ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ - ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΖΑΧΑΡΙΑ ΧΡΙΣΤΙΝΑ

Περιγραφή διασποράς ρύπων απο εγκαταστάσεις μεταλλευτικών αποβλήτων με σύγχρονα λογισμικά εργαλεία

Επιβλέπουσα:
Επ. Καθηγήτρια Ν. Παπασιώπη

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2010

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ζαχαριά Χριστίνα

Περιγραφή διασποράς ρύπων από εγκαταστάσεις μεταλλευτικών αποβλήτων με σύγχρονα λογισμικά εργαλεία

Επιβλέπουσα:
Επ.Καθηγήτρια Ν. Παπασιώπη

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2010

Copyright © Ζαχαριά Χριστίνα, 2010
Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved.

Ευχαριστίες

Τώρα που αυτή η διπλωματική έφτασε στο τέλος της, θα ήθελα πρώτα από όλα να ευχαριστήσω την κυρία Νυμφοδώρα Παπασιώπη, Επίκουρη Καθηγήτρια της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την καλή συνεργασία που είχαμε και κυρίως για την προθυμία που έδειχνε πάντα να απαντήσει στις ερωτήσεις μου και να με βοηθήσει.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστώ το ΙΓΜΕ, και πιο συγκεκριμένα τους κυρίους Ιάκωβο Δρούγκα και Αλέξανδρο Λιακόπουλο για την άμεση απόκρισή τους και την παροχή των απαραίτητων δεδομένων που αφορούσαν στην περιοχή μελέτης. Χωρίς αυτά, δεν θα ήταν δυνατή η εκπόνηση αυτής την διπλωματικής.

Δεν θα ήθελα να παραλείψω να ευχαριστήσω τον κύριο Καραλή Σωτήρη, αρχικά για τη βοήθεια του στην εκμάθηση του μοντέλου SWAT και στη συνέχεια για τις απαντήσεις που μου παρείχε σε κάθε πρόβλημα που προέκυπτε.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω μέσα από την καρδιά μου την οικογένεια μου και τους φίλους μου, οι οποίοι μου στάθηκαν όχι μόνο κατά τη διάρκεια αυτής της διπλωματικής εργασίας, αλλά σε όλα τα χρόνια της φοίτησης μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Τους ευχαριστώ για την κατανόηση, τη στήριξη και την αγάπη τους.

Ζαχαριά Χριστίνα
Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2010

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες V
Περιεχόμενα VI
Λίστα σχημάτων IX
Λίστα Πινάκων XI
Λίστα Εξισώσεων XII
ABSTRACT XIV
1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ 1
2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ SWAT 4
2.1 Υδρολογικά μοντέλα 4
2.2 Περιγραφή μοντέλου SWAT 6
2.2.1 Γενικά 6
2.2.2 Δεδομένα 7
2.2.3 Προσομοίωση και αποτελέσματα 8
2.2.3.1 Καινοτομία μοντέλου 8
2.2.3.2 Βήματα προσομοίωσης 9
2.3 Υδρολογία του μοντέλου 10
2.4 Υπολογιστική αρχιτεκτονική του μοντέλου 16
2.5 Εφαρμογές του SWAT 17
Εφαρμογή σε μεταλλευτικές περιοχές 18
3.ΡΥΠΑΝΣΗ ΥΔΑΤΩΝ 20
3.1 Γενικά 20
3.2 Αρχές μεταφοράς ρύπων 20
3.2.1 Μεταγωγή 20
3. 2.2 Μηχανική Διασπορά 20
3.2.3 Διάχυση 21
3.2.4 Ρόφηση 21
3.2.5 Αποδόμηση 21
3.3 Πηγές Ρύπανσης 21
3.4. Κατηγοριοποίηση ρύπων 22
3.5 Νομοθεσία 23
3.6 Όξινη απορροή μεταλλείων 23
3.6.1 Αντιμετώπιση της όξινης απορροής μεταλλείων 24
3.6.1.1 Πρόληψη 25

3.6.1.2 Απομάκρυνση όξινων νερών 25
3.6.1.3 Αραίωση όξινων νερών 25
3.5.1.4 Εξουδετέρωση όξινων νερών 26
3.7 SWAT και βαρέα μέταλλα 27
4.ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ 27
4.1 Ιστορικό μεταλλευτικών δραστηριοτήτων 27
4.2 Η κατάσταση σήμερα 31
4.2.1 Άγιος Φίλιππος 31
4.2.2 Κίρκη 33
4.3 Γεωλογία 38
4.4 ΚΛΙΜΑ 39
4.5 Υδρολογία και υδροχημεία της περιοχής 41
4.5.1 Κύρια υδρολογικά χαρακτηριστικά 41
4.5.2 Κύρια υδροχημικά χαρακτηριστικά 42
4.6 Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία 44
5. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ 47
5.1 Διαμόρφωση λεκάνης απορροής 47
5.1.1 Ψηφιακό μοντέλο εδάφους και υδρογραφικό δίκτυο 48
5.1.2 Σημεία εξόδου υπολεκανών 48
5.2 Σημειακές πηγές ρύπανσης 50
5.3 Χρήσεις γης, τύποι και κλίσεις εδαφών 52
5.3.1 Χρήσεις γης 53
5.3.2 Τύποι εδαφών 53
5.3.3 Κλίσεις εδάφους 55
5.4 Μονάδες υδρολογικής απόκρισης 56
5.5 Μετεωρολογικά δεδομένα 58
5.6 Σύνοψη δεδομένων ροών 62
5.7 Σύνοψη δεδομένων ρύπανσης 62
5.8 Αρχεία εισαγωγής δεδομένων 63
5.8.1 Αρχεία υπόγειου νερού (.gw) 63
5.8.2 Αρχεια υδρολογικών μονάδων απόκρισης (.hru) 65
5.8.3 Αρχείο υφιστάμενων η/και συνθετικών χρονοσειρών μετεωρολογικών παραμέτρων (.wgn) 65
5.8.4 Αρχεία υδατορεύματος (.rte) 66
5.8.5 Αρχεία διαχείρισης νερού (.wus) 66

5.8.6 Αρχεία υπολεκανών (.sub)..... 66
5.8.7 Αρχεία εδάφους (.sol) 66
5.8.8 Αρχεία χημικών εδάφους (.chm)..... 67
5.8.9 Αρχεία διαχείρισης (.mgt)..... 67
5.8.10 Αρχεία αναχωμάτων (.pnd) 68
5.8.11 Αρχεία ποιοτικών χαρακτηριστικών υδατορευματος (.swq) 68
5.8.12 Αρχεία ταμιευτήρα (.rsv) 68
6. ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ..... 69
6.1 Αρχεία προδιαγραφών προσομοίωσης..... 69
6.1.1 Αρχείο γενικών ιδιοτήτων λεκανών .bsn 69
6.1.2 Αρχείο file.cio 69
6.1.3 Αρχείο ορισμού υπολεκανών .fig..... 69
6.1.4 Αρχεία βροχόπτωσης και θερμοκρασίας 69
6.2 Εκτέλεση..... 69
6.3 Αρχεία αποτελεσμάτων..... 70
6.3.1 Γενικευμένο αρχείο αποτελεσμάτων output.std 70
6.3.2 Αρχείο αποτελεσμάτων κυρίου υδατορεύματος output.rch 71
6.3.3 Αρχείο αποτελεσμάτων υπολεκανών output.sub..... 71
6.3.4 Αρχείο αποτελεσμάτων μονάδων υδρολογικής αποκρισης output.hru72
6.3.5 Αρχείο αποτελεσμάτων ταμιευτήρα output.rsv 73
7. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΡΟΩΝ 74
7.1 Προσομοίωση της λεκάνης απορροής από το SWAT. Ανακεφαλαίωση κύριων χαρακτηριστικών 74
7.2 Δείκτες έλεγχου ακρίβειας των αποτελεσμάτων προσομοίωσης 76
7.3 Προσομοίωση απορροών στα ρέματα Κιρκάλων και Ειρήνης 76
7.3.1 Επίδραση δεδομένων βροχόπτωσης..... 76
7.3.2. Αποτελέσματα προσομοίωσης με τις παραμέτρους του μοντέλου που προτείνονται από το SWAT..... 81
7.3.3. Αποτελέσματα προσομοίωσης μετά την ρύθμιση παραμέτρων..... 89
7.4 Χαρακτηριστικά στοιχεία υδατικού ισοζυγίου 93
8. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ ΡΥΠΩΝ ΣΤΟ SWAT..... 96
8.1 Μεθοδολογία προσομοίωσης του ρυθμού αποδέσμευσης και διασποράς ρύπων..... 96
8.2 Σύγκριση μετρήσεων και προσομοίωσης της διασποράς της ρύπανσης κατά μήκος των υδατορευμάτων (Δεκ. 2005)..... 97
8.3. Διακύμανση της ρύπανσης στη διάρκεια του υδρολογικού κύκλου..100

9. ΧΡΗΣΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ PHREEQC 103
9.1 Εισαγωγικά στοιχεία PHREEQC 103
9.2 Ειδοταυτοποίηση και υπολογισμός δεικτών κορεσμού στα νερά των ρεμάτων Κιρκάλων και Ειρήνης..... 104
9.2 Συνδυασμένη χρήση SWAT και PHREEQC. 110
10. ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 114
Βιβλιογραφικές Αναφορές 118

Λίστα σχημάτων

Σχήμα 2.1: Κατηγορίες Υδρολογικών Μοντέλων..... 4
Σχήμα 2.2: Βήματα Προσομοίωσης..... 9
Σχήμα 2.3: Σχηματική απεικόνιση του υδρολογικού κύκλου..... 10
Σχήμα 2.4: Συνιστώσες SWAT..... 11
Σχήμα 2.5: Δρόμοι νερού στο SWAT..... 12
Σχήμα 2.6: Διαθέσιμες διαδρομές για την κίνηση του νερού στο SWAT..... 13
Σχήμα 2.7: Υπολογιστικός βρόχος του μοντέλου..... 16
Σχήμα 2.8 Παράδειγμα συσχέτισης συγκεντρώσεων των ρύπων και απορροής ποταμού από μελέτη εφαρμογής του SWAT σε λεκάνη απορροής με ρύπανση από όξινη απορροή μεταλλείων 19
Σχήμα 4.1 α,β,γ:Περιοχή μελέτης..... 31
Σχήμα 4.2: Το μεταλλείο του Αγίου Φιλίππου όπως είναι σήμερα..... 32
Σχήμα 4.3: Λίμνη ανοικτής εκσκαφής..... 33
Σχήμα 4.4: Λίμνη ανοικτής εκσκαφής..... 33
Σχήμα 4.5: Απορροή Στοάς 4..... 33
Σχήμα 4.6: Εγκαταλελειμένο Εργοστάσιο Εμπλουτισμού..... 34
Σχήμα 4.7: Διάβρωση εδάφους στην περιοχή του εργοστασίου..... 35
Σχήμα 4.8: Όξινη Απορροή..... 35
Σχήμα 4.9: Γεωλογικός Χάρτης της περιοχής της Κίρκης με τα ρυπασμένα σημεία..... 36
Σχήμα 4.10: Το εσωτερικό του εργοστασίου Εμπλουτισμού..... 37
Σχήμα 4.11: Σκουριασμένα μηχανήματα εμπλουτισμού..... 37
Σχήμα 4.12:Αποθήκη χημικών αντιδραστηρίων..... 37
Σχήμα 4.13: Αφύλακτα χημικά μέσα στην αποθήκη..... 37
Σχήμα 4.14: Το πρόχειρο κανάλι που οδηγούσε τα απόβλητα από το εργοστάσιο εμπλουτισμού στο ποτάμι Ειρήνη..... 38
Σχήμα 4.15: Σωροί μεταλλεύματος και απορριμάτων..... 38
Σχήμα 4.16: Βαρέλια με τα χημικά αντιδραστήρια..... 38

Σχήμα 4.17: Διάγραμμα Θερμοκρασιών για το σταθμό της Αλεξανδρούπολης.. 40
Σχήμα 4.18: Σημεία δειγματοληψίας στη λεκάνη απορροής 45
Σχήμα 4.19: Σημεία δειγματοληψίας των ρεμάτων Ειρήνης και Κιρκάλων..... 46
Σχήμα 5.1: Automatic watershed delineation..... 47
Σχήμα 5.2: Εισαγωγή Δεδομένων στο πρώτο βήμα της προσομοίωσης..... 47
Σχήμα 5.3: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους και υδρογραφικό δίκτυο..... 48
Σχήμα 5.4: Υπολεκάνες..... 50
Σχήμα 5.5: Σημειακές πηγές ρύπανσης..... 51
Σχήμα 5.6: Land Use/Soils/Slope Definition..... 52
Σχήμα 5.7: Κατανομή χρήσεων γης..... 53
Σχήμα 5.8: Υπόμνημα Υδρολιθολογικού χάρτη..... 54
Σχήμα 5.9: Ομαδοποίηση κωδικών με βάση τα Αμερικάνικα πρότυπα..... 54
Σχήμα 5.10: Χάρτης Τύπων εδαφών..... 55
Σχήμα 5.11: Χάρτης Κλίσεων εδάφους..... 56
Σχήμα 5.12: Μονάδες υδρολογικής απόκρισης..... 57
Σχήμα 5.13:Χάρτης με τις μονάδες υδρολογικής απόκρισης..... 58
Σχήμα 5.14: Εισαγωγή πίνακα με τις συντεταγμένες του μετεωρολογικού σταθμού της Αλεξανδρούπολης..... 59
Σχήμα 5.15:Εισαγωγή συντεταγμένων του βροχομετρικού σταθμού της Κίρκης..... 60
Σχήμα 5.16: Μέρος του αρχείου alexpcp.dbf με τις καταγεγραμμένες ημερήσιες βροχοπτώσεις..... 61
Σχήμα 5.17: Βροχομετρικός σταθμός..... 61
Σχήμα 6.1: Πλαίσιο διαλόγου για την εκτέλεση του μοντέλου..... 70
Σχήμα 7.1: Υπολεκάνες..... 74
Σχήμα 7.2: Κατανομή χρήσεων γης, τύποι εδαφών και κλίσεων εδάφους. Από το συνδυασμό αυτών των χαρτών προέκυψαν οι μονάδες υδρολογικής απόκρισης (HRU)..... 75
Σχήμα 7.3: Μετρήσεις βροχόπτωσης στο μετεωρολογικό σταθμό (ΜΣ) Αλέξανδρούπολης (υψ. 7m) και στο βροχόμετρο στην περιοχή του Εργοστασίου Εμπλουτισμού στην Κίρκη (υψ. 190 m)..... 78
Σχήμα 7.4: Αποτελέσματα προσομοίωσης σε σύγκριση με τις παρατηρημένες τιμές παροχής στο σημείο υδρομετρήσεων Ε11 με χρήση των δεδομένων βροχόπτωσης του ΜΣ της Αλεξανδρούπολης..... 79
Σχήμα 7.5: Αποτελέσματα προσομοίωσης σε σύγκριση με τις παρατηρημένες τιμές παροχής στο σημείο υδρομετρήσεων Ε11 με χρήση των δεδομένων βροχόπτωσης από το βροχόμετρο της Κίρκης..... 80
Σχήμα 7.6: Αποτελέσματα Κ12..... 81-82
Σχήμα 7.7: Αποτελέσματα Κ17..... 82
Σχήμα 7.8: Αποτελέσματα Ε8..... 83
Σχήμα 7.9: Αποτελέσματα Ε9..... 84

Σχήμα 7.10: Αποτελέσματα ΑΣ1..... 85
Σχήμα 7.11: Αποτελέσματα Ε10..... 86
Σχήμα 7.12: Αποτελέσματα Ε11..... 87
Σχήμα 7.13: Απορροές Δεκεμβρίου 2005 πριν τη βαθμονόμηση του μοντέλου..... 88
Σχήμα 7.14. Περιπτώσεις ροής του νερού μεταξύ του υπόγειου υδροφόρου και του υδατορεύματος μέσω του πυθμένα του υδατορεύματος..... 90
Σχήμα 7.15: Απορροές Δεκεμβρίου 2005 μετα τη ρύθμιση παραμέτρων του μοντέλου..... 92
Σχήμα 7.16: Στοιχεία υδατικού ισοζυγίου για το 2005. Κατανομή βροχόπτωσης (PREC) και επιμέρους στοιχεία της συνολικής απορροής (WYLD)..... 95
Σχήμα 8.1: Συγκέντρωση Zn (Δεκέμβριος 2005)..... 97
Σχήμα 8.2: Συγκέντρωση Pb (Δεκέμβριος 2005)..... 98
Σχήμα 8.3: Συγκέντρωση Cd (Δεκέμβριος 2005)..... 98
Σχήμα 8.4: Εποχιακές διακυμάνσεις της συγκέντρωσης Zn στο σημείο Ε10 (2005)..... 100
Σχήμα 8.5: Εποχιακές διακυμάνσεις της συγκέντρωσης Pb στο σημείο Ε10(2005)..... 101
Σχήμα 8.6: Εποχιακές διακυμάνσεις της συγκέντρωσης Cd στο σημείο Ε10(2005)..... 101
Σχήμα 8.7: Απορροή στο Ε10 (2005)..... 102
Σχήμα 9.1: Εισαγωγή δεδομένων στο Phreeqc για το σημείο Κ0..... 104
Σχήμα 9.2: Αναπαράσταση σταδιακής ανάμιξης καθαρών απορροών με τα ρυπασμένα νερά από την περιοχή των μεταλλευτικών εγκαταστάσεων (από το σημείο Ε4 προς τα κατάντη)..... 111
Σχήμα 9.3: Σύγκριση SWAT και συνδυασμού SWAT και PHREEQC για την περιγραφή των μεταβολών της συγκέντρωσης του Zn κατά μήκος του ρέματος Ειρήνη (Δεκέμβριος 2005)..... 112
Σχήμα 9.4: Σύγκριση SWAT και συνδυασμού SWAT και PHREEQC για την περιγραφή των μεταβολών της συγκέντρωσης του Pb κατά μήκος του ρέματος Ειρήνη (Δεκέμβριος 2005)..... 113
Σχήμα 9.5: Σύγκριση SWAT και συνδυασμού SWAT και PHREEQC για την περιγραφή των μεταβολών της συγκέντρωσης του Cd κατά μήκος του ρέματος Ειρήνη (Δεκέμβριος 2005)..... 113

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 2.1. Ενδεικτικός κατάλογος διπλωματικών και μεταπτυχιακών εργασιών που πραγματοποιήθηκαν με χρήση του SWAT..... 18
Πίνακας 4.1: Μεταλλικά Ορυκτά του κοιτάσματος του Αγίου Φιλίππου..... 29
Πίνακας 4.2: Μέσες μηνιαίες τιμές μετεωρολογικών παραμέτρων, Μ.Σ. Αλεξανδρούπολης (1951-1997)..... 41
Πίνακας 4.3: Υδρολογικό ισοζύγιο των εξεταζόμενων λεκανών στην περιοχή

μελέτης..... 42
Πίνακας 5.1: Συντεταγμένες σημείων δειγματοληψίας..... 49
Πίνακας 5.2: Weather Generator Data(Custom Database)-Συντεταγμένες σταθμού Αλεξανδρούπολης..... 59
Πίνακας 5.3: Rainfall Data(Custom Database)- Συντεταγμένες σταθμού Κίρκης..... 60
Πινάκας 5.4: Δεδομένα Ροών..... 62
Πίνακας 5.5: Δεδομένα Ρύπανσης..... 62
Πίνακας 7.1: Επιφάνεια ανά υπολεκάνη και επιφάνεια αποστράγγισης ανά τμήμα υδατορεύματος..... 75
Πίνακας 7.2: Παράμετροι που διερευνήθηκαν για βελτίωση της προσομοίωσης..... 90
Πίνακας 7.3: Παραδείγματα τιμών υδραυλικής αγωγιμότητας για διάφορα υλικά στον πυθμένα υδατορρευμάτων 91
Πίνακας 7.4: Δείκτες ακρίβειας του μοντέλου SWAT..... 93
(α) Περιγραφή μηνιαίας διακύμανσης των απορροών για το χρονικό διάστημα Ιούνιο 2005 - Μάιο 2006..... 93
(β) Περιγραφή της απορροής κατά μήκος των υδατορευμάτων για το μήνα Δεκέμβριο 2005..... 93
Πίνακας 7.5: Γενικό υδατικό ισοζύγιο στη συνολική λεκάνη απορροής. Όλα τα μεγέθη σε mm H2O..... 94
Πίνακας 7.6: Επιμέρους στοιχεία της συνολικής απορροής (WYLD). Όλα τα μεγέθη σε mm H2O..... 94
Πίνακας 8.1: Ρυθμός αποδέσμευσης των ρύπων (kg/d) από τις δύο πηγές ρύπανσης..... 96
Πίνακας 9.1. Δεδομένα ποιότητας των νερών για το μήνα Δεκέμβριο 2005.. 106
(α) Φυσικοχημικές παράμετροι και κύρια κατιόντα και ανιόντα..... 106
(β) Βαρέα μέταλλα και άλλα ιχνοστοιχεία..... 106
Πίνακας 9.2(α):Οι δείκτες κορεσμού των νερών ως προς τις πιθανές ορυκτές φάσεις στις διάφορες θέσεις δειγματοληψίας κατά μήκος των ρεμάτων Κιρκάλων και Ειρήνης. Αποτελέσματα με χρήση του γεωχημικού μοντέλου Phreeqc..... 107
Πίνακας 9.2 (β): Οι δείκτες κορεσμού των νερών ως προς τις πιθανές ορυκτές φάσεις στις διάφορες θέσεις δειγματοληψίας κατά μήκος των ρεμάτων Κιρκάλων και Ειρήνης. Αποτελέσματα με χρήση του γεωχημικού μοντέλου Phreeqc..... 108
Πίνακας 9.3: Αναλογίες ανάμιξης των υδατικών διαλυμάτων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση στο Phreeqc, με βάση τις ροές των ρευμάτων που παρουσιάζονται στο σχήμα 9.2..... 112

Λίστα Εξισώσεων

Εξίσωση 2.1: Γενική Εξίσωση Υδρολογικού κύκλου του SWAT..... 10
Εξισώσεις 3.1-3.4: Αντιδράσεις όξινης απορροής μεταλλείων..... 24

Εξίσωση 7.1 : Συντελεστής Nash-Sutcliffe..... 76
Εξίσωση 7.2: Εξίσωση Διαγραμμάτων Διασποράς..... 76
Εξίσωση 9.1: Υπολογισμός E_H..... 104
Εξίσωση 9.2: Υπολογισμός E_H..... 105
Εξίσωση 9.3: Υπολογισμός Δείκτη κορεσμού S.I..... 105
Εξίσωση 9.4: Υπολογισμός IAP(Ion Activity Product)..... 105

ABSTRACT

The hydrologic model SWAT (Soil and Water Assessment Tool) was applied to the Eirini stream watershed, located in Evros Prefecture (NE Greece). Water quality in the watershed is adversely affected by the presence of an abandoned mixed sulfide mine, which is located upstream in the river basin. The whole area and the environmental problems related with the mining activities have been systematically investigated, with the most recent studies being the ones conducted by IGME (Institute of Geology and Mineral Exploration) from 2004 to 2007. These studies include flowrate and water quality measurements at several monitoring stations along the tributaries and the main stream of the watershed.

The last version of SWAT, being SWAT 2005, which runs in an ArcGIS 9.3 environment, was used in the project. After importing the necessary data in the model, i.e. topography, land use, soil types etc., the 218 km^2 drainage basin was discretized into 13 sub-basins and 185 hydrologic response units (HRU).

The model was applied using meteorological data from the weather station of Alexandroupoli and rainfall data from a station installed in Kirki beneficiation plant. Model performance was evaluated by comparing the simulation results with flow and concentration measurements from 12 monitoring points, for the time period from June 2005 to July 2006. Flowrate results showed good agreement between simulated and measured data.

Pollution problem was described assuming that the mining site corresponds to two point sources, one representing the core of mining operations, i.e. the open pit and the waste rock stockpiles, and one representing the beneficiation plant and the nearby tailings ponds. Simulation was focused on the fate of three pollutants, i.e. Zn, Pb and Cd, assuming that these pollutants are emitted with a constant mass flowrate (kg/d) from the two point sources. SWAT was used to study (a) the profile of pollutants concentrations along the main stream and (b) seasonal fluctuations of concentration in the lower reaches of the basin. The results showed that SWAT systematically over-estimates the pollutants concentrations in the Eirini river.

Data describing the detailed chemical composition of water samples were introduced in the geochemical model PHREEQC. Speciation calculations indicated that the concentration of pollutants is most probably controlled by the precipitation of solid phases, like $ZnCO_3$, $CdCO_3$, etc. Precipitation reactions are not simulated by SWAT and this can explain the fact that observed concentrations are lower compared to the ones predicted by SWAT. Calculations that were made combining the flowrate results

of SWAT with the geochemical modeling of PHREEQC, proved that the combination of these two models can lead to a better simulation of the concentrations profile along the river.

From the results of this Diploma thesis, we came to the conclusion that, when it comes to large river basins and in order to describe pollutants dispersion from mining activities, it is necessary to combine the capabilities of a GIS based hydrologic model, like SWAT, with a suitable geochemical model, like PHREEQC.

A short description of the essay's structure is provided below:

Chapter 1st: *Introduction*

The first chapter summarizes the scope, the general approach and the main conclusions of the work.

Chapter 2nd: Features of SWAT hydrologic model

In the second chapter, we define the main categories of hydrologic models and we describe the most important features of SWAT model. Characteristic applications of SWAT in Greece are also presented.

Chapter 3rd: Water pollution

After defining the term "water pollution", there is a short reference to contaminants transport phenomena, main pollution sources and categories of pollutants, and to the European legal framework for water quality protection. Finally, a more detailed description about acid mine drainage phenomenon is provided.

Chapter 4rth: *Study Area*

The mining history of the area is shortly presented, in the first part of the chapter. Current situation in the mining site of Agios Filippos, as well as in the beneficiation plant of Kirki, is described in detail. Specific reference is made to the environmental assessment studies carried out by IGME, and the set of data, which were used during the work, are presented.

Chapter 5th: *Data entry procedure*

In this chapter, we describe the data entry procedure in SWAT in order to simulate the river basin. We also present all types of data required, i.e. soil maps, land use maps, weather data, pollution sources etc.

Chapter 6th: *Run/Simulation*

This chapter describes the simulation files created by SWAT, the run options and the main categories of output files.

Chapter 7th: *Flowrate simulation results*

In the first part of Chapter 7, there is a summary of the main characteristics of watershed discretization. This information is followed by the presentation of the statistical parameters and coefficients that are used as criteria for evaluating simulation performance. The main part of the chapter is dedicated to the presentation of simulation results in comparison with the observed flow data for the selected hydropoints along the river basin.

Chapter 8th: *Pollutants dispersion simulation in SWAT*

We present the diagrams showing the comparison between observed pollution data and simulated results, regarding (a) the profile of pollutants concentrations along the main stream and (b) seasonal fluctuations of concentration in the lower reaches of the basin.

Chapter 9th : PHREEQC model

Calculation results using PHREEQC model, as well as combining SWAT and PHREEQC are presented in this chapter.

Chapter 10th: *Summary and conclusions*

The final chapter summarizes the main points and the most important conclusions of the work.

BHG

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, χρησιμοποιήθηκε το υδρολογικό μοντέλο Soil and Water Assessment Tool (SWAT), για την περιγραφή της διασποράς της ρύπανσης στην κλίμακα της ευρύτερης λεκάνης απορροής από τα εγκαταλειμμένα μεταλλεία μικτών θειούχων στην περιοχή της Κίρκης, Ν. Έβρου, Θράκη. Η περιοχή και τα σχετικά περιβαλλοντικά προβλήματα έχουν μελετηθεί συστηματικά, με πιο πρόσφατες και λεπτομερείς τις μελέτες που πραγματοποιήθηκαν από το ΙΓΜΕ την περίοδο 2004-2007. Στις μελέτες αυτές περιλαμβάνονται υδρομετρήσεις και αναλύσεις των νερών σε πολυάριθμα σημεία κατά μήκος των υδατορευμάτων της λεκάνης απορροής, στοιχεία τα οποία χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

Χρησιμοποιήθηκε η τελευταία έκδοση του SWAT (2005), η οποία συνεργάζεται με το σύστημα GIS ArcView 9.3. Μετά την εισαγωγή των απαραίτητων ψηφιακών δεδομένων και πληροφοριών σχετικά με το ανάγλυφο, τις χρήσεις γης, τους τύπους εδαφών, κλπ., η λεκάνη απορροής, συνολικής έκτασης 218 km^2, χωρίστηκε σε 14 υπολεκάνες και 185 μονάδες υδρολογικής απόκρισης (HRU, hydrologic response units), με βάση τις οποίες το μοντέλο κάνει τους υπολογισμούς των υδατικών ισοζυγίων.

Χρησιμοποιήθηκαν μετεωρολογικά δεδομένα από το μετεωρολογικό σταθμό (ΜΣ) της Αλεξανδρούπολης, καθώς και δεδομένα βροχόπτωσης από βροχόμετρο στην περιοχή της Κίρκης. Η ακρίβεια της προσομοίωσης ελέγχθηκε σε σύγκριση με τις μετρήσεις των ροών και συγκεντρώσεων σε 12 σταθμούς και για τη χρονική περίοδο από Ιούνιο 2005 μέχρι Ιούλιο 2006. Ως προς τις **ροές** διαπιστώθηκε ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ μετρήσεων και προσομοιωμένων τιμών, ιδιαίτερα μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων που λαμβάνουν υπόψη τις απώλειες νερού από τον πυθμένα του υδατορεύματος προς τα υπόγεια νερά.

Το πρόβλημα της **ρύπανσης** περιγράφηκε στο SWAT θεωρώντας ότι οι μεταλλευτικές εγκαταστάσεις αντιστοιχούν σε δύο σημειακές πηγές ρύπανσης, μία στη θέση του μεταλλείου και μία στο εργοστάσιο εμπλουτισμού. Η προσομοίωση εστιάστηκε στους τρείς ρύπους, Zn, Pb και Cd, και θεωρήθηκε ότι οι ρύποι αυτοί αποδεσμεύονται από τις δύο πηγές με σταθερό μαζικό ρυθμό ροής (kg/d). Μελετήθηκαν με το SWAT (α) οι μεταβολές των συγκεντρώσεων κατά μήκος των ρεμάτων και (β) οι εποχιακές διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων στο κάτω μέρος της λεκάνης απορροής. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν σε ότι αφορά το προφίλ των

συγκεντρώσεων κατά μήκος του ρέματος Ειρήνη έδειξαν ότι το SWAT συστηματικά υπερεκτιμά τις συγκεντρώσεις των ρύπων.

Χρησιμοποιώντας το γεωχημικό μοντέλο PHREEQC, στο οποίο εισάχθηκαν αναλυτικά δεδομένα της σύστασης των νερών, διαπιστώθηκε ότι είναι πιθανή η καταβύθιση στερεών φάσεων, όπως π.χ. $ZnCO_3$, $CdCO_3$, φαινόμενο που μπορεί να εξηγήσει τις παρατηρούμενες χαμηλότερες συγκεντρώσεις των ρύπων σε σύγκριση με τις προβλέψεις του SWAT. Υπολογισμοί που πραγματοποιήθηκαν συνδυάζοντας τα δεδομένα απορροών του SWAT με τους γεωχημικούς υπολογισμούς του PHREEQC, έδειξαν ότι με το συνδυασμό των δύο μοντέλων επιτυγχάνεται πολύ καλύτερη προσομοίωση των μεταβολών της συγκέντρωσης των ρύπων κατά μήκος του ρέματος.

Από τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας προέκυψε το συμπέρασμα ότι για την περιγραφή των προβλημάτων ρύπανσης από μεταλλευτικές δραστηριότητες, στην κλίμακα μεγάλων λεκανών απορροής, είναι αναγκαίο να συνδυαστούν οι δυνατότητες ενός υδρολογικού μοντέλου όπως το SWAT, με ένα κατάλληλο γεωχημικό μοντέλο όπως το Phreeqc.

Δίνεται παρακάτω συνοπτική περιγραφή της δομής της εργασίας:

Κεφάλαιο 1ο :*Εισαγωγή*

Στο πρώτο κεφάλαιο δίνεται ο σκοπός της εργασίας καθώς και μια σύντομη σύνοψη αυτής και των συμπερασμάτων.

Κεφάλαιο 2ο : Χαρακτηριστικά του υδρολογικού μοντέλου SWAT

Στο δεύτερο αυτό κεφάλαιο, αρχικά ορίζονται οι κατηγορίες των υδρολογικών μοντέλων και στη συνέχεια περιγράφεται αναλυτικά το υδρολογικό μοντέλο SWAT. Τέλος, αναφέρονται εφαρμογές του SWAT στην Ελλάδα, καθώς και σε μεταλλευτικές περιοχές.

Κεφάλαιο 3ο :*Ρύπανση υδάτων*

Αφού οριστεί ο όρος «ρύπανση υδάτων», γίνεται σύντομη αναφορά στις αρχές μεταφοράς, τις πηγές ρύπανσης, τις κύριες κατηγορίες των ρύπων καθώς και στην ισχύουσα νομοθεσία και παρουσιάζεται αναλυτικότερα το φαινόμενο της όξινης απορροής μεταλλείων.

Κεφάλαιο 4ο : *Περιοχή Μελέτης*

Αρχικά καταγράφεται η ιστορία της περιοχής μελέτης . Στη συνέχεια περιγράφεται η κατάσταση που επικρατεί σήμερα στον Άγιο Φίλιππο και στην Κίρκη και τέλος αναφέρονται παλαιότερες μελέτες που έχουν γίνει στην περιοχή, με έμφαση στη

μελέτη του ΙΓΜΕ, τα δεδομένα της οποίας χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Κεφάλαιο 5ο : *Διαδικασία εισαγωγής δεδομένων*

Περιγράφεται η διαδικασία εισαγωγής των δεδομένων στο SWAT για την περιγραφή της λεκάνης απορροής και καταγράφονται αναλυτικά το είδος των δεδομένων που απαιτούνται, π.χ. ψηφιακοί χάρτες ισοϋψών, χρήσεων γης, τύπων εδαφών, μετεωρολογικά δεδομένα, θέση και χαρακτηριστικά πηγών ρύπανσης, κοκ.

Κεφάλαιο 6ο :*Εκτέλεση της προσομοίωσης*

Περιγράφονται τα αρχεία προδιαγραφών προσομοίωσης που δημιουργεί το μοντέλο, οι επιλογές εκτέλεσης και τα αρχεία αποτελεσμάτων.

Κεφάλαιο 7ο :*Αποτελέσματα προσομοίωσης ροών*

Μετά την σύντομη ανακεφαλαίωση των κυρίων χαρακτηριστικών της λεκάνης, αναλύονται οι δείκτες ελέγχου ακρίβειας της αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και παρουσιάζονται τα διαγράμματα με τη σύγκριση των παρατηρημένων και των προσομοιωμένων απορροών για κάθε υδροσημείο, καθώς και τα αντίστοιχα διαγράμματα διασποράς.

Κεφάλαιο 8ο: *Προσομοίωση διασποράς των ρύπων στο SWAT*

Παρουσιάζονται τα διαγράμματα με τη σύγκριση της παρατηρημένης και της προσομοιωμένης ρύπανσης κατά μήκος των υδατορευμάτων και τα διαγράμματα με τις προβλέψεις της εποχιακής διακύμανσης της ρύπανσης στα κατώτερα πεδινά σημεία της λεκάνης απορροής.

Κεφάλαιο 9ο : *Χρήση λογισμικού PHREEQC*

Παρουσιάζονται αποτελέσματα υπολογισμών με χρήση του γεωχημικού μοντέλου Phreeqc, καθώς και με το συνδυασμό των δύο μοντέλων SWAT και Phreeqc.

Κεφάλαιο 10ο: *Ανακεφαλαίωση και συμπεράσματα*

Ανακεφαλαιώνονται τα κύρια σημεία της εργασίας και συνοψίζονται τα σημαντικότερα συμπεράσματα.

2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ SWAT

2.1 Υδρολογικά μοντέλα

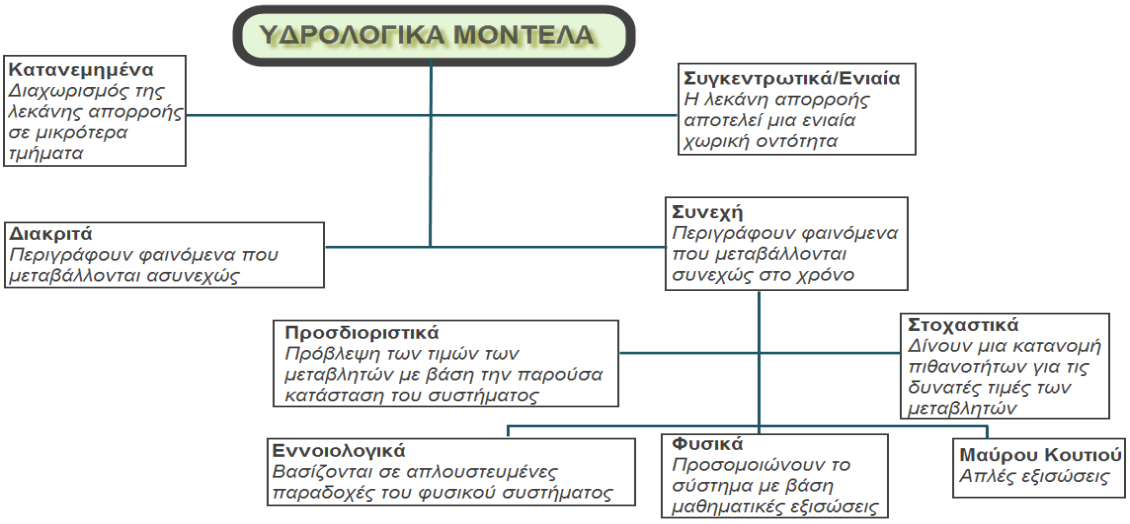
Κάθε σύστημα που μπορεί να αναπαραγάγει την συμπεριφορά και την απόκριση ενός υπόγειου υδροφορέα ονομάζεται «μοντέλο» ή «ομοίωμα» του πραγματικού συστήματος.

Η διαδικασία λειτουργίας του μοντέλου και επεξεργασίας των αποτελεσμάτων λέγεται «προσομοίωση» του φυσικού συστήματος.

Ο όρος **υδρολογικό μοντέλο** αναφέρεται σε ένα ευρύ φάσμα μαθηματικών μετασχηματισμών που χρησιμοποιούν δεδομένα πεδίου και εύλογες υποθέσεις σχετικά με τους φυσικούς μηχανισμούς, με στόχο την ποσοτική εκτίμηση υδρολογικών μεταβλητών που είναι πρακτικά αδύνατο να μετρηθούν στο πεδίο. Τα μοντέλα αυτά περιγράφουν (*ΕΜΠ, 2009*):

- Μεμονωμένα γεγονότα
- Τη διαχρονική εξέλιξη του ισοζυγίου των υδατικών πόρων μιας πεπερασμένης χωρικής ενότητας (π.χ. μιας λεκάνης απορροής)

Η διάκριση των υδρολογικών μοντέλων σε επιμέρους κατηγορίες φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.1: Κατηγορίες Υδρολογικών Μοντέλων

(*Ε.Μ.Π. 2006*)

Η επιλογή του μοντέλου από τον εκάστοτε μελετητή εξαρτάται κυρίως από τρεις παράγοντες:

- Το σκοπό της μελέτης
- Την εμπειρία του μελετητή
- Τα διαθέσιμα δεδομένα

Η ποσότητα αλλά και η ποιότητα των διαθέσιμων δεδομένων αποτελεί, συχνά, τον κύριο περιοριστικό παράγοντα κατά την εκπόνηση μιας μελέτης, καθώς η επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας, προσκρούει στην ανεπάρκεια υδρολογικών μετρήσεων και άλλων δεδομένων.

Η πρώτη απόπειρα προσομοίωσης του υδρολογικού κύκλου αποδίδεται στον Thornthwaite (1948), που ανέπτυξε ένα μονοπαραμετρικό σχήμα μηνιαίου υδατικού ισοζυγίου για την εκτίμηση της πραγματικής εξατμοδιαπνοής απλών λεκανών, εφήμερης δίαιτας και χωρίς συνεισφορά των υπόγειων νερών.

Αργότερα, οι Thornthwaite and Mather (1955) παρουσίασαν μια τροποποιημένη εκδοχή του ίδιου σχήματος, η οποία αποτέλεσε τη βάση όλων των μεταγενέστερων σχημάτων υδρολογικής προσομοίωσης. Η εκτεταμένη χρήση των τελευταίων ξεκίνησε από τη δεκαετία του 1960, ταυτόχρονα με την ραγδαία εξάπλωση των υπολογιστικών εργαλείων.

Στη βιβλιογραφία ξεχωρίζουν περίπου 70 καταξιωμένα υδρολογικά μοντέλα, τα οποία χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες, ανάλογα με (*ΕΜΠ 2009)*:

- *Το πεδίο εφαρμογής τους*: λεκάνη απορροής, υδροφορέας, συνδυασμένη προσομοίωση επιφανειακών και υπόγειων διεργασιών και συνδυασμένη προσομοίωση με τη χρήση και άλλων μοντέλων
- *Τη χωρική τους κλίμακα*: αδιαμέριστη(συγκεντρωτική), ημι-κατανεμημένη, ημι-αδιαμέριστη και κατανεμημένη
- *Τη μαθηματική τους δομή*: φυσικά, εννοιολογικά, μαύρου κουτιού κτλ.
- *Τη χρονική τους διακριτότητα*: ετήσια, μηνιαία ή ημερήσια χρονική κλίμακα.

Μερικά από τα πιο γνωστά υδρολογικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι τα παρακάτω:

- Arno
- SWAT
- GR2M
- Mike SHE(Système Hydrologique Européenne)
- SWRRBW(Simulator for Water Resources in Rural Basins)

- Modflow
- Feflow
- AWBM(Australian Water Balance Model)
- HEC

2.2 Περιγραφή μοντέλου SWAT

2.2.1 Γενικά

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε το υδρολογικό μοντέλο SWAT, κυρίως διότι είναι πολύ ικανό στην περιγραφή των ροών μέσα στη λεκάνη, αλλά και με την προοπτική να αξιολογήσουμε την ικανότητα του να προσομοιώσει την ρύπανση από εγκαταστάσεις μεταλλευτικών αποβλήτων.

Η συνοπτική ονομασία SWAT, αποτελεί το ακρωνύμιο των λέξεων **S**oil and **W**ater **A**ssessment **T**ool. Πρόκειται για ένα υδρολογικό μοντέλο λεκάνης απορροής που αναπτύχθηκε για την Υπηρεσία Αγροτικών Ερευνών, USDA (**U**nited **S**tates **D**epartment of **A**griculture).

Αντικείμενο του SWAT είναι η πρόβλεψη των επιπτώσεων αγροτικών και καλλιεργητικών δραστηριοτήτων (φυτοφάρμακα, παρασιτοκτόνα κλπ), καθώς και ρυπογόνων βιοτεχνικών και βιομηχανικών δραστηριοτήτων στην ποιότητα του νερού. Παράλληλα υπολογίζει την εδαφική διάβρωση και την συνεπαγόμενη στερεομεταφορά των φερτών υλών μέσα στα ποτάμια.

Είναι ένα φυσικό, προσδιοριστικό, κατανεμημένο μοντέλο συνεχούς χρόνου, που λαμβάνει υπόψη δεδομένα σχετικά με το έδαφος και το κλίμα σε μια λεκάνη και δίνει αποτελέσματα σχετικά με τις απορροές, τα φερτά και την περιεκτικότητα σε χημικά, στην έξοδο της λεκάνης αλλά και σε ενδιάμεσα σημεία *(Στεργιούλη 2007).*

Προκειμένου να πετύχει αυτό το στόχο, το μοντέλο SWAT *(Neitsch et al. 2005)*:

- *Έχει φυσική βάση*. Δηλαδή απαιτεί συγκεκριμένες πληροφορίες για τον καιρό, τις ιδιότητες του εδάφους, τη βλάστηση, την τοπογραφία και τις διαχειριστικές πρακτικές στην λεκάνη απορροής.
- *Είναι υπολογιστικά ικανό*, έτσι ώστε να εφαρμόζεται σε μεγάλες λεκάνες σε λογικό χρόνο.
- *Είναι συνεχές*, μπορεί δηλαδή να προσομοιώσει μεγάλες περιόδους για την μελέτη των επιπτώσεων από τις αλλαγές στην διαχείριση.

Το SWAT εξελίσσει και ενσωματώνει διαδικασίες από προηγούμενα μοντέλα, όπως τα (*ΕΜΠ, 2006*):

- **CREAMS**: Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems
- **EPIC**: Erosion Productivity Impact Calculator
- **GLEAMS**: Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems
- **SWRRB**:Simulator for Water Resources in Rural Basins
- **QUAL2E**: In Stream Nutrient Processes
- **ROTO**: Routing Outputs to Outlet

Το SWAT είναι επέκταση της λειτουργικότητας του ArcGIS. Για να λειτουργήσει πρέπει να έχει ενεργοποιηθεί μέσω των tools-extensions. Η χρήση του είναι σειριακή βήμα προς βήμα στο μενού αρχίζοντας από την αριστερή λίστα και καταλήγοντας στην τελευταία. Δεν είναι δυνατό να προχωρήσουμε στο επόμενο βήμα, εάν δεν έχει ολοκληρωθεί σωστά το προηγούμενο.

2.2.2 Δεδομένα

Το SWAT αναπτύχθηκε ώστε να χρησιμοποιεί τα δεδομένα, που σύμφωνα με τις διεθνείς τάσεις, είναι συνήθως διαθέσιμα για μια λεκάνη απορροής. Παρόλα αυτά, τα εν λόγω δεδομένα, που μπορούν να διαχωριστούν στις δύο μεγάλες κατηγορίες των χαρτογραφικών δεδομένων και των χρονοσειρών, είναι αρκετά δύσκολο να συγκεντρωθούν για τις περισσότερες περιοχές του ελλαδικού χώρου (*Ζαχαριά, 2009*).

Στα ***χαρτογραφικά*** δεδομένα που απαιτούνται για τη λειτουργία του μοντέλου περιλαμβάνονται:

- Το ψηφιακό μοντέλο του εδάφους
- Οι χρήσεις γης (αρχείο Corine)
- Οι τύποι εδάφους που εμφανίζονται στη λεκάνη(με βάση την υδροπερατότητα)
- Οι θέσεις των μετεωρολογικών και βροχομετρικών σταθμών που χρησιμοποιούνται.

Επιπροσθέτως, ο χρήστης μπορεί να εισάγει τα αρχεία υδατορευμάτων και υπολεκανών.

Στα δεδομένα ***χρονοσειρών*** περιλαμβάνονται:

- Κυρίως οι χρονοσειρές βροχόπτωσης και θερμοκρασίας

- Δευτερευόντως ανεμολογικά στοιχεία και μετρήσεις ηλιοφάνειας, για όλο το χρονικό διάστημα της προσομοίωσης. Σε περίπτωση που δεν είναι διαθέσιμα αυτά τα στοιχεία, υπάρχει η δυνατότητα προσομοίωσης τους από το SWAT.

