ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Λήψη αποφάσεων για τον σχεδιασμό βιώσιμων μέτρων για την προστασία της χημικής κατάστασης του υδάτινου περιβάλλοντος από μη σημειακές πηγές ρύπανσης

Διδακτορική διατριβή

Ιωάννης Ν. Παναγόπουλος

Αθήνα, Δεκέμβριος 2010

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Λήψη αποφάσεων για τον σχεδιασμό βιώσιμων μέτρων για την προστασία της χημικής κατάστασης του υδάτινου περιβάλλοντος από μη σημειακές πηγές ρύπανσης

Διδακτορική διατριβή

Ιωάννης Ν. Παναγόπουλος

Επιβλέπουσα: Καθ. Μ. Α. Μιμίκου

Αθήνα, Δεκέμβριος 2010

στη μνήμη του πατέρα μου

Πίνακας Περιεχομένων

Πίνακας Περιεχομένων i
Ευρετήριο Σχημάτων vi
Ευρετήριο Πινάκων x
Ευρετήριο Βασικών Συντομογραφιών και Συμβόλων xii
Πρόλογος xiii
Περίληψη xv
Extended Abstract xix
1 Εισαγωγή 1
1.1 Τοποθέτηση του προβλήματος 1
1.2 Άζωτο, φώσφορος και ευτροφισμός 5
1.2.1 Ο κύκλος του αζώτου 5
1.2.2 Ο κύκλος του φωσφόρου 7
1.2.3 Ευτροφισμός 9
1.3 Στόχος της διατριβής 10
1.4 Συνοπτική παρουσίαση της μεθοδολογίας 13
1.5 Συμβολή της διατριβής στην επιστήμη και πρωτότυπα σημεία 15
1.6 Ερευνητικό και δημοσιευμένο έργο συνδεδεμένο με τη διατριβή 16
1.7 Δομή της διδακτορικής διατριβής 19
2 Νομοθεσία και Έρευνα 23
2.1 Νομοθεσία 23
2.1.1 Η Οδηγία – Πλαίσιο 2000/60 23
2.1.2 Η Οδηγία των νιτρικών 1991/676 26
2.1.3 Η Κοινή Αγροτική Πολιτική 29
2.1.4 Θέσπιση ορίων συγκεντρώσεων θρεπτικών στοιχείων στα επιφανειακά νερά 30
2.2 Διεθνείς δράσεις για τον περιορισμό της ρύπανσης των υδάτων από θρεπτικά 35
2.2.1 Συνεργασίες και Οργανισμοί 36
2.2.2 Το ευρωπαϊκό πρόγραμμα Euroharp 38
2.2.3 Η Ευρωπαϊκή δράση COST 869 39
2.3 Η περιβαλλοντική κατάσταση και παρακολούθηση των υδάτινων σωμάτων στην Ελλάδα 42
2.3.1 Φορείς διαχείρισης των υδατικών πόρων και καταγραφής της ποιότητας των επιφανειακών υδάτων 42

2.3.2 Περιβαλλοντική κατάσταση των ελληνικών υδάτινων σωμάτων και εθνικές δράσεις ... 43
2.4 Γενική αποτίμηση και προοπτική ... 45
3 Ποσοτικοποίηση Μη Σημειακής Ρύπανσης Επιφανειακών Υδάτων από Θρεπτικά ... 47
3.1 Γενικά ... 47
3.2 Ποσοτικοποίηση απωλειών θρεπτικών από μη σημειακές πηγές στα επιφανειακά νερά ... 48
3.2.1 Χρήση Δεδομένων Φορτίου Ποταμού ... 48
3.2.2 Ολικό Ισοζύγιο Θρεπτικών στο έδαφος ... 52
3.2.3 Εκτίμηση Κινδύνου ... 61
3.2.4 Στατιστικά Μοντέλα ... 64
3.2.4.1 Το στατιστικό μοντέλο PolFlow ... 64
3.2.4.2 Το μοντέλο GREEN ... 66
3.2.4.3 Μέθοδος των Συντελεστών Απορροής ... 68
3.2.4.4 Άλλα Στατιστικά Μοντέλα ... 70
3.2.5 Προσδιοριστικά Μοντέλα Προσομοίωσης Διαδικασιών ... 71
3.2.5.1 Γενικά ... 71
3.2.5.2 Διαδεδομένα Προσδιοριστικά Μοντέλα Προσομοίωσης Διαδικασιών ... 76
3.3 Το υδρολογικό μοντέλο λεκάνης απορροής SWAT ... 85
3.3.1 Ιστορικό ... 85
3.3.2 Υδρολογία ... 87
3.3.3 Διάβρωση ... 91
3.3.4 Θρεπτικά ... 93
3.4 Γενική αποτίμηση μεθοδολογιών ... 94
4 Διαχειριστικές Πρακτικές για την Αντιμετώπιση της Ρύπανσης από Θρεπτικά ... 97
4.1 Γενικά ... 97
4.2 Κατηγοριοποίηση Διαχειριστικών Πρακτικών ... 98
4.2.1 Διαχείριση εφαρμογής θρεπτικών μέσω χημικών λιπασμάτων και κοπριάς 100
4.2.2 Διαχείριση καλλιέργειας ... 103
4.2.3 Διαχείριση ζωικής παραγωγής ... 107
4.2.4 Διαχείριση εδαφικών πόρων ... 109
4.2.5 Άλλες Διαχειριστικές Πρακτικές ... 113
4.3 Διαχειριστικές Πρακτικές στο μοντέλο SWAT ... 114
4.4 Το κόστος εφαρμογής των Διαχειριστικών Πρακτικών ... 116
4.5 Συμπεράσματα για την εξαγωγή της σχέσης κόστους-αποτελεσματικότητας των Διαχειριστικών Πρακτικών ... 123

5 Εργαλεία και Μεθοδολογίες Υποστήριξης Αποφάσεων για τη Διαχείριση Λεκάνης Απορροής 125
5.1 Γενικά 125
5.2 Βελτιστοποίηση 127
5.2.1 Γενικά 127
5.2.2 Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση 129
5.2.3 Επιθυμητή πορεία αναζήτησης αλγόριθμων βελτιστοποίησης 133
5.3 Γενετικοί Αλγόριθμοι βελτιστοποίησης 136
5.3.1 Βασικές έννοιες και χαρακτηριστικά Γενετικών Αλγόριθμων 136
5.3.2 Δομή και υπολογιστική διαδικασία Γενετικών Αλγόριθμων 139
5.3.3 Εξέλιξη Γενετικών Αλγόριθμων 146
5.3.4 Ο ταχύς και εκλεκτικός Γενετικός Αλγόριθμος μη κυριαρχούμενης ταξινόμησης (NSGA-II) 148
5.4 Ο Γενετικός Αλγόριθμος του MATLAB 151
5.4.1 Γενικά για το MATLAB 151
5.4.2 Η εργαλειοθήκη του Γενετικού Αλγόριθμου 152
5.5 Λήψη αποφάσεων για τον περιορισμό της ρύπανσης των υδάτων από θρεπτικά 158
5.5.1 Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων 158
5.5.2 Υποστήριξη αποφάσεων για την εφαρμογή Διαχειριστικών Πρακτικών σε λεκάνη απορροής 161
5.5.3 Αξιολόγηση μεθοδολογιών υποστήριξης αποφάσεων για τη διαχείριση λεκάνης απορροής 167
5.6 Γενική αποτίμηση 170
6 Μεθοδολογία 171
6.1 Εισαγωγή 171
6.2 Γενική διάρθρωση μεθοδολογίας 172
6.3 Επιλογή Διαχειριστικών Πρακτικών προς εφαρμογή και προσομοίωση στο SWAT 175
6.4 Κοστολόγηση Διαχειριστικών Πρακτικών 179
6.5 Συνολικός αριθμός Διαχειριστικών Πρακτικών προς εξέταση 183
6.6 Δημιουργία της Βάσης Διαχειριστικών Πρακτικών 185
6.7 Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση 189
6.8 Συμπεράσματα για την προτεινόμενη μεθοδολογία 194
7 Εφαρμογή της Μεθοδολογίας στη Λεκάνη Απορροής του Αράχθου 197
7.1 Εισαγωγή 197
7.2 Περιοχή μελέτης 199
7.2.1 Γενικές πληροφορίες 199

7.2.2 Υφιστάμενες αγροτικές δραστηριότητες 204
7.3 Προσαρμογή της μεθοδολογίας στη λεκάνη του Αράχθου 209
7.3.1 Επιλογή Διαχειριστικών Πρακτικών προς εφαρμογή στη λεκάνη του Αράχθου και προσομοίωση στο SWAT 210
7.3.2 Κοστολόγηση Διαχειριστικών Πρακτικών στη λεκάνη του Αράχθου 215
7.3.3 Συνολικός αριθμός Διαχειριστικών Πρακτικών προς εξέταση στη λεκάνη του Αράχθου 219
7.3.4 Δημιουργία της Βάσης Διαχειριστικών Πρακτικών της λεκάνης του Αράχθου 221
7.3.5 Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση κόστους και φορτίου απωλειών θρεπτικών στη λεκάνη του Αράχθου 227
8 Η Λεκάνη του Αράχθου στο Μοντέλο SWAT 233
8.1 Εισαγωγή 233
8.2 Παραμετροποίηση της λεκάνης του Αράχθου 237
8.2.1 Σχηματοποίηση λεκάνης 237
8.2.2 Απεικόνιση χρήσεων γης και εδάφους 239
8.2.3 Σχηματισμός Υδρολογικών Μονάδων Απόκρισης 246
8.2.4 Μετεωρολογικά δεδομένα 249
8.2.5 Καθορισμός πιέσεων θρεπτικών στη λεκάνη 251
8.3 Βαθμονόμηση του μοντέλου της λεκάνης του Αράχθου 253
8.3.1 Παράμετροι βαθμονόμησης 253
8.3.2 Αποτελέσματα βαθμονόμησης 262
8.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης υφιστάμενης κατάστασης 271
8.5 Εφαρμογή Διαχειριστικών Πρακτικών στο βαθμονομημένο μοντέλο του Αράχθου 278
8.5.1 Διαμόρφωση της σχέσης Κόστους – Αποτελεσματικότητας των ΔΠ 280
8.5.2 Αποτελέσματα ανά τύπο εδαφοκάλυψης 281
8.5.3 Αποτελέσματα ανά Υδρολογική Μονάδα 283
8.5.4 Αποτελέσματα σε κλίμακα λεκάνης απορροής 286
8.6 Γενικά συμπεράσματα 288
9 Λήψη Αποφάσεων για τη Διαχείριση της Λεκάνης του Αράχθου 291
9.1 Εισαγωγή 291
9.2 Επιλογή συναρτήσεων και παραμέτρων Γενετικού Αλγόριθμου 293
9.2.1 Επιλογή γενικών ρυθμίσεων, συναρτήσεων και παραμέτρων γενετικών τελεστών 294
9.2.2 Επιλογή μεγέθους πληθυσμού και μέγιστου παραγόμενου αριθμού γενιών 301
9.3 Λήψη αποφάσεων μέσω της βελτιστοποίησης τριών κριτηρίων 308

9.3.1 Προσέγγιση του βέλτιστου μετώπου Pareto με τις τελικές ρυθμίσεις του Γενετικού Αλγόριθμου 308
9.3.2 Αποτύπωση βέλτιστων μετώπων Pareto για την αναζήτηση λύσεων 311
9.3.3 Αναζήτηση και επιλογή λύσεων από τα βέλτιστα Pareto μέτωπα 314
9.3.4 Απεικόνιση λύσεων στο χάρτη της λεκάνης του Αράχθου 321
9.4 Διατύπωση του προβλήματος με βελτιστοποίηση ενός κριτηρίου 334
9.5 Γενική αποτίμηση 339
10 Συνολική Αποτίμηση, Μελλοντική Έρευνα και Προοπτικές 341
10.1 Γενικά 341
10.2 Ανακεφαλαίωση 342
10.3 Συμπεράσματα 347
10.3.1 Γενικά συμπεράσματα για τη μεθοδολογία διαχείρισης της αγροτικής γης 347
10.3.2 Συμπεράσματα για τη διαχείριση της λεκάνης του Αράχθου 348
10.4 Μελλοντική έρευνα 352
10.5 Προοπτικές στη διαχείριση της αγροτικής γης 357
Ελληνική Βιβλιογραφία 359
Ξένη Βιβλιογραφία 361

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1.1 Κύκλος αζώτου (πηγή: Neitch et al., 2005a). 6
Σχήμα 1.2 Κύκλος φωσφόρου (πηγή: Neitch et al, 2005a). 8
Σχήμα 3.1 Ολικό Εισερχόμενο Άζωτο στα Ευρωπαϊκά εδάφη από χημικά λιπάσματα και κοπριά ζώων (πηγή: Mulligan et al., 2006). 55
Σχήμα 3.2 Προβλεπόμενη εναπόθεση οξειδωμένου N (NOx) στην Ευρώπη (g/m^2/έτος) με βάση το πρόγραμμα EMEP για το έτος 2000 (πηγή: EMEP, 2007). 56
Σχήμα 3.3 Ολικό ισοζύγιο N στα Ευρωπαϊκά εδάφη (πηγή: Grizzetti et al., 2007). 58
Σχήμα 3.4 Ολικό ισοζύγιο P στα Ευρωπαϊκά εδάφη (πηγή: Grizzetti et al., 2007). 59
Σχήμα 3.5 Εισροές N στα επιφανειακά νερά των χωρών της ΕΕ-15 από μη σημειακές πηγές (πηγή: Grizzeti and Bouraoui, 2006). 67
Σχήμα 3.6 Απώλειες N σε kgN/km^2/έτος στη Φινλανδία (πηγή: Lepistö et al., 2006). 69
Σχήμα 3.7 Χαρακτηριστικά στάδια μοντελοποίησης σε μοντέλο προσομοίωσης διαδικασιών. 76
Σχήμα 3.8 Διάγραμμα ροής μοντέλου SWAT (πηγή: Neitsch et al., 2005a). 78
Σχήμα 3.9 Δημοσιεύσεις εργασιών με το μοντέλο SWAT σε επιστημονικά περιοδικά και συνέδρια με κριτές κατά την τελευταία δεκαετία (πηγή: www.scopus.com). 85
Σχήμα 3.10 Ο υδρολογικός κύκλος του SWAT (πηγή: Neitch et al., 2005a). 87
Σχήμα 4.1 Κατά ζώνες αμειψισπορά στις ΗΠΑ (πηγή: SERA-17, 1990). 105
Σχήμα 4.2 Κάλυψη γυμνών λωρίδων εδάφους με βλάστηση (πηγή: SERA-17, 1990). 106
Σχήμα 4.3 Αναβαθμίδα με κάλυψη γρασιδιού και κλίση πρανών 2:1 (πηγή: SERA-17, 1990). 112
Σχήμα 5.1 Απεικόνιση των σχέσεων κυριαρχίας και του μετώπου Pareto σε ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης δύο κριτηρίων (ελάχιστη τιμή 0 για τα δύο κριτήρια). 131
Σχήμα 5.2 Κατανομή τεσσάρων λύσεων στο χώρο αναζήτησης (αριστερά) και στο χώρο αποτίμησης (δεξιά) σε πρόβλημα βελτιστοποίησης δύο κριτηρίων (πηγή: Ευστρατιάδης, 2008). 135
Σχήμα 5.3 Κωδικοποίηση μεταβλητών σε Γενετικό Αλγόριθμο. 140
Σχήμα 5.4 Εξαναγκασμένη ρουλέτα για την επιλογή ατόμων προς αναπαραγωγή του πληθυσμού (πηγή: Λυκοθανάσης, 2001). 141
Σχήμα 5.5 Διασταύρωση γονέων μονού σημείου σε δυαδικό πρόβλημα. 142
Σχήμα 5.6 Είδη διασταυρώσεως ως προς τη θέση/θέσεις διασταύρωσης. 143
Σχήμα 5.7 Μετάλλαξη στην πέμπτη θέση χρωμοσώματος δυαδικής αναπαράστασης. 143
Σχήμα 5.8 Λογικό διάγραμμα ροής Γενετικού Αλγόριθμου. 145

Σχήμα 5.9 Η απόσταση συνωστισμού στον Γενετικό Αλγόριθμο NSGA-II (πηγή: Deb et al., 2002).....150
Σχήμα 5.10 Το περιβάλλον προγραμματισμού MATLAB.....152
Σχήμα 5.11 Η εργαλειοθήκη του Γενετικού Αλγόριθμου στο MATLAB.....153
Σχήμα 5.12 Το περιβάλλον εργασίας του ΣΥΑ FLUMAGIS (πηγή: Volk et al., 2007).....159
Σχήμα 6.1 Σχηματικό διάγραμμα του Εργαλείου Υποστήριξης Αποφάσεων (ΕΥΑ) και των συνιστωσών του. 173
Σχήμα 6.2 Διαδοχικά αυτοματοποιημένα βήματα δημιουργίας της ΒΔΠ.....187
Σχήμα 6.3 Η διαδικασία πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης με τον ΓΑ του MATLAB για την επιλογή και τοποθέτηση ΔΠ στην αγροτική γη λεκάνης απορροής.....190
Σχήμα 6.4 Χρωμόσωμα που αναπαριστά ένα συνδυασμό ΔΠ ή μία συγκεκριμένη διαχειριστική λύση σε ολόκληρη τη λεκάνη απορροής με *T* σε σύνολο ΥΜ. 191
Σχήμα 7.1 Θέση λεκάνης Αράχθου στον ελληνικό χώρο.....200
Σχήμα 7.2 Το γεφύρι της Πλάκας (πηγή: Γεωργίου, 2005).....201
Σχήμα 7.3 Διαχωρισμός της λεκάνης του Αράχθου σε 259 Υδρολογικές Μονάδες. 222
Σχήμα 7.4 Τυπικό αρχείο 'mgt' υδρολογικής μονάδας αραβόσιτου σε έδαφος φλύσχη υπό διαχείριση με τη ΔΠ 6 (λωρίδα συγκράτησης). Πρόκειται για την τρίτη υδρολογική μονάδα της τρίτης κατά σειρά αριθμήσεως υπολεκάνης (όνομα αρχείου '000030003.mgt'). 224
Σχήμα 7.5 Τμήμα του πίνακα αποθήκευσης των απωλειών Ρ από τις ΥΜ της λεκάνης του Αράχθου κάτω από την εφαρμογή ΔΠ, που αποτελεί μέρος της ΒΔΠ. Διακρίνεται στο κέντρο η θέση που αποθηκεύεται η τιμή απωλειών Ρ από τη 12^{η} ΥΜ (αραβόσιτος) και την 8^{η} κατά σειρά ΔΠ (στήλη Η), που είναι ίση με 1241, 4 kgP/έτος. 226
Σχήμα 7.6 Διαδοχικά αυτοματοποιημένα βήματα δημιουργίας της ΒΔΠ στη λεκάνη του Αράχθου. 226
Σχήμα 7.7 Η διαδικασία πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης με τον ΓΑ του MATLAB για την επιλογή και τοποθέτηση ΔΠ στην αγροτική γη της λεκάνης του Αράχθου.....228
Σχήμα 7.8 Χρωμόσωμα που αναπαριστά ένα σχήμα ΔΠ ή μία συγκεκριμένη διαχειριστική λύση σε ολόκληρη τη λεκάνη του Αράχθου. 228
Σχήμα 8.1 Διαχωρισμός της λεκάνης του άνω Αράχθου σε υπολεκάνες με βάση το ΨΜΕ και το υδρογραφικό δίκτυο.....238
Σχήμα 8.2 Επικάλυψη χάρτη εδαφοκάλυψης CLC2000 (α) με χάρτη διοικητικής διαίρεσης (β) για την παραγωγή του χάρτη χρήσεων γης στο SWAT με ενσωμάτωση των καλλιεργειών αραβόσιτου και μηδικής (γ). Οι κωδικοί στο υπόμνημα του χάρτη α παραπέμπουν στον Πίνακα 8.1.....245
Σχήμα 8.3 Αρχικός γεωλογικός χάρτης της λεκάνης του Αράχθου (α) και ομαδοποιημένος γεωλογικός χάρτης (β) για χρήση ως εδαφολογικού υποβάθρου της λεκάνης του Αράχθου στο

SWAT. Ο φλύσχης, ο ασβεστόλιθος και τα αλλούβια θα θεωρηθούν ως ένα αδιαπέρατο, ένα διαπερατό και ένα ημιδιαπερατό έδαφος αντίστοιχα..... 246
Σχήμα 8.4 Χάρτης χρήσεων γης πριν (α) και μετά τον καθορισμό των ΥΜ (β). Ο δεύτερος χάρτης έχει διαιρέσει τη ίδια πληροφορία σε 259 πολύγωνα με βάση την επικάλυψη του χάρτη α με τους χάρτες των υπολεκανών και του εδάφους..... 248
Σχήμα 8.5 Μετεωρολογικοί σταθμοί στη λεκάνη του Αράχθου. 249
Σχήμα 8.6 Οριοθέτηση υπολεκάνης Τσιμόβου εντός της λεκάνης της Πλάκας (έξοδος). ... 256
Σχήμα 8.7 Διαχωρισμός υδρογραφήματος στο Τσίμοβο σε βασική και άμεση απορροή. Η κόκκινη απεικόνιση αντιστοιχεί στη βασική ροή, ενώ η μπλε στη συνολική απορροή. Με αφαίρεση της πρώτης από τη δεύτερη προκύπτει η άμεση απορροή. Η τελευταία αποτελεί περίπου το 40% του συνολικού υδρογραφήματος..... 259
Σχήμα 8.8 Προσομοιωμένες και παρατηρημένες παροχές (πάνω) και στερεοπαροχές (κάτω) στη θέση Τσίμοβο για ολόκληρο το διάστημα με διαθέσιμα δεδομένα. 266
Σχήμα 8.9 Προσομοιωμένες και παρατηρημένες παροχές (πάνω) και στερεοπαροχές (κάτω) στη θέση Πλάκα (έξοδος) για ολόκληρο το διάστημα με διαθέσιμα δεδομένα. 267
Σχήμα 8.10 Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων εποχιακών συγκεντρώσεων θρεπτικών στην Πλάκα (αριστερά) και στη Γότιστα (δεξιά)..... 270
Σχήμα 8.11 Μέσες μηνιαίες αποδόσεις φορτίου φερτών (tn/μήνα), N-NO3 (kg/μήνα) και P (kg/μήνα) στην έξοδο της λεκάνης για την περίοδο 2001-2005..... 273
Σχήμα 8.12 Ετήσιες απώλειες εδάφους και θρεπτικών ανά τύπο εδαφοκάλυψης στη λεκάνη. 274
Σχήμα 8.13 Γεωγραφική διαφοροποίηση ετήσιων φορτίων απωλειών ρύπων από τις ΥΜ της λεκάνης του Αράχθου..... 276
Σχήμα 8.14 Γεωγραφική διαφοροποίηση της σχέσης ΚΑ μετά από εφαρμογή ΔΠ στην αγροτική γη της λεκάνης του Αράχθου. 284
Σχήμα 9.1 Μέτωπα Pareto στο δισδιάστατο χώρο κόστους-P (πάνω) και κόστους-N-NO3 (κάτω) με υπολογισμό της διασποράς των λύσεων στο χώρο αναζήτησης και αποτίμησης. 295
Σχήμα 9.2 Μέτωπα Pareto στο δισδιάστατο χώρο κόστους-P (πάνω) και κόστους-N-NO3 (κάτω) με τρεις συναρτήσεις επιλογής των ατόμων-γονέων για παραγωγή της επόμενης γενιάς. 296
Σχήμα 9.3 Μέτωπα Pareto στο δισδιάστατο χώρο κόστους-P (πάνω) και κόστους-N-NO3 (κάτω) με τρεις διαφορετικές συναρτήσεις διασταύρωσης των ατόμων του πληθυσμού. 298
Σχήμα 9.4 Μέτωπα Pareto στο δισδιάστατο χώρο κόστους-P (πάνω) και κόστους-N-NO3 (κάτω) με πέντε διαφορετικές τιμές πιθανότητας διασταύρωσης των ατόμων του πληθυσμού. 299

Σχήμα 9.5 Μέτωπα Pareto στο δισδιάστατο χώρο κόστους-P (πάνω) και κόστους-N-NO3 (κάτω) με τέσσερις διαφορετικές τιμές συρρίκνωσης του ρυθμού μετάλλαξης των ατόμων του πληθυσμού κατά την εξέλιξη της βελτιστοποίησης. 300
Σχήμα 9.6 Εξέλιξη μετώπου Pareto στο δισδιάστατο χώρο κόστους-P με πληθυσμό 100. ..303
Σχήμα 9.7 Εξέλιξη μετώπου Pareto στο δισδιάστατο χώρο κόστους-P με πληθυσμό 250. ..304
Σχήμα 9.8 Εξέλιξη μετώπου Pareto στο δισδιάστατο χώρο κόστους-P με πληθυσμό 500. ..305
Σχήμα 9.9 Εξέλιξη μετώπου Pareto στο δισδιάστατο χώρο κόστους-P με πληθυσμό 750. ..305
Σχήμα 9.10 Διαμόρφωση μετώπων Pareto στο δισδιάστατο χώρο κόστους-P με πέντε διαφορετικούς συνδυασμούς μεγέθους πληθυσμού – μέγιστου αριθμού παραγόμενων γενιών. 306
Σχήμα 9.11 Μεταβολή του απαιτούμενου χρόνου αξιολόγησης μίας λύσης σε συνάρτηση του μεγέθους του πληθυσμού. 307
Σχήμα 9.12 Καμπύλες αντιστάθμισης Κόστους - P και Κόστους - N-NO3 κατά την εξέλιξη της διαδικασίας βελτιστοποίησης τριών κριτηρίων. Απεικονίζονται τα διαμορφωμένα μέτωπα μετά από παραγωγή μίας, 30, 100, 5000, 10000, 25000 και του μέγιστου αριθμού των 40000 γενιών. 310
Σχήμα 9.13 Ολικά – βέλτιστα Pareto μέτωπα Κόστους - P και Κόστους - N-NO3, όπως προέκυψαν κατά το τέλος της διαδικασίας βελτιστοποίησης τριών κριτηρίων. 312
Σχήμα 9.14 Απεικόνιση βέλτιστων μετώπων Pareto στο δισδιάστατο χώρο με έκφραση των περιβαλλοντικών κριτηρίων σε όρους μέσης ετήσιας συγκέντρωσης. Τα αριθμημένα χαρακτηριστικά σημεία αντιπροσωπεύουν λύσεις ιδιαίτερου ενδιαφέροντος. 315
Σχήμα 9.15 Απεικόνιση βέλτιστης καμπύλης αντιστάθμισης μεταξύ συγκεντρώσεων P και N-NO3. Διακρίνονται οι λύσεις 1 και 2 καθώς και ο γραμμικός χαρακτήρας μεταβολής των εν λόγω μεγεθών. 320
Σχήμα 9.16 Κατανομή ΔΠ στο γεωγραφικό χώρο της λεκάνης του Αράχθου με βάση τη βέλτιστη λύση 1 (P: 0,125mg/l, N-NO3: 0,49mg/l, κόστος: 513065€).....322
Σχήμα 9.17 Κατανομή ΔΠ στο γεωγραφικό χώρο της λεκάνης του Αράχθου με βάση τη βέλτιστη λύση 10 (μηδενικό κόστος, P: 0,153mg/l, N-NO3: 0,53mg/l). 325
Σχήμα 9.18 Κατανομή ΔΠ στο γεωγραφικό χώρο της λεκάνης του Αράχθου με βάση τη βέλτιστη λύση 7 (ελάχιστη δυνατή συγκέντρωση P: 0,09mg/l, N-NO3: 0,406mg/l, κόστος 3,14M€). 327
Σχήμα 9.19 Κατανομή ΔΠ στο γεωγραφικό χώρο της λεκάνης του Αράχθου με βάση τη βέλτιστη λύση 8 (ελάχιστη δυνατή συγκέντρωση N-NO3: 0,397mg/l, P: 0,091mg/l, κόστος 3,33M€). 328
Σχήμα 9.20 Κατανομή ΔΠ στο γεωγραφικό χώρο της λεκάνης του Αράχθου με βάση τη βέλτιστη λύση 9 (ελάχιστο δυνατό κόστος εφαρμογής: όφελος 519579€, συγκέντρωση N-NO3: 0,63mg/l, P: 0,193mg/l). 330

Σχήμα 9.21 Κατανομή ΔΠ στο γεωγραφικό χώρο της λεκάνης του Αράχθου με βάση τις βέλτιστες λύσεις 3 (πάνω) και 4 (κάτω) με παραπλήσιο κόστος: 1,8 και 2,2M€ αντίστοιχα, και με ίδιο περιβαλλοντικό αποτέλεσμα (συγκέντρωση P: ~0, 10mg/l, N-NO3: ~0,42mg/l). 332

Σχήμα 9.22 Απεικόνιση βέλτιστης καμπύλης αντιστάθμισης μεταξύ συγκεντρώσεων N-NO3 και κόστους όπως προέκυψε από τη διαδικασία πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης (3 κριτήρια) με απεικόνιση στο ίδιο διάγραμμα των 4 μεμονωμένων λύσεων της μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης του Πίνακα 9.4 (παριστάνονται με πράσινα τρίγωνα). . 338

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2.1 Προτεινόμενες κλάσεις ποιότητας με βάση τις συγκεντρώσεις νιτρικών ($NO3^-$) ή ισοδύναμα αζώτου νιτρικών (N-NO3), (Οδηγία 91/676/ΕΟΚ, 2008)..... 32

Πίνακας 2.2 Προτεινόμενες κλάσεις ποιότητας των επιφανειακών υδάτων στην Ελλάδα (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2008). 32

Πίνακας 2.3 Προτεινόμενες κλάσεις ποιότητας των επιφανειακών υδάτων στην Ελλάδα κατά Skoulikidis et al. (2006)..... 33

Πίνακας 2.4 Προτεινόμενες κλάσεις ποιότητας των ποταμών της Γαλλίας (πηγή: Skoulikidis et al., 2006). 34

Πίνακας 2.5 Προτεινόμενες κλάσεις ποιότητας των ποταμών της Ιταλίας (πηγή: Skoulikidis et al, 2006)..... 34

Πίνακας 3.1 Παράδειγμα εκτίμησης κινδύνου απωλειών P εδαφικής μονάδας (πηγή: EPA, 1994)..... 62

Πίνακας 4.1 Κατηγοριοποίηση Διαχειριστικών Πρακτικών (πηγή: COST 869 - http://www.cost869.alterra.nl/Fs/List_of_options.htm)..... 99

Πίνακας 6.1 Οι προτεινόμενες Διαχειριστικές Πρακτικές για εφαρμογή σε αγροτικές λεκάνες απορροής. 179

Πίνακας 6.2 Τρόπος κοστολόγησης των Διαχειριστικών Πρακτικών του Πίνακα 6.1. 181

Πίνακας 6.3 Το σύνολο των ΔΠ (*A,B,C*), μεμονωμένων πρακτικών και συνδυασμών τους (έκφραση ακέραιων τιμών), που δημιουργούνται για χρήση στη διαδικασία βελτιστοποίησης. 184

Πίνακας 7.1 Πρόγραμμα καλλιεργητικών τεχνικών βιολογικού κύκλου αραβόσιτου και μηδικής. 206

Πίνακας 7.2 Πρακτικές εναπόθεσης κοπριάς στις χορτολιβαδικές εκτάσεις της λεκάνης του ποταμού Αράχθου..... 208

Πίνακας 7.3 Στοιχεία για την ποσότητα και σύσταση της κοπριάς των διαφόρων ειδών ζώων στη λεκάνη του ποταμού Αράχθου. 208
Πίνακας 7.4 Οι Διαχειριστικές Πρακτικές που επιλέχτηκαν για εφαρμογή στην αγροτική γη της λεκάνης του άνω Αράχθου. 214
Πίνακας 7.5 Κοστολόγηση Διαχειριστικών Πρακτικών που επιλέχτηκαν για εφαρμογή στην αγροτική γη της λεκάνης του άνω Αράχθου. 217
Πίνακας 7.6 Το σύνολο των Διαχειριστικών Πρακτικών, μεμονωμένων και συνδυασμών τους, που επιλέχτηκαν για χρήση στη διαδικασία βελτιστοποίησης στη λεκάνη του Αράχθου. 220
Πίνακας 8.1 Αντιστοίχιση του χάρτη CLC 2000 με τους τύπους εδαφοκάλυψης του SWAT στη λεκάνη του Αράχθου. 243
Πίνακας 8.2 Στοιχεία για τους σταθμούς βροχόπτωσης της λεκάνης του Άνω Αράχθου.....250
Πίνακας 8.3 Μέσες ετήσιες φορτίσεις (εισροές) N και P στη λεκάνη του Αράχθου. 253
Πίνακας 8.4 Τελικές τιμές 6 ευαίσθητων παραμέτρων του μοντέλου SWAT για την προσομοίωση της απορροής, της διάβρωσης και εμμέσως των απωλειών θρεπτικών από τα εδάφη της λεκάνης του Αράχθου. 254
Πίνακας 8.5 Παράμετροι βαθμονόμησης που καθορίστηκαν με ενιαίο τρόπο στη λεκάνη...257
Πίνακας 8.6 Στατιστικά κριτήρια σύγκρισης παρατηρημένων και προσομοιωμένων μηνιαίων χρονοσειρών παροχής και στερεοπαροχής στο Τσίμοβο και στην Πλάκα. 265
Πίνακας 8.7 Καταμερισμός ετήσιου φορτίου θρεπτικών στο υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης του Αράχθου με βάση τις πηγές προέλευσης (2001-2005). 272
Πίνακας 8.8 Διαμόρφωση σχέσης ΚΑ επιλεγμένων ΔΠ ανά τύπο αγροτικής χρήσης γης....281
Πίνακας 8.9 Αναλυτικά αποτελέσματα και διαμόρφωση της σχέσης ΚΑ σε κλίμακα λεκάνης απορροής από την εφαρμογή 8 ΔΠ στη λεκάνη του Αράχθου. 286
Πίνακας 9.1 Τελικές ρυθμίσεις ΓΑ για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης των τριών κριτηρίων στη λεκάνη του Αράχθου. 309
Πίνακας 9.2 Διαμόρφωση των τριών κριτηρίων βελτιστοποίησης μετά από εφαρμογή 10 βέλτιστων (Pareto) λύσεων ή διαχειριστικών σχημάτων στον Άραχθο. 319
Πίνακας 9.3 Επίδραση 10 λύσεων από το βέλτιστο μέτωπο Pareto στη συνολική ετήσια στερεοπαροχή του ποταμού στην έξοδο της λεκάνης. 320

Ευρετήριο Βασικών Συντομογραφιών και Συμβόλων

ΒΔΠ :	Βάση Διαχειριστικών Πρακτικών
ΓΑ :	Γενετικός Αλγόριθμος
ΔΠ :	Διαχειριστική/ές Πρακτική/ές
ΔΣ :	Διαχειριστικό/α Σχέδιο/α
ΕΓΥ :	Ειδική Γραμματεία Υδάτων
ΕΕ :	Ευρωπαϊκή Ένωση
ΕΕΚ:	Επιτροπή των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων
ΕΘΙΑΓΕ :	Εθνικό Ίδρυμα Αγροτικής Έρευνας
ΕΣΥΕ:	Εθνική Στατιστική Υπηρεσία Ελλάδας
ΕΥΑ :	Εργαλείο Υποστήριξης Αποφάσεων
ΕΖ :	Ευπρόσβλητες Ζώνες
ΙΓΜΕ :	Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών
ΚΑ :	Κόστος-Αποτελεσματικότητα
ΚΑΠ :	Κοινή Αγροτική Πολιτική
ΚΟΓΠ:	Κώδικες Ορθής Γεωργικής Πρακτικής
ΚΥΥ :	Κεντρική Υπηρεσία Υδάτων
ΟΟΣΑ :	Οργανισμός Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης
ΣΓΠ :	Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών
ΥΜ:	Υδρολογική/ές Μονάδα/ες
ΥΠΑΑΤ :	Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων
ΥΠΓΕ :	Υπουργείο Γεωργίας
ΥΠΕΚΑ :	Υπουργείο Περιβάλλοντος Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής
ΥΠΕΧΩΔΕ :	Υπουργείο Περιβάλλοντος Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων
EC:	European Commission
EEA:	European Environmental Agency
EPA:	Environmental Protection Agency
MATLAB :	MATrix LABoratory
SWAT :	Soil and Water Assessment Tool
N:	Άζωτο ή ολικό άζωτο
$NO3^-$:	Νιτρικά ιόντα
N-NO3 :	Άζωτο νιτρικών
P:	Φώσφορος ή ολικός φώσφορος

Πρόλογος

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων του ΕΜΠ και συνδυάζει γνώσεις και εμπειρίες που αποκτήθηκαν τόσο από τις προπτυχιακές σπουδές μου στο Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών (1997-2002), όσο και από την μεταπτυχιακή μου φοίτηση και ερευνητική δραστηριότητα στο ΕΜΠ (2002-σήμερα). Η έρευνα συνθέτει διαφορετικές, πλην όμως συμπληρωματικές επιστημονικές περιοχές της Υδρολογίας και της Διαχείρισης των Υδατικών Πόρων.

Με την από 22-6-2004 απόφαση της Γ.Σ.Ε.Σ. της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών έγινα δεκτός για εκπόνηση διδακτορικής διατριβής στο ΕΜΠ, με τριμελή Συμβουλευτική Επιτροπή τους κ.κ. Μ. Μιμίκου, Καθηγήτρια ΕΜΠ (επιβλέπουσα), Γ. Καραντούνια, Καθηγητή ΓΠΑ και Ε. Μπαλτά, Αναπ. Καθηγητή ΑΠΘ, ενώ το αρχικό θέμα της διατριβής ορίστηκε σε «Διερεύνηση του Ρόλου του Εδάφους και της Φυτοκάλυψης στην Προσομοίωση της Απορροής Υδρολογικής Λεκάνης» και εγκρίθηκε με την από 7-12-2004 απόφαση της Γ.Σ.Ε.Σ. της Σχολής. Ο σημερινός τίτλος της διατριβής προέκυψε μετά από τροποποίηση του αρχικού με την από 20-1-2009 απόφαση της Γ.Σ.Ε.Σ. της Σχολής, ενώ η σύνθεση της τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής μεταβλήθηκε με αντικατάσταση του κ. Γ. Καραντούνια από τον κ. Χ. Μακρόπουλο, Λέκτορα ΕΜΠ, με την από 13-7-2010 απόφαση της Γ.Σ.Ε.Σ. της Σχολής. Η τελική έκθεση προόδου υποβλήθηκε τον Οκτώβριο του 2010, ενώ η υποστήριξη της διατριβής πραγματοποιήθηκε ενώπιον επταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής στις 16-12-2010 στην αίθουσα τελετών της Σχολής στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου.

Η εκπόνηση της διδακτορικής διατριβής υποστηρίχθηκε από το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ) από το Νοέμβριο του 2005 έως και τον Οκτώβριο του 2008 με χορήγηση υποτροφίας, η οποία ανήκε στο γνωστικό αντικείμενο «Αειφορική Διαχείριση Υδάτινου Περιβάλλοντος» με κωδικό 0360521503.001.091.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που με βοήθησαν στην πραγματοποίηση και ολοκλήρωση αυτής της πολυετούς έρευνας.

Πρωτίστως, ευχαριστώ την Καθηγήτρια του ΕΜΠ και επιβλέπουσα τη διδακτορική μου διατριβή κα. Μ. Μιμίκου για την αρχική επιλογή και ανάθεση του θέματος, για την οριοθέτηση της γενικής κατεύθυνσης της έρευνας, καθώς και για τη συνεχή επίβλεψη της εκπόνησής της. Από τον Μάρτιο του 2004 έως και σήμερα η παρουσία μου στο Εργαστήριο Υδρολογίας και η ενασχόληση με το ερευνητικό και εκπαιδευτικό του αντικείμενο μου προσέφεραν πολύτιμες επιστημονικές γνώσεις με συμμετοχή σε πλήθος ερευνητικών προγραμμάτων, καθώς και σημαντική διδακτική εμπειρία. Πιστεύω πλέον ότι το διδακτορικό

είναι μία έρευνα που η κατεύθυνση και το αποτέλεσμά της διαμορφώνονται στην πορεία από όλα τα ερεθίσματα του ακαδημαϊκού χώρου στον οποίο εκπονείται. Η εμπιστοσύνη που μου έδειξε η κα. Μιμίκου για πολυετή συμμετοχή σε όλα τα ανωτέρω και η συνεχής συνεργασία μαζί της ήταν αυτά που οδήγησαν στην ωρίμανση των συνθηκών για την ολοκλήρωση αυτής της μεγάλης προσπάθειας.

Θέλω επίσης να ευχαριστήσω τον κ. Ε. Μπαλτά, Αναπληρωτή Καθηγητή του ΑΠΘ για τη μεγάλη του συνεισφορά, ως διδάσκοντος, στην απόκτηση γνώσεων κατά τη διάρκεια φοίτησής μου στο Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων» του ΕΜΠ (Σεπτέμβριος 2002 – Μάρτιος 2004), για τη συμβολή του στην αποσαφήνιση επιστημονικών εννοιών και ζητημάτων, καθώς και για την αμείωτη προθυμία συνεργασίας μαζί μου με παροχή συμβουλών κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής.

Θερμές ευχαριστίες οφείλονται στον κ. Χ. Μακρόπουλο, Λέκτορα του ΕΜΠ και μέλος της τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής, επίσημα από τον περασμένο Ιούλιο. Η συνεργασία μας ξεκίνησε ωστόσο από τις αρχές του 2008 και η συμμετοχή του από τότε στη διατριβή μου ήταν καθοριστική. Με χρήσιμες συμβουλές και πρωτότυπες ιδέες, σε ένα κρίσιμο στάδιο όπου ο ακριβής καθορισμός των στόχων ήταν απαραίτητος, με ώθησε σε μία εποικοδομητική σύνθεση γνώσεων και αξιοποίηση επιστημονικών και τεχνολογικών εργαλείων. Οφείλω να του αναγνωρίσω την πολύτιμη αυτή συνεισφορά και να τον ευχαριστήσω για τη συνεχή ουσιαστική βοήθεια και συνεργασία έως το πέρας της διδακτορικής διατριβής.

Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω τον κ. Γ. Καραντούνια, Καθηγητή του ΓΠΑ, μέλος της Εξεταστικής, καθώς και της Συμβουλευτικής Επιτροπής έως τον Ιούλιο του 2010, για την προθυμία συνεργασίας και τις πολύτιμες συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής. Θέλω επίσης να σημειώσω ότι ήταν ο άνθρωπος μέσω του οποίου γνώρισα την Επιστήμη της Υδρολογίας, καθώς ήταν ο πρώτος Καθηγητής από τον οποίο άκουσα για το αντικείμενο αυτό στο ΓΠΑ το ακαδημαϊκό έτος 2000-2001.

Ευχαριστώ επίσης τους κ.κ. Γ. Τσακίρη, Καθηγητή ΕΜΠ, Γ. Καρατζά, Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης και Χ. Καραβίτη, Λέκτορα ΓΠΑ, μέλη της Εξεταστικής Επιτροπής της διδακτορικής μου διατριβής, για τις πολύ χρήσιμες και ουσιαστικές παρατηρήσεις τους.

Τέλος, θα ήταν παράλειψη να μην ευχαριστήσω τον κ. Ν. Μαμάση, Λέκτορα ΕΜΠ, την κα. Δ. Παναγούλια, Επίκουρη Καθηγήτρια ΕΜΠ, καθώς και τους υπόλοιπους συνεργάτες μου, πρώην και νυν, στο Εργαστήριο Υδρολογίας για την άψογη και εποικοδομητική συνεργασία μας όλα αυτά τα χρόνια.

Γιάννης Παναγόπουλος

Περίληψη

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή με τίτλο: ‘Λήψη αποφάσεων για τον σχεδιασμό βιώσιμων μέτρων για την προστασία της χημικής κατάστασης του υδάτινου περιβάλλοντος από μη σημειακές πηγές ρύπανσης’, προτείνεται μία νέα μεθοδολογία, βασισμένη σε εξελικτικές μεθόδους πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, με σκοπό τον περιορισμό της ρύπανσης των επιφανειακών υδάτων λεκάνης απορροής από τις αγροτικής προέλευσης ενώσεις θρεπτικών του αζώτου νιτρικών (N-NO3) και του φωσφόρου (P).

Οι συνήθεις γεωργικές και κτηνοτροφικές δραστηριότητες που περιλαμβάνουν την εφαρμογή συμβατικών μεθόδων βαθιάς άροσης του εδάφους, μεγάλες ποσότητες χημικής λίπανσης και εφαρμογής κοπριάς στους αγρούς, καθώς και υψηλή συγκέντρωση ζωικού κεφαλαίου με εκτεταμένη και πολύμηνη βόσκηση στις φυσικές εκτάσεις, αποτελούν σήμερα αιτίες υποβάθμισης της ποιότητας των υδάτινων σωμάτων σε αγροτικές λεκάνες απορροής. Η προσπάθεια ελέγχου και περιστολής της μη σημειακής ρύπανσης των υδάτων από θρεπτικά που προκαλούν αυτές οι δραστηριότητες είναι μία συνεχής διαδικασία συνδεδεμένη με τις υδρολογικές διεργασίες λεκάνης απορροής, που απαιτεί την ταυτόχρονη ικανοποίηση αντικρουόμενων περιβαλλοντικών και οικονομικών στόχων. Οι Βέλτιστες Διαχειριστικές Πρακτικές ή απλούστερα Διαχειριστικές Πρακτικές (ΔΠ) κερδίζουν ολοένα έδαφος ως μέσο αντιμετώπισης του προβλήματος, ωστόσο, η αποδοτικότητά τους εξαρτάται έντονα από τα τοπικά υδροκλιματικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά των αγροτικών περιοχών στις οποίες εφαρμόζονται. Επιπλέον, η φύση και ο μηχανισμός δράσης τους επιδρούν σε διαφορετικό βαθμό στη μείωση των διαφόρων τύπων ρυπαντικού φορτίου με αποτέλεσμα η περιβαλλοντική αποτελεσματικότητά τους να μην μπορεί να κριθεί μονοσήμαντα. Η βέλτιστη επιλογή και τοποθέτηση ΔΠ στο χώρο (ολοκληρωμένα διαχειριστικά σχήματα) καθίσταται λοιπόν ένα πρόβλημα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης με πολλαπλούς στόχους, ενώ ο αριθμός των δυνατών διαχειριστικών λύσεων αυξάνεται δραστικά με την έκταση της λεκάνης. Οι παράγοντες αυτοί καθιστούν αναγκαία την προσέγγιση του προβλήματος μέσω της αξιοποίησης νέων επιστημονικών και τεχνολογικών εργαλείων.

Ένα αποδοτικό και εύχρηστο Εργαλείο Υποστήριξης Αποφάσεων (ΕΥΑ) αναπτύσσεται σε προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB, ικανό να εκτιμά την αποτελεσματικότητα ενός μεγάλου αριθμού διαφορετικών τύπων ΔΠ, σε μικρές και μεγάλες λεκάνες με ανάγκες διαχείρισης των καλλιεργειών και του ζωικού κεφαλαίου, καλύπτοντας μεγάλο εύρος των μέτρων που σήμερα εφαρμόζονται στην Ευρώπη. Η διατύπωση του προβλήματος προς βελτιστοποίηση που τίθεται στην παρούσα διατριβή έχει ως εξής: αξιολόγηση συνδυασμών ΔΠ που ελαχιστοποιούν το άθροισμα του μέσου ετήσιου φορτίου

απωλειών N-NO3 και P από ολόκληρη την αγροτική έκταση της λεκάνης απορροής προς τα επιφανειακά νερά με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση του κόστους εφαρμογής τους. Με τα μέτρα που προτείνονται, επιτυγχάνεται ταυτόχρονα μείωση της διάβρωσης του εδάφους και της στεροπαροχής του ποταμού, ιδιαίτερα επιθυμητής για την επιβράδυνση της πλήρωσης του νεκρού όγκου των ταμιευτήρων με φερτές ύλες. Το ΕΥΑ αποτελείται από τις πέντε κάτωθι συνιστώσες:

α) τις πιθανές εναλλακτικές ΔΠ που διαμορφώνονται με βάση συνήθεις ανάγκες διαχείρισης ελληνικών ορεινών λεκανών απορροής, περιλαμβάνοντας ένα αντιπροσωπευτικό εύρος παρεμβάσεων στη διαχείριση καλλιέργειας, των εδαφικών πόρων, της εφαρμογής θρεπτικών και του ζωικού κεφαλαίου. Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκε η μεταβολή στην ποσότητα και στη χρονική στιγμή της χημικής λίπανσης σε καλλιέργειες σιτηρών (π.χ. αραβόσιτος) και πολυετών ψυχανθών (π.χ. μηδική), καλλιέργεια σιτηρών κατά τις ισοϋψείς με μειωμένη άροση, μείωση του αριθμού των παραγωγικών ζώων και του χρονικού διαστήματος ελεύθερης βόσκησης, αποθήκευση κοπριάς αιγοπροβάτων και πουλερικών πριν τη διασπορά τους στους βοσκότοπους, καθώς και εγκατάσταση λωρίδων βλάστησης για τη συγκράτηση θρεπτικών στα όρια των αγρών,

β) μία εμπειρική συνάρτηση κόστους, η οποία υπολογίζει το επιπρόσθετο μέσο ετήσιο κόστος 5ετούς εφαρμογής των ανωτέρω ΔΠ, συνυπολογίζοντας την απώλεια εισοδήματος από πιθανές απώλειες απόδοσης καρπού σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση,

γ) το υδρολογικό, κατανεμημένο μοντέλο προσομοίωσης διαδικασιών SWAT (Soil and Water Assessment Tool), το οποίο, ύστερα από την αποτύπωση και προσομοίωση της υφιστάμενης κατάστασης, αξιολογεί την περιβαλλοντική αποτελεσματικότητα εφαρμογής των ΔΠ σε όλες τις υδρολογικά ομοιογενείς περιοχές της λεκάνης απορροής (Υδρολογικές Μονάδες - ΥΜ), παρέχοντας επιπρόσθετα τις εκτιμήσεις για τις ετήσιες αποδόσεις των καλλιεργειών,

δ) μία Βάση Δεδομένων Διαχειριστικών Πρακτικών (ΒΔΠ), η οποία αποθηκεύει δεδομένα μέσου ετήσιου φορτίου απωλειών ρύπων και κόστους που προκύπτουν από όλες τις ΥΜ της λεκάνης μετά από εφαρμογή με το SWAT σε αυτές όλων των συμβατών ΔΠ. Το περιεχόμενο της ΒΔΠ που διατάσσεται σε πινακοποιημένη μορφή χρησιμοποιείται στη διαδικασία βελτιστοποίησης αντί του μοντέλου για την αξιολόγηση των εναλλακτικών διαχειριστικών σχημάτων στη λεκάνη, μειώνοντας σημαντικά τον υπολογιστικό χρόνο,

ε) τον εκλεκτικό Γενετικό Αλγόριθμο (ΓΑ) του MATLAB, βασισμένο στον αλγόριθμο τρίτης γενιάς NSGA-II (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm), ο οποίος αποτελεί τη 'μηχανή' βελτιστοποίησης για την επιλογή και τοποθέτηση ΔΠ στην αγροτική γη της λεκάνης με σκοπό τη βελτιστοποίηση του οικονομικού και των περιβαλλοντικών κριτηρίων. Ο αλγόριθμος είναι ικανός να ψάξει σε ένα εκτεταμένο, μη γραμμικό και μη

συνεχές πεδίο αναζήτησης, ενώ το στοιχείο του ελιτισμού εγγυάται την επιλογή ατόμων του πληθυσμού (λύσεων ή διαχειριστικών σχημάτων στη λεκάνη) με την καλύτερη διαμόρφωση των τιμών των κριτηρίων, διατάσσοντας τις λύσεις αυτές σε ένα βέλτιστο (μη-κυριαρχούμενο) μέτωπο Pareto τριών διαστάσεων. Η ενσωματωμένη συνάρτηση της 'απόστασης συνωστισμού' επιτρέπει τη διατήρηση ικανοποιητικής διασποράς των λύσεων στο μέτωπο προτιμώντας εκείνες που βρίσκονται σε μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ τους.

Η Μεθοδολογία και το Εργαλείο εφαρμόστηκαν στη μέσης έκτασης (940km^2) λεκάνη του άνω ρου του Αράχθου στη Δυτική Ελλάδα. Δημιουργήθηκαν 50 ΔΠ προς εξέταση, που περιλαμβάνουν τις μεμονωμένες πρακτικές που περιγράφηκαν, τους δυνατούς συνδυασμούς τους και τη συμβατική (υφιστάμενη) πρακτική σε κάθε έναν από τους τρεις αγροτικούς τύπους χρήσης γης (αραβόσιτος, μηδική, βοσκότοποι). Οι καμπύλες αντιστάθμισης στο δισδιάστατο χώρο κόστους-P και κόστους-N-NO3 από το μέτωπο Pareto τριών διαστάσεων, παρείχαν πληροφορία για 100 διαφορετικούς συνδυασμούς ΔΠ, οι οποίοι προκαλούν διαφορετικά ετήσια κόστη και φορτία απωλειών θρεπτικών από τα εδάφη ή μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις τους στην έξοδο της λεκάνης. Η αρχική προσπάθεια ήταν ο εντοπισμός ενός αποδεκτού συμβιβασμού ανάμεσα στους αντικρουόμενους στόχους επιλέγοντας λύσεις που αντιστοιχούν σε διαχειριστικά σχήματα τα οποία, με ανεκτό κόστος, μειώνουν τις συγκεντρώσεις P και N-NO3 στο ποτάμι κάτω από αυστηρά ανώτατα όρια. Μία τέτοια διαχειριστική λύση, για παράδειγμα, κατέδειξε ότι η συγκέντρωση του P μπορεί να μειωθεί κατά 45% από την υφιστάμενη κατάσταση με ταυτόχρονη μείωση 25% της συγκέντρωσης N-NO3 και με επιπρόσθετο συνολικό ετήσιο κόστος περίπου 500000€ ή 5€/ha γης στη λεκάνη. Η λύση αυτή οδηγεί ακόμα στη μείωση της μέσης ετήσιας στερεοπαροχής του ποταμού κατά 20% σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση.

Άλλες λύσεις από τις καμπύλες αντιστάθμισης είναι εκείνες που προκαλούν βελτίωση της ποιότητας του νερού με μικρό ή μηδενικό κόστος, όπως και οι ακραίες λύσεις του μετώπου, οι οποίες αντιστοιχούν σε σημαντικές μειώσεις συγκεντρώσεων σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση με σημαντικό κόστος ή μικρότερες μειώσεις, οι οποίες όμως συνδυάζονται ακόμα και με υπολογίσιμη αύξηση στο ετήσιο εισόδημα του αγροτικού πληθυσμού. Μεγάλο ενδιαφέρον προκαλεί το γεγονός ότι σε πολλές περιπτώσεις η βελτιστοποίηση προτείνει σχήματα χωρικής κατανομής ΔΠ στη λεκάνη, τα οποία ικανοποιούν τους στόχους θεωρώντας ότι μία σημαντική έκταση της αγροτικής γης δεν τίθεται υπό διαχείριση, λύσεις που θα ήταν αδύνατο να ανακαλυφθούν και να προταθούν εμπειρικά. Η διερεύνηση καταλήγει στο συμπέρασμα οτι στη λεκάνη του Αράχθου, ένας αποδεκτός συμβιβασμός μεταξύ αντικρουόμενων κριτηρίων είναι η διαμόρφωση λωρίδων συγκράτησης στους περισσότερους αγρούς αραβόσιτου και σε επιλεγμένες εκτάσεις

βοσκότοπων σε συνδυασμό με τη σημαντική μείωση της χημικής λίπανσης στις εκτάσεις μηδικής, πρακτική που βρέθηκε να μην έχει κανένα αντίκτυπο στην παραγωγή.

Το πλαίσιο πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης (τρία κριτήρια) που παρουσιάζεται καταδεικνύει τη σημασία της ανάλυσης λύσεων που προκαλούν τη μείωση περισσοτέρων του ενός ρύπων ταυτόχρονα σε συνάρτηση με τις οικονομικές δαπάνες που απαιτούνται, παρέχοντας παράλληλα τη χωρική κατανομή των ΔΠ στη λεκάνη που προκύπτει από τις λύσεις αυτές. Οι παραγόμενοι χάρτες αποτελούν πολύτιμο μέσο για τη λήψη αποφάσεων διευκολύνοντας την ανάλυση των επιδράσεων πολλαπλών συνδυασμών επιλογής και τοποθέτησης ΔΠ στη λεκάνη. Οι λαμβάνοντες τις αποφάσεις μπορούν ξεκάθαρα να δουν την αντιστάθμιση του κόστους και των συγκεντρώσεων θρεπτικών και να διερευνήσουν τη χωρική κατανομή των ΔΠ στη λεκάνη απορροής επιβάλλοντας επιπρόσθετους περιορισμούς τοπικού χαρακτήρα, αν αυτό είναι απαραίτητο. Η χρήση της μεθοδολογίας που παρουσιάζεται μπορεί να συμβάλλει στην ολοκληρωμένη διαχείριση των εδαφικών και υδατικών πόρων και στην υλοποίηση της Περιβαλλοντικής Νομοθεσίας με ικανοποιητικούς όρους κόστους και αποτελεσματικότητας σε κλίμακα λεκάνης απορροής.

Extended Abstract

In the present PhD thesis entitled: 'Decision making for planning sustainable measures for water quality protection against non-point source pollution', a novel methodology based on multi-objective evolutionary optimization is proposed for the mitigation of nitrates-nitrogen (N-NO3) and total phosphorus (TP) surface water pollution arising from diffuse agricultural sources in river basins.

Farming practices such as conventional tillage, high chemical fertilization and manure application rates to fields, high livestock stocking rates and over-grazing have all been identified as potential pressures deteriorating the quality of water bodies in agricultural catchments. The effort to manage diffuse nutrient pollution from those sources is an ongoing challenge, linked to catchment hydrological processes and needs to take into account trade-offs between environmental objectives and costs. Best Management Practices (BMPs) are gaining ground as a means to address the problem, but their application efficiency is highly dependant on the location-specific hydroclimatic and geomorphological characteristics of the land in which they are to be applied. Furthermore, BMPs effectiveness also depends on the degree to which control of each separate nutrient element is desired, as different BMPs are better at reducing specific types of pollutants than others. The optimal selection and placement of BMPs across the landscape (integrated management schemes) is inevitably a multi-objective problem, with a significant number of possible combinations, which increases drastically with the catchment area.

An efficient and user friendly Decision Support Tool (DST) is developed in MATLAB-programming, able to assess the effectiveness of a large number of different BMP types, in small and large catchments with both crop and livestock management needs, covering a significant range of types of measures currently applied in Europe. The corresponding problem formulation presented herein is stated as the evaluation of BMP combinations that minimize the sum of the average annual N-NO3 and P losses from all locations in the catchment together with the minimization of the total cost of implementation. At the same time, the proposed interventions can limit soil erosion and river sediment yields, which can reduce sediments deposition rates in the reservoirs. A schematic of the DST elements is presented in Figure 1.

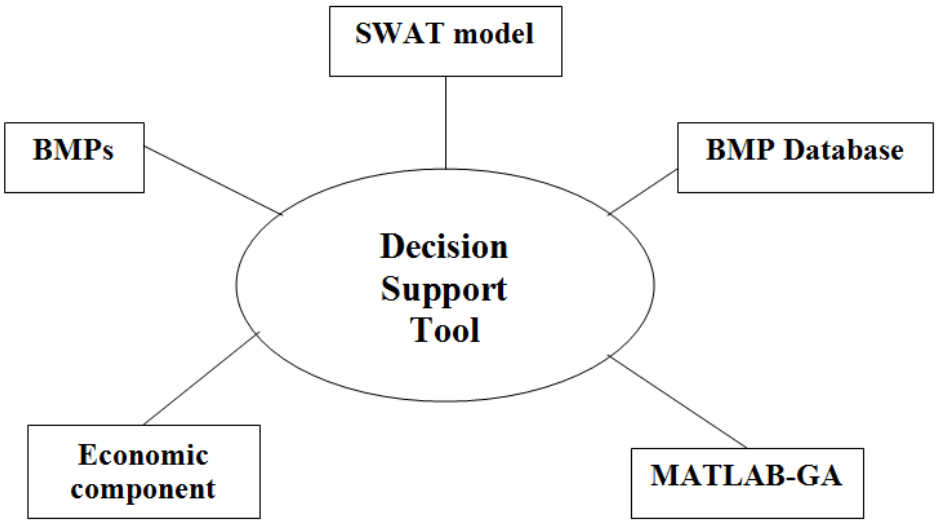


Figure 1. A schematic of the developed Decision Support Tool.

As Figure 1 demonstrates, the DST is comprised of five components:

a) The BMPs that are developed according to the most common management needs of Greek mountainous catchments, covering a representative range of crop, soil, nutrient application and livestock management interventions such as: changing the amount and timing of chemical fertilization on cereal (e.g. corn) and perennial legume (e.g. alfalfa) cultivations, contour farming cultivation and reduced-tillage on cereals, reduction of livestock stocking rates and of the length of the sheep grazing season in pastureland, sheep and poultry manure storage before spreading to fields as well as the establishment of vegetative filter strips at the edge of fields.

b) An empirical economic component, which calculates the additional mean annual cost of their 5-year implementation including income lost due to possible reductions in crop yields compared to the baseline.

c) The process-based distributed SWAT (Soil and Water Assesment Tool) model, which evaluates the environmental effectiveness of the BMP interventions at all homogeneous locations within the catchment (Hydrologic Response Units – HRUs) after representing the baseline. SWAT also provides estimates of annual crop yields.

d) A BMP Database that stores mean annual nutrient losses and costs arising from the implementation of each BMP to all possible HRUs. Its contents are then used in the optimisation process in the form of a look-up table, instead of running SWAT repeatedly to evaluate each alternative intervention scheme. This significantly decreases computation time.

e) An elitist MATLAB Genetic Algorithm (GA), a variant of the NSGA-II (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm), which serves as the optimization engine for the selection and placement of BMPs in the agricultural land in the catchment in order to optimise both environmental and economic objectives. The algorithm provides an efficient method of searching through an extensive, non-linear and non-continuous solution space, while the controlled elitism ensures that fit individuals are well represented in the population while maintaining population diversity for convergence to an optimal (non-dominated) three-dimensional Pareto front. An embedded crowding distance function helps to maintain diversity of solutions by favoring individuals that are relatively far from each other.

The methodology is tested in the medium-sized (940km^2) Arachtos catchment of Western Greece. The catchment is partly agricultural (arable and pasture) and partly forested with natural pasture covering the 45% of the area, serving as grazing land for animals (mainly sheep). The main crops cultivated for satisfying livestock nutrition needs are corn and alfalfa that cover 12% of the catchment area. The base-line scenario, representing business as usual for the catchment was firstly modeled in SWAT. Under conventional practices, the mean annual river sediment yield at the outlet was 1320 Ktn/y, while N-NO3 and TP river loads were calculated by SWAT equal to 769000 and 263000 kg/y respectively, corresponding to mean annual concentrations of 0.65 mg/l N-NO3 and 0.22 mg/l TP at the outlet. Agricultural diffuse losses were responsible for more than 80% of both nutrient losses, with corn being the most vulnerable land use type in terms of all pollutant losses from HRUs.

Fifty different BMPs were formulated including the individual measures that are presented in Table 1, the majority of their compatible combinations, as well as the conventional (existing) agricultural practice in each agricultural land use type (corn, alfalfa, pastureland). The costs presented in Table 1, were calculated as the additional costs needed to implement a specific BMP compared to the baseline, including the capital and maintenance costs for a 5-year period of BMP operation, as well as loss of incomes arising by its implementation. The latter represents possible losses of corn and alfalfa yields from each HRU as well as losses of revenues from livestock numbers reduction. Cost estimation was undertaken mainly by taking into consideration two recent studies conducted by the National Agricultural Research Foundation (NAGREF) of Greece regarding alfalfa cultivation and sheep-breeding. Empirical estimations for fuel and labor costs are included, while for field strips reported annual cost rates were also used for comparison to the approximations made in this study. All prices were estimated with reference to 2007. The formulated BMPs are numbered sequentially in Table 2.

Table 1: BMPs selected for implementation in the agricultural land of the Arachtos catchment.

LAND USE	BMP	BMP Description	HOW implemented in SWAT	*COST Additional Cost - Income
CORN	C1	Timing of chemical fertilization	29/4 instead of 29/3	0.17 € / kg yield lost -0.17 € / kg yield gained
	C2	Fertilizer reduction	-30% N and P	-0.19€ / kg fert 20-10-00 -0.245€ / kg fert 33-00-00 0.17 € / kg yield lost
	C3	Contour Farming	$P_{USLE} = 0.9$ $CN_{new} = CN - 3$	10 € / ha 0.17 € / kg yield lost
	C4	No-tillage	Tillage removal	- 40 € / ha 0.17 € / kg yield lost
	C5	Field border	5m strip width	50 €/ha
ALFALFA	A1	Timing of chemical fertilization	15/3 instead of 15/2	0.17 € / kg yield lost -0.17 € / kg yield gained
	A2	Fertilizer reduction	-100% N, -50% P	-0.17€/ kg fert 11-52-00 and 00-15-00 0.17 € / kg yield lost
	A3	Field border	5m strip width	50 €/ha
PASTURE	P1	Poultry numbers reduction	-30% manure deposition	Broilers (0.35 €/animal)
	P2	Storage of poultry manure and application only in the dry season	15% reduction in manure N content Application from April to September Double the manure application rate	Broilers (0.15 €/animal)
	P3	Sheep numbers reduction	-30% manure deposition	Sheep (3.56 €/animal)
	P4	Reduce sheep grazing season by 2 months Manure storage and spread during the dry season	Sheep grazing 150 days: 1May-30 Sep Store manure of the non-grazing period and deposition during: 1 May-30 Sep with 30% N content reduction and 40% increase in the application rate	Sheep (3.5 €/animal)
	P5	Field border	5m strip width	50 €/ha

*Positive values indicate additional cost of BMP implementation compared to conventional practice. Negative values indicate additional farmers' income arising from BMP implementation.

Table 2: Composite BMPs selected by combining different measures within corn, alfalfa and pastureland HRUs.

BMP Number	BMP	LAND USE	BMP Number	BMP	LAND USE	BMP Number	BMP	LAND USE
1	baseline	CORN	18	C1 & C2 & C4	CORN	35	A2	ALFA
2	C1	CORN	19	C1 & C2 & C5	CORN	36	A3	ALFA
3	C2	CORN	20	C1 & C3 & C4	CORN	37	A1 & A2	ALFA
4	C3	CORN	21	C1 & C3 & C5	CORN	38	A1 & A3	ALFA
5	C4	CORN	22	C1 & C4 & C5	CORN	39	A2 & A3	ALFA
6	C5	CORN	23	C2 & C3 & C4	CORN	40	A1 & A2 & A3	ALFA
7	C1 & C2	CORN	24	C2 & C3 & C5	CORN	41	baseline	PAST
8	C1 & C3	CORN	25	C2 & C4 & C5	CORN	42	P1	PAST
9	C1 & C4	CORN	26	C3 & C4 & C5	CORN	43	P2	PAST
10	C1 & C5	CORN	27	C1 & C2 & C3 & C4	CORN	44	P3	PAST
11	C2 & C3	CORN	28	C1 & C2 & C3 & C5	CORN	45	P4	PAST
12	C2 & C4	CORN	29	C1 & C2 & C4 & C5	CORN	46	P5	PAST
13	C2 & C5	CORN	30	C1 & C3 & C4 & C5	CORN	47	P1 & P3	PAST
14	C3 & C4	CORN	31	C2 & C3 & C4 & C5	CORN	48	P2 & P4	PAST
15	C3 & C5	CORN	32	C1 & C2 & C3 & C4 & C5	CORN	49	P1 & P3 & P5	PAST
16	C4 & C5	CORN	33	baseline	ALFA	50	P2 & P4 & P5	PAST
17	C1 & C2 & C3	CORN	34	A1	ALFA	51*	NO BMP	OTHER

* The 51st is not actually a BMP but was incorporated to facilitate the expression of no interventions in non-agricultural areas.

The BMP database, developed for use with the DST, stores losses of mean annual sediments, N-NO3 and TP, as well as the respective calculated costs arising from the implementation of each BMP to all HRUs. The database consists of tables that contain information concerning the environmental or cost variables (in this case four tables for four variables: sediments, N-NO3, TP and cost) for each HRU. Rows, in these tables represent the HRUs of the catchment and columns represent the loads and costs that result after each BMP has been implemented in the specific HRU. In the case of the Arachtos catchment each Table contains 259×51 cells, whereby 259 is the number of HRUs in the catchment and 51 is the number of BMPs totally tested (Table 2).

The procedure for creating the BMP database is simple and completely automated. A set of scripts in MATLAB find and open the input 'mgt' files used by SWAT to identify practices within each HRU. It recognizes landuse and soil information and sets the values which are required to represent each BMP. For example, in order to assess the introduction of field borders in corn HRUs, the script related to BMP no. 6 in Table 2 was executed,

recognized all 'mgt' files with corn as their land use type and set the field strip value to 5m instead of 0. SWAT is then run for 5 years (2001-2005) thus simulating mean annual loads that would have been produced from all HRUs during this period, if a BMP was applied. After each run, the mean annual pollutant losses from each HRU and the mean annual crop yields are obtained, as well as the respective cost estimates for each BMP implementation. The environmental information obtained and the cost information derived from the consecutive runs of all 51 BMPs are then automatically stored at the BMP Database. Figure 2 illustrates the process of populating the database.

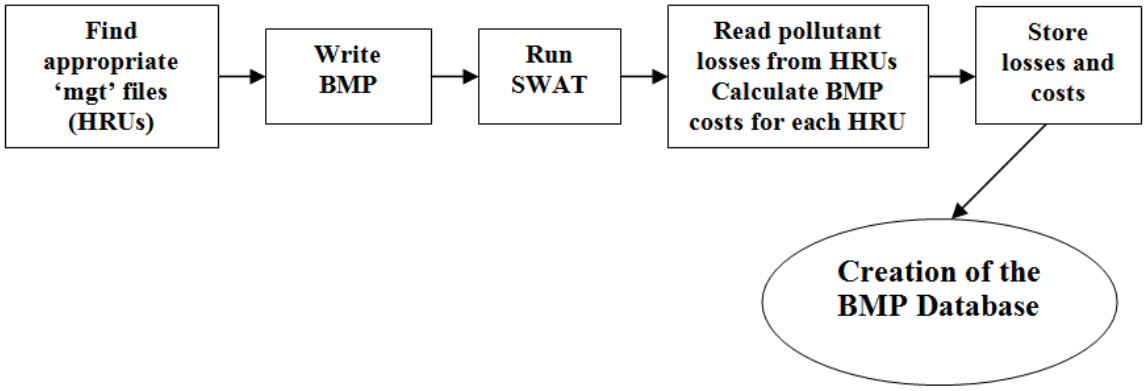


Figure 2. Populating the BMP database.

Minimizing TP, N-NO3 losses and cost of BMP implementation from all HRUs in the Arachtos catchment is the optimization problem addressed in the DST through the multi-objective GA. The multi-objective optimization process is depicted in Figure 3.

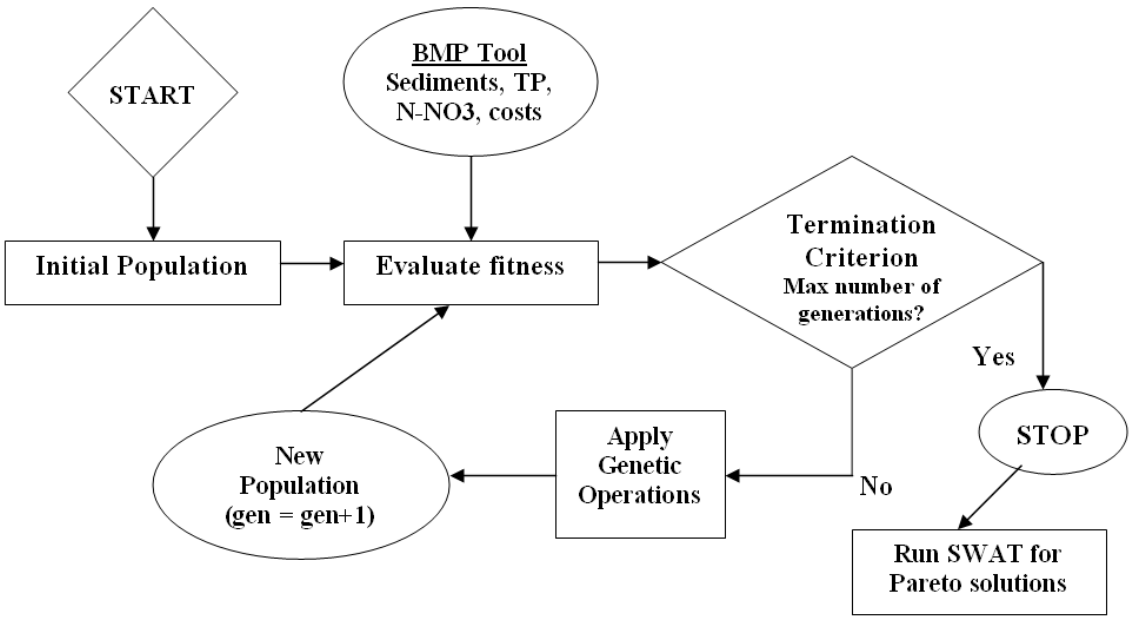


Figure 3. The multi-objective optimization process for BMP selection and placement.

The process starts with the initialization of a population either randomly by the GA or by the user. Each individual of the population consists of genes equal to the number of decision variables (in this case the number of HRUs). The values of genes of an individual form the genotype, while their real representation is called phenotype, which represents a combination of BMPs in the HRUs of the Arachtos catchment. A real integer coding was selected to represent this problem, thus the genes of each individual are expressed by integer values between 1 and 51, the 51 alternative situations as they were numbered in Table 2. The representation of a hypothetical individual (chromosome) is demonstrated in Figure 4.

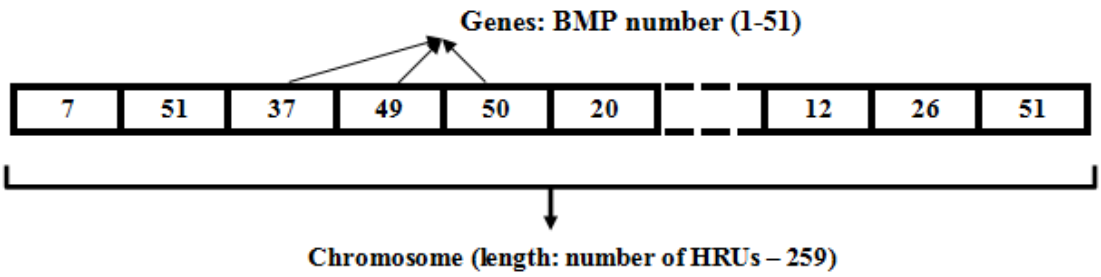


Figure 4. A chromosome representing a complete BMP scheme in the Arachtos catchment (a single management solution).

A set of lower and upper bounds (LB and UB) is also defined to ensure that the GA would select values from the first 32 columns of the BMP Database for corn HRUs, from the following 8 for alfalfa and the next 10 for pastureland. For non-agricultural HRUs the GA is constraint to choose values from the last (51th) column. Bound constrains in each x_i chromosome gene (HRU) are therefore expressed as follows:

$$1 \le x_i^{CORN} \le 32 \ , \ 33 \le x_i^{ALFA} \le 40 \, , \ 41 \le x_i^{PAST} \le 50 \ , \ 51 \le x_i^{OTHER} \le 51 \qquad (1)$$

Once appropriately formulated, the individuals of the population are evaluated according to the fitness functions, which are the sum of pollutant losses and costs from all HRUs provided by the BMP Database (Fig. 3), which in this case acts as a lookup table, instead of running SWAT. The algorithm tries to minimize all possible criteria through an iterative process of population redistribution. After the evaluation of the population, the algorithm compares the generation number with the maximum generation set as the termination criterion. If the current generation number is equal to the maximum, the algorithm stops, otherwise the population undergoes selection and genetic operations (crossover, mutation) in order to form a new population for the next generation.

Optimization process was terminated after 40000 generations with a population of 250 individuals and the optimal trade-off frontiers between cost-TP and cost-N-NO3 provided information on 100 different BMP combinations, which result in various mean annual costs and nutrient losses or concentrations at the outlet. In order to examine optimal solutions with translation to the latter environmental expression, the 100 pareto set solutions proposed by the GA were imported into SWAT and the model was executed 100 times to calculate the mean annual (2001-2005) concentrations at the outlet (last step in Fig. 3). The optimal trade-off frontiers between cost-TP and cost-N-NO3 are depicted in Figure 5.

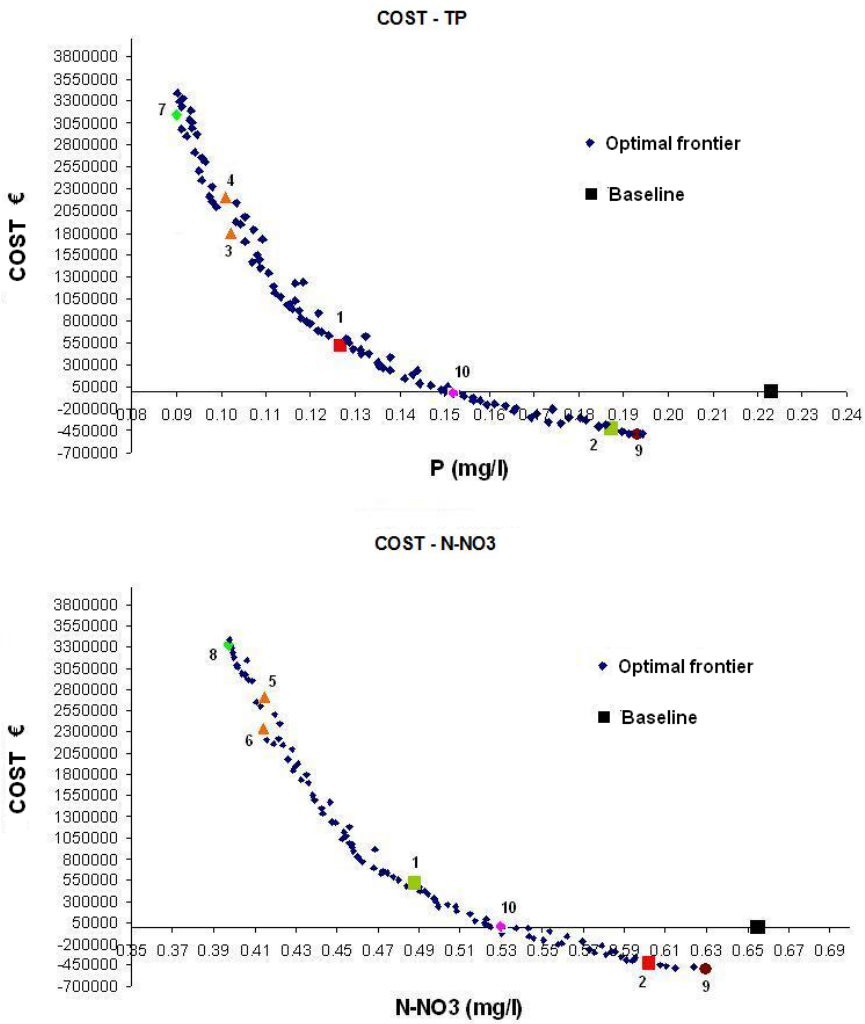


Figure 5. Two dimensional projections of the optimal trade-off frontiers produced from the three-criterion optimization.

Attempt was made first to discover an acceptable compromise between conflicting objectives by selecting solutions which represented management schemes that reduce TP and N-NO3 concentrations below strict permissible limits with affordable cost of implementation. As an example, the application management solution number 1 in Figure 5 achieves a 45% TP

reduction from the baseline (decrease of TP concentration to 0.125 mg/l at the catchment outlet) and costs nearly 500000€, which approximately corresponds to 25€/inhabitant/year or 5€/ha. On the other hand, the same solution, depicted as a green rectangle in the cost-N-NO3 space, reduces N-NO3 concentration to 0.49mg/l, thus achieves a reduction of 25% as compared to the baseline. This management solution also results in a 20% mean annual reduction of the river sediment yield at the outlet compared to the current state.

Depicting this optimal Pareto solution in a map the BMP allocation in the Arachtos catchment is demonstrated. As can be seen in Figure 6, the solution represents a compromise between more and less expensive BMPs identified by the algorithm. For alfalfa fields (green background) the solution suggests chemical fertilization reduction (BMP 35), combined with a delay in the timing of application in some fields (BMP 37) or more extensively with the establishment of field strips (BMP39). There was, however, one field in the Northern part of the catchment where all three possible alfalfa BMPs were combined (BMP 40).

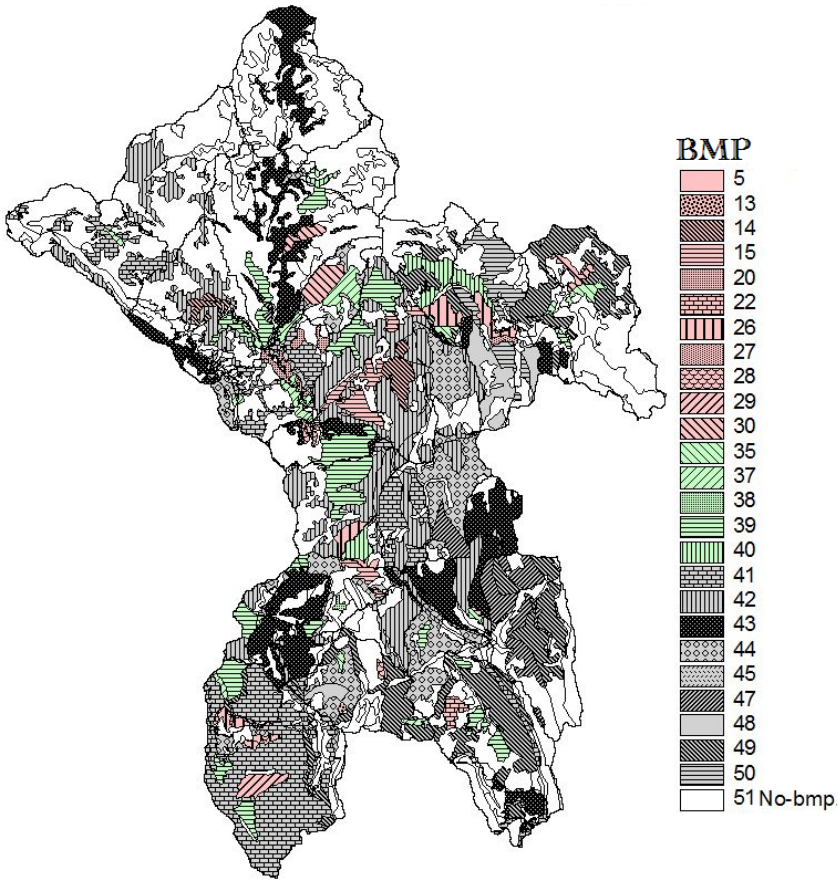


Figure 6. BMP allocation of solution no.1 in the Arachtos catchment (TP: 0.125 mg/l, N-NO3: 0.49 mg/l, cost: 513065€).

As for corn (pink background), the algorithm favors BMPs that mostly include the establishment of field strips along with a series of alternative additional measures (BMP 13,

15, 22, 26, 28, 29, 30). This happens because field strips are more efficient in reducing the significant TP losses from corn fields via sediment or direct trapping. The combined nutrient application management (fertilization reduction and delay) is also the next most preferable measure, incorporated in wider corn BMP combinations (BMP 27, 28, 29). For pastureland (grey background), a high range of possible measures is applied across the catchment. However, it is of great interest that a number of large pastureland HRUs, such as the one in the downstream most part of the catchment, were not managed at all (BMP41). In general, poultry and sheep reduction (BMP 42 and BMP 44), along with the establishment of field strips (BMP 49), are favored by the algorithm in the majority of pastureland HRUs.

Other solutions discovered on the frontiers of Figure 5 are those which result in environmental improvements at little or no cost (e.g. solution 10) as well as the extremes, which represent the greatest nutrient reductions with significant cost (solutions 7 and 8) or small concentration reductions coupled however with a considerable increase in the farmers annual income compared to the baseline (solutions 2 and 9). With a significant amount of economic resources available for river basin management, there are solutions which can decrease TP concentrations by more than 50% and N-NO3 concentrations by approximately 35%. For instance, solutions 3 and 4 in the cost-TP space represent combinations of BMP implementation, which drastically decrease TP concentrations (0.10 instead of 0.22 mg/l), while solutions 5 and 6 cause a significant reduction in N-NO3 concentrations (0.42 instead of 0.65 mg/l). These schemes include BMP combinations which simultaneously incorporate many different unique measures in each land use type, which maximize the environmental effectiveness. Such measures include the combined application of nutrient, crop and soil management operation for corn, while manure and livestock management along with the establishment of field strips for pastureland. The cost of implementing these practices increases to more than 2M€.

In this case it is essential to take additional socio-economic factors into consideration before reaching a decision. Both sets of solutions (3 & 4 and 5 & 6) represent BMP combinations of the same environmental effectiveness, which differ slightly in their total cost of implementation, but with a (potentially significant) difference in BMPs spatial allocation in the catchment. This implies that further examination by the decision maker is required, possibly considering additional local factors that may be prohibitive for the establishment of a measure in specific areas, in order to reach an acceptable solution. It is concluded that in the Arachtos catchment, an acceptable compromise between economic and environmental criteria is the combination of filter strips in corn and in selected pastureland fields with the fertilization reduction in alfalfa fields, which does not impact on crop yields.

The three-criterion optimization framework presented addresses the importance of analyzing solutions that reflect the reduction of more than one pollutant at the same time

along with the economic expenses needed, providing at the same time the spatial distribution of measures that these solutions represent. The produced maps are invaluable for decision-making facilitating the analysis of the impact of multiple combinations of BMPs in the catchment. Of high interest is that in many cases the optimization process can propose integrated management schemes, which satisfy the objectives by considering a significant part of the agricultural land under no BMP implementation, demonstrating solutions that would be impossible to plan with empirical methods. Policy-makers can explicitly see the trade-offs between cost and nutrient reductions and examine spatial patterns or impose additional local constraints. It is suggested that the methodology could already be used to assist in a more integrated soil and water resources management as well as cost-effective implementation of the environmental legislation at the catchment scale.

1 Εισαγωγή

1.1 Τοποθέτηση του προβλήματος

Ο εμπλουτισμός των υδάτων με ανθρωπογενούς προέλευσης θρεπτικά στοιχεία (nutrients), όπως το Άζωτο (Nitrogen - N) και ο Φώσφορος (Phosphorus - P) αποτελεί ένα σημαντικό περιβαλλοντικό ζήτημα που απασχολεί έντονα την Περιβαλλοντική Νομοθεσία τις τελευταίες δεκαετίες. Συχνά, η διαδικασία αυτή οδηγεί στον *ευτροφισμό* των εσωτερικών και παράκτιων υδάτων με υποβάθμιση της ποιότητάς τους και συνεπώς μείωση της καταλληλότητάς τους για διάφορες χρήσεις (Withers and Haygarth, 2007). Στα επιφανειακά ύδατα η παρουσία αυξημένων συγκεντρώσεων αζωτούχων και φωσφορικών ενώσεων, με τη συνδρομή και της ηλιακής ακτινοβολίας, ενισχύει, συχνά σε υπερβολικό βαθμό, την ανάπτυξη υδρόβιας βλάστησης και φυτικών μικροοργανισμών (φυτοπλαγκτόν). Στις συνέπειες του ευτροφισμού περιλαμβάνονται η μείωση του διαλυμένου οξυγόνου στα βαθύτερα στρώματα του νερού, η δημιουργία τοξινών που σκοτώνουν τα ψάρια, η παραγωγή ενώσεων που προσδίδουν δυσάρεστη οσμή και η εν γένει διαταραχή της οικολογικής ισορροπίας.

Ενδιαφέρον για το θέμα αυτό εκδηλώθηκε τη δεκαετία του ’90 στη Βόρεια Ευρώπη για τα παράκτια ύδατα με επιβολή μέτρων για τη μείωση των εισροών θρεπτικών στοιχείων στη θάλασσα, ενώ πολλές Ευρωπαϊκές χώρες άρχισαν να αναπτύσσουν δείκτες για την παρακολούθηση των τάσεων της ποιότητας των υδάτων (European Environmental Agency - EEA, 2003). Σύμφωνα με επιστημονικά ευρήματα από χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) και την Αμερική, μεγαλύτερη ανησυχία προκαλούν σήμερα οι εισροές P από τα εδάφη στα επιφανειακά ύδατα εξαιτίας της στενής σύνδεσης του στοιχείου με την εδαφική διάβρωση και τη στερεοαπορροή (Edwards and Withers, 1998· Sharpley, 1985· Sharpley and Smith, 1990).

Με τη θέσπιση της Οδηγίας-Πλαίσιο για τα ύδατα (Water Framework Directive - WFD) 2000/60 (Directive 2000/60/EC) τον Δεκέμβριο του 2000 υπάρχει πλέον ένα ολοκληρωμένο θεσμικό πλαίσιο σχετικά με τη διαχείριση των υδατικών πόρων σε χωρική κλίμακα λεκάνης απορροής ποταμού στην Ευρώπη. Ο έλεγχος των εισροών των δύο θρεπτικών στοιχείων στα νερά κρίνεται ως ένα βασικό μέρος της ολοκληρωμένης διαχείρισης, ώστε με βάση την Οδηγία να επιτευχθεί ο ουσιώδης στόχος της *καλής χημικής και οικολογικής κατάστασης* των υδάτων μέχρι το 2015. Σύμφωνα με τελευταία στοιχεία (EEA, 2005), οι αγροτικές δραστηριότητες συνεισφέρουν περίπου κατά 50% (25-75%) στις συνολικές ετήσιες εισροές P στα ευρωπαϊκά ύδατα, με μεγαλύτερα ποσοστά στις χώρες όπου οι σημειακές φορτίσεις του εν λόγω στοιχείου έχουν μειωθεί αρκετά από την επεξεργασία

των αστικών και βιομηχανικών αποβλήτων. Τα ποσοστά για το N είναι για πολλές χώρες αρκετά μεγαλύτερα, γεγονός που οφείλεται στις μεγάλες, ακόμα και σήμερα, ποσότητες αζωτούχων λιπασμάτων που εφαρμόζονται. Ενδεικτικά αναφέρονται πρόσφατοι ακριβείς υπολογισμοί για το Ηνωμένο Βασίλειο, οι οποίοι κατέδειξαν πως το 70% των ετήσιων ποσοτήτων N στα υδάτινα σώματα είναι αγροτικής προέλευσης (Hunt et al., 2004), με το αντίστοιχο ποσοστό για τον P να είναι μόλις 28% (White and Hammond, 2007).

Οι πηγές προέλευσης των θρεπτικών που καταλήγουν στα υδάτινα σώματα διακρίνονται σε *σημειακές* (point) και *μη σημειακές* (non-point) ή *διάχυτες* (diffuse). Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τις ποσότητες που απελευθερώνονται απευθείας στα επιφανειακά νερά (λίμνες, ποτάμια) και είναι αποκλειστικά ανθρωπογενούς προέλευσης. Εδώ ανήκουν οι εκροές βιολογικών καθαρισμών πόλεων, τα αστικά λύματα, τα βιομηχανικά απόβλητα και ακόμα τα λύματα των οργανωμένων κτηνοτροφικών μονάδων. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τις ποσότητες θρεπτικών, όχι απαραίτητα ανθρωπογενούς προέλευσης, που καταλήγουν στα επιφανειακά νερά μετά από κίνηση στο έδαφος, όπου έχουν τύχει χημικών μετασχηματισμών και φυσικής μεταφοράς υπακούοντας στους νόμους των υδρολογικών διεργασιών και του υδρολογικού κύκλου. Εδώ ανήκουν οι εισροές από αγροτικές δραστηριότητες, όπως η απόπλυση λιπασμάτων και κοπριάς από την καλλιεργήσιμη γη και τους βοσκότοπους, τα οικιακά λύματα με την εκτεταμένη χρήση βόθρων για τη διάθεσή τους και γενικότερα τα απόβλητα εγκαταστάσεων μη συνδεδεμένων με αποχετευτικό σύστημα, οι ποσότητες θρεπτικών με απορροές από φυσικές εκτάσεις, όπως δάση ή ακαλλιέργητα εδάφη, καθώς και αυτές που προέρχονται από την ατμόσφαιρα με φυσική εναπόθεση. Η συνεισφορά των δύο τελευταίων πηγών αναμένεται συνήθως να είναι πολύ μικρότερη, ως ποσοστό της συνολικής μη σημειακής συνεισφοράς, σε σχέση με τις υπόλοιπες και ιδιαίτερα σε σχέση με τη συνεισφορά του αγροτικού τομέα. Σύμφωνα με επίσημα στοιχεία της Ευρωπαϊκής Επιτροπής για το N, έχει υπολογιστεί ότι στα ελληνικά εδάφη εισέρχονται ετησίως 541000tn, εκ των οποίων το 57% και το 37% προέρχονται από χημικά λιπάσματα και κοπριά ζώων αντίστοιχα, με μόλις 6% να είναι οι εισροές από άλλες πηγές (ECR, 2002).

Στη γεωργία η τάση προς περαιτέρω αύξηση της έντασης και της παραγωγικότητας κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών συνοδεύθηκε από σημαντική αύξηση της χρήσης τόσο του ανόργανου N, όσο και των φωσφορικών λιπασμάτων. Η μεγαλύτερη αύξηση στην Ελλάδα παρατηρήθηκε μεταξύ 1958 και 1978, όταν οι συνολικές ποσότητες εφαρμοζόμενων λιπασμάτων αυξήθηκαν κατά 4,3 φορές, τα αζωτούχα 5 φορές και τα φωσφορικά 3,3 (Καρανδεινός, 1990). Ωστόσο, από τα μέσα της δεκαετίας του ’80 παρατηρήθηκε σταδιακή μείωση της κατανάλωσης λιπασμάτων και η τάση αυτή συνεχίστηκε στην περίοδο 2000-2003. Σε επίπεδο ΕΕ των 15 (ΕΕ-15), η μείωση που καταγράφηκε την περίοδο 2000-2003 σε σύγκριση με την προηγούμενη περίοδο (1996-1999) ήταν 6% για το N και 15% για τα

φωσφορικά λιπάσματα αντίστοιχα, με συνέχιση των πτωτικών τάσεων το 2004 και το 2005. Συγκρινόμενη με την προηγούμενη περίοδο αναφοράς, η ετήσια συνολική κατανάλωση ανόργανων αζωτούχων λιπασμάτων στην ΕΕ-15 παρέμεινε σταθερή κατά την περίοδο 2004-2007, φθάνοντας περίπου σε 9×10^6tn, ενώ στην ΕΕ-27 αυξήθηκε κατά 6%, συγκεκριμένα από $11{,}4\times10^6$ σε $12{,}1\times10^6$tn. Η κατανάλωση δε ανόργανων φωσφορούχων λιπασμάτων μειώθηκε στην ΕΕ-15 κατά 9%, ενώ στην ΕΕ-27 μόλις κατά 1% σε σύγκριση με την περίοδο 2000-2003 (ΕΕΚ, 2010). Στη Γαλλία παρουσιάστηκε μείωση στις εφαρμογές αζωτούχων και φωσφορικών λιπασμάτων κατά 10% και 20% αντίστοιχα κατά την περίοδο 1986-1994, ενώ παρόμοια ποσοστά μείωσης καταγράφηκαν σε Αγγλία και Ολλανδία, κάτι που εξηγείται από την πρόσφατη στροφή στη *γεωργία ακριβείας* (precision farming), με προσπάθεια οι λιπαντικές εφαρμογές να είναι πλέον στενά συνδεδεμένες με τις ακριβείς ανάγκες των καλλιεργειών προς εξοικονόμηση δαπανών (Stoate et al., 2001).

Στον τομέα της κτηνοτροφίας, κατά την τελευταία πεντηκονταετία παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση στον αριθμό των παραγωγικών ζώων, επιβαρύνοντας περαιτέρω τις φορτίσεις N και P μέσω της εναπόθεσης κοπριάς. Οι αλλαγές όμως στην Αγροτική Πολιτική στην Ευρώπη, ιδίως το 1984 και το 1992, συνέβαλαν στη σταθεροποίηση της μείωσης του αριθμού των βοοειδών και των αιγοπροβάτων, πλην όμως, οι αριθμοί των χοίρων και των πουλερικών εξακολούθησαν να αυξάνονται. Η σύγκριση των περιόδων 2000-2003 και 1996-1999 υποδηλώνει τη συνέχιση των πτωτικών τάσεων των αριθμών των βοοειδών και προβάτων, καθώς και των πουλερικών, αλλά στασιμότητα στους αριθμούς των χοίρων, με μια συνολική μείωση της επιβάρυνσης λόγω κοπριάς, που υπολογίζεται για το N μόλις σε 5% (ΕΕΚ, 2007). Από τη σύγκριση μεταξύ των ετών 2003 και 2007 προκύπτει ότι στην ΕΕ-15 το πλήθος των χοίρων και των πουλερικών, πλην των ορνίθων ωοπαραγωγής, μειώθηκε, ενώ το πλήθος των αιγοπροβάτων και των βοοειδών αυξήθηκε ελαφρά (ΕΕΚ, 2010).

Εκτός από τις φορτίσεις, που αποτελούν την προϋπόθεση της διαθεσιμότητας θρεπτικών στο έδαφος, οι ποσότητες μεταφοράς τους προς τους υδάτινους αποδέκτες καθορίζονται και από άλλους παράγοντες. Η απόπλυση των λιπασμάτων από τα γεωργικά εδάφη ευνοείται από την υπεράρδευση των καλλιεργειών. Στις Μεσογειακές χώρες η αρδευόμενη έκταση αυξάνεται σταθερά τις τελευταίες δεκαετίες, με αποτέλεσμα στην Ελλάδα ο αριθμός τους να ανέρχεται σε 14×10^6 στρέμματα (Food and Agriculture Organization - FAO, 2005). Η διάβρωση των εδαφών αποτελεί επίσης έναν ιδιαίτερα ευνοϊκό παράγοντα μεταφοράς των θρεπτικών ενώσεων από τα εδάφη στα νερά. Εκτιμήσεις κάνουν λόγο για μέσες ετήσιες εδαφικές απώλειες 8tn/ha στη Βόρεια Ευρώπη, τη στιγμή που στις Μεσογειακές χώρες έχουν παρατηρηθεί απώλειες εδάφους μεγαλύτερες από 40tn/ha μετά από ένα μεμονωμένο και ισχυρό επεισόδιο βροχής. Επακόλουθο είναι η ταχεία μεταφορά των

ενώσεων N και P που είναι προσκολλημένα στα εδαφικά σωματίδια, ιδιαίτερα των οργανικών μορφών των στοιχείων αυτών (Stoate et al., 2001).

Η αγροτική γη (καλλιέργειες και βοσκότοποι) αποτελεί αναμφισβήτητα τον πιο ευαίσθητο τύπο χρήσης γης στις απορροές θρεπτικών στοιχείων που ρυπαίνουν τα επιφανειακά νερά και διαμορφώνουν ευτροφικές συνθήκες. Οι μεγάλες φορτίσεις που δέχεται, η υπερεντατική πολλές φορές εκμετάλλευση και το μεγάλο ποσοστό του εδάφους που μένει για μεγάλο χρονικό διάστημα του έτους ακάλυπτο, και επομένως επιρρεπές στις επιδράσεις των φυσικών φαινομένων, διαμορφώνουν τους παράγοντες που της προσδίδουν αυτό το χαρακτηριστικό (Novotny, 1999). Μεταξύ δε του συνόλου των αγροτικών εκτάσεων μιας λεκάνης απορροής, ιδιαίτερα ευαίσθητα στα φαινόμενα αυτά είναι τα τμήματα γης που χαρακτηρίζονται από απότομη τοπογραφία, από σύσταση και δομή εδάφους που δεν παρέχουν αντίσταση στην αποκόλληση των εδαφικών συσσωματωμάτων και φυσικά εκείνα που δέχονται την πιο εντατική και μη ορθολογική διαχείριση από τον άνθρωπο (υπερβολικές λιπάνσεις, αρόσεις, συνεχής και πυκνή βόσκηση κλπ). Εκτός της μεγάλης συνεισφοράς στη ρύπανση των υδάτων, συνέπεια της μη ορθολογικής διαχείρισης είναι και η εξάντληση και υποβάθμιση του εδάφους, ως φυσικού πόρου, που πολλές φορές απαιτεί την παρέλευση πολλών ετών για να αποκτήσει ξανά τις ωφέλιμες ιδιότητές του.

Η αντιμετώπιση των απωλειών θρεπτικών από μη σημειακές πηγές μέσω λήψης αποφάσεων για εφαρμογή μέτρων περιορισμού τους στην αγροτική γη, είναι ωστόσο αρκετά δύσκολη και προϋποθέτει την αξιόπιστη ποσοτικοποίηση των απωλειών αυτών με την ταυτόχρονη αναγνώριση των γεωγραφικών εκείνων περιοχών που συνεισφέρουν δυσανάλογα περισσότερο με απορροές και στερεοαπορροές στα επιφανειακά νερά. Η ευαισθησία των περιοχών αυτών στην απορροή νερού, φερτών και αναπόφευκτα θρεπτικών στοιχείων έγκειται σε ένα συνδυασμό υδροκλιματικών, γεωμορφολογικών και παραγόντων που σχετίζονται με τις γεωργικές πρακτικές που ακολουθούνται από τον άνθρωπο. Η γεωγραφική διαφοροποίηση και το αθροιστικό αποτέλεσμα των παραγόντων αυτών δύναται σήμερα να εκτιμηθεί με ικανοποιητική ακρίβεια με τα κατανεμημένα υδρολογικά ομοιώματα (μοντέλα), που προσομοιώνουν τις φυσικές διεργασίες σε κλίμακα λεκάνης απορροής και λειτουργούν σε περιβάλλον Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ).

Ο περιορισμός των αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων στα υδάτινα σώματα μπορεί πλέον να επιτευχθεί με πολλαπλές παρεμβάσεις στον τύπο, τον χρόνο, τον τρόπο και την ένταση των γεωργικών πρακτικών. Οι παρεμβάσεις αυτές, που είναι γνωστές ως *Βέλτιστες Διαχειριστικές Πρακτικές* (Best Management Practices - BMPs), (Cherry et al., 2008) ή απλούστερα *Διαχειριστικές Πρακτικές* (ΔΠ), διερευνώνται εντατικά και συνδέονται στενά με την επίτευξη των περιβαλλοντικών στόχων που προβλέπει η Κοινοτική Νομοθεσία. Η τελευταία, με συνεχείς αναφορές στα επίσημα κείμενά της, κάνει ωστόσο σαφή την ανάγκη

της οικονομικότητας της εφαρμογής αυτών των παρεμβάσεων, στόχος που είναι συνήθως αντικρουόμενος με την περιβαλλοντική αποτελεσματικότητά τους και που αναγκαστικά οδηγεί σε συμβιβασμούς για την αντιμετώπιση του προβλήματος.

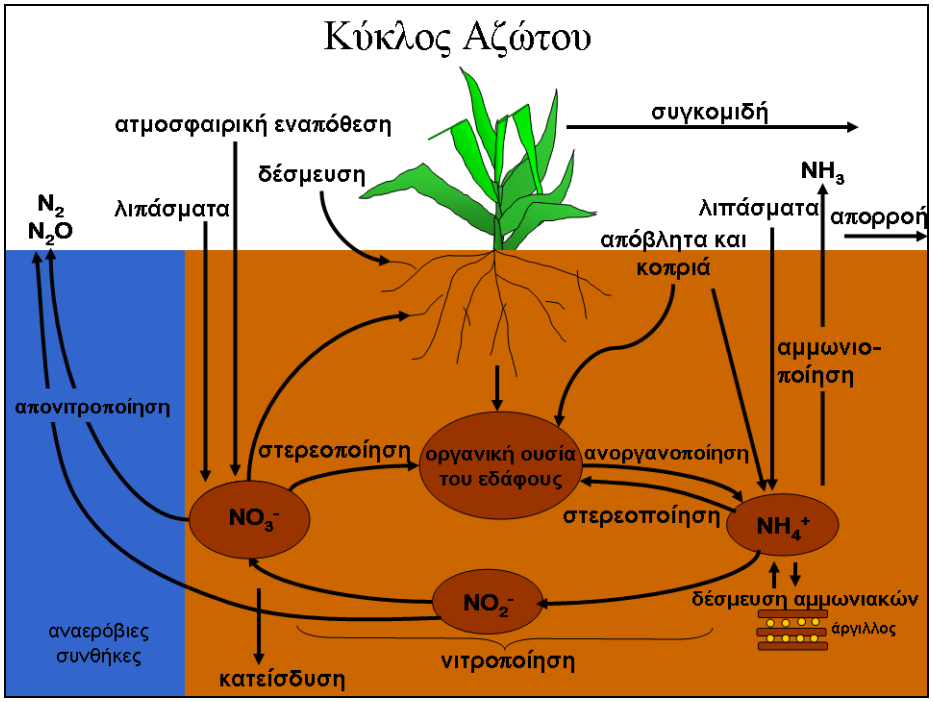
Η επιλογή λύσεων που ικανοποιούν ταυτόχρονα στο μέγιστο δυνατό βαθμό αντικρουόμενους στόχους, διευκολύνεται όταν ο μελετητής έχει τη δυνατότητα να εντοπίσει τις πιο ευαίσθητες περιοχές στις απώλειες θρεπτικών από τα εδάφη στα νερά και τον κύριο μηχανισμό μεταφοράς τους, ώστε να παρεμβαίνει με τον πιο αποτελεσματικό τρόπο (τύπος παρέμβασης σε δεδομένη τοποθεσία) στα διάφορα τμήματα της αγροτικής γης. Η επιλογή μεταξύ πολλών εναλλακτικών παρεμβάσεων και εφαρμογή τους σε πολλαπλές αγροτικές ομοιογενείς εκτάσεις σε κλίμακα λεκάνης απορροής (ολοκληρωμένα διαχειριστικά σχήματα χωρικής κατανομής ΔΠ) είναι μία αρκετά σύνθετη και χρονοβόρα διαδικασία, στην υλοποίηση της οποίας για εύρεση βέλτιστων συνδυασμών μπορεί να συμβάλλει η χρήση σύγχρονων εργαλείων του πεδίου της *Τεχνητής Νοημοσύνης* της επιστήμης των υπολογιστών.

Προτού αναφερθεί στους στόχους και στην αξιοποίηση των νέων τεχνολογιών για την ανάπτυξη μιας σύγχρονης μεθοδολογίας προσέγγισης και αντιμετώπισης του σύνθετου αυτού προβλήματος σε κλίμακα λεκάνης απορροής, η παρούσα διδακτορική διατριβή παραθέτει στο εισαγωγικό αυτό κεφάλαιο μία σύντομη περιγραφή θεμελιωδών φυσικών εννοιών που σχετίζονται με τον κύκλο των δύο θρεπτικών στη φύση και το φαινόμενο του ευτροφισμού των υδάτων.

1.2 Άζωτο, φώσφορος και ευτροφισμός

1.2.1 Ο κύκλος του αζώτου

Η είσοδος του N στην βιολογική αλυσίδα γίνεται μέσω των παραγωγικών οργανισμών οι οποίοι το ενσωματώνουν στις παραγόμενες πρωτεΐνες. Από αυτούς εφοδιάζονται με το αναγκαίο οργανικό N όλοι οι υπόλοιποι οργανισμοί, ενώ διάφοροι ειδικευμένοι αποσυνθέτες διασπούν τις αζωτούχες ενώσεις της νεκρής οργανικής ύλης. Το μεγαλύτερο μέρος του N αυτού παραμένει στο έδαφος ή στο νερό με τη μορφή νιτρικών ή αμμωνιακών αλάτων και ξαναχρησιμοποιείται από τα φυτά. Ένα μικρότερο μέρος, ελευθερώνεται ως αέριο στην ατμόσφαιρα και κλείνει τον κύκλο. Οι κύριες γραμμές ροής του N, που παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.1, είναι η *δέσμευση* (fixation), η *εξάχνωση* (volatilization), η *νιτροποίηση* (nitrification) και η *απονιτροποίηση* (denitrification).



Σχήμα 1.1 Κύκλος αζώτου (πηγή: Neitch et al., 2005a).

Δέσμευση είναι η μετατροπή του μοριακού N (N_2) στις χρησιμοποιήσιμες μορφές, βασικά του αμμωνιακού N ($NH4^+$) και των νιτρικών ($NO3^-$). Φυσική δέσμευση πραγματοποιείται είτε με φυσικοχημικές διεργασίες, κυρίως υπό την επίδραση των ηλεκτρικών εκκενώσεων των καταιγίδων, είτε με βιολογικές διεργασίες. Η βιολογική δέσμευση πραγματοποιείται από ετεροτροφικούς αλλά και αυτοτροφικούς-φωτοσυνθετικούς μικροοργανισμούς. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση του ριζοβίου που αναπτύσσεται στις ρίζες των ψυχανθών, όπως τριφύλλι, φασόλι, μπιζέλι, φακή κ.α. Το βακτηρίδιο αυτό δεσμεύει N_2 από την ατμόσφαιρα, το οποίο χρησιμοποιείται από τα ψυχανθή, ενώ το ίδιο παίρνει από τα φυτά αυτά την απαιτούμενη ενέργεια-συμβίωση με παράλληλο εμπλουτισμό του εδάφους με N (Καρανδεινός, 1990).

Το N που ενσωματώνεται στους ζωντανούς οργανισμούς επιστρέφει στο περιβάλλον με ανόργανη μορφή, την αμμωνία και το προϊόν ιονισμού της $NH4^+$, ως αποτέλεσμα της αποσύνθεσης των νεκρών οργανισμών και των περιττωμάτων τους. Το φαινόμενο ονομάζεται *αμμωνιοποίηση* ή *εξάχνωση*. Το φαινόμενο της βιολογικής μετατροπής της αμμωνίας σε $NO3^-$ ονομάζεται *νιτροποίηση*. Η ενδιάμεση ασταθής μορφή είναι τα νιτρώδη ($NO2^-$) τα οποία μετατρέπονται γρήγορα σε $NO3^-$, που είναι πιο πρόσφορα για τις βιολογικές διεργασίες αλλά αποτελούν και ρύπο των υδάτινων σωμάτων. Η νιτροποίηση είναι παράγοντας αποξυγόνωσης του νερού εξαιτίας της αερόβιας οξείδωσης. Η *απονιτροποίηση* (denitrification) είναι η αναγωγή των $NO3^-$ σε N_2 και N_2O κατά την αναερόβια οξείδωση της οργανικής ύλης από μικροοργανισμούς. Το N_2O ανάγεται σε N_2 με περαιτέρω βακτηριακή δράση ή με

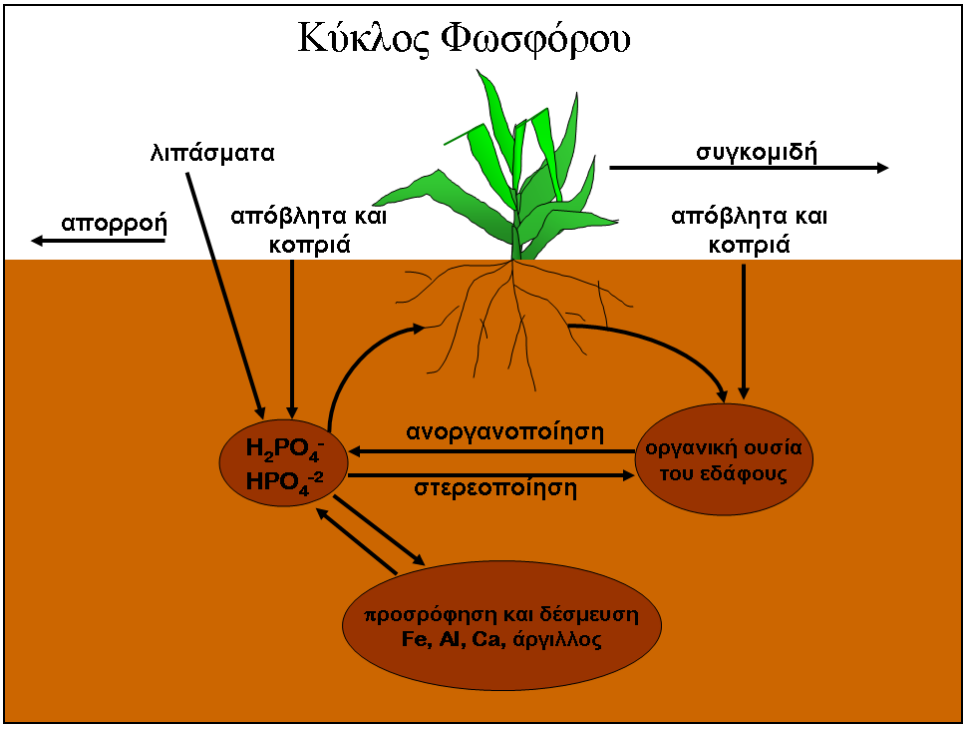
φωτοχημικές αντιδράσεις στη ατμόσφαιρα. Υπάρχουν επίσης κάποιες κατηγορίες βακτηριδίων που μετατρέπουν τα $NO3^-$ σε $NO2^-$ και τα $NO2^-$ σε αμμωνιακό N. Τέλος, οι διάφορες μορφές ανόργανου και οργανικού N παρασύρονται από τα νερά της απορροής (runoff) επιφανειακά στο έδαφος, ενώ τα $NO3^-$ είναι η διαλυτή μορφή, που αρχικά με τη *διήθηση* (infiltration) διαμέσου του εδάφους και στη συνέχεια με την *κατείσδυση* (leaching) στα υπόγεια υδροφόρα στρώματα εμπλουτίζει τα υπόγεια νερά καθιστώντας τα συχνά ακατάλληλα προς χρήση.

Συνέπεια σήμερα της σοβαρής διαταραχής του κύκλου του N είναι η ταχεία συσσώρευσή του στη βιόσφαιρα. Αυτό συμβαίνει επειδή η ταχύτητα συνολικής δέσμευσής του είναι πλέον σημαντικά μεγαλύτερη από την ταχύτητα συνολικής απονιτροποίησης, γεγονός που αποτελεί σοβαρό παράγοντα ρύπανσης, μορφές της οποίας είναι ο ευτροφισμός των υδατικών οικοσυστημάτων που έχουν ως περιοριστικό παράγοντα το N και η επιβάρυνση των διαφόρων υδάτινων σωμάτων (ποτάμια, λίμνες, θάλασσα, υπόγεια νερά) με $NO3^-$ (Χατζημπίρος, 2000).

1.2.2 Ο κύκλος του φωσφόρου

Όλο το απόθεμα του P περιέχεται στη λιθόσφαιρα και εισέρχεται στην κυκλοφορία της βιόσφαιρας με την απόπλυση της επιφάνειας του εδάφους. Μέσω της ροής του νερού φτάνει στα χερσαία και υδάτινα οικοσυστήματα, απορροφάται από τα φυτά και στη συνέχεια περνά μέσα από τις τροφικές αλυσίδες. Όπως και στον κύκλο του N, στον κύκλο του P, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.2, οι διάφοροι αποσυνθέτες στο έδαφος ή στο νερό διασπούν τη νεκρή οργανική ύλη και παράγουν ανόργανες μορφές διαθέσιμες για τα φυτά, διαδικασία γνωστή ως *ανοργανοποίηση* (mineralization). Χρησιμοποιείται από τους παραγωγικούς οργανισμούς με την μορφή, κατά κανόνα, των διαλυτών ορθοφωσφορικών ($PO4^-$), προϊόν της μετατροπής αδιάλυτων ενώσεων με τη βοήθεια από μικροοργανισμούς. Η αποσύνθεση των νεκρών οργανισμών και των περιττωμάτων τους αποδίδει έτσι στο περιβάλλον τον P με τη μορφή των $PO4^-$, τα οποία όμως εύκολα σχηματίζουν αδιάλυτες ενώσεις με τα πολύ συνηθισμένα στο έδαφος ιόντα ασβεστίου (Ca), σιδήρου (Fe) και αργιλίου (Al), μια διαδικασία γνωστή ως *προσρόφηση* (adsorption). Λόγω της αδιάλυτης αυτής μορφής, ο P συνδέεται στενά με τη διάβρωση και μεταφορά εδαφικού υλικού και κατ' επέκταση με τη στερεομεταφορά των ποταμών. Αυτή η ανακύκλωση είναι σχεδόν πλήρης στα χερσαία οικοσυστήματα, όπου οι σκελετοί των νεκρών ζώων αποσυντίθεται και ο P που περιέχουν γίνεται εκ νέου εκμεταλλεύσιμος. Το ίδιο συμβαίνει και στα γλυκά νερά ή στις ρηχές θάλασσες, όπου οι αποθέσεις δεσμευμένου P μπορούν σχετικά εύκολα να επανέλθουν στις τροφικές αλυσίδες. Αντίθετα, στους ωκεανούς υπάρχει μια διαρκής απώλεια P που οφείλεται

στη συσσώρευση οργανικής ύλης και κυρίως νεκρών σωμάτων, οστών κλπ. στα μεγάλα βάθη. Τα ανοδικά θαλάσσια ρεύματα που εμπλουτίζουν με θρεπτικά άλατα τα ρηχά νερά των υφαλοκρηπίδων δεν μπορούν να επαναφέρουν αυτές τις αποθέσεις στον βιογεωχημικό κύκλο του P. Ο κύκλος λοιπόν του P παραμένει εν μέρει και βραχυπρόθεσμα ανοικτός (Χατζημπίρος, 2000).



Σχήμα 1.2 Κύκλος φωσφόρου (πηγή: Neitch et al, 2005a).

Η ανθρώπινη δραστηριότητα επιβαρύνει την ατέλεια του κύκλου του P. Μεγάλες ποσότητες φωσφορούχων ουσιών εξορύσσονται από τα φυσικά αποθέματα της λιθόσφαιρας, μετατρέπονται σε φωσφορικά άλατα από τη βιομηχανία λιπασμάτων ή απορρυπαντικών και τελικά καταλήγουν στην υδρόσφαιρα και εν μέρει στο βυθό των ωκεανών. Ο P φαίνεται ότι αποτελεί τον περιοριστικό παράγοντα σε περισσότερες περιπτώσεις από κάθε άλλο στοιχείο. Μια αιτία είναι η ευκολία σχηματισμού αδιάλυτων ενώσεων, πράγμα που παρεμποδίζει την απόληψη του από τα φυτά και την μεταφορά στα επιφανειακά και υπόγεια νερά. Μια άλλη αιτία είναι ότι δεν σχηματίζει στο φυσικό περιβάλλον αξιόλογες αέριες ενώσεις, γεγονός που του στερεί την δυνατότητα της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας. Τα αστικά υγρά απόβλητα περιέχουν σημαντικές ποσότητες P, εξαιτίας κυρίως των χρησιμοποιούμενων απορρυπαντικών, το ίδιο δε συμβαίνει και με μερικά βιομηχανικά απόβλητα. Ο P των αποβλήτων αυτών έχει γίνει αιτία εκδήλωσης προχωρημένων ευτροφικών φαινομένων σε λίμνες και παράκτια ύδατα. Μικρότερη είναι η συμβολή των φωσφορούχων λιπασμάτων

λόγω του αναφερθέντος σχηματισμού αδιάλυτων ενώσεων με στοιχεία του εδάφους (Χατζημπίρος, 2000).

1.2.3 Ευτροφισμός

Η λέξη *ευτροφισμός* (euthrophication), που χρησιμοποιείται παγκοσμίως, προέρχεται από τη σύνθεση των ελληνικών λέξεων *ευ* (= καλά) και τροφή. Όπως δηλώνει και η ετυμολογία της λέξης πρόκειται για ένα φαινόμενο-πρόβλημα που παρουσιάζεται σε λίμνες και κλειστούς αβαθείς κόλπους ή ακόμα και σε ποτάμια χαμηλής σχετικά ταχύτητας ροής κάτω από υπέρμετρη αύξηση της συγκέντρωσης θρεπτικών στοιχείων, κυρίως ενώσεων N και P. Χαρακτηρίζεται από υπέρμετρη αύξηση της πρωτογενούς παραγωγικότητας, από υπέρμετρη δηλαδή αύξηση της φυτικής βιομάζας (φυτοπλαγκτόν, υδρόβια, υδροχαρής βλάστηση) μιας υδάτινης μάζας (Andersen et al., 2006).

Ο ευτροφισμός των υδάτων μπορεί να οφείλεται σπανιότερα σε φυσικούς παράγοντες (γεωγραφικά, γεωμορφολογικά, κλιματολογικά, μορφομετρικά, υδροδυναμικά και άλλα χαρακτηριστικά των υδάτινων σωμάτων) ή σε ανθρωπογενείς επιδράσεις (αστικά λύματα, κτηνοτροφικά και βιομηχανικά απόβλητα, αποπλύσεις καλλιεργούμενων εκτάσεων), όπως είναι και το συνηθέστερο. Συνέπεια του ευτροφισμού είναι η αλλοίωση των φυσικοχημικών και βιολογικών χαρακτηριστικών του νερού. Προκαλείται μείωση του διαλυμένου οξυγόνου στα βαθύτερα υδάτινα στρώματα λόγω αυξημένων αναπνευστικών αναγκών των βακτηρίων που αποικοδομούν τις οργανικές ουσίες δημιουργώντας ανοξικές συνθήκες. Τα βακτήρια και τα άλγη γίνονται τόσα πολλά που σχηματίζουν φιλμ (κρούστα) στις υδατικές επιφάνειες, προκαλώντας σκίαση στα νερά κάτω από την επιφάνεια. Χωρίς φως, τα φύκια και τα βακτήρια στον πυθμένα θανατώνονται προσφέροντας ακόμη μεγαλύτερη ποσότητα τροφής σε άλλα βακτήρια που συνεχίζουν να αναπτύσσονται. Η κατανάλωση του οξυγόνου αυξάνεται δραστικά με αποτέλεσμα να ελαττώνεται η διαθεσιμότητά του για τα ψάρια, προκαλώντας το θάνατό τους και τη γενικότερη διαταραχή του οικοσυστήματος, που καθίσταται νεκρό ύστερα και από το θάνατο των βακτηρίων. Αποτέλεσμα του ευτροφισμού είναι η μείωση της ποιότητας του νερού, η μεταβολή της χλωρίδας και της πανίδας του, η μείωση της αισθητικής αξίας καθώς και οι περιορισμένες δυνατότητες για αναψυχή (Καρανδεινός, 1990).

Διάφορα μέτρα πρόληψης και αποκατάστασης των ευτροφικών υδάτων ήδη περιλαμβάνονται σε Ευρωπαϊκές Οδηγίες, όπως η Οδηγία για τα αστικά απόβλητα (Directive, 91/271/EEC) και η Οδηγία για τη ρύπανση από $NO3^-$ αγροτικής προέλευσης (Directive 91/676/EEC). Η Οδηγία-Πλαίσιο 2000/60 λειτουργεί ως 'ομπρέλα' για τις δύο προαναφερθείσες οδηγίες και ακολουθεί τον καθορισμό και την προσέγγιση του ευτροφισμού

που ακολουθείται στα κείμενά τους. Σε συνέδριο που διοργανώθηκε το 2004 από το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο και το ερευνητικό κέντρο Joint Research Center (JRC) στην Ispra της Ιταλίας (Andersen et al., 2006), συζητήθηκε το γενικότερο πλαίσιο θεώρησης του ευτροφισμού σε σχέση με τις υπάρχουσες περιβαλλοντικές Οδηγίες και αποσαφηνίστηκε ο καθορισμός του με βάση τα πρότυπα της Οδηγίας 91/271/EEC για τα αστικά απόβλητα, ως σημείο εκκίνησης για περαιτέρω επιστημονικές συζητήσεις. Ο ορισμός του ευτροφισμού λήφθηκε απλουστευτικά ως εξής: «Ευτροφισμός είναι ο εμπλουτισμός των υδάτων με θρεπτικά στοιχεία κυρίως Άζωτο/Φώσφορο και Οργανική Ουσία». Ο ορισμός αυτός υπερίσχυσε εκείνου που δίνεται στην Οδηγία των νιτρικών, η οποία εστιάζει αποκλειστικά στις ενώσεις του N. Αυστηρότερα, ο ορισμός που δίνεται στη Οδηγία των αστικών αποβλήτων είναι ο εξής: «Ευτροφισμός είναι ο εμπλουτισμός των Υδάτων με θρεπτικά στοιχεία κυρίως Άζωτο/Φώσφορο, που δημιουργούν μια επιταχυνόμενη ανάπτυξη αλγών και ανώτερων μορφών φυτικής ζωής, προκαλώντας ανεπιθύμητη διαταραχή της ισορροπίας των οργανισμών του νερού και της ποιότητάς του».

1.3 Στόχος της διατριβής

Με γνώμονα τον υφιστάμενο περιβαλλοντικό κίνδυνο και τις απαιτήσεις της Νομοθεσίας, η παρούσα διδακτορική διατριβή επιχειρεί να αναπτύξει και πιλοτικά να εφαρμόσει μία ολοκληρωμένη μεθοδολογία υποστήριξης αποφάσεων για εφαρμογή μέτρων μείωσης των απωλειών θρεπτικών από την αγροτική γη στα επιφανειακά νερά λεκάνης απορροής, με υπολογισμό του οικονομικού κόστους και με γνώμονα την ικανοποίηση των περιβαλλοντικών στόχων κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου. Η μεθοδολογία περιλαμβάνει την εφαρμογή κυρίως μη κατασκευαστικών μέτρων για τη μείωση των απωλειών θρεπτικών από τις αγροτικές εκτάσεις λεκάνης απορροής, ως εναλλακτικών ΔΠ σχετιζόμενων με τις καλλιέργειες σιτηρών και πολυετών ψυχανθών, καθώς και με την κτηνοτροφική δραστηριότητα στους βοσκότοπους.

Οι αντικρουόμενοι στόχοι της ταυτόχρονης επίτευξης χαμηλού φορτίου και συγκέντρωσης στο ποτάμι δύο διαφορετικής φύσης χημικών στοιχείων όπως είναι το άζωτο νιτρικών (N-NO3) και ο P, καθώς και της ελαχιστοποίησης του κόστους εφαρμογής ΔΠ, καθιστούν αναγκαία τη χρήση σύγχρονων εργαλείων ποσοτικοποίησης των απωλειών ρύπων στα επιφανειακά νερά λεκάνης απορροής και μεθόδων πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης. Νέες τεχνολογίες όπως τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ), το κατανεμημένο υδρολογικό μοντέλο λεκάνης απορροής Soil Water Assessment Tool - SWAT (Arnold et al., 1998), που λειτουργεί σε περιβάλλον ΣΓΠ και προσομοιώνει τον υδρολογικό κύκλο και τη διαχείριση της γης, καθώς και ένας Γενετικός Αλγόριθμος (ΓΑ) βελτιστοποίησης σε

MATLAB, επιλέχθηκαν για το λόγο αυτό. Με σύνθεση των παραπάνω εργαλείων επιχειρείται η διαμόρφωση της προτεινόμενης μεθοδολογίας περιβαλλοντικής και οικονομικής αξιολόγησης ενός μεγάλου αριθμού εναλλακτικών αγροτικών δράσεων με πρόβλεψη της γεωγραφικής κατανομής τους στις ομοιογενείς υδρολογικά εδαφικές μονάδες εντός της λεκάνης απορροής.

Για την υλοποίηση της μεθοδολογίας η διατριβή στοχεύει στην ανάπτυξη ενός Εργαλείου Υποστήριξης Αποφάσεων (ΕΥΑ), ως αποτέλεσμα συνεργασίας πακέτων λογισμικού και προγραμματιστικού κώδικα σε MATLAB, που θα έχει τη δυνατότητα να παρέχει σε εύλογο χρόνο στον εκάστοτε χρήστη και ερευνητή την απαραίτητη πληροφορία για την περιβαλλοντική και οικονομική αποδοτικότητα ενός πολύ μεγάλου πλήθους διαχειριστικών σχημάτων προς εφαρμογή σε λεκάνη απορροής. Η διατριβή στοχεύει εν τέλει στο να αναδείξει τη χρησιμότητα του ΕΥΑ σε περιβαλλοντικές δράσεις στρατηγικού χαρακτήρα και προσδοκά το συνολικό αποτέλεσμά της να συμβάλλει στην αποτελεσματικότητα των δράσεων που θα προτείνονται μέσω των Διαχειριστικών Σχεδίων (ΔΣ) σε κλίμακα λεκάνης απορροής ποταμού στην Ελλάδα και ευρύτερα.

Τα ΔΣ που απαιτούνται βάσει της Ευρωπαϊκής Νομοθεσίας προβλέπουν τη διερεύνηση ή/και αναθεώρηση των υφιστάμενων δράσεων για την επίτευξη της καλής οικολογικής κατάστασης των υδάτων μέχρι το έτος-στόχο 2015. Αν και η παρούσα διατριβή θα εστιάσει σε εφαρμογή συγκεκριμένων μέτρων για τον έλεγχο δύο μόνο χημικών στοιχείων του νερού, το ΕΥΑ επιχειρείται να δομηθεί με τρόπο ώστε να μπορεί να προσαρμόζεται και σε διαφορετικές ανάγκες, προσφέροντας τη δυνατότητα της εκτίμησης του συνδυασμού διαφορετικών μέτρων που βελτιστοποιούν τις συγκεντρώσεις διαφόρων ρύπων σε πολλαπλές θέσεις του υδρογραφικού δικτύου. Ο στόχος αυτός προσεγγίζεται με τη φιλικότητα του αναπτυχθέντος εργαλείου προς τον τελικό επιστήμονα – χρήστη, με σκοπό την υποστήριξη στη λήψη τελικών αποφάσεων και στην πληροφόρηση γεωργών σχετικά με την υιοθέτηση ήπιων εναλλακτικών ΔΠ χαμηλού κόστους. Τέλος, επιχειρείται η ανάδειξη και προσδοκάται η αύξηση της αναγνώρισης των νέων τεχνολογιών ως πολύ χρήσιμων και αποτελεσματικών μέσων για την επιτυχή εφαρμογή της Περιβαλλοντικής Νομοθεσίας.

Για τους λόγους αυτούς η μεθοδολογία εφαρμόζεται πιλοτικά σε μία ελληνική ημιορεινή λεκάνη απορροής μέσης έκτασης, τη λεκάνη του άνω ρου του Αράχθου (~1000km^2), στην Ήπειρο. Οι επιμέρους στόχοι της διατριβής συνοψίζονται ως εξής:

- Παραμετροποίηση και επιτυχής βαθμονόμηση του μοντέλου της επιλεγμένης λεκάνης (Άραχθος) στο SWAT με πιστή αποτύπωση της υφιστάμενης κατάστασης και με απεικόνιση της γεωγραφικής διαφοροποίησης των υφιστάμενων ετήσιων φορτίων απωλειών θρεπτικών από τα εδάφη στο υδρογραφικό δίκτυο.

- Επιλογή υπαρχόντων ΔΠ της διεθνούς βιβλιογραφίας και ανάπτυξη νέων, εφικτών και συμβατών με τους δημοφιλείς αγροτικούς τύπους χρήσης γης των σιτηρών, των πολυετών ψυχανθών και των βοσκότοπων για διερεύνηση της αποτελεσματικότητάς τους στον περιορισμό των απωλειών θρεπτικών στα επιφανειακά νερά μέσω ορθής προσομοίωσής τους στο μοντέλο SWAT.
- Κοστολόγηση των επιλεγμένων ΔΠ σε ετήσια βάση με κατ' ελάχιστον συνυπολογισμό του κόστους κεφαλαίου και των ετήσιων δαπανών για τη λειτουργία και συντήρηση.
- Επιλογή εξελικτικού υπολογιστικού σχήματος πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης σε κατάλληλο προγραμματιστικό περιβάλλον, που μέσω ορθής κωδικοποίησης του προβλήματος θα επιτρέπει την εξερεύνηση ενός πολύ μεγάλου αριθμού συνδυασμών επιλογής και τοποθέτησης ΔΠ στο γεωγραφικό χώρο λεκάνης απορροής και την αξιολόγηση του κόστους και της περιβαλλοντικής αποτελεσματικότητάς τους μέσω του υπολογισμού των τιμών αντίστοιχων αντικειμενικών συναρτήσεων.
- Μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας του αλγόριθμου πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης για την εύρεση των βέλτιστων διαχειριστικών λύσεων σε εύλογο χρονικό διάστημα με: i) αποσύνδεση του χρονικά απαιτητικού μοντέλου SWAT από τη διαδικασία βελτιστοποίησης και αντικατάστασή του από μία βάση δεδομένων με τα ετήσια φορτία απωλειών και τα κόστη που προκύπτουν από την εφαρμογή όλων των ΔΠ σε όλες τις συμβατές ΥΜ και ii) με τον εντοπισμό, μέσω ανάλυσης ευαισθησίας, των γενικών ρυθμίσεων και των τιμών των παραμέτρων του αλγόριθμου που εγγυώνται τη σύγκλιση με το πραγματικό βέλτιστο Pareto μέτωπο *n* διαστάσεων (όπου *n* ο αριθμός των κριτηρίων).
- Εύρεση και επιλογή ολοκληρωμένων διαχειριστικών λύσεων στη λεκάνη από το βέλτιστο μέτωπο Pareto ώστε αυτές να αποτελούν αντιπροσωπευτικές λύσεις όλων των δυνατών επιλογών, με ιδιαίτερη έμφαση σε εκείνες που αποτελούν αποδεκτούς συμβιβασμούς για τις διαμορφωμένες τιμές όλων των κριτηρίων.
- Πιλοτική εφαρμογή της μεθοδολογίας στη λεκάνη απορροής του άνω ρου του ποταμού Αράχθου (θέση γέφυρα Πλάκας) στην Ήπειρο, με ερμηνεία των ιδιαίτερων αποτελεσμάτων που προκύπτουν και με εξαγωγή συμπερασμάτων για το εύρος καταλληλότητας της μεθοδολογίας στις πολυάριθμες αγροτικές λεκάνες της Ελλάδας.
- Πρόταση σύνδεσης του αναπτυχθέντος ΕΥΑ με τα ΔΣ Υδατικών Διαμερισμάτων που η χώρα μας εκπονεί με καθυστέρηση στην παρούσα χρονική στιγμή με ανάδειξη των πλεονεκτημάτων των ήπιων, κυρίως μη κατασκευαστικών και βιώσιμων παρεμβάσεων, λόγω του μικρού και αποδεκτού κόστους εφαρμογής τους, του σεβασμού στο περιβάλλον και της κοινωνικής αποδοχής.

1.4 Συνοπτική παρουσίαση της μεθοδολογίας

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται συνοπτικά η μεθοδολογία ανάπτυξης του ΕΥΑ για τη διαχείριση λεκάνης απορροής. Η αναλυτική της παρουσίαση γίνεται ωστόσο στο 6^{ο} Κεφάλαιο της διατριβής.

Ως ολοκληρωμένα μέτρα (σχήματα) διαχείρισης λεκάνης απορροής ορίζονται οι διαφορετικοί συνδυασμοί εφαρμογής ΔΠ στις αγροτικές ομοιογενείς εκτάσεις της λεκάνης. Ως ομοιογενείς εκτάσεις θεωρούνται συνήθως τα τμήματα γης που χαρακτηρίζονται από ομοιόμορφη τοπογραφία, ενιαίες εδαφικές και κλιματικές ιδιότητες, καθώς και ενιαίο τρόπο διαχείρισης από τον άνθρωπο. Στις εφαρμογές ΣΓΠ, η γεωγραφική διαφοροποίηση αυτών των παραγόντων, διαμορφώνει τον αριθμό των ομοιογενών εκτάσεων εντός μιας λεκάνης απορροής, που λόγω της ενιαίας υδρολογικής συμπεριφοράς τους συχνά καλούνται *Υδρολογικές Μονάδες Απόκρισης* ή απλούστερα *Υδρολογικές Μονάδες* (ΥΜ).

Οι ΔΠ που επιλέγονται στη διατριβή περιλαμβάνουν μέτρα σχετικά με τη μείωση των ποσοτήτων και αλλαγή του χρόνου των λιπάνσεων στις καλλιέργειες ψυχανθών για κτηνοτροφική χρήση (π.χ. μηδική) και των αγροστωδών (π.χ. αραβόσιτος), με την αλλαγή της διάταξης της καλλιέργειας του αραβόσιτου και τη μείωση των αρόσεων, με τη μείωση του ζωικού κεφαλαίου και την αποθήκευση της κοπριάς πριν τη διασπορά της στους βοσκότοπους, καθώς και με την εγκατάσταση λωρίδων συγκράτησης στα όρια των αγρών. Οι πρακτικές αυτές, που μπορούν να υιοθετούνται μεμονωμένα ή και συνδυαστικά σε κάθε τύπο χρήσης γης, κοστολογούνται εμπειρικά για τον ελληνικό χώρο με βάση πρόσφατες μελέτες του Εθνικού Ιδρύματος Αγροτικής Έρευνας (ΕΘΙΑΓΕ) και παρόμοιες εργασίες της διεθνούς βιβλιογραφίας, ώστε να υπολογίζεται το επιπρόσθετο μέσο ετήσιο κόστος πενταετίας, που θα προκαλούσε η εφαρμογή τους αν επιλέγονταν αντί των συμβατικών πρακτικών. Η μεθοδολογία κοστολόγησης αυτή δεν αποβλέπει ωστόσο στην απόλυτη αποδοχή των μεγεθών κόστους, αλλά σε έναν ικανοποιητικό τρόπο εκτίμησής του που θα μπορεί να επιτύχει σε κάθε περιοχή μια ασφαλή συγκριτική αξιολόγηση της οικονομικής επιβάρυνσης που προκύπτει μεταξύ διαφόρων εναλλακτικών διαχειριστικών μέτρων στην αγροτική γη.

Η συμβατότητα των εν λόγω ΔΠ με τη λεκάνη του Αράχθου στην Ήπειρο (χρήσεις γης, οικονομικά δεδομένα) καθιστά τη μεθοδολογία κατάλληλη για ορεινές και ημιορεινές λεκάνες του ελληνικού χώρου με ίδιες ή παρόμοιες γεωργικές καλλιέργειες και κτηνοτροφικές ασχολίες των κατοίκων. Ωστόσο, η δομή του ΕΥΑ είναι τέτοια, που με τις απαραίτητες τροποποιήσεις μπορεί εύκολα να προσαρμοστεί σε οποιαδήποτε λεκάνη απορροής. Το πρώτο βήμα της μεθοδολογίας περιλαμβάνει μία ολοκληρωμένη υδρολογική και ποιοτική προσομοίωση λεκάνης απορροής (water quality modeling). Αντιμετωπίζονται τα προβλήματα παραμετροποίησης και βαθμονόμησης ενός απαιτητικού μοντέλου

προσομοίωσης διαδικασιών, όπως το SWAT, που πηγάζουν από την περιορισμένη διαθεσιμότητα των απαραίτητων δεδομένων εισόδου του μοντέλου και των δεδομένων καταγραφής των ποσοτικών και ποιοτικών παραμέτρων του ποταμού. Γίνεται αποκωδικοποίηση και επεξεργασία των υπαρχόντων δεδομένων και η προσομοίωση των υδρολογικών διεργασιών της λεκάνης του Αράχθου (περιοχή μελέτης) μέσω επιστημονικά τεκμηριωμένων απλουστευτικών παραδοχών και προσεγγίσεων, όπου απαιτείται.

Η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση της επιλογής και τοποθέτησης ΔΠ στην αγροτική γη του ήδη βαθμονομημένου μοντέλου του Αράχθου γίνεται με χρήση του ΓΑ που είναι ενσωματωμένος στην ομώνυμη εργαλειοθήκη του MATLAB. Ωστόσο, ως εκτιμητής του εισρέοντος ρυπαντικού φορτίου στο υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης μετά από πολλαπλούς συνδυασμούς τοποθέτησης ΔΠ στην αγροτική γη, δεν λαμβάνεται στη διαδικασία βελτιστοποίησης το μοντέλο SWAT, αλλά μία απλή, εύχρηστη και αυτόματα δημιουργούμενη βάση δεδομένων, η λεγόμενη Βάση Δεδομένων Βέλτιστων Διαχειριστικών Πρακτικών ή χάριν συντομίας, *Βάση Διαχειριστικών Πρακτικών* (ΒΔΠ). Η βάση αυτή διαμορφώνεται, μετά από έναν συγκεκριμένο αριθμό προσομοιώσεων διάρκειας 5 ετών του SWAT, αποθηκεύοντας αποτελέσματα σχετικά με το μέσο ετήσιο φορτίο απωλειών ρύπων (απώλεια εδάφους, P, N-NO3) και το κόστος εφαρμογής όλων των ΔΠ από όλες τις ΥΜ της λεκάνης. Η ΒΔΠ αντικαθιστά τη χρονικά απαιτητική δυναμική σύνδεση του μοντέλου με τη διαδικασία βελτιστοποίησης, όπου ο συντριπτικός χρόνος θα αφορούσε στις συνεχείς εκτελέσεις του και εκτιμήσεις του ρυπαντικού φορτίου που προκαλούν οι διάφορες λύσεις, επιταχύνοντας σημαντικά τη διαδικασία.

Κατά την τελευταία φάση της λειτουργίας του ΕΥΑ (φάση βελτιστοποίησης) ένας αρχικός πληθυσμός από άτομα – πιθανές λύσεις (συνδυασμοί ΔΠ στη λεκάνη), παράγεται από τον ΓΑ του MATLAB και αξιολογείται με βάση το οικονομικό και τα περιβαλλοντικά κριτήρια. Για τον υπολογισμό των επιμέρους αντικειμενικών συναρτήσεων λαμβάνονται από τη διαδικασία τα δεδομένα της ΒΔΠ που αντιστοιχούν στις λύσεις από τον πληθυσμό αυτό. Η κάθε λύση (άτομο του πληθυσμού) αναπαρίσταται στον ΓΑ με ένα χρωμόσωμα το οποίο κωδικοποιείται με απόδοση ακέραιων τιμών στα γονίδιά του, κάθε μία εκ των οποίων αντιστοιχεί σε μία και μοναδική ΔΠ (μεμονωμένη ή συνδυαστική). Το μήκος του χρωμοσώματος ή αλλιώς το πλήθος των γονιδίων, ταυτίζεται με τον αριθμό των ΥΜ στις οποίες έχει διαιρεθεί η λεκάνη, ενώ η ακέραιη τιμή (ΔΠ) που μπορεί να λάβει κάθε γονίδιο (ΥΜ) διέπεται από περιορισμούς ώστε σε κάθε θέση του χρωμοσώματος ο αλγόριθμος να αποδίδει ένα διαχειριστικό μέτρο συμβατό με τη χρήση γης της εκάστοτε ΥΜ. Ο αλγόριθμος επιχειρεί να ελαχιστοποιήσει τις τιμές των κριτηρίων και το πράττει με μία επαναληπτική διαδικασία, όπου τα άτομα του πληθυσμού αναπαράγονται μέσω των γενετικών διαδικασιών της διασταύρωσης και της μετάλλαξης. Η νέα ομάδα ατόμων που προκύπτει αποτελεί τη νέα

γενιά, η οποία αξιολογείται με τη σειρά της ως προς τη διαμόρφωση των αντικειμενικών συναρτήσεων (κριτηρίων). Η διαδικασία, τυπική της μίμησης των διαδικασιών της επιστήμης της Γενετικής, εμπεριέχει κανόνες με τους οποίους δεν δημιουργείται τυχαία ο νέος πληθυσμός, αλλά με τρόπο ώστε τα καλύτερα άτομα να υπερισχύουν και έτσι να βελτιώνεται συστηματικά το αποτέλεσμα, δηλαδή οι τιμές των κριτηρίων ή σε αναλογία με τη φύση η εξέλιξη των ειδών.

Ο ΓΑ έχει τη δυνατότητα να εξερευνήσει αντιπροσωπευτικά το χώρο αναζήτησης και να καταλήξει μετά από παραγωγή ορισμένου αριθμού γενιών στις βέλτιστες λύσεις που διατάσσονται κατά μήκος του πραγματικού μετώπου Pareto *n* διαστάσεων, όπου *n* ο αριθμός των κριτηρίων. Με το τέλος της διαδικασίας βελτιστοποίησης η τελική επιλογή κατανομής ΔΠ ή διαχειριστικών σχημάτων (λύσεων) στη λεκάνη συστήνεται μέσω της διαμόρφωσης των καμπυλών αντιστάθμισης των αντικρουόμενων περιβαλλοντικών και του οικονομικού στόχου με ανάλυσή τους στο δισδιάστατο χώρο (ανά δύο κριτήρια). Κάθε λύση αντιπροσωπεύει μοναδική γεωγραφική κατανομή ΔΠ στη λεκάνη με συγκεκριμένο κόστος και συγκεκριμένο εισρέον φορτίο απωλειών ρύπων στο υδρογραφικό δίκτυο ή εναλλακτικά συγκεκριμένη συγκέντρωσή τους σε δεδομένη διατομή ποταμού (π.χ την έξοδο της λεκάνης). Ως περιβαλλοντικοί στόχοι μπορούν κατά μέγιστο να οριστούν η ελαχιστοποίηση του ετήσιου φορτίου απωλειών P, N-NO3 και εδάφους από όλη την έκταση της λεκάνης προς το υδρογραφικό της δίκτυο, ενώ στην πιλοτική εφαρμογή της μεθοδολογίας συστήνεται η χρήση μόνο των δύο πρώτων, που όμως αναπόφευκτα οδηγεί και σε μείωση της διάβρωσης της λεκάνης και της ετήσιας στερεοπαροχής του ποταμού.

1.5 Συμβολή της διατριβής στην επιστήμη και πρωτότυπα σημεία

Η διδακτορική διατριβή χαρακτηρίζεται από πρωτότυπα σημεία, που είτε τέθηκαν από την αρχή ως στόχοι, είτε προέκυψαν στην πορεία της ως καινοτόμα μέσα για την επίτευξή τους. Βασική ωστόσο καινοτομία θεωρείται η μεθοδολογία στο σύνολό της που παρουσιάζει ένα ολοκληρωμένο ΕΥΑ, που αναπτύσσεται με συνεργασία επιμέρους συνιστωσών και το οποίο πιστεύεται πλέον ότι, υπό την προϋπόθεση της ορθής προσομοίωσης του φυσικού συστήματος στον υπολογιστή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην πράξη. Η εργασία αυτή αποτελεί πρωτοπόρα προσέγγιση της διαχείρισης λεκάνης απορροής για την υποστήριξη των αρμοδίων στη λήψη αποφάσεων σχετικά με τη χωρική κατανομή ήπιων παρεμβάσεων που βελτιστοποιούν διαφορετικά κριτήρια. Επιμέρους καινοτομίες της διατριβής θεωρούνται:

α) Η διαμόρφωση κατάλληλων ΔΠ προς εφαρμογή σε συγκεκριμένες καλλιέργειες (σιτηρά, πολυετή ψυχανθή για κτηνοτροφική χρήση) και εκτάσεις βοσκότοπων.

β) Η μεθοδολογία κοστολόγησης της εφαρμογής εναλλακτικών ΔΠ σε ορίζοντα πενταετίας.

γ) Η υδρολογική και κυρίως η ποιοτική προσομοίωση ελληνικής λεκάνης απορροής με ένα διαχειριστικό μοντέλο προσομοίωσης των φυσικών διεργασιών, που πάντα παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον ως προς την αντιμετώπιση των δυσκολιών παραμετροποίησης και βαθμονόμησης λόγω ελλείψεων στα απαραίτητα δεδομένα πεδίου.

δ) Η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση συνολικού κόστους εφαρμογής ΔΠ και των φορτίων δύο ταυτόχρονα θρεπτικών στοιχείων (N-NO3 και P) των επιφανειακών υδάτων.

ε) Η ανάπτυξη προγραμματιστικού περιβάλλοντος για την αυτόματη συνεργασία ενός υδρολογικού μοντέλου, μιας βάσης δεδομένων και ενός ΓΑ σε MATLAB και

στ) Η δημιουργία μέσω προγραμματισμού, μιας πρωτότυπης, αυτόματα δημιουργούμενης και εύχρηστης ΒΔΠ που μειώνει σημαντικά τον απαιτούμενο χρόνο της διαδικασίας πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, καθιστώντας τη πρακτικά εφικτή για κάθε περιοχή μελέτης, ανεξαρτήτως μεγέθους και πολυπλοκότητας.

Επιπλέον, η διατριβή μπορεί να συμβάλλει: α) στην ερευνητική δραστηριότητα στους τομείς της περιβαλλοντικής και προχωρημένης υδρολογίας, της διαχείρισης των υδατικών πόρων, της ανάλυσης συστημάτων, της θεωρίας βελτιστοποίησης και ιδιαίτερα στον τομέα της διαχείρισης της αγροτικής γης, καθώς και στην εκπαιδευτική διαδικασία στους τομείς αυτούς, β) στη λήψη αποφάσεων και στην κατάρτιση προγραμμάτων δράσεων σε κλίμακα λεκάνης απορροής και γ) στην εφαρμογή της Περιβαλλοντικής Νομοθεσίας σε θέματα ποιότητας υδάτων.

1.6 Ερευνητικό και δημοσιευμένο έργο συνδεδεμένο με τη διατριβή

Η διδακτορική αυτή διατριβή είναι το επιστέγασμα μιας πολυετούς περιόδου ενασχόλησης με τα επιστημονικά αντικείμενα της υδρολογίας, της υδρολογικής προσομοίωσης και της ρύπανσης των επιφανειακών υδάτων από μη σημειακές ή διάχυτες πηγές ρύπανσης (φερτές ύλες, θρεπτικά στοιχεία). Κρίνεται σκόπιμο στο σημείο αυτό να παρατεθεί σύντομα ένα ιστορικό του εκπονημένου και δημοσιευμένου έργου από το 2004 έως σήμερα, που είτε αποτελεί αμιγώς επιστημονικό έργο της διατριβής αυτής (έτος 2010), είτε αποτέλεσε ενδιαφέρουσες επιστημονικές προσπάθειες προσέγγισης του θέματος της διατριβής, συνδεόμενες έμμεσα με αυτή κατά την πορεία εκπόνησής της.

Στο Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων του ΕΜΠ, η πρώτη ενασχόληση του συγγραφέα με την υδρολογική προσομοίωση έγινε στα πλαίσια της

μεταπτυχιακής του εργασίας με τίτλο: 'Εδαφολογική Διερεύνηση για τη Βελτίωση της Ακρίβειας του Μοντέλου SWAT στην Εκτίμηση των Επιπτώσεων των Αλλαγών Χρήσης Γης στην Πεδιάδα της Θεσσαλίας' (Παναγόπουλος, 2004). Στην εργασία αυτή βαθμονομήθηκε το υδρολογικό μοντέλο SWAT στη λεκάνη απορροής Αλή-Εφέντη του ποταμού Πηνειού, μέσω συστηματικής διερεύνησης των φυσικών εδαφικών παραμέτρων, ενώ εκτιμήθηκαν οι μεταβολές στις συνιστώσες του υδρολογικού κύκλου κάτω από διάφορα σενάρια αποδάσωσης. Η προσομοίωση του ποιοτικού μέρους και τα αποτελέσματα στις απώλειες N μετά από εφαρμογή διαφόρων ΔΠ σχετικά με τις ποσότητες και το χρόνο λίπανσης, διερευνήθηκαν στη λεκάνη αυτή πρόσφατα (Panagopoulos, 2010b).

Το 2005, δημοσιεύτηκε η βαθμονόμηση του μοντέλου SWAT σε πολλαπλές θέσεις του υδρογραφικού δικτύου λεκάνης απορροής της Σουηδίας (Bekiaris et al., 2005), τα στοιχεία για την προσομοίωση της οποίας αποκτήθηκαν μέσω του ερευνητικού ευρωπαϊκού προγράμματος Euroharp (Euroharp, 2000). Η ποιότητα του νερού κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου της ίδιας λεκάνης διερευνήθηκε αμέσως μετά, με αναλυτικό υπολογισμό και αποσαφήνιση του επιμερισμού της συνεισφοράς των διαφόρων πηγών στα φορτία N και P (Panagopoulos et al., 2006). Στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού προγράμματος Euroharp, διερευνήθηκε με χρήση του SWAT μία ακόμα Σκανδιναβική λεκάνη ως προς την απόκρισή της σε σημειακές και μη σημειακές φορτίσεις των εν λόγω θρεπτικών στοιχείων. Η Νορβηγική αυτή λεκάνη μελετήθηκε ως προς τη συμπεριφορά έξι διαφορετικής σύστασης εδαφών στις απώλειες θρεπτικών στοιχείων προς τα επιφανειακά νερά και βρέθηκε ότι παρά τις ιδιαίτερες κλιματικές συνθήκες με τα υψηλά ετήσια ύψη χιονόπτωσης και την ψύξη των εδαφών, τα εδάφη αυτά, συγκριτικά μεταξύ τους, συμπεριφέρονται με τον ίδιο τρόπο όπως συμβαίνει σε άλλες περιοχές με πιο ήπια κλιματικά χαρακτηριστικά (Panagopoulos et al., 2007b). Ωστόσο, η επίδραση των ιδιαίτερων γεωκλιματικών παραγόντων στη Σκανδιναβία σε σχέση με την περιοχή της Μεσογείου προκαλεί έντονες διαφορές στη χρονική κατανομή των απωλειών θρεπτικών και κατ' επέκταση στην αποδοτικότητα των ΔΠ, κάτι που διερευνήθηκε με παράλληλη προσομοίωση με το SWAT και ανάλυση των αποτελεσμάτων της εν λόγω Νορβηγικής και της λεκάνης Αλή Εφέντη του Πηνειού (Panagopoulos et al., 2010f).

Πολύ πρόσφατα ωστόσο, δημοσιεύτηκαν αποτελέσματα σχετικά με το συνολικό έργο του Εργαστηρίου Υδρολογίας στο πρόγραμμα Euroharp με:

α) την αναλυτική συγκριτική περιγραφή της επιστημονικής προσέγγισης εννέα μοντέλων προσομοίωσης του κύκλου των θρεπτικών στοιχείων σε κλίμακα λεκάνης απορροής (Schoumans et al., 2009a), μεταξύ των οποίων και του SWAT,

β) την αξιολόγησή τους, ως προς την ικανότητα πρόβλεψης των φορτίων θρεπτικών σε ετήσια βάση (Schoumans et al., 2009b),

γ) τη συγκριτική τους αξιολόγηση στον επιμερισμό της συνεισφοράς των φορτίων από διάφορες πηγές σε 17 λεκάνες απορροής (Kronvang et al., 2009) και

δ) τη συγκρισιμότητά τους ως προς την ικανότητα προσομοίωσης των βιοχημικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα εντός του υδρογραφικού δικτύου (in-stream processes) κατά τη μεταφορά των θρεπτικών στοιχείων, επηρεάζοντας τα τελικά φορτία που καταλήγουν στις εξόδους των λεκανών απορροής (Hejzlar et al., 2009).

Η διάβρωση λεκάνης απορροής και η στερεοπαροχή ποταμού έχει μελετηθεί στον ποταμό Άραχθο, με τελικό αποτέλεσμα την ποσοτικοποίηση των απωλειών εδάφους από τα διάφορα τμήματα της λεκάνης και της εκτίμησης του ρυθμού πρόσχωσης του ταμιευτήρα 'Πουρναρίου Ι' ανάντη της πόλης της Άρτας (Panagopoulos and Mimikou, 2006). Η εκτίμηση των επιπτώσεων στη διάβρωση από την εφαρμογή ΔΠ στην αγροτική γη κατέδειξε ότι είναι εφικτή η μείωση της ετήσιας στερεοπαροχής του ποταμού έως και 25% (Panagopoulos et al., 2007c) με αναπόφευκτα οφέλη στη διάρκεια της ωφέλιμης ζωής του έργου. Η παραπάνω έρευνα, που έγινε με χρήση του μοντέλου SWAT στον ποταμό Άραχθο συγκεντρώθηκε και περιγράφηκε ολοκληρωμένα μαζί με τις επιπτώσεις στη μορφολογία του Δέλτα του ποταμού λόγω της δραστικά μειωμένης στερεοπαροχής κατάντη του φράγματος (Panagopoulos et al., 2008). Ο γειτονικός ποταμός Καλαμάς μελετήθηκε με το μοντέλο SWAT ως προς τις πηγές προέλευσης των φορτίων P, με επιμερισμό της συνεισφοράς τους και με γεωγραφική διαφοροποίηση των απωλειών του στοιχείου σε επίπεδο υπολεκάνης (Panagopoulos et al., 2007a).

Τα αμιγή τμήματα της παρούσας διδακτορικής διατριβής κατατέθηκαν πολύ πρόσφατα για δημοσίευση σε επιστημονικά περιοδικά και συνέδρια. Η πλήρης υδρολογική και ποιοτική προσομοίωση της λεκάνης του Αράχθου στο SWAT με χαρτογράφηση των ετήσιων απωλειών θρεπτικών στα επιφανειακά νερά κατατέθηκε τον Νοέμβριο του 2010 (Panagopoulos et al., 2010a). Τον ίδιο μήνα υποβλήθηκε άρθρο με την περιγραφή της μεθοδολογίας κοστολόγησης διαφόρων ΔΠ και με τη διερεύνηση της σχέσης ΚΑ που διαμορφώνουν μετά από στοχευμένη εφαρμογή, όταν η σχέση αυτή υπολογίζεται σε διάφορες χωρικές κλίμακες (Panagopoulos et al., 2010d). Η μεθοδολογία πολυκριτηριακής βετιστοποίησης με την ανάπτυξη της ΒΔΠ και του ΕΥΑ της παρούσας διατριβής κατατέθηκε σε επιστημονικό περιοδικό επίσης τον ίδιο μήνα (Panagopoulos et al., 2010e). Τέλος, προηγήθηκαν δύο ανακοινώσεις σε συνέδρια τον Σεπτέμβριο του 2010, η μία σχετικά με τη διερεύνηση της διαμόρφωσης της ποιότητας του ποταμού μετά από εφαρμογή ΔΠ (Panagopoulos et al., 2010b) και η άλλη με παρουσίαση της έννοιας της διαχείρισης λεκάνης απορροής μέσω πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης (Panagopoulos et al., 2010c).

1.7 Δομή της διδακτορικής διατριβής

Με βάση το γενικό και τα επιμέρους αντικείμενα που πραγματεύεται, καθώς και τους στόχους στους οποίους προσβλέπει η παρούσα εργασία, γίνεται χωρισμός της σε 10 Κεφάλαια.

Στο παρόν και *πρώτο* Κεφάλαιο έγινε η γενική τοποθέτηση του προβλήματος της ρύπανσης των επιφανειακών υδάτων από τα θρεπτικά στοιχεία του N και του P με κίνδυνο δημιουργίας ευτροφισμού και παρουσιάστηκαν οι φυσικοί μηχανισμοί κίνησης των στοιχείων αυτών στο περιβάλλον. Το κεφάλαιο οριοθετεί ακόμα τους στόχους της διατριβής, παρουσιάζει περιληπτικά τη μεθοδολογία επίτευξής τους και κλείνει με την παρουσίαση των καινοτομιών και της γενικότερης συμβολής της διατριβής στην επιστήμη.

Στο *δεύτερο* Κεφάλαιο γίνεται μια αναλυτική παρουσίαση των επίσημων νομοθετικών και ερευνητικών δράσεων που στοχεύουν στην αντιμετώπιση του περιβαλλοντικού προβλήματος των μη σημειακών απωλειών N και P στα επιφανειακά νερά και αποτιμάται η περιβαλλοντική κατάσταση των υδάτινων σωμάτων και η γενικότερη ερευνητική και νομοθετική δράση στην Ελλάδα.

Το *τρίτο* Κεφάλαιο περιλαμβάνει μία εμπεριστατωμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση των σύγχρονων μεθοδολογιών που έχουν αναπτυχθεί για την ποσοτικοποίηση των απωλειών θρεπτικών από πηγές διάχυσης σε κλίμακα λεκάνης απορροής, συμπεριλαμβανομένων των προσδιοριστικών μοντέλων προσομοίωσης διαδικασιών που επιτρέπουν την εκτίμηση της χωρικής διαφοροποίησης της μη σημειακής ρύπανσης από τα διάφορα τμήματα της αγροτικής γης. Παρουσιάζεται εκτενέστερα, ένα από τα πιο διαδεδομένα μοντέλα λεκάνης απορροής, το SWAT, το οποίο άλλωστε χρησιμοποιείται στη διατριβή.

Στο *τέταρτο* Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα μέτρα διαχείρισης της αγροτικής γης που ολοένα αναπτύσσονται και εφαρμόζονται με σκοπό τον περιορισμό των απωλειών θρεπτικών προς τα υδάτινα σώματα. Γίνεται μία κατηγοριοποίηση των υφιστάμενων ΔΠ στην Ευρώπη και την Αμερική, με περιγραφή της οικονομικής προσέγγισης κοστολόγησης που επιτρέπει την αξιολόγηση της απόδοσής τους με όρους κόστους και αποτελεσματικότητας.

Στο *πέμπτο* Κεφάλαιο παρουσιάζεται το μαθηματικό πρόβλημα της βελτιστοποίησης και γίνεται η ανασκόπηση των βασικότερων χαρακτηριστικών της, με έμφαση στη συμμετοχή περισσότερων του ενός κριτηρίων (πολυκριτηριακή). Αφιερώνεται σημαντική έκταση του κεφαλαίου στην περιγραφή της δομής και λειτουργίας των ΓΑ για τη βελτιστοποίηση συναρτήσεων με δημιουργία και συνεχή αναπαραγωγή πληθυσμών λύσεων. Περιγράφεται η εννοιολογική δομή του εκλεκτικού ΓΑ μη κυριαρχούμενης ταξινόμησης *NSGA-II*, του οποίου μικρή παραλλαγή είναι ο ΓΑ που ενσωματώνεται στη σχετική εργαλειοθήκη του MATLAB και τυγχάνει χρήσης στην παρούσα διατριβή. Ακολουθεί η

εμπεριστατωμένη παρουσίαση του ΓΑ του MATLAB με τις διάφορες ρυθμίσεις, συναρτήσεις και παραμέτρους του, ενώ το κεφάλαιο κλείνει με ανασκόπηση ήδη αναπτυχθέντων συστημάτων ή απλούστερων εργαλείων και μεθοδολογιών λήψης ή υποστήριξης αποφάσεων σχετικά με διαχειριστικά μέτρα αγροτικής φύσης. Έμφαση δίνεται σε μεθοδολογίες των ΗΠΑ που αξιοποιούν τις δυνατότητες των ΓΑ και των υδρολογικών μοντέλων για την πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση αντικρουόμενων στόχων σε κλίμακα λεκάνης απορροής.

Το *έκτο* Κεφάλαιο περιγράφει τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία. Οι επιμέρους συνιστώσες της παρουσιάζονται αναλυτικά, ενώ περιγράφεται ο τρόπος συνεργασίας τους ώστε να οδηγήσουν στη δημιουργία του ΕΥΑ για τη διαχείριση λεκάνης απορροής. Αναδεικνύεται η δυνατότητα ευρύτερης προσαρμογής του σε αγροτικές λεκάνες.

Στο *έβδομο* Κεφάλαιο, η μεθοδολογία και το αναπτυχθέν Εργαλείο εφαρμόζονται στην περιοχή πιλοτικής εφαρμογής τους, τη λεκάνη του Αράχθου στην Ήπειρο. Η λεκάνη αποδεικνύεται πολύ πρόσφορη για την πρακτική εφαρμογή του ΕΥΑ, αφού είναι απόλυτα συμβατή με τις ΔΠ και τη μεθοδολογία κοστολόγησης που αναπτύχθηκαν. Το κεφάλαιο αποτελεί και έναν οδηγό για μελλοντική εφαρμογή της μεθοδολογίας και χρήση του ΕΥΑ σε άλλη λεκάνη.

Το *όγδοο* Κεφάλαιο περιλαμβάνει την αναλυτική περιγραφή της προσομοίωσης των φυσικών διεργασιών στην περιοχή μελέτης με το SWAT. Περιγράφονται αναλυτικά η σχηματοποίηση, ο διαχωρισμός της λεκάνης σε ΥΜ και η βαθμονόμηση του μοντέλου με βάση παρατηρημένα δεδομένα παροχών, στερεοπαροχών και συγκεντρώσεων θρεπτικών κατά μήκος του ποταμού Αράχθου. Μεγάλη έμφαση δίνεται στην αντιμετώπιση προβλημάτων σχετικά με την προσομοίωση του φυσικού συστήματος και την αναπαραγωγή των παρατηρημένων μεγεθών των προαναφερθεισών μεταβλητών στο μοντέλο, λόγω μη επαρκούς διαθεσιμότητας των απαραίτητων δεδομένων. Το κεφάλαιο είναι απαραίτητο για την πλήρη αποτύπωση της υφιστάμενης κατάστασης ως προς τις πιέσεις θρεπτικών στην αγροτική γη και τα επίπεδά τους στο ποτάμι, προτού διερευνηθούν εναλλακτικά διαχειριστικά σχήματα. Ωστόσο, πιστεύεται ότι μπορεί να αποτελέσει έναν συμβουλευτικό οδηγό υδρολογικής και ποιοτικής προσομοίωσης λεκάνης απορροής. Τέλος, επιτυγχάνεται η γεωγραφική απεικόνιση της διαφοροποίησης των απωλειών θρεπτικών από τις ΥΜ της λεκάνης και διερευνάται στοχευμένα ένας ικανοποιητικός αριθμός ΔΠ με εφαρμογή σε αυτές, παρέχοντας μία σαφή εικόνα για τον τρόπο προσομοίωσης της εναλλακτικής διαχείρισης της γης με το SWAT.

Στο *ένατο* Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικά αποτελέσματα της διατριβής, που προκύπτουν με εφαρμογή της μεθοδολογίας και του ΕΥΑ στη λεκάνη του Αράχθου. Προτού παρουσιαστούν τα τελικά αποτελέσματα γίνεται ανάλυση ευαισθησίας των συναρτήσεων και

παραμέτρων του ΓΑ ώστε να βρεθεί ο βέλτιστος συνδυασμός που προσεγγίζει ικανοποιητικά το πραγματικό μέτωπο Pareto σε εύλογο χρονικό διάστημα. Η λήψη αποφάσεων συστήνεται από τις παρεχόμενες λύσεις στις καμπύλες αντιστάθμισης κόστους-P και κόστους-N-NO3 μετά την ταυτόχρονη βελτιστοποίηση των τριών κριτηρίων. Εντοπίζονται οι πιο πρόσφορες, συμβιβαστικές και επιθυμητές λύσεις, καθώς και οι πιο ενδιαφέρουσες με βάση τη θέση τους στις καμπύλες και αναλύονται ως προς τις τιμές των κριτηρίων που διαμορφώνουν. Η απεικόνιση των λύσεων στο χάρτη της λεκάνης αποκαλύπτει τους συνδυασμούς ΔΠ στο χώρο προτείνοντας το είδος της εναλλακτικής διαχείρισης σε συγκεκριμένες θέσεις. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με μία πολύ σύντομη περιγραφή της διατύπωσης του προβλήματος στον Άραχθο με αναγωγή των τριών κριτηρίων σε μία ενιαία έκφραση αντικειμενικής συνάρτησης για λόγους απλής σύγκρισης και ανάδειξης των πλεονεκτημάτων της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης έναντι της μονοκριτηριακής.

Το *δέκατο* και τελευταίο Κεφάλαιο συνοψίζει και ανακεφαλαιώνει τα συμπεράσματα της διατριβής, αναλύει και σχολιάζει τα επιμέρους σημεία της και εμβαθύνει σε εκείνα που είναι δυνατόν να βελτιώσουν το συνολικό αποτέλεσμα. Γίνεται αναφορά στη μελλοντική έρευνα, και ιδιαίτερα στην ανάγκη αντιμετώπισης των προβλημάτων προσομοίωσης της υφιστάμενης κατάστασης λεκάνης απορροής κατά τη φάση μοντελοποίησης, καθώς και στην εκτίμηση των πηγών αβεβαιότητας που εμπεριέχονται στην αξιολόγηση μέσω μοντέλου των επιδράσεων των ΔΠ στην περιστολή των απωλειών θρεπτικών. Συστήνονται παράλληλα οι απαραίτητες ενέργειες που θα καταστήσουν στο μέλλον το αναπτυχθέν ΕΥΑ ακόμα πιο αξιόπιστο, λειτουργικό, φιλικό στον απλό χρήστη και ευρύτερα εφαρμόσιμο. Τέλος, γίνεται μία γενική θεώρηση της υποστήριξης και λήψης αποφάσεων για τη διαχείριση λεκάνης απορροής με χρήση των νέων τεχνολογιών και δίνεται έμφαση στη χρησιμότητα της διατριβής, τόσο στην επιστήμη της Περιβαλλοντικής Υδρολογίας, όσο και στην άσκηση Περιβαλλοντικής Πολιτικής στη χώρα μας, ειδικότερα στην κατάρτιση των ΔΣ των Λεκανών Απορροής των Υδατικών Διαμερισμάτων της.

2 Νομοθεσία και Έρευνα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται η υφιστάμενη διεθνής Νομοθεσία και οι ερευνητικές δράσεις που σχετίζονται με το περιβαλλοντικό πρόβλημα των μη σημειακών αγροτικών απωλειών αζωτούχων και φωσφωρικών ενώσεων στα επιφανειακά νερά, ενώ περιγράφεται και η υφιστάμενη κατάσταση στην Ελλάδα, τόσο ως προς την ποιότητα των επιφανειακών υδάτων, όσο και ως προς τις εθνικές δράσεις και στρατηγικές παρακολούθησης και βελτίωσής της.

2.1 Νομοθεσία

2.1.1 Η Οδηγία – Πλαίσιο 2000/60

Η αναγκαιότητα ορθολογικής διαχείρισης των υδατικών πόρων αντικατοπτρίζεται στην Κοινοτική νομοθεσία από μία σειρά Οδηγιών που έχουν εκδοθεί τα τελευταία χρόνια και αφορούν, μεταξύ άλλων, και στην προστασία από την ρύπανση με θρεπτικά (αστικά, βιομηχανικά λύματα, επικίνδυνα απόβλητα, γεωργική ρύπανση κ.ά.). Καινοτομία όμως στο ευρωπαϊκό νομικό πλαίσιο της διαχείρισης υδατικών πόρων αποτέλεσε ή εκδοθείσα Κοινοτική Οδηγία-Πλαίσιο 2000/60 (Directive 2000/60/EC) του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου για τη θέσπιση πλαισίου Κοινοτικής δράσης στο πεδίο πολιτικής των υδάτων με στόχο την προστασία και αειφορική διαχείριση των εσωτερικών επιφανειακών, μεταβατικών, παράκτιων και υπόγειων υδάτων και με βασική επιδίωξη τη θέσπιση μέτρων και ανάληψη δράσεων σε επίπεδο λεκάνης απορροής ποταμού. Η Οδηγία-Πλαίσιο 2000/60 παρέχει στις εθνικές και τοπικές αρχές κάθε Ευρωπαϊκού κράτους τη νομοθετική βάση για τη διατήρηση της καλής *οικολογικής* και *χημικής* κατάστασης των επιφανειακών υδάτων καθώς και της *χημικής* των υπόγειων υδάτων. Ακόμα και μη Ευρωπαϊκές χώρες βλέπουν σήμερα την Οδηγία ως την κορυφαία νομοθετική ρύθμιση της τελευταίας 20ετίας σχετικά με την πολιτική επί των υδάτων (Andersen et al., 2006). Η ελληνική νομοθεσία εναρμονίστηκε με την Κοινοτική Οδηγία 2000/60 με την έκδοση του νόμου 3199 ΦΕΚ 280^{A}/9.12.2003.

Η Οδηγία-Πλαίσιο 2000/60 περιλαμβάνει 26 άρθρα, παραρτήματα και πίνακες και χαρακτηρίζεται αρκετά γενική ως προς το περιεχόμενό της. Πολύ συχνά παραπέμπει σε άλλες περιβαλλοντικές Οδηγίες, πιο εξειδικευμένες σε μια χρήση ή έναν τύπο ρύπανσης των υδάτων. Για το λόγο αυτό η Οδηγία-Πλαίσιο 2000/60 για τα νερά θεωρείται η ‘ομπρέλα’ που συγκεντρώνει τις νομοθετικές ρυθμίσεις και διατάξεις όλων των μέχρι σήμερα σχετικών με την ποσότητα και ποιότητα των υδατικών πόρων, Οδηγιών της Κοινότητας. Στην ενότητα

αυτή γίνεται μία συνοπτική επισκόπηση των περισσότερων άρθρων της Οδηγίας με μεγαλύτερη αναφορά στα σημεία που περισσότερο άπτονται της διδακτορικής διατριβής.

Στο άρθρο 1 της Οδηγίας περιγράφονται οι γενικοί στόχοι που αναπτύχθηκαν παραπάνω, ενώ στο 2^{ο} δίνονται οι απαραίτητοι ορισμοί, σχετικοί με τους υδατικούς πόρους, τα υδάτινα σώματα και το περιβάλλον. Στο 3^{ο} κατά σειρά άρθρο ζητείται από τα κράτη-μέλη ο καθορισμός των λεκανών απορροής που βρίσκονται σε ολόκληρη την επικράτειά τους μαζί με κανόνες για τη διοίκησή τους. Με την έκδοση του νόμου 1739 ΦΕΚ 201^{A}/19-20.11.1987, η Ελλάδα έχει χωριστεί σε 14 Υδατικά Διαμερίσματα με βάση την κατά το δυνατόν μεγαλύτερη υδρομετεωρολογική και υδρολογική ομοιογένεια και ταυτόχρονα έχουν καθοριστεί όλες οι λεκάνες απορροής ποταμού του κάθε ενός από αυτά. Στο άρθρο 4 εκτίθενται οι περιβαλλοντικοί στόχοι και ορίζονται τα 15 έτη από την έναρξη ισχύος της (έτος 2000), ως το μέγιστο χρονικό διάστημα μέσα στο οποίο όλα τα κράτη-μέλη οφείλουν να έχουν επιτύχει καλή οικολογική και χημική κατάσταση των υδάτων τους.

Στο άρθρο 5 συστήνεται σε κάθε κράτος-μέλος η αναλυτική επισκόπηση των επιπτώσεων των ανθρώπινων δραστηριοτήτων στα επιφανειακά ύδατα και η οικονομική ανάλυση του κόστους ύδατος. Η χώρα μας έχει συντάξει επίσημη έκθεση που καταγράφει για όλα τα Υδατικά Διαμερίσματα τις πιέσεις που δέχονται τα επιφανειακά νερά από τις διάφορες ανθρώπινες δραστηριότητες (ΕΜΠ, 2008), καθώς και προκαταρκτική έκθεση οικονομικής ανάλυσης του κόστους ύδατος (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2008). Η συστηματική παρακολούθηση των ποσοτικών και ποιοτικών χαρακτηριστικών των επιφανειακών υδάτων συστήνεται στο άρθρο 8. Στο άρθρο 10 η Οδηγία αναφέρεται στον έλεγχο των σημειακών και μη σημειακών εισροών ρύπων στα νερά και απαιτεί τη συμμόρφωση με τα μέγιστα επιτρεπόμενα όρια καθώς και τον μέγιστο δυνατό έλεγχο των εισροών από μη σημειακές πηγές με υιοθέτηση εναλλακτικών πρακτικών διαχείρισης στη λεκάνη απορροής. Για το λόγο αυτό παραπέμπει σε άλλες Οδηγίες, όπως η Οδηγία των νιτρικών (Directive 91/676/EEC) για περαιτέρω και αναλυτικότερη έκθεση νομοθετικών ρυθμίσεων. Με το άρθρο 11 δίνεται ακόμα στα κράτη-μέλη το δικαίωμα να καταρτίζουν προγράμματα μέτρων πρόληψης και αποκατάστασης των υδάτων, όπου αυτό απαιτείται, συστήνεται όμως η υιοθέτηση των πιο οικονομικών και αποτελεσματικών μέτρων, δείγμα της σημασίας που δίνει η Ευρωπαϊκή Νομοθεσία στην οικονομικότητα των εφαρμογών.

Ένα πολύ σημαντικό άρθρο της Οδηγίας είναι το άρθρο 13, το σχετικό με την εφαρμογή *Διαχειριστικών Σχεδίων* (ΔΣ), (River Basin Management Plans - RBMPs). Σύμφωνα με το άρθρο αυτό, τα κράτη-μέλη ήταν υποχρεωμένα μέχρι την παρέλευση 9 ετών από την έναρξη ισχύος της Οδηγίας, δηλαδή κατά το έτος 2009, να έχουν καταρτίσει ολοκληρωμένα προγράμματα ΔΣ, τα οποία και θα αξιολογήσουν πλήρως ύστερα από 6ετή εφαρμογή τους (2015). Παρόλο που η αυστηρή μετάφραση στα ελληνικά παραπέμπει σε

λεκάνη απορροής, στην πράξη ένα ΔΣ αναφέρεται ευρύτερα σε χωρική κλίμακα Υδατικού Διαμέρισματος, (River Basin District – RBD). Κατά συνέπεια η χώρα μας έχει υποχρέωση να καταρτίσει 14 τέτοια Σχέδια. Στο παράρτημα *VII* της Οδηγίας συνοψίζονται επίσης τα στοιχεία που πρέπει να καλύπτονται από τα ΔΣ, όπου μεταξύ άλλων, περιλαμβάνονται οι πιέσεις που δέχονται τα επιφανειακά ύδατα και οι λεπτομερείς στόχοι που τίθενται. Η ταυτόχρονη ενημέρωση και ενθάρρυνση ενεργού συμμετοχής του κοινού και όλων των ενδιαφερόμενων μερών στην υλοποίηση των ΔΣ συστήνεται στο άρθρο 14, ενώ στο αμέσως επόμενο (άρθρο 15) ζητείται η υποβολή εκθέσεων σχετικά με αυτή. Στην Ελλάδα οι προκαταρκτικές εκθέσεις για τα ΔΣ δεν έχουν υποβληθεί ακόμα, μιας και αυτά πολύ πρόσφατα προκηρύχθηκαν από την επιφορτισμένη με αυτήν την αρμοδιότητα Ειδική Γραμματεία Υδάτων (ΕΓΥ) του Υπουργείου Περιβάλλοντος Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής (ΥΠΕΚΑ), πρώην Κεντρικής Υπηρεσίας Υδάτων (ΚΥΥ) του Υπουργείου Περιβάλλοντος Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων (ΥΠΕΧΩΔΕ).

Στο 16^{ο} άρθρο περί στρατηγικών κατά της ρύπανσης των υδάτων, εκτίθεται η πρόθεση της Επιτροπής να καταρτίσει λίστα με τις *ουσίες προτεραιότητας* ως προς την ανάγκη αντιμετώπισης των εισροών τους στα υδάτινα σώματα και συστήνεται στα κράτη-μέλη η θέσπιση περιβαλλοντικών ποιοτικών προτύπων σε εθνικό επίπεδο. Στο Παράρτημα *VIII* της Οδηγίας ως ουσίες προτεραιότητας χαρακτηρίζονται, μεταξύ άλλων, οι νιτρικές και φωσφορικές ενώσεις, που συμβάλλουν στον ευτροφισμό των επιφανειακών υδάτων.

Σε σχέση λοιπόν με την ποιότητα των εσωτερικών υδάτων, η Οδηγία-Πλαίσιο αποβλέπει στο να βελτιώσει την περιβαλλοντική κατάσταση των υδατικών συστημάτων με προοδευτική μείωση των εδαφικών απωλειών ρύπων. Τα υδάτινα σώματα πρέπει να κατηγοριοποιηθούν σε μία από τις 5 κλάσεις ποιότητας: *Εξαίρετη, Καλή*, *Μέτρια*, *Ελλιπής*, *Κακή*, με τις δύο πρώτες να κρίνονται αποδεκτές. Ο λεκτικός διαχωρισμός προκαλεί κάποιες ασάφειες ως προς το πότε ένα υδάτινο σώμα χαρακτηρίζεται από ικανοποιητική ή μη οικολογική κατάσταση, η Οδηγία ωστόσο αναφέρει πως η κατάταξη γίνεται με βάση το πόσο αποκλίνει η ποιοτική κατάσταση ενός σώματος από την κατάσταση αναφοράς. Ως τέτοια ορίζεται η κατάσταση ενός υδάτινου σώματος όταν αυτό είναι πλήρως απαλλαγμένο από οποιαδήποτε εξωτερική επίδραση ανθρωπογενούς προέλευσης και από οποιαδήποτε διαταραχή στα φυσικοχημικά, υδρομορφολογικά και βιολογικά χαρακτηριστικά του (Εξαίρετη). Η κατάσταση αναφοράς πρέπει να καθοριστεί από κάθε κράτος-μέλος για κάθε υδάτινο σώμα με βάση τα τυπολογικά χαρακτηριστικά του, παράλληλα με την καταγραφή των φυσικών και ανθρωπογενών πιέσεων και επιδράσεων που δέχεται. Για την αντιμετώπιση των εγγενών ασαφειών και την προώθηση κοινής κατανόησης και προσέγγισης του όρου *καλή οικολογική κατάσταση*, για κάθε τύπο υδάτινου σώματος, τα κράτη-μέλη της ΕΕ συμμετέχουν σε *ασκήσεις ενδοβαθμονόμησης* (intercalibration exercise). Οι ενώσεις

θρεπτικών συγκαταλέγονται συχνά στην Οδηγία στους δευτερεύοντες δείκτες οικολογικής κατάστασης.

Η Οδηγία συστήνει ως συχνότητα παρακολούθησης των θρεπτικών στοιχείων που παίζουν ρόλο στη διαμόρφωση της χημικής κατάστασης του νερού και έμμεσα καθορίζουν την οικολογική, τους τρεις μήνες, ωστόσο, προτείνεται ο ένας μήνας όταν οι ενώσεις αυτές έχουν υιοθετηθεί από το κράτος-μέλος ως ουσίες προτεραιότητας. Στο παράρτημα *VI* η Οδηγία κατηγοριοποιεί τα μέτρα που κάθε κράτος-μέλος μπορεί να θεσπίσει για κάθε περιοχή λεκάνης απορροής ποταμού ως τμήμα του προγράμματος μέτρων που απαιτείται σύμφωνα με το άρθρο 11, όπου εκτός των διοικητικών, νομοθετικών, εκπαιδευτικών, ερευνητικών, κατασκευαστικών και οικονομικών μέτρων, προτείνεται και η υιοθέτηση *Κωδίκων Ορθής Γεωργικής Πρακτικής* (ΚΟΓΠ), κάτι που θα αναλυθεί στην αμέσως επόμενη ενότητα σχετικά με την Οδηγία των νιτρικών. Τέλος, υπενθυμίζεται ότι ως έτος-στόχος για την επίτευξη αποδεκτής οικολογικής και χημικής κατάστασης όλων των υδάτινων σωμάτων των κρατών-μελών έχει οριστεί το 2015 (Directive 2000/60/EC).

2.1.2 Η Οδηγία των νιτρικών 1991/676

Η Οδηγία 91/676/EC (Directive 91/676/EEC) εκδόθηκε στις 12 Δεκεμβρίου του 1991 από το συμβούλιο των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων για την προστασία των υδάτων από τη ρύπανση νιτρικών γεωργικής προέλευσης. Όπως ρητά αναφέρεται στο πρώτο της άρθρο, αποβλέπει στη μείωση της ρύπανσης των υδάτων που προκαλείται άμεσα ή έμμεσα από νιτρικά ιόντα ($NO3^-$) γεωργικής προέλευσης και στην πρόληψη της περαιτέρω επιδείνωσής τους, προκειμένου να προστατευθούν η ανθρώπινη υγεία και τα υδάτινα οικοσυστήματα και να εξασφαλισθούν οι χρήσεις του νερού. Αιτία της ρύπανσης από $NO3^-$ είναι κατά κανόνα η άμεση ή έμμεση απόρριψη αζωτούχων ενώσεων στο υδάτινο περιβάλλον, με συνέπεια τη συσσώρευση υψηλών συγκεντρώσεων N, κυρίως με τη μορφή $NO3^-$ στα επιφανειακά και υπόγεια ύδατα.

Για την έκδοση της Οδηγίας των νιτρικών λήφθηκαν υπόψη μια σειρά από ζητήματα όπως: α) το γεγονός ότι η περιεκτικότητα των υδάτων σε $NO3^-$ σε ορισμένες περιοχές των κρατών-μελών αυξάνεται επικίνδυνα, β) ότι η αναγκαία για τη γεωργία χρήση αζωτούχων λιπασμάτων και κοπριάς αποτελεί περιβαλλοντικό κίνδυνο και μάλιστα την κύρια αιτία της ρύπανσης των υδάτων από διάχυτες πηγές και γ) ότι λόγω των υδρογεωλογικών συνθηκών σε ορισμένα κράτη-μέλη, τα πιθανά μέτρα αποκατάστασης μπορούν να οδηγήσουν σε βελτίωση της ποιότητας του νερού με πολύ μεγάλη χρονική καθυστέρηση που αποτιμάται σε αρκετά έτη (Directive 91/676/EEC).

Αρχικός στόχος της Οδηγίας ήταν, σύμφωνα με το 3^{ο} άρθρο της, ο εντός διετίας χαρακτηρισμός των περιοχών των κρατών-μελών, όπου οι συγκεντρώσεις $NO3^-$ στα επιφανειακά ή υπόγεια νερά ανέρχονται έστω και παροδικά σε υψηλά-μη επιτρεπτά επίπεδα, ως *ευπρόσβλητων ζωνών* (ΕΖ). Ως ανώτερη επιτρεπτή τιμή συγκέντρωσης $NO3^-$τόσο στα επιφανειακά, όσο και στα υπόγεια νερά, ορίστηκε η τιμή των 50 mg/l, το όριο καταλληλότητας του πόσιμου νερού. Στο άρθρο 4 η Οδηγία προβλέπει τη θέσπιση ΚΟΓΠ, (Good Farming Practices – GFPs), που θα εφαρμόζονται προαιρετικά από τους γεωργούς και την κατάρτιση προγράμματος της εφαρμογής τους, το οποίο εμπεριέχει και πρόβλεψη για την επιμόρφωση και ενημέρωσή τους σχετικά με τα μέτρα μείωσης της διασποράς αζωτούχων λιπασμάτων και ζωικής κοπριάς στο έδαφος. Τα κράτη-μέλη είναι επιφορτισμένα να λαμβάνουν συμπληρωματικά μέτρα ή τις ενισχυμένες δράσεις που κρίνουν ότι απαιτούνται εάν εξαρχής ή βάσει της πείρας που αποκτάται κατά την εφαρμογή των προγραμμάτων δράσης καθίσταται καταφανές ότι τα παραπάνω μέτρα δεν επαρκούν για την επίτευξη των στόχων. Κατά την επιλογή αυτών των μέτρων ή δράσεων τα κράτη-μέλη πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τους την αποτελεσματικότητά τους, καθώς και το κόστος τους σε σχέση με άλλα δυνατά προληπτικά μέτρα, ώστε με αξιόπιστο τρόπο αυτά να ενσωματωθούν στα ευρύτερα ΔΣ της Οδηγίας 2000/60. Πιο αναλυτικά, η Οδηγία των νιτρικών κατευθύνει τα κράτη-μέλη στη λήψη συγκεκριμένων ΚΟΓΠ για τη μείωση των απορροών $NO3^-$ που σχετίζονται με:

- αποφυγή εφαρμογών λιπασμάτων σε περιόδους ακατάλληλες για λίπανση,
- μειωμένη λίπανση σε εδάφη με μεγάλες κλίσεις,
- προσεκτική λίπανση σε πλημμυρισμένα ή παγωμένα εδάφη,
- αποφυγή ή μείωση λίπανσης σε εδάφη που γειτνιάζουν με υδάτινους αποδέκτες,
- την κατασκευή αποθηκευτικών χώρων των περιττωμάτων των κτηνοτροφικών ζώων και διάθεσή τους σε περιόδους με περιορισμένες απορροές,
- την υιοθέτηση κατάλληλων λιπαντικών τεχνικών ως προς το ρυθμό και την ομοιομορφία εφαρμογής στο έδαφος,
- εφαρμογή εναλλαγής καλλιεργειών (*αμειψισπορών*) και κατάλληλο ποσοστό συνύπαρξης μόνιμων και ετήσιων καλλιεργειών σε μία περιοχή,
- τη διατήρηση ενός ελάχιστου ποσοστού κάλυψης του εδάφους κατά τις βροχερές περιόδους του έτους για δέσμευση του N από το έδαφος και αποτροπή απώλειάς του σε υδάτινους αποδέκτες,
- την κατάρτιση σχεδίου λιπαντικής αγωγής σε επίπεδο αγροκτήματος και καταγραφή ιστορικού αρχείου και τέλος,
- την αποτροπή κατείσδυσης του N κάτω από τη ριζική ζώνη στα αρδευόμενα εδάφη.

Ιδιαίτερα για τις ΕΖ και τα σχέδια δράσης που εφαρμόζονται σε αυτές προτείνεται η θέσπιση επιπλέον κανόνων που να έχουν σχέση και με τον εδαφικό τύπο, τις εδαφοκλιματικές συνθήκες και τις αρδευτικές ποσότητες, ενώ στην Οδηγία υφίστανται κάποιοι συγκεκριμένοι κανόνες που εκφράζονται με ανώτατα όρια πιέσεων στην αγροτική γη, όπως π.χ. τη μέγιστη επιτρεπόμενη ποσότητα εναπόθεσης N με διασπορά κοπριάς κτηνοτροφικών ζώων (170 kgN/ha/έτος), (Directive 91/676/EEC).

Τα κράτη-μέλη οφείλουν να εφαρμόζουν τα μέτρα στις ΕΖ και να παρακολουθούν συστηματικά την περιεκτικότητα σε $NO3^-$ των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων (άρθρο 5) σε επιλεγμένα σημεία μέτρησης, ώστε να προσδιορίζουν την έκταση της γεωργικής ρύπανσης των υδάτων. Στο 6° άρθρο της η Οδηγία αναφέρεται στη συχνότητα παρακολούθησης ή λήψης δειγμάτων από έναν υδάτινο φορέα, η οποία ορίζεται στο μηνιαίο χρονικό βήμα για τις ΕΖ. Στο ίδιο άρθρο ορίζεται ακόμα και το χρονικό διάστημα που απαιτείται μέχρι την επανέναρξη μηνιαίων μετρήσεων ετήσιας διάρκειας, το οποίο ορίστηκε σε 4 χρόνια εκτός από τις περιπτώσεις υδάτινων φορέων που όλα τα ιστορικά δείγματα δεν κατέδειξαν ποτέ συγκέντρωση $NO3^-$ μεγαλύτερη από 25 mg/l. Στην τελευταία περίπτωση, τα ετήσια προγράμματα παρακολούθησης μπορούν να επαναλαμβάνονται ανά 8 έτη.

Με βάση το άρθρο 10 της Οδηγίας, τα κράτη-μέλη θα πρέπει να καταρτίζουν και να υποβάλλουν στην Επιτροπή τετραετείς εκθέσεις που να περιλαμβάνουν: α) τα αποτελέσματα της παρακολούθησης της χημικής κατάστασης των υδάτων, β) χάρτες με τις ΕΖ και κατάδειξη των πιο πρόσφατα καταγραμμένων που να συνοδεύονται με τα πιθανά μέτρα που χρειάζονται κατά περίπτωση, γ) στοιχεία σχετικά με την εφαρμογή αυτών των μέτρων στα πλαίσια εφαρμογής των ΔΣ και των ΚΟΓΠ και δ) υπόθεση, συνοδευόμενη και με την αβεβαιότητα που αυτή εμπεριέχει, για το πιθανό χρονικό διάστημα που είναι απαραίτητο να παρέλθει για την διαπίστωση των πρώτων αποτελεσμάτων-αποκρίσεων του φυσικού συστήματος στα μέτρα αυτά (Directive 91/676/EEC).

Σε αντίθεση με το στοιχείο του N, δεν υπάρχει Ευρωπαϊκή Οδηγία που να αναφέρεται αποκλειστικά σε ενώσεις του P. Αυτό θα μπορούσε να εξηγηθεί από το γεγονός πως οι αζωτούχες ενώσεις, όπως τα $NO3^-$, λόγω της υψηλής διαλυτότητάς τους και των μεγάλων ποσοτήτων αζωτούχων λιπασμάτων, έχρηζαν άμεσης προσοχής κατά τη δεκαετία του ’90. Ωστόσο, τόσο στην Οδηγία-Πλαίσιο 2000/60 όσο και σε άλλες Οδηγίες (π.χ. Οδηγία αστικών αποβλήτων) γίνονται συστηματικά αναφορές στις ενώσεις του P. Επιπλέον, θα μπορούσε κάποιος να ισχυριστεί ότι, παρόλο που η φύση και οι ιδιότητες του στοιχείου αυτού διαφέρουν από το N, οι ΚΟΓΠ της Οδηγίας των νιτρικών αποτελούν σε μεγάλο βαθμό ταυτόχρονες δράσεις για τον περιορισμό και των απωλειών φωσφορικών ενώσεων από τα εδάφη.

2.1.3 Η Κοινή Αγροτική Πολιτική

Η Αναθεωρημένη Κοινή Αγροτική Πολιτική (ΚΑΠ), (Council Regulation 1782/2003) αποτελεί μία από τις πιο συγκροτημένες πολιτικές της ΕΕ που απορροφά πάνω από το 40% του Κοινοτικού προϋπολογισμού. Σύμφωνα με το ιστορικό της ΚΑΠ που δημοσιεύεται λεπτομερώς στην σχετική με τον αγροτικό τομέα επίσημη ιστοσελίδα της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, (http://ec.europa.eu/agriculture), πριν από μια δεκαετία ξεκίνησε η πορεία προς μια ΚΑΠ φιλική προς το περιβάλλον, συντονισμένη στις ανάγκες και τους κανόνες της αγοράς, που υποστηρίζει τη βιώσιμη και αποδοτική γεωργία μακριά από τη λογική στήριξης της υπερπαραγωγής. Μετά τις μεταρρυθμίσεις στα πλαίσια της πρότασης που έμεινε γνωστή ως *Agenda 2000*, οι ριζοσπαστικές αλλαγές στην ΚΑΠ το 2003 αποτέλεσαν το επόμενο βήμα προς μια πολιτική που θα στήριζε, όχι απλώς τη γεωργία, αλλά το επίπεδο διαβίωσης των αγροτικών κοινοτήτων στο σύνολό τους που συγκεντρώνουν το 50% περίπου του πληθυσμού της επικράτειας της ΕΕ. Η αναθεώρηση της ΚΑΠ θέτει το νέο πλαίσιο υλοποίησης των Κοινοτικών ενισχύσεων. Κυρίαρχο στοιχείο αυτής της αναθεώρησης είναι η αποδέσμευση των ενισχύσεων από την παραγωγή. Έτσι, η ΕΕ δεν ενισχύει πλέον την παραγωγή αλλά τον παραγωγό, δηλαδή τη γεωργική εκμετάλλευση μέσω της *Ενιαίας Αποδεσμευμένης Ενίσχυσης*. Η νέα αυτή ενίσχυση αντικαθιστά τις μέχρι τώρα χορηγούμενες ενισχύσεις με στόχο την διασφάλιση ενός ελάχιστου εγγυημένου εισοδήματος στον παραγωγό. Η αποκοπή του δεσμού μεταξύ παραγωγής και ενισχύσεων, γνωστή ως *αποσύνδεση* (decoupling) καθιστά τους αγρότες πιο ανταγωνιστικούς και ελεύθερους να καλλιεργούν ό, τι είναι πιο επικερδές για αυτούς, καθώς συνεχίζουν να λαμβάνουν σταθερά εισοδήματα.

Η Ελλάδα βρίσκεται ανάμεσα στα κράτη-μέλη με το υψηλότερο ποσοστό πληθυσμού, οικονομικά εξαρτώμενου άμεσα από τις γεωργικές δραστηριότητες, ενώ ο αγροτικός τομέας καταναλώνει περίπου το 85% των εθνικών υδατικών πόρων. Από τα στοιχεία της Εθνικής Στατιστικής Υπηρεσίας Ελλάδας (ΕΣΥΕ), με περίοδο βάσης το χρονικό διάστημα 1991-2002, προκύπτει ότι το σημαντικότερο τμήμα της χώρας καλλιεργείται με αροτραίες (σιτάρι μαλακό, σιτάρι σκληρό, κριθάρι, βρώμη, σίκαλη, αραβόσιτος, ρύζι) και δενδρώδεις καλλιέργειες (ελιές) ενώ σημαντικό τμήμα καλύπτουν και τα βιομηχανικά φυτά όπως το βαμβάκι και ο καπνός (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2008). Η ΚΑΠ ενισχύει την εντατική καλλιέργεια των ελληνικών προϊόντων με επιδοτήσεις των παραγωγών, στα σημερινά τους επίπεδα, προσαυξημένο κατά 1% κατ' έτος μέχρι και το 2013, διασφαλίζοντας τις χρηματοδοτήσεις για τα μεσογειακά προϊόντα (βαμβάκι, ελαιόλαδο, καπνός) στο σημερινό

τους ύψος και με ίση μεταχείριση με τα βόρεια προϊόντα. Η Ελλάδα εισπράττει για την στήριξη των τριών ανωτέρω βασικών αγροτικών της προϊόντων περίπου 1650M€ ετησίως.

