi: 10.1016/j.apgeochem.2008.12.025.

Schwartz M.O. and Kgomanyane, 2007. Modeling natural attenuation of heavy-metal groundwater contamination in the Selebi-Phikwe mining area, Botswana. Environ Geol, 54, 819-830.

Sfikas A., Angelidis P., Samaras P., Zoras S. and Evagelopoulos V., 2013. Utilization of a multi-parameter sensor network for on-line monitoring of the water quality in the lignite mining area of Kozani, Greece. Desal. Water Treat., 51, 2977-2986.

Sfikas A., Zoras S., Evagelopoulos V., Angelidis P. and Samaras P., 2011. Development of a multi-parameter sensors network for monitoring the water quality of Kozani lignite mines region, Greece. Proceedings of the 3rd International Conference on Environmental Management, Engineering, Planning and Economics (CEMEPE), June 19-24, Skiathos, Greece, 335-342.

Snell S. and Gregory K., 2002. A flash food prediction model for rural and urban basins in New Mexico. Technical Completion Report.

Sotiropoulos P., Tzanis A.and Sideris G., 2007. WatertoolTM: An automated system for hydrological investigations with application at the area of Kato Souli (NE Attica, Greece). Bulletin of the Geological Society of Greece, 37, Proceedings of the 4th Environmental Conference of Macedonia, May, Athens, Greece.

Tiwary R. K., 2001. Environmental impact of coal mining on water regime and its management. Water, Air and Soil Pollution, 132, 185-199.

Tutu H., McCarthy T. S. and Cukrowska E., 2008. The chemical characteristics of acid mine drainage with particular reference to sources, distribution and remediation: The Witwatersrand Basin, South Africa as a case study. Applied Geochemistry, 23, 3666-3684.

Tzimopoulos C. and Ginidi P., 2005. Optimized aquifer management using linear programming. An application to the Agia Varvara aquifer, Drama, Greece. Global NEST Journal, 7(3), 395-404.

Valente T. M. and Gomes C. L., 2009. Occurrence, properties and pollution potential of environmental minerals in acid mine drainage. Science of the Total Environment, 407, 1135-1152.

Wycisk P., Hubert T., Gossel W. and Neumann Ch., 2009. High-resolution 3D spatial modeling of complex geological structures for an environmental risk assessment of abundant mining and industrial megasites. Computers and Geosciences, 35, 165-182.

Younger P. L., 2000. Predicting temporal changes in total iron concentrations in groundwaters flowing from abandoned deep mines: a first approximation. Journal of Contaminant Hydrology, 44, 47-69.

Zar J. H., 1999. Biostatistical analysis. 4th edition, Prentice Hall Inc., New Jersey, 929.

ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Θεοδωρίδης Κ., 2009. Παρουσίαση με θέμα Περιβαλλοντικές πιέσεις στο λεκανοπέδιο Αμυνταίου από Ατμοηλεκτρικούς Σταθμούς και ορυχεία, Προσυνεδριακή Εκδήλωση: Βέλτιστη Εκμετάλλευση του Λιγνίτη στην Ηλεκτροπαραγωγή. Δήμος Αμυνταίου, 11/05/2009, Πτολεμαΐδα

Θεόπουλος Α., Ιούνιος 2010, Μέθοδος υπολογισμού της παροχής των αντλιοστασίων Καρδιάς και Ορυχείου Νότιου Πεδίου. ΑΠΘ, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Φυσικής, Εργαστήριο Ηλεκτρονικής.

Ισμαηλίδης Α., 2005. Σταθμοί Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας και Περιβάλλον. Πτυχιακή Εργασία, ΤΕΙ Κρήτης, Τμήμα Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Τομέας Περιβαλλοντικής Τεχνολογίας, Εργαστήριο Περιβαλλοντικής Χημείας και Βιοχημικών Διεργασιών, Χανιά.

Καβουρίδης Κ., Χαλούλος Κ., Ρούμπος Χ. και Λεοντίδης Μ., 2005. Η εκμετάλλευση του λιγνίτη στην Ελλάδα με οικονομικά και περιβαλλοντικά κριτήρια. Σημερινή κατάσταση – προοπτικές, Διημερίδα ΤΕΕ Λιγνίτης και φυσικό αέριο στην ηλεκτροπαραγωγή της χώρας, 9-10 Ιουνίου, Αθήνα.

Κουτσογιάννης, Δ., Α. Ανδρεαδάκης, Ρ. Μαυροδήμου, Α. Χριστοφίδης, Ν. Μαμάσης, Α. Ευστρατιάδης, Α. Κουκουβίνος, Γ. Καραβοκυρός, Σ. Κοζάνης, Δ. Μαμάης, και Κ. Νουτσόπουλος, 2008. Εθνικό Πρόγραμμα Διαχείρισης και Προστασίας των Υδατικών Πόρων, Υποστήριξη της κατάρτισης Εθνικού Προγράμματος Διαχείρισης και Προστασίας των Υδατικών Πόρων. Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Πετρίδης Δ., 2013. Ανάλυση πολυμεταβλητών τεχνικών – Εφαρμογές περιπτώσεων, 1η Έκδοση. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Δίβατον, σελ. 332.

Πετρίδης Δ., 2000. Εφαρμοσμένη Στατιστική (Με έμφαση στην επιστήμη των τροφίμων). Θεσσαλονίκη: Όμηρος Εκδοτική, σελ. 517.