2.2.3 Προσομοίωση και αποτελέσματα

Χρησιμοποιώντας τις πιο γνωστές μεθόδους της επιστήμης της υδρολογίας, το SWAT προσομοιώνει τα σημαντικότερα φαινόμενα που λαμβάνουν μέρος στη λεκάνη απορροής, όπως είναι η μετατροπή της κατακρήμνισης σε απορροή, η διήθηση, η εξάτμιση, η υπόγεια απορροή, η διόδευση στα υδατορεύματα, η στερεομεταφορά, η μεταβολή της συγκέντρωσης των χημικών και άλλες. Το μοντέλο δίνει αποτελέσματα σε μορφή χρονοσειρών, σε ετήσιο, μηνιαίο ή ημερήσιο βήμα ανάλογα με τις επιλογές του χρήστη, τόσο στην έξοδο της λεκάνης όσο και σε ενδιάμεσες θέσεις που θα ορίσει ο χρήστης.

Επιπροσθέτως, το SWAT αποδίδει τα αποτελέσματα σε μορφή πινάκων για όλες τις υπολεκάνες, έτσι ώστε να είναι κατανοητά και εύκολα στην περαιτέρω επεξεργασία σε κάποιο λογιστικό φύλλο.

2.2.3.1 Καινοτομία μοντέλου

Το πρώτο βήμα στην διαμόρφωση μιας λεκάνης είναι ο διαχωρισμός αυτής σε υπολεκάνες. Το SWAT επιτρέπει τη δημιουργία πολλών υπολεκανών (subbasins).

Η καινοτομία όμως του συγκεκριμένου ομοιώματος έγκειται στο γεγονός ότι κάθε υπολεκάνη διαχωρίζεται σε περαιτέρω μικρότερες υδρολογικές οντότητες, τις *μονάδες υδρολογικής απόκρισης*, με βάση τον τύπο του εδάφους και τη χρήση γης που κυριαρχεί.

ΜΟΝΑΔΕΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ (HRU: HYDROLOGIC RESPONSE UNITS)

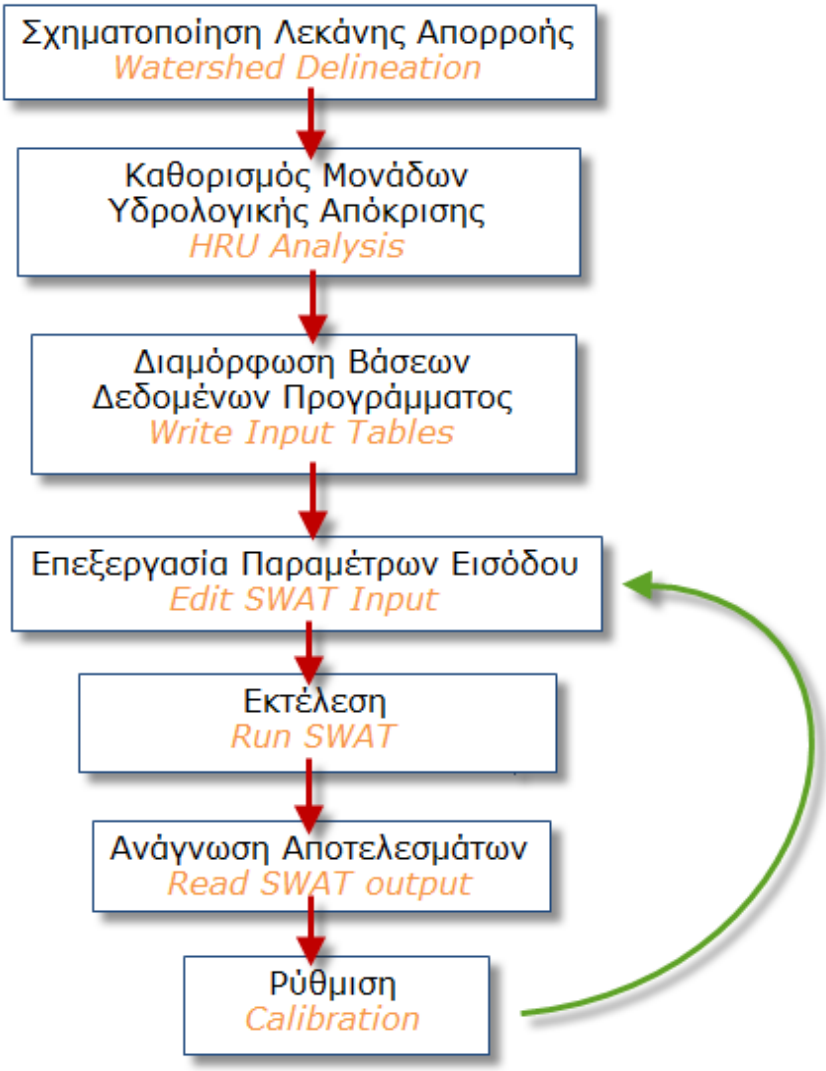
Είναι μικρότερες υδρολογικές οντότητες μέσα στις υπολεκάνες που έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά χρήσεων γης, υδρολογικού τύπου εδάφους και κλίσης. Κάθε μονάδα υδρολογικής απόκρισης αντιμετωπίζεται ξεχωριστά από το μοντέλο και κατόπιν όλες οι μονάδες συνθέτουν το τελικό αποτέλεσμα, σε ό,τι αφορά στον υδρολογικό κύκλο.

Ο διαχωρισμός αυτός δίνει στο χρήστη την ικανότητα να επιτύχει μια λεπτομερή ρύθμιση του μοντέλου στη λεκάνη. Πιο συγκεκριμένα το όφελος από τη χρήση των μονάδων υδρολογικής απόκρισης έγκειται στην αύξηση της ακρίβειας στην πρόβλεψη των αποφορτίσεων της λεκάνης. Η ανάπτυξη της βλάστησης μπορεί να διαφέρει γεωγραφικά μέσα στη λεκάνη και συνεπώς, όταν οι διαφοροποιήσεις αυτές

λαμβάνονται υπόψη, η καθαρή ποσότητα της απορροής που εισέρχεται στο κύριο υδατορεύμα θα είναι πολύ πιο ακριβής.

2.2.3.2 Βήματα προσομοίωσης

Η επιτυχής προσομοίωση με χρήση του μοντέλου SWAT ακολουθεί 8 διαδοχικά βήματα, τα οποία παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα *(Ζαχαριά, 2009)*:



Σχήμα 2.2: Βήματα Προσομοίωσης

(Ζαχαριά 2009)

2.3 Υδρολογία του μοντέλου

Η γενική εξίσωση που χρησιμοποιεί το SWAT για την περιγραφή του υδρολογικού κύκλου είναι η παρακάτω (*Neitsch et al. 2005*):

$$SW_t = SW + \sum_{i=1}^{t} (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i) \qquad (2.1)$$

Όπου:

SW_t : Το περιεχόμενο νερό στο έδαφος τη χρονική στιγμή t (mm H20)

SW: Το αρχικό περιεχόμενο νερό στο έδαφος (mm H20)

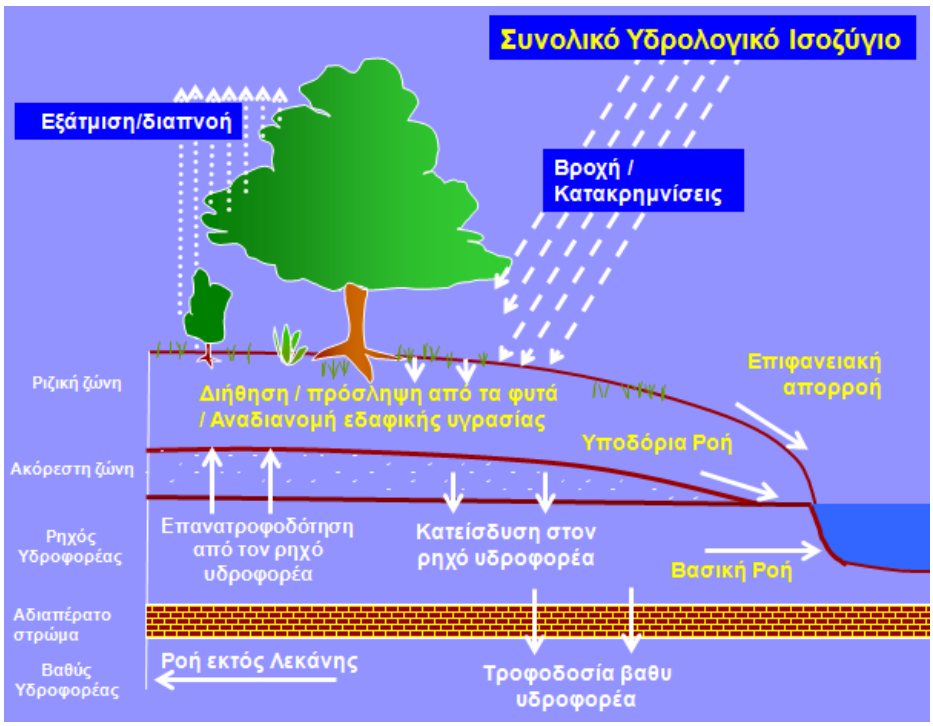
R_i : Η ημερήσια κατακρήμνιση (mm H2O)

Q_i : Η ημερήσια απορροή (mm H2O)

ET_i : Η ημερήσια πραγματική εξατμισοδιαπνοή (mm H2O)

P_i : Η ημερήσια διήθηση (mm H2O)

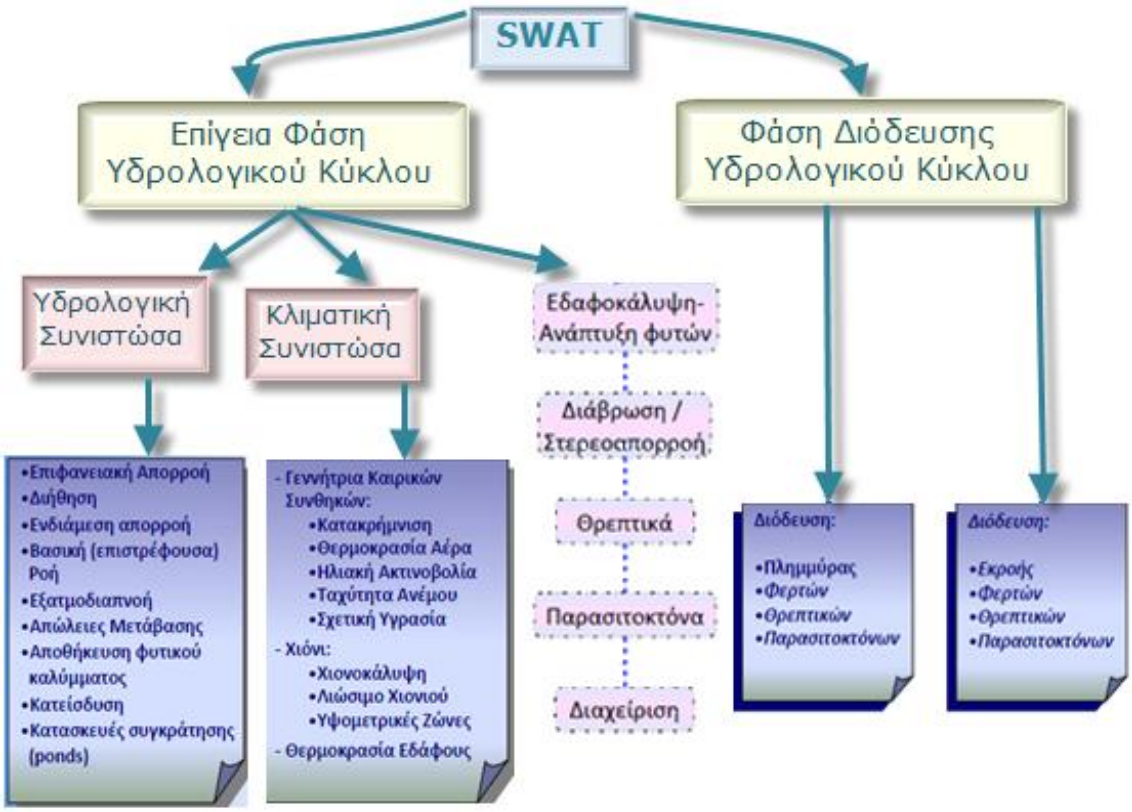
QR_i : Η ημερήσια υπόγεια/επιστρέφουσα ροή (mm H2O)



Σχήμα 2.3: Σχηματική απεικόνιση του υδρολογικού κύκλου *(Neitsch et al. 2005)*

Το νερό της βροχής, απορρέει επιφανειακά ή διηθείται στο έδαφος. Το ποσοστό που απορρέει ρυθμίζεται από το συντελεστή απορροής, ανάλογα με τον τύπο του εδάφους και τις χρήσεις της γης, ενώ το νερό που διηθείται ακολουθεί μια κατακόρυφη ή οριζόντια διαδρομή μέσα στο έδαφος.

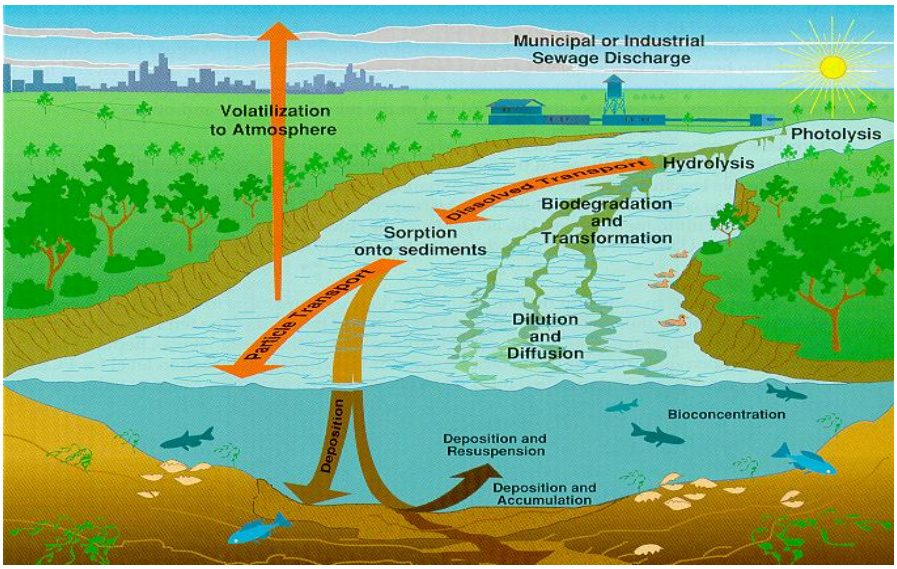
Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται οι συνιστώσες που θεωρεί το πρόγραμμα:



Σχήμα 2.4: Συνιστώσες SWAT

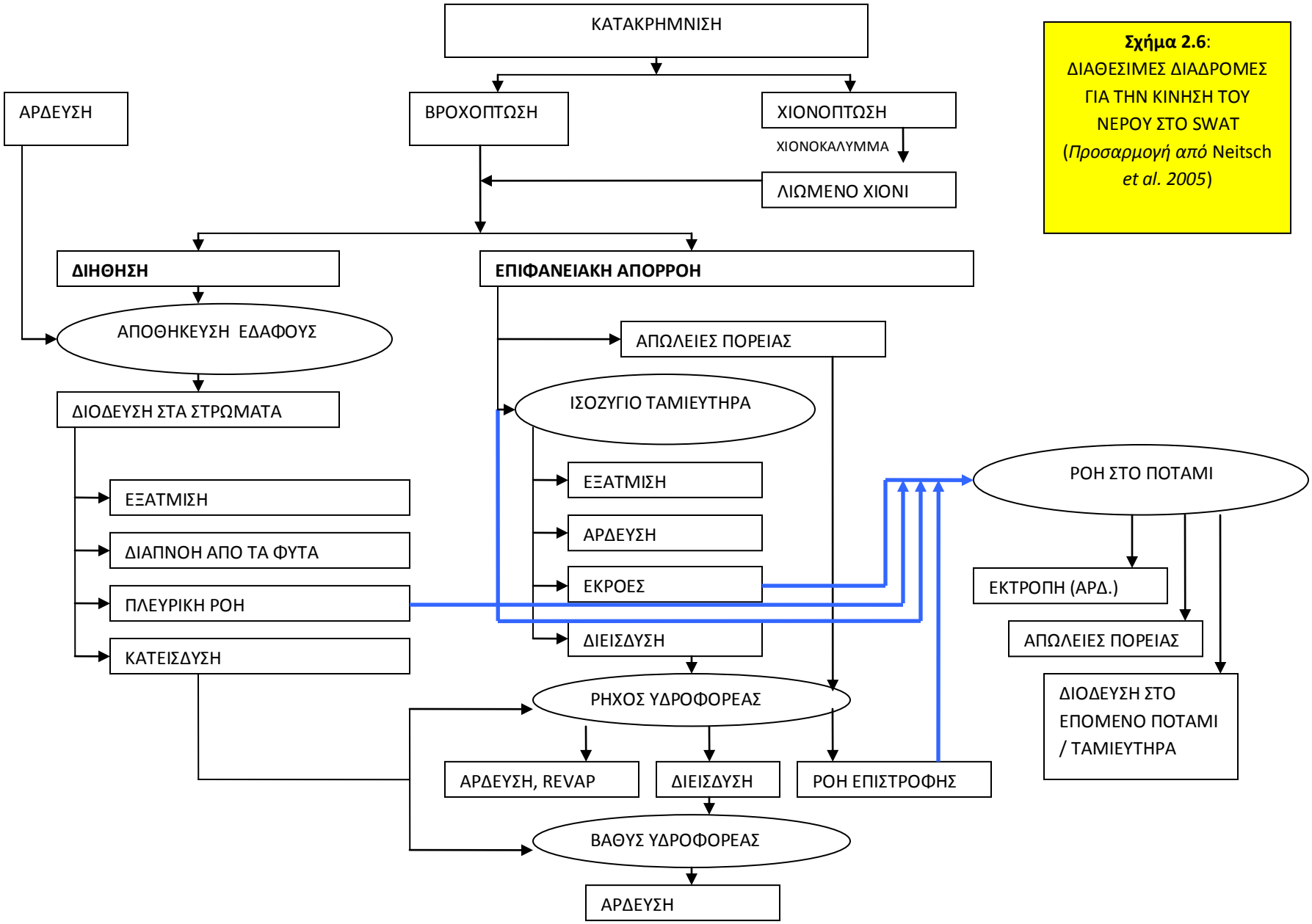
(Μπακή & Ευστρατιάδης, 2010)

Στα σχήματα 2.5 και 2.6 δίνεται σχηματικά η υδρολογία και οι δρόμοι του νερού που θεωρεί και υπολογίζει το μοντέλο.



Σχήμα 2.5: Δρόμοι νερού στο SWAT

(Neitsch et al. 2005)



Σχήμα 2.6: ΔΙΑΘΕΣΙΜΕΣ ΔΙΑΔΡΟΜΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΙΝΗΣΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΟ SWAT (*Προσαρμογή από* Neitsch *et al. 2005*)

Καθώς το νερό κατακρημνίζεται μπορεί να κατακρατηθεί στο φύλλωμα ή να πέσει στο έδαφος. Το νερό στο έδαφος μπορεί να διηθηθεί στη ριζική ζώνη ή να απομακρυνθεί με την επιφανειακή απορροή. Η απορροή κινείται σχετικά γρήγορα προς το υδρογραφικό δίκτυο και συμβάλλει στην απόκρισή του στην βροχόπτωση. Το νερό στο έδαφος μπορεί να κατακρατηθεί στο χώμα ή να επιστρέψει στην ροή των ρευμάτων (πλευρική ροή). Οι σημαντικότερες **υδρολογικές μέθοδοι που χρησιμοποιεί το μοντέλο** αναφέρονται παρακάτω συνοπτικά*(Ζαχαριά, 2009):*

1. Κατακράτηση στο φύλλωμα: Η αποθήκευση στο φύλλωμα λαμβάνεται υπόψη με τη χρήση της μεθόδου του αριθμού καμπύλης για τον υπολογισμό της επιφανειακής απορροής. Το μοντέλο επιτρέπει στο χρήστη να ορίσει τη μέγιστη ποσότητα νερού που αποθηκεύεται στο φύλλωμα στη μέγιστή του δυνατή ανάπτυξη (μέγιστος δείκτης ανάπτυξης φυλλώματος – maximum leaf area).

2. Διήθηση: Καθώς η διήθηση από την επιφάνεια στο έδαφος συνεχίζεται, το προφίλ του εδάφους αποθηκεύει μεγαλύτερη υγρασία, με συνέπεια ο ρυθμός διήθησης να μειώνεται, μέχρι να φτάσει μια σταθερή τιμή. Η τελική κατάσταση είναι ισοδύναμη με την κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα του χώματος. Επειδή η μέθοδος του αριθμού καμπύλης για τον υπολογισμό της επιφανειακής απορροής λειτουργεί σε ημερήσιο βήμα και δεν είναι δυνατό να υπολογίσει άμεσα τη διήθηση, η ποσότητα του νερού που διηθείται υπολογίζεται με βάση τη διαφορά ανάμεσα στην ποσότητα της βροχόπτωσης και την ποσότητα της επιφανειακής απορροής.

3. Αναδιανομή: Η αναδιανομή αναφέρεται στην κίνηση του νερού στο εδαφικό προφίλ, εφόσον η είσοδος του νερού έχει σταματήσει. Η αναδιανομή προκαλείται από διαφορετικές περιεκτικότητες νερού στα διαφορετικά στρώματα που μπορούν να υπάρξουν στο προφίλ του εδάφους (δέκα το μέγιστο). Η τεχνική της διόδευσης ανάμεσά τους γίνεται με τη θεώρηση συνδεόμενων δεξαμενών.

4. Εξάτμιση/διαπνοή (ΕΤ): Περιλαμβάνει συλλογικά τις μετατροπές του νερού από την υγρή στην αέρια φάση του, δηλαδή την εξάτμιση από λίμνες/ταμιευτήρες, ποτάμια, το έδαφος, και τις επιφάνειες του φυλλώματος και επίσης τη διαπνοή από τα φυτά και την εξαέρωση από το χιόνι. Μπορεί να υπολογιστεί με τρεις διαφορετικές μεθόδους:

   α. Penman-Monteith

   β.Priestley-Taylor

γ. Hargreaves

5. Πλευρική ροή: Αναφέρεται στη λεγόμενη και επιδερμική ή ενδιάμεση ροή, αυτή δηλαδή που συμβαίνει στο εδαφικό προφίλ προς το υδατρεύμα, και δεν αφορά τον ρηχό υδροφορέα. Σε κάθε εδαφικό στρώμα χρησιμοποιείται ένα μοντέλο κινηματικής αποθήκευσης (kinematic storage) για τον υπολογισμό της επιδερμικής ροής.

6. Επιφανειακή απορροή: Με τον όρο αυτό εννοείται ειδικά η επιφανειακή ροή, αυτή δηλαδή που συμβαίνει υπό μορφή στρώματος νερού πάνω στην πλαγιά. Το SWAT υπολογίζει την ροή αυτή για κάθε HRU, είτε με μια τροποποιημένη μέθοδο αριθμού καμπύλης CN, είτε με την μέθοδο Green-Ampt (που απαιτεί όμως υπο-ημερήσια δεδομένα βροχής). Η μέγιστη πλημμυρική απορροή υπολογίζεται με μια τροποποιημένη ορθολογική μέθοδο. Ο χρόνος της συγκέντρωσης υπολογίζεται με τη χρήση του τύπου του Manning συνυπολογίζοντας την επιφανειακή ροή καθώς και αυτήν στο ποτάμι. Η επιφανειακή απορροή εξαρτάται από: την εδαφική διαπερατότητα, την εδαφοκάλυψη και τις συνθήκες υγρασίας.

7. Συμβάλλοντα υδατορεύματα: Δυο τύπων ρεύματα θεωρούνται μέσα στην υπολεκάνη. Το βασικό ρεύμα και τα δευτερεύοντα. Τα δευτερεύοντα ρεύματα δεν λαμβάνουν ροή από τα υπόγεια νερά. Τα χαρακτηριστικά των δευτερευόντων ρευμάτων χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του χρόνου συγκέντρωσης.

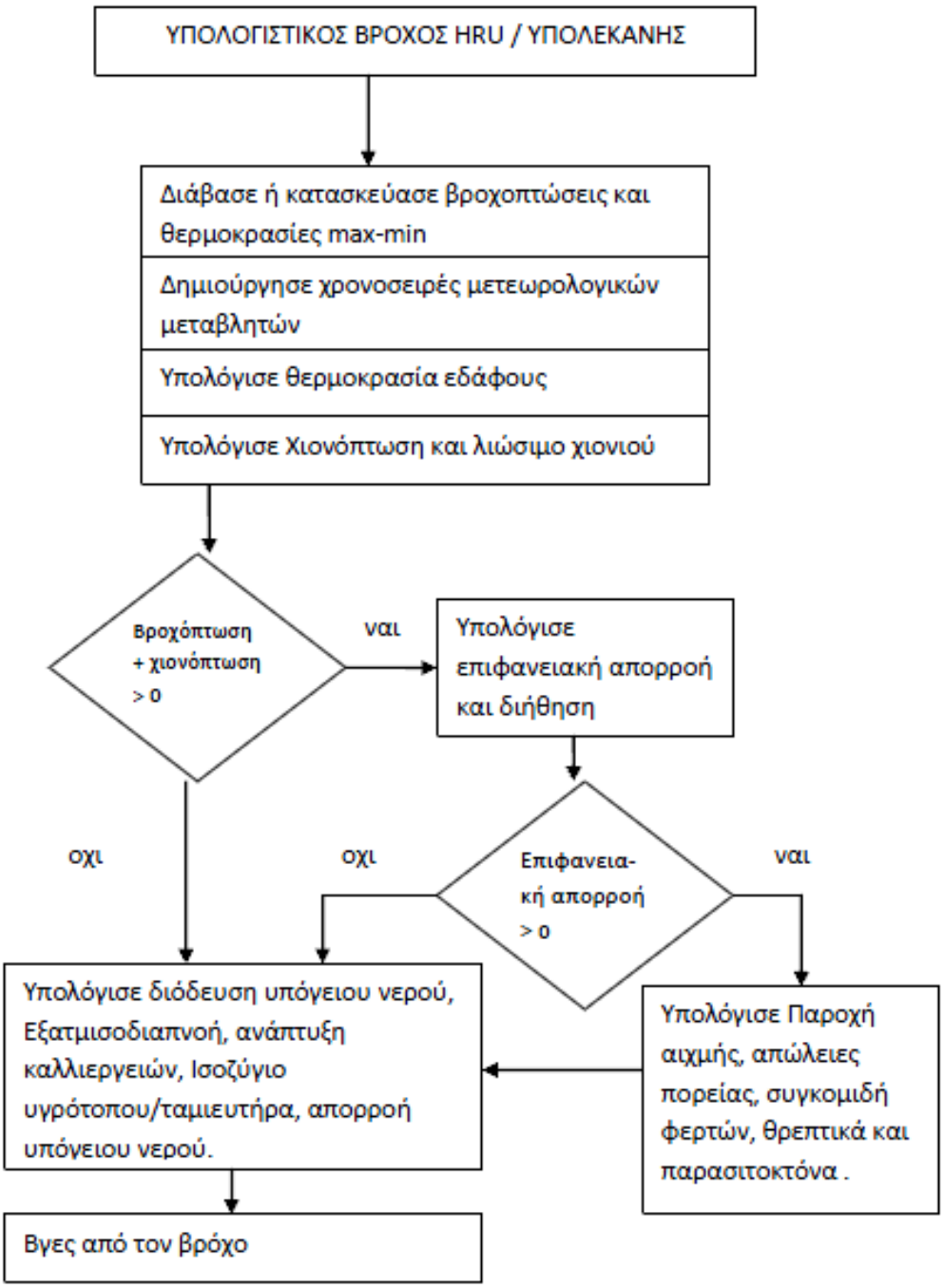
8. Απώλειες πορείας: Οι απώλειες αυτές που λέγονται και απώλειες μετάβασης, αναφέρονται στην τροφοδότηση του υπόγειου υδροφορέα από τη ροή μέσα σε εφήμερα κανάλια όταν αυτά διέρχονται από ημιέρημες – ξερές περιοχές. Οι απώλειες αυτές είναι συνάρτηση του πλάτους και του μήκους του καναλιού, καθώς και του χρόνου που διαρκεί η ροή.

9. Βασική ροή (ροή επιστροφής): Είναι η ποσότητα του νερού στο κανάλι που προέρχεται από τον υπόγειο υδροφορέα. Στο SWAT ο υπόγειος υδροφορέας χωρίζεται σε έναν ρηχό, μη περιορισμένο υδροφορέα από τον οποίο ένα τμήμα επιστρέφει στην επιφάνεια, και σε έναν βαθύ υδροφορέα που συνεισφέρει παροχή σε ρεύματα εκτός της λεκάνης.

10. Λίμνες - Ταμιευτήρες / Υγρότοποι: Το μοντέλο επιτρέπει τη μοντελοποίηση των αποθηκεύσεων νερού σε δεξαμενές. Ο ταμιευτήρας μπορεί μόνο να τοποθετηθεί στην έξοδο μιας υπολεκάνης και λαμβάνει όλο το νερό που εκρέει, ενώ ο υγρότοπος αποτελεί ένα υποσύνολο της επιφάνειας της υπολεκάνης.

2.4 Υπολογιστική αρχιτεκτονική του μοντέλου

Για να δοθεί μια ιδέα της υπολογιστικής αρχιτεκτονικής του μοντέλου, δίνεται παρακάτω υπό μορφή λογικού διαγράμματος ο βασικός υπολογιστικός βρόχος (loop) του διαγράμματος:



Σχήμα 2.7: Υπολογιστικός βρόχος του μοντέλου

(Προσαρμογή από Neitsch *et al. 2005*)

2.5 Εφαρμογές του SWAT

Το μοντέλο SWAT είναι ευρέως διαδεδομένο στο εξωτερικό (κυρίως στις Η.Π.Α), αλλά και στην Ελλάδα, τα τελευταία χρόνια, χρησιμοποιείται σε περιβαλλοντικές μελέτες, καθώς και σε ακαδημαϊκές εργασίες. Ένας κατάλογος διπλωματικών και μεταπτυχιακών εργασιών που πραγματοποιήθηκαν με χρήση του SWAT δίνεται στον Πίνακα 2.1. Ορισμένες δημοσιεύσεις που αφορούν εφαρμογές του SWAT στον Ελλαδικό χώρο αναφέρονται στη συνέχεια:

Οι Varanou et al. (2002) εφάρμοσαν το SWAT στη λεκάνη απορροής Αλή Εφέντη, που αποτελεί υπολεκάνη του Πηνειού ποταμού στην Κεντρική Ελλάδα. Η περιοχή μελέτης καλύπτει έκταση 2796 km2. Χρησιμοποιήθηκαν μετεωρολογικά δεδομένα από 15 σταθμούς στη λεκάνη απορροής. Οι μετρήσεις ροών προέρχονταν από σταθμό παρακολούθησης στην έξοδο της λεκάνης απορροής και κάλυπταν χρονική περίοδο 23 ετών, από το 1970 έως το 1993. Στόχος της προσομοίωσης ήταν η πρόβλεψη των επιπτώσεων από τις συνέπειες της κλιματικής αλλαγής.

Η δημοσίευση των Gikas et al. (2006) σχετίζεται με τη λεκάνη απορροής της Βισθονίδας, στη Θράκη, συνολικής έκτασης 1349 km2. Χρησιμοποιήθηκαν μετεωρολογικά δεδομένα από 8 μετεωρολογικούς σταθμούς και μετρήσεις απορροών και συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων και θρεπτικών από 9 σταθμούς. Οι μετρήσεις κάλυπταν περίοδο 21 μηνών από το Μάιο του 1998 μέχρι τον Ιανουάριο του 2000. Το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα εναλλακτικών σεναρίων συγκομιδής στις αγροτικές καλλιέργειες με στόχο τη μείωση του συνολικού φορτίου αζώτου προς τη λιμνοθάλασσα της Βισθονίδας.

Οι Pisinaras et al (2010) εφάρμοσαν το SWAT για να περιγράψουν τη λεκάνη απορροής του ποταμού Κόσυνθου στη Θράκη. Η συνολική έκταση της λεκάνης είναι 440 km2. Χρησιμοποιήθηκαν μετεωρολογικά δεδομένα 3 μετεωρολογικών σταθμών και δεδομένα απορροών από 4 σταθμούς παρακολούθησης. Οι μετρήσεις κάλυπταν χρονική περίοδο 3 ετών από το Νοέμβριο του 2003 μέχρι το Νοέμβριο του 2006.

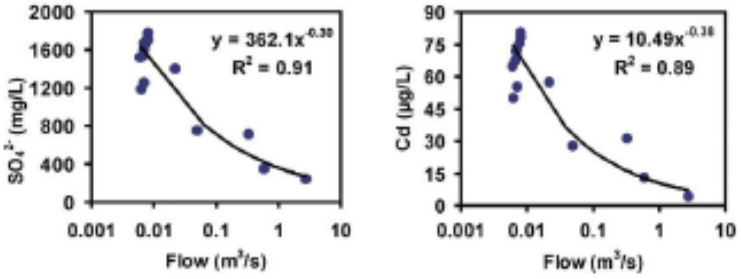
Πίνακας 2.1. Ενδεικτικός κατάλογος διπλωματικών και μεταπτυχιακών εργασιών που πραγματοποιήθηκαν με χρήση του SWAT

	Διπλωματικές εργασίες
1	Ράμπιας Ευάγγελος (2005), «Εφαρμογή του μοντέλου SWAT για την εκτίμηση των επιπτώσεων των αλλαγών χρήσης γης στις απορροές και στερεοαπορροες του ποταμού Αλιάκμονα», Επιβλέπουσα: Μαρία Μιμίκου, Σχ.Πολ. Μηχ., ΕΜΠ
2	Χριστοφίδης Αντώνιος(2005), «Εφαρμογή του μοντέλου SWAT για την εκτίμηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στο υδατικό ισοζύγιο της υδρολογικής λεκάνης του ποταμού Άραχθου», Επιβλέπουσα: Μαρία Μιμίκου, Σχ. Πολ. Μηχ., ΕΜΠ
	Μεταπτυχιακές εργασίες
1	Βουμβουλάκη, Ευαγγελία(2005), «Ρύθμιση και επαλήθευση του ομοιώματος SWAT για την εκτίμηση των επιπτώσεων των αλλαγών χρήσης γης στις απορροές του ποταμού Αλιάκμονα», Επιβλέπουσα: Μαρία Μιμίκου Σχ.Πολ. Μηχ., ΕΜΠ
2	Καμπεράι, Βικέλ(2007), «Διερεύνηση της ευαισθησίας του ομοιώματος SWAT στην πυκνότητα της βροχομέτρικής πληροφορίας για την προσομοίωση της απορροής υδρολογικής λεκάνης», Επιβλέπουσα: Μαρία Μιμίκου, Σχ.Πολ. Μηχ., ΕΜΠ
3	Μπεκιάρης, Ιωάννης(2004), «Εφαρμογή του μοντέλου SWAT για την εκτίμηση ποσοτικών και ποιοτικών παραμέτρων υδρολογικών λεκανών», Επιβλέπουσα: Μαρία Μιμίκου, Σχ.Πολ. Μηχ., ΕΜΠ
4	Παναγόπουλος, Ιωάννης(2004), «Εδαφολογική διερεύνηση για τη βελτίωση της ακρίβειας του μοντέλου SWAT στην εκτίμηση των επιπτώσεων των αλλαγών χρήσης γης στην πεδιάδα της Θεσσαλίας», Επιβλέπουσα: Μαρία Μιμίκου, Σχ.Πολ. Μηχ., ΕΜΠ
5	Πικούνης, Μιχαήλ(2002), «Εφαρμογή και ποιοτικός έλεγχος του ομοιώματος SWAT στην εκτίμηση των υδρολογικών επιπτώσεων των αλλαγών χρήσεως γης», Επιβλέπων: Μαρία Μιμίκου, Σχ.Πολ. Μηχ., ΕΜΠ
6	Πολυζώη, Ευσταθία(2006), «Χρήση ομοιώματος SWAT για την εκτίμηση επιπτώσεων από τις αλλαγές στις πρακτικές διαχείρισης γης στις στερεοαπορροες του ποταμού Άραχθου», Επιβλέπουσα: Μαρία Μιμίκου, Σχ.Πολ. Μηχ., ΕΜΠ
7	Στεργιούλη, Μαρθα – Λητώ(2007), «Προσδιορισμός πηγών προέλευσης και ποσοτικοποίηση απωλειών θρεπτικών, με εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου SWAT, υπό την επίδραση διαφορετικών κλιματολογικών συνθηκών», Επιβλέπουσα: Μαρία Μιμίκου, Σχ.Πολ. Μηχ., ΕΜΠ
8	Τσοτσώνης, Γεώργιος(2000), «Εφαρμογή του ολοκληρωμένου ημερήσιου μοντέλου Soil and Water Assessment Tool (SWAT) στη Θεσσαλία κάτω από συνθήκες κλιματικής αλλαγής», Επιβλέπουσα Μαρία Μιμίκου, Σχ.Πολ. Μηχ., ΕΜΠ
9	Τσουκαλά, Παρασκευή(2008), «Χρήση του υδρολογικού ομοιώματος SWAT για τη διερεύνηση της επίδρασης των γεωργικών πρακτικών στην παραγωγή θρεπτικών και στις αποδόσεις των καλλιεργειών στη λεκάνη του Πηνειού Θεσσαλίας», Επιβλέπων: Μαρία Μιμίκου, Σχ.Πολ. Μηχ., ΕΜΠ.

Εφαρμογή σε μεταλλευτικές περιοχές

Περιπτώσεις εφαρμογής του SWAT σε μεταλλευτικές περιοχές είναι πολύ περιορισμένες. Συγκεκριμένα εντοπίστηκε μία μόνο σχετική δημοσίευση των Galvan et al. (2009). Η δημοσίευση αυτή αναφέρεται στην περιγραφή της λεκάνης απορροής του ποταμού Meca (315 km2) στη ΝΔ Ισπανία. Τα νερά του ποταμού είναι ρυπασμένα λόγω της όξινης απορροής που προέρχεται από τα μεταλλεία Tharsis που βρίσκονται στο βόρειο τμήμα της λεκάνης. Η ρύπανση μεταφέρεται στα νερά του ταμιευτήρα Sancho, ο οποίος ρυθμίζει τη ροή του ποταμού. Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα ενός μετεωρολογικού σταθμού και

ενός σημείου μέτρησης ροών και ποιότητας των νερών, στην είσοδο του ταμιευτήρα. Οι μετρήσεις ροών κάλυπταν χρονικό διάστημα 20 ετών από το 1982 έως το 2002, ενώ οι μετρήσεις ποιότητας πραγματοποιήθηκαν σε διαφορετικό χρονικό διάστημα, από το 2003 έως το 2005. Για τον υπολογισμό του ρυπαντικού φορτίου προς τον ταμιευτήρα (ton/y), έγινε επεξεργασία των μετρήσεων και διαμορφώθηκαν εμπειρικές εξισώσεις συσχέτισης της συγκέντρωσης των ρύπων με τη ροή των νερών. Δύο χαρακτηριστικά τέτοια διαγράμματα για τα θειικά ανιόντα και το Cd παρουσιάζονται στο σχήμα 2.8. Σημειώνεται ότι οι συγκεντρώσεις των ρύπων αντιστοιχούν σε μετρήσεις πεδίου ενώ οι ροές σε αποτελέσματα προσομοίωσης με χρήση του SWAT.



Σχήμα 2.8 Παράδειγμα συσχέτισης συγκεντρώσεων των ρύπων και απορροής ποταμού από μελέτη εφαρμογής του SWAT σε λεκάνη απορροής με ρύπανση από όξινη απορροή μεταλλείων (Galvan et al., 2009)

3.ΡΥΠΑΝΣΗ ΥΔΑΤΩΝ

3.1 Γενικά

Ρύπανση υδάτων ονομάζεται οποιαδήποτε μεταβολή των φυσικών, χημικών και βιολογικών παραμέτρων του νερού (θαλασσών, ποταμών, λιμνών), λόγω της παρουσίας σε αυτό ουσιών σε ποσότητα που υπερβαίνει τα φυσιολογικά όρια. Η μεταβολή αυτή μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις στον άνθρωπο, σε άλλους ζωικούς ή φυτικούς οργανισμούς και γενικότερα να διαταράξει την ισορροπία των οικοσυστημάτων σε μικρή ή μεγάλη γεωγραφική κλίμακα. Οι ουσίες αυτές διαλύονται στο νερό, επιπλέουν ή παραμένουν ως ιζήματα στον πυθμένα και προέρχονται κυρίως από ανθρωπογενείς δραστηριότητες, όπως το πετρέλαιο, τα λιπάσματα, τα απόβλητα βιομηχανικών μονάδων κλπ. Επίσης, είναι πιθανή η απελευθέρωση ενέργειας υπό τη μορφή θερμότητας ή ραδιενέργειας, η οποία προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας του νερού, οπότε έχουμε τη «θερμική ρύπανση των υδάτων».

3.2 Αρχές μεταφοράς ρύπων

Τα φαινόμενα που συμβάλλουν στη μεταφορά των ρύπων διαχωρίζονται ως προς τη φύση τους σε μηχανικά και μοριακά. Στα μηχανικά ανήκουν η μεταγωγή και η διασπορά, ενώ στα μοριακά η διάχυση*(ΕΜΠ 2008).*

3.2.1 Μεταγωγή

Είναι η μεταφορά του ρύπου που οφείλεται στην κίνηση του υπόγειου νερού. Γίνεται με ταχύτητα v/n (ταχύτητα Darcy/πορώδες), η οποία ονομάζεται και «ταχύτητα μεταγωγής». Τα χαρακτηριστικό της μεταφοράς λόγω μεταγωγής είναι ότι η μάζα και η συγκέντρωση του ρύπου σε ένα στοιχειώδη όγκο ρευστού δεν μεταβάλλονται. Δεδομένου όμως ότι προκύπτουν αποκλίσεις από τη μέση ταχύτητα κίνησης του υπόγειου νερού, ή και των επιφανειακών νερών, και στο μέγεθος και στην κατεύθυνση, αυτές οι διαφορές έχουν σαν αποτέλεσμα τη διασπορά της μάζας του ρύπου.

3. 2.2 Μηχανική Διασπορά

Είναι ένα φαινόμενο μεταγωγής στην κλίμακα του εδαφικού πόρου που συντελεί στην ανάμιξη του ρύπου στην κλίμακα του πεδίου ροής-μεταφοράς. Δεν μπορεί να υπάρξει μηχανική διασπορά χωρίς μεταγωγή.

3.2.3 Διάχυση

Είναι ένα μοριακό φαινόμενο που έχει ως αποτέλεσμα τη μετακίνηση του ρύπου από περιοχές υψηλής συγκέντρωσης(π.χ από την πηγή) προς περιοχές χαμηλότερης συγκέντρωσης, συντελώντας έτσι στην περαιτέρω ανάμειξη των μορίων του ρύπου με τα μόρια του νερού. Ο μηχανισμός της διάχυσης είναι ανεξάρτητος από την κίνηση του νερού.

Άμα διαχωρίσουμε τα φαινόμενα μεταφοράς ως προς τα αποτελέσματά τους, τότε συνήθως η μεταγωγή μελετάται ξεχωριστά, καθώς δεν συντελεί στην ανάμειξη του ρύπου με το υπόγειο νερό. Παράλληλα, υπολογίζουμε μαζί τα αποτελέσματα της διάχυσης και της μηχανικής διασποράς, στις οποίες και αναφερόμαστε με τον κοινό όρο «υδροδυναμική συμπεριφορά».

Για την ολοκληρωμένη περιγραφή της εξέλιξης της ρύπανσης, εκτός από τις διεργασίες που περιγράφηκαν παραπάνω, εξετάζονται επιπλέον οι αλληλεπιδράσεις των ρύπων στην υδατική φάση με τη στερεά, οι οποίες περιγράφονται στα περισσότερα μοντέλα σαν ένας απλός μηχανισμός ρόφησης, καθώς και ο μηχανισμός της αποδόμησης, δηλαδή η δυνατότητα διάσπασης του ρύπου με χημικές ή βιολογικές διεργασίες.

3.2.4 Ρόφηση

Επιφέρει μοίρασμα της μάζας του ρύπου ανάμεσα στο νερό των πόρων και τα εδαφικά στερεά. Το αποτέλεσμα της ρόφησης είναι μικρότερη μάζα και συνεπώς μικρότερη συγκέντρωση σε ένα ορισμένο σημείο, εξαιτίας της συγκράτησης μέρους της μάζας του ρύπου από τα εδαφικά στερεά.

3.2.5 Αποδόμηση

Τα αποτελέσματα είναι ίδια με τη ρόφηση, αλλά η διαφορά είναι ότι η αποδόμηση επιφέρει *μόνιμη μ*είωση της μάζας του ρύπου.

Υπάρχουν και μηχανισμοί επιβράδυνσης των ρύπων όπως η ανταλλαγή ιόντων, η κατακρήμνιση, η χημική οξείδωση/αναγωγή και η βιολογική οξείδωση/αναγωγή, η αναλυτική περιγραφή των οποίων περιλαμβάνεται σε εξειδικευμένα γεωχημικά μοντέλα.

3.3 Πηγές Ρύπανσης

Διακρίνουμε 4 βασικές πηγές ρύπων:

- Πηγές ρύπανσης που υπάρχουν στο φυσικό περιβάλλον, καθώς το νερό έρχεται σε επαφή με αυτές, πχ. ραδιενεργά πετρώματα, μέταλλα, μεταλλεύματα, υφαλμύρωση παρακτίων υδροφορέων, κλπ.
- Αστικά απόβλητα, για παράδειγμα από διαρροές από αγωγούς που περιέχουν συνήθως υψηλό οργανικό φορτίο καθώς και μικροβιακή μόλυνση (βακτηρίδια, ιοί, κλπ.).
- Βιομηχανικά απόβλητα που μπορεί να περιέχουν βαριά μέταλλα, οργανικούς ρύπους, κλπ.
- Γεωργικά φάρμακα και λιπάσματα στη γεωργία.

Οι πηγές της ρύπανσης μπορεί να είναι σημειακές ή μη:

- **Σημειακές πηγές**: χαρακτηρίζονται όλες οι πηγές που εκβάλλουν ρύπους σε εντοπισμένα σημεία. Αυτά είναι τα άκρα αγωγών, τάφρων ή αποχετευτικών δικτύων που καταλήγουν σε υδάτινους αποδέκτες. Σε αυτή την κατηγορία ταξινομούνται οι βιομηχανικές μονάδες, οι μονάδες επεξεργασίας λυμάτων που απομακρύνουν μέρος των ρύπων, ενεργά η εγκαταλελειμμένα ορυχεία, πετρελαιοπηγές και τάνκερς. Επειδή βρίσκονται σε συγκεκριμένο μέρος, συνήθως σε αστικές περιοχές, είναι σχετικά εύκολος ο εντοπισμός τους και κατά συνέπεια και η παρακολούθησή τους.
- **Μη σημειακές πηγές**: είναι πηγές οι οποίες δεν είναι δυνατόν να εντοπιστούν σε κανένα ειδικό σημείο απορροής. Είναι συνήθως μεγάλες περιοχές που ρυπαίνουν το νερό με επιφανειακή ή υπόγεια απορροή ή απόθεση στην ατμόσφαιρα. Τέτοιες είναι, για παράδειγμα, οι απορροές χημικών στα επιφανειακά νερά και η διαρροή τους στο έδαφος μέσα από χωράφια, υλοτομημένα δάση, ζωοτροφές, δρόμους, αποχετεύσεις κ.ά. Εκτιμάται ότι σε χώρες με αγροτική παραγωγή η γεωργική ρύπανση, υπό τη μορφή στερεών αποθέσεων, ανόργανων λιπασμάτων, κοπριάς, αλάτων διαλυμένων στο νερό άρδευσης και παρασιτοκτόνων, είναι υπεύθυνη για πάνω από το 60% των συνολικών ρύπων που φτάνουν σε ποτάμια και λίμνες. Ο έλεγχος της ρύπανσης αυτού του τύπου είναι πολύ δύσκολος, επειδή είναι δύσκολο να εντοπιστούν οι τόσο διαφορετικές και διεσπαρμένες πηγές ρύπανσης.