Οι κατευθυντήριες αρχές που διαμόρφωσαν τις πρόσφατες μεταρρυθμίσεις της ΚΑΠ διατυπώθηκαν από το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο του Γκέτεμποργκ το 2001 και επιβεβαιώθηκαν στα σχετικά με τη στρατηγική της Λισσαβόνας συμπεράσματα του Ευρωπαϊκού Συμβουλίου της Θεσσαλονίκης, τον Ιούνιο του 2003: 'Καλές Οικονομικές Επιδόσεις' σε συνδυασμό με την 'Αειφόρο Χρήση των Φυσικών Πόρων'. Η ΚΑΠ προάγει συστηματικά κατευθύνσεις παραγωγής με σεβασμό στο περιβάλλον. Έχει θεσπίσει γενικούς ΚΟΓΠ σε άμεση σχέση με την Οδηγία των νιτρικών, στη βάση των οποίων το κάθε κράτος-μέλος οφείλει να θεσπίσει τους δικούς του ιδιαίτερους κώδικες με γνώμονα τον περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και τη βιώσιμη αγροτική παραγωγή. Σε αυτήν την κατεύθυνση η ΚΑΠ ενισχύει τους αγρότες με κονδύλια ώστε να υιοθετήσουν καλλιεργητικές τεχνικές που σέβονται το περιβάλλον, όπως π.χ. μείωση των ποσοτήτων χημικών λιπασμάτων που εφαρμόζουν ή μείωση του αριθμού των κτηνοτροφικών ζώων ανά μονάδα έκτασης (ha) αγροτικής γης. Συνιστά επίσης άλλες τεχνικές όπως την ακαλλιέργεια μικρών εδαφικών ζωνών στα όρια των αγροκτημάτων ή ισοδύναμα κατασκευή μικρών λιμνών (ponds), φύτευση δένδρων ή ακόμα και εγκατάσταση φραχτών ώστε να εμποδίζεται η διασπορά ρύπων εκτός των ορίων της καλλιέργειας και η εισροή τους στους υδάτινους αποδέκτες. Τα κονδύλια αυτά ουσιαστικά εξισορροπούν το χαμένο κέρδος από την υιοθέτηση και εφαρμογή ΚΟΓΠ, αποτελώντας το αντιστάθμισμα του επιπρόσθετου κόστους ή του χαμένου εισοδήματος του παραγωγού.

Η αναθεωρημένη ΚΑΠ είναι πλέον αυστηρή απέναντι στο γεωργικό πληθυσμό απαιτώντας να σέβεται τους περιβαλλοντικούς κανόνες για παραγωγή υψηλής ποιότητας προϊόντων με πολύ περιορισμένη επίδραση των δραστηριοτήτων στο ευρύτερο περιβάλλον. Συγχρόνως, οι αγρότες πρέπει να τηρούν συγκεκριμένα πρότυπα για την προστασία του περιβάλλοντος, την ασφάλεια των τροφίμων και την καλή μεταχείριση των ζώων. Όσοι δεν τηρούν τα πρότυπα αυτά θα αντιμετωπίζουν μειώσεις των άμεσων κοινοτικών ενισχύσεων, κατάσταση γνωστή ως *πολλαπλή συμμόρφωση* (cross-compliance). Οι παραπάνω μεταρρυθμίσεις έχουν πλέον προσδώσει ένα διαφορετικό πρόσωπο στην ΚΑΠ, τονίζοντας την αξία της για όλη την κοινωνία.

2.1.4 Θέσπιση ορίων συγκεντρώσεων θρεπτικών στοιχείων στα επιφανειακά νερά

Κρίνεται σκόπιμο στο σημείο αυτό να κατατεθεί το αποτέλεσμα της προσπάθειας που γίνεται τα τελευταία χρόνια για τη θέσπιση κλάσεων συγκεντρώσεων θρεπτικών στοιχείων στα επιφανειακά νερά. Παρόλο που σε ορισμένες περιπτώσεις υφίστανται ήδη διεθνή ανώτατα επιτρεπτά όρια για κάποιες ενώσεις (π.χ. η συγκέντρωση των 50mg/l για τα $NO3^-$),

δεν έχει ακόμα επιτευχθεί μία εναρμονισμένη και με γενική ισχύ κατάταξη για όλες τις ενώσεις που να έχει ενταχθεί επίσημα στην Ευρωπαϊκή Νομοθεσία. Έτσι, κάθε κράτος θεσπίζει έως τώρα τα δικά του όρια με βάση τις ιδιαιτερότητες των υδάτινων σωμάτων του και την ανάγκη αποκατάστασης, όπου αυτό είναι απαραίτητο. Στα διάφορα κράτη-μέλη της ΕΕ χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της κατάστασης του ευτροφισμού διαφορετικά κριτήρια, όπως η συγκέντρωση του ολικού P, του ολικού N, των ορθοφωσφορικών ($PO4^-$), των $NO3^-$, του οξυγόνου, της χλωροφύλλης, ενώ ακόμα χρησιμοποιούνται πολλές φορές και βιοδείκτες (φυτοπλαγκτόν, είδος και πυκνότητα μακροφύτων κ.α.). Τα κράτη-μέλη είναι υποχρεωμένα να αναφέρουν τη μεθοδολογία και να προσδιορίζουν τον ευτροφισμό χωριστά για τους ποταμούς, τις λίμνες και τα παράκτια ύδατα. Έχει μεγάλη σημασία για την παρούσα διατριβή να παρουσιαστούν εδώ κάποια πρόσφατα στοιχεία που έχουν δημοσιευτεί προς την κατεύθυνση του προσδιορισμού του ευτροφισμού και της κατάταξης των υδάτων των ποταμών ως προς τη συγκέντρωση ενώσεων των δύο βασικών θρεπτικών στοιχείων.

Στον επίσημο Οδηγό για τη Σύνταξη των Εκθέσεων των κρατών-μελών για τη ρύπανση από $NO3^-$ του έτους 2008 με τίτλο 'Κατάσταση και Τάσεις του Υδάτινου Περιβάλλοντος και των Γεωργικών Πρακτικών', (Οδηγία 91/676/ΕΟΚ, 2008), προτείνονται ενδιάμεσες κλάσεις συγκεντρώσεων $NO3^-$ στα επιφανειακά νερά προκειμένου να εντοπιστούν διαφορετικά επίπεδα εμπλουτισμού που μπορεί να οδηγήσουν σε ευτροφισμό. Πιο συγκεκριμένα, προτείνεται η καθιέρωση των κλάσεων με κατώτατα όρια 2 mg/l και 10 mg/l $NO3^-$ για τη μετάβαση από ολιγοτροφική σε μεσοτροφική και ευτροφική κατάσταση αντίστοιχα. Τα εν λόγω κατώτατα όρια πρέπει να καθορίζονται σε συνάρτηση με την ευαισθησία του τοπικού φυσικού περιβάλλοντος στον ευτροφισμό κατ' εφαρμογή του παραρτήματος Ι μέρος Α παράγραφος 3 και μέρος Β της Οδηγίας. Οι κλάσεις συνοψίζονται στον Πίνακα 2.1, όπου υπενθυμίζεται ότι η κλάση με ανώτατο όριο τα 50mg/l εκφράζει την προειδοποιητική κατάσταση πριν το σημείο ακαταλληλότητας των υδάτων, ενώ μεγαλύτερες τιμές συγκεντρώσεων καθιστούν το επιφανειακό νερό ακατάλληλο. Τα αντίστοιχα χρώματα σε κάθε κλάση αποτελούν το χρωματικό κώδικα που προτείνεται για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων σε χάρτες ύστερα από απαίτηση της Οδηγίας των νιτρικών. Στον Οδηγό αυτό προτείνεται ακόμα να παρέχονται από κάθε κράτος-μέλος πέντε τύποι χαρτών:

- Χάρτης των μέγιστων τιμών συγκέντρωσης,
- χάρτης των μέσων ετήσιων τιμών συγκέντρωσης για ένα ή περισσότερα έτη,
- χάρτης των μέσων χειμερινών συγκεντρώσεων (περίοδος Οκτωβρίου-Μαρτίου) για τα υδατορρεύματα και τις λίμνες που εμφανίζουν ευτροφισμό, για ένα ή περισσότερα έτη,

- χάρτες για την εξέλιξη και τις τάσεις συγκρίνοντας την προηγούμενη με την τρέχουσα έκθεση παρακολούθησης,
- χάρτες των συνολικών τάσεων (μεταξύ της πρώτης και της τρέχουσας περιόδου αναφοράς).

Πίνακας 2.1 Προτεινόμενες κλάσεις ποιότητας με βάση τις συγκεντρώσεις νιτρικών ($NO3^-$) ή ισοδύναμα αζώτου νιτρικών (N-NO3), (Οδηγία 91/676/ΕΟΚ, 2008).

Κλάση	**$NO3^-$ (mg/l)**	**N-NO3 (mg/l)**	**Χρώμα**
I	0 – 2	0 – 0,45	σκούρο μπλε
II	2 – 10	0,45 – 2,26	ανοικτό μπλε
III	10–25	2,26–5,65	πράσινο
IV	25–40	5,65–9,04	κίτρινο
V	40–50	9,04–11,30	πορτοκαλί
VI	> 50	> 11,30	κόκκινο

Στην τελική Έκθεση του ΥΠΕΧΩΔΕ περί εφαρμογής των οικονομικών πτυχών του άρθρου 5 της Κοινοτικής Οδηγίας περί Υδάτων 2000/60/ΕΚ στα Υδατικά Διαμερίσματα της Ελλάδας (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2008), έχει γίνει η κατάταξη που περιγράφεται στον Πίνακα 2.2. Η εν λόγω κατάταξη έγινε στα πλαίσια του Εθνικού Προγράμματος Διαχείρισης του ΥΠΕΧΩΔΕ με βάση πραγματικές μετρήσεις που διενεργήθηκαν στα ελληνικά ποτάμια για τις συγκεντρώσεις $NO3^-$ και φωσφορικών ενώσεων.

Πίνακας 2.2 Προτεινόμενες κλάσεις ποιότητας των επιφανειακών υδάτων στην Ελλάδα (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2008).

Παράμετροι (για ποταμούς)	**Όρια για τις κλάσεις ποιότητας (επίπεδα ευτροφισμού)**		
	Χαμηλή Συγκέντρωση	Μέση Συγκέντρωση	Υψηλή Συγκέντρωση
P (mg/l)	<0,17	0,17-0,31	>0,31
N-NO3 (mg/l)	<5	5-11	>11
N-NH4 (mg/l)	<0,04	0,04-1	>1

Η συγκέντρωση χαρακτηρίζεται χαμηλή, μέση ή υψηλή ανάλογα με τα επίπεδα του ρυπαντικού παράγοντα. Η ποιότητα των υδάτων σε ένα υδατικό διαμέρισμα χαρακτηρίζεται *Καλή* εάν η πλειονότητα των μετρήσεων για όλα τα ρυπαντικά φορτία υποδεικνύει χαμηλή περιεκτικότητα, *Μέση* εάν η πλειονότητα υποδεικνύει μέση περιεκτικότητα και τέλος,

χαρακτηρίζεται *Κακή* εάν η πλειονότητα των μετρήσεων για όλα τα ρυπαντικά φορτία υποδεικνύει υψηλή περιεκτικότητα. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.2, επιπλέον του N-NO3$^-$, για τα οποία η εν λόγω κατάταξη περιλαμβάνει ουσιαστικά μια σύμπτυξη των κλάσεων που παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 2.1, περιλαμβάνονται και οι ενώσεις του αζώτου αμμωνιακών (N-NH4) και του P.

Στους παραπάνω πίνακες, το σύμβολο P αναφέρεται στον ολικό P (Total Phosphorus), ενώ οι ενώσεις N-NO3 και N-NH4 αναφέρονται στο N των NO3$^-$ και NH4 αντίστοιχα. Με βάση τα ατομικά βάρη των στοιχείων (N=14, O=16 και H=1) μπορούν εύκολα να προκύψουν οι αντίστοιχες συγκεντρώσεις NO3$^-$ και NH4 στην κατάταξη. Για παράδειγμα, τα όρια των 5,65 και 11,30 mg/l N-NO3 της τρίτης στήλης του Πίνακα 2.1 ισοδυναμούν με όρια ίσα περίπου με 25 και 50 mg/l αντίστοιχα για τα NO3$^-$. Αξίζει επίσης να σημειωθεί πως με βάση την κατάταξη του Πίνακα 2.2 που έκανε το ΥΠΕΧΩΔΕ, το πλείστο των Υδατικών Διαμερισμάτων της χώρας μας χαρακτηρίστηκε από *Καλή* κατάσταση και μόνο εκείνα της Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας και Θεσσαλίας από *Μέση* (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2008).

Μια πολύ αξιόλογη προσπάθεια για τη θέσπιση κλάσεων συγκεντρώσεων θρεπτικών στα ελληνικά ποτάμια έχει γίνει πρόσφατα από τους Skoulikidis et al. (2006). Το σύστημα κατάταξης που προτείνουν έχει καταρτιστεί ύστερα από στατιστική ανάλυση μέσων ετήσιων τιμών συγκεντρώσεων σε 36 θέσεις μικρών και μέσων ποταμών χωρίς μορφολογικές αλλοιώσεις που καλύπτουν σχεδόν όλη την ελληνική επικράτεια. Οι κλάσεις ποιότητας και τα εύρη διακύμανσης των συγκεντρώσεων παρατίθενται στον Πίνακα 2.3.

Πίνακας 2.3 Προτεινόμενες κλάσεις ποιότητας των επιφανειακών υδάτων στην Ελλάδα κατά Skoulikidis et al. (2006).

Παράμετροι	**Κλάσεις Ποιότητας**				
	Υψηλή	Καλή	Μέση	Φτωχή	Κακή
N-NO3 mg/l	<0,22	0,22-0,60	0,61-1,30	1,31-1,80	>1,80
N-NH4 mg/l	<0,024	0,024-0,060	0,061-0,20	0,21-0,50	>0,5
N-NO2 μg/l	<3	3-8	8,1-30	30,1-70	>70
P-PO4 μg/l	<70	70-105	106-165	166-340	>340
P μg/l	<125	125-165	166-220	221-405	>405

Κάνοντας σύγκριση των Πινάκων 2.2 και 2.3 μπορούν να εξαχθούν κάποια χρήσιμα και ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Παρατηρείται πως τα όρια που έχουν εξαχθεί από τους Skoulikidis et al. (2006) για ορισμένες ενώσεις είναι πολύ πιο αυστηρά από τα όρια της μελέτης του ΥΠΕΧΩΔΕ. Π.χ. στον Πίνακα 2.3 συγκέντρωση N-NO3 πάνω από 1,80mg/l παραπέμπει σε κακή κατάσταση υδάτων, ενώ συγκεντρώσεις της ίδιας ένωσης μέχρι και 5 mg/l ανήκουν στην κατηγορία της χαμηλής συγκέντρωσης ή καλής ποιότητας των υδάτων σύμφωνα με τον Πίνακα 2.2. Ανάλογη διαφοροποίηση, σε μικρότερο όμως βαθμό,

παρατηρείται και με το N-NH4 του οποίου το ανώτερο όριο που χαρακτηρίζει τη συγκέντρωση στο νερό υψηλή (κακή ποιότητα) σύμφωνα με το ΥΠΕΧΩΔΕ είναι στο 1mg/l, ενώ στην κατάταξη των Skoulikidis et al. (2006) η υψηλή ποιότητα απαιτεί κατά μέγιστο το μισό αυτής της τιμής, δείγμα και αυτό των αυστηρότερων προτύπων που ισχύουν στη δεύτερη περίπτωση. Οι διαφορές αυτές οφείλονται οπωσδήποτε στη μεθοδολογία που έχει χρησιμοποιηθεί σε κάθε περίπτωση για την εξαγωγή των ορίων των κλάσεων κάτι που δεν ενδιαφέρει σε βάθος την παρούσα εργασία. Το συμπέρασμα που μπορεί να προκύψει όμως και που είναι αρκετά χρήσιμο είναι πως το δείγμα που χρησιμοποιήθηκε και με βάση το οποίο καταρτίστηκε ο τελευταίος πίνακας, παρέπεμπε σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις θρεπτικών στα ελληνικά ποτάμια κάτι που κατατάσσει τις συνθήκες αναφοράς (reference conditions) των ελληνικών ποταμών σε ιδιαίτερα χαμηλά επίπεδα. Το γεγονός αυτό καθιστά τον όποιο περιβαλλοντικό στόχο σχετικά με την ποιότητα των ελληνικών ποταμών, ως προς τις συγκεντρώσεις σε θρεπτικά στοιχεία, αρκετά υψηλό και απαιτητικό κάτι που έχει ληφθεί υπόψη στην παρούσα διδακτορική διατριβή.

Τέλος, στους Πίνακες 2.4 και 2.5 δίνονται για αντιπαραβολή τα όρια των κλάσεων για τις συγκεντρώσεις θρεπτικών ενώσεων που έχουν καταρτιστεί από τις γαλλικές και ιταλικές αρχές και αφορούν στα ύδατα των ποταμών των χωρών τους. Στους Πίνακες γίνεται με τον ίδιο τρόπο αντιστοίχιση των κατώτερων ορίων κάθε κλάσης με ένα επίπεδο ευτροφισμού με λεκτικό χαρακτηρισμό.

Πίνακας 2.4 Προτεινόμενες κλάσεις ποιότητας των ποταμών της Γαλλίας (πηγή: Skoulikidis et al., 2006).

Παράμετροι	**Κλάσεις Ποιότητας**				
	Υψηλή	Καλή	Μέση	Φτωχή	Κακή
N-NO3 mg/l	<0,45	0,45-5,60	5,6-11,30	11,3-18	>18
N-NH4 mg/l	<0,07	0,07-0,39	0,39-1,55	1,55-6,22	>6,22
P-PO4 μg/l	<65	65-163	163-196	196-653	>653
P μg/l	<100	100-300	300-600	600-1000	>1000

Πίνακας 2.5 Προτεινόμενες κλάσεις ποιότητας των ποταμών της Ιταλίας (πηγή: Skoulikidis et al, 2006).

Παράμετροι	**Κλάσεις Ποιότητας**				
	Υψηλή	Καλή	Μέση	Φτωχή	Κακή
N-NO3 mg/l	<0,07	0,07-0,34	0,34-1,13	1,13-2,26	>2,26
N-NH4 mg/l	<0,023	0,023-0,077	0,077-0,39	0,39-1,17	>1,17
P μg/l	<70	70-150	150-300	300-600	>600

Παρατηρείται πως οι κλάσεις που έχουν καταρτιστεί για την Ιταλία μοιάζουν πολύ με την κατάταξη για τα ελληνικά ποτάμια από τους Skoulikidis et al. (2006), ενώ οι αντίστοιχες

για τη Γαλλία παραπέμπουν σε λιγότερο αυστηρά όρια. Συμπερασματικά, η θέσπιση ορίων συγκεντρώσεων θρεπτικών, αν και όχι ολοκληρωμένη μέχρι σήμερα, είναι αναγκαία για τη λήψη και αξιολόγηση μέτρων αποκατάστασης στην Ευρώπη. Παρόλο που οι διάφορες μεθοδολογίες που ακολουθούνται πάντα θα επιδέχονται βελτιώσεων και επικαιροποιήσεων με νέα πρωτογενή δεδομένα πεδίου, τα αποτελέσματα της μέχρι τώρα προσπάθειας δύναται να αποτελέσουν τις συνθήκες αναφοράς (στόχους) για ερευνητικές εργασίες όπως είναι και η παρούσα διατριβή, που στοχεύει στη μείωση της ρύπανσης των υδάτων από ενώσεις θρεπτικών.

2.2 Διεθνείς δράσεις για τον περιορισμό της ρύπανσης των υδάτων από θρεπτικά

Εκτός από τις περιβαλλοντικές Οδηγίες που έχουν γενική ισχύ σε όλα τα κράτη-μέλη, ανάμεσα σε Ευρωπαϊκές χώρες που μοιράζονται κοινές θάλασσες έχουν αναπτυχθεί οργανισμοί και έχουν υπογραφεί συμβάσεις που έχουν θεσπίσει κανόνες και που αναλαμβάνουν δράσεις για τη συνεχή παρακολούθηση και προστασία του υδάτινου περιβάλλοντος, μεταξύ άλλων, και από εισροές θρεπτικών στοιχείων. Ακόμα, η Γενική Διεύθυνση Περιβάλλοντος της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (DG Environment) σε συνεργασία με άλλους Ευρωπαϊκούς φορείς έχουν αναλάβει κοινές δράσεις με σκοπό την ανάπτυξη τεχνολογιών και την παραγωγή γνώσης για την αποτελεσματικότερη εφαρμογή της Ευρωπαϊκής Πολιτικής ενάντια στη ρύπανση των υδάτων από θρεπτικά. Πλήθος ερευνητικών προγραμμάτων και επιστημονικών δράσεων, έχουν πραγματοποιηθεί μετά από χρηματοδότηση της ΕΕ στο επιστημονικό αυτό αντικείμενο. Ενδεικτικά αναφέρονται το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα INCA (Integrated Nitrogen in CAtchments), που οδήγησε στην ανάπτυξη ενός απλοποιημένου εργαλείου-μοντέλου προσομοίωσης του κύκλου του N συμπεριλαμβανομένων και των πιέσεων ανθρωπογενούς προέλευσης (INCA, 2004), το πρόγραμμα 'Euroharp' (Euroharp, 2000), που σύγκρινε υπάρχοντα μοντέλα ως προς την ικανότητα προσομοίωσης των διαδικασιών που διέπουν τις απώλειες θρεπτικών σε κλίμακα λεκάνης απορροής, η δράση COST 832 (COST Action 832, 1997) με τίτλο: 'Ποσοτικοποίηση της Συνεισφοράς της Γεωργίας στον Ευτροφισμό', και η δράση COST 869 (COST Action 869, 2005) με τίτλο: 'Πρακτικές Περιορισμού των Θρεπτικών στα Επιφανειακά και Υπόγεια Νερά'. Κρίνεται σκόπιμο, εκτός από αναφορά σε ανωτέρω συνεργασίες να γίνει και μία σύντομη αναφορά στους οργανισμούς των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής (ΗΠΑ) και στις δράσεις που αυτοί αναλαμβάνουν. Ειδικότερα, το ερευνητικό πρόγραμμα Euroharp και η Ευρωπαϊκή δράση COST 869 αναπτύσσονται λεπτομερέστερα στη συνέχεια μιας και συνδέουν το Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων του ΕΜΠ με θέματα ποιότητας υδάτων σχετικά με τα θρεπτικά στοιχεία του N και του P.

2.2.1 Συνεργασίες και Οργανισμοί

Οι αρχές 15 χωρών από τη Σκανδιναβική μέχρι και την Ιβηρική χερσόνησο έχουν υπογράψει τη συνθήκη OSPAR για την προστασία του παράκτιου περιβάλλοντος του Βορειοανατολικού Ατλαντικού (Ospar, 2003), που προέκυψε ύστερα από συνδυασμό και συνεχή επικαιροποίηση δύο παλιότερων συνθηκών, του Όσλο και του Παρισιού. Μία επιστημονική ομάδα από τις χώρες αυτές συνέταξε τις 9 Οδηγίες HARP για την ποσοτικοποίηση των σημειακών και μη σημειακών απωλειών θρεπτικών στα επιφανειακά και παράκτια ύδατα (Borgvang and Selvik, 2000). Οι Οδηγίες HARP παρέχουν επιστημονικές μεθοδολογίες για μια εναρμονισμένη και αξιόπιστη διαδικασία ποσοτικοποίησης των απωλειών αυτών, από όλες τις χώρες. Η πιο πρόσφατη αναθεώρηση και επικαιροποίησή τους έλαβε χώρα το 2004, όμως παρόλο που σε ότι αφορά τις σημειακές φορτίσεις έχει υπάρξει πλήρης συμφωνία για την ισχύ των μεθοδολογιών, δεν κατέστη δυνατή η εύρεση ανάλογων, κοινά αποδεκτών και κατάλληλων μεθοδολογιών για την εκτίμηση των απωλειών θρεπτικών από τις μη σημειακές πηγές. Η 6η Οδηγία HARP που αφορά ακριβώς σε αυτές έχει συνταχθεί, αλλά χρησιμοποιείται προς το παρόν σε δοκιμαστική φάση (Ospar, 2007).

Άλλη σπουδαία ευρωπαϊκή συνεργασία είναι αυτή που γίνεται μεταξύ των χωρών που βρέχονται από τη Βαλτική θάλασσα. Ο οργανισμός HELCOM (Helsinki Commission) βασίζει τις εργασίες και δραστηριότητές του στην αναθεωρημένη συνθήκη του Helsinki (Helcom, 2004), στης οποίας τα άρθρα περιγράφονται όλες οι ενέργειες που οι εμπλεκόμενες χώρες οφείλουν να ακολουθούν ώστε να προστατέψουν τη Βαλτική θάλασσα από οποιαδήποτε μορφή ρύπανσης. Ο ευτροφισμός αποτελεί προτεραιότητα με ιδιαίτερη έμφαση στην αγροτική συνεισφορά και στα μέτρα μείωσής της, μιας και τον τελευταίο αιώνα η κλειστή αυτή θάλασσα έχει μετατραπεί σε ευτροφική. Τα επιτεύγματα από τη δράση του οργανισμού είναι αρκετά ικανοποιητικά τα τελευταία χρόνια όσον αφορά τις ποσότητες θρεπτικών που καταλήγουν στη θάλασσα και σε αυτό συνέβαλε και η επαρκής και αυστηρή παρακολούθηση της ποιότητας των παράκτιων υδάτων στα πλαίσια ενός ιδιαίτερου προγράμματος δράσης (HELCOM-COMBINE), που ακολουθούν οι εμπλεκόμενες χώρες (http://www.helcom.fi/).

Ανάλογες δράσεις για τη Μεσόγειο θάλασσα γίνονται με βάση το σχέδιο δράσης για τη Μεσόγειο (Mediterannean Action Plan – MAP), που υπογράφηκε στη Βαρκελώνη το 1976 στα πλαίσια του περιβαλλοντικού προγράμματος του οργανισμού των Ηνωμένων Εθνών UNEP (http://www.unepmap.org/). Δεκαέξι χώρες αρχικά, και σήμερα πλέον 21 χώρες που βρέχονται από τη Μεσόγειο, έχουν υπογράψει τη συνθήκη συνεργασίας για την προστασία των θαλάσσιων υδάτων από διάφορους τύπους ρύπων. Η παρακολούθηση όσον αφορά τα

θρεπτικά στοιχεία που είναι υπεύθυνα για τον ευτροφισμό εντάσσεται στο νεότερο πρόγραμμα-σχέδιο MEDPOL, που περιλαμβάνει και μέτρα για τον έλεγχο της ρύπανσης από πηγές ανθρωπογενούς προέλευσης στα εδάφη των χωρών της Μεσογείου. Το στρατηγικό σχέδιο δράσης (UNEP/Map/Medpol, 1999), που εντάσσεται στο ανωτέρω πρόγραμμα, περιλαμβάνει κατηγοριοποίηση των ρύπων της Μεσογείου και δράσεις με ανθρώπινες παρεμβάσεις και μέτρα μείωσης της ρύπανσης σύμφωνα με ένα καλά σχεδιασμένο χρονοδιάγραμμα με έτος-στόχο το 2025. Αξίζει πάντως να σημειωθεί ότι η Μεσόγειος είναι θάλασσα ολιγοτροφική, δεν εμφανίζονται δηλαδή υψηλές συγκεντρώσεις N και P παρά μόνο σε λίγες περιπτώσεις και τοπικά.

Ίσως την πιο ολοκληρωμένη προσπάθεια παγκοσμίως για την αντιμετώπιση της ρύπανσης των υδάτων από θρεπτικά αποτελούν οι δράσεις και οι θεσμοθετημένοι κανόνες της Υπηρεσίας Προστασίας του Περιβάλλοντος των ΗΠΑ (Environmental Protection Agency - EPA). Η Υπηρεσία αυτή σε συνεργασία με την Υπηρεσία Διατήρησης Φυσικών Πόρων (Natural Resources Conservation Service - NRCS) του Υπουργείου Γεωργίας των ΗΠΑ (United States Department of Agriculture - USDA) είναι υπεύθυνη για τον έλεγχο των απωλειών θρεπτικών από διάχυτες πηγές στα περίπου 130×10^6 ha αγροτικής γης της χώρας. Στην πολύ μεγάλη τεχνική έκθεση που ολοκληρώθηκε το 2003 περιλαμβάνονται δεκάδες υποχρεωτικά και προαιρετικά μέτρα ή κανόνες γεωργικής πρακτικής συνοδευόμενα από υπολογισμό κόστους για το καθένα (EPA, 2003). Σημειώνεται ότι στις ΗΠΑ οι εν λόγω συνιστώμενοι κανόνες διαφοροποιούνται ανάμεσα στις διαφορετικές Πολιτείες λόγω των τοπικών συνθηκών. Η μεγαλύτερη καινοτομία της Αμερικής στην αντιμετώπιση της ρύπανσης από θρεπτικά είναι ωστόσο η θέσπιση του *Ολικού Μέγιστου Ημερήσιου Φορτίου* (Total Maximum Daily Load - TMDL), που μπορεί να δέχεται ένα υδάτινο σώμα χωρίς να κινδυνεύει να αποκλίνει από τα πρότυπα καλής οικολογικής και χημικής κατάστασης. Για τον καθορισμό του ημερήσιου φορτίου προσμετρούνται οι σημειακές και οι μη-σημειακές πηγές ρύπανσης που συνεισφέρουν με θρεπτικά στα διάφορα υδάτινα σώματα, η εποχιακή διακύμανσή τους, ενώ λαμβάνεται υπόψη η 'χωρητικότητα' των σωμάτων. Χρησιμοποιούνται επιστημονικές μεθοδολογίες από απλά ισοζύγια έως σύγχρονα μοντέλα που διατίθενται ως πακέτα λογισμικού. Την ευθύνη για τον καθορισμό των ανώτατων αυτών ορίων φορτίου σε ημερήσια βάση έχει η κάθε Πολιτεία για όλα τα υδάτινα σώματα που βρίσκονται στα όριά της με τελικό στόχο της προσπάθειας αυτής την υιοθέτηση ολοκληρωμένων σχεδίων σε κλίμακα λεκάνης απορροής. Λεπτομέρειες για αυτή την καινοτόμο και ιδιαίτερα φιλόδοξη δράση διατίθενται στη σχετική ιστοσελίδα: http://www.epa.gov/owow/tmdl.

2.2.2 Το ευρωπαϊκό πρόγραμμα Euroharp

Το πρόγραμμα *Euroharp* (Euroharp, 2000) αποτέλεσε μια από τις δράσεις στρατηγικού σχεδιασμού και ενοποιημένων διαχειριστικών μεθοδολογιών/εργαλείων σε κλίμακα λεκάνης απορροής, στον τομέα της αειφόρου διαχείρισης και ποιότητας των υδάτων (sustainable management and quality of water), που καθορίστηκαν από το 5° Πρόγραμμα-Πλαίσιο της ΕΕ: 'Ενέργεια, Περιβάλλον και Αειφόρος Ανάπτυξη'. Ο πλήρης τίτλος του ερευνητικού αυτού προγράμματος ήταν: 'Προς Ευρωπαϊκές Εναρμονισμένες Διαδικασίες για την Ποσοτικοποίηση των Απωλειών Θρεπτικών από Μη Σημειακές Πηγές Ρύπανσης'. Δημιουργήθηκε σε ανταπόκριση Περιβαλλοντικών Οδηγιών της ΕΕ, όπως η Οδηγία των νιτρικών 91/676/ΕΕ και η Οδηγία-Πλαίσιο για τα νερά 2000/60/ΕΕ για να διευκολύνει την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της ανθρωπογενούς δραστηριότητας σε λεκάνες απορροής της Ευρώπης. Το έτος αφετηρία του ήταν το 2000, ενώ ολοκληρώθηκε το 2006 με την επίτευξη των επιμέρους στόχων του, που ήταν οι εξής:

- Η αξιολόγηση και σύγκριση εννέα διαθέσιμων μοντέλων στην ικανότητα ποσοτικοποίησης των απωλειών θρεπτικών (N, P) από μη σημειακές πηγές σε κλίμακα λεκάνης απορροής, ώστε να μπορεί ο τελικός χρήστης να επιλέξει το καταλληλότερο ανάλογα με τα διαθέσιμα δεδομένα, τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής και τους διαθέσιμους χρονικούς και οικονομικούς πόρους.
- Η δημιουργία μιας ηλεκτρονικής 'Εργαλειοθήκης' (Toolbox), απαραίτητης για την ορθολογική και αξιόπιστη λήψη αποφάσεων, μέσω της οποίας θα μπορεί να γίνεται άμεσα και αξιόπιστα η ταυτοποίηση των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων της χρήσης καθενός από τα εννέα μοντέλα (αναφέρονται και ως 'εργαλεία') κάτω από τις ιδιαίτερες συνθήκες της κάθε περιοχής.

Οι χώρες που συμμετείχαν ενεργά στην υλοποίηση των στόχων του προγράμματος ήταν 17, περιλαμβάνοντας όλα σχεδόν τα κράτη-μέλη της ΕΕ και εκπροσωπήθηκαν κάθε μία από έναν ή περισσότερους φορείς (πανεπιστήμια, τεχνολογικά ιδρύματα, ερευνητικά ινστιτούτα κλπ). Η Ελλάδα εκπροσωπήθηκε από το Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων του ΕΜΠ το οποίο ήταν επιφορτισμένο να προσομοιώσει τον κύκλο του νερού και των θρεπτικών στοιχείων σε δύο Σκανδιναβικές λεκάνες απορροής με χρήση του ευρέως διαδεδομένου υδρολογικού μοντέλου *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), αμερικανικής προέλευσης (Arnold et al., 1998). Η υπολεκάνη Αλή-Εφέντη της ευρύτερης λεκάνης απορροής του ποταμού Πηνειού Θεσσαλίας ήταν από ελληνικής πλευράς μία από τις συνολικά 17 λεκάνες απορροής ποταμού που επιλέχθηκαν στο πρόγραμμα. Η επίγνωση της

σπουδαιότητας της αντιμετώπισης των απωλειών θρεπτικών σε διασυνοριακό επίπεδο αποτυπώθηκε στο Euroharp από την συμπερίληψη μιας διασυνοριακής λεκάνης, στα σύνορα Ολλανδίας - Γερμανίας.

Κατά το παρελθόν, οι διάφορες στρατηγικές που εφαρμόστηκαν από την Κοινότητα σε πολλές περιπτώσεις υπήρξαν πολύ πιο αποτελεσματικές στον περιορισμό της ρύπανσης θρεπτικών από σημειακές πηγές παρά των απωλειών θρεπτικών από διάχυση (μη σημειακές πηγές). Το γεγονός αυτό αποδίδεται κυρίως στην αδυναμία κατανόησης των επιδόσεων των διαφορετικών 'εργαλείων' ποσοτικοποίησης, αλλά και στην περιορισμένη δυνατότητα αξιοποίησης των διαθέσιμων δεδομένων πεδίου των διαφόρων λεκανών απορροής. Το Euroharp, συνέβαλλε στην αποσαφήνιση και βελτίωση των μεθόδων ποσοτικοποίησης των απωλειών θρεπτικών από μη σημειακές πηγές μέσω διαφόρων 'υδρολογικών οδών' (hydrological pathways), προς τους υδάτινους αποδέκτες. Κατ' επέκταση συνέβαλε στην αποτελεσματικότητα των περιοριστικών πρακτικών και στη διευκόλυνση του έργου όσων τις εφαρμόζουν.

2.2.3 Η Ευρωπαϊκή δράση COST 869

Οι Ευρωπαϊκές δράσεις COST (Cooperation in Science and Technology) αποτελούν ένα πλαίσιο συνεργασίας στην επιστήμη και τεχνολογία μεταξύ Ευρωπαίων επιστημόνων που εργάζονται σε πανεπιστήμια, ερευνητικά ινστιτούτα ή/και τη βιομηχανία και γενικότερα τον ιδιωτικό τομέα (COST, 2010). Οι δράσεις αυτές επιτρέπουν το συντονισμό σε Ευρωπαϊκό επίπεδο, μεμονωμένων εθνικών ερευνητικών έργων κάθε κράτους-μέλους. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρηματοδότηση του ερευνητή για συναντήσεις, με στόχο την ανταλλαγή γνώσης και εμπειρίας και την ενημέρωση προς και από τους ομολόγους του για τις τρέχουσες επιστημονικές εξελίξεις και ευρήματα στον τομέα του. Αν και οι δράσεις δεν χρηματοδοτούν την έρευνα αυτή καθεαυτή, κατά την έναρξή τους καθορίζονται ρητά οι στόχοι και τα παραδοτέα μετά το πέρας της πενταετούς συνήθως διάρκειάς τους. Προγράμματα, ερευνητικές πρωτοβουλίες και γενικότερα ακαδημαϊκές δράσεις σε εθνικό επίπεδο ευνοούνται μέσω του εμπλουτισμού τους με νέα δεδομένα και επιτυγχάνουν να πορεύονται προς τις πιο σύγχρονες κατευθύνσεις με περιορισμό πιθανών αδυναμιών και ελλείψεων. Έτσι, ο βασικός στόχος των δράσεων COST διαμορφώνεται στο να διασφαλίζεται ότι η Ευρώπη κατέχει μία πολύ ισχυρή θέση στους τομείς της επιστημονικής και τεχνολογικής έρευνας και πορεύεται ως μία συμπαγής, αξιόπιστη και δημιουργική ερευνητική δύναμη.

Η δράση COST 869 (COST 869, 2005) ξεκίνησε επίσημα το έτος 2006 με χρονικό ορίζοντα πενταετίας. Ανήκει στον επιστημονικό τομέα 'Τρόφιμα και Γεωργία' των δράσεων COST και έχει τίτλο: 'Πρακτικές Περιορισμού των Θρεπτικών Στοιχείων στα Επιφανειακά

και Υπόγεια Νερά'. Στη δράση συμμετέχουν επιστήμονες 29 χωρών, οι οποίοι εργάζονται στο ερευνητικό αντικείμενο του προσδιορισμού και περιορισμού των απωλειών N και P προς τους υδάτινους αποδέκτες. Όπως αναφέρεται στο *Μνημόνιο Κατανόησης* (Memorandum of Understanding – MoU) της δράσης (COST 869, 2005), ο βασικός στόχος για τη δημιουργία της ήταν η επιστημονική αποτίμηση της καταλληλότητας και της σχέσης μεταξύ οικονομικότητας-αποτελεσματικότητας διαφόρων μέτρων-δράσεων που εφαρμόζονται για τη μείωση των απωλειών θρεπτικών στοιχείων στα επιφανειακά και υπόγεια υδάτινα σώματα της Ευρώπης. Η αποτίμηση γίνεται σε κλίμακα λεκάνης απορροής με γνώμονα τις ιδιαιτερότητες των διαφόρων περιοχών όσον αφορά τις τοπικές κλιματικές, οικολογικές και γεωγραφικές συνθήκες. Με δεδομένο τον κίνδυνο που υφίστανται τα ευρωπαϊκά ύδατα από το φαινόμενο του ευτροφισμού καθορίστηκαν επιμέρους στόχοι που συνοψίζονται ως εξής:

- Ανάπτυξη μεθοδολογιών για την εύκολη αναγνώριση των ευαίσθητων στις απώλειες θρεπτικών γεωγραφικών περιοχών εντός λεκάνης απορροής και των υδρολογικών οδών μεταφοράς τους.
- Διερεύνηση της χρονικής μεταβλητότητας των απωλειών θρεπτικών και της σημασίας αυτής στην προσπάθεια για τον περιορισμό τους.
- Επιλογή κατάλληλων γεωγραφικών περιοχών για εφαρμογή κατασκευαστικών και μη κατασκευαστικών μέτρων μείωσης των απωλειών θρεπτικών με βάση περιβαλλοντικούς, κοινωνικούς και οικονομικούς παράγοντες.
- Εκτίμηση της αποτελεσματικότητας διαφόρων μέτρων μέσω της μελέτης περιοχών όπου αυτά έχουν εφαρμοστεί και τα αποτελέσματα έχουν ήδη καταγραφεί στα υδάτινα σώματα και συνολική αποτίμηση μεγάλων προγραμμάτων εφαρμογής μέτρων περιορισμού με συμπεράσματα για τις δυνατότητες βελτίωσής τους.

Τα μέτρα μείωσης που συστηματικά αναφέρονται στους ανωτέρω στόχους ενσωματώνουν σε πολύ μεγάλο ποσοστό τους ΚΟΓΠ ή τις ΔΠ, που έχουν αναφερθεί προηγούμενα. Οι περιοχές που εξετάζονται ως προς τα αποτελέσματα που καταγράφηκαν μετά από εφαρμογή μέτρων είναι περιορισμένες, μιας και η απόκριση του φυσικού συστήματος σε τέτοιου είδους μεταβολές είναι μακροχρόνια, ενώ αξίζει να αναφερθεί πως στην Ελλάδα δεν έχουμε ακόμα επίσημα αποτελέσματα από τη Θεσσαλία όπου πιλοτικά άρχισαν να εφαρμόζονται τέτοια μέτρα.

Η επιστημονική ομάδα που απαρτίζει τη δράση COST 869 χωρίστηκε σε 4 υπο-ομάδες εργασίας κάθε μία επιφορτισμένη με ενασχόληση με ένα επιμέρους αντικείμενο που σχεδόν ταυτίζεται με κάθε έναν από τους επιμέρους στόχους όπως αναπτύχθηκαν παραπάνω. Το Εργαστήριο Υδρολογίας συμμετέχει στην 1^{η} ομάδα εργασίας που έχει ως αντικείμενο

ενασχόλησης την αναγνώριση των πιο ευαίσθητων γεωγραφικών τμημάτων εντός λεκάνης απορροής στις απώλειες θρεπτικών στοιχείων. Η σύνδεση ενός ερευνητή με μία ομάδα εργασίας δεν αποτελεί περιορισμό για την ανάμιξή του και στα υπόλοιπα αντικείμενα, αντίθετα, η ανταλλαγή απόψεων και επιστημονικής γνώσης γίνεται σε ολόκληρο το ευρύ φάσμα αντικειμένων της δράσης.

Ο πρώτος και βασικός, όπως αναφέρθηκε, στόχος της δράσης είναι η κατάρτιση μιας επίσημης λίστας με κατασκευαστικά και μη κατασκευαστικά μέτρα που έχουν ήδη υιοθετηθεί και εφαρμοστεί στις συμμετέχουσες χώρες για την αντιμετώπιση του περιβαλλοντικού προβλήματος του ευτροφισμού στα υδάτινα σώματα, προερχομένου από τις αυξημένες συγκεντρώσεις N και P. Σχεδόν με την έλευση του έτους 2009 η λίστα αυτή ήταν ήδη πολύ μεγάλη, επικαιροποιείται συνεχώς και σήμερα περιλαμβάνει πάνω από 70 διαφορετικά μέτρα τα οποία ομαδοποιούνται στις κατηγορίες παρεμβάσεων σχετικά με:

- Τη διαχείριση εφαρμογής θρεπτικών στον αγρό,
- τη διαχείριση των καλλιεργειών,
- τη διαχείριση των εδαφικών πόρων
- τη χρήση του νερού στη γεωργία,
- τις αλλαγές στις χρήσεις γης,
- τις υποδομές της αγροτικής γης,
- άμεσες παρεμβάσεις στους επιφανειακούς υδάτινους αποδέκτες.

Κάθε κατηγορία χωρίζεται σε υποκατηγορίες και περιλαμβάνει ακόμα και ιδιαίτερα μέτρα που έχουν εφαρμοστεί, έστω και σε μόλις μία μεμονωμένη περιοχή. Η λίστα αυτή αποτελεί μια ανεκτίμητης αξίας βάση δεδομένων που παρέχει σημαντική πληροφορία στους επιστήμονες που ασχολούνται με τη διαχείριση της αγροτικής γης και καλούνται να κατανοήσουν τη φύση των μέτρων-δράσεων και να επιλέξουν τα πιο κατάλληλα για εφαρμογή σε συγκεκριμένη περιοχή. Είναι επίσης δυνατή η τροποποίηση των υπαρχόντων μέτρων και η προσαρμογή τους στις τοπικές συνθήκες της εκάστοτε περιοχής μελέτης. Όπως θα παρουσιαστεί στη συνέχεια, αυτό έχει πραγματοποιηθεί στην παρούσα διατριβή με σκοπό την εύρεση και υιοθέτηση του συγκεκριμένου τύπου και τόπου εφαρμογής διαφόρων ΔΠ στην αγροτική γη λεκάνης απορροής. Η διατριβή επίσης περιλαμβάνει επιστημονικά ευρήματα που συμβάλλουν στη μετάδοση γνώσης μεταξύ Ευρωπαίων επιστημόνων μέσω της δράσης COST 869.

2.3 Η περιβαλλοντική κατάσταση και παρακολούθηση των υδάτινων σωμάτων στην Ελλάδα

2.3.1 Φορείς διαχείρισης των υδατικών πόρων και καταγραφής της ποιότητας των επιφανειακών υδάτων

Το κάθε κράτος-μέλος της ΕΕ διαθέτει φορείς διαχείρισης των εθνικών του υδατικών πόρων επιφορτισμένους με την εφαρμογή της Ευρωπαϊκής Νομοθεσίας και της εναρμόνισης με τις Ευρωπαϊκές Οδηγίες. Επιφορτισμένο με την αρμοδιότητα εφαρμογής της Οδηγίας-Πλαίσιο 2000/60 στη χώρα μας ορίστηκε επίσημα το ΥΠΕΧΩΔΕ, νυν ΥΠΕΚΑ και ειδικότερα η ΚΥΥ, νυν ΕΓΥ και οι Διευθύνσεις Υδάτων των Περιφερειών (ΕΜΠ, 2008). Η ελληνική νομοθεσία εναρμονίστηκε με την Κοινοτική Οδηγία 2000/60 με την έκδοση του νόμου 3199 (ΦΕΚ 280^{A}/9.12.2003). Στο άρθρο 4 του εν λόγω ΦΕΚ συστάθηκε η ΚΥΥ με αναλυτική αναφορά της πληθώρας των αρμοδιοτήτων της. Συνοπτικά, στις βασικές αρμοδιότητες της Υπηρεσίας ανήκουν: η συστηματική παρακολούθηση των εθνικών υδάτων, η διαχείριση των ιστορικών ηλεκτρονικών υδρομετεωρολογικών δεδομένων, ο συντονισμός των διαφόρων υπηρεσιών και κρατικών φορέων σχετικών με τη διαχείριση των υδατικών πόρων, η κατάρτιση εθνικών προγραμμάτων, αλλά και η εισήγηση νομοθετικών μέτρων για τη βελτίωση της ποσοτικής και ποιοτικής κατάστασης του 'Εθνικού Υδατικού Πλούτου'. Η ΚΥΥ υποχρεούται ακόμα να καταρτίζει ετήσια έκθεση προόδου με αναλυτική περιγραφή της υφιστάμενης κατάστασης των εθνικών υδάτων και τα βήματα εναρμόνισης με την Κοινοτική Οδηγία (ΦΕΚ 280^{A}/9.12.2003).

Οι ανωτέρω αρμοδιότητες ενισχύθηκαν στα πλαίσια μεταγενέστερης αναπροσαρμογής της οργάνωσης της ΚΥΥ τον Δεκέμβριο του 2005 με βάση νέα Υπουργική Απόφαση 49139/24-11-05 ΚΥΑ (ΦΕΚ 1695^{B}/2.12.2005). Με την Υπουργική Απόφαση 47630/16-11-05 ΚΥΑ ορίστηκε επιπλέον η διάρθρωση της Υπηρεσίας Υδάτων της Περιφέρειας (ΦΕΚ 1688^{B}/1.12.2005). Με βάση αυτήν την απόφαση η διαχείριση των υδάτων κάθε λεκάνης απορροής είναι αρμοδιότητα της Υπηρεσίας της Περιφέρειας στης οποίας τα διοικητικά όρια εκτείνεται. Υπενθυμίζεται πως η χώρα έχει χωρισθεί σε 14 Υδατικά Διαμερίσματα με το Νόμο 1739/1987 (ΦΕΚ 201^{A}/19-20.11.1987), αν και έχουν διατυπωθεί και προτάσεις για διαχωρισμό σε λιγότερα με σκοπό την αποτελεσματικότερη διαχείριση των υδατικών πόρων (Baltas, 2008).

Το βασικό πρόβλημα που αντιμετωπίζει η Ελλάδα ως προς την άσκηση της Υδατικής Πολιτικής είναι το γεγονός πως, τα προηγούμενα χρόνια, οι αρμοδιότητες που προαναφέρθηκαν ήταν στην πράξη χωρισμένες σε πολύ περισσότερους φορείς και ορισμένες φορές ασαφώς καθορισμένες (Mimikou, 2005). Π.χ. με την παρακολούθηση της ποιότητας

των εσωτερικών επιφανειακών υδάτων στην Ελλάδα εμπλέκονται δύο υπουργεία, το Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων (ΥΠΑΑΤ), πρώην Υπουργείο Γεωργίας (ΥΠΓΕ) και το ΥΠΕΚΑ, δημόσιες υπηρεσίες όπως υπηρεσίες ύδρευσης και αποχέτευσης και τέλος, ερευνητικά κέντρα και πανεπιστήμια, που συλλέγουν όμως δεδομένα για περιορισμένης χρονικής διάρκειας διαστήματα και σε συγκεκριμένες περιοχές ενδιαφέροντος για δική τους χρήση.

Το ΥΠΓΕ, σύμφωνα με Τεχνική Έκθεση του 2001 (ΥΠΓΕ, 2001), διέθετε 935 σταθμούς σε πολλά ποτάμια και λίμνες καλύπτοντας και τα 14 Υδατικά Διαμερίσματα της χώρας. Ανάμεσα στις παραμέτρους που μετρούνταν περιλαμβάνονται και διάφορες μορφές N και P με μηνιαία συχνότητα δειγματοληψίας. Η ΚΥΥ του ΥΠΕΧΩΔΕ εγκαθίδρυσε επίσης ένα δίκτυο παρακολούθησης το 1986, αλλά η έλλειψη οικονομικών πόρων καθυστέρησε την έναρξη της λειτουργίας του σχεδόν κατά μία δεκαετία (Tsouni et al., 2002). Η συχνότητα δειγματοληψίας είναι επίσης μηνιαία. Οι μετρήσεις των δικτύων των δύο Υπουργείων αποτελούν σήμερα τη σημαντικότερη βάση δεδομένων φυσικοχημικών και βιολογικών παραμέτρων των εσωτερικών επιφανειακών υδάτων της χώρας. Και αυτή η βάση όμως δεν κρίνεται επαρκής με βασικές αιτίες τη μικρή πυκνότητα του δικτύου, ιδιαίτερα στην Ανατολική Ελλάδα, και την κακή και διακοπτόμενη λειτουργία του, που εν τέλει παρέχει χρονικά ασυνεχή δεδομένα. Χαρακτηριστικό είναι ότι τα δεδομένα του ΥΠΓΕ είναι εξαιρετικά ελλιπή, ιδιαίτερα σε ότι αφορά τις αζωτούχες ενώσεις στα ποτάμια. Επίσης, το πρόγραμμα παρακολούθησης του ΥΠΕΧΩΔΕ διέκοψε τη λειτουργία του το 2000 με επανέναρξη το 2005 παρέχοντας ουσιαστικά λιγότερο από μια πενταετία συνεχών μηνιαίων μετρήσεων στα ελληνικά ποτάμια, στις εκβολές τους και στις λίμνες της χώρας.

2.3.2 Περιβαλλοντική κατάσταση των ελληνικών υδάτινων σωμάτων και εθνικές δράσεις

Παρά τα προβλήματα που προαναφέρθηκαν, μια γενική θεώρηση της ποιότητας των ελληνικών εσωτερικών επιφανειακών υδάτων είναι εφικτή με τα υπάρχοντα δεδομένα. Μία πρώτη γενική προσπάθεια στις αρχές της δεκαετίας, που βασίστηκε στην πρώτη ομάδα συλλεγόμενων δεδομένων της δεκαετίας του ’90, έδειξε ότι η οικολογική κατάσταση των υδάτινων σωμάτων είναι αρκετά καλή με περίπου το 80% των ποταμών, το 60% των λιμνών, το 66% των μεταβατικών και το 79% των τεχνητών σωμάτων να είναι πρακτικά πλήρως αδιατάρακτα ή σε καλή περιβαλλοντική κατάσταση (Tsouni et al., 2002). Τα ποσοστά αυτά θεωρείται ότι υποεκτιμούν την πραγματικότητα δεδομένου ότι στο συνολικό αριθμό των υδάτινων σωμάτων δεν είχαν συμπεριληφθεί μικρότερα και πιο απομακρυσμένα υδάτινα σώματα, που θεωρείται απίθανο να αποκλίνουν από την κατάσταση αναφοράς. Το ποσοστό

που αναφέρεται στις φυσικές λίμνες είναι σχετικά μικρό, πράγμα που οφείλεται στο γεγονός πως οι λίμνες είναι συχνά αποδέκτες αποβλήτων και γεωργικών απορροών, ενώ και οι διαδικασίες φυσικής αποκατάστασης είναι πολύ αργές.

Με βάση την επίσημη έκθεση της χώρας μας για το άρθρο 5 της Κοινοτικής Οδηγίας (Directive 2000/60/EC - Article 5, 2006), τα τελευταία χρόνια οι τάσεις που επικράτησαν στην Ελλάδα ήταν τάσεις αργής υποβάθμισης της ποιότητας των υδάτων και σε γενικές γραμμές τα ελληνικά υδάτινα σώματα κρίνονται ακόμα σήμερα αποδεκτής ποιοτικής κατάστασης. Οι ποταμοί Πηνειός Θεσσαλίας, Αξιός, Στρυμόνας και Έβρος, αν και χαρακτηρίζονται με αποδεκτά όρια συγκεντρώσεων, χρειάζονται περαιτέρω διερεύνηση, ενώ ως ευαίσθητοι αποδέκτες έχουν χαρακτηριστεί οι λίμνες Βιστωνίδα, Βόλβη, Λαγκαδά, Μητρικού και Πετρών. Πάντως, το συμπέρασμα αυτό βασίζεται περισσότερο στις περιορισμένες πιέσεις λόγω μικρών βιομηχανικών δραστηριοτήτων στη χώρα, και μάλιστα με πολύ μικρή εκπομπή τοξικών φορτίων, καθώς και στη συμμόρφωση όλων των Δήμων της χώρας με τη νομοθεσία για την επεξεργασία των αστικών αποβλήτων πριν αυτά οδηγηθούν σε υδάτινο αποδέκτη και πολύ λιγότερο στη συστηματική παρακολούθηση των υδάτων.

Από την άλλη μεριά, η Ελλάδα ως γεωργική χώρα διαθέτει διάσπαρτες καλλιεργούμενες εκτάσεις με εντατική εκμετάλλευση, όπου οι υπερβολικές λιπάνσεις για την επίτευξη ικανοποιητικών αποδόσεων έχουν προκαλέσει τοπικά προβλήματα στα επιφανειακά και υπόγεια νερά αποτελώντας σημαντική αιτία ρύπανσης με δύσκολη αντιμετώπιση, εν αντιθέσει με την αξιόλογη πρόοδο που παρουσιάζεται στην αντιμετώπιση της ρύπανσης από σημειακές πηγές (ΕΜΠ, 2008). Οι ελληνικές ΕΖ ρύπανσης από $NO3^-$, που έχουν καθοριστεί, καταδεικνύουν κυρίως την πεδιάδα της Θεσσαλίας, περιοχές της Κεντρικής και Ανατολικής Μακεδονίας και την περιοχή της Κωπαΐδας του νομού Βοιωτίας ως πιο επιβαρυμένες. Δευτερευόντως, περιλαμβάνονται και η πεδιάδα Άρτας-Πρέβεζας, το Αργολικό πεδίο και ο ποταμός Πηνειός του Νομού Ηλείας (Directive 2000/60/EC - Article 5, 2006). Σύμφωνα δε με την πιο πρόσφατη Έκθεση που υποβλήθηκε στην Επιτροπή από τα κράτη-μέλη με αναφορά στην περίοδο 2004-2007, η Ελλάδα ανήκει στις περιοχές με σχετικά υψηλό ποσοστό σταθμών όπου παρατηρείται αύξηση των συγκεντρώσεων $NO3^-$ και υποβάθμιση της ποιότητας του νερού, ποσοστό που ανέρχεται συνολικά σε 41% (ΕΕΚ, 2010).

Το ΥΠΑΑΤ έχει ήδη εφαρμόσει πιλοτικά προγράμματα στο Θεσσαλικό κάμπο για την καταπολέμηση της ρύπανσης από $NO3^-$, όμως τα πρώτα αποτελέσματα δεν είναι ακόμα διαθέσιμα. Για τα προγράμματα αυτά έχει θεσπίσει ΚΟΓΠ με την Υπουργική Απόφαση 125347/568, που αποβλέπουν στη μείωση της ρύπανσης συνεκτιμώντας τις ιδιαίτερες συνθήκες που επικρατούν στις διάφορες περιοχές σύμφωνα με τις υποδείξεις της Οδηγίας των νιτρικών και στα πλαίσια της ΚΑΠ. Οι κώδικες αυτοί, σχετίζονται με την κατεργασία του εδάφους, την αμειψισπορά, τη λίπανση, τη φυτοπροστασία, τη διαχείριση της αυτοφυούς

χλωρίδας, τη διαχείριση υπολειμμάτων καλλιέργειας και άλλες ΔΠ. Ενδεικτικά αναφέρονται επιμέρους πρακτικές που συστήνονται από τους κώδικες αυτούς όπως: η εφαρμογή των βέλτιστων ποσοτήτων λιπασμάτων σύμφωνα με τα 'πρακτικά λίπανσης' που εκδίδονται από τις οικείες Διευθύνσεις Αγροτικής Ανάπτυξης-Γεωργίας και το ΕΘΙΑΓΕ, η χορήγηση των λιπασμάτων σε δόσεις, η αποφυγή λιπάνσεων σε περιοχές γειτνιάζουσες με όχθες ποταμών και λιμνών, κανάλια άρδευσης, στράγγισης, πηγάδια, και γεωτρήσεις, όπως και η αποφυγή λίπανσης όταν πνέουν δυνατοί άνεμοι.

Άλλες πρακτικές που προβλέπονται είναι η ύπαρξη λωρίδας ακαλλιέργητου εδάφους ανάμεσα στα αγροτεμάχια με σκοπό τη διατήρηση αυτοφυών φυτών στο περιθώριο της εκμετάλλευσης, αλλά και η καλλιέργεια χλωρής λίπανσης, ιδιαίτερα στα επικλινή εδάφη, με σκοπό τη μείωση της επιφανειακής απορροής και κατά συνέπεια της διάβρωσης του εδάφους και της απώλειας θρεπτικών στοιχείων προς τους επιφανειακούς υδάτινους αποδέκτες. Σχετικά με τις φορτίσεις θρεπτικών που προέρχονται από την κτηνοτροφία, συστήνονται επιπλέον συγκεκριμένες μέθοδοι και τρόποι επεξεργασίας των ζωικών αποβλήτων στις μονάδες εκτροφής πριν την απομάκρυνσή τους. Αναλυτικά τα μέτρα του ΥΠΑΑΤ περιγράφονται στο ΦΕΚ 1422/Β/2001, που αφορά στα μέτρα προστασίας κατά της ρύπανσης από $NO3^-$ στην περιοχή του Θεσσαλικού κάμπου.

2.4 Γενική αποτίμηση και προοπτική

Σύμφωνα με όλα τα ανωτέρω, διαπιστώνεται πως στην Ελλάδα βρισκόμαστε σε πρώιμο στάδιο εφαρμογής μέτρων αποκατάστασης της ρύπανσης των υδάτων από ουσίες που προκαλούν το φαινόμενο του ευτροφισμού και υποβαθμίζουν το υδάτινο περιβάλλον, ενώ μέχρι σήμερα δεν συναντώνται μέτρα πρόληψης. Τα αποσπασματικά μέτρα αποκατάστασης δεν μπορούν να κριθούν επαρκή ώστε να παρέχουν τα εχέγγυα για την καλή κατάσταση των υδάτινων σωμάτων μέχρι το έτος-στόχο 2015, ενώ η αντιμετώπιση του προβλήματος γίνεται με απουσία μιας ολοκληρωμένης επιστημονικής μεθοδολογίας προσέγγισης.

Γίνεται αντιληπτό πως η ολοκληρωμένη διαχείριση της ποιότητας των υδάτων περνά αναγκαστικά μέσα από τη γεωργική πρακτική, ενώ η εφαρμογή της Αγροτικής Πολιτικής στη χώρα με γνώμονα τον έλεγχο των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τις αγροτικές δραστηριότητες είναι αναγκαία, έχοντας παράλληλα κοινωνικές και οικονομικές προεκτάσεις. Στα πλαίσια του ελέγχου των μη σημειακών απωλειών από τον αγροτικό τομέα, ιδιαίτερη έμφαση μπορεί να δοθεί στη λήψη μέτρων μη-κατασκευαστικού χαρακτήρα. Η λεκάνη απορροής ποταμού ως χωρική κλίμακα μελέτης οριοθετεί την έκταση των διαχειριστικών δράσεων που πρέπει να αναληφθούν, ταυτόχρονα όμως, τόσο το γεγονός ότι η Ελλάδα χαρακτηρίζεται από πολυδιάσπαση του χώρου σε μικρές λεκάνες απορροής με

έντονη ανομοιογένεια φυσικών χαρακτηριστικών (χρήσεις γης, εδάφη, τοπογραφία, κλίμα), όσο και η έλλειψη ιστορικών δεδομένων των πιέσεων σε θρεπτικά και των συγκεντρώσεών τους στα υδάτινα σώματα, απαιτεί μία σύγχρονη και προσαρμοσμένη στα ελληνικά δεδομένα επιστημονική προσπάθεια προσέγγισης. Συνοψίζοντας, τα βασικά σημεία που προκύπτουν από την έως τώρα παρουσίαση έχουν ως εξής:

- Το πρόβλημα των υψηλών συγκεντρώσεων θρεπτικών και η περιβαλλοντική απειλή του ευτροφισμού των υδάτων οφείλονται κυρίως στις αγροτικές μη σημειακές πηγές ρύπανσης, των οποίων η δύσκολη διαδικασία ελέγχου πρέπει να ενταθεί.
- Η Ευρωπαϊκή Νομοθεσία δίνει μεγάλο βάρος στη διατήρηση της καλής χημικής και οικολογικής κατάστασης των υδάτινων σωμάτων και συστήνει οικονομικά εναλλακτικά μέτρα διαχείρισης της αγροτικής γης για τη μείωση των εισροών θρεπτικών σε αυτά.
- Οι διεθνείς δράσεις, συνεργασίες και οργανισμοί υιοθετούν αυτά τα μέτρα, τα βελτιώνουν συστηματικά και δίνουν έμφαση στη βελτιστοποίηση της σχέσης οικονομικότητας-αποτελεσματικότητας που προκύπτει.

Μία ολοκληρωμένη επιστημονική προσέγγιση για την περιστολή των εισροών θρεπτικών στοιχείων στα επιφανειακά υδάτινα σώματα, ιδιαίτερα της ελληνικής επικράτειας, προτείνεται επομένως ότι πρέπει να περιλαμβάνει:

- Την αξιοποίηση των ήδη υπαρχόντων, έστω και ελλιπών, δεδομένων πεδίου με επιστημονικά αξιόπιστο και αποτελεσματικό τρόπο.
- Την πρόταση οικονομικά βιώσιμων και ρεαλιστικών ως προς την εφαρμογή τους μέτρων-δράσεων για τον περιορισμό των αγροτικών διάχυτων απωλειών θρεπτικών προς τους υδάτινους φορείς.
- Την αξιοποίηση σύγχρονων επιστημονικών και τεχνολογικών μέσων για: α) την αποσαφήνιση των μηχανισμών μεταφοράς των θρεπτικών από το έδαφος στα νερά, β) τη διερεύνηση της αποτελεσματικότητας των εναλλακτικών διαχειριστικών δράσεων και γ) την υποστήριξη στη λήψη αποφάσεων σχετικά με την ολοκληρωμένη διαχείριση λεκάνης απορροής με ικανοποίηση αντικρουόμενων περιβαλλοντικών και οικονομικών στόχων.

Τα συμπεράσματα και οι διαφαινόμενες προοπτικές βρίσκονται σε πλήρη αρμονία με τον βασικό και τους επιμέρους στόχους της διατριβής που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο και που περιλαμβάνουν την ανάπτυξη μιας σύγχρονης μεθοδολογίας διαχείρισης λεκάνης απορροής για τον περιορισμό των μη σημειακών απωλειών θρεπτικών από τα αγροτικά εδάφη στους επιφανειακούς υδάτινους αποδέκετες.

3 Ποσοτικοποίηση Μη Σημειακής Ρύπανσης Επιφανειακών Υδάτων από Θρεπτικά

3.1 Γενικά

Όπως ήδη αναφέρθηκε η εντατικοποίηση της γεωργίας και της κτηνοτροφίας στις περισσότερες Ευρωπαϊκές χώρες, κατέστησε τον αγροτικό τομέα τη σημαντικότερη διάχυτη πηγή συνεισφοράς των θρεπτικών στοιχείων N και P στα υδάτινα σώματα και βασικό παράγοντα διαμόρφωσης της ποιότητάς τους. Οι υψηλές ποσότητες λιπασμάτων και κοπριάς δημιουργούν υψηλά αποθέματα ή *περισσεύματα* (surpluses) θρεπτικών στοιχείων στα εδάφη, τα οποία μεταφέρονται προς τους υδάτινους αποδέκτες (λίμνες, ποτάμια) με τα νερά της απορροής και με τα εδαφικά σωματίδια της στερεοαπορροής. Με βάση την Ευρωπαϊκή Νομοθεσία είναι επιθυμητή η επαναλαμβανόμενη και τακτική εκτίμηση των επιδράσεων του αγροτικού τομέα στην ποιότητα του νερού των υδάτινων αποδεκτών εξαιτίας των απωλειών θρεπτικών στοιχείων και του διαχωρισμού αυτών από άλλες πιέσεις σημειακού χαρακτήρα. Η δυσκολία έγκειται στο γεγονός ότι η ποσότητα των στοιχείων αυτών όταν προέρχονται από διάχυτες πηγές δεν είναι άμεσα μετρήσιμη σε αντίθεση με τις σημειακές πηγές που η μέτρησή τους είναι εύκολη και ακριβής όταν γίνεται λίγο πριν την απελευθέρωση των φορτίων στον υδάτινο αποδέκτη.

Εκτός από την επίδραση των υδρομετεωρολογικών και διαβρωτικών συνθηκών της λεκάνης απορροής, οι ποσότητες των θρεπτικών που καταλήγουν από το έδαφος στα επιφανειακά νερά, έμμεσα εξαρτώνται και από άλλες φυσικές διεργασίες που προκαλούν τη λεγόμενη *κατακράτηση* θρεπτικών στο έδαφος (soil nutrient retention). Η κατακράτηση αυτή συνδέει έμμεσα τις εφαρμοζόμενες ποσότητες ή πιέσεις που δέχεται μία εδαφική έκταση με τις ποσότητες που εν τέλει μεταφέρονται στους επιφανειακούς υδάτινους αποδέκτες μέσω των μηχανισμών του υδρολογικού κύκλου. Η χρονική μεταβολή στις διαθέσιμες ποσότητες θρεπτικών στο έδαφος συμβαίνει συνήθως σε συνάρτηση με την απορρόφησή τους από τη βλάστηση και με την μετατροπή τους από τη μία χημική μορφή στην άλλη. Οι πιο σημαντικές μετατροπές είναι αυτές που οδηγούν στις αέριες απώλειες θρεπτικών σε μία λεκάνη απορροής και αφορούν αποκλειστικά το N. Περιλαμβάνουν: α) τη μετατροπή του σε αέρια αμμωνία (εξάχνωση) που ευνοείται όταν η κοπριά και το λίπασμα απλώνονται στα χωράφια και β) την απονιτροποίηση, δηλαδή τη διαφυγή προς την ατμόσφαιρα αζωτούχων ενώσεων του εδάφους (κυρίως $NO3^-$) ύστερα από μετατροπή τους σε NO_x και N_2, όπως περιγράφηκε στον κύκλο του N στην ενότητα 1.2.1. Η απονιτροποίηση ευνοείται από τη θερμοκρασία και την εδαφική υγρασία και υπάρχουν περιπτώσεις που οι ευνοϊκές αυτές συνθήκες έχουν

αποβάλλει μέχρι και το 90% του διαθέσιμου N στο έδαφος (Wriedt and Rode, 2006). Η αέρια μετατροπή N από το έδαφος θεωρείται ευεργετική από μία άποψη αφού μειώνει τις διαθέσιμες ποσότητες προς μεταφορά στα νερά, αλλά και επιζήμια από την άλλη μιας και σε ορισμένες περιπτώσεις η διαθεσιμότητα ωφέλιμων προς λήψη από τις καλλιέργειες ποσοτήτων N περιορίζεται.

Βασικός στόχος της επιστημονικής κοινότητας είναι η εύρεση ενός πλαισίου μέσα στο οποίο η συνεισφορά των αγροτικών δραστηριοτήτων, ως βασικός παράγοντας μη σημειακής ρύπανσης από θρεπτικά, θα μπορεί να ποσοτικοποιηθεί με αξιοπιστία και ακρίβεια από τις Ευρωπαϊκές χώρες. Παράλληλα, η εκτίμηση της αποτελεσματικότητας των ΔΠ στην περιστολή των απωλειών αυτών αποτελεί ένα σπουδαίο αντικείμενο έρευνας με απώτερο στόχο την πρόληψη και αντιμετώπιση του ευτροφισμού. Σε παγκόσμια κλίμακα υπάρχουν σήμερα πολλές επιστημονικές προσεγγίσεις υπολογισμού της συνεισφοράς των διάχυτων αγροτικών πηγών στα φορτία και στις συγκεντρώσεις θρεπτικών στα υδάτινα σώματα καθώς και εκτίμησης της αποτελεσματικότητας των ΔΠ στη μείωση των ποσοτήτων μεταφοράς σε αυτά. Περιλαμβάνουν τεχνικές και εργαλεία, από απλές εξισώσεις ισοζυγίων έως σύνθετα μαθηματικά μοντέλα, που διαφοροποιούνται μεταξύ τους ανάλογα με την πολυπλοκότητα, την περιγραφή των φυσικών διεργασιών και τις απαιτήσεις σε δεδομένα πεδίου. Δεδομένου ότι η διδακτορική διατριβή πραγματεύεται τη βελτιστοποίηση της εφαρμογής διαφόρων ΔΠ στο γεωγραφικό χώρο λεκάνης απορροής, είναι απαραίτητο στο παρόν κεφάλαιο να γίνει μία αναλυτική επισκόπηση των υφιστάμενων μεθοδολογιών εκτίμησης του φορτίου θρεπτικών από μη σημειακές πηγές και στο επόμενο, των ΔΠ που έχουν αναπτυχθεί διεθνώς και που αποτελούν το μέσο περιορισμού του προβλήματος. Παρόλο που το αντικείμενο δεν είναι δυνατόν να εξαντληθεί, γίνεται σαφής ο βαθμός στον οποίο οι διάφορες μεθοδολογίες ποσοτικοποίησης θρεπτικών είναι ικανές να ενσωματώσουν ΔΠ για την εκτίμηση της περιβαλλοντικής κατάστασης των υδάτων μετά από εφαρμογή τους.

3.2 Ποσοτικοποίηση απωλειών θρεπτικών από μη σημειακές πηγές στα επιφανειακά νερά

3.2.1 Χρήση Δεδομένων Φορτίου Ποταμού

Η *Χρήση Δεδομένων Φορτίου Ποταμού* (River Load Data) είναι μία διαδεδομένη και απλουστευμένη μεθοδολογία εκτίμησης των θρεπτικών από πηγές διάχυσης, που βασίζεται στη συνεχή καταγραφή της χημικής κατάστασης των υδάτων (Grimvall and Stalnacke, 1996). Τα δεδομένα καταγραφής της συγκέντρωσης των θρεπτικών στοιχείων σε σημεία των ποταμών (mg/l) σε συνδυασμό με την καταγεγραμμένη παροχή νερού (m^3/s), μπορούν να

χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των ετήσιων συνολικών ποσοτήτων ή φορτίων θρεπτικών που εισρέουν από τις ανάντη αυτών των σημείων λεκάνες απορροής. Το φορτίο που προέρχεται από μη σημειακές ή διάχυτες αγροτικές πηγές ρύπανσης υπολογίζεται με γνωστές (καταγεγραμμένες) ή με κάποιο τρόπο εκτιμημένες: α) τις σημειακές φορτίσεις θρεπτικών δηλαδή τις φορτίσεις που συνήθως προέρχονται από τις εκροές των βιολογικών καθαρισμών πόλεων και των βιομηχανικών εγκαταστάσεων, και β) τις ποσότητες θρεπτικών από διάχυτες φυσικές πηγές (απόπλυση φυσικών δασικών εκτάσεων).

Το μη σημειακό αγροτικό φορτίο προκύπτει ως διαφορά των δύο ανωτέρω ποσοτήτων από το συνολικό καταγεγραμμένο φορτίο ποταμού αφού ληφθεί υπόψη και η εξασθένιση του φορτίου που λαμβάνει χώρα κατά την μεταφορά μέσα στο ποτάμι. Πρόκειται για τη λεγόμενη *κατακράτηση στην υγρή φάση* (water nutrient retention), η οποία σε αντιστοιχία με την κατακράτηση στο έδαφος μειώνει τα φορτία θρεπτικών που καταλήγουν στη θέση μέτρησης. Πιο αναλυτικά, οι ανωτέρω ποσότητες συνοψίζονται στην ακόλουθη εξίσωση που αποτελεί το *ισοζύγιο θρεπτικών στο ποτάμι* (riverine load apportionment):

$$L_{river} = D_P + L_{OD} + L_{OB} - R \;\; ή \;\; L_{OD} = L_{river} - D_P - L_{OB} + R \qquad (3.1)$$

όπου: L_{river} είναι τα φορτία θρεπτικών (kg ή tn) στο σημείο του ποταμού, L_{OD} είναι οι εισρέουσες ποσότητες θρεπτικών στα νερά που προέρχονται από διάχυτες πηγές ανθρωπογενούς προέλευσης, L_{OB}, οι εισρέουσες ποσότητες θρεπτικών στα νερά προερχόμενες από διάχυτες πηγές φυσικής προέλευσης, D_P οι συνολικές εισροές από σημειακές πηγές και τέλος, R η κατακράτηση θρεπτικών στον υδάτινο αποδέκτη (Grimvall and Stalnacke, 1996).

Το βασικό πλεονέκτημα της πολύ απλής αυτής μεθοδολογίας, που κάνει χρήση δεδομένων φορτίου ποταμού, έγκειται στο ότι τα απαιτούμενα δεδομένα είναι σχεδόν πάντα διαθέσιμα στα κράτη-μέλη και για τα κυριότερα μεγάλα ποτάμια, είτε ως αποτέλεσμα εθνικών προγραμμάτων παρακολούθησης είτε ως απαίτηση εφαρμογής ή τήρησης κάποιας Οδηγίας ή Συνθήκης. Το φορτίο από τον αγροτικό τομέα, συνήθως αποτελεί τη συνολική ποσότητα θρεπτικών από διάχυτες πηγές L_{OD} της Εξ. 3.1, μιας και άλλη ανθρωπογενούς προέλευσης φόρτιση που περιλαμβάνεται σε αυτόν τον όρο είναι μόνο οι ποσότητες από τα απόβλητα μεμονωμένων κατοικιών μη συνδεδεμένων με το αποχετευτικό δίκτυο, που συνήθως σε μεγάλες αγροτικές λεκάνες είναι δυνατόν και να αμεληθούν. Ακόμα όμως και αν αυτό δεν ενδείκνυται, είναι πολύ εύκολη η αξιόπιστη εκτίμησή τους με βάση τον πληθυσμό. Το ίδιο ακριβώς ισχύει και για τις ποσότητες από διάχυτες πηγές φυσικής προέλευσης L_{OB}, όταν δεν αμελούνται. Οι ποσότητες αυτές μπορούν να προκύψουν από μετρήσεις καταγραφής απωλειών θρεπτικών από λεκάνες παρεμφερούς κλίματος, αποκλειστικά καλυμμένες με

φυσική βλάστηση. Πρέπει να σημειωθεί εδώ, ότι το μη σημειακό φορτίο L_{OD}, συμπεριλαμβάνει και τη συνεισφορά της ατμοσφαιρικής εναπόθεσης στις ποσότητες θρεπτικών που εγκαταλείπουν το έδαφος και εισέρχονται στα νερά. Αυτή η συνεισφορά, ιδίως όταν πρόκειται για το N, μπορεί να εκτιμηθεί έμμεσα με χρήση πραγματικών μετρήσεων εναπόθεσης σε αναλογία με τις πιέσεις αγροτικής φύσεως. Έτσι, από το φορτίο L_{OD} μπορεί εν τέλει να προκύψει η συνεισφορά των αγροτικών δραστηριοτήτων.

Δεδομένου ότι κάτω από τις απαιτήσεις των διεθνών συμβάσεων και της διεθνούς νομοθεσίας, είναι υποχρεωτική, εκτός από τη συνεχή λειτουργία του δικτύου παρακολούθησης ποιότητας του νερού των ποταμών, και η καταγραφή όλων των σημειακών φορτίσεων D_P από εγκαταστάσεις επεξεργασίας αστικών, βιομηχανικών, κτηνοτροφικών κ.α λυμάτων, η μέθοδος αποτελεί έναν εύκολο τρόπο παροχής πληροφορίας όταν τα απαραίτητα δεδομένα για την ανάπτυξη πιο σύνθετων μεθοδολογιών δεν είναι διαθέσιμα. Η πιο αναξιόπιστη εκτίμηση όρου της Εξίσωσης 3.1 είναι αυτή της κατακράτησης θρεπτικών R, που εκφράζει το βαθμό στον οποίο οι ποσότητες θρεπτικών που εισήλθαν στο ποτάμι ή στις λίμνες μειώθηκαν λόγω βιοχημικών διεργασιών πριν οδηγηθούν στη θέση μέτρησης. Τέτοιες διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά την παραμονή των θρεπτικών στο νερό είναι για το N, κυρίως η εξάχνωση και η απονιτροποίηση, που δρουν ανάλογα με την περίπτωση της κατακράτησης στην εδαφική φάση. Σύμφωνα με τους Haag and Kaupenjohann (2001), η απονιτροποίηση των $NO3^-$ στα ποτάμια της κεντρικής Ευρώπης κυμαίνεται μόλις μεταξύ 1 και 5% της συνολικής μεταφερόμενης ποσότητάς τους. Για τον P, βασική διεργασία είναι η στερεοποίηση και εναπόθεσή του σε ιζήματα στα τοιχώματα και τον πυθμένα του ποταμού (deposition), κάτι που επηρεάζεται από την ταχύτητα του νερού. Σημαντικό ρόλο στη συνολική ένταση των διεργασιών της κατακράτησης στην υγρή φάση έχει αποδειχτεί πλέον ότι παίζει ο χρόνος παραμονής των θρεπτικών στα επιφανειακά νερά των λεκανών απορροής (Seitzinger et al., 2002· Laursen and Seitzinger, 2002). Οι διεργασίες αυτές δεσμεύουν μερικές φορές σημαντικές ποσότητες θρεπτικών και διαφοροποιούν τις πραγματικές ποσότητες μη σημειακών εισροών θρεπτικών στα επιφανειακά νερά από τις καταγεγραμμένες ποσότητες σε κατάντη θέσεις ποταμού και ιδιαίτερα στις εξόδους των λεκανών. Η μείωση αυτή αναμένεται να είναι σημαντική και αδύνατον να αμεληθεί σε λεκάνες που τα υδάτινα σώματα καταλαμβάνουν μεγάλο ποσοστό της έκτασής τους.

Σε κάθε περίπτωση, υπάρχουν απλές μεθοδολογίες που υπολογίζουν τον όρο R, στηριζόμενες σε υδρογεωμορφολογικά χαρακτηριστικά των λεκανών απορροής, εύκολα μετρήσιμα και διαθέσιμα για κάθε λεκάνη απορροής. Ενδεικτικά αναφέρεται η χρήση του *Υδραυλικού Φορτίου Λεκάνης* από τους Behrendt and Opitz (2000), που ορίζεται ως το πηλίκο της συνολικής ετήσιας απορροής της λεκάνης προς τη συνολική επιφάνεια των υδάτινων σωμάτων της για την εκτίμηση της συνολικής ετήσιας κατακράτησης θρεπτικών στα

επιφανειακά νερά. Συνολικά, ανασκόπηση των μεθοδολογιών υπολογισμού του όρου *R* της Εξίσωσης 3.1 γίνεται από τους Kronvang et al. (2004), οι οποίοι συνθέτοντας πολλές από αυτές παρουσιάζουν και ένα εύχρηστο εργαλείο-λογισμικό που αναπτύχθηκε στα πλαίσια του προγράμματος Euroharp (Euroharp, 2000) και προσαρμόζεται σε όλες τις λεκάνες απορροής παρέχοντας μία εκτίμηση για την κατακράτηση θρεπτικών στα επιφανειακά νερά σε ετήσιο βήμα. Τονίζεται τέλος, πως οι διαδικασίες της κατακράτησης μεταβάλλονται από τις ανθρώπινες παρεμβάσεις (επεμβάσεις στο σχήμα των ποταμών, αποκατάσταση λιμνών, κατασκευή ταμιευτήρων κ.α.), ενώ πολλές φορές η εθνική και τοπική στρατηγική αντιμετώπισης της ρύπανσης των νερών από θρεπτικά απαιτεί μέτρα που ευνοούν τη φυσική πραγμάτωση του φαινομένου (Kronvang et al., 2004).

Σχετικά με τη χρήση της εν λόγω μεθόδου, υπάρχουν ωστόσο κάποια γενικότερα μειονεκτήματα. Πρώτο είναι το γεγονός ότι τα δεδομένα που προέρχονται από παρακολούθηση και καταγραφή των παραμέτρων των επιφανειακών υδάτων συνήθως υποεκτιμούν τις μη σημειακές ποσότητες θρεπτικών. Αυτό συμβαίνει διότι τα θρεπτικά στοιχεία καταλήγουν στο ποτάμι από τις εδαφικές επιφάνειες με χρονικά ανομοιόμορφο τρόπο, τη στιγμή που η καταγραφή της ποιότητας του νερού με συλλογή δειγμάτων γίνεται σε μηνιαία ή εβδομαδιαία βάση και κάτω από ήπιες συνήθως μετεωρολογικές συνθήκες. Η μέθοδος αποτυγχάνει να συμπεριλάβει ένα μεγάλο ποσοστό των ετήσιων ποσοτήτων θρεπτικών που μεταφέρεται στο ποτάμι κατά τη διάρκεια των πολύ ισχυρών καταιγίδων και πλημμυρών. Τα δεδομένα αυτά αντιπροσωπεύουν συνεπώς την ποιότητα του νερού που διαμορφώνεται κάτω από σχετικά ξηρές υδρομετεωρολογικές συνθήκες και εξαιτίας κυρίως των σημειακών φορτίσεων, που χρονικά μεταβάλλονται σε πολύ στενά όρια. Η μέθοδος μπορεί να εφαρμόζεται με πολύ μεγαλύτερη αξιοπιστία, όταν εμπειρικές σχέσεις που συνδέουν φορτίο και παροχή έχουν καταρτιστεί για τις διάφορες θέσεις του ποταμού. Το πρόβλημα αυτό αναμένεται να είναι πιο έντονο στις Μεσογειακές χώρες, όπου υπάρχει έντονη ανομοιογένεια στην χρονική κατανομή της βροχόπτωσης και μετέπειτα της απορροής, της στερεοαπορροής και της μεταφοράς θρεπτικών στοιχείων (Styczen et al., 2007).

Κατά δεύτερον, η ανωτέρω μέθοδος αδυνατεί με άμεσο τρόπο να εκτιμήσει ξεχωριστά τη συνεισφορά διαφορετικών μη σημειακών πηγών σε θρεπτικά, όπως π.χ. των ειδών αγροτικής δραστηριότητας (γεωργία, κτηνοτροφία), των αστικών αποβλήτων (προερχόμενα από κατοικίες μη συνδεδεμένες με αποχετευτικό δίκτυο), της ατμοσφαιρικής εναπόθεσης N κλπ. Για τις μεγάλες λεκάνες απορροής της Ευρώπης, η συνεισφορά των μη αγροτικών δραστηριοτήτων στο σύνολο των μη σημειακών φορτίσεων είναι συνήθως πολύ μικρότερη έως αμελητέα σε σχέση με αυτή των αγροτικών. Σε περιπτώσεις όμως που αυτό δε συμβαίνει γίνεται χρήση εμπειρικών μεθόδων ποσοτικοποίησης των μη-σημειακών μη αγροτικών φορτίσεων που εν συνεχεία αφαιρούνται από το συνολικό μη σημειακό φορτίο και

επιτρέπουν τον υπολογισμό των φορτίσεων από τον αγροτικό τομέα. Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, αυτό συμβαίνει και για το διαχωρισμό της συνεισφοράς της ατμοσφαιρικής εναπόθεσης N, όπου συντελεστές εισροής χρησιμοποιούνται για να εκτιμηθεί το ποσοστό από τις ποσότητες των θρεπτικών που εγκαταλείπουν το έδαφος, που αντιπροσωπεύει τη συνεισφορά αυτή.

Το τρίτο κατά σειρά μειονέκτημα της Χρήσης Δεδομένων Φορτίου Ποταμού είναι η αδυναμία να εξετάσει κανείς άμεσα και γρήγορα τις επιδράσεις στην ποιότητα του νερού από σενάρια εφαρμογής ολοκληρωμένων διαχειριστικών μέτρων κατά της ρύπανσης από θρεπτικά δηλαδή διαφόρων εκτεταμένα εφαρμοσμένων ΔΠ. Αυτό οφείλεται στο ότι οι μεταβολές στο φορτίο που θα παράγεται από τις μη σημειακές πηγές, είναι δυνατόν να υπολογιστούν μόνο μέσω νεότερης παρακολούθησης των φυσικοχημικών παραμέτρων του ποταμού. Η αξιοπιστία των συμπερασμάτων μειώνεται σε μεγάλο βαθμό με τη αύξηση της χωρικής κλίμακας μελέτης. Αν συνυπολογίσει κανείς το γεγονός ότι η απόκριση του συστήματος σε τέτοιου είδους μεταβολές είναι συνήθως κάποια έτη, γίνεται κατανοητό πως η εν λόγω μεθοδολογία δεν είναι ικανή να εκτιμήσει τις μεταβολές αυτές άμεσα παρά μόνο με την πάροδο μεγάλων χρονικών διαστημάτων που συχνά υπερβαίνουν το χρονικό ορίζοντα που έχει τεθεί από τη νομοθεσία ως έτος-στόχος για την επίτευξη της καλής κατάστασης των υδάτων (Kronvang et al., 2005a· Kronvang et al., 2005b· Stalnacke et al., 2003). Η παρακολούθηση και εκ νέου καταγραφή των συγκεντρώσεων των στοιχείων στο νερό αποτελεί την πιο αξιόπιστη και ακριβή εκτίμηση της αποδοτικότητας των ΔΠ, που πρέπει όμως να γίνεται συστηματικά και αφού ληφθούν υπόψη και οι πιθανές διαφοροποιήσεις στους φυσικούς παράγοντες και κυρίως στις κλιματικές συνθήκες που επικρατούσαν κατά την περίοδο εφαρμογής των ΔΠ (Cherry et al., 2008).

3.2.2 Ολικό Ισοζύγιο Θρεπτικών στο έδαφος

Η μεθοδολογία του *Ολικού Ισοζυγίου Θρεπτικών* (Gross Nutrient Balance) εφαρμόζεται στα αγροτικά εκείνα συστήματα, όπου οι ποσότητες εισόδου θρεπτικών στο έδαφος είναι μεγαλύτερες από τις αναγκαίες προς δέσμευση από τις καλλιέργειες ποσότητες (θετικό ισοζύγιο). Το Ολικό Ισοζύγιο υπολογίζεται από τη διαφορά των εισερχόμενων στο εδαφικό σύστημα ποσοτήτων θρεπτικών (λιπάσματα, κοπριά) και των ποσοτήτων θρεπτικών που έχουν δεσμευτεί από τα φυτά και περιέχονται στα φυτικά μέρη που απομακρύνονται κατά τη συγκομιδή. Τα Ολικά Ισοζύγια μπορεί να είναι και αρνητικά, που στις μέρες μας πολύ σπάνια συναντώνται στην Ευρώπη, πράγμα που ουσιαστικά δηλώνει ότι οι ανθρωπογενείς πιέσεις με θρεπτικά πάντα σχεδόν υπερβαίνουν τις αναγκαίες ποσότητες για την ανάπτυξη των φυτών. Το θετικό αυτό ισοζύγιο (είσοδος θρεπτικών > έξοδος θρεπτικών

με τη συγκομιδή) αναφέρεται ως *περίσσευμα* ή *πλεόνασμα* θρεπτικών στο έδαφος (nutrient surplus) και πρόκειται για την πλεονάζουσα ποσότητα θρεπτικών που είναι θεωρητικά διαθέσιμη για διαφυγή προς τους επιφανειακούς υδάτινους αποδέκτες. Το αρνητικό ισοζύγιο από την άλλη, αν και σπανιότερο, δηλώνει τάση υποβάθμισης της γονιμότητας των εδαφών.

Τα Ολικά Ισοζύγια υπολογίζονται συνήθως χρησιμοποιώντας την προσέγγιση της *επιφάνειας εδάφους* (soil surface), που βασίζεται στα επίσημα αγροτικά στοιχεία που υποβάλλονται κάθε χρόνο από τα κράτη-μέλη στη Ευρωπαϊκή Στατιστική Υπηρεσία (Eurostat) ή στον Οργανισμό Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (ΟΟΣΑ). Η προσέγγιση αυτή εκτιμά τις ποσότητες που θεωρητικά καταλήγουν στα επιφανειακά νερά μέσω της ποσοτικοποίησης του ισοζυγίου των εισερχόμενων και εξερχόμενων ποσοτήτων N και P στο έδαφος (Εξισώσεις 3.2 και 3.3 για το N και τον P αντίστοιχα):

$$GB_N = MF_N + LVM_N + BF_N + AD_N - CUP_N - NH_3VL - DT \quad (3.2)$$

$$GB_P = MF_P + LVM_P - CUP_P - DP_{soil} \quad (3.3)$$

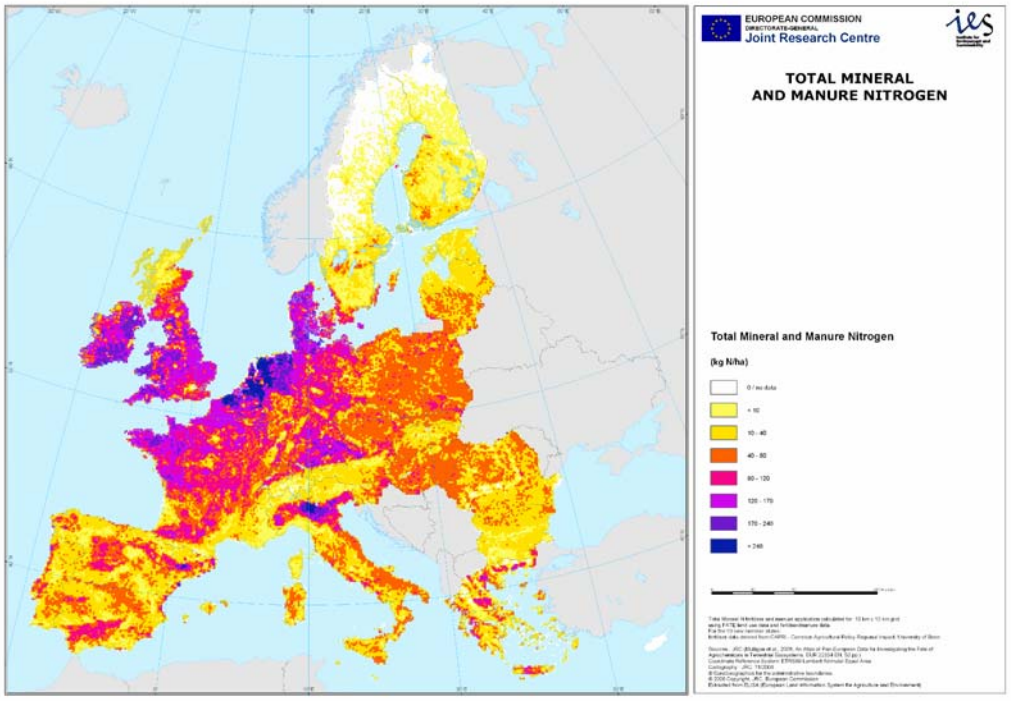
όπου *GB* το Ολικό Ισοζύγιο (Gross Balance) στο έδαφος (θετικό ή αρνητικό), *MF*, οι ποσότητες θρεπτικών από χημικά λιπάσματα (Mineral Fertilizers), *LVM*, οι ποσότητες θρεπτικών από ζωική κοπριά (Livestock Manure), *BF*, η ποσότητα από βιολογική δέσμευση (Biological Fixation), που ισχύει μόνο για το N, *AD*, η ατμοσφαιρική εναπόθεση (Atmospheric Deposition), που συχνά αναφέρεται μόνο στο N διότι ο εναποτιθέμενος P από την ατμόσφαιρα συνήθως αμελείται και *CUP*, είναι οι ποσότητες που λαμβάνονται από τις καλλιέργειες (Crop UPtake). Η πρόσθεση των όρων της κατακρήμνισης P στο έδαφος (DP_{soil} – Deposition Phosphorus) στην Εξίσωση 3.3 και των αέριων απωλειών εξάχνωσης (NH_3VL - Volatilization) και απονιτροποίησης (*DT* - Denitrification) για το N στην Εξίσωση 3.2 του Ισοζυγίου επιτρέπουν τον υπολογισμό των περισσευμάτων θρεπτικών στο έδαφος που θεωρητικά είναι εξ ολοκλήρου διαθέσιμα για μεταφορά στους υδάτινους αποδέκτες (Styczen et al., 2007).

Οι όροι φόρτισης ανθρωπογενούς προέλευσης των παραπάνω εξισώσεων εκτιμώνται με χρήση στατιστικών δεδομένων, όπως π.χ. τον αριθμό των κτηνοτροφικών ζώων, τα είδη των καλλιεργειών, τις αποδόσεις τους, καθώς και συντελεστές που συσχετίζουν τα αριθμητικά αυτά δεδομένα με ποσότητες N και P. Οι συντελεστές χρησιμοποιούνται για να ποσοτικοποιήσουν τη βιολογική δέσμευση N από ικανά για αυτό φυτά (ψυχανθή), την περιεκτικότητα του N και του P στην κοπριά των διαφόρων κατηγοριών ζώων (animal manure) και την ποσότητα του περιεχομένου N και P στην ξηρά ουσία ενός συγκεκριμένου φυτού που συγκομίζεται (harvest). Στις παραπάνω εξισώσεις υπεισέρχονται ακόμα οι

ποσότητες N και P που προέρχονται από τα χημικά λιπάσματα, καθώς και η ποσότητα N που προέρχεται από την ατμόσφαιρα και μπορεί να μετρηθεί εύκολα. Όσον αφορά τον όρο της απονιτροποίησης, εκτιμάται συνήθως εμπειρικά. Η φυσική αυτή διαδικασία στη ζώνη ριζοστρώματος εξαρτάται από την υφή του εδάφους, τη διαθέσιμη υγρασία, τη θερμοκρασία και τη διαθεσιμότητα οργανικού άνθρακα. Έτσι, στα βαριά (αργιλώδη) εδάφη η απονιτροποίηση συνήθως ευνοείται με εκτιμήσεις να τοποθετούν την ένταση του φαινομένου μεταξύ 2 και 30 kg/100kg εφαρμοζόμενου λιπάσματος κατ' έτος. Η εξάχνωση από την άλλη, αφορά κυρίως τα εδάφη που δέχονται μεγάλες ποσότητες κοπριάς, η οποία έχει μεγάλη περιεκτικότητα σε αμμωνία. Η απελευθέρωση της αμμωνίας στην ατμόσφαιρα μπορεί να φτάσει και το 90% της διαθέσιμης μέσω της κοπριάς όταν επικρατούν υψηλές θερμοκρασίες. Τέλος, κατακράτηση P στο έδαφος είναι δυνατόν να συμβεί μετά από χημική αντίδραση του στοιχείου με ιόντα σιδήρου, αργιλίου, ανθρακικού ασβεστίου και με οργανική ουσία του εδάφους. Ο P προσροφάται και κατακρημνίζεται κάτω από την επιφάνεια, ενώ η ικανότητα του εδάφους να συγκρατεί αυτές τις ποσότητες είναι πολύ μεγάλη (Styczen et al., 2007).

Τα περισσότερα από τα δεδομένα για τον υπολογισμό του Ισοζυγίου, που εκφράζει τις ποσότητες θρεπτικών που θεωρητικά είναι διαθέσιμες για μεταφορά στους υδάτινους αποδέκτες, είναι διαθέσιμα σε επίπεδο Περιφερειών για όλη την Ευρώπη και φυλάσσονται σε οργανωμένες βάσεις δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα διατίθενται:

- Δεδομένα για τις αγροτικές ιδιοκτησίες από τη Eurostat. Τα δεδομένα συλλέγονται από τις εθνικές στατιστικές υπηρεσίες των κρατών-μελών ανά 10 έτη σε διοικητικό επίπεδο. Πρόκειται για τα λεγόμενα *Farm Structural Surveys* (FSS) που στη συνέχεια αποστέλλονται στη Eurostat, η οποία είναι υπεύθυνη για τον έλεγχο και τη δημοσίευσή τους. Περιλαμβάνουν στοιχεία για τα καλλιεργούμενα είδη, την κτηνοτροφία και τις τεχνικές καλλιέργειας και είναι διαθέσιμα σε τρεις γεωγραφικές κλίμακες: κράτη, διοικητικά διαμερίσματα και περιφέρειες με βάση την Ονοματολογία των Ευρωπαϊκών Χωρικών Μονάδων (Nomenclature of European Territorial Units - NUTS), (Eurostat, 2006). Τα δεδομένα για τα κράτη-μέλη είναι πολλές φορές επίσης διαθέσιμα ανά Δήμο και Κοινότητα και συνεπώς απαιτείται σωστή ομαδοποίησή τους ώστε να αντιστοιχηθούν σε κλίμακα λεκάνης απορροής (Campling et al., 2005). Στο Σχήμα 3.1 (Mulligan et al., 2006), απεικονίζονται οι ετήσιες εισερχόμενες ποσότητες N στα Ευρωπαϊκά εδάφη με βάση υπολογισμούς από τα επίσημα στοιχεία των εθνικών στατιστικών υπηρεσιών.

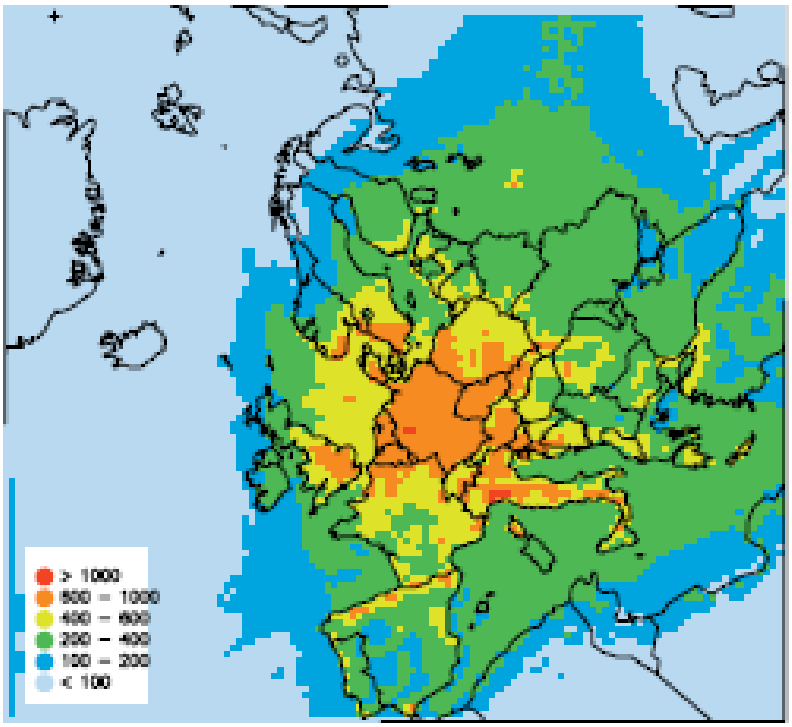


Σχήμα 3.1 Ολικό Εισερχόμενο Άζωτο στα Ευρωπαϊκά εδάφη από χημικά λιπάσματα και κοπριά ζώων (πηγή: Mulligan et al., 2006).

- Δεδομένα τύπων κάλυψης γης από τη βάση δεδομένων του CORINE LAND COVER (CLC), (EEA-ETC/TE, 2002, ETC, 2005). Πρόκειται για επικαιροποίηση των χαρτών του 1990. Το προϊόν του CLC2000 σχεδιάστηκε για χρήση σε κλίμακα χάρτη 1:100.000 και διαθέτει ελάχιστη μονάδα χάρτη ίση με 25ha. Είναι καταγεγραμμένα 44 διαφορετικά είδη κάλυψης γης, που περιλαμβάνουν τους βασικούς τύπους διαμόρφωσης της επιφάνειας του εδάφους στη Ευρώπη. Οι αγροτικές εκτάσεις χωρίζονται σε τέσσερις γενικές υποκατηγορίες: καλλιεργήσιμη γη (arable land), μόνιμες καλλιέργειες (permanent crops), βοσκότοποι (pastures) και ετερογενείς αγροτικές εκτάσεις (heterogeneous agricultural areas). Εκτός από τους βοσκότοπους, οι υπόλοιπες προαναφερθείσες υποκατηγορίες διαιρούνται περαιτέρω σε πιο λεπτομερείς κατηγορίες. Το CORINE, παρότι είναι πολύ χρήσιμο, περιγράφει τον τύπο κάλυψης της γης και δε δίνει ιδιαίτερες πληροφορίες για τη χρήση της όπως π.χ. τον αριθμό των εκτρεφόμενων ζώων σε κάθε γεωγραφική μονάδα ή τα ποσοστά των καλλιεργούμενων ειδών και τις καλλιεργητικές πρακτικές που ακολουθούνται σε κάθε τόπο.

- Ετήσια δεδομένα εναπόθεσης N στα Ευρωπαϊκά κράτη (Σχήμα 3.2). Αυτά παρέχονται από το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα συνεργασίας για την παρακολούθηση των

αέριων ρύπων στην Ευρώπη (Co-operative European Programme for Monitoring and Evaluation of the Long-range Transmission of Air pollutants in Europe (EMEP, 2001).



Σχήμα 3.2 Προβλεπόμενη εναπόθεση οξειδωμένου N (NOx) στην Ευρώπη (g/m^2/έτος) με βάση το πρόγραμμα EMEP για το έτος 2000 (πηγή: EMEP, 2007).

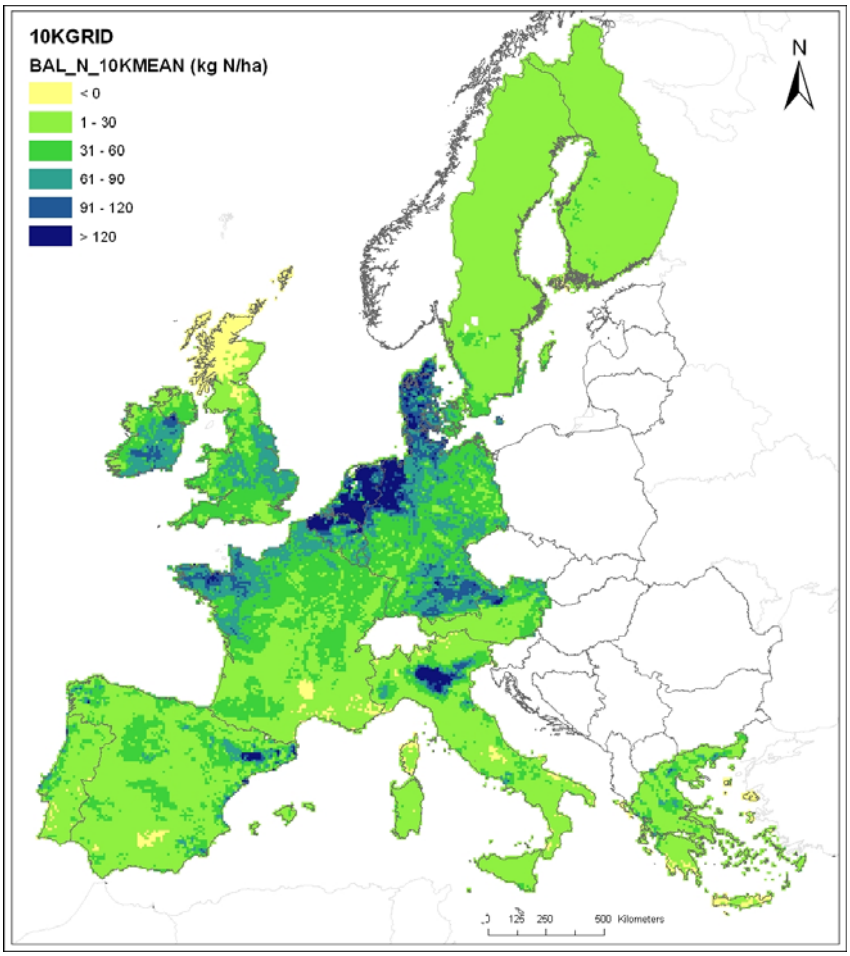
Σε αντίθεση με την πρώτη μέθοδο που αξιοποιεί τα δεδομένα ποταμού, η μέθοδος Ολικού Ισοζυγίου ακολουθεί μία προσέγγιση με υπολογισμό των ποσοτήτων στο έδαφος. Ωστόσο, υπάρχουν και σε αυτήν την περίπτωση κάποια βασικά μειονεκτήματα για την εφαρμογή της που είναι τα κάτωθι:

- Η συχνή έλλειψη κάποιων από τα δεδομένα που ήδη περιγράφηκαν στην ιδανική χωρική μονάδα μελέτης, που συνήθως είναι η λεκάνη απορροής ποταμού. Συνήθως, τα εν λόγω δεδομένα είναι διαθέσιμα σε εθνικό ή περιφερειακό επίπεδο.
- Η ασυμφωνία που υπάρχει ανάμεσα στους αγροτικούς τύπους χρήσης γης που περιγράφονται στους χάρτες του CORINE και στις συνολικές εκτάσεις που καταλαμβάνουν οι διάφορες καλλιέργειες σύμφωνα με τα επίσημα στοιχεία των εθνικών στατιστικών υπηρεσιών.
- Η αβεβαιότητα που υπεισέρχεται στην απόδοση διαφόρων γεωργικών συντελεστών για τον υπολογισμό των διαφόρων όρων των Εξισώσεων 3.2 και 3.3.

Ειδικά για την αντιμετώπιση του δεύτερου κατά σειρά μειονεκτήματος και για την επίτευξη αξιόπιστων τοπικών ισοζυγίων, έχουν αναπτυχθεί μεθοδολογίες που χρησιμοποιούν αρχικά το CORINE ως πληροφορία για τους τύπους κάλυψης γης σε κλίμακα λεκάνης απορροής και εν συνεχεία κατανέμουν σε κάθε τύπο την αναλυτικότερη πληροφορία, που αφορά στις διαφορετικές καλλιέργειες σε διοικητικό επίπεδο. Μια προσπάθεια έχει γίνει από τους Campling et al. (2005) για την ΕΕ-15, ενώ και οι Grizzetti et al. (2007) έχουν συνδυάσει με πολύ επιτυχημένο τρόπο τα δύο είδη δεδομένων με αποτέλεσμα την παραγωγή χάρτη της ΕΕ-15 με χωρική ανάλυση 10km^2 (100m raster), όπου οι διάφορες καταγεγραμμένες αγροτικές καλλιέργειες έχουν αποκτήσει γεωγραφική οντότητα.

Οι μεθοδολογίες Ισοζυγίων που στις μέρες μας χρησιμοποιούνται σε τοπικό ή περιφερειακό επίπεδο στην Ευρώπη ξεπερνούν τις 50 (Goodlass et al., 2003). Διάφορα Ισοζύγια θρεπτικών όμως, έχουν εκτιμηθεί συνολικά για τον Ευρωπαϊκό χώρο και έχουν δημοσιευτεί τα τελευταία χρόνια, π.χ. από το ερευνητικό κέντρο JRC στην Ispra της Ιταλίας οι εργασίες που ήδη αναφέρθηκαν (Grizzetti et al., 2007· Campling et al., 2005), από το πρόγραμμα MITERRA-EUROPE (Velthof, 2007), και από το πρόγραμμα CAPRI (Britz, 2000). Οι μεγάλες αυτές εργασίες ακολουθούν την απλή προσέγγιση Ισοζυγίου που περιγράφηκε, αλλά διαφέρουν μεταξύ τους ως προς τις πηγές δεδομένων που χρησιμοποιούν, τους διάφορους συντελεστές που επιλέγουν και τη χωρική κλίμακα στην οποία τελικά αναπτύσσονται και αναφέρονται.

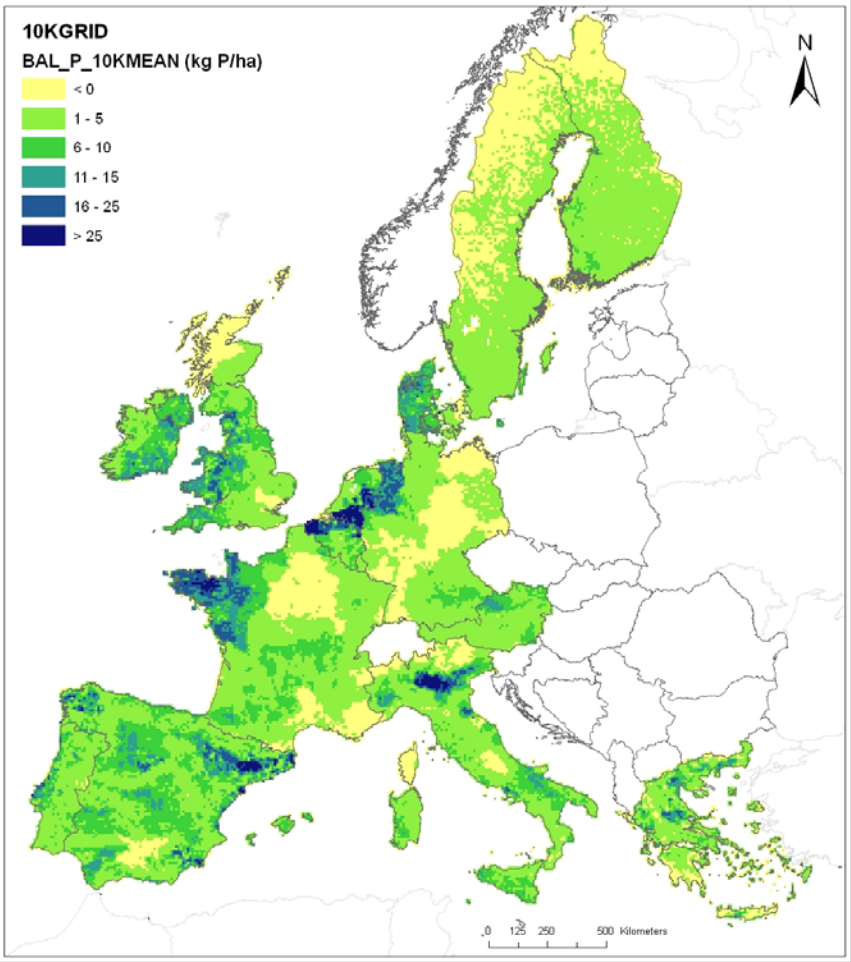
Την πιο πρόσφατη ολοκληρωμένη προσπάθεια σχετικά με τον υπολογισμό των Ολικών Ισοζυγίων θρεπτικών αποτελεί η εργασία που έγινε από το JRC και δημοσιεύτηκε το 2007 στην επίσημη Έκθεση που αναφέρθηκε (Grizzetti et al., 2007). Ο στόχος της έρευνας ήταν η εκτίμηση των πιέσεων σε θρεπτικά από τον αγροτικό τομέα που δέχονται τα υδάτινα σώματα των 15 κρατών-μελών της ΕΕ. Η εν λόγω εργασία ανέπτυξε ευρωπαϊκούς χάρτες με τις συνολικές ετήσιες πιέσεις των εδαφών με N και P από αγροτικές δραστηριότητες, καθώς και με τα υπολογισμένα Ολικά Ισοζύγια N και P, που απεικονίζονται στο Σχήμα 3.3 και στο Σχήμα 3.4 αντίστοιχα. Οι χάρτες αυτοί αναπτύχθηκαν στα πλαίσια του προγράμματος FATE (Fate of Agrochemicals in Terrestrial Ecosystems) με το διπλό στόχο να προσφέρουν απ' ευθείας εκτίμηση των πιέσεων σε θρεπτικά και ένα αξιόπιστο θεματικό επίπεδο που χρησιμεύει για ανάλυση διακινδύνευσης ρύπανσης των υδάτων σε συνδυασμό με χρήση μοντέλων.



Σχήμα 3.3 Ολικό ισοζύγιο N στα Ευρωπαϊκά εδάφη (πηγή: Grizzetti et al., 2007).

Όσον αφορά την Ελλάδα, και σύμφωνα με τους υπολογισμούς της εργασίας του JRC (Grizzetti et al., 2007), το μεγαλύτερο μέρος των αγροτικών εκτάσεων της χώρας δέχεται ετησίως χημικά λιπάσματα με φορτίσεις 40-120 kgN/ha και 10-20 kgP/ha αγροτικής γης με λίγες περιπτώσεις εκτάσεων που ανήκουν σε ευρύτερες περιοχές εντατικής γεωργίας (Θεσσαλικός κάμπος, Μακεδονία, Δυτική Πελοπόννησος), όπου οι εν λόγω φορτίσεις φτάνουν μέχρι 170 kgN/ha και και 25 kgP/ha. Οι φορτίσεις N και P από ζωική κοπριά έχουν υπολογιστεί στα ίδια επίπεδα για τις περισσότερες εκτάσεις της χώρας (40-80 kgN/ha και 10-20 kgP/ha) με τις μεγαλύτερες όμως τιμές που υπερβαίνουν τα 170 και 25 kg/ha για το N και τον P αντίστοιχα να παρουσιάζονται στη Δυτική Στερεά Ελλάδα και την Ήπειρο λόγω του ότι στις περιοχές αυτές συγκεντρώνεται ο μεγαλύτερος αριθμός κτηνοτροφικών ζώων και βοσκότοπων σύμφωνα με τα στοιχεία απογραφής της εθνικής μας στατιστικής υπηρεσίας. Αθροιστικά οι δύο πηγές θρεπτικών (χημικές λιπάνσεις και κοπριά) είναι υπεύθυνες με βάση τους υπολογισμούς της εργασίας, για ετήσιες φορτίσεις N και P που δεν πέφτουν σε κανένα σχεδόν σημείο της ελληνικής αγροτικής γης κάτω από τα 80 και τα 15 kg/ha αντίστοιχα, ενώ

οι αγροτικές περιοχές της Θεσσαλίας, Μακεδονίας και της Ηπείρου χαρακτηρίζονται εμφανώς από πολύ υψηλές φορτίσεις σε θρεπτικά.



Σχήμα 3.4 Ολικό ισοζύγιο P στα Ευρωπαϊκά εδάφη (πηγή: Grizzetti et al., 2007).

Παρά τις σημαντικές ποσότητες εφαρμογής στην Ελληνική γεωργική γη, το υπολογισμένο Ισοζύγιο θρεπτικών δεν έχει οδηγήσει σε πολύ μεγάλες τιμές περισσευμάτων (surpluses), όταν αυτά ανάγονται στη συνολική έκταση (Σχήμα 3.3 και Σχήμα 3.4). Για το N, τα Ισοζύγια υπολογίζουν το μεγαλύτερο μέρος της χώρας να βρίσκεται κάτω από τα 30kg/ha (Σχήμα 3.3), με λίγες μικρές εκτάσεις να το υπερβαίνουν αλλά να μην ξεπερνούν τα 60kg/ha. Για τον P, πολύ λίγες εκτάσεις επίσης, όπου πιθανά συγκεντρώνονται εντατικές καλλιέργειες, ξεπερνούν τα 15kg/ha περισσεύματος ετησίως, ενώ η πλειονότητα των ελληνικών περιοχών χαρακτηρίζεται από τιμές μικρότερες των 10kg/ha (Σχήμα 3.4). Αξίζει να σημειωθεί ότι και για τα δύο θρεπτικά στοιχεία, περιοχές της Κρήτης, της Νότιας Πελοποννήσου, καθώς και κάποια νησιά του Αιγαίου χαρακτηρίζονται από ελλειμματικά ισοζύγια (< 0). Υπενθυμίζεται όμως, ότι οι τιμές των χαρτών (Σχήμα 3.3 και Σχήμα 3.4) αναφέρονται σε ha ολικής γης και

όχι αγροτικής που σημαίνει πως οι αντίστοιχοι χάρτες με απεικόνιση των περισσευμάτων ανά ha αγροτικής γης θα εμφάνιζαν σαφώς μεγαλύτερες τιμές. Τέλος, οι μεγαλύτερες τιμές πλεονάσματος στην ΕΕ-15 έχουν υπολογιστεί για την Ολλανδία, τη Δανία, τη Βόρεια Γερμανία, Βόρεια Ιταλία και Βορειοδυτική Γαλλία, ενώ πολύ υψηλά είναι τοπικά τα Ισοζύγια και για την Αγγλία και την Ιρλανδία.

Οι χάρτες Ολικών Ισοζυγίων θρεπτικών που δημιουργήθηκαν και παρουσιάστηκαν πιο πάνω μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της διαθεσιμότητας του εδάφους σε θρεπτικά στην ΕΕ-15 αφού παρέχουν το N και τον P που βρίσκεται σε περίσσεια στα Ευρωπαϊκά εδάφη σε υπερετήσια χρονική βάση. Οι ποσότητες αυτές αποτελούν ουσιαστικά τις πιθανές συνολικές απώλειες των στοιχείων στα υδάτινα σώματα. Οι χάρτες όμως καταδεικνύουν τον πιθανό και όχι τον πραγματικό κίνδυνο για ρύπανση των υδάτων. Για την εκτίμηση του πραγματικού κινδύνου πολλά ακόμα δεδομένα πρέπει να ληφθούν υπόψη όπως η τοπογραφία, το κλίμα, η υδρογεωλογία και οι τεχνικές καλλιέργειας της γης που διαμορφώνουν με σύνθετο τρόπο τα ποσοστά των περισσευμάτων θρεπτικών που οδηγούνται τελικά στους υδάτινους αποδέκτες. Ενώ λοιπόν τα Ισοζύγια υπολογίζουν τα περισσεύματα N και P στο έδαφος, δεν είναι άμεσα συνδεδεμένα με τις καταγεγραμμένες συγκεντρώσεις των στοιχείων σε θέσεις ποταμών.

Στο Ισοζύγιο θρεπτικών MINAS (Mineral Accounting System) στην Ολλανδία, το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίστηκε με την ανάπτυξη εμπειρικών σχέσεων που συνδέουν τα περισσεύματα θρεπτικών με τις συγκεντρώσεις τους σε θέσεις ποταμών (Oenema et al., 2005). Με τον τρόπο αυτό τέθηκαν ανώτερες τιμές περισσευμάτων ως μη επιτρεπόμενα όρια αντί τιμών συγκεντρώσεων στο νερό και η διαχείριση της γης γίνεται με γνώμονα τη μη υπέρβαση των ορίων αυτών που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες τιμές συγκέντρωσης θρεπτικών στο ποτάμι.

Μια ανάλογη περίπτωση είναι το ισοζύγιο OVERSEER στη Νέα Ζηλανδία (Wheeler et al., 2003), το οποίο ισχύει σε μικρή χωρική κλίμακα δηλαδή κλίμακα εδαφικής ομοιογενούς μονάδας (farm) και ταυτόχρονα παρέχει ένα εργαλείο ανάπτυξης και εφαρμογής ΔΠ, το οποίο αποτελεί σήμερα το βασικό μέσο λήψης αποφάσεων στη χώρα. Τέλος, μία από τις πιο πρόσφατες επιστημονικές εκτιμήσεις ισοζυγίων για ολόκληρη την Ευρώπη, που περιλαμβάνει και πρόβλεψη για την περαιτέρω κατάληξη του περισσεύματος των θρεπτικών στο έδαφος είναι το μοντέλο MITERRA, που αναπτύχθηκε στα πλαίσια του ομώνυμου ευρωπαϊκού προγράμματος (Velthof, 2007). Το μοντέλο κατανέμει το περίσσευμα N, υπολογίζοντας το ποσοστό του N που κατεισδύει, το ποσοστό που απορρέει καθώς και τις ποσότητες που απομακρύνονται με απονιτροποίηση. Για τους υπολογισμούς αυτούς λαμβάνονται υπόψη: η μέθοδος εφαρμογής της κοπριάς στον αγρό, ο τύπος του εδάφους (υφή, περιεκτικότητα σε οργανικό άνθρακα), μετεωρολογικά δεδομένα, το είδος της

φυτοκάλυψης και φυσικά το μέγεθος του περισσεύματος N. Οι προβλέψεις του μοντέλου για την ΕΕ-27 είναι διαθέσιμες σε επίπεδο περιφερειών, ενώ σύντομα το μοντέλο μπορεί να είναι σε θέση να λειτουργήσει και σε κλίμακα λεκάνης απορροής.

Η μέθοδος του Ισοζυγίου που παρουσιάστηκε επιτυγχάνει την αναγνώριση των περιοχών με υψηλό περίσσευμα σε θρεπτικά στοιχεία, έστω και αν πρόκειται συνήθως για περιφερειακό επίπεδο. Με τον τρόπο αυτό ουσιαστικά καταδεικνύονται οι τοποθεσίες όπου οι ΔΠ είναι επιβεβλημένο να εφαρμοστούν και πιθανότερο να είναι αποδοτικές. Για να ισχύει το τελευταίο γίνεται η υπόθεση ότι μικρότερο περίσσευμα έχει ως αποτέλεσμα μικρότερες πραγματικές απώλειες εκτός εδάφους, κάτι που φαίνεται αναμενόμενο, όμως δεν είναι εγγυημένο. Επιπλέον, η υπόθεση που γίνεται ότι το περίσσευμα θρεπτικών προκύπτει μετά την αφαίρεση των ληφθέντων ποσοτήτων από τη βλάστηση καθιστά την εν λόγω μεθοδολογία ισχυρή σε υπερετήσια χρονική βάση και μόνο. Τέλος, οι Εξισώσεις 3.2 και 3.3 υπολογίζουν τη συνολική ποσότητα θρεπτικών που θεωρητικά καταλήγουν στα επιφανειακά νερά και ευθύνονται για τη ρύπανση τους, όμως, δεν επιτρέπουν περαιτέρω διαχωρισμό με βάση την οδό διαφυγής τους (transport pathway), που μπορεί να είναι επιφανειακή, υπόγεια, μέσω των φερτών υλών κλπ. Εξαιτίας αυτού δεν είναι δυνατή η εκτίμηση της αποτελεσματικότητας πολλών ειδών ΔΠ, που συνδέονται με τους μηχανισμούς μεταφοράς των θρεπτικών στοιχείων από το έδαφος στα υδάτινα σώματα.

3.2.3 Εκτίμηση Κινδύνου

Οι μεθοδολογίες *Εκτίμησης του Κινδύνου* (Risk Assessment) για απώλειες θρεπτικών από μία έκταση βασίζονται στην εκτίμηση της διαθεσιμότητας θρεπτικών στο έδαφος και ταυτόχρονα της ύπαρξης ευνοϊκών συνθηκών μεταφοράς τους προς τα επιφανειακά νερά (Heckrath et al., 2008). Για την εκτίμηση αυτών των παραγόντων αναγνωρίζονται σε κάθε γεωγραφική περιοχή οι βασικές πηγές εμπλουτισμού των εδαφών σε θρεπτικά και οι διαδικασίες που διέπουν τη μεταφορά τους μέσω του υδρολογικού κύκλου. Μια τέτοια προσέγγιση επιτυγχάνει να αναγνωρίσει μικρές γεωγραφικές περιοχές που συνεισφέρουν δυσανάλογα σε φορτίο θρεπτικών στα υδάτινα σώματα και λόγω της τρωτότητας τους να τις υποδείξει ως κατάλληλες για εφαρμογή ΔΠ. Τέτοιες μεθοδολογίες έχουν αναπτυχθεί ευρέως τα τελευταία χρόνια σε εθνικό και τοπικό επίπεδο και αφορούν κυρίως το στοιχείο του P.

Γνησιότερος εκπρόσωπος αυτής της κατηγορίας μεθόδων είναι ο δείκτης P των ΗΠΑ (US P Index), που χρησιμοποιεί στοιχεία λίπανσης, κοπριάς ζώων και εδαφικά δείγματα P για να περιγράψει τη διαθεσιμότητα του στοιχείου στις διάφορες εδαφικές μονάδες, καθώς και στοιχεία για τη διαβρωσιμότητα, την περατότητα και τη γειτνίαση αυτών των μικρών γεωγραφικών περιοχών με υδάτινα σώματα για να εκτιμήσει τη δυνατότητα μεταφοράς

θρεπτικών σε αυτά (Lemunyon and Gilbert, 1993). Ένα απλό σύστημα απόδοσης βαθμών σε κάθε έναν από τους επιμέρους παράγοντες εφαρμόζεται με εμπειρικό τρόπο για να εκτιμηθεί ποιοτικά ο κίνδυνος απωλειών θρεπτικών από κάθε γεωγραφική περιοχή συναρτήσει του αθροίσματος των επιμέρους βαθμών. Ο τελικός αθροιστικός βαθμός παραπέμπει σε μία κλάση κινδύνου με λεκτικό χαρακτηρισμό από 'πολύ υψηλός' έως 'πολύ χαμηλός'. Ο αριθμός των κλάσεων ορίζει και τη διαβάθμιση ανάμεσα σ' αυτές τις δύο ακραίες περιπτώσεις. Ο δείκτης P έχει ενσωματωθεί στη Νομοθεσία των ΗΠΑ μέσω της Υπηρεσίας Προστασίας του Περιβάλλοντος (EPA, 1994) και εφαρμόζεται με διάφορες παραλλαγές σε τοπικό επίπεδο. Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζεται ένα απλό παράδειγμα χαρακτηρισμού μιας περιοχής ως προς την πιθανότητα απωλειών P.

Πίνακας 3.1 Παράδειγμα εκτίμησης κινδύνου απωλειών P εδαφικής μονάδας (πηγή: EPA, 1994).

Παράγοντες κινδύνου και αξιολόγησή τους / Απόδοση βαθμών	**Βαθμολογία**
Εδαφική διάβρωση: 7,5 tn/ac/έτος (συντ. βάρους = 1,5, μέσος κίνδυνος, τιμή = 2)	1,5 × 2 = 3,0
Διάβρωση λόγω άρδευσης: δεν εφαρμόζεται άρδευση (συντ. βάρους = 1,5, κανένας κίνδυνος, τιμή = 0)	1,5 × 0 = 0
Κλάση Υδρομορφίας: διαπερατό έδαφος (συντ. βάρους = 0,5, μικρός κίνδυνος, τιμή = 1)	0,5 × 1 = 0,5
P στο εδαφικό δείγμα: 82 lb P (συντ. βάρους = 1,0, υψηλός κίνδυνος, τιμή = 4)	1,0 × 4 = 4,0
Εφαρμογή P κατά τη λίπανση: 25 lb/ac (συντ. βάρους = 0,75, μικρός κίνδυνος, τιμή = 1)	0,75 × 1 = 0,75
Μέθοδος λίπανσης: κατά τη σπορά (συντ. βάρους = 0,5, μικρός κίνδυνος, τιμή = 1)	0,5 × 1 = 0,5
Εφαρμογή οργανικού P: 95 lb/ac (συντ. βάρους = 1,0, πολύ υψηλός κίνδυνος, τιμή = 8)	1,0 × 8 = 8,0
Μέθοδος εφαρμογής οργανικού P: επιφανειακή (συντ. βάρους = 1,0, υψηλός κίνδυνος, τιμή =4)	1,0 × 4 = 4,0
Άθροισμα	20,75

Η εδαφική μονάδα του ανωτέρω παραδείγματος συγκεντρώνει συνολική βαθμολογία 20,75 και κατατάσσεται στις περιοχές 'υψηλού' κινδύνου. Από τη βαθμολόγηση προκύπτει πως η μεγαλύτερη συνεισφορά στο αποτέλεσμα αυτό προέκυψε από την υψηλή εφαρμογή οργανικού P. Η απόδοση βαθμών και συντελεστών βάρους που οδηγεί στην τελική βαθμολόγηση των παραγόντων βασίζεται στον τρόπο που ο μελετητής θέλει να εκφράσει τον κίνδυνο που πηγάζει από τους παράγοντες αυτούς, ο οποίος μεταφράζεται στη βαρύτητα που προσδίδει στον καθένα και είναι καθαρά υποκειμενική και άρα εμπειρική. Ο αριθμός των επιμέρους παραγόντων που λαμβάνονται υπόψη και βαθμολογούνται διαφέρει από μεθοδολογία σε μεθοδολογία και εξαρτάται, εκτός από υποκειμενικούς παράγοντες, και από

τη διαθεσιμότητα δεδομένων. Πολύ συχνά αθροίζονται ξεχωριστά οι βαθμολογίες από τα φορτία ή 'παράγοντες πηγών' και εκείνες από τις συνθήκες μεταφοράς θρεπτικών ή 'παράγοντες μεταφοράς' και στη συνέχεια αποδίδονται νέα βάρη στα αθροίσματα ώστε να δοθεί συνολικά σε κάθε μία ομάδα παραγόντων επιπρόσθετη βαρύτητα στην εκτίμηση του κινδύνου απωλειών P από το έδαφος.

Σήμερα η μέθοδος του δείκτη P είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη και πολλές χώρες έχουν αναπτύξει σε τοπικό επίπεδο τον δικό τους δείκτη P, μεταβάλλοντας εν μέρει την αρχική μεθοδολογία του δείκτη των ΗΠΑ. Ο δείκτης P της Πενσυλβάνια (Sharpley et al., 2003) πολλαπλασιάζει τα αθροίσματα των παραγόντων πηγών και μεταφοράς, έτσι ώστε να προσδώσει μεγάλη επικινδυνότητα απωλειών P στην περιοχή εκείνη, που όχι μόνο δέχεται σημαντικά φορτία, αλλά και τα μεταφέρει εύκολα προς τους υδάτινους αποδέκτες. Με αυτόν τον τρόπο μία έκταση που δέχεται πολύ υψηλά φορτία θα συνεισφέρει τελικά λίγο αν το έδαφός της, η κλίση της και η γεωγραφική θέση της σε σχέση με το υδρογραφικό δίκτυο δεν επιτρέπουν την εύκολη μεταφορά των φορτίων αυτών. Οι πιο καλά ανεπτυγμένοι δείκτες P στον Ευρωπαϊκό χώρο είναι οι δείκτες των Σκανδιναβικών χωρών. Οι ιδιαίτερες μετεωρολογικές συνθήκες, που έχουν ως αποτέλεσμα το πάγωμα των εδαφών για μακροχρόνια διαστήματα, είναι προφανώς ένας σημαντικός λόγος για την πρόοδο των χωρών αυτών στην ανάπτυξη τέτοιων μεθοδολογιών. Σε εκτάσεις με παγωμένα εδάφη ευνοείται σημαντικά η απορροή και η διάβρωση ως συνέπεια της μηδενικής διήθησης. Ενδεικτικά αναφέρονται ο δείκτης P της Δανίας (Andersen and Kronvang, 2006), που καινοτομεί στο ότι υπολογίζει το βαθμό επικινδυνότητας σε υγρή και ξηρή περίοδο, και ο δείκτης της Νορβηγίας (Bechmann et al., 2003), που τροποποιεί την αρχική μεθοδολογία των ΗΠΑ στο ότι οι παράγοντες πηγών συμπεριλαμβάνουν, εκτός από τις φορτίσεις, και στοιχεία για τις αποδόσεις των καλλιεργειών και τη λήψη P από το έδαφος.

Η μεθοδολογία του δείκτη P δεν οδηγεί στον υπολογισμό του φορτίου θρεπτικών που καταλήγει σε υδάτινο σώμα αλλά παράγει έναν χάρτη τρωτότητας ή επικινδυνότητας των περιοχών σε απώλειες P. Το αποτέλεσμα αυτό είναι πολύ χρήσιμο και ιδιαίτερα ικανοποιητικό αν συνυπολογιστεί ο σχετικά μικρός όγκος των απαιτούμενων δεδομένων. Το μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου, που αναφέρεται σε μικρή χωρική κλίμακα, είναι το γεγονός ότι μπορεί με πολύ μεγάλη επιτυχία να υποδείξει τις περιοχές προς εφαρμογή ΔΠ. Ειδικά η αποσαφήνιση του είδους των παραγόντων που παίζουν τον σημαντικότερο ρόλο στις απώλειες P από τα εδάφη προς τα επιφανειακά νερά, υποδεικνύει και τον τύπο των ΔΠ προς εφαρμογή. Έτσι, σε μία περιοχή όπου η μεταφορά P ευνοείται, οι ΔΠ που ενδείκνυνται περισσότερο είναι αυτές που εμποδίζουν το χημικό στοιχείο να εγκαταλείψει το έδαφος μέσω της απορροής και στερεοαπορροής και όχι εκείνες που σχετίζονται με μείωση των φορτίσεων. Αντίθετα, μειονεκτήματα της μεθόδου είναι η ισχύς της συνήθως σε ετήσια βάση

και το γεγονός ότι για να προβλέψει φορτία απωλειών πρέπει να γίνει χρήση συντελεστών απορροής P, η εξαγωγή των οποίων εμπεριέχει μεγάλη αβεβαιότητα.

3.2.4 Στατιστικά Μοντέλα

Τα *Στατιστικά Μοντέλα* (Statistical Models) αποτελούν την πρώτη σειρά ομοιωμάτων που εμφανίστηκαν στο τέλος της δεκαετίας του 80, πριν ακόμα αναπτυχθούν τα πολύπλοκα μοντέλα που είναι σήμερα ικανά να περιγράψουν τις διαδικασίες του κύκλου των θρεπτικών στη φύση. Αποτέλεσαν έτσι για μεγάλο χρονικό διάστημα τις βασικές μεθοδολογίες εκτίμησης απωλειών θρεπτικών και ακόμα και σήμερα χρησιμοποιούνται τουλάχιστον για σύγκριση και επαλήθευση των σύγχρονων αναλυτικών μοντέλων. Τα *απλά στατιστικά ή εμπειρικά μοντέλα* (simple statistical or empirical models), που χρησιμοποιούνται για την ποσοτικοποίηση του φορτίου θρεπτικών από μη σημειακές πηγές προέλευσης, χαρακτηρίζονται από την απλότητά τους, τις μικρές απαιτήσεις σε δεδομένα εισόδου και τη δυνατότητα τους συνήθως να εφαρμόζονται σε πολύ μεγάλη χωρική κλίμακα. Τα εμπειρικά αυτά μοντέλα αποτελούνται συνήθως από μία και μοναδική μαθηματική εξίσωση η οποία περιλαμβάνει τις πιέσεις θρεπτικών στη λεκάνη ως εισόδους και κάποιους συντελεστές που καθορίζουν το ποσοστό των πιέσεων που καταλήγει στη θέση ποταμού και αποτελεί το ρυπαντικό φορτίο θρεπτικών. Οι συντελεστές έχουν προκύψει από συσχέτιση των παρατηρημένων φορτίων θρεπτικών σε θέσεις ποταμών και των γνωστών πιέσεων θρεπτικών στις εκτάσεις των ανάντη λεκανών απορροής, με τα γεωμορφολογικά και κλιματικά χαρακτηριστικά των λεκανών αυτών. Ανάμεσα στις μεθοδολογίες αυτές συγκαταλέγεται και η προσέγγιση των συντελεστών απορροής.

3.2.4.1 Το στατιστικό μοντέλο PolFlow

Ο De Wit ήταν ανάμεσα στους πρώτους που ανέπτυξαν ένα στατιστικό μοντέλο για την εκτίμηση του φορτίου θρεπτικών σε κλίμακα λεκάνης απορροής και το εφάρμοσαν στις μεγάλες λεκάνες των ποταμών Έλβα και Ρήνου (De Wit, 2000· De Wit and Behrendt, 1999). Η δομική εξίσωση υπολογισμών του μοντέλου PolFlow του De Wit (De Wit, 2001) είναι η κάτωθι:

$$L_x = a \cdot (DI_x + (b \cdot SSS_x)) \tag{3.4}$$

όπου, L_x το φορτίο στη θέση ποταμού x, DI_x, οι άμεσα εισερχόμενες ποσότητες θρεπτικών (σημειακά φορτία) στα υδατορρεύματα ανάντη του σημείου x (οι παράμετροι ως μέσες τιμές 5αετίας), SSS_x το περίσσευμα θρεπτικών στην επιφάνεια του εδάφους ανάντη του x (μέση τιμή 30ετίας), a συντελεστής που περιγράφει τις απώλειες από κατακράτηση θρεπτικών στο ποτάμι (river retention) και b συντελεστής που περιγράφει τις απώλειες θρεπτικών στο έδαφος και στα υπόγεια νερά (soil and groundwater retention). Η Εξίσωση 3.4 εφαρμόζεται σε κάθε υπολεκάνη ξεχωριστά μέχρι την τελική έξοδο της ευρύτερης λεκάνης. Το περίσσευμα θρεπτικών στην επιφάνεια του εδάφους (SSS_x) περιλαμβάνει όλες τις εισερχόμενες ποσότητες στο έδαφος μείον τις εξερχόμενες ποσότητες θρεπτικών, που λαμβάνονται από τις καλλιέργειες. Ο De Wit χρησιμοποιεί όμως για την παράμετρο αυτή μια μορφή 'μνήμης' μιας και ενσωματώνει το μέσο όρο 30 ετών. Ο συντελεστής b αναφέρεται συνολικά στις απώλειες κατακράτησης (retention) στο έδαφος και στα υπόγεια νερά στη λεκάνη και περιλαμβάνει ακόμα, όταν πρόκειται για το N, και τις απώλειες σε αέρια NH_3 και την απονιτροποίηση που υφίσταται το N στο ανώτερο στρώμα του εδάφους.

Οι De Wit and Behrendt (1999) συσχέτισαν την παράμετρο b με διάφορα χαρακτηριστικά της λεκάνης και βρήκαν ότι η γεωλογία είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας. Η κατακράτηση ($1–b$) στις λεκάνες του Ρήνου και του Elbe ήταν μεγαλύτερη για τους λιγότερο σταθερούς γεωλογικούς σχηματισμούς (60-100%) απ' ότι για τους πιο σταθερούς (30-90%). Αυτό ερμηνεύτηκε με βάση το χρόνο ταξιδιού του νερού, που είναι μεγαλύτερος στα λιγότερο σταθερά πετρώματα με ταυτόχρονα μεγαλύτερο διαθέσιμο χρόνο για απονιτροποίηση. Μία δεύτερη πιο προσδιοριστική προσέγγιση (De Wit, 2001) εκτιμά τις απώλειες N στην ατμόσφαιρα από το έδαφος, τον αβαθή και το βαθύ υδροφορέα ξεχωριστά. Η απονιτροποίηση στο έδαφος είναι συνάρτηση του περισσεύματος N και του τύπου εδάφους, ενώ στον αβαθή και βαθύ υδροφορέα εξαρτάται από την εισερχόμενη ποσότητα N και τη γεωλογία. Παρόλο που πρόκειται για αδρές εκτιμήσεις βασισμένες σε επί τόπου εργασίες στη Γερμανία, η προσέγγιση αυτή παρέχει σημαντική πληροφορία για τις απώλειες απονιτροποίησης από διαφορετικούς γεωλογικούς σχηματισμούς με τα πυριγενή πετρώματα λιγότερο επιρρεπή στο φαινόμενο και τους ασταθείς γεωλογικούς σχηματισμούς περισσότερο.

Το απλό αυτό μοντέλο μπορεί να εκτιμήσει το μέσο ετήσιο φορτίο θρεπτικών 5ετίας σε διατομή ποταμού, με γνωστά τα σημειακά φορτία, τον υπολογισμό του περισσεύματος 30ετίας, στοιχεία για τη γεωλογία (εκτίμηση του συντελεστή b) και στοιχεία για το υδρογραφικό δίκτυο (εκτίμηση του συντελεστή a). Αν και η μεθοδολογία φαντάζει πολύ απλή, εκτίμησε τα φορτία στους δύο πολύ μεγάλους ποταμούς Έλβα και Ρήνο με μεγάλη επιτυχία (De Wit, 2000· De Wit and Behrendt, 1999).

3.2.4.2 Το μοντέλο GREEN

Το στατιστικό μοντέλο GREEN (Geospatial Regression Equation for European Nutrient losses) αναπτύχθηκε από τους Grizzetti et al. (2005a) και βασίζεται σε εξισώσεις παλινδρόμησης για να εκτιμήσει σε λογαριθμική κλίμακα τα φορτία θρεπτικών στο ποτάμι. Το απλό αυτό μοντέλο εμπνεύστηκε από τη μεθοδολογία SPARROW (SPAtially Referenced Regressions On Watershed attributes), (Smith et al., 1997), συσχετίσεων των φορτίων με δεδομένα λεκανών και εφαρμόστηκε από το JRC για την εκτίμηση των πιέσεων N και P σε Ευρωπαϊκή κλίμακα (Grizzetti and Bouraoui, 2006). Η βασική εξίσωση είναι:

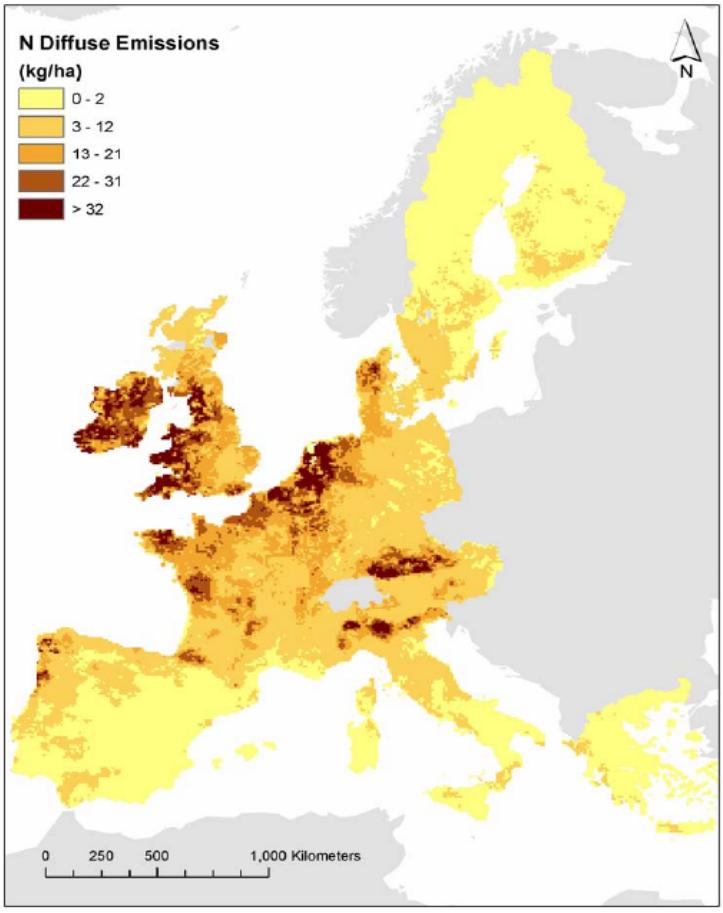
$$\log L_i = \log(x_{DS,i} \cdot B_i \cdot R_i + x_{PS,i} \cdot R_i) + E \qquad (3.5)$$

όπου L_i είναι το ετήσιο φορτίο N ή P (t/έτος), B_i είναι αδιάστατη παράμετρος μείωσης φορτίου στη λεκάνη, R_i είναι αδιάστατη παράμετρος μείωσης φορτίου στο ποτάμι (εκφράζουν αντίστοιχα τις απώλειες θρεπτικών από κατακράτηση σε έδαφος και ποτάμι αντίστοιχα), $x_{DS,i}$ είναι το άθροισμα των φορτίων N ή P από μη σημειακές πηγές (t/έτος) και $x_{PS,i}$ είναι το άθροισμα των φορτίων N ή P από σημειακές πηγές (t/έτος), με E τον παράγοντα σφάλματος (t/έτος).

Βασική διαφορά του μοντέλου GREEN με τη μεθοδολογία του De Wit, είναι ότι χρησιμοποιεί εισερχόμενα φορτία θρεπτικών στη λεκάνη απορροής αντί για περισσεύματα με αποτέλεσμα οι ποσότητες θρεπτικών που καταναλώνονται από τα φυτά να συμπεριλαμβάνονται στον όρο κατακράτησης του εδάφους. Επίσης, ο παράγοντας μείωσης θρεπτικών εντός των εδαφών της λεκάνης B_i στο μοντέλο GREEN έχει εκτιμηθεί στατιστικά συναρτήσει της βροχόπτωσης κατά την υγρή περίοδο μόνο και όχι άλλων χαρακτηριστικών της λεκάνης. Η βροχόπτωση αυτή βρέθηκε να είναι η πιο σημαντική στατιστικά παράμετρος. Ο παράγοντας R_i που εκφράζει την κατακράτηση στο ποτάμι προκύπτει από συσχέτιση με την παροχή την ξηρή περίοδο. Από την ανάλυση φάνηκε ότι η παροχή αυτή ήταν στατιστικά πολύ σημαντική και το γεγονός αυτό εξηγήθηκε από την ένταση του φαινομένου της απονιτροποίησης κατά την περίοδο που οι θερμοκρασίες είναι μεγάλες και η ροή του ποταμού χαμηλή.

Το μοντέλο GREEN έχει εφαρμοστεί σε μεγάλη κλίμακα για την εκτίμηση των ετήσιων ποσοτήτων N και P σε 7 μεγάλα Υδατικά Διαμερίσματα της Κεντρικής Ευρώπης (Danube, Rhine, Elbe, Weser and Ems, Meuse, Seine and Rhone), ενώ σε μικρότερη κλίμακα έχει εφαρμοστεί με επιτυχία στις λεκάνες Wash (Ηνωμένο Βασίλειο), Zelivka (Τσεχία) και Vilaine (Γαλλία) για τον επιμερισμό του φορτίου N ποταμού από διάφορες πηγές (Grizzetti et al., 2005a) και στη λεκάνη Loire της Γαλλίας (Bouraoui and Grizzetti, 2008). Συγκρινόμενο

δε με το διαχειριστικό μοντέλο λεκάνης απορροής SWAT (Arnold et al., 1998) στη λεκάνη Wash (Grizzetti et al., 2005b), έδωσε πολύ καλά αποτελέσματα. Οι εκτιμήσεις γενικά είναι πολύ επιτυχημένες και βελτιώνονται ανάλογα με το μέγεθος των φορτίων των ποταμών. Το μοντέλο GREEN έτυχε μεγάλης αναγνώρισης όταν εφαρμόστηκε με σκοπό την παροχή γενικευμένων εκτιμήσεων εισροών N στα υδάτινα σώματα ολόκληρου του Ευρωπαϊκού χώρου (Σχήμα 3.5), αποτελώντας τη μόνη επίσημα δημοσιευμένη εκτίμηση μέχρι σήμερα (Grizzetti and Bouraoui, 2006). Για τον υπολογισμό των μη σημειακών φορτίων $x_{DS,i}$ της Εξίσωσης 3.5 απαιτήθηκε η χρήση δεδομένων κάλυψης και διαχείρισης γης από το CORINE και τη Eurostat αντίστοιχα, ενώ οι ποσότητες των λιπάνσεων υπολογίστηκαν με βάση δεδομένα του Διεθνούς Οργανισμού Λιπασμάτων και του ΟΟΣΑ. Τα φορτία θρεπτικών σε θέσεις ποταμών αποκτήθηκαν από τοπικές και εθνικές αρχές όπως και από διεθνείς επιτροπές λεκανών απορροής. Δεδομένα τέλος για σημειακές φορτίσεις αντλήθηκαν από τη βάση δεδομένων της Οδηγίας των αστικών αποβλήτων.



Σχήμα 3.5 Εισροές N στα επιφανειακά νερά των χωρών της ΕΕ-15 από μη σημειακές πηγές (πηγή: Grizzeti and Bouraoui, 2006).

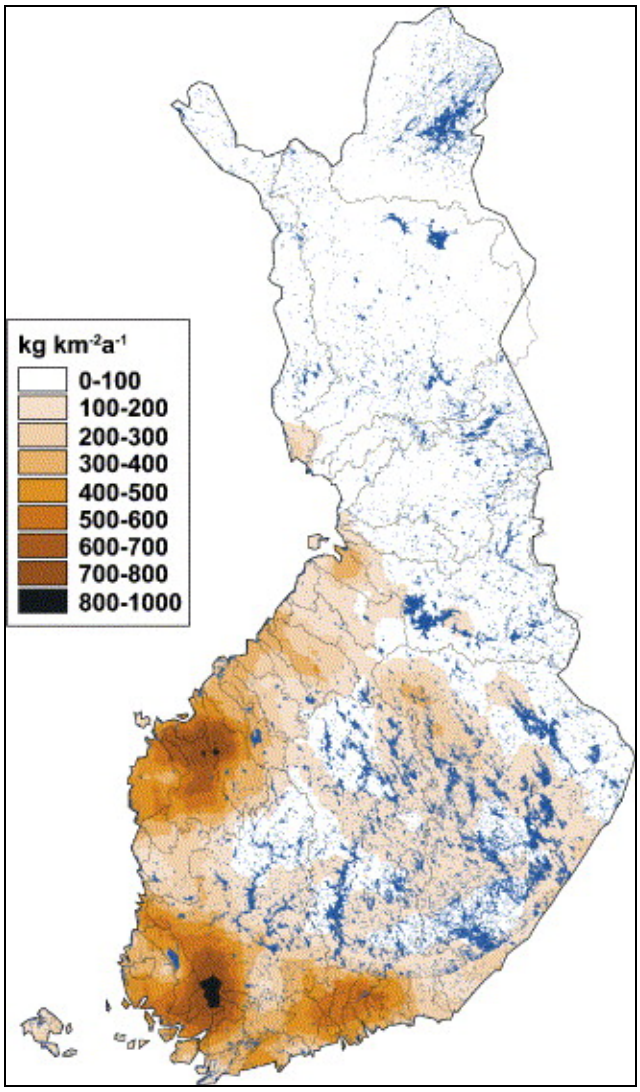
Με βάση το Σχήμα 3.5, δεν υπάρχει ελληνικό έδαφος που να ανήκει σε υψηλότερη κατηγορία από τη δεύτερη με ετήσιες απώλειες N στα επιφανειακά νερά έως 12kg/ha ετησίως. Μάλιστα, οι υψηλότερες αυτές τιμές, όπως διακρίνεται, αντιστοιχούν σε περιοχές της Δυτικής Ελλάδας και της Ηπείρου, προφανώς εξαιτίας των πιέσεων από την εκτεταμένη κτηνοτροφία και την απόπλυση του N από το έδαφος λόγω των μεγάλων βροχοπτώσεων. Ωστόσο, τονίζεται ότι και αυτός ο χάρτης απεικονίζει τις απώλειες ανά ha συνολικής έκτασης και όχι αγροτικής με μικρότερη μονάδα χάρτη την έκταση των $10km^2$.

3.2.4.3 Μέθοδος των Συντελεστών Απορροής

Σύμφωνα με τη μέθοδο των *Συντελεστών Απορροής* (Export Coefficient Approach), για τον υπολογισμό της ετήσιας ποσότητας θρεπτικών που μεταφέρεται προς τα υδάτινα σώματα από κάθε ομοιογενή γεωγραφική περιοχή λαμβάνονται υπόψη παράγοντες όπως: ο τύπος κάλυψης γης, η χρήση γης, το κλίμα, η τοπογραφία και το έδαφος. Η μέθοδος, που αρχικά αναπτύχθηκε από τον Johnes (1996), αντιστοιχεί σε κάθε ομοιογενή περιοχή συντελεστές απορροής με βάση κάποια από τα χαρακτηριστικά που προαναφέρθηκαν και με εμπειρικό τρόπο. Η μέθοδος ακολουθεί την προσέγγιση της μεθόδου 'εκτίμησης κινδύνου' που περιγράφηκε στην ενότητα 3.2.3 από την οποία διαφέρει ουσιαστικά στο ότι κάνει ποσοτική εκτίμηση των φορτίων θρεπτικών και όχι μια απλή ποιοτική εκτίμηση του μεγέθους του κινδύνου απωλειών από μία έκταση. Αυτό επιτυγχάνεται με τον πολλαπλασιασμό του διαθέσιμου φορτίου N ή P στο έδαφος με έναν συντελεστή απορροής, που έχει προκύψει συναρτήσει των διαφόρων παραγόντων. Η απόδοση βαρών σε αυτούς τους παράγοντες είναι και εδώ εμπειρική και εξαρτάται από τη γνώση των φυσικών μηχανισμών και την εμπειρία του μελετητή. Οι συντελεστές που αποδίδονται στις διάφορες γεωγραφικές περιοχές προκύπτουν από το συνδυασμό πληροφορίας που παρέχεται από δεδομένα πεδίου, από εργασίες με μοντέλα, από την κρίση του μελετητή ή ακόμα από καταγραφή δεδομένων του δικτύου παρακολούθησης μικρών ομοιογενών λεκανών απορροής. Στην τελευταία περίπτωση ο συντελεστής μπορεί να συνυπολογίζει και την κατακράτηση που λαμβάνει χώρα στο ποτάμι κατά τη μεταφορά των στοιχείων έως την τελική έξοδο της λεκάνης απορροής. Η χρήση τεχνολογιών ΣΓΠ επιτρέπει την μετέπειτα άθροιση των αποτελεσμάτων από τις επιμέρους γεωγραφικές περιοχές στην επιθυμητή χωρική κλίμακα για την εξαγωγή των συνολικών ποσοτήτων θρεπτικών από μία έκταση.

Η εν λόγω μεθοδολογία αποτελεί χρήσιμο διαχειριστικό εργαλείο για την εναρμόνιση με την Οδηγία-Πλαίσιο 2000/60. Στην Αγγλία έχουν καθοριστεί συντελεστές για την εκτίμηση των απωλειών P από αγροτικές δραστηριότητες (DEFRA, 2006), ενώ στα πλαίσια των εργασιών του Οργανισμού Helcom (2004), έχουν μετρηθεί οι απώλειες θρεπτικών από

πολλές ομοιογενείς αγροτικές λεκάνες της Δανίας, Εσθονίας, Πολωνίας και Φινλανδίας με σκοπό τον επιμερισμό των φορτίων θρεπτικών σε εθνική κλίμακα. Οι Johnes and Butterfield (2002) έχουν δημοσιεύσει επίσης συντελεστές απορροής στο Ηνωμένο Βασίλειο με χρήση γεωμορφοκλιματικών παραμέτρων και έχουν ποσοτικοποιήσει την αβεβαιότητα που υπεισέρχεται στον υπολογισμό τους, ενώ οι Hetling et al. (1999) ανέπτυξαν τη μεθοδολογία σε μεγάλες λεκάνες απορροής. Οι Lepistö et al. (2006) εφάρμοσαν τη μεθοδολογία των συντελεστών απορροής για τον υπολογισμό των ετήσιων απωλειών N στα επιφανειακά νερά της Φινλανδίας και παρήγαγαν χάρτη της χώρας με ανάλυση 1km×1km (Σχήμα 3.6).



Σχήμα 3.6 Απώλειες N σε kgN/km^2/έτος στη Φινλανδία (πηγή: Lepistö et al., 2006).

Η μεθοδολογία των συντελεστών απορροής, αν και περιέχει αρκετή αβεβαιότητα, αποτελεί έναν σύντομο, απλό και όχι ιδιαίτερα απαιτητικό σε δεδομένα τρόπο ποσοτικοποίησης της αγροτικής συνεισφοράς στη ρύπανση των υδάτων από θρεπτικά

στοιχεία. Επιπλέον, η βάση δεδομένων του CORINE παρέχει ενιαίους τύπους κάλυψης γης για όλη την Ευρώπη, στους οποίους μπορούν να αποδοθούν συντελεστές απορροής. Πολλοί μελετητές όπως οι Smith et al. (2005) και οι Jordan et al. (2000) στη Βόρεια Ιρλανδία έχουν κάνει χρήση του CORINE για την κατάρτιση πινάκων με συντελεστές απορροής. Παρόλα αυτά οι συντελεστές δεν είναι εύκολο να παραχθούν χωρίς τη γνώση και εμπειρία των τοπικών συνθηκών και έτσι μία γενικευμένη χρήση ενιαίων συντελεστών για όλη την Ευρώπη θα ήταν παρακινδυνευμένη. Η ετήσια χρονική βάση εφαρμογής και η χωρική κλίμακα Υδατικού Διαμερίσματος ενδείκνυνται περισσότερο και υπόσχονται επιτυχείς εκτιμήσεις των φορτίων του ποταμού, ακόμα και μετά από εφαρμογή ΔΠ με μεταβολές στις πιέσεις θρεπτικών στην αγροτική γη (Johnes et al., 2007).

3.2.4.4 Άλλα Στατιστικά Μοντέλα

Ένα στατιστικό μοντέλο, βασισμένο σε εξισώσεις που συσχετίζουν τις συγκεντρώσεις των ανόργανων μορφών του N και P σε θέσεις ποταμού με χαρακτηριστικά των ανάντη λεκανών απορροής αναπτύχθηκε για την Αγγλία και την Ουαλία από τους Davies and Neal (2007). Από τους κλιματικούς και γεωμορφολογικούς παράγοντες που χρησιμοποιήθηκαν για 168 θέσεις παρατήρησης η έκταση της αγροτικής γης και η έκταση και ο πληθυσμός των αστικών περιοχών ήταν οι σημαντικότεροι παράγοντες που σχεδόν εξ ολοκλήρου καθορίζουν τις συγκεντρώσεις των $NO3^-$ και $PO4^-$ αντίστοιχα. Η συσχέτιση των συγκεντρώσεων με τους παράγοντες αυτούς ήταν ισχυρά θετική σε αντίθεση με άλλους παράγοντες όπως η ενεργός βροχόπτωση και ο δείκτης βασικής ροής που παρουσίασαν μηδενική ή και ελαφρά αρνητική συσχέτιση.

Οι Kronvang et al. (1995) έχουν κάνει παρόμοια προσπάθεια στη Δανία χρησιμοποιώντας 270 θέσεις παρατήρησης στα ποτάμια της χώρας. Μετά από την στατιστική ανάλυσή τους προέκυψε ότι τέσσερις παράγοντες συσχετίζονται με τα φορτία N στο ποτάμι. Αυτοί είναι: η μέση ετήσια απορροή, το ποσοστό της λεκάνης που καλύπτεται από αγροτική γη, το ποσοστό των αμμωδών (διαπερατών) εδαφών και η έκταση της λεκάνης. Η σχέση της τελευταίας με τα φορτία N αποδόθηκε στο ότι η βασική ροή είναι συνήθως μεγαλύτερη όσο αυξάνεται το μέγεθος της λεκάνης με αποτέλεσμα τη συνεχή συνεισφορά με αζωτούχες ενώσεις προς τα ποτάμια. Η συσχέτιση του P είχε να κάνει με τους τρεις πρώτους προαναφερθέντες παράγοντες και καθόλου με την έκταση της λεκάνης. Το γεγονός αυτό ενίσχυσε το συμπέρασμα για το ρόλο της βασικής ροής στη μεταφορά ενώσεων κυρίως του N και επιβεβαίωσε τη σχέση που διέπει τον P με επιφανειακές οδούς διαφυγής (επιφανειακή απορροή, διάβρωση), ως μη διαλυτό στοιχείο στο έδαφος. Οι εν λόγω σχέσεις μπορούν με γνωστή κάθε φορά την απορροή, που εύκολα εκτιμάται από τη βροχόπτωση, και με γνωστές

τις πιθανές μεταβολές στα ποσοστά των αγροτικών εκτάσεων, να εκτιμά τα ετήσια φορτία N και P σε θέσεις ποταμών λεκανών απορροής.

Ένα ακόμα στατιστικό μοντέλο που αναπτύχθηκε στα μέσα της προηγούμενης δεκαετίας είναι το MESAW (Grimvall and Stalnacke, 1996). Το μοντέλο χρησιμοποιεί μη γραμμικές εξισώσεις που συσχετίζουν χαρακτηριστικά της λεκάνης, όπως χρήσεις γης, εδαφικές ιδιότητες, αριθμό υπολεκανών, σημειακές φορτίσεις, ατμοσφαιρική εναπόθεση, κ.α., με μετρήσεις φορτίων θρεπτικών σε θέσεις ποταμού. Η χρήση του μοντέλου σε λεκάνη έκτασης 44000 km^2 στα όρια των χωρών Λετονία, Εσθονία και Ρωσία, οδήγησε σε ικανοποιητική σύγκλιση των προβλεπομένων φορτίων θρεπτικών με τα παρατηρημένα που καταλήγουν μέσω του υδρογραφικού δικτύου στη λίμνη 'Peipsi' (Vassilief and Stalnacke, 2005). Το μοντέλο, αν και απλό, έχει καταστεί μία πολύ αξιόπιστη μεθοδολογία για την ταυτόχρονη εκτίμηση των φορτίων θρεπτικών, τον επιμερισμό τους ανάλογα με τις πηγές προέλευσης και της κατακράτησης των φορτίων αυτών στην υγρή φάση. Το μοντέλο MESAW συγκρίθηκε με ένα δυναμικό μοντέλο με μεγάλες δυνατότητες προσομοίωσης των φυσικών διεργασιών μετά από εφαρμογή στη λεκάνη 'Matsalu Bay' της Εσθονίας και αποδείχτηκε ότι έδωσε το ίδιο ικανοποιητικά αποτελέσματα, τόσο ως προς τα εκτιμημένα φορτία από μη σημειακές πηγές όσο και ως προς τους ρυθμούς κατακράτησης θρεπτικών στο ποτάμι (Liden et al., 1999).

3.2.5 Προσδιοριστικά Μοντέλα Προσομοίωσης Διαδικασιών

3.2.5.1 Γενικά

Η κατηγορία των *Προσδιοριστικών Μοντέλων Προσομοίωσης των Φυσικών Διεργασιών* (Διαδικασιών), (Deterministic Process-Based Models) του υδρολογικού κύκλου, της διάβρωσης και του κύκλου των θρεπτικών περιλαμβάνει σήμερα το μεγαλύτερο εύρος διαθέσιμων μεθοδολογιών ποσοτικοποίησης της ρύπανσης των υδάτων από θρεπτικά και εκτίμησης των μεταβολών της μετά από εφαρμογή ΔΠ. Εκτός από το να προσομοιώσουν σωστά την ποιότητα του νερού στο ποτάμι, τα μοντέλα αυτά έχουν στόχο να εκτιμήσουν με μεγάλη ακρίβεια τη *συνεισφορά των διαφορετικών πηγών* θρεπτικών στη ρύπανση (source apportionment) και να προσομοιώσουν αναλυτικά τις διαφορετικές *οδούς μεταφοράς* των θρεπτικών προς τα επιφανειακά νερά (transport pathways). Για να επιτευχθεί αυτό, τα μοντέλα είναι καταρχήν υδρολογικά, μπορούν δηλαδή να προσομοιώνουν πλήρως τον υδρολογικό κύκλο και τις συνιστώσες του ώστε να αποτελούν μία αξιόπιστη αναπαράσταση της συμπεριφοράς και απόκρισης του φυσικού συστήματος. Ως ένα πολύπλοκο σύστημα νοείται η λεκάνη απορροής και *προσδιοριστικό* (deterministic), το μοντέλο χωρίς πιθανοτικά

('τυχαία') τμήματα, που είναι ικανό να προσομοιώσει το μετασχηματισμό των εισόδων της λεκάνης σε εξόδους. Στα *ντετερμινιστικά* μοντέλα, η έξοδος είναι καθορισμένη, με δεδομένο το σύνολο των ποσοτήτων και σχέσεων εισόδου του μοντέλου. Τα σύγχρονα μοντέλα αυτής της κατηγορίας στοχεύουν στην κατανόηση και αναλυτική προσομοίωση των διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα στη λεκάνη απορροής και στο υδρογραφικό δίκτυο και σχετίζονται με τον κύκλο του N και του P στη φύση και με τη ρύπανση των υδάτων από τα στοιχεία αυτά. Λόγω της αναλυτικής προσομοίωσης των επιμέρους υδρο-χημικών διαδικασιών μέσω της αξιοποίησης σημαντικών γνώσεων και δεδομένων φυσικής και εννοιολογικής μαθηματικής βάσης, τα εν λόγω μοντέλα χαρακτηρίζονται ως *οικο-υδρολογικά μοντέλα προσομοίωσης διαδικασιών* (eco-hydrological process-based models), (Krysanova et al., 2005).

Τα μοντέλα της κατηγορίας αυτής διαχωρίζονται με βάση τη μαθηματική δομή τους σε μοντέλα *φυσικής βάσης* (physically-based) και *εννοιολογικά* (conceptual). Ως φυσικής βάσης μοντέλο νοείται εκείνο που οι διαδικασίες περιγράφονται με βάση εξισώσεις της φυσικής, που περιγράφουν δηλαδή του φυσικούς νόμους και αποτελούν θεμελιώδεις αρχές με γενική ισχύ. Η αδυναμία πλήρους προσομοίωσης μιας διαδικασίας με τέτοιες εξισώσεις, οδήγησε στη δεύτερη κατηγορία των μοντέλων. Η πράξη δείχνει ότι είναι σχεδόν αδύνατον ένα πολύπλοκο μοντέλο περιγραφής των φυσικών διεργασιών να είναι απόλυτα φυσικής βάσης, απλούστατα, διότι οι ενδιάμεσες διεργασίες του κύκλου του νερού και των θρεπτικών δεν είναι τελείως γνωστές. Για τη μείωση των απαιτήσεων σε δεδομένα τα μοντέλα φυσικής βάσης προσομοιώνουν με εμπειρικό τρόπο αρκετές από τις βασικότερες φυσικές διεργασίες στη λεκάνη απορροής μεταπίπτοντας ουσιαστικά σε εννοιολογικά.

Σε κάθε περίπτωση, η αναλυτικότερη περιγραφή των φυσικών διαδικασιών καθιστά τα μοντέλα αυτά πολύ πιο απαιτητικά σε δεδομένα σε σχέση με τις απλές στατιστικές μεθοδολογίες με αποτέλεσμα η χρήση τους να ενδείκνυται περισσότερο σε κλίμακα λεκάνης απορροής. Οι απαιτήσεις για ακριβή προσομοίωση των μηχανισμών που καθορίζουν τις απώλειες θρεπτικών από το έδαφος στο νερό απαιτούν την εφαρμογή τους σε *ημι-κατανεμημένη* (semi-distributed) ή *πλήρως κατανεμημένη* (fully distributed) μορφή και όχι *συγκεντρωτική ή αδιαμέριστη* (lumped). Η λεκάνη απορροής χωρίζεται δηλαδή σε μικρότερες εσωτερικές υπολεκάνες (nested subcatchments), οι οποίες είναι δυνατόν να διαιρούνται περαιτέρω σε μικρότερες ομοιογενείς χωρικές οντότητες βάσει π.χ. των εδαφικών χαρακτηριστικών και των χρήσεων γης. Το μέγεθος των χωρικών αυτών οντοτήτων είναι στη μεγαλύτερη δυνατή ανάλυση το *κύτταρο* (pixel), που μπορεί να αντιστοιχεί σε έκταση ακόμα και μερικών τετραγωνικών μέτρων, αλλά πιο συχνά είναι η *Υδρολογική Μονάδα Απόκρισης* (Hydrologic Response Unit – HRU), ή απλούστερα *Υδρολογική Μονάδα* (ΥΜ) που έχει μεταβλητό μέγεθος από 1ha έως λίγα km^2. Όταν όλες οι παράμετροι του μοντέλου είναι δυνατόν να οριστούν για κάθε μία ομοιογενή περιοχή (κύτταρο ή ΥΜ), τότε το μοντέλο

χαρακτηρίζεται πλήρως κατανεμημένο. Όταν όμως έστω και ένας μικρός αριθμός παραμέτρων δε μπορεί να οριστεί σε μεγαλύτερη χωρική ανάλυση από αυτή της υπολεκάνης, τότε το μοντέλο λειτουργεί σε ημι-κατανεμημένη μορφή. Η ιδεατή περίπτωση της πλήρως κατανεμημένης προσέγγισης θα απαιτούσε, μεταξύ άλλων, δεδομένα βροχόπτωσης από μετεωρολογικά ραντάρ ώστε να είναι δυνατόν σε κάθε μία ομοιογενή γεωγραφική περιοχή να αποδοθεί διαφορετική βροχόπτωση. Στην πράξη επειδή είναι σχεδόν αδύνατο να αποδοθούν τιμές σε όλες τις παραμέτρους και κατ' επέκταση να προσομοιωθούν όλες οι φυσικές διεργασίες σε τόσο μικρή χωρική κλίμακα, τα συνήθη μοντέλα είναι ως επί τω πλείστον ημι-κατανεμημένα. Σε κάθε περίπτωση και με την όποια διαίρεση της λεκάνης, οι διαφοροποιήσεις στο κλίμα και στα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά (κλίσεις, εδαφοκάλυψη, τύπος εδάφους) είναι δυνατόν να λαμβάνονται υπόψη και να οδηγούν σε ακριβέστερες εκτιμήσεις σε πολλαπλές θέσεις στη λεκάνη απορροής. Κατά συνέπεια τα μοντέλα της κατηγορίας αυτής συνδέονται στενά με εφαρμογές ΣΓΠ.

Με τη χρήση των προσδιοριστικών μοντέλων αξιοποιείται ο μεγάλος όγκος δεδομένων που διατίθεται σε πολλές λεκάνες απορροής και επιτρέπεται η μελέτη των φυσικών διεργασιών σε πολύ μικρότερη χρονική κλίμακα από την ετήσια π.χ. μηνιαία και ημερήσια, καθιστώντας τα μοντέλα *συνεχή* και *δυναμικά*, ικανά δηλαδή για προσομοίωση σε συνεχή χρόνο και για πολλά έτη. Λόγω της αναλυτικής προσομοίωσης, περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με διεργασίες όπως η κατακράτηση θρεπτικών στο έδαφος, οι διαφυγές N προς στην ατμόσφαιρα, η μεταφορά θρεπτικών μέσω της επιφανειακής απορροής, της βασικής ροής και της στερεοαπορροής, καθώς και ο χρόνος και ο τρόπος καλλιέργειας (αρόσεις, αρδεύσεις, λιπάνσεις κλπ.), μπορούν να περιγραφούν. Επίσης, μπορεί να συνυπολογιστεί κάθε είδους πηγή συνεισφοράς θρεπτικών, συμπεριλαμβανομένων των σημειακών πηγών, αλλά και των φυσικών μη σημειακών, όπως η συνεισφορά σε θρεπτικά των φυσικών εκτάσεων και της ατμόσφαιρας. Μεγάλο πλεονέκτημα είναι συνεπώς η ικανότητα των μοντέλων αυτών να εξετάζουν τις επιπτώσεις *σεναρίων* με μεταβολές σε πλήθος παραγόντων που καθορίζουν το βαθμό της υδατικής ρύπανσης από θρεπτικά, όπως: μεταβολές στις χρήσεις γης, στις καλλιεργητικές πρακτικές, στην επεξεργασία των υγρών αποβλήτων, ακόμα και μεταβολές στο κλίμα, που μεταφράζονται σε μακροπρόθεσμες αλλαγές στη χρονική κατανομή και στο συνολικό ύψος των βροχοπτώσεων και στη θερμοκρασία (Cherry et al., 2008).

Μειονέκτημα των προσδιοριστικών μοντέλων αποτελεί η ανάγκη *βαθμονόμησης* ή *ρύθμισης* και *επαλήθευσης* της προσομοίωσής τους με βάση πραγματικές μετρήσεις κατά μήκος του ποταμού. Ως βαθμονόμηση καλείται η συστηματική διαδικασία προσαρμογής των τιμών των παραμέτρων ενός μοντέλου, έτσι ώστε οι προσομοιωμένες αποκρίσεις του (παροχές, εξατμισοδιαπνοή, στερεοπαροχές, φορτία N και P) να προσεγγίζουν όσο το δυνατό

περισσότερο τις αντίστοιχες παρατηρημένες τιμές. Στο πρόβλημα βαθμονόμησης οι παράμετροι που περιγράφουν τις εσωτερικές διεργασίες δεν είναι πάντοτε γνωστές, οπότε ζητείται ουσιαστικά η βελτιστοποίηση της ίδιας της μαθηματικής δομής του μοντέλου με τρόπο ώστε η προσομοιωμένη απόκριση να προσεγγίζει καλύτερα την παρατηρημένη συμπεριφορά του υδρολογικού συστήματος. Δεδομένου ότι σε ένα μοντέλο φυσικής βάσης όλες οι παράμετροι είναι θεωρητικά μετρήσιμες ιδιότητες του φυσικού συστήματος, μια τέτοια στρατηγική αναιρεί το χαρακτηρισμό του μοντέλου ως φυσικής βάσης, αφού η προσαρμογή έστω και μιας παραμέτρου κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης καθιστά την όλη προσέγγιση εννοιολογική (Ευστρατιάδης, 2008). Όσο πιο πολύπλοκο είναι ένα μοντέλο, τόσο πιο δύσκολο είναι να προσομοιωθούν με υψηλό βαθμό βεβαιότητας οι διάφορες φυσικές διεργασίες, κάτι που γίνεται περισσότερο εφικτό όταν διατίθενται πολλά δεδομένα πεδίου, που όμως η συλλογή τους απαιτεί χρόνο και έχει σημαντικό κόστος. Η δυσκολία στη βαθμονόμηση μπορεί να οφείλεται σε εσωτερικές παραμέτρους του μοντέλου που στερούνται πλήρους φυσικής σημασίας και προσαρμόζονται εμπειρικά. Το γεγονός αυτό οδηγεί πολύ συχνά σε ισοδύναμες λύσεις και στο φαινόμενο της *ισοδυναμίας* (equifinality), δηλαδή στην ικανοποιητική σύγκλιση προσομοιωμένων και παρατηρημένων δεδομένων ή γενικότερα στο ίδιο αποτέλεσμα από πολλούς συνδυασμούς τιμών των παραμέτρων του μοντέλου, ένα συχνό πρόβλημα που προσδίδει σημαντική αβεβαιότητα στην προσομοίωση (Schulz et al., 1999). Το φαινόμενο αυτό ενισχύεται όταν η βαθμονόμηση γίνεται σε μία και μοναδική θέση ποταμού (συνήθως στην έξοδο της λεκάνης), με αποτέλεσμα να μην είναι γνωστό ποιος συνδυασμός αποκρίσεων της λεκάνης σε ενδιάμεσα σημεία ανταποκρίνεται καλύτερα στην πραγματικότητα. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού είναι απαραίτητη η καταγραφή των φυσικοχημικών παραμέτρων του νερού σε ενδιάμεσες θέσεις που αντιπροσωπεύουν μικρές εκτάσεις, το δυνατόν πιο ομοιογενείς ως προς τα γεωμορφολογικά και κλιματικά τους χαρακτηριστικά (Cherry et al., 2008).

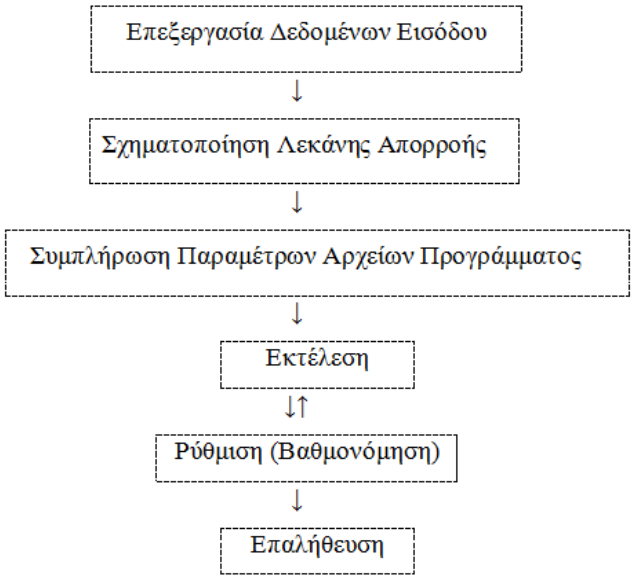
Η βαθμονόμηση των μοντέλων μπορεί να είναι *χειροκίνητη*, *αυτόματη* ή *ημιαυτόματη*. Στην πρώτη περίπτωση ο χρήστης ελέγχει πλήρως τη διαδικασία αφού μετά από μία αλλαγή στις παραμέτρους ελέγχει εμπειρικά μέσω γραφημάτων ή και στατιστικά με χρήση κάποιου δείκτη τα αποτελέσματα και αποφαίνεται για την επιτυχία της προσομοίωσης. Η διαδικασία είναι ιδιαίτερα επίπονη όταν το μοντέλο είναι πολυπαραμετρικό. Η αυτόνομη βαθμονόμηση προσφέρει τη δυνατότητα πολλαπλών δοκιμών με τυχαίες αλλαγές στις παραμέτρους με σκοπό τα αποτελέσματα του μοντέλου να παρουσιάζουν την επιθυμητή συνέπεια με τα παρατηρημένα. Αν και η μέθοδος υπόσχεται την εύρεση της βέλτιστης λύσης, χρειάζεται προσοχή ώστε να μην επιτραπεί η ανεξέλεγκτη και χωρίς περιορισμούς μεταβολή παραμέτρων με σκοπό την επίλυση αποκλειστικά ενός μαθηματικού προβλήματος που δε ‘σέβεται’ τους νόμους του φυσικού συστήματος. Η καλύτερη ίσως μεθοδολογία είναι η

ημιαυτόματη βαθμονόμηση, η οποία αποτελεί το συνδυασμό των δύο προηγούμενων. Στη διαδικασία αυτή ο χρήστης κάνει αρχικά κάποιες μεταβολές με βάση την εμπειρία και τη γνώση του, αποκλείει κάποιες παραμέτρους από τη διαδικασία της βαθμονόμησης και στη συνέχεια αφήνει την αυτόματη διαδικασία να ψάξει τη βέλτιστη λύση μεταβάλλοντας τις κατάλληλες παραμέτρους σε ένα στενότερο εύρος τιμών. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται η εγκυρότητα της προσομοίωσης και ταυτόχρονα επιτρέπεται στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης του μοντέλου να επιτύχει το βέλτιστο δυνατό αποτέλεσμα σε μικρό χρόνο.

Για να θεωρηθεί ωστόσο μία προσομοίωση επιτυχής, δεν αρκεί η ικανοποιητική, ρεαλιστική και με φυσικό νόημα μεταβολής των παραμέτρων βαθμονόμηση του μοντέλου. Είναι απαραίτητο να διερευνηθεί αν το μοντέλο διαθέτει επαρκή *προγνωστική ικανότητα*, δηλαδή αν είναι ικανό να αναπαράγει ένα ευρύ φάσμα των αποκρίσεων της λεκάνης (π.χ. υγρά και ξηρά έτη) και σε περισσότερες της μίας θέσεις ποταμού. Για το λόγο αυτό, ένα ανεξάρτητο δείγμα παρατηρήσεων που δε χρησιμοποιήθηκε για σύγκριση κατά τη βαθμονόμηση και αναφέρεται σε διαφορετική χρονική περίοδο ή διαφορετική διατομή ποταμού εντός της λεκάνης, συγκρίνεται εκ των υστέρων με το αντίστοιχο προσομοιωμένο δείγμα (Refsgaarg, 1997). Αυτή η σύγκριση, που αποτελεί τη διαδικασία της επαλήθευσης, κρίνει τελικά την επιτυχία της προσομοίωσης και καθορίζει την προγνωστική ικανότητα, που είναι επιβεβλημένο να είναι ικανοποιητική για ένα μοντέλο που επιχειρείται μετέπειτα να χρησιμοποιηθεί στην προσομοίωση εναλλακτικών ΔΠ σε τμήματα της λεκάνης απορροής. Μειονέκτημα τέλος, των μοντέλων της κατηγορίας αυτής αποτελεί η *αβεβαιότητα* (uncertainty), που υπεισέρχεται στους υπολογισμούς λόγω της εγγενούς πολυπλοκότητας των φυσικών συστημάτων, των λαθών στις μετρήσεις των δεδομένων εισόδου και στη δομή του μοντέλου αυτή καθεαυτή (Beven, 1993). Η αβεβαιότητα των εκτιμήσεων μειώνεται ωστόσο από τη βαθμονόμηση του μοντέλου.

Συγκεντρωτικά, τα στάδια προσομοίωσης στα προσδιοριστικά μοντέλα προσομοίωσης διαδικασιών απεικονίζονται στο Σχήμα 3.7. Η μοντελοποίηση ξεκινά με την επεξεργασία των διαθέσιμων δεδομένων της περιοχής μελέτης (χάρτες, κλιματικές χρονοσειρές κ.α), ώστε να έρθουν στη μορφή (format) που απαιτεί το εκάστοτε μοντέλο. Το βήμα αυτό, αν και δεν είναι αμιγώς βήμα μοντελοποίησης, είναι απαραίτητο και κρίσιμο για την επιτυχία της προσομοίωσης, ενώ για ορισμένα μοντέλα η διαδικασία αυτή μπορεί να είναι πολύ πιο επίπονη και χρονοβόρα απ' ότι τα επόμενα στάδια. Μετά την εισαγωγή των δεδομένων στην κατάλληλη μορφή, σχηματοποιείται η λεκάνη απορροής μέσω του κατάλληλου προγράμματος ΣΓΠ με χωρισμό σε υπολεκάνες και περαιτέρω ορισμό ομοιογενών περιοχών. Η διαθεσιμότητα δεδομένων καθορίζει ουσιαστικά το φυσικό και πρακτικό νόημα που έχει η εκάστοτε χωρική διακριτοποίηση με το χρήστη να ορίζει αυθαίρετα επιπρόσθετες θέσεις ποταμού ως εξόδους ανάλογα με το που επιθυμεί να λαμβάνει

αποκρίσεις. Τα δεδομένα φορτίσεων και διαχείρισης της γης της λεκάνης, όπως χρόνος και είδος λιπάνσεων και αρόσεων, περίοδος βόσκησης, ποσότητα κοπριάς που εναποτίθεται, ατμοσφαιρική εναπόθεση N κ.α., εισάγονται και στη συνέχεια μεταβάλλονται οι παράμετροι του μοντέλου εκείνες για τις οποίες υπάρχει επαρκής πληροφορία και γνώση. Ακολουθεί η πρώτη εκτέλεση του προγράμματος με ανάγνωση των αποτελεσμάτων και γραφημάτων που καθορίζει την επιτυχία της προσομοίωσης μέσω σύγκρισης με τα αντίστοιχα παρατηρημένα δεδομένα. Η αποτυχία ικανοποιητικής σύγκλισης οδηγεί στην επαναλαμβανόμενη διαδικασία μεταβολής τιμών παραμέτρων και εκτέλεσης (ρύθμιση ή βαθμονόμηση) έως ότου επιτευχθεί ικανοποιητικό αποτέλεσμα. Τέλος, ακολουθεί η διαδικασία της επαλήθευσης που μαρτυρά αν το μοντέλο έχει ικανοποιητική προγνωστική ικανότητα σε ανεξάρτητες περιόδους προσομοίωσης.



Σχήμα 3.7 Χαρακτηριστικά στάδια μοντελοποίησης σε μοντέλο προσομοίωσης διαδικασιών.

3.2.5.2 Διαδεδομένα Προσδιοριστικά Μοντέλα Προσομοίωσης Διαδικασιών

Ξεκινώντας την παρουσίαση των πιο διαδεδομένων μοντέλων της κατηγορίας αυτής, και έχοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά τους, όπως περιγράφηκαν στις προηγούμενες παραγράφους (μεγάλες απαιτήσεις σε δεδομένα, ημι-κατανεμημένη μορφή και σύνδεση με ΣΓΠ, συνεχές χρονικό βήμα προσομοίωσης φυσικών διεργασιών και κύκλου θρεπτικών), αναφέρεται αρχικά το μοντέλο SWAT (Arnold et al., 1998), ως ένα πολύ αντιπροσωπευτικό μοντέλο της κατηγορίας. Ο χαρακτηρισμός αυτός βασίζεται στην ικανότητα του μοντέλου να προσομοιώνει πλήρως τις φυσικές και γεω-χημικές διεργασίες λεκάνης απορροής, μιας και

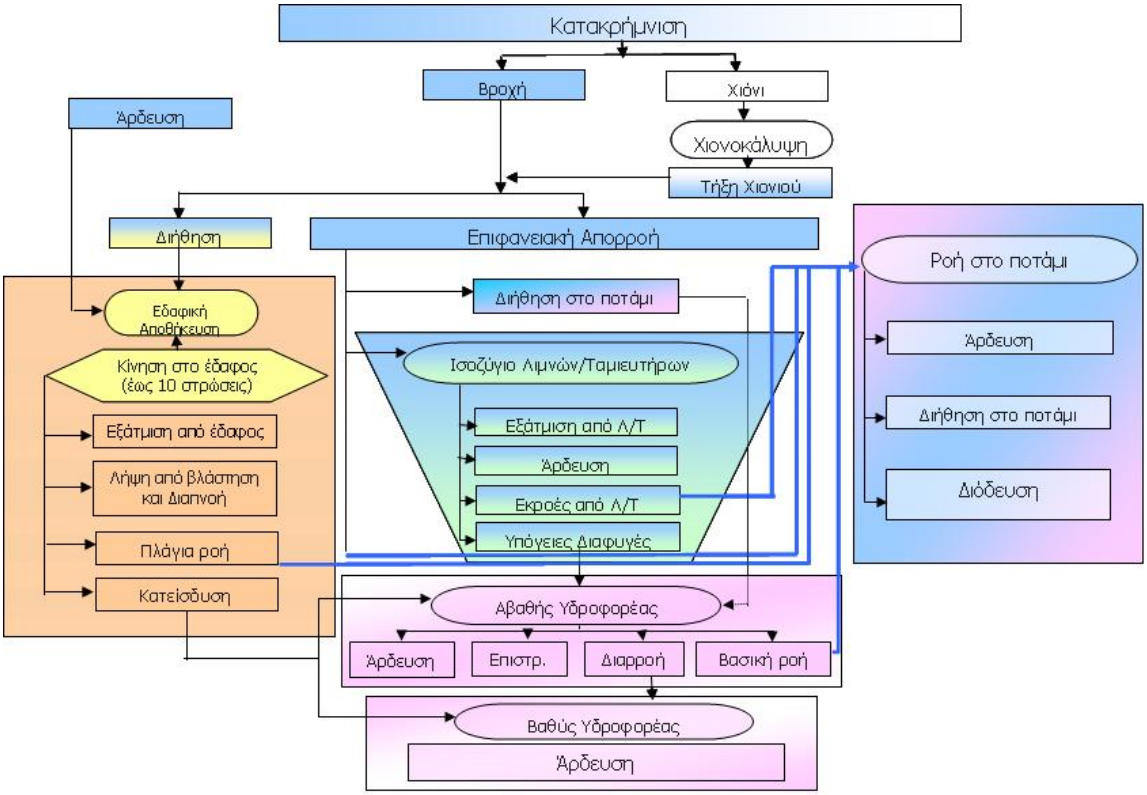
αποτελεί τη σύνθεση πολλών προγενέστερων απλούστερων μοντέλων και ρουτινών και ενισχύεται από την ευρεία αποδοχή του σε όλο τον κόσμο, με τις εκατοντάδες επιστημονικές εργασίες που έχουν δημοσιευτεί μετά από χρήση του (βλ. Gassman et al., 2007). Επιπλέον, τακτικά συνέδρια αφιερώνονται αποκλειστικά για παρουσίαση ερευνητικών δραστηριοτήτων με αυτό, ενώ έχει ενσωματωθεί στο πολύ-στοχικό εργαλείο περιβαλλοντικής ανάλυσης BASINS της Υπηρεσίας Προστασίας του Περιβάλλοντος των ΗΠΑ (EPA) ως σύγχρονο εργαλείο παροχής συμβουλών για λήψη αποφάσεων. Το λογισμικό BASINS (Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources), (BASINS, 2010) αναπτύσσεται διαρκώς από το 1996 από την EPA, με στόχο να παρέχει στις περιφερειακές και τοπικές αρχές των ΗΠΑ επιστημονική πληροφορία συμβουλευτικού χαρακτήρα για την επίλυση ζητημάτων ποιότητας του νερού.

Το SWAT είναι ένα ημερήσιο υδρολογικό μοντέλο λεκάνης απορροής, που διατίθεται ως ελεύθερο λογισμικό μέσω του διαδικτύου και λειτουργεί σε περιβάλλον ΣΓΠ. Αναπτύχθηκε για την Υπηρεσία Αγροτικών Ερευνών του Υπουργείου Αγροτικής Ανάπτυξης των ΗΠΑ (Arnold et al., 1998), με σκοπό να προβλέπει την επίδραση των τεχνικών διαχείρισης της γης, στο νερό, στα φερτά και στα αγροτικά χημικά. Είναι ένα προσδιοριστικό, κατανεμημένο μοντέλο συνεχούς χρόνου, που λαμβάνει υπόψη δεδομένα, σχετικά με το έδαφος, τις χρήσεις γης και το κλίμα σε μια λεκάνη και δίνει αποτελέσματα σχετικά με τις απορροές, τα φερτά υλικά και τις ποιοτικές παραμέτρους του επιφανειακού νερού, χημικές (συγκεντρώσεις ενώσεων N και P) και βιολογικές (BOD, DO), στην έξοδο της λεκάνης αλλά και σε ενδιάμεσα σημεία. Το SWAT θεωρείται ένα πολύ αξιόπιστο μοντέλο για προσομοίωση των φυσικών διεργασιών σε αγροτικές λεκάνες απορροής σε συνεχή χρόνο (Borah and Bera, 2003), όμως τα αποτελέσματά του είναι περισσότερο αξιόπιστα όταν ανάγονται σε μηνιαίο ή ετήσιο βήμα και όχι τόσο όταν λαμβάνονται σε ημερήσιο (Borah and Bera, 2004).

Στα χαρτογραφικά δεδομένα που απαιτούνται για τη λειτουργία του μοντέλου περιλαμβάνονται το ανάγλυφο, οι χρήσεις γης (τύποι εδαφοκάλυψης και πληροφορία για τη διαχείριση της γης) και οι τύποι εδάφους, ιδανικά του ανώτερου στρώματος (ακόρεστη ζώνη), ενώ στα δεδομένα με μορφή χρονοσειρών περιλαμβάνονται κυρίως τα ημερήσια δεδομένα βροχόπτωσης και θερμοκρασίας, για όλο το διάστημα προσομοίωσης. Η κατανεμημένη προσέγγιση λεκάνης απορροής από το SWAT επιτυγχάνεται με τον περαιτέρω διαχωρισμό των υπολεκανών σε μικρότερες υδρολογικές οντότητες που έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά χρήσεων γης και τύπου εδάφους, τις ΥΜ. Κάθε ΥΜ αντιμετωπίζεται χωριστά από το μοντέλο και κατόπιν όλες οι ΥΜ αθροίζονται ανά υπολεκάνη και συνθέτουν το τελικό αποτέλεσμα, αυξάνοντας την ακρίβεια πρόβλεψης των αποφορτίσεων της λεκάνης (Neitsch et al., 2005a). Ο καθορισμός των ΥΜ με βάση τα δύο αυτά χαρακτηριστικά είναι

ενδεικτική της βαρύτητας που απέδωσαν οι κατασκευαστές του στην επίδραση της χρήσης γης και του τύπου εδάφους στον υδρολογικό κύκλο, στην προσομοίωση της διάβρωσης και στη μεταφορά θρεπτικών από το έδαφος στο νερό. Ο καθορισμός της κλίσης και της μετεωρολογικής πληροφορίας σε επίπεδο υπολεκάνης είναι η αιτία που κατατάσσει το μοντέλο στην κατηγορία των ημι-κατανεμημένων μοντέλων, παρόλο που η πλειοψηφία των μεταβλητών και παραμέτρων ορίζονται σε πλήρως κατανεμημένη βάση.

Στο Σχήμα 3.8 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του μοντέλου δίνοντας μία σαφή εικόνα για την πλήρη διαδικασία προσομοίωσης του υδρολογικού κύκλου ενός μοντέλου προσομοίωσης διαδικασιών.



Σχήμα 3.8 Διάγραμμα ροής μοντέλου SWAT (πηγή: Neitsch et al., 2005a).

Συνοπτικά, η διαδικασία αυτή μπορεί να περιγραφεί ως εξής (πηγή: Μιμίκου, 2006): Η κατακρήμνιση διαχωρίζεται σε βροχή και χιόνι ανάλογα με την επικρατούσα θερμοκρασία. Το ύψος χιονοστρώματος υπολογίζεται σε ημερήσια βάση και ο ρυθμός λιωσίματος του χιονιού ακολουθεί τις θερμοκρασιακές μεταβολές. Το διαθέσιμο νερό, είτε διηθείται στο έδαφος, όπου διοδεύεται στις διαφορετικές στρώσεις (μέχρι 10), είτε απορρέει επιφανειακά. Το εδαφικό νερό προσλαμβάνεται από τη βλάστηση και διαπνέεται, εξατμίζεται απ' ευθείας στην ατμόσφαιρα, κατεισδύει στον αβαθή υδροφορέα ή και επιστρέφει στην επιφάνεια μέσω πλάγιας ροής. Ένα μέρος του υπόγειου νερού από τον αβαθή υδροφορέα (shallow aquifer)

θεωρείται ότι φτάνει στα βαθύτερα στρώματα (deep aquifer) και χάνεται απ' το σύστημα. Το επιφανειακό νερό κινούμενο στο ποτάμι συναντά πιθανούς ταμιευτήρες και λίμνες, όπου η εξίσωση υδατικού ισοζυγίου διέπει την αποθήκευση και την απελευθέρωση νερού στο εκάστοτε χρονικό βήμα. Το αθροιστικό νερό που παραμένει στο ποτάμι διοδεύεται μέχρι τον επόμενο ταμιευτήρα ή λίμνη ή μέχρι την έξοδο της λεκάνης. Το μοντέλο επιτρέπει ακόμα την αφαίρεση νερού από κάθε σημείο του συστήματος (υδατόρρευμα, ταμιευτήρας, λίμνη, αβαθής και βαθύς υδροφορέας) για ανθρωπογενείς χρήσεις.

Η προσομοίωση του κύκλου των θρεπτικών στο μοντέλο SWAT βασίζεται αρχικά στην υδρολογική προσομοίωση. Το N και ο P εισέρχονται στο έδαφος μέσω των φορτίσεων που ορίζει ο χρήστης για κάθε ΥΜ (χημικά λιπάσματα και κοπριά, ατμοσφαιρική εναπόθεση) και εμπειρικές κυρίως εξισώσεις διέπουν μετέπειτα τον τρόπο αποβολής των ποσοτήτων των δύο αυτών θρεπτικών από το έδαφος κατά τη διάρκεια της εξέλιξης της προσομοίωσης του υδρολογικού κύκλου στη λεκάνη. Ο κύκλος του N και του P στο SWAT (βλ. και 1.2.1 & 1.2.2) προσομοιώνονται με βάση το κλίμα, το έδαφος και την διαχείριση του εδάφους από τον άνθρωπο, με διαχωρισμό των ποσοτήτων θρεπτικών σε όλες τις δυνατές μορφές, ανόργανες και οργανικές που απαντώνται στη φύση, ενώ η μεταφορά τους από το έδαφος στα υδάτινα σώματα είναι απόρροια της διαθεσιμότητάς τους στο έδαφος, της δυνατότητας λήψης τους από τη βλάστηση και των κλιματικών και εδαφικών συνθηκών. Οι χημικές και βιολογικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα μέσα στο ποτάμι (in-stream processes) κατά την κίνηση και μεταφορά των θρεπτικών σε κατάντη θέσεις, προσομοιώνονται προαιρετικά και επιτρέπουν εκτιμήσεις της κατακράτησης στην υγρή φάση. Η ενσωμάτωση των πρακτικών διαχείρισης της γης γίνεται στο SWAT με τρόπο ώστε να είναι δυνατή η ρεαλιστική προσομοίωση εναλλακτικών σεναρίων με μεταβολές σε παραμέτρους του μοντέλου. Λόγω της χρήσης του SWAT στην παρούσα διδακτορική διατριβή για εφαρμογή ΔΠ, θα γίνει εκτενέστερη περιγραφή των αλγόριθμων και εξισώσεων που διέπουν τις φυσικές διεργασίες του κύκλου του νερού και των θρεπτικών και εκείνων που επιτρέπουν την προσομοίωση ΔΠ, σε επόμενες ενότητες του παρόντος και του επόμενου κεφαλαίου.