Σαχανίδης Χ. και Παυλουδάκης Φ., 2001.Έλεγχος της ποιότητας των επιφανειακών και υπόγειων νερών της ευρύτερης περιοχής των ορυχείων του Λιγνιτικού Κέντρου Πτολεμαΐδας – Αμυνταίου. Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, Τομ. XXXIV/5, 1941-1949.

Σφήκας Α., 2011. Αποτύπωση πιθανών πηγών ρύπανσης και λοιπών περιβαλλοντικών πληροφοριών στην ευρύτερη περιοχή της Κοζάνης, Τεχνική έκθεση στα πλαίσια διδακτορικής έρευνας. Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας.

Τσικριτζής Λ., 2011, 29 Ιανουαρίου. Ανάρτηση σε ιστολόγιο με θέμα Περιβαλλοντικά Προβλήματα Ν. Κοζάνης: Ένα βήμα μπρος και δύο πίσω, Οικολογική Κίνηση Κοζάνης, http://lignitisel.blogspot.gr (πρόσβαση Δεκέμβριος 2011).

ΑΛΛΕΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

Echmes Ε.Π.Ε., 2010. Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων Ορυχείων Πτολεμαΐδας. ΔΕΗ Α.Ε., Αθήνα.

Terramentor E.E.I.G., 2009. User's Manual of Watertool II multisensor and software MTL. Athens, Greece.

Υπουργική Απόφαση ΔΥΓ2/Γ.Π. οικ 38295/2007 (ΦΕΚ 630Β – 26/04/2007) - Τροποποίηση της Υγειονομικής Διάταξης κοινής υπουργικής απόφασης Υ2/2600/2001 Ποιότητα του νερού ανθρώπινης κατανάλωσης, σε συμμόρφωση προς την οδηγία 98/83/ΕΚ του Συμβουλίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης της 3ης Νοεμβρίου 1998.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Α) Χάρτης αποτύπωσης πιθανών πηγών ρύπανσης και λοιπών περιβαλλοντικών πληροφοριών στην ευρύτερη περιοχή Κοζάνης (κλίμακα 1:120000).

Β) Χάρτης αποτύπωσης πιθανών πηγών ρύπανσης καθώς και χρήσεων γης στην ευρύτερη περιοχή Κοζάνης (κλίμακα 1:120000).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Εκτίμηση χρονικής υστέρησης απόκρισης μεταξύ σημείων εκροής αντλιοστασίων ορυχείων (Καρδιάς, ΟΝΠ) και σταθμού μέτρησης “Σουλού”.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

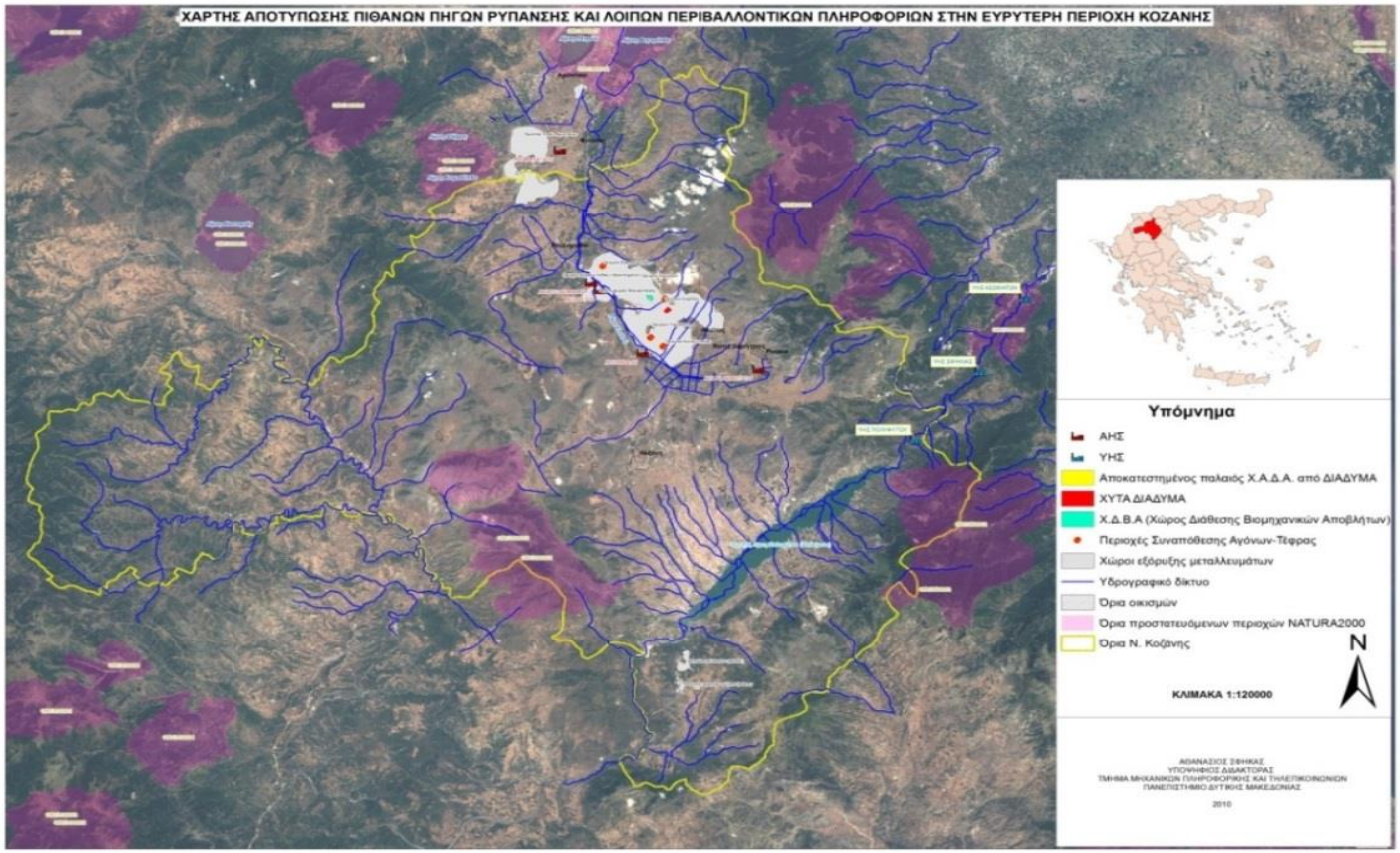
Πίνακας αντιστοίχησης των τυποποιημένων τιμών (-1 έως 1) με τις μετρούμενες για βροχόπτωση και ογκομετρικές παροχές (Καρδιά, ΟΝΠ) για την συνάρτηση εμπειρικής αθροιστικής κατανομής των μεταβλητών - ECDF.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