3.4. Κατηγοριοποίηση ρύπων

Οι ρύποι διακρίνονται σε οργανικούς και ανόργανους. Περνούν στο νερό μέσω της βροχής, κατά τη διήθησή του στο έδαφος, ή (η πιο συνηθισμένη περίπτωση) με την ανάμειξή του με αστικά λύματα ή υγρά απόβλητα. Οι οργανικές

ενώσεις, λόγω της αποδόμησής τους από τους μη παθογόνους μικροοργανισμούς του νερού, προκαλούν την κατανάλωση του διαλυμένου στο νερό οξυγόνου. Έτσι όμως οι αερόβιοι οργανισμοί του νερού, όπως τα ψάρια, ασφυκτιούν και πεθαίνουν, ενώ αναπτύσσονται οργανισμοί που δεν χρειάζονται οξυγόνο για να ζήσουν, οι οποίοι παράγουν ανεπιθύμητα προϊόντα, όπως δύσοσμα αέρια (υδρόθειο, μεθάνιο). Από τις ανόργανες ουσίες πρόβλημα δημιουργούν τα ιόντα των λεγόμενων βαρέων μετάλλων, όπως ιόντα μολύβδου (Pb^{2+}), υδραργύρου (Hg^{+}, Hg^{2+}), χρωμίου (Cr^{3+}, CrO_4^{6+}), καδμίου (Cd^{2+}), τα αρσενικού (AsO_4^{3-}, AsO_3^{3-}) κλπ., τα οποία βρίσκονται συνήθως σε βιομηχανικά απόβλητα και είναι τοξικά για τους υδρόβιους οργανισμούς

3.5 Νομοθεσία

Για την προστασία της ποιότητας των υπόγειων και επιφανειακών νερών υφίσταται ένα ευρύ νομοθετικό πλαίσιο σε Ευρωπαϊκό επίπεδο, σημαντικά στοιχεία του οποίου είναι τα ακόλουθα (*Δερματάς 2010*):

- Οδηγία Πλαίσιο 2000/60/ΕΚ για τα Νερά
- Οδηγία για την προστασία του υπόγειου νερού 2006/118/ΕΚ από την υποβάθμιση και τη χημική ρύπανση, έπρεπε να ενσωματωθεί στο εθνικό Δίκαιο έως τις 16 Ιανουαρίου 2009
- Οδηγία προστασίας του εδάφους υπό επεξεργασία
- Άλλες οδηγίες π.χ. Οδηγία 2006/21/ΕΚ σχετικά με διαχείριση αποβλήτων εξορυκτικής βιομηχανίας, Οδηγία 2004/35/ΕΚ για την Περιβαλλοντική Ευθύνη

3.6 Όξινη απορροή μεταλλείων

Η όξινη απορροή μεταλλείων(ΟΑΜ) είναι το αποτέλεσμα της οξείδωσης των θειούχων μεταλλευμάτων και αποβλήτων, όταν αυτά εκτίθενται στη συνδυασμένη δράση του νερού και του οξυγόνου.

Η δημιουργία της όξινης απορροής μεταλλείων είναι το αποτέλεσμα μιας περίπλοκης σειράς χημικών αντιδράσεων που περιλαμβάνουν*:*

- **Παραγωγή θειϊκού οξέος**, εξαιτίας της οξείδωσης των θειούχων ορυκτών που περιέχονται στα μεταλλεύματα και στα στερεά απόβλητα από τη συνδυασμένη δράση οξυγόνου και νερού. Οι αντιδράσεις αυτές είναι αυτοκαταλυόμενες και η ταχύτητά τους επιταχύνεται από τη δράση τυχόν υπαρχόντων βακτηρίων.

- **Εξουδετέρωση της παραγόμενης οξύτητας** από ανθρακικά κυρίως ορυκτά. Οι αντιδράσεις αυτές προκαλούν την καταβύθιση γύψου, υδροξειδίων των μετάλλων, οξυ-υδροξειδίων και άλλων ενώσεων. Εάν η ικανότητα ενός υλικού (δυναμικό εξουδετέρωσης) να εξουδετερώνει την παραγόμενη οξύτητα είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της παραγωγής της, τότε η προκαλούμενη απορροή θα είναι αλκαλική ή ουδέτερη. Πάντως θεωρείται πιθανόν, ακόμη και στην περίπτωση αυτή, να παράγεται τοπικά όξινη απορροή από κάποια τμήματα ενός αποβλήτου ή στείρου εκμετάλλευσης, στα οποία υπερτερούν οι θειούχες ενώσεις.

Κύριες πηγές της όξινης απορροής μεταλλείων είναι οι επιφανειακές και υπόγειες μεταλλευτικές δραστηριότητες, οι σωροί υπερκειμένων και στείρων και τα τέλματα εμπλουτισμού. Η ΟΑΜ χαρακτηρίζεται από χαμηλό pH (1,5-3,5) και υψηλές συγκεντρώσεις τοξικών ιόντων, με αποτέλεσμα να προκαλεί σημαντική περιβαλλοντική επιβάρυνση, σε περίπτωση που έλθει σε επαφή με επιφανειακά και υπόγεια νερά ή με εδάφη. Οι αντιδράσεις δημιουργίας της ΟΑΜ είναι αυτοκαταλυόμενες και συνεπώς, όταν αρχίσουν, είναι πολύ δύσκολο να ανα-σταλούν.

Η όξινη απορροή μεταλλέιων θεωρείται το σημαντικότερο περιβαλλοντικό πρόβλημα που προκαλείται από τις μεταλλευτικές δραστηριότητες εξόρυξης άνθρακα, λιγνίτη και πολυμεταλλικών θειούχων μεταλλευμάτων.

Η κύρια αντίδραση της όξινης απορροής μεταλλείων είναι η οξείδωση του σιδηροπυρίτη (FeS_2) (*Κούρτης 2008)*:

$$2FeS_2 + 7O_2 + H_2O \rightarrow 2Fe^{2+} + 4SO_4^{2-} + 4H^+ \quad (3.1)$$

$$2Fe^{2+} + \tfrac{1}{2}\, O_2 + 2H^+ \rightarrow 2Fe^{3+} + H_2O \quad (3.2)$$

$$Fe^{3+} + 3H_2O \rightarrow Fe(OH)_3 + 3H^+ \quad (3.3)$$

$$FeS_2 + 14\, Fe^{3+} + 8H_2O \rightarrow 15Fe^{2+} + 2SO_4^{2-} + 16H^+ \quad (3.4)$$

Καθοριστική για την κινητική του φαινομένου είναι η αντίδραση 3.2, δηλαδή η παραγωγή Fe^{3+}.

3.6.1 Αντιμετώπιση της όξινης απορροής μεταλλείων

Για το πρόβλημα των όξινων νερών δεν υπάρχει άμεση, εύκολη και φθηνή λύση. Και αυτό διότι το 80% περίπου των όξινων νερών προέρχεται από εγκαταλειμμένα (εξοφλημένα) μεταλλεία. Σημειώνεται ότι για τα εγκαταλειμμένα μεταλλεία δεν υπάρχει σχετική νομοθεσία.

Οι μέθοδοι πρόληψης ή αντιμετώπισης τη όξινης απορροής κατατάσσονται σε τέσσερις (4) κατηγορίες(*Κούρτης 2008)*:

3.6.1.1 Πρόληψη

Πρόκειται για τις μεθόδους που εμποδίζουν το σχηματισμό των όξινων νερών. Σε αυτές εντάσσονται οι παρακάτω:

- Σφράγισμα του μεταλλείου
- Εκτροπή ή άντληση των νερών μεταλλείων πριν οξειδωθούν τα περιεχόμενα θειούχα ορυκτά
- Τροποποίηση της μεθόδου εκμετάλλευσης ώστε να εμποδίζεται η συνύπαρξη σιδηροπυρίτη, νερού και οξυγόνου.
- Κάλυψη των σωρών στείρων και των εκσκαφών.

3.6.1.2 Απομάκρυνση όξινων νερών

Πρόκειται για απόρριψη των όξινων νερών στο έδαφος με γεωτρήσεις βάθους 1.000-2.000 m και με παροχή 4.000 m^3/h.

Το όξινο νερό εισάγεται σε υδροφόρους ορίζοντες που βρίσκονται σε μεγάλο βάθος. Η ποιότητα νερού του αποδέκτη δεν πρέπει να είναι καλύτερη από εκείνη του όξινου νερού.

Τα κύρια μέρη της γεώτρησης είναι η ίδια η γεώτρηση και το σύστημα προετοιμασίας στην επιφάνεια.

Μειονεκτήματα

- Το μεγάλο βάθος εισαγωγής συνεπάγεται μεγάλο κόστος κατασκευής των γεωτρήσεων.
- Προκαλείται εύκολα έμφραξη της γεώτρησης

3.6.1.3 Αραίωση όξινων νερών

Πρόκειται για μεθόδους που έχουν εφαρμοστεί στο παρελθόν. Η πιο συνηθισμένη ήταν η διάθεση των όξινων νερών σε υπάρχοντα ρεύματα. Η ισχύουσα νομοθεσία, όμως, δεν το επιτρέπει. Επομένως, οι παραπάνω μέθοδοι δεν μπορούν να εφαρμοστούν, εκτός αν η αραίωση λάβει χώρα πριν από το σημείο εκπομπής. Αυτό δεν είναι δυνατό στις περισσότερες περιπτώσεις λόγω της έλλειψης νερού, αλλά και λόγω της ισχύουσας νομοθεσίας και, επομένως, η αραίωση εφαρμόζεται πολύ σπάνια.

3.5.1.4 Εξουδετέρωση όξινων νερών

Πρόκειται για μεθόδους που βρίσκουν ευρεία εφαρμογή στην αντιμετώπιση του φαινομένου της όξινης απορροής, τόσο σε λειτουργούντα, όσο και σε εγκαταλελειμμένα μεταλλεία.

Στόχος της εξουδετέρωσης είναι η απομάκρυνση της οξύτητας (pH) και των διαλυμένων συστατικών (Fe, Cd, Zn, Mn, As, Pb, κα)

Οι μέθοδοι επεξεργασίας όξινων νερών διακρίνονται σε:

- **Δυναμικές** (συμβατικές) μέθοδοι επεξεργασίας: Οι δυναμικές μέθοδοι επεξεργασίας έχουν σκοπό την παραγωγή ενός τελικού υγρού αποβλήτου, το οποίο να ικανοποιεί τα περιβαλλοντικά όρια απόρριψης σε υδάτινους αποδέκτες. Οι περιεχόμενοι ρυπαντές (βαρέα και τοξικά μέταλλα) καταβυθίζονται ως αδιάλυτες ενώσεις (υδροξείδια, θειούχες), σχηματίζοντας μία λάσπη εξουδετέρωσης. Τα αντιδραστήρια που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι:
    - Ασβεστόλιθος, $CaCO_3$
    - Υδράσβεστος, $Ca(OH)_2$
    - Ασβέστης, CaO
    - Άνυδρη σόδα, Na_2CO_3
    - Καυστική σόδα, NaOH
    - Αμμωνία, NH_3 ή NH_4OH
    - Υδρόθειο, H_2S
- **Παθητικές** μέθοδοι επεξεργασίας: Οι παθητικές μέθοδοι επεξεργασίας στοχεύουν στη βελτίωση της ποιότητας των νερών με χρήση μόνο φυσικά διαθέσιμων πηγών ενέργειας (π.χ. βαρύτητα, ενέργεια μεταβολισμού βακτηρίων, φωτοσύνθεση) σε συστήματα που δεν απαιτούν συνεχή (μολονότι τακτική) συντήρηση για να λειτουργήσουν αποτελεσματικά για όλο το χρονικό διάστημα σχεδιασμού τους " (USBM).

Οι σημαντικότεροι <u>*μηχανισμοί απομάκρυνσης μετάλλων*</u> είναι:

- Αντιδράσεις ανταλλαγής ιόντων με το οργανικό υπόστρωμα
- Καταβύθιση ανθρακικών ενώσεων από το παραγόμενο HCO_3^-
- Αναγωγή θειικών ιόντων και καταβύθιση MeS
- Καταβύθιση υδροξειδίων Fe^{3+} και Mn

- Προσρόφηση μετάλλων σε υδροξείδια Fe^{3+}
- Απορρόφηση μετάλλων από φυτικά είδη
- Εξουδετέρωση και καταβύθιση μετάλλων με NH_3
- Προσρόφηση και ανταλλαγή μετάλλων σε άλγη

3.7 SWAT και βαρέα μέταλλα

Η πολυπλοκότητα των διεργασιών που επηρεάζουν τη διαλυτότητά των βαρέων μετάλλων κάνουν την λεπτομερή προσομοίωση των μετασχηματισμών που υφίστανται ταυτόχρονα με τη μεταφορά τους στα υπόγεια νερά και τα υδατορεύματα πολύ δύσκολη. Προς το παρόν, το SWAT επιτρέπει να προστεθούν συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων στο υδατορεύμα, ως σημειακές πηγές και στη συνέχεια εκτιμά την μεταφορά τους, χωρίς όμως να περιλαμβάνει αλγορίθμους για την προσομοίωση των διαδικασιών μέσα στο υδατορεύμα. Συνεπώς, απλές εξισώσεις ισοζυγίου μάζας χρησιμοποιούνται από το μοντέλο για να περιγράψουν τη μεταφορά των βαρέων μετάλλων μέσα στο υδρογραφικό δίκτυο(*Neitsch et al. 2005)*.

4.ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

4.1 Ιστορικό μεταλλευτικών δραστηριοτήτων

Το μεταλλείο μεικτών θειούχων «Άγιος Φίλιππος» βρίσκεται 9 χιλιόμετρα βορειοανατολικά της Κίρκης, και το εργοστάσιο της επεξεργασίας των μεταλλευμάτων, 3 χιλιόμετρα ανατολικά αυτής. Από τον 19° αιώνα που έγινε γνωστή η ύπαρξη των κοιτασμάτων, Άγγλοι, Γερμανοί, Αμερικάνοι καθώς και ντόπιοι προσπάθησαν να τα εκμεταλλευτούν, με τα μεταλλεία να κλείνουν οριστικά το 1997 και έκτοτε να στέκουν ερειπωμένα.

Παρακάτω παρουσιάζεται συνοπτικά η ιστορία της περιοχής*(ΙΓΜΕ 2006):*

- **1890** : πρώτη ιδιωτική παραχώρηση
- **1926 -1940** : Αγγλική περίοδος : Alfred Jackson, ", "Thracian Union Ltd", "Thracian Mineral Products", " Kirka Mines Ltd".

Αποτέλεσμα αυτής της εξόρυξης ήταν η δημιουργία ενός δικτύου στοών συνολικού μήκους περίπου 1600 m. Το μετάλλευμα μετά την εξόρυξή του στελνόταν ακατέργαστο στην Ευρώπη από το σιδηροδρομικό σταθμό της Κίρκης.

- **1940-1946** : Γερμανική περίοδος: "Africa Bergweks A.G."και η Γερμανό-Βουλγαρική "TrazischBergweks"

Οι Γερμανοί κατασκεύασαν και εξόπλισαν, 3 km ανατολικά της Κίρκης, κοντά στη σιδηροδρομική γραμμή, ένα, για την εποχή εκείνη, σύγχρονο εργοστάσιο εμπλουτισμού μεταλλευμάτων, αποτελούμενο από δύο μεγάλα κτίρια για την κατεργασία του μεταλλεύματος του Αγίου Φιλίππου που περιελάμβανε μονάδες θραύσης, λειοτρίβησης και εμπλουτισμού με τη μέθοδο επίπλευσης. Για τη μεταφορά του μεταλλεύματος από το μεταλλείο Αγίου Φιλίππου μέχρι το εργοστάσιο εμπλουτισμού, συνολικής απόστασης 6 km, κατασκευάστηκε σύστημα εναέριας μεταφοράς. Στο μεταλλείο Αγίου Φιλίππου διευρύνθηκε το δίκτυο στοών, σε συνολικό μήκος περίπου 3500 m.

Οι εγκαταστάσεις, εκτός από το μεταλλείο «Άγιος Φίλιππος» και το εργοστάσιο εμπλουτισμού του μεταλλεύματος, περιελάμβαναν και δύο μονάδες παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος, κτίρια για διάφορα συνεργεία, χημικά εργαστήρια και αποθήκες, καθώς και πολλά οικήματα για το εργατικό και υπαλληλικό προσωπικό, μεταξύ των οποίων και πολυτελείς βίλες για το ανώτατο προσωπικό.

Με το τέλος του πολέμου το 1945 και την οπισθοχώρηση των Γερμανών και Βουλγάρων (η Θράκη ήταν υπό βουλγαρική κατοχή), όλες αυτές οι εγκαταστάσεις εγκαταλείφθηκαν και περιήλθαν στη δικαιοδοσία του Ελληνικού Κράτους.

- **1946-1953**:Αμερικάνικη περίοδος : "Mines "

Οι προσπάθειες της αμερικάνικης εταιρείας καθώς και της Ελληνικής Τράπεζας Βιομηχανικής Ανάπτυξης (ΕΤΒΑ) στη δεκαετία του 1960 να δημιουργήσουν μεταλλευτική βιομηχανία, δεν καρποφόρησαν.

- **1973-1981** : «Κίρκη Μεταλλευτική» ΕΠΕ (Κυπριάδης)

Όταν τα μεταλλεία πέρασαν στην κατοχή του Κυπριάδη, άρχισε η υπόγεια εξόρυξη του κοιτάσματος στο μεταλλείο Άγιος Φίλιππος. Το συγκρότημα Κυπριάδη έθεσε σε λειτουργία και το εργοστάσιο εμπλουτισμού, καθώς επίσης και το εναέριο σύστημα για τη μεταφορά του μεταλλεύματος από το μεταλλείο Αγίου Φιλίππου. Η μη εφαρμογή όλων των απαραίτητων μέτρων ασφάλειας, έγιναν αιτία, ύστερα από μια ισχυρή βροχόπτωση το καλοκαίρι του 1977, να σημειωθεί καθίζηση στο μεταλλείο και τελικά να καταρρεύσει το κεντρικό σύστημα στοών. Έτσι, άρχισε η επιφανειακή εξόρυξη προς βαθύτερα σημεία του μεταλλοφόρου ρήγματος. Οι προσπάθειες όμως αυτές δεν είχαν τα αναμενόμενα οικονομικά αποτελέσματα με αποτέλεσμα να σταματήσουν οι εργασίες το έτος 1980.

- **1989 -1992**: «Μεταλλεία Έβρου» ΕΠΕ (Κυπριάδης) .

Σε αυτή τη φάση της εκμετάλλευσης, οι ποσότητες και η ποιότητα του μεταλλεύματος από την επιφανειακή εξόρυξη περιορίσθηκαν αισθητά. Το φτωχό

αυτό μετάλλευμα μεταφερόταν με φορτηγά οχήματα (αντί της μεταφοράς με τον εναέριο σιδηρόδρομο) για την κατεργασία του στο εργοστάσιο εμπλουτισμού. Τα στείρα της εξόρυξης αποτέθηκαν γύρω από το ορυχείο. Το επιφανειακό μεταλλείο απέκτησε με την πάροδο του χρόνου μεγάλες διαστάσεις. Το δυτικό, σχεδόν κατακόρυφο τοίχωμά του έφτασε το ύψος των 50 m περίπου δημιουργώντας άμεσο κίνδυνο για την τύχη των εργαζομένων σε περίπτωση κατακρήμνισης. Στο βαθύτερο μέρος της εκσκαφής συγκεντρώθηκαν και λίμνασαν επιφανειακά νερά τα οποία παρά τις αντλήσεις δημιουργούσαν μεγάλες δυσκολίες στην εξόρυξη με αποτέλεσμα να διακόπτονται συχνά οι εργασίες που οδήγησαν το 1997 στην οριστική παύση της μεταλλευτικής δραστηριότητας.

Κατά τις μεταλλευτικές δραστηριότητες στο μεταλλείο του Αγίου Φιλίππου, το ενδιαφέρον συγκεντρωνόταν στην ανάκτηση συμπυκνωμάτων των κύριων θειούχων ορυκτών του μολύβδου (κυρίως γαληνίτη) και του ψευδαργύρου (σφαλερίτη και βουρτσίτη). Το κοίτασμα όμως του Αγίου Φιλίππου είναι πολυμεταλλικό και περιέχει μέχρι περίπου 20 θειούχα ορυκτά.

Πίνακας 4.1: Μεταλλικά Ορυκτά του κοιτάσματος του Αγίου Φιλίππου

(Αρίκας 2007)

Κύρια ορυκτά		*Δευτερεύοντα ορυκτά*	
Όνομα	*Τύπος*	*Όνομα*	*Τύπος*
σιδηροπυρίτης	FeS_2	κεστερίτης	Cu_2ZnSnS_4
σφαλερίτης	ZnS	χαλκοπυρίτης	$CuFeS_2$
βουρτσίτης	ZnS	μαρκασίτης	FeS_2
γαληνίτης	PbS	βισμουθινίτης	Bi_2S_3
κιρκιΐτης	$Pb_{10}Bi_3As_3S_{19}$	κοζαλίτης	$PbBi_2S_5$
ιορδανίτης	$Pb_{14}As_6S_{23}$	εναργίτης	Cu_3AsS_4
Bi-ιορδανίτης	$Pb_{14}BiAs_5S_{23}$	λουζονίτης	Cu_3SbS_4
τενναντίτης	$Cu_{12}As_4S_{13}$	σελιγμαννίτης	$CuPbAsS_3$

<u>Τρόποι εκμετάλλευσης</u>

- 1973-1981 υπόγεια εκμετάλλευση
- 1989-1992 επιφανειακή εκμετάλλευση

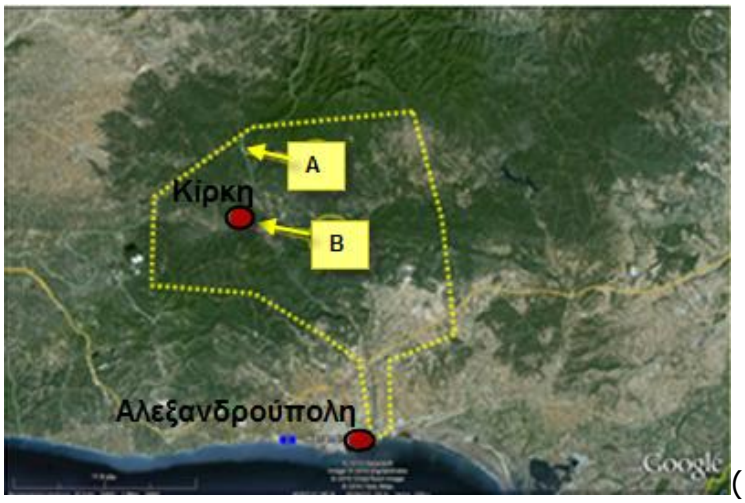
<u>Παραγωγή</u>

- 1973-1981 : 132.000 τόνοι μεταλλεύματος
- 1989-1992 : 120.000 τόνοι μεταλλεύματος

Στείρα-απορρίμματα

Κατά τη διάρκεια της εκμετάλλευσης, προέκυψαν σημαντικές ποσότητες στείρων και απορριμμάτων από τα θειούχα ορυκτά, πλούσιων σε σιδηροπυρίτη. Ο όγκος τους υπολογίζεται στα 86.000 m^3.

(α)



(β)

(γ)

Σχήμα 4.1:Περιοχή μελέτης

4.2 Η κατάσταση σήμερα

4.2.1 Άγιος Φίλιππος

Η εκμετάλλευση οδήγησε στη δημιουργία τεσσάρων υπόγειων πατωμάτων στα μεταλλεία, καθώς και μιας ανοικτής εκσκαφής με απότομες πλευρές. Στον πυθμένα της εκσκαφής συσσωρεύεται το νερό της βροχής, δημιουργώντας κατά αυτό τον τρόπο μια λίμνη με όξινο και ρυπασμένο νερό.

Τα στείρα της εξόρυξης, μαζί με το φτωχό για επεξεργασία μετάλλευμα, βρίσκονται ακόμα σε σωρούς έξω από το εργοστάσιο της Κίρκης, διαβρώνονται από το νερό της βροχής και προκαλούν όξινη απορροή.

Επίσης, η επιφανειακή απορροή σε συνδυασμό με τις φιλτραρισμένες από τα στείρα απορροές, κινούνται προς το ρέμα Κιρκάλων μεταφέροντας όξινο νερό και τοξικά μέταλλα.

Σταθερά μεγάλη επιβάρυνση στο ρέμα Κιρκάλων σε τοξικά στοιχεία προέρχεται από τη συνεχή εκροή νερού από την υψομετρικά χαμηλότερη στοά του μεταλλείου Αγίου Φιλίππου, η οποία διανοίχθηκε την περίοδο 1941–43 για την αποστράγγιση των υπερκείμενων στοών εξόρυξης και είναι γνωστή και ως στοά 4.

Συνοπτικά, η ρύπανση στο μεταλλείο του Αγίου Φιλίππου προκαλείται από τρεις κυρίως πηγές (ΙΓΜΕ 2006, Αρίκας κ.α., 2004, 2007, Triantafyllidis and Skarpelis, 2006, Triantafyllidis et al., 2007, Λιακόπουλος, 2009, Papassiopi et al., 2009):

1. Τη λίμνη της ανοιχτής εκσκαφής
2. Το σωρό των στείρων— απορριμμάτων
3. Την απορροή της στοάς 4

Η ρύπανση αναχαιτίζεται μερικώς από τη καθίζηση του λεπτόκοκκου υλικού και τη συγκράτηση των φερτών υλικών, σε ένα μικρό φράγμα που υπάρχει στο ρέμα Κιρκλάκων, καθώς και από την αραίωση του νερού με καθαρότερο από παράπλευρες εισροές.

Σχήμα 4.2: Το μεταλλείο του Αγίου Φιλίππου όπως είναι σήμερα

(antigoldgreece.wordpress.com)

Σχήμα 4.3: Λίμνη ανοικτής εκσκαφής
((antigoldgreece.wordpress.com)

Σχήμα 4.4: Λίμνη ανοικτής εκσκαφής
(ΙΓΜΕ 2006)

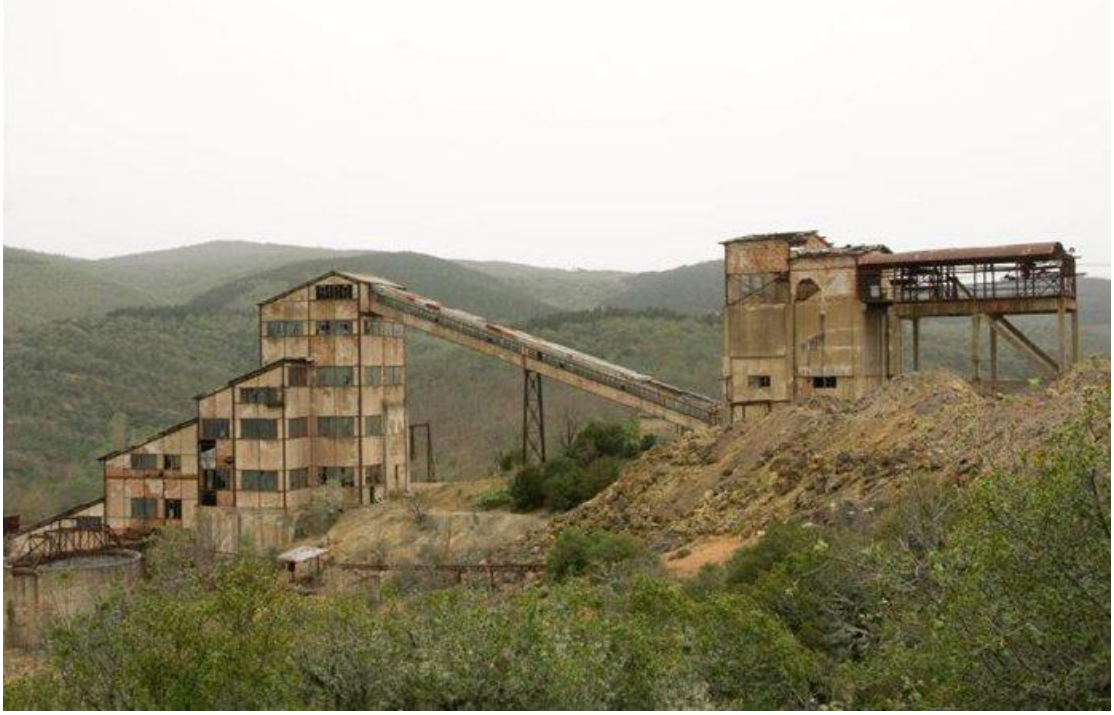
Σχήμα 4.5: Απορροή Στοάς 4
(ΙΓΜΕ 2006)

4.2.2 Κίρκη

Το εργοστάσιο εμπλουτισμού βρίσκεται στο νότιο άκρο του ρέματος Κιρκάλων. Ο σιδηρόδρομος εναέριας μεταφοράς υπάρχει ακόμα, όπως και το εργοστάσιο εμπλουτισμού και η αποθήκη των αντιδραστηρίων. Ο χώρος δυστυχώς δεν φυλάσσεται, συνεπώς άνθρωποι και ζώα έχουν εύκολη πρόσβαση σε τοξικά και επικίνδυνα υλικά.

Έξω από το εργοστάσιο εμπλουτισμού υπάρχουν οχτώ ασκέπαστες λίμνες τελμάτων, οι οποίες διαβρώνονται από το νερό της βροχής, δημιουργώντας όξινη απορροή, πλούσια σε μόλυβδο, ψευδάργυρο, κάδμιο, νικέλιο, κοβάλτιο αλλά και λεπτόκοκκο υλικό. Τα χωράφια στην περιοχή τροφοδοτούνται με αυτό το νερό και επίσης ο άνεμος καθώς και η βροχή μεταφέρουν το λεπτόκοκκο υλικό μακριά.

Τελικός αποδέκτης αυτής την ρύπανσης, αν και αρκετά αραιωμένης, είναι ο κόλπος της Αλεξανδρούπολης. Σε απόσταση πέντε χιλιομέτρων υπάρχει και χωματερή, επιδεινώνοντας την ήδη επιβαρυμένη κατάσταση.



Σχήμα 4.6: Εγκαταλελειμμένο Εργοστάσιο Εμπλουτισμού (antigoldgreece.wordpress.com)

Σχήμα 4.7: Διάβρωση εδάφους στην περιοχή του εργοστασίου

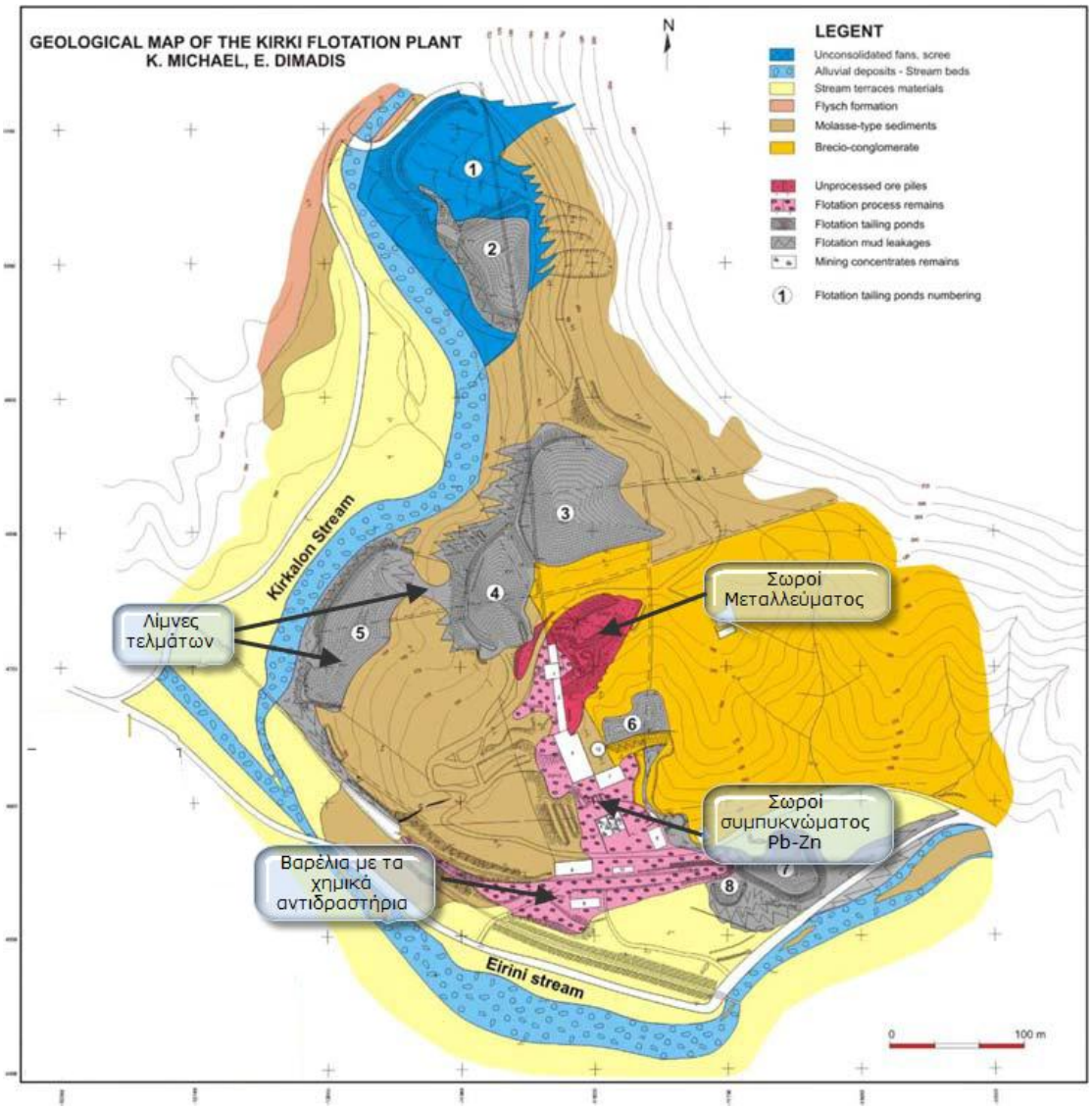
(ΙΓΜΕ 2006)

Σχήμα 4.8: Όξινη Απορροή

(ΙΓΜΕ 2006)

Συνοπτικά, οι πηγές που συνεισφέρουν στη ρύπανση στο εργοστάσιο εμπλουτισμού είναι οι παρακάτω:

1. Οι λίμνες των τελμάτων
2. Οι σωροί μεταλλεύματος
3. Οι σωροί απορριμμάτων σπαστηροτριβείου
4. Οι σωροί συμπυκνωματος Pb/Zn
5. Τα βαρέλια με τα χημικά αντιδραστήρια



Σχήμα 4.9: Γεωλογικός Χάρτης της περιοχής της Κίρκης με τα ρυπασμένα σημεία (ΙΓΜΕ 2006).

Σχήμα 4.10: Το εσωτερικό του εργοστασίου Εμπλουτισμού

*(*www.ideografhmata.gr*)*

Σχήμα 4.11: Σκουριασμένα μηχανήματα εμπλουτισμού

*(*www.ideografhmata.gr*)*

Σχήμα 4.12:Αποθήκη χημικών αντιδραστηρίων

*(*ΙΓΜΕ 2006*)*

Σχήμα 4.13: Αφύλακτα χημικά μέσα στην αποθήκη

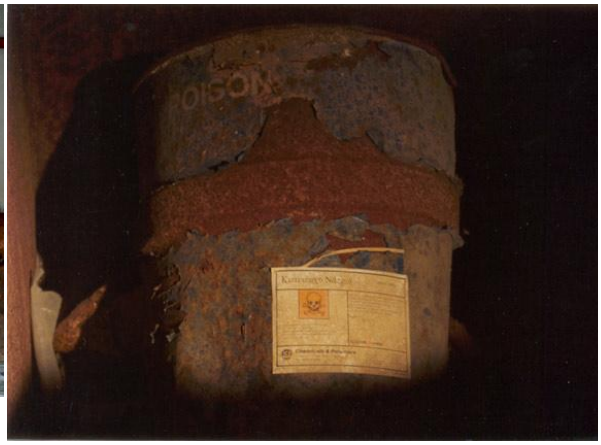
(antigoldgreece.wordpress.com)

Σχήμα 4.14: Το πρόχειρο κανάλι που οδηγούσε τα απόβλητα από το εργοστάσιο εμπλουτισμού στο ποτάμι Ειρήνη

*(*www.ideografhmata.gr*)*

Σχήμα 4.15: Σωροί μεταλλεύματος και απορριμάτων

*(*www.ideografhmata.gr*)*



Σχήμα 4.16: Βαρέλια με τα χημικά αντιδραστήρια

(antigoldgreece.wordpress.com)

4.3 Γεωλογία

Με βάση τα αποτελέσματα λεπτομερούς γεωλογικής χαρτογράφησης (κλίμακα 1: 1000) σε έκταση 300 στρ. που πραγματοποιήθηκε από το ΙΓΜΕ το 2005, στην περιοχή του εργοστασίου εμπλουτισμού της Κίρκης, παρουσιάζονται οι παρακάτω γεωλογικοί σχηματισμοί (Μυλωνά 2007):

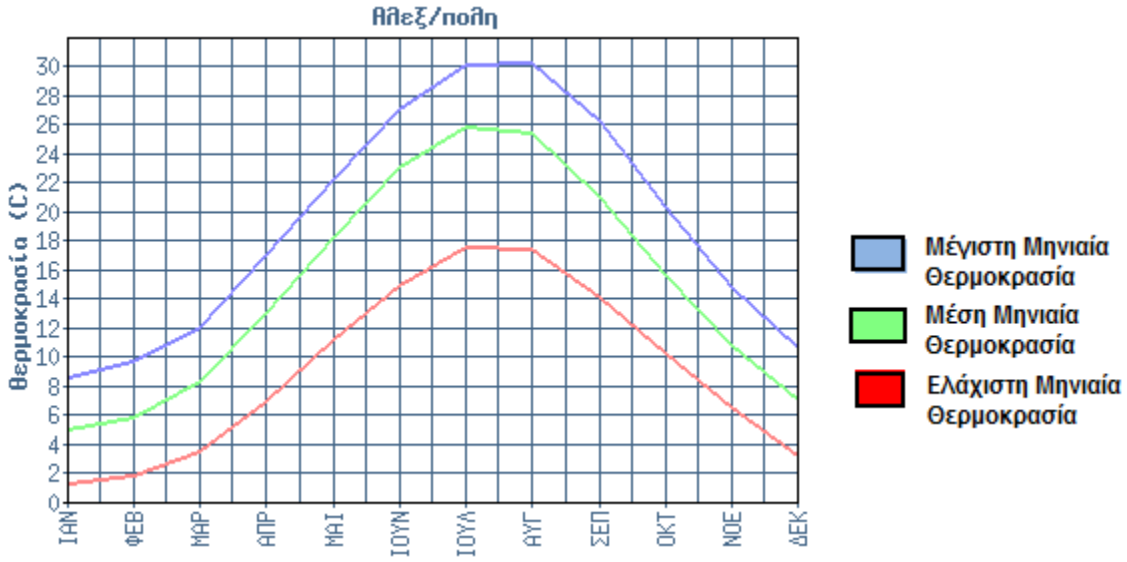
- Βασικά λατυποκροκαλοπαγή: Πρόκειται για συμπαγή και συνεκτικά πετρώματα με πάχος που κυμαίνεται από 120 έως 150 m. Αποτελούν κλαστικό σχηματισμό υλικών διάβρωσης παλαιότερων πετρωμάτων και συνίστανται σε γνεύσιους, λεπτινίτες, γρανιτογνεύσιους, φυλλίτες, χαλαζίτες, γρανίτες κλπ. Επί τόπου δοκιμές που έλαβαν χώρα, οδήγησαν στον υπολογισμό του συντελεστή υδροπερατότητας, ο οποίος βρέθηκε περίπου 1,5-3,5$\times10^{-7}$ m/s (Κωνσταντοπούλου και Λουπασάκης, 2007). Τα πετρώματα αυτού του τύπου χαρακτηρίζονται βραδυδροφόρα (Ρωμαΐδης, 2007).
- Ιζήματα μολασσικής (μεταβατικής σειράς): Η μολασσική σειρά αποτελείται από εναλλαγές πηλιτών (αργιλιτών), ψαμμιτών, μικρολατυποκροκαλοπαγών, μαργαϊκών αποθέσεων και σπανιότερα λεπτών ενστρώσεων λιγνιτών. Το πάχος της μολασσικής σειράς είναι περίπου 100 m. Σε σύγκριση με τα βασικά Άμα συγκρίνουμε τα πετρώματα της μολασσικής σειράς με τα βασικά λατυποκροκαλοπαγή, προκύπτει ότι τα πρώτα είναι λιγότερο συνεκτικά και έχουν μεγαλύτερη υδροπερατότητα, δηλ. 1,2$\times10^{-6}$ m/s (Κωνσταντοπούλου και Λουπασάκης, 2007). Τα πετρώματα αυτά χαρακτηρίζονται επίσης βραδυδροφόρα με μηδαμινή αποθηκευτική ικανότητα (Ρωμαΐδης, 2007).
- Ιζήματα σειράς φλύσχη: Η σειρά φλύσχη χαρακτηρίζεται από εναλλαγές λεπτών ενστρώσεων πηλιτών, ψαμμιτών και μαργών. Τα πετρώματα της σειράς αυτής αποτελούν υδατοστεγή σχηματισμό με το πάχος τους να κυμαίνεται από 200 έως 250 m.
- Αλουβιακοί σχηματισμοί: Συνίστανται σε λεπτόκοκκα αργιλοϊλιώδη υλικά με καστανέρυθρο και κιτρινωπό χρώμα με άμμους, λατύπες και κροκάλες. Οι αλλουβιακοί σχηματισμοί φιλοξενούν τον υπόγειο (φρεάτιο) υδροφορέα της περιοχής. Το πάχος τους υπολογίζεται περίπου 0,5-6 m.
- Σύγχρονες αποθέσεις ρέματος: Αποτελούνται από ασύνδετα υλικά, λατύπες, χαλίκια, κροκάλες και άμμους στην κοίτη του ρέματος.

Η τεκτονική καταπόνηση των πετρωμάτων στην περιοχή του εργοστασίου εμπλουτισμού είναι περιορισμένη. Οι τεκτονικές ζώνες που εντοπίστηκαν έχουν τοπικό χαρακτήρα. Περαιτέρω, η περιοχή χαρακτηρίζεται από ένα αραιό δίκτυο διακλάσεων.

4.4 ΚΛΙΜΑ

Ο πλησιέστερος μετεωρολογικός σταθμός στην περιοχή μελέτης είναι ο σταθμός της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας στην Αλεξανδρούπολη με γεωγραφικό μήκος (Long) $25^0$53’0’, γεωγραφικό πλάτος (Lat) $40^0$51’0’ και ύψος

2.5m. Η θάλασσα επιδρά στο κλίμα της Αλεξανδρούπολης και συνεπώς δεν υπάρχουν ψυχροί μήνες, ενώ η περίοδος Ιουνίου-Σεπτεμβριίου χαρακτηρίζεται ως ξηροθερμική. Οι μέσες μηνιαίες τιμές των περιβαλλοντικών παραμέτρων του μετεωρολογικού σταθμού Αλεξανδρούπολης για την περίοδο 1951-1997 (www.hnms.gr/hnms/greek/climatology) δίνονται στον Πίνακα 4.1. Στο σχήμα 4.17 παρουσιάζεται η μέση, ελάχιστη και μέγιστη μηνιαία θερμοκρασία.



Σχήμα 4.17: Διάγραμμα Θερμοκρασιών για το σταθμό της Αλεξανδρούπολης (www.hnms.gr)

Με βάση τα στοιχεία του Μ.Σ. Αλεξανδρούπολης προκύπτει ότι:

- Η μέση ετήσια θερμοκρασία αέρα είναι 15 oC, με την ελάχιστη μέση μηνιαία θερμοκρασία να εμφανίζεται τον μήνα Ιανουάριο (5,0 oC) και τη μέση μέγιστη μηνιαία να εμφανίζεται το μήνα Ιούλιο (25,8 oC).
- Το μέσο ετήσιο ύψος βροχής ανέρχεται σε 553,2 mm, με υγρότερο μήνα το Νοέμβριο και ξηρότερο μήνα τον Αύγουστο.
- Η μέση μηνιαία τιμή της σχετικής υγρασίας του αέρα, διατηρείται σε σχετικά υψηλά επίπεδα (67,6%) και κυμαίνεται μεταξύ 54,4% τον Ιούλιο-Αύγουστο και 76,9% το Δεκέμβριο.

Πίνακας 4.2: Μέσες μηνιαίες τιμές μετεωρολογικών παραμέτρων, Μ.Σ. Αλεξανδρούπολης (1951-1997)

Μετεωρολογική Παράμετρος	**Ιανουάριος**	**Φεβρουάριος**	**Μάρτιος**	**Απρίλιος**	**Μάιος**	**Ιούνιος**	**Ιούλιος**	**Αύγουστος**	**Σεπτέμβριος**	**Οκτώβριος**	**Νοέμβριος**	**Δεκέμβριος**	**Έτους**
Θερμοκρασία (oC)	5,0	5,9	8,3	13,1	18,3	23,1	25,8	25,4	21,1	15,6	10,8	7,1	15,0
Βροχόπτωση (mm)	61,6	56,5	48,6	39,6	34,7	29,5	19,3	13,0	26,9	50,5	88,0	85,0	553,2
Μέση μηνιαία υγρασία (%)	75,5	73,5	72,4	71,0	68,7	61,0	54,4	54,4	59,9	68,2	75,5	76,9	67,6

Για την παρακολούθηση της βροχόπτωσης στην περιοχή μελέτης, το ΙΓΜΕ έχει εγκαταστήσει βροχόμετρο κοντά στο εργοστασίου εμπλουτισμού σε υψόμετρο 190 m.

4.5 Υδρολογία και υδροχημεία της περιοχής

4.5.1 Κύρια υδρολογικά χαρακτηριστικά

Η ευρύτερη περιοχή του μεταλλείου Αγίου Φιλίππου στην περιοχή της Κίρκης εντάσσεται στην υδρολογική λεκάνη του ρέματος Ειρήνη, η οποία καλύπτει έκταση 229,5 Km2. Μορφολογικά, η λεκάνη διακρίνεται σε τρία τμήματα που περιλαμβάνουν (Ρωμαίδης 2007):

- Το νότιο πεδινό τμήμα (ΝΟ) με επιφάνεια 28,8 Km2 που αποστραγγίζεται από τον κάτω ρου του ποταμού Ειρήνη.
- Το ΒΔ τμήμα, ανάντη της συμβολής του ποταμού Ειρήνη με το ρέμα Απόκρημνο με επιφάνεια 108 Km2.
- Το βόρειο (ΒΟ) τμήμα με άξονα αποστράγγισης το ρέμα Απόκρημνο και επιφάνεια 92,6 Km2.

Στην υδρογεωλογική θεώρηση του έργου ως ευρύτερη περιοχή μελέτης θεωρείται το ΒΔ τμήμα της υδρολογικής λεκάνης του ποταμού Ειρήνη.

Η λεκάνη του ρέματος Κιρκάλων που αποτελεί το βόρειο κλάδο του ποταμού Ειρήνη και στην οποία βρίσκονται το μεταλλείο Αγίου Φιλίππου, οι εγκαταστάσεις

εμπλουτισμού και οι χώροι απόθεσης των μεταλλευτικών απορριμμάτων θεωρείται ως στενή περιοχή μελέτης. Το ρέμα Κιρκάλων έχει μήκος κεντρικού άξονα 7 Km, μέση κλίση >85 %0 και έκταση λεκάνης απορροής 18,5 Km2.