Επίσης ένα αμερικάνικο μοντέλο λεκάνης απορροής είναι το HSPF (Hydrological Simulation Program – Fortran), το οποίο αναπτύχθηκε από την EPA (Bicknell et al., 1997). Το εξελιγμένο και ιδιαίτερα αναλυτικό αυτό μοντέλο λειτουργεί σε περιβάλλον ΣΓΠ και χρησιμοποιεί μεγάλο όγκο δεδομένων εισόδου (υδρομετεωρολογικά, χρήσεις γης, καλλιεργητικές τεχνικές κ.α.) για να προσομοιώσει όλες τις δυνατές οδούς διαφυγής θρεπτικών προς τους επιφανειακούς αποδέκτες. Επιφανειακή, ενδιάμεση και βασική ροή, υγρασία του εδάφους, στερεοαπορροή και απορροή θρεπτικών, μεταξύ άλλων, προσομοιώνονται σε χρονικό βήμα από ένα μόλις λεπτό έως μία ημέρα και για χρονική διάρκεια από μερικά λεπτά μέχρι εκατοντάδες έτη. Το μοντέλο ακολουθεί την προσέγγιση

της ΥΜ στην οποία προσομοιώνει τον κύκλο των θρεπτικών με όλες τι δυνατές μορφές N και P, οργανικές και ανόργανες που υπάρχουν στη φύση, ενώ δίνει αποτελέσματα και για κάποιες βιολογικές παραμέτρους όπως το BOD και το διαλυμένο οξυγόνο. Η ενσωμάτωση των ποιοτικών παραμέτρων έγινε το 1970 στο αρχικό πολύ γνωστό και θεμελιώδες υδρολογικό μοντέλο Stanford, ενώ στα τέλη της δεκαετίας του 70 συντάχθηκε ο πλήρης του κώδικας σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN 77. Υπάρχουν εκατοντάδες εργασίες αναφορικά με τη χρήση του μοντέλου HSPF, από προσομοίωση θρεπτικών του νερού σε χρονική βάση επεισοδίου (Ribarova et al., 2008) έως την συνεχή προσομοίωση της απόκρισης λεκάνης απορροής με εκτίμηση φερτών υλών και θρεπτικών (π.χ. Hunter and Walton, 2008), αλλά και πολλών βιολογικών παραμέτρων του ποταμού (Tzoraki and Nikolaidis, 2007). Στην τελευταία περίπτωση μάλιστα οι συγγραφείς κατάφεραν επιτυχώς να προσομοιώσουν μία μέσης έκτασης λεκάνη απορροής στη Βόρεια Πελοπόννησο ξεπερνώντας τις δυσκολίες που προέκυπταν λόγω των μεγάλων απαιτήσεων του μοντέλου σε δεδομένα. Οι Kourgialas et al. (2010) βαθμονόμησαν επιτυχώς το μοντέλο HSPF σε μία μικρή λεκάνη της Δυτικής Κρήτης, και μάλιστα το συνδύασαν με μοντέλα καρστικής υδρολογίας και τήξης του χιονιού για την αύξηση της ακρίβειας των εκτιμήσεων. Το HSPF χρησιμοποιείται ευρέως για την εκτίμηση των επιπτώσεων των αλλαγών χρήσης γης που περιλαμβάνουν διάφορες ΔΠ και θεωρείται σήμερα ένα από τα πιο 'δυνατά' μοντέλα για την πρόβλεψη της ποιότητας των υδάτων, που βασισμένο σε εκατοντάδες αλγόριθμους που πηγάζουν από τη θεωρία, από εργαστηριακά πειράματα και από παρατηρήσεις σε πειραματικές λεκάνες, προσομοιώνει το σύνολο των φυσικών διαδικασιών που είναι έως σήμερα επιστημονικά γνωστές (Bicknell et al., 1997). Η εφαρμογή του στη λεκάνη Upper Bann της Ιρλανδίας με εφαρμογή ΔΠ υπό καθεστώς κλιματικής αλλαγής κατέδειξε πως η χρήση του είναι πολύ χρήσιμη στην εκπόνηση των ΔΣ του Ηνωμένου Βασιλείου (Yang and Wand, 2009). Το μοντέλο τέλος, αποτελεί και αυτό επίσημο εργαλείο για την πολιτική ενάντια στη ρύπανση των υδάτων από την EPA και έχει ενσωματωθεί στο πολύ-εργαλείο BASINS.

Ένα προσδιοριστικό, πλήρως κατανεμημένο και αναλυτικού χρονικού βήματος μοντέλο είναι το ANSWERS (Areal Nonpoint Source Watershed Environment Simulation), (Beasley and Huggins, 1982), που αναπτύχθηκε στο Τμήμα Γεωργικής Μηχανικής του πανεπιστημίου Purdue των ΗΠΑ. Το μοντέλο αρχικά αναπτύχθηκε για την προσομοίωση της διάβρωσης και της μεταφοράς φερτών υλών στα επιφανειακά νερά και μετέπειτα βελτιώθηκε ώστε να προσομοιώνει και τη μεταφορά θρεπτικών. Η λεκάνη στο μοντέλο αυτό διαιρείται σε τετραγωνικά στοιχεία ή κύτταρα όπου σε κάθε ένα από αυτά, πληροφορία για την κλίση, την τραχύτητα, την εδαφική υγρασία, την εδαφική διαβρωσιμότητα, τη βλάστηση και το κλίμα δίνονται από το χρήστη για μία πολύ αναλυτική προσομοίωση. Αν και την περίοδο που αναπτύχθηκε η τεχνολογία παρείχε μικρές δυνατότητες για τόσο μεγάλο διαχωρισμό μεγάλων

λεκανών απορροής, σήμερα η χρήση του μοντέλου είναι πολύ πιο εύκολη και έχει ενσωματωθεί και αυτό στα εργαλεία χρήσης για την πολιτική κατά της ρύπανσης των υδάτων των ΗΠΑ από την EPA. Μεγάλης σπουδαιότητας είναι το γεγονός πως, ανάλογα με το χρονικό βήμα της καταμετρημένης βροχόπτωσης, το μοντέλο ANSWERS μπορεί να κάνει προσομοιώσεις παροχής φερτών και θρεπτικών στο ποτάμι σε πολύ αναλυτική χρονική βάση. Μειονέκτημά του είναι η απουσία αλγόριθμων για τη μετατροπή του N και P σε διάφορες μορφές, που ουσιαστικά το καθιστά ελλιπές ως προς την πλήρη προσομοίωση του κύκλου των θρεπτικών στη φύση.

Το μοντέλο AnnAGNPS (Annualized Agricultural Non-Point Source Pollution Model), επίσης Αμερικάνικο, είναι ένα συνεχές μοντέλο λεκάνης απορροής που αποτελεί τη μετεξέλιξη του μεμονωμένου υδρολογικού γεγονότος μοντέλου AGNPS (Young et al., 1995· Cronshey and Theurer, 1998). Αναπτύχθηκε σε συνεργασία της Υπηρεσίας Διατήρησης των Φυσικών Πόρων (NRCS) και της Υπηρεσίας Αγροτικής Έρευνας (ARS) των ΗΠΑ. Η προσομοίωση των διαδικασιών της επιφανειακής απορροής και της διάβρωσης γίνεται με χρήση της μεθόδου των αριθμών καμπύλης κατά SCS (Soil Conservation Service) και της αναθεωρημένης εξίσωσης εδαφικής απώλειας (Revised Universal Soil Loss Equation) αντίστοιχα. Ειδικές ρουτίνες είναι ενσωματωμένες για την προσομοίωση των διάχυτων και σημειακών πηγών ρύπανσης σε θρεπτικά, τα οποία διαχωρίζονται σε *διαλυτά* (dissolved) και σε *προσκολλημένα* στα εδαφικά σωματίδια (particulate). Η μεταφορά τους από το έδαφος στο νερό έγκειται σε υδρομετεωρολογικούς και τοπογραφικούς παράγοντες. Το μοντέλο είναι ιδιαίτερα αξιόπιστο στην προσομοίωση ΔΠ εντός της λεκάνης και μπορεί να εξετάσει τις επιπτώσεις διαφόρων τεχνικών άρδευσης, άροσης, χρόνου σποράς και συγκομιδής κ.α. στις ποσότητες θρεπτικών που εγκαταλείπουν το έδαφος, ενσωματώνοντας και μία ρουτίνα λήψης θρεπτικών από τη βλάστηση για την ανάπτυξή της. Ενδεικτικά αναφέρεται η εργασία των Baginska et al. (2003), που χρησιμοποίησαν το μοντέλο σε μία μικρή λεκάνη απορροής της Αυστραλίας και συμπέραναν ότι σε μηνιαίο βήμα τα αποτελέσματα φορτίων θρεπτικών στο ποτάμι ήταν απλά ικανοποιητικά, και εκείνη των Yuan et al. (2003) που συμπέραναν ότι οι προβλέψεις στερεοπαροχών ήταν πολύ ικανοποιητικές σε μηνιαίο βήμα σε αντίθεση με την προσομοίωση μεμονωμένου υδρολογικού γεγονότος όπου οι εκτιμήσεις φορτίων φερτών υλών ήταν πολύ μακριά σε σχέση με τις παρατηρημένες. Τέλος, οι Yuan et al. (2003) στην ίδια εργασία κατέδειξαν ότι για την αξιόπιστη εκτίμηση των φορτίων N είναι απαραίτητη η γνώση των παραμέτρων που σχετίζονται με την ικανότητα λήψης του στοιχείου από τις διάφορες καλλιέργειες καθώς και οι αρχικές του συγκεντρώσεις στο έδαφος, πριν την έναρξη της προσομοίωσης.

Το σύγχρονο προσδιοριστικό μοντέλο PHYSIC (Davison et al., 2008), αναπτύχθηκε πρόσφατα για την εκτίμηση των φορτίων στερεοαπορροής και P που καταλήγουν στα

ποτάμια της Αγγλίας. Το μοντέλο αυτό, όταν εφαρμόζεται σε κλίμακα λεκάνης απορροής αντλεί δεδομένα από την εθνική βάση δεδομένων MAGPIE ικανοποιώντας τις υψηλές απαιτήσεις του. Αντίθετα, όταν εφαρμόζεται σε κλίμακα αγροκτήματος (field) ο χρήστης χρειάζεται πιο αναλυτικά δεδομένα για την παραμετροποίηση. Το μοντέλο λειτουργεί σε μηνιαία βάση και σε κατανεμημένη μορφή και λαμβάνει υπόψη του τις διαφοροποιήσεις στο κλίμα, στην τοπογραφία και στα εδάφη, ενώ είναι πολύ ευαίσθητο στις μεταβολές των φορτίσεων από χημικά λιπάσματα και κοπριά ζώων. Σημαντικό για τον καθορισμό των πιο *τρωτών* περιοχών, ως πηγών συνεισφοράς σε θρεπτικά (Critical Source Areas - CSAs), είναι το γεγονός ότι λαμβάνεται υπόψη η *συνδεσιμότητα* (connectivity) των περιοχών αυτών με το υδρογραφικό δίκτυο με επίδραση των κατάλληλων παραγόντων (θέση, έδαφος, κλίση). Το PHYSIC διαχωρίζει επίσης τον P σε *διαλυτό* (dissolved) και *αδιάλυτο* ή *σωματιδιακής μορφής* (particulate) και επιτρέπει την προσομοίωση των αλληλεπιδράσεων των μορφών αυτών με τις εδαφικές και υδρολογικές διεργασίες, προβλέποντας έτσι την κίνηση τους στο έδαφος και τις οδούς διαφυγής τους προς τα επιφανειακά νερά. Το μοντέλο προσομοιώνει με μεγάλη ακρίβεια τον υδρολογικό κύκλο και τις απώλειες P σε επτά αντιπροσωπευτικούς δασικούς και αγροτικούς τύπους χρήσης γης στην Αγγλία όντας ιδιαίτερα ικανό να προσομοιώσει ΔΠ και να εκτιμήσει την επίδρασή τους στη μεταφορά εδαφικών σωματιδίων και P από το έδαφος στα ποτάμια (Davison et al., 2008). Τέλος, οι χημικές και βιολογικές διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα μέσα στο ποτάμι (in-stream processes) δεν προσομοιώνονται από το μοντέλο και άρα δεν επιτρέπουν εκτιμήσεις της κατακράτησης στην υγρή φάση.

Το μοντέλο INCA (Integrated Nitrogen in Catchments), (Whitehead et al., 1998) αναπτύχθηκε με σκοπό την εκτίμηση και ποσοτικοποίηση της συνεισφοράς των διαφόρων πηγών σε N στα επιφανειακά νερά λεκάνης απορροής. Πρόκειται για ένα μοντέλο προσομοίωσης διαδικασιών που χρησιμοποιεί εξισώσεις της κινηματικής για να προσομοιώσει τις συνιστώσες του υδρολογικού κύκλου. Προσομοιώνει επιτυχώς την επιφανειακή και υποεπιφανειακή απορροή σε ημι-κατανεμημένη χωρική βάση μέσω του ενσωματωμένου μοντέλου εδαφικής υγρασίας MORECS και μπορεί ταυτόχρονα να λάβει υπόψη του 6 διαφορετικούς τύπους εδαφοκάλυψης. Λόγω του μικρού αυτού αριθμού τύπων εδαφοκάλυψης, η αγροτική γη διαχωρίζεται σε καλλιεργήσιμη (arable), χαμηλής βλάστησης - μη βοσκούμενης (ungrazed), χαμηλής βλάστησης - βοσκούμενης (grazed) και χαμηλής βλάστησης με λίπανση (fertilized), δίχως περαιτέρω διαχωρισμό ανάλογα με το είδος της καλλιέργειας και το είδος των ζώων. Η πληροφορία αυτή βέβαια λαμβάνεται έμμεσα υπόψη με τον καθορισμό των φορτίσεων σε κάθε έναν από τους ανωτέρω τύπους μέσω της σύνδεσης του μοντέλου με ΣΓΠ. Οι δασικές και αστικές εκτάσεις συμπληρώνουν την εξάδα των τύπων εδαφοκάλυψης. Οι μη σημειακές πηγές στο μοντέλο είναι συγκεντρωτικά: η ατμοσφαιρική εναπόθεση N, οι αγροτικές δραστηριότητες, η συνεισφορά N από τις φυσικές δασικές

εκτάσεις και οι μη σημειακές φορτίσεις από αστικές εκτάσεις. Σημειακές φορτίσεις μπορούν να εισαχθούν ως δεδομένα εισόδου στο υδρογραφικό δίκτυο, ανεξαρτήτως προέλευσης. Αν και το μοντέλο INCA προσομοιώνει μόνο τις ενώσεις $NO3^-$ και $NH4^+$ του N, η προσομοίωση αυτή γίνεται σε ημερήσιο βήμα. Όλες οι διαδικασίες όπως: απονιτροποίηση στο έδαφος και στο νερό, εξάχνωση και αζωτοδέσμευση, προσομοιώνονται με βάση το κλίμα και τη διαθεσιμότητα N, ενώ η μεταφορά των ενώσεων του στοιχείου στο υδρογραφικό δίκτυο είναι ανάλογη της συγκέντρωσής τους στο έδαφος που εξαρτάται σε κάθε χρονικό βήμα από τις κλιματικές συνθήκες, την ικανότητα λήψης N από τη βλάστηση και την υγρασία του εδάφους. Οι ΔΠ είναι εφικτό να προσομοιωθούν με το μοντέλο INCA μέσω της μεταβολής των φορτίσεων σε επιλεγμένους τύπους εδαφοκάλυψης και μέσω μεταβολών από έναν τύπο σε άλλον. Το μοντέλο γενικά θεωρείται πολύ ικανό στην προσομοίωση του κύκλου του N και των ΔΠ κάτι που αποδεικνύεται από τα ευρήματα 22 εργασιών, που αποτέλεσαν έναν ολόκληρο δημοσιευμένο τόμο του περιοδικού HESS (Hydrological and Earth Systems Science), αφιερωμένο αποκλειστικά στο μοντέλο (Special Issue), το έτος 2004 (HESS, 2004).

Ένα ακόμα μοντέλο αποκλειστικής προσομοίωσης του N είναι το HBV-N (Arheimer and Brandt, 1998· Arheimer and Brandt, 2000). Το μοντέλο HBV-N αναπτύχθηκε στο Norrkoping της Σουηδίας, αρχικά το 1972, και πήρε την τελική του μορφή στα τέλη της δεκαετίας του ’90. Πρόκειται για ένα ημι-κατανεμημένο μοντέλο εννοιολογικής βάσης που προσομοιώνει τις διαδικασίες του κύκλου του N (οργανικές και ανόργανες μορφές) και της μεταφοράς του στα επιφανειακά νερά, όπως σχεδόν το μοντέλο INCA που περιγράφηκε προηγουμένως. Οι βασικές διαφοροποιήσεις του μοντέλου αυτού που το καθιστούν ιδιαίτερο είναι η ρουτίνα προσομοίωσης του χιονιού, η οποία έχει αναπτυχθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να λαμβάνει υπόψη της το ιδιαίτερο κλιματικό καθεστώς των Σκανδιναβικών χωρών, καθώς και το ωριαίο βήμα προσομοίωσης. Η λεκάνη απορροής διαιρείται σε υψομετρικές ζώνες όπου βροχόπτωση και θερμοκρασία διαφοροποιούνται. Αν και πολλά μοντέλα ακολουθούν σήμερα την ίδια προσέγγιση, το μοντέλο HBV-N ήταν από τα πρώτα που έκανε την εν λόγω θεώρηση για να λάβει υπόψη του στην εκτίμηση των φορτίων N του ποταμού, τις επιδράσεις της χιονοκάλυψης και της τήξης του χιονιού στις Σουηδικές λεκάνες.

Ένα συνεχές ημι-κατανεμημένο μοντέλο που αναπτύχθηκε στη Γερμανία είναι το οικο-υδρολογικό μοντέλο SWIM (Krysanova et al., 1998· Krysanova et al., 2005), που προσομοιώνει και τα δύο θρεπτικά στοιχεία N και P μέσω του υδρολογικού κύκλου και της διάβρωσης. Το μοντέλο λειτουργεί σε περιβάλλον ΣΓΠ ονόματι GRASS (Geographic Resources Analysis Support System), (GRASS4.1, 1993), που επιτρέπει τον ορισμό των διαφόρων παραμέτρων σε κατανεμημένη μορφή. Το μοντέλο βασίζεται στις εξισώσεις του SWAT και στο μοντέλο MATSALU BAY (Krysanova et al., 1989) για υποβοήθηση στην προσομοίωση διαφόρων ΔΠ. Το τελευταίο πήρε το όνομά του από την ομώνυμη περιοχή της

Εσθονίας στην οποία πρωτοεφαρμόστηκε. Το αντίστοιχο μοντέλο λεκάνης απορροής και προσομοίωσης της μη-σημειακής ρύπανσης από θρεπτικά του Ινστιτούτου Υδραυλικής της Δανίας (Danish Hydraulic Institute – DHI) είναι το MIKE SHE (Abbott et al., 1986· Refsgaard and Storm, 1995). Πρόκειται για πλήρως κατανεμημένο, φυσικής βάσης μοντέλο σε περιβάλλον ΣΓΠ που έχει χρησιμοποιηθεί σε ερευνητικές και επιχειρησιακές δράσεις στη Δανία. Ο Behrendt (1999) και οι Behrendt et al. (1999) ανέπτυξαν το μοντέλο MONERIS, ένα εννοιολογικό μοντέλο σε περιβάλλον ΣΓΠ, και το εφάρμοσαν στους ποταμούς της Γερμανίας. Το μοντέλο, αν και δεν είναι δυναμικό, αλλά στατικό, προσομοιώνει το ετήσιο φορτίο θρεπτικών σε θέσεις ποταμού λαμβάνοντας υπόψη επτά διαφορετικές οδούς διαφυγής μεταξύ των οποίων η επιφανειακή και βασική απορροή και η στερεοαπορροή.

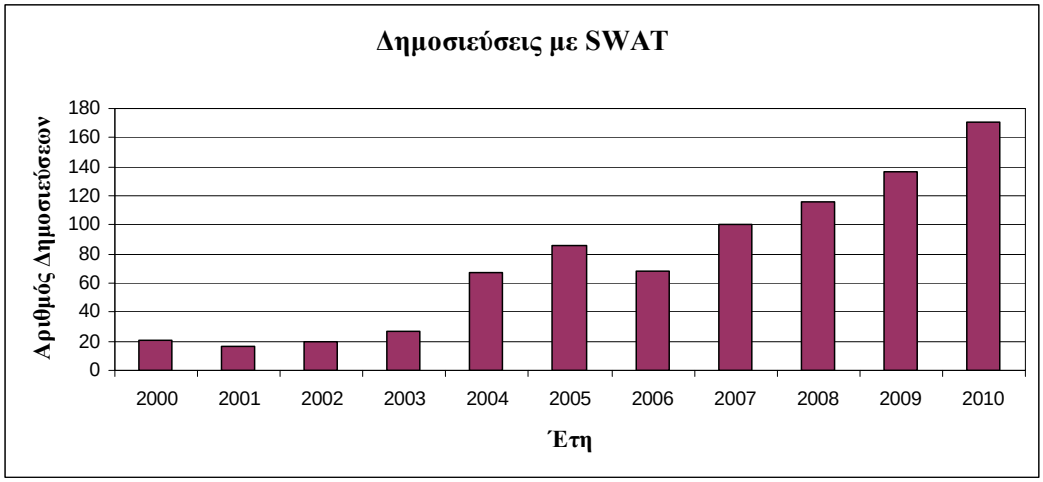
Ο αριθμός των προσδιοριστικών μοντέλων που συνολικά διαθέτει σήμερα η επιστημονική κοινότητα δε μπορεί να είναι με ακρίβεια γνωστός. Η ανάπτυξή τους είναι συνεχής και γίνεται από ερευνητικά κέντρα, ινστιτούτα και εργαστήρια πανεπιστημίων με σκοπό πολλές φορές την προσομοίωση των φυσικών διεργασιών σε τοπικό επίπεδο. Αυτό καθιστά πολλά από τα διαθέσιμα και λιγότερο γνωστά μοντέλα ικανά για εκτιμήσεις σε μικρό γεωγραφικό εύρος αφού είναι προσαρμοσμένα σε τοπικές συνθήκες. Από την επισκόπηση που έγινε παραπάνω σχετικά με τα πιο γνωστά και διαδεδομένα μοντέλα προσομοίωσης διαδικασιών και με βάση τις δημοσιευμένες εργασίες με χρήση τους σε δεκάδες λεκάνες απορροής, προκύπτει ότι η προσομοίωση του κύκλου του N είναι σε γενικές γραμμές πιο επιτυχής σε σχέση με αυτόν του P. Αυτό ίσως συνδέεται με την ανάγκη να προσομοιωθούν σωστά οι διεργασίες της επιφάνειας του εδάφους και ιδιαίτερα η διάβρωση στη δεύτερη περίπτωση. Αυτό που επίσης προκύπτει μετά από μία ενδελεχή επισκόπηση είναι το γεγονός ότι η σωστή επιλογή του μοντέλου αποτελεί θεμελιώδη παράγοντα για την επιτυχία της εκτίμησης φορτίων θρεπτικών στο ποτάμι στην εκάστοτε περιοχή ενδιαφέροντος. Η επιλογή αυτή πρέπει να γίνεται πολύ προσεκτικά και αφού ληφθούν υπόψη μια σειρά από κριτήρια. Τα πιο σημαντικά είναι ο σκοπός της χρήσης ενός μοντέλου και η διαθεσιμότητα δεδομένων. Ο σκοπός περιλαμβάνει συνήθως τα ερωτήματα: α) πόσες και ποιες χημικές μορφές θρεπτικών (N, P, ανόργανες, οργανικές κλπ) μπορεί ένα μοντέλο να προσομοιώσει; β) σε ποια χωρική κλίμακα μπορεί να εκτιμήσει τις απώλειες από το έδαφος; γ) ποιο είναι το χρονικό βήμα και η χρονική περίοδος προσομοίωσης; δ) ποιες είναι ακριβώς οι συνιστώσες του υδρολογικού κύκλου μέσω των οποίων τα θρεπτικά στοιχεία καταλήγουν στα επιφανειακά νερά από το μοντέλο; και ε) πόσο επιτυχής είναι η προσομοίωση των ΔΠ στη λεκάνη ώστε να είναι εφικτή και ρεαλιστική η εφαρμογή σεναρίων διαχείρισης; Η διαθεσιμότητα δεδομένων, ως δεύτερο κατά σειρά κριτήριο, καθορίζει το κατά πόσο είναι εφικτό ένα μοντέλο να εφαρμοστεί ακόμα και αν καλύπτει τις ανάγκες του χρήστη. Έτσι, από τα προεπιλεχθέντα μοντέλα που πληρούν το κριτήριο του σκοπού επιλέγεται εκείνο που οι

απαιτήσεις του σε δεδομένα εισόδου μπορούν να ικανοποιηθούν χωρίς να υπάρχει ο κίνδυνος της υπερ-παραμετροποίησης με εισαγωγή μεγάλης αβεβαιότητας στην προσομοίωση. Τριτεύοντα κριτήρια είναι επίσης: η ήδη υπάρχουσα εμπειρία του χρήστη σε κάποιο μοντέλο, η ικανότητα και ο απαιτούμενος χρόνος εκμάθησης και φυσικά το κόστος απόκτησης και χρήσης του μοντέλου.

3.3 Το υδρολογικό μοντέλο λεκάνης απορροής SWAT

3.3.1 Ιστορικό

Η ανάπτυξη του SWAT (Soil and Water Assessment Tool), (Arnold et al., 1998) είναι το αποτέλεσμα μιας 30χρονης προσπάθειας της Υπηρεσίας Αγροτικών Ερευνών των ΗΠΑ (USDA). Το μοντέλο τυγχάνει σήμερα μεγάλης αποδοχής, κάτι που αποδεικνύεται από τα διεθνή συνέδρια και το πλήθος δημοσιεύσεων σε επιστημονικά περιοδικά. Στις αρχές του 2007 οι επιστημονικές δημοσιεύσεις μόνο σε περιοδικά με κριτές ήταν 250 (Gassman et al., 2007), ενώ μία αναζήτηση στη μηχανή Scopus το Δεκέμβριο του 2010 εντοπίζει πάνω από 800 δημοσιευμένες εργασίες σε περιοδικά και πρακτικά συνεδρίων. Οι εργασίες αφορούν σε πλήθος επιστημονικών πεδίων όπως: ανάλυση ευαισθησίας και ρύθμιση του μοντέλου σε λεκάνες απορροής, εκτίμηση του ρυπαντικού φορτίου ποταμών, διερεύνηση των επιδράσεων της κλιματικής αλλαγής και εναλλακτικών αγροτικών ΔΠ στην ποσότητα και ποιότητα του νερού, σύγκριση με άλλα μοντέλα κ.α. Στο Σχήμα 3.9 δίνεται ο ετήσιος αριθμός δημοσιεύσεων σε διεθνή περιοδικά και πρακτικά συνεδρίων με το μοντέλο SWAT.



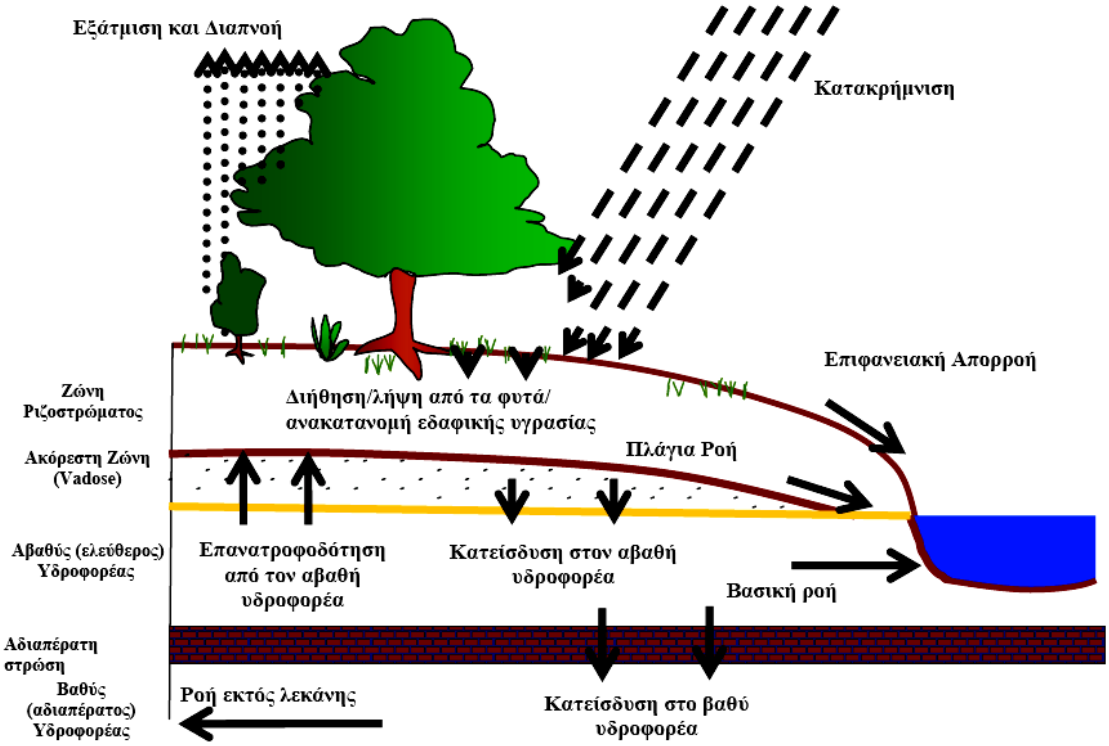
Σχήμα 3.9 Δημοσιεύσεις εργασιών με το μοντέλο SWAT σε επιστημονικά περιοδικά και συνέδρια με κριτές κατά την τελευταία δεκαετία (πηγή: www.scopus.com).

Ιστορικά, το SWAT αποτελεί τη μετεξέλιξη και συγχώνευση προγενέστερων μοντέλων της Υπηρεσίας Αγροτικών Ερευνών των ΗΠΑ, όπως το CREAMS (Chemicals Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems), το GLEAMS (Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems), (Leonard et al., 1987) και του EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator), (Williams, 1990). Το μοντέλο CREAMS αποτέλεσε τη βάση, προσομοιώνοντας τις επιδράσεις της διαχείρισης της γης στις ποσότητες νερού, εδάφους και θρεπτικών που εγκαταλείπουν το έδαφος. Το GLEAMS προσομοίωνε τη συνεισφορά θρεπτικών από τα υπόγεια νερά, ενώ το EPIC αναπτύχθηκε για την προσομοίωση της επίδρασης της διάβρωσης στην παραγωγή της καλλιέργειας. Το σημερινό μοντέλο SWAT είναι απόγονος του SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins), (Arnold and Williams, 1987), που σκοπό είχε την εκτίμηση των επιδράσεων στον υδρολογικό κύκλο και τη στερεοαπορροή ποταμού, διαφόρων διαχειριστικών παρεμβάσεων. Το SWRRB ξεκίνησε να αναπτύσσεται με ενσωμάτωση των επιμέρους ρουτινών των προαναφερθέντων μοντέλων, το έτος 1980. Καινοτομίες τότε ήταν η ενσωμάτωση ρουτίνας για τα υπόγεια νερά, την προσομοίωση ταμιευτήρων, την προσομοίωση μεταφοράς φυτοφαρμάκων και νέων εξισώσεων για τη μεταφορά φερτών υλών. Τη δεκαετία του ’90 προστέθηκε η ρουτίνα διόδευσης του νερού από την έξοδο υπολεκάνης σε κατάντη θέσεις ποταμού με το μοντέλο ROTO (Routing Outputs to Outlet), (Arnold et al., 1995b), ενώ τα τελευταία χρόνια προστέθηκε το μοντέλο προσομοίωσης χημικών διεργασιών στο ποτάμι QUAL2E (Brown and Barnwell, 1987). Η σύντομη αυτή αναδρομή αποδεικνύει τη συστηματική προσπάθεια της USDA για ένα ολοκληρωμένο εργαλείο λεκάνης απορροής με ικανότητα προσομοίωσης των σύνθετων φυσικών διεργασιών κάτω από ένα μεγάλο εύρος διαχειριστικών προβλημάτων ποσότητας και ποιότητας του νερού, πράγμα που προέκυψε τελικά από τη σύνθεση ήδη επικυρωμένων ρουτινών, κάθε μία κατάλληλη για αξιόπιστη προσομοίωση μιας ή λίγων περιβαλλοντικών συνιστωσών. Το εργαλείο αυτό, που σήμερα ονομάζεται SWAT, τελειοποιήθηκε με την ανάπτυξη ειδικού περιβάλλοντος ΣΓΠ, που ως πακέτο λογισμικού που το ενσωματώνει, υποστηρίζει την κατανεμημένη προσέγγιση μοντελοποίησης και την επεξεργασία των απαραίτητων χωρικών δεδομένων εισόδου. Το πρώτο περιβάλλον ΣΓΠ για τη συνεργασία με το SWAT ήταν το GRASS (Geographic Resources Analysis Support System), (GRASS4.1, 1993· Srinivasan and Arnold, 1994), το οποίο δεχόταν χάρτες σε μορφή raster και παρείχε τα αποτελέσματα προσομοίωσης σε μορφή χαρτών. Το επόμενο βήμα ήταν η δημιουργία του περιβάλλοντος AVSWAT (Di Luzio et al., 2001) σε πρόγραμμα ArcView3.x (εκδόσεις 3.1, 3.2 και 3.3), που χρησιμοποιείται με την έκδοση SWAT2000 και βελτίωσε σε μεγάλο βαθμό τη δυνατότητα των χρηστών να επεξεργάζονται τα χωρικά δεδομένα σε ένα φιλικό περιβάλλον, ταυτόχρονα με την υδρολογική προσομοίωση στο SWAT. Η τελευταία έκδοση του εν λόγω περιβάλλοντος

εργασίας είναι το AVSWAT-X (Di Luzio et al., 2004) που φιλοξενεί την έκδοση SWAT 2005 και παρέχει επιπρόσθετες λειτουργίες και έτοιμα εδαφολογικά δεδομένα για τις ΗΠΑ καθώς και ενσωματωμένες ρουτίνες για ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων, αυτόματη βαθμονόμηση και εκτίμηση αβεβαιότητας. Η τελευταία έκδοση του SWAT (SWAT2009) άρχισε να αναπτύσσεται τα τελευταία χρόνια (Olivera et al., 2006) σε περιβάλλον ArcGIS και σήμερα διατίθεται σε συνδυασμό με τα κατάλληλα πακέτα υπηρεσιών (service packs) στις εκδόσεις 9.1, 9.2 και 9.3 του προγράμματος. Όλες οι εκδόσεις του SWAT, καθώς και πλούσιο υλικό που τις συνοδεύει διατίθενται ελεύθερα μέσω της επίσημης ιστοσελίδας: http://swatmodel.tamu.edu/.

3.3.2 Υδρολογία

Ο υδρολογικός κύκλος στο SWAT είναι αυτός που διέπει την ποσότητα νερού, φερτών υλών και θρεπτικών στοιχείων που εγκαταλείπουν το έδαφος και καταλήγουν στο υδρογραφικό δίκτυο στο ημερήσιο χρονικό βήμα προσομοίωσης. Οι συνιστώσες του υδρολογικού κύκλου απεικονίζονται στο Σχήμα 3.10 και προσομοιώνονται από το μοντέλο στη χωρική κλίμακα της ΥΜ, όπως ορίστηκε σε προηγούμενη ενότητα.



Σχήμα 3.10 Ο υδρολογικός κύκλος του SWAT (πηγή: Neitch et al., 2005a).

Το SWAT δέχεται ημερήσια δεδομένα για τα κατακρημνίσματα που εμφανίζονται στη λεκάνη απορροής. Έχει επίσης τη δυνατότητα παραγωγής των κατακρημνισμάτων μέσω γέννησης χρονοσειρών με βάση ιστορικά δεδομένα, αν δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία, χρησιμοποιώντας μια αλυσίδα Markov πρώτης τάξης για τον καθορισμό μιας ημέρας ως βροχερής ή όχι και μιας στατιστικής κατανομής για τον υπολογισμό του ύψους βροχόπτωσης. Με στατιστικές κατανομές και ιστορικά μέσα μηνιαία δεδομένα γεννώνται χρονοσειρές για τις υπόλοιπες μετεωρολογικές μεταβλητές όπως θερμοκρασία, ηλιακή ακτινοβολία, ταχύτητα ανέμου και σχετική υγρασία, αν και οι τρεις τελευταίες είναι απαραίτητες μόνο στην περίπτωση που η επιλεγμένη μέθοδος για την προσομοίωση της χρονοσειράς δυνητικής εξατμισοδιαπνοής το απαιτεί. Η κατακρήμνιση εμφανίζεται με τη μορφή βροχόπτωσης ή χιονόπτωσης, ανάλογα με τη μέση ημερήσια θερμοκρασία. Η χιονόπτωση σχηματίζει στρώση χιονιού στο έδαφος, το οποίο τήκεται όταν η εδαφική θερμοκρασία το επιτρέψει. Η δε συμπεριφορά του λιωμένου χιονιού είναι αντίστοιχη με αυτή της βροχόπτωσης (Neitch et al., 2005a).

Το νερό της βροχής, που αναλογεί σε κάθε υπολεκάνη, είναι αυτό που έχει καταγραφεί από εκείνον τον μετεωρολογικό σταθμό (μεταξύ αυτών που ορίζει ο χρήστης), που βρίσκεται πιο κοντά στο κέντρο βάρους της. Το νερό της βροχής είτε απορρέει επιφανειακά, είτε διηθείται στο έδαφος. Το ποσοστό που θα απορρεύσει ρυθμίζεται από το συντελεστή απορροής, ανάλογα με τον τύπο εδάφους και τη χρήση γης. Εκτιμάται με μια τροποποιημένη μέθοδο του αριθμού καμπύλης CN (Curve Number) κατά SCS (USDA, Soil Conservation Service, 1972). Το νερό που απορρέει επιφανειακά καταλήγει στους υδάτινους αποδέκτες, ενώ εκείνο που διηθείται ακολουθεί μια οριζόντια ή κατακόρυφη διαδρομή μέσα στο έδαφος. Το μοντέλο χωρίζει το έδαφος σε 3 κύριες στρώσεις: (α) το εδαφικό προφίλ, (β) τον αβαθή υδροφορέα και (γ) τον βαθύ υδροφορέα. Μέρος του νερού του εδαφικού προφίλ περνάει στην αέρια φάση, είτε με την εδαφική εξάτμιση, είτε έμμεσα, με τη δέσμευση του από τα φυτά και τη διαπνοή των φυλλωμάτων τους. Για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής, το μοντέλο περιλαμβάνει τρεις διαφορετικές μεθόδους (Thornthwaite, Hargreaves και Penman-Monteith), που χρησιμοποιούνται ανάλογα με τα υπάρχοντα δεδομένα. Μέρος του νερού που υπάρχει στο εδαφικό προφίλ συμβάλλει στην απορροή στην έξοδο της λεκάνης με την ενδιάμεση απορροή (lateral flow), ενώ το υπόλοιπο κατεισδύει στον αβαθή υδροφορέα. Ροή προς τα κάτω, λαμβάνει χώρα όταν η υδατοϊκανότητα μιας εδαφικής στρώσης υπερβαίνεται και η κάτω στρώση δεν είναι κορεσμένη. Η περιεχόμενη υγρασία του εδάφους προσομοιώνεται από το μοντέλο SWAT σε κάθε χρονικό βήμα με βάση την ποσότητα νερού που εισέρχεται σε αυτό και της υδατοχωρητικότητας που υπολογίζεται ως διαφορά της περιεκτικότητας νερού στο σημείο υδατοικανότητας και του σημείου μόνιμης μάρανσης. Εκτός από το εδαφικό προφίλ, ο αβαθής υδροφορέας τροφοδοτείται με διήθηση

από υδατορρεύματα και ταμιευτήρες. Η αποφόρτιση του προς το ποτάμι γίνεται είτε με την επιστρέφουσα (return flow) ή βασική ροή, δηλαδή με οριζόντια κίνηση του νερού που τροφοδοτεί τα επιφανειακά νερά, αλλά και προς τα βαθύτερα στρώματα με κατείσδυση νερού στο βαθύ υδροφορέα. Η τελευταία ρυθμίζεται ως σταθερό ποσοστό της επαναπλήρωσης του αβαθούς υδροφορέα από το χρήστη και το νερό αυτό δεν επιστρέφει ξανά στη λεκάνη απορροής. Ταυτόχρονα, μέρος του νερού που είναι αποθηκευμένο στον αβαθή υδροφορέα, κινείται κάτω από ορισμένες συνθήκες εδαφικής υγρασίας προς τα πάνω και τροφοδοτεί το εδαφικό στρώμα, με μια διαδικασία που το πρόγραμμα ονομάζει επανατροφοδότηση (revap).

Το νερό που τελικά καταλήγει στο ποτάμι είναι το άθροισμα της επιφανειακής, ενδιάμεσης και υπόγειας απορροής. Σε όλες τις φάσεις της μετέπειτα διόδευσης του νερού από μία θέση ποταμού στα κατάντη, το μοντέλο λαμβάνει υπόψη τις απώλειες μετάβασης (διήθηση στον πυθμένα του ποταμού και εξάτμιση), που για κάποια υδατορρεύματα μπορεί να μην είναι αμελητέες. Οι απώλειες μετάβασης προκύπτουν ως συνάρτηση του μήκους και πλάτους των καναλιών και της διάρκειας της ροής. Οι μέθοδοι διόδευσης που περιλαμβάνει το μοντέλο SWAT είναι αυτή της μεταβλητής αποθήκευσης και η μέθοδος Muskingum, που βασίζονται στο μοντέλο κινηματικού κύματος. Η διόδευση πάντως, μικρή σημασία έχει όταν η λεκάνη απορροής έχει μικρό μέγεθος και χρόνο συγκέντρωσης πολύ μικρότερο της ημέρας ή όταν ο χρήστης μελετά την περιοχή ενδιαφέροντος σε μηνιαίο ή ετήσιο βήμα.

Η γενική εξίσωση που χρησιμοποιεί το SWAT για την περιγραφή του υδρολογικού κύκλου του Σχήματος 3.10 σε κάθε ΥΜ είναι:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^{t} (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{\mathrm{gw}}) \tag{3.6}$$

όπου SWt είναι η τελική περιεκτικότητα υγρασίας του εδάφους την ημέρα t, SW_0 η αρχική περιεκτικότητα υγρασίας του εδάφους τη χρονική στιγμή 0, R_{day} η ημερήσια κατακρήμνιση την ημέρα i (mm H_2O), Q_{surf} η ημερήσια επιφανειακή απορροή την ημέρα i (mm H_2O), E_a η ημερήσια εξατμισοδιαπνοή την ημέρα i (mm H_2O), w_{seep} η ποσότητα νερού που εξέρχεται από τη ζώνη ριζοστρώματος και εισέρχεται στη ζώνη vadose την ημέρα i (mm H_2O) και Q_{gw} η υπόγεια ροή την ημέρα i (mm H_2O).

Με δεδομένη την ημερήσια βροχόπτωση, το μοντέλο προσομοιώνει την επιφανειακή απορροή, χρησιμοποιώντας μια τροποποιημένη μέθοδο των καμπυλών της SCS (USDA, Soil Conservation Service, 1972), όπως προελέχθη. Η τεχνική αυτή επιλέχθηκε γιατί: (α) έχει προκύψει από πολυετή πειράματα σε μικρές λεκάνες απορροής στις ΗΠΑ και έχει χρησιμοποιηθεί για πολλά χρόνια, (β) είναι υπολογιστικά αποδοτική, (γ) τα δεδομένα εισόδου

είναι γενικώς διαθέσιμα από τους πίνακες της SCS για δεδομένο τύπο εδάφους και είδος φυτοκάλυψης. Η μέθοδος συσχετίζει την επιφανειακή απορροή με τη βροχόπτωση και τη μέγιστη δυνατή κατακράτηση του εδάφους. Η τελευταία είναι απόρροια της *υδρομορφίας* του εδάφους (A, B, C, ή D, με A να δηλώνει πολύ και D ελάχιστα διαπερατό έδαφος), του είδους φυτοκάλυψης και της πυκνότητας φύτευσης. Οι παράγοντες αυτοί εκφράζονται αθροιστικά με τον αριθμό καμπύλης CN κατά SCS, ενώ πίνακες με τέτοιους αριθμούς υπάρχουν στα σχετικά εγχειρίδια (USDA, Soil Conservation Service, 1972). Οι σχέσεις που αποτελούν τη μέθοδο είναι οι κάτωθι:

$$Q_{surf} = \frac{\left(R_{day} - 0.2S\right)^2}{\left(R_{day} + 0.8S\right)} \tag{3.7}$$

$$S = 25.4\left(\frac{1000}{CN} - 10\right) \tag{3.8}$$

όπου, Q_{surf} η ημερήσια επιφανειακή απορροή, R_{day} η ημερήσια βροχόπτωση και S παράμετρος που εκφράζει τη μέγιστη κατακράτηση του εδάφους σε νερό. Η σχέση υπολογισμού της επιφανειακής απορροής ισχύει μόνο στην περίπτωση που η ημερήσια βροχόπτωση είναι μεγαλύτερη από τις αρχικές απώλειες στο έδαφος που υπολογίζονται ως το 20% της συνολικής κατακράτησης S. Διαφορετικά η επιφανειακή απορροή είναι μηδενική. Η παράμετρος S είναι αναπόφευκτο να μεταβάλλεται (α) μεταξύ των ΥΜ, γιατί οι γεωμορφολογικοί παράγοντες μεταβάλλονται και (β) με το χρόνο, εξαιτίας της μεταβολής της περιεκτικότητας του εδάφους σε νερό. Τα μεγέθη S, R και Q των πιο πάνω εξισώσεων, εκφράζονται σε mm. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι το γεγονός ότι καταρτίστηκε με δεδομένα πεδίου των ΗΠΑ και έως σήμερα η γενικότερη ισχύς της στην παρούσα μορφή δεν έχει ακόμα γίνει απόλυτα αποδεκτή, με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται και εναλλακτικές μεθοδολογίες (Soulis et al., 2009). Πρόκειται πάντως για εμπειρική μέθοδο που χρησιμοποιείται ευρέως μιας και οι πίνακες κατηγοριοποιούν τους αριθμούς καμπύλης σύμφωνα με τύπους εδάφους και χρήσεις γης που απαντώνται παγκοσμίως.

Το SWAT υπολογίζει την ενδιάμεση ή πλάγια ροή με ένα μοντέλο κινηματικής αποθήκευσης, που χρησιμοποιεί την εξίσωση συνέχειας λαμβάνοντας υπόψη ολόκληρο το εδαφικό προφίλ σαν όγκο ελέγχου (Sloan and Moore, 1984). Η ποσότητα νερού που μεταφέρεται με αυτό το είδος της ροής αναμένεται να είναι μεγάλη όταν η υδραυλική αγωγιμότητα του κατώτερου στρώματος του εδάφους είναι μικρή και δεν επιτρέπει την κατείσδυση προς τον αβαθή υδροφορέα και όταν οι κλίσεις εδάφους είναι μεγάλες (Neitch et al., 2005a). Το υπόγειο νερό που συνεισφέρει στη ροή του ποταμού (βασική ροή) διέπεται

από τις εξισώσεις ενός απλού μοντέλου, που υπολογίζει το ισοζύγιο του αβαθούς υδροφορέα σε ημερήσιο βήμα. Για την ποσότητα νερού που επιστρέφει στο ριζόστρωμα (revap), εκείνη που κατεισδύει στο βαθύ υδροφορέα και χάνεται καθώς και εκείνη που αποτελεί την επιστρέφουσα ροή στο ποτάμι, σημαντικό ρόλο παίζουν οι παράμετροι υπόγειου νερού στα σχετικά αρχεία του προγράμματος. Το SWAT ως μοντέλο επιφανειακής υδρολογίας χρησιμοποιεί απλουστευμένες εξισώσεις ώστε να επιτρέψει τη συνεισφορά των υπόγειων υδροφορέων στη συνολική παροχή του ποταμού. Για το λόγο αυτό, πολύ συχνά συστήνεται η χρήση φίλτρων που διαχωρίζουν την παρατηρημένη χρονοσειρά παροχής σε χρονοσειρά βασικής και άμεσης απορροής. Με τον τρόπο αυτό ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να συγκρίνει τις συνιστώσες της απορροής, όπως προσομοιώθηκαν από το μοντέλο, με τις αντίστοιχες παρατηρημένες και με εμπειρική μεταβολή των παραμέτρων υπόγειου νερού να επιτυγχάνει μία ικανοποιητική εκτίμηση της υπόγειας συνεισφοράς και επομένως, της αναλογίας μεταξύ αυτής και εκείνης από την άμεση απορροή. Τέλος, η συνολική παροχή του ποταμού διοδεύεται από κάθε υπολεκάνη έως την τελική έξοδο της λεκάνης απορροής με μία από τις μεθόδους διόδευσης που ήδη αναφέρθηκαν. Οι εξισώσεις που διέπουν όλες τις συνιστώσες του υδρολογικού κύκλου περιγράφονται αναλυτικά στο εγχειρίδιο θεωρητικής βάσης του μοντέλου SWAT (Neitch et al., 2005a).

3.3.3 Διάβρωση

Το SWAT χρησιμοποιεί μία τροποποιημένη έκδοση της *Παγκόσμιας Εξίσωσης Εδαφικής Απώλειας* (Universal Soil Loss Equation – USLE) για τον υπολογισμό, όχι της ποσότητας εδάφους που διαβρώνεται, αλλά της διαβρωθείσας ποσότητας εδάφους που καταλήγει στο υδρογραφικό δίκτυο, λαμβάνοντας υπόψη ουσιαστικά το συντελεστή στερεοαπορροής. Αυτό επιτυγχάνεται με την αντικατάσταση του όρου διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης που υπήρχε στην αρχική εξίσωση με τους όρους της επιφανειακής απορροής και της παροχής αιχμής. Η *Τροποποιημένη Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας* (Modified Universal Soil Loss Equation - MUSLE) του SWAT είναι η εξής (Neitch et al., 2005a):

$$sed = 11{,}8\left(Q_{surf} * q_{peak} * area_{hru}\right)^{0{,}56} * K_{usle} * C_{usle} * P_{usle} * L_{usle} * CFRG \qquad (3.9)$$

όπου: sed η ποσότητα φερτών που καταλήγει στο ποτάμι από κάθε ΥΜ (tn/ημέρα), Q_{surf} η επιφανειακή απορροή (mm/ha/ημέρα), q_{peak} η παροχή αιχμής (m^3/s), $area_{hru}$ η έκταση της ΥΜ (ha), K_{usle} ο παράγοντας διαβρώσεως εδάφους, C_{usle} ο παράγοντας κάλυψης και διαχείρισης

γης, P_{usle} ο παράγοντας διαχείρισης εδαφών κατά της διάβρωσης, LS_{usle} ο παράγοντας τοπογραφίας και *CFRG* ένας παράγοντας που εκφράζει την επίδραση στη στερεοαπορροή της περιεκτικότητας του εδάφους σε χοντρά θραύσματα. Από τους εν λόγω παράγοντες, οι 5 τελευταίοι εκφράζουν με εμπειρικό τρόπο την ευαισθησία μιας ΥΜ στην εδαφική απώλεια εμπεριέχοντας τους φυσικούς και διαχειριστικούς παράγοντες που τη διαμορφώνουν. Ο παράγοντας εδάφους K_{usle} εκφράζει την ευαισθησία ενός εδαφολογικού σχηματισμού στη διάβρωση ως απόρροια της κοκκομετρικής σύστασης, του σχήματος των εδαφικών σωματιδίων, της δομής και της περιεκτικότητας σε οργανική ουσία. Ο συντελεστής C_{usle} εκφράζει την προστασία που παρέχει ένας τύπος φυτοκάλυψης στο έδαφος, κάτι που εξαρτάται από το ποσοστό κάλυψης λόγω της ανάπτυξης φυλλωμάτων και της πυκνότητας φύτευσης. Ο συντελεστής αυτός εξαρτάται από το στάδιο ανάπτυξης μιας καλλιέργειας και το SWAT τον επικαιροποιεί κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Ο παράγοντας P_{usle} εκφράζει με τη σειρά του την προστασία που παρέχεται ενάντια στη διάβρωση του εδάφους από ανθρωπογενείς πρακτικές διαχείρισης π.χ. διαμόρφωση αναβαθμίδων, καλλιέργεια κατά τις ισοϋψείς κλπ, ενώ ο τοπογραφικός παράγοντας LS_{usle} προσθέτει την πολύ σημαντική επίδραση της τοπογραφίας στη διάβρωση. Ο τελευταίος παράγοντας αναφέρεται στην % περιεκτικότητα του εδάφους σε χοντρά θραύσματα (*rock*) με μεγάλες τιμές να μειώνουν την εκτίμηση εδαφικών απωλειών σύμφωνα με τη σχέση $CFRG = e^{-0.053 \times rock}$. Αντίθετα, για τους προηγούμενους τέσσερις παράγοντες μεγάλες τιμές αυξάνουν την εδαφική απώλεια. Τέλος, σημαντική επίδραση στους υπολογισμούς έχει η παροχή αιχμής. Πρόκειται για έναν δείκτη που εκφράζει την διαβρωτικότητα ενός επεισοδίου βροχής και υπολογίζεται με μία τροποποιημένη τεχνική της ορθολογικής μεθόδου λαμβάνοντας υπόψη το χρόνο συγκέντρωσης της λεκάνης, ως άθροισμα της ροής στην επιφάνεια του εδάφους (overland flow) και στο υδατόρευμα (channel flow). Για τον υπολογισμό του εν λόγω δείκτη χρησιμοποιείται ακόμα, η μέγιστη βροχόπτωση διάρκειας μισής ώρας που έχει παρατηρηθεί στη λεκάνη σε κάθε μήνα του έτους, μεταβλητή που έχει οριστεί από το χρήστη με βάση ιστορικά δεδομένα στην αρχή της προσομοίωσης.

Οι φερτές ύλες, που υπολογίζεται με βάση την ανωτέρω εξίσωση ότι εγκαταλείπουν το έδαφος και εισέρχονται στο ποτάμι, διοδεύονται στα κατάντη του ποταμού. Εντός του ποταμού το μοντέλο SWAT επιτρέπει την προσομοίωση δύο διαδικασιών, της εναπόθεσης φερτών και της διάβρωσης του πυθμένα, οι οποίες καθορίζουν αθροιστικά τη στερεοπαροχή του ποταμού σε συγκεκριμένη θέση. Για την προσομοίωση των εν λόγω διαδικασιών το SWAT λαμβάνει υπόψη του την ποσότητα εδαφικού υλικού που εισέρχεται στο ποτάμι από την ανάντη λεκάνη και την μεταφορική ικανότητα φερτών του ποταμού, η οποία εκτιμάται με εμπειρικές σχέσεις. Όταν η εισερχόμενη ποσότητα φερτών είναι μεγαλύτερη από τη

μεταφορική ικανότητα του ποταμού, τότε λαμβάνει χώρα εναπόθεση, ενώ όταν συμβαίνει το αντίθετο, το μοντέλο προσομοιώνει διάβρωση από τον πυθμένα. (Neitsch et al., 2005a).

3.3.4 Θρεπτικά

Οι κύκλοι του N και του P, που έχουν περιγραφεί στις ενότητες 1.2.1 και 1.2.2 αντίστοιχα, αντικατοπτρίζουν πλήρως τις φυσικές διαδικασίες που προσομοιώνονται από το μοντέλο SWAT για τα δύο αυτά στοιχεία. Τόσο το N, όσο και ο P διαχωρίζονται στο έδαφος σε δύο μορφές, οργανική και ανόργανη. Το SWAT χωρίζει το N σε δύο ιόντα ανόργανης μορφής, τα αμμωνιακά ($NH4^+$) και τα νιτρικά ($NO3^-$) και σε τρεις οργανικές μορφές, το *φρέσκο* (fresh), το *ενεργό* (active) και το *σταθερό* (stable) οργανικό N. Το πρώτο βρίσκεται στο έδαφος λόγω της παρουσίας υπολειμμάτων καλλιέργειας, ενώ τα άλλα δύο περιέχονται στον εδαφικό χούμο. Οι εδαφικές συνθήκες καθορίζουν το ρυθμό μεταβολής του N από τη μία στην άλλη μορφή κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Τα $NH4^+$ υπόκεινται στη διαδικασία την αεριοποίησης (volatilization) και τα $NO3^-$ αποτελούν τη διαθέσιμη για τα φυτά μορφή, όμως υπόκεινται σε αέρια απονιτροποίηση (denitrification), που είναι ανάλογη της περιεκτικότητας του εδάφους σε $NO3^-$, οργανικό άνθρακα και νερό, καθώς και της θερμοκρασίας. Πηγές N στο μοντέλο είναι τα χημικά λιπάσματα και η κοπριά ζώων, τα υπολείμματα καλλιεργειών, η αζωτοδέσμευση από βακτήρια και η βροχόπτωση. Τα $NO3^-$ διηθούνται στα βαθύτερα εδαφικά στρώματα και μεταφέρονται στα επιφανειακά υδάτινα σώματα με την ενδιάμεση και τη βασική ροή. Αντίθετα, το οργανικό N του εδάφους μεταφέρεται με την επιφανειακή απορροή και τα προϊόντα της διάβρωσης, σε αναλογία, ενώ τα επίπεδα οργανικού φορτίου N στο έδαφος κάθε χρονική στιγμή εξαρτώνται από την περιεκτικότητά του σε οργανικό άνθρακα και από τις ΔΠ. Όσον αφορά τον P, εισέρχεται στο έδαφος, όπως και το N, χωρίς όμως τη δέσμευση και τη βροχόπτωση. Το στοιχείο διαχωρίζεται σε ανόργανη και οργανική μορφή με τις ανόργανες μορφές να είναι στην περίπτωση αυτή τρεις, ανάλογες ακριβώς με τις οργανικές που ταυτίζονται με τις αντίστοιχες του N. Η ανόργανη μορφή P που προσλαμβάνεται από τη βλάστηση είναι ο διαλυτός P, ο οποίος αλληλεπιδρά με το ανώτερο στρώμα του εδάφους (10mm στο SWAT). Ο P χαρακτηρίζεται από πολύ μικρότερη κινητικότητα σε σχέση με το N, δεν μεταπίπτει σε αέρια μορφή και μεταφέρεται στα υδάτινα σώματα μόνο μέσω της επιφανειακής απορροής και της διάβρωσης (Neitch et al., 2005a).

Η λήψη των δύο θρεπτικών στοιχείων από τη βλάστηση ακολουθεί έναν κανόνα προσφοράς-ζήτησης και η ποσότητα N και P που λαμβάνεται υπολογίζεται από τη διαφορά της περιεκτικότητας των στοιχείων στο φυτό και της μέγιστης δυνατής περιεκτικότητας (optimum) στην εκάστοτε χρονική στιγμή. Η optimum περιεκτικότητα μεταβάλλεται ανάλογα

με το βλαστικό στάδιο (Jones, 1983) και για τον υπολογισμό αυτού του ελλείμματος, το μοντέλο προσομοιώνει τον πλήρη βιολογικό κύκλο των καλλιεργειών με βάση το μοντέλο ανάπτυξης καλλιέργειας EPIC (Williams, 1990). Σύμφωνα με τη ρουτίνα ανάπτυξης καλλιέργειας, η φυτική βιομάζα που παράγεται κάθε ημέρα προσομοίωσης εξαρτάται από την ενέργεια που προσλαμβάνεται από το φυτό (ακτινοβολία) και από την ικανότητα του τελευταίου να τη μετατρέπει σε βιομάζα. Ο ρυθμός αυτός ποσοτικοποιείται με βάση τη θεωρία των *Μονάδων Θερμότητας* (Heat Units), σύμφωνα με την οποία, το άθροισμα των ημερησίων διαφορών της optimum θερμοκρασίας του φυτού σε κάθε στάδιο ανάπτυξης από τη θερμοκρασία του αέρα (βαθμοί ή θερμικές μονάδες ανά ημέρα), ορίζει τις βαθμοημέρες (θερμικές μονάδες × ημέρες). Το φυτό φτάνει στην ολοκλήρωση μιας βλαστικής φάσης όταν ο απαιτούμενος αριθμός βαθμοημερών συμπληρωθεί. Οι καλλιέργειες χωρίζονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες, τις μονοετείς ή πολυετείς καλλιέργειες, τις μονοετείς ή πολυετείς καλλιέργειες ψυχανθών (συνδέονται με την αζωτοδέσμευση μέσω βακτηρίων) και τις δενδρώδεις. Η βάση δεδομένων του μοντέλου περιλαμβάνει πλήθος παραμέτρων σχετικά με το βλαστικό κύκλο, τη μορφολογία και τη φυσιολογία της κάθε καλλιέργειας, ενώ καλύπτει ένα ιδιαίτερα ευρύ φάσμα γνωστών καλλιεργειών σε όλον τον κόσμο. Οι παράμετροι στην εν λόγω βάση δεδομένων καθορίζουν το πώς αλληλεπιδρά μία καλλιέργεια με το περιβάλλον (π.χ. φωτοσύνθεση, λήψη θρεπτικών και νερού κλπ) και εν τέλει, σε τι επίπεδα θα φτάσει η απόδοσή της στο τέλος της βλαστικής περιόδου (Neitch et al., 2005a).

Τέλος, οι ποσότητες θρεπτικών που εισέρχονται στο ποτάμι διοδεύονται μέχρι την έξοδο. Κατά την μεταφορά αυτή το μοντέλο προσφέρει τη δυνατότητα της προσομοίωσης των βιοχημικών διαδικασιών κατακράτησης στην υγρή φάση (in-stream processes). Οι διαδικασίες αυτές είναι δυνατόν να μεταβάλλουν το φορτίο N και P που τελικά θα μεταφερθεί έως την έξοδο της λεκάνης. Οι μη διαλυτές μορφές θρεπτικών που είναι προσκολλημένες στα εδαφικά υλικά εναποτίθενται στον πυθμένα με το ρυθμό εναπόθεσης φερτών υλών που το μοντέλο προσομοιώνει. Οι εν λόγω διαδικασίες προσομοιώνονται με την ενσωματωμένη της ρουτίνας QUAL2E (Brown and Barnwell, 1987) και αναμένεται να είναι σημαντικές σε λεκάνες απορροής με λίμνες και μικρή ταχύτητα ροής του νερού στα ποτάμια.

3.4 Γενική αποτίμηση μεθοδολογιών

Συγκρίνοντας τις μεθοδολογίες που αναπτύχθηκαν, συμπεραίνεται ότι για την επίτευξη ολοκληρωμένης και αξιόπιστης ποσοτικοποίησης της επίδρασης του αγροτικού τομέα στην ποιότητα του νερού, δεν υπάρχει προσέγγιση χωρίς περιορισμούς και αδυναμίες.

Η χρήση Δεδομένων Φορτίου Ποταμού παρέχει αξιόπιστη εκτίμηση των φορτίων θρεπτικών που καταλήγουν σε θέσεις ποταμών, όταν οι μετρήσεις είναι πυκνές, όμως το

κόστος της συνεχούς καταγραφής της ποιότητας του νερού είναι πολλές φορές απαγορευτικό, ενώ η εφαρμογή ΔΠ δεν μπορεί παρά μόνο μετά την παρέλευση μεγάλων χρονικών διαστημάτων να αξιολογηθεί. Η προσέγγιση Ολικού Ισοζυγίου είναι καλά ανεπτυγμένη, βελτιώνεται συνεχώς με νέα πακέτα δεδομένων σε ευρωπαϊκό επίπεδο, είναι εύκολη στην ερμηνεία και ήδη διαθέσιμη για την ΕΕ-27. Όμως, σημαντικό για τη βελτίωσή της είναι η περαιτέρω κατανόηση των μηχανισμών κατακράτησης θρεπτικών στην εδαφική φάση ώστε η ανάπτυξη νέων μεθοδολογιών ποσοτικοποίησής της να επιτρέψει τον ακριβέστερο διαχωρισμό των ποσοτήτων θρεπτικών που χάνονται προς την ατμόσφαιρα και αυτών που μεταφέρονται στα υδάτινα σώματα. Η γεωγραφική αποτύπωση των ανωτέρω σε πιο αναλυτική χωρική κλίμακα είναι επιβεβλημένη για τον καθορισμό των περιοχών που θα τύχουν εφαρμογής ΔΠ.

Οι μεθοδολογίες Εκτίμησης Κινδύνου απαιτούν αρκετά δεδομένα και δεν δίνουν προσδιοριστικά αποτελέσματα για τις απώλειες θρεπτικών από το έδαφος παρά μόνο έναν χαρακτηρισμό της εδαφικής μονάδας ως προς την τρωτότητά της. Ο χρόνος δεν υπεισέρχεται πάντα στις εκτιμήσεις, αλλά οι τελευταίες μπορούν να γίνουν σε αναλυτική χωρική κλίμακα και να υποδείξουν τις πιο ευαίσθητες περιοχές σε απώλειες θρεπτικών για εφαρμογή ΔΠ.

Τα απλά στατιστικά μοντέλα παρέχουν μία χρήσιμη και σχετικά γρήγορη εκτίμηση των μη σημειακών απωλειών θρεπτικών και των ποσοτήτων κατακράτησής τους στην εδαφική και υγρή φάση. Οι μικρές απαιτήσεις σε δεδομένα έχουν επιτρέψει την πραγματοποίηση πανευρωπαϊκών εκτιμήσεων με εφαρμογή απλών εξισώσεων και με ανάγκη βαθμονόμησης ελάχιστων παραμέτρων. Η απλότητά τους τα καθιστά πολύ πιο φιλικά στο χρήστη σε σχέση με τα προσδιοριστικά μοντέλα πλήρους προσομοίωσης διαδικασιών, αν και η προγνωστική τους ικανότητα είναι πιο περιορισμένη και είναι αποδεκτή σε ετήσια ή το πολύ σε εποχιακή χρονική βάση. Τα στατιστικά μοντέλα δεν προσφέρουν πληροφορία για τις φυσικές διεργασίες, σε πολλά σημεία ακολουθούν δηλαδή προσεγγίσεις μαύρου κουτιού, μην παρέχοντας γνώση για τους μηχανισμούς μεταφοράς των θρεπτικών. Δεδομένης της απουσίας προσομοίωσης των διαφόρων συνιστωσών του υδρολογικού κύκλου, τα μοντέλα αυτά δεν ενδείκνυνται για την υπόδειξη περιοχών προς εφαρμογή των κατάλληλων ΔΠ. Οι μόνες ουσιαστικά ΔΠ που μπορούν να εξεταστούν από ένα στατιστικό μοντέλο είναι εκείνες που σχετίζονται με μεταβολές στις εφαρμοζόμενες ποσότητες θρεπτικών στο έδαφος, όπου οι διαφορές καταγράφονται στα αποτελέσματα μέσω της εφαρμογής των εξισώσεων. Πρακτικές σχετικά με το χρόνο εφαρμογής, τον τρόπο καλλιέργειας (βάθος άροσης, μείωση χρονικής διάρκειας βόσκησης κ.α.) δε μπορούν να διερευνηθούν. Επιπλέον, το γεγονός ότι τα μοντέλα αυτά βαθμονομήθηκαν με βάση γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά συγκεκριμένων περιοχών, καθιστά την εφαρμογή τους σε άλλες μία λανθασμένη πρακτική, ενώ και η εφαρμογή τους σε

εντελώς διαφορετικές εποχές από αυτές για τις οποίες βαθμονομήθηκαν περιέχει μεγάλο κίνδυνο εξαγωγής λανθασμένων συμπερασμάτων.

Τα προσδιοριστικά μοντέλα προσομοίωσης διαδικασιών περιλαμβάνουν αναμφισβήτητα τον πιο ορθό επιστημονικά τρόπο προσέγγισης του προβλήματος. Δυστυχώς όμως είναι πολύ απαιτητικά σε δεδομένα και χρονοβόρα για την αρχική επεξεργασία των δεδομένων αυτών και τη σωστή βαθμονόμησή τους. Οι περιορισμοί αυτοί τα καθιστούν πρακτικά εφαρμόσιμα μόνο σε κλίμακα λεκάνης απορροής και οι εκτιμήσεις εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το επίπεδο γνώσεων του μελετητή. Οι μεγάλες ανάγκες παραμετροποίησης μπορεί να καταστήσουν τα μοντέλα αυτά ακόμα και επιζήμια με εξαγωγή μη ρεαλιστικών αποτελεσμάτων από έναν απλό χρήστη που δεν γνωρίζει επαρκώς τη φυσική λειτουργία του συστήματος, τις ρουτίνες του μοντέλου που την προσομοιώνουν και την αβεβαιότητα που υπεισέρχεται στις εκτιμήσεις. Ωστόσο, η χρήση αναλυτικών δεδομένων, η λεπτομερής προσομοίωση των φυσικών διεργασιών και οι εφαρμογές ΣΓΠ με τις οποίες συνδέονται τα μοντέλα αυτά, επιτρέπουν την άμεση και εύκολη εξέταση σεναρίων με γεωγραφική και χρονική αναφορά, ενώ η αντιμετώπιση των προβλημάτων παραμετροποίησης και βαθμονόμησης αποτελεί αναμφισβήτητα μία πρόκληση που προσδίδει μεγαλύτερη επιστημονική βαρύτητα στην ερευνητική διαδικασία. Για τους λόγους αυτούς η επιλογή ενός τέτοιου μοντέλου, και ειδικά του SWAT, κρίθηκε ως η πιο ενδεδειγμένη για τη χρήση του εκτιμητή ρυπαντικού φορτίου στην παρούσα εργασία μετά από εφαρμογή ΔΠ στην αγροτική γη λεκάνης απορροής.

Φυσικά, δεν υπάρχει σαφής απάντηση για το ποια μεθοδολογία ενδείκνυται περισσότερο στην εκάστοτε ερευνητική εργασία. Η ασάφεια αυτή έχει οδηγήσει στη σύγκριση μεθοδολογιών και αξιολόγησή τους μετά από ενδελεχή ανάλυση των θετικών και αρνητικών σημείων τους. Εργασίες όπως αυτή των Grizzetti et al. (2005b), που συνέκριναν το στατιστικό μοντέλο GREEN με το προσδιοριστικό μοντέλο προσομοίωσης διαδικασιών SWAT μετά από εφαρμογή στη λεκάνη Wash του Ηνωμένου Βασιλείου, των Alexander et al. (2002) που έκαναν σύγκριση έξι μοντέλων ως προς την προγνωστική ικανότητα στο φορτίο N στις ΗΠΑ, καθώς και η αναλυτική επισκόπηση από τους Schoumans et al. (2003) των εννέα μεθοδολογιών που χρησιμοποιήθηκαν στο πρόγραμμα Euroharp (Euroharp, 2000), αν και δεν καταδεικνύουν σαφώς τις καλύτερες μεθοδολογίες, παρουσιάζουν τις διαφορές των διαφόρων προσεγγίσεων και αποτελούν αξιόλογες προσπάθειες που μπορούν να βοηθήσουν στη λήψη της κατάλληλης απόφασης. Οι Cherry et al. (2008) μετά από αναλυτική παρουσίαση των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων των διαφόρων μεθοδολογιών, καταλήγουν ωστόσο στο συμπέρασμα ότι μόνο μία ολοκληρωμένη προσέγγιση με ταυτόχρονη συγκριτική χρήση πολλών μεθοδολογιών μπορεί να αυξήσει την ακρίβεια και να μειώσει την αβεβαιότητα των εκτιμήσεων.

4 Διαχειριστικές Πρακτικές για την Αντιμετώπιση της Ρύπανσης από Θρεπτικά

4.1 Γενικά

Οι δράσεις που έχουν αναπτυχθεί για την περιστολή των μη σημειακών απωλειών θρεπτικών στα νερά βασίζονται στην παρακολούθηση των πιέσεων και στη μελέτη των μηχανισμών απομάκρυνσης των στοιχείων από το έδαφος. Οι δράσεις αυτές, είτε μεταβάλλουν άμεσα τις εφαρμοζόμενες ποσότητες στο έδαφος, είτε επιδρούν στους μηχανισμούς συσσώρευσης θρεπτικών στο έδαφος και στη μετέπειτα μεταφορά τους και επιτυγχάνουν τη μείωση του παραγόμενου φορτίου που εμπλουτίζει τα υδάτινα σώματα. Οι εν λόγω δράσεις συχνά αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία ως (Cherry et al., 2008): *Βέλτιστες Διαχειριστικές Πρακτικές* (Best Management Practices – BMPs) ή *Μέτρα/Μέθοδοι Κατευνασμού* (Mitigation Measures/Methods) της ρύπανσης ή *Πρακτικές Συντήρησης* (Conservation Practices) των εδαφικών πόρων ή ακόμα *Κώδικες Ορθής Γεωργικής Πρακτικής* (Good Farming Practices). Αν και οι παραπάνω όροι χρησιμοποιούνται κατά το δοκούν και δεν είναι όλοι μεταξύ τους ταυτόσημοι, παραπέμπουν από κοινού σε δράσεις ενάντια στη μη σημειακή ρύπανση από θρεπτικά. Θεωρείται ωστόσο πιο δόκιμη η χρήση του πρώτου όρου και για διευκόλυνση σε ολόκληρο το κείμενο της διατριβής: *Διαχειριστικές Πρακτικές* (ΔΠ).

Οι ΔΠ καλούνται εδώ και τουλάχιστον δύο δεκαετίες να αντιμετωπίσουν τις ανησυχίες και τα περιβαλλοντικά προβλήματα που δημιουργήθηκαν από την εντατικοποίηση της γεωργίας και της κτηνοτροφίας με επίδραση σε ένα ή περισσότερα αίτια και μηχανισμούς συσσώρευσης και μεταφοράς θρεπτικών από το έδαφος στα επιφανειακά νερά (Mausbach and Dedrick, 2004). Ιστορικά, οι ΔΠ στόχευαν στον περιορισμό της διάβρωσης του εδάφους και της μεταφοράς εδαφικών σωματιδίων στο υδρογραφικό δίκτυο που θεωρούνταν ότι οδηγούσε στον εμπλουτισμό των υδάτων με διαλυτές μορφές N και P (Walter et al., 1979). Σήμερα, μετά από αρκετά χρόνια εμπειρίας, έχει αποδειχτεί ότι αυτές οι πρακτικές δεν αρκούν για τον περιορισμό των απωλειών διαλυτών μορφών θρεπτικών και για να είναι αποτελεσματικές πρέπει να συνδυάζονται με πρακτικές διαχείρισης των εδαφικών πόρων και της εφαρμογής θρεπτικών στο έδαφος.

Οι πρακτικές κατασκευαστικού χαρακτήρα, θεωρήθηκαν αρχικά προτιμητέες αφού προκαλούν συνήθως μεταβολή στην υδρολογική δίοδο των εδαφικών και θρεπτικών σωματιδίων (π.χ. επιφανειακά ή υπόγεια στραγγιστικά δίκτυα, φράκτες στα όρια των αγροκτημάτων), χωρίς να επηρεάζουν τις αποδόσεις και το εισόδημα. Το σημαντικό κόστος

εγκατάστασης όμως, κατέστησε στις μέρες μας τις μη κατασκευαστικές πρακτικές ως πιο αποτελεσματικές και συμβατές με την ανάγκη προστασίας του περιβάλλοντος, μιας και μεταβάλλουν τον τρόπο άσκησης των αγροτικών δραστηριοτήτων επεμβαίνοντας ήπια στη φύση. Οι ΔΠ της βιβλιογραφίας συνήθως αξιολογούνται με έναν παράγοντα που εκφράζει το βαθμό περιορισμού της ρύπανσης από θρεπτικά και εκφράζεται ως η % μείωση στο υφιστάμενο φορτίο ποταμού. Λόγω της ευρείας χωρικής κλίμακας εφαρμογής των ΔΠ, για τον ίδιο τύπο πρακτικών παρατηρούνται πολύ μεγάλα εύρη τιμών (Rao et al., 2009), που μαρτυρούν ότι η αποδοτικότητα τους έχει έντονα τοπικό χαρακτήρα και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Κατά συνέπεια μία ΔΠ με μεγάλη αποδοτικότητα σε μία περιοχή μπορεί ακόμα και να αντενδείκνυται σε μία άλλη.

Οι αγροτικές ΔΠ έχουν πλέον κατηγοριοποιηθεί σε διεθνές επίπεδο και η αποτελεσματικότητά τους μελετάται συνολικά συναρτήσει των γεωγραφικών διαφοροποιήσεων. Ιδιαίτερη σημασία σε μια εποχή έντονων οικονομικών μεταβολών έχει εκτός από την θετική επίδραση στο περιβάλλον, και η αξιολόγηση των ΔΠ ως προς την οικονομικότητα της εφαρμογής τους. Γι' αυτό τείνουν πλέον να διερευνώνται με τη σχέση Κόστους–Αποτελεσματικότητας (ΚΑ), (Cost–Effectiveness - CE). Πρόσφατα έχει ακόμα τεθεί το θέμα της αντιμετώπισης αυτών των δράσεων ως πολλαπλού σκοπού. Ενδεικτικά αναφέρεται η περίπτωση των ζωνών συγκράτησης ή λωρίδων διήθησης (buffer zones ή filter strips), που ως ζώνες βλάστησης στα όρια των αγροκτημάτων, ιδανικά θα μπορούσαν να χρησιμεύσουν τόσο για τη συγκράτηση εδαφικών σωματιδίων και θρεπτικών στοιχείων, όσο και ως ενδιαιτήματα αυξάνοντας τη βιοποικιλότητα του τοπίου (Stoate et al., 2001).

4.2 Κατηγοριοποίηση Διαχειριστικών Πρακτικών

Οι ΔΠ χωρίζονται σε μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με τη δράση τους (Cherry et al., 2008). Έτσι, διακρίνονται σε μεθόδους που στοχεύουν στη μείωση της διαθεσιμότητας των θρεπτικών στο έδαφος (μέθοδοι στην πηγή), σε εκείνες που μεταβάλλουν τη χρονική στιγμή των καλλιεργητικών φροντίδων (μέθοδοι χρόνου) και σε εκείνες που στοχεύουν στη μείωση των απωλειών των θρεπτικών προς τους υδάτινους αποδέκτες μέσω του μηχανισμού μεταφοράς (μέθοδοι μεταφοράς). Στα πλαίσια της Ευρωπαϊκής δράσης COST 869 (COST Action 869, 2005) και μετά από συλλογική δουλειά ανασκόπησης δημοσιευμένων εργασιών, οι διαθέσιμες και τοπικά εφαρμοζόμενες έως σήμερα ΔΠ στην Ευρώπη και την Αμερική (SERA-17, 1990), κατηγοριοποιήθηκαν σε ομάδες με βάση κοινά τους χαρακτηριστικά. Η παραχθείσα οργανωμένη λίστα καθιστά ευκολότερη την αναζήτηση των διαφόρων τύπων ΔΠ, ενώ η δομή της επιτρέπει τη συνεχή επικαιροποίηση με νέα δεδομένα. Κάθε ομάδα ΔΠ της λίστας περιλαμβάνει μέτρα που έχουν την ίδια φύση, επιδρούν με παρόμοιο τρόπο στην

ανθρωπογενή φόρτιση ή στο φυσικό μηχανισμό μεταφοράς θρεπτικών, αλλά που διαφέρουν μεταξύ τους στον τρόπο ή στο μέσο εφαρμογής. Συνεπώς, σε κάθε ομάδα της λίστας αυτής περιλαμβάνονται συχνά παρεμφερείς πρακτικές που λόγω μικρών διαφοροποιήσεων και τοπικής ισχύος παρουσιάζονται ως ξεχωριστά μέτρα. Για ουσιαστικούς και πρακτικούς λόγους, από τις συνολικά 78 ΔΠ που αναρτώνται σήμερα ως ξεχωριστά μέτρα στην επίσημη ιστοσελίδα της δράσης, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1, μετά από απαλοιφή ή συγχώνευση επαναλαμβανόμενων πρακτικών με παρεμφερή δράση, οι βασικότερες από αυτές.

Πίνακας 4.1 Κατηγοριοποίηση Διαχειριστικών Πρακτικών (πηγή: COST 869 - http://www.cost869.alterra.nl/Fs/List_of_options.htm).

Διαχείριση Εφαρμογής Θρεπτικών μέσω Χημικών Λιπασμάτων και Κοπριάς

1. Χρήση συστήματος συμβουλών λίπανσης με λήψη εδαφικού δείγματος (Π)
2. Συνδυασμένη χρήση χημικών λιπασμάτων και κοπριάς (Π)
3. Μείωση εφαρμοζόμενων ποσοτήτων χημικών λιπασμάτων (Π)
4. Τοποθέτηση χημικού λιπάσματος δίπλα στο φυτό (Π)
5. Αποφυγή εφαρμογής χημικών λιπασμάτων σε περιοχές υψηλού κινδύνου (Π)
6. Αποφυγή εφαρμογής χημικών λιπασμάτων σε χρονικές περιόδους υψηλού κινδύνου (Χ)
7. Αποθήκευση κοπριάς με αύξηση όγκου αποθηκευτικών χώρων (Χ)
8. Μετατροπή υγρής κοπριάς σε ξηρή (Π)
9. Αποφυγή εφαρμογής κοπριάς σε περιοχές υψηλού κινδύνου (Π)
10. Αποφυγή εφαρμογής κοπριάς σε χρονικές περιόδους υψηλού κινδύνου (Χ)
11. Ενσωμάτωση κοπριάς εντός του εδάφους (Π)
12. Αποτέφρωση κοπριάς (Π)

Διαχείριση Καλλιέργειας

13. Εναλλαγή καλλιεργειών στην ίδια έκταση - Αμειψισπορά (Μ)
14. Καλλιέργεια κατά ζώνες (Μ)
15. Διατήρηση κάλυψης εδάφους μεταξύ συγκομιδής - νέας σποράς (Μ)
16. Εγκατάσταση χλωρής λίπανσης σε περιοχές με κίνδυνο διάβρωσης (Μ)
17. Πρωΐμιση σποράς των χειμερινών καλλιεργειών (Χ)
18. Επιλογή καλλιεργειών με μεγαλύτερη ικανότητα λήψης θρεπτικών από το έδαφος (Μ)
19. Επιλογή καλλιεργειών λιγότερο ευαίσθητων στην επιφανειακή απορροή (Μ)

Διαχείριση Ζωικής Παραγωγής

20. Μείωση αριθμού ζώων (Π)
21. Περιορισμός αναπαραγωγής ζώων (Π)
22. Κοπή λειβαδικής βλάστησης και τροφοδότηση ζώων αντί βόσκησης (Μ)
23. Μείωση ημερήσιας χρονικής διάρκειας ή χρονικής περιόδου βόσκησης (Χ)
24. Αποφυγή επαφής ζωικού κεφαλαίου με το υδρογραφικό δίκτυο (Μ)
25. Μείωση αριθμού εκτρεφόμενων ζώων στα λιβάδια όταν τα εδάφη είναι υγρά (Μ)
26. Τοποθέτηση στερεής κοπριάς μακριά από υδάτινα σώματα (Μ)

Διαχείριση Εδαφικών Πόρων

27. Σε βαριά εδάφη απ' ευθείας διάτρηση του εδάφους για σπορά αντί για άροση (Μ)
28. Σε ελαφριά εδάφη και για ανοιξιάτικη σπορά καλλιεργειών, άροση την άνοιξη αντί φθινοπώρου (Χ)
29. Κατάργηση άροσης (Μ)
30. Συντηρητική (αβαθής) άροση (Μ)
31. Άροση κατά τις ισοϋψείς και εγκάρσια στις κλίσεις (Μ)
32. Διαμόρφωση αναβαθμίδων (Μ)
33. Διατήρηση και εμπλουτισμός οργανικής ουσίας του εδάφους (Μ)
34. Χρήση σταθεροποιητών εδάφους (εδαφοβελτιωτικών) (Μ)
35. Εγκατάσταση ζωνών συγκράτησης εντός της εδαφικής περιοχής (Μ)

Η λίστα καλύπτει εξ ολοκλήρου τις τέσσερις βασικές ομάδες πρακτικών που σχετίζονται με τη διαχείριση της εφαρμογής θρεπτικών, τη διαχείριση των καλλιεργειών, της ζωικής παραγωγής και των εδαφικών πόρων και καλύπτουν απόλυτα τις ΔΠ που διερευνώνται στα επόμενα κεφάλαια της παρούσης εργασίας. Σε παρένθεση σημειώνεται η κατηγοριοποίηση της κάθε δράσης ανάλογα με το αν επιδρά στην πηγή (Π), στη χρονική στιγμή εφαρμογής (Χ) ή στο μηχανισμό μεταφοράς θρεπτικών από το έδαφος στο νερό (Μ). Στη συνέχεια γίνεται σύντομη αναφορά στη φυσική ερμηνεία των ΔΠ κάθε ομάδας με ορισμένες αναφορές από τη βιβλιογραφία, ενώ αναλυτική περιγραφή όλων των ΔΠ, συμπεριλαμβανομένων και εκείνων που δεν παρατίθενται εδώ, μπορεί να βρεθεί στην επίσημη ιστοσελίδα της δράσης COST 869 (COST Action 869, 2005).

4.2.1 Διαχείριση εφαρμογής θρεπτικών μέσω χημικών λιπασμάτων και κοπριάς

Οι ετήσιες ποσότητες θρεπτικών που εγκαταλείπουν το έδαφος και καταλήγουν στους υδάτινους αποδέκτες αναμένεται να είναι ανάλογες των ετήσιων φορτίσεων ανθρωπογενούς προέλευσης (χημικά λιπάσματα ανόργανης μορφής της βιομηχανίας) και εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν την περίοδο των λιπάνσεων. Η χρήση κοπριάς ζώων αντί χημικών λιπασμάτων δρα συγκολλητικά στο έδαφος αυξάνοντας τα επίπεδα οργανικής ουσίας, αλλά δεν ακολουθείται συχνά ως πρακτική, ακόμα και στις περιοχές με ανεπτυγμένη κτηνοτροφία, όπου οι γεωργοί προτιμούν τη λύση των έτοιμων προϊόντων της βιομηχανίας. Η πρώτη κατηγορία του Πίνακα 4.1 περιλαμβάνει εκείνα τα μέτρα που αφορούν σε άμεσες παρεμβάσεις στις ποσότητες θρεπτικών που εφαρμόζονται στις αγροτικές εκτάσεις και επομένως οι επιμέρους ΔΠ χαρακτηρίζονται ως επί τω πλείστον ως μέτρα εφαρμογής στην πηγή. Σκοπός των μέτρων αυτών είναι η επίτευξη αυξημένης τιμής του λόγου: Λήψη θρεπτικών από τις καλλιέργειες/Περίσσευμα θρεπτικών στο έδαφος, ώστε να μειώνεται η διαθέσιμη ποσότητα προς μεταφορά στους υδάτινους αποδέκτες. Το πρώτο μέτρο της λίστας αφορά σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα λιπάνσεων με λήψη και χημική ανάλυση εδαφικών δειγμάτων από κάθε αγρό για εφαρμογή λίπανσης σε ενδεδειγμένους χρόνους και θέσεις (επιμέρους μέτρα 5, 6 & 9, 10). Η μέθοδος αυτή, που παραπέμπει στη *γεωργία ακριβείας* (precision agriculture), αποτελεί τον πιο αποτελεσματικό τρόπο επίτευξης ισοζυγίου μεταξύ εφαρμοζόμενων ποσοτήτων θρεπτικών και αναγκών των καλλιεργειών με εξοικονόμηση λιπασμάτων και ταυτόχρονα εξασφάλιση της διαθεσιμότητάς τους στο έδαφος όταν η καλλιέργεια το απαιτεί. Το κόστος της συλλογής και ανάλυσης εδαφικών δειγμάτων σε συστηματική βάση αποτελεί το βασικό περιοριστικό παράγοντα αποδοχής αυτού του μέτρου από τον αγροτικό κόσμο.

Η μονομερής μείωση των ποσοτήτων χημικών λιπασμάτων, που παρουσιάζεται ως το τρίτο κατά σειρά μέτρο του Πίνακα 4.1 αποτελεί την πιο συνηθισμένη ΔΠ της κατηγορίας. Εφαρμογές αυτής της πρακτικής έχουν δείξει ότι αμέσως μετά τη συγκομιδή της καλλιέργειας τα υπολείμματα $NO3^-$ στο έδαφος είναι μειωμένα (Johnson et al., 2002) και οι απώλειες κατά τη διάρκεια του φθινοπώρου περιορισμένες (Webster et al., 1993). Η ελάττωση αζωτούχου λίπανσης δεν επηρεάζει όμως καθόλου τους ρυθμούς ανοργανοποίησης του N από την οργανική ουσία, ενώ σχεδόν πάντα οδηγεί σε μειώσεις παραγωγής, εκτός αν πρόκειται για εφαρμογή του μέτρου σε καλλιέργειες ψυχανθών (μηδική, τριφύλλια, όσπρια). Η μείωση των φωσφορικών λιπάνσεων από την άλλη μπορεί να οδηγήσει σε δραματικές μειώσεις των αποδόσεων σε καλλιέργειες που αντιδρούν θετικά στον P, ενώ μειώσεις στις απώλειες από το έδαφος παρατηρούνται συνήθως σε μεγαλύτερο βάθος χρόνου δηλαδή μετά την παρέλευση κάποιων ετών. Είναι ακόμα πιθανό, όταν η μείωση αφορά στο ένα εκ των δύο στοιχείων, να διαταραχθεί έντονα η σχέση διαθεσιμότητας που τα συνδέει με αποτέλεσμα να περιοριστεί η ικανότητα της βλάστησης να απορροφήσει τις ενώσεις του έτερου στοιχείου (εκείνου δηλαδή για το οποίο δεν υπήρξε καμία μεταβολή στην εφαρμογή) με τις απώλειές του να είναι συνεπώς μεγαλύτερες. Πειραματισμοί με το ποσοστό μείωσης χημικών λιπασμάτων στην Αγγλία κατέδειξαν ότι μειώσεις τουλάχιστον 20% και 50% είναι απαραίτητες για N και P αντίστοιχα, ώστε ικανοποιητικές μειώσεις στις απώλειες από το έδαφος να είναι διακριτές στα ποτάμια, ενώ μείωση μόλις 10% στο εφαρμοζόμενο N οδήγησε σε αναπόφευκτο περιορισμό των αποδόσεων χειμερινού σιταριού κατά 3% (Cuttle et al., 2007). Οι μειώσεις αποδόσεων πατάτας από ανάλογη μείωση στη λίπανση με P_2O_5 ήταν πολύ μεγαλύτερες. Στην Ολλανδία οι Lebbink et al. (1994) κατέγραψαν μειώσεις 10% σε αποδόσεις διαφόρων καλλιεργειών σε σχέση με τη συμβατική μέθοδο καλλιέργειας όταν μείωσαν ταυτόχρονα τις λιπάνσεις και τις αρόσεις. Μετά από μείωση των ποσοτήτων χημικών λιπασμάτων και κοπριάς παρατηρήθηκε μείωση των συγκεντρώσεων P στα νερά, αλλά για ένα σύντομο χρονικό διάστημα μετά την εφαρμογή. Οι συγκεντρώσεις που παρατήρησαν μακροπρόθεσμα δεν διαφοροποιούνταν ιδιαίτερα από εκείνες πριν τη μείωση των ποσοτήτων, πράγμα που σημαίνει ότι η πρακτική αυτή περιορίζει τις απώλειες λόγω βροχοπτώσεων σε άμεσο χρόνο, αλλά μακροπρόθεσμα δεν είναι ικανή να τις περιορίσει συστηματικά, διότι φαίνεται να εξαρτώνται από το περίσσευμα του στοιχείου στο έδαφος που μπορεί να διαφοροποιηθεί μόνο σε αρκετά μεγάλο βάθος χρόνου και μόνο εφόσον η πρακτική τυγχάνει συνεχούς εφαρμογής. Το κόστος εφαρμογής της εν λόγω ΔΠ υπολογίζεται χονδρικά ως ισοζύγιο μεταξύ του κέρδους από την εξοικονόμηση λιπασμάτων και των απωλειών από τις μειωμένες αποδόσεις.

Το 4° κατά σειρά μέτρο της πρώτης κατηγορίας ΔΠ αφορά στην εφαρμογή του λιπάσματος πολύ κοντά στο φυτό ώστε η απορρόφησή του να ευνοείται και ταυτόχρονα να

είναι μικρότερη η επιφάνεια του εδάφους που λιπαίνεται. Η μέθοδος ενδείκνυται όταν οι καλλιέργειες αρδεύονται με συστήματα τοπικής άρδευσης (στάγδην) και συνδυάζουν τον εν λόγω τρόπο λίπανσης. Η αυξημένη αποδοτικότητα της άρδευσης με τη διατήρηση ενός μικρού μετώπου διαβροχής του εδάφους και με την ταυτόχρονη χορηγία λιπάσματος σε μικρές δόσεις εξασφαλίζουν τη λήψη του N και του P με μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα και μειώνουν το χρόνο διαθεσιμότητάς τους στο έδαφος (Ben-Gal and Dudley, 2003· Vazquez et al., 2006). Ωστόσο η μέθοδος έχει μεγάλο κόστος λόγω της εγκατάστασης, συντήρησης και λειτουργίας του εξοπλισμού άρδευσης, αλλά ενδείκνυται στις αγροτικές εκτάσεις που ήδη αρδεύονται με τοπικές μεθόδους.

Ως αποδοτική ΔΠ θεωρείται η συνδυασμένη χρήση χημικών λιπασμάτων και κοπριάς με εν μέρει αντικατάσταση της χημικής λίπανσης από κοπριά ζώων (2° μέτρο). Η μέθοδος οδηγεί σε εξοικονόμηση χρημάτων από τη μείωση αγοράς χημικών λιπασμάτων και ευνοεί τη βελτίωση κάποιων φυσικοχημικών παραμέτρων του εδάφους (διατήρηση οργανικής ουσίας και δομής του στα επιθυμητά επίπεδα) λόγω της χρήσης κοπριάς, ενώ απαιτεί κόστος εργασίας για τη συλλογή της. Ωστόσο, η κοπριά των ζώων δεν είναι πάντα επωφελής για το αγρο-οικοσύστημα. Σε ορισμένες περιπτώσεις έχει αποδειχτεί τοξική για το περιβάλλον και ιδιαίτερα τα περιττώματα πουλερικών ευνοούν την ανοργανοποίηση της οργανικής ουσίας και την επακόλουθη απόπλυση N. Οι Brannan et al. (2000) μελέτησαν διάφορες μεθόδους επεξεργασίας κοπριάς ζώων και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι σημαντικές μειώσεις απωλειών θρεπτικών επιτυγχάνονται αν αυτές υιοθετούνται πριν την εφαρμογή στις αγροτικές εκτάσεις. Ένα μέτρο κατασκευαστικού χαρακτήρα που ανήκει στις μεθόδους επεξεργασίας ζωικής κοπριάς είναι η πολύμηνη αποθήκευσή της σε ειδικές δεξαμενές όπου η βελτίωση της σύστασής της προκύπτει από τη θανάτωση των βακτηρίων, την παροχή ικανοποιητικού χρόνου για αεριοποίηση του N και την ξήρανσή της που επιτρέπει το διαχωρισμό των υγρών από τη στερεή κοπριά (μέτρα 7 και 8). Η μέθοδος οδηγεί στη μείωση μόνο του φορτίου N έως και 50% μετά από 3 μήνες αποθήκευσης όταν πρόκειται για κοπριά βοοειδών και χοίρων και 15% όταν πρόκειται για κοπριά πουλερικών (Cuttle et al., 2007). Η εφαρμογή της κοπριάς στους αγρούς μπορεί με αυτόν τον τρόπο να γίνει σε περιόδους με μετεωρολογικές συνθήκες που προκαλούν μικρό κίνδυνο απωλειών. Ως δράση κατασκευαστικού χαρακτήρα, έχει σημαντικό κόστος κυρίως για την αγορά και εγκατάσταση των δεξαμενών αυτών και λιγότερο για την εργασία που απαιτείται για τη συλλογή και αποθήκευση.

Η χρονική στιγμή της εφαρμογής χημικών λιπασμάτων και κοπριάς από την άλλη, δεν αποτελεί εγγυημένη πρακτική ενάντια στην απόπλυση των συστατικών τους από το έδαφος λόγω της τυχαιότητας των μετεωρολογικών φαινομένων. Έτσι, τα οφέλη από τη μετάθεση της εφαρμογής κατά μία ή λίγες εβδομάδες, όταν η βροχόπτωση ιστορικά

παρατηρείται μειωμένη (μέτρα 6 και 10), μπορεί να αναιρεθούν, αν ένα και μόνο ισχυρό επεισόδιο ακολουθήσει τις επόμενες μέρες. Ωστόσο οι Bishop et al. (2005) παρατήρησαν σημαντική ελάττωση όταν απέφυγαν την εφαρμογή κατά τις υγρές περιόδους σε αγροτικές περιοχές της Νέας Υόρκης. Οι Sharpley et al. (2001) παρατήρησαν ακόμα ότι η εφαρμογή κοπριάς νωρίτερα κατά ένα περίπου μήνα ή ισοδύναμα η καθυστέρηση εμφάνισης της βροχόπτωσης σε σχέση με την εφαρμογή είχε σαν αποτέλεσμα την καταγραφή συγκεντρώσεων διαλυτού P στα νερά της απορροής από ένα ελαφρύ έδαφος, ίσες με 0,40mg/l αντί για 2,75mg/l όταν η εφαρμογή γινόταν στο συνηθισμένο χρόνο. Οι Chambers et al. (2000b) ισχυρίζονται ακόμα ότι η εφαρμογή κοπριάς πουλερικών, αργά το χειμώνα αντί του φθινοπώρου έχει ως αποτέλεσμα την αναστολή της νιτροποίησης της αμμωνίας λόγω των χαμηλότερων θερμοκρασιών και συνεπώς μικρότερες διαθέσιμες ποσότητες $NO3^-$ για μεταφορά από το έδαφος στα νερά. Οι επιπτώσεις στην παραγωγή από τα μέτρα αυτά μπορεί να είναι ασήμαντες όταν οι καλλιέργειες ικανοποιούν τις ανάγκες τους από τα περισσεύματα θρεπτικών στο έδαφος, αλλά σημαντικές όταν η διαθεσιμότητα αυτή είναι μικρή και δεν επαρκεί για τις αυξημένες ανάγκες της αρχικής περιόδου ανάπτυξής τους. Στην περίπτωση που το μέτρο αφορά ζωική κοπριά είναι απαραίτητη η αποθήκευσή της που παρουσιάζει επίσης κόστος όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο.

Άλλα πιο σπάνια μέτρα σχετικά με τη διαχείριση της ζωικής κοπριάς είναι η ενσωμάτωσή της στο έδαφος και η αποτέφρωσή της. Η ενσωμάτωση (μέτρο 11) γίνεται κατά τη διάρκεια της άροσης του εδάφους (παράχωμα) και σκοπεύει στον περιορισμό της έκθεσής της στην επιφάνεια και στη διατήρησή της κατά λίγα εκατοστά βαθύτερα στα εδαφικά στρώματα. Εξαιρουμένου του κόστους αποθήκευσης της κοπριάς, η εφαρμογή της στο έδαφος σε συνδυασμό με την άροση προκαλεί επιπλέον κόστος που μεταφράζεται σε κόστος εργασίας, συνήθως επίπονης. Η αποτέφρωση (μέτρο 12) ενδείκνυται κατά τους Cuttle et al. (2007) για την κοπριά πουλερικών, η οποία περιέχει μικρά ποσοστά υγρασίας και πειράματα που έκαναν στην Αγγλία έδειξαν ότι η μείωση της περιεκτικότητας σε θρεπτικά φτάνει έως και 90%. Το κόστος της μεθόδου έγκειται στις υποδομές για την αποθήκευση της κοπριάς καθώς και στην εργασία που απαιτείται για τη μεταφορά της σε ειδικές θέσεις αποτέφρωσης, μακριά από τις μονάδες παραγωγής.

4.2.2 Διαχείριση καλλιέργειας

Οι τεχνικές διαχείρισης καλλιέργειας περιλαμβάνουν μέτρα αποκλειστικά μη κατασκευαστικού χαρακτήρα και αποσκοπούν στη μείωση της απορροής και κυρίως στην αύξηση, συγκράτηση ή αναδημιουργία του εδάφους στη διάβρωση. Οι συγκεκριμένες τεχνικές στοχεύουν στην προστασία του εδάφους με μέγιστη δυνατή κάλυψή του σε χρόνο

και σε έκταση με την επιλογή της κατάλληλης καλλιέργειας, πυκνότητας και διάταξής της. Για το λόγο αυτό πρόκειται σχεδόν εξ ολοκλήρου για μέτρα που μειώνουν τις απώλειες θρεπτικών από το έδαφος με αναστολή της επιφανειακής απορροής και στερεοαπορροής, επιδρούν επομένως στο μηχανισμό μεταφοράς και γι' αυτό χαρακτηρίζονται ως μέθοδοι μεταφοράς.

Σε καλλιέργειες με ετήσιο ή ολιγοετή βιολογικό κύκλο η εναλλαγή καλλιέργειας στην ίδια έκταση από έτος σε έτος ή κάθε λίγα έτη, αλλιώς *αμειψισπορά*, αποτελεί την πλέον ενδεδειγμένη τεχνική (μέτρο 13). Δεδομένου ότι οι διάφορες καλλιέργειες δεν προσφέρουν την ίδια αντιδιαβρωτική προστασία στο έδαφος και απορροφούν τα θρεπτικά στοιχεία με διαφορετικό ρυθμό, η αμειψισπορά μπορεί να καλύψει ταυτόχρονα αγροτικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές ανάγκες σε μία περιοχή. Οι σκαλιστικές καλλιέργειες (π.χ. κηπευτικά) προσφέρουν μηδενική προστασία στη διάβρωση, η καλλιέργεια σιτηρών μικρή, ενώ οι καλλιέργειες ψυχανθών σημαντική. Οι τελευταίες μάλιστα εμπλουτίζουν το έδαφος με N ωφελώντας την καλλιέργεια που θα ακολουθήσει και θα βρει υψηλά αποθέματα του στοιχείου στο έδαφος. Η εναλλαγή ενός σιτηρού π.χ. σιτάρι ή αραβόσιτος με ένα κτηνοτροφικό ψυχανθές π.χ. μηδική θα μπορούσε να προσφέρει ικανοποιητική προστασία στη διάβρωση λόγω της 3ετούς ή 4ετούς πυκνής κάλυψης του εδάφους από τη μηδική, και να εξοικονομήσει οικονομικούς πόρους για αγορά αζωτούχων λιπασμάτων για την απαιτητική καλλιέργεια του σιτηρού (Καραμάνος, 1994). Αντίθετα, η συνεχής σπορά της ίδιας καλλιέργειας στη ίδια έκταση, έχει σαν αποτέλεσμα την εξάντληση του εδάφους όταν εκεί αναπτύσσεται συστηματικά μία απαιτητική καλλιέργεια με έντονη διάβρωση εδάφους και απώλειες θρεπτικών προς τους υδάτινους αποδέκτες. Το έδαφος χάνει τη γονιμότητα του, πολλαπλασιάζονται τα προβλήματα με τα ζιζάνια και τις ασθένειες και το κόστος της παραγωγής αυξάνει, γιατί υπάρχει μεγαλύτερη ανάγκη για λιπάσματα και φυτοφάρμακα, ενώ οι αποδόσεις μειώνονται με το χρόνο.

Η καλλιέργεια κατά ζώνες (μέτρο 14) αποτελεί ένα καλλιεργητικό σύστημα με τοποθέτηση των καλλιεργειών στο έδαφος σε εναλλασσόμενες ζώνες. Με τον τρόπο αυτό αν μία ζώνη καλλιέργειας ευνοεί τη διάβρωση, οι δύο εκατέρωθεν ζώνες σπέρνονται με αντιδιαβρωτικές καλλιέργειες ή φυτά συγκράτησης και κάλυψης του εδάφους (αναφέρονται στη συνέχεια ως ξεχωριστό μέτρο) ώστε να δημιουργούνται φυσικά φράγματα στην απορροή. Μέσω της συγκαλλιέργειας προάγεται η ευνοϊκή αλληλεπίδραση μεταξύ των διαφορετικών ειδών ή ποικιλιών φυτών. Ο ανταγωνισμός και η συμπληρωματικότητα μεταξύ κατάλληλα επιλεγμένων εμβόλιμων καλλιεργειών ενισχύει τη συνολική σταθερότητα του συστήματος, συμπεριλαμβανομένης της ανθεκτικότητας κατά των παρασίτων, των ασθενειών και των ζιζανίων. Αυτή η πρακτική έχει θετικές επιπτώσεις στο πορώδες και στη βιοποικιλότητα του εδάφους, στηρίζει τους κύκλους θρεπτικών ουσιών και οδηγεί σε αύξηση της σοδειάς. Στο

σύστημα αυτό εντάσσεται η πολλαπλή *καλλιέργεια κατά ζώνες* (strip-cropping rotation), αλλά και η *καλλιέργεια κατά τις ισοϋψείς* (contour cultivation). Στην τελευταία τα όρια των ζωνών ακολουθούν τις ισοϋψείς προσφέροντας μεγαλύτερη προστασία του εδάφους από τη διάβρωση. Στην πράξη οι δύο προαναφερόμενες τεχνικές μπορεί να συνυπάρχουν και έτσι να πραγματοποιείται είτε η απλή κατά ζώνες αμειψισπορά είτε η κατά ζώνες και κατά ισοϋψείς αμειψισπορά. Στην περίπτωση που γίνεται καλλιέργεια κατά τις ισοϋψείς οι καλλιεργητικές φροντίδες όπως άροση, αυλάκωμα και φύτευση γίνονται κατά μήκος των ισοϋψών καμπυλών (σε ορθές γωνίες στην κανονική ροή της απορροής, και όχι πάνω και κάτω στο πρανές). Δημιουργούνται έτσι αυλάκια κάθετα στην κλίση του εδάφους και σχηματίζονται ακανόνιστου σχήματος επιφάνειες στο έδαφος που εμποδίζουν το νερό να απορρεύσει. Με την καλλιέργεια κατά μήκος των ισοϋψών καμπυλών επιδιώκεται η κατακράτηση νερού μέσα στον επιφανειακό εδαφικό ορίζοντα και η επιβράδυνση της ταχύτητας απορροής, παρέχοντας χρόνο για την απορρόφησή του νερού από το έδαφος. Το Σχήμα 4.1 απεικονίζει μία κατά ζώνες αμειψισπορά στις ΗΠΑ.

Σχήμα 4.1 Κατά ζώνες αμειψισπορά στις ΗΠΑ (πηγή: SERA-17, 1990).

Το φαινόμενο της διάβρωσης και απορροής ευνοείται ιδιαίτερα στις περιοχές του εδάφους που δεν καλύπτονται από βλάστηση και ιδίως κατά το μεσοδιάστημα μεταξύ συγκομιδής και εκ νέου σποράς, όταν το έδαφος μένει ολοκληρωτικά ακάλυπτο. Το χρονικό διάστημα αυτό πολύ συχνά αφορά ολόκληρη τη χειμερινή περίοδο όταν οι βροχοπτώσεις είναι έντονες. Λύση στο πρόβλημα δίνει η εγκατάσταση και διατήρηση βλάστησης με ταχεία ανάπτυξη κατά τις περιόδους μη γεωργικής εκμετάλλευσής του (μέτρο 15). Τα λεγόμενα

φυτά συγκράτησης ή κάλυψης του εδάφους (catch ή cover crops) περιλαμβάνουν συνήθως παραγωγικά φυτά ή αυτοφυή βλάστηση όπως τριφύλλι, ραπανάκι, κεχρί, μάραθο, λάχανο, μαρούλι και άλλα κηπευτικά, που μπορούν να μειώσουν τις απώλειες $NO3^-$ κατά τις περιόδους αυτές διότι ακινητοποιούν τις αζωτούχες ενώσεις με λήψη και αποθήκευση στους ιστούς τους. Οι διαθέσιμες ποσότητες απελευθερώνονται εκ νέου στο έδαφος μετά από άροση και καταστροφή των φυτών αυτών, τα οποία παραμένουν ως υπολείμματα καλλιέργειας στο έδαφος. Επιπλέον, η βλάστηση προστατεύει το έδαφος από διαβρωτικά φαινόμενα και ενισχύει τη δομή και συγκράτηση των εδαφικών συσσωματωμάτων με αποτέλεσμα να περιορίζεται η μεταφορά N και P με την επιφανειακή απορροή και στερεοαπορροή. Οι Cuttle et al. (2007) διαπίστωσαν μείωση στις ετήσιες απώλειες N κατά 28kg/ha και σε ποσοστό 28% για τον P, κατά τη χρονιά εγκατάστασης των φυτών σε φάρμες της Αγγλίας που δέχονταν μόνο χημικά λιπάσματα. Σε μόνιμες δενδρώδεις καλλιέργειες το μέτρο βρίσκει επίσης εφαρμογή με εγκατάσταση πυκνής φυτοκάλυψης στα μεσοδιαστήματα των δενδροστοιχιών η οποία προστατεύει το έδαφος (Σχήμα 4.2). Παρόμοια τεχνική αποτελεί η κάλυψη του εδάφους με *χλωρή λίπανση* (mulching). Πρόκειται για κάλυψη του εδάφους από νεκρά φυτικά μέρη που αποτελούν υπολείμματα καλλιεργειών, τα οποία άμεσα προστατεύουν το έδαφος από τη διάβρωση, ενώ η σταδιακή αποσύνθεσή τους εμπλουτίζει το έδαφος με οργανική ουσία (μέτρο 16).

Σχήμα 4.2 Κάλυψη γυμνών λωρίδων εδάφους με βλάστηση (πηγή: SERA-17, 1990).

Άλλα μέτρα σχετικά με τη διαχείριση καλλιέργειας είναι η *επίσπευση* (πρωΐμιση) της σποράς των χειμερινών καλλιεργειών (π.χ. σιτάρι) ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερη χρονική διάρκεια κάλυψης του εδάφους (μέτρο 17). Ιδιαίτερα σε περιοχές με έντονες βροχοπτώσεις το φθινόπωρο, η σπορά στα μέσα Οκτωβρίου αντί στα τέλη της εποχής, μπορεί να ωφελήσει σημαντικά με συγκράτηση εδαφικών υλικών και θρεπτικών στοιχείων. Τέλος, η διαφορετική απόκριση των διαφόρων καλλιεργειών στην παροχή θρεπτικών στοιχείων καθώς και η διαφορετική μορφολογία (ριζικό σύστημα, φύλλωμα και ποσοστό κάλυψης του εδάφους), αποτελούν στοιχεία που μπορούν να ληφθούν υπόψη κατά την επιλογή καλλιέργειας ώστε να είναι αυξημένη η αποδοτικότητα των λιπάνσεων και η διήθηση του νερού στο έδαφος (μέτρα 18 και 19). Ασφαλώς η επιλογή εμπεριέχει σε μεγάλο βαθμό οικονομικά κριτήρια.

Το κόστος εφαρμογής των ΔΠ της κατηγορίας αυτής θεωρείται γενικά μικρό μιας και πρόκειται για επεμβάσεις μη κατασκευαστικού χαρακτήρα. Κυρίως, θα μπορούσε να μεταφραστεί σε επιπρόσθετες δαπάνες για αγορά σπόρων, σε κόστος εργασίας για την προετοιμασία του εδάφους και τη σπορά ή τοποθέτηση των φυτών σε ειδικές διατάξεις και σε πιθανό κόστος λόγω απώλειας στη συνολική απόδοση που πάντως αναμένεται, αν υπάρχει, να είναι μικρή.

4.2.3 Διαχείριση ζωικής παραγωγής

Η κτηνοτροφία αποτελεί τον κλάδο που καλείται να υποστηρίξει τον ολοένα αυξανόμενο πληθυσμό της γης καλύπτοντας τις διατροφικές ανάγκες των ανθρώπων. Υπάρχουν περιοχές του πλανήτη που ο αριθμός των αναπαραγωγικών ζώων έχει αυξηθεί σημαντικά τις τελευταίες δεκαετίες. Πρόκειται κυρίως για βοοειδή, αιγοπρόβατα, χοίρους και πουλερικά που αποτελούν τα πλέον παραγωγικά ζώα. Η κτηνοτροφική δραστηριότητα λαμβάνει χώρα είτε σε εκτατική μορφή (ελεύθερη) είτε σε εντατική με οργανωμένες κτηνοτροφικές και πτηνοτροφικές μονάδες (Καλαϊσάκης, 1982). Το περιβάλλον δε θα μπορούσε να μείνει ανεπηρέαστο από τις συνέπειες της αυξημένης κτηνοτροφικής δραστηριότητας και δέχεται πιέσεις από τη διάθεση των αποβλήτων του ζωικού κεφαλαίου. Η ανεξέλεγκτη και πολλές φορές υπερβολική βόσκηση οδηγεί στην αποψίλωση των βοσκότοπων, καθιστά το έδαφος γυμνό για μεγάλο χρονικό διάστημα του έτους και επομένως επιρρεπές στη διάβρωση και τη μεταφορά θρεπτικών στοιχείων προς τα ποτάμια. Η παράνομη διάθεση των αποβλήτων από τις οργανωμένες μονάδες από την άλλη, χωρίς την απαραίτητη επεξεργασία, είτε με απ' ευθείας απελευθέρωση στα υδάτινα σώματα, είτε με ανεξέλεγκτη διασπορά στα εδάφη, συνεισφέρουν άμεσα ή έμμεσα με N και P, αυξάνοντας τις συγκεντρώσεις των στοιχείων στο νερό. Τα θέματα αυτά αντιμετωπίζουν οι ΔΠ που σχετίζονται με τη ζωική παραγωγή και αποτελούν την τρίτη κατηγορία ΔΠ του Πίνακα 4.1.

Ο στόχος στη διαχείριση της ζωικής παραγωγής είναι η εύρεση του βέλτιστου μεγέθους ζωικού κεφαλαίου που να καλύπτει τις ανάγκες και να μην υποβαθμίζει το περιβάλλον. Σύμφωνα με τον Isermann (2007), η Γερμανία καταναλώνει διπλάσια ποσότητα κρέατος σε ετήσια βάση από αυτή που είναι πραγματικά απαραίτητη, ενώ υπάρχει ανάγκη για μείωση περίπου 60-80% στις ποσότητες N και P που ανακυκλώνονται στο διατροφικό σύστημα της χώρας. Για την αντιμετώπιση της κατάστασης αυτής θεωρεί απαραίτητη την αναθεώρηση του αριθμού των παραγωγικών ζώων στις φάρμες της Γερμανίας που φιλοξενούν τα περισσότερα από αυτά. Η μελέτη του οδηγεί στο συμπέρασμα πως με τη μείωση του αριθμού των ζώων και τον περιορισμό της αναπαραγωγικής διαδικασίας (μέτρα 20 και 21) τα οφέλη δε θα είναι μόνο περιβαλλοντικά, αλλά και άμεσα σχετιζόμενα με τη υγεία των ανθρώπων μέσω της σωστότερης διατροφής. Το συνολικό κόστος μιας τέτοιας προσέγγισης δε μπορεί να προκύψει παρά μόνο μέσω αναλυτικής μελέτης για το πώς διαμορφώνεται το ισοζύγιο οφέλους και ζημίας από τη μείωση του αριθμού των ζώων. Σε τοπικές κοινωνίες πάντως, εικάζεται πως η ζημία από την κατά κεφαλή απώλεια ζωικού κεφαλαίου θα υπερισχύει του κόστους ανάπτυξης και συντήρησής του.

Το μέτρο 22 του Πίνακα αποτελεί μία πολύ αποδοτική τεχνική για τη μείωση κυρίως των απωλειών N από τους φυσικούς βοσκότοπους. Ο Jarvis (2000) και οι Trott et al. (2004) έχουν καταγράψει σημαντικά αποτελέσματα από την αντικατάσταση της απ' ευθείας βόσκησης σε επιφάνειες γρασιδιού και ποικιλιών τριφυλλιού με την κοπή της βλάστησης αυτής, την διάθεσή της στα ζώα και την μετέπειτα ομοιόμορφη διασπορά της κοπριάς σε ενδεδειγμένες δόσεις και χρονικές στιγμές στις αγροτικές εκτάσεις. Ταυτόχρονα, η βλάστηση των βοσκότοπων δεν εκμηδενίζεται και διατηρεί την αντιδιαβρωτική της ικανότητα. Το κόστος του μέτρου αυτού είναι προφανές ότι σχετίζεται με την κοπή και αποθήκευση της βλάστησης για παροχή στα ζώα καθώς και με την αποθήκευση και μετέπειτα διασπορά της κοπριάς από τον άνθρωπο. Παρεμφερή δράση έχει το μέτρο 23 που αναφέρεται στον περιορισμό της βόσκησης, είτε χρονικό σε καθημερινή βάση, είτε με αποφυγή για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Η τεχνική αυτή προτιμάται κατά τους υγρούς μήνες διότι ευνοεί τη διατήρηση της φυσικής βλάστησης με προφύλαξη του εδάφους απέναντι στη διάβρωση και την επιφανειακή απορροή, ενώ μειώνει κατά τους κρίσιμους αυτούς μήνες και τις διαθέσιμες ποσότητες κοπριάς στην επιφάνεια του εδάφους. Στην περίπτωση που εφαρμόζεται η περιορισμένη βόσκηση σε καθημερινή βάση, στόχος είναι η συστηματική διατήρηση της φυσικής βλάστησης, ενώ στην περίπτωση που η βόσκηση περιορίζεται κατά έναν-δύο υγρούς μήνες δίνεται έμφαση στον περιορισμό των απωλειών θρεπτικών κατά μία συγκεκριμένη κρίσιμη περίοδο. Το κόστος της πρακτικής αυτής έχει να κάνει με το επιπρόσθετο στάβλισμα των ζώων, τη συλλογή της κοπριάς που εναποτίθεται σε κλειστούς

χώρους αντί σε φυσικές εκτάσεις και ασφαλώς την εργασία για τη μετέπειτα διασπορά της στους αγρούς.

Άλλα μέτρα σχετικά με τη διαχείριση του ζωικού κεφαλαίου είναι οι πρακτικές 25 και 26 που στοχεύουν στη μείωση της μεταφερόμενης ποσότητας θρεπτικών προς τα υδάτινα σώματα. Τα μέτρα, που μεταξύ άλλων, έχουν δοκιμαστεί σε φάρμες της Αγγλίας (Cuttle et al., 2007), είναι πολύ αποδοτικά και απαιτούν χαμηλό κόστος εφαρμογής. Η εκ περιτροπής βόσκηση σε περιόδους που τα εδάφη είναι υγρά καθώς και η διασπορά της κοπριάς σε θέσεις μακριά από υδάτινα σώματα είναι αποδοτικές πρακτικές που απαιτούν όμως τη συνεργασία και συμμόρφωση του αγροτικού πληθυσμού. Τέλος, το μέτρο 24 αποβλέπει στην πλήρη αποφυγή επαφής των ζώων με το υδρογραφικό δίκτυο και για την επίτευξή της προτείνονται κατασκευαστικές λύσεις χαμηλού κόστους, όπως η κατασκευή φρακτών για τον περιορισμό της διαβίωσης των ζώων σε συγκεκριμένο χώρο, μη γειτνιάζοντα με επιφανειακούς υδάτινους αποδέκτες.

4.2.4 Διαχείριση εδαφικών πόρων

Η υπερεκμετάλλευση των εδαφικών πόρων προς όφελος της παραγωγής οδήγησε σε αυξημένα διαβρωτικά φαινόμενα με τους Stoate et al. (2001) να κάνουν λόγο για ετήσιες εδαφικές απώλειες από αγροτικά εδάφη 3,6tn/ha στο Βέλγιο και μέσες ετήσιες τιμές κοντά στους 8tn/ha στη Βόρεια Ευρώπη. Σε περιοχές της Μεσογείου παρατηρήσεις αναφέρουν σημαντικά μεγαλύτερες τιμές εδαφικών απωλειών, περίπου 30-40tn/ha, ύστερα από ένα και μοναδικό έντονο επεισόδιο βροχής (De la Rosa et al., 2000). Το φαινόμενο ευνοείται σε εδάφη με μικρή περιεκτικότητα οργανικής ουσίας που δρα συγκολλητικά στο έδαφος ενισχύοντας την ικανότητα των εδαφικών σωματιδίων να οργανώνονται σε συσσωματώματα και να κατακρατούν μεγάλα αποθέματα υγρασίας. Οι βαθιές αρόσεις στην υπερεντατική γεωργία, επιτυγχάνουν μεν την καταστροφή των ζιζανίων και την απαραίτητη αναμόχλευση του εδάφους στις αρχές φθινοπώρου και πριν τη σπορά νέας καλλιέργειας, αλλά το πέρασμα βαριών μηχανημάτων και η συμπίεση του εδάφους καταστρέφουν τη δομή του, μειώνουν τα διαθέσιμα αποθέματα οργανικής ουσίας, ελαττώνουν τη φαινόμενη πυκνότητα και δημιουργούν τσιμεντοποιημένα εδαφικά στρώματα μεγάλου βάθους και συμπυκνωμένους εδαφικούς ορίζοντες. Τα προαναφερόμενα μπορεί να παρεμποδίζουν την ανάπτυξη ριζών και την απορρόφηση νερού και θρεπτικών ουσιών. Ως αποτέλεσμα, οι βροχές που ακολουθούν δρουν διαβρωτικά και τα προϊόντα της διάβρωσης (εδαφικά τεμαχίδια) παρασύρονται ευκολότερα με τα νερά της απορροής, συμπαρασύροντας ενώσεις των θρεπτικών στοιχείων N και P.

Το φαινόμενο της διάβρωσης και στερεομεταφοράς είναι στενά συνδεδεμένο με τις απώλειες των ενώσεων των δύο θρεπτικών που ενυπάρχουν στο έδαφος σε σωματιδιακή μορφή και απορροφώνται δύσκολα από τη βλάστηση. Πρόκειται κυρίως για τις οργανικές μορφές του N και του P, που για τα ελληνικά π.χ. ποτάμια μία εκτίμηση αναφέρει ότι συνεισφέρουν στο συνολικό φορτίο σε ποσοστό 25-60% (Nikolaidis et al., 2009), αλλά και για ανόργανες μορφές του P, όπως τα $PO4^-$, που συνδέονται στενά με τη διάβρωση (Sharpley and Smith, 1990). Επιπλέον, είναι γνωστό ότι την περίοδο του φθινοπώρου που ακολουθεί τη συγκομιδή των καλοκαιρινών φυτών μεγάλης καλλιέργειας, η βαθιά άροση ευνοεί την ανοργανοποίηση της οργανικής ουσίας του εδάφους που με τη σειρά της οδηγεί στην απόπλυση μεγάλων ποσοτήτων $NO3^-$ από το έδαφος.

Για την αντιμετώπιση των φαινομένων αυτών εφαρμόζονται οι ΔΠ της τέταρτης κατηγορίας, που αναφέρονται ως πρακτικές διαχείρισης του εδάφους, είτε μεμονωμένα είτε σε συνδυασμό με τις ΔΠ της δεύτερης κατηγορίας σχετικά με τη διαχείριση καλλιέργειας. Το κοινό χαρακτηριστικό των δύο ομάδων ΔΠ είναι ότι σκοπεύουν κυρίως στην περιστολή της διάβρωσης και επομένως στον έμμεσο περιορισμό των απωλειών θρεπτικών από τα εδάφη. Κατά συνέπεια, οι ΔΠ της κατηγορίας αυτής επιδρούν και αυτές στο μηχανισμό μεταφοράς. Συχνά στις ΔΠ διαχείρισης εδάφους συγκαταλέγονται και κάποιες από την κατηγορία διαχείρισης καλλιέργειας, ο διαχωρισμός που επιλέχτηκε στον Πίνακα 4.1 όμως, δεν περιέχει επαναλήψεις.

Η *αποφυγή της άροσης* (μέτρο 29) έχει αποδειχτεί ότι προκαλεί επιθυμητά αποτελέσματα με μειώσεις εδαφικής απώλειας έως και 76% να έχουν καταγραφεί μετά από πλήρη κατάργηση των φθινοπωρινών αρόσεων στην Αγγλία (Chambers et al., 2000a) και τις ΗΠΑ (Sharpley et al., 2001). Το μέτρο θεωρητικά έχει και οικονομικά οφέλη λόγω της εξοικονόμησης εργασίας και καυσίμων, αλλά για βαθύρριζες καλλιέργειες που αφήνουν υπολείμματα μετά τη συγκομιδή, το κόστος από την αναγκαία εφαρμογή ζιζανιοκτόνων θα πρέπει να προσμετρηθεί. Άλλη πρακτική άροσης που συνηθίζεται είναι η μετάβαση σε *συντηρητική άροση* (conservation) αντί συμβατικής (conventional). Κατά την πρακτική αυτή (30) οι αρόσεις γίνονται πιο αραιά και σε μικρότερο βάθος με αποτέλεσμα τα υπολείμματα καλλιέργειας να παραμένουν στην επιφάνεια του εδάφους και να μην εισχωρούν βαθιά στο έδαφος προστατεύοντας σε σημαντικό βαθμό την επιφανειακή στρώση. Τα ευρήματα από την εφαρμογή της εν λόγω πρακτικής είναι σπουδαία όσον αφορά την μείωση απωλειών εδάφους και θρεπτικών όταν δοκιμάστηκαν σε αμειψισπορά αραβόσιτου-σόγιας (Laflen and Tabatabai, 1984), ενώ οι Hansen et al. (2000) διερεύνησαν τις συνέπειες της εφαρμογής τους παράλληλα με δύο άλλες τεχνικές άροσης και διαπίστωσαν ότι η μείωση των φορτίων που επιτυγχάνεται είναι ευεργετική σε λεκάνες απορροής όπου η ανοιξιάτικη απορροή ενισχύεται από την τήξη του χιονιού.

Πιο εξειδικευμένη τεχνική είναι η σημειακή διάτρηση του εδάφους (27) που επιτυγχάνεται με ειδικό εξοπλισμό μόνο στα σημεία τοποθέτησης των σπόρων (direct drilling). Η μέθοδος θεωρείται ενδεδειγμένη για τα βαριά εδάφη των Σκανδιναβικών χωρών (Ulen and Kalisky, 2005) και η αποφυγή άροσης του μεγαλύτερου μέρους της εδαφικής έκτασης του αγροκτήματος έχει τα θετικά αποτελέσματα που αναλύθηκαν παραπάνω. Στις ίδιες χώρες προτείνεται ακόμα η μετάθεση της άροσης την άνοιξη από τις αρχές φθινοπώρου. Η πρακτική αυτή (28) αφορά σε ελαφριά εδάφη με μεγάλη περιεκτικότητα χονδρόκοκκων σωματιδίων που σπέρνονται την άνοιξη και μετά τη φθινοπωρινή συγκομιδή μένουν ακάλυπτα. Η αποφυγή της άροσης αμέσως μετά τη συγκομιδή δεν ανακατανέμει τα εδαφικά σωματίδια και δεν ευνοεί την ανοργανοποίηση της οργανικής ουσίας, που εύκολα με έναν βαρύ χειμώνα μπορεί να οδηγήσει σε υψηλές αποπλύσεις $NO3^-$ και αυξημένη διάβρωση. Αντίθετα, η ταχεία ανάπτυξη καλλιέργειας μετά την ανοιξιάτικη άροση προστατεύει το έδαφος. Εφαρμογή του μέτρου στη νότια Νορβηγία (Lundekvam et al., 2003) προκάλεσε μείωση απωλειών P κατά 50-75%, ενώ καταγράφονται παρόμοια αποτελέσματα και στη Δανία (Kronvang et al., 2005a).

Άλλοι τρόποι άροσης που ενδείκνυνται σε επικλινή και αργιλώδη εδάφη είναι η *άροση κατά τις ισοϋψείς και εγκάρσια στις κλίσεις* του εδάφους. Η μέθοδος αποτρέπει το σχηματισμό υδατοδιαδρόμων εμποδίζοντας την επιφανειακή απορροή και κατ' επέκταση τη διάβρωση, αποτελεί δε επιμέρους τεχνική που εντάσσεται στο μέτρο 14 περί διαχείρισης καλλιέργειας που αναπτύχθηκε λεπτομερώς στη σχετική ενότητα. Ενδεικτικές αναφορές με επιτυχία της μεθόδου στο να περιορίσει αισθητά τις απώλειες ολικού P έχουν γίνει για αγροτικές εκτάσεις στην Αγγλία (Quinton et al., 2007· Cuttle et al., 2007). Ο περιορισμός της διάβρωσης γίνεται ακόμα με διαμόρφωση *αναβαθμίδων* (terraces) στο έδαφος (μέτρο 32). Πρόκειται συνήθως για τμήματα φυσικής πλαγιάς που περιλαμβάνονται μεταξύ δύο ισοϋψών. Παραδοσιακά οι αναβαθμίδες κατασκευάζονταν με υποστηρικτικά πέτρινα τοιχία, ώστε να γίνεται δυνατή η καλλιέργεια των πλαγιών σε ορεινές περιοχές χωρίς να προκαλείται υπερβολική διάβρωση του εδάφους. Η σημερινή διατήρησή τους απαιτεί εντατική εργασία και η εγκατάλειψή τους μπορεί να προκαλέσει καθιζήσεις. Οι αναβαθμίδες αποτελούν πάντως πολύ αξιόπιστο μέτρο κατά της επιφανειακής απορροής και στερεοαπορροής αφού στις οριζόντιες επιφάνειες που δημιουργούνται, τόσο τα εδαφικά σωματίδια όσο και το νερό, εμποδίζονται να διαφύγουν. Αντιπροσωπευτική περίπτωση της εν λόγω πρακτικής αποτελεί η αναβαθμίδα στο Σχήμα 4.3.

Σχήμα 4.3 Αναβαθμίδα με κάλυψη γρασιδιού και κλίση πρανών 2:1 (πηγή: SERA-17, 1990).

Άλλα μέτρα για τον περιορισμό της απόπλυσης θρεπτικών του εδάφους είναι η διατήρηση της οργανικής ουσίας του εδάφους σε επιθυμητά επίπεδα (33), η χρήση σταθεροποιητών εδάφους (34) και η εγκατάσταση λωρίδων ή ζωνών συγκράτησης ή διήθησης στα όρια των αγροκτημάτων (35). Η διατήρηση της οργανικής ουσίας γίνεται με απλούς τρόπους που έχουν ήδη περιγραφεί και περιλαμβάνουν κυρίως την εναπόθεση ζωικής κοπριάς ή και χλωρής βλάστησης και υπολειμμάτων καλλιέργειας στο έδαφος. Ωστόσο, επειδή οι πρακτικές αυτές δεν είναι πάντα εφικτές, επιλέγεται πολλές φορές η χρήση χημικών ουσιών που δρουν ως σταθεροποιητές εδάφους. Μεγάλη σημασία για την κίνηση του P στο έδαφος έχει η παρουσία ασβεστίου. Με χρήση φωσφορικών λιπασμάτων που περιέχουν ασβέστιο ή με εφαρμογή ανθρακικού ασβεστίου (CaCO3), αλλιώς με την *ασβέστωση* των εδαφών (liming), οι ενώσεις P κατακρατούνται και κατακρημνίζονται στο έδαφος χωρίς να είναι ευάλωτες στην εδαφική απώλεια. Η πρακτική αυτή αποδείχτηκε αποδοτική και μείωσε τις απώλειες διαλυτού P σε εδάφη της Φινλανδίας (Muukkonen, 2007). Η κατασκευή τέλος, των *λωρίδων διήθησης* (filter strips) ή *ζωνών συγκράτησης* (buffer zones) γίνεται με διαμόρφωση ζωνών βλάστησης, αυτοφυούς ή μη και ενδείκνυται σε επικλινή εδάφη, συνήθως σε χαμηλά σημεία στα όρια των αγροκτημάτων απ' όπου εδαφικά σωματίδια και θρεπτικά στοιχεία περνούν πριν εγκαταλείψουν την εδαφική έκταση.

Οι λωρίδες βλάστησης, που μπορεί να είναι προσωρινές ή μόνιμες και να χρειάζονται και αυτές τακτική φροντίδα, λειτουργούν ως φυσικά εμπόδια στην επιφανειακή απορροή, τη μεταφορά εδαφικών σωματιδίων και τις μη σημειακές απώλειες N και P. Η διαμόρφωσή τους

όσον αφορά το πλάτος γίνεται με βάση τις τοπικές συνθήκες (κλίμα, κλίση, έκταση αγροτεμαχίου, ποσότητα θρεπτικών που προσδοκάται να συγκρατήσουν κ.α.). Πρωταρχικό ρόλο στην αποδοτικότητα παίζει το πλάτος της λωρίδας. Εφαρμογή στον Καναδά κατέδειξε ότι η αποδοτικότητα στη συγκράτηση P λωρίδων πλάτους 2 και 15m ήταν 31 και 89% αντίστοιχα (Abu-Zreig et al., 2003). Έχει επίσης διερευνηθεί ότι πλάτος λωρίδων έως 10m επηρεάζει με ανάλογο τρόπο τη μείωση της ρύπανσης των υδάτινων σωμάτων, ενώ περαιτέρω αύξησή του έχει μικρή επιπρόσθετη συνεισφορά (Kronvang et al., 2005a). Ο καθορισμός του πλάτους των λωρίδων διήθησης καθορίζεται πάντως και από πρακτικούς λόγους στην εκάστοτε περιοχή μιας και αναπόφευκτα καταλαμβάνεται αξιοποιήσιμη αγροτική έκταση. Η πρακτική αυτή έχει ακόμα αποδειχτεί πολύ αποτελεσματική στη συγκράτηση εδαφικού υλικού και θρεπτικών από εκτάσεις που γειτνιάζουν με υδάτινο σώμα (Dillaha et al., 1989· Uusi-Kamppa et al., 2000), τυγχάνει όμως έντονης διερεύνησης αν η αποτελεσματικότητα έγκειται περισσότερο στην ικανότητα συγκράτησης ή στην απουσία εφαρμογών θρεπτικών στην περιοχή που γειτνιάζει με το υδρογραφικό δίκτυο και καταλαμβάνεται από τις λωρίδες (Rao et al., 2009). Η αποτελεσματικότητα αυτής της ΔΠ διέπεται αναμφισβήτητα από τις τοπικές συνθήκες με τη βιβλιογραφία να κάνει λόγο γα αποδόσεις στη μείωση των θρεπτικών από 19 έως και 99% (Eghball et al., 2000· Gitau et al., 2005· Schmit et al., 1999).

4.2.5 Άλλες Διαχειριστικές Πρακτικές

Οι ΔΠ που κατηγοριοποιούνται μέσω της δράσης COST 869 περιλαμβάνουν, εκτός από τις προαναφερθείσες, και άλλου τύπου πρακτικές που όμως δεν ενδιαφέρουν άμεσα την παρούσα διατριβή. Τέτοιες είναι οι πρακτικές που σχετίζονται με τη διαχείριση του νερού στη γεωργία, με την ολοκληρωτική αλλαγή στη χρήση γης και αλλαγή του τύπου φυτοκάλυψης ή ακόμα με απευθείας παρεμβάσεις στα επιφανειακά υδάτινα σώματα. Ενδεικτικά αναφέρονται κάποιες αντιπροσωπευτικές δράσεις των εν λόγω κατηγοριών ΔΠ.

Η αλλαγή της μεθόδου άρδευσης μπορεί να αποτελέσει καθοριστικό παράγοντα για τον περιορισμό των απωλειών N και P από τα εδάφη και ιδιαίτερα η κατάργηση της επιφανειακής άρδευσης και η αντικατάστασή της από μεθόδους υπό πίεση μπορεί να εξασφαλίσει μειωμένη απορροή από την επιφάνεια του αγροτικού εδάφους και άρα μειωμένη διάβρωση και στερεοαπορροή. Επιπρόσθετο μέτρο είναι η επαναχρησιμοποίηση του αρδευτικού νερού με συλλογή των απωλειών άρδευσης που περιέχουν θρεπτικά στοιχεία και με αυτόν τον τρόπο αποτροπή της κατάληξής τους στα φυσικά υδάτινα σώματα με ταυτόχρονη ωφέλιμη επαναχρησιμοποίηση των θρεπτικών από τις καλλιέργειες. Σε έντονα προβληματικές περιοχές είναι δυνατόν να προτείνονται πιο αποτελεσματικά ακόμα μέτρα όπως η αλλαγή της

χρήσης γης με μετατροπή μέρους της καλλιεργήσιμης έκτασης σε εκτεταμένο λιβαδότοπο ή η δάσωση μέρους των αγροτικών εκτάσεων. Τέτοιες μεταβολές, που στοχεύουν στη μείωση της συνολικής έκτασης που συνεισφέρει σε θρεπτικά είναι προφανές ότι εξαρτώνται έντονα από κοινωνικοοικονομικά κριτήρια. Τέλος, άμεσες δράσεις αποκατάστασης της οντότητας υδάτινων σωμάτων που έχουν εκφυλιστεί, κυρίως λιμνών, καθώς και δημιουργία μικρών λιμνών (ponds) έως 1000m^2, προτείνονται μέσω της δράσης COST 869. Μέσω της τελευταίας πρακτικής επιτυγχάνεται η κατακράτηση των θρεπτικών για σημαντικό χρονικό διάστημα έως την απελευθέρωσή τους προς τα κατάντη υδάτινα σώματα της λεκάνης απορροής και συνεπώς η εξασθένιση του φορτίου με επιμήκυνση των διαδικασιών κατακράτησης στην υγρή φάση (Kronvang et al., 1999). Περισσότερα για επιμέρους δράσεις και παραδείγματα εφαρμογής τους σε αγροτικές λεκάνες απορροής, που ανήκουν στις ομάδες ΔΠ που σύντομα αναφέρθηκαν στην ενότητα αυτή μπορούν να βρεθούν από την επίσημη ιστοσελίδα της δράσης COST 869 (COST Action 869, 2005).

4.3 Διαχειριστικές Πρακτικές στο μοντέλο SWAT

Το μοντέλο SWAT επιτυγχάνει μια πολύ λεπτομερειακή προσομοίωση ΔΠ στην αγροτική γη, μιας και οι βασικές ΔΠ όπως: σπορά, λίπανση, άροση, άρδευση, συγκομιδή, βόσκηση κ.α., ορίζονται εύκολα από το χρήστη για κάθε ΥΜ. Ειδικότερα, ο τρόπος προσομοίωσης των ΔΠ που διερευνώνται στην παρούσα διδακτορική διατριβή περιγράφεται παρακάτω.

Η αρχή και το τέλος της βλαστικής περιόδου μιας καλλιέργειας ορίζεται από το χρήστη με βάση τις ημερομηνίες σποράς (sowing) και συγκομιδής (harvest). Η απόδοση της καλλιέργειας κατά τη στιγμή της συγκομιδής καθορίζεται από τη ρουτίνα ανάπτυξης που σύντομα περιγράφηκε στην ενότητα 3.3.4. Υπάρχει η δυνατότητα να οριστεί το τέλος της βλαστικής περιόδου, ως συγκομιδή και απομάκρυνση της καλλιέργειας (harvest and kill) ή μόνο ως συγκομιδή. Στην τελευταία περίπτωση η καλλιέργεια αναπτύσσεται εκ νέου το επόμενο έτος, ενώ ο ορισμός της αποδοτικότητας συγκομιδής (harvest efficiency) καθορίζει το ποσοστό της βιομάζας που απομακρύνεται (λαμβάνεται ως απόδοση) και εκείνο που εξακολουθεί να αποτελεί τη βιομάζα της ενυπάρχουσας καλλιέργειας στο έδαφος. Στην πρώτη περίπτωση, ολόκληρη η φυτική βιομάζα τη στιγμή της συγκομιδής απομακρύνεται. Η άροση του εδάφους (tillage) ορίζεται στην κατάλληλη ημερομηνία και με τον κατάλληλο τύπο. Η βάση δεδομένων αρόσεων του SWAT περιλαμβάνει διάφορους τύπους που διαφοροποιούνται με βάση το βάθος άροσης και την αποδοτικότητα στην ανακατανομή των εδαφικών σωματιδίων, που κατά συνέπεια προκαλούν και ανακατανομή των θρεπτικών. Το μοντέλο επιτρέπει τον ορισμό νέου αριθμού καμπύλης CN, διαφορετικού από τον αρχικό, σε

κάθε ΥΜ, ως ένδειξη ότι η εφαρμογή άροσης ή η συγκομιδή έχει μεταβάλλει τις ιδιότητες του εδάφους και επομένως την ικανότητα απορροής νερού από το έδαφος.

Η λίπανση (fertilization) των καλλιεργειών ορίζεται επίσης στην κατάλληλη ημερομηνία και με τον τύπο λιπάσματος που επιθυμεί ο χρήστης. Η βάση δεδομένων λιπασμάτων του μοντέλου διαθέτει όλα σχεδόν τα γνωστά λιπάσματα του εμπορίου. Ο τύπος λιπάσματος καθορίζει ουσιαστικά την ποσότητα N και P που εισέρχεται στο έδαφος, η οποία προκύπτει ως γινόμενο της περιεκτικότητας των δύο στοιχείων στο λίπασμα και της ποσότητας λιπάσματος που ορίζει ο χρήστης. Ένας συντελεστής τέλος, σχετικά με το κλάσμα του λιπάσματος που εφαρμόζεται στην επιφάνεια του εδάφους ορίζεται επίσης από το χρήστη, ώστε να ληφθεί υπόψη η περίπτωση που υποεπιφανειακή τεχνική λίπανσης ακολουθείται. Δύο ακόμα επιλογές λίπανσης είναι η αυτόματη (auto-application) και η συνεχής (continuous). Στην πρώτη περίπτωση δίνεται η δυνατότητα στο μοντέλο να εφαρμόζει αυτόματα ποσότητα λιπάσματος στις καλλιέργειες ανάλογα με τη διαθεσιμότητα του στοιχείου στο έδαφος και τότε που η καλλιέργεια αντιμετωπίζει πρόβλημα στην ανάπτυξή της λόγω έλλειψης κάποιου στοιχείου στο έδαφος (nutrient stress). Στη δεύτερη περίπτωση ορίζεται συνεχής λίπανση σε τακτά χρονικά διαστήματα. Η πρακτική αυτή στην πράξη, μπορεί να αφορά σε εβδομαδιαία ή μηνιαία διασπορά κοπριάς ζώων στις αγροτικές εκτάσεις αφού πρώτα συλλεχθεί σε κοπροσωρούς. Ο χρήστης ορίζει τον τύπο, την ποσότητα και το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών εφαρμογών λίπανσης.

Η βόσκηση (grazing) ορίζεται με ημερομηνίες έναρξης και λήξης εντός του έτους και το μοντέλο προσομοιώνει εναπόθεση κοπριάς σε ημερήσια βάση στο βοσκότοπο, αλλά και απομάκρυνση βιομάζας ως λήψη τροφής από τα ζώα. Ο ρυθμός και η σύσταση της εναποτιθέμενης κοπριάς, αλλά και ο ρυθμός απομάκρυνσης βιομάζας από το βοσκότοπο ορίζονται από το χρήστη με βάση το είδος των ζώων. Η βάση λιπασμάτων του μοντέλου συμπεριλαμβάνει και τύπους κοπριάς που καλύπτουν όλα σχεδόν τα γνωστά παραγωγικά ζώα. Στην περίπτωση που η βιομάζα στο έδαφος έχει εξαντληθεί κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, η βόσκηση αυτομάτως σταματά μέχρι να αναπτυχθεί ξανά φυτική βλάστηση στο βοσκότοπο.

Άλλες πρακτικές, σχετικά με τη διαχείριση καλλιέργειας, προσομοιώνονται από το μοντέλο με ορισμό του παράγοντα P_{USLE} της διάβρωσης (βλ. Εξίσωση 3.9) και με μεταβολή του αριθμού καμπύλης CN για την εκάστοτε ΥΜ. Έτσι, η καλλιέργεια, π.χ. κατά τις ισοϋψείς, σε εναλλασσόμενες ζώνες καλλιεργειών ή με αναβαθμίδες, προσομοιώνεται από το μοντέλο με μείωση του αριθμού CN κατά ένα συγκεκριμένο ποσοστό και του συντελεστή P κάτω από την αρχική τιμή 1 (Arabi et al., 2008). Το μέγεθος αυτής της μείωσης εξαρτάται από την κλίση του εδάφους και συνήθως υπάρχουν πίνακες με προτεινόμενες τιμές (Neitch et al., 2005a).

Η επίδραση των λωρίδων συγκράτησης στα όρια των αγρών γίνεται από το SWAT με ενσωματωμένες εξισώσεις που υπολογίζουν το ποσοστό των φερτών υλών, του N και του P που συγκρατούνται στη λωρίδα και δεν εγκαταλείπουν την εδαφική έκταση. Οι εξισώσεις παρουσιάζονται παρακάτω και υπολογίζουν την ικανότητα συγκράτησης αποκλειστικά με βάση το πλάτος της λωρίδας, το οποίο ορίζει ο χρήστης μεταβάλλοντας την αρχική μηδενική τιμή στα αρχεία διαχείρισης ('mgt') του προγράμματος.

$$trap_{ef} = 0.367(width_{filtstrip})^{0.2967} \tag{4.1}$$

$$trap_{ef,sub} = \frac{2.1661(width_{filtstrip}) - 5.1302}{100} \tag{4.2}$$

,όπου $trap_{ef}$ και $trap_{ef,sub}$ είναι τα κλάσματα (μεταξύ 0 και 1) των μεταφερόμενων φορτίων εδαφικής απώλειας και ενώσεων του N και του P από την επιφανειακή και υποεπιφανειακή απορροή αντίστοιχα, που συγκρατούνται από τη λωρίδα πριν φτάσουν στους επιφανειακούς υδάτινους αποδέκτες και $width_{filtstrip}$ είναι το πλάτος της λωρίδας (m). Για παράδειγμα και με βάση τις εξισώσεις, λωρίδα πλάτους 5m θα προκαλέσει τη συγκράτηση φερτών και θρεπτικών κατά 59% και 6% από την επιφανειακή και υποεπιφανειακή απορροή αντίστοιχα.

4.4 Το κόστος εφαρμογής των Διαχειριστικών Πρακτικών

Οι ΔΠ αποτελούν μέσα επίτευξης των στόχων της Οδηγίας 2000/60 για υδάτινα σώματα *καλής οικολογικής κατάστασης* και ως τέτοια πρέπει να εξετάζονται όχι μόνο ως προς την αποτελεσματικότητα στην προσπάθεια επίτευξης των στόχων αυτών, αλλά και ως προς το κόστος εφαρμογής τους. Στις προηγούμενες ενότητες περιγραφής των ομάδων ΔΠ, έγινε μια ποιοτική προσέγγιση του υπολογισμού του συνολικού κόστους εφαρμογής τους με αναφορά συνήθως σε κόστος εξοπλισμού, εργασίας, σε απώλεια εισοδήματος κλπ. Ωστόσο, η επίτευξη μιας ολοκληρωμένης και αξιόπιστης κοστολόγησης των κατασκευαστικών και μη δράσεων για την περιστολή της ρύπανσης από θρεπτικά σε λεκάνη απορροής, θα πρέπει να βασιστεί σε συνεργασία με αρμόδιους επιστήμονες και αναλυτικές οικονομικές μελέτες που συνυπολογίζουν πλήθος παραγόντων. Μια τέτοια γενικευμένη προσπάθεια βρίσκεται για όλα σχεδόν τα κράτη-μέλη της ΕΕ σε αρχικό στάδιο και εμπεριέχει μεγάλη δυσκολία λόγω των έντονων ιδιαιτεροτήτων που υφίστανται σε τοπικό επίπεδο. Η εφαρμογή των ΔΠ άλλωστε, εμπεριέχει εκτός από το κόστος εφαρμογής και ένα παραγόμενο όφελος για τον εκάστοτε

τοπικό πληθυσμό, επιμερισμένο σε οικονομικό, περιβαλλοντικό, κοινωνικό, που επίσης κοστολογείται με βάση σύγχρονες μεθοδολογίες των οικονομικών επιστημών (Leo De Nocker et al., 2007).

Βασικός παράγοντας διαμόρφωσης της σχέσης *κόστους - οφέλους* (cost-benefit) που προκύπτει από την εφαρμογή ΔΠ είναι η *απόκλιση* (gap) της υφιστάμενης κατάστασης των υδάτων και της επιθυμητής καλής ποιότητας, όπως αυτή ορίζεται από την Περιβαλλοντική Νομοθεσία, και επιτυγχάνεται μέσω εφαρμογής ΔΠ. Η απόκλιση εξαρτάται έντονα από το βαθμό στον οποίο τα υδάτινα σώματα είναι υποβαθμισμένα στην υφιστάμενη κατάσταση και από τη φιλοδοξία και αυστηρότητα των στόχων που θέτει η Νομοθεσία. Ο λόγος ΚΑ των διαφόρων ΔΠ αποτελεί επίσης πολύ σημαντικό παράγοντα διαμόρφωσης του τελικού κόστους εφαρμογής τους και άρα της σχέσης κόστους-οφέλους. Ο τύπος και η χρησιμότητα του υδάτινου σώματος (π.χ. πόσιμο νερό, αναψυχή), καθώς και ο αριθμός των χρηστών και τα επίπεδα κέρδους τους από τις δράσεις, αποτελούν επίσης καθοριστικούς παράγοντες διαμόρφωσης του οφέλους. Παράγοντες τοπικού χαρακτήρα όπως ο χρονικός ορίζοντας εφαρμογής και τα επιτόκια διαμορφώνουν με τη σειρά τους τον τελικό λόγο κόστους-οφέλους (Leo De Nocker et al., 2007).

Σε αντίθεση με το κόστος που εκτιμάται σήμερα με κάποιο βαθμό αξιοπιστίας, πολύ λίγη πληροφορία υπάρχει για τα οφέλη και τον υπολογισμό τους, όπως προκύπτουν μετά από την εφαρμογή ΔΠ. Αυτό συμβαίνει διότι τα οφέλη δεν αποτελούν άμεσα μετρήσιμα μεγέθη και έτσι, η μόνη αξιόλογη προσπάθεια να εντοπιστούν και να ποσοτικοποιηθούν είναι μέσω της αξιολόγησης του επιπέδου ευτροφισμού στο οποίο βρίσκεται ένα υδάτινο σώμα μετά από εφαρμογή συγκεκριμένων ΔΠ. Ως πηγάζον οικονομικό όφελος από την εφαρμογή μίας αγροτικής ΔΠ μπορεί να θεωρηθεί η αποφυγή μιας δαπανηρής διαδικασίας π.χ. της επεξεργασίας του νερού πριν τη χρησιμοποίησή του ή η βελτίωση της ανθρώπινης υγείας και ποιότητας ζωής με αύξηση π.χ. του τουρισμού σε μία περιοχή, αποτελέσματα που μέσω της επιστήμης των οικονομικών είναι δυνατόν να κοστολογούνται. Το κόστος εφαρμογής ΔΠ από την άλλη έχει τύχει πολύ πιο επιτυχημένης και ρεαλιστικής ποσοτικοποίησης, αν και συνήθως αυτό αφορά μόνο στα κόστη αρχικού κεφαλαίου, λειτουργίας και συντήρησης κατά την εφαρμογή ΔΠ σε αγροτικές εκτάσεις. Το συνολικό κόστος εφαρμογής μιας ΔΠ επιμερίζεται ως εξής (Leo De Nocker et al., 2007):

- *Κόστος κεφαλαίου (επένδυσης)*

Το κόστος επένδυσης (*capital - investment cost)* αφορά σε απαιτούμενες υποδομές, εργασία και έξοδα κατά την έναρξη εφαρμογής μιας ΔΠ. Η αγορά π.χ. ειδικών δεξαμενών για την αποθήκευση της κοπριάς προτού γίνει η διασπορά της στις αγροτικές εκτάσεις ή η δημιουργία μικρών λιμνών εντός της λεκάνης απορροής για τη συγκράτηση των θρεπτικών

αποτελούν υψηλά επενδυτικά κόστη των σχετικών ΔΠ. Η εγκατάσταση λωρίδων συγκράτησης στα όρια των αγροκτημάτων απαιτεί επίσης επενδυτικό κόστος για αγορά σπόρων και εργασία για την εγκατάστασή τους σε ειδική διάταξη στα εδαφικά όρια των αγρών.

- *Κόστος συντήρησης και λειτουργίας*

Το κόστος συντήρησης και λειτουργίας (*operational and maintenance cost*) περιλαμβάνει πολλές φορές το μεγαλύτερο ποσοστό του συνολικού κόστους στα μη κατασκευαστικά μέτρα και αφορά κυρίως στο κόστος ανθρώπινης εργασίας για τη διατήρηση του μέσου εφαρμογής της εκάστοτε ΔΠ σε καλή κατάσταση, αλλά και στο κόστος συντήρησης των υποδομών όταν η ΔΠ έχει κατασκευαστικό χαρακτήρα. Π.χ. η ανάγκη μείωσης του ρυθμού εφαρμογής ζωικής κοπριάς ανά μονάδα έκτασης απαιτεί εφαρμογή σε μεγαλύτερη έκταση με μεγαλύτερο κόστος μεταφοράς (καύσιμα) και εργασίας, ενώ η καλλιέργεια κατά ζώνες απαιτεί επιπλέον χρόνο για την κατάλληλη διάταξη των καλλιεργειών με επιπρόσθετη απαιτούμενη εργασία σε συστηματική ετήσια βάση.

- *Διοικητικό κόστος*

Το διοικητικό ή διαχειριστικό κόστος (*administrative cost*) πηγάζει από θέσπιση κανόνων και προγραμμάτων παρακολούθησης των υδάτων, από επιβολή μέτρων σχετικά με τη μη-συμμόρφωση του αγροτικού πληθυσμού, από επιβολή φόρων (π.χ. στα λιπάσματα) που δρουν αποτρεπτικά μιας ακολουθούμενης πρακτικής και ακόμα, από δαπάνες πιστοποίησης των γεωργικών και κτηνοτροφικών προϊόντων (π.χ. βιολογικά).

- *Περιβαλλοντικό κόστος*

Το περιβαλλοντικό κόστος (*environmental cost*) περιλαμβάνει το κόστος από επιπρόσθετα μέτρα με αντίστροφα αποτελέσματα για το περιβάλλον, που λαμβάνουν οι γεωργοί παράλληλα με την εφαρμογή μιας ΔΠ και απορρέουν αναπόφευκτα από αυτή. Η μειωμένη άροση π.χ. απαιτεί συνήθως αυξημένη χρήση ζιζανιοκτόνων για την καταπολέμηση των ριζών που δεν καταστράφηκαν κατά την άροση και εκφύονται δρώντας παρασιτικά για την καλλιέργεια.

- *Κόστος ευκαιρίας*

Κόστος ευκαιρίας (*opportunity cost*) ή εναλλακτικό κόστος ονομάζεται γενικά το κόστος που προκύπτει απ' τη θυσία ενός αγαθού, για την παραγωγή ή κατανάλωση κάποιου άλλου. Στην περίπτωση των ΔΠ εκφράζει ουσιαστικά το οικονομικό όφελος που θα υπήρχε αν δεν εφαρμοζόταν μια συγκεκριμένη ΔΠ, αλλά η συμβατική πρακτική. Περιλαμβάνει δηλαδή τις

οικονομικές επιπτώσεις που αφορούν σε απώλεια εισοδήματος λόγω μείωσης της παραγωγής. Παραδείγματα του εν λόγω κόστους είναι η απώλεια εσόδων από μείωση της παραγωγής μετά από μειωμένη λίπανση ή η απώλεια αξιοποιήσιμης γεωργικής έκτασης λόγω εγκατάστασης λωρίδων βλάστησης για τη συγκράτηση των θρεπτικών στοιχείων.

Υπάρχουν πλέον Ευρωπαϊκές χώρες στις οποίες έχει ξεκινήσει μια ολοκληρωμένη προσπάθεια αξιολόγησης των διαφόρων ΔΠ ως προς το κόστος εφαρμογής τους. Το υπουργείο Περιβάλλοντος και Αγροτικής Ανάπτυξης της Αγγλίας (DEFRA - Department for Environment, Food and Rural Affairs), στα πλαίσια του προγράμματος 'Κόστος-Αποτελεσματικότητα Ολοκληρωμένων Μέτρων Κατευνασμού της Μη-Σημειακής Ρύπανσης', (Cost-Effectiveness of Integrated Diffuse Pollution Mitigation Measures), έχει σήμερα εκπονήσει την πιο ολοκληρωμένη εργασία κοστολόγησης ΔΠ στην Ευρώπη. Ο παραχθείς οδηγός (Cuttle et al., 2007) περιλαμβάνει τον υπολογισμό του κόστους 44 ΔΠ, σχετικών με τη διαχείριση των εδαφικών πόρων, του ζωικού κεφαλαίου, τη διαχείριση θρεπτικών μέσω ανόργανης και οργανικής λίπανσης και των αγροτικών υποδομών, σε ομοιογενείς εκτάσεις έντονης αγροτικής δραστηριότητας με ταυτόχρονη αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας στη μείωση των απωλειών $NO3^-$ και P. Η τελευταία υπολογίστηκε για κάθε ΔΠ με επί τόπου παρατήρηση ή με χρήση ρυθμισμένων (βαθμονομημένων) μοντέλων και άλλων μεθοδολογιών και εκφράστηκε ως διαφορά απωλειών σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση σε kgN-NO3/ha/έτος και kgP/ha/έτος. Τα γεωργικά αγροκτήματα (arable farms) είχαν μέση έκταση 300ha, τα κτηνοτροφικά (livestock farms) 75-100ha, ενώ όλα χωρίζονταν σε επιμέρους ομοιογενείς εκτάσεις ή πεδία (fields) έκτασης 8ha. Το κόστος υπολογίστηκε σε λίρες Αγγλίας ανά μονάδα έκτασης γης (£/ha), ως άθροισμα του κόστους επένδυσης, συντήρησης και ευκαιρίας, όπου αυτό ήταν εφικτό, εκφράζοντας το επιπρόσθετο κόστος παραγωγής που προέκυπτε λόγω εφαρμογής της εκάστοτε ΔΠ. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι τα συνολικά κόστη που προέκυψαν από 20% μείωση εφαρμογής αζωτούχων και φωσφορικών λιπασμάτων υπολογίστηκαν ίσα με 5,3 και 2,3£/ha αντίστοιχα, ενώ η εγκατάσταση λωρίδων συγκράτησης στις γεωργικές και κτηνοτροφικές φάρμες κόστισε 31,9£/ha. Η εκπόνηση του εν λόγω προγράμματος βασίστηκε σε πραγματικά στοιχεία σχετικά, μεταξύ άλλων, με τον αριθμό των ζώων ανά φάρμα, τη σύσταση και ποσότητα της κοπριάς ανά παραγωγικό ζώο, τις ετήσιες ποσότητες χημικής λίπανσης των καλλιεργειών και τις τιμές των λιπασμάτων, πράγμα που προσδίδει έντονα τοπική ισχύ στον οδηγό που παρήχθη για εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τα ακριβή κόστη εφαρμογής των διαφόρων ΔΠ. Ωστόσο, ο οδηγός αυτός είναι πολύτιμος για συγκριτική αξιολόγηση κόστους και αποτελεσματικότητας διαφόρων πρακτικών, μιας και όλες εξετάστηκαν κάτω από κοινές περιβαλλοντικές και οικονομικές συνθήκες.

Μία ανάλογη οργανωμένη προσπάθεια έχει γίνει από το Εθνικό Ινστιτούτο Περιβαλλοντικής Έρευνας της Δανίας (National Environmental Research Institute – NERI). Σκοπός της εργασίας ήταν να εξεταστούν ορισμένες ΔΠ ως προς το κόστος εφαρμογής και την αποτελεσματικότητά τους στη μείωση των φορτίων θρεπτικών που καταλήγουν στη Βαλτική θάλασσα από τις γειτνιάζουσες λεκάνες απορροής (Schou et al., 2006). Το τελικό αποτέλεσμα ήταν η δημιουργία ενός φιλικού συστήματος λήψης αποφάσεων για χρήση από τους φορείς προστασίας της Βαλτικής θάλασσας ενάντια σε φαινόμενα ευτροφισμού. Στην εργασία αυτή που έλαβε χώρα στα πλαίσια του προγράμματος MARE (MArine Research of Eutrophication), χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τον FAO, τη Eurostat καθώς και εθνικά δεδομένα από τις χώρες των οποίων οι λεκάνες απορροής εκβάλλουν στη Βαλτική. Για την εκτίμηση του κόστους και της αποτελεσματικότητας, αναπτύχθηκαν για κάθε ΔΠ συναρτησιακά μοντέλα υπολογισμού κόστους και μείωσης φορτίου από εφαρμογή ΔΠ. Ανάμεσα στις 6 ΔΠ που μελετήθηκαν ήταν η ποσοστιαία (25%) μείωση της ποσότητας λίπανσης των καλλιεργειών, η μείωση του αριθμού των παραγωγικών ζώων (χοίροι και βοοειδή) κατά 80% και η εγκατάσταση φυτών συγκράτησης στις ακαλλιέργητες επιφάνειες εδάφους. Το κόστος υπολογίστηκε και σε αυτήν την περίπτωση ως άθροισμα επενδυτικού και κόστους λειτουργίας και συντήρησης των ΔΠ, ενώ η ενσωμάτωση οφέλους ως δευτερεύουσα επίπτωση στο συνολικό κόστος δεν κατέστη τελικά δυνατή λόγω των μεγάλων διαφοροποιήσεων ανάμεσα στις διάφορες χώρες. Αυτό θα αφορούσε π.χ. στο δευτερεύον όφελος από τη μείωση του αριθμού των παραγωγικών ζώων που πηγάζει από τη μείωση της εκπεμπόμενης ποσότητας αμμωνίας με μετέπειτα ευεργετικές επιδράσεις στον περιορισμό του ευτροφισμού των λιμνών λόγω μείωσης της ατμοσφαιρικής εναπόθεσης N. Για τη Δανία το όφελος αυτό είχε κοστολογηθεί ίσο με 1€/kgN, αλλά έλειπαν ανάλογες εκτιμήσεις για τα υπόλοιπα 8 κράτη. Ο στόχος της εργασίας αυτής ήταν ουσιαστικά να βρεθεί ο συνδυασμός μέτρων στο γεωγραφικό χώρο που ελαχιστοποιεί το κόστος εφαρμογής τους για την επίτευξη συγκεκριμένου περιβαλλοντικού στόχου που εκφραζόταν ως συγκεκριμένη μείωση φορτίου θρεπτικών στοιχείων που καταλήγουν στη Βαλτική θάλασσα. Τελικά, το σενάριο που προέβλεπε συνολική μείωση N κατά 320000tn αποδείχτηκε, με βάση τα αποτελέσματα της εργασίας, ότι μπορεί να επιτευχθεί με μέσο κόστος 2,4€/kgN, ενώ έχει μεγάλη σημασία ο επιμερισμός αυτού του κόστους ανάμεσα στα ενδιαφερόμενα κράτη που κατέδειξε τη Φινλανδία και την Πολωνία ως τις χώρες με την μεγαλύτερη οικονομική επιβάρυνση. Η εργασία των Schou et al. (2006) αποτελεί σε κάθε περίπτωση μία προσέγγιση της σχέσης ΚΑ των ΔΠ με τοπική επίσης ισχύ στα κράτη που περιβάλλουν τη Βαλτική θάλασσα μιας και τα πρωτογενή στοιχεία που αντλήθηκαν και οι υποθέσεις που έγιναν για την κατασκευή των συναρτήσεων αφορούν τα κράτη αυτά. Η εν λόγω προσέγγιση είναι πολύ απλούστερη από

εκείνη των Cuttle et al. (2007) για το Ηνωμένο Βασίλειο αφού εξετάζονται μόνο 6 ΔΠ, αλλά αφορά πολλά κράτη και η χωρική κλίμακα μελέτης είναι μεγαλύτερη.

Οι Fröschl et al. (2008) έκαναν ανάλογη προσπάθεια υπολογισμού της σχέσης ΚΑ διαφόρων ΔΠ σε λεκάνες απορροής από τέσσερις χώρες του Δούναβη, με σκοπό τη μείωση του συνολικού φορτίου που καταλήγει στη Μαύρη Θάλασσα. Ο υπολογισμός του κόστους των ΔΠ έγινε με εμπειρικό τρόπο και η σχέση ΚΑ των ΔΠ υπολογίστηκε ως το συνολικό κόστος που προκύπτει για τους αγρότες προς τη διαφορά στο ολικό ισοζύγιο Ν στο έδαφος ή στα φορτία που καταλήγουν στα νερά του ποταμού και εν συνεχεία στη Μαύρη Θάλασσα. Το κόστος στην ανάλυση αυτή υπολογίστηκε ως σύνολο δαπανών και κερδών για τους αγρότες από τις ΔΠ, ενώ τα αποτελέσματα κατέδειξαν τη Ρουμανία ως τη χώρα που τα σενάρια ευνοούν περισσότερο την περιστολή των απωλειών Ν και παρουσιάζουν τη μικρότερη τιμή ΚΑ. Η εργασία ανέδειξε τέλος, την εφαρμογή συγκεκριμένων ΔΠ που μπορούν να βελτιώσουν τόσο την ποιότητα των υδάτων, όσο και το εισόδημα των αγροτών σε κάθε μία από τις τέσσερις χώρες.

Υπάρχουν ακόμα μεμονωμένες εργασίες που προσεγγίζουν σε τοπικό επίπεδο τη σχέση ΚΑ των ΔΠ. Οι Lacroix et al. (2005) διερεύνησαν τα αποτελέσματα της εφαρμογής 6 ΔΠ σχετικών με μείωση χημικών λιπάνσεων και χρόνου εγκατάστασης φυτών συγκράτησης σε μία μικρή αγροτική έκταση (145ha) της Γαλλίας, στο Υδατικό Διαμέρισμα που ανήκει το Παρίσι. Για τον υπολογισμό του κόστους στηρίχτηκαν σε τοπικά στοιχεία (με αναφορά στο έτος 1997) σχετικά με το κόστος εργασίας και απόκτησης σπόρων για τα φυτά συγκράτησης, ενώ οι αποδόσεις των καλλιεργειών μετά από εφαρμογή των ΔΠ και οι απώλειες $NO3^-$ προέκυψαν με χρήση μοντέλου. Με βάση την κοστολόγηση των διαφόρων συνδυασμών ΔΠ το ετήσιο κόστος βρέθηκε να κυμαίνεται σε ένα μεγάλο εύρος μεταξύ 6 και 150€/ha, ενώ η εγκατάσταση φυτών συγκράτησης και ιδιαίτερα ο χρόνος που αυτό πραγματοποιείται οδήγησαν σε μειώσεις συγκεντρώσεων $NO3^-$ 15-25mg/l τη στιγμή που η κατά 20% μείωση των λιπάνσεων κατόρθωσε να ελαττώσει τη συγκέντρωση μόνο κατά 4mg/l. Η εργασία διερεύνησε την αποτελεσματικότητα των ΔΠ κάτω από διαφορετικές κλιματικές συνθήκες και κατέληξε στο ότι υπάρχει έντονη αβεβαιότητα ως προς την εξαγωγή απόλυτων συμπερασμάτων για αυτή λόγω της στοχαστικότητας των μετεωρολογικών φαινομένων. Συγκεκριμένα, οι ίδιες ΔΠ δεν κατόρθωσαν να επιτύχουν το ίδιο αποτέλεσμα σε όλα τα έτη της προσομοίωσης. Ωστόσο, οι Lacroix et al. (2005) προτείνουν ανεπιφύλακτα ότι στη συγκεκριμένη και σε κάθε άλλη γειτνιάζουσα περιοχή είναι προτιμητέα η εγκατάσταση φυτών συγκράτησης νωρίς, στο τέλος του καλοκαιριού, παρά η μείωση των λιπάνσεων που οδηγεί σε αισθητή μείωση παραγωγής.

Οι Hutchins et al. (2009) εφάρμοσαν 5 εναλλακτικά σενάρια αγροτικών δραστηριοτήτων στη λεκάνη Yorkshire Derwent του Ηνωμένου Βασιλείου. Τα δύο πρώτα

αφορούσαν σε μείωση 20% των χημικών λιπάνσεων στις καλλιέργειες και ίδια μείωση στον αριθμό των παραγωγικών ζώων και τα υπόλοιπα σε μετατροπή του 20% της γεωργικής γης σε λιβάδια με εγκατάλειψη της γεωργικής δραστηριότητας σε διαφορετικές υπολεκάνες. Για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας, όσον αφορά τη μείωση στις συγκεντρώσεις $NO3^-$ στο ποτάμι, η κάθε πρακτική διερευνήθηκε με χρήση μοντέλου, ενώ το κόστος υπολογίστηκε με βάση το συνολικό εισόδημα και τις συνολικές δαπάνες που προκύπτουν κάθε φορά. Στον οικονομικό υπολογισμό δεν συμπεριελήφθησαν πιθανά οφέλη από την εφαρμογή των ΔΠ. Με βάση τα αποτελέσματα της εργασίας τους αποδείχθηκε ότι τα τρία τελευταία μέτρα ήταν πολύ πιο αποτελεσματικά στη μείωση των συγκεντρώσεων κάτι που αναμενόταν λόγω της έντονης δραστικότητάς τους. Όταν όμως οι 5 ΔΠ συγκρίθηκαν με βάση το λόγο ΚΑ, διαπιστώθηκε ότι η κατάταξη εξαρτιόταν έντονα, όχι μόνο από το κόστος εφαρμογής της κάθε ΔΠ, αλλά και από το ποιο κριτήριο είχε επιλεχθεί για την αξιολόγηση του περιβαλλοντικού αποτελέσματος μεταξύ της συγκέντρωσης $NO3^-$ στην έξοδο της λεκάνης και σε περισσότερα σημεία του υδρογραφικού δικτύου.

Οι Turpin et al. (2005) στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού προγράμματος AgriBMPWater διερεύνησαν τη σχέση ΚΑ πολλών ΔΠ με χρήση διαφόρων υδρολογικών και οικονομικών μοντέλων σε 8 Ευρωπαϊκές λεκάνες απορροής. Καινοτομία στην όλη διαδικασία ήταν η κοινωνική διάσταση την οποία πρόσθεσαν αφού την αρχική διερεύνηση διαδέχτηκε η επαφή με τον γεωργικό πληθυσμό και η εκτίμηση του βαθμού αποδοχής κάθε ΔΠ. Τα ευρήματα της εργασίας που περιελάμβανε ΔΠ πολλών κατηγοριών ήταν ότι ΔΠ με χαμηλό κόστος και μεγάλη αποτελεσματικότητα (μείωση συγκεντρώσεων $NO3^-$ στο ποτάμι) δεν τις καθιστούσε αυτονόητα ως τις πιο αποδεκτές από τους χρήστες, ενώ η χρήση πολλών διαφορετικών εργαλείων μπόρεσε, έστω και σε αρχικό στάδιο, να αναδείξει διάφορες πτυχές της σχέσης ΚΑ και της αβεβαιότητας στις εκτιμήσεις της.

Άλλες εργασίες καινοτομούν στο ότι κατορθώνουν να κοστολογήσουν το περιβαλλοντικό όφελος που προκύπτει από εφαρμογή ΔΠ και το ενσωματώνουν στη συνολική αξιολόγηση της ΔΠ. Για παράδειγμα, οι Arabi et al. (2006a) υπολόγισαν το όφελος που προκύπτει εντός και εκτός της περιοχής που υφίσταται την εφαρμογή ΔΠ. Το μεν εντός της λεκάνης όφελος το υπολόγισαν με εμπειρικό τρόπο σύμφωνα με την απόλυτη μείωση στο φορτίο φερτών υλών και θρεπτικών που προκύπτει από κάθε ΔΠ, το δε εκτός λεκάνης όφελος το ποσοτικοποίησαν με βάση την κοστολόγηση των καταστροφικών συνεπειών που θα προκαλούσε η μη εφαρμογή της κάθε πρακτικής. Στην ίδια εργασία οι συγγραφείς θεώρησαν το κόστος λειτουργίας και συντήρησης της κάθε ΔΠ ως σταθερό ποσοστό (10%) του κόστους αρχικού κεφαλαίου. Οι Cools et al. (2010) χρησιμοποίησαν ένα εργαλείο, που χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη των ΔΣ στο Βέλγιο, που συνδυάζει το υδρολογικό μοντέλο μη-σημειακών απωλειών θρεπτικών SWAT με το οικονομικό μοντέλο ECM (Environmental

Costing Modeling), με σκοπό να εκτιμήσουν τη σχέση ΚΑ στη λεκάνη Grote Nete του Βελγίου (400 km^2). Οι ΔΠ που διερευνήθηκαν ήταν δράσεις σχετικές με τον περιορισμό διάχυτων και σημειακών αστικών απωλειών Ν. Από την ανάλυση με τα δύο μοντέλα προέκυψε ότι την πιο ικανοποιητική σχέση ΚΑ δίνει συνδυασμός μέτρων που επιδρούν σε όλες τις πηγές θρεπτικών στη λεκάνη, ενώ όταν ο στόχος είναι η μείωση των $NO3^-$ ο αγροτικός τομέας έχει τη μεγαλύτερη επίδραση και οι αγροτικές ΔΠ δίνουν την πιο ικανοποιητική σχέση ΚΑ.

4.5 Συμπεράσματα για την εξαγωγή της σχέσης κόστους-αποτελεσματικότητας των Διαχειριστικών Πρακτικών

Συνοπτικά και δεδομένου ότι η παρούσα διδακτορική διατριβή επιχειρεί στη συνέχεια την κοστολόγηση και την εξαγωγή σχέσεων ΚΑ διαφόρων ΔΠ, υποστηρίζεται ότι υπάρχουν κάποια βασικά στοιχεία που διέπουν την επιτυχία μιας τέτοιας προσέγγισης. Όπως προκύπτει από τη βιβλιογραφία, οι υπολογισμοί του συνολικού κόστους εφαρμογής και της αποδοτικότητας των ΔΠ εξαρτώνται από την οικονομική προσέγγιση και τον εκτιμητή απωλειών θρεπτικών που επιλέγει ο εκάστοτε ερευνητής. Έτσι, μία αξιόπιστη διερεύνηση της σχέσης ΚΑ των ΔΠ βασίζεται αφενός στη διαθεσιμότητα οικονομικών στοιχείων της περιοχής μελέτης, ώστε ο μελετητής-υδρολόγος να μπορεί να τα αξιοποιήσει άμεσα βασιζόμενος σε απλές γνώσεις και υποθέσεις οικονομικής φύσης, και αφετέρου στη χρήση ενός αξιόπιστου εργαλείου ποσοτικοποίησης των απωλειών θρεπτικών σε κλίμακα λεκάνης απορροής. Σε μία οικονομική ανάλυση εφαρμογής ΔΠ ο συνδυασμός των ανωτέρω πρέπει να αποδεικνύεται ικανός να εκτιμά τη διαφοροποίηση της σχέσης ΚΑ ενός ικανού αριθμού εναλλακτικών μέτρων ανάμεσα σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές εφαρμογής τους, ώστε να μπορεί να υποδείξει την πιο κατάλληλη πρακτική σε κάθε περιοχή ανάλογα με τις τοπικές ιδιαιτερότητες.

Ως προς την αποτελεσματικότητα, και όπως ήδη αναφέρθηκε στο τέλος του προηγούμενου κεφαλαίου, θεωρείται ότι το μοντέλο SWAT αποτελεί έναν ικανοποιητικό εκτιμητή της μείωσης της ρύπανσης των υδάτων λόγω εφαρμογής εναλλακτικής διαχείρισης. Για την κοστολόγηση των ΔΠ τα πράγματα είναι πιο σύνθετα και συνήθως δεν υπάρχει κάποια έτοιμη διαθέσιμη μεθοδολογία ή οικονομικό μοντέλο προς χρήση στην εκάστοτε περιοχή μελέτης. Ωστόσο, θεωρείται εφικτός ο συνυπολογισμός του κόστους κεφαλαίου, λειτουργίας και συντήρησης, καθώς και της πιθανά προκύπτουσας απώλειας εισοδήματος με βάση τοπικά οικονομικά στοιχεία του αγροτικού τομέα. Δυστυχώς, η κοστολόγηση του οφέλους μετά την εφαρμογή μιας ΔΠ βρίσκεται σε αρχικά στάδια διερεύνησης σε όλα τα

κράτη-μέλη της ΕΕ, εμπεριέχει μεγάλη δυσκολία ποσοτικοποίησης και απαιτεί πολύ πιο εξειδικευμένες γνώσεις.

Σημαντικός παράγοντας διαμόρφωσης του συνολικού κόστους των ΔΠ είναι ακόμα ο χρονικός ορίζοντας εφαρμογής τους. Οι οικονομικές μεταβολές από έτος σε έτος και η διαφορετική χρονική στιγμή στην οποία αναφέρονται από τη φύση τους τα επιμέρους κόστη (π.χ. κεφαλαίου, συντήρησης) απαιτούν αρχικά την αναγωγή τους στο ίδιο χρονικό σημείο πριν την αξιολόγηση της σχέσης ΚΑ των ΔΠ, ιδιαίτερα όταν ο χρονικός ορίζοντας εφαρμογής είναι μεγάλος (π.χ. 30-40 έτη). Αντίθετα, όταν ο χρονικός ορίζοντας μελέτης είναι μικρός, π.χ. 3-5 έτη, τότε η αναγωγή αυτή μπορεί και να αμεληθεί (Leo De Nocker et al., 2007).

Σε κάθε περίπτωση και με βάση τις δυσκολίες που συναντώνται στην ακριβή κοστολόγηση διαφόρων ΔΠ, το ζητούμενο είναι περισσότερο η ύπαρξη αξιοπιστίας στη συγκριτική αξιολόγηση του διαμορφωθέντος κόστους και του λόγου ΚΑ μεταξύ διαφόρων τύπων ΔΠ και θέσεων εφαρμογής τους εντός της λεκάνης απορροής, παρά η εξαγωγή απόλυτα αποδεκτών τιμών για κάθε ΔΠ και θέση. Τέλος, η κοινωνική αποδοχή, που ελάχιστα έχει ληφθεί έως σήμερα υπόψη στις σχετικές εργασίες, δεν πρέπει να θεωρείται δεδομένη ακόμα και αν η επιστημονική ανάλυση έχει αποδείξει ότι μια ΔΠ είναι ταυτόχρονα περιβαλλοντικά αποδοτική και οικονομικά επωφελής.

5 Εργαλεία και Μεθοδολογίες Υποστήριξης Αποφάσεων για τη Διαχείριση Λεκάνης Απορροής

5.1 Γενικά

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναλύθηκαν διεξοδικά πολλά είδη ΔΠ για εφαρμογή στην αγροτική γη με σκοπό τη μείωση των απωλειών θρεπτικών στοιχείων προς τα επιφανειακά νερά. Είναι προφανές ότι πολλές πρακτικές μπορεί κάθε φορά να είναι εφικτές σε κάθε γεωγραφική περιοχή, ανάλογα βέβαια και με τους περιορισμούς που επιβάλλουν τα τοπικά γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, αλλά και η κοινωνική διάσταση του προβλήματος. Αν υποτεθεί ωστόσο ότι η τελευταία δεν αποτελεί περιοριστικό παράγοντα, τότε ο ερευνητής έχει συνήθως να επιλέξει μεταξύ πολλών εναλλακτικών πρακτικών για εφαρμογή σε κάθε υποπεριοχή (έστω ΥΜ) της αγροτικής γης. Η τελική απόφαση λαμβάνεται θεωρητικά από ένα σύνολο, πεπερασμένου μεν, αλλά πολύ μεγάλου αριθμού δυνατών συνδυασμών ΔΠ στο χώρο. Έτσι, αν για παράδειγμα οι διαθέσιμες προς εφαρμογή ΔΠ είναι 2 και οι διαφορετικές περιοχές προς εφαρμογή αυτών των ΔΠ είναι 30, τότε έχουμε ένα μέγιστο σύνολο 2^{30} = $1{,}07\times10^{9}$ διαφορετικών συνδυασμών επιλογής και τοποθέτησης ΔΠ εντός της λεκάνης απορροής. Αν δε, οι δύο αυτές ΔΠ μπορούν να συνδυαστούν μεταξύ τους και να εφαρμοστούν ταυτόχρονα, τότε αυτομάτως δημιουργείται και μία τρίτη διαθέσιμη εναλλακτική ΔΠ και το σύνολο των δυνατών συνδυασμών κατανομής τους στη λεκάνη γίνεται 3^{30} = $2{,}06\times10^{14}$. Επιπρόσθετα, αν η διατήρηση των συμβατικών πρακτικών σε μία χωρική μονάδα είναι και αυτή ένα πιθανό σενάριο, τότε το σύνολο εφικτών συνδυασμών (λύσεων) φτάνει σε 4^{30} = $1{,}15\times10^{18}$. Όσο αυξάνεται λοιπόν ο αριθμός των δυνατών ΔΠ και ο αριθμός των ομοιογενών χωρικών μονάδων, τόσο περισσότερο σύνθετο και δισεπίλυτο είναι το πρόβλημα. Ιδιαίτερα σε μία λεκάνη μέσου μεγέθους (<1000km^2), η οποία στις υδρολογικές εφαρμογές συνήθως περιγράφεται χωρικά από εκατοντάδες ομοιογενείς χωρικές μονάδες (ΥΜ), και δεδομένου ότι τουλάχιστον 4-5 ΔΠ διαφορετικής φύσης διερευνώνται κάθε φορά, προκύπτει ένας τεράστιος αριθμός δυνατών συνδυασμών επιλογής ΔΠ και τοποθέτησής τους στο χώρο ίσος π.χ. με 5^{100} ή ~10^{70}, που ορίζει το χώρο αναζήτησης. Η διερεύνηση των δυνατών αυτών λύσεων δεν είναι προφανώς εφικτό να γίνει με προσεγγίσεις τύπου δοκιμής-πλάνης από τον μελετητή.

Η εφαρμογή τέτοιων ολοκληρωμένων διαχειριστικών λύσεων απαιτεί και την αξιολόγηση ενός μέτρου επίδοσής τους, δηλαδή της αξιολόγησης του περιβαλλοντικού αποτελέσματος που επιφέρουν ως προς τη συγκέντρωση ή το φορτίο ενός ρύπου στο υδάτινο σώμα. Ο περιβαλλοντικός στόχος μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες της

εκάστοτε περιοχής και για την περίπτωση της παρούσης διατριβής, είτε να είναι η μείωση του φορτίου N-NO3, είτε του P, είτε ακόμα των φερτών υλών που είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με τις απώλειες θρεπτικών. Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι διάφορες ΔΠ με βάση το φυσικό τους μηχανισμό, επιδρούν σε διαφορετικό βαθμό στη μείωση των φορτίων του κάθε ρύπου, γίνεται φανερό ότι η τελική λήψη απόφασης για ένα διαχειριστικό σχήμα εξαρτάται από τον περιβαλλοντικό στόχο που τίθεται (ρύπος και επιθυμητός βαθμός μείωσης απωλειών του από το έδαφος στα νερά). Ακόμα όμως και αν όλα τα ανωτέρω καθοριστούν, υπάρχει ο περιοριστικός παράγοντας του κόστους εφαρμογής ενός συνόλου ΔΠ σε λεκάνη απορροής. Έτσι, ο τελικός συνδυασμός λύσεων (επιλογής και τοποθέτησης ΔΠ στο χώρο) προϋποθέτει και ένα αποδεκτό, συνήθως αρκετά χαμηλό κόστος που καθιστά ένα τέτοιο πρόβλημα ακόμα πιο σύνθετο.

Η *λήψη αποφάσεων* (decision making) για εφαρμογή ΔΠ σε λεκάνη απορροής είναι επομένως ένα πρόβλημα *πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης* (multi-criteria optimization) με ανταγωνιστικά κριτήρια που δεν αποτιμώνται σε κοινή μονάδα μέτρησης. Η απάντηση του προβλήματος αυτού δίνεται από μία προσέγγιση που συνεπάγεται την ύπαρξη πολλαπλών βέλτιστων λύσεων που αποτυπώνονται στο πεδίο αποτίμησης με το λεγόμενο *μέτωπο Pareto*, όπου η μετακίνηση από ένα σημείο του μετώπου σε άλλο προκαλεί την αναπόφευκτη μείωση της επίδοσης ενός κριτηρίου όταν ένα άλλο βελτιώνεται. Το κεφάλαιο αυτό κάνει μία ανασκόπηση των βασικότερων χαρακτηριστικών της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης και των *αλγόριθμων* (algorithms) με τους οποίους αυτή πραγματοποιείται, στο βαθμό που αυτό είναι απαραίτητο για την ικανοποίηση του στόχου της διατριβής.

Αναφέρεται τέλος, ότι η συνήθης και παραδοσιακή τεχνική είναι η εμπειρική εφαρμογή ΔΠ στο χώρο λεκάνης απορροής, η λεγόμενη *στοχευμένη στρατηγική* (targeting strategy), σύμφωνα με την οποία ο ερευνητής εφαρμόζει ΔΠ στην αγροτική έκταση κατά το δοκούν, βασιζόμενος στη γενική εμπειρία και τη γνώση του για την αποτελεσματικότητά τους (Veith et al., 2004). Με την στρατηγική αυτή μία ΔΠ συνήθως εφαρμόζεται ολοκληρωτικά σε όλες τις αγροτικές περιοχές της λεκάνης απορροής που χαρακτηρίζονται από κοινό τύπο χρήσης γης. Η εν λόγω στρατηγική όμως δεν εγγυάται σε καμία περίπτωση την εύρεση του πιο οικονομικού και περιβαλλοντικά αποτελεσματικού διαχειριστικού σχήματος, καθότι αδυνατεί να διερευνήσει έναν πολύ μεγάλο αριθμό πιθανών συνδυασμών λύσεων και έτσι να εξερευνήσει ολοκληρωτικά το χώρο αναζήτησης. Ωστόσο, προσφέρει τη δυνατότητα παρατήρησης της διαφοροποίησης στην αποδοτικότητα της εκάστοτε ΔΠ στο χώρο και την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων για τους λόγους που ένα μέτρο, ενώ είναι πολύ αποτελεσματικό σε κάποιες περιοχές, δεν ενδείκνυται σε άλλες. Αντίθετα, η βελτιστοποίηση δεν προσφέρει άμεσα αυτή τη δυνατότητα, καθότι, η βέλτιστη ή βέλτιστες λύσεις αναζητούνται με μία διαδικασία, που ορίστηκε μεν από τον ερευνητή, αλλά που δεν μπορεί

να ελεγχθεί σε κάθε στάδιο ώστε να ερμηνεύονται συστηματικά τα ενδιάμεσα αποτελέσματά της. Η βελτιστοποίηση όμως είναι η μόνη που εγγυάται την εύρεση των βέλτιστων συνδυασμών ΔΠ στο χώρο λεκάνης απορροής μέσω της αξιολόγησης ενός πολύ μεγάλου αριθμού λύσεων και αντιπροσωπευτικής έτσι εξερεύνησης του χώρου αναζήτησης. Η στοχευμένη στρατηγική εφαρμόζεται στην παρούσα εργασία στο 8° Κεφάλαιο με έναν μικρό αριθμό ΔΠ για την αγροτική γη της λεκάνης του Αράχθου, πριν τη βελτιστοποίηση που περιγράφεται στο επόμενο και που περιλαμβάνει το μεγαλύτερο όγκο αποτελεσμάτων της διατριβής. Οι δύο μέθοδοι επιτρέπουν μία ενδιαφέρουσα σύγκριση.

5.2 Βελτιστοποίηση

5.2.1 Γενικά

Αναζητώντας τη βέλτιστη λύση ενός προβλήματος δηλαδή την ελαχιστοποίηση ή τη μεγιστοποίηση μιας συνάρτησης, αξιολογούνται μια σειρά από αποφάσεις για τις τιμές των μεταβλητών ελέγχου ή απόφασης (x_1, x_2, ..., x_n), με ένα *μέτρο επίδοσης* (performance measure), $P = f((x_1, x_2, ..., x_n)$, που είναι συνήθως η τιμή της συνάρτησης για τις τιμές που έλαβαν οι μεταβλητές του διανύσματος $x = [x_1, x_2, ..., x_n]$. Το μέτρο f καλείται *αντικειμενική συνάρτηση* (objective function) και είναι βαθμωτό μέγεθος, ενώ οι μεταβλητές απόφασης μπορεί να υπόκεινται σε περιορισμούς με συχνά εμφανιζόμενους για παράδειγμα αυτούς της απλής μορφής:

$$lb_i \leq x_i \leq ub_i \tag{5.1}$$

,όπου lb_i, το κατώτερο όριο τιμών (lower bound) που μπορεί να λάβει η μεταβλητή x_i και ub_i, το ανώτερο (upper bound). Το πεδίο ορισμού της συνάρτησης καλείται *χώρος αναζήτησης* (search space), ενώ το πεδίο τιμών καλείται *χώρος αποτίμησης* (evaluation space). Από μαθηματική σκοπιά, *βελτιστοποίηση* (optimization) ονομάζεται η διαδικασία εντοπισμού των ακροτάτων μιας συνάρτησης. Ειδικότερα, η διαδικασία εντοπισμού του ολικού ακροτάτου (μεγίστου ή ελαχίστου) της συνάρτησης στο πεδίο ορισμού είναι γνωστή ως *ολική βελτιστοποίηση* (global optimization), ενώ η διαδικασία εντοπισμού ενός τοπικού ακροτάτου σε μια περιοχή του πεδίου καλείται *τοπική βελτιστοποίηση* (local optimization).

Είναι φανερό ότι η εύρεση του βέλτιστου απαιτεί μεγάλο πλήθος δοκιμών (trial and error) με τιμές για τις μεταβλητές απόφασης, κάτι που είναι ανθρωπίνως δυνατό μόνο για μικρό αριθμό μεταβλητών, που λαμβάνουν διακριτές τιμές και σε στενά όρια. Το πρόβλημα στην αντίθετη και φυσικά ρεαλιστική περίπτωση λύνεται από κάποιον αλγόριθμο

βελτιστοποίησης που αναζητεί τη βέλτιστη λύση πιο 'έξυπνα' και πιο γρήγορα εντός του χώρου αναζήτησης. Η αποτελεσματικότητα των αλγόριθμων έγκειται στο ότι ψάχνουν τη βέλτιστη λύση με έναν συστηματικό τρόπο ακολουθώντας κάποιους κανόνες μετάβασης από ένα σημείο του χώρου αναζήτησης σε άλλο, χωρίς φυσικά να είναι απαραίτητο να ψάξουν ολόκληρο αυτόν το χώρο. Εξαιτίας του τελευταίου, οι διάφοροι αλγόριθμοι δεν εντοπίζουν πάντα το πραγματικά βέλτιστο σημείο, αλλά το προσεγγίζουν. Ο τρόπος δε με τον οποίο γίνεται η αναζήτηση διαφέρει ανάμεσα στους διάφορους αλγόριθμους ή μεθοδολογίες βελτιστοποίησης. Για παράδειγμα, οι *Γενετικοί Αλγόριθμοι* (ΓΑ), (Genetic Algorithms), που θα αναφερθούν εκτενέστερα στη συνέχεια, διαθέτουν έναν τρόπο αναζήτησης βασισμένο στην επιστήμη της Γενετικής μιμούμενοι τη διαδικασία αναπαραγωγής των κυττάρων του ανθρώπινου οργανισμού, ενώ η αποδοτικότητα επίσης διαφέρει ανάμεσά τους λόγω διαφοροποιήσεων στη δομή τους. Η χρήση ενός ΓΑ δεν εγγυάται την εύρεση του ολικά βέλτιστου, αλλά έχει την έννοια της προσέγγισης μιας ικανοποιητικής λύσης που προσεγγίζει την ολικά βέλτιστη σε εύλογο χρονικό διάστημα. Το τελευταίο είναι απόρροια του εκάστοτε προβλήματος, αλλά και της ικανότητας του αλγόριθμου στην ταχύτητα προσέγγισης καλύτερων λύσεων (Goldberg, 1989).

Στην περίπτωση που οι τιμές των μεταβλητών απόφασης λαμβάνουν τις ακέραιες τιμές μεταξύ ενός κατώτατου (lb) και ενός ανώτατου ορίου (ub), τότε το πεδίο τιμών των μεταβλητών είναι μη συνεχές, αλλά διακριτό (discrete) και εκφράζει ένα υπερ-ορθογώνιο στον n-διάστατο χώρο. Εξ ορισμού κάθε υπερ-ορθογώνιο πεδίο αναζήτησης είναι και κυρτό δηλαδή η γέννηση σημείων εντός του χώρου αναζήτησης εγγυάται την παραγωγή εφικτών λύσεων. Στην παρούσα διατριβή το πρόβλημα που θα αναπτυχθεί συγκεντρώνει αυτά τα χαρακτηριστικά και δε θα μας απασχολήσουν ζητήματα μη εφικτότητας λύσεων τα οποία θα έπρεπε να εκφραστούν με μία συνάρτηση ποινής. Τέλος, η επιφάνεια απόκρισης της συνάρτησης χαρακτηρίζεται επίσης από κυρτότητα ή μη. Στο πλείστο των περιπτώσεων η επιφάνεια απόκρισης είναι μη κυρτή που σημαίνει ότι δεν υπάρχει μόνο ένα ακρότατο (ολικό), αλλά μια πολύπλοκη γεωμετρία που περιλαμβάνει περισσότερα από ένα ακρότατα (ολικό και τοπικά) καθιστώντας τη συνάρτηση πολυσχηματική (multimodal).

Μπορεί στο σημείο αυτό να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης της επιλογής και τοποθέτησης ΔΠ στο χώρο λεκάνης απορροής είναι ένα τυπικό πρόβλημα μη γραμμικής βελτιστοποίησης με μεταβλητές απόφασης τις διαφορετικές ΥΜ που τίθενται υπό διαχείριση και τιμές των μεταβλητών αυτών τις διακριτές και ακέραιες εκφράσεις των ΔΠ. Προφανώς, επειδή υφίστανται περιορισμοί στις ΔΠ που εφαρμόζονται σε κάθε ΥΜ λόγω της χρήσης γης, οι μεταβλητές απόφασης (ΥΜ) παίρνουν τιμές που περιορίζονται από μια σχέση της μορφής 5.1. Η διάσταση του χώρου αναζήτησης καθορίζεται από τον αριθμό των ΥΜ, ενώ η αντικειμενική συνάρτηση είναι το βαθμωτό

μέγεθος που αποτιμά τη συγκέντρωση ή το φορτίο του ρύπου σε κάποια θέση του υδρογραφικού δικτύου. Το ολικά βέλτιστο σημείο του χώρου αναζήτησης είναι ο συνδυασμός ΔΠ στο χώρο που ελαχιστοποιεί τη συγκέντρωση ή το φορτίο στη θέση αυτή (μέτρο επίδοσης). Η έξοδος της λεκάνης απορροής αποτελεί τη συνήθη θέση υπολογισμού του μέτρου επίδοσης σε τέτοια προβλήματα. Σε αυτήν την περίπτωση το μέτρο επίδοσης αποτελεί ουσιαστικά το άθροισμα ή μία ικανοποιητική προσέγγιση του αθροίσματος επιμέρους μέτρων επίδοσης, που είναι τα φορτία του ρύπου που εγκαταλείπουν κάθε ΥΜ. Η ενσωμάτωση των επιμέρους αυτών φορτίων στο ολικό μέτρο επίδοσης είναι απόλυτα ορθή και θεμιτή διότι τα κριτήρια:

- είναι *μη αντικρουόμενα* (non-conflicting) δηλαδή η ελαχιστοποίηση των φορτίων που εγκαταλείπουν τις εκτάσεις οδηγεί και σε ελαχιστοποίηση του συνολικού φορτίου στην έξοδο και
- είναι *σύμμετρα* (commensurable) δηλαδή αποτιμώνται στην ίδια μονάδα μέτρησης (π.χ. kg)

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης γίνεται πιο σύνθετο όταν η αξιολόγηση πρέπει να γίνει ως προς τουλάχιστον άλλο ένα κριτήριο και μάλιστα διαφορετικής φύσης π.χ. το κόστος της εφαρμογής. Στην περίπτωση αυτή, που τα δύο μέτρα επίδοσης είναι αντικρουόμενα και μη σύμμετρα, είτε ενσωματώνονται σε μία μοναδική έκφραση μετά από αδιαστατοποίηση, είτε ακολουθείται η μεθοδολογία της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης. Οι προσεγγίσεις αυτές αναλύονται στην επόμενη ενότητα.

5.2.2 Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση

Η ένταξη δύο ή περισσότερων κριτηρίων σε μία κοινή καθολική αριθμητική έκφραση αποτίμησης μπορεί να γίνει υποκειμενικά με απόδοση βαρών στα επιμέρους μέτρα επίδοσης μετατρέποντας έμμεσα το πρόβλημα σε μονοκριτηριακό. Στην περίπτωση αυτή καθίσταται υποχρεωτική η επανάληψη της υπολογιστικής διαδικασίας πολλές φορές, ώσπου να εντοπιστεί ικανοποιητικός αριθμός λύσεων που είναι αντιπροσωπευτικές ενός συνόλου από βέλτιστες, με διαφορετικές τιμές για τα βάρη (w_i) των κριτηρίων (f_i), συνδυασμοί που μπορεί να οδηγήσουν σε πολύ διαφορετικά αποτελέσματα του συνολικού μέτρου επίδοσης f. Η παρακάτω σχέση περιγράφει ένα τέτοιο πρόβλημα με τις μεταβλητές να έχουν ήδη οριστεί.

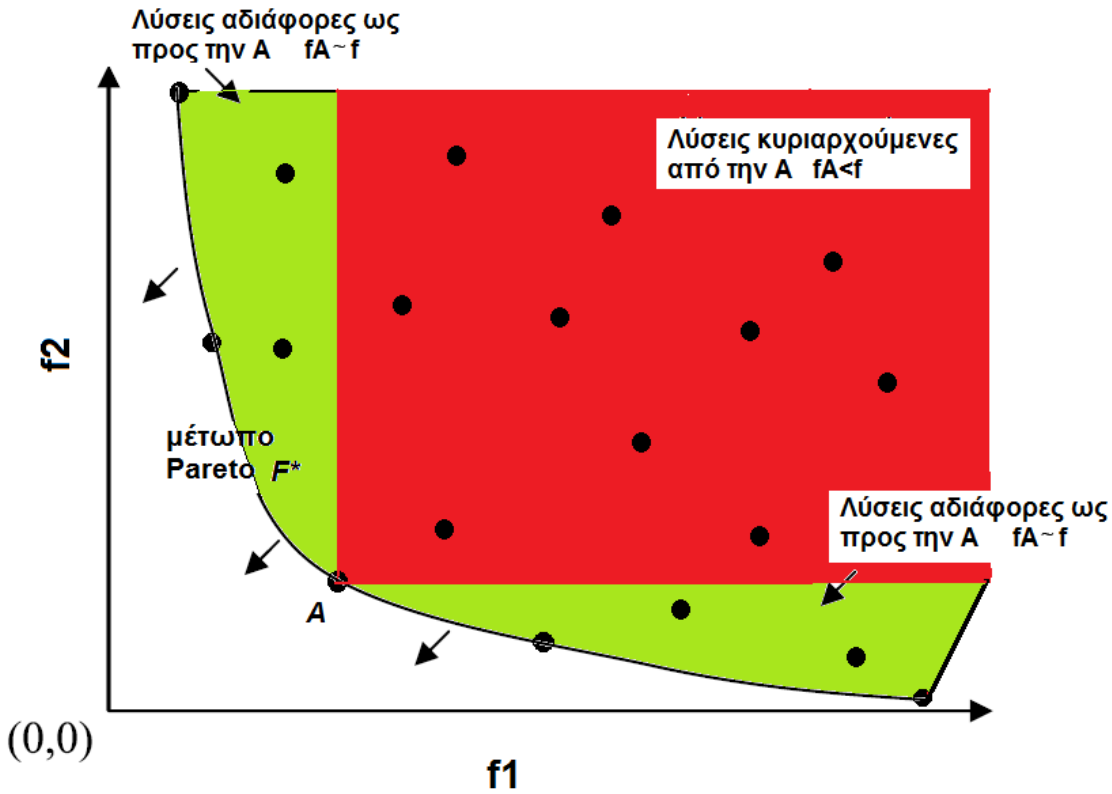
$$f = w_1 f_1 + w_2 f_2 + \ldots + w_n f_n \text{ με } \sum_{i=1}^{n} w_i = 1 \tag{5.2}$$

Η μέθοδος αυτή, αν και απλή, δίνει ένα μονοσήμαντο αποτέλεσμα και αδυνατεί πολλές φορές να εντοπίσει κάποιες πιθανές λύσεις, δημιουργώντας έντονα μη ομαλές επιφάνειες απόκρισης εξαιτίας της ενσωμάτωσης κριτηρίων διαφορετικής κλίμακας σε μια ενιαία αριθμητική έκφραση. Όταν λοιπόν πρόκειται για μη σύμμετρα κριτήρια το συνολικό μέτρο επίδοσης δεν έχει φυσικό νόημα και αυτό προϋποθέτει την εκ των προτέρων διαδικασία της *κανονικοποίησης* (standardization) των επιμέρους μέτρων επίδοσης (Makropoulos et al., 2007). Η διαδικασία αυτή μπορεί για παράδειγμα να πραγματοποιηθεί με διαίρεση των επιμέρους μέτρων με το εκ των προτέρων γνωστό ελάχιστο μέτρο επίδοσης κάθε κριτηρίου ώστε τα επιμέρους μέτρα επίδοσης f_i της Εξίσωσης 5.2 να εκφράζουν όλα μία απόλυτη σύγκλιση με τη βέλτιστη τιμή τους (μονάδα). Ακόμα και έτσι όμως, εμπεριέχεται έντονη υποκειμενικότητα ως προς την έκφραση των μέτρων επίδοσης των κριτηρίων.