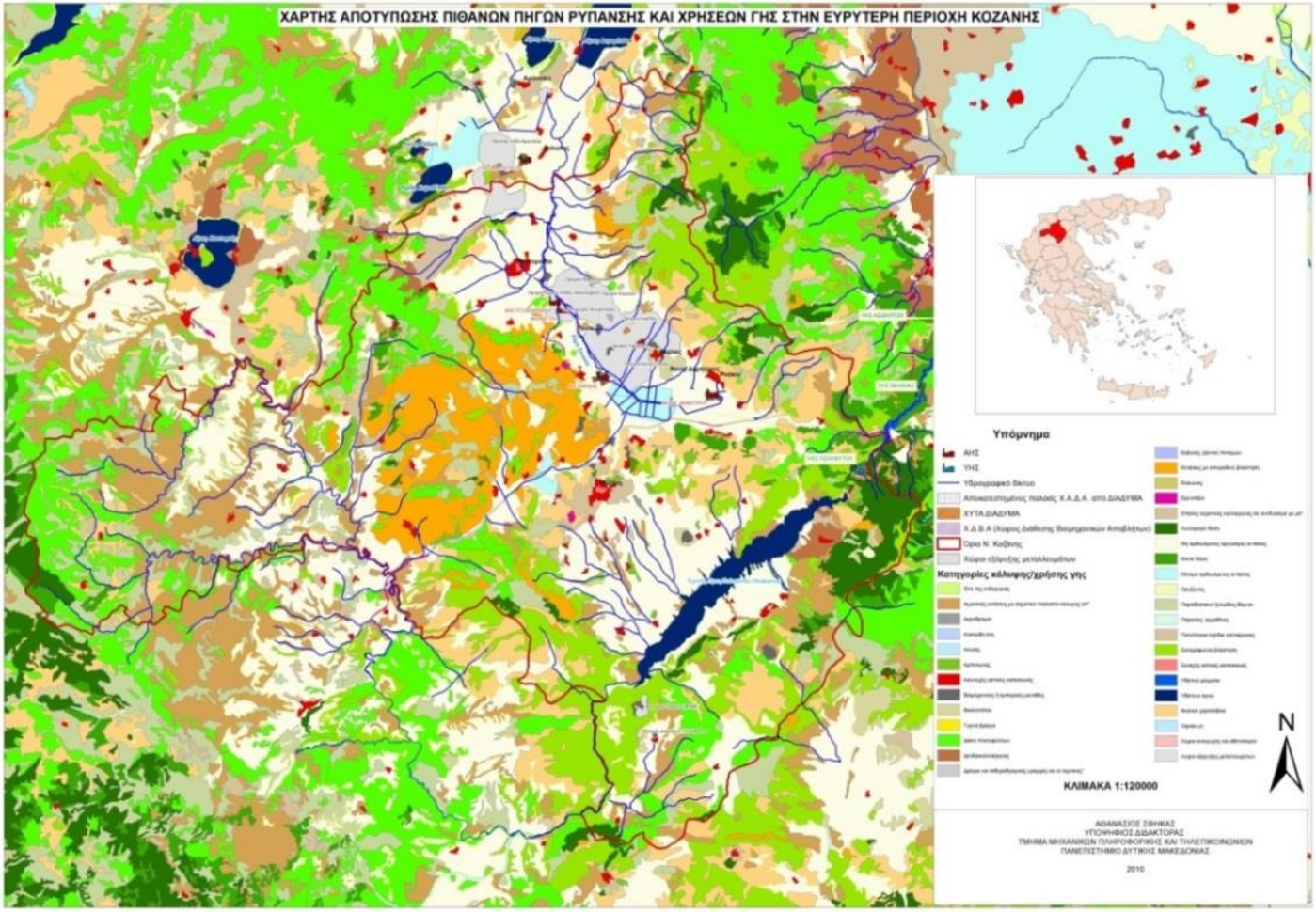
Αποτελέσματα εφαρμογής πολλαπλής παλινδρόμησης φυσικοχημικών παραμέτρων (αγωγιμότητα, pH, SO_4^{-2} και Cl^-).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Α) Χάρτης αποτύπωσης πιθανών πηγών ρύπανσης και λοιπών περιβαλλοντικών πληροφοριών στην ευρύτερη περιοχή Κοζάνης (κλίμακα 1:120000).