Πίνακας 4.3: Υδρολογικό ισοζύγιο των εξεταζόμενων λεκανών στην περιοχή μελέτης (Ρωμαΐδης, 2007, Μυλωνά 2007)

Λεκάνη	Επιφάνεια S (Km2)	Βροχόπτωση P (mm)	Όγκος βροχόπτωσης VP (×106 m3)	Όγκος απορροής + κατείσδυσης VW (×106 m3)	VW (%)	Εξατμισοδιαπνοή (×106 m3)
Ειρήνη	229,46	661,24	151,73	33,67	22,2	118,06
ΒΔ τμήμα Ειρήνης	108,03	667,49	72,11	16,07	22,3	56,04
Κιρκάλων	18,47	720,20	13,30	3,28	24,6	10,02

4.5.2 Κύρια υδροχημικά χαρακτηριστικά

Στην περιοχή της Κίρκης, η ύπαρξη του μεταλλείου του Αγ.Φιλίππου, λόγω της γεωγραφικής του θέσης, αλλά και της ποσότητας του νερού που διέρχεται από αυτό και από το εργοστάσιο εμπλουτισμού, αποτελεί καθοριστικό παράγοντα στη διαμόρφωση των περιβαλλοντικών παραμέτρων.

Προκειμένου να προσδιοριστεί η ποιότητα των νερών, έγιναν από το ΙΓΜΕ δειγματοληψίες στα επιφανειακά καθώς και στα υπόγεια νερά της στενής και της ευρύτερης περιοχής που καλύπτουν την ξηρή και την υγρή περίοδο. Τα κυριότερα συμπεράσματα είναι τα ακόλουθα:

- ***Επιφανειακά νερά ρέματος Κιρκάλων***

Με βάση τη χημική ανάλυση ως προς τα ιόντα Ca, Mg, HCO3, CO3, SO4 και Cl-, τα δείγματα που συλλέχθηκαν ανάντη του υπαίθριου μεταλλείου και στα παράπλευρα ρέματα χαρακτηρίζονται ως ασβεστοοξυανθρακούχα. Τα δείγματα κατάντη του μεταλλείου χαρακτηρίζονται ως θειοασβεστούχα.

Η αγωγιμότητα των δειγμάτων κυμαίνεται από 319 έως 2002 μS/cm.

Η συγκέντρωση των θειικών ιόντων κυμαίνεται από 47 έως και 1615 mg/l. Μικρότερες τιμές της συγκέντρωσης θειικών (έως και 373 mg/l) έχουν κυρίως τα δείγματα παράπλευρων ρεμάτων. Γενικά παρατηρείται μείωση της συγκέντρωσης των θειικών ιόντων κατά μήκος του ρέματος Κιρκάλων. Η μείωση αυτή αποδίδεται στην καταβύθιση των θειικών ιόντων αρχικά με τη μορφή θειικού μαγνησίου και θειικού νατρίου (δείγματα με pH < 7,0) και στη συνέχεια με τη μορφή γύψου (δείγματα με pH > 7,0). Η απόθεση θειικών αλάτων λαμβάνει χώρα κυρίως κατά τη ξηρή περίοδο, ενώ κατά την υγρή περίοδο είναι πιθανό να λαμβάνει χώρα διαλυτοποίηση αλάτων και μεταφορά τους στα κατάντη.

- ***Επιφανειακά νερά ποταμού Ειρήνη***

Η ποιότητα των νερών του ρέματος Κιρκάλων επηρεάζει άμεσα την ποιότητα των νερών στον ποταμό Ειρήνη. Φορτία σε θειικά ιόντα της τάξης των 10-20 kg/h που μετρήθηκαν σε δείγματα του ρέματος Κιρκάλων πριν τη συμβολή του με τον ποταμό Ειρήνη τον Οκτώβριο 2005 βρέθηκαν και σε δείγματα του ποταμού Ειρήνη. Ο αριθμός δειγμάτων που χαρακτηρίζονται ως θειοασβεστούχα ή ασβεστοοξυανθρακούχα είναι μικρός και για τα περισσότερα δείγματα δεν υπάρχει ιόν που επικρατεί. Επίσης η εξέταση του δείκτη σταθερότητας έδειξε ότι τα περισσότερα δείγματα είναι διαβρωτικά ενώ λίγα ήταν τα δείγματα που παρουσιάζουν τάση για απόθεση αλάτων.

- ***Υπόγεια νερά***

Στοιχεία για την ποιότητα των νερών της ευρύτερης περιοχής μελέτης προέρχονται από τις υδρευτικές γεωτρήσεις της Αλεξανδρούπολης του Άβαντα και της Κίρκης. Με βάση τη χημική ανάλυση ως προς τα ιόντα Ca, Mg, HCO3, CO3, SO4 και Cl- προκύπτει ότι η πλειονότητα των δειγμάτων νερών χαρακτηρίζονται ασβεστοοξυανθρακούχα.

4.6 Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία

Η παρούσα εργασία βασίστηκε στα στοιχεία που συγκεντρώθηκαν στο πλαίσιο της λεπτομερούς μελέτης της περιοχής που πραγματοποιήθηκε από το ΙΓΜΕ. Για τα υδρολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα της υδρογεωλογικής μελέτης του Ρωμαϊδη (2007), η οποία εστιάζει στην ευρύτερη περιοχή του Ρέματος Ειρήνη και της αντίστοιχης λεκάνης απορροής, καθώς και στη στενή περιοχή που αναπτύχθηκε η μεταλλευτική δραστηριότητα, δηλαδή στο Ρέμα Κιρκάλων μέχρι τη συμβολή του με το Ρέμα Ειρήνη, όπου και βρίσκονται οι εγκαταστάσεις εμπλουτισμού.

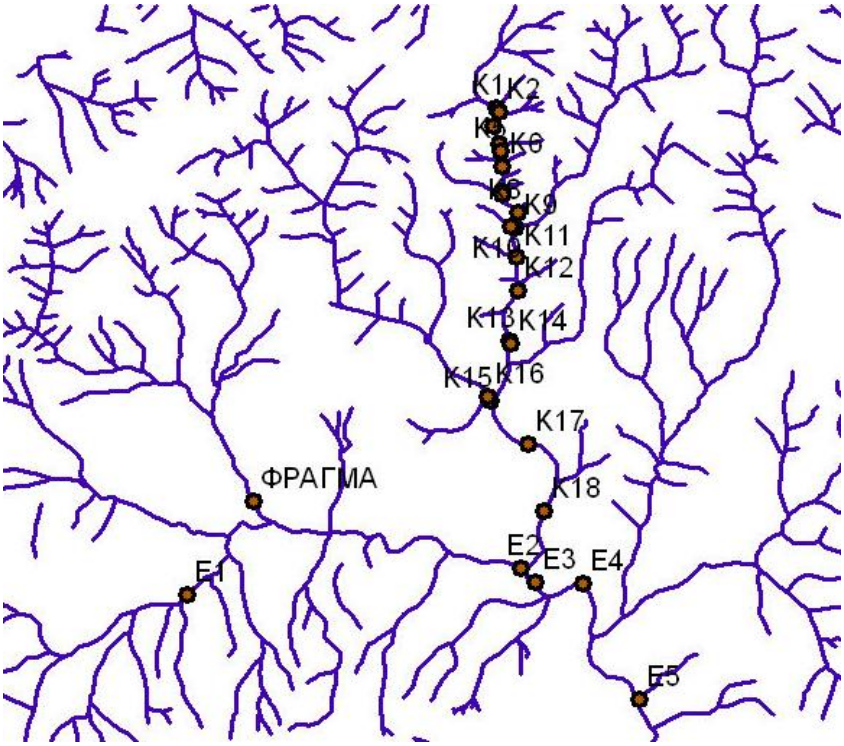
Πιο συγκεκριμένα, στο Ρέμα Κιρκάλων, ακολουθήθηκε από το ΙΓΜΕ η διαδικασία της διαφορικής παρατήρησης επί μήκους 6Km, με την επιλογή 19 κυρίων σημείων παρακολούθησης.

Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και για το Ρέμα Ειρήνη, όπου σε συνολικό μήκος 21 Km, επιλέχθηκαν 12 σημεία παρατήρησης εκ των οποίων τα δύο είναι ανάντη της συμβολής με το ρέμα Κιρκάλων και τα υπόλοιπα κατάντη μέχρι της εκβολής στη θάλασσα ανατολικά της Αλεξανδρούπολης.

Για τις ανάγκες της προσομοίωσης στο πλαίσιο της συγκεκριμένης διπλωματικής αξιοποιήθηκαν τα δεδομένα παροχής σε δύο σημεία του ρέματος Κιρκάλων, Κ12 και Κ17, εννέα σημεία του ρέματος Ειρήνης, Ε2, Ε4, Ε5, Ε6, Ε7, Ε8, Ε9, Ε10 και Ε11, και ένα σημείο, ΑΣ1, στο ρέμα Αισύμης λίγο πριν τη συμβολή του με το ρέμα Κιρκάλων (Σχήμα 4.18). Δεν ενσωματώθηκαν στο SWAT όλα τα σημεία υδρομετρήσεων για να αποφευχθεί ο κατακερματισμός της περιοχής σε υπερβολικά μεγάλο αριθμό λεκανών απορροής, γεγονός που θα επιβάρυνε σημαντικά τον υπολογιστικό χρόνο.

Σχήμα 4.18: Σημεία δειγματοληψίας στη λεκάνη απορροής

(Ρωμαίδης 2007)



Σχήμα 4.19: Σημεία δειγματοληψίας των ρεμάτων Ειρήνης και Κιρκάλων

(Ρωμαίδης 2007)

Παράλληλα με τα παραπάνω σημεία, και για το σκοπό της συγκεκριμένης μελέτης από το ΙΓΜΕ, οι παρατηρήσεις επεκτάθηκαν και σε πηγές και γεωτρήσεις, τόσο στη στενή όσο και στην ευρύτερη περιοχή.

Για την μέτρηση της βροχόπτωσης, εγκαταστάθηκε βροχόμετρο κοντά στο εργοστάσιο εμπλουτισμού σε υψόμετρο 190 m.

Οι παρατηρήσεις της μελέτης του ΙΓΜΕ αφορούν σε μετρήσεις:

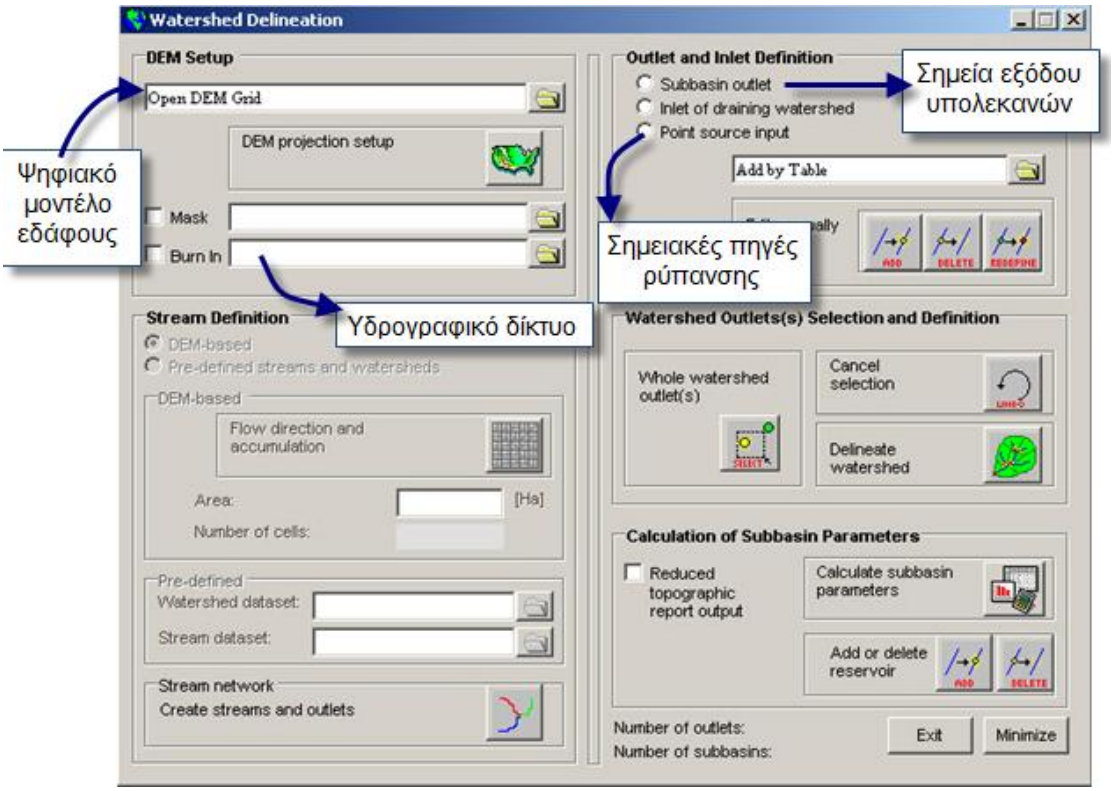
- Παροχής υδρορευμάτων στα επιλεγμένα σημεία κατά μήκος των ρεμάτων Ειρήνης και Κιρκάλων
- Στάθμης νερού και επιφάνειας νερού στην ανοικτή εκσκαφή
- Παροχής πηγών
- Φυσικοχημικών παραμέτρων του νερού
- Ύψους βροχόπτωσης στο εγκατεστημένο βροχόμετρο.

5. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

5.1 Διαμόρφωση λεκάνης απορροής

Στο πρώτο βήμα της διαδικασίας εκτέλεσης του προγράμματος (**Automatic watershed delineation**), ο χρήστης έρχεται σε επαφή με το μενού του σχήματος 5.2, όπου εισάγει το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, το υδρογραφικό δίκτυο, τα σημεία εξόδου των υπολεκανών, και τις σημειακές πηγές ρύπανσης.

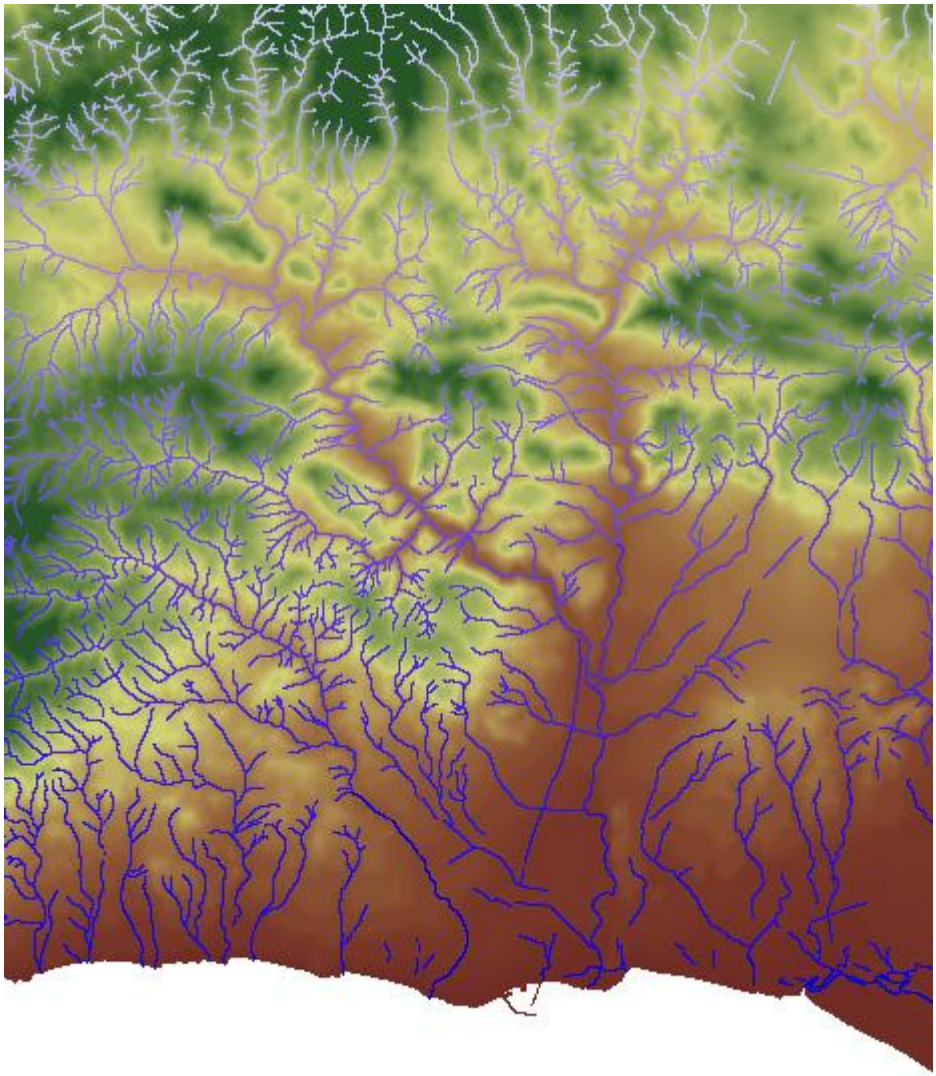
Σχήμα 5.1: Automatic watershed delineation



Σχήμα 5.2: Εισαγωγή Δεδομένων στο πρώτο βήμα της προσομοίωσης

5.1.1 Ψηφιακό μοντέλο εδάφους και υδρογραφικό δίκτυο

Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους πρέπει να έχει προκαθορισμένο σύστημα προβολής, προκειμένου να εισαχθεί με επιτυχία στο μοντέλο. Στην παρούσα εργασία το σύστημα προβολής που χρησιμοποιήθηκε ήταν το GRS_1980_Transverse Mercator.



Σχήμα 5.3: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους και υδρογραφικό δίκτυο

5.1.2 Σημεία εξόδου υπολεκανών

Για την διαμόρφωση της λεκάνης απορροής, επιλέξαμε ορισμένα από τα σημεία δειγματοληψίας παλαιότερης υδρογεωλογικής μελέτης που περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο (Ρωμαίδης, 2007) και τα ορίσαμε ως σημεία εξόδου των υπολεκανών, προκειμένου να συγκρίνουμε τα υπάρχοντα παρατηρημένα δεδομένα με τα προσομοιωμένα αποτελέσματα.

Τα Σημεία δειγματοληψίας που θεωρήσαμε είναι τα παρακάτω:

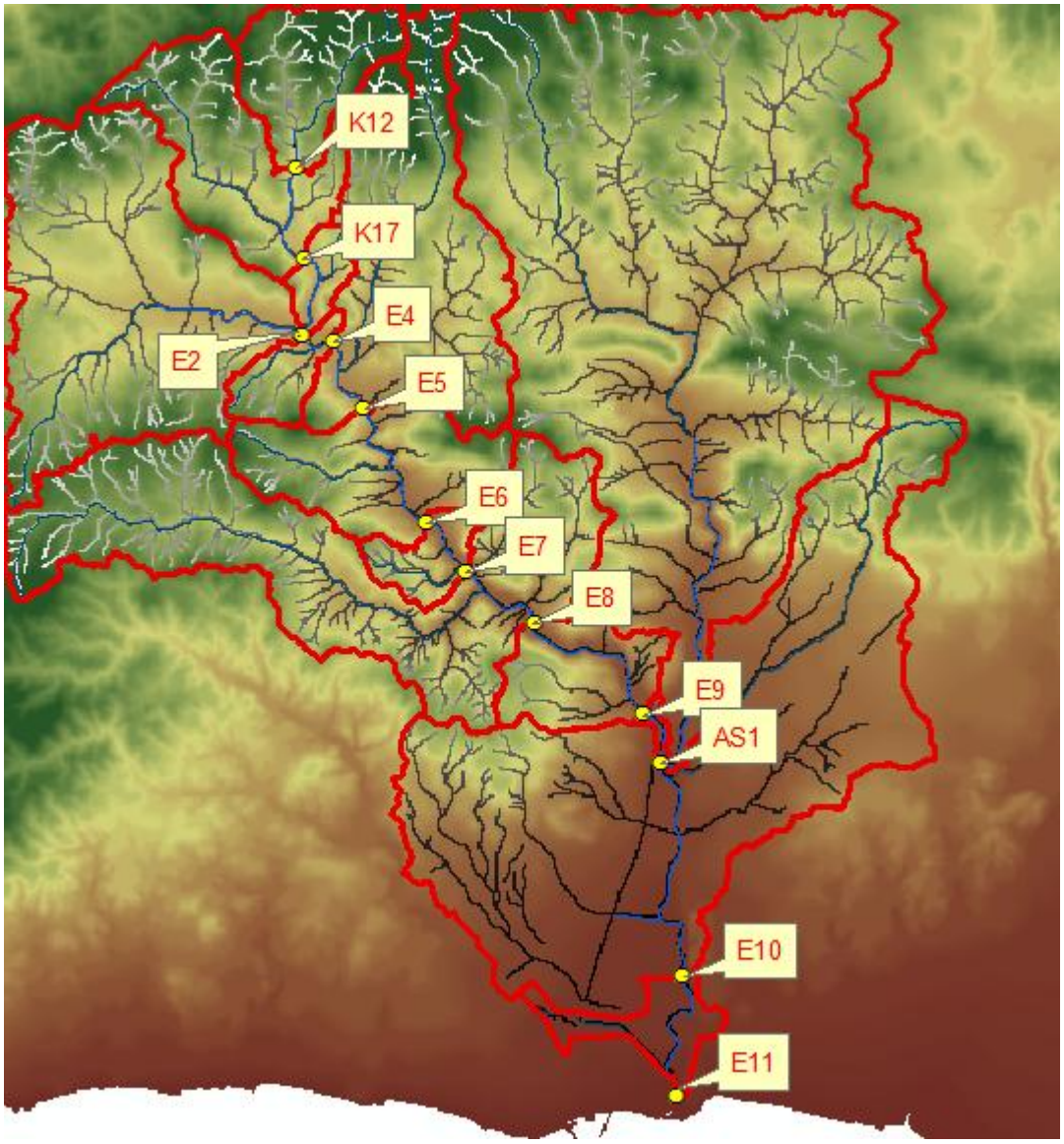
Κ12, Κ17, Ε2, Ε4, Ε5, Ε6, Ε7, Ε8, Ε9, ΑΣ1, Ε10, Ε11

Οι συντεταγμένες τους φαίνονται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 5.1: Συντεταγμένες σημείων δειγματοληψίας

Συντεταγμένες	**Xegsa**	**Yegsa**
Κ12	653279	4539993
Κ17	653394.5	4538382
Ε2	653314.4	4537069
Ε4	653942.1	4536895
Ε5	654526.8	4535682
Ε6	655602.1	4533613
Ε7	656327.1	4532746
Ε8	657531	4531815
Ε9	659520.5	4530176
ΑΣ1	659832	4529322
Ε10	660261.9	4525472
Ε11	660141.4	4523473

Και συνεπώς σχηματίστηκαν οι υπολεκάνες όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 5.4: Υπολεκάνες

5.2 Σημειακές πηγές ρύπανσης

Σε αυτό το σημείο της προσομοίωσης τοποθετούμε τις σημειακές πηγές πάνω στο χάρτη και στη συνέχεια από το μενού **Edit SWAT Input<Point Source Discharges**, καθορίζουμε τη μαζική ροή των ρύπων για κάθε πηγή ρύπανσης.

Η προσομοίωση εστιάστηκε σε τρείς ρύπους, δηλ. τον Zn, το Pb και το Cd. Τα τρία αυτά στοιχεία επελέγησαν με βάση τα κύρια συμπεράσματα της μελέτης γεωχημικού χαρακτηρισμού στείρων εξόρυξης και τελμάτων εμπλουτισμού που πραγματοποιήθηκε από το Εργαστήριο Μεταλλουργίας του ΕΜΠ για λογαριασμό του ΙΓΜΕ (Εργ. Μεταλ. ΕΜΠ, 2007). Η μελέτη αυτή είχε δείξει ότι τα συγκεκριμένα μεταλλευτικά απορρίμματα που βρίσκονται αποτεθειμένα στην περιοχή των

μεταλλείων Αγ. Φιλίππου και του Εργοστασίου Εμπλουτισμού Κίρκης παρουσιάζουν υψηλή εκχυλισιμότητα κυρίως ως προς τα τρία αυτά στοιχεία.

Έτσι, θεωρήσαμε ότι η ρύπανση από το μεταλλείο του Αγίου Φιλίππου, το εργοστάσιο εμπλουτισμού της Κίρκης και τις άλλες διάσπαρτες πηγές, συσσωρεύεται ουσιαστικά σε δύο σημεία: πάνω από το Κ12 και ανάμεσα στο Ε2 και το Ε4.

- Στο πρώτο σημείο (**Α**) συγκεντρώνεται η ρύπανση που προέρχεται από το μεταλλείο του Αγίου Φιλίππου και πιο συγκεκριμένα από: τη λίμνη της ανοιχτής εκσκαφής, το σωρό των στείρων και των απορριμάτων και την απορροή της στοάς 4.
- Στο δεύτερο σημείο (**Β**) συγκεντρώνεται η ρύπανση από τον Άγιο Φίλιππο και το εργοστάσιο εμπλουτισμού της Κίρκης, δηλαδή από: τις λίμνες τελμάτων, τις σωρούς του μεταλλεύματος και αυτές των απορριμμάτων του σπαστηροτριβείου και του συμπυκνώματος Pb–Zn και τέλος τα βαρέλια με τα χημικά αντιδραστήρια.

Σχήμα 5.5: Σημειακές πηγές ρύπανσης

Θεωρήθηκε ότι οι ρύποι αποδεσμεύονται από τις δύο πηγές με σταθερό μέσο μαζικό ρυθμό ροής (kg/d). Η μαζική ροή για τους τρεις ρύπους προσδιορίστηκε με διαδοχικές δοκιμές προσομοίωσης, έτσι ώστε να υπάρχει αντιστοιχία των προσομοιωμένων τιμών με τις παρατηρημένες, στα σημεία Κ12 και Ε4, με βάση τη δειγματοληψία Δεκεμβρίου 2005.

Τελικά, και μετά από πλήθος δοκιμών, καταλήξαμε στα δεδομένα εισόδου για την κάθε πηγή, τα οποία και είναι:

Α. Για τον Άγιο Φίλιππο:

- Zn=45.47685 kg/d
- Pb=0.016981 kg/d
- Cd=0.5 kg/d

Β. Για την Κίρκη:

- Zn=1 kg/d
- Pb=0.566627 kg/d
- Cd=0.10761 kg/d

5.3 Χρήσεις γης, τύποι και κλίσεις εδαφών

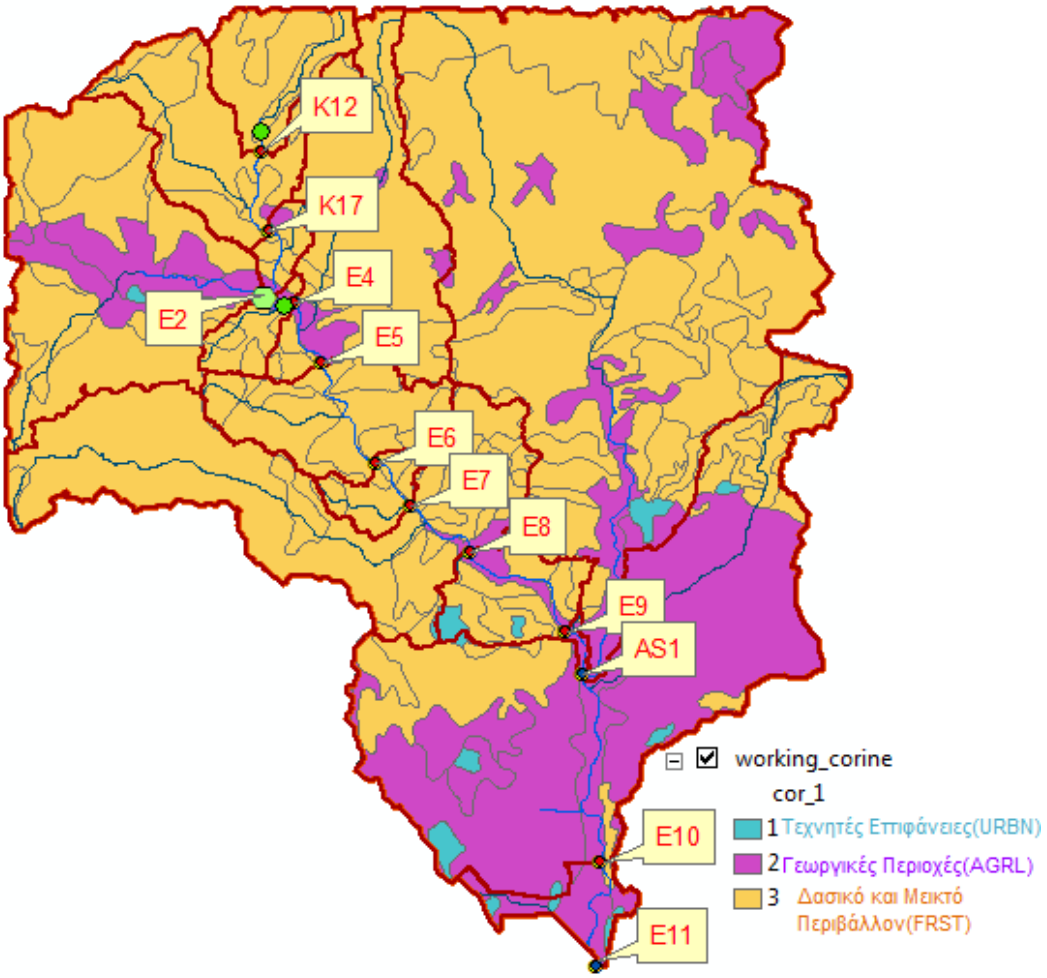
Στο δεύτερο βήμα της διαδικασίας εκτέλεσης του προγράμματος, ο χρήστης επιλέγει **Land Use/Soils/Slope Definition** και έρχεται σε επαφή με το μενού του σχήματος 5.6. Σε αυτό το σημείο εισάγει τα ψηφιακά αρχεία χρήσεων γης, τύπων εδαφών και επιπροσθέτως καθορίζει τις κατηγορίες των κλίσεων μέσα στην λεκάνη απορροής και το εύρος κάθε κατηγορίας.

Σχήμα 5.6: Land Use/Soils/Slope Definition

Σημειώνεται ότι τα αρχεία που εισάγει ο χρήστης πρέπει να είναι σε μορφή grid ή shapefile. Τα shape files μετατρέπονται αυτόματα σε grid.

5.3.1 Χρήσεις γης

Οι χρήσεις γης προκύπτουν από το αρχείο Corine, το οποίο και είναι διαθέσιμο για όλη την Ελλάδα. Στον παρακάτω χάρτη εμφανίζονται οι χρήσεις γης μετά από επεξεργασία και ομαδοποίηση.



Σχήμα 5.7: Κατανομή χρήσεων γης

5.3.2 Τύποι εδαφών

Οι τύποι εδαφών προκύπτουν από υδρολιθολογικούς χάρτες, αφού πρώτα τους έχουμε περιορίσει στη λεκάνη απορροής.

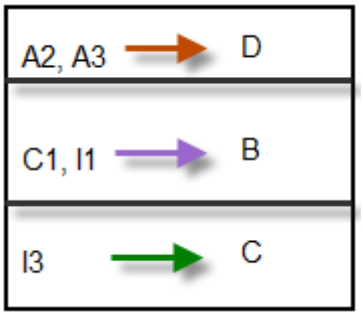
Το υπόμνημα του υδρολοθολογικού χάρτη που χρησιμοποιήσαμε φαινεται στην εικόνα 5.8. Από αυτό ομαδοποιήσαμε τα στοιχεία της στήλης Code με βάση τα αμερικάνικα πρότυπα (Σχήμα 5.9). Στη συνέχεια, αντιστοιχήσαμε κάθε τύπο

εδάφους του χάρτη με ένα έδαφος από τη βάση δεδομένων του SWAT, με την ιδια υδροπερατότητα. Λόγω έλλειψης στοιχείων, δεν μπορούσαμε να κάνουμε αυτή την αντιστοίχιση βασιζόμενοι σε περισσότερα κριτήρια. Συνεπώς, έπειτα από αρκετές δοκιμές και τρεξίματα του μοντέλου, θεωρήσαμε ότι τα εδάφη που ταιριάζουν καλύτερα στη λεκάνη απορροής που μελετάμε, είναι τα παρακάτω:

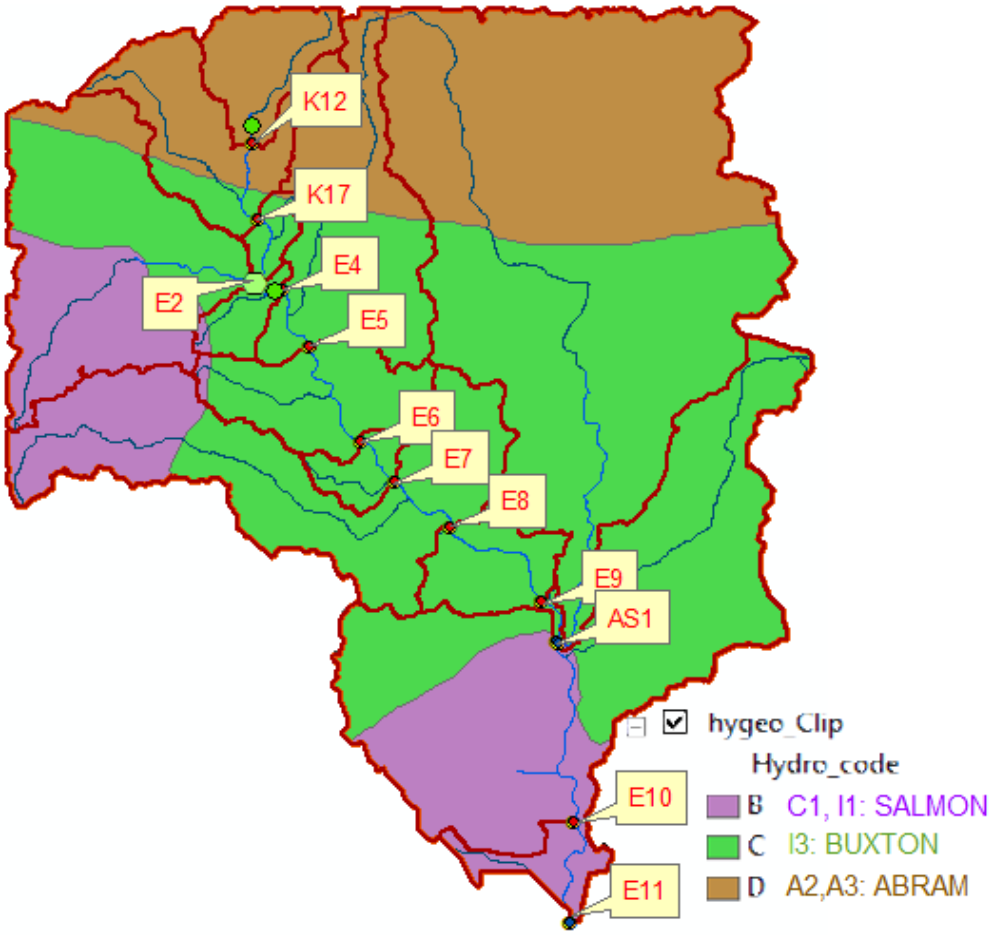
- **SALMON**: Το έδαφος με υδροπερατότητα C1, I1(υπόμνημα), δηλαδή B(Αμερικάνικα πρότυπα)
- **ABRAM**: Το έδαφος με υδροπερατότητα A2,A3(υπόμνημα), δηλαδή D(Αμερικάνικα πρότυπα)
- **BUXTON:** Το έδαφος με υδροπερατότητα I3(υπόμνημα), δηλαδή C(Αμερικάνικα πρότυπα)

"Rowid_"	"ID"	"CODE"	"SYMBOL"	"CATEGORY"	"TITLE"	"TEXT_"
	1,000000	"A"	85	"ΑΔΙΑΠΕΡΑΤΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ"	" "	" "
	2,000000	"A1"	86	"ΑΔΙΑΠΕΡΑΤΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ"		"- φλύσχης"
	3,000000	"A2"	101	"ΑΔΙΑΠΕΡΑΤΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ"		"- Μεταμορφωμένα πετρώματα"
	4,000000	"A3"	113	"ΑΔΙΑΠΕΡΑΤΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ"		"- πλουτωνια και ηφαιστειακά πετρώματα."
	5,000000	"C"	52	"ΚΑΡΣΤΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ"	"- Ασβεστόλιθοι και μαρμαρα εκτεταμενης αναπτυξης, μέτριας εως υψηλης	
	6,000000	"C1"	67	"ΚΑΡΣΤΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ"	"- Αβεστόλιθοι και μαρμαρα περιορισμενης αναπτυξης, κυμαινομενης υδρ	
	7,000000	"C1'"	73	"ΚΑΡΣΤΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ"	"- Τριαδικά ασβεστολιθικά λατυποπαγή της Ιονίου ζωνης, μικρης εως μέτρ	
	8,000000	"I"	104	"ΠΟΡΩΔΕΙΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ"	" "	" "
	9,000000	"I1"	82	"ΠΟΡΩΔΕΙΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ"	"- Κοκκώδεις προσχωματικές αποθέσεις κυμαινόμενης υδροπερατότητας"	
	10,000000	"I2"	83	"ΠΟΡΩΔΕΙΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ"	"- Κοκκώδεις μη προσχωματικές αποθέσεις μέτριας εως πολύ μικρης υδροπε	
	11,000000	"I3"	84	"ΠΟΡΩΔΕΙΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ"	"- Κοκκώδεις μολασσικές αποθέσεις σχετικά μικρης υδροπερατότητας"	

Σχήμα 5.8: Υπομνημα Υδρολιθολογικού χάρτη



Σχήμα 5.9: Ομαδοποίηση κωδικών με βάση τα Αμερικάνικα πρότυπα

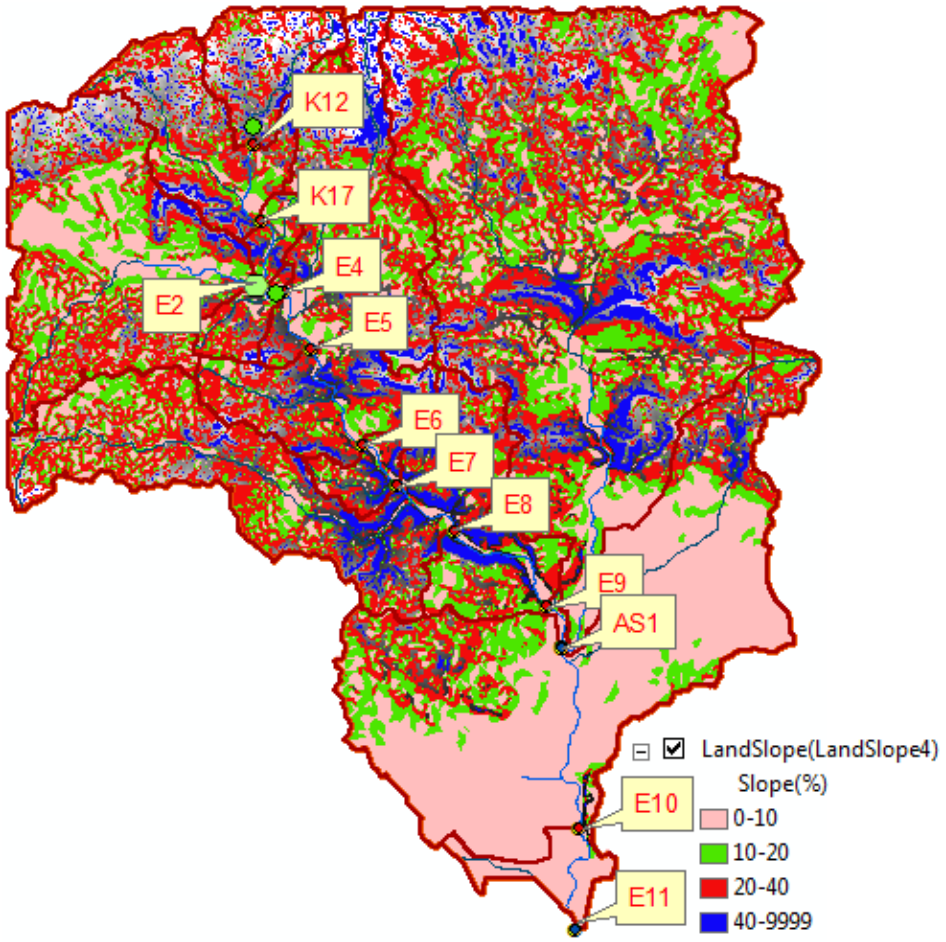


Σχήμα 5.10: Χάρτης Τύπων εδαφών

5.3.3 Κλίσεις εδάφους

Η κλίση των εδαφών παίζει σημαντικό ρόλο στην κίνηση του νερού, καθώς και στη διάβρωση εδαφών και τη συμπαράσυρση θρεπτικών και ρύπων. Το μοντέλο υπολογίζει μόνο του τις κλίσεις με βάση ανάγλυφο της περιοχής, δηλαδή από τις ισοϋψείς καμπύλες του ψηφιακού μοντέλου εδάφους. Ο χρήστης καθορίζει μόνο τις κατηγορίες κλίσεων. Στην παρούσα εργασία, ορίσαμε τέσσερις κατηγορίες κλίσεων:

1. Από 0 έως 10%
2. Από 10 έως 20%
3. Από 20 έως 40 %
4. Από 40% και πάνω



Σχήμα 5.11: Χάρτης Κλίσεων εδάφους

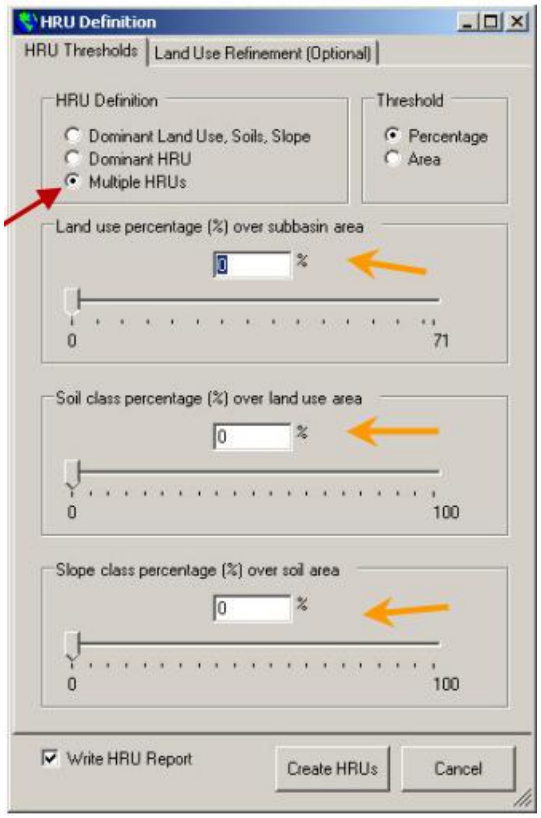
5.4 Μονάδες υδρολογικής απόκρισης

Η επιλογή **HRU DEFINITION** ανοίγει το μενού του σχήματος 5.12. Σε αυτό το σημείο ο χρήστης καθορίζει τα κριτήρια με βάση τα οποία θα κατανεμηθούν οι μονάδες υδρολογικής απόκρισης.

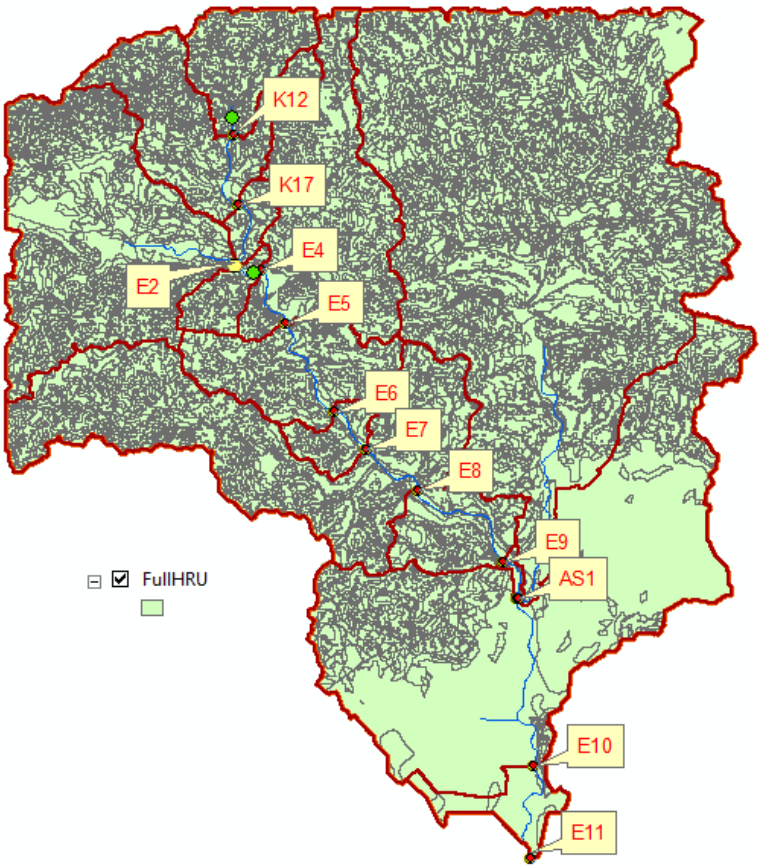
Έχει δύο επιλογές: Να ορίσει μια μονάδα υδρολογικής απόκρισης σε κάθε υπολεκάνη ή να ορίσει περισσότερες. Σε περίπτωση που ο χρήστης επιλέξει να ορίσει μια μονάδα υδρολογικής απόκρισης, τότε αυτή θα καθοριστεί από το συνδυασμό των επικρατέστερων χρήσεων γης, τύπων εδαφών και κλίσεων μέσα στην υπολεκάνη. Εάν ο χρήστης επιλέξει να ορίσει περισσότερες υδρολογικές μονάδες μέσα σε κάθε υπολεκάνη, τότε επιλέγει και πόσο λεπτομερής θα είναι η δημιουργία τους.

Στην συγκεκριμένη εργασία εισαγάγαμε και στα τρια κελιά του σχήματος 5.12 την τιμή 15%(Όσο πιο χαμηλές τιμές επιλέξει ο χρήστης, τόσο πιο κατανεμημένο είναι το μοντέλο, δηλαδή τόσο πιο λεπτομερής θα είναι η δημιουργία μονάδων

υδρολογικής απόκρισης). Τελικά, στην λεκάνη απορροής δημιουργήθηκαν 185 μονάδες υδρολογικής απόκρισης.