Σε κάθε περίπτωση, σε αυτή τη μορφή βελτιστοποίησης οι εναλλακτικές λύσεις αξιολογούνται μόνο ως προς τη συνάθροιση αυτών μέσω της ολικής αντικειμενικής συνάρτησης. Αυτό οδηγεί πάντα στην απώλεια σημαντικής πληροφορίας στην αξιολόγηση των διαφόρων πτυχών του προβλήματος, με αδυναμία π.χ. να εντοπιστεί το μέγεθος της υποβάθμισης ενός κριτηρίου όταν κάποιο άλλο βελτιώνεται (αντικρουόμενα), που πιθανά να οδηγούσε σε διαφορετική πορεία αναζήτησης και αποδοχής των παραγόμενων λύσεων. Τα ανωτέρω ζητήματα οδήγησαν τις τελευταίες δεκαετίες σε αντιμετώπιση τέτοιων προβλημάτων μέσω πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, δηλαδή με ταυτόχρονη αναζήτηση πολλών ισοδύναμων βέλτιστων λύσεων, όπως θα παρουσιαστεί στη συνέχεια. Λόγω των αδυναμιών μιας προσέγγισης μετατροπής του πολυκριτηριακού προβλήματος σε μονοκριτηριακό, θεωρείται ότι η αντιμετώπιση με βάση την Εξίσωση 5.2 μπορεί να εφαρμοστεί μόνο βοηθητικά, και περισσότερο για σύγκριση με την παροχή υποστήριξης για τη λήψη απόφασης που έχει πραγματοποιηθεί εκ των προτέρων με βάση την πολυκριτηριακή ανάλυση. Από μόνη της η εν λόγω προσέγγιση δε θα μπορούσε παρά να δώσει μία αυθαίρετη και εκ των προτέρων καθορισμένη συμβιβαστική λύση που θεωρείται η καλύτερη, χωρίς επαρκή πληροφορία για τον ανταγωνισμό των κριτηρίων, παρά μόνο μετά από το επίπονο στάδιο των πολυάριθμων δοκιμών με εναλλακτικές τιμές για τα επιμέρους βάρη.

Αν υποθέσουμε ότι το πρόβλημα που μελετάμε αξιολογείται ως προς δύο αντικρουόμενα κριτήρια (π.χ. φορτίο ρύπου σε κάποια θέση ποταμού και κόστος εφαρμογής ΔΠ στην ανάντη λεκάνη), τότε οι εφικτές λύσεις μπορούν να παρασταθούν ως σημεία σε διάγραμμα δύο αξόνων, με κάθε ένα να αποτελεί μία λύση που διαμορφώνει με συγκεκριμένο

τρόπο τα δύο μέτρα επίδοσης των κριτηρίων. Στο Σχήμα 5.1 τα τελευταία απεικονίζονται στους άξονες x και y ως οι συναρτήσεις f_1 και f_2. Στην πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση υπεισέρχεται η έννοια της κυριαρχίας μεταξύ των διαφόρων εφικτών λύσεων που αναλύεται με βάση το σχήμα αυτό.



Σχήμα 5.1 Απεικόνιση των σχέσεων κυριαρχίας και του μετώπου Pareto σε ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης δύο κριτηρίων (ελάχιστη τιμή 0 για τα δύο κριτήρια).

Υποθέτοντας ότι η επιθυμητή πορεία της βελτιστοποίησης είναι η εύρεση λύσεων κοντά στην αρχή των αξόνων δηλαδή ότι τα μέτρα επίδοσης πρέπει να ελαττώνονται ταυτόχρονα και έχοντας ως βάση μία υποθετική λύση A (Σχήμα 5.1), το πρόβλημα της βελτιστοποίησης περιγράφεται με βάση τις υποπεριοχές του σχήματος ως εξής:

Η υποπεριοχή πάνω δεξιά από το σημείο A (κόκκινη τετραγωνισμένη περιοχή), περιλαμβάνει επιλογές που κυριαρχούνται από την επιλογή αναφοράς (λύση A) δηλαδή παρουσιάζουν χειρότερα (μεγαλύτερα) μέτρα επίδοσης για τα δύο κριτήρια από την λύση A (f_A<f). Επιπλέον, οι πράσινες περιοχές πάνω αριστερά και κάτω δεξιά από το σημείο A περιλαμβάνουν επιλογές που χαρακτηρίζονται αδιάφορες ως προς την αντίστοιχη επιλογή αναφοράς καθότι οι λύσεις αυτές είναι μεν καλύτερες από την A για ένα κριτήριο, αλλά χειρότερες ως προς το άλλο (f_A~ f). Με τη βοήθεια του Σχήματος 5.1 ορίζεται και μία ακόμα σχέση κυριαρχίας, του A, ως προς μία λύση που πιθανά να βρίσκεται πάνω στις γραμμές του

κόκκινου τετραγώνου που τέμνονται με το Α. Σε αυτήν την περίπτωση η εκάστοτε λύση είναι χειρότερη από την Α για το ένα μόνο κριτήριο και ίση ως προς το άλλο και τότε λέγεται ότι η λύση Α κυριαρχεί ασθενώς ως προς τη λύση αυτή.

Η έννοια της κυριαρχίας επιτρέπει τον χαρακτηρισμό ορισμένων λύσεων ως βέλτιστων, σύμφωνα με τους ακόλουθους ορισμούς:

«Ένα εφικτό σημείο $\mathbf{x}^*$ *στο χώρο αναζήτησης είναι βέλτιστο εφόσον δεν υπάρχει κανένα άλλο εφικτό σημείο* $\mathbf{x}$*, τέτοιο ώστε* $\mathbf{f}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{f}(\mathbf{x}^*)$*, δηλαδή δεν υπάρχει εφικτό σημείο που κυριαρχεί επ' αυτού»* (πηγή: Ευστρατιάδης, 2008: 55) ή

«Το σημείο x είναι βέλτιστο εφόσον δεν υπάρχει εφικτό σημείο x το οποίο να μπορεί να βελτιώσει το ένα κριτήριο f1, χωρίς ταυτόχρονα να χειροτερέψει το άλλο κριτήριο f2»* (πηγή: Ευστρατιάδης, 2008: 55).

Με βάση το Σχήμα 5.1 ο ορισμός αυτός αληθεύει για όλα τα σημεία που ενώνονται με τη μαύρη γραμμή. Πρόκειται δηλαδή για σημεία, που ως προς το Α, παρουσιάζουν καλύτερη επίδοση για ένα κριτήριο και χειρότερη για ένα άλλο (αδιάφορα ως προς το Α), αλλά δεν ανήκουν στις περιοχές αδιάφορων λύσεων καθότι κάτω από αυτά δεν υπάρχουν άλλα σημεία με ικανοποιητικότερη επίδοση, που να δίνουν δηλαδή μέτρα επίδοσης μικρότερα για τις δύο συναρτήσεις (κριτήρια) σε σχέση με το Α (f_A>f). Το σύνολο των εν λόγω σημείων ονομάζεται σύνολο *μη κυριαρχούμενων* (non-dominated) ή *μη κατώτερων* (non-inferior) σημείων, και είναι γνωστό ως σύνολο *Pareto* βέλτιστων σημείων (Pareto set) αποτελώντας προφανώς ένα υποσύνολο του πεδίου ορισμού της δικριτηριακής συνάρτησης. Τα σημεία του συνόλου Pareto είναι αδιάφορα μεταξύ τους, ενώ κάθε ένα από αυτά είτε κυριαρχεί, είτε είναι αδιάφορο ως προς κάθε άλλο σημείο του εφικτού χώρου αναζήτησης. Στο πρόβλημα δύο κριτηρίων (m = 2) του Σχήματος 5.1, ως μέτωπο Pareto καλείται η καμπύλη που ενώνει το σύνολο των Pareto λύσεων και είναι γνωστή ως *καμπύλη αντιστάθμισης* (tradeoff curve), αποτελώντας το κάτω όριο του πεδίου ορισμού (Zitzler and Thiele, 1999). Στην περίπτωση που το πρόβλημα περιλαμβάνει περισσότερα των δύο κριτηρίων, το μέτωπο απεικονίζεται ως μια υπερεπιφάνεια διάστασης $m - 1$.

Στην πολυκριτηριακή λοιπόν βελτιστοποίηση σκοπός είναι ο εντοπισμός ενός αντιπροσωπευτικού αριθμού μη κατώτερων λύσεων με βάση τις οποίες είναι δυνατή μια προσεγγιστική χάραξη του μετώπου Pareto και ειδικότερα στην περίπτωση ελαχιστοποίησης στην οποία αναφερόμαστε, το μέτωπο αυτό είναι επιθυμητό να βρίσκεται όσο το δυνατόν εγγύτερα στην αρχή των αξόνων, να προσεγγίζει δηλαδή το *ολικό μέτωπο Pareto* που περιλαμβάνει το σύνολο των μη κυριαρχούμενων λύσεων του πεδίου τιμών. Όπως θα

αναλυθεί περισσότερο παρακάτω για να επιτευχθεί η προσέγγιση του ολικού μετώπου Pareto θα πρέπει ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης να έχει τέτοια χαρακτηριστικά και να του δίνεται ο απαραίτητος χρόνος ώστε να μην αφήνει ανεξερεύνητες περιοχές του χώρου αναζήτησης και συνεπώς να μην εγκλωβίζεται σε τοπικά μέτωπα Pareto που ορίζονται σε αντιστοιχία με τα τοπικά ακρότατα των μονοκριτηριακών προβλημάτων.

Η λήψη απόφασης σε ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα έγκειται σε μεγάλο βαθμό στην κρίση του ερευνητή και είναι υποκειμενική. Σε αντίθεση με την εκ των προτέρων απόδοση βαρών στα κριτήρια ώστε τελικά από το σύνολο των ισοδύναμων λύσεων Pareto να προκύπτει η μία και μοναδική βέλτιστη, η επιλογή της καλύτερα συμβιβαστικής λύσης προτιμάται (ιδιαίτερα στην παρούσα διατριβή) να γίνεται μετά την αναζήτηση, με επιλογή από το σύνολο των μη κυριαρχούμενων λύσεων. Μεγάλη σημασία για την ορθότητα κάθε λήψης απόφασης έχει βέβαια ο σωστός καθορισμός του μετώπου που καθορίζεται από τη γεωμετρία του. Η τελευταία είναι άγνωστη στα περισσότερα προβλήματα, κατά συνέπεια η χάραξή του γίνεται πάντα κατά προσέγγιση, εντοπίζοντας όσο το δυνατόν πιο πολλές μη κατώτερες λύσεις.

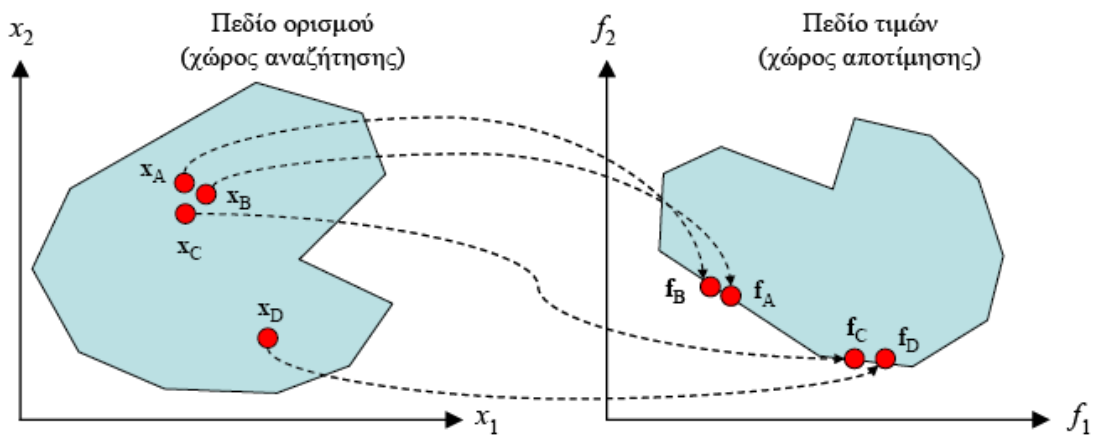
5.2.3 Επιθυμητή πορεία αναζήτησης αλγόριθμων βελτιστοποίησης

Η αναζήτηση του ολικού ακρότατου ή του ολικού μετώπου Pareto υλοποιείται μέσω μιας διαδικασίας που ακολουθεί ένας αλγόριθμος και η επιτυχία της εξαρτάται έντονα από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας απόκρισης, το πλήθος των μεταβλητών απόφασης, από το διατιθέμενο χρόνο για την πραγματοποίηση δοκιμών, αλλά σε μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά (δυνατότητες) του ίδιου του αλγόριθμου. Οι μέθοδοι ολικής βελτιστοποίησης που διατίθενται σήμερα ομαδοποιούνται σε κατηγορίες, ακολουθώντας την ιστορική τους εξέλιξη και έχουν ενδελεχώς αναλυθεί στη βιβλιογραφία. Είναι επομένως εκτός του σκοπού της παρούσης διατριβής να τις αναλύσει διεξοδικά και θα δοθεί έμφαση μόνο στην κατηγορία των Εξελικτικών και ΓΑ με την οποία άλλωστε γίνεται η επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης σε αυτή τη διατριβή.

Τα δύο βασικά χαρακτηριστικά των μεθόδων ή αλγοριθμικών σχημάτων είναι η αποτελεσματικότητα (effectiveness) και η αποδοτικότητα (efficiency). Τα χαρακτηριστικά αυτά εκφράζουν την ικανότητα του αλγόριθμου να προσεγγίζει τη βέλτιστη ή το σύνολο των βέλτιστων λύσεων με επιτυχία και σε εύλογο χρονικό διάστημα. Η αποτελεσματικότητα μεταφράζεται ως η ικανότητα του αλγόριθμου να μην εγκλωβίζεται σε τοπικά ακρότατα με ενσωμάτωση ποικιλίας στρατηγικών μετάβασης από σημείο σε σημείο του χώρου αναζήτησης, ώστε να είναι ικανός να εντοπίζει ή να προσεγγίζει το ολικό βέλτιστο. Η αποδοτικότητα σχετίζεται με την εξοικονόμηση υπολογιστικού φόρτου και μεταφράζεται ως

η ικανότητα του αλγόριθμου να ανακαλύπτει σύντομα την επιθυμητή πορεία αναζήτησης. Είναι προφανές ότι η αποτελεσματικότητα και η αποδοτικότητα είναι αντικρουόμενες, δηλαδή όσο πιο καλά προσεγγίζει ένας αλγόριθμος το βέλτιστο μέτωπο Pareto, τόσο περισσότερο υπολογιστικό χρόνο χρειάζεται. Θα λέγαμε ότι η ταυτόχρονη μεγιστοποίηση των δύο αυτών χαρακτηριστικών αποτελεί και το μεγάλο στόχο στην ανάπτυξη αλγοριθμικών σχημάτων. Ένα επίσης σημαντικό χαρακτηριστικό των αλγόριθμων είναι η τυχαιότητα κατά την διάρκεια της αναζήτησης δηλαδή η αποδοχή ακόμα και μη επιθυμητής πορείας κάποιες φορές ή αλλιώς αποδοχή λύσεων που είναι χειρότερες από τις υφιστάμενες, ώστε να δίνεται η δυνατότητα να αναζητούνται λύσεις σε διαφορετικές περιοχές του χώρου αναζήτησης. Το γεγονός αυτό δεν υπονοεί μια ανεξέλεγκτη πορεία, αλλά μια ελεγχόμενη διαδικασία, στην οποία οι μεταβολές συμβαίνουν με συστηματικό τρόπο που ενσωματώνει και στοχαστικούς κανόνες. Η τυχαιότητα αποτελεί θεμελιώδη έννοια κάθε μεθόδου ολικής βελτιστοποίησης, και όχι μόνο εμποδίζει τον εγκλωβισμό σε τοπικά ακρότατα, αλλά εξασφαλίζει και την αναγκαία ευελιξία για την κίνηση σε έντονα μη κυρτούς χώρους (Makropoulos, 2003).

Τα κριτήρια με τα οποία αποτιμάται η επιτυχία μιας πολυκριτηριακής αναζήτησης σχετίζονται με τη θέση και τον αριθμό των βέλτιστων λύσεων κατά Pareto που αποτελούν το εν λόγω μέτωπο (Deb, 2001). Η θέση εκφράζεται με τη σύγκλιση του τελικού πληθυσμού προς το πραγματικό μέτωπο Pareto, ενώ η ποσότητα με την ομοιόμορφη κάλυψη του μετώπου, δηλαδή την ανάπτυξη ενός καλά κατανεμημένου πληθυσμού κατά μήκος του. Για την εξασφάλιση των ανωτέρω είναι απαραίτητη η τήρηση της σχέσης της κυριαρχίας ώστε ο πληθυσμός να κατευθύνεται προς το μέτωπο Pareto, καθώς και η μεγιστοποίηση της διασποράς των λύσεων στο χώρο αναζήτησης και αποτίμησης, ώστε οι λύσεις να είναι αντιπροσωπευτικές των δυνατών εναλλακτικών επιλογών από το σύνολο των εφικτών λύσεων του προβλήματος. Το τελευταίο σημαίνει ότι μη κατώτερες λύσεις που είναι συγκεντρωμένες στην ίδια περιοχή του εφικτού χώρου και ταυτόχρονα απεικονίζονται στην ίδια περιοχή του μετώπου Pareto, παρέχουν μικρή επιπρόσθετη πληροφορία (μία είναι αρκετή), ενώ αντίθετα, λύσεις με μακρινές αποστάσεις στο χώρο αναζήτησης και κοντινές στο χώρο αποτίμησης (και το αντίστροφο) παρουσιάζουν εξαιρετικό ενδιαφέρον καλύπτοντας μεγάλο εύρος των εφικτών λύσεων του προβλήματος. Περισσότερο αντιληπτό γίνεται αυτό στο Σχήμα 5.2 (πηγή: Ευστρατιάδης, 2008).



Σχήμα 5.2 Κατανομή τεσσάρων λύσεων στο χώρο αναζήτησης (αριστερά) και στο χώρο αποτίμησης (δεξιά) σε πρόβλημα βελτιστοποίησης δύο κριτηρίων (πηγή: Ευστρατιάδης, 2008).

Στο ανωτέρω σχήμα απεικονίζονται οι μη κατώτερες λύσεις ενός υποθετικού προβλήματος δύο μεταβλητών απόφασης και δύο αντικειμενικών συναρτήσεων. Τα σημεία x_A και x_B, και τα αντίστοιχα μέτρα επίδοσης, f_A και f_B, βρίσκονται σε πολύ κοντινή απόσταση, οπότε ένα από τα δύο, μπορεί να αγνοηθεί, προς όφελος της μεγιστοποίησης της διασποράς των μη κατωτέρων λύσεων του προβλήματος. Αυτό επιτυγχάνεται εισάγοντας με κάποιον τρόπο έναν όρο ποινής στο μέτρο καταλληλότητας αυτού, κάτι που είναι υποκειμενικό, ωστόσο οι αλγόριθμοι νέας γενιάς κατορθώνουν να το αντιμετωπίζουν, όπως θα παρουσιαστεί στη συνέχεια στην περίπτωση του γενετικού αλγόριθμου NSGA-II (Deb et al., 2002). Αντίθετα, το σημείο x_C, που επίσης βρίσκεται στην γειτονιά των x_A και x_B, απεικονίζεται σε εντελώς διαφορετική περιοχή του προσεγγιστικού μετώπου Pareto. Αυτό σημαίνει ότι μεταβάλλοντας ελάχιστα τις τιμές των μεταβλητών ελέγχου, αλλάζουν σημαντικά οι τιμές των κριτηρίων, πράγμα που συνεπάγεται μεγάλη ευαισθησία των μεταβλητών του συστήματος που περιγράφει το πρόβλημα βελτιστοποίησης. Ακριβώς αντίστροφη είναι η συμπεριφορά της λύσης x_D, που ενώ απεικονίζεται στην ίδια περιοχή του μετώπου Pareto με την x_C, οι αντίστοιχες τιμές των μεταβλητών ελέγχου διαφέρουν σημαντικά. Στην περίπτωση αυτή, οι μεταβλητές παρουσιάζουν πολύ μικρή ευαισθησία ως προς τα κριτήρια βελτιστοποίησης. Αν εξαιρέσουμε λοιπόν ένα εκ των δύο πρώτων σημείων, x_A και x_B, ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης επιθυμούμε να ανακαλύπτει όλα τα υπόλοιπα σημεία δίνοντας αποτελέσματα που καλύπτουν σε μεγάλο βαθμό το χώρο αναζήτησης, αλλά και προκαλούν αποτελέσματα σε όλο το εύρος του πεδίου αποτίμησης.

5.3 Γενετικοί Αλγόριθμοι βελτιστοποίησης

5.3.1 Βασικές έννοιες και χαρακτηριστικά Γενετικών Αλγόριθμων

Κατά τη διάρκεια των τριών τελευταίων δεκαετιών υπάρχει ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον σε αλγόριθμους που μιμούνται διαδικασίες της φύσης. Στους πιο γνωστούς αλγόριθμους αυτής της κατηγορίας περιλαμβάνονται οι ΓΑ, ο εξελικτικός προγραμματισμός, οι εξελικτικές στρατηγικές, οι μέθοδοι τοπικής αναζήτησης και τα νευρωνικά δίκτυα (Fu et al., 2010· Makropoulos and Butler, 2005a· Makropoulos and Butler, 2005b). Οι παραπάνω κατηγορίες ανήκουν στο επιστημονικό πεδίο της *Τεχνητής Νοημοσύνης* όπου ο υπολογιστής μιμείται ουσιαστικά την ανθρώπινη φύση, με τους εξελικτικούς αλγόριθμους να αποτελούν το συνδυασμό αλγοριθμικών σχημάτων για τη λύση πραγματικών προβλημάτων.

Οι ΓΑ, που δεν είναι ορθό να ταυτίζονται με τους εξελικτικούς μιας και αποτελούν μόνο μία κατηγορία αυτών (Nicklow, 2010), βασίζονται στην αρχή της εξέλιξης (επιβίωση του καταλληλότερου – survival of the fittest), όπου ένας πληθυσμός από άτομα υποβάλλεται σε μια ακολουθία από τύπου μετάλλαξης και τύπου διασταύρωσης μετασχηματισμούς. Αυτά τα άτομα ανταγωνίζονται για επιβίωση και ένα σχήμα επιλογής προκατειλημμένο υπέρ των καταλληλότερων ατόμων, επιλέγει την επόμενη γενιά. Μετά από ένα αριθμό επαναλήψεων, προσδοκάται ότι το καλύτερο άτομο αναπαριστά τη βέλτιστη λύση. Οι ΓΑ αποτελούν σήμερα μέθοδο με ευρεία χρήση για τη βελτιστοποίηση πλήθους προβλημάτων, μεταξύ άλλων, και στην επιστήμη των υδατικών πόρων (Nicklow, 2010).

Τα τελευταία χρόνια υπάρχουν και λειτουργούν με επιτυχία πολλά συστήματα βασισμένα σε ΓΑ σε τομείς όπως η επεξεργασία εικόνας, η σχεδίαση με τη βοήθεια Η/Υ, η οικονομία, οι τηλεπικοινωνίες, η τεχνολογία λογισμικού, ο χρονοπρογραμματισμός, τα γραφικά υπολογιστών και πολλούς άλλους (Λυκοθανάσης, 2001). Στον τομέα της διαχείρισης των υδατικών πόρων, και στον ακαδημαϊκό χώρο τα τελευταία χρόνια στην Ελλάδα έχουν γίνει δύο διδακτορικές διατριβές που προσπαθούν να λύσουν ένα σχετικό πρόβλημα, αποκλειστικά ή μη με ΓΑ. Η Πεταλά (2004) χρησιμοποίησε ΓΑ για τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης υπόγειων υδροφορέων. Με συνδυασμό της μεθόδου των οριακών στοιχείων και ΓΑ βελτιστοποιήθηκε η απόληψη νερού από γεωτρήσεις ώστε να μην παρατηρείται το φαινόμενο της υφαλμύρισης. Ο Ευστρατιάδης (2008) ανέπτυξε εξελικτικά σχήματα για την αντιμετώπιση ενός πολύ επίκαιρου προβλήματος στην επιστήμη των υδατικών πόρων, της βαθμονόμησης των υδρολογικών μοντέλων με βάση πολλά κριτήρια αξιολόγησης της αποδοτικότητάς τους. Η εν λόγω διδακτορική διατριβή πειραματίστηκε στη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού. Η περιγραφή των ΓΑ που ακολουθεί βασίζεται στα κλασικά εγχειρίδια των Goldberg (1989) και Michalewicz (1996), καθώς και στο ολοκληρωμένο σύγγραμμα του

Λυκοθανάση (2001) που απαντάται στην ελληνική βιβλιογραφία, βασιζόμενο όμως και αυτό σε μεγάλο βαθμό στα προηγούμενα.

Η συστηματική ανάπτυξη των ΓΑ πραγματοποιήθηκε στις αρχές του 1970 από τον John Holland και τους συνεργάτες του στο Πανεπιστήμιο του Michigan (Holland et al., 1975). Ο Holland φαντάστηκε ότι οι λειτουργίες της φύσης θα μπορούσαν να έχουν αποτελέσματα αν ενσωματώνονταν σε αλγόριθμους για υπολογιστές, ώστε να προκύψουν αποδοτικές τεχνικές επίλυσης δύσκολων προβλημάτων. Η βασική ιδέα που κρύβεται πίσω από τους ΓΑ είναι η μίμηση των μηχανισμών της φύσης που περιγράφονται από την επιστήμη της Γενετικής (Golberg, 1989). Πιο συγκεκριμένα, οι ΓΑ μιμούνται τις μεταβολές των χαρακτηριστικών των *ατόμων* (individuals) με αλλαγή στα *χρωμοσώματά* τους (chromosomes), τα πολύπλοκα οργανικά μόρια που κωδικοποιούν τη δομή και τα χαρακτηριστικά τους, αποτελώντας το γενετικό ανάλογο των συντεταγμένων σε προβλήματα πραγματικών μεταβλητών. Τα χρωμοσώματα αποτελούνται από μικρότερα μέρη, γνωστά ως *γονίδια* (genes), που τοποθετημένα σε σειρά αποτελούν το σύνολο της γενετικής πληροφορίας που είναι κωδικοποιημένο σε αυτά και ονομάζεται *γονότυπος* (genotype). Η διαδικασία διαμόρφωσης του γονότυπου ενός ατόμου συναρτήσει των χαρακτηριστικών του καλείται *κωδικοποίηση* (encoding), ενώ η αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών με βάση τον γονότυπο καλείται *αποκωδικοποίηση* (decoding). Η τελευταία παράγει το *φαινότυπο* (phenotype) που περιλαμβάνει το σύνολο των ορατών χαρακτηριστικών και της συμπεριφοράς του ατόμου δηλαδή της περιγραφής των εξωτερικών χαρακτηριστικών του (Goldberg 1989).

Κυρίαρχες λειτουργίες του φαινομένου της εξέλιξης στη φύση και οι οποίες περιέχονται σε έναν ΓΑ, είναι η πραγματοποίησή της σε στάδια που καλούνται *γενιές* (generations) και παράγονται με *αναπαραγωγή* (reproduction). Προϊόν της αναπαραγωγής, που γίνεται με *επιλογή* (selection), *διασταύρωση* (crossover) και *μετάλλαξη* (mutation) είναι ένας νέος οργανισμός, τα χρωμοσώματα του οποίου αποτελούνται από γονίδια που προέρχονται από τους γονείς. Τα γονίδια που τελικά καθορίζουν το χαρακτηριστικό λέγονται *κυρίαρχα* (dominant) και τα άλλα *υπολειπόμενα* (recessive). Κάθε χαρακτηριστικό γνώρισμα του ατόμου έχει την δυνατότητα να εμφανιστεί με διάφορες μορφές, ανάλογα με την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το αντίστοιχο γονίδιο που το επηρεάζει. Γονίδια που διεκδικούν την ίδια θέση σε ένα χρωμόσωμα, που είναι δηλαδή υπεύθυνα για το ίδιο χαρακτηριστικό και αποτελούν τις διαφορετικές καταστάσεις, που μπορεί να πάρει το γονίδιο λέγονται *αλληλόμορφα* (alleles). Κάθε μέλος της νέας γενιάς, δηλαδή κάθε νέα λύση που εντάσσεται στον πληθυσμό, ονομάζεται *απόγονος* (offspring), ενώ τα άτομα με βάση τα οποία έχει παραχθεί η λύση αυτή ονομάζονται *γονείς* (parents).

Κατά τις δύο πρώτες φάσεις της αναπαραγωγής επιλέγονται οι γονείς και ο τρόπος που θα διασταυρωθούν για την παραγωγή ενός απογόνου. Κατά την τρίτη φάση, τη φάση της μετάλλαξης, συμβαίνει με τυχαίο τρόπο μία αλλαγή της δομής των χρωμοσωμάτων ενός οργανισμού. Η φάση αυτή αντιπροσωπεύει μια φυσική λειτουργία που γίνεται συνήθως από λανθασμένη αντιγραφή βιολογικών μορίων ή από εξωγενείς παράγοντες, έχοντας ως άμεσο αποτέλεσμα την αλλαγή σε κάποιο χαρακτηριστικό που μερικές φορές, μπορεί να προκαλέσει βελτιώσεις (Λυκοθανάσης, 2001). Τέλος, για τη δημιουργία της επόμενης γενιάς στους σύγχρονους αλγόριθμους τα πιο ισχυρά άτομα δεν υπόκεινται σε καμία μεταβολή δηλαδή σε καμία από τις ανωτέρω φάσεις, ώστε ο νέος πληθυσμός να αποκλείει με απόλυτη βεβαιότητα την πιθανότητα να είναι χειρότερος από τον προηγούμενο.

Η εξέλιξη που ακολούθησε τις τελευταίες δεκαετίες είναι ραγδαία και σήμερα οι ΓΑ θεωρούνται πιο εύρωστοι από τις υπάρχουσες μεθόδους άμεσης αναζήτησης αφού είναι σε θέση να συνδυάζουν στοιχεία και από άμεσες και από στοχαστικές τεχνικές αναζήτησης (Michalewicz, 1996· Nicklow, 2010). Σημαντικό χαρακτηριστικό τους είναι η ταχύτητα και αξιοπιστία αναζήτησης μιας και διατηρούν έναν πληθυσμό πιθανών λύσεων πάνω στον οποίο πειραματίζονται, σε αντίθεση με άλλες μεθόδους που επεξεργάζονται ένα μόνο σημείο του διαστήματος αναζήτησης. Οι ΓΑ έχουν τη δυνατότητα να συνεργαστούν με τα υπάρχοντα μοντέλα και συστήματα, να συμμετέχουν σε υβριδικές μορφές με άλλες μεθόδους (Michalewicz, 1996), ενώ δεν απαιτούν περιορισμούς στις συναρτήσεις που επεξεργάζονται. Οι ποσότητες πληροφορίας που επεξεργάζονται σε κάθε τους βήμα είναι δε μεγάλες αφού κάθε άτομο θεωρείται αντιπρόσωπος πολλών άλλων. Έχει υπολογιστεί ότι η αναλογία αυτή είναι της τάξεως $O(n^3)$ δηλαδή 10 άτομα αντιπροσωπεύουν περίπου 1000. Είναι λοιπόν προφανές ότι μπορούν να καλύψουν με αποδοτικό ψάξιμο μεγάλους χώρους σε μικρούς χρόνους (Λυκοθανάσης, 2001).

Ταυτόχρονα με την εκτενή εξερεύνηση του χώρου αναζήτησης, οι ΓΑ κάνουν εκμετάλλευση της ήδη επεξεργασμένης πληροφορίας (Michalewicz, 1996). Απαραίτητη προϋπόθεση για την επιτυχημένη έκβαση ενός τέτοιου ψαξίματος αποτελεί η συνύπαρξη και εξισορρόπηση δύο διαδικασιών που είναι προφανώς αντικρουόμενες, της εκμετάλλευσης και διατήρησης των καλύτερων λύσεων και της όσο το δυνατόν καλύτερης εξερεύνησης όλου του διαστήματος. Οι ΓΑ επιτυγχάνουν το βέλτιστο συνδυασμό εξερεύνησης (με αναζήτηση σε πολλά σημεία ταυτόχρονα και όχι μόνο σε ένα), και εκμετάλλευσης, πράγμα που τους κάνει ιδιαίτερα αποδοτικούς. Βασικό τους επίσης χαρακτηριστικό είναι ότι χρησιμοποιούν μόνο την αντικειμενική συνάρτηση και καμία επιπρόσθετη πληροφορία (‘τυφλό’ ψάξιμο), προσπαθώντας μέσω της εξέλιξης των γενιών να τη βελτιώσουν. Οι ΓΑ χρησιμοποιούν τέλος, πιθανοθεωρητικούς κανόνες αναζήτησης και όχι ντετερμινιστικούς, χωρίς αυτό να σημαίνει

ότι η όλη διαδικασία βαδίζει στην τύχη, η οποία μέσω των γενετικών τελεστών, χρησιμοποιείται ως οδηγός για αναζήτηση (Λυκοθανάσης, 2001).

5.3.2 Δομή και υπολογιστική διαδικασία Γενετικών Αλγόριθμων

Η λύση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης με έναν ΓΑ περιλαμβάνει τα παρακάτω βασικά βήματα (Michalewicz 1996· Λυκοθανάσης, 2001):

- Γενετική αναπαράσταση των πιθανών λύσεων του προβλήματος (κωδικοποίηση).
- Δημιουργία ενός αρχικού πληθυσμού των πιθανών λύσεων (αρχικοποίηση).
- Αξιολόγηση λύσεων μέσω μιας αντικειμενικής συνάρτησης, που παίζει το ρόλο του περιβάλλοντος, κατατάσσοντας τις λύσεις με βάση την καταλληλότητά τους μετά από αποκωδικοποίηση (αξιολόγηση).
- Χρήση γενετικών τελεστών (επιλογή, διασταύρωση, μετάλλαξη) που μετατρέπουν τη σύνθεση των απογόνων (αναπαραγωγή).
- Απόδοση τιμών σε διάφορες παραμέτρους που χρησιμοποιεί ο ΓΑ (μέγεθος πληθυσμού, πιθανότητες εφαρμογής των γενετικών τελεστών, κ.λ.π.) και ορισμός του κριτηρίου τερματισμού της υπολογιστικής διαδικασίας.

Η κωδικοποίηση περιλαμβάνει την αναπαράσταση των λύσεων με ένα μαθηματικό τρόπο, ώστε να είναι δυνατή η επεξεργασία από τον υπολογιστή. Κύριος στόχος της κωδικοποίησης είναι να αναπαριστά με ικανοποιητικό τρόπο τα επιμέρους χαρακτηριστικά των λύσεων, ώστε να διευκολύνει τις επόμενες λειτουργίες του αλγόριθμου. Διάφορα είναι τα είδη της κωδικοποίησης που μπορούν να γίνουν από πρόβλημα σε πρόβλημα. Η πιο απλή είναι η κωδικοποίηση με δυαδικά ψηφία (bits) όπου κάθε λύση (χρωμόσωμα) αναπαρίσταται από μια δυαδική συμβολοσειρά (binary string) καθορισμένου μήκους (σύνολο γονιδίων με αναπαράσταση 0 ή 1). Η δυαδική αναπαράσταση περιέχει μεγάλη ευελιξία καθώς μπορούν να αναπαρασταθούν ακόμα και μεταβλητές που δεν περιγράφονται μαθηματικά, όμως, σε πολλά προβλήματα απαιτείται η δημιουργία πολύ μεγάλων συμβολοσειρών, το μήκος των οποίων εξαρτάται από το πλήθος των μεταβλητών, το εύρος του πεδίου αναζήτησης και την απαιτούμενη ακρίβεια Αντίθετα, σε άλλες μορφές κωδικοποίησης, που πλέον προσφέρονται από τα εξελικτικά προγράμματα (Λυκοθανάσης, 2001), είναι δυνατόν ο γονότυπος να εκφράζεται με πραγματικές τιμές και να ταυτίζεται με το φαινότυπο δηλαδή η αναπαράσταση του κάθε γονιδίου να ταυτίζεται με την τιμή της μεταβλητής που εκφράζει το εξωτερικό χαρακτηριστικό της. Τέτοια αναπαράσταση γίνεται έμμεσα και στην παρούσα διατριβή, όπου η εκάστοτε ΔΠ προς εφαρμογή σε μία ΥΜ εκφράζεται με έναν ακέραιο αριθμό που αποτελεί

το γονίδιο, ενώ ένα σύνολο από ακέραιους αριθμούς σε σειρά, ίσο με τον αριθμό των ΥΜ της λεκάνης απορροής, εκφράζει τον γονότυπο του χρωμοσώματος δηλαδή ενός σχήματος ΔΠ στο χώρο που αποτελεί μια πιθανή λύση. Ανάλογος είναι ο ρόλος της αποκωδικοποίησης. Εδώ, πρόκειται για την αντίστροφη διαδικασία με την εμφάνιση της συμβολοσειράς στο περιβάλλον να αποτελεί το φαινότυπο ή τη 'μετάφραση' του γονοτύπου στην πραγματικότητα. Στο Σχήμα 5.3 παρατίθενται παραδείγματα κωδικοποίησης προβλημάτων προς επίλυση με ΓΑ. Η πρώτη περίπτωση είναι μία δυαδική συμβολοσειρά, ενώ οι δύο επόμενες είναι απεικονίσεις πραγματικών αριθμών (ακεραίων και δεκαδικών), που προφανώς στα αντίστοιχα προβλήματα που αναφέρονται τα γονίδια ταυτίζονται με τις πραγματικές τιμές των μεταβλητών που αναπαριστούν.

1	0	0	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1

-19	4	108	46

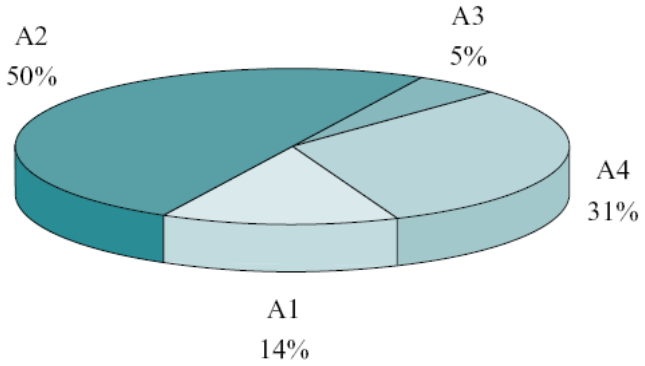
0.433	-33.345	0.0013

Σχήμα 5.3 Κωδικοποίηση μεταβλητών σε Γενετικό Αλγόριθμο.

Η αρχικοποίηση είναι το βήμα στο οποίο ορίζεται ο αρχικός πληθυσμός, πάνω στον οποίο θα λάβουν χώρα οι λειτουργίες του ΓΑ. Ο πληθυσμός αυτός διαλέγεται με τυχαίο τρόπο ανάμεσα σε όλες τις δυνατές τιμές των μεταβλητών του προβλήματος, ενώ το μέγεθός του ορίζεται από το χρήστη και εξαρτάται από τα χρονικά περιθώρια που έχει στη διάθεσή του. Ο αρχικός πληθυσμός περιλαμβάνει συγκεκριμένο αριθμό ατόμων ή χρωμοσωμάτων τα οποία διαφέρουν ως προς το γονότυπο. Μέσα σε έναν αρχικό πληθυσμό είναι δυνατόν το ίδιο χρωμόσωμα να υπάρχει περισσότερες της μίας φορές. Ο καθορισμός του αρχικού πληθυσμού από το χρήστη είναι συνήθως προαιρετικός, δηλαδή μπορεί ο ίδιος ο αλγόριθμος να 'γεννήσει' αρχικό πληθυσμό σεβόμενος πάντα τους περιορισμούς που διέπουν τις καταστάσεις τις οποίες μπορούν να λάβουν οι μεταβλητές (αλληλόμορφα). Η υπολογιστική διαδικασία πάντως σε έναν εύρωστο ΓΑ μετά από μεγάλο αριθμό επαναλήψεων οδηγεί συνήθως σε αποτέλεσμα που εξαρτάται ελάχιστα από τον αρχικό πληθυσμό. Η κάθε λύση που παράγεται αποκωδικοποιείται όπως αναφέρθηκε ανωτέρω και σύμφωνα με το 3^{ο} κατά σειρά βήμα αξιολογείται με βάση μία αντικειμενική συνάρτηση που αποτελεί ουσιαστικά ένα μέτρο επίδοσης ή αποτίμησης της εκάστοτε λύσης.

Η σημαντικότερη λειτουργία του ΓΑ είναι η αναπαραγωγή, κατά την οποία λαμβάνει χώρα ο κύριος όγκος της εργασίας του αλγόριθμου. Η δομή της αναπαραγωγικής διαδικασίας είναι σύνθετη και περιλαμβάνει την επιλογή, τη διασταύρωση και τη μετάλλαξη. Με την επιλογή, βρίσκει εφαρμογή στα πλαίσια του αλγόριθμου, ο νόμος της επιβίωσης του

ικανότερου (survival of the fittest). Μέσω αυτής της διαδικασίας, καθορίζονται τα άτομα από τον υπάρχοντα πληθυσμό τα οποία θα έχουν την ευκαιρία να λάβουν μέρος στην αναπαραγωγή και να κληροδοτήσουν στην επόμενη γενιά μέρος ή το σύνολο των χαρακτηριστικών τους. Στόχος της λειτουργίας της επιλογής είναι να επιτρέπει εκθετική αύξηση των ικανοτέρων ατόμων και τελικά, μετά από αναπαραγωγή αρκετών γενιών, την επικράτησή τους. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι υλοποίησης της επιλογής στα πλαίσια ενός ΓΑ, που όλες αποδίδουν μεγαλύτερες πιθανότητες αναπαραγωγής σε άτομα που αξιολογούνται ως τα πιο ικανά. Ο τελεστής αναπαραγωγής μπορεί να εκφραστεί σε αλγοριθμική βάση, με πολλούς τρόπους με τον πιο διαδεδομένο, αυτόν της εξαναγκασμένης ρουλέτας, στην οποία κάθε συμβολοσειρά ενός πληθυσμού αντιπροσωπεύεται σε ένα μέρος της ρουλέτας, σε αναλογία με την απόδοσή της, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.4.

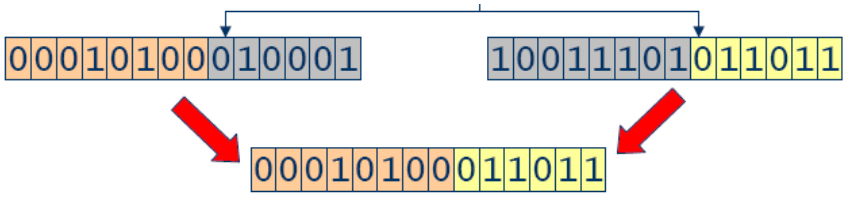


Σχήμα 5.4 Εξαναγκασμένη ρουλέτα για την επιλογή ατόμων προς αναπαραγωγή του πληθυσμού (πηγή: Λυκοθανάσης, 2001).

Στο Σχήμα 5.4, έστω ότι A1 A2, A3 και A4 είναι τέσσερα χρωμοσώματα (συμβολοσειρές) που αποτελούν λύσεις του προβλήματος και έχουν αξιολογηθεί με βάση μία αντικειμενική συνάρτηση. Στην περίπτωση της ρουλέτας το μέτρο επίδοσης του κάθε χρωμοσώματος διαιρείται με το άθροισμα των μέτρων επίδοσης όλων των χρωμοσωμάτων, με το πηλίκο αυτό να εκφράζει το βαθμό καταλληλότητας και να είναι μεγαλύτερο για τα πιο αποδοτικά χρωμοσώματα. Η διαίρεση αυτή εκφρασμένη επί τοις εκατό δίνει και την πιθανότητα ένα χρωμόσωμα να συμμετάσχει στη διαδικασία της επιλογής για την παραγωγή της επόμενης γενιάς. Η λύση A1 λοιπόν σύμφωνα με το Σχήμα 5.4 είναι η πλέον κατάλληλη με πιθανότητα να συμμετάσχει στη διαδικασία της επιλογής 50% ή διαφορετικά, σε κάθε 100 χρωμοσώματα-γονείς για την παραγωγή νέων λύσεων τα 50 θα είναι χρωμοσώματα A1. Ανάλογα ορίζεται και η συμμετοχή των χρωμοσωμάτων A2, A3, A4. Η διαδικασία της ρουλέτας ελαχιστοποιεί την πιθανότητα ένα χρωμόσωμα χαμηλής απόδοσης να υπάρχει στην επόμενη γενιά αφού ελαχιστοποιείται το πλήθος αντιγράφων του (απογόνων) στη διαδικασία

της επιλογής. Τα χρωμοσώματα που επιλέχθηκαν από αυτή τη διαδικασία αποθηκεύονται προσωρινά στη λεγόμενη δεξαμενή ζευγαρώματος (mating pool), όπου θα υποστούν περισσότερες γενετικές διαδικασίες (Golberg, 1989).

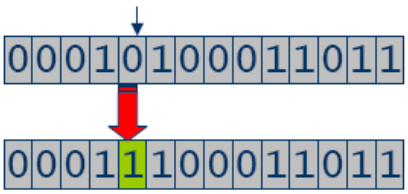
Στόχος της διασταύρωσης που ακολουθεί είναι η νέα γενιά που θα προκύψει μετά την εφαρμογή της να περιλαμβάνει άτομα που θα διαφέρουν από τους γονείς τους και θα φέρουν συνδυασμό των καλύτερων χαρακτηριστικών τους. Ένα ενδεικτικό της χρησιμότητας της διασταύρωσης είναι η ανακατεύθυνση του ψαξίματος σε νέες απάτητες περιοχές του χώρου αναζήτησης. Έτσι, διευρύνεται το πεδίο δράσης του αλγόριθμου και αυξάνουν οι πιθανότητες επιτυχίας του, αφού τα ήδη αξιολογημένα χρωμοσώματα της δεξαμενής χρησιμοποιούνται για παραγωγή νέων προς αξιολόγηση. Τα νέα άτομα περιλαμβάνουν συνδυασμούς χαρακτηριστικών των γονέων τους και δεδομένου ότι οι γονείς ήταν τα πλέον ισχυρά άτομα, είναι πιθανότερο να προκύψουν επιτυχημένοι συνδυασμοί υψηλής ικανότητας. Η διασταύρωση λαμβάνει χώρα με πιθανότητα, τη λεγόμενη *πιθανότητα διασταύρωσης* (crossover probability), *pc*, που καθορίζεται από το σχεδιαστή του ΓΑ. Συνήθως, αυτή η πιθανότητα ποικίλει από πρόβλημα σε πρόβλημα, ενώ είναι δυνατό και να αλλάζει κατά τον χρόνο τρεξίματος επηρεάζοντάς τον σε κάποιο βαθμό. Η τιμή *pc* = 1, σημαίνει συνεχή εφαρμογή του τελεστή διασταύρωσης, άρα το ψάξιμο γίνεται με μικρό βήμα. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα η αναζήτηση να γίνει σε όλο το χώρο, άρα ο αλγόριθμος θα συγκλίνει στο βέλτιστο, αλλά πολύ αργά. Αντίθετα, χρησιμοποιώντας μικρές τιμές της *pc* το ψάξιμο κάνει άλματα, άρα ο αλγόριθμος είναι πιθανόν να συγκλίνει πιο γρήγορα. Χρησιμοποιώντας μεγάλο βήμα, υπάρχει ο κίνδυνος ο αλγόριθμος να ξεπεράσει το βέλτιστο και έτσι να αποκλίνει. Στο Σχήμα 5.5 απεικονίζεται διασταύρωση μονού σημείου μεταξύ χρωμοσωμάτων (γονέων) που καταλήγει σε νέο χρωμόσωμα με σύνθεση μέρους του γονότυπου από τον καθένα. Τονίζεται ότι προκύπτει και δεύτερος απόγονος από τη διαδικασία με μίξη των υπολοίπων μερών των γονοτύπων των δύο χρωμοσωμάτων. Το Σχήμα 5.6 τέλος, απεικονίζει διάφορους τρόπους διασταύρωσης. Διακρίνονται διασταυρώσεις μονού σημείου (όπως και στο Σχήμα 5.5), διπλού σημείου, ομοιόμορφης και τυχαίας διασταύρωσης. Η αποτελεσματικότητα των ειδών αυτών δεν είναι κάτι που μπορεί να προεξοφληθεί, εξαρτάται από το εκάστοτε πρόβλημα και εντοπίζεται συνήθως με δοκιμαστικό τρόπο.



Σχήμα 5.5 Διασταύρωση γονέων μονού σημείου σε δυαδικό πρόβλημα.

Σχήμα 5.6 Είδη διασταυρώσεως ως προς τη θέση/θέσεις διασταύρωσης.

Το υπόλοιπο μέρος του πληθυσμού που δεν λαμβάνει μέρος στη διασταύρωση (1-*pc*), αντιγράφεται ως έχει στην επόμενη γενιά, όπου λαμβάνει χώρα η τελευταία φάση της αναπαραγωγικής διαδικασίας, η μετάλλαξη. Η μετάλλαξη δρα μεμονωμένα σε κάποια χρωμοσώματα μεταβάλλοντας αυθαίρετα την κατάσταση ενός γονιδίου (αλληλόμορφο). Στη δυαδική αναπαράσταση αυτό σημαίνει ότι το 0 γίνεται 1 και το αντίστροφο, ενώ σε οποιαδήποτε άλλη αναπαράσταση ότι η κατάσταση του γονιδίου μεταπίπτει σε κάποια άλλη δυνατή μορφή με βάση πάντα το πεδίο ορισμού της μεταβλητής. Η διαδικασία αυτή συμβαίνει τυχαία με μικρή πιθανότητα, τη λεγόμενη πιθανότητα μετάλλαξης (mutation probability), *pm*, η οποία συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 0.1 – 1% ώστε να μην επιβραδύνεται η πορεία σύγκλισης. Στην περίπτωση δηλαδή που η συχνότητα αυτή είναι μεγάλη, υπάρχει ο κίνδυνος ο ΓΑ να εκφυλίζεται σε τυχαίο ψάξιμο. Το ποσοστό 1% δηλώνει ότι από τα 10 χρωμοσώματα του νέου πληθυσμού με μήκος π.χ. 10 γονιδίων, μόνο το 1 γονίδιο θα υποστεί μετάλλαξη. Γενικά, πρόκειται για μια ασφαλιστική δικλείδα για τις περιπτώσεις, κατά τις οποίες η επιλογή και η διασταύρωση, ενδεχομένως, χάσουν κάποιες πολύτιμες γενετικές πληροφορίες. Όταν συμβαίνει, επιφέρει ποικιλία στον πληθυσμό, ανακατευθύνει την αναζήτηση και εξασφαλίζει το γεγονός ότι σημεία του χώρου αναζήτησης που πιθανά να έμεναν ανεξερεύνητα δεν αποκλείονται τελικά από τη διαδικασία αναζήτησης. Το Σχήμα 5.7 παρουσιάζει τη διαδικασία της μετάλλαξης σε γονίδιο χρωμοσώματος ($5^{η}$ θέση) δυαδικής αναπαράστασης.



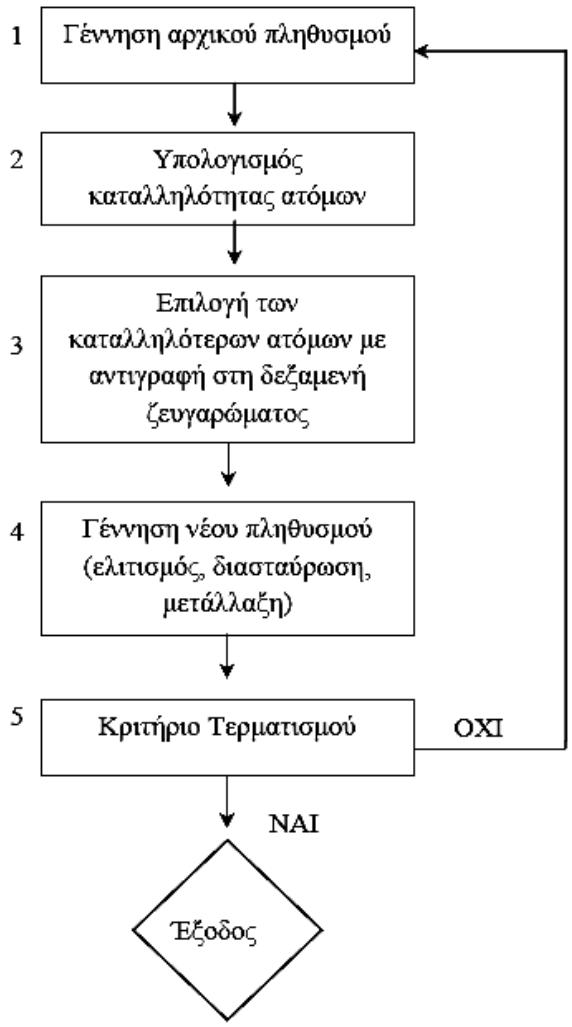
Σχήμα 5.7 Μετάλλαξη στην πέμπτη θέση χρωμοσώματος δυαδικής αναπαράστασης.

Αν και οι παραπάνω γενετικές διαδικασίες φαντάζουν αρκετές ώστε ο αλγόριθμος να καταλήγει κάθε φορά σε καλύτερο πληθυσμό, υπάρχει πάντα η περίπτωση, λόγω της τυχαιότητας της όλης πορείας, ούτε η διασταύρωση, ούτε η μετάλλαξη να δημιουργήσουν άτομο που θα βελτιώνει την αντικειμενική συνάρτηση και άρα θα δημιουργεί έναν πληθυσμό (σύνολο ατόμων) με καλύτερη επίδοση. Υπάρχουν δε περιπτώσεις που η επίδοση αυτή μπορεί να είναι και χειρότερη από την προηγούμενη. Για την άρση αυτού του μειονεκτήματος στην αναπαραγωγική διαδικασία, όλοι πλέον οι αλγόριθμοι νεότερης γενιάς ενσωματώνουν το στοιχείο του *εκλεκτισμού* ή *ελιτισμού* (elitism), που εισήγαγε ο De Jong (1975). Πρόκειται για μία απλή διαδικασία όπου το καλύτερο ή καλύτερα χρωμοσώματα από άποψη επίδοσης αποθηκεύονται στη μνήμη της διαδικασίας και συγκαταλέγονται χωρίς άλλο κριτήριο ή διαδικασία επιλογής στο νέο πληθυσμό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο αλγόριθμος να κινείται αυστηρά μονοτονικά προς το βέλτιστο χωρίς να κάνει 'πισωγυρίσματα'. Έστω και ένα χρωμόσωμα κάθε φορά είναι αρκετό για να εγγυηθεί αυτή την πορεία, αν και αρκετοί αλγόριθμοι επιτρέπουν τη διατήρηση περισσότερων κατά τη δημιουργία νέας γενιάς κάθε φορά.

Το τελευταίο βήμα της διαδικασίας εφαρμογής του ΓΑ σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης περιλαμβάνει, εκτός από τον ορισμό των γενετικών τελεστών που περιγράφηκε, τον καθορισμό του μεγέθους του πληθυσμού και του κριτηρίου τερματισμού της αναζήτησης. Μεγάλος πληθυσμός συνεπάγεται μεγάλη ικανότητα ψαξίματος του εφικτού χώρου αλλά ταυτόχρονα μεγάλο υπολογιστικό φόρτο. Δεν υπάρχει κάποιος κανόνας που να συσχετίζει το μέγεθος του πληθυσμού με το κάθε πρόβλημα, γενικά θα μπορούσε να λεχθεί όμως ότι ο πληθυσμός πρέπει να έχει μέγεθος αυστηρά μεγαλύτερο του αριθμού των μεταβλητών με μία τάση ο λόγος μεταξύ των δύο να μειώνεται όσο οι μεταβλητές πληθαίνουν. Όσον αφορά το κριτήριο τερματισμού της διαδικασίας βελτιστοποίησης, αυτό μπορεί να είναι είτε ένας συγκεκριμένος και μεγάλος αριθμός γενιών, είτε ένα ανώτατο όριο που εκφράζει το ποσοστό βελτίωσης της αντικειμενικής συνάρτησης μετά από συγκεκριμένο αριθμό παραγωγής γενιών, είτε ακόμα ένα ανώτατο όριο χρόνου, όπου δεν παρατηρείται η ελάχιστη επιθυμητή βελτίωση της αντικειμενικής συνάρτησης. Επειδή σε μία διαδικασία αναζήτησης ο ΓΑ πολύ πιθανόν να κάνει κάποιο άλμα στη βελτίωση της αντικειμενικής συνάρτησης μετά από αρκετό χρόνο, δηλαδή μετά από πολλές συνεχόμενες επαναλήψεις όπου δεν παρουσίαζε σημαντική πρόοδο, θεωρείται ότι το πιο εγγυημένο κριτήριο τερματισμού για την προσέγγιση της ολικά βέλτιστης λύσης/λύσεων είναι η δημιουργία ενός αρκετά μεγάλου αριθμού γενιών.

Με βάση τα ανωτέρω μπορεί να γίνει μία σύνοψη και ανακεφαλαίωση της λειτουργίας των ΓΑ στο Σχήμα 5.8. Σύμφωνα με αυτό, για τη λύση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης (μονό ή πολυκριτηριακό) γεννάται ένας αρχικός πληθυσμός από πιθανές

λύσεις, οι οποίες αξιολογούνται ταυτόχρονα ως προς την καταλληλότητά τους μέσω της αντικειμενικής/ων συνάρτησης/εων. Στη συνέχεια επιλέγονται με κάποια μέθοδο τα καλύτερα άτομα του πληθυσμού από την δεξαμενή ζευγαρώματος, ως γονείς για ζευγάρωμα (mating) και αναπαραγωγή του πληθυσμού. Οι γενετικές διαδικασίες (διασταύρωση, μετάλλαξη) ορίζουν τον τρόπο αναπαραγωγής και τη γέννηση του νέου πληθυσμού προς αξιολόγηση, ενώ τα πιο ισχυρά άτομα μεταφέρονται αυτούσια στο νέο πληθυσμό (ελιτισμός). Ελέγχεται το κριτήριο τερματισμού του αλγόριθμου και η διαδικασία συνεχίζεται έως ότου αυτό ικανοποιηθεί. Μετά τον τερματισμό το άτομο/άτομα με την καλύτερη επίδοση αποτελούν τη βέλτιστη/ες λύση/σεις του προβλήματος, ενώ μετά από μεγάλο χρονικό διάστημα ο τελικός πληθυσμός μπορεί να περιλαμβάνει πολλά αντίγραφα του καταλληλότερου ατόμου και σίγουρα άτομα με μεγάλο βαθμό καταλληλότητας σχεδόν στο σύνολό του.



Σχήμα 5.8 Λογικό διάγραμμα ροής Γενετικού Αλγόριθμου.

5.3.3 Εξέλιξη Γενετικών Αλγόριθμων

Οι πολυκριτηριακοί ΓΑ βελτιστοποίησης, στην εξέλιξη τους στο χρόνο διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες, τους αλγόριθμους πρώτης, δεύτερης και τρίτης γενιάς. Οι βασικές σχεδιαστικές επιλογές στις οποίες διαφοροποιούνται οι ΓΑ και οι γενιές ΓΑ πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης είναι δε, μεταξύ άλλων, η χρήση των κριτηρίων καταλληλότητας, οι τεχνικές διατήρησης της ποικιλίας του πληθυσμού, οι τεχνικές εφαρμογής ελιτισμού και η αντιμετώπιση των περιορισμών (Παπαγιάννη, 2009). Οι αλγόριθμοι πρώτης γενιάς δεν εφαρμόζουν άμεσα την έννοια της Pareto κυριαρχίας για τη σύγκριση των διανυσμάτων των λύσεων. Αντιθέτως, χρησιμοποιούν κατά τη διαδικασία αξιολόγησης των λύσεων βαθμωτά μέτρα καταλληλότητας, τα οποία είτε εξετάζονται ξεχωριστά είτε συνδυάζονται σε μια ενιαία έκφραση. Την πρώτη προσπάθεια για την ενσωμάτωση πολλαπλών κριτηρίων σε διαδικασία βελτιστοποίησης με τη χρήση ΓΑ αποτέλεσε ο διανυσματικός ΓΑ (Vector Evaluated Genetic Algorithm –VEGA). Για το σκοπό αυτό, για ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με m αντικειμενικούς στόχους χρησιμοποιούνται m υπο-πληθυσμοί ατόμων, κάθε ένας εκ των οποίων δημιουργείται με αναλογική επιλογή από τον αρχικό πληθυσμό με βάση το αντίστοιχο κριτήριο βελτιστοποίησης. Η ανάμιξη των μελών των επιμέρους υποπληθυσμών δημιουργεί τον νέο πληθυσμό στον οποίο εφαρμόζονται οι κατάλληλοι τελεστές. Με βάση την παραπάνω διαδικασία ευνοείται η επιβίωση ατόμων που παρουσιάζουν άριστη επίδοση ως προς ένα κριτήριο, ενώ εμποδίζεται η επιβίωση αυτών που εμφανίζουν ενδιάμεση συμπεριφορά, και που μπορούν να θεωρηθούν ως οι πλέον συμβιβαστικές του προβλήματος, ενώ δεν δύναται να εντοπιστούν μη κυρτές περιοχές του μετώπου Pareto (Παπαγιάννη, 2009). Εναλλακτικές μέθοδοι οι οποίες ανήκουν στους αλγόριθμους πρώτης γενιάς είναι οι λεξικογραφικές εξελικτικές μέθοδοι, οι μέθοδοι με χρήση min-max βέλτιστου και μέθοδοι οι οποίες χρησιμοποιούν εκλεκτισμό και τυχαία δημιουργία βαρών (Ευστρατιάδης, 2008).

Στους αλγόριθμους δεύτερης γενιάς δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στο κριτήριο επιλογής της σχέσης κυριαρχίας ανάμεσα στις υπό εξέταση λύσεις, αντιστοιχίζοντας σε κάθε μέλος του πληθυσμού ένα βαθμωτό μέτρο κυριαρχίας (τάξη). Ο βαθμός της τάξης είναι ανάλογος του αριθμού των λύσεων οι οποίες κυριαρχούν στο άτομο, με μεγάλες τάξεις να αντιστοιχούν σε περισσότερο κυριαρχούμενες λύσεις και την τάξη 1 να αντιστοιχεί στις πλέον μη κυριαρχούμενες ή ολικά Pareto βέλτιστες λύσεις (Goldberg, 1989). Η μέθοδος αυτή είναι γνωστή και ως μέθοδος *μη κυριαρχούμενης ταξινόμησης* (non-dominated sorting) και προσβλέπει στην διαμόρφωση υποομάδων λύσεων ή αλλιώς *μετώπων* (fronts), όπου το πρώτο μέτωπο περιλαμβάνει τις μη κατώτερες λύσεις του συνόλου του πληθυσμού, το δεύτερο τις μη κατώτερες πλην αυτών του πρώτου μετώπου κοκ. Συνεπώς, επιτυγχάνεται ταξινόμηση του

πληθυσμού με βάση τη σχετική θέση των διανυσμάτων-λύσεων στο διανυσματικό πεδίο τιμών. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν αλγόριθμοι όπως ο ΓΑ πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης MOGA (Multi-Objective Genetic Algorithm), (Fonseca and Fleming, 1993), ο ΓΑ NPGA με θύλακες Pareto (Niched Pareto Genetic Algorithm), (Horn et al., 1994) και ο ΓΑ μη κυριαρχούμενης ταξινόμησης NSGA (Non Dominated Sorting Genetic Algorithm), (Srinivas and Deb, 1994).

Ένα άλλο χαρακτηριστικό που διαμόρφωσε τη δεύτερη γενιά πολυκριτηριακών αλγόριθμων είναι η αντιμετώπιση της συσσώρευσης των λύσεων σε μία περιοχή του μετώπου Pareto ή αλλιώς η μη ομοιόμορφη διασπορά τους κατά μήκος του. Εδώ τίθεται το ζήτημα της διατήρησης της ποικιλίας του πληθυσμού. Για το σκοπό αυτό στους αλγόριθμους δεύτερης γενιάς, στη διαδικασία αξιολόγησης κάθε διανύσματος-λύσης εκτός από το μέτρο κυριαρχίας (τάξη) συμπεριλαμβάνεται και ένα μέτρο διασποράς με διαμοιρασμό των καταλληλολήτων. Η ιδέα για την χρήση του μέτρου διασποράς ανήκει στον Goldberg (1989), με τη χρήση ποινής για κάθε μέλος του πληθυσμού ως μέτρο διασποράς, με στόχο να ευνοούνται σημεία τα οποία χαρακτηρίζονται από μεγάλη διασπορά των αποστάσεων τους σε σχέση με τις υπόλοιπες λύσεις (βλ. Σχήμα 5.2 για περιγραφή του προβλήματος). Η *απόσταση συνωστισμού* (crowding distance), (Deb et al., 2002) και η *πυκνότητα κελιού* (cell-based density), (Corne et al., 2000· Knowles and Corne, 2000) αποτελούν ακόμα μεταγενέστερες εναλλακτικές λύσεις του προβλήματος, ενώ η πρώτη θα αναλυθεί στη συνέχεια αποτελώντας βασικό στοιχείο μετεξέλιξης του ΓΑ NSGA, που κατατάσσεται στους αλγόριθμους τρίτης πλέον γενιάς με την ονομασία NSGA-II. Συμπερασματικά και βάσει των ανωτέρω απαιτήσεων, στους λεγόμενους πολυκριτηριακούς εξελικτικούς αλγόριθμους δεύτερης γενιάς, η αποτίμηση κάθε ατόμου, που καθορίζει την πιθανότητα επιβίωσής του στην επόμενη γενιά, αποτιμάται με βάση ένα σύνθετο μέτρο καταλληλότητας, που εμπεριέχει τόσο το μέτρο κυριαρχίας (τάξη) όσο και το μέτρο διασποράς σε σχέση με τα υπόλοιπα άτομα. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται σύγκλιση του πληθυσμού προς το πραγματικό μέτωπο Pareto, και ευνοείται η επιλογή ατόμων που έχουν λιγότερα άλλα μέλη του πληθυσμού στη γειτονιά τους, παρέχοντας στο μελετητή τη δυνατότητα να διερευνήσει λύσεις που καλύπτουν ομοιόμορφα και πληρέστερα το πεδίο αποτίμησης.

Στους αλγόριθμους τρίτης γενιάς πλέον, οι οποίοι άρχισαν να αναπτύσσονται στα τέλη του 1990, εισάγεται για πρώτη φορά η έννοια του ελιτισμού, της διατήρησης συνεπώς των μη κατώτερων λύσεων οι οποίες αντιπροσωπεύουν συγκεκριμένες περιοχές του μετώπου Pareto, η οποία συνήθως πραγματοποιείται με τη χρήση ενός εξωτερικού πληθυσμού (αρχείο) πεπερασμένου μεγέθους (Παπαγιάννη, 2009). Η ύπαρξη του εξωτερικού αρχείου δημιουργεί την ανάγκη επιλογής του τρόπου αλληλεπίδρασης του με τον πληθυσμό, του ορισμού της χωρητικότητας του και τις προϋποθέσεις εισαγωγής ή διαγραφής από το αρχείο μίας λύσης. Ο

ελιτισμός επιτρέπει τη διατήρηση των αποδοτικότερων ατόμων στο νέο πληθυσμό και εκμηδενίζει την πιθανότητα μία νέα γενιά να οδηγεί σε αντίθετη κατεύθυνση με τη βέλτιστη πορεία, όπως ήδη έχει εξηγηθεί προηγούμενα. Στους αλγόριθμους τρίτης γενιάς βελτιώθηκαν επίσης κάποια άλλα χαρακτηριστικά, όπως ο τρόπος κατάταξης των λύσεων και η αξιολόγηση της διασποράς τους κατά μήκος του μετώπου Pareto, που μαζί με τον ελιτισμό τους καθιστά τους πιο αποδοτικούς αλγόριθμους έως σήμερα. Βασικοί εκπρόσωποι αυτής της γενιάς αλγόριθμων είναι ο εξελικτικός αλγόριθμος Pareto ισχύος SPEA (Strength Pareto Evolutionary Algorithm) και βελτιώσεις της μεθόδου (Zitzler and Thiele, 1999· Zitzler et al., 2001), η εξελικτική στρατηγική με αρχεία Pareto, PAES (Pareto Archived Evolutionary Strategy) (Knowles and Corne, 2000), ο αλγόριθμος επιλογής Pareto λύσεων με βάση φακέλους, PESA (Pareto Envelope based Selection Algorithm), (Corne et al., 2000) και βελτιώσεις της μεθόδου (PESA-II), (Corne et al., 2001), και ο ταχύς και εκλεκτικός αλγόριθμος μη κυριαρχούμενης ταξινόμησης NSGA-II (fast Non dominated Sorting Genetic Algorithm), (Deb et al., 2000· 2002).

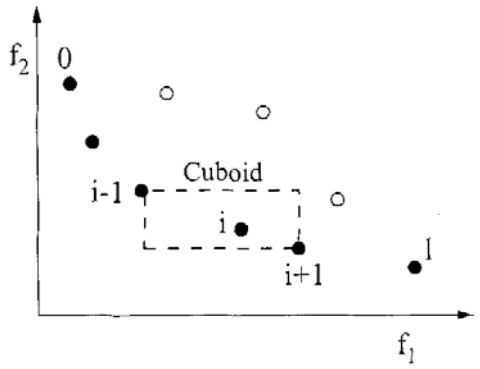
5.3.4 Ο ταχύς και εκλεκτικός Γενετικός Αλγόριθμος μη κυριαρχούμενης ταξινόμησης (NSGA-II)

Ο αρχικός ΓΑ μη κυριαρχούμενης ταξινόμησης NSGA αναπτύχθηκε το 1993 από τους Srinivas και Deb (Srinivas and Deb, 1994) στην Ινδία. Η διαφοροποίηση από αυτόν, του νεότερου ΓΑ τρίτης γενιάς NSGA-II (Deb, 2002) έγκειται στη βελτίωση της μεθοδολογίας ταξινόμησης των λύσεων, στην ενσωμάτωση ελιτισμού και στη μεταβολή του τρόπου αξιολόγησης των λύσεων ως προς τη διασπορά τους πάνω στο μέτωπο Pareto. Κατά συνέπεια, ο αλγόριθμος κατέστη ταχύτερος από τον πρόγονό του και πιο αποτελεσματικός, καθότι χρησιμοποιεί στρατηγική διατήρησης του 'ελίτ' συνόλου και ένα μηχανισμό διατήρησης της ποικιλομορφίας του πληθυσμού που δεν εξαρτάται από τον ορισμό του μέτρου πυκνότητας από το χρήστη.

Για την ταξινόμηση του πληθυσμού με βάση τον ορισμό της κυριαρχίας Pareto, απαιτείται η σύγκριση κάθε ατόμου με όλα τα υπόλοιπα, ως προς το σύνολο των κριτηρίων βελτιστοποίησης M και ως προς το μέγεθος του πληθυσμού P με απαιτούμενο πλήθος υπολογισμών τάξης $O(MP^3)$. Στον αλγόριθμο NSGA-II εισάγεται μια ειδική διαδικασία ταξινόμησης, η οποία χρησιμοποιεί ένα μητρώο όπου αποθηκεύονται όλες οι λύσεις επί των οποίων κυριαρχεί κάθε άτομο, επιτυγχάνοντας έτσι υπολογιστικό φόρτο τάξης $O(MP^2)$. Αρχικά, δημιουργείται ο πληθυσμός P_t, που με βάση αυτόν παράγεται ο πληθυσμός των απογόνων Q_t, με την εφαρμογή των γενετικών τελεστών. Ωστόσο, αντί να βρεθούν τα μη κυριαρχούμενα μέτωπα μόνο του Q_t, οι δύο πληθυσμοί συνδυάζονται προκειμένου να

σχηματίσουν τον πληθυσμό R_t με μέγεθος 2N. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται μία ταξινόμηση με βάση την Pareto-κυριαρχία σε ολόκληρο τον πληθυσμό R_t. Η διαδικασία αυτή επιτρέπει να ελεγχθούν όλα τα άτομα για την εύρεση των μη-κυριαρχούμενων μετώπων και μόλις ολοκληρωθεί, ο νέος πληθυσμός συμπληρώνεται από λύσεις διαφόρων μη κυριαρχούμενων μετώπων. Η συμπλήρωση ξεκινά με τα άτομα του πρώτου μη κυριαρχούμενου μετώπου, συνεχίζει με το δεύτερο και προχωράει μέχρι να συμπληρωθούν τα N άτομα του νέου πληθυσμού εισάγοντας την έννοια του ελιτισμού. Από τη στιγμή που το μέγεθος του R_t είναι 2N, στο νέο πληθυσμό μεγέθους N, δεν θα συμπεριληφθούν όλα τα μέτωπα των λύσεων και αυτά που δεν συμπεριλαμβάνονται διαγράφονται. Επίσης, είναι δυνατόν να μη συμπεριληφθούν όλα τα μέλη του τελευταίου μετώπου λύσεων, που λαμβάνεται υπόψη κατά τη συμπλήρωση του νέου πληθυσμού. Αντί να απορριφθούν τυχαία κάποια μέλη του τελευταίου αυτού μετώπου, ακολουθείται μία στρατηγική υποπληθυσμών (niching strategy) και επιλέγονται εκείνα τα μέλη, που βρίσκονται στις λιγότερο πυκνές περιοχές του. Η στρατηγική αυτή, διασφαλίζει πως από τον πληθυσμό αυτόν, θα επιλεγεί ένα ποικιλόμορφο σύνολο και με αυτόν τον τρόπο, όταν ολόκληρος ο πληθυσμός τείνει να συγκλίνει προς το Pareto-βέλτιστο μέτωπο, η εξέλιξη του αλγόριθμου θα διασφαλίσει μία καλύτερη κατανομή των λύσεων.

Η αξιολόγηση των λύσεων ως προς τη θέση τους πάνω στο μέτωπο Pareto γίνεται με τη χρήση ενός μέτρου σύγκρισης (d_i), τη λεγόμενη *απόσταση συνωστισμού* (crowding distance). Αυτό σημαίνει ότι στην περίπτωση που οι δύο λύσεις είναι αδιάφορες, (ανήκουν στο ίδιο μέτωπο) επιλέγεται η λύση με μεγαλύτερη τιμή στο μέτρο αυτό, η λύση δηλαδή η οποία βρίσκεται σε λιγότερο γνωστή περιοχή του Pareto μετώπου. Πρόκειται για μία εκτίμηση της περιμέτρου του ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου που σχηματίζεται, χρησιμοποιώντας τις γειτονικότερες λύσεις ως κορυφές. Στο Σχήμα 5.9 η απόσταση πυκνότητας της *i*-οστής λύσης εντός του μετώπου κυριαρχίας στο οποίο ανήκει (που σημειώνεται με τις μαύρες τελείες) ισούται με το μέσο πλευρικό μήκος του ορθογωνίου (που διαγράφεται από τις διακεκομμένες γραμμές). Η απόσταση συνωστισμού δηλαδή χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του μεγαλύτερου κυβοειδούς το οποίο περικλείει μόνο την υπό εξέταση λύση ορίζοντας ουσιαστικά το άθροισμα των διαφορών στις τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων όλων των κριτηρίων μεταξύ δύο γειτονικών λύσεων. Σημειώνεται ότι το μέγεθος αυτό, αν και συνηθίζεται να μετράται στο φαινοτυπικό πεδίο, μπορεί να μετρηθεί και στο πεδίο τιμών. Στις λύσεις δε οι οποίες αποτελούν οριακές τιμές (π.χ. 0 και 1 στο Σχήμα 5.9) ανατίθεται πολύ μεγάλη (άπειρη) απόσταση συνωστισμού ώστε να διατηρηθούν στο μέτωπο.



Σχήμα 5.9 Η απόσταση συνωστισμού στον Γενετικό Αλγόριθμο NSGA-II (πηγή: Deb et al., 2002).

Δύο πιθανές λύσεις *i* και *j* συγκρίνονται στον αλγόριθμο NSGA-II με βάση τα δύο κριτήρια, της κυριαρχίας (*r)* και της απόστασης συνωστισμού (*d*) μέσα στον πληθυσμό. Εάν η λύση *i* έχει καλύτερη διάταξη, δηλαδή ανήκει σε χαμηλότερο επίπεδο μη κυριαρχίας, $r_i < r_j$, επιλέγεται. Διαφορετικά, η λύση *i* επιλέγεται εάν οι δύο λύσεις έχουν την ίδια διάταξη κυριαρχίας, αλλά η λύση *i* έχει καλύτερη τιμή απόστασης συνωστισμού από τη λύση *j*, δηλαδή $r_i = r_j$ και $d_i > d_j$. Η πρώτη συνθήκη διασφαλίζει πως οι επιλεγμένες λύσεις βρίσκονται σε καλύτερο μη κυριαρχούμενο μέτωπο και η δεύτερη ότι χαρακτηρίζονται από ικανοποιητική διασπορά (spread).

Η παραπάνω λογική κατέστησε σήμερα τον ΓΑ NSGA-II έναν από τους πιο αποδοτικούς και χρήσιμους αλγόριθμους βελτιστοποίησης για τη λύση πολυκριτηριακών προβλημάτων σε εύλογο χρόνο. Υπάρχουν αρκετές εργασίες που αντιμετωπίζουν τέτοια προβλήματα με χρήση του. Ενδεικτικά αναφέρονται οι εργασίες των Bekele and Nicklow (2007), των Dumedah et al. (2010), των Khu and Madsen (2005), των Remegio et al. (2007) και των Shafii and Smedt (2009), που χρησιμοποίησαν τον ΓΑ NSGA-II για τη βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων με βάση περισσότερα από ένα κριτήρια βελτιστοποίησης. Οι Bekele and Nicklow (2007) έθεσαν ως κριτήρια προς ταυτόχρονη βελτιστοποίηση, τη σύγκλιση των παρατηρημένων και προσομοιωμένων από το μοντέλο SWAT, ημερήσιων παροχών και στερεοπαροχών σε διαφορετικές χρονικές περιόδους και σε διαφορετικές θέσεις ποταμού εντός της λεκάνης. Οι Remegio et al. (2007) χρησιμοποίησαν επίσης τον αλγόριθμο με το SWAT για την ταυτόχρονη βελτιστοποίηση 139 παραμέτρων του μοντέλου θέτοντας ως αντικρουόμενα κριτήρια τη σύγκλιση των υψηλών (αιχμές) και χαμηλών προσομοιωμένων παροχών με τις παρατηρημένες. Οι Dumedah et al. (2010) βελτιστοποίησαν τις παραμέτρους, επίσης του μοντέλου SWAT, με αντικρουόμενα κριτήρια όμως αυτή τη φορά δύο στατιστικούς δείκτες, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE) και την απόκλιση προσομοιωμένων και παρατηρημένων παροχών (bias). Οι Khu and Madsen (2005) και οι

Shafii and Smedt (2009) τέλος, χρησιμοποίησαν τον ΓΑ NSGA-II για τη βελτιστοποίηση των υδρολογικών μοντέλων MIKE-11 και WetSpa αντίστοιχα.

Ο εν λόγω αλγόριθμος έχει τύχει επίσης και ευρείας σύγκρισης ως προς την αποδοτικότητά του σε σχέση με άλλους ΓΑ. Οι Tang et al. (2006) συνέκριναν τον αλγόριθμο με άλλους δύο, ως προς την αποτελεσματικότητά του στην βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η μικρή παραλλαγή του NSGA-II που χρησιμοποίησαν αποδείχτηκε πολύ ισχυρό εργαλείο για την ικανοποίηση του σκοπού τους, αφού κατάφερε να προσεγγίσει με μεγάλη σχετικά ακρίβεια το ολικά βέλτιστο μέτωπο Pareto και μάλιστα σε πολύ μικρό χρόνο. Σε γενικές γραμμές αποδείχτηκε ως ο πιο ταχύς στη σύγκριση και το ίδιο ανταγωνιστικός με τον αλγόριθμο SPEA-II, που έχει αναφερθεί παραπάνω. Εξάλλου, ο ίδιος ο Deb στο άρθρο που περιγράφει τη δημιουργία του αλγόριθμου NSGA-II (Deb et al., 2002), τον συνέκρινε με τους αλγόριθμους PEAS και SPEA σε κυρτά, μη-κυρτά, μη κυρτά συνεχή και μη κυρτά ασυνεχή προβλήματα και διαπίστωσε ότι η αποδοτικότητά του ήταν η καλύτερη στα περισσότερα προβλήματα μιας και κατόρθωσε καλύτερα από τους άλλους αλγόριθμους να προσεγγίσει το ολικό μέτωπο Pareto με ομοιόμορφη διασπορά των λύσεων.

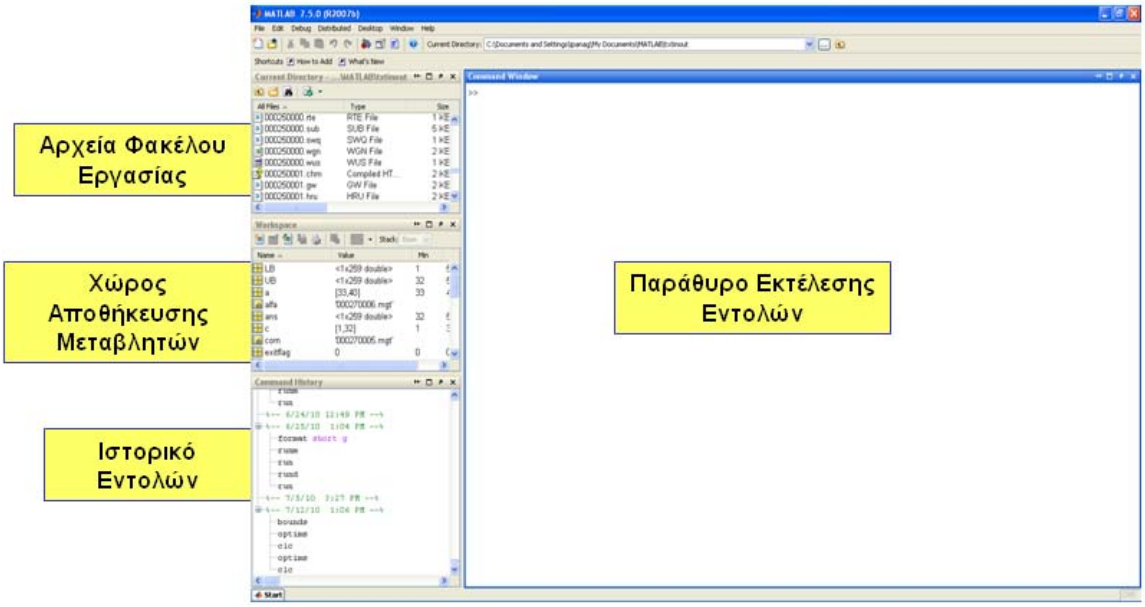
Άλλη περίπτωση χρήσης του αλγόριθμου NSGA-II είναι η βελτιστοποίηση της εφαρμογής ΔΠ σε λεκάνη απορροής, που άλλωστε επιχειρείται και στην παρούσα διατριβή.. Η πιο αντιπροσωπευτική και σύγχρονη εργασία στον τομέα αυτό είναι των Maringanti et al. (2009), οι οποίοι χρησιμοποίησαν τον αλγόριθμο σε συνδυασμό με το μοντέλο SWAT για να βρουν βέλτιστα συνδυαστικά σχήματα ΔΠ στο χώρο μιας λεκάνης απορροής στο Αρκάνσας των ΗΠΑ. Οι συγγραφείς έθεσαν ως αντικρουόμενους στόχους το κόστος εφαρμογής των ΔΠ με το ολικό φορτίο φερτών υλών, του ολικού P και του ολικού N που εισέρχεται στα επιφανειακά νερά από τις αγροτικές εκτάσεις και τους ανέλυσαν ανά δύο με διαμόρφωση του μετώπου Pareto. Ο ΓΑ NSGA-II αποδείχτηκε σε αυτήν την εργασία πολύ αποδοτικός, αφού τα μέτωπα συνέκλιναν στα ολικά βέλτιστα και η διασπορά των λύσεων πάνω σε αυτά ήταν ομοιόμορφη και ικανοποιητική παρέχοντας στους ερευνητές πλήθος από δυνατές επιλογές διαχειριστικών σχημάτων προς εφαρμογή.

5.4 Ο Γενετικός Αλγόριθμος του MATLAB

5.4.1 Γενικά για το MATLAB

Το MATLAB είναι λογισμικό υλοποίησης αλγόριθμων και διεξαγωγής υπολογισμών, που χαρακτηρίζεται από ένα πολύ φιλικό και εύχρηστο περιβάλλον εργασίας για αλληλεπίδραση με το χρήστη. Διαθέτει δική του γλώσσα προγραμματισμού με δυνατότητες

εξέλιξης στις απαιτήσεις κάθε χρήστη και περιλαμβάνει πλήθος βιβλιοθηκών συναρτήσεων και ειδικών εργαλείων (toolboxes). Οι εργαλειοθήκες αυτές είναι συναθροίσεις συναρτήσεων του MATLAB (M-files) που επεκτείνουν το περιβάλλον του προγράμματος σε λύσεις ειδικών προβλημάτων, μεταξύ αυτών και θεμάτων βελτιστοποίησης συναρτήσεων (μονό ή πολυκριτηριακής). Στο Σχήμα 5.10 παρουσιάζεται το περιβάλλον εργασίας του MATLAB που χωρίζεται σε τέσσερα βασικά μέρη: στο βασικό παράθυρο εργασίας προγραμματισμού ή εκτέλεσης εντολών (command window), στο χώρο όπου εκτίθενται όλα τα αρχεία του φακέλου στον οποίο ο χρήστης είναι συνδεδεμένος και απ' όπου πιθανά αντλεί αρχεία ή αποθηκεύει νέα (current directory), στο χώρο στον οποίο αποθηκεύονται όλες οι μεταβλητές που ο χρήστης ορίζει (workspace) και τέλος, στο χώρο όπου αποθηκεύεται όλο το ιστορικό εντολών της εφαρμογής (command history). Βασικό χαρακτηριστικό του MATLAB είναι ότι όλες οι μεταβλητές, είτε μοιάζουν, είτε όχι με αλγεβρικούς πίνακες, αποθηκεύονται, επεξεργάζονται και γενικότερα συμμετέχουν στις υπολογιστικές διαδικασίες ως τέτοιοι, εξ ου και η ονομασία του προγράμματος: 'Εργαστήριο Πινάκων', (MATrix LABoratory – MATLAB).

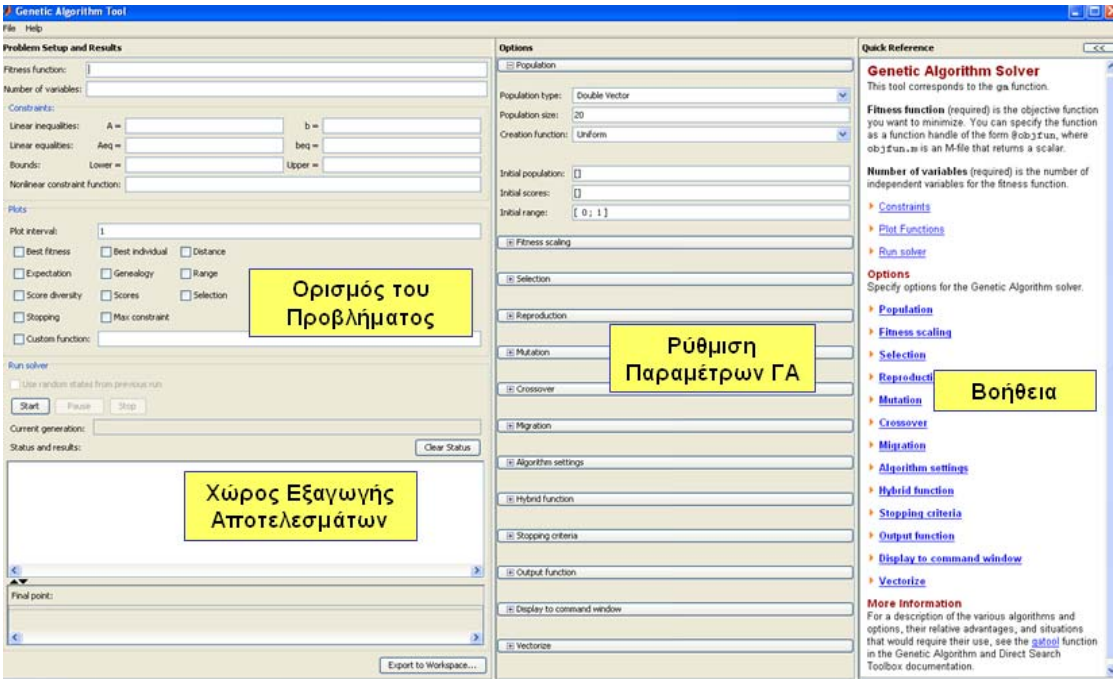


Σχήμα 5.10 Το περιβάλλον προγραμματισμού MATLAB.

5.4.2 Η εργαλειοθήκη του Γενετικού Αλγόριθμου

Το MATLAB διαθέτει μία σπουδαία εργαλειοθήκη για βελτιστοποίηση προβλημάτων, που στην έκδοση MATLAB R2007b ονομάζεται *Εργαλειοθήκη Γενετικού Αλγόριθμου και Άμεσης Αναζήτησης*, (Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox). Εκεί

ενσωματώνεται ένας ΓΑ, που πραγματοποιεί μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση μιας συνάρτησης, που ορίζεται από το χρήστη μαζί με τους πιθανούς περιορισμούς και τις επιλογές για τις παραμέτρους του ΓΑ. Στο Σχήμα 5.11 παρουσιάζεται η εργαλειοθήκη αυτή, που ανοίγει με την εντολή 'gatool' στο παράθυρο εντολών στο Σχήμα 5.10.



Σχήμα 5.11 Η εργαλειοθήκη του Γενετικού Αλγόριθμου στο MATLAB.

Στο Σχήμα 5.11 απεικονίζονται οι τέσσερις χώροι, που αποτελούν το περιβάλλον εργασίας για την αντιμετώπιση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης. Αριστερά ο χρήστης πρέπει να ορίσει τη συνάρτηση, η οποία θα πρέπει να έχει συνταχτεί και αποθηκευτεί ως M-file, τους γραμμικούς και μη γραμμικούς περιορισμούς καθώς και τα όρια των μεταβλητών. Στην κάτω αριστερά θέση ο αλγόριθμος εξάγει τα αποτελέσματα, δηλαδή τη βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και τις βέλτιστες τιμές των μεταβλητών. Στο κέντρο του παραθύρου επιτρέπεται να ρυθμιστούν οι παράμετροι του ΓΑ, όπως οι μέθοδοι διασταύρωσης, μετάλλαξης, επιλογής, που διατίθενται από το πρόγραμμα. Ο αρχικός πληθυσμός, ο αριθμός γενιών, τα κριτήρια τερματισμού, καθώς και άλλες ρυθμίσεις ορίζονται επίσης εδώ. Επεξηγήσεις και βοήθεια για τη λειτουργία του εργαλείου δίνονται δεξιά.

Ο ΓΑ πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης στο MATLAB αποτελεί μικρή παραλλαγή του ΓΑ NSGA-II (Deb et al., 2002), που βελτιστοποιεί ταυτόχρονα περισσότερα από ένα κριτήρια (Deb, 2001). Η δυνατότητα πολυκριτηριακής προσέγγισης με τον ΓΑ προστέθηκε στην εν λόγω εργαλειοθήκη με την διάθεση της έκδοσης R2007b του προγράμματος, που

άλλωστε χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία. Στην εργαλειοθήκη που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.11 ωστόσο, συμπεριλαμβάνονται μόνο οι επιλογές για ορισμό προβλήματος και παραμέτρων μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης. Η εντολή και οι παράμεροι ορισμού πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης δεν είχαν ενσωματωθεί σε αυτήν την έκδοση του MATLAB και γίνονται με απ' ευθείας εκτέλεση στο παράθυρο εντολών (Σχήμα 5.10), κάτι που παραπέμπει σε άμεσα προγραμματιστικό περιβάλλον και που άλλωστε προτιμάται στην παρούσα εργασία. Στις επόμενες εκδόσεις η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση ενσωματώθηκε και στο περιβάλλον εργασίας της εργαλειοθήκης του ΓΑ. Το γεγονός ότι σε αυτή τη διατριβή γίνεται αναφορά στην έκδοση R2007b έχει να κάνει με την έκδοση που χρησιμοποιήθηκε εξ αρχής και δεδομένου ότι οι επόμενες εκδόσεις δεν συμπεριέλαβαν κάποιες ουσιαστικές βελτιώσεις στη μαθηματική δομή του ΓΑ βελτιστοποίησης, επιλέχτηκε ως η χρησιμοποιούμενη έκδοση έως το πέρας της διατριβής. Τονίζεται ότι η δομή του αλγόριθμου όσον αφορά τις παραμέτρους του είναι ακριβώς η ίδια με την περίπτωση χρήσης του για μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση και οι επιλογές στο Σχήμα 5.11 αφορούν ακριβώς και προβλήματα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης. Για ιστορικούς λόγους αναφέρεται ότι στην έκδοση R2008a, το εργαλείο του ΓΑ ενσωματώθηκε στο ευρύτερο εργαλείο βελτιστοποίησης (optimization tool), με ενσωμάτωση και της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης στο γραφικό περιβάλλον εργασίας, ενώ πολύ πρόσφατα, στην έκδοση R2010a υπήρξε μία συνένωση όλων των αλγόριθμων βελτιστοποίησης στην *Εργαλειοθήκη Ολικής Βελτιστοποίησης* (Global Optimization Toolbox), χωρίς να γίνει καμία μεταβολή στη μαθηματική δομή του ΓΑ που να διαφοροποιεί τον τρόπο λειτουργίας του όπως αυτός διαμορφώνεται στην έκδοση R2007b (MATLAB, 2010a, 2010b).

Ο πολυκριτηριακός εκλεκτικός ΓΑ του MATLAB λοιπόν, δουλεύει με την εντολή 'gamultiobj' πάνω σε έναν πληθυσμό και χρησιμοποιεί τους γνωστούς γενετικούς τελεστές για την αναπαραγωγή του. Ο πληθυσμός ορίζεται ως ένα σύνολο σημείων στο συναρτησιακό χώρο, ενώ ο αρχικός πληθυσμός ορίζεται είτε από το χρήστη, είτε τυχαία. Στη δεύτερη περίπτωση ο αλγόριθμος γεννά με μία ομοιόμορφη κατανομή τον τυχαίο αρχικό πληθυσμό. Η επόμενη γενιά παράγεται με αξιολόγηση των σχέσεων μη κυριαρχίας και της διασποράς των λύσεων πάνω στο μέτωπο, που υπολογίζεται με την απόσταση συνωστισμού, όπως αναλυτικά έχει περιγραφεί στην ενότητα 5.3.4. Το δεύτερο αυτό κριτήριο επιτρέπει την επιλογή ατόμων από τον πληθυσμό, που ενδέχεται να έχουν ακόμα και ελαφρώς μικρότερη επίδοση. Στον ΓΑ του MATLAB έχει δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στη σημασία διατήρησης των λύσεων πάνω στο μέτωπο με ικανοποιητική διασπορά με ταυτόχρονο έλεγχο των καλύτερων ατόμων (elite) του πληθυσμού καθώς ο αλγόριθμος εξελίσσει τη διαδικασία. Το γεγονός ότι γίνεται κατάταξη των ατόμων με βάση τη σχέση μη κυριαρχίας καθιστά αυτόματη την εισαγωγή ελιτισμού χωρίς να είναι απαραίτητος ο ορισμός του αριθμού των καλύτερων ατόμων προς διατήρηση

στο νέο πληθυσμό, όπως συμβαίνει στην περίπτωση μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης. Ο χρήστης ορίζει δύο βασικές επιπλέον παραμέτρους που διαχωρίζουν την πολυκριτηριακή από την μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση. Πρόκειται για το χώρο στον οποίο ελέγχεται αυτή η διασπορά των λύσεων (χώρος αναζήτησης ή χώρος αποτίμησης – genotype ή phenotype space) και για το ποσοστό των ατόμων του πληθυσμού που κατά μέγιστο μπορούν σε κάθε γενιά να βρίσκονται στο πρώτο μη κυριαρχούμενο μέτωπο (Pareto Fraction). Με τις δύο αυτές παραμέτρους καθορίζεται εν μέρει η μορφή του μετώπου Pareto που εξάγεται από τον αλγόριθμο σε συνεχή χρόνο κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Γραμμικοί περιορισμοί καθώς και όρια διακύμανσης για τις μεταβλητές απόφασης είναι ακόμα δυνατόν να ορίζονται, ενώ μη γραμμικοί περιορισμοί υφίστανται μόνο στη μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση. Ο ΓΑ του MATLAB είναι ικανός να δώσει λύσεις σε ομαλά και μη ομαλά προβλήματα βελτιστοποίησης με μη κυρτές συνεχείς ή μη συναρτήσεις (MATLAB, 2010a).

Όπως κάθε ΓΑ, έτσι και ο ΓΑ του MATLAB ακολουθεί τα γνωστά βήματα για την ολοκλήρωση της διαδικασίας βελτιστοποίησης, δηλαδή: αξιολόγηση ατόμων πληθυσμού με βάση το μέτρο επίδοσης, διαβάθμιση καταλληλότητας ατόμων, επιλογή ατόμων (γονέων), αναπαραγωγή πληθυσμού μέσω ελιτισμού, διασταύρωσης και μετάλλαξης, τερματισμός διαδικασίας όταν κάποιο κριτήριο ικανοποιηθεί. Στο σημείο αυτό περιγράφονται οι δυνατότητες του ΓΑ του MATLAB ως προς την πραγματοποίηση των παραπάνω βημάτων.

Ύστερα από την αξιολόγηση των ατόμων (individuals) με βάση το μέτρο επίδοσης, ο ΓΑ κάνει μία διαβάθμιση καταλληλότητας αυτών. Η συνάρτηση 'Fitness Scaling' μετατρέπει τις βαθμολογίες επίδοσης των ατόμων σε μία σειρά κατάλληλη για τη συνάρτηση επιλογής. Στην εργαλειοθήκη διατίθενται, μεταξύ άλλων, οι συναρτήσεις 'Rank' και 'Proportional'. Η συνάρτηση 'Rank' διαβαθμίζει τις βαθμολογίες επίδοσης με βάση τον ιεραρχικό βαθμό κάθε ατόμου και όχι με τη βαθμολογία αυτή καθεαυτή. Ως ιεραρχικός βαθμός ορίζεται η θέση του ατόμου στην κατάταξη των βαθμολογιών και για το πιο κατάλληλο άτομο είναι 1, για το δεύτερο 2 κοκ. Στην περίπτωση της αναλογικής (Proportional) κατάταξης, το κάθε άτομο διαβαθμίζεται αναλογικά με την επίδοσή του (MATLAB, 2010a).

Η επιλογή των ατόμων που ακολουθεί, βασίζεται επίσης σε διάφορες συναρτήσεις. Οι πιο δόκιμες με βάση πειραματισμό σε απλά και πιο σύνθετα προβλήματα είναι η 'στοχαστικά ομοιόμορφη' (stochastic uniform), η επιλογή του 'τροχού της ρουλέτας' (roulette wheel) και η 'επιλογή τουρνουά' (tournament selection). Στην πρώτη περίπτωση το κάθε άτομο-γονέας αντιστοιχεί σε τμήμα μιας γραμμής ανάλογο της διαβαθμισμένης τιμής του. Ο αλγόριθμος προχωράει σε ίσα τμήματα πάνω στη γραμμή και σε κάθε στάση επιλέγει έναν γονέα. Κατά συνέπεια οι γονείς που αντιστοιχούν σε μεγάλο μήκος θα επιλεχθούν και περισσότερες φορές. Η δεύτερη περίπτωση, της ρουλέτας, επιλέγει το άτομο-γονέα με βάση τυχαίες δειγματοληψίες που φυσικά ευνοούν την επιλογή ατόμων με μεγάλο μερίδιο

κατάληψης της επιφάνειάς της. Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί έναν τυχαίο αριθμό για να επιλέξει κάποιο τμήμα της ρουλέτας με πιθανότητα που είναι ανάλογη της έκτασής του (βλ. και Σχήμα 5.4). Τέλος, στην τρίτη περίπτωση παίζονται τουρνουά, δηλαδή γίνεται σύγκριση μεταξύ δύο κατ' ελάχιστον τυχαία επιλεγμένων μελών και η καλύτερη λύση εισάγεται αυτομάτως στον πληθυσμό. Αν δύο άτομα επιλεχθούν για σύγκριση δύο φορές τότε η καλύτερη λύση θα κερδίσει και τις δυο φορές οπότε θα έχει δυο αντίγραφα στο νέο πληθυσμό, ενώ η χειρότερη θα χάσει και τις δύο και δε θα έχει κανένα αντίγραφο. Ο αλγόριθμος του MATLAB έχει ως αρχική ρύθμιση τη σύγκριση τεσσάρων ατόμων για την επιλογή του καλύτερου (MATLAB, 2010a).

Ο ΓΑ περιλαμβάνει αρκετούς τρόπους διασταύρωσης. Πρόκειται για την 'τυχαία' (scattered), την 'μονού' και 'διπλού σημείου' (one και two-point crossover), την 'ενδιάμεση' (intermediate), την 'ευρετική' (heuristic) και την 'αριθμητική' (arithmentic) διασταύρωση. Μεγάλη αποτελεσματικότητα έχει βρεθεί από προσωπική ανάλυση ευαισθησίας του συγγραφέα με πειραματισμό σε διάφορα προβλήματα ότι έχει η πρώτη. Σύμφωνα με αυτή, δημιουργείται ένα δυαδικό διάνυσμα με μήκος ίσο με το μήκος των ατόμων του πληθυσμού. Για τις θέσεις του δυαδικού διανύσματος που υπάρχει η τιμή 1 επιλέγονται τα γονίδια του πρώτου γονέα, ενώ για εκείνες που είναι 0 τα γονίδια του δεύτερου, ώστε με ανάμιξη να προκύπτει ένα νέο άτομο (απόγονος). Πρόκειται δηλαδή για μία τυχαία εντελώς μίξη των γονιδίων δύο ατόμων. Οι διασταυρώσεις μονού και διπλού σημείου αφορούν σε μονή ή διπλή μίξη γονοτύπων μεταξύ δύο ατόμων (βλ. Σχήμα 5.6), ενώ η ενδιάμεση χρησιμοποιεί τα αντίστοιχα γονίδια δύο ατόμων αφού τους αποδοθούν βάρη για να δημιουργήσει ένα νέο γονότυπο. Στην αριθμητική διασταύρωση τα γονίδια του απογόνου προκύπτουν ως βαρυκεντρικοί μέσοι όροι των τιμών των γονιδίων δύο επιλεγμένων γονέων, με σεβασμό στους περιορισμούς, ενώ στην ευρετική διασταύρωση τα γονίδια του απογόνου προκύπτουν με βάση τα γονίδια των δύο γονέων αλλά βρίσκονται πιο κοντά στα γονίδια του γονέα με τη μεγαλύτερη επίδοση, σε βαθμό που έμμεσα καθορίζεται από το χρήστη. Ο ΓΑ απαιτεί τέλος, ανεξαρτήτως της μεθόδου διασταύρωσης, τον ορισμό του ποσοστού διασταύρωσης ως τιμή μεταξύ του 0 και του 1 (MATLAB, 2010a).

Η διαδικασία της μετάλλαξης αποτελεί το τελευταίο στάδιο δημιουργίας του νέου πληθυσμού. Οι δύο βασικοί τρόποι μετάλλαξης στον ΓΑ του MATLAB είναι η 'Γκαουσσιανή' (Gaussian) ή κανονικά κατανεμημένη μετάλλαξη και η 'Ομοιόμορφη' (Uniform). Στην πρώτη, η ποσότητα μετάλλαξης καθορίζεται με βάση δύο παραμέτρους, της *συρρίκνωσης* (shrink) και της *κλίμακας* (scale). Ο βαθμός μετάλλαξης του πληθυσμού είναι ανάλογος της διασποράς μιας κανονικής κατανομής αριθμών με μέση τιμή μηδέν, η οποία μειώνεται γραμμικά με το πέρας των γενιών και στο τέλος της διαδικασίας ισούται με (1-shrink) φορές την τιμή της κατά την έναρξη της διαδικασίας. Οι τυχαίοι αριθμοί που

παράγονται προστίθενται στα γονίδια των ατόμων προς μετάλλαξη. Η παράμετρος κλίμακας (scale) καθορίζει τη διασπορά (var) κατά τη δημιουργία της πρώτης γενιάς με βάση τη σχέση: scale × (v(2) - v(1)), όπου v(2) και v(1) το ανώτατο και κατώτατο όριο τιμών που λαμβάνει μία μεταβλητή (γονίδιο), όπως έχει οριστεί στο αρχικό εύρος διακύμανσης. Η παράμετρος συρρίκνωσης (shrink) καθορίζει το πόσο αυτή η διασπορά μειώνεται με το πέρασμα *k* γενιών:

$$\mathrm{var}_k = \mathrm{var}_{k-1}\left(1 - shrink\frac{k}{generations}\right) \tag{5.3}$$

Στην ανωτέρω εξίσωση, αν η παράμετρος shrink λάβει τιμή πολύ κοντά στο 1, τότε με το πέρας της διαδικασίας δηλαδή μετά από τη δημιουργία του μέγιστου αριθμού γενιών (*generations*), η διασπορά θα είναι μηδενική. Αντίθετα, τιμή 0 δημιουργεί τελική διασπορά ίση με την αρχική. Τα παραπάνω έχουν το εξής νόημα: μικρή τιμή της παραμέτρου shrink σημαίνει μεγάλη διασπορά, άρα σημαντική μετάλλαξη στον πληθυσμό με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγάλη ποικιλία ατόμων στην τελευταία γενιά. Αντίθετα, μεγάλη τιμή της παραμέτρου σημαίνει μικρή διασπορά κατά την τελευταία γενιά δηλαδή μικρή ποικιλότητα στον τελικό πληθυσμό, ο οποίος τείνει να περιλαμβάνει άτομα με παραπλήσιο γονότυπο. Θεμιτό είναι η τιμή της παραμέτρου shrink να είναι κάπως ενδιάμεση, δηλαδή να επιτρέπει την εξερεύνηση σημαντικού μέρους του χώρου αναζήτησης, ακόμα και στην τελευταία γενιά, αλλά από την άλλη αυτό να μη γίνεται ανεξέλεγκτα ώστε να μην υπεισέρχεται απόλυτη τυχαιότητα στη διαδικασία (σημαντική μετάλλαξη). Το πώς επηρεάζει τη σύγκλιση του μετώπου με το ολικά βέλτιστο στο εκάστοτε πρόβλημα αυτός ο τρόπος μετάλλαξης είναι κάτι που πάντα διαπιστώνεται μέσω δοκιμών για τις παραμέτρους του. Η δεύτερη μέθοδος, της ομοιόμορφης μετάλλαξης, είναι μία διαδικασία δύο βημάτων. Αρχικά, ο αλγόριθμος διαλέγει ένα ποσοστό του διανύσματος εισόδου ενός ατόμου για μετάλλαξη, όπου κάθε στοιχείο του διανύσματος έχει μία συγκεκριμένη πιθανότητα να μεταλλαχθεί. Η πιθανότητα μετάλλαξης (mutation rate), *pm*, με βάση την αρχική ρύθμιση, έχει τιμή 0,01. Στο δεύτερο βήμα, ο αλγόριθμος αντικαθιστά κάθε επιλεγμένο γονίδιο με έναν τυχαίο αριθμό που επιλέγεται ομοιόμορφα από τα όρια διακύμανσης της συγκεκριμένης μεταβλητής (MATLAB, 2010a).

Ο τερματισμός του ΓΑ του MATLAB γίνεται με βάση κάποιο κριτήριο που ορίζει ο χρήστης. Οι διαθέσιμες επιλογές είναι η συμπλήρωση κάποιου μέγιστου χρόνου τρεξίματος του αλγόριθμου, η συμπλήρωση του μέγιστου παραγόμενου αριθμού γενιών, η προσέγγιση τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης ίση με μία ελάχιστη τιμή που έχει οριστεί, η μικρότερη μεταβολή στη μέση τιμή ή στην αθροιστική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης σε σχέση με το όριο που έχει τεθεί για συγκεκριμένο αριθμό γενιών, και ακόμα, η έλλειψη βελτίωσης της

αντικειμενικής συνάρτησης μετά από παρέλευση συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος. Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα ο ΓΑ να συνδυαστεί με μία υβριδική συνάρτηση δηλαδή μετά το πέρας της βελτιστοποίησης από τον ΓΑ, να τρέξει μια συνάρτηση με σκοπό την τοπική αναζήτηση και ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής ή αντικειμενικών συναρτήσεων (MATLAB, 2010a).

Σε γενικές γραμμές κρίνεται ότι ο ΓΑ του MATLAB είναι ένα ολοκληρωμένο εργαλείο βελτιστοποίησης είτε ενός, είτε παραπάνω κριτηρίων, ενώ προσφέρεται πλήθος επιλογών για τη βελτίωση της αποδοτικότητάς του στο εκάστοτε πρόβλημα. Ο καλύτερος συνδυασμός τελεστών και παραμέτρων βρίσκεται συνήθως μέσω πολυάριθμων εκτελέσεων. Περισσότερες λεπτομέρειες για τη δομή του ΓΑ του MATLAB και των συναρτήσεων που χρησιμεύουν στις διάφορες διαδικασίες μπορούν να βρεθούν στο εγχειρίδιο χρήσης (MATLAB, 2010a).

5.5 Λήψη αποφάσεων για τον περιορισμό της ρύπανσης των υδάτων από θρεπτικά

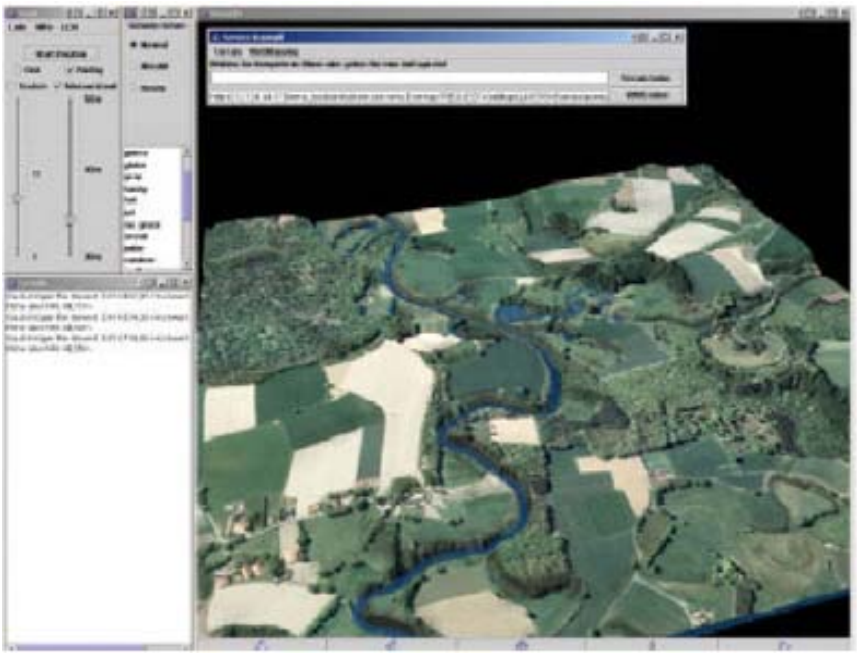
5.5.1 Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων

Η Οδηγία-Πλαίσιο 2000/60 για τα νερά θέτει πλέον μεγάλες προκλήσεις στους ερευνητές και στους διαχειριστές του νερού όσον αφορά την ανάπτυξη ΣΓΠ που ενσωματώνουν μοντέλα και άλλα εργαλεία για την ανάλυση, ερμηνεία και παρουσίαση ζητημάτων σχετικά με τους υδατικούς πόρους (Volk et al., 2008). Είναι προφανές ότι η λήψη μιας απόφασης σχετικά με ένα περιβαλλοντικό θέμα εξαρτάται από το συνυπολογισμό πολλών επιμέρους συνιστωσών (οικονομικών, κοινωνικών κλπ.) και είναι συνυφασμένη με εφαρμογή μεθόδων βελτιστοποίησης που εξυπηρετούν στην εύρεση πολλαπλών εφικτών και ικανοποιητικών λύσεων. Από τη χρήση και λειτουργία των *Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων* (ΣΥΑ) προκύπτει ότι η τελική επιλογή και υλοποίηση αποφάσεων επιτυγχάνονται με συλλογή και συναξιολόγηση πληροφοριών, με διατύπωση εναλλακτικών προτάσεων και με τον υπολογισμό των επιπτώσεων των εναλλακτικών σεναρίων. Όλα τα ανωτέρω επιτυγχάνονται στις μέρες μας με χρήση σύγχρονων τεχνολογιών ώστε τελικά ή έννοια του ΣΥΑ (Decision Support System - DSS) να ταυτίζεται με ένα αλληλεπιδραστικό λογισμικό (software-based) σύστημα, πολλές φορές συνδεδεμένο στο διαδίκτυο, που σκοπεύει να βοηθήσει αυτούς που λαμβάνουν τις αποφάσεις στη συλλογή χρήσιμων πληροφοριών από ένα συνδυασμό ακατέργαστων δεδομένων και προσωπικών γνώσεων ή μοντέλων, έτσι ώστε να αναγνωριστούν, να λυθούν προβλήματα και να παρθούν αποφάσεις (Power, 1997). Ένα τέτοιο σύστημα που έχει να κάνει με αποφάσεις στο χώρο μιας γεωγραφικής έκτασης ονομάζεται *Σύστημα Υποστήριξης Αποφάσεων στο Χώρο* (Spatial

Decision Support System - SDSS), (Makropoulos and Butler, 2005b· Makropoulos et al., 2003).

Θα μπορούσε εξαρχής να θεωρηθεί ότι ένα *Εργαλείο Υποστήριξης Αποφάσεων* (ΕΥΑ) στο γεωγραφικό χώρο λεκάνης απορροής με στόχο τον περιορισμό της ρύπανσης των υδάτων από θρεπτικά στοιχεία πρέπει να αποτελείται από μία βάση δεδομένων συνεχούς ανανέωσης με όλα τα απαραίτητα δεδομένα πεδίου (φυσικά, οικονομικά κ.α) για ένα πλήθος από εναλλακτικά μέτρα διαχείρισης (ΔΠ), ένα ή περισσότερα μοντέλα λεκάνης απορροής που προσομοιώνουν την ποσότητα και ποιότητα του νερού και ένα οικονομικό μοντέλο που είναι ικανό να κοστολογήσει τα εναλλακτικά αυτά σενάρια διαχείρισης. Η ενσωμάτωση των ανωτέρω σε περιβάλλον ΣΓΠ επιτρέπει την απεικόνιση της λεκάνης απορροής και των χαρακτηριστικών της και καθιστά την εφαρμογή ένα ΕΥΑ στο χώρο, ενώ στην ιδανική περίπτωση που έχει δημιουργηθεί ειδικό περιβάλλον εργασίας και ανάπτυξη λογισμικού, όπου όλα τα στοιχεία του ΕΥΑ αλληλεπιδρούν με ένα φιλικό για το χρήστη τρόπο, τότε μιλάμε για ένα ολοκληρωμένο ΣΥΑ στο γεωγραφικό χώρο λεκάνης απορροής.

Ένα τέτοιο Σύστημα είναι αυτό που προσφάτως δημιουργήθηκε στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού προγράμματος FLUMAGIS στη Γερμανία με σκοπό να σταθεί αρωγός στην εφαρμογή της Ευρωπαϊκής Οδηγίας (Volk et al., 2007· 2008). Στα πλαίσια αυτού του προγράμματος, υδρολογικά, οικονομικά και οικολογικά μοντέλα ενσωματώθηκαν σε μία εφαρμογή τρισδιάστατης απεικόνισης ΣΓΠ, πολύ φιλικής στο χρήστη (Σχήμα 5.12), ώστε διάφορα σενάρια αλλαγής χρήσης γης να μπορούν να αξιολογηθούν ως προς τις περιβαλλοντικές και κοινωνικοοικονομικές τους συνέπειες.



Σχήμα 5.12 Το περιβάλλον εργασίας του ΣΥΑ FLUMAGIS (πηγή: Volk et al., 2007).

Ωστόσο, στο εν λόγω ΣΥΑ, οι διάφοροι αντικρουόμενοι στόχοι δεν προβάλλονται μέσω καμπυλών αντιστάθμισης, ως προϊόν πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης και η τελική απόφαση διαχείρισης υποστηρίζεται μέσω της εμπειρικής αξιολόγησης των επιμέρους στόχων, εκ των προτέρων και με βάση την ικανότητα και την εμπειρία του μελετητή.

Ένα επίσης σύγχρονο ΣΥΑ με χρήση στην Ευρώπη είναι το 'Elbe-DSS', που περιγράφεται από τους Graf et al. (2009) και αναπτύχτηκε αποκλειστικά για τη διαχείριση της λεκάνης απορροής του ποταμού Elbe. Το εν λόγω ΣΥΑ ενδείκνυται επίσης περισσότερο για μεγάλες λεκάνες απορροής ή για Υδατικά Διαμερίσματα παρέχοντας πληροφορία για διαχείριση σε μεγάλη κλίμακα. Είναι αξιοσημείωτο ότι οι συγγραφείς κάνουν λόγο για εμπόδια στη διαδικασία υποστήριξης αποφάσεων που πηγάζουν από προβλήματα στη συνεργασία των ρουτινών και μοντέλων, που οφείλονται είτε σε διαφορές στον εννοιολογικό σχεδιασμό τους, είτε στην διαφορετική προσαρμοστικότητά τους σε διάφορες χωρικές κλίμακες. Τέλος, αξίζει η αναφορά για τον Ευρωπαϊκό χώρο στο γενικό πλαίσιο διαχείρισης που προτείνει η ολοκληρωμένη εφαρμογή λογισμικού SEAMLESS-IF, που δημιουργήθηκε στα πλαίσια του ομώνυμου ευρωπαϊκού προγράμματος (Ittersum et al., 2008). Το ΣΥΑ αυτό παρέχει τη δυνατότητα εκτίμησης πλήθους εναλλακτικών σεναρίων διαχείρισης της αγροτικής γης σε μεγάλο εύρος χωρικών κλιμάκων. Ωστόσο, δεν ενσωματώνονται ούτε σε αυτό το αναπτυχθέν λογισμικό εξελικτικές στρατηγικές πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης για την αξιολόγηση αντικρουόμενων στόχων, που γίνεται περισσότερο εμπειρικά.

Στην Αμερικανική Ήπειρο το ΣΥΑ CRP-DSS δημιουργήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος διατήρησης αποθεμάτων (Conservation Reserve Program - CRP) από την Υπηρεσία Αγροτικών Ερευνών των ΗΠΑ (USDA) για να συμβουλεύει τον αγροτικό πληθυσμό στην υιοθέτηση και εφαρμογή εναλλακτικών ΔΠ (Rao et al., 2007). Πρόκειται για ένα επίσης βασισμένο σε ΣΓΠ περιβάλλον εργασίας με ανάπτυξη του ειδικού λογισμικού AFIRS (Automated Feature Information Retrieval System), που επιτρέπει την διαδραστική επαφή του χρήστη με τη λεκάνη απορροής και υποπεριοχές της. Καινοτομεί στο ότι είναι ελεύθερα διαθέσιμο μέσω του διαδικτύου, οι βάσεις δεδομένων του ανανεώνονται σε πραγματικό χρόνο με νέα δεδομένα και διευκολύνει τους διαχειριστές λεκανών απορροής στο να αναπροσαρμόζουν τα σχέδιά τους με συνεχή συνυπολογισμό στοιχείων και για απομακρυσμένες περιοχές. Βασικό του επίσης χαρακτηριστικό είναι ότι ενσωματώνει το μοντέλο SWAT, το οποίο ο χρήστης μπορεί να 'εκτελέσει' μέσω του ολοκληρωμένου αυτού συστήματος διερευνώντας πολλαπλά σενάρια διαχείρισης. Εξάλλου, ένα από τα πρώτα ΣΥΑ με δικτυακή διαδραστικότητα, που δημιουργήθηκαν στις ΗΠΑ ήταν για λογαριασμό της Υπηρεσίας Περιβάλλοντος της Αμερικής (USEPA) το WATERSHEDSS (WATER, Soil, and Hydro-Environmental Decision Support System) με σκοπό να παρέχει μέσω ΣΓΠ την

απαραίτητη πληροφορία για την περιβαλλοντική κατάσταση των υδάτων σε λεκάνη απορροής και κατ' επέκταση να βοηθήσει του λαμβάνοντες τις αποφάσεις στην υιοθέτηση ορθών ΔΠ (Osmond et al., 1997).

5.5.2 Υποστήριξη αποφάσεων για την εφαρμογή Διαχειριστικών Πρακτικών σε λεκάνη απορροής

Τα ΣΥΑ για τα οποία έγινε μνεία στην προηγούμενη ενότητα αναφέρονται σε ολοκληρωμένα εργαλεία, που τα επιμέρους στοιχεία τους συνθέτονται σε ένα ενιαίο περιβάλλον εργασίας. Στις εφαρμογές αυτές, για τη λήψη απόφασης, τα αντικρουόμενα κριτήρια δεν υπεισέρχονται στις εκτιμήσεις με κάποιο αυτόματο αλγοριθμικό σχήμα, αλλά περισσότερο συνυπολογίζονται από το μελετητή με βάση την εμπειρία και την κρίση του που διαμορφώνεται από την πληροφορία που το Σύστημα του παρέχει. Κατά συνέπεια, τα ΣΥΑ αυτά χρησιμεύουν ως επιστημονικά εργαλεία, περισσότερο για εκτεταμένη παρέμβαση σε τμήματα της αγροτικής γης και όχι για εύρεση των βέλτιστων συνδυασμών επιλογής και τοποθέτησης ΔΠ σε εκατοντάδες ομοιογενείς αγροτικές εκτάσεις (ΥΜ) λεκάνης απορροής. Γι' αυτό άλλωστε ενδείκνυνται και περισσότερο για χρήση σε μεγάλες λεκάνες απορροής που προσομοιάζουν με τα Υδατικά Διαμερίσματα. Αντίθετα, αυτό που ενδιαφέρει την παρούσα διατριβή είναι η λήψη αποφάσεων αποκλειστικά μέσω βελτιστοποίησης, κατά προτίμηση πολυκριτηριακής, δηλαδή μέσω ανάγνωσης των βέλτιστων λύσεων από τις καμπύλες αντιστάθμισης των αντικρουόμενων στόχων και μάλιστα δίχως καμία εκ των προτέρων εμπειρική εγκαθίδρυση κανόνων εξερεύνησης ή επιλογής λύσεων. Η χωρική κλίμακα μελέτης προσδοκάται επίσης να είναι η λεκάνη απορροής οποιουδήποτε μεγέθους (μικρού, μέσου ή μεγάλου). Με βάση τα ευρήματα της βιβλιογραφίας, η προσέγγιση του προβλήματος αυτού γίνεται σήμερα με χρήση εξελικτικών στρατηγικών αναζήτησης λύσεων, ενώ τα ΕΥΑ που αναπτύσσονται, δεν έχουν τύχει ενσωμάτωσης σε ολοκληρωμένα λογισμικά, ώστε να αποτελούν συνιστώσες κάποιων ΣΥΑ.

Στην ενότητα αυτή γίνεται επομένως μία σύντομη ανασκόπηση εργασιών που αναπτύσσουν μεθοδολογίες υποστήριξης αποφάσεων, σπάνια μετουσιωμένες σε ολοκληρωμένο και ενιαίο λογισμικό, για την επιλογή και τοποθέτηση αγροτικών ΔΠ στο χώρο λεκάνης απορροής με σκοπό τη μείωση του φορτίου φερτών υλών, ενώσεων Ν ή ενώσεων Ρ στα νερά. Οι εν λόγω μεθοδολογίες, που φυσικά παρουσιάζουν κοινά στοιχεία με τη μεθοδολογία που αναπτύσσεται στην παρούσα εργασία, βασίζονται σε ένα αλγοριθμικό σχήμα βελτιστοποίησης κριτηρίων μέσω κατανομής ΔΠ στο χώρο, ώστε: είτε να μειώνουν το ρυπαντικό φορτίο στα επιφανειακά νερά με δεδομένο αποδεκτό κόστος, είτε να ελαχιστοποιούν το κόστος με δεδομένο ανώτατο επιτρεπτό ρυπαντικό φορτίο, είτε τέλος, να

ελαχιστοποιούν ταυτόχρονα δύο ή παραπάνω κριτήρια. Η τελευταία περίπτωση αποτελεί ένα πρόβλημα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης που οδηγεί σε πλήθος βέλτιστων λύσεων, δηλαδή διαφόρων συνδυασμών ΔΠ στο χώρο λεκάνης απορροής, ώστε εκεί να απαιτηθεί η κρίση του ερευνητή για το ποια λύση τελικά θα επιλεχθεί.

Τονίζεται ωστόσο, ότι από τις πιο πρόσφατες και αντιπροσωπευτικές εργασίες που επιλέχθηκαν να περιγραφούν πιο κάτω υπάρχει μόνο μία που εξετάζει βελτιστοποίηση περισσοτέρων των δύο κριτηρίων, κάτι που γενικότερα απαντάται σπάνια στη βιβλιογραφία. Αυτό ερμηνεύεται από το γεγονός ότι οι περιβαλλοντικοί στόχοι μείωσης φερτών, N και P στα επιφανειακά νερά είναι συνήθως ελαφρά αντικρουόμενοι μιας και οι ΔΠ κατορθώνουν να μειώσουν όλους αυτούς τους ρύπους ταυτόχρονα (αν και σε διαφορετικό βαθμό). Σε συνδυασμό με το γεγονός ότι σχεδόν πάντα σε μία λεκάνη απορροής, υπάρχει αυξημένο ενδιαφέρον για κάποιο ρύπο έναντι των άλλων, φαίνεται ότι δεν κατέστη τελικά υψηλός ο προβληματισμός των ερευνητών για ταυτόχρονη βελτιστοποίηση κόστους και πολλών διαφορετικών ρύπων. Είναι αλήθεια όμως ότι το κόστος εφαρμογής είναι το πλέον αντικρουόμενο κριτήριο στη μείωση του φορτίου ενός ρύπου και η έρευνα αποκτά επιχειρησιακό χαρακτήρα όταν ενσωματώνεται αυτή πρωταρχικά η συνιστώσα στην ανάλυση. Τέλος, προκαλεί μεγάλη εντύπωση το γεγονός ότι απουσιάζει από την παρακάτω περιγραφή κάποια εργασία που να έχει γίνει στον Ευρωπαϊκό χώρο ή να αναφέρεται σε λεκάνη απορροής κάποιου Ευρωπαϊκού κράτους. Αυτό προκαλεί αίσθηση, αποδεικνύοντας σε ένα βαθμό την πρωτοπορία των ΗΠΑ σε θέματα περιβαλλοντικής διαχείρισης αλλά και αξιοποίησης των νέων τεχνολογιών σε αυτή.

Ξεκινώντας την ανασκόπηση αναφέρεται ότι η λήψη αποφάσεων σε ένα τέτοιο πρόβλημα απαιτεί τη χρήση ενός εκτιμητή ρυπαντικού φορτίου στα επιφανειακά νερά λεκάνης απορροής κάτω από τις συμβατικές και εναλλακτικές πρακτικές διαχείρισης (συνήθως πρόκειται για ένα μοντέλο), ενός οικονομικού μοντέλου ή μιας βάσης δεδομένων με οικονομικά στοιχεία για την κοστολόγηση των ΔΠ και τέλος, ενός αλγόριθμου (σχεδόν πάντα ΓΑ), που χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση. Οι ομοιογενείς γεωγραφικές περιοχές προς διαχείριση (ΥΜ) αποτελούν τις μεταβλητές απόφασης που λαμβάνουν τιμές (αλληλόμορφα), είτε του δυαδικού συστήματος, είτε πραγματικές, ανάλογα με το πως ο κάθε ερευνητής επιθυμεί και εξυπηρετείται να εκφράσει τις ΔΠ που οι ΥΜ φιλοξενούν. Ένα χρωμόσωμα, δηλαδή η αναπαράσταση ενός ατόμου του πληθυσμού σε έναν ΓΑ έχει μήκος σε αυτήν την περίπτωση ίσο με τον αριθμό των ΥΜ της λεκάνης απορροής.

Οι Muleta and Nicklow (2002) ανέπτυξαν ένα ΕΥΑ για την εφαρμογή μέτρων κατά της διάβρωσης λεκάνης απορροής. Ως μοντέλο εκτίμησης των μη-σημειακών φορτίσεων σε φερτές ύλες χρησιμοποίησαν το SWAT, ενώ οι ΔΠ που δοκίμασαν ήταν η κατάργηση της άροσης ή η συντηρητική άροση σε όλες τις καλλιέργειες της λεκάνης Big Creek (133km^2)

στην Πολιτεία Illinois των ΗΠΑ. Η οικονομική πτυχή του προβλήματος βελτιστοποίησης ελήφθη υπόψη με ενσωμάτωση του καθαρού συνολικού κέρδους του αγροτικού πληθυσμού που προέκυπτε κάθε φορά από την εφαρμογή ΔΠ σε όλη τη λεκάνη. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκε για την ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση φορτίου στερεοαπορροής και μεγιστοποίησης κέρδους ήταν ο ΓΑ SPEA. Τελικά, οι συγγραφείς κατέληξαν σε ένα μέτωπο Pareto με λίγες λύσεις ή συνδυασμούς ΔΠ με συγκεκριμένο περιβαλλοντικό και οικονομικό όφελος. Το γεγονός ότι για κάθε αξιολόγηση μιας λύσης (άτομο του πληθυσμού) ήταν απαραίτητο να εκτελείται το μοντέλο SWAT κατέστησε τη διαδικασία χρονοβόρα (διήρκησε περίπου 63 ώρες), ενώ αυτός ήταν και ο λόγος που επιλέχθηκε μικρός πληθυσμός (100) εξ ου και ο μικρός αριθμός βέλτιστων λύσεων Pareto. Οι ίδιοι συγγραφείς δημοσιεύουν τρία χρόνια αργότερα μία νεότερη και βελτιωμένη έκδοση της αναπτυχθείσας μεθοδολογίας τους (Muleta and Nicklow, 2005), όπου έχουν προσθέσει αυτόματη βαθμονόμηση του SWAT με ΓΑ στην ίδια λεκάνη καθώς και την αντικατάσταση του μοντέλου από ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο. Η μίμηση του μοντέλου από το τελευταίο κατόρθωσε να μειώσει το χρόνο υλοποίησης της διαδικασίας κατά 84% καταδεικνύοντας πόσο χρονοβόρα είναι η συμμετοχή ενός μοντέλου προσομοίωσης διαδικασιών στη διαδικασία βελτιστοποίησης. Τέλος, οι Bekele and Nicklow (2005) την ίδια χρονιά δημοσιεύουν μία ακόμα εργασία στην εν λόγω λεκάνη με μεγάλη καινοτομία αυτή τη φορά την πολυκριτηριακή ανάλυση σε επίπεδο ΥΜ, δηλαδή με δημιουργία Pareto βέλτιστων λύσεων και μετώπων για κάθε ομοιογενή γεωγραφική περιοχή. Στην ουσία οι συγγραφείς έφτιαξαν 76 τέτοια μέτωπα, ένα για κάθε ΥΜ της λεκάνης αφού ως κριτήρια βελτιστοποίησης τέθηκαν κάθε φορά η απώλεια εδάφους από την εκάστοτε ΥΜ και το κόστος εφαρμογής της κάθε ΔΠ σε αυτό. Για να υπάρχουν αρκετά σημεία στο μη-κυριαρχούμενο μέτωπο σε αυτήν την περίπτωση πρέπει ο αριθμός των ΔΠ που είναι εφικτό να εφαρμόζονται σε κάθε ΥΜ να είναι μεγάλος. Η ανάλυση έγινε αυτή τη φορά με τον βελτιωμένο ΓΑ SPEA-II.

Οι Gitau et al. (2006) ανέπτυξαν από την πλευρά τους ένα διαφορετικής δομής ΕΥΑ δεδομένου ότι δε χρειαζόταν να τρέξει κάποιο μοντέλο κάθε φορά για να εκτιμηθεί η περιβαλλοντική αποτελεσματικότητα των ΔΠ στη λεκάνη Town Brook των ΗΠΑ. Αυτό αποφεύχθηκε διότι δημιούργησαν μία βάση δεδομένων που περιείχε συντελεστές μείωσης φορτίου P από εδάφη διαφορετικής σύστασης και κλίσης. Το περιεχόμενο της βάσης αυτής συλλέχθηκε από βιβλιογραφία με παρατηρήσεις μειωμένου φορτίου μετά από εφαρμογή ΔΠ. Οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν ωστόσο και αυτοί το SWAT για να εκτιμήσουν το φορτίο P της υφιστάμενης κατάστασης και μετέπειτα τα στοιχεία της βάσης δεδομένων για την εξαγωγή των φορτίων μετά από την εφαρμογή των ΔΠ. Ο υπολογιστικός χρόνος ήταν σε αυτήν την περίπτωση εύλογος και εξετάστηκαν πρακτικές σχεδόν όλων των ειδών (λωρίδες

διήθησης, μείωση ποσότητας λιπασμάτων, επεξεργασία κοπριάς, αμειψισπορές κλπ) συνδυαστικά. Το κόστος υπολογίστηκε σε ετήσια βάση ως άθροισμα κόστους κεφαλαίου και λειτουργίας των ΔΠ από τοπικά στοιχεία. Μειονέκτημα στην εργασία αυτή για τη λήψη αποφάσεων ήταν η μονοκριτηριακή ουσιαστικά προσέγγιση αφού φορτία P και κόστος ενσωματώθηκαν σε μία ενιαία έκφραση, ώστε ο ΓΑ που χρησιμοποιήθηκε να μην παρείχε πληροφορία για την καμπύλη αντιστάθμισης.

Οι Arabi et al. (2006a) χρησιμοποίησαν έναν ΓΑ δυαδικής κωδικοποίησης για να συνθέσουν το δικό τους ΕΥΑ για εφαρμογή ΔΠ σε δύο μικρές λεκάνες (6 και 7 km^2) της ευρύτερης λεκάνης Black Creek των ΗΠΑ. Χρησιμοποίησαν και αυτοί το μοντέλο SWAT ως εκτιμητή τεσσάρων ΔΠ, δύο στην αγροτική γη (λωρίδες συγκράτησης και αναβαθμίδες) και δύο κατά μήκος των ποταμών με πρόβλεψη για εγκατάσταση βλάστησης που συγκρατεί φερτά και θρεπτικά στοιχεία. Παρόλο που εξετάστηκαν τόσο τα φερτά, όσο και το N και ο P, μειονέκτημα της εργασίας ήταν ότι δεν έκανε ταυτόχρονη βελτιστοποίηση ρυπαντικού φορτίου και κόστους. Πιο συγκεκριμένα, κάθε φορά ένας ρύπος λάμβανε μία μέγιστη τιμή και ο αλγόριθμος εκτελούσε πολλαπλές φορές το SWAT για να βρει τον συνδυασμό ΔΠ στις ομοιογενείς εκτάσεις και τα τμήματα ποταμού κάθε υπολεκάνης, που ελαχιστοποιούσαν το κόστος ώστε αυτή η τιμή να μην ξεπεραστεί. Αντίστροφα, ένα ανώτατο κόστος αποτελούσε τον περιορισμό και ο αλγόριθμος βελτιστοποιούσε το φορτίο ενός ρύπου στην έξοδο των λεκανών. Το γεγονός ότι το SWAT έτρεχε κάθε φορά για να δώσει αποτελέσματα οδήγησε σε μία προσομοίωση 15 ωρών για τις δύο λεκάνες. Ο χρόνος αυτός, αν και όχι απαγορευτικός, είναι αρκετά σημαντικός αν συνυπολογίσει κανείς το μικρό μέγεθος των λεκανών και επομένως τον περιορισμένο αριθμό ΥΜ και υπολεκανών προς εφαρμογή ΔΠ. Βέβαια, αυτό οδήγησε σε μικρό πληθυσμό και μικρό αριθμό γενιών μέχρις ότου βρεθεί η βέλτιστη λύση. Καινοτομία της εργασίας αποτελεί ίσως το γεγονός ότι το κόστος εφαρμογής των ΔΠ υπολογίστηκε ως άθροισμα του κόστους εγκατάστασης, λειτουργίας και ευκαιρίας, καθώς και του περιβαλλοντικού οφέλους που προέκυπτε μετά από εφαρμογή ΔΠ. Οι συγγραφείς αξιοποίησαν τοπικές μελέτες για να κοστολογήσουν αυτό το όφελος και να το ενσωματώσουν πολύ εύστοχα στο οικονομικό τους μοντέλο.

Ένα πιο απλό εργαλείο είναι αυτό που αναπτύχθηκε από τους Veith et al. (2004) με χρήση ενός ΓΑ, της γνωστής παγκόσμιας εξίσωσης εδαφικής απώλειας για τον υπολογισμό των απωλειών εδάφους και μιας απλής μεθοδολογίας που ενσωματώνει συντελεστές στερεοαπορροής και τη διόδευση των φερτών έως την έξοδο της λεκάνης. Με μεταβολή σε ορισμένες παραμέτρους του απλού αυτού συνδυαστικού μοντέλου, τρία σχήματα συνδυασμού διαφόρων τύπων ΔΠ εφαρμόστηκαν και αξιολογήθηκαν ως προς τη μείωση του φορτίου που παράγεται από τις αγροτικές εκτάσεις μιας μικρής λεκάνης (1km^2) στη Virginia των ΗΠΑ. Το κόστος υπολογίστηκε με εμπειρικό τρόπο και με βάση τοπικά στοιχεία σχετικά

με το κόστος των σπόρων, της εργασίας, των καυσίμων και των τιμών των προϊόντων. Και σε αυτήν την περίπτωση όμως η βελτιστοποίηση που έγινε αφορούσε σε ένα κριτήριο: στην ελαχιστοποίηση του κόστους για συγκεκριμένη μείωση φορτίου φερτών. Οι συγγραφείς έθεσαν ως κριτήριο τερματισμού του αλγόριθμου έναν αριθμό επαναλήψεων όπου η περαιτέρω μείωση του κόστους για συγκεκριμένο φορτίο θα ήταν μηδαμινή. Στην πραγματικότητα οι Veith et al. (2004) στην εργασία τους είχαν στόχο τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης με εκείνα που προέκυψαν από εφαρμογή ΔΠ μέσω στοχευμένης στρατηγικής (targeting strategy) και διαπίστωσαν ότι το ίδιο περιβαλλοντικό αποτέλεσμα είναι δυνατόν να επιτυγχάνεται με αρκετά μικρότερο κόστος όταν ακολουθείται μία στρατηγική βελτιστοποίησης για τη λήψη αποφάσεων. Στην εργασία αυτή παρατηρείται ακόμα προσπάθεια των συγγραφέων να πειραματιστούν με τους γενετικούς τελεστές του αλγόριθμου και μετά από δοκιμές να καταλήξουν στο πιο εύρωστο σχήμα.

Οι Srivastava et al. (2002) συνέδεσαν έναν ΓΑ σε γλώσσα C++ με το μοντέλο AnnAGNPS για τη βελτιστοποίηση τοποθέτησης ΔΠ στη μικρή λεκάνη Mahantango Creek (7,25km^2) στην Πενσυλβάνια των ΗΠΑ. Οι ΔΠ που επέλεξαν να εφαρμόσουν αφορούσαν σε 15 διαφορετικές αμειψισπορές των κυριότερων καλλιεργειών στη λεκάνη με μειωμένη ή καθόλου άροση. Από το σύνολο των ομοιογενών περιοχών προς εφαρμογή ΔΠ επέλεξαν λιγότερες του 50% για διαχείριση. Το κόστος υπολογίστηκε ως άμεσο και έμμεσο από την εφαρμογή των διαφόρων μέτρων με συνυπολογισμό των αποδόσεων των καλλιεργειών. Τελικά, κατέληξαν σε υπολογισμό ενός επιπρόσθετου οικονομικού οφέλους για τον αγροτικό πληθυσμό το οποίο προσπάθησαν να μεγιστοποιήσουν. Στη βελτιστοποίηση που ακολούθησε, ύστερα από παραγωγή 150 γενιών από τον ΓΑ προέκυψε βέλτιστη μείωση φορτίου 56% και μέγιστη αύξηση οφέλους 109%. Η αντικειμενική συνάρτηση προς βελτιστοποίηση φορτίου περιελάμβανε την οικονομική συνιστώσα και όλους τους ρύπους (φερτά, N και P) σε μία κανονικοποιημένη έκφραση. Παρά την πολύ εύστοχη έκφραση της συνάρτησης, τα τελικά αποτελέσματα που αναφέρθηκαν προέκυψαν μετά από βελτιστοποίηση ενός κριτηρίου χωρίς να δίνεται η πληροφορία για πολλαπλές ισοδύναμες λύσεις μέσω των καμπυλών αντιστάθμισης των επιμέρους κριτηρίων.

Η πιο πρόσφατη και ίσως πιο ολοκληρωμένη και καινοτόμα εργασία για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με εφαρμογή ΔΠ σε λεκάνη απορροής είναι αυτή των Maringanti et al. (2009). Όπως αναφέρθηκε και στο τέλος της ενότητας 5.3.4 οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν τον ΓΑ NSGA-II για τη βελτιστοποίηση της εφαρμογής τριών ειδών ΔΠ (μείωση λιπάνσεων, συντηρητική άροση, εγκατάσταση λωρίδων συγκράτησης) και συνδυασμών τους. Η λεκάνη στην οποία ανέπτυξαν τη μεθοδολογία ήταν η L'Anguille στο Arkansas των ΗΠΑ με έκταση 2520km^2. Η μεγάλη καινοτομία της εργασίας ήταν η ανάπτυξη μιας βάσης δεδομένων για τις ΔΠ (BMPTool), που περιείχε τα απαραίτητα δεδομένα για την αποτελεσματικότητα και το

κόστος εφαρμογής κάθε μιας σε κάθε ομοιογενή περιοχή της λεκάνης απορροής. Τα δεδομένα της βάσης που αφορούσαν στην περιβαλλοντική επίδοση των ΔΠ, προέκυψαν μετά από μικρό αριθμό εκτελέσεων του μοντέλου SWAT, με εφαρμογή μίας και μόνο ΔΠ κάθε φορά σε ολόκληρη την έκταση ενός συγκεκριμένου τύπου χρήσης γης. Τα δε οικονομικά δεδομένα υπολογίστηκαν για κάθε ομοιογενή περιοχή με βάση την έκτασή της και έτοιμα δεδομένα για το κόστος εγκατάστασης, λειτουργίας και ευκαιρίας που προκύπτει από εφαρμογή της κάθε ΔΠ. Με αυτό τον τρόπο η βελτιστοποίηση που ακολούθησε δε χρειάστηκε τη δυναμική σύνδεση του ΓΑ με το μοντέλο, αλλά με μία βάση δεδομένων από την οποία αντλούσε κάθε φορά τα απαιτούμενα δεδομένα. Ο χρόνος επίτευξης της βελτιστοποίησης ήταν μόλις 2 ώρες με πληθυσμό 100 ατόμων και παραγωγή 80000 γενιών, που προέκυψαν μετά από ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων του ΓΑ καταδεικνύοντας το συνδυασμό που οδηγεί στην καλύτερη προσέγγιση του ολικού μετώπου Pareto. Οι συγγραφείς δεν επέλεξαν κάποια ενιαία έκφραση αντικειμενικής συνάρτησης με ενσωμάτωση περιβαλλοντικού και οικονομικού στόχου παρά έκαναν βελτιστοποίηση δύο κριτηρίων κάθε φορά: του συνολικού κόστους εφαρμογής και της ελαχιστοποίησης φερτών, ολικού N και ολικού P που συνολικά εγκαταλείπουν τη λεκάνη από τις επιμέρους εκτάσεις και εισέρχονται στα επιφανειακά νερά. Η λήψη αποφάσεων συστήνεται σε αυτήν την εργασία μέσω της επιλογής λύσεων από τις καμπύλες αντιστάθμισης δύο διαστάσεων.

Τελευταία εργασία που παρουσιάζεται στην ενότητα αυτή με σκοπό τη λήψη αποφάσεων για εφαρμογή ΔΠ σε λεκάνη απορροής είναι των Jha et al. (2009), που μέσω πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης προσπαθούν να εντοπίσουν κατάλληλα διαχειριστικά σχήματα στη μεγάλη λεκάνη Racoon στη Δυτική Iowa των ΗΠΑ, έκτασης 9400km^2. Οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν τον ΓΑ SPEA-II και το μοντέλο SWAT, ενώ η λεκάνη χωρίστηκε σε παραπάνω από 3000 ΥΜ. Συνολικά, 33 ΔΠ αποτέλεσαν τις πιθανές λύσεις για κάθε ομοιογενή χωρική μονάδα και το μοντέλο εκτελέστηκε αρχικά για πληθυσμό 50. Ύστερα από αρκετές γενιές η διαδικασία τερματίστηκε και καινοτομία της εργασίας αποτελεί η ταυτόχρονη βελτιστοποίηση τριών κριτηρίων: του κόστους εφαρμογής, του μέσου ετήσιου φορτίου N-NO3 και του μέσου ετήσιου φορτίου P. Οι συγγραφείς ανέλυσαν τις καμπύλες αντιστάθμισης ανά δύο κριτήρια, η ταυτόχρονη βελτιστοποίηση όλων των κριτηρίων όμως επέτρεψε την εξαγωγή συμπερασμάτων για το βαθμό επίτευξης και των τριών στόχων ταυτόχρονα μετά από επιλογή μιας λύσης από ένα μέτωπο. Το μέγεθος της λεκάνης (πολλές ΥΜ προς διαχείριση) και η δυναμική σύνδεση του μοντέλου SWAT στη διαδικασία βελτιστοποίησης λογικά θα οδηγούσε σε πολύ μεγάλο χρόνο ολοκλήρωσης της διαδικασίας. Με έναν πολύ έξυπνο τρόπο όμως οι συγγραφείς οδήγησαν τον αλγόριθμο σε σύγκλιση με το επιθυμητό μέτωπο ορίζοντας έναν αρχικό πληθυσμό με άτομα αντιπροσωπευτικά καλών λύσεων δηλαδή επιλογών ΔΠ που βελτιστοποιούν σε μεγάλο βαθμό τα διάφορα κριτήρια.

5.5.3 Αξιολόγηση μεθοδολογιών υποστήριξης αποφάσεων για τη διαχείριση λεκάνης απορροής

Αναλύοντας τις μεθοδολογίες υποστήριξης αποφάσεων σχετικά με το αντικείμενο εφαρμογής ΔΠ σε λεκάνη απορροής μπορούν να βγουν κάποια χρήσιμα συμπεράσματα, που πιστεύεται ότι συνδέουν εποικοδομητικά την ιστορική ανασκόπηση με την ερευνητική προσπάθεια της παρούσης διατριβής. Οι εργασίες που αναφέρθηκαν παραπάνω αποτελούν τις πλέον σύγχρονες προσεγγίσεις για διαχείριση λεκάνης απορροής και τις πιο ολοκληρωμένες μεθοδολογίες υποστήριξης αποφάσεων για τους ιθύνοντες, που διατίθενται αυτή τη στιγμή επίσημα στη διεθνή βιβλιογραφία (διεθνή επιστημονικά περιοδικά). Όλες οι ομάδες των ερευνητών προσεγγίζουν το θέμα με σύνδεση ενός διαχειριστικού περιβαλλοντικού μοντέλου, τις περισσότερες φορές το SWAT, ενός εργαλείου βελτιστοποίησης, πάντα ΓΑ, και ενός απλού οικονομικού μοντέλου ή μιας βάσης δεδομένων οικονομικών στοιχείων τοπικού χαρακτήρα. Οι συγγραφείς δείχνουν σε γενικές γραμμές το δρόμο της σύγχρονης διαχείρισης λεκάνης απορροής με πλήρη εκμετάλλευση των νέων τεχνολογιών. Εφαρμόζουν ΔΠ διαφόρων ειδών και συγκρίνουν το μέσο ετήσιο φορτίο ρύπων που προκύπτει με το αντίστοιχο των συμβατικών πρακτικών στη λεκάνη. Ουσιαστικά η σύγκριση δείχνει το πόσο μειωμένο θα ήταν το φορτίο αυτό αν η διαχείριση των αγροτικών εκτάσεων της λεκάνης ήταν διαφορετική.

Η αναφορά στο μέσο ετήσιο φορτίο είναι εύστοχη καθότι οι απώλειες θρεπτικών από το έδαφος στα νερά είναι πιο δόκιμο να μελετώνται σε μεγάλη χρονική κλίμακα. Αντίθετα με την απορροή η οποία μπορεί να έχει έντονες διακυμάνσεις ανάλογα με τη σφοδρότητα της βροχόπτωσης, η απώλεια N και P, ακόμα και σε μία χρονιά με μηδενικές ανθρωπογενείς φορτίσεις, αναμένεται το ίδιο μεγάλη ύστερα από ένα έντονο επεισόδιο βροχής. Αυτό συμβαίνει διότι τα θρεπτικά στοιχεία ενυπάρχουν στο έδαφος από το περίσσευμα που δημιουργείται με το πέρασμα του χρόνου, με αποτέλεσμα η μικρή χρονική κλίμακα μελέτης να μην είναι ικανή να καταδείξει σημαντικές διαφορές ανάμεσα στη συμβατική και στην εναλλακτική διαχείριση. Ο περιορισμός των απωλειών επιτυγχάνεται σε βάθος χρόνου και αυτό που άλλωστε ενδιαφέρει στην καταπολέμηση του φαινομένου του ευτροφισμού είναι το ετήσιο φορτίο και όχι οι αιχμές που έχουν φυσικό νόημα στην πλημμύρα, δηλαδή στη μελέτη του φαινομένου της απορροής. Αυτός είναι άλλωστε και ο λόγος που οι μεταβολές στο καθεστώς της χημικής κατάστασης των υδάτων μετά από εφαρμογή ΔΠ γίνονται αντιληπτές μετά από παρέλευση μεγάλων χρονικών διαστημάτων (high response time). Παρόλα αυτά, η κάθε εργασία/μεθοδολογία και κατ' επέκταση το κάθε ΕΥΑ που αναπτύσσεται διαφέρουν μεταξύ τους σε επιμέρους σημεία. Τα βασικότερα από αυτά είναι:

- *Ο ρύπος που εξετάζεται.*

Άλλες μεθοδολογίες εξετάζουν μόνο τις φερτές ύλες, άλλες το ολικό N και τον ολικό P, ενώ άλλες και επιμέρους μορφές των δύο θρεπτικών στοιχείων π.χ. N-NO3, διαλυτός P, κάποια οργανική μορφή κλπ.

- *Το είδος και ο αριθμός των ΔΠ που επιλέγονται*

Υπάρχουν μεθοδολογίες που εξετάζουν πολύ μικρό αριθμό ΔΠ, άρα είναι λίγες οι επιλογές ανάμεσα στα διαφορετικά εφικτά σχήματα διαχείρισης εντός της λεκάνης, και άλλες, που ο αριθμός αυτός φτάνει τις μερικές δεκάδες. Το είδος επίσης των ΔΠ διαφέρει από μεθοδολογία σε μεθοδολογία. Έτσι, σε μερικές περιπτώσεις απαντάται μόνο ένα είδος, π.χ. μέθοδοι άροσης της γης, ενώ σε άλλες πολλά, π.χ. διαχείριση εδαφικών πόρων, καλλιέργειας, εφαρμογής θρεπτικών, ζωικής παραγωγής κ.α. Η ποικιλία εξαρτάται φυσικά από τις συνθήκες της εκάστοτε περιοχής μελέτης, αλλά και από την πολυπλοκότητα που θέλει να προσδώσει ο ερευνητής στη διαδικασία υποστήριξης αποφάσεων.

- *Ο υπολογισμός του κόστους εφαρμογής των ΔΠ*

Και εδώ οι διαφορές που παρουσιάζονται είναι σημαντικές. Οι περισσότερες εργασίες δεν αναπτύσσουν μία δική τους μεθοδολογία υπολογισμού του κόστους. Λαμβάνουν έτοιμα δεδομένα από άλλες μελέτες οικονομικού χαρακτήρα για τις ΔΠ. Αυτή βέβαια η δυνατότητα προσφέρεται στις περιοχές των ΗΠΑ λόγω της οικονομικής ανάλυσης που έχει πραγματοποιηθεί για τις ΔΠ. Παρόλα αυτά, τα διατιθέμενα στοιχεία δεν είναι παντού ίδια. Έτσι, οι περισσότερες εργασίες αναφέρονται σε κόστος κεφαλαίου (εγκατάστασης) και λειτουργίας της ΔΠ, ενώ λιγότερες ενσωματώνουν και το κόστος ευκαιρίας. Για το τελευταίο απαιτείται ο συνυπολογισμός των απωλειών στο αγροτικό εισόδημα από την εφαρμογή εναλλακτικών σεναρίων διαχείρισης, π.χ. οι απώλειες απόδοσης καρπού. Ελάχιστες εργασίες είναι αυτές που αξιοποιούν την εκτίμηση των μοντέλων μέσω της ρουτίνας ανάπτυξης καλλιέργειας για αυτή τη συνιστώσα, που χρησιμοποιούν δηλαδή την εκτιμώμενη ετήσια απόδοση των καλλιεργειών από τα μοντέλα με βάση τις εκάστοτε καλλιεργητικές τεχνικές. Ο συνυπολογισμός αυτής της συνιστώσας στο συνολικό κόστος θεωρείται απαραίτητος και προκαλεί εντύπωση το γεγονός ότι ενώ το μοντέλο SWAT, που ως επί τω πλείστον χρησιμοποιείται στις παραπάνω εργασίες, έχει παραδοσιακά αυτό το σκοπό, τελικά δεν τυγχάνει ευρείας αποδοχής ως προς την εκτίμησή του για τις αποδόσεις. Μόνο μία εργασία (Arabi et al., 2006a) ενσωματώνει δε και το επιπρόσθετο θετικό περιβαλλοντικό αποτέλεσμα ως οικονομικό όφελος, κάτι σύνθετο και αρκετά δύσκολο ως προς τον υπολογισμό. Τέλος, η

αναφορά σε κόστος γίνεται πάντα στο μέσο έτος, ώστε αυτό να συγκρίνεται με την περιβαλλοντική συνιστώσα στην ίδια χρονική βάση.

- *Το είδος βελτιστοποίησης που επιχειρείται και ο αλγόριθμος που επιλέγεται*

Αν και όλες οι εργασίες χρησιμοποιούν παρόμοια μέσα βελτιστοποίησης (ΓΑ), οι περισσότερες δεν έχουν ακόμα υιοθετήσει την πολυκριτηριακή προσέγγιση. Φυσικά λαμβάνουν υπόψη τους τα δύο κριτήρια (περιβαλλοντικό, οικονομικό), αλλά συνήθως τα ενσωματώνουν σε μία ενιαία έκφραση αντικειμενικής συνάρτησης ώστε τελικά να μετατρέπουν το πρόβλημα σε μονοκριτηριακό. Άλλη περίπτωση είναι να θέτουν το ένα κριτήριο ως περιορισμό με ορισμό ανώτατης επιτρεπόμενης τιμής και να βελτιστοποιούν το άλλο. Και αυτό όμως αποτελεί μία εκδοχή μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης. Σε λιγότερες περιπτώσεις ακολουθείται η ταυτόχρονη βελτιστοποίηση και των δύο κριτηρίων που δεν αποκρύπτει καμία πτυχή του προβλήματος και αποκαλύπτει εν τέλει όλα τα περιβαλλοντικά σχήματα που αποτελούν ισοδύναμες βέλτιστες λύσεις. Σε μία μόνο εργασία (Jha et al., 2009) αυτή η προσέγγιση συμπεριέλαβε και τρίτο κριτήριο, δηλαδή κόστος και δύο ρύπους ταυτόχρονα, αναδεικνύοντας και την πιθανή ανταγωνιστικότητα μεταξύ δύο περιβαλλοντικών κριτηρίων. Τέλος, δύο ιδιαίτερα αποδεκτοί ΓΑ, οι αλγόριθμοι SPEA και NSGA, είτε στην αρχική τους, είτε στη βελτιωμένη τους μορφή αποτελούν τις βασικότερες 'μηχανές' βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούνται στα ΕΥΑ των εργασιών αυτών.

- *Η σύνδεση του ΕΥΑ με τον εκτιμητή (μοντέλο) ρυπαντικού φορτίου*

Αν εξαιρεθούν δύο εργασίες (Gitau et al., 2006· Maringanti et al., 2009), όλες οι εργασίες κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης εκτιμούν την αποδοτικότητα των ατόμων του πληθυσμού με συνεχείς εκτελέσεις του μοντέλου που ενσωματώνουν. Η δυναμική αυτή σύνδεση απαιτεί πολύ μεγάλους χρόνους πραγματοποίησης της διαδικασίας που εξαρτώνται από το μέγεθος και το διαχωρισμό της λεκάνης. Οι δύο εργασίες που αναφέρθηκαν ξεπέρασαν αυτό το πρόβλημα με σύνδεση μιας βάσης δεδομένων αντί του μοντέλου, ώστε οι αξιολογήσεις των λύσεων να γίνονται σε υποπολλαπλάσιο χρόνο. Με αυτήν την προσέγγιση βέβαια δεν λαμβάνεται ως περιβαλλοντικό κριτήριο το φορτίο στην έξοδο της λεκάνης, αλλά το σύνολο του φορτίου που εγκαταλείπει τις ανάντη εκτάσεις, κάτι που μπορεί να είναι το ίδιο αντιπροσωπευτικό υπό προϋποθέσεις. Γενικότερα, όταν το μοντέλο απαιτείται να εκτελείται συστηματικά κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, το ΕΥΑ δεν είναι εύχρηστο και αποδοτικό αφού απαιτεί μεγάλους χρόνους για την εξαγωγή αποτελεσμάτων.

5.6 Γενική αποτίμηση

Στο κεφάλαιο αυτό προβλήθηκαν τα πλεονεκτήματα της πολυκριτηριακής έναντι της μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης για τη διαχείριση της αγροτικής γης σε λεκάνη απορροής, καθώς και η χρησιμότητα των ΓΑ ως μέσων βελτιστοποίησης πολλαπλών κριτηρίων περιβαλλοντικής και οικονομικής φύσης. Σε αντίθεση με τα ΣΥΑ που έχουν αναπτυχθεί σήμερα στην Ευρώπη και που, ως επί τω πλείστον, δεν ενσωματώνουν κανόνες πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης μέσω εξελικτικών στρατηγικών αναζήτησης λύσεων, οι διάφορες μεθοδολογίες ανάπτυξης απλούστερων λογισμικών ή ΕΥΑ για την εναλλακτική διαχείριση στον αγροτικό τομέα, αξιοποιούν τα τεχνολογικά εργαλεία αυτού του επιστημονικού πεδίου.

Οι πιο σύγχρονες από αυτές τις μεθοδολογίες που παρουσιάστηκαν, χρησιμοποιούν στη συντριπτική τους πλειοψηφία το μοντέλο SWAT για την προσομοίωση της εναλλακτικής διαχείρισης και έχουν αναπτυχθεί στις ΗΠΑ. Μετά από αναζήτηση στο διαδίκτυο δεν βρέθηκαν άλλα μοντέλα, πλην του AnnAGNPS που αναφέρθηκε σε μία εργασία παραπάνω, που να ενσωματώνονται σε παρόμοιες προσεγγίσεις διαχείρισης λεκάνης απορροής, ούτε καν του HSPF, το οποίο θεωρείται ανάλογο σε δυνατότητες με το SWAT. Η επιλογή του SWAT γίνεται λόγω των μεγάλων δυνατοτήτων του στην προσομοίωση ΔΠ και λόγω της αποδοχής του, που πηγάζει, τόσο από τη γενικότερη χρήση του, όσο και από την ενσωμάτωσή του σε δράσεις στρατηγικού χαρακτήρα από την EPA. Οι ομάδες επιστημόνων που ασχολούνται εντατικά με το αντικείμενο της περιβαλλοντικής διαχείρισης αγροτικών λεκανών απορροής βρίσκονται στο Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Νοτίου Ιλινόις (Department of Civil Engineering, Southern Illinois University), στο Κέντρο Αγροτικών Ερευνών του Πανεπιστημίου της Αιόβα (Center for Agricultural and Rural Development, Iowa State University), στο Τμήμα Αγροτικής και Βιολογικής Μηχανικής του Πανεπιστημίου Purdue της Ιντιάνα (Agricultural and Biological Engineering, Purdue University) και στο ομώνυμο Τμήμα του Πανεπιστημίου της Πενσυλβάνια (Department of Agricultural and Biological Engineering, The Pennsylvania State University).

Με βάση την ανασκόπηση των νέων τεχνολογικών εργαλείων που έγινε στο παρόν κεφάλαιο και την έρευνα που κατευθύνεται κυρίως από τα ανωτέρω Τμήματα, θεωρείται στο σημείο αυτό ότι η επιλογή ενός ΓΑ ως εργαλείου βελτιστοποίησης σε περιβάλλον προγραμματισμού MATLAB, καθώς και του ευρέως γνωστού υδρολογικού μοντέλου SWAT ως εκτιμητή μη σημειακών φορτίσεων θρεπτικών στα νερά, αποτελούν ορθές επιλογές στα πλαίσια της παρούσης διδακτορικής διατριβής για την ανάπτυξη μιας καινοτόμας μεθοδολογίας και ενός αποδοτικού ΕΥΑ στον τομέα της διαχείρισης της αγροτικής γης σε κλίμακα λεκάνης απορροής.

6 Μεθοδολογία

6.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η ανάπτυξη μιας νέας μεθοδολογίας υποστήριξης αποφάσεων για την ορθότητα επιλογής διαχειριστικών μέτρων σε λεκάνη απορροής με σκοπό την προστασία της χημικής κατάστασης των επιφανειακών υδάτων από μη σημειακές εισροές ρύπων. Ως ρύποι, θεωρούνται οι φερτές ύλες (απώλειες εδάφους λόγω διάβρωσης) και οι ενώσεις N και P. Ως ολικό N (Total Nitrogen - TN) και ολικός P (Total Phosphorus - TP), καλούνται τα φορτία που προκύπτουν από τη συνάθροιση των επιμέρους αζωτούχων και φωσφορικών ενώσεων αντίστοιχα και χάριν συντομίας θα αναφέρονται ως N και P. Στην εργασία αυτή ωστόσο, η μεθοδολογία που αναπτύσσεται παρέχει άμεσα τη δυνατότητα ελαχιστοποίησης του P και του αζώτου νιτρικών (nitrates nitrogen – N-NO3) δεδομένου ότι: α) πρόκειται για τις μορφές θρεπτικών στοιχείων με τις περισσότερες διαθέσιμες καταγεγραμμένες τιμές συγκεντρώσεων στα ποτάμια και με μεγάλη περιβαλλοντική σημασία και β) οι απώλειες P και N-NO3 αναμένεται να παρουσιάζουν, έστω και ελαφρώς, αντικρουόμενη συμπεριφορά κάτω από τις διάφορες πρακτικές διαχείρισης της αγροτικής γης σε αντίθεση π.χ. με τον P και το N, που λόγω των περιεχομένων οργανικών φορτίων, αναμένεται τα μεγέθη των απωλειών τους από το έδαφος να διαμορφώνονται ταυτόχρονα, σε μεγάλο βαθμό, από τις εδαφικές απώλειες. Το N-NO3 είναι η βασική μορφή ανόργανου N που λόγω της διαλυτής μορφής στην οποία απαντάται μεταφέρεται κυρίως με την επιφανειακή και υποεπιφανειακή απορροή σε αντίθεση με τον P, που είναι στενά συνδεδεμένος με τη διάβρωση και τη στερεομεταφορά.

Ο βασικός στόχος στον οποίο επικεντρώνεται η μεθοδολογία είναι η επιλογή και τοποθέτηση κατάλληλων ΔΠ σε ομοιογενείς αγροτικές εκτάσεις, δηλαδή στις ΥΜ λεκάνης απορροής, ώστε ταυτόχρονα να ελαχιστοποιούνται δύο έως τέσσερα κατά μέγιστο κριτήρια: τα αθροιστικά φορτία απωλειών εδάφους, P και N-NO3 που καταλήγουν στο υδρογραφικό δίκτυο, καθώς και το αθροιστικό κόστος εφαρμογής των διαχειριστικών αυτών παρεμβάσεων. Πρόκειται για ένα πρόβλημα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης (δύο έως τέσσερα κριτήρια), που οδηγεί στην εύρεση των καμπυλών αντιστάθμισης (trade-off) ανά δύο κριτήρια, ώστε να δίνεται πληροφορία για τη σχέση που διέπει τη μεταβολή του ενός σε σχέση με το άλλο. Η πληροφορία αυτή δίνει τη δυνατότητα στους λαμβάνοντες τις αποφάσεις να επιλέξουν από ένα πλήθος ισοδύναμων λύσεων, τις πιο κατάλληλες, βασιζόμενοι και σε επιπλέον κριτήρια που μπορεί να αναθεωρούνται (π.χ. κοινωνικά).

6.2 Γενική διάρθρωση μεθοδολογίας

Για την ανάπτυξη της μεθοδολογίας, απαιτείται καταρχήν ο καθορισμός των ΔΠ προς επιλογή καθώς και η κοστολόγηση εφαρμογής τους. Αν και υπάρχει πληθώρα ΔΠ στη βιβλιογραφία (βλέπε ενότητα 4.2), η ρεαλιστική προσέγγιση του προβλήματος απαιτεί την επιλογή εφικτών, από πρακτική και οικονομική άποψη μέτρων για την εκάστοτε περιοχή μελέτης. Στην παρούσα εργασία επιλέγονται ΔΠ που μπορούν να εφαρμοστούν σε πλήθος ημιορεινών λεκανών απορροής της Ελλάδας, όπου η κτηνοτροφική δραστηριότητα είναι σημαντική και επικρατούν καλλιέργειες αγρωστωδών και κτηνοτροφικών φυτών. Η δε κοστολόγηση γίνεται με βάση το συνυπολογισμό του κόστους κεφαλαίου, συντήρησης και ευκαιρίας αξιοποιώντας κυρίως ελληνικά στοιχεία.

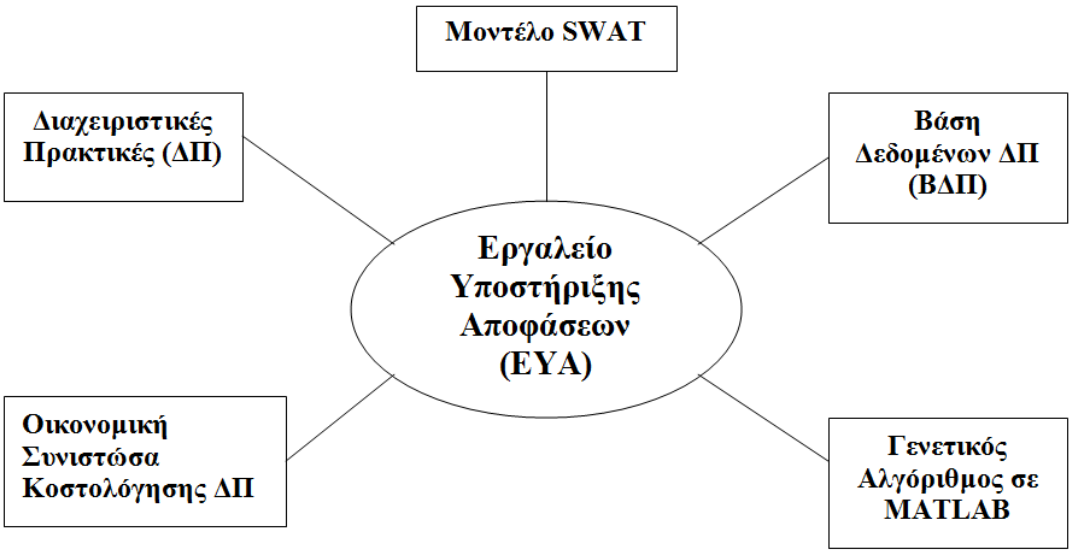
Στη συνέχεια απαιτείται ένας εκτιμητής ρυπαντικού φορτίου, είτε στην έξοδο των αγροτεμαχίων (απώλειες θρεπτικών – nutrient losses), είτε σε διατομή υδατορρεύματος (απόδοση θρεπτικών – nutrient yield), ύστερα από την εφαρμογή των επιλεγμένων ΔΠ. Ο εκτιμητής αυτός είναι συνήθως ένα μοντέλο προσομοίωσης διαδικασιών, που έχει ήδη αποτυπώσει επιτυχώς την υφιστάμενη κατάσταση στην εκάστοτε περιοχή μελέτης (έχει βαθμονομηθεί), παρέχοντας τη δυνατότητα της επαρκούς προσομοίωσης διαφόρων ΔΠ σε χωρική κλίμακα ΥΜ με μεταβολές σε κατάλληλες παραμέτρους, και των μηχανισμών μεταφοράς θρεπτικών από τη γη στα επιφανειακά νερά. Η μεθοδολογία της διατριβής επιλέγει το μοντέλο SWAT ως τον εκτιμητή ρυπαντικού φορτίου, το οποίο έχει τη δυνατότητα της προσομοίωσης πλήθους ΔΠ στις αγροτικές ΥΜ της λεκάνης απορροής (βλ. 4.3). Ως ΥΜ υπενθυμίζεται ότι ορίζεται η ομοιογενής έκταση ως προς κάποια γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά εντός της λεκάνης (κλίση, χρήση γης, έδαφος), που τη διαφοροποιεί από οποιαδήποτε άλλη ως προς την υδρολογική συμπεριφορά της.

Ακόμα, απαιτείται η χρήση ενός μέσου βελτιστοποίησης, δηλαδή ενός αλγόριθμου που θα είναι ικανός να ψάξει επαρκώς έναν μεγάλο χώρο αναζήτησης δηλαδή να εξετάσει έναν πολύ μεγάλο αριθμό συνδυασμών ΔΠ στη λεκάνη, ώστε εν τέλει να οδηγήσει σε βέλτιστες λύσεις. Επιλέγεται στην παρούσα εργασία ο πολυκριτηριακός ΓΑ του MATLAB (βλ. 5.4.2), ως η μηχανή αναζήτησης λύσεων και καθοδήγησης της διαδικασίας βελτιστοποίησης.

Βασικός και καινοτόμος στόχος της μεθοδολογίας θεωρείται η ανάπτυξη μιας βάσης δεδομένων, της λεγόμενης *Βάσης Διαχειριστικών Πρακτικών* (ΒΔΠ), που είναι απλή στη δομή, εύχρηστη και δημιουργείται αυτόματα, αποθηκεύοντας αποτελέσματα του υδρολογικού μοντέλου SWAT σχετικά με τις απώλειες ρύπων και το κόστος εφαρμογής ΔΠ από όλες τις ΥΜ της λεκάνης και αντικαθιστά τη δυναμική σύνδεση του SWAT με τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Η ΒΔΠ δημιουργείται μετά από έναν αριθμό εκτελέσεων του SWAT ίσο με

το συνολικό αριθμό των ΔΠ προς διερεύνηση και περιλαμβάνει τις ετήσιες απώλειες ρύπων (φερτά, N-NO3 και P) από τα όρια των αγροτεμαχίων προς το υδρογραφικό δίκτυο. Προσδοκάται δε ότι η χρήση της μπορεί να μειώσει σημαντικά τον απαιτούμενο χρόνο βελτιστοποίησης αφού στην περίπτωση που υπήρχε σύνδεση του μοντέλου με τη διαδικασία βελτιστοποίησης θα έπρεπε αυτό να εκτελείται κάθε φορά που ο αλγόριθμος θα εκτιμούσε το αποτέλεσμα μιας πιθανής λύσης (ενός συνδυασμού ΔΠ στη λεκάνη). Με δεδομένο το μεγάλο πλήθος λύσεων (δεκάδες ή εκατοντάδες χιλιάδες), που ο αλγόριθμος καλείται να αξιολογήσει γίνεται φανερό ότι μία τέτοια διαδικασία είναι χρονικά ασύμφορη. Το μοντέλο SWAT μπορεί ωστόσο προαιρετικά να εκτελεστεί εκ των υστέρων για τις ισοδύναμες βέλτιστες λύσεις που προκύπτουν από τις καμπύλες αντιστάθμισης και οι οποίες αναπαριστούν το φορτίο ρύπων που εγκαταλείπει τις ΥΜ και εισέρχεται στα ποτάμια, ώστε να εκτιμήσει τα αντίστοιχα φορτία ή συγκεντρώσεις θρεπτικών στην έξοδο της λεκάνης μετά από προσομοίωση της κίνησής τους κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου.

Η μεθοδολογία υποστήριξης αποφάσεων που περιγράφεται στο παρόν κεφάλαιο στοχεύει στη δημιουργία μίας ολοκληρωμένης Εφαρμογής σε περιβάλλον προγραμματισμού MATLAB, καλούμενης ως *Εργαλείο Υποστήριξης Αποφάσεων* (ΕΥΑ), η οποία αποτελείται από τις συνιστώσες που ήδη αναφέρθηκαν και παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.1.



Σχήμα 6.1 Σχηματικό διάγραμμα του Εργαλείου Υποστήριξης Αποφάσεων (ΕΥΑ) και των συνιστωσών του.

Έχοντας υπόψη το Σχήμα 6.1, η μεθοδολογία ανάπτυξης του ΕΥΑ ακολουθεί τα παρακάτω βήματα:

i Παραμετροποίηση και βαθμονόμηση της λεκάνης απορροής στο μοντέλο SWAT με αξιόπιστη προσομοίωση της υφιστάμενης κατάστασης, όσον αφορά τις μη σημειακές απώλειες ρύπων από τις ΥΜ και των ετήσιων φορτίων τους σε θέσεις ποταμού.

ii Επιλογή εφικτών εναλλακτικών ΔΠ για εφαρμογή στις βασικές καλλιέργειες αγρωστωδών και κτηνοτροφικών φυτών (π.χ. αραβόσιτος και μηδική) εντός της λεκάνης, καθώς και σε βοσκότοπους όπου εναποτίθεται κοπριά ζώων (π.χ. προβάτων και πουλερικών).

iii Κοστολόγηση ΔΠ με βάση το μέσο επιπρόσθετο ετήσιο κόστος 5ετούς εφαρμογής (κόστος εγκατάστασης, λειτουργίας και ευκαιρίας), με αξιοποίηση οικονομικών στοιχείων από σύγχρονες τοπικές μελέτες, δημοσιευμένων προσεγγίσεων υπολογισμού κόστους σε παρόμοιες μελέτες, καθώς και απλουστευτικών υποθέσεων και παραδοχών.

iv Εφαρμογή του μοντέλου SWAT για την προσομοίωση των ΔΠ στους ανωτέρω τύπους χρήσης γης και για την, μετά την εφαρμογή τους, εκτίμηση του ρυπαντικού φορτίου που εγκαταλείπει το έδαφος των ΥΜ.

v Αποθήκευση των αποτελεσμάτων του μοντέλου SWAT σχετικά με τις απώλειες ρύπων και το επιπρόσθετο κόστος εφαρμογής ΔΠ σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση από όλες τις ΥΜ της λεκάνης, σε βάση δεδομένων και αυτόματη δημιουργία της ΒΔΠ, η οποία χρησιμεύει ως βασικό μέρος της διαδικασίας βελτιστοποίησης.

vi Επιλογή του ΓΑ του MATLAB για την ταυτόχρονη βελτιστοποίηση (ελαχιστοποίηση) του οικονομικού και των περιβαλλοντικών κριτηρίων (από δύο έως τέσσερα κριτήρια), με εύρεση των Pareto βέλτιστων λύσεων που διαμορφώνουν τις καμπύλες αντιστάθμισης ανά δύο κριτήρια και εκφράζουν συγκεκριμένους συνδυασμούς επιλογής και τοποθέτησης διαφόρων τύπων ΔΠ στις ΥΜ της λεκάνης. Τα κριτήρια εκφράζονται ως αθροίσματα απωλειών ρύπων και κόστους, υπολογιζόμενα από τα δεδομένα της ΒΔΠ για όλες τις ΥΜ της λεκάνης.

vii Εκτέλεση του μοντέλου SWAT για έναν αριθμό ίσο με τον αριθμό των βέλτιστων Pareto λύσεων για την εκτίμηση των αντίστοιχων φορτίων ή συγκεντρώσεων θρεπτικών στην έξοδο της λεκάνης μετά από προσομοίωση της κίνησής τους κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου και διαμόρφωση των καμπυλών αντιστάθμισης με όρους συγκεντρώσεων ρύπων στην έξοδο της λεκάνης αντί για συνολικά φορτία που

εισέρχονται στο υδρογραφικό δίκτυο. Επιλογή συμβιβαστικών λύσεων από τις καμπύλες αυτές.

6.3 Επιλογή Διαχειριστικών Πρακτικών προς εφαρμογή και προσομοίωση στο SWAT

Μετά την πλήρη παραμετροποίηση και βαθμονόμηση του μοντέλου της εκάστοτε λεκάνης στο μοντέλο SWAT για την αποτύπωση της υφιστάμενης κατάστασης ως προς το ποιοτικό καθεστώς των υδάτων (1^{ο} βήμα μεθοδολογίας), μπορούν να εφαρμοστούν διάφορες ΔΠ στην αγροτική γη. Στην παρούσα διατριβή οι πρακτικές που αναπτύσσονται, είτε είναι γενικές και προσαρμόζονται σε οποιοδήποτε τύπο χρήσης γης (π.χ. λωρίδες συγκράτησης), είτε είναι συνυφασμένες με καλλιέργειες σιτηρών (π.χ. αραβόσιτος, σιτάρι, κριθάρι, βρώμη κλπ) και πολυετών ψυχανθών για κτηνοτροφική χρήση (π.χ. μηδική, τριφύλλια), είτε αφορούν στη διαχείριση του ζωικού κεφαλαίου (π.χ. αιγοπρόβατα, βοοειδή, χοίροι, πουλερικά) με παρεμβάσεις στον αριθμό και στη διαβίωση των ζώων, καθώς και στην εφαρμογή της κοπριάς στους βοσκότοπους. Πιο συγκεκριμένα, αναπτύσσονται οι κάτωθι ΔΠ:

- Εγκατάσταση λωρίδων συγκράτησης φερτών και θρεπτικών στα όρια των αγροτεμαχίων (καλλιέργειες και βοσκότοποι).
- Μείωση χημικής λίπανσης καλλιεργειών (μονοετών και πολυετών).
- Αλλαγή στο χρόνο χημικής λίπανσης των καλλιεργειών (μονοετών και πολυετών).
- Καλλιέργεια σιτηρών κατά τις ισοϋψείς.
- Κατάργηση φθινοπωρινής άροσης εδάφους στην καλλιέργεια σιτηρών.
- Μείωση αριθμού ζωικού κεφαλαίου με κατ' επέκταση μείωση εναποτιθέμενης κοπριάς στους βοσκότοπους.
- Αποθήκευση κοπριάς ζώων για τουλάχιστον τρεις μήνες και διασπορά στους βοσκότοπους μόνο κατά την ξηρή περίοδο.
- Μείωση περιόδου βόσκησης ζώων (υγροί μήνες) με αποθήκευση της κοπριάς της περιόδου σταβλισμένης εκτροφής.

Ο φυσικός μηχανισμός επίδρασης των διαφόρων ΔΠ στις μεταφερόμενες ποσότητες φερτών και θρεπτικών στοιχείων έχει αναλυθεί διεξοδικά στην ενότητα 4.2, ενώ η προσομοίωσή τους από το μοντέλο SWAT στην ενότητα 4.3. Μια απαραίτητη παρουσίαση γίνεται σύντομα όμως στην ενότητα αυτή για κάθε έναν από τους τύπους ΔΠ που επιλέχθηκαν προς διερεύνηση, ενώ στην επόμενη θα περιγραφεί η προτεινόμενη μεθοδολογία κοστολόγησής τους.

Η εγκατάσταση λωρίδων συγκράτησης στα όρια των αγρών ανήκει στην κατηγορία πρακτικών διαχείρισης του εδάφους και έχει ευεργετικά αποτελέσματα μιας και προκαλεί τη συγκράτηση φερτών και θρεπτικών στοιχείων πριν την απελευθέρωσή τους στα επιφανειακά νερά. Η μέθοδος είναι πιο αποτελεσματική στις επικλινείς εκτάσεις, όπου η διάβρωση είναι εντονότερη. Το μοντέλο SWAT προσομοιώνει την επίδραση της πρακτικής αυτής με βάση τις Εξισώσεις 4.1 και 4.2, με ορισμό από το χρήστη μόνο του πλάτους της λωρίδας (Neitch et al., 2005a). Με βάση τις σχέσεις αυτές η επίδραση της λωρίδας είναι πολύ μεγαλύτερη στη συγκράτηση ρυπων που μεταφέρονται με την επιφανειακή απορροή και λιγότερο με την υποεπιφανειακή. Για παράδειγμα, ο ορισμός λωρίδας πλάτους 5m στις εν λόγω σχέσεις, προκαλεί 59% κατακράτηση ρύπων από την επιφανειακή απορροή και μόνο 6% από την υποεπιφανειακή. Κατά συνέπεια, προσδοκάται μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα της μεθόδου στη συγκράτηση φερτών και P παρά του N-NO3 που μεταφέρεται και υποεπιφανειακά.

Η μείωση των διαθεσίμων ποσοτήτων θρεπτικών στην επιφάνεια του εδάφους είναι μία κοινή πρακτική για τον περιορισμό των απωλειών στα υδάτινα σώματα. Επιτυγχάνεται συνήθως με μείωση των εφαρμοζόμενων χημικών λιπασμάτων και κοπριάς (βλ. εν. 4.2.1). Η εν λόγω ΔΠ προσομοιώνεται από το μοντέλο SWAT με μοναδική αλλαγή στο ρυθμό εφαρμογής λιπασμάτων στα αρχεία διαχείρισης 'mgt' των ΥΜ. Κάποιες μειώσεις στις αποδόσεις των καλλιεργειών αναμένονται ωστόσο, ιδιαίτερα για τα σιτηρά. Για τα ψυχανθή, τα οποία εμπλουτίζουν το έδαφος με N, αναμένεται μία μικρότερη επίδραση στις αποδόσεις, όχι μόνο στην πραγματικότητα, αλλά και στις εκτιμήσεις του μοντέλου SWAT που επιτυχώς προσομοιώνει τον βιολογικό κύκλο των καλλιεργειών και την αζωτοδέσμευση (Neitch et al., 2005a). Για το λόγο αυτό προτείνεται η εν λόγω πρακτική να εφαρμόζεται με μεγάλη έως ολοκληρωτική μείωση στην αζωτούχο λίπανση των ψυχανθών και μικρότερη αλλά σημαντική στη φωσφορική. Αντίθετα, για τα σιτηρά προτείνεται μια πιο συγκαταβατική παρέμβαση με μείωση τόσο της αζωτούχου, όσο και της φωσφορικής λίπανσης κατά 20-30%/έτος. Τέλος, για τους βοσκότοπους το μέτρο αυτό μεταφράζεται σε μείωση της εναποτιθέμενης κοπριάς που προέρχεται από μείωση του ζωικού κεφαλαίου στη λεκάνη, μέτρο που ανήκει στη διαχείριση της ζωικής παραγωγής (βλ. εν. 4.2.1). Στο SWAT, η πρακτική αυτή προσομοιώνεται με μείωση της ημερήσιας εναποτιθέμενης κοπριάς ζώων κατά την περίοδο της βόσκησης ή/και του σταθερού ρυθμού εναπόθεσης κατά την υπόλοιπη περίοδο.

Οι καλλιέργειες σιτηρών (π.χ. αραβόσιτος) επιδέχονται και άλλου τύπου πρακτικές όπως: καλλιέργεια κατά τις ισοϋψείς και μειωμένη ή πλήρης κατάργηση της άροσης. Όπως περιγράφηκε στην ενότητα 4.2.2 για τα μέτρα σχετικά με τη διαχείριση καλλιέργειας, η κατά τις ισοϋψείς καλλιέργεια παρέχει μεγαλύτερη προστασία του εδάφους από τη διάβρωση. Οι καλλιεργητικές φροντίδες όπως άροση, αυλάκωμα και φύτευση γίνονται κατά μήκος των

ισοϋψών καμπυλών με αποτέλεσμα να δημιουργούνται αυλάκια κάθετα στην κλίση του εδάφους και να σχηματίζονται ακανόνιστου σχήματος επιφάνειες στο έδαφος, που εμποδίζουν το νερό να απορρεύσει. Με την καλλιέργεια κατά μήκος των ισοϋψών καμπυλών επιτυγχάνεται μείωση της επιφανειακής απορροής και της διάβρωσης και συνεπώς, της μεταφοράς θρεπτικών μέσω αυτών. Η εν λόγω πρακτική προσομοιώνεται στο μοντέλο SWAT με μείωση του παράγοντα διαχείρισης εδαφών κατά της διάβρωσης, P_{USLE}, της Εξίσωσης 3.9 ώστε έμμεσα να προσομοιωθούν οι ανωτέρω επιδράσεις του μέτρου. Ταυτόχρονα, συστήνεται και η μείωση του αριθμού καμπύλης CN (Curve Number – βλ. ενότ. 3.3.2, Εξ. 3.8) ώστε να μεταφραστεί η μείωση της επιφανειακής απορροής στο SWAT (Arabi et al., 2008). Το μέγεθος των μεταβολών αυτών εξαρτάται από τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής υπό διαχείριση. Για μεγάλες κλίσεις εδάφους (>25%) συστήνεται μία μικρή μείωση του παράγοντα P_{USLE} από 1,0, που είναι η αρχική του τιμή, σε 0,8 ή 0,9 (Neitch et al., 2005b). Για τον αριθμό καμπύλης CN μία μείωση 3 μονάδων θεωρείται επαρκής (Arabi et al., 2008).

Η κατάργηση της άροσης είναι επίσης ένα μέτρο που επιδρά ευεργετικά κατά της μεταφοράς ρύπων και ο μηχανισμός του έχει αναπτυχθεί στην ενότητα 4.2.4. Ειδικότερα, η αποφυγή της άροσης αμέσως μετά τη συγκομιδή δεν ανακατανέμει τα εδαφικά σωματίδια και δεν ευνοεί την ανοργανοποίηση της οργανικής ουσίας, που εύκολα με έναν υγρό χειμώνα, μπορεί να οδηγήσει σε υψηλές απώλειες $NO3^-$, αυξημένη διάβρωση και μεταφορά θρεπτικών με τα φερτά. Η απαλοιφή της καλλιεργητικής αυτής τεχνικής μετά τη συγκομιδή των σιτηρών προσδοκάται ότι δύναται να μειώσει τους πιθανούς παράγοντες που οδηγούν σε αυτά τα αποτελέσματα. Η πρακτική προσομοιώνεται από το SWAT με απλή απαλοιφή της άροσης μετά τη συγκομιδή σε κάθε έτος. Ως αποτέλεσμα, οι τιμές της καμπύλης CN που προσομοιώνει την επιφανειακή απορροή δεν αυξάνονται περαιτέρω μετά τη συγκομιδή ώστε να εκφράσουν τη αυξημένη ευαισθησία του εδάφους στην απορροή μετά από άροση.

Η πρακτική που σχετίζεται με το χρόνο λίπανσης έχει ως στόχο την αποφυγή συσσώρευσης θρεπτικών στοιχείων στο έδαφος κατά τις περιόδους με υψηλό κίνδυνο απόπλυσης. Αυτές οι περίοδοι είναι οι χειμερινοί μήνες, που στις Μεσογειακές κυρίως χώρες χαρακτηρίζονται από έντονα επεισόδια με μεγάλο ύψος βροχόπτωσης. Επιπρόσθετα, δίνεται με αυτόν τον τρόπο η δυνατότητα στην καλλιέργεια να κάνει πιο αποδοτική και πλήρη χρήση των θρεπτικών στοιχείων του εδάφους. Για τις καλλιέργειες σιτηρών και πολυετών ψυχανθών το μέτρο αυτό συστήνεται με πρώιμη ή όψιμη σπορά και λίπανση σε σχέση με τις συνήθεις ημερομηνίες (π.χ. σπορά και βασική λίπανση το Μάιο αντί για τον Μάρτιο ή τον Απρίλιο για τον αραβόσιτο, τον Οκτώβριο αντί για το Νοέμβριο για το σιτάρι, λίπανση τον Μάρτιο ή τον Απρίλιο αντί για το Φεβρουάριο για τη μηδική και τα τριφύλλια). Με την πρακτική αυτή προσδοκάται η διαθεσιμότητα θρεπτικών στο έδαφος λόγω λίπανσης να μεταφερθεί για κάθε

καλλιέργεια σε λιγότερο υγρούς μήνες, ώστε να τύχουν καλύτερης αξιοποίησης από τα φυτά και να περιοριστούν οι απώλειές τους από το έδαφος.

Μία ΔΠ που επίσης ανήκει στην κατηγορία της Διαχείρισης Εφαρμογής Θρεπτικών (βλ. εν. 4.2.1) είναι η αποθήκευση της κοπριάς για ένα διάστημα ορισμένων μηνών (συνήθως τριών) και η μετέπειτα διασπορά και εναπόθεσή της στους αγρούς. Όταν εφαρμόζεται η πρακτική αυτή, οι αζωτούχες ενώσεις αεριοποιούνται με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται η σύσταση της κοπριάς και εν τέλει αυτή να περιέχει μικρότερες ποσότητες N. Επισημαίνεται ότι η μέθοδος δεν επηρεάζει την περιεκτικότητα της κοπριάς σε P (Cuttle et al., 2007). Όπως αναλύθηκε και στην ενότητα 4.2.1, για την κοπριά πουλερικών και βοοειδών η βιβλιογραφία κάνει λόγο για επίτευξη μείωσης 15% και 50% αντίστοιχα στην περιεκτικότητα N. Η προσομοίωση της εν λόγω ΔΠ στο SWAT, γίνεται με καθορισμό νέων τύπων κοπριάς με μειωμένη περιεκτικότητα σε N, ενώ η συνεχής εφαρμογή τους δύναται να προσομοιωθεί με εναπόθεση των νέων τύπων κοπριάς μόνο κατά την ξηρή περίοδο, ώστε να μειωθεί ο κίνδυνος απόπλυσης από την επιφάνεια του εδάφους. Η αποφυγή εναπόθεσης κατά την υγρή περίοδο αναμένεται δε να μειώσει δραστικά και τις απώλειες P. Παρ' όλα αυτά, όπως και στην περίπτωση της μεταβολής στο χρονικό σημείο λίπανσης των καλλιεργειών, η μέθοδος δεν μπορεί να εγγυηθεί απόλυτα τα προσδοκώμενα αυτά αποτελέσματα μιας και η στοχαστικότητα των μετεωρολογικών φαινομένων μπορεί να οδηγήσει σε έντονες αποπλύσεις ακόμα και κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.

Παρόμοια επίδραση αναμένεται να έχει ο περιορισμός της περιόδου βόσκησης με κατάργησή της σε κάποιους υγρούς μήνες τους έτους. Κατά τους μήνες αυτούς η εκτροφή των ζώων (π.χ. αιγοπρόβατα, βοοειδή) μπορεί να θεωρηθεί ότι λαμβάνει χώρα σε κλειστούς χώρους και η κοπριά που προκύπτει αποθηκεύεται για μετέπειτα διασπορά στις εκτάσεις σε πιο ξηρούς μήνες. Εκτός από τη μείωση της εναποτιθέμενης κοπριάς κατά τους υγρούς μήνες, διαθέσιμης προς απόπλυση από το έδαφος, το μέτρο επιτρέπει και την καλύτερη ανάπτυξη της φυσικής βλάστησης η οποία δρα ανασχετικά στην απορροή και στη μεταφορά ρύπων. Όταν εφαρμόζεται η εν λόγω ΔΠ, η περίοδος βόσκησης στο SWAT προσομοιώνεται με διαφορετικές ημερομηνίες έναρξης και τέλους.

Οι ΔΠ που προτείνονται για εφαρμογή σε αγροτικές λεκάνες απορροής συνοψίζονται στον Πίνακα 6.1 με αναφορά σε τρεις τύπους αγροτικής χρήσης γης: καλλιέργειες σιτηρών, πολυετών ψυχανθών και εκτάσεων βοσκότοπων.

Πίνακας 6.1 Οι προτεινόμενες Διαχειριστικές Πρακτικές για εφαρμογή σε αγροτικές λεκάνες απορροής.

Χρήση γης	Περιγραφή ΔΠ	Τρόπος Εφαρμογής στο SWAT	Λειτουργία
ΣΙΤΗΡΑ	Επίσπευση ή καθυστέρηση σποράς και βασικής λίπανσης	Αλλαγή στην ημερομηνία	Αποφυγή μεταφοράς N και P σε περίοδο με ισχυρές βροχοπτώσεις
	Μείωση λίπανσης	- (20-30%) στα εφαρμοζόμενα λιπάσματα	Μείωση εισερχόμενου N και P στα εδάφη
	Καλλιέργεια κατά τις ισοϋψείς	$P_{USLE} < 1,0$ CNνέο = CN -3	Μείωση επιφανειακής απορροής και διάβρωσης
	Κατάργηση άροσης	Απαλοιφή άροσης στα αρχεία 'mgt' $CN_{\text{άροσης}} = CN_{\text{συγκομιδής}}$	Μείωση επιφανειακής απορροής και διάβρωσης
	Λωρίδες συγκράτησης	4-10 m πλάτος λωρίδας	Συγκράτηση φερτών και θρεπτικών
ΨΥΧΑΝΘΗ	Επίσπευση ή καθυστέρηση ετήσιας λίπανσης	Αλλαγή στην ημερομηνία	Αποφυγή μεταφοράς N και P σε περίοδο με ισχυρές βροχοπτώσεις
	Μείωση λίπανσης	- (80-100%) N, - (40-60%) P	Μείωση εισερχόμενου N και P στα εδάφη
	Λωρίδες συγκράτησης	4-10 m πλάτος λωρίδας	Συγκράτηση φερτών και θρεπτικών
ΒΟΣΚΟΤΟΠΟΙ	Μείωση αριθμού ζώων	- (20-30%) στην εναπόθεση κοπριάς	Μείωση εισερχόμενου N και P στα εδάφη
	Αποθήκευση κοπριάς ζώων και διασπορά κατά την ξηρή περίοδο	Μείωση στην περιεκτικότητα N της κοπριάς– Εφαρμογή κοπριάς από Απρίλη έως Σεπτέμβρη με διπλασιασμό της ποσότητας κοπριάς ανά εφαρμογή	Μείωση στην εναποτιθέμενη ποσότητα N και μείωση πιθανότητας απόπλυσης από τα εδάφη
	Μείωση περιόδου βόσκησης	Περίοδος βόσκησης: Μάιος –Σεπτέμβριος	Μείωση στην εναποτιθέμενη ποσότητα N κατά την υγρή περίοδο
	Λωρίδες συγκράτησης	4-10 m πλάτος λωρίδας	Συγκράτηση φερτών και θρεπτικών

6.4 Κοστολόγηση Διαχειριστικών Πρακτικών

Για την ολοκλήρωση της δόμησης των πιθανών ΔΠ προς εφαρμογή απαιτείται ακόμα μία ρεαλιστική κοστολόγησή τους με βάση όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστα στοιχεία. Είναι αλήθεια ότι η κοστολόγηση των ΔΠ έχει έντονα τοπικό χαρακτήρα. Ωστόσο, στην ενότητα αυτή προτείνεται μία απλή μεθοδολογία που αποτελεί έναν οδηγό, με τον οποίο ο ερευνητής μπορεί να αξιοποιήσει γνώσεις και τα εκάστοτε τοπικά δεδομένα για να ακολουθήσει τη δική του οικονομική προσέγγιση για τις ίδιες ή παρόμοιες ΔΠ του Πίνακα 6.1.