Β) Χάρτης αποτύπωσης πιθανών πηγών ρύπανσης καθώς και χρήσεων γης στην ευρύτερη περιοχή Κοζάνης (κλίμακα 1:120000).



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Εκτίμηση χρονικής υστέρησης απόκρισης μεταξύ σημείων εκροής αντλιοστασίων ορυχείων (Καρδιάς, ΟΝΠ) και σταθμού μέτρησης "Σουλού".

Οι αποστάσεις που μεσολαβούν ανάμεσα στα δύο σημεία εκροής των αντλιοστασίων των ορυχείων (ΟΝΠ, Καρδιά) και τους σταθμούς μέτρησης ποιότητας υδάτων (ΑΗΣ Αγ. Δημητρίου, Σουλού) υπολογίστηκαν από την κοίτη του ρέματος Σουλού όπως αυτή είναι αποτυπωμένη στο αρχείο "ποταμοί (hydroscope.gr)" από το διαδικτυακό χώρο "Ανοιχτά Δημόσια Δεδομένα geodata.gov.gr" (πρόσβαση 27/3/2015) με χρήση του προγράμματος Google Earth. Με επιτόπια παρατήρηση πεδίου εκτιμήθηκαν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κοίτης και υπολογίστηκαν οι διατομές για τα τρία τμήματα στα οποία κατατμήθηκε το ρέμα Σουλού στην εξεταζόμενη περιοχή. Οι διατομές θεωρήθηκαν προσεγγιστικά τραπεζοειδείς με κλίση πλευρών περίπου 45°. Οι μέσες διαστάσεις τους για κάθε τμήμα παρουσιάζονται στον Πίνακα Α1 που ακολουθεί.

Η ετήσια απορροή του Σουλού ανέρχεται σε 27 x 10^6 m^3 (ΜΠΕ Ορυχείων Πτολεμαΐδας, 2010). Με βάση το δεδομένο αυτό μπορεί να εκτιμηθεί μία μέση παροχή ίση με 0.86 m^3/s.

Ακολούθως υπολογίστηκε η ταχύτητα των υδάτων (ροή) για κάθε τμήμα του ρέματος Σουλού και με βάση αυτή ο χρόνος απόκρισης που απαιτείται μεταξύ των σημείων εκροής από τα αντλιοστάσια των ορυχείων και των σταθμού μέτρησης "Σουλού" (βλ. παρακάτω Πίνακα Α1).

Οι παρακάτω εκτιμώμενες τιμές της ταχύτητας του ύδατος επιβεβαιώθηκαν και πειραματικά, από επιτόπια μέτρηση πεδίου της ροής του ρέματος στο ύψος του σταθμού μέτρησης "Σουλού", η οποία έδωσε τιμές από 0.3 έως 0.35 m/s.

Πίνακας Α1. Δεδομένα για τον υπολογισμό της ταχύτητας των υδάτων στο ρέμα Σουλού.

Τμήμα	**Απόσταση (km)**	**Παροχή (m^3/έτος)**	**Παροχή (m^3/s)**	**Διατομή κοίτης ρέματος Σουλού**				**Ταχύτητα (m/s)**	**Χρόνος (hr)**
				Μικρή έδρα τραπεζίου (m)	**Μεγάλη έδρα τραπεζίου (m)**	**Βάθος (m)**	**Διατομή (m^2)**		
Από σταθμό μέτρησης ΑΗΣ Αγ. Δημητρίου έως σημείο εκροής αντλιοστασίου ΟΝΠ	12.42	27000000	0.86	0.9	3.3	1.2	2.52	0.34	10.2
Από σημείο εκροής αντλιοστασίου ΟΝΠ έως σημείο εκροής αντλιοστασίου Καρδιάς	3.66			1.2	3.4	1.1	2.53	0.34	3.0
Από σημείο εκροής αντλιοστασίου Καρδιάς έως σταθμό μέτρησης Σουλού	7.2			1.6	3.6	1	2.6	0.33	6.1
								Συνολικός χρόνος	**19.2**

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Πίνακας αντιστοίχησης των τυποποιημένων τιμών (-1 έως 1) με τις μετρούμενες για βροχόπτωση και ογκομετρικές παροχές (Καρδιά, ΟΝΠ) για την συνάρτηση εμπειρικής αθροιστικής κατανομής των μεταβλητών - ECDF.