Σχήμα 5.12: Μονάδες υδρολογικής απόκρισης



Σχήμα 5.13:Χάρτης με τις μονάδες υδρολογικής απόκρισης

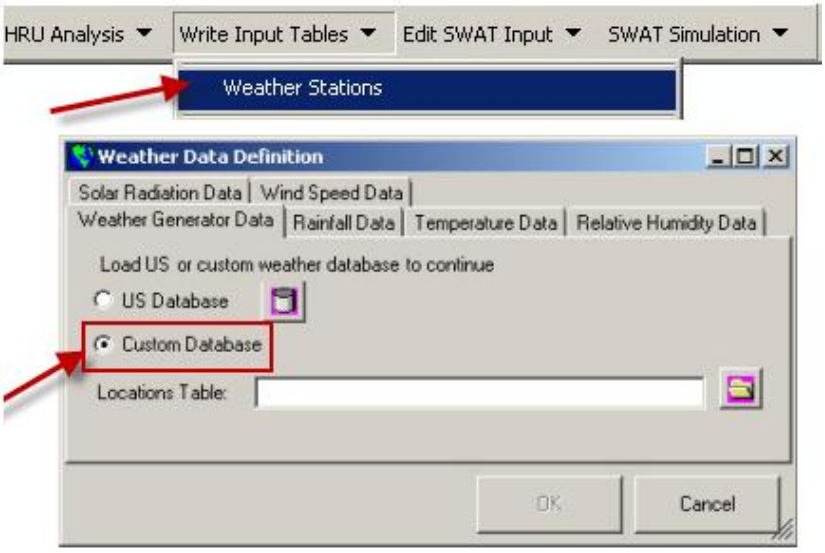
5.5 Μετεωρολογικά δεδομένα

Στο κεντρικό μενού του SWAT, ο χρήστης αρχικά επιλέγει **Write Input Tables** και στη συνέχεια **Weather Stations .** Στο νέο παράθυρο που ανοίγει (Σχήμα 5.14) εισάγει τα δεδομένα θερμοκρασίας, βροχόπτωσης, ηλιακής ακτινοβολίας, σχετικής υγρασίας και ηλιοφάνειας. Το πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα προσομοίωσης των παραπάνω δεδομένων ή εισαγωγής τους από πίνακες που έχει κατασκευάσει ο χρήστης.

Πιο συγκεκριμένα, στην πρώτη καρτέλα με τίτλο **Weather Generator Data,** εισάγουμε πίνακα(σε μορφή .dbf) με τις συντεταγμένες του μετεωρολογικού σταθμού της Αλεξανδρούπολης(σε decimal degrees). (*Πίνακας 5.2)*

Το πρόγραμμα παίρνει τα μετεωρολογικά και τα κλιματολογικά δεδομένα για το σταθμό που εισάγαμε από τη βάση δεδομένων SWAT2005.mdb (C:\Program Files\Swat\ArcSWAT\Databases) και γι αυτό ο χρήστης πρέπει να έχει επεξεργαστεί από πριν τον πίνακα Userwgn που περιέχεται σε αυτή.

Στην συγκεκριμένη εργασία, συμπληρώσαμε τα δεδομένα του πίνακα userwgn με δεδομένα από το ΙΓΜΕ(Ρωμαίδης, 2007) και τη βοήθεια της ιστοσελίδας www.weatheronline.co.uk/, μετά από επεξεργασία των διαγραμμάτων και υπολογισμό των τυπικών αποκλίσεων. (Weather maps<Europe<Greece<Alexandroupoli<History)

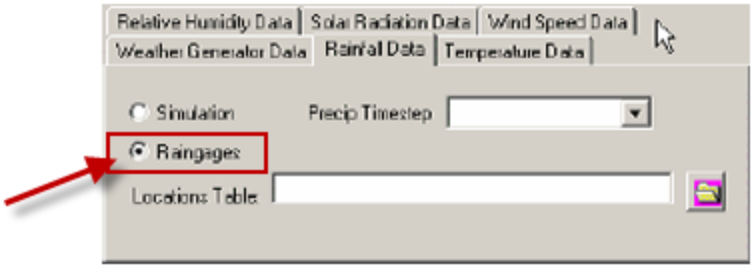


Σχήμα 5.14: Εισαγωγή πίνακα με τις συντεταγμένες του μετεωρολογικού σταθμού της Αλεξανδρούπολης

Πίνακας 5.2: Weather Generator Data(Custom Database)-Συντεταγμένες σταθμού Αλεξανδρούπολης

	A	B	C	D
1	ID	NAME	LONG	LAT
2	1	alex	25.87998	40.85817

Στη δεύτερη καρτέλα με τίτλο Rainfall Data (Σχήμα 5.15), εισάγουμε πινακα(σε μορφή .dbf) με τις συντεταγμένες του βροχομετρικού σταθμού (σε decimal degrees) και το υψόμετρο αυτού(σε μέτρα). Θεωρήσαμε βροχομετρικό σταθμό κοντά στο εργοστάσιο εμπλουτισμού της Κίρκης και σε υψόμετρο 190m (Ρωμαίδης, 2007) (*Πίνακας 5.3).*



Σχήμα 5.15:Εισαγωγή συντεταγμένων του βροχομετρικού σταθμού της Κίρκης

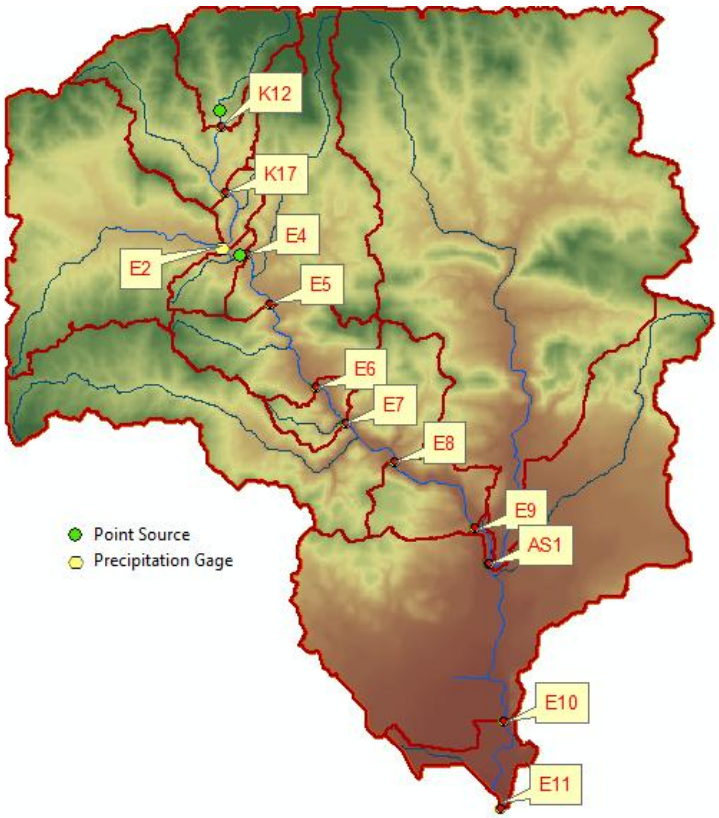
Πίνακας 5.3: Rainfall Data(Custom Database)- Συντεταγμένες σταθμού Κίρκης

	A	B	C	D	E
1	ID	NAME	LAT	LONG	ELEVATION
2	1	alexpcp	40.96982	25.822598	190

Ο πίνακας αυτός, συνδέεται με ένα αρχείο που έχουμε κατασκευάσει (με όνομα alexpcp.dbf). Σε αυτό καταγράφονται οι ημερήσιες βροχοπτώσεις για το όλο το χρονικό διάστημα της προσομοίωσης. Για τη συμπλήρωση αυτού του πίνακα συμβουλευτήκαμε και πάλι τη μελέτη του Ρωμαίδη, καθώς και την ιστοσελίδα www.weatheronline.co.uk/. Ένα μέρος του αρχείου παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα.

DATE	PCP
1/1/2002	0.0
1/2/2002	0.0
1/3/2002	0.0
1/4/2002	0.0
1/5/2002	0.0
1/6/2002	0.0
1/7/2002	0.0
1/8/2002	0.0
1/9/2002	0.0
1/10/2002	0.0
1/11/2002	0.0
1/12/2002	0.0
1/13/2002	0.0
1/14/2002	0.0
1/15/2002	0.0
1/16/2002	0.0
1/17/2002	5.0
1/18/2002	8.0
1/19/2002	3.0
1/20/2002	0.0

Σχήμα 5.16: Μέρος του αρχείου alexpcp.dbf με τις καταγεγραμμένες ημερήσιες βροχοπτώσεις.



Σχήμα 5.17: Βροχομετρικος σταθμος

5.6 Σύνοψη δεδομένων ροών

Πινάκας 5.4: Δεδομένα Ροών

Δεδομένα Ροών(σε m3/h)							
	Κ12	**Κ17**	**Ε8**	**Ε9**	**ΑΣ1**	**Ε10**	**Ε11**
Ιούνιος 05	20	20	43.8	87.0	30.11	41.60	72.34
Ιούλιος 05	20	20	-	-	-	-	-
Αύγουστος 05	25	25	-	-	-	-	-
Σεπτέμβριος 05	20	20	-	-	-	-	-
Οκτώβριος 05	25	25	-	-	-	-	-
Νοέμβριος 05	25	450	1883	2027	2318	4031	4345.00
Δεκέμβριος 05	70	150	1250	988	676	1781	1664.00
Ιανουάριος 06	180	370	2000	2200	2200	5000	4400.00
Φεβρουάριος 06	225	360	2000	2200	2700	5000	4900.00
Μάρτιος 06	**1433**	**3024**	**10500**	**12000**	**14700**	**22500**	**26700.00**
Απρίλιος 06	150	350	2000	2200	2200	4900	4400.00
Μάϊος 06	95	120	1000	600	600	1000	1200.00
Ιούνιος 06	25	30	-	-	-	-	-
Ιούλιος 06	20	20	-	-	-	-	-

5.7 Σύνοψη δεδομένων ρύπανσης

Πίνακας 5.5: Δεδομένα Ρύπανσης

Συγκεντρώσεις(Δεκέμβριος 2005)			
	Zn	**Pb**	**Cd**
	μg/l	μg/l	μg/l
Κ12	13600	5	140
Κ17	9000	2.5	85
Ε4	2700	38	30
Ε5	1500	2.5	16
Ε6	1200	2.5	12
Ε7	900	2.5	10
Ε8	700	2.5	8
Ε9	430	2.5	2.5
Ε10	150	2.5	2.5
Ε11	120	2.5	2.5

Δεδομένα της ρύπανσης σε τέσσερεις χρονικές στιγμές (Ιούνιος 2005, Ιούλιος 2005, Σεπτέμβριος 2005 και Δεκέμβριος 2005) υπάρχουν κυρίως για τα σημεία δειγματοληψίας κατά μήκος του ρέματος Κιρκάλων. Πλήρη δεδομένα για όλα τα

σημεία, τόσο κατά μήκος του ρέματος Κιρκάλων όσο και του ρέματος Ειρήνης, υπάρχουν από τις δειγματοληψίες που πραγματοποιήθηκαν το Δεκεμβρίου του 2005, και είναι τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στη διπλωματική εργασία. Οι τιμές που αφορούν τις συγκεντρώσεις Zn, Pb και Cd δίνονται στον Πίνακα 5.5.

5.8 Αρχεία εισαγωγής δεδομένων

Μετά την εισαγωγή των μετεωρολογικών δεδομένων, χρησιμοποιούμε την επιλογή **Write All**, προκειμένου να δημιουργηθούν τα αρχεία εισαγωγής δεδομένων(**Input Files**). Το πλήθος κάθε τύπου αρχείου είναι ίσο με τον αριθμό των υπολεκανών(στη συγκεκριμένη εργασία η λεκάνη απορροής υποδιαιρέθηκε σε 14 υπολεκάνες).

Τα αρχεία εισαγωγής δεδομένων είναι τα παρακάτω(*Neitsch et al. 2004):*

- Αρχεία υπόγειου νερού(.gw)
- Αρχεία υ*δρολογικών μονάδων απόκρισης (.hru)*
- Αρχείο υφιστάμενων η/και συνθετικών χρονοσειρών μετεωρολογικών παραμέτρων (.wgn)
- Αρχεία υδατορεύματος (.rte)
- Αρχεία διαχείρισης νερού (.wus)
- Αρχεία υπολεκανών (.sub)
- Αρχεία εδάφους (.sol)
- Αρχεία χημικών χαρακτηριστικών εδάφους (.chm)
- Αρχεία διαχείρισης (.mgt)
- Αρχεία αναχωμάτων (.pnd)
- Αρχεία ποιοτικών χαρακτηριστικών υδατορεύματος (.swq)
- Αρχεία ταμιευτήρα (.rsv)

5.8.1 Αρχεία υπόγειου νερού (.gw)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί το SWAT κατηγοριοποιεί τους υπόγειους υδροφορείς στον φρεάτιο και στον βαθύ υδροφορέα. Το νερό που κινείται στον φρεάτιο υδροφορέα επανατροφοδοτεί τα επιφανειακά υδατορεύματα ενώ αυτό που κινείται στο βαθύ υδροφορέα τροφοδοτεί τα επιφανειακά υδατορεύματα εκτός λεκάνης απορροής. Πάνω από τον φρεάτιο υδροφορέα βρίσκεται η ακόρεστη ζώνη καθώς και τα εδαφικά στρώματα. Τα αρχεία gw ρυθμίζουν την κίνηση του υπόγειου νερού μέσα σε αυτές τις στρώσεις, αλλά και από την μία στρώση στην άλλη.

Οι κυριότερες παράμετροι των αρχείων υπόγειου νερού είναι οι εξής:

- **SHALLST:** Το αρχικό βάθος νερού στον φρεάτιο υδροφορέα κατά την έναρξη της προσομοίωσης.
- **DEEPST:** Το αρχικό βάθος νερού στο βαθύ υδροφορέα κατά την έναρξη της προσομοίωσης.
- **GW_DELAY:** *Χρόνος υστέρησης υπόγειου νερού.* Το νερό αφού κινηθεί μέσω της διήθησης και της κίνησης μέσω εδαφικών ρωγμών μέχρι το τελευταίο εδαφικό στρώμα του εδαφικού προφίλ στη συνέχεια κινείται εντός της ακόρεστης ζώνης πριν φθάσει στον φρεάτιο υδροφορέα. Η **χρονική** διάρκεια μεταξύ της εξόδου του νερού από το τελευταίο εδαφικό στρώμα μέχρι να φτάσει στον φρεάτιο ορίζοντα ορίζεται ως χρόνος υστέρησης υπόγειου νερού. Εξαρτάται από το βάθος της πιεζομετρικής γραμμής και τις υδραυλικές ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών και εκφράζεται σε ημέρες.
- **ALPHA_BF:** *Παράγοντας Άλφα ή σταθερά υστέρηση βασικής ροής.* Εκφράζει την ανταπόκριση της υπόγειας ροής σε μεταβολές της επαναπλήρωσης. Κυμαίνεται από 0 έως 1 με τις μικρές τιμές να εκφράζουν αργή ανταπόκριση.
- **GWQMN:** Το κατώφλι ύψους νερού (mm H2O) στον αβαθή υδροφορέα που απαιτείται προκειμένου να ξεκινήσει η επιστρέφουσα υπόγεια ροή. Όταν το βάθος του νερού στον αβαθή υδροφορέα ξεπερνιέται, λαμβάνει χώρα ροή προς το υδατόρευμα.
- **GWREVAP:** *Συντελεστής επανατροφοδότησης.* Είναι ο συντελεστής που ρυθμίζει τη ροή του νερού από τον ρηχό υδροφορέα προς τη ριζική ζώνη λόγω έλλειψης εδαφικής υγρασίας και πρόσληψης νερού από τα φυτά με βαθιές ρίζες. Κυμαίνεται μεταξύ 0.02 και 0.2 και μικρές τιμές περιορίζουν το φαινόμενο.
- **REVAPMN:** *Όριο επανατροφοδότησης νερού.* Πρόκειται για το ελάχιστο ύψος νερού σε mm στο φρεάτιο υδροφορέα που απαιτείται για την κίνηση του νερού τόσο στην ακόρεστη ζώνη όσο και προς τον βαθύ υδροφορέα.
- **RCHGR_DP:** *Κλάσμα νερού στον βαθύ υδροφορέα.* Εκφράζει το κλάσμα νερού της ριζικής ζώνης (του εδαφικού δηλαδή προφίλ) που τροφοδοτεί τον βαθύ υδροφορέα. Κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0 και 1.
- **GW**_*SPYLD:* ***Ειδική απόδοση φρεατίου υδροφορέα.*** Εκφράζει τον όγκο νερού που αποστραγγίζεται με την βαρύτητα προς το συνολικό όγκο

βράχου (m^3/m^3). Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των αυξομειώσεων του ύψους του υπόγειου νερού.

5.8.2 Αρχεια υδρολογικών μονάδων απόκρισης (.hru)

Σε αυτή την κατηγορία αρχείων περιλαμβάνονται απαραίτητες πληροφορίες που αφορούν *τις* ιδιότητες των μονάδων υδρολογικής απόκρισης όπως η έκταση, παράγοντες επιφανειακής ροής σε αυτές κ.α.

5.8.3 Αρχείο υφιστάμενων η/και συνθετικών χρονοσειρών μετεωρολογικών παραμέτρων (.wgn)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, εάν δεν είναι διαθέσιμες μετρημένες τιμές των απαιτούμενων μετεωρολογικών παραμέτρων (σχετικής υγρασίας, ηλιοφάνειας και ηλιακής ακτινοβολίας, μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας και ταχύτητας ανέμου), το SWAT χρησιμοποιεί μέσες μηνιαίες τιμές για την δημιουργία χρονοσειρών σε ημερήσιο βήμα. Η δημιουργία τους επιτυγχάνεται με χρήση στατιστικών νόμων που είναι ενσωματωμένοι στο μοντέλο σε μορφή εξισώσεων.

Ενδεικτικά αναφέρονται μερικές από τις παραμέτρους που εισάγονται στο εν λόγω αρχείο:

- **WLATITUDE:** Το γεωγραφικό πλάτος του μετεωρολογικού σταθμού .
- **WLONGITUDE:** Το γεωγραφικό μήκος του μετεωρολογικού σταθμού.
- **WELEV:** Υψόμετρο μετεωρολογικού σταθμού.
- **RAIN_YRS:** Ο αριθμός των χρόνων όπου υπήρχε μέγιστη βροχή μισής ώρας. Αν δεν εισαχθεί από το χρήστη καμία τιμή, τότε το SWAT θέτει την τιμή 10.
- **TMPMX:** Μέγιστη θερμοκρασία αέρα για το μήνα (°C)
- **TMPMN:** Ελάχιστη θερμοκρασία αέρος για το μήνα (°C)
- **PCPMM:** Μέση μηνιαία κατακρήμνιση (mm H2O)
- **PCPSTD:** Τυπική απόκλιση που αναφέρεται στην ημερήσια κατακρήμνιση μέσα στο διάστημα ενός μήνα (mm H_2O/day).
- **PCPSKW:** Συντελεστής συσχέτισης της ημερήσιας κατακρήμνισης σε χρονικό διάστημα ενός μήνα.
- **SOLARAV:** Μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία για ένα μήνα (MJ/m^2/day)
- **PCPD:** Μέσος αριθμός ημερών κατακρήμνισης στη διάρκεια ενός μήνα.

5.8.4 Αρχεία υδατορεύματος (.rte)

Προκειμένου να προσομοιωθούν φυσικές διεργασίες οι οποίες επηρεάζουν τη ροή του *νερού,* την μεταφορά φερτών υλών και ρύπων, στο δίκτυο υδατορευμάτων της υδρολογικής λεκάνης, το SWAT απαιτεί πληροφορίες για τα φυσικά χαρακτηριστικά του κύριου υδατορεύματος για κάθε υπολεκάνη. Το αρχείο εισαγωγής δεδομένων υδατορεύματος συνοψίζει τα φυσικά χαρακτηριστικά του υδατορεύματας όπως το μήκος του, ο συντελεστής τραχύτητας, η υδραυλική αγωγιμότητα της κοίτης, ο συντελεστής διαάβρωσιμότητας υδατορεύματος κ.α.

Σημειώνεται ότι το μοντέλο υπολογίζει τις εν λόγω παραμέτρους μέσω ανάγνωσης των ψηφιακών χαρτών.

- **CH_L:** *Μήκος* κύριου υδατορεύματος (km)
- **CH_N:** *Συντελεστής τραχύτητας κατά Manning*
- **CH_EROD:** *Συντελεστής διαβρωσιμότητας υδατορεύματος.* Ο συντελεστής αυτός είναι ίδιος με τον συντελεστή διαβρωσιμότητας του εδάφους ο οποίος χρησιμοποιείται στην εξίσωση εδαφικής απώλειας.

5.8.5 Αρχεία διαχείρισης νερού (.wus)

Τα αρχεία διαχείρισης νερού ποσοτικοποιούν την καταναλωτική χρήση του νερού στην εξεταζόμενη λεκάνη. Το νερό που απομακρύνεται από το σύστημα θεωρείται ότι χάνεται. Οι ποσότητες νερού που ζητούνται από αυτού του τύπου τα αρχεία αφορούν άρδευση ή κατανάλωση για βιομηχανική χρήση εκτός λεκάνης απορροής.

5.8.6 Αρχεία υπολεκανών (.sub)

Πρόκειται για αρχεία τα οποία περιέχουν πληροφορίες σχετικά με τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά των υπολεκανών. Οι παράμετροι των αρχείων αυτών (γεωγραφικό πλάτος, μήκος, πλάτος υδατορευμάτων, κλίση και υδραυλική αγωγιμότητα) υπολογίζονται από το μοντέλο, με αποτέλεσμα να μην είναι χρειάζεται να επέμβει ο χρήστης. Η μοναδική τιμή που χρειάζεται ρύθμιση είναι η CN_N1=0.014, η οποία αφορά τον συντελεστή τραχύτητας του κυρίως υδατορεύματος.

5.8.7 Αρχεία εδάφους (.sol)

Τα αρχεία εδάφους, μαζί με αυτά του υπογείου νερού είναι τα πιο καθοριστικά για την επιτυχή ρύθμιση του μοντέλου. Τα αρχεία εδάφους που

χρησιμοποιούνται από το SWAT χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τις τιμές των φυσικών και τις τιμές των χημικών ιδιοτήτων. Οι πρώτες ελέγχουν την κίνηση του νερού και του αέρα μέσα στο εδαφικό προφίλ και έχουν μεγάλη επίδραση στον κύκλο του νερού σε κάθε μονάδα υδρολογικής απόκρισης. Στοιχεία σχετικά με τα χημικά χαρακτηριστικά χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό αρχικών τιμών χημικών στο έδαφος.

Το αρχείο εισαγωγής δεδομένων εδάφους καθορίζει τις φυσικές ιδιότητες για το σύνολο των εδαφικών στρωμάτων του εδαφικού προφίλ, ο μέγιστος αριθμός των οποίων ανέρχεται σε 10 για το SWAT.

- **HYDGRP:** Διαπερατότητα εδάφους. Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί τους δείκτες A,B,C,D για να εκφράσει υψηλή, μέτρια, μικρή και μηδενική διαπερατότητα αντίστοιχα.
- **SOL_ZMX:** Μέγιστο βάθος εδάφους στο οποίο μπορούν να φτάσουν οι ρίζες. (mm)
- **SOL_CRK:** Δυνητικός ή μέγιστος όγκος ρωγμών στο έδαφος.
- **TEXTURE:** Υφή ή μηχανική σύσταση εδάφους.
- **SOL_BD:** Υγρή φαινομενική πυκνότητα
- **CLAY:** Επί τοις εκατό σύσταση σε άργιλο στο εδαφικό στρώμα.
- **SILT:** Επί τοις εκατό σύσταση σε πηλό στο εδαφικό στρώμα.
- **SAND:** Επί τοις εκατό σύσταση σε άμμο στο εδαφικό στρώμα.

5.8.8 Αρχεία χημικών εδάφους (.chm)

Δρουν ως συνέχεια των αρχείων εδάφους αποδίδοντας χημικές ιδιότητες στην ανώτερη εδαφική στρώση. Χρησιμεύουν στην ποιοτική προσομοίωση του υδρολογικού κύκλου περιέχοντας πληροφορίες για την αρχική συγκέντρωση σε οργανικό άζωτο, φυτοφάρμακα, άνθρακα κ.α. Η συγκεκριμένη ποιοτική συνιστώσα του μοντέλου δεν ενδιαφέρει την παρούσα εργασία γι΄αυτό και οι τιμές των αρχείων αυτών δεν μεταβλήθηκαν.

5.8.9 Αρχεία διαχείρισης (.mgt)

Τα αρχεία αυτά περιλαμβάνουν στοιχεία σχετικά με τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Περιέχουν πληροφορίες για τη σπορά, το θερισμό, την άρδευση και την εφαρμογή φυτοφαρμάκων στις καλλιέργειες.

5.8.10 Αρχεία αναχωμάτων (.pnd)

Το SWAT περιγράφει τη λειτουργία μικρών αναχωμάτων κατά μήκος του υδατορεύματος. Τα αναχώματα υπερχειλίζουν όταν υπερβληθεί η χωρητικότητα τους. Με τη βοήθεια αυτών των αρχείων προσομοιώνεται και η συγκράτηση φερτών υλικών.

5.8.11 Αρχεία ποιοτικών χαρακτηριστικών υδατορευματος (.swq)

Οι ποιοτικές πληροφορίες για το νερό στα υδατορεύματα περιέχονται σε αυτά τα αρχεία. Μερικές είναι: οι αρχικές συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου, αμμωνίας, νιτρικών, φωσφόρου, BOD κ.α.

5.8.12 Αρχεία ταμιευτήρα (.rsv)

Στο συγκεκριμένο αρχείο εισάγονται όλες εκείνες οι απαραίτητες πληροφορίες που αφορούν την ενδεχόμενη ύπαρξη ταμιευτήρα και τα ισοζύγια νερού, φερτών υλών και ρύπων ως προς τον ταμιευτήρα.

Χρόνος έναρξης λειτουργίας ταμιευτήρα:

RES_ESA: Μέγιστη ωφέλιμη επιφάνεια ταμιευτήρα

RES_EVOL: Μέγιστος ωφέλιμος όγκος ταμιευτήρα

RES_PSA: Αρχική επιφάνεια ταμιευτήρα

RES_PVOL: Αρχικός όγκος ταμιευτήρα

Τα περισσότερα από τα παραπάνω αρχεία μαζί με τις τιμές παραμέτρων και σταθερών, εγγράφονται σαν αρχεία κειμένου από τη GIS βάση του SWAT, και είναι διαθέσιμα στο χρήστη για αλλαγές είτε μέσα από το ArcSWAT και το μενού **Edit SWAT Input** είτε, αφού πρωτοεγγραφούν, από τον ειδικό editor, SWATEditor.

6. ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

6.1 Αρχεία προδιαγραφών προσομοίωσης

Μετά τη δημιουργία των αρχείων εισαγωγής δεδομένων που περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, το μοντέλο επιτρέπει την εκτέλεση της προσομοίωσης.

Για την εφαρμογή του τελικού αυτού βήματος, το SWAT δημιουργεί τα αρχεία προδιαγραφών προσομοίωσης, που καθοδηγούν τη διαδικασία της προσομοίωσης.

Τα αρχεία αυτά είναι τα παρακάτω (*Neitsch et al. 2004)*:

6.1.1 Αρχείο γενικών ιδιοτήτων λεκανών .bsn

Πρόκειται για ένα αρχείο που περιέχει πληροφορίες σχετικά με την έκταση της λεκάνης, την υστέρηση της, το μέγιστο ρυθμό τήξεως του χιονιού κ.α.

6.1.2 Αρχείο file.cio

Πρόκειται για ένα από τα σημαντικότερα αρχεία του μοντέλου και είναι υπεύθυνο για την εκτέλεση της προσομοίωσης. Με εξαίρεση ορισμένα αρχεία που διαβάζονται απευθείας από το πρόγραμμα, όλα τα άλλα περιέχονται σε αυτό.

6.1.3 Αρχείο ορισμού υπολεκανών .fig

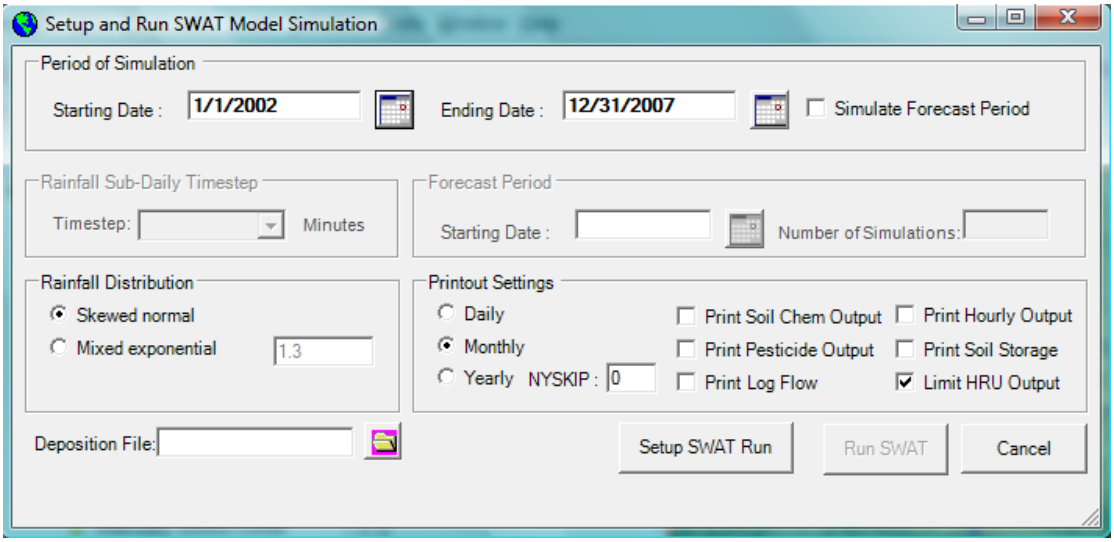
Το αρχείο αυτό περιλαμβάνει πληροφορίες για τις διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα σε κάθε υπολεκάνη, όπως η διόδευση του νερού, τα φερτά και τα θρεπτικά ως την τελική έξοδο. Δημιουργείται πριν αρχίσει η κατασκευή των αρχείων δεδομένων. Κατά την εκτέλεση, το πρόγραμμα διαβάζει πληροφορίες από αυτό το αρχείο και όχι από τον ψηφιακό χάρτη.

6.1.4 Αρχεία βροχόπτωσης και θερμοκρασίας

Τα αρχεία pcp.pcp και tmp.tmp περιέχουν τις χρονοσειρές βροχόπτωσης και θερμοκρασίας που θα διαβάσει το μοντέλο. Η τιμή -99 αντιπροσωπεύει τα κενά που υπάρχουν στις παρατηρημένες τιμές της θερμοκρασίας και της κατακρήμνισης.

6.2 Εκτέλεση

Στο σχήμα 6.1 παρουσιάζεται το παράθυρο για την εκτέλεση του μοντέλου. Οι ρυθμίσεις που επιλέχθηκαν για τη συγκεκριμένη εργασία είναι:



Σχήμα 6.1: Πλαίσιο διαλόγου για την εκτέλεση του μοντέλου.

- *Χρονικό Εύρος Προσομοίωσης*: Από 1/1/2002 έως 31/12/2007.
- *Χρονικό Βήμα Αρχείων Δεδομένων Αποτελεσμάτων*: Επιλέχθηκε το μηνιαίο βήμα.

Το SWAT χρειάζεται ένα χρονικό διάστημα για να ζεσταθεί(warming up period). Στη διάρκεια αυτού του διαστήματος γίνονται αρχικοί υπολογισμοί για τον υδρολογικό κύκλο, μέχρι την αποκατάσταση των «μόνιμων συνθηκών», και γι αυτό τα αποτελέσματα αυτής της περιόδου δεν είναι αξιόπιστα. Αυτός είναι και ο λόγος που ορίσαμε την έναρξη της προσομοίωσης στο 2002, έτσι ώστε το μοντέλο να έχει χρόνο να ζεσταθεί μέχρι το 2005 και να μπορέσουμε να συγκρίνουμε τα προσομοιωμένα αποτελέσματα με τα παρατηρημένα.

6.3 Αρχεία αποτελεσμάτων

Μετά την εκτέλεση της προσομοίωσης δημιουργούνται τα αρχεία δεδομένων εξόδου που περιλαμβάνουν το σύνολο των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Τα αρχεία αυτά είναι *(Neitsch et al. 2004)*:

6.3.1 Γενικευμένο αρχείο αποτελεσμάτων output.std

Πρόκειται για ένα γενικευμένο αρχείο που συγκεντρώνει τα αποτελέσματα προσομοίωσης στην έξοδο της λεκάνης. Περιέχει σημαντικές πληροφορίες για το υδατικό ισοζύγιο, τα θρεπτικά και τα φερτά. Η χρησιμότητά του έγκειται στο ότι συνοψίζει τις μέσες τιμές των υδρολογικών συνιστωσών (βροχόπτωση, εξατμισοδιαπνοή, απορροή, κατείσδυση) για το σύνολο της λεκάνης και επίσης

δίνει τις μέσες μηνιαίες υπερετήσιες τιμές των παραμέτρων επιτρέποντας να γίνει ένας προσεγγιστικός έλεγχος των αποτελεσμάτων.

6.3.2 Αρχείο αποτελεσμάτων κυρίου υδατορεύματος output.rch

Το συγκεκριμένο αρχείο εξετάζει το ισοζύγιο εισόδου – εξόδου σε κάθε υπολεκάνη, τόσο στις ποσοτικές όσο και στις ποιοτικές συνιστώσες του υδρολογικού κύκλου στο βήμα που έχει οριστεί από τον χρήστη. Τα αποτελέσματα εδώ δίνονται σε μονάδες παροχής (m^3/sec). Η χρησιμότητά του είναι μεγάλη στην ποιοτική προσομοίωση, αφού τα ποιοτικά αποτελέσματα αποτελούν το 90% των δεδομένων του.

Στη συνέχεια επεξηγούνται ορισμένες παράμετροι του αρχείου:

- **FLOW_IN:** Μέση ημερήσια παροχή που εισέρχεται στο υδατορεύμα στο χρονικό βήμα της προσομοίωσης(m^3/sec).
- **FLOW_OUT:** Μέση ημερήσια παροχή που εξέρχεται από το υδατορεύμα στο χρονικό βήμα της προσομοίωσης(m^3/sec).
- **EVAP:** Μέσος ημερήσιος ρυθμός απώλειας νερού στο υδατορεύμα λόγω εξάτμισης, στο χρονικό βήμα της προσομοίωσης(m^3/sec).
- **SED_IN:** Μέση ημερήσια στερεοπαροχή που εισέρχεται στο υδατορεύμα στο χρονικό βήμα της προσομοίωσης(ton).
- **SED_OUT:** Μέση ημερήσια στερεοπαροχή που εξέρχεται από το υδατορεύμα στο χρονικό βήμα της προσομοίωσης(ton).
- **SEDCONC**: Συγκέντρωση φερτών στο υδατορεύμα κατά το χρονικό βήμα της προσομοίωσης(mg/l).
- **ORGN_IN:** Οργανικό άζωτο που μεταφέρεται εντός του υδατορεύματος στο χρονικό βήμα της προσομοίωσης(kg).
- **ORGN_OUT:** Οργανικό άζωτο που μεταφέρεται εκτός του υδατορεύματος στο χρονικό βήμα της προσομοίωσης(kg).

6.3.3 Αρχείο αποτελεσμάτων υπολεκανών output.sub

Το αρχείο αυτό περιλαμβάνει αποτελέσματα στην έξοδο κάθε υπολεκάνης ξεχωριστά. Αποτελεί τη βασική πηγή άντλησης των εξαγόμενων της προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα δίνονται για όλες τις συνιστώσες σε mm. Το συγκεκριμένο αρχείο περιλαμβάνει υδρολογικές παραμέτρους του προαναφερόμενου αρχείου(.sbs), αλλά σε επίπεδο υπολεκάνης και δίνει

πληροφορίες για την υπόγεια, την επιφανειακή, την συνολική απορροή αλλά και για την κατείσδυση και τη βροχόπτωση.

- **WYLD:** Συνολική απορροή
- **GW_Q:** Βασική απορροή(Συμβολή των νερών του φρεάτιου υδροφόρου στη ροή του κυρίου υδατορεύματος)
- **SURQ:** Επιφανειακή απορροή
- **PERC:** Κατείσδυση

6.3.4 Αρχείο αποτελεσμάτων μονάδων υδρολογικής αποκρισης output.hru

Σε αντίθεση με τα προηγούμενα αρχεία αποτελεσμάτων, το hru αναφέρεται σε κάθε μονάδα υδρολογικής απόκρισης και όχι σε υπολεκάνη. Η ιδιαιτερότητά του αυτή βοηθά το χρήστη να καταλάβει την επίδραση των HRU στα αποτελέσματα και να διαπιστώσει πως οι τύποι εδάφους και κάλυψης διαμορφώνουν τις αποφορτίσεις. Το πλήθος των αποτελεσμάτων οδήγησε τους κατασκευαστές του να το παρέχουν όταν επιλεγμένο είναι το ετήσιο βήμα μόνο. Σε κάθε άλλη περίπτωση το μέγεθός του θα ήταν τεράστιο και θα το καθιστούσε δυσανάγνωστο. Τα αποτελέσματα είναι σε mm και ταυτίζονται με αυτά του bsb με τη διαφορά ότι εδώ διατίθεται και η ενδιάμεση ή υποδερμική ροή.

- **AREA:** Έκταση απορροής μονάδας υδρολογικής απόκρισης. (Km^2)
- **PRECIP:** Κατακρήμνιση στην μονάδα υδρολογικής απόκρισης στη διάρκεια του χρονικού βήματος. (mm H_20)
- **SNOWFALL:** Ποσότητα της κατακρήμνισης που πέφτει ως χιόνι ή χιονόνερο στη διάρκεια του χρονικού βήματος. (mm H_20)
- **SNOWMELT:** Ποσότητα χιονιού ή πάγου που λιώνει στη διάρκεια του χρονικού βήματος. (mm H_20)
- **PET:** Δυνητική εξατμισοδιαπνοή στην μονάδα υδρολογικής απόκρισης στη διάρκεια του χρονικού βήματος.
- **ET:** Πραγματική εξατμισοδιαπνοή στην μονάδα υδρολογικής απόκρισης στη διάρκεια του χρονικού βήματος.
- **SW:** Η ποσότητα του νερού στο εδαφικό προφίλ στο τέλος της χρονικής περιόδου. (mm H_20)

6.3.5 Αρχείο αποτελεσμάτων ταμιευτήρα output.rsv

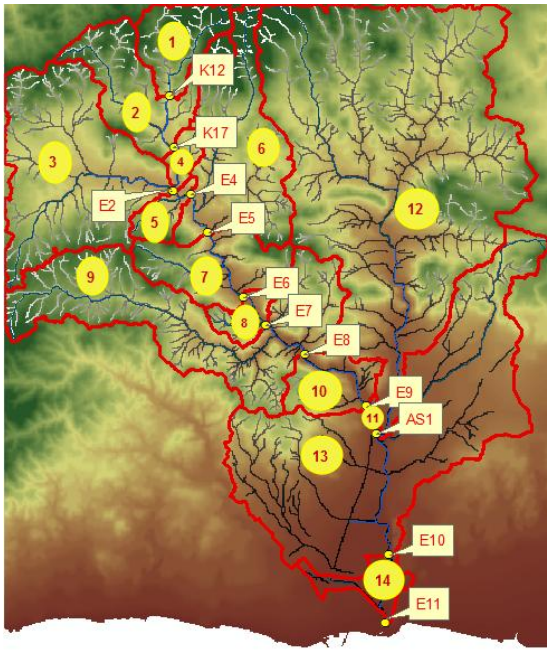
Το αρχείο αυτό περιλαμβάνει αποτελέσματα που αφορούν τον ταμιευτήρα.

- **VOLUME:** Ο όγκος του νερού που υπάρχει στον ταμιευτήρα στο τέλος του χρονικού βήματος της προσομοίωσης. (m^3 H_20)
- **FLOW_IN:** Μέση ημερήσια παροχή που εισέρχεται στον ταμιευτήρα στο χρονικό βήμα της προσομοίωσης. (m^3/sec H_20)
- **FLOW_OUT:** Μέση ημερήσια παροχή που εξέρχεται από τον ταμιευτήρα στο χρονικό βήμα της προσομοίωσης. (m^3/sec H_20)
- **EVAP:** Απώλεια νερού στον ταμιευτήρα λόγω εξάτμισης, στο χρονικό βήμα της προσομοίωσης. (m^3/sec)
- **SED_IN:** Μέση ημερήσια στερεοπαροχή που εισέρχεται στον ταμιευτήρα στο χρονικό βήμα της προσομοίωσης. (ton)
- **SED_OUT:** Μέση ημερήσια στερεοπαροχή που εξέρχεται από τον ταμιευτήρα στο χρονικό βήμα της προσομοίωσης. (ton)
- **SEEPAGE:** Ο όγκος του νερού που διαρρέει τον πυθμένα του ταμιευτήρα και εισέρχεται στο ρηχό υδροφορέα κατά τη διάρκεια του χρονικού βήματος της προσομοίωσης. (m^3 H_2O)

7. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΡΟΩΝ

7.1 Προσομοίωση της λεκάνης απορροής από το SWAT. Ανακεφαλαίωση κύριων χαρακτηριστικών

Στην παράγραφο αυτή συνοψίζονται τα κύρια χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής που αντιστοιχεί στην περιοχή μελέτης και ο τρόπος με τον οποίο έγινε η προσομοίωση της στο SWAT.



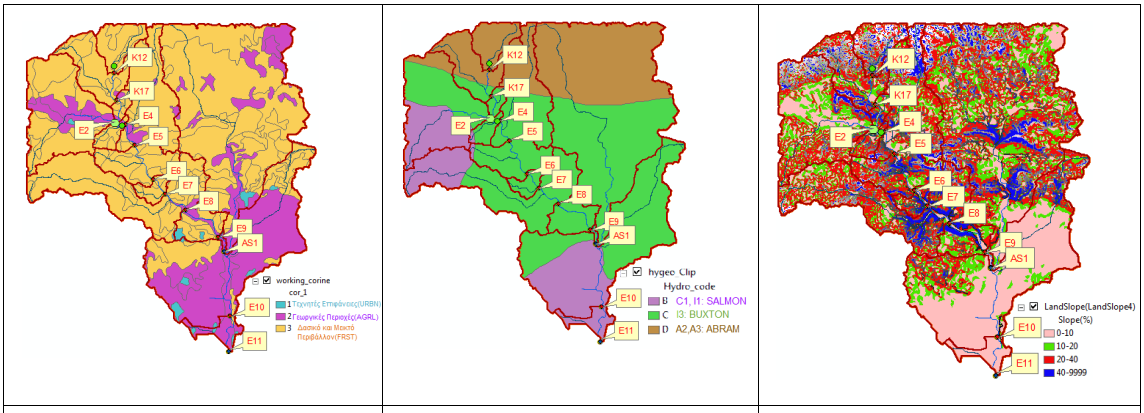
Σχήμα 7.1: Υπολεκάνες

Η λεκάνη απορροής χωρίστηκε σε 14 υπολεκάνες η αρίθμηση των οποίων φαίνεται στο σχήμα 7.1. Σε κάθε υπολεκάνη αντιστοιχεί ένα τμήμα (reach) υδατορεύματος, στο οποίο συγκεντρώνεται η απορροή από την ίδια την υπολεκάνη, καθώς και από τα προηγούμενα τμήματα του υδατορεύματος. Στον Πίνακα 7.1 παρουσιάζεται η επιφάνεια που αντιστοιχεί σε κάθε υπολεκάνη απορροής, καθώς και η συνολική επιφάνεια που επηρεάζει τη ροή σε κάθε τμήμα υδατορεύματος.

Στη λεκάνη απορροής εντοπίστηκαν τρείς κατηγορίες χρήσεων γης (Corine) και τρείς τύποι εδαφών (από τους υδρολιθογραφικούς χάρτες), καθορίστηκαν επίσης 4 κατηγορίες κλίσεων εδάφους (βλ. Σχήμα 7.2). Από το συνδυασμό αυτών των πληροφοριών προέκυψαν 185 μονάδες υδρολογικής απόκρισης, οι οποίες αποτελούν τη βάση υπολογισμού του υδατικού ισοζυγίου.

Πίνακας 7.1: Επιφάνεια ανά υπολεκάνη και επιφάνεια αποστράγγισης ανά τμήμα υδατορεύματος

Υπολεκάνη	**Επιφάνεια** km^2	**Τμήμα υδατορεύματος**	**Επιφάνεια αποστράγγισης** km^2
1	5.81	1	5.81
2	10.10	2	15.95
3	23.88	3	23.88
4	1.51	4	17.47
5	2.13	5	43.48
6	16.30	6	59.75
7	8.67	7	68.42
8	2.22	8	70.64
9	24.40	9	95.07
10	5.27	10	100.3
11	0.31	11	100.6
12	70.99	12	70.99
13	43.96	13	215.6
14	2.87	14	218.5



Χρήσεις γης	Τύποι εδαφών	Κλίσεις εδάφους

Σχήμα 7.2: Κατανομή χρήσεων γης, τύποι εδαφών και κλίσεων εδάφους. Από το συνδυασμό αυτών των χαρτών προέκυψαν οι μονάδες υδρολογικής απόκρισης (HRU)

7.2 Δείκτες έλεγχου ακρίβειας των αποτελεσμάτων προσομοίωσης

Για να ελεγχθεί η ακρίβεια της προσομοίωσης που επιτυγχάνεται με τη χρήση του SWAT σε σύγκριση με τις αντίστοιχες μετρήσεις πεδίου χρησιμοποιήθηκαν ο συντελεστής Nash-Sutcliffe και τα διαγράμματα διασποράς προσομοιωμένων-παρατηρημένων τιμών (Nash and Sutcliffe, 1970, Tsihrintzis and Hamid, 1998, Pisinaras et al., 2010).

Ο **συντελεστής Nash-Sutcliffe** υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$NSC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} (O_i - \bar{O})^2} \qquad (7.1)$$

όπου P_i είναι οι τιμές που αντιστοιχούν στα αποτελέσματα της προσομοίωσης, O_i είναι οι παρατηρούμενες τιμές, $\bar{O}$ η μέση τιμή των παρατηρούμενων τιμών και N το πλήθος των παρατηρήσεων. Η βέλτιστη τιμή του NSC αντιστοιχεί στο 1.

Τα **διαγράμματα διασποράς** επιτρέπουν την άμεση οπτική εκτίμηση της ακρίβειας προσομοίωσης. Είναι διαγράμματα που κατασκευάζονται θεωρώντας ότι ο άξονας των τετμημένων X αντιστοιχεί στις παρατηρούμενες τιμές και ο άξονας των τεταγμένων Y στις προσομοιωμένες τιμές. Στα διαγράμματα διασποράς υπολογίζεται με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων η ευθεία που αντιστοιχεί στην εξίσωση 7.2:

$$P_i = \gamma O_i \qquad (7.2)$$

Η κλίση της ευθείας γ δίνει ένα μέτρο για το κατά πόσο η προσομοίωση υπερεκτιμά (γ>1) ή υποεκτιμά (γ<1) τις παρατηρούμενες τιμές. Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης R^2 αποτελεί ένα δείκτη της διασποράς των σημείων γύρω από τη συγκεκριμένη ευθεία. Ακριβής προσομοίωση προϋποθέτει οι τιμές τόσο του γ όσο και του R^2 να προσεγγίζουν το 1.