Οι ΔΠ μπορούν να κοστολογηθούν λαμβάνοντας υπόψη πρόσφατες και αξιόπιστες μελέτες (αν υπάρχουν), δημοσιευμένες τιμές πώλησης λιπασμάτων, καθώς και αξιοποίηση

στοιχείων από οικονομικές προσεγγίσεις άλλων ερευνητών. Ο υπολογισμός του κόστους πρέπει επίσης να γίνεται με αναφορά σε ένα πρόσφατο έτος. Τονίζεται ακόμα, ότι σε μία ανάλυση κόστους - περιβαλλοντικού αποτελέσματος, θα πρέπει το δεύτερο να έχει την ίδια χρονική αναφορά με το πρώτο. Ωστόσο, όταν εφαρμόζεται μία ΔΠ στην αγροτική γη, τα περιβαλλοντικά αποτελέσματα δεν είναι συνήθως άμεσα ορατά. Ένα εύλογο χρονικό διάστημα είναι απαραίτητο, ώστε να εγγυηθεί την επίδραση της πρακτικής στους φυσικούς μηχανισμούς συσσώρευσης θρεπτικών στο έδαφος και μεταφοράς τους στους υδάτινους αποδέκτες. Η χρήση δε αποτελεσμάτων των ΔΠ με εφαρμογή τους μέσω μοντέλου σε συγκεκριμένο έτος, έστω και του ιδίου έτους με εκείνο της οικονομικής ανάλυσης, δεν εγγυάται ότι αντιπροσωπεύουν ικανοποιητικά τη φυσική επίδραση της ΔΠ, αφού η διαμόρφωσή τους μπορεί να έγκειται σε μεγάλο βαθμό στις ιδιαίτερες μετεωρολογικές συνθήκες του συγκεκριμένου έτους. Επιπρόσθετα, όταν μια ΔΠ αφορά σε καλλιέργεια με πολυετή βιολογικό κύκλο (π.χ. πολυετή ψυχανθή), δεν είναι δυνατόν να εκτιμηθεί η επίδραση της εφαρμογής της σε ένα έτος. Για τους λόγους αυτούς, ο μέσος όρος πενταετίας θεωρείται ως μία κατ' ελάχιστον ικανή εκτίμηση για να είναι αντιπροσωπευτική των απωλειών ρύπων από εφαρμογή μιας ΔΠ. Προτείνεται έτσι η εκτίμηση του ρυπαντικού φορτίου ως μέσος όρος των ετήσιων απωλειών ενός διαστήματος π.χ. τεσσάρων ή πέντε ετών και του κόστους σε ένα έτος αναφοράς, κοντά στην εν λόγω περίοδο. Το περιβαλλοντικό αποτέλεσμα των ΔΠ συνεπώς, αφορά στις απώλειες ρύπων που θα προκαλούνταν από την αγροτική γη σε ετήσια βάση για μία πενταετή περίοδο, αν εφαρμόζονταν οι πρακτικές, εναλλακτικά των συμβατικών και κάτω από τις ίδιες μετεωρολογικές συνθήκες της εν λόγω πενταετίας στην εκάστοτε λεκάνη.

Τα κόστη περιλαμβάνουν το απαιτούμενο κεφάλαιο, τη συντήρηση ή συνεχή λειτουργία της ΔΠ για πέντε έτη και το χαμένο εισόδημα που προκύπτει σε ορισμένες περιπτώσεις, κάτι που εκφράζει το κόστος ευκαιρίας (βλ. ενότητα 4.4). Το τελευταίο αφορά στη μείωση αποδόσεων των καλλιεργειών μετά από μείωση λίπανσης, την απώλεια εισοδήματος από μείωση του αριθμού των ζώων καθώς και την απώλεια γεωργικής έκτασης προς εκμετάλλευση όταν εγκαθίστανται λωρίδες συγκράτησης. Η μείωση στην απόδοση μπορεί να υπολογιστεί από τα δεδομένα εξόδου του μοντέλου SWAT μετά από εφαρμογή των ΔΠ, ενώ η απώλεια έκτασης λόγω εγκατάστασης λωρίδων, από την αξιόπιστη προσέγγιση των Cuttle et al. (2007) στο Ηνωμένο Βασίλειο. Η μείωση στον αριθμό των ζώων καθορίζεται άμεσα από το ίδιο το μέτρο για κάθε περιοχή βοσκότοπου στην περιοχή μελέτης. Ουσιαστικά, η διαφοροποίηση στη συγκέντρωση του ζωικού κεφαλαίου εντός της λεκάνης και στη διαμόρφωση της ετήσιας απόδοσης των καλλιεργειών είναι οι δύο παράγοντες που διαφοροποιούν το κόστος ανά μονάδα επιφάνειας όταν οι ίδιες ΔΠ εφαρμόζονται σε διάφορες θέσεις με κοινό τύπο εδαφοκάλυψης.

Ο Πίνακας 6.2 συνοψίζει τα δεδομένα της απλής αυτής μεθοδολογίας κοστολόγησης των ΔΠ σε λεκάνη απορροής. Στην τελευταία στήλη του πίνακα το γράμμα στην παρένθεση δηλώνει αν η ΔΠ οδηγεί σε επιπρόσθετη δαπάνη ή κόστος (Κ) ή αν έχει σαν αποτέλεσμα εξοικονόμηση οικονομικών πόρων δηλαδή αποφέρει επιπρόσθετο οικονομικό όφελος στον αγροτικό πληθυσμό (Ο).

Πίνακας 6.2 Τρόπος κοστολόγησης των Διαχειριστικών Πρακτικών του Πίνακα 6.1.

Χρήση γης	Περιγραφή ΔΠ	Επιπρόσθετο Ετήσιο Κόστος – Όφελος
ΣΙΤΗΡΑ	Επίσπευση ή καθυστέρηση σποράς και βασικής λίπανσης	(Κ) € / kg χαμένης απόδοσης ή (Ο) € / kg επιπλέον απόδοσης
	Μείωση λίπανσης	(Ο) € / kg λιπάσματος (Κ) € / kg χαμένης απόδοσης
	Καλλιέργεια κατά τις ισοϋψείς	(Κ) € / ha για εργασία και καύσιμα (Κ) € / kg χαμένης απόδοσης ή (Ο) € / kg επιπλέον απόδοσης
	Κατάργηση άροσης	(Ο) € / ha για εργασία και καύσιμα (Κ) € / kg χαμένης απόδοσης ή (Ο) € / kg επιπλέον απόδοσης
	Λωρίδες συγκράτησης	(Κ) €/ha για σπόρους, εργασία και κατάληψη αξιοποιήσιμης έκτασης
ΨΥΧΑΝΘΗ	Επίσπευση ή καθυστέρηση ετήσιας λίπανσης	(Κ) € / kg χαμένης απόδοσης ή (Ο) € / kg επιπλέον απόδοσης
	Μείωση λίπανσης	(Ο) € / kg λιπάσματος (Κ) € / kg χαμένης απόδοσης
	Λωρίδες συγκράτησης	(Κ) €/ha για σπόρους, εργασία και κατάληψη αξιοποιήσιμης έκτασης
ΒΟΣΚΟΤΟΠΟΙ	Μείωση αριθμού ζώων	(Κ) €/κεφαλή
	Αποθήκευση κοπριάς ζώων και διασπορά κατά την ξηρή περίοδο	(Κ) €/κεφαλή για αγορά δεξαμενών αποθήκευσης και εργασία
	Μείωση περιόδου βόσκησης	(Κ) €/κεφαλή για εργασία συλλογής κοπριάς
	Λωρίδες συγκράτησης	(Κ) €/ha για σπόρους και εργασία

Το ετήσιο καθαρό κέρδος από την παραγωγή ενός kg σιτηρών ή κτηνοτροφικών φυτών μπορεί να υπολογιστεί από γεωργοοικονομικές μελέτες. Επομένως, η απώλεια παραγωγής που προσομοιώνεται από το μοντέλο SWAT μετά την εφαρμογή μιας ΔΠ μπορεί με βάση αυτήν την τιμή ανά kg προϊόντος να οδηγήσει στον υπολογισμό του επιπρόσθετου κόστους ή χαμένου εισοδήματος. Τέτοιες γεωργοοικονομικές μελέτες έχει εκπονήσει, έστω και περιορισμένα στην Ελλάδα, το ΕΘΙΑΓΕ. Οι τιμές χημικών λιπασμάτων μπορούν να βρεθούν, είτε από τις εν λόγω μελέτες, οι οποίες τις λαμβάνουν υπόψη για την εξαγωγή του ετήσιου καθαρού κέρδους του παραγωγού, είτε από δημοσιεύματα στον τύπο και κάποια έρευνα αγοράς. Η τιμή ανά kg λιπάσματος επιτρέπει τον υπολογισμό του εξοικονομούμενου ποσού ή οφέλους που προκύπτει από μέτρα μείωσης της λίπανσης στις καλλιέργειες. Το

κόστος από τη μείωση του ζωικού κεφαλαίου μεταφράζεται σε μείωση εισοδήματος για τον παραγωγό λόγω εκμετάλλευσης λιγότερων ζώων άρα και μικρότερη παραγωγή προϊόντων. Μία οικονομική ανάλυση για την καθαρή ετήσια πρόσοδο από την κατά κεφαλή εκμετάλλευση παραγωγικών ζώων μπορεί μόνο να βρεθεί από εθνικές μελέτες, π.χ. του ΕΘΙΑΓΕ και σε αυτήν την περίπτωση για την Ελλάδα.

Η κατάργηση της άροσης στις εκτάσεις σιτηρών γενικά θεωρείται ότι εξοικονομεί χρήματα δεδομένου ότι η πρακτική αυτή απαιτεί ανθρώπινη εργασία και καύσιμα για τα γεωργικά μηχανήματα. Εφαρμόζοντας αυτή τη ΔΠ ωστόσο, κάποια επιπλέον έξοδα για την καταπολέμηση ζιζανίων που δεν καταστράφηκαν λόγω απουσίας άροσης, αλλά και απώλεια εισοδήματος από πιθανές μειώσεις στην παραγωγή μπορεί να προκύψουν. Συνολικά, το μέτρο αυτό εκτός της πιθανής μείωσης αποδόσεων που υπολογίζεται από το μοντέλο SWAT, και άρα χαμένου εισοδήματος, αποφέρει εξοικονόμηση χρημάτων για τον παραγωγό λόγω μειωμένης εργασίας και κατανάλωσης καυσίμων. Ο τρόπος με τον οποίο μπορεί να υπολογιστεί αυτό το άθροισμα είναι καθαρά εμπειρικός και έγκειται σε γνώση των τοπικών οικονομιών. Ωστόσο, μία σύγκριση μπορεί να γίνει με ανάλογες εργασίες στην Ευρώπη, π.χ των Cuttle et al. (2007) στο Ηνωμένο Βασίλειο. Συγκεκριμένα, οι συγγραφείς της εν λόγω εργασίας ακολούθησαν παρόμοια προσέγγιση και υπολόγισαν ένα οικονομικό όφελος 40£/ha/έτος με ελαχιστοποίηση της άροσης. Όσον αφορά την καλλιέργεια κατά τις ισοϋψείς, αυτή συνήθως απαιτεί επιπλέον εργασία και καύσιμα. Το επιπλέον κόστος εφαρμογής της πρακτικής αυτής μπορεί επίσης να εκτιμηθεί εμπειρικά και με αναφορά σε παρόμοιες προσεγγίσεις.

Οι λωρίδες συγκράτησης από την άλλη, μπορούν να εκτιμηθούν επίσης με εμπειρικό τρόπο συνυπολογίζοντας το κόστος σπόρων της ειδικής βλάστησης, το κόστος εργασίας για την εγκατάσταση και ετήσια συντήρηση και την απώλεια καλλιεργήσιμης έκτασης, που το μοντέλο SWAT δεν λαμβάνει υπόψη του. Οι Cuttle et al. (2007) αθροίζουν τις εν λόγω συνιστώσες και εκτιμούν μέσο ετήσιο κόστος 32£/ha/έτος στις φάρμες του Ηνωμένου Βασιλείου. Η κοστολόγηση αυτής της ΔΠ είναι πιο δύσκολη δεδομένου ότι δύσκολα μπορεί κάποιος να βρει δημοσιευμένες οικονομικές μελέτες που αναφέρονται σε τέτοια μέτρα, ενώ στην Ελλάδα η πρακτική δεν είναι ιδιαίτερα δημοφιλής.

Το κόστος συλλογής και αποθήκευσης της κοπριάς πουλερικών και αιγοπροβάτων μπορεί να εκτιμηθεί με γνώμονα τις προσεγγίσεις ολοκληρωμένων εργασιών, κάνοντας ωστόσο κάποιες προσεγγίσεις για το κόστος αγοράς δεξαμενών τοποθέτησης της κοπριάς και των εξόδων λειτουργίας που σχετίζονται με ετήσιο κόστος εργασίας. Τέλος, ο περιορισμός της βόσκησης κατά ένα διάστημα της υγρής περιόδου του έτους όπως επίσης και η πρωίμιση ή οψίμιση της σποράς ή/και λίπανσης των καλλιεργειών μπορούν να θεωρηθούν ως ΔΠ με μικρό έως αμελητέο επιπρόσθετο κόστος ή όφελος. Στην πρώτη περίπτωση, το κόστος

μεταφράζεται σε μικρή επιπλέον εργασία για τη συλλογή και αποθήκευση της κοπριάς κατά τους μήνες που η εκτροφή γίνεται πλέον σε κλειστούς χώρους, ενώ στη δεύτερη, με την πιθανή μικρή απόκλιση (θετική ή αρνητική) στις προσδοκώμενες ετήσιες αποδόσεις των καλλιεργειών.

6.5 Συνολικός αριθμός Διαχειριστικών Πρακτικών προς εξέταση

Οι ΔΠ των Πινάκων 6.1 και 6.2 δεν είναι ασύμβατες μεταξύ τους δηλαδή μπορούν να εφαρμοστούν και συνδυαστικά ανά χρήση γης. Αυτό σημαίνει ότι με συνυπολογισμό των συνδυασμών τους ανά δύο, τρεις κτλ, μπορούν να προκύψουν επιπλέον ΔΠ στην αγροτική γη με αθροιστική επίδραση στις απώλειες εδάφους και θρεπτικών από τις ΥΜ της λεκάνης απορροής, καθώς και με κόστος εφαρμογής ίσο με το αθροιστικό κόστος των μεμονωμένων πρακτικών. Αν θεωρηθεί ότι η συμβατική πρακτική καλλιέργειας είναι και αυτή ένα πιθανό σενάριο διαχείρισης (μη παρέμβαση) τότε το σύνολο των δυνατών επιλογών A για διαχείριση ενός τύπου χρήσης γης με N μεμονωμένες και συμβατές μεταξύ τους ΔΠ είναι:

$$A = \binom{N}{1} + \binom{N}{2} + \ldots + \binom{N}{N-1} + \binom{N}{N} + 1 \tag{6.1}$$

Με τον τρόπο αυτό οι επιλεγμένες ΔΠ της αγροτικής γης για χρήση στη διαδικασία βελτιστοποίησης αυξάνονται κατά πολύ και δίνεται η δυνατότητα στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης να επιλέξει μεταξύ ενός μεγάλου εύρους σεναρίων διαχείρισης για το σύνολο των ΥΜ της εκάστοτε λεκάνης απορροής. Αν υποτεθεί ότι υπάρχουν τρεις τύποι χρήσης γης προς διαχείριση (έστω οι τρεις των Πινάκων 6.1 και 6.2) και οι A σε σύνολο δυνατές ΔΠ για τον πρώτο τύπο (σιτηρά) είναι οι συνδυασμοί των N (μεμονωμένων και συμβατών μεταξύ τους + η συμβατική) ΔΠ, όπως υπολογίσηκε από την Εξ. 6.1, οι B δυνατές ΔΠ για τον δεύτερο τύπο (ψυχανθή) είναι οι συνδυασμοί των K (μεμονωμένων και συμβατών μεταξύ τους + η συμβατική) ΔΠ, ενώ οι C δυνατές ΔΠ για τον τρίτο τύπο (βοσκότοποι) είναι οι συνδυασμοί των L (μεμονωμένων και συμβατών μεταξύ τους + η συμβατική) ΔΠ, τότε το σύνολο των πιθανών ΔΠ στους τρεις αγροτικούς τύπους της λεκάνης συνοψίζεται ακολούθως στον Πίνακα 6.3.

Πίνακας 6.3 Το σύνολο των ΔΠ (*A,B,C*), μεμονωμένων πρακτικών και συνδυασμών τους (έκφραση ακέραιων τιμών), που δημιουργούνται για χρήση στη διαδικασία βελτιστοποίησης.

Σύνολο ΔΠ στην καλλιέργεια σιτηρών		**Σύνολο ΔΠ στην καλλιέργεια ψυχανθών**		**Σύνολο ΔΠ στους βοσκότοπους**	
A	Συμβατική τεχνική καλλιέργειας σιτηρών 1 2 . . N 1 + 2 1 + 3 . . 1 + N 2 + 3 . . 2 + N . . N-1 + N 1 + 2 + 3 . . 1 + 2 + N . . N-2 + N-1 + N . . 1 + 2 + 3 +.. + N-1 + N	***B***	Συμβατική τεχνική καλλιέργειας ψυχανθών 1 2 . . K 1 + 2 1 + 3 . . 1 + K 2 + 3 . . 2 + K . . K-1 + K 1 + 2 + 3 . . 1 + 2 + K . . K-2 + K-1 + K . . 1 + 2 + 3 +.. + K-1 + K	***C***	Συμβατική τεχνική εκμετάλλευσης βοσκότοπων 1 2 . . L 1 + 2 1 + 3 . . 1 + L 2 + 3 . . 2 + L . . L-1 + L 1 + 2 + 3 . . 1 + 2 + L . . L-2 + L-1 + L . . 1 + 2 + 3 +.. + L-1 + L

Αν τέλος υποθέσουμε ότι οι τρεις τύποι χρήσης γης συναντώνται με αριθμό ΥΜ στη λεκάνη *m*, *n* και *l*, ενώ *A*, *B*, *C*, είναι αντίστοιχα οι συνολικοί αριθμοί ΔΠ (μεμονωμένων και συνδυαστικών – βλ. Πίνακα 6.3) προς εφαρμογή σε κάθε έναν από αυτούς, τότε ο συνολικός αριθμός σεναρίων διαχείρισης στους τρεις αγροτικούς τύπους της λεκάνης είναι $\Delta = A + B + C$, ενώ ο συνολικός αριθμός ολοκληρωμένων διαχειριστικών λύσεων ή συνδυασμών ΔΠ σε ολόκληρη την αγροτική γη της λεκάνης απορροής είναι:

$$\Lambda = A^m \times B^n \times C^l \tag{6.2}$$

Με το συνδυασμό των μεμονωμένων ΔΠ ο χώρος αναζήτησης αυξάνεται σημαντικά και αξιοποιείται η δυνατότητα των αλγόριθμων να εξερευνήσουν και να ανακαλύψουν λύσεις που θα ήταν αδύνατο να εντοπιστούν εμπειρικά λόγω έλλειψης χρόνου.

6.6 Δημιουργία της Βάσης Διαχειριστικών Πρακτικών

Ο αριθμός Δ όπως ορίστηκε παραπάνω εκφράζει το σύνολο των ΔΠ (μεμονωμένων, συνδυαστικών και συμβατικής τεχνικής) που μπορούν να εξεταστούν συνολικά στις ΥΜ των τύπων αγροτικής χρήσης γης της λεκάνης απορροής. Οι ακέραιοι αριθμοί 1 έως Δ+1 αποτελούν έτσι την έκφραση των Δ+1 ΔΠ στο προγραμματιστικό περιβάλλον του MATLAB, που θα φιλοξενήσει τη διαδικασία της βελτιστοποίησης της επιλογής και τοποθέτησης ΔΠ για την ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους εφαρμογής τους στην εκάστοτε λεκάνη απορροής και των απωλειών θρεπτικών από τα εδάφη στο υδρογραφικό δίκτυο. Νωρίτερα, οι κωδικοί αυτοί χρησιμεύουν ως αναφορά σε Δ+1 εκτελέσεις του μοντέλου SWAT για τη δημιουργία της ΒΔΠ που αποθηκεύει δεδομένα των μέσων ετήσιων απωλειών ρύπων (φερτά, N-NO3 και P) και κόστους από όλες τις ΥΜ της λεκάνης μετά από εφαρμογή όλων των ΔΠ. Η πρακτική Δ+1 χρησιμεύει ως μία εικονική ΔΠ που αντιστοιχίζει τη συμβατική πρακτική διαχείρισης σε μη αγροτικές ΥΜ της λεκάνης. Η δημιουργία της ΒΔΠ αποτελεί ουσιαστική καινοτομία της διατριβής και στοχεύει στο να επιταχύνει τη διαδικασία της βελτιστοποίησης.

Η ΒΔΠ αποτελείται από 4 φύλλα Excel ή από ένα σετ 4 αυτοτελών αρχείων, αν επιλεχθεί κάποιο άλλο πρόγραμμα του λειτουργικού συστήματος Windows (π.χ. Notepad). Το κάθε ένα από τα φύλλα εργασίας ή αρχεία περιέχει πληροφορία για μία περιβαλλοντική μεταβλητή ή για το κόστος. Η πληροφορία αυτή διατάσσεται σε έναν πίνακα όπου οι σειρές αντιστοιχούν στις ΥΜ της λεκάνης, ενώ οι στήλες στις Δ+1 ΔΠ. Η κάθε τιμή του πίνακα εκφράζει δηλαδή το μέγεθος των απωλειών ενός ρύπου ή το κόστος που προκλήθηκε από την εφαρμογή μίας εκ των Δ+1 ΔΠ σε συγκεκριμένη ΥΜ της λεκάνης. Στην περίπτωση που η λεκάνη έχει χωριστεί σε T ΥΜ, τότε ο κάθε πίνακας αποτελείται από $T \times$ Δ+1 στοιχεία: τις T ΥΜ και τις Δ+1 ΔΠ που εξετάζονται. Υπενθυμίζεται ότι η Δ+1 πρακτική ενσωματώνεται για να διευκολύνει την έκφραση της απουσίας διαχείρισης στις φυσικές εκτάσεις.

Το βαθμονομημένο μοντέλο της εκάστοτε λεκάνης απορροής στο SWAT, αποτελείται από σύνολο αρχείων σε ειδικό φάκελο, που βρίσκεται σε ορισμένη από το χρήστη θέση της μνήμης αποθήκευσης του υπολογιστή. Ανάμεσα στα αρχεία του φακέλου υπάρχουν T αρχεία διαχείρισης με κατάληξη ‘mgt’, που ανοίγουν ως αρχεία κειμένου ‘txt’ και περιέχουν την πληροφορία διαχείρισης των T ΥΜ της λεκάνης. Το περιεχόμενο του κάθε αρχείου αποτελείται από ένα σύνολο αριθμητικών δεδομένων που επιτρέπουν στο μοντέλο SWAT να προσομοιώσει την εκάστοτε ΔΠ και μετά από εκτέλεση να ποσοτικοποιήσει τις απώλειες ρύπων από κάθε ΥΜ.

Η διαδικασία δημιουργίας της ΒΔΠ είναι πλήρως αυτοματοποιημένη. Ένας αριθμός Δ+1 αυτοτελών προγραμματιστικών εγγράφων, ‘scripts’, συντάσσεται σε γλώσσα

προγραμματισμού MATLAB (M-αρχεία), με κάθε ένα να αντιστοιχεί σε μία ΔΠ από τις Δ+1 που συνολικά εξετάζονται. Το κάθε script εκτελεί μία σειρά εντολών για την εγγραφή του σετ δεδομένων που απαρτίζουν τη μαθηματική αναπαράσταση μιας ΔΠ στο SWAT, σε όλα ταυτόχρονα τα αρχεία 'mgt' στα οποία η συγκεκριμένη ΔΠ αναφέρεται, δηλαδή σε όλες ταυτόχρονα τις ΥΜ, των οποίων η χρήση γης επιδέχεται εφαρμογής της συγκεκριμένης ΔΠ. Συγκεκριμένα, η διαδικασία εκτελεί κατά σειρά τις παρακάτω λειτουργίες:

i Ανοίγει όλα τα 'mgt' αρχεία (*T*).

ii Αναγνωρίζει την πληροφορία για τη χρήση γης και το έδαφος που περιέχεται σε κάθε ένα από τα αρχεία αυτά.

iii Κάνοντας χρήση της εντολής εγγραφής του MATLAB 'fprintf' συντάσσει τα αρχεία εκείνα που η χρήση γης επιδέχεται την εφαρμογή της εκάστοτε ΔΠ με το σετ δεδομένων που την απαρτίζει.

iv Εκτελεί το μοντέλο SWAT για έναν αριθμό ετών π.χ. 5 έτη με την εντολή 'dosSWAT2005', ώστε το μοντέλο να προσομοιώσει τις υδρολογικές και χημικές διεργασίες στη λεκάνη με εφαρμογή της εκάστοτε ΔΠ κατά το εν λόγω διάστημα.

v Διαβάζει με την εντολή 'dlmread' τα μέσα ετήσια φορτία φερτών υλών, N-NO3 και P που εγκαταλείπουν την κάθε ΥΜ και εισέρχονται στο υδρογραφικό δίκτυο.

vi Διαβάζει με την ίδια εντολή από τα αρχεία εξόδου του μοντέλου τις μέσες ετήσιες αποδόσεις των καλλιεργειών ανά ΥΜ.

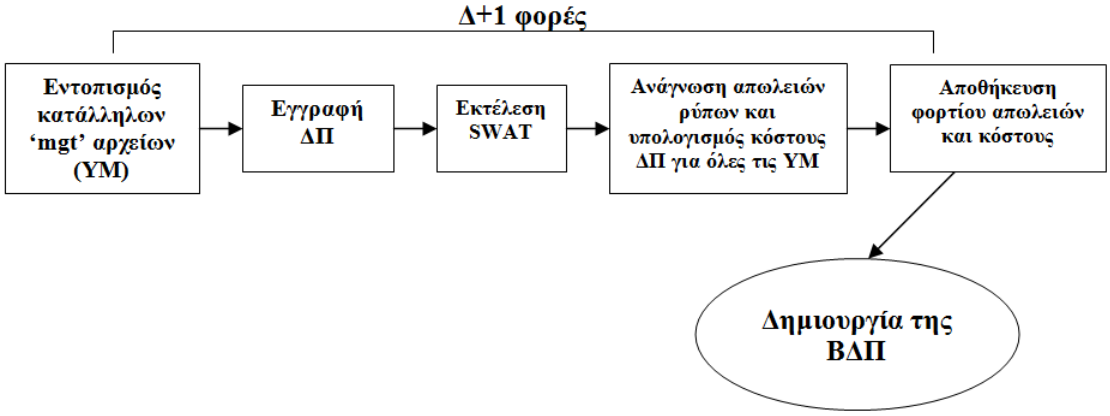
vii Χρησιμοποιεί τις ανωτέρω αποδόσεις, τις αποδόσεις των καλλιεργειών της υφιστάμενης κατάστασης, τον αριθμό των ζώων κάθε ΥΜ βοσκότοπου και τα οικονομικά δεδομένα που συντάσσονται με βάση τη μεθοδολογία της ενότητας 6.4, σε ειδικά διαμορφωμένη μαθηματική φόρμουλα για τον υπολογισμό του μέσου ετήσιου κόστους εφαρμογής της εκάστοτε ΔΠ σε κάθε ΥΜ.

viii Αποθηκεύει τα αποτελέσματα των απωλειών ρύπων και κόστους των ΔΠ για κάθε ΥΜ στη ΒΔΠ.

Μετά την εκτέλεση και των Δ+1 M-αρχείων, αποκτάται το σύνολο της περιβαλλοντικής πληροφορίας και του κόστους εφαρμογής των ΔΠ με αποτέλεσμα η δημιουργία της ΒΔΠ να ολοκληρώνεται. Η βάση δεδομένων προτείνεται στην παρούσα μεθοδολογία να περιέχει τις απώλειες ρύπων από τις ΥΜ μετά από εφαρμογή των ΔΠ, σε tn για τα φερτά και σε kg για τον P και το N-NO3, και όχι τις διαφορές ή τις ποσοστιαίες μεταβολές των απωλειών από την υφιστάμενη κατάσταση. Επιπλέον, τόσο οι απώλειες ρύπων, όσο και τα κόστη εφαρμογής των ΔΠ προτείνεται να αποθηκεύονται όχι με αναφορά

ανά μονάδα έκτασης της ΥΜ, αλλά ως τιμές αναφερόμενες στις συνολικές εκτάσεις αυτών (tn, kg, €).

Η ΒΔΠ, αποτελείται από τέσσερις πίνακες $T\times\Delta+1$ στοιχείων, όπου οι ρύποι και τα κόστη των A ΔΠ στις ΥΜ του πρώτου αγροτικού τύπου χρήσης γης (σιτηρά) βρίσκονται στις πρώτες A στήλες, των B ΔΠ του δεύτερου τύπου (ψυχανθή) στις στήλες $A+1$ έως $A+B$, ενώ των ΔΠ των βοσκότοπων (τρίτος αγροτικός τύπος γης) στις στήλες $A+B+1$ έως $A+B+C=\Delta$. Τονίζεται ότι μία μόνο ΔΠ (μεμονωμένη ή συνδυαστική) εφαρμόζεται στη λεκάνη κάθε φορά που εκτελείται στο MATLAB ένας από τους Δ+1 κώδικες, αφορώντας δηλαδή μόνο έναν τύπο χρήσης γης. Οι απώλειες δε από τις μη αγροτικές εκτάσεις (π.χ. δασικές) βρίσκονται στις γραμμές που περιλαμβάνουν τις ΥΜ με την εν λόγω χρήση γης και είναι ίδιες και ίσες με αυτές της υφιστάμενης κατάστασης για οποιαδήποτε από τις Δ+1 στήλες των πινάκων, ενώ το κόστος στον αντίστοιχο πίνακα είναι σταθερά μηδενικό. Αυτό συμβαίνει διότι οι φυσικές εκτάσεις δεν τίθενται υπό διαχείριση σε κανένα από τα Δ+1 σενάρια που εξετάζονται, με το τελευταίο όμως (Δ+1) να είναι συνυφασμένο με αυτές για πρακτικούς λόγους, όπως θα δειχτεί παρακάτω. Οι διαδικασίες ανάπτυξης της ΒΔΠ συνοψίζονται στο Σχήμα 6.2.



Σχήμα 6.2 Διαδοχικά αυτοματοποιημένα βήματα δημιουργίας της ΒΔΠ.

Η ΒΔΠ περιέχει τιμές για τα μέσα ετήσια φορτία ρύπων που εγκαταλείπουν τα όρια των ΥΜ και εισέρχονται στο υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης απορροής. Το άθροισμα των απωλειών ρύπων από όλες τις ΥΜ της λεκάνης δεν ταυτίζεται απαραίτητα με το ολικό φορτίο που παρατηρείται στη διατομή ποταμού στην έξοδο της λεκάνης μετά από εκτέλεση του SWAT. Αυτό συμβαίνει διότι στη φύση και κατά την υδρολογική προσομοίωση των φυσικών διεργασιών με το μοντέλο, οι ρύποι υφίστανται μεταβολές ως προς τις ποσότητές τους λόγω βιοχημικών διεργασιών κατά την υδατική μεταφορά τους στα κατάντη. Επιπλέον, η διάβρωση ή η εναπόθεση φερτών στον πυθμένα του ποταμού μεταβάλλει την ποσότητα εδάφους που μεταφέρεται έως την έξοδο σε σχέση με αυτή που έχει εισρεύσει στο ποτάμι από

τις εκτάσεις. Κατά συνέπεια, η ελαχιστοποίηση του αθροίσματος απωλειών ρύπων από τις εκτάσεις με χρήση των δεδομένων της ΒΔΠ δεν οδηγεί αυστηρά στον ίδιο ακριβώς συνδυασμό ΔΠ στη λεκάνη όταν ελαχιστοποιείται το συνολικό φορτίο ποταμού στην έξοδο.

Ωστόσο, πιστεύεται ότι με τη χρήση των δεδομένων της ΒΔΠ, ο στόχος της διαδικασίας αντιπροσωπεύει καλύτερα τον περιβαλλοντικό στόχο που τίθεται σε μια αγροτική λεκάνη απορροής. Είναι δηλαδή ορθότερο να προσπαθεί κανείς να ελαχιστοποιεί τους ρύπους καθ' όλη την έκταση της λεκάνης, όπου πιθανά η ποιότητα του νερού των παραποτάμων είναι επίσης αντικείμενο περιβαλλοντικής ανησυχίας. Η λήψη μέτρων σε αυτήν την περίπτωση δεν αντιμετωπίζει το πρόβλημα αυστηρά ως προσπάθεια μείωσης της συγκέντρωσης σε διατομή ποταμού, αλλά ως προσπάθεια διατήρησης του εδάφους και των θρεπτικών στη 'θέση' τους, δηλαδή ως προσπάθεια αποφυγής υποβάθμισης των εδαφών και των επιφανειακών υδάτων στο σύνολό τους εντός της λεκάνης. Στην αντίθετη περίπτωση, όταν η ελαχιστοποίηση γίνεται με γνώμονα το φορτίο ή τη συγκέντρωση ρύπου στην έξοδο, οι βιοχημικές διεργασίες στο υδρογραφικό δίκτυο μπορεί, σε εξαιρετικές περιπτώσεις βέβαια, να βρίσκονται σε μεγάλη αναντιστοιχία με τις απώλειες από τις ανάντη εκτάσεις. Έτσι, αν οι διεργασίες αυτές είναι σημαντικές, είναι δυνατόν η μείωση που επιτυγχάνεται κατά την κίνηση του νερού στο ποτάμι να είναι υπεύθυνη για χαμηλές συγκεντρώσεις και φορτία στην έξοδο, ώστε να μη διαφαίνεται ως απαραίτητη η διαχείριση της αγροτικής γης στα ανάντη, παρόλο που τα φορτία απωλειών προς τους υδάτινους αποδέκτες είναι αυξημένα και μη επιθυμητά. Σ' αυτήν την περίπτωση, το χαμηλό φορτίο στην έξοδο δεν είναι αντιπροσωπευτικό της αποτελεσματικότητας της διαχείρισης στα ανάντη και μπορεί να παραπλανά.

Στις ελληνικές λεκάνες ωστόσο, οι μετρήσεις ποιοτικών παραμέτρων στα ποτάμια και η γνώση που διατίθεται έως τώρα δεν επιτρέπουν μία αξιόπιστη εκτίμηση της σπουδαιότητας των βιοχημικών διεργασιών κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου. Όπως θα εξηγηθεί αναλυτικά στο Κεφάλαιο 8, η μεταβολή του φορτίου κατά την κίνηση των ρύπων στο νερό μέσω των εν λόγω διεργασιών, στην πράξη θεωρείται ότι σε ετήσια βάση μπορεί να αμεληθεί για ένα ελληνικό ποτάμι ταχείας απόκρισης. Αυτό βασίζεται στην γεωμορφολογία των ελληνικών λεκανών που οδηγούν σε άμεση ανταπόκριση των ποταμών στα μετεωρολογικά φαινόμενα, κατά συνέπεια στο μικρό χρόνο παραμονής του νερού εντός της κοίτης, πράγμα που στον πραγματικό κόσμο δεν ευνοεί πολλές από τις βιοχημικές διεργασίες που προσομοιώνονται από το SWAT. Μπορεί έτσι να θεωρηθεί ότι τα φορτία θρεπτικών που μετρούνται από τις Υπηρεσίες ή προσομοιώνονται από το μοντέλο στην έξοδο της λεκάνης αντιπροσωπεύουν επαρκώς τα αθροιστικά φορτία απωλειών θρεπτικών από τις ανάντη εκτάσεις που εισέρχονται στο υδρογραφικό δίκτυο αφού τις εγκαταλείψουν. Σχετικά με τη στερεομεταφορά, έχει επίσης αποδειχτεί ότι στα ελληνικά ποτάμια το φορτίο απόπλυσης,

δηλαδή το φορτίο φερτών υλών σε διατομή ποταμού που προέρχεται από τη διάβρωση της ανάντη λεκάνης και μεταφέρεται σε αιώρηση (Μιμίκου, 2006· Τσακίρης, 2006) είναι με μεγάλη διαφορά ο βασικός παράγοντας διαμόρφωσης της στερεοπαροχής του ποταμού σε δεδομένη θέση (Zarris et al., 2001). Συνεπώς, η τελευταία μπορεί ικανοποιητικά να εκφράσει την απώλεια εδάφους από την ανάντη λεκάνη. Από τα ανωτέρω, που αναλυτικά περιγράφονται και αιτιολογούνται στο Κεφάλαιο 8, μπορεί να θεωρηθεί ότι η βελτιστοποίηση των περιβαλλοντικών κριτηρίων σε μία ελληνική λεκάνη με χρήση των δεδομένων της ΒΔΠ ουσιαστικά καλύπτει το πρόβλημα βελτιστοποίησης των φορτίων ή συγκεντρώσεων θρεπτικών στην έξοδο του ποταμού.

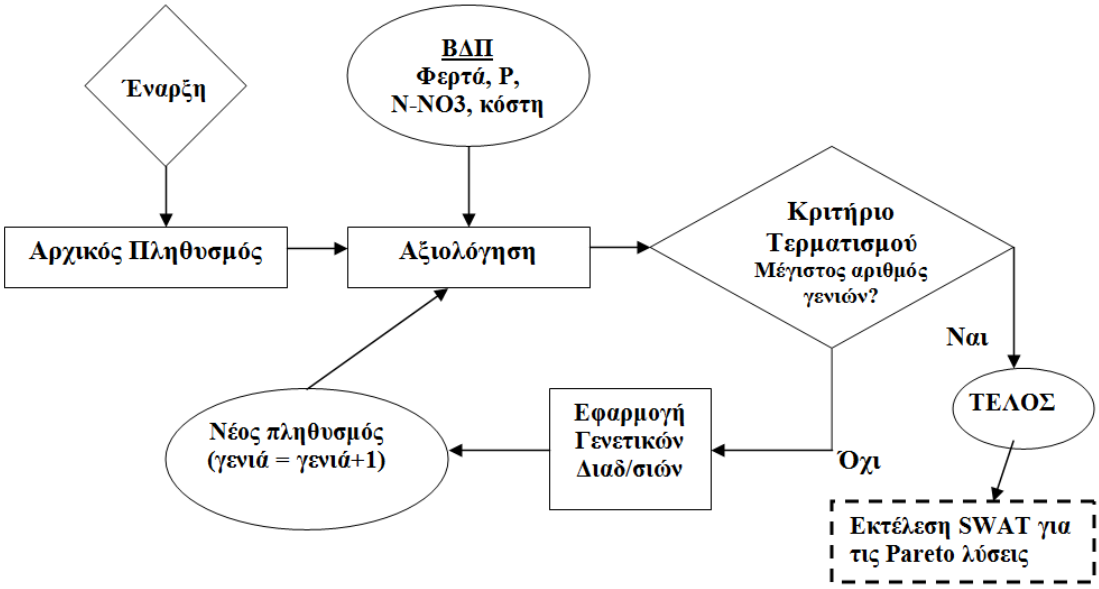
6.7 Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση

Η ΒΔΠ που μόλις παρουσιάστηκε, περιέχει σε πινακοποιημένη μορφή τα φορτία απωλειών εδάφους (tn), N-NO3 (kg), P (kg) και κόστους (€) σε διάταξη $T\times\Delta+1$, όπου T ο αριθμός των ΥΜ και Δ+1 εκείνος των ΔΠ. Η βελτιστοποίηση (ελαχιστοποίηση) ενός μόνο στόχου, π.χ. του συνολικού φορτίου απωλειών P από όλες τις ΥΜ θα απαιτούσε την εύρεση της πιο αποδοτικής ΔΠ για κάθε ΥΜ, δηλαδή την μικρότερη τιμή σε κάθε γραμμή του πίνακα αποθήκευσης των απωλειών P, ανάμεσα από τις Δ+1 (στήλες), που ως ελάχιστη συμβάλλει κατά το ελάχιστο στο άθροισμα συνολικού φορτίου απωλειών P από τις ΥΜ της λεκάνης. Οι T τιμές του αθροίσματος αντιπροσωπεύουν δηλαδή τις ελάχιστες δυνατές απώλειες P που προκύπτουν από την εφαρμογή της πιο αποδοτικής στην περιστολή των απωλειών P πρακτικής σε κάθε ΥΜ. Έτσι, ο στόχος της βελτιστοποίησης είναι η εύρεση του συνδυασμού T στοιχείων του πίνακα (ένα από κάθε γραμμή), που το άθροισμά τους διαμορφώνει την μικρότερη τιμή από οποιοδήποτε άλλο συνδυασμό T στοιχείων κάθε ενός προερχομένου από μία γραμμή. Με την ανάπτυξη της ΒΔΠ το πρόβλημα αυτό είναι πολύ εύκολο να λυθεί με απλή εύρεση του ελαχίστου κάθε γραμμής του πίνακα σε ένα φύλλο excel, είτε πρόκειται για κάποιον από τους τρεις ρύπους, είτε για το κόστος. Το πρόβλημα ελαχιστοποίησης στην περίπτωση του P μαθηματικοποιείται ως εξής:

$$\min \sum_{i=1}^{T} P(i,j), \qquad P_{(\text{ΥΜ},\Delta\Pi)} = \begin{bmatrix} a_{1,1} & . & . & . & . & . & a_{1,\Delta+1} \\ a_{2,1} & . & . & . & . & . & a_{2,\Delta+1} \\ . & . & . & . & . & . & . \\ a_{i,1} & . & . & a_{i,j} & . & . & a_{i,\Delta+1} \\ . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . \\ a_{T,1} & . & . & . & . & . & a_{T,\Delta+1} \end{bmatrix} \tag{6.3}$$

, όπου $a_{i,j}$, το στοιχείο του πίνακα που αντιστοιχεί σε μέσες ετήσιες απώλειες P (kg) από την $i_{\text{οστή}}$ ΥΜ όταν εφαρμόζεται η $j_{\text{οστή}}$ ΔΠ.

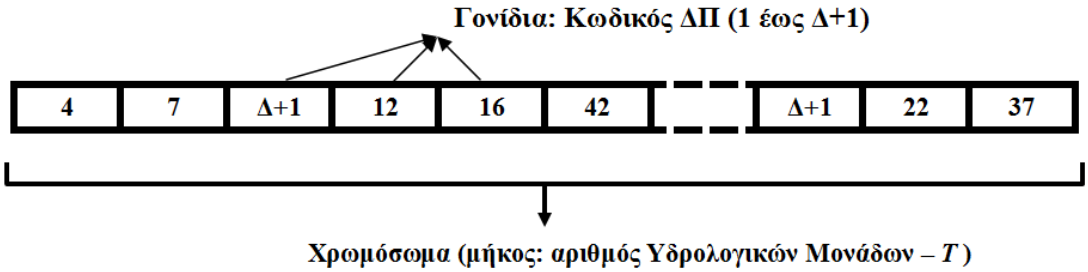
Ωστόσο, όταν δύο ή περισσότερα αντικρουόμενα κριτήρια περιλαμβάνονται στο πρόβλημα της βελτιστοποίησης, για παράδειγμα, όταν οι συνολικές απώλειες εδάφους (φερτών), P και N-NO3, ταυτόχρονα με το αθροιστικό επιπρόσθετο κόστος, αποτελούν όλες αντικειμενικές συναρτήσεις προς ελαχιστοποίηση, ο συνδυασμός ΔΠ που ελαχιστοποιεί τη μία συνάρτηση δεν ελαχιστοποιεί και μία άλλη την ίδια στιγμή. Αυτό είναι ουσιαστικά το πρόβλημα της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης που ο ΓΑ του MATLAB καλείται να λύσει. Τα βήματα της διαδικασίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.3.



Σχήμα 6.3 Η διαδικασία πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης με τον ΓΑ του MATLAB για την επιλογή και τοποθέτηση ΔΠ στην αγροτική γη λεκάνης απορροής.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.3, η διαδικασία βελτιστοποίησης με χρήση ΓΑ ξεκινάει με τον ορισμό ενός αρχικού πληθυσμού (βλ. και ενότητα 5.3.2 και Σχήμα 5.8), είτε τυχαία, είτε με καθορισμό από το χρήστη. Κάθε άτομο του πληθυσμού αναπαρίσταται από ένα χρωμόσωμα αποτελούμενο από γονίδια, ίσα σε αριθμό με τον αριθμό των μεταβλητών απόφασης, δηλαδή τον αριθμό *T* των ΥΜ της εκάστοτε λεκάνης απορροής. Οι τιμές όλων των γονιδίων (*T*) ενός χρωμοσώματος δημιουργούν το γονότυπο του ατόμου, ενώ η πραγματική τους αναπαράσταση το φαινότυπο, ο οποίος είναι ένας συγκεκριμένος συνδυασμός ΔΠ στις *T* ΥΜ της λεκάνης. Η έως τώρα δόμηση του προβλήματος με τις ΔΠ να κωδικοποιούνται με ακέραιους αριθμούς από το 1 έως το Δ+1, καθιστά την έκφραση αυτή

των καταστάσεων που τα γονίδια του χρωμοσώματος μπορούν να λάβουν, την πιο δόκιμη. Κατά συνέπεια, στο εν λόγω πρόβλημα τα γονίδια εκφράζονται με ακέραιους αριθμούς μεταξύ 1 και Δ+1 εκφράζοντας μία από τις Δ+1 ΔΠ σε κάθε ΥΜ. Ο ΓΑ του MATLAB δεν έχει άλλωστε περιορισμό στην κωδικοποίηση των χρωμοσωμάτων (π.χ. δεν προβλέπει μόνο κωδικοποίηση δυαδικής μορφής). Η αναπαράσταση ενός υποθετικού χρωμοσώματος φαίνεται στο Σχήμα 6.4.



Σχήμα 6.4 Χρωμόσωμα που αναπαριστά ένα συνδυασμό ΔΠ ή μία συγκεκριμένη διαχειριστική λύση σε ολόκληρη τη λεκάνη απορροής με *T* σε σύνολο ΥΜ.

Στη φάση της κωδικοποίησης είναι παρόλα αυτά απαραίτητο να καθοριστούν οι αναγκαίοι περιορισμοί σχετικά με τα όρια ακέραιων τιμών, ανάμεσα στα οποία θα κινούνται οι πιθανές τιμές των γονιδίων όταν δημιουργούνται τα άτομα του πληθυσμού. Οι περιορισμοί αυτοί είναι της μορφής της Σχέσης 5.1, όπου η μεταβλητή απόφασης περιορίζεται από κατώτερο και ανώτερο όριο. Με τον εν λόγω περιορισμό, το εύρος των πιθανών τιμών κάθε γονιδίου που αντιστοιχεί σε ΥΜ καλλιέργειας σιτηρών θα είναι από 1 έως *A*, που σημαίνει ότι ο ΓΑ θα επιλέγει τιμές για το εν λόγω γονίδιο από τις πρώτες *A* στήλες των τεσσάρων πινάκων της ΒΔΠ. Ομοίως, για τις ΥΜ της καλλιέργειας πολυετούς ψυχανθούς και των βοσκότοπων τα εύρη των ακέραιων τιμών των γονιδίων θα είναι (*A*+1 έως *A*+*B*) και (*A*+*B*+1 έως Δ) αντίστοιχα, σε πλήρη δηλαδή αντιστοιχία με τις δυνατές ΔΠ κάθε τύπου χρήσης γης. Οι μη αγροτικές εκτάσεις πρέπει επίσης να αναπαριστώνται σταθερά με τον ακέραιο αριθμό Δ+1 δηλαδή ο αλγόριθμος να επιλέγει τις τιμές της τελευταίας στήλης των πινάκων της ΒΔΠ. Ωστόσο, για τις μη αγροτικές εκτάσεις, ο αλγόριθμος θα μπορούσε να λαμβάνει τιμές από οποιαδήποτε στήλη του πίνακα μιας και όλες είναι μεταξύ τους ίσες και εκφράζουν υφιστάμενα φορτία απωλειών και μηδενικά κόστη. Όμως, περιορίζοντας το ψάξιμο από τον αλγόριθμο σε μία μόνο στήλη, υποβοηθείται η διαδικασία να μην κάνει άσκοπες προσπάθειες ανεύρεσης λύσεων και έτσι να κερδίζει χρόνο. Το ότι εν τέλει επιλέχθηκε η μία και μοναδική στήλη να είναι η Δ+1 οφείλεται σε λόγους που σχετίζονται με την μετέπειτα ανάγκη μονοσήμαντης απεικόνισης της διαχειριστικής δράσης σε χάρτη για κάθε ΥΜ. Έτσι,

αποφεύγεται η σύγχυση με τους ακέραιους αριθμούς 1 έως Δ, που όλοι εκφράζουν κάποια ΔΠ στη αγροτική γη. Επιπλέον, αν κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης κάποια αγροτική ΥΜ επιλεχθεί να βρίσκεται υπό διαχείριση με τις συμβατικές τεχνικές (ενσωματωμένη ΔΠ στις *A*, *B*, και *C* πρακτικές για τα τρία είδη), τότε θα διευκολύνεται ο διαχωρισμός μιας φυσικής έκτασης, που ούτως ή άλλως δεν τίθεται υπό διαχείριση από την συνειδητή επιλογή μία αγροτική έκταση να μην υφίσταται κάποια εναλλακτική ΔΠ. Οι περιορισμοί για κάθε γονίδιο x_i ενός χρωμοσώματος είναι λοιπόν οι κάτωθι:

$$
\begin{aligned}
&1 \le x_i^{\text{ΣΙΤΗΡΑ}} \le A \\
&A+1 \le x_i^{\text{ΨΥΧΑΝΘΗ}} \le A+B \\
&A+B+1 \le x_i^{\text{ΒΟΣΚ}} \le \Delta \\
&\Delta+1 \le x_i^{\text{ΑΛΛΟ}} \le \Delta+1
\end{aligned}
\tag{6.4}
$$

Αφού κωδικοποιηθούν με βάση τους ανωτέρω περιορισμούς, τα άτομα του πληθυσμού αξιολογούνται με βάση τις αντικειμενικές συναρτήσεις, δηλαδή το αθροιστικό φορτίο απωλειών φερτών, P και N-NO3 και το αθροιστικό κόστος, που προκύπτουν από την άθροιση των *T* στοιχείων των αντίστοιχων πινάκων της ΒΔΠ στα οποία παραπέμπουν οι τιμές των *T* γονιδίων. Η χρήση της ΒΔΠ, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.3, είναι εξωτερική, δηλαδή αυτή συνεισφέρει εξωτερικά τα απαραίτητα δεδομένα κάθε φορά που οι αντικειμενικές συναρτήσεις υπολογίζονται. Πρόκειται για το κρίσιμο σημείο της διαδικασίας βελτιστοποίησης, όπου εξοικονομείται σημαντικά χρόνος έως την περάτωσή της. Στην περίπτωση που η αξιολόγηση των ατόμων γινόταν κάθε φορά με εκτέλεση του μοντέλου SWAT και οι αντικειμενικές συναρτήσεις για τους περιβαλλοντικούς στόχους ήταν τα υπολογιζόμενα φορτία ρύπων στην έξοδο της λεκάνης, τότε ο απαιτούμενος χρόνος θα ήταν πολλαπλάσιος για την αξιολόγηση ενός ατόμου, για την προσομοίωση δηλαδή ενός διαχειριστικού σχήματος στη λεκάνη. Η διαδικασία βελτιστοποίησης θα χρειαζόταν πολύ μεγάλο χρόνο για να ολοκληρωθεί αν ληφθεί υπόψη ότι ένας πληθυσμός αποτελείται από 100άδες άτομα ενώ 1000άδες γενιές δημιουργούνται. Η εξωτερική χρήση των δεδομένων της ΒΔΠ επιτρέπει την αξιολόγηση ενός ατόμου του πληθυσμού σε χιλιοστά του δευτερολέπτου όπως θα δούμε στο Κεφάλαιο 9.

Η διαδικασία του αλγόριθμου βελτιστοποίησης του Σχήματος 6.3 επιχειρεί συστηματικά την ελαχιστοποίηση των αντικειμενικών συναρτήσεων και την εύρεση των ολικά βέλτιστων λύσεων Pareto μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας αναπαραγωγής πληθυσμών. Μετά από κάθε αξιολόγηση ενός πληθυσμού ελέγχεται αν ο διαδοχικός αριθμός

γενιάς συμπίπτει με το κριτήριο τερματισμού, δηλαδή με τον μέγιστο δυνατό αριθμό γενιάς που έχει οριστεί στον αλγόριθμο. Η διαδικασία σταματά αν το κριτήριο ικανοποιείται, διαφορετικά συνεχίζεται με εφαρμογή των γνωστών γενετικών διαδικασιών στον υπάρχοντα πληθυσμό, όπως διασταύρωση και μετάλλαξη (βλ. ενότητα 5.3.2) για την παραγωγή της επόμενης γενιάς και τη δημιουργία του νέου πληθυσμού, ο οποίος εκ νέου αξιολογείται με τις αντικειμενικές συναρτήσεις. Είναι προφανές ότι όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος του πληθυσμού και ο αριθμός γενιών τόσο καλύτερη η σύγκλιση με το ολικά βέλτιστο μέτωπο Pareto, αλλά και τόσο μεγαλύτερος ο υπολογιστικός φόρτος της διαδικασίας.

Το τέλος της διαδικασίας προτείνει ένα σύνολο από λύσεις, τις βέλτιστες Pareto λύσεις. Κάθε λύση αναπαρίσταται με ένα χρωμόσωμα, του οποίου κάθε γονίδιο εκφράζει μία ΔΠ σε κάθε ΥΜ της λεκάνης. Πρόκειται λοιπόν για τους βέλτιστους ή μη κατώτερους ή μη κυριαρχούμενους συνδυασμούς ΔΠ εντός της λεκάνης, οι οποίοι προβάλλονται από τη διαδικασία στο πρώτο μη κυριαρχούμενο ή βέλτιστο Pareto μέτωπο *n* διαστάσεων, όπου *n* το πλήθος των κριτηρίων (2-4). Το αν το εξαγόμενο από τη διαδικασία μέτωπο είναι το βέλτιστο είναι κάτι που εξαρτάται από τις επιλογές στις παραμέτρους του αλγόριθμου, από τα ίδια τα χαρακτηριστικά του, αλλά κυρίως από τον παρεχόμενο χρόνο που του δίνεται για να ψάξει το χώρο αναζήτησης. Το ζήτημα αυτό θα μας απασχολήσει στο 9^{ο} Κεφάλαιο. Οι λύσεις του μετώπου εκφράζουν διαχειριστικά σχήματα με συγκεκριμένη διαμόρφωση τιμών για τα κριτήρια, δηλαδή για το σύνολο του φορτίου απωλειών εδάφους, N-NO3, P και για το συνολικό κόστος, και μπορούν να παρασταθούν σε διαγράμματα ανά δύο, ώστε να δίνουν τις καμπύλες αντιστάθμισης των δύο κριτηρίων. Τα περιβαλλοντικά κριτήρια αναμένεται να είναι έντονα αντικρουόμενα με το κόστος, με τις λύσεις να υποδηλώνουν χαμηλό κόστος για μεγάλο φορτίο απωλειών εδάφους και θρεπτικών και το αντίστροφο. Οι καμπύλες αντιστάθμισης μεταξύ δύο περιβαλλοντικών κριτηρίων αναμένεται να έχουν λιγότερο αντικρουόμενο χαρακτήρα και έχει μεγάλο ενδιαφέρον για παράδειγμα να ανακαλύψουμε πως οι επιλογές ΔΠ για τη μείωση του ενός θρεπτικού στοιχείου, ανταποκρίνονται στη μείωση του άλλου σε μία λεκάνη απορροής.

Με το τέλος της διαδικασίας βελτιστοποίησης υπάρχει ακόμα η δυνατότητα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.3, της εκτέλεσης του μοντέλου SWAT για την προσομοίωση της μεταφοράς των ρύπων έως την έξοδο της λεκάνης. Αυτό συστήνεται στην παρούσα μεθοδολογία να γίνει μία φορά για κάθε μία από τις ισοδύναμες λύσεις του μετώπου Pareto, δηλαδή για κάθε έναν βέλτιστο συνδυασμό ΔΠ στην εκάστοτε λεκάνη απορροής. Με το τελευταίο αυτό βήμα επιτυγχάνεται η εύρεση των φορτίων ή των συγκεντρώσεων θρεπτικών στην έξοδο, μετά από το τέλος της διαδικασίας βελτιστοποίησης που όμως ήδη έγινε για τις ποσότητες ρύπων που εισέρχονται στο υδρογραφικό δίκτυο. Το τελευταίο αυτό βήμα είναι προαιρετικό στη μεθοδολογία που προτείνεται, γι' αυτό και περικλείεται στο Σχήμα 6.3 από

διακεκομμένες γραμμές. Αν κρίνεται ότι η βελτιστοποίηση με υπολογισμό των ετήσιων απωλειών θρεπτικών από την έκταση της λεκάνης προς το υδρογραφικό δίκτυο εκφράζει απόλυτα το πρόβλημα, το βήμα αυτό δε χρειάζεται να πραγματοποιείται. Αν όμως επιθυμείται απλά η διόδευση των ρύπων ως την έξοδο και η εξαγωγή των ετήσιων φορτίων στη θέση αυτή από το μοντέλο ή η προσομοίωση των βιοχημικών διεργασιών εντός του ποταμού και ο υπολογισμός της επίδρασής τους στη διαμόρφωση των φορτίων ή των μέσων ετήσιων συγκεντρώσεων, τότε το βήμα αυτό είναι απαραίτητο.

6.8 Συμπεράσματα για την προτεινόμενη μεθοδολογία

Η μεθοδολογία που περιγράφηκε στο κεφάλαιο αυτό στοχεύει στη δημιουργία ενός ΕΥΑ με ευρεία προσαρμοστικότητα σε αγροτικές λεκάνες απορροής υπό την προϋπόθεση βέβαια της διαθεσιμότητας των απαραίτητων δεδομένων για την προσομοίωσή τους στο μοντέλο SWAT. Η δόμηση του προγραμματιστικού κώδικα έγινε με γνώμονα τα φορτία απωλειών τριών διαφορετικών ρύπων: του N-NO3, του P και των φερτών υλών. Η ενσωμάτωση άλλων ρύπων στη διαδικασία βελτιστοποίησης μπορεί ωστόσο να γίνει για όλες τις χημικές και βιολογικές ενώσεις, των οποίων τα ετήσια μεγέθη εκτιμώνται από το SWAT, όπως οι οργανικές μορφές του N και του P, τα $PO4^-$, το ολικό N, το BOD κ.α. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί με μικρές μεταβολές στον ήδη συνταχθέντα κώδικα, ώστε μετά την προσομοίωση κάθε ΔΠ, το φορτίο ρύπου που διαβάζεται από τα αρχεία εξόδου του μοντέλου και που αποτελεί μία αντικειμενική συνάρτηση προς ελαχιστοποίηση, να αφορά τον εκάστοτε ρύπο που διαφεύγει από τις ΥΜ και καταλήγει σε θέση ποταμού (π.χ. στην έξοδο της λεκάνης).

Οι ΔΠ που επιλέχθηκαν μπορούν να εφαρμοστούν σε πλήθος ημιορεινών λεκανών απορροής της Ελλάδας και όχι μόνο, όπου η κτηνοτροφική δραστηριότητα είναι σημαντική και επικρατούν καλλιέργειες αγρωστωδών και κτηνοτροφικών φυτών. Η δημιουργία νέων ΔΠ με αναφορά σε άλλες καλλιέργειες μπορεί να γίνει πολύ εύκολα με σύνταξη νέων προγραμματιστικών εγγράφων, βασισμένων στα υφιστάμενα, που παραπέμπουν σε αλλαγή στις κατάλληλες παραμέτρους των αρχείων διαχείρισης ‘mgt’, ώστε να προσομοιωθουν οι εναλλακτικές τεχνικές διαχείρισης της αγροτικής γης. Μία πολύ ενδιαφέρουσα για παράδειγμα ομάδα ΔΠ είναι εκείνη της διαχείρισης του νερού στη γεωργία με τις εναλλακτικές δράσεις να σκοπεύουν στη μεταβολή των απολήψεων νερού άρδευσης από διάφορες πηγές π.χ. επιφανειακές και υπόγειες (Tsakiris and Spiliotis, 2006).

Η κοστολόγηση των ΔΠ έγινε με βάση το συνυπολογισμό του κόστους κεφαλαίου, συντήρησης και ευκαιρίας αξιοποιώντας κυρίως ελληνικά στοιχεία, με μεθοδολογία όμως που μπορεί να προσαρμοστεί σε οποιαδήποτε περιοχή, αν στοιχειώδη δεδομένα οικονομικής

φύσεως είναι διαθέσιμα. Με δεδομένη την έλλειψη οικονομικών στοιχείων και την πολύ περιορισμένη προσπάθεια κοστολόγησης των ΔΠ στην Ευρώπη (ανύπαρκτη στην Ελλάδα), θεωρείται ότι η απλή προσέγγιση που ακολουθήθηκε μπορεί να προσφέρει μία ικανοποιητική εκτίμηση του πραγματικού κόστους εφαρμογής των πρακτικών και ίσως να αποτελέσει μία απόλυτα επαρκή μέθοδο για τη συγκριτική αξιολόγηση κόστους εφαρμογής διαφόρων τύπων ΔΠ στις διάφορες ομοιογενείς αγροτικές εκτάσεις της εκάστοτε λεκάνης απορροής.

Η ΒΔΠ στη μεθοδολογία που προτάθηκε είναι επίσης προσαρμοσμένη σε λεκάνες με κτηνοτροφική δραστηριότητα, καλλιέργειες σιτηρών και πολυετών ψυχανθών. Αν είναι επιθυμητό να δημιουργηθεί σε υδρολογικές λεκάνες με διαφορετικούς τύπους χρήσης γης, άρα και διαφορετικές ΔΠ, η σύνταξη νέων προγραμματιστικών εγγράφων για αυτές τις πρακτικές μπορεί να οδηγήσει στην αυτόματη δημιουργία μιας τοπικής ΒΔΠ για μετέπειτα χρήση σε προβλήματα βελτιστοποίησης. Η υπάρχουσα δόμηση του προγραμματιστικού κώδικα στο MATLAB ωστόσο, επιτρέπει τη δημιουργία της ΒΔΠ για τις υφιστάμενες ΔΠ σε οποιαδήποτε λεκάνη ανεξαρτήτως μεγέθους και αριθμού ΥΜ.

Σε γενικές γραμμές η μεθοδολογία και το ΕΥΑ που προτείνονται στο παρόν κεφάλαιο μπορούν με τις απαραίτητες μικρές τροποποιήσεις, που αφορούν μόνο στις εκάστοτε τοπικές συνθήκες, να εφαρμοστούν σε οποιαδήποτε λεκάνη απορροής για τη διαχείριση της αγροτικής γης με γνώμονα την ικανοποίηση οικονομικών και περιβαλλοντικών στόχων. Οι τελευταίοι δε είναι δυνατόν μέσω του ΕΥΑ να αξιολογούνται με την αποτίμηση αντικειμενικών συναρτήσεων που ως μέτρα επίδοσης έχουν είτε το συνολικό φορτίο απωλειών ρύπου από το έδαφος προς το υδρογραφικό δίκτυο, είτε το φορτίο ή τη συγκέντρωση ρύπου σε θέση ποταμού εντός της λεκάνης.

7 Εφαρμογή της Μεθοδολογίας στη Λεκάνη Απορροής του Αράχθου

7.1 Εισαγωγή

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο περιγράφει αναλυτικά τα βήματα ανάπτυξης του ΕΥΑ για τη διαχείριση της αγροτικής γης. Το εργαλείο μπορεί να τύχει άμεσης χρήσης σε κάθε λεκάνη απορροής που χαρακτηρίζεται από χρήσεις γης συμβατές με τις ΔΠ που αναπτύχθηκαν και προτείνονται, καθώς και από ικανοποιητική διαθεσιμότητα οικονομικών στοιχείων για την κοστολόγησή τους, βάσει της προσέγγισης που περιγράφηκε.

Σε αυτό το κεφάλαιο η μεθοδολογία και η ανάπτυξη του ΕΥΑ προσαρμόζονται στη λεκάνη απορροής του άνω ρου του Αράχθου στην Ήπειρο με σκοπό την επιλογή και τοποθέτηση κατάλληλων ΔΠ σε ομοιογενείς αγροτικές εκτάσεις, ώστε ταυτόχρονα να ελαχιστοποιούνται το αθροιστικό κόστος εφαρμογής των διαχειριστικών παρεμβάσεων και οι απώλειες δύο εκ των τριών ειδών ρύπων που προβλέπεται: τα αθροιστικά φορτία P και N-NO3 που καταλήγουν στο υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης. Πρόκειται για ένα πρόβλημα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης (τρία κριτήρια), που οδηγεί στην εύρεση των καμπυλών αντιστάθμισης τριών κριτηρίων (ανά δύο), ώστε να δίνεται πληροφορία για τη σχέση που διέπει τη μεταβολή του ενός σε σχέση με το άλλο. Η λεκάνη αυτή είναι συμβατή με τις επιλογές σχετικά με τις ΔΠ της διατριβής δεδομένου ότι οι βασικές καλλιέργειες στη λεκάνη είναι ο αραβόσιτος (αγρωστώδες) και η μηδική (πολυετές ψυχανθές), ενώ παραδοσιακά ασκείται κτηνοτροφική δραστηριότητα.

Στο πρόβλημα βελτιστοποίησης που περιγράφεται μέσω της προσαρμογής της μεθοδολογίας στη λεκάνη ωστόσο, δεν συγκαταλέγεται το κριτήριο της ελαχιστοποίησης των απωλειών φερτών υλών από τις ΥΜ της λεκάνης. Αυτό συμβαίνει διότι οι ΔΠ στη λεκάνη του Αράχθου δομούνται σε αυτό το κεφάλαιο με γνώμονα τον περιορισμό της ρύπανσης των υδάτων από θρεπτικά. Αναμένεται ωστόσο κάποιες από αυτές να οδηγούν και σε μείωση της μεταφοράς φερτών στα νερά. Συνεπώς, το πρόβλημα βελτιστοποίησης τίθεται ως η ελαχιστοποίηση τριών κριτηρίων, η οποία όμως αναπόφευκτα και ιδιαιτέρως επιθυμητά οδηγεί σε μείωση και του συνολικού φορτίου απωλειών εδάφους από την αγροτική γη της λεκάνης. Η προσαρμογή της μεθοδολογίας στην εν λόγω λεκάνη γίνεται με βάση τα παρακάτω βήματα:

i. Παραμετροποίηση και βαθμονόμηση της λεκάνης του άνω ρου του Αράχθου στο μοντέλο SWAT με αξιόπιστη προσομοίωση της υφιστάμενης κατάστασης, όσον αφορά τις απώλειες ρύπων από το σύνολο των ομοιογενών ΥΜ και των ετήσιων φορτίων τους σε θέσεις ποταμού.
ii. Επιλογή εφικτών ΔΠ για εφαρμογή στις καλλιέργειες αραβόσιτου και μηδικής εντός της λεκάνης, καθώς και σε βοσκότοπους όπου εναποτίθεται κοπριά προβάτων και πουλερικών.
iii. Κοστολόγηση ΔΠ με βάση το μέσο επιπρόσθετο ετήσιο κόστος 5ετούς εφαρμογής (κόστος εγκατάστασης, λειτουργίας και ευκαιρίας) που προκαλείται.
iv. Εφαρμογή του μοντέλου SWAT για την προσομοίωση των ΔΠ στους ανωτέρω τύπους χρήσης γης και για την, μετά την εφαρμογή τους, εκτίμηση του ρυπαντικού φορτίου που εγκαταλείπει το έδαφος των ΥΜ.
v. Δημιουργία της ΒΔΠ, στην οποία αποθηκεύονται τα φορτία απωλειών ρύπων και το κόστος εφαρμογής ΔΠ από όλες τις ΥΜ της λεκάνης.
vi. Επιλογή του ΓΑ του MATLAB για την ταυτόχρονη βελτιστοποίηση (ελαχιστοποίηση) του οικονομικού και των περιβαλλοντικών κριτηρίων (N-NO3 και P), με εύρεση των Pareto βέλτιστων λύσεων που διαμορφώνουν τις καμπύλες αντιστάθμισης ανά δύο κριτήρια (κόστος-P και κόστος-N-NO3) και εκφράζουν συγκεκριμένους συνδυασμούς επιλογής και τοποθέτησης διαφόρων τύπων ΔΠ στις ΥΜ της λεκάνης.
vii. Εκτέλεση του μοντέλου SWAT για τις βέλτιστες Pareto λύσεις για την εκτίμηση των αντίστοιχων φορτίων και συγκεντρώσεων θρεπτικών στην έξοδο της λεκάνης του Αράχθου και διαμόρφωση των καμπυλών αντιστάθμισης με όρους συγκεντρώσεων ρύπων στην έξοδο αντί για συνολικά φορτία που εισέρχονται στο υδρογραφικό δίκτυο. Επιλογή συμβιβαστικών λύσεων από τις καμπύλες αυτές.

Η επιλογή συγκεκριμένης περιοχής μελέτης για την εφαρμογή της μεθοδολογίας καθιστά απαραίτητη τη δόμηση αυτού του κεφαλαίου σε δύο μέρη. Το πρώτο είναι αφιερωμένο σε μία σύντομη περιγραφή της λεκάνης ενδιαφέροντος και ιδιαίτερα της υφιστάμενης κατάστασης, που περιλαμβάνει τη διαχείριση της αγροτικής γης με τις συμβατικές τεχνικές. Στο δεύτερο μέρος περιγράφονται αναλυτικά τα ανωτέρω βήματα για την προσαρμογή της μεθοδολογίας του 6^{ου} Κεφαλαίου στην λεκάνη του άνω ρου του Αράχθου στην Ήπειρο.

7.2 Περιοχή μελέτης

7.2.1 Γενικές πληροφορίες

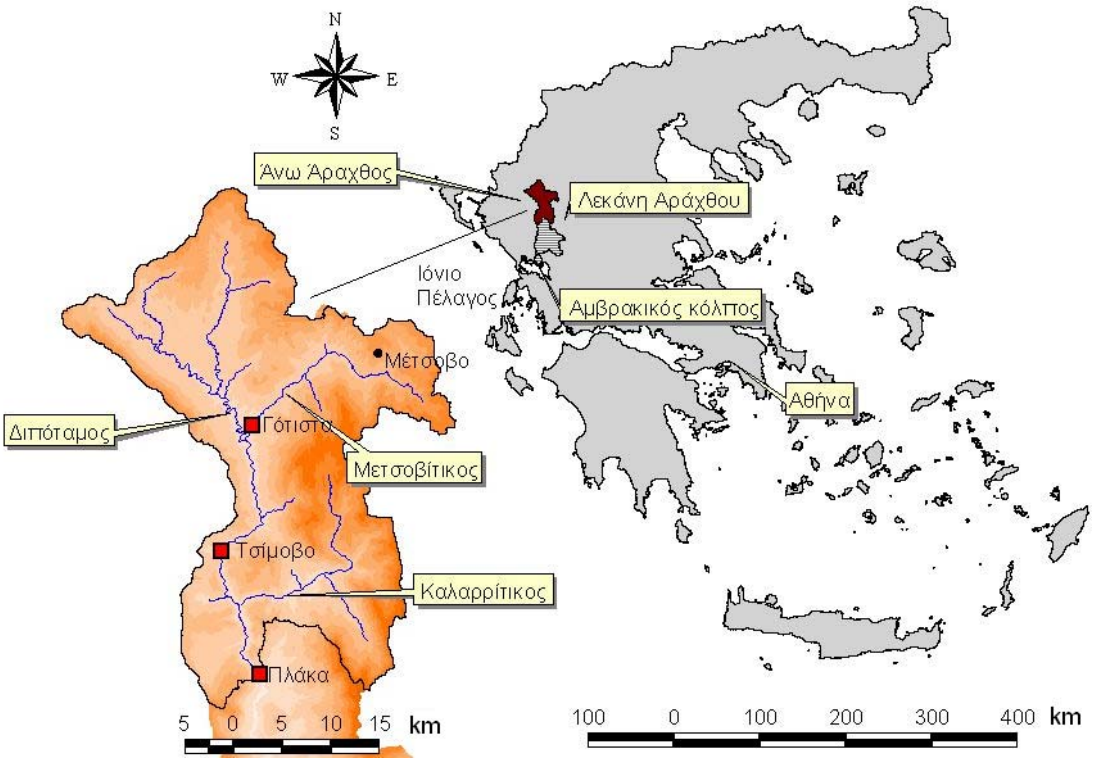
Ο ποταμός Άραχθος ή ποταμός της Άρτας ή Αρτινός έχει κύριο άξονα ροής από Βορρά προς Νότο, πηγάζει από το όρος Λάκμωνα της Βόρειας Πίνδου, στη θέση Οξυά Δεσπότη (υψόμετρο 1700m) και ύστερα από συνολικό μήκος 110km, εκβάλλει στον Αμβρακικό κόλπο, μία κλειστή θάλασσα που επικοινωνεί μέσω ενός στενού ανοίγματος με το Ιόνιο Πέλαγος στα Δυτικά (Γεωργίου, 2005).

Σχετικά με την εν λόγω λεκάνη, υπάρχει ήδη ερευνητική εμπειρία στα πλαίσια ερευνητικών και εκπαιδευτικών προγραμμάτων στο Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων του ΕΜΠ. Στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού προγράμματος *CADSEALAND* για παράδειγμα, διερευνήθηκε η στερεοπαροχή του ποταμού κάτω από φυσικές και μη συνθήκες. Στη δεύτερη περίπτωση, ποσοτικοποιήθηκε η επίδραση των ανθρωπογενών παρεμβάσεων κατά μήκος του ποταμού και βρέθηκε ότι η κατακράτηση φερτών στο φράγμα 'Πουρνάρι Ι' είναι καθολική και κατ' επέκταση, η μείωση της στερεοπαροχής του ποταμού στις εκβολές είναι κατά πολύ μειωμένη μετά την κατασκευή του (Panagopoulos and Mimikou, 2006· Panagopoulos et al., 2008). Οι μεταβολές που προκλήθηκαν από αυτήν την παρέμβαση στο σχήμα και στη γενικότερη μορφολογία του Δέλτα διερευνήθηκαν μέσω σύγκρισης αεροφωτογραφιών μεταξύ του 1960 και του 1995, δηλαδή πριν και μετά την έναρξη λειτουργίας του φράγματος, που έγινε το 1981 (Georgiou and Mimikou, 2006). Σε αυτήν την εργασία η επιλογή της λεκάνης του άνω ρου του ποταμού με έξοδο τη θέση *Γεφύρι Πλάκας* και όχι ολόκληρης της λεκάνης, βασίζεται σε τέσσερα σημαντικά κριτήρια που συνοψίζονται ως εξής:

- Η ανάντη λεκάνη που συμβάλλει με απορροές στη θέση *Γεφύρι Πλάκας* δεν παρουσιάζει καμία ανθρωπογενή παρέμβαση κατά μήκος του ποταμού, κατά συνέπεια η απορροή, τα φερτά και τα θρεπτικά διοδεύονται ανεμπόδιστα έως την έξοδο.
- Οι πηγές θρεπτικών στοιχείων είναι, ως επί τω πλείστον, διάχυτες αγροτικές (γεωργία, κτηνοτροφία), ενώ απουσιάζουν σημειακές πηγές ρύπανσης λόγω της πολύ περιορισμένης έως ανύπαρκτης βιομηχανικής ανάπτυξης.
- Στην 'Πλάκα', την έξοδο δηλαδή της λεκάνης, διατίθενται, αν και για διαφορετικές χρονικές περιόδους, δεδομένα μετρημένης παροχής, στερεοπαροχής και συγκεντρώσεων θρεπτικών (N-NO3 και P). Είναι η μοναδική θέση εντός της λεκάνης του Αράχθου, στην οποία έχουν γίνει κατά καιρούς όλα τα είδη μετρήσεων.

- Η έκταση της λεκάνης που σχηματίζεται ανάντη της θέσης 'Πλάκα' είναι περίπου 940km^2 και παραπέμπει σε μέσης έκτασης λεκάνη (100-1000km^2), αντιπροσωπευτικής της πλειοψηφίας των σχηματιζόμενων λεκανών απορροής στην Ελλάδα και ιδανικής για επιστημονική διερεύνηση ζητημάτων ποιότητας νερού.

Στο Σχήμα 7.1 φαίνεται η θέση της ευρύτερης και της λεκάνης του άνω ρου του Αράχθου στον Ελληνικό χώρο, όπως σχεδιάστηκε με τη βοήθεια ΣΓΠ, ενώ αριστερά εικονίζεται η λεκάνη του άνω Αράχθου με το τοπογραφικό ανάγλυφο, το κύριο υδρογραφικό δίκτυο και κάποιες βασικές τοποθεσίες.



Σχήμα 7.1 Θέση λεκάνης Αράχθου στον ελληνικό χώρο.

Ο ποταμός αρχικά διέρχεται ανάμεσα από τα βουνά της Πίνδου και τα Τζουμέρκα, συγκεντρώνει νερά από το μεγαλύτερο μέρος του ορεινού όγκου, μεταξύ Μετσόβου και Τζουμέρκων (Ζαγόρι, Μέτσοβο, Περιστέρι Κακαρδίτσα, Αθαμανικά), και περνάει ορμητικά ανάμεσα σε μία μεγάλη χαράδρα - φαράγγι μέχρι το παλαιό ιστορικό μονότοξο γεφύρι της Πλάκας, που φαίνεται στο Σχήμα 7.2 (Γεωργίου, 2005). Όπως αναφέρθηκε, η θέση αυτή προσφέρθηκε κατά το παρελθόν για όλα τα είδη μετρήσεων, δυστυχώς όμως σήμερα, όλες οι μετρήσεις έχουν σταματήσει.

Σχήμα 7.2 Το γεφύρι της Πλάκας (πηγή: Γεωργίου, 2005).

Ο ποταμός στα Βορειοανατολικά, διερχόμενος νότια της κωμόπολης του Μετσόβου, ονομάζεται Μετσοβίτικος, μετά τη συνάντησή του με τον ποταμό Διπόταμο παίρνει το όνομα Άραχθος και έως την έξοδο στο γεφύρι της Πλάκας, κύρια παραποτάμια συνεισφορά είναι αυτή του ποταμού Καλαρρύτικου (Σχήμα 7.1).

Η ευρύτερη λεκάνη απορροής καλύπτει επιφάνεια περίπου 2000km^2, στην οποία απαντάται μεγάλη επιφανειακή ανάπτυξη του φλύσχη. Έτσι, το καθεστώς απορροής χαρακτηρίζεται από μεγάλες διακυμάνσεις της παροχής του με χαμηλές σχετικά θερινές παροχές και υψηλές πλημμυρικές αιχμές. Στα κεντρικά και νότια της λεκάνης υπάρχουν ωστόσο και ασβεστολιθικά πετρώματα, ενώ αλλουβιακές αποθέσεις παρατηρούνται σποραδικά εντός της λεκάνης. Η μέση ετήσια παροχή στη γέφυρα Άρτας, λίγα km πριν το Δέλτα, έχει υπολογιστεί περίπου 66m^3/s (ΕΜΠ, 2008). Στις θέσεις γέφυρα Τσιμόβου και γέφυρα Πλάκας, όπου επίσης ελέγχεται ή ελεγχόταν κατά το παρελθόν η παροχή του ποταμού, οι μέσες ετήσιες καταγεγραμμένες παροχές είναι 22 και 39m^3/s αντίστοιχα.

Στο πεδινό τμήμα της πεδιάδας της Άρτας ο ποταμός Άραχθος εκβάλει τα νερά του με μεγάλο Δέλτα εξαιρετικού υγροβιότοπου στον Αμβρακικό κόλπο. Ο Αμβρακικός θεωρείται από τις πιο ρυπασμένες ελληνικές θάλασσες, με πληθυσμιακές εκρήξεις φυτοπλαγκτού, χαμηλή διαφάνεια, πρόβλημα αποξυγόνωσης κλπ. Η ρύπανση του κόλπου, σύμφωνα με νεότερες εκτιμήσεις, οφείλεται σε υπέρμετρο ευτροφισμό που προκαλείται από την μεγάλη προσφορά θρεπτικών συστατικών (φωσφορούχων και αζωτούχων) σε συνδυασμό με τις δυσμενείς υδρολογικές συνθήκες (λεκάνη αραίωσης). Τα θρεπτικά συστατικά προέρχονται κατά κύριο λόγο από τα λιπάσματα των γεωργικών καλλιεργειών που καταλήγουν στον κόλπο με την απόπλυση των εδαφών. Η περίσσεια του φυτοπλαγκτού δε

μπορεί να καταναλωθεί από τις θαλάσσιες τροφικές αλυσίδες και καταλήγει στο βυθό, όπου προκαλεί ανοξικές συνθήκες (Γεωργίου, 2005).

Παρά τα πρόσφατα περιβαλλοντικά προβλήματα, η περιοχή του Αμβρακικού κόλπου έχει μεγάλη οικολογική σημασία, τόσο ως σύνθετο οικοσύστημα (θαλάσσια λεκάνη, λιμνοθάλασσες, εκβολές ποταμών, χερσαία πεδινή και ορεινή ζώνη), όσο και ως βιότοπος χλωρίδας και πανίδας (Kotti et al., 2005). Σημαντική είναι η ποικιλία των φυτοκοινωνιών που εποικούν τις διάφορες περιοχές των υγροβιότοπων. Σύμφωνα με τα μέχρι σήμερα δεδομένα, στην περιοχή συναντώνται περισσότερα από 300 είδη ανώτερης χλωρίδας (φυτά), εκ των οποίων περισσότερα από 10 είδη είναι σπάνια ή ενδημικά. Επίσης, στην περιοχή έχουν παρατηρηθεί περισσότερα από 200 είδη πτηνών, πολλά από τα οποία προστατεύονται από διεθνείς συμβάσεις. Ο υγροβιότοπος προστατεύεται σήμερα από τη διεθνούς σημασίας συνθήκη RAMSAR και ανήκει στις προστατευόμενες περιοχές σύμφωνα με την Οδηγία 79/409/ΕΟ (Kotti et al., 2005).

Με τα νερά του ποταμού Αράχθου, τα οποία είναι ρυθμισμένα χάρις στην κατασκευή από τη ΔΕΗ των υδροηλεκτρικών φραγμάτων στις θέσεις Πουρνάρι Ι και Πουρνάρι ΙΙ, λίγα μόλις χιλιόμετρα ανάντη της πόλης της Άρτας, αρδεύονται περί τα 45000 στρέμματα της πεδιάδας της Άρτας. Ωστόσο, τις τρεις τελευταίες δεκαετίες ο ποταμός Άραχθος έχει υποστεί αλλοιώσεις από την κατασκευή των φραγμάτων. Οι φυσικοχημικές παράμετροι του φυσικού οικοσυστήματος του Αμβρακικού έχουν αλλοιωθεί, ενώ παράλληλα, η δυναμική οικολογική ισορροπία έχει διαταραχθεί λόγω της απότομης, μαζικής και μη συνεχούς ροής γλυκού νερού στο θαλάσσιο περιβάλλον. Η προσφορά μεγάλης ποσότητας γλυκού νερού σε μικρό χρονικό διάστημα μεταβάλλει απότομα την αλατότητα, με αποτέλεσμα το θαλάσσιο οικοσύστημα και η ιχθυοπανίδα να μην μπορεί να προσαρμοστεί (Γεωργίου, 2005).

Η κατασκευή των φραγμάτων Πουρνάρι Ι και ΙΙ είχε ακόμα σαν αποτέλεσμα την έντονη μείωση της στερεοπαροχής στα κατάντη. Η μείωση αυτή έχει σήμερα προκαλέσει αλλαγές στο σχήμα της ακτογραμμής των εκβολών με έντονες θαλάσσιες διαβρωτικές διεργασίες στο Δέλτα (Kapsimalis et al., 2002· Georgiou and Mimikou, 2006). Για να γίνει αντιληπτό το μέγεθος της μείωσης της συνεισφοράς του ποταμού με φερτά στην περιοχή του Δέλτα, αρκεί η αναφορά στη μέση ετήσια καταγεγραμμένη στερεοπαροχή στη γέφυρα Άρτας από τη ΔΕΗ, που για τα έτη 1965-1977 (χωρίς φράγμα ανάντη) ήταν περίπου $3,5\times10^6$tn φερτών (Panagopoulos et al., 2008). Αντίστοιχα, οι καταγεγραμμένες μέσες ετήσιες στερεοπαροχές στο Τσίμοβο και την Πλάκα ήταν $0,5\times10^6$tn και $1,4\times10^6$tn με βάση στοιχεία της ίδιας περιόδου. Σε γενικές γραμμές ο Άραχθος παρουσιάζει μεγάλη ετήσια στερεοπαροχή, που αν αναχθεί στην έκταση της λεκάνης είναι ίση με 18tn/ha/έτος, κάτι που αποκαλύπτει τα έντονα διαβρωτικά φαινόμενα στην περιοχή, οφειλόμενα στο έντονο τοπογραφικό ανάγλυφο, στα αδιαπέρατα εδάφη και στις έντονες βροχοπτώσεις. Το γεγονός

αυτό θέτει ως περιβαλλοντικό ζήτημα και την ταχεία πλήρωση του νεκρού όγκου του ταμιευτήρα του Πουρναρίου Ι με φερτές ύλες, κάτι που επιταχύνει την έλευση του πέρατος της ωφέλιμης ζωής του έργου (Panagopoulos and Mimikou, 2006· Panagopoulos et al., 2008).

Το κλίμα της περιοχής του Αράχθου χαρακτηρίζεται ήπιο, μεσογειακού τύπου με θερμό και ξηρό θέρος και υγρό χειμώνα, με μέσο θερμομετρικό εύρος από 16°C έως 18°C. Η μέση ετήσια βροχόπτωση σε ολόκληρη τη λεκάνη του ποταμού ανέρχεται περίπου σε 2000mm, σύμφωνα με ανάλυση δεδομένων βροχομετρικών σταθμών για ένα μεγάλο διάστημα που έγινε από τη Γεωργίου (2005). Έχει παρατηρηθεί ότι στο βόρειο και νότιο τμήμα της λεκάνης απορροής του ποταμού Αράχθου το ύψος των βροχοπτώσεων είναι συγκριτικά χαμηλότερο απ' ότι στο μέσον της λεκάνης. Η κατανομή των βροχών στη διάρκεια του έτους είναι η τυπική του Μεσογειακού κλίματος με ανισοκατανομή του συνολικού ετήσιου ύψους ανάμεσα στους υγρούς και ξηρούς μήνες.

Σχετικά με την υδρογεωλογία της περιοχής, υπάρχει μεγάλη εξάπλωση των καρστικών ενοτήτων, που σε πολλές περιπτώσεις καλύπτουν περιοχές που ανήκουν σε 2-3 ή και περισσότερες λεκάνες απορροής. Στη λεκάνη του Αράχθου διακρίνονται τα καρστικά συστήματα του αντικλίνου Αράχθου και των Τζουμέρκων. Το πρώτο αναπτύσσεται στους ανθρακικούς σχηματισμούς της περιοχής Τσιμόβου-Πλάκας και εκφορτίζεται μέσω των πηγών Κλίφκη και Πλατανούσας και διάσπαρτων αναβλύσεων στην κοίτη του ποταμού. Στη συνεισφορά αυτή συγκαταλέγεται και η παροχή που προέρχεται από τη λεκάνη των Ιωαννίνων και είναι περίπου 1,5m^3/s. Το δεύτερο καρστικό σύστημα αναπτύσσεται στους ανθρακικούς σχηματισμούς της ζώνης της Πίνδου και εκφορτίζεται με μία σειρά πηγών υπερχείλισης (Ανθοχωρίου, Μελισσουργών, Καταρράχτη κλπ). Η υπολογισμένη παροχή είναι περίπου 8m^3/s (ΕΜΠ, 2008).

Σύμφωνα με τη 'Μελέτη υποδομής δικτύων ελέγχου ποιότητας των επιφανειακών και υπογείων νερών της Ηπείρου', που εκπονήθηκε από το Κέντρο Υδροβιολογικών Ερευνών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, και τα αποτελέσματά της συνοψίζονται από τη Γεωργίου (2005), οι ρυπαντές του ποταμού Αράχθου είναι: τα αστικά λύματα των παρόχθιων οικισμών, η λειτουργία του εργοστασίου βιολογικού καθαρισμού των αστικών λυμάτων της πόλης του Μετσόβου, που όμως ξεκίνησε πολύ πρόσφατα, τα απόβλητα δύο μεγάλων χοιροτροφικών μονάδων και ενός τυροκομείου στην ευρύτερη περιοχή του Δήμου Εγνατίας, τα απόβλητα από διάφορα πτηνοτροφεία που είναι διάσπαρτα εντός της λεκάνης και φυσικά οι κτηνοτροφικές και γεωργικές δραστηριότητες.

7.2.2 Υφιστάμενες αγροτικές δραστηριότητες

Οι τοπικές κοινωνίες γύρω από τον Άραχθο, βασίζουν τις οικονομίες τους ακόμα και σήμερα στον πρωτογενή τομέα. Παρόλο που τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά τοποθετούν αυτήν τη περιοχή, ανάμεσα στις πιο άγονες και ανεκμετάλλευτες στην Ελλάδα, η κτηνοτροφική δραστηριότητα, αν και μειωμένη τα τελευταία χρόνια, είναι ακόμα σημαντική και οι ανάγκες σίτισης των ζώων μεγάλες. Έτσι, η γεωργική δραστηριότητα συγκεντρώνεται σε εύφορες και μικρής κλίσης πεδιάδες εντός της λεκάνης με παραγωγή κτηνοτροφικών φυτών (αραβόσιτος και μηδική) για την εκτροφή των ζώων, ενώ η κτηνοτροφική, κατά την θερινή περίοδο, στις εκτεταμένες ορεινές εκτάσεις βοσκότοπων ακολουθώντας την παραδοσιακή εκτατική μορφή άσκησης που συναντάται στην Ελλάδα (Καλαϊσάκης, 1982· Zervas, 1998). Τα κυριότερα ζώα που στηρίζουν τις οικονομίες των κοινοτήτων στην περιοχή του Αράχθου είναι τα αιγοπρόβατα, λιγότερο οι βελτιωμένες φυλές αγελάδων και σημαντικά τα πουλερικά που αναπτύσσονται τόσο σε οργανωμένες μονάδες πάχυνσης, όσο και στις αγροτικές κατοικίες. Στην περιοχή επικρατεί κατά το πλείστον η μικρή ιδιοκτησία και ο πολυτεμαχισμός. Επικρατεί ο τύπος της μικρής ή μεσαίας οικογενειακής γεωργοκτηνοτροφικής εκμετάλλευσης που είναι συνήθως αυτάρκης σε εργατικά χέρια και γεωργικά μηχανήματα. Οι ετήσιες αποδόσεις καλαμποκιού και μηδικής φτάνουν τα 1200 και 1600kg/στρ. (Γεωργίου, 2005). Η χρήση του νερού για τη γεωργία και την κτηνοτροφία είναι μικρή, αφού γίνεται κυρίως για τη κάλυψη των αναγκών διαβίωσης των ζώων και καθαρισμού των κτηνοτροφικών μονάδων, ενώ οι καλλιέργειες σπάνια αρδεύονται (ΕΜΠ, 2008).

Για τις ανάγκες της διατριβής και για την ανάπτυξη και διερεύνηση εναλλακτικών ΔΠ στην αγροτική γη, λήφθηκε η μεγαλύτερη δυνατή πληροφορία για τις συμβατικές αγροτικές πρακτικές διαχείρισης. Οι καλλιεργητικές τεχνικές του αραβόσιτου και της μηδικής καθορίστηκαν με βάση τις γενικές πληροφορίες που παρέχονται από το Ινστιτούτο Σιτηρών (http://www.cerealinstitute.gr) και από προσωπική επικοινωνία τόσο με υπαλλήλους του Ινστιτούτου, όσο και με αρμόδιους φορείς στους Δήμους, που βρίσκονται εντός ή πλησίον της λεκάνης του άνω Αράχθου[1]. Από την επικοινωνία αυτή λήφθηκαν και σημαντικές πληροφορίες για τη βόσκηση των αιγοπροβάτων, καθώς και για τη διαχείριση

1 Τα στοιχεία των αρμοδίων που βοήθησαν στην αποσαφήνιση των υφιστάμενων αγροτικών δραστηριοτήτων στη λεκάνη του Αράχθου συνοψίζονται ως εξής:
Δήμος Μετσόβου: κ. Μιττάκος – Γεωπόνος, Δήμος Εγνατίας: κ. Κουτουρούμας - Υπάλληλος του Δήμου, Δήμος Πραμάντων: κ. Τραγουδάρας – Δήμαρχος, Δήμος Παμβώτιδας: κα. Λέκκα – Υπάλληλος ΕΛΓΑ, Δήμος Τζουμέρκων: κ. Γεωργούλης – Προϊστάμενος Δήμου, Ινστιτούτο Κτηνοτροφικών Φυτών και Βοσκών Λάρισα: κ. Βλαχοστέργιος, Ινστιτούτο Σιτηρών Θεσσαλονίκη: κ. Ευγενίδης και κ. Μάτσας.

των αποβλήτων τους κατά την περίοδο οικόσιτης διαβίωσης, αλλά και για τη διαχείριση των αποβλήτων του μεγάλου αριθμού πουλερικών στη λεκάνη.

Ο αραβόσιτος είναι μία απαιτητική καλλιέργεια σε λίπανση με N και P. Καλλιεργείται κυρίως για τον καρπό του και δευτερευόντως για παραγωγή βιομάζας για άμεση κατανάλωση ή ενσίρωση. Η απορρόφηση N από τα φυτά του αραβόσιτου είναι συνεχής σε όλη τη διάρκεια της ζωής των φυτών (Καραμάνος, 1999). Αν και η αντίδραση του φυτού στον P είναι πολύ λιγότερο θεαματική από εκείνη που παρατηρείται στο N, η έλλειψη P μπορεί να περιορίσει σημαντικά την τελική απόδοση. Η συσσώρευση του P, είναι επίσης συνεχής καθ' όλη τη διάρκεια της ανάπτυξης των φυτών και ο ρυθμός απορρόφησης ακολουθεί μια συνεχή ανοδική πορεία κατά τη βλαστική ανάπτυξη. Στη χώρα μας, το Ινστιτούτο Σιτηρών συνιστά την χορήγηση 75kg/στρέμμα περίπου φωσφορικής αμμωνίας (20-10-00) κατά τη σπορά (τέλος Μαρτίου) και 45kg/στρέμμα νιτρικής αμμωνίας (33-00-00) κατά τα τέλη Μαΐου. Οι λιπάνσεις αυτές αν αναχθούν σε ha γης συνεισφέρουν με ετήσιες ποσότητες N και P ίσες με 300 και 33kg αντίστοιχα[2]. Το φυτό συγκομίζεται στα μέσα Σεπτέμβρη και στα τέλη του μήνα μία μετρίου βάθους άροση (15-20cm) ακολουθεί.

Όσον αφορά τη μηδική, η καλλιέργειά της στην Ήπειρο γίνεται για τον ίδιο σκοπό όπως και του αραβόσιτου, δηλαδή για την κάλυψη των διατροφικών αναγκών των ζώων. Πρόκειται για ένα πολυετές ψυχανθές φυτό που έχει την ικανότητα της αζωτοδέσμευσης, δηλαδή της δέσμευσης N από την ατμόσφαιρα και μέσω βιολογικής δράσης της συσσώρευσης του στοιχείου στο έδαφος. Υπολογίζεται ότι στην Ελλάδα η καλλιέργεια είναι ικανή να εμπλουτίζει ετησίως το έδαφος με πάνω από 22 kgN/στρέμμα (Τζουραμάνη κ.α., 2008α). Κατά συνέπεια, η μηδική δεν είναι απαιτητική σε N, αλλά περισσότερο σε P. Η καλλιέργειά της μένει στο χωράφι για 3-5 χρόνια, ανάλογα με τις εκάστοτε συνήθειες. Αυτό σημαίνει ότι η συγκομιδή γίνεται κάθε χρόνο χωρίς την εκρίζωση του φυτού, το οποίο απομακρύνεται την τελευταία χρονιά της πολυετούς ανάπτυξής του. Σύμφωνα με την πληροφορία που συλλέχθηκε, η λίπανση της μηδικής περιλαμβάνει 2,2kgN/στρέμμα και 4,5kgP/στρέμμα κατά τη σπορά (μέσα Μαρτίου), ενώ κατά τα υπόλοιπα έτη ανάπτυξης μόνο φωσφορική λίπανση με ρυθμό 3,3kgP/στρέμμα. Αν θεωρηθεί ότι ο πλήρης κύκλος ανάπτυξης της καλλιέργειας διαρκεί 5 έτη, οι τιμές αυτές οδηγούν σε μέση ετήσια φόρτιση λιπασμάτων 5ετίας ίση με 0,44 και 3,55kgN και P/στρέμμα ή 4,4 και 35,5kgN/ha και kgP/ha. Το φυτό συγκομίζεται κάθε χρόνο στα μέσα Σεπτέμβρη και κατά τον πέμπτο χρόνο απομακρύνεται

[2] Ο τύπος λιπάσματος εκφράζεται με 3 αριθμούς που δηλώνουν τη συστασή του. Για παράδειγμα ο τύπος 20-10-00 σε 100kg λιπάσματος περιέχει 20% N, 10% P σε μορφή P_2O_5 και 0% κάλιο (K_2). Για τον υπολογισμό της ποσότητας P γίνεται αναγωγή με χρήση των Ατομικών Βαρών του P (31) και του O (16) στην ένωση P_2O_5.

από το έδαφος. Μία μετρίου βάθους άροση κλείνει τον κύκλο των καλλιεργητικών πρακτικών του φυτού στην 5ετή αυτή περίοδο.

Οι καλλιεργητικές τεχνικές των δύο αυτών καλλιεργειών στη λεκάνη του Αράχθου συνοψίζονται στον Πίνακα 7.1 με τις αντίστοιχες ημερομηνίες εφαρμογής τους. Σημειώνεται ότι κατά τα στάδια της συγκομιδής και πλήρους απομάκρυνσης των καλλιεργειών από το έδαφος, καθώς και της άροσης του εδάφους, οι νέες εδαφικές συνθήκες ευνοούν περισσότερο την απορροή. Στον Πίνακα 7.1 δίνεται ο νέος αριθμός καμπύλης CN κατά SCS, όπως ορίζεται στο μοντέλο SWAT μετά το τέλος των εν λόγω πρακτικών. Με τον τρόπο αυτό προσομοιώνεται η αυξημένη ευαισθησία του εδάφους στην επιφανειακή απορροή. Αν και πρόκειται για μια λεπτομέρεια που σχετίζεται με τη μοντελοποίηση της λεκάνης στο SWAT, η οποία θα παρουσιαστεί στο επόμενο κεφάλαιο, είναι εδώ απαραίτητη η σχετική αναφορά μιας και η μεταβολή στους αριθμούς καμπύλης αποτελεί εν μέρει τρόπο προσομοίωσης κάποιων ΔΠ που εξετάζονται στα πλαίσια της μεθοδολογίας της διατριβής.

Πίνακας 7.1 Πρόγραμμα καλλιεργητικών τεχνικών βιολογικού κύκλου αραβόσιτου και μηδικής.

ΜΗΔΙΚΗ				ΑΡΑΒΟΣΙΤΟΣ		
Έτος καλ-λιέργειας	ΗΜ/ΝΙΑ	Καλλιεργητική πρακτική		Έτος καλ-λιέργειας	ΗΜ/ΝΙΑ	Καλλιεργητική πρακτική
1	12 Μαρ	Σπορά		1	31 Μαρ	Σπορά
1	12 Μαρ	Λίπανση 200 kg/ha 11-52-00 22 kg N/ha, 45 kgP/ha		1	31 Μαρ	Λίπανση 750 kg/ha 20-10-00 150 kg N/ha, 33 kgP/ha
1	15 Σεπ	Συγκομιδή		1	31 Μαι	Λίπανση 450 kg/ha 33-00-00 148,5 kg N/ha
2	15 Φεβ	Λίπανση 500 kg/ha 00-15-00 33 kgP/ha		1	10 Σεπ	Συγκομιδή και απομάκρυνση $CN_{συγκ} = CN + 3$
2	15 Σεπ	Συγκομιδή		1	30 Σεπ	Άροση $CN_{αρ} = CN_{συγκ}+3$
3	15 Φεβ	Λίπανση 500 kg/ha 00-15-00 33 kgP/ha				
3	15 Σεπ	Συγκομιδή				
4	15 Φεβ	Λίπανση 500 kg/ha 00-15-00 33 kgP/ha				
4	15 Σεπ	Συγκομιδή				
5	15 Φεβ	Λίπανση 500 kg/ha 00-15-00 33 kgP/ha				
5	15 Σεπ	Συγκομιδή και απομάκρυνση $CN_{συγκ} = CN + 3$				
5	30 Σεπ	Άροση $CN_{άρ} = CN_{συγκ}+3$				

Όσον αφορά την κτηνοτροφική δραστηριότητα στη λεκάνη, οι πιέσεις που δέχονται οι αγροτικές εκτάσεις υπολογίστηκαν με βάση το συνολικό αριθμό των ζώων που βρίσκονται

εντός αυτής και τους τύπους κοπριάς για κάθε κατηγορία ζώου που διατίθενται στη βιβλιογραφία (Neitch et al., 2005b). Η βόσκηση των αιγοπροβάτων και των βοοειδών διαρκεί από τον Απρίλιο έως και τον Οκτώβριο. Με βάση τις πληροφορίες που συλλέχθηκαν από επικοινωνία με τοπικούς φορείς, θεωρήθηκε ότι η βόσκηση γίνεται σε εκτατική μορφή, δηλαδή παρουσιάζεται εκτεταμένα σε χορτολιβαδικές ή ακόμα και ημι-δασικές εκτάσεις και ότι τυπική περίοδος που λαμβάνει χώρα είναι η 7μηνη περίοδος που προαναφέρθηκε[3]. Επιπλέον, σε ορισμένους δήμους οι πληροφορίες κάνουν λόγο ακόμα και για χειμερινή ελεύθερη βόσκηση τις ημέρες που ο καιρός το επιτρέπει. Η ανάγκη να θεωρηθεί ένα ενιαίο πρόγραμμα βόσκησης μας οδήγησε ωστόσο στο να την ορίσουμε σε συνεχή βάση κατά το προαναφερθέν 7μηνο διάστημα και σε όλες τις μη δασικές και μη καλλιεργούμενες εκτάσεις, που θεωρήθηκαν από κοινού ελεύθεροι βοσκότοποι. Κατά τους υπόλοιπους υγρούς μήνες του έτους θεωρήθηκε ότι τα ζώα εκτρέφονται αποκλειστικά σε κλειστούς ή περιορισμένους ανοιχτούς χώρους και ότι η κοπριά που συσσωρεύεται μαζεύεται σε κοπροσωρούς και εν συνεχεία εναποτίθεται στις χορτολιβαδικές εκτάσεις σε σταθερή χρονική βάση 7 ημερών (εβδομαδιαία).

Σχετικά με τα πουλερικά στη λεκάνη του Αράχθου, θεωρήθηκε ότι τα περιττώματά τους διασπείρονται με ανάλογο τρόπο στις μη καλλιεργούμενες και μη δασικές εκτάσεις της λεκάνης, όπως δηλαδή και για τα αιγοπρόβατα και τα βοοειδή κατά την περίοδο μη βόσκησης. Η αλήθεια είναι ότι η προσπάθεια να συλλεχθούν πληροφορίες σχετικά με τον τρόπο απελευθέρωσης των πτηνοτροφικών αποβλήτων από τις οργανωμένες μονάδες δεν στέφτηκε από επιτυχία αφού οι τοπικοί φορείς δήλωναν είτε αδυναμία, είτε απροθυμία στην πληροφόρηση. Κάποιες πληροφορίες έκαναν ωστόσο λόγο για μη απελευθέρωση των αποβλήτων στα κοντινά υδατορρεύματα, παρά για ακανόνιστη διασπορά στις γύρω εκτάσεις. Θεωρήθηκε έτσι ένα ενιαίο πρόγραμμα εβδομαδιαίας διασποράς κοπριάς πουλερικών στις χορτολιβαδικές εκτάσεις (βοσκοτόπια) για ολόκληρο τον αριθμό των πουλερικών της λεκάνης (οικόσιτων και εκτρεφόμενων σε οργανωμένες πτηνοτροφικές μονάδες) και για όλη τη διάρκεια του έτους.

Στον Πίνακα 7.2 συνοψίζονται οι δραστηριότητες σχετικά με τα ζώα, που αποτελούν πηγές ρύπανσης σε θρεπτικά στη λεκάνη του Αράχθου, ενώ στον Πίνακα 7.3 δίνεται η σύσταση και η εναποτιθέμενη ημερήσια ποσότητα κοπριάς ανά ζώο, καθώς και το N και ο P που περιέχεται σε αυτή. Οι τιμές του Πίνακα 7.3 προέκυψαν από τη βάση δεδομένων του μοντέλου SWAT (Neitch et al., 2005b) και έχουν προέλθει από την Ένωση Γεωργικών Μηχανικών των ΗΠΑ (American Society of Agricultural Engineers – ASAE).

---

[3] Μάλιστα, οι τοπικοί φορείς έλεγαν ότι: «Η ελεύθερη βόσκηση στην περιοχή συνηθίζεται από του Αγίου Γεωργίου έως του Αγίου Δημητρίου», περίπου δηλαδή από τα τέλη της Άνοιξης έως τα τέλη Οκτωβρίου.

Πίνακας 7.2 Πρακτικές εναπόθεσης κοπριάς στις χορτολιβαδικές εκτάσεις της λεκάνης του ποταμού Αράχθου.

Πρακτική	**Περίοδος και χρονικό εύρος εφαρμογής**
Διασπορά κοπριάς πουλερικών	1/1 – 31/12 ανά 7 ημέρες
Διασπορά κοπριάς αιγοπροβάτων	1/1 – 31/3 και 1/11 – 31/12 ανά 7 ημέρες
Διασπορά κοπριάς βοοειδών	1/1 – 31/3 και 1/11 – 31/12 ανά 7 ημέρες
Βόσκηση αιγοπροβάτων	1/4 – 30/10 σε ημερήσια βάση
Βόσκηση βοοειδών	1/4 – 30/10 σε ημερήσια βάση

Πίνακας 7.3 Στοιχεία για την ποσότητα και σύσταση της κοπριάς των διαφόρων ειδών ζώων στη λεκάνη του ποταμού Αράχθου.

	Βοοειδή	Αιγοπρόβατα	Χοίροι	Πουλερικά
Τυπική τιμή μάζας ανά ζώο (kg)	360	27	61	1,8
Παραγόμενη κοπριά ανά 1000kg ζωικής μάζας ανά ημέρα (kg)	58	40	84	64
Παραγόμενη στερεή κοπριά ανά 1000kg ζωικής μάζας ανά ημέρα (kg)	8,5	11	11	16
Παραγόμενη κοπριά ανά ζώο ανά ημέρα (kg)	20,88	1,08	5,12	0,12
Παραγόμενη στερεή κοπριά ανά ζώο ανά ημέρα (kg)	3,060	0,297	0,671	0,029
Κλάσμα N στη στερεή κοπριά	0,04	0,038	0,047	0,053
Κλάσμα P στη στερεή κοπριά	0,011	0,008	0,016	0,019
Εναποτιθέμενο N ανά ημέρα ανά ζώο (kg)	0,1224	0,0113	0,0315	0,0015
Εναποτιθέμενος P ανά ημέρα ανά ζώο (kg)	0,0337	0,0024	0,0107	0,0005

*Οι περιεκτικότητες σε θρεπτικά (N, P), αναφέρονται στην παραγόμενη στερεή κοπριά των ζώων.

Με βάση το συνολικό αριθμό των ζώων στη λεκάνη, που όπως προέκυψε από τα στοιχεία της ΕΣΥΕ (ΕΣΥΕ, 2000) για το έτος 2000 ήταν: 3000 βοοειδή, 100000 αιγοπρόβατα (κυρίως πρόβατα) και περίπου 2×10^6 πουλερικά, και σύμφωνα με την περιεκτικότητα της κοπριάς τους από τον Πίνακα 7.3, προκύπτουν μέσες συνολικές ετήσιες πιέσεις 33kgN/ha και 11kgP/ha βοσκότοπου αντίστοιχα. Ασφαλώς, και όπως θα παρουσιαστεί στο επόμενο κεφάλαιο όπου παραμετροποιείται η λεκάνη του Αράχθου στο μοντέλο SWAT, οι πιέσεις αυτές μεταβάλλονται ανάμεσα στις διαφορετικές περιοχές βοσκότοπων εντός της λεκάνης ανάλογα με τη συγκέντρωση των ζώων στις διάφορες Κοινότητες. Τονίζεται ακόμα ότι η παρεμφερής σύσταση της κοπριάς αίγας και προβάτου σε συνδυασμό με τη συντριπτική πλειοψηφία προβάτων έναντι αιγών στη λεκάνη, μας επιτρέπει να ενσωματώσουμε τις αίγες στα πρόβατα, τόσο όταν αναφερόμαστε σε αριθμό ζώων εντός της λεκάνης και στα χαρακτηριστικά τους, όσο και όταν αναφερόμαστε στον τρόπο διαβίωσης και εκμετάλλευσής τους.

Συνοψίζοντας, κρίνεται ότι η αποσαφήνιση της υφιστάμενης κατάστασης με βάση τις πηγές πληροφοριών που προαναφέρθηκαν είναι επαρκής και ρεαλιστική για την περιοχή μελέτης. Δυστυχώς, στη χώρα μας δεν διαθέτουμε αρχεία καλλιεργητικών τεχνικών με καταγεγραμμένα όλα τα ιστορικά στοιχεία για τις διάφορες πρακτικές[4]. Οι πρακτικές της γεωργίας και της κτηνοτροφίας στον Άραχθο καθορίστηκαν με βάση την κοινή εμπειρία και την αξιόπιστη πληροφορία των αρμόδιων φορέων και, αν και ενδέχεται κάπου να παρεκκλίνουν από την πραγματικότητα, θεωρείται ότι σε γενικές γραμμές ανταποκρίνονται στα ελληνικά δεδομένα. Η αξιόπιστη περιγραφή της υφιστάμενης κατάστασης έχει πάντως μεγάλη σημασία για την ανάπτυξη, εφαρμογή και ποσοτικοποίηση της επίδρασης των εναλλακτικών ΔΠ που θα αναφερθούν στη συνέχεια.

Τέλος, το πρόγραμμα παρακολούθησης της ποιότητας των υδάτων της Ηπείρου (συμπεριλαμβανομένου του Αράχθου) δεν παραπέμπει σε μεγάλες συγκεντρώσεις N-NO3 και P (Directive 2000/60/EC - Article 5, 2006). Οι συγκεντρώσεις των στοιχείων παραμένουν εντός των αποδεκτών ορίων, αν και αυτά καθορίζονται περισσότερο εμπειρικά ακόμα στη χώρα μας. Ωστόσο, το εθνικό σύστημα ταξινόμησης των υδάτων των Skoulikidis et al. (2006) για μικρού και μέσου μεγέθους λεκάνες απορροής, θέτει την επιθυμητή κατάσταση των υδάτων κάτω από πολύ αυστηρά όρια συγκεντρώσεων θρεπτικών (βλ. ενότητα 2.1.4). Η κατάταξη των υδάτων του Αράχθου στις κλάσεις *Υψηλής* και *Καλής* οικολογικής κατάστασης δεν είναι δεδομένο ότι επιτυγχάνεται. Δεδομένου ακόμα ότι η εκβολή του ποταμού αποτελεί μια περιβαλλοντικά ευαίσθητη περιοχή, ότι η διάβρωση της λεκάνης είναι μεγάλη και ότι το Υδατικό Διαμέρισμα της Ηπείρου συγκαταλέγεται μέσα στα πιλοτικά για την εφαρμογή της πρώτης φάσης των ΔΣ στη χώρα μας, η επιλογή της περιοχής μελέτης για την περιστολή των απωλειών εδάφους και θρεπτικών με αποδοτικές ΔΠ θεωρείται δόκιμη. Η επιλογή της λεκάνης του Αράχθου για την επικύρωση της μεθοδολογίας μπορεί να αποτελέσει οδηγό για τη μετέπειτα επέκτασή της σε άλλες λεκάνες απορροής (π.χ. στη Θεσσαλία) που αναμένεται να έχουν μεγαλύτερα περιβαλλοντικά προβλήματα.

7.3 Προσαρμογή της μεθοδολογίας στη λεκάνη του Αράχθου

Όπως περιγράφηκε στην αρχή του κεφαλαίου, το πρώτο βήμα της μεθοδολογίας είναι η πλήρης παραμετροποίηση και βαθμονόμηση του μοντέλου SWAT στη λεκάνη του Αράχθου στην Ήπειρο. Η προσομοίωση της υφιστάμενης κατάστασης και της ποιότητας των υδάτων της λεκάνης με βάση τις παρατηρημένες παροχές, στερεοπαροχές και συγκεντρώσεις

[4] Αναφέρεται ακόμα ότι σε προσωπική επίσκεψη που έγινε στις 21 Μαρτίου 2010 στην περιοχή από το συγγραφέα (κοινότητα Μεγάλης Γότιστας), η επαφή με τον τοπικό πληθυσμό δεν ήταν ικανή να μας διαφωτίσει περαιτέρω.

θρεπτικών κατά μήκος του ποταμού, αποτελεί αντικείμενο υδρολογικής ποιοτικής προσομοίωσης (water quality modeling) και είναι η θεμελιώδης προϋπόθεση επιτυχίας της αναπτυχθείσας μεθοδολογίας. Η ορθή προσομοίωση της υφιστάμενης κατάστασης είναι εκείνη που θα εγγυηθεί την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων που πηγάζουν από υποθετικά σενάρια και μπορεί να χαρακτηριστεί ως μία ανεξάρτητη επιστημονική εργασία-οδηγός υδρολογικής και ποιοτικής προσομοίωσης μιας ελληνικής λεκάνης απορροής. Εκτιμάται ότι αυτό είναι ένα σημαντικό επιστημονικό μέρος της διατριβής, το οποίο λόγω και του μεγάλου όγκου εργασίας κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστεί ανεξάρτητα στο επόμενο κεφάλαιο.

7.3.1 Επιλογή Διαχειριστικών Πρακτικών προς εφαρμογή στη λεκάνη του Αράχθου και προσομοίωση στο SWAT

Με βάση την υφιστάμενη αγροτική δραστηριότητα οι ΔΠ που μπορούν να εφαρμοστούν στη λεκάνη του Αράχθου σχετίζονται με τις καλλιέργειες αραβόσιτου και μηδικής, τη βόσκηση των αιγοπροβάτων και τη διαχείριση της κοπριάς των πουλερικών. Ο αριθμός των βοοειδών στη λεκάνη είναι περιορισμένος και μάλλον η διαβίωσή τους δεν επιδέχεται διαχείρισης. Είναι ακόμα δυνατόν να εφαρμοστούν ΔΠ, που είναι ανεξάρτητες της χρήσης γης (π.χ. λωρίδες συγκράτησης). Πιο συγκεκριμένα, για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας επιλέχτηκαν οι κάτωθι ΔΠ:

- Εγκατάσταση λωρίδων συγκράτησης φερτών και θρεπτικών στα όρια των αγροτεμαχίων και των τριών τύπων αγροτικής χρήσης γης (αραβόσιτος, μηδική, βοσκότοποι),
- μείωση χημικής λίπανσης καλλιεργειών αραβόσιτου και μηδικής,
- αλλαγή στο χρόνο χημικής λίπανσης των καλλιεργειών αραβόσιτου και μηδικής,
- καλλιέργεια αραβόσιτου κατά τις ισοϋψείς,
- κατάργηση άροσης στην καλλιέργεια αραβόσιτου,
- μείωση αριθμού αιγοπροβάτων και πουλερικών με κατ' επέκταση μείωση εναποτιθέμενης κοπριάς στους βοσκότοπους,
- αποθήκευση κοπριάς πουλερικών για 3 μήνες και διασπορά στους βοσκότοπους μόνο κατά την ξηρή περίοδο,
- μείωση περιόδου βόσκησης αιγοπροβάτων κατά δύο μήνες με ταυτόχρονη 3μηνη αποθήκευση της κοπριάς όλης της περιόδου σταβλισμένης εκτροφής, και διασπορά στους βοσκότοπους αποκλειστικά κατά την ξηρή περίοδο.

Ο φυσικός μηχανισμός επίδρασης αυτών των ειδών ΔΠ στις μεταφερόμενες ποσότητες, καθώς και η προσομοίωσή τους από το μοντέλο SWAT έχει αναλυθεί διεξοδικά

στην ενότητα 6.3. Στο σημείο αυτό οι ΔΠ που συμπεριλαμβάνονται στη μεθοδολογία της διατριβής συγκεκριμενοποιούνται ως προς τις καλλιέργειες αραβόσιτου και μηδικής καθώς και ως προς τα δύο είδη ζώων που κυριαρχούν στη λεκάνη.

Οι λωρίδες συγκράτησης εφαρμόζονται στη λεκάνη του Αράχθου με σταθερό πλάτος 5m είτε αφορούν σε εκτάσεις καλλιεργειών, είτε βοσκότοπων. Η μείωση των χημικών λιπάνσεων στις καλλιέργειες αραβόσιτου και μηδικής γίνεται με γνώμονα την ευαισθησία της ανάπτυξης του κάθε φυτού σε αυτές. Για τη μηδική, η οποία ως ψυχανθές εμπλουτίζει το έδαφος με N, αναμένεται μία μικρότερη επίδραση στις αποδόσεις, όχι μόνο στην πραγματικότητα, αλλά και στις εκτιμήσεις του μοντέλου SWAT, που επιτυχώς προσομοιώνει τον βιολογικό κύκλο των καλλιεργειών και την αζωτοδέσμευση (Neitch et al., 2005a). Η εν λόγω πρακτική εφαρμόστηκε με 100% μείωση N και 50% P από τη συνολική χημική λίπανση 5ετίας της μηδικής, που αποτελεί τον πλήρη βιολογικό της κύκλο. Για τον αραβόσιτο, μια πιο συγκαταβατική παρέμβαση επιλέχθηκε, με μείωση τόσο της αζωτούχου, όσο και της φωσφορικής λίπανσης κατά 30% κατ' έτος. Για τους βοσκότοπους, το μέτρο μείωσης των διαθέσιμων ποσοτήτων θρεπτικών στο έδαφος μεταφράστηκε σε 30% μείωση στην εναποτιθέμενη κοπριά, που προήλθε από ανάλογη μείωση στον αριθμό των αιγοπροβάτων και των πουλερικών. Στο SWAT, η πρακτική αυτή προσομοιώθηκε με μείωση της ημερήσιας εναποτιθέμενης κοπριάς αιγοπροβάτων κατά την περίοδο της βόσκησης αλλά και του σταθερού ρυθμού εβδομαδιαίας εναπόθεσης κατά την υπόλοιπη περίοδο. Για την κοπριά πουλερικών, η δεύτερη αυτή περίπτωση εναπόθεσης με μείωση 30% εφαρμόστηκε σταθερά για όλο το διάστημα του έτους.

Για την καλλιέργεια αραβόσιτου επιλέχθηκαν ακόμα η καλλιέργεια κατά τις ισοϋψείς και η κατάργηση της άροσης. Με την καλλιέργεια κατά μήκος των ισοϋψών καμπυλών επιτυγχάνεται μείωση της επιφανειακής απορροής και της διάβρωσης και συνεπώς, της μεταφοράς θρεπτικών μέσω αυτών. Η εν λόγω πρακτική προσομοιώθηκε στο μοντέλο SWAT με μείωση του παράγοντα διαχείρισης εδαφών κατά της διάβρωσης P_{USLE} της Εξίσωσης 3.9, ώστε έμμεσα να προσομοιωθούν οι ανωτέρω επιδράσεις του μέτρου. Ταυτόχρονα, συστήνεται και η μείωση του αριθμού καμπύλης CN ώστε να μεταφραστεί η μείωση της επιφανειακής απορροής στο SWAT (Arabi et al., 2008). Για τη λεκάνη του Αράχθου που χαρακτηρίζεται από μεγάλες κλίσεις εδάφους, θεωρήθηκε ότι η εν λόγω ΔΠ στις εκτάσεις αραβόσιτου, προσομοιώνεται ορθά με μείωση του παράγοντα P_{USLE} σε 0,9 και του CN κατά 3 μονάδες από την αρχική τιμή. Η κατάργηση της άροσης είναι επίσης ένα μέτρο που επιδρά ενάντια στη μεταφορά ρύπων και η αποφυγή της αμέσως μετά τη συγκομιδή δεν ανακατανέμει τα εδαφικά σωματίδια και δεν ευνοεί την ανοργανοποίηση της οργανικής ουσίας, που εύκολα με έναν υγρό χειμώνα, όπως στην Ήπειρο, μπορεί να οδηγήσουν σε υψηλές απώλειες $NO3^-$, αυξημένη διάβρωση και μεταφορά θρεπτικών με τα φερτά. Η

απαλοιφή της καλλιεργητικής αυτής τεχνικής στα τέλη Σεπτέμβρη από τα αγροτεμάχια αραβόσιτου προσδοκάται ότι δύναται να μειώσει τους πιθανούς παράγοντες που οδηγούν σε αυτά τα αποτελέσματα. Η πρακτική προσομοιώνεται από το SWAT με απλή απαλοιφή της άροσης μετά τη συγκομιδή. Κατά συνέπεια, οι τιμές της καμπύλης CN στις εκτάσεις αραβόσιτου δεν αυξάνονται κατά 3 μονάδες στα τέλη Σεπτέμβρη (Πίνακας 7.1) και η επιφανειακή απορροή δεν ευνοείται περαιτέρω διατηρώντας το μέγεθος που της έχει προσδώσει η συγκομιδή στα μέσα του μήνα, ως τελευταία πλέον καλλιεργητική τεχνική του ετήσιου βιολογικού κύκλου του φυτού.

Η πρακτική που σχετίζεται με το χρόνο λίπανσης έχει ως στόχο την αποφυγή συσσώρευσης θρεπτικών στοιχείων στο έδαφος κατά τους χειμερινούς μήνες, που στην Ελλάδα χαρακτηρίζονται από έντονα επεισόδια με μεγάλο ύψος βροχόπτωσης. Επιπρόσθετα, δίνεται με αυτόν τον τρόπο η δυνατότητα στην καλλιέργεια να κάνει πιο αποδοτική και πλήρη χρήση των θρεπτικών στοιχείων του εδάφους. Για την καλλιέργεια του αραβόσιτου το μέτρο αυτό εφαρμόστηκε με καθυστέρηση ενός μήνα στη σπορά και στην εφαρμογή χημικής λίπανσης, στα τέλη Απριλίου αντί για τα τέλη Μαρτίου, ενώ για τη μηδική εφαρμόστηκε σε κάθε χρονιά του 5ετούς βιολογικού της κύκλου, εκτός της πρώτης, με καθυστέρηση της χημικής λίπανσης κατά ένα μήνα δηλαδή με εφαρμογή στα μέσα Μαρτίου αντί στα μέσα Φεβρουαρίου. Με την πρακτική αυτή προσδοκάται η διαθεσιμότητα θρεπτικών στο έδαφος λόγω λίπανσης να μεταφερθεί για κάθε καλλιέργεια στον επόμενο, λιγότερο υγρό μήνα.

Στους βοσκότοπους εφαρμόστηκε ακόμα η αποθήκευση της κοπριάς για ένα διάστημα τριών μηνών και η μετέπειτα διασπορά και εναπόθεσή της στους αγρούς. Όπως αναλύθηκε και στην ενότητα 4.2.1, για την κοπριά πουλερικών η συνήθης μείωση είναι 15%, ενώ για τα αιγοπρόβατα, ελλείψει δημοσιευμένων αναφορών, θεωρήθηκε αυθαίρετα μία μείωση 30%, ως πιο κοντινή στα αναφερόμενα ποσοστά για την κοπριά βοοειδών (Cuttle et al., 2007). Η ενσωμάτωση της εν λόγω ΔΠ στο SWAT έγινε με καθορισμό νέων τύπων κοπριάς με μειωμένη περιεκτικότητα σε N, ενώ η συνεχής εφαρμογή της έγινε με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, όπως και στην υφιστάμενη κατάσταση (ανά 7 ημέρες), αλλά με εναπόθεση των νέων τύπων κοπριάς μόνο κατά την ξηρή περίοδο.

Ειδικότερα, για την κοπριά πουλερικών, το μέτρο περιλαμβάνει τη συλλογή των περιττωμάτων σε κοπροσωρούς σε ειδικά διαμορφωμένους εξωτερικούς χώρους καθ' όλη την υγρή περίοδο και αφού 'ωριμάσει' για τουλάχιστον τρεις μήνες, σταδιακή διασπορά της στους βοσκότοπους από τις αρχές Απρίλη, σε σταθερές δόσεις ανά 7 ημέρες. Στο μοντέλο SWAT ορίστηκε μία νέα σύσταση κοπριάς πουλερικών με μειωμένη περιεκτικότητα N κατά 15% από εκείνη της υφιστάμενης κατάστασης (βλ. Πίνακα 7.3), ενώ ο ρυθμός εναπόθεσης κατά την ξηρή περίοδο διπλασιάστηκε ώστε να συμπεριλάβει τη συλλεγόμενη κοπριά της υγρής περιόδου. Η εν λόγω ΔΠ μειώνει ουσιαστικά μόνο το εναποτιθέμενο N κατά 15% κατ'

έτος, κάτι που φυσιολογικά οδηγεί και σε μειωμένες ετήσιες αποπλύσεις από το έδαφος. Επιπλέον, η αποφυγή εναπόθεσης κατά την υγρή περίοδο αναμένεται να μειώσει δραστικά και τις απώλειες P. Παρ' όλα αυτά, όπως και στην περίπτωση της μεταβολής στο χρονικό σημείο λίπανσης των καλλιεργειών, η μέθοδος δεν μπορεί να εγγυηθεί απόλυτα τα προσδοκώμενα αυτά αποτελέσματα μιας και η στοχαστικότητα των μετεωρολογικών φαινομένων μπορεί να οδηγήσει σε έντονες αποπλύσεις ακόμα και κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Σε ορίζοντα 5ετίας πάντως αναμένεται πως οι μέσες ετήσιες απώλειες θρεπτικών θα είναι οπωσδήποτε μικρότερες από εκείνες της υφιστάμενης κατάστασης, ιδιαίτερα για το N, που είναι μειωμένο στην πηγή κατά 15%.

Παρόμοια επίδραση αναμένεται να έχει το μέτρο αυτό, όταν αναφέρεται στη συλλογή κοπριάς αιγοπροβάτων. Το μέτρο εφαρμόστηκε για τα αιγοπρόβατα σε συνδυασμό με περιορισμό κατά δύο μήνες στην περίοδο της βόσκησης. Έτσι, η περίοδος βόσκησης ορίστηκε με έναρξη ένα μήνα αργότερα (την 1^{η} Μαΐου αντί την 1^{η} Απριλίου) και τέλος, ένα μήνα νωρίτερα, στο τέλος Σεπτεμβρίου αντί στο τέλος Οκτωβρίου όπως είχε οριστεί στην υφιστάμενη κατάσταση (βλ. Πίνακα 7.2). Κατά τους δύο μήνες περιορισμού της βόσκησης η εκτροφή των αιγοπροβάτων θεωρείται ότι λαμβάνει χώρα σε κλειστούς χώρους και η κοπριά που προκύπτει αποθηκεύεται για μετέπειτα διασπορά στις εκτάσεις. Κατά τους σημαντικά βροχερούς μήνες Απρίλιο και Οκτώβριο στη λεκάνη του Αράχθου, η απουσία βόσκησης, εκτός από τη μείωση της εναποτιθέμενης κοπριάς, διαθέσιμης προς μεταφορά, επιτρέπει και την καλύτερη ανάπτυξη της φυσικής βλάστησης η οποία δρα ανασχετικά στην απορροή και στη μεταφορά ρύπων. Όταν εφαρμόζεται η εν λόγω ΔΠ, η περίοδος βόσκησης στο SWAT προσομοιώνεται με διαφορετικές ημερομηνίες έναρξης και λήξης, ενώ η συνεχής εναπόθεση κοπριάς αιγοπροβάτων, που ελάμβανε χώρα κατά την υγρή περίοδο (1/1-31/3 και 1/11-31/12 στον Πίνακα 7.2), σταματά και η κοπριά της 5μηνης υγρής περιόδου, όταν τα ζώα δεν βοσκούσαν ελεύθερα, συλλέγεται σε κοπροσωρούς. Αθροιστικά λοιπόν, κοπριά αιγοπροβάτων 7 μηνών συλλέγεται και αποθηκεύεται (για 3 μήνες), ενώ με την έναρξη του Μαΐου ξεκινά η σταδιακή εναπόθεσή της ανά 7 ημέρες στις εκτάσεις των βοσκότοπων. Ταυτόχρονα με την εναπόθεση αυτή λαμβάνει χώρα σε ημερήσια βάση και η ελεύθερη βόσκηση του θέρους. Στο SWAT, η εβδομαδιαία εναπόθεση προσομοιώνεται πλέον με ορισμό νέου τύπου κοπριάς αιγοπροβάτων με μειωμένη κατά 30% περιεκτικότητα N από την υφιστάμενη κατάσταση (βλ. Πίνακα 7.3) και την ίδια ακριβώς περιεκτικότητα P. Η βόσκηση ορίζεται με έναρξη 1 μήνα αργότερα και τέλος 1 μήνα νωρίτερα με εναποτιθέμενη κοπριά ανά ημέρα ακριβώς ίδια με εκείνη της υφιστάμενης κατάστασης. Ο ρυθμός της εβδομαδιαίας εφαρμογής του νέου τύπου κοπριάς όμως, είναι αυξημένος κατά 40% για να συμπεριλάβει την ποσότητα κοπριάς που συλλέχθηκε για δύο επιπλέον μήνες σταβλισμένης εκτροφής (5 μήνες κατά την υγρή περίοδο και 2 από μείωση βόσκησης) και διασπορά της σε ίδιο χρονικό

διάστημα (5 μήνες), μετατεθειμένο όμως στην περίοδο από 1η Μαΐου έως 30 Σεπτεμβρίου. Οι επιπτώσεις της συνδυαστικής αυτής ΔΠ αναμένεται να είναι παρόμοιες με εκείνες των αντίστοιχων ΔΠ σχετικά με τη μεταβολή στο χρόνο εφαρμογής θρεπτικών των καλλιεργειών και της κοπριάς πουλερικών, ενώ η αποτελεσματικότητά της έγκειται παρομοίως στη στοχαστικότητα των βροχοπτώσεων.

Οι ΔΠ που αναλύθηκαν παραπάνω και αποτελουν συγκεκριμένη εφαρμογή των πρακτικών που παρουσιάστικαν στον Πίνακα 6.1, υιοθετήθηκαν τελικά για εφαρμογή στη λεκάνη του άνω Αράχθου και συνοψίζονται στον Πίνακα 7.4.

Πίνακας 7.4 Οι Διαχειριστικές Πρακτικές που επιλέχτηκαν για εφαρμογή στην αγροτική γη της λεκάνης του άνω Αράχθου.

Χρήση γης	ΔΠ	Περιγραφή ΔΠ	Τρόπος Εφαρμογής στο SWAT	Λειτουργία
ΑΡΑΒΟΣΙΤΟΣ	A1	Καθυστέρηση λίπανσης	30/4 αντί για 31/3	Αποφυγή μεταφοράς N και P σε περίοδο με ισχυρές βροχοπτώσεις
	A2	Μείωση λίπανσης	-30% στα εφαρμοζόμενα λιπάσματα	Μείωση εισερχόμενου N και P στα εδάφη
	A3	Καλλιέργεια κατά τις ισοϋψείς	P_{USLE} = 0,9 CNνέο = CN -3	Μείωση επιφανειακής απορροής και διάβρωσης
	A4	Κατάργηση άροσης	Απαλοιφή άροσης στα αρχεία 'mgt' $CN_{\text{άροσης}} = CN_{\text{συγκομιδής}}$	Μείωση επιφανειακής απορροής και διάβρωσης
	A5	Λωρίδες συγκράτησης	5m πλάτος λωρίδας	Συγκράτηση φερτών και θρεπτικών
ΜΗΔΙΚΗ	M1	Καθυστέρηση λίπανσης	15/3 αντί για 15/2	Αποφυγή μεταφοράς N και P σε περίοδο με ισχυρές βροχοπτώσεις
	M2	Μείωση λίπανσης	-100% N, -50% P	Μείωση εισερχόμενου N και P στα εδάφη
	M3	Λωρίδες συγκράτησης	5m πλάτος λωρίδας	Συγκράτηση φερτών και θρεπτικών
ΒΟΣΚΟΤΟΠΟΙ	B1	Μείωση αριθμού πουλερικών	-30% εναπόθεση κοπριάς	Μείωση εισερχόμενου N και P στα εδάφη
	B2	Αποθήκευση κοπριάς πουλερικών και διασπορά κατά την ξηρή περίοδο	15% μείωση στην περιεκτικότητα της κοπριάς με N – Εφαρμογή κοπριάς από Απρίλη έως Σεπτέμβρη με διπλασιασμό της ποσότητας κοπριάς ανά εφαρμογή	15% ετήσια μείωση στην εναποτιθέμενη ποσότητα N και μείωση πιθανότητας απόπλυσης από τα εδάφη
	B3	Μείωση αριθμού αιγοπροβάτων	-30% εναπόθεση κοπριάς	Μείωση εισερχόμενου N και P στα εδάφη
	B4	Μείωση περιόδου βόσκησης αιγοπροβάτων κατά 2 μήνες, αποθήκευση κοπριάς και διασπορά κατά την ξηρή περίοδο	Περίοδος βόσκησης: 1 Μαΐου – 30 Σεπτεμβρίου Αποθήκευση της κοπριάς της υπόλοιπης περιόδου και εφαρμογή της μεταξύ 1 Μαΐου – 30 Σεπ. με μείωση στην περιεκτικότητα N κατά 30% και αύξηση της ποσότητας εφαρμογής κατά 40%	30% ετήσια μείωση στην εναποτιθέμενη ποσότητα N και μείωση πιθανότητας απόπλυσης από τα εδάφη
	B5	Λωρίδες συγκράτησης	5m πλάτος λωρίδας	Συγκράτηση φερτών και θρεπτικών

7.3.2 Κοστολόγηση Διαχειριστικών Πρακτικών στη λεκάνη του Αράχθου

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.4, συνολικά δημιουργήθηκαν 5 πρακτικές για τον αραβόσιτο, 3 για τη μηδική και 5 για τους βοσκότοπους. Οι πρακτικές αυτές αναφέρονται στη λεκάνη του Αράχθου δεδομένου ότι εκεί απαντώνται οι εν λόγω καλλιέργειες και το είδος της κτηνοτροφίας που αυτές αφορούν. Για την ολοκλήρωση της δόμησης των ΔΠ προς εφαρμογή γίνεται στο σημείο αυτό η ακριβής κοστολόγησή τους με βάση τη μεθοδολογία της ενότητας 6.4. Η ανάλυση της κοστολόγησης που ακολουθεί, μπορεί να χαρακτηριστεί ως αντιπροσωπευτική για ολόκληρη την Ελλάδα, αφού οι ΔΠ κοστολογήθηκαν λαμβάνοντας κυρίως υπόψη δύο πολύ πρόσφατες και αξιόπιστες ελληνικές μελέτες του ΕΘΙΑΓΕ για τη βιολογική μηδική και προβατοτροφία (Τζουραμάνη κ.α., 2008α· 2008β). Επειδή τα στοιχεία των μελετών δεν επαρκούσαν για την κοστολόγηση και των 13 πρακτικών του Πίνακα 7.4, συλλέχτηκαν επίσης στοιχεία από δημοσιεύσεις στον τύπο για την τιμή πώλησης κάποιων λιπασμάτων και έγινε χρήση των δεδομένων της εργασίας των Cuttle et al. (2007) για σύγκριση με την κοστολόγηση 44 ΔΠ σε φάρμες του Ηνωμένου Βασιλείου. Στην τελευταία περίπτωση δεν ελήφθη φυσικά μία ετήσια τιμή κόστους αυτούσια από την εργασία, αλλά έγινε αρχικά προσπάθεια εμπειρικής εκτίμησης του κόστους μιας πρακτικής στον Άραχθο και στη συνέχεια συγκρίθηκε η προσέγγιση αυτή με την αντίστοιχη της εν λόγω εργασίας. Σημειώνεται ότι το κόστος που θα παρουσιαστεί στην ενότητα αυτή αποτελεί το μέσο ετήσιο επιπρόσθετο κόστος (σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση) εγκατάστασης και λειτουργίας μιας ΔΠ με αναφορά στο έτος 2007. Στο έτος αυτό, αναφέρονται τόσο οι μελέτες του ΕΘΙΑΓΕ, όσο και η εργασία των Cuttle et al. (2007). Όλες οι επιπρόσθετες υποθέσεις και προσεγγίσεις για τον υπολογισμό του κόστους έγιναν με αυστηρή αναφορά στο ίδιο έτος.

Στην ενότητα 6.4 αναλύθηκαν οι λόγοι που η κοστολόγηση και η περιβαλλοντική αποτελεσματικότητα των ΔΠ πρέπει να γίνονται με αναφορά σε κοντινά χρονικά διαστήματα, ενώ η δεύτερη πρέπει να αναφέρεται σε ένα μέσο όρο κάποιων ετών. Στην παρούσα διατριβή οι απώλειες ρύπων από κάθε ΔΠ εκτιμήθηκαν ως μέσος όρος των ετήσιων απωλειών του διαστήματος 2001-2005. Τα πέντε αυτά έτη αποτελούν τα πιο πρόσφατα έτη, για τα οποία υπήρχαν τα διαθέσιμα δεδομένα (βροχομετρικά) για την προσομοίωση της λεκάνης του Αράχθου στο SWAT. Το περιβαλλοντικό αποτέλεσμα των ΔΠ συνεπώς, αφορά στις απώλειες ρύπων που θα προκαλούνταν από την αγροτική γη σε ετήσια βάση κατά τα έτη 2001-2005, αν εφαρμόζονταν οι πρακτικές εναλλακτικά των συμβατικών και κάτω από τις ίδιες μετεωρολογικές συνθήκες της εν λόγω πενταετίας στη λεκάνη.

Υπάρχει εδώ μία μικρή χρονική αναντιστοιχία ανάμεσα στην απώλεια ρύπων από την αγροτική γη και στο κόστος εφαρμογής της εκάστοτε πρακτικής. Ωστόσο, τα διαθέσιμα

οικονομικά δεδομένα μας αναγκάζουν να κάνουμε την οικονομική αναφορά στο έτος 2007 και να τη θεωρήσουμε αντιπροσωπευτική των ετών 2001-2005. Παρόλο που οπωσδήποτε θα υπήρχαν διαφοροποιήσεις σε εκείνα τα έτη, ο σκοπός της εργασίας να κάνει σχετική σύγκριση κόστους ανάμεσα σε διάφορες ΔΠ επιτυγχάνεται με αυτήν την προσέγγιση. Ακόμα, η αναγωγή των διαφόρων ειδών κόστους (κεφαλαίου, συντήρησης, ευκαιρίας) στο ίδιο χρονικό σημείο με χρήση ράντας και επιτοκίου, δεν θα διαφοροποιούσε αισθητά τα οικονομικά δεδομένα, με το μέσο ετήσιο κόστος να είναι παραπλήσιο και τη σχετική του βαρύτητα μεταξύ των διαφόρων ΔΠ να παραμένει η ίδια. Άλλωστε, ο χρονικός ορίζοντας εφαρμογής είναι πολύ μικρός (5 έτη). Δεδομένης της δυσκολίας ανάπτυξης μιας ολοκληρωμένης ανάλυσης κόστους εφαρμογής ΔΠ, θεωρείται ότι η προσέγγιση που ακολουθεί για την εκτίμηση του επιπρόσθετου κόστους που απαιτείται για την εφαρμογή των ΔΠ του Πίνακα 7.4 είναι επαρκής για τις ανάγκες της διατριβής.

Τα κόστη περιλαμβάνουν το απαιτούμενο κεφάλαιο, τη συντήρηση ή συνεχή λειτουργία της ΔΠ για 5 έτη και το χαμένο εισόδημα που προκύπτει σε ορισμένες περιπτώσεις. Το τελευταίο αφορά στη μείωση αποδόσεων αραβόσιτου και μηδικής μετά από μείωση λίπανσης, την απώλεια εισοδήματος από μείωση του αριθμού των ζώων καθώς και την απώλεια γεωργικής έκτασης προς εκμετάλλευση όταν εγκαθίστανται λωρίδες συγκράτησης. Η μείωση στην απόδοση υπολογίστηκε από τα δεδομένα εξόδου του μοντέλου SWAT μετά από εφαρμογή των ΔΠ, ενώ η απώλεια έκτασης λόγω εγκατάστασης λωρίδων, από την προσέγγιση των Cuttle et al. (2007). Η απώλεια εισοδήματος λόγω μείωσης του αριθμού των ζώων καθορίζεται άμεσα από το ίδιο το μέτρο για κάθε περιοχή βοσκότοπου στη λεκάνη. Τα ετήσια κόστη των ΔΠ με αναφορά στο έτος 2007 συνοψίζονται στον Πίνακα 7.5.

Το ετήσιο καθαρό κέρδος από την παραγωγή ενός kg μηδικής στην Ελλάδα έχει υπολογιστεί από τους Τζουραμάνη κ.α. (2008α) ίσο με 0,17€ με αναφορά στο έτος 2007. Η παραγωγή προορίζεται αποκλειστικά για κτηνοτροφική χρήση. Για τον αραβόσιτο το ΕΘΙΑΓΕ δεν έχει κάνει ανάλογη μελέτη. Δεδομένου ότι η καλλιέργεια στην Ήπειρο προορίζεται για τον ίδιο σκοπό, θεωρήθηκε η ίδια τιμή ανά kg παραγωγής (0,17€/kg). Το κόστος αγοράς 1kg των τύπων χημικών λιπασμάτων 11-52-00 και 00-15-00 για τη μηδική εκτιμήθηκε 0,17€ μετά από ανάλυση των δεδομένων από την εργασία του ΕΘΙΑΓΕ (Τζουραμάνη κ.α., 2008α). Για τον αραβόσιτο, οι τιμές αυτές ήταν ελαφρώς μεγαλύτερες, μιας και οι τύποι λιπασμάτων 20-10-00 και 33-00-00 βρέθηκαν να κοστίζουν ακριβότερα κατά την αγορά το έτος 2007 (0,19 και 0,245€/kg αντίστοιχα), με βάση δημοσιευμένη πληροφορία στον τύπο (Ημερησία Online, 2010). Με βάση αυτές τις τιμές, τα έξοδα ενός γεωργού για αγορά 30% λιγότερων λιπασμάτων αραβόσιτου είναι μειωμένα κατά 76€/ha/έτος, ενώ για μείωση των φωσφορικών και αζωτούχων λιπασμάτων κατά 50% και

100% αντίστοιχα στη μηδική, υπολογίζονται μειωμένα κατά 49€/ha/έτος. Τα μέτρα καθυστέρησης της χημικής λίπανσης αραβόσιτου και μηδικής κατά ένα μήνα, θεωρείται ότι δεν προκαλούν κάποιο άμεσο κόστος, εκτός από το έμμεσο που μπορεί να προκύψει λόγω μικρής απόκλισης (θετικής ή αρνητικής) στις προσδοκώμενες αποδόσεις των καλλιεργειών.

Πίνακας 7.5 Κοστολόγηση Διαχειριστικών Πρακτικών που επιλέχτηκαν για εφαρμογή στην αγροτική γη της λεκάνης του άνω Αράχθου.

Χρήση γης	**ΔΠ**	**Περιγραφή ΔΠ**	***Επιπρόσθετο κόστος – Όφελος**
ΑΡΑΒΟΣΙΤΟΣ	Α1	Καθυστέρηση λίπανσης	0.17 € / kg χαμένης απόδοσης ή - 0.17 € / kg επιπλέον απόδοσης
	Α2	Μείωση λίπανσης	-0.19€ / kg λιπάσματος 20-10-00 -0.245€ / kg λιπάσματος 33-00-00 0.17 € / kg χαμένης απόδοσης
	Α3	Καλλιέργεια κατά τις ισοϋψείς	10 € / ha 0.17 € / kg χαμένης απόδοσης ή - 0.17 € / kg επιπλέον απόδοσης
	Α4	Κατάργηση άροσης	- 40 € / ha 0.17 € / kg χαμένης απόδοσης ή - 0.17 € / kg επιπλέον απόδοσης
	Α5	Λωρίδες συγκράτησης	50 €/ha
ΜΗΔΙΚΗ	Μ1	Καθυστέρηση λίπανσης	0.17 € / kg χαμένης απόδοσης ή - 0.17 € / kg επιπλέον απόδοσης
	Μ2	Μείωση λίπανσης	- 0.17€/ kg λιπάσματος 11-52-00 και 00-15-00 0.17 € / kg χαμένης απόδοσης
	Μ3	Λωρίδες συγκράτησης	50 €/ha
ΒΟΣΚΟΤΟΠΟΙ	Β1	Μείωση αριθμού πουλερικών	(0.35 €/κεφαλή)
	Β2	Αποθήκευση κοπριάς πουλερικών και διασπορά κατά την ξηρή περίοδο	(0.15 €/κεφαλή)
	Β3	Μείωση αριθμού αιγοπροβάτων	(3.56 €/κεφαλή)
	Β4	Μείωση περιόδου βόσκησης αιγοπροβάτων κατά 2 μήνες, αποθήκευση κοπριάς και διασπορά κατά την ξηρή περίοδο	(3.5 €/κεφαλή)
	Β5	Λωρίδες συγκράτησης	50 €/ha

*Οι θετικές τιμές υποδεικνύουν επιπρόσθετο κόστος για την εφαρμογή της εκάστοτε ΔΠ σε σχέση με τη συμβατική τεχνική, ενώ οι αρνητικές επιπρόσθετο εισόδημα ή εξοικονόμηση οικονομικών πόρων για τον αγροτικό πληθυσμό.

Η εργασία των Τζουραμάνη κ.α. (2008β) υπολογίζει την καθαρή ετήσια πρόσοδο από την εκμετάλλευση προβάτων ίση με 3,56€/κεφαλή. Η τιμή αντιπροσωπεύει το κόστος ανά ζώο για εφαρμογή της κατά 30% μείωσης του αριθμού προβάτων στη λεκάνη του Αράχθου.

Υπενθυμίζεται ότι οι αισθητά λιγότερες αίγες στη λεκάνη θεωρήθηκαν ως ένα ενιαίο είδος με τα πρόβατα. Το κόστος μείωσης των πουλερικών ή η απώλεια προσόδου, υπολογίστηκε εμπειρικά σε 0,35€/κεφαλή/έτος σε αναλογία 1:10 με την κατά κεφαλή πρόσοδο των προβάτων (Τζουραμάνη κ.α., 2008β).

Η κατάργηση της άροσης στις εκτάσεις αραβόσιτου εξοικονομεί χρήματα αφού η πρακτική αυτή απαιτεί εργασία και καύσιμα για τα γεωργικά μηχανήματα. Εφαρμόζοντας αυτήν τη ΔΠ ωστόσο, κάποια επιπλέον έξοδα για την καταπολέμηση ζιζανίων που δεν καταστράφηκαν, αλλά και απώλεια εισοδήματος από πιθανές μειώσεις στην παραγωγή μπορεί να προκύπτουν. Συνολικά το μέτρο αυτό, εκτός της πιθανής μείωσης αποδόσεων που υπολογίζεται από το μοντέλο SWAT, εκτιμήθηκε ότι αποφέρει εξοικονόμηση 40€/ha/έτος για τον παραγωγό, ενώ η σύγκριση με την εργασία των Cuttle et al. (2007) επιβεβαίωσε την ορθότητα αυτής της προσέγγισης. Συγκεκριμένα, στο Ηνωμένο Βασίλειο οι συγγραφείς της εν λόγω εργασίας ακολούθησαν παρόμοια προσέγγιση και υπολόγισαν ένα οικονομικό όφελος 40£/ha κατ' έτος με ελαχιστοποίηση της άροσης. Επιπρόσθετα, η καλλιέργεια κατά τις ισοϋψείς απαιτεί συνήθως επιπλέον εργασία και καύσιμα. Το επιπλέον κόστος εφαρμογής της πρακτικής αυτής εκτιμήθηκε εμπειρικά ίσο με 10€/ha/έτος για τη λεκάνη του Αράχθου.

Οι λωρίδες συγκράτησης από την άλλη, μπορούν να εκτιμηθούν επίσης με εμπειρικό τρόπο συνυπολογίζοντας το κόστος σπόρων της ειδικής βλάστησης, το κόστος εργασίας για την εγκατάσταση και ετήσια συντήρηση και την απώλεια καλλιεργήσιμης έκτασης, που το μοντέλο SWAT δεν λαμβάνει υπόψη του. Οι Cuttle et al. (2007) αθροίζουν τις εν λόγω συνιστώσες και εκτιμούν μέσο ετήσιο κόστος 32£/ha στο Ηνωμένο Βασίλειο. Στην παρούσα εργασία εκτιμήθηκε το επιπρόσθετο μέσο ετήσιο κόστος από εφαρμογή της ΔΠ στη λεκάνη του Αράχθου ίσο με 50€/ha και υιοθετήθηκε προσεγγιστικά σταθερό, είτε εφαρμόζεται σε καλλιεργήσιμη έκταση (αραβόσιτος, μηδική), είτε σε βοσκότοπο, παρόλο που στην τελευταία περίπτωση δεν υπάρχει απώλεια καλλιεργήσιμης έκτασης.

Τέλος, το κόστος συλλογής και αποθήκευσης της κοπριάς πουλερικών και αιγοπροβάτων εκτιμήθηκε με γνώμονα την εργασία των Cuttle et al. (2007), αλλά με κάποιες επιπρόσθετες απλουστευτικές παραδοχές. Πιο συγκεκριμένα, αγνοήθηκε το κόστος αγοράς δεξαμενών τοποθέτησης της κοπριάς μιας και θεωρήθηκε πολύ ακριβό και ανέφικτο στην περιοχή της Ηπείρου. Μία εφικτή παραλλαγή του μέτρου που περιγράφουν οι Άγγλοι συγγραφείς είναι η συλλογή της κοπριάς σε κοπροσωρούς σε γειτνιάζοντες με τις κτηνοτροφικές μονάδες χώρους. Έτσι, μόνο έξοδα λειτουργίας θεωρήθηκαν στην περίπτωση της περιοχής μελέτης, που σχετίζονται αποκλειστικά με κόστος εργασίας. Με βάση την ποσότητα κοπριάς που παράγεται από κάθε ζώο για τη λεκάνη του Αράχθου εκτιμήθηκαν τα κόστη αυτής της ΔΠ ίσα με 3,5 και 0,15€/κεφαλή για αιγοπρόβατα και πουλερικά αντίστοιχα. Τέλος, στην περίπτωση των αιγοπροβάτων, ο ταυτόχρονος περιορισμός της βόσκησης κατά

δύο μήνες θεωρήθηκε ότι προκαλεί κάποιο μικρό κόστος εργασίας για τη συλλογή και αποθήκευση της κοπριάς που ήδη ενσωματώθηκε στην προαναφερθείσα τιμή των 3,5€/κεφαλή.

7.3.3 Συνολικός αριθμός Διαχειριστικών Πρακτικών προς εξέταση στη λεκάνη του Αράχθου

Οι 13 ΔΠ του Πίνακα 7.4, πέντε για το αραβόσιτο, τρεις για τη μηδική και πέντε για τους βοσκότοπους, μπορούν να εφαρμοστούν και συνδυαστικά ανά χρήση γης. Αυτό σημαίνει ότι π.χ. για τον αραβόσιτο, οι 5 ΔΠ μπορούν να συνδυαστούν ανά 2, ανά 3, ανά 4 και ανά 5 ώστε τελικά να διαμορφώνουν συνδυαστικές ΔΠ προς εφαρμογή με αθροιστική αποτελεσματικότητα στον περιορισμό των απωλειών ρύπων, αλλά και αθροιστικό κόστος εφαρμογής. Για παράδειγμα, στην περίπτωση που και οι πέντε επιμέρους πρακτικές του αραβόσιτου εφαρμόζονται ταυτόχρονα, πρόκειται για μία ΔΠ που περιλαμβάνει: καλλιέργεια αραβόσιτου κατά τις ισοϋψείς, χωρίς άροση, με μειωμένη λίπανση που εφαρμόζεται με καθυστέρηση ενός μήνα έναντι της συμβατικής τεχνικής και με εγκατάσταση λωρίδων συγκράτησης στα όρια των αγρών. Μία τέτοια συνδυαστική πρακτική αυξάνει δραστικά την αποτελεσματικότητα στη μείωση απωλειών ρύπων από τις εκτάσεις αραβόσιτου, αλλά ταυτόχρονα και το συνολικό κόστος εφαρμογής, το οποίο υπολογίζεται με συνάθροιση των επιμέρους κοστών των πέντε μεμονωμένων πρακτικών από τον Πίνακα 7.5. Ο συνολικός αριθμός ΔΠ, που μπορούν να εφαρμοστούν με συνδυασμό ή μη στον αραβόσιτο, υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\Delta\Pi_{\alpha\rho\alpha\beta} = \binom{5}{1} + \binom{5}{2} + \binom{5}{3} + \binom{5}{4} + \binom{5}{5} = 31 \qquad (7.1)$$

Θεωρώντας τη διατήρηση της συμβατικής καλλιέργειας αραβόσιτου (υφιστάμενη κατάσταση) ως μία πιθανή πρακτική, ο συνολικός αριθμός ΔΠ ανέρχεται σε 32. Με τον ίδιο τρόπο, οι πιθανές ΔΠ σε κάθε εδαφική μονάδα καλλιέργειας μηδικής προκύπτουν από τη συνάθροιση της συμβατικής τεχνικής, των τριών μεμονωμένων πρακτικών του Πίνακα 7.4 και των συνδυασμών των τελευταίων ανά δύο και ανά τρεις, άρα οκτώ στο σύνολο. Για τους βοσκότοπους, οι πέντε επιμέρους πρακτικές οδηγούν σε σύνολο 32 ΔΠ, όπως στον αραβόσιτο. Ωστόσο, στην παρούσα εργασία επιλέχτηκαν μόνο δέκα για χρήση στη μετέπειτα διαδικασία της βελτιστοποίησης, που περιλαμβάνουν τη συμβατική τεχνική σε κάθε ομοιογενή έκταση βοσκότοπου, τις πέντε μεμονωμένες και άλλες τέσσερις, συνδυαστικές των τελευταίων. Οι 4 συνδυαστικές πρακτικές αντιπροσωπεύουν την ταυτόχρονη μείωση κατά 30% του αριθμού αιγοπροβάτων και πουλερικών (μέτρα B1 και B3), την ταυτόχρονη

εφαρμογή των μέτρων αποθήκευσης και χρονικής μετάθεσης εφαρμογής της κοπριάς των δύο τύπων ζώων στα εδάφη (μέτρα Β2 και Β4), καθώς και την εγκατάσταση λωρίδων συγκράτησης στα 2 τελευταία συνδυαστικά μέτρα (Β1&Β3&Β5 και Β2&Β4&Β5). Οι επιλεγμένες ΔΠ της αγροτικής γης για χρήση στη διαδικασία βελτιστοποίησης είναι συνολικά 50, τρεις που αντιστοιχούν στις συμβατικές τεχνικές και 47 σε εναλλακτικές αυτών. Συνολικά, 32 αφορούν στον αραβόσιτο, 8 στη μηδική και 10 στους βοσκότοπους και συνοψίζονται αριθμημένες στον Πίνακα 7.6. Σημειώνεται ότι οι συμβατικές τεχνικές συμπεριλαμβάνονται στον πίνακα ως πιθανές ΔΠ, ώστε να δίνεται η δυνατότητα στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης να έχει ακόμα και την επιλογή της μη-διαχειριστικής παρέμβασης στις ΥΜ. Η 51^{η} πρακτική του πίνακα, αντιπροσωπεύει τέλος και αυτή, την υφιστάμενη κατάσταση και ουσιαστικά δεν αποτελεί κάποια ΔΠ στην αγροτική γη. Όπως έχει εξηγηθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, συμπεριλαμβάνεται στον Πίνακα για προγραμματιστικούς λόγους ώστε κατά τη διαδικασία της δημιουργίας της ΒΔΠ και της βελτιστοποίησης να αντιστοιχεί μία εικονική ΔΠ στις μη αγροτικές εκτάσεις, να τις λαμβάνει δηλαδή συστηματικά υπόψη χωρίς διαχείριση.

Πίνακας 7.6 Το σύνολο των Διαχειριστικών Πρακτικών, μεμονωμένων και συνδυασμών τους, που επιλέχτηκαν για χρήση στη διαδικασία βελτιστοποίησης στη λεκάνη του Αράχθου.

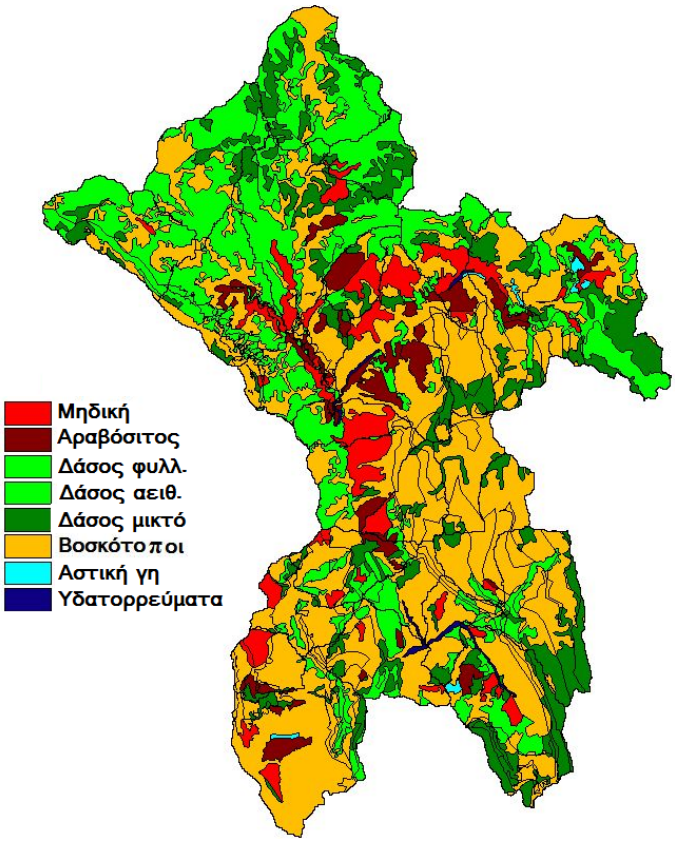
Κωδικός ΔΠ	**ΔΠ**	**Κωδικός ΔΠ**	**ΔΠ**	**Κωδικός ΔΠ**	**ΔΠ**
1	Συμβατική τεχνική καλλιέργειας αραβόσιτου	18	Α1 & Α2 & Α4	35	Μ2
2	Α1	19	Α1 & Α2 & Α5	36	Μ3
3	Α2	20	Α1 & Α3 & Α4	37	Μ1 & Μ2
4	Α3	21	Α1 & Α3 & Α5	38	Μ1 & Μ3
5	Α4	22	Α1 & Α4 & Α5	39	Μ2 & Μ3
6	Α5	23	Α2 & Α3 & Α4	40	Μ1 & Μ2 & Μ3
7	Α1 & Α2	24	Α2 & Α3 & Α5	41	Συμβατική Κτηνοτροφική Δραστηριότητα στον Βοσκότοπο
8	Α1 & Α3	25	Α2 & Α4 & Α5	42	Β1
9	Α1 & Α4	26	Α3 & Α4 & Α5	43	Β2
10	Α1 & Α5	27	Α1 & Α2 & Α3 & Α4	44	Β3
11	Α2 & Α3	28	Α1 & Α2 & Α3 & Α5	45	Β4
12	Α2 & Α4	29	Α1 & Α2 & Α4 & Α5	46	Β5
13	Α2 & Α5	30	Α1 & Α3 & Α4 & Α5	47	Β1 & Β3
14	Α3 & Α4	31	Α2 & Α3 & Α4 & Α5	48	Β2 & Β4
15	Α3 & Α5	32	Α1 & Α2 & Α3 & Α4 & Α5	49	Β1 & Β3 & Β5
16	Α4 & Α5	33	Συμβατική τεχνική καλλιέργειας μηδικής	50	Β2 & Β4 & Β5
17	Α1 & Α2 & Α3	34	Μ1	51	ΟΧΙ ΔΠ

7.3.4 Δημιουργία της Βάσης Διαχειριστικών Πρακτικών της λεκάνης του Αράχθου

Οι αριθμοί 1-51 στον Πίνακα 7.6 αποτελούν την έκφραση των 51 ΔΠ στο προγραμματιστικό περιβάλλον του MATLAB, το οποίο τους χρησιμοποιεί κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης της επιλογής και τοποθέτησης ΔΠ στην αγροτική γη. Το μοντέλο SWAT εκτελείται 51 φορές και δημιουργείται η ΒΔΠ που αποθηκεύει δεδομένα των μέσων ετήσιων απωλειών ρύπων (φερτά, N-NO3 και P) και επιπρόσθετου κόστους από όλες τις ΥΜ της λεκάνης του άνω Αράχθου μετά από εφαρμογή όλων των ΔΠ.

Η ΒΔΠ αποτελείται από 4 πίνακες, έναν για κάθε μεταβλητή με την πληροφορία στους πίνακες να διατάσσεται σε σειρές και στήλες ίσες με τις ΥΜ της λεκάνης και τις συνολικές ΔΠ. Η κάθε τιμή του πίνακα εκφράζει δηλαδή το μέγεθος των απωλειών ενός ρύπου ή το κόστος εφαρμογής που προκλήθηκε από την εφαρμογή μίας εκ των ΔΠ του Πίνακα 7.6 σε συγκεκριμένη ΥΜ της λεκάνης. Στην περίπτωση της λεκάνης του Αράχθου ο κάθε πίνακας αποτελείται από 259×51 στοιχεία, που αντιστοιχούν στις 259 ΥΜ και τις 51 ΔΠ που εξετάζονται. Υπενθυμίζεται ότι η 51^{η} πρακτική ενσωματώθηκε για να διευκολύνει την έκφραση της απουσίας διαχείρισης στις φυσικές εκτάσεις.

Στο Σχήμα 7.3 φαίνεται η λεκάνη του Αράχθου διαιρεμένη σε 259 ΥΜ, οι οποίες προέκυψαν από αλληλοεπικάλυψη τριών θεματικών επιπέδων σε ΣΓΠ: (α) των επιπέδων των υπολεκανών της λεκάνης του άνω Αράχθου, (β) των χρήσεων γης και (γ) του εδάφους. Στο επόμενο κεφάλαιο θα περιγραφεί η διαδικασία παραγωγής του χάρτη αυτού εντός της γενικότερης αξιοποίησης των χαρτογραφικών δεδομένων της λεκάνης, ωστόσο για τις ανάγκες του παρόντος κεφαλαίου, αναφέρεται ότι ο εν λόγω χάρτης εκφράζει τη διαφορετικότητα μιας μονάδας εδάφους από οποιαδήποτε άλλη ως προς: την κλίση εδάφους, τη χρήση γης ή τις εδαφικές ιδιότητες. Η κάθε μία τέτοια μονάδα χαρακτηρίζεται από ομοιογενή υδρολογική συμπεριφορά στο σύνολο της έκτασής της, η οποία διαφοροποιείται από εκείνη οποιασδήποτε άλλης μονάδας μιας και τουλάχιστον ένας από τους τρεις παράγοντες διαφέρει. Η κλίση αποδίδεται στο μοντέλο SWAT σε επίπεδο υπολεκάνης, δηλαδή όλες οι εκτάσεις διαφορετικών χρήσεων γης και εδάφους εντός της ίδιας υπολεκάνης χαρακτηρίζονται από την ίδια κλίση. Στη λεκάνη του Αράχθου έγινε διαχωρισμός σε 27 υπολεκάνες, που σημαίνει ότι κατά μέσο όρο εντός κάθε μιας από αυτές υπάρχουν περίπου 10 διαφορετικοί συνδυασμοί χρήσεων γης και τύπων εδαφών, ώστε σε σύνολο να αθροίζουν σε 259 ΥΜ.



Σχήμα 7.3 Διαχωρισμός της λεκάνης του Αράχθου σε 259 Υδρολογικές Μονάδες.

Το βαθμονομημένο μοντέλο του Αράχθου, που παρουσιάζεται στο χρήστη μέσω του περιβάλλοντος εργασίας σε ΣΓΠ, αποτελείται από σύνολο αρχείων σε ειδικό φάκελο, που βρίσκεται σε ορισμένη από το χρήστη θέση της μνήμης αποθήκευσης του υπολογιστή. Ανάμεσα στα αρχεία του φακέλου υπάρχουν 259 αρχεία διαχείρισης με κατάληξη ‘mgt’, που ανοίγουν ως αρχεία κειμένου ‘txt’ και περιέχουν την πληροφορία διαχείρισης των 259 ΥΜ της λεκάνης. Το περιεχόμενο του κάθε αρχείου αποτελείται από ένα σύνολο αριθμητικών δεδομένων που επιτρέπουν στο μοντέλο SWAT να προσομοιώσει την εκάστοτε ΔΠ και να ποσοτικοποιήσει τις απώλειες ρύπων από κάθε ΥΜ.

Η διαδικασία δημιουργίας της ΒΔΠ είναι απλή και πλήρως αυτοματοποιημένη. Τα 51 αυτοτελή προγραμματιστικά έγγραφα, ‘scripts’, συντάχθηκαν σε γλώσσα προγραμματισμού MATLAB (Μ-αρχεία), κάθε ένα αντιστοιχούμενο σε μία ΔΠ από τις 51 του Πίνακα 7.6. Το κάθε script εκτελεί μία σειρά εντολών για την εγγραφή του σετ δεδομένων που απαρτίζουν τη μαθηματική προσομοίωση μιας ΔΠ στο SWAT, σε όλα ταυτόχρονα τα αρχεία ‘mgt’, στα οποία η συγκεκριμένη ΔΠ αναφέρεται, δηλαδή σε όλες ταυτόχρονα τις ΥΜ, των οποίων η χρήση γης επιδέχεται εφαρμογής της συγκεκριμένης ΔΠ. Συγκεκριμένα, και με βάση τη μεθοδολογία ανάπτυξης της ΒΔΠ της ενότητας 6.6, η διαδικασία εκτελεί κατά σειρά τις παρακάτω λειτουργίες για τη δημιουργία της στην περιοχή μελέτης:

i Ανοίγει όλα τα ‘mgt’ αρχεία (259),

ii αναγνωρίζει την πληροφορία για τη χρήση γης και το έδαφος που περιέχεται σε κάθε ένα από τα αρχεία αυτά,

iii κάνοντας χρήση της εντολής εγγραφής του MATLAB ‘fprintf’, συντάσσει τα αρχεία εκείνα που η χρήση γης επιδέχεται την εφαρμογή της εκάστοτε ΔΠ με το σετ δεδομένων που την απαρτίζει,

iv εκτελεί το μοντέλο SWAT για 5 έτη (2001-2005) με την εντολή ‘dosSWAT2005’, ώστε το μοντέλο να προσομοιώσει τις υδρολογικές και χημικές διεργασίες στη λεκάνη, με εφαρμογή της εκάστοτε ΔΠ κατά το εν λόγω διάστημα,

v διαβάζει με την εντολή ‘dlmread’ τα μέσα ετήσια φορτία φερτών υλών, N-NO3 και P, που εγκαταλείπουν την κάθε ΥΜ και εισέρχονται στο υδρογραφικό δίκτυο,

vi διαβάζει με την ίδια εντολή από τα αρχεία εξόδου του μοντέλου τις μέσες ετήσιες αποδόσεις αραβόσιτου και μηδικής ανά ΥΜ,

vii χρησιμοποιεί τις ανωτέρω αποδόσεις, τις αποδόσεις των καλλιεργειών της υφιστάμενης κατάστασης, τον αριθμό των ζώων κάθε ΥΜ βοσκότοπου και τα οικονομικά δεδομένα του Πίνακα 7.5 σε ειδικά διαμορφωμένη μαθηματική φόρμουλα για τον υπολογισμό του μέσου ετήσιου κόστους εφαρμογής της εκάστοτε ΔΠ σε κάθε ΥΜ,

viii αποθηκεύει τα αποτελέσματα των απωλειών ρύπων και κόστους των ΔΠ για κάθε ΥΜ.

Για παράδειγμα, στο τρίτο βήμα, ο αντίστοιχος κώδικας της εγγραφής και προσομοίωσης των λωρίδων συγκράτησης στις εκτάσεις αραβόσιτου, βρίσκεται στο 6^{ο} κατά σειρά προγραμματιστικό έγγραφο (Κωδικός ΔΠ = 6 στον Πίνακα 7.6 για την πρακτική Α5), το οποίο αναγνωρίζει τα αρχεία διαχείρισης ‘mgt’ που αντιπροσωπεύουν ΥΜ με χρήση γης αραβόσιτου και μόνο σε αυτά (αγνοεί τα υπόλοιπα) μεταβάλλει την αρχική τιμή του πλάτους της λωρίδας σε 5m (από 0), ώστε να προσδώσει στις μονάδες αυτές την εν λόγω πρακτική διαχείρισης. Η συγκεκριμένη διαδικασία ‘σέβεται’ την υπόλοιπη πληροφορία που βρίσκεται εντός του αρχείου, αφήνοντάς τη ως έχει. Αυτό έχει μεγάλη σημασία διότι σε ένα αρχείο ‘mgt’ εκτός από δεδομένα σχετικά με την εκάστοτε ΔΠ βρίσκονται και επιπρόσθετα δεδομένα, π.χ. ο αριθμός καμπύλης CN, που διαφέρει ανάμεσα σε διαφορετικούς τύπους εδάφους και που η διαφοροποίησή του προσδίδει στα διάφορα εδάφη ιδιαίτερη υδρολογική συμπεριφορά. Στο Σχήμα 7.4 φαίνεται ένα τυπικό αρχείο ‘mgt’, το οποίο αναφέρεται σε ΥΜ αραβόσιτου με ΔΠ την εγκατάσταση λωρίδας συγκράτησης πλάτους 5m στα όρια των αγρών.

```
000030003.mgt - Notepad
File  Edit  Format  View  Help
CORN flysch        Αραβόσιος σε φλύσχη
            0
0
                1
               19
             0.00
             0.00
          1400.00
0
             0.80
            87.00 CN - 87
             1.00
             0.00
            5.000 λωρίδα 5m
0
                0
                0
0
                0
                0
            0.000
            0.000
            0.000
0
            0.000
            0.000
            0.000
0
                1
0
  3 29          3   56          750.00000   0.80
  3 31          1   19         1400.00000   0.00     0.00000 0.00    0.00 87.00
  5 31          3    6          450.00000   0.80
  9 10          5                90.00000
  9 30          6    1           93.00000
0
```

Σχήμα 7.4 Τυπικό αρχείο ‘mgt’ υδρολογικής μονάδας αραβόσιτου σε έδαφος φλύσχη υπό διαχείριση με τη ΔΠ 6 (λωρίδα συγκράτησης). Πρόκειται για την τρίτη υδρολογική μονάδα της τρίτης κατά σειρά αριθμήσεως υπολεκάνης (όνομα αρχείου ‘000030003.mgt’).

Στην περίπτωση που μία πρακτική δεν αποφέρει μείωση απόδοσης καρπού, ενώ οι μεταβολές στη διαχείριση της ΥΜ εξοικονομούν χρήματα για το γεωργό, προκύπτει μία αρνητική τιμή κόστους. Μία τέτοια πρακτική αναμένεται να είναι για παράδειγμα, η ΔΠ 35, που αναφέρεται στη μηδική. Όπως θα παρουσιαστεί στα επόμενα κεφάλαια, η μείωση λιπάνσεως μειώνει τα έξοδα αγοράς χημικών λιπασμάτων, ενώ η απόδοση της καλλιέργειας της μηδικής δε μειώνεται με αποτέλεσμα να δημιουργεί αύξηση εισοδήματος. Μετά την εκτέλεση και των 51 Μ-αρχείων, αποκτάται το σύνολο της περιβαλλοντικής πληροφορίας και του κόστους εφαρμογής των ΔΠ με αποτέλεσμα η δημιουργία της ΒΔΠ να ολοκληρώνεται. Με βάση τις επιλογές μας κατά τη δημιουργία της, αυτή περιέχει τις απώλειες ρύπων από τις ΥΜ μετά από εφαρμογή των ΔΠ, σε tn για τα φερτά και σε kg για τον P και το N-NO3, και όχι τις διαφορές ή τις ποσοστιαίες μεταβολές των απωλειών από την υφιστάμενη κατάσταση. Επιπλέον, τόσο οι απώλειες ρύπων, όσο και τα κόστη εφαρμογής των ΔΠ δεν αποθηκεύονται με αναφορά ανά μονάδα έκτασης (π.χ. ha) της ΥΜ, αλλά στη συνολική έκτασή της (tn, kg, €).

Η ΒΔΠ της λεκάνης του Αράχθου λοιπόν, αποτελείται από 4 πίνακες 259×51 στοιχείων, όπου οι ρύποι και τα κόστη των 32 ΔΠ στις ΥΜ αραβόσιτου βρίσκονται στις πρώτες 32 στήλες, των 8 ΔΠ της μηδικής στις στήλες 33-40, ενώ των ΔΠ των βοσκότοπων στις στήλες 41-50. Για παράδειγμα, οι απώλειες ρύπων της υφιστάμενης κατάστασης και άρα

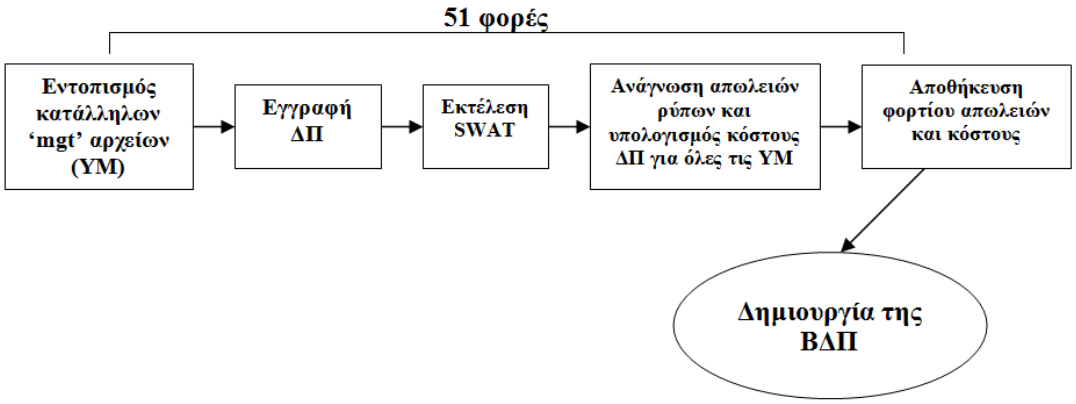
το υφιστάμενο μηδενικό επιπρόσθετο κόστος εφαρμογής ΔΠ στον αραβόσιτο, συναντώνται στις γραμμές του πίνακα που φιλοξενούν ΥΜ αραβόσιτου, οι οποίες διασταυρώνονται με την πρώτη στήλη του πίνακα ($1^{η}$ ΔΠ του Πίνακα 7.6 – συμβατική καλλιέργεια αραβόσιτου), καθώς και με τις τελευταίες 19 (33-51), οι οποίες περιλαμβάνουν τις ΔΠ 33-51 του Πίνακα 7.6 και αφορούν σε πρακτικές άλλων χρήσεων γης. Αυτό άλλωστε εξηγεί το ότι μία μόνο ΔΠ, που εξ ορισμού αφορά μόνο σε έναν τύπο χρήσης γης, εφαρμόζεται κάθε φορά που εκτελείται στο MATLAB ένας από τους 51 κώδικες. Παρομοίως, η υφιστάμενη κατάσταση απωλειών ρύπων και άρα μηδενικού κόστους στις εκτάσεις μηδικής αποτυπώνονται στις θέσεις των τεσσάρων πινάκων που ανήκουν σε γραμμές, οι οποίες αντιστοιχούν σε ΥΜ με αυτήν την καλλιέργεια, και στις στήλες 1-32 και 41-50 (ΔΠ για αραβόσιτο και βοσκότοπους αντίστοιχα), την στήλη 33 (ΔΠ της καλλιέργειας μηδικής με τις συμβατικές τεχνικές) και φυσικά τη στήλη 51. Οι απώλειες από τις μη αγροτικές εκτάσεις (π.χ. δασικές) αποθηκεύονται στις γραμμές που περιλαμβάνουν τις ΥΜ με την εν λόγω χρήση γης και είναι ίδιες και ίσες με αυτές της υφιστάμενης κατάστασης για οποιαδήποτε από τις 51 στήλες των πινάκων, ενώ το κόστος στον αντίστοιχο πίνακα είναι σταθερά μηδενικό. Αυτό συμβαίνει διότι οι φυσικές εκτάσεις δεν τίθενται υπό διαχείριση.

Στο Σχήμα 7.5 φαίνεται μέρος ενός από τους πίνακες 259×51 που βοηθά στην κατανόηση της δόμησής τους. Στον πίνακα excel του σχήματος φαίνονται οι ετήσιες απώλειες P (σε kg) από τις 27 πρώτες ΥΜ της λεκάνης (γραμμές) μετά από εφαρμογή των πρώτων 14 ΔΠ (στήλες). Οι πρώτες 14 ΔΠ είναι εκείνες με την αντίστοιχη αρίθμηση στον Πίνακα 7.6 και αφορούν την καλλιέργεια αραβόσιτου, ενώ οι 27 ΥΜ αναφέρονται στις πρώτες 27 από ανάντη προς την έξοδο της λεκάνης, σύμφωνα με την αρίθμηση που ακολουθεί το μοντέλο SWAT κατά τη σχηματοποίησή της. Παρατηρείται ότι όλες οι τιμές σε κάθε γραμμή πλην της $12^{ης}$ γραμμής του πίνακα είναι (ανά γραμμή) ίσες μεταξύ τους. Αντίθετα, εκείνες της $12^{ης}$ γραμμής διαφέρουν και φανερώνουν ότι η γραμμή αυτή εκπροσωπεί μία ΥΜ αραβόσιτου με συνέπεια οι πρώτες 14 ΔΠ του πίνακα (που αναφέρονται στον αραβόσιτο) να εφαρμόζονται σε αυτή τηνΥΜ και να οδηγούν σε διαφορετικά φορτία απωλειών P. Όλες οι υπόλοιπες ΥΜ (γραμμές 1-11 και 13-27) αφορούν προφανώς ΥΜ μηδικής, βοσκότοπου, δάσους ή αστικής γης, οπότε η διαδικασία δημιουργίας της ΒΔΠ ορθά δεν εφάρμοσε τις ΔΠ 1-14 του αραβόσιτου. Οι τιμές στις γραμμές αυτές αντιστοιχούν στις ετήσιες ποσότητες απωλειών P κάτω από τη συμβατική τεχνική διαχείρισης, μιας και το μοντέλο SWAT όταν εκτελέστηκε για την προσομοίωση του φορτίου απωλειών από τις 14 πρώτες ΔΠ του Πίνακα 7.6 δεν επενέβη στις ΥΜ που δεν περιλαμβάνουν την καλλιέργεια αραβόσιτου στη λεκάνη του Αράχθου.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	2620,6	2620,6	2620,6	2620,6	2620,6	2620,6	2620,6	2620,6	2620,6	2620,6	2620,6	2620,6	2620,6	2620
2	998,2	998,2	998,2	998,2	998,2	998,2	998,2	998,2	998,2	998,2	998,2	998,2	998,2	998
3	4576,8	4576,8	4576,8	4576,8	4576,8	4576,8	4576,8	4576,8	4576,8	4576,8	4576,8	4576,8	4576,8	4576
4	775,9	775,9	775,9	775,9	775,9	775,9	775,9	775,9	775,9	775,9	775,9	775,9	775,9	775
5	86,6	86,6	86,6	86,6	86,6	86,6	86,6	86,6	86,6	86,6	86,6	86,6	86,6	86
6	828,8	828,8	828,8	828,8	828,8	828,8	828,8	828,8	828,8	828,8	828,8	828,8	828,8	828
7	76,4	76,4	76,4	76,4	76,4	76,4	76,4	76,4	76,4	76,4	76,4	76,4	76,4	76
8	1878,0	1878,0	1878,0	1878,0	1878,0	1878,0	1878,0	1878,0	1878,0	1878,0	1878,0	1878,0	1878,0	1878
9	282,9	282,9	282,9	282,9	282,9	282,9	282,9	282,9	282,9	282,9	282,9	282,9	282,9	282
10	2296,4	2296,4	2296,4	2296,4	2296,4	2296,4	2296,4	2296,4	2296,4	2296,4	2296,4	2296,4	2296,4	2296
11	35,4	35,4	35,4	35,4	35,4	35,4	35,4	35,4	35,4	35,4	35,4	35,4	35,4	35
12	1640,2	1496,3	1497,2	1366,5	1511,8	900,7	1401,5	1241,4	1379,9	821,7	1247,2	1249,6	822,4	1254
13	3871,3	3871,3	3871,3	3871,3	3871,3	3871,3	3871,3	3871,3	3871,3	3871,3	3871,3	3871,3	3871,3	3871
14	915,7	915,7	915,7	915,7	915,7	915,7	915,7	915,7	915,7	915,7	915,7	915,7	915,7	915
15	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1
16	817,6	817,6	817,6	817,6	817,6	817	12η ΥΜ (αραβόσιτος) και 8η ΔΠ			17,6	817,6	817,6	817,6	817
17	388,1	388,1	388,1	388,1	388,1	388,				388,1	388,1	388,1	388,1	388
18	89,5	89,5	89,5	89,5	89,5	89,5	89,5	89,5	89,5	89,5	89,5	89,5	89,5	89
19	1972,2	1972,2	1972,2	1972,2	1972,2	1972,2	1972,2	1972,2	1972,2	1972,2	1972,2	1972,2	1972,2	1972
20	350,5	350,5	350,5	350,5	350,5	350,5	350,5	350,5	350,5	350,5	350,5	350,5	350,5	350
21	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1
22	1684,7	1684,7	1684,7	1684,7	1684,7	1684,7	1684,7	1684,7	1684,7	1684,7	1684,7	1684,7	1684,7	1684
23	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0
24	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2
25	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0
26	111,0	111,0	111,0	111,0	111,0	111,0	111,0	111,0	111,0	111,0	111,0	111,0	111,0	111
27	1993,1	1993,1	1993,1	1993,1	1993,1	1993,1	1993,1	1993,1	1993,1	1993,1	1993,1	1993,1	1993,1	1993

Σχήμα 7.5 Τμήμα του πίνακα αποθήκευσης των απωλειών P από τις ΥΜ της λεκάνης του Αράχθου κάτω από την εφαρμογή ΔΠ, που αποτελεί μέρος της ΒΔΠ. Διακρίνεται στο κέντρο η θέση που αποθηκεύεται η τιμή απωλειών P από τη 12^{η} ΥΜ (αραβόσιτος) και την 8^{η} κατά σειρά ΔΠ (στήλη Η), που είναι ίση με 1241, 4 kgP/έτος.

Οι διαδικασίες ανάπτυξης της ΒΔΠ στη λεκάνη του Αράχθου που περιγράφηκαν πιο πάνω συνοψίζονται στο Σχήμα 7.6.



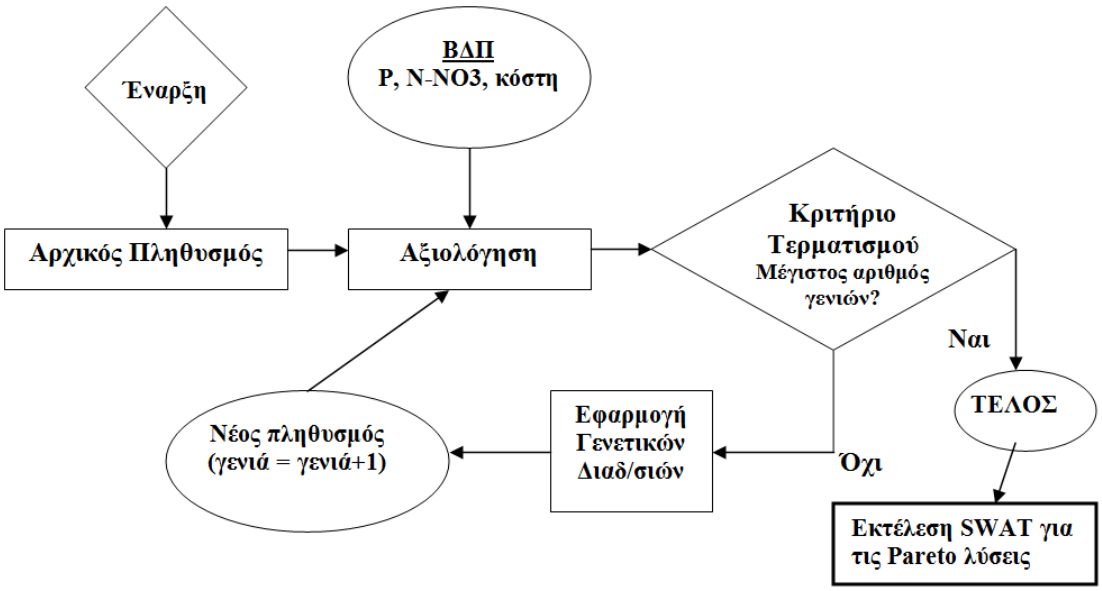
Σχήμα 7.6 Διαδοχικά αυτοματοποιημένα βήματα δημιουργίας της ΒΔΠ στη λεκάνη του Αράχθου.

Η ΒΔΠ του Αράχθου περιέχει τιμές για τα μέσα ετήσια (2001-2005) φορτία ρύπων που εγκαταλείπουν τα όρια των ΥΜ και εισέρχονται στο υδρογραφικό δίκτυο. Όπως αναλύθηκε στο τέλος της ενότητας 6.6, πιστεύεται ότι με τη χρήση των δεδομένων αυτών, ο στόχος της διαδικασίας αντιπροσωπεύει καλύτερα τον περιβαλλοντικό στόχο που τίθεται σε

μια αγροτική λεκάνη απορροής. Είναι δηλαδή ορθότερο να προσπαθεί κανείς να ελαχιστοποιεί τους ρύπους καθ' όλη την έκταση της λεκάνης δηλαδή να προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει την υποβάθμιση του συνόλου των εδαφών και των επιφανειακών υδάτων της λεκάνης. Στην λεκάνη του Αράχθου, τυπική των ελληνικών συνθηκών, θεωρείται ακόμα ότι η ταχεία απόκριση που ο ποταμός παρουσιάζει στα μετεωρολογικά φαινόμενα, έχει ως αποτέλεσμα το μικρό χρόνο παραμονής του νερού στα ποτάμια, πράγμα που δεν ευνοεί τις βιοχημικές διεργασίες. Μπορεί έτσι να θεωρηθεί ότι τα φορτία θρεπτικών που προσομοιώνονται από το μοντέλο στην έξοδο της λεκάνης αντιπροσωπεύουν επαρκώς τα αθροιστικά φορτία απωλειών θρεπτικών από τις ανάντη εκτάσεις που εισέρχονται στο υδρογραφικό δίκτυο αφού τις εγκαταλείψουν και αποθηκεύονται σε ετήσια βάση για όλες τις ΥΜ της λεκάνης στη ΒΔΠ. Η βελτιστοποίηση των περιβαλλοντικών κριτηρίων στη λεκάνη του Αράχθου με χρήση των δεδομένων της ΒΔΠ καλύπτει ταυτόχρονα το πρόβλημα βελτιστοποίησης των φορτίων ή συγκεντρώσεων θρεπτικών στην έξοδο του ποταμού (στη θέση Γεφύρι της Πλάκας).

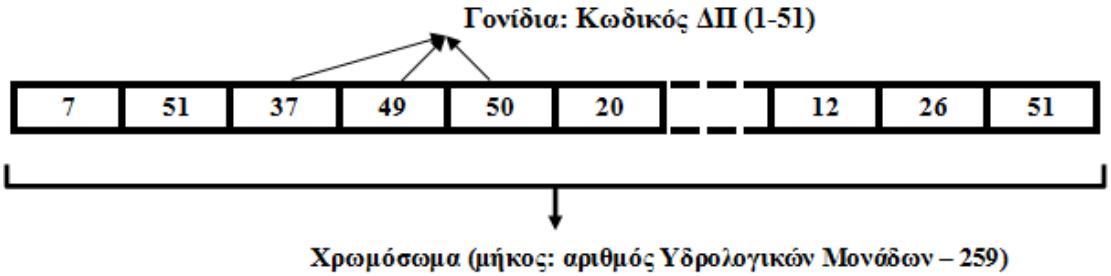
7.3.5 Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση κόστους και φορτίου απωλειών θρεπτικών στη λεκάνη του Αράχθου

Η ΒΔΠ που μόλις παρουσιάστηκε, περιέχει σε πινακοποιημένη μορφή τα φορτία απωλειών εδάφους (tn), N-NO3 (kg), P (kg) και κόστους (€) σε διάταξη 259×51, όπου 259 ο αριθμός των ΥΜ και 51 εκείνος των ΔΠ. Στη λεκάνη του Αράχθου δύο περιβαλλοντικά κριτήρια και το οικονομικό περιλαμβάνονται στο πρόβλημα της βελτιστοποίησης: οι συνολικές απώλειες P και N-NO3, ταυτόχρονα με το αθροιστικό κόστος των ΔΠ. Είναι φανερό ότι ο συνδυασμός ΔΠ στη λεκάνη που ελαχιστοποιεί μία από τις τρεις αντικειμενικές συναρτήσεις δεν ελαχιστοποιεί ταυτόχρονα και τις άλλες δύο. Αυτό το πρόβλημα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης (τρία κριτήρια) καλείται να λύσει ο ΓΑ του MATLAB εντοπίζοντας τις βέλτιστες Pareto λύσεις σε ένα μέτωπο τριών διαστάσεων. Τα βήματα της διαδικασίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.7.



Σχήμα 7.7 Η διαδικασία πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης με τον ΓΑ του MATLAB για την επιλογή και τοποθέτηση ΔΠ στην αγροτική γη της λεκάνης του Αράχθου.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.7, η διαδικασία βελτιστοποίησης με χρήση ΓΑ ξεκινάει με τον ορισμό ενός αρχικού πληθυσμού, κάθε άτομο του οποίου αναπαρίσταται από ένα χρωμόσωμα αποτελούμενο από γονίδια, ίσα σε αριθμό με τις ΥΜ της λεκάνης του Αράχθου (μεταβλητές απόφασης). Οι τιμές όλων των γονιδίων (259) ενός χρωμοσώματος δημιουργούν το γονότυπο του ατόμου, ενώ η πραγματική τους αναπαράσταση το φαινότυπο, ο οποίος είναι ένας συγκεκριμένος συνδυασμός ΔΠ στις 259 ΥΜ της λεκάνης. Στο εν λόγω πρόβλημα τα γονίδια εκφράζονται με ακέραιους αριθμούς μεταξύ 1-51 εκφράζοντας μία από τις 51 ΔΠ σε κάθε ΥΜ. Η αναπαράσταση ενός υποθετικού χρωμοσώματος φαίνεται στο Σχήμα 7.8.



Σχήμα 7.8 Χρωμόσωμα που αναπαριστά ένα σχήμα ΔΠ ή μία συγκεκριμένη διαχειριστική λύση σε ολόκληρη τη λεκάνη του Αράχθου.

Ακολουθώντας πιστά τη μεθοδολογία του 6ου Κεφαλαίου, πρέπει στη φάση της κωδικοποίησης να καθοριστούν οι αναγκαίοι περιορισμοί σχετικά με τα όρια ακέραιων τιμών, ανάμεσα στα οποία θα κινούνται οι πιθανές τιμές των γονιδίων όταν δημιουργούνται τα άτομα του πληθυσμού. Με τους εν λόγω περιορισμούς, το εύρος των πιθανών τιμών κάθε γονιδίου που αντιστοιχεί σε ΥΜ αραβόσιτου θα είναι 1-32, δηλαδή ο ΓΑ θα επιλέγει τιμές για το εν λόγω γονίδιο από τις πρώτες 32 στήλες των τριών πινάκων της ΒΔΠ. Ομοίως, για τις ΥΜ μηδικής και βοσκότοπων τα εύρη τιμών των γονιδίων θα είναι 33-40 και 41-50, σε αντιστοιχία με τις δυνατές ΔΠ κάθε τύπου χρήσης γης του Πίνακα 7.6. Οι μη αγροτικές εκτάσεις πρέπει επίσης να αντιστοιχούν σταθερά στον αριθμό 51 δηλαδή ο αλγόριθμος να επιλέγει τις τιμές της 51ης στήλης από τη ΒΔΠ. Υπενθυμίζεται ότι περιορίζοντας το ψάξιμο από τον αλγόριθμο στην 51η στήλη για τις εν λόγω ΥΜ ο αλγόριθμος δεν κάνει άσκοπες προσπάθειες ανεύρεσης λύσεων, ενώ εξασφαλίζεται και η μονοσήμαντη χαρτογραφική απεικόνιση των μη αγροτικών ΥΜ στη συνέχεια. Έτσι, αν κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης κάποια αγροτική ΥΜ επιλεχθεί να βρίσκεται υπό διαχείριση με τις συμβατικές τεχνικές (ΔΠ 1, 33 και 41 για αραβόσιτο, μηδική και βοσκότοπους αντίστοιχα), τότε θα διευκολύνεται η διαφοροποίηση μιας φυσικής έκτασης, που ούτως άλλως δεν τίθεται υπό διαχείριση, από τη συνειδητή επιλογή μία αγροτική έκταση να μην υφίσταται κάποια μεταβολή σε σχέση με τις συμβατικές τεχνικές διαχείρισης. Οι περιορισμοί για κάθε γονίδιο x_i ενός χρωμοσώματος στο διαμορφωθέν πρόβλημα της λεκάνης του Αράχθου έχουν ως εξής:

$$1 \le x_i^{\text{ΑΡΑΒ}} \le 32 \ , \ 33 \le x_i^{\text{ΜΗΔ}} \le 40 \ , \ 41 \le x_i^{\text{ΒΟΣΚ}} \le 50 \ , \ 51 \le x_i^{\text{ΑΛΛΟ}} \le 51 \qquad (7.2)$$

Η διαδικασία βελτιστοποίησης συνεχίζεται μετά την κωδικοποίηση υπό περιορισμούς, με τα άτομα του πληθυσμού να αξιολογούνται ως προς τη διαμόρφωση των μέτρων επίδοσης των αντικειμενικών συναρτήσεων που είναι το αθροιστικό φορτίο P και N-NO3 και το αθροιστικό επιπρόσθετο κόστος, όπως προκύπτουν από την άθροιση των 259 στοιχείων των αντίστοιχων πινάκων της ΒΔΠ στα οποία παραπέμπουν οι τιμές των 259 γονιδίων. Η χρήση της ΒΔΠ, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.7, γίνεται για την παροχή των απαραίτητων δεδομένων κάθε φορά που οι αντικειμενικές συναρτήσεις υπολογίζονται. Η διαφορά με το αντίστοιχο σχήμα της γενικής μεθοδολογίας του 6ου Κεφαλαίου (Σχήμα 6.3) είναι ότι στην περίπτωση της λεκάνης του Αράχθου δεν αντλείται η πληροφορία για το φορτίο απωλειών εδάφους από τις ΥΜ, μιας και αυτό το κριτήριο δεν ενσωματώνεται στη διαδικασία της βελτιστοποίησης. Ο αλγόριθμος επιχειρεί συστηματικά την ελαχιστοποίηση των αντικειμενικών συναρτήσεων και την εύρεση των ολικά βέλτιστων Pareto λύσεων μέσω της επαναληπτικής διαδικασίας αναπαραγωγής πληθυσμών. Μετά από κάθε αξιολόγηση ενός

πληθυσμού ελέγχεται αν ο διαδοχικός αριθμός γενιάς συμπίπτει με το κριτήριο τερματισμού, δηλαδή με τον μέγιστο δυνατό αριθμό γενιάς που έχει οριστεί στον αλγόριθμο. Η διαδικασία σταματά αν το κριτήριο ικανοποιείται, διαφορετικά συνεχίζεται με εφαρμογή των γνωστών γενετικών διαδικασιών στον υπάρχοντα πληθυσμό, όπως διασταύρωση και μετάλλαξη, για την παραγωγή της επόμενης γενιάς και τη δημιουργία του νέου πληθυσμού, ο οποίος εκ νέου αξιολογείται με τις αντικειμενικές συναρτήσεις.

Το τέλος της διαδικασίας προτείνει ένα σύνολο από λύσεις, τις βέλτιστες Pareto λύσεις. Κάθε λύση αναπαρίσταται με ένα χρωμόσωμα, του οποίου τα γονίδια εκφράζουν μία ΔΠ σε κάθε ΥΜ από τις 259 της λεκάνης. Πρόκειται λοιπόν για τους βέλτιστους ή μη κατώτερους ή μη κυριαρχούμενους συνδυασμούς ΔΠ εντός της λεκάνης του Αράχθου, οι οποίοι προβάλλονται από τη διαδικασία στο πρώτο μη κυριαρχούμενο ή βέλτιστο μέτωπο Pareto τριών διαστάσεων. Οι λύσεις του μετώπου εκφράζουν διαχειριστικά σχήματα με συγκεκριμένη διαμόρφωση τιμών για τα τρία κριτήρια, δηλαδή για το σύνολο του φορτίου απωλειών N-NO3, P και για το συνολικό κόστος και μπορούν να παρασταθούν ανά δύο ώστε να δίνουν τις καμπύλες αντιστάθμισης δύο κριτηρίων κάθε φορά.