Row	RAIN	RAIN1	KARDIA	KARDIA1	Sorted ONP	ONP1
1	0.01	-1.00000	256.377	-1.00000	151.893	-1.00000
2	0.01	-0.98925	255.807	-0.95912	147.363	-0.88878
3	0.01	-0.98925	258.243	-0.87211	159.112	-0.85337
4	0.01	-0.98925	255.618	-0.84398	146.144	-0.69973
5	0.01	-0.98925	256.103	-0.84266	156.191	-0.48107
6	0.01	-0.97849	257.230	-0.81371	158.326	-0.45708
7	0.01	-0.97849	255.694	-0.81080	158.643	-0.39209
8	0.01	-0.97849	257.640	-0.74886	157.579	-0.37483
9	0.01	-0.97849	255.157	-0.72966	158.647	-0.36868
10	0.01	-0.96774	257.658	-0.71027	159.920	-0.36132
11	0.01	-0.95699	254.713	-0.69694	160.853	-0.34557
12	0.01	-0.94624	256.946	-0.66710	161.112	-0.32809
13	0.01	-0.94624	255.403	-0.65916	161.217	-0.31718
14	0.01	-0.94624	255.484	-0.60166	159.483	-0.29742
15	0.02	-0.92473	255.902	-0.58955	150.647	-0.25362
16	0.02	-0.91398	252.978	-0.58928	149.174	-0.21701
17	0.02	-0.91398	252.214	-0.58360	147.050	-0.18332
18	0.02	-0.90323	252.403	-0.57085	140.863	-0.18139
19	0.02	-0.89247	255.431	-0.56956	*	-0.17449
20	0.02	-0.88172	257.459	-0.56022	*	-0.03859
21	0.02	-0.87097	254.812	-0.55569	150.875	-0.01619
22	0.02	-0.86022	260.344	-0.54459	155.292	0.08382
23	0.02	-0.86022	255.433	-0.54135	152.567	0.15001
24	0.03	-0.78495	256.302	-0.54008	155.443	0.16285
25	0.04	-0.75269	256.540	-0.52506	157.813	0.17548
26	0.04	-0.75269	255.566	-0.52376	155.180	0.21951
27	0.04	-0.74194	253.080	-0.51591	153.392	0.22859
28	0.04	-0.69892	252.432	-0.51416	155.233	0.23113
29	0.04	-0.69892	254.235	-0.51307	*	0.34122
30	0.05	-0.65591	255.498	-0.51000	142.355	0.40680
31	0.05	-0.65591	258.277	-0.50669	157.783	0.40775
32	0.05	-0.64516	260.992	-0.50144	157.590	0.41201
33	0.05	-0.64516	255.971	-0.50049	157.780	0.41776

34	0.06	-0.61290	256.928	-0.49633	*	0.43263
35	0.06	-0.60215	258.215	-0.49494	157.757	0.48964
36	0.06	-0.58065	257.889	-0.49424	*	0.50610
37	0.06	-0.55914	252.332	-0.49147	141.995	0.54294
38	0.07	-0.53763	245.996	-0.48284	*	0.55113
39	0.07	-0.50538	249.626	-0.48190	*	0.58729
40	0.07	-0.50538	250.039	-0.45478	156.023	0.59817
41	0.07	-0.49462	251.116	-0.45296	156.566	0.60817
42	0.08	-0.40860	255.416	-0.44746	155.190	0.64254
43	0.08	-0.40860	255.147	-0.43237	148.013	0.64358
44	0.09	-0.37634	257.316	-0.42475	156.649	0.64940
45	0.09	-0.32258	255.940	-0.41514	157.128	0.65428
46	0.10	-0.23656	249.173	-0.41486	157.017	0.65999
47	0.10	-0.23656	252.603	-0.41386	158.329	0.66003
48	0.11	-0.19355	255.770	-0.40740	158.471	0.66225
49	0.11	-0.16129	256.418	-0.39298	158.764	0.66258
50	0.11	-0.16129	256.410	-0.38492	158.497	0.66515
51	0.15	0.15054	256.440	-0.37475	158.498	0.66541
52	0.17	0.26882	256.846	-0.36480	158.389	0.66546
53	0.18	0.35484	255.665	-0.36400	158.250	0.67092
54	0.26	1.00000	256.961	-0.36051	158.248	0.67604
55			256.320	-0.35714	158.492	0.67633
56			255.740	-0.35017	158.115	0.67908
57			254.858	-0.34806	158.027	0.68126
58			254.535	-0.34234	157.757	0.68347
59			251.113	-0.32944	157.973	0.68353
60			252.005	-0.32322	157.699	0.68408
61			250.945	-0.32229	157.230	0.68651
62			252.156	-0.31901	157.810	0.68701
63			252.345	-0.31042	159.010	0.69518
64			251.797	-0.30853	159.088	0.69964
65			252.260	-0.29813	159.144	0.70015
66			251.780	-0.29758	158.898	0.70384
67			252.422	-0.29740	158.574	0.70727
68			255.258	-0.29578	158.416	0.70822
69			255.515	-0.29015	158.166	0.70841
70			255.445	-0.29007	153.366	0.71339
71			255.984	-0.28934	*	0.71395
72			256.440	-0.28380	159.420	0.71591
73			255.345	-0.28238	158.959	0.71618
74			263.383	-0.28219	158.959	0.72124
75			266.058	-0.27962	159.659	0.72204
76			264.549	-0.27939	159.635	0.72471