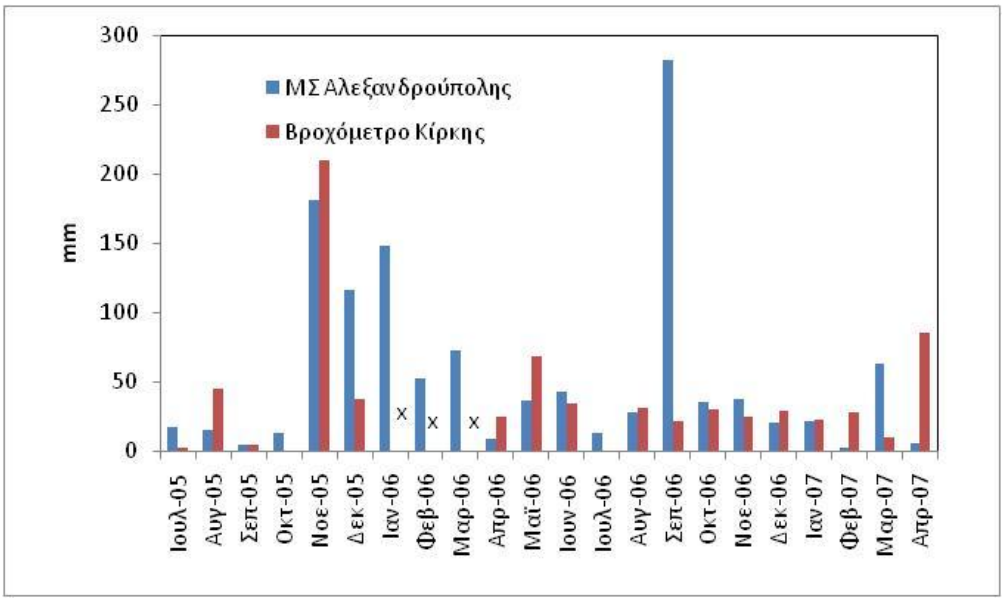
7.3 Προσομοίωση απορροών στα ρέματα Κιρκάλων και Ειρήνης

7.3.1 Επίδραση δεδομένων βροχόπτωσης

Η σημαντικότερη παράμετρος που καθορίζει το μέγεθος των παροχών που μετρούνται κατά μήκος των ρεμάτων είναι το ύψος της βροχόπτωσης που πέφτει

στις λεκάνες απορροής στα ανάντη του κάθε σημείου υδρομέτρησης. Όπως προαναφέρθηκε λεπτομερή μετεωρολογικά δεδομένα για πολλές παραμέτρους διατίθενται από τον μετεωρολογικό σταθμό Αλεξανδρούπολης, ο οποίος όμως βρίσκεται στην έξοδο της λεκάνης απορροής και δεν είναι βέβαιο ότι αντιπροσωπεύει τις βροχοπτώσεις στα ανάντη. Τα δεδομένα μηνιαίας βροχόπτωσης, όπως καταγράφηκαν στους δύο σταθμούς συγκρίνονται στο σχήμα 7.3. Είναι φανερό ότι δεν υπάρχει άμεση συχέτιση. Όπως επισημαίνει και ο Ρωμαΐδης (2007), αν και το βροχόμετρο της Κίρκης βρίσκεται σε μεγαλύτερο υψόμετρο (190 m) σε σύγκριση με αυτό της Αλεξανδρούπολης (7 m) δεν παρατηρήθηκαν συστηματικά υψηλότερες τιμές βροχόπτωσης.

Πρέπει επισης να αναφερθεί ότι το έτος 2006 χαρακτηρίστηκε από κάποια έντονα καιρικά φαινόμενα με τοπικό χαρακτήρα. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο Σεπτέμβριος του 2006. Με αιχμή την 21-09-2006 καταγράφηκαν στο ΜΣ Αλεξανδρούπολης ιδιαίτερα υψηλές τιμές βροχόπτωσης, με συνολικό μηνιαίο ύψος τα 282 mm, ενώ η μέση μηνιαία τιμή για το μήνα Σεπτέμβριο , με βάση τα ιστορικά στοιχεία βροχόπτωσης του σταθμού για το διάστημα 2000-2008, είναι μόλις 50.5 mm (Ιστότοπος Weather on Line, http://www.weatheronline.co.uk/). Για το Σεπτέμβριο του 2006 στο βροχόμετρο της Κίρκης μετρήθηκαν μόλις 21.3 mm βροχής.



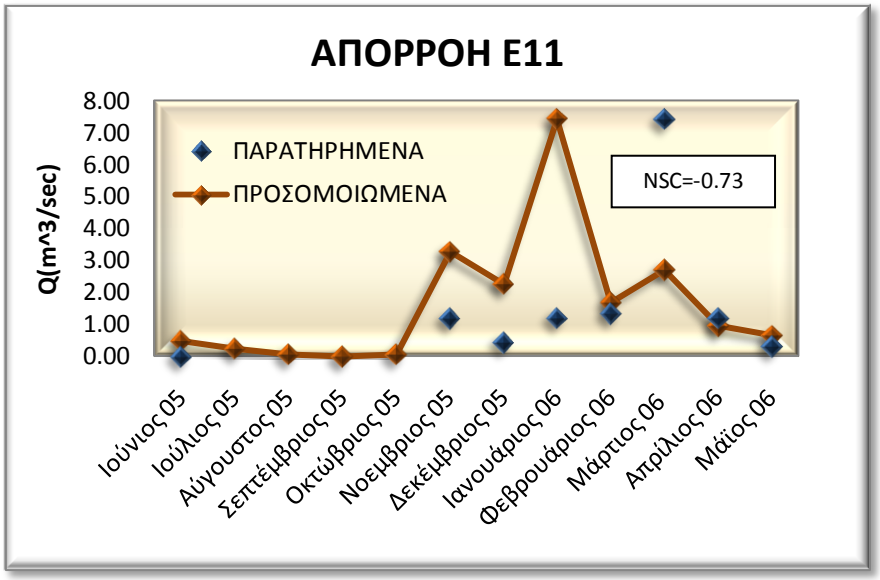
Σχήμα 7.3: Μετρήσεις βροχόπτωσης στο μετεωρολογικό σταθμό (ΜΣ) Αλέξανδρούπολης (υψ. 7m) και στο βροχόμετρο στην περιοχή του Εργοστασίου Εμπλουτισμού στην Κίρκη (υψ. 190 m).

Στο βροχόμετρο της Κίρκης δεν υπήρξε καταγραφή δεδομένων το χρονικό διάστημα Ιανουάριος – Μάρτιος 2006 (σημεία x).

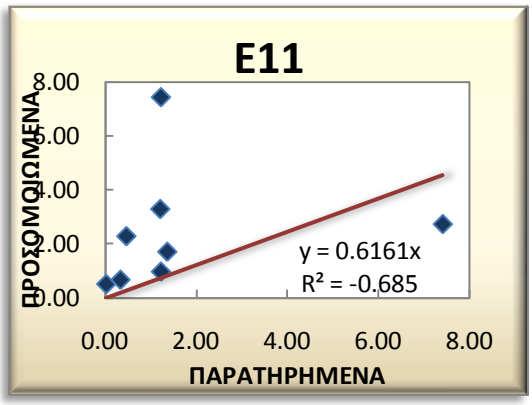
Αντίθετα το μήνα Μαρτιο 2006 παρατηρήθηκαν ιδιαίτερα έντονες βροχοπτώσεις και καταγράφηκαν πλημμυρικά φαινόμενα στην περιοχή της Κίρκης (Ρωμαΐδης, 2007), ενώ η βροχόπτωση που μετρήθηκε στο ΜΣ της Αλεξανδρούπολης ήταν 72.9 mm, τιμή που δεν αντιστοιχεί σε ασυνήθιστα καιρικά φαινόμενα. Δυστυχώς την περίοδο αυτή (από Ιανουάριο μέχρι και Μαρτιο 2006) δεν λειτουργούσε το βροχόμετρο του Εργοστασίου Εμπλουτισμού Κίρκης λόγω βλάβης, με συνέπεια να μην υπάρχουν δεδομένα για το ύψος των βροχοπτώσεων στην Κίρκη. Για τις ανάγκες της προσομοίωσης, το ύψος βροχόπτωσης Ιανουαρίου και Φεβρουαρίου 2006 θεωρήθηκε ίσο με τις μέσες μηνιαίες τιμές Ιανουαρίου και Φεβρουαρίου στο ΜΣ Αλεξανδρούπολης, δηλ. 72.6 και 41.9 mm αντίστοιχα. Για το Μάρτιο του 2006 θεωρήθηκε ύψος βροχόπτωσης 200 mm, αντίστοιχο δηλαδή με αυτό του Νοεμβρίου.

Η προσπάθεια περιγραφής των απορροών στα ρέματα Κιρκάλων και Ειρήνης με δεδομένα βροχόπτωσης από το ΜΣ Αλεξανρούπολης έδωσε αποτελέσματα χαμηλής ακρίβειας προσομοίωσης. Στο σχήμα 7.4 (α) και (β) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης σε σύγκριση με τις παρατηρημένες τιμές παροχής για το σημείο υδρομετρήσεων Ε11. Στο σχήμα 7.4 (α) δίνονται οι παρατηρημένες και προσομοιωμένες τιμές παροχής από Ιούνιο 2005 μέχρι Μάιο 2006, ενώ στο 7.4 (β)

δίνεται το αντίστοιχο διάγραμμα διασπράς. Ο δείκτης NSC έχει αρνητική τιμή -0.73, ενώ και στο διάγραμμα διασποράς είναι εμφανής η ακανόνιστη διασπορά των σημείων με αρνητικό συντελεστή συσχέτισης R^2 = - 0.685 και κλίση γ=0.616.

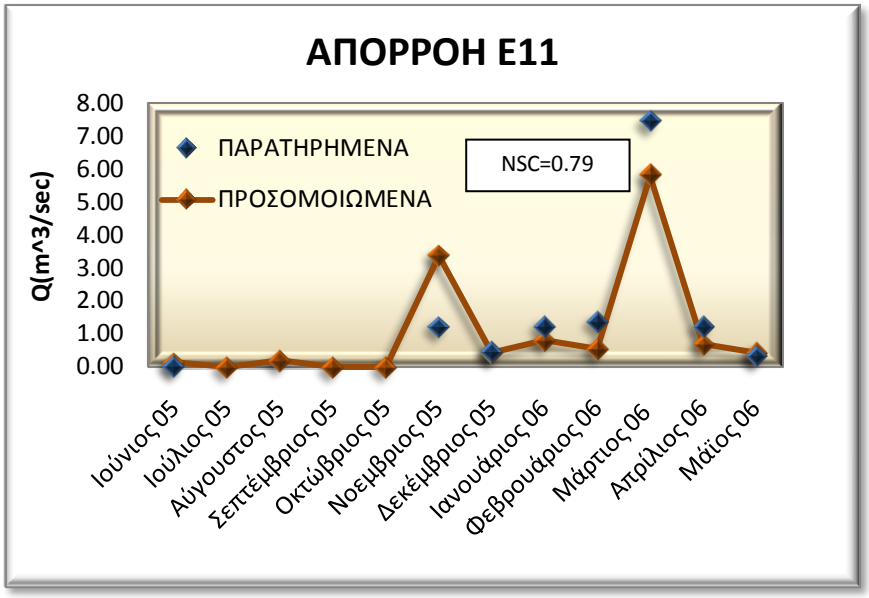


(α)

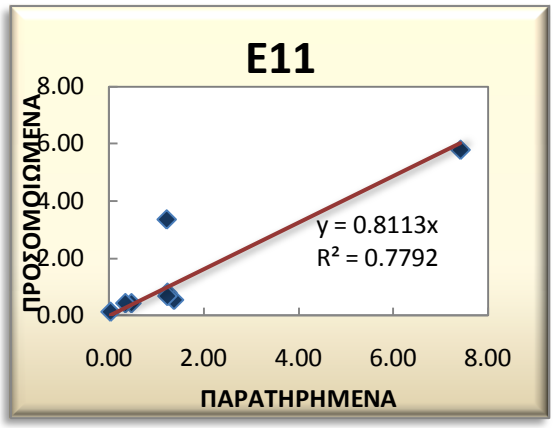


(β)

Σχήμα 7.4: Αποτελέσματα προσομοίωσης σε σύγκριση με τις παρατηρημένες τιμές παροχής στο σημείο υδρομετρήσεων Ε11 με χρήση των δεδομένων βροχόπτωσης του ΜΣ της Αλεξανδρούπολης.



(α)



(β)

Σχήμα 7.5: Αποτελέσματα προσομοίωσης σε σύγκριση με τις παρατηρημένες τιμές παροχής στο σημείο υδρομετρήσεων Ε11 με χρήση των δεδομένων βροχόπτωσης από το βροχόμετρο της Κίρκης.

Στο σχήμα 7.5 (α) και (β) παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα προσομοίωσης στο σημείο Ε11 με χρήση των δεδομένων βροχόπτωσης από το βροχόμετρο της Κίρκης. Στο σχήμα 7.5 (α) δίνονται οι παρατηρημένες και προσομοιωμένες τιμές παροχής από Ιούνιο 2005 μέχρι Μάιο 2006, ενώ στο 7.5 (β) δίνεται το αντίστοιχο διάγραμμα διασποράς. Παρατηρούμε ότι ο δείκτης NSC αυξάνεται από -0.73 σε 0.79 , ενώ και στο διάγραμμα διασποράς είναι εμφανής η καλύτερη διασπορά των σημείων με το συντελεστή συσχέτισης R^2 να αυξάνεται από -6.85 σε 0.7792 και την κλίση γ να φτάνει το 0.8113.

Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα θεωρήσαμε αναγκαίο να χρησιμοποιήσουμε τις τιμές βροχόπτωσης από το βροχόμετρο της Κίρκης,

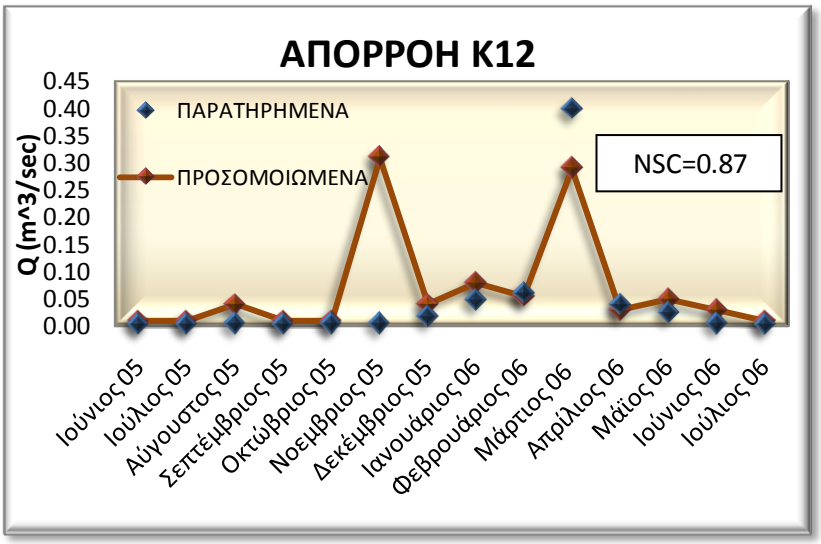
προκειμένου να πετύχουμε μεγαλύτερη ακρίβεια στην προσομοίωση των απορροών.

7.3.2. Αποτελέσματα προσομοίωσης με τις παραμέτρους του μοντέλου που προτείνονται από το SWAT

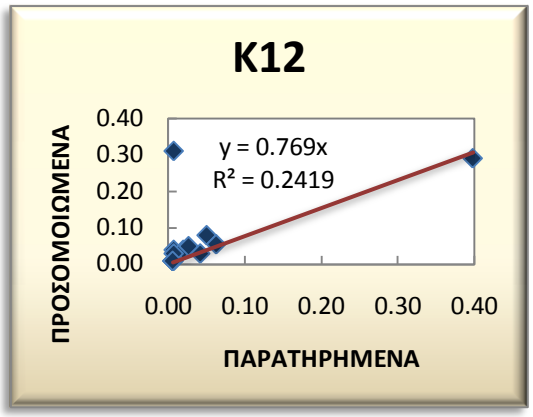
Αρχικά, από τα αρχεία αποτελεσμάτων του προγράμματος και πιο συγκεκριμένα το αρχείο output.rch, επεξεργαστήκαμε τις ροές. Σκοπός αυτής της επεξεργασίας ήταν η σύγκριση των προσομοιωμένων ροών με υπάρχουσες παρατηρημένες σε συγκεκριμένα σημεία δειγματοληψίας που αναλύθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο και στη συνέχεια η βελτιστοποίηση των παραμέτρων που προτείνει το μοντέλο.

Παρακάτω, και για κάθε σημείο του υδατορεύματος που επιλέξαμε στην αρχή της προσομοίωσης, παρουσιάζονται δύο διαγράμματα:

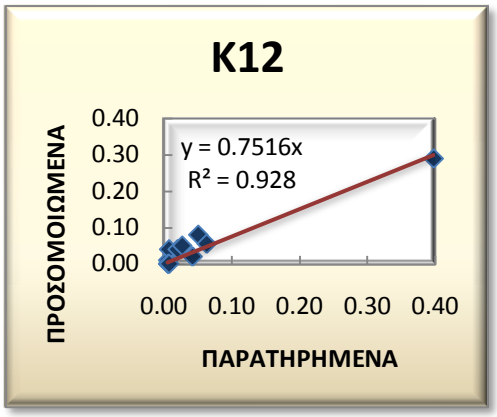
1. Το διάγραμμα της απορροής των παρατηρημένων δεδομένων σε σχέση με τα προσομοιωμένα, για όσους μήνες είχαμε διαθέσιμα δεδομένα μαζί με το αντίστοιχο αποτέλεσμα του δείκτη Nash και
2. Το διάγραμμα διασποράς για κάθε σημείο, με το Νοέμβρη και χωρίς. Είναι σαφής η βελτίωση των αποτελεσμάτων όταν δεν λαμβάνεται υπόψη ο Νοέμβρης.



(α)

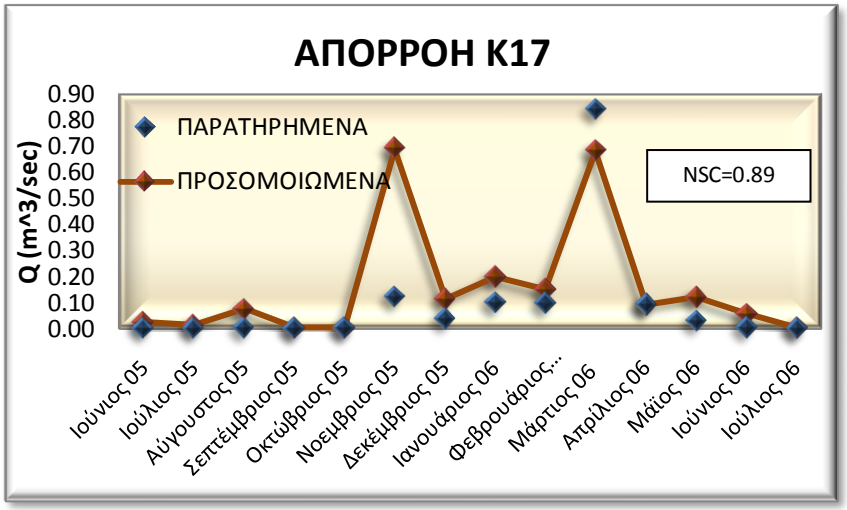


(β1) Με το Νοέμβρη

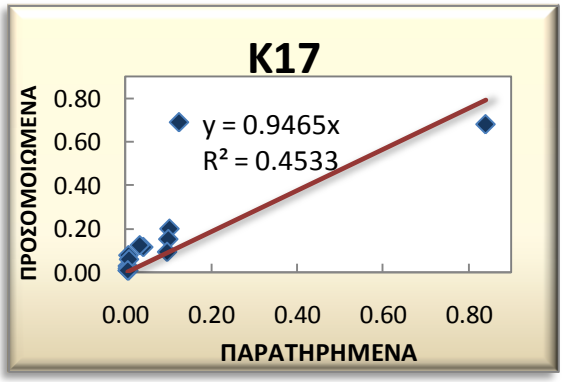


(β2) Χωρίς το Νοέμβρη

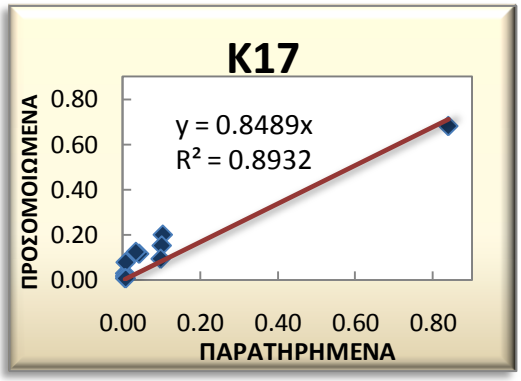
Σχήμα 7.6: Αποτελέσματα K12



(α)

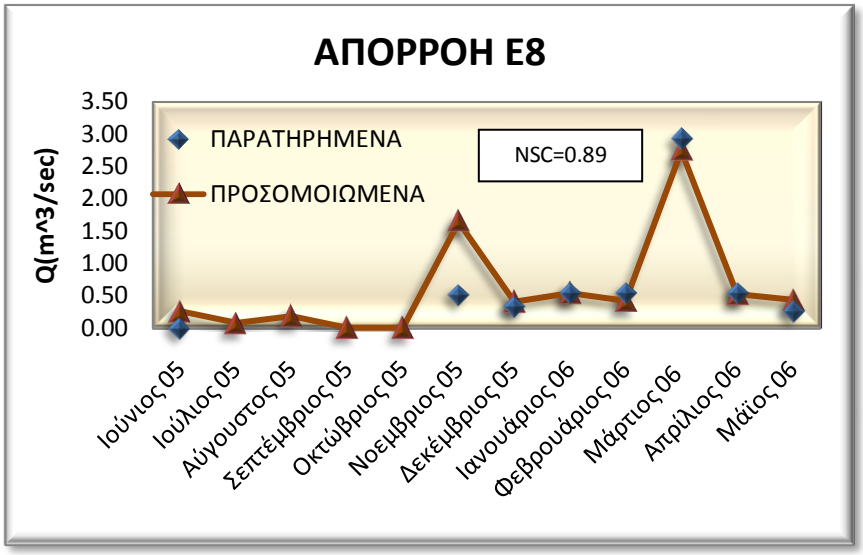


(β1) Με το Νοέμβρη

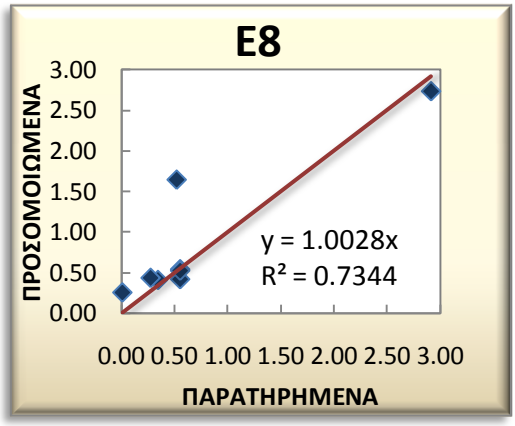


(β2) Χωρίς το Νοέμβρη

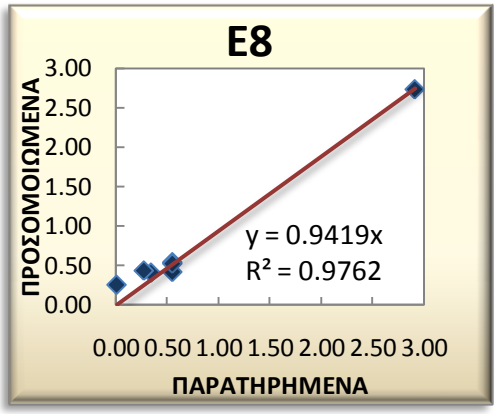
Σχήμα 7.7: Αποτελέσματα K17



(α)

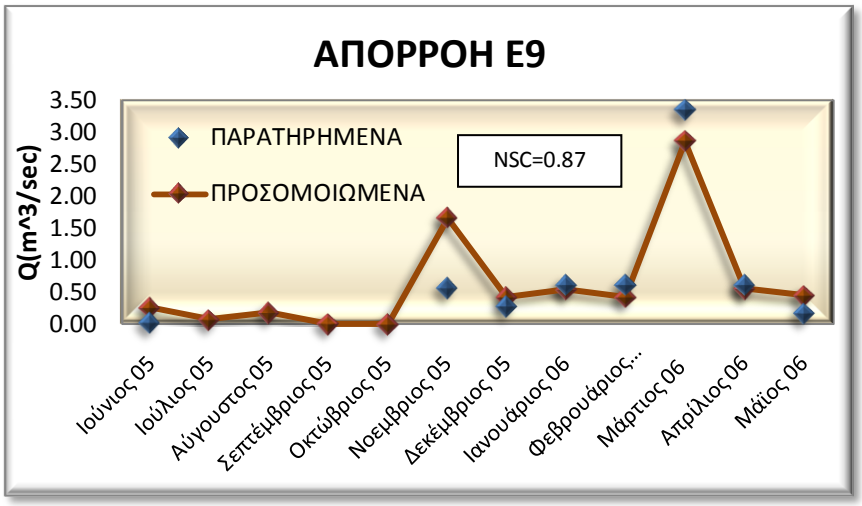


(β1) Με το Νοέμβρη

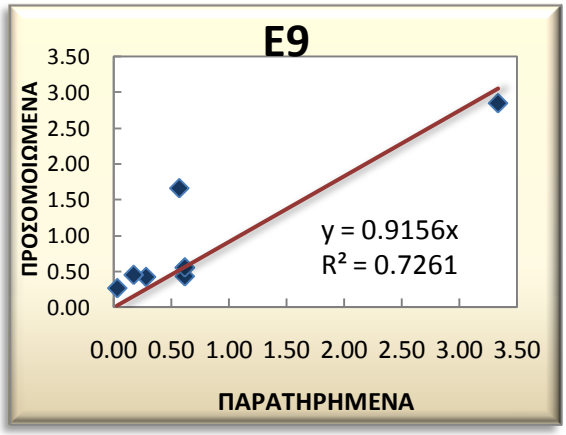


(β2) Χωρίς το Νοέμβρη

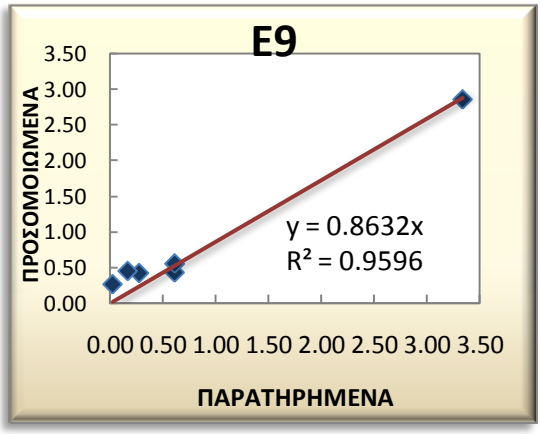
Σχήμα 7.8: Αποτελέσματα Ε8



(α)

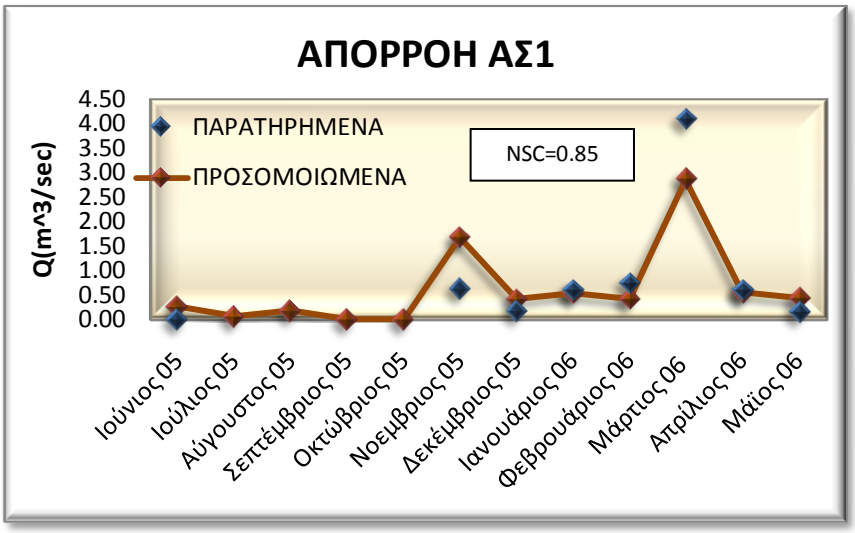


(β1) Με το Νοέμβρη

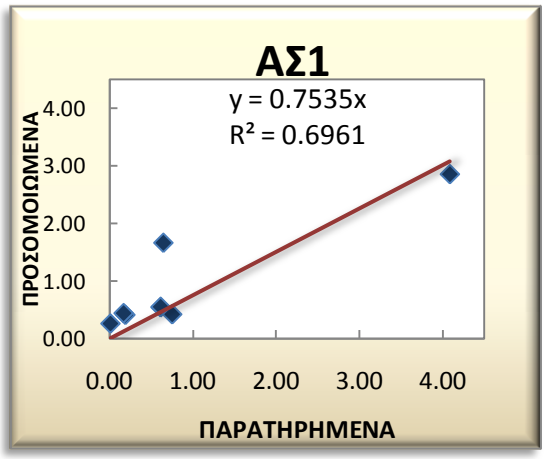


(β2) Χωρίς το Νοέμβρη

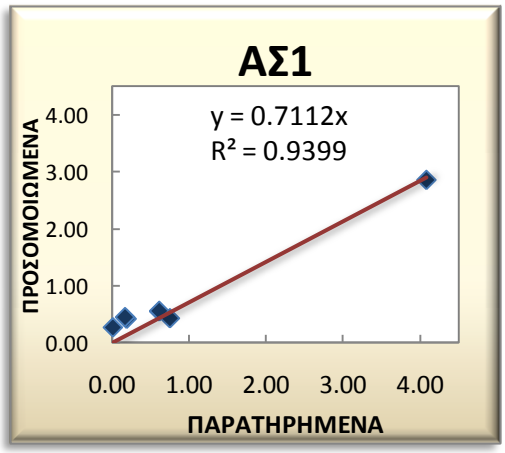
Σχήμα 7.9: Αποτελέσματα Ε9



(α)

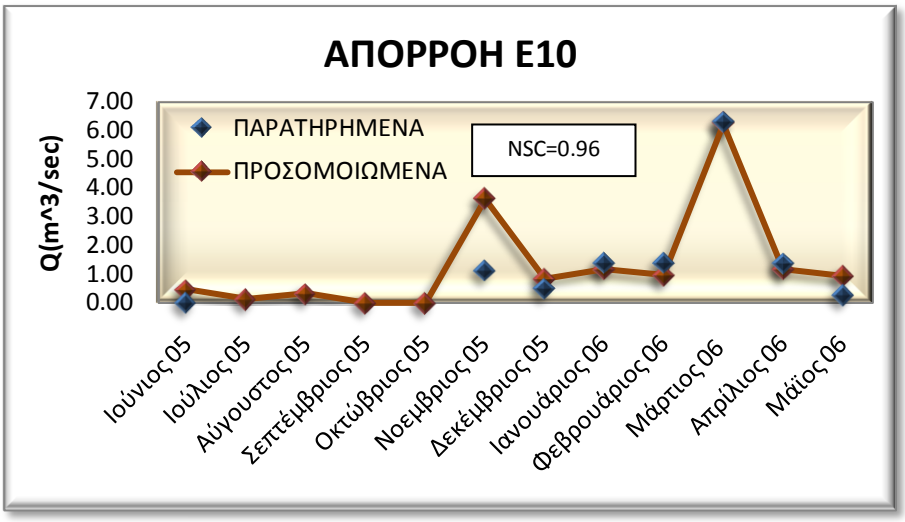


(β1) Με το Νοέμβρη

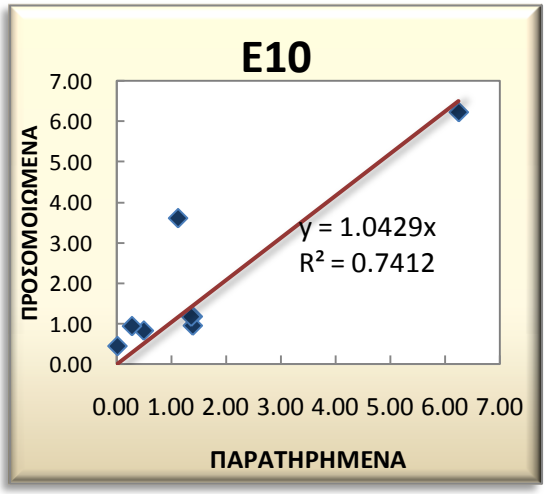


(β2) Χωρίς το Νοέμβρη

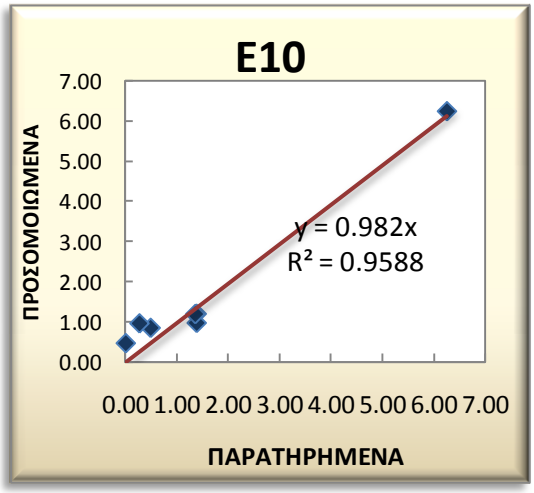
Σχήμα 7.10: Αποτελέσματα ΑΣ1



(α)

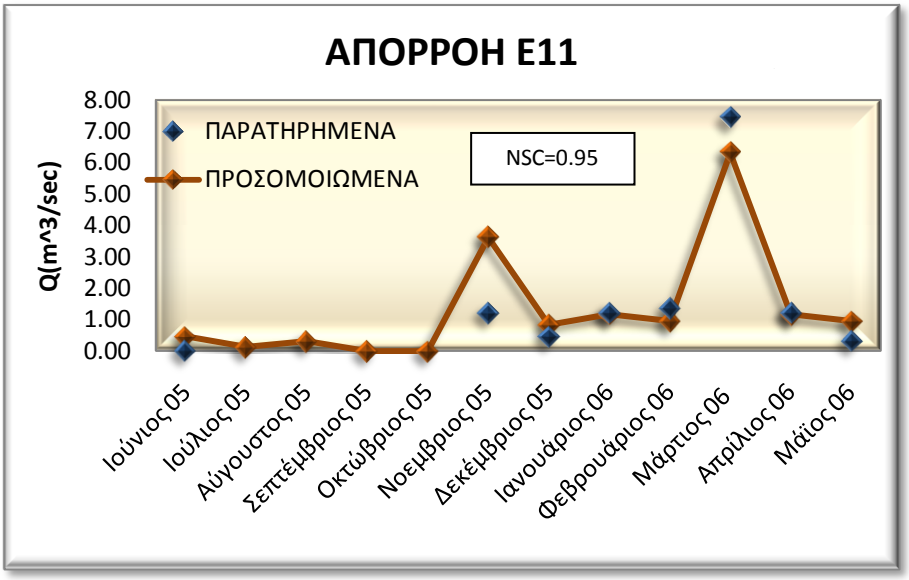


(β1) Με το Νοέμβρη

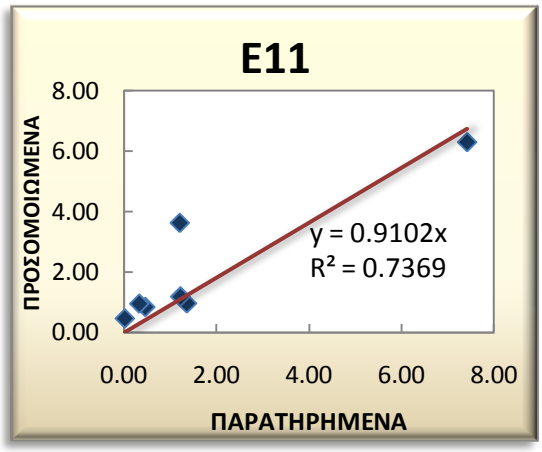


(β2) Χωρίς το Νοέμβρη

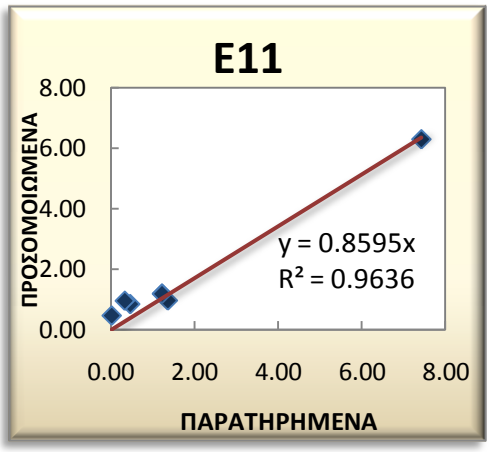
Σχήμα 7.11: Αποτελέσματα Ε10



(α)



(β1) Με το Νοέμβρη



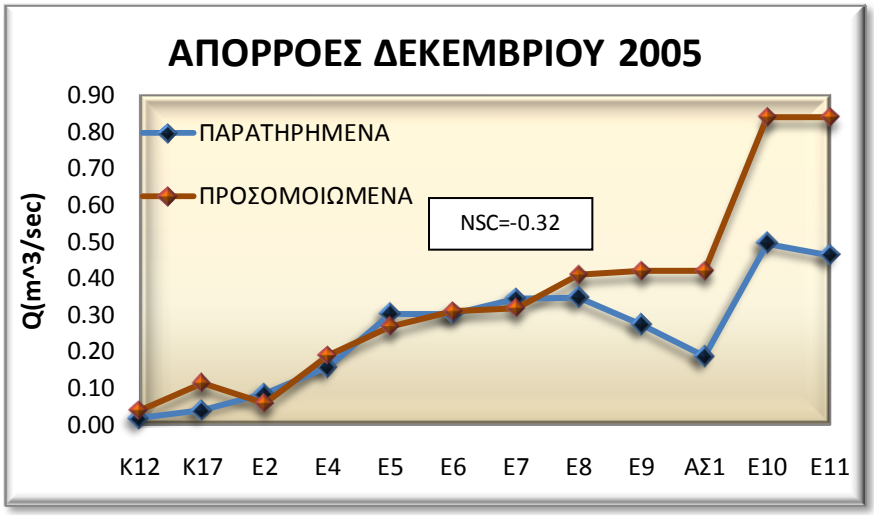
(β2) Χωρίς το Νοέμβρη

Σχήμα 7.12: Αποτελέσματα Ε11

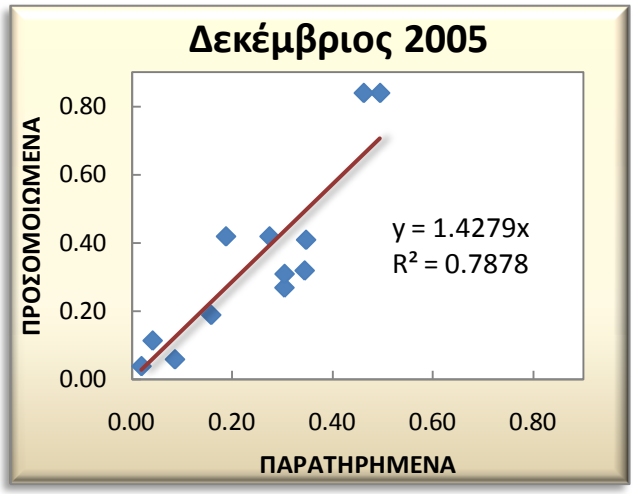
Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι το πρόγραμμα παρέχει ικανοποιητική προσομοίωση των παροχών σε όλα σχεδόν τα σημεία υδρομέτρησης συναρτήσει των μηνών. Υπάρχει βέβαια συστηματική υπερεκτίμηση για το μήνα Νοέμβριο σε όλα τα σημεία και γι αυτό υπολογίσαμε τους δείκτες αρχικά με τον Νοέμβρη και στη συνέχεια παραλείποντας τον Νοέμβρη, έτσι ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των δύο τιμών.

Μια πιθανή ερμηνεία για τη μεγάλη απόκλιση των μετρούμενων και των προσομοιωμένων τιμών για το Νοέμβριο του 2005 είναι η ακόλουθη. Οι υδρομετρήσεις κατά μήκος των υδατορευμάτων είναι πιθανόν να έχουν λάβει

χώρα πριν από τα γεγονότα βροχόπτωσης, τα οποία όπως φαίνεται από το σχήμα 7.3 παρουσίασαν μεγάλη ένταση το 2005. Σημειώνεται ότι ενώ η μέση βροχόπτωση Νοεμβρίου αντιστοιχεί σε 66.2 mm με βάση στοιχεία από το 2000 έως το 2008 (http://www.weatheronline.co.uk), το 2005 καταγράφηκε βροχόπτωση 181 mm στο ΜΣ Αλεξανδρούπολης και 210 mm στο βροχόμετρο Κίρκης (Σχήμα 7.3).



(α)



(β)

Σχήμα 7.13: Απορροές Δεκεμβρίου 2005 πριν τη βαθμονόμηση του μοντέλου

Από το διάγραμμα του σχήματος 7.13, παρατηρούμε ότι όσον αφορά τις ροές κατα μήκος των ρεμάτων το μήνα Δεκέμβριο 2005, η προσομοίωση είναι ικανοποιητική μέχρι το σημείο Ε8, αλλά παρατηρείται υπερτίμηση στα σημεία Ε9, ΑΣ1, Ε10 και Ε11. Έτσι προκύπτει και η ανάγκη ρύθμισης ορισμένων παραμέτρων του μοντέλου, προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη προσομοίωση των απορροών.

7.3.3. Αποτελέσματα προσομοίωσης μετά την ρύθμιση παραμέτρων

Η ρύθμιση των παραμέτρων του μοντέλου έγινε με σκοπό να βελτιωθεί η προσομοίωση των απορροών κατά μήκος των υδατορευμάτων με βάση τις διαθέσιμες μετρήσεις του Δεκεμβρίου 2005.

Οι αποκλίσεις που παρατηρούνται στο Σχήμα 7.13 δείχνουν ότι από το σημείο υδρομέτρησης Ε9 και μετά υπάρχουν απώλειες νερού, οι οποίες δεν λαμβάνονται υπόψη στο μοντέλο με βάση την αρχική ρύθμιση των παραμέτρων. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε μια σειρά παραμέτρων που είναι πιθανό να επηρεάζουν το μέγεθος της απορροής και πραγματοποιήθηκαν διαδοχικές δοκιμές προσομοίωσης αλλάζοντας την τιμή τους, με στόχο τη βελτίωση των τιμών στους τρεις δείκτες ελέγχου της ακρίβειας, NSC, κλίση και R2, για τις μετρήσεις Δεκεμβρίου 2005. Οι παράμετροι που εξετάσθηκαν, το εύρος τιμών που μπορούν να λάβουν και οι τελικές τιμές που χρησιμοποιήθηκαν συνοψίζονται στον Πίνακα 7.2.

Σύντομη επεξήγηση των συγκεκριμένων παραμέτρων δίνεται στη συνέχεια:

ESCO: Περιγράφει τη συνεισφορά στην εξάτμιση των κατώτερων στρωμάτων του εδάφους. Μπορεί να πάρει τιμές από 0.01 μέχρι 1. Όσο μειώνεται η τιμή του, το μοντέλο υπολογίζει ότι μπορεί να αντληθεί νερό από χαμηλότερα στρώματα του εδάφους. Χρησιμοποιήθηκε η τιμή 0.7 για όλη τη λεκάνη απορροής. Οι μεταβολές της παραμέτρου δεν βελτίωσαν την προσομοίωση για το μήνα Δεκέμβριο 2005.

EPCO: Περιγράφει την ικανότητα των φυτών να αντλούν νερό από μεγάλα βάθη. Μπορεί να πάρει τιμές από 0.01 μέχρι 1. Τιμές που προσεγγίζουν το 1 επιτρέπουν άντληση νερού από χαμηλότερο βάθος. Χρησιμοποιήθηκε η τιμή 1.0 για όλη τη λεκάνη απορροής. Οι μεταβολές της παραμέτρου δεν βελτίωσαν την προσομοίωση για το μήνα Δεκέμβριο 2005.

GW_REVAP: Υπεισέρχεται στις εξισώσεις που περιγράφουν την τριχοειδή κίνηση του νερού από το ρηχό υδροφόρο στρώμα προς την ακόρεστη ζώνη λόγω εξάτμισης. Μπορεί να πάρει τιμές από 0.02 μέχρι 0.2. Οι μεταβολές της τιμής δεν επηρέασαν την ακρίβεια της προσομοίωσης. Χρησιμοποιήθηκε η τιμή 0.02.

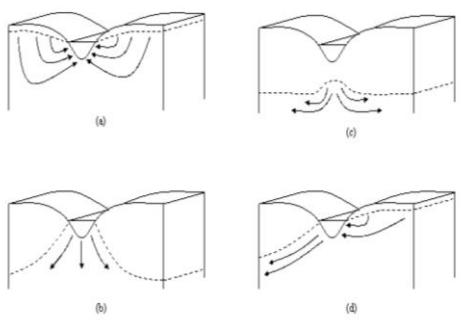
GWQMN: Καθορίζει ένα ελάχιστο βάθος του νερού, πάνω από το οποίο το μοντέλο επιτρέπει τη ροή από το ρηχό υδροφόρο στρώμα προς το υδατόρευμα. Η παράμετρος μπορεί να πάρει τιμές από 0-300 mm. Δεν επηρεάζει σημαντικά την ακρίβεια της προσομοίωσης στη συγκεκριμένη εφαρμογή, γι αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκε η τιμή 0.

Πίνακας 7.2: Παράμετροι που διερευνήθηκαν για βελτίωση της προσομοίωσης

Παράμετρος	Περιγραφή	Εύρος	Τιμή που χρησιμοποιή-θηκε
ESCO	Συνεισφορά στην εξάτμιση των κατώτερων στρωμάτων του εδαφους	0-1	0.7
EPCO	Ικανότητα φυτών να αντλούν νερό από μεγάλα βάθη	0-1	1
GW_REVAP	Συντελεστής επανατροφοδότησης	0.02-0.20	0.02
GWQMN	Βάθος νερού για επιστρέφουσα ροή	0-300 mm	0
RCHRG_DP	Κλάσμα νερού προς τον βαθύ υδροφορέα	0-1	0.05
CH_K(2)	Υδραυλική αγωγιμότητα του πυθμένα των υδατορευμάτων		10 mm/h

RCHRG-DP: Κλάσμα από το νερό κατείσδυσης που απομακρύνεται προς το βαθύ υδροφόρο. Οι τιμές κυμαίνονται από 0 μέχρι 1. Δεν διαπιστώθηκε σημαντική επίδραση στην ακρίβεια της προσομοίωσης. Χρησιμοποιήθηκε η τιμή 0.05.

CH_K(2): Αντιστοιχεί στην υδραυλική αγωγιμότητα του πυθμένα του υδατορεύματος. Είναι μια παράμετρος που μπορεί να ρυθμιστεί για κάθε επιμέρους τμήμα του υδατορεύματος. Στο σχήμα 7.14 παρουσιάζονται οι διάφορες περιπτώσεις της κυκλοφορίας του νερού από τον υδροφορέα προς το ρέμα και αντιστρόφως. Για τμήματα υδατορεύματος τα οποία τροφοδοτούνται μόνον από το υπόγειο νερό (περίπτωση Σχ. 7.14 α), χρησιμοποιείται μηδενική τιμή της παραμέτρου CH_K(2)=0. Για όλες τις άλλες περιπτώσεις πρέπει να δοθούν τιμές, οι οποίες εξαρτώνται από τη διαπερατότητα του ιζήματος. Τυπικές τιμές δίνονται υδραυλικής αγωγιμότητας δίνονται στον Πίνακα 7.3.