Το τελευταίο βήμα της διαδικασίας περιλαμβάνει την εκτέλεση του μοντέλου SWAT για την προσομοίωση της μεταφοράς των ρύπων έως την έξοδο της λεκάνης. Αυτό γίνεται για κάθε μία από τις ισοδύναμες λύσεις του μετώπου Pareto, δηλαδή για κάθε έναν βέλτιστο συνδυασμό ΔΠ στη λεκάνη του Αράχθου. Επιτυγχάνεται έτσι η εύρεση των φορτίων ή των συγκεντρώσεων θρεπτικών στην έξοδο, μετά από το τέλος της διαδικασίας βελτιστοποίησης που όμως ήδη έγινε για τις ποσότητες ρύπων που εισέρχονται στο υδρογραφικό δίκτυο αφού εγκαταλείψουν τις ΥΜ. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα βελτιστοποίησης ο λόγος που καθιστά απαραίτητο αυτό το βήμα είναι η ανάγκη αξιολόγησης των λύσεων με βάση τη συγκέντρωση των θρεπτικών στοιχείων στο νερό, κάτι για το οποίο μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα αν ληφθούν υπόψη κάποια ανώτερα επιτρεπτά όρια τιμών που πάντα υφίστανται σε όρους συγκέντρωσης. Αντίθετα, η προσομοίωση των βιοχημικών διεργασιών κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου δεν αποτελεί αιτία της υιοθέτησης αυτού του προαιρετικού βήματος μιας και οι εν λόγω διεργασίες δεν τέθηκαν υπό προσομοίωση κατά την εκτέλεση του μοντέλου. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση αυτή το φορτίο ισούται απόλυτα με το άθροισμα του φορτίου απωλειών ρύπων που εισέρχονται στα νερά, μιας και η διόδευση σε ετήσια βάση δεν επιφέρει διαφοροποιήσεις. Μικρές διαφορές μπορεί να παρατηρούνται στην περίπτωση που η εναπόθεση φερτών στη κοίτη ή η διάβρωση αυτής είναι αξιοσημείωτες κατά τη διάρκεια προσομοίωσης (2001-2005), ώστε να παρασύρουν τις μορφές θρεπτικών που είναι στενά συνδεδεμένες με τα εδαφικά σωματίδια (ισχύει κυρίως για τον P).

Στο πρόβλημα βελτιστοποίησης που περιγράφεται μέσω της προσαρμογής της μεθοδολογίας στη λεκάνη του Αράχθου δεν συγκαταλέγεται το κριτήριο της ελαχιστοποίησης

των απωλειών φερτών υλών. Κάτι τέτοιο είναι εφικτό και θα οδηγούσε σε πολυκριτηριακή ανάλυση τεσσάρων κριτηρίων, του οικονομικού και τριών περιβαλλοντικών. Ωστόσο, οι ΔΠ του Πίνακα 7.6 δεν διαφοροποιούνται στο σύνολό τους ως προς την επίδρασή τους στην απώλεια εδάφους. Για παράδειγμα, η μειωμένη και η καθυστερημένη λίπανση δεν επηρεάζουν την εδαφική απώλεια ή οι λωρίδες συγκράτησης είτε ως μεμονωμένα μέτρα, είτε ως συνδυαστικά με μείωση λίπανσης ή αριθμού ζώων προκαλούν ακριβώς ή σχεδόν τα ίδια αποτελέσματα ως προς τις απώλειες εδάφους. Αυτό οφείλεται στο ότι οι ΔΠ αναπτύχθηκαν και δομήθηκαν με γνώμονα τον περιορισμό της ρύπανσης από θρεπτικά, αν και κάποιες από αυτές έμμεσα οδηγούν και σε μείωση της μεταφοράς φερτών στα νερά. Συνεπώς, το πρόβλημα βελτιστοποίησης τίθεται ως η ελαχιστοποίηση τριών κριτηρίων, η οποία έμμεσα οδηγεί σε μείωση των απωλειών εδάφους. Η ΒΔΠ ωστόσο, είναι έτσι δομημένη ώστε να αποθηκεύει και τις απώλειες εδάφους από τις ΥΜ, ώστε με διαφοροποίηση των ΔΠ προς διερεύνηση, κάλλιστα να μπορεί να ενσωματωθεί το κριτήριο αυτό σε μελλοντική διαδικασία πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης στη λεκάνη του Αράχθου.

8 Η Λεκάνη του Αράχθου στο Μοντέλο SWAT

8.1 Εισαγωγή

Το πρώτο βήμα της μεθοδολογίας ανάπτυξης του ΕΥΑ για τον περιορισμό της μη σημειακής ρύπανσης των επιφανειακών υδάτων της λεκάνης του Αράχθου περιλαμβάνει την πλήρη αποτύπωση της υπάρχουσας κατάστασης, μέσω προσομοίωσης του υδρολογικού και ποιοτικού καθεστώτος της λεκάνης με τον εκτιμητή ρυπαντικού φορτίου, το μοντέλο SWAT. Η υδρολογική ποιοτική προσομοίωση (water quality modeling), όπως ήδη αναφέρθηκε, αποτελεί ένα ανεξάρτητο επιστημονικό κομμάτι της διατριβής και παρουσιάζεται ξεχωριστά. Αποτελεί τη βασική προϋπόθεση επιτυχίας της διαδικασίας αξιολόγησης της αποδοτικότητας των ΔΠ στη μείωση των απωλειών ρύπων από τα εδάφη της λεκάνης και στη διαμόρφωση του φορτίου του ποταμού. Η ποσοτικοποίηση των επιδράσεων των ΔΠ στο SWAT είναι τόσο πιο ρεαλιστική και αξιόπιστη όσο καλύτερα έχει αποσαφηνιστεί η υφιστάμενη κατάσταση, δηλαδή η ποσοτικοποίηση των συνιστωσών του υδρολογικού κύκλου και του ρυπαντικού φορτίου κάτω από τις συμβατικές πρακτικές διαχείρισης στη λεκάνη.

Το μοντέλο SWAT, όπως αναλύθηκε και στην ενότητα 3.3, είναι ιδιαίτερα απαιτητικό σε δεδομένα εισόδου και στον καθορισμό των παραμέτρων των αρχείων του που καθορίζουν τις συνιστώσες του κύκλου του νερού, των θρεπτικών και της διάβρωσης. Σε ένα κατανεμημένο μοντέλο, που αναγκαστικά συνδέεται με εφαρμογές ΣΓΠ, τα βασικά χωρικά δεδομένα εισόδου είναι το τοπογραφικό ανάγλυφο, ο χάρτης χρήσεων γης και ο χάρτης εδάφους. Ο διαχωρισμός σε υπολεκάνες και μετέπειτα σε ΥΜ είναι αποτέλεσμα, μεταξύ άλλων, και της ανάλυσης των διαθέσιμων αυτών δεδομένων και παίζει σημαντικό ρόλο στην ορθή προσομοίωση των ΔΠ που διερευνώνται στη λεκάνη απορροής. Η ποιότητα των ανωτέρω δεδομένων σε συνδυασμό με την πυκνότητα της βροχομετρικής πληροφορίας έχει αποδειχτεί ότι καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την επιτυχία των προβλέψεων του μοντέλου SWAT. Εκτός από τον πειραματισμό με χρήση του μοντέλου στην εκάστοτε περιοχή μελέτης, αυτό διαπιστώνεται πλέον και επίσημα σε μία σειρά από εργασίες που πραγματεύονται η κάθε μία, αποκλειστικά την ευαισθησία του μοντέλου σε μία ή παραπάνω κατηγορίες από τα δεδομένα αυτά (Chaplot et al., 2005· Di Luzio et al., 2005· Geza and McCray, 2008· Muleta et al., 2007· Muttiah and Wurbs, 2002· Romanowicz et al., 2005). Είναι προφανές ότι αναλυτικότερα και καλύτερης ποιότητας χωρικά δεδομένα εισόδου επιτρέπουν καλύτερο διαχωρισμό της λεκάνης, παρέχοντας μεγαλύτερη ακρίβεια στον εντοπισμό των περιοχών με μεγαλύτερη ευαισθησία στην απώλεια ρύπων και οδηγούν σε

ορθότερα αποτελέσματα υδρολογικής προσομοίωσης και εν τέλει σε διαμόρφωση καλύτερης βάσης για αξιολόγηση σεναρίων.

Η προσομοίωση της ποιότητας του νερού με το SWAT απαιτεί επίσης τον καθορισμό πάνω από 80 παραμέτρων στα αρχεία εισόδου του. Οι παράμετροι αυτές, άλλοτε τυγχάνουν και άλλοτε στερούνται πλήρους φυσικής σημασίας. Ωστόσο, η έλλειψη στοιχείων καθιστά τον καθορισμό τους μία πολύπλοκη και αβέβαιη διαδικασία, που είναι όμως εφικτή μέσω της διαδικασίας της βαθμονόμησης του μοντέλου με προσομοίωση των παρατηρημένων φορτίων ποταμού. Για παράδειγμα, στις εργασίες με ελληνικές λεκάνες απορροής, το μεγάλο πλήθος των εδαφολογικών παραμέτρων δεν είναι σχεδόν ποτέ διαθέσιμο. Οι λεπτομερείς εδαφολογικές μελέτες που υφίστανται στην Ελλάδα έχουν γίνει από το ΕΘΙΑΓΕ και αφορούν κυρίως σε μικρές, αμιγώς αγροτικές πεδινές εκτάσεις της χώρας, οι οποίες καλύπτουν πάντα ένα μικρό μέρος της λεκάνης απορροής που μελετάται. Επιπλέον, στοιχεία σχετικά με την χωρική κατανομή των καλλιεργειών και τις εκτάσεις που χρησιμοποιούνται ως βοσκότοποι δεν υπάρχουν ελλείψει λεπτομερούς χαρτογράφησης. Έτσι, στοιχεία για τις συνολικές εκτάσεις κάθε καλλιέργειας ή βοσκότοπου μπορούν συνήθως να βρεθούν μόνο μέσω των στατιστικών στοιχείων που έχουν διοικητική γεωγραφική αναφορά. Ακόμα, η πληροφορία για ιστορικά δεδομένα σχετικά με τις καλλιεργητικές πρακτικές (π.χ. ποσότητες λιπάνσεων, αρόσεις κλπ.) είναι σπάνια μιας και δεν ακολουθήθηκε κατά το παρελθόν ένα οργανωμένο και συνεπές, στα πλαίσια νομοθεσίας, πρόγραμμα ώστε να κρατούνται αρχεία.

Οι δυσκολίες βαθμονόμησης του μοντέλου SWAT είναι επίσης πολλές όταν διερευνάται μια ελληνική λεκάνη και πηγάζουν από επιπρόσθετες ελλείψεις δεδομένων. Πρόκειται για τις καταμετρημένες τιμές παροχής, στερεοπαροχής και θρεπτικών στα ελληνικά ποτάμια. Το μεγάλο δίκτυο σταθμών καταγραφής των δύο πρώτων παραμέτρων της ΔΕΗ έχει περιοριστεί αισθητά μετά την κατασκευή των μεγάλων φραγμάτων. Σχετικά με τα θρεπτικά, οι μετρήσεις που διατίθενται από τις Υπηρεσίες είναι συνήθως αραιές, μη-συστηματικές και ανεπαρκείς να καλύψουν ένα συνεχόμενο και ικανοποιητικό διάστημα προσομοίωσης για συγκρίσεις και στατιστικές αναλύσεις με τις προσομοιωμένες χρονοσειρές. Ακόμα, δύσκολα μπορεί κανείς να βρει θέσεις ποταμού όπου όλα τα είδη των ανωτέρω δεδομένων του νερού (ποσοτικών και ποιοτικών) είναι διαθέσιμα. Έτσι, πολύ συχνά συναντάται το φαινόμενο οι συγκεντρώσεις του νερού σε θρεπτικά να μετρώνται σε διαφορετικές, πολύ μακρινές θέσεις εντός της λεκάνης σε σχέση με εκείνες των παροχών και στερεοπαροχών. Ακόμα όμως και αν κάτι τέτοιο δε συμβαίνει είναι πολύ πιθανό τα διάφορα είδη μετρήσεων σε μία κοινή θέση ποταμού να έχουν συλλεχθεί σε διαφορετικές χρονικές περιόδους, μην παρέχοντας μία ενιαία περίοδο διαθέσιμων δεδομένων όλων των τύπων. Το πρόβλημα αυτό αναγκάζει τον ερευνητή να βαθμονομεί το μοντέλο για την κάθε μεταβλητή με αναφορά σε διαφορετικές περιόδους, χωρίς όμως να μπορεί να λάβει υπόψη του τις

μεταβολές ανθρωπογενούς προέλευσης, που πιθανά συνέβησαν στη λεκάνη μεταξύ των περιόδων αυτών. Κατ' επέκταση δεν μπορεί να ενσωματώσει αυτές τις αλλαγές στο μοντέλο με μεταβολή στις τιμές των παραμέτρων, τις οποίες αυθαίρετα θεωρεί αμετάβλητες.

Τα ανωτέρω προβλήματα περιορίζουν τις δυνατότητες για παραγωγή χαρτών με αξιόπιστη και επαρκή απεικόνιση της χωρικής διαφοροποίησης του φορτίου απωλειών φερτών και θρεπτικών προς τα επιφανειακά νερά, καθώς και της αναπαραγωγής των παρατηρημένων χρονοσειρών παροχής και φορτίων ρύπων σε θέσεις ποταμού. Για παράδειγμα, οι Pisinaras et al. (2010) μοντελοποίησαν με το SWAT μία λεκάνη στη Βορειοανατολική Ελλάδα με σκοπό την εκτίμηση των επιδράσεων ΔΠ στις συγκεντρώσεις του ποταμού σε θρεπτικά στοιχεία. Ωστόσο, οι πιέσεις N και P από τις διάφορες καλλιέργειες αθροίστηκαν και ορίστηκαν με ενιαίο τρόπο στην αγροτική έκταση της λεκάνης μιας και τα είδη καλλιεργειών δεν ήταν δυνατόν να έχουν συγκεκριμένη γεωαναφορά. Εξαιτίας της έλλειψης μετρήσεων στερεοπαροχής δεν έγινε βαθμονόμηση για τις φερτές ύλες και η μελέτη εστίασε στη μεταφορά μόνο των διαλυτών μορφών θρεπτικών που δεν εξαρτώνται από τη στερεομεταφορά. Επιπρόσθετα, επιτεύχθηκε η προσομοίωση μόνο μιας μικρής περιόδου (τρία έτη). Η εν λόγω εργασία δεν ήταν εφικτό επομένως να οδηγήσει στην παραγωγή χαρτών με τη γεωγραφική διαφοροποίηση των περιοχών στις απώλειες ρύπων, ούτε να υποδείξει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο βαθμονόμησης του SWAT. Οι Gikas et al. (2006) λαμβάνουν υπόψη τους πιο λεπτομερώς τις χρήσεις γης σε λεκάνη της Βόρειας Ελλάδας. Ωστόσο, ούτε σε αυτήν την εργασία παρουσιάζονται χάρτες με χωρική διαφοροποίηση των καλλιεργειών και συνεπώς δεν γίνεται αναλυτική γεωγραφική εκτίμηση των μη σημειακών απωλειών ρύπων. Σε μια παλαιότερη εργασία οι Varanou et al. (2002) εκτίμησαν την επίδραση των σεναρίων κλιματικής αλλαγής στα φορτία N του ποταμού Πηνειού στη Θεσσαλία. Παρόλο που το μοντέλο SWAT εκτελέστηκε για μεγάλη περίοδο προσομοίωσης και οι καλλιέργειες κατανεμήθηκαν γεωγραφικά στη λεκάνη, δεν παρήχθησαν χάρτες απωλειών N από τις διάφορες περιοχές και η εργασία εστίασε μόνο σε εκτιμήσεις στην έξοδο της λεκάνης, μην παρέχοντας πληροφορία για τις πιο πρόσφορες ΥΜ σε πιθανή εφαρμογή ΔΠ.

Οι πρόσφατες προσπάθειες του συγγραφέα στη μοντελοποίηση ελληνικών λεκανών με το SWAT έχουν εστιαστεί σε δύο λεκάνες της Κεντρικής και Βορειοδυτικής Ελλάδας. Δύο εργασίες έχουν ήδη βαθμονομήσει το μοντέλο με χρήση παρατηρημένων παροχών και στερεοπαροχών στην ευρύτερη λεκάνη του Αράχθου (Panagopoulos and Mimikou, 2006· Panagopoulos et al., 2008), ενώ σενάρια αλλαγών χρήσης γης έχουν επίσης διερευνηθεί με σκοπό τη μείωση της στερεοπαροχής του ποταμού (Panagopoulos et al., 2007c· 2008). Σε αυτές τις εργασίες ωστόσο, οι αναλύσεις έγιναν με ενιαία ομαδοποίηση των καλλιεργειών σε ολόκληρη την αγροτική γη, ελλείψει λεπτομερών στοιχείων για τη γεωγραφική αναφορά και

διαχείρισή τους. Επιπλέον, λόγω έλλειψης παρατηρημένων δεδομένων συγκεντρώσεων θρεπτικών στο ποτάμι, οι εργασίες δεν συμπεριέλαβαν εκτιμήσεις για τα θρεπτικά. Η πρώτη ουσιαστική προσπάθεια έγινε για τη γειτονική λεκάνη του ποταμού Καλαμά (Panagopoulos et al., 2007a), αλλά η γεωγραφική διαφοροποίηση των απωλειών ρύπων περιορίστηκε σε επίπεδο υπολεκάνης. Δυστυχώς υπάρχουν βασικοί περιορισμοί στη μοντελοποίηση ελληνικών λεκανών απορροής λόγω μη επαρκών δεδομένων, σε αντίθεση με άλλες Ευρωπαϊκές λεκάνες όπου η διαθεσιμότητά τους επέτρεψε πολύ πιο επιτυχημένες προσπάθειες υδρολογικής και ποιοτικής προσομοίωσης (Panagopoulos et al., 2006· 2007b).

Δεδομένου ότι τα ελληνικά στοιχεία δεν μπορούν να καλύψουν ποτέ το σύνολο των απαιτούμενων δεδομένων ενός μοντέλου σαν το SWAT για την προσομοίωση των διεργασιών μιας λεκάνης απορροής, χρειάζεται πάντα να γίνονται υποθέσεις και απλουστευτικές παραδοχές, θεμελιωμένες όμως στην εμπειρία και στην επιστημονική γνώση. Είναι επίσης απαραίτητη η εκτενής πολλές φορές επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων ώστε αυτά να μπορέσουν να αποτελέσουν δεδομένα εισόδου κατάλληλης μορφής στο μοντέλο. Λαμβάνοντας ωστόσο υπόψη ότι ο εντοπισμός των περιοχών με μεγάλο κίνδυνο διάχυτων απωλειών ρύπων θεωρείται πολύτιμος για τη διαχείριση λεκάνης απορροής (Heathwaite et al., 2005), είναι βασικός στόχος του παρόντος κεφαλαίου να παρουσιάσει τον τρόπο με τον οποίο μια ολοκληρωμένη υδρολογική προσομοίωση μπορεί να οδηγήσει σε αυτόν, παρά τις δυσκολίες που συναντώνται.

Η προσομοίωση της υφιστάμενης κατάστασης της λεκάνης του Αράχθου στο SWAT περιγράφεται λοιπόν στο παρόν κεφάλαιο μαζί με όλες τις αποφάσεις που ελήφθησαν για να ξεπεραστούν τα προβλήματα αναπαράστασης δεδομένων στη λεκάνη. Οι αποφάσεις αυτές βασίστηκαν στα ήδη υπάρχοντα δεδομένα, σε βιβλιογραφικές πηγές, στην υφιστάμενη γνώση και εμπειρία χρήσης του μοντέλου SWAT και στην επικοινωνία με τον τοπικό πληθυσμό. Η παραμετροποίηση και η βαθμονόμηση του μοντέλου παρουσιάζονται αναλυτικά, ώστε σύμφωνα με το πρωτόκολλο εφαρμογής υδρολογικών μοντέλων (Engel et al., 2007), να καθιστούν εφικτή την αναπαραγωγή του μοντέλου του Αράχθου ως σημείο εκκίνησης σε άλλη ερευνητική προσπάθεια στην περιοχή. Η ορθότητα και επάρκεια της πραγματοποίησης των 2 αυτών βημάτων της μοντελοποίησης είναι απαραίτητη ώστε να εντοπιστούν και να υποδειχθούν οι πιο τρωτές περιοχές στις απώλειες ρύπων, πράγμα που μπορεί να αποτελέσει τη βάση για τη μετέπειτα εμπειρική εφαρμογή και αξιολόγηση σεναρίων με εναλλακτικές ΔΠ στην αγροτική γη. Ακόμα όμως και όταν επιλέγεται η εύρεση αποτελεσματικών διαχειριστικών λύσεων μέσω βελτιστοποίησης, η ορθή αποτύπωση της υφιστάμενης κατάστασης είναι αυτή που επιτρέπει την αξιόπιστη ποσοτικοποίηση των απωλειών ρύπων που προκύπτουν από τις λύσεις αυτές. Τονίζεται ακόμα ότι η πιο ολοκληρωμένη προσομοίωση της συγκεκριμένης λεκάνης στην παρούσα εργασία (μεγαλύτερη αξιοποίηση

διαθέσιμων δεδομένων, ορθότερες προσεγγίσεις), μεταβάλλει εν μέρει τις παραμέτρους βαθμονόμησης του μοντέλου σε σχέση με εκείνες που επετεύχθησαν στις προηγούμενες προσπάθειες μοντελοποίησης.

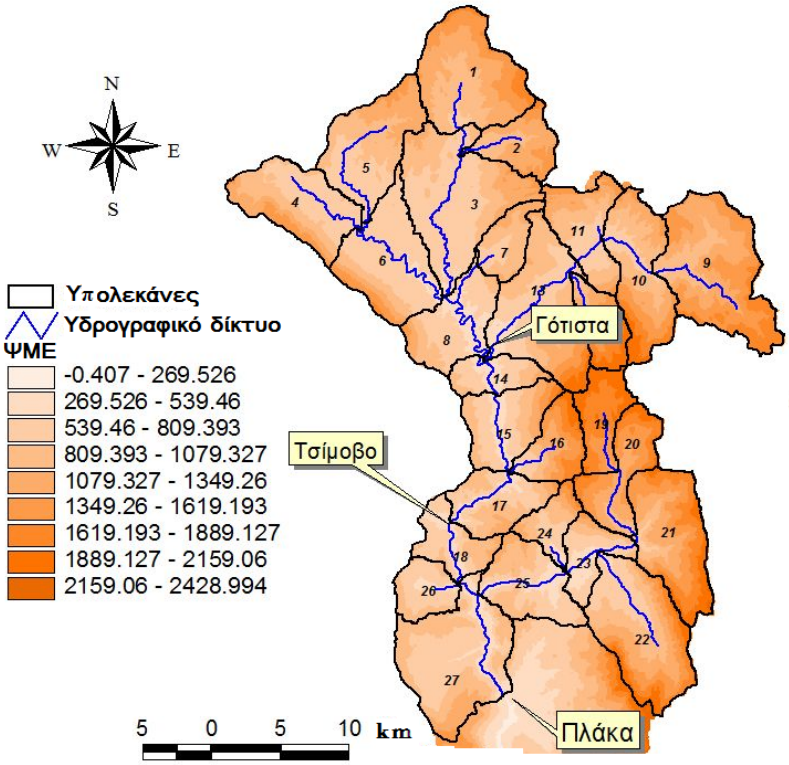
Εξετάζεται ακόμα στο παρόν κεφάλαιο ένας περιορισμένος αριθμός ΔΠ, με καθολική εφαρμογή σε συγκεκριμένους τύπους χρήσης γης για να εντοπιστούν οι ΥΜ όπου οι εν λόγω πρακτικές είναι πιο αποδοτικές και οικονομικές. Για το σκοπό αυτό υπολογίζεται ο λόγος Κόστους-Αποτελεσματικότητας (ΚΑ) των ΔΠ. Η εν λόγω εξέταση σεναρίων αποτελεί τη λεγόμενη *στοχευμένη στρατηγική* (targeting strategy) για τη μείωση των απωλειών ρύπων, η οποία είναι μια εμπειρική στρατηγική και γίνεται με επιλογή παρεμβάσεων που πιστεύεται εκ των προτέρων ότι είναι αποδοτικές σε εκτεταμένες αγροτικές εκτάσεις. Οπωσδήποτε, η στρατηγική αυτή δεν μπορεί παρά να αξιολογήσει έναν περιορισμένο αριθμό ΔΠ στην αγροτική γη χωρίς να εγγυάται ότι θα εντοπίσει τα πιο αποτελεσματικά και οικονομικά διαχειριστικά σχήματα εντός της λεκάνης. Για το τελευταίο, η διαδικασία της βελτιστοποίησης είναι αυτή που επιτρέπει την εύρεση των βέλτιστων λύσεων, κάτι που γίνεται στο επόμενο κεφάλαιο.

8.2 Παραμετροποίηση της λεκάνης του Αράχθου

8.2.1 Σχηματοποίηση λεκάνης

Το πρώτο βήμα της μοντελοποίησης με το SWAT περιλαμβάνει τη σχηματοποίηση της λεκάνης απορροής που θα ορίσει το βασικό χαρακτηριστικό της κλίσης εδάφους στα διάφορα τμήματα της λεκάνης. Η διαδικασία αυτή γίνεται σε περιβάλλον ΣΓΠ, στο οποίο έχουν ενσωματωθεί 'κουμπιά' και 'εργαλεία' της εφαρμογής του μοντέλου SWAT. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε η έκδοση SWAT2005 με περιβάλλον εργασίας το 'AVSWAT-X', ενσωματωμένο στο πρόγραμμα ΣΓΠ, 'ArcView 3.3' (Di Luzio et al., 2004). Η σχηματοποίηση της λεκάνης ξεκινά με την εισαγωγή του ψηφιακού μοντέλου εδάφους (ΨΜΕ), (Digital Elevation Model – DEM), που αποτελεί το υπόβαθρο με βάση το οποίο τα ΣΓΠ θα σχεδιάσουν το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης. Το αρχείο αυτό διατίθεται σε μορφή καννάβου (grid) με τα κελιά να χαρακτηρίζονται από μία και μοναδική τιμή υψομέτρου. Χάρτες τοπογραφικού ανάγλυφου διατίθενται στο Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων του ΕΜΠ για όλη την Ελλάδα με ανάλυση κελιού 50×50m. Το τοπογραφικό ανάγλυφο της λεκάνης του Αράχθου φαίνεται στο Σχήμα 8.1. Μετά την εισαγωγή του, το πρόγραμμα ArcView μπορεί να σχεδιάσει το υδρογραφικό δίκτυο, η ακρίβεια του οποίου όμως, μπορεί σε ορισμένα σημεία της λεκάνης να είναι μειωμένη λόγω ατελειών του ΨΜΕ. Για την αποφυγή τέτοιων προβλημάτων υπάρχει η δυνατότητα

εισαγωγής του υδρογραφικού δικτύου από το χρήστη, ως αρχείου τύπου 'shape'. Το ήδη ψηφιοποιημένο υδρογραφικό δίκτυο βοηθά το πρόγραμμα να εκμηδενίσει προβλήματα ασυνεχειών στη χάραξη των ποταμών εντός της λεκάνης. Χρησιμοποιήθηκε συνεπώς το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής όπως είχε προκύψει κατά το παρελθόν, ύστερα από επεξεργασία στο Εργαστήριο. Επιπλέον, ζητείται από το πρόγραμμα η τιμή κατωφλίου η οποία αντιπροσωπεύει την ελάχιστη έκταση σε ha, που απαιτείται για τη δημιουργία συγκεντρωτικής ροής ή αλλιώς για δημιουργία τμήματος ποταμού (Di Luzio et al., 2001). Όσο μικρότερη είναι η τιμή αυτή, τόσο πιο πυκνό θα είναι το υδρογραφικό δίκτυο που θα σχεδιαστεί από το πρόγραμμα. Για τη λεκάνη του Αράχθου χρησιμοποιήθηκε μια τιμή κατωφλίου 940ha υποδηλώνοντας ότι το υδρογραφικό δίκτυο σχηματίζεται όταν συγκεντρώνεται νερό απορροής από έκταση ίση κατ' ελάχιστον με το 1% της έκτασης της λεκάνης (94000ha).



Σχήμα 8.1 Διαχωρισμός της λεκάνης του άνω Αράχθου σε υπολεκάνες με βάση το ΨΜΕ και το υδρογραφικό δίκτυο.

Με την ολοκλήρωση αυτών των βημάτων το μοντέλο είναι έτοιμο να ορίσει εξόδους υπολεκανών και το κάνει για όλα τα σημεία προ συμβολής υδατορρευμάτων. Ο χρήστης επιλέγει τις υπολεκάνες που επιθυμεί να συμπεριληφθούν στην υδρολογική προσομοίωση, δηλαδή καθορίζει το βαθμό στον οποίο θα διαιρεθεί η λεκάνη, αφαιρώντας ή προσθέτοντας

θέσεις εξόδου υπολεκανών στο υδρογραφικό δίκτυο. Υπενθυμίζεται ότι η κλίση εδάφους στους μετέπειτα υπολογισμούς του μοντέλου αποδίδεται σε επίπεδο υπολεκάνης, γι' αυτό ο εν λόγω διαχωρισμός έχει ιδιαίτερη σημασία. Τελικά επιλέχθηκαν 27 υπολεκάνες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.1, ώστε:

- Ο διαχωρισμός να είναι επαρκής για την ακρίβεια των εκτιμήσεων του μοντέλου SWAT (FitzHugh and Mackay, 2000) με τη μέση έκταση υπολεκάνης να είναι περίπου 4% της συνολικής έκτασης που θεωρείται ικανοποιητική για εφαρμογή ΔΠ (Arabi et al., 2006b).
- Η διαθέσιμη βροχομετρική πληροφορία (πυκνότητα βροχομετρικών σταθμών) να λαμβάνεται εξ ολοκλήρου υπόψη με δεδομένο ότι η κάθε υπολεκάνη λαμβάνει στο μοντέλο τη βροχόπτωση του εγγύτερου σταθμού.
- Καίριες θέσεις κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου να αντιπροσωπεύονται από έξοδο υπολεκάνης ώστε το μοντέλο να εξάγει αποτελέσματα σε αυτές.

Οι εν λόγω θέσεις στο Σχήμα 8.1 είναι η Γότιστα (έξοδος υπολεκάνης 13 και σημείο προ συμβολής του παραπόταμου Μετσοβίτικου με τον Άραχθο), το Τσίμοβο (έξοδος υπολεκάνης 17) και η έξοδος της λεκάνης (Πλάκα). Στις τρεις αυτές θέσεις διατίθενται παρατηρημένα δεδομένα παροχών, στερεοπαροχών και συγκεντρώσεων θρεπτικών για χρήση κατά τη βαθμονόμηση του μοντέλου. Σημαντική θέση όπου το μοντέλο θα ήταν επιθυμητό να εξάγει αποτελέσματα είναι επίσης η έξοδος της υπολεκάνης 25, που αποτελεί το σημείο που συγκεντρώνεται η απορροή της λεκάνης του ποταμού Καλαρρύτικου. Η σχηματοποίηση της λεκάνης ολοκληρώνεται με ορισμό των θέσεων εντός του υδρογραφικού δικτύου όπου εκβάλλουν πιθανές υδρογεωλογικές πηγές ή πηγές ρύπανσης. Τέτοιων μορφών συνεισφορά, που δεν προέρχεται από το μετασχηματισμό της βροχής σε απορροή εντός της λεκάνης, ορίζεται στο μοντέλο με πηγές σημειακού χαρακτήρα. Στη λεκάνη του Αράχθου ορίστηκαν τέσσερις θέσεις σημειακών πηγών, τρεις που αντιστοιχούν σε υδρογεωλογικές πηγές που εκφορτίζονται στο υδρογραφικό δίκτυο (υπολεκάνες 10, 22 και 25) και μία που συγκεντρώνει την απελευθέρωση των αποβλήτων δύο μεγάλων χοιροτροφικών μονάδων στο Δήμο Εγνατίας (υπολεκάνη 13).

8.2.2 Απεικόνιση χρήσεων γης και εδάφους

Ήδη αναφέρθηκε η δυσκολία που υπάρχει στην ακριβή απεικόνιση των διαφόρων χρήσεων γης και εδάφους σε μια ελληνική λεκάνη. Με βάση τη γενικότερη διαθεσιμότητα κρίθηκε ότι οι γεωλογικοί χάρτες του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών

(ΙΓΜΕ), καθώς και η βάση δεδομένων *CORINE LAND COVER* (CLC) για τους τύπους κάλυψης γης είναι οι πιο αξιόπιστες πηγές. Σε μία εργασία όμως που προσδοκάται η διερεύνηση ΔΠ σε διαφορετικούς τύπους αγροτικής γης, η αδρή γεωγραφική διαφοροποίηση και ομαδοποίηση της αγροτικής γης σε μεγάλες κατηγορίες δεν επαρκεί. Απαιτείται ο διαχωρισμός σε επιμέρους αγροτικές εκτάσεις με βάση την καλλιέργεια και τη διαχείριση, δηλαδή με βάση την πληροφορία για τη χρήση γης. Ο μόνος τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος, εκτός φυσικά της επί τόπου χαρτογράφησης και συλλογής πληροφοριών που θα ήταν μια επίπονη εργασία και εκτός του σκοπού της διατριβής, είναι η αξιοποίηση των στοιχείων της ΕΣΥΕ για τις εκτάσεις των καλλιεργειών και τον αριθμό των ζώων ανά Δήμο ή Κοινότητα. Με συνδυασμό των δύο τύπων δεδομένων (χάρτες CORINE και στοιχεία ΕΣΥΕ), αν και δεν επιτυγχάνεται απόλυτη ακρίβεια στη γεωγραφική αποτύπωση των χρήσεων γης, αποκτάται ωστόσο μία ικανοποιητική απεικόνιση που σε επίπεδο υπολεκάνης εκτιμάται ότι ανταποκρίνεται ικανοποιητικά στην πραγματικότητα. Όσο για το έδαφος, το μοντέλο απαιτεί στοιχεία για ιδιότητες του ανώτερου στρώματος, που όμως δεν παρέχονται από τον γεωλογικό χάρτη. Ωστόσο, το μητρικό πέτρωμα είναι πάντα υπεύθυνο για τη γένεση και υδρολογική συμπεριφορά των εδαφών, οπότε μια ορθή επιστημονική προσέγγιση μπορεί να αντιστοιχίσει τις κατηγορίες εδάφους του γεωλογικού χάρτη με τους γεωπονικούς όρους που απαιτούνται στο μοντέλο SWAT.

Τα διαθέσιμα παρατηρημένα δεδομένα ποταμού στη λεκάνη του Αράχθου ξεκινούν από τα μέσα της δεκαετίας του ’60 και φτάνουν έως το 2002 για τις παροχές στο Τσίμοβο και μόλις μέχρι το 1977 για τις στερεοπαροχές σε Τσίμοβο και Πλάκα. Σε αντίθεση με τη γεωλογία, οι χρήσεις γης υφίστανται μεταβολές και θεωρείται ότι ένας πρόσφατος χάρτης δεν είναι απαραίτητα αντιπροσωπευτικός του παρελθόντος. Για το λόγο αυτό οι χάρτες χρήσεων γης του CORINE, κλίμακας 1:100000, με έτη αναφοράς τόσο το 2000 όσο και το 1990 (ETC, 2005), συγκρίθηκαν μεταξύ τους. Με βάση μία λεπτομερή ανάλυση διαπιστώθηκε ότι οι διαφορές στις χρήσεις γης μεταξύ των δύο χαρτών στη λεκάνη του Αράχθου είναι μηδαμινές (<0,5%).

Τα δεδομένα με αναφορά στις διοικητικές μονάδες (Κοινότητες) για το έτος 2000 αντλήθηκαν από την επίσημη βάση δεδομένων της ΕΣΥΕ (ΕΣΥΕ, 2000). Σύμφωνα με την επικοινωνία με τους τοπικούς φορείς, διαπιστώθηκε μία αναντιστοιχία σε σχέση με τα επίσημα στοιχεία. Θεωρήθηκε αρχικά ότι η κατηγορία των ετήσιων καλλιεργειών στην ομαδοποίηση των στοιχείων της ΕΣΥΕ αφορά σχεδόν αποκλειστικά στις καλλιέργειες κτηνοτροφικών φυτών στη λεκάνη. Εκτός του αραβόσιτου, η μηδική καλλιεργείται επίσης εντατικά και έγινε η απλουστευτική παραδοχή ότι παρόλο που είναι πολυετής καλλιέργεια, συγκαταλέγεται στις εκτάσεις που έχουν καταγραφεί ως ετήσιες καλλιέργειες. Θεωρήθηκε επίσης, σύμφωνα με την επικοινωνία με τους τοπικούς φορείς, ότι αραβόσιτος και μηδική

καταλαμβάνουν σχεδόν ισόποσα τις καλλιεργήσιμες εκτάσεις, ενώ κάποιες πολύ περιορισμένες εκτάσεις με αμπέλια ενσωματώθηκαν στις ανωτέρω καλλιέργειες. Σύμφωνα με τις τοπικές μαρτυρίες, οι εκτάσεις των καλλιεργειών, καθώς και το ζωικό κεφάλαιο στην περιοχή είναι μειωμένα σε σχέση με το παρελθόν μιας και αρκετές εκτάσεις έχουν εγκαταλειφθεί και ο μόνιμος αγροτικός πληθυσμός μειώνεται. Παρόλα αυτά, υπήρξε διαβεβαίωση ότι οι συνήθειες δεν έχουν αλλάξει, οι τύποι και οι μέθοδοι καλλιέργειας είναι οι ίδιοι/ες, όπως άλλωστε και η άσκηση της κτηνοτροφίας.

Ύστερα από ανάλυση των δεδομένων θεωρήθηκε ότι ο σκοπός της εργασίας, που είναι η εξέταση ΔΠ με περίοδο αναφοράς τα έτη 2001-2005, ικανοποιείται απόλυτα με χρήση των πιο πρόσφατων δεδομένων δηλαδή του χάρτη χρήσεων γης CORINE 2000 και των στατιστικών δεδομένων του ίδιου έτους. Οι διαφοροποιήσεις στις αγροτικές εκτάσεις ανά Δήμο μεταξύ των δύο ειδών δεδομένων αντιμετωπίστηκαν με υπερεκτίμηση, ως επί τω πλείστον, των καλλιεργούμενων εκτάσεων ώστε να καταλαμβάνονται ολόκληρες οι αγροτικές εκτάσεις του χάρτη CORINE με τις δύο δημοφιλείς καλλιέργειες. Οι προσεγγίσεις στο σημείο αυτό ήταν απαραίτητες, αλλά δεν αλλοιώνουν το σκοπό και τα προσδοκώμενα αποτελέσματα της εργασίας.

Το μοναδικό πραγματικό πρόβλημα ωστόσο, που μπορεί να προκύπτει όταν τα ανωτέρω δεδομένα υιοθετηθούν για ολόκληρη την περίοδο προσομοίωσης (1964-2005), αφορά στην προσομοίωση της διάβρωσης και της στερεοαπορροής. Η βαθμονόμηση του μοντέλου με βάση την παρατηρημένη στερεοπαροχή έως το έτος 1977 δε μπορεί να θεωρηθεί απόλυτα αντιπροσωπευτική όταν χρησιμοποιούνται δεδομένα χρήσης γης του 2000. Ωστόσο, μία σειρά από λόγους που συνοψίζονται παρακάτω επέτρεψαν τελικά να χρησιμοποιηθούν τα εν λόγω χωρικά δεδομένα για όλη την περίοδο προσομοίωσης:

- Ο χάρτης χρήσεων γης του CORINE για το έτος 1990 εγγυάται ότι η γεωγραφική διαφοροποίηση των ευρύτερων τύπων εδαφοκάλυψης είναι περίπου η ίδια κατά τις τελευταίες δύο δεκαετίες τουλάχιστον.
- Οι περιοχές που με βάση τους χάρτες του CORINE 1990 και 2000 συγκαταλέγονται στις αγροτικές εκτάσεις γενικής χρήσεως, θεωρείται ότι πιθανότατα συμπεριλαμβάνουν και εγκαταλειμμένες εκτάσεις πρώην εντατικής αγροτικής δραστηριότητας (πριν το 1990). Η αντιστοίχιση της αγροτικής γης στο SWAT, είτε ως γης γενικής αγροτικής χρήσης, είτε ως γης με ανάπτυξη συγκεκριμένης καλλιέργειας, προσδίδει στις εν λόγω εκτάσεις τιμή του παράγοντα διαβρώσεως C_{USLE} της Εξίσωσης 3.9 παραπλήσια και αισθητά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη των φυσικών εκτάσεων (δάση). Επομένως, οι εν λόγω εκτάσεις θεωρείται ότι είχαν και έχουν χρονικά σταθερή συμπεριφορά στη διάβρωση.

- Οι μαρτυρίες των τοπικών φορέων για διατήρηση των παραδοσιακών καλλιεργητικών πρακτικών και κτηνοτροφικών δραστηριοτήτων οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η ευαισθησία των αγροτικών εδαφών στη διάβρωση λόγω του τρόπου άσκησης της γεωργίας και της κτηνοτροφίας δεν έχει μεταβληθεί αισθητά.

Μπορεί προσεγγιστικά να θεωρηθεί λοιπόν, ότι η βαθμονόμηση του μοντέλου ως προς τα παλιά δεδομένα στερεοπαροχής, μπορεί ικανοποιητικά να γίνει με χρήση των πιο πρόσφατων στοιχείων χρήσης γης. Είναι άλλωστε προτιμότερο να γίνουν στο σημείο αυτό απλουστευτικές παραδοχές, παρά να γίνει προσπάθεια βαθμονόμησης του μοντέλου ως προς τα φορτία θρεπτικών σε πρόσφατα έτη χωρίς πρώτα να έχει γίνει αξιολόγηση των εκτιμήσεων του για τη διάβρωση της λεκάνης και τη στερεοπαροχή του ποταμού. Όσον αφορά την προσομοίωση των παροχών του ποταμού, η διαθεσιμότητά τους έως και το έτος 2002 στο Τσίμοβο συνάδει με τη χρονική αναφορά των χωρικών δεδομένων.

Οι χάρτες που παρέχονται από το CORINE περιγράφουν τα είδη κάλυψης της γης με διαχωρισμό σε 44 υποκατηγορίες, οι οποίες ομαδοποιούνται σε τρία επίπεδα ονοματολογίας (EEA-ETC/TE, 2002, ETC, 2005). Το SWAT δε μπορεί να λάβει απ' ευθείας υπόψη του την ονοματολογία του CORINE καθότι διαθέτει δικούς του κωδικούς κατηγοριοποίησης των τύπων εδαφοκάλυψης. Οι κατηγορίες του CORINE αντιστοιχήθηκαν σε κατηγορίες της βάσης δεδομένων του μοντέλου και προέκυψαν οι τύποι εδαφοκάλυψης που συνοψίζονται στον Πίνακα 8.1. Σύμφωνα με αυτήν, οι βασικοί τύποι εδαφοκάλυψης στη λεκάνη είναι τα δάση φυλλοβόλων (FRSD), αειθαλών (FRSE) και τα μικτά (FRST), οι βοσκότοποι (PAST) και η καλλιεργήσιμη γη που καλύπτει το 12% της λεκάνης και φιλοξενεί τις δύο βασικές καλλιέργειες του αραβόσιτου και της μηδικής. Σε πρώτη φάση οι εκτάσεις αυτές θεωρήθηκαν ως ενιαίος τύπος προτού κατανεμηθούν στις δύο καλλιέργειες με βάση τα στοιχεία της ΕΣΥΕ. Οι δασικές εκτάσεις καλύπτουν σε σύνολο το 42% και οι βοσκότοποι το 44% της συνολικής έκτασης της λεκάνης. Μόνο οι μεγάλες Κοινότητες της λεκάνης, όπως π.χ. το Μέτσοβο στα Βορειοδυτικά τυγχάνουν αποτύπωσης ως αστικής γης στο χάρτη του CORINE καταλαμβάνοντας συνολικά μόλις το 0,31% της λεκάνης, ενώ περιοχές με υδατική κάλυψη συναντώνται σε ποσοστό 0,39% και αφορούν μόνο υδατορρεύματα, δηλαδή περιοχές όπου το πλάτος του ποταμού είναι μεγάλο και δημιουργούνται τοπικά σημαντικές υδάτινες επιφάνειες. Η απεικόνιση αυτή του CORINE δεν αφορά σε λίμνες σε αυτήν τη λεκάνη.

Πίνακας 8.1 Αντιστοίχιση του χάρτη CLC 2000 με τους τύπους εδαφοκάλυψης του SWAT στη λεκάνη του Αράχθου.

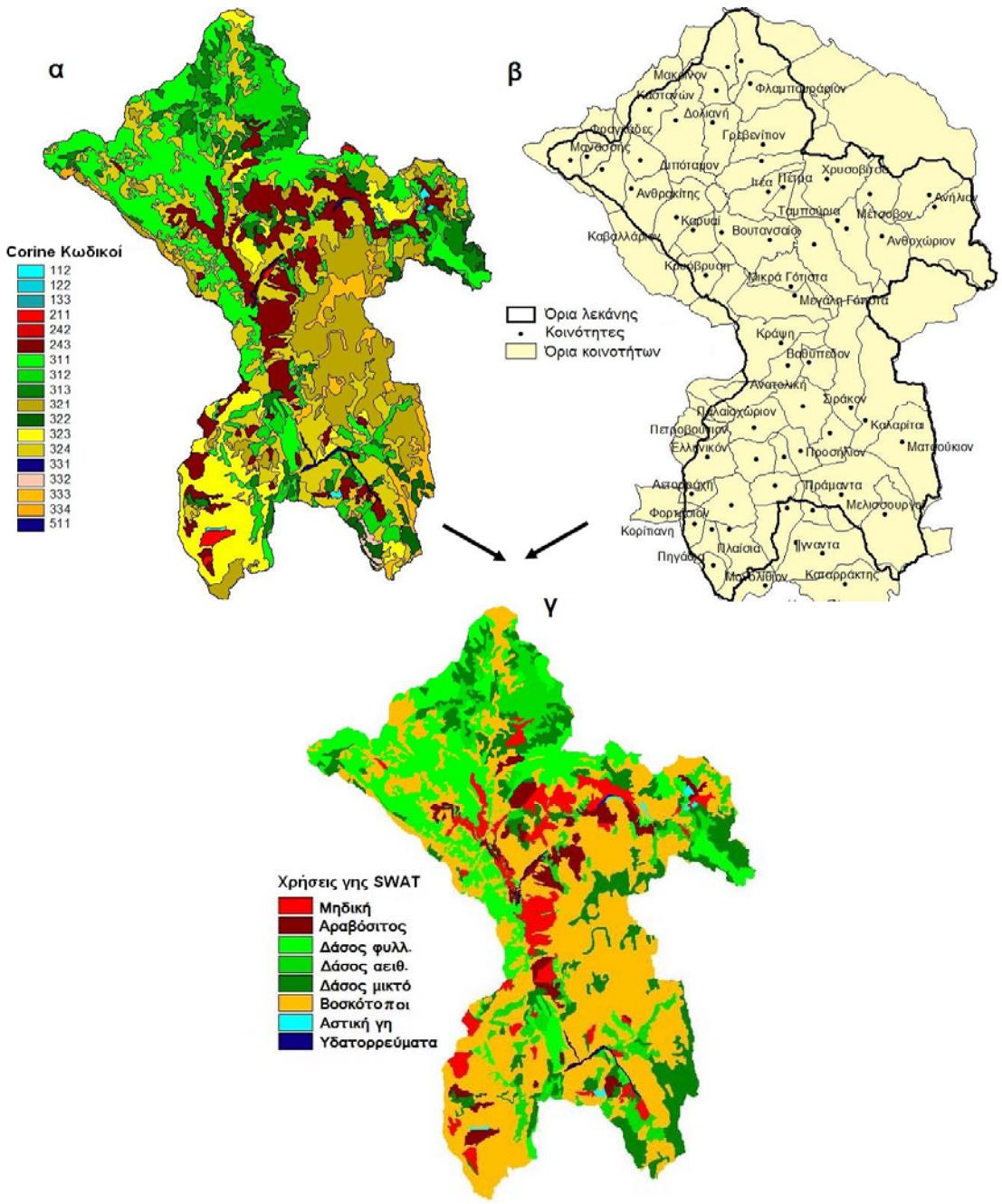
Κωδικός CLC	**Περιγραφή CLC**	**Έκταση (ha)**	**Κατηγοριοποίηση SWAT**	**% Συνολικής Έκτασης**
1.1.2	Ασυνεχής αστικός ιστός (Discontinuous urban fabric)	191,2	Αστική γη χαμηλής Πυκνότητας - Urban low density (URML)	0,20
1.2.2	Οδικά και σιδηροδρομικά δίκτυα (Road and rail networks and associated land)	46,8	Αστική γη χαμηλής Πυκνότητας (URML)	0,05
1.3.3	Χώροι οικοδόμησης (Construction sites)	53,7	Αστική γη χαμηλής Πυκνότητας (URML)	0,06
2.1.1	Μη αρδευόμενη αρόσιμη γη (Non-irrigated arable land)	395,7	Καλλιεργήσιμη γη - Arable (Αραβόσιτος + μηδική CORN + ALFA)	0,42
2.4.2	Σύνθετες καλλιέργειες (Complex cultivation)	142,2	Καλλιεργήσιμη γη (Αραβόσιτος + μηδική CORN + ALFA)	0,15
2.4.3	Γη που χρησιμοποιείται κυρίως για γεωργία μαζί με σημαντικά τμήματα φυσικής βλάστησης (Land principally occupied by agriculture, with significant areas of natural vegetation)	11189,3	Καλλιεργήσιμη γη (Αραβόσιτος + μηδική CORN + ALFA)	11,89
3.1.1	Δάσος πλατύφυλλων (Broad-leaved forest)	17787,1	Φυλλοβόλο δάσος - Forest deciduous (FRSD)	18,90
3.1.2	Δάσος κωνοφόρων (Coniferous forest)	8740,3	Αειθαλές δάσος (FRSE)	9,29
3.1.3	Μικτό δάσος (Mixed forest)	7014,2	Μικτό δάσος (FRST)	7,45
3.2.1	Φυσικοί βοσκότοποι (Natural grassland)	13425,3	Βοσκότοπος - Pasture (PAST)	14,27
3.2.2	Θάμνοι και χερσότοποι (Moors and heathland)	1767,8	Μικτό δάσος - Forest mixed (FRST)	1,88
3.2.3	Σκληροφυλλική βλάστηση (Sclerophyllous vegetation)	9130,4	Βοσκότοπος (PAST)	9,70
3.2.4	Μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις (Transitional woodland/shrub)	19130,9	Βοσκότοπος (PAST)	20,33
3.3.1	Παραλίες, αμμόλοφοι, αμμουδιές (Beaches, dunes, and sand plains)	232,2	Υγρότοπος - Wetland (WETL)	0,25
3.3.2	Απογυμνωμένοι βράχοι (Bare rock)	271,0	Μικτό δάσος (FRST)	0,29
3.3.3	Εκτάσεις με αραιή βλάστηση (Sparsely vegetated areas)	4336,6	Μικτό δάσος (FRST)	4,61
3.3.4	Αποτεφρωμένες εκτάσεις (Burnt areas)	104,9	Μικτό δάσος (FRST)	0,11
5.1.1	Υδατορρεύματα (Water courses)	130,2	Υγρότοπος (WETL)	0,14
	Σύνολο	94089,8	Σύνολο	100,00

Οι βοσκότοποι ορίστηκαν ως συνάθροιση όλων των εκτάσεων όπου θεωρητικά η ελεύθερη βόσκηση λαμβάνει χώρα και έχοντας υπόψη ότι στην Ελλάδα η δραστηριότητα είναι εκτεταμένη και πραγματοποιείται σε χορτολιβαδικές, θαμνώδεις και ακόμα ημι-δασικές φυσικές εκτάσεις (Καλαϊσάκης, 1982· Zervas, 1998). Επομένως, οι φυσικές εκτάσεις που περιγράφονται στο CORINE ως λιβάδια, σκληροφυλλική βλάστηση και μεταβατικές

θαμνώδους/δασώδους βλάστησης αποδόθηκαν στους βοσκότοπους. Οι καλλιεργήσιμες εκτάσεις θεωρήθηκε ότι βρίσκονται στα εδάφη που καλύπτονται από τους τύπους του CORINE: *Γη που χρησιμοποιείται κυρίως για γεωργία μαζί με σημαντικά τμήματα φυσικής βλάστησης, Σύνθετες καλλιέργειες* και *Μη αρδευόμενη αρόσιμη γη*. Το σύνολο των εκτάσεων αυτών των τύπων αθροίζει συνολικά περισσότερο από το σύνολο των εκτάσεων των καλλιεργειών της ΕΣΥΕ, ωστόσο, θεωρήθηκε απλουστευτικά ότι αντιπροσωπεύει ολοκληρωτικά τις δύο βασικές καλλιέργειες. Για την κατανομή των καλλιεργειών εντός των πολυγώνων αγροτικής χρήσης του CORINE έγινε επικάλυψη του χάρτη CLC2000 με το διοικητικό χάρτη της λεκάνης με αποτέλεσμα να παραχθεί ένα νέο θεματικό επίπεδο στο πρόγραμμα ΣΓΠ ArcGIS 9.2, που περιελάμβανε τους τύπους κάλυψης γης διαιρεμένους σε μικρότερες γεωγραφικές μονάδες (πολύγωνα). Σε κάθε διοικητική μονάδα (Κοινότητα) αντιστοιχούσαν κάποια πολύγωνα καλλιεργήσιμης γης. Τα στοιχεία για τις εκτάσεις των καλλιεργειών σε κάθε Κοινότητα αντιστοιχήθηκαν με τυχαίο τρόπο στα πολύγωνα καλλιεργήσιμης γης που βρίσκονταν εντός των ορίων αυτής. Με αυτόν τον τρόπο οι εκτάσεις αραβόσιτου και μηδικής απέκτησαν συγκεκριμένη γεωαναφορά. Τονίζεται και πάλι ότι όπου τα στατιστικά στοιχεία δεν έδιναν παραπλήσια έκταση καλλιεργειών με εκείνη που απεικονίζεται ως καλλιεργήσιμη για κάθε Κοινότητα, έγιναν οι απαραίτητες προσεγγίσεις, ενώ άλλες καλλιέργειες (π.χ. αμπέλια, δενδρώδεις) αγνοήθηκαν λόγω της πολύ μικρότερης συνολικής παρουσίας τους στη λεκάνη σε σχέση με τα κτηνοτροφικά φυτά.

Την ίδια περίπου μεθοδολογία έχουν ακολουθήσει οι Grizzetti et al. (2007) στην εργασία τους για ολόκληρη την Ευρώπη. Σε αυτήν την εργασία ωστόσο, οι συγγραφείς συνάντησαν μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ των εκτάσεων του CLC2000 και των στοιχείων της Eurostat. Συγκεκριμένα, οι βοσκότοποι βρέθηκαν να υποεκτιμώνται στο χάρτη CLC2000, κάτι που ενδυναμώνει την επιλογή μας να επεκτείνουμε αρκετά το συγκεκριμένο τύπο κάλυψης γης. Τελικά, στη λεκάνη του Αράχθου θεωρείται ότι, αν και όχι απόλυτα αντιπροσωπευτική δεδομένων των προβλημάτων, η απεικόνιση των τύπων εδαφοκάλυψης που επετεύχθη με κατανομή των βασικών καλλιεργειών και των βοσκότοπων εντός αυτής είναι ικανοποιητική.

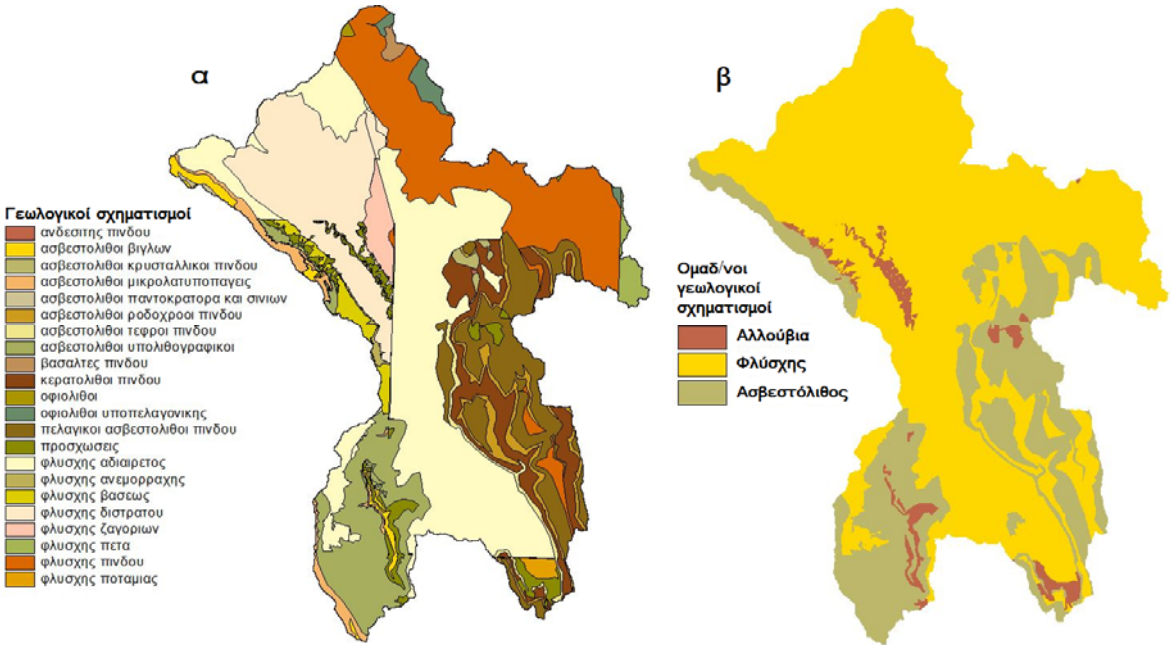
Στο Σχήμα 8.2γ απεικονίζεται ο τρόπος παραγωγής του χάρτη χρήσεων γης στο SWAT, αρχικά με ομαδοποιήσεις και αντιστοίχιση των τύπων εδαφοκάλυψης του CORINE (Σχήμα 8.2α) με τους κωδικούς χρήσης γης του SWAT (βλ. Πίνακα 8.1) και στη συνέχεια με την επικάλυψη του χάρτη με το χάρτη των διοικητικών μονάδων της λεκάνης του Αράχθου (Σχήμα 8.2β) για την διαίρεση της αρόσιμης γης (καλλιεργήσιμης) σε εκτάσεις καλλιέργειας αραβόσιτου και μηδικής.



Σχήμα 8.2 Επικάλυψη χάρτη εδαφοκάλυψης CLC2000 (α) με χάρτη διοικητικής διαίρεσης (β) για την παραγωγή του χάρτη χρήσεων γης στο SWAT με ενσωμάτωση των καλλιεργειών αραβόσιτου και μηδικής (γ). Οι κωδικοί στο υπόμνημα του χάρτη α παραπέμπουν στον Πίνακα 8.1.

Ο χάρτης εδάφους δημιουργήθηκε με βάση το γεωλογικό χάρτη του ΙΓΜΕ για την περιοχή μελέτης που διατίθεται σε κλίμακα 1:50000. Ο τελευταίος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.3 αριστερά, διαχωρίζει τη λεκάνη του Αράχθου σε 22 γεωλογικούς σχηματισμούς. Οι περισσότεροι από αυτούς ανήκουν σε σχηματισμούς φλύσχη και ασβεστόλιθου. Η εδαφική

πληροφορία που χρειάζεται το μοντέλο SWAT θα οριστεί στη συνέχεια, αλλά το υπόβαθρο ορίζεται στο σημείο αυτό με ομαδοποίηση του αρχικού γεωλογικού χάρτη. Οι τελικοί σχηματισμοί που προέκυψαν απεικονίζονται στο Σχήμα 8.3 (δεξιά). Προέκυψαν τελικά τρεις τύποι σχηματισμών, ο φλύσχης, ο ασβεστόλιθος και τα αλλούβια με κάθε ένα από αυτά να μπορεί να αντιστοιχηθεί, με βάση την γενικότερη γνώση για την κατείσδυση του νερού, σε ένα αδιαπέρατο, σε ένα δαπερατό και σε ένα ημιδιαπερατό έδαφος αντίστοιχα. Ελλείψει λεπτομερέστερων εδαφολογικών χαρτών οι εδαφικές παράμετροι του μοντέλου θα οριστούν στη συνέχεια με βάση την εν λόγω θεώρηση αντιστοιχίας, δεδομένου ότι ο γεωλογικός σχηματισμός είναι σε μεγάλο βαθμό υπεύθυνος για τις ιδιότητες του σχηματισθέντος εδάφους.



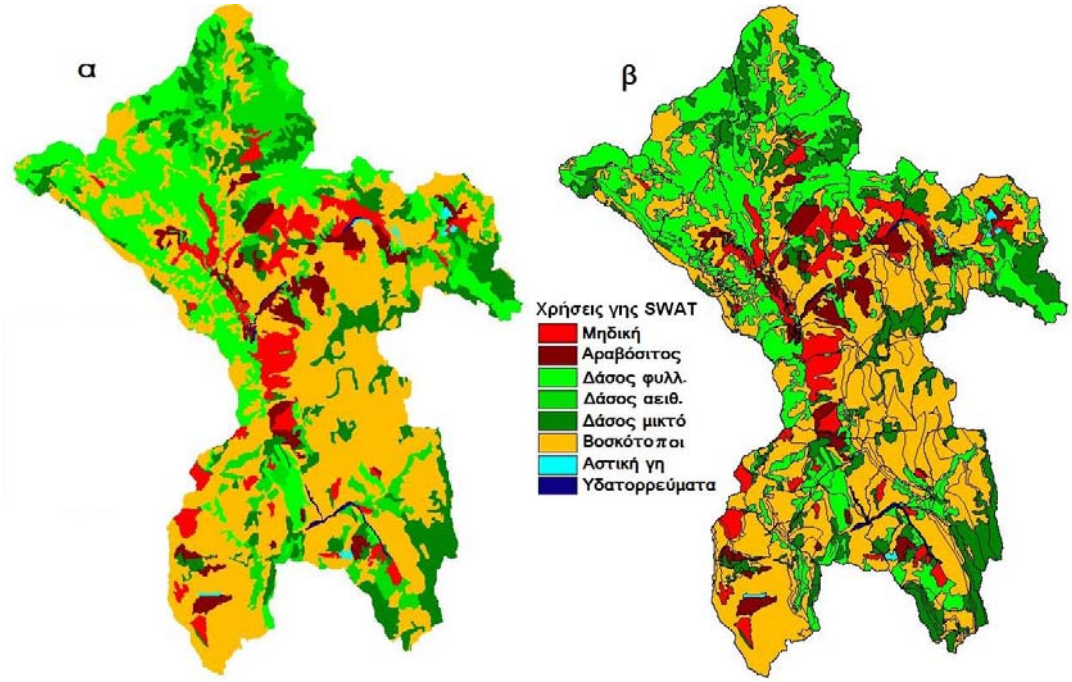
Σχήμα 8.3 Αρχικός γεωλογικός χάρτης της λεκάνης του Αράχθου (α) και ομαδοποιημένος γεωλογικός χάρτης (β) για χρήση ως εδαφολογικού υποβάθρου της λεκάνης του Αράχθου στο SWAT. Ο φλύσχης, ο ασβεστόλιθος και τα αλλούβια θα θεωρηθούν ως ένα αδιαπέρατο, ένα διαπερατό και ένα ημιδιαπερατό έδαφος αντίστοιχα.

8.2.3 Σχηματισμός Υδρολογικών Μονάδων Απόκρισης

Οι υδρολογικές μονάδες απόκρισης (Hydrologic Response Units – HRUs) ή απλούστερα ΥΜ είναι η γεωγραφική διαίρεση της λεκάνης στην οποία το μοντέλο SWAT πραγματοποιεί όλους τους υπολογισμούς του υδρολογικού κύκλου, της διάβρωσης και του κύκλου των θρεπτικών. Η κλίση εδάφους, η βροχόπτωση και κάποια στοιχεία για τις ιδιότητες των υδατορρευμάτων ορίζονται ωστόσο σε επίπεδο υπολεκάνης. Όλες οι ΥΜ μιας

υπολεκάνης έχουν την ίδια κλίση και δέχονται την ίδια βροχόπτωση. Ο διαχωρισμός σε ΥΜ εξυπηρετεί τα μέγιστα στη διερεύνηση της επίδρασης των διαφόρων ΔΠ στη ρύπανση των υδάτων. Η ΥΜ είναι η έκταση που χαρακτηρίζεται από μοναδικό συνδυασμό τοπογραφικής, εδαφικής και διαχειριστικής πληροφορίας και προσομοιάζει τη χωρική μονάδα αγρού (field), (Muleta and Nicklow, 2005). Ως διαχειριστική πληροφορία εννοείται ο τύπος εδαφοκάλυψης και η διαχείριση που μαζί ορίζουν τη χρήση γης. Επομένως, η επικάλυψη του χάρτη των υπολεκανών (Σχήμα 8.1), του χάρτη χρήσεων γης (Σχήμα 8.2γ) και του χάρτη εδάφους (Σχήμα 8.3β) δημιουργεί όλους τους συνδυασμούς των ανωτέρω χαρακτηριστικών στη λεκάνη.

Υπάρχει ωστόσο η δυνατότητα κατά τη δημιουργία των ΥΜ να αγνοηθούν οι χρήσεις γης ή τα εδάφη που καταλαμβάνουν ποσοστό έκτασης της λεκάνης μικρότερο από ένα ποσοστό ορισμένο από το χρήστη. Τα ποσοστά των εναπομεινάντων τύπων χρήσης γης και εδάφους αυξάνονται αναλογικά ώστε να αθροίσουν σε 100% της ολικής έκτασης της λεκάνης αφού συμπεριλάβουν τους τύπους που αγνοήθηκαν (Di Luzio et al., 2001). Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε κατώφλι για την εν λόγω διαδικασία ίσο με 0%, δηλαδή όλοι οι τύποι χρήσης γης και εδάφους, ανεξαρτήτως έκτασης, συμπεριελήφθησαν στη δημιουργία των ΥΜ. Η έκδοση του μοντέλου SWAT που χρησιμοποιήθηκε στη διατριβή, μεταφράζει τη δημιουργία των ΥΜ σε ισάριθμα αρχεία διαφόρων τύπων για τον ορισμό των παραμέτρων και την εκτέλεση των υπολογισμών, αλλά δεν δημιουργεί τον επιθυμητό χάρτη. Η διαδικασία χαρτογραφικής επικάλυψης που περιγράφηκε, έγινε ανεξάρτητα στο πρόγραμμα ΣΓΠ ArcGIS 9.2 και προέκυψε ο χάρτης των ΥΜ της λεκάνης του Αράχθου, που έχει ήδη παρουσιαστεί στο Σχήμα 7.3 ως προς τον τύπο χρήσης γης για τα 259 πολύγωνα (ΥΜ). Το Σχήμα 8.4 πιο κάτω παραθέτει ωστόσο τον ίδιο χάρτη σε αντιπαράθεση με το γενικευμένο χάρτη χρήσεων γης στο SWAT (Σχ. 8.1γ) για να γίνει αντιληπτή, με απεικόνιση της ίδιας χωρικής πληροφορίας (χρήσεις γης), η διαίρεση της λεκάνης σε ΥΜ. Ο χάρτης του Σχήματος 8.4β αποτελεί ουσιαστικά μία αναλυτικότερη έκφραση του χάρτη χρήσεων γης του Σχήματος 8.4α, αφού το κάθε πολύγωνο εκφράζει πλέον και τον αριθμό υπολεκάνης στην οποία βρίσκεται, αλλά και τον τύπο εδάφους που συνυπάρχει στην ίδια έκταση.



Σχήμα 8.4 Χάρτης χρήσεων γης πριν (α) και μετά τον καθορισμό των ΥΜ (β). Ο δεύτερος χάρτης έχει διαιρέσει τη ίδια πληροφορία σε 259 πολύγωνα με βάση την επικάλυψη του χάρτη α με τους χάρτες των υπολεκανών και του εδάφους.

Ο μέγιστος αριθμός ΥΜ που θα μπορούσε να προκύψει με επιλεγμένο κατώφλι 0% θα ήταν 27×8×3=648, όπου 27 ο αριθμός των υπολεκανών (Σχήμα 8.1), 8 ο αριθμός των τύπων κάλυψης γης (Σχήμα 8.2γ) και 3 ο αριθμός των τύπων εδάφους (Σχήμα 8.3β). Αυτό θα συνέβαινε στην περίπτωση που τόσο οι 8 τύποι κάλυψης γης, όσο και οι 3 τύποι εδάφους συνυπήρχαν (αλληλοεπικαλύπτονταν) σε όλες τις 27 υπολεκάνες της λεκάνης του Αράχθου. Τελικά, και όπως εύκολα διαπιστώνει κανείς απ' τους χάρτες που παρατέθηκαν, η αλληλοεπικάλυψη αυτή συμβαίνει σε αρκετά μικρότερη έκταση της λεκάνης με αποτέλεσμα τελικά να δημιουργούνται 259 ΥΜ. Από τα πολύγωνα αυτά, 23 ανήκουν σε καλλιέργεια αραβόσιτου, 29 σε καλλιέργεια μηδικής και 61 σε βοσκότοπους. Οι υπόλοιπες 146 ΥΜ ανήκουν σε δασικές εκτάσεις, αστική γη και περιοχές που καταλαμβάνονται από υδατορρεύματα. Η έκταση των ΥΜ αυτών παρουσιάζει εύρος από 1 έως 4000ha (μία αστική ΥΜ και μία ΥΜ βοσκότοπου), με τις ΥΜ μηδικής και αραβόσιτου να κυμαίνονται μεταξύ 25 και 700ha. Η μέση έκταση ΥΜ αραβόσιτου και μηδικής είναι 190 και 210ha αντίστοιχα, ενώ οι βοσκότοποι αντιστοιχούν κατά μέσο όρο σε ΥΜ με έκταση 600ha. Οι συνολικές εκτάσεις που τελικά αποδόθηκαν στον αραβόσιτο, τη μηδική και τους βοσκότοπους είναι 43,5· 62,4 και 421,7km^2, οι οποίες αντιστοιχούν περίπου στο 5%, στο 7% και στο 45% της συνολικής έκτασης της λεκάνης αντίστοιχα.

8.2.4 Μετεωρολογικά δεδομένα

Η μετεωρολογική πληροφορία στο SWAT αφορά κυρίως στην ημερήσια βροχόπτωση και στην ημερήσια μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία, ενώ στην περίπτωση που απαιτείται ο υπολογισμός της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής με κάποια απαιτητική σε δεδομένα μέθοδο, όπως η Penman-Monteith, απαιτούνται και στοιχεία για την ταχύτητα του ανέμου, την ηλιακή ακτινοβολία και τη σχετική υγρασία. Τα τελευταία δεδομένα συναντώνται πολύ πιο αραιά από τη βροχόπτωση, ενώ το μοντέλο παρέχει τη δυνατότητα της γένεσης χρονοσειρών για τις μετεωρολογικές μεταβλητές με χρήση στατιστικών κατανομών και ιστορικών μέσων ετήσιων τιμών (Neitch et al., 2005a). Η εν λόγω διαδικασία επιτρέπει επίσης τη συμπλήρωση χρονοσειρών. Ωστόσο, στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η εκ των προτέρων και εκτός του μοντέλου επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων με συμπληρώσεις χρονοσειρών και στατιστικούς ελέγχους, ενώ η δυνητική εξατμισοδιαπνοή υπολογίστηκε από το SWAT με τη μέθοδο Hargreaves (Hargreaves and Samani, 1985), που κάνει χρήση μόνο δεδομένων θερμοκρασίας.

Η διαθέσιμη βροχόπτωση στη λεκάνη προέρχεται συνολικά από 8 σταθμούς της ΔΕΗ και του ΥΠΕΧΩΔΕ, των οποίων η θέση εντός της λεκάνης παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.5. Στη Χρυσοβίτσα διατίθενται και δεδομένα θερμοκρασίας, ενώ ο δεύτερος σταθμός με τα εν λόγω δεδομένα είναι το Χαροκόπι.

Σχήμα 8.5 Μετεωρολογικοί σταθμοί στη λεκάνη του Αράχθου.

Τα στοιχεία των βροχομετρικών σταθμών, καθώς και η μέση ετήσια βροχόπτωση του πιο πρόσφατου διαστήματος προσομοίωσης (1996-2005) παρατίθενται στον Πίνακα 8.2.

Πίνακας 8.2 Στοιχεία για τους σταθμούς βροχόπτωσης της λεκάνης του Άνω Αράχθου.

Σταθμός	**Υψόμετρο σε m**	**Φορέας**	**Μέση Ετήσια Βροχόπτωση (1996-2005) σε mm**
Γρεβενίτιο	1006	ΥΠΕΧΩΔΕ	1312
Μέτσοβο	1150	ΥΠΕΧΩΔΕ	1210
Δικόρυφο	995	ΥΠΕΧΩΔΕ	1523
Ανατολική	797	ΥΠΕΧΩΔΕ	1413
Πλατανούσα	455	ΥΠΕΧΩΔΕ	1763
Ελατοχώρι	1014	ΔΕΗ	1343
Χρυσοβίτσα	820	ΔΕΗ	1200
Πράμαντα	817	ΔΕΗ	1873

Δεδομένου ότι το διάστημα προσομοίωσης είναι αρκετά μεγάλο, οι βροχομετρικοί σταθμοί δεν διέθεταν ολοκληρωμένες χρονοσειρές βροχής για όλο το διάστημα προσομοίωσης. Κατά συνέπεια, από το 1964 έως το 1990, λιγότεροι από 8 σταθμοί λαμβάνονταν υπόψη κατά διαστήματα, εκείνοι που διέθεταν δεδομένα. Η ανάλυση ωστόσο ποιότητας του νερού (βαθμονόμηση του μοντέλου ως προς N-NO3 και P) και η εξέταση ΔΠ, που θα γίνουν στη συνέχεια, αναφέρονται στο πιο πρόσφατο διάστημα προσομοίωσης όπου η βροχόπτωση είναι η πλέον αντιπροσωπευτική στη λεκάνη. Σχετικά με τη θερμοκρασία, οι δύο μετεωρολογικοί σταθμοί διέθεταν δεδομένα για ολόκληρη την περίοδο προσομοίωσης. Υπενθυμίζεται εδώ ότι τα μετεωρολογικά δεδομένα αποδίδονται από το μοντέλο σε κάθε υπολεκάνη με βάση τον πιο κοντινό σταθμό στο κέντρο βάρους της. Με βάση το Σχήμα 8.5 διαπιστώνεται ότι η Ανατολική και τα Πράμαντα βρίσκονται σε σημεία με επιρροή σε αρκετές υπολεκάνες, ενώ αντίθετα, οι σταθμοί στα Βόρεια της λεκάνης έχουν ο καθένας επιρροή σε λιγότερες, μιας και είναι μεγάλη η πυκνότητά τους. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι με βάση τα στοιχεία του Πίνακα 8.2 το νότιο τμήμα της λεκάνης δέχεται ετήσια βροχόπτωση κατά το διάστημα 1996-2005 περίπου 1800mm (Πράμαντα, Πλατανούσα), που είναι κατά περίπου 400mm μεγαλύτερη από την ετήσια βροχόπτωση των σταθμών στο κεντρικό και βόρειο τμήμα. Μεγάλο μέρος των μηνιαίων βροχοπτώσεων μπορεί να βρεθεί στο παράρτημα της μεταπτυχιακής εργασίας της Γεωργίου (2005).

8.2.5 Καθορισμός πιέσεων θρεπτικών στη λεκάνη

Το επόμενο βήμα πριν την πρώτη εκτέλεση του SWAT είναι η συμπλήρωση των αρχείων του προγράμματος, που περιλαμβάνει τις πιέσεις θρεπτικών από πηγές ανθρωπογενούς και φυσικής προέλευσης, σημαντικές για την ποιοτική προσομοίωση. Η μοναδική σημειακή πηγή ρύπανσης βρίσκεται στην υπολεκάνη 13 και αντιπροσωπεύει την απελευθέρωση των αποβλήτων δύο μεγάλων χοιροστασίων στην κοινότητα Μεγάλου Περιστερίου του Δήμου Εγνατίας. Πρόκειται συνολικά για τα απόβλητα 8000 ζώων, τα οποία οι τοπικοί φορείς ισχυρίζονται ότι τυγχάνουν κάποιας επεξεργασίας προτού απελευθερωθούν στον υδάτινο αποδέκτη. Στο μοντέλο θεωρήθηκε μία σταθερή ημερήσια συνεισφορά σε θρεπτικά στο ποτάμι βασισμένη στον αριθμό των ζώων, στη σύσταση της κοπριάς τους που παρουσιάστηκε στον Πίνακα 7.3, καθώς και σε έναν βαθμό μείωσης του N και του P μετά από επεξεργασία που λήφθηκε προσεγγιστικά ίσος με 50%. Η συνεισφορά αυτή στον Μετσοβίτικο υπολογίστηκε σε 80kgN/ημέρα και 27kgP/ημέρα. Όσον αφορά τη συνεισφορά των τριών υδρογεωλογικών πηγών στις υπολεκάνες 10, 14 και 22, θεωρήθηκε ένας σταθερός ημερήσιος ρυθμός εκφόρτισης, ίσος με $2m^3/s$ για κάθε μία, δηλαδή συνολικά $6m^3/s$ για ολόκληρη τη λεκάνη. Πρόκειται για συνεισφορά που προέρχεται εκτός της λεκάνης, από τα καρστικά συστήματα της περιοχής (βλ. 7.2.1) και η συνολική παροχή υπολογίστηκε προσεγγιστικά με βάση δημοσιευμένες εκτιμήσεις (ΕΜΠ, 2008).

Ο μικρός αγροτικός πληθυσμός της λεκάνης είναι σύμφωνα με τα στοιχεία της ΕΣΥΕ ίσος με 18000 κατοίκους και συγκεντρώνεται σε μικρές Κοινότητες (Σχ. 8.2β). Η μεγαλύτερη κοινότητα είναι το Μέτσοβο στα Βορειοανατολικά της λεκάνης, στην οποία όμως πολύ πρόσφατα ξεκίνησε τη λειτουργία του βιολογικός καθαρισμός με επεξεργασία των αστικών αποβλήτων. Συνεπώς, για το διάστημα προσομοίωσης στο SWAT που φτάνει έως το έτος 2005 δεν υφίσταται ο ορισμός οποιασδήποτε σημειακής πηγής ρύπανσης κατά μήκος του ποταμού. Το μοντέλο SWAT θεωρεί ότι στις εκτάσεις αστικής γης (0,31% της λεκάνης – βλ. Σχ. 8.2γ) υπάρχουν κάποιες μη σημειακές απώλειες σε θρεπτικά στοιχεία. Οι εν λόγω απώλειες είναι πολύ μικρές και προσεγγίζουν τις απώλειες που θα προκαλούνταν αν γινόταν η συνήθης παραδοχή για εκπομπές 10gN/κάτοικο/ημέρα και 2gP/κάτοικο/ημέρα (ΕΜΠ, 2008). Δεν έγινε καμία περαιτέρω τροποποίηση στις πιέσεις θρεπτικών από τον πληθυσμό της λεκάνης μιας και το ποσοστό συνεισφοράς σε θρεπτικά είναι μηδαμινό σε σχέση με άλλες πηγές, των οποίων το μέγεθος θα φανεί παρακάτω.

Οι αγροτικές δραστηριότητες είναι αυτές που συνεισφέρουν με τις μεγαλύτερες ποσότητες σε θρεπτικά στη λεκάνη. Οι φορτίσεις από τις δύο βασικές καλλιέργειες του αραβόσιτου και της μηδικής παρουσιάστηκαν αναλυτικά στην ενότητα 7.2.2 και στον Πίνακα 7.1. Το N και ο P που εισέρχονται στα εδάφη αραβόσιτου από χημικές λιπάνσεις είναι 298,5

και 33kg/ha/έτος, ενώ οι μέσες ετήσιες φορτίσεις στην καλλιέργεια μηδικής για διάστημα βιολογικού κύκλου 5ετίας είναι 4,5kgN/ha και 35,5kgP/ha. Όπως ήδη περιγράφηκε, οι φορτίσεις αυτές καθορίστηκαν προσεγγιστικά μετά από συνεννόηση με τους τοπικούς φορείς και το ινστιτούτο σιτηρών, ενώ υπάρχουν εργασίες όπως π.χ. αυτή των Pisinaras et al. (2010) στη βορειοδυτική Ελλάδα, όπου χρησιμοποιήθηκαν παρόμοιες τιμές. Οι δύο καλλιέργειες θεωρήθηκε ότι δεν αρδεύονται, ενώ μία βαθιά άροση ακολουθούσε τη συγκομιδή στο τέλος του βλαστικού κύκλου. Στους βοσκότοπους, οι πιέσεις N και P υπολογίστηκαν με βάση τον αριθμό των ζώων και στοιχεία για την ποσότητα και σύσταση της κοπριάς τους, όπως αναλυτικά παρουσιάστηκε στην ενότητα 7.2.2. Η εναπόθεση κοπριάς αιγοπροβάτων και βοοειδών θεωρήθηκε ότι λαμβάνει χώρα σε ημερήσια βάση κατά την περίοδο της βόσκησης και σε εβδομαδιαία κατά την περίοδο εκτροφής σε κλειστούς χώρους. Παρόμοιο με το τελευταίο ήταν και το σχήμα διασποράς της κοπριάς πουλερικών στις εκτάσεις βοσκότοπων σε όλη τη διάρκεια του έτους. Το σύνολο των 3000 βοοειδών, 100000 αιγοπροβάτων και 2×10^6 πουλερικών στη λεκάνη οδηγεί σε ετήσιες πιέσεις 33kgN/ha και 11kgP/ha βοσκότοπου αντίστοιχα κατά μέσο όρο. Όλες οι φορτίσεις της αγροτικής γης ορίστηκαν στο μοντέλο με εισαγωγή των πρακτικών που αναλυτικά παρουσιάστηκαν στην ενότητα 7.2.2 στα αρχεία διαχείρισης 'mgt' των ΥΜ.

Τελευταία φόρτιση στο μοντέλο είναι η εναπόθεση N από την ατμόσφαιρα, η οποία ορίζεται με ενιαίο τρόπο για όλη τη λεκάνη. Λόγω έλλειψης μετρήσεων στη λεκάνη του Αράχθου, οι εκτιμήσεις βασίστηκαν σε μία σύντομη βιβλιογραφική επισκόπηση. Οι Tzoraki and Nikolaidis (2007) εκτίμησαν το ρυθμό εναπόθεσης N σε μία ελληνική λεκάνη στη Βόρεια Πελοπόννησο, ίση με 1,2tn/km^2/έτος ή 12kg/ha/έτος. Οι Anatolaki and Tsitouridou (2007) μέτρησαν την ολική ετήσια εναπόθεση N στη Θεσσαλονίκη, ίση με 20kg/ha, ενώ η υγρή εναπόθεση ήταν περίπου το 1/3 αυτής της ποσότητας. Με βάση τις δύο αυτές εργασίες, θεωρήθηκε ότι ένας μέσος ετήσιος ρυθμός υγρής εναπόθεσης N, 5-10kg/ha είναι μάλλον αντιπροσωπευτικός για τον ελληνικό χώρο και την περιοχή μελέτης. Έτσι, ορίστηκε στο μοντέλο συγκέντρωση N στη βροχόπτωση ίση με 5mg/l, που οδηγεί σε μέση ανηγμένη εναπόθεση 7,5kgN/ha κατ' έτος με μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης 1500mm. Το μέγεθος εναπόθεσης αυτό συμφωνεί με τις δημοσιευμένες για την Ελλάδα τιμές εναπόθεσης, που υπολογίστηκαν για τα έτη 1980-2007 από ευρωπαϊκά μοντέλα του προγράμματος παρακολούθησης της μόλυνσης της ατμόσφαιρας EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme), (EMEP, 2001). Για τον P, το SWAT δεν προβλέπει εναπόθεση. Οι μέσες ετήσιες φορτίσεις N και P συνοψίζονται στον Πίνακα 8.3, ως μέσες ανηγμένες τιμές ανά τύπο χρήσης γης της λεκάνης του Αράχθου. Για το N, συμπεριλαμβάνεται στον πίνακα ως πηγή του στοιχείου ο εμπλουτισμός του εδάφους λόγω αζωτοδέσμευσης, όπως υπολογίστηκε στη συνέχεια στις εκτάσεις μηδικής από το μοντέλο.

Πίνακας 8.3 Μέσες ετήσιες φορτίσεις (εισροές) N και P στη λεκάνη του Αράχθου.

Ετήσιες Φορτίσεις (kg/ha/έτος)						
Χρήση γης	N από χημική λίπανση ή κοπριά	P από χημική λίπανση ή κοπριά	N από ατμοσφαιρική εναπόθεση	N από Αζωτο-δέσμευση	Σύνολο N	Σύνολο P
Μηδική	4,40	35,60	7,02	287,27	298,70	35,60
Αραβόσιτος	298,50	33,00	6,72		305,20	33,00
Βοσκότοποι	32,60	11,01	7,50		40,10	11,01
Δάσος			7,27		7,27	

8.3 Βαθμονόμηση του μοντέλου της λεκάνης του Αράχθου

8.3.1 Παράμετροι βαθμονόμησης

Η *βαθμονόμηση* ή *ρύθμιση* (calibration) ενός μοντέλου επιτυγχάνεται με μεταβολή των τιμών των παραμέτρων του ώστε να υπάρχει ικανοποιητική σύγκλιση μεταξύ των προβλέψεων του μοντέλου και των αντίστοιχων παρατηρήσεων. Συνήθως οι μεταβολές αφορούν στις πιο ευαίσθητες παραμέτρους και σε εκείνες που εμπεριέχουν τη μεγαλύτερη αβεβαιότητα δηλαδή στις παραμέτρους για τις οποίες δεν υφίσταται ικανοποιητική φυσική ερμηνεία ή ικανοποιητική μέτρησή τους στη φύση. Στην παρούσα εργασία έγινε ρύθμιση του μοντέλου με μεταβολή σε παραμέτρους που παίζουν το σπουδαιότερο ρόλο στην προσομοίωση των υδρολογικών μεγεθών, ενώ ταυτόχρονα δεν υφίσταται συγκεκριμένη γνώση για το μέγεθός τους. Οι εν λόγω παράμετροι είναι άλλωστε γνωστές για την ευαισθησία τους στην επιστημονική κοινότητα υδρολογικής προσομοίωσης με το SWAT, όπως έχει διερευνηθεί και αποδειχτεί σε πλήθος εργασιών πλέον (π.χ. Arabi et al., 2008· Lenhart et al., 2002· Santhi et al., 2001· Van Griensven et al., 2006). Πρόκειται για χειροκίνητη βαθμονόμηση, όπου μία μεταβολή τη φορά συνοδεύεται από γραφική και στατιστική σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων αποτελεσμάτων στο ποτάμι (trial and error process). Παρόλο που είναι υποκειμενική και χρονοβόρα, η χειροκίνητη βαθμονόμηση αποτελεί έναν άριστο τρόπο να ελεγχθεί ο τρόπος μεταβολής των πιο ευαίσθητων και αβέβαιων παραμέτρων (Engel et al., 2007).

Ο αριθμός καμπύλης (Curve Number - CN) που διέπει την επιφανειακή απορροή και η διαθέσιμη υγρασία του εδάφους (Available Water Capacity - AWC), που καθορίζει την χωρητικότητά του σε νερό και έμμεσα διέπει όλες τις συνιστώσες του υδρολογικού κύκλου, έχουν βρεθεί ότι είναι οι πιο ευαίσθητες παράμετροι που καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την απορροή και μετέπειτα τη στερεοαπορροή και τη μεταφορά θρεπτικών. Οι παράγοντες διαβρώσεως K_{USLE}, C_{USLE} και P_{USLE} της Εξίσωσης 3.9 είναι επίσης πολύ βασικές παράμετροι για την προσομοίωση της διάβρωσης. Όλες οι παραπάνω παράμετροι καθορίζουν ουσιαστικά

σε πολύ μεγάλο βαθμό τη σχετική ευαισθησία των 259 ΥΜ στις απώλειες των διαφόρων ειδών ρύπων, όντας υπεύθυνες για τον καθορισμό των περιοχών με το μεγαλύτερο κίνδυνο στις απώλειες αυτές.

Στη λεκάνη του Αράχθου ελλείψει λεπτομερών εδαφολογικών ερευνών που θα βοηθούσαν στον καθορισμό των παραμέτρων αυτών, οι τρεις γεωλογικοί σχηματισμοί του φλύσχη, των αλλουβίων και του ασβεστόλιθου αντιστοιχήθηκαν υποθετικά σε τρία εδάφη, ένα βαρύ (αδιαπέρατο), ένα μέσης σύστασης (ημιδιαπερατό) και ένα ελαφρύ (διαπερατό). Με τον τρόπο αυτό η γνώση για την κατείσδυση του νερού στους τρεις γεωλογικούς σχηματισμούς αντιστοιχίζεται στη συμπεριφορά των εδαφών στη διήθηση, στην υδατοικανότητα και επομένως στην ευαισθησία τους στην απορροή. Οπωσδήποτε πρόκειται για μία αυθαίρετη διαδικασία, κατά την οποία θεωρείται ότι ο ανώτερος εδαφικός ορίζοντας διαμορφώνεται αποκλειστικά με βάση το μητρικό πέτρωμα, ενώ πιθανές διαφοροποιήσεις που απαντώνται στην πραγματικότητα αγνοούνται. Με την απλουστευτική αυτή παραδοχή επιτυγχάνεται ωστόσο η απόδοση ιδιοτήτων στους τρεις τύπους εδάφους που συνάδουν με τη γενικότερη και αναμενόμενη σχετική συμπεριφορά μεταξύ τους, ενώ η απόλυτη επίδρασή τους στις φυσικές διαδικασίες μπορεί να επιτευχθεί μέσω της διαδικασίας βαθμονόμησης. Όλα τα εδάφη θεωρήθηκαν με βάθος 1m. Οι προαναφερθείσες παράμετροι για τα τρία εδάφη καθορίστηκαν λοιπόν με δοκιμές και έλεγχο της προσομοιωμένης απορροής και στερεοαπορροής και οι τελικές τους τιμές παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.4.

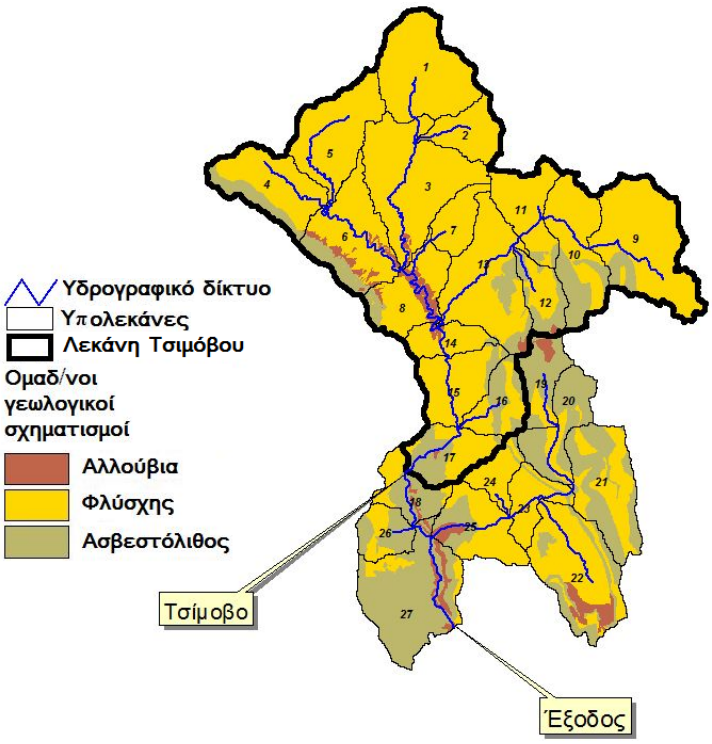
Πίνακας 8.4 Τελικές τιμές 6 ευαίσθητων παραμέτρων του μοντέλου SWAT για την προσομοίωση της απορροής, της διάβρωσης και εμμέσως των απωλειών θρεπτικών από τα εδάφη της λεκάνης του Αράχθου.

Παράμετρος/Τύπος χρήσης γης	**Δάσος**	**Αραβόσιτος**	**Μηδική**	**Βοσκότοπος**
C_{USLE}	0,01	0,2	0,05	0,05
P_{USLE}	1,00	1,00	1,00	1,00
Αριθμός καμπύλης (CN)	33, 57, 78	70, 80, 87	62, 75, 84	49, 69, 84
Παράμετρος/Τύπος εδάφους	**Αλλούβια (μέσο έδαφος)**	**Ασβεστόλιθοι (ελαφρύ έδαφος)**	**Φλύσχης (βαρύ έδαφος)**	
Διαθέσιμη Υγρασία - AWC (mmH2O/mmΕδάφους)	0,10	0,08	0,12	
Κορεσμένη υδραυλική Αγωγιμότητα - Ksat (mm/h)	50	150	10	
K_{USLE}	0,30	0,35	0,25	
Υδρολογική Ομάδα	C	A	D	

Οι αρχικές τιμές των αριθμών καμπύλης CN για τους διάφορους συνδυασμούς χρήσης γης και εδαφών αντλήθηκαν από τους Πίνακες της SCS (USDA, Soil Conservation Service, 1972) και μεταβλήθηκαν ελαφρά με αυξομείωση κατά 2 μονάδες κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 8.4 παρουσιάζονται συστηματικά

υψηλότερες για τις αγροτικές παρά για τις δασικές εκτάσεις. Η υψηλότερη από τις τρεις τιμές για κάθε τύπο εδαφοκάλυψης αναφέρεται στο αδιαπέρατο έδαφος (υδρολογική ομάδα D), ενώ η μέση και η μικρότερη τιμή στο ημι-διαπερατό και στο διαπερατό έδαφος αντίστοιχα (υδρολογικές ομάδες C και A). Κατά συνέπεια, η επιφανειακή απορροή που προσομοιώνεται από το μοντέλο είναι μεγαλύτερη στο λιγότερο διαπερατό έδαφος (φλύσχης) για δεδομένη βροχόπτωση. Ο συντελεστής C_{USLE} καθορίζεται αρχικά από το μοντέλο για κάθε τύπο χρήσης γης και επικαιροποιείται σε ημερήσια βάση ανάλογα με την ανάπτυξη της καλλιέργειας (Neitsch et al., 2005a). Ωστόσο, αυτή η αρχική τιμή διέπει σε μεγάλο βαθμό την τρωτότητα ενός τύπου εδαφοκάλυψης στη διάβρωση, τόσο κατά το αρχικό, όσο και κατά τα επόμενα στάδια της προσομοίωσης. Οι δασικοί τύποι, η μηδική και οι βοσκότοποι καλύπτουν σε μεγαλύτερο βαθμό το έδαφος σε σχέση με τον αραβόσιτο και έτσι προστατεύουν περισσότερο το έδαφος από φαινόμενα διάβρωσης με τις αρχικές τιμές της παραμέτρου να είναι αρκετά μικρότερες στη βάση δεδομένων του μοντέλου. Ωστόσο, για μία τυπική ελληνική λεκάνη, είναι γνωστό ότι η εκτεταμένη βόσκηση συχνά απογυμνώνει το έδαφος (Zervas, 1998), ενώ και η μηδική δεν θεωρείται ότι καλύπτει ολοκληρωτικά το έδαφος. Επομένως, οι αρχικές αυτές τιμές για τους εν λόγω τύπους εδαφοκάλυψης θεωρήθηκε ότι υποεκτιμούν τις απώλειες εδάφους και αυξήθηκαν στην τιμή 0,05. Ο παράγοντας P_{USLE} δηλώνει την προστασία του εδάφους στη διάβρωση όταν υφίσταται μία συγκεκριμένη πρακτική διαχείρισης της γης (Neitsch et al., 2005a). Δεδομένου ότι οι συμβατικές τεχνικές διαχείρισης δεν περιλαμβάνουν κάποια ιδιαίτερη πρακτική διαμόρφωσης του εδάφους κατά την καλλιέργεια, η τιμή της παραμέτρου παρέμεινε σταθερή και ίση με την αρχική τιμή, που τίθεται από το μοντέλο ίση με 1,0.

Σχετικά με τον καθορισμό των παραμέτρων που αναφέρονται στα τρία εδάφη, αυτές καθορίστηκαν με διαφορετική προσέγγιση. Οι τιμές της παραμέτρου K_{USLE} για τη λεκάνη του Αράχθου προέκυψαν κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης με γνώμονα την εδαφική διάβρωση ανά μονάδα επιφάνειας που υποδηλώνουν οι μετρήσεις στο Τσίμοβο και την Πλάκα. Οι μέσες ετήσιες στερεοπαροχές (1965-1977) στις δύο θέσεις καταγράφηκαν ίσες με 480×10^6 και 1390×10^6tn αντίστοιχα. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 8.6, η έκταση της λεκάνης ανάντη του Τσιμόβου είναι σημαντική σε σχέση με τη συνολική έκταση της λεκάνης ανάντη Πλάκας (940km^2) και σχεδιάστηκε στα ΣΓΠ ίση περίπου με 630km^2 (υπολεκάνες 1-17). Η μεταξύ των δύο θέσεων έκταση της λεκάνης είναι δηλαδή 310km^2 (υπολεκάνες 18-27, Σχ. 8.6). Η τελευταία ωστόσο, δε συμφωνεί με την κατά τρεις φορές μεγαλύτερη στερεοπαροχή που παρατηρείται στην έξοδο σε σχέση με το Τσίμοβο. Οι καταγεγραμμένες μέσες ετήσιες στερεοπαροχές στις δύο θέσεις υποδηλώνουν ετήσιους ρυθμούς διάβρωσης 762 και 2935tn/km^2 για τα δύο τμήματα της λεκάνης με την έκταση κατάντη Τσιμόβου να διαβρώνεται πολύ περισσότερο σε σχέση με την ανάντη αυτού.



Σχήμα 8.6 Οριοθέτηση υπολεκάνης Τσιμόβου εντός της λεκάνης της Πλάκας (έξοδος).

Αν και υπάρχει έντονη υποψία για την εγκυρότητα των παρατηρημένων δεδομένων στερεοπαροχής που παρέχονται, τελικά υιοθετούνται και επιχειρείται η ακόλουθη προσέγγιση. Η βροχόπτωση στο νοτιότερο τμήμα, αν και μεγαλύτερη (βλ. ενότητα 8.2.4), δε μπορεί να δικαιολογήσει αυτή τη διαφορά. Επιπλέον, τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά των υπολεκανών στο τμήμα κατάντη Τσιμόβου είναι παρόμοια με εκείνων ανάντη. Η διαχείριση της γης δεν διαφέρει επίσης αξιοσημείωτα ανάμεσα σε αυτά τα δύο τμήματα. Επομένως, τα εδάφη και οι τύποι εδαφοκάλυψης που συναντώνται στο νότιο τμήμα πρέπει να διαβρώνονται περισσότερο. Η ευαισθησία που έχει το ελαφρύ έδαφος στη διάβρωση, θεωρήθηκε λοιπόν λίγο μεγαλύτερη σε σχέση με των υπολοίπων, δεδομένου ότι απαντάται κυρίως στο νότιο τμήμα της λεκάνης, κάτι που μεταφράστηκε σε μεγαλύτερη τιμή για την παράμετρο K_{USLE}, όπως φαίνεται στον Πίνακα 8.4. Αυτό το καθεστώς διάβρωσης ενισχύει επίσης την επιλογή της αύξησης της τιμής της παραμέτρου C_{USLE} των βοσκότοπων, οι οποίοι καταλαμβάνουν μεγάλο μέρος της λεκάνης κατάντη του Τσιμόβου.

Οι παράμετροι της κορεσμένης υδραυλικής αγωγιμότητας και της διαθέσιμης υγρασίας καθορίστηκαν σε αναλογία με την υδρολογική ομάδα στην οποία ανήκει το κάθε έδαφος. Η αγωγιμότητα αυξάνει με την περατότητα, σε αντίθεση με την διαθέσιμη υγρασία που μειώνεται. Οι τιμές του Πίνακα 8.4 προέκυψαν εμπειρικά για τα τρία εδάφη κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης. Ωστόσο, οι μεταβολές έγιναν με τέτοιο τρόπο, ώστε οι τιμές

μεταξύ των εδαφών να είναι αληθοφανείς ως προς τη φυσική συμπεριφορά των περατών, ημιπερατών και αδιαπέρατων εδαφών, με τα τελευταία να χαρακτηρίζονται από μικρότερη αγωγιμότητα, αλλά μεγαλύτερη ικανότητα στη συγκράτηση νερού. Άλλες σημαντικές παράμετροι βαθμονόμησης, καθορίστηκαν ενιαία για ολόκληρη τη λεκάνη και παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.5.

Πίνακας 8.5 Παράμετροι βαθμονόμησης που καθορίστηκαν με ενιαίο τρόπο στη λεκάνη.

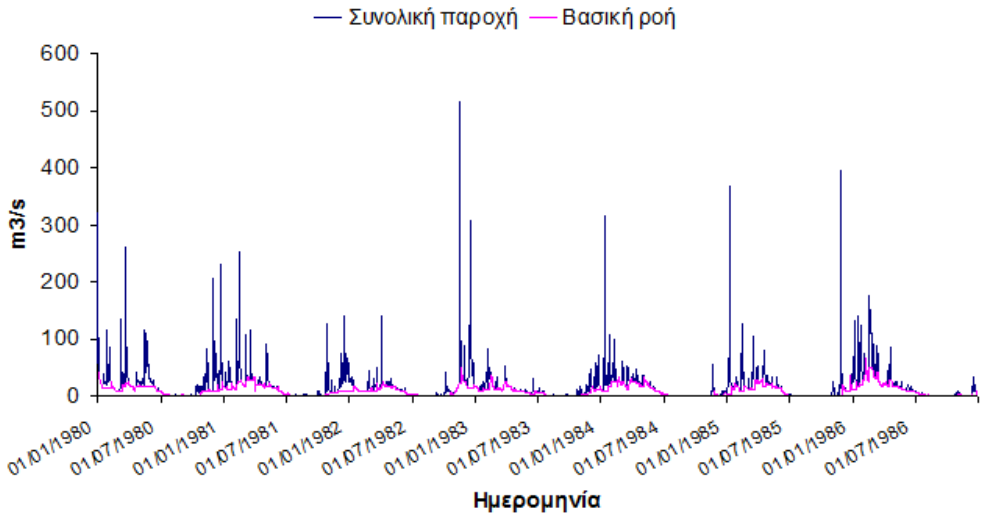
Παράμετρος	Επίδραση	Περιγραφή παραμέτρου	Τυπικό Εύρος	Τελική τιμή
SOL_CBN	Οργανικό N, P	Περιεκτικότητα οργ. άνθρακα στο έδαφος (Organic Carbon content of soil layer)	0,05-10 (%)	0,8
GW_REVAP	Απορροή	Συντελεστής επανατροφοδότησης υπ. νερού (Groundwater revap coefficient)	0,02–0,20	0,02
GWQMN	Απορροή	Ελάχιστο βάθος νερού στον αβαθή υδροφορέα για να επιτρέπεται η κατείσδυση (Threshold depth of water in shallow aquifer for percolation to occur)	0,0–300 (mm)	50
RCHRG_DP	Απορροή	Κλάσμα ποσότητας νερού που από τον αβαθή κατεισδύει στο βαθύ υδροφορέα (Deep aquifer percolation fraction)	0,0–1,0	0,05
ALPHA_BF	Απορροή	Παράγοντας ύφεσης της παροχής του υπόγειου νερού (Base flow alpha factor)	0,0–1,0	0,0373
NPERCO	N-NO3	Συντελεστής κατείσδυσης αζώτου νιτρικών (Nitrate Nitrogen percolation coefficient)	0,0–1,0	0,5
PPERCO	Διαλυτός P	Συντελεστής κατείσδυσης διαλυτού φωσφόρου (Soluble Phosphorus percolation coefficient)	10,0–17,5	10
PHOSKD	Διαλυτός P	Συντελεστής κινητικότητας διαλυτού P Phosphorus soil partitioning coefficient	100-200	175
PSP	Διαλυτός P	Συντελεστής διαθεσιμότητας διαλυτού P (Phosphorus availability index)	0,01-0,7	0,4
PRF	Φερτά στο ποτάμι	Παράγοντας προσαρμογής επίδρασης αιχμών στη διόδευση των φερτών στο ποτάμι (Peak rate adjustment factor for sediment routing in the main channel)	0-2	1
SPCON	Φερτά στο ποτάμι	Γραμμική παράμετρος για τον υπολογισμό της μέγιστης ποσότητας φερτών εναπόθεσης/επανααιώρησης κατά τη διόδευση στο ποτάμι (Linear parameter for calculating the maximum amount of sediment that can be reentrained during channel sediment routing)	0,0001-0,01	0,0002
SPEXP	Φερτά στο ποτάμι	Εκθετική παράμετρος για τον υπολογισμό της μέγιστης ποσότητας φερτών εναπόθεσης/επαναιώρησης κατά τη διόδευση στο ποτάμι (Exponential parameter for calculating sediment reentrained in channel sediment routing)	1-1,5	1,27
CDN	N-NO3	Συντελεστής εκθετικού ρυθμού απονιτροποίησης (Denitrification exponential rate coefficient)	0-3	0,9
SDNCO	N-NO3	Κατώφλι περιεκτικότητας εδαφικής υγρασίας για την προσομοίωση απονιτροποίησης (Denitrification threshold water content)	0,1-1,1	0,997

Η περιεκτικότητα όλων των τύπων εδαφών σε οργανικό άνθρακα (SOL_CBN) τέθηκε ίση με 0,8% του βάρους του εδάφους, δεδομένου ότι τα ελληνικά εδάφη είναι φτωχά σε οργανική ουσία (Dimoyiannis et al., 1998· Tsadilas et al., 2005). Η παράμετρος καθορίζει σε σημαντικό βαθμό το οργανικό φορτίο θρεπτικών που είναι σε κάθε χρονικό βήμα διαθέσιμο στην επιφάνεια του εδάφους.

Το SWAT κατηγοριοποιεί το υπόγειο νερό σε αυτό που κινείται στον επιφανειακό, ελεύθερο υδροφορέα (αβαθή) και επανατροφοδοτεί τα επιφανειακά υδατορεύματα και σε εκείνο που εισέρχεται στο βαθύ υδροφορέα και τροφοδοτεί τα επιφανειακά υδατορεύματα εκτός λεκάνης απορροής. Στη δεύτερη περίπτωση το νερό προέρχεται από κατείσδυση μέρους του διαθέσιμου νερού του αβαθούς υδροφορέα, που τελικά δεν επιστρέφει στα επιφανειακά νερά της λεκάνης και χάνεται οριστικά από το σύστημα. Η παράμετρος που εκφράζει αυτό το ποσοστό (RCHRG_DP) στα αρχεία υπόγειων νερών του μοντέλου έχει αρχική τιμή 0,05 και δεν μεταβλήθηκε, υποδηλώνοντας ότι το 5% του νερού που βρίσκεται στον αβαθή υδροφορέα στο εκάστοτε χρονικό βήμα, εισέρχεται στον βαθύ και δεν επιστρέφει στη λεκάνη. Οι ρυθμίσεις των αρχείων υπόγειων νερών, αν και χωρίς ιδιαίτερη φυσική σημασία, επηρεάζουν σε κάποιο βαθμό την υδρολογική και ποιοτική προσομοίωση. Πάνω από τον επιφανειακό υδροφορέα βρίσκεται η ριζική ζώνη και οι παράμετροι που ενδιαφέρουν είναι κυρίως αυτές που ρυθμίζουν την κίνηση και ποσότητα του νερού από τον υδροφορέα στη ζώνη αυτή καθώς και την γενικότερη συνεισφορά του υπόγειου νερού στην παροχή του ποταμού.

Ο παράγοντας ‘άλφα’ (ALPHA_BF), που είναι η σταθερά ύφεσης της παροχής του υπόγειου νερού, τέθηκε ίσος με 0,0373. Εκφράζει την ανταπόκριση της υπόγειας ροής σε μεταβολές της επαναπλήρωσης και κυμαίνεται από 0 έως 1 με τις μικρές τιμές να εκφράζουν αργή ανταπόκριση. Η τιμή της παραμέτρου καθορίστηκε μετά από χρήση ενός φίλτρου που διαχωρίζει τη συνολική απορροή του παρατηρημένου υδρογραφήματος σε βασική και άμεση απορροή και παρέχεται μαζί με το SWAT. Η αυτόματη αυτή μέθοδος διαχωρισμού του υδρογραφήματος, αναπτύχθηκε από τους Arnold et al. (1995a) και τροποποιήθηκε από τους Arnold and Allen (1999), επιτρέποντας τη σύγκριση ανάμεσα στις δύο βασικές συνιστώσες απορροής του υδρογραφήματος, το μέγεθος των οποίων παίζει σημαντικό ρόλο και για τη μετέπειτα προσομοίωση της μεταφοράς φερτών και θρεπτικών. Η εύρεση του συντελεστή μέσω ανάλυσης του παρατηρημένου υδρογραφήματος είναι σημαντική μιας και καθοδηγεί το μοντέλο στο να προσομοιώσει σωστά το σχήμα του υδρογραφήματος. Η χρήση του φίλτρου με χρήση του παρατηρημένου ημερήσιου υδρογραφήματος στο Τσίμοβο έδωσε την προαναφερθείσα τιμή για τον παράγοντα ‘άλφα’ και εκτίμησε ότι σε υπερετήσια βάση η υπόγεια απορροή είναι περίπου το 65% της συνολικής απορροής στη θέση. Η βασική ροή του παρατηρημένου υδρογραφήματος στο Τσίμοβο διαχωρίστηκε επίσης με χρήση της εμπειρικής

μεθόδου των λογαρίθμων (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2006), ώστε να διαπιστωθεί και με άλλο τρόπο η αναλογία των συνιστωσών της απορροής στην τελική διαμόρφωσή του. Στο Σχήμα 8.7 εικονίζεται ο εν λόγω διαχωρισμός στο παρατηρημένο υδρογράφημα του Τσιμόβου για ένα ενδεικτικό χρονικό διάστημα 7ετίας (1980-1986). Στη θέση της τελικής εξόδου της λεκάνης δεν ήταν διαθέσιμο ωστόσο, το ημερήσιο υδρογράφημα για κανένα χρονικό διάστημα της περιόδου προσομοίωσης, ενώ η χρήση μηνιαίου υδρογραφήματος δεν είναι ενδεικτική για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Έτσι, θεωρήθηκε τελικά η τιμή 0,0373, ως ενιαία τιμή του παράγοντα 'άλφα' για όλα τα αρχεία υπόγειου νερού στη λεκάνη δηλαδή για όλες τις ΥΜ.



Σχήμα 8.7 Διαχωρισμός υδρογραφήματος στο Τσίμοβο σε βασική και άμεση απορροή. Η κόκκινη απεικόνιση αντιστοιχεί στη βασική ροή, ενώ η μπλε στη συνολική απορροή. Με αφαίρεση της πρώτης από τη δεύτερη προκύπτει η άμεση απορροή. Η τελευταία αποτελεί περίπου το 40% του συνολικού υδρογραφήματος.

Δύο ακόμα παράμετροι για τις οποίες κρίνεται σκόπιμο να γίνει μνεία είναι ο συντελεστής επανατροφοδότησης (GW_REVAP) και το όριο επιστρέφουσας ροής (GWQMN). Η πρώτη είναι ο συντελεστής που ρυθμίζει τη ροή του νερού από τον αβαθή υδροφορέα προς τη ριζική ζώνη λόγω έλλειψης εδαφικής υγρασίας και πρόσληψης νερού απ' τα φυτά με βαθιές ρίζες. Κυμαίνεται μεταξύ 0,02 και 0,2 και μικρές τιμές περιορίζουν το φαινόμενο. Η δεύτερη εκφράζει το όριο νερού στον αβαθή υδροφορέα (mm) που απαιτείται για ύπαρξη επιστρέφουσας ροής. Όταν το βάθος του νερού στον αβαθή υδροφορέα ξεπερνιέται, επιτρέπεται ροή προς το υδατόρρευμα. Η τιμή της παραμέτρου αυτής προσαρμόστηκε κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης στα 50mm για όλες τις ΥΜ.

Με τη διαμόρφωση των τιμών των παραμέτρων που μέχρι στιγμής παρουσιάστηκαν επιτυγχάνεται ικανοποιητική σύγκλιση μεταξύ προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών παροχής και στερεοπαροχής. Δεδομένου ότι η μεταφορά θρεπτικών διέπεται από τις προαναφερθείσες διεργασίες, με το τέλος της βαθμονόμησης για αυτές τις μεταβλητές πρέπει και τα θρεπτικά να έχουν σε έναν ικανοποιητικό βαθμό εκτιμηθεί. Ωστόσο, επιπλέον παράμετροι που εκφράζουν διάφορες πτυχές του κύκλου των θρεπτικών μπορούν να προσαρμοστούν για την ολοκλήρωση της βαθμονόμησης του μοντέλου. Οι συντελεστές κατείσδυσης N και P (NPERCO και PPERCO), εκφράζουν τη σχέση της συγκέντρωσης των $NO3^-$ και του διαλυτού P στην επιφανειακή απορροή σε σχέση με εκείνη στο νερό κατείσδυσης και κατ' επέκταση ρυθμίζουν τη δίοδο μεταφοράς τους προς το υδρογραφικό δίκτυο. Τιμή κοντά στο κατώτερο όριο εκμηδενίζει το ποσοστό που μεταφέρεται απ' ευθείας με την απορροή, ενώ τιμή κοντά στη μονάδα εξισώνει τα ποσοστά που μεταφέρονται μέσω απορροής και κατείσδυσης. Επισημαίνεται ότι για τον P, η διαλυτή μορφή αντιπροσωπεύει ένα μικρό ποσοστό του ολικού P. Για τη μορφή αυτή, μία επιπλέον παράμετρος καθορίζει το ποσοστό του στοιχείου από τον συνολικό διαλυτό P στα ανώτερα 10mm του εδάφους που είναι δυνατόν να μεταφέρονται με την επιφανειακή απορροή (PHOSKD). Τα ανώτερα όρια δηλώνουν μικρή δυνατότητα κινητικότητας. Τέλος, η παράμετρος PSP καθορίζει το ποσοστό του εναποτιθέμενου P που βρίσκεται σε διαλυτή μορφή μετά το πέρας της άμεσης και ταχείας αντίδρασής του με άλλα στοιχεία στο έδαφος, όταν εφαρμόζεται σε αυτό μέσω λιπάνσεων.

Οι παράμετροι που διαμορφώνουν το ρυθμό της απονιτροποίησης από το έδαφος είναι οι δύο τελευταίες του Πίνακα 8.5. Η παράμετρος CDN ρυθμίζει με εκθετικό τρόπο το ρυθμό απονιτροποίησης του N από το έδαφος, ενώ η παράμετρος SDNCO αποτελεί το κλάσμα της διαθέσιμης υγρασίας του εδάφους, που όταν ξεπερνιέται, επιτρέπει στο μοντέλο να προσομοιώσει την εν λόγω διεργασία. Η παράμετρος αυτή έχει το νόημα της σύνδεσης του φαινομένου με την διαθεσιμότητα υγρασίας στο έδαφος. Οι δύο παράμετροι μεταβλήθηκαν εμπειρικά ώσπου το μοντέλο να υπολογίζει έναν αληθοφανή ετήσιο ρυθμό απονιτροποίησης από τα εδάφη αραβόσιτου, συνήθως μέσα στα όρια του 10-20% του ετήσιου ρυθμού αζωτούχου λίπανσης (Neitch et al., 2005a). Οι τιμές που τελικά επιλέχτηκαν (Πίνακας 8.5) οδήγησαν σε έναν μέσο ετήσιο ρυθμό απονιτροποίησης N από το έδαφος με καλλιέργεια αραβόσιτου ίσο με 40kgN/ha, όταν η λίπανση προσθέτει περίπου 300kgN/ha.

Τέλος, τρεις ακόμα παράμετροι παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.5 και αφορούν στη μεταφορά φερτών μέσω του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης του Αράχθου. Πρόκειται για τις παραμέτρους PRF, SPCON και SPEXP, οι οποίες ρυθμίστηκαν έτσι, ώστε σε κάθε χρονικό βήμα να προσομοιώνεται μία μικρή συνεισφορά ή κατακράτηση φερτών από τα υδατορρεύματα, που παραπέμπει σε μικρό ρυθμό διάβρωσής τους ή εναπόθεση εδάφους στην κοίτη τους αντίστοιχα. Οι παράμετροι, που είναι φυσικά εμπειρικές, εξυπηρετούν στο να

εκφράσει ο ερευνητής τα προαναφερθέντα φαινόμενα σε λεκάνες απορροής. Ωστόσο, όπως έχει προκύψει από την εργασία των Zarris et al. (2001), στα ελληνικά ποτάμια η ποσότητα φερτών στις διατομές ποταμών προέρχεται σε πολύ μεγάλο ποσοστό από το φορτίο απόπλυσης, το αιωρούμενο φορτίο από τη διάβρωση της ανάντη λεκάνης (Μιμίκου, 2006· Τσακίρης, 2006). Συνεπώς, επιλέχτηκαν τιμές των εν λόγω εμπειρικών συντελεστών που δεν τροποποιούν αισθητά το φορτίο που διοδεύεται στη διατομή εξόδου της λεκάνης σε σχέση με το συνολικό φορτίο εδαφικής απώλειας που εισέρχεται στο υδρογραφικό δίκτυο. Επιπρόσθετα, αγνοώντας το συρόμενο φορτίο ποταμού (που στα ισχυρά πλημμυρικά επεισόδια ίσως να είναι σημαντικό στη λεκάνη του Αράχθου) υπάρχει συμφωνία με τη φύση των παρατηρημένων στερεοπαροχών, οι οποίες δεν περιλαμβάνουν στην καταγραφή τους το φορτίο κοίτης με σύρση παρά μόνο το αιωρούμενο, που συντριπτικά προέρχεται από τη διάβρωση της λεκάνης.

Οι εκτελέσεις του μοντέλου κατά τη χειροκίνητη διαδικασία της βαθμονόμησης γίνονται μέσω ενός τελικού διαλόγου, όπου ο χρήστης του μοντέλου προβαίνει σε κάποιες τελικές ρυθμίσεις. Η σημαντικότερη από αυτές είναι η επιλογή για την προσομοίωση η μη των βιοχημικών διεργασιών στο ποτάμι (in-stream processes), που όπως ήδη αναφέρθηκε στα δύο προηγούμενα κεφάλαια, στην παρούσα εργασία δεν επιλέχθηκαν. Οι διεργασίες αυτές αφορούν στην απονιτροποίηση του N, στην μικροβιακή και φυτική λήψη θρεπτικών, στην εναπόθεσή τους στον πυθμένα του ποταμού κ.α. Μετά από εκτεταμένες έρευνες, έχει βρεθεί ότι οι εν λόγω διεργασίες είναι ανάλογες της έκτασης της λεκάνης απορροής που καλύπτεται με νερό, δηλαδή εξαρτώνται από την έκταση που καταλαμβάνουν το υδρογραφικό δίκτυο και οι πιθανές λίμνες (Behrendt and Opitz, 2000). Η απονιτροποίηση εξαρτάται επίσης στενά από το χρόνο παραμονής του νερού στο ποτάμι (Laursen and Seitzinger, 2002· Seitzinger et al., 2002· Birgand et al., 2007) και επιτείνεται όταν επικρατούν συνθήκες χαμηλής ροής (Kronvang et al., 1999). Με βάση τα ευρήματα αυτά, στη λεκάνη του Αράχθου η απουσία εκτεταμένων υγροτόπων (λιμναζόντων νερών – λιμνών), η ταχεία απόκριση της λεκάνης και η ορμητική ροή του ποταμού (μεγάλες κλίσεις), θεωρείται ότι παίζουν αρνητικό ρόλο στην πραγματοποίηση των εν λόγω φαινομένων. Με την παραδοχή αυτή μπορεί να θεωρηθεί ότι οι βιοχημικές διεργασίες είναι δευτερεύουσας σημασίας και έτσι, το φορτίο θρεπτικών που εισέρχεται στο υδρογραφικό δίκτυο σε ετήσια βάση διοδεύεται εξολοκλήρου έως την έξοδο της λεκάνης απορροής. Επιπρόσθετα, η σύγκριση διαφόρων μοντέλων στην προσομοίωση των διεργασιών αυτών κατέδειξε ότι το SWAT έχει την τάση συστηματικά να τις υποεκτιμά (Hejzlar et al., 2009). Ακόμα όμως και αν συνέτρεχαν όλοι οι λόγοι ώστε η προσομοίωση των διεργασιών στο ποτάμι να ήταν επιβεβλημένη, στη λεκάνη του Αράχθου οι καταγραφές ποιοτικών παραμέτρων του νερού είναι τόσο αραιές στο χώρο και στο χρόνο που δεν θα

επέτρεπαν μία αξιόπιστη σύγκριση με τα αποτελέσματα του μοντέλου. Τα αποτελέσματα αυτά θα εμπεριείχαν μεγάλη αβεβαιότητα.

8.3.2 Αποτελέσματα βαθμονόμησης

Η επιτυχία προσομοίωσης του SWAT ελέγχθηκε με γραφική και στατιστική σύγκριση των διαθέσιμων μετρήσεων παροχής, στερεοπαροχής και συγκεντρώσεων P και N-NO3 με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του μοντέλου. Η βαθμονόμηση με μεταβολή στις παραμέτρους της προηγούμενης ενότητας έγινε πρώτα για τις παροχές, μετέπειτα για τις στερεοπαροχές και τέλος, για τα θρεπτικά. Για τις δύο πρώτες μεταβλητές η διαδικασία ξεκίνησε από την ανάντη θέση με διαθέσιμες μετρήσεις (Τσίμοβο) και ολοκληρώθηκε στην έξοδο της λεκάνης. Οι διαθέσιμες χρονοσειρές με μετρήσεις για τις μεταβλητές ενδιαφέροντος (παροχή, στερεοπαροχή), διαιρέθηκαν σε δύο ίσα μέρη, με το δεύτερο ανεξάρτητο σετ δεδομένων να χρησιμοποιείται για επαλήθευση του μοντέλου. Στην περίπτωση των ενώσεων θρεπτικών (N-NO3 και P), ο περιορισμένος αριθμός παρατηρήσεων (σποραδικές μετρήσεις σε μία 5ετή περίοδο) οδήγησε σε βαθμονόμηση στην έξοδο της λεκάνης με χρήση όλου του δείγματος, ενώ η επαλήθευση έγινε με χρήση των ανάλογων δεδομένων στη Γότιστα, προσεγγιστικά την έξοδο της υπολεκάνης του ποταμού Μετσοβίτικου (Σχ. 8.1).

Τα διαθέσιμα δεδομένα παροχής και στερεοπαροχής προέρχονται από το πρόγραμμα μετρήσεων της ΔΕΗ. Οι στερεοπαροχές είναι διαθέσιμες μέχρι και το έτος 1977, οπότε και η καταγραφή σταμάτησε. Στη θέση Πλάκα σταμάτησε επίσης και η καταγραφή της στάθμης, αλλά και η διενέργεια υδρομετρήσεων λίγα χρόνια αργότερα. Σήμερα η ΔΕΗ καταγράφει σε συνεχή χρόνο τη στάθμη του νερού του ποταμού στη θέση Τσίμοβο, όπου διενεργεί και υδρομετρήσεις. Ημερήσια δεδομένα παροχής έχουμε στη διάθεσή μας μόνο στην εν λόγω θέση από το 1980 και μετά, ύστερα από επεξεργασία πρωτογενών δεδομένων και εξαγωγή ημερησίων παροχών που έγινε από τη Γεωργίου (2005) με κατάρτιση καμπυλών στάθμης - παροχής. Στη θέση Πλάκα, μόνο οι μηνιαίες παροχές είναι διαθέσιμες, όπως αποκτήθηκαν από τη ΔΕΗ τα τελευταία χρόνια για χρήση σε ερευνητικούς σκοπούς στο Εργαστήριο Υδρολογίας. Το ίδιο ισχύει και για τις στερεοπαροχές, οι οποίες διατίθενται σε μηνιαία βάση ύστερα από διενέργεια μετρήσεων και κατάρτιση καμπυλών παροχής - στερεοπαροχής από τη ΔΕΗ. Όλες οι διαθέσιμες χρονοσειρές μηνιαίας παροχής και στερεοπαροχής στις δύο θέσεις παρατίθενται από τη Γεωργίου (2005) στο Παράρτημα της εργασίας της και διατίθενται στις βάσεις δεδομένων του Εργαστηρίου, έχοντας τύχει χρήσης για ερευνητικούς σκοπούς κατά το παρελθόν. Η αξιοποίηση των μηνιαίων χρονοσειρών των μεταβλητών

κρίνεται επαρκής για το σκοπό της παρούσας εργασίας. Για τις μετρήσεις θρεπτικών θα γίνει συζήτηση στη συνέχεια.

Μεταξύ διαφόρων στατιστικών δεικτών για την αξιολόγηση της προγνωστικής ικανότητας των μοντέλων είναι ο δείκτης αποδοτικότητας Nash-Sutcliffe (Nash Sutcliffe Efficiency - *NSE*), ο συντελεστής προσδιορισμού (coefficient of determination - R^2), η ποσοστιαία απόκλιση (Percent BIAS - *PBIAS*) και ο λόγος του μέσου τετραγωνικού σφάλματος προς την τυπική απόκλιση των μετρήσεων (Root mean square error - Standard deviation of measured data Ratio - *RSR*). Οι δείκτες αυτοί υπολογίστηκαν κατά τη σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών παροχής και στερεοπαροχής στις θέσεις Τσίμοβο και Πλάκα. Παρόλο που οι αποδεκτές τιμές των εν λόγω δεικτών εξαρτώνται πάντα από το εκάστοτε πρόβλημα, οι Moriasi et al. (2007) έχουν κάνει μία ενδελεχή επισκόπηση των στατιστικών μέτρων για την αξιολόγηση, μεταξύ άλλων, και του μοντέλου SWAT και συμπέραναν ότι η προγνωστική ικανότητα του μοντέλου σε μηνιαίο βήμα μπορεί να κριθεί επιτυχής όταν ο δείκτης *NSE* είναι μεγαλύτερος από 0,50, ο *RSR* < 0,70 και όταν ο *PBIAS* δηλώνει ποσοστιαία απόκλιση μεταξύ αθροίσματος προσομοιωμένων και παρατηρημένων τιμών, ± 25% για την παροχή, ± 55% για τη στερεοπαροχή και ± 70% για τις μετρήσεις θρεπτικών του N και του P.

Ο δείκτης *NSE* είναι μία κανονικοποιημένη στατιστική έκφραση που εκτιμά τη σύγκλιση της προσομοιωμένης με την παρατηρημένη χρονοσειρά και δίνεται από την εξίσωση (Nash and Sutcliffe, 1970):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Q_{obs,i} - Q_{sim,i}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(Q_{obs,i} - \overline{Q}_{obs}\right)^2} \tag{8.1}$$

όπου: Q_{sim}, η προσομοιωμένη χρονοσειρά, Q_{obs}, η παρατηρημένη χρονοσειρά, $\overline{Q}_{obs}$, ο αριθμητικός μέσος όρος της παρατηρημένης χρονοσειράς και *n* το μήκος τους. Η βέλτιστη και ταυτόχρονα μέγιστη τιμή του δείκτη είναι η μονάδα και λαμβάνεται όταν οι παρατηρημένες τιμές ταυτίζονται πλήρως με τις προσομοιωμένες. Ο δείκτης δεν έχει κάτω όριο δηλαδή λαμβάνει και αρνητικές τιμές. Επίσης, εκτός της απόκλισης των δύο χρονοσειρών, λαμβάνει υπόψη του και τη διασπορά του δείγματος με χρήση της απόκλισης των παρατηρημένων τιμών από το μέσο όρο τους, στον παρονομαστή.

Ο δείκτης *PBIAS* μετρά τη μέση τάση των προσομοιωμένων τιμών να είναι μεγαλύτερες ή μικρότερες απ' ότι οι αντίστοιχες παρατηρημένες και έχει τη δυνατότητα να

καταδεικνύει ξεκάθαρα την μικρή αποδοτικότητα ή προγνωστική ικανότητα του μοντέλου (Gupta et al., 1999). Η βέλτιστη τιμή του δείκτη είναι το 0, με κοντινές τιμές σε αυτό να προδίδουν επιτυχή και ακριβή προσομοίωση, ενώ οι θετικές τιμές υποδηλώνουν ότι το μοντέλο έχει την τάση να υποεκτιμά τις πραγματικές τιμές των μεταβλητών και οι αρνητικές το αντίστροφο (Gupta et al., 1999). Ο δείκτης έχει τη μορφή της εξίσωσης:

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Q_{obs,i} - Q_{sim,i}\right)*100}{\sum_{i=1}^{n}\left(Q_{obs,i}\right)} \tag{8.2}$$

όπου: *PBIAS* είναι η ποσοστιαία απόκλιση μεταξύ των δεδομένων, ενώ τα Q_{sim} και Q_{obs} έχουν περιγραφεί πιο πάνω.

Το μέσο υπολειμματικό σφάλμα (*RMSE*) είναι από τους πιο συχνά χρησιμοποιούμενους στατιστικούς δείκτες με τις μικρές τιμές να υποδηλώνουν καλή αποδοτικότητα του μοντέλου (Moriasi et al., 2007). Ωστόσο, οι τιμές που υπολογίζει η στατιστική αυτή φόρμουλα εξαρτώνται από την κλίμακα των μεγεθών στα οποία αναφέρεται. Συνεπώς, η διαίρεση με την τυπική απόκλιση των παρατηρήσεων διαμορφώνει το δείκτη *RSR*, που είναι πιο κατατοπιστικός μιας και ενσωματώνει μια διαδικασία κανονικοποίησης. Ο δείκτης *RSR* μεταβάλλεται από την τιμή 0, η οποία αντιστοιχεί σε μηδενική τιμή του *RMSE* ή μηδενική απόκλιση των σφαλμάτων και επομένως τέλεια προσομοίωση, έως μία μεγάλη θετική τιμή. Όσο μικρότερο είναι το *RSR*, τόσο μικρότερο το *RMSE*, και επομένως τόσο καλύτερη η προγνωστική ικανότητα του μοντέλου. Ο δείκτης *RSR* υπολογίζεται από το λόγο του *RMSE* και της τυπικής απόκλισης των δεδομένων της παρατηρημένης χρονοσειράς ($STDEV_{obs}$), όπως φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(Q_{obs,i} - Q_{sim,i}\right)^2}}{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(Q_{obs,i} - \overline{Q}_{obs}\right)^2}} \tag{8.3}$$

Ο συντελεστής προσδιορισμού (R^2) εκφράζει το βαθμό συγγραμικότητας ανάμεσα στην προσομοιωμένη και παρατηρημένη χρονοσειρά. Ο συντελεστής κυμαίνεται από 0 έως 1, με τις υψηλές τιμές να υποδηλώνουν μικρή απόκλιση σφάλματος, ενώ τυπικές τιμές μεγαλύτερες του 0,5 θεωρούνται αποδεκτές (Santhi et al., 2001). Οι στατιστικοί δείκτες που υπολογίστηκαν με σύγκριση των μηνιαίων χρονοσειρών παροχής και στερεοπαροχής στις

θέσεις Τσίμοβο και Πλάκα συνοψίζονται στον Πίνακα 8.6. Οι τιμές στις παρενθέσεις αναφέρονται στην περίοδο επαλήθευσης δηλαδή στο δεύτερο μισό του συνολικού μήκους των χρονοσειρών. Το τελευταίο αναγράφεται στη δεύτερη στήλη του Πίνακα για κάθε μεταβλητή και θέση.

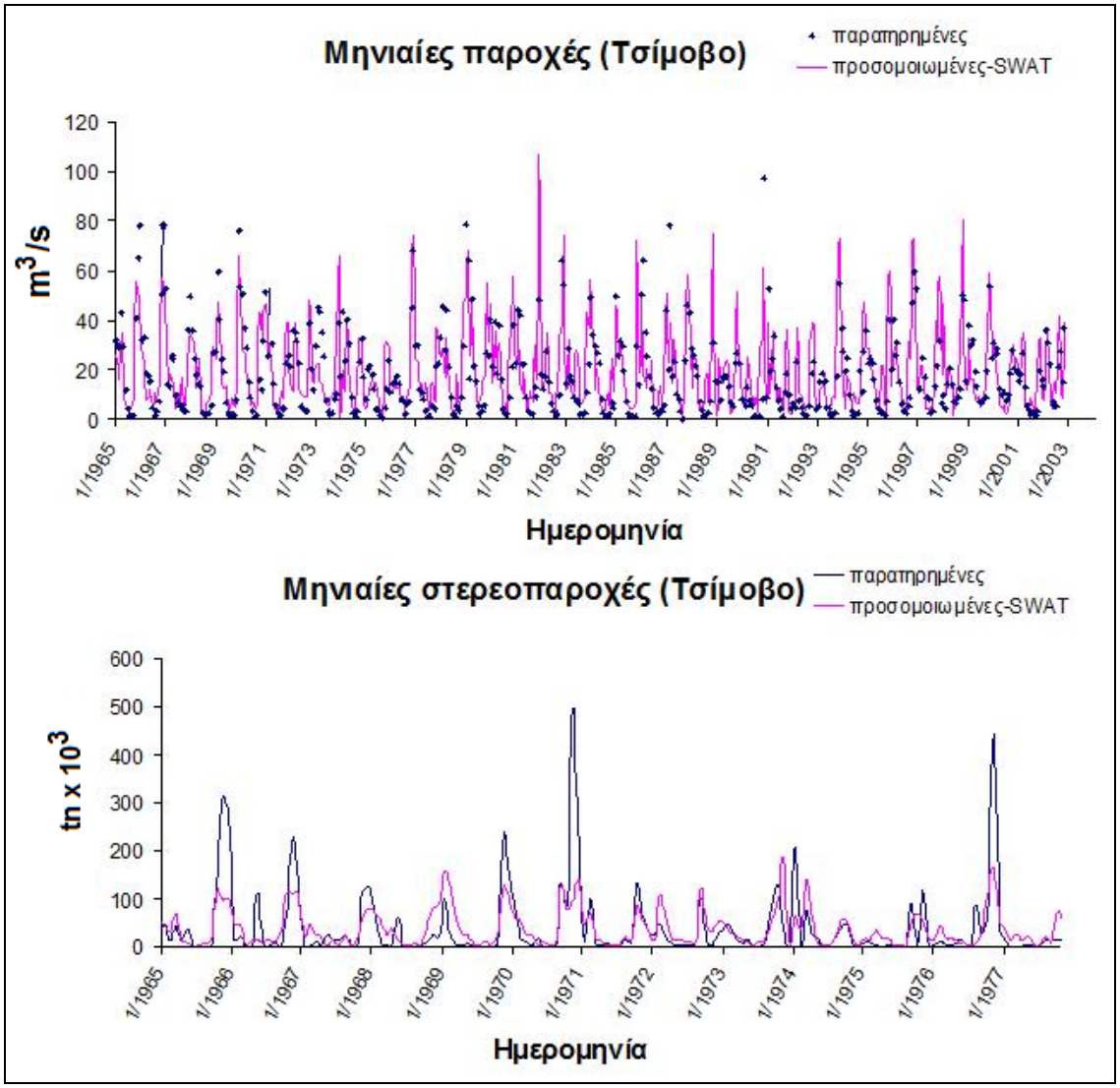
Πίνακας 8.6 Στατιστικά κριτήρια σύγκρισης παρατηρημένων και προσομοιωμένων μηνιαίων χρονοσειρών παροχής και στερεοπαροχής στο Τσίμοβο και στην Πλάκα.

Θέση ποταμού	**Μεταβλητή (διάστημα με διαθέσιμα δεδομένα)**	**Στατιστικοί Δείκτες**			
		NSE	***RSR***	***PBIAS* (%)**	R^2
Τσίμοβο	Παροχή (1964-2002)	0,58 (0,51)	0,65 (0,73)	-3,94 (-14,69)	0,88 (0,86)
	Φερτά (1965-1977)	0,387 (0,464)	0,68 (0,72)	12,66 (-11,67)	0,81 (0,83)
Πλάκα (έξοδος)	Παροχή (1964-1980)	0,683 (0,615)	0,56 (0,62)	13,81 (1,08)	0,92 (0,90)
	Φερτά (1965-1977)	0,346 (0,280)	0,70 (0,74)	20,71 (10,02)	0,82 (0,81)

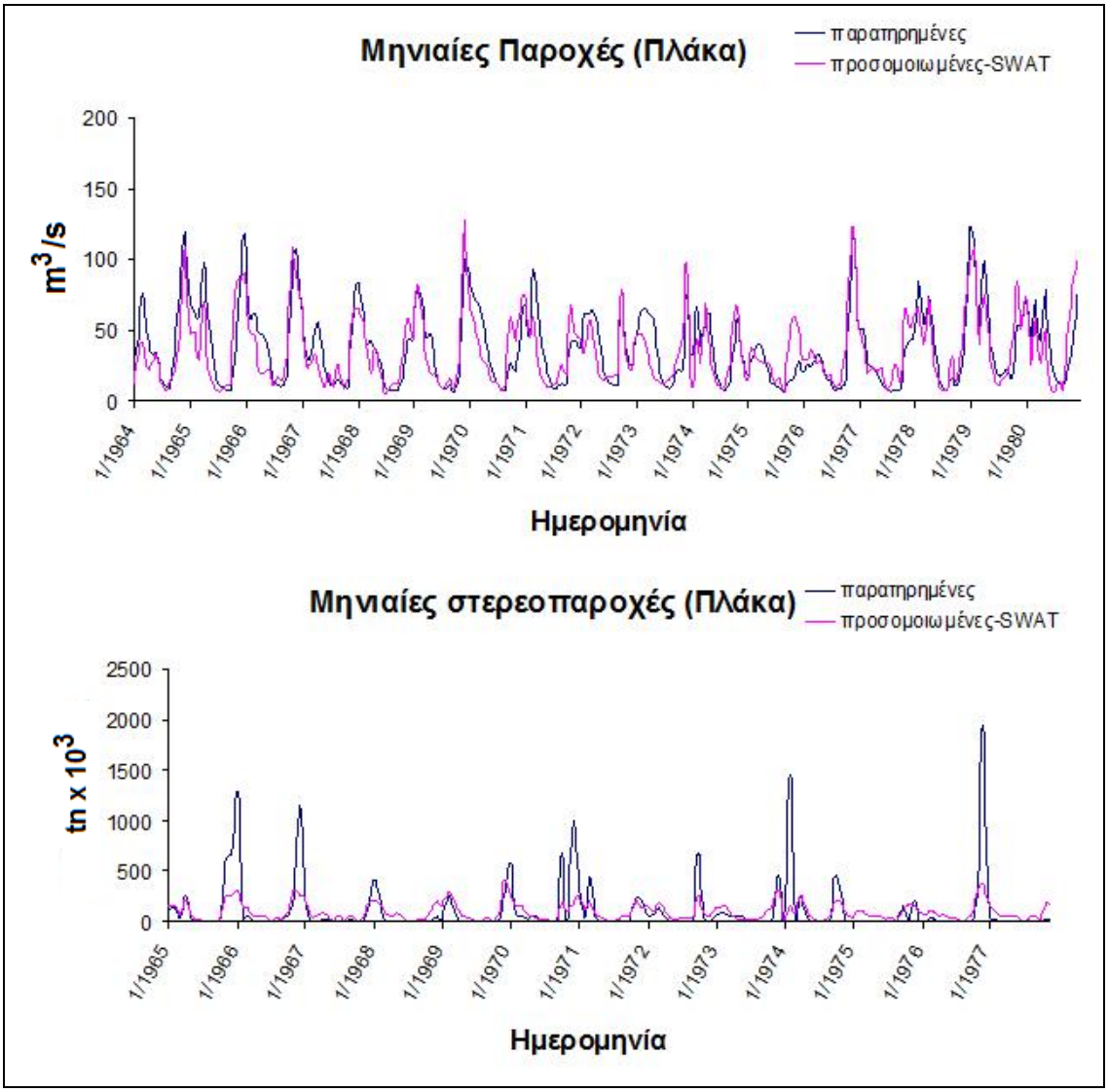
Για τις παροχές και στερεοπαροχές, ο δείκτης *PBIAS* καταδεικνύει ότι το μέσο μέγεθος των προσομοιωμένων τιμών είναι πολύ κοντά σε εκείνο των παρατηρημένων. Η μεγαλύτερη απόκλιση παρατηρείται κατά την περίοδο βαθμονόμησης στη θέση Πλάκα, όπου το μοντέλο υποεκτίμησε την παρατηρημένη χρονοσειρά κατά περίπου 20%, ωστόσο, όπως θα φανεί και παρακάτω οι μετρήσεις στη Πλάκα ήταν ιδιαίτερα υψηλές για κάποιους μήνες. Ο δείκτης R^2 συστηματικά δηλώνει την ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των χρονοσειρών με τιμές πάντα ανώτερες του 0,80. Ο δείκτης *NSE* υπολογίστηκε πάνω από 0,5 για τις παροχές στο Τσίμοβο και την Πλάκα, ενώ κατά την περίοδο επαλήθευσης βρέθηκε λίγο μικρότερος απ' ότι στην περίοδο βαθμονόμησης. Για τις στερεοπαροχές, ο δείκτης δεν ξεπέρασε την τιμή αυτή σε κάποια θέση υποδηλώνοντας ότι τα αποτελέσματα δεν είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικά (Moriasi et al., 2007). Ωστόσο, αυτές οι τιμές μπορούν να αποδοθούν στην αδυναμία να προσομοιωθεί ένας μικρός αριθμός αιχμών του διαστήματος προσομοίωσης, κάτι που επιδρά σημαντικά στον στατιστικό δείκτη. Λαμβάνοντας υπόψη την ποιότητα των παρατηρημένων δεδομένων και το μικρό μήκος της διαθέσιμης χρονοσειράς μετρήσεων, καθώς και προηγούμενες προσπάθειες βαθμονόμησης του μοντέλου ως προς τις στερεοπαροχές (Panagopoulos and Mimikou, 2006· Panagopoulos et al., 2008), θεωρούμε τα αποτελέσματα αυτά οριακά επιτυχή και αποδεκτά. Άλλωστε, ο δείκτης *PBIAS* παρέχει την απόδειξη ότι το SWAT μπορεί επιτυχώς να προγνώσει το μέγεθος της στερεοπαροχής σε υπερετήσια βάση. Τέλος, ο δείκτης *RSR* λαμβάνει τιμές κάτω των επιτρεπτών ανώτατων ορίων όπως τέθηκαν από τους Moriasi et al. (2008), με κάποιες εξαιρέσεις, όπου όμως οι αποκλίσεις είναι πολύ μικρές. Οι τιμές που αντιστοιχούν στην επαλήθευση (παρενθέσεις) είναι πάντα συγκρίσιμες

με εκείνες της βαθμονόμησης και σε ορισμένες περιπτώσεις καλύτερες. Αυτό επιβεβαιώνει την προγνωστική ικανότητα του μοντέλου σε ανεξάρτητες περιόδους και ενισχύει τις επιλογές ρύθμισης των παραμέτρων του κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης.

Η γραφική σύγκριση των χρονοσειρών παρουσιάζεται στα Σχήματα 8.8 και 8.9 για τις θέσεις Τσίμοβο και Πλάκα αντίστοιχα, με διαδοχική απεικόνιση παροχής και στερεοπαροχής για ολόκληρο το διάστημα με διαθέσιμα δεδομένα (βαθμονόμηση και επαλήθευση). Η απεικόνιση βοηθά στο να εντοπιστούν πιθανές έντονες αποκλίσεις και διαφορές στις αιχμές και στο γενικότερο σχήμα των κλάδων των παροχογραφημάτων και στερεοπαροχογραφημάτων.



Σχήμα 8.8 Προσομοιωμένες και παρατηρημένες παροχές (πάνω) και στερεοπαροχές (κάτω) στη θέση Τσίμοβο για ολόκληρο το διάστημα με διαθέσιμα δεδομένα.



Σχήμα 8.9 Προσομοιωμένες και παρατηρημένες παροχές (πάνω) και στερεοπαροχές (κάτω) στη θέση Πλάκα (έξοδος) για ολόκληρο το διάστημα με διαθέσιμα δεδομένα.

Όπως φαίνεται στο πάνω μέρος των σχημάτων, μεταξύ των μηνιαίων προσομοιωμένων και παρατηρημένων παροχών υπάρχει πολύ ικανοποιητική σύγκλιση και στις δύο θέσεις με διαθέσιμα δεδομένα. Αντίθετα, στο κάτω μέρος, η γραφική σύγκριση των στερεοπαροχών προδίδει την προαναφερθείσα αδυναμία του μοντέλου να προβλέψει έναν μικρό αριθμό (4-5) πολύ μεγάλων καταγεγραμμένων αιχμών εντός του διαστήματος προσομοίωσης. Από την άλλη όμως, το γενικότερο σχήμα των στερεοπαροχογραφημάτων σε όλη την περίοδο σύγκρισης προσεγγίζει πολύ ικανοποιητικά το παρατηρημένο, με το μοντέλο να αποδεικνύεται πολύ ικανό να προσομοιώσει τις εποχιακές διακυμάνσεις που δηλώνουν οι μετρήσεις πεδίου. Η αναντιστοιχία ωστόσο στις λίγες αυτές αιχμές, που άλλωστε είναι κυρίως υπεύθυνη για την εξαγωγή τιμών των στατιστικών δεικτών με οριακή αποδοχή,

αποδίδεται περισσότερο σε πιθανές λανθασμένες παρατηρήσεις παρά σε ανεπάρκεια προγνωστικής ικανότητας του μοντέλου. Θεωρείται άλλωστε σίγουρο ότι οι μηνιαίες αυτές πολύ μεγάλες στερεοπαροχές προέκυψαν από κάποια καμπύλη παροχής-στερεοπαροχής, η οποία εμπεριέχει μεγάλη αβεβαιότητα για τις μεγάλες τιμές όπου προφανώς χρειάζεται επέκταση με βάση υποκειμενικά κριτήρια.

Τα δεδομένα καταγραφής της συγκέντρωσης N-NO3 και P στη λεκάνη του Αράχθου αναφέρονται στην περίοδο 1996-2000 και έχουν γίνει από την ΚΥΥ του ΥΠΕΧΩΔΕ με συλλογή δειγμάτων σε μηνιαία βάση στις θέσεις Πλάκα και Γότιστα (Σχ. 8.1). Οι αναλύσεις των δειγμάτων έγιναν στο Γενικό Χημείο του Κράτους. Τα δεδομένα καλύπτουν μόνο 25-35 από τους 60 μήνες της 5ετούς χρονικής περιόδου (διαθεσιμότητα 3-9 δειγμάτων ανά έτος και θέση). Η άντληση των στοιχείων αφορούσε στις συγκεντρώσεις $NO3^-$ και P, ενώ αποτελέσματα για το N δεν ήταν διαθέσιμα[5]. Κατά το χρονικό διάστημα διαθεσιμότητας μετρήσεων θρεπτικών (1996-2000) δεν διατίθενται ωστόσο μετρήσεις παροχής στις θέσεις Πλάκα και Γότιστα, κάτι που καθιστά ανέφικτη την εξαγωγή φορτίων θρεπτικών στις εν λόγω θέσεις ποταμού. Έτσι, γίνεται απ' ευθείας χρήση των καταγεγραμμένων συγκεντρώσεων και σύγκρισή τους με τις προσομοιωμένες συγκεντρώσεις του μοντέλου, οι οποίες υπολογίστηκαν ως πηλίκο μηνιαίου φορτίου θρεπτικών προς μέση μηνιαία παροχή.

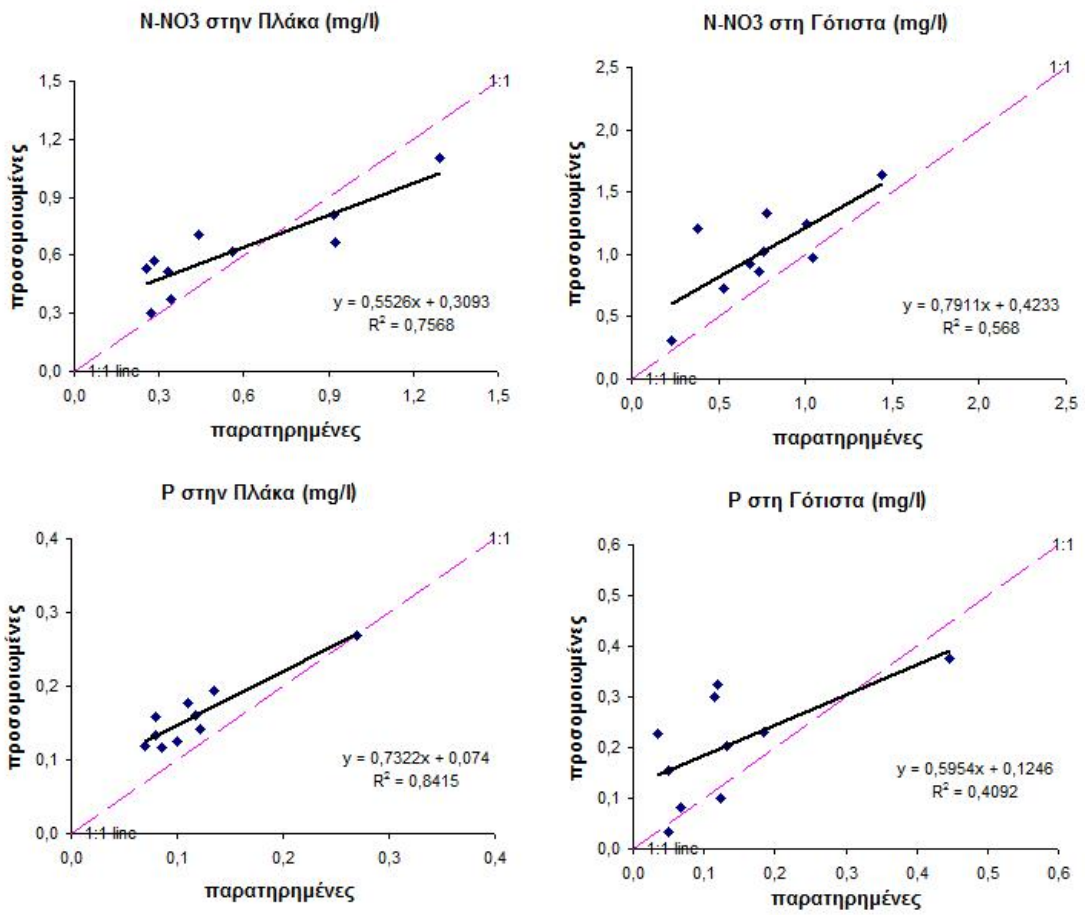
Οι μετρήσεις θρεπτικών του ποταμού είναι φανερό ότι είναι πολύ λίγες ώστε να υπολογιστούν με αξιοπιστία οι στατιστικοί δείκτες που χρησιμοποιήθηκαν για τις παροχές και τις στερεοπαροχές. Μία ανάλυση έγινε αρχικά για να διαπιστωθεί αν οι μετρήσεις είναι αντιπροσωπευτικές. Συγκεκριμένα, με βάση τις ημερομηνίες κατά τις οποίες συλλέχθηκαν τα δεδομένα θρεπτικών ελέγχθηκε η προσπίπτουσα βροχόπτωση στη λεκάνη, καθώς και η παροχή στο Τσίμοβο. Όπως διαπιστώθηκε, σχεδόν όλες οι μετρήσεις, ακόμα και εκείνες κατά του υγρούς μήνες είχαν γίνει υπό χαμηλές συνθήκες ροής, ενώ το ύψος βροχόπτωσης των

---

[5] Η συλλογή των δεδομένων συγκέντρωσης $NO3^-$ και P έγινε από τον ίδιο το συγγραφέα με καθημερινές επισκέψεις στην Κεντρική Υπηρεσία Υδάτων (ΚΥΥ) του πρώην ΥΠΕΧΩΔΕ (Πατησίων 42) τον Ιούνιο του 2006. Το πρόγραμμα συλλογής και ανάλυσης δειγμάτων νερού δεν περιλαμβάνει διαθέσιμα στοιχεία για το ολικό N. Αυτό αφορά όλη την ελληνική επικράτεια στην οποία έγιναν συστηματικές μετρήσεις κατά το χρονικό διάστημα 1996-2000, και όχι μόνο την περιοχή της λεκάνης του Αράχθου. Η διάθεσή τους ήταν εφικτή μέσω της ανάγνωσης τευχών (ένα για κάθε μήνα), που η Υπηρεσία διέθετε στα αρχεία της και τα οποία είχαν συνταχθεί από το Γενικό Χημείο του Κράτους για λογαριασμό της ΚΥΥ. Υπήρξε δυσκολία στην ανεύρεση των τευχών αυτών (δεν ήταν οργανωμένα) και τελικά δεν βρέθηκαν όλα, παρόλο που οι υπάλληλοι ισχυρίζονταν ότι οι μετρήσεις ήταν συστηματικές σε μηνιαία βάση. Επιπλέον, σε κάποια τεύχη απουσίαζαν μετρήσεις για κάποιο από τα δύο ή και για τα δύο στοιχεία σε μία ή και στις δύο θέσεις ενδιαφέροντος (Πλάκα και Γότιστα). Μετά το 2000, το πρόγραμμα σταμάτησε και έκτοτε μόνο εποχιακές μετρήσεις είναι διαθέσιμες σε επιλεγμένες θέσεις ελληνικών ποταμών, όχι όμως σε θέσεις ενδιαφέροντος της περιοχής μελέτης της διατριβής.

προηγούμενων ημερών ήταν μηδενικό ή σχετικά μικρό. Το συμπέρασμα από αυτόν τον έλεγχο ήταν ότι τα δεδομένα δεν είναι ιδιαίτερα αντιπροσωπευτικά μιας και δεν καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα υδρολογικών συνθηκών. Η αντιπροσωπευτικότητα των μετρήσεων θα επέβαλλε τη συλλογή δειγμάτων και υπό συνθήκες υψηλής ροής, όταν η απόπλυση του εδάφους είναι μεγάλη και οι ποσότητες των θρεπτικών που μεταφέρονται δυσανάλογα μεγαλύτερες σε σχέση με την υπόλοιπη περίοδο. Αν και δε μπορεί κανείς να βγάλει ασφαλή συμπεράσματα, πιστεύεται ότι οι συγκεντρώσεις υποεκτιμούν την πραγματικότητα και δεν μπορούν ικανοποιητικά να αντιπροσωπεύσουν τις μηνιαίες συγκεντρώσεις του ποταμού. Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξαν οι Tzoraki and Nikolaidis (2007) μετά από ανάλυση δειγμάτων αιωρούμενων στερεών σε μία λεκάνη στη Βόρεια Πελοπόννησο. Τα ζεύγη τιμών διατάχτηκαν αρχικά σε άξονες και η χαμηλή συσχέτιση ενίσχυσε την πεποίθηση περί μη επαρκούς αντιπροσωπευτικότητας των μετρήσεων. Επιλέχτηκε έτσι, η ομαδοποίηση των μετρήσεων ανά έτος σε μετρήσεις υγρής και ξηρής περιόδου με σκοπό την αύξηση της αντιπροσωπευτικότητάς τους. Από τα αποτελέσματα του μοντέλου, υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες εποχιακές συγκεντρώσεις και τελικά συγκρίθηκαν εννέα παρατηρημένες με εννέα προσομοιωμένες τιμές συγκεντρώσεων για κάθε μία από τις δύο ενώσεις θρεπτικών.

Στις περιπτώσεις όπου μόνο ένα σύνολο από ακανόνιστες μετρήσεις είναι διαθέσιμο, ο συνήθης τρόπος σύγκρισης είναι η γραφική απεικόνιση που συνήθως βοηθά στο να εξαχθούν συμπεράσματα για τη συσχέτιση, αλλά και για το αν οι προσομοιωμένες τιμές βρίσκονται εντός του εύρους διακύμανσης των παρατηρημένων. Τα εννέα ζεύγη τιμών διατάχτηκαν σε διπλό άξονα μαζί με τη γραμμή 1:1 για να εντοπιστεί πιθανή απόκλιση μεταξύ τους (Moriasi et al., 2007). Επιπλέον, η ευθεία της συσχέτισης μπορεί να καταδείξει πόσο καλά προσομοιάζουν, ενώ ο συντελεστής προσδιορισμού να υποδηλώσει την ισχύ της συσχέτισης. Οι παρατηρημένες και προσομοιωμένες εποχιακές συγκεντρώσεις στην έξοδο της λεκάνης παρουσιάζονται στο Σχήμα 8.10 αριστερά, ενώ οι αντίστοιχες στη θέση Γότιστα δεξιά. Η δεύτερη σύγκριση έγινε πάλι με εποχιακές τιμές συγκεντρώσεων (υγρή και ξηρή περίοδος) και αποτελεί την προσπάθεια επαλήθευσης της προγνωστικής ικανότητας του μοντέλου σε εποχιακή χρονική βάση σε μία ανεξάρτητη θέση εντός της λεκάνης.



Σχήμα 8.10 Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων εποχιακών συγκεντρώσεων θρεπτικών στην Πλάκα (αριστερά) και στη Γότιστα (δεξιά).

Με μια πρώτη ματιά τα διαγράμματα φανερώνουν θετική συσχέτιση και συγκρίσιμα μεγέθη μεταξύ προσομοιωμένων και παρατηρημένων συγκεντρώσεων. Στην Πλάκα, τα ζεύγη τιμών συγκεντρώσεων του N-NO3 βρίσκονται πάνω ή κάτω από τη γραμμή 1:1, οπότε το μοντέλο δεν παρουσιάζει συστηματικά κάποια τάση να τις υποεκτιμά ή να τις υπερεκτιμά σε εποχιακή βάση. Όσο για τον P, υπάρχει μια συστηματική μικρή υπερεκτίμηση. Τα ζεύγη είναι ωστόσο συγκεντρωμένα κοντά στη γραμμή 1:1, με το μοντέλο να εκτιμά το μέγεθος των συγκεντρώσεων κοντά στην πραγματικότητα. Ο συντελεστής προσδιορισμού είναι επίσης αποδεκτός και για τα δύο είδη θρεπτικών στην έξοδο της λεκάνης. Αντίθετα, τα αποτελέσματα της επαλήθευσης στη Γότιστα κρίνονται λιγότερο επιτυχή. Το μοντέλο εκτίμησε υψηλότερες εποχιακές συγκεντρώσεις N-NO3 και P σε σχέση με τις παρατηρημένες, δεδομένου ότι τα περισσότερα ζεύγη βρίσκονται πάνω από τη γραμμή 1:1, παρόλο που κανένα δε βρέθηκε αρκετά μακριά από αυτή. Επιπρόσθετα, η συσχέτιση είναι αποδεκτή για το N-NO3 και κρίνεται οριακά αποδεκτή για τον P.

Με βάση τα προσομοιωμένα αποτελέσματα, οι μέσες συγκεντρώσεις N-NO3 και P της 5ετίας στην Πλάκα είναι 0,62 και 0,15mg/l αντίστοιχα, με τις αντίστοιχες παρατηρημένες τιμές να είναι 0,56 και 0,12mg/l. Στη Γότιστα το μοντέλο εκτίμησε τις εν λόγω συγκεντρώσεις ίσες με 1,02 και 0,19mg/l, με τις παρατηρημένες τιμές να είναι 0,75 και 0,14mg/l. Οι υψηλότερες τιμές για τις προσομοιωμένες τιμές συγκεντρώσεων στη Γότιστα αποδίδονται στις φορτίσεις από τη σημειακή πηγή ρύπανσης που βρίσκεται ακριβώς ανάντη και που ίσως υπερεκτιμήθηκαν κατά την παραμετροποίηση. Σε γενικές γραμμές η βαθμονόμηση και η επαλήθευση κρίνονται οριακά επιτυχείς σε εποχιακή και πλήρως αποδεκτές σε υπερετήσια βάση. Η μικρή υπερεκτίμησή τους στην Πλάκα και η πιο αισθητή στη Γότιστα μπορεί να θεωρηθούν ακόμα και επιθυμητές αν αναλογιστεί κανείς τα συμπεράσματα περί αντιπροσωπευτικότητας των μετρήσεων που αναλύθηκαν προηγούμενα. Η διερεύνηση των ΔΠ που θα γίνει στη συνέχεια θα βασιστεί ωστόσο σε μέσες υπερετήσιες τιμές φορτίου απωλειών ή συγκεντρώσεων (5 έτη), που σημαίνει ότι η προσομοίωση των συγκεντρώσεων θρεπτικών της υφιστάμενης κατάστασης στον Άραχθο από το μοντέλο SWAT μπορεί επαρκώς να υποστηρίξει την ικανοποίηση του βασικού αυτού στόχου της διατριβής.

8.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης υφιστάμενης κατάστασης

Ύστερα από τη βαθμονόμηση και επαλήθευσή του με βάση μετρήσεις παροχής, στερεοπαροχής και θρεπτικών σε δύο θέσεις ποταμού κάθε φορά, το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εκτιμήσεις σε κάθε άλλη χρονική περίοδο του διαστήματος προσομοίωσης. Στο σημείο αυτό επιλέγεται η πενταετία 2001-2005, ως το πιο πρόσφατο διάστημα της περιόδου προσομοίωσης για να παρουσιαστούν τα μέσα υδρομετεωρολογικά και ποιοτικά μεγέθη που εξήχθησαν από το μοντέλο. Άλλωστε, η ανάλυση που θα ακολουθήσει για την αποτελεσματικότητα των ΔΠ, θα βασιστεί επίσης στα μέσα ετήσια αποτελέσματα του μοντέλου σε αυτήν την περίοδο.

Σε αυτήν την περίοδο προσομοίωσης το μοντέλο υπολόγισε μία μέση ετήσια παροχή στη θέση Πλάκα, ίση με 36,7m^3/s, με τα 6m^3/s να προέρχονται από πηγές εκτός λεκάνης που εκφορτίζονται κατά μήκος του ποταμού. Η μέση ετήσια παροχή στη θέση Τσίμοβο υπολογίστηκε 20m^3/s, στη θέση Γότιστα (έξοδος ποταμού Μετσοβίτικου) 6,7m^3/s και στην έξοδο της λεκάνης του παραποτάμου Καλαρρύτικου (υπολεκάνη 25 - Σχ. 8.1) 11,2m^3/s. Τα 30,7m^3/s στην έξοδο της λεκάνης αντιστοιχούν σε ύψος απορροής 1030mm που προέκυψε από το μετασχηματισμό της βροχής σε απορροή εντός της λεκάνης με το 10% αυτού του ύψους να προέρχεται από λιώσιμο χιονιού, σύμφωνα με το μοντέλο. Η επιφανειακή απορροή σε ετήσια βάση, υπολογίστηκε με τη μέθοδο της SCS (USDA, Soil Conservation Service,

1972) ίση περίπου με 300mm. Η μέση ετήσια εξατμισοδιαπνοή της λεκάνης υπολογίστηκε για το διάστημα 2001-2005, 486mm με τη συνολική βροχόπτωση να είναι ίση με 1550mm.

Η μέση ετήσια στερεοπαροχή στην έξοδο της λεκάνης υπολογίστηκε 1,32Mtn/έτος, που αντιστοιχεί σε έναν μέσο ετήσιο ρυθμό διάβρωσης 14tn/ha στη λεκάνη. Στο Τσίμοβο η αντίστοιχη εκτίμηση του μοντέλου ήταν 538Ktn/έτος. Οι αποδόσεις φορτίων N και P στην έξοδο εκτιμήθηκαν 1900 και 263tn/έτος, που αντιστοιχούν σε μέσες ετήσιες απώλειες 20 και 2,8kg/ha από τα εδάφη της λεκάνης. Οι συγκεντρώσεις των στοιχείων N-NO3, N και P στην έξοδο υπολογίστηκαν 0,65, 1,5 και 0,22mg/l αντίστοιχα, με τη δεύτερη τιμή (αυτή του ολικού N) να μην προέρχεται από βαθμονόμηση του μοντέλου, ελλείψει παρατηρημένων δεδομένων για το N. Τα οργανικά φορτία που εμπεριέχονται στα ολικά φορτία θρεπτικών εκτιμήθηκαν περίπου στο 60% αυτών, ένα ποσοστό που φαίνεται λογικό για τα ελληνικά ποτάμια (Nikolaidis et al., 2009). Ο καταμερισμός των ολικών φορτίων που υπολογίστηκαν με βάση τις πηγές προέλευσής τους εντός της λεκάνης παρουσιάζεται στον Πίνακα 8.7.

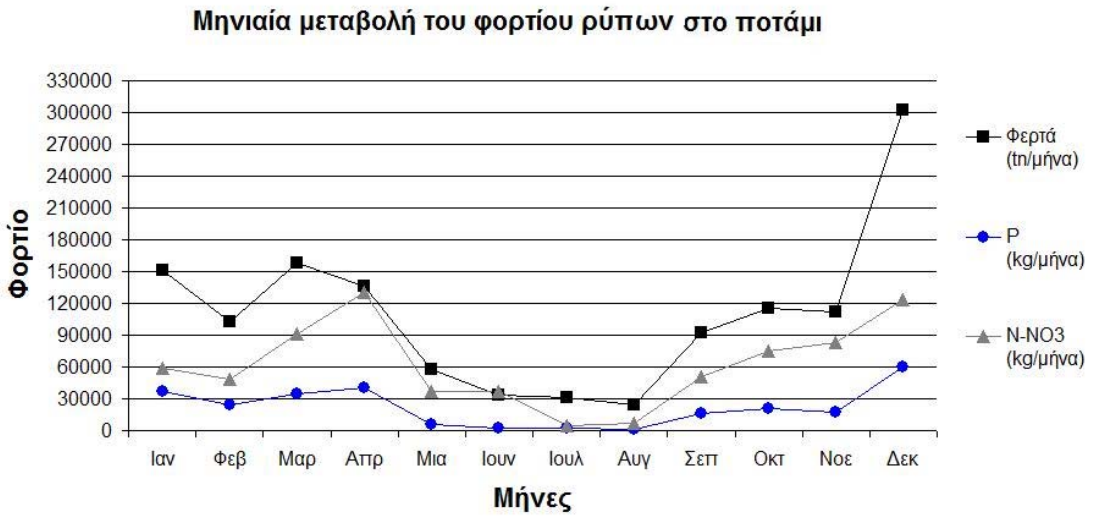
Πίνακας 8.7 Καταμερισμός ετήσιου φορτίου θρεπτικών στο υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης του Αράχθου με βάση τις πηγές προέλευσης (2001-2005).

Πηγές	**N (kg)**	**% ΣΦ**	**P (kg)**	**% ΣΦ**
Σημειακές	33367,0	1,8	11359,0	4,3
Αγροτικές Μη Σημειακές	1532455,2	80,5	218645,5	83,3
Φυσικές Μη Σημειακές	337055,8	17,7	32593,3	12,4
Συνολικά Φορτία (ΣΦ)	1902878,0	100,0	262597,8	100,0

Όπως φαίνεται στον πίνακα, οι αγροτικές μη σημειακές πηγές ρύπανσης είναι υπεύθυνες για περισσότερο από το 80% του φορτίου N και P στα επιφανειακά νερά, ενώ οι σημειακές συνεισφέρουν ελαφρά με ποσοστά περίπου 2 και 4% για τα δύο θρεπτικά αντίστοιχα. Αυτό είναι αποτέλεσμα της ανύπαρκτης βιομηχανικής δραστηριότητας στη λεκάνη. Οι φυσικές εκτάσεις (δάση) συνεισφέρουν ωστόσο με μη σημειακές φορτίσεις σε ένα σημαντικό ποσοστό που περίπου είναι 18% για το N και 12% για τον P. Τα τελευταία ποσοστά ενσωματώνουν ωστόσο και τις πολύ μικρές φορτίσεις από την αστική γη και κυρίως περιέχουν οργανικά φορτία θρεπτικών. Οι τιμές του πίνακα που αφορούν σε μη σημειακές πηγές, εξήχθησαν με άθροιση του μέσου ετήσιου φορτίου απωλειών από όλες τις ΥΜ κοινού τύπου χρήσης γης. Π.χ. οι αγροτικές πηγές εκφράζουν το άθροισμα του φορτίου απωλειών από όλες τις ΥΜ με αραβόσιτο, μηδική και βοσκότοπους.

Η εποχιακή συμπεριφορά της λεκάνης στη μεταφορά ρύπων προς το υδρογραφικό δίκτυο και στη μετέπειτα διόδευσή τους στην έξοδο φαίνεται στο Σχήμα 8.11. Πρόκειται για τα μέσα μηνιαία φορτία φερτών υλών, N-NO3 και P της περιόδου 2001-2005 που

καταλήγουν στην έξοδο της λεκάνης (Πλάκα). Στο εν λόγω σχήμα παρουσιάζονται μόνο οι μεταβλητές για τις οποίες το μοντέλο έτυχε βαθμονόμησης.

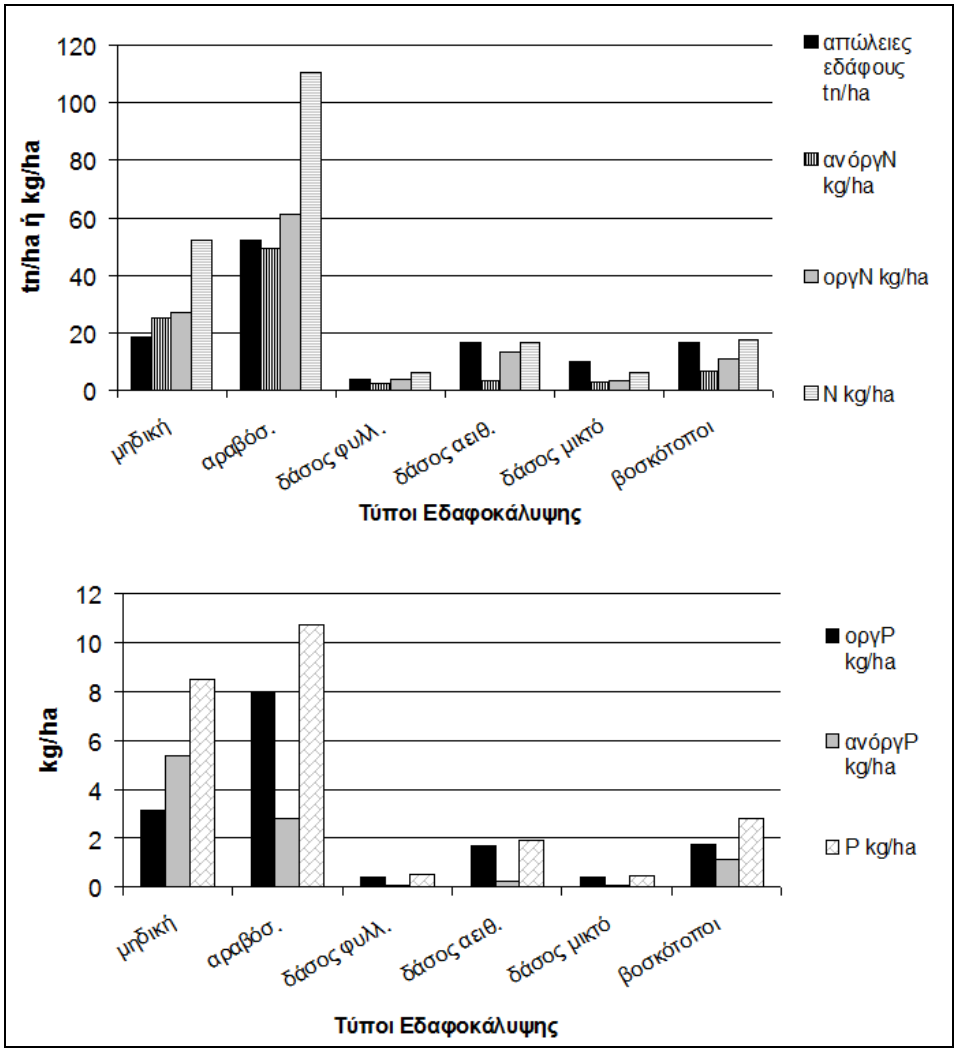


Σχήμα 8.11 Μέσες μηνιαίες αποδόσεις φορτίου φερτών (tn/μήνα), N-NO3 (kg/μήνα) και P (kg/μήνα) στην έξοδο της λεκάνης για την περίοδο 2001-2005.

Όπως εμφανώς καταγράφεται στο Σχήμα 8.11, το εύρος εντός του οποίου κυμαίνονται τα μηνιαία φορτία ρύπων στη λεκάνη του Αράχθου είναι αρκετά μεγάλο. Αυτό άλλωστε αναμένεται λόγω των ιδιαιτεροτήτων της μηνιαίας διακύμανσης της κατακρήμνισης, τυπικής του Μεσογειακού κλίματος. Τα φορτία στην έξοδο διαφέρουν σημαντικά μεταξύ υγρής και ξηρής περιόδου. Τα φερτά και ο P μεταφέρονται κατά πολύ μεγαλύτερο ποσοστό κατά τους χειμερινούς μήνες όταν η διάβρωση είναι δυσανάλογα μεγαλύτερη σε σχέση με τους υπόλοιπους. Ο P είναι στενά συνδεδεμένος με τη στερεομεταφορά στο SWAT, κάτι που αποτυπώνεται πλήρως στην παραπλήσια μορφή του μηνιαίου διαγράμματος των δύο ρύπων. Απ' την άλλη μεριά, τα φορτία N-NO3 διέπονται κυρίως από την απορροή (επιφανειακή και υποεπιφανειακή). Εκτός από τους χειμερινούς μήνες, όπου η απορροή είναι μεγάλη, οι απώλειες του στοιχείου και κατ' επέκταση τα φορτία στο ποτάμι είναι επίσης μεγάλα την άνοιξη λόγω τήξης του χιονιού στη λεκάνη του Αράχθου, κάτι που προσομοιώθηκε επαρκώς. Ο Απρίλιος είναι άλλωστε ο μήνας με τα μεγαλύτερα προσομοιωμένα φορτία N-NO3 στην έξοδο της λεκάνης. Για όλα τα είδη ρύπων, οι αποδόσεις φορτίων στην έξοδο είναι αξιοσημείωτα μικρότερες κατά την ξηρή περίοδο, κάτι που φαίνεται στο Σχήμα 8.11 από τις πολύ μικρές τιμές κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.

Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η ευαισθησία των διαφορετικών τύπων εδαφοκάλυψης στις απώλειες ρύπων από τα εδάφη εντός της λεκάνης. Ως κατανεμημένο μοντέλο, το SWAT υπολογίζει τις απώλειες αυτές για κάθε ΥΜ, οπότε η άθροιση τους ανά

τύπο εδαφοκάλυψης είναι μια εύκολη διαδικασία. Το Σχήμα 8.12 απεικονίζει τις μέσες ετήσιες απώλειες φερτών και όλων των μορφών θρεπτικών ανά τύπο εδαφοκάλυψης στη λεκάνη για την περίοδο 2001-2005.



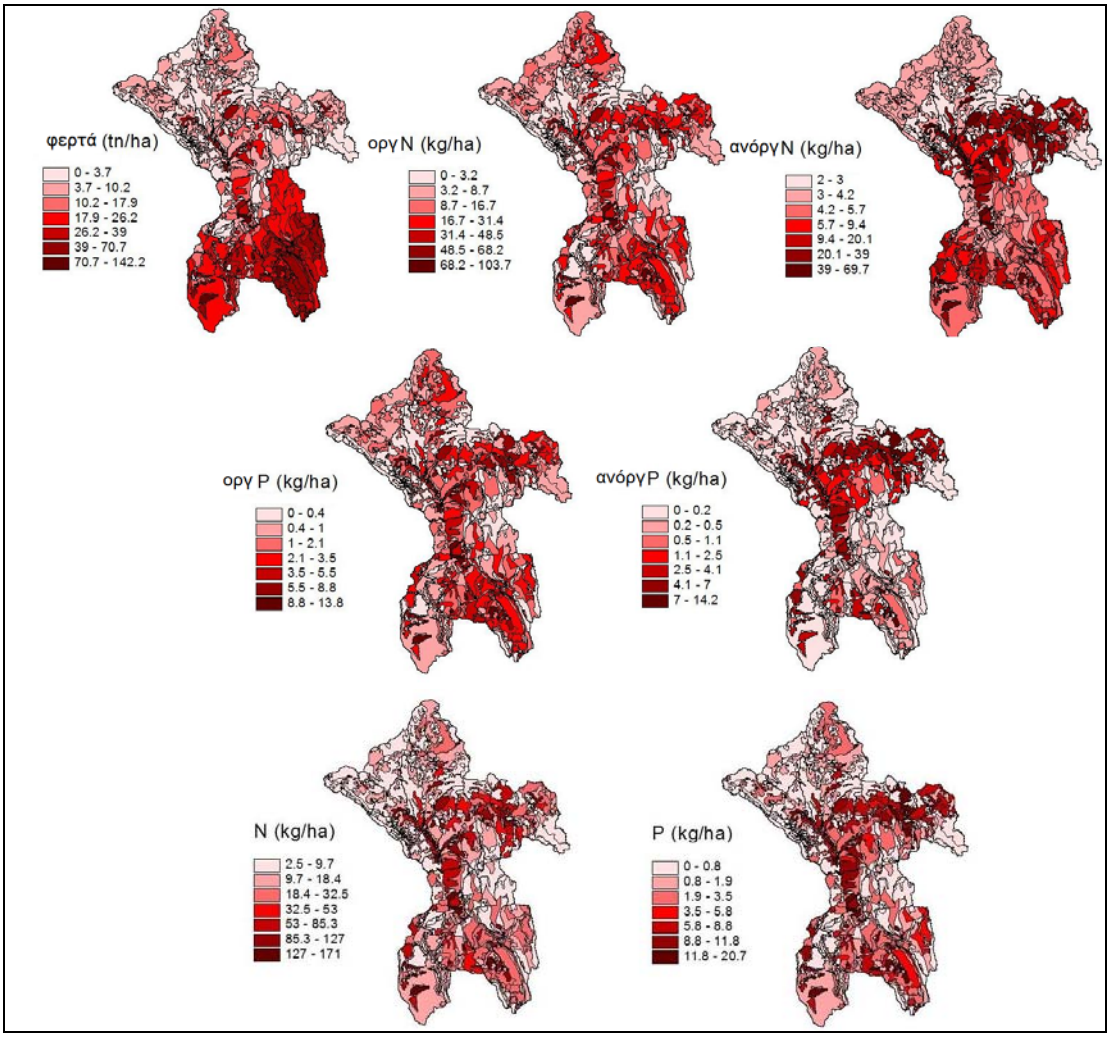
Σχήμα 8.12 Ετήσιες απώλειες εδάφους και θρεπτικών ανά τύπο εδαφοκάλυψης στη λεκάνη.

Από την απεικόνιση των απωλειών του Σχήματος 8.12 φαίνεται ξεκάθαρα ότι οι εκτάσεις αραβόσιτου διαβρώνονται σημαντικά και πολύ περισσότερο απ' ότι οι υπόλοιπες εκτάσεις εντός της λεκάνης. Ο μέσος ετήσιος ρυθμός απώλειας εδάφους από τις εκτάσεις αραβόσιτου είναι 50tn/ha, ενώ εκείνοι από τις εκτάσεις μηδικής και βοσκότοπων δεν φτάνουν ούτε καν στο ήμισυ αυτής της τιμής. Κάτι τέτοιο άλλωστε αναμένεται, δεδομένου ότι ο παράγοντας C_{USLE} για τον αραβόσιτο είναι μεγαλύτερος (Πίνακας 8.4). Το καθεστώς αυτό έχει αντίκτυπο και στις οργανικές μορφές του N και του P, οι οποίες είναι προσκολλημένες στα εδαφικά σωματίδια, ενώ η μεγάλη τους συνεισφορά στη διαμόρφωση των ολικών

φορτίων απωλειών N και P διαμορφώνει ανάλογη ευαισθησία των διαφόρων τύπων εδαφοκάλυψης και για τα φορτία αυτά. Επισημαίνεται ότι ως ανόργανο N, εννοείται σε συντριπτικό ποσοστό το N των $NO3^-$ (N-NO3).

Ωστόσο, οι απώλειες P από τις εκτάσεις μηδικής είναι επίσης μεγάλες (8,2kg/ha) επειδή η καλλιέργεια λαμβάνει σημαντικές ποσότητες φωσφορικής λίπανσης. Παρόλο επίσης που η καλλιέργεια λαμβάνει σε ετήσια βάση ποσότητες αζωτούχου λίπανσης κατά δύο τάξεις μεγέθους μικρότερες απ' ότι ο αραβόσιτος, οι απώλειες N είναι σημαντικές (50kg/ha) λόγω συνεχούς διαθεσιμότητας του στοιχείου στο έδαφος εξαιτίας της αζωτοδέσμευσης. Η φυσική αυτή διαδικασία προσομοιώθηκε στις εκτάσεις μηδικής με ρυθμό 287kg/ha/έτος, τιμή που συμφωνεί με εκτιμήσεις για τα ελληνικά εδάφη (Τζουραμάνη κ.α., 2008α), όπως άλλωστε και η προσομοιωμένη μέση ετήσια αποδόση της καλλιέργειας (12,03tn/ha). Οι απώλειες N και P από τις εκτάσεις αραβόσιτου υπολογίστηκαν 110 και 10,5kg/ha αντίστοιχα, ενώ η απόδοση της καλλιέργειας 11,66tn/ha/έτος. Στους βοσκότοπους, οι απώλειες εκτιμήθηκαν σε μικρότερα επίπεδα. Αν εξαιρεθεί η ευαισθησία τους στις απώλειες εδάφους, που είναι περίπου ίδια με τις εκτάσεις μηδικής (ίδιο C_{USLE} στον Πίνακα 8.4), όλες οι ενώσεις N και P εγκαταλείπουν τις εκτάσεις βοσκότοπων με μικρότερο ετήσιο ρυθμό. Αυτό βέβαια οφείλεται στις μικρότερες φορτίσεις των στοιχείων ανά μονάδα επιφάνειας, όπως παρουσιάστηκε στον Πίνακα 8.3, που φυσιολογικά δημιουργεί και μικρότερη διαθεσιμότητα στο έδαφος για μεταφορά στους υδάτινους αποδέκτες. Ωστόσο, αν ληφθεί υπόψη η συνολική έκταση των βοσκότοπων στη λεκάνη, που είναι περίπου 4πλάσια της αθροιστικής έκτασης που καταλαμβάνουν οι δύο καλλιέργειες, τότε οι συνολικές απώλειες είναι ιδιαίτερα σημαντικές.

Μεταξύ των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης της υφιστάμενης κατάστασης στη λεκάνη του Αράχθου που επιλέχθηκαν να παρουσιαστούν σ' αυτήν την ενότητα, είναι η απεικόνιση σε χάρτη των απωλειών εδάφους και θρεπτικών απ' όλες τις ΥΜ της λεκάνης. Οι τιμές απωλειών που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο σχήμα είναι άλλωστε οι συναθροίσεις των επιμέρους απωλειών από ΥΜ με κοινό τύπο εδαφοκάλυψης, οι οποίες διαφέρουν όμως ως προς τον εδαφικό τύπο, την τοπογραφία, το κλίμα και σε ορισμένες περιπτώσεις τη διαχείριση (π.χ. οι εκτάσεις βοσκότοπων που διαφοροποιούνται ως προς τον αριθμό ζώων). Η παρουσίαση των απωλειών που προέρχονται από τις 259 ΥΜ θα ήταν δύσκολο να γίνει είτε σε πινακοποιημένη, είτε σε μορφή γραφημάτων. Αντίθετα, αυτό που εξυπηρετεί περισσότερο είναι η απεικόνισή τους με τέτοιο τρόπο ώστε να τυγχάνουν συγκεκριμένης γεωαναφοράς, παρέχοντας τη δυνατότητα παρατήρησης της χωρικής διαφοροποίησής τους εντός της λεκάνης με ταυτόχρονη δυνατότητα εντοπισμού των πιο ευαίσθητων περιοχών. Το Σχήμα 8.13 παρέχει αυτά τα αποτελέσματα για όλες τις μορφές ρύπων του Σχήματος 8.12.



Σχήμα 8.13 Γεωγραφική διαφοροποίηση ετήσιων φορτίων απωλειών ρύπων από τις ΥΜ της λεκάνης του Αράχθου.

Σύμφωνα με το Σχήμα 8.13, τη μεγαλύτερη συνεισφορά στις απώλειες εδάφους παρουσιάζει το νότιο τμήμα της λεκάνης. Όπως περιγράφηκε προηγούμενα, το περατό έδαφος (ασβεστόλιθος), που κυρίως απαντάται σε αυτό το τμήμα, χαρακτηρίστηκε ως πιο ευπρόσβλητο στη διάβρωση με απόδοση της μεγαλύτερης τιμής του συντελεστή K_{USLE}. Επιπλέον, το τμήμα αυτό δέχεται μεγαλύτερη ετήσια βροχόπτωση, ενώ και οι κλίσεις εδάφους υπολογίστηκαν ελαφρά μεγαλύτερες στις υπολεκάνες που το απαρτίζουν. Τα τρία αυτά χαρακτηριστικά καθιστούν την περιοχή κατάντη Τσιμόβου πιο τρωτή στη διάβρωση και στην απώλεια εδάφους, κάτι που αποτυπώθηκε άλλωστε από τις μετρήσεις στερεοπαροχών στις θέσεις Τσίμοβο και Πλάκα. Επομένως, οι ΥΜ με τη μεγαλύτερη συνεισφορά στην ολική στερεοπαροχή του ποταμού βρίσκονται πιο κοντά στην έξοδο της λεκάνης, με τον μεγαλύτερο ρυθμό εδαφικής απώλειας να έχει εκτιμηθεί σε μία ΥΜ, ίσος με 142tn/ha/έτος. Ωστόσο, υπάρχουν διάσπαρτες ΥΜ σε όλη τη λεκάνη με εξίσου μεγάλη ευαισθησία και

προφανώς πρόκειται για εκτάσεις αραβόσιτου που διαβρώνονται αισθητά περισσότερο από κάθε άλλο τύπο εδαφοκάλυψης.

Όσον αφορά τα θρεπτικά, η εικόνα είναι άλλοτε ελαφρώς και άλλοτε ισχυρώς διαφορετική. Στην περίπτωσή τους, ένας ακόμα παράγοντας, η φόρτιση από τις αγροτικές δραστηριότητες καθορίζει μαζί με τους υπόλοιπους φυσικούς παράγοντες τη γεωγραφική διαφοροποίηση των απωλειών εντός της λεκάνης. Το SWAT υπολόγισε σημαντικά μεγαλύτερες απώλειες N και P, ειδικά των ανόργανων μορφών, από τις αγροτικές ΥΜ οι οποίες λαμβάνουν σημαντικές ποσότητες θρεπτικών είτε με χημική λίπανση, είτε με εναποτιθέμενη κοπριά (βοσκότοποι). Οι γεωμορφολογικοί και οι υδρομετεωρολογικοί παράγοντες είναι αυτοί που μετέπειτα καθορίζουν το μέγεθος των απωλειών μεταξύ ΥΜ με την ίδια αγροτική χρήση. Είναι φανερό και από τους έξι χάρτες που απεικονίζουν τις απώλειες θρεπτικών, ότι οι περιοχές με τη μεγαλύτερη συνεισφορά βρίσκονται τώρα στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης και σε διάσπαρτες ΥΜ είτε στο νότιο τμήμα είτε στα βορειοανατολικά. Είναι αναμενόμενο ότι οι δύο καλλιέργειες (αραβόσιτος και μηδική) συνεισφέρουν σημαντικά ανά μονάδα επιφάνειας σε θρεπτικά, ανεξαρτήτως θέσης εντός της λεκάνης, μιας και οι φορτίσεις τέθηκαν σταθερές σε όλη τους την έκταση. Από τις εκτεταμένες εκτάσεις βοσκότοπων, αυτές που συνεισφέρουν περισσότερο είναι προφανώς εκείνες με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση ζωικού κεφαλαίου. Τελικά, το μοντέλο προσομοίωσε μέγιστες απώλειες N και P σε ΥΜ, ίσες με 171 και 21kg/ha/έτος αντίστοιχα. Ωστόσο, αν κάποιος παρατηρήσει τους χάρτες με προσοχή, έχει μεγάλο ενδιαφέρον να εντοπίσει τις σημαντικές διαφορές που μπορεί να υπάρχουν μεταξύ απωλειών διαφορετικών ενώσεων θρεπτικών από τις ίδιες ΥΜ. Το γεγονός αυτό αποδίδεται είτε στην ανομοιόμορφη φόρτιση των δύο στοιχείων, είτε στη διαφορετικότητα της συμπεριφοράς των ΥΜ στις απώλειες τους, που επιβάλλεται από τους μηχανισμούς μεταφοράς τους στα επιφανειακά νερά.

Ο εντοπισμός των περιοχών με τη μεγαλύτερη ανά μονάδα έκτασης συνεισφορά στο ρυπαντικό φορτίο του ποταμού είναι γενικά ένας στόχος που προσεγγίζεται μέσω μιας πολύπλοκης διαδικασίας, δεδομένου ότι ο ερευνητής για να τον επιτύχει πρέπει να λάβει υπόψη του τους τοπογραφικούς, εδαφικούς, κλιματολογικούς και διαχειριστικούς παράγοντες και τη διαφοροποίησή τους εντός της λεκάνης. Προς διευκόλυνσή μας, το κατανεμημένο μοντέλο λεκάνης απορροής SWAT ποσοτικοποίησε τη συνδυαστική επίδραση των ανωτέρω παραγόντων παρέχοντας τους χάρτες της λεκάνης στο Σχήμα 8.13 που μπορούν να χαρακτηριστούν πολύτιμα μέσα για τη διαχείριση λεκάνης απορροής. Η λήψη αποφάσεων μπορεί να βασιστεί σε αυτούς τους χάρτες, όταν η παραμετροποίηση και η βαθμονόμηση του μοντέλου έχουν γίνει ορθά, οδηγώντας το στο να αποτυπώσει την υφιστάμενη κατάσταση ρεαλιστικά. Περισσότερες θέσεις με διαθέσιμα δεδομένα μετρήσεων στο υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης θα βελτίωναν την προγνωστική ικανότητα του μοντέλου στο χώρο, ωστόσο,

εκτός από την έξοδο της λεκάνης, μία ακόμα θέση με διαθέσιμα δεδομένα βοηθά στην παρούσα εργασία να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι το μοντέλο εκτός της ορθής εκτίμησης του φορτίου στην έξοδο, κάνει και ορθή κατανομή της προέλευσής του εντός της λεκάνης. Η ΥΜ αποτελεί μία ευέλικτη χωρική μονάδα έκφρασης της γεωγραφικής διαφοροποίησης των απωλειών που προσομοιάζει τη διαίρεση της λεκάνης σε μεγάλους αγρούς με ενιαία διαχείριση και μπορεί να είναι τόσο πιο αναλυτική, όσο καλύτερη είναι η ποιότητα και η ανάλυση των διατιθέμενων χωρικών δεδομένων εισόδου και πιέσεων στη λεκάνη.

Τα βασικά σημεία της παραμετροποίησης, βαθμονόμησης και εξαγωγής των αποτελεσμάτων του μοντέλου SWAT, αποτελούν μία επαρκή παρουσίαση των βημάτων μοντελοποίησης μιας λεκάνης απορροής με αρκετά προβλήματα διαθεσιμότητας δεδομένων. Όπως συμβαίνει με το σύνολο των εκτιμήσεων του μοντέλου, οι τελικοί χάρτες απεικονίζουν τις απώλειες ρύπων από τις διάφορες περιοχές της λεκάνης με κάποια αβεβαιότητα. Ωστόσο, η πληροφορία για τη σχετική ευαισθησία των ΥΜ της λεκάνης είναι πολύτιμη και εμπεριέχει πολύ μικρότερη αβεβαιότητα και έτσι βοηθά στον εντοπισμό των περιοχών εκείνων όπου η εφαρμογή μέτρων ενδείκνυται περισσότερο για τη μεγιστοποίηση της αποτελεσματικότητας στον περιορισμό των απωλειών ρύπων στο υδρογραφικό δίκτυο. Η όλη διαδικασία αποτελεί το υπόβαθρο για να διερευνηθούν η αποτελεσματικότητα και το κόστος εφαρμογής διαφόρων ΔΠ στην αγροτική γη της λεκάνης του Αράχθου, είτε στοχευμένα, με εκτεταμένη εφαρμογή εναλλακτικών σεναρίων σε τμήματα της αγροτικής γης (επόμενη ενότητα), είτε με χρήση μεθόδων βελτιστοποίησης για την εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού επιλογής και τοποθέτησης ΔΠ εντός της λεκάνης (επόμενο κεφάλαιο).

8.5 Εφαρμογή Διαχειριστικών Πρακτικών στο βαθμονομημένο μοντέλο του Αράχθου

Το ήδη βαθμονομημένο μοντέλο της λεκάνης του Αράχθου στο SWAT μπορεί να τύχει πλέον χρήσης για τη διερεύνηση των επιδράσεων που εναλλακτικά σενάρια διαχείρισης μπορεί να έχουν στο υδρολογικό και ποιοτικό καθεστώς του ποταμού. Έως σήμερα το μοντέλο έχει τύχει ευρείας χρήσης για την εφαρμογή και αξιολόγηση ΔΠ σε λεκάνες απορροής. Μεταξύ των δεκάδων εργασιών που δημοσιεύονται, οι περισσότερες διερευνούν την αποτελεσματικότητα των ΔΠ στην ικανοποίηση περιβαλλοντικών στόχων, όπως μείωση στερεοπαροχής και συγκεντρώσεων θρεπτικών (Arabi et al., 2006b· Barlund et al., 2007· Behera and Panda 2006· Bracmort et al., 2006· Chaplot et al., 2004· Sahu and Gu, 2009· Santhi et al., 2006· Tripathi et al., 2005· Tuppad et al., 2010· Ullrich and Volk, 2009· White and Arnold, 2009), ενώ λιγότερες διερευνούν τη σχέση Κόστους-Αποτελεσματικότητας (ΚΑ) των ΔΠ με συνυπολογισμό, εκτός του περιβαλλοντικού αποτελέσματος που προκαλούν, και

του κόστους εφαρμογής τους (Cools et al., 2010· Gassman et al., 2002· Gassman et al., 2006· Osei et al., 2003· Turpin et al., 2005).

Στη δεύτερη ομάδα εργασιών οι συγγραφείς συνδύασαν το μοντέλο SWAT με ένα απλό εμπειρικό ή ένα πλήρως ανεπτυγμένο οικονομικό μοντέλο με σκοπό να αξιολογήσουν τη σχέση ΚΑ που προκύπτει από εφαρμογή μεμονωμένων ή συνδυασμού ΔΠ, καθορισμένων εκ των προτέρων για εφαρμογή σε τμήματα της αγροτικής γης. Δύο είναι τα σημαντικά σημεία αυτής της προσέγγισης. Το πρώτο είναι η ενσωμάτωση του κόστους στη διερεύνηση των ΔΠ, ώστε τελικά να παρέχεται η πληροφορία για την οικονομικότητα των εναλλακτικών σεναρίων. Υπάρχει πλέον η τάση και άλλωστε συστήνεται από την Ευρωπαϊκή Νομοθεσία να επιλέγονται διαχειριστικά σχήματα, που εκτός από αποτελεσματικά στην ικανοποίηση των περιβαλλοντικών στόχων, να είναι και ικανά να τους επιτύχουν με αποδεκτό κόστος. Το δεύτερο αφορά στον τρόπο εξέτασης των ΔΠ, ο οποίος ονομάζεται *στοχευμένη στρατηγική* (targeting strategy) επειδή περιλαμβάνει μέτρα που με βάση την εμπειρία και τη γνώση των μηχανισμών δράσης τους προσδοκάται ότι θα έχουν αποτελεσματικότητα όταν εφαρμόζονται σε συγκεκριμένες αγροτικές περιοχές της λεκάνης.

Συνήθως, η εν λόγω στρατηγική εφαρμόζεται με συνέπεια σε κάποιον τύπο εδαφοκάλυψης της λεκάνης (π.χ. σε συγκεκριμένη καλλιέργεια) δεδομένου ότι η εκάστοτε ΔΠ προορίζεται για αυτόν και προσδοκάται να έχει θετική επίδραση όταν εφαρμόζεται ολοκληρωτικά. Ωστόσο, ο τρόπος δράσης αυτός δεν λαμβάνει υπόψη του κάποια γεωγραφικά χαρακτηριστικά (κλίμα, έδαφος, τοπογραφία), τα οποία χρήζουν ιδιαίτερης αντιμετώπισης μιας και μπορεί να διαφοροποιούν έντονα την αντίδραση των διαφόρων περιοχών στις ΔΠ. Η όλη προσέγγιση αναπόφευκτα δε μπορεί να εντοπίσει το πιο αποδοτικό σενάριο ΔΠ σχετικά με όρους ΚΑ, το οποίο όμως είναι δυνατόν να βρεθεί με χρήση μεθόδων βελτιστοποίησης (Veith et al., 2004). Παρόλα αυτά, όταν συγκεκριμένες ΔΠ εφαρμόζονται εκτεταμένα σε τμήματα της λεκάνης μπορούν να αναδείξουν τους τοπικούς παράγοντες που παίζουν σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της σχέσης ΚΑ και να καταστήσουν κάποιες αγροτικές περιοχές πιο επιθυμητές στην εφαρμογή μέτρων απ' ότι άλλες. Η επιτυχία στην επιλογή των κατάλληλων ΔΠ και περιοχών προς εφαρμογή τους με γνώμονα τη βελτιστοποίηση της σχέσης ΚΑ εξαρτάται επομένως από την καταλληλότητα των ΔΠ που είναι διαθέσιμες για εφαρμογή και από τη διαθεσιμότητα οικονομικών δεδομένων για την κοστολόγησή τους. Για τη λεκάνη του Αράχθου η προσπάθεια προσέγγισης παρουσιάστηκε στην ενότητα 7.3.2.