77	257.627	-0.27872	159.581	0.73012
78	251.735	-0.27763	160.169	0.73217
79	252.023	-0.27744	159.356	0.73269
80	253.634	-0.27660	158.380	0.73279
81	252.590	-0.27381	157.868	0.74024
82	251.581	-0.27278	157.812	0.74705
83	252.470	-0.27253	158.300	0.74748
84	254.800	-0.27153	158.306	0.75143
85	253.394	-0.27140	157.951	0.75222
86	253.834	-0.26784	158.238	0.75892
87	253.531	-0.26408	157.920	0.75943
88	254.224	-0.26116	158.002	0.76971
89	253.289	-0.26068	159.034	0.77210
90	254.086	-0.26043	159.448	0.77238
91	255.155	-0.25862	159.524	0.77495
92	255.669	-0.25526	158.927	0.77536
93	254.456	-0.25309	159.489	0.77792
94	251.195	-0.25047	159.299	0.77806
95	247.590	-0.24356	159.594	0.77811
96	259.003	-0.24082	159.084	0.78302
97	266.437	-0.23860	157.923	0.78312
98	268.797	-0.23768	154.513	0.78545
99	262.961	-0.23146	159.986	0.78567
100	255.368	-0.22905	160.366	0.79034
101	259.279	-0.21469	159.987	0.79079
102	263.115	-0.21372	159.961	0.79104
103	*	-0.21336	148.831	0.79316
104	260.614	-0.21175	158.203	0.79630
105	259.320	-0.20930	*	0.79885
106	264.777	-0.20838	152.697	0.79904
107	267.008	-0.20691	152.826	0.80682
108	267.151	-0.20628	149.264	0.81152
109	266.960	-0.20471	159.876	0.81227
110	267.475	-0.20470	159.795	0.81713
111	262.853	-0.20453	157.649	0.82254
112	268.492	-0.20362	*	0.82337
113	268.489	-0.19747	157.996	0.82491
114	269.022	-0.19151	*	0.82614
115	268.831	-0.19092	159.515	0.82955
116	267.573	-0.18970	158.874	0.83016
117	*	-0.18789	159.865	0.83270
118	269.186	-0.18527	158.161	0.83362
119	271.114	-0.17650	147.225	0.83925

120	270.876	-0.17581	158.931	0.84052
121	266.583	-0.17539	147.812	0.84090
122	267.600	-0.17059	160.387	0.84219
123	270.204	-0.16944	153.274	0.84456
124	267.906	-0.16818	143.919	0.84684
125	266.926	-0.16711	159.598	0.84696
126	266.240	-0.16232	159.435	0.84994
127	268.278	-0.16198	146.388	0.85012
128	257.027	-0.15043	149.194	0.86019
129	257.231	-0.14762	161.037	0.86712
130	257.032	-0.14759	159.251	0.86824
131	255.517	-0.14629	147.701	0.86858
132	255.501	-0.14500	147.523	0.87249
133	256.648	-0.14316	158.688	0.87654
134	257.788	-0.14142	160.123	0.87871
135	255.179	-0.13115	158.769	0.87903
136	249.441	-0.11896	159.036	0.87912
137	250.149	-0.11802	161.120	0.89247
138	251.519	-0.11677	159.611	0.89697
139	255.257	-0.10736	160.273	0.90502
140	254.283	-0.10288	159.009	0.90719
141	256.913	-0.10007	158.696	0.91631
142	248.050	-0.08998	158.032	0.91839
143	260.432	-0.07649	159.411	0.96423
144	260.226	-0.07448	148.459	0.98231
145	267.353	-0.07206	159.170	0.98964
146	267.088	-0.06791	147.288	0.99043
147	267.605	-0.01959	159.983	1.00000
148	264.787	0.00032	158.901	*
149	268.380	0.00335	160.251	*
150	267.665	0.00970	159.091	*
151	268.603	0.04130	158.957	*
152	269.091	0.06876	159.172	*
153	*	0.07731	159.660	*
154	255.406	0.08362	159.692	*
155	263.253	0.09681	157.997	*
156	256.443	0.10951	159.690	*
157	254.330	0.12411	159.307	*
158	252.132	0.13424	159.880	*
159	267.726	0.19046		
160	267.638	0.25852		
161	273.118	0.26630		
162	268.750	0.27742		

163	268.715	0.28021
164	255.659	0.28741
165	256.673	0.29682
166	247.609	0.33583
167	261.911	0.38102
168	257.249	0.39753
169	256.389	0.39825
170	254.426	0.46466
171	256.709	0.48709
172	248.907	0.49006
173	256.631	0.49190
174	257.192	0.50319
175	253.003	0.51738
176	266.701	0.52798
177	255.003	0.53522
178	256.840	0.53646
179	253.545	0.55273
180	255.365	0.55519
181	269.466	0.55862
182	252.171	0.56446
183	253.945	0.56899
184	268.280	0.58356
185	256.455	0.59241
186	268.845	0.59944
187	257.267	0.60142
188	245.430	0.60175
189	257.850	0.60418
190	269.899	0.60612
191	258.029	0.61051
192	254.977	0.62352
193	268.445	0.62722
194	259.408	0.65041
195	257.292	0.65054
196	271.797	0.65427
197	266.084	0.65774
198	260.790	0.66242
199	258.334	0.66562
200	253.527	0.66587
201	268.632	0.67383
202	255.269	0.67598
203	266.017	0.68193
204	259.846	0.68451
205	247.201	0.68785

206	251.389	0.69031
207	268.332	0.69134
208	256.831	0.70416
209	248.009	0.70910
210	263.153	0.71084
211	269.115	0.71594
212	256.623	0.73623
213	256.343	0.76749
214	256.315	0.78952
215	251.371	0.83808
216	263.923	0.85522
217	266.684	0.90456
218	256.070	1.00000
219	265.707	*
220	261.133	*
221	267.957	*

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

Αποτελέσματα εφαρμογής πολλαπλής παλινδρόμησης φυσικοχημικών παραμέτρων (αγωγιμότητα, pH, SO_4^{-2} και Cl^-).