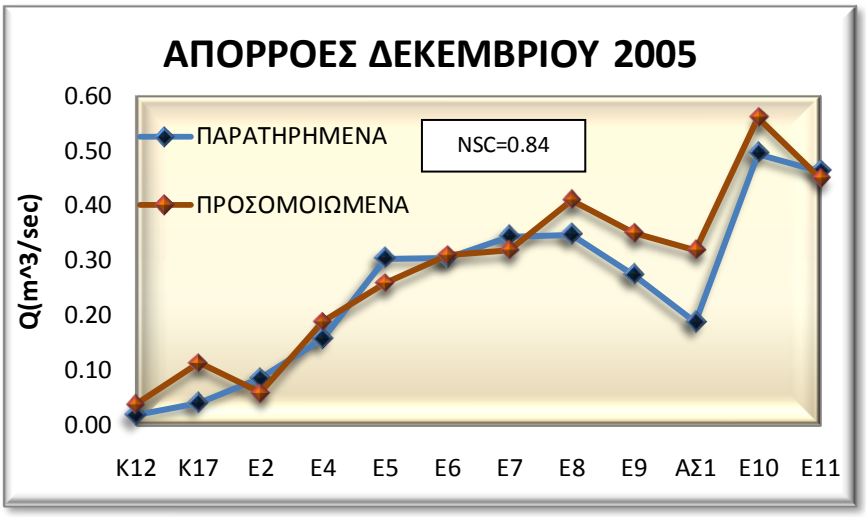


Σχήμα 7.14. Περιπτώσεις ροής του νερού μεταξύ του υπόγειου υδροφόρου και του υδατορεύματος μέσω του πυθμένα του υδατορεύματος (Neitch et al., 2004).

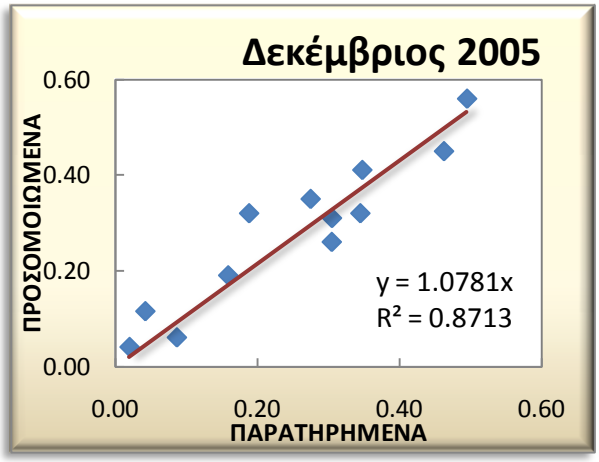
Πίνακας 7.3: Παραδείγματα τιμών υδραυλικής αγωγιμότητας για διάφορα υλικά στον πυθμένα υδατορρευμάτων (Neitch et al., 2004).

Κατηγορία υλικού πυθμένα	Χαρακτηριστικά υλικού	Υδραυλική αγωγιμότητα
1 Πολύ υψηλός ρυθμός απώλειας	Καθαρό χαλίκι και χονδρόκοκκη άμμος	>127mm/hr
2 Υψηλός ρυθμός απώλειας	Χαλίκι και άμμος	51-127mm/hr
3 Αρκετά υψηλός ρυθμός απώλειας	Μίγμα άμμου-χαλικιού με μικρή περιεκτικότητα ιλύος-αργίλου	25-76mm/hr
4 Μέτριος ρυθμός απώλειας	Μίγμα άμμου-χαλικιού με υψηλή περιεκτικότητα ιλύος-αργίλου	6-25mm/hr
5 Ασήμαντος ρυθμός απώλειας	Σταθεροποιημένο υλικό πυθμένα με υψηλή περιεκτικότητα ιλύος-αργίλου	0.025-2.5mm/hr

Διαπιστώθηκε ότι μέσω της παραμέτρου CH_K(2) μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά η ακρίβεια της προσομοίωσης. Χρησιμοποιήθηκε τελικά η τιμή 10 mm/h για τις υπολεκάνες 1, 10,11, 13 και 14. Η σύγκριση προσομοιωμένων-παρατηρημένων τιμών με τη χρήση αυτών των παραμέτρων παρουσιάζεται στο σχήμα 7.15.



(α)



(β)

Σχήμα 7.15: Απορροές Δεκεμβρίου 2005 μετα τη ρύθμιση παραμέτρων του μοντέλου..

Με τη ρύθμιση των συγκεκριμένων παραμέτρων ο δείκτης NSC από την αρνητική τιμή -0.32 αυξηθηκε σε 0.84, η κλίση στο διάγραμμα διασποράς προσέγγισε τη μονάδα (από 1.48 έγινε 1.08) και ο συντελεστής συσχέτισης αυξήθηκε από 0.79 σε 0.87.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι δείκτες ακρίβειας της προσομοίωσης μετά τη βαθμονόμηση του μοντέλου.

Πίνακας 7.4: Δείκτες ακρίβειας του μοντέλου SWAT

(α) Περιγραφή μηνιαίας διακύμανσης των απορροών για το χρονικό διάστημα Ιούνιο 2005 - Μάιο 2006

ΣΗΜΕΙΑ	*ΧΩΡΙΣ ΤΟ ΝΟΕΜΒΡΗ*			*ΜΕ ΤΟ ΝΟΕΜΒΡΗ*		
	NSC	**R^2**	**ΚΛΙΣΗ**	**NSC**	**R^2**	**ΚΛΙΣΗ**
Κ12	0.87	0.9280	0.7516	0.20	0.274	0.7651
Κ17	0.89	0.8948	0.8488	0.37	0.458	0.9463
Ε8	0.89	0.9788	0.9376	0.67	0.74	0.9983
Ε9	0.87	0.9763	0.8379	0.88	0.761	0.8882
ΑΣ1	0.83	0.9703	0.6791	0.76	0.752	0.7190
Ε10	0.96	0.0682	0.9241	0.77	0.778	0.9812
Ε11	0.93	0.9869	0.7969	0.81	0.796	0.8434

(β) Περιγραφή της απορροής κατά μήκος των υδατορευμάτων για το μήνα Δεκέμβριο 2005

NSC	**R^2**	**ΚΛΙΣΗ**
0.84	0.871	1.078

7.4 Χαρακτηριστικά στοιχεία υδατικού ισοζυγίου

Στους Πίνακες 7.5 και 7.6 συνοψίζονται χαρακτηριστικά στοιχεία του υδατικού ισοζυγίου, όπως έχουν προσδιορισθεί από τους υπολογισμούς του SWAT. Στο σχήμα 7.16 παρουσιάζονται τα στοιχεία για το έτος 2005. Όπως φαίνεται στο σχήμα, από τη συνολική βροχόπτωση που πέφτει στη λεκάνη απορροής το 2005 ένα ποσοστό 57% απομακρύνεται μέσω της εξατμισοδιαπνοής, ένα ποσοστό 36% απορρέει και ένα ποσοστό 7% συμβάλλει στη αύξηση της ποσότητας του νερού που βρίσκεται αποθηκευμένο στο εδαφικό προφίλ.

Πίνακας 7.5: Γενικό υδατικό ισοζύγιο στη συνολική λεκάνη απορροής. Όλα τα μεγέθη σε mm H2O.

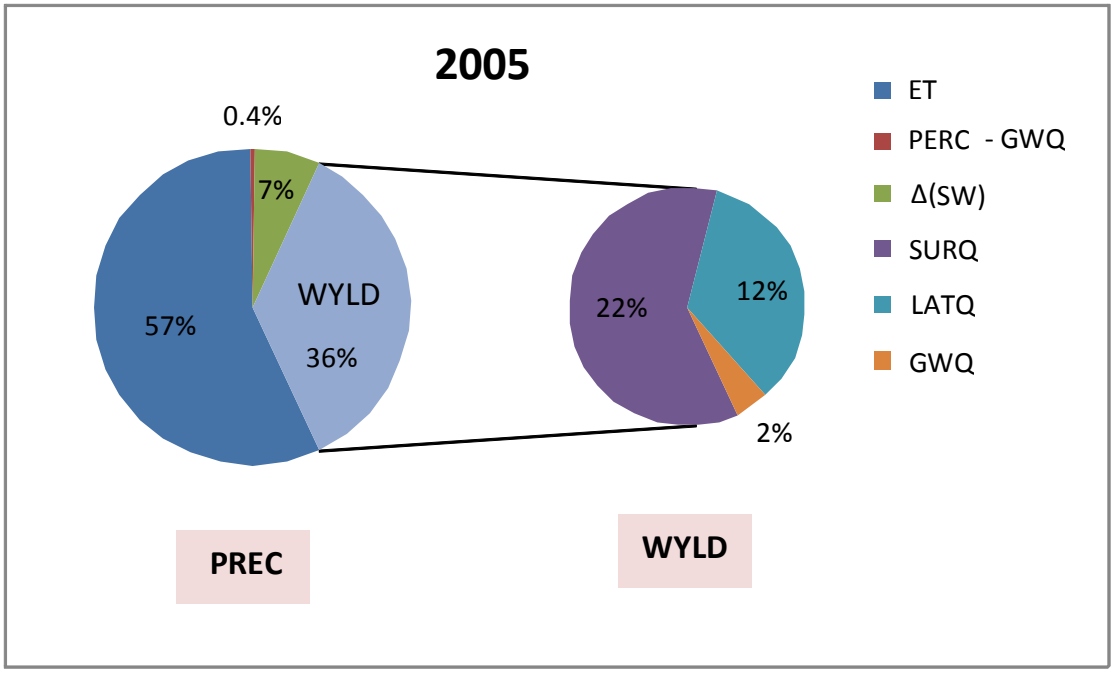
	PREC	1	2	3	4	ΑΘΡΟΙΣΜΑ
		ET	WYLD	PERC-GWQ	Δ(SW)	1+2+3+4
2004	403.1	326.35	47.87	1.61	25.91	401.74
2005	811.6	462.39	291.35	3.58	53.67	810.99
2006	577.6	536.58	140.56	2.96	-102.85	577.25
2007	479.4	338.30	58.64	2.88	79.21	479.03

PREC: Βροχόπτωση, ET: Εξατμισοδιαπνοή, WYLD: Συνολική απορροή, PERC: Κατείσδυση, GWQ: Συμμετοχή των υπόγειων νερών (από το ρηχό υδροφόρο) στη ροή του κύριου υδατορεύματος, Δ(SW) : Μεταβολή της ποσότητας νερού που βρίσκεται αποθηκευμένο στο εδαφικό προφίλ.

Πίνακας 7.6: Επιμέρους στοιχεία της συνολικής απορροής (WYLD). Όλα τα μεγέθη σε mm H2O.

	WYLD	1	2	3	ΑΘΡΟΙΣΜΑ
		SURQ	LATQ	GWQ	1+2+3
2004	47.87	5.09	40.04	2.87	48
2005	291.35	178.82	100.61	13.23	292.66
2006	140.56	45.77	75.07	20.96	141.8
2007	58.64	4.67	51.33	2.83	58.83

SURQ: Επιφανειακή απορροή, LATQ: Πλευρική ροή από το εδαφικό προφίλ προς το υδατόρευμα, GWQ: Ροή από το ρηχό υδροφόρο προς το υδατόρευμα.



ET: Εξατμισοδιαπνοή, **PERC-GWD**: Κατείσδυση προς βαθύ υδροφόρο, **Δ(SW)**: Αύξηση αποθηκευμένου νερού στο έδαφος, **SURQ**: Επιφανειακή απορροή, **LATQ**: Πλευρική ροή από το εδαφικό προφίλ προς το υδατόρευμα, **GWQ**: Ροή από το ρηχό υπόγειο υδροφόρο προς το υδατόρευμα.

Σχήμα 7.16: Στοιχεία υδατικού ισοζυγίου για το 2005. Κατανομή βροχόπτωσης (PREC) και επιμέρους στοιχεία της συνολικής απορροής (WYLD).

Στη διαμόρφωση του 36% της συνολικής απορροής συμβάλλουν κυρίως η επιφανειακή απορροή (22%), αλλά και πλευρική ροή από το εδαφικό προφίλ προς τα υδατορεύματα (12%), καθώς και ροή από το ρηχό υπόγειο υδροφόρο (2%).

8. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ ΡΥΠΩΝ ΣΤΟ SWAT

8.1 Μεθοδολογία προσομοίωσης του ρυθμού αποδέσμευσης και διασποράς ρύπων

Όπως προαναφέρθηκε, για να διερευνηθεί η δυνατότητα προσομοίωσης της διασποράς της ρύπανσης με χρήση του SWAT, χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα που σχετίζονται με τις μετρούμενες συγκεντρώσεις Zn, Pb και Cd, στην δειγματοληψία που πραγματοποιήθηκε το Δεκέμβριο του 2005. Τα τρία αυτά στοιχεία επελέγησαν με βάση τα κύρια συμπεράσματα της μελέτης γεωχημικού χαρακτηρισμού στείρων εξόρυξης και τελμάτων εμπλουτισμού που πραγματοποιήθηκε από το Εργαστήριο Μεταλλουργίας του ΕΜΠ για λογαριασμό του ΙΓΜΕ (Εργ. Μεταλ. ΕΜΠ, 2007). Η μελέτη αυτή είχε δείξει ότι τα συγκεκριμένα μεταλλευτικά απορρίμματα που βρίσκονται αποτεθειμένα στην περιοχή των μεταλλείων Αγ. Φιλίππου και του Εργοστασίου Εμπλουτισμού Κίρκης παρουσιάζουν υψηλή εκχυλισιμότητα κυρίως ως προς τα τρία αυτά στοιχεία.

Δεδομένου ότι η κλίμακα της περιοχής μελέτης είναι πολύ μεγαλύτερη από την έκταση που καταλαμβάνουν οι μεταλλευτικές εγκαταστάσεις, θεωρήθηκε ότι οι εστίες ρύπανσης μπορούν να περιγραφούν ως δύο σημειακές πηγές, μία στη θέση του μεταλλείου Αγ. Φιλίππου και μία στο Εργοστάσιο Εμπλουτισμού της Κίρκης. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε θεωρώντας ότι οι ρύποι αποδεσμεύονται από τις δύο πηγές με σταθερό μέσο μαζικό ρυθμό ροής (kg/d), όπως φαίνεται στον Πίνακα 8.1.

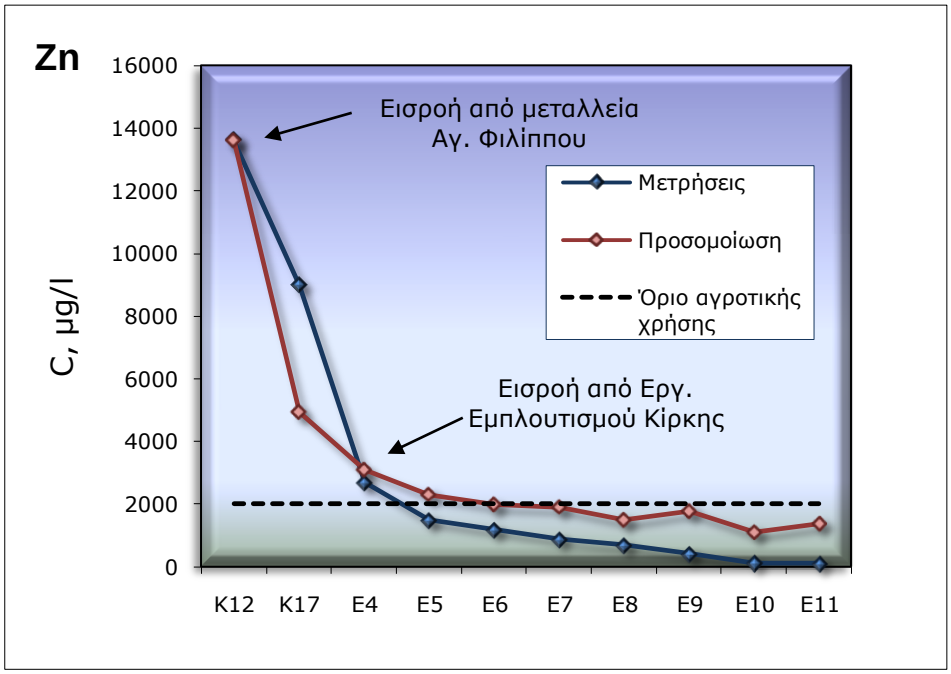
Πίνακας 8.1: Ρυθμός αποδέσμευσης των ρύπων (kg/d) από τις δύο πηγές ρύπανσης.

	Μεταλλεία Αγ. Φίλιππου	**Εργ. Εμπλουτισμού Κίρκης**
Zn (kg/d)	45.48	1.00
Pb (kg/d)	0.017	0.57
Cd (kg/d)	0.50	0.11

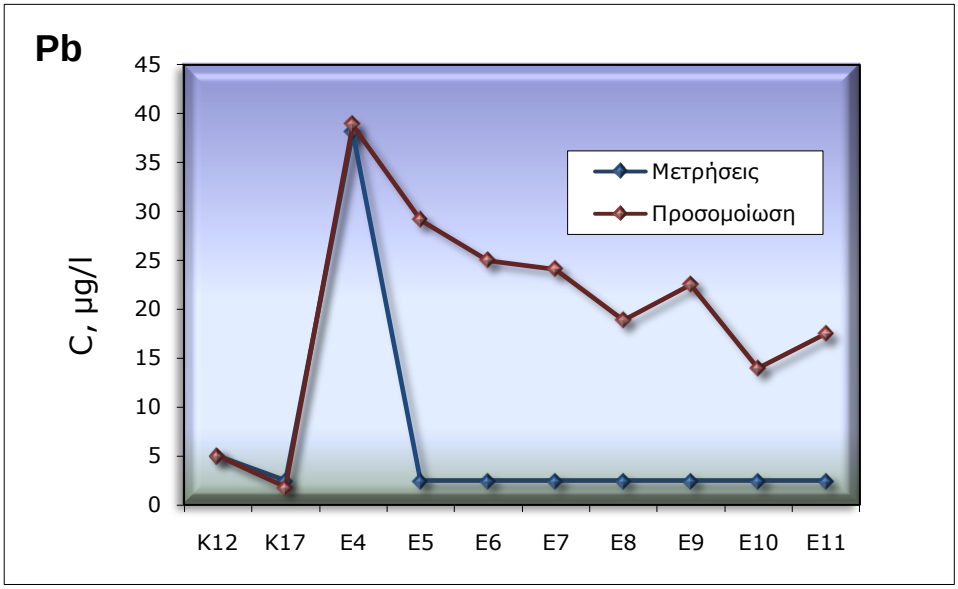
Οι τιμές αυτές προσδιορίστηκαν μετά από δοκιμές προσομοίωσης, έτσι ώστε να επιτευχθεί ικανοποιητική προσέγγιση των μετρούμενων συγκεντρώσεων στα σημεία δειγματοληψίας K12 και E4.

8.2 Σύγκριση μετρήσεων και προσομοίωσης της διασποράς της ρύπανσης κατά μήκος των υδατορευμάτων (Δεκ. 2005)

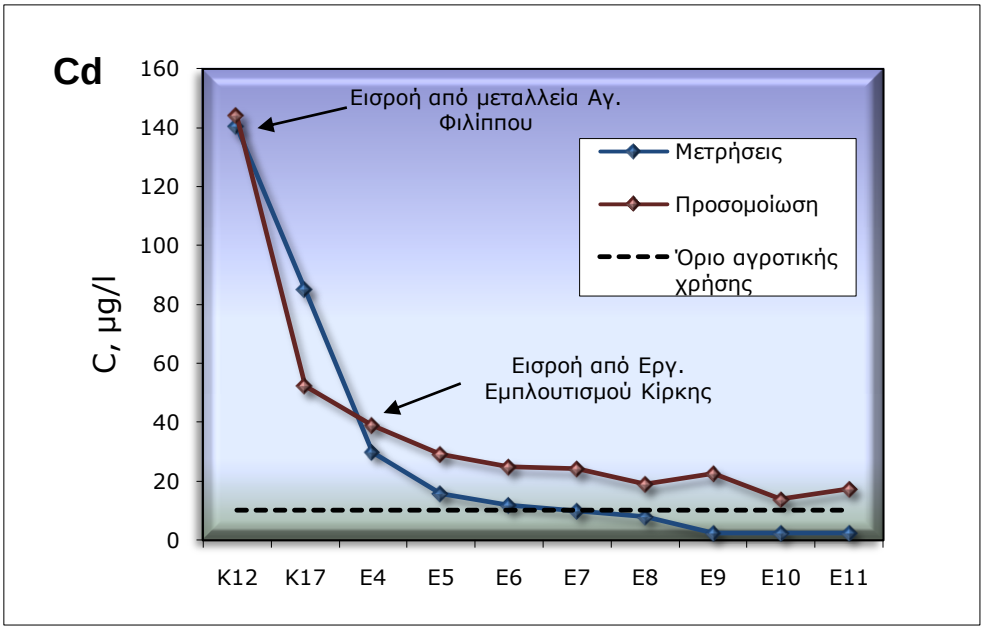
Στα διαγράμματα 8.1 έως 8.3 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις των μετάλλων Zn, Pb, Cd, όπως προσομοιώθηκαν από το SWAT κατά μήκος των σημείων δειγματοληψίας K12 έως E11 για το Δεκέμβριο του 2005. Στα διαγράμματα που αφορούν τον Zn και το Cd, παρουσιάζονται για σύγκριση και οι τιμές που θεωρούνται ανώτατο όριο για χρήση των νερών σε εργασίες άρδευσης, οι οποίες αντιστοιχούν σε 2000 μg/l για τον Zn και 10 μg/l για το Cd. (Ayers and Westcot, 1994). Το όριο για τον Pb είναι 5000 μg/l, δηλαδή σημαντικά υψηλότερο από τις μετρούμενες συγκεντρώσεις.



Σχήμα 8.1: Συγκέντρωση Zn (Δεκέμβριος 2005)



Σχήμα 8.2: Συγκέντρωση Pb (Δεκέμβριος 2005)



Σχήμα 8.3: Συγκέντρωση Cd (Δεκέμβριος 2005)

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι:

- Στο σημείο K17 τα προσομοιωμένα αποτελέσματα για τον Zn και το Cd είναι χαμηλότερα από τα παρατηρημένα. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι

η ρύπανση στην πραγματικότητα δεν είναι σημειακή, όπως θεωρήσαμε κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης, αλλά αντιθέτως υπάρχουν πολλαπλά σημεία κατά μήκος του ρέματος Κιρκάλων όπου σημειώνεται αποδέσμευση ρύπων, όπως π.χ. διάσπαρτοι εγκαταλειμμένοι σωροί στείρων εξόρυξης, σημεία εκκροής νερών από τις παλιές μεταλλευτικές στοές, κλπ.

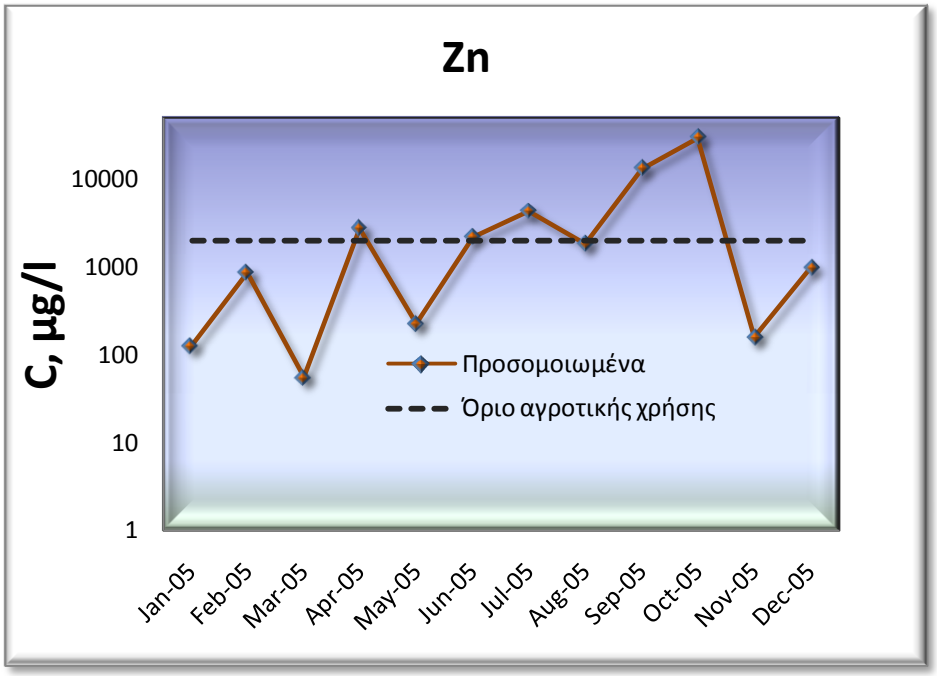
- Μετά το σημείο Ε4 παρατηρείται μια υπερτίμηση των ρυπαντικών φορτίων από το SWAT, καθώς και στα τρία διαγράμματα, οι προσομοιωμένες τιμές είναι σημαντικά αυξημένες σε σχέση με τις παρατηρημένες.
- Σε σύγκριση με τα όρια για την αγροτική χρήση των νερών, η προσομοίωση θα οδηγούσε στο συμπέρασμα ότι τα νερά είναι ακατάλληλα για άρδευση σε όλο το μήκος του ρέματος Ειρήνη, κυρίως λόγω του καδμίου και δευτερευόντως λόγω του ψευδαργύρου τουλάχιστον μέχρι το σημείο Ε5. Στην πραγματικότητα τα νερά είναι κατάλληλα για άρδευση μετά το σημείο δειγματοληψίας Ε8, τόσο ως προς τον ψευδάργυρο όσο και ως προς το κάδμιο.
- Η απόκλιση των τιμών ανάμεσα στις μετρούμενες συγκεντρώσεις και στα προσομοιωμένα αποτελέσματα οφείλεται εν μέρει στην απόκλιση των απορροών όπως αυτή περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Το SWAT βγάζει τα αποτελέσματα της ρύπανσης σε kg/d, ενώ οι παρατηρημένες τιμές που είχαμε στη διάθεση μας ήταν σε mg/l. Συνεπώς, και προκειμένου να είναι εφικτή η σύγκριση των δύο τιμών, μετατρέψαμε τα αποτελέσματα του μοντέλου από kg/d σε mg/l διαιρώντας με την αντίστοιχη απορροή για το κάθε σημείο και δεδομένης της μερικής απόκλισης των προσομοιωμένων με τις παρατηρημένες απορροές, επηρεάστηκαν αντίστοιχα και οι συγκεντρώσεις των μετάλλων.
- Η σημαντικότερη αιτία για τις διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ μετρήσεων και προσομοιωμένων τιμών είναι ότι το μοντέλο, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, δεν λαμβάνει υπόψη του τα φαινόμενα φυσικής απομείωσης (natural attenuation) που λαμβάνουν χώρα στην πραγματικότητα. Δεν ενσωματώνει δηλαδή εξισώσεις ικανές να περιγράψουν τα φαινόμενα καταβύθισης ή και προσρόφησης των ρύπων στα σωματίδια του πυθμένα των υδατορευμάτων, φαινόμενα που είναι πιθανόν να λαμβάνουν χώρα καθώς τα ρυπασμένα νερά ρέουν στα υδατορεύματα, αναμιγνυόμενα με τις πλευρικές απορροές.

Στην ενότητα 9 χρησιμοποιήθηκε το γεωχημικό μοντέλο PHREEQC για να διερευνηθεί εάν η σύσταση των νερών υποδεικνύει το ενδεχόμενο καταβυθίσεων, που θα μπορούσαν να δικαιολογήσουν συγκεντρώσεις χαμηλότερες από αυτές που υπολογίζονται όταν λαμβάνεται υπόψη μόνον η αραίωση των ρυπασμένων νερών

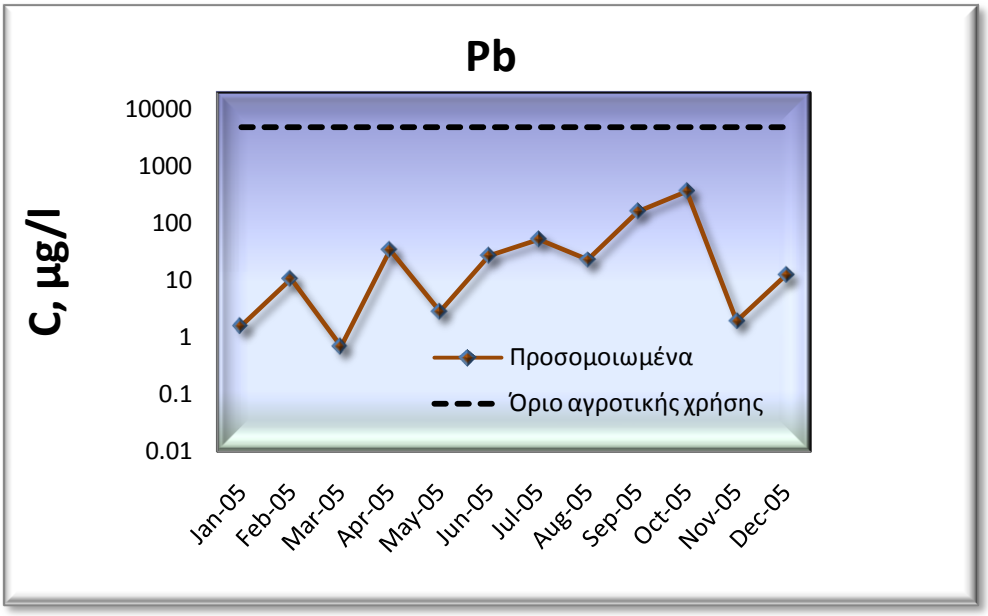
από την ανάμιξή τους με τις καθαρές απορροές, όπως συμβαίνει πρακτικά στο SWAT για την περίπτωση των μετάλλων.

8.3. Διακύμανση της ρύπανσης στη διάρκεια του υδρολογικού κύκλου

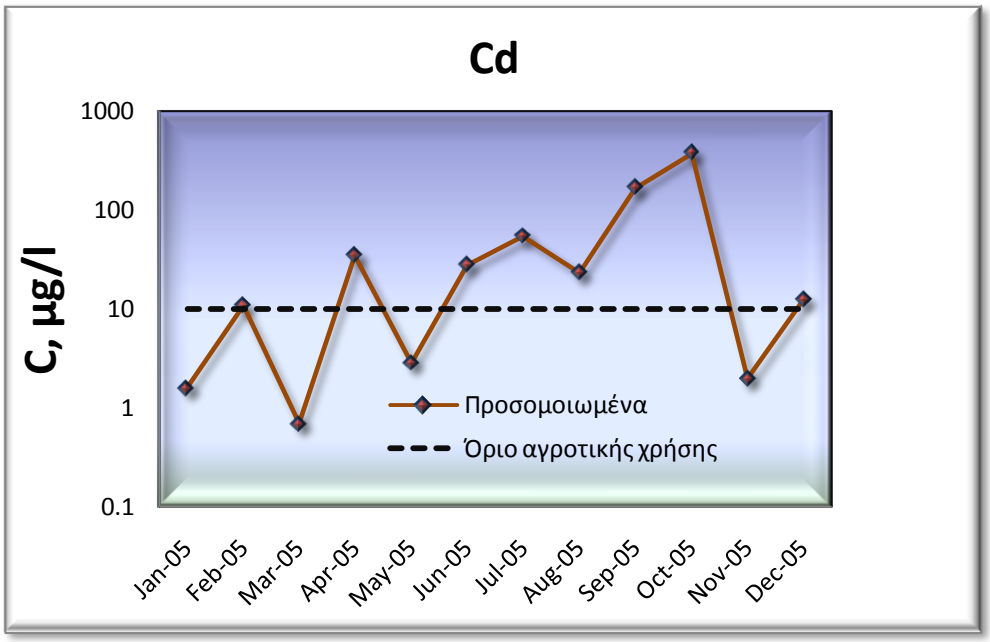
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ως προς τις προβλεπόμενες εποχιακές διακυμάνσεις της ρύπανσης στη διάρκεια ενός υδρολογικού έτους. Η επεξεργασία έγινε για το σημείο Ε10, το οποίο βρίσκεται στο κάτω μέρος της λεκάνης απορροής, δηλαδή σε πεδινή έκταση με εκτεταμένες αγροτικές δραστηριότητες, όπως φαίνεται και από το χάρτη χρήσεων γης. Στα σχήματα 8.4, 8.5 και 8.6 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις Zn, Pb και Cd αντίστοιχα.



Σχήμα 8.4: Εποχιακές διακυμάνσεις της συγκέντρωσης Zn στο σημείο Ε10 (2005)



Σχήμα 8.5: Εποχιακές διακυμάνσεις της συγκέντρωσης Pb στο σημείο E10(2005)



Σχήμα 8.6: Εποχιακές διακυμάνσεις της συγκέντρωσης Cd στο σημείο E10(2005)

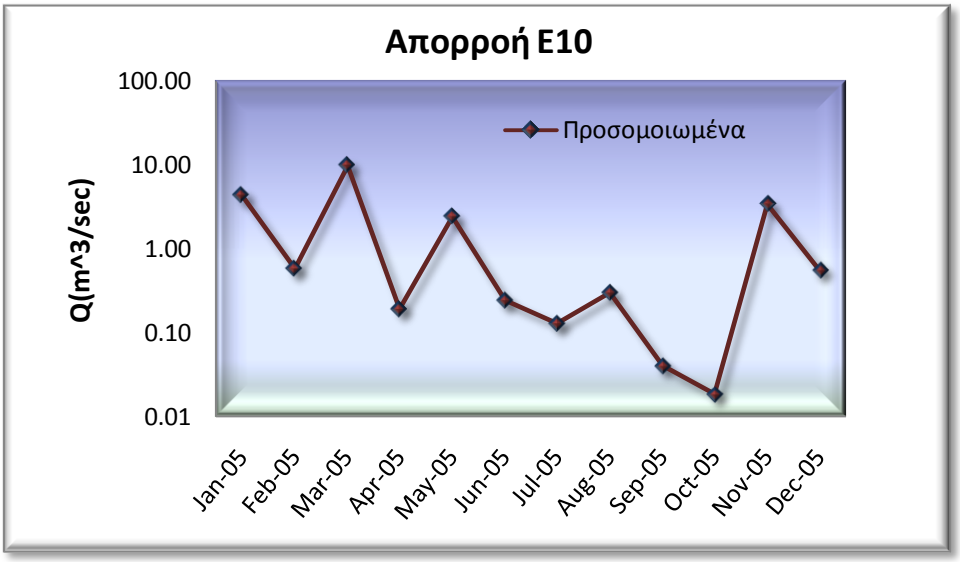
Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι:

- Σύμφωνα με το SWAT τα νερά είναι ακατάλληλα για άρδευση, κυρίως λόγω του καδμίου, για τους 8 μήνες του χρόνου, ενώ οι συγκεντρώσεις

βρίσκονται μέσα στα αποδεκτά όρια το Ιανουάριο, το Φεβρουάριο, το Μάιο και τον Νοέμβριο.

- Όσον αφορά στο μόλυβδο, το SWAT θεωρεί ότι δεν υπάρχει πρόβλημα ρύπανσης καθώς το όριο αγροτικής χρήσης είναι 5000 μg/l, πολύ υψηλότερο από τις συγκεντρώσεις που προσομοίωσε το μοντέλο.

Στο διάγραμμα 8.7 φαίνονται οι εποχιακές διακυμάνσεις της απορροής στο σημείο Ε10 για το ίδιο υδρολογικό έτος. Είναι φανερό ότι οι απορροές εμφανίζουν τάση αντιστρόφως ανάλογη σε σχέση με τις συγκεντρώσεις των μετάλλων.



Σχήμα 8.7: Απορροή στο Ε10 (2005)

Πρέπει πάντως να αναφερθεί ότι οι προβλέψεις αυτές στηρίζονται στην υπόθεση ότι η μαζική ροή των ρύπων (kg/d) από τις περιοχές των μεταλλευτικών εγκαταστάσεων δεν μεταβάλλεται στη διάρκεια του έτους. Αυτό δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Όταν κατά τη θερινή περίοδο μειώνεται η ποσότητα των νερών που διαβρέχει τις μεταλλευτικές εγκαταστάσεις με τις διάφορες εκτεθειμένες πηγές ρύπανσης, όπως στείρα εξόρυξης, τέλματα εμπλουτισμού, υπολείμματα μεταλλεύματος, κλπ., αναμένεται να μειώνεται αντίστοιχα και η ποσότητα των ρύπων που αποδεσμεύεται και μεταφέρεται προς τα υδατορεύματα. Το SWAT παρέχει τη δυνατότητα να εισαχθούν διαφορετικές τιμές μαζικής ροής των ρύπων σε επίπεδο μηνός ή ακόμη και σε ημερήσια βάση. Αυτό όμως προϋποθέτει την ύπαρξη πολλών μετρήσεων πεδίου, που να αποτυπώνουν με ακρίβεια τις εποχιακές διακυμάνσεις του παραγόμενου ρυπαντικού φορτίου κοντά στις κύριες πηγές ρύπανσης.

9. ΧΡΗΣΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ PHREEQC

9.1 Εισαγωγικά στοιχεία PHREEQC

Το PHREEQC είναι ένα ελεύθερο λογισμικό γεωχημικής μοντελοποίησης, το οποίο αναπτύχθηκε την τελευταία δεκαετία από τη Γεωλογική Υπηρεσία Των ΗΠΑ, USGS (United States Geological Survey) και διατίθεται δωρεάν από το διαδίκτυο στους χρήστες μέσω της ιστοσελίδας www.brr.cr.usgs.gov.

Ο κώδικας είναι σε γλώσσα προγραμματισμού C και εφαρμόζεται σε περιβάλλον DOS καθώς και Windows. Το PHREEQC απαιτεί καθόλου ή ελάχιστο προγραμματισμό, γεγονός που καθιστά την μοντελοποίηση εύκολη.

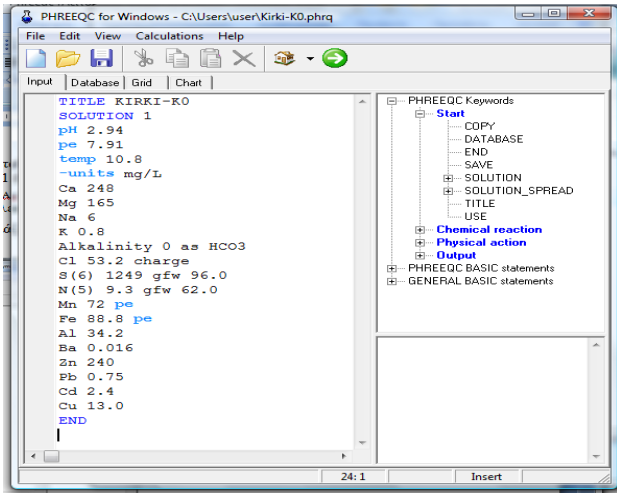
Ο πυρήνας των υπολογισμών στο PHREEQC βρίσκεται στην περιγραφή της υδατικής φάσης και πιο συγκεκριμένα στην ειδοταυτοποίηση (speciation), δηλ. στην ανάλυση της κατανομής των στοιχείων σε συγκεκριμένα είδη (species), π.χ. Zn2+, ZnOH+, κλπ. Στη συνέχεια το PHREEQC ελέγχει αν στο σύστημα που μελετάμε υπάρχουν στερεές φάσεις σε ισορροπία με την υδατική, ακολουθώντας την εξής μεθοδολογία (Αποκατάσταση ρυπασμένων εδαφών):

- Ξεκινάμε με την υπόθεση ότι δεν υπάρχουν στερεές φάσεις και κάνουμε την ειδοταυτοποίηση στην υδατική φάση
- Προσδιορίζουμε το δείκτη κορεσμού (SI, saturation index) των πιθανών στερεών φάσεων
- Εάν SI <0 (IAP<Ksp) για όλες τις πιθανές φάσεις, τότε δεν καταβυθίζεται κανένα στερεό
- Εάν για κάποια στερεή φάση ισχύει SI >0 (IAP>Ksp), τότε η συγκεκριμένη ένωση, θεωρητικά πρέπει να καταβυθιστεί.

Με αφετηρία αυτόν τον πυρήνα, στο PHREEQC έχουν ενσωματωθεί και πολλές άλλες δυνατότητες, όπως π.χ. μέχρι και απλά μοντέλα υπολογισμού διασποράς των ρύπων σε συνθήκες μονοδιάστατης ροής. Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήσαμε τις βασικές δυνατότητες του PHREEQC για τους υπολογισμούς των γεωχημικών ισορροπιών, καθώς και για την επίλυση απλών προβλημάτων ανάμιξης.

9.2 Ειδοταυτοποίηση και υπολογισμός δεικτών κορεσμού στα νερά των ρεμάτων Κιρκάλων και Ειρήνης

Τα δεδομένα της ποιότητας των νερών για το μήνα Δεκέμβριο 2005 συνοψίζονται στο Πίνακα 9.1. Παρουσιάζονται στοιχεία για 4 σημεία δειγματοληψίας, K0, K2, K4 και K7, κοντά στις εξορυκτικές δραστηριότητες του Αγίου Φιλίππου, όπου είναι εμφανής η επιβάρυνση της ποιότητας των νερών λόγω της όξινης απορροής, καθώς και για τα 12 σημεία που έχουν συμπεριληφθεί στην προσομοίωση στο SWAT. Τα δεδομένα εισήχθησαν στο λογισμικό γεωχημικών υπολογισμών Phreeqc για να προσδιοριστεί εάν η σύσταση των νερών υποδεικνύει την τάση για καταβύθιση συγκεκριμένων ορυκτών φάσεων των ρύπων.



Σχήμα 9.1: Εισαγωγή δεδομένων στο Phreeqc για το σημείο K0.

Οι υπολογισμοί στο Phreeqc πραγματοποιήθηκαν λαμβάνοντας υπόψη όλες τις παραμέτρους και συγκεντρώσεις των στοιχείων που παρουσιάζονται στον Πίνακα 9.1, εκτός από τα στοιχεία Ni και Co και τα ιόντα NH_4^+. Στο σχήμα 9.1 παρουσιάζεται ενδεικτικά η επιφάνεια εργασίας στο Phreeqc κατά την εισαγωγή των δεδομένων για το σημείο K0. Όπου οι μετρήσεις ήταν χαμηλότερες από τα όρια ανίχνευσης χρησιμοποιήθηκε σαν τιμή το ½ του ορίου ανίχνευσης, π.χ. για τον Fe από το σημείο K2 και μετά χρησιμοποιήθηκε η τιμή 50 μg/l. Οι τιμές του οξειδοαναγωγικού δυναμικού, E, χρησιμοποιήθηκαν για να προσδιορισθεί από το μοντέλο η οξειδωτική βαθμίδα των στοιχείων Fe και Mn. Αντί του οξειδοαναγωγικού δυναμικού στα δεδομένα εισόδου εισάχθηκε η αντίστοιχη τιμή της παραμέτρου pe, η οποία αντιστοιχεί στον αρνητικό δεκαδικό λογάριθμο μιας ποσότητας που μπορεί να θεωρηθεί ως «γραμμομοριακή συγκέντρωση ηλεκτρονίων». Η pe υπολογίστηκε από τις μετρήσεις δυναμικού $E_{Ag/AgCl}$ με βάση τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\frac{2.303RT}{F}pe = E_H \qquad (9.1)$$

$$E_H = E_{Ag/AgCl} + 0.205 \text{ (V)} \quad (9.2)$$

Όπου R η παγκόσμια σταθερά των αερίων, F η σταθερά Faraday, T η θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin. ($F/R=11.605$ K V^{-1}), E_H το δυναμικό με βάση το πρότυπο ηλεκτρόδιο υδρογόνου σε Volt και $E_{Ag/AgCl}$ το δυναμικό (σε Volt) με βάση τις μετρήσεις πεδίου, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν με ηλεκτρόδιο Ag/AgCl.

Στον Πίνακα 9.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών σε σχέση με τους δείκτες κορεσμού ως προς τις πιθανές ορυκτολογικές φάσεις. Οι υπολογισμοί έγιναν με τη βάση θερμοδυναμικών δεδομένων του ίδιου του Phreeqc. Σημειώνεται ότι υπάρχουν ενσωματωμένες και άλλες τέσσερεις βάσεις δεδομένων.

Ο δείκτης κορεσμού SI (saturation index) υπολογίζεται από την εξίσωση 9.3:

$$SI = \log\left(\frac{IAP}{Ks}\right) \quad (9.3)$$

όπου IAP (ion activity product) είναι το γινόμενο ενεργοτήτων κατιόντων και ανιόντων που αντιστοιχούν σε μια στερεή φάση και Ks το αντίστοιχο γινόμενο διαλυτότητας. Π.χ. για τη στερεή φάση βαρύτη, $BaSO_4$, το γινόμενο ενεργοτήτων υπολογίζεται με βάση τη σύσταση των νερών από την εξίσωση:

$$IAP = \{Ba^{+2}\} \cdot \{SO_4^{-2}\} \quad (9.4)$$

Οι ενεργότητες των ελεύθερων ιόντων Ba^{+2} και SO_4^{-2} προσδιορίζονται μετά τους υπολογισμούς ειδοταυτοποίησης (speciation) της υδατικής φάσης. Το γινόμενο διαλυτότητας του βαρύτη, logKs = -9.97 (σε 25°C), περιλαμβάνεται στα στοιχεία της βάσης δεδομένων. Όταν υπάρχουν και στοιχεία ειδικής ενθαλπίας, το μοντέλο πραγματοποιεί τη διόρθωση της τιμής Ks ως προς τη θερμοκρασία.

Αρνητικές τιμές του δείκτη κορεσμού, SI<0, δείχνουν ότι οι συγκεντρώσεις ανιόντων και κατιόντων στην υδατική φάση δεν δικαιολογούν την καταβύθιση της συγκεκριμένης στερεής ένωσης. Τιμές SI που προσεγγίζουν το μηδέν, SI~0, υποδεικνύουν ότι τα νερά είναι σε ισορροπία με τη συγκεκριμένη στερεή φάση. Τιμές SI>0 δείχνουν ότι τα νερά είναι υπέρκορα ως προς μια στερεή φάση. Αυτό μπορεί να συμβαίνει γιατί η κινητική της καταβύθισης ή η κινητική της κρυστάλλωσης ενός συγκεκριμένου ορυκτού είναι σχετικά αργή. Ένα παράδειγμα για την περίπτωση της δυσκολίας κρυστάλλωσης αποτελεί το οξείδιο του τρισθενούς σιδήρου αιματίτης, Fe_2O_3, το οποίο αποτελεί τη σταθερότερη θερμοδυναμικά φάση του Fe(III), αλλά δεν καταβυθίζεται στα φυσικά νερά.