Σκοπός της ενότητας αυτής είναι να εξεταστεί μέσω στοχευμένης στρατηγικής ένας περιορισμένος αριθμός ΔΠ ως προς την διαμόρφωση της σχέσης ΚΑ, πριν γίνει χρήση του αλγόριθμου βελτιστοποίησης για την επιλογή και τοποθέτηση ΔΠ στο γεωγραφικό χώρο της λεκάνης απορροής του Αράχθου. Στόχος της στοχευμένης στρατηγικής είναι να εντοπιστούν οι ομοιογενείς περιοχές εντός της λεκάνης, όπου η σχέση ΚΑ βελτιστοποιείται

(ελαχιστοποιείται), δηλαδή οι περιοχές όπου η εκάστοτε ΔΠ εφαρμόζεται με μικρό κόστος, ενώ επιτυγχάνει σημαντικό περιβαλλοντικό αποτέλεσμα. Η διαμόρφωση των επιθυμητών αυτών χαρακτηριστικών εξαρτάται από τοπικούς παράγοντες, των οποίων η ποσοτικοποίηση και συνάθροιση επιτυγχάνεται με αξιοποίηση των δυνατοτήτων του μοντέλου SWAT και της οικονομικής συνιστώσας που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διατριβής. Για παράδειγμα, η μείωση των λιπάνσεων στις εκτάσεις αραβόσιτου μπορεί να αποδειχτεί ότι εφαρμόζεται με καλύτερο δείκτη ΚΑ σε ένα έδαφος που δεν ευνοεί την απορροή και τη διάβρωση και επομένως δεν διευκολύνει την απόπλυση των θρεπτικών από το έδαφος, ώστε η διαθεσιμότητά τους για την καλλιέργεια να μην ελαττώνεται αισθητά λόγω της ΔΠ και έτσι να μην μειώνονται και οι αποδόσεις. Η επίδραση των στρατηγικών αυτών στις αγροτικές ΥΜ αθροίζονται και παρουσιάζονται επίσης συνολικά για τη λεκάνη του Αράχθου.

8.5.1 Διαμόρφωση της σχέσης Κόστους – Αποτελεσματικότητας των ΔΠ

Η έκφραση της σχέσης ΚΑ γίνεται με υπολογισμό του πηλίκου του κόστους (Κ) εφαρμογής μιας ΔΠ προς την αποτελεσματικότητά της (Α). Το κόστος (Κ) των ΔΠ υπολογίζεται σε €/ha από τα δεδομένα του Πίνακα 7.5 και από τις αποδόσεις των καλλιεργειών που προκύπτουν σε ετήσια βάση από το μοντέλο SWAT. Η αποτελεσματικότητα (Α) των ΔΠ στη μείωση των απωλειών ρυπαντικού φορτίου από τις ΥΜ υπολογίζεται ως η διαφορά των απωλειών φορτίου του εκάστοτε ρύπου ύστερα από εφαρμογή μιας ΔΠ ($\Phi_{\Delta\Pi}$), από τις αντίστοιχες της συμβατικής πρακτικής ($\Phi_{\Sigma\Pi}$) και εκφράζεται σε tn/ha για τα φερτά και σε kg/ha για το N-NO3 και τον P:

$$A = \Phi_{\Sigma\Pi} - \Phi_{\Delta\Pi} \tag{8.4}$$

Η σχέση ΚΑ διαμορφώνεται στη συνέχεια για κάθε ΥΜ με διαίρεση των δύο μεγεθών, ώστε τελικά να προκύπτει η δαπάνη που απαιτείται για μοναδιαία μείωση του φορτίου ενός ρύπου (€/tn, €/kg):

$$KA = \frac{K}{A} \tag{8.5}$$

Μικρή τιμή του δείκτη ΚΑ δηλώνει ότι σημαντική μείωση στο ρυπαντικό φορτίο επιτυγχάνεται με μικρό κόστος και στην περίπτωση που η τιμή είναι αρνητική φανερώνει ότι ο περιβαλλοντικός στόχος ικανοποιείται με λιγότερες δαπάνες απ' ότι στην υφιστάμενη κατάσταση, δηλαδή με αύξηση του καθαρού εισοδήματος του γεωργού. Ωστόσο, υπάρχουν περιπτώσεις όπως θα φανεί παρακάτω, όπου η σχέση ή ο δείκτης ΚΑ πρέπει να ερμηνεύεται με προσοχή ώστε να μην οδηγεί σε λανθασμένα συμπεράσματα.

Από τις διαθέσιμες ΔΠ του Πίνακα 7.4 εξετάζονται δύο σε κάθε τύπο αγροτικής χρήσης γης της λεκάνης του Αράχθου. Η μία είναι η εγκατάσταση λωρίδων συγκράτησης και στους τρεις τύπους χρήσης γης του αραβόσιτου, της μηδικής και των βοσκότοπων (ΔΠ Α5, Μ3 και Β5 του Πίνακα 7.4). Η δεύτερη αφορά σε ένα άλλο μέτρο που στοχεύει στη μείωση της διαθεσιμότητας των θρεπτικών στο έδαφος. Για τη μηδική εξετάζεται το σενάριο Μ2 με μηδενισμό της αζωτούχου λίπανσης και μείωση της φωσφορικής κατά 50%. Για τους βοσκότοπους εφαρμόζονται συνδυαστικά τα μέτρα Β1 και Β3, δηλαδή η μείωση του αριθμού πουλερικών και αιγοπροβάτων κατά 30%. Τέλος, για τον αραβόσιτο εφαρμόζεται μία συνδυαστική ΔΠ με εφαρμογή μειωμένης λίπανσης κατά 30%, καλλιέργεια κατά τις ισοϋψείς και απαλοιφή της άροσης (Α2, Α3 και Α4 του Πίνακα 7.4). Τα εν λόγω σενάρια εξετάζονται με ολοκληρωτική εφαρμογή στην έκταση του τύπου εδαφοκάλυψης στον οποίο αναφέρονται, με εκτέλεση του μοντέλου SWAT για κάθε ένα από αυτά.

8.5.2 Αποτελέσματα ανά τύπο εδαφοκάλυψης

Η προσομοίωση των ΔΠ στο SWAT έγινε για το διάστημα 2001-2005 και οι απώλειες φορτίων από τις ΥΜ αθροίστηκαν ανά αγροτικό τύπο χρήσης γης και εκφράστηκαν ως μέσες τιμές απ' όλη την έκτασή τους. Το συνολικό κόστος ανά μονάδα επιφάνειας προέκυψε από τα δεδομένα του Πίνακα 7.5. Στην περίπτωση των συνδυαστικών πρακτικών προέκυψε με άθροιση των επιμέρους κοστών των μεμονωμένων πρακτικών. Τα κόστη εκφράστηκαν επίσης ως μέσα κόστη ανά μονάδα επιφάνειας του εκάστοτε τύπου χρήσης γης. Τα αποτελέσματα και ο υπολογισμός της σχέσης ΚΑ συνοψίζονται στον Πίνακα 8.8.

Πίνακας 8.8 Διαμόρφωση σχέσης ΚΑ επιλεγμένων ΔΠ ανά τύπο αγροτικής χρήσης γης.

ΔΠ	Περιγραφή	Χρήση γης	Κ (€/ha)	Α Φερτά (tn/ha)	Α N-NO3 (kg/ha)	Α P (kg/ha)	ΚΑ Φερτά (€/tn)	ΚΑ N-NO3 (€/kg)	ΚΑ P (€/kg)
ΔΠ1	Μείωση λίπανσης	Μηδική	-49,3	~0	0,63	3,35	-	(-78,17)	-14,70
ΔΠ2	Λωρίδα συγκράτησης	Μηδική	50	10,90	8,73	5,04	4,59	5,73	9,92
ΔΠ3	Μείωση λίπανσης Καλλιεργ. - ισοϋψείς Κατάργηση άροσης	Αραβόσ.	161,23	27,78	19,42	3,73	5,80	8,30	43,23
ΔΠ4	Λωρίδα συγκράτησης	Αραβόσ.	50	31,01	16,17	6,34	1,61	3,09	7,88
ΔΠ5	Μείωση αριθμού ζώων	Βοσκότ.	7,89	~0	0,96	0,33	-	8,21	(23,77)
ΔΠ6	Λωρίδα συγκράτησης	Βοσκότ.	50	9,68	1,72	1,68	5,17	29,07	29,76

* Οι τιμές στις παρενθέσεις αναφέρονται σε σχέσεις ΚΑ που δεν είναι πρακτικά εφικτές.

Με βάση τα αριθμητικά αποτελέσματα του Πίνακα 8.8 η μηδική φαίνεται να μην είναι ευαίσθητη στη μείωση της λίπανσης αφού οι αποδόσεις δεν επηρεάστηκαν καθόλου από το μέτρο (ΔΠ1) και το εξαγόμενο κόστος αντιστοιχεί σε οικονομικό όφελος από τη μείωση εξόδων για αγορά λιπασμάτων. Η σχέση ΚΑ προέκυψε έτσι αρνητική δηλώνοντας ότι με μείωση απωλειών P κατά 1kg/ha, προκύπτει καθαρό κέρδος 14,7€/kg για το γεωργό. Η σχέση ΚΑ που υπολογίστηκε για το N-NO3, με αυστηρή ερμηνεία των αριθμών, δηλώνει όφελος 78,17€ για μείωση 1kg απωλειών από τις εκτάσεις μηδικής. Κάτι τέτοιο παρόλα αυτά είναι παραπλανητικό διότι η μείωση 0,63kg/ha απωλειών N-NO3 που προέκυψε από τη δεδομένη ΔΠ είναι η μέγιστη δυνατή μιας και το N απαλείφθηκε από τη λιπαντική αγωγή. Κατά συνέπεια το πηλίκο ΚΑ δηλώνει ένα κέρδος που είναι ανέφικτο να επιτευχθεί. Αυτό που μπορεί να λεχθεί ωστόσο για την εν λόγω πρακτική στις εκτάσεις μηδικής είναι ότι 0,63kg/ha λιγότερες απώλειες φορτίου N-NO3 προκαλούνται όταν η αζωτούχος λίπανση καταργείται, κάτι που εξοικονομεί ετησίως 49,3€/ha για τον αγροτικό πληθυσμό. Το μέτρο αυτό από την άλλη δεν είχε καμία επίδραση στις απώλειες εδάφους, κάτι που φυσικά αναμενόταν. Στις εκτάσεις βοσκότοπων η μείωση του αριθμού των πουλερικών και των αιγοπροβάτων κατά 30% (ΔΠ5) υπολογίστηκε ότι κοστίζει 23,77€/kg μείωσης των απωλειών P και με βάση την αποτελεσματικότητα που προέκυψε (0,33kg/ha), η σχέση ΚΑ δεν είναι ικανοποιητική δεδομένου ότι για την επίτευξη του περιορισμού των απωλειών P κατά 1kg, μία πολύ πιο δραστική μείωση, πέραν του 30%, θα χρειαζόταν. Ωστόσο, για το N-NO3 η σχέση είναι αποδεκτή, ενώ η επίδραση της ΔΠ στα φερτά είναι αμελητέα.

Η συνδυασμένη πρακτική μείωσης λιπάνσεων και διαχείρισης εδάφους στον αραβόσιτο (ΔΠ3) είχε σημαντική επίδραση στη μείωση των φερτών και των θρεπτικών. Όμως, η πρακτική συνοδεύτηκε από σημαντική μείωση στις ετήσιες αποδόσεις, όπως προσομοιώθηκε στο SWAT, ίση περίπου με 1,5tn/ha/έτος ή 13% σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση. Το αποτέλεσμα αυτό διαμόρφωσε μία θετική και στην περίπτωση του P, πολύ μεγάλη τιμή του δείκτη ΚΑ. Η εν λόγω πρακτική υπολογίστηκε ότι μειώνει τις απώλειες εδάφους με ένα επιπρόσθετο κόστος 5,8€/tn, το N-NO3 με 8,3€/kg, αλλά τον P με ένα αισθητά μεγαλύτερο κόστος, ίσο με 43€/kg. Το τελευταίο πάντως δε σημαίνει ότι η ΔΠ είναι λιγότερο αποτελεσματική στη μείωση του P απ' ότι σε εκείνη των άλλων δύο τύπων ρύπων. Στην πραγματικότητα, αν η αποτελεσματικότητα είχε εκφραστεί ως ποσοστό μείωσης από την υφιστάμενη κατάσταση, η μείωση απωλειών των 3,73kgP/ha θα αντιστοιχούσαν σε αρκετά μεγάλο ποσοστό (35%), συγκρίσιμο με τα παραγόμενα ποσοστά για τους άλλους ρύπους (40-50%). Οι απόλυτες τιμές ωστόσο, είναι πιο κατατοπιστικές για τη συνεισφορά της ΔΠ στη μείωση του φορτίου. Η σχέση ΚΑ που προκύπτει από αυτήν την ΔΠ είναι η μεγαλύτερη στον πίνακα λόγω του μεγάλου κόστους (απώλεια εισοδήματος) που προκαλείται από τη μείωση των αποδόσεων. Το συγκεκριμένο παράδειγμα είναι ωστόσο ιδιαίτερα

διαφωτιστικό για τις διαφορές που προκύπτουν στη σχέση ΚΑ ανάλογα με την επιλογή περιβαλλοντικού στόχου που τίθεται κάθε φορά στη διαχείριση λεκάνης απορροής.

Η εγκατάσταση λωρίδων συγκράτησης (ΔΠ2, ΔΠ4, ΔΠ6) βρέθηκε να είναι πολύ αποτελεσματική στη συγκράτηση φερτών απ' όλους τους αγροτικούς τύπους χρήσης γης και θρεπτικών από τις εκτάσεις των δύο καλλιεργειών. Η μείωση θρεπτικών από τις εκτάσεις βοσκότοπων μειώνονται σε έναν μικρότερο βαθμό, αλλά αυτό οφείλεται αποκλειστικά στα σημαντικά μικρότερα αρχικά φορτία απωλειών ανά ha γης από τις εν λόγω εκτάσεις (Σχήμα 8.12) και όχι σε διαφοροποίηση της αποτελεσματικότητας της ΔΠ στους διάφορους αγροτικούς τύπους χρήσης γης. Γι' αυτό άλλωστε, η σχέση ΚΑ είναι συστηματικά μικρότερη στον αραβόσιτο, του οποίου οι εκτάσεις χαρακτηρίζονται από τις μεγαλύτερες ανά μονάδα έκτασης απώλειες ρύπων. Αντίθετα, η εγκατάσταση λωρίδων συγκράτησης στις ΥΜ βοσκότοπων, ως προσπάθεια μείωσης του N-NO3 και του P στη λεκάνη του Αράχθου, φαίνεται ασύμφορη.

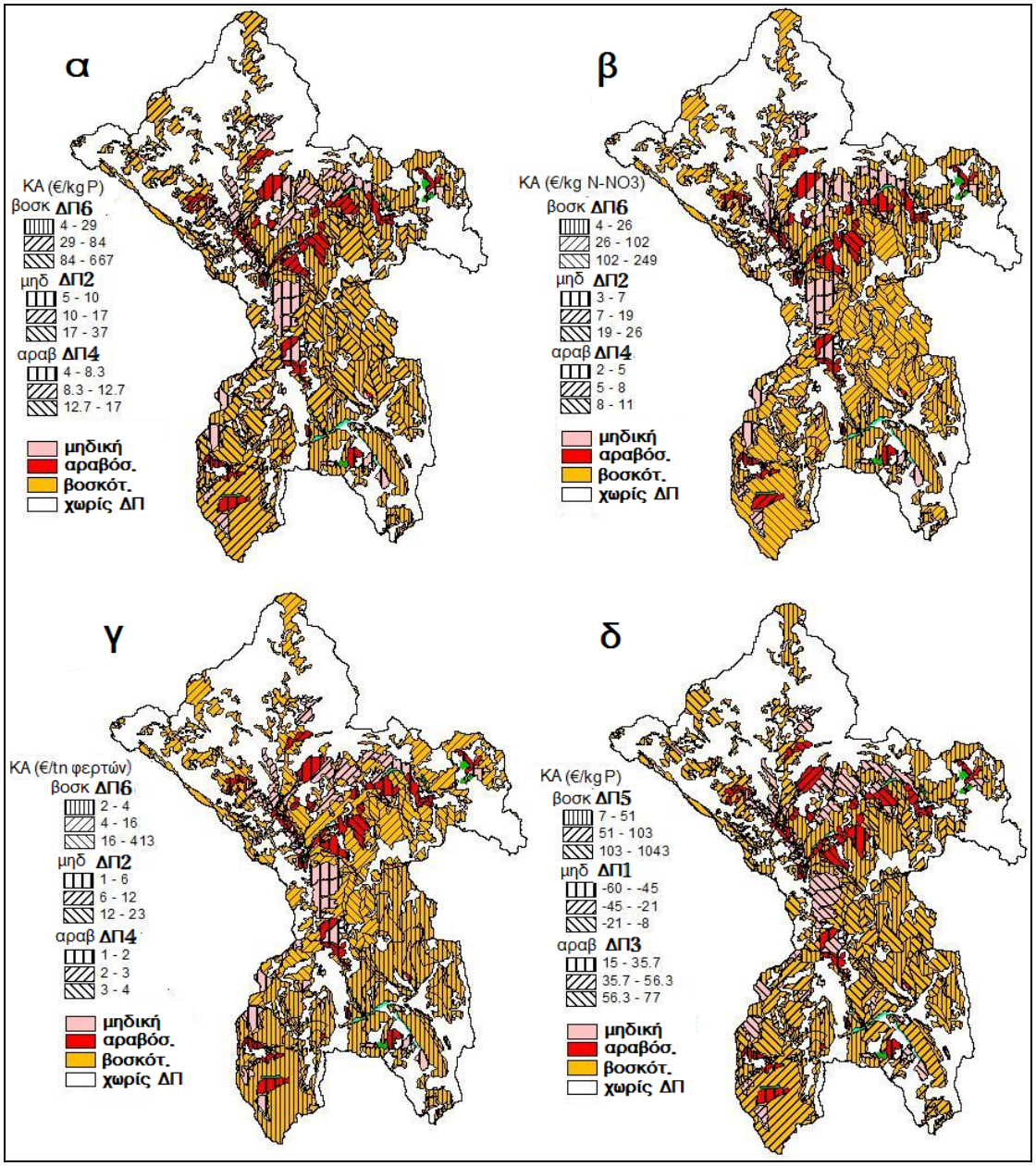
Τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από τις 6 ΔΠ που διερευνήθηκαν στους τρεις τύπους αγροτικής χρήσης γης της λεκάνης του Αράχθου συνοψίζονται ως εξής:

- Η μείωση λίπανσης ενδείκνυται για την καλλιέργεια της μηδικής, αλλά όχι για τον αραβόσιτο όπου προκαλούνται σημαντικές μειώσεις αποδόσεων.
- Η μείωση του ζωικού κεφαλαίου δεν φαίνεται να μειώνει αισθητά τις απώλειες ρύπων από τους βοσκότοπους, ενώ προκαλεί σημαντική απώλεια εισοδήματος.
- Οι λωρίδες συγκράτησης διαμορφώνουν έναν επιθυμητό δείκτη ΚΑ στις εκτάσεις αραβόσιτου για όλους τους ρύπους. Η εγκατάστασή τους στις εκτάσεις βοσκότοπων μπορεί ίσως να περιοριστεί μόνο σε συγκεκριμένες ΥΜ, μιας και η εκτεταμένη εφαρμογή της ΔΠ οδήγησε σε υπολογισμό πολύ μεγάλων και μη επιθυμητών λόγων ΚΑ για τα δύο θρεπτικά.

8.5.3 Αποτελέσματα ανά Υδρολογική Μονάδα

Για τον εντοπισμό βέλτιστων τιμών της σχέσης ΚΑ σε τοπικό επίπεδο, μια πιο ακριβής γεωγραφική εξαγωγή της είναι απαραίτητη. Οι σχέσεις ΚΑ υπολογίστηκαν για κάθε ΥΜ και ΔΠ ξεχωριστά και παρουσιάζονται με γραφική απεικόνιση στο χάρτη της λεκάνης απορροής του Αράχθου. Συνολικά, 6 χάρτες μπορούν να δημιουργηθούν με απεικόνιση του δείκτη ΚΑ για τρεις ΔΠ κάθε φορά (μία σε κάθε τύπο χρήσης γης) για δύο τύπους ΔΠ (μείωση φορτίσεων, λωρίδες συγκράτησης) και για τρεις ρύπους. Στο Σχήμα 8.14 παρουσιάζονται τέσσερις χάρτες, με τους τρεις πρώτους (α, β και γ) να απεικονίζουν τη σχέση ΚΑ για τον P, το N-NO3 και τις απώλειες εδάφους αντίστοιχα μετά από εγκατάσταση

λωρίδων συγκράτησης (ΔΠ2, ΔΠ4, ΔΠ6) και τον χάρτη δ να απεικονίζει τη σχέση για τον περιορισμό των απωλειών P έπειτα από εφαρμογή του μέτρου μείωσης της διαθεσιμότητας θρεπτικών στο έδαφος για κάθε τύπο αγροτικής χρήσης γης (ΔΠ1, ΔΠ3, ΔΠ5).



Σχήμα 8.14 Γεωγραφική διαφοροποίηση της σχέσης ΚΑ μετά από εφαρμογή ΔΠ στην αγροτική γη της λεκάνης του Αράχθου.

Αναλύοντας προσεκτικά τους χάρτες του Σχήματος 8.14, μπορεί αρχικά να βγει το συμπέρασμα ότι παρόλο που η ολοκληρωτική εγκατάσταση των λωρίδων συγκράτησης στις εκτάσεις βοσκότοπων αποδείχτηκε ότι έγινε με μη επιθυμητή (υψηλή) τιμή σχέσης ΚΑ

(Πίνακας 8.8), υπάρχουν κάποιες ΥΜ όπου η εν λόγω ΔΠ αποδεικνύεται λιγότερο δαπανηρή σε σχέση με τη μείωση των απωλειών φορτίου θρεπτικών. Οι χάρτες α και β δείχνουν ότι κάποιες ΥΜ με επιθυμητό (χαμηλό) δείκτη ΚΑ για τον Ρ και το N-NO3 εντοπίζονται στο κεντρικό και το νοτιοανατολικό τμήμα της λεκάνης. Πρόκειται ίσως για τις ΥΜ που δέχονται τις μεγαλύτερες πιέσεις σε θρεπτικά λόγω μεγάλης συγκέντρωσης ζωικού κεφαλαίου, κάτι που προκαλεί αναπόφευκτα και μεγάλη αποτελεσματικότητα της ΔΠ σε όρους μείωσης φορτίου ανά ha γης. Όσον αφορά τις δύο καλλιέργειες, οι χαμηλότερες τιμές της σχέσης παρουσιάζονται σε ΥΜ του κεντρικού και νότιου τμήματος της λεκάνης. Για όλους τους αγροτικούς τύπους χρήσης γης ωστόσο, πιστεύεται ότι το κλίμα αποτελεί έναν κρίσιμο παράγοντα στη διαμόρφωση της σχέσης ΚΑ. Η ετήσια βροχόπτωση στο νότιο τμήμα της λεκάνης έχει καταγραφεί κατά την περίοδο 2001-2005 περίπου 400mm μεγαλύτερη απ' ότι στο βόρειο. Το γεγονός αυτό προκαλεί αναπόφευκτα μεγαλύτερες απώλειες ανά μονάδα έκτασης του ιδίου τύπου χρήσης γης στο νότιο τμήμα και συνεπώς η αποτελεσματικότητα των λωρίδων συγκράτησης είναι αναλογικά μεγαλύτερη. Αντίθετα, το κόστος εφαρμογής της ΔΠ ανά μονάδα έκτασης δεν διαφέρει γεωγραφικά και είναι σταθερό και ίσο με 50€/ha με αποτέλεσμα ο λόγος ΚΑ να διαμορφώνεται αποκλειστικά από τον παρονομαστή, δηλαδή από την αποτελεσματικότητα και να είναι μικρότερος και πιο επιθυμητός στο νότιο τμήμα της λεκάνης.

Άλλο σημαντικό αποτέλεσμα που προκύπτει από το Σχήμα 8.14 είναι η διαφοροποίηση της κλάσης στην οποία ανήκει ο λόγος ΚΑ όταν αναφέρεται στην ίδια ΥΜ αλλά σε διαφορετικό ρύπο. Για παράδειγμα, μετά από εγκατάσταση λωρίδων συγκράτησης η ΥΜ αραβόσιτου που βρίσκεται στο νοτιότερο σημείο της λεκάνης χαρακτηρίζεται από μικρή τιμή του δείκτη ΚΑ (ανήκει στην πρώτη κλάση) όταν υπολογίζεται ως προς την αποτελεσματικότητα στη μείωση των απωλειών Ρ (χάρτης α), αλλά από μέση τιμή (μεσαία κλάση) όταν υπολογίζεται ως προς τις απώλειες N-NO3 (χάρτης β). Αυτό εξηγείται από το μηχανισμό δράσης των λωρίδων συγκράτησης, οι οποίες, με βάση τις εξισώσεις του μοντέλου (Εξ. 4.1 και 4.2), είναι πολύ πιο αποτελεσματικές στη μείωση των απωλειών ρύπων που μεταφέρονται αποκλειστικά επιφανειακά (Ρ) απ' ότι στη μείωση εκείνων που μεταφέρονται σε σημαντικό ποσοστό και υποεπιφανειακά (N-NO3). Η εν λόγω ΔΠ είναι ωστόσο πολύ αποτελεσματική στη μείωση των απωλειών εδάφους από τις ΥΜ όλων των τύπων προς τα επιφανειακά νερά, κάτι που αποτυπώνεται στο χάρτη γ του Σχήματος 8.14, με την πλειοψηφία τους να χαρακτηρίζεται από μικρές τιμές του λόγου ΚΑ. Τέλος, οι σχέσεις ΚΑ μετά από εφαρμογή του μέτρου μείωσης της διαθεσιμότητας θρεπτικών στο έδαφος (ΔΠ1, ΔΠ3, ΔΠ5) των τριών τύπων αγροτικής χρήσης, εικονίζεται στο χάρτη δ και αποκαλύπτει ότι οι απώλειες Ρ μειώνονται με σημαντικό επιπρόσθετο οικονομικό όφελος παραγωγής στις εκτάσεις μηδικής, ενώ υπάρχει μόνο ένας μικρός αριθμός ΥΜ βοσκότοπων

όπου το μέτρο μείωσης του ζωικού κεφαλαίου είναι αποδεκτό, ανήκει δηλαδή στην πρώτη κλάση της ΔΠ5. Οι αποδόσεις της καλλιέργειας αραβόσιτου είναι ωστόσο πολύ ευαίσθητες στη λίπανση, οπότε η εφαρμογή του μέτρου μπορεί να αποδειχτεί οριακά αποδεκτή μόνο σε ορισμένες ΥΜ, όπου ο συνδυασμός κλίματος και εδαφικών ιδιοτήτων δεν ευνοούν την απόπλυση των θρεπτικών από την επιφάνεια του εδάφους με αποτέλεσμα τα περισσεύματά τους στο έδαφος να μη διαταράσσονται αισθητά λόγω της ΔΠ και οι αποδόσεις να μένουν κοντά στα ίδια επίπεδα με την υφιστάμενη κατάσταση.

8.5.4 Αποτελέσματα σε κλίμακα λεκάνης απορροής

Για να αποκτηθεί μία γενικότερη άποψη για τη διαμόρφωση των σχέσεων ΚΑ των ΔΠ, παρουσιάζεται πιο κάτω μία ανάλυση σε κλίμακα λεκάνης απορροής. Ο Πίνακας 8.9 συνοψίζει το φορτίο και τις συγκεντρώσεις θρεπτικών στην έξοδο της λεκάνης, σε αντιπαράθεση με το συνολικό κόστος και τη σχέση ΚΑ που προκύπτει για ολόκληρη τη λεκάνη από την εφαρμογή των διαφόρων ΔΠ. Επιπλέον, δύο ακόμα συνδυαστικές πρακτικές εξετάζονται ως προς τη διαμόρφωση των εν λόγω μεγεθών, η εφαρμογή του καθενός από τους δύο τύπους ΔΠ ολοκληρωτικά στην αγροτική γη της λεκάνης,

Πίνακας 8.9 Αναλυτικά αποτελέσματα και διαμόρφωση της σχέσης ΚΑ σε κλίμακα λεκάνης απορροής από την εφαρμογή 8 ΔΠ στη λεκάνη του Αράχθου.

ΔΠ	Φερτά (Ktn/ έτος)	N-NO3 (tn/ έτος)	P (tn/ έτος)	N-NO3 (mg/ lt)	P (mg/ lt)	Κόστος (1000€ /έτος)	Α Φερτά (Ktn /έτος)	Α N-NO3 (tn/ έτος)	Α P (tn/ έτος)	ΚΑ Φερτά (€/tn)	ΚΑ N-NO3 (€/kg)	ΚΑ P (€/kg)
Υφιστ.	1316	746,1	263,3	0,647	0,223	0	-	-	-	-	-	-
ΔΠ1	1316	741,7	243,3	0,643	0,211	-307	0,0	4,4	20,0	-	-69,8	-15,4
ΔΠ2	1296	691,7	232,8	0,599	0,202	312	20,0	54,4	30,5	15,6	5,7	10,2
ΔΠ3	1259	661,4	248,0	0,574	0,215	701	57,0	84,7	15,3	12,3	8,3	45,8
ΔΠ4	1250	675,0	236,5	0,586	0,205	217	66,0	71,1	26,8	3,3	3,1	8,1
ΔΠ5	1316	705,0	250,3	0,612	0,217	332	0,0	41,1	13,0	-	8,1	25,6
ΔΠ6	1160	673,1	193,7	0,584	0,168	2108	156,0	73,0	69,6	13,5	28,9	30,3
ΔΠ7 (1-3-5)	1259	616,7	213,2	0,535	0,185	727	57,0	129,4	50,1	12,8	5,6	14,5
ΔΠ8 (2-4-6)	1050	548,4	134,3	0,476	0,117	2638	266,0	197,7	129,0	9,9	13,3	20,4

Με βάση και τα ανωτέρω αποτελέσματα, που εκφράζονται πλέον σε κλίμακα λεκάνης απορροής, η σχέση ΚΑ που διαμορφώνεται από τη μείωση λίπανσης στη μηδική (ΔΠ1) είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική (αρνητική), αλλά οι συγκεντρώσεις των δύο στοιχείων (N-NO3 και P) στην έξοδο της λεκάνης μειώνονται πολύ λίγο εξαιτίας της περιορισμένης έκτασης που η καλλιέργεια καταλαμβάνει στη λεκάνη (περίπου 7%). Η μείωση λίπανσης στον αραβόσιτο σε συνδυασμό με καλλιέργεια κατά τις ισοϋψείς χωρίς άροση (ΔΠ3), είναι

πιο αποτελεσματική στη μείωση της συγκέντρωσης του N-NO3 στην έξοδο, αυτό όμως επιτυγχάνεται με σημαντικά μεγαλύτερη τιμή του δείκτη ΚΑ (θετική). Για τη μείωση του P η πρακτική δεν ενδείκνυται μιας και οδηγεί σε πολύ υψηλό δείκτη ΚΑ λόγω της μικρής μείωσης του φορτίου στην έξοδο. Οι λωρίδες συγκράτησης αποδεικνύεται και σε αυτήν την ανάλυση ότι είναι πολύ πιο επιθυμητές στις εκτάσεις αραβόσιτου (ΔΠ4) αφού δεν έχουν καμία επίδραση στην ανάπτυξη του φυτού και παράλληλα, συγκρατούν ένα σημαντικό ποσοστό των παραγόμενων ρύπων πριν αυτοί καταλήξουν στα επιφανειακά νερά. Οι τιμές του δείκτη ΚΑ είναι μικρές για την εν λόγω πρακτική στις εκτάσεις αραβόσιτου και ειδικά όταν ο στόχος είναι η μείωση των απωλειών εδάφους και N-NO3 η πρακτική συστήνεται ανεπιφύλακτα. Οι λωρίδες συγκράτησης αποδεικνύονται επίσης πολύ αποτελεσματικές όταν εφαρμόζονται στη μηδική και στους βοσκότοπους (ΔΠ2 και ΔΠ6 αντίστοιχα), με σημαντικές μειώσεις των συγκεντρώσεων θρεπτικών στην έξοδο. Ωστόσο, η πρακτική αυτή απαιτεί υψηλές δαπάνες όταν εφαρμόζεται ολοκληρωτικά στους βοσκότοπους (μεγάλες εκτάσεις), πράγμα που οδηγεί σε υψηλούς δείκτες ΚΑ. Επομένως, μια πιο στοχευμένη εφαρμογή της ΔΠ σε επιλεγμένες ΥΜ βοσκότοπων υποδηλώνεται και από αυτήν την ανάλυση. Η μείωση του ζωικού κεφαλαίου από την άλλη (ΔΠ5) αποδεικνύεται πιο αποτελεσματική στη μείωση της συγκέντρωσης N-NO3 παρά του P, αλλά και πάλι μάλλον ενδείκνυται η εφαρμογή της στις περιοχές εκείνες που η σχέση ΚΑ ελαχιστοποιείται, παρά ολοκληρωτικά.

Τα συνδυασμένα σχήματα ΔΠ στη λεκάνη με ταυτόχρονη εφαρμογή τριών πρακτικών, μία σε κάθε τύπο αγροτικής χρήσης γης, αποδεικνύονται ωστόσο πολύ αποτελεσματικά (ΔΠ7 και ΔΠ8). Τα εν λόγω μέτρα των οποίων τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις δύο τελευταίες γραμμές του Πίνακα 8.9 μειώνουν αισθητά τις συγκεντρώσεις θρεπτικών. Ειδικά ο P, ο οποίος συγκρατείται εντονότερα από τις λωρίδες συγκράτησης, μειώνεται κατά περίπου 50%, όταν το μέτρο εφαρμόζεται σε όλη την αγροτική γη, το N-NO3 κατά 25%, ενώ τα φερτά στην έξοδο της λεκάνης μειώνονται κατά 266Ktn/έτος ή κατά 20%. Ωστόσο, με βάση την Εξίσωση 4.1, ένα ποσοστό συγκράτησης 59% προσδοκάται για τα φερτά από τις λωρίδες συγκράτησης πλάτους 5m. Η τιμή του Πίνακα 8.9 αναφέρεται όμως στη στερεοπαροχή στην έξοδο μετά την εφαρμογή της ΔΠ8 και όχι στις απώλειες εδάφους από τις αγροτικές ΥΜ μόνο, που συνολικά όντως είναι μειωμένες κατά 59%. Στο μοντέλο SWAT, εξαιτίας της πολύ μειωμένης εισροής φερτών υλών όταν εφαρμόζεται αυτό το μέτρο, προσομοιώθηκε ακόμα μια αυξημένη διάβρωση του ποταμού (channel degradation). Η ΔΠ8 είναι η μοναδική που επιτυγχάνει το μέγιστο δυνατό περιβαλλοντικό αποτέλεσμα και κατατάσσει τον ποταμό ως προς τη συγκέντρωση P στην πρώτη κλάση *Υψηλής* ποιότητας με άνω όριο τα 0,125 mg/l (Skoulikidis et al., 2006). Ωστόσο, η εν λόγω πρακτική δεν ενδείκνυται από οικονομική άποψη μιας και επιτυγχάνει τον αξιοσημείωτο περιβαλλοντικό αυτό στόχο με μεγάλο κόστος (2,64M€) διαμορφώνοντας

συνεπώς υψηλούς δείκτες ΚΑ για τη μείωση των δύο θρεπτικών. Η ΔΠ7 αποτελεί ίσως τον πιο επιθυμητό συμβιβασμό στη λεκάνη με αρκετά μικρότερο κόστος από την ΔΠ8, αλλά σαφώς με μικρότερη, πλην όμως ικανοποιητική, περιβαλλοντική επίδοση. Οι σχέσεις ΚΑ από τα ολοκληρωτικά μέτρα ΔΠ7 και ΔΠ8 κυμαίνονται από 5,6 έως 20,4€/kg μείωσης φορτίου απωλειών θρεπτικού στοιχείου, κάτι που φανερώνει ότι η αποδοχή εφαρμογής των μέτρων έγκειται σε μεγάλο βαθμό στους διαθέσιμους οικονομικούς πόρους και στον περιβαλλοντικό στόχο (είδος και συγκέντρωση ρύπου) που τίθεται από τους αρμόδιους φορείς.

Σε γενικές γραμμές, η ανάλυση σε κλίμακα λεκάνης απορροής συστήνει ως ολοκληρωμένο, αποδεκτό και επιθυμητό διαχειριστικό σχήμα στη λεκάνη του Αράχθου την εγκατάσταση λωρίδων συγκράτησης στις ΥΜ αραβόσιτου και πιθανά σε επιλεγμένες ΥΜ βοσκότοπων, καθώς και μία σημαντική μείωση στις ποσότητες λιπάνσεων της καλλιέργειας μηδικής. Ο εν λόγω συνδυασμός μέτρων αποδεικνύεται ως ο καλύτερος συμβιβασμός για την επίτευξη των περιβαλλοντικών στόχων με αποδεκτό κόστος. Ωστόσο, η ανάλυση ΚΑ σε επίπεδο λεκάνης απορροής κρύβει κάποιες κοινωνικές πτυχές του προβλήματος. Οι δαπάνες και τα οικονομικά οφέλη από τις ΥΜ της λεκάνης αθροίζονται, με αποτέλεσμα πιθανές κοινωνικές επιδράσεις των ΔΠ σε τοπικό επίπεδο να μην μπορούν να αναλυθούν. Έτσι, μπορεί να κρίνεται ένα διαχειριστικό σχήμα ως πλήρως αποδεκτό και επιθυμητό για τη λεκάνη με όρους ΚΑ που προκύπτει για το σύνολο αυτής, αλλά να αγνοούνται οι κοινωνικοοικονομικές επιδράσεις των ΔΠ σε μικρές τοπικές κοινωνίες (χωριά), που προσεγγιστικά μπορούν να εκπροσωπηθούν από έναν μικρό αριθμό ΥΜ. Αποτελεί επιπρόσθετο πλεονέκτημα της εξαγωγής της σχέσης ΚΑ σε κλίμακα ΥΜ, πέρα από την αξιολόγηση της τοπικής αποδοτικότητας, το γεγονός ότι κοινωνικοί παράγοντες μπορούν να ληφθούν υπόψη στην τελική λήψη απόφασης για τοπική εφαρμογή ΔΠ.

8.6 Γενικά συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε η παραμετροποίηση και βαθμονόμηση της λεκάνης του άνω ρου του Αράχθου στο SWAT με αναλυτική περιγραφή των παραδοχών και της επιστημονικής τεκμηρίωσής τους για την ολοκλήρωση των απαραίτητων βημάτων μοντελοποίησης. Το SWAT έχει τη δυνατότητα, ως κατανεμημένο μοντέλο, να εξάγει αποτελέσματα για τις απώλειες ρύπων για κάθε υπολεκάνη ή ΥΜ, λαμβάνοντας υπόψη την αθροιστική επίδραση των τοπικών υδροκλιματικών και γεωμορφολογικών παραγόντων, ενώ παράλληλα αθροίζει τα αποτελέσματα ώστε να δίνει αποτελέσματα φορτίων ρύπων σε οποιαδήποτε διατομή ποταμού. Οι δυνατότητες του αυτές, αν και βασίζονται σε μεγάλο όγκο δεδομένων εισόδου, εξυπηρετούν στη διερεύνηση των επιδράσεων που έχει η εναλλακτική αγροτική διαχείριση στην ποιότητα των επιφανειακών υδάτων εντός της λεκάνης απορροής.

Η μοντελοποίηση της λεκάνης του Αράχθου βασίστηκε: α) στην αξιοποίηση των χαρτών του CORINE και των στατιστικών στοιχείων της ΕΣΥΕ για την απεικόνιση των χρήσεων γης, β) στην ομαδοποίηση των σχηματισμών του γεωλογικού χάρτη για την απεικόνιση του εδάφους, γ) στην προεπεξεργασία των μετρήσεων θρεπτικών στο ποτάμι, ώστε να είναι επαρκώς αντιπροσωπευτικές για την εξαγωγή αξιόπιστων προσομοιώσεων και δ) στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων με κατανοητό τρόπο, ικανό να καταδεικνύει με σαφήνεια τη χωρική και χρονική μεταβλητότητα των απωλειών ρύπων στα επιφανειακά νερά. Πρέπει ωστόσο να σημειωθεί ότι η προσομοίωση της υφιστάμενης κατάστασης της λεκάνης του Αράχθου στο SWAT έχει περιθώρια βελτίωσης που σχετίζονται κυρίως με την ύπαρξη περισσότερων δεδομένων πεδίου τα οποία θα επιτρέψουν τον έλεγχο της ορθότητας των ρουτινών που προσομοιώνουν τις διάφορες διεργασίες. Ενδεικτικά αναφέρεται η ρουτίνα των υπόγειων νερών, η οποία επηρεάζει σε κάποιο βαθμό και τις απώλειες θρεπτικών στα επιφανειακά νερά. Οι παράμετροι των σχετικών αρχείων θα μπορούσαν να καθοριστούν με μεγαλύτερη ακρίβεια αν ήταν διαθέσιμες μετρήσεις στάθμης του υπόγειου νερού και πιεζομετρικοί χάρτες. Συνολικά ωστόσο, η προσομοίωση με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα κρίνεται ότι ορθά αποτέλεσε το υπόβαθρο για την εξέταση εναλλακτικών ΔΠ στην αγροτική γη.

Η εφαρμογή δύο τύπων ΔΠ στους τρεις διαφορετικούς αγροτικούς τύπους της λεκάνης του Αράχθου μας οδηγεί σε χρήσιμα συμπεράσματα για τη διαφοροποίηση της αποδοτικότητάς τους στο γεωγραφικό χώρο της λεκάνης. Οι οικονομικές και περιβαλλοντικές πτυχές του προβλήματος αναδεικνύονται σε σημαντικό βαθμό μιας και εντοπίζονται συγκεκριμένες περιοχές εντός της λεκάνης όπου οι ΔΠ είναι πιο επιθυμητές απ' ότι σε άλλες, με ελαχιστοποίηση του λόγου ΚΑ. Στις περιοχές αυτές το κόστος εφαρμογής των ΔΠ είναι αποδεκτό (σε ορισμένες περιπτώσεις προκύπτει επιπρόσθετο οικονομικό όφελος) και το περιβαλλοντικό αποτέλεσμα σημαντικό. Η παραγωγή χαρτών με απεικόνιση του δείκτη ΚΑ αποτελεί ένα πολύτιμο εργαλείο για την επιλογή των κατάλληλων μέτρων στις κατάλληλες περιοχές, δεδομένου ότι οι ΔΠ πρέπει να υιοθετούνται με γνώμονα τα ιδιαίτερα τοπικά χαρακτηριστικά. Ωστόσο, με τον εμπειρικό τρόπο της στοχευμένης στρατηγικής, ο συνολικός αριθμός των πιθανών συνδυασμών λύσεων που παρέχεται στους λαμβάνοντες τις αποφάσεις για επιλογή μιας συμβιβαστικής λύσης είναι περιορισμένος.

Όπως φάνηκε στον Πίνακα 8.9, η επιλογή μπορεί να γίνει από μία συγκεκριμένη ομάδα τιμών συγκεντρώσεων θρεπτικών στην έξοδο της λεκάνης, χωρίς να παρέχονται λύσεις για ένα μεγάλο εύρος διακύμανσής τους που θα προέκυπτε από την εξέταση πολλών ακόμα ΔΠ. Για παράδειγμα, η καλλιέργεια αραβόσιτου κατά τις ισοϋψείς και η κατάργηση της άροσης δεν εξετάζονται ξεχωριστά με αποτέλεσμα να μην εξάγονται ασφαλή συμπεράσματα για τη μεμονωμένη δράση και αποδοτικότητά τους. Η πλειοψηφία των μεμονωμένων ή συνδυαστικών πρακτικών του Πίνακα 7.6 θα μπορούσε ακόμα να εξεταστεί

οδηγώντας σε μία χρονοβόρα και επίπονη διαδικασία παραγωγής χαρτών για την απεικόνιση της σχέσης ΚΑ. Ακόμα όμως και αν κάτι τέτοιο πραγματοποιούνταν, υπάρχει ένας τεράστιος αριθμός συνδυασμών μέτρων προς εξέταση στις αγροτικές ΥΜ της λεκάνης ίσος με m^n, όπου m ο αριθμός των ΔΠ και n ο αριθμός των ΥΜ. Κατά συνέπεια, όσους συνδυασμούς πρακτικών και αν εξετάσει κανείς στοχευμένα, είναι πολύ δύσκολο να εντοπίσει εκείνους με τη μέγιστη δυνατή περιβαλλοντική αποτελεσματικότητα και το ελάχιστο δυνατό κόστος εφαρμογής.

Επιπρόσθετα, η επιλογή λύσης σύμφωνα με τη μέθοδο που παρουσιάστηκε εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον περιβαλλοντικό στόχο που τίθεται. Για παράδειγμα, ο περιορισμός των απωλειών Ρ μπορεί να οδηγεί σε μία διαχειριστική λύση, πολύ διαφορετική από εκείνη που εγγυάται το στόχο του περιορισμού των απωλειών N-NO3 στη λεκάνη. Ο μελετητής στερείται της δυνατότητας να επιλέξει μεταξύ ενός μεγάλου εύρους διαχειριστικών λύσεων που διαμορφώνουν ταυτόχρονα σε επιθυμητά επίπεδα το λόγο ΚΑ με αναφορά σε δύο ή παραπάνω ρύπους.

Συμπερασματικά ωστόσο, για τη στοχευμένη στρατηγική εφαρμογής ΔΠ στη λεκάνη απορροής του Αράχθου, μπορεί να διατυπωθεί ότι το μέγεθος του λόγου ΚΑ που προκύπτει και κατ' επέκταση οι αποφάσεις για τη διαχείριση της λεκάνης, εξαρτώνται από τους κάτωθι παράγοντες:

- Τη μαθηματική έκφραση αυτής καθεαυτής της σχέσης ΚΑ.
- Την ακρίβεια της οικονομικής προσέγγισης στην αξιολόγηση τους κόστους εφαρμογής των ΔΠ.
- Την προγνωστική ικανότητα του μοντέλου SWAT και την ικανότητά του στην προσομοίωση αγροτικών ΔΠ.
- Τον περιβαλλοντικό στόχο που τίθεται, δηλαδή το είδος και το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο ή συγκέντρωση ρύπου στο ποτάμι.

Τη λύση στα μειονεκτήματα της στρατηγικής αυτής έρχεται να δώσει η βελτιστοποίηση πολλών κριτηρίων (περιβαλλοντικών και οικονομικών) μέσω της επιλογής και τοποθέτησης ΔΠ στο γεωγραφικό χώρο λεκάνης απορροής, με αναζήτηση σε έναν χώρο με πολυάριθμες πιθανές λύσεις που δεν είναι δυνατόν να εντοπιστούν και να εξεταστούν εμπειρικά. Η διαδικασία αυτή παρέχει ένα πλήθος από διαχειριστικά σχήματα για τη λεκάνη (συνδυασμούς ΔΠ) που καλύπτουν ομοιόμορφα όλο το εύρος της πιθανής διακύμανσης των συγκεντρώσεων των ρύπων στο ποτάμι και του συνολικού κόστους εφαρμογής.

9 Λήψη Αποφάσεων για τη Διαχείριση της Λεκάνης του Αράχθου

9.1 Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό περιγράφει αναλυτικά τα αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθοδολογίας και του ΕΥΑ που αναπτύχτηκε στο 6^{ο} Κεφάλαιο και που προσαρμόστηκε στη λεκάνη του Αράχθου στο 7^{ο} με σκοπό τον περιορισμό της μη σημειακής ρύπανσης των επιφανειακών υδάτων από θρεπτικά στην εν λόγω λεκάνη. Η λήψη αποφάσεων σχετικά με οικονομικά και περιβαλλοντικά αποτελεσματικά μέτρα στη λεκάνη, συστήνεται μέσω της ανάγνωσης, ανάλυσης και ερμηνείας των καμπυλών αντιστάθμισης (trade-offs) μεταξύ του οικονομικού και των περιβαλλοντικών στόχων. Οι περιβαλλοντικοί στόχοι που προβλέπονται προς βελτιστοποίηση από τη μεθοδολογία της παρούσας εργασίας είναι η ελαχιστοποίηση των απωλειών φορτίου εδάφους και θρεπτικών από την αγροτική γη στους επιφανειακούς υδάτινους αποδέκτες μέσω επιλογής και τοποθέτησης ΔΠ στις αγροτικές ΥΜ, ενώ ο οικονομικός στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους εφαρμογής. Πρόκειται για ένα πρόβλημα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης με τέσσερα κατά μέγιστο κριτήρια (κόστος, απώλειες εδάφους, P, N-NO3). Ωστόσο, το πρόβλημα προς βελτιστοποίηση που εξετάζεται στη λεκάνη του Αράχθου είναι η ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση κόστους, απωλειών P και απωλειών N-NO3, δηλαδή τριών τελικά κριτηρίων, με τον περιορισμό των απωλειών εδάφους από τη λεκάνη να προκύπτει έμμεσα. Η επιλογή αυτή σχετίζεται με τη φύση των ΔΠ, οι οποίες είναι έτσι δομημένες ώστε όλες να στοχεύουν στη μείωση των απωλειών θρεπτικών, ενώ κάποιες μόνο να επηρεάζουν ταυτόχρονα και τα φερτά (βλ. Κεφ. 7).

Βασική αντικρουόμενη συμπεριφορά σε αυτό το πρόβλημα τριών κριτηρίων αναμένεται να έχει το κόστος με τον κάθε ρύπο. Δεδομένου όμως ότι η φύση των δύο θρεπτικών στοιχείων είναι διαφορετική, αναμένεται και μία μικρότερη αντικρουόμενη συμπεριφορά μεταξύ τους κάτω από τις εκάστοτε ΔΠ ή αν όχι, αναμένεται διαφορετικός βαθμός περιορισμού των απωλειών τους. Οι τρεις στόχοι ενσωματώνονται λοιπόν ταυτόχρονα στη διαδικασία βελτιστοποίησης, ώστε η επίδραση ενός διαχειριστικού σχήματος συγκεκριμένου κόστους στη μείωση του ενός ρύπου εντός της λεκάνης να φανερώνει ταυτόχρονα το αντίκτυπό του στον περιορισμό του άλλου. Οι καμπύλες αντιστάθμισης αναλύονται ωστόσο ανά δύο κριτήρια στο δισδιάστατο χώρο.

Η ανεύρεση λύσεων γίνεται με χρήση της ΒΔΠ στο σχήμα βελτιστοποίησης, η οποία έχει εκ των προτέρων αποθηκεύσει τα περιβαλλοντικά και οικονομικά αποτελέσματα όλων των ΔΠ μετά από εφαρμογή σε όλες τις ΥΜ της λεκάνης, αντικαθιστώντας τη σύνδεση του

μοντέλου SWAT με τη διαδικασία. Δεδομένου ότι η λεκάνη του Αράχθου χωρίστηκε σε 259 ΥΜ, εκ των οποίων 23 είναι ΥΜ αραβόσιτου με 32 πιθανές ΔΠ προς εφαρμογή, 29 είναι ΥΜ μηδικής με 8 ΔΠ προς εφαρμογή, 61 είναι ΥΜ βοσκότοπων με 10 ΔΠ προς εφαρμογή και οι υπόλοιπες 146 είναι ΥΜ αστικής ή δασικής γης με μία ΔΠ προς εφαρμογή (την υφιστάμενη κατάσταση), (βλ. Πίνακες 7.4 και 7.6), ο χώρος αναζήτησης αποτελείται από $32^{23}\times8^{29}\times10^{61}\times1^{146} = 6{,}43\times10^{121}$ διαφορετικές λύσεις. Ο χρόνος που εξοικονομείται με χρήση της ΒΔΠ είναι πολύ μεγάλος και καθιστά τη διαδικασία εφικτή και λειτουργική. Ο ΓΑ του MATLAB ψάχνει λύσεις με ανάγνωση των δεδομένων της ΒΔΠ και προβάλλει τις βέλτιστες με βάση την τήρηση των σχέσεων Pareto κυριαρχίας, όπως περιγράφηκαν στο 5^{ο} Κεφάλαιο. Η λήψη αποφάσεων υποστηρίζεται έτσι μέσα από μία διαδικασία ανεύρεσης λύσεων από ολόκληρο το χώρο αναζήτησης, κάτι που είναι φυσικά ανέφικτο μέσω της στοχευμένης στρατηγικής που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Υπενθυμίζεται πολύ σύντομα η διαδικασία πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης για την επιλογή και τοποθέτηση ΔΠ στην αγροτική γη της λεκάνης του ποταμού Αράχθου. Το μοντέλο SWAT εξετάζει τις 50 ΔΠ που αποτελούν εναλλακτικά σενάρια στις εκτάσεις αραβόσιτου, μηδικής και βοσκότοπων (βλ. ενότητα 7.3.3) με διαδοχικές εκτελέσεις. Οι μέσες ετήσιες (2001-2005) απώλειες εδάφους, N-NO3 και P από όλες τις ΥΜ και τις ΔΠ που είναι δυνατόν να εφαρμόζονται σε αυτές, ανάλογα με τη συμβατότητά τους (Εξ. 7.2), καθώς και το αντίστοιχο κόστος εφαρμογής που υπολογίζεται με βάση τη μεθοδολογία της ενότητας 7.3.2, αποθηκεύονται σε πινακοποιημένη μορφή διαμορφώνοντας τη ΒΔΠ (βλ. ενότητα 7.3.4 και Σχήμα 7.6). Ο ΓΑ του MATLAB αξιολογεί έναν αρχικό πληθυσμό λύσεων, με μία λύση να αντιπροσωπεύει ένα εναλλακτικό ολοκληρωμένο σενάριο διαχείρισης της λεκάνης (χρωμόσωμα – Σχήμα 7.8), υπολογίζοντας με βάση τα δεδομένα της ΒΔΠ τις αντικειμενικές συναρτήσεις που είναι: το συνολικό φορτίο απωλειών N-NO3, το συνολικό φορτίο απωλειών P και το συνολικό κόστος εφαρμογής απ' όλες τις ΥΜ της λεκάνης. Η διαδικασία (Σχήμα 7.7) συνεχίζεται με αναπαραγωγή πληθυσμών μέσω των γενετικών διαδικασιών με συστηματική ελάττωση των τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων έως ότου ο μέγιστος επιτρεπόμενος αριθμός παραγωγής νέων πληθυσμών (γενιών) συμπληρωθεί. Από τον τελικό πληθυσμό, τα μη-κυριαρχούμενα άτομα διατάσσονται στο πρώτο μέτωπο (μέτωπο Pareto) και αντιπροσωπεύουν τις βέλτιστες λύσεις του προβλήματος. Οι λύσεις αυτές δίνουν έναυσμα στο SWAT για ισάριθμες εκτελέσεις και εκτίμηση των συγκεντρώσεων των δύο θρεπτικών στην έξοδο της λεκάνης, οι οποίες αντικαθιστούν τις τιμές απωλειών φορτίου στις καμπύλες αντιστάθμισης του δισδιάστατου χώρου. Η λήψη αποφάσεων λαμβάνεται με υποκειμενικά κριτήρια, από τις εν λόγω καμπύλες (κόστος-συγκεντρώσεις).

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα κύρια επιστημονικά ευρήματα της διατριβής, δηλαδή τα αποτελέσματα της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης που περιλαμβάνουν την

απεικόνιση των λύσεων Pareto και την γεωγραφική κατανομή των ΔΠ στη λεκάνη στην οποία οι λύσεις αυτές παραπέμπουν. Επιχειρείται προηγουμένως η αναλυτική παρουσίαση της λειτουργίας του αλγοριθμικού σχήματος που οδηγεί στις βέλτιστες λύσεις, με ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων του ΓΑ και εντοπισμό των ρυθμίσεων που τον καθιστούν πιο αποδοτικό. Τέλος, παρουσιάζεται η εναλλακτική μετατροπή του προβλήματος σε μονοκριτηριακό, με απόδοση βαρών στα επιμέρους κριτήρια, με ενσωμάτωσή τους δηλαδή σε μία ενιαία έκφραση αντικειμενικής συνάρτησης. Σκοπός της σύντομης και απλής αυτής παράθεσης είναι να ολοκληρωθεί το πλαίσιο των προτεινόμενων μεθόδων για την προσέγγιση του προβλήματος της διαχείρισης λεκάνης απορροής, που περιλαμβάνει και τη στοχευμένη στρατηγική του προηγούμενου κεφαλαίου. Σε αυτό το κεφάλαιο ωστόσο, αναδεικνύεται η πολυκριτηριακή ανάλυση, ως ένα προνομιούχο μέσο υποστήριξης αποφάσεων διαχειριστικού χαρακτήρα.

9.2 Επιλογή συναρτήσεων και παραμέτρων Γενετικού Αλγόριθμου

Για τη λήψη αποφάσεων με σκοπό την επιλογή και τοποθέτηση ΔΠ μέσω πολύκριτηριακής βελτιστοποίησης απαιτείται η εύρεση του βέλτιστου μετώπου Pareto n διαστάσεων, όπου n ο αριθμός των κριτηρίων ή αντικειμενικών συναρτήσεων. Το βέλτιστο Pareto μέτωπο είναι αυτό που περιλαμβάνει τις βέλτιστες ή μη κυριαρχούμενες λύσεις. Στο χώρο κάτω αριστερά από τις λύσεις αυτές, όταν αναλύονται ανά δύο (σε δύο διαστάσεις), δεν υπάρχουν δηλαδή άλλες λύσεις που να κυριαρχούν επί αυτών (βλ. Σχήμα 5.1). Το βέλτιστο Pareto μέτωπο στο δισδιάστατο χώρο είναι λοιπόν αυτό που πλησιάζει κοντά στους άξονες και από το μέτωπο αυτό γίνεται η επιλογή των εφικτών λύσεων. Κάθε μία εξ αυτών είναι βέλτιστη τουλάχιστον ως προς ένα κριτήριο, σε σχέση με κάθε άλλη κυριαρχούμενη λύση.

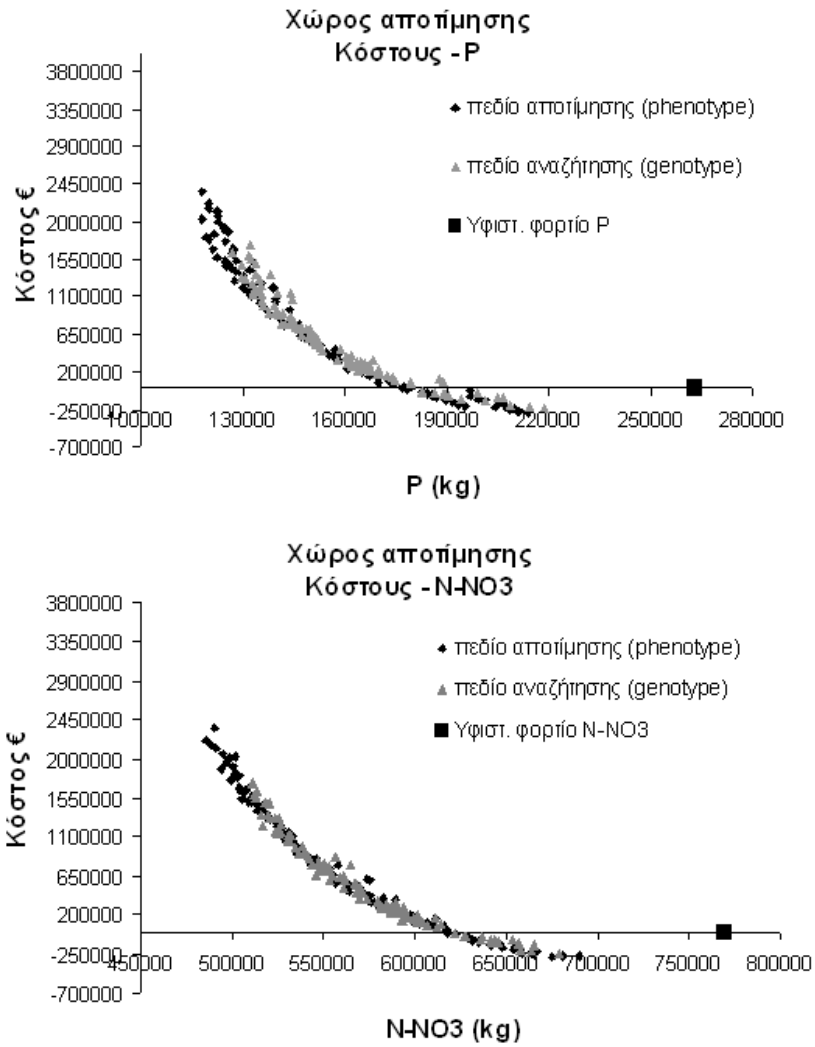
Η προσέγγιση του εν λόγω μετώπου εξαρτάται από το χρόνο που διατίθεται στη διαδικασία βελτιστοποίησης, δεδομένου ότι ο ΓΑ όσο πλησιάζει προς το βέλτιστο μέτωπο τόσο πιο αργά ταυτίζεται με αυτό και έτσι ένας αρκετά μεγάλος αριθμός επαναλήψεων είναι αναγκαίος. Ωστόσο, οι συναρτήσεις και οι παράμετροι που χρησιμοποιεί ο ΓΑ για να πραγματοποιήσει την επιλογή, τη διασταύρωση και τη μετάλλαξη, καθώς και το μέγεθος του πληθυσμού και ο μέγιστος αριθμός παραγόμενων γενιών επηρεάζουν σημαντικά το βαθμό και το χρόνο στους οποίους το βέλτιστο μέτωπο θα προσεγγιστεί. Σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με ΓΑ ενδιαφέρει η εύρεση ενός συμβιβαστικού σχήματος συναρτήσεων και παραμέτρων του, ώστε να επιτυγχάνεται η σύγκλιση με το βέλτιστο μέτωπο σε λογικό χρόνο. Το αν αυτό το μέτωπο, στο οποίο ο αλγόριθμος καταλήγει, είναι όντως μία πιστή προσέγγιση του πραγματικού (ολικά βέλτιστου), μπορεί να ελεγχθεί με εμπειρικούς τρόπους όπως θα δούμε. Στην επόμενη ενότητα παρατίθενται τα αποτελέσματα της ανάλυσης

ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε στις διάφορες επιλογές του ΓΑ του MATLAB μετά από δοκιμαστικές προσπάθειες βελτιστοποίησης τριών κριτηρίων ταυτόχρονα.

9.2.1 Επιλογή γενικών ρυθμίσεων, συναρτήσεων και παραμέτρων γενετικών τελεστών

Ο πολυκριτηριακός εκλεκτικός ΓΑ του MATLAB δουλεύει με την εντολή 'gamultiobj' πάνω σε έναν πληθυσμό και χρησιμοποιεί τους γνωστούς γενετικούς τελεστές για την αναπαραγωγή του. Ο χρήστης ορίζει όλες τις επιλογές για τις συναρτήσεις και τις τιμές των παραμέτρων του ΓΑ μέσω του προγραμματιστικού περιβάλλοντος της επιφάνειας εργασίας ή μέσω σύνταξης ενός M-αρχείου. Η ανάλυση ευαισθησίας εξέτασε τις πιο σημαντικές εναλλακτικές επιλογές ρυθμίσεων (συναρτήσεις και τιμές παραμέτρων) με μεταβολή μίας κάθε φορά και με σταθερές τις υπόλοιπες, ενώ η εκτέλεση με τον ίδιο αρχικό πληθυσμό κάθε φορά βοήθησε ώστε να αποφευχθούν πιθανές αποκλίσεις λόγω διαφορετικών αρχικών συνθηκών. Κάποιες τυπικές επιλογές κατά τη διάρκεια όλων των εκτελέσεων είναι: α) το μέτρο με το οποίο ο αλγόριθμος εκτιμά τη διασπορά των λύσεων πάνω στο μέτωπο Pareto. Επιλέχτηκε η λεγόμενη *απόσταση συνωστισμού* (βλ. ενότητα 5.3.4), συνάρτηση η οποία είναι ενσωματωμένη στην εργαλειοθήκη ΓΑ του MATLAB (MATLAB, 2010a), β) η διαβάθμιση καταλληλότητας των ατόμων μετά από την αξιολόγησή τους. Η διαβάθμιση έγινε με την ενσωματωμένη στην εργαλειοθήκη συνάρτηση 'Rank', που σημαίνει με βάση τον ιεραρχικό βαθμό κάθε ατόμου και όχι με τη βαθμολογία αυτή καθεαυτή (βλ. ενότητα 5.4.2).

Η πρώτη σύγκριση αφορά στη διαμόρφωση του μετώπου Pareto μετά από υπολογισμό της απόστασης συνωστισμού στο χώρο αναζήτησης και στο χώρο αποτίμησης. Πρόκειται δηλαδή για υπολογισμό της διασποράς των λύσεων πάνω στο μη κυριαρχούμενο μέτωπο στους δύο προαναφερθέντες χώρους σύμφωνα με την ενσωματωμένη συνάρτηση του ΓΑ NSGA-II, παραλλαγή του οποίου είναι ο ΓΑ του MATLAB. Στην πρώτη περίπτωση ο αλγόριθμος υπολογίζει τις αποστάσεις των λύσεων μεταξύ τους (διασπορά στο μέτωπο) με βάση το γονότυπό τους (genotype space), ενώ στη δεύτερη με βάση το φαινότυπο (phenotype space). Συστηματικά μετά από δοκιμές, βρέθηκε ότι στο παρόν πρόβλημα βελτιστοποίησης το μέτωπο Pareto διαμορφώνεται καλύτερα με τη δεύτερη επιλογή. Αυτό αποδείχτηκε με πολλούς συνδυασμούς μεγέθους πληθυσμών, αριθμού γενιών και άλλων παραμέτρων. Στο Σχήμα 9.1 παρατίθενται ωστόσο οι καμπύλες αντιστάθμισης κόστους-P και κόστους-N-NO3 μετά από βελτιστοποίηση τριών κριτηρίων με πληθυσμό 250 και αριθμό γενιών 100.

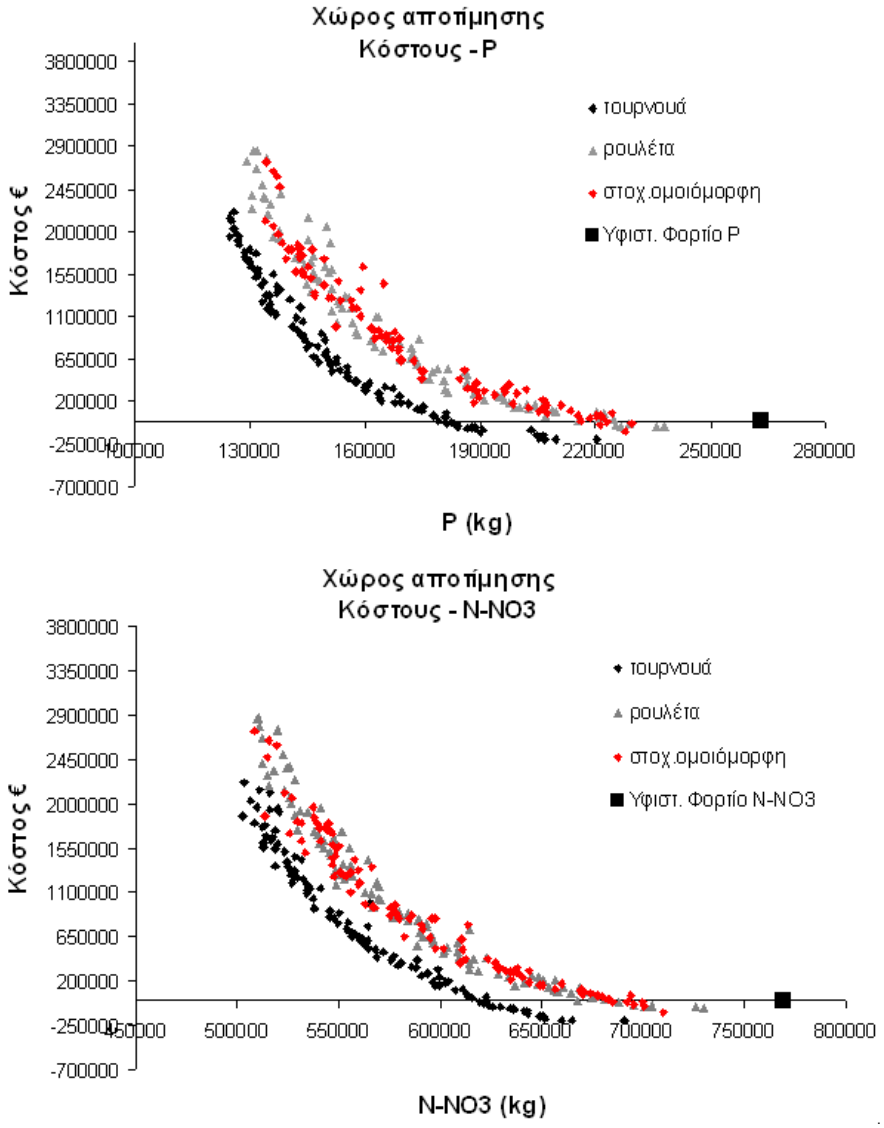


Σχήμα 9.1 Μέτωπα Pareto στο δισδιάστατο χώρο κόστους-P (πάνω) και κόστους-N-NO3 (κάτω) με υπολογισμό της διασποράς των λύσεων στο χώρο αναζήτησης και αποτίμησης.

Όπως προκύπτει από το σχήμα, όταν χρησιμοποιείται η δεύτερη επιλογή δηλαδή ο υπολογισμός της διασποράς των λύσεων στο φαινοτυπικό πεδίο τιμών, το μέτωπο Pareto που διαμορφώνεται είναι πιο ικανοποιητικό με μεγαλύτερο μήκος προς τις δύο κατευθύνσεις και καλύτερη διασπορά των λύσεων. Σημειώνεται ότι οι λύσεις που βρίσκονται στα δύο μέτωπα Pareto του κάθε διαγράμματος είναι ίσες μεταξύ τους και αθροίζουν σε 100 σε κάθε μέτωπο λόγω της επιλογής ποσοστού 40% των ατόμων του πληθυσμού να βρίσκονται στο πρώτο μη κυριαρχούμενο μέτωπο (Pareto Fraction = 0,40). Παρατηρείται ακόμα ότι τα μέτωπα βρίσκονται αρκετά μακριά από το υφιστάμενο συνολικό φορτίο απωλειών P και N-NO3 από τις ΥΜ της λεκάνης μετά από την παραγωγή μόλις 100 γενιών. Η επιλογή του φαινοτυπικού πεδίου τιμών για την αξιολόγηση της διασποράς των λύσεων έχει ωστόσο από τόσο νωρίς

οδηγήσει σε ένα πιο καλά κατανεμημένο μέτωπο που καλύπτει αρκετά μεγαλύτερο εύρος πιθανών λύσεων.

Η επιλογή των ατόμων-γονέων για αναπαραγωγή μετά τη διαβάθμισή τους γίνεται με κάποια συνάρτηση επιλογής. Στο Σχήμα 9.2 συγκρίνεται η απόδοση τριών επιλογών για τη συνάρτηση αυτή στη διαμόρφωση των μετώπων Pareto μετά από παραγωγή 100 γενιών πληθυσμού 250 με υπολογισμό της διασποράς των λύσεων στο φαινοτυπικό πεδίο τιμών.

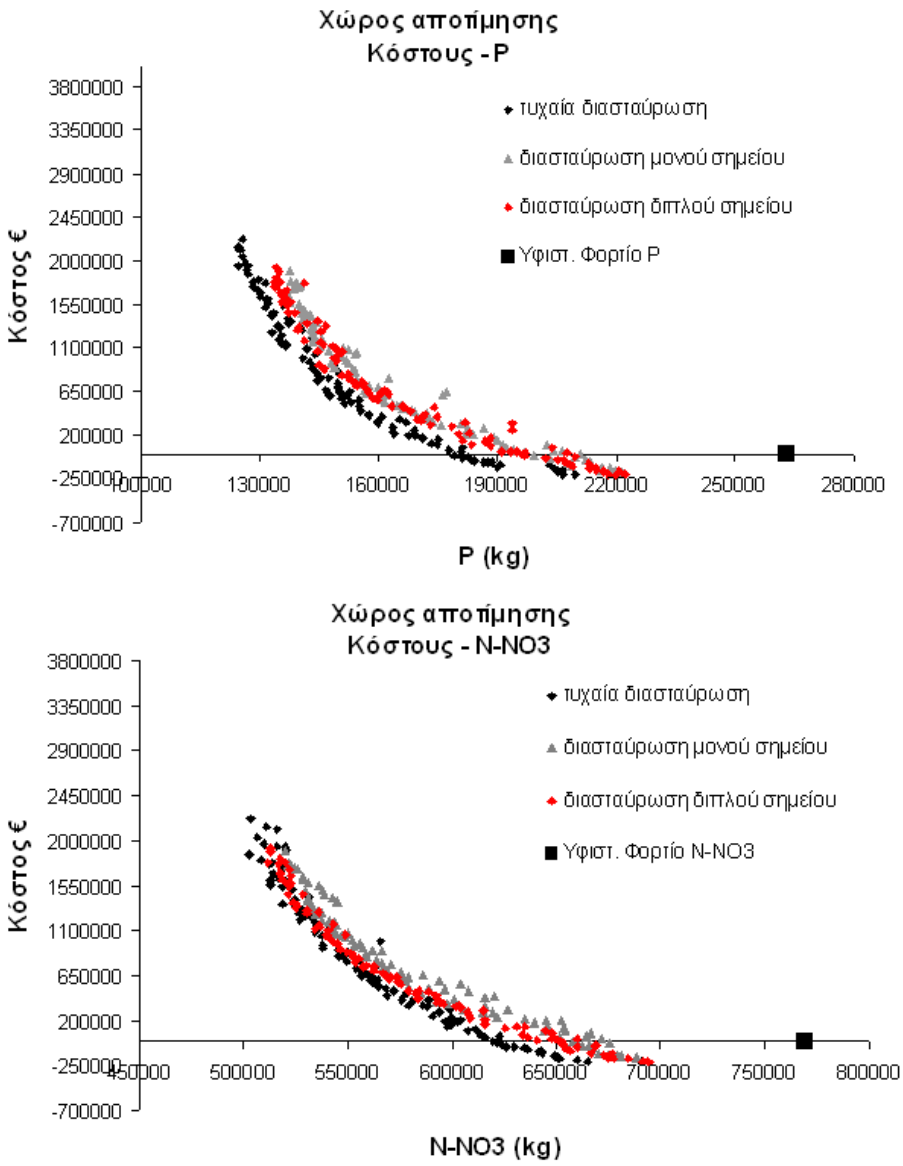


Σχήμα 9.2 Μέτωπα Pareto στο δισδιάστατο χώρο κόστους-P (πάνω) και κόστους-N-NO3 (κάτω) με τρεις συναρτήσεις επιλογής των ατόμων-γονέων για παραγωγή της επόμενης γενιάς.

Πρόκειται για τη στοχαστικά ομοιόμορφη (stochastic uniform) επιλογή, την επιλογή του τροχού της ρουλέτας (roulette wheel) και την επιλογή τουρνουά (tournament selection). Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η επιλογή των ατόμων-γονέων με χρήση της κάθε συνάρτησης έχει περιγραφεί στην ενότητα 5.4.2.

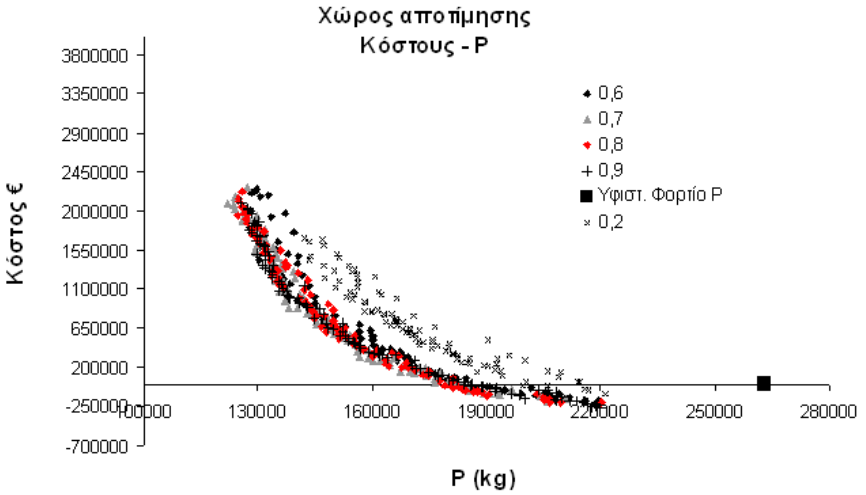
Είναι φανερό από το σχήμα ότι η επιλογή τουρνουά, δηλαδή η σύγκριση δύο τυχαία επιλεγμένων μελών του πληθυσμού και η επιλογή του καλύτερου ατόμου (λύσης), διαμορφώνει καλύτερο μέτωπο, που αντιστοιχεί σε μικρότερες και πιο επιθυμητές τιμές για τα τρία κριτήρια. Η εν λόγω μέθοδος συστήνεται άλλωστε σε προβλήματα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, τόσο από το εγχειρίδιο χρήσης του ΓΑ του MATLAB (MATLAB, 2010a), όσο και από άλλους ερευνητές (Makropoulos and Butler, 2005a· Nicklow et al., 2010). Οι παραπάνω επιλογές ελέγχθηκαν και για μεγαλύτερο αριθμό γενιών, ωστόσο τα αποτελέσματα του Σχήματος 9.2 είναι ενδεικτικά της καλύτερης προσέγγισης του μετώπου Pareto όταν υιοθετείται η επιλογή τουρνουά.

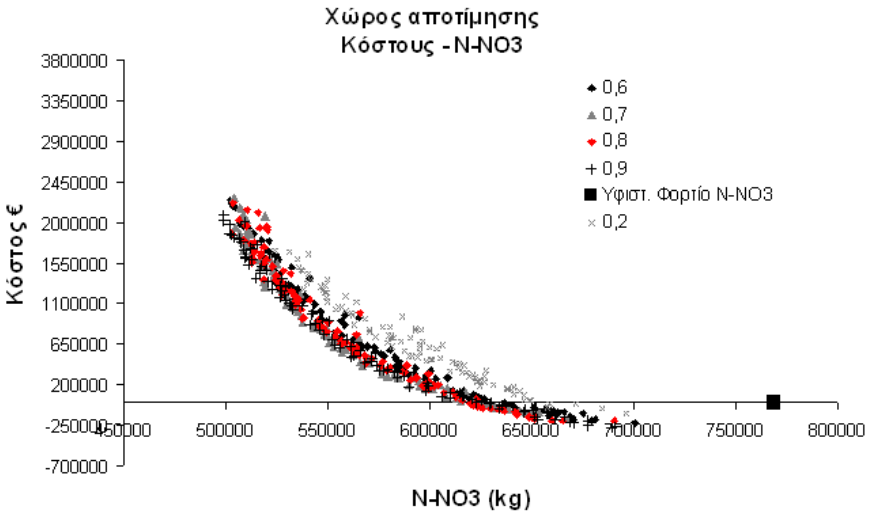
Η επιλογή τουρνουά τέθηκε εκ νέου ως μέθοδος επιλογής των ατόμων-γονέων και η ανάλυση ευαισθησίας συνεχίζεται με σύγκριση των συναρτήσεων διασταύρωσης. Συγκρίθηκαν τρεις μέθοδοι διασταύρωσης των ατόμων του πληθυσμού, η τυχαία, η μονού σημείου και η διπλού σημείου (βλ. ενότητα 5.4.2 και Σχ. 5.6). Αναφέρεται ότι οι υπόλοιπες επιλογές στην εργαλειοθήκη ΓΑ του MATLAB οδηγούσαν σε πολύ χειρότερα αποτελέσματα και δεν παρουσιάζονται. Η θέση και η μορφή των μετώπων Pareto μετά από παραγωγή 100 γενιών πληθυσμού 250 ατόμων παρουσιάζεται στο Σχήμα 9.3 στο δισδιάστατο χώρο κόστους-P και κόστους-N-NO3. Τα αποτελέσματα, ιδιαίτερα στο χώρο κόστους-P, κάνουν εμφανή την υπεροχή της τυχαίας διασταύρωσης με το μέτωπο να έχει προχωρήσει περισσότερο και να περιλαμβάνει πιο επιθυμητές λύσεις. Η ανάλυση ευαισθησίας έχει γίνει επίσης για άλλους συνδυασμούς πληθυσμού και αριθμού γενιών, καθώς επίσης και για μονοκριτηριακά προβλήματα βελτιστοποίησης στην περιοχή μελέτης (ελαχιστοποίηση P, N-NO3 ή κόστους – ένα κάθε φορά) με τον ΓΑ του MATLAB και τα αποτελέσματα μαρτυρούν συστηματικά αυτήν την υπεροχή.



Σχήμα 9.3 Μέτωπα Pareto στο δισδιάστατο χώρο κόστους-P (πάνω) και κόστους-N-NO3 (κάτω) με τρεις διαφορετικές συναρτήσεις διασταύρωσης των ατόμων του πληθυσμού.

Με επιλογή πλέον της τυχαίας διασταύρωσης ελέγχθηκαν διάφορες πιθανότητες διασταύρωσης, που ουσιαστικά δηλώνουν το ποσοστό των ατόμων του πληθυσμού που υπόκεινται στη γενετική αυτή διαδικασία. Η αρχική πιθανότητα ήταν 0,8, ενώ επιλέχτηκαν ακόμα οι τιμές 0,2· 0,6· 0,7 και 0,9 και παρουσιάζονται ως προς την επίδρασή τους στη διαμόρφωση των μετώπων Pareto των τριών κριτηρίων ανά δύο στο Σχήμα 9.4.



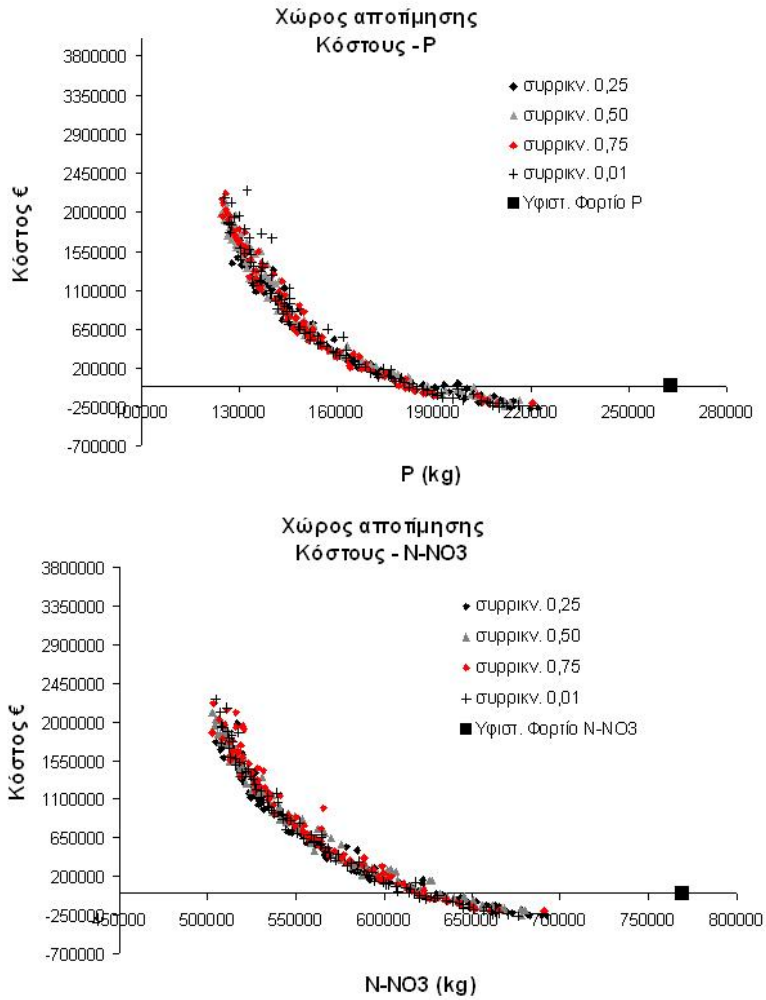


Σχήμα 9.4 Μέτωπα Pareto στο δισδιάστατο χώρο κόστους-P (πάνω) και κόστους-N-NO3 (κάτω) με πέντε διαφορετικές τιμές πιθανότητας διασταύρωσης των ατόμων του πληθυσμού.

Δεδομένου ότι η διασταύρωση είναι η κύρια γενετική διαδικασία αναπαραγωγής, θεωρείται ότι μία υψηλή τιμή της πιθανότητας είναι λογικά απαραίτητη για την επιτάχυνση της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Αυτό άλλωστε αποδεικνύεται και από την αρχική συνιστώμενη ρύθμιση (0,8). Αρχικά επιλέχτηκαν πιθανότητες διασταύρωσης κοντινές στην τιμή 0,8, και συγκεκριμένα οι τιμές 0,6· 0,7 και 0,9. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 9.4, τα μέτωπα Pareto με επιλογή πιθανότητας διασταύρωσης μεταξύ αυτών των τιμών και της υφιστάμενης (0,8) δεν διαφέρουν ιδιαίτερα μετά από παραγωγή 100 γενιών πληθυσμού 250 ατόμων. Μόνο το μέτωπο με τιμή 0,6 μπορεί κάπως να διακριθεί στο συναρτησιακό χώρο κόστους – P (πάνω) ότι αποκλίνει από τα υπόλοιπα. Είναι μία ένδειξη ότι όταν επέρχεται αισθητή μείωση από την αρχική η θέση του μετώπου είναι χειρότερη. Προς διερεύνηση αυτού, τέθηκε τέλος τιμή πιθανότητας διασταύρωσης ίση με 0,2 και τα μέτωπα που προέκυψαν και στα δύο

διαγράμματα του Σχήματος 9.4 ήταν εμφανώς απομακρυσμένα από τα υπόλοιπα. Τελικά, και μετά από πολλαπλές δοκιμές με πληθυσμούς και μέγιστο αριθμό παραγόμενων γενιών επιλέχθηκε η τιμή πιθανότητας διασταύρωσης 0,8 σταθερά για τη συνέχεια της ανάλυσης ευαισθησίας, αλλά και ως τυπική τιμή για το τελικό σχήμα βελτιστοποίησης.

Η ανάλυση ευαισθησίας που έγινε σχετικά με τη διαδικασία της μετάλλαξης δεν οδήγησε σε σημαντικά ευρήματα. Στην παρούσα εργασία επιλέχτηκε η *Γκαουσσιανή* μετάλλαξη ύστερα από σύγκρισή της με την ομοιόμορφη. Η βασική παράμετρος της συρρίκνωσης που διέπει το ρυθμό μετάλλαξης των ατόμων του πληθυσμού κατά τη διάρκεια της διαδικασίας βελτιστοποίησης, με βάση την Εξίσωση 5.3, επιδέχεται προσαρμογής. Η επίδρασή της στα μέτωπα Pareto απεικονίζεται στο Σχήμα 9.5.



Σχήμα 9.5 Μέτωπα Pareto στο δισδιάστατο χώρο κόστους-P (πάνω) και κόστους-N-NO3 (κάτω) με τέσσερις διαφορετικές τιμές συρρίκνωσης του ρυθμού μετάλλαξης των ατόμων του πληθυσμού κατά την εξέλιξη της βελτιστοποίησης.

Ο πειραματισμός με τιμές συρρίκνωσης 0,25· 0,50 και 0,75 που δηλώνουν το ποσοστό της μείωσης του ρυθμού μετάλλαξης στην τελευταία γενιά ως προς εκείνον στην πρώτη (κατά την έναρξη της βελτιστοποίησης), έχει ως αποτέλεσμα τη διαμόρφωση παραπλήσιων μετώπων Pareto. Αυτό σημαίνει ότι ο ρυθμός μείωσης της μετάλλαξης δεν είναι τόσο κρίσιμος για την πορεία της βελτιστοποίησης. Αυτό αποδείχτηκε και όταν οι εν λόγω τιμές διερευνήθηκαν ως προς το αντίκτυπό τους στα μέτωπα που προέκυπταν μετά από πολύ μεγάλο αριθμό γενιών με την απεικόνιση όμως να μην προδίδει καμία διαφοροποίηση. Στην παρούσα απεικόνιση με πληθυσμό 250 και 100 γενιές φαίνεται έστω και αμυδρά, κυρίως από το χώρο αποτίμησης κόστους-P, ότι η τιμή 0,75 υπερέχει ελαφρά ως προς τη διαμόρφωση της έκτασης του μετώπου Pareto. Η τιμή αυτή υποδηλώνει ότι ο ρυθμός μετάλλαξης των ατόμων του πληθυσμού στην τελευταία γενιά είναι μειωμένος κατά 75% με εκείνον στην αρχική, που έχει τεθεί ίσος με τον μέγιστο δυνατό. Τελικά, επιχειρήθηκε ο έλεγχος των μετώπων με σχεδόν μηδενική μείωση του ρυθμού μετάλλαξης κατά την τελευταία γενιά (0,01). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.11, τα αποτελέσματα δεν διαφέρουν σημαντικά, αλλά η επιλογή αυτή είναι καλύτερο να μην προτιμάται ώστε η μετάλλαξη να πραγματοποιείται με έναν μειούμενο ρυθμό όσο η διαδικασία εξελίσσεται. Σε γενικές γραμμές πάντως αποδεικνύεται ότι στη Γκαουσσιανή συνάρτηση για την πραγματοποίηση της μετάλλαξης στον ΓΑ του MATLAB, ο ρυθμός μείωσης της μετάλλαξης με το πέρας της διαδικασίας δεν είναι ιδιαίτερα ευαίσθητος ως προς τη διαμόρφωση των αποτελεσμάτων, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι η διαδικασία της μετάλλαξης συνολικά δεν είναι σημαντική κατά τη βελτιστοποίηση.

9.2.2 Επιλογή μεγέθους πληθυσμού και μέγιστου παραγόμενου αριθμού γενιών

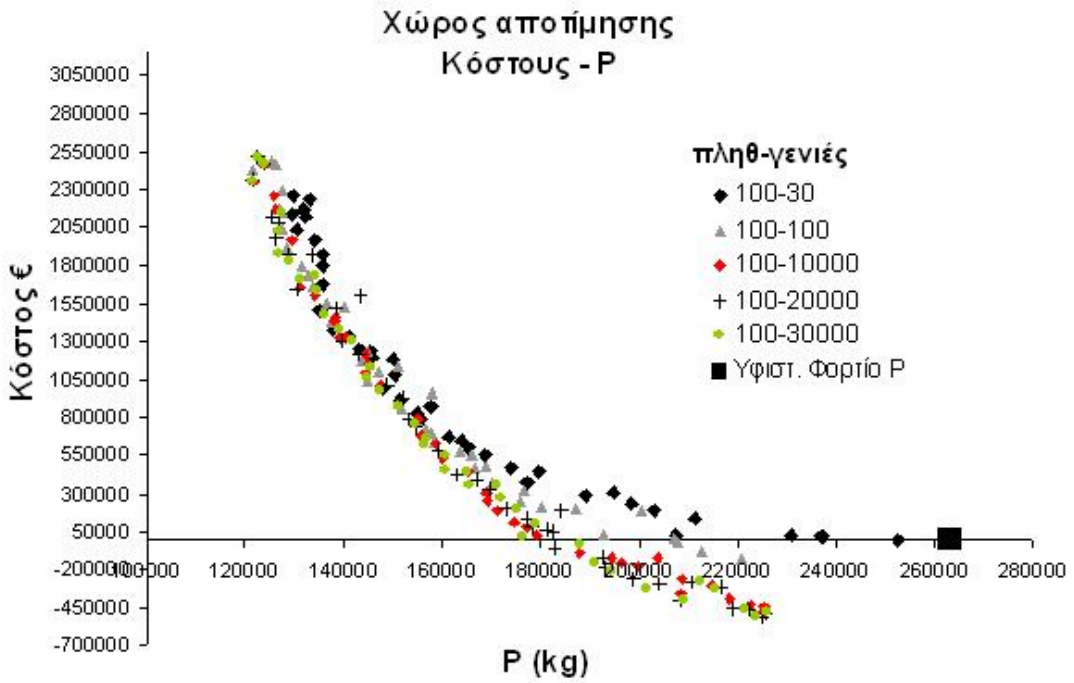
Οι πιο σημαντικές παράμετροι για την προσέγγιση του βέλτιστου μετώπου Pareto στην πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση με τον ΓΑ του MATLAB αναμένεται να είναι το μέγεθος του πληθυσμού και ο μέγιστος αριθμός γενιών μέχρι τον τερματισμό της διαδικασίας. Δυστυχώς όμως, μεγάλος πληθυσμός και αριθμός γενιών εγγυώνται το επιθυμητό αποτέλεσμα μετά από μεγάλο χρονικό διάστημα εκτέλεσης της διαδικασίας. Ο μεγάλος πληθυσμός συνεπάγεται περισσότερα άτομα κατά τη διαδικασία της εξέλιξης, άρα και μεγαλύτερη πιθανότητα να παραχθούν καλύτεροι απόγονοι. Μεγάλος αριθμός γενιών επιτρέπει την παραγωγή πολλών πληθυσμών και την αξιολόγηση πολλών λύσεων με αποτέλεσμα να ανακαλύπτονται συνεχώς καλύτερες. Ο χρόνος όμως που απαιτείται για την ολοκλήρωση της διαδικασίας είναι ένας περιοριστικός παράγοντας αφού είναι επιθυμητό η ολοκλήρωσή της να πραγματοποιείται σε ένα εύλογο χρονικό διάστημα. Είναι έτσι

απαραίτητο να γίνει ένας συμβιβασμός μετά από ανάλυση ευαισθησίας των δύο αυτών σημαντικών παραμέτρων.

Οι βέλτιστες συναρτήσεις και παράμετροι που προέκυψαν από την ανάλυση ευαισθησίας της προηγούμενης ενότητας επιλέχτηκαν και ο αλγόριθμος εκτελέστηκε για έναν επαρκή αριθμό συνδυασμών μεγέθους πληθυσμού και μέγιστου αριθμού γενιών. Οι μεγάλοι πληθυσμοί (π.χ. 500, 750, 1000) βρέθηκε ότι μπορούσαν να προσεγγίσουν το βέλτιστο μέτωπο Pareto μετά από σχετικά μικρό αριθμό γενιών (π.χ. 1000). Όπως θα δούμε παρακάτω όμως, ο μικρός αριθμός γενιών με έναν μεγάλο πληθυσμό δεν αντισταθμίζει απόλυτα τον απαιτούμενο χρόνο παραγωγής μεγάλου αριθμού γενιών με μικρότερο πληθυσμό. Αρχικά, επιλέχτηκαν πληθυσμοί 100, 250, 500 και 750 ατόμων και ελέγχθηκε η εξέλιξη της θέσης του μετώπου Pareto μετά από συγκεκριμένους αριθμούς παραγόμενων γενιών. Τα ποσοστά του αριθμού των ατόμων του πληθυσμού που κατά μέγιστο μπορούν να βρίσκονται στο πρώτο μη κυριαρχούμενο μέτωπο ήταν 40, 40, 30 και 20 αντίστοιχα για τους τέσσερις πληθυσμούς. Επιλέχθηκε να μειώνεται το ποσοστό με την αύξηση του μεγέθους του πληθυσμού ώστε στους μεγάλους πληθυσμούς να μην δημιουργείται ένα σμήνος από σημεία και να διατηρείται μία ικανοποιητική διασπορά των λύσεων πάνω στο μέτωπο. Βέβαια, η συγκεκριμένη επιλογή δε μπορεί να είναι ανεξέλεγκτη αφού το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο στον αριθμό των μη κυριαρχούμενων λύσεων καθορίζεται και από τη διαδικασία της βελτιστοποίησης. Ο έλεγχος παρουσιάζεται με απεικόνιση των μετώπων Pareto στο δισδιάστατο χώρο αποτίμησης του κόστους με το συνολικό φορτίο απωλειών P από όλες τις ΥΜ της λεκάνης του Αράχθου. Η απεικόνιση αυτή αρκεί, δεδομένου ότι η διαμόρφωση των μετώπων στο δισδιάστατο χώρο κόστους - N-NO3 είναι πανομοιότυπη.

Στο Σχήμα 9.6 παρουσιάζεται η εξέλιξη του μετώπου Pareto μετά από 30, 100, 10000, 20000 και 30000 γενιές με πληθυσμό 100. Στο μέτωπο βρίσκονται κάθε φορά 40 άτομα (λύσεις) από τον πληθυσμό. Όπως παρατηρούμε, μετά από 30 γενιές ο αλγόριθμος δεν έχει καταφέρει να βρει κάποια λύση με οικονομικό όφελος, ενώ το ελάχιστο συνολικό φορτίο απωλειών P από τις ΥΜ της λεκάνης είναι λίγο μεγαλύτερο από 130tn. Η εξέλιξη της διαδικασίας μετά από 70 ακόμα γενιές οδηγεί σε ένα βελτιωμένο, ως προς τη θέση, μέτωπο με εύρεση συνδυασμών ΔΠ στη λεκάνη που μειώνει περαιτέρω το φορτίο P και περιλαμβάνει λύσεις που αποφέρουν κέρδος. Ωστόσο, η συνέχεια της διαδικασίας δεν επιφυλάσσει ιδιαίτερη βελτίωση των αποτελεσμάτων. Όπως παρατηρείται, μετά από 10000, 20000 και 30000 γενιές η θέση του μετώπου βελτιώνεται ελάχιστα με το συνολικό φορτίο P να είναι περίπου 120000kg και το συνολικό κόστος -450000€. Αναλύοντας τη βάση δεδομένων των ΔΠ (ΒΔΠ) που προέκυψε για τη λεκάνη του Αράχθου με βάση τη μεθοδολογία της ενότητας 7.3.4, έχουν βρεθεί τα ελάχιστα δυνατά φορτία απωλειών P και N-NO3 που μπορούν να προκύψουν από συγκεκριμένο συνδυασμό ΔΠ στη λεκάνη και είναι ίσα με 103762 και

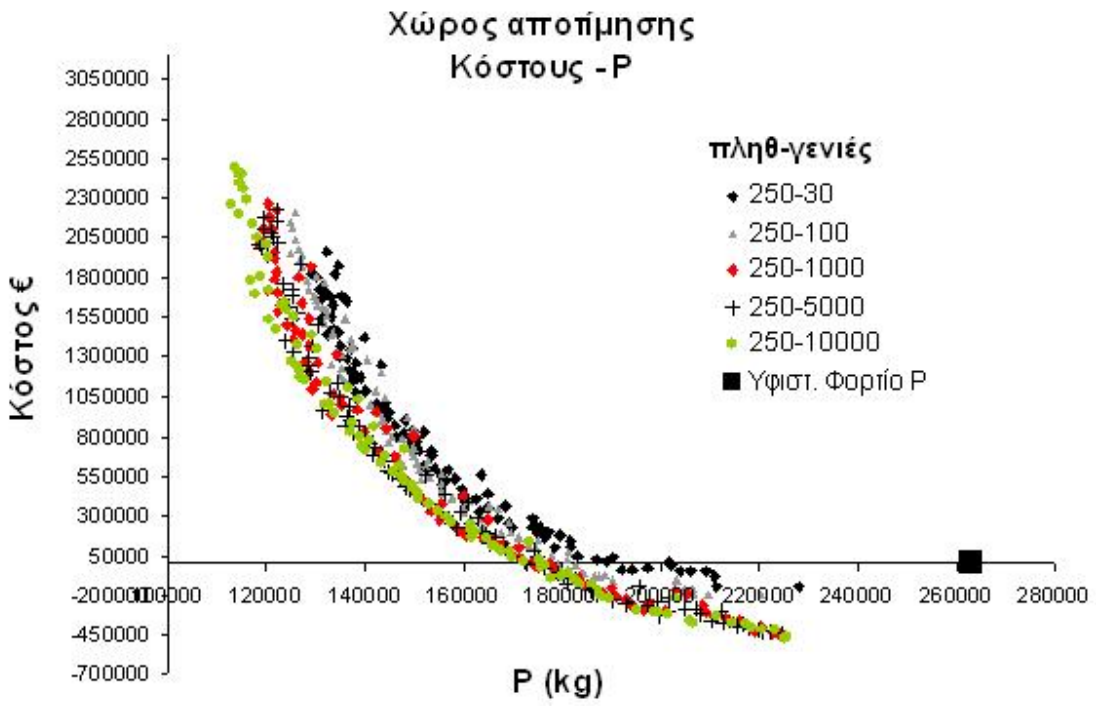
459232kg για τα δύο θρεπτικά αντίστοιχα. Το ελάχιστο κόστος είναι -520500€, που αντιστοιχεί σε συνολικό ετήσιο κέρδος από συγκεκριμένο συνδυασμό ΔΠ. Ένας εμπειρικός τρόπος να ελεγχθεί η προσέγγιση του ολικού ή βέλτιστου μετώπου Pareto είναι λοιπόν η παρατήρηση του πόσο μακριά βρίσκονται οι παραπάνω ελάχιστες τιμές από το εκάστοτε διαμορφωθέν μέτωπο. Στο Σχήμα 9.6 είναι σαφές ότι ακόμα και μετά από 30000 γενιές ο αλγόριθμος απέχει πολύ από τη θέση του βέλτιστου μετώπου Pareto και μάλιστα η πολύ αργή σύγκλιση του μετώπου προδίδει την κατά πάσα πιθανότητα αδυναμία της συγκεκριμένης επιλογής να οδηγήσει στο επιθυμητό αποτέλεσμα.



Σχήμα 9.6 Εξέλιξη μετώπου Pareto στο δισδιάστατο χώρο κόστους-P με πληθυσμό 100.

Η αύξηση του μεγέθους του πληθυσμού θεωρείται επιβεβλημένη και έτσι ένας νέος πληθυσμός που περιλαμβάνει 250 άτομα εξετάζεται ως προς την αποδοτικότητά του στο Σχήμα 9.7. Όπως διακρίνεται, μετά από 30 μόλις γενιές ο αλγόριθμος εντοπίζει τώρα κάποιες λύσεις αρνητικού κόστους, ενώ μετά από 100 η θέση του μετώπου παρουσιάζεται βελτιωμένη. Με την παρέλευση 1000 γενιών ο αλγόριθμος εντοπίζει λύσεις με φορτίο P κοντά στα 120000kg, κάτι που οριακά κατέστη δυνατό με πληθυσμό 100 μετά από 30000 γενιές. Η συνέχεια είναι ακόμα πιο διαφωτιστική της επίδρασης του πληθυσμού στην αποδοτικότητα της διαδικασίας αφού μετά από 5000 και ιδιαίτερα μετά από 10000 γενιές, ο αλγόριθμος έχει βελτιώσει κατά πολύ τη θέση του μετώπου με εύρεση λύσεων συνολικού

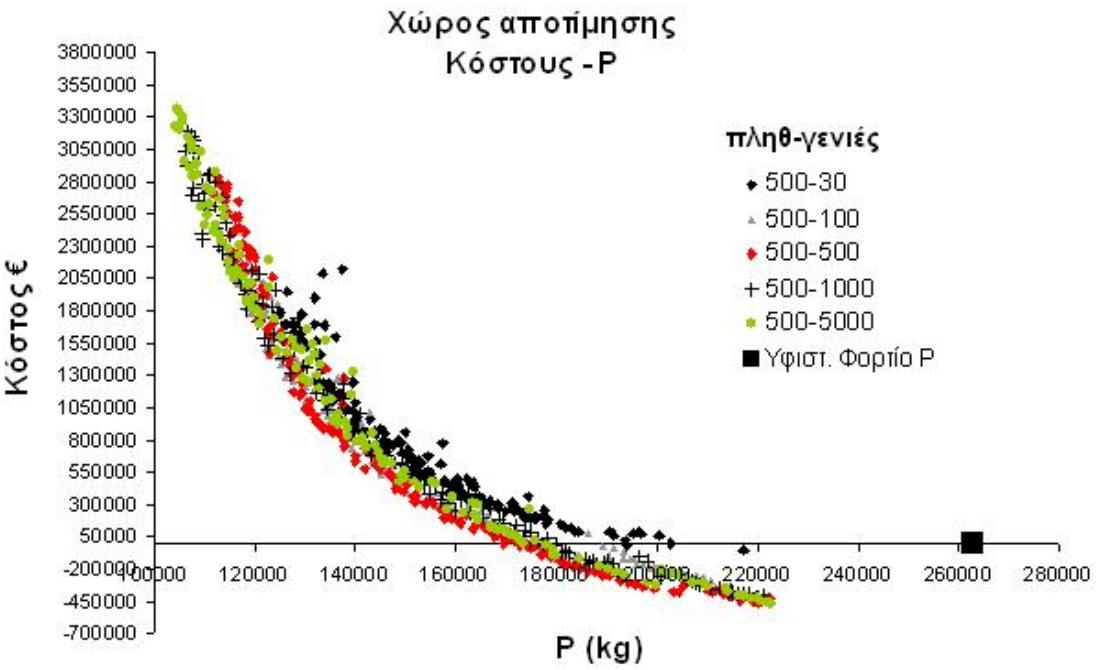
φορτίου μικρότερου των 120tn και κόστους κοντά στα χαμηλότερα δυνατά όρια. Συνολικά, το μέτωπο προσεγγίζει επίσης καλύτερα τους άξονες και έχει πιο κυρτό σχήμα.



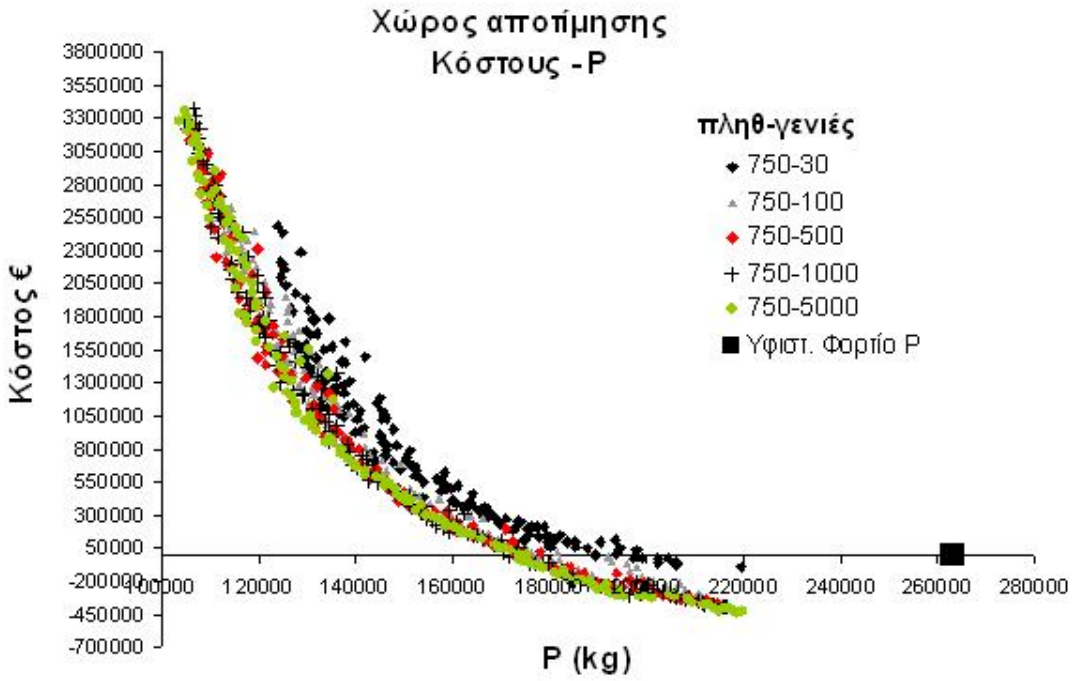
Σχήμα 9.7 Εξέλιξη μετώπου Pareto στο δισδιάστατο χώρο κόστους-P με πληθυσμό 250.

Στο Σχήμα 9.8 παρουσιάζεται η εξέλιξη του μετώπου Pareto όταν ο πληθυσμός περιλαμβάνει 500 άτομα. Αυτό που προκαλεί ενδιαφέρον είναι το γεγονός ότι από τις 500 κιόλας γενιές ο αλγόριθμος έχει ανακαλύψει αρκετές λύσεις με συνολικό φορτίο P κοντά πλέον στα 110000kg και με κόστος πολύ κοντά στα κατώτερα όρια, ενώ το σχήμα του μετώπου προδίδει ικανοποιητικότερη σύγκλιση με το ολικά βέλτιστο. Όσο η διαδικασία προχωρά (1000 και 5000 γενιές), τόσο μεγαλύτερη πρόοδος παρατηρείται με το μέτωπο να προσεγγίζει πλέον πολύ κοντά στο ελάχιστο όριο φορτίου P. Το μέτωπο του πληθυσμού 500 και των 5000 γενιών βρίσκεται σε καλύτερη θέση από εκείνο του μισού πληθυσμού και διπλάσιων γενιών (250-10000) που παρουσιάστηκε νωρίτερα.

Τέλος, στο Σχήμα 9.9 παρουσιάζεται η εξέλιξη του μετώπου μετά από επιλογή πληθυσμού 750 ατόμων. Πρόκειται πλέον για έναν πολύ μεγάλο πληθυσμό που σκοπό έχει να επιβεβαιώσει τα μέχρι τώρα συμπεράσματα. Πράγματι, από τις 500 κιόλας γενιές το μέτωπο παίρνει πολύ ικανοποιητικό σχήμα και έχει ικανοποιητικό μήκος προσεγγίζοντας τα ελάχιστα όρια, ενώ μετά από 1000 και 5000 γενιές μπορούμε να θεωρήσουμε ότι σχεδόν ταυτίζεται με αυτά.



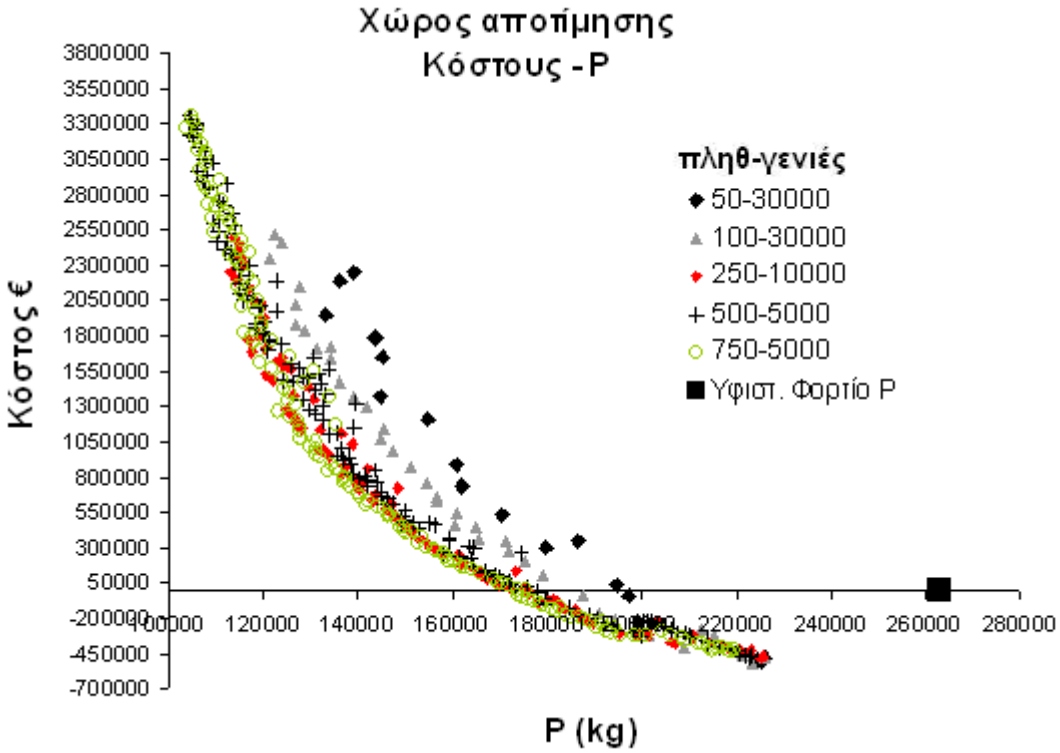
Σχήμα 9.8 Εξέλιξη μετώπου Pareto στο δισδιάστατο χώρο κόστους-P με πληθυσμό 500.



Σχήμα 9.9 Εξέλιξη μετώπου Pareto στο δισδιάστατο χώρο κόστους-P με πληθυσμό 750.

Σε γενικές γραμμές, αυτό που αναμφισβήτητα συμπεραίνεται είναι ότι ο μεγάλος πληθυσμός οδηγεί στο ίδιο ή καλύτερο αποτέλεσμα μετά από μικρότερο αριθμό γενιών σε σχέση με έναν μικρότερο, κάτι που άλλωστε αναμενόταν. Ωστόσο, τα ακριβή αριθμητικά

αποτελέσματα και η εξέλιξη του μετώπου που παρατηρήθηκε με τους δύο μεγάλους πληθυσμούς (500 και 750) κατέδειξαν ότι ακόμα και στην περίπτωση του μεγάλου πληθυσμού η απόλυτη σύγκλιση με το ολικά βέλτιστο μέτωπο Pareto γίνεται από ένα σημείο και μετά πολύ αργά. Ως αποτέλεσμα, απαιτείται και εδώ η παραγωγή ενός σημαντικά μεγαλύτερου αριθμού γενιών μέχρι τον τερματισμό της διαδικασίας βελτιστοποίησης (π.χ. 15000 - 20000), ώστε να εγγυηθεί την εύρεση του ολικά βέλτιστου μετώπου Pareto. Στο Σχήμα 9.10 συγκρίνονται άμεσα πέντε διαφορετικοί πληθυσμοί με βάση τη θέση του διαμορφωθέντος μετώπου Pareto ύστερα από παραγωγή συγκεκριμένου αριθμού γενιών για τον καθένα. Πρόκειται για την παράλληλη απεικόνιση των καλύτερων μετώπων από τα Σχήματα 9.6-9.9 με προσθήκη ενός ακόμα συνδυασμού με μικρό πληθυσμό (50).



Σχήμα 9.10 Διαμόρφωση μετώπων Pareto στο δισδιάστατο χώρο κόστους-P με πέντε διαφορετικούς συνδυασμούς μεγέθους πληθυσμού – μέγιστου αριθμού παραγόμενων γενιών.

Από το παραπάνω Σχήμα γίνεται εκ νέου αντιληπτή η υπεροχή των μεγαλύτερων πληθυσμών έναντι των μικρότερων (50 και 100). Οι πληθυσμοί 50 και 100 κρίνονται ακατάλληλοι για το πρόβλημα βελτιστοποίησης της παρούσας διατριβής αφού η θέση και το σχήμα των μετώπων μετά από 30000 γενιές δεν είναι ικανοποιητικά. Ωστόσο, ο ενδιάμεσος πληθυσμός με 250 άτομα δείχνει να διαμορφώνει ένα μέτωπο συγκρίσιμο με εκείνα των δύο μεγαλύτερων (500, 750). Μπορεί η έκταση του μετώπου να είναι μικρότερη, ιδιαίτερα προς

την κατεύθυνση της μείωσης του P, αλλά η θέση δεν διαφέρει σημαντικά. Προσδοκάται έτσι ότι η αναπαραγωγή των πληθυσμών μέσω των γενετικών διαδικασιών με έναν μεγάλο αριθμό γενιών μπορεί να επιτρέψει την επιμήκυνση του μετώπου. Ο λόγος που συμπεριλαμβάνουμε τον πληθυσμό 250 μέσα στις πιθανές τελικές επιλογές και δεν καταλήγουμε άμεσα στον μεγαλύτερο πληθυσμό σχετίζεται με τον απαιτούμενο χρόνο εκτέλεσης της διαδικασίας.

Ο πειραματισμός με τα ανωτέρω σχήματα πληθυσμών-γενιών απέδειξε ότι ο χρόνος τερματισμού της διαδικασίας αυξάνεται εκθετικά με μέγεθος του πληθυσμού πάνω από 250. Θα περίμενε κανείς ότι ο αλγόριθμος χρειάζεται τον ίδιο χρόνο για την αξιολόγηση μίας λύσης ανεξάρτητα του μεγέθους του πληθυσμού. Σε αυτήν την περίπτωση οι συνδυασμοί πληθυσμών-γενιών: 250-10000 και 500-5000, που περιλαμβάνουν και οι δύο 2500000 αξιολογήσεις λύσεων θα έπρεπε να οδηγούν σε ίσο χρόνο πραγματοποίησης τη διαδικασίας έως τον τερματισμό της. Παρόλα αυτά και όπως φαίνεται στο Σχήμα 9.11, ο αλγόριθμος χρειάζεται 2ms για την αξιολόγηση μιας λύσης όταν ο πληθυσμός είναι 250 και 3ms όταν αυτός αποτελείται από 500 άτομα. Τα εν λόγω αποτελέσματα προέκυψαν με εκτελέσεις σε φορητό υπολογιστή με επεξεργαστή διπλού πυρήνα, 2,13 GHz και μνήμης RAM 4GB (Intel(R) Core(TM)2 CPU@ 2.13GHz - 4GB RAM).

Σχήμα 9.11 Μεταβολή του απαιτούμενου χρόνου αξιολόγησης μίας λύσης σε συνάρτηση του μεγέθους του πληθυσμού.

Τα αποτελέσματα αυτά συνηγορούν στην ανάγκη ενός συμβιβασμού για τον τελικό συνδυασμό μεγέθους πληθυσμού – μέγιστου αριθμού γενιών ώστε να επιτυγχάνεται

ικανοποιητικό αποτέλεσμα σε εύλογο χρονικό διάστημα. Αν υποθέσουμε ότι είμαστε μεταξύ των επιλογών 250 και 500 για τον πληθυσμό και ότι μας αρκεί ο τερματισμός της διαδικασίας με τις μισές γενιές στη δεύτερη περίπτωση απ' ότι στην πρώτη (αξιολόγηση ίσου αριθμού λύσεων), τότε ο αλγόριθμος χρειάζεται 50% περισσότερο χρόνο για να ολοκληρώσει τη διαδικασία με το μεγαλύτερο πληθυσμό. Ο χρόνος γίνεται απαγορευτικός δε για τον μεγάλο πληθυσμό των 750 ατόμων δεδομένου ότι ακόμα και υποτριπλάσιος αριθμός γενιών σε σχέση με εκείνον του πληθυσμού 250 (ίδιος συνολικός αριθμός αξιολογήσεων) απαιτεί υπερδιπλάσιο χρόνο περάτωσης της διαδικασίας με 0,0047 δευτερόλεπτα ανά λύση για τον πρώτο πληθυσμό έναντι μόλις 0,002 για το δεύτερο. Προφανώς, η εκτενέστερη εφαρμογή των γενετικών διαδικασιών και κυρίως της διασταύρωσης όταν ο πληθυσμός είναι μεγάλος, είναι αυτή που προκαλεί αυτή τη διαφορά, η οποία είναι αρκετά πιο δυσανάλογη όταν ο πληθυσμός αποτελείται από 750 άτομα.

Με βάση την εμπειρία που αποκτήθηκε από τον πειραματισμό με διάφορους συνδυασμούς πληθυσμών-γενιών, και πάνα με τυχαίο αρχικό πληθυσμό δημιουργούμενο από τον ΓΑ με βάση μία ομοιόμορφη κατανομή, καταλήξαμε ότι στο συγκεκριμένο πρόβλημα με 259 μεταβλητές απόφασης (ΥΜ) και τρία κριτήρια ο πληθυσμός 250 ατόμων και η παραγωγή 40000 γενιών αποτελούν τον καλύτερο συμβιβασμό. Πληθυσμοί 300, 350 και 400 αύξαναν σημαντικά τον απαιτούμενο χρόνο ανά λύση (βλ. Σχήμα 9.11), ενώ ο μικρότερος αριθμός παραγόμενων γενιών για την αντιστάθμιση των επιπλέον χρονικών απαιτήσεων δεν οδηγούσε σε καλύτερα αποτελέσματα. Η βελτιστοποίηση με πληθυσμούς 500 και 750 με μέγιστο παραγόμενο αριθμό γενιών ίσο με 20000 και 12000 αντίστοιχα, θα απαιτούσε 50% και 100% παραπάνω χρόνο αντίστοιχα. Αντίθετα, υπήρχε επιφύλαξη για το ότι πληθυσμοί με λιγότερα άτομα θα μπορούσαν να προσεγγίσουν το βέλτιστο μέτωπο, άλλωστε, διαπιστώθηκε ότι οι μικροί πληθυσμοί 50 και 100 τελικά εγκλωβίστηκαν σε κάποιο σημείο της διαδικασίας.

9.3 Λήψη αποφάσεων μέσω της βελτιστοποίησης τριών κριτηρίων

9.3.1 Προσέγγιση του βέλτιστου μετώπου Pareto με τις τελικές ρυθμίσεις του Γενετικού Αλγόριθμου

Οι τελικές ρυθμίσεις του ΓΑ για τη βελτιστοποίηση των τριών κριτηρίων (κόστος ΔΠ, συνολικό φορτίο απωλειών N-NO3 και P), που προέκυψαν μέσω ανάλυσης ευαισθησίας συνοψίζονται στον Πίνακα 9.1.

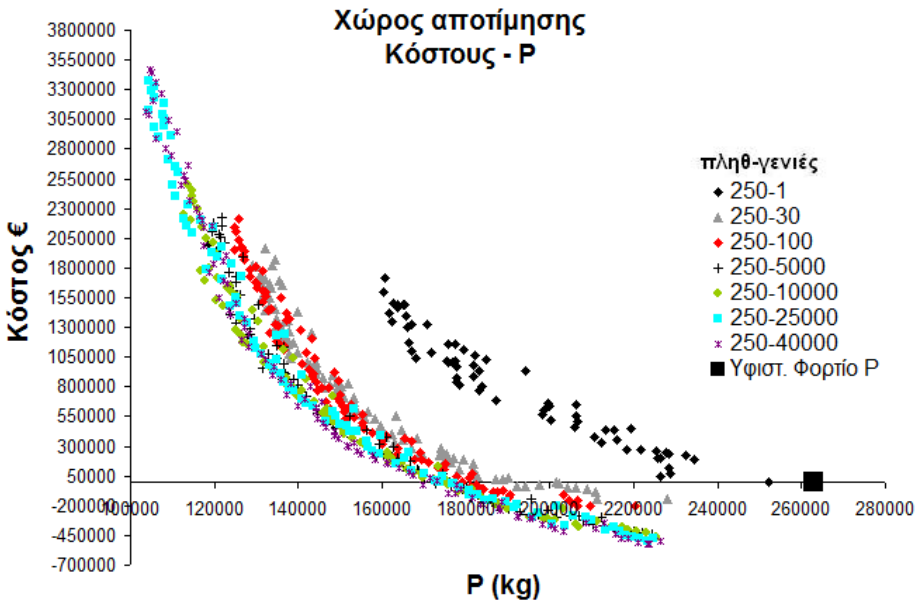
Πίνακας 9.1 Τελικές ρυθμίσεις ΓΑ για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης των τριών κριτηρίων στη λεκάνη του Αράχθου.

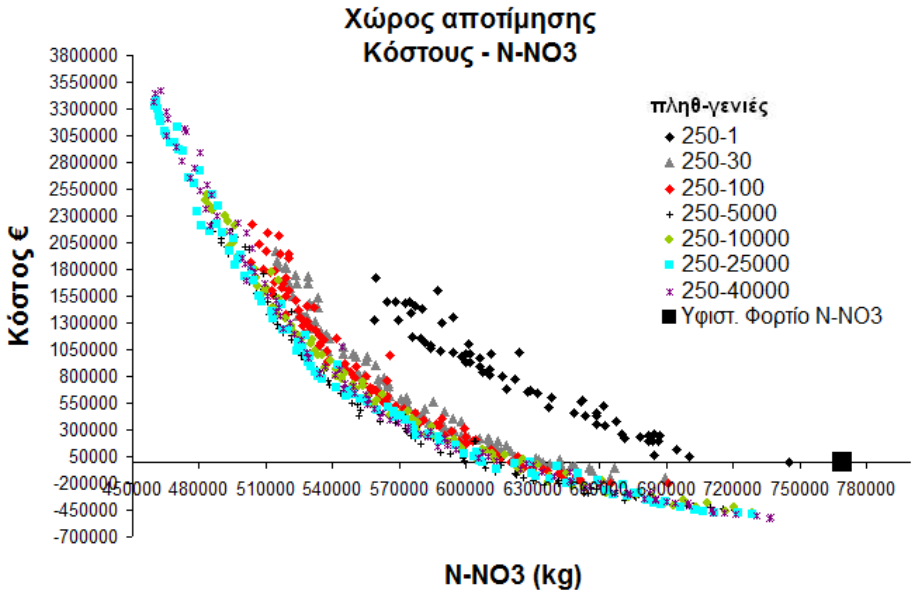
Γενετική Διαδικασία / Παράμετρος	**Επιλογή στο τελικό σχήμα βελτιστοποίησης**
Διαβάθμιση ατόμων πληθυσμού	Κατάταξη με βάση τη συνάρτηση 'Rank'
Επιλογή ατόμων-γονέων	Μέθοδος Τουρνουά (tournament)
Μέθοδος διασταύρωσης	Τυχαία (scattered crossover)
Πιθανότητα διασταύρωσης	0,8
Μέθοδος μετάλλαξης	Γκαουσσιανή (Gaussian)
Συρρίκνωση μετάλλαξης	0,75
Μέγεθος πληθυσμού	250
Κλάσμα πληθυσμού στο μέτωπο Pareto	0,40
Μέγιστος αριθμός γενιών	40000
Υπολογισμός διασποράς λύσεων στο μέτωπο Pareto	Χώρος αποτίμησης (phenotype space)

Στο Σχήμα 9.12 απεικονίζεται το τελικό μέτωπο Pareto (βέλτιστο), καθώς και η πλήρης εξέλιξη της θέσης και του σχήματός του κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης. Όπως διακρίνεται, τόσο το συνολικό φορτίο απωλειών P, όσο και το φορτίο N-NO3 μειώνονται σημαντικά σε σχέση με τα φορτία της υφιστάμενης κατάστασης από την πρώτη κιόλας γενιά. Αυτό συμβαίνει φυσιολογικά αφού όλες οι ΔΠ είναι αποτελεσματικές στη μείωση των απωλειών θρεπτικών από τις ΥΜ και έτσι οποιοσδήποτε αρχικός τυχαίος συνδυασμός τους προκαλεί συνολικό φορτίο αισθητά μικρότερο από αυτό που προκύπτει από τις συμβατικές τεχνικές διαχείρισης της λεκάνης. Μετά από έναν μικρό αριθμό γενιών (30 και 100) τα δύο είδη φορτίων μειώνονται αρκετά, πράγμα που υποδηλώνει ότι ο αλγόριθμος εντοπίζει γρήγορα τις ΔΠ με τη μεγαλύτερη αποδοτικότητα στη μείωση των απωλειών από τις ΥΜ (λωρίδες συγκράτησης, μείωση λιπάνσεων) και προφανώς εκείνες τις ΥΜ με τη μεγαλύτερη έκταση, άρα και επίδραση στο συνολικό φορτίο.

Ο αλγόριθμος συνεχίζει την ανεύρεση λύσεων με μικρότερο ρυθμό βελτίωσης της θέσης του μετώπου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 9.12. Είναι ενδεικτικό ότι χρειάζεται 10000 γενιές για να επιμηκύνει αισθητά τις καμπύλες αντιστάθμισης προς την κατεύθυνση πάνω-αριστερά (μείωση P και N-NO3), έχοντας πλέον εφαρμόσει πιο εκτεταμένα τις ΔΠ και έχοντας πιθανά συμπεριλάβει και επιπλέον μέτρα στις ΥΜ της λεκάνης που είναι λιγότερο αποδοτικά (π.χ. καθυστέρηση λίπανσης, αποθήκευση κοπριάς κ.α.), αλλά που αθροιστικά, συνεισφέρουν σημαντικά όταν εφαρμόζονται συνδυαστικά με τα πιο αποδοτικά. Ωστόσο, η σημαντικότερη φάση επιμήκυνσης του μετώπου προς την κατεύθυνση κάτω-δεξιά (μείωση κόστους) λαμβάνει χώρα μέχρι τις 5000 γενιές με πολύ μικρότερη επιπρόσθετη βελτίωση στις 5000 επόμενες. Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι ο αλγόριθμος δείχνει μία προτίμηση να ανακαλύπτει πρώτα εκείνες τις ΔΠ που ελαχιστοποιούν το κόστος. Στην προκειμένη περίπτωση πρόκειται για αρνητικές τιμές που υποδηλώνουν επιπλέον οικονομικό όφελος για τον αγροτικό πληθυσμό. Οι εν λόγω ΔΠ δεν είναι άλλες από τη μείωση των λιπάνσεων στις

εκτάσεις μηδικής και την κατάργηση της άροσης στις εκτάσεις αραβόσιτου, οι οποίες εξοικονομούν χρήματα για τον αγροτικό πληθυσμό.





Σχήμα 9.12 Καμπύλες αντιστάθμισης Κόστους - P και Κόστους - N-NO3 κατά την εξέλιξη της διαδικασίας βελτιστοποίησης τριών κριτηρίων. Απεικονίζονται τα διαμορφωμένα μέτωπα μετά από παραγωγή μίας, 30, 100, 5000, 10000, 25000 και του μέγιστου αριθμού των 40000 γενιών.

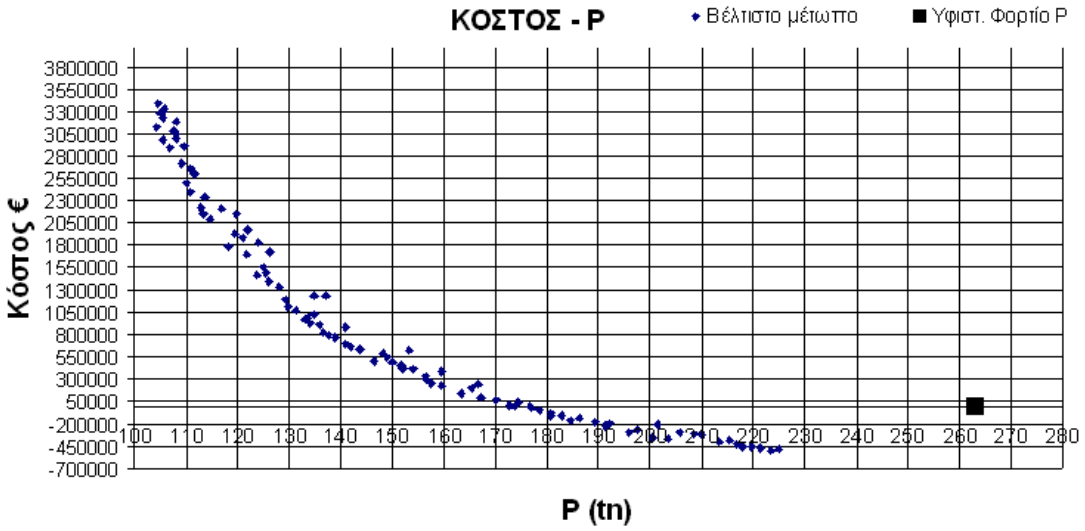
Ακόμα όμως και μετά από 10000 γενιές, οι καμπύλες αντιστάθμισης αποκλίνουν αισθητά από το βέλτιστο Pareto μέτωπο, κάτι που συμπεραίνουμε γνωρίζοντας εκ των προτέρων τη βέλτιστη τιμή του κάθε κριτηρίου. Υπενθυμίζεται ότι οι ελάχιστες δυνατές

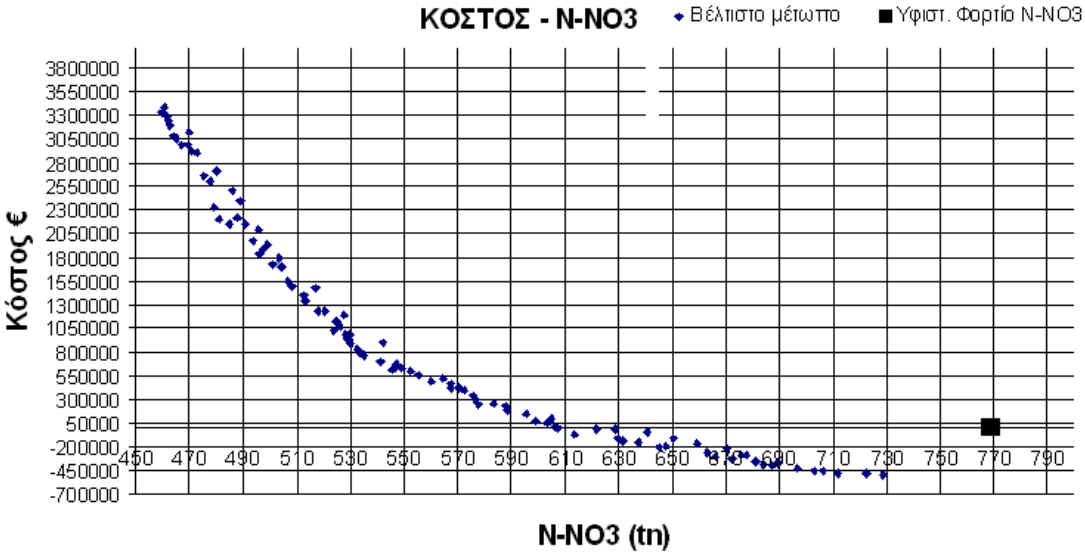
ετήσιες τιμές για το κόστος, το συνολικό φορτίο απωλειών P και το συνολικό φορτίο απωλειών N-NO3 είναι -520500€, 103762kg και 459232kg αντίστοιχα. Τελικά, ο αλγόριθμος συγκλίνει αργά προς το βέλτιστο μέτωπο Pareto ανακαλύπτοντας επιπλέον συνδυασμούς λύσεων μεταξύ 10000 και 25000 γενιών. Στο σημείο αυτό μπορεί να θεωρηθεί ότι οι καμπύλες αντιστάθμισης μεταξύ δύο κριτηρίων είναι αποδεκτές προσεγγίσεις των βέλτιστων μετώπων. Η διαδικασία ωστόσο ολοκληρώνεται μετά την παραγωγή 40000 γενιών συνολικά, ώστε να δοθεί η δυνατότητα στον αλγόριθμο να προσεγγίσει όσο το δυνατόν πιο στενά τις βέλτιστες λύσεις. Ο συνολικός χρόνος περάτωσης της διαδικασίας βελτιστοποίησης ήταν περίπου 5 ώρες και 30 λεπτά, κάτι που αντιστοιχεί σε 0,002s για την αξιολόγηση της απόδοσης ενός ατόμου του πληθυσμού δηλαδή μιας λύσης (βλ. και Σχήμα 9.11 για πληθυσμό 250).

Αξίζει στο σημείο αυτό μία σύγκριση με το χρόνο που θα χρειαζόταν αν το μοντέλο SWAT συμμετείχε στη διαδικασία βελτιστοποίησης, δηλαδή αν η αξιολόγηση της κάθε λύσης γινόταν με εκτέλεσή του και ανάγνωση των συνολικών ετήσιων φορτίων ή συγκεντρώσεων θρεπτικών στην έξοδο. Δεδομένου ότι μία εκτέλεση για προσομοίωση 5 ετών (2001-2005) απαιτεί 20s, οι $40000\times250 = 10\times10^6$ εκτελέσεις θα απαιτούσαν 200×10^6s, ή 2314 ημέρες ή περίπου 6 έτη. Κάτι τέτοιο θα ήταν φυσικά ανέφικτο και θα ανάγκαζε την εφαρμογή της διαδικασίας με έναν πολύ μικρότερο πληθυσμό και μέγιστο αριθμό παραγόμενων γενιών και απαραίτητα θα απαιτούσε την εκτέλεση του SWAT για ένα και μόνο έτος προσομοίωσης αντί για πέντε. Η χρησιμοποίηση της βάσης δεδομένων των ΔΠ (ΒΔΠ) επιταχύνει τη διαδικασία κατά 1000 φορές επιτρέποντας την επαρκή εξερεύνηση του χώρου αναζήτησης μέσω ενός μεγάλου πληθυσμού και ενός μεγάλου αριθμού επαναλήψεων για τη συνεχή αναπαραγωγή του.

9.3.2 Αποτύπωση βέλτιστων μετώπων Pareto για την αναζήτηση λύσεων

Τα βέλτιστα μέτωπα Pareto που προέκυψαν με το πέρας της διαδικασίας βελτιστοποίησης απεικονίζονται ξεχωριστά στο Σχήμα 9.13. Τα δεδομένα απωλειών θρεπτικών που είναι αποθηκευμένα στη ΒΔΠ αφορούν στο μέσο ετήσιο φορτίο που εγκαταλείπει τις ΥΜ και εισέρχεται στα επιφανειακά νερά. Οι οριζόντιοι άξονες λοιπόν στα διαγράμματα του Σχήματος 9.13 εκφράζουν το συνολικό (αθροιστικό από όλες τις ΥΜ) ετήσιο φορτίο P και N-NO3 που εισέρχεται στο υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης του Αράχθου. Το κόστος στους κάθετους άξονες εκφράζει το συνολικό επιπρόσθετο χρηματικό ποσό που απαιτείται για εφαρμογή μιας λύσης ή αλλιώς ενός συνδυασμού ΔΠ σε ολόκληρη την έκταση της λεκάνης (διαχειριστικό σχήμα).





Σχήμα 9.13 Ολικά – βέλτιστα Pareto μέτωπα Κόστους - P και Κόστους - N-NO3, όπως προέκυψαν κατά το τέλος της διαδικασίας βελτιστοποίησης τριών κριτηρίων.

Με το τέλος της βελτιστοποίησης, ο αλγόριθμος κατέληξε σε μία διαμόρφωση του μετώπου Pareto τριών διαστάσεων (τρία κριτήρια), που όπως φαίνεται από την απεικόνιση των μετώπων στο δισδιάστατο χώρο (ανά δύο κριτήρια), περιλαμβάνει ένα πλήθος από αντιπροσωπευτικές λύσεις. Το μήκος των μετώπων ή καμπυλών αντιστάθμισης μεταξύ δύο κριτηρίων (κόστος-P και κόστος-N-NO3) έχει προσεγγίσει με μεγάλη ακρίβεια τα ελάχιστα δυνατά συνολικά ετήσια φορτία των 103,8tn για τον P και των 459,2tn για το N-NO3. Ωστόσο, όπως φαίνεται στο σχήμα, τα φορτία αυτά είναι δυνατόν να επιτευχθούν με κόστος που ξεπερνά τα 3M€. Προφανώς οι λύσεις που αντιπροσωπεύουν αυτά τα πολύ ικανοποιητικά περιβαλλοντικά αποτελέσματα και που συγκεντρώνονται στο πάνω-αριστερά

άκρο των μετώπων, εκφράζουν τη μέγιστη δυνατή διαχείριση στην αγροτική γη της λεκάνης του Αράχθου. Το σύνολο των ΔΠ ή αλλιώς οι πλέον συνδυαστικές ΔΠ από τον Πίνακα 7.6, έχουν εφαρμοστεί για να επιτευχθεί ο μέγιστος δυνατός βαθμός μείωσης των απωλειών φορτίου θρεπτικών από τις ΥΜ της λεκάνης. Όπως παρατηρείται, η μείωση αυτή ανέρχεται σε περίπου 160tnP/έτος και 310tnN-NO3/έτος ή σε 60% και 40% αντίστοιχα των απωλειών φορτίου υπό το συμβατικό καθεστώς διαχείρισης.

Στο άλλο άκρο των μετώπων, ο αλγόριθμος έχει ικανοποιητικά ανιχνεύσει πολύ οικονομικές λύσεις, αλλά πολύ λιγότερο περιβαλλοντικά αποτελεσματικές. Και για τα δύο θρεπτικά υπάρχει λύση που αποφέρει σχεδόν το μέγιστο οικονομικό όφελος για τον αγροτικό πληθυσμό (~520000€) και επιτυγχάνει μείωση περίπου 40tn στο συνολικό τους φορτίο ετησίως. Σε ποσοστά, η μείωση αυτή είναι περίπου 15% για τον P και 5% για το N-NO3 σε σχέση με το υφιστάμενο φορτίο. Είναι όμως αξιοσημείωτο το γεγονός ότι ακόμα και αυτή η μικρή μείωση μπορεί να επιτευχθεί με εξοικονόμηση χρημάτων για τον αγροτικό πληθυσμό. Προφανώς, οι ΔΠ που προβλέπονται από τις λύσεις που συγκεντρώνονται στο κάτω-δεξιά άκρο του μετώπου, είναι η μείωση της λίπανσης στη μηδική και η κατάργηση της άροσης στον αραβόσιτο, οι οποίες μειώνουν τα έξοδα καλλιέργειας χωρίς να επηρεάσουν τις ετήσιες αποδόσεις. Εννοείται ότι για να παραμείνει το συνολικό κόστος για τη λεκάνη σε αυτά τα επίπεδα, πρέπει ταυτόχρονα ο αλγόριθμος να αποδώσει τη συμβατική ΔΠ στις εκτάσεις βοσκότοπων (ΔΠ 41 – Πίνακας 7.6), η οποία είναι η μοναδική που δεν αυξάνει το ετήσιο κόστος διαχείρισης στις εν λόγω εκτάσεις.

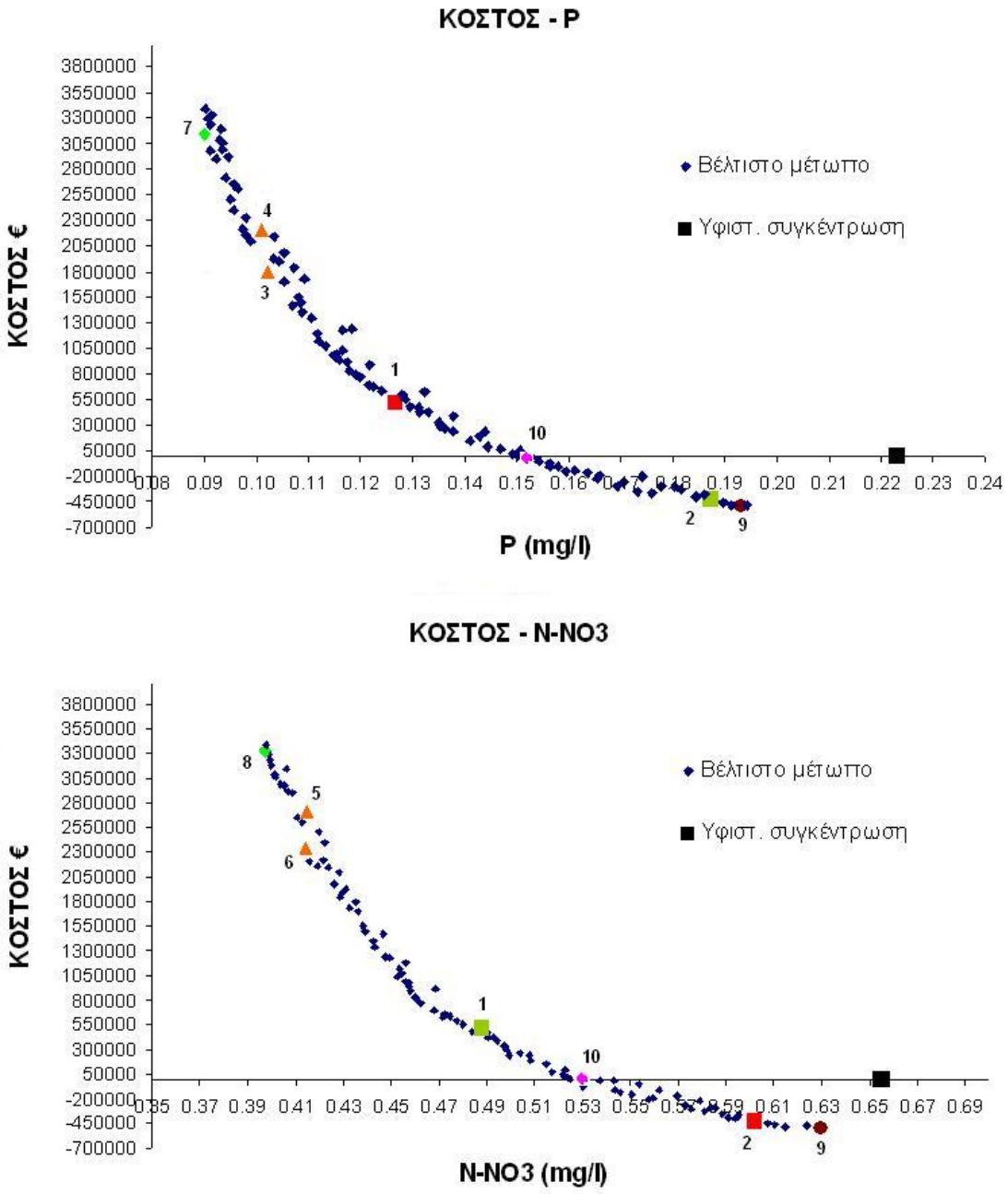
Όλες οι 100 λύσεις που διαμορφώνουν τα μέτωπα Pareto του Σχήματος 9.13 ονομάζονται Pareto βέλτιστες και αποτελούν ισοδύναμες λύσεις του προβλήματος. Εκτός από τις ακραίες λύσεις για τις οποίες έγινε συζήτηση, υπάρχει πλήθος ενδιάμεσων λύσεων που επιτυγχάνουν ενδιάμεσα περιβαλλοντικά αποτελέσματα με μέσο κόστος. Η λήψη αποφάσεων συνήθως γίνεται με ανάγνωση και ερμηνεία αυτών των ενδιάμεσων λύσεων, δεδομένου ότι απαιτείται συνήθως ένας συμβιβασμός που να ικανοποιεί σε κάποιο βαθμό όλα τα κριτήρια. Ωστόσο, το πρόβλημα βελτιστοποίησης που παρουσιάζεται, περιλαμβάνει δύο ρύπους, τον P και το N-NO3, πράγμα που σημαίνει ότι αν υπάρχει ενδιαφέρον για τη μείωση και των δύο, η ανάγνωση μιας λύσης από το ένα μέτωπο πρέπει να μεταφέρεται και στο άλλο. Με τον τρόπο αυτό η αποδοτικότητα μιας λύσης συγκεκριμένου κόστους στη μείωση του ενός θρεπτικού στοιχείου θα συσχετίζεται με την αποδοτικότητά του στη μείωση του άλλου. Προφανώς, ούτε οι απόλυτοι, ούτε οι ποσοστιαίοι βαθμοί μείωσης του φορτίου απωλειών των δύο θρεπτικών θα ταυτίζονται μετά από επιλογή της εκάστοτε λύσης, κάτι που φυσικά οφείλεται στα φυσικά μεγέθη των στοιχείων, στα υφιστάμενα αρχικά φορτία τους στη λεκάνη και στο βαθμό που οι ΔΠ επιδρούν στον περιορισμό τους.

Το πρόβλημα είναι αρκετά σύνθετο, μιας και πρέπει τρία κριτήρια να αξιολογούνται κάθε φορά. Η απεικόνιση των μετώπων του Σχήματος 9.13 προσφέρει πλήθος ισοδύναμων λύσεων παρέχοντας ουσιαστικά πληροφορία για πιθανούς συμβιβασμούς στην τελική λήψη αποφάσεων από τους ιθύνοντες. Το μόνο πρόβλημα που παραμένει είναι ότι η αξιολόγηση του περιβαλλοντικού αποτελέσματος με βάση τα μέτωπα αυτά γίνεται με όρους φορτίου απωλειών και όχι συγκεντρώσεων στο ποτάμι που είναι μάλλον πιο διαφωτιστικές. Η περιβαλλοντική νομοθεσία εξάλλου, συνηθίζεται να θεσπίζει όρια συγκεντρώσεων στα υδάτινα σώματα, όπως άλλωστε παρουσιάστηκε αναλυτικά στο 2^{ο} Κεφάλαιο. Για την Ελλάδα μπορούμε να πούμε ότι δεν έχουμε ακόμα επίσημα θεσπισμένα όρια τα οποία θα μπορούσαμε να συμβουλευτούμε για να αξιοποιήσουμε την πληροφορία που μας παρέχεται από τα μέτωπα Pareto. Μπορούμε ωστόσο να χρησιμοποιήσουμε τα πολύ αυστηρά όρια των Skoulikidis et al. (2006) που παρατέθηκαν στον Πίνακα 2.3 της ενότητας 2.1.4, ώστε να κάνουμε μία εποικοδομητική ανάλυση επιλογής λύσεων από τις δύο καμπύλες αντιστάθμισης δύο κριτηρίων. Προηγουμένως, απαιτείται η μετατροπή των καμπυλών αυτών (Σχήμα 9.13) σε ολικά βέλτιστα Pareto μέτωπα που στον οριζόντιο άξονα θα αναγράφεται η συγκέντρωση των ρύπων αντί του φορτίου. Αυτό μπορεί πολύ εύκολα να επιτευχθεί με εκτέλεση του μοντέλου SWAT για τις 100 λύσεις (χρωμοσώματα) του μετώπου Pareto, ώστε να διοδευτούν τα φορτία από τις ΥΜ στην έξοδο της λεκάνης και να υπολογιστούν οι μέσες ετήσιες (2001-2005) συγκεντρώσεις P και N-NO3.

9.3.3 Αναζήτηση και επιλογή λύσεων από τα βέλτιστα Pareto μέτωπα

Το μοντέλο SWAT εκτελέστηκε μέσω MATLAB 100 φορές, με εγγραφή των 'σετ' δεδομένων που αντιπροσωπεύουν τους 100 συνδυασμούς ΔΠ στις 259 ΥΜ της λεκάνης, στα αρχεία διαχείρισης 'mgt'. Οι 100 συνδυασμοί ΔΠ είναι οι ισάριθμες λύσεις που προβάλλονται στα μέτωπα Pareto του Σχήματος 9.13. Από τις εκτελέσεις του μοντέλου προέκυψαν τα φορτία στην έξοδο και φυσικά οι μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις, οι οποίες εξαρτώνται από τη μέση ετήσια παροχή. Η προκύπτουσα παροχή στην έξοδο μεταβάλλεται ελάχιστα ή καθόλου σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση μετά από την εφαρμογή των αναπτυχθέντων ΔΠ στη λεκάνη του Αράχθου. Υπενθυμίζεται ακόμα ότι το μοντέλο εκτελέστηκε χωρίς να προσομοιώσει τις βιοχημικές διεργασίες στο ποτάμι (in-stream processes). Επομένως, τα συνολικά φορτία απωλειών θρεπτικών από τις ΥΜ της λεκάνης που αντιστοιχούν στις 100 λύσεις των μετώπων Pareto, αναμένεται με πολύ μικρές έως ανύπαρκτες διαφορές να είναι ίσα με τα αντίστοιχα φορτία που προσομοιώνονται από το μοντέλο στην έξοδο (θέση Πλάκα, Σχ. 7.1). Οι υπολογισμένες συγκεντρώσεις αντικαθιστούν τα φορτία των οριζοντίων αξόνων του Σχήματος 9.13 και προκύπτουν έτσι οι καμπύλες

αντιστάθμισης μεταξύ κόστους και συγκεντρώσεων θρεπτικών στην έξοδο της λεκάνης που απεικονίζονται στο Σχήμα 9.14.



Σχήμα 9.14 Απεικόνιση βέλτιστων μετώπων Pareto στο δισδιάστατο χώρο με έκφραση των περιβαλλοντικών κριτηρίων σε όρους μέσης ετήσιας συγκέντρωσης. Τα αριθμημένα χαρακτηριστικά σημεία αντιπροσωπεύουν λύσεις ιδιαίτερου ενδιαφέροντος.

Η λήψη αποφάσεων μπορεί πλέον να γίνει με αναζήτηση λύσεων στα εν λόγω μέτωπα. Μια πρώτη προσπάθεια είναι να εντοπιστούν οι λύσεις που μειώνουν τις

συγκεντρώσεις P και N-NO3 κάτω από τα ανώτερα επιτρεπτά όρια επιθυμητών κλάσεων ποιότητας, όπως τέθηκαν από τους Skoulikidis et al. (2006) και παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 2.3. Με βάση τα μεγέθη που προκύπτουν από τη διαχείριση στη λεκάνη, παρατηρούμε ότι ένας εφικτός στόχος για το στοιχείο του P μπορεί να είναι η μείωση της συγκέντρωσής του στο ποτάμι κάτω από τα 0,125mg/l, πράγμα που κατατάσσει τα επιφανειακά νερά στην κλάση *Υψηλής* ποιότητας. Αντίθετα, για το N-NO3 το όριο των 0,22mg/l της εν λόγω κλάσης φαίνεται ότι με τις ΔΠ που εξετάζονται στη διατριβή δεν μπορεί να προσεγγιστεί. Το μέτωπο στο δισδιάστατο χώρο κόστους-N-NO3 του Σχήματος 9.14 μας δείχνει ότι τα κατώτερα επίπεδα συγκέντρωσης του στοιχείου είναι κοντά στα 0,40mg/l. Παρόλα αυτά, το ανώτερο όριο των 0,60mg/l της δεύτερης κατά σειρά κλάσης του Πίνακα 2.3 για το N-NO3 είναι εφικτό να επιτευχθεί κατατάσσοντας το ποτάμι στην κλάση *Καλής* ποιότητας ως προς τη συγκέντρωση του στοιχείου. Άλλες ενδιαφέρουσες λύσεις προς διερεύνηση είναι οι ακραίες λύσεις των μετώπων, αυτές δηλαδή που προκαλούν τη μέγιστη δυνατή μείωση των συγκεντρώσεων των θρεπτικών σε σχέση με την υφιστάμενη καθώς και εκείνες που προσφέρουν το μέγιστο δυνατό επιπρόσθετο ετήσιο εισόδημα στον αγροτικό πληθυσμό. Ακόμα, άλλες ενδιάμεσες λύσεις μπορεί να παρουσιάζουν αρκετά μεγάλο ενδιαφέρον με βάση κάποιο υποκειμενικό κριτήριο. Στο Σχήμα 9.14 έχουν εντοπιστεί δέκα ενδιαφέρουσες λύσεις, οι οποίες αναλύονται στη συνέχεια.

Η λύση με τον αριθμό 1, που απεικονίζεται με κόκκινο τετράγωνο στο χώρο αποτίμησης κόστους – P επιτυγχάνει τη μείωση της μέσης ετήσιας συγκέντρωσης του P στα επίπεδα των 0,125mg/l. Πρόκειται για μείωση 44% για τον P σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση, η οποία επιτυγχάνεται με συνδυασμό ΔΠ στη λεκάνη που κοστίζει κάτι παραπάνω από 500000€. Το ποσό αυτό υποδηλώνει ότι πρόκειται πολύ πιθανά για έναν αποδεκτό συμβιβασμό. Η συγκεκριμένη λύση απεικονίζεται επίσης στο δισδιάστατο χώρο κόστους – N-NO3 με πράσινο τετράγωνο. Από την ανάγνωση της συγκέντρωσης του στοιχείου στον οριζόντιο άξονα προκύπτει μία μείωση 25% σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση με διαμόρφωσή της στα 0,49mg/l. Και στην περίπτωση αυτού του στοιχείου, η μείωση είναι σημαντική και κατατάσσει την ποιότητα του νερού με βάση αυτό το κριτήριο στην κλάση *Καλής* κατάστασης (Skoulikidis et al., 2006).

Η λύση 2 στο χώρο κόστους-N-NO3, που απεικονίζεται με κόκκινο τετράγωνο αποτελεί το συνδυασμό ΔΠ στο χώρο της λεκάνης απορροής που διαμορφώνει τη συγκέντρωση του στοιχείου στα ανώτερα επιτρεπτά όρια της προηγούμενης κλάσης: 0,60mg/l. Παρατηρείται εύκολα ότι η μείωση που απαιτείται σε αυτήν την περίπτωση είναι οριακή δεδομένου ότι η συγκέντρωση του N-NO3 υπό τις συμβατικές πρακτικές διαχείρισης ήταν ήδη αρκετά χαμηλή (0,65mg/l). Πρόκειται για μία μικρή μείωση 8%, που μάλλον δεν καθιστά δόκιμη την επιλογή αυτής της λύσης. Είναι ωστόσο πολύ ενδιαφέρον ότι η λύση

αυτή επιτυγχάνεται με οικονομικό όφελος, ίσο περίπου με 420000€ που είναι κοντά στα ανώτερα δυνατά επίπεδα. Η μείωση της λίπανσης στη μηδική με μηδενική επίδραση στις αποδόσεις έχει σαφώς προτιμηθεί και προτάσσεται ως η καλύτερη επιλογή διαχείρισης της λεκάνης για μικρές μειώσεις συγκεντρώσεων. Όταν η λύση αυτή εντοπίζεται στο χώρο κόστους-P (πράσινο τετράγωνο), διαμορφώνει τη συγκέντρωση του P στα 0,187mg/l, προκαλώντας μείωση 16% από την υφιστάμενη κατάσταση. Η επίτευξη αυτής της μείωσης δεν καταφέρνει ωστόσο να κατατάξει το ποτάμι, ούτε καν στη δεύτερη καλύτερη κλάση ποιότητας ως προς τον P με ανώτερο επιτρεπόμενο όριο τα 0,165mg/l (βλ. Πίνακα 2.3).

Άλλες αξιοσημείωτες λύσεις από τα μέτωπα Pareto του Σχήματος 9.14 είναι εκείνες που συγκεντρώνονται κοντά στον οριζόντιο άξονα δηλαδή αυτές που προκαλούν θετικά περιβαλλοντικά αποτελέσματα χωρίς κόστος. Όπως φαίνεται στο σχήμα, υπάρχουν πολλά εναλλακτικά διαχειριστικά σχήματα εντός της λεκάνης, τα οποία επιτυγχάνουν σημαντικές μειώσεις στα φορτία απωλειών από τις ΥΜ της λεκάνης και συνεπώς και στις συγκεντρώσεις των δύο στοιχείων στην έξοδο. Οι μέγιστες δυνατές μειώσεις που μπορούν να επιτευχθούν στις συγκεντρώσεις των στοιχείων από συνδυασμό μέτρων μηδενικού κόστους είναι 31% και 19% για τον P και το N-NO3 αντίστοιχα με διαμόρφωση των μέσων ετήσιων συγκεντρώσεων στην έξοδο σε 0,15mg/l και 0,53mg/l αντίστοιχα. Προφανώς, οι δύο ΔΠ που εξοικονομούν χρήματα συνδυάζονται στην περίπτωση αυτή με πιο ακριβά και πιο αποτελεσματικά μέτρα ώστε στο σύνολο να αθροίσουν μία ικανοποιητική μείωση θρεπτικών χωρίς κόστος. Μία αντιπροσωπευτική τέτοια λύση είναι η αριθμημένη με τον αριθμό 10 στα διαγράμματα του Σχήματος 9.14.

Η πιο οικονομική λύση που αναδεικνύεται από την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι ωστόσο η λύση 9 (Σχήμα 9.14). Πρόκειται για το συνδυασμό ΔΠ που ελαχιστοποιεί το κόστος εφαρμογής τους ή αλλιώς που μεγιστοποιεί το ετήσιο οικονομικό όφελος στη λεκάνη του Αράχθου (~519000€). Ωστόσο, η λύση 9, ως ακραία, δεν επιδρά ουσιαστικά καθόλου στη συγκέντρωση του N-NO3 (μείωση < 5%) και προκαλεί μία μικρή ελάττωση εκείνης του P κατά περίπου 14%. Είναι όμως ενδεικτικό ότι ακόμα και αν ο Άραχθος πληροί τα περιβαλλοντικά κριτήρια χωρίς να κρίνεται απαραίτητος ο περιορισμός των απωλειών θρεπτικών στο υδρογραφικό δίκτυο, υπάρχουν περιπτώσεις όπου η διαχείριση της αγροτικής γης ενδείκνυται για οικονομικούς και μόνο λόγους. Υπάρχουν ωστόσο αρκετές λύσεις αρνητικού κόστους στα μέτωπα Pareto που μπορούν να επιτύχουν, έστω σε έναν μικρό αλλά υπολογίσιμο βαθμό, τον περιορισμό των θρεπτικών και την αύξηση του εισοδήματος.

Στην διαφορετική περίπτωση που ένα σημαντικό χρηματικό ποσό διατίθεται από τους αρμόδιους φορείς ή θυσιάζεται από τους ίδιους τους παραγωγούς με σκοπό τη διαχείριση της αγροτικής γης, άλλες λύσεις από τα μέτωπα Pareto μπορούν να προτιμηθούν. Για παράδειγμα, οι λύσεις 3 και 4 στο χώρο αποτίμησης κόστους-P, καθώς και οι λύσεις 5 και 6

στο χώρο αποτίμησης κόστους-N-NO3 παραπέμπουν σε συνδυασμούς ΔΠ που μειώνουν δραστικά τις συγκεντρώσεις των δύο θρεπτικών και τις διαμορφώνουν στα επίπεδα των 0,10mg/l και 0,42mg/l αντίστοιχα. Πρόκειται για μείωση που υπερβαίνει το 50% στον P και είναι περίπου 35% για το N-NO3. Οι ΔΠ που απαρτίζουν τα εν λόγω διαχειριστικά σχήματα στη λεκάνη του Αράχθου προφανώς ενσωματώνουν ταυτόχρονα πολλές μεμονωμένες ΔΠ σε κάθε τύπο αγροτικής χρήσης γης. Στα σχήματα αυτά προτιμώνται δηλαδή συνδυαστικές πρακτικές από τον Πίνακα 7.6, οι οποίες φυσικά προκαλούν το αθροιστικό περιβαλλοντικό αποτέλεσμα των μεμονωμένων, δυστυχώς όμως με ένα σημαντικό κόστος. Προφανώς στις λύσεις αυτές εμπεριέχονται σε μεγάλο βαθμό οι λωρίδες συγκράτησης, η μείωση του ζωικού κεφαλαίου ή η αποθήκευση της κοπριάς, καθώς και η μείωση λίπανσης στον αραβόσιτο με αναπόφευκτη μείωση των αποδόσεων. Το κόστος εφαρμογής αυτών των ολοκληρωμένων δράσεων ανέρχεται στα 2-3M€.

Στην περίπτωση αυτή ωστόσο, υπεισέρχονται έντονα στο πρόβλημα και τοπικοί κοινωνικό-οικονομικοί παράγοντες. Η λήψη απόφασης απαιτεί μεγαλύτερη προσοχή και καλύτερο σχεδιασμό ώστε να θιγεί όσο λιγότερο γίνεται το σύνολο του πληθυσμού στη λεκάνη. Με ανάλυση των τεσσάρων ανωτέρω λύσεων ανά δύο, είναι πιθανό ο λαμβάνων τις αποφάσεις να συμπεράνει ότι πρόκειται μεν για δράσεις με ίδιο περιβαλλοντικό αποτέλεσμα και παραπλήσιο συνολικό κόστος εφαρμογής, αλλά που όμως διαφέρουν σημαντικά στην κατανομή των διαφόρων τύπων ΔΠ στο χώρο της λεκάνης απορροής. Προς διερεύνηση αυτού, οι λύσεις αυτές θα παρουσιαστούν, μεταξύ άλλων, στη συνέχεια. Τέτοιες εναλλακτικές επιλογές μπορεί να βοηθήσουν τους ιθύνοντες στη λήψη της απόφασης που δε θα θίγει συγκεκριμένες μικρές κοινωνίες εντός της λεκάνης απορροής.

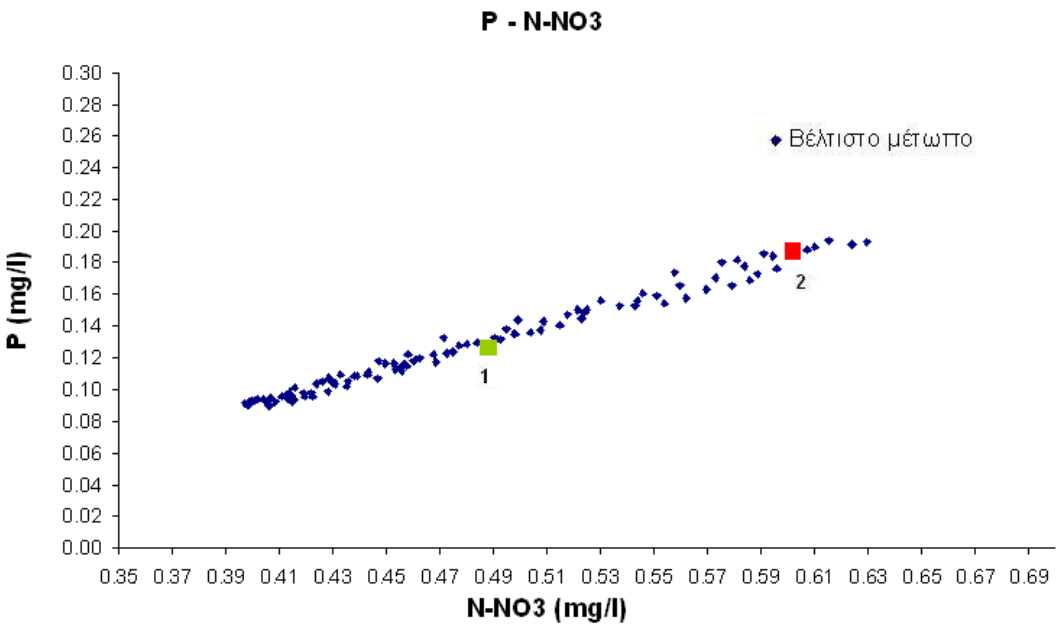
Οι λύσεις 7 και 8 στα μέτωπα του Σχήματος 9.14 αποτελούν τις πιο αποτελεσματικές συνολικές δράσεις για τη λεκάνη του Αράχθου. Τα εν λόγω διαχειριστικά σχήματα περιλαμβάνουν το μέγιστο δυνατό αριθμό μεμονωμένων ΔΠ σε κάθε ΥΜ ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη (ελάχιστη) απώλεια ρύπων από την αγροτική γη προς τα επιφανειακά νερά και φυσικά η ελάχιστη συγκέντρωσή τους στην έξοδο. Το κόστος ωστόσο σε αυτήν την περίπτωση ξεπερνά τα 3M€ και στην περίπτωση της ελαχιστοποίησης του N-NO3 είναι κάτι παραπάνω από 3,3M€. Οι συγκεντρώσεις P και N-NO3 έχουν μειωθεί στο μέγιστο δυνατό βαθμό που είναι εφικτό με τις υφιστάμενες ΔΠ και διαμορφώνονται στα επίπεδα των 0,09mg/l και 0,40mg/l, μειωμένες κατά 60% και 39% αντίστοιχα.

Τα δεδομένα που αφορούν τις 10 επιλεγμένες λύσεις του Σχήματος 9.14 συνοψίζονται στον Πίνακα 9.2.

Πίνακας 9.2 Διαμόρφωση των τριών κριτηρίων βελτιστοποίησης μετά από εφαρμογή 10 βέλτιστων (Pareto) λύσεων ή διαχειριστικών σχημάτων στον Άραχθο.

Λύση	Κόστος (€)	Συγκέντρωση P (mg/l)	Συγκέντρωση N-NO3 (mg/l)	Μείωση συγκέντρωσης P (%)	Μείωση συγκέντρωσης N-NO3 (%)
1	513065	0,125	0,488	43,9	25,5
2	-419125	0,187	0,602	16,0	8,1
3	1790469	0,102	0,435	54,2	33,6
4	2204026	0,101	0,416	54,7	36,5
5	2603131	0,098	0,414	56,0	36,8
6	2334041	0,096	0,413	56,8	37,0
7	3140000	0,090	0,406	59,6	38,0
8	3329886	0,091	0,397	59,0	39,3
9	-519579	0,193	0,630	13,4	3,9
10	-8256	0,153	0,533	31,4	18,9

Από την ανάλυση που προηγήθηκε και τη σύνοψή της στον Πίνακα 9.2, είναι φανερό ότι όλες οι λύσεις ή συνδυασμοί ΔΠ στη λεκάνη επιδρούν ομοιοτρόπως στα δύο θρεπτικά. Αναμφισβήτητα, δεν παρατηρείται κάποια έντονη αντικρουόμενη συμπεριφορά στη μείωση των δύο θρεπτικών από τα διάφορα σενάρια διαχείρισης. Για παράδειγμα, οι λύσεις 7 και 8, που αφορούν στη μέγιστη δυνατή μείωση της συγκέντρωσης P και N-NO3 αντίστοιχα, επιτυγχάνουν ταυτόχρονα η κάθε μία και μείωση πολύ κοντά στα μέγιστα δυνατά επίπεδα για το έτερο στοιχείο. Η λύση 7 επιτυγχάνει τη μέγιστη μείωση P (60%) και μειώνει το N-NO3 κατά 38%, τη στιγμή που η λύση 8, που αποτελεί το βέλτιστο συνδυασμό ΔΠ στη λεκάνη για τη μείωση του δεύτερου στοιχείου, το ελαττώνει μόνο κατά 1,3% παραπάνω (39,3%). Σε γενικές γραμμές υπάρχει μία ανάλογη συμπεριφορά ανάμεσα στις απώλειες των δύο ρύπων, δείγμα του ότι τελικά οι ΔΠ που επιλέχτηκαν στην παρούσα διατριβή κατά κανόνα έχουν διπλή δράση. Η συμπεριφορά αυτή αποτυπώνεται πλήρως στην καμπύλη αντιστάθμισης ανάμεσα στις συγκεντρώσεις των δύο στοιχείων, που απεικονίζεται στο Σχήμα 9.15 και προκύπτει όταν από το βέλτιστο μέτωπο Pareto, επιλέγονται τα δύο αυτά κριτήρια για απεικόνιση στο δισδιάστατο χώρο. Οι διαφορές εν τέλει στα ποσοστά μείωσης των δύο ρύπων που επιτυγχάνονται με τις διάφορες λύσεις, αποδεικνύεται ότι οφείλονται περισσότερο στα αρχικά φορτία τους και στα μεγέθη στα οποία αυτά κυμαίνονται, παρά στο μηχανισμό επίδρασης των ΔΠ. Ακόμα όμως και αυτοί οι παράγοντες είναι αρκετοί ώστε να καταστήσουν πιο σύνθετη τη διαδικασία επιλογής μιας συμβιβαστικής λύσης δεδομένου ότι με σκοπό την ταυτόχρονη μείωση και των δύο ρύπων, ενδιαφέρει το ζεύγος των απόλυτων τιμών των συγκεντρώσεών τους, που κυμαίνονται σε ένα μεγάλο εύρος ανάλογα με τις διάφορες λύσεις.



Σχήμα 9.15 Απεικόνιση βέλτιστης καμπύλης αντιστάθμισης μεταξύ συγκεντρώσεων P και N-NO3. Διακρίνονται οι λύσεις 1 και 2 καθώς και ο γραμμικός χαρακτήρας μεταβολής των εν λόγω μεγεθών.

Στο πρόβλημα βελτιστοποίησης με επιλογή και τοποθέτηση ΔΠ στην αγροτική γη της λεκάνης του Αράχθου δεν ενσωματώθηκε το κριτήριο της μείωσης των απωλειών εδάφους και της στερεοπαροχής του ποταμού διότι, όπως αναφέρθηκε, η φύση των εναλλακτικών σεναρίων είναι τέτοια που στοχεύει στη μείωση των θρεπτικών. Ο περιορισμός των ετήσιων απωλειών εδάφους από τις ΥΜ της λεκάνης και κατ' επέκταση της μέσης ετήσιας στερεοπαροχής του ποταμού προκύπτει ωστόσο έμμεσα και όπως φαίνεται από τα δεδομένα του Πίνακα 9.3 δεν είναι καθόλου αμελητέα.

Πίνακας 9.3 Επίδραση 10 λύσεων από το βέλτιστο μέτωπο Pareto στη συνολική ετήσια στερεοπαροχή του ποταμού στην έξοδο της λεκάνης.

Λύση	Κόστος (€)	Φερτά στην έξοδο (10^6tn/έτος)	Μείωση μέσης ετήσιας στερεοπαροχής (%)
1	513065	1,046	20,8
2	-419125	1,229	6,6
3	1790469	1,003	23,8
4	2204026	1,031	21,6
5	2603131	1,017	22,6
6	2334041	0,971	26,2
7	3140000	0.898	31,7
8	3329886	0,918	30,3
9	-519579	1,234	6,2
10	-8256	1,165	11,5

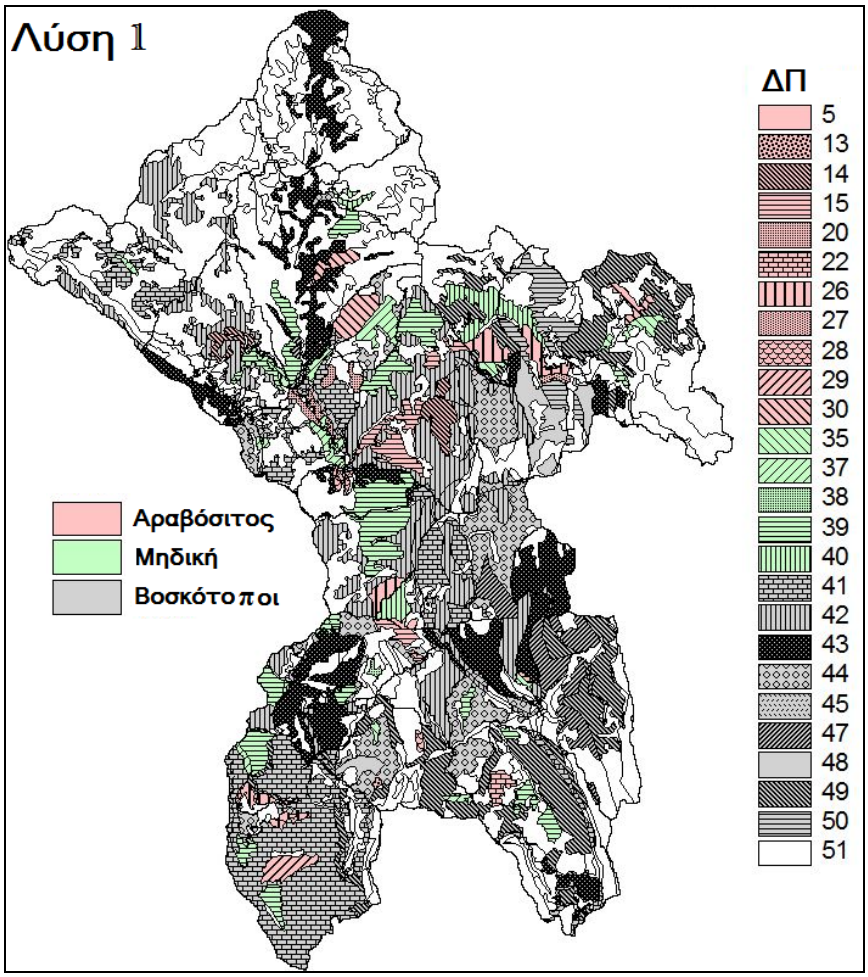
Οι 10 λύσεις που αναλύθηκαν διεξοδικά πιο πάνω παρουσιάζουν μεγάλο εύρος επίδρασης στη στερεοπαροχή του ποταμού, αλλά όπως φαίνεται επιδρούν πάντα θετικά. Οι λύσεις 2 και 9 με το μεγάλο οικονομικό όφελος για τον πληθυσμό της λεκάνης είναι οι λιγότερο αποδοτικές στη μείωση της στερεοπαροχής, όπως άλλωστε και των συγκεντρώσεων θρεπτικών στην έξοδο. Παρόλα αυτά, αποδεικνύουν ότι η κατάργηση της άροσης στις εκτάσεις αραβόσιτου, που προφανώς περιλαμβάνεται σε αυτές, είναι ευεργετική για τον περιορισμό των απωλειών εδάφους. Τα ποσοστά στην τελευταία στήλη του Πίνακα 9.3 είναι μικρά, αλλά πρέπει να συνυπολογίσει κανείς το μικρό ποσοστό κατάληψης της λεκάνης από την καλλιέργεια αραβόσιτου (5%). Σε λεκάνες με μεγάλες εκτάσεις αγρωστωδών το μέτρο αποδεικνύεται πολύ αποτελεσματικό και μάλιστα με αξιοσημείωτα οικονομικά οφέλη. Πολύ μεγάλη επίδραση στη μείωση έχουν τα μέτρα 7 και 8 που όπως άλλωστε αναλύθηκε προηγουμένως περιλαμβάνουν πιθανότατα την εκτεταμένη εγκατάσταση λωρίδων συγκράτησης στην αγροτική γη. Με βάση την Εξίσωση 4.1, η συνολική απώλεια εδάφους από την αγροτική γη όταν εγκαθίστανται ολοκληρωτικά λωρίδες συγκράτησης, πλάτους 5m, πρέπει να είναι μειωμένη κατά 59%. Τα ποσοστά του Πίνακα 9.3 ωστόσο αναφέρονται στη μέση ετήσια στερεοπαροχή στην εξοδο που είναι λιγότερο μειωμένη εξαιτίας κυρίως της συνεισφοράς των μη αγροτικών εκτάσεων που φυσικά μένει ανεπηρέαστη, και δευτερευόντως λόγω της ελαφρά αυξημένης διάβρωσης της κοίτης του ποταμού που προσομοιώνεται από το SWAT όταν η είσοδος φερτών στο υδρογραφικό δίκτυο είναι αισθητά μειωμένη. Ακόμα όμως και αυτές οι προβλέψεις είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικές, αν λάβουμε υπόψη μας το σοβαρό πρόβλημα ταχείας πλήρωσης του νεκρού όγκου του ταμιευτήρα Πουρναρίου Ι ανάντη της Άρτας (Panagopoulos and Mimikou, 2006· Panagopoulos et al., 2008). Τέλος, η λύση 10 προβλέπει μείωση της ετήσιας στερεοπαροχής κατά 12% περίπου, που σημαίνει ότι ακόμα και με μηδενικό κόστος για τη λεκάνη, υπάρχουν εναλλακτικά σχήματα διαχείρισης της αγροτικής γης που βοηθούν σε αυτήν την κατεύθυνση.

9.3.4 Απεικόνιση λύσεων στο χάρτη της λεκάνης του Αράχθου

Στην προηγούμενη ενότητα, παράλληλα με την ανάλυση των τιμών των τριών κριτηρίων μετά από επιλογή βέλτιστων λύσεων, έγινε και συζήτηση για τον πιθανό συνδυασμό ΔΠ που αυτές περιλαμβάνουν. Για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων, καθώς και για την παρατήρηση της χωρικής κατανομής των ΔΠ εντός της λεκάνης επιβάλλεται η απεικόνιση αυτών των λύσεων σε χάρτη. Οι 100 βέλτιστες Pareto λύσεις δίνουν έναυσμα για παραγωγή ισάριθμων χαρτών απεικόνισής τους στη λεκάνη του

Αράχθου. Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται οι χάρτες επιλεγμένων λύσεων, που αποτελούν πολύτιμο εργαλείο για τη λήψη αποφάσεων.

Στο Σχήμα 9.16 φαίνεται ο χάρτης της λεκάνης του Αράχθου με τη χωρική κατανομή των ΔΠ που προβλέπει η λύση 1. Πρόκειται για τη μείωση του P στα επίπεδα των 0,125mg/l δηλαδή στο όριο της πρώτης και καλύτερης κλάσης ποιότητας κατά τους Skoulikidis et al. (2006).



Σχήμα 9.16 Κατανομή ΔΠ στο γεωγραφικό χώρο της λεκάνης του Αράχθου με βάση τη βέλτιστη λύση 1 (P: 0,125mg/l, N-NO3: 0,49mg/l, κόστος: 513065€).

Όπως υποθέταμε, ο αλγόριθμος πράγματι αποδίδει σε αυτή τη λύση ένα συνδυασμό περισσότερο και λιγότερο δαπανηρών ΔΠ στην αγροτική γη της λεκάνης, ώστε να επιτύχει το στόχο της σημαντικής μείωσης του P κατά 44% από την υφιστάμενη κατάσταση με ένα μικρό σχετικά κόστος. Στις εκτάσεις μηδικής (υπόβαθρο με πράσινο χρώμα), η λύση 1 προβλέπει τη μείωση των λιπάνσεων είτε μόνη της (ΔΠ 35 από Πίνακα 7.6), είτε σε συνδυασμό με καθυστέρησή της κατά ένα μήνα (ΔΠ 37) ή εκτενέστερα με εγκατάσταση λωρίδων

συγκράτησης στις ΥΜ (39). Υπάρχει ωστόσο και μία ΥΜ, στο βορειοδυτικό μέρος της λεκάνης, όπου και οι τρεις μεμονωμένες πρακτικές της μηδικής εφαρμόζονται ταυτόχρονα (40). Στις εκτάσεις της καλλιέργειας αυτής, ο αλγόριθμος προτιμά κατά κανόνα την εφαρμογή των δύο πιο αποτελεσματικών ΔΠ στον περιορισμό των απωλειών Ρ αντισταθμίζοντας το κόστος των λωρίδων συγκράτησης με το όφελος από τη χρήση λιγότερων λιπασμάτων.

Στις εκτάσεις αραβόσιτου (υπόβαθρο ροζ χρώματος), ο αλγόριθμος έχει να επιλέξει μεταξύ 32 διαφορετικών ΔΠ (Πίνακας 7.6). Όπως φαίνεται όμως, προτιμώνται οι λωρίδες συγκράτησης σε συνδυασμό πάντα με κάποιο ή κάποια άλλα μεμονωμένα μέτρα (ΔΠ 13, 15, 22, 26, 28, 29, 30). Αυτό συμβαίνει φυσικά διότι οι λωρίδες συγκράτησης είναι το πιο αποτελεσματικό μέτρο στη μείωση των απωλειών Ρ στα επιφανειακά νερά, είτε άμεσα, είτε με έμμεση συγκράτηση εδαφικών σωματιδίων. Δεδομένου ότι από τις εκτάσεις αραβόσιτου προέρχεται ένα πολύ σημαντικό ποσοστό του συνολικού Ρ στη λεκάνη (μέγιστη απώλεια ανά μονάδα έκτασης), είναι λογικό η λύση να προτιμά τα πιο αποτελεσματικά μέτρα για την επίτευξη του φιλόδοξου περιβαλλοντικού στόχου των 0,125mg/l. Το δεύτερο σε σειρά προτίμησης πιο αποτελεσματικό μέτρο στις εκτάσεις αυτές φαίνεται ότι είναι ο συνδυασμός μείωσης και καθυστέρησης της λίπανσης, ο οποίος ενσωματώνεται σε μέτρα ευρύτερων συνδυασμών (ΔΠ 27, 28, 29). Η μείωση της λίπανσης έχει ωστόσο αποδειχτεί ότι συνολικά επιβαρύνει οικονομικά τον πληθυσμό, αφού η απώλεια εισοδήματος λόγω μειωμένων αποδόσεων δεν αντισταθμίζεται από την αγορά μικρότερων ποσοτήτων λιπασμάτων. Ο αλγόριθμος προσπαθεί κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης να ελαχιστοποιήσει ταυτόχρονα και το κόστος εφαρμογής. Όπως αποτυπώνεται πολύ αντιπροσωπευτικά στις εκτάσεις αραβόσιτου, αυτό το επιτυγχάνει με αντιστάθμιση των δαπανών των προηγούμενων μέτρων από την εκτεταμένη κατάργηση της άροσης, είτε σε συνδυασμό με κάποιο ή κάποια δαπανηρά μέτρα (ΔΠ 22, 26, 29, 30), είτε χωρίς κανένα από αυτά (ΔΠ 5, 14, 20).

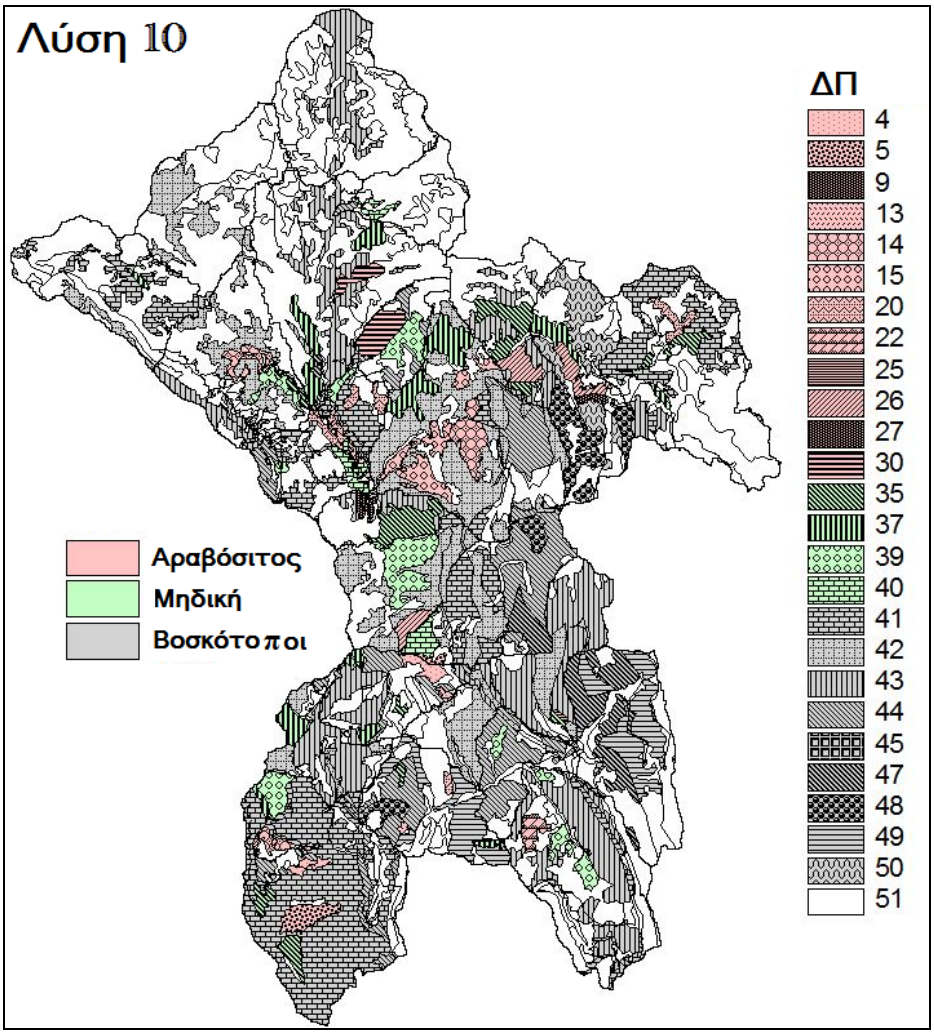
Σχετικά με τις εκτάσεις βοσκότοπων (υπόβαθρο γκρι χρώματος), παρατηρείται αρκετά μεγάλη ποικιλία μέτρων. Αυτό αναμένεται στις συγκεκριμένες εκτάσεις δεδομένου ότι η λύση 1 αποτελεί έναν συμβιβασμό μεταξύ των κριτηρίων (σημαντική, αλλά όχι καθολική μείωση θρεπτικών, θετικό αλλά αποδεκτό κόστος) και δεδομένου ότι οι βοσκότοποι κατέχουν τη μεγαλύτερη έκταση στη λεκάνη, άρα η επίδρασή τους στο συνολικό αποτέλεσμα είναι βαρύνουσα. Πράγματι, παρατηρώντας το χάρτη βλέπουμε ότι οι ΔΠ 42-45 και 47-50 έχουν σχεδόν ομοιόμορφα κατανεμηθεί στη λεκάνη. Πρόκειται είτε για μεμονωμένη εφαρμογή μείωσης ζωικού κεφαλαίου/αποθήκευσης κοπριάς είτε για συνδυασμό τους με εγκατάσταση λωρίδων συγκράτησης. Ο αλγόριθμος εφαρμόζει επιλεκτικά το τελευταίο μέτρο επειδή προφανώς είναι δαπανηρό. Ωστόσο, δεν το προτιμά μεμονωμένο (ΔΠ46), αλλά πάντα σε συνδυασμό με κάποιο άλλο. Αυτό σημαίνει ότι επιζητεί αθροιστική περιβαλλοντική

επίδραση και λόγω της αρκετά μικρότερης δαπάνης των άλλων μέτρων, προτιμά την ενσωμάτωσή τους σε ένα συνδυαστικό διαχειριστικό μέτρο με τις λωρίδες συγκράτησης. Αυτό όμως που προκαλεί ενδιαφέρον, είναι ότι σημαντικές εκτάσεις βοσκότοπων δεν τίθενται υπό διαχείριση. Υπάρχουν κάποιες ΥΜ (π.χ. η μεγάλη ΥΜ κοντά στην έξοδο) όπου ο αλγόριθμος αντιστοιχεί τη ΔΠ 41 δηλαδή τη διατήρηση των συμβατικών τεχνικών διαχείρισης. Είναι αναπόφευκτο, λόγω ανυπαρξίας κάποιου μέτρου με αύξηση εσόδων στους βοσκότοπους, να συμπεριληφθούν οι συμβατικές τεχνικές σε τμήμα των βοσκότοπων της λεκάνης ώστε η βελτιστοποίηση να οδηγήσει στη συμβιβαστική και αρκετά επιθυμητή εν τέλει λύση 1.

Το σενάριο που παρουσιάστηκε στο Σχήμα 9.16 αποτελεί ένα ολοκληρωμένο διαχειριστικό σχήμα στη λεκάνη του Αράχθου που εφαρμόζεται με συνολικό κόστος 513000€ και αντιστοιχεί σε μέσο ετήσιο κόστος διαχείρισης κάτι παραπάνω από 5€/ha γης ή κάτι λιγότερο από 30€/κάτοικο/έτος. Συγκρίνοντας αυτό το αποτέλεσμα με το κόστος που προέκυψε από τη στοχευμένη στρατηγική εφαρμογής ΔΠ σε κλίμακα λεκάνης απορροής της ενότητας 8.5.4, διαπιστώνεται ότι ο περιβαλλοντικός στόχος επιτυγχάνεται με πολύ μικρότερο κόστος μέσω πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης. Στην ενότητα εκείνη, μία μόνο συνδυαστική διαχειριστική προσέγγιση με εφαρμογή λωρίδων συγκράτησης σε ολόκληρη την αγροτική έκταση της λεκάνης, κατόρθωσε να μειώσει τη συγκέντρωση P κάτω από τα ανώτερα επιτρεπτά επίπεδα. Το κόστος υπολογίστηκε στα 2,64 Μ€, ένα ποσό σχεδόν πενταπλάσιο από τη λύση 1 που προτείνεται από το μέτωπο Pareto για την επίτευξη του ίδιου στόχου. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει τις μεγάλες δυνατότητες που προσφέρει η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση με διερεύνηση ενός πολύ μεγάλου αριθμού πιθανών λύσεων που θα ήταν αδύνατο να εξεταστούν διαφορετικά.

Στο Σχήμα 9.17 έχει σχεδιαστεί η λύση 10, ο συνδυασμός ΔΠ στη λεκάνη που προκαλεί το μέγιστο δυνατό περιβαλλοντικό αποτέλεσμα με μηδενική συνολική δαπάνη. Οι συγκεντρώσεις θρεπτικών που προκύπτουν από αυτή τη λύση είναι 0,15 και 0,53mg/l για τον P και το N-NO3 αντίστοιχα. Η λύση, όπως είναι αναμενόμενο, περιλαμβάνει πολλές από τις 50 ΔΠ του Πίνακα 7.6, ώστε να επιτυγχάνεται ο συμβιβασμός του μηδενικού κόστους και της αισθητής μείωσης θρεπτικών. Ο αλγόριθμος και σε αυτήν την περίπτωση προτιμά αποτελεσματικές και πιο οικονομικές ΔΠ σε συνδυασμό τέτοιο, ώστε κόστος και όφελος να αντισταθμίζονται πλήρως. Σε γενικές γραμμές η ανάλυση του χάρτη είναι περίπου ίδια με εκείνη του προηγούμενου δηλαδή της λύσης 1. Κάποιες μικρές διαφορές είναι η ενσωμάτωση των ΔΠ 4 και 9 στο διαχειριστικό αυτό σχήμα και η μη ενσωμάτωση των ΔΠ 28 και 29. Πρόκειται για τέσσερα από τα 32 μέτρα που εφαρμόζονται στον αραβόσιτο με τα δύο πρώτα να μην περιλαμβάνουν καμία από τις δύο πιο δαπανηρές, αλλά και αποτελεσματικές μεμονωμένες πρακτικές στον αραβόσιτο (μείωση λίπανσης, λωρίδες συγκράτησης) και τα

δύο επόμενα να περιλαμβάνουν σε ευρύτερους συνδυασμούς και τις δύο. Στη μηδική δεν παρατηρούνται αξιοσημείωτες διαφορές σε σχέση με το Σχήμα 9.16, ενώ στις εκτάσεις βοσκότοπων η διαχείριση είναι παρόμοια, με τη μεγάλη ΥΜ στο νότιο τμήμα να μην τυγχάνει ούτε εδώ παρεμβάσεων.

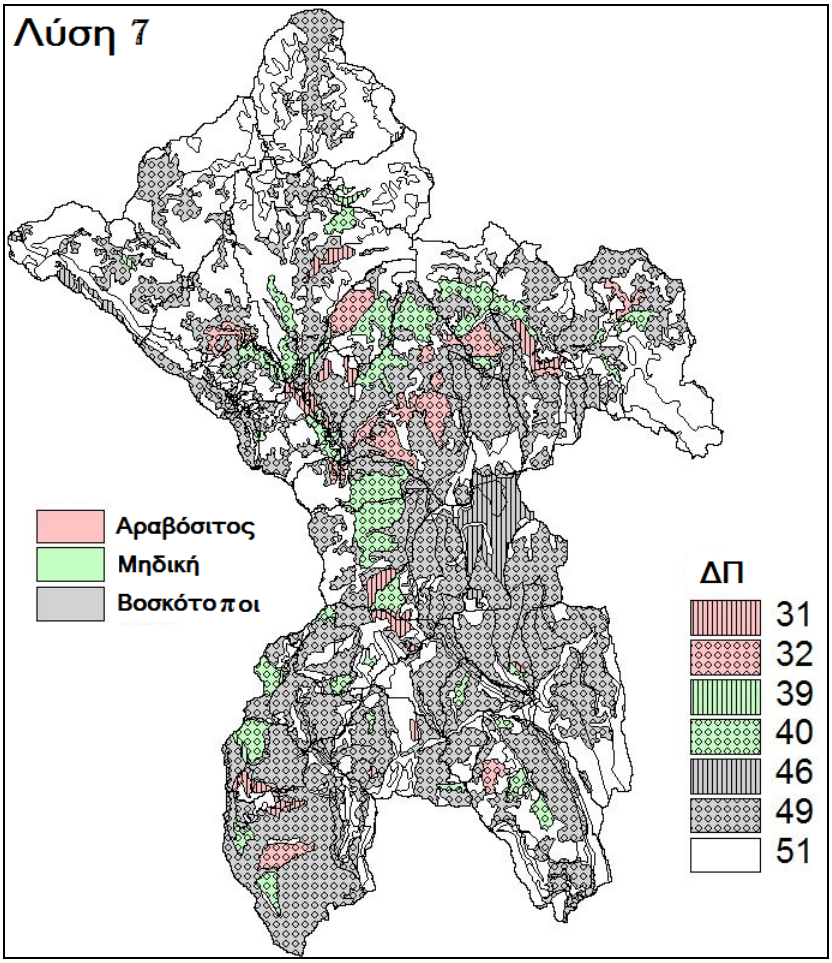


Σχήμα 9.17 Κατανομή ΔΠ στο γεωγραφικό χώρο της λεκάνης του Αράχθου με βάση τη βέλτιστη λύση 10 (μηδενικό κόστος, P: 0,153mg/l, N-NO3: 0,53mg/l).

Θα έλεγε κανείς ότι η πιο οικονομική αυτή λύση επιτυγχάνεται με ηπιότερη διαχείριση της καλλιέργειας αραβόσιτου στη λεκάνη, σε σχέση με την προηγούμενη, ώστε να μην δαπανάται το ποσό των περίπου 500000€. Η εγκατάσταση λωρίδων συγκράτησης και η μείωση λιπάνσεων σε μικρότερο βαθμό όμως, σε συνδυασμό και με τις όποιες μεταβολές στις εκτάσεις των άλλων δύο αγροτικών τύπων χρήσης γης δεν αποφέρουν τα πολύ ικανοποιητικά ποιοτικά αποτελέσματα του ποταμού της λύσης 1. Η εντύπωση που αφήνει ωστόσο η σύγκριση των δύο αυτών λύσεων είναι ότι αξίζει η μικρή οικονομική θυσία που προβλέπει η

λύση 1, αφού επιτυγχάνει τη μείωση του P στα κατώτερα επίπεδα και καθιστά την ποιότητα του νερού του ποταμού με βάση αυτό το κριτήριο *Υψηλή*. Με κριτήριο το N-NO3, το συμπέρασμα μάλλον είναι διαφορετικό, δεδομένου ότι η διαφορά στην προκαλούμενη συγκέντρωση από την εφαρμογή των λύσεων 1 και 10 (0,49 και 0,53mg/l) δεν μεταβάλλει την κλάση και το λεκτικό χαρακτηρισμό της ποιότητας του νερού. Επιπλέον, η λύση 10 εξοικονομεί το ποσό των 513000€, αφού προκαλεί μηδενικό κόστος, μία διαφορά που αν και μικρή, ακούγεται σίγουρα θετικά από τον αγροτικό πληθυσμό και ενισχύει την προθυμία του να συνεργαστεί στην εφαρμογή των δράσεων.