Regression Analysis: COND versus Παροχή Καρδιά; Source

Method

Categorical predictor coding (1; 0)
Box-Cox transformation λ = 0.5
Rows unused 355

Analysis of Variance for Transformed Response

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	10	13590.8	86.99%	13590.8	1359.08	1007.03	0.000
Παροχή Καρδιά	1	13.7	0.09%	27.7	27.73	20.54	0.000
Source	9	13577.1	86.90%	13577.1	1508.57	1117.80	0.000
Error	1506	2032.5	13.01%	2032.5	1.35		
Lack-of-Fit	371	861.6	5.51%	861.6	2.32	2.25	0.000
Pure Error	1135	1170.9	7.49%	1170.9	1.03		
Total	1516	15623.3	100.00%				

Model Summary for Transformed Response

S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)
1.16172	86.99%	86.90%	2059.75	86.82%

Coefficients for Transformed Response

Term	Coef	SE Coef	95% CI	T-Value	P-Value	VIF
Constant	26.670	0.510	(25.669; 27.670)	52.29	0.000	
Παροχή Καρδιά	0.00868	0.00192	(0.00492; 0.01244)	4.53	0.000	1.08
Source						
6-07-2010	2.607	0.182	(2.251; 2.964)	14.34	0.000	2.62
28-08-2010	-7.278	0.176	(-7.622; -6.933)	-41.41	0.000	2.96
8-09-2010	-5.306	0.174	(-5.647; -4.964)	-30.46	0.000	3.09

19-09-2010	-6.314	0.200	(-6.707; -5.920)	-31.49	0.000	2.04
25-09-2010	-6.581	0.223	(-7.018; -6.145)	-29.57	0.000	1.71
12-10-2010	-6.560	0.157	(-6.869; -6.252)	-41.71	0.000	5.62
16-11-2010	-18.219	0.497	(-19.193; -17.244)	-36.68	0.000	1.09
9-12-2010	-7.971	0.162	(-8.289; -7.654)	-49.26	0.000	4.51
23-12-2010	-7.279	0.169	(-7.611; -6.947)	-42.99	0.000	3.74

Regression Equation

Source

1-07-2010 COND^0.5 = 26.670 + 0.00868 Παροχή Καρδιά

6-07-2010 COND^0.5 = 29.277 + 0.00868 Παροχή Καρδιά

28-08-2010 COND^0.5 = 19.392 + 0.00868 Παροχή Καρδιά

8-09-2010 COND^0.5 = 21.364 + 0.00868 Παροχή Καρδιά

19-09-2010 COND^0.5 = 20.356 + 0.00868 Παροχή Καρδιά

25-09-2010 COND^0.5 = 20.088 + 0.00868 Παροχή Καρδιά

12-10-2010 COND^0.5 = 20.109 + 0.00868 Παροχή Καρδιά

16-11-2010 COND^0.5 = 8.451 + 0.00868 Παροχή Καρδιά

9-12-2010 COND^0.5 = 18.699 + 0.00868 Παροχή Καρδιά

23-12-2010 COND^0.5 = 19.391 + 0.00868 Παροχή Καρδιά

Regression Analysis: Cl versus Παροχή Καρδιά; Source

Method

Categorical predictor coding	(1; 0)
Box-Cox transformation	λ = 0
Rows unused	546

Analysis of Variance for Transformed Response

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	16	623.04	38.9399	89.83	0.000
Παροχή Καρδιά	1	5.74	5.7399	13.24	0.000
Source	15	604.21	40.2804	92.92	0.000
Error	1213	525.83	0.4335		
Lack-of-Fit	330	191.55	0.5805	1.53	0.000
Pure Error	883	334.28	0.3786		
Total	1229	1148.87			

Model Summary for Transformed Response

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.658405	54.23%	53.63%	52.97%

Coefficients for Transformed Response

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	1.498	0.767	1.95	0.051	
Παροχή Καρδιά	0.01088	0.00299	3.64	0.000	1.29
Source					
03-06-10	0.1909	0.0735	2.60	0.009	1.48
06-09-10	0.317	0.332	0.95	0.341	1.02
07-05-10	0.3692	0.0987	3.74	0.000	1.22
08-09-10	1.8848	0.0718	26.25	0.000	1.59
12-05-10	0.365	0.237	1.54	0.124	1.03
12-10-10	1.4685	0.0951	15.45	0.000	1.25
14-05-10	0.462	0.114	4.06	0.000	1.16
14-07-10	0.550	0.106	5.19	0.000	1.20
16-11-10	-2.862	0.239	-11.96	0.000	1.05
19-09-10	1.2223	0.0923	13.24	0.000	1.28

22-10-10	0.4979	0.0684	7.28	0.000	1.78
23-06-10	-0.328	0.224	-1.46	0.144	1.04
25-09-10	-0.3954	0.0905	-4.37	0.000	1.28
28-04-10	0.179	0.142	1.26	0.208	1.10
28-08-10	0.6232	0.0727	8.57	0.000	1.54