Πίνακας 9.1. Δεδομένα ποιότητας των νερών για το μήνα Δεκέμβριο 2005

(α) Φυσικοχημικές παράμετροι και κύρια κατιόντα και ανιόντα

	Q	T	pH	E	Ca	Mg	Na	K	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{-2}	NO_3^-	NH_4^+
	m^3/h	°C		mV	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
K0	-	10.8	2.94	239	248	165	6	0.8		53.2	1249	9.3	1
K2	8.97	12.5	3.52	208	204	173	9.2	1.6		31.9	1201	9.3	0.5
K4	22.4	16.5	6.36	53	265	165	27.6	1.6	195	53.2	1273	0	0.45
K7	46.3	11.8	7.71	-23	237	99.2	22.5	1.6	36.6	30.1	1076	0	0.65
K12	77.5	12.1	8.08	-43	160	82.7	22.1	1.6	187	35.5	565	3.1	0.5
K17	153.9	11.7	8.13	-45	88.2	46.7	18.4	1.6	146	30.1	298	0	<0.26
E2	309.8	11.3	8.04	-40	51.3	19	17.5	2.3	172	24.8	62.4	6.2	<0.26
E4	567.6	11.1	8.14	-46	81.3	25.3	17	1.6	171	21.3	178	6.2	<0.26
E5	1094.9	11.4	8.35	-57	86.6	18	18.9	1.6	183	10.6	156	6.2	<0.26
E6	1094.5	6.4	8.28	-52	72.1	34	17.5	1.6	178	19.5	183	0	<0.26
E7	1237.5	6.9	8.19	-48	72.1	27.2	20.7	1.6	183	24.8	158	0	<0.26
E8	1254.2	7.4	8.28	-52	75.4	27.2	20.2	1.6	183	26.6	165	0	<0.26
E9	987.9	8.5	8.26	-52	89.0	25.8	20.7	1.6	207	26.6	174	0	<0.26
ΑΣ1	675.7	8.3	8.47	-62	72.1	31.6	23.4	2.3	268	30.1	106	6.2	<0.26
E10	1781.0	8.2			89.8	33.1	25.3	2.3	238	31.9	183	3.1	<0.26
E11	1664.0	8.1	8.32	-56	86.6	35.5	29.4	2.3	244	37.2	184	3.1	<0.26

(β) Βαρέα μέταλλα και άλλα ιχνοστοιχεία

	Ni	Mn	Fe	Pb	Cu	Zn	Cd	Ba	Al	Co
	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l
K0	970	72 000	88 800	750	13 000	240 000	2 400	16	34 200	125
K2	950	182 000	<100	1450	3 900	150 000	1 330	11	20 600	138
K4	450	33 800	<100	8	<5	48 300	92	14	13	58
K7	370	50 000	<100	14	28	43 000	325	24	10	47
K12	170	22 000	<100	5	15	13 600	140	25	<5	20
K17	75	10 800	<100	<5	33	9 000	85	25	13	8
E2	<5	<5	<100	<5	<5	40	<5	20	8	<5
E4	20	2 400	100	38	16	2 700	30	22	90	<5
E5	11	1 300	<100	<5	<5	1 500	16	24	14	<5
E6	8	1 120	<100	<5	6	1 200	12	23	10	<5
E7	7	860	<100	<5	5	900	10	22	7	<5
E8	5	620	<100	<5	<5	700	8	24	10	<5
E9	<5	250	<100	<5	<5	430	<5	30	<5	<5
ΑΣ1	<5	15	<100	<5	<5	30	<5	80	<5	<5
E10	<5	100	<100	<5	<5	150	<5	40	7	<5
E11	<5	70	<100	<5	<5	120	<5	40	7	<5

Πίνακας 9.2(α):Οι δείκτες κορεσμού των νερών ως προς τις πιθανές ορυκτές φάσεις στις διάφορες θέσεις δειγματοληψίας κατά μήκος των ρεμάτων Κιρκάλων και Ειρήνης. Αποτελέσματα με χρήση του γεωχημικού μοντέλου Phreeqc

Θέση δειγματοληψίας νερών		**K0**	**K2**	**K4**	**K7**	**K12**	**K17**	**E4**
pH νερών		2.94	3.52	6.36	7.71	8.08	8.13	8.14
Ορυκτό	**Μοριακός τύπος**	**Δείκτης κορεσμού, SI**						
Al(OH)3(a)	Al(OH)3	-7.06	-5.44	-1.05	-1.81	-2.88	-2.09	-1.22
Alunite	KAl3(SO4)2(OH)6	-4.85	-1.51	3.00	-3.00	-7.78	-5.90	-3.66
Anglesite	PbSO4	-0.72	-0.41	-2.96	-2.92	-4.58	-5.05	-4.16
Anhydrite	CaSO4	-0.79	-0.84	-0.65	-0.69	-1.02	-1.40	-1.58
Aragonite	CaCO3			-1.01	-0.57	0.46	0.24	0.37
Baryte	BaSO4	0.23	0.06	0.14	0.47	0.38	0.29	0.13
Calcite	CaCO3			-0.86	-0.42	0.61	0.40	0.52
Cd(OH)2	Cd(OH)2	-13.14	-12.19	-7.57	-4.28	-3.84	-3.86	-4.23
CdSO4	CdSO4	-8.28	-8.40	-9.21	-8.83	-9.34	-9.67	-10.28
Cerrusite	PbCO3			-1.88	-1.30	-1.60	-1.90	-0.70
Dolomite	CaMg(CO3)2			-1.69	-1.05	1.11	0.68	0.68
Fe(OH)3(a)	Fe(OH)3	-4.75	-6.80	-1.04	1.59	2.09	2.18	2.51
Gibbsite	Al(OH)3	-4.23	-2.63	1.71	1.00	-0.07	0.73	1.60
Goethite	FeOOH	0.61	-1.37	4.54	6.99	7.50	7.58	7.89
Gypsum	CaSO4:2H2O	-0.53	-0.59	-0.40	-0.44	-0.76	-1.15	-1.32
Halite	NaCl	-7.04	-6.99	-7.64	-7.66	-7.37	-7.69	-8.06
Hausmannite	Mn3O4	-35.29	-30.14	-14.31	-6.64	-5.60	-6.12	-8.23
Hematite	Fe2O3	3.16	-0.80	11.04	15.92	16.95	17.10	17.71
Jarosite-K	KFe3(SO4)2(OH)6	-10.07	-17.46	-8.19	-4.78	-4.79	-5.08	-4.53
Manganite	MnOOH	-11.92	-10.36	-5.42	-2.42	-2.10	-2.23	-2.88
Melanterite	FeSO4:7H2O	-3.29	-6.53	-6.55	-6.53	-7.01	-7.22	-7.08
Otavite	CdCO3			-1.21	-0.14	0.69	0.55	0.27
Pb(OH)2	Pb(OH)2	-8.90	-7.38	-4.18	-1.61	-2.29	-2.47	-1.41
Pyrochroite	Mn(OH)2	-12.63	-11.06	-6.15	-3.22	-2.91	-3.06	-3.71
Pyrolusite	MnO2:H2O	-19.49	-17.64	-11.99	-9.73	-9.35	-9.53	-11.06
Rhodochrosite	MnCO3			0.76	1.45	2.15	1.87	1.04
Siderite	FeCO3			-2.34	-1.91	-1.04	-1.09	-0.83
Smithsonite -	ZnCO3			-0.43	-0.01	0.40	0.25	-0.63
Witherite	BaCO3			-5.7	-4.93	-3.66	-3.59	-3.45
Zn(OH)2(e)	Zn(OH)2	-8.53	-7.57	-2.45	0.25	0.27	0.24	-0.49

Πίνακας 9.2 (β): Οι δείκτες κορεσμού των νερών ως προς τις πιθανές ορυκτές φάσεις στις διάφορες θέσεις δειγματοληψίας κατά μήκος των ρεμάτων Κιρκάλων και Ειρήνης. Αποτελέσματα με χρήση του γεωχημικού μοντέλου Phreeqc

Θέση δειγματοληψίας νερών		**E5**	**E6**	**E7**	**E8**	**E9**	**E10**	**E11**
pH νερών		8.35	8.28	8.19	8.28	8.26		8.32
Ορυκτό	**Μοριακός τύπος**	**Δείκτης κορεσμού, SI**						
Al(OH)3(a)	Al(OH)3	-2.25	-2.11	-2.19	-2.15	-2.79	-2.37	-2.38
Alunite	KAl3(SO4)2(OH)6	-7.50	-6.45	-6.47	-6.62	-8.53	-7.19	-7.28
Anglesite	PbSO4	-5.65	-5.47	-5.40	-5.49	-5.53	-5.62	-5.64
Anhydrite	CaSO4	-1.60	-1.67	-1.66	-1.63	-1.56	-1.55	-1.57
Aragonite	CaCO3	0.64	0.40	0.35	0.46	0.57	0.66	0.67
Baryte	BaSO4	0.13	0.21	1.19	0.23	0.31	0.44	0.44
Calcite	CaCO3	0.80	0.56	0.50	0.61	0.73	0.82	0.83
Cd(OH)2	Cd(OH)2	-4.07	-4.35	-4.60	-4.52	-5.07	-5.01	-4.97
CdSO4	CdSO4	-10.58	-10.92	-10.96	-11.02	-11.48	-11.49	-11.50
Cerrusite	PbCO3	-1.90	-1.83	-1.83	-1.84	-1.86	-1.86	-1.86
Dolomite	CaMg(CO3)2	1.07	0.86	0.65	0.86	1.02	1.29	1.36
Fe(OH)3(a)	Fe(OH)3	2.31	2.52	2.39	2.46	2.39	2.43	2.38
Gibbsite	Al(OH)3	0.57	0.76	0.67	0.71	0.06	0.49	0.47
Goethite	FeOOH	7.70	7.71	7.59	7.68	7.66	7.69	7.64
Gypsum	CaSO4:2H2O	-1.34	-1.41	-1.40	-1.37	-1.30	-1.29	-1.31
Halite	NaCl	-8.11	-7.72	-7.94	-7.96	-7.97	-7.81	-7.68
Hausmannite	Mn3O4	-7.94	-9.49	-10.34	-10.18	-11.31	-12.42	-13.15
Hematite	Fe2O3	17.34	17.33	17.10	17.29	17.24	17.30	17.20
Jarosite-K	KFe3(SO4)2(OH)6	-5.83	-5.43	-5.51	-5.49	-5.52	-5.36	-5.57
Manganite	MnOOH	-2.81	-2.82	-3.18	-3.17	-3.66	-3.98	-4.27
Melanterite	FeSO4:7H2O	-7.77	-7.35	-7.23	-7.35	-7.39	-7.44	-7.36
Otavite	CdCO3	0.25	-0.03	-0.16	-0.16	-0.63	-0.55	-0.53
Pb(OH)2	Pb(OH)2	-2.41	-2.60	-2.70	-2.59	-2.64	-2.67	-2.66
Pyrochroite	Mn(OH)2	-3.65	-3.80	-4.07	-4.07	-4.53	-4.89	-5.02
Pyrolusite	MnO2:H2O	-10.15	-10.91	-11.27	-11.16	-11.48	-11.82	-12.29
Rhodochrosite	MnCO3	1.21	1.04	0.89	0.80	0.43	0.08	-0.06
Siderite	FeCO3	-1.04	-0.87	-0.81	-0.85	-0.82	-0.80	-0.69
Smithsonite -	ZnCO3	-0.46	-0.62	-0.75	-0.84	-1.04	-1.50	-1.60
Witherite	BaCO3	-3.15	-3.27	-2.36	-3.24	-3.11	-2.9	-2.87
Zn(OH)2(e)	Zn(OH)2	-0.38	-0.49	-0.73	-0.75	-1.04	-1.52	-1.61

Συνήθως καταβυθίζονται άμορφα ή χαμηλής κρυσταλλικότητας υδροξείδια του Fe(III), τα οποία στη συνέχεια μπορεί να μετασχηματισθούν με πολύ βραδεία κινητική στις πιο σταθερές κρυσταλλικές μορφές.

Από τον Πίνακα 9.2 (α) και (β) φαίνεται ότι όλα τα νερά, τόσο τα πολύ όξινα, K0 και K2, όσο και τα ουδέτερα και ελαφρώς αλκαλικά βρίσκονται σε ισορροπία με τον βαρύτη, $BaSO_4$, με τιμές SI που κυμαίνονται από 0.06 μέχρι 0.47 (με εξαίρεση το E7). Σε σχέση με τα άλλα κύρια μέταλλα μπορούν να αναφερθούν τα εξής:

- Fe:

Συγκέντρωση μεγαλύτερη του ορίου ανίχνευσης (100 μg/l) προσδιορίστηκε μόνο στη θέση K0. Σ' αυτή τη θέση ο δείκτης κορεσμού που προσεγγίζει το 0 είναι αυτός του γκαιτίτη, FeOOH, SI=0.61. Όπως προαναφέρθηκε η καταβύθιση αιματίτη, Fe_2O_3 SI=3.16, δεν είναι πολύ πιθανή. Αναφέρεται επίσης ότι, με βάση τις οξειδοαναγωγικές συνθήκες που επικρατούν, το μοντέλο υπολογίζει ότι το μεγαλύτερο μέρος του Fe στη θέση K0 βρίσκεται στη δεύτερη οξειδωτική βαθμίδα. Σε όλες τις άλλες θέσεις οι μετρούμενες συγκεντρώσεις σιδήρου, ήταν κάτω από το όριο ανίχνευσης. Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε η τιμή 50 μg/l, η οποία όμως είναι πιθανό ότι υπερεκτιμά την πραγματική συγκέντρωση του σιδήρου στα νερά. Συνεπώς και οι δείκτες κορεσμού που αντιστοιχούν στις διάφορες στερεές φάσεις του σιδήρου, από το K2 και μετά, δεν είναι βέβαιο ότι περιγράφουν με ακρίβεια τις ισορροπίες του σιδήρου στα νερά.

- Mn:

Με βάση τους υπολογισμούς του Phreeqc το Mn βρίσκεται κυρίως στη δεύτερη οξειδωτική βαθμίδα σε όλες τις θέσεις. Η πιθανότερη ορυκτολογική φάση ισορροπίας είναι ο ροδοχροσίτης, $MnCO_3$, ο οποίος εμφανίζεται από τη θέση K4 και μετά, οπότε το pH των νερών επιτρέπει την παρουσία ανθρακικών ενώσεων.

- Ca:

Οι συγκεντρώσεις του Ca στα όξινα και ελαφρώς όξινα pH, δηλ. στις θέσεις K0, K2 και K4, είναι πιθανό ότι ρυθμίζονται από την ισορροπία με τη γύψο $CaSO_4.2H_2O$, η οποία παρουσιάζει δείκτη κορεσμού SI από -0.40 μέχρι -0.59. Στα ελαφρώς αλκαλικά νερά σταθερότερη φάση είναι ο ασβεστίτης, $CaCO_3$, με SI που κυμαίνεται από -0.42 μέχρι 0.83.

- Al:

Από το σημεία K4 και μετά τα νερά φαίνεται ότι είναι σε ισορροπία με τον γιββσίτη, $Al(OH)_3$, με τιμές SI που κυμαίνονται από -0.07 μέχρι 1.7.

Σε σχέση με τους τρεις ρύπους, Zn, Cd και Pb:

- Zn:

Οι συγκεντρώσεις του Zn στα νερά φαίνεται ότι ρυθμίζονται είτε από τον σμισθονίτη, $ZnCO_3$, (από το σημείο K4 και μετά) είτε από το υδροξείδιο $Zn(OH)_2$ (e). Οι τιμές του SI κυμαίνονται από -1.60 μέχρι 0.40, χωρίς σαφή διαφοροποίηση μεταξύ των δύο φάσεων.

- Cd:

Οι συγκεντρώσεις του Cd είναι πιθανόν να καθορίζονται από τον οταβίτη, $CdCO_3$, δεδομένου ότι από το K7 και μετά οι τιμές SI κυμαίνονται από το -0.53 μέχρι το 0.69.

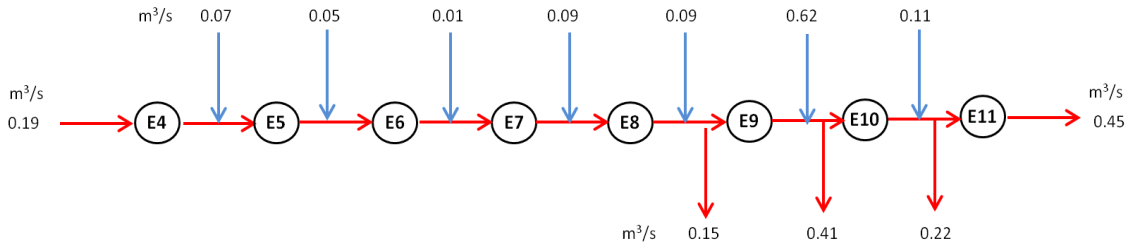
- Pb:

Στην περίπτωση του Pb τα αποτελέσματα των υπολογισμών δείχνουν ότι είναι πιθανή η ισορροπία με τον αγγλεσίτη, $PbSO_4$, στα όξινα pH, δηλαδή στα σημεία K0 και K2. Από το K4 και μετά οι δείκτες κορεσμού είναι αρκετά αρνητικοί και για τα 4 ορυκτά του Pb, που θεωρεί ως πιθανές φάσεις το μοντέλο με χρήση της συγκεκριμένης βάσης δεδομένων.

9.2 Συνδυασμένη χρήση SWAT και PHREEQC.

Η επεξεργασία των δεδομένων ποιότητας των νερών με χρήση του γεωχημικού μοντέλου Phreeqc έδειξε ότι είναι πιθανή η καταβύθιση συγκεκριμένων ορυκτών φάσεων των ρύπων κατά μήκος των υδατορευμάτων, όπως π.χ. σμισθονίτη (ZnCO3) για τον Zn και οταβίτη (CdCO3) για το Cd. Τα φαινόμενα αυτά δεν περιγράφονται από το SWAT, ενώ αποτελούν το ειδικό αντικείμενο των γεωχημικών μοντέλων, όπως το Phreeqc. Από την άλλη πλευρά τα γεωχημικά μοντέλα δεν ενσωματώνουν το σύνολο των πληροφοριών που σχετίζονται με το υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου στις λεκάνες απορροής, αντικείμενο που καλύπτουν τα υδρολογικά μοντέλα. Είναι συνεπώς αναγκαίο να συνδυαστούν οι δυνατότητες των δύο αυτών κατηγοριών μοντέλων, για βελτιωθεί η δυνατότητα πρόβλεψης της διασποράς της ρύπανσης στις περιπτώσεις των ανόργανων ρύπων.

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα δοκιμών προσομοίωσης που πραγματοποιήθηκαν συνδυάζοντας τα αποτελέσματα του SWAT με τις δυνατότητες του Phreeqc. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα του SWAT σε ότι αφορά το μέγεθος των απορροών που συγκεντρώνονται στο υδατόρευμα Ειρήνης, σε όλη την πορεία από τις μεταλλευτικές εγκαταστάσεις προς την εκβολή του ρέματος στο Θρακικό πέλαγος. Με βάση αυτά τα αποτελέσματα διαμορφώθηκε το μοντέλο αναμίξεως των ρυπασμένων νερών με τις καθαρές απορροές, το οποίο παρουσιάζεται στο σχήμα 9.2.



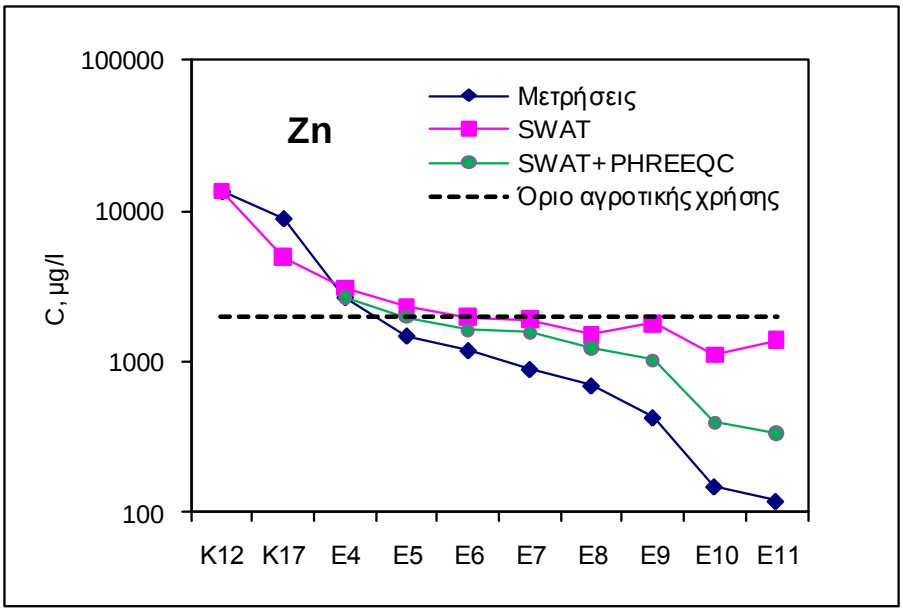
Σχήμα 9.2: Αναπαράσταση σταδιακής ανάμιξης καθαρών απορροών με τα ρυπασμένα νερά από την περιοχή των μεταλλευτικών εγκαταστάσεων (από το σημείο Ε4 προς τα κατάντη). Σημειώνονται και οι απώλειες προς τον αβαθή υδροφόρο από τον πυθμένα του υδατορεύματος. Οι ροές προέκυψαν από την προσομοίωση της υδρολογικής λεκάνης στο SWAT.

Στο Phreeqc καθορίστηκε η σύσταση των καθαρών νερών (Διάλυμα 1) με βάση τις μετρήσεις στο σημείο ΑΣ (Πίνακας 9.1). Το σημείο αυτό αντιστοιχεί στη λεκάνη απορροής του υδατορεύματος Ασίνη, και δεν επηρεάζεται από τις μεταλλευτικές εγκαταστάσεις. Η σύσταση των ρυπασμένων νερών (Διάλυμα 2) καθορίστηκε με βάση τις αναλύσεις των νερών στο σημείο Ε4. Στο Phreeqc καθορίζονται οι διαδοχικές αναλογίες ανάμιξης των διαλυμάτων και το μοντέλο υπολογίζει τη σύσταση των διαλυμάτων που προκύπτουν από την ανάμιξη. Οι αναλογίες ανάμιξης που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη συγκεκριμένη προσομοίωση υπολογίστηκαν με βάση τις ροές που παρουσιάζονται στο σχήμα 9.1 και συνοψίζονται στον Πίνακα 9.3.

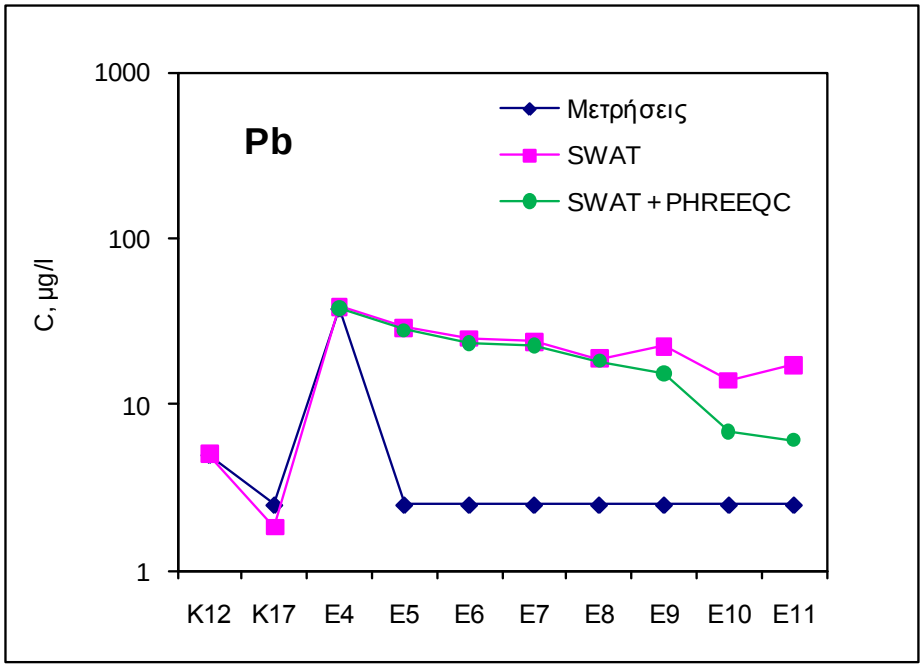
Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε «επιτρέποντας» την καταβύθιση οταβίτη, CdCO3, σμισθονίτη, ZnCO3, και υδροκερρουσίτη, Pb3(CO3)2(OH)2. Για τον υδροκερρουσίτη εισήχθηκαν δεδομένα από την εναλλακτική βάση δεδομένων Minteqa.

Πίνακας 9.3: Αναλογίες ανάμιξης των υδατικών διαλυμάτων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση στο Phreeqc, με βάση τις ροές των ρευμάτων που παρουσιάζονται στο σχήμα 9.2.

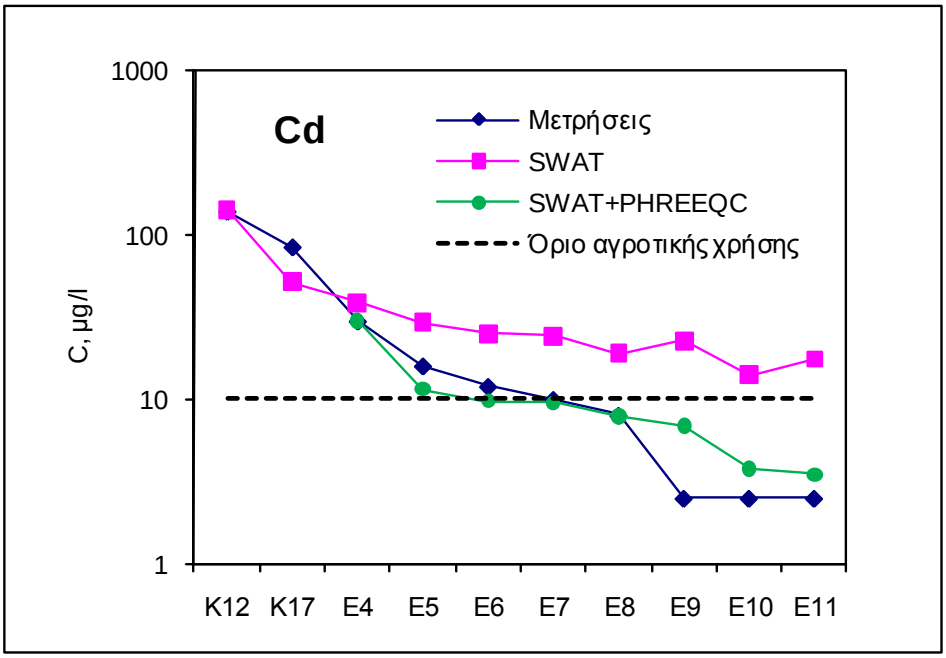
	Διαλύματα	Αναλογίες ανάμιξης						
(ΑΣ)	1	0.269	0.192	0.031	0.220	0.180	0.639	0.164
E4	2	0.731						
E5	3		0.839					
E6	4			0.969				
E7	5				0.780			
E8	6					0.820		
E9	7						0.361	
E10	8							0.836
E11	9							



Σχήμα 9.3: Σύγκριση SWAT και συνδυασμού SWAT και PHREEQC για την περιγραφή των μεταβολών της συγκέντρωσης του Zn κατά μήκος του ρέματος Ειρήνη (Δεκέμβριος 2005)



Σχήμα 9.4: Σύγκριση SWAT και συνδυασμού SWAT και PHREEQC για την περιγραφή των μεταβολών της συγκέντρωσης του Pb κατά μήκος του ρέματος Ειρήνη (Δεκέμβριος 2005)



Σχήμα 9.5: Σύγκριση SWAT και συνδυασμού SWAT και PHREEQC για την περιγραφή των μεταβολών της συγκέντρωσης του Cd κατά μήκος του ρέματος Ειρήνη (Δεκέμβριος 2005)

Στα σχήματα 9.3, 9.4 και 9.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών προσομοίωσης με το συνδυασμό SWAT και Phreeqc, για τα τρία μέταλλα, σε σύγκριση με τα αποτελέσματα που είχαν προκύψει με χρήση μόνον του SWAT.

Είναι φανερό ότι με το συνδυασμό των δύο μοντέλων επιτυγχάνεται πολύ καλύτερη προσομοίωση, ιδιαίτερα για την περίπτωση του Cd (σχήμα 9.5) και δευτερευόντως για τον Zn (σχήμα 9.3). Σημειώνεται ότι για το Cd το Phreeqc προβλέπει ότι καταβυθίζεται οταβίτης ($CdCO_3$), ενώ για το Pb και τον Zn δεν παρατηρήθηκε υπερκορεσμός, ως προς τις αντίστοιχες ορυκτές φάσεις. Παρόλα αυτά παρατηρείται βελτίωση των προβλέψεων και για τον Zn και τον Pb στα σημεία Ε9, Ε10 και Ε11. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το SWAT δεν λάμβανε υπόψη την ποσότητα των ρύπων που απομακρύνεται μαζί με το νερό από τον πυθμένα του υδατορεύματος.

10. ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε το υδρολογικό μοντέλο Soil and Water Assessment Tool για την αξιολόγηση των προβλημάτων διασποράς της ρύπανσης από τις εγκαταλειμμένες μεταλλευτικές εγκαταστάσεις στην περιοχή της Κίρκης του Νομού Αλεξανδρούπολης, Θράκη. Οι εγκαταστάσεις, περιλαμβάνουν το χώρο του μεταλλείου του Αγ. Φιλίππου, με μία ανοικτή εκσκαφή και διάσπαρτες αποθέσεις στείρων εξόρυξης, καθώς και το χώρο του εργοστασίου εμπλουτισμού, όπου βρίσκονται οι εγκαταλειμμένες κτιριακές εγκαταστάσεις καθώς και οκτώ λίμνες απόθεσης τελμάτων. Οι χώροι αυτοί βρίσκονται στη λεκάνη απορροής του ρέματος Ειρήνη και συμβάλλουν στη σημαντική επιβάρυνση της ποιότητας των νερών, ιδιαίτερα στο ανώτερο τμήμα του ποταμού. Η περιοχή και τα σχετικά περιβαλλοντικά προβλήματα έχουν μελετηθεί από διάφορους ερευνητές. Οι πιο πρόσφατες και λεπτομερείς μελέτες πραγματοποιήθηκαν από το ΙΓΜΕ την περίοδο 2004-2007. Στις μελέτες περιλαμβάνονται συστηματικές υδρομετρήσεις και αναλύσεις των νερών σε 30 περίπου σημεία κατά μήκος των ρεμάτων Κιρκάλων και Ειρήνης. Η διπλωματική εργασία βασίστηκε στις μετρήσεις και τα δεδομένα των συγκεκριμένων μελετών.

Για την περιγραφή της υδρολογικής λεκάνης χρησιμοποιήθηκε η τελευταία έκδοση του μοντέλου (SWAT2005), η οποία συνεργάζεται με το γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών GIS ArcView 9.3. Η υδρολογική λεκάνη συνολικής έκτασης 218 km^2 χωρίστηκε σε 14 υπολεκάνες, από το ίδιο το λογισμικό με βάση το ψηφιακό μοντέλο εδάφους και τα σημεία παρακολούθησης της ποιότητας των νερών που καθορίστηκαν. Συνδυάζοντας τις πληροφορίες χρήσεων γης, τύπου εδαφών και κλίσεων του εδάφους, οι υπολεκάνες χωρίστηκαν περαιτέρω σε 185 μονάδες

υδρολογικής απόκρισης (HRU), με βάση τις οποίες το μοντέλο κάνει τους υπολογισμούς των υδατικών ισοζυγίων. Τα στοιχεία τα οποία απαιτούνται για την αρχική περιγραφή της λεκάνης απορροής είναι (α) το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, (β) οι χρήσεις γης (Corine) και (γ) οι τύποι εδαφών. Πρέπει να αναφερθεί ότι το ψηφιακό μοντέλο εδάφους και τα αρχεία χρήσεων γης είναι διαθέσιμα από τις αντίστοιχες δημόσιες υπηρεσίες, δεν υπήρχαν όμως ψηφιακοί χάρτες για τους τύπους των εδαφών με το βαθμό λεπτομέρειας που προϋποθέτει το SWAT. Αντί αυτών χρησιμοποιήθηκαν υδρολιθολογικοί χάρτες, που δίνουν το γενικό χαρακτηρισμό των γεωλογικών σχηματισμών, ως προς τη διαπερατότητά τους. Στη συνέχεια, επιλέξαμε από τη βάση δεδομένων του SWAT, που είναι κατασκευασμένη για τα εδάφη των ΗΠΑ, τύπους εδαφών που να έχουν υδροπερατότητα αντίστοιχη με αυτή του συγκεκριμένου υδρολιθολογικού σχηματισμού.

Ιδιαίτερα κρίσιμη παράμετρος για να επιτευχθούν ακριβείς προβλέψεις των απορροών είναι η ύπαρξη μετεωρολογικών δεδομένων και κυρίως δεδομένων βροχόπτωσης μέσα στη λεκάνη απορροής, κατά προτίμηση προς τα ανάντη. Στη συγκεκριμένη περίπτωση υπάρχει ένας μόνο μόνιμος μετεωρολογικός σταθμός (ΜΣ), στη πόλη της Αλεξανδρούπολης, δηλαδή ακριβώς στην έξοδο της λεκάνης απορροής. Στις αρχικές δοκιμές προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα αυτού του ΜΣ, αλλά διαπιστώθηκε ότι δεν επιτυγχάνεται ικανοποιητική περιγραφή των απορροών, διότι δεν περιγράφονται με ακρίβεια τα γεγονότα βροχόπτωσης στα υψηλά σημεία της λεκάνης απορροής. Χρησιμοποιήθηκαν τελικά δεδομένα βροχόπτωσης από σταθμό μέτρησης που είχε τοποθετηθεί από το ΙΓΜΕ στην περιοχή του εργοστασίου εμπλουτισμού, δηλαδή σχετικά ψηλά στη λεκάνη. Με αυτά τα δεδομένα επιτεύχθηκε σημαντική βελτίωση στην ακρίβεια της προσομοίωσης των απορροών.

Η ακρίβεια της προσομοίωσης ελέγχθηκε σε σύγκριση με τις μετρήσεις των ροών σε 12 σταθμούς, 2 κατά μήκος του ρέματος Κιρκάλων και 10 κατά μήκος του ρέματος Ειρήνης, και για τη χρονική περίοδο από Ιούνιο 2005 μέχρι Ιούλιο 2006. Πρόκειται δηλαδή για ένα πυκνό δίκτυο, το οποίο επέτρεψε να προσδιοριστούν διαφοροποιήσεις στα χαρακτηριστικά απορροής κατά μήκος της λεκάνης. Για παράδειγμα διαπιστώθηκε ότι για την ακριβή πρόβλεψη των ροών, στο κάτω μέρος του ρέματος Ειρήνη, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι υπάρχει απώλεια νερών από τον πυθμένα του ρέματος προς τα υπόγεια νερά, λόγω της σχετικά υψηλής διαπερατότητας του πυθμένα.

Τα διαθέσιμα δεδομένα ροής χαρακτηρίζονται από μεγάλη χωρική πυκνότητα, αλλά καλύπτουν σε χρονική διάρκεια μόνον ένα υδρολογικό έτος. Αυτό έχει σαν

συνέπεια να είναι δυνατή η «ρύθμιση» (calibration) του μοντέλου, αλλά να μην είναι δυνατή η «επικύρωσή» του (validation).

Το πρόβλημα της **ρύπανσης** περιγράφηκε στο SWAT θεωρώντας ότι οι μεταλλευτικές εγκαταστάσεις αντιστοιχούν σε δύο σημειακές πηγές ρύπανσης, μία στη θέση του μεταλλείου και μία στο εργοστάσιο εμπλουτισμού. Η προσομοίωση εστιάστηκε στους τρείς ρύπους, Zn, Pb και Cd, και θεωρήθηκε ότι οι ρύποι αυτοί αποδεσμεύονται από τις δύο πηγές με σταθερό μαζικό ρυθμό ροής (kg/d). Μελετήθηκαν με το SWAT (α) οι μεταβολές των συγκεντρώσεων κατά μήκος των ρεμάτων και (β) οι εποχιακές διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων στο κάτω μέρος της λεκάνης απορροής.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν σε ότι αφορά το προφίλ των συγκεντρώσεων κατά μήκος του ρέματος Ειρήνη έδειξαν ότι το SWAT συστηματικά υπερεκτιμά τις συγκεντρώσεις των ρύπων, δεν λαμβάνει δηλαδή υπόψη του φαινόμενα που συμβάλλουν στη μείωση των συγκεντρώσεων των ρύπων. Πρέπει να αναφερθεί ότι το SWAT είναι κυρίως προσανατολισμένο στη προσομοίωση της ρύπανσης που προέρχεται από αγροτικές δραστηριότητες. Ενσωματώνει δηλαδή περίπλοκα μοντέλα και εξισώσεις για να περιγράψει τους κύκλους του αζώτου, του φωσφόρου αλλά και των παρασιτοκτόνων. Εν αντιθέσει με τη ρύπανση από γεωργικές πηγές, το SWAT δεν είναι κατάλληλα προσαρμοσμένο όσον αφορά τη περιγραφή ρύπων από εγκαταστάσεις μεταλλευτικών αποβλήτων, δεδομένου ότι δεν περιλαμβάνει εξισώσεις για να περιγράψει τα φαινόμενα καταβύθισης ή/και προσρόφησης των ρύπων και θεωρεί ότι η συγκέντρωση αυτών μειώνεται μόνο λόγω της αραίωσης που προκύπτει όταν τα υδατορεύματα αναμειγνύονται με καθαρά νερά.

Για να διερευνηθεί το κατά πόσον οι συγκεντρώσεις των ρύπων στα νερά του ρέματος επηρεάζονται από φαινόμενα καταβύθισης, χρησιμοποιήθηκε το γεωχημικό μοντέλο PHREEQC στο οποίο εισάχθηκαν δεδομένα της σύστασης των νερών και υπολογίστηκαν οι δείκτες κορεσμού ως προς πιθανές στερεές φάσεις. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι πολλά μέταλλα έχουν συγκεντρώσεις υψηλότερες ή πολύ κοντά στα όρια κορεσμού για καταβύθιση στερεών φάσεων, όπως για παράδειγμα οι ανθρακικές ενώσεις σμισθονίτης, $ZnCO_3$, και οταβίτης, $CdCO_3$ για τον Zn και το Cd αντίστοιχα.

Εξετάσθηκε στη συνέχεια η ακρίβεια των προβλέψεων που μπορούν να επιτευχθούν με το συνδυασμό της χρήσης του SWAT και του Phreeqc. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα του SWAT σε ότι αφορά το μέγεθος των απορροών που συγκεντρώνονται στο υδατορεύμα Ειρήνης. Με βάση αυτά τα αποτελέσματα υπολογίστηκαν οι αναλογίες ανάμιξης των ρυπασμένων

νερών με τις καθαρές απορροές και τα δεδομένα αυτά εισάχθηκαν στο Phreeqc. Διαπιστώθηκε ότι με το συνδυασμό των δύο μοντέλων επιτυγχάνεται πολύ καλύτερη προσομοίωση των μεταβολών της συγκέντρωσης των ρύπων κατά μήκος του ρέματος, ιδιαίτερα για την περίπτωση του Cd, για το οποίο προβλέπεται ότι οι συγκεντρώσεις του στα νερά του ρέματος ρυθμίζονται από την καταβύθιση $CdCO_3$.

Συνοψίζοντας, δύο είναι τα κύρια συμπεράσματα αυτής της εργασίας:

(α) Για την περιγραφή των προβλημάτων ρύπανσης από μεταλλευτικές δραστηριότητες στην κλίμακα μεγάλων λεκανών απορροής είναι αναγκαίο να συνδυαστούν οι δυνατότητες ενός υδρολογικού μοντέλου όπως το SWAT, με ένα κατάλληλο γεωχημικό μοντέλο, όπως το Phreeqc.

(β) Η ακρίβεια των προβλέψεων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το πλήθος, τη συχνότητα και το χρονικό εύρος που καλύπτουν οι μετρήσεις πεδίου, με βάση τις οποίες γίνεται η ρύθμιση βασικών παραμέτρων του μοντέλου. Η αξιοπιστία των προβλέψεων μπορεί να αυξηθεί σημαντικά εάν υπάρχουν μετρήσεις που να αποτυπώνουν τις αλληλοεξαρτώμενες εποχιακές διακυμάνσεις βροχόπτωσης, απορροών και επιπέδων ρύπανσης, για συνολικό χρονικό διάστημα τουλάχιστο ίσο ή μεγαλύτερο των δύο υδρολογικών ετών.

Βιβλιογραφία

Ελληνόγλωσση

Αποκατάσταση ρυπασμένων εδαφών, «Γεωχημική μοντελοποίηση: εργαλείο για την περιγραφή της συμπεριφοράς των ανόργανων ρύπων στα εδάφη», ΕΜΠ Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών

Αρίκας Κ., Asfahani N., Nowak A., Dietmar Goetz D., (2007), «Τα μεταλλεία Κίρκης Νομού Έβρου και εκτιμήσεις περιβαλλοντικών επιπτώσεων», Μεταλλειολογικά και Μεταλλουργικά Χρονικά 17: 21-50 & 51-69

Αρίκας, Κ., Watzl, V., και Goetz, D. (2004): «Περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τα μεταλλεία Κίρκης, περιοχή Αλεξανδρούπολης». Δελτίο Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, τόμος 36, σσ. 140–149.

Δερματάς 2010, «Ρύπανση του Υπεδάφους και των Υπόγειων Υδροφορέων στην Εποχή της Κλιματικής Αλλαγής», Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, ΕΜΠ

ΕΜΠ 2006, «ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ SWAT», ΜΑΘΗΜΑ ΠΡΟΧΩΡΗΜΕΝΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ, Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων

ΕΜΠ 2008, «Αρχές μεταφοράς ρύπων», Μ. Πανταζίδου, Α. Ξενίδης, Ν. Παπασιώπη Μάθημα αποκατάσταση ρυπασμένων χώρων, Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών του ΕΜΠ Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων

ΕΜΠ 2009, «ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ», ΜΑΘΗΜΑ ΠΡΟΧΩΡΗΜΕΝΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ, Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων

Εργ. Μεταλ. ΕΜΠ, (2007). «Αποτελέσματα δοκιμών γεωχημικού περιβαλλοντικού χαρακτηρισμού», Παραδοτέο ΑΒ1, Υποέργο 5, Έργο «Καινοτόμες τεχνολογίες -τεχνικές καταγραφής και αξιοποίησης απορριμμάτων μεταλλευτικής και μεταλλουργικής βιομηχανίας και εγκαταλειμμένων δημόσιων μεταλλείων. Πιλοτικές εφαρμογές», ΙΓΜΕ, 2007.

Ζαχαριά 2009, «Εισαγωγή στο SWAT- Εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου SWAT στη λεκάνη απορροής του Άραχθου ποταμού», ΕΜΠ σχολή ΜΜΜ

ΙΓΜΕ (2006) «Μεταλλευτική περιοχή Κίρκης. Σχέδιο Μελέτης – Προσωρινά Αποτελέσματα », Παρουσίαση σε Ενημερωτική ημερίδα, Αλεξανδρούπολη 23 Ιουνίου 2006.

Κούρτης 2008, «Υγρά Απόβλητα στη Βιομηχανία Αξιοποίησης των Ορυκτών Υλών και των Υλικών», Σχολή Μηχ. Μετ Μετ ΕΜΠ

Λιακόπουλος Α. (2009). «Περιβαλλοντική Μελέτη της μεταλλευτικής περιοχής Κίρκης. Έκταση της ρύπανσης και προτεινόμενα μέτρα αντιμετώπισης», ΙΓΜΕ, Τεχνική έκθεση, 227 σελ., 2 παραρτήματα.

Μπακή Σ. & Ευστρατιάδης Α. 2010, «Μοντέλο ποιοτικής προσομοίωσης λεκανών» ΕΜΠ, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος

Μυλωνά, Ε. (2007), «Προκαταρκτική αξιολόγηση εναλλακτικών μεθόδων αδρανοποίησης–κάλυψης των λιμνών τελμάτων εμπλουτισμού» , Τεχνική Έκθεση Εργαστηρίου Μεταλλουργίας ΕΜΠ για λογαριασμό του ΙΓΜΕ, 77 σελ., 1 παράρτημα

Ρωμαίδης Γ., (2007), «Καταγραφή απορριμμάτων μεταλλευτικής και μεταλλουργικής δραστηριότητας, μελέτες και έρευνες επιπτώσεων, τεχνικών αδρανοποίησης και αξιοποίησης, πιλοτική περιοχή μεταλλείων Κίρκης (Πρόδρομη υδρογεωλογική μελέτη)» ΙΓΜΕ, Τεχνική έκθεση, 50σελ.

Στεργιούλη, Μαρθα – Λητώ(2007)**,** «Προσδιορισμός πηγών προέλευσης και ποσοτικοποίηση απωλειών θρεπτικών, με εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου SWAT, υπό την επίδραση διαφορετικών κλιματολογικών συνθηκών», Ε.Μ.Π Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών σπουδών «Επιστήμη και τεχνολογία υδατικών πόρων», Επιβλέπουσα: Μαρία Μιμίκου.

Ξενόγλωσση

Angelidis P., Kotsikas M., Kotsovinos N., (2009) «Management of Upstream Dams and Flood Protection of the Transboundary River Evros/Maritza», *Water Resources Management* 24, 2467–2484

Ayers, R.S. and Westcot, D.W., (1994), "Water quality for irrigation", Food and Agriculture Organization (FAO): Irrigation and Drainage Paper, no 29 Rev1.

Galvan L., Olvas M, Fernandez de Villaran R., Domingo Santos J.M. , Nieto J.M., Sarmiento A.M., Canovas C.R.(2009) ,«Application of the SWAT model to an AMD-affected river (Meca River, SW Spain).Estimation of transported pollutant load», Journal of Hydrology 377, 445–454

Gikas, G.D., Yiannakopoulou, T., and Tsihrintzis, V.A. (2006) "Modeling of non-point source pollution in a Mediterranean drainage basin", Environmental Modeling and Assessment 11, 219–234.

Liakopoulos, A., Lemiere B., Drougas I., Crouzet C., Laperche V., Michaels C., Lassin A., andRomaidis I. (2009). Environmental impacts of unmanaged solid waste at a former base metal mining and ore processing site (Kirki, Greece). 2nd Int. Conf. on Environmental Management, Engineering, Planning & Economics (CEMEPE 09) & SECOTOX Conference, Mykonos, Greece, June 21-26, 2009.

Mimikou M., Varanou E., Gkouvatsou E., Baltas E., (2002) «Quantity and Quality Integrated Catchment Modeling under Climate Change with use of Soil and Water Assessment Tool Model», *Journal of Hydrologic Engineering*, 7(3), 228-243

Nash, J.E. and Sutcliffe, J.E. (1970). "River flow forecasting through conceptual models. Part I. A discussion of principles", Journal of Hydrology 10 (3) 282–290.

Neitsch S.L , Arnold J.G., Kiniry J.R , Srinivasan R., Williams J.R (2004), «SWAT Input/output file documentation(Version 2005)»

Neitsch S.L , Arnold J.G., Kiniry J.R , Williams J.R (2005), «Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation(Version 2005)»

Papassiopi, N., Mylona, E., Xenidis, A., Paspaliaris, I., Liakopoulos, A., Angellatou, V., and Drougas, J. (2009) "Assessment of major acid generation sources in the mining site of Agios Filippos, Kirki, GR", Proceedings of the 3rd International Conference on Advances in Mineral Resources Management and Environmental Geotechnology (Amireg) 2009

Pisinaras V., Petalas C., Gikas G.D., Gemitzi A., Tsihrintzis V.A.,(2010) «Hydrological and water quality modeling in a medium-sized basin using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT)», *Desalination*, 250, 274–286

Triantafyllidis, S. and Scarpelis, N. (2006). Mineral formation in an acid pit lake from a high-sulfidation ore deposit: Kirki, NE Greece. J. of Chemical Exploration 88: 68-71.

Triantafyllidis, S., Scarpelis, N. and Komnitsas, K. (2007). Environmental characterization and geochemistry of Kirki, Thrace, NE Greece, abandoned flotation tailings dumps. Environmental Forensics, 8(4): 351-359.

Tsihrintzis, V and Hamid, R. (1998) "Runoff quality prediction from small urban catchments using SWMM", Hydrological Processes 12, 311–329.

Varanou E., Gkouvatsou E., Baltas E., Mimikou M., (2002) «Quantity and Quality Integrated Catchment Modeling under Climate Change with use of Soil and

Water Assessment Tool Model», Journal of Hydrologic Engineering, 7(3), 228-243

Ιστοσελίδες

www.in.gr

antigoldgreece.wordpress.com/

www.ideografhmata.gr

www.hnms.gr

http://www.brc.tamus.edu/swat/