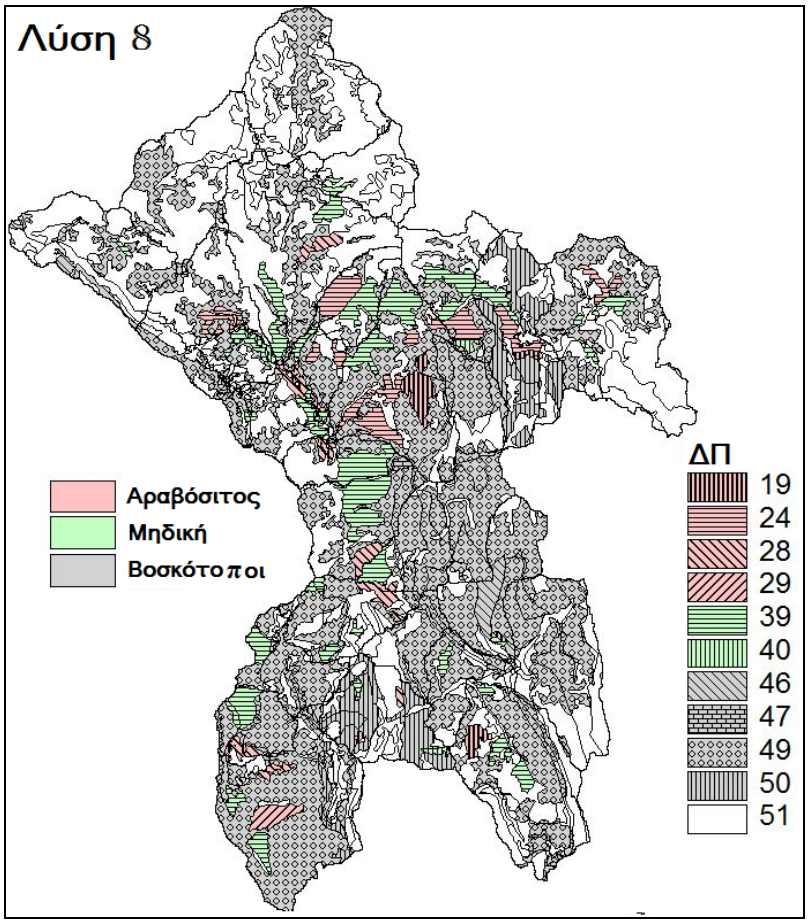
Στις Εικόνες 9.18 και 9.19 απεικονίζονται οι λύσεις 7 και 8 δηλαδή οι συνδυασμοί ΔΠ που ελαχιστοποιούν τη συγκέντρωση P και N-NO3 αντίστοιχα. Παρατηρούμε στο Σχήμα 9.18 ότι η ελαχιστοποίηση της συγκέντρωσης του P προκύπτει μετά από επιλογή ενός πολύ μικρού αριθμού ΔΠ στην αγροτική γη. Ο αλγόριθμος έχει επιλέξει δύο μόνο εναλλακτικά σενάρια για κάθε αγροτικό τύπο χρήσης γης, συνολικά δηλαδή 6 από τα 50 του Πίνακα 7.6. Στον αραβόσιτο έχουν εφαρμοστεί οι ΔΠ 31 και 32. Η δεύτερη αποτελεί το συνδυασμό και των 5 μεμονωμένων πρακτικών που προβλέπονται ως εναλλακτικές αγροτικές τεχνικές στην καλλιέργεια αυτή, ενώ η πρώτη περιλαμβάνει τις 4 από τις 5, με εξαίρεση της καθυστέρησης λίπανσης κατά ένα μήνα. Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο, δεδομένου ότι η αθροιστική επίδραση όλων των ΔΠ είναι και η μέγιστη δυνατή στον περιορισμό των απωλειών του P. Το ίδιο ισχύει και για τη μηδική. Εδώ οι ΔΠ που επιλέγονται είναι η 39 και η 40 με την πρώτη να εξαιρεί την αλλαγή στο χρόνο φωσφορικής λίπανσης και την εφαρμογή της ένα μήνα αργότερα στα 4 από τα 5 χρόνια καλλιέργειας (βλ. Πίνακα 7.6). Ωστόσο, παρατηρώντας προσεκτικά το χάρτη, συμπεραίνεται ότι το μέτρο της καθυστέρησης λίπανσης στις δύο καλλιέργειες έχει συντριπτικά ενσωματωθεί και μόνο ελάχιστες και πολύ μικρές σε έκταση ΥΜ δεν το συμπεριλαμβάνουν. Αυτό δείχνει ότι το μέτρο, αν και έχει μειωμένη επίδραση σε σχέση με τα άλλα, αθροιστικά συνεισφέρει στη συνολική μείωση των απωλειών. Το ότι υπάρχουν όμως έστω και λίγες ΥΜ που η συγκεκριμένη ΔΠ δεν εφαρμόζεται μπορεί να οφείλεται σε δύο λόγους. Ο πρώτος έχει να κάνει με το ότι σε κάποιες υπολεκάνες είναι δυνατόν η μέση μηνιαία βροχόπτωση της περιόδου 2001-2005 του μήνα στον οποίο συμβατικά εφαρμοζόταν η λίπανση να ήταν τελικά μικρότερη από την αντίστοιχη του επόμενου, επομένως η ΔΠ να μην ενδείκνυται. Ο δεύτερος προδίδει ότι το μέτωπο Pareto στο οποίο κατέληξε η διαδικασία βελτιστοποίησης δεν είναι ακριβώς το βέλτιστο αλλά μία πολύ καλή προσέγγιση αυτού ώστε τελικά κάποιες πολύ μικρές βελτιώσεις των αντικειμενικών συναρτήσεων να είναι ακόμα εφικτές μετά από παραγωγή περισσότερων γενιών.



Σχήμα 9.18 Κατανομή ΔΠ στο γεωγραφικό χώρο της λεκάνης του Αράχθου με βάση τη βέλτιστη λύση 7 (ελάχιστη δυνατή συγκέντρωση P: 0,09mg/l, N-NO3: 0,406mg/l, κόστος 3,14M€).

Εστιάζοντας στα βορειοδυτικά της λεκάνης, κοντά δηλαδή στην περιοχή του Μετσόβου, διακρίνεται μία ΥΜ αραβόσιτου με τη ΔΠ 31 που γειτνιάζει με μία ΥΜ μηδικής με τη ΔΠ 40. Οι δύο ΥΜ βρίσκονται στην ίδια υπολεκάνη και δέχονται την ίδια βροχόπτωση, επομένως, η ενσωμάτωση μόνο στη μία της πρακτικής αλλαγής του χρόνου λίπανσης οδηγεί στην υιοθέτηση της δεύτερης από τις ανωτέρω ερμηνείες. Αυτό ενισχύεται από την ύπαρξη ΥΜ στις εκτάσεις βοσκότοπων με τη ΔΠ 46, που εκφράζει την εγκατάσταση λωρίδων συγκράτησης μεμονωμένα. Πρόκειται για έναν πολύ μικρό αριθμό ΥΜ, στις οποίες βρίσκεται επίσης μικρός αριθμός ζώων. Παρ' όλα αυτά, η ΔΠ 49 είναι σίγουρα πιο αποτελεσματική από την 46 αφού ενσωματώνει συνδυασμό μέτρων και ανεξάρτητα των πιέσεων που δέχονται οι συγκεκριμένες ΥΜ θα έπρεπε η έστω και ανεπαίσθητη υπεροχή της να έχει αποτυπωθεί στο τελικό αποτέλεσμα. Αποδεικνύεται ότι ο αλγόριθμος χρειαζόταν κάποιες επαναλήψεις (γενιές) ακόμα ώστε να μπορέσει να ταυτιστεί με το ολικά βέλτιστο μέτωπο. Στη συντριπτική

πλειοψηφία των εν λόγω εκτάσεων έχει ωστόσο αποδώσει την ΔΠ 49 που είναι η συνδυασμένη πρακτική λωρίδων συγκράτησης και μείωσης ζωικού κεφαλαίου κατά 30% (πουλερικά και αιγοπρόβατα). Φαίνεται ότι η ΔΠ 49 είναι πιο αποτελεσματική από τη ΔΠ 50, δηλαδή η μείωση του ζωικού κεφαλαίου είναι πιο δραστική στη μείωση του P απ' ότι η αποθήκευση της κοπριάς με αλλαγή στο χρόνο διασποράς και περιορισμό της περιόδου βόσκησης, κάτι που φυσικά αναμένεται αφού η δεύτερη ομάδα μέτρων δεν μεταβάλλει τη σύσταση της κοπριάς ως προς το στοιχείο του P.



Σχήμα 9.19 Κατανομή ΔΠ στο γεωγραφικό χώρο της λεκάνης του Αράχθου με βάση τη βέλτιστη λύση 8 (ελάχιστη δυνατή συγκέντρωση N-NO3: 0,397mg/l, P: 0,091mg/l, κόστος 3,33M€).

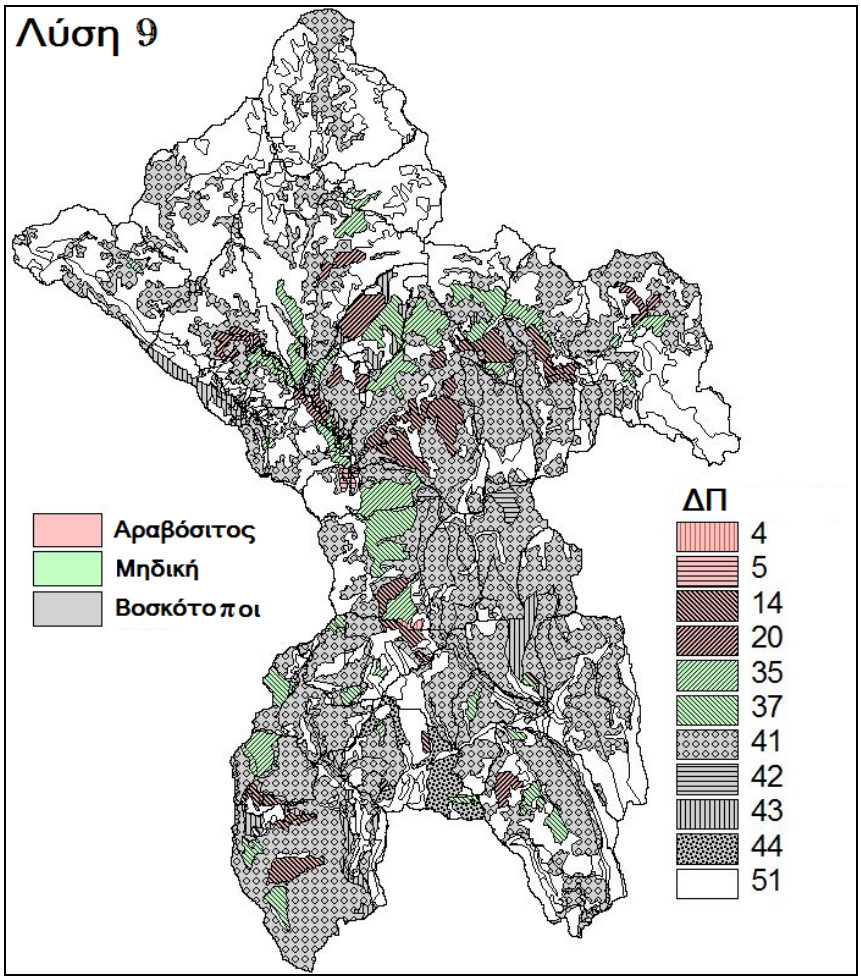
Όσο για την ελαχιστοποίηση του N-NO3, τα πράγματα είναι λίγο διαφορετικά και οι διαφορές αυτές αποτυπώνονται στις εκτάσεις βοσκότοπων, μηδικής και αραβόσιτου του Σχήματος 9.19. Στις πρώτες, ο αλγόριθμος εκ νέου για τη λύση 8 αποδίδει τη ΔΠ 49 ως την καλύτερη στη μείωση και αυτού του ρύπου. Ωστόσο, υπάρχουν εκτάσεις στο χάρτη (νότια και βορειοδυτικά της λεκάνης) όπου η ΔΠ 50 έχει προτιμηθεί, φανερώνοντας ότι η

αποθήκευση της κοπριάς, ο περιορισμός της βόσκησης και η εναπόθεση κατά την ξηρή περίοδο είναι πιο αποτελεσματικά μέτρα στις συγκεκριμένες εκτάσεις σε σχέση με τη μείωση του ζωικού κεφαλαίου. Η ύπαρξη ακόμα δύο πρακτικών, έστω σε πολύ περιορισμένο βαθμό (ΔΠ 46 και ΔΠ 47), απλά αποδεικνύει ότι ο αλγόριθμος δεν ταυτίζεται με το ολικά βέλτιστο μέτωπο αλλά το προσεγγίζει. Οι ΥΜ στις οποίες αφορούν ωστόσο οι δύο αυτές πρακτικές είναι πολύ μικρές και δύσκολα εντοπίζονται ακόμα και στο χάρτη. Στον αραβόσιτο έχει κατά κανόνα προτιμηθεί η ΔΠ 24, αλλά υπάρχουν 3 ΥΜ, σε κάθε μία εκ των οποίων έχει αποδοθεί μία εκ των πρακτικών 19, 28 και 29. Η πρακτική 24 περιλαμβάνει τη μείωση λίπανσης, την καλλιέργεια κατά τις ισοϋψείς και την εγκατάσταση λωρίδων συγκράτησης (βλ. Πίνακα 7.6). Οι τρεις επιπρόσθετες ΔΠ ενσωματώνουν στα δύο πιο αποτελεσματικά μέτρα (λωρίδες, μείωση λίπανσης), είτε την καθυστέρηση λίπανσης, είτε την κατάργηση της άροσης. Στον αραβόσιτο φαίνεται ότι η κατάργηση της άροσης έχει επίδραση περισσότερο στη μείωση των απωλειών εδάφους και κατ' επέκταση των απωλειών Ρ που συνδέονται στενά μεταξύ τους. Είναι παρ' όλα αυτά αναμενόμενο ότι ο αλγόριθμος εδώ έχει να επιλέξει μεταξύ πολλών εναλλακτικών δράσεων (32), οπότε είναι και φυσικό η μικρή παρέκκλιση από το ολικά βέλτιστο μέτωπο να περιλαμβάνει σε λίγο μεγαλύτερο βαθμό και κάποιες ακόμα ΔΠ, που αγγίζουν το βέλτιστο αλλά δεν ταυτίζονται με αυτό. Τέλος, στις εκτάσεις μηδικής παρατηρείται η προτίμηση της ΔΠ 39 και όχι της ΔΠ 40 όπως στην προηγούμενη περίπτωση για τον Ρ. Αυτό συμβαίνει διότι η καθυστέρηση λίπανσης στην καλλιέργεια αυτή αφορά μόνο στο στοιχείο του Ρ, επομένως ο αλγόριθμος δικαιολογημένα προτιμά την ΔΠ 39, το συνδυασμό δηλαδή μειωμένης λίπανσης (100% μείωση για το Ν) και εγκατάστασης λωρίδων συγκράτησης. Μάλιστα, η μείωση του Ρ που προκαλεί η αλλαγή στο χρόνο λίπανσης στη μηδική, όπως αποδείχτηκε από το χάρτη του Σχήματος 9.18, μάλλον δρα αντίστροφα για το έτερο στοιχείο, προκαλώντας την ελαφρώς μεγαλύτερη διαθεσιμότητά του στο έδαφος και άρα πιθανότητα απόπλυσης. Η εν λόγω φυσική ανταγωνιστική συμπεριφορά προσομοιώθηκε όπως φαίνεται από το μοντέλο SWAT.

Συνοψίζοντας τα συμπεράσματα από τις λύσεις 7 και 8 φαίνεται ότι πρόκειται για παρόμοιες σχεδόν λύσεις. Παρόλο που η κάθε μία στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του ενός εκ των δύο ρύπων, τα δεδομένα του Πίνακα 9.2 αποδεικνύουν ότι ταυτόχρονα βελτιστοποιούνται οι συγκεντρώσεις και των δύο. Αυτό συμβαίνει διότι υπάρχει πολύ μικρή ανταγωνιστικότητα μεταξύ των μηχανισμών που διέπουν τον περιορισμό των δύο ρύπων από τις διάφορες ΔΠ. Μπορούμε ωστόσο να προτιμήσουμε τη λύση 7, η οποία αντιστοιχεί σε κόστος περίπου 200000€ λιγότερο σε σχέση με τη λύση 8, ένα ποσό που δεν είναι αμελητέο.

Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η απεικόνιση της λύσης 9, του διαχειριστικού σχήματος εντός της λεκάνης του Αράχθου που ελαχιστοποιεί το κόστος εφαρμογής ή αλλιώς

που μεγιστοποιεί το επιπρόσθετο οικονομικό όφελος για τον αγροτικό πληθυσμό. Το Σχήμα 9.20 παραθέτει τη χωρική κατανομή των ΔΠ που αντιστοιχούν σε αυτή τη λύση.



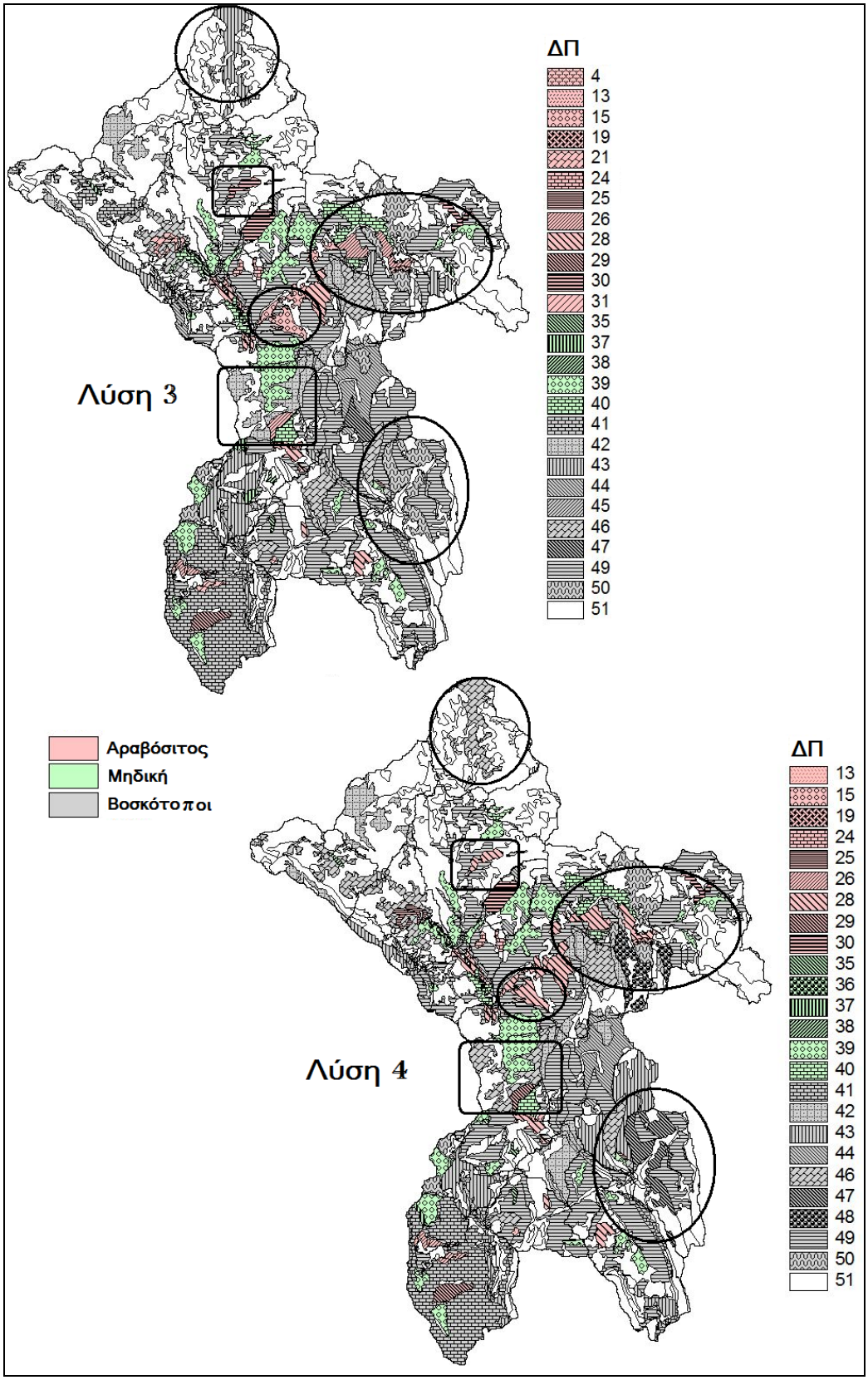
Σχήμα 9.20 Κατανομή ΔΠ στο γεωγραφικό χώρο της λεκάνης του Αράχθου με βάση τη βέλτιστη λύση 9 (ελάχιστο δυνατό κόστος εφαρμογής: όφελος 519579€, συγκέντρωση N-NO3: 0,63mg/l, P: 0,193mg/l).

Ξεκινώντας από τις εκτάσεις μηδικής, παρατηρείται ότι ο αλγόριθμος επιλέγει τις ΔΠ 35 και 37 του Πίνακα 7.6, δηλαδή την καλλιέργεια με μειωμένη λίπανση και το συνδυασμό αυτής με τη μεταβολή στο χρόνο εφαρμογής αντίστοιχα. Ο αλγόριθμος προσπαθεί σε αυτήν την περίπτωση να ελαχιστοποιήσει το κόστος και το επιτυγχάνει με τον ίδιο τρόπο επιλέγοντας μία εκ των δύο πρακτικών. Η μειωμένη λίπανση αποφέρει κέρδη από την αγορά λιγότερων λιπασμάτων, ενώ οι αποδόσεις δεν επηρεάζονται σύμφωνα με την προσομοίωση του SWAT. Η ενσωμάτωση της καθυστέρησής της κατά τα 4 τελευταία έτη του 5ετούς κύκλου της καλλιέργειας πραγματοποιείται χωρίς κόστος με αποτέλεσμα το όφελος να παραμένει στα ίδια ακριβώς επίπεδα, ίσως ελαφρά αυξημένο, αν η μειωμένη απόπλυση του P

λόγω της εφαρμογής του μέτρου, προκαλεί ελαφρά αυξημένη λήψη του και άρα απόδοση της καλλιέργειας. Ο αλγόριθμος επιλέγει έτσι τις ΔΠ 35 και 37 στις εκτάσεις μηδικής για την ελαχιστοποίηση του κόστους.

Στους βοσκότοπους η μοναδική πρακτική που δεν προκαλεί αύξηση των δαπανών είναι η ΔΠ 41 που αναφέρεται στη συμβατική διαχείριση. Στη συντριπτική πλειοψηφία των ΥΜ βοσκότοπων έχει αποδοθεί η εν λόγω ΔΠ, όπως φαίνεται στο Σχήμα 9.20. Ωστόσο, οι ΔΠ μείωσης αριθμού πουλερικών (42), αποθήκευσης κοπριάς πουλερικών (43) και μείωσης αριθμού αιγοπροβάτων (44) έχουν επιλεχθεί σε έναν πολύ μικρό αριθμό ΥΜ με χαμηλό κόστος λόγω του περιορισμένου ζωικού κεφαλαίου σε αυτές. Η επιπρόσθετη μείωση του συνολικού κόστους, αν και μηδαμινή, είναι εφικτή, μέσω περισσότερων επαναλήψεων στην αναπαραγωγή πληθυσμών του ΓΑ. Τέλος, στον αραβόσιτο έχουν βασικά επιλεχθεί οι ΔΠ 14 και 20 που με βάση τον Πίνακα 7.6 περιγράφουν την καλλιέργεια του φυτού κατά τις ισοϋψείς χωρίς άροση (14) καθώς και συνδυαστικά με καθυστέρηση λίπανσης κατά ένα μήνα (Απρίλιο αντί Μαρτίου). Η κατάργηση της άροσης είναι το μοναδικό μέτρο στις εκτάσεις αραβόσιτου που υπόσχεται άμεσα θετικά αποτελέσματα στην κατεύθυνση της εξοικονόμησης δαπανών για την καλλιέργεια. Όπως φαίνεται ωστόσο, ο αλγόριθμος το προτιμά σε συνδυασμό με την καλλιέργεια κατά ισοϋψείς, που μειώνει αυτό το όφελος (30€ αντί 40€, βλ. Πίνακα 7.5). Προφανώς ο συνδυασμός τους επιδρά πιο ευεργετικά στην διατήρηση της διαθεσιμότητας των θρεπτικών στοιχείων στο έδαφος (περιορισμός απόπλυσης) με αποτέλεσμα η λήψη τους να είναι εντονότερη και οι αποδόσεις μεγαλύτερες, με αντίκτυπο στον υπολογισμό του συνολικού κόστους. Η αλλαγή στο χρόνο λίπανσης που προστίθεται σε κάποιες ΥΜ (ΔΠ 20) έχει να κάνει προφανώς με επίδραση στους ανωτέρω μηχανισμούς, επιδρώντας ελάχιστα στη διαμόρφωση των αποδόσεων. Υπάρχουν ακόμα και δύο πολύ μικρές ΥΜ αραβόσιτου στις οποίες έχουν αποδοθεί μεμονωμένα οι ΔΠ 4 και 5, που αντιστοιχούν στην καλλιέργεια κατά τις ισοϋψείς και στην κατάργηση της άροσης αντίστοιχα, τις δύο ΔΠ που υπόσχονται τη μέγιστη απόδοση στον αραβόσιτο, προκαλώντας όμως πολύ μικρή μείωση φορτίου απωλειών θρεπτικών. Τα συνολικά φορτία από την πολύ οικονομική λύση 9 (επιπρόσθετο ετήσιο όφελος 519579€) διαμορφώνουν συγκεντρώσεις P και N-NO3 στην έξοδο της λεκάνης 0,193mg/l και 0,63mg/l αντίστοιχα, αναπόφευκτα πολύ λίγο μειωμένες σε σχέση με εκείνες της υφιστάμενης κατάστασης.

Οι τελευταίες λύσεις που απεικονίζονται παρακάτω είναι οι λύσεις 3 και 4 του Πίνακα 9.2. Πρόκειται για δύο διαχειριστικά σχήματα εντός της λεκάνης, που με σημαντικό και παραπλήσιο κόστος (κοντά στα 2M€) προκαλούν το ίδιο περιβαλλοντικό αποτέλεσμα, με μείωση της συγκέντρωσης του P στα επίπεδα των 0,10mg/l. Στόχος της παράλληλης απεικόνισής τους στο Σχήμα 9.21 είναι να εντοπιστούν πιθανές διαφορές μεταξύ της χωρικής κατανομής των διαφόρων ΔΠ στη λεκάνη του Αράχθου.



Σχήμα 9.21 Κατανομή ΔΠ στο γεωγραφικό χώρο της λεκάνης του Αράχθου με βάση τις βέλτιστες λύσεις 3 (πάνω) και 4 (κάτω) με παραπλήσιο κόστος: 1,8 και 2,2M€ αντίστοιχα, και με ίδιο περιβαλλοντικό αποτέλεσμα (συγκέντρωση P: ~0, 10mg/l, N-NO3: ~0,42mg/l).

Πράγματι, με προσεκτική παρατήρηση των δύο χαρτών εντοπίζονται διαφορές στην επιλογή ΔΠ στις εστιασμένες περιοχές. Η βορειότερη ΥΜ βοσκότοπων στη λεκάνη (κύκλος στο βόρειο τμήμα) σύμφωνα με τη λύση 3 προτείνεται να τύχει διαχείρισης μέσω επεξεργασίας και μεταβολής στο σύστημα διασποράς της κοπριάς πουλερικών (ΔΠ 43), ενώ με τη λύση 4 προτείνεται η εγκατάσταση λωρίδων συγκράτησης στα όριά της (ΔΠ 46). Στην κυκλωμένη περιοχή του νοτιοανατολικού άκρου της λεκάνης οι ΥΜ βοσκότοπων που είναι εκεί συγκεντρωμένες τυγχάνουν επίσης διαφορετικής διαχείρισης. Ο αλγόριθμος προτείνει τη συνδυαστική διαχείριση με εγκατάσταση λωρίδων και αποθήκευση κοπριάς πουλερικών και αιγοπροβάτων (ΔΠ 50) στην πρώτη περίπτωση (λύση 3), ενώ την περιορίζει σε μείωση αριθμού πουλερικών και αιγοπροβάτων στη δεύτερη (ΔΠ 47). Ο μικρός κύκλος στο κέντρο της λεκάνης εστιάζει σε ΥΜ αραβόσιτου που με βάση τη λύση 3 τυγχάνει μόνο καλλιέργειας κατά τις ισοϋψείς και εγκατάστασης λωρίδων συγκράτησης (ΔΠ 15), ενώ με βάση τη λύση 4 τυγχάνει σχεδόν ολοκληρωτικής διαχείρισης με επιπρόσθετη μείωση της ποσότητας και αλλαγή στο χρόνο λίπανσης (ΔΠ 28). Στην περιοχή που εστιάζεται από τους μεγάλους κύκλους στα βορειοανατολικά, κοντά στην περιοχή του Μετσόβου, καταδεικνύονται δύο ΥΜ αραβόσιτου που με βάση τις λύσεις 3 και 4 τυγχάνουν επίσης σημαντικής διαχείρισης, που διαφέρει ωστόσο εν μέρει λόγω της ενσωμάτωσης διαφορετικών μεμονωμένων πρακτικών (ΔΠ 26 και ΔΠ 28). Στην πρώτη περίπτωση δεν προβλέπεται μείωση της λίπανσης, κάτι που προφανώς δεν έχει και επιπτώσεις στην παραγωγή, αντίθετα, στη δεύτερη, η κατάργηση της άροσης έχει αντικατασταθεί από τη συνδυασμένη εφαρμογή μειωμένης και οψιμότερης εφαρμογής λιπασμάτων. Κάτι ανάλογο συμβαίνει και στην ΥΜ αραβόσιτου που εστιάζεται από το μικρό τετράγωνο στους δύο χάρτες. Η λύση 3 προβλέπει τη ΔΠ 30, δηλαδή την εφαρμογή των 4 από τα 5 μεμονωμένα μέτρα στον αραβόσιτο, εξαιρουμένης δηλαδή της μειωμένης ποσότητας λίπανσης. Αντίθετα, η μοναδική πρακτική που εξαιρείται σε αυτήν την ΥΜ σύμφωνα με τη λύση 4, είναι η κατάργηση της άροσης (ΔΠ 28) αντί της μειωμένης λίπανσης. Επομένως, σημαντική απώλεια εισοδήματος προκαλείται σε αυτήν την περίπτωση στους ιδιοκτήτες των αγροτικών αυτών εκτάσεων λόγω μειωμένης προσφοράς θρεπτικών στοιχείων και άρα παραγωγής. Τέλος, στα μεγάλα τετράγωνα, κεντρικά στη λεκάνη, περικλείονται ΥΜ αραβόσιτου και βοσκότοπων με διαφορετική διαχείριση. Ο αραβόσιτος καλλιεργείται με βάση τη ΔΠ 26 στη λύση 3 και με βάση τη ΔΠ 29 στη δεύτερη. Όπως προκύπτει από την ανάγνωση των εν λόγω ΔΠ στους Πίνακες 7.6 και 7.4, και εδώ η βασική διαφορά είναι η ενσωμάτωση ή μη του μέτρου της μειωμένης λίπανσης που παίζει σημαντικό ρόλο στις τελικές αποδόσεις. Οι ΥΜ βοσκότοπων τυγχάνουν επίσης πολύ διαφορετικής διαχείρισης με βάση τις δύο λύσεις, με την πρώτη να προβλέπει μείωση στον αριθμό πουλερικών (ΔΠ 42) και τη δεύτερη την εγκατάσταση λωρίδων συγκράτησης χωρίς να θίγει

ουσιαστικά την κτηνοτροφική δραστηριότητα των κατοίκων στις μικρές αυτές κοινωνίες (χωριά).

Η παρουσίαση των εναλλακτικών σχημάτων διαχείρισης εντός της λεκάνης που προτείνονται από τις λύσεις 3 και 4 είναι ενδεικτική του ότι τα ίδια περίπου αποτελέσματα είναι δυνατόν να επιτυγχάνονται με διάφορους τρόπους, δηλαδή με εφαρμογή διαφορετικών ΔΠ σε τμήματα της αγροτικής γης. Ανάλογη συμπεριφορά αναμένεται να έχουν οι λύσεις 5 και 6 που εντοπίστηκαν στην καμπύλη αντιστάθμισης κόστους – N-NO3. Η παροχή εναλλακτικών λύσεων με τον ίδιο περίπου βαθμό ικανοποίησης των κριτηρίων κρίνεται πολύτιμη διότι σε ένα τέτοιο πρόβλημα υπεισέρχεται πάντα και ο παράγοντας της κοινωνικής αποδοχής. Στην περίπτωση λοιπόν που η μεθοδολογία που προτείνεται σε αυτή τη διατριβή τύχει χρήσης για πραγματική εφαρμογή αγροτικών διαχειριστικών δράσεων, τέτοιες εναλλακτικές επιλογές μπορούν να επιτύχουν τον απαιτούμενο συμβιβασμό με μετριασμό των αντιδράσεων από τους τοπικούς πληθυσμούς. Είναι προφανές ότι η μείωση των αποδόσεων αραβόσιτου και του ζωικού κεφαλαίου, που παραδοσιακά αποτελούν τη βασική πηγή εισοδήματος εντός της λεκάνης, μπορεί να ακούγεται πολύ δυσάρεστη για κάποιες μικρές κοινωνίες.

9.4 Διατύπωση του προβλήματος με βελτιστοποίηση ενός κριτηρίου

Στην ενότητα 5.2.2 του 5ου κεφαλαίου, πριν την ανάλυση περί πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, παρουσιάστηκε η δυνατότητα που παρέχεται για μετατροπή του προβλήματος σε μονοκριτηριακό μέσω απόδοσης βαρών στα διάφορα κριτήρια (Εξ. 5.2). Η ένταξη δύο ή περισσότερων κριτηρίων σε μία κοινή καθολική αριθμητική έκφραση αποτίμησης γίνεται στην περίπτωση αυτή υποκειμενικά και καθίσταται υποχρεωτική η επανάληψη της υπολογιστικής διαδικασίας πολλές φορές, ώσπου να εντοπιστεί ικανοποιητικός αριθμός λύσεων που είναι αντιπροσωπευτικές ενός συνόλου από βέλτιστες. Οι τιμές για τα βάρη της Εξίσωσης 5.2 αθροίζουν στη μονάδα, με τα μεγαλύτερα βάρη να δηλώνουν τη μεγαλύτερη βαρύτητα που δίνει ο μελετητής στην ικανοποίηση κάποιων μέτρων επίδοσης (κριτηρίων) έναντι των άλλων. Στην ενότητα αυτή, στόχος δεν είναι η εξονυχιστική αναζήτηση λύσεων μέσω αυτής της διαδικασίας που άλλωστε δεν κρίνεται χρήσιμη, αλλά μία σύντομη παρουσίαση της διατύπωσης του προβλήματος ακολουθώντας μια τέτοια προσέγγιση.

Τα τρία κριτήρια προς ελαχιστοποίηση στο πρόβλημα βελτιστοποίησης που πραγματεύεται η διατριβή στον Άραχθο (κόστος, συγκέντρωση P, συγκέντρωση N-NO3), αποτιμώνται σε διαφορετική μονάδα μέτρησης (€ και kg ή mg/l). Προϋπόθεση για την ένταξή τους σε ένα καθολικό μέτρο επίδοσης είναι η αδιαστατοποίησή τους. Αυτό μπορεί να

επιτευχθεί με χρήση των ελαχίστων τιμών των τριών αυτών κριτηρίων που είναι εκ των προτέρων γνωστά από τη βάση δεδομένων της ΒΔΠ. Πρόκειται για τιμές -520500€ για το κόστος, 459232kg για το ετήσιο φορτίο απωλειών N-NO3 και 103762kg για το ετήσιο φορτίο απωλειών P από τις ΥΜ της λεκάνης. Τα δύο αυτά φορτία αντιστοιχούν στις βέλτιστες (ελάχιστες) δυνατές συγκεντρώσεις των 0,09 και 0,39mg/l για τα δύο θρεπτικά αντίστοιχα. Μία κανονικοποιημένη καθολική έκφραση της αντικειμενικής συνάρτησης με ενσωμάτωση και των τριών κριτηρίων μπορεί να είναι η ακόλουθη:

$$f = w_1 \frac{\phi_{\mathrm{N-NO3}} - 459232}{459232} + w_2 \frac{\phi_P - 103762}{103762} + w_3 \frac{\mathrm{K} - (-520500)}{520500} \text{ με } \sum_{i=1}^{3} w_i = 1 \qquad (9.1)$$

όπου: $\phi_{\mathrm{N-NO3}}$ και ϕ_P τα μέσα ετήσια φορτία απωλειών N-NO3 και P (kg) από τις ΥΜ της λεκάνης του Αράχθου αντίστοιχα, που προκύπτουν από την εφαρμογή του εκάστοτε διαχειριστικού συνδυασμού ΔΠ στην αγροτική γη και K, το συνολικό κόστος εφαρμογής σε €. Στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης *f* (min*f*), ενώ τα βάρη *w* επιλέγονται υποκειμενικά για τη συμμετοχή των επιμέρους τριών κριτηρίων στη διαμόρφωση του συνολικού μέτρου επίδοσης. Με χρήση της Εξίσωσης 9.1 επιτυγχάνεται η αδιαστατοποίηση των τριών κριτηρίων αφού ο κάθε ένας από τους τρεις όρους της είναι αδιάστατος με βέλτιστη τιμή το 0. Επομένως, και η βέλτιστη τιμή της συνάρτησης *f* είναι θεωρητικά το 0, αφού, όπως έχουν διαμορφωθεί οι όροι της, κανένας δε μπορεί να λάβει αρνητική τιμή. Η διαίρεση των επιμέρους μέτρων με το εκ των προτέρων γνωστό ελάχιστο μέτρο επίδοσης κάθε κριτηρίου έχει σαν αποτέλεσμα ο κάθε όρος να εκφράζει τη σύγκλιση του κάθε κριτηρίου με τη βέλτιστη τιμή του. Είναι ωστόσο φανερό ότι η βέλτιστη τιμή της συνάρτησης δε μπορεί στην πράξη να είναι το 0, αλλά μια τιμή που το προσεγγίσει, δεδομένου ότι το κόστος είναι έντονα αντικρουόμενο με τα άλλα κριτήρια και έτσι, δεν είναι δυνατό να επιτευχθεί ο ταυτόχρονος μηδενισμός και των τριών όρων στο δεξί μέρος της Εξίσωσης 9.1.

Η συνάρτηση ενσωμάτωσης των τριών κριτηρίων μπορεί να αποτελέσει το μέτρο επίδοσης της μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης με χρήση του ΓΑ του MATLAB. Οι ρυθμίσεις του ΓΑ που επιλέχθηκαν για μία σύντομη αποτίμηση της *f* είναι οι ίδιες με εκείνες του Πίνακα 9.1, με εξαίρεση φυσικά αυτών που αναφέρονται στην πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση και που εδώ δεν ορίζονται. Επιλέχθηκε πληθυσμός 250 με έναν μικρό μέγιστο αριθμό γενιών (500) για τέσσερις διαφορετικούς συνδυασμούς βαρών της Εξίσωσης 9.1. Με το τέλος της βελτιστοποίησης, προέκυπτε μία μοναδική λύση (μοναδικό χρωμόσωμα 259 γονιδίων) για συγκεκριμένη επιλογή βαρών, που διαμόρφωνε την τιμή της αντικειμενικής

συνάρτησης με συγκεκριμένο συνδυασμό ΔΠ στις 259 ΥΜ της λεκάνης Με εκτέλεση του μοντέλου SWAT για την κάθε λύση υπολογίστηκαν τα φορτία και οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών στην έξοδο της λεκάνης (συνολικά 4 εκτελέσεις). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 9.4 .

Πίνακας 9.4 Διαμόρφωση των τιμών της καθολικής αντικειμενικής συνάρτησης και των τριών μεταβλητών (κόστος, συγκέντρωση N-NO3, P) μετά από εφαρμογή 4 συνδυασμών βαρών για τους όρους της Εξίσωσης 9.1.

Λύση	**Βάρη** ***w*1, *w*2, *w*3**	**Τιμή αντικ. συνάρτησης *f***	**Συγκέντρωση N-NO3 (mg/l)**	**Συγκέντρωση P (mg/l)**	**Κόστος (€)**
1	0,2 0,2 0,6	0,3588	0,631	0,190	-507000
2	0,6 0,2 0,2	0,5248	0,536	0,153	-136530
3	0,2 0,6 0,2	0,6441	0,513	0,137	106430
4	0,33 0,33 0,33	0,5716	0,599	0,171	-423000

Στον Πίνακα 9.4 η λύση 1 αποδίδει μεγαλύτερη βαρύτητα στη μείωση του κόστους, η δεύτερη στη μείωση της συγκέντρωσης N-NO3 και η τρίτη στη συγκέντρωση P. Η τέταρτη λύση αποδίδει ίσα βάρη στους τρεις όρους της Εξίσωσης 9.1, δηλαδή στα τρία επιμέρους κριτήρια. Αν και οι 500 γενιές δεν εγγυώνται την εύρεση του ολικά βέλτιστου, οι τιμές του πίνακα μπορούν να μας οδηγήσουν σε κάποια χρήσιμα συμπεράσματα. Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι ένας αδιάστατος αριθμός που πρακτικά δεν δίνει ουσιαστική πληροφορία για τις μεταβλητές ενδιαφέροντος, παρά μόνο για την πορεία της βελτιστοποίησης.

Είναι αξιοσημείωτο ότι όλες οι λύσεις επιτυγχάνονται με πολύ οικονομικό τρόπο μιας και το κόστος είναι χαμηλό, στις 3 δε από τις 4 πρόκειται για όφελος. Αυτό συμβαίνει δηλαδή ακόμα και για πολύ μικρά βάρη για τον όρο του κόστους (π.χ. 0,2). Είναι προφανές ότι η ιδιαιτερότητα αυτή στη διαμόρφωση των επιμέρους κριτηρίων έγκειται σε πολύ μεγάλο βαθμό στα αρχικά μεγέθη. Πράγματι, αν σκεφτούμε τα μέγιστα όρια των τριών μεταβλητών, που είναι περίπου 3M€ για το K, 769000kg για το $\phi_{\mathrm{N-NO3}}$ και 263000kg για το ϕ_P (υφιστάμενα φορτία απωλειών στη λεκάνη), μπορούμε εύκολα να συμπεράνουμε ότι ο όρος στο δεξί μέρος της Εξ. 9.1 που λαμβάνει εκ φύσεως μεγαλύτερες τιμές είναι ο όρος κόστους. Με βάση τις μέγιστες τιμές των μεταβλητών που αναφέρηκαν, οι μέγιστες τιμες των τριών όρων είναι κατά σειρά: 1,7 για το N-NO3, 2,6 για τον P και περίπου 7 για το κόστος. Αυτό σχετίζεται φυσικά με τη δόμηση αυτής της εξίσωσης δηλαδή με την επιλογή έκφρασης της ολικής αντικειμενικής συνάρτησης. Η ελαχιστοποίηση λοιπόν του ολικού μέτρου επίδοσης είναι φανερό ότι επιτυγχάνεται πολύ πιο γρήγορα όταν ελαχιστοποιείται ο όρος κόστους, επομένως ο αλγόριθμος προτιμά τις λύσεις που μειώνουν το κόστος εφαρμογής ΔΠ στη

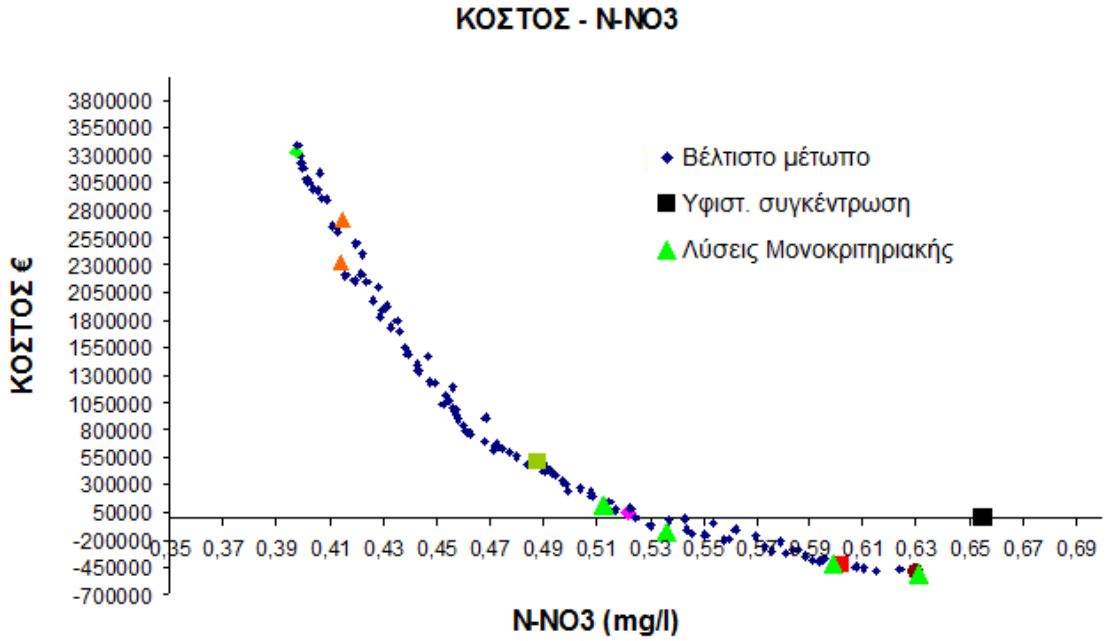
λεκάνη ακόμα και όταν ο συντελεστής βάρους είναι πολύ μικρός για το αντίστοιχο κριτήριο. Με το απλό αυτό παράδειγμα αποδεικνύεται η επίδραση της υποκειμενικότητας κατά το στάδιο της κατάρτισης της αντικειμενικής συνάρτησης στην εξαγωγή συμπερασμάτων.

Με την πρώτη ματιά προκαλεί ακόμα εντύπωση ότι η λύση 2 παρόλο που αποδίδει το μεγαλύτερο βάρος στη μείωση του N-NO3, εν τέλει δεν είναι αυτή που προκαλεί τη μικρότερη συγκέντρωση του ρύπου στην έξοδο. Η λύση 3, που αποδίδει το μεγαλύτερο βάρος στη μείωση του P, επιτυγχάνει ταυτόχρονα και τη μικρότερη μείωση του N-NO3 με τις δύο λύσεις να αποδίδουν το ίδιο βάρος στον όρο κόστους. Προφανώς αυτό εξαρτάται και πάλι από τα μεγέθη των δύο ρυπαντικών φορτίων στη λεκάνη. Ο αλγόριθμος με μικρότερο βάρος για τον όρο του P στη λύση 2, επιτυγχάνει μεγαλύτερη ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης διότι, όπως φαίνεται στην τελευταία στήλη του πίνακα, το κόστος (με την πιο βαρύνουσα σημασία) έχει μειωθεί περισσότερο απ' ότι στη λύση 3. Η επιδίωξη εύρεσης λύσης με γνώμονα την ελαχιστοποίηση του N-NO3 (μεγαλύτερος συντελεστής βάρους) ουσιαστικά είναι παραπλανητική αφού ο όρος του έτερου θρεπτικού στοιχείου και ιδιαίτερα το κόστος διαμορφώνουν πιο δραστικά την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Επομένως, ο αλγόριθμος δείχνει προτίμηση πρώτα στην ελαχιστοποίηση αυτών των όρων, έστω και αν ο συντελεστής βάρους τους είναι μικρότερος. Λόγω δε της μη αντικρουόμενης συμπεριφοράς των δύο ρύπων οι λύσεις 2 και 3 παρουσιάζουν αναλογία στη διαμόρφωση των συγκεντρώσεων των δύο ρύπων, ανεξαρτήτως του ποιος από τους δύο τέθηκε να επιδρά περισσότερο στη διαμόρφωση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης.

Με βάση τα ανωτέρω γίνεται σαφές ότι η υποκειμενικότητα στη διαμόρφωση της αντικειμενικής συνάρτησης παίζει μεγάλο ρόλο στην κατεύθυνση της πορείας της βελτιστοποίησης. Όλες οι λύσεις του Πίνακα 9.4 περιλαμβάνουν, ως επί τω πλείστον, ΔΠ μικρού κόστους (οφέλους), με πρώτη τη μείωση λίπανσης στη μηδική, ώστε να ελαχιστοποιείται κατά προτίμηση ο τρίτος όρος του κόστους που διαμορφώνει πιο έντονα την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης *f*. Ακόμα και κάποια πιο δόκιμη έκφραση της συνάρτησης αυτής δε θα μπορούσε να αποκρύψει απόλυτα κάποια υποκειμενικότητα, επομένως και την προτίμηση του αλγόριθμου να κατευθύνει τη διαδικασία βελτιστοποίησης προς συγκεκριμένη πορεία αναζήτησης λύσεων που δεν συμφωνεί απαραίτητα με την προσδοκώμενη, όπως εκφράζεται μέσω της διαμόρφωσης των συντελεστών βάρους των επιμέρους κριτηρίων.

Σε γενικές γραμμές η μέθοδος δε μπορεί να οδηγήσει εύκολα και απλά σε ασφαλή συμπεράσματα. Ωστόσο, οι 4 λύσεις του Πίνακα 9.4 παριστάνονται για συγκριτικούς λόγους στο βέλτιστο μέτωπο Pareto του δισδιάστατου χώρου κόστους-N-NO3 (Σχήμα 9.22). Παρατηρείται ότι πρόκειται για 4 λύσεις με χαμηλό κόστος που, αν και πάνω στο βέλτιστο μέτωπο, καλύπτουν ένα πολύ στενό εύρος λύσεων από εκείνες που παρήχθησαν από την

πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση. Αποτελεί μειονέκτημα της επίλυσης του μονοκριτηριακού προβλήματος ότι αποκτάται μόνο μία και μοναδική λύση για κάθε έναν συνδυασμό συντελεστών βάρους, δηλαδή για μία μόνο εκτέλεση του αλγόριθμου. Η ανεύρεση πολλών λύσεων απαιτεί την επανάληψη της διαδικασίας πολλές φορές. Στην περίπτωση που έστω εξετάζονται 100 λύσεις (όσες και του μετώπου Pareto) για τη διάταξή τους σε διπλούς άξονες, ο χρόνος που χρειάζεται για αυτήν την επίπονη διαδικασία με συνεχή συμμετοχή του χρήστη θα είναι πολλαπλάσιος σε σχέση με την πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση, ενώ η υποκειμενικότητα της αντικειμενικής συνάρτησης σίγουρα δε θα επιτρέψει την ομοιόμορφη κάλυψη του μετώπου. Θα ήταν σκόπιμο επομένως, να επαναληφθεί η διαδικασία αυτή για παραπάνω από μία εκφράσεις της καθολικής αντικειμενικής συνάρτησης.



Σχήμα 9.22 Απεικόνιση βέλτιστης καμπύλης αντιστάθμισης μεταξύ συγκεντρώσεων N-NO3 και κόστους όπως προέκυψε από τη διαδικασία πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης (3 κριτήρια) με απεικόνιση στο ίδιο διάγραμμα των 4 μεμονωμένων λύσεων της μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης του Πίνακα 9.4 (παριστάνονται με πράσινα τρίγωνα).

Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι αναμφισβήτητα. Η παράθεση της ενότητας απλά παρουσιάζει μία πιθανή μονοκριτηριακή προσέγγιση του προβλήματος βελτιστοποίησης τριών κριτηρίων στη λεκάνη του Αράχθου και επιβεβαιώνει τα πολλαπλά οφέλη της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης με άμεση απεικόνιση, μέσω των καμπυλών αντιστάθμισης, των τιμών και των τριών κριτηρίων δίχως καμία απόκρυψη των πτυχών του προβλήματος.

9.5 Γενική αποτίμηση

Η ΒΔΠ που χρησιμοποιήθηκε στην πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση της παρούσης εργασίας επιτάχυνε τη διαδικασία, έχοντας το ρόλο του εκτιμητή ρυπαντικού φορτίου και του κόστους εφαρμογής διαφόρων διαχειριστικών σχημάτων στη λεκάνη του Αράχθου. Η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση με τον ΓΑ του MATLAB συμπεριέλαβε στην αναζήτηση λύσεων ένα μεγάλο αριθμό εναλλακτικών ΔΠ στην αγροτική γη της λεκάνης και κατέληξε στην παραγωγή του βέλτιστου μετώπου Pareto τριών διαστάσεων με πολύ καλή προσέγγιση του πραγματικού. Η ανάλυση του μετώπου μέσω των δισδιάστατων καμπυλών αντιστάθμισης κόστους-N-NO3 και κόστους-P περιλαμβάνει την αναζήτηση και επιλογή εναλλακτικών διαχειριστικών σχημάτων από ένα σύνολο 100 ισοδύναμων λύσεων, που αποτελούν η κάθε μία έναν συμβιβασμό ικανοποίησης των τριών κριτηρίων. Η ανάλυση των λύσεων πάνω στις καμπύλες αντιστάθμισης, αλλά και η απεικόνιση της χωρικής κατανομής των ΔΠ στο χάρτη της λεκάνης, αποκαλύπτουν ένα μεγάλο εύρος εναλλακτικών διαχειριστικών σχημάτων με αντίστοιχο μεγάλο εύρος στις συγκεντρώσεις των δύο θρεπτικών στο ποτάμι και στη διαμόρφωση του συνολικού κόστους.

Το πιο αυστηρό και εφικτό σενάριο για τη λεκάνη, η μείωση του P στα επίπεδα των 0,125mg/l επιτυγχάνεται με συνδυασμό μέτρων που προκαλούν ένα αποδεκτό (μάλλον ανεκτό) συνολικό κόστος. Η μη αντικρουόμενη συμπεριφορά της μείωσης των δύο θρεπτικών, προκαλεί ταυτόχρονα σημαντική μείωση της συγκέντρωσης του N-NO3. Το σενάριο αυτό αποτελεί πιθανά τον πλέον αποδεκτό συμβιβασμό ικανοποίησης των τριών κριτηρίων στη λεκάνη του Αράχθου, με εγκατάσταση λωρίδων συγκράτησης στις εκτάσεις αραβόσιτου και σε επιλεγμένα τμήματα των εκτάσεων βοσκότοπων και με ταυτόχρονη μείωση της λίπανσης στη μηδική που αποφέρει σημαντικά κέρδη για τον παραγωγό αφού δε μειώνει τις αποδόσεις.

Οι ακραίες λύσεις του προβλήματος αποκαλύπτουν πολύ σημαντικές βελτιώσεις στην ποιότητα του νερού του ποταμού και σημαντική αύξηση εισοδήματος για τον αγροτικό πληθυσμό, η οποία συμβαίνει επίσης με μικρή, αλλά όχι αμελητέα μείωση των συγκεντρώσεων των δύο θρεπτικών στο ποτάμι. Στην περίπτωση της διαχείρισης με μεγάλο κόστος, οι τοπικές κοινωνικές αντιδράσεις, μπορούν να μετριαστούν ή και πλήρως να αντιμετωπιστούν με ανάγνωση και ερμηνεία διαφορετικών λύσεων από τις καμπύλες, παραπλήσιων ως προς τη διαμόρφωση των τιμών των κριτηρίων, αλλά σημαντικά διαφορετικών στη γεωγραφική απεικόνιση των διαχειριστικών σχημάτων.

Η βελτιστοποίηση τριών κριτηρίων υπερέχει έναντι της μονοκριτηριακής (ενσωμάτωση των κριτηρίων σε ένα μέτρο επίδοσης) και της στοχευμένης στρατηγικής διότι

παρέχει πληροφορία για όλο το φάσμα των πιθανών λύσεων του προβλήματος. Αναδεικνύει επίσης τα πλεονεκτήματα και τη σημαντικότητα της ανάλυσης λύσεων που αφορούν περισσότερους από έναν ρύπους ταυτόχρονα. Με αυτόν τον τρόπο, η λήψη αποφάσεων και η χάραξη Περιβαλλοντικής Πολιτικής διευκολύνονται, επιταχύνονται και βελτιώνονται ως προς το περιεχόμενό τους και ως προς τη βιωσιμότητα των αποτελεσμάτων τους.

10 Συνολική Αποτίμηση, Μελλοντική Έρευνα και Προοπτικές

10.1 Γενικά

Στο τελευταίο αυτό κεφάλαιο της διατριβής γίνεται μία γενική ανακεφαλαίωση και συνοψίζονται τα αποτελέσματα, τα συμπεράσματα σχετικά με την ικανοποίηση των επιδιωκόμενων στόχων, καθώς και η προοπτική που διαφαίνεται στον τομέα της διαχείρισης της αγροτικής γης σε κλίμακα λεκάνης απορροής. Η ερευνητική ενασχόληση με το αντικείμενο της διατριβής εμπνεύστηκε από τα υπαρκτά προβλήματα ποιότητας των υδάτινων σωμάτων που αντιμετωπίζουν σήμερα πολλά κράτη-μέλη της ΕΕ, ανάμεσα σε αυτά και η Ελλάδα. Βασικό πρόβλημα ποιότητας είναι ο εμπλουτισμός των υδάτων με τις διάφορες διαλυτές και μη διαλυτές μορφές των θρεπτικών στοιχείων του αζώτου (N) και του φωσφόρου (P) στα επιφανειακά και υπόγεια νερά, που παρατηρείται σχεδόν σε όλες τις έντονα αγροτικές λεκάνες απορροής της Ευρώπης. Η ρύπανση των υδάτων με τα εν λόγω στοιχεία από τις αγροτικές δραστηριότητες είναι μη σημειακή και για το λόγο αυτό καθίσταται δύσκολη η αντιμετώπισή της. Οι συνέπειες είναι αρνητικές για τον πληθυσμό των θιγόμενων περιοχών λόγω υποβάθμισης των υδάτων τα οποία καθίστανται συχνά ακατάλληλα για μία ή περισσότερες χρήσεις. Ακραία περίπτωση είναι ο ευτροφισμός των επιφανειακών υδάτων με πολύ έντονη υποβάθμισή τους, που αποτελεί περιβαλλοντική απειλή και κίνδυνο ακόμα της δημόσιας υγείας.

Η εκμετάλλευση της αγροτικής γης είναι απαραίτητη για την ικανοποίηση των διατροφικών αναγκών του ανθρώπου και σε πολλές χώρες αποτελεί ακόμα και σήμερα τη βασική επαγγελματική δραστηριότητα της πλειοψηφίας των πληθυσμών. Η αύξηση της παραγωγής αγροτικών προϊόντων και του εισοδήματος του αγροτικού πληθυσμού είναι ωστόσο, όπως φαίνεται, αντικρουόμενες με τη διατήρηση του περιβάλλοντος σε καλή κατάσταση και ιδιαίτερα με τη διατήρηση της χημικής κατάστασης των υδάτινων σωμάτων σε επιθυμητά επίπεδα. Η Περιβαλλοντική Νομοθεσία σήμερα στην Ευρώπη είναι πολύ αυστηρή, με συνέπεια η διαχείριση της αγροτικής γης με εναλλακτικές μεθόδους και τεχνικές να θεωρείται επιβεβλημένη. Η τάση αυτή αποτυπώνεται, όχι μόνο στις εκτενείς αναφορές για υιοθέτηση μέτρων διαχείρισης από τις Ευρωπαϊκές Οδηγίες και Πολιτικές (Οδηγία 2000/60 και Οδηγία νιτρικών, ΚΑΠ), αλλά και από πολλά ερευνητικά προγράμματα και επιστημονικές δράσεις συνεργασίας που εκπονούνται στις μέρες μας (π.χ. COST 869, 2005).

Οι συστάσεις για αποτελεσματική διαχείριση της αγροτικής γης και συνεπώς του περιορισμού της μη σημειακής ρύπανσης των υδάτων από θρεπτικά έχουν σήμερα πλήρως

υιοθετηθεί από τον επιστημονικό κόσμο, που μελετά τους μηχανισμούς πραγματοποίησης του φαινομένου και αναπτύσσει μεθοδολογίες για αποτελεσματική παρέμβαση. Υπάρχει ωστόσο ακόμα ένα χάσμα μεταξύ της επιστημονικής προσέγγισης και της εφαρμογής στην πράξη που μεταφράζεται σε έλλειψη συνεργασίας με τον αγροτικό πληθυσμό, κάτι που αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση επίτευξης των στόχων. Οι λόγοι ύπαρξης αυτών των εμποδίων σχετίζονται προφανώς με οικονομικούς παράγοντες. Ο αγροτικός πληθυσμός παρουσιάζεται σχεδόν πάντα επιφυλακτικός στην υιοθέτηση νέων κανόνων διαχείρισης της γης φοβούμενος, πιθανώς δικαιολογημένα, ότι μπορεί να θιγεί το εισόδημά του. Η διαχείριση της αγροτικής γης είναι επομένως ένα σύνθετο πρόβλημα που, στην ανάλυσή του, πρέπει να ενσωματώθεί και ο στόχος της ελαχιστοποίησης του κόστους εφαρμογής των εναλλακτικών πρακτικών ή/και της απώλειας εισοδήματος. Ακόμα όμως και η ΕΕ που χαράζει την Περιβαλλοντική Πολιτική δε φαίνεται διατεθειμένη να παράσχει υπέρογκες οικονομικές ενισχύσεις για την εφαρμογή εναλλακτικών πρακτικών, αντίθετα, προτιμά και συστήνει ήπια μέτρα που βελτιστοποιούν τη σχέση μεταξύ κόστους και αποτελεσματικότητας.

Οι αντικρουόμενοι αυτοί στόχοι σε μία εποχή οικονομικών δυσχερειών κρίνεται ότι πρέπει να επιδιωχθούν με επιστημονικά σύγχρονο και πρακτικά εφικτό τρόπο. Η διδακτορική αυτή δατριβή λαμβάνοντας υπόψη αυτά τα δεδομένα ανέπτυξε μία σύγχρονη, αποδοτική και καινοτόμα μεθοδολογία για τη διαχείριση της αγροτικής γης σε κλίμακα λεκάνης απορροής αξιοποιώντας την ήδη υπάρχουσα επιστημονική γνώση και τις νέες τεχνολογίες που υπόσχονται πολλά πλέον στον τομέα της Διαχείρισης Περιβάλλοντος. Το ολοκληρωμένο Εργαλείο Υποστήριξης Αποφάσεων (ΕΥΑ) που αναπτύχθηκε μέσω της μεθοδολογίας της διατριβής, αξιοποίησε ένα ευρέως αποδεκτό διαχειριστικό υδρολογικό μοντέλο λεκάνης απορροής σε περιβάλλον Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ) και τις δυνατότητες που παρέχει σήμερα το επιστημονικό πεδίο της Τεχνητής Νοημοσύνης, για να βοηθήσει στη λήψη αποφάσεων για εφαρμογή προγραμμάτων δράσης ενάντια στη ρύπανση από θρεπτικά στοιχεία. Το Εργαλείο αυτό μπορεί να εντοπίσει και να προτείνει τα πιο βιώσιμα και συμβιβαστικά μέτρα διαχείρισης σε κλίμακα λεκάνης απορροής και να αποτελέσει συνιστώσα άσκησης Περιβαλλοντικής Πολιτικής, συνδεδεμένης με τα ΔΣ Υδατικών Διαμερισμάτων της Οδηγίας 2000/60.

10.2 Ανακεφαλαίωση

Οι συνιστώσες του ΕΥΑ που αναπτύχθηκε στη διατριβή συνοψίζονται ως εξής: α) καθορισμός εναλλακτικών Διαχειριστικών Πρακτικών (ΔΠ) στην αγροτική γη για μείωση ρυπαντικού φορτίου στο υδρογραφικό δίκτυο λεκάνης απορροής, β) κοστολόγηση ΔΠ ως προς το κόστος εγκατάστασης, λειτουργίας και ευκαιρίας, γ) διαχειριστικό μοντέλο λεκάνης

απορροής για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων εφαρμογής των ΔΠ, δ) χρήση Γενετικού Αλγόριθμου (ΓΑ) σε MATLAB για την πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση του ρυπαντικού φορτίου φερτών υλών, αζώτου νιτρικών (N-NO3), ολικού P και κόστους εφαρμογής ΔΠ στη λεκάνη, ε) ανάπτυξη μιας βάσης δεδομένων ΔΠ (ΒΔΠ) για την αποθήκευση του φορτίου απωλειών ρύπων και του κόστους εφαρμογής των ΔΠ σε όλες τις Υδρολογικές Μονάδες (ΥΜ) της λεκάνης με σκοπό την επιτάχυνση της διαδικασίας βελτιστοποίησης και την εύρεση βέλτιστων διαχειριστικών σχημάτων στη λεκάνη. Ειδικότερα, η ανακεφαλαίωση για κάθε μία από τις επιμέρους συνιστώσες που συνθέτουν το προτεινόμενο πλαίσιο διαχείρισης έχει ως εξής:

- Η εργασία ανέπτυξε έναν επαρκή αριθμό ΔΠ για λεκάνες απορροής με ανάγκες διαχείρισης δημοφιλών καλλιεργειών και κτηνοτροφίας. Προτάθηκαν παρεμβάσεις στο χρόνο και στην ποσότητα χημικής λίπανσης καλλιεργειών σιτηρών και πολυετών ψυχανθών, καλλιέργεια κατά τις ισοϋψείς και κατάργηση της άροσης στις καλλιέργειες σιτηρών, μείωση ζωικού κεφαλαίου, διαχείριση της κοπριάς των ζώων με αποθήκευση και διασπορά στις αγροτικές εκτάσεις στον κατάλληλο χρόνο, μείωση χρονικής περιόδου ελεύθερης βόσκησης, καθώς και εγκατάσταση λωρίδων συγκράτησης στα όρια των αγρών.
- Προτάθηκε μία απλή μεθοδολογία κοστολόγησης των ανωτέρω ΔΠ για εφαρμογή σε χρονικό ορίζοντα πενταετίας με συνυπολογισμό του κόστους εγκατάστασης, ετήσιας λειτουργίας/συντήρησης και ευκαιρίας. Συστάθηκε η χρήση σύγχρονων τοπικών οικονομικών μελετών, δημοσιευμένων τιμών για τις τιμές των χημικών λιπασμάτων και των προϊόντων στην αγορά, καθώς και η συμβουλευτική αξιοποίηση ολοκληρωμένων προσεγγίσεων κοστολόγησης ΔΠ σε άλλες χώρες.
- Ανάμεσα από πολλές μεθοδολογίες ποσοτικοποίησης της μη σημειακής ρύπανσης των υδάτων από θρεπτικά, επιλέχθηκε το μοντέλο SWAT, αντιπροσωπευτικό της κατηγορίας των προσδιοριστικών μοντέλων προσομοίωσης των φυσικών διεργασιών σε κλίμακα λεκάνης απορροής, που λειτουργεί σε περιβάλλον ΣΓΠ και χαρακτηρίζεται από επαρκή προγνωστική ικανότητα των συνιστωσών του υδρολογικού κύκλου και του φορτίου φερτών υλών και θρεπτικών στοιχείων κατά μήκος του ποταμού.
- Προτάθηκε η επίλυση του προβλήματος περιορισμού του ρυπαντικού φορτίου και του κόστους εφαρμογής των ΔΠ μέσω πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, δηλαδή ταυτόχρονης βελτιστοποίησης πολλαπλών κριτηρίων. Για το λόγο αυτό, επιλέχθηκε ένας ΓΑ ενσωματωμένος σε εργαλειοθήκη του λογισμικού MATLAB, ο οποίος έχει τη δυνατότητα μέσω μίμησης των διαδικασιών αναπαραγωγής των ειδών στην φύση, να εξετάζει έναν τεράστιο αριθμό δυνατών συνδυασμών ΔΠ στις ΥΜ της εκάστοτε λεκάνης

(ολοκληρωμένα διαχειριστικά σχήματα - λύσεις) και να εντοπίζει τους βέλτιστους για την ικανοποίηση των κριτηρίων. Ο αλγόριθμος δουλεύει με συνεχή αναπαραγωγή πληθυσμών λύσεων και καταλήγει στην εύρεση των βέλτιστων με κατανομή τους στο βέλτιστο μέτωπο Pareto *n* διαστάσεων, όπου *n* το πλήθος των κριτηρίων.

- Η περιβαλλοντική και οικονομική αξιολόγηση των ατόμων (λύσεων) των πληθυσμών της διαδικασίας βελτιστοποίησης με τον ΓΑ, προτείνεται μέσω της ανάπτυξης μίας 'έξυπνης' προγραμματιστικής καινοτομίας που αποβλέπει στην επιτάχυνση της διαδικασίας. Παρουσιάστηκε στο πλαίσιο αυτό η μεθοδολογία δημιουργίας της ΒΔΠ με διαδοχικές εκτελέσεις του SWAT για προσομοίωση της εφαρμογής όλων των ΔΠ σε όλες τις συμβατές ΥΜ της λεκάνης και ακολούθως με αποθήκευση των αποτελεσμάτων (ρυπαντικά φόρτια - κόστος) σε πινακοποιημένη μορφή. Η ΒΔΠ παρέχει τα απαιτούμενα δεδομένα φορτίου απωλειών ρύπων και κόστους, που αντιστοιχούν σε όλες τις ΥΜ και πιθανές ΔΠ σε αυτές στη λεκάνη, στη διαδικασία βελτιστοποίησης, ώστε να αποσυνδεθεί το χρονικά απαιτητικό υδρολογικό μοντέλο από την τελευταία.
- Η σύνθεση των ανωτέρω συνιστωσών έγινε σε περιβάλλον προγραμματισμού MATLAB με σύνταξη ειδικού κώδικα που επιτρέπει τη συνεργασία του υδρολογικού μοντέλου με τα προγραμματιστικά έγγραφα προσαρμογής των ΔΠ στα αρχεία του για τη δημιουργία της ΒΔΠ και τη συνεργασία της τελευταίας με τον ΓΑ του MATLAB για την εκτέλεση της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης. Το σύνολο του προγραμματιστικού υλικού στο περιβάλλον εργασίας του MATLAB αποτελεί το προτεινόμενο ΕΥΑ για τη διαχείριση της αγροτικής γης λεκάνης απορροής.

Η μεθοδολογία της διατριβής επικυρώθηκε με χρήση του ΕΥΑ σε τμήμα της λεκάνης απορροής του Αράχθου στην Ήπειρο. Η μέσης έκτασης (940km^2) λεκάνη του άνω ρου του ποταμού με έξοδο τη θέση *Γεφύρι Πλάκας* επιλέχθηκε λόγω της διαθεσιμότητας των απαραίτητων δεδομένων και της απόλυτης συμβατότητάς της με τις αγροτικές χρήσεις που η μεθοδολογία προβλέπει προς διαχείριση. Οι βασικές καλλιέργειες στη λεκάνη είναι ο αραβόσιτος και η μηδική, ενώ τα κυριότερα είδη ζώων που συναντώνται τα αιγοπρόβατα και τα πουλερικά. Τα βασικά περιβαλλοντικά προβλήματα που καθιστούν σκόπιμη την εναλλακτική διαχείριση στην εν λόγω περιοχή είναι η υποβάθμιση της ποιότητας των υδάτων της περιοχής του Αμβρακικού κόλπου (εκβολές Αράχθου), και δευτερευόντως, η έντονη διάβρωση της λεκάνης που έχει ως αποτέλεσμα την αυξημένη στερεοπαροχή του ποταμού και εναπόθεση φερτών στο νεκρό όγκο του ταμιευτήρα 'Πουρνάρι Ι' ανάντη της Άρτας. Οι περιβαλλοντικοί στόχοι που τέθηκαν ωστόσο στη λεκάνη ήταν η ελαχιστοποίηση δύο μορφών θρεπτικών (N-NO3 και P), ώστε η διαδικασία πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, με ενσωμάτωση και του κόστους, να οδηγήσει σε λύσεις που μειώνουν το φορτίο απωλειών των

δύο αυτών ρύπων από τις ΥΜ της λεκάνης και επομένως τα φορτία και τις συγκεντρώσεις τους στο ποτάμι. Η μείωση των απωλειών εδάφους δεν ελήφθη άμεσα ως στόχος προς ελαχιστοποίηση, αλλά προέκυψε έμμεσα από την εφαρμογή ΔΠ που εν μέρει έχουν πολλαπλή δράση επιδρώντας ευεργετικά και στη στερεοπαροχή του ποταμού. Ανακεφαλαιώνοντας, τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την εφαρμογή της μεθοδολογίας στη λεκάνη του Αράχθου έχουν ως εξής:

- Οι ΔΠ για εφαρμογή διαμορφώθηκαν σε: εγκατάσταση λωρίδων φυσικής βλάστησης πλάτους 5m στα όρια των αγρών για τη συγκράτηση θρεπτικών, μεταβολή της χημικής λίπανσης των καλλιεργειών με 30% μείωση στον αραβόσιτο, πλήρη μηδενισμό της αζωτούχου και περιορισμό κατά το ήμισυ της φωσφορικής στη μηδική, αλλαγή στο χρόνο εφαρμογής της με καθυστέρηση ενός μήνα και στις δύο καλλιέργειες, καλλιέργεια του αραβόσιτου κατά τις ισοϋψείς, χωρίς άροση για μία πενταετία, μείωση του χρονικού διαστήματος βόσκησης των αιγοπροβάτων κατά δύο μήνες κατ' έτος, αποθήκευση κοπριάς αιγοπροβάτων και πουλερικών για τρεις μήνες και διασπορά της στους βοσκότοπους σε εποχές με μικρότερο κίνδυνο απόπλυσης, καθώς και μείωση κατά 30% του ζωικού κεφαλαίου.
- Για την κοστολόγηση των ΔΠ αξιοποιήθηκαν δύο πρόσφατες μελέτες του ΕΘΙΑΓΕ (Τζουραμάνη κ.α. 2008α, 2008β) για την καλλιέργεια μηδικής και την προβατοτροφία στην Ελλάδα. Η πρώτη μελέτη περιελάμβανε όλα τα οικονομικά στοιχεία για τις λιπάνσεις, το κόστος εργασίας, τις τιμές αποδόσεων και φυσικά την ακαθάριστη και καθαρή ετήσια πρόσοδο για το γεωργό, ενώ η δεύτερη, μεταξύ πολλών επιμέρους οικονομικών στοιχείων, παρείχε την καθαρή πρόσοδο από την εκμετάλλευση προβάτων ανά κεφαλή στην Ελλάδα. Η κοστολόγηση ολοκληρώθηκε για το σύνολο των ΔΠ, με δημοσιεύσεις τιμών λιπασμάτων στον τύπο, με συμβολή από αναλυτικές μελέτες κοστολόγησης ΔΠ του ευρωπαϊκού χώρου (Cuttle et al., 2007), με τις απαραίτητες παραδοχές όπου απαιτούνταν, και τέλος, με την ανάγνωση από τα αρχεία εξόδου του μοντέλου SWAT των αποδόσεων των καλλιεργειών σε κάθε ΥΜ μετά την εφαρμογή των ΔΠ.
- Το μοντέλο της λεκάνης του Αράχθου παραμετροποιήθηκε στο SWAT με διαχωρισμό της λεκάνης σε 259 ΥΜ. Για την επαρκή γεωαναφορά των καλλιεργειών και των βοσκότοπων ακολουθήθηκε μία προσέγγιση καθολικής αξιοποίησης των διαθέσιμων χωρικών και στατιστικών δεδομένων χρήσης γης της λεκάνης σε συνδυασμό με τις δυνατότητες που προσφέρουν οι εφαρμογές ΣΓΠ. Η βαθμονόμηση του μοντέλου ήταν εφικτή για τις συγκεντρώσεις θρεπτικών στο ποτάμι μόνο σε εποχιακή ή ετήσια βάση, ενώ για τις παροχές και στερεοπαροχές του ποταμού σε μηνιαία. Η υδρολογική και

ποιοτική προσομοίωση είχε αναμφισβήτητα αρκετά προβλήματα να αντιμετωπίσει, όλα σχετικά με τη διαθεσιμότητα των απαραίτητων δεδομένων. Ωστόσο, επιστημονικά τεκμηριωμένες παραδοχές και υποθέσεις οδήγησαν σε μία ολοκληρωμένη μοντελοποίηση της λεκάνης στο SWAT.

- Μετά από επιλεκτική εφαρμογή ορισμένων ΔΠ στο βαθμονομημένο μοντέλο υπολογίστηκε η σχέση κόστους-αποτελεσματικότητάς (ΚΑ) τους στο γεωγραφικό χώρο της λεκάνης. Τα σενάρια διαχείρισης εφαρμόστηκαν στοχευμένα, δηλαδή με εκ των προτέρων επιλογή των τύπων ΔΠ και της έκτασης της εφαρμογής τους.
- Η ΒΔΠ με αναφορά στη λεκάνη του Αράχθου δημιουργήθηκε με προσομοίωση στο SWAT 50 διαφορετικών ΔΠ, διαδοχικά εφαρμοζόμενων στον συμβατό με αυτές τύπο χρήσης γης. Ο αριθμός αυτός προέκυψε από το άθροισμα 13 μεμονωμένων ΔΠ των τριών αγροτικών τύπων γης, συνδυασμών τους, και της υφιστάμενης πρακτικής διαχείρισης, δηλαδή της αγροτικής δραστηριότητας με τις συμβατικές τεχνικές. Οι μέσες ετήσιες απώλειες εδάφους, N-NO3 και P, καθώς και το κόστος εφαρμογής των ΔΠ σε κάθε ΥΜ της λεκάνης αποθηκεύτηκαν στη βάση δεδομένων για χρήση στη διαδικασία της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης.
- Ο ΓΑ του MATLAB εκτέλεσε τη διαδικασία βελτιστοποίησης στην οποία περιλαμβάνονταν τρεις στόχοι προς ελαχιστοποίηση: το κόστος, οι απώλειες N-NO3 και οι απώλειες P από το σύνολο των 259 ΥΜ. Μετά από ανάλυση ευαισθησίας των συναρτήσεων και παραμέτρων του ΓΑ, σχετικών με την πραγματοποίηση των γενετικών διαδικασιών και γενικότερα της λειτουργίας του, βρέθηκε το βέλτιστο σχήμα βελτιστοποίησης με γνώμονα τη σύγκλιση με το ολικά βέλτιστο μέτωπο Pareto τριών διαστάσεων και τον απαιτούμενο υπολογιστικό χρόνο της διαδικασίας.
- Στο μέτωπο Pareto συμπεριελήφθησαν 100 ισοδύναμες λύσεις ή συνδυασμοί εφαρμογής ΔΠ στις 259 ΥΜ της λεκάνης καλύπτοντας όλο το εύρος διακύμανσης των συγκεντρώσεων θρεπτικών στην έξοδο της λεκάνης και του κόστους εφαρμογής των ολοκληρωμένων διαχειριστικών παρεμβάσεων στον Άραχθο. Από τις λύσεις αυτές επιλέγονται με υποκειμενικά κριτήρια οι πιο συμβιβαστικές μετά από ανάλυση των κριτηρίων ανά δύο και ανάγνωση των λύσεων από τις καμπύλες αντιστάθμισης στο δισδιάστατο χώρο κόστους-N-NO3 και κόστους-P. Από τις εν λόγω καμπύλες, που αποτυπώνουν τον έντονα αντικρουόμενο χαρακτήρα του κόστους με τις συγκεντρώσεις θρεπτικών αναλύθηκαν δέκα ενδιαφέρουσες λύσεις για τη διαχείριση της λεκάνης του Αράχθου περιλαμβάνοντας από πολύ οικονομικές, άρα λίγο αποτελεσματικές, έως πολύ δαπανηρές και εντυπωσιακά αποτελεσματικές στη μείωση των συγκεντρώσεων στο ποτάμι σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση.

- Το πρόβλημα της βελτιστοποίησης στον Άραχθο εκφράστηκε τέλος με ενσωμάτωση των τριών κριτηρίων σε μία ενιαία έκφραση αντικειμενικής συνάρτησης, με σκοπό τη σύγκριση της μονοκριτηριακής αυτής προσέγγισης με την πολυκριτηριακή.

10.3 Συμπεράσματα

10.3.1 Γενικά συμπεράσματα για τη μεθοδολογία διαχείρισης της αγροτικής γης

Από την ανάπτυξη του ΕΥΑ με σκοπό τη διαχείριση της αγροτικής γης σε κλίμακα λεκάνης απορροής προκύπτουν τα παρακάτω γενικά συμπεράσματα για τις συνιστώσες του και για την προσδοκόμενη χρησιμότητά του:

- Οι εναλλακτικές ΔΠ που αναπτύχθηκαν και προτάθηκαν για εφαρμογή σε αγροτικές λεκάνες συνάδουν απόλυτα με τις συστάσεις της Οδηγίας των νιτρικών και τους *Κώδικες Ορθής Γεωργικής Πρακτικής* (ΚΟΓΠ) που αυτή προτάσσει ως διαχειριστικά μέτρα, καθώς και με την κατευθυντήρια αρχή της πολλαπλής συμμόρφωσης των αγροτών της ΚΑΠ.
- Η οικονομική προσέγγιση που ακολουθήθηκε για την κοστολόγηση αυτών των μέτρων θεωρείται ότι επιτυγχάνει μία ικανοποιητική εκτίμηση του πραγματικού κόστους κάθε ΔΠ και μία αρκετά αξιόπιστη συγκριτική αξιολόγηση των απαιτούμενων δαπανών για την εφαρμογή τους στην εκάστοτε λεκάνη.
- Η επιλογή του μοντέλου SWAT για την προσομοίωση της εναλλακτικής διαχείρισης ανέδειξε τη δυνατότητά του να προσομοιώσει επαρκώς το σύνολο των επιλεγμένων ΔΠ σε κλίμακα λεκάνης απορροής, καθώς και να ποσοτικοποιήσει την επίδρασή τους, τόσο στο φορτίο απωλειών ρύπων από το σύνολο των ΥΜ, όσο και στα φορτία και τις συγκεντρώσεις των ρύπων στο ποτάμι.
- Ο ΓΑ του MATLAB αποτελεί ένα αποδοτικό μέσο για την εκτέλεση της διαδικασίας βελτιστοποίησης αντικρουόμενων στόχων, παρέχοντας έναν μεγάλο αριθμό ισοδύναμων διαχειριστικών λύσεων της λεκάνης για λήψη αποφάσεων. Ο ΓΑ αποδεικνύεται ότι μπορεί να ψάξει αντιπροσωπευτικά τον πολύ μεγάλο χώρο αναζήτησης (m^k λύσεις με m τις ΔΠ και k τις ΥΜ της λεκάνης) και να καταλήξει με αξιοπιστία στο τελικό αποτέλεσμα, δηλαδή στην προσέγγιση του πραγματικού μετώπου Pareto n διαστάσεων, με n τον αριθμό των κριτηρίων.
- Η δημιουργία της ΒΔΠ αποδείχτηκε πολύ εύστοχη επιλογή για την ολοκλήρωση της διαδικασίας βελτιστοποίησης σε εύλογο χρονικό διάστημα, μιας και η παροχή των ετήσιων τιμών των απωλειών ρύπων και κόστους για όλες τις ΥΜ και ΔΠ στη λεκάνη

από πίνακες αποθήκευσης δεδομένων, αντί της συνεχούς εκτέλεσης του μοντέλου SWAT, είναι ικανή να μειώσει δραστικά τον απαιτούμενο χρόνο εύρεσης των βέλτιστων λύσεων.

- Η πολυκριτηριακή προσέγγιση που υιοθετείται στο ΕΥΑ της διατριβής υπερέχει έναντι κάθε άλλης προσέγγισης επίλυσης του προβλήματος διότι παρέχει τη δυνατότητα της παρατήρησης της διαμόρφωσης επιμέρους κριτηρίων ταυτόχρονα, χωρίς να αποκρύπτει καμία πτυχή του προβλήματος, όπως συμβαίνει π.χ. στη μονοκριτηριακή. Η τελευταία, συνήθως περιλαμβάνει την ενσωμάτωση των επιμέρους στόχων σε μία ενιαία έκφραση αντικειμενικής συνάρτησης που ήδη εμπεριέχει υποκειμενικότητα ή ακόμα, στοχεύει στη βελτιστοποίηση ενός μόνο κριτηρίου θέτοντας τα άλλα υπό περιορισμούς. Και στις δύο περιπτώσεις ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης καταλήγει σε μοναδική λύση διαμορφωμένη σε μεγάλο βαθμό από τις αρχικές επιλογές. Η πολυκριτηριακή προσέγγιση του προβλήματος παρέχει στους λαμβάνοντες τις αποφάσεις έναν μεγάλο αριθμό εφικτών λύσεων με διαφοροποίηση των τιμών των κριτηρίων ώστε να διακρίνεται η σχέση ανταγωνιστικότητας μεταξύ τους και η λήψη απόφασης να οδηγεί σε καλύτερο συμβιβασμό και σε βιώσιμα διαχειριστικά σχήματα.
- Η μεθοδολογία ανάπτυξης του ΕΥΑ της διατριβής έχει ευρεία προσαρμοστικότητα σε αγροτικές λεκάνες απορροής ανεξαρτήτως μεγέθους και πολυπλοκότητας (αριθμός ΥΜ), υπό την προϋπόθεση της διαθεσιμότητας των απαραίτητων δεδομένων για την προσομοίωσή τους στο μοντέλο SWAT. Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει λόγω: i) της συμβατότητας των ΔΠ που εξετάστηκαν με τις αγροτικές δραστηριότητες σε πλήθος ημιορεινών λεκανών απορροής της Ελλάδας και ευρύτερα, ii) του απλού τρόπου κοστολόγησης των ΔΠ με οικονομικά δεδομένα που αφορούν σε ολόκληρη την ελληνική επικράτεια, και ο οποίος μπορεί να υιοθετηθεί σε οποιαδήποτε άλλη περιοχή, αν τα προτεινόμενα δεδομένα οικονομικής φύσεως είναι διαθέσιμα, iii) της εύληπτης και κατανοητής δόμησης του προγραμματιστικού κώδικα στο MATLAB που επιτρέπει με εύκολο και γρήγορο τρόπο την πραγματοποίηση μεταβολών για την ανάπτυξη επιπρόσθετων ΔΠ προς διερεύνηση, την ενσωμάτωση στη διαδικασία βελτιστοποίησης και άλλων, εκτιμώμενων από το SWAT, ρύπων, καθώς και τη δημιουργία της ΒΔΠ προσαρμοσμένης στις εκάστοτε επιλεγμένες ΔΠ και στον εκάστοτε διαχωρισμό της αγροτικής γης εντός της λεκάνης.

10.3.2 Συμπεράσματα για τη διαχείριση της λεκάνης του Αράχθου

Από την εφαρμογή της μεθοδολογίας και του ΕΥΑ στο τμήμα του άνω ρου της λεκάνης απορροής του Αράχθου στην Ήπειρο προκύπτουν τα κάτωθι ειδικά συμπεράσματα:

- Οι ΔΠ προς εφαρμογή στους τρεις τύπους αγροτικής χρήσης γης (αραβόσιτος, μηδική, βοσκότοποι) που επιλέχθηκαν για εφαρμογή στον Άραχθο, κρίνονται απόλυτα συμβατές τόσο με την Ευρωπαϊκή Νομοθεσία (ΚΟΓΠ της Οδηγίας των νιτρικών και αρχή πολλαπλής συμμόρφωσης της ΚΑΠ), όσο και με τα μέτρα που συστήνονται από τις ελληνικές Διευθύνσεις Αγροτικής Ανάπτυξης-Γεωργίας και το ΕΘΙΑΓΕ. Η κοστολόγηση των ΔΠ που ακολούθησε κρίνεται απόλυτα επιτυχής για τη συγκριτική τους αξιολόγηση ως προς το επιπρόσθετο μέσο ετήσιο κόστος 5ετίας.
- Επιστημονικά τεκμηριωμένες παραδοχές και υποθέσεις για την αντιμετώπιση διαφόρων προβλημάτων κατά τη φάση υδρολογικής προσομοίωσης της λεκάνης στο SWAT, οδήγησαν σε μία ολοκληρωμένη και επιτυχή μοντελοποίηση (παραμετροποίηση, βαθμονόμηση), που μπορεί να χρησιμεύσει και ως οδηγός για προσομοίωση άλλης περιοχής με παρόμοιους περιορισμούς. Τα αποτελέσματα της υφιστάμενης κατάστασης στη λεκάνη αποκάλυψαν ότι οι ΥΜ αραβόσιτου είναι οι πιο ευαίσθητες στις απώλειες εδάφους και θρεπτικών προς το υδρογραφικό δίκτυο. Το μοντέλο υπολόγισε ρεαλιστικά τη γεωγραφική κατανομή των απωλειών αυτών στη λεκάνη με υπολογισμό τους σε όλες τις ΥΜ, συνεκτιμώντας τη συνεισφορά των γεωμορφολογικών, κλιματικών και διαχειριστικών παραγόντων σε κάθε μία. Η απεικόνιση της γεωγραφικής διαφοροποίησης των απωλειών ρύπων εντός της λεκάνης, παρείχε το υπόβαθρο για τη διερεύνηση εναλλακτικών σεναρίων διαχείρισης.
- Μετά από στοχευμένη εφαρμογή επιλεγμένων ΔΠ στην αγροτική γης της λεκάνης του Αράχθου, αποδείχτηκε ότι το πιο προσοδοφόρο μέτρο είναι η μείωση της λίπανσης στη μηδική, που εξοικονομεί χρήματα για τους γεωργούς χωρίς να επηρεάσει τις αποδόσεις. Το περιβαλλοντικό αποτέλεσμα (μείωση απωλειών εδάφους, N-NO3 και P) βελτιώνεται αισθητά όταν εγκαθίστανται λωρίδες συγκράτησης στις εκτάσεις αραβόσιτου και βοσκότοπων με σημαντική προφανώς αύξηση του κόστους και διαφοροποίηση στο λόγο ΚΑ. Η συνδυασμένη χρήση των ανωτέρω με εφαρμογή των πιο δαπανηρών μέτρων σε επιλεγμένες ΥΜ καταδεικνύεται ως ένα συμβιβαστικό σενάριο διαχείρισης της λεκάνης. Ωστόσο, η μέθοδος της στοχευμένης στρατηγικής δε μπορεί να εγγυηθεί την εύρεση των πιο επιθυμητών μέτρων με γνώμονα την ικανοποίηση αντικρουόμενων κριτηρίων, ενώ μόνο ένα ολοκληρωτικό μέτρο εγκατάστασης λωρίδων στην αγροτική γη της λεκάνης κατάφερε να μειώσει τις συγκεντρώσεις θρεπτικών και τη στερεοπαροχή σε πολύ ικανοποιητικά επίπεδα, αλλά με πολύ μεγάλο κόστος για τον πληθυσμό (2,64M€). Η μέθοδος αποδείχτηκε ωστόσο χρήσιμη στην αναγνώριση των ΥΜ της λεκάνης του Αράχθου όπου η σχέση ΚΑ των ΔΠ βελτιστοποιείται, αλλά δεν θεωρείται επαρκής για την εύρεση των πιο ικανοποιητικών λύσεων αφού είναι αδύνατον να εξεταστεί με αυτόν τον τρόπο ένας πολύ μεγάλος αριθμός δυνατών συνδυασμών ΔΠ στη λεκάνη.

- Πριν την τελική εκτέλεση της βελτιστοποίησης τριών κριτηρίων (κόστος εφαρμογής ΔΠ, συνολικό φορτίο απωλειών N-NO3, συνολικό φορτίο απωλειών P) με τον ΓΑ του MATLAB, έγινε ανάλυση ευαισθησίας των συναρτήσεων και παραμέτρων του. Βρέθηκε ότι το βέλτιστο σχήμα βελτιστοποίησης αποκτάται με επιλογή των ατόμων-γονέων για αναπαραγωγή με τη μέθοδο τουρνουά, με τυχαία διασταύρωση των ατόμων πιθανότητας 0,8, με βαθμιαία μείωση του ρυθμού μετάλλαξης έως το τέλος της δημιουργίας των 40000 γενιών, και με πληθυσμό ατόμων-λύσεων 250. Από την ανάλυση ευαισθησίας φάνηκε ότι ο χρόνος αξιολόγησης μιας λύσης αυξάνεται εκθετικά για πληθυσμούς μεγαλύτερους από 250 άτομα και έτσι έγινε ο συμβιβασμός τερματισμού της διαδικασίας στις 40000 παραγόμενες γενιές με αξιολόγηση ανά γενιά 250 ατόμων. Ο αλγόριθμος προσέγγισε πολύ ικανοποιητικά το ολικά βέλτιστο (πραγματικό) μέτωπο Pareto τριών διαστάσεων σε περίπου 5 ώρες και 30 λεπτά, χρόνος πολύ ικανοποιητικός που οφείλεται στη χρήση της ΒΔΠ στη διαδικασία βελτιστοποίησης. Ο ΓΑ του MATLAB κρίνεται σε γενικές γραμμές ένα αξιόπιστο εργαλείο βελτιστοποίησης διατηρώντας τον ελιτισμό κατά τη δημιουργία του πρώτου μη κυριαρχούμενου μετώπου και την ικανοποιητική διασπορά των λύσεων πάνω σε αυτό.
- Από τις 100 βέλτιστες λύσεις του μετώπου Pareto, το πιο αυστηρό και εφικτό σενάριο για τη λεκάνη εκπροσωπούσε εκείνη που αντιστοιχούσε σε μείωση του P κατά 44% από την υφιστάμενη κατάσταση, στα επίπεδα των 0,125mg/l, με συνδυασμό μέτρων που προκαλούν ένα αποδεκτό συνολικό κόστος. Το όριο αυτό κατατάσσει τον ποταμό στην κλάση Υψηλής ποιότητας με βάση την κατάταξη των ελληνικών ποταμών των Skoulikidis et al. (2006). Η μη αντικρουόμενη συμπεριφορά της μείωσης των δύο θρεπτικών προκάλεσε ταυτόχρονα σημαντική μείωση της συγκέντρωσης του N-NO3 κατά 25% διαμορφώνοντάς τη στα 0,49mg/l. Το σενάριο αυτό προτείνεται ως ο πλέον αποδεκτός συμβιβασμός ικανοποίησης των τριών κριτηρίων στη λεκάνη του Αράχθου, με εγκατάσταση λωρίδων συγκράτησης στις εκτάσεις αραβόσιτου και σε επιλεγμένα τμήματα των εκτάσεων βοσκότοπων για τον πλέον αποδοτικό περιορισμό των απωλειών ρύπων, και με ταυτόχρονη μείωση της λίπανσης στη μηδική που αποφέρει σημαντικά κέρδη για τον παραγωγό αφού δε μειώνει τις αποδόσεις. Ο αλγόριθμος εντοπίζει αυτή τη λύση με ένα συνδυασμό περισσότερο και λιγότερο δαπανηρών ΔΠ στην αγροτική γη της λεκάνης, ώστε να επιτύχει το φιλόδοξο στόχο της σημαντικής μείωσης του P με ένα μικρό σχετικά κόστος (περίπου 500000€), που αντιστοιχεί σε 28€/κάτοικο/έτος.
- Ενδιαφέρουσα λύση από το μέτωπο Pareto είναι, μεταξύ άλλων, και η επίτευξη ικανοποιητικών μειώσεων στις συγκεντρώσεις με μηδενικό κόστος. Οι συγκεντρώσεις θρεπτικών που προκύπτουν από αυτή τη λύση είναι 0,15 και 0,53mg/l για τον P και το N-

NO3 αντίστοιχα και επιτυγχάνονται επίσης με συνδυασμό δαπανηρών και οικονομικά προσοδοφόρων μέτρων εντός της λεκάνης.

- Ακόμα όμως και μία άλλη λύση που αντιστοιχεί στο ελάχιστο δυνατό κόστος (μέγιστο δυνατό όφελος ~520000€), κατορθώνει να μειώσει τις συγκεντρώσεις έστω και σε μικρά ποσοστά. Η λεκάνη του Αράχθου μπορεί επομένως να τύχει διαχείρισης με γνώμονα και μόνο τη βελτιστοποίηση του οικονομικού οφέλους για τον πληθυσμό και αυτό είναι ένα πολύ βασικό συμπέρασμα για τη διαχείριση της αγροτικής γης στην Ελλάδα. Αυτό που ουσιαστικά πρότεινε η εν λόγω λύση ήταν η κατάργηση της αζωτούχου λίπανσης στη μηδική, μία καλλιέργεια που δεν την έχει ανάγκη αφού ικανοποιεί τις ανάγκες της με τη φυσική διαδικασία της αζωτοδέσμευσης, καθώς και η κατάργηση της ετήσιας άροσης του εδάφους και καλλιέργειας κατά τις ισοϋψείς στον αραβόσιτο. Η πρώτη πρακτική προτρέπει τον αγροτικό πληθυσμό να χρησιμοποιεί λιγότερα χημικά λιπάσματα και άρα να ξοδεύει λιγότερα χρήματα και έμμεσα θίγει το ζήτημα της υπερκατανάλωσης αγροτικών χημικών προς χάριν της εμπορικής τους διακίνησης χωρίς ουσιαστικά αυτά να είναι απαραίτητα για την επίτευξη μεγάλων αποδόσεων. Το δεύτερο μέτρο προτρέπει τον αγροτικό πληθυσμό σε ηπιότερη κατεργασία του εδάφους, που παραδοσιακά πιστεύεται ότι είναι πάντα ευεργετική για την καλλιέργεια. Και όμως, η μείωση των αρόσεων είχε τελικά θετικά αποτελέσματα, αφού περιόρισε την απόπλυση των θρεπτικών στοιχείων από το έδαφος αυξάνοντας τη διαθεσιμότητά τους για την καλλιέργεια και προκαλώντας λιγότερα έξοδα.
- Με σύγκριση των τριών ανωτέρω διαχειριστικών σχημάτων πιστεύεται τελικά, ότι οι δύο προσοδοφόρες ΔΠ σε μηδική και αραβόσιτο μπορούν να συνδυαστούν τοπικά με πιο δαπανηρά και αποτελεσματικά μέτρα (π.χ. λωρίδες συγκράτησης), ώστε να οδηγήσουν σε σημαντική μείωση του ρυπαντικού φορτίου στο ποτάμι με μηδενικό ή πολύ μικρό επιπρόσθετο συνολικό κόστος για τον πληθυσμό. Η μείωση του ζωικού κεφαλαίου ή η διαχείριση της κοπριάς δεν είναι απαραίτητη στη λεκάνη παρά μόνο σε πολύ περιορισμένο αριθμό ΥΜ βοσκότοπων όπου συγκεντρώνονται οι μεγαλύτεροι ζωικοί πληθυσμοί. Η απόφαση αυτή πιστεύεται ότι ικανοποιεί τον πληθυσμό, αφού δεν του θίγει τη βασική ενασχόληση και επαγγελματική δραστηριότητα. Συνολικά, το σενάριο προτείνεται ως απόλυτα εφικτό, και εκτιμάται ότι για την επίτευξη του απαιτείται μόνο η επαρκής ενημέρωση του πληθυσμού.
- Ο αλγόριθμος εντοπίζει τις πιο αποτελεσματικές λύσεις για τη μείωση των συγκεντρώσεων ρύπων με ενσωμάτωση των πλέον συνδυαστικών μέτρων σε κάθε αγροτική ΥΜ. Με τη μέγιστη αυτή διαχείριση, η αποτελεσματικότητα στον περιορισμό των απωλειών είναι η μέγιστη (αθροιστική επίδραση μεμονωμένων μέτρων), αλλά επιτυγχάνεται με σημαντικό κόστος που ξεπερνά τα 3Μ€. Ανάμεσα σε 'ακριβές' λύσεις

συγκαταλέγονται παραπλήσια διαχειριστικά σχήματα ως προς το κόστος και το περιβαλλοντικό αποτέλεσμα, που όμως, η διαφοροποίηση στην κατανομή των ΔΠ στο χώρο της λεκάνης επιτρέπει το συνυπολογισμό και τοπικών κοινωνικοοικονομικών παραγόντων για την επιλογή τους. Ωστόσο, πιστεύεται ότι η κατάσταση των υδάτων στον Άραχθο, και το εύρος των διαθέσιμων διαχειριστικών σχημάτων προς εφαρμογή που υπέδειξε η βελτιστοποίηση αποτρέπουν από την υιοθέτηση τέτοιων λύσεων. Ο πολύ φιλόδοξος στόχος της κατάταξης του ποταμού στην πρώτη κλάση ποιότητας με βάση τη συγκέντρωση του P μπορεί άλλωστε να επιτευχθεί με ηπιότερη διαχείριση και πολύ μικρό κόστος.

- Η διαχείριση της λεκάνης του Αράχθου για τη μείωση των θρεπτικών έχει και ευεργετικά αποτελέσματα για τη στερεοπαροχή του ποταμού. Τα πιο δαπανηρά μέτρα βρέθηκε ότι μειώνουν τη μέση ετήσια στερεοπαροχή στην έξοδο της λεκάνης μέχρι και 32% σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση. Τα δε πιο συμβιβαστικά, υπολογίστηκε ότι αποφέρουν μία μείωση στα επίπεδα περίπου του 20%. Και αυτό ακόμα το αποτέλεσμα είναι πολύ θετικό αν ληφθεί υπόψη η σημασία του για το Υδροηλεκτρικό έργο 'Πουρνάρι Ι' κατάντη της εξόδου της λεκάνης (Πλάκα). Η μείωση αυτή μπορεί κάλλιστα να μεταφραστεί σε ανάλογη επιμήκυνση του ωφέλιμου χρόνου ζωής του έργου λόγω επιβράδυνσης της πλήρωσης του νεκρού όγκου του ταμιευτήρα με φερτές ύλες.
- Έγινε τέλος φανερό ότι η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση υπερέχει έναντι της μονοκριτηριακής (ενσωμάτωση των κριτηρίων σε ένα μέτρο επίδοσης) και της στοχευμένης στρατηγικής διότι παρέχει πληροφορία για όλο το φάσμα των πιθανών λύσεων του προβλήματος χωρίς να αποκρύπτει καμία πτυχή του. Στην περίπτωση που είχε ακολουθηθεί η προσέγγιση της μονοκριτηριακής ανάλυσης, οι πλέον συμβιβαστικές λύσεις που επιλέχτηκαν στη λεκάνη του Αράχθου πιθανότατα δεν θα είχαν βρεθεί λόγω της υποκειμενικότητας στην κατάρτιση της ολικής αντικειμενικής συνάρτησης και στον καθορισμό των συντελεστών βάρους των επιμέρους κριτηρίων. Επίσης, το πιο αποτελεσματικό μέτρο βάσει της στοχευμένης στρατηγικής εφαρμογής ΔΠ, αποδείχτηκε πολύ δαπανηρό, με την πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση να προτείνει ανάλογες λύσεις με υποπολλαπλάσιο κόστος. Η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση συστήνεται ανεπιφύλακτα για τη λήψη αποφάσεων στη λεκάνη του Αράχθου.

10.4 Μελλοντική έρευνα

Είναι αρκετά τα σημεία της συνολικής προσέγγισης που ακολούθησε η διατριβή για τη διαχείριση λεκάνης απορροής, που με τη διαθεσιμότητα περισσότερων και καλύτερων δεδομένων ή με περαιτέρω έρευνα, μπορούν να βελτιωθούν και ταυτόχρονα να βελτιώσουν

στο σύνολό της τη μεθοδολογία που προτάθηκε. Το βασικότερο αντικείμενο που πιστεύεται ότι χρήζει περαιτέρω βελτίωσης είναι η αναπαράσταση του φυσικού συστήματος στον ηλεκτρονικό υπολογιστή, δηλαδή η βελτίωση της ακρίβειας των εκτιμήσεων του υδρολογικού μοντέλου σε σχέση με την πραγματικότητα στην εκάστοτε περιοχή μελέτης. Πιστεύεται άλλωστε, ότι αυτό αποτελεί και τη μεγάλη πρόκληση στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών για την αντιμετώπιση θεμάτων Περιβαλλοντικής Διαχείρισης. Συγκεκριμένα η παρούσα μεθοδολογία μπορεί να βελτιωθεί στα πιο κάτω σημεία:

- Αποτύπωση και προσομοίωση της υφιστάμενης κατάστασης και της εναλλακτικής διαχείρισης σε λεκάνη απορροής

Πρόκειται ουσιαστικά για την αντιμετώπιση των υπαρχόντων προβλημάτων κατά τη φάση μοντελοποίησης μιας λεκάνης απορροής με το SWAT. Τα δεδομένα εισόδου παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο για την επιτυχία της υδρολογικής ποιοτικής προσομοίωσης. Ιδιαίτερα τα χωρικά δεδομένα εισόδου, για τα οποία έγινε ειδική μνεία στο σχετικό κεφάλαιο, απαιτείται να είναι καλύτερης ποιότητας. Τοπογραφικό ανάγλυφο με μεγαλύτερη ανάλυση, ολοκληρωμένος εδαφολογικός χάρτης με πιστή απεικόνιση της διαφοροποίησης των φυσικοχημικών ιδιοτήτων, καθώς και αναλυτικός χάρτης χρήσεων γης με τη διαφοροποίηση των καλλιεργειών και με πιστή αποτύπωση της υφιστάμενης διαχείρισης, είναι δεδομένο ότι θα βελτιώσουν σε πολύ μεγάλο βαθμό την ακρίβεια διαχωρισμού της λεκάνης σε ΥΜ και θα ενισχύσουν τη συμμετοχή των νέων τεχνολογιών στην ανάπτυξη της γεωργίας ακριβείας (precision agriculture). Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε ένας γεωλογικός χάρτης και με προσεγγίσεις αποδόθηκαν τιμές για τις εδαφικές ιδιότητες στους διάφορους σχηματισμούς. Ελλείψει γεωγραφικής αναφοράς των υφιστάμενων καλλιεργειών, αυτές κατανεμήθηκαν προσεγγιστικά εντός της αγροτικής γης της λεκάνης με βάση στατιστικά στοιχεία. Η αναλυτικότερη περιγραφή των εν λόγω χαρακτηριστικών θα μπορούσε να επιτευχθεί με επί τόπου χαρτογράφηση των χρήσεων γης και μέτρηση των υδραυλικών ιδιοτήτων των εδαφών σε διάφορες θέσεις. Ειδικότερα η πρώτη θα είχε ως αποτέλεσμα τη σχηματοποίηση της λεκάνης του Αράχθου στο μοντέλο SWAT με διαχωρισμό σε περισσότερες και μικρότερες σε μέγεθος ΥΜ που προφανώς θα προσομοιάζουν περισσότερο με τις ιδιοκτησίες αγρών και τον πολυτεμαχισμό του κλήρου στην περιοχή. Δυστυχώς, η κατασκευή αναλυτικών χαρτών (χρήσεις γης και εδάφους) απαιτεί μεγάλο κόστος, γι' αυτό άλλωστε, όπου οι χάρτες αυτοί είναι διαθέσιμοι αφορούν μόνο μία περιορισμένη έκταση και δε μπορούν να καλύψουν το χώρο που περικλείεται από τα όρια μιας μέσης ή μεγάλης έκτασης λεκάνης απορροής.

Απαραίτητα θεωρούνται ακόμα τα δεδομένα καταγραφής των παραμέτρων του ποταμού, δηλαδή παροχή, στερεοπαροχή και συγκεντρώσεις θρεπτικών για τη βαθμονόμηση

του μοντέλου. Η παροχή είναι ίσως η μόνη αρκετά αξιόπιστη μεταβλητή ανάμεσα σε εκείνες που καταγράφονται στα ποτάμια της Ελλάδας αυτή τη στιγμή. Αυτό γιατί μετράται με συνεχή καταγραφή της στάθμης του ποταμού και εφαρμογής της στις καταρτισμένες καμπύλες στάθμης-παροχής. Αντίθετα, τόσο η καταγεγραμμένη στερεοπαροχή, όσο και οι μετρήσεις θρεπτικών πιστεύεται ότι αποκρύπτουν σε σημαντικό βαθμό τα πραγματικά φορτία του ποταμού λόγω της χρονικά αραιής δειγματοληψίας. Στην περίπτωση της στερεοπαροχής υπεισέρχεται μεγάλο σφάλμα όταν στην καμπύλη παροχής-στερεοπαροχής εφαρμόζονται μεγάλες τιμές παροχής του ποταμού. Στα ανώτερα αυτά όρια υπάρχει έντονη αβεβαιότητα για τη σχέση των δύο μεγεθών που είναι δύσκολο να αποσαφηνιστεί ελλείψει μετρήσεων. Στην περίπτωση των συγκεντρώσεων θρεπτικών, η αντιπροσωπευτικότητα είναι επίσης μειωμένη δεδομένου ότι η πυκνότερη επίσημη δειγματοληψία στα περισσότερα κράτη αφορά στη μηνιαία χρονική βάση. Το μειονέκτημα εδώ είναι ότι έστω και αυτές οι μετρήσεις έχουν κατά κύριο λόγο γίνει κάτω από χαμηλές συνθήκες ροής και έτσι αποκρύπτουν τα φορτία που μεταφέρονται με τις πλημμύρες και που ενδέχεται να διαμορφώνουν πολύ διαφορετικά τις μέσες μηνιαίες και ετήσιες συγκεντρώσεις των στοιχείων στα ποτάμια. Για τη βελτίωση της προσομοίωσης και τη μείωση της αβεβαιότητας των εκτιμήσεων του μοντέλου θεωρείται απαραίτητη η βελτίωση της ποιότητας των εν λόγω δεδομένων καθώς και η αύξηση της διαθεσιμότητάς τους στο χώρο. Το τελευταίο θα επιτρέψει τη βαθμονόμηση του μοντέλου μιας λεκάνης απορροής σε πολλές ενδιάμεσες υπολεκάνες, ώστε η πρόβλεψη για τη γεωγραφική διαφοροποίηση των απωλειών ρύπων να είναι πιο αξιόπιστη.

Πολύτιμη στη βελτίωση της ακρίβειας των εκτιμήσεων του μοντέλου αναμένεται να είναι η βελτίωση της μαθηματικής δομής του, ιδιαίτερα όσον αφορά στην προσομοίωση των ΔΠ εντός της λεκάνης. Το μοντέλο SWAT, αν και ευρέως αποδεκτό πλέον, περιλαμβάνει κάποιες εμπειρικές ρουτίνες υπολογισμού μεγεθών. Αυτές π.χ. είναι η μέθοδος του αριθμού καμπύλης CN κατά SCS για τον υπολογισμό της επιφανειακής απορροής και η Τροποποιημένη Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας για εκείνον της στερεοαπορροής. Πρόκειται για μεθόδους που η σημασία τους στον καθορισμό των απωλειών θρεπτικών προς το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης είναι βαρύνουσα. Πολύ συχνά η χρήση των μεθόδων αυτών σε τοπικό επίπεδο δεν αποφέρει τα επιθυμητά αποτελέσματα αποδεικνύοντας ότι οι μέθοδοι δεν προσαρμόζονται πάντα. Ελλείψει άλλων πιο αποτελεσματικών μεθόδων έχουν επικρατήσει. Ωστόσο, η συστηματική προσπάθεια για τη βελτίωσή τους αναμένεται να βελτιώσει σε μεγάλο βαθμό τις εκτιμήσεις του μοντέλου SWAT. Το ίδιο ισχύει γενικότερα για την προσομοίωση της διαχείρισης στη λεκάνη απορροής με χρήση παραμέτρων και εξισώσεων που προσομοιώνουν διάφορες ΔΠ. Υπάρχουν αρκετές περιπτώσεις που η ικανότητα του μοντέλου έχει αμφισβητηθεί. Για παράδειγμα, οι Barlund et al. (2007) και οι White and Arnold (2009) θεωρούν ότι οι σχέσεις για τον υπολογισμό του ποσοστού

συγκράτησης φερτών και θρεπτικών από τις λωρίδες φυσικής βλάστησης χρειάζονται μετατροπές για να προσομοιώσουν σωστά τη λειτουργία τους σε τοπικές συνθήκες. Η βελτίωση του μοντέλου στην προσομοίωση της διαχείρισης θα ενισχύσει πολύ την ορθότητα της λήψης αποφάσεων για εναλλακτικά διαχειριστικά σχήματα σε λεκάνη απορροής. Γίνονται και σε αυτό το σημείο συστηματικές προσπάθειες βελτίωσης με ενσωμάτωση νέων παραμέτρων και με μεταβολές στον κώδικα του μοντέλου, των οποίων η ορθότητα ελέγχεται με βάση πραγματικές καταγραφές της ποιότητας του νερού ύστερα από πολύχρονη εφαρμογή ΔΠ σε αγροτικές λεκάνες απορροής.

Στην παρούσα εργασία θίχτηκε σε μικρό βαθμό και μόνο ποιοτικά το ζήτημα της αβεβαιότητας των εκτιμήσεων του μοντέλου SWAT. Η αβεβαιότητα στις εκτιμήσεις ενός μοντέλου έγκειται στην αβεβαιότητα που προσδίδουν τα δεδομένα εισόδου, οι ίδιες οι παράμετροι καθώς και η εννοιολογική δομή του μοντέλου. Στη δομή του μοντέλου περιλαμβάνονται βασικά οι πηγές αβεβαιότητας που προσδίδουν: α) η αδυναμία του κώδικα να προσομοιώσει κάποια διεργασία που συμβαίνει στη φύση, β) η αδυναμία του χρήστη να κατανοήσει πώς συμβαίνει κάποια διεργασία στη φύση η οποία όμως προσομοιώνεται από το μοντέλο και γ) η προσομοίωση κάποιων φυσικών διεργασιών μέσω απλουστευτικών παραδοχών στον κώδικα του μοντέλου. Η αβεβαιότητα στα δεδομένα εισόδου είναι προφανής, ενώ η αβεβαιότητα των παραμέτρων σχετίζεται με το πρόβλημα της ισοδυναμίας, σύμφωνα με το οποίο πολλαπλοί συνδυασμοί τιμών παραμέτρων δύναται να οδηγούν στο ίδιο αποτέλεσμα. Όλα τα ανωτέρω προσδίδουν μη μονοσήμαντη και αβέβαιη εκτίμηση των διαφόρων μεγεθών σε μία διαδικασία μοντελοποίησης, καθιστώντας έτσι την έκφραση των ορίων εμπιστοσύνης για τα μεγέθη αυτά πιο δόκιμη από την απόδοση συγκεκριμένης τιμής. Υπάρχουν άλλωστε αρκετές μέθοδοι που μπορούν να επιτύχουν μία ικανοποιητική προσέγγιση της αβεβαιότητας και ειδικά για το μοντέλο SWAT, έχει αναπτυχθεί ένα ειδικό λογισμικό (SWAT-CUP: Abbaspour, 2007) με ευρεία χρήση (Faramarzi et al., 2009· Schuol et al., 2008a· Schuol et al., 2008b· Yang et al., 2008). Παρόλα αυτά, έχει αποδειχτεί ότι η αβεβαιότητα που 'κρύβεται' στις συγκριτικές εκτιμήσεις των ΔΠ είναι σημαντικά μικρότερη από εκείνη της εκτίμησης απόλυτων τιμών (Arabi et al., 2007) και γι' αυτό ίσως το λόγο τα μοντέλα πιστεύεται πλέον ότι είναι πιο χρήσιμα όταν κάνουν συγκριτική αξιολόγηση σεναρίων. Πράγματι, στην παρούσα εργασία η διαμόρφωση του μετώπου Pareto ή των καμπυλών αντιστάθμισης μεταξύ κόστους και ενός ρύπου περιλαμβάνει λύσεις οι οποίες διαφέρουν μεταξύ τους ως προς τη διαμόρφωση των τιμών των κριτηρίων. Ακόμα και αν οι εκτιμήσεις εμπεριέχουν σημαντική αβεβαιότητα, μπορούμε να ισχυριστούμε ότι η συγκριτική αξιολόγηση των λύσεων μας οδηγεί σε ορθές αποφάσεις κατά την επιλογή των πιο συμβιβαστικών. Φυσικά, οι επιλογές κατά τη φάση παραμετροποίησης και βαθμονόμησης του μοντέλου πιστεύεται ότι μείωσαν σε μεγάλο βαθμό την αβεβαιότητα και των απόλυτων

εκτιμήσεων. Θα είναι ωστόσο χρήσιμο να γίνει μία ενδελεχής διερεύνηση της αβεβαιότητας της προγνωστικής ικανότητας του μοντέλου στο μέλλον με εφαρμογή των διαθέσιμων μεθόδων για την ποσοτικοποίησή της.

- Κοστολόγηση Διαχειριστικών Πρακτικών

Η κοστολόγηση των ΔΠ έγκειται σε μεγάλο βαθμό στα διαθέσιμα τοπικά δεδομένα. Σε αυτήν την εργασία έγιναν ορισμένες παραδοχές για κάποιες ΔΠ στους τρεις αγροτικούς τύπους χρήσης γης. Περισσότερο, αυτές αφορούσαν στις τιμές των καυσίμων και στην κοστολόγηση της εργασίας, τα οποία υπολογίστηκαν προσεγγιστικά με αναφορά στο έτος 2007. Με εμπειρικό τρόπο και με συμβουλή από πιο αναλυτικές προσεγγίσεις (Cuttle et al., 2007) έγινε και η εκτίμηση του κόστους των λωρίδων συγκράτησης (αγορά σπόρων, εργασία, χαμένη καλλιεργούμενη έκταση). Αναμφισβήτητα, το μέρος αυτό της διατριβής επιδέχεται βελτιώσεων. Η μεθοδολογία πρέπει ενδεχομένως να συμπεριλάβει σε χρηματικούς όρους το περιβαλλοντικό όφελος από την εφαρμογή εναλλακτικής διαχείρισης. Επίσης, θα ήταν χρήσιμο να υπολογιστεί το κόστος των ΔΠ σε μεγαλύτερο χρονικό ορίζοντα από τα πέντε έτη. Οι σημαντικές αυτές βελτιώσεις καθιστούν την οικονομική ανάλυση πιο σύνθετη και η πραγματοποίησή τους χρειάζεται ευρύτερη συνεργασία με ειδικούς επιστήμονες, ώστε συνολικά η κοστολόγηση να είναι ιδιαίτερα αξιόπιστη για ενδεχόμενη χρήση της μεθοδολογίας σε δράσεις επιχειρησιακού χαρακτήρα.

- Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση

Η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση στη λεκάνη του Αράχθου έγινε ως προς τρία κριτήρια: κόστος, φορτίο N-NO3 και φορτίο P. Μελλοντικός στόχος είναι να συμπεριληφθούν και άλλες μορφές των θρεπτικών στοιχείων του N και του P, καθώς και οι φερτές ύλες, αλλά αυτό προϋποθέτει να προηγηθούν: α) η βαθμονόμηση του μοντέλου ως προς τις επιμέρους μορφές των θρεπτικών στοιχείων (άρα βασίζεται αποκλειστικά στη διαθεσιμότητα μετρήσεων γι' αυτές) και β) η ανάπτυξη και άλλων τύπων ΔΠ που θα στοχεύουν άμεσα στον περιορισμό της διάβρωσης του εδάφους.

Ως μηχανή εκτέλεσης της διαδικασίας βελτιστοποίησης επιλέχτηκε ο ΓΑ του MATLAB, και όπως αναφέρθηκε στα συμπεράσματα αποδείχτηκε ικανοποιητικό μέσο για την επίτευξη των στόχων. Ωστόσο, υπάρχουν πολλοί εύρωστοι και αποδοτικοί αλγόριθμοι πλέον, που θα μπορούσαν να εγγυηθούν την εύρεση των βέλτιστων Pareto λύσεων γρηγορότερα. Η χρήση νέων εξελικτικών αλγόριθμων και στρατηγικών είναι ένας βασικός

μελλοντικός στόχος που πιστεύεται ότι μπορεί να βελτιώσει πολύ την αποδοτικότητα του ΕΥΑ που ανέπτυξε η διατριβή.

- Γενίκευση Μεθοδολογίας

Η προγραμματιστική δομή του ΕΥΑ της διατριβής, χαρακτηρίζεται από κάποιους περιορισμούς δεδομένου ότι αναπτύχθηκε για την αξιολόγηση ενός μεγάλου μεν εύρους ΔΠ, το οποίο όμως δεν καλύπτει όλα τα είδη καλλιεργειών και κτηνοτροφικής δραστηριότητας. Η γενίκευση της μεθοδολογίας απαιτεί καταρχήν την ενσωμάτωση επιπλέον ΔΠ που θα εγγυηθούν τη χρησιμότητα του ΕΥΑ ευρύτερα. Κατά δεύτερον, απαιτούνται κάποιες μικρές μεταβολές στον υφιστάμενο προγραμματιστικό κώδικα για την προσαρμογή του στην εκάστοτε περιοχή μελέτης. Η εξάλειψη της ανάγκης πραγματοποίησης αυτών των μετατροπών θα τελειοποιήσει το Εργαλείο. Τέλος, αποτελεί στόχο του άμεσου μέλλοντος να ενσωματωθεί το Εργαλείο αυτό σε ένα γραφικό περιβάλλον εργασίας (Graphical User Interface – GUI), ώστε να είναι πιο φιλικό στο χρήστη και να του προσδίδεται χαρακτήρας ολοκληρωμένου λογισμικού. Το περιβάλλον αυτό, με ενσωμάτωση ίσως και κάποιου χωρικού Συστήματος Λήψης Αποφάσεων (ΣΥΑ) για τον καθορισμό καλλιεργητικών τεχνικών σε πολύ αναλυτικότερη χωρική κλίμακα (Παπαδόπουλος, 2009), αναμένεται να ενισχύσει τη στροφή προς τη γεωργία ακριβείας για την περιβαλλοντική και οικονομική διαχείριση αγροτικών λεκανών απορροής.

10.5 Προοπτικές στη διαχείριση της αγροτικής γης

Η ποιότητα των υδάτινων σωμάτων είναι πλέον συνυφασμένη με τον αγροτικό τομέα δεδομένου ότι το συντριπτικό ποσοστό των μη σημειακών απωλειών ρύπων προέρχεται από τα αγροτικά εδάφη. Για την ορθολογική και οικονομικά βιώσιμη διαχείρισή τους, που θα συμβάλλει στην κατεύθυνση εναρμόνισης με την Κοινοτική Περιβαλλοντική Νομοθεσία, η εργασία αναδεικνύει τη χρησιμότητα γνώσεων και εργαλείων της Επιστήμης και της Τεχνολογίας. Το αντικείμενο είναι ωστόσο αρκετά σύνθετο, ώστε η εφαρμογή στην πράξη νέων επιστημονικών μεθοδολογιών με σκοπό τη διασφάλιση της ποιότητας των υδάτινων σωμάτων, να πρέπει άμεσα ή έμμεσα να συνυπολογίσει και άλλες περιβαλλοντικές ή κοινωνικο-οικονομικές συνιστώσες όπως: *προστασία εδαφικών πόρων, παραγωγή πιστοποιημένων αγροτικών προϊόντων υψηλής ποιότητας, εγγυημένα εισοδήματα για το γεωργικό πληθυσμό, απασχόληση πληθυσμού στην ύπαιθρο και βελτίωση της διαβίωσής του,* και ακόμα να συμβαδίσει με την *Εθνική Αγροτική Πολιτική*.

Η διαχείριση της αγροτικής γης προτείνεται μέσω της υιοθέτησης εναλλακτικών ήπιων πρακτικών που σχετίζονται με τα γεωργοπεριβαλλοντικά μέτρα της Νομοθεσίας.

Αποδεικνύεται ότι η επίτευξη των περιβαλλοντικών στόχων στα υδάτινα σώματα μπορεί να πραγματοποιηθεί με επιλογή μέτρων που δεν θίγουν τον αγροτικό πληθυσμό και που μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να έχουν και επιπρόσθετα οφέλη, όπως για παράδειγμα: α) τη μείωση των δαπανών καλλιέργειας για την ίδια ποσότητα παραγόμενων προϊόντων με i) βελτίωση της ποιότητάς τους (παραγωγή βιολογικών προϊόντων με μηδενισμό χημικής λίπανσης) ή με ii) διατήρηση της ποσότητας και της δομής του εδάφους (μειωμένες και πιο ήπιες αρόσεις) ή β) την αύξηση της παραγωγής (αύξηση των εκτρεφόμενων ζώων όταν εγκαθίσταται λωρίδα συγκράτησης στα όρια των εκτάσεων βοσκότοπων).

Ο στόχος της ολοκληρωμένης διαχείρισης των εδαφοϋδατικών πόρων σε κλίμακα λεκάνης απορροής είναι θεμιτό να περιλαμβάνει την αξιοποίηση των νέων τεχνολογιών, οι οποίες μπορούν να υπηρετήσουν την επιστήμη της Περιβαλλοντικής Υδρολογίας διευκολύνοντας την αποσαφήνιση των φυσικών μηχανισμών συσσώρευσης ρύπων στο έδαφος και μεταφοράς τους στα υδάτινα σώματα. Ωστόσο, δημιουργείται η αίσθηση ότι για την εμπιστοσύνη στην αξιοποίηση των σύγχρονων μεθοδολογιών και τεχνολογικών μέσων με σκοπό την άσκηση Περιβαλλοντικής Πολιτικής, και ειδικότερα την ολοκληρωμένη διαχείριση λεκάνης απορροής, οι περιοριστικοί παράγοντες δεν σχετίζονται με την έλλειψη καινοτομίας και επιστημονικού υποβάθρου τους, αλλά περισσότερο με τη διαθεσιμότητα και οργάνωση των δεδομένων πεδίου που αξιοποιούν, καθώς και με την έλλειψη στρατηγικών και θεσμικών πρωτοβουλιών με σκοπό την ευρύτερη αποδοχή και αξιοποίησή τους.

Στην επίσημη ιστοσελίδα του ΥΠΕΚΑ είναι σήμερα διαθέσιμες οι προκηρύξεις για την κατάρτιση των ΔΣ των Λεκανών Απορροής των Υδατικών Διαμερισμάτων της Ελλάδας. Στην περιγραφή της σύμβασης των μελετών που απαιτούνται γίνεται σαφής αναφορά στις απαιτήσεις της Οδηγίας 2000/60 και ιδιαίτερα στην καταγραφή των ανθρωπογενών πιέσεων σε κάθε λεκάνη απορροής, στην πρόταση μέτρων, καθώς και στην πληροφόρηση του κοινού και τη δημόσια διαβούλευση των Προσχεδίων Διαχείρισης έξι μήνες πριν την ολοκλήρωσή τους. Θεωρείται επομένως ότι η πιθανή αξιοποίηση του μεθοδολογικού πλαισίου της διατριβής και η γενικότερη συνδεσή της με την πράξη και την άσκηση Περιβαλλοντικής Πολιτικής θα ενισχύονταν από τη χωροθέτηση της αγροτικής γης με σαφή αποτύπωση των δεδομένων που αφορούν σε αυτή, καθώς και από τη δημιουργία μιας ενοποιημένης βάσης δεδομένων του αγροτικού τομέα με τη μορφή ενός διευρυμένου κτηματολογίου. Για την ενίσχυση της κοινωνικής αποδοχής κρίνεται απαραίτητη η εκπαίδευση και η ενημέρωση των απασχολούμενων στη γεωργία, ώστε να έχουν πρόσβαση και να είναι σε θέση να αξιοποιούν τα νέα εργαλεία πληροφορικής, και έτσι να συμμετέχουν και οι ίδιοι στις μελλοντικές φάσεις εκπόνησης των ΔΣ με γνώμονα την επιλογή ήπιων, κυρίως μη κατασκευαστικών και βιώσιμων παρεμβάσεων για την ικανοποίηση οικονομικών και περιβαλλοντικών στόχων.

Ελληνική Βιβλιογραφία

Γεωργίου Ε. (2005). *Υδρολογική Διερεύνηση και Ανάλυση της λεκάνης του ποταμού Αράχθου*. Μεταπτυχιακή Εργασία, ΔΠΜΣ: Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων. ΕΜΠ.

ΕΜΠ (Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο), 2008. Εθνικό Πρόγραμμα Διαχείρισης και Προστασίας των Υδατικών Πόρων. Τεχνική Υποστήριξη της Κεντρικής Υπηρεσίας Υδάτων για την «Κατάρτιση του Μεσοχρόνιου Προγράμματος Προστασίας και Διαχείρισης του Υδατικού Δυναμικού της Χώρας» Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Αθήνα, Φεβρουάριος 2008.

ΕΕΚ (Επιτροπή των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων), (2007). Έκθεση της Επιτροπής στο Συμβούλιο και στο Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο για την Εφαρμογή της Οδηγίας 91/676/Εοκ Σχετικά με την Προστασία των Υδάτων από τη Νιτρορρύπανση Γεωργικής Προέλευσης για την Περίοδο 2000-2003.

ΕΕΚ (Επιτροπή των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων), (2010). Έκθεση της Επιτροπής στο Συμβούλιο και στο Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο για την Εφαρμογή της Οδηγίας 91/676/Εοκ Σχετικά με την Προστασία των Υδάτων από τη Νιτρορρύπανση Γεωργικής Προέλευσης για την Περίοδο 2000-2003.

ΕΣΥΕ (2000). http://www.statistics.gr/portal/page/portal/ESYE (τελευταία πρόσβαση: Ιούλιος, 2010).

Ευστρατιάδης, Α. (2008). *Μη γραμμικές μέθοδοι σε πολυκριτηριακά προβλήματα βελτιστοποίησης υδατικών πόρων, με έμφαση στη βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων*. Διδακτορική Διατριβή. Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υδατικών πόρων και Περιβάλλοντος, ΕΜΠ. Αθήνα, Φεβρουάριος, 2008.

Ημερησία online (2010). Εκρηκτική αύξηση στις τιμές των λιπασμάτων. Διαθέσιμο: http://www.imerisia.gr/article.asp?catid=12336&subid=2&pubid=753203&tag=2656 (τελευταία πρόσβαση: 26 Ιουνίου 2010).

Καλαϊσάκης, Π. (1982). *Εφηρμοσμένη Διατροφή Αγροτικών Ζώων*. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών. Έκδοση 2$^{α.}$ Αθήνα 1982. Εκδόσεις Σταμούλη.

Καρανδεινός, Μ. (1990). *Σημειώσεις Μαθήματος Οικολογίας*. Εργαστήριο Οικολογίας και Προστασίας Περιβάλλοντος. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.

Καραμάνος, Α. (1994). *Τα Σιτηρά των Εύκρατων Κλιμάτων*. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών. Αθήνα, 1994.

Καραμάνος Α. (1999). *Τα Σιτηρά των Θερμών Κλιμάτων, Αραβόσιτος-Σόργο-Ρύζι-Κεχρί*. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών. Αθήνα, 1999.

Λυκοθανάσης, Σ. (2001). *Γενετικοί Αλγόριθμοι και Εφαρμογές, (Τόμος Γ'). Θεματική Ενότητα: Τεχνητή Νοημοσύνη και Εφαρμογές*. Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας. Πάτρα. Διαθέσιμο online: http://www.free-ebooks.gr/en/e-rafi.php?id=203

Μιμίκου, Μ.Α. (2006). *Τεχνολογία Υδατικών Πόρων*, γ' έκδοση, εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2006.

Μιμίκου, Μ.Α. και Μπαλτάς, Ε. (2006). *Τεχνική Υδρολογία*, δ΄ έκδοση, εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2006.

Οδηγία 91/676/ΕΟΚ (2008). Κατάσταση και Τάσεις του Υδάτινου Περιβάλλοντος και των Γεωργικών Πρακτικών, Οδηγός για τη Σύνταξη των Εκθέσεων των Κρατών Μελών.

Παναγόπουλος, Ι. (2004). *Εδαφολογική Διερεύνηση για τη Βελτίωση της Ακρίβειας του Μοντέλου SWAT στην Εκτίμηση των Επιπτώσεων των Αλλαγών Χρήσης Γης στην Πεδιάδα της Θεσσαλίας*. Μεταπτυχιακή Εργασία, ΔΠΜΣ: Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων. ΕΜΠ. Αθήνα, 2004.

Παπαδόπουλος, Α. (2009). *Ανάπτυξη χωρικού συστήματος υποστήριξης αποφάσεων για τη χωρικά καθορισμένη διαχείριση καλλιεργειών*. Διδακτορική Διατριβή. Σχολή

Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Τομέας Γεωγραφίας και Περιφερειακού Σχεδιασμού, ΕΜΠ. Αθήνα, 2009.

Παπαγιάννη, Χ. (2009). *Αποδοτικοί Αλγόριθμοι Σχεδίασης Δικτύων Επικοινωνιών με έμφαση στην ποιότητα υπηρεσίας*. Διδακτορική Διατριβή. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών. Τομέας Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών. Αθήνα, Μάιος 2009.

Πεταλά, Ζ. (2004). *Βελτιστοποίηση της Διαχείρισης Υπόγειων Υδοφορέων με τη Χρήση Γενετικών Αλγόριθμων*. Διδακτορική Διατριβή. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υδραυλικής και Τεχνικής Περιβάλλοντος. Θεσσαλονίκη 2004.

Τζουραμάνη, Ε., Σιντόρη, Α., Λιοντάκης, Α., Νεβρούζογλου, Π., Παπαευθυμίου, Μ., Καρανικόλας, Π. και Αλεξόπουλος, Γ. (2008α). *Βιολογική Μηδική*. Ινστιτούτο Γεωργο-οικονομικών και Κοινωνιολογικών Ερευνών. Εθνικό Ίδρυμα Αγροτικής Έρευνας. Διαθέσιμη στο διαδίκτυο: http://www.agroepiloges.gr/Files/midiki/Midiki.pdf (τελευταία πρόσβαση: Ιούνιος 2010).

Τζουραμάνη, Ε., Σιντόρη, Α., Λιοντάκης, Α., Νεβρούζογλου, Π., Παπαευθυμίου, Μ., Καρανικόλας, Π. και Αλεξόπουλος, Γ. (2008β). *Βιολογική Προβατοτροφία*. Ινστιτούτο Γεωργο-οικονομικών και Κοινωνιολογικών Ερευνών. Εθνικό Ίδρυμα Αγροτικής Έρευνας. Διαθέσιμη στο διαδίκτυο: http://www.agroepiloges.gr/Files/provata/Provata.pdf (τελευταία πρόσβαση: Ιούνιος 2010).

Τσακίρης, Γ. (2006). *Υδραυλικά Έργα, Σχεδιασμός και Διαχείριση. Τόμος ΙΙ: Εγγειοβελτιωτικά Έργα*. Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 2006.

ΥΠΕΧΩΔΕ (2008). Εφαρμογή των Οικονομικών Πτυχών του Άρθρου 5 της Κοινοτικής Οδηγίας περί Υδάτων 2000/60/ΕΚ στην Ελλάδα. Κεντρική Υπηρεσία Υδάτων Υπουργείου Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων. Αθήνα, Μάρτιος 2008.

ΥΠΓΕ (2001). Υπουργείο Γεωργίας. Ποιοτικά Χαρακτηριστικά Ποταμών και Λιμνών της Ελλάδας. Τεχνική Έκθεση. Τόμοι Ι & ΙΙ, Αθήνα.

ΦΕΚ 280/Α/9.12.2003 Νόμος 3199/2003. Προστασία και διαχείριση των υδάτων - Εναρμόνιση με την Οδηγία 2000/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Οκτωβρίου 2000.

ΦΕΚ 1422/Β/21.10.2001. Εφημερίδα της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας. Τεύχος Δεύτερο, Αρ. Φύλλου 1422, 22 Οκτωβρίου 2001.

ΦΕΚ 1695/Β/3.12.2005. Εφημερίδα της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας. Τεύχος Δεύτερο, Αρ. Φύλλου 1695, 2 Δεκεμβρίου 2005.

ΦΕΚ 1688/Β/ 1.12.2005. Εφημερίδα της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας. Τεύχος Δεύτερο, Αρ. Φύλλου 1688, 1 Δεκεμβρίου 2005.

ΦΕΚ 201/Α/19-20.11.1987. Εφημερίδα της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας. Τεύχος Πρώτο, Αρ. Φύλλου 201, 19-20 Νοεμβρίου 1987.

Χατζημπίρος, Κ. (2000). Σημειώσεις Μαθήματος Οικολογίας. Εργαστήριο Υγειονομικής Τεχνολογίας. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Αθήνα, 2000.

Ξένη Βιβλιογραφία

Abbaspour, K.C., (2007). *User Manual for SWAT-CUP, SWAT Calibration and Uncertainty Analysis Programs*. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, Duebendorf, Switzerland. 93 pp.

Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E. and Rasmussen, J. (1986). An introduction to the European Hydrological System – Systéme Hydrologique Européen SHE 2: structure of a physically based distributed modelling system. *Journal of Hydrology* 87(1-2), 61-77.

Abu-Zreig, M., Rudra, R.P., Whiteley, H.R., Lalonde, M.N. and Kaushik, K. (2003). Phosphorus removal in vegetated filter strips. *Journal of Environmental Quality* 32(2), 613-619.

Alexander, R. B., Johnes, P.J., Boyer, E.W. and Smith, R.A. (2002). A comparison of models for estimating the riverine export of nitrogen from large watersheds. *Biogeochemistry* 57/58, 295-339.

Anatolaki, C. and Tsitouridou, R. (2007). Atmospheric deposition of nitrogen, sulfur and chloride in Thessaloniki, Greece. *Atmospheric Research* 85(3-4), 413-428.

Andersen, H.E. and Kronvang, B. (2006). Modifying and evaluating a P index for Denmark. *Water, Air and Soil Pollution* 174, 341-353.

Andersen, J.H., Schluter, L. and Aertebjerg, G. (2006). Coastal eutrophication: recent developments in definitions and implications for monitoring strategies. *Journal of Plankton Research* 28(7), 621-628.

Arabi, M., Govindaraju, R.S. and Hantush, M.M. (2006a). Cost-effective allocation of watershed management practices using a genetic algorithm, *Water Resources Research* 42, W10429, 14pp, doi:10.1029/2006WR004931.

Arabi, M., Govindaraju, R.S., Hantush, M.M. and Engel, B.A. (2006b). Role of watershed subdivision on modeling the effectiveness of best management practices with swat. *Journal of the American Water Resources Association* 42(2), 513-528.

Arabi, M., Govindaraju, R.S. and Hantush, M.M. (2007). A probabilistic approach for analysis of uncertainty in the evaluation of watershed management practices. *Journal of Hydrology* 333(2-4), 459-471.

Arabi, M., Frankenberger, J.R., Engel, B.A., and Arnold, J.G. (2008). Representation of agricultural conservation practices with SWAT. *Hydrological processes* 22, 3042-3055.

Arheimer, B. and Brandt, M. (1998). Modelling nitrogen transport and retentions in the catchments of Southern Sweden. *Ambio* 27(6), 471-480.

Arheimer, B. and Brandt, M. (2000). Watershed modelling of non-point nitrogen pollution from arable land to the Swedish coast in 1985 and 1994. *Ecological Engineering* 14(4), 389-404.

Arnold, J.G. and Williams, J.R. (1987). Validation of SWRRB: Simulator for water resources in rural basins. *Journal of Water Resources Planning and Management* 113(2), 243-256.

Arnold, J.G., Allen, P.M., Muttiah, R.S. and Bernhardt, G. (1995a). Automated baseflow separation and recession analysis techniques. *Ground Water* 33(6), 1010–1018.

Arnold J.G., Williams, J.R., and Maidment, D.R. (1995b). Continuous time water and sediment routing model for large basins. *Journal of Hydraulic Enginering* 121(2), 171-183.

Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S. and Williams. J.R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *Journal of American Water Resource Association* 34(1), 73-89.

Arnold, J.G. and Allen, P.M. (1999). Automated methods for estimating baseflow and ground water recharge from streamflow records. *Journal of the American Water Resources Association* 35(2), 411-424.

Baginska, B., Milne-Home, W. and Cornish, P.S. (2003). Modelling nutrient transport in Currency Creek, NSW with AnnAGNPS and PEST. *Environmental Modelling and Software* 18(8-9), 801-808.

Baltas, E.A. (2008). Climatic Conditions and Availability of Water Resources in Greece. *International Journal of Water Resources Development* 24(4), 635-649.

Barlund, I., Kirkkala, T., Malve, O. and Kamari, J. (2007). Assessing SWAT model performance in the evaluation of management actions for the implementation of the Water Framework Directive in a Finnish catchment. *Environmental Modelling and Software* 22(5), 719-724.

BASINS, 2010. Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources. Διαθέσιμη: http://www.epa.gov/waterscience/basins/ (πρόσβαση: Σεπτέμβριος 2010).

Beasley, D.B. and Huggins, L.F. (1982). *ANSWERS user's manual*. Department of Agricultural Engineering, Purdue University, West Lafayette, IN, USA.

Bechmann, M, Krogstad, T. and Sharpley, A.N. (2003). A phosphorus index for Norway: justification of factors. *Proceedings of the International Water Association Conference on Diffuse Pollution* (pp. 36-45), Dublin.

Behera, S., and Panda, R. (2006). Evaluation of management alternatives for an agricultural watershed in a sub-humid subtropical region using a physical process based model. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 113(1-4), 62-72.

Behrendt, H. (1999). Estimation of the nutrient inputs into medium and large river basins- A case study for German rivers. *Loicz newsletter* 12, 1-4.

Behrendt, H. and Opitz, D. (2000). Retention of nutrients in a river systems: dependence on specific runoff and hydraulic load, *Hydrobiologia* 410, 111-122.

Behrendt, H., Huber, P., Kornmilch, M., Opitz, D., Schmoll, O., Scholz, G. and Uebe, R. (1999). Nutrient Emissions into River Basins of Germany. Institute of Freshwater Ecology and Inland Fisheries. Report UBA-FB, Berlin.

Bekele, E.G., and Nicklow, J.W. (2005). Multiobjective management of ecosystem services by integrative watershed modeling and evolutionary algorithms. *Water Resources Research* 41, W10406, 10p, doi:10.1029/2005WR004090.

Bekele, E.G., and Nicklow, J.W. (2007). Multi-objective automatic calibration of SWAT using NSGA-II, *Journal of Hydrology* 341(3-4), 165-176.

Bekiaris, I., Panagopoulos, I. and Mimikou, M. (2005). Application of the SWAT (Soil and water assessment tool) model in the Ronnea catchment of Sweden. *GlobalNEST International Journal* 7(3), 313-322.

Ben-Gal, A. and Dudley, L.M. (2003). Phosphorus availability under continuous point source irrigation. *Soil Science Society of America Journal* 67(5), 1449-1456.

Beven, K.J. (1993). Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrological modelling. *Advances in Water Resources* 16(1), 41-51.

Bicknell, B.R., Imhoff, J.C., Kittle, J.L., Jr., Donigian, A.S., Jr., and Johanson, R.C. (1997). Hydrological Simulation Program--Fortran: User's manual for version 11: U.S. Environmental Protection Agency, National Exposure Research Laboratory, Athens, Ga., EPA/600/R-97/080, 755p.

Birgand, F., Skaggs, R.W., Chescheir, G.M. and Gilliam, J.W. (2007). Nitrogen Removal in Streams of Agricultural Catchments - A Literature Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 37(5), 381-487.

Bishop, P.L., Hively, W.D., Stedinger, J.R., Rafferty, M.R., Lojpersberger, J.L. and Bloomfield, J.A. (2005). Multivariate analysis of paired watershed data to evaluate agricultural best management practice effects on stream water phosphorus. *Journal of Environmental Quality* 34(3), 1087-1101.

Borah, D.K. and Bera, M. (2003). Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: Review of mathematical bases. *Transactions of the ASAE* 46(6), 1553-1566.

Borah, D.K. and Bera, M. (2004). Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: Review of applications. *Transactions of the ASAE* 47(3), 789-803.

Borgvang, S-A. and Selvik, J.R (2000). Development of HARP Guidelines – Harmonised Quantification and Reporting Procedure for Nutrients. SFT Report 1759/2000. ISBN 82-7655-401-6. 179 pp.

Bouraoui, F. and Grizzetti, B. (2008). An Integrated Modelling framework to estimate the fate of nutrients: Application to the Loire (France). *Ecological Modelling* 212(3-4), 450-459.

Bracmort, K.S., Arabi, M., Frankenberger, J.R., Engel, B.A. and Arnold, J.G. (2006). Modeling long-term water quality impact of structural BMPs. *Transactions of the ASABE* 49(2), 367-374.

Brannan, K.M., Mostaghimi, S., McClellan, P.W., Inamdar, S. (2000). Animal waste BMP impacts on sediment and nutrient losses in runoff from the Owl Run watershed. *Transactions of the ASAE* 43(5), 1155-1166.

Britz, W. (2000). CAPRI Common Agricultural Policy Regional Impact Analysis, Final Report, FAIR3 - CT96 - 1849, Bonn University.

Brown, L.C. and Barnwell, T.O. (1987). The Enhanced Water Quality Models, QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: Documentation and User Manual. EPA/600/3-87/007.

Campling, P., Terres, J.M., Vande Walle, S., Van Orshoven, J. and Crouzet, P. (2005). Estimation of Nitrogen balances from agriculture for EU 15: spatialisation of estimates to river basins using the CORINE Land Cover. *Physics and Chemistry of the Earth* 30(1-3), 25-34.

Chambers, B.J., Garwood, T.W.D. and Unwin, R.J. (2000a). Controlling soil water erosion and phosphorus losses from arable land in England. *Journal of Environmental Quality* 29(1),145-150.

Chambers, B.J., Smith K.A. and Pain, B.F. (2000b). Strategies to encourage better use of nitrogen in animal manures. *Soil Use and Management* 16, 157-161.

Chaplot, V., Saleh, A., Jaynes, D.B. and Arnold, J. (2004). Predicting water, sediment and NO3-N loads under scenarios of land-use and management practices in a flat watershed. *Water, Air and Soil Pollution* 154(1-4), 271-293.

Chaplot, V., Saleh, A. and Jaynes, D.B. (2005). Effect of the accuracy of spatial rainfall information on the modeling of water, sediment, and NO3-N loads at the watershed level. *Journal of Hydrology* 312(3), 223-234.

Cherry, K.A., Shepherd, M., Withers, P.J.A. and Mooney, S.J. (2008). Assessing the effectiveness of actions to mitigate nutrient loss from agriculture: A review of methods. *Science of the Total Environment* 406(1-2), 1-23.

Cools, J., Broekx, S., Vandenberghe, V., Sels, H., Meynaerts, E., Vercaemst, P., et al. (2010). Coupling a hydrological water quality model and an economic optimization model to set up a cost-effective emission reduction scenario for nitrogen. *Environmental Modelling and Software* 26(1), 44-51.

Corne, D.W., Knowles, J.D. and Oates, M.J. (2000). The Pareto envelope-based selection algorithm for multiobjective optimization. In: *Proceedings of sixth international conference on parallel problem solving from Nature*, pp. 839-848.

Corne, D.W., Jerram, NR., Knowles, J.D. and Oates, J. (2001). *PESA-II:* Region-based selection in evolutionary multiobjective optimization. In: *Proceedings of the genetic and evolutionary computation conference* (GECCO-2001), pp. 283-290.

COST Action 832, 1997. Quantifying the Agricultural Contribution to Eutrophication. Διαθέσιμη ιστοσελίδα: http://www.cost832.alterra.nl/ (πρόσβαση: Σεπτέμβριος 2010).

COST Action 869, 2005. Mitigation Options for nutrient reduction in surface water and groundwaters. Διαθέσιμη ιστοσελίδα: http://www.cost869.alterra.nl/ (πρόσβαση: Σεπτέμβριος 2010).

COST, 2010. European Cooperation in Science and Technology. Διαθέσιμη ιστοσελίδα: http://www.cost.esf.org/ (πρόσβαση: Σεπτέμβριος 2010).

Cronshey, R.G. and Theurer, F.G. (1998). AnnAGNPS Non-Point Pollutant Loading Model. In: Proceedings of First Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference, Las

Vegas, Nevada. Subcommittee on Hydrology of the Interagency Advisory Committee on Water Data, pp. 1-9 to 1-16.

Cuttle, S., Macleod, C., Chadwick, D., Scholefield, D., Haygarth, P., Newell-Price, P., Harris, D., Shepherd, M., Chambers, B. and Humphrey, R. (2007). An Inventory of Methods to Control Diffuse Water Pollution from Agriculture (DWPA), USER MANUAL. Defra report, Project ES0203, 115 pp. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: http://www.cost869.alterra.nl/UK_Manual.pdf (πρόσβαση: Οκτώβριος 2010).

Davies, H. and Neal, C. (2007). Estimating nutrient concentrations from catchment characteristics. *Hydrological and Earth Systems Science* 11(1), 550-558.

Davison, P., Withers, P., Lord, E., Betson, M. and Stromqvist, J. (2008). PSYCHIC – A process-based model of phosphorus and sediment mobilisation and delivery within agricultural catchments. Part 1: Model description and parameterisation. *Journal of Hydrology* 350(3-4), 290-302.

Deb, K. (2001). *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*, John Wiley and Sons.

Deb, K., Agarwal, S., Pratap, A. and Meyarivan, T. (2000). A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II, Kanpur Genetic Algorithm Laboratory (KanGAL) Report, No 200001, Indian Institute of Technology, Kanpur, India.

Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. and Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 6(2), 182-197.

DEFRA (2006). Updating the estimate of the sources of Phosphorus in UK waters.

De Jong, K.A. (1975). *An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems*. Doctoral dissertation, University of Michigan.

De la Rosa, D., Moreno, J.A., Mayol, F. and Bonson, T. (2000). Assessment of soil erosion vulnerability in Western Europe and potential impact on crop productivity due to loss of soil depth using the ImpelERO model. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 81(3), 179-190.

De Wit, M.J.M. (2001). Nutrient fluxes at the river basin scale. I: the PolFlow model. *Hydrological Processes* 15(5), 743-759.

De Wit, M. J. M. and Behrendt, H. (1999). Nitrogen and phosporous emissions from soil to surface water in the Rhine and Elbe basins. *Water Science and Technology* 39(12), 109-116.

De Wit, M.J.M. (2000). Modelling nutrient fluxes from source to river load: a macroscopic analysis applied to the Rhine and Elbe basins. *Hydrobiologica* 410, 123-130.

Dillaha, T.A., Reneau, R.B., Mostaghimi, S. and Lee, D. (1989). Vegetative filter strips for agricultural nonpoint source pollution control. *Transactions of the ASAE* 32(2), 513–519.

Di Luzio, M, Srinivasan R. and Arnold, J.G. (2001). *ArcView Interface for SWAT 2000*. Blackland Research Center - Texas.

Di Luzio, M., Srinivasan, R. and Arnold, J.G. (2004). A GIS-coupled hydrological model system for the watershed assessment of agricultural nonpoint and point sources of pollution. *Transactions in GIS* 8(1), 113-136.

Di Luzio, M., Arnold J.G., Srinivasan, R. (2005). Effect of GIS data quality on small watershed streamflow and sediment simulations. *Hydrological Processes* 19(3), 629-650

Dimoyiannis, D.G., Tsadilas, C.D. and Valmis, S. (1998). Factors affecting aggregate instability of Greek agricultural soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 29(9-10), 1239-1251.

Directive 91/271/EEC of 21 May 1991 concerning Urban Waste Water Treatment Official Journal of the European Communities L135.

Directive 91/676/EEC of 12 December 1991 concerning the protection of waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources. Official Journal of the European Communities L375.

Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. Official Journal of the European Communities L327/1.

Directive 2000/60/EC - Article 5, 2006. Report on the pressures and qualitative characteristics of water bodies in the water districts of Greece and a methodological approach for further analysis. Hellenic republic ministry of environment physical planning and public works. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: http://circa.europa.eu/Public/irc/env/wfd/library?l=/framework_directive/implementation_documents_1/wfd_reports/member_states/greece/article_5/article_130606pdf/_EN_1.0_anda=d (πρόσβαση: Απρίλιος 2010).

Dumedah, G., Berg, A.A., Wineberg, M. and Collier, R. (2010). Selecting Model Parameter Sets from a Trade-off Surface Generated from the Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-II. *Water Resources Management* 24(15), 4469-4489.

ECR (European Commission Report), (2002). Implementation of the nitrates directive, COM (2002) 407.

Edwards, A.C. and Withers, P.J.A. (1998). Soil phosphorus management and water quality: a UK perspective. *Soil Use and Management* 14, 124-130.

EEA-ETC/TE, 2002. CORINE Land Cover update. IandCLC 2000 project, Technical Guidelines, Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: http://etc-lusi.eionet.europa.eu/ (πρόσβαση: Ιανουάριος 2010).

EEA (2003). Europe's water: an indicator-based assessment. Summary. European Environmental Agency, Copenhagen, 24 pp.

EEA, (2005). Source Apportionment of nitrogen and phosphorus inputs into the aquatic environment. EEA Report No. 7/2005. European Environmental Agency, Copenhagen, 48 pp.

Eghball, B., Gilley, J.E., Kramer, L.A. and Moorman, T.B. (2000). Narrow grass hedge effects on phosphorus and nitrogen in runoff following manure and fertilizer application. *Journal of Soil and Water Conservation* 55(2), 172–176.

EMEP, 2001. (The Co-operative Programme for the Monitoring and Evaluation of the Long - Range Transmission of Air Pollutants in Europe), 2001. EMEP measurement database. Διαθέσιμη ιστοσελίδα: http://www.emep.int/ (πρόσβαση: Απρίλιος 2010).

EMEP, (2007). http://www.emep.int/assessment/Part1/057-072_03-Nitrogen-Part1.pdf (πρόσβαση: Απρίλιος 2010).

Engel, B., Storm, D., White, M., Arnold, J., and Arabi, M. (2007). A Hydrologic / Water Quality Model Application Protocol. *Journal of the American Water Resources Association* 43(5), 1223-1236.

EPA (1994). The Phosphorus Index, a Phosphorus Assessment Tool. Technical Note. Πρόσβαση (2010) στο: http://www.nrcs.usda.gov/technical/ecs/nutrient/pindex.html

EPA (2003). National Management Measures to Control Nonpoint Source Pollution from Agriculture, EPA 841-B-03-004, July 2003. Διαθέσιμο: http://epa.gov/nps/agmm/ (πρόσβαση: Απρίλιος 2010).

ETC, European Topic Centre on Terrestrial Environment (2005). Corine land cover database (Version 05/2005).

Euroharp (2000). Towards European Harmonised Procedures for Quantification of Nutrient Losses from Diffuse Sources. An EC Framework V project number EVK-CT-2001-00096, Διαθέσιμη ιστοσελίδα: www.euroharp.org.

Eurostat (2006). Nomenclature of territorial units for statistics – NUTS Statistical regions of Europe. Διαθέσιμο: http://ec.europa.eu/eurostat/ramon/nuts/home_regions_en.html (πρόσβαση: Απρίλιος 2010).

FAO (2005). Agricultural data FAOSTAT. Διαθέσιμο: http://faostat.fao.org (πρόσβαση: Ιούνιος 2010).

Faramarzi, M., Abbaspour, K. C., Schulin, R. and Yang, H. (2009). Modelling blue and green water resources availability in Iran. *Hydrological Processes* 23(3), 486- 501.

Fassio, A., Giupponi, C., Hiederer, R. and Simota, C. (2005). A decision support tool for simulating the effects of alternative policies affecting water resources: an application at the European scale. *Journal of Hydrology* 304(1-4), 462-476.

FitzHugh, T.W., Mackay, D.S. (2000). Impacts of input parameter spatial aggregation on an agricultural nonpoint source pollution model. *Journal of Hydrology* 236(1-2), 35-53.

Fonseca, C.M. and Fleming, P.J. (1993). Genetic algorithms for multiobjective optimization: Formulation, discussion and generalization. In: Forest, S. (Ed.). *Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms* (pp. 416-423). San Mateo, California, Morgan Kauffman Publishers.

Fröschl, L., Pierrard, R., Schönbäck, W. (2008). Cost-efficient choice of measures in agriculture to reduce the nitrogen load flowing from the Danube river into the Black Sea. *Ecological Economics* 68(1-2), 96-105.

Fu, G., Makropoulos, C. and Butler, D. (2010). Simulation of urban wastewater systems using artificial neural networks: embedding urban areas in integrated catchment modelling, *Journal of Hydroinformatics* 12(2), 140-149.

Gassman, P.W., Osei, E., Saleh, A. and Hauck, L.M. (2002). Application of an environmental and economic modeling system for watershed assessments. *Journal of the American Water Resources Association,* 38(2), 423-438.

Gassman, P.W., Osei, E., Saleh, A., Rodecap, J., Norvell, S. and Williams, J. (2006). Alternative practices for sediment and nutrient loss control on livestock farms in northeast Iowa. *Agriculture, Ecosystems and Environment,* 117(2-3), 135-144.

Gassman, P.W., Reyes, M.R., Green, C.H. and Arnold, J.G. (2007). The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions *Transactions of the ASABE* 50(4), 1211-1250.

Georgiou, E. and Mimikou, M. (2006). Integrated Methodologies for the mapping of costal evolution due to the man-made interventions in the Arachtos River Basin. *Journal of WSEAS Transactions on Environment and Development* 2(4), 375-382.

Geza, M. and McCray, J.E. (2008). Effects of soil data resolution on SWAT model stream flow and water quality predictions. *Journal of Environmental Management* 88(3), 393-406.

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(3), 219-233.

Gitau, M.W., Gburek, W.J. and Jarrett, A.R. (2005). A tool for estimating best management practice effectiveness for phosphorus pollution control. *Journal of Soil and Water Conservation* 60(1), 1-10.

Gitau, M.W., Veith, T.L., Gburek, W.J. and Jarrett, A.R. (2006). Watershed Level Best Management Practice Selection and Placement in the Town Brook Watershed, New York. *Journal of the American Water Resources Association* 42(6), 1565-1581.

Giupponi, C. (2007). Decision Support Systems for implementing the European Water Framework Directive: The MULINO approach. *Environmental Modelling and Software* 22(2), 248-258.

Goldberg, D.E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison Wesley Publishing Company, Inc.

Goodlass, G., Halberg, N. and Verschuur, G. (2003). Input output accounting systems in the European community - an appraisal of their usefulness in raising awareness of environmental problems. *European Journal of Agronomy* 20(1-2), 17-24.

Graf, N., Seppelt, R., Matthies, M. and Lautenbach, S. (2009). Scenario analysis and management options for sustainable river basin management : Application of the Elbe DSS. *Environmental Modelling and Software* 24(1), 26-43.

GRASS 4.1. (1993). Reference Manual. US Army Corps of Engineers. Construction Engineering Research Laboratories, Champaign, IL.

Grimvall, A. and Stalnacke, P. (1996). Statistical methods for source apportionment of riverine loads of pollutants. *Environmetrics* 7(2), 201-213.

Grizzetti, B. and Bouraoui, F. (2006). Assessment of Nitrogen and Phosphorous Environmental Pressure at European Scale. EUR22526 EN. Institute for Environment and Sustainability.

Grizzetti, B., Bouraoui, F., De Marsily, G., Bidoglio G. (2005a). A statistical method for source apportionment of riverine nitrogen loads. *Journal of Hydrology* 304(1-2), 302-315.

Grizzetti, B., Bouraoui, F., De Marsily, G., Bidoglio G. (2005b). Modelling nitrogen pressure in river basins: A comparison between a statistical approach and the physically-based SWAT model. *Physics and Chemistry of the Earth* 30(8-10), 508-517.

Grizzeti, B., Bouraoui, F. and Aloe, A. (2007). Specialised European Nutrient Balance. Institute for Environment and Sustainability, JRC, Report: EUR 22692 EN. pp 104.

Gupta, H.V., Sorooshian, S. and Yapo, P.O. (1999). Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *Journal of Hydrologic Engineering* 4(2), 135-143.

Haag, D. and Kaupenjohann, M. (2001). Landscape fate of nitrate fluxes and emissions in Central Europe A critical review of concept, data, and models for transport and retention. *Agriculture, Ecosystem and Environment* 86(1), 1-21.

Hansen, N.C., Gupta, S.C. and Moncrief, J.F. (2000). Snowmelt runoff, sediment and phosphorus losses under three different tillage systems. *Soil and Tillage Research* 57(1–2), 93-100.

Hargreaves, H.G. and Samani, Z.A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture* 1(2), 96-99.

Heathwaite, A.L., Quinn, P.F., and Hewett, C.J.M. (2005). Modelling and managing critical source areas of diffuse pollution from agricultural land using flow connectivity simulation. *Journal of Hydrology* 304(1-4), 446-461.

Heckrath, G., Bechmann, M., Ekholm, P., Ulen, B., Djodjic, F. and Andersen, H.E. (2008). Review of indexing tools for identifying high risk areas of phosphorus loss in Nordic catchments. *Journal of Hydrology* 349(1-2), 68-87.

Hejzlar, J., Anthony, S., Arheimer, B., Behrendt, H., Bouraoui, F., Grizzetti, B., Groenendijk, P., Jeuken, M.H.J.L., Johnsson, H., Lo Porto, A., Kronvang, B., Panagopoulos, Y., Siderius, C., Silgram, M., Venohr, M. and Žaloudík, J. (2009). Nitrogen and phosphorus retention in surface waters: an inter-comparison of predictions by catchment models of different complexity *Journal of Environmental Monitoring* 11, 584-593.

Helcom, (2004). Convention on the Protection of the Marine Environment of the Baltic Area, 1992 (Helsinki Convention). Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: http://helcom.navigo.fi/stc/files/Convention/Conv0704.pdf (πρόσβαση: Φεβρουάριος 2010).

HESS (2004). An Introduction to INCA: Integrated Nitrogen in Catchments. *Hydrological and Earth System Sciences Journal* 8(4), Special Issue.

Hetling, L.J., Jaworski, N.A. and Garretson, D.J. (1999). Comparison of nutrient input loading and riverine export fluxes in large watersheds. *Water Science and Technology* 39(12), 189-196.

Holland, J.H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems.* M.I.T. Press.

Horn, J., Nafpliotis, N., Goldberg, D.E. (1994). A Niched Pareto Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization. In: *Proceedings of the First Conference on Evolutionary Computation*, pp 82-87.

Hunt, D.T.E., Dee, A.S. and Oakes, D.B. (2004). Updating an estimate of the sources of nitrogen to UK waters – Phase 2. Defra Final Report for Project WT03016. Διαθέσιμο: <http://www.defra.gov.uk/science/project_data/DocumentLibrary/WT0701CSF/WT03016_1573.FRA.pdf> (πρόσβαση: Απρίλιος 2010).

Hunter, H. and Walton, R. (2008). Land-use effects on fluxes of suspended sediment, nitrogen and phosphorus from a river catchment of the Great Barrier Reef, Australia. *Journal of Hydrology* 356(1-2), 131-146.

Hutchins, M., Fezzi, C., Bateman, I., Posen, P. and Deflandre-Vlandas, A. (2009). Cost-effective mitigation of diffuse pollution: setting criteria for river basin management at multiple locations. *Environmental management* 44(2), 256-67.

INCA (2004). An introduction to INCA: Integrating Nitrogen in Catchments. *Hydrology and Earth System Sciences* 8(4), 597-600.

Isermann, K. (2007). Mitigation options for nutrient reduction in surface water and groundwater. Oral contribution COST 869/WG 3 Workshop, 27-29th November 2007. Devon / UK.

Ittersum, M. K., Ewert, F., Heckelei, T., Wery, J., Olsson, J.A., Andersen, E., Bezlepkina, I., Brouwer, F., Donatelli, M.,Flichman, G., Olsson, L., Rizzoli, A.E., Wal, T., Erik, J.E. and Wolf, J. (2008). Integrated assessment of agricultural systems - A component-based framework for the European Union (SEAMLESS). *Agricultural Systems* 96(1-3), 150-165.

Jarvis, S.C. (2000). Progress in studies of nitrate leaching from grassland soils. *Soil Use and Management* 16, 152-156.

Jha, M., Rabotyagov, S. and Gassman, P.W. (2009). Optimal placement of conservation practices using genetic algorithm with swat. *International Agricultural Engineering Journal* 18(1-2), 41-50.

Jones, C.A. (1983). A survey of the variability of tissue nitrogen and phosphorus concentrations in maize and grain sorghum. *Field Crops Research* 6, 133-147.

Johnes, P.J. (1996). Evaluation and management of the impact of land use change on the nitrogen and phosphorus load delivered to surface waters: The export coefficient modelling approach. *Journal of Hydrology* 183(3-4), 323-349.

Johnes, P.J. and Butterfield, D. (2002). Landscape, regional and global estimates of nitrogen flux from land to sea: Errors and uncertainties. *Biogeochemistry* 57/58, 429-476.

Johnes, P.J., Foy, R., Butterfield, D. and Haygarth, P.M. (2007). Land use scenarios for England and Wales: evaluation of management options to support good ecological status in surface freshwaters. *Soil Use and Management* 23, 176-94.

Johnson, P.A., Shepherd, M.A., Hatley, D.J. and Smith P.N. (2002). Nitrate leaching from a shallow limestone soil growing a five course combinable crop rotation: the effects of crop husbandry and nitrogen fertiliser rate on losses from the second complete rotation. *Soil Use and Management* 18, 68-76.

Jordan, C., McGuckin, S.O. and Smith, R.V. (2000). Increased predicted losses of phosphorus to surface waters from soils with high Olsen-P concentrations. *Soil Use and Management* 16, 27-35.

Kapsimalis, V., Tziavos, C., Livanos, I. and Anagnostou, C. (2002). *The new mouth of the Arachtos river (NW Greece). Factors affected the geomorphological evolution*. A study of Greek Maritime Research Centre and Institute of Oceanography.

Khu, S. T. and Madsen, H. (2005). Multiobjective calibration with Pareto preference ordering: An application to rainfall-runoff model calibration. *Water Resources Research* 41(3), 1-14.

Knowles, J.D. and Corne, D.W. (2000). Approximating the nondominated front using the Pareto archived evolution strategy. *Evolutionary Computation* 8(2), 149-72.

Kotti, M.E., Vlessidis, A.G., Thanasoulias, N.C. and Evmiridis, N.P. (2005). Assessment of River Water Quality in Northwestern Greece. *Water Resources Management* 19(1), 77-94.

Kourgialas, N.N, Karatzas, G.P. and Nikolaidis, N.P. (2010). An integrated framework for the hydrologic simulation of a complex geomorphological river basin. *Journal of Hydrology* 381(3-4), 308-321.

Kronvang, B., Grant, R., Larsen, E., Svendsen, L.M. and Kristensen, P. (1995). Non-point source nutrient losses to the aquatic environment in Denmark: impact of agriculture. *Marine and Freshwater Research* 46(1), 167-177.

Kronvang, B., Hoffmann, C.C., Svendsen, L.M., Windolf, J., Jensen, J.P. and Dørge, J. (1999). Retention of nutrients in river basins. *Aquatic Ecology* 33(1), 29-40.

Kronvang, B., Hejzlar, J., Boers. P., Jensen. J.P., Behrendt, H., Anderson, T., Arheimer, B., Venohr, M., Hoffmann C.C. and Nielsen, C.B. (2004). Nutrient Retention Handbook, Software Manual for EUROHARP-NUTRET and Scientific Review on Nutrient Retention. EUROHARP Report No. 9, Norwegian Institute for Water Research, Oslo.

Kronvang, B., Bechmann, M., Lundekvam, H., Behrendt, H., Rubaek, G.H., Schoumans, O.F., et al. (2005a). Phosphorus losses from agricultural areas in river basins: effects and uncertainties of targeted mitigation measures. *Journal of Environmental Quality* 34(6), 2129-2144.

Kronvang, B., Jeppesen, E., Conley, D.J., Sondergaard, M., Larsen, S.E., Ovesen, N.B., et al. (2005b). Nutrient pressures and ecological responses to nutrient loading reductions in Danish streams, lakes and coastal waters. *Journal of Hydrology* 304(1-4), 274-88.

Kronvang, B., Behrendt, H., Andersen, H.E., Arheimer, B., Barr, A., Borgvang, S.A., Bouraoui, F., Granlund, K., Grizzetti, B., Groenendijk, P., Schwaiger, E., Hejzlar, J., Hoffmann, L., Johnsson, H., Panagopoulos, Y., Lo Porto, A., Reisser, H., Schoumans, O., Anthony, S., Silgram, M., Venohr, M. and Larsen, S.E. (2009). Ensemble modelling of nutrient loads and nutrient load partitioning in 17 European catchments. *Journal of Environmental Monitoring* 11, 572-583.

Krysanova, V., Meiner, A., Roosaare, J., Vasilyev, A. (1989). Simulation modelling of the coastal waters pollution from agricultural watershed. *Ecological Modelling* 49(1-2), 7-29.

Krysanova, V., Müller-Wohlfeil, D.I. and Becker, A. (1998). Development and test of a spatially distributed hydrological/water quality model for mesoscale watersheds. *Ecological Modelling* 106(1-2), 261-289.

Krysanova, V., Hattermann, F. and Wechsung, F. (2005). Development of the ecohydrological model SWIM for regional impact studies and vulnerability assessment. *Hydrological Processes* 19(3), 763-783.

Lacroix, A., Beaudoin, N. and Makowski, D. (2005). Agricultural water nonpoint pollution control under uncertainty and climate variability. *Ecological Economic* 53(1), 115-127.

Laflen, J.M., Tabatabai, M.A. (1984). Nitrogen and phosphorus loss from corn-soybean rotations as affected by tillage practices. *Transactions of the ASAE* 27(1), 58-63.

Laursen, A.E. and Seitzinger, S.P. (2002). Measurement of denitrification in rivers: An integrated, whole reach approach. *Hydrobiologia* 485(1-3), 67-81.

Lebbink, G., Vanfaassen, H.G., Vanouwerkerk, C. and Brussaard, L. (1994). The Dutch programme on soil ecology of arable farming systems: farm management monitoring programme and general results. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 51(1-2), 7-20.

Lemunyon, J.L. and Gilbert, R.G., (1993). The concept and need for a phosphorus assessment tool. *Journal of Production Agriculture* 6(4), 483-486.

Lenhart, T., Eckhardt, K., Fohrer, N. and Frede, H.-G. (2002). Comparison of two different approaches of sensitivity analysis. *Physics and Chemistry of the Earth* 27(9-10), 645-654.

Leo De Nocker L.D., Broekx, S., Liekens, I., Görlach, B., Jantzen, J. and Campling, P. (2007). Costs and Benefits associated with the implementation of the Water Framework Directive, with a special focus on agriculture: Final Report. Study for DG Environment - Final Version.

Leonard, R.A., Knisel, W.G. and Still, D.A. (1987). GLEAMS: Groundwater loading effects of agricultural management systems. *Transactions of the ASAE* 30(5), 1403-1418.

Lepistö, A., Granlund, K., Kortelainen, P. and Räike, A. (2006) Nitrogen in river basins: Sources, retention in the surface waters and peatlands, and fluxes to estuaries in Finland. *Science of the Total Environment* 365(1-3), 238-259.

Liden, R., Vsilyev, A., Stalnacke, P., Loigu, E. and Wittgren, H.B. (1999). Nitrogen source apportionment - a comparison between a dynamic and a statistical model. *Ecological Modelling* 114(2-3), 235-250.

Lundekvam, H.E., Romstad, E. and Øygarden, L. (2003). Agricultural policies in Norway and effects on soil erosion. *Environmental Science & Policy* 6(1), 57-67.

Makropoulos, C. (2003). *Spatial Decision Support for Urban Water Management*. PhD Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College London.

Makropoulos C., Butler, D. and Maksimovic, C. (2003). Fuzzy Logic Spatial Decision Support System for Urban Water Management. *Journal of Water Resources Planning and Management* 129(1), 69-78.

Makropoulos, C. and Butler, D. (2005a). A multi-objective evolutionary programming approach to the "object location" spatial analysis and optimisation problem within the urban water management domain. *Civil and Environmental Systems* 22(2), 85-107.

Makropoulos, C.K. and Butler, D. (2005b). A neurofuzzy spatial decision support system for pipe replacement prioritisation. *Urban Water Journal* 2(3), 141-150.

Makropoulos, C., Argyrou, E., Memon, F.A. and Butler, D. (2007). A suitability evaluation tool for siting wastewater treatment facilities in new urban developments, *Urban Water Journal* 4(2), 61-78.

Maringanti, C., Chaubey, I. and Popp, J. (2009). Development of a multiobjective optimization tool for the selection and placement of best management practices for nonpoint source pollution control. *Water Resources Research* 45(6), W06406, doi:10.1029/2008WR007094.

MATLAB (2010a). Global Optimization Toolbox, User's Guide. Διαθέσιμο: http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/pdf_doc/gads/gads_tb.pdf (πρόσβαση: Φεβρουάριος 2010).

MATLAB (2010b). Global Optimization Toolbox, Release Notes. Διαθέσιμο: http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/pdf_doc/gads/rn.pdf (πρόσβαση: Φεβρουάριος 2010).

Mausbach, M.J. and Dedrick, A.R. (2004). The length we go: Measuring environmental benefits of conservation practices. *Journal of Soil and Water Conservation* 59(5), 96A-103A.

Michalewicz, Z. (1996). *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*. Springer-Verlag, New York.

Mimikou, M. (2005). Water Resources in Greece: Present and Future, *GlobalNEST International Journal* 7(3), 252-257.

Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., Veith, T.L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE* 50(3), 885-900.

Muleta, M.K. and Nicklow, J.W. (2002). Evolutionary algorithms for multiobjective evaluation of watershed management decisions. *Journal of Hydroinformatics* 4(2), 83-97.

Muleta, M.K. and Nicklow, J.W. (2005). Decision Support for Watershed Management Using Evolutionary Algorithms. *Journal of Water Resources Planning and Management* 131(1), 35-44.

Muleta, M.K., Nicklow, J.W. and Bekele, E.G. (2007). Sensitivity of a Distributed Watershed Simulation Model to Spatial Scale. *Journal of Hydrologic Engineering* 12(2), 163-172.

Mulligan, D., Bauraoui, F., Grizzetti, B., Aloe, A. and Dusart, J., (2006). An Atlas of Pan-European Data for Investigation of the Fate of Agro-chemicals in Terrestrial Ecosystems, Institute of Environment and Sustainability, JRC, EUR 22334 EN.

Muukkonen, P., Hartikainen, H. and Alakukku, L. (2007). Effect of tillage and liming on the water-soluble phosphorus in the clay soil fields. In: Heckrath, G., Rubaek, G. and Kronvang, B. (Dds). *Diffuse Phosphofus Loss: Risk Assessment, Mitigation Options and Ecological Effects in River Basins. The Fifth International Phosphorus Workshop,* 3-7 September 2007, Silkeborg, Denmark (pp. 111-114).

Muttiah, R.S. and Wurbs, R.A. (2002). Scale-dependent soil and climate variability effects on watershed water balance of the SWAT model. *Journal of Hydrology* 256(3), 264-285.

Mysiak, J., Giupponi, C. and Rosato, P. (2005). Towards the development of a decision support system for water resource management. *Environmental Modelling and Software* 20(2), 203-214.

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

Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R. and Williams, J.R. (2005a). Soil and water assessment tool–theoretical documentation-version 2005. Blackland Research Center – Agricultural Research Service, Texas - USA. Διαθέσιμο: http://swatmodel.tamu.edu/documentation (πρόσβαση: Ιούλιος 2009).

Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Srinivasan, R. and Williams, J.R. (2005b). Soil and Water assessment tool - Input/Output file documentation-version 2005. Blackland Research Center – Agricultural Research Service, Texas – USA. Διαθέσιμο: http://swatmodel.tamu.edu/documentation (πρόσβαση: Ιούλιος 2009).

Nicklow, J., Reed, P., Savic, D., Dessalegne, T., Harrell, L., Chan-Hilton, A., Karamouz, M., Minsker, B., Ostfeld, A., Singh, A. and Zechman, E. (2010). State of the Art for Genetic Algorithms and Beyond in Water Resources Planning and Management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(4), 412-432.

Nikolaidis, N., Karageorgis, A., Kapsimalis, V., Drakopoulou, P., Skoulikidis, N., Behrendt, H. and Levkov Z. (2009). Management of nutrient emissions of Axios River catchment: Their effect in the coastal zone of Thermaikos Gulf, Greece. *Ecological Modelling* 220(3), 383-396.

Novotny, V. (1999). Diffuse pollution from agriculture - A worldwide outlook. *Water Science and Technology* 39(3), 1-3.

Oenema, O., van Liere, L. and Schoumans, O. (2005). Effects of lowering nitrogen and phosphorus surpluses in agriculture on the quality of groundwater and surface water in the Netherlands. *Journal of Hydrology* 304(1-4), 289-301.

Olivera, F., Valenzuela, M., Srinivasan, R. and Choi, J. (2006). ARC GIS-SWAT: A GEODATA model and GIS interface for SWAT 1. *Journal of the American Water Resources Association* 42(2), 295-309.

Osei, E. Gassman, P. W., Hauck, L. M., Jones, R., Beran, L., Dyke, P. T., Goss, D. W., Flowers, J. D., McFarland, A. M. S. and Saleh, A. (2003). Environmental benefits and economic costs of manure incorporation on dairy waste application fields. *Journal of Environmental Management* 68(1), 1-11.

Osmond, D.L., Cannon, R.W., Gale, J.A., Line, D.E., Knott, C.B., Phillips, K.A., et al. (1997). WATERSHEDSS : A Decision Support System For Watershed-Scale Nonpoint Source Water Quality Problems. *Journal of the American Water Resources Association* 33(2), 327-341.

Ospar (2003). Strategies of the Ospar Commission for the Protection of the Marine Environment of the North-East Atlantic. II – Euthrophication. Διαθέσιμο: http://www.ospar.org/eng/html/welcome.html (πρόσβαση: Σεπτέμβριος 2010).

Ospar (2007). Ospar Eutrophication Strategy. Annual Report of the Ospar Commision 2006/07.

Panagopoulos, I. and Mimikou, M. (2006). Assessment of the changes in the Arachtos river flow and sediment discharges due to anthropogenic interventions. *Protection and Restoration of the Environment VIII,* 3-7 July 2006, Chania, Greece.

Panagopoulos, I., Mimikou, M. and Bekiaris, I. (2006). Catchment modeling for the estimation of nutrient losses in surface waters. *Proceedings of the Conference on Protection and Restoration of the Environment VIII*, 3-7 July 2006 Chania, Greece.

Panagopoulos, Y., Efthimiou, N. and Mimikou, M. (2007a). Phosphorus fate and transport modelling in a catchment of Western Greece and identification of critical source areas, *The 5th International Phosphorus Workshop (IPW5),* in Silkeborg, Denmark, 3-7 September 2007.

Panagopoulos, I., Mimikou, M. and Kapetanaki, M. (2007b). Estimation of nitrogen and phosphorus losses to surface water and groundwater through the implementation of the SWAT model for Norwegian soils. *Journal of Soils and Sediments* 7(4), 223-231.

Panagopoulos, Y., Polyzoi, E. and Mimikou, M. (2007c). LAND Use Change Effects on River Sediment Yields in Western Greece. *4th International SWAT Conference,* 2-6/7/2007, Delft, The Netherlands.

Panagopoulos, Y., Georgiou, E., Grammatikogiannis, A., Polizoi, E. and Mimikou, M. (2008). Impacts of Human Interaction on the Sediment Transport Processes in the Arachtos River Basin, Western Greece. *European Water* 21/22, 3-16.

Panagopoulos, Y., Makropoulos, C., Baltas, E. and Mimikou, M. (2010a). SWAT parameterization for the identification of critical diffuse pollution source areas under data limitations. (υποβολή για δημοσίευση στο *Environmental Modeling and Assessment*, Νοέμβριος 2010)

Panagopoulos, Y., Makropoulos, C. and Mimikou, M. (2010b). Prediction of water quality improvements due to man-made alterations in agricultural management practices. *HydroPredict' 2010*, *International Interdisciplinary Conference on Predictions for Hydrology, Ecology and Water Resources Management. Changes and Hazards Caused by Direct Human Interventions and Climate Change*. Prague, Czech Republic, 20-23 Sep. 2010.

Panagopoulos, Y., Makropoulos, C. and Mimikou, M. (2010c). Multiobjective optimization for the allocation of cost-effective BMPs at the watershed scale. The *6th International Phosphorus Workshop (IPW6)*, Sevilla, Spain, 27 Sep - 1 Oct 2010.

Panagopoulos, Y., Makropoulos C. and Mimikou M. (2010d). Reducing surface water pollution through the assessment of the cost-effectiveness of BMPs at different spatial scales. (υποβολή για δημοσίευση στο *Journal of Environmental Management*, Νοέμβριος 2010).

Panagopoulos, Y., Makropoulos C. and Mimikou M. (2010e). Decision Support for Diffused Pollution Management. (υποβολή για δημοσίευση στο *Environmental Modelling and Software*, Νοέμβριος 2010).

Panagopoulos, Y., Makropoulos C. and Mimikou M. (2010f). Diffuse surface water pollution: Driving factors for different geoclimatic regions. (υποβολή για δημοσίευση στο *Water Resources Management Journal*, Απρίλιος 2010).

Pisinaras, V., Petalas, C., Gikas, G.D., Gemitzi, A. and Tsihrintzis, V.A. (2010). Hydrological and water quality modeling in a medium-sized basin using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT). *Desalination* 250(1), 274-286.

Power, D.J. (1997). What is a DSS? DSstar. The On-Line Executive. *Journal for Data-Intensive Decision Support* 1(3).

Quinton, J., Stevens, C., Deasy, C., Silgram, M., Jackson, B. and Bailey, A. (2007). Mitigation options for phosphorus and sediment. In: Heckrath, G., Rubaek, G. and Kronvang, B. (Eds). Tillage Treatments and the Use of Vegetative Barriers.

International Phosphorus Workshop, 3-7 September 2007, Silkeborg, Denmark, pp. 295-302.

Rao, M., Fan, G., Thomas, J., Cherian, G., Chudiwale, V., Awawdeh, M., et al. (2007). A web-based GIS Decision Support System for managing and planning USDA's Conservation Reserve Program (CRP). *Environmental Modelling and Software* 22(9), 1270-1280.

Rao, N.S., Easton, Z.M., Schneiderman, E.M., Zion, M.S., Lee, D.R. and Steenhuis, T.S. (2009). Modeling watershed-scale effectiveness of agricultural best management practices to reduce phosphorus loading. *Journal of Environmental Management* 90(3), 1385-95.

Refsgaard, J.C. and Storm, B. (1995). MIKE SHE. In: Singh, V.P. (Ed). *Computer Models of Watershed Hydrology* (pp. 809-846), Water Resources Publication.

Refsgaard, J.C. (1997). Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology* 198(1-4), 69-97.

Remegio, B., Confesor, J. and Whittaker, G.W. (2007). Automatic Calibration of Hydrologic Models with Multi-Objective Evolutionary Algorithm And Pareto Optimization. *Journal of the American Water Resources Association* 43(4), 981-989.

Ribarova, I., Ninovb, P. and Cooper, D. (2008). Modeling nutrient pollution during a first flood event using HSPF software: Iskar River case study, Bulgaria. *Ecological Modelling* 211(1-2), 241-246.

Romanowicz, A.A., Vanclooster, M., Rounsevell, M. and Junesse, I.L. (2005). Sensitivity of the SWAT model to the soil and land use data parametrisation: a case study in the Thyle catchment, Belgium. *Ecological Modelling* 187(1), 27-39.

Sahu, M. and Gu, R.R. (2009). Modeling the effects of riparian buffer zone and contour strips on stream water quality. *Ecological Engineering* 35(8), 1167-1177.

Santhi, C, Arnold, J.G., Williams, J.R., Dugas, W.A., Srinivasan, R. and Hauck, L.M. (2001). Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *Journal of the American Water Resources Association* 37(5), 1169-1188.

Santhi, C., Srinivasan, R., Arnold, J.G. and Williams, J.R. (2006). A modeling approach to evaluate the impacts of water quality management plans implemented in a watershed in Texas. *Environmental Modelling and Software* 21(8), 1141-1157.

Schmitt, T.J., Dosskey, M.G. and Hoagland, R.D. (1999). Filter strip performance and processes for different vegetation, widths and contaminants. *Journal of Environmental Quality* 28(5), 1479-1489.

Schou, J.S., Neye, S.T., Lundhede, T., Martinsen, L. and Hasler, B. (2006). Modelling Cost-Efficient Reductions of Nutrient Loads to the Baltic Sea. Model specification, Data and Cost Functions. National Environmental Research Institute, Denmark. 69 pp. – NERI Technical Report no 592. Διαθέσιμο: http://www.dmu.dk/Pub/FR592.pdf (πρόσβαση: Μάρτιος 2010).

Schoumans, O.F. and Silgram, M. (Eds.) (2003). *Review and literature evaluation of nutrient quantification tools*. EUROHARP report 1-2003, NIVA report SNO 4739-2003, Oslo, Norway, 120 pp.

Schoumans, O.F., Silgram, M., Groenendijk, P., Bouraoui, F., Andersen, H.E., Kronvang, B., Behrendt, H., Arheimer, B., Johnsson, H., Panagopoulos, Y., Mimikou, M., Lo Porto, A., Reisser, H., Le Gall, G., Barr, A. and Anthony, S.G. (2009a). Description of nine nutrient loss models: capabilities and suitability based on their characteristics. *Journal of Environmental Monitoring* 11, 506-514.

Schoumans, O.F., Silgram, M., Walvoort, D.J.J., Groenendijk, P., Bouraoui, F., Andersen, H.E., Lo Porto, A., Reisser, H., Le Gall, G., Anthony, S., Arheimer, B., Johnsson, H., Panagopoulos, Y., Mimikou, M., Zweynert, U., Behrendt H. and Barr, A. (2009b). Evaluation of the difference of eight model applications to assess diffuse annual nutrient losses from agricultural land. *Journal of Environmental Monitoring* 11, 540-553.

Schulz K., Beven, K. and Huwe, B. (1999). Equifinality and the problem of robust calibration in nitrogen budgets simulations. *Soil Science Society American Journal* 63, 1934-1941.

Schuol, J., Abbaspour, K.C., Sarinivasan, R., Yang, H. (2008a). Estimation of freshwater availability in the West African Sub-continent using the SWAT hydrologic model. *Journal of Hydrology* 352(1-2), 30-42.

Schuol, J., Abbaspour, K.C., Yang, H., Srinivasan, R. and Zehnder, A.J.B. (2008b). Modelling blue and green water availability in Africa. *Water Resources Research* 44, W07406, 18pp., doi:10.1029/2007WR006609.

Seitzinger, S.P., Styles, R.V., Boyer, E.W., Alexander, R.B., Billen, G., Howarth, R.W., Mayer, B. and Van Breemen, N. (2002). Nitrogen retention in rivers: Model development and application to watersheds in the northeastern U.S.A. *Biogeochemistry* 57-58(1), 199-237.

SERA-17 (1990). Southern Extension-Research Activity. The 17th group of the Cooperative States Research, Education, and Extension Service. An Organization to Minimize Phosphorus Losses from Agriculture. Διαθέσιμη ιστοσελίδα: http://www.sera17.ext.vt.edu/ (πρόσβαση: Φεβρουάριος 2010).

Shafii, M. and Smedt, F.D. (2009). Multi-objective calibration of a distributed hydrological model (WetSpa) using a genetic algorithm. *Hydrology and Earth System Sciences* 13, 2137-2149.

Sharpley, A.N. (1985). The selective erosion of plant nutrients in runoff. *Soil Science Society of America Journal* 49(6), 1527-1534.

Sharpley, A.N. and Smith, S.J. (1990). Phosphorus transport in agricultural runoff: the role of soil erosion. In: Boardman, J., Foster, L.D.L. and Dearing, J.A. (Eds). *Soil Erosion on Agricultural Land* (pp. 351-66). John Wiley and Sons, Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Syngapore.

Sharpley, A.N., McDowell, R.W. and Kleinman, P.J.A. (2001). Phosphorus loss from land and water: Integrating agricultural and environmental management. *Plant and Soil* 237(2), 287-307.

Sharpley, A.N., Weld, J.L., Beegle, D.B., Kleinman, P.J.A., Gburek, W.J., Moore, P.A., et al. (2003). Development of phosphorus indices for nutrient management planning strategies in the United States. *Journal of Soil and Water Conservation* 58(3), 137-152.

Skoulikidis, N.Th., Amaxidis, Y., Bertahas, I., Laschou, S. and Gritzalis, K. (2006). Analysis of factors driving stream water composition and synthesis of management tools - A case study on small/medium Greek catchments. *Science of the Total Environment* 362(1-3), 205-241.

Sloan, P.G and Moore, I.D. (1984). Modeling subsurface stormflow on steeply sloping forested watersheds. *Water Resources Research* 20(12), 1815-1822.

Smith, R.A., Schwarz, G.E. and Alexander, R.A. (1997). Regional interpretation of water-quality monitoring data. *Water Resources Research* 33(12), 2781-2798.

Smith, R.V., Jordan, C. and Annett, J.A. (2005). A phosphorus budget for Northern Ireland: inputs to inland and coastal water. *Journal of Hydrology* 304(1-4), 193-202.

Soulis, K.X., Valiantzas, J.D., Dercas, N. and Londra, P.A. 2009. Investigation of the direct runoff generation mechanism for the analysis of the SCS-CN method applicability to a partial area experimental watershed**.** *Hydrology and Earth System Sciences* 13, 605-615.

Srinivas, N. and Deb, K. (1994). Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms. *Evolutionary Computation* 2(3), 221-248.

Srinivasan, R., and Arnold, J.G. (1994). Integration of a basin scale water quality model with GIS. *Water Resources Bulletin* 30(3), 453-462.

Srivastava, P., Hamlett, J.M., Robillard, P.D. and Day, R.L. (2002). Watershed optimization of best management practices using AnnAGNPS and a genetic algorithm. *Water Resources Research* 38, 1021, 14 pp, doi:10.1029/2001WR000365.

Stalnacke, P., Grimvall, A., Libiseller, C., Laznik, A. and Kokorite, I. (2003). Trends in nutrient concentrations in Latvian rivers and the response to the dramatic change in agriculture. *Journal of Hydrology* 283(1-4), 184-205.

Stoate, C., Boatman, N.D., Borralho, R.J., Carvalho, C.R., De Snoo G.R. and Eden, P. (2001). Ecological impacts of arable intensification in Europe. *Journal of Environmental Management* 63(4), 337-365.

Styczen, M., Raat, K.J., Duijnisveld, W., Panagopoulos, Y. and Collins, R.P. (2007). Towards a method for the assessment of agricultural impact on nutrient water quality across Europe. EEA/ETC-Water, activity: 4.3.1, LARA - Linkages between agriculture and water quality water task 29 - Future analytical framework for analysing agri-water linkages. Διαθέσιμο: http://eea.eionet.europa.eu/Members/irc/eionet-circle/etcwater/library?l=/2007/activities_2007/linkages_agriculture/analysing_agri-waterandvm=detailedandsb=Title (πρόσβαση: Ιανουάριος 2010).

Tang, Y., Reed, P. and Wagener, T. (2006). How effective and efficient are multiobjective evolutionary algorithms at hydrologic model calibration? *Hydrology and Earth System Sciences* 10(2), 289-307.

Trott, H., Wachendorf, M., Ingwersen, B. and Taube, F. (2004). Performance and environmental effects of forage production on sandy soils. I. Impact of defoliation system and nitrogen input on performance and N balance of grassland. *Grass and Forage Science* 59(1), 41-55.

Tripathi, M.P., Panda, R.K. and Raghuwanshi, N.S. (2005). Development of effective management plan for critical subwatersheds using SWAT model. *Hydrological Processes* 19(3), 809-826.

Tsadilas, C.D., Mitsios, I.K. and Golia, E. (2005). Influence of Biosolids Application on Some Soil Physical Properties. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 36(4-6), 709-716.

Tsakiris, G. and Spiliotis, M. (2006). Cropping pattern planning under water supply from multiple sources. *Irrigation and Drainage Systems* 20(1), 57-68.

Tsouni, A., Zervos, N., Hadjibiros, K. and Andreadakis, A. (2002). An Environmental Database for the Status of Freshwater in Greece. *Global Nest: The International Journal* 4(1), 1-14.

Tuppad, P., Kannan, N., Srinivasan, R., Rossi, C.G. and Arnold, J.G. (2010). Simulation of Agricultural Management Alternatives for Watershed Protection. *Water Resources Management* 24(12), 3115-3144.

Turpin, N., Bontems, P., Rotillon, G., Bärlund, I., Kaljonen, M., Tattari, S., Feichtinger, F., Strauss, P., Haverkamp, R., Garnier, M., Lo Porto, A., Benigni, G., Leone, A., Ripa, M.N., Eklo, O.-M., Romstad, E., Bioteau, T., Birgand, F., Bordenave, P., Laplana, R., Lescot, J.M., Piet, L. and Zahm, F. (2005). AgriBMPWater: systems approach to environmentally acceptable farming. *Environmental Modelling and Software* 20(2), 187-196.

Tzoraki, O. and Nikolaidis, N.P. (2007). A generalized framework for modeling the hydrologic and biogeochemical response of a Mediterranean temporary river basin. *Journal of Hydrology* 346(3-4),112-121.

Ulén, B. and Kalisky, T. (2005). Water erosion and phosphorus problems in an agricultural catchment – Need for natural research for implementation of the EU Water Framework Directive. *Environmental Science & Policy* 8(5), 477-488.

Ullrich, A. and Volk, M. (2009). Application of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to predict the impact of alternative management practices on water quality and quantity. *Agricultural Water Management* 96(8), 1207-1217.

Unep/Map/Medpol, 1999. Strategic Action Programme to Address Pollution From Land-Based Activities, Map Technical Reports Series, No 119, Athens, Greece. Διαθέσιμο: http://195.97.36.231/acrobatfiles/MTSAcrobatfiles/mts119eng.pdf (πρόσβαση: Μάρτιος 2009).

USDA, Soil Conservation Service, 1972. Section 4: Hydrology in National Engineering Handbook. SCS.

Uusi-Kamppa, J., Braskerud, B., Jansson, H., Syversen, N. and Uusitalo, R. (2000). Buffer zones and constructed wetlands as filters for agricultural phosphorus. *Journal of Environmental Quality* 29(1), 151-158.

Van Griensven, A., Meixner, T., Grunwald, S., Bishop, T., Diluzio, M. and Srinivasan, R. (2006). A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. *Journal of Hydrology* 324(1-4), 10-23.

Varanou, E., Gkouvatsou, E., Baltas, E. and Mimikou, M. (2002). Quantity and quality integrated catchment modelling under climate change with use of soil and water assessment tool model. *Journal of Hydrologic Engineering* 7(3), 228-244.

Vassiljev, A. and Stålnacke, P. (2005). Statistical modelling of riverine nutrient sources and retention in the Lake Peipsi drainage basin. *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 51(3-4), 309-317.

Vázquez, N., Pardo, A., Suso, M.L. and Quemada, M. (2006). Drainage and nitrate leaching under processig tomato growth with drip irrigation and plastic mulching. *Agriculture Ecosystems and Environment* 112(4), 313-323.

Veith, T.L., Wolfe, M.L. and Heatwole, C.D. (2004). Cost-Effective BMP Placement: Optimization versus Targeting. *Transactions of the ASAE* 47(5), 1585-1594.

Velthof, G.L., (2007). *Development and application of the integrated nitrogen model Miterra-EUROPE*. Alterra, Wageningen.

Volk, M., Hirschfeld, J., Schmidt, G., Bohn, C., Dehnhardt, A., Liersch, S. and Lymburner, L. (2007). A SDSS-based Ecological-economic Modelling Approach for Integrated River Basin Management on Different Scale Levels – The Project FLUMAGIS. *Water Resources Management* 21(12), 2049-2061.

Volk, M., Hirschfeld, J., Dehnhardt, A., Schmidt, G., Bohn, C., Liersch, S. and Gassman, P.W. (2008). Integrated ecological-economic modelling of water pollution abatement management options in the Upper Ems River Basin. *Ecological Economics* 66(1), 66-76.

Walter, M.F., Steenhuis, T.S. and Haith, D.A. (1979). Nonpoint source pollution control by soil and water conservation practices. *Transactions of the ASAE* 22(5), 834-840.

Webster, C.P., Shepherd, M.A., Goulding, K.W.T. and Lord, E.I. (1993). Comparisons of methods for measuring the leaching of mineral nitrogen from arable land. *Journal of Soil Science* 44(1), 49-62.

Wheeler, D.M., Ledgard, S.F., De Klein, C.A.M., Monaghan, R.M., Carey, P.L., McDowell, R.W. and Johns K.L. (2003). OVERSEER nutrient budgets - moving towards on-farm resource accounting. *Proceedings of the New Zealand Grassland Association* 65, 191-194.

White, M.J. and Arnold, J.G. (2009). Development of a simplistic vegetative filter strip model for sediment and nutrient retention at the field scale. *Hydrological Processes* 23(11), 1602-1616.

White, P.J. and Hammond, J.P. (2007). Updating the estimate of the sources of phosphorus in UK waters. Defra Final Report for Project WT0701CSF. Διαθέσιμο: <http://www.defra.gov.uk/science/project_data/DocumentLibrary/WT0701CSF/WT0701CSF-4159.FRP.pdf> (πρόσβαση: Απρίλιος 2010).

Whitehead, P.G., Wilson, E.J. and Butterfield, D. (1998). A semidistributed Integrated Nitrogen model for multiple source assessment in Catchments (INCA): Part I-model structure and process equations. *Science of the Total Environment* 210/211, 547-58.

Williams, J.R. (1990). The erosion productivity impact calculator (EPIC) model: A case history. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 329, 421-428.

Withers, P.J.A. and Haygarth, P.M. (2007). Agriculture, phosphorus and eutrophication: a European perspective. Preface of the Special Issue. *Soil Use and Management* 23(1), 1-4.

Wriedt, G. and Rode, M. (2006). Modelling nitrate transport and turnover in a lowland catchment system. *Journal of Hydrology* 328(1-2),157-76.

Yang, J., Reichert, P., Abbaspour, K.C., Xia, J., Yang, H. (2008). Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to Chaohe Basin in China. *Journal of Hydrology* 358(1-2), 1-23.

Yang, Y.S. and Wang, L. (2009). A Review of Modelling Tools for Implementation of the EUWater Framework Directive in Handling DiffuseWater Pollution. *Water Resources Management Journal*, 24(9), 1819-1843.

Young, R.A., Onstad, C.A. and Bosch, D.D. (1995). AGNPS: An agricultural nonpoint source model. In: Singh, V.P. (Ed.). *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resource Publications, Highlands Ranch, Colorado.

Yuan, Y., Bingner, R.L. and Rebich, R.A. (2003). Evaluation of AnnAGNPS nitrogen loading in an agricultural watershed. *Journal of the American Water Resources Association* 39(2), 457-466.

Zarris, D., Lykoudi, E. and Koutsoyiannis, D. (2001). Final Report, *Appraisal of river sediment deposits in reservoirs of hydropower dams.* Contractor: Department of Water Resources, Hydraulic and Maritime Engineering - National Technical University of Athens, 243 pages, October 2001.

Zervas, G. (1998). Quantifying and Optimizing Grazing Regimes in Greek Mountain Systems. *Journal of Applied Ecology* 35(6), 983-986.

Zitzler, E. and Thiele, L. (1999). Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength Pareto approach. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 3(4), 257-71.

Zitzler, E., Laumanns, M. and Thiele, L. (2001). SPEA2: Improving the strength Pareto evolutionary algorithm, TIK-Report 103, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Switzerland.