Regression Equation

Source

01-07-10 ln(Cl) = 1.498 + 0.01088 Παροχή Καρδιά

03-06-10 ln(Cl) = 1.689 + 0.01088 Παροχή Καρδιά

06-09-10 ln(Cl) = 1.815 + 0.01088 Παροχή Καρδιά

07-05-10 ln(Cl) = 1.868 + 0.01088 Παροχή Καρδιά

08-09-10 ln(Cl) = 3.383 + 0.01088 Παροχή Καρδιά

12-05-10 ln(Cl) = 1.864 + 0.01088 Παροχή Καρδιά

12-10-10 ln(Cl) = 2.967 + 0.01088 Παροχή Καρδιά

14-05-10 ln(Cl) = 1.961 + 0.01088 Παροχή Καρδιά

14-07-10 ln(Cl) = 2.048 + 0.01088 Παροχή Καρδιά

16-11-10 ln(Cl) = -1.364 + 0.01088 Παροχή Καρδιά

19-09-10 ln(Cl) = 2.721 + 0.01088 Παροχή Καρδιά

22-10-10 ln(Cl) = 1.996 + 0.01088 Παροχή Καρδιά

23-06-10 ln(Cl) = 1.170 + 0.01088 Παροχή Καρδιά

25-09-10 ln(Cl) = 1.103 + 0.01088 Παροχή Καρδιά

28-04-10 ln(Cl) = 1.678 + 0.01088 Παροχή Καρδιά

28-08-10 ln(Cl) = 2.122 + 0.01088 Παροχή Καρδιά

Regression Analysis: pH versus Παροχή ΟΝΠ; Source

Method

Categorical predictor coding	(1; 0)
Box-Cox transformation	λ = 0
Rows unused	447

Analysis of Variance for Transformed Response

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	12	0.686280	0.057190	455.72	0.000
Παροχή ΟΝΠ	1	0.002608	0.002608	20.78	0.000
Source	11	0.685974	0.062361	496.92	0.000
Error	572	0.071783	0.000125		
Lack-of-Fit	120	0.025363	0.000211	2.06	0.000
Pure Error	452	0.046420	0.000103		
Total	584	0.758063			

Model Summary for Transformed Response

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0112024	90.53%	90.33%	90.05%

Coefficients for Transformed Response

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	2.03004	0.00544	373.43	0.000	
Παροχή ΟΝΠ	0.000156	0.000034	4.56	0.000	1.20
Source					
03-06-10	0.01137	0.00169	6.73	0.000	1.23
06-09-10	-0.00256	0.00567	-0.45	0.652	1.02
07-05-10	0.03216	0.00156	20.57	0.000	1.27
12-05-10	0.03247	0.00278	11.67	0.000	1.08
14-05-10	0.03422	0.00207	16.54	0.000	1.15
14-07-10	0.01789	0.00340	5.26	0.000	1.17
20-09-10	0.15637	0.00224	69.81	0.000	1.14
23-06-10	0.01173	0.00797	1.47	0.141	1.01
25-09-10	0.01957	0.00275	7.12	0.000	1.11
28-04-10	0.04850	0.00254	19.06	0.000	1.09

```
  28-08-10   0.00844   0.00129     6.52    0.000  1.43


Regression Equation

Source
01-07-10  ln(pH) = 2.03004 + 0.000156 Παροχή ΟΝΠ

03-06-10  ln(pH) = 2.04141 + 0.000156 Παροχή ΟΝΠ

06-09-10  ln(pH) = 2.02748 + 0.000156 Παροχή ΟΝΠ

07-05-10  ln(pH) = 2.06220 + 0.000156 Παροχή ΟΝΠ

12-05-10  ln(pH) = 2.06251 + 0.000156 Παροχή ΟΝΠ

14-05-10  ln(pH) = 2.06425 + 0.000156 Παροχή ΟΝΠ

14-07-10  ln(pH) = 2.04793 + 0.000156 Παροχή ΟΝΠ

20-09-10  ln(pH) = 2.18641 + 0.000156 Παροχή ΟΝΠ

23-06-10  ln(pH) = 2.04177 + 0.000156 Παροχή ΟΝΠ

25-09-10  ln(pH) = 2.04961 + 0.000156 Παροχή ΟΝΠ

28-04-10  ln(pH) = 2.07853 + 0.000156 Παροχή ΟΝΠ

28-08-10  ln(pH) = 2.03848 + 0.000156 Παροχή ΟΝΠ
```

Regression Analysis: SO4 versus Παροχή Καρδιά; Source

Method

Categorical predictor coding	(1. 0)
Box-Cox transformation	λ = 0
Rows unused	130

Analysis of Variance for Transformed Response

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	4	248.49	77.20%	248.488	62.1221	332.58	0.000
Παροχή Καρδιά	1	86.32	26.82%	4.771	4.7712	25.54	0.000
Source	3	162.17	50.38%	162.166	54.0554	289.39	0.000
Error	393	73.41	22.80%	73.408	0.1868		
Lack-of-Fit	81	22.01	6.84%	22.012	0.2718	1.65	0.001
Pure Error	312	51.40	15.97%	51.395	0.1647		
Total	397	321.90	100.00%				

Model Summary for Transformed Response

S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)
0.432190	77.20%	76.96%	74.6623	76.81%

Coefficients for Transformed Response

Term	Coef	SE Coef	95% CI	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-3.41	1.74	(-6.82. 0.01)	-1.96	0.051	
Παροχή Καρδιά	0.03432	0.00679	(0.02097. 0.04767)	5.05	0.000	1.30
Source						
14-07-2010	-1.1534	0.0718	(-1.2946. -1.0123)	-16.07	0.000	1.16
28-08-2010	-1.5310	0.0533	(-1.6358. -1.4262)	-28.72	0.000	1.39
06-09-2010	-1.001	0.218	(-1.430. -0.572)	-4.59	0.000	1.01

Regression Equation

Source
01-07-2010 ln(SO4) = -3.41 + 0.03432 Παροχή Καρδιά

```
14-07-2010  ln(SO4) = -4.56 + 0.03432 Παροχή Καρδιά

28-08-2010  ln(SO4) = -4.94 + 0.03432 Παροχή Καρδιά

06-09-2010  ln(SO4) = -4.41 + 0.03432 Παροχή Καρδιά